

Spettri Stellari

Non tutti sanno che la luce emessa da qualsiasi corpo (in grado di emetterla) costituisce una vera e propria miniera di informazioni. Infatti le radiazioni luminose emesse da corpi che si trovano in determinati stati energetici ci forniscono una rappresentazione fedele della loro composizione e dei processi chimico-fisici in atto. L'astronomia, essendo purtroppo affetta da una naturale incapacità di contatto con le realtà presenti nel cosmo a causa delle enormi distanze, ha dovuto sviluppare dei metodi e delle tecniche di indagine assai particolari. Il campo che studia le radiazioni elettromagnetiche nelle lunghezze d'onda del visibile si chiama per l'appunto "**spettroscopia**" ossia la branca della scienza che studia la composizione degli spettri contenuti nella luce. Ma che cos'è lo spettro?

Lo spettro è un'entità fisica difficile da definire...lo possiamo pensare come un insieme di onde elettromagnetiche di diverse componenti cromatiche che sono state ricavate tramite separazione della luce originaria attraverso il metodo della diffrazione. A molti di voi sarà sicuramente capitato di osservare il fenomeno dell'arcobaleno; questo fenomeno si genera quando la luce solare colpendo le piccolissime goccioline d'acqua sospese nell'atmosfera si scinde nei sette colori fondamentali: rosso, arancio, giallo, verde, azzurro, indaco e violetto. Nell'ambito astronomico il meccanismo è lo stesso, la luce proveniente dalle stelle viene separata in tutte le sue componenti fondamentale e successivamente analizzata. Appare ovvio che una spettro stellare tendente al bianco-azzurro ci comunicherà un certo messaggio, invece uno tendente al giallo-rosso ce ne comunicherà un altro.

La gran parte degli atomi esistenti in natura possono emettere luce quando si trovano in particolari stati energetici, inoltre ognuno di essi possiede la capacità di emettere o assorbire particolari frequenze elettromagnetiche che contraddistinguono ogni singolo atomo dagli altri. Possiamo allora affermare che l'analisi della luce che ci proviene da un qualsiasi corpo, proprio in relazione a questa possibilità, ci fornisce informazioni ben precise sulla composizione dell'oggetto, infatti le righe spettrali costituiscono una vera e propria "carta di identità" per i singoli atomi che li contraddistinguono inequivocabilmente. Abbiamo già affrontato la composizione interna delle stelle nella sezione "Struttura Interna".

Verso un modello di classificazione...

Nel 1872 l'astronomo americano **Draper** propose per la prima volta un metodo per classificare le stelle basato sull'analisi delle righe spettrali. Intorno al 1918 l'astronoma americana **Annie Cannon** ampliò l'idea di Draper e fornì una versione molto più completa della teoria di classificazione stellare. La teoria venne adottata universalmente dall'**I.A.U** (Unione Astronomica Internazionale) intorno agli anni '30 ed è conosciuta con lo pseudonimo di HD o **Harvard Classification**.

La classificazione HD è basata su righe spettrali che sono principalmente sensibili alla temperatura piuttosto che alla luminosità o alla gravità.

Essa suddivide le stelle in sette classi principali contraddistinte dalle lettere **O, B, A, F, G, K, M**. Per ricordare queste lettere è stata proposta la simpatica frase:

Oh, Be A Fine Girl Kiss Me

Ogni classe si divide a sua volta in 10 sottoclassi contraddistinte da una cifra che oscilla tra 0 e 9. Facciamo qualche esempio: O0, O1, O2, O3,O9, B0, B1, B2,B9,A5,F1,G8,G9, ...K3,M7, ecc. I numeri progressivi sono stati introdotti per distinguere due stelle che, anche appartenendo a una stessa classe, presentano piccole differenze di temperatura; in generale possiamo risalire alla classe di appartenenza e alla temperatura superficiale delle stelle semplicemente stimando il colore secondo questa tabella:

Classe spettrale	Colore stella	Temperatura superficiale
O	Blu	50.000 - 25.000 K
B	Blu/Bianche	25.000 - 11.000 K
A	Bianche	11.000 – 7.500 K
F	Bianche/Gialle	7.500 – 6.000 K
G	Gialle	6.000 - 5.000 K
K	Gialle/Arancione	5.000 – 3.500 K
M	Rosse	3.500 – 3.000 K

Inoltre la classificazione spettrale è molto utilizzata anche per determinare la densità del nucleo e la luminosità della stella. In generale più le stelle sono calde più sono massicce, più sono massicce più sono dense, più sono dense più sono luminose. Le stelle massicce hanno un nucleo molto denso proprio a causa dell'enorme peso degli involucri esterni che tende a compattarlo, ma per sostenere tale peso sono necessarie quantità di energia enormi che devono essere prodotte tramite le reazioni di fusione, ma se le reazioni di fusione bruciano moltissimo combustibile producono molta energia quindi sono più luminose. Man mano che la temperatura superficiale discende passando progressivamente da stelle di classe O a stelle di classe M si modificano i processi vitali che seguiranno le diverse stelle. Si stima infatti che i processi di fusione del CNO, del triplo alfa, del carbonio, dell'ossigeno del neon e del silicio sono possibili solo nelle stelle di classe O-B poiché esse riescono a raggiungere temperature nucleari dell'ordine dei 2700 milioni di gradi Kelvin indispensabili per innescarli; già nelle stelle di tipo F-G si può verificare solo ed esclusivamente il ciclo di fusione Protone-Protone.

Oltre alle classi "canoniche" sopra elencate esistono altre cinque classi di stelle che presentano dei comportamenti "anomali", ciò ha determinato la creazione di queste sottoclassi molto particolari:

Classe spettrale	Colore stella	Temperatura superficiale
R, N, S	Rosso scuro	< 2.500 K
L	Rosso/Marrone	1.300 – 2.200 K
T	Marrone	750 – 1.300 K

Le stelle di tipo R, N, S presentano un'abbondanza anomala di carbonio, azoto e metalli ionizzati nei rispettivi involucri, quelle di tipo L presentano tenui bande di TiO, FeH, CrH, H₂O, metalli alcalini ionizzati una volta quali Na I, K I, Cs I, Rb I e CH₄ (metano) ed infine quelle di classe T che presentano forti bande di TiO (ossido di titanio) e CH₄.

Le stelle appartenenti alle classi **R, N, S, L, T**, proprio a causa delle basse temperature presenti nel nucleo, non riescono neanche a intraprendere il ciclo di fusione PP.

Esistono inoltre altre tre classi stellari che sono presenti solamente sulla carta poiché racchiudono oggetti estremamente particolari. Queste ulteriori classi vengono rappresentate con le lettere **Q, P e W**. La classe Q rappresenta le cosiddette "Novae" ossia le stelle che, avendo concluso il proprio ciclo vitale, hanno espulso enorme quantità di polvere e gas nello spazio in una sorta di piccola esplosione. La classe P rappresenta le "Nebulose Planetarie" ossia le stelle che, avendo oltrepassato la fase di Novae, hanno generato intorno a quello che rimane del nucleo collassato una fascia nebulosa di forma anulare molto appariscente e spesso ben visibile da Terra. Citiamo

nel merito due oggetti molto apprezzati dagli astrofili: M57 nella Lira e M27 (Dumbell nebula) nella Volpetta. Infine le stelle di classe W, note spesso con lo pseudonimo di stelle di **Wolf-Rayet**, costituiscono stelle di tipo “**peculiare**”, ossia presentano un comportamento anomalo perché sono molto calde e ricche di metalli, emettono fortissimi venti stellari che trasportano grandi quantità di gas e spesso sono legate in sistemi stellari binari.

Ricapitolando, gli spettri stellari sono molto importanti perché ci permettono di stimare:

- 1) la temperatura superficiale delle stelle
- 2) la densità del nucleo stellare
- 3) la luminosità della stella

Ma come si fa effettivamente a stimare il colore di una stella nota la sua temperatura superficiale?. A questa domanda pose definitivamente risposta il fisico austriaco **Wilhelm Wien**. Egli ricavò un'espressione che permette di calcolare esattamente la lunghezza d'onda del picco di un'emissione da parte di un corpo nero in funzione della sua temperatura:

$$\lambda_{\max} = \frac{0.00298}{T}$$

La lunghezza d'onda del picco è uguale alla costante 0.00298 diviso la temperatura in gradi Kelvin, ossia più caldo è un oggetto, più corta è la lunghezza d'onda a cui emetterà radiazione. Verifichiamone il funzionamento tramite due esempi: Betelgeuse (α Orionis) ha un colore rossastro distintamente visibile a occhio nudo, la sua temperatura superficiale è di circa 3.500 gradi Kelvin:

$$\lambda = 0.00298 : 3500 \rightarrow \lambda = 8.51 \times 10^{-7} \text{ m} = 851 \text{ nm (nanometri)}$$

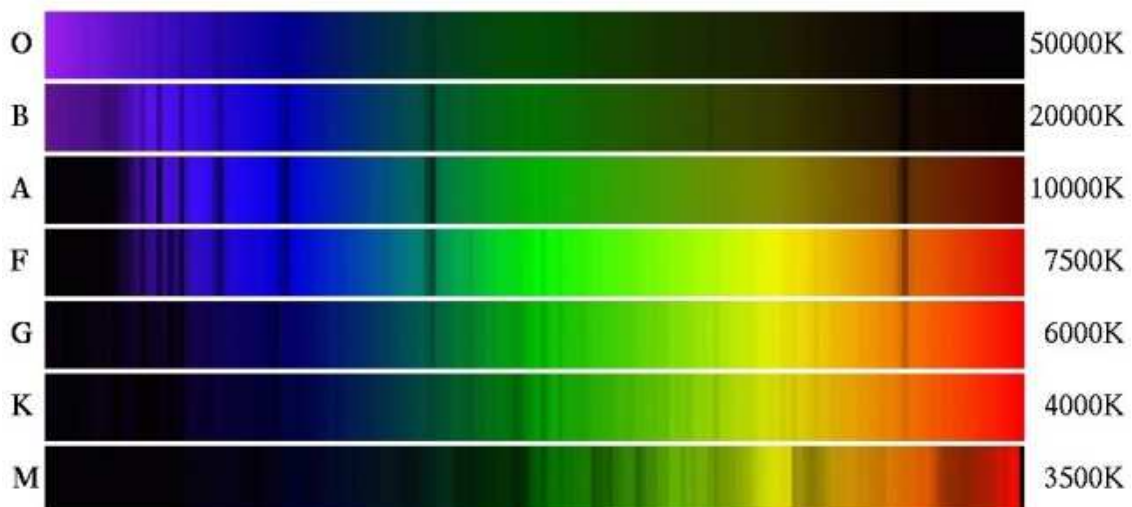
851 nm ricadono nell'infrarosso ma la radiazione più vicina ad essa percepibile dai nostri occhi è quella corrispondente a 700 nm che è, guarda caso, la lunghezza d'onda del rosso.

Il Sole ha colore giallo chiaro per definizione, la sua temperatura superficiale è di circa 5.870 gradi Kelvin:

$$\lambda = 0.00298 : 5870 \rightarrow \lambda = 5.07 \times 10^{-7} \text{ m} = 507 \text{ nm (nanometri)}$$

507 nm corrispondono alla lunghezza d'onda tipica del giallo.

Per ribadire ancora una volta i concetti fin qui espressi riportiamo qui di sotto sette spettri stellari appartenenti alle sette classi principali:



In merito a questi spettri possiamo fare le seguenti considerazioni:

- 1) Le stelle emettono lunghezze d'onda diverse (determinate dai vari elementi chimici di cui sono composte) spesso distribuite in un'ampia porzione dello spettro elettromagnetico ma quella che determina il loro colore della stella corrisponde di volta in volta alla lunghezza d'onda del picco.
- 2) Le stelle delle classi marginali (O-M) emettono la maggior parte della radiazione rispettivamente nell'ultravioletto e nell'infrarosso lasciando poco spazio alle righe emesse nel "visibile".
- 3) Man mano che ci si sposta dalla classe B alla classe K si assiste ad una transizione del picco d'emissione dal bianco-blu a giallo-arancio.
- 4) Le piccole bande scure che appaiono sono le cosiddette righe in assorbimento e sono dovute o ad una mancanza degli elementi chimici che le emettono o alla presenza di nubi interstellari di gas e polveri che interferiscono con il percorso della luce nel tratto Stella-Terra.

Gli spettri delle stelle appartenenti alle classi marginali R, N, S, L, T non sono riportati poiché questi oggetti emettono la maggior parte della loro radiazione quasi esclusivamente nell'infrarosso questo gli ha fatto guadagnare l'appellativo di "nane brune" o addirittura quello di oggetti "sub-stellari" (in pratica non vere stelle).

La nostra galassia contiene circa 400 miliardi di stelle, i dati qui sotto riportati mostrano il numero stimato di stelle divise per classe spettrale di appartenenza. Come possiamo vedere la stragrande maggioranza delle stelle appartiene alle ultime tre classi spettrali, questa evidenza si giustifica col fatto che le stelle di piccola massa si formano molto più facilmente di quelle di grande massa.

- O ~ 10.000 (incerto) – Blu
- B ~ 300.000.000 (incerto) - Blu/Bianche
- A ~ 3.000.000.000 (0.75%) – Bianche
- F ~ 12.000.000.000 (3%) - Bianche/Gialle
- G ~ 26.000.000.000 (6.5%) – Gialle
- K ~ 52.000.000.000 (13%) - Gialle/Arancione
- M ~ 270.000.000.000 (67.5%) - Rosse

Classificazione MKK

La classificazione di Harvard è molto diffusa all'interno della comunità scientifica internazionale ma già nel 1943 gli scienziati americani **William W. Morgan, Phillip C. Keenan e Edith Kellman** proposero un nuovo metodo di classificazione denominato "MKK" dalle iniziali dei rispettivi cognomi. Il motivo per cui fu proposta questa nuova classificazione risiede nel fatto che erano state osservate alcune stelle che, anche avendo la stessa temperatura superficiale, presentavano luminosità molto differenti. Questa motivazione costituiva un problema serio poiché in alcuni casi smentiva i risultati ottenuti con la classificazione HD.

La classificazione **MKK** si basa sulla luminosità di una stella, ossia sulla quantità di radiazione elettromagnetica che la stella emette nell'unità di tempo. La luminosità è fortemente influenzata dalla gravità superficiale poiché il raggio di una stella gigante è molto più elevato di quello di una stella nana, mentre invece le loro masse possono essere all'incirca comparabili, la gravità e quindi la densità e la pressione dei gas superficiali sono molto inferiori per la stella gigante. Tutte le stelle vengono suddivise in sei classi di luminosità (evidenziate in grassetto):

- **Ia** Supergiganti più luminose
- **Ib** Supergiganti meno luminose
- **II** Giganti luminose
- **III** Giganti normali

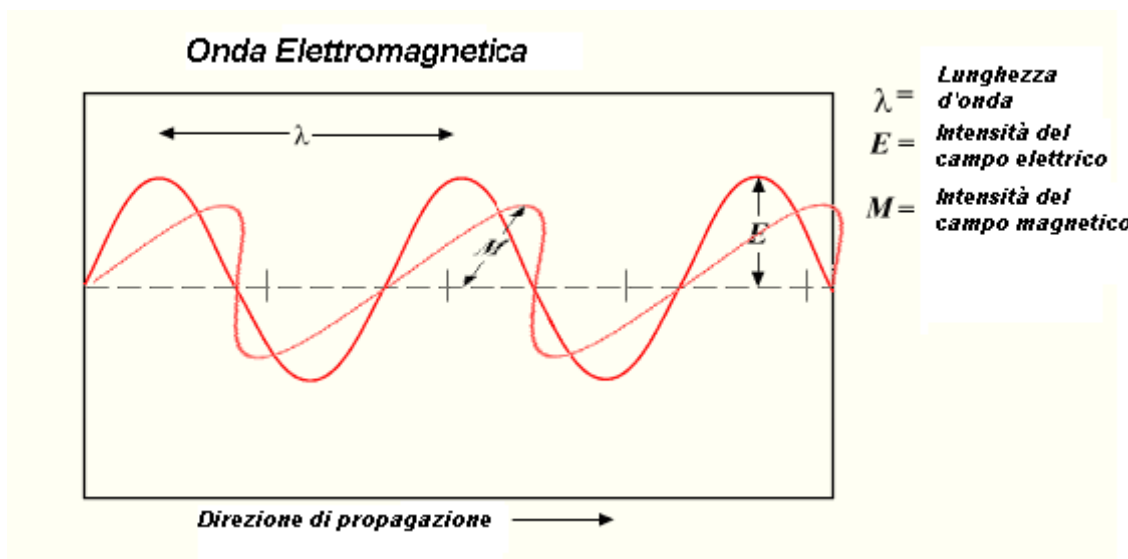
- **IV** Sottogiganti
- **V** Stelle della sequenza principale (nane)

Notare che la prima classe, ossia quella delle Supergiganti, si suddivide nei rami **Ia** e **Ib**. La classificazione MKK è molto più precisa dell'HD poiché accurati studi hanno dimostrato che le diverse luminosità stellari (e il conseguente incremento di temperatura nel nucleo) producono effetti di dilatazione e intensificazione delle linee spettrali. Questa è l'essenza dell'importante contributo apportato dalla teoria.

LA LUCE IN ASTRONOMIA

La Radiazione Elettromagnetica

La **radiazione elettromagnetica** è, dal punto di vista dell'elettromagnetismo classico, un fenomeno ondulatorio dovuto alla contemporanea propagazione di perturbazioni periodiche di un campo elettrico e di un campo magnetico, oscillanti in piani tra di loro ortogonali. Al meglio dell'attuale conoscenza fisica, nel vuoto la direzione di propagazione della radiazione elettromagnetica è perpendicolare al piano identificato dalle direzioni delle due oscillazioni dei campi elettrico e magnetico e la velocità di propagazione è costante, ed indipendente dalla velocità della sorgente, dalla direzione di propagazione, e dalla velocità dell'osservatore (vedi immagine sottostante).



Questa velocità (che prende il nome di **velocità della luce**) si indica in genere con la lettera **c** ed il suo valore numerico in unità del sistema internazionale risulta di circa 300.000 km al secondo ($c = 299.792.458$ m/s nel vuoto). Nei mezzi materiali la propagazione della radiazione elettromagnetica diviene un fenomeno più complesso e la sua velocità è diversa rispetto a quella nel vuoto secondo un fattore che dipende dalle proprietà del mezzo. L'astronomo danese Ole Rømer fu il primo a determinare empiricamente la velocità della luce per mezzo dell'osservazione dei satelliti di Giove (1675).

Contesto teorico ed evidenze sperimentali

Le onde elettromagnetiche furono predette teoricamente prima di essere osservate (o meglio, prima di essere riconosciute come tali tramite una osservazione). Le equazioni di Maxwell, che riassumono l'elettromagnetismo classico, ammettono una soluzione ondulatoria propagantesi nel vuoto (o, come ci si sarebbe espressi all'epoca della loro formulazione, nell'etere) alla velocità della luce. Furono le esperienze di Hertz a confermare l'esistenza delle cosiddette onde hertziane ed a misurarne la velocità.

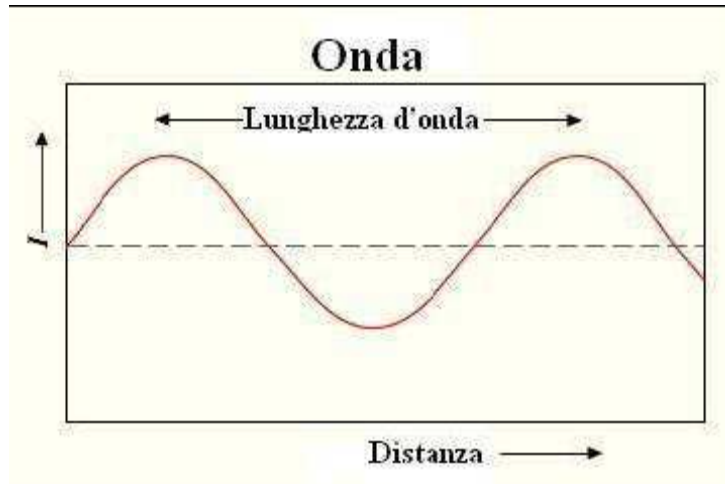
L'esperienza di Michelson, che provò invece l'indipendenza della velocità della luce dalla direzione di propagazione (anche se non rigorosamente nel vuoto, ma in aria), mise in crisi la meccanica classica richiedendo la formulazione della relatività ristretta.

Natura quantistica della radiazione elettromagnetica

Gli studi sull'effetto fotoelettrico, tra i quali spicca il contributo del 1905 di Albert Einstein (che gli valse il premio Nobel) evidenziarono l'esistenza di una frequenza di soglia sotto la quale tale effetto non ha luogo, indipendentemente dall'intensità della radiazione incidente.

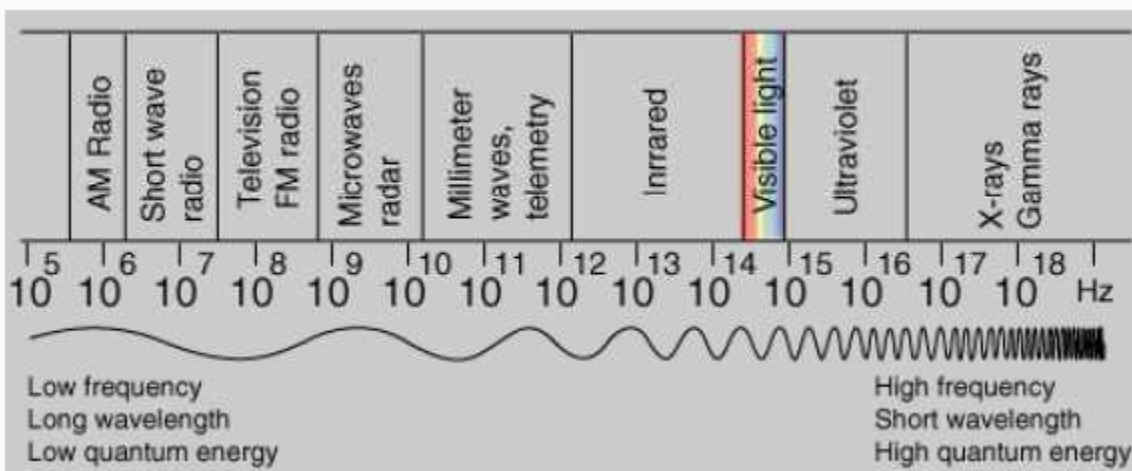
Esperienze correlate, quali la misura dello spettro di corpo nero, ed i relativi tentativi di giustificazione teorica, indussero i fisici dell'inizio del secolo scorso a riaprire il secolare dibattito sulla natura della luce su cui le equazioni di Maxwell sembravano l'ultima parola, introducendo la nozione di **quanto di energia**. Il quanto di radiazione elettromagnetica prende il nome di **fotone**.

Lo spettro elettromagnetico



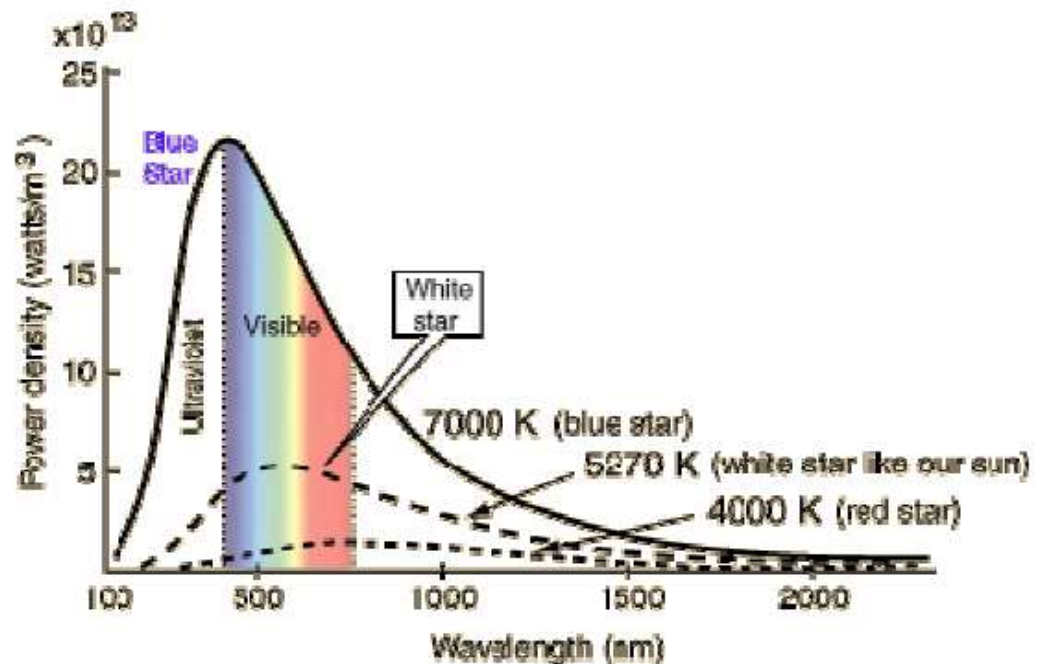
L'insieme delle radiazioni costituisce lo **spettro elettromagnetico**. Le radiazioni sono onde elettromagnetiche caratterizzate da una **lunghezza d'onda** (vedi immagine a sinistra) e da una **frequenza** (numero di lunghezze d'onda nell'unità di tempo). Poiché la lunghezza d'onda e la frequenza di una radiazione sono inversamente proporzionali, tanto minore sarà la lunghezza d'onda, tanto maggiore sarà la frequenza e quindi l'energia. Con la vista riusciamo a percepire lunghezze d'onda comprese tra i 400 e i 700 nanometri (nm) a cui diamo il nome di **luce visibile**. Lunghezze d'onda minori corrispondono ai **raggi ultravioletti**, ai **raggi X** ed ai **raggi gamma** che hanno tutti quindi frequenza superiore alla luce visibile e perciò maggiore energia. Le **radiazioni infrarosse**, le **onde radio** e le **microonde** hanno invece lunghezze d'onda maggiori della luce e trasportano energia inferiore.

Spettro elettromagnetico



La luce delle stelle: radiazione di corpo nero, spettro stellare e classificazione spettrale

Anche la luce proveniente dalle stelle è radiazione elettromagnetica. In prima approssimazione le stelle si comportano come dei corpi neri. Un **corpo nero** è un oggetto che assorbe tutta la radiazione incidente su di esso e re-irradia energia con caratteristiche proprie del solo sistema, indipendentemente dalla radiazione assorbita. Se pensiamo alle stelle come a dei corpi neri, i loro colori visibili dipendono dalla superficiale (**legge di Wien**, vedi immagine sottostante).



temperatura

Questo consente una prima classificazione delle stelle, in base al loro colore e, quindi, come abbiamo appena visto, alla loro temperatura. Per le stelle più lontane questo potrebbe essere un problema.

Quindi si preferisce classificarle in base al loro spettro. Esistono diversi tipi di spettri stellari, caratterizzati da **linee di emissione** e di **assorbimento**. In particolare le linee di emissione possono essere osservate solo per un certo intervallo di temperature, perché solo per quel intervallo sono coinvolti gli orbitali degli atomi popolati. Di particolare importanza sono le linee di assorbimento dell'idrogeno. Studiare gli spettri delle stelle ci permette di avere informazioni sulla composizione chimica delle stelle. Non solo. Lo spettro stellare oggi è così ben compreso da farci avere informazioni anche sulla magnitudine assoluta, che ci permette di conoscere la distanza dell'astro. Anche l'età di una stella può essere studiata a partire dallo spettro, perché le stelle più giovani hanno un'alta concentrazione di elementi più pesanti dell'elio rispetto alle stelle che si sono formate nell'universo primordiale. Grazie all'effetto Doppler, lo spettro è utile anche per conoscere il moto relativo di una stella e, quindi, ci può fornire indizi sull'esistenza di una possibile compagna o buco nero.