

# Scuola di Storia della Fisica

“La luce, una storia infinita”

Ferrara 25 Febbraio – 1 Marzo 2019

**GRUPPO DI LAVORO**  
**LA LUCE COME SONDA COSMICA**

Biagio Buonaura – Liceo Scientifico Albertini -Nola

## ASTRONOMIA

- a) La più antica di tutte le scienze
- b) Strettamente legata a tutte le scienze della natura e ad altre discipline quali la filosofia, è connessa con l'estetica e con la religione, ma anche con la superstizione.
- c) Il settore della Fisica coinvolto maggiormente è la meccanica: la Meccanica Celeste

## ASTROFISICA

- a) Si sviluppa dall'astronomia alla fine del XVIII secolo, come conseguenza dell'applicazione al dominio astronomico delle leggi della radiazione elettromagnetica enunciate da Gustav Kirchhoff (1824-1887) e Robert Bunsen (1811-1899) **nel 1859**  
(P. Angelo Secchi nel 1871 la "Società degli Spettroscopisti Italiani", che dal 1920 ha preso il nome di **Società Astronomica Italiana** (SAIT))
- b) Essa si avvale indistintamente di tutte le branche della Fisica.
- c) L'Astrofisica classica include lo studio delle proprietà fisiche: luminosità, densità, temperatura e composizione chimica, di oggetti quali pianeti, stelle, galassie, mezzo interstellare, e le loro reciproche interazioni.

## Premessa sul Metodo

L'Astrofisica è un ramo della Fisica, ed è pertanto una **scienza sperimentale** con una stretta interazione tra teoria e osservazione. Segue gli stessi metodi d'indagine matematici - sperimentali degli altri rami della fisica.

### Tuttavia

a) L'Astrofisica è una scienza osservativa: per ovvi motivi gli astronomi non possono eseguire esperimenti controllati in laboratorio in cui selezionare o mettere in evidenza l'effetto fisico di interesse. In Astrofisica l'esperimento è sostituito dall'osservazione dei corpi celesti tramite telescopi. Infatti, non si possono compiere esperimenti sugli astri (Ad es. non si può a nostro piacimento variare la gravità solare o la composizione chimica solare, ecc.).

c) La «riproducibilità» dell'esperimento richiesta dal metodo scientifico in fisica è surrogata dall'osservazione di un campione ampio di oggetti ritenuti «simili», talvolta con un certo margine di errore. Ciò implica la necessità di utilizzare metodi statistici di indagine.

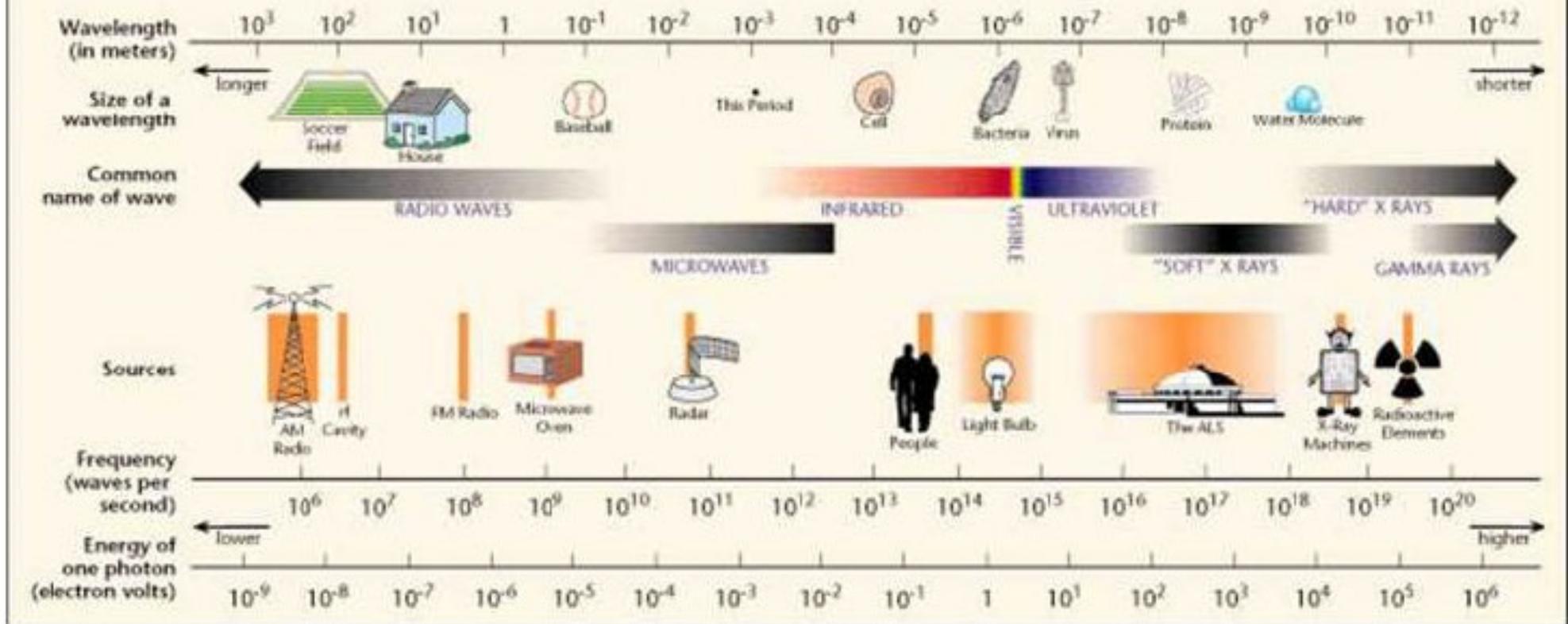


L'obiettivo dell'Astrofisica è, quindi, quello di ricavare **la struttura fisica degli oggetti celesti, l'origine e l'evoluzione , la morte e l'età**; in questo senso anche l'**Universo** nel suo insieme è argomento di studio attraverso la Cosmologia.

Ovviamente per perseguire tale obiettivo bisogna costruire **modelli teorici** degli oggetti celesti (si ricordi che solo la teoria ci dice cosa osservare ) basandosi su misure di grandezze fisiche quali: **distanze, dimensioni, massa, potenza** (sua distribuzione sulle varie energie: spettro e temperatura), **luminosità e composizione chimica**.

I dati su cui le misure sono effettuate provengono, quasi interamente, dalla **radiazione elettromagnetica** (in questo senso la luce è la più potente e versatile sonda che abbiamo a disposizione per lo studio dell'Universo) che riceviamo dai corpi celesti e intercettiamo con **i telescopi** (strumento di qualunque tipo che raccoglie radiazione elettromagnetica di qualunque frequenza:  $\gamma$ , X, UV, Visibile, IR, Microonde, Onde Radio) e con i rivelatori posti nel fuoco di essi.

# THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM



“It’s of no use whatsoever [. . .] this is just an experiment that proves Maestro Maxwell was right – we just have these mysterious electromagnetic waves that we cannot see with the naked eye. But they are there.”

Heinrich Hertz

## Lo Spettro Di Righe

Nel 1814 il maestro ottico Tedesco **Joseph Fraunhofer** aveva rifatto l' esperimento di Newton di scomporre la luce del Sole nei suoi colori tramite un prisma. Stavolta aveva ingrandito moltissimo lo spettro colorato risultante. Scopri' che lo spettro colorato era interrotto da piùdi 600 righe scure che oggi chiamiamo **righe spettrali** (oggi ne conosciamo circa un milione !).

50 anni dopo Fraunhofer i chimici scoprirono che si potevano generare spettri di righe simili a quello del Sole anche in laboratorio. Nel 1857 a Heidelberg il chimico tedesco Robert Bunsen aveva inventato una fiamma senza colore, che permetteva di scaldare le sostanze senza contaminarle, e quindi di analizzare la fiamma prodotta da queste sostanze.

Il suo giovane collega Gustav Kirchhoff propose di analizzare la luce prodotta da queste fiamme attraverso un prisma. Il Bunsen e Fraunhofer scoprirono che lo spettro delle fiamme era una serie di righe brillanti su sfondo scuro.

L' analisi della sequenza di righe nello spettro permetteva di identificare univocamente le sostanze componenti. Una volta catalogati gli spettri degli elementi conosciuti, si cominciarono a trovare spettri nuovi e quindi elementi sconosciuti.

Si scopri' che il Sole era fatto soprattutto di **Idrogeno**, e nel 1868 si scopri' un nuovo elemento nello spettro del Sole, che venne chiamato **Elio**.

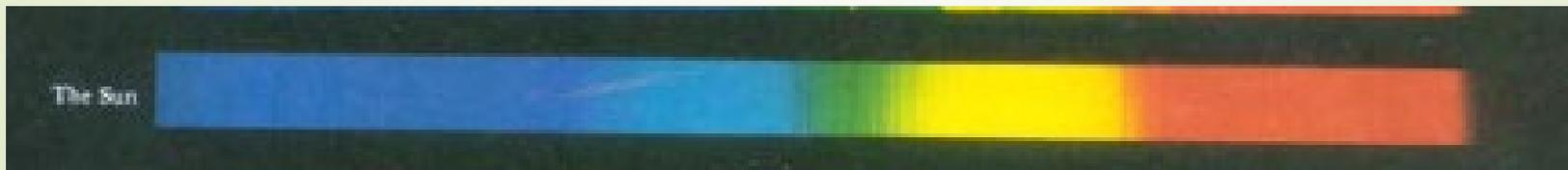


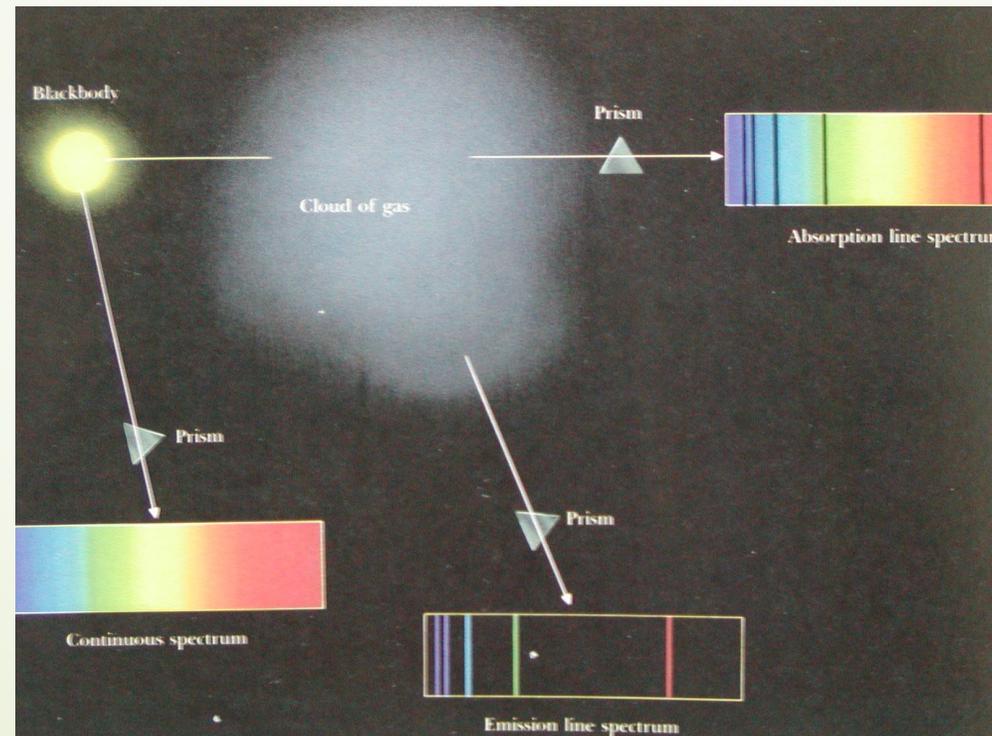
Fig.16 Spettro Sole

Nel 1860 erano conosciute le seguenti leggi di Kirchoff dell' analisi spettrale:

Un oggetto caldo o un gas denso e caldo producono uno spettro continuo (tipo corpo nero) : un arcobaleno continuo senza bande nere.

Un gas caldo e rarefatto produce uno spettro di righe brillanti e nessun continuo.

Un gas freddo di fronte a un oggetto con emissione continua produce uno spettro con bande di assorbimento (come quello del Sole).



**Fig.17**



IN DIESEM HAUSE HAT  
**KIRCHHOFF**  
1859 SEINE MIT BÜNSEN BEGRÜNDETE  
**SPEKTRALANALYSE**  
AUF SONNE UND GESTIRNE GEWANDT  
UND DAMIT DIE CHEMIE DES WELTALLS  
ERSCHLOSSEN



## Come interpretare una fenomenologia così variegata dell' interazione tra la luce e la materia ?

Al tempo di queste scoperte si sapeva che la materia era costituita di atomi. Un atomo è la più piccola parte di un elemento chimico che ha ancora le proprietà chimiche caratteristiche di quell' elemento.

Le righe corrispondono quindi ad interazioni della luce con gli atomi, e sono caratteristiche di ciascun elemento.

Perché gli atomi assorbono e emettono solo luce di lunghezze d' onda ben precise (quelle delle righe spettrali) ?

Allora qual è **il meccanismo ( o quali sono i meccanismi ) che producono la caratteristica radiazione di corpo nero** (ovvero lo spettro continuo della radiazione degli oggetti stellari) **e le righe osservate nello spettro della radiazione stellare?**

Le risposte arrivarono solo all'inizio del 900, con la scoperta della meccanica quantistica !!

Inoltre, all'inizio del XX secolo le stelle venivano classificate in base a **tipi spettrali** definiti dalla forza (profondità) delle righe di assorbimento osservate.

Dalla Fisica si sa che:

- a) *Una sorgente incandescente dà uno spettro continuo (black body);*
- b) *Righe di emissione e assorbimento di un gas appaiono alle stesse lunghezze d'onda.*
- c) *Miscele di elementi producono le righe di tutti gli elementi.*

Lo spettro di un oggetto celeste, stella o altro, è in generale composto da una parte *la cui intensità varia lentamente al variare della lunghezza d'onda* (**spettro continuo**), su cui sono sovrapposte le cosiddette **righe spettrali**, in **assorbimento** o in **emissione** se esse sono rispettivamente più scure o più brillanti dello spettro continuo sottostante.

La forma dello spettro continuo è determinata dalla **temperatura** superficiale dell'oggetto celeste osservato.

Ciascuna riga è prodotta da un ben determinato elemento chimico (o da molecole), e la loro osservazione (e misura quantitativa) fornisce quindi informazioni sulle **condizioni fisiche** e sulla **composizione chimica** della superficie dell'oggetto osservato.

Per ottenere spettri si utilizza uno strumento detto **spettrografo** collocato sul piano focale del telescopio.

Una comprensione dei meccanismi radiativi fondamentali osservati in natura è essenziale in astrofisica moderna. Questa comprensione consente ad un astrofisico di analizzare gli **spettri** di sorgenti astronomiche lontane e ottenere informazioni riguardanti le condizioni presenti nelle regioni del universo che la radiazione ha attraversato.

All'interno di molte regioni interessanti dell'universo molti di questi meccanismi di radiazione sono di importanza speciale.

Attraverso esempi vedremo che **i processi di emissione di bremsstrahlung, emissione di sincrotrone e diffusione di Compton** sono comunemente osservati, quindi di grande importanza.

# Caratteristiche dello spettro

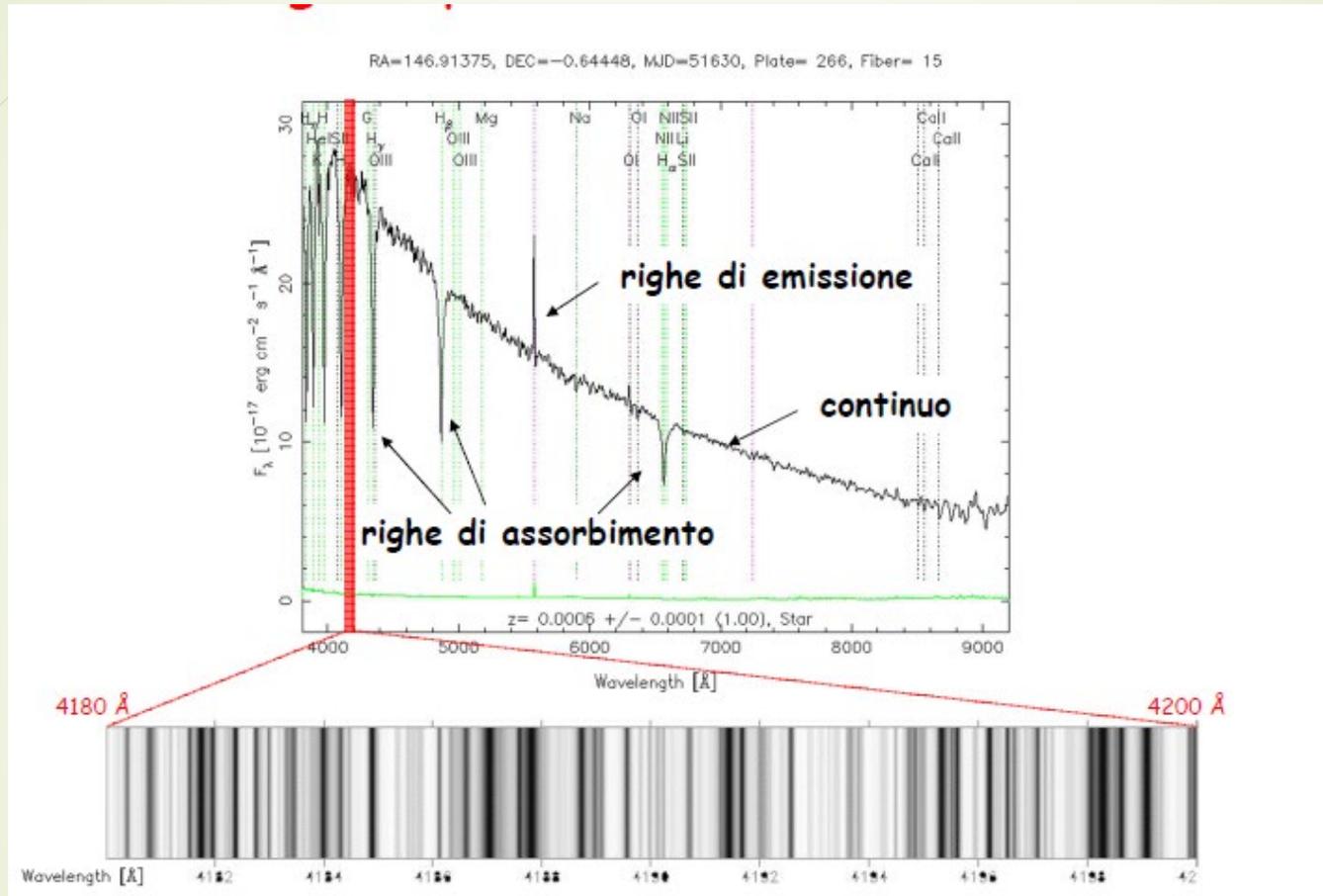


Fig.4 Spettro

Vi sono, poi, altri problemi legati alla natura dell'ambiente astrofisico all'interno del quale si generano le righe.

Ad esempio:

- a) Perché alcune righe sono più intense di altre?
- b) Perché alcune righe si presentano "più sottili" nelle stelle più luminose?
- c) Perché alcune righe si presentano "più allargate" nelle stelle meno luminose?

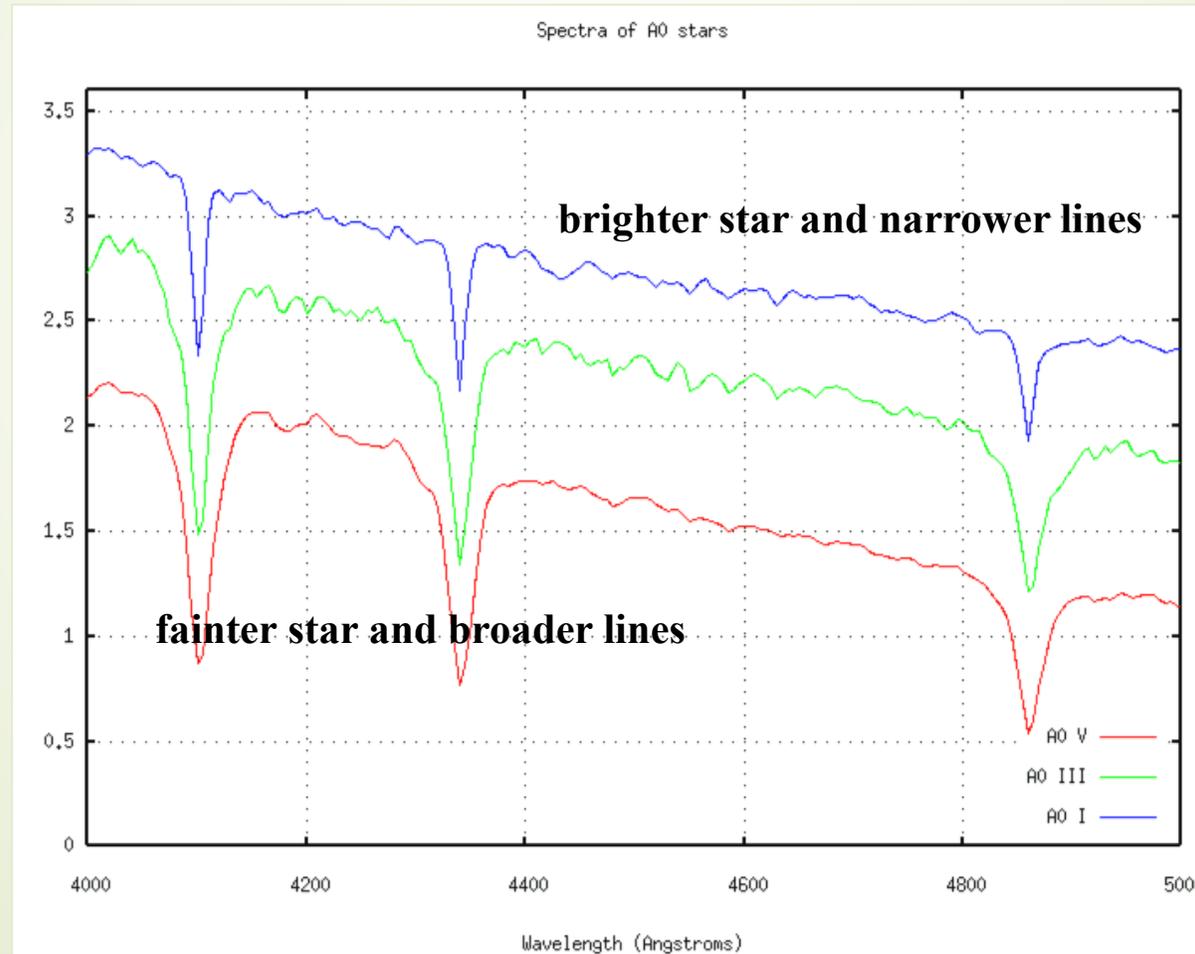


Fig.18

## Radiazione Elettromagnetica: Allargamento delle righe

Le righe spettrali non sono sottili e rigorosamente monocromatiche, ma sono allargate

### Allargamento

L'allargamento  
probabilità di

Si può ricavare

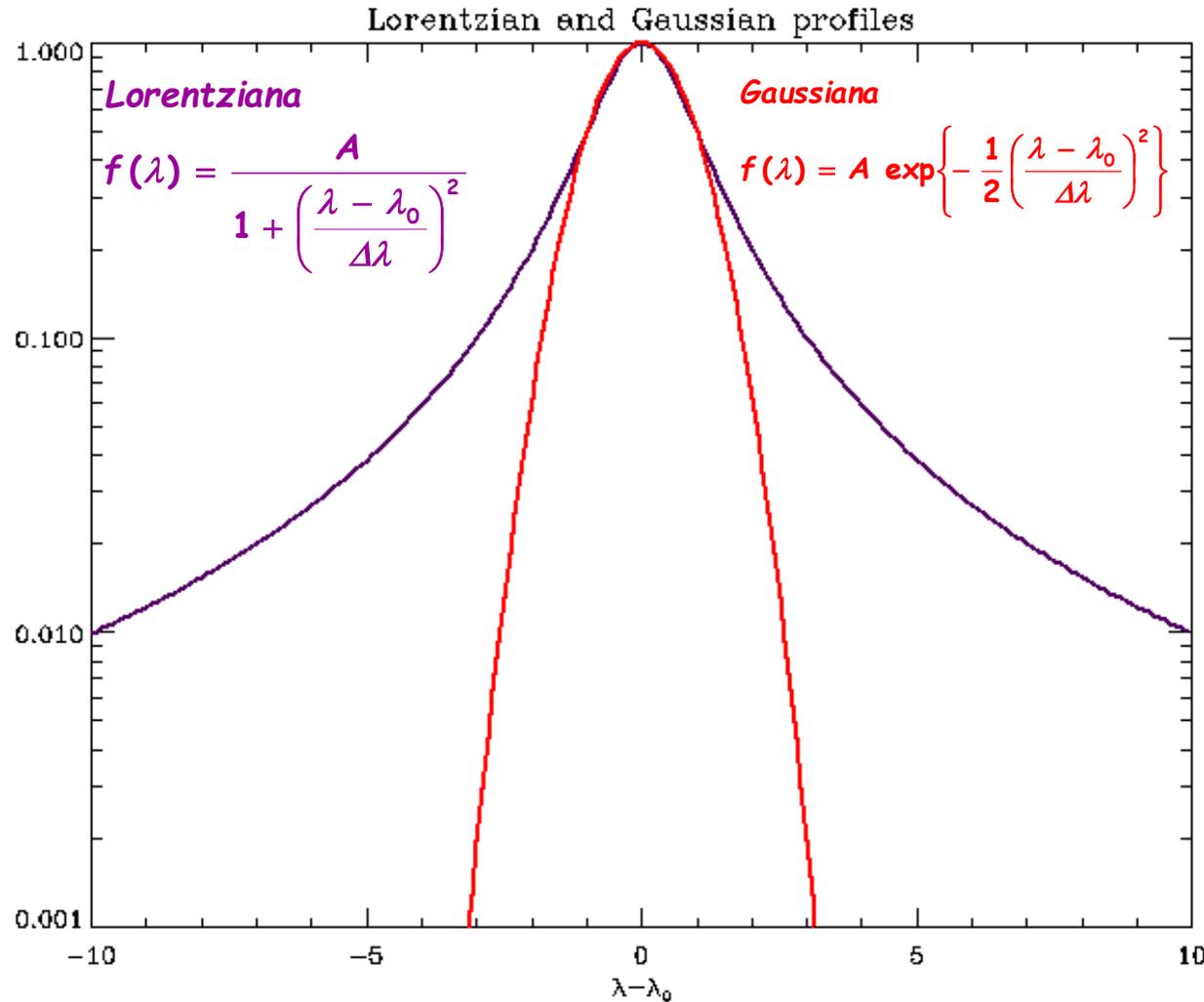
$$\Delta E \Delta t \approx \hbar$$

dove  $\Delta E$  è l'incertezza  
su quel livello

$$\Delta E = h\Delta\nu \quad \text{si ha}$$

### La larghezza di diseccitazione

Il profilo di riga



legato alla

energia:

dell'elettrone

probabilità di

\* Omogeneità significa che ogni singola emissione da un contributo alla riga con profilo Lorentziano. Al

## Allargamento Doppler

L'allargamento Doppler è dovuto alla distribuzione di velocità degli atomi emettenti. Se gli atomi sono distribuiti termicamente secondo una distribuzione maxwelliana il profilo di riga è gaussiano e disomogeneo.

Un atomo in moto assorbe un fotone che è leggermente shiftato il lunghezza d'onda (o in frequenza) a causa dell'Effetto Doppler: se la velocità media dovuta al moto termico è:

$$v = [2kT/m]^{1/2}$$

Allora lo shift in lunghezza d'onda è:

$$\Delta\lambda/\lambda = \pm |v_r|/c = \frac{2}{c} \left( \frac{2kT}{m} \right)^{1/2}$$

Il fattore 2 è dovuto sia al moto di avvicinamento che di allontanamento dall'osservatore.

Il moto turbolento (rimescolamento del fluido, in tempi più brevi del moto termico) con una velocità  $v_{\text{turb}}$ , può essere incluso come:

L'allargamento Doppler della riga  $H\alpha$  per il Sole ( $T=5780\text{K}$ ) è  $\approx 0.43^\circ$  cioè 1000 volte più grande dell'allargamento naturale ( $0.46 \times 10^{-3} \text{ \AA}$ ).

## Allargamento collisionale

L'allargamento collisionale è dovuto all'effetto delle collisioni dell'atomo che emette con le particelle vicine. Esso dipende dalla densità e dalla temperatura del gas e provoca un ulteriore allargamento della riga.

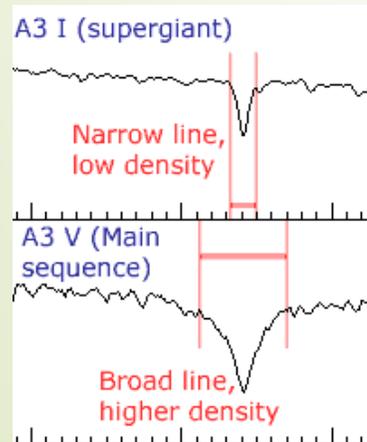
Il profilo di riga è, di nuovo, lorentziano e omogeneo.

Quando l'atmosfera stellare è **molto densa** (un gran numero  $n$  di atomi per unità di volume) bisogna prendere in considerazione questo tipo di allargamento.

Sia  $\Delta t = \ell/v$  il tempo libero medio di collisione fra atomi, dove  $\ell = 1/(n\sigma)$  è il cammino libero medio e  $\sigma$  è la sezione d'urto per collisione. Usando nuovamente  $v \doteq [2kT/m]^{1/2}$  si ottiene:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda}{2\pi c\Delta t} = \frac{\lambda n\sigma}{\pi c} \left( \frac{2kT}{m} \right)^{1/2}$$

Si noti che tale allargamento è direttamente proporzionale alla densità degli atomi:

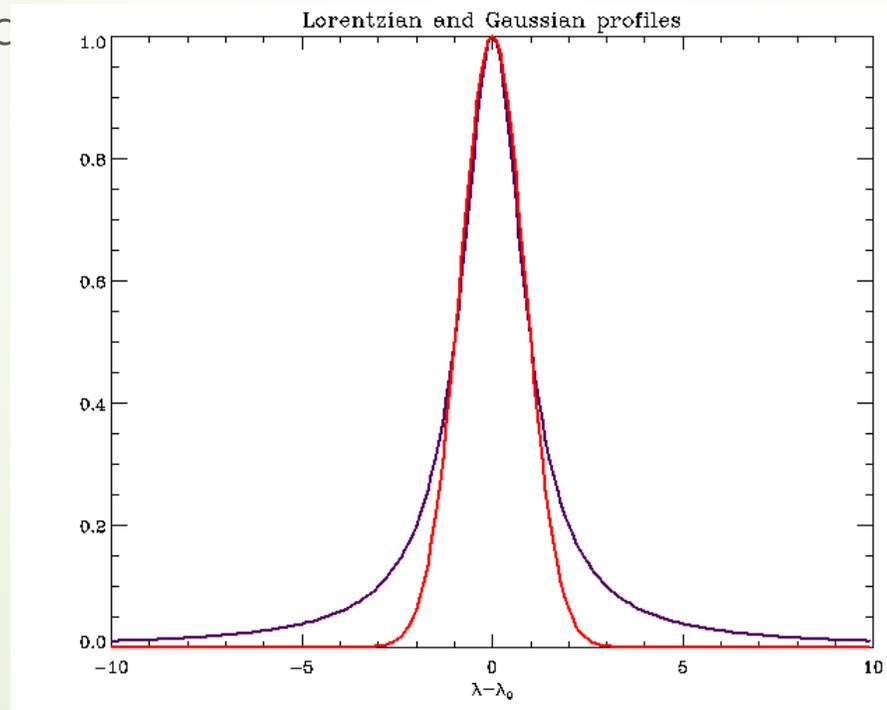


Supergiganti: bassa densità righe sottili  
Stelle di Sequenza Principale: densità media /alta  
righe più larghe.

In generale la riga avrà un profilo che combina tutti e tre i tipi di allargamento descritti, dando luogo ad un profilo detto di Voigt.

Questo profilo ha centro riga di forma **gaussiana** e le ali. **lorentziane**, perchè si ottiene dalla convoluzione di tante lorentziane sopra un profilo gaussiano

Questi sono i meccanismi di allargamento fondamentali ai quali si ricollegano tutti gli altri fenomeni di allargamento dovuti, ad esempio, alla rotazione di un corpi celesti o ai moti turbolenti di un gc



$$L \propto M^\alpha$$

$$\alpha \sim 3 - h$$

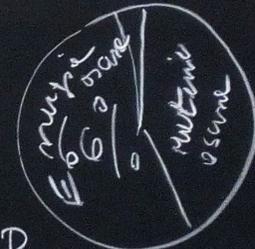
$$L = \frac{h^2 R^2 \pi^4}{c}$$

$$\frac{3}{2} k_B T \approx m_H g_0 H$$

$$H = \frac{1.5 \cdot k_B T_0}{m_H g_0} \approx$$

$$g_0 \approx G \frac{M_0}{R_0^2}$$

$$= \frac{6.67 \times 10^{-11} \cdot 2 \times 10^{30}}{(7 \times 10^8 \text{ m})^2}$$



$$700 \text{ Km} \ll R_0$$

$$P = m k_B T + \frac{1}{3} a T^4$$

% materia visibile

$$m_H = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

$$T_0 = 5800 \text{ K}$$

Torta dell'ingrediente universale

$\Delta U = \frac{1}{2} m_e v^2$   
 $\Delta U = \frac{1}{2} m_e v^2$   
 $\tau_{CH} = \frac{m_p \tau_p + m_e \tau_e}{m_p + m_e}$   
 $E_{CH} = E_m - E_m$

$KT \approx \frac{1}{4} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_H}$       compressa tipica H (H non ionizzato)  
 $KT \geq \frac{1}{4} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$       anello di idrogeno (comp. ionizzato)

$E_m + \Delta E_m$        $\mu = (m_e)$        $\frac{m v^2}{2} = \frac{1}{4} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$   
 $\frac{1}{2} m_e v^2 = \frac{1}{4} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$

$\Delta U = \frac{1}{2} m_e v^2 \iff$   
 $\tau_{CH} = \frac{m_e \tau_e}{m_p + m_e} = \frac{m_e}{2000 m_p + m_e} \tau_e$   
 $V_{th} \sim \sqrt{\frac{KT}{m}} = \frac{m_e}{m_p + m_e}$   
 $\tau_e = \tau_{CH} \ll \tau_e$   
 $L = m v r = \mu h$   
 $m v^2 = \frac{1}{4} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \implies m v = \sqrt{\frac{1}{4} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} m}$   
 $\frac{1}{2} m_e v^2 = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{4} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \right)$

