



Tutta la fisica in una Stella

*Il cielo è l'unica finestra che abbiamo per immergerci nell'immensità dell'universo. Se la chiudiamo, rimarremo bloccati nei nostri confini e con le nostre barriere.» -
Silvana Teresa Tapia Panigua*

Astrofisica e Astronomia

- Le stelle sono corpi celesti che brillano di luce propria
- I pianeti sono visibili di notte ad occhio nudo o al telescopio perchè riflettono la luce del sole
- Se si osserva il ad occhio nudo o al telescopio, le stelle presentano una luce tremolante mentre i pianeti una luce più stabile
- L'energia stellare è regolata dalle leggi della termodinamica e da quelle della fisica nucleare
- Altri fattori intervengono nel trasporto di energia e nell'evoluzione stellare. Alcuni fenomeni sono trascurabili ma vengono presi in considerazione in un momento successivo allo studio di quelli fondamentali
- L'astrofisica studia i principi che regolano il funzionamento delle stelle e di altri corpi celesti a differenza dell'astronomia che si occupa dell'osservazione del cielo

Archeoastronomia

**Le stelle sono oggetti di osservazioni fin dall'antichità.
L'uomo ha avuto sempre a disposizione il cielo sopra la
sua testa.**

**Chiunque si sarebbe accorto degli eventi astronomici,
della periodicità e dell'imprevedibilità.**

**Oggi non solo siamo distratti da tante cose ma a volte, è
anche difficile avere a disposizione un buon cielo**

**Sembra che alcune civiltà avessero
sviluppato una tecnologia abbastanza
avanzata per osservare il cielo ad
occhio nudo**

**L'Archeoastronomia studia i legami tra il progetto degli antichi
monumenti e i cicli celesti, al fine di comprendere il pensiero e la
religione dei loro costruttori**

L'astronomia dall'antichità al 1800

Da reperti archeologici ma anche da fonti più certe, come testi scritti, si è giunti a conclusione che le antiche popolazioni utilizzavano il cielo per culti religiosi, miti...il cielo era per gli antichi una rilevanza di divinità perché tutto ciò che essi osservavano era ed è tutt'ora un miracolo, un insieme di fenomeni affascinanti.

Si conosce per certo che alcune civiltà come i greci abbiano provato a simulare tramite modelli, il cielo al fine di prevedere alcuni fenomeni periodici. Altre civiltà come gli egizi, i maya, popoli del nord Europa, hanno costruito grandi strutture in funzione del movimento periodico degli astri come del Sole, della Luna e di stelle molto luminose.

Ricordiamo le principali teorie che si sono scontrate nel tempo come quella geocentrica che vede la terra al centro dell'universo e tutti gli astri che ruotano attorno ad essa, e quella eliocentrica dove è il sole al centro e i pianeti ruotano attorno ad esso.

La prima, sostenuta da Aristotele, fu perfezionata da Tolomeo nel II secolo d.c. e molto sponsorizzata dalla chiesa cattolica fino a condannare a morte chi la confutasse; la seconda fu proposta già da Aristarco di Samo nel III secolo a.c. ma dobbiamo aspettare a Copernico nel 1540 e a Galileo nel 1610 affinché essa fosse ripresa e formulata con teorie di geometria sferica ma accettata definitivamente nel 1850 con le osservazioni di Foucault

Leggi di Keplero e leggi della gravitazione universale di Newton

Le tre leggi di Keplero furono formulate intorno al 1615 (in tempi differenti dal 1608 al 1619) per descrivere il moto della terra e dei pianeti attorno al sole ma sono valide anche per descrivere il moto di qualsiasi corpo celeste che ruota attorno ad un altro. Es moto delle stelle in una galassia o di una stella attorno ad una compagna

I legge: le orbite descritte dai pianeti attorno al Sole sono ellissi di cui il Sole occupa uno dei fuochi.

II legge: Il raggio vettore che va dal Sole a un pianeta spazza aree uguali in intervalli di tempo uguali.

III legge: Il rapporto tra il cubo del semiasse maggiore dell'orbita e il quadrato del periodo di rivoluzione è lo stesso per tutti i pianeti

La legge di gravitazione universale, formulata da Newton nel 1687, regola la forza attrattiva tra due corpi massivi e afferma che la forza tra due corpi è direttamente proporzionale al prodotto delle loro masse e inversamente proporzionale al quadrato delle loro distanze.

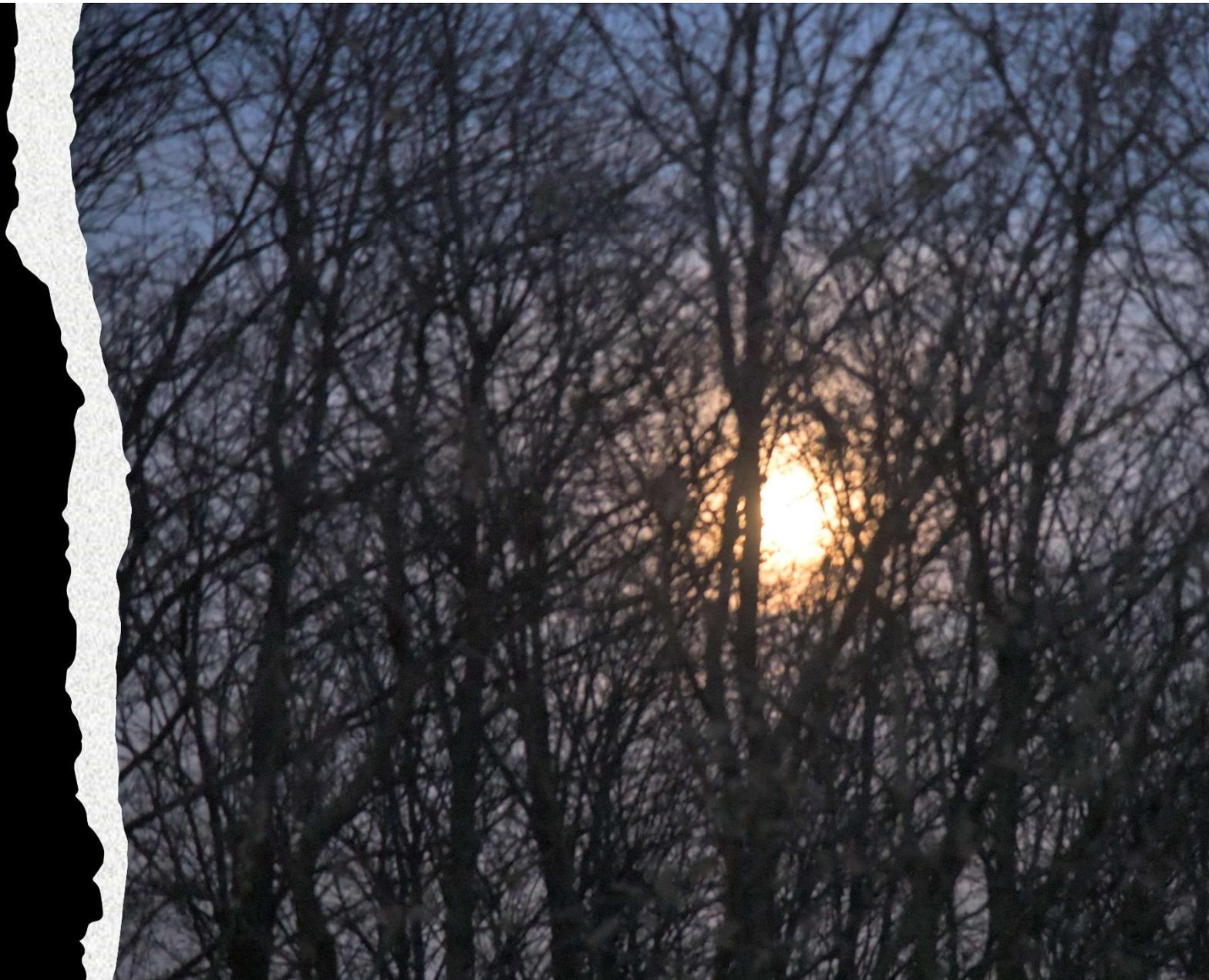
Due corpi celesti interagiscono gravitazionalmente secondo tale legge ma anche massive nubi di gas presenti nel cosmo e che potrebbero addensarsi per formare corpi celesti e, in determinate condizioni, stelle

Dall'astronomia all'astrofisica

Lo studio dell'astronomia richiede conoscenze di meccanica celeste. La fisica stellare ha bisogno anche di altre teorie fisiche

La nascita dell'astrofisica risale a metà dell'800 grazie ai nuovi metodi di indagine con l'invenzione dello spettroscopio.

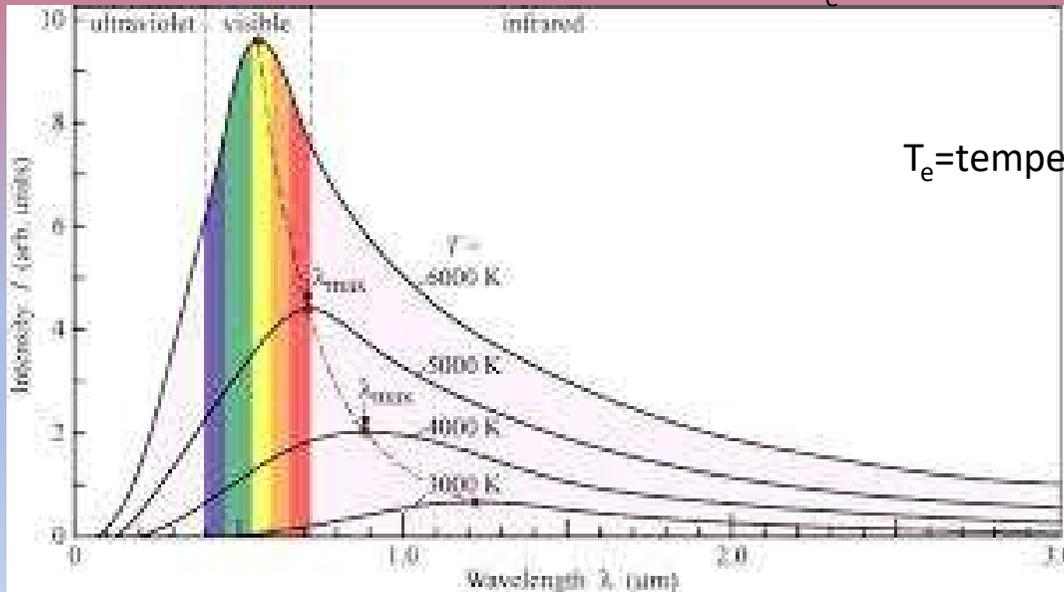
Le antiche civiltà già riconoscevano il colore delle stelle dovuto alla loro temperatura.



Colore stelle

Il colore di una stella è determinato dalla sua temperatura superficiale, secondo la legge di Stefan-Boltzmann, che stabilisce una relazione diretta tra temperatura e radiazione emessa. Le stelle più calde appaiono blu-bianche, mentre quelle più fredde tendono al rosso

$$\text{flusso di radiazione } L = 4 \pi R^2 T_e^4$$



T_e = temperatura effettiva

| Temperatura | Colore |
|-------------------|----------------|
| 2700-3800 gradi | Rosso |
| 3800-5000 gradi | Arancio |
| 5000-6000 gradi | Giallo |
| 6000-8000 gradi | Bianco-Giallo |
| 8000-10000 gradi | Bianco |
| 10000-30000 gradi | Azzurro-Bianco |
| 30000-50000 gradi | Azzurro |

L'astrofisica e la fisica

L'energia delle stelle è generata dalla fusione nucleare, gli elementi leggeri si fondono generando elementi pesanti, energia e particelle.



Le teorie della termodinamica forniscono le basi per comprendere i fenomeni di trasporto e diffusione dell'energia in sistemi, anche nelle stelle

Nello studio di trasporto energetico e dell'evoluzione stellare intervengono anche altre branche della fisica come la dinamica dei fluidi, la meccanica, l'elettromagnetismo

Termodinamica:

È una branca della fisica e si occupa degli scambi di energia, sotto forma di calore o lavoro, tra sistemi fisici e il loro ambiente, e delle conseguenti variazioni delle proprietà del sistema.

I principi della termodinamica sono quattro:

- Principio zero: se due corpi hanno la stessa temperatura di un terzo corpo, allora essi sono caratterizzati dalla medesima temperatura. Tale principio è simile alla proprietà transitiva.
- Primo principio: è anche conosciuto come principio della conservazione dell'energia in un sistema chiuso. Matematicamente viene espresso nel seguente modo: la variazione dell'energia interna in un sistema è data dalla differenza tra il calore scambiato dal sistema e del lavoro svolto da esso svolto
- Secondo principio: può essere formulato in due modi differenti.
 - L'entropia di un sistema isolato non può diminuire nel tempo
 - Il calore non può passare spontaneamente da un corpo più freddo ad uno più caldo
- Terzo principio è detto anche principio dei Nerst: l'entropia di un sistema cristallino e puro, tende a zero quando la temperatura si avvicina allo zero assoluto

Questi principi sono fondamentali per comprendere il comportamento dei sistemi fisici, inclusi i processi che avvengono nelle stelle e in molti altri fenomeni naturali.



Fisica atomica: branca della fisica che studia il comportamento degli Atomi e la relativa struttura nonché il comportamento degli elettroni attorno al nucleo.

Fisica nucleare riguarda particolarmente il nucleo atomico le sue componenti e le relative proprietà.

Fisica particellare: studia i costituenti fondamentali della materia e le loro interazioni

Le tre discipline concorrono allo studio delle reazioni termonucleari che avvengono all'interno delle stelle

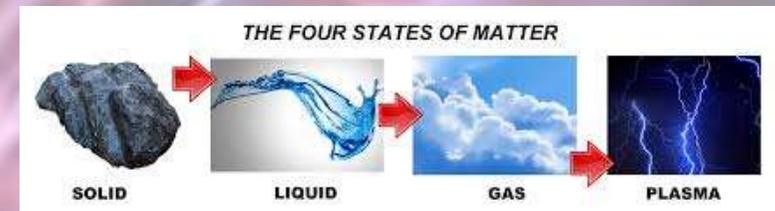


Nel 1925, Cecilia Payne-Gaposchkin nella sua tesi di dottorato, intitolata "Stellar Atmospheres", fu la prima a proporre che le stelle fossero principalmente costituite da idrogeno ed elio, in contrasto con le teorie dell'epoca che suggerivano composizioni simili a quelle della Terra. La comunità scientifica non accettò subito queste nuove teorie confermate poi da dati scientifici che diedero vita all'astrofisica moderna.

Le stelle e il sole, sono state sempre considerate sorgenti di energia e radiazione che non poteva però essere originata da una semplice combustione dei componenti l'astro altrimenti, quest'ultimo si sarebbe esaurito in breve tempo. La teoria termonucleare ha risolto i notevoli dubbi riguardanti le sorgenti dell'energia stellare

Le stelle sono formate per lo più da gas ionizzato a causa delle altissime pressioni e temperature. Per questo si dice che esse sono formate da plasma

Il gas plasma è il quarto stato della materia, è un gas ionizzato costituito da ioni positivi, elettroni liberi e, in alcuni casi, particelle neutre. Questo stato della materia si ottiene fornendo energia a un gas, tipicamente attraverso calore elevato o scariche elettriche, che causa la separazione degli elettroni dagli atomi, creando appunto gli ioni liberi



Nel caso delle stelle, si parla di caldo e denso; esso ribolle in alcuni strati delle stelle e si annida all'interno dei grandi pianeti come Giove, è molto difficile da fabbricare sulla superficie terrestre, pur essendo comune nell'Universo

Le reazioni termonucleari, storia di una scoperta

La fisica nucleare nasce nel XIX secolo dalle scoperte sulla radioattività, come quelle di Henri Becquerel e della coppia Pierre e Marie Curie

Intorno al 1930 furono effettuati studi sulla fissione nucleare che hanno poi portato alla realizzazione della bomba atomica

Il processo di fusione nucleare è stato compreso intorno al 1930 da scienziati come Rutherford, Oliphant, Chadwick, Eddington e Bethe.

Essi hanno indagato il processo che avviene all'interno delle stelle sia teoricamente che sperimentalmente, permettendoci di replicarlo qui sulla Terra

Alla fine degli anni trenta il fisico e astronomo tedesco Hans Bethe formalizzò le reazioni che descrivono il processo di fusione nucleare nelle stelle tramite il cosiddetto ciclo di Bethe

Si dice che siamo polvere di stelle

Infatti, l'universo sarebbe costituito di solo idrogeno, l'elemento più semplice che esiste in natura, se non fosse per le stelle che sintetizzano elementi più pesanti.

L'idrogeno è formato da un protone nel nucleo e da un elettrone.

Le stelle si formano da addensamenti di nubi di gas di nuclei di idrogeno H^+ tenute insieme da bilanciamenti di forze gravitazionali e centrifughe.

In condizione di una determinata temperatura e pressione, avviene una prima fusione dei due nuclei atomici detta catena p-p secondo la seguente equazione:



Dove:

D è l'isotopo dell'idrogeno $^2H^+$ caratterizzato da nucleo con un protone ed un neutrone;

e^+ è un positrone

ν_e è un neutrino

I nuclei di idrogeno e di deuterio continuano la fusione secondo la seguente reazione



3He elio con un nucleo di 2 protoni ed un neutrone

γ particella gamma

La differenza di massa tra reagenti e prodotti si trasforma in energia secondo la legge della relatività

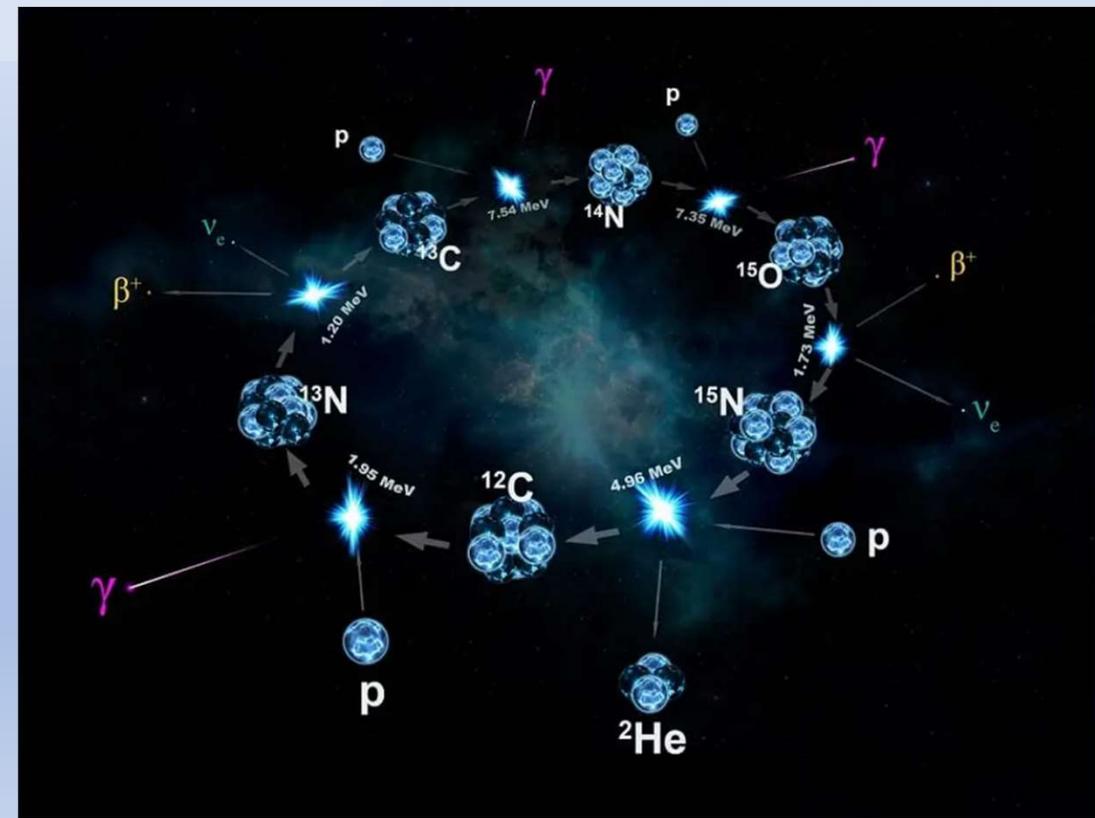
$$E=mc^2$$

La fusione procede per sintetizzare elementi più pesanti descritti nella catena CNOa seconda della massa stellare e delle temperature raggiunte



Riassumendo:

- Nella catena protone-protone descritta nella slide precedente, i due nuclei di idrogeno formano deuterio che a sua volta interagisce con un altro atomo di idrogeno producendo ${}^3\text{He}$ che reagendo con un altro ${}^3\text{He}$ forma ${}^4\text{He}$ e due protoni
- Il ciclo carbonio-azoto-ossigeno prevede la presenza di elementi pesanti come il carbonio, l'azoto e l'ossigeno che agiscono da catalizzatori, ovvero vengono consumati e prodotti all'interno del ciclo.



Problemi di trasporto dell'energia

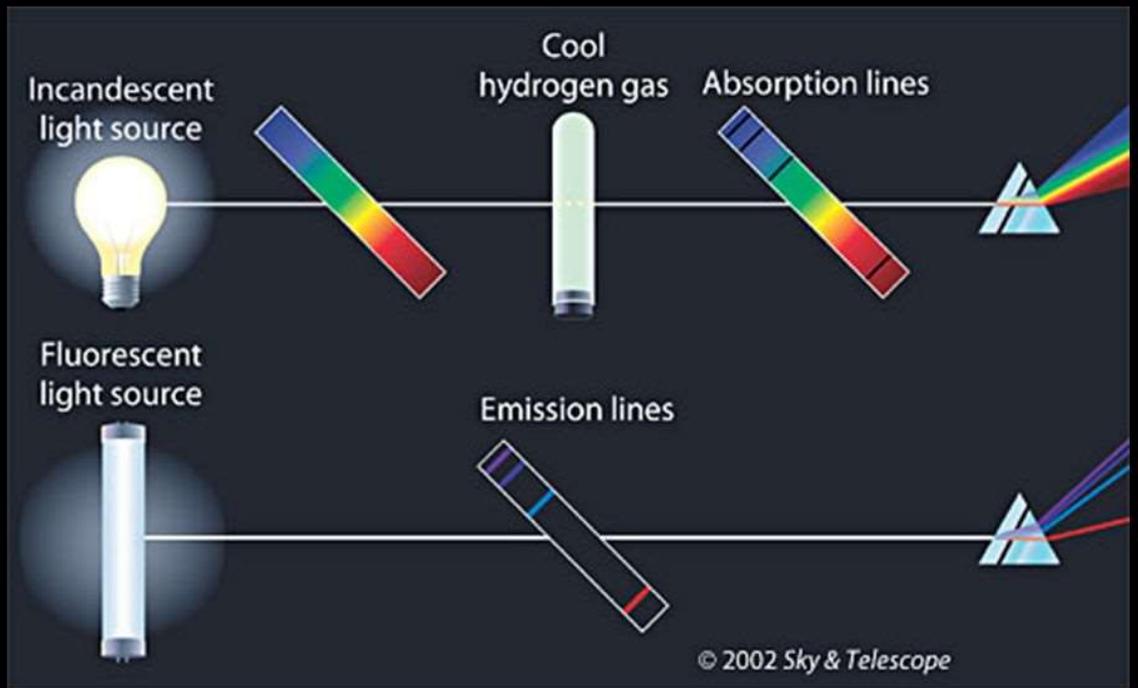
Le stelle non sono delle sfere uniformi ma, si ipotizza che esse siano formate da diversi strati di gas.

Nella parte più interna, il nucleo, avvengono le reazioni termonucleari.

L'energia sviluppata viene trasportata verso strati esterni tramite i seguenti meccanismi:

- **Trasporto convettivo:** è caratterizzato dal moto di bolle di gas che si spostano dal centro della stella verso gli strati più esterni e ridiscendono verso il centro quando incontrano strati con densità minore. In questo meccanismo intervengono le leggi della fluidodinamica e la spinta di Archimede. Questo processo avviene quando c'è una grande quantità di calore da trasportare.
- **Trasporto radiativo-convettivo:** se uno strato non è completamente convettivo, allora ci sarà anche un trasporto tramite radiazione elettromagnetica che prevale su quello convettivo perché più veloce in quanto, avviene tramite fotoni che si muovono alla velocità della luce. Tuttavia, la velocità media che ha un fotone quando esso fuoriesce dall'interno stellare sarà minore di quello della luce perché esso sarà assorbito dagli strati stellari e poi riemesso in tutte le direzioni. In ogni caso, la velocità del fotone sarà abbastanza grande.
- **Trasporto conduttivo:** è molto semplice e molto raro e si verifica in quelle stelle il cui plasma è elettricamente degenere e quindi quando il coefficiente di conduzione è elevato. Un plasma è degenere se è molto compresso le particelle non sono libere ma interagiscono tra loro e sono così vincolate a rispettare il principio di esclusione del Pauli; la loro velocità è diversa da quella di un gas ordinario

Lo spettro stellare



Le stelle emettono uno spettro continuo solcato da righe di assorbimento. La parte continua segue la distribuzione di Planck secondo cui l'andamento dell'intensità di energia per una fissata temperatura è espresso da

$$u(\lambda) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

L'equazione di corpo nero formulata da [Planck](#)

Le righe di assorbimento sono dovute alla presenza di strati gassosi esterni che assorbono la radiazione emergente dagli interni stellari. Dalla posizione di queste righe di assorbimento è possibile risalire alla composizione chimica degli strati esterni.

La classificazione di Harvard

| Classe | Temperatura (K) | Colore |
|--------|-----------------|-------------------|
| O | 28 000 - 50 000 | Blu-azzurro |
| B | 9 600 - 28 000 | Bianco-azzurro |
| A | 7 100 - 9 600 | Bianco |
| F | 5 700 - 7 100 | Bianco-giallastro |
| G | 4 600 - 5 700 | Giallo |
| K | 3 200 - 4 600 | Arancione |
| M | 1 700 - 3 200 | Rosso |

Sistema utilizzato in astronomia per classificare le stelle in base alla loro temperatura superficiale e colore, utilizzando le lettere O, B, A, F, G, K, M. Questo sistema, sviluppato all'Harvard College Observatory, è un pilastro della classificazione stellare ed è ancora in uso oggi.