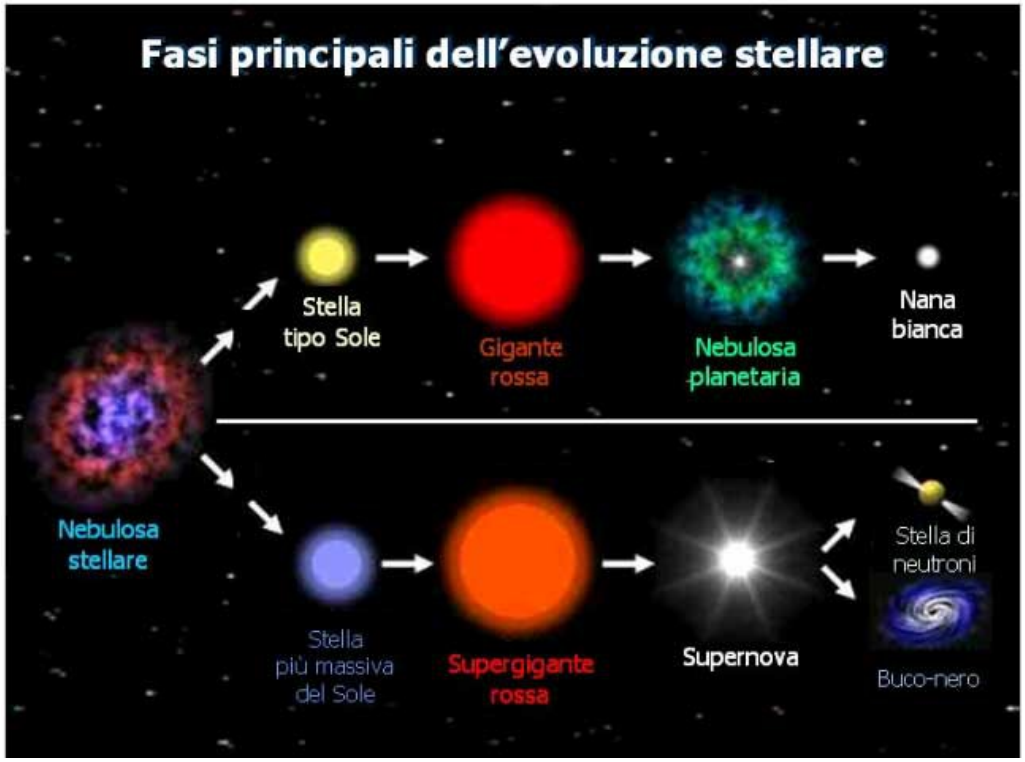
# Corso di Astronomia

4° Incontro

## **Le Stelle - 2° parte**

# Evoluzione Stellare




Con **evoluzione stellare** si intendono in astronomia i mutamenti che una stella subisce nel corso della sua esistenza. Durante il suo ciclo evolutivo la stella subisce variazioni di luminosità, raggio e temperatura. Essendo impossibile per un essere umano seguire l'intero ciclo di vita di una stella, per comprendere come esse evolvono si osserva una popolazione stellare che contiene stelle in diverse fasi della loro vita, e si costruiscono modelli fisico-matematici che permettono di riprodurre le proprietà osservate.

Uno strumento fondamentale per gli astronomi, al fine di comprendere i meccanismi evolutivi, è il diagramma di H-R che, riportando temperatura e luminosità (che variano insieme al raggio in funzione dell'età, della massa e della composizione chimica della stella) permette di sapere in che fase della vita si trova una stella.

# Popolazioni stelllari

**Popolazione II**

Le stelle di popolazione II sono stelle relativamente povere di metalli. È importante sottolineare che si tratta di una povertà relativa dato che anche gli oggetti ricchi di metalli presentano una percentuale di elementi più pesanti dell'elio molto piccola e sono per lo più costituiti da quest'ultimo elemento e da idrogeno.

**Popolazione I**

La generazione successiva di stelle, quelle di popolazione I, nacquero da nubi di gas contaminate dai metalli prodotti dalle stelle di popolazione II e rilasciati nel mezzo interstellare da tali stelle dopo la fine della loro esistenza. Quando una stella muore, rilascia parte del materiale di cui è composta tramite l'esplosione di una supernova o la formazione di una nebulosa planetaria.

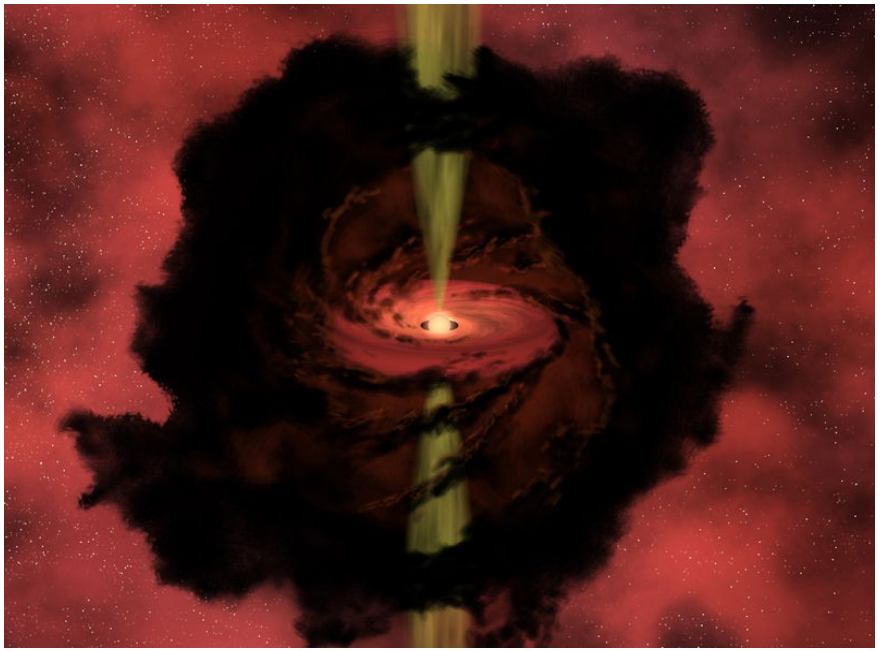
# Le stelle si formano all'interno di nubi molecolari

- In astronomia, il **mezzo interstellare** è il materiale rarefatto costituito da gas e polvere che si trova tra le stelle all'interno di una galassia. Il mezzo interstellare consiste di una miscela piuttosto rarefatta di ioni, atomi, molecole, granuli di polvere. Il 99% della materia è costituito dai gas, il restante 1% dalle polveri. Il gas del mezzo interstellare è costituito all'incirca all'89% da idrogeno e per il 9% da elio, con un 2% di elementi più pesanti. Quando una nube si addensa per effetto di un graduale raffreddamento si hanno condizioni che permettono agli atomi di idrogeno di combinarsi in molecole biatomiche ($H_2$), tramite meccanismi che vedono coinvolte le polveri in qualità di catalizzatori; la nube diviene ora una nube molecolare, che può contenere al suo interno anche complesse molecole organiche.

- Si è osservato che le **nubi molecolari**, sono il luogo di nascita delle stelle, e fanno parte del ciclo del mezzo interstellare, secondo cui i gas e le polveri passano dalle nubi alle stelle e, al termine della loro esistenza, tornano a far parte delle nubi, costituendo la materia prima per una nuova generazione di stelle. Il mezzo interstellare è inizialmente rarefatto, con una densità compresa tra 0,1 e 1 particella per $cm^3$

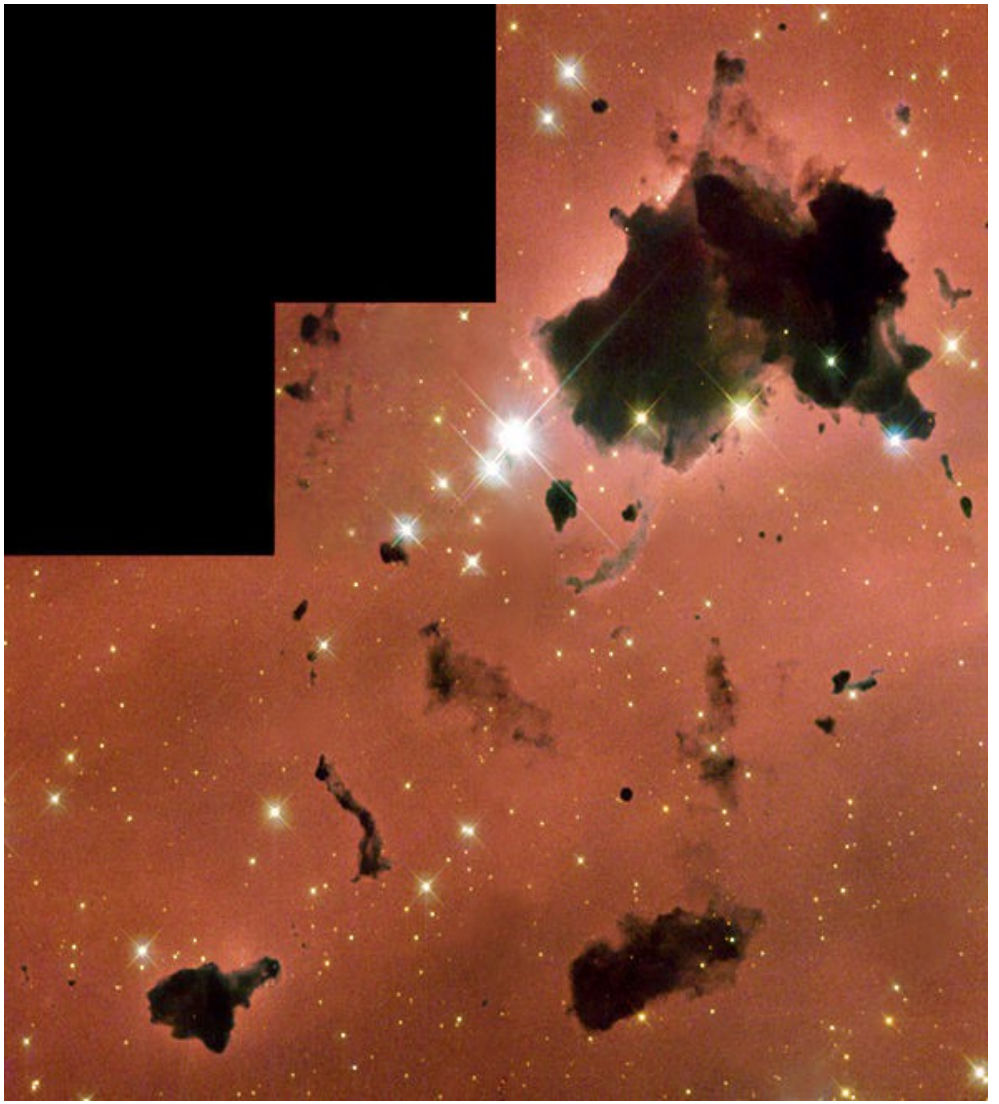
# Nascita una stella

La formazione di una stella ha inizio quando una nube molecolare inizia a manifestare fenomeni di instabilità gravitazionale, spesso innescati dalle onde d'urto di una supernova o della collisione tra due galassie. Non appena si raggiunge una densità della materia tale da soddisfare i criteri dell'**instabilità di Jeans**, la regione inizia a collassare sotto la sua stessa gravità. Il graduale collasso della nube porta alla formazione di densi agglomerati di gas e polveri oscure, noti come **globuli di Bok**, che arrivano a contenere una quantità di materia pari ad oltre 50 masse solari. Mentre all'interno del globulo il collasso gravitazionale causa un incremento della densità materiale, l'energia potenziale gravitazionale viene convertita in energia termica, con un conseguente aumento della temperatura: si forma in tal modo una protostella, circondata da un disco che ha il compito di accrescerne la massa. Il periodo in cui l'astro è soggetto al collasso, fino all'innesco, nelle parti centrali della protostella, delle reazioni di fusione dell'idrogeno in elio, è variabile. Una stella massiccia in formazione permane in questa fase per qualche centinaio di migliaia di anni, mentre per una stella di massa medio-piccola dura un periodo di circa 10–15 milioni di anni.

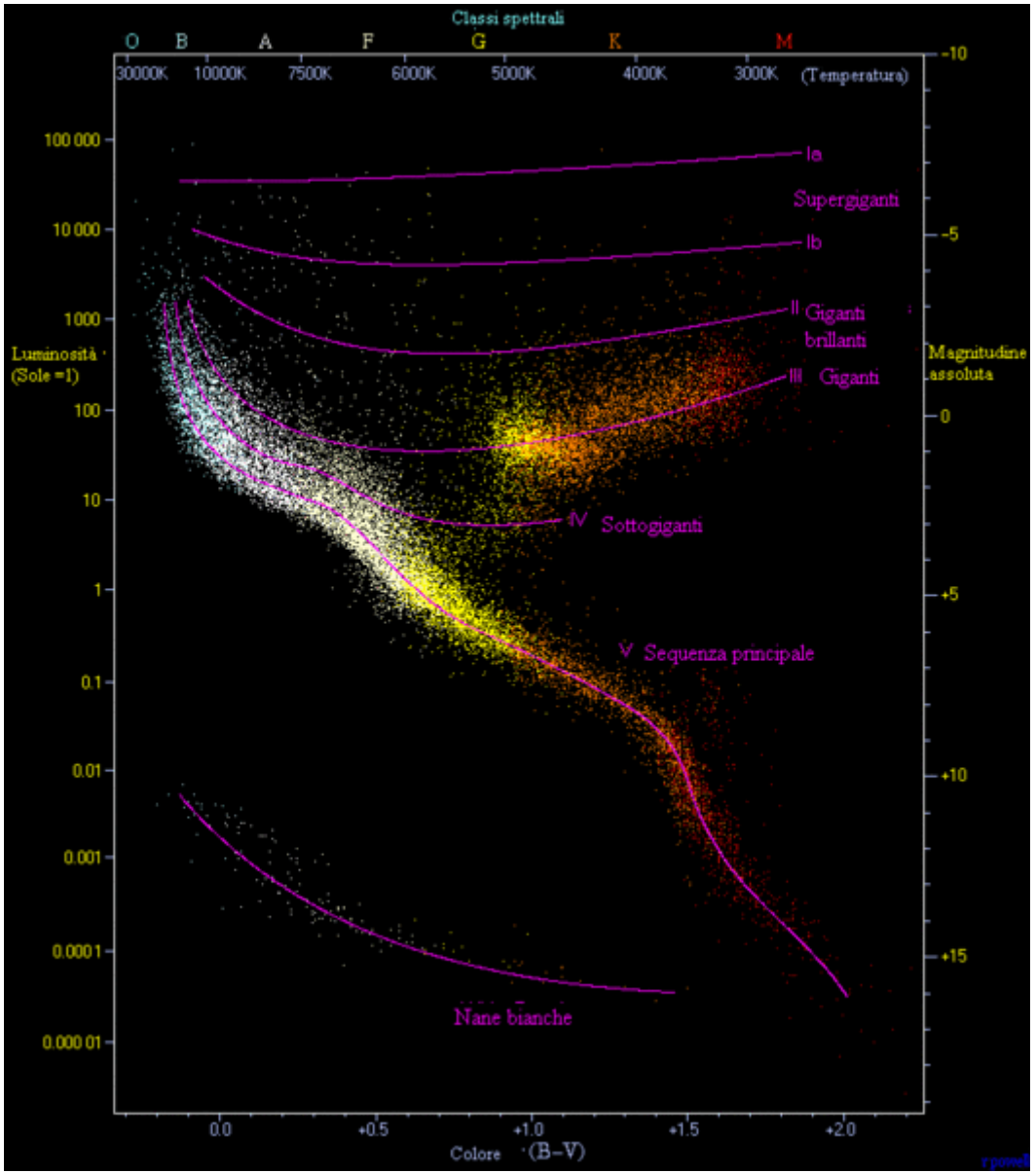


# Fase precedente la sequenza principale

- Se possiede una **massa inferiore a 0,08** , la protostella non raggiunge l'innesco delle reazioni nucleari e si trasforma in una fredda e poco brillante **nana bruna**.
- se possiede una massa fino ad **otto masse solari**, si forma una stella pre-sequenza principale, spesso circondata da un **disco protoplanetario**;
- se la massa è **superiore ad 8 masse solari,** la stella raggiunge direttamente la **sequenza principale** senza passare per questa fase.
- Le stelle pre-sequenza principale si dividono in due categorie: le stelle T Tauri (ed FU Orionis), che hanno una massa non superiore a due masse solari
- Per le **stelle più massicce**, nel momento in cui al loro interno si innescano le reazioni nucleari, si trovano ancora nel pieno della fase di accrescimento, anche in questo caso, sembra che si formino dei dischi associati a getti polari che permetterebbero all'accrescimento di proseguire.

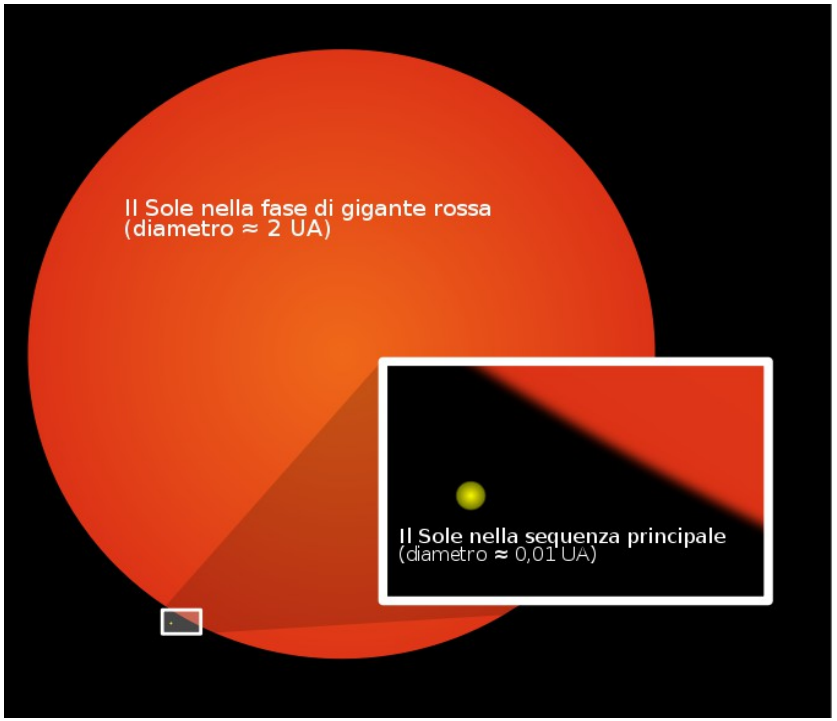


# Nella Sequenza Principale




- Le stelle trascorrono circa il 90% della propria esistenza in una fase di stabilità durante la quale fondono l'idrogeno del proprio nucleo trasformandolo in elio a temperatura e pressione elevate; tale fase prende il nome di sequenza principale.
- La durata della fase di sequenza principale dipende innanzi tutto dalla quantità di combustibile nucleare disponibile, quindi dalla velocità a cui esso è fuso; vale a dire, dalla massa iniziale e dalla luminosità della stella.
- La permanenza di una stella nella sequenza principale varia da poche decine o centinaia di milioni di anni per le stelle più massicce a circa 10 miliardi di anni per stelle più piccole come il Sole, fino decine e centinaia di miliardi di anni per le stelle più piccole.

# Dopo la Sequenza Principale

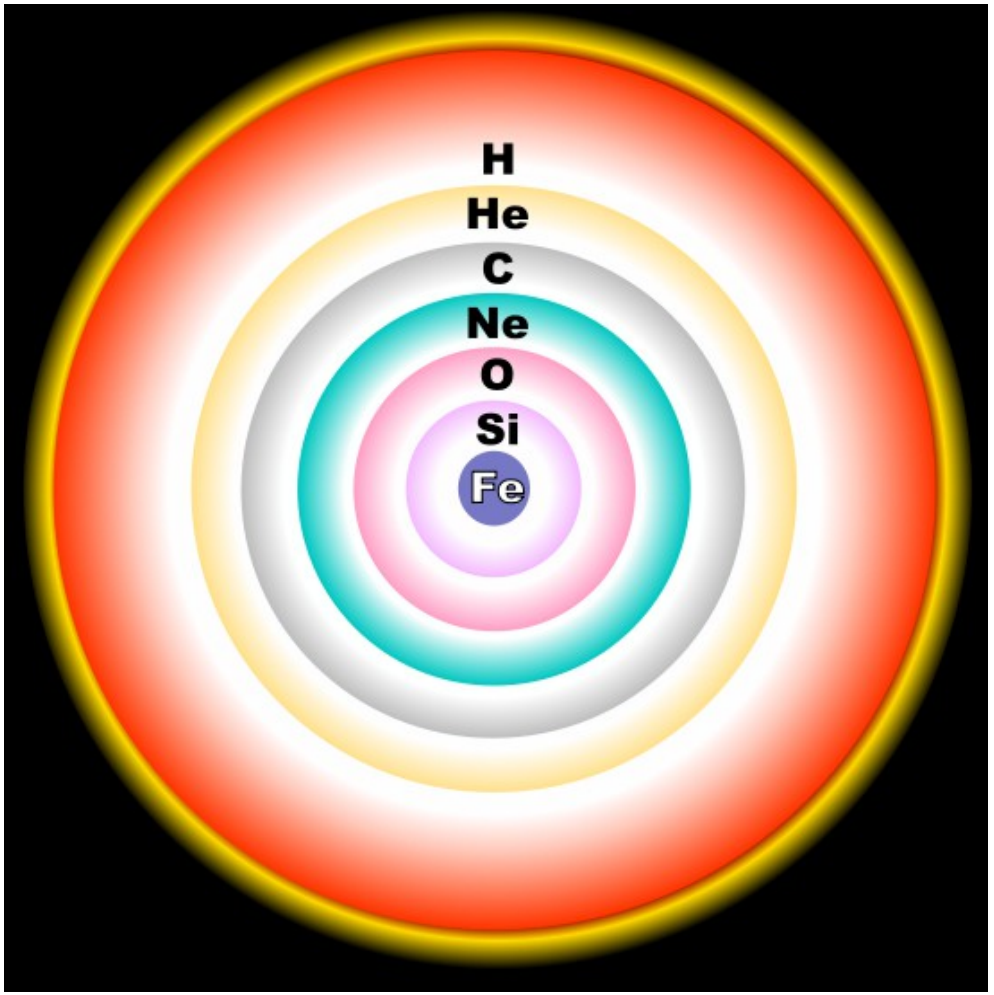



La sequenza principale termina non appena l'idrogeno, contenuto nel nucleo della stella, è stato completamente convertito in elio dalla fusione nucleare; la successiva evoluzione della stella **segue vie diverse a seconda della massa dell'oggetto celeste.**

le **nane rosse** (0,08/0,5 masse sol.),si riscaldano mano a mano che l'idrogeno viene consumato al loro interno, accelerando la velocità delle reazioni nucleari e divenendo per breve tempo delle stelle azzurre; quando tutto l'idrogeno è stato convertito in elio, esse si contraggono gradualmente, diminuendo di luminosità ed evolvendo **in nane bianche** costituite di elio. Essendo la durata di vita di una nana rossa intorno a 80 miliardi di anni, stelle di questo tipo ancora non esistono.

Le stelle la cui **massa è compresa tra 0,5 ed 8 masse solari** attraversano una fase di notevole instabilità alla fine della sequenza principale: il nucleo (core) subisce diversi collassi gravitazionali, incrementando la propria temperatura, mentre gli strati più esterni, in reazione al vasto surplus energetico che ricevono dal core in contrazione, si espandono e si raffreddano, assumendo di conseguenza una colorazione via via sempre più tendente al rosso. Si innesca la reazione di fusione dell'idrogeno nella fascia esterna al nucleo dopo esser passata per la fase altamente instabile di **subgigante**, si trasforma in una fredda ma brillante **gigante rossa** con un nucleo inerte di elio e un guscio in cui prosegue la fusione dell'idrogeno e permane in questa fase per circa un miliardo di anni. Quando il nucleo raggiunge la massa sufficiente, una complessa serie di contrazioni e collassi gravitazionali provoca un forte innalzamento della temperatura nucleare sino ad oltre 100 milioni di kelvin, che segna l'innesco della fusione dell'elio in carbonio e ossigeno.

# Stelle di maggiori dimensioni > 8 masse solari

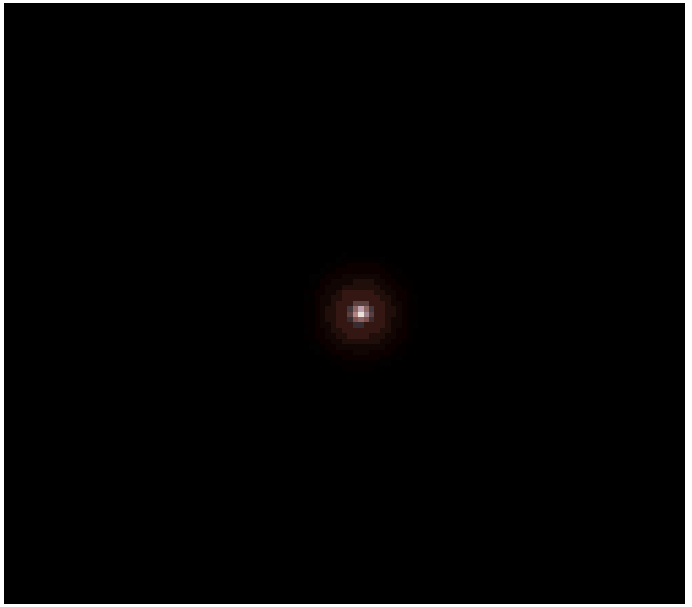



Le stelle di massa superiore alle 8 masse solari hanno un percorso diverso nella fase successiva alla sequenza principale. Quando termina il processo di fusione dell'idrogeno in elio ed inizia la conversione di quest'ultimo in carbonio, le stelle massicce si espandono raggiungendo lo stadio di supergigante rossa.

Non appena si esaurisce anche la fusione dell'elio, i processi nucleari non si arrestano ma, complice una serie di successivi collassi del nucleo ed aumenti di temperatura e pressione, proseguono con la sintesi di altri elementi più pesanti: ossigeno, neon, silicio e zolfo. In tali stelle, poco prima della loro fine, può svolgersi in contemporanea la nucleosintesi di più elementi all'interno di un nucleo che appare stratificato; tale struttura è paragonata da molti astrofisici agli strati concentrici di una cipolla. In ciascun guscio avviene la fusione di un differente elemento: il più esterno fonde idrogeno in elio, quello immediatamente sotto fonde elio in carbonio e via dicendo

Il prodotto finale della nucleosintesi è il nichel-56 che decade rapidamente in ferro-56.

# Fasi finali dell'evoluzione stellare



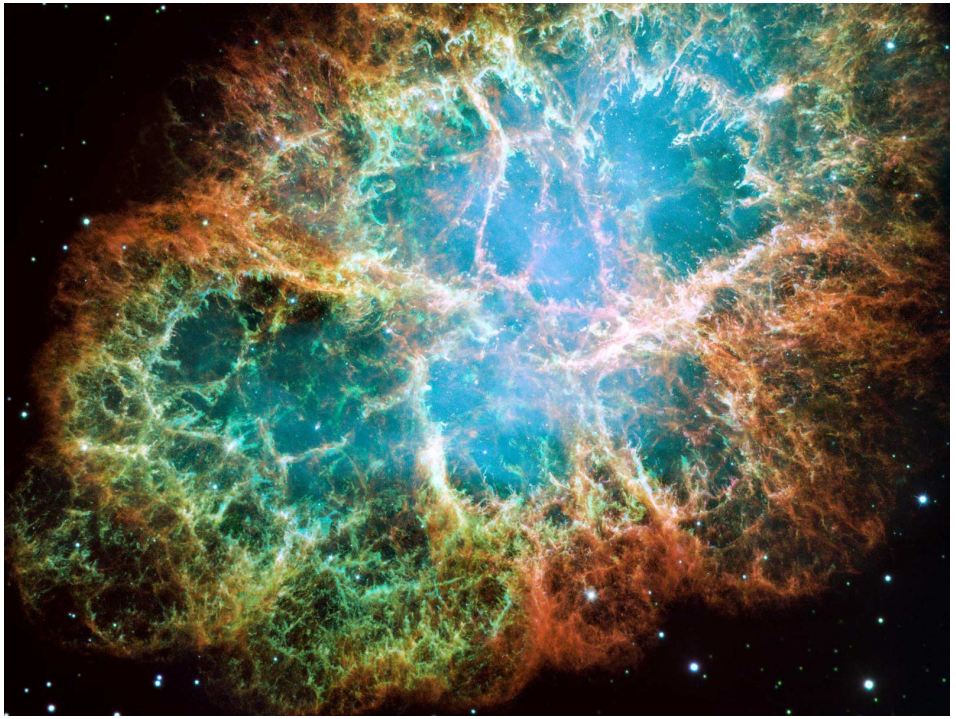
Quando una stella è prossima alla fine della propria esistenza, la pressione di radiazione del nucleo non è più in grado di contrastare la gravità degli strati più esterni dell'astro. Di conseguenza il nucleo va incontro ad un collasso, mentre gli strati più esterni vengono espulsi in maniera più o meno violenta; ciò che resta è un oggetto estremamente denso: una stella compatta, costituita da materia in uno stato altamente degenere.

- Stella piccola 0.08-0,5 masse sol. Una volta esaurito il combustibile nucleare si contrae espellendo gli strati esterni tramite il vento stellare e si trasforma spontaneamente in una nana bianca.
- Stella da 0,5 a 8 masse sol. si generano delle violente pulsazioni termiche all'interno dell'astro che causano l'espulsione dei suoi strati più esterni i quali vanno a costituire una nebulosità in espansione, la nebulosa planetaria con al centro i resti della stella che si trasforma in nana bianca.
- Stella con massa Superiore alle 8 masse sol. In queste stelle, la fusione nucleare continua finché il nucleo non raggiunge una massa superiore al limite di Chandrasekhar. Oltrepassato questo limite, il nucleo non riesce più a tollerare la sua stessa massa e va incontro ad un improvviso e irreversibile collasso.

# Diffusione del mezzo interstellare nella Galassia

In una tipica **galassia spirale**, come la Via Lattea, il **gas molecolare** ($H_2$) rappresenta meno dell'1% del volume del mezzo interstellare, anche se ne costituisce la porzione con maggiore densità. Nella nostra Galassia, le nubi molecolari rappresentano approssimativamente la metà di tutta la massa dei gas all'interno dell'orbita del Sole intorno al centro galattico. La maggior parte di questo gas molecolare è contenuta in un anello molecolare disposto tra 3,5 e 7,5 kiloparsec (il Sole dista mediamente 8,5 kiloparsec dal centro). Mappe a larga scala dell'emissione del CO mostrano che l'idrogeno molecolare si dispone prevalentemente in corrispondenza dei bracci della spirale galattica. Questa distribuzione dei gas è tutto sommato uniforme lungo ampie distanze, tuttavia la distribuzione su piccola scala è altamente irregolare, con gran parte dei gas accumulati in nubi distinte e complessi di nubi. All'interno di una **galassia ellittica** la quantità di materia del mezzo interstellare è ben più esigua rispetto a quella delle galassie a spirale; conseguentemente, vien meno la possibilità che si formino strutture nebulari diffuse, a meno che essa non interagisca con altre galassie acquisendone materiale

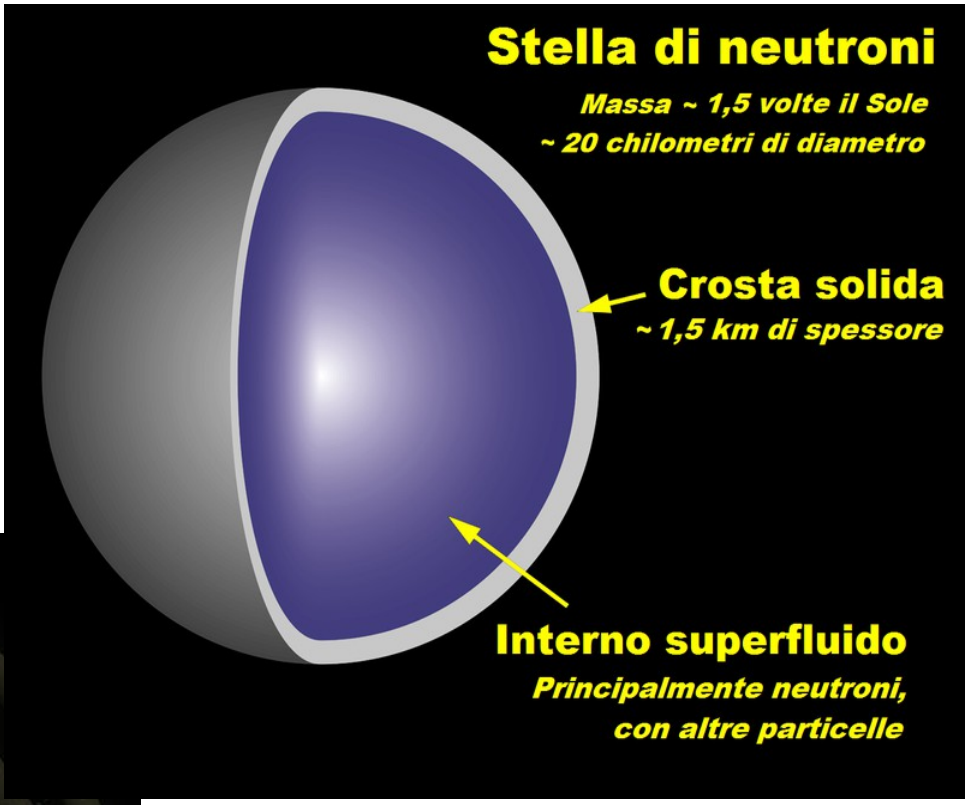
# Supernovae

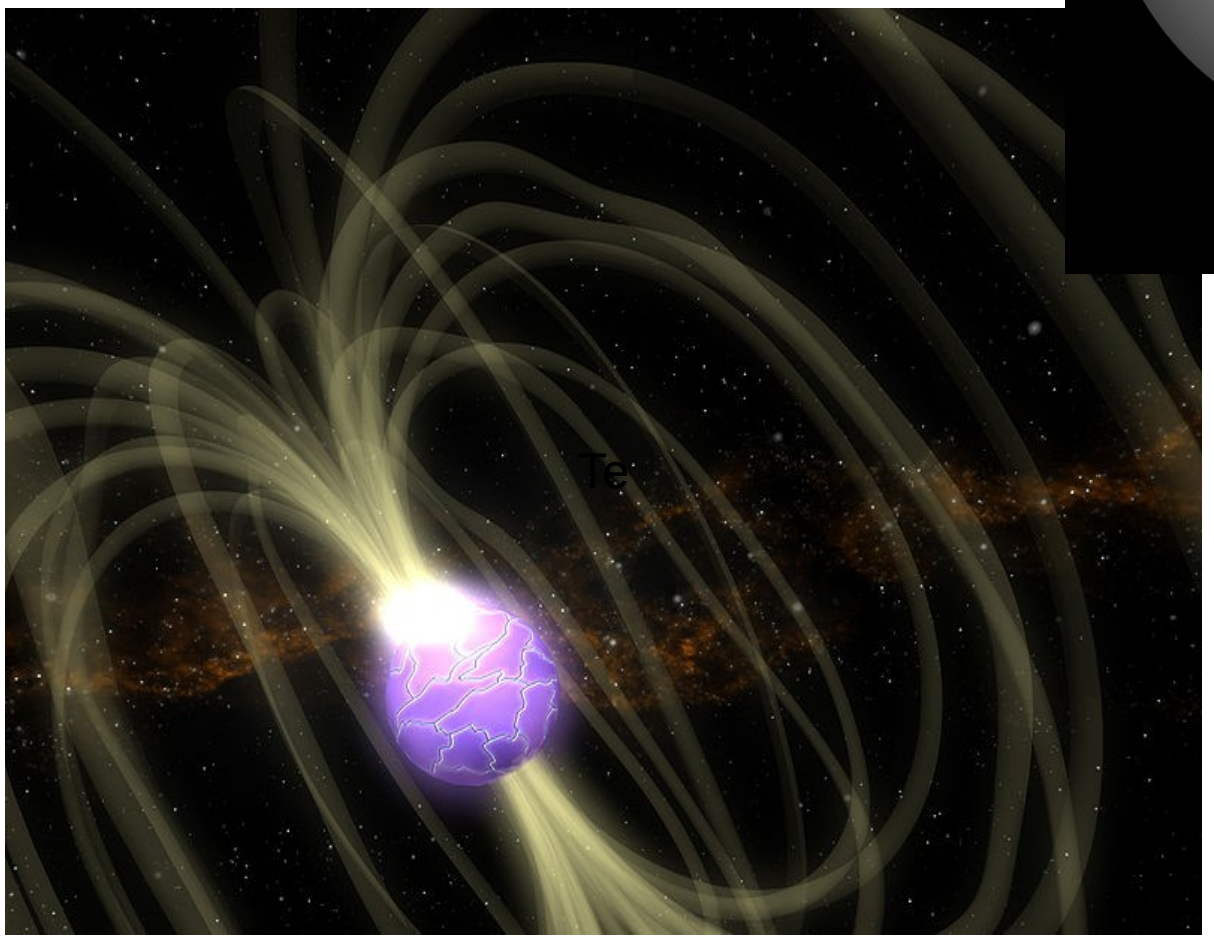


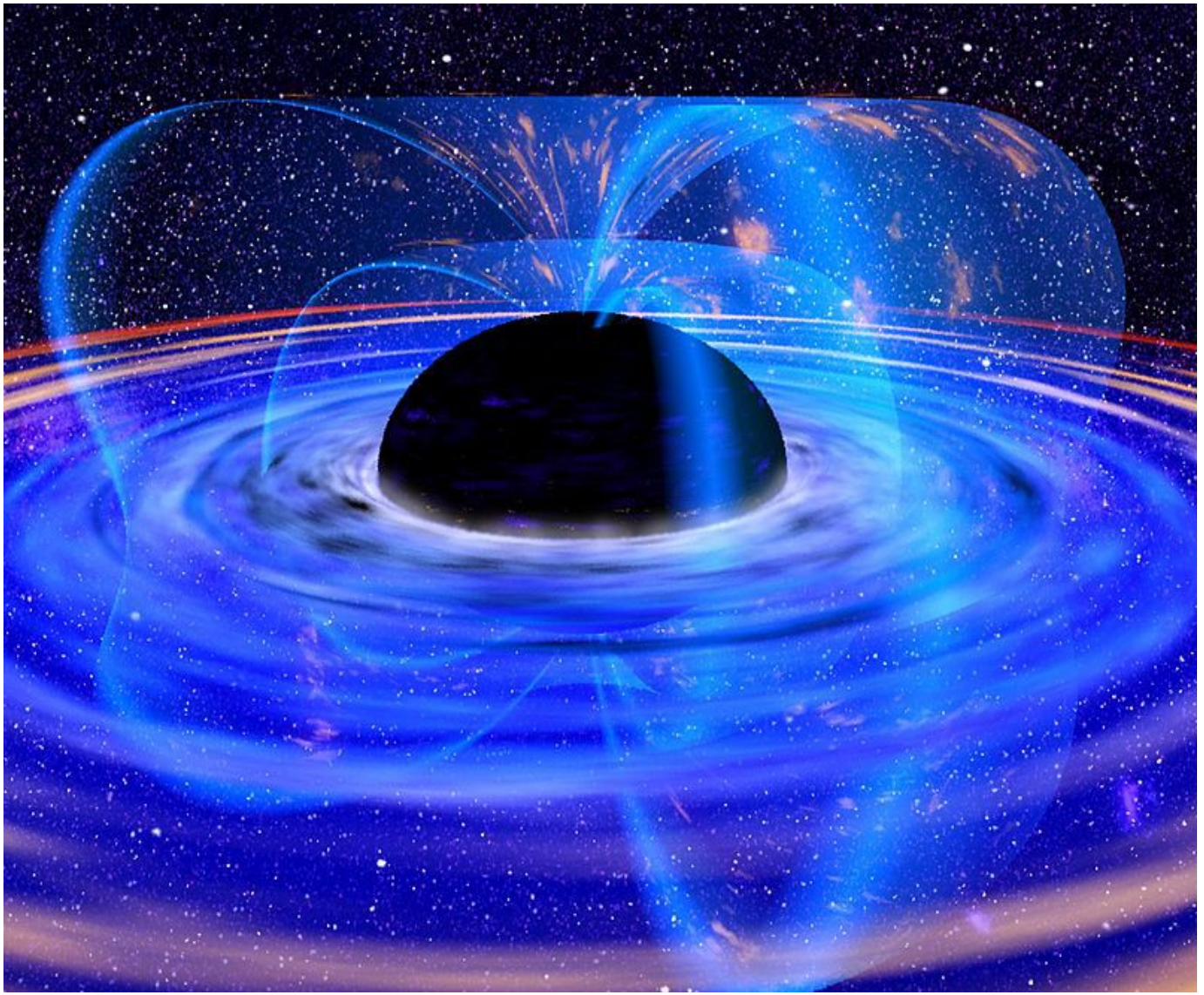
- Le supernovae sono stelle massicce che esauriscono il combustibile nucleare e subiscono un collasso gravitazionale. L'onda d'urto generata da questo improvviso collasso provoca la catastrofica esplosione della stella trasformandola in una brillantissima supernova.
- Le supernovae hanno una luminosità tale da superare, anche se per breve tempo, la luminosità complessiva dell'intera galassia che le ospita. L'energia liberata nell'esplosione è talmente elevata da consentire la fusione dei prodotti della nucleosintesi stellare in elementi ancora più pesanti, quali oro, magnesio ecc; questo fenomeno è detto nucleosintesi delle supernovae.
- Se la massa del residuo è compresa tra 1,4 e 3,8 masse solari, esso collassa in una **stella di neutroni** (talvolta **pulsar**).
- Nel caso in cui la stella originaria sia talmente massiccia che il nucleo residuo mantiene una massa superiore a 3,8 masse solari si origina un **buco nero stellare**

# Stelle di neutroni

Teorizzate alla fine dell'800 e scoperte da Susan Joicelyn Bell e Antony Hewish nel 1967.



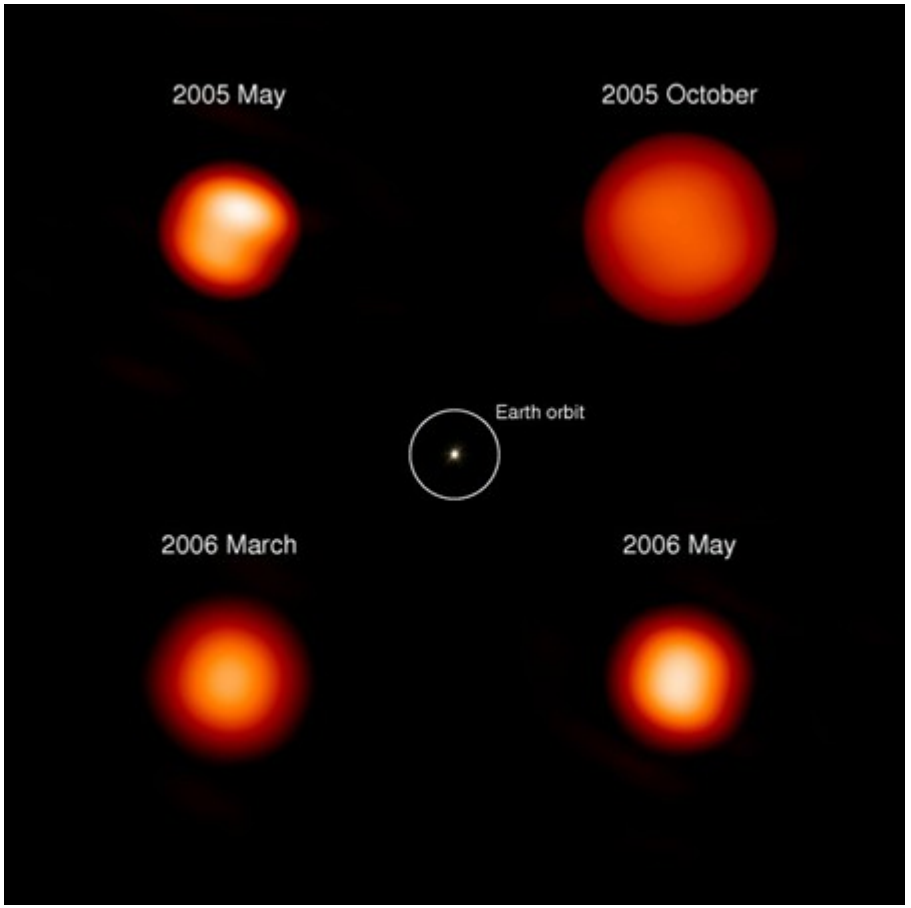





# Buco nero

Nella relatività generale, si definisce buco nero una regione dello spaziotempo con un campo gravitazionale così forte e intenso che nulla al suo interno può sfuggire all'esterno, nemmeno la luce.

# Stelle variabili

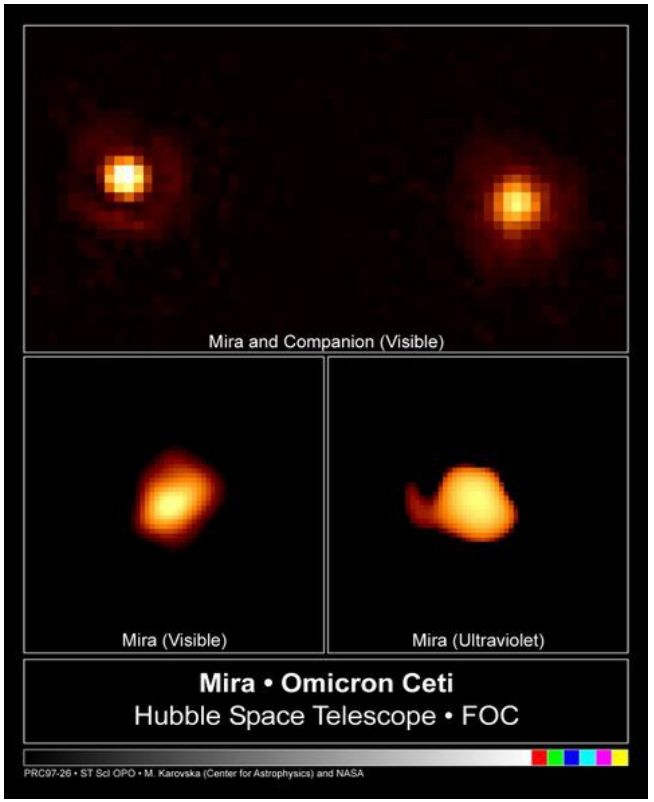



Chi Cygni ( χ Cyg) è una stella visibile nella costellazione del Cigno la cui distanza da Terra è approssimativamente di 550 anni luce si tratta di una variabile con un periodo di 408 giorni.

Una stella variabile è una stella la cui luminosità non è costante, ma cambia nel tempo. La variazione può essere piccola, grande, regolare, irregolare o perfino distruttiva a seconda del tipo di stella variabile.

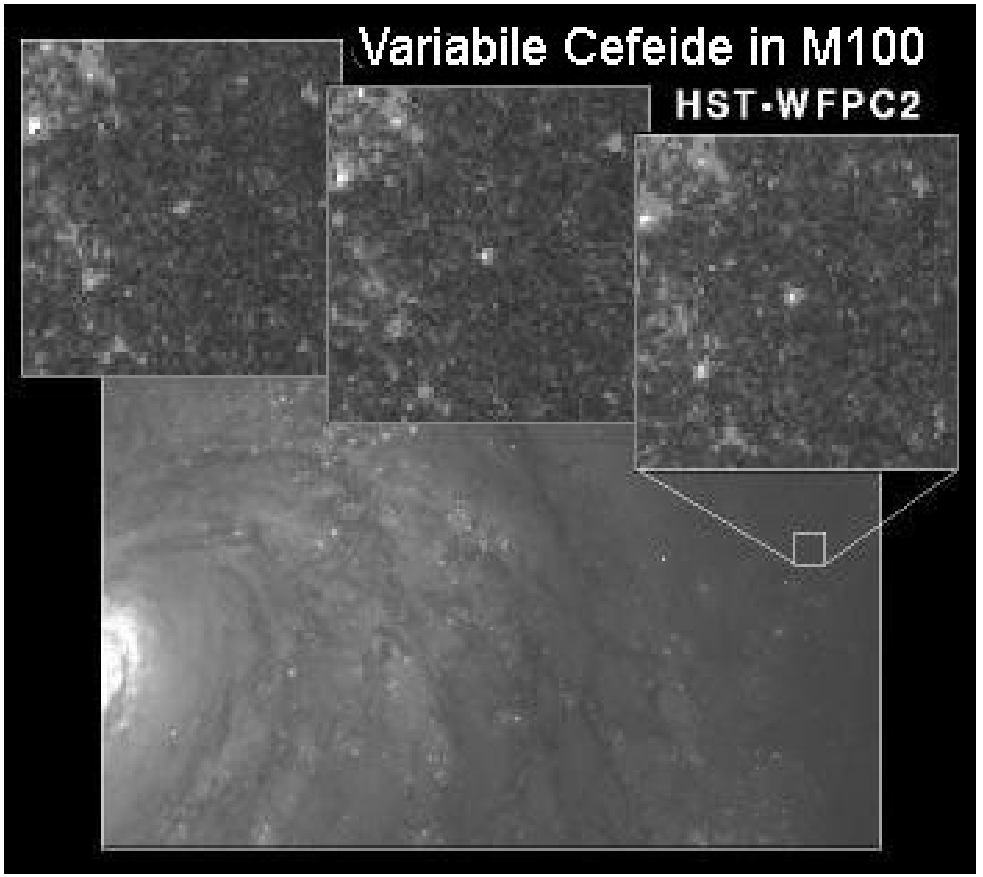
- La maggior parte delle stelle hanno una luminosità quasi costante. Il nostro Sole è un buon esempio di stella che non ha praticamente alcuna variazione misurabile. Molte stelle sono invece variabili, e si dividono in due categorie principali: variabili **intrinseche** e variabili **estrinseche**.
- Le variabili **estrinseche** appaiono di luminosità variabile a causa di qualche influenza esterna. Una delle cause più comuni è la presenza di una compagna, che forma con la principale una stella doppia
- Le variabili **intrinseche** sono stelle la cui luminosità varia effettivamente, cioè la stella stessa diventa più o meno luminosa. Ci sono molti tipi di variabili intrinseche, che a volte si sovrappongono.

# Variabile tipo Mira-Ceti




- Le **variabili Mira** sono una classe di stelle variabili pulsanti, caratterizzate da colore rosso, periodo di pulsazione **più lungo di 100 giorni**, e **ampiezze di pulsazione maggiori di una magnitudine**. Prendono il nome dalla stella Mira (**Omicron Ceti**), la prima variabile di questo tipo scoperta. Sono stelle **giganti rosse**, nelle ultime fasi dell'evoluzione stellare, che entro pochi milioni di anni espelleranno i loro strati esterni come nebulose planetarie, e diventeranno nane bianche.
- Le variabili Mira hanno masse **non superiori a due masse solari**, ma possono essere migliaia di volte più luminose del Sole, grazie ai loro strati esterni molto estesi. Si pensa che siano pulsanti in modi radiali, dove **l'intera stella si espande e si contrae** con simmetria sferica. La pulsazione si traduce in cambiamenti sia di raggio sia di temperatura, causando il loro cambiamento di luminosità. Il periodo di pulsazione è funzione della massa e del raggio della stella.

# Variabile cefeide




Una **variabile Cefeide** è un membro di una particolare classe di stelle variabili, notevole per una correlazione molto stretta tra il loro **periodo di variabilità** e la **luminosità stellare assoluta**.

Grazie a questa correlazione, e alla grande precisione con cui viene misurato il periodo della pulsazione, le variabili Cefeidi possono essere usate come **candele standard** per determinare la distanza degli ammassi globulari e delle galassie in cui sono contenute.

Una Cefeide è in genere una stella **gigante gialla** giovane di **popolazione I** e massa intermedia che pulsa regolarmente espandendosi e contraendosi, mutando così la sua luminosità in un ciclo estremamente regolare. La luminosità delle stelle Cefeidi è in genere compresa tra 1000 e 10000 volte quella del Sole e il periodo di oscillazione va dall'ordine del **giorno alle centinaia di giorni**.

Il fenomeno di oscillazione (espansione, contrazione) è un fenomeno limitato alla sola **superficie stellare** e non è dovuto ad alcun mutamento nella quantità di energia prodotta dalle fusioni nucleari che avvengono nelle regioni più interne delle strutture, e dunque l'oscillazione in luminosità è causata unicamente dalla maggiore o minore dimensione della superficie esterna irraggiante

# Variabili RR Lyrae

Le variabili RR Lyrae sono un'importante classe di stelle variabili per pulsazioni radiali, usate spesso come **candele standard** su distanze galattiche. Prendono il nome dal prototipo della categoria, la stella variabile RR Lyrae.

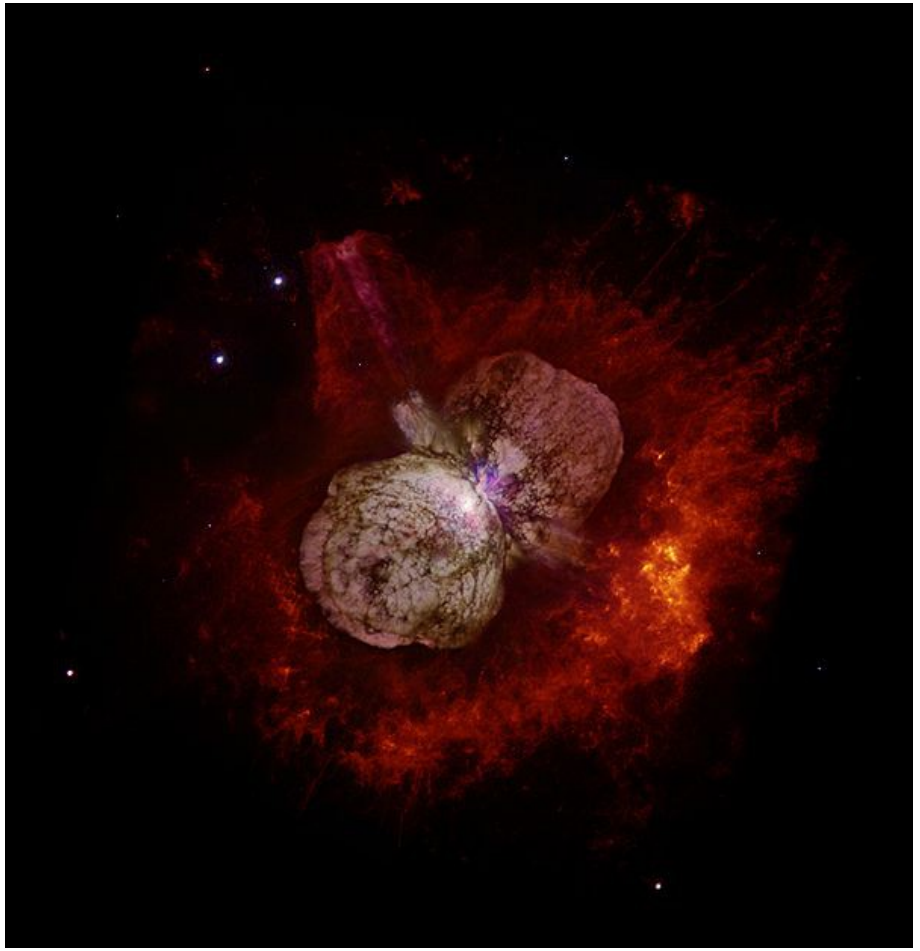
RR Lyrae è una stella variabile visibile nella costellazione della Lira. È il prototipo della classe di variabili detta appunto variabili RR Lyrae, un tipo di stelle piuttosto comune che viene usato dagli astronomi per calcolare la distanza di vari oggetti celesti. RR Lyrae varia la sua luminosità con un periodo di circa **13 ore**, oscillando tra le magnitudini 7 e 8.

Esiste una regione del Diagramma H-R detta **fascia d'instabilità** (dall'inglese instability strip): gli astri che occupano tale fascia sono instabili per pulsazioni radiali, quindi variabili.

Esistono due categorie di astri che possono occupare la striscia d'instabilità durante la loro evoluzione, ovvero le **Cefeidi** e, appunto, le **RR Lyrae**. Le prime sono stelle relativamente massicce e giovani, quindi luminose, in fase di combustione di elio al centro e di idrogeno in una shell.

Le RR Lyrae invece sono stelle di ramo orizzontale, quindi hanno tutte una massa relativamente piccola ed un'età avanzata.

# Variabili S Doradus



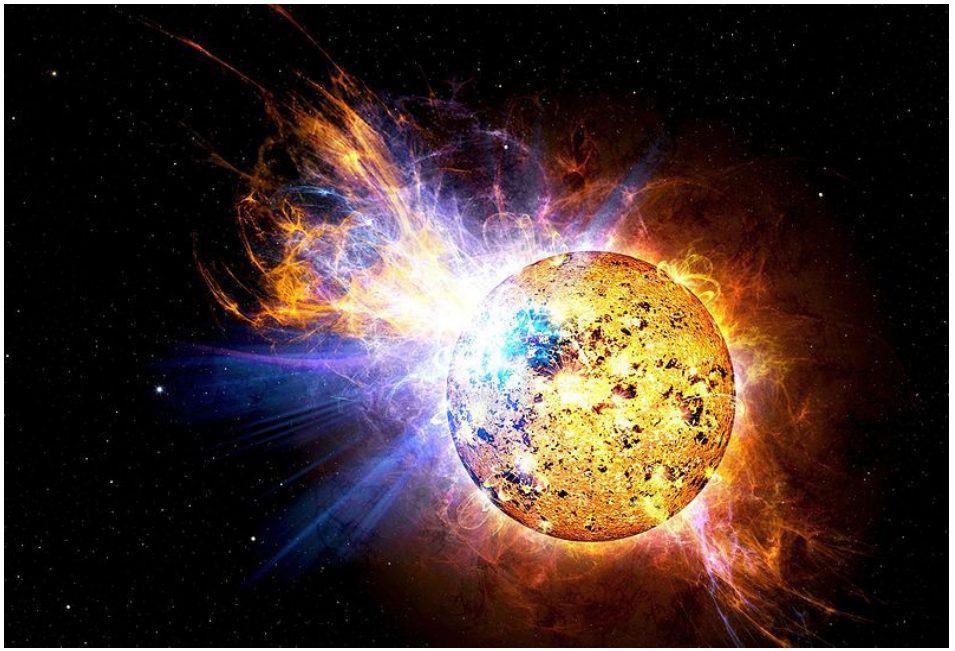
Un esempio di Variabile S Doradus: Eta Carinae

- **S Doradus** è la stella più luminosa della **Grande Nube di Magellano**, una galassia satellite della Via Lattea. E' il prototipo di una classe di stelle variabili.

- Si tratta di stelle **blu ipergiganti** (classi spettrali O, B) con massa pari a 150 masse sol. (molto vicine al **limite di Eddington**). A causa della loro massa consumano rapidamente il loro combustibile nucleare, esaurendolo in circa un milione di anni e sono destinate ad esplodere come **supernovae.**

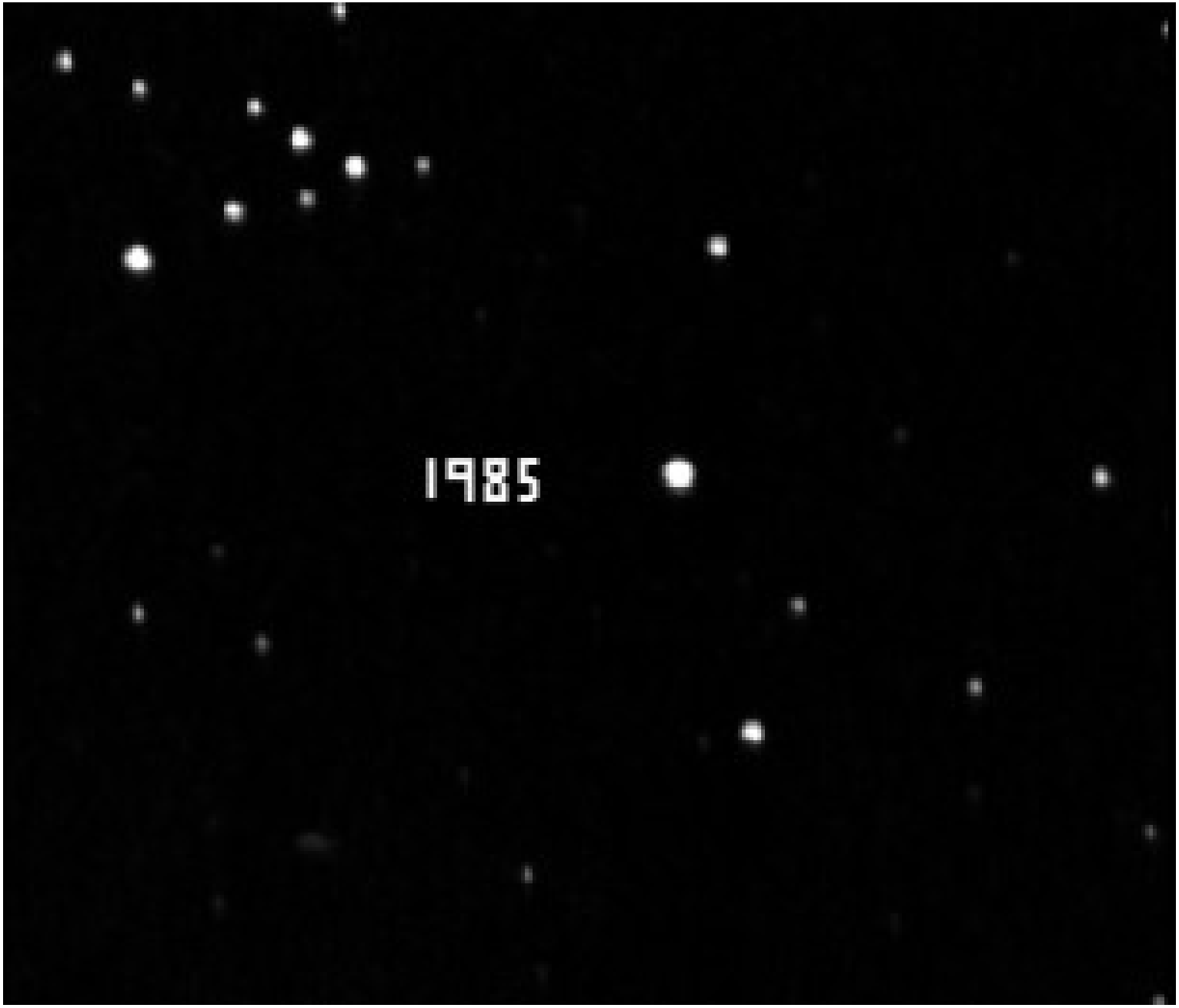
- La variabilità si manifesta su **lunghi periodi** (decine di anni) con variazioni di **parecchie magnitudini**. Talvolta si verificano delle **violente esplosioni**, che portano all'**espulsione di grandi quantità di materia**, a velocità di parecchi Km al secondo. Nel caso di Eta Carinae il materiale espulso si è disposto attorno alla stella formando una specie di clessidra (nebulosa Omuncolo).

# Stelle a brillamento (UV Ceti)



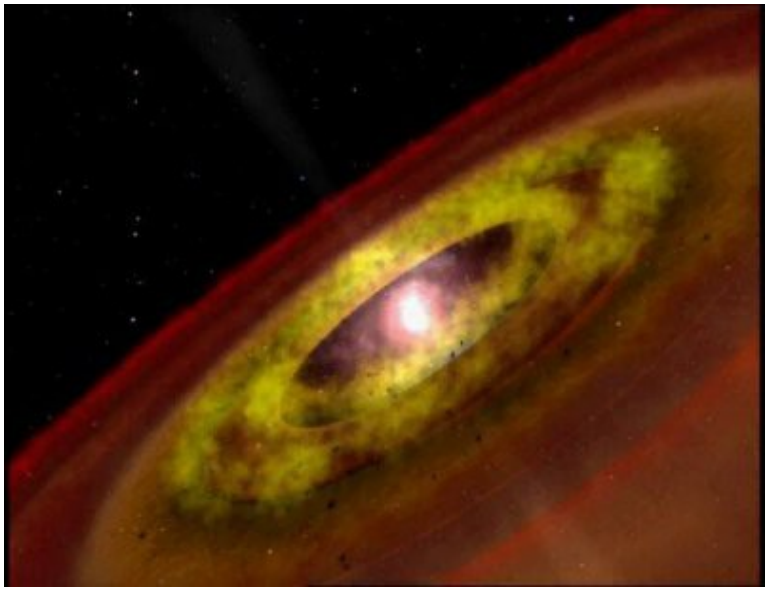
Una stella a brillamento (in inglese **flare** star) è una stella variabile in cui avvengono improvvisi e giganteschi aumenti di luminosità **della durata di pochi minut**i o di **qualche ora**. Lo splendore aumenta in tutto lo spettro, dai raggi X alle onde radio. Le flare stars sono generalmente **nane rosse.** Le prime flare stars note, furono scoperte nel 1924. La stella più nota di questa classe, **UV Ceti**, fu scoperta nel 1948, ed oggi le stelle a brillamento sono indicate anche come **variabili UV Ceti**.

La stella più vicina al Sole, **Proxima Centauri**, appartiene alla classe delle flare stars, ed anche un'altra stella molto vicina, **Wolf 359**. La **stella di Barnard**, la seconda stella più vicina, potrebbe forse essere una flare star. A causa della loro debole luminosità, tutte le stelle a brillamento conosciute si trovano nel raggio di appena **60 anni luce**.

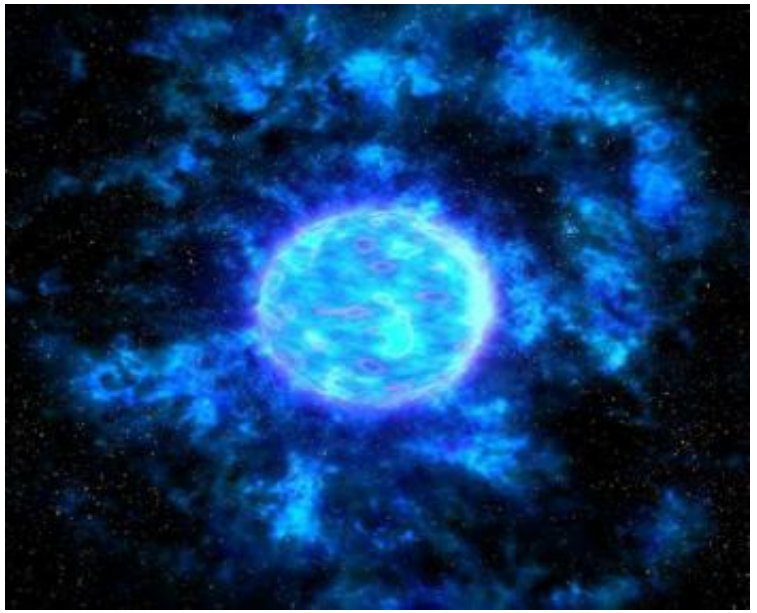



**Spostamento della stella di Barnard dal 1985 al 2005**

# Variabili eruttive



Rappresentazione artistica di una stella T Tauri



Rappresentazione artistica di una stella di Wolf-Rayet, circondata da una nebulosità costituita dal vento emesso dalla stella stessa.

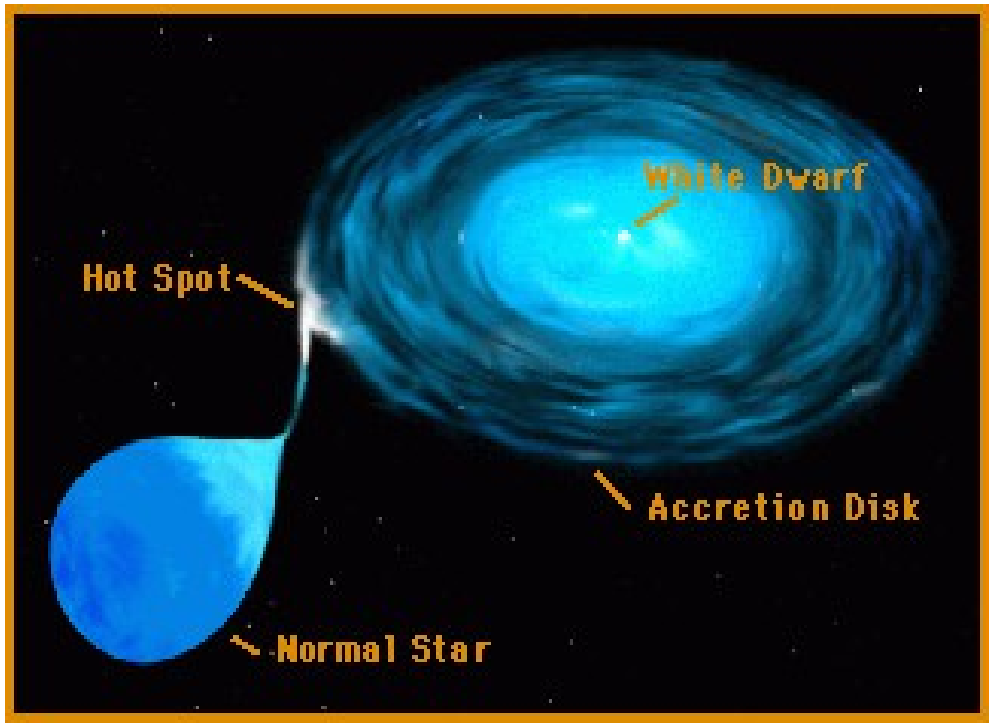
Le variabili eruttive sono una classe di stelle che include vari tipi di variabili di tipo **irregolare**.

La luminosità delle variabili eruttive varia a causa di processi violenti che avvengono nelle loro cromosfera e corone stellari. Tale variazione di luminosità è causata da un'**eruzione, cioè una forte dilatazione**, che in alcuni casi (se l'eruzione è di particolare entità) può provocare la **liberazione degli strati più esterni della stella**, nello spazio circostante.

Possono essere stelle in fase **pre SP** con ancora un disco di accrescimento presente come le FU Orionis o le Ae/Be di Herbig o anche le T Tauri.

Oppure possono essere **stelle massicce** di classe spettrale **O** o **B** nella fase finale della loro esistenza, con **temperature superficiali elevate** (25-50 mila Kelvin) e massa **> 20 masse sol**. Con **venti stellari molto forti**, con velocità superiori a 2000 km/s, e caratterizzati da una **forte emissione di polveri.** Disperdono quindi grandi quantità di materia nello spazio. Stelle di questo tipo si chiamano **Stelle di Wolf Rayet.** Sono estremamente rare se ne contano 230 in tutta la Galassia. Fra esse ricordiamo la **Gamma Velorum** e la **Stella Pistola** nel Sagittario.

# Variabile cataclismica (U Geminorum)




Schema di una variabile cataclismica.

sono una classe di stelle variabili intrinseche, consistenti di una stella binaria in cui una componente è una **nana bianca**, mentre l'altra è una **stella normale** che cede gas alla compagna. Le due stelle sono così vicine che la gravità della nana bianca distorce l'altra stella, che **perde gas a favore della compagna**. La materia che cade sulla nana bianca si dispone generalmente su un **disco di accrescimento** attorno alla stella. Durante la fase di accrescimento, la materia continua ad accumularsi sulla superficie della nana bianca. Si tratta principalmente di **idrogeno**, di cui la stella donatrice è ricca. Prima o poi la temperatura e la densità dello strato di idrogeno raggiungono livelli abbastanza alti da innescare reazioni di **fusione nucleare,** producendo un'esplosione che avvolge la nana bianca. La luminosità del sistema aumenta improvvisamente per qualche ora o per qualche giorno, mentre la materia viene espulsa nello spazio interstellare. Tale fenomeno è detto **nova**. Le novae possono essere quindi **ricorrenti**, ad intervalli di qualche **decennio o secolo**. Se la materia accresciuta non è espulsa regolarmente, essa può far aumentare la massa della nana bianca fino al limite di **Chandrasekhar**, oltre il quale essa non è più in grado di sostenere il proprio peso. Esploderà allora come **supernova**.