

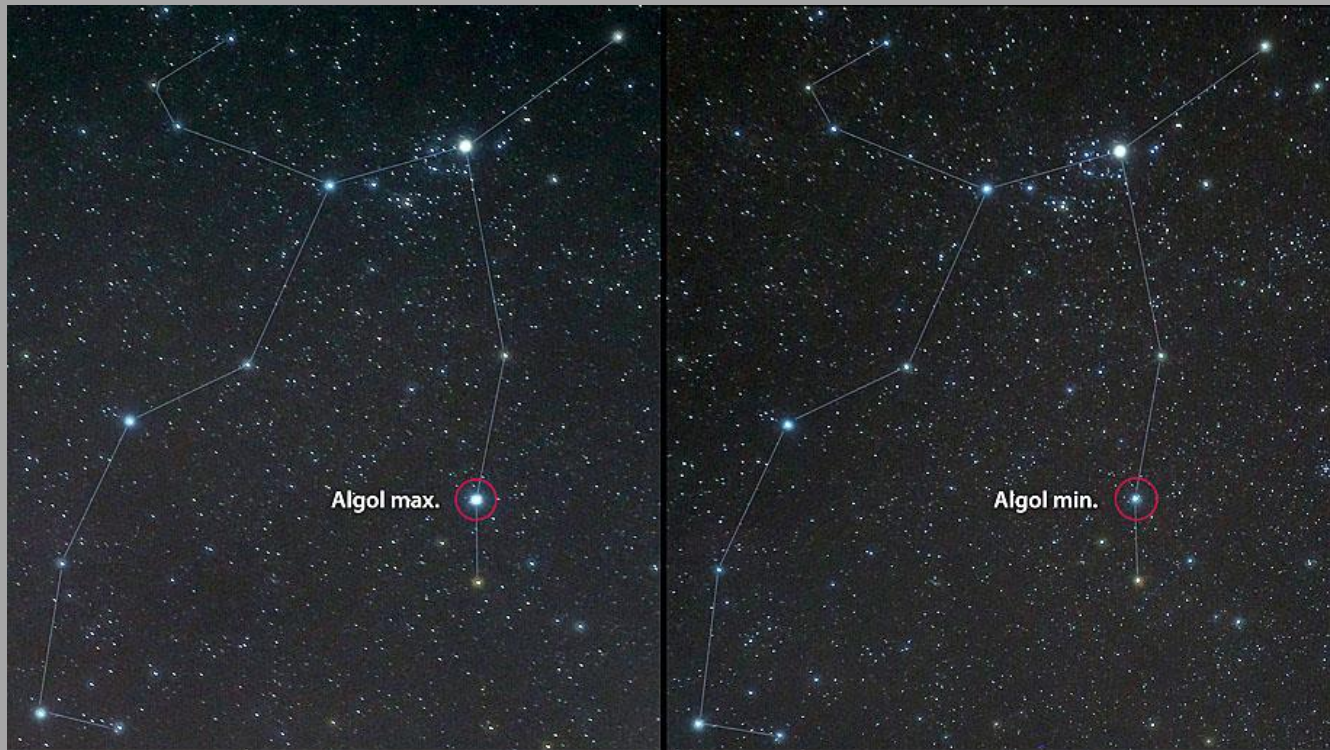
STELLE VARIABILI

CORSO DI FORMAZIONE DI ASTRONOMIA E ASTROFISICA

PER DOCENTI DI SCUOLA SECONDARIA

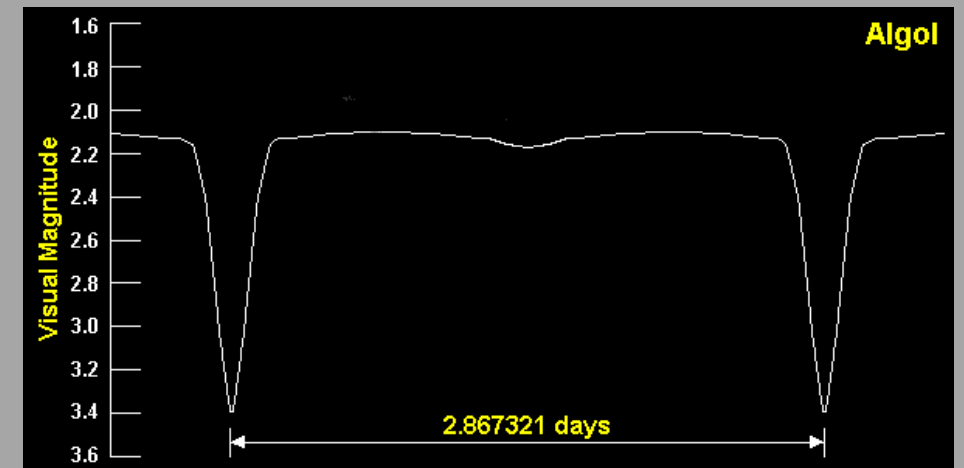
ANNO 2020-2021

COSA SONO LE STELLE VARIABILI



Crediti: Sky & Telescope - β Persei (Algol) al massimo e al minimo

Si definiscono "variabili" quelle stelle la cui **luminosità** varia in funzione del **tempo**.



PERCHÉ STUDIARE LE VARIABILI

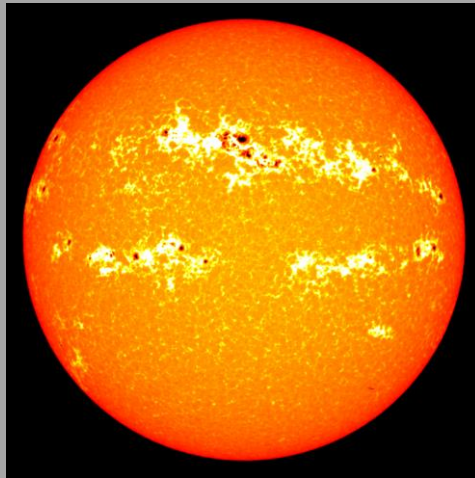
Forniscono informazioni:

- sulle **distanze** degli oggetti all'interno e al di fuori della Galassia;
- sulle **masse** e i **raggi** delle stelle;
- sull'**evoluzione** e sulla **struttura** interna delle stelle;
- sul comportamento della materia in **condizioni estreme** di temperatura, densità, ionizzazione e in presenza di forti campi magnetici;
- sugli **effetti mareali, magnetici e termici** tra le componenti di sistemi binari a contatto.

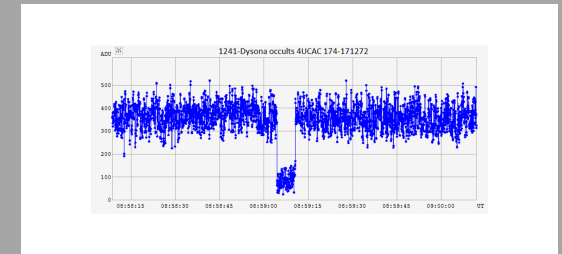
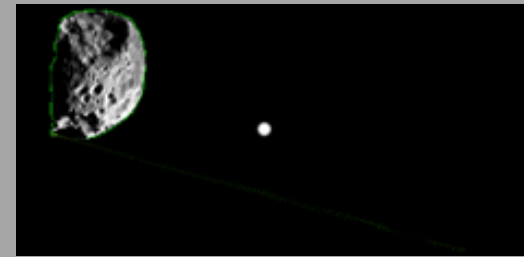


COSA NON CLASSIFICHIAMO COME VARIABILI

- Il Sole, anche se mostra sulla superficie fotosferica aree attive (ad esempio **macchie solari**, **facole**) che inducono variazioni della luminosità osservata.



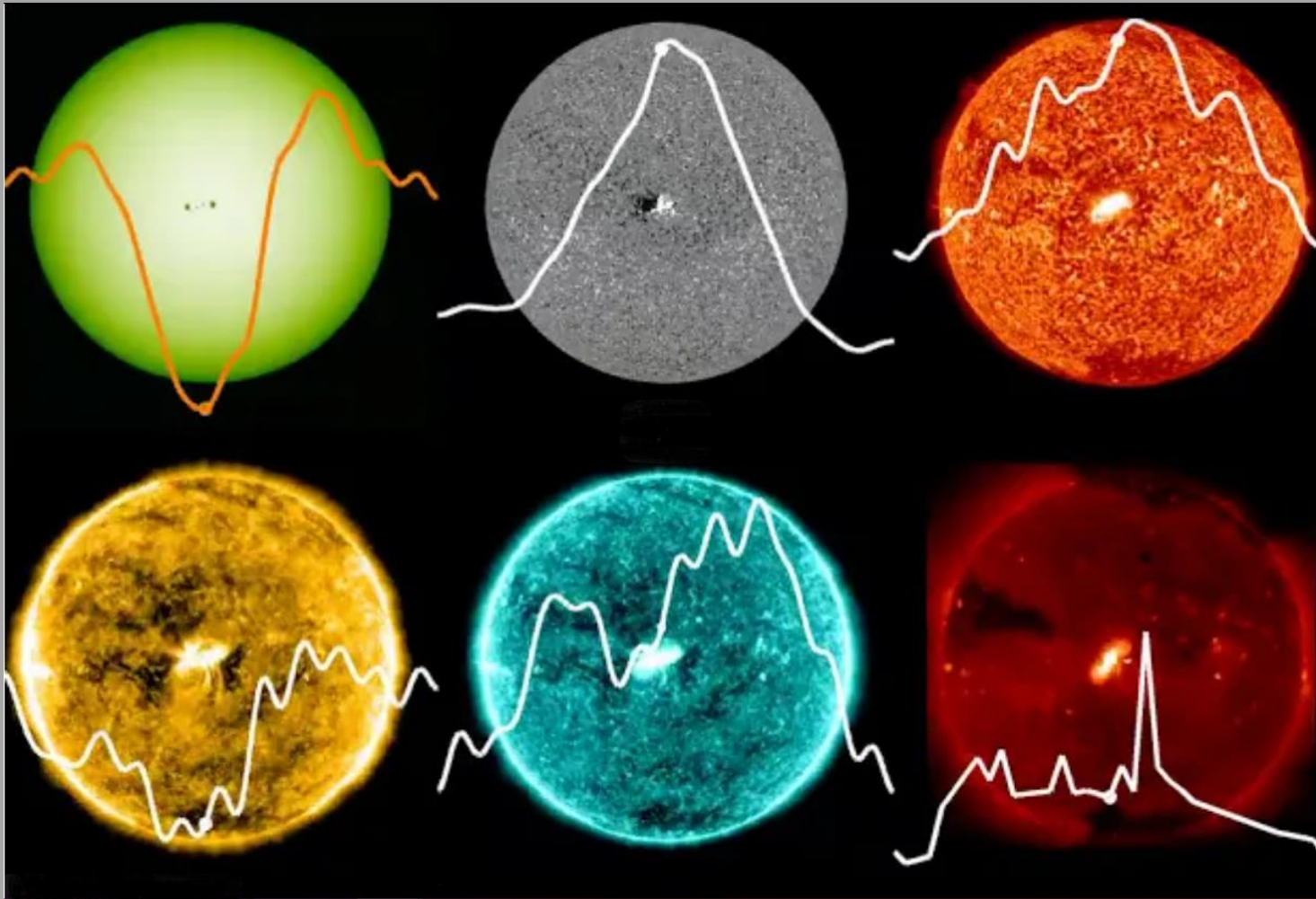
Macchie solari e aree attive sulla superficie solare



Curva di luce di una tipica occultazione asteroidale

- Le stelle la cui luminosità appare variare in maniera occasionale a causa di fenomeni di **microlensing** o **occultazioni di asteroidi**.

L'EFFETTO DELLE AREE ATTIVE SULLA LUMINOSITÀ DEL SOLE



L'impatto sulla luminosità del Sole a causa di un gruppo di macchie e delle aree attive associate dipende dalla lunghezza d'onda a cui si osserva.

<https://www.nasa.gov/feature/goddard/2020/a-new-look-at-sunspots-is-helping-nasa-scientists-understand-major-flares-and-life-around/>

TOTAL SOLAR IRRADIANCE (TSI)

- Total Solar Irradiance (TSI) è l'energia per unità di superficie che incide alla sommità dell'atmosfera terrestre, normalizzata alla distanza di 1 U.A.
- In media $TSI = 1361 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ con variazioni del 0.1% in fase con il ciclo undecennale di attività solare.
- Occasionalmente, si possono verificare variazioni più cospicue: la variazione maggiore misurata in presenza di un'area attiva è del 0.34%.
- Su tempi scala di ore o minuti la TSI mostra variazioni dell'ordine di 0.01%.

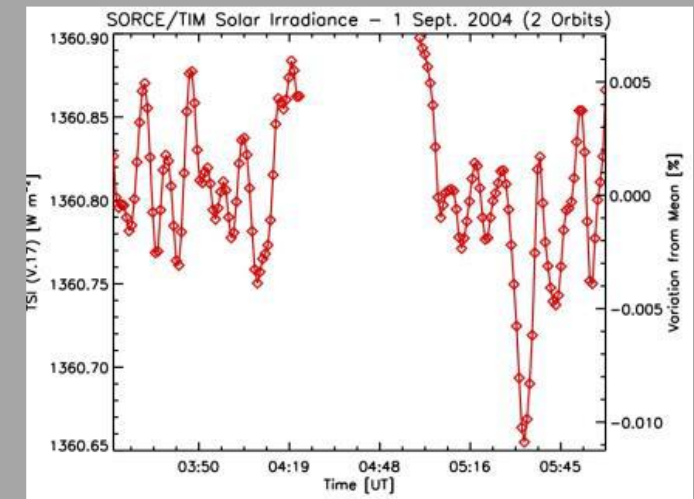
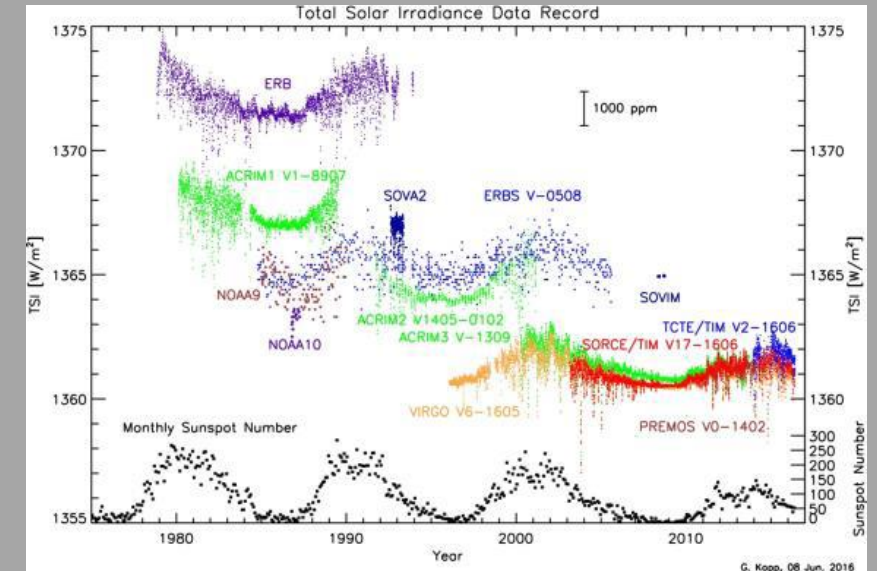
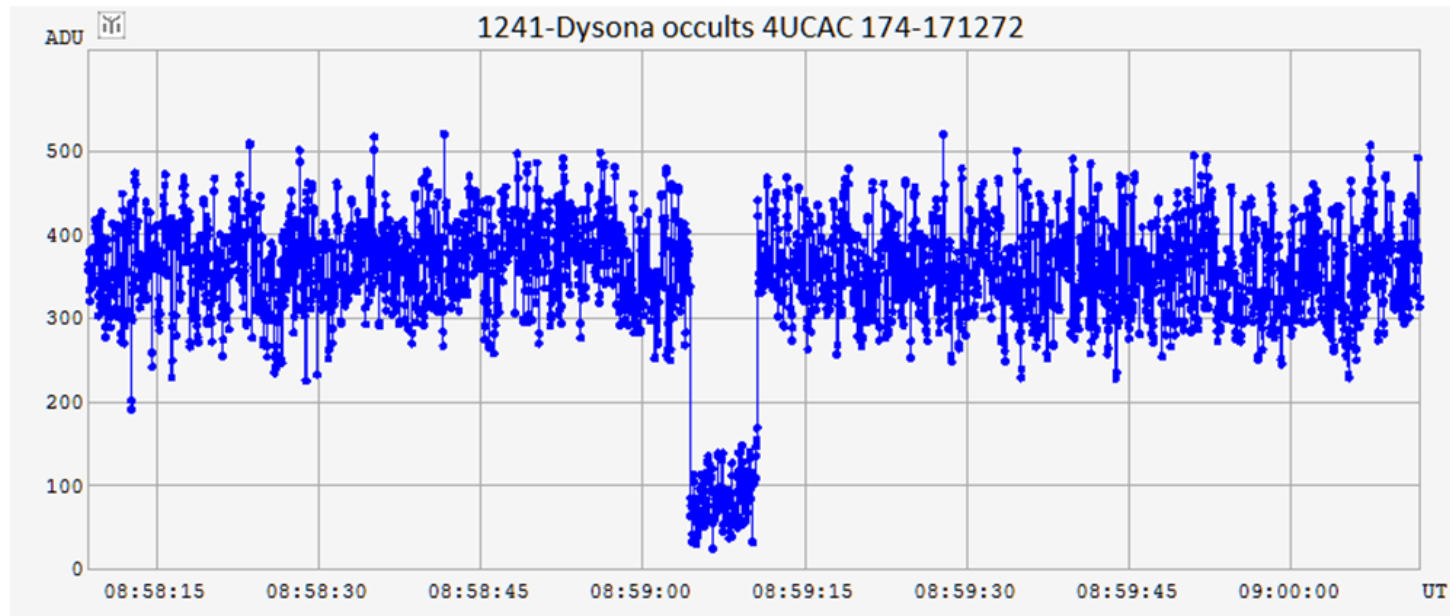


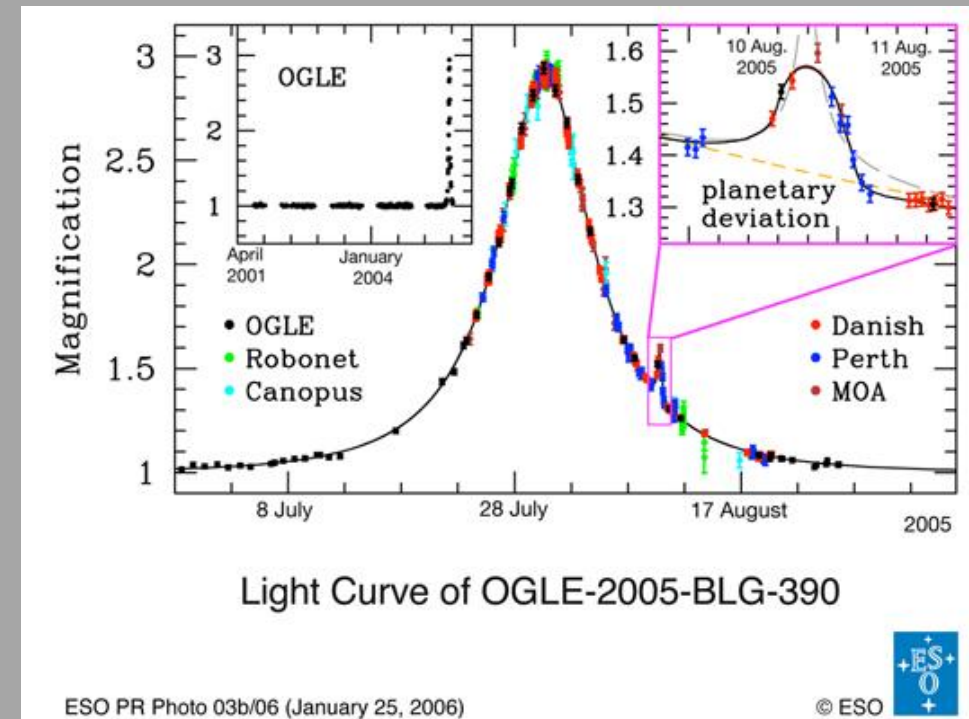
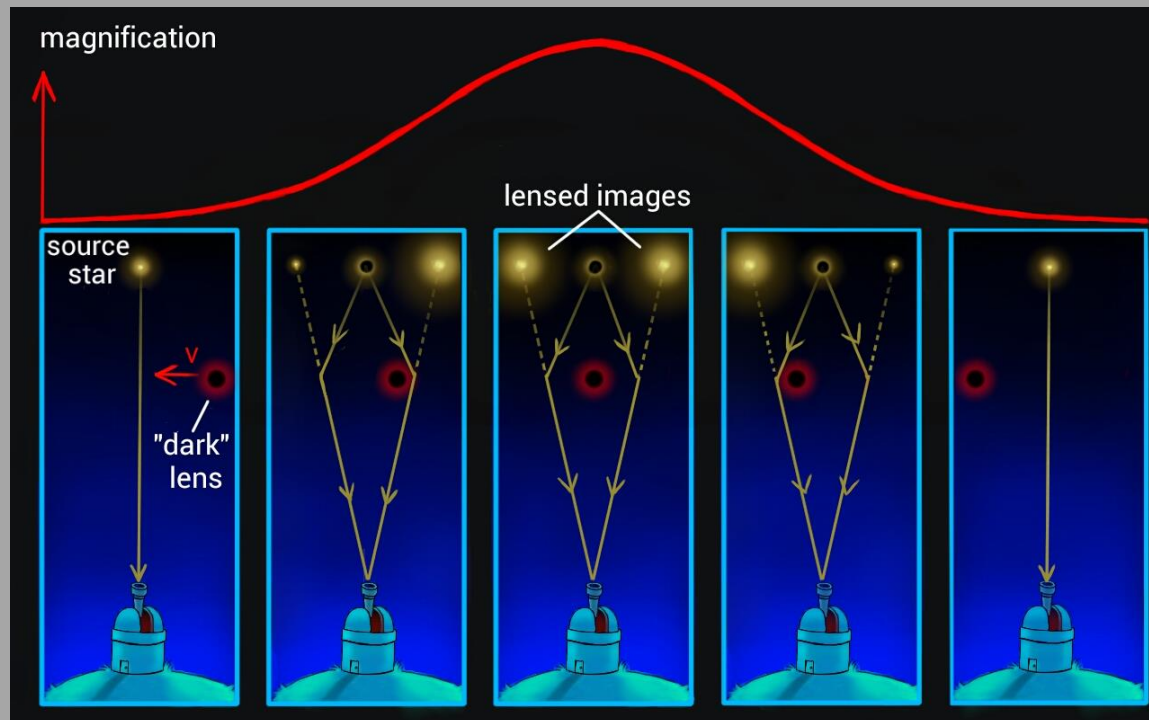
Immagine: JSWSC, 2016, doi:10.1051/swsc/2016025

CURVA DI LUCE DI UNA TIPICA OCCULTAZIONE ASTEROIDALE

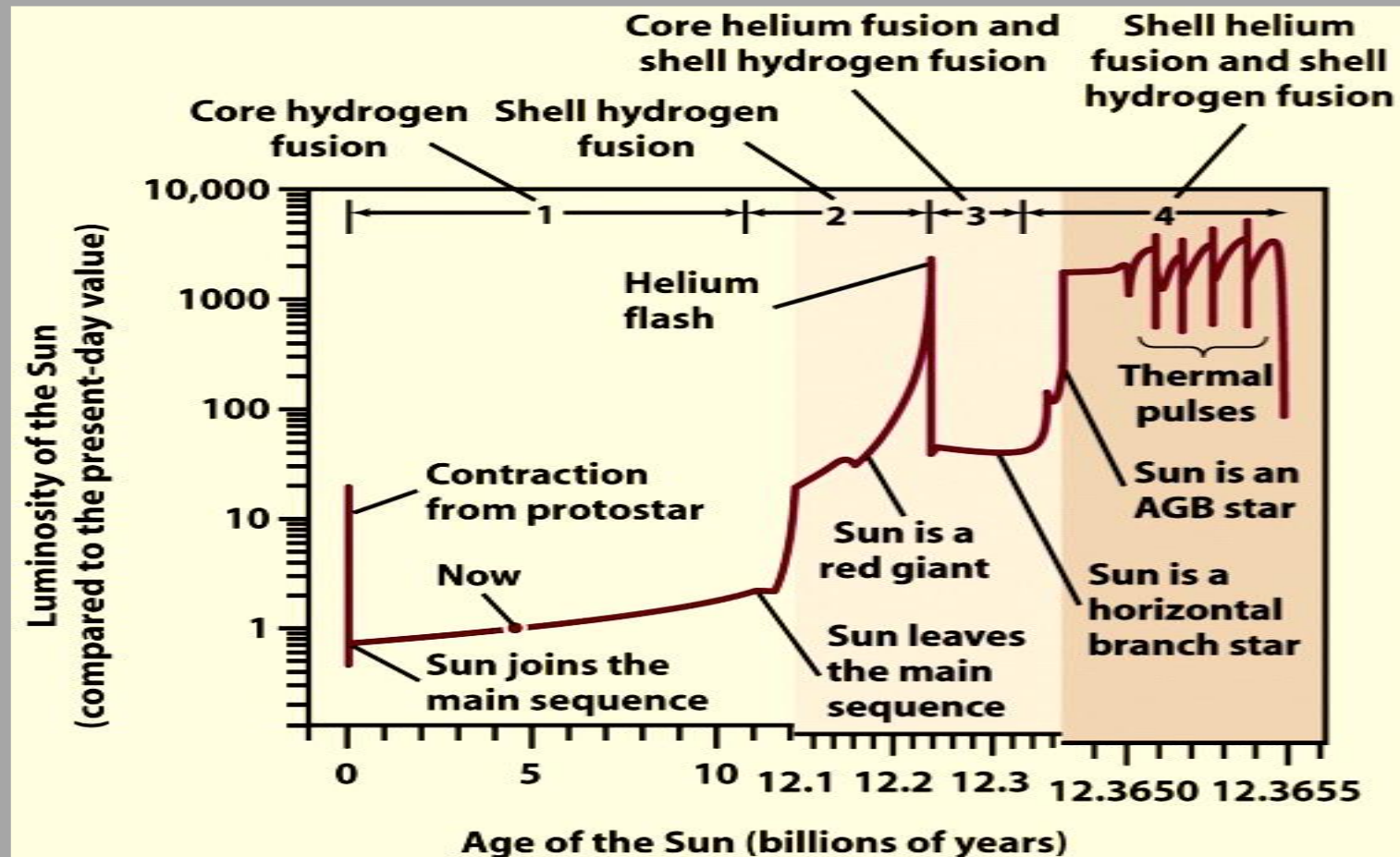


ESEMPIO DI MICROLENSING

- La luce di una stella più lontana viene deviata e amplificata dalla presenza della massa di una stella più vicina che si frappone lungo la linea di vista dell'osservatore.



SONO STATE O SARANNO TUTTE VARIABILI



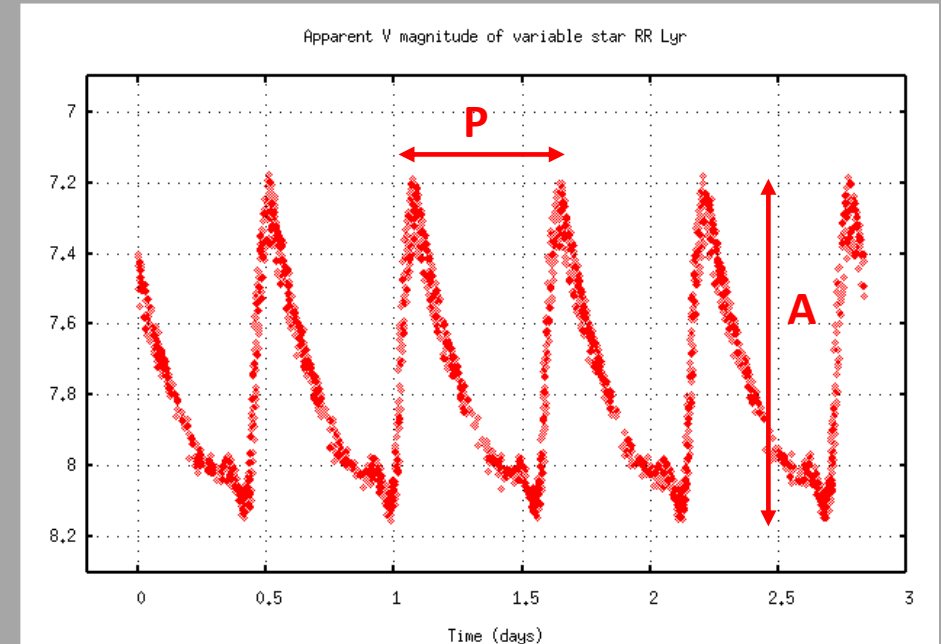
Tutte le stelle nell'arco della loro esistenza variano la loro luminosità.

CURVA DI LUCE, AMPIEZZA E PERIODO

Curva di luce: grafico che riporta la magnitudine della stella in funzione del tempo.

Ampiezza A della curva di luce: la differenza tra il minimo e il massimo di luminosità.

Periodo P della curva di luce: l'intervallo di tempo in cui la curva si ripete (intervallo tra due massimi o due minimi).



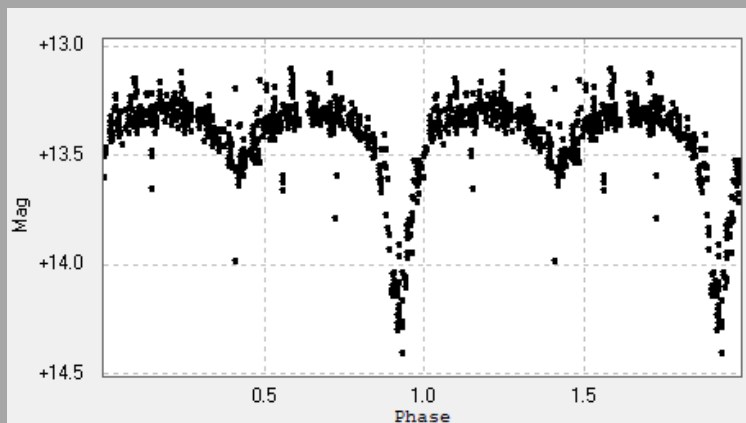
$$A = 0.001 \div 20 \text{ magnitudini}$$

$$P = 1 \text{ ms} \div >2000 \text{ giorni}$$

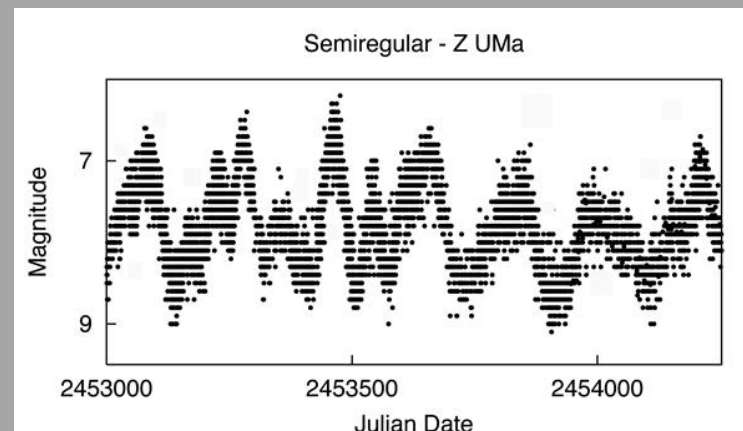
$$m_1 - m_2 \equiv \Delta m = -2.5 \cdot \log_{10} \frac{L_1}{L_2} \longrightarrow \frac{L_1}{L_2} = 10^{\frac{-\Delta m}{2.5}}$$
$$\Delta m = -5 \longrightarrow \frac{L_1}{L_2} = 100$$

PERIODICHE, SEMIREGOLARI, IRREGOLARI

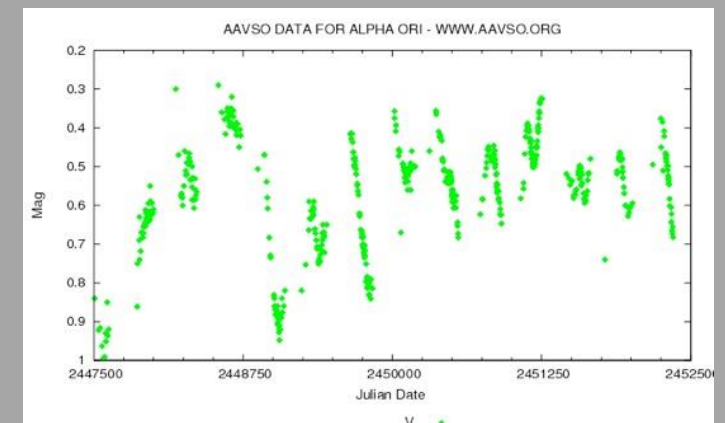
- **Variabili periodiche:** la curva di luce si mantiene regolare nel tempo.
- **Semiregolari:** la curva di luce mostra un andamento ciclico di massimi e minimi ma ampiezza e/o periodo hanno valori diversi da un ciclo all'altro. Il periodo è definito come un valore medio su più cicli.
- **Irregolari:** la curva di luce non mostra alcun tipo di periodicità.



Periodica



Semiregolare



Irregolare

CLASSIFICAZIONE DELLE STELLE VARIABILI

variabili estrinseche o geometriche

le variazioni luminose sono causate da **fattori esterni** alla stella; l'energia totale emessa dalla stella non varia.

- variabili rotanti (periodiche)
- sistemi binari ad eclisse (periodiche)
- sistemi che mostrano eclissi dovute al transito di pianeti (periodiche)

La loro variabilità dipende dalla prospettiva da cui sono osservate

variabili intrinseche o fisiche

le variazioni luminose sono causate da variazioni nelle **condizioni fisiche** della stella.

- variabili pulsanti (periodiche, semiregolari)
- variabili eruttive (irregolari)
- variabili cataclismatiche (irregolari)

Appaiono sempre variabili a qualunque osservatore galattico

CENTINAIA DI TIPI DI VARIABILI - 1

All'interno di ogni classe si identificano decine di tipi diversi sulla base:

Delle proprietà fotometriche	Delle proprietà spettroscopiche	Dello stato evolutivo (classe di luminosità)
<ul style="list-style-type: none">• Forma della curva di luce• Regolarità, periodo• Ampiezza• Magnitudine assoluta	<ul style="list-style-type: none">• Tipo spettrale (temperatura)• Righe spettrali in assorbimento e/o emissione• Intensità del campo magnetico	<ul style="list-style-type: none">• Pre-sequenza• Sequenza (V)• Sub-giganti (IV)• Giganti (III)• Supergiganti (I-II)

$$L = 4 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \sigma \cdot T^4$$

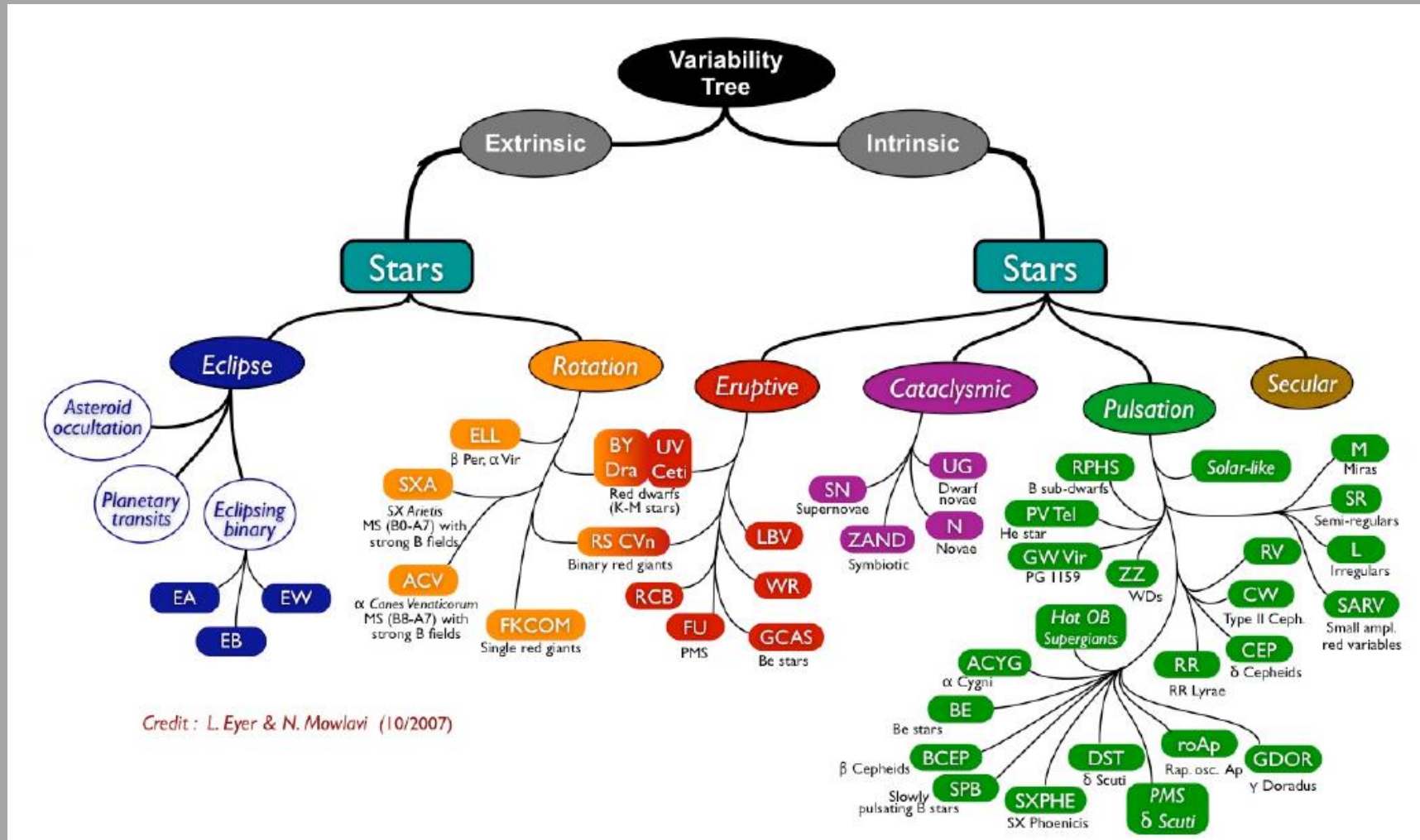
L = Luminosità della stella

R = Raggio della stella

T = Temperatura effettiva (superficiale, della fotosfera) della stella

σ = costante di Stefan-Boltzmann = $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$

CENTINAIA DI TIPI DI VARIABILI - 2



VARIABILI ROTANTI

- Sono stelle la cui **luminosità superficiale non è uniforme** e/o con **forme ellissoidali**.
- I vari tipi di variabili rotanti possono essere caratterizzate:
 - dalla presenza sulla fotosfera di **macchie, estese e persistenti**, più fredde o più calde (*cold* o *hot spots*) rispetto alla superficie circostante;
 - da **disomogeneità di composizione chimica** nell'atmosfera stellare;
 - dalla **forma ellissoidale**, che la stella assume a causa della presenza di un'altra componente molto vicina oppure per l'alta velocità di rotazione;
 - sono sistemi binari che mostrano effetti di **riflessione**.
- **L'energia totale** emessa dalla stella **non cambia** e la **rotazione** della stella è la **causa** principale della variazione luminosa osservata.

Tipi di variabili rotanti

BY Dra (BY)

RS CVn (RS CVn)

α Vir (ELL)

α^2 CVn (ACV, ACVO)

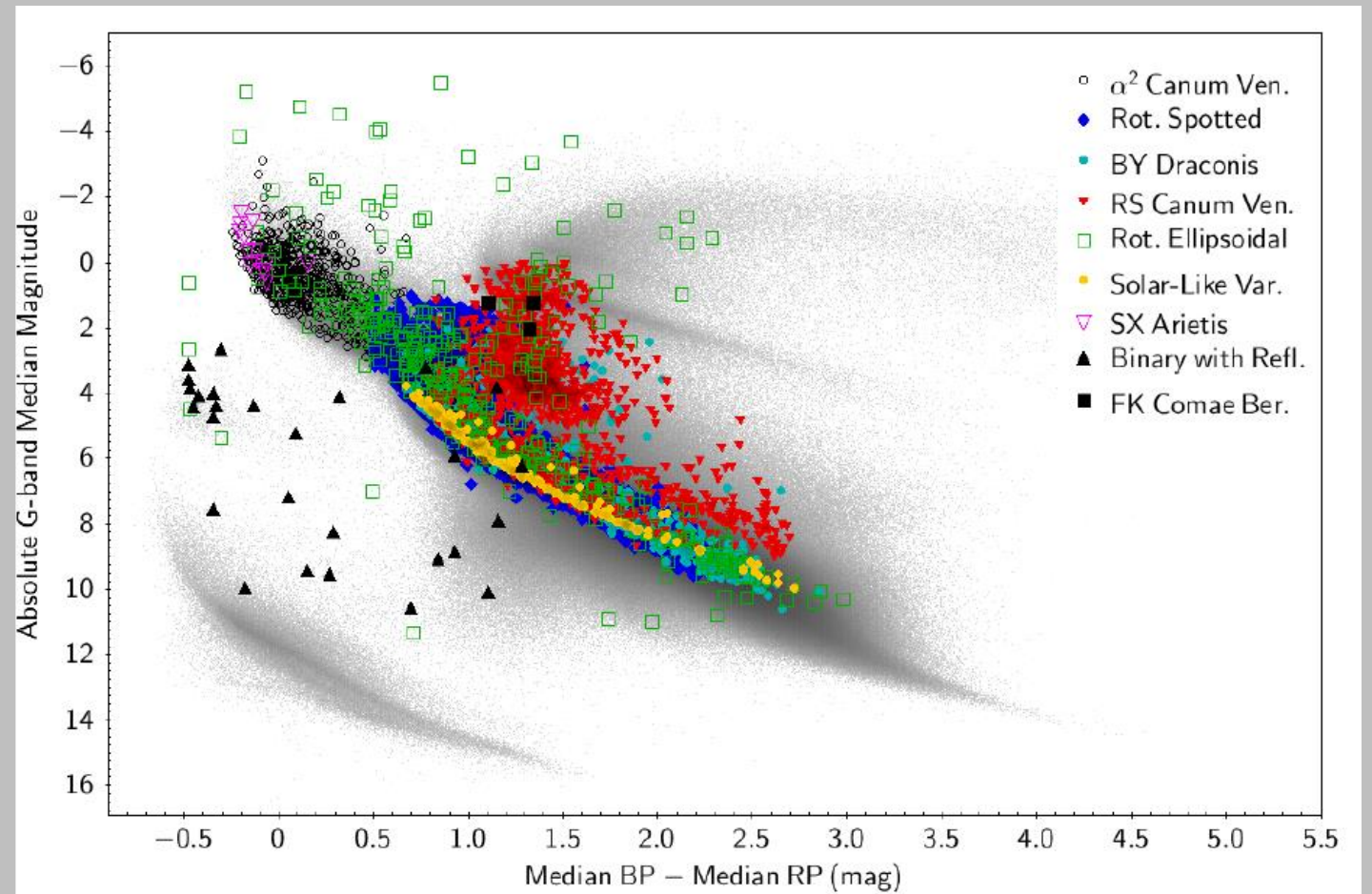
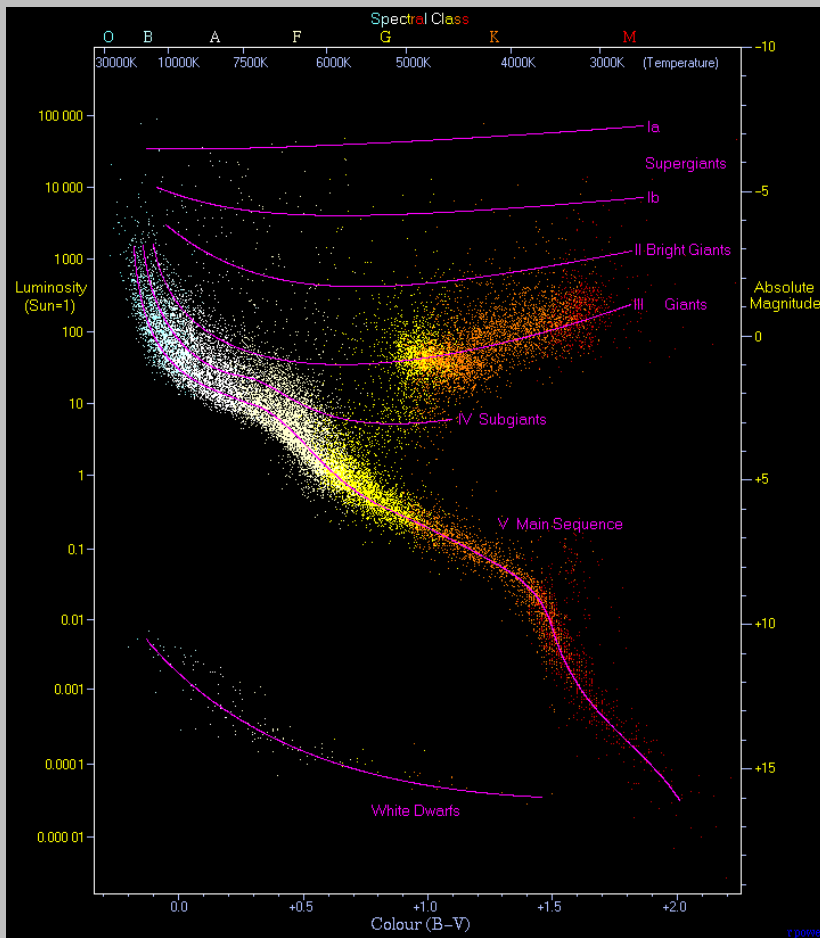
FK Com (FKCOM)

SX Ari (SXARI)

CM Tau (PSR)

AU Ari (R)

VARIABILI ROTANTI NEL DIAGRAMMA H-R

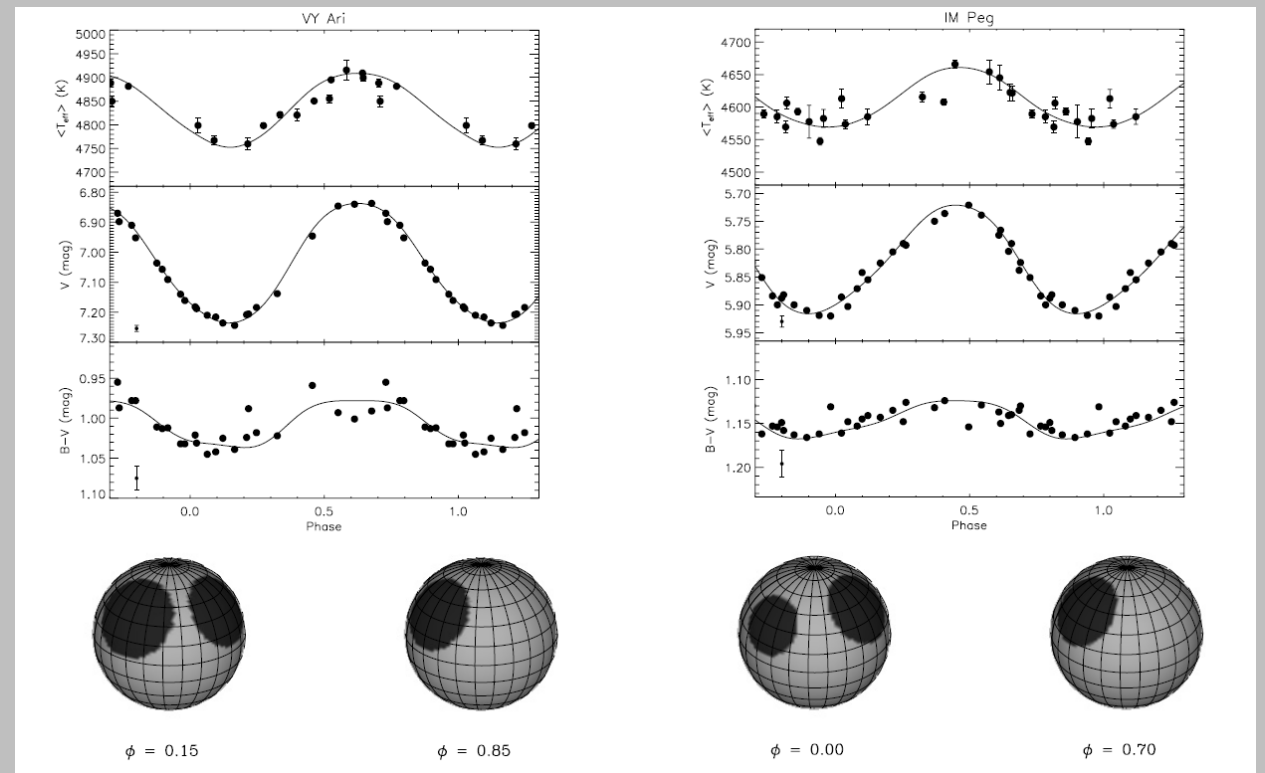


Gaia DR2 (Gaia Collaboration, 2020), Variable stars in the colour-absolute magnitude diagram

MAPPATURA DEGLI SPOT TRAMITE MODELLI

- Confronto tra la curva di luce osservata e la curva di luce teorica, attesa dalle proprietà fisiche della stella (e.g. massa, raggio, temperatura) e dalle caratteristiche degli spot:
 - numero
 - dimensioni
 - posizione sulla superficie
 - temperatura

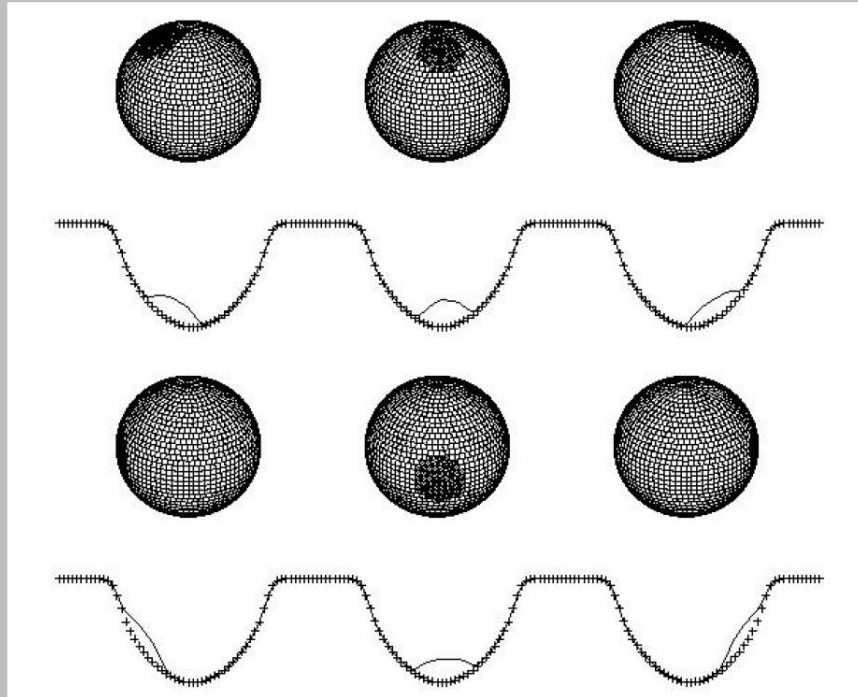
Modellizzazione di macchie stellari



A. Frasca et al.: Measuring starspot temperature from line-depth ratio. II

MAPPATURA DEGLI SPOT TRAMITE DOPPLER IMAGING

- Doppler imaging: evidenzia la presenza della macchia sulla base dell'alterazione che questa provoca sul profilo delle righe spettrali.



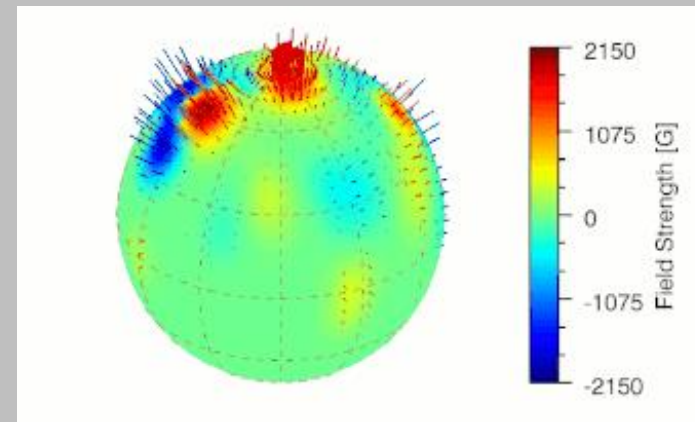
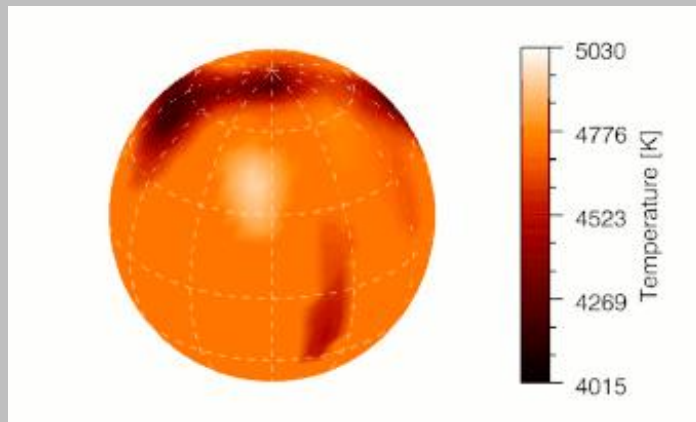
Alina A. Semenova - Doppler Imaging of Starspots: Spectral Diagnostics. A Case Study of the RS CVn Star σ Geminorum

Le condizioni del Doppler Imaging:

- La velocità di rotazione deve essere l'effetto dominante nell'allargamento della riga spettrale, in altre parole la stella deve ruotare velocemente
$$V \cdot \sin(i) > 10 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$$
- L'inclinazione deve essere compresa tra 20° e 70°
 - Per angoli $< 20^\circ$, la stella è vista dal suo Polo di rotazione, l'effetto Doppler non c'è o è troppo piccolo.
 - Per angoli maggiori di 70° diventa difficile interpretare se la macchia si trova nell'emisfero nord o sud.

MAPPATURA DEGLI SPOT TRAMITE ZEEMAN-DOPPLER IMAGING

- Zeeman-Doppler Imaging: è una variante del Doppler-Imaging che misura la polarizzazione lineare e circolare delle righe spettrali prodotte per effetto Zeeman, per misurare gli spostamenti di lunghezza d'onda e le perturbazioni del profilo delle righe spettrali che si manifestano in presenza di un campo magnetico.



Mappe della temperatura e del campo magnetico superficiali ottenute in un periodo completo di rotazione di 6.7 giorni della stella II Pegasi con imaging Zeeman-Doppler. Crediti: Aip

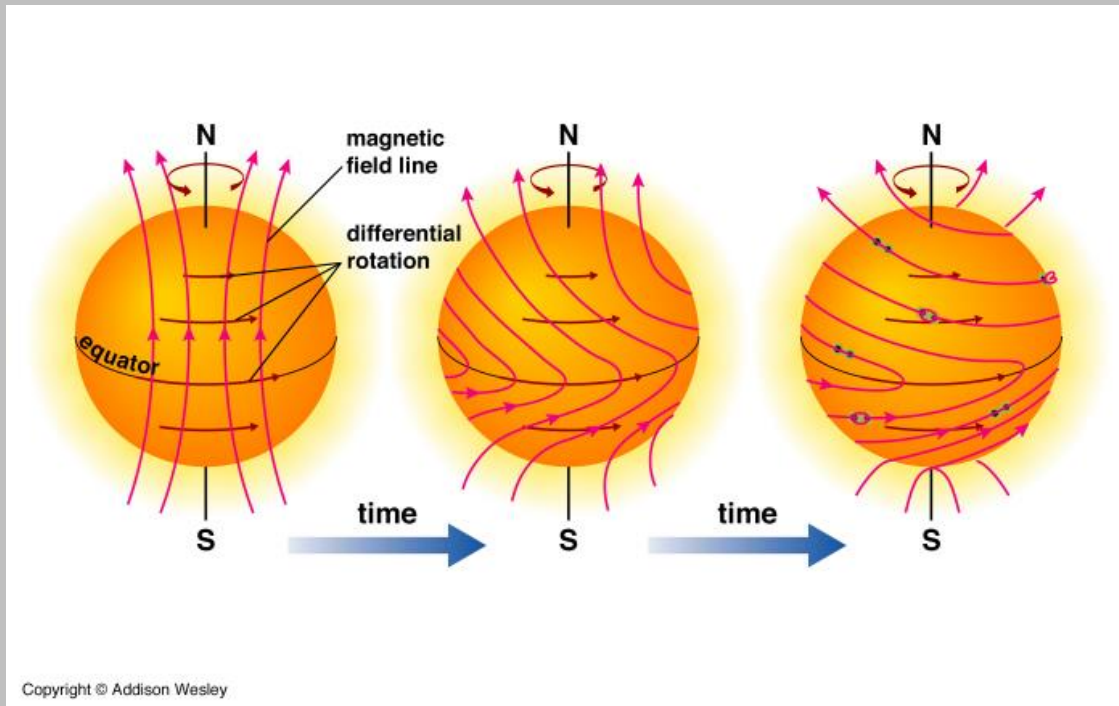
Animazioni ai link:

https://www.media.inaf.it/wp-content/uploads/2019/03/iipeg-di-movie_resized.gif

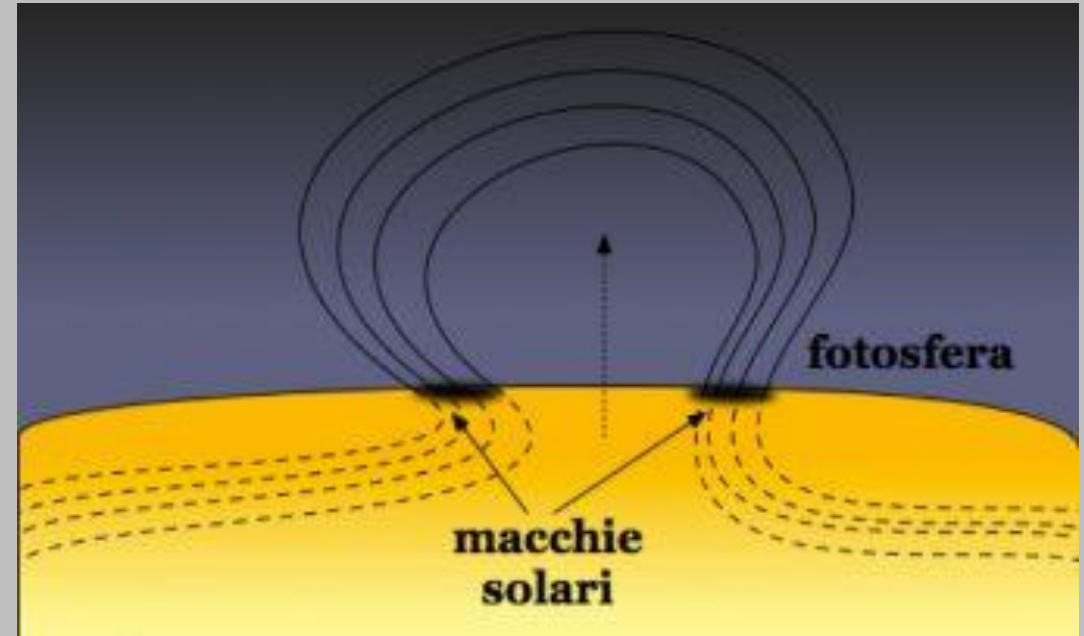
https://www.media.inaf.it/wp-content/uploads/2019/03/iipeg-zdi-movie_resized.gif

LA FORMAZIONE DELLE STARSPOTS

Rotazione differenziale



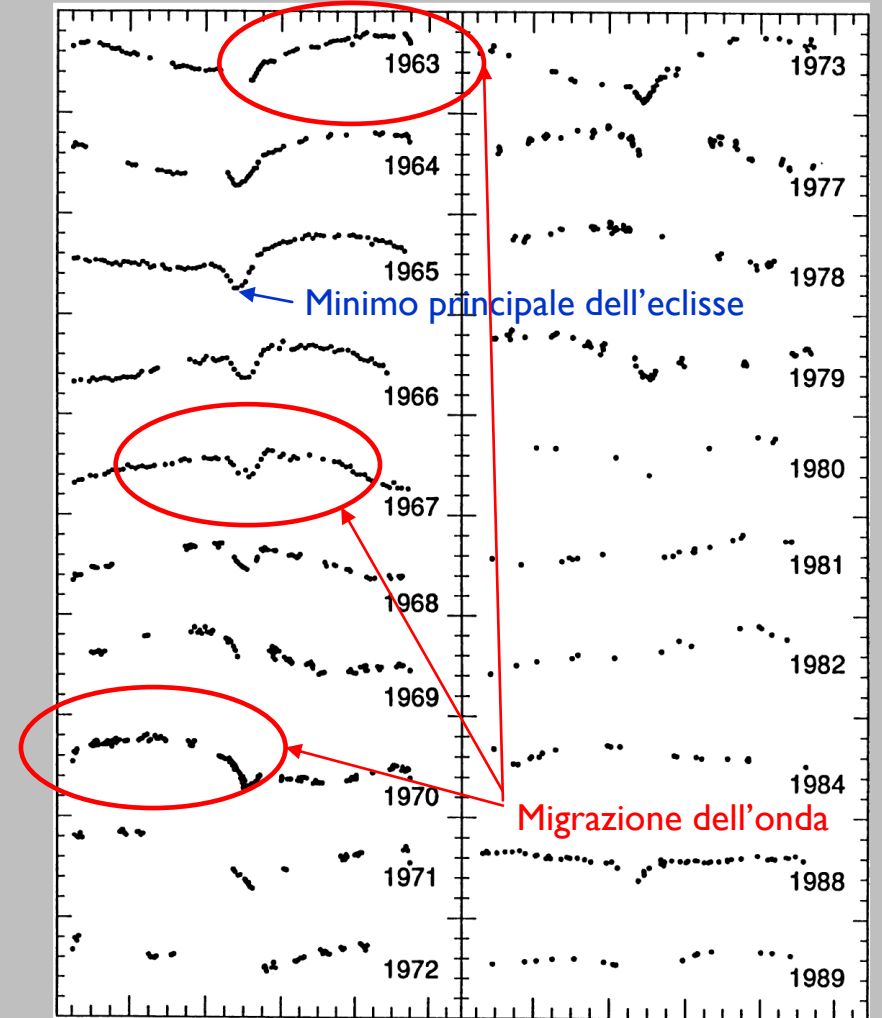
<https://youtu.be/-PTQaOWkEfs>



Le macchie sono la manifestazione dell'emersione superficiale di tubi di flusso magnetici prodotti negli strati più interni della stella. Per effetto dell'intenso campo magnetico che costituisce questi tubi di flusso, il plasma viene confinato all'esterno degli stessi.

VARIABILI ROTANTI - TIPO RS CANUM VENATICORUM (RS CVN)

- Sono sistemi binari, la cui curva di luce è caratterizzata da una persistente **distorsione ad onda**, che si sovrappone all'effetto della mutua eclisse tra le componenti.
- La distorsione non è spiegabile con gli effetti usuali di ellissoidicità e riflessione.
- L'onda ha **ampiezza e velocità di migrazione variabili e migra** verso fasi orbitali crescenti o decrescenti:
 - Migrazione dell'onda: interpretata con la presenza e migrazione in longitudine di un gruppo di macchie.
 - Variazione della velocità di migrazione dell'onda: spiegata con una **migrazione in latitudine** della **formazione delle macchie** (in analogia con il ciclo undecennale di attività solare).
 - Ampiezza non costante dell'onda: **quantità variabile di superficie ricoperta da macchie** (in analogia con il ciclo undecennale di attività solare).



BINARIE AD ECLISSE

- Sono sistemi binari il cui piano orbitale è prossimo alla linea di vista dell'osservatore.
- A causa delle reciproche occultazioni tra le due stelle, si osservano variazioni periodiche della luminosità totale del sistema, con periodi coincidenti al moto orbitale delle due componenti.
- In funzione della forma della curva di luce si classificano come:
 - Algol (EA)
 - β Lyr (EB)
 - W UMa (EW)

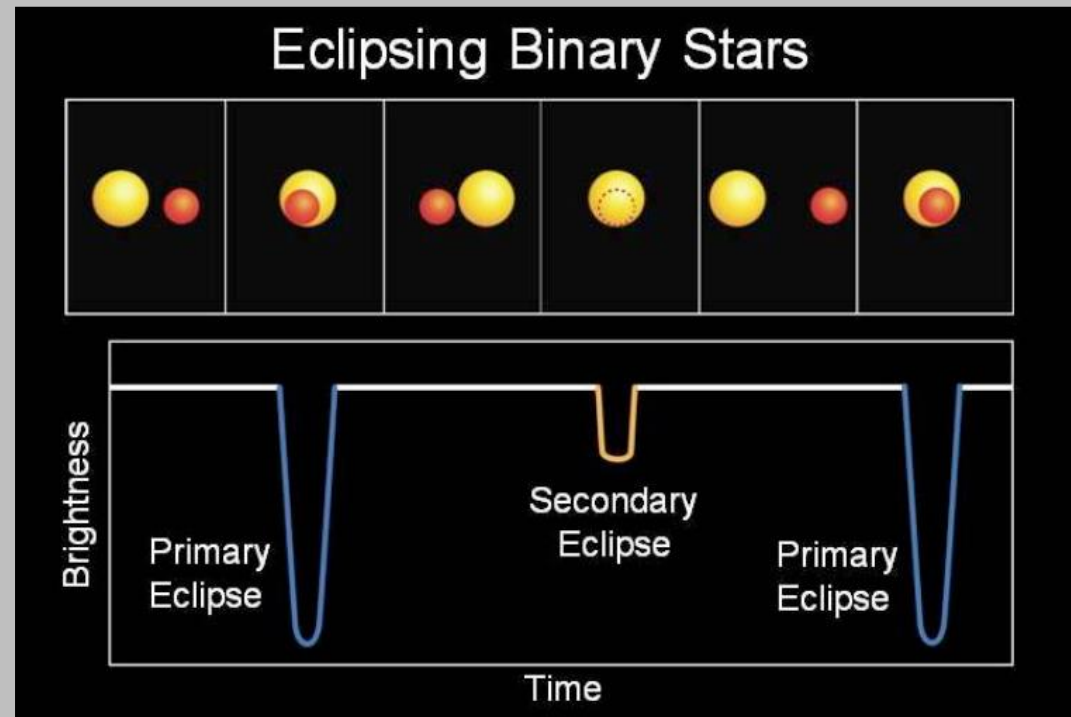
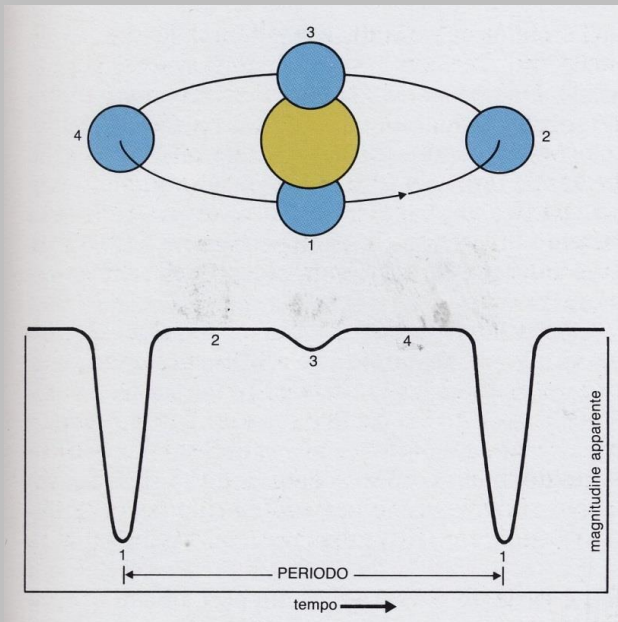


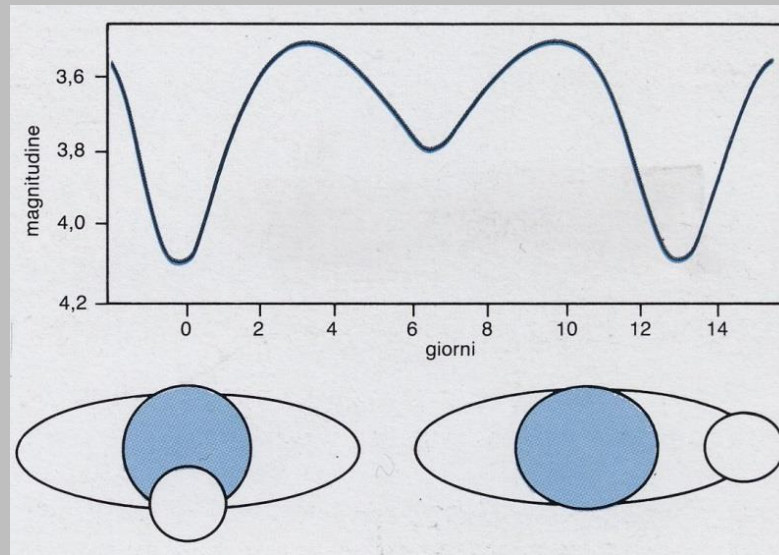
Immagine tratta da: Variable Star Classification and Light Curves (AAVSO)

BINARIE AD ECLISSE TIPO ALGOL (EA)

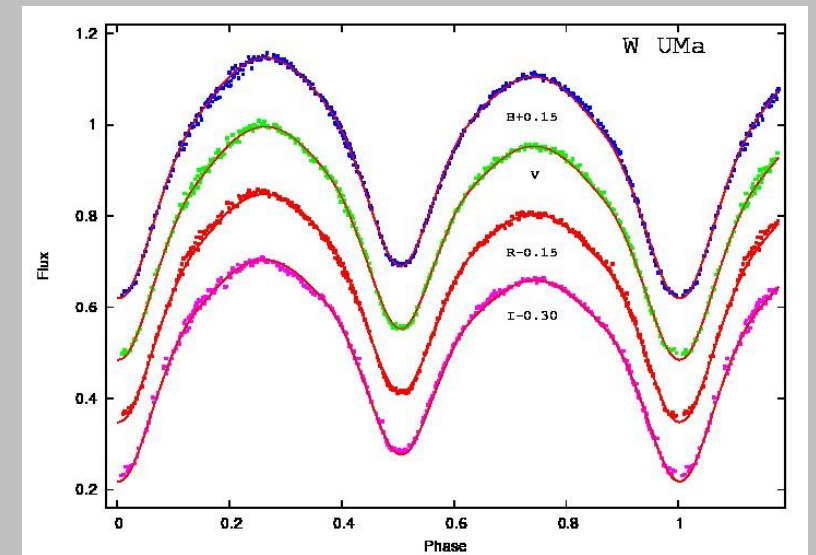
- In funzione della forma della curva di luce si classificano come:
 - Algol (EA)
 - β Lyr (EB)
 - W UMa (EW)



EA



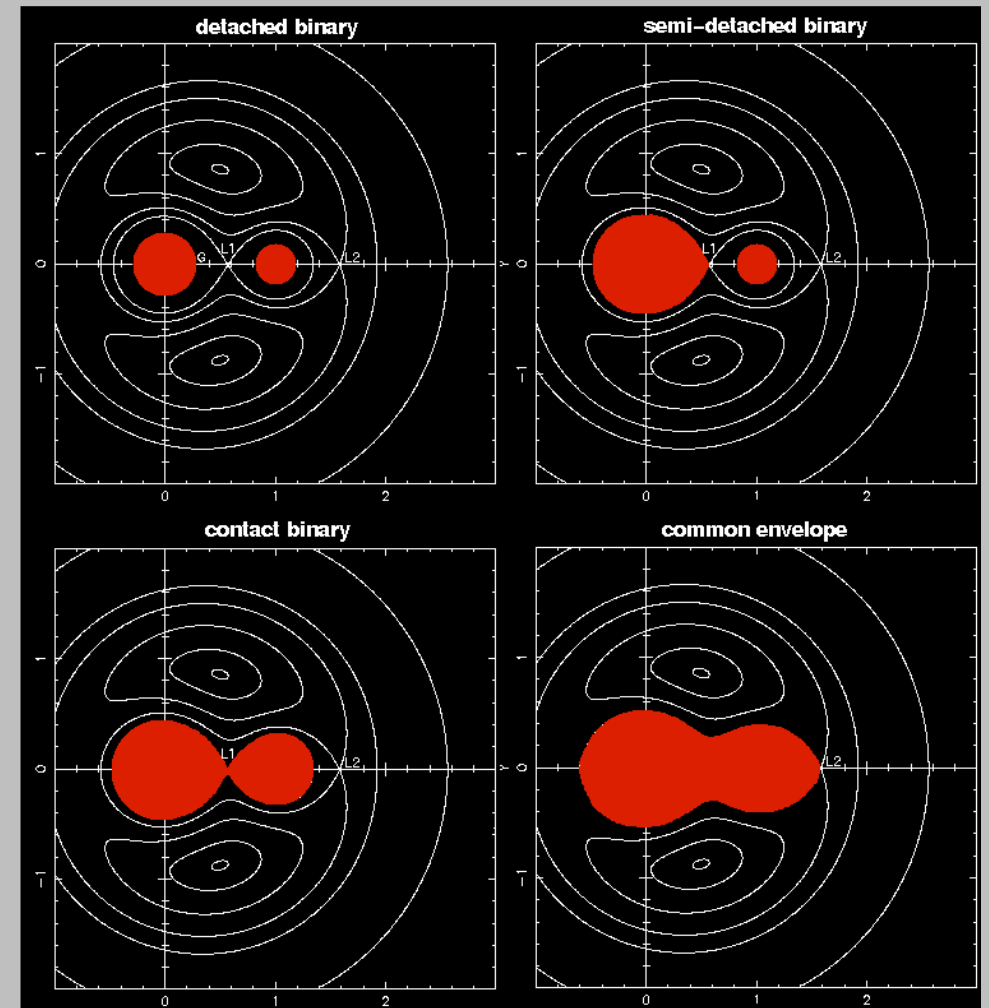
EB



EW

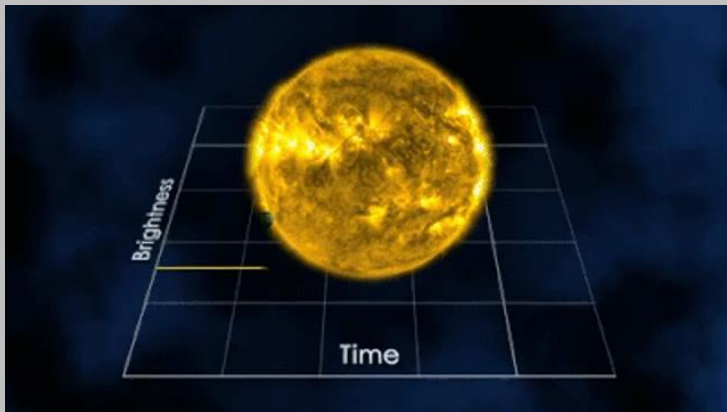
ULTERIORE CLASSIFICAZIONE DELLE BINARIE AD ECLISSE

- Una classificazione più moderna dei sistemi binari ad eclisse si basa sui concetti di Lobi di Roche e punti Lagrangiani:
 - **Sistemi binari staccati:** le componenti occupano un volume ben all'interno dei propri lobi di Roche, sono quasi-sferiche e la distorsione dovuta agli effetti mareali è minima.
 - **Sistemi binari semi-staccati:** una delle due componenti riempie il proprio lobo di Roche ed è distorta dalle forze mareali. Può avvenire scambio di materiale con l'altra componente attraverso il punto di Lagrange più interno.
 - **Sistemi binari a contatto:** entrambe le componenti riempiono i rispettivi Lobi di Roche, sono distorte e praticamente a contatto.
 - **Sistemi con un involuppo comune:** le due componenti sono completamente fuse in un involuppo comune.



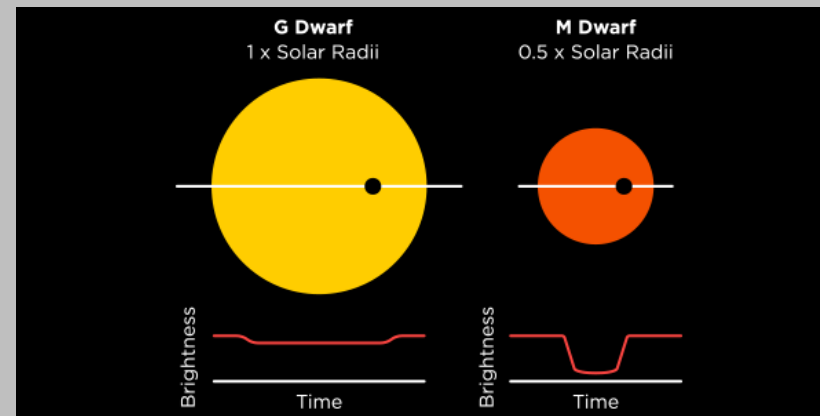
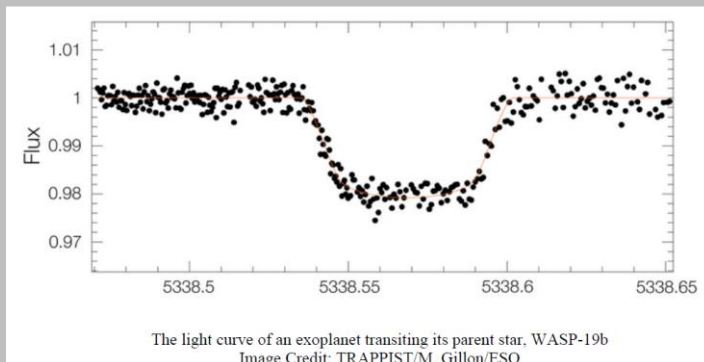
SISTEMI CHE MOSTRANO ECLISSI DOVUTE AL TRANSITO DI PIANETI (EP)

- Stelle in cui la variazione di luminosità è causata dal transito di uno o più pianeti.



Animazione NASA:

https://svs.gsfc.nasa.gov/vis/a010000/a011400/a011428/Exoplanet_Animation_Transit_Light_Curve_ipod_lg.m4v



Crediti immagine: Planet Hunters

Una stella di raggio minore genera nella curva di luce un minimo più profondo rispetto al transito sul disco di una stella di dimensione maggiore.

$$\text{Depth} = \left(\frac{R_p}{R_\star} \right)^2$$

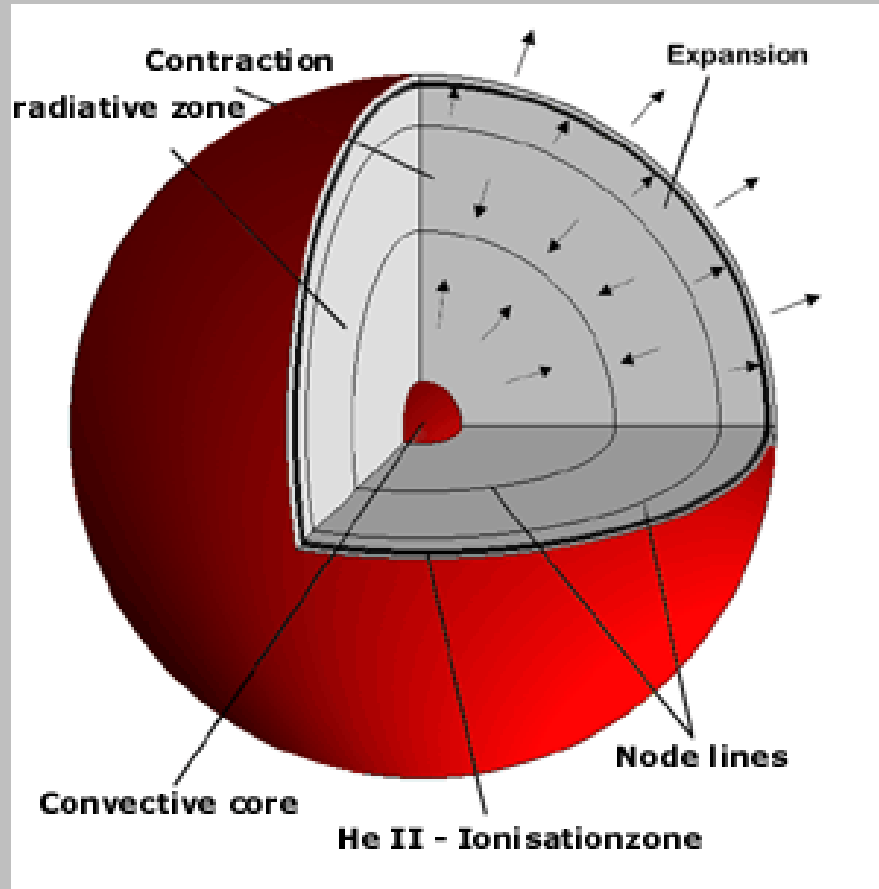
R_p = raggio del pianeta
 R_\star = raggio della stella

VARIABILI PULSANTI

- Sono stelle in cui **regolarmente** si verifica un'**espansione** e una **contrazione** degli strati esterni dell'atmosfera stellare (pulsazione).
- Le pulsazioni possono essere:
 - **Radiali**: la stella si **espande simmetricamente** mantenendo una forma **sferica**.
 - **Non radiali**: l'espansione non è simmetrica, alcune parti della stella si contraggono verso l'interno e altre si espandono verso l'esterno; la stella **cambia forma ma non volume**.

Pulsazioni radiali	Pulsazioni non-radiali
Mira (M)	Alpha Cygni (ACYG)
Semiregolari (SR)	ZZ Ceti (ZZ)
RV Tauri (RV)	Gamma Doradus (GDOR)
Cefeidi (CEP, DCEP)	Pulsazioni radiali + non-radiali
W Virginis (CW)	Beta Cephei (BCEPS, BCEPS)
RR Lyrae (RRAB, RRC, RRD)	Delta Scuti (DSCT, DSCTC)

TIPI DI PULSAZIONI RADIALI



Esempio di pulsazione radiale ($n = 2$)

n = numero di **linee nodali**: sono le linee lungo la direzione radiale in cui gli strati della stella sono fermi.

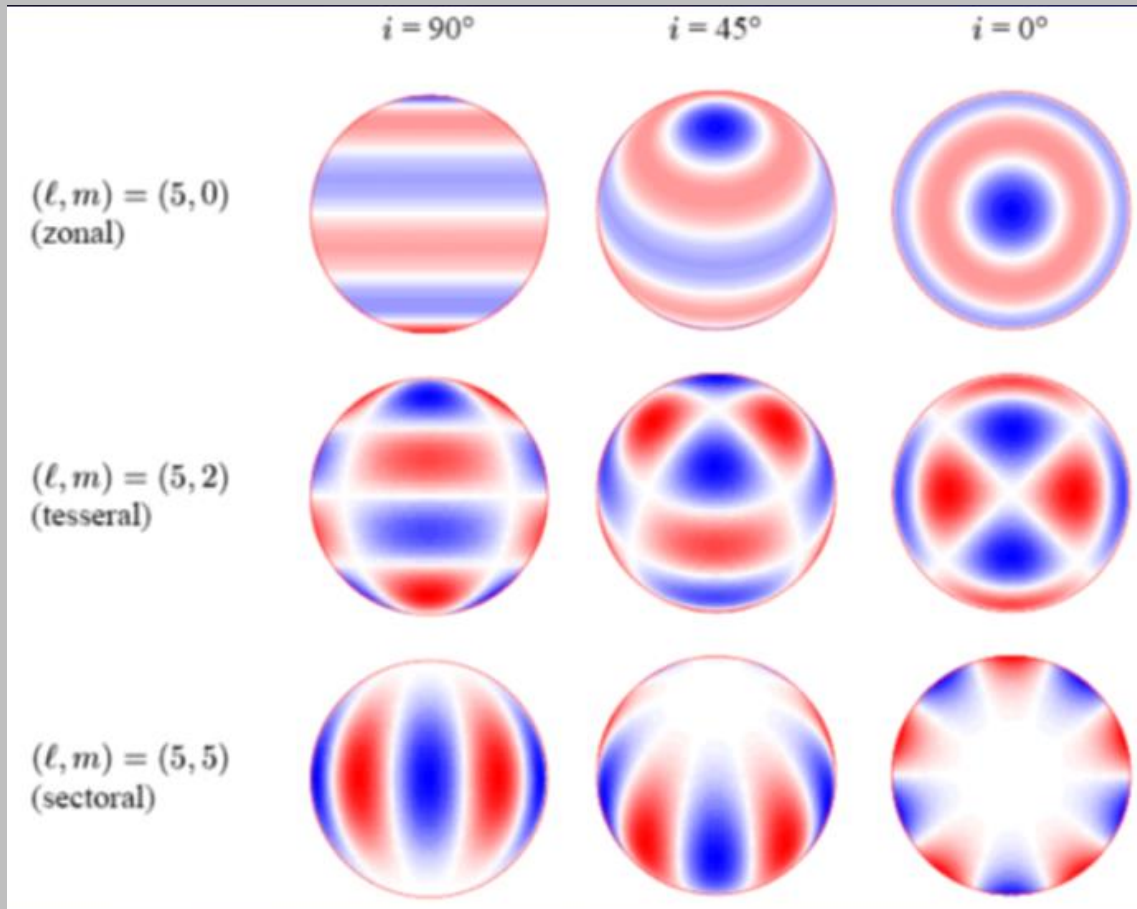
Tipi di pulsazioni radiali:

$n = 0$ – tono fondamentale

$n = 1$ – prima armonica

$n = 2$ – seconda armonica

I PARAMETRI DELLE PULSAZIONI NON RADIALI



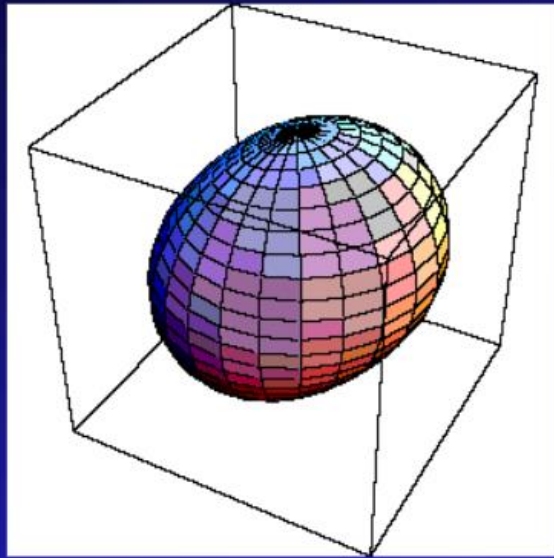
Le pulsazioni non-radiali sono descritte da 3 parametri:

- n = numero linee nodali radiali
- l = numero di linee nodali parallele all'equatore della stella
- m = numero di linee nodali passanti per i poli della stella

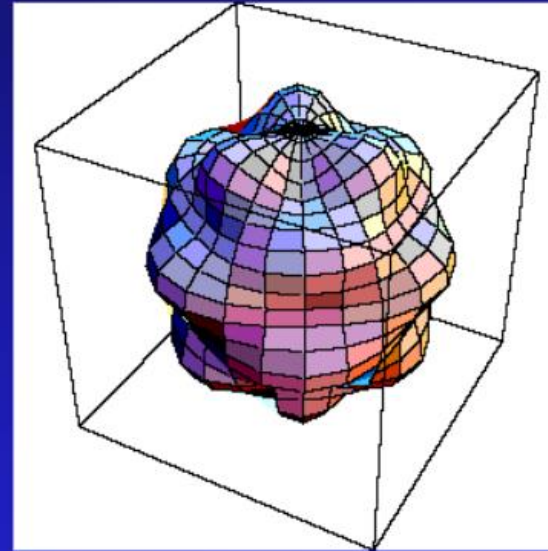
Per il Sole i modi di pulsazione identificati sono più di 10^5

Per le altre stelle i modi di pulsazione di grado più elevato osservabili sono tipicamente $l = 3$ or 4 .

EFFETTO DI UNA PULSAZIONE NON RADIALE



$l = 2,$
 $m = 1$



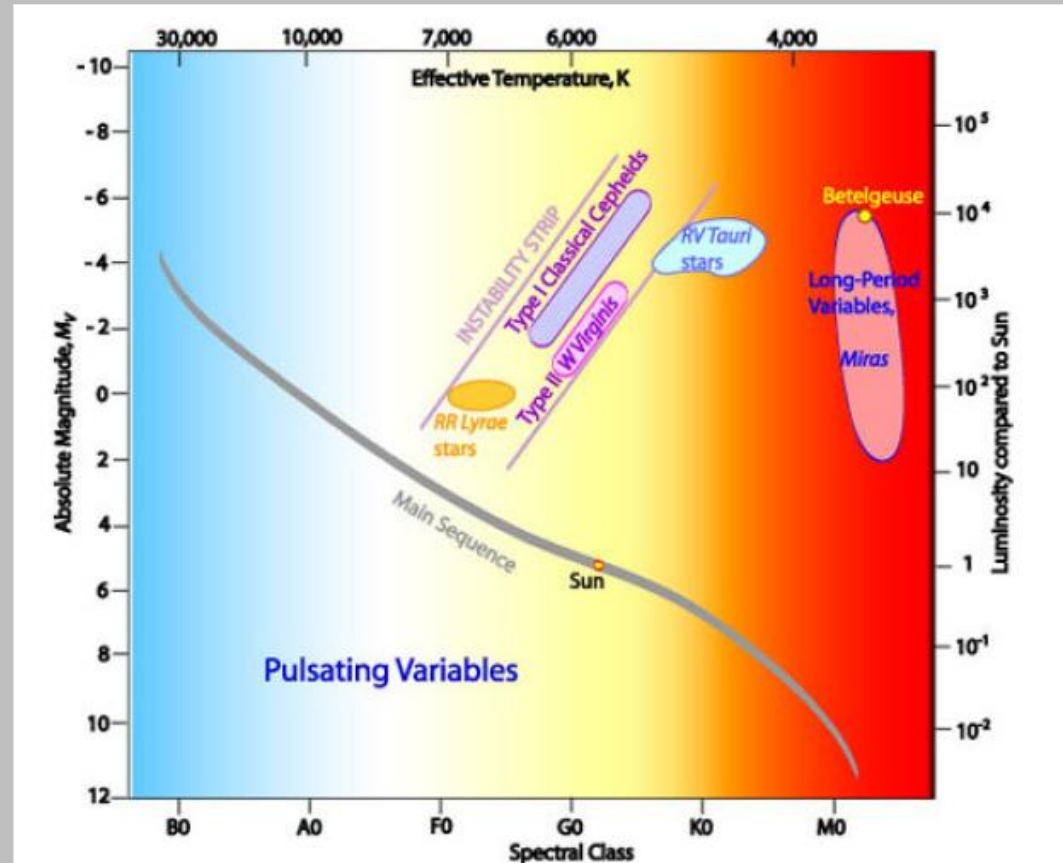
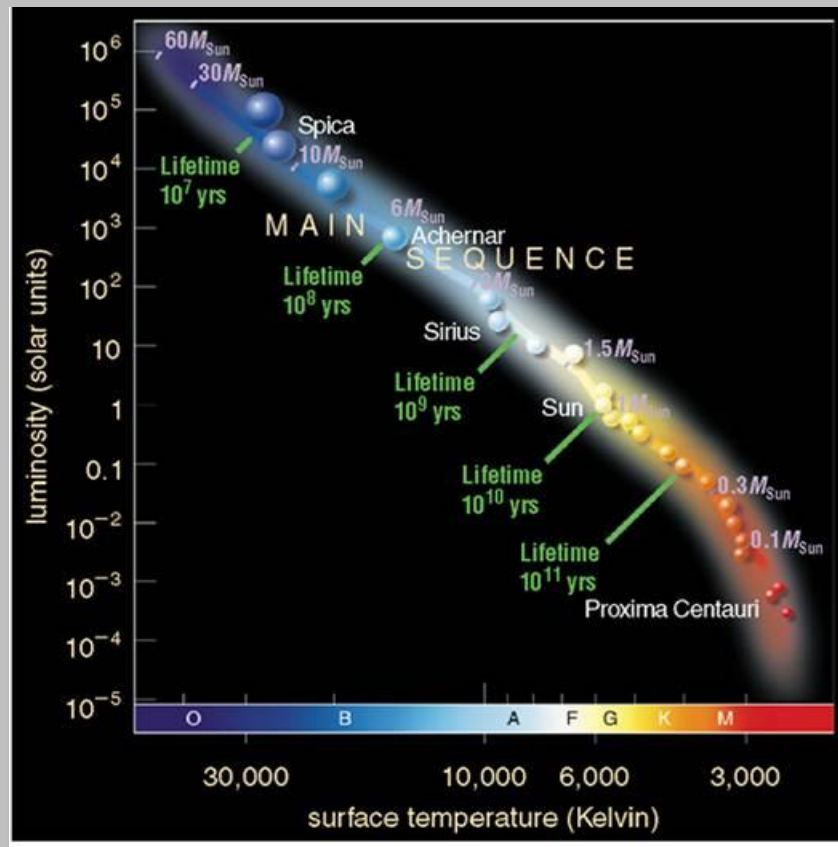
$l = 8,$
 $m = 3$

Tim Bedding

Animazione: vedi slide 27 della presentazione al link <https://slideplayer.com/slide/7350301/>

VARIABILI PULSANTI NEL DIAGRAMMA H-R

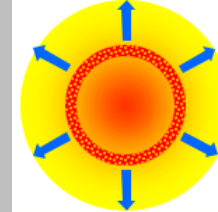
- Sono stelle di post-sequenza al termine della loro evoluzione



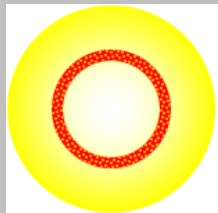
IL MOTORE DELLA PULSAZIONE - IL MECCANISMO DI OPACITÀ 'K'



1. Ad un certo punto della sua vita, ad uno strato della stella viene a mancare la pressione che bilancia la gravità e tende a cadere verso l'interno.

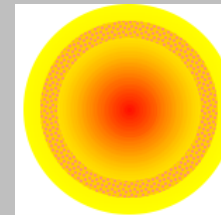


4. Di conseguenza, la pressione del materiale sottostante aumenta e spinge lo strato verso l'esterno.

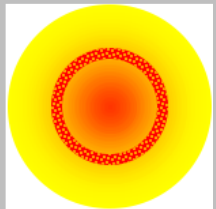


2. Nella caduta lo strato aumenta di temperatura e densità e modifica il suo coefficiente di opacità k .

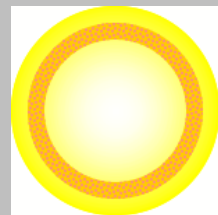
$$k \propto \frac{\rho}{T^{3.5}} \quad \text{Legge di Kramers}$$



5. Espandendosi, lo strato diminuisce di temperatura e densità e diventa più trasparente alla radiazione.



3. Se l'opacità aumenta, il calore si disperde verso l'esterno più lentamente e il materiale sottostante allo strato in caduta si scalda.



6. L'energia fuoriesce liberamente attraverso lo strato e la pressione del materiale sottostante diminuisce. Lo strato che ha innescato la pulsazione cade nuovamente verso l'interno e il ciclo si ripete.

MECCANISMO DI OPACITÀ K E IONIZZAZIONE

- Occorrono condizioni particolari affinché la compressione dello strato determini un aumento dell'opacità e l'innesco della pulsazione.
- Le regioni di una stella in cui si verificano condizioni adatte all'instaurarsi della pulsazione sono quelle in cui si ha una parziale ionizzazione del plasma.
- In questi strati ionizzati, la maggior parte del lavoro fatto dalla compressione dello strato produce nuove ionizzazioni e la temperatura aumenta di poco. In questa condizione, secondo la legge di Kramers, la densità diventa il fattore dominante nella variazione dell'opacità.
- Durante l'espansione gli ioni si ricombinano con gli elettroni liberi e la temperatura diminuisce; la diminuzione dell'opacità è controllata principalmente dalla diminuzione della densità.

Strato parzialmente ionizzato

Lavoro prodotto
dalla compressione

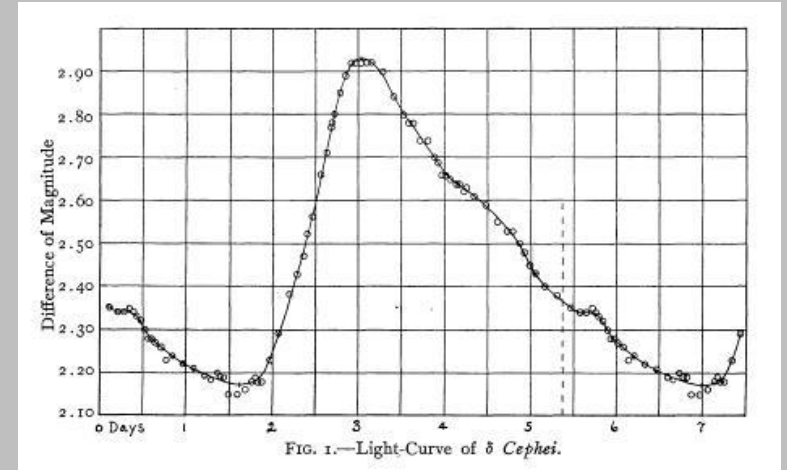
Aumento della ionizzazione
La densità aumenta più della temperatura

Aumento dell'opacità e
innesco della pulsazione

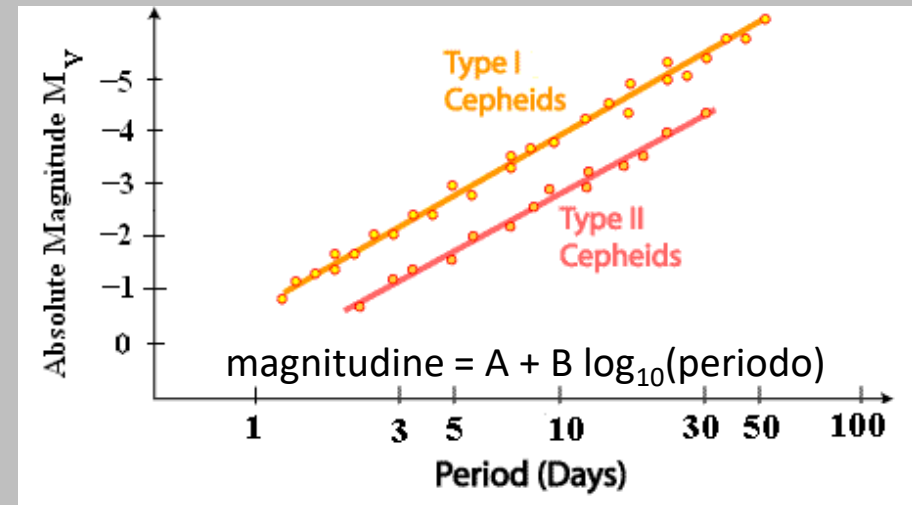
Elemento ionizzato	Tipo di variabile
Idrogeno	Mira
Elio ionizzato due volte	Cefeidi
Ferro	Beta Cephei

VARIABILI PULSANTI - CEFEIDI

- Sottotipi: δ Cephei (cefeidi classiche, Popolazione I), W Virginis (stelle di popolazione II, meno luminose rispetto alle Cefeidi classiche), Tipo TU Cas (pulsano nel modo fondamentale più la prima armonica)
- Periodo: 1 ÷ 135 giorni (0.8 ÷ 35 per W Vir)
- Ampiezza: 0.3 ÷ 2 mag nel visibile (0.3 ÷ 1.2 per W Vir)
- Tipo spettrale: F (al massimo), G-K (minimo)
- Stato evolutivo: supergiganti (I-II)
- Pulsazione: radiale (fondamentale, prima armonica, multimodo)
- Il massimo della velocità di espansione è quasi coincidente coincide con il massimo di luminosità
- Esiste una **relazione periodo-luminosità**
- Esiste una relazione periodo-temperatura (maggiore il periodo minore è la temperatura)



Curva di luce di una Cefeide classica



Relazione periodo-luminosità per le Cefeidi Classiche e di tipo II (W Vir)

HENRIETTA SWAN LEAVITT

Tratto da 'Periods of 25 Variable Stars In The Small Magellanic Cloud -
Harvard College Circular 173 - Edward C. Pickering, March 3, 1912

<http://adsabs.harvard.edu/pdf/1912HarCi.173....1L>



Henrietta Swan Leavitt (1868-1921) scopritrice della relazione periodo-luminosità delle Cefeidi.

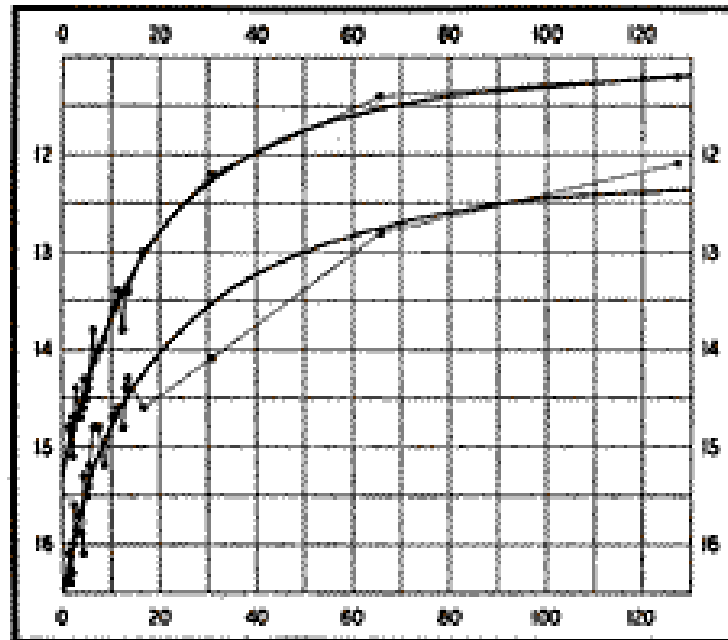


FIG. 1.

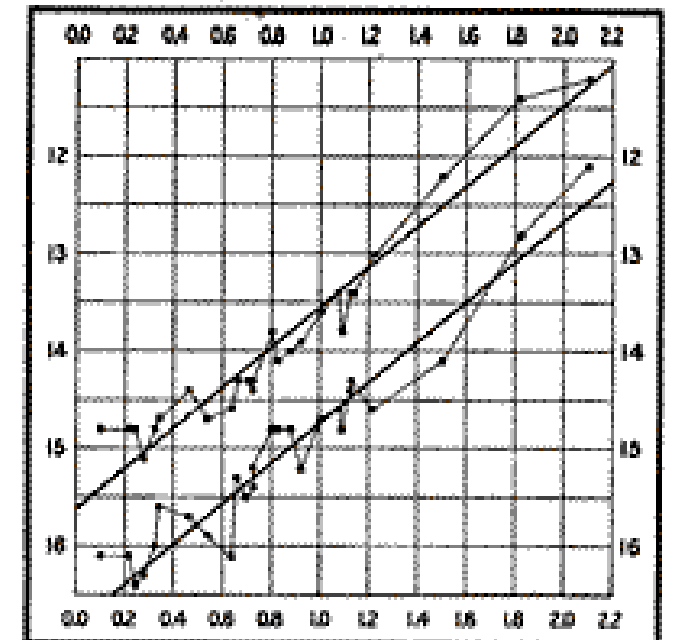


FIG. 2.

Magnitudine apparente al massimo e la minimo di 25 Cefeidi osservate nella Piccola Nube di Magellano in funzione del periodo e del logaritmo (base 10) del periodo

MAGNITUDINE ASSOLUTA E DISTANZA

- Magnitudine apparente m , magnitudine assoluta M e distanza d (o la parallasse π) sono legate dall'equazione:

$$M - m = 5 - 5 \cdot \log_{10} d \quad (\text{se } d \text{ in parsec})$$

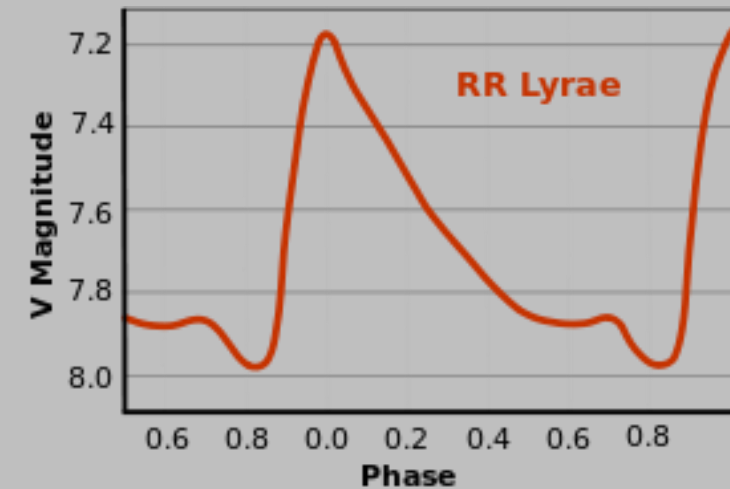
$$M - m = 5 + 5 \cdot \log_{10} \pi \quad (\text{se } \pi \text{ in secondi d'arco})$$

- Se sono in grado di determinare la magnitudine assoluta M di una stella, misurata la sua magnitudine apparente m , posso determinarne sempre la distanza con l'equazione:

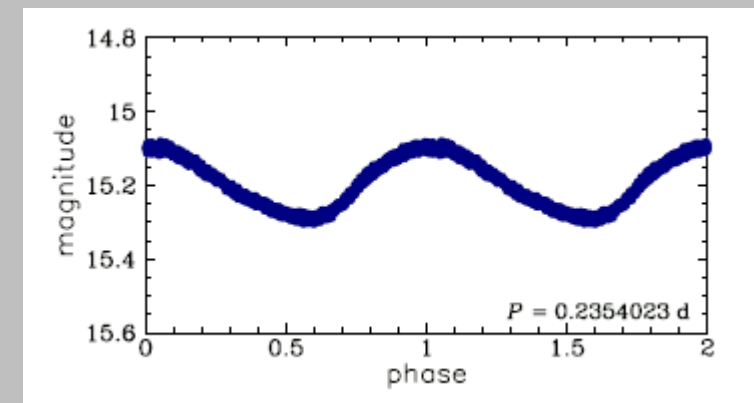
$$d = 10^{[-(M-m-5)/5]} \quad (d \text{ in parsec, } 1 \text{ parsec} = 3.26 \text{ anni luce})$$

VARIABILI PULSANTI - RR LYRAE

- Sottotipi: RRab, RRc, RRd
- Periodo: 0.2 ÷ 1.2 giorni (0.2 ÷ 0.5 per RRc)
- Ampiezza: 0.2 ÷ 2 mag nel visibile (< 0.8 per RRc)
- Tipo spettrale: A-F
- Stato evolutivo: giganti
- Pulsazione: radiale
 - RRab: modo fondamentale
 - RRc: prima armonica
 - RRd: modo fondamentale più prima armonica
- Indicatori di distanza: $M_V = 0.6 \pm 0.3$ (H. Karttunen)



Curva di luce di una variabile RRab

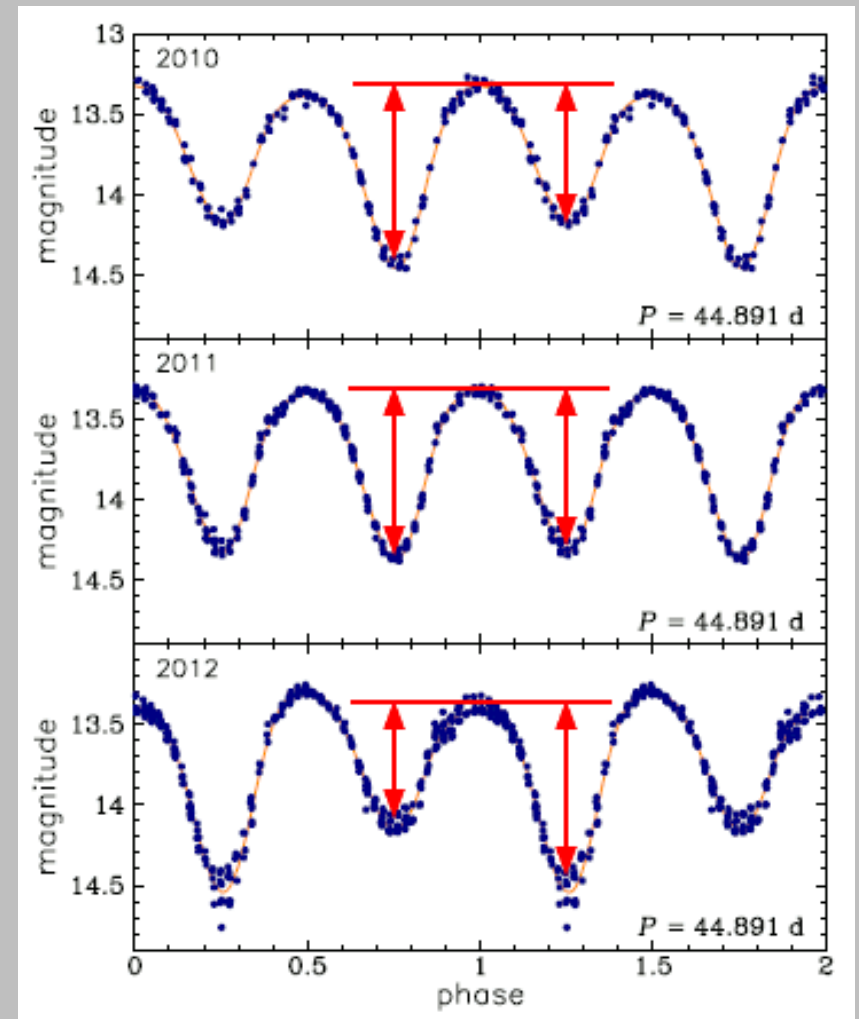


Curva di luce di variabili RRc

Immagine da: OGLE Atlas of Variable Star Light Curves

Variabili pulsanti - RV Tauri

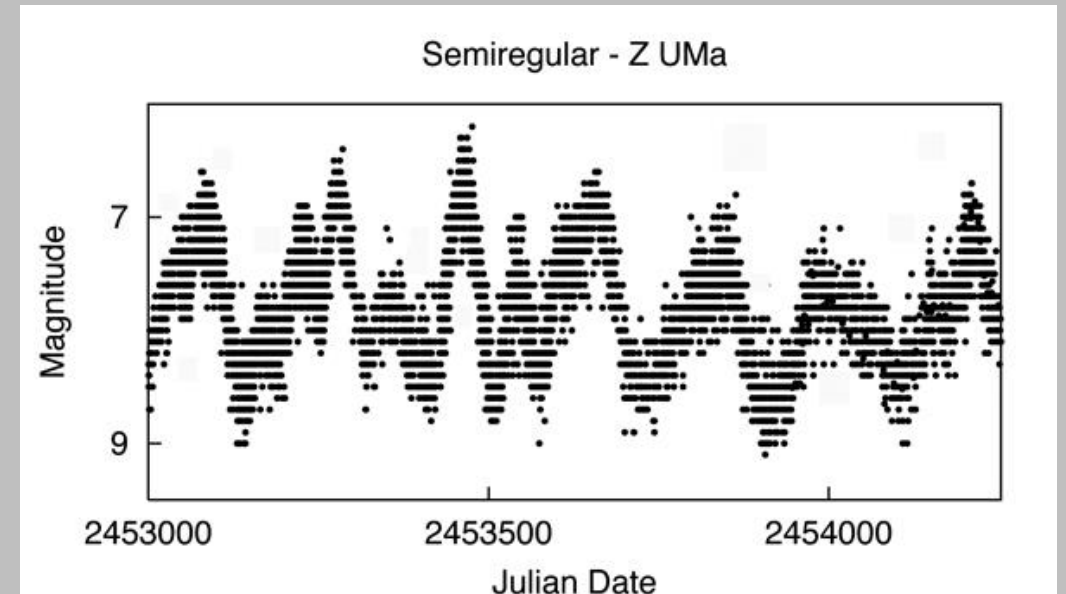
- Sottotipi: RVA, RVB
- Periodo: 30 ÷ 150 giorni
- Ampiezza: sino a 3 ÷ 4 mag. nel visibile
- Tipo spettrale: F-G (al massimo) K-M (al minimo)
- Stato evolutivo: supergiganti
- Pulsazione: radiale
- Curva di luce: caratterizzata dalla presenza di una doppia onda con minimi principali e secondari che si alternano e che possono variare in ampiezza sino ad arrivare a scambiarsi.
- Il sottotipo RVb mostra variazioni periodiche (600 ÷ 1500 giorni) della magnitudine media (sino a 2 mag nel visibile).



Alternanza dei minimi primari e secondari
Immagine da: OGLE Atlas of Variable Star Light Curves

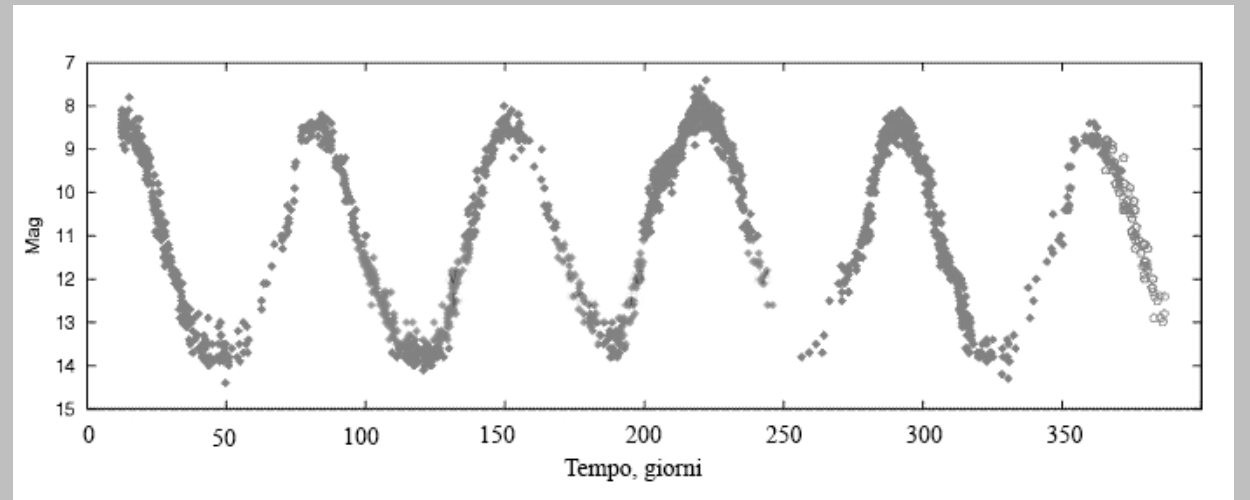
Variabili pulsanti – Semiregolari

- Sottotipi: SRA, SRB, SRC, SRD
- Periodo: $20 \div >2000$ giorni (periodicità notevole nelle variazioni luminose, accompagnata o talvolta interrotta da irregolarità varie).
- Ampiezza: $1 \div 2$ mag. nel visibile
- Tipo spettrale: G-K-M
- Stato evolutivo: giganti o supergiganti
- Pulsazione: radiale
- Curva di luce: gruppo eterogeneo, con curve piuttosto differenti e variabili.



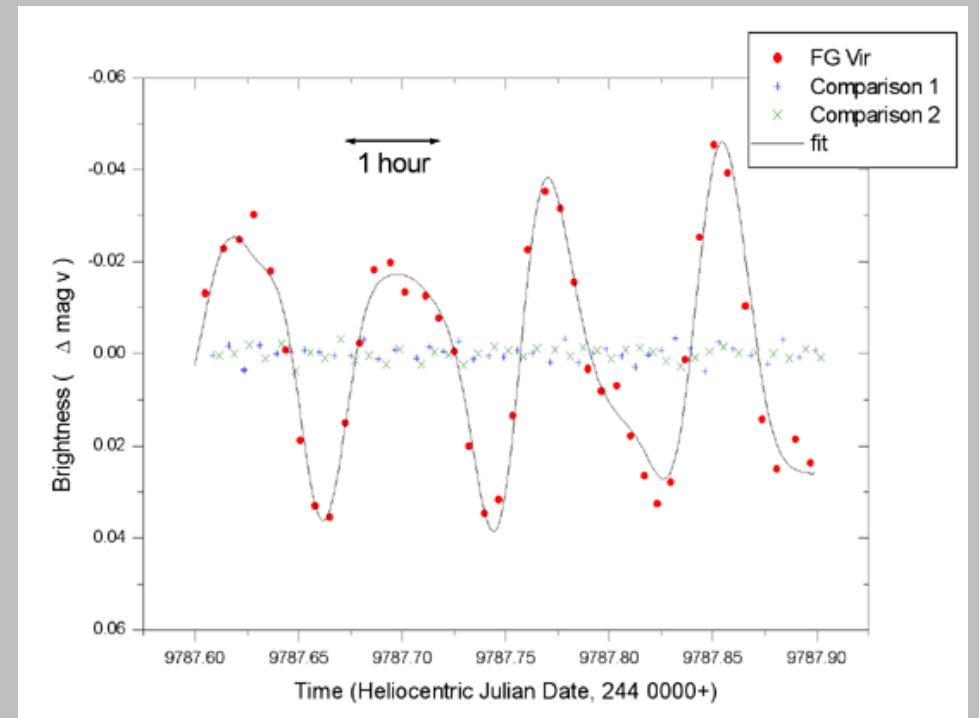
VARIABILI PULSANTI - Mira

- Sottotipi: -
- Periodo: $80 \div 1000$ giorni
- Ampiezza: $2.5 \div 11$ mag nel visibile
- Tipo Spettrale: M
- Temperatura: < 2500 K
- Riga spettrali: bande molecolari TiO
- Stato evolutivo: giganti
- Pulsazione: radiale



VARIABILI PULSANTI - δ Scuti

- Sottotipi: DSCT, DSCTC, HADS
- Periodo: 0.01 ÷ 0.2 giorni
- Ampiezza: 0.003 ÷ 0.9 mag. nel visibile
 - < 0.1 e appartenenti alla sequenza (DSCTC)
 - > 0.3 (HADS)
- Tipo spettrale: A0-F5
- Stato evolutivo: sequenza-giganti
- Pulsazione radiale più non radiale
 - modo fondamentale (HADS)
 - prima armonica
 - multimodo

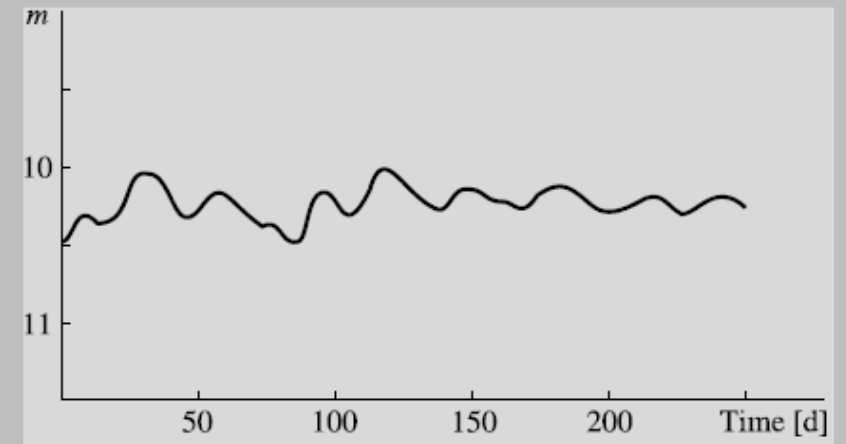
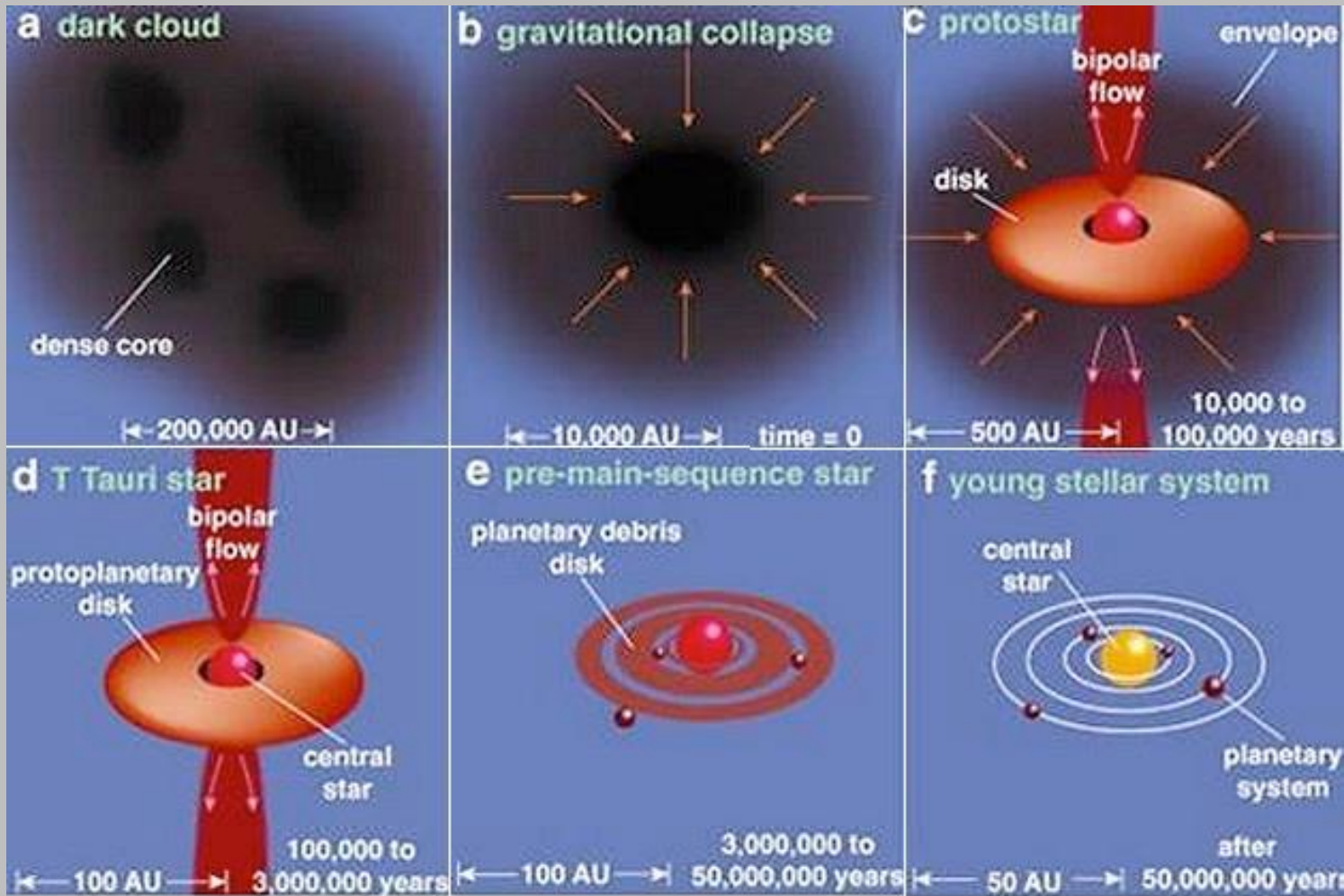


VARIABILI ERUTTIVE

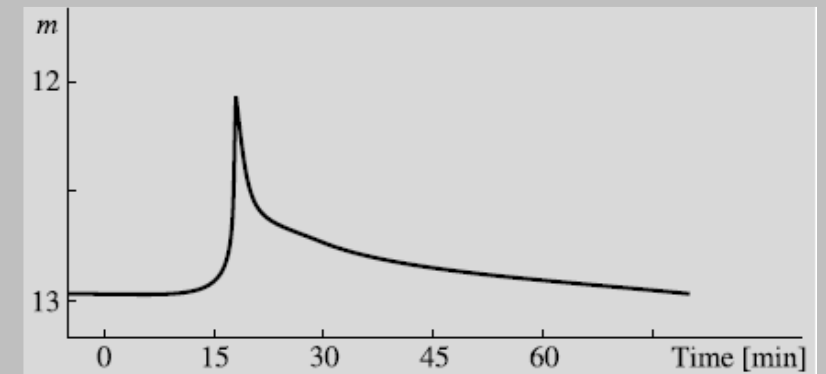
- Sono un gruppo di variabili eterogeneo per cui non esiste una singola causa alla base della variazione luminosa.
- La ragione della loro variabilità può essere unica, non collegata ad altre variabili eruttive e in molti casi ignota.
- In questo gruppo, sono collocate anche tutte le variabili Irregolari

Tipo	Caratteristiche e Causa della variazione
T Tauri	Stelle di pre-sequenza che mostrano fluttuazioni irregolari di luminosità.
UV Ceti	Nane rosse di pre-sequenza (KVe - MVe) che mostrano improvvisi brillamenti che durano pochi secondi. Il brillamento produce la stessa energia di un tipico brillamento solare ma sulla superficie di una stella di luminosità inferiore produce un aumento di luminosità sino a 4-5 magnitudini
Gamma Cas	Stelle O-B in rapida rotazione da cui fuoriesce materiale dalla zona equatoriale
S Doradus	Stelle rare e altamente luminose che mostrano variazioni su tempi scala che vanno da giorni a decenni.
R Corona Borealis	Supergiganti, povere di idrogeno e ricche di carbonio, la cui luminosità diminuisce, anche di 9 magnitudini, in modo imprevedibile e rapido. Possono rimanere al minimo per molte settimane, mesi o anni.

FORMAZIONE DELLE STELLE

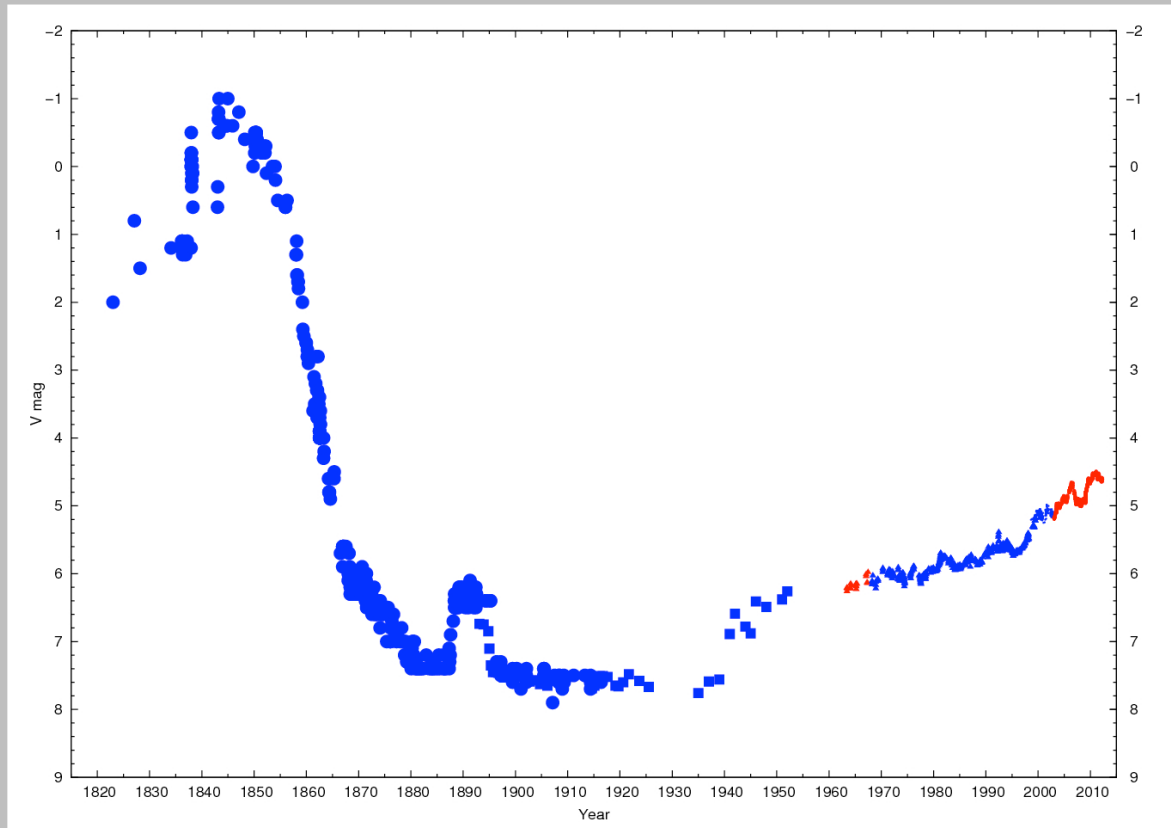


Tipica curva di luce di una variabile tipo T Tauri

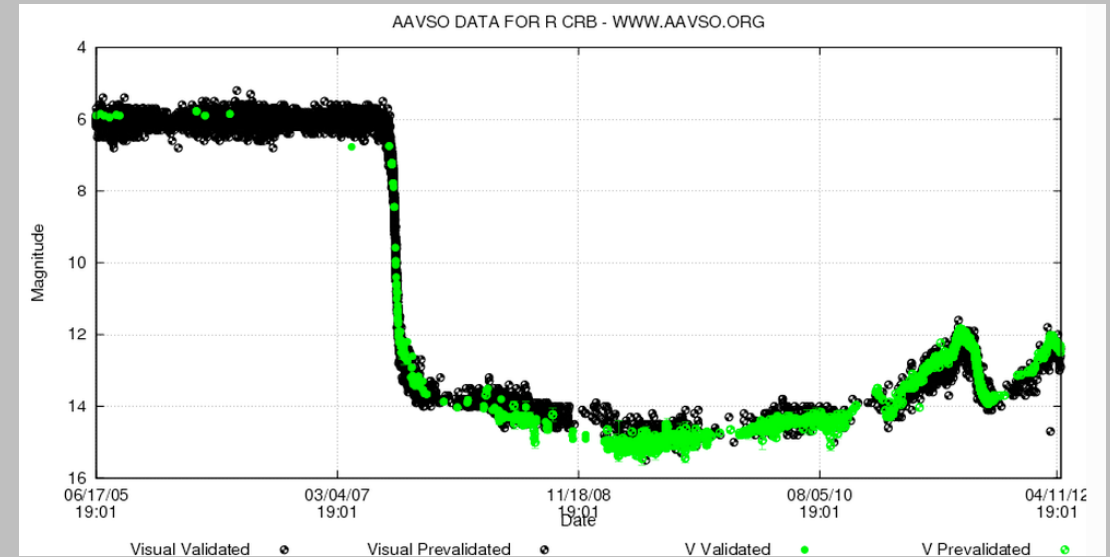


Tipica curva di luce di una variabile tipo UV Ceti

CURVE DI LUCE DI VARIABILI TIPO S DORAUDS E R CORONAE BOREALIS



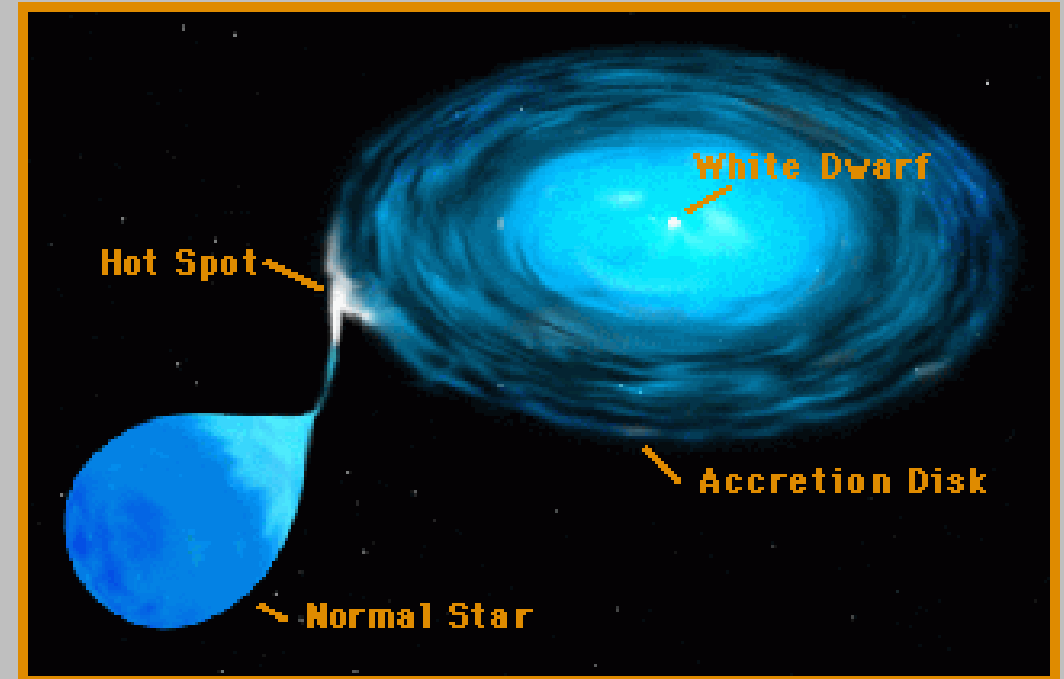
Curva di luce della variabile Eta Carinae (tipo S Doradus)
Immagine AAVSO: Fernández-Lajús et al. (2009, A&A, 493, 1093)



Curva di luce AAVSO della variabile R CrB

VARIABILI CATACLISMATICHE

- Sono **sistemi binari** semi-staccati, ma molto stretti, in cui in genere la componente primaria è una **nana bianca** e la **secondaria** è una stella **di sequenza principale**.
- I periodi orbitali sono molto brevi, per cui le componenti sono molte vicine.
- La forza gravitazionale della nana bianca modifica la forma della secondaria, **che trasferisce materiale alla nana bianca attraverso un disco di accrescimento**.



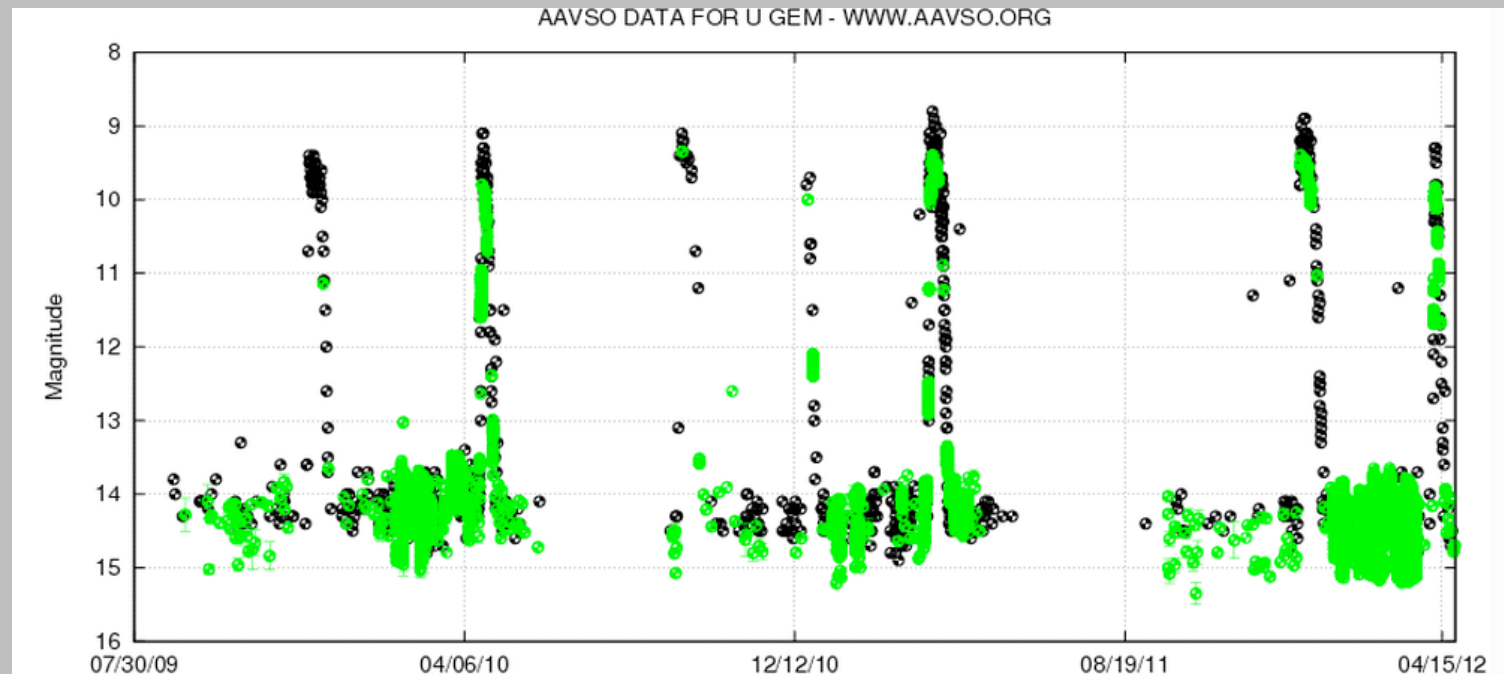
Temperatura nana bianca = $2 \cdot 10^5$ K (KPD 0005+5106)

Densità nana bianca = 10^9 kg · m⁻³

Campo magnetico: 1 ÷ 100 MGauss

VARIABILI CATACLISMATICHE - TIPO U GEMINORUM

Nel caso delle U Geminorum, quando il plasma del disco di accrescimento raggiunge una temperatura critica, modifica la sua viscosità e collassa sulla nana bianca, rilasciando una grande quantità di energia potenziale gravitazionale.

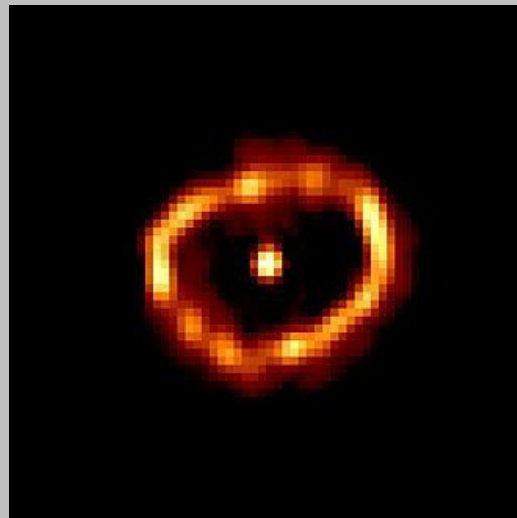


VARIABILI CATACLISMATICHE - NOVAE

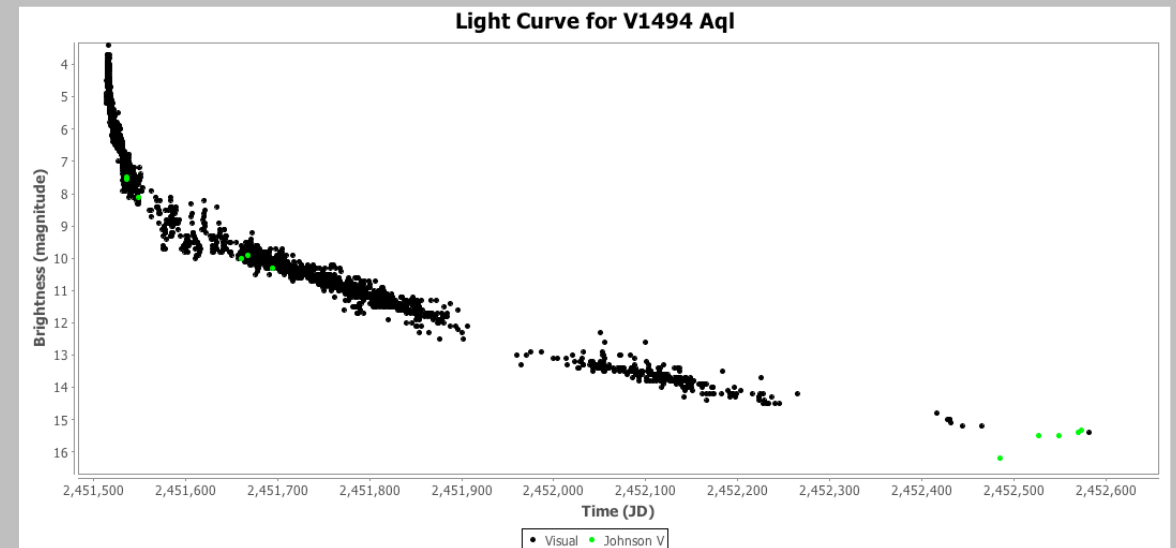
- Il materiale accumulato nel disco di accrescimento, riscaldato dalla nana bianca, aumenta temperatura e pressione a livelli tali da innescare reazioni di fusione nucleare ed esplodere.
- Il fenomeno può essere ricorrente, con una frequenza che è funzione della massa della nana bianca

Disco di accrescimento in espansione dopo l'esplosione

Tipica velocità di espansione: 3000 km/s

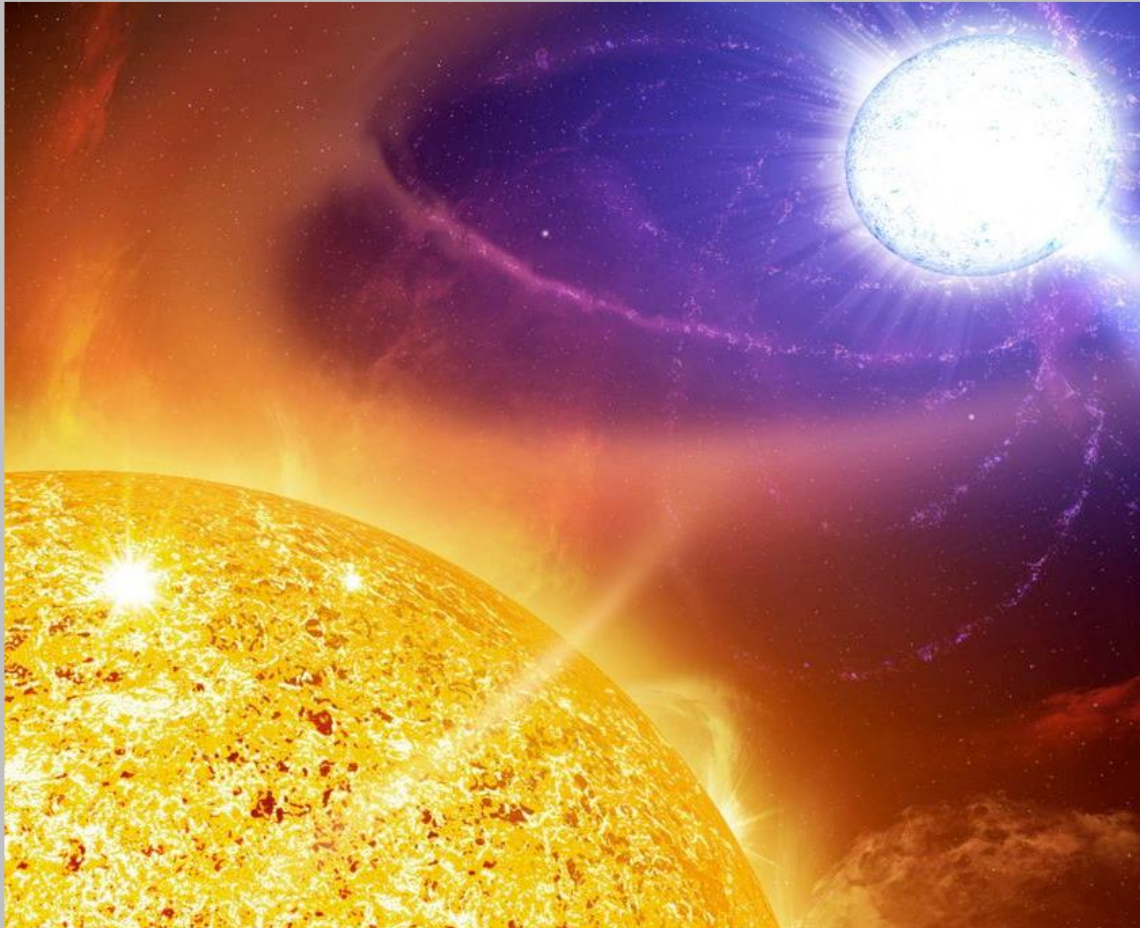


Nova Cygni 1992

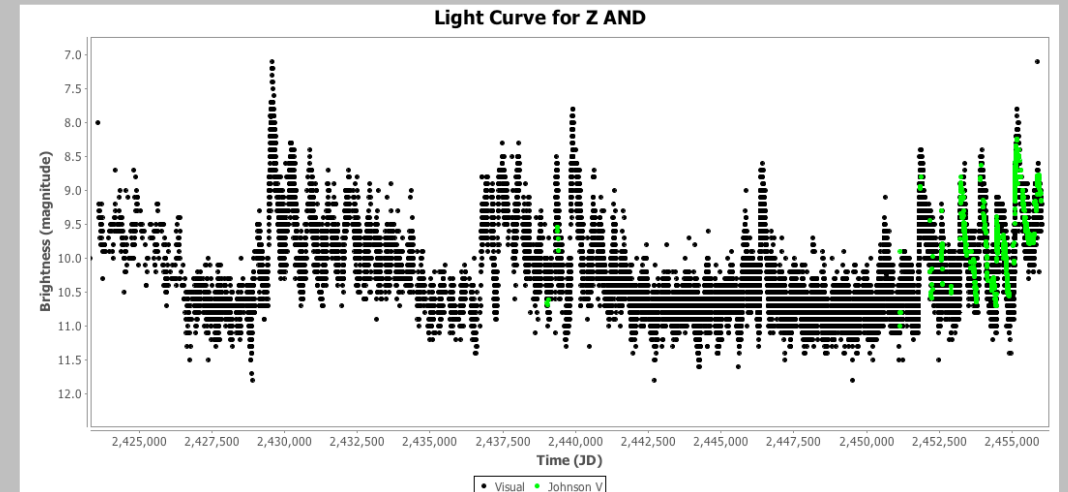


La luminosità aumenta di un fattore 10^5

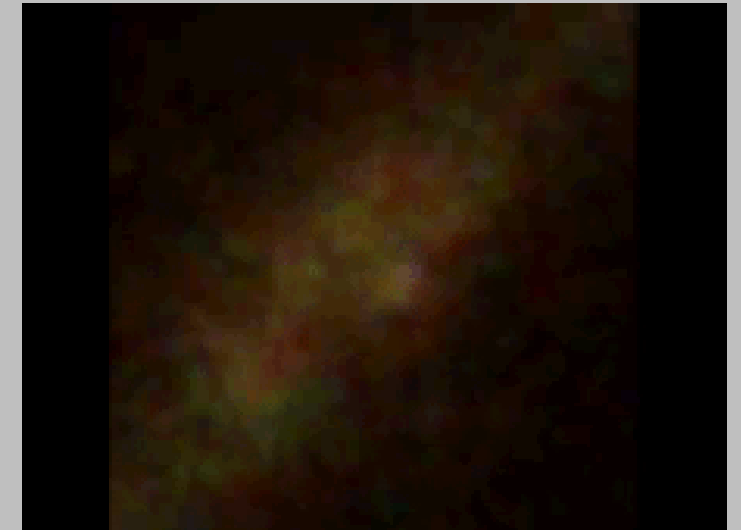
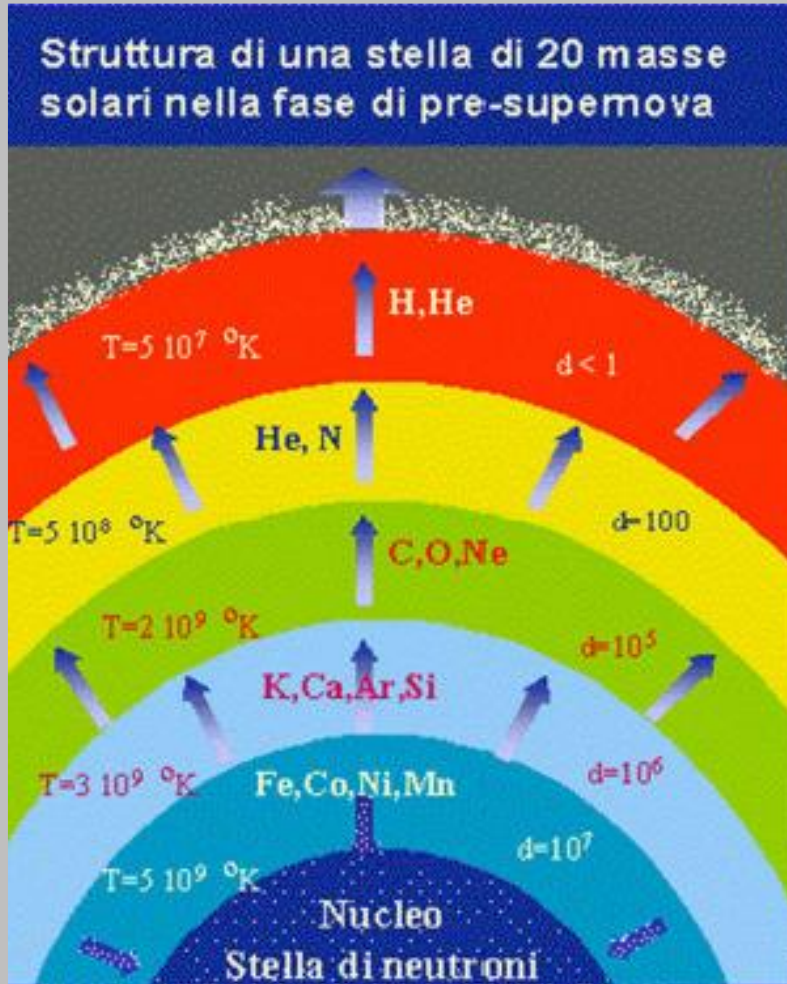
VARIABILI CATACLISMATICHE - SIMBIOTICHE



- La primaria può essere una stella di sequenza molto calda, una nana bianca o una stella di neutroni.
- La secondaria è una gigante.
- Tutto il sistema è circondato da un involucro gassoso



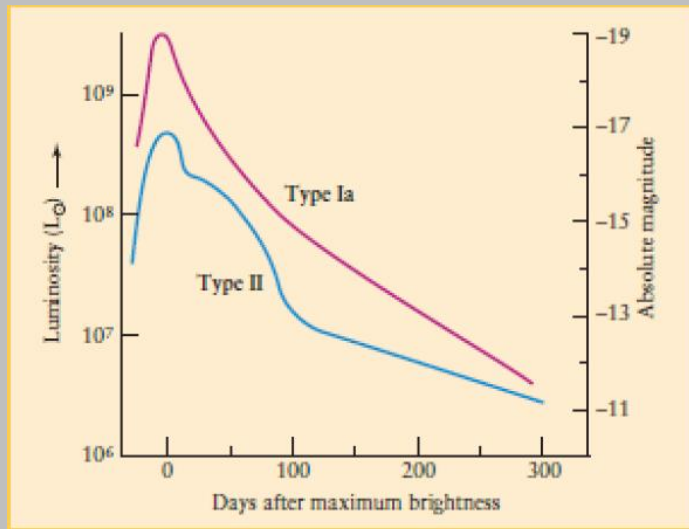
SUPERNOVAE



Animazione: pulsar della Vela in raggi γ al link:
https://en.wikipedia.org/wiki/Vela_Pulsar#/media/File:Cycle_of_pulsed_gamma_rays_from_the_Vela_pulsar_220px.gif

TIPI DI SUPERNOVAE

- Tipo I: supernovae che non mostrano linee di assorbimento dell'idrogeno nello spettro.
 - Tipo Ia: senza righe spettrali dell'elio, linee intense del silicio.
 - Tipo Ib: righe spettrali intense dell'elio
 - Tipo Ic: nessuna riga spettrale di elio o silicio
- Tipo II: supernovae che mostrano linee di assorbimento dell'idrogeno nello spettro.



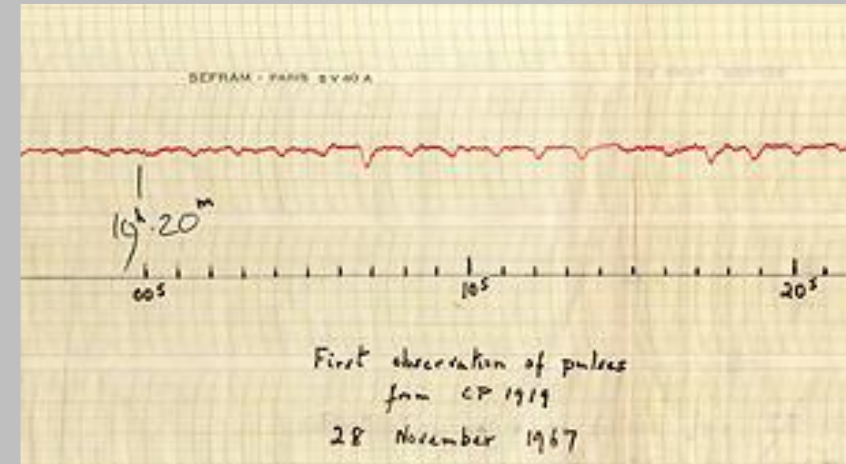
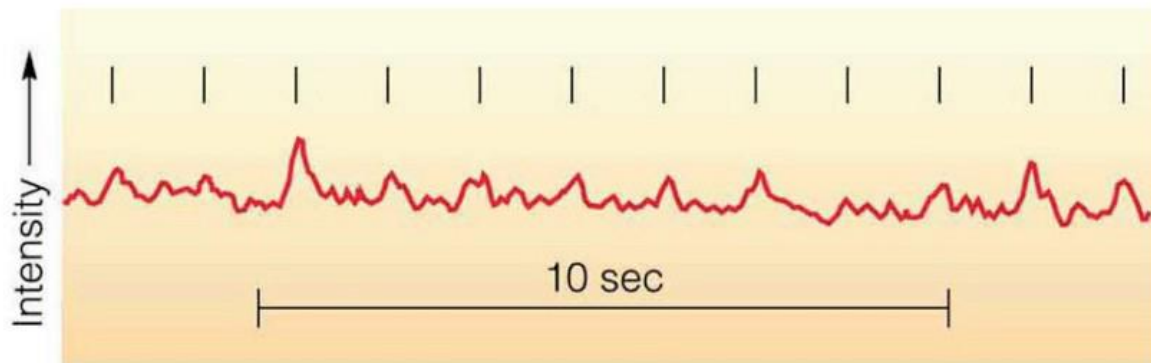
Tipo Ib, Ic, II: sono esplosioni dovute al collasso del nucleo di stelle singole (Ib, Ic con massa superiori a 20 masse solari).

Tipo Ia: sono sistemi binari stretti, in cui la componente principale è una nana bianca e la secondaria può essere una gigante o anch'essa una nana bianca. Se nel trasferimento di massa alla componente primaria viene superata la massa critica di 1.44 masse solari, si innesca la fusione esplosiva del Carbonio, che porta alla distruzione totale della stella. **L'energia rilasciata non è di origine gravitazionale (non c'è un collasso del nucleo) ma termonucleare.**

PULSAR

Discovery of pulsars:
Bell and Hewish, 1967

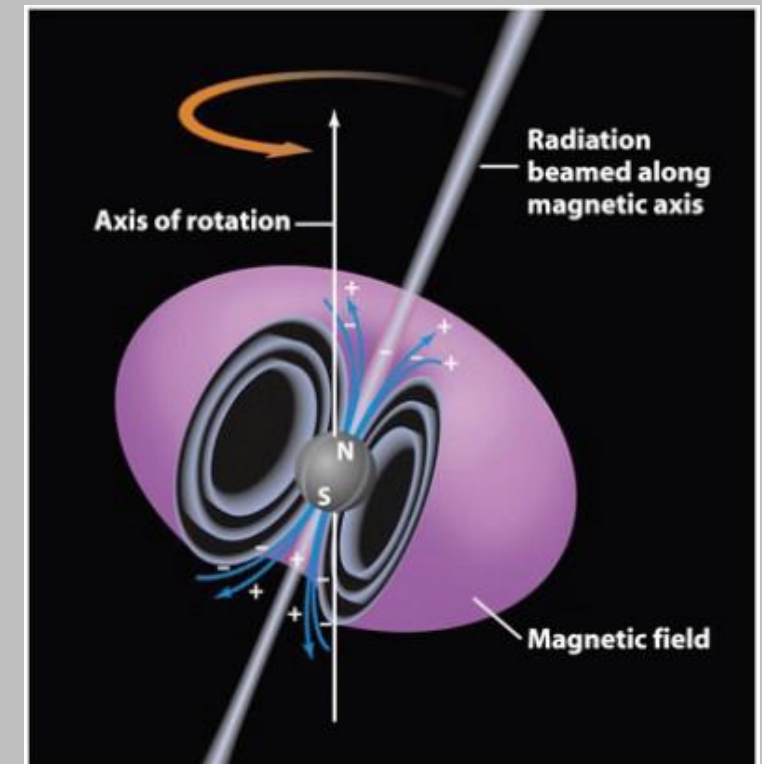
Jocelyn Bell



- Variabili pulsanti: no, periodo troppo breve.
- Binarie in occultazione: no, periodo troppo breve. dalla legge di Keplero si dovrebbe avere una distanza tra le stelle di 1000 km, troppo piccola.
- Nane bianche in rotazione con un «beam» di luce: no la rotazione è troppo veloce e la nana bianca si disintegrerebbe.

STELLE DI NEUTRONI

- Durante l'esplosione di una supernova i nuclei atomici si disgregano in neutroni.
- Il collasso è arrestato dalla pressione di degenerazione dei neutroni.
- Rimane un oggetto molto compatto, costituito essenzialmente da neutroni.
- Proprietà di una stella di neutroni:
 - Massa: $M = \sim 1.4 - 3$ (?) masse solari
 - Raggio: $R \sim 10$ km
 - Densità: $\rho \sim 10^{17} \div 10^{18} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
 - Gravità superficiale, $g \sim 10^{12} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \sim 10^{11} \text{ g}$
 - Velocità di fuga: $\sim 0.8 c$
 - Il momento angolare si conserva \rightarrow ruota rapidamente.
 - Il flusso magnetico ($\sim B \cdot R^2$) si conserva \rightarrow forte campo magnetico.
 - Il forte campo magnetico crea coppie di particelle (elettroni), che spiraleggiano lungo le linee di forza ed emettono radiazione EM (radio, visibile, X) lungo queste.
 - Se siamo lungo la linea di vista dell'emissione, vediamo la luminosità della stella di neutroni pulsare (in realtà le pulsars non pulsano affatto)



BIBLIOGRAFIA

- Le stelle variabili, Leonida Rosino, Tipografia Compositori Bologna
- Radial Stellar Pulsations - <https://www.astro.princeton.edu/~gk/A403/pulse.pdf>
- Atlas of Variable Star Light Curves - <http://ogle.astro.uw.edu.pl/atlas/>
- Variable Star Classification and Light Curves
<https://www.aavso.org/sites/default/files//Variable%20Star%20Classification%20and%20Light%20Curves%20Manual%202.1.pdf>
- General Catalogue of Variable Stars 5.1
<http://www.sai.msu.su/gcvs/gcvs/vartype.htm>