

UNA PARTICOLARE CATEGORIA DI STELLE

Le «variabili cataclismiche».

1 PREMESSA

Tra le tante stelle che popolano l'Universo, una grande parte sono «variabili», intendendo con questa parola stelle che variano di luminosità in periodi relativamente brevi.

Le stelle variabili vengono classificate secondo la causa della variabilità: alcune variano per motivi interni (variabili «intrinseche», come le stelle pulsanti), altre per motivi esterni (variabili «estrinseche», ad esempio le stelle binarie che, dal nostro punto di osservazione, si eclissano a vicenda).

Le stelle variabili sono molto importanti, in quanto la loro variabilità consente di acquisire informazioni sui meccanismi evolutivi che le caratterizzano e sui fenomeni fisici che avvengono al loro interno o nelle loro vicinanze.

Tra le stelle variabili più studiate si trovano quelle classificate come «variabili cataclismiche», ove il termine «cataclismiche» indica che, anziché essere soggette a trasformazioni periodiche progressive, sono soggette a variazioni improvvise della loro magnitudine, che possono avvenire in termini di ore o giorni.

Le note che seguono sono basate sull'eccellente libro «**Cataclysmic Variable Stars: how and why they vary**» di Coel Hellier, Springer-Praxis, 2001, cui si rimanda per ulteriori approfondimenti.

2 PER COMINCIARE: una variabile non cataclismica

2.1 Il sistema binario a eclisse NN Ser

In un senso che sarà meglio precisato più avanti, le variabili cataclismiche sono sistemi binari in cui materiale (sostanzialmente plasma di idrogeno) fluisce da una stella all'altra. Per meglio comprendere questi sistemi, è meglio considerare un sistema binario molto simile a quelli che danno luogo alle variabili cataclismiche, ma senza la complicazione del flusso di materia da una stella all'altra.

Il sistema scelto è la variabile NN Ser (ove «Ser» sta per la costellazione del Serpente, a cavallo della costellazione di Ofioco).

NN Ser è una stella binaria, costituita quindi da due stelle che ruotano attorno a un comune centro di gravità (o, se preferite, che ruotano una attorno all'altra).

Ciò che rende particolare questo sistema è il fatto che il suo periodo orbitale (se preferite, il tempo impiegato da una stella per ruotare attorno all'altra) è di sole 3 ore e 7 minuti (per confronto, Terra ruota attorno a Sole con un periodo di oltre 365 giorni!).

E' evidente che, con un periodo orbitale così ridotto, le due stelle devono essere molto vicine l'una all'altra e, in effetti, i calcoli basati sulle leggi di Keplero indicano che l'intero sistema delle due stelle starebbe dentro il nostro Sole!

Data la piccolezza del sistema e la sua lontananza (NN Ser si trova a circa 1700 anni-luce di distanza), non possiamo distinguere le due stelle, ma possiamo inferire le loro caratteristiche dalla «curva di luce» che riceviamo. In altre parole, se registriamo la luminosità proveniente dalla stella per un tempo sufficientemente lungo (maggiore di un periodo) otteniamo il seguente grafico:

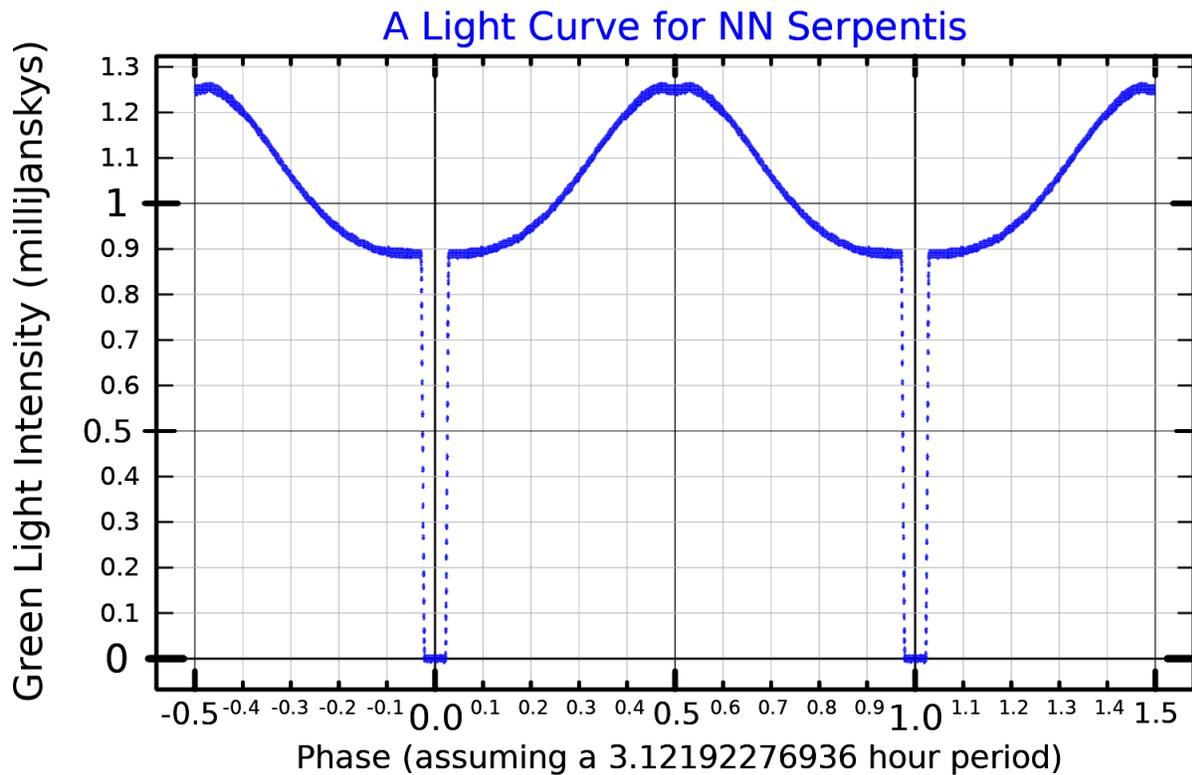


Figura 2.1: Curva di luce di NN Ser (due fasi).

La curva di luce mostra (nelle fasi 0.0 e 1.0) due decise e uguali diminuzioni dell'intensità del flusso luminoso, a distanza di 3 ore e 7 minuti l'una dall'altra. Questa diminuzione corrisponde all'eclisse della stella più luminosa, che passa dietro alla stella meno luminosa, per cui il flusso luminoso del sistema cade al livello zero (notate che come livello zero viene preso il flusso luminoso della stella «compagna», anche se, ovviamente il suo flusso, in valore assoluto, è diverso da zero). L'eclisse dura solo 80 secondi, poi la stella più brillante

esce dal limbo della compagna e aggiunge la sua luminosità. La curva fra i due minimi (i pozzi dovuti all'eclisse) ha un andamento crescente-decrescente dovuto al fatto che la stella più brillante, nel suo movimento, illumina (cioè riscalda) la stella compagna che quindi riflette parte della luce della stella più brillante. In cima alla curva, alla fase 0.5, la stella più brillante eclissa una piccola area della stella compagna, e questo causa una leggera diminuzione di intensità mostrata dalla minuscola concavità che si vede in quel punto.

Dai tempi e dall'intensità luminosa misurati sulla curva di luce possiamo ricavare molti parametri del sistema NN Ser.

Innanzitutto, la stella più brillante è molto piccola, con una massa di $M_1 = 0.53 M_\odot$ e un raggio di circa $R_1 = 14000 \text{ Km}$ (per comparazione, Terra ha un raggio di 6700 km circa) e ha una temperatura superficiale di $60\,000 \text{ K}$, il che la classifica come una **nana bianca** di massa intermedia.

Per quanto riguarda la compagna, invece, si tratta di una stella di raggio $R_2 = 0.15 R_\odot$ e massa $M_2 = 0.12 M_\odot$, con temperatura superficiale di 2900 K (per confronto, Sole ha una temperatura superficiale di circa 5800 K), il che la definisce come una **nana rossa**. Come già accennato, la nana bianca che le gira intorno la illumina e riscalda fino a creare una «macchia» di temperatura che può raggiungere i $7\,500 \text{ K}$ nel punto più caldo (cioè quello direttamente opposto alla nana bianca. Questo surriscaldamento, chiamato «**effetto di riflessione**¹», è quello che causa la modulazione della curva di luce fra le due eclissi.

Come avrete notato, per le grandezze relative alle due stelle il pedice 1 viene riservato alla stella di massa maggiore, la nana bianca, chiamata anche la *stella primaria*, mentre il pedice 2 è riservato alla stella di massa minore, la nana rossa, chiamata anche *stella secondaria*.

2.2 La geometria di Roche

Supponiamo di avere un sistema binario, come quello della NN Ser. Se prendiamo una particella di massa trascurabile rispetto a quella delle due stelle, e la poniamo in un punto dello spazio, la particella subirà un'attrazione gravitazionale che è la somma vettoriale dell'attrazione delle due masse stellari. Questa attrazione varia a secondo del punto nello spazio ove la particella si trova e, con un'adeguata analisi matematica del sistema, è possibile tracciare nello spazio delle *superfici* in cui l'attrazione di gravità abbia la stessa *grandezza*, anche se non la stessa direzione. Ad esempio, se la particella viene posta sufficientemente vicina a una delle due stelle da poter considerare ininfluenza l'attrazione dell'altra stella, le superfici nei cui punti il valore dell'attrazione gravitazionale sulla particella è lo stesso sono, ovviamente, delle sfere concentriche, ogni sfera essendo caratterizzato da un valore diverso dell'attrazione gravitazionale. Queste sfere virtuali prendono il nome di superfici equipotenziali².

¹Una denominazione un po' bizzarra, dato che la nana rossa non riflette per niente, ma semplicemente si riscalda ed emette l'energia luminosa appropriata alla sua temperatura superficiale.

²Il nome deriva dal fatto che le superfici hanno la stessa energia potenziale gravitazionale per massa unitaria. In pratica, significa che se poniamo una massa in un punto qualunque della superficie equipotenziale...

Un'analisi completa della geometria di un sistema anche solo binario è sufficientemente complicata da richiedere un modello computerizzato piuttosto complesso, ma facendo alcune ipotesi semplificative (ad esempio che le orbite siano circolari e che la massa di ciascuna stella sia concentrata al suo centro) è possibile ottenere una buona approssimazione analitica³.

Questo lavoro fu svolto da Edouard Roche nel XIX secolo, per cui la geometria di questi sistemi si chiama «Geometria di Roche». In pratica, per due masse M_1 ed M_2 , la geometria di Roche è mostrata nella figura seguente, che rappresenta una sezione della geometria tridimensionale. In pratica, dovete immaginare che la figura ruoti attorno all'asse che congiunge i centri delle due masse.

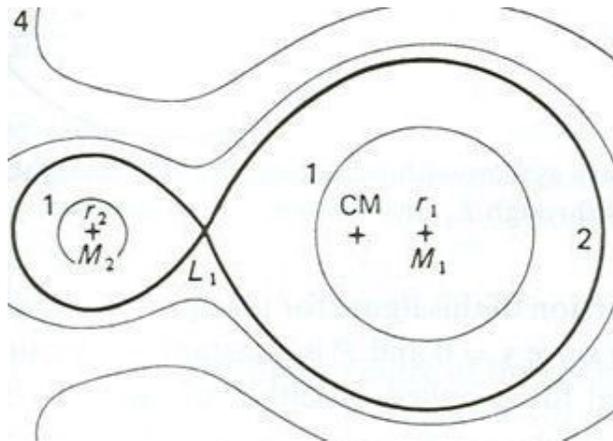


Figura 2.2: I lobi di Roche per due masse in orbita attorno al comune centro di massa CM.

Nella figura vediamo due stelle di massa e raggio rispettivamente m_1, r_1 e m_2, r_2 , la cui massa viene supposta concentrata nel loro centro (indicato da una croce); il centro di massa del sistema è indicato dalla croce marcata CM. I due cerchi grigi rappresentano due superfici, una per ciascuna stella, sui cui punti l'energia potenziale è la stessa. Poiché queste superfici sono molto vicine ai centri delle due stelle, in cui si può supporre concentrata la massa che causa la forza di gravità, la superficie equipotenziale è composta da due superfici sferiche di raggio diverso, in quanto le superfici sono sufficientemente vicine alle stelle da non essere sensibilmente influenzate dall'attrazione della stella più distante. Una massa posta su un punto qualunque dell'una o dell'altra sfera (che costituiscono un'unica superficie equipotenziale) subisce una stessa forza di attrazione gravitazionale, ma diretta verso la stella più vicina.

Di particolare interesse è la superficie contrassegnata con una linea più spessa. Questa superficie viene chiamata «**Lobo di Roche**» ed è caratterizzata dal fatto che le superfici che circondano ciascuna stella si toccano in un punto, chiamato «**Punto di Lagrange**

tenziale, la massa subirà una forza di attrazione sempre uguale in valore, ma con direzione perpendicolare alla superficie nel punto in cui è posizionata.

³In pratica, il potenziale in ogni punto è la somma del potenziale dovuto alla massa M_1 più quello dovuto alla massa M_2 più un termine dovuto alla forza centrifuga dovuta alla rotazione. Per definizione, questi potenziali sono tutti negativi, quindi l'energia potenziale totale è negativa.

L_1 ». In questo punto l'attrazione gravitazionale delle due stelle si equilibra e una piccola massa che vi si trovi rimarrebbe ferma nello spazio, essendo attratta in maniera uguale ed opposta. Naturalmente, una qualunque perturbazione che sposti la massa, anche di poco, da una parte o dall'altra avrebbe come risultato che la massa cadrebbe verso la stella verso cui si è spostata.

Una visione più ampia della geometria di Roche per due masse è mostrata nella figura successiva, in cui si vedono gli altri quattro «Punti di Lagrange», numerati da L_2 a L_5 , che condividono con il punto L_1 la caratteristica che in quei punti le forze gravitazionali agenti sulla massa si equilibrano e quindi, a tutti gli effetti, la massa si librerebbe in equilibrio⁴. Notate la maggior complessità delle superfici equipotenziali a una certa distanza dalle stelle.

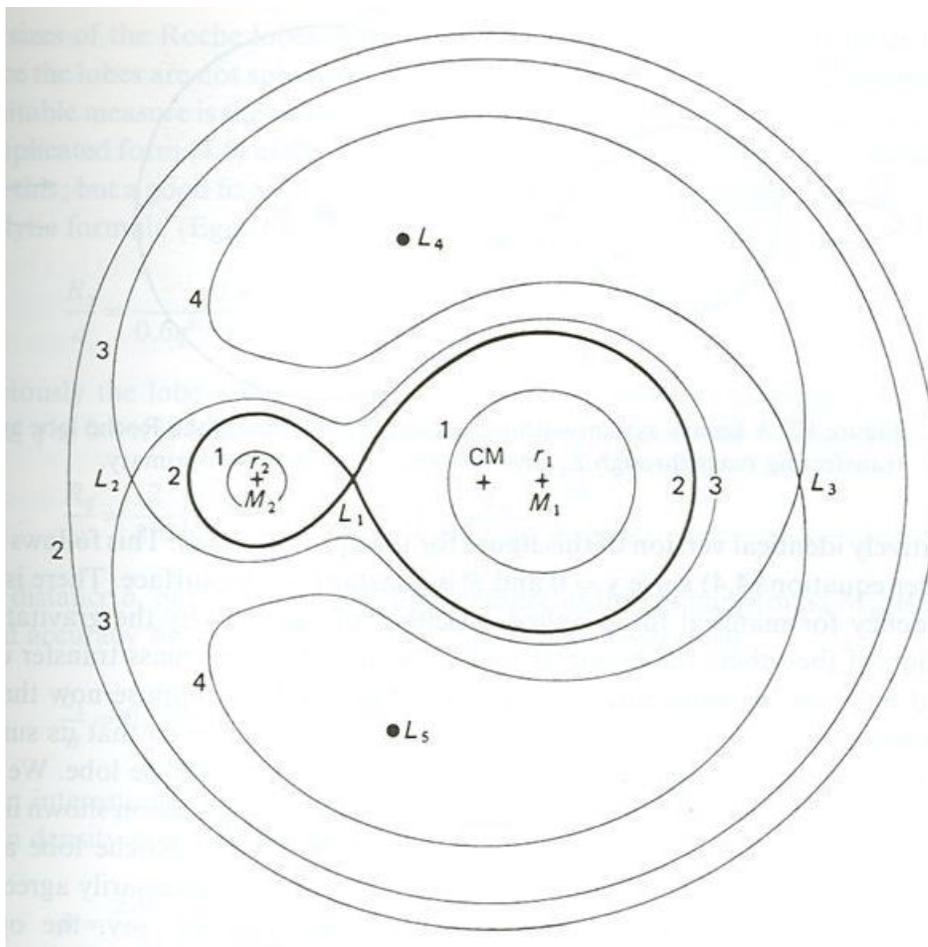


Figura 2.3: Una rappresentazione più estesa della geometria di Roche per due masse stellari in orbita attorno a un comune centro di massa MC. I numeri identificano le superfici equipotenziali e i punti di Lagrange sono indicati dalla lettera L con il pedice corrispondente.

⁴I punti di Lagrange sono sempre numerati nella stessa maniera. Il punto L_1 è quello tra le due masse, ove le superfici si incontrano, il punto L_2 è quello esterno, dalla parte della massa minore, il punto L_3 è quello esterno dalla parte della massa maggiore, mentre i punti L_4 ed L_5 hanno le posizioni indicate.

Poiché le stelle non sono dei punti, ma piuttosto delle sfere, in generale piuttosto grandi, saranno normalmente contenute all'interno del lobo di Roche; il sistema binario in questo caso si dice «**staccato**» (detached).

Se le due stelle si avvicinano, tuttavia, il lobo di Roche rimpicciolisce⁵ e a una certa distanza la sfera che costituisce la stella di maggior volume (attenzione: non è necessariamente quella di maggiore massa!) riempirà la sua intera porzione del lobo di Roche: il sistema in questo caso prende il nome di «**semi-staccato**» (semi-detached) e si trova in una situazione instabile: se il materiale che si trova sulla cuspidale (punto di Lagrange L_1) subisce una piccola perturbazione, oltrepasserà il punto di equilibrio stella e penetrerà nel semilobo lobo di Roche di una delle due stelle, venendo attirato verso di essa. A meno che la stella donatrice non subisca una contrazione, rientrando entro il suo semilobolobo, il flusso di materia da una stella all'altra sarà continuo.

Infine, avvicinandosi ulteriormente, ambedue le stelle riempiranno i loro semilobi, arrivando a toccarsi e addirittura a condividere gli strati esterni formando un involucro comune, e il sistema binario si dice «**a contatto**» (contact).

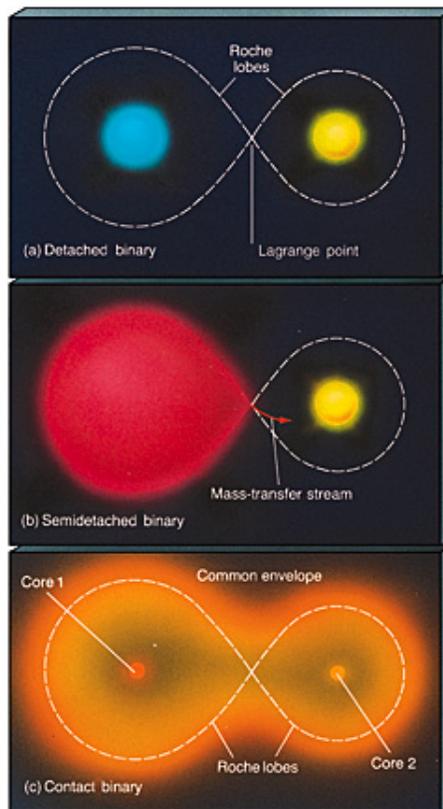


Figura 2.4: Diversi tipi di sistemi binari in relazione alla vicinanza delle loro stelle.

Notate che, in generale, quando un sistema binario è semi-staccato, e certamente quando è a contatto, le forze di marea tra le due stelle le hanno forzate a rivolgersi sempre la

⁵La *forma* del lobo di Roche è determinata solamente dal rapporto tra le masse delle due stelle $q = M_2/M_1 \leq 1$, ma la *grandezza* delle due parti dipende dalla distanza orbitale.

stessa faccia, quindi il sistema si comporta come una nocciolina americana che gira su se stessa...

2.3 Il trasferimento di massa e il disco di accrescimento

La NN Ser è un sistema binario staccato, ma la compagna (la nana rossa) è a malapena contenuta nella sua parte del lobo di Roche. Una piccola diminuzione della distanza orbitale la porterà a riempire il semilobolo: a quel punto, si creerà un piccolo pertugio nel punto lagrangiano (di dimensione circa un millesimo della superficie della nana rossa) da cui emergerà, spinto dalla pressione interna della stella, un sottile flusso di materia stellare (praticamente idrogeno) che sarà attirato sulla nana bianca a una velocità di circa 10 km/s (corrispondente alla velocità del suono nel plasma della corona).

Il punto L_1 ruota attorno alla stella a una velocità di circa 100 km/h , quindi imprime al flusso un movimento rotatorio che fa sì che il flusso non si diriga direttamente sulla nana bianca, ma piuttosto si inserisca in un'orbita circolare⁶ attorno ad essa. Poiché il momento angolare del flusso è quello impartito dalla rotazione del punto L_1 e il momento angolare si conserva, il materiale trasferito circolerà attorno alla nana bianca a un raggio ben definito dalle leggi di Keplero (detto appunto «raggio di circolarizzazione»).

Ma l'anello di materiale orbitante ha una certa larghezza, per cui i grumi di materiale più interni (rispetto alla nana bianca assunta come centro) si muoveranno più velocemente di quelli più esterni, causando frizioni e turbolenze⁷ che riscaldano il materiale con conseguente irradiazione (e quindi perdita) di energia. Questa perdita di energia causa il movimento di una parte del materiale verso orbite più interne⁸. Ma la riduzione del raggio di movimento riduce il momento angolare totale⁹ che, per conservarsi, necessita che altro materiale si muova su orbite più esterne.

Pertanto, il materiale trasferito dalla stella compagna si disporrà in un anello centrato sulla nana bianca, che continuerà a dilatarsi finché all'interno non raggiungerà (quasi) la nana bianca stessa.

Nella parte esterna, il materiale si estenderà invece verso la compagna finché il momento angolare in eccesso sarà restituito alla compagna stessa, e in quel momento l'anello esterno raggiungerà una situazione di equilibrio e cesserà di espandersi.

Il materiale stellare peraltro continua a trasferirsi dalla secondaria e quindi a fluire sull'anello, nel quale si muove verso l'interno accumulandosi tendenzialmente sulla nana bianca (ovvero «*accrescendola*»).

Questo anello prende il nome di «**disco di accrescimento**».

⁶Il flusso, girando attorno alla nana bianca, si scontra con se stesso formando un flusso turbolento che dissipa energia, per cui il materiale si assesterà nell'orbita con la minima energia, che è appunto l'orbita circolare.

⁷Il materiale, in un senso che sarà meglio precisato più avanti, è soggetto a viscosità

⁸Potete pensare a un'analogia con i satelliti artificiali che, perdendo energia a causa della frizione con l'atmosfera, scendono su orbite più basse.

⁹Non compensata dalla maggiore velocità acquisita nell'orbita più interna.

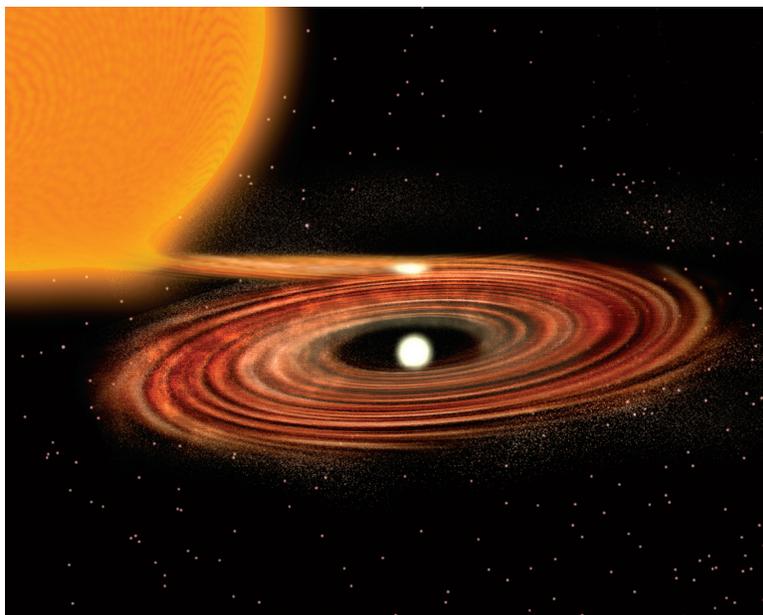


Figura 2.5: Il disco di accrescimento

L'interesse delle variabili cataclismiche è in gran parte legato al comportamento del disco di accrescimento. I dischi di accrescimento sono un po' dappertutto nell'Astrofisica, da quelli che circondano le stelle in formazione, ai dischi protoplanetari in cui si formano i pianeti, a quelli che alimentano i quasar... Ma per la maggior parte, questi dischi di accrescimento sono molto lontani e pochi sono osservabili, mentre le variabili cataclismiche sono in buon numero e generalmente facilmente osservabili, per cui costituiscono dei comodi laboratori per studiare i fenomeni associati ai dischi.

2.4 Il «punto caldo» («brightspot» o «hotspot»)

Il sottile pennello di materiale proveniente dalla secondaria incontra il disco in qualche punto; qui il materiale che si muove verso la nana bianca urta il materiale del disco in rapida rotazione e, come in tutti gli urti, il risultato è piuttosto turbolento. Ciò che succede nell'urto è poco compreso. Le simulazioni al computer sembrano suggerire che il materiale in arrivo buchi il disco e venga solo lentamente assimilato; inoltre, il flusso sembra essere più ampio dello spessore del disco, per cui parte del materiale accresciuto si spalma sulla superficie. Sia come sia, nell'urto l'energia cinetica viene convertita in calore, che viene irradiato producendo in alcune cataclismiche fino al 30% della luce emessa dal sistema.

Separare la luce proveniente dalle varie parti del sistema (nana bianca primaria, nana rossa secondaria, disco di accrescimento, punto caldo) è relativamente facile se le due stelle sono poste, rispetto al nostro punto di osservazione, in modo che si eclissino, ovvero l'una passi davanti e dietro l'altra.

La curva di luce di una variabile cataclismica con queste caratteristiche, riportata a un periodo¹⁰, è mostrata nella figura seguente:

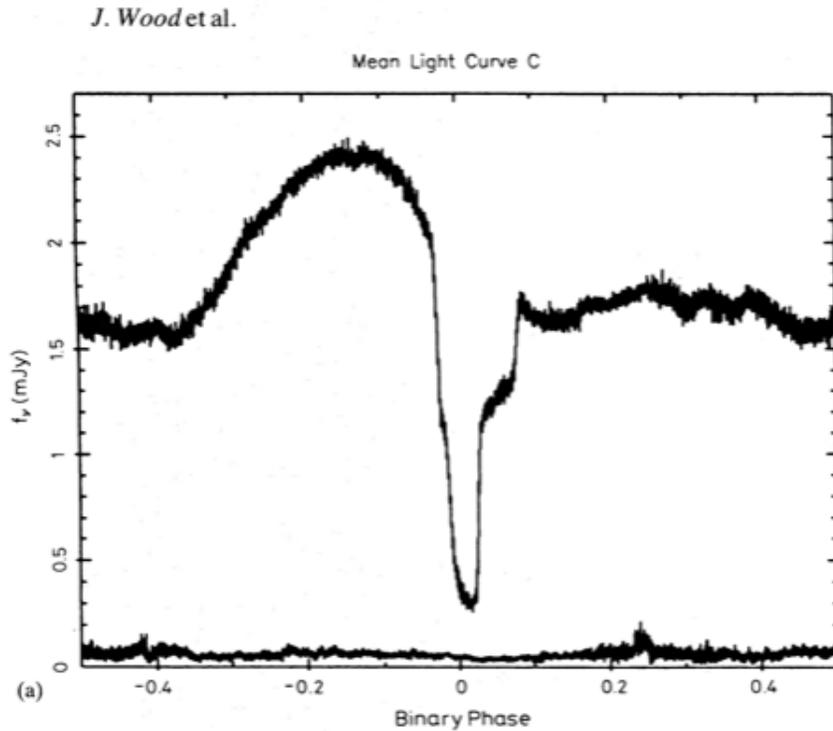


Figura 2.6: Flusso luminoso relativo a un periodo di rotazione di Z Cha.

Con adatte tecniche matematiche è possibile scomporre la curva di luce nelle sue componenti (vedasi figura successiva), cioè:

1. la luce proveniente dalla primaria, la nana bianca, che è costante salvo nel punto in cui essa è oscurata dalla secondaria che le passa davanti (linea blu); la scomparsa della luce proveniente dalla nana bianca è quasi repentina, data le sue piccole dimensioni, quindi appare come un pozzo quasi verticale, salvo una piccola inclinazione delle «pareti», dato che comunque la nana bianca non è puntiforme e scompare progressivamente (anche se velocemente) dietro la nana rossa;

¹⁰La figura mostra la curva di luce della variabile cataclismica a eclisse Z Cha. Queste figure sono ottenute sovrapponendo le osservazioni in modo che mostrino l'andamento del flusso luminoso durante un periodo (spesso la curva viene raddoppiata in modo da mostrare due periodi, per maggiore chiarezza, come nella Figura 2.1). Sull'asse delle ascisse è mostrata la «fase», ovvero il periodo viene considerato di lunghezza unitaria, con il punto di minimo (cioè quando la stella primaria è esattamente dietro al centro della secondaria) normalmente posto nel punto 0 (o nei punti 0 e 1 se si mostrano due periodi). Nella figura, si è scelto di porre l'eclisse al centro del grafico, per cui la fase va da -0.5 a $+0.5$. Se si fosse scelto di mostrare la fase da 0 a 1, la metà sinistra della figura sarebbe stata trasportata nella parte destra e il pozzo dell'eclisse sarebbe risultato diviso in due parti. Chiaramente, il grafico da -0.5 a $+0.5$ è più chiaro.

3 L'EVOLUZIONE DELLE VARIABILI CATACLISMICHE

3.1 Il progenitore e il percorso per diventare una variabile cataclismica

Il progenitore di una variabile cataclismica è un sistema binario in cui una stella ha una massa inferiore a una massa solare mentre l'altra ha una massa compresa fra 2 e 8 masse solari, e le due stelle sono tipicamente separate da alcune centinaia di raggi solari (quindi qualche centinaia di milioni di km) e orbitano una attorno all'altra con un periodo di circa 10 anni.

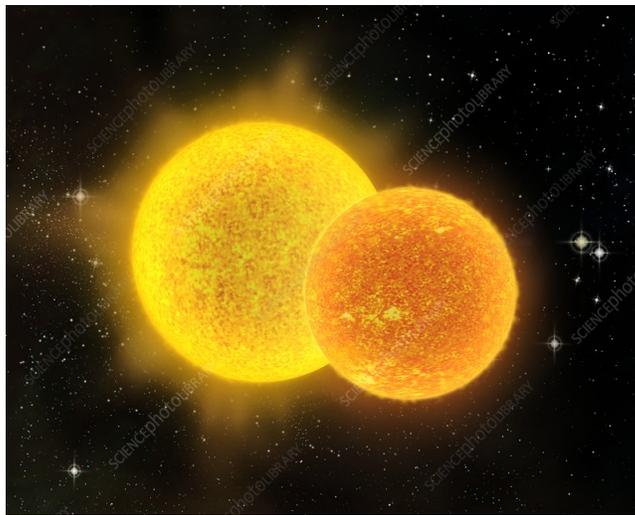


Figura 3.1: Disegno di un sistema progenitore di una variabile cataclismica

La stella più massiccia evolve rapidamente e si espande diventando una gigante rossa e, in questa fase, riempie il suo lobo di Roche e pertanto trasferisce una parte dei suoi strati esterni alla compagna di massa minore. Questa situazione (trasferimento di massa da una stella più massiccia a una stella meno massiccia) è instabile, in quanto il materiale trasferito, allontanandosi dal centro di massa, tende ad aumentare il momento angolare del sistema che, pertanto, risponde accorciando la separazione fra le due stelle. Ma l'avvicinamento delle due stelle diminuisce le dimensioni dei lobi di Roche, la stella più massiccia tende a strabordare il suo lobo e quindi aumenta il trasferimento di materia sulla compagna.

Il risultato è un «effetto valanga» in cui la stella di massa maggiore scarica sulla compagna il suo involucro alla massima velocità con cui il materiale può fluire. Il trasferimento di tutto il materiale possibile può durare anche solo pochi anni, che in termini astronomici sono un nonnulla.

Ma la stella di massa minore non riesce ad assimilare tutto questo materiale, per cui le due stelle non solo riempiono i loro lobi, ma addirittura strabordano, formando un sistema

«a contatto» in cui hanno un involucro comune (come una nocciolina americana): a tutti gli effetti, è come se le due stelle orbitassero una nell'atmosfera dell'altra.

L'effetto è lo stesso di quello che subisce un satellite che si muova nell'atmosfera: l'attrito deprime le stelle della loro energia cinetica, costringendole ad avvicinarsi: In circa 1000 anni, la loro distanza si riduce da qualche centinaio di raggi solari a circa un raggio solare (circa 700000 km).

Dal punto di vista dell'atmosfera comune, le due stelle agiscono come le pale di un ventilatore, spingendola lontano a formare una «nebulosa planetaria» e lasciando a nudo ciò che resta delle due stelle¹¹ che, a questo punto, costituiscono o una variabile cataclismica o, se la separazione è troppo grande perchè continui il trasferimento di massa, un sistema staccato nana rossa - nana bianca.

Nel caso che la separazione sia sufficientemente piccola, è ora la stella di massa minore a riempire il suo lobo (l'altra, essendosi trasformata in una nana bianca, non solo è troppo piccola, ma non dispone praticamente di un involucro di gas che possa espandersi).

3.2 Il meccanismo del trasferimento di massa dalla nana rossa alla nana bianca

Abbiamo visto che il meccanismo che ha depredato la stella più massiccia del suo involucro è stato sostanzialmente un «effetto valanga» innescato dal rigonfiamento della stella quando è diventata una gigante rossa. In base a questo meccanismo, il trasferimento dalla stella più massiva a quella meno massiva è stabile¹².

Al contrario, il trasferimento di materia da una stella di massa inferiore a una stella di massa maggiore (come dalla nana rossa alla nana bianca) di per sé *non* è stabile¹³!

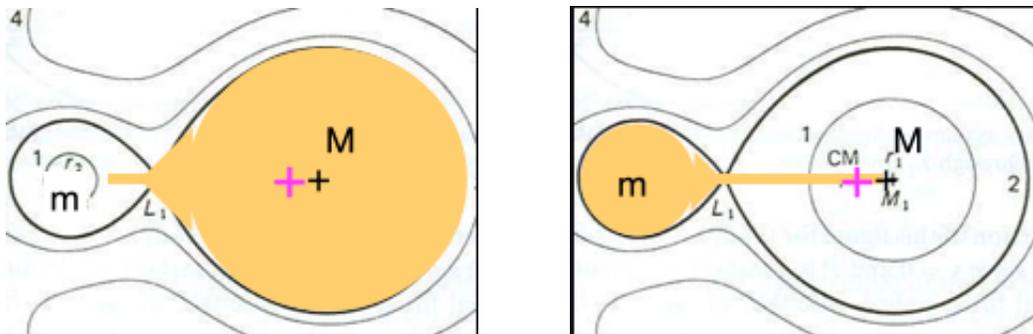


Figura 3.2: Il meccanismo di trasferimento di materia da una stella di massa maggiore a una di massa minore (a sinistra) e viceversa (a destra).

Infatti, nel trasferimento da una stella meno massiva a una stella più massiva, il materiale trasferito dalla stella meno massiva si avvicina al centro di massa e pertanto il sistema

¹¹Ove, nel frattempo, la più massiccia ha raggiunto lo stadio di nana bianca.

¹²Nel senso che, una volta innescato, si autosostiene.

¹³Nel senso che, una volta iniziato, tende ad interrompersi.

tenderebbe a perdere momento angolare e, per compensare e mantenere il momento invariato, la distanza fra le due stelle dovrebbe aumentare, con il risultato che il lobo di Roche aumenterebbe di volume e la stella non lo riempirebbe più; quindi il trasferimento si interromperebbe e le variabili cataclismiche, di conseguenza, non dovrebbero esistere.

Tuttavia esistono, quindi ci dev'essere un meccanismo che mantiene la stella donatrice a contatto col suo lobo di Roche!

Una possibilità è che la stella donatrice sia in evoluzione in una gigante rossa, quindi il suo rigonfiamento progressivo la mantenga a contatto col lobo. Tuttavia, questo richiede che la stella donatrice abbia almeno una massa solare, mentre nella maggior parte delle variabili cataclismiche la secondaria ha una massa inferiore, quindi si tratta di stelle la cui evoluzione è talmente lenta che *non* possono ancora essersi evolute in giganti rosse.

L'unica possibilità che rimane è che la stella, in qualche modo, perda momento angolare. In questo caso, la perdita di momento angolare contrasterebbe l'aumento della distanza tra le due stelle e si verrebbe a creare una situazione di equilibrio dinamico in cui il trasferimento di massa procederebbe indisturbato.

Al momento si ritiene che vi siano due meccanismi che possono condurre a una perdita di momento angolare: la *radiazione gravitazionale* e la *frenatura magnetica*.

In accordo con la Teoria della Relatività Generale, due masse sufficientemente grandi che ruotano attorno a un centro di gravità perdono energia emettendo *onde gravitazionali*, cioè creando delle ondulazione nello spazio-tempo che sottraggono al sistema energia gravitazionale e, quindi, producono un progressivo avvicinamento delle due masse.

Normalmente, la perdita per radiazione gravitazionale è trascurabile per la maggior parte dei sistemi binari, ma diventa significativa se le due masse si trovano a una distanza sufficientemente ridotta e quindi si muovono con una velocità sufficientemente alta, cioè hanno un corto periodo orbitale. Ad esempio, per una binaria cataclismica con periodo di due ore, la perdita di momento angolare dovuta alla radiazione gravitazionale consentirebbe di mantenere un trasferimento¹⁴ di massa costante $\dot{M} \sim 10^{-10} M_{\odot} yr^{-1}$ (ove usiamo l'abbreviazione inglese *yr* per indicare un anno).

La seconda possibilità, la *frenatura magnetica*, è il risultato di una stella che perde vento stellare in un forte campo magnetico: a causa delle *forze di marea*, la stella donatrice ruota su se stessa con lo stesso periodo del sistema (poche ore): la forte velocità di rotazione produce intensi campi magnetici che si estendono molto in là nello spazio.

Le particelle cariche del vento stellare che seguono le linee di forza più distanti subiscono una forte accelerazione centrifuga che le scaglia lontano dal sistema producendo una sottrazione di momento angolare tale da mantenere il sistema in trasferimento stabile di materia.

¹⁴Il tasso di variazione nel tempo di una grandezza si indica spesso ponendo un punto sopra il simbolo della grandezza: così, ad esempio, se s è lo spazio percorso da una particella, con il simbolo \dot{s} si indica la variazione nel tempo della distanza, ovvero la velocità della particella. In questo caso, siamo interessati alla variazione di massa (massa iniziale meno la massa finale nel tempo in esame, diviso il tempo trascorso), quindi \dot{M} indica la variazione di massa della donatrice nell'unità di tempo, che è esattamente la massa trasferita (nell'unità di tempo). Notate che \dot{M} non è necessariamente costante, può variare col tempo.

La sottrazione di momento angolare tenderebbe a rallentare la rotazione della donatrice, ma essa è costretta dalle forze di marea a ruotare alla stessa velocità del sistema, per cui la perdita di momento angolare può solo essere assorbita avvicinando le due stelle.

Sfortunatamente, mentre è molto facile calcolare il momento perduto per radiazione gravitazionale con i metodi della Teoria della Relatività Generale, e quindi dedurre il conseguente trasferimento di massa, gli effetti della frenatura magnetica non sono così facilmente calcolabili.

L'osservazione porta a inferire che il trasferimento di massa per frenatura magnetica possa essere dell'ordine di $\dot{M} \sim 10^{-9} M_{\odot} yr^{-1}$ (in altre parole, il trasferimento di un decimo di massa solare avverrebbe in 100 milioni di anni, che non è un tempo molto lungo in termini astronomici); tuttavia, i dati osservativi mostrano che c'è una grande variabilità tra i sistemi cataclismici, che possono avere trasferimenti di materia dell'ordine di decine o centinaia di volte quello calcolato, per ragioni che non sono ben note.

3.3 La distribuzione dei periodi orbitali

Da quanto detto finora, sappiamo che il periodo orbitale dev'essere piuttosto corto, ma quanto corto? Come varia? Dato che i tempi evolutivi di una variabile cataclismica sono dell'ordine di 10 milioni di anni, la variazione di periodo non può essere direttamente osservata e dobbiamo ricorrere alla distribuzione statistica delle variabili osservabili, per le quali è noto il periodo¹⁵.

Il testo citato di Coel Herrier riporta una grafico delle circa 300 variabili cataclismiche di periodo noto all'atto della pubblicazione (2001), riprodotto nella figura seguente¹⁶, dal quale si possono ricavare molte interessanti informazioni.

¹⁵Quando il testo cui ci riferiamo è stato stampato (2001), il catalogo delle variabili cataclismiche di Ritter e Kolb conteneva circa 300 variabili di cui era noto il periodo. Attualmente, il numero di variabili cataclismiche (di periodo noto e confermato) nell'ultimo aggiornamento del catalogo (Ver. 7.24) è di 1429.

¹⁶Il catalogo aggiornato è liberamente scaricabile o consultabile su internet all'indirizzo <https://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/RKcat/>. Chi vuole può divertirsi a fare un istogramma aggiornato, ma attenzione alle diverse tipologie.

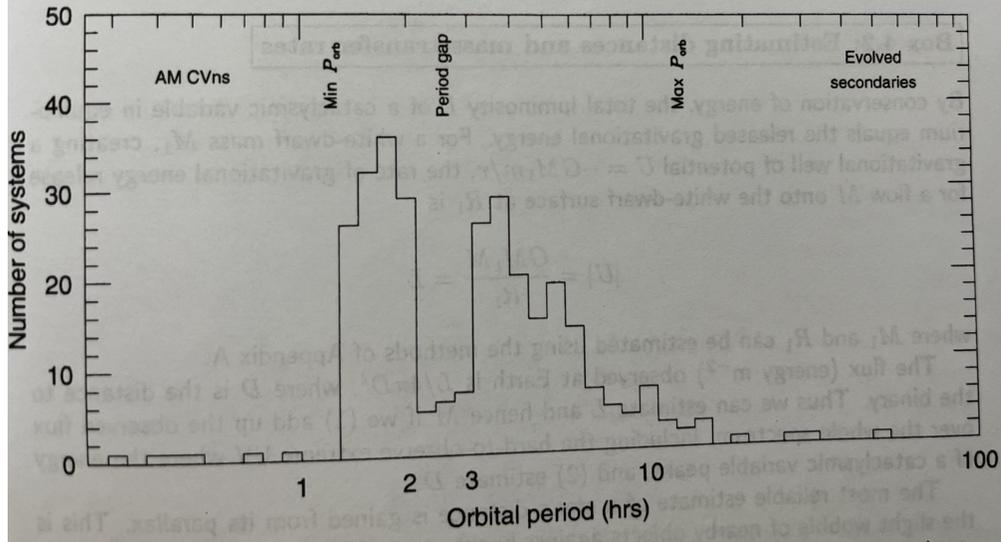


Figura 3.3: Grafico della distribuzione del periodo orbitale per le variabili cataclismiche catalogate fino al 2001.

Per prima cosa osserviamo che il periodo massimo è di circa 12 ore, a parte qualche occasionale periodo più lungo che corrisponde a variabili cataclismiche in cui la compagna si trova nello stato evolutivo di gigante rossa e la sostenibilità del flusso di materia è garantita dal progressivo aumento del raggio della stella, come descritto nel paragrafo precedente (un esempio è *GK Per*, con un periodo di 48 ore). Questo periodo deriva dal requisito che la stella primaria sia una nana bianca, la cui massa limite è di $1.41 M_{\odot}$ («limite di Chandrasekhar»). Poichè la nana rossa compagna deve avere una massa inferiore, questo requisito limita la distanza tra le due nane¹⁷, e quindi limita il periodo di rotazione a un massimo di 12 ore circa.

Tuttavia, pochissime nane bianche hanno masse vicine al limite di Chandrasekhar, per cui in pratica la maggior parte di variabili cataclismiche ha un periodo inferiore alle 6 ore. Dal grafico, si vede bene che il numero di cataclismiche aumenta al diminuire del periodo, raggiungendo un massimo quando $P \approx 4 \text{ hr}$ e cadendo bruscamente nel limite di $P \approx 3 \text{ hr}$ e poi risalendo di nuovo a $P \approx 2 \text{ hr}$.

La scarsità di variabili cataclismiche di periodo tra le 2 e le 3 ore è chiamata «**period gap**» ed è dovuta alla cessazione del meccanismo di frenatura magnetica che garantisce il mantenimento del trasferimento. In altre parole, con il rimpicciolirsi della stella, i campi magnetici si indeboliscono e non riescono più a garantire la diminuzione di momento angolare che mantiene il sistema in una situazione stabile di traferimento di massa.

¹⁷In quanto la nana rossa deve riempire il suo lobo di Roche e, siccome sappiamo qual'è il raggio di una stella in relazione alla sua massa, conosciamo la geometria di Roche del sistema limite.

Infatti, il trasferimento di massa, mantenuto dalla radiazione gravitazionale, priva la stella donatrice di parte della sua massa e quindi della pressione che agisce sul suo nucleo, e pertanto le reazioni che ivi avvengono tendono a rallentare e l'energia generata nel nucleo diminuisce. Con minore energia a sostenerla, la stella tende a contrarsi leggermente sotto l'effetto della sua gravità. Questo meccanismo di perdita di energia, tuttavia, avviene su tempi molto lunghi¹⁸ e se, come quasi sempre avviene, il meccanismo di trasferimento di massa è più veloce, la stella non riesce ad equilibrarlo (cioè «rimane indietro»). Quando il meccanismo di frenatura magnetica si «spegne»¹⁹, la stella si ritrova con un raggio troppo grande per la sua massa residua e pertanto si contrae, distaccandosi dal suo lobo di Roche e interrompendo il trasferimento di massa. Rimane in funzione, ovviamente, la radiazione gravitazionale che però è un meccanismo molto debole di perdita di energia, e pertanto per un certo tempo la stella rimane nella condizione «distaccata», senza trasferimento di massa.

Finalmente, la perdita di energia del sistema causata dalla pur debole radiazione gravitazionale (che peraltro si rafforza quanto più le due masse si avvicinano) riesce a ridurre il periodo di rotazione a circa 2 ore, la riduzione del lobo di Roche finalmente lo porta in contatto con la secondaria e il trasferimento di materia verso la nana bianca riprende, sia pure nella misura ridotta compatibile con la radiazione gravitazionale.

Si noti che il «gap» in realtà non è completamente vuoto: si ritiene che i sistemi che lo popolano siano quelli che, date le masse in gioco, «nascono» direttamente con periodi fra le 2 e le 3 ore, oppure forse quando la nana bianca stessa ha un forte campo elettromagnetico o in altre situazioni che si verificano raramente e che al momento sono poco comprese. In ogni caso, anche le stelle che hanno periodi fra 2 e 3 ore subiranno, se ancora ce l'hanno, lo spegnimento della frenatura elettromagnetica e il successivo lento declino dovuto alla radiazione gravitazionale.

Un'altra caratteristica del grafico è il brusco crollo a zero che avviene a $P \approx 78 \text{ min}$, che è quindi il periodo minimo che una variabile cataclismica può avere, e che ha luogo quando la nana rossa ha perso talmente tanta parte del suo involucro da assumere caratteristiche simili a quelle della nana bianca, ovvero la pressione che, contrastando l'attrazione gravitazionale, la mantiene in equilibrio non è più fornita dal moto termico del plasma caldo ma dallo stato *degenerato* di gran parte del materiale che la compone. In questo stato, si verifica una inversione del rapporto fra massa e raggio della stella: ove in una stella non degenerata *maggiore* è la massa, maggiore è il raggio, in un corpo degenerato *minore* è la massa, maggiore è il raggio!

Pertanto, raggiunto lo stato degenerato, la ulteriore perdita di massa dovuta al trasferimento verso la nana bianca causa l'ingrandimento della compagna, che quindi tende ad oltrepassare il lobo di Roche. Per mantenere il momento angolare, la distanza tra le due

¹⁸Chiamata scala temporale di Kelvin-Helmoltz che, per una cataclismica con periodo di 3 ore, corrisponde a 500 milioni di anni.

¹⁹Il motivo per cui la frenatura magnetica si spegne potrebbe essere collegato al fatto che la stella ha raggiunto uno stadio in cui il suo involucro è totalmente convettivo, quindi la dinamo che genera il campo magnetico sparisce e il campo si spegne, e con esso la frenatura magnetica. Si noti però che questa transizione dipende molto dalla velocità di rotazione della stella su se stessa.

masse deve aumentare leggermente, in modo che la nana rossa rientri nel lobo, e quindi il sistema si evolve verso periodi più lunghi.

Quando il periodo della variabile cataclismica raggiunge i 78 minuti (corrispondente a un flusso $\dot{M} \approx 0.06 M_{\odot}$) e ricomincia ad aumentare, il sistema è vicino alla sua fine. Mentre il periodo aumenta, il flusso di trasferimento continua a diminuire, e quando il periodo è tornato a circa 100 secondi è solo di $\dot{M} \approx 0.02 M_{\odot}$). La nana rossa ha ormai una massa così ridotta che la radiazione gravitazionale è rapidamente diminuita, l'evoluzione della stella è diventata molto lenta e il sistema stesso emette così poca energia che diventa anche difficile da rilevare.

Alla fine, quando la secondaria si riduce alla massa di un pianeta (cioè al di sotto di 10 volte la massa di Giove), la teoria prevede che il sistema si riduca a un pianeta supergioviano in orbita attorno a una nana bianca. Non abbiamo prove osservative di una variabile cataclismica che si sia evoluta fino a questo stadio²⁰. Esiste però una variabile cataclismica, la WZ Sge, che ha un periodo di 82 minuti, che potrebbe essere in evoluzione verso questo stadio finale.



Figura 3.4: Rappresentazione artistica di una variabile cataclismica «spenta».

Ciò nonostante, l'osservazione del grafico mostra la presenza di qualche variabile cataclismica con periodo inferiore a 78 minuti: si tratta di sistemi, noti come «Tipo AM CVn» dal nome della stella tipo, ove la secondaria ha perso la maggior parte dell'involuppo di idrogeno ed è quindi formata sostanzialmente di elio²¹ e, di conseguenza, anche il materiale traferito è principalmente elio e il disco di accrescimento è anch'esso costituito da elio.

²⁰Benché qualche sistema costituito da un pianeta gioviano o super gioviano orbitante attorno a una nana bianca sia stato in effetti individuato, il periodo orbitale è in genere troppo grande per poter essere il resto di una variabile cataclismica. Tuttavia è stato recentemente individuato un pianeta gioviano con massa $M \approx 1 - 2 M_J$ in orbita attorno a una nana bianca a una distanza $a \approx 2.5 - 6 AU$, che sembrerebbe avere le caratteristiche cercate.

²¹Un possibile meccanismo per la formazione di questi sistemi potrebbe essere la trasformazione di ambedue le stelle in giganti rosse; in questo caso, la seconda fase di involuppo comune potrebbe portare i nuclei delle due stelle a distanza sufficientemente ravvicinata da consentire lo scambio dell'elio che li circonda, con conseguente dispersione, per il già citato effetto ventilatore, di tutto l'involucro comune di idrogeno. Si tratta ovviamente di un numero esiguo tra i sistemi finora osservati.

Poichè l'elio è più pesante dell'idrogeno, stelle di questo tipo sono, a parità di massa, più piccole delle nane rosse e quindi devono essere più vicine alla primaria per avere un lobo sufficientemente piccolo da poter essere riempito.

Come conseguenza della minore separazione, i loro periodi sono più corti. Per il resto, la loro evoluzione rispecchia quella delle variabili cataclismiche con trasferimento di idrogeno, salvo il fatto che, per la maggiore vicinanza delle due stelle, la radiazione gravitazione è amplificata. Anche queste stelle passeranno per un minimo (inferiore a 78 minuti ma non ancora quantificato) e poi, raggiunto lo stato degenerato, il periodo risalirà fino alla fine del sistema come precedentemente descritto.

4 DISCO DI ACCRESCIMENTO E OUTBURST

Il nome «variabili cataclismiche» per questo tipo di sistemi deriva da un improvviso («cataclismico») aumento della luminosità del sistema, chiamato «**outburst**», che ha origine nel disco e che conduce ad un aumento della luminosità di parecchie magnitudini nel giro più o meno di un giorno. L'outburst rimane visibile per alcuni giorni ed è poi seguito da un declino relativamente lento fino alle condizioni di quiescenza. Più precisamente, questi eventi sono chiamati «**outburst di nova nani**» («**dwarf nova outburst**») per distinguerli da un altro tipo di evento cataclismico, ancora più potente, chiamato «**eruzione di nova**» («**nova eruptions**»), che avviene più raramente e ha origine sulla nana bianca.

Gli outburst furono rilevati inizialmente nel 1855 nel sistema *U Gem* (da cui il nome «Tipo U Gem» dato a questi sistemi). L'aspetto di questi outbursts è mostrato nella figura seguente: notate la variazione di luminosità di circa 5 magnitudini²² rispetto allo stato normale (detto «**stato di quiescenza**»).

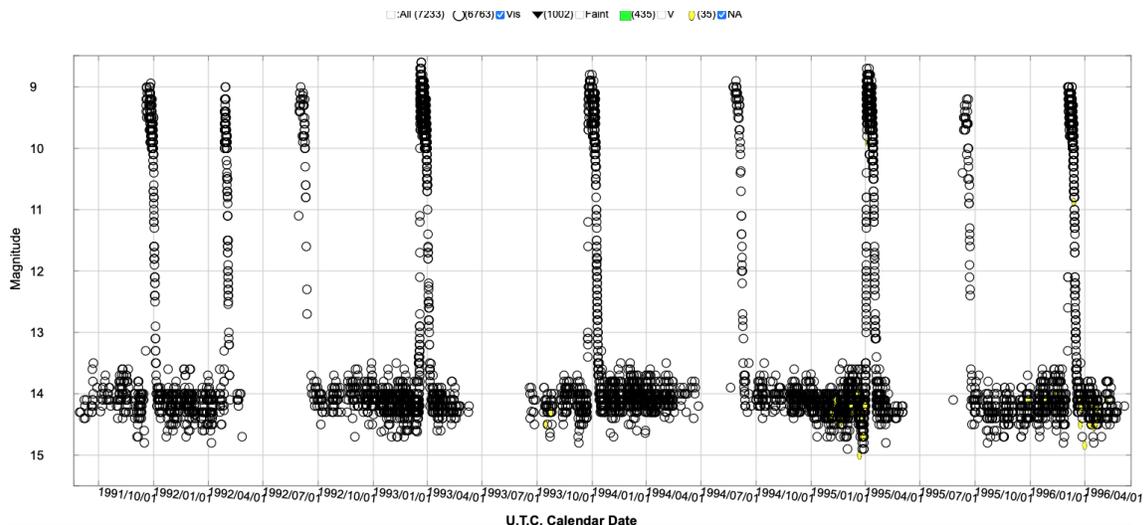


Figura 4.1: Curva di luce con outburst di U Gem (1991-1996).

²²Un aumento di luminosità di circa 100 volte in un solo giorno!

Gli outburst di nova nani sono causati da un improvviso aumento della luminosità del disco dovuto al fatto che, se il materiale trasferito dalla stella viene fornito a un tasso maggiore di quello che il disco scarica sulla nana bianca o comunque perde in qualche modo, il materiale stesso si accumulerà sul disco²³. Questo accumulo a un certo punto diventerà insostenibile, la viscosità del disco aumenterà, il disco si espanderà sia verso l'interno che verso l'esterno e il trasporto di materiale verso la nana bianca aumenterà, privando il disco dell'eccesso di materiale accresciuto e riportandolo allo stato di quiescenza, con bassa viscosità e dimensioni più ridotte²⁴, pronto ad essere di nuovo accresciuto dal flusso proveniente dalla compagna e ricominciare il ciclo.

Notate che gli outburst sono abbastanza caratteristici di ogni singolo sistema. Per confronto, nell'immagine successiva è riportata la curva di luce di *SS Cyg*: come si può vedere, gli outburst di *SS Cyg* si ripetono molto più di frequente, confrontati con quelli di *U Gem*, e hanno dimensioni diverse.

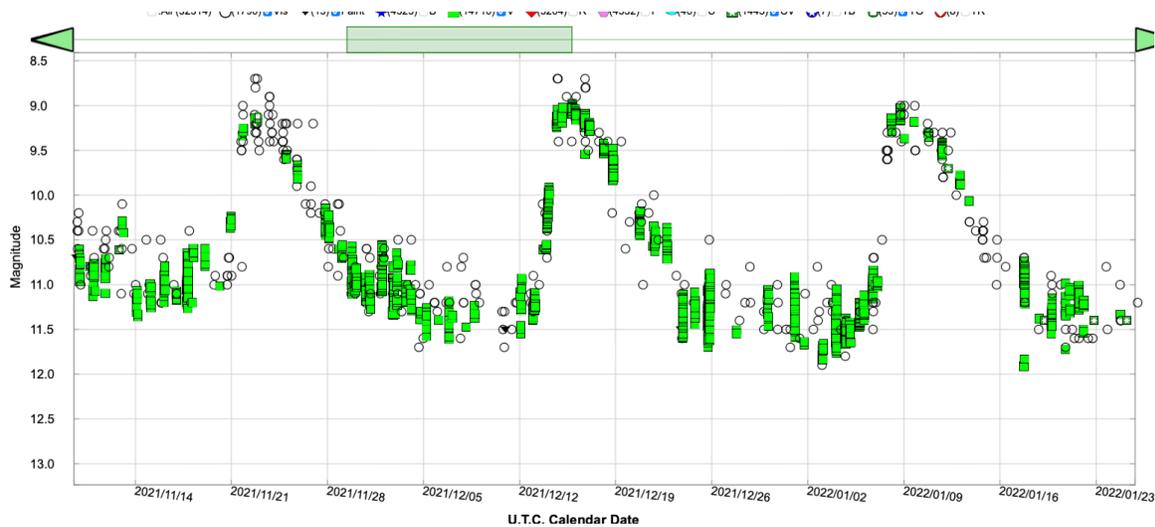


Figura 4.2: Curva di luce di *SS Cyg*. I cerchietti sono osservazioni visuali, i quadrati verdi osservazioni in filtro V con una CCD.

4.1 Viscosità e turbolenza magnetica

Il termine «**viscosità**», o più precisamente «viscosità dinamica» per distinguerlo da altri concetti simili, che è alla base della diffusione del materiale del disco in senso radiale, richiede qualche precisazione.

Matematicamente, il disco di accrescimento può essere modellato come un insieme di anelli concentrici²⁵, ognuno dei quali ruota a una propria «velocità kepleriana», caratteristica del moto in presenza di una forza centripeta. Considerando due anelli adiacenti

²³Cioè «accresce» il disco, da cui il nome «disco di accrescimento».

²⁴Il materiale che aveva strabordato rifluisce verso l'interno del disco, cioè verso il cerchio cui corrisponde il raggio di circolarizzazione.

²⁵Notate però che gli «anelli» non sono da considerarsi solidi e uniformi, ma piuttosto costituiti da «grumi» di materia tra loro in qualche modo legati.

qualunque, l'anello interno, con raggio più piccolo, ruoterà a velocità maggiore rispetto all'anello esterno, con raggio maggiore. La *viscosità* è una sorta di attrazione che si esercita tra il materiale degli anelli, che tende ad opporsi alla direzione del moto, per cui un grumo di materiale dell'anello interno tenderà a essere rallentato dall'anello esterno, perdendo momento angolare, mentre un grumo dell'anello esterno tenderà invece a essere accelerato dall'anello interno, aumentando il suo momento angolare. La tensione sui grumi che costituiscono gli anelli tenderà ad attirarne parte verso l'interno e parte verso l'esterno. Per questo motivo, la *viscosità* è il nome dato al meccanismo che causa questi effetti di trascinamento.

La maggior parte del materiale si muove verso l'interno, rilascia energia gravitazionale (e quindi si riscalda e aumenta la propria luminosità), mentre quella che fluisce verso l'esterno riequilibra il momento angolare²⁶.

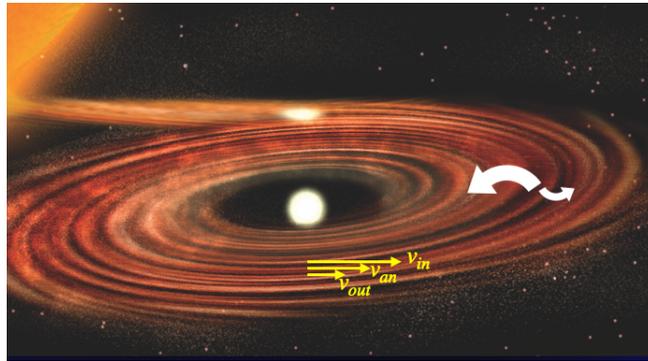


Figura 4.3: Il moto del materiale nel disco di accrescimento.

La viscosità spiega bene il comportamento del disco, ma l'origine della viscosità stessa, ovvero la ragione per cui le particelle radialmente adiacenti si attraggono, è stata per molto tempo un mistero²⁷.

La spiegazione attualmente accettata è che il materiale del disco sia in moto turbolento, in modo tale che ci sia un continuo scambio di grumi di materiale tra dischi adiacenti²⁸. Peraltro, il modello della viscosità alfa non spiega quale sia l'origine dell'attrazione, dato che considerando solo concetti idrodinamici il disco tende ad essere stabile e tende a sopprimere la turbolenza, anche se indotta artificialmente.

²⁶Questo avviene perché il momento angolare totale deve rimanere invariato. La dimostrazione matematica può essere trovata a pag. 60 del testo di riferimento.

²⁷La viscosità con la quale abbiamo normalmente a che fare deriva dal fatto che molecole adiacenti tendono a creare dei legami chimici, ma il materiale del disco è così diffuso che la viscosità molecolare è miliardi di volte troppo debole per spiegare il suo comportamento.

²⁸Il modello teorico viene chiamato «viscosità alfa» e prevede che il disco sia molto sottile rispetto al suo raggio, che la sua sezione abbia una forma svasata verso l'esterno (come una lunga tromba) e che la sua massa sia trascurabile rispetto a quella della nana bianca al suo centro. In queste condizioni, risulta che la velocità di rotazione orbitale di un anello sia dell'ordine di circa 1000 km/s , di gran lunga maggiore della velocità del suono nel gas (circa 10 km/s), mentre la velocità media con cui il materiale fluisce verso l'interno è solo di circa 0.3 km/s .

La teoria di formazione della turbolenza attualmente più generalmente accettata fu proposta alla fine degli anni '90 e risiede nell'interazione fra le particelle cariche e i campi magnetici di un gas ionizzato, come è quello del disco. In pratica, la rotazione del disco, o meglio dei vari anelli di cui si può considerare costituito, composti di materiale ionizzato, crea delle correnti circolari che sono costrette a muoversi come se fossero contenute in «tubi» le cui pareti sono costituite dalle linee di forza del campo magnetico che si viene a creare per effetto della corrente elettrica²⁹.

Tuttavia, può accadere che una particella che si trova verso l'esterno del « tubo» in cui scorre possa subire l'attrazione di un'altra particella del «tubo» adiacente, e quindi tra le due particelle si venga a creare un legame elettromagnetico (se volete, una «linea di forza»).

Ma la particella più interna si muove a velocità maggiore di quella più esterna, e questo «tende» la linea di forza finché l'ordinata circolazione delle due particelle, ognuna nel suo «tubo», viene sconvolta, almeno una delle due particelle viene strappata via e si crea l'effetto di turbolenza³⁰.

4.2 L'instabilità termica

Perché la turbolenza magnetica si instauri, è necessario che il plasma sia ionizzato, quindi che sia ad alta temperatura. In un disco «freddo»³¹, gli atomi non sono ionizzati e quindi non c'è turbolenza magnetica e non ci sono outburst.

Un gas freddo è *trasparente*, in quanto gli atomi sono neutri, non assorbono praticamente radiazione elettromagnetica (fotoni) e quella che assorbono viene rapidamente riemessa in una direzione a caso, quindi gli atomi non acquistano energia cinetica (il che equivale a dire che la temperatura rimane la stessa). Quando il gas di idrogeno si riscalda a circa 7000 K, i suoi atomi cominciano a ionizzarsi in maniera sensibile e il gas inizia a diventare «opaco», ovvero quando un fotone colpisce uno ione l'energia assorbita viene trasformata in energia cinetica (che è come dire che la temperatura del gas aumenta). Questa energia cinetica aggiuntiva aumenta la temperatura locale del gas ma, soprattutto, aumenta la percentuale di atomi ionizzati e, quindi, il gas diviene sempre più opaco³².

Consideriamo cosa succede in un disco di accrescimento non ionizzato: localmente, la temperatura non è costante ma è soggetta a variazioni statistiche. Se in una certa zona del disco la temperatura aumenta, il movimento casuale degli atomi diventa più rapido e la viscosità aumenta; come abbiamo visto, un aumento di viscosità produce un aumento del flusso che abbandona la zona³³ (principalmente espandendosi nell'anello e solo debolmente

²⁹La spiegazione qui data è fatta in modo da essere intuitiva, evitando il ricorso a concetti dell'elettromagnetismo. Ovviamente, non è rigorosissima...

³⁰Questo processo è chiamato «instabilità di Balbus-Hawley».

³¹Cioè con una temperatura nel punto più caldo al di sotto di 7000 K circa. Notate che qui «temperatura» è sinonimo di velocità degli atomi.

³²L'aumento di opacità del gas è proporzionale alla decima potenza della temperatura.

³³Poiché la velocità di diffusione del materiale lungo un anello del disco è enormemente più alta della velocità di movimento del materiale da un disco all'altro, a tutti gli effetti qui per «zona» potete intendere un intero anello del disco (che è modellato come un insieme di anelli concentrici).

verso l'interno del disco), per cui la zona diminuisce di densità e la temperatura scende. Quindi la situazione del disco, nel complesso, rimane stabile.

Consideriamo invece quello che avviene se il disco è parzialmente ionizzato: una piccola fluttuazione in aumento della temperatura causa un grande aumento dell'opacità della zona interessata. Ma l'opacità impedisce la diffusione del calore creato dalla viscosità, e questo aumenta ulteriormente la temperatura della zona che, in breve tempo, si estende a tutto l'anello. Benché l'aumento di viscosità causi un aumento del flusso di materiale che lascia l'anello, questo non è sufficiente a riequilibrare la situazione, per cui la temperatura nell'anello aumenta rapidamente finché l'idrogeno è completamente ionizzato (a circa 14000 K). A questo punto, il calore non è più intrappolato e l'anello ritrova il suo equilibrio termico ma *a una temperatura molto più alta* delle zone circostanti. In questa situazione, l'alta viscosità causa un fortissimo e quasi improvviso aumento del flusso di materiale che lascia l'anello, divenuto ora caldissimo e viscosissimo. Questo flusso in uscita dall'anello sorpassa grandemente il flusso che entra a causa del materiale trasferito dalla compagna, per cui l'anello si svuota e la temperatura scende a livelli di equilibrio.

Il fenomeno di aumento della temperatura, che interessa un intero anello del disco, è chiamato «*instabilità termica*». A causa dell'accresciuta viscosità il materiale caldo si riversa in massima parte sugli anelli adiacenti più interni, creando quella che viene chiamata «*onda di riscaldamento*», che produce un aumento di luminosità del disco, originando il fenomeno ottico chiamato «*outburst*».

L'evoluzione dell'outburst dipende in maniera abbastanza tecnica dalla distribuzione del materiale sul disco e dal raggio dell'anello che subisce l'instabilità termica iniziale. Senza entrare nei dettagli, l'instabilità può avere origine nella parte esterna o nella parte interna del disco. La velocità di diffusione del materiale (l'*onda di riscaldamento*) è molto più alta verso l'interno che verso l'esterno, per cui in outburst originati sulla parte esterna il materiale caldo si riversa molto velocemente³⁴ verso l'interno. A un certo punto, in qualche anello esterno il materiale drenato provoca una sufficiente diminuzione di temperatura, per cui l'*onda di riscaldamento* è seguita da un'*onda di raffreddamento*, che produce un risucchio di materiale verso l'esterno e il disco ritorna a uno stato di bassa temperatura.

Chiaramente, una parte del materiale del disco si riversa sulla nana bianca e sfugge. Tuttavia, questa fuga di materiale dura soltanto tra il momento in cui l'*onda di riscaldamento* raggiunge il bordo interno del disco e il momento in cui arriva l'*onda di raffreddamento*. Nel complesso, solo circa il 10% del materiale del disco può accrescere la nana bianca, mentre la maggioranza del materiale del disco non fa altro che fluire verso l'interno e poi rifluire verso l'esterno.

4.3 Forma e durata dell'outburst

La posizione ove ha inizio l'onda di calore influisce sulla durata e sulla forma dell'outburst:

³⁴Intuitivamente, poiché andando verso l'interno gli anelli diventano più piccoli, il materiale deve aumentare la velocità di trasferimento per potersi scaricare da un anello all'altro.

- una salita molto rapida della luminosità dell'outburst indica che l'onda di calore ha avuto origine in un anello esterno: infatti, gli anelli esterni sono più alti³⁵ e quindi contengono molto più materiale di quelli interni; poiché la viscosità causa un flusso di materiale maggiore verso l'interno che verso l'esterno, gli anelli interni che ricevono il materiale da quelli esterni lo trasferiscono molto rapidamente fino a riversarlo sulla nana bianca in un processo di flusso accelerato;
- viceversa, se l'onda di calore origina nella parte interna del disco, gli stessi fattori indicati nel punto precedente adesso agiscono in modo da ridurre il flusso verso l'esterno e pertanto l'onda di calore viaggia più lentamente;
- l'onda di calore potrebbe non riuscire a raggiungere il margine esterno del disco, quindi potrebbe interessare solo una parte; in questo caso, la parte rimasta «fredda» risucchia materiale dalla parte calda contribuendo a raffreddarlo e la fase di alta luminosità ha una durata ridotta. Gli outbursts possono quindi avere durata totale (salita e discesa) variabile;
- un permanenza prolungata dell'outburst ai massimi («plateau») indica che non solo l'intero disco è stato interessato dall'onda di calore, ma anche che il disco contiene una grande quantità di materiale, o forse che l'effetto di riflessione contribuisce a mantenere il disco ad alta temperatura;
- outburst «corti» e outburst «lunghi» tendono ad alternarsi, in quanto se una parte del disco non viene interessata (outburst corto), non scarica materia e quindi la volta successiva è più probabile che partecipi all'outburst;
- il declino dell'outburst, essendo causato dall'onda di raffreddamento che origina *sempre* nella parte esterna del disco, tende ad essere simile per tutti gli outburst.

Il verificarsi dell'outburst dipende dalla velocità di trasferimento della materia dalla stella e dalla temperatura del disco.

Se il disco è «freddo» e l'accrescimento è limitato, in modo che il materiale abbia il tempo di scaricarsi sulla nana bianca in modo tranquillo, senza innalzare la temperatura oltre il limite di ionizzazione in nessuna parte del disco, allora semplicemente gli outburst non si produrranno³⁶.

Viceversa, il trasferimento di massa può essere così grande da mantenere l'intero disco a una temperatura alla quale il materiale è tutto ionizzato. In questo caso, potremmo dire che il disco è *permanentemente* in outburst. Variabili cataclismiche di questo tipo sono dette «*novalike*» o tipo UX UMa, e hanno quasi tutte periodo superiore alle 3 ore, a conferma che alti tassi di accrescimento derivano dal meccanismo della frenatura magnetica.

³⁵Si ricordi la forma «a tromba» del disco di accrescimento.

³⁶Non conosciamo stelle di questo tipo, probabilmente perchè, non producendo outburst, sono finora sfuggite alla classificazione come variabili cataclismiche.

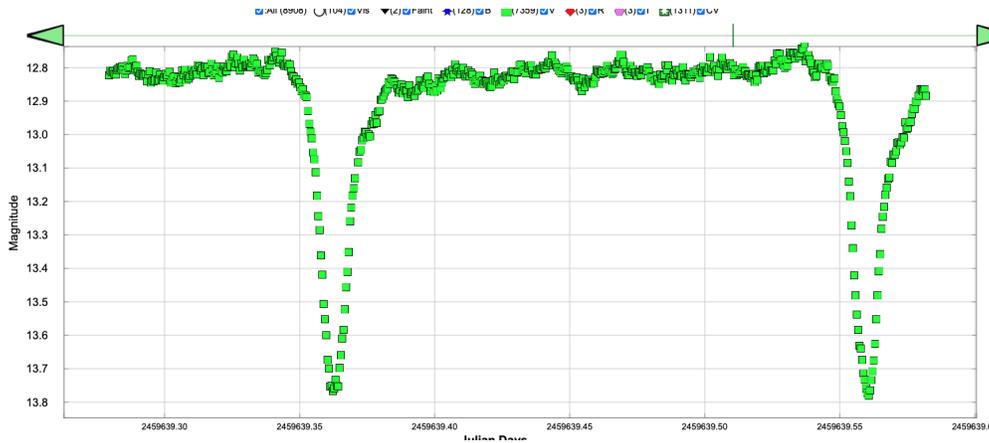


Figura 4.4: Andamento della curva di luce di UX UMa. I pozzi sono dovuti all'eclisse della nana bianca e del disco che la circonda.

Alcune variabili cataclismiche (dette di tipo Z Cam) alternano rapidi outburst separati da periodi «novalike», in cui restano per parecchio tempo in una condizione di materiale totalmente ionizzato. Questi periodi, sempre innescati da un outburst, sono probabilmente causati da un tasso sostenuto di trasferimento di materia, finché qualche altro evento (magari una improvvisa diminuzione del flusso) le riporta allo stato di quiescenza. Si tratta comunque sempre di variabili cataclismiche con trasferimento sostenuto di materia, quindi anche con outburst veloci e ravvicinati.

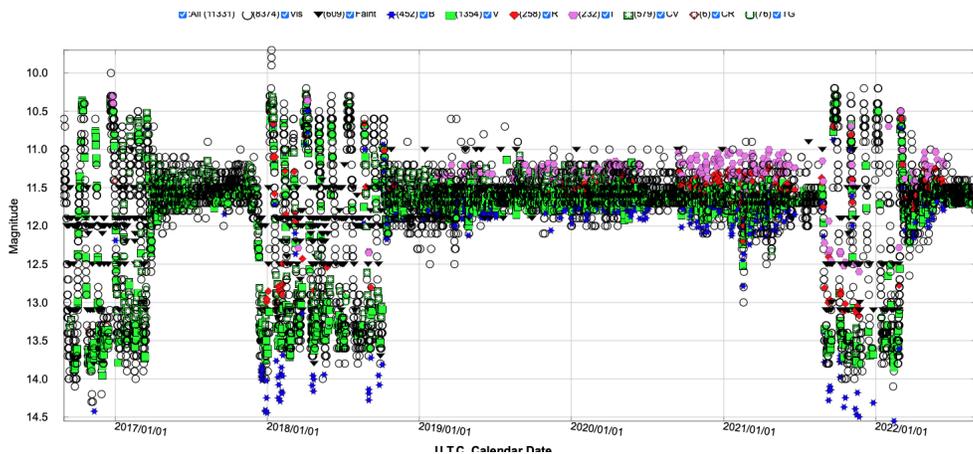


Figura 4.5: Andamento della curva di luce di Z Cam.

5 Al confine del disco di accrescimento

5.1 Lo «strato limite» («boundary layer»)

Alla fine, il materiale trasferito dalla compagna sul disco di accrescimento si riverserà sulla superficie della nana bianca. Come avviene questo scarico?

Date le ridotte dimensioni della nana bianca, la velocità kepleriana dell'anello più interno del disco è molto elevata, dell'ordine di circa 3000 km/s , mentre la nana bianca ruota su se stessa a una velocità molto inferiore, tipicamente³⁷ circa 300 km/s .

Ne consegue che il materiale che si riversa sulla nana bianca deve subire una brusca decelerazione nello spazio fra l'anello più interno del disco e la superficie della nana bianca: questo spazio è chiamato «**strato limite**» (in inglese, «**boudary layer**»). In questo spazio, l'energia cinetica del materiale rallentato viene convertita in calore e irradiata, creando una luminosità che può raggiungere la metà della luminosità totale del sistema.

Se il tasso di accrescimento è sufficientemente alto, lo strato limite può essere sufficientemente denso da impedire alla radiazione di disperdersi direttamente verso l'esterno; in questo caso l'intero strato si riscalda emettendo una radiazione di corpo nero a una temperatura caratteristica di circa $200\,000 \text{ K}$, parecchie volte maggiore della temperatura più elevata raggiungibile nel disco.

5.2 L'effetto sifone

Nel caso in cui il tasso di accrescimento sia molto basso, il materiale che fluisce dal disco verso la nana bianca è molto rarefatto e non riesce a raffreddarsi³⁸ a sufficienza. Di conseguenza, il gas si espande, diventa ancora più rarefatto e quindi ancora meno incline a raffreddarsi, e quindi si espande sempre di più. In pratica, il disco «evapora» nello strato limite, formando una «corona» diffusa attorno al disco con una temperatura di circa 100 milioni di gradi³⁹

In questo caso il riscaldamento del materiale che fluisce dal bordo interno del disco verso la nana bianca è dovuto alla trasformazione dell'energia gravitazionale in energia cinetica (calore) che riscalda la corona. La corona rifluisce verso il disco, riscaldandolo a sua volta e producendo una evaporazione dello strato superficiale, il cui materiale va ad alimentare la corona stessa. Per conservare il momento angolare, una parte della corona fluisce verso l'esterno ove andrà a condensarsi sulla parte esterna del disco (e ovviamente una parte del materiale coronale si perde nello spazio).

³⁷Naturalmente, la massa della nana bianca influenza sia la sua velocità di rotazione che il suo raggio, quindi anche la distanza dall'anello interno e la sua velocità kepleriana. Pertanto queste velocità sono quelle del caso più comune e possono variare notevolmente in relazione a ogni singolo caso. Comunque, rimane la grande differenza tra le due velocità

³⁸Come al solito in questi argomenti, per «raffreddamento» si intende la diminuzione della velocità media delle particelle (atomi di idrogeno). Questa diminuzione avviene principalmente tramite collisioni degli atomi, che risultano in una dissipazione di energia e una riduzione della velocità degli atomi coinvolti nell'urto. In un gas tenue, gli atomi collidono molto di rado e pertanto il gas non si «raffredda».

³⁹Di nuovo, ricordate che qui «temperatura» è sinonimo di velocità media degli atomi di gas.

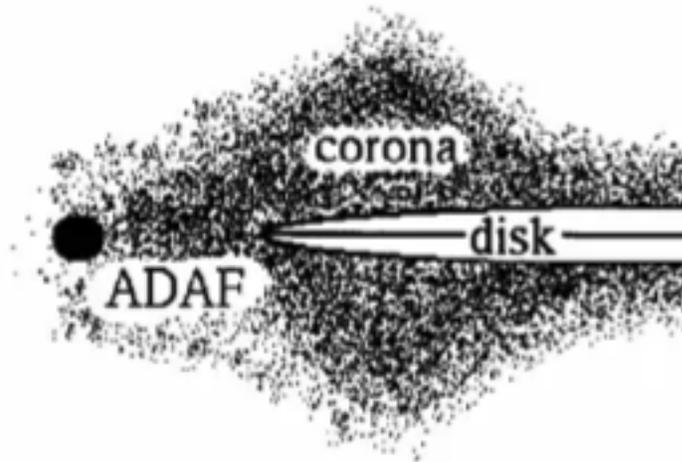


Figura 5.1: Effetto sifone (adattato da Czerny, Rozanska e Janiuk, Adv.Space.Res. Vol 28, pp, 39-443, 2001)

5.3 Venti

Gli atomi del gas che sono attratti dalla gravità dal margine interno del disco verso la nana bianca sono anche soggetti al bombardamento di fotoni molto energetici emessi dalla nana bianca, che tendono a spingerli indietro. Tuttavia, gli atomi sono particolarmente efficienti nell'assorbire fotoni di determinate energie (energie di eccitazione); un atomo che assorba un fotone di queste energie lo riemette in una direzione *casuale* e pertanto la spinta che riceve dall'emissione (quantità di moto) non è diretta nella direzione del fotone assorbito ma in qualche altra direzione.

Pertanto molti atomi, in seguito a una catena di assorbimento e riemissione di fotoni di adeguate energie, saranno dispersi in direzioni a caso, formando un «vento» che li porta lontano dalla nana bianca.

Il fenomeno del rapido assorbimento e riemissione di fotoni è chiamato «*transizione di risonanza*» ed è ben visibile negli spettri della luce emessa dal sistema, chiamato «*profilo P Cygni*». Questo «profilo» è particolarmente evidente quando il tasso di accrescimento della nana bianca è molto alto, ad esempio⁴⁰ durante il picco dell'outburst oppure nelle variabili «novalike».

5.4 Impatto tra il flusso emesso dalla compagna e il disco di accrescimento

All'altra estremità del disco di accrescimento, quella esterna, abbiamo l'impatto con il flusso di materiale proveniente dalla compagna.

La fisica della collisione è ancora molto incerta e i dettagli dipendono da parametri, come ad esempio l'altezza del bordo del disco, che possiamo solo supporre, ma l'osservazio-

⁴⁰I dettagli del meccanismo della creazione dei «venti» sono comunque ancora molto poco compresi.

ne (sostanzialmente l'emissione luminosa del punto caldo) suggerisce che l'energia cinetica del materiale sia in gran parte dissipata nell'impatto.

Nella collisione, una parte del materiale proveniente dalla compagna viene scagliato perpendicolarmente al piano del disco e una parte (circa il 10%), anzichè urtare il bordo del disco, fluisce sopra e sotto il disco, rallentando e ponendosi in una traiettoria balistica per poi ricadere da qualche parte sulla superficie interna del disco stesso. La stessa sorte subisce parte del materiale scagliato perpendicolarmente.

Vi sono anche indicazioni che l'impatto produca delle onde stazionarie di compressione sul bordo del disco.

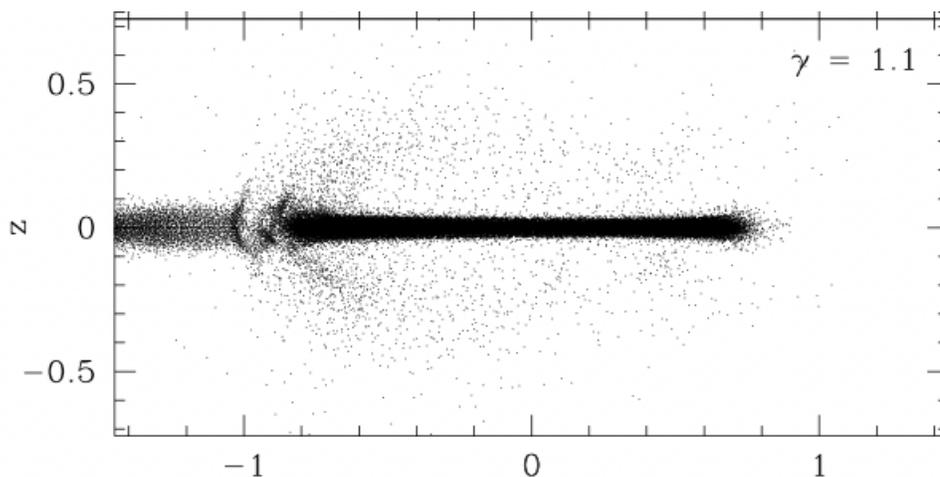


Figura 5.2: Una simulazione dell'impatto sul disco: a sinistra il flusso in arrivo, a destra il disco. Sono visibili la dispersione del materiale (puntini) e le onde di compressione sul bordo (Armitage, Livio, ApJ, 493, 1998).

5.5 Il «flickering» e le oscillazioni quasi periodiche

Abbiamo visto che l'emissione luminosa di una variabile cataclismica mostra periodi di tranquillità («quiescenza») interrotti da eruzioni più o meno regolari del disco («outburst»).

Tuttavia, anche in periodo di quiescenza la curva di luce può mostrare variazioni aperiodiche di piccola entità, che possono durare da pochi secondi a qualche ora, detti «flickering» (lampeggiamenti). La figura seguente mostra un esempio del fenomeno.

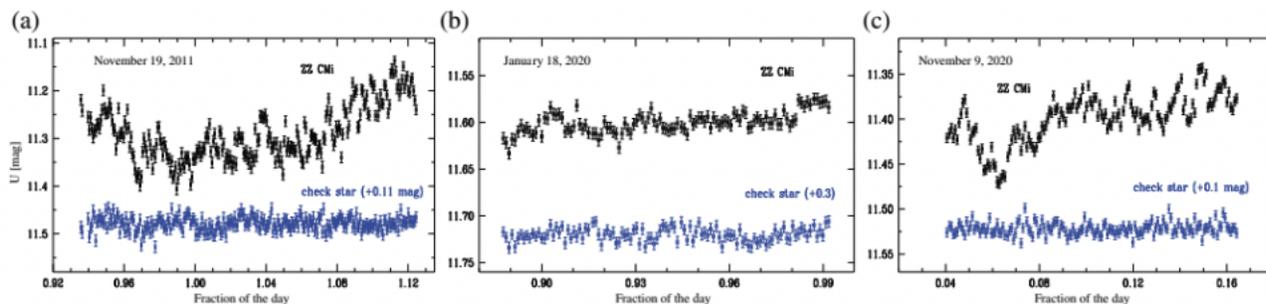


FIGURE 1 The symbiotic binary ZZ CMi—detection of flickering in Johnson U band on November 19, 2011, and November 9, 2020

Figura 5.3: Flickering della variabile cataclismica ZZ CMi nella banda U (rispettivamente nei giorni 19 nov 2011, 18 gen 2020 e 9 nov 2020).

Il flickering, come si può rilevare, comporta oscillazioni di qualche decimo di magnitudine, che non vanno confuse con il rumore dovuto alle variazioni statistiche, la cui influenza è mostrata nella curva della «check star» in basso (in blu), che è una stella fissa e la cui curva di luce, in assenza di rumore, mostrerebbe una linea costante. Naturalmente, le variazioni statistiche influenzano anche la curva di luce della variabile che però, depurata di queste variazioni, mostra chiaramente le oscillazioni di flickering.

Il flickering è un fenomeno poco compreso, ma si sa che è spesso localizzato nella parte interna del disco, vicino alla nana bianca, per cause ancora non chiare.

In certi casi, invece, poiché il flickering è localizzato nel punto in cui il flusso di materiale proveniente dalla compagna urta il disco di accrescimento, possiamo dedurre che è causato dalla turbolenza conseguente all’urto, che produce una notevole emissione luminosa la cui variazione si manifesta come «flickering».

Oltre al flickering, che avviene in modo casuale, la curva di luce può mostrare delle oscillazioni sinusoidali di piccola ampiezza, della durata inferiore ad alcuni minuti, probabilmente dovute all’improvvisa comparsa di punti caldi sul disco che durano per alcune rotazioni e poi vengono riassorbiti, per essere magari rimpiazzati da altri con fase diversa e diverso periodo. Queste fluttuazioni vengono denominate «oscillazioni quasi periodiche». Al momento non abbiamo una chiara idea di cosa le produca⁴¹.

6 Le «eruzioni di nova»

6.1 Il meccanismo della «nova»

Il fenomeno più spettacolare che una variabile cataclismica possa mostrare è però collegato alla nana bianca ed è la cosiddetta (eruzione di) **nova**, durante la quale la luminosità della variabile può aumentare di 8-15 magnitudini (da 1500 a un milione di volte rispetto alla luminosità in quiescenza).

⁴¹In realtà, oltre al flickering e alle oscillazioni quasi periodiche, vi sono altri tipi di oscillazioni di piccola ampiezza della curva luminosa, ma si tratta sempre di fenomeni poco compresi, per cui non ne tratteremo.

Il fenomeno è dovuto all'accrescimento di materiale (sostanzialmente idrogeno) proveniente dal disco, che si riversa sulla superficie della nana bianca. La nana bianca, di per sé, è costituita da materiale più pesante dell'idrogeno, compattato in un oggetto di grande massa e piccolo raggio, per cui la gravità superficiale è elevatissima. L'idrogeno proveniente dal disco viene fortemente compresso sulla superficie della nana bianca⁴², causando la degenerazione che produce la pressione necessaria a mantenere il gas accreto in equilibrio. Tuttavia, quanto più materiale si riversa sulla nana, tanto più la sua temperatura e densità aumentano, finché in qualche punto nello strato a contatto con la superficie della nana bianca si raggiungono le condizioni dell'innesco della fusione nucleare.

In uno stato non degenerato, l'energia proveniente dalla fusione nucleare locale causerebbe un aumento della temperatura con conseguente espansione dell'idrogeno e con una reazione a catena moderata.

Nel materiale degenerato, tuttavia, l'energia liberata non può aumentare la pressione del gas e produrne l'espansione, ma può solo aumentarne la temperatura, il che causa un aumento della velocità della fusione nucleare⁴³, provocando un «effetto valanga» negli strati a contatto della superficie della nana bianca, che continua finché l'aumento della temperatura riesce finalmente a espandere il gas e lo strato degenerato, ormai non più tale, si espande verso l'esterno come se fosse una bolla.

La reazione nucleare produce una copiosissima quantità di elementi radioattivi, il cui decadimento emette una quantità di energia sufficiente a sostenere un'ulteriore espansione della bolla; dopo circa 15 minuti dall'inizio della reazione, la bolla emette un'energia pari a circa 100 000 volte la luminosità di Sole, dovuta principalmente alla radioattività, e si espande a una velocità di circa $3\,000\text{ km s}^{-1}$.

La bolla si estende fino ad inglobare l'intero sistema binario, dopodiché continua ad espandersi con una velocità che va da 500 a $2\,000\text{ km s}^{-1}$ (rispettivamente tipiche di nove con declino lento o veloce), raffreddandosi e diventando sempre meno brillante.

Dopo circa tre anni la bolla diventa sufficientemente grande e superficialmente abbastanza debole da poter essere osservata come una nebulosa intorno alla binaria (vedi immagine successiva).

⁴²L'accelerazione di gravità sulla superficie della nana bianca è dell'ordine del milione di $m s^{-2}$.

⁴³Cioè un aumento del numero di nuclei che subiscono la fusione nucleare nell'unità di tempo. La fusione iniziale è del tipo PP (protone-protone), ma con l'innalzamento della temperatura passa rapidamente al tipo CNO (carbonio-azoto-ossigeno), molto più veloce.



Figura 6.1: Immagine della variabile cataclismica GK Per, di cui si vede la bolla di materiale espulso nell'eruzione di nova del 1901.

Durante l'espansione della bolla, quando la temperatura scende sotto i $1\,000 - 2\,000\text{ K}$, gli atomi di carbonio e silicio si condensano in granelli di polvere del diametro di circa $0.01\ \mu\text{m}$, che bloccano la radiazione luminosa causando un incremento della velocità di condensazione e una diminuzione della luminosità osservata (nonché un suo spostamento verso l'infrarosso). Successivamente, tuttavia, con l'ulteriore espansione della bolla, la polvere si dissipa e la brillantezza della binaria aumenta di nuovo.

Finalmente, dopo alcune centinaia di anni, la densità della bolla sarà diventata così bassa da renderla invisibile all'osservazione visuale.

Nella figura seguente è mostrata la curva di luce dell'eruzione di Nova Persei 1901, che ha interessato una trascurabile stella di magnitudine $V \approx 13$ a circa 1450 anni luce di distanza nella costellazione del Perseo. In seguito a questa eruzione, successivamente la stella fu riconosciuta come una variabile cataclismica composta da una nana bianca di massa $M_1 \approx 1.03 M_\odot$ e da una compagna di classe $K1 V$ con massa $M_2 \approx 0.39 M_\odot$ e le fu attribuita la designazione GK Persei (GK Per).

Come di regola in questi casi, la nova è stata rilevata quando era oramai visibile a occhio nudo⁴⁴, quindi le fasi iniziali della salita della curva di luce sono andate perse. Fortunatamente, la nova compariva in una fotografia scattata due giorni prima, in cui appariva al suo minimo, per cui, tenuto conto che la luminosità salì ulteriormente fino a un massimo di $V = 0.2$ in altri due giorni, l'intera fase di salita è durata meno di quattro giorni.

⁴⁴Per l'esattezza, quando aveva già raggiunto magnitudine $V = 2.7$.

Come si può vedere nella figura, Nova Persei 1901 è poi scesa rapidamente di tre magnitudini in circa 100 giorni, classificandosi⁴⁵ quindi come «nova veloce». Successivamente, la luminosità della nova ha continuato a declinare fino a ritornare al suo minimo nel giro di 3-4 anni.

Dopo essere tornata alla magnitudine di quiescenza ($V \approx 12-13$), GK Per ha mostrato qualche outburst sporadico dell'ampiezza di 2–3 magnitudini, finché a partire dal 1980 ha mostrato outburst piuttosto regolari, della durata di circa due mesi ogni tre anni, durante i quali raggiunge $V = 9-10$ (si vedano i due inserti superiori nella figura). L'ultimo di questi outburst è avvenuto tra la metà di dicembre 2022 e la fine di febbraio 2023, con un picco di $V \approx 10.1$, ed è stato seguito con quasi 500 osservazioni anche dall'AFAM.

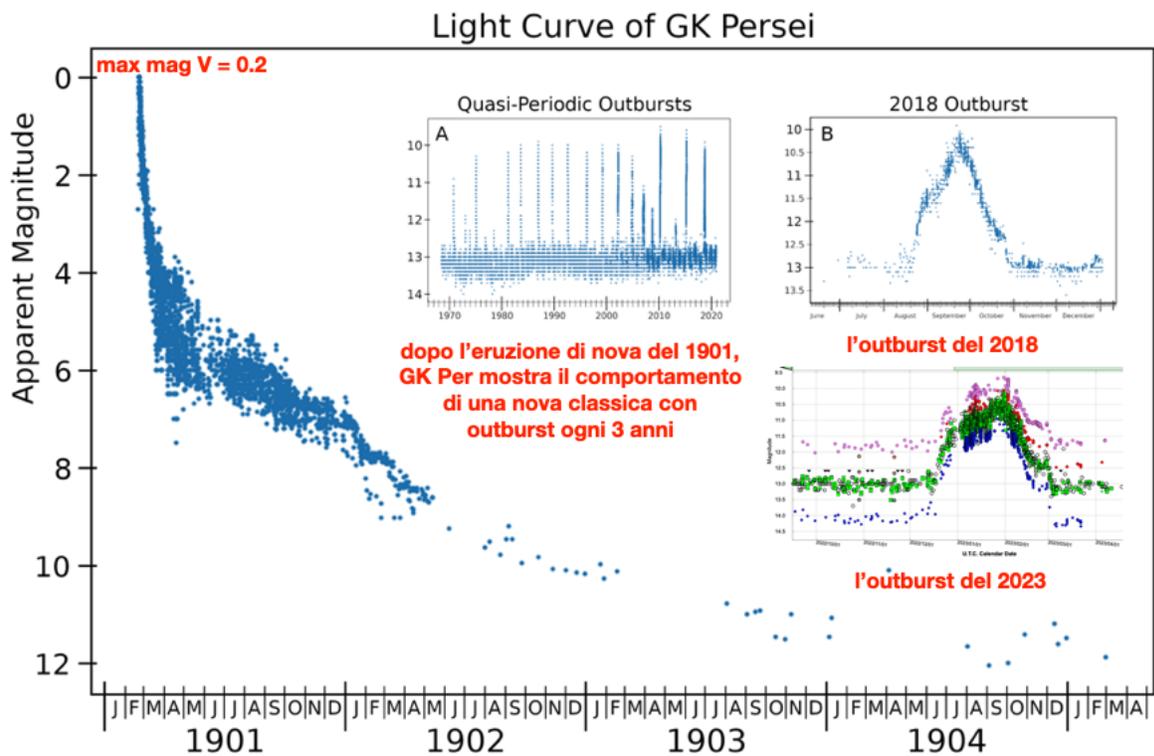


Figura 6.2: Curva di luce della NOVA Persei 1901 (GK Per).

Tra gli elementi prodotti da una eruzione di nova merita di essere citato un isotopo del berillio (${}^7_4\text{Be}$), instabile, che decade rapidamente in un isotopo del litio (${}^7_3\text{Li}$). Litio o berillio sono elementi creati nella nucleosintesi primordiale e sono molto fragili⁴⁶, per cui, anche se vengono creati nelle esplosioni di supernova, vengono rapidamente annichiliti. Fino a pochi anni fa, pertanto, si riteneva che quasi tutto il litio e il berillio esistenti

⁴⁵Le nove vengono classificate a seconda del tempo che impiegano a scendere di tre magnitudini, una volta raggiunto il massimo. Si dicono «nove veloci» quelle che, raggiunto il massimo, lo mantengono per uno o due giorni e poi impiegano al massimo 110 giorni per calare di tre magnitudini, altrimenti, se il tempo impiegato è maggiore di 110 giorni, si dicono «nove lente».

⁴⁶Nel senso che l'energia di legame dei nucleoni è molto bassa.

nell'Universo fossero il prodotto della nucleosintesi del Big Bang, come del resto l'idrogeno e l'elio. Tuttavia, mentre la corrispondenza tra le previsioni teoriche e la quantità esistente era perfetta per l'idrogeno e l'elio, per il litio veniva osservata una forte eccedenza rispetto ai valori calcolati («problema del litio»). Ora sappiamo che il litio viene prodotto dalle esplosioni di nova, e il problema è risolto.

6.2 Le nove ricorrenti

Nella maggior parte dei casi, le variabili cataclismiche che hanno eruttato in nova lo hanno fatto solo una volta nella storia delle osservazioni astronomiche.

Ovviamente, una nova si produce quando una massa sufficientemente grande di materiale si è depositata sulla superficie della nana bianca, quindi il tempo di accumulo dipende dalla quantità di materia fornita dalla compagna nell'unità di tempo. Se il flusso è debole, ci vorrà molto tempo, mentre se il flusso è rilevante l'accrescimento sarà veloce e le condizioni per l'eruzione di nova si produrranno in un tempo relativamente breve.

Un fattore molto rilevante è però anche la gravità superficiale che la nana bianca possiede, in quanto determina la pressione sullo strato di idrogeno depositato sulla superficie della nana bianca: una nana con piccola massa ha un raggio grande, e quindi una gravità superficiale piuttosto ridotta, quindi ha bisogno di uno strato maggiore di idrogeno per innescare l'eruzione, rispetto ad una nana bianca di massa maggiore e raggio minore. Una nana bianca di massa $\sim 0.6 M_{\odot}$ ha bisogno di accrescere un quantitativo di idrogeno quasi cento volte superiore a quello di cui ha bisogno una nana di $\sim 1.3 M_{\odot}$ e, considerando i valori tipici di trasferimento di massa da una nana rossa compagna, mentre per la nana bianca più massiva ci vorranno circa 30 000 anni per raggiungere la quantità necessaria a innescare la nova, per quella meno massiva ce ne vorranno addirittura 5 milioni!

La nana bianca è un oggetto robusto, e la fusione dello strato di idrogeno accresciuto sulla sua superficie, per quanto violenta, potrebbe lasciarla del tutto inalterata. E' probabile pertanto che tutte le variabili cataclismiche, nel corso della loro esistenza, vadano soggette a eruzioni di nova ripetute, ma così lontane una dall'altra che, per la maggior parte delle variabili di cui abbiamo osservato un'eruzione, non siamo ancora riusciti a osservarne la ripetizione.

Tuttavia, abbiamo indizi che il materiale accresciuto potrebbe amalgamarsi in parte con il materiale superficiale della nana bianca, una piccola parte della quale potrebbe essere espulsa durante l'eruzione di nova, lasciando quindi una nana bianca meno massiva.

In altri casi, invece, per le nane bianche più massicce, potrebbe avvenire l'effetto contrario e la nana bianca potrebbe riuscire a trattenere una parte del materiale accresciuto, aumentando quindi la sua massa.

L'eruzione di nova potrebbe anche avere degli effetti sulla compagna. In realtà, benché alcuni effetti possano essere ipotizzati, al momento l'osservazione non ha dato risultati affidabili, quindi la questione è aperta.

Esistono tuttavia alcuni sistemi in cui abbiamo *già osservato* la ricorrenza di eruzioni di nova; tali sistemi vengono chiamati «**nove ricorrenti**», contrapposti ai sistemi in cui

la nova è stata osservata una sola volta, che vengono chiamati «**nove classiche**». Non è ancora certo se si tratti di sistemi come quelli descritti in questo testo o sistemi di tipo diverso. Certamente può trattarsi di variabili cataclismiche in cui la nana bianca ha una massa vicina al limite di Chandrasekhar ($1.4 M_{\odot}$), per i quali, con flussi di materiale sostenuti, le eruzioni di nova potrebbero avvenire a intervalli inferiori a 100 anni⁴⁷.

Tuttavia, la maggior parte delle nove ricorrenti non sono sistemi costituiti da una nana bianca e una nana rossa in semi-contatto, con periodi orbitali di ore, ma sistemi in cui la stella compagna è una gigante rossa, con periodi orbitali molto più lunghi (da alcuni giorni a centinaia di giorni⁴⁸). La natura degli outburst di questi sistemi non è chiara, e gli eventi identificati come eruzioni di nova potrebbero essere correlati con la stella gigante e con il disco, anziché con la nana bianca.

Una nota sulla nomenclatura: una nova viene identificata con la designazione «nova», seguita dal genitivo della costellazione in cui è stata identificata, dall'anno in cui è stata osservata ed eventualmente, se nello stesso anno sono state osservate più nove nella stessa costellazione, dal numero progressivo di apparizione. Ad esempio, la nova molto brillante osservata nel Perseo nel 1901 ha avuto la designazione *Nova Persei 1901*. Se ce ne fossero state due, la prima sarebbe stata denominata *Nova Persei 1901 No. 1* e la seconda *Nova Persei 1901 No. 2*. La comparsa di nove dipende molto dalla costellazione: nel 2012 ci furono cinque nove nel Sagittario e nel 2021 cinque nello Scorpione; d'altra parte ci sono costellazioni in cui non ne abbiamo osservata nemmeno una, ad esempio il Capricorno, l'Hydra e persino nella costellazione più estesa, l'Orsa Maggiore.

Poiché una nova è anche una stella variabile, le nove che ancora non abbiano una designazione di Bayes la ricevono in quel momento; ad esempio, la *Nova Persei 1901* è stata anche denominata *GK Per*.

Mentre le supernove sono rare (si ritiene che ne esplodano 1 o 2 al secolo nella nostra galassia), le nove sono molto più comuni e si ritiene che nella nostra galassia ne appaiano circa 30 all'anno, di cui una molto brillante (cioè visibile a occhio nudo) ogni 10 anni circa. L'attuale tasso di individuazione è tra 5 e 15 nove all'anno, le rimanenti essendo invisibile in quanto coperte dalle polveri intergalattiche⁴⁹

Curiosamente, sono 80 anni che non vediamo una nova brillante; nel secolo scorso, *Nova Persei 1901* raggiunse mag 0.2, *Nova Aquilae 1918* (*V603 Aql*, la più brillante conosciuta, quasi come *Sirio*) ebbe mag -1.1 , *Nova Pictoris 1925* (*RR Pic*) raggiunse mag 1.0, *Nova Herculis 1934* (*DQ Her*) mag 1.3 e finalmente *Nova Puppis 1942* (*CP Pup*), con mag 0.5, poi più niente⁵⁰! Qualcuno dice che, semplicemente, siccome non ci sono più gli astronomi di una volta, che conoscevano a memoria tutte le stelle del cielo, le supposte 7–8 nove che

⁴⁷Ad esempio, il sistema T Pyx è una «nova ricorrente», avendo avuto eruzioni di nova negli anni 1890, 1902, 1920, 1944, 1966 e 2011.

⁴⁸Ad esempio la celebre RH Oph, con periodo orbitale di 230 giorni.

⁴⁹Ovviamente, più dense sono le stelle, maggiori sono le probabilità che appaia una nova, pertanto la maggioranza delle nove appare probabilmente verso il centro della galassia, ove sono più difficili da individuare.

⁵⁰Sky&Telescope, Aprile 2023, pag 36.

si sarebbero dovuto osservare dal 1942 sono, semplicemente, passate senza che nessuno se ne sia accorto...

6.3 Le supernove di tipo Ia

C'è un ultimo evento che può interessare una variabile cataclismica, ben più impressionante di quelli finora descritti: l'esplosione di Supernova!

Come abbiamo visto, esiste la possibilità che la nana bianca, se è vicina al suo limite di Chandrasekhar, possa in qualche modo accrescere materiale e superare il limite stesso, sia pure per un attimo. In questo caso, se la nana bianca è composta per la maggior parte di carbonio e ossigeno⁵¹, le condizioni di temperatura e densità potrebbero innescare la reazione nucleare di fusione anche di questi elementi (oltre all'idrogeno superficiale) e l'energia rilasciata sarebbe sufficiente a disintegrare la nana bianca.

D'altra parte, se la nana bianca fosse composta in gran parte di ferro, che non può subire una reazione di fusione nucleare con emissione di energia, la nana bianca collapserebbe in una cosiddetta «stella di neutroni», un oggetto composto di neutroni del diametro di una decina di km.

In questo caso, la nana bianca sparisce ma è rimpiazzata da una «stella di neutroni» che potrebbe col tempo ripetere lo schema delle variabili cataclismiche, ma con una stella di neutroni al posto della nana bianca⁵².

La disintegrazione della nana bianca di carbonio e ossigeno rilascia una enorme quantità di energia e l'evento viene denominato «Supernova di tipo Ia». Si tratta di un evento molto raro (si stima che in una galassia come la nostra, con circa 300 miliardi di stelle, si verifichi una supernova tipo Ia in media una volta al secolo⁵³), riconoscibile dalla particolare curva di luce dell'esplosione, che differisce dalle curve di luce degli altri tipi di supernove.

L'enorme luminosità consente di rilevare queste esplosioni anche in galassie molto lontane, in quanto l'energia rilasciata da una supernova di questo tipo rivalessa spesso con quella della galassia che la ospita, come si può vedere nella figura seguente.

⁵¹In altre parole, il progenitore era una stella di massa $2 - 8 M_{\odot}$.

⁵²Sistemi di questo tipo sono definiti *Low Mass X-ray Binaries* (LMXB) in quanto, date le caratteristiche delle stelle di neutroni, emettono grandi quantità di raggi X durante i loro outbursts (in queste stelle denominati semplicemente «bursts»), che sono molto frequenti, a distanza di ore l'uno dall'altro, e che durano più o meno un minuto. In questo corso non li trattiamo.

⁵³In realtà, l'ultima supernova di questo tipo osservata nella nostra Galassia è stata quella del 1604 in Ofioco, denominata «Supernova di Keplero», e la precedente è stata la «Supernova di Ticho Brahe», osservata nel 1572 in Cassiopea. Da allora nella Via Lattea non sono state più osservate supernove Ia, forse perché hanno avuto luogo dalla parte opposta del centro galattico e quindi sono state per noi invisibili. Stiamo aspettando...

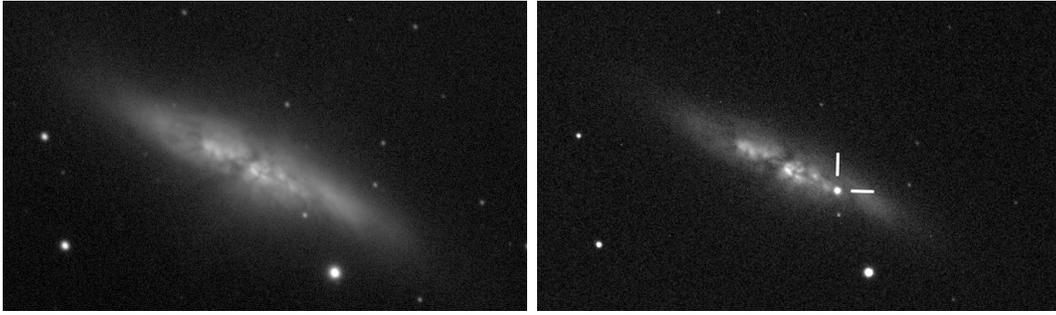


Figura 6.3: La supernova SN 2014J nella Galassia Sigaro (M82): a sinistra prima dell'esplosione, a destra durante l'esplosione.

Poiché l'esplosione di supernova, nel caso del tipo Ia⁵⁴, avviene per una specifica massa della nana bianca (circa $1.41 M_{\odot}$), l'energia rilasciata nell'evento è (teoricamente) sempre uguale e questo consente di stimare con una certa precisione la distanza della supernova e, quindi, la distanza delle stelle che si trovano nella stessa area e sono ad essa gravitazionalmente collegate, il che è molto importante. Per questo motivo, le supernove tipo Ia vengono considerate «candele standard», ovvero luci di intensità nota.

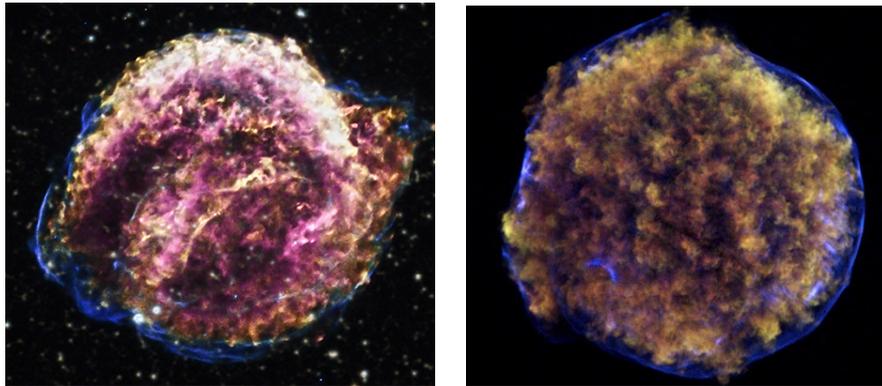


Figura 6.4: I resti della supernova Ia di Tycho (a sinistra) e di quella di Keplero (a destra). Si noti la somiglianza.

Sfortunatamente, ultimamente gli studi relativi alle variabili cataclismiche in cui la stella donatrice è una stella che ha perso l'involuppo di idrogeno (ad esempio le massicce stelle denominate Wolf-Rayet), e quindi accresce elio anziché idrogeno, sembrano indicare che l'energia emessa da supernove Ia derivanti da questi sistemi è alquanto diversa da quella emessa dalle supernove Ia usuali, il che potrebbe indurre in alcuni casi a una riconsiderazione delle distanze ottenute.

Come già rimarcato, al momento si ritiene che, nel corso delle eruzioni di nova, la maggior parte delle nane bianche perda massa, quindi non rischino di esplodere come

⁵⁴Distinguibile dalle esplosioni di supernova tipo II, causate dal collasso delle stelle di grande massa, in quanto lo spettro di una supernova tipo I indica la presenza di pochissimo o nessun quantitativo di idrogeno, mentre lo spettro di una supernova tipo II ne mostra in abbondanza.

supernove Ia. Tuttavia, quelle con la massa maggiore, vicina al limite di Chandrasekhar, probabilmente composte in gran parte di ferro, sembrano al contrario accrescere massa durante le eruzioni di nova e, pertanto, potrebbero a un certo punto esplodere come supernove. Poiché i sistemi con nane bianche di grande massa sono quelli denominati «nove ricorrenti», le nove ricorrenti potrebbero essere i progenitori delle supernove di tipo Ia.

La figura seguente mostra un profilo teorico tipico di una supernova tipo Ia, assieme a un profilo tipo di una supernova tipo II (evidenti le differenze). A fianco, la curva di luce (nei filtri V ed R rispettivamente) della supernova tipo Ia SN 2014J.

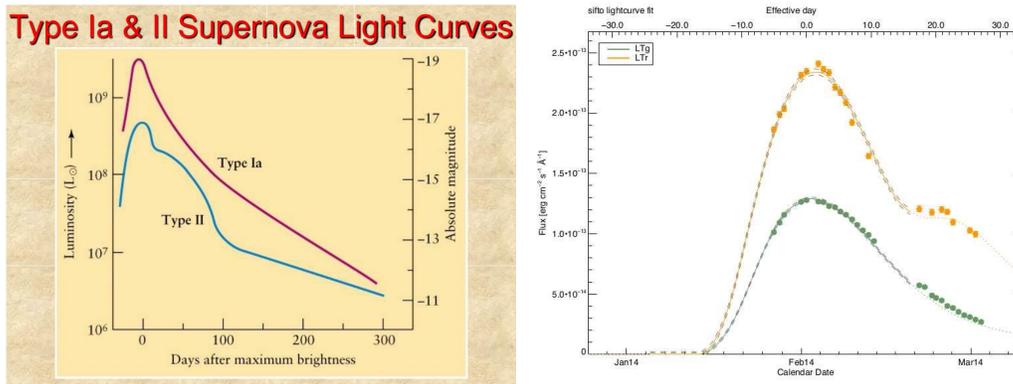


Figura 6.5: Curve di luce teoriche delle SN tipo I e II (a sinistra) e curva di luce della SN Tipo Ia SN 2014J (a destra).

7 Conclusione

In questo corso abbiamo trattato una speciale classe di oggetti stellari, le *variabili cataclismiche*. La trattazione ha riguardato gli aspetti più comuni, tralasciandone altri.

Forse il fattore più importante che abbiamo trascurato è relativo alla possibile influenza dei campi magnetici, che caratterizzano la sottoclasse delle *variabili cataclismiche magnetiche*. Data la presenza di flussi di plasma in rotazione, presumibilmente tutte le variabili cataclismiche posseggono dei campi magnetici. In effetti, la trattazione di questo testo si deve intendere riferita a variabili cataclismiche in cui i loro effetti sono trascurabili; per variabili in cui i campi magnetici sono intermedi o grandi, la situazione si complica alquanto.

Abbiamo inoltre assunto che i dischi di accrescimento siano perfettamente circolari: questo non è sempre il caso, in quanto la gravità della stella compagna, se il disco è abbastanza esteso, può ovalizzarlo, permanentemente o anche solo durante gli outburst, quando il disco si estende verso l'esterno a causa del trasporto di momento angolare dovuto all'accresciuta viscosità. In questi casi si creano degli effetti di risonanza e dei momenti torcenti prodotti dal flusso di materiale trasferito dalla stella donatrice; questo può causare variazioni nel periodo orbitale e variazioni di luminosità nel culmine della curva di luce di

un outburst, chiamati «superhumps», nonché la presenza di cicli in cui i normali outburst sono cadenzati da outburst più lunghi e più luminosi, chiamati «superoutburst».

Ancora, nel caso in cui il periodo orbitale del sistema e il periodo di rotazione del disco ellittico entrino in risonanza, il disco di accrescimento può essere interessato da onde di pressione (shock waves) che si muovono a spirale nel disco stesso. Questo caso è però poco frequente e per di più potrebbe verificarsi solo durante gli outburst.

Un argomento che abbiamo sorvolato riguarda il flusso di materia trasferito dalla stella compagna, che può variare nel tempo per vari motivi. In teoria, la massa trasferita nell'unità di tempo dovrebbe dipendere solo dalla massa dei due oggetti (nana bianca e stella donatrice) e dalla loro reciproca distanza (quindi dal periodo orbitale). In realtà, l'osservazione di sistemi con caratteristiche molto simili mostra che essi possono avere trasferimenti anche centinaia di volte differenti. Le cause, che potrebbero differire da sistema a sistema, potrebbero essere intrinseche, dovute a una variabilità della stella o alla presenza su di essa di macchie di grandi dimensioni, oppure esterne, come il riscaldamento della superficie della stella da parte della nana bianca (riflessione). In molti casi la variazione di flusso sembra essere del tutto casuale, senza apparente motivo (resta sempre la possibilità che la causa risieda in forti campi magnetici⁵⁵). Alcune stelle mostrano variazioni del periodo orbitale, la cui causa è ancora sconosciuta, che ovviamente indurrebbero cambiamenti nella geometria del sistema e quindi nel trasferimento di massa.

E' comunque chiaro il fascino e l'importanza dello studio delle variabili cataclismiche e spero che queste brevi note abbiano acceso il vostro interesse e, chissà, il desiderio di partecipare alla ricerca in questo campo.

⁵⁵Scusa sempre valida...