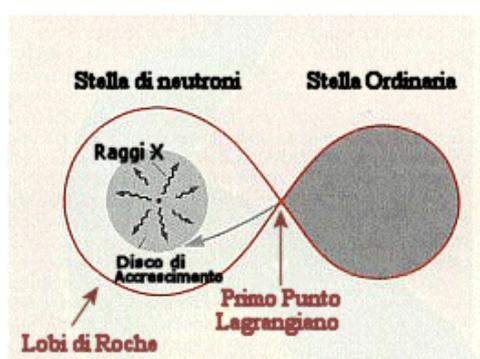


## Emissione X da sistemi binari

Le binarie X sono sistemi in cui un oggetto compatto (una nana bianca, una stella di neutroni o un buco nero) cattura materia proveniente da una stella compagna in un'orbita binaria chiusa. A seconda delle caratteristiche fisiche e geometriche del sistema il trasferimento ha luogo con diverse modalità alle quali sono associati diversi tipi di emissione energetica.

Le binarie X contenenti stelle di neutroni si dividono tradizionalmente in due classi, chiamate LMXRB (Low Mass X-Ray Binaries) and HMXRB (High Mass X-Ray Binaries).

Le binarie di classe **LMXRB** contengono una stella ordinaria avente massa simile a quella del sole. L'unico modo per cui uno di questi oggetti può raggiungere una luminosità in banda X compatibile con quella osservata è il trasferimento diretto di materia. Questo passaggio può avvenire solamente se la stella ha dimensioni tali da riempire tutto il suo lobo di Roche (definito come la superficie equipotenziale che passa per il punto dove l'attrazione gravitazionale delle due stelle si annulla); in questo caso la materia stellare straripa e cade verso l'oggetto compatto. A causa del momento angolare della massa ceduta si forma un disco di accrescimento che ruota in maniera differenziale, si riscalda per frizione tra diversi strati e produce quindi raggi X. La radiazione proveniente dal disco di accrescimento domina anche l'emissione ottica e quindi questi sistemi appaiono spesso come stelle bluastre.

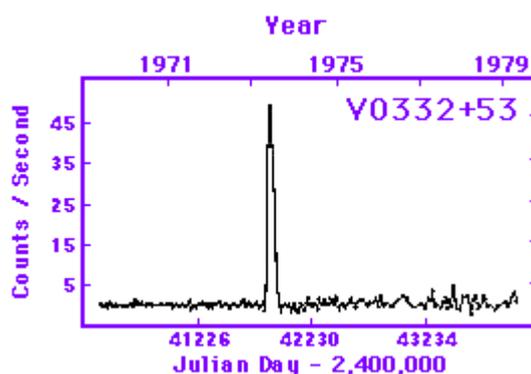


**Fig1:** Rappresentazione grafica dei lobi di Roche e primo punto lagrangiano in un sistema binario

Le binarie di classe **HMXRB** hanno al loro interno una stella molto massiva che emette un intenso vento stellare accelerato dalla pressione di radiazione a velocità che possono raggiungere  $2000 \text{ Km s}^{-1}$ . L'oggetto secondario cattura una certa frazione del vento stellare e converte la sua energia cinetica in raggi X. Il calcolo dell'emissione X in questi sistemi è

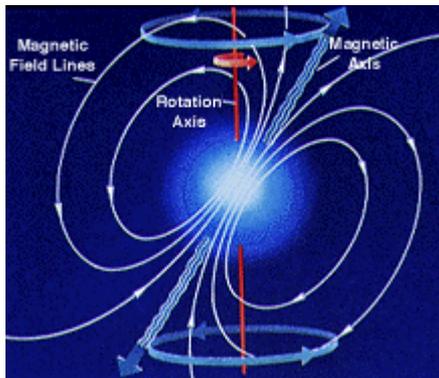
molto complesso, infatti è necessario tenere conto della pressione di radiazione X sul vento stellare (che riduce la sua energia cinetica), dell'assorbimento fotoelettrico e dell'eventuale dipendenza della velocità e intensità del vento stellare dall'angolo di emissione

Nel caso la stella ordinaria appartenga alla classe spettrale Be il comportamento di quest'ultima controlla le caratteristiche del sistema. Una stella di classe Be è sostanzialmente una stella di classe B che ruota molto rapidamente; la forza centrifuga nelle zone periferiche equatoriali ha intensità comparabile a quella gravitazionale e quindi parte dell'atmosfera stellare riesce ad abbandonare la stella creando un involucro gassoso che la circonda e si espande in generale in maniera differenziale. Le proprietà spettrali infatti suggeriscono (Zickgraf, 1985) che l'espansione dell'involucro gassoso sia dominata da un vento stellare a due componenti, una polare più veloce e una equatoriale più lenta (con velocità tipiche rispettivamente di  $10^3$  e  $10$  Km  $s^{-1}$ ). In questo involucro si originano intense linee di emissione dell'idrogeno e dell'elio tipiche di questi sistemi. Inoltre le stelle Be usualmente espellono materiale ad intervalli regolari, dando origine ad involucri gassosi concentrici; quando l'oggetto compatto ne incontra uno la luminosità X del sistema si alza, originando un burst X. Questo comportamento è tipico delle **sorgenti X transienti**. I burts possono essere periodici o aperiodici e non sembra esserci una correlazione tra l'intervallo di tempo che separa due bursts e la loro intensità.



[Figura 2: La curva di luce della sorgente X transiente V0332+53. Nel 1973 è diventata molto intensa, circa 1000 volte superiore allo stato normale. E' classificata di classe spettrale Be]

Un comportamento simile a quello delle sorgenti X transienti sembra caratterizzare anche alcune binarie di tipo LMXRB, tuttavia non è del tutto chiaro quale sia il processo che genera il cambiamento nel regime di accrescimento necessario per generare i burst. Alcuni hanno pensato che questi siano causati dal transito dell'oggetto compatto all'interno degli strati più densi dell'atmosfera stellare della primaria. Un'altra ipotesi piuttosto popolare introduce una instabilità nel disco di accrescimento; fondamentalmente il materiale si accumulerebbe fino a quando non si genera una condizione di instabilità che aumenta temporaneamente il tasso di accrescimento sull'oggetto compatto



[Fig 3: Il diagramma di una pulsar; sono evidenziati l'asse di rotazione e il campo magnetico con il suo asse.]

Molte binarie HMXRB sono caratterizzate da pulsazioni periodiche di raggi X con periodi che vanno da pochi centesimi di secondo fino ad alcune decine di minuti. In questo caso il sistema prende il nome di "pulsar X". L'impulso ha origine in vicinanza della stella di neutroni che si trova all'interno del sistema, la quale è caratterizzata da un intenso campo magnetico bipolare (tipicamente  $10^{12}$  Gauss) con asse magnetico usualmente disallineato dall'asse di rotazione. In campo magnetico spinge le particelle elettricamente cariche del plasma proveniente dalla stella ordinaria verso le regioni magnetiche polari, accelerandole fino a velocità prossime a quella della luce. Quando il gas raggiunge i due poli l'impatto è così violento da creare punti estremamente caldi ( $\sim 10^8$  K) i quali emettono raggi X con luminosità centinaia di

migliaia di volte superiore a quella del Sole. Dato che i poli rotazionali non coincidono con quelli magnetici questi possono essere alternatamente visibili e invisibili durante la rotazione della stella di neutroni; se l'osservatore si trova nella giusta posizione osserva quindi impulsi periodici di radiazione X.

Una valutazione approssimata della luminosità bolometrica  $L_{bol}$  di una binaria X si ottiene imponendo che l'energia cinetica acquistata dalla materia caduta sulla superficie dell'oggetto compatto venga interamente convertita in radiazione elettromagnetica. E' quindi facilmente dimostrabile la validità della relazione

$$L_{bol} = \frac{GM \dot{m}}{r} \quad (1.1)$$

$\dot{m}$  è il tasso di accrescimento (ovvero la quantità di materia convertita in radiazione nell'unità di tempo), M è la massa dell'oggetto compatto e r il suo raggio.

Si assume inoltre che la distribuzione energetica della radiazione emessa sia una plankiana caratterizzata da una temperatura equivalente determinata dalla legge di Stefan

$$T = \left( \frac{L}{S\sigma} \right)^{1/4} \quad (1.2)$$

( $\sigma$  è la costante di Stefan-Boltzmann e S la superficie della stella)

L'energia  $E_{\max}$  in cui si ha il picco di emissione è invece, secondo la legge di Wien, direttamente proporzionale alla temperatura assoluta

$$E_{\max} = \text{cost } T \quad (1.3)$$

Quando il sistema contiene una nana bianca al posto della stella di neutroni l'emissione X è radicalmente diversa e dipende sia dalle caratteristiche della stella donatrice sia dal campo magnetico della nana bianca. In generale la luminosità X è quasi sempre compresa tra  $10^{31}$  e  $10^{32}$  erg s<sup>-1</sup> (0.15-3 keV) ed è quindi di alcuni ordini di grandezza inferiore a quella delle binarie X (come è facilmente deducibile dalla 1.1 tenendo in considerazione che il raggio tipico di una nana bianca è circa 100 volte superiore a quello di una stella di neutroni). Inoltre lo spettro è in generale più soft dei sistemi contenenti stelle di neutroni; infatti un raggio inferiore implica una luminosità bolometrica e una temperatura equivalente inferiore (1.1 e 1.2) e conseguentemente un picco di emissione della distribuzione energetica situato ad energie inferiori (1.3).

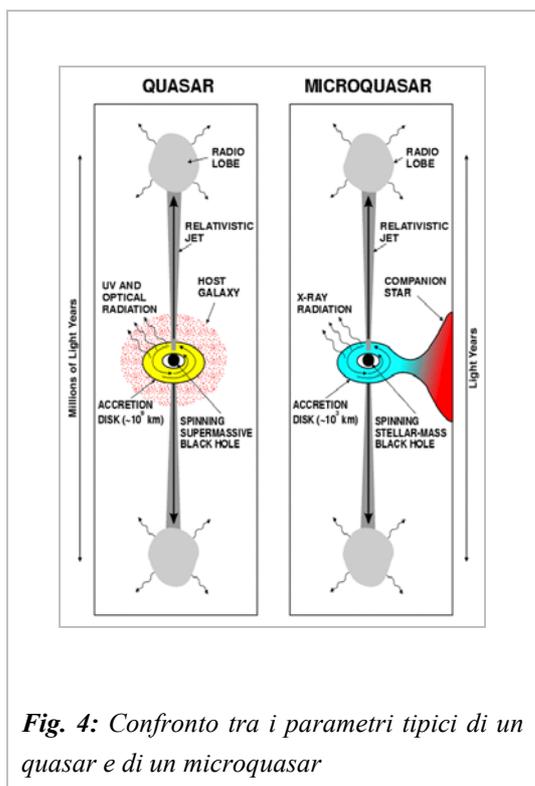
La maggior parte delle volte il responsabile dell'emissione X è un disco di accrescimento con temperature che possono raggiungere 100 milioni di gradi. Questi sistemi sono detti **variabili cataclismiche**, in quanto mostrano anche una variabilità intrinseca nell'ottico con bursts periodici che innalzano la luminosità di alcune magnitudini in maniera ricorrente. Molte nane bianche hanno un intenso campo magnetico (circa  $10^6$  Gauss) il quale agisce sul disco di accrescimento, distruggendolo e guidando le particelle cariche lungo le regioni polari. Questi sistemi (chiamati Polars) sono caratterizzati da una emissione X più intensa di quella generata da un disco di accrescimento e spesso da impulsi periodici. Esistono anche oggetti chiamati Sorgenti Super-Soft (SSS), poichè presentano spettri X estremamente molli se comparati con quelli delle normali variabili cataclismiche (la maggioranza dei fotoni è al di sotto di 0.5 keV) e dominati dall'emissione di corpo nero con temperatura compresa tra 200.000 e 800.000K.

E' evidente che, se l'osservatore individua un impulso periodico nel sistema binario è necessariamente presente un oggetto compatto, tuttavia l'assenza di pulsazioni non è una condizione sufficiente per escluderne la presenza e pensare ad altri meccanismi di emissione o a sistemi binari contenenti buchi neri. La condizione necessaria è invece data dalla funzione di massa ottica superiore a 3.2 masse solari. Questa esprime la massa minima dell'oggetto collassato all'interno del sistema binario; poichè non esistono condizioni di stabilità per una stella di neutroni di massa superiore a questo limite, quando viene superato il sistema contiene sicuramente un buco nero.

In generale sistemi binari X contenenti buchi neri sono caratterizzati da un' alta luminosità in banda X ( $L_x > 10^{36}$  erg/s) con spettri più soft di quelli delle binarie X ordinarie. Inoltre è quasi sempre presente una variabilità aperiodica veloce con assenza di bursts di tipo I. Questi sono improvvisi aumenti della luminosità X determinati dall'innescio di reazioni nucleari in prossimità della superficie dell'oggetto collassato; durano qualche decina di

secondi, si presentano ogni poche ore e mostrano una tipica curva di rilassamento. Sembra inoltre che tutte le binarie X aventi all'interno un buco nero producano una coppia di radiogetti con velocità relativistiche, simmetrici o quasi simmetrici, ricalcando la fenomenologia osservata nei quasars (una classe di AGN). Certamente il buco nero in un quasar ha massa tipica di alcuni milioni di masse solari, mentre nei microquasars l'oggetto compatto è di poche masse solari; tuttavia si ritiene che il processo fisico che produce i radiogetti sia lo stesso.

Recentemente si è scoperto che numerosi sistemi binari-X aventi all'interno una stella di neutroni presentano dei radiogetti relativistici e quindi attualmente si preferisce includerle nella categoria dei microquasars. Radiogetti possono essere emessi in certe condizioni anche da altri oggetti quali nane bianche o nuclei di nebulose planetarie, ma la loro velocità raggiunge al massimo  $10000 \text{ Km s}^{-1}$ , un ordine di grandezza inferiore a quelli tipici di sistemi con buchi neri e stelle di neutroni.



*Fig. 4: Confronto tra i parametri tipici di un quasar e di un microquasar*

largamente sconosciuti e coinvolge sicuramente complicati processi di magnetoidrodinamica.

Attualmente si conoscono diverse centinaia di binarie X candidate a contenere un buco nero; prima di tutte Cygnus X-1, in cui l'oggetto compatto sembra avere massa compresa tra 7 e 16 masse solari.

*Tratto dalla tesi di Michele Moroni*

Sembra che esista una correlazione tra velocità dei radiogetti e la massa dell'oggetto compatto che li produce, tuttavia la statistica è ancora bassa e su questa base è attualmente difficile distinguere la presenza di una stella di neutroni o di un buco nero. Un'altro indicatore della massa dell'oggetto compatto è la presenza di una variabilità quasi-periodica (QPO) i cui tempi scala sembrano proporzionali alla massa dell'oggetto centrale.

E' stato scoperto che gli eventi di espulsione di radiogetti sono associati alla diminuzione della luminosità X al di sopra dei 20 keV; sembra quindi che parte della materia del disco di accrescimento, responsabile della produzione di raggi X duri, venga parzialmente assorbita dall'oggetto compatto e riemessa andando a formare i radiogetti. Tuttavia i dettagli del processo fisico che produce questi getti è