

# Studio di sistemi binari Galattici con accrescimento su oggetti compatti mediante il satellite per astronomia gamma INTEGRAL

Lorenzo Ducci

*Relatore interno:* Prof. Pierre M. Pizzochero

*Relatore esterno:* Dott. Sandro Mereghetti (INAF-IASF Milano)

*Correlatore:* Dott.ssa Adamantia Paizis (INAF-IASF Milano)

*Correlatore:* Dott.ssa Lara Sidoli (INAF-IASF Milano)

Università degli Studi di Milano

Corso di Laurea in Fisica



# Indice

- 1 Sistemi Binari X (HMXB)
  - Componenti del sistema
  - Accrescimento
  
- 2 Curve di luce X
  - HMXB con stella Be: A0535+26
  - HMXB con stella OB: 4U 1700-37
  - HMXB con stella Be: V0332+53
  
- 3 SAX J2103.5+4545
  - Spettri di energia e profili di pulsazione
  - Periodo di pulsazione

# Binarie X di grande massa (HMXB)

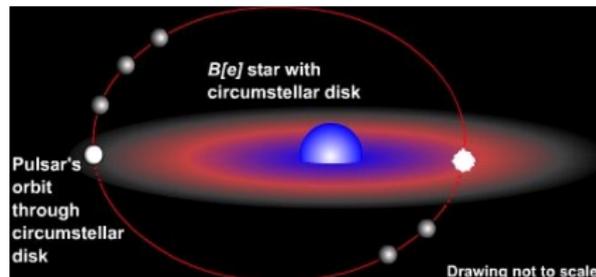
## Oggetto Compatto

- *Stella di Neutroni (NS)*
- *Buco Nero (BH)*



## Stella normale $M > 10 M_{\odot}$

- *Supergigante OB*
- *Stella Be*



# Binarie X di grande massa (HMXB)

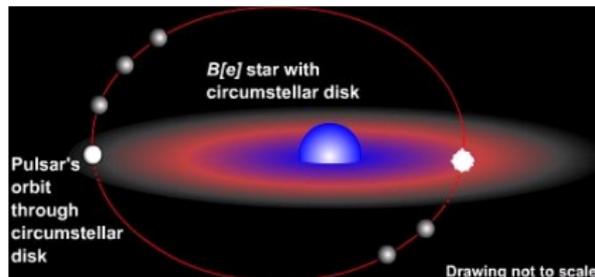
## Oggetto Compatto

- *Stella di Neutroni (NS)*
- *Buco Nero (BH)*



## Stella normale $M > 10 M_{\odot}$

- *Supergigante OB*
- *Stella Be*

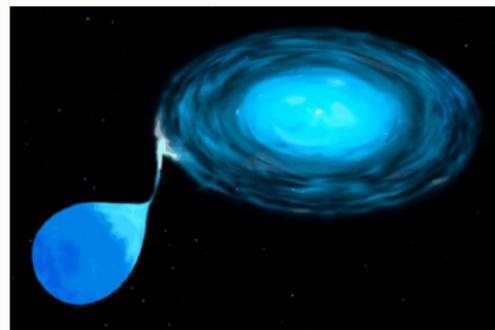


# Tipi di Accrescimento

## Accrescimento direttamente da vento



## Disco di Accrescimento



$$\text{Luminosità: } L_x \propto \frac{GM_x}{R_x} \dot{M}_x$$

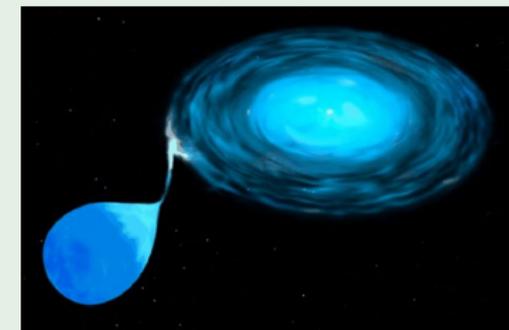
$$\dot{M}_x = f(P_{orb}, e, r, v_{vento}, \rho, T)$$

# Tipi di Accrescimento

## Accrescimento direttamente da vento



## Disco di Accrescimento



$$\text{Luminosità: } L_x \propto \frac{GM_x}{R_x} \dot{M}_x$$

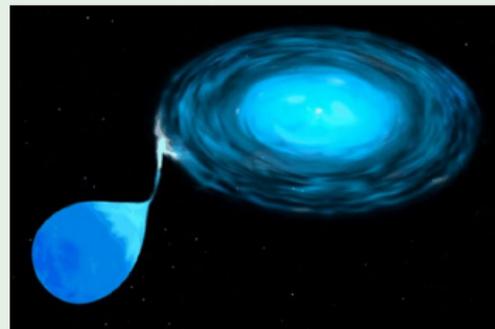
$$\dot{M}_x = f(P_{orb}, e, r, v_{vento}, \rho, T)$$

# Tipi di Accrescimento

## Accrescimento direttamente da vento



## Disco di Accrescimento



$$\text{Luminosità: } L_x \propto \frac{GM_x}{R_x} \dot{M}_x$$

$$\dot{M}_x = f(P_{orb}, e, r, v_{vento}, \rho, T)$$

## Parte II: Studio delle curve di luce nelle HMXB

### Luminosità X

$$L_x = 4\pi \frac{(GM_x)^3}{R_x} \frac{\rho(r)}{v_{rel}^3} \quad \text{erg/sec}$$

$v_{rel}$  è la velocità relativa del vento:

$$v_{rel}^2 = (v_{vento}(r) - v_r)^2 + (v_{rot,w}(r) - v_\phi)^2 + c^2$$

Parametri che possono modificare  $L_x$ :

- *Parametri delle stelle:* Masse e raggi, campo magnetico e periodo di pulsazione della stella di neutroni.
- *Parametri orbitali:*  $P_{orb}$ , eccentricità, inclinazione del piano orbitale rispetto al disco circumstellare (Be), troncamento del disco (Be);
- *Parametri del vento:*  $\dot{M}$ ,  $v_{vento}(r)$ ,  $\rho(r)$ , temperatura.

## Parte II: Studio delle curve di luce nelle HMXB

### Luminosità X

$$L_x = 4\pi \frac{(GM_x)^3}{R_x} \frac{\rho(r)}{v_{rel}^3} \quad \text{erg/sec}$$

$v_{rel}$  è la velocità relativa del vento:

$$v_{rel}^2 = (v_{vento}(r) - v_r)^2 + (v_{rot,w}(r) - v_\phi)^2 + c^2$$

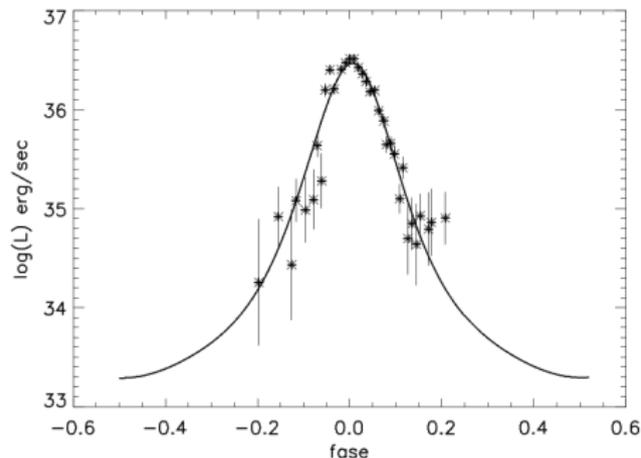
### Parametri che possono modificare $L_x$ :

- *Parametri delle stelle:* Masse e raggi, campo magnetico e periodo di pulsazione della stella di neutroni.
- *Parametri orbitali:*  $P_{orb}$ , eccentricità, inclinazione del piano orbitale rispetto al disco circumstellare (Be), troncamento del disco (Be);
- *Parametri del vento:*  $\dot{M}$ ,  $v_{vento}(r)$ ,  $\rho(r)$ , temperatura.

# HMXB con stella Be: A0535+26

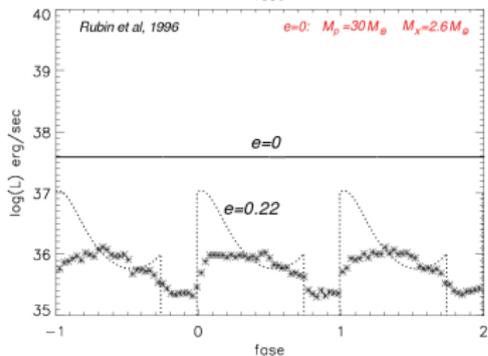
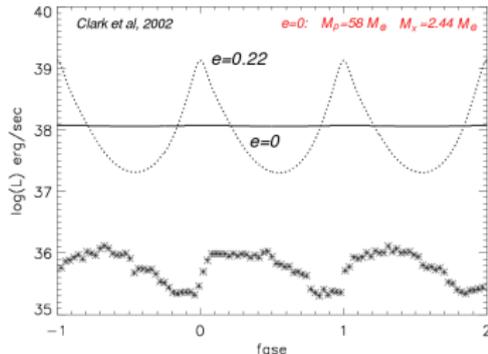
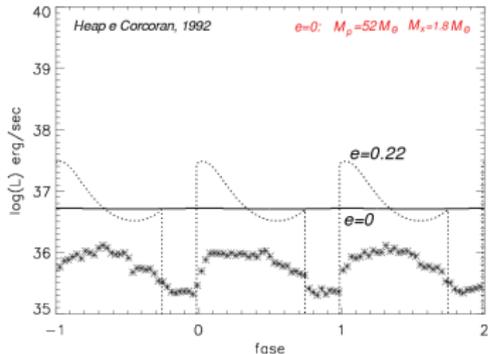
## Caratteristiche (Motch et al., 1991):

- $M_{Be} = 12 M_{\odot}$ ;
- $M_{NS} = 1.4 M_{\odot}$ ;
- *Parametri orbitali:*
  - Piano orbitale contenuto all'interno del disco circumstellare,
  - $P_{orb} = 111$  giorni,
  - $e = 0.47$ ;
- *Caratteristiche del disco circumstellare:*
  - $v_0 \sim 30$  km/sec,
  - $\rho_0 = 10^{-11}$  gr/cm<sup>3</sup> ed  $n = 3.3$ ,
  - $v_{rot,p} = 330$  km/sec con disco kepleriano  $\alpha = 0.5$ ;



⇒ **Accordo tra teoria e osservazioni**  
(RXTE, 2 – 10 keV, Agosto 2005)

# HMXB con stella OB: 4U 1700-37



$$f_x(M) = \frac{M_p^3 \sin^3 i}{(M_x + M_p)^2} = \frac{4\pi^2 (a \sin i)^3}{GP_{orb}^2}$$

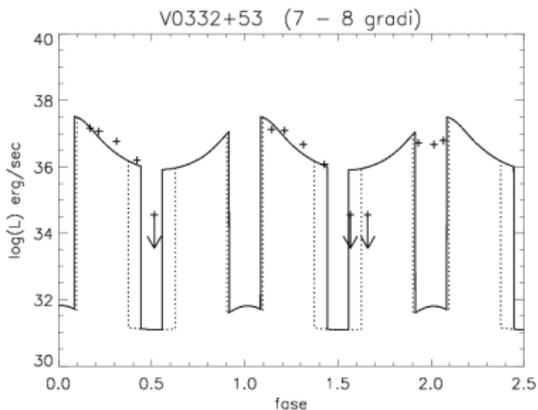
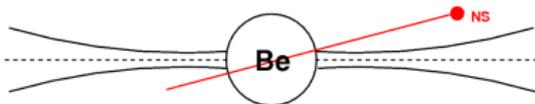
- { Hammerschlag-Hensberge et al. 2003 → e = 0.22
- { Rubin et al. 1996 → i = 66°<sup>+7</sup><sub>-5</sub>

⇒ Caratteristiche del vento prodotto dalla OB diverse da quelle assunte.

(RXTE, 2 – 10 keV, dal Gennaio 1996 al Gennaio 2000)

# HMXB con stella Be: V0332+53

Piano orbitale inclinato rispetto al disco

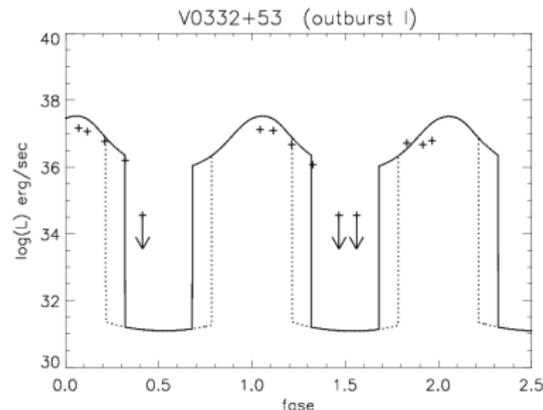
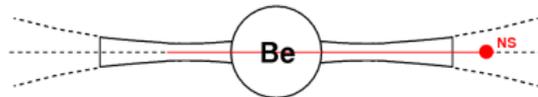


⇒ **Disaccordo tra teoria e osservazioni**

Parametri del sistema:

(Waters et al., 1988; Negueruela et al., 1999)

Troncamento del disco



⇒ **Accordo tra teoria e osservazioni**

(TENMA ed EXOSAT, 1983/1984)

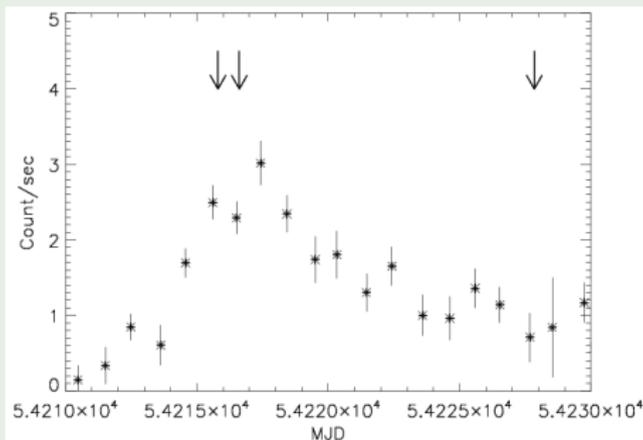
## Parte III

# Studio del sistema binario SAX J2103.5+4545

## SAX J2103.5+4545

- Costituito da stella *Be* e una *pulsar* ( $P_{puls} \sim 352.6$  secondi),
- Transiente  $L_x \sim 10^{36}$  erg/sec,
- $P_{orb} = 12.66528 \pm 0.00051$  (Camero Arranz et al., 2007),
- $e = 0.401 \pm 0.018$  (Camero Arranz et al., 2007),
- *distanza* =  $6.5 \pm 0.9$  kpc (Reig et al., 2004).

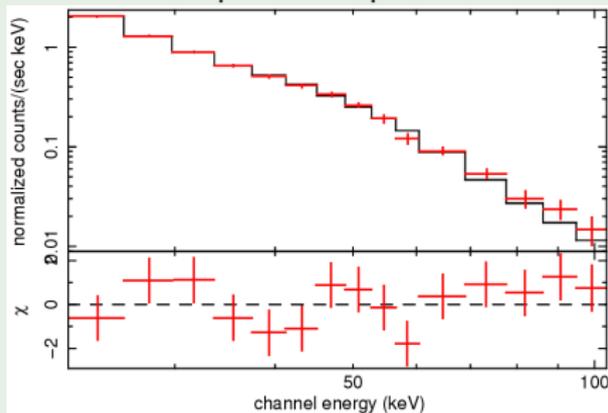
## Outburst Aprile-Maggio 2007 (RXTE, 2-10 keV)



## SAX J2103.5+4545: Spettri di energia e profili di pulsazione

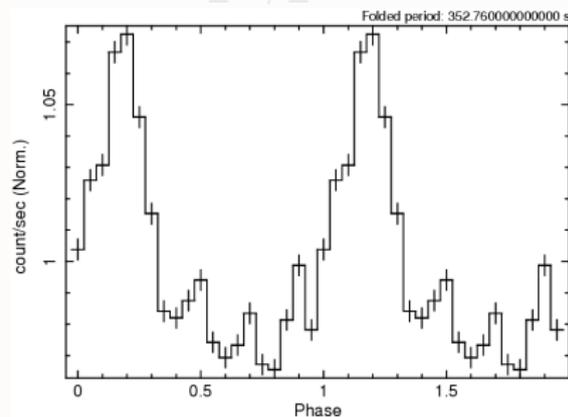
## Spettri di energia INTEGRAL

~ 25 Aprile - 27 Aprile 2007



bremsstrahlung:  $kT = 23.4^{+0.8}_{-0.7}$  keV  
 $F_x(20 - 100 \text{ keV}): 1.69 \cdot 10^{-9} \text{ erg}/(\text{cm}^2 \text{ sec})$   
 $L_x = 5.6 \cdot 10^{36} \text{ erg/sec}$

## Profili di pulsazione INTEGRAL

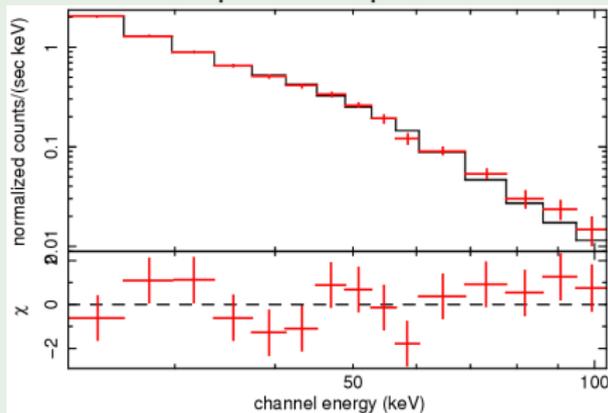
 $15 \leq E_\gamma \leq 60 \text{ keV}$ 

- Variabilità nel tempo;
- Variabilità per diversi intervalli di energia.

## SAX J2103.5+4545: Spettri di energia e profili di pulsazione

## Spettri di energia INTEGRAL

~ 25 Aprile - 27 Aprile 2007

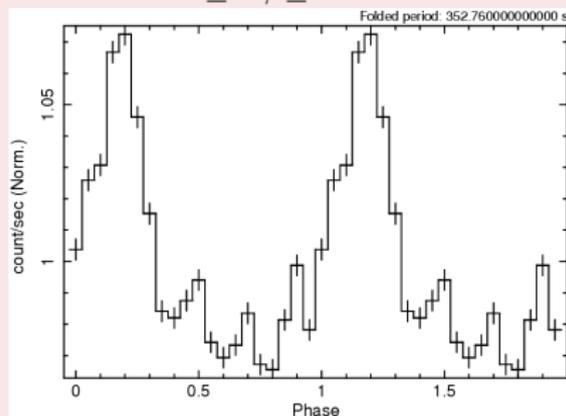


bremsstrahlung:  $kT = 23.4^{+0.8}_{-0.7}$  keV

$F_x(20 - 100 \text{ keV}): 1.69 \cdot 10^{-9} \text{ erg}/(\text{cm}^2 \text{ sec})$

$L_x = 5.6 \cdot 10^{36} \text{ erg/sec}$

## Profili di pulsazione INTEGRAL

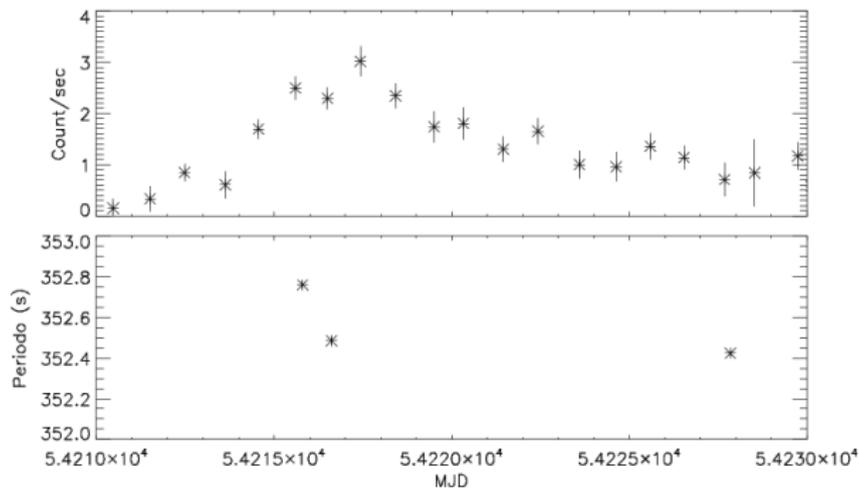
 $15 \leq E_\gamma \leq 60 \text{ keV}$ 

- Variabilità nel tempo;
- Variabilità per diversi intervalli di energia.



## SAX J2103.5+4545: Periodo di pulsazione e Spin-up

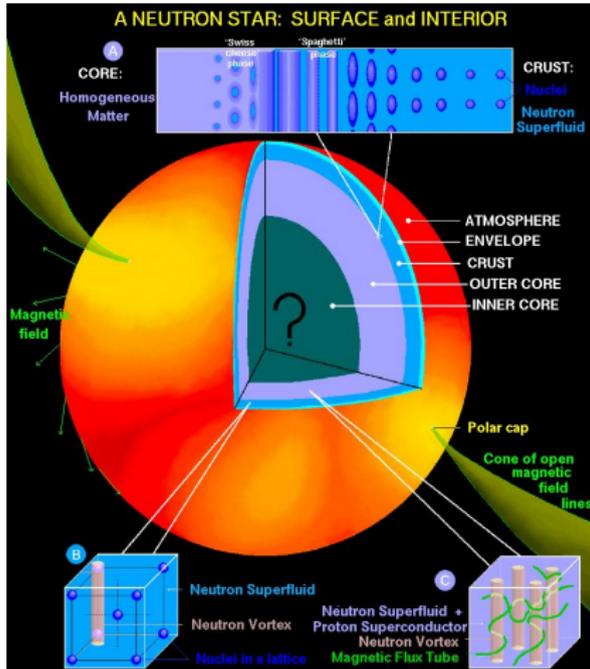
$P_{puls}$ (s)
$352.760 \pm 0.020$
$352.485 \pm 0.017$
$352.424 \pm 0.010$



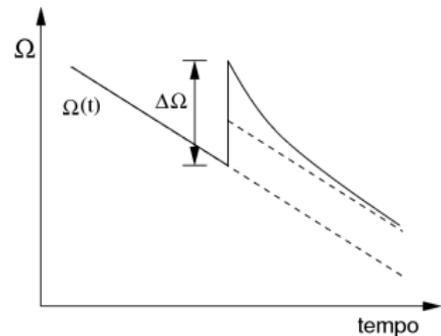
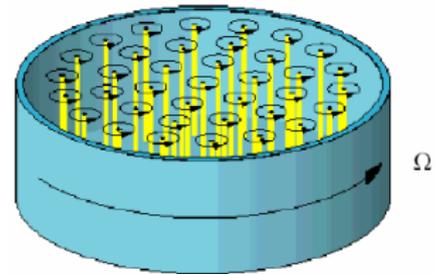
$$\dot{P} = (-1.95 \pm 0.19) \cdot 10^{-6} \text{ s s}^{-1}$$

$$\dot{P}_{medio} = (-1.78 \pm 0.81) \cdot 10^{-7} \text{ s s}^{-1}$$

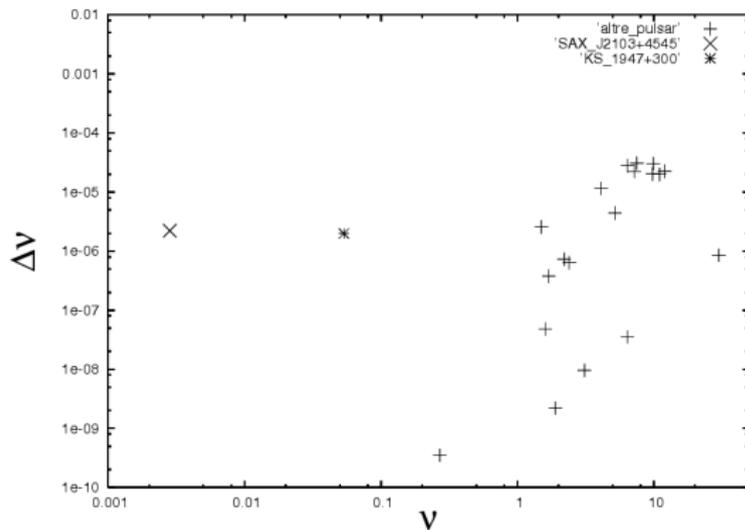
# Glitches



Trasferimento di momento angolare dai vortici di superfluido di neutroni alla crosta della pulsar:



## SAX J2103.5+4545: Glitch



$$(\Delta\nu)_{\text{SAX}\dots} = 2.2 \cdot 10^{-6} \text{ Hz}$$

$(\Delta\nu)_{\text{max}} \sim 10^{-4} \text{ Hz}$ ,  
(Link e Cutler, 2002; Donati e Pizzochero 2006)

$$\Rightarrow (\Delta\nu)_{\text{SAX}\dots} < (\Delta\nu)_{\text{max}}$$

$$\Rightarrow (\Delta\nu)_{\text{KS } 1947+300} < (\Delta\nu)_{\text{max}}$$

# Conclusioni:

## Studio delle curve di luce X per tre sistemi binari:

- Ho confrontato le curve di luce teoriche con le curve di luce vere;
- Il comportamento dei sistemi binari con stella Be sono ben descritti dalle curve di luce teoriche;
- Inoltre da questo confronto ho visto che le caratteristiche del vento della supergigante O di 4U 1700-37 sono diverse da quelle note.

## Studio del sistema binario SAX J2103.5+4545:

Dall'analisi dei dati INTEGRAL ho osservato un improvviso spin-up riconducibile al fenomeno dei glitches, tipico delle **pulsar radio veloci**, e rappresenta una novità per le **pulsar lente**. In futuro sarà interessante osservare tale fenomeno in altre *HMXB*.

FINE

# Conclusioni:

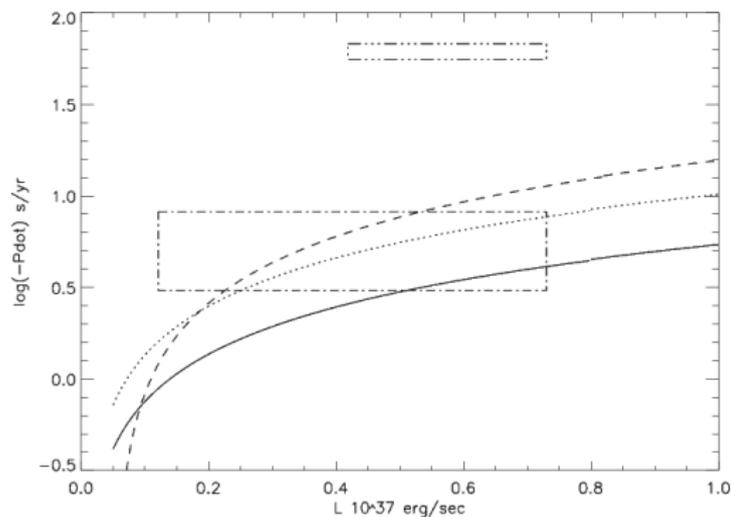
## Studio delle curve di luce X per tre sistemi binari:

- 4U 1700-37 → Caratteristiche del vento prodotto dalla OB diverse da quelle note
- A0535+26 →  $L_x \text{ teorica}(\phi) = L_x \text{ oss}(\phi)$
- V0332+53 → troncamento del disco

## Studio del sistema binario SAX J2103.5+4545:

- *Analisi dei dati INTEGRAL;*
- *Spettri di energia 22 – 100 keV:*
  - *bremsstrahlung  $\sim 23 \text{ keV}$ ;*
  - *$L_x \sim 5 \cdot 10^{36} \text{ erg/sec}$  ( $d = 6.5 \text{ kpc}$ );*
- *Profili di pulsazione:* Variabili nel tempo e per intervalli di energia;
- *Periodo di pulsazione:*
  - $\dot{P}_{medio}$  → accrescimento (teoria Ghosh e Lamb);
  - $\dot{P}$  → glitch (superfluido di neutroni);
  - *Spin-down dal Novembre 2004 ad Aprile 2007.*

# SAX J2103.5+4545: Periodo di pulsazione



---


$$P_{puls} \approx 352.6 \text{ s}$$


---

$$\dot{P} = -1.95 \cdot 10^{-6} \pm 0.19 \text{ s s}^{-1}$$


---

$$\dot{P}_{medio} = -1.78 \cdot 10^{-7} \pm 0.81 \text{ s s}^{-1}$$


---

# Componenti del Sistema

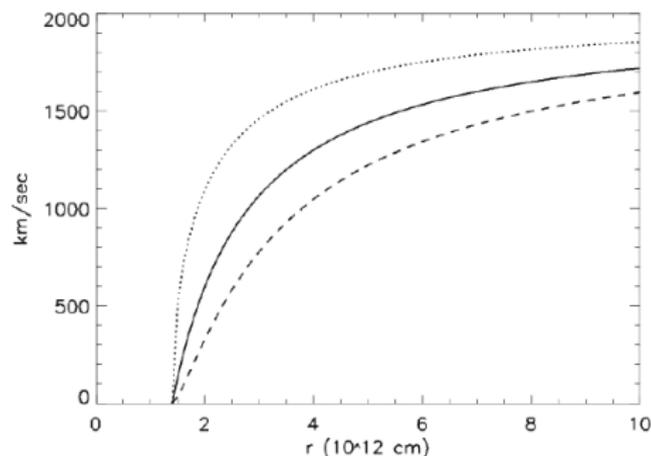
Supergigante OB  $M > 10 M_{\odot}$

$$v(r) = v_{\infty} \cdot \left(1 - \frac{R_p}{r}\right)^{\beta}$$

Stella Be  $M > 10 M_{\odot}$

$$v_{disc}(r) = v_0 \cdot \left(\frac{r}{R_p}\right)^{n-2}$$

$$v_{polar}(r) = v_{\infty} \cdot \left(1 - \frac{R_p}{r}\right)^{\beta}$$



# Componenti del Sistema

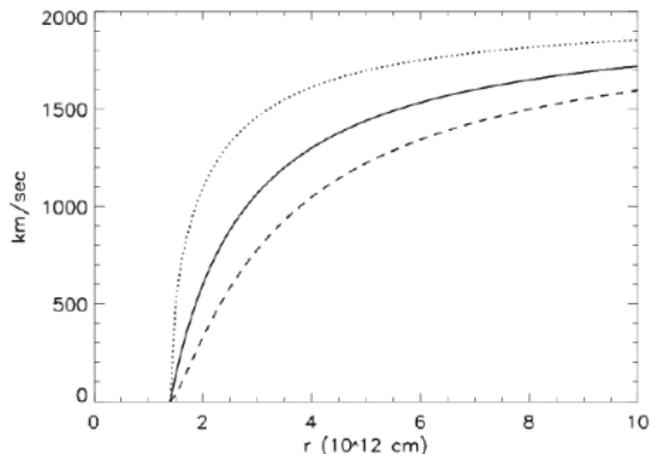
Supergigante OB  $M > 10 M_{\odot}$

$$v(r) = v_{\infty} \cdot \left(1 - \frac{R_p}{r}\right)^{\beta}$$

Stella Be  $M > 10 M_{\odot}$

$$v_{disco}(r) = v_0 \cdot \left(\frac{r}{R_p}\right)^{n-2}$$

$$v_{polar}(r) = v_{\infty} \cdot \left(1 - \frac{R_p}{r}\right)^{\beta}$$



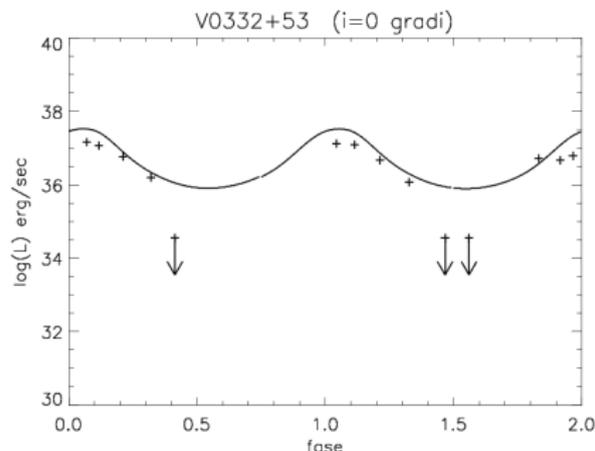
# HMXB con stella Be: V0332+53

## Caratteristiche

(Waters et al., 1988; Negueruela et al., 1999):

- $M_{Be} = 20 M_{\odot}$ ;
- $M_{NS} = 1.4 M_{\odot}$ ;
- **Parametri orbitali:**
  - $P_{orb} = 34.45$  giorni,
  - $e = 0.37$ ;
- **Caratteristiche del disco circumstellare:**
  - $v_0 \sim 10$  km/sec,
  - $\rho_0 = 10^{-11}$  gr/cm<sup>3</sup> ed  $n = 3.25$ ,
  - $v_{rot,p} = 150$  km/sec con disco kepleriano  $\alpha = 0.5$ ;
- **Caratteristiche del vento nelle zone polari:**
  - $\dot{M} \sim 10^{-8} M_{\odot}$ ,
  - $v_{vento}(r) = v_{\infty} \cdot (1 - R_p/r)^{\beta}$ , con  $v_{\infty} = 1800$  km/sec,  $\beta = 0.5$ .

(Piano orbitale contenuto nel disco circumstellare):



(TENMA ed EXOSAT, 1983/1984)