

**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PALERMO**  
**DIPARTIMENTO DI SCIENZE FISICHE ED ASTRONOMICHE**

**ASTROFISICA DELLE ALTE ENERGIE**  
**STUDIO DEI SISTEMI BINARI DEGENERI**

- **PROCESSI DI ACCRESCIMENTO SU OGGETTI COMPATTI**  
(carattere osservativo-interpretativo)
- **EVOLUZIONE DI SISTEMI LOW MASS X BINARY (LMXB) E**  
**FORMAZIONE DI MILLISECOND RADIO PULSAR**  
(carattere osservativo & teorico-numeric)

**PARTECIPANTI ALLA RICERCA:**

- |                      |                                      |
|----------------------|--------------------------------------|
| • Natale ROBBA       | Prof. Straordinario (SSD FIS/01)     |
| • Tiaziana DI SALVO  | Ricercatore (SSD FIS/05)             |
| • Rosario IARIA      | Assegno universitario post dottorato |
| • Giuseppe LAVAGETTO | Allievo scuola di dottorato          |

## **ISTITUTI CON CUI ESISTONO COLLABORAZIONI STABILI:**

- INAF – Osservatorio di Monteporzio (Buderi – D’Antona – Stella).
- INAF – Osservatorio/Università di Cagliari (D’Amico – Possenti)
- Astronomical Institute "Anton Pannekoek," University of Amsterdam and Center for High-Energy Astrophysics (van der Klis)

## **FONTI DI FINANZIAMENTO:**

- MIUR (COFIN/PRIN)
- Agenzia Spaziale Italiana
- Università di Palermo

## **PUBBLICAZIONI ULTIMI 3 ANNI:**

- RIVISTE INTERNAZIONALI REFERATE: 20
- ATTI CONVEGNI: 33

## **Calcolo**

- Rete computer alpha e pc

## **Osservazioni nella banda X**

- BeppoSAX
- RossiXTE
- Chandra
- XMM-Newton
- Integral

## **Osservazioni multibanda**

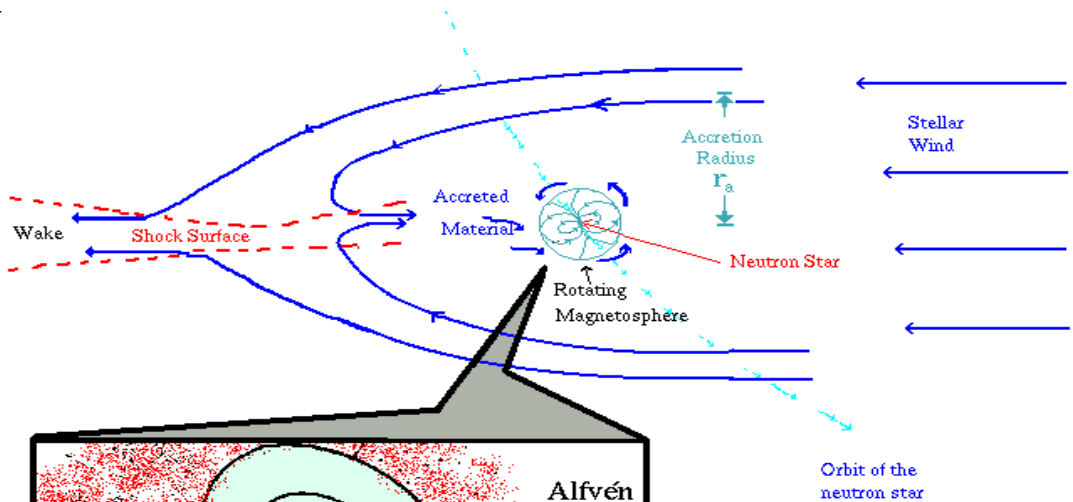
- X - X
- RADIO – OTTICO – X

# PROCESSI DI ACCRESCIMENTO SU OGGETTI COMPATTI

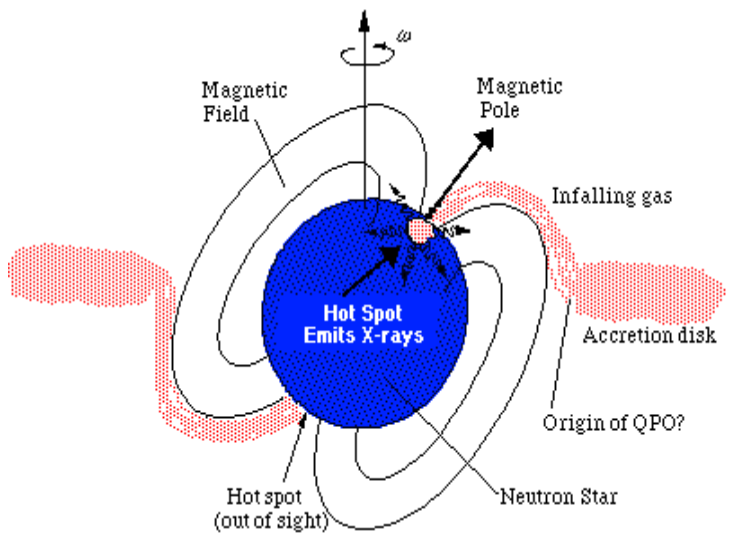
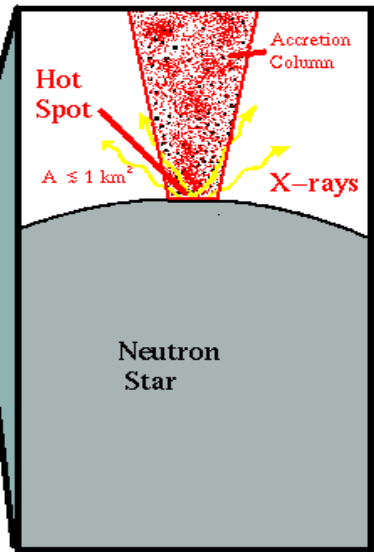
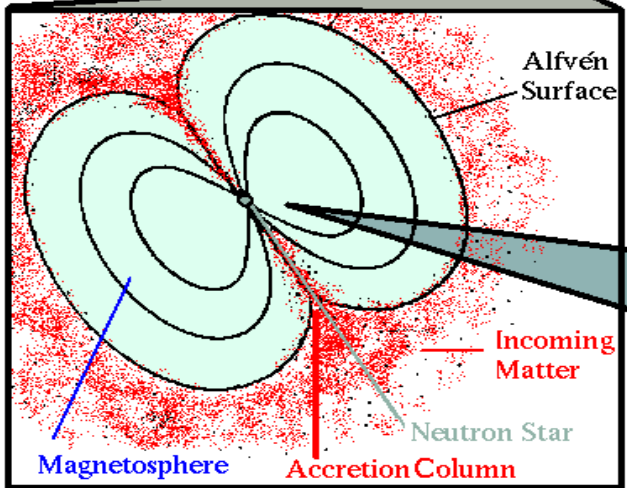
## OBBIETTIVI

LO STUDIO DEI MECCANISMI DI ACCRESCIMENTO ATTRAVERSO L'OSSERVAZIONE DI SISTEMI BINARI CONTENENTI UN OGGETTO COMPATTO (STELLA DI NEUTRONI, BUCO NERO).

# High Mass X-ray Binaries - Wind Accretion

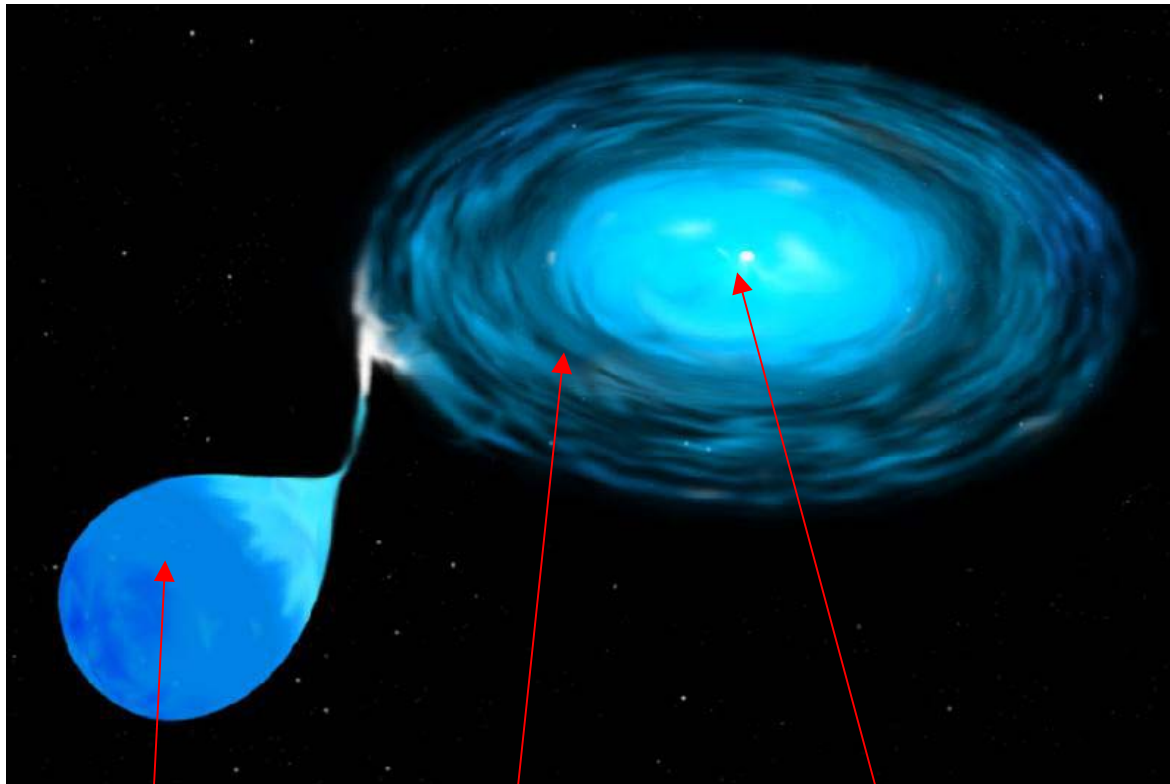


$M_{\text{star}} > 2M_{\odot}$   
 $B_{\text{NS}} \sim 10^{12} \text{ G}$



# Low Mass X-ray Binaries LMXBs

## Overflow dal lobo di Roche

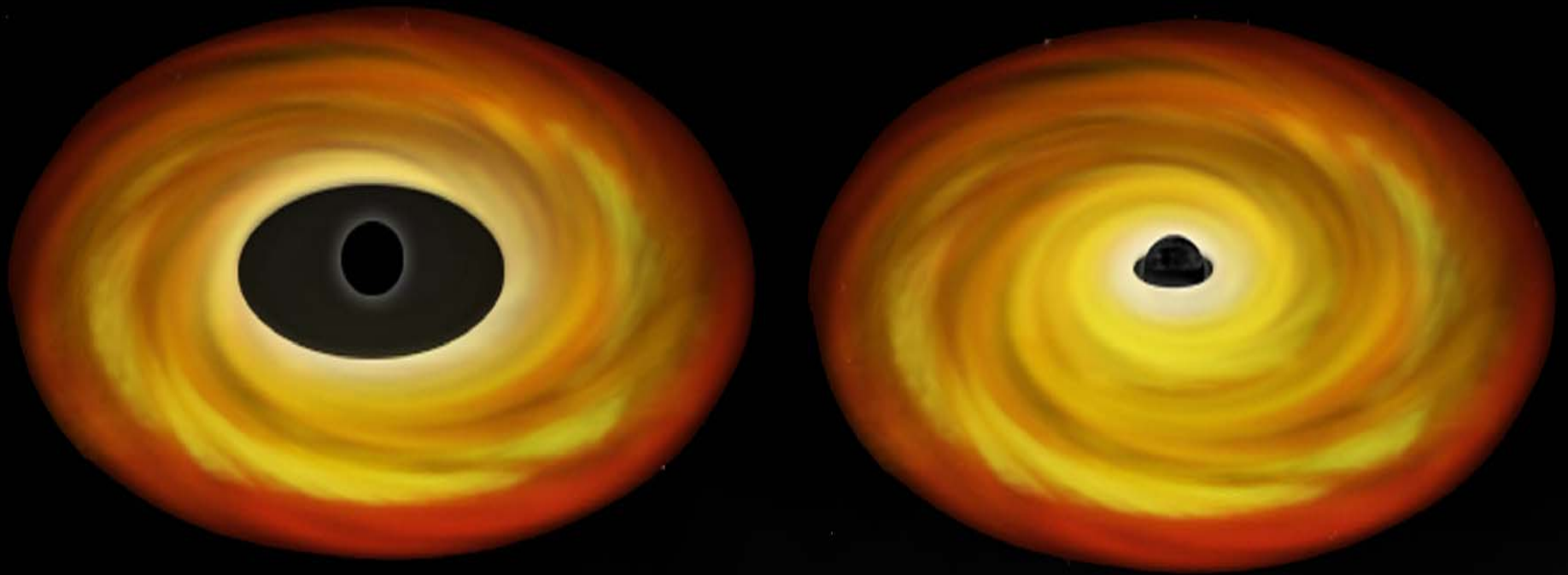


Normal star:  
 $M < 1 M_{\text{SUN}}$

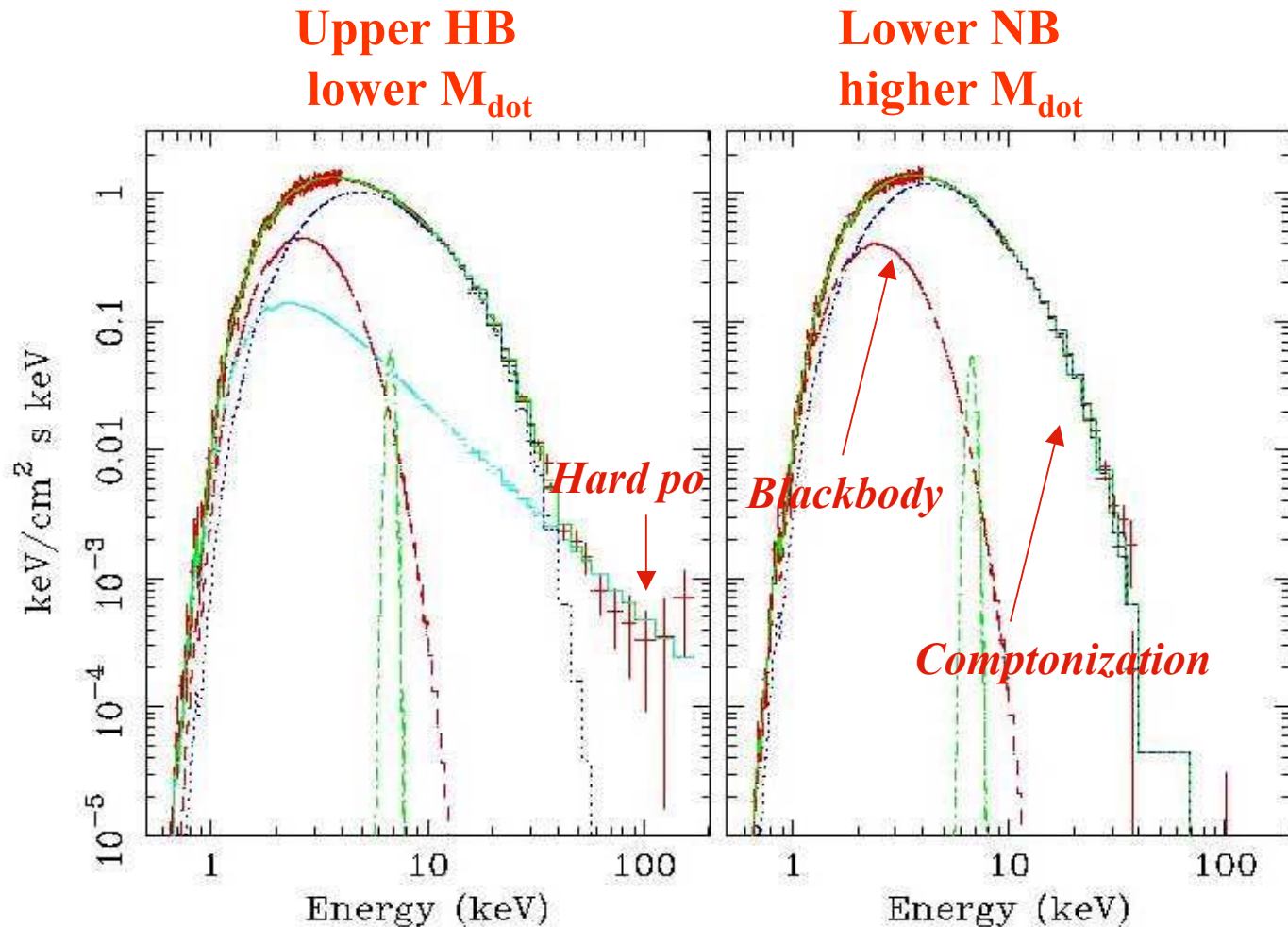
Accretion disk

Compact object:  
NS with  $B < 10^{10}$  G

# Black Hole



# High energy emission from bright LMXBs *GX 17+2: BeppoSAX spectra*



Correlazione HT – emissione radio  
Similitudine BH (soft)

(Di Salvo et al. 2000)



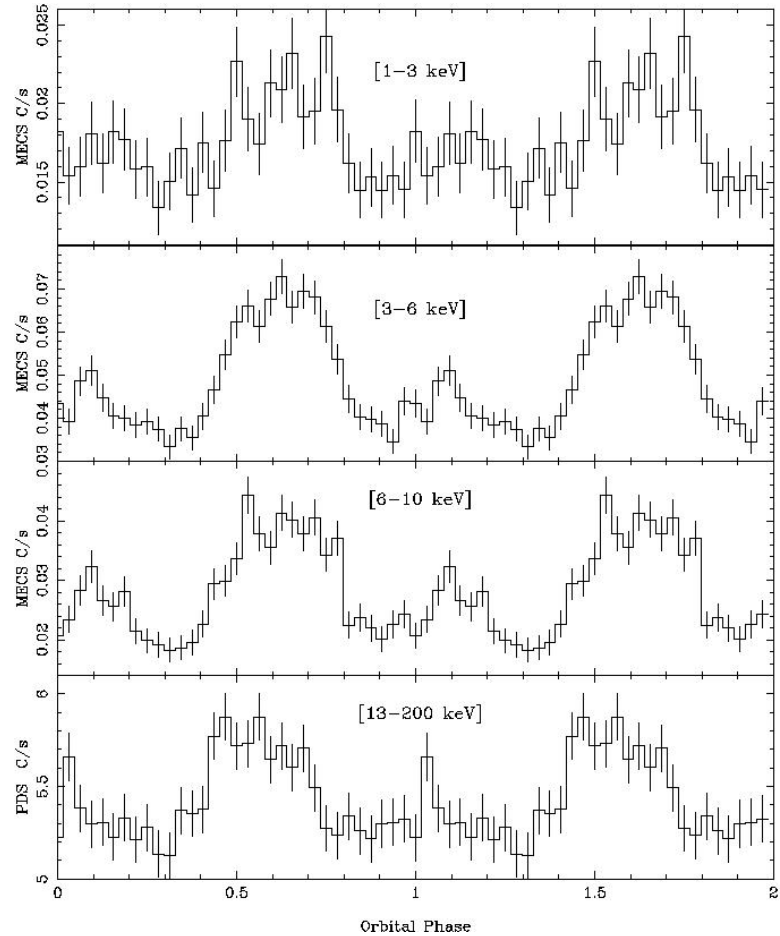
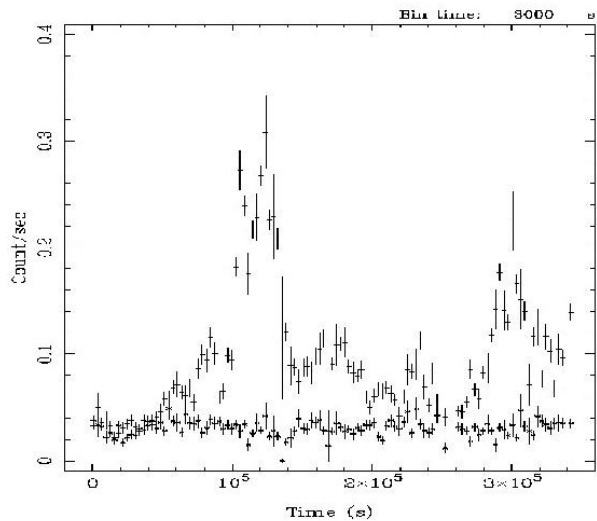
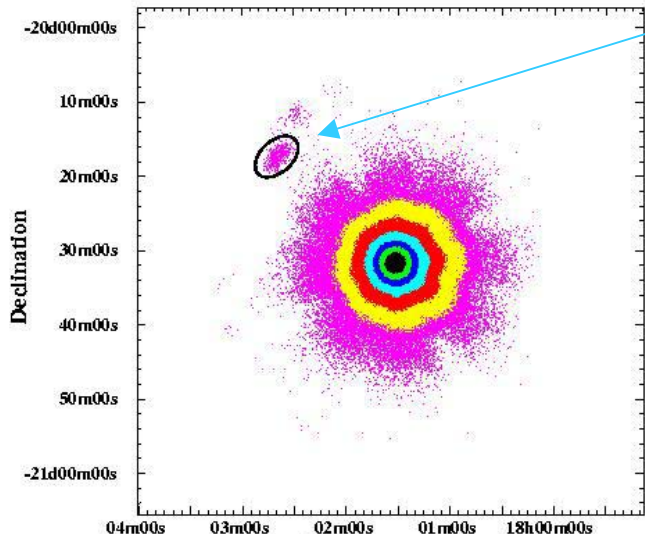
- GX 17+2 (Di Salvo et al. 2000; hard component in HB)
- GX 349+2 (Di Salvo et al. 2001; hard component in NB/FB vertex, BUT not always present, Iaria et al. 2003)
- Sco X-1 (D'amico et al. 2001, Strickman & Barret 2000; variable hard power-law component, not correlated with the position in the CD, but probably with periods of radio flares)
- GX 5-1 (Asai et al. 1994; hard component decreased from the NB to the FB, but possible confusion with a nearby source)
- Cyg X-2 (Frontera et al. 1998, Di Salvo et al. 2002, Piraino et al. 2002; possible hard component in the HB)
- GX 340+0 (possible hard component; Lavagetto et al. in prep.)
- Cir X-1 (Iaria et al. 2001, 2002; steep hard component observed at periastron in the non-flaring spectrum)

GX 9+1

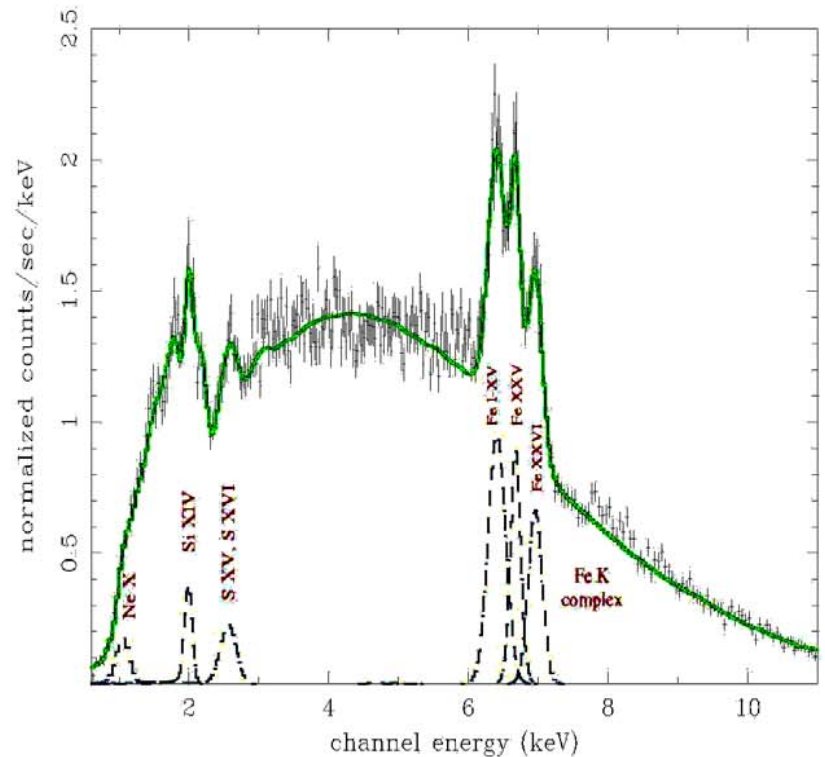
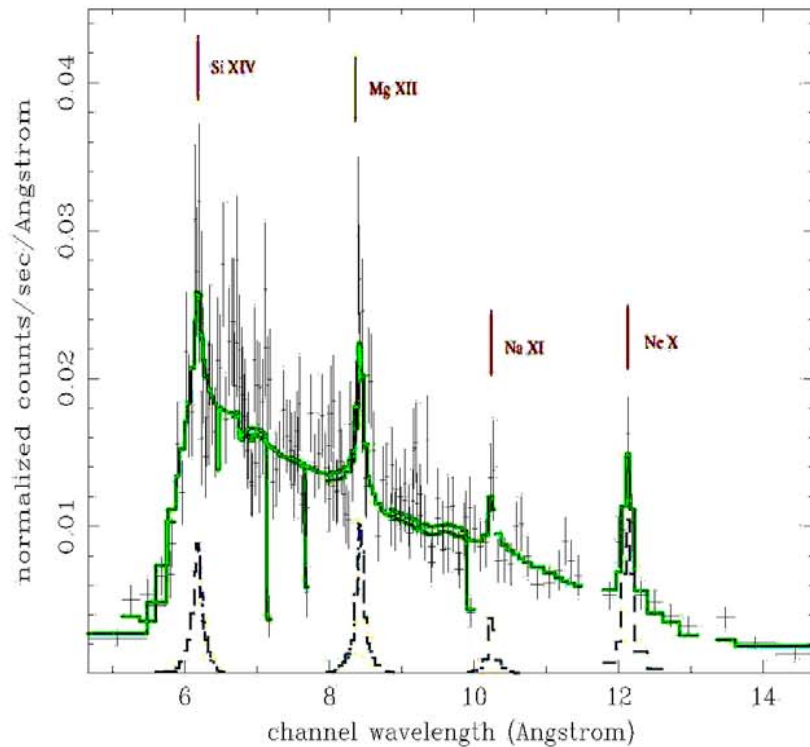
SAX J1802-2017

P=139.6s

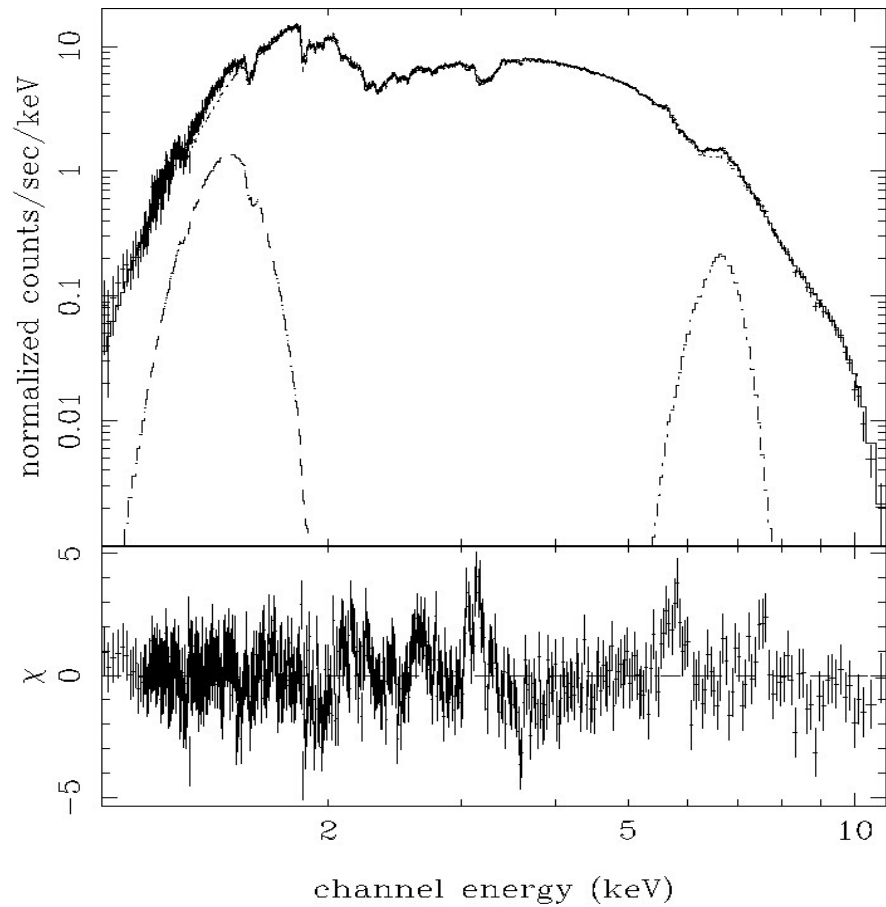
Porb=4.6d



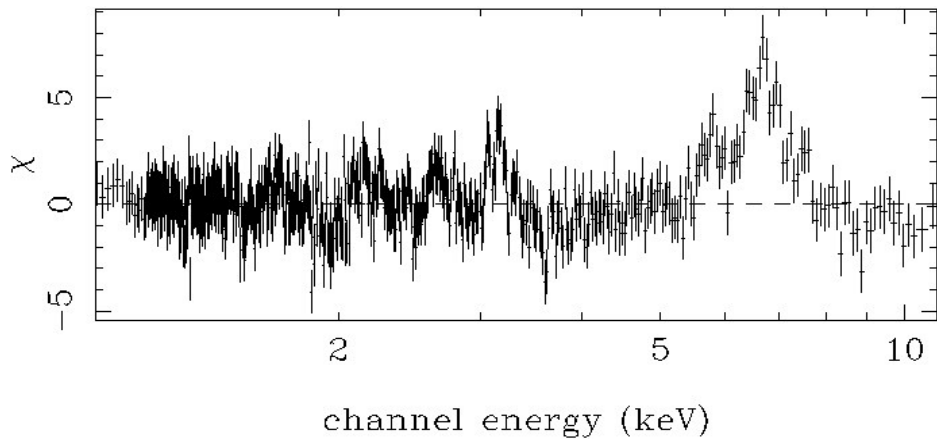
# X-ray Spectroscopy: XMM observation of Cen X-3 during an eclipse



LMXB Atoll 4U1705-44  
25Ks - CHANDRA/HETG



BB+COMPTT+GAUSS



BB+COMPTT

# PROBLEMATICHE FUTURE

1. SPETTROSCOPIA AD ALTA RISOLUZIONE DI ALCUNI SISTEMI DI TIPO LOW MASS X-RAY BINARIES (LMXB) CON CHANDRA; IN PARTICOLARE SI INTENDE RISOLVERE IL PROFILO DELLA RIGA DI FLUORESCENZA DEL FERRO IN TALI SISTEMI E RISOLVERE EVENTUALI RIGHE A PIÙ BASSA ENERGIA.
2. STUDIO DEI TRANSIENTI X (CONTENENTI STELLE DI NEUTRONI) IN QUIESCENZA CON XMM; TALI OSSERVAZIONI CI PERMETTERANNO DI RICAVARE DEI LIMITI SUL CAMPO MAGNETICO DI QUESTO TIPO DI SISTEMI. QUESTO TIPO DI INFORMAZIONE È DI PARTICOLARE IMPORTANZA PER L'INTERPRETAZIONE DELLE CONTROPARTI RADIO E OTTICHE DI QUESTE SORGENTI.
3. STUDIO DELLE CONTROPARTI RADIO ED OTTICHE DEI TRANSIENTI X CONTENENTI STELLE DI NEUTRONI; IN PARTICOLARE TALI OSSERVAZIONI CI PERMETTERANNO DI VERIFICARE L'IPOTESI CHE LA STELLA DI NEUTRONI SI ACCENDA COME RADIO PULSAR DURANTE I PERIODI DI QUIESCENZA.
4. STUDIO MULTIBANDA (RADIO, OTTICO, X E GAMMA) DI SORGENTI LMXB DI TIPO Z; TALI STUDI SONO FINALIZZATI ALL'INTERPRETAZIONE DELLE COMPONENTI A LEGGE DI POTENZA CHE SI ESTENDONO FINO AGLI X DURI IN QUESTI SISTEMI, ED IN PARTICOLARE ALLO STUDIO DEL RUOLO DI OUTFLOW E/O JET NELL'ORIGINE DI QUESTE COMPONENTI.

# Radio Pulsars

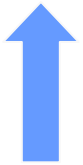
The energy lost in electromagnetic radiation and in the relativistic particle beam comes from the rotational energy of the pulsar, which slows down.

$$L = \frac{2}{3c^3} \mu^2 \left( \frac{2\pi}{P} \right)^4 = 3.85 \cdot 10^{35} \mu_{26}^2 P_{-3}^{-4} \text{ergs}^{-1}$$

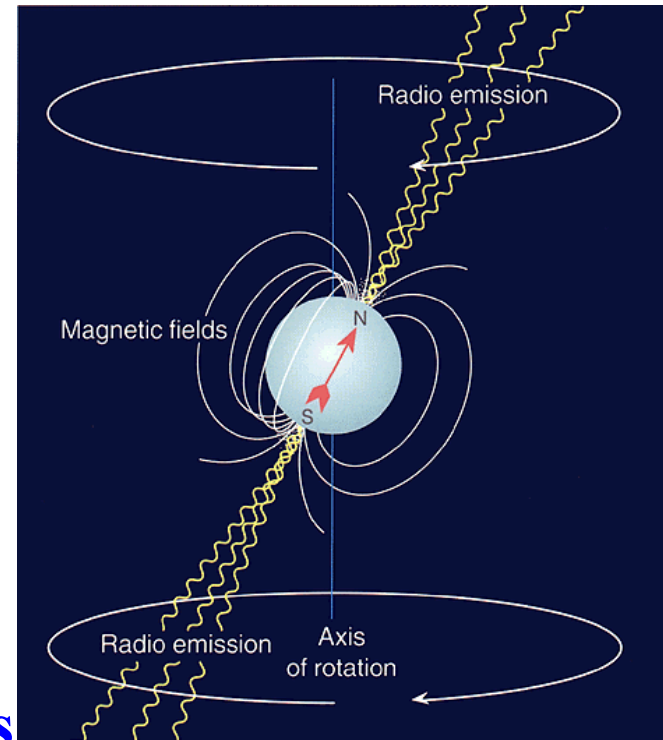
$$I\omega\dot{\omega} = L$$

$$\dot{\omega} = 2\pi\dot{P}/P^2$$

$$P\dot{P} = 9.75 \cdot 10^{-24} \mu_{26}^2 I_{45}^{-1} \text{s}$$



Measuring  $P$  and  $\dot{P}$  allows to derive  $\mu$ :  
 $B \sim 10^8$  Gauss for MSPs



# EVOLUZIONE DI SISTEMI LMXB E FORMAZIONE DI MILLISECOND RADIO PULSAR

## MILLISECOND RADIO PULSAR

- $P_{\min} = 1.42 \text{ msec}$
- $P_{\dot{}} \sim 10^{-18} - 10^{-20}$

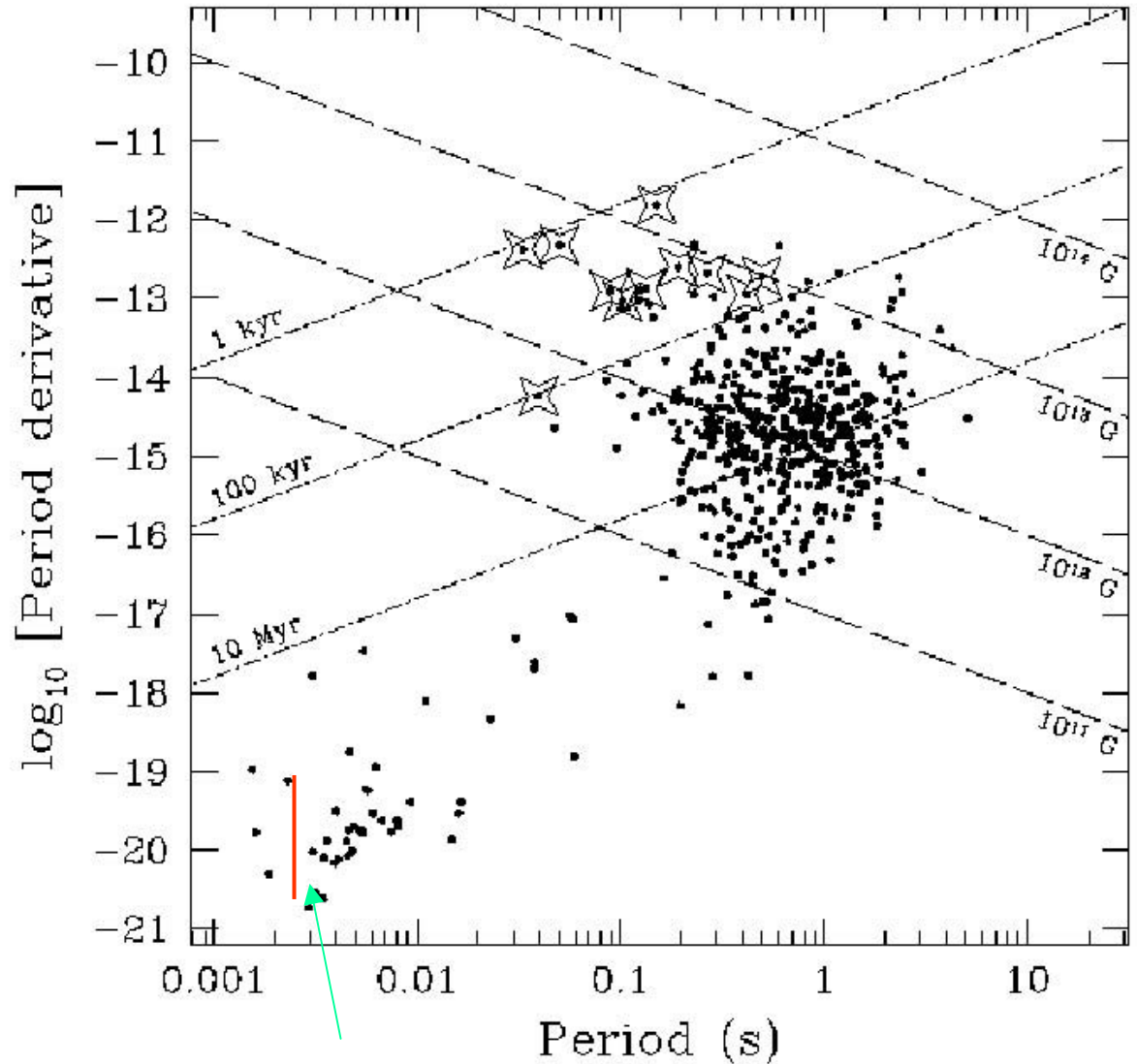
Ad oggi si conoscono con  $P < 10 \text{ms}$ :

- 31 msec isolate;
  - 51 msec binarie (NS-star)
- 
- 1300 radio pulsar

# Pulsar P-Pdot Diagram

$$B \approx 3 \cdot 10^{19} (P \cdot P_{\dot{P}})^{1/2} \text{ G}$$

$$B \sim 10^8 - 10^9 \text{ G}$$



SAX J1808-3658



# LMXBs: the recycling scenario

In un sistema LMXB l'accrescimento può accelerare la NS a periodi  $\sim 1$  ms; quando l'accrescimento finisce si accende una millisecond radio pulsar (MSP)

Low mass X-ray binaries

Low mass companion  
( $M \sim 1 M_{\text{sun}}$ )

$B \sim 10^8 - 10^9 G$

Millisecond radio Pulsars

Low mass companion  
( $M \sim 0.1 M_{\text{sun}}$ )

$B \sim 10^8 - 10^9 G$

Progenitors



Accretion causes spin-up



End products ( $P_{\text{spin}} \sim 1\text{ms}$ )

No direct evidence of the recycling scenario, but...

**Now we know 5 LMXBs (transients) which show X-ray millisecond coherent modulation**

SAX J1808.4-3658:  $P_s=2.5\text{ms}$ ,  $P_{orb}=2\text{hr}$  (Wijnands & van der Klis 1998)

XTE J1751-306:  $P_s=2.3\text{ms}$ ,  $P_{orb}=42\text{m}$  (Markwardt et al. 2002)

XTE J0929-314:  $P_s=5.4\text{ms}$ ,  $P_{orb}=43.6\text{m}$  (Galloway et al. 2002)

XTE J1807-294:  $P_s=5.2\text{ms}$ ,  $P_{orb}=40\text{m}$  (Markwardt et al. 2003)

XTE J1814-338:  $P_s=3.2\text{ms}$ ,  $P_{orb}=1.9\text{hr}$  (Markwardt et al. 2003)

# CODICE MODELLO DI RECYCLING

## ➤ CODICE DI EVOLUZIONE DI UN SISTEMA BINARI “ATON” (D'Antona, Mazzitelli & Ritter):

- Evoluzione stellare
- Evoluzione parametri orbitali
- Trasferimento di massa  $dM/dt$

## ➤ CODICE DI EVOLUZIONE DELLA NS IN ACCRESIMENTO (Burderi & Lavagetto):

- Interazione disco- $B_{NS}$
- Evoluzione NS
- Evoluzione  $B_{NS}$
- Verifica la formazione di un BH ( $M_{NS}$ ,  $\Omega_{NS}$ , EoS)
- Verifica la formazione di una Radio Pulsar

## ➤ I DUE CODICI SONO STATI DA NOI INTEGRATI

# Evoluzione di una LMXB

Evoluzione  
del sistema  
binario

BISOGNA  
ACCOPIARE  
I DUE EFFETTI!

**evoluzione stellare**

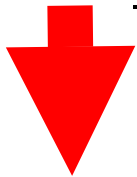
**eredita di momento  
angolare orbitale**

Trasferimento di  
massa dalla secondaria

**evoluzione dello spin  
della NS ed espulsione  
di materia**

Interazione  
NS- Disco

- -  $M_*$
- - Struttura e composizione stellare
- -  $M_{NS}$
- - Separazione
- - Canali perdita momento angolare



**ATON**



- $M_*$
- Struttura e composizione stellare
- Parametri Orbitali

$dM/dt$

$M_{NS}$  (propeller)

- -  $M_{NS}$
- -  $EoS_{NS}$
- -  $P_{NS}$
- -  $B_{NS}$



**BL**



- Caratteristiche NS ( $M_{NS}$ ,  $P_{NS}$ , Mom. Angolare)
- $B_{NS}$
- Formazione BH
- Accensione radio pulsar

Le NS vengono accelerate a periodi ben al di sotto di un millisecondo anche se viene accresciuta una quantità di materia molto inferiore a quella normalmente trasferita in un sistema binario. Questo è in contrasto con le osservazioni che sembrano indicare l'assenza di NS in sistemi binari con periodi al di sotto di 1.5 ms.

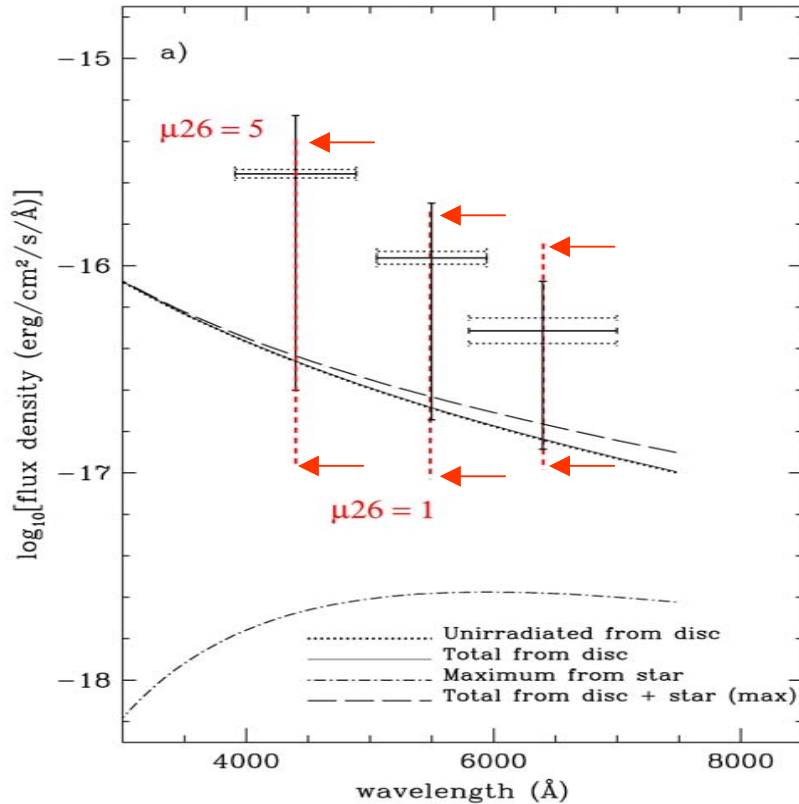
Per la maggior parte delle equazioni di stato, in assenza di prolungate fasi di propeller, il collasso diretto in un buco nero può essere pressoché inevitabile.

Si possono escludere alcune delle equazioni di stato più soft (che supportano una massa massima più piccola)

# The optical counterpart of SAX J1808-3658 in quiescence

## Estimated reprocessed luminosity

Can a magneto-dipole rotator in vacuo be active in the transient millisecond X-ray pulsar SAX J1808-3658 in quiescence?



Red arrows are the predictions from our model (Burderi et al. 2003)

During quiescence the mass accretion rate is so low that  $R_m$  can easily be pushed outside the light cylinder radius!

- $L_X$  in quiescence ( $5 \cdot 10^{31}$  erg/s), then:  
 $R_m > 1.5 \cdot 10^7$  cm (for  $B > 10^8$  Gauss).
- $R_{LC} = 1.2 \cdot 10^7$  cm
- $R_m > R_{LC}$

**Mstar = 0.1 Msun**

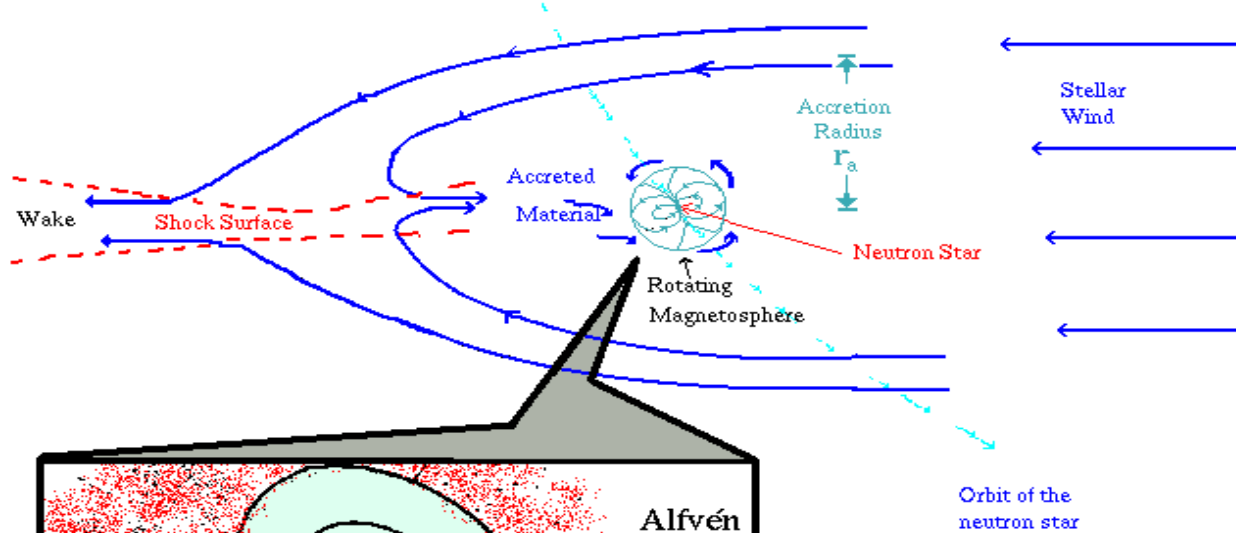
**During quiescence:**

**Optical counterpart V=21.5 mag.**

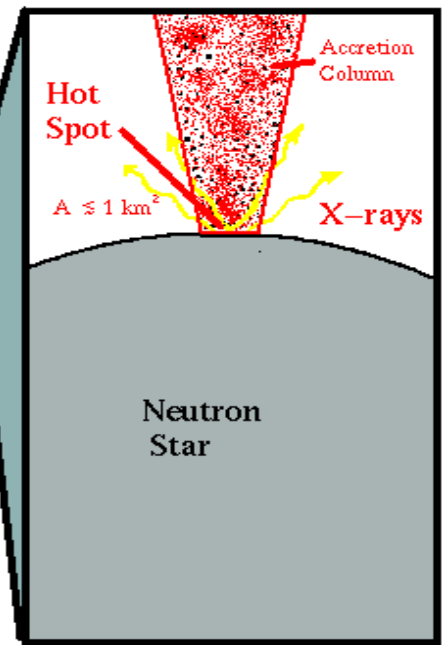
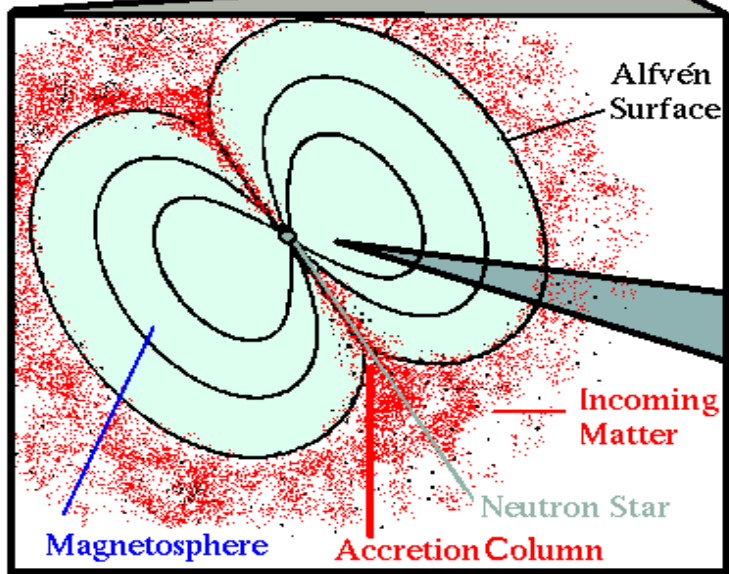
**Estimated reprocessed luminosity:**

**A fraction,  $f_{\text{tot}}$ , of the spin-down luminosity will be intercepted and reprocessed by a remnant disk and/or companion star.**

# High Mass X-ray Binaries - Wind Accretion



$M_{\text{star}} > 2M_{\odot}$   
 $B_{\text{NS}} \sim 10^{12} \text{ G}$

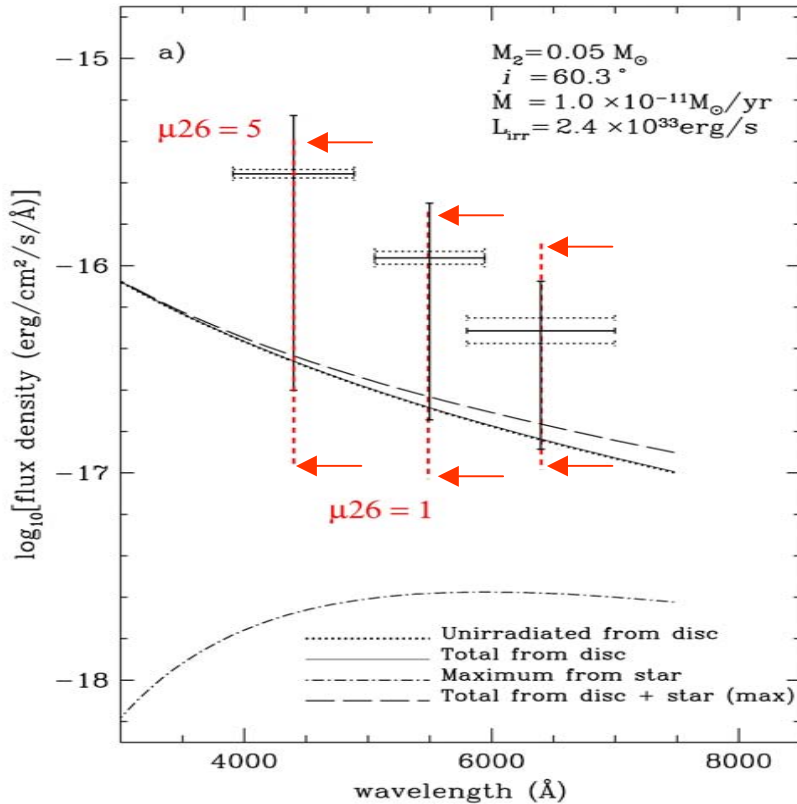




# The optical counterpart of SAX J1808-3658 in quiescence

## Estimated reprocessed luminosity

Can a magneto-dipole rotator in vacuo be active in the transient millisecond X-ray pulsar SAX J1808-3658 in quiescence?



Red arrows are the predictions from our model (Burderi et al. 2003)

During quiescence the mass accretion rate is so low that  $R_m$  can easily be pushed outside the light cylinder radius! If  $\dot{M}$  is simply given by measured  $L_X$  in quiescence ( $5 \times 10^{31} \text{ erg/s}$ ), then:

$$R_m > 1.5 \times 10^7 \text{ cm (for } B > 10^8 \text{ Gauss)}$$

$$R_{\text{LC}} = 1.2 \times 10^7 \text{ cm}$$

**Estimated reprocessed luminosity:**

$$L_{\text{PSR}} = 3.85 \times 10^{35} P_{-3}^{-4} B_8^2 \text{ erg/s}$$

$$1 < B_8 < 5 \Rightarrow L_{\text{PSR}} = (1 - 25) \times 10^{34} \text{ erg/s}$$

A fraction,  $f_{\text{tot}}$ , of the spin-down luminosity will be intercepted and reprocessed by a remnant disk and/or companion star. We have calculated:  $f_{\text{tot}} = f_{\text{disk}} + f_{\text{star}} \sim 3 \times 10^{-2}$