

*UAK 2018 – 21. Ulusal Astronomi Kongresi (3–7 Eylül 2018, Erciyes Üniversitesi, Kayseri)*

**Düşük kütleli  $X$ -ışını çiftlerinden aşırı parlak  $X$ -ışını kaynaklarına: nötron yıldızlarından gözlenen yarı periyodik salınımlar**

M. Hakan Erkut<sup>1</sup> & K. Yavuz Ekşi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*İstanbul Teknik Üniversitesi,  
Fen-Edebiyat Fakültesi,  
Fizik Mühendisliği Bölümü*

## Nötron yıldızı içeren LMXB

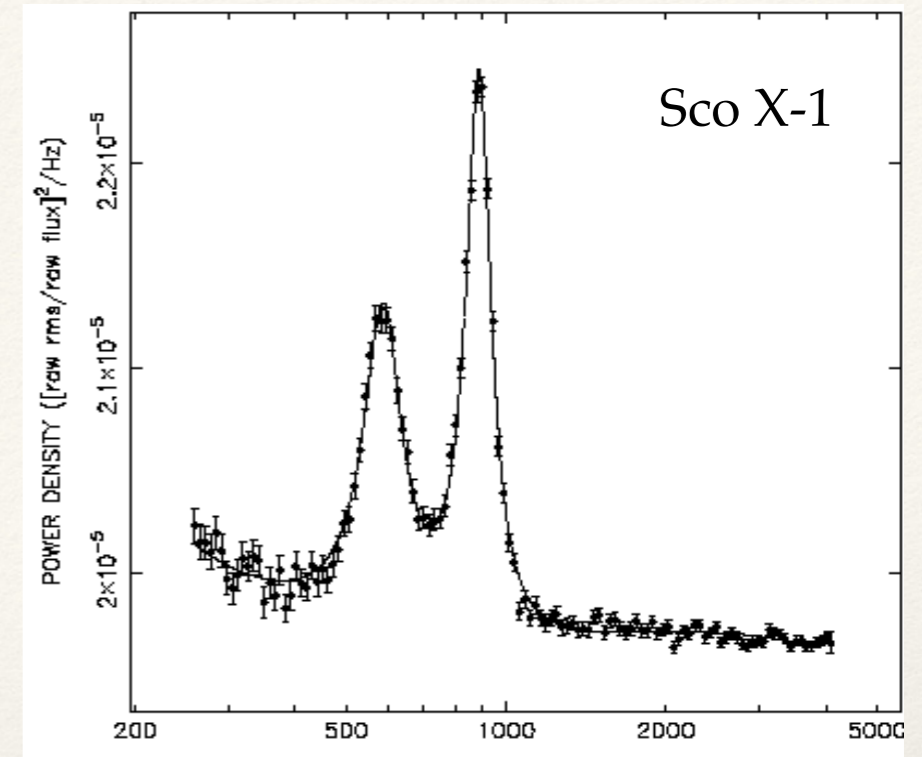
$$\nu_{\text{QPO}} \sim 0.04 - 1300 \text{ Hz}$$

VLF QPO ( $\sim 0.04$  Hz), örn. 4U 1626-67

LF QPO ( $\sim 1-70$  Hz), örn. HBO, NBO, & FBO (Z kaynakları)

HF QPO ( $\sim 200-1300$  Hz) genellikle çiftler halinde gözlenir.  
(frekans oranları  $\sim 1.2-3$  aralığında değişen ikiz kHz QPO)

kHz QPO frekansları ve X-ışın akısı kısa dönemde ( $\sim$  saatler) ilişkili,  
ancak uzun dönemde ( $>$  gün), ilişki bozulur ve *paralel izler* belirir.



van der Klis 2000  
ARA&A 38, 717

## Karadelik içeren LMXB

$$\nu_{\text{QPO}} \sim 0.01 - 450 \text{ Hz}$$

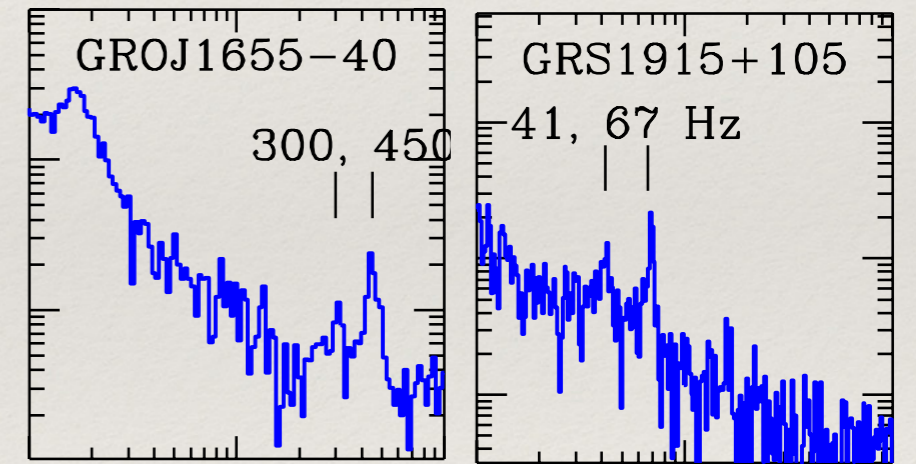
VLF QPO ( $\sim 0.01-0.1$  Hz)

LF QPO ( $\sim 0.1-30$  Hz) faz gecikmelerine göre A, B, C tipleri

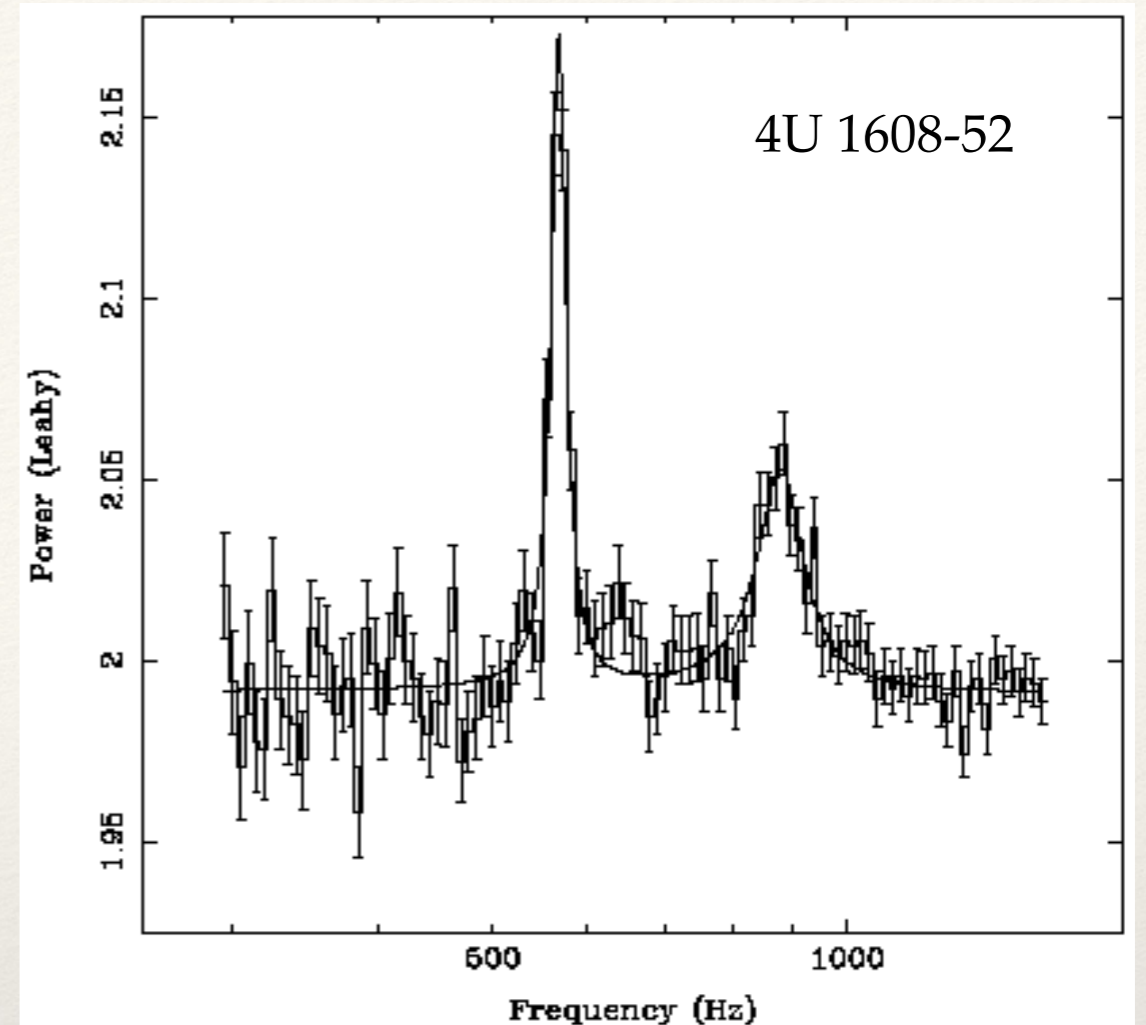
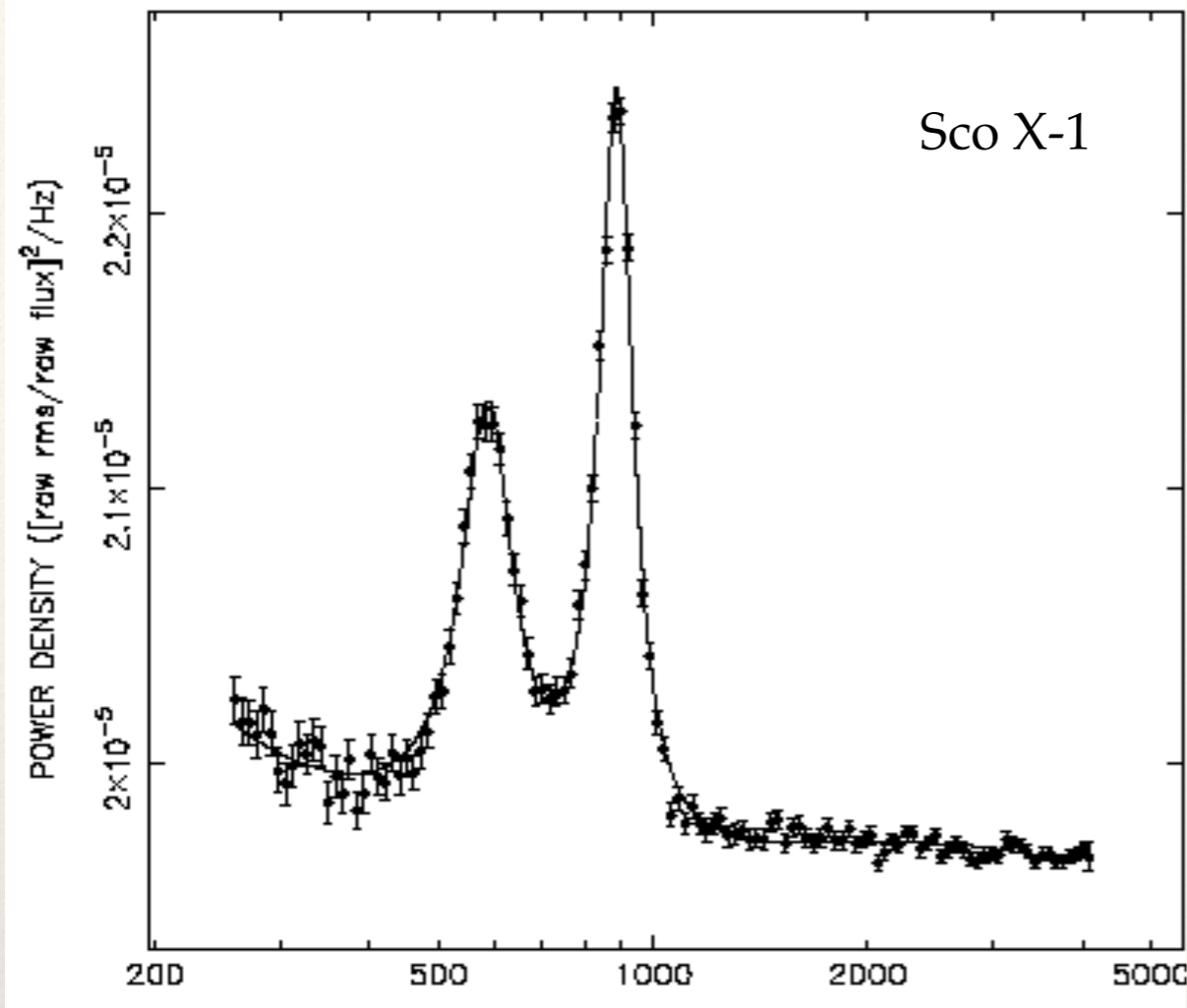
C-tipi QPO frekansı disk akısı ile ilişkili iken A/B tipleri için ilişki yok

HF QPO ( $\sim 40-450$  Hz) 7 kaynakta görüldü (4 kaynakta frekans oranı  $\sim 1.5$  olan çiftler)

HF QPO: salınım frekansı ve X-ışın akısı arasında ilişki yok



Remillard & McClintock 2006  
ARA&A 44, 49



van der Klis 2000  
ARA&A 38, 717

### NY kHz QPO

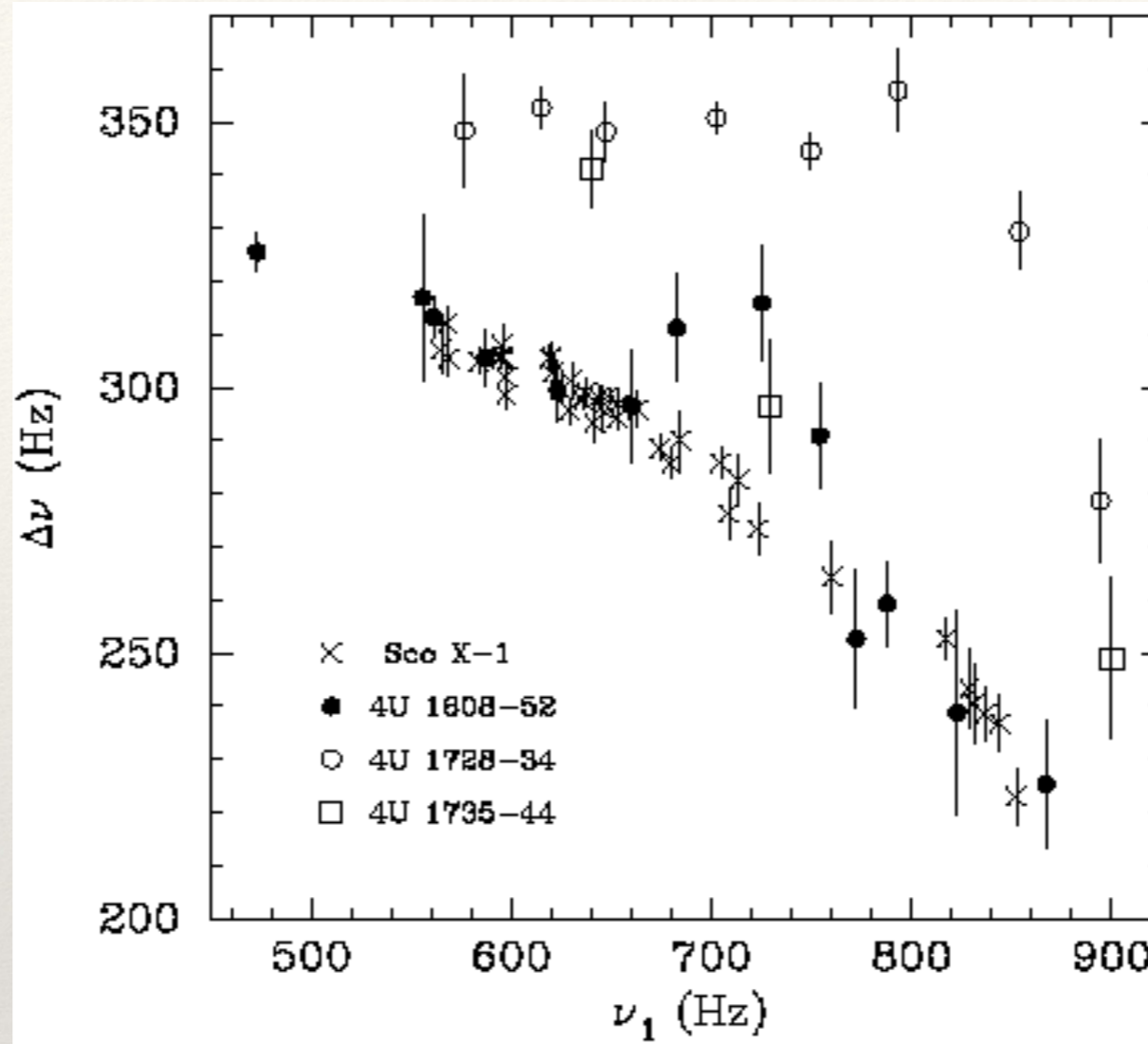
ilk gözlemler  $\rightarrow \Delta\nu = \nu_2 - \nu_1 \simeq \nu_{\text{burst}} = \nu_{\text{spin}}$

düşük kHz QPO frekansı vuru olabilir mi?

$\rightarrow$  Sonik Nokta Vuru Frekans Modeli (Miller et al. 1998, ApJ, 508, 791)

sonraki gözlemler ise  $\Delta\nu \neq \text{const.}$

$\nu_1$  ve  $\nu_2 \uparrow \Delta\nu \downarrow$



**NY kHz QPO**  
van der Klis 2000  
ARA&A, 38, 717

### Rölativistik Yalpalama Modeli (RPM)

Stella & Vietri 1998, 1999  
(ApJL, 492, L59), (PRL, 82, 17)

$$\nu_2 = \nu_\phi$$

$$\nu_1 = \nu_\phi - \nu_r$$

$$\nu_l = \nu_\phi - \nu_\theta$$

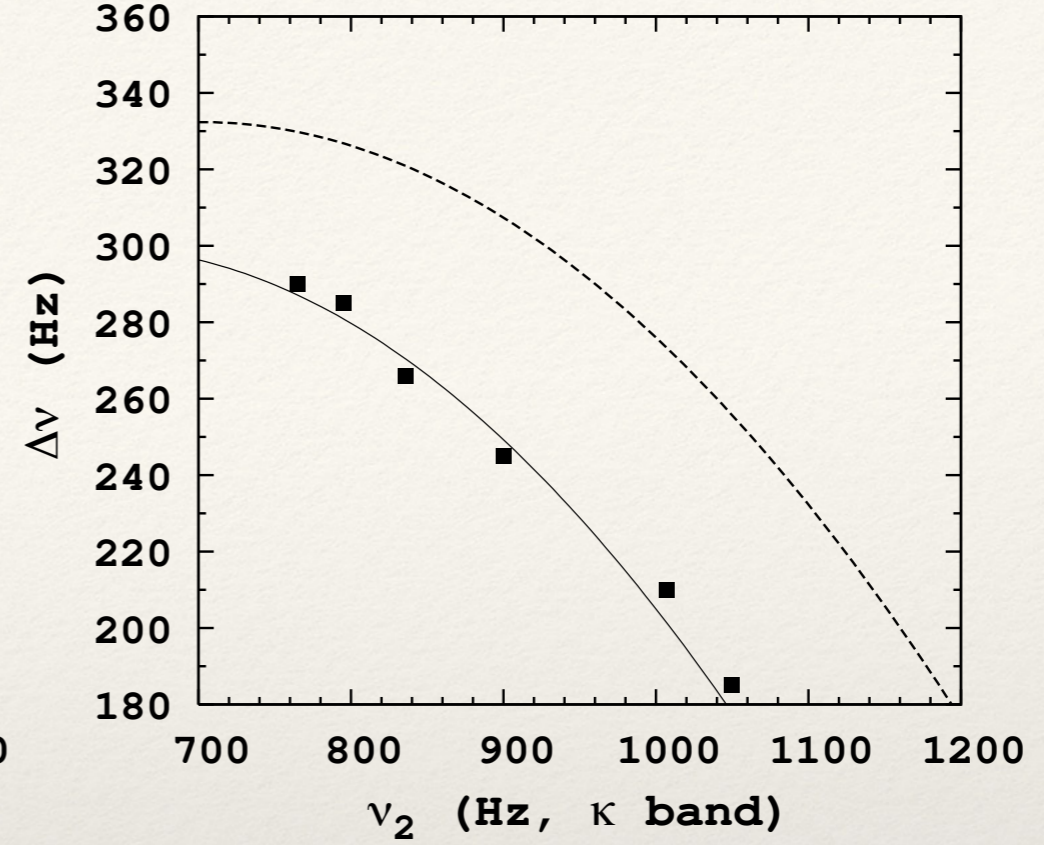
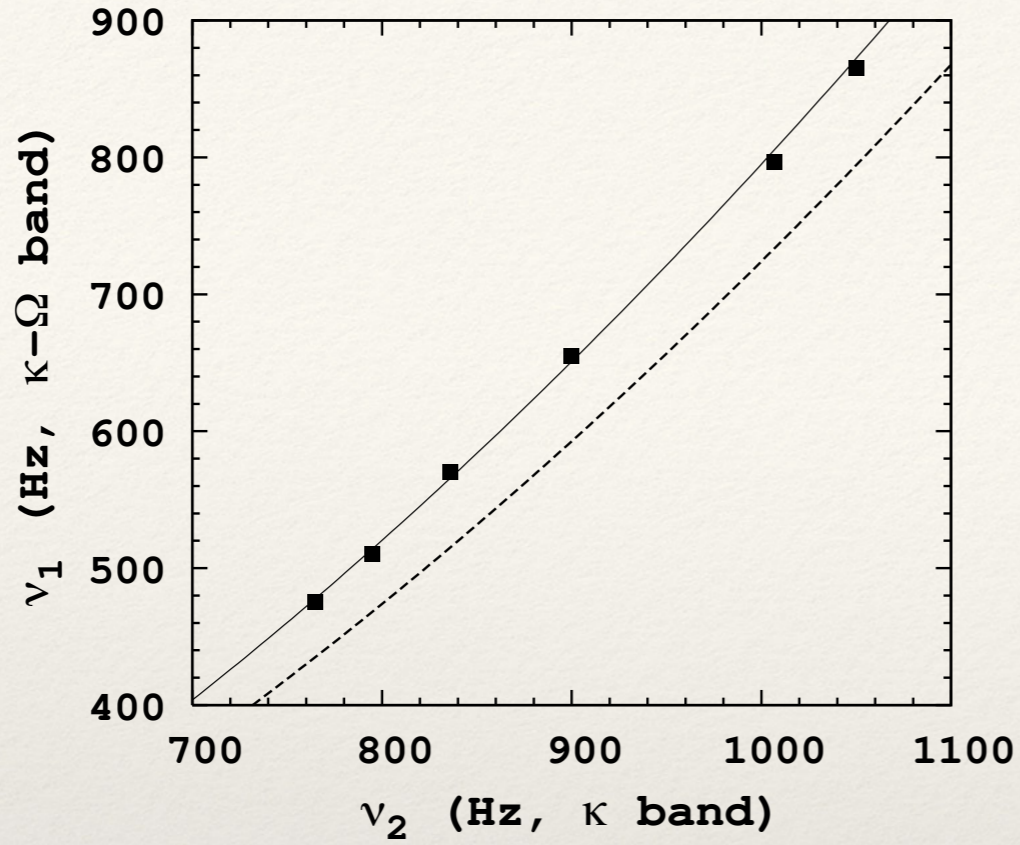
### Sınır Bölgesi Modeli (BRM)

Alpar & Psaltis 2008 (MNRAS, 391, 1472),  
Erkut et al. 2008 (ApJ, 687, 1220)

$$\nu_2 = \nu_r$$

$$\nu_1 = \nu_r - \nu_\phi$$

$$\nu_l = \nu_r - m\nu_\phi \quad (m \geq 2)$$



Erkut 2011, AIPC, 1379, 103

BRM ile tahmin edilen frekans-frekans ilişkilerine uydurulan kuvvet yasası dönme frekansı 300 Hz olan bir NY (kesiksiz çizgi), Sco X-1 (kesikli çizgi)

$$\nu_1 = C \left( \frac{\nu_2}{1000} \right)^{1.9} \text{ Hz}$$

$C = 724$  kesikli çizgi (Sco X-1) (Psaltis et al. 1998, ApJL, 501, 95)

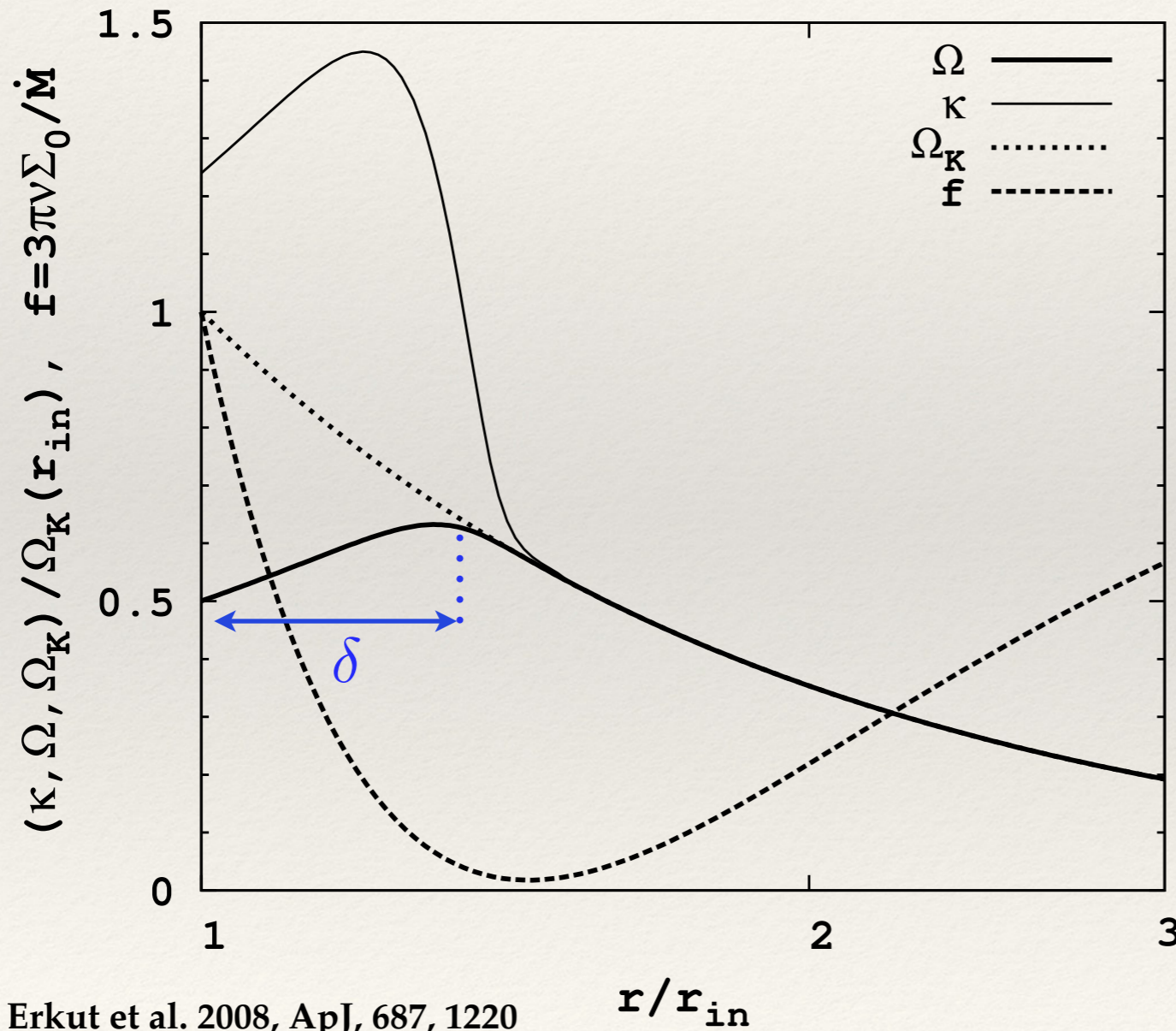
$C = 795$  kesiksiz çizgi (dönme frekansı 300 Hz olan bir NY) (Erkut 2011, AIPC, 1379, 103)

**NY için BRM** (Alpar & Psaltis 2008, MNRAS, 391, 1472; Erkut, Psaltis, & Alpar 2008, ApJ, 687, 1220)

KD QPO için de BRM uyarlandı ve frekans oranlarını açıklamada kullanıldı (Erkut 2011, ApJ, 743, 5)

NY manyetosferi ve disk etkileşimi → manyetik frenleme → **Kepler altı sınır bölgesi**

global mod analizi →  $\kappa \pm \Omega$  ve  $\kappa$  genlikleri büyüyen frekans bandları



Erkut et al. 2008, ApJ, 687, 1220

$$\kappa = 2\pi\nu_r$$

$$\Omega = 2\pi\nu_\phi$$

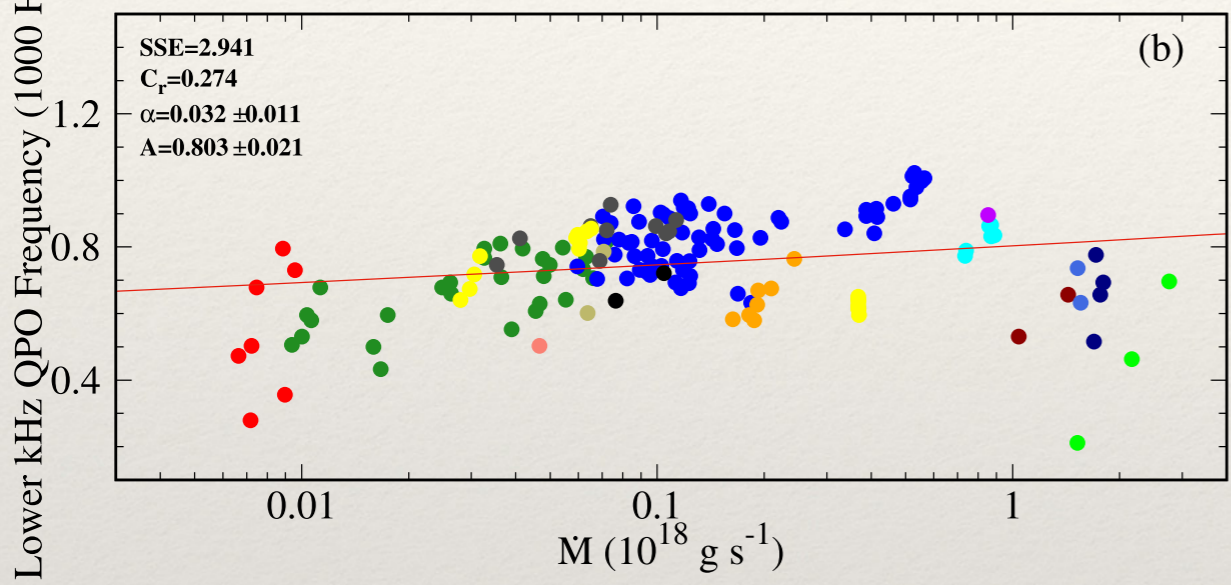
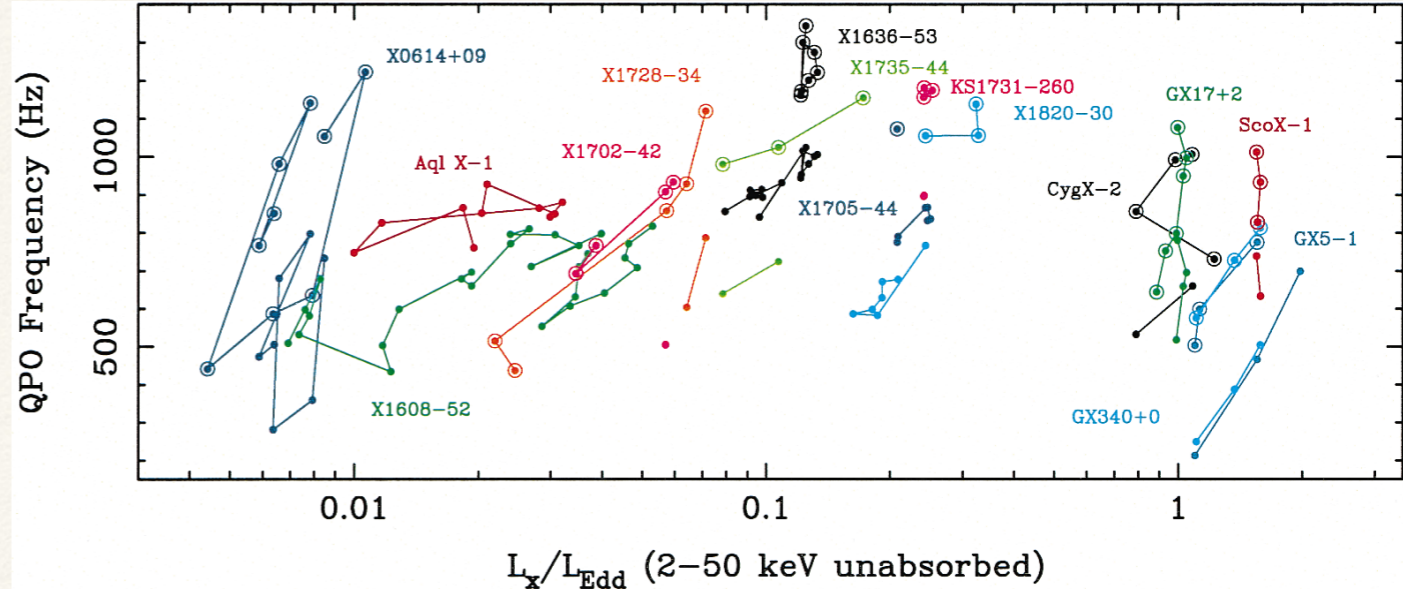
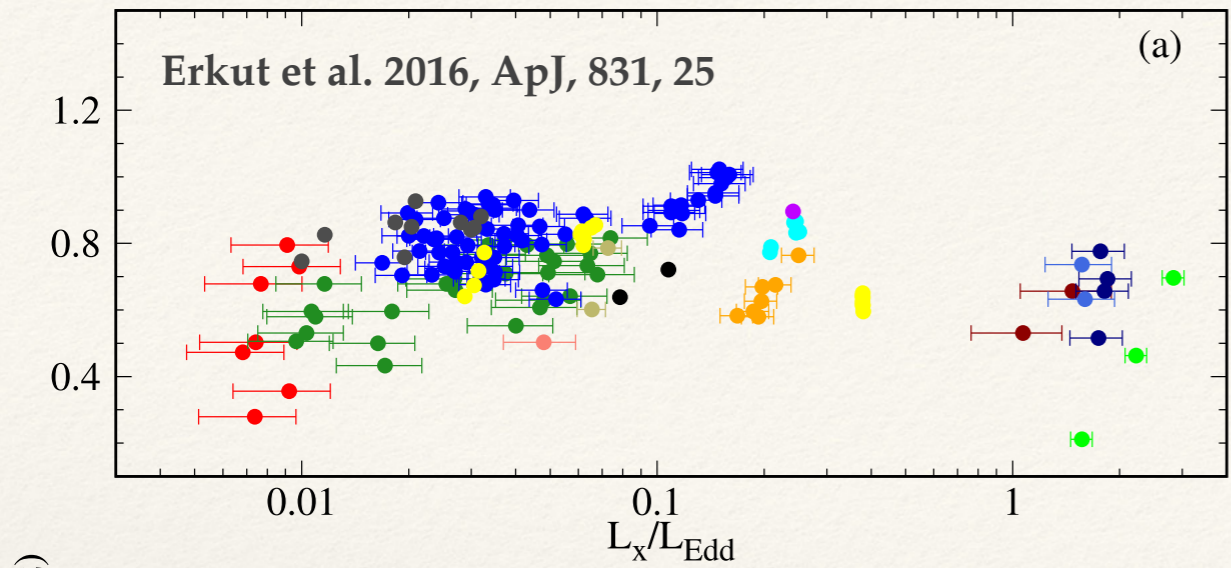
e.g.  $\nu_2 = \nu_r$

$$\nu_1 = \nu_r - \nu_\phi$$

$$\nu_r = \nu_\phi \sqrt{4 + 2 \frac{d \ln \nu_\phi}{d \ln r}}$$

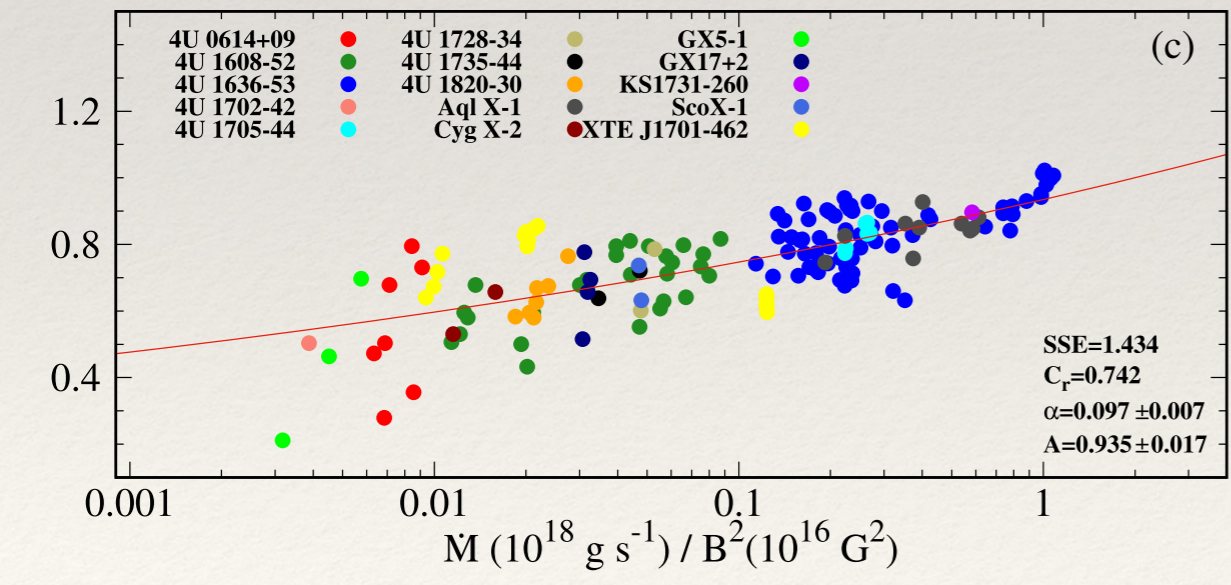
$$r_{in} \simeq r_A \propto \left( \dot{M} / B^2 \right)^{-2/7}$$

kritik (Eddington) altı yığışma hızları



**NY içeren LMXB kümesi**  
 $\nu_1$  ve  $L_X$  arasında ilişki yok

$$L_X \simeq \frac{GM\dot{M}}{R}$$

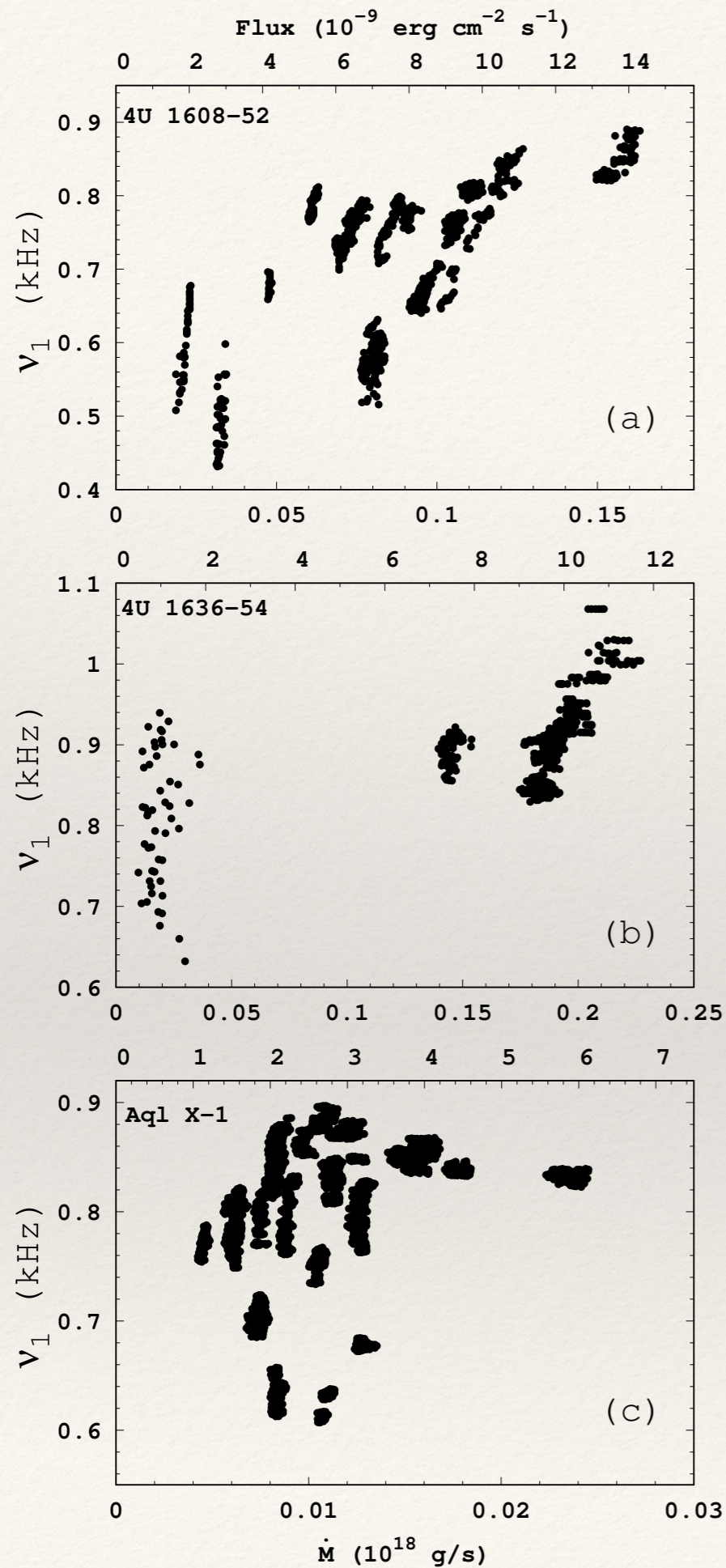


$\nu_1$  ve  $\dot{M}/B^2$  arasında ise bir ilişki mümkün

*NY-madde etkileşimi manyetik kökenli olabilir!*

$$B \sim 10^7 - 10^9 \text{ G}$$

(zayıf manyetik alana sahip NY kümesi)



**kHz QPO frekansları and X-ışın akısı arasında kısa vadede (~saatler) ilişki olsa da uzun vadede (>gün) ilişki bozular ve *paralel izler* gözlenir.**

BRM paralel izleri açıklayabilir (Erkut & Çatmabacak 2017, ApJ, 849, 58)

$$\nu_1 = \nu_r - \nu_\phi$$

$$\nu_r = \nu_\phi \sqrt{4 + 2 \frac{d \ln \nu_\phi}{d \ln r}}$$

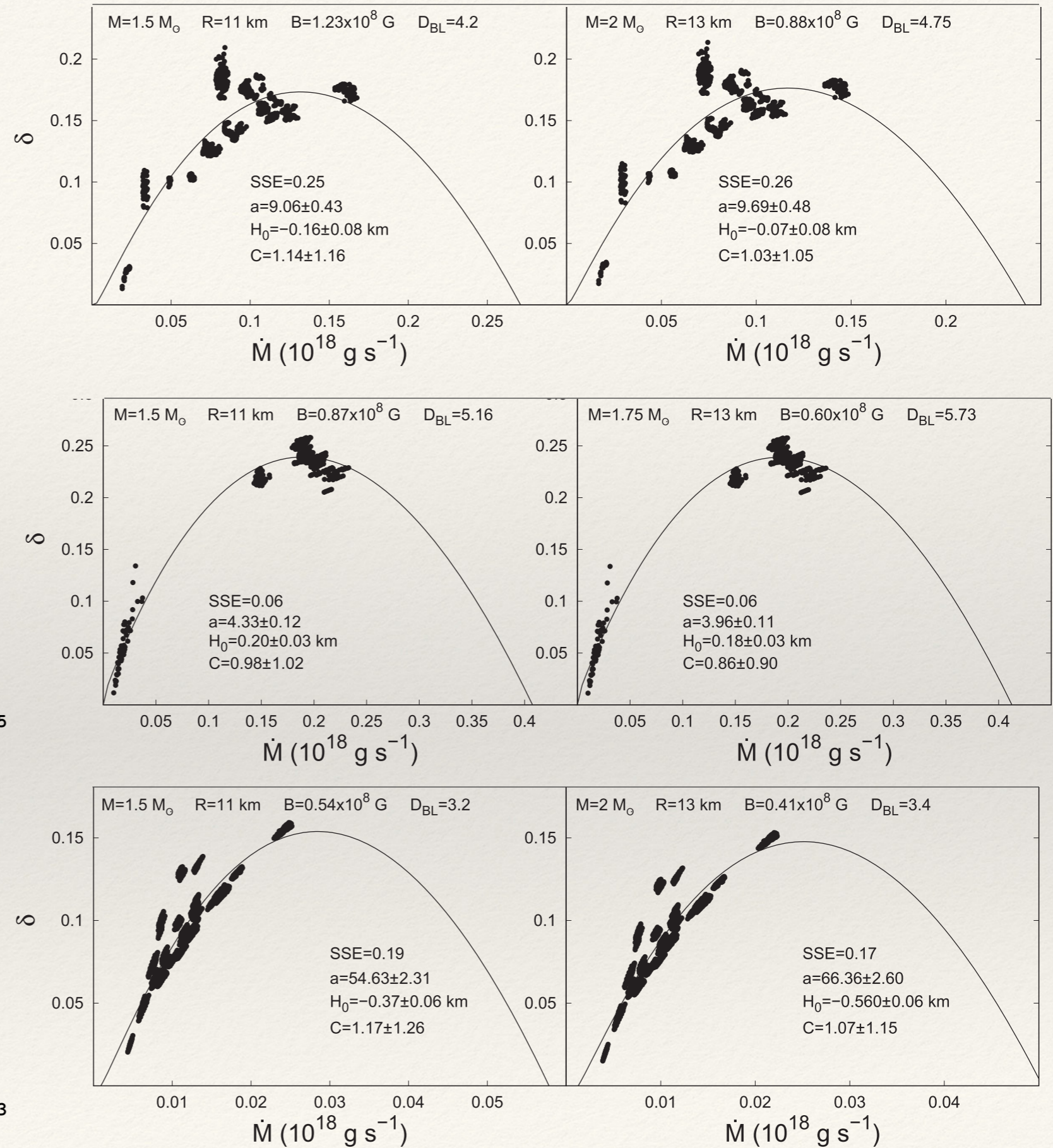
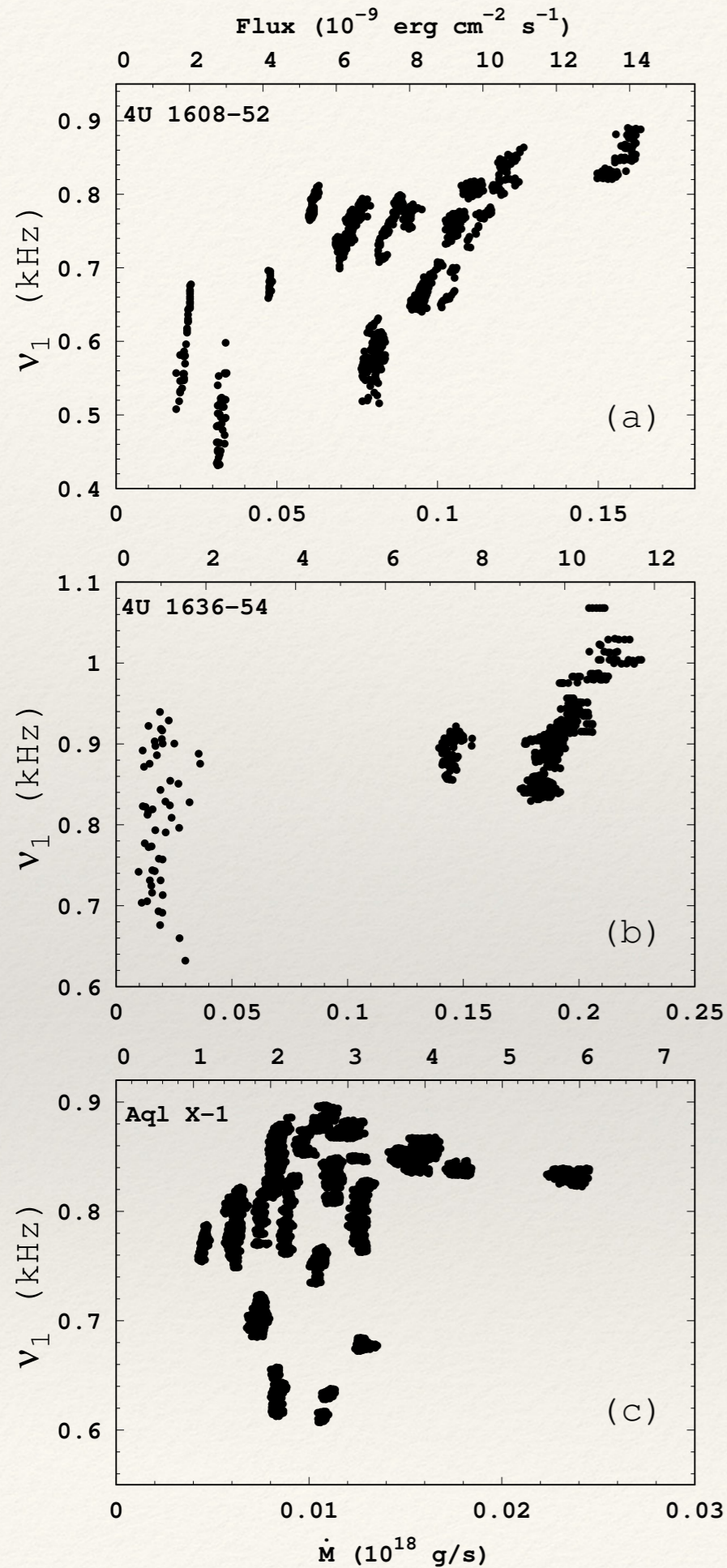
Kepler altı yörünge frekansı, sınır bölgesi genişliği

$$\delta = \frac{\varepsilon D_{BL}}{2} \quad \varepsilon(\dot{M}) = \frac{H_t}{r_{in}}$$

dolayısıyla kütle yığılma hızı cinsinden modellenenir.

$$M = 1.4 M_\odot, R = 10 \text{ km} \quad \text{kullanarak} \quad F_X \rightarrow \dot{M}$$





**Aşırı parlak X-ışını kaynakları (ULX): Kritik üstü (Eddington üstü) hızlarda kütle yığıştıran NY**

Yakındaki yıldız oluşum galaksileri → ULX oldukça genç sistemler olmalı

$L_X \gg L_E$  izotropik ışıma yapan güneş kütleli bir cisim için

İzotropik ışıma varsayımı → ULX: orta kütleli karadelikler (IMBH: 100–10000  $M_\odot$ )

KD varsayımı + Rölativistik modeller ile QPO frekanslarının yorumlanması →  $M_{BH} \sim 10^3 - 10^4 M_\odot$

Ancak, IMBH daha çok yoğun küresel kümelerde olmalı (yaşlı sistemler) → ULX olma olasılığı düşük

ULX içerebilecek HMXB sistemlerinde madde yığıştıran IMBH oluşturma zorluğu

**ULX sistemleri muhtemelen kritik üstü hızlarda kütle yığıştıran NY / Güneş kütleli KD**

Gözlenen QPO'lara dayanarak M82 X-2 için IMBH modeli önerilmişti, data sonra M82 X-2'den pulsasyon gözlemlendi → ULX pulsarı (PULX) olan bir NY (NuSTAR J095551+6940.8)

Kısa süre önce 3 PULX daha keşfedildi + 1 yeni aday → ULX popülasyonu içinde NY yaygın olabilir

## QPO gösteren ULX listesi

Source	$\nu_{\text{QPO}}$ (Hz)	$F_{\text{X}}$ (erg cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	$d$ (Mpc)	References
M82 X-1	0.12 – 5.07	$2.5 \times 10^{-11}$	3.63	(1),(2),(3)
M82 X-2	$(2.77 - 3.98) \times 10^{-3}$	$1.2 \times 10^{-11}$	3.63	(4)
NGC 628 (J013651.1+154547)	$(0.1 - 0.4) \times 10^{-3}$	$10^{-13}$	9.7	(5)
Holmberg IX X-1	0.2	$1.06 \times 10^{-11}$	3.4	(6)
NGC 5408 X-1	$(10 - 40) \times 10^{-3}$	$4 \times 10^{-12}$	4.8	(7),(8)
NGC 6946 X-1	$8.5 \times 10^{-3}$	$2.4 \times 10^{-12}$	5.9	(9)
NGC 1313 X-1	0.0329 – 0.46	$9.8 \times 10^{-12}$	4.13	(10)

NOTE—Except the sources such as Holmberg IX X-1 and NGC 6946 X-1 that exhibit only one QPO, we provide the minimum and maximum values of the QPO frequencies,  $\nu_{\text{QPO}}$ , which have been observed when the average X-ray flux of the source is around the value of  $F_{\text{X}}$ .

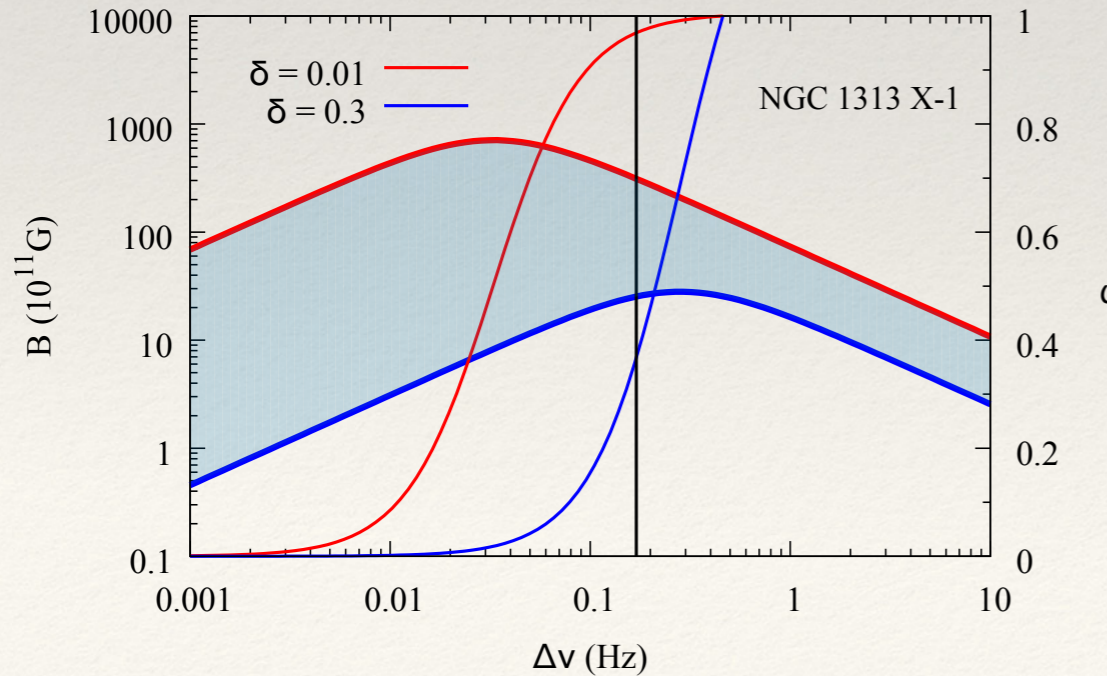
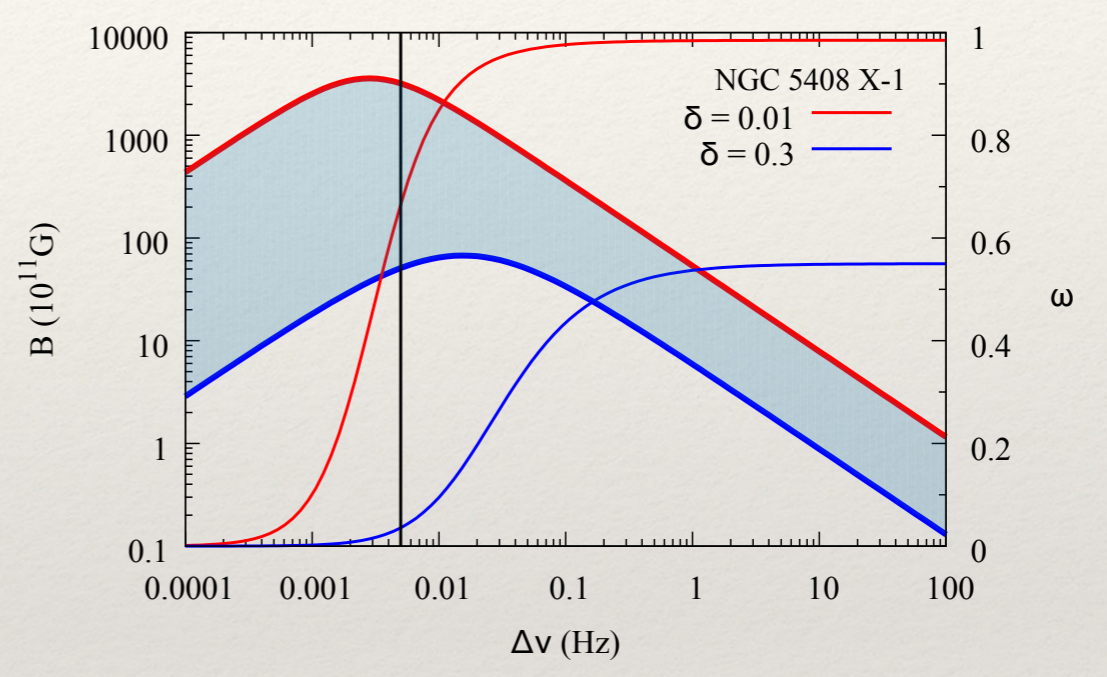
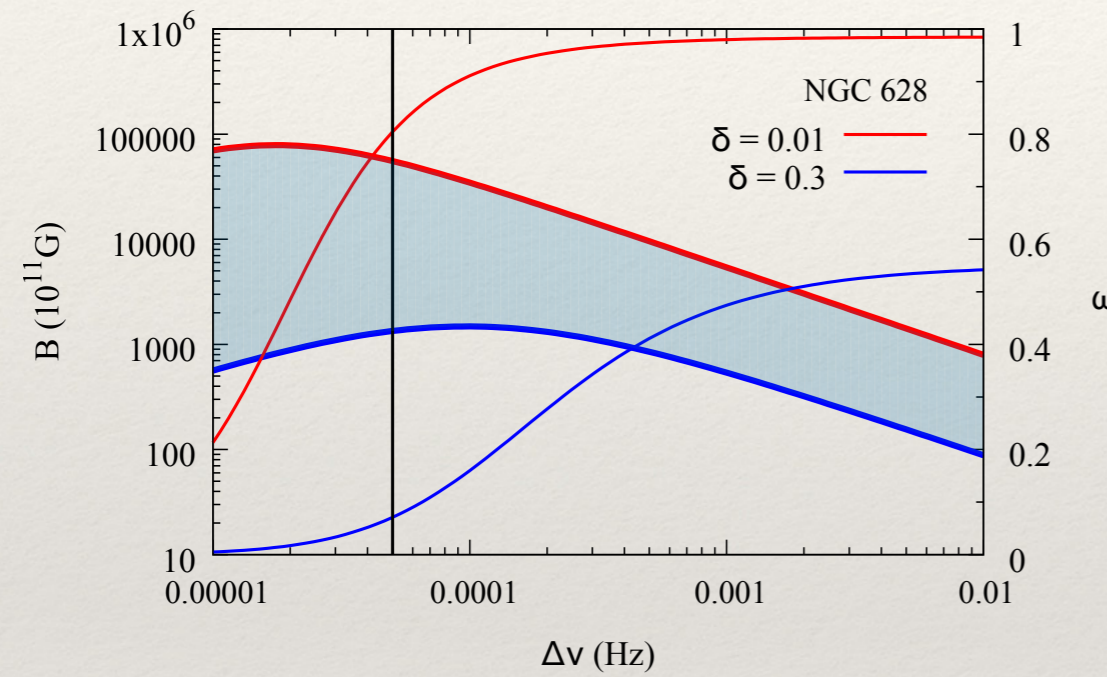
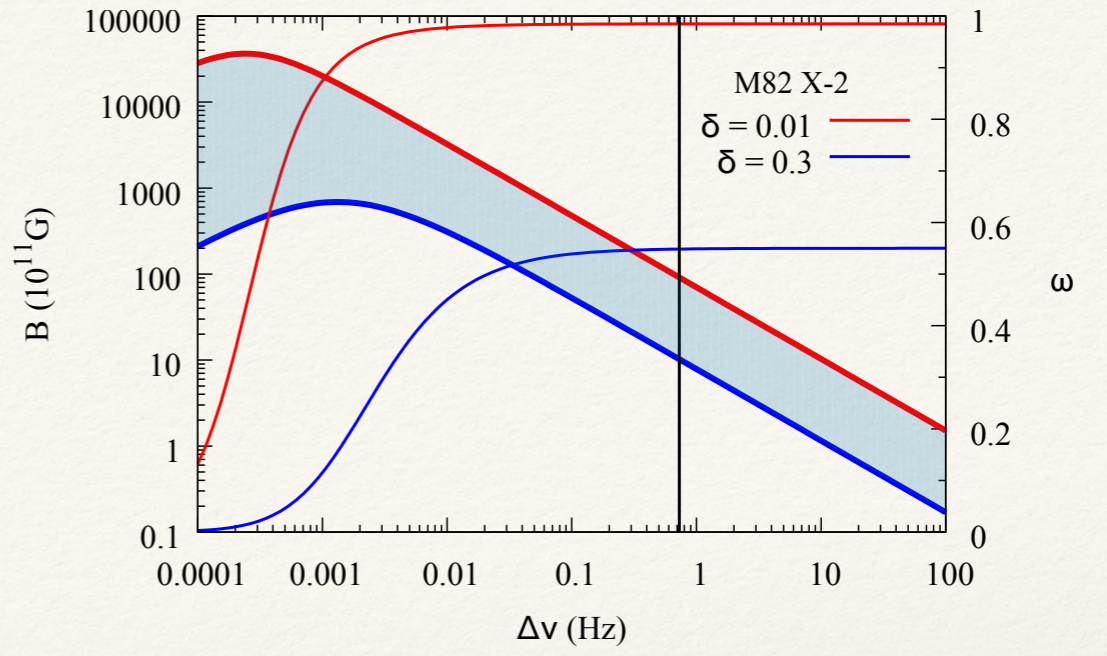
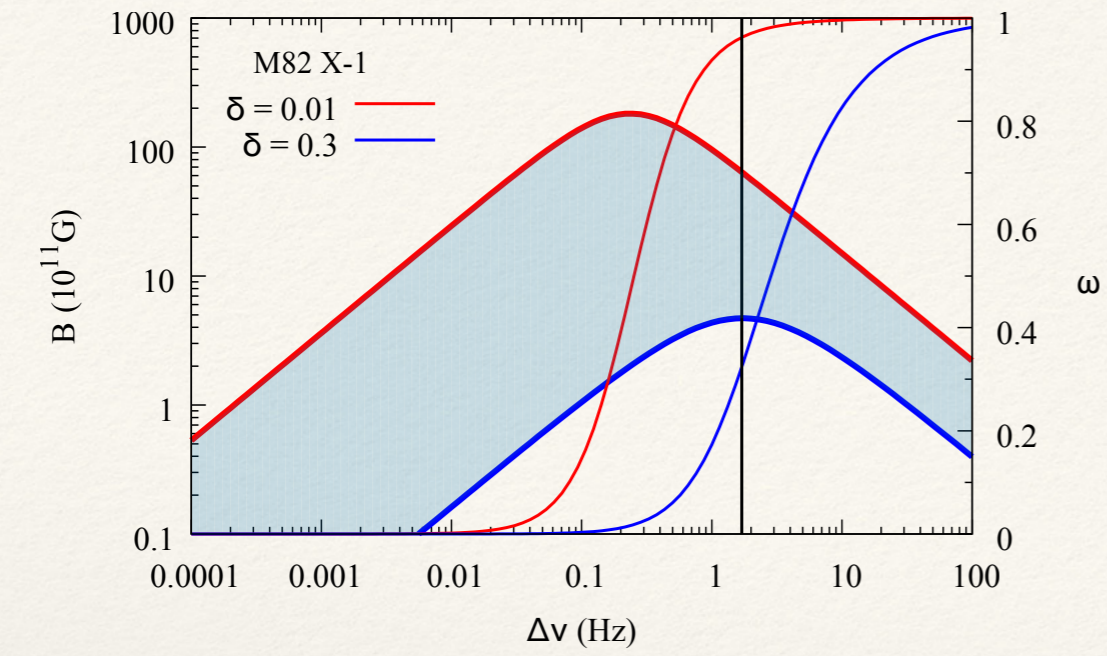
References—(1) [Pasham et al. 2014](#); (2) [Pasham & Strohmayer 2013](#); (3) [Mucciarelli et al. 2006](#); (4) [Feng et al. 2010](#); (5) [Liu et al. 2005](#); (6) [Dewangan et al. 2006a](#); (7) [Dheeraj & Strohmayer 2012](#); (8) [Strohmayer 2009](#); (9) [Rao et al. 2010](#); (10) [Pasham et al. 2015](#).

İzotropik olmayan ışınım  $L_{\text{X}} = bL_{\text{iso}} = 4\pi bd^2 F_{\text{X}}$  ( $b < 1$ ) ve kritik üstü yığılma hızlarında

iç diskin küreselleşmesi (şişmesi) dikkate alınırca  $r_{\text{in}} \propto (F_{\text{X}}/B^2\delta)^{-2/5} \propto \nu_{\text{K}}^{-2/3}$  bulunur

QPO frekansları için BRM tahmini:  $\nu_{\text{QPO}} = \nu_r - m\Delta\nu$  ( $\Delta\nu \equiv \nu_2 - \nu_1 = \nu_\phi$ )

(Erkut, Ekşi, & Alpar 2018, gönderilmek üzere)



- $B \simeq (0.5 - 6) \times 10^{12} \text{ G}$  (M82 X-1)
- $B \simeq (0.1 - 1) \times 10^{13} \text{ G}$  (M82 X-2)
- $B \simeq (1.5 - 50) \times 10^{14} \text{ G}$  (NGC 628)
- $B \simeq (0.5 - 30) \times 10^{13} \text{ G}$  (NGC 5408 X-1)
- $B \simeq (0.3 - 3) \times 10^{13} \text{ G}$  (NGC 1313 X-1)

(Erkut, Ekşi, & Alpar 2018, gönderilmek üzere)

## ÖZET VE SONUÇLAR

- Birçok ULX, kritik üstü hızlarda kütle aktarımını gerçekleştiren ve NY içeren HMXB olabilir.
- Kritik üstü rejim ve hüzmeleme faktörü NY içeren ULX modellenmesinde hesaba katılmalıdır.
- NY/KD içeren LMXB yaşlı sistemler olup genellikle Eddington altı hızlarda kütle yığılırlar.
- Hem kritik altı hem de kritik üstü rejimlerde gözlenen QPO frekansları BRM altında anlaşılabilir.
- QPO frekanslarının BRM yorumu manyetosfer disk etkileşimine dayanmaktadır.
- BRM kullanıldığında,
  - (i) NY içeren LMXB'deki QPO frekans parlaklık ilişkileri  $\rightarrow B \sim 10^7 - 10^9$  G
  - (ii) ULX'den gözlenen QPO frekansları  $\rightarrow B \sim 10^{12} - 10^{15}$  G