

# AXK NuSTAR J095551+6940.8: yüksek kütleli bir X-ışını çiftinde süper manyetik alanlı bir nötron yıldızı



K. Yavuz Ekşi\*,  
Ceyhun Andaç,  
Sercan Çıkıntoğlu,  
A. Arda Gençali,  
Can Güngör,  
Filiz Öztekin



İstanbul Teknik Üniversitesi  
Fizik Mühendisliği Bölümü, Maslak

UAK 2015, Ortadođu Teknik Üniversitesi

## Aşırı-parlak X-ışını kaynakları (AXK)

- Her galakside 1-2 tane var.
- $L_X \sim 10^{41}$  erg/s
- $L_E \simeq 10^{38} (M/M_\odot)$  erg/s
- Ortanca kütleli ( $M = 100 - 1000 M_\odot$ ) karadelik mi?
- $M = 20 - 40 M_\odot$  'lık yıldız kütleli karadelikten hüzmelenmiş ışınım mı?

## LETTER

doi:10.1038/nature13791

### An ultraluminous X-ray source powered by an accreting neutron star

M. Bachetti<sup>1,2</sup>, F. A. Harrison<sup>3</sup>, D. J. Walton<sup>3</sup>, B. W. Grefenstette<sup>3</sup>, D. Chakrabarty<sup>4</sup>, F. Fürst<sup>1</sup>, D. Barret<sup>1,2</sup>, A. Beloborodov<sup>5</sup>, S. E. Boggs<sup>6</sup>, F. E. Christensen<sup>7</sup>, W. W. Craig<sup>8</sup>, A. C. Fabian<sup>9</sup>, C. J. Hailey<sup>10</sup>, A. Hornschemeyer<sup>11</sup>, V. Kaspi<sup>12</sup>, S. R. Kulkarni<sup>3</sup>, T. Maccarone<sup>13</sup>, J. M. Miller<sup>14</sup>, V. Rana<sup>1</sup>, D. Stern<sup>15</sup>, S. P. Tendulkar<sup>1</sup>, J. Tomsick<sup>6</sup>, N. A. Webb<sup>1,2</sup> & W. W. Zhang<sup>11</sup>

The majority of ultraluminous X-ray sources are point sources that are spatially offset from the nuclei of nearby galaxies and whose X-ray luminosities exceed the theoretical maximum for spherical infall (the Eddington limit) onto stellar-mass black holes<sup>1,2</sup>. Their X-ray luminosities in the 0.5–10 kiloelectronvolt energy band range from 10<sup>39</sup> to 10<sup>41</sup> ergs per second<sup>3</sup>. Because higher masses imply less extreme ratios of the luminosity to the isotropic Eddington limit, theoretical models have focused on black hole rather than neutron star systems<sup>4,5</sup>. The most challenging sources to explain are those at the luminous end of the range (more than 10<sup>40</sup> ergs per second), which require black hole masses of 50–100 times the solar value or significant departures from the standard thin disk accretion that powers bright Galactic X-ray binaries, or both. Here we report broadband X-ray observations of the nuclear region of the galaxy M82 that reveal pulsations with an average period of 1.37 seconds and a 2.5-day sinusoidal modulation. The pulsations result from the rotation of a magnetized neutron star, and the modulation arises from its binary orbit. The pulsed flux alone corresponds to an X-ray luminosity in the 3–30 kiloelectronvolt range of 4.9 × 10<sup>39</sup> ergs per second. The pulsating source is spatially coincident with a variable source<sup>6</sup> that can reach an X-ray luminosity in the 0.3–10 kiloelectronvolt range of 1.8 × 10<sup>40</sup> ergs per second<sup>7</sup>. This association implies a luminosity of about 100 times the Eddington limit for a 1.4-solar-mass object, or more than ten times brighter than any known accreting pulsar. This implies that neutron stars

ULXs, the most luminous being M82 X-1<sup>13</sup>, which can reach  $L_X(0.3\text{--}10\text{ keV}) \approx 10^{40}\text{ erg s}^{-1}$ , and the second brightest being a transient, M82 X-2 (also referred to as X42.3+59<sup>3</sup>), which has been observed to reach<sup>14</sup>  $L_X(0.3\text{--}10\text{ keV}) \approx 1.8 \times 10^{40}\text{ erg s}^{-1}$ . The two sources are separated by 5", and so can only be clearly resolved by the Chandra X-ray telescope. During the M82 monitoring campaign, NuSTAR observed bright emission from the nuclear region containing the two ULXs. The region shows moderate flux variability at the 20% level during the first 22 days of observation. The flux was then found to have decreased by 60% by the time of the final observation ~20 days later. The peak X-ray flux,  $F_X(3\text{--}30\text{ keV}) = (2.33 \pm 0.01) \times 10^{-11}\text{ erg cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$  (90% confidence; Fig. 1) corresponds to a total 3–30 keV luminosity assuming isotropic emission of  $3.7^{+0.01}_{-0.01} \times 10^{40}\text{ erg s}^{-1}$ .

A timing analysis revealed a narrow peak just above the noise at a frequency of ~0.7 Hz in the power density spectrum. An accelerated epoch folding search<sup>15</sup> on overlapping 30-ks intervals of data found coherent pulsations with a mean period  $P$  of 1.37 s modulated with a sinusoidal period of 2.53 days throughout the 10-day interval starting at modified Julian day (MJD) 56691 (2014 February 03), and also in the last observation at MJD 56720 (Fig. 1). The statistical significance of the pulsations is ~13σ during the most significant 30-ks segments, and >30σ for the entire observation. A refined analysis (see Methods) subsequently enabled the detection of pulsations over a longer interval beginning on MJD 56686. The pulsed flux is variable, ranging from 5% to 13% in the

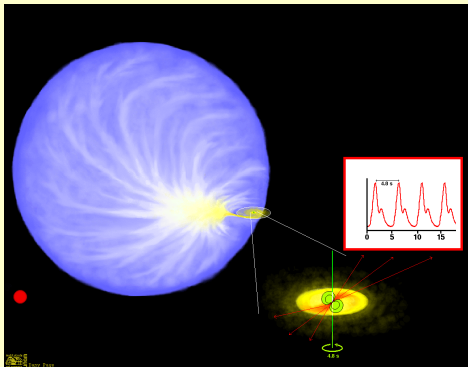
Nature 514, 202-204 (9 Ekim 2014)

arXiv:1410.3590 (14 Ekim 2014)

Tüm AXK'lar karadelik değil; en azından biri nötron yıldızı!

# X-ışını pulsarları

- Nötron yıldızı içeren X-ışını çifti
- Disk-manyetosfer etkileşimi
- Yüksek ( $B \sim 10^{12}$  G) manyetik alan diskin iç kısmını parçalayarak manyetik kutuplara kanallar.
- Kara deliğin manyetik alanı yoktur.



# X-ışını pulsarları

- Nötron yıldızı içeren X-ışını çifti
- Disk-manyetosfer etkileşimi
- Yüksek ( $B \sim 10^{12}$  G) manyetik alan diskin iç kısmını parçalayarak manyetik kutuplara kanallar.
- Kara deliğin manyetik alanı yoktur.

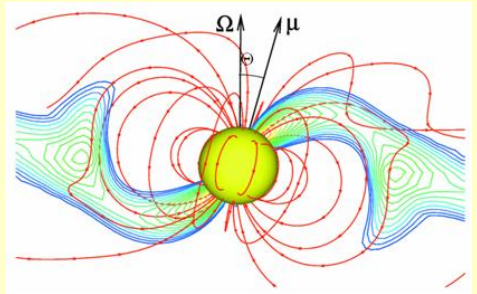


Image courtesy : Romanova et al.

# X-ışını pulsarları

- Nötron yıldızı içeren X-ışını çifti
- Disk-manyetosfer etkileşimi
- Yüksek ( $B \sim 10^{12}$  G) manyetik alan diskin iç kısmını parçalayarak manyetik kutuplara kanallar.
- Kara deliğin manyetik alanı yoktur.

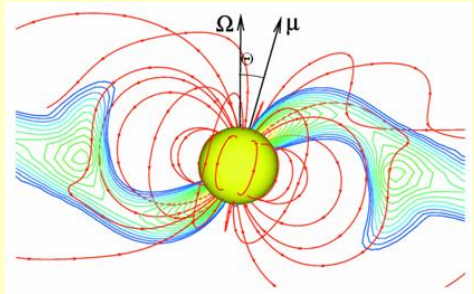


Image courtesy : Romanova et al.

# X-ışını pulsarları

- Nötron yıldızı içeren X-ışını çifti
- Disk-manyetosfer etkileşimi
- Yüksek ( $B \sim 10^{12}$  G) manyetik alan diskin iç kısmını parçalayarak manyetik kutuplara kanallar.
- Kara deliğin manyetik alanı yoktur.

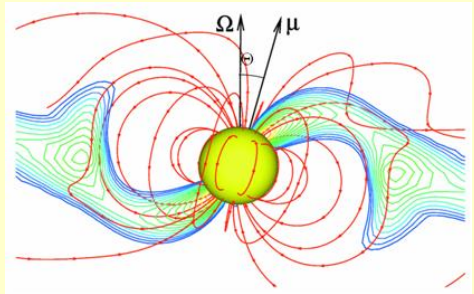


Image courtesy : Romanova et al.

# Atımlar gösteren bir AXK

Eşlikçi yıldızdan kütle aktarımı yapan yüksek manyetik alanlı bir nötron yıldızı

- NuSTAR<sup>1</sup> J095551+16940.8 (M82 X-2)  $d \simeq 3.6$  Mpc
- $P = 1.87$  s
- $\dot{P} = -2 \times 10^{-10}$  s/s
- $P_{\text{orb}} = 2.5$  day bir HMXB içinde.  $M_{\text{comp}} > 5.2 M_{\odot}$ ,  
 $R_{\text{comp}} > R_{\odot}$  ( $f = 2.1 M_{\odot}$ )
- Atımlı ışınma gücü  $L_{3-30 \text{ keV}} = 4.9 \times 10^{39}$  erg/s (değişken)
- $L_{0.3-10 \text{ keV}} = 1.8 \times 10^{40}$  erg/s  
 $L_{0.5-10 \text{ keV}} = (6.6 \pm 0.1) \times 10^{39}$  erg/s
- $1.4 M_{\odot}$  kütleli bir nesne için  $L \sim 10^2 L_E!$



Kütle aktarımdan kaynaklanan ışımaya gücü

$$L_X = \frac{GM\dot{M}}{R} \quad (1)$$

Alfvén yarıçapı

$$R_A = \left( \frac{\mu^2}{\sqrt{2GM\dot{M}}} \right)^{2/7} \quad (2)$$

Diskin iç yarıçapı

$$R_{\text{in}} = \xi R_A = \xi \left( \frac{\mu^2 \sqrt{GM}}{\sqrt{2} L_X R} \right)^{2/7} \quad (3)$$

Eş-dönme yarıçapı

$$R_{\text{co}} = \left( \frac{GM}{\Omega^2} \right)^{1/3} = \left( \frac{GMP^2}{4\pi^2} \right)^{1/3} \quad (4)$$

Dönme hızı parametresi

$$\omega_* = \left( \frac{R_{\text{in}}}{R_{\text{co}}} \right)^{3/2} = \xi^{3/2} \left( \frac{\mu^2 \sqrt{GM}}{\sqrt{2} L_X R} \right)^{3/7} \left( \frac{GMP^2}{4\pi^2} \right)^{-1/2} \quad (5)$$

Yıldıza etkiyen tork

$$N = n(\omega_*) N_0, \quad N_0 = \sqrt{GMR_{\text{in}} \dot{M}} \quad (6)$$

Boyutsuz tork  $n(\omega_*)$  disk-manyetosfer etkileşimine ilişkin varsayımlara bağlı ancak tork dengesine yakın bir sistem için:

$$n = n_0 \left( 1 - \frac{\omega_*}{\omega_c} \right) \quad (7)$$

biçimindedir. Burada  $\omega_c \sim n_0 \sim O(1)$ .

## Tork dengesi

Dengeye yakın bir sistem için  $\omega_* \simeq \omega_c$ :

$$R_{\text{in}} = \omega_c^{2/3} R_{\text{co}} \quad (8)$$

Buna göre

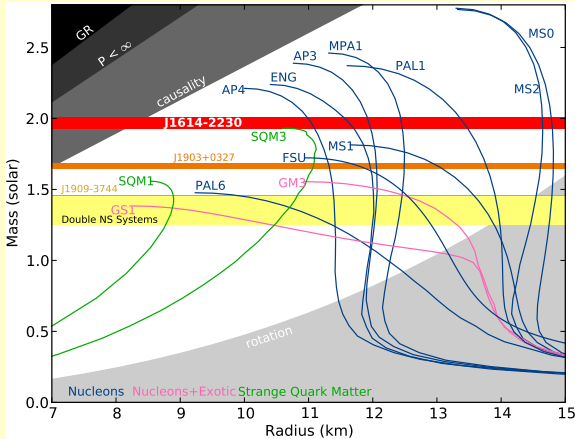
$$\xi \left( \frac{\mu^2 \sqrt{GM}}{\sqrt{2} L_X R} \right)^{2/7} = \omega_c^{2/3} \left( \frac{GMP^2}{4\pi^2} \right)^{1/3} \quad (9)$$

Buradan yıldızın manyetik momentini çözersek

$$\mu = 1.17 \times 10^{31} \text{ G cm}^3 \omega_c^{7/6} \xi^{-7/4} m_{1.4}^{1/3} L_{40}^{1/2} R_6^{1/2} \quad (10)$$

$\mu = \frac{1}{2} BR^3$  ve  $\xi = 0.5$  ile  $B \sim 7 \times 10^{13} \text{ G}$ : **magnetar!**

# Nötron yıldızı kütle-yarıçap ilişkisi

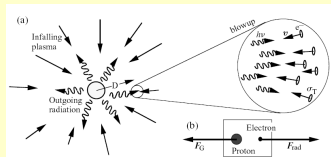


Hiçbir hal denklemine göre 3 Güneş-kütlesinden büyük nötron yıldızı olamaz!

# Eddington limiti

Elektronlar üzerindeki ışımaya basıncının protonlar üzerindeki gravitasyonel kuvveti dengelediği ışımaya gücü

$$L_E = \frac{4\pi GMm_p c}{\sigma_T} \\ = 1.3 \times 10^{38} (M/M_\odot) \text{ erg s}^{-1}$$



$$\sigma_T = \frac{8\pi}{3} \frac{e^2}{m_e c^2} = 6.65 \times 10^{-25} \text{ cm}^2 \text{ Thomson cross-section}$$

# Elektron tesir kesiti $\sigma$ 'nın yüksek manyetik alanda küçülmesi

Kritik manyetik alan

$$B_c \equiv \frac{m_e^2 c^3}{\hbar e} = 4.4 \times 10^{13} \text{ G}$$

Daha yeğın manyetik alanlarda elektronun tesir kesiti küçülür:

$$\frac{\sigma}{\sigma_T} \simeq 0.5 \left( \frac{B}{10^{12} \text{ G}} \right)^{-4/3}$$

Kritik luminosite büyür:

$$\frac{L_{\text{cr}}}{L_E} \simeq 2 \left( \frac{B}{10^{12} \text{ G}} \right)^{4/3} \simeq 580$$

## Sonuç

- AXK'lar heterojen bir grup olarak belirsiz sayıda nötron yıldızı içeriyor olabilir.
- Bu nötron yıldızları yüksek manyetik alana sahip olabilir.
- Işıma gücünün Eddington limitini aşmasının yolu kuantum elektrodinamiksel süreçler ile elektron saçılma tesir kesitinin küçülmesi olabilir.
- Işımanın hüzmelenmiş olması da Eddington limitinin aşılmasına katkıda bulunuyor olabilir.