

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова  
Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга

Докладчик: Богомазов Алексей Иванович

## Об эволюции рентгеновских новых с ускоренным уменьшением орбитального периода

06.04.2021

## Рентгеновские новые с аномально быстрым уменьшением орбитального периода

- ▶ **A0620-00 = V616 Mon:**  $P_{orb} \approx 0.32$  дня,  $\dot{P}_{orb} = -0.60 \pm 0.08$  мс год<sup>-1</sup>,  $\tau \approx 70$  миллионов лет,  $M_2 = 0.4M_{\odot}$  (BH+opt). (*González Hernández et al., 2014*)
- ▶ **XTE J1118+480 = KV UMa:**  $P_{orb} \approx 0.17$  дня,  $\dot{P}_{orb} = -1.90 \pm 0.57$  мс год<sup>-1</sup>,  $\tau \approx 12$  миллионов лет,  $M_2 = 0.18M_{\odot}$  (BH+opt). (*González Hernández et al., 2012*)
- ▶ **Nova Muscae 1991:**  $P_{orb} \approx 0.43$  дня,  $\dot{P}_{orb} = -20.7 \pm 12.7$  мс год<sup>-1</sup>,  $\tau \approx 2.7$  миллиона лет,  $M_2 = 0.89M_{\odot}$  (BH+opt). (*González Hernández et al., 2017*)
- ▶ **AX J1745.6-2901:**  $P_{orb} \approx 0.35$  дня,  $\dot{P}_{orb} \approx -1.3 \pm 0.08$  мс год<sup>-1</sup>,  $\tau \approx 20 - 40$  миллионов лет,  $M_2 \lesssim 0.8M_{\odot}$  (NS+opt). (*Ponti et al., 2017*)
- ▶ Количество рентгеновских новых с черными дырами и известными массами 15.
- ▶ Количество рентгеновских новых в Галактике от 300 до 3000.
- ▶ Количество изученных рентгеновских новых с нейтронными звездами около нескольких десятков.

## «Машина сценариев»



## Введение: «Машина сценариев»: стадия с общей оболочкой

Общая оболочка возникает, если свою полость Роша заполняет звезда с сильно проэволюционировавшим ядром независимо от отношения масс, в остальных случаях для возникновения общей оболочки должно выполняться условие  $q \leq q_{cr} = 0.3$ , если  $q > 0.3$ , то эволюция идет без общей оболочки.

$$\alpha_{CE} = \frac{\Delta E_b}{\Delta E_{orb}},$$

где  $\Delta E_b = E_{grav} - E_{thermal}$  - это энергия связи выброшенной оболочки и  $\Delta E_{orb}$  - уменьшение орбитальной энергии в процессе сближения

$$\alpha_{CE} \left( \frac{GM_a M_c}{2a_f} - \frac{GM_a M_d}{2a_i} \right) = \frac{GM_d (M_d - M_c)}{R_d},$$

где  $M_c$  - масса ядра звезды-донора с массой  $M_d$  и радиусом  $R_d$ ,  $a_i$  - большая полуось системы,  $M_a$  - масса звезды-аккретора,  $a_f$  - большая полуось системы в конце общей оболочки (величины  $M_c$ ,  $M_d$ ,  $M_a$  и  $a_i$  относятся к началу общей оболочки).

# Введение: «Машина сценариев»: магнитный звездный ветер, доля массы предсверхновой, уходящей под горизонт событий, толчок во время взрыва сверхновой

Унос углового момента в МЗВ:

$$\frac{d \ln J}{dt} = -10^{-14} \frac{R_2^4 (M_1 + M_2)^2 R_\odot}{\lambda_{MSW}^2 a^5 M_1 M_\odot} \text{s}^{-1},$$

Характерное время МЗВ:

$$\tau = \frac{3.3 a^5 M_1 \lambda_{MSW}^2}{(M_1 + M_2)^2 R_2^4};$$

Доля массы предсверхновой, уходящей под горизонт событий в момент образования черной дыры  $k_{BH}$ :

$$M_{BH} = k_{BH} M_{preSN};$$

Дополнительная скорость нейтронной звезды после взрыва сверхновой:

$$f(v_a) \sim \frac{v_a^2}{v_0^3} e^{-\frac{v_a^2}{v_0^2}},$$

с равновероятным направлением. Величина  $v_0$  выступает в роли свободного параметра. Дополнительный толчок черных дыр во время их образования представлен в виде:

$$v_{BH} = v_a \frac{M_{preSN} - M_{BH}}{M_{BH}},$$

где  $v_{BH}$  — дополнительная скорость, получаемая черной дырой при рождении.

## Введение: «Машина сценариев»: магнитные поля нейтронных звезд

Начальный магнитный момент  $\mu$  нейтронных звезд распределялся как

$$f(\log \mu) \propto \text{const},$$

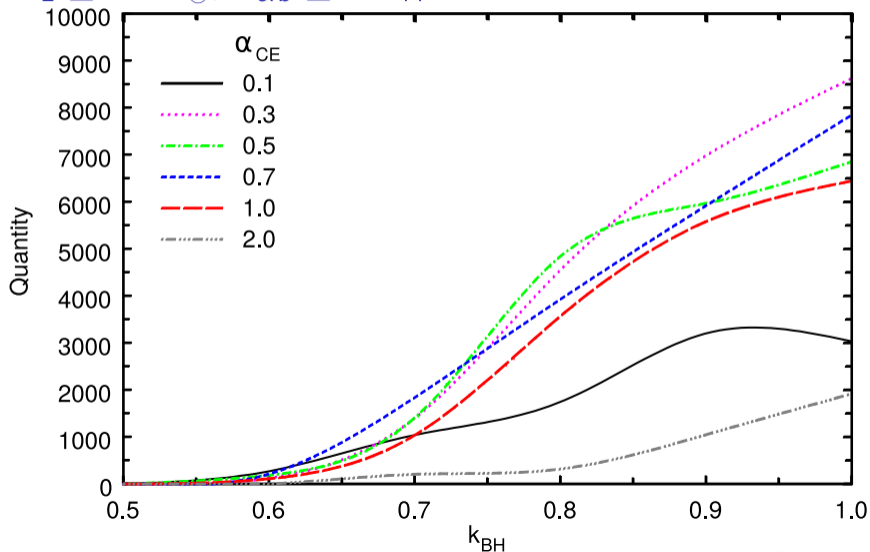
в диапазоне  $10^{28} \leq \mu \leq 10^{32}$  Гс см<sup>-3</sup>,  
начальные периоды вращения НЗ  
принимались равными 10 мс.

Распад магнитного поля  $B$  со временем  $t$  были приняты в форме:

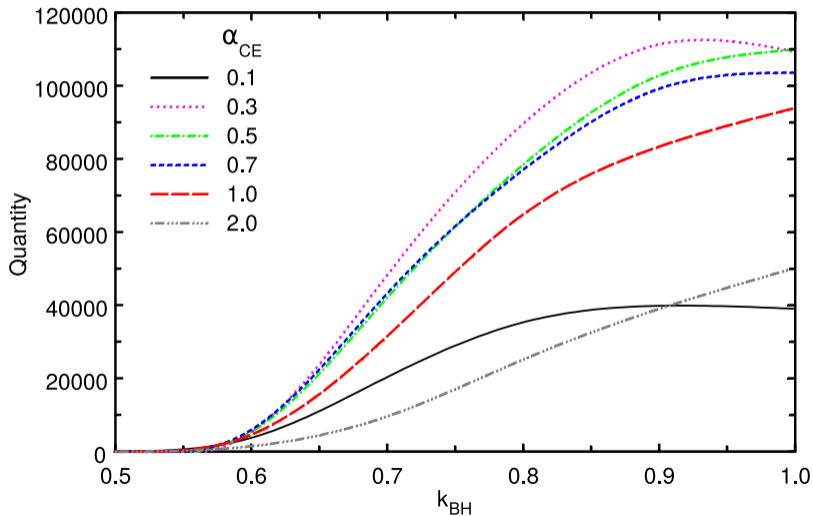
$$B = \begin{cases} B_0 \exp(-t/\tau_{NS}), & t < \tau_{NS} \ln(B_0/B_{\min}), \\ B_{\min}, & t \geq \tau_{NS} \ln(B_0/B_{\min}), \end{cases}$$

где  $B_0 = 8 \times 10^7$  Гс.

Количество систем ВН+орт в Галактике,  
 $0.2M_{\odot} \leq M_2 \leq 1.1M_{\odot}$ ,  $P_{orb} \leq 0.5$  дня

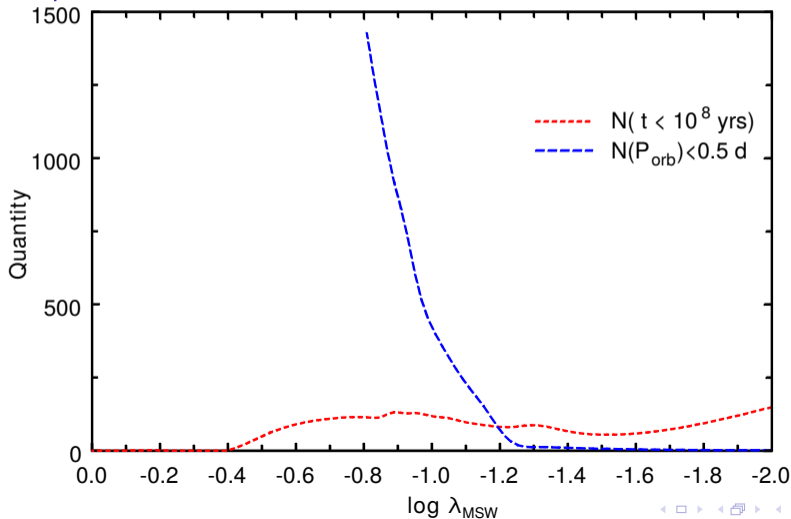


Количество систем ВН+орб в Галактике,  
 $0.2M_{\odot} \leq M_2 \leq 1.1M_{\odot}$ ,  $P_{orb} \leq 1.5$  дня

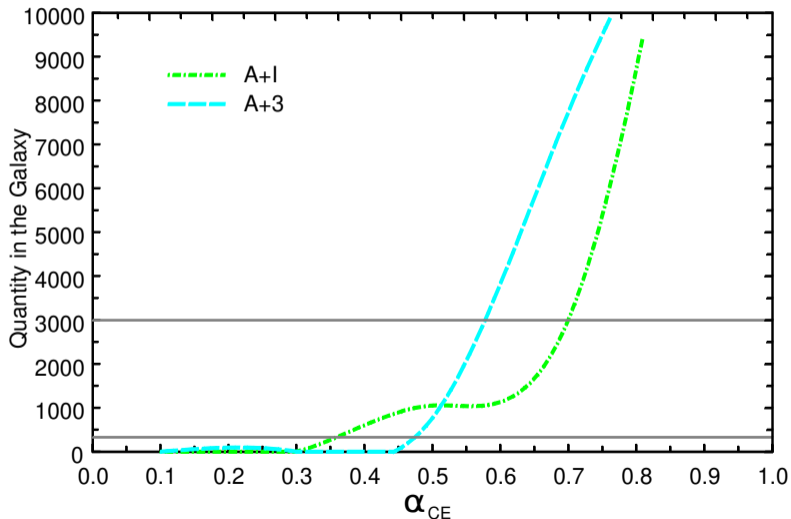




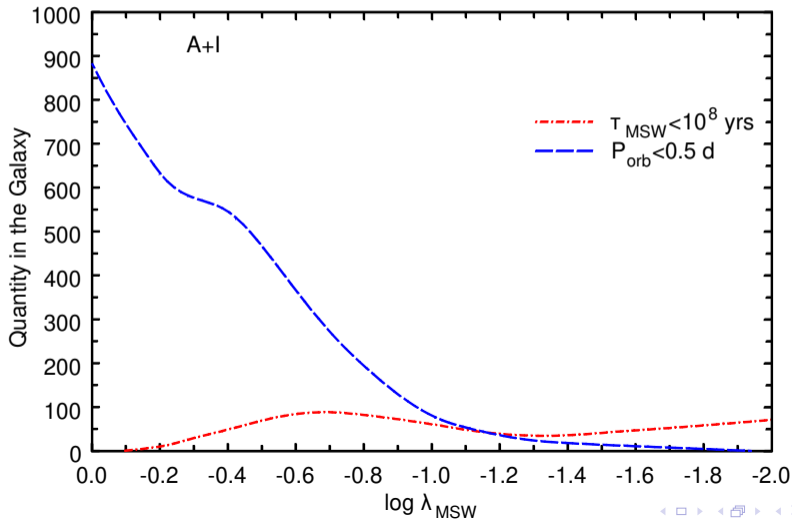
Отношение количества систем с коротким временем магнитного звездного ветра к количеству систем с орбитальным периодом меньше 0.5 дня,  $VN+opt$



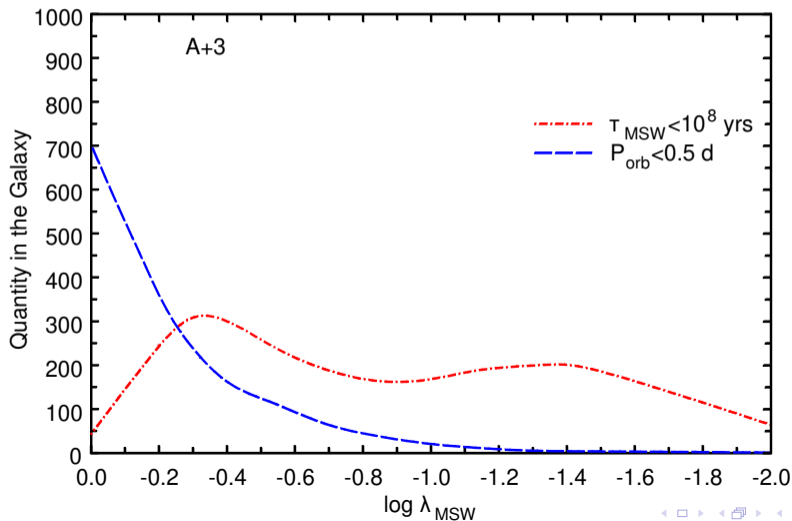
Количество систем NS+opt в Галактике,  
 $0.2M_{\odot} \leq M_2 \leq 1.1M_{\odot}$ ,  $P_{orb} \leq 0.5$  дня



Отношение количества систем с коротким временем магнитного звездного ветра к количеству систем с орбитальным периодом меньше 0.5 дня



Отношение количества систем с коротким временем магнитного звездного ветра к количеству систем с орбитальным периодом меньше 0.5 дня



# Эволюционный трек со слабым МЗВ ( $\lambda_{MSW} = 1$ ), BH+opt

System	$\Delta T, 10^6$ лет	$M_1, M_{\odot}$	$M_2, M_{\odot}$	$a, R_{\odot}$	$P_{orb}$ , дней	$e$	$T, 10^6$ лет
I+I	4.8	31.55	0.75	750	419	0	0
I+I		28.25	0.75	830	515	0	4.8
II+I	0.48	28.25	0.75	830	515	0	4.8
II+I		19.21	0.75	1200	1079	0	5.3
3+I, CE	0.01	19.21	0.75	1200	1079	0	5.3
3+I, CE		12.55	0.75	28	4.7	0	5.3
WR+I	0.45	12.55	0.75	28	4.7	0	5.3
WR+I		8.78	0.75	39	9.15	0	5.8
SN Ib							
BH+I	1.5E+04	7.03	0.75	50	14.7	0.23	5.8
BH+I		7.03	0.73	49	14.28	0.19	$1.5 \cdot 10^4$

# Эволюционный трек с сильным МЗВ ( $\lambda_{MSW} = 0.13$ ), BH+opt

System	$\Delta T, 10^6$ лет	$M_1, M_{\odot}$	$M_2, M_{\odot}$	$a, R_{\odot}$	$P_{orb}$ , дней	$e$	$T, 10^6$ лет	
I+I	4.8	31.55	0.75	750	419	0	0	
I+I		28.25	0.75	830	515	0	4.8	
II+I	0.48	28.25	0.75	830	515	0	4.8	
II+I		19.21	0.75	1200	1079	0	5.3	
3+I, CE	0.01	19.21	0.75	1200	1079	0	5.3	
3+I, CE		12.55	0.75	28	4.7	0	5.3	
WR+I, MSW	0.2	12.55	0.75	28	4.7	0	5.3	
WR+I, MSW		10.82	0.75	32	6.2	0	5.5	
BB+3, MSW, CE	0.01	10.82	0.75	32	6.2	0	5.5	
BB+3, MSW, CE		7.90	0.34	1.7	0.09	0	5.5	
		SN Ib						
BH+3, MSW	30.65	6.32	0.34	2.2	0.15	0.24	5.5	
		МЗВ останавливается, либо оптическая звезда распадается						36.15

# Эволюционный трек с сильным МЗВ ( $\lambda_{MSW} = 0.1$ ), NS+opt

System	$\Delta T, 10^6$ лет	$M_1, M_{\odot}$	$M_2, M_{\odot}$	$P_{orb}$ , дней	$a, R_{\odot}$	$e$	$T, 10^6$ лет
I+I	16	12.30	0.58	2875	2200	0	0.0
I+I		11.86	0.58	2926	2200	0	16
II+I	1.6	11.86	0.58	2926	2200	0	16
II+I		11.56	0.58	3166	2300	0	17
3+I, CE	0.01	11.56	0.58	3166	2300	0	17
3+I, CE	0.01	3.36	0.58	1	7.3	0	17
WR+I, MSW	0.94	3.36	0.58	1	7.3	0	17
WR+I, MSW	0.94	2.35	0.58	1.8	9.8	0	18
BB+I, MSW	0.01	2.35	0.58	1.8	9.8	0	18
BB+I, MSW	0.01	1.92	0.58	0.08	1.2	0	18
			SN Ib				
Psr+I, MSW	0.0001	1.30	0.58	0.18	1.8	0.34	18
Ej+I, MSW		1.30	0.58	0.18	1.8	0.34	18
Ej+3, MSW	0.0003	1.30	0.58	0.18	1.8	0.34	18
Ej+3, MSW		1.30	0.58	0.18	1.8	0.34	18
P+3, MSW	0.0005	1.30	0.58	0.18	1.8	0.34	18
P+3, MSW		1.30	0.58	0.18	1.8	0.34	18
A+3, MSW	2	1.30	0.58	0.18	1.8	0.34	18

Final state

# Эволюционный трек с слабым MЗВ ( $\lambda_{MSW} = 1$ ), NS+opt

System	$\Delta T, 10^6$ лет	$M_1, M_{\odot}$	$M_2, M_{\odot}$	$P_{orb}$ , дней	$a, R_{\odot}$	$e$	$T, 10^6$ лет
I+I	16	12.30	0.58	2875	2200	0	0
I+I		11.86	0.58	2926	2200	0	16
II+I	1.6	11.86	0.58	2926	2200	0	16
II+I		11.56	0.58	3166	2300	0	17
3+I, CE	0.01	11.56	0.58	3166	2300	0	17
3+I, CE		3.36	0.58	1	7.3	0	17
WR+I	0.94	3.36	0.58	1	7.3	0	17
WR+I		2.35	0.58	1.8	9.8	0	18
			SN Ib				
Psr+I	0.22	1.30	0.58	8	23	0.57	18
Ej+I		1.30	0.58	8	23	0.57	18
GP+I	1	1.30	0.58	8	23	0.57	18
GP+I		1.30	0.58	8	23	0.57	20
G+I	100	1.30	0.58	8	23	0.57	20
G+I		1.30	0.58	8	23	0.57	120
A+I	15000	1.30	0.58	8	23	0.57	120
A+I		1.30	0.58	8	20	0.48	$1.5 \times 10^4$



## Альтернативное объяснение

A mechanism for orbital period modulation in close binaries, J. H. Applegate, *Astrophysical Journal*, 385, 621 (1992).

Some eclipsing variables are observed to undergo orbital period modulations of amplitude  $10^{-5}$  over time scales of decades or longer. These modulations can be explained by the gravitational coupling of the orbit to variations in the shape of a magnetically active star in the system. The variable deformation of the active star is produced by variations in the distribution of angular momentum as the star goes through its activity cycle. The torque needed to redistribute the angular momentum can be exerted by a mean subsurface magnetic field of several kilogauss.

Альтернативное объяснение кажется маловероятным, так все три системы с известным ускоренным изменением орбитального периода имеют один знак: период уменьшается, тогда как в случае магнитного механизма Апплегейта должно быть и циклическое увеличение орбитального периода.

## Дополнительное объяснение: circumbinary disc, tidal torque

Chen, Wen-Cong, Li, Xiang-Dong, A&A, 2015  
Xu, Xiao-Tian, Li, Xiang-Dong, ApJ, 2018

Chen, Wen-Cong, Podsiadlowski, Philipp,  
ApJL, 2019

# Выводы

По BH+opt опубликовано в работе: Cherepashchuk et al., MNRAS, 490, 3287 (2019).

По NS+opt в работе.

- ▶ Основной вывод: быстрое укорочение орбитального периода исследуемых систем совместимо с предположением о том, что оно связано с уносом орбитального момента магнитным звездным ветром маломассивной звезды, магнитное поле которой было многократно усилено в предшествующей общей оболочке.
- ▶ Дополнительные выводы: (1) более половины массы предсверхновой звезды коллапсировало в черную дыру, в противном случае система бы распалась, (2) дополнительный толчок должен быть нулевым или близким к нулю для всех типов исследуемых систем с маломассивными звездами.

Спасибо за внимание!