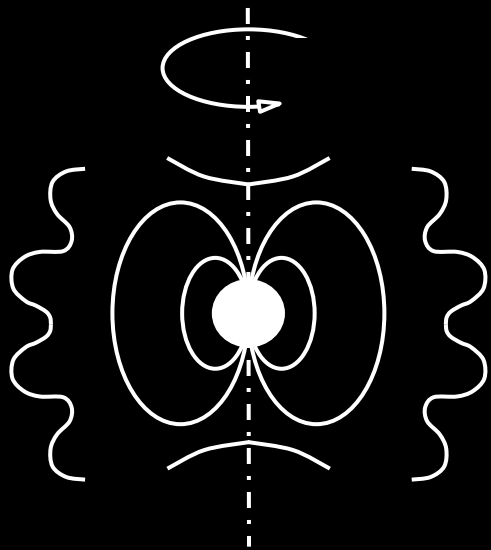




Эволюция нейтронных звезд в широких маломассивных двойных системах



Марина Афонина
Сергей Попов

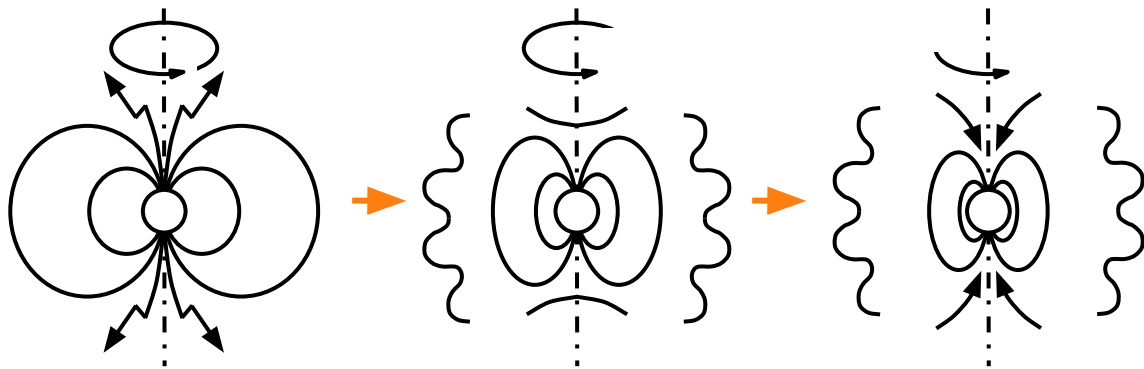
Эволюция вращения НЗ

- Частота вращения НЗ меняется: $K = -I\dot{\omega}$
- Замедляющий момент K для каждой стадии свой
- Эволюционная стадия зависит от положения характерного радиуса взаимодействия с внешним веществом.

Эжектор

Пропеллер

Аккректор



С внешним веществом взаимодействует:
пульсарный ветер или **магнитосфера**
(эжектор) (пропеллер или аккректор)

Одиночные НЗ

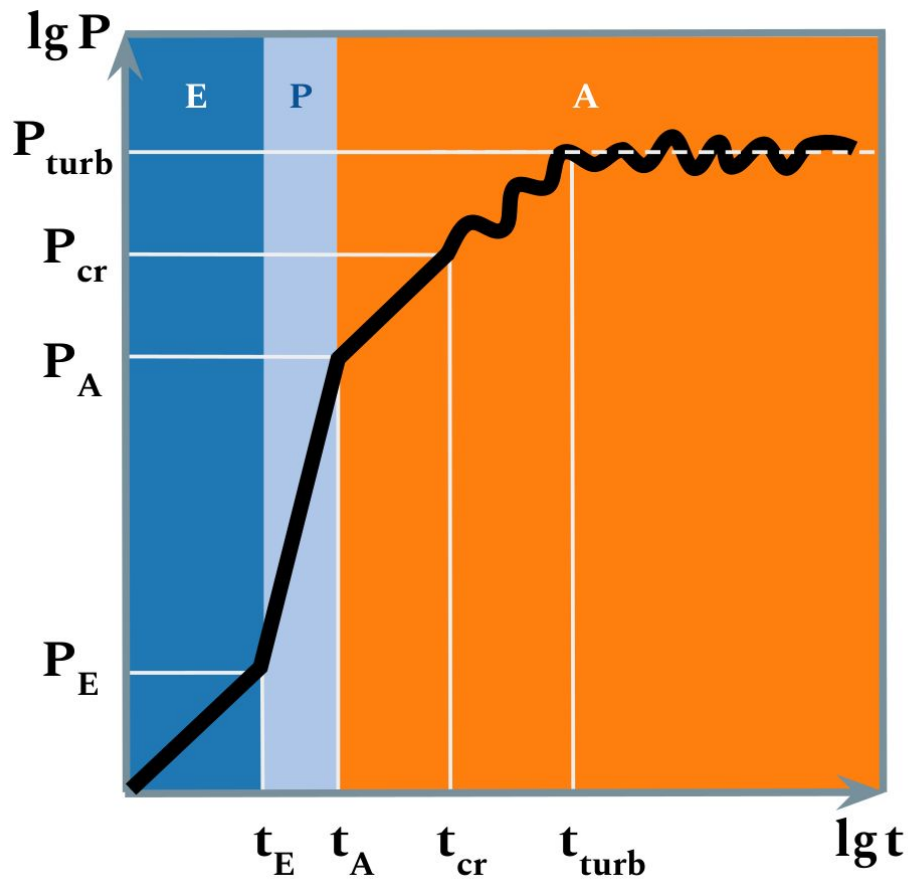
Эволюция низкоскоростных НЗ при постоянных плотности и скорости в разных моделях на больших масштабах времени

рассмотрение аккреции на одиночные НЗ:

В. Ф. Шварцман (1970)

J. P. Ostriker et al. (1970)

- эжектор
- пропеллер
- аккретор



Системы со звездой типа Солнца и невидимым компонентом

Системы **широкие** -
орбитальный период
~1 года и больше

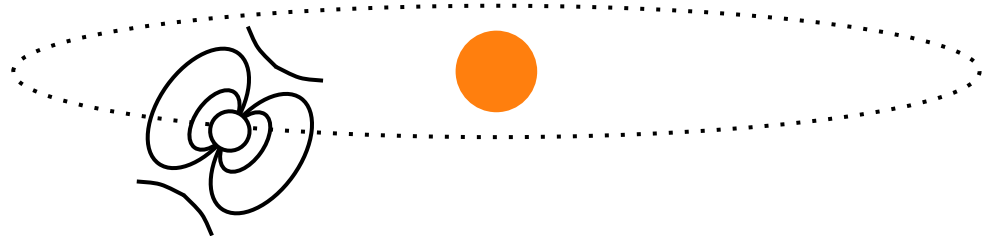
метод: Я.Б. Зельдович,
О.Х. Гусейнов (1966)

таблица: El-Badry et al.
(2024) **2405.00089**



Name	P_{orb} [days]	$M_{\star}$ [$M_{\odot}$]	M_2 [$M_{\odot}$]	eccentricity	ϖ [mas]
J0553-1349	189.10 ± 0.05	0.98 ± 0.06	1.33 ± 0.05	0.3879 ± 0.0007	2.505 ± 0.015
J2057-4742	230.15 ± 0.07	1.048 ± 0.031	1.31 ± 0.04	0.3095 ± 0.0026	1.745 ± 0.019
J1553-6846	310.17 ± 0.11	1.04 ± 0.05	1.323 ± 0.032	0.5314 ± 0.0021	1.344 ± 0.012
J2102+3703	480.9 ± 0.6	1.03 ± 0.03	1.44 ± 0.04	0.432 ± 0.017	1.520 ± 0.014
J0742-4749	497.6 ± 0.4	0.90 ± 0.05	1.28 ± 0.04	0.168 ± 0.004	1.035 ± 0.014
J0152-2049	536.14 ± 0.18	0.782 ± 0.03	1.291 ± 0.024	0.6615 ± 0.0010	2.453 ± 0.017
J0003-5604	561.83 ± 0.29	0.802 ± 0.03	1.34 ± 0.04	0.795 ± 0.005	2.183 ± 0.016
J1733+5808	570.94 ± 0.31	1.16 ± 0.05	1.362 ± 0.030	0.3093 ± 0.0010	1.452 ± 0.010
J1150-2203	631.80 ± 0.23	1.18 ± 0.06	1.39 ± 0.04	0.553 ± 0.004	1.738 ± 0.016
J1449+6919	632.76 ± 0.22	0.91 ± 0.05	1.261 ± 0.032	0.2635 ± 0.0013	1.812 ± 0.012
J0217-7541	636.1 ± 0.7	0.996 ± 0.033	1.396 ± 0.033	0.3228 ± 0.0033	1.193 ± 0.012
J0639-3655	654.6 ± 0.6	1.32 ± 0.06	1.70 ± 0.07	0.721 ± 0.013	1.130 ± 0.011
J1739+4502	657.4 ± 0.6	0.778 ± 0.03	1.38 ± 0.04	0.6770 ± 0.0019	1.126 ± 0.013
J0036-0932	719.8 ± 0.9	0.94 ± 0.04	1.362 ± 0.034	0.3993 ± 0.0021	1.661 ± 0.019
J1432-1021	730.9 ± 0.5	0.790 ± 0.03	1.898 ± 0.030	0.1203 ± 0.0022	1.367 ± 0.011
J1048+6547	814.2 ± 3.4	1.00 ± 0.05	1.68 ± 0.07	0.381 ± 0.016	0.899 ± 0.012
J2145+2837	889.8 ± 1.2	0.95 ± 0.05	1.40 ± 0.04	0.583 ± 0.010	4.135 ± 0.017
J2244-2236	938.3 ± 0.5	1.002 ± 0.03	1.443 ± 0.023	0.5666 ± 0.0011	2.079 ± 0.019
J0824+5254	1027 ± 4	1.100 ± 0.03	1.603 ± 0.035	0.686 ± 0.013	1.643 ± 0.015
J0230+5950	1029 ± 5	1.114 ± 0.03	1.401 ± 0.034	0.753 ± 0.011	2.523 ± 0.015
J0634+6256	1046.0 ± 2.1	1.18 ± 0.06	1.48 ± 0.09	0.564 ± 0.011	0.689 ± 0.011

НЗ в двойной со
звездой типа
Солнца
эволюционирует
как одиночная



Большая часть систем – **широкие**

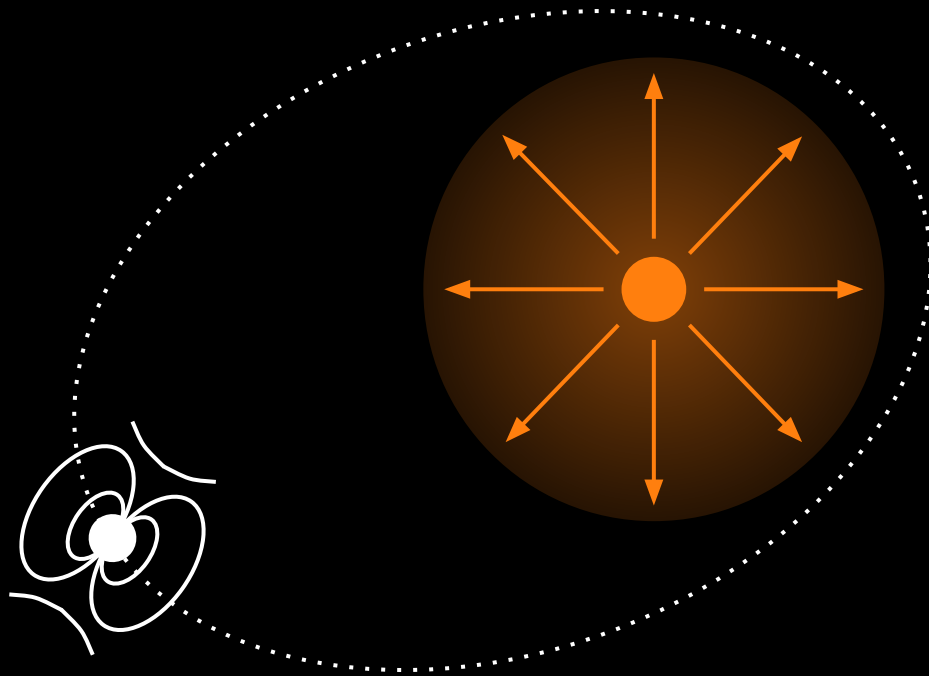
Source Name	DR3 Gaia ID	distance pc	period ¹ d	eccentricity	m_1^2 $M_\odot$	Type ³	G mag	m_2^4 $M_\odot$
0616+2319	3425175331243738240	1111±30	$0.866605 \pm 1.0 \cdot 10^{-6}$	$0.0007^{+0.007}_{-0.0005}$	1.7 ± 0.1	G7	13.21	1.1-1.3
1220+5841	1581117310088807552	219±3	927 ± 11	0.52 ± 0.01	0.70 ± 0.2	K5	14.51	$1.43^{+0.16}_{-0.17}$
1313+4152	1525829295599805184	248±7	328 ± 2	0.37 ± 0.04	0.69 ± 0.2	K7	16.18	$1.44^{+0.19}_{-0.20}$
1527+3536	1375051479376039040	118±0.9	$0.2556698 \pm 2 \cdot 10^{-7}$	0.0^5	0.62 ± 0.01	K9–M0	13.05	0.98 ± 0.03
1832–0119	4271998639836225920	181±2	545 ± 2	0.44 ± 0.05	0.63-1.00	M2	15.62	1.44 ± 0.17
2128+3316	1854241667792418304	227±2	1430 ± 66	0.59 ± 0.02	0.70 ± 0.2	K5	14.87	$1.62^{+0.17}_{-0.18}$

Sbarufatti et al. (2024) **2404.16170**

Цель

Определить параметры, при которых **НЗ** **начинает аккрецировать** вещество звездного ветра, пока второй компонент остается звездой **главной последовательности**

Дальнейшее изучение таких систем позволит уточнить законы эволюции НЗ на больших масштабах времени ~10 млрд. лет.



План

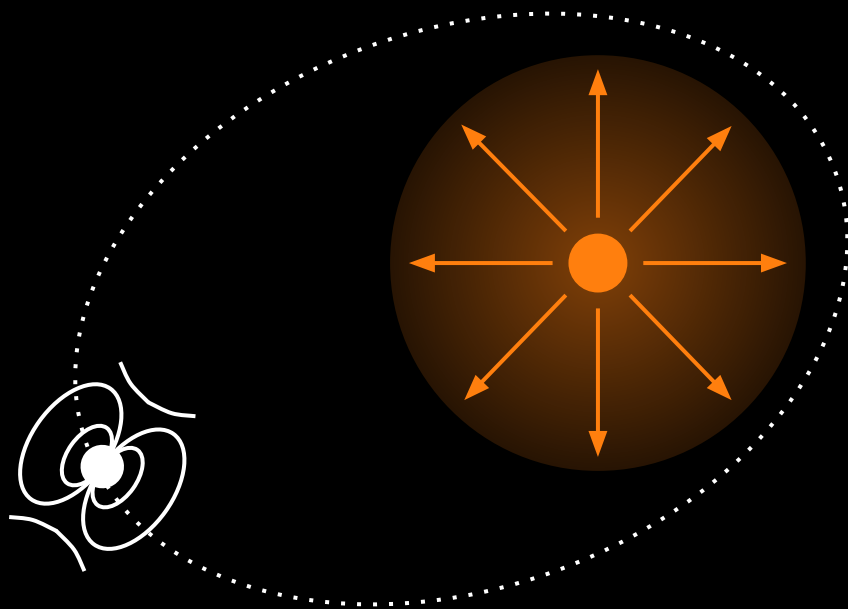
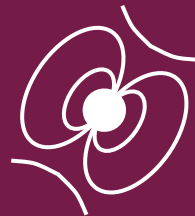
1. Общая модель

- эволюция НЗ
- эволюция звезды типа Солнца

2. Результаты

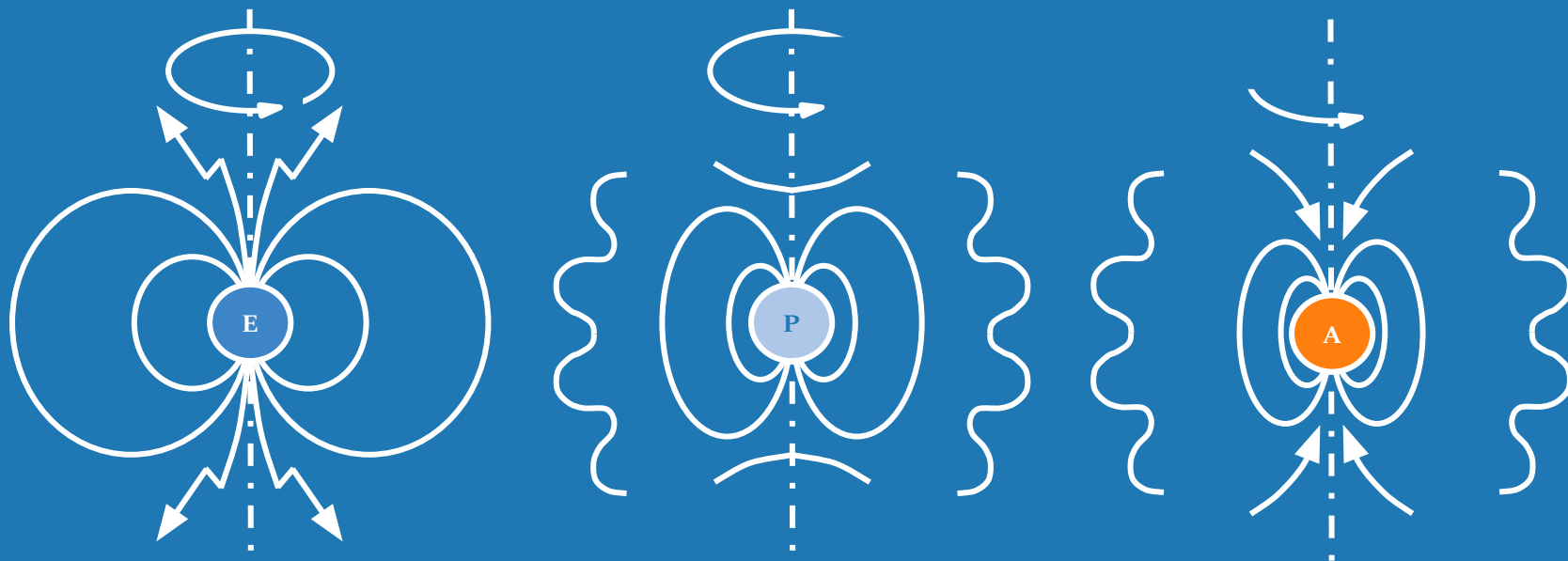
- круговые орбиты (2409.00714)
- дополнение к модели и результаты для эксцентрических орбит (2501.15918)

3. Заключение



Эволюция НЗ

- эволюционные стадии и условия переходов между стадиями
- замедляющий момент на каждой стадии



Эволюционные стадии и условия переходов между ними

$$R_G = \frac{2GM}{v^2}$$

$$R_l = \frac{c}{\omega} = \frac{cP}{2\pi}$$

$$R_c = 0.87 \left(\frac{GM}{\omega^2} \right)^{1/3}$$

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

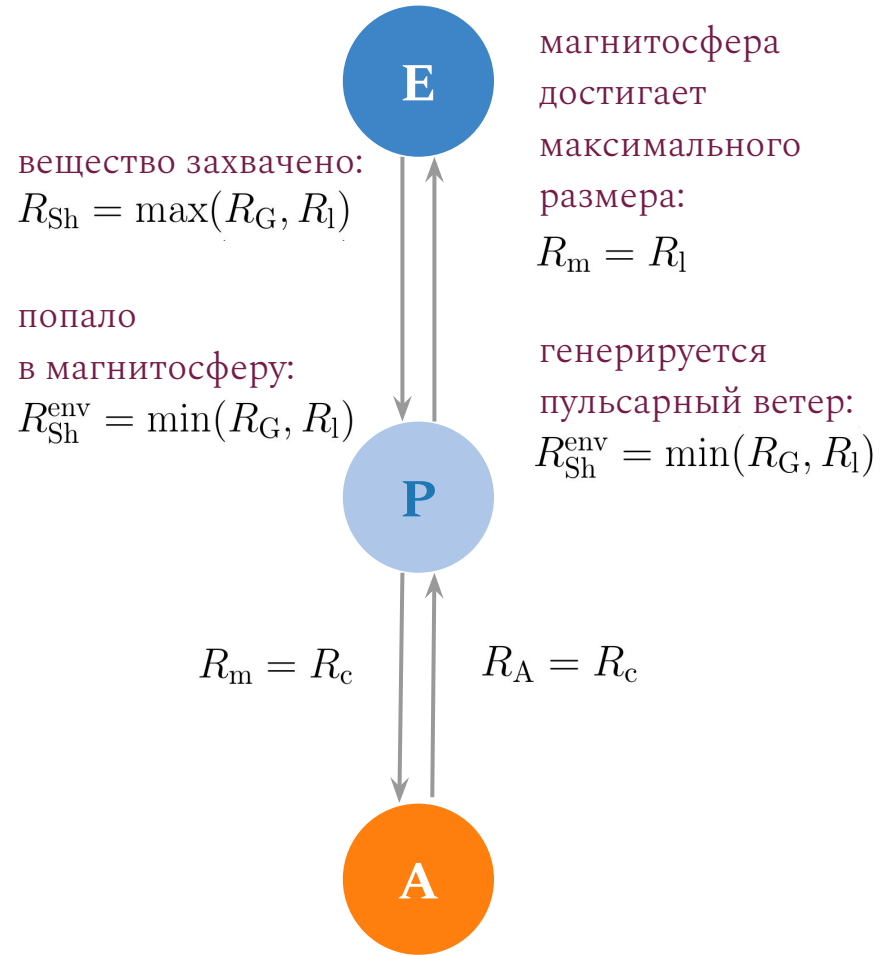
взаимодействие магнитосферы с веществом:

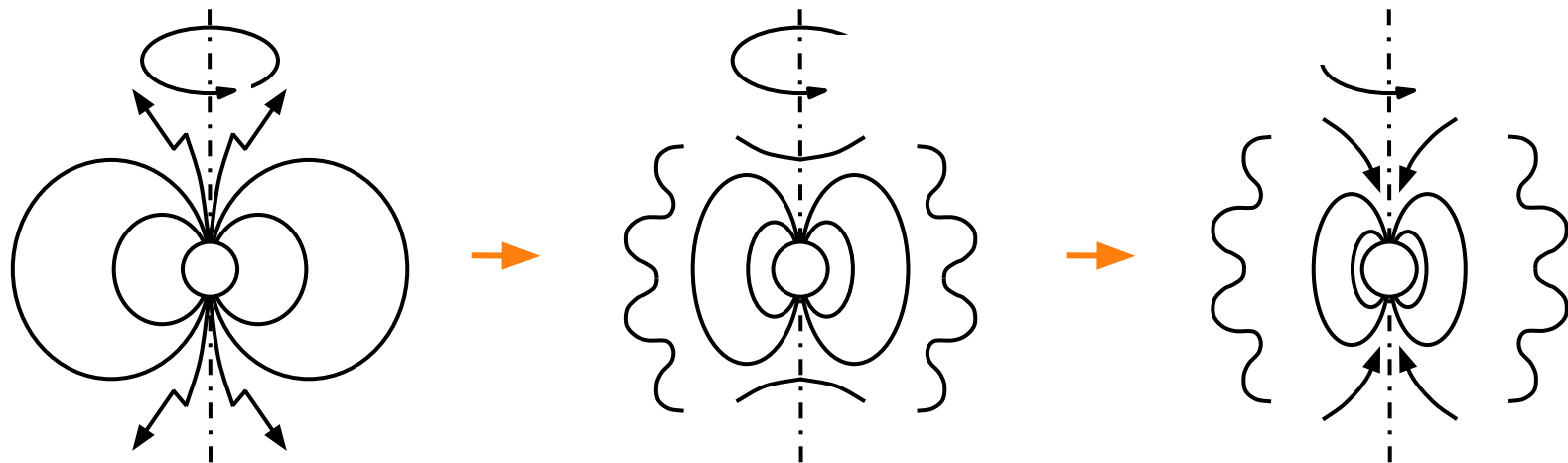
$$R_m = \begin{cases} \max(R_A, R_A^{7/9} R_G^{2/9}), & R_m \leq R_G \\ \left(\frac{2\mu^2 (GM)^2}{\dot{M} v^5} \right)^{1/6}, & R_m > R_G \end{cases}$$

взаимодействие пульсарного ветра с веществом:

$$R_{Sh} = \left(\frac{4\xi\mu^2 (GM)^2 \omega^4}{\dot{M} v^5 c^4} \right)^{1/2} \quad R_{Sh}^{env} = R_G \left(\frac{\xi\mu^2 \omega^4}{c^4 \dot{M} v} \right)^2$$

$$\xi = 2$$





ТЕ – транзисентный эжектор.

Это возможная промежуточная стадия между эжектором и пропеллером.

Замедление как на стадии эжектора.

Эволюция периода на каждой стадии

Эжектор

ТЕ

Пропеллер

Аккректор

замедление вращения

$$I \frac{d\omega}{dt} = -K_E$$

замедляющий
угловой момент

$$K_E = \xi \frac{\mu^2}{R_l^3}$$

$$\xi = k_0 + k_1 \sin^2 \alpha \approx 2$$

замедление

$$I \frac{d\omega}{dt} = -K$$

ускорение и замедление

$$I \frac{d\omega}{dt} = K_{su} - K_{sd}$$

ускоряющий и замедляющий моменты

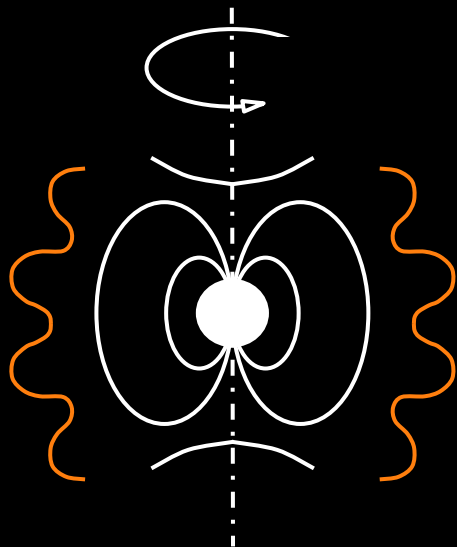
$$K_{sd} = \zeta \mu^2 / R_c^3 \quad \zeta = 0.4$$

$$K_{su} = \begin{cases} \dot{M} \sqrt{GM R_m}, & \text{диск} \\ \dot{M} \eta \Omega R_G^2, & \end{cases} \quad \Omega \approx \sqrt{\frac{GM_*}{a^3}}$$

условие образования диска

$$\sqrt{GM R_m} \leq \eta \Omega R_G^2, \quad \eta = \frac{1}{4}$$

Стадия пропеллера



Оболочка из вещества с
пологим профилем
плотности от R_m до R_G

Замедляющий момент и радиус магнитосферы для
стадии пропеллера

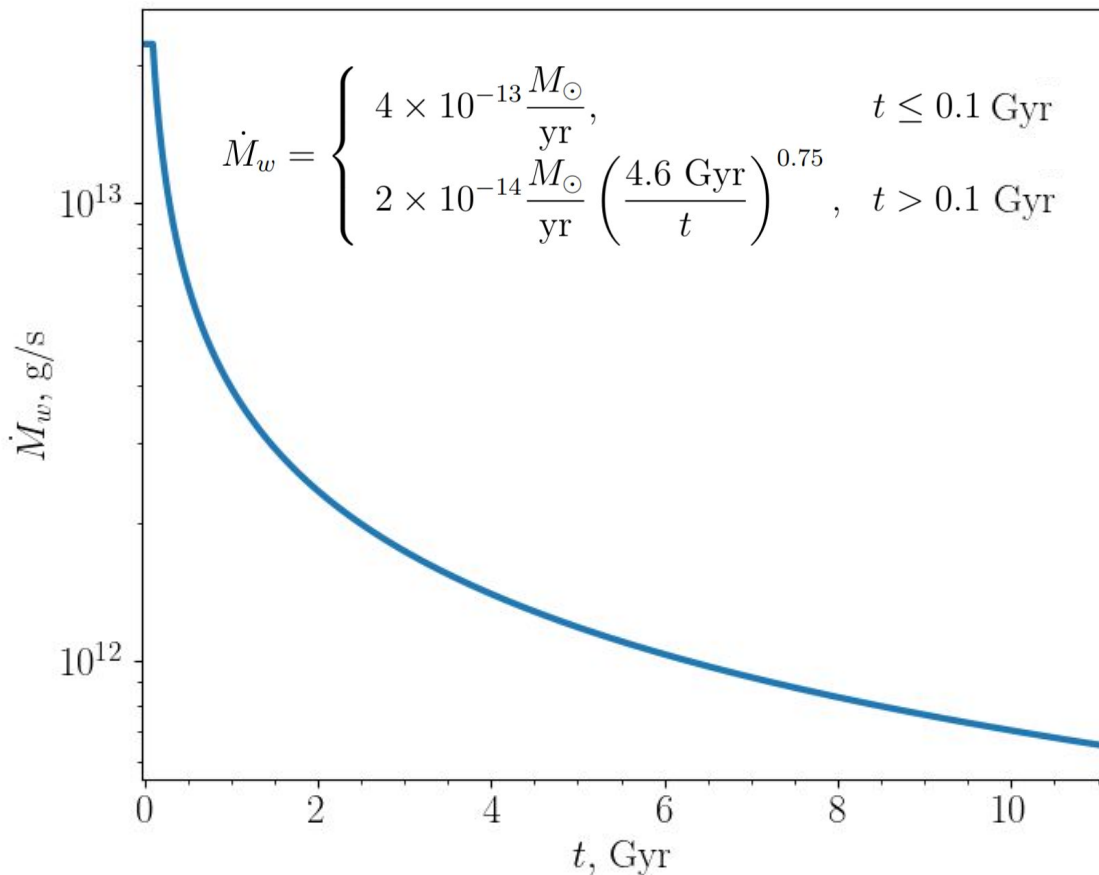
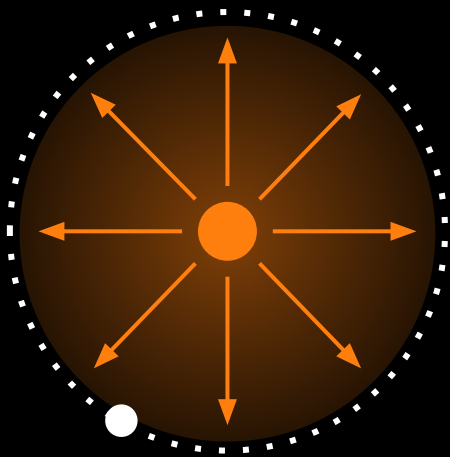
Модель	$K = -I\dot{\omega}$	R_m , если $R_m < R_G$
A	$\dot{M}\omega R_m^2$	$R_A^{7/9} R_G^{2/9}$
B	$\dot{M}\sqrt{2GM R_m}$	
C	$\dot{M}v_{ff}^2(R_m)/(2\omega)$	
D	$\dot{M}v^2/(2\omega)$	

Авторы моделей: A — N. I. Shakura (1975), B — Davidson and Ostriker (1973),
C — Illarionov and Sunyaev (1975), D — Davies and Pringle (1981).

Параметры ветра звезды

скорость ветра на
расстоянии орбиты:

$$v_w = 400 \text{ км с}^{-1}$$



Vidotto (2021); Vidotto, Cleary (2020)

Круговые орбиты

Темп аккреции

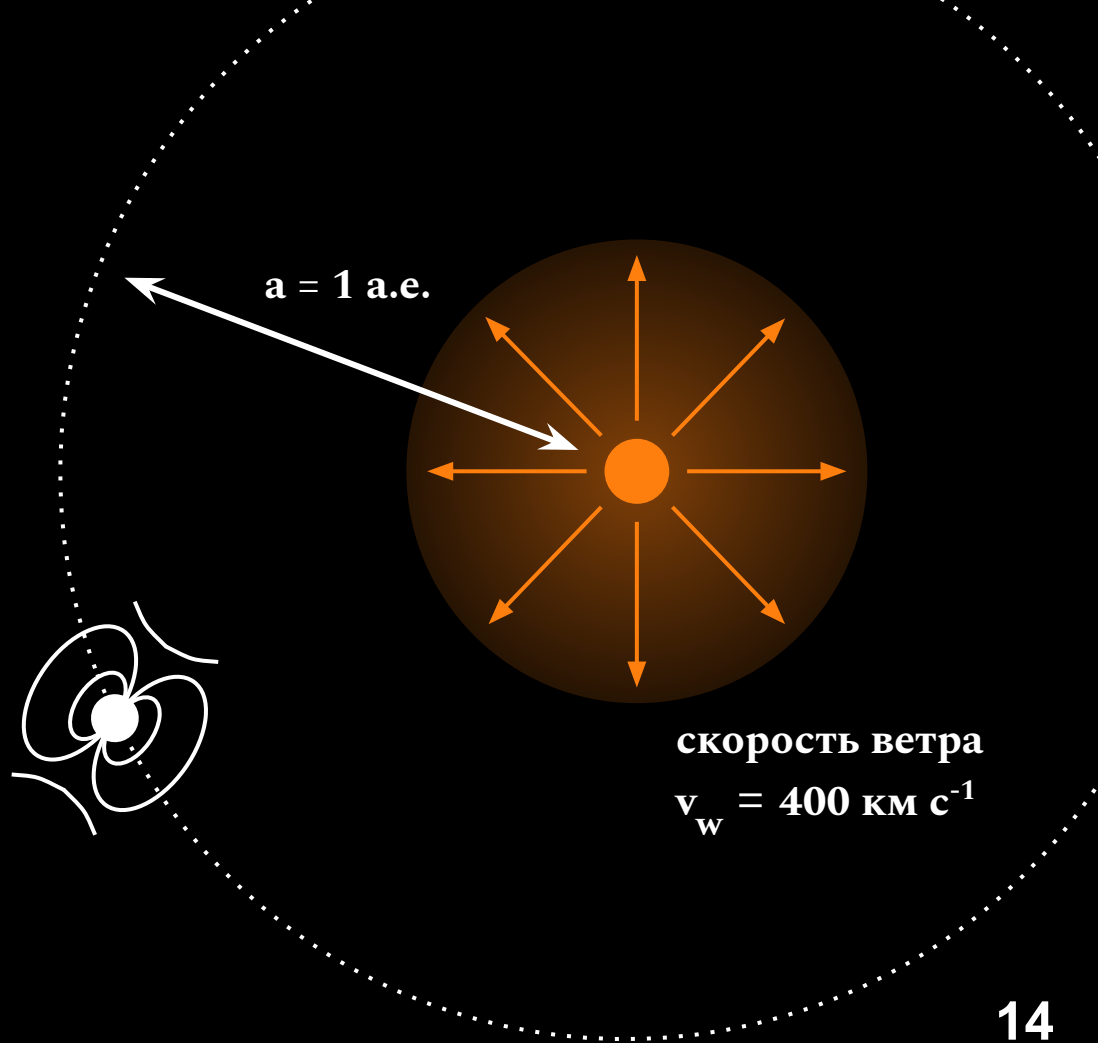
$$\dot{M} = 4\pi(GM)^2 v^{-3} \rho$$

Характерная скорость
вещества относительно
НЗ

$$v = \sqrt{v_w^2 + G(M + M_\odot)/r}$$

Начальный период НЗ

$$P_0 = 100 \text{ ms}$$



Результаты для H3 на круговых орбитах

2025 Probing the propeller regime
with wide neutron star binaries
Afonina M.D., Popov S.B.
в журнале *Astronomische
Nachrichten*, том 346, № 1
DOI:10.1002/asna.20240096

2409.00714



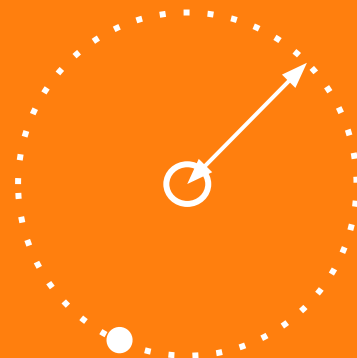
1. Разные магнитные поля



две модели пропеллера:

- модель А
- модель В

2. Разные большие полуоси



две модели пропеллера:

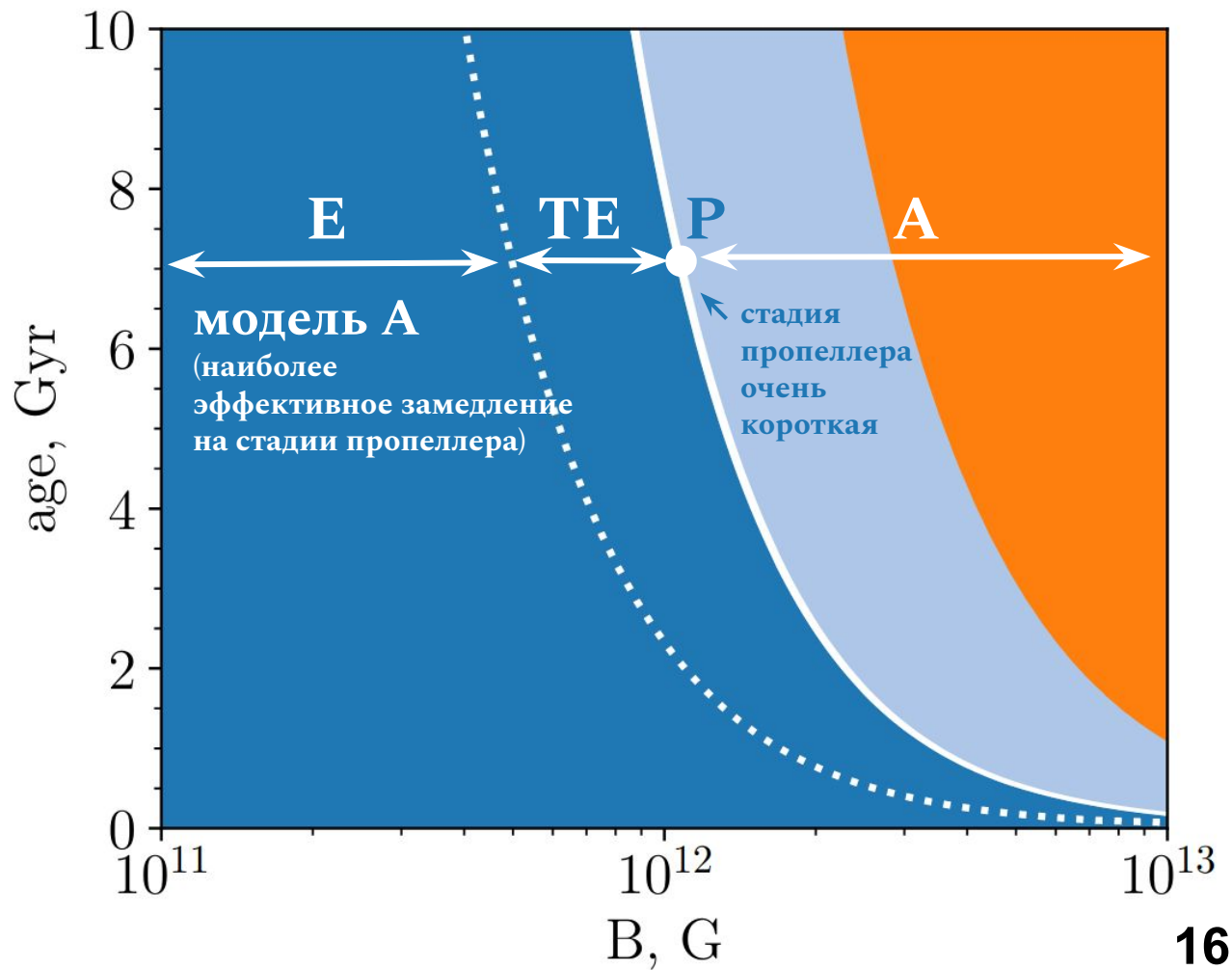
- модель А
- модель В

Магнитное поле



НЗ на круговой орбите $a = 1$ а.е.

2409.00714

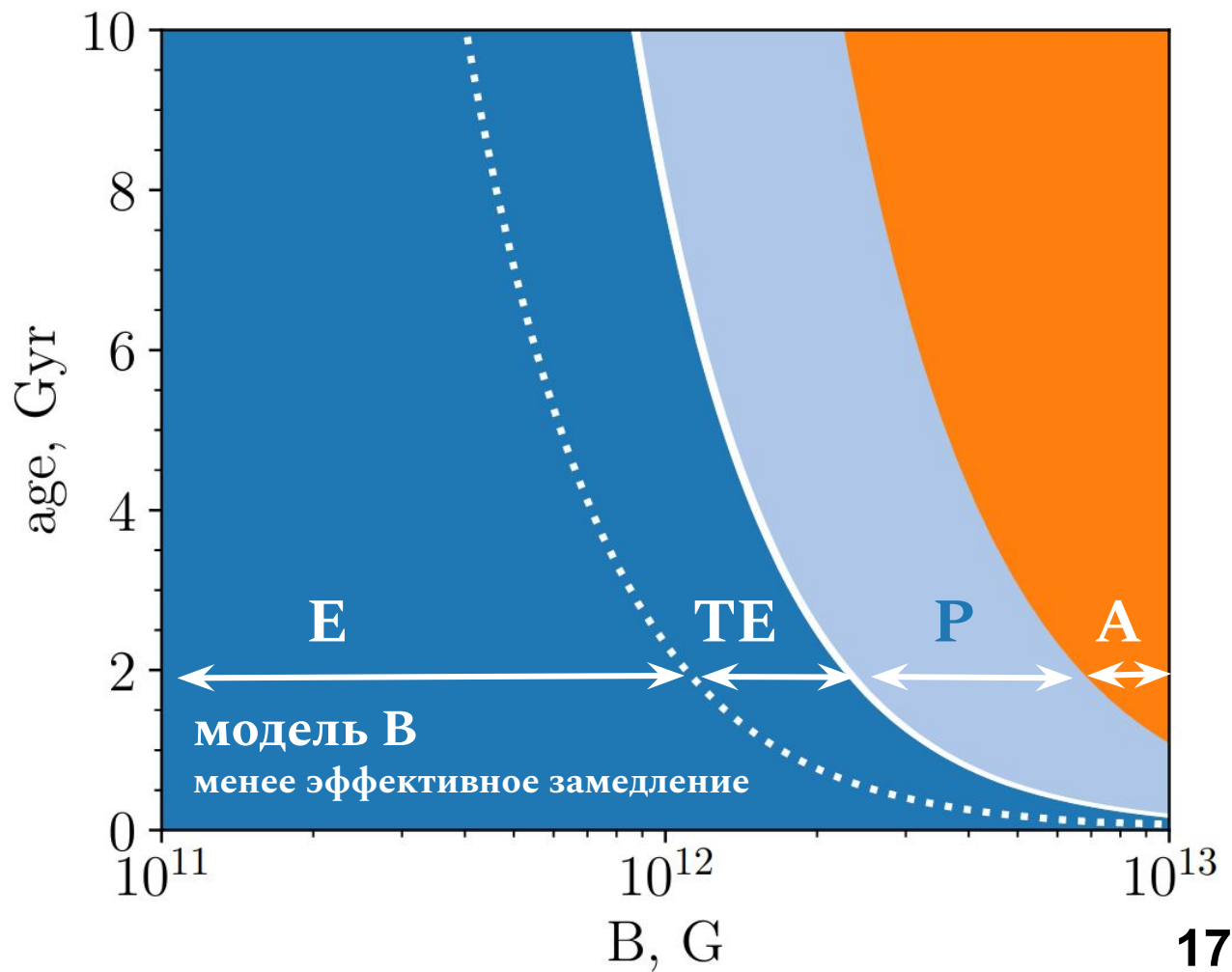


Магнитное поле

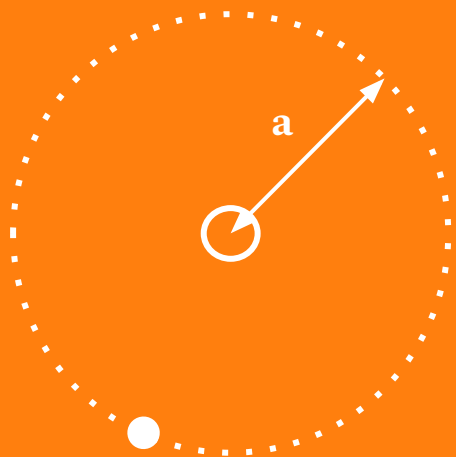


НЗ на круговой орбите $a = 1$ а.е.

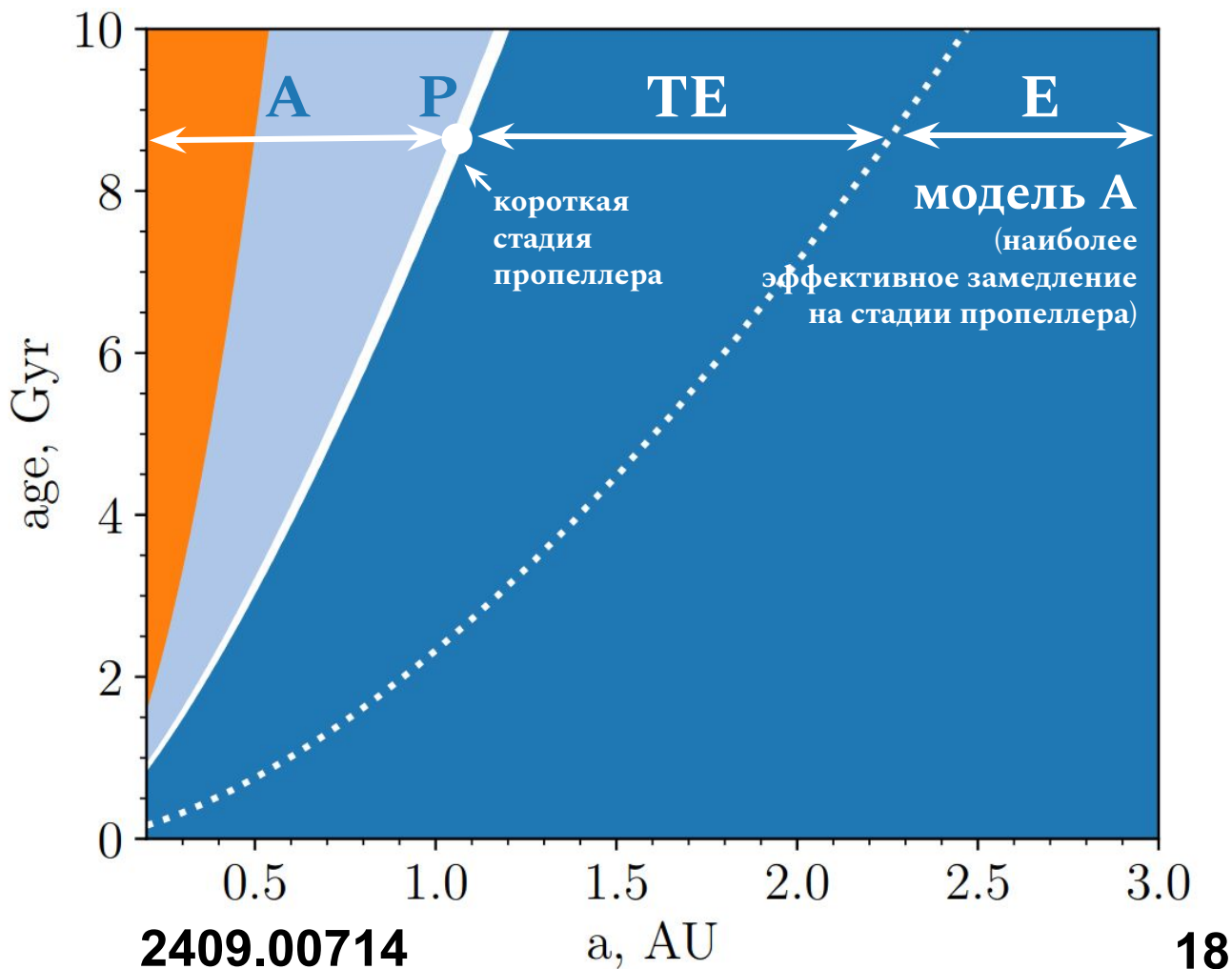
2409.00714



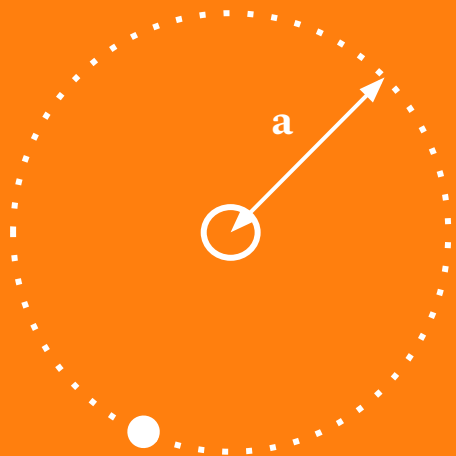
Большая полуось



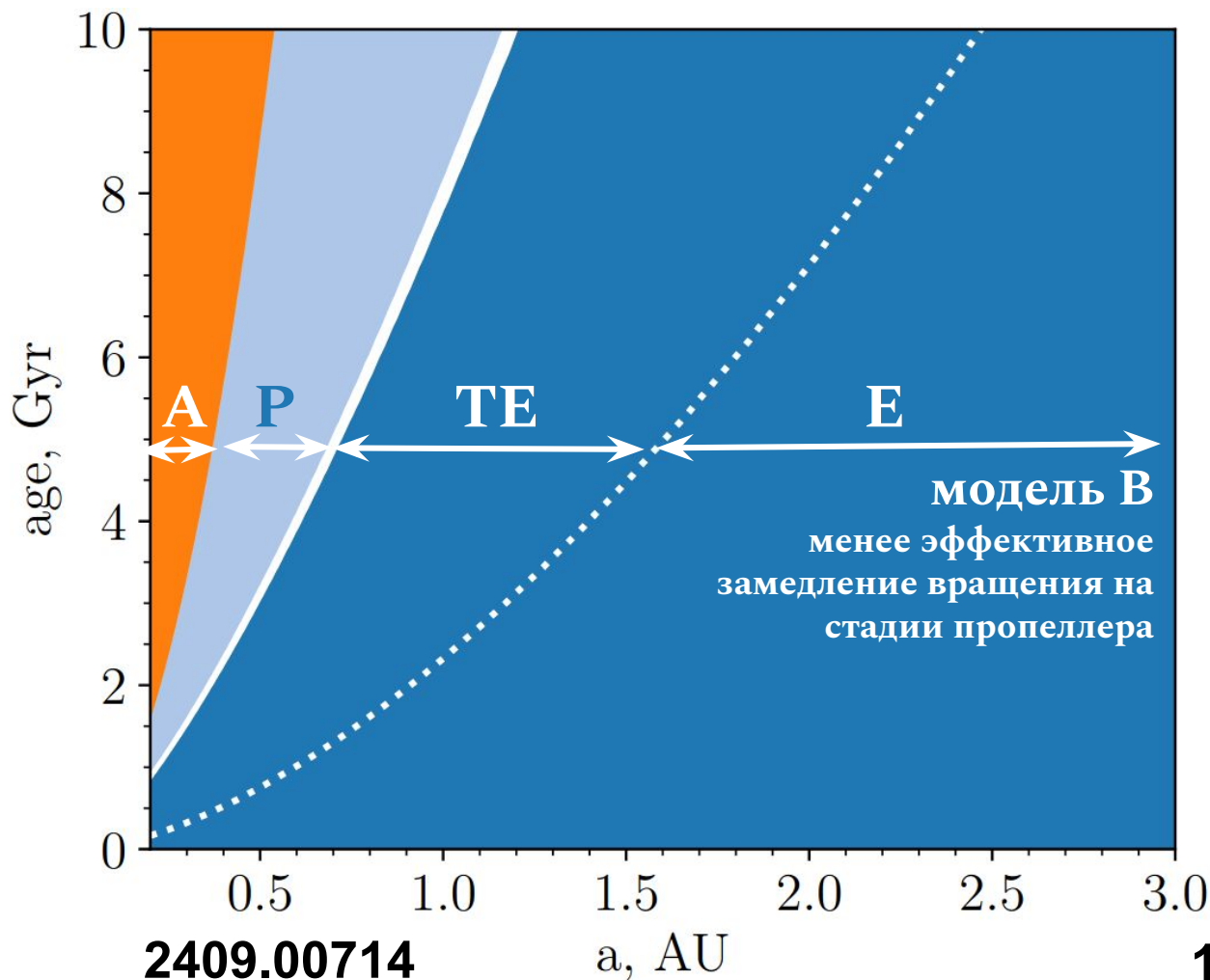
НЗ с магнитным полем
 $B = 10^{12}$ Гс



Большая полуось



НЗ с магнитным полем
 $B = 10^{12}$ Гс



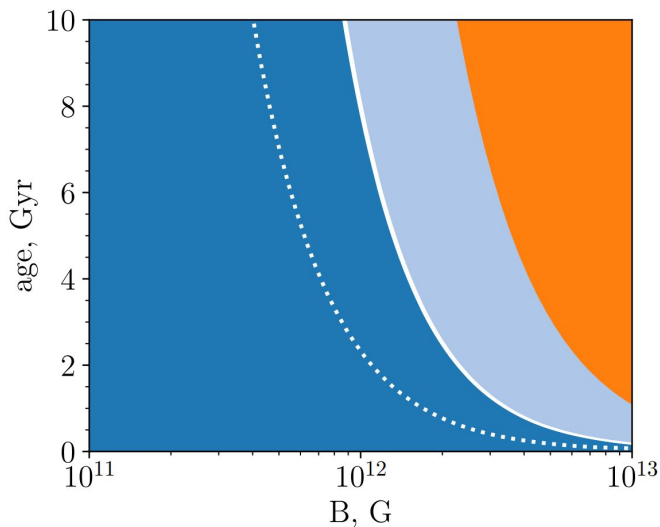
Результаты

Стадия
эжектора
заканчивается
за 10 млрд. лет
только для НЗ
ближе 1 а.е. с
полем больше
 10^{12} Гс

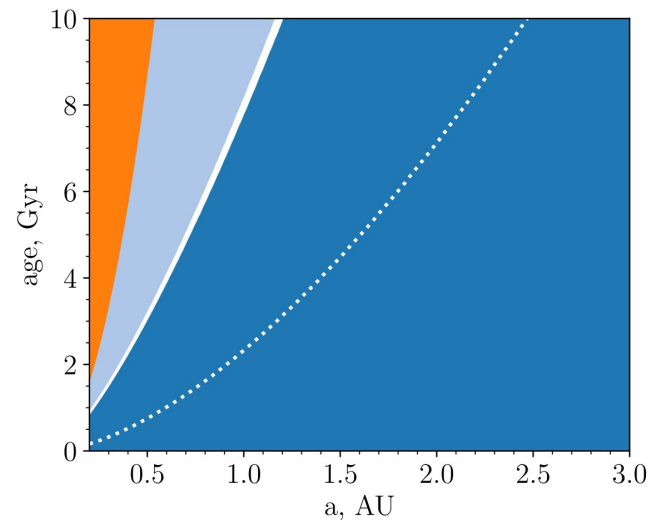
2409.00714

arXiv

разное магнитное поле



большая полуось



НЗ может достичь стадии аккреции, только если механизм замедления на стадии пропеллера достаточно эффективен (как в моделях А и В)

Широкие системы со звездами типа Солнца

Необходимо
рассмотреть эволюцию
НЗ на вытянутых
орбитах

таблица:
El-Badry et al. (2024)
2405.00089

Орбитальный период ~1 года и больше; эксцентриситет $e > 0.1$

Name	P_{orb} [days]	$M_{\star}$ [$M_{\odot}$]	M_2 [$M_{\odot}$]	eccentricity	ϖ [mas]
J0553-1349	189.10 ± 0.05	0.98 ± 0.06	1.33 ± 0.05	0.3879 ± 0.0007	2.505 ± 0.015
J2057-4742	230.15 ± 0.07	1.048 ± 0.031	1.31 ± 0.04	0.3095 ± 0.0026	1.745 ± 0.019
J1553-6846	310.17 ± 0.11	1.04 ± 0.05	1.323 ± 0.032	0.5314 ± 0.0021	1.344 ± 0.012
J2102+3703	480.9 ± 0.6	1.03 ± 0.03	1.44 ± 0.04	0.432 ± 0.017	1.520 ± 0.014
J0742-4749	497.6 ± 0.4	0.90 ± 0.05	1.28 ± 0.04	0.168 ± 0.004	1.035 ± 0.014
J0152-2049	536.14 ± 0.18	0.782 ± 0.03	1.291 ± 0.024	0.6615 ± 0.0010	2.453 ± 0.017
J0003-5604	561.83 ± 0.29	0.802 ± 0.03	1.34 ± 0.04	0.795 ± 0.005	2.183 ± 0.016
J1733+5808	570.94 ± 0.31	1.16 ± 0.05	1.362 ± 0.030	0.3093 ± 0.0010	1.452 ± 0.010
J1150-2203	631.80 ± 0.23	1.18 ± 0.06	1.39 ± 0.04	0.553 ± 0.004	1.738 ± 0.016
J1449+6919	632.76 ± 0.22	0.91 ± 0.05	1.261 ± 0.032	0.2635 ± 0.0013	1.812 ± 0.012
J0217-7541	636.1 ± 0.7	0.996 ± 0.033	1.396 ± 0.033	0.3228 ± 0.0033	1.193 ± 0.012
J0639-3655	654.6 ± 0.6	1.32 ± 0.06	1.70 ± 0.07	0.721 ± 0.013	1.130 ± 0.011
J1739+4502	657.4 ± 0.6	0.778 ± 0.03	1.38 ± 0.04	0.6770 ± 0.0019	1.126 ± 0.013
J0036-0932	719.8 ± 0.9	0.94 ± 0.04	1.362 ± 0.034	0.3993 ± 0.0021	1.661 ± 0.019
J1432-1021	730.9 ± 0.5	0.790 ± 0.03	1.898 ± 0.030	0.1203 ± 0.0022	1.367 ± 0.011
J1048+6547	814.2 ± 3.4	1.00 ± 0.05	1.68 ± 0.07	0.381 ± 0.016	0.899 ± 0.012
J2145+2837	889.8 ± 1.2	0.95 ± 0.05	1.40 ± 0.04	0.583 ± 0.010	4.135 ± 0.017
J2244-2236	938.3 ± 0.5	1.002 ± 0.03	1.443 ± 0.023	0.5666 ± 0.0011	2.079 ± 0.019
J0824+5254	1027 ± 4	1.100 ± 0.03	1.603 ± 0.035	0.686 ± 0.013	1.643 ± 0.015
J0230+5950	1029 ± 5	1.114 ± 0.03	1.401 ± 0.034	0.753 ± 0.011	2.523 ± 0.015
J0634+6256	1046.0 ± 2.1	1.18 ± 0.06	1.48 ± 0.09	0.564 ± 0.011	0.689 ± 0.019

Вытянутые орбиты

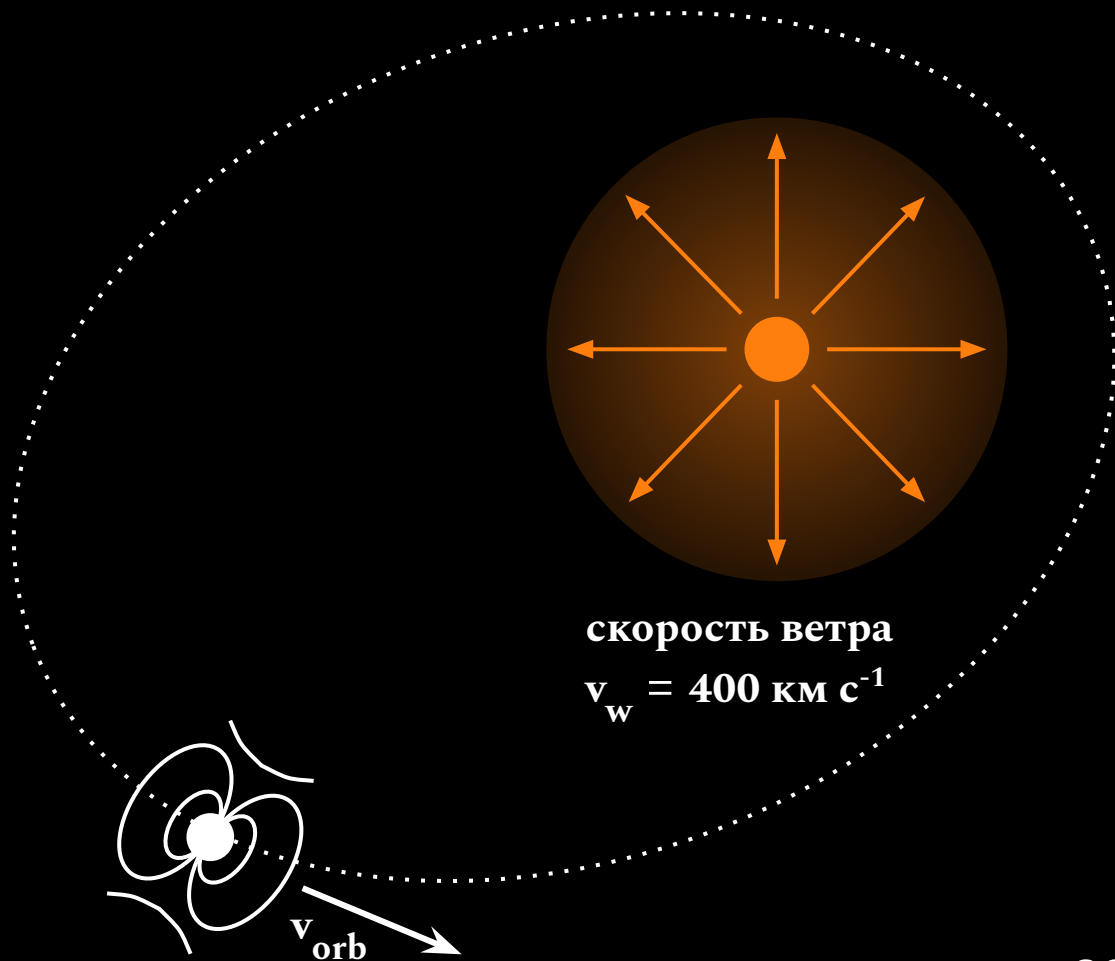
Скорость вещества относительно НЗ – векторная сумма скоростей НЗ и ветра,

$$\vec{v} = \vec{v}_w - \vec{v}_{\text{orb}}.$$

Она меняется при движении НЗ по орбите.

Начальный период НЗ

$$P_0 = 100 \text{ ms}$$



Параметры вещества

За время прохождения одной орбиты меняются **скорость НЗ относительно вещества** и **темп аккреции**.

Параметры орбиты:

- большая полуось

$$a = 1 \text{ а.е.}$$

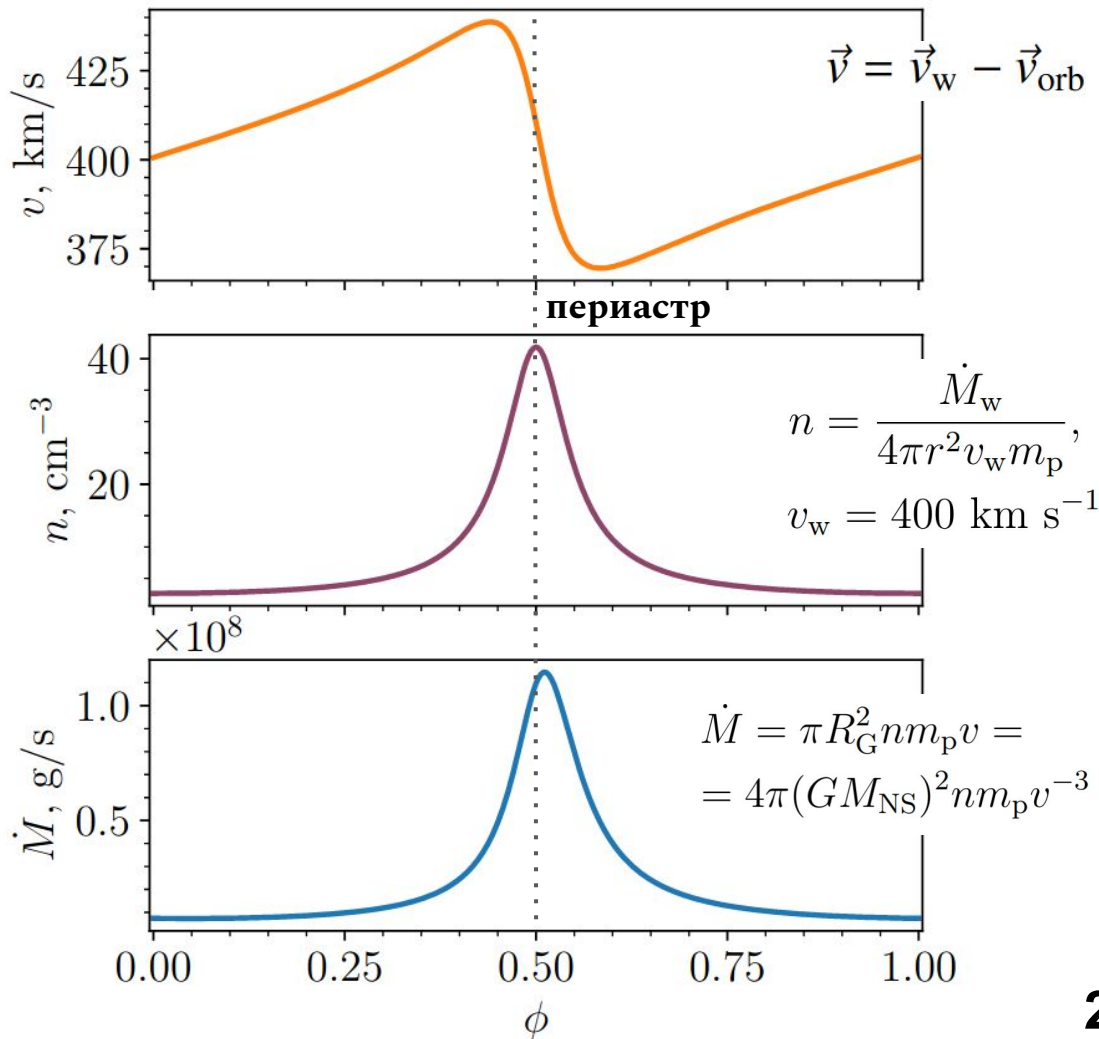
- эксцентриситет

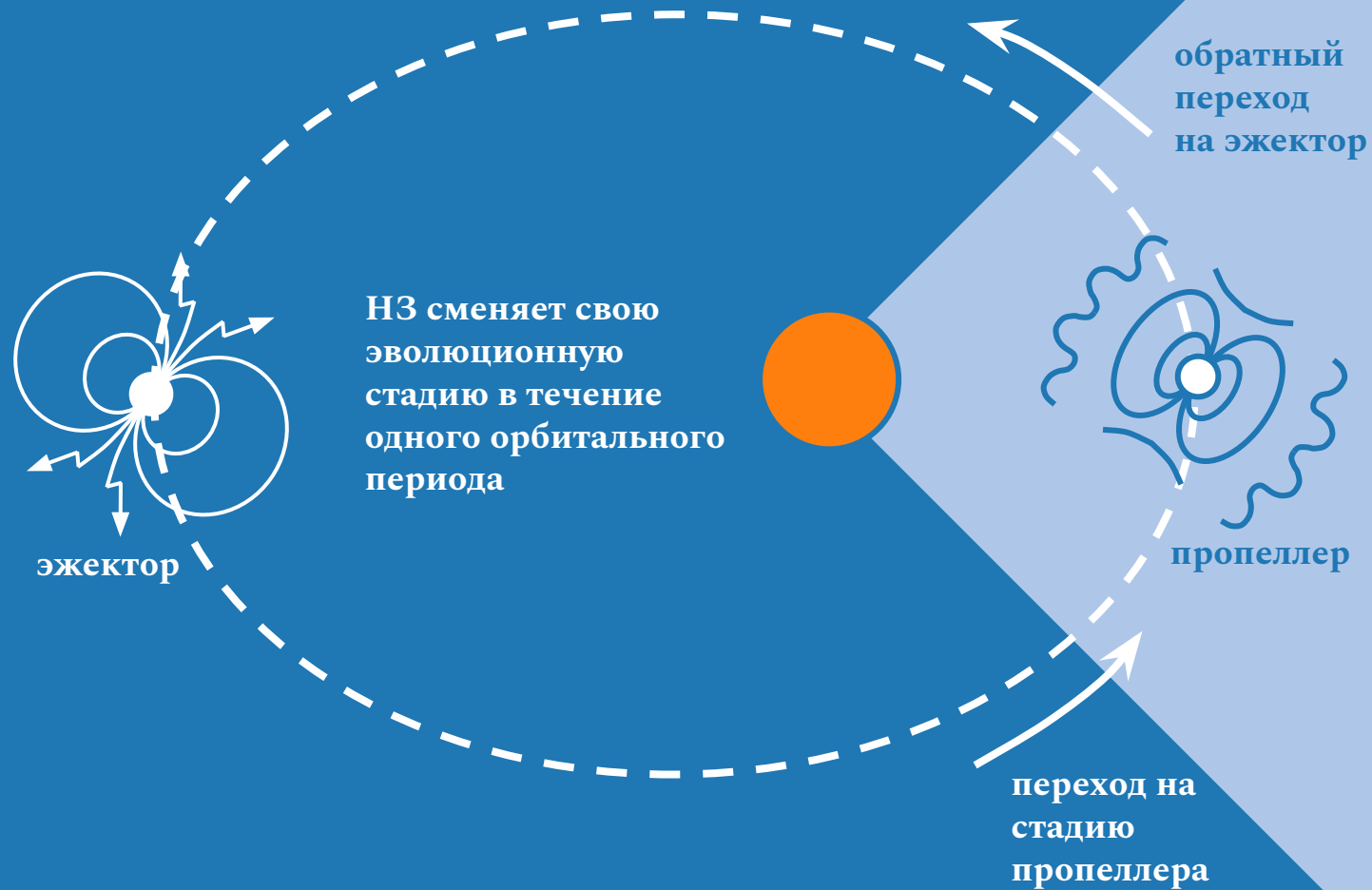
$$e = 0.6$$

Возраст звезды:

4.6 млрд. лет

(как у Солнца)





Критические периоды перехода

За время прохождения одной орбиты меняются **периоды прямого (-) и обратного (--) перехода между стадиями**

Параметры орбиты:

- большая полуось

$$a = 1 \text{ а.е.}$$

- эксцентриситет

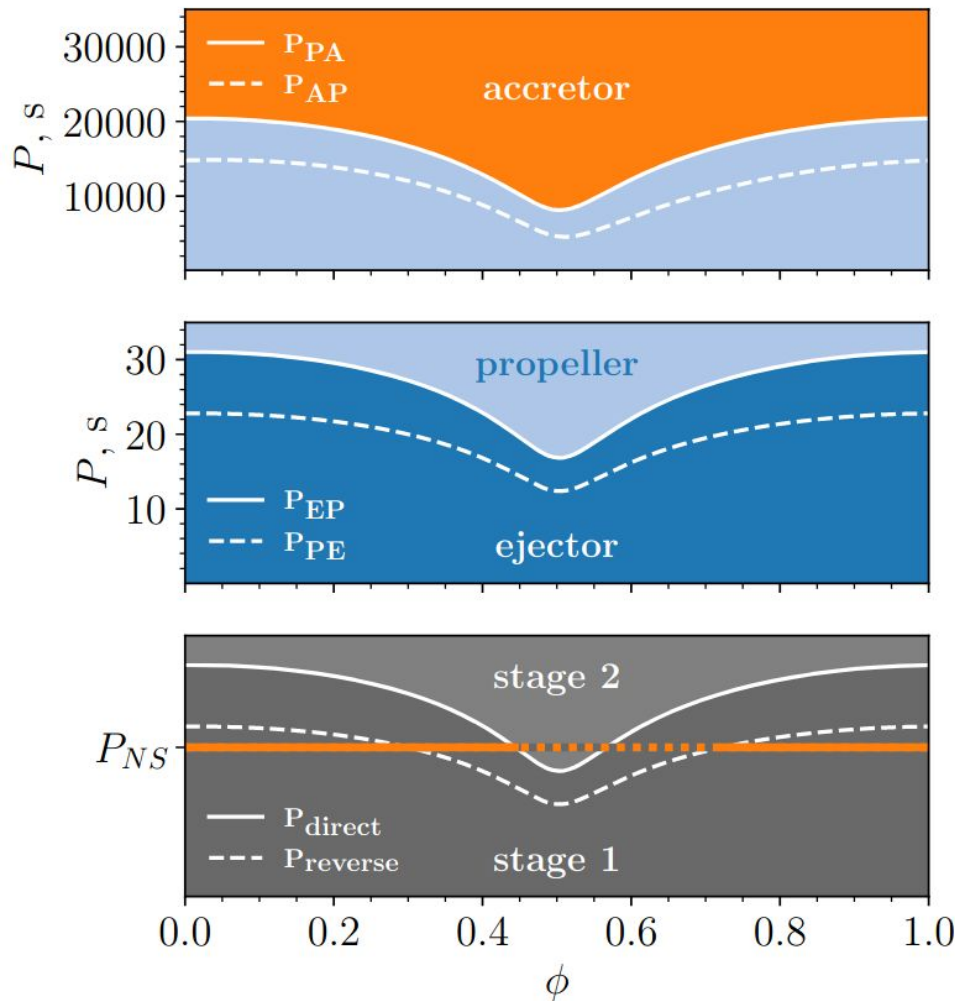
$$e = 0.6$$

Возраст звезды:

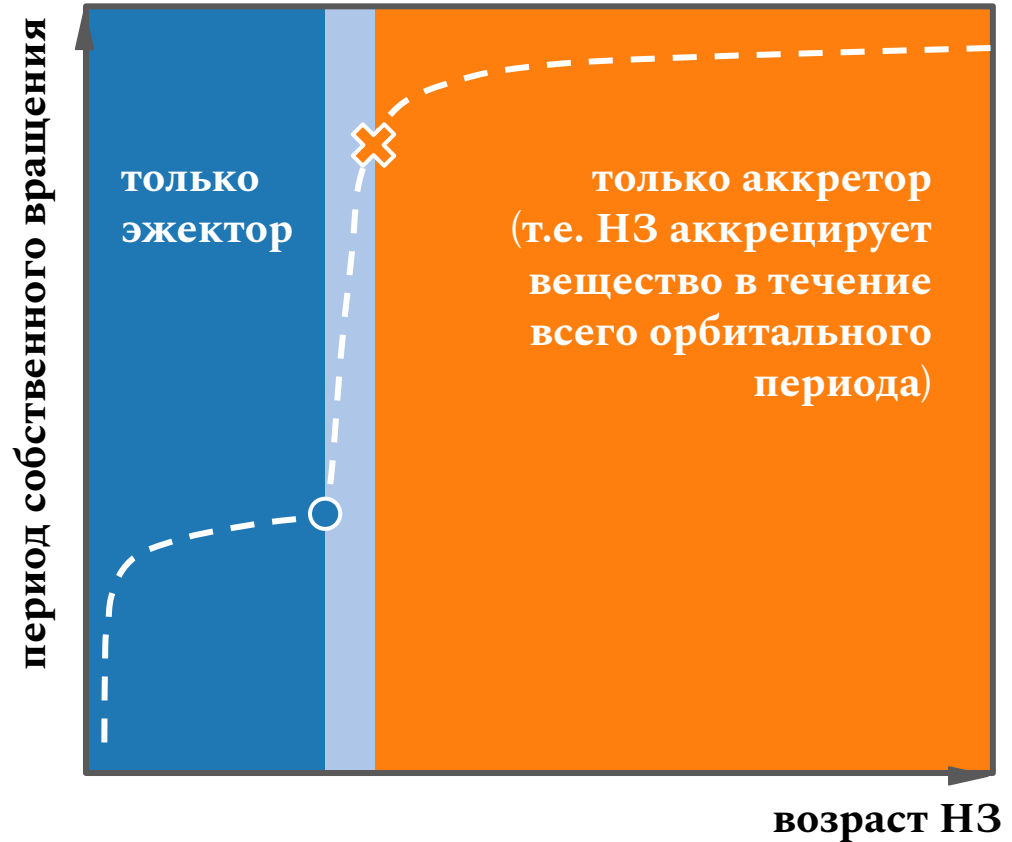
$$4.6 \text{ млрд. лет}$$

Магнитное поле НЗ:

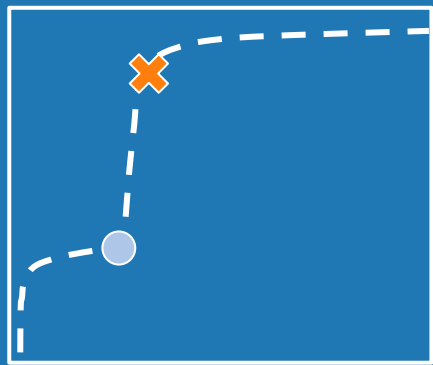
$$10^{12} \text{ Гс}$$



Зависимость периода собственного вращения от времени для НЗ на эксцентрической орбите

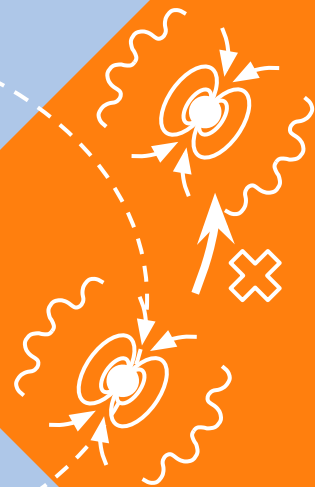
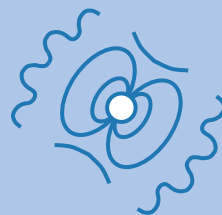
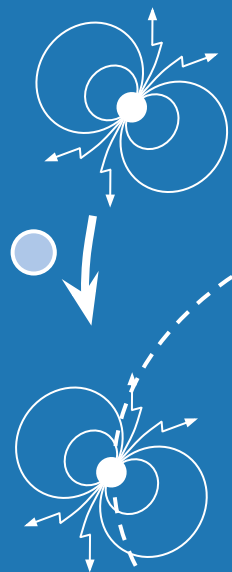


период вращения

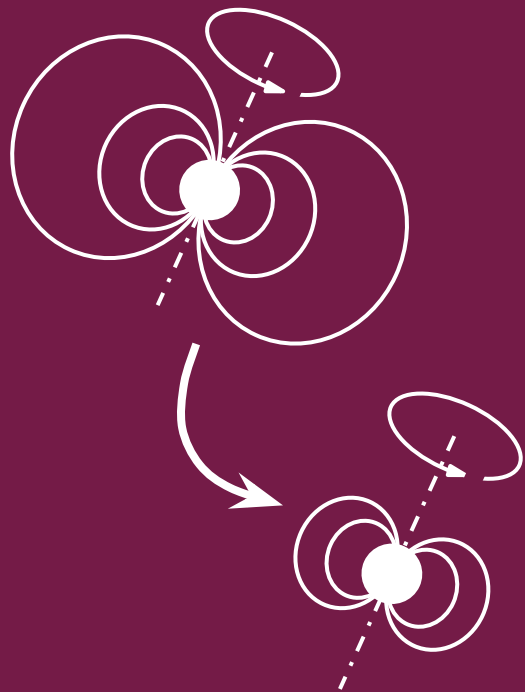


возраст H3

- эжектор
- пропеллер
- аккректор



Затухание магнитного поля



Constant Field

Поле сохраняется постоянным все время эволюции.

Exponential Decay

Поле затухает примерно в 10 000 раз за время 13.8 млрд. лет

$$B = B_0 \exp(-t/\tau_{\text{Ohm}}),$$

где омическое время $\tau_{\text{Ohm}} \approx 1.5 \times 10^9$ лет.

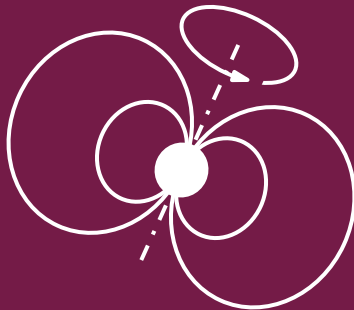
Результаты для НЗ на вытянутых орбитах

2025 Evolution of neutron stars in wide
eccentric low-mass binary systems
Afonina Marina, Popov Sergei
в журнале New Astronomy,
DOI:10.1016/j.newast.2025.102401

2501.15918

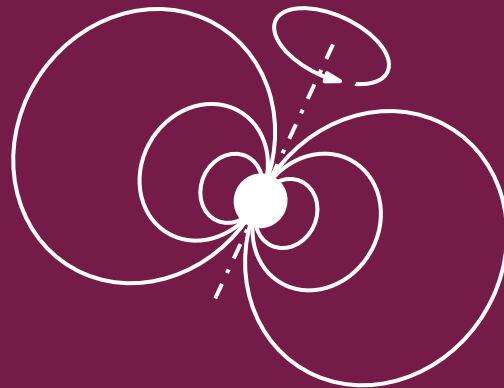


1. Типичное магнитное поле 10^{12} Гс



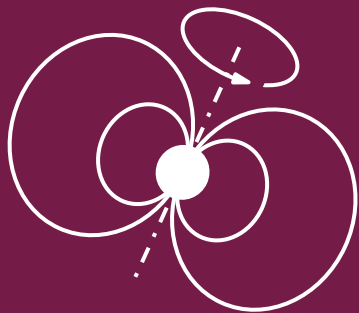
- две модели пропеллера:
А и В
- две модели эволюции
поля:
постоянное и
затухающее
- четыре значения
эксцентриситета

2. Большое поле 10^{13} Гс



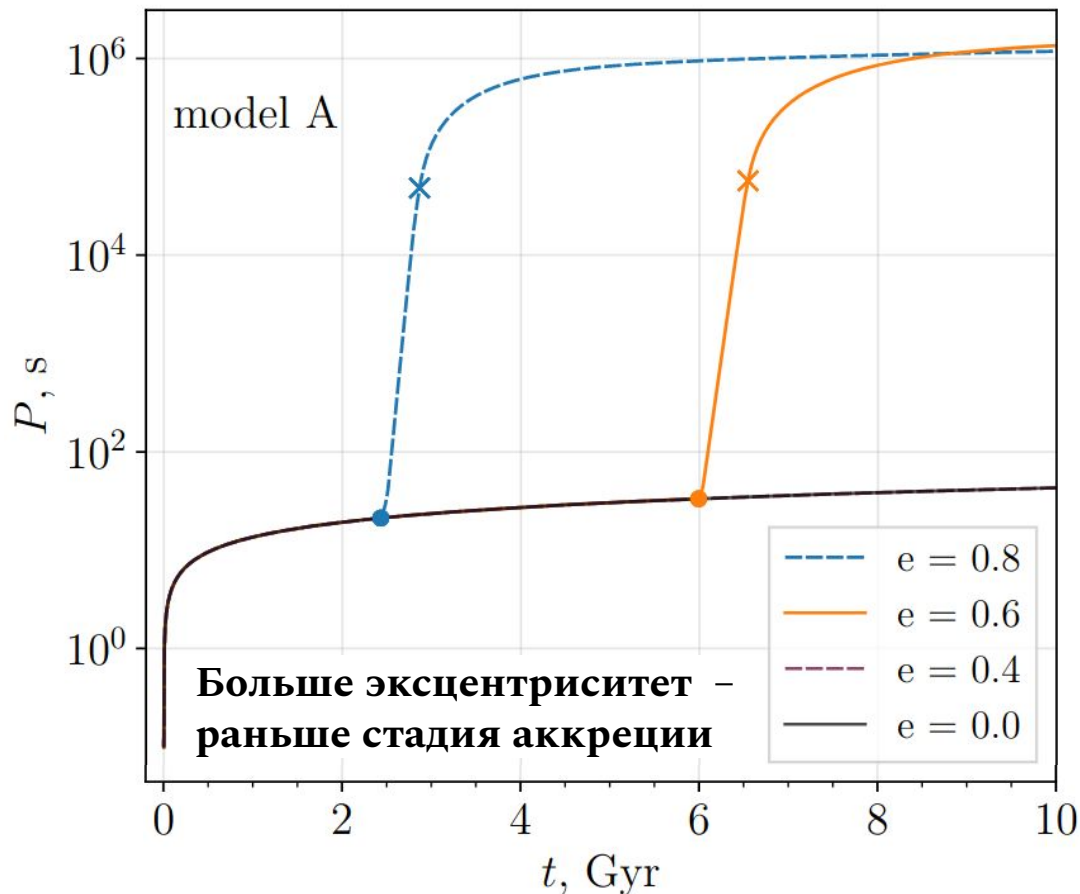
- две модели пропеллера:
А и В
- две модели эволюции
поля:
постоянное и
затухающее
- четыре значения
эксцентриситета

Эволюция периода НЗ с разными значениями эксцентриситета орбиты



- Типичное магнитное поле 10^{12} Гс
- Большая полуось 1 а.е.

2501.15918



Усредненный по орбите темп аккреции в зависимости от эксцентриситета

Большая полуось

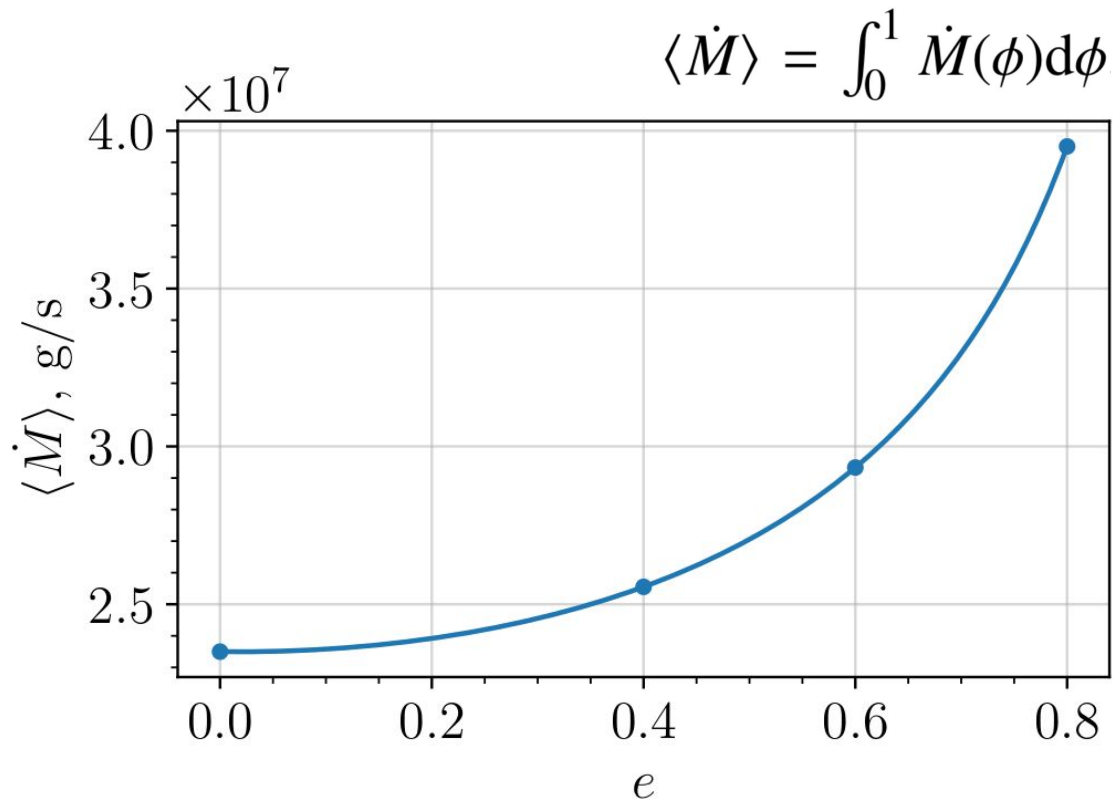
1 а.е.

Возраст звезды:

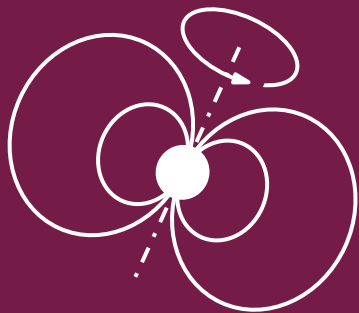
4.6 млрд. лет

Усредненный темп аккреции больше при больших значениях e

2501.15918



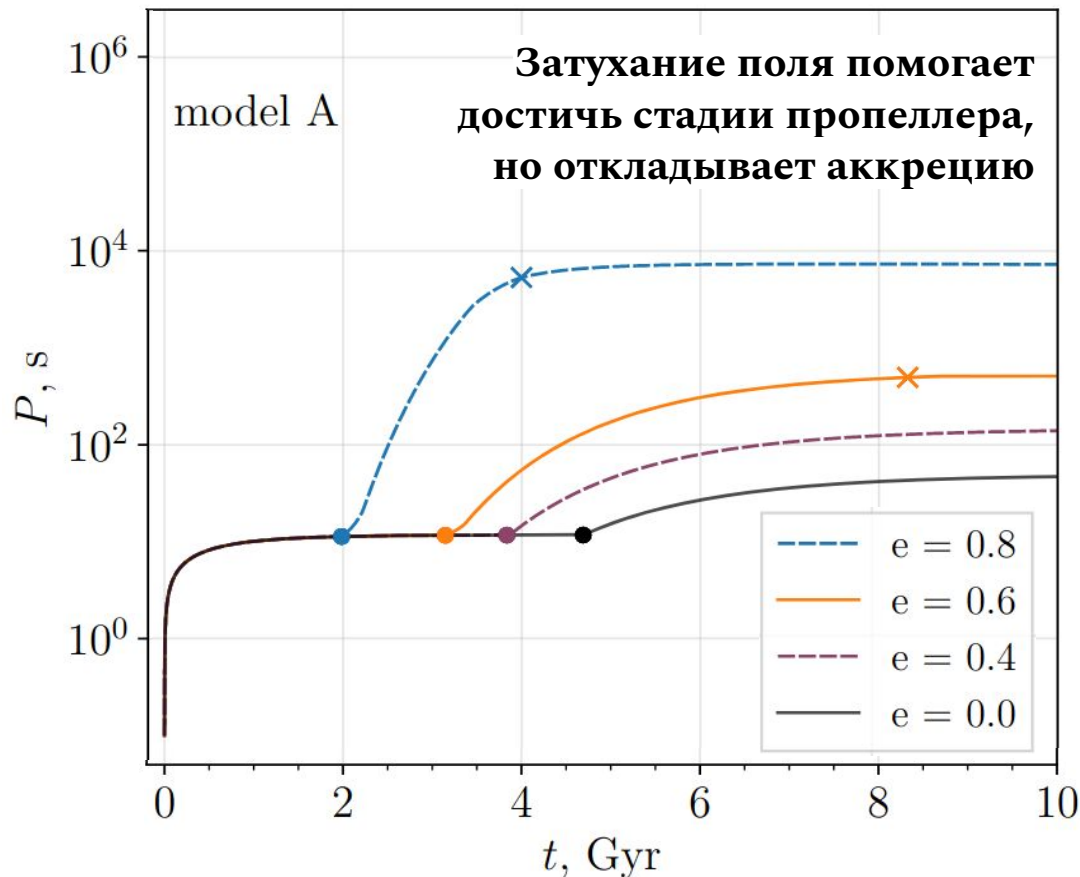
Эволюция периода НЗ с разными значениями эксцентриситета орбиты



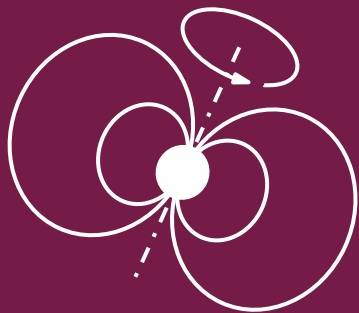
- Типичное магнитное поле 10^{12} Гс
- Большая полуось 1 а.е.

2501.15918

Exponential Decay

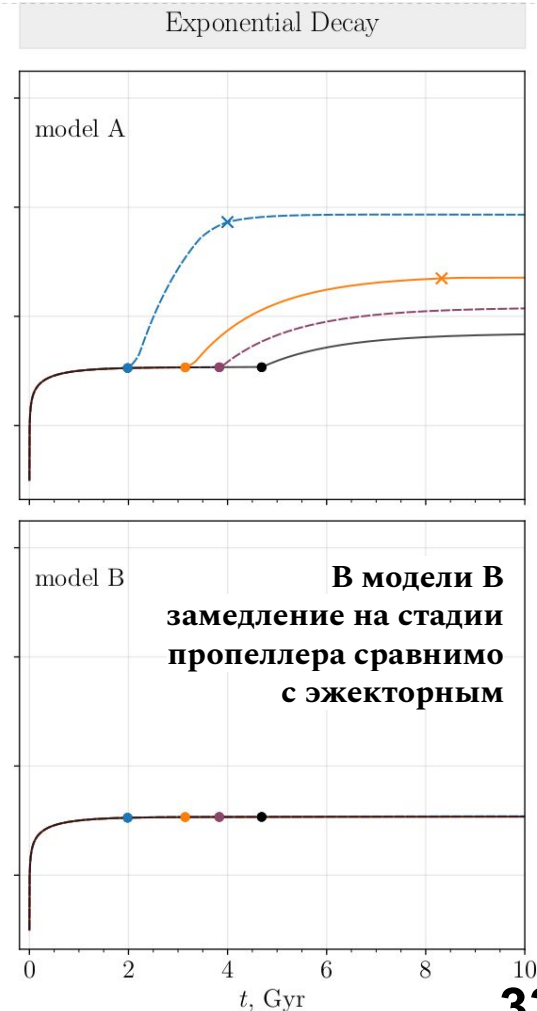
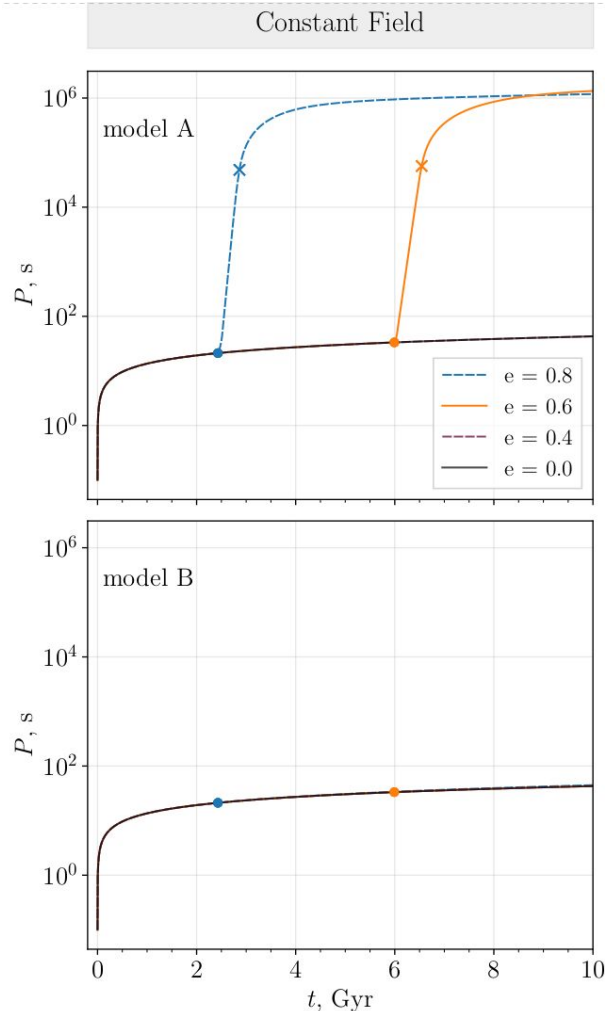


Эволюция периода НЗ с разными значениями эксцентриситета орбиты

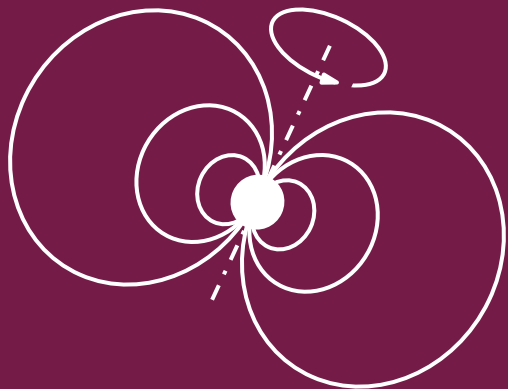


- Типичное магнитное поле 10^{12} Гс
- Большая полуось 1 а.е.

2501.15918

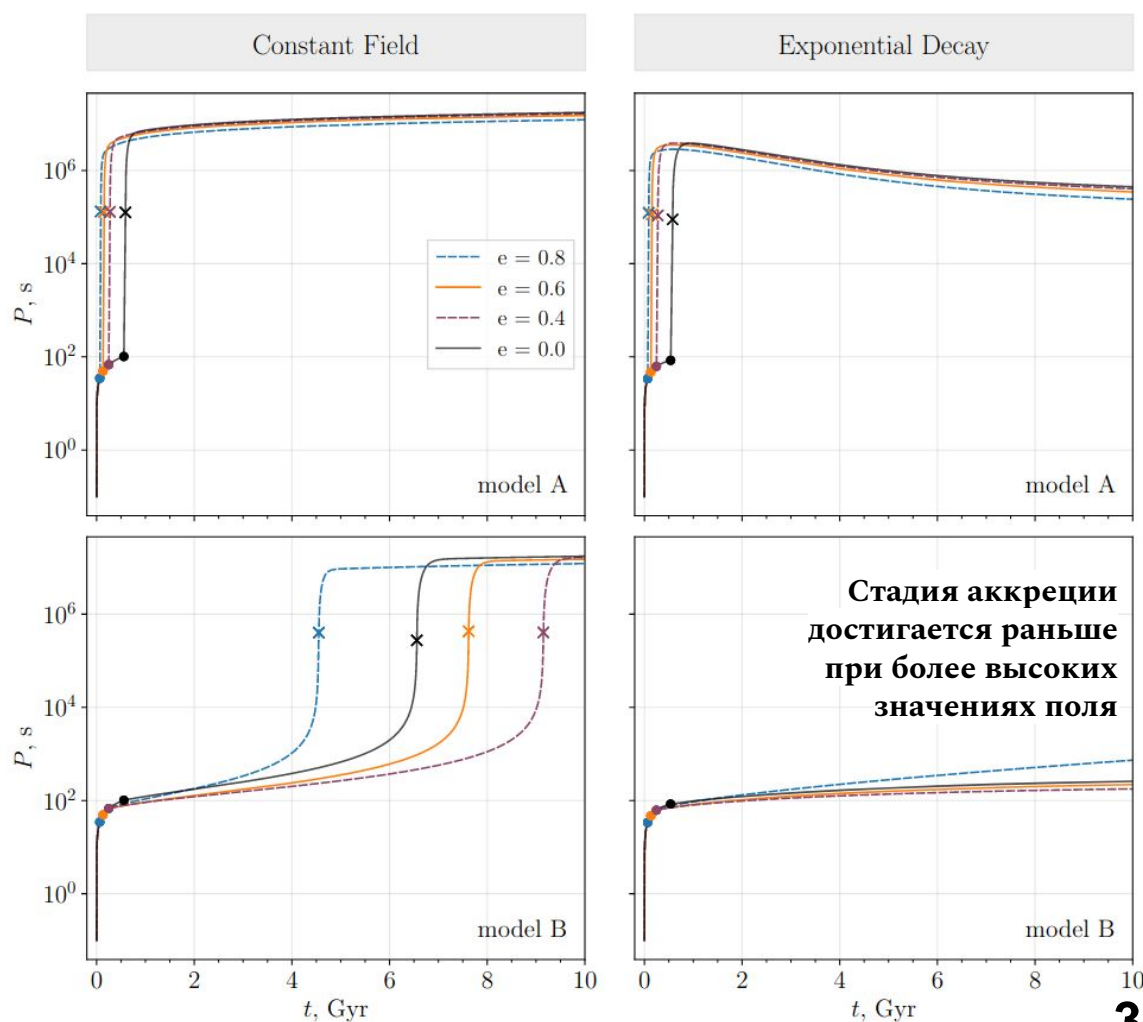


Эволюция периода НЗ с разными значениями эксцентриситета



- Магнитное поле 10^{13} Гс
- Большая полуось 1 а.е.

2501.15918



Доля каждой стадии по времени, поле постоянное

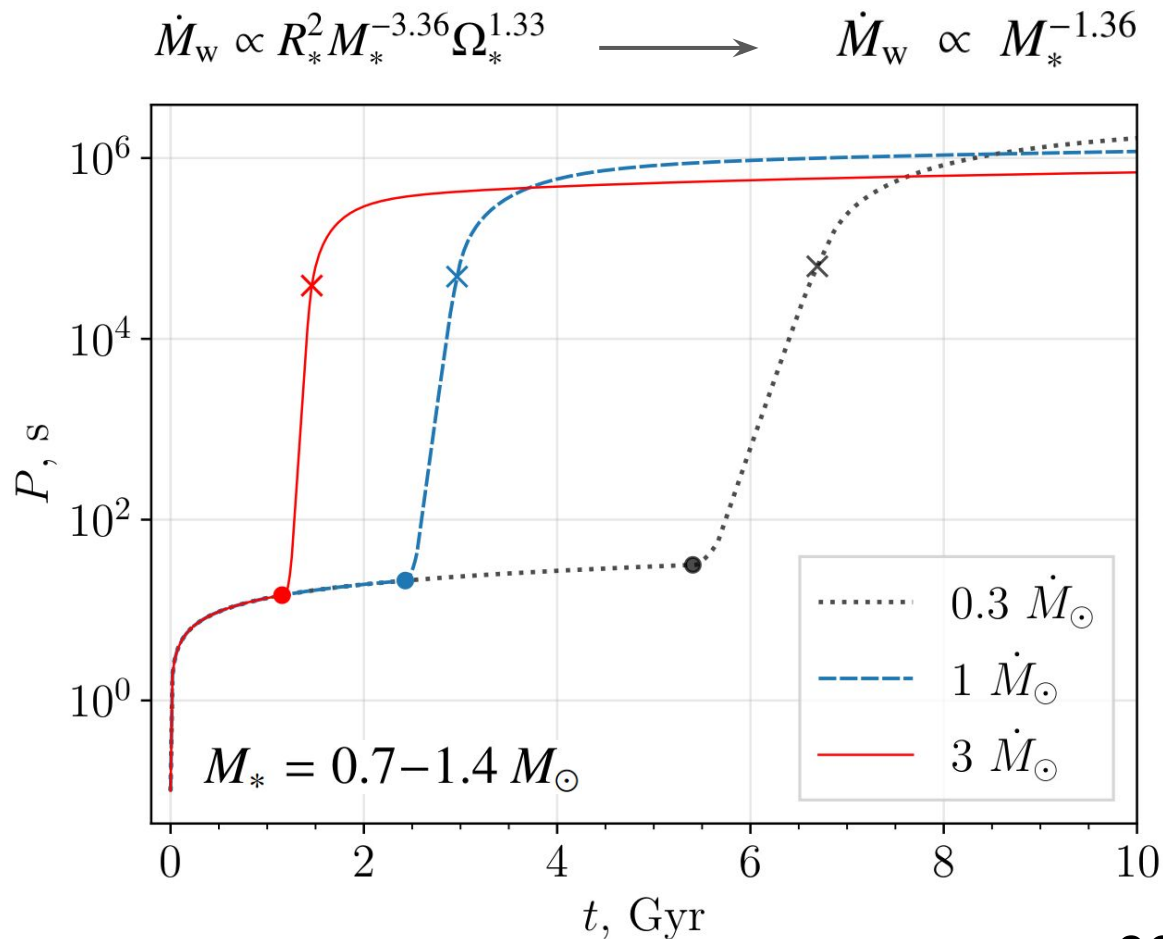
	В е	10^{12} G				10^{13} G			
		0	0.4	0.6	0.8	0	0.4	0.6	0.8
модель В	E_A	1.00	1.00	0.61	0.26	0.06	0.03	0.02	0.01
	P_A	0.00	0.00	0.06	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01
	A_A	0.00	0.00	0.34	0.70	0.93	0.97	0.98	0.98
	E_B	1.00	1.00	0.92	0.89	0.06	0.03	0.03	0.02
	P_B	0.00	0.00	0.08	0.11	0.61	0.88	0.74	0.44
	A_B	0.00	0.00	0.00	0.00	0.34	0.09	0.24	0.54

НЗ находятся на стадии аккреции больше времени при большей эффективности замедления на стадии пропеллера, большем магнитном поле и, как правило, большем эксцентриситете.

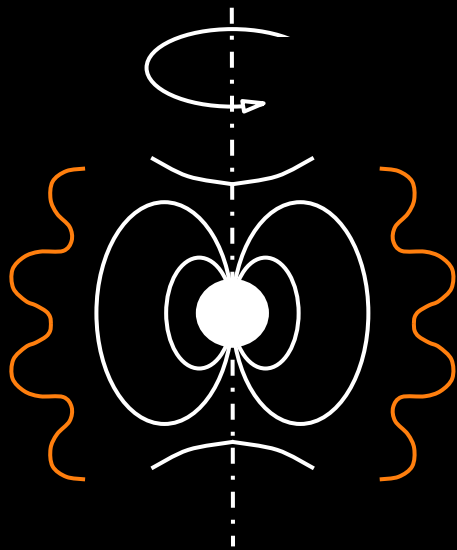
Влияние параметров второго компонента на эволюцию НЗ

Разная масса
второго компонента
может уменьшить или
увеличить темп истечения
ветра $\sim$ в три раза

- Магнитное поле
 10^{12} Гс
- Эксцентриситет
 0.8
- Большая полуось
 1 а.е.



Другие возможные режимы аккреции



Оболочка из вещества –
от R_m до R_G

Максимальная светимость НЗ в двойной системе

$$L = \frac{GM}{R_{NS}} \dot{M} \approx 10^{28} \dot{M}_8 \left(\frac{M}{M_\odot} \right) \left(\frac{R_{NS}}{10^6 \text{ cm}} \right)^{-1} \text{ erg s}^{-1}$$

Аккреция с оседанием (Shakura et al. 2012; Popov et. al. 2015):

вещество медленно аккрецирует на поверхность НЗ,

радиальная скорость u_r/u_{ff} зависит от характерного времени охлаждения $\sim (t_{ff}/t_{cool})^{1/3}$

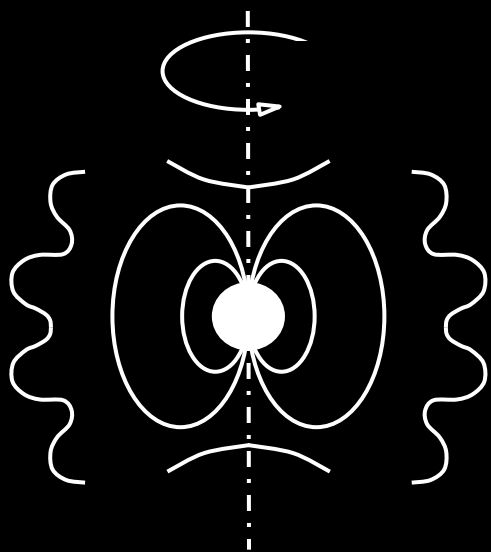
$$t_{ff} = R^{3/2} / \sqrt{GM}$$

$$t_{cool} = 3 \times 10^8 \left(\frac{R_A}{10^{10} \text{ cm}} \right) \left(\frac{L_x}{10^{30} \text{ erg s}^{-1}} \right)^{-1} \frac{f(u)}{0.01} (1 + X)^{-1} \text{ s.}$$

При этом темп аккреции снижается

$$\dot{M}_x \simeq \dot{M}_B (t_{ff}/t_{cool})^{1/3}$$

Данный эффект может уменьшить рентгеновскую светимость на несколько порядков.



**Спасибо за
внимание!**

Заключение

НЗ начинают аккрецировать раньше при большем эксцентриситете и меньшем разделении между компонентами

Замедление вращения в режиме пропеллера играет решающую роль в эволюции НЗ в двойных системах. В зависимости от модели пропеллера аккреция может начаться сразу после конца стадии эжектора или не начаться за время жизни Вселенной.

Дальнейшие наблюдения НЗ в широких двойных системах позволят уточнить законы эволюции НЗ на большом масштабе времени в условиях низкого темпа аккреции.

Эволюционные стадии НЗ

Эжектор

$$R_{Sh} = \left(\frac{\xi \mu^2 (GM)^2 \omega^4}{\dot{M} v^5 c^4} \right)^{1/2}$$

$$R_l = c/\omega, \quad R_G = \frac{2GM}{v^2}$$

Пропеллер

$$R_{co} = \left(\frac{GM}{\omega^2} \right)^{1/3}$$

Аккректор ($R_m > R_G$)

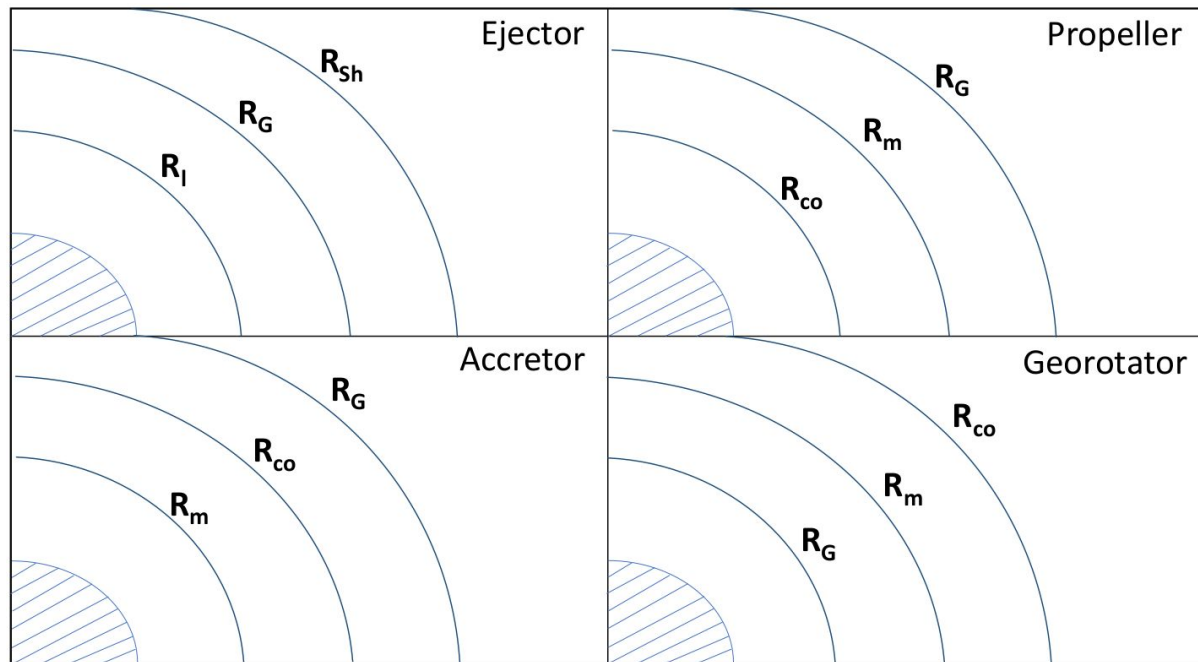
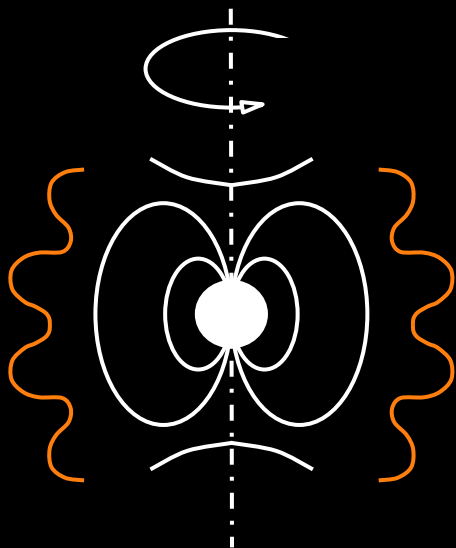


рисунок: Abolmasov et al. (2024), 2402.04331

классификация эволюционных стадий: Lipunov, V.M. (1992)

Другие возможные режимы аккреции



Оболочка из вещества –
от R_m до R_G

Дозвуковой пропеллер

- **Аккреция не начинается, если вещество не может охлаждаться эффективно** (Arons & Lea 1976)
- Оценка темпа замедления (Davies, Fabian and Pringle 1979, Davies & Pringle 1981). Период, при котором **начинается дозвуковой пропеллер**

$$P'_{eq} = 23 \mu_{30}^{2/3} \dot{M}_{15}^{-1/3} V_8^{-2/3} \text{ s.}$$

- Корректное значение периода, при достижении которого **начинается стадия аккреции** (Ikhsanov 2001)

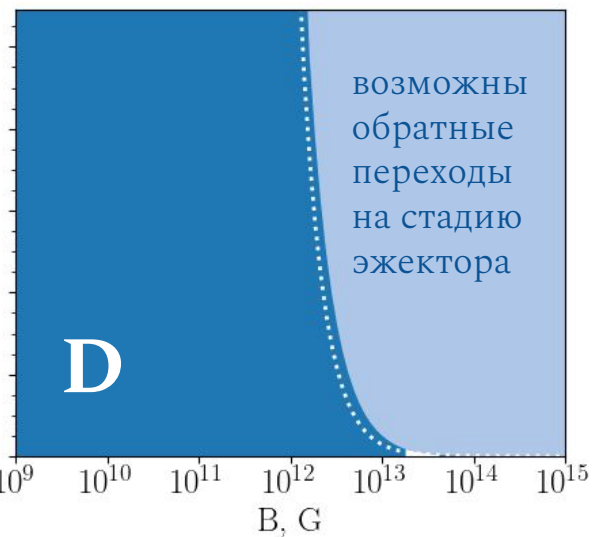
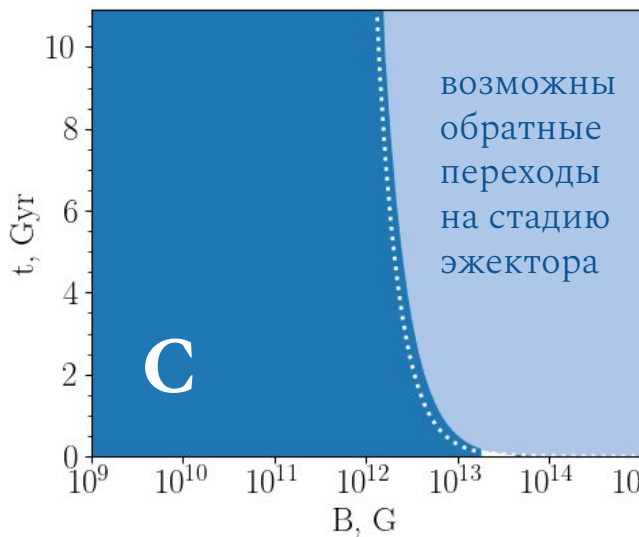
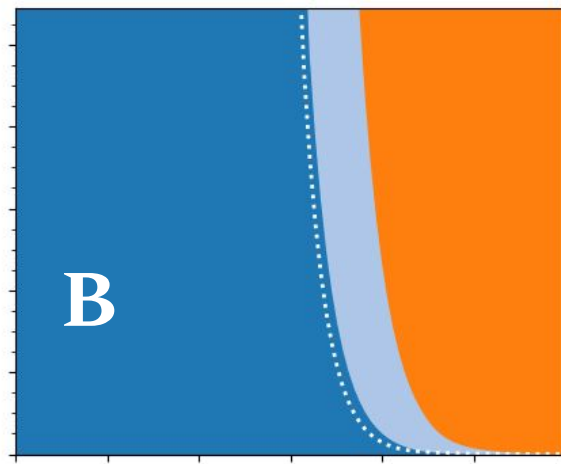
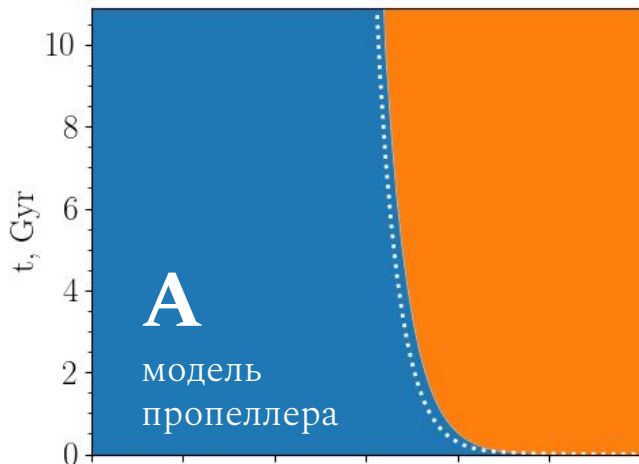
$$P_{br} \simeq 450 \mu_{30}^{16/21} \dot{M}_{15}^{-5/7} (M/M_{\odot})^{-4/21} \text{ s}$$

Магнитное поле

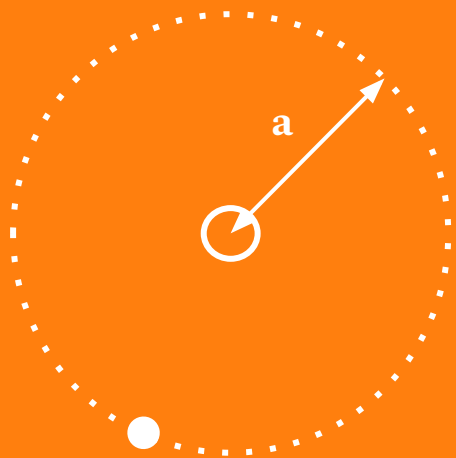


НЗ на круговой
орбите $a = 1$ а.е.

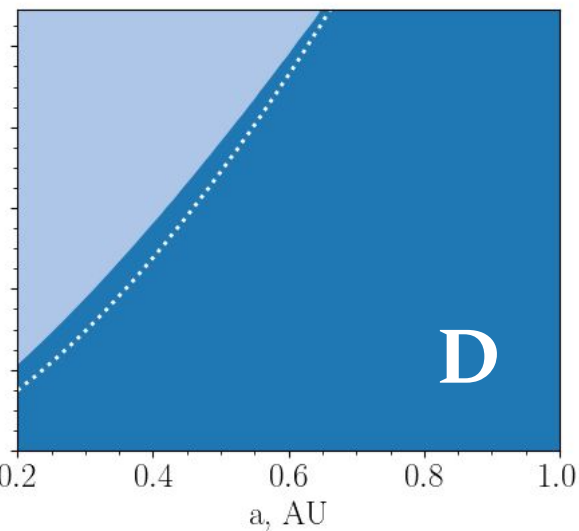
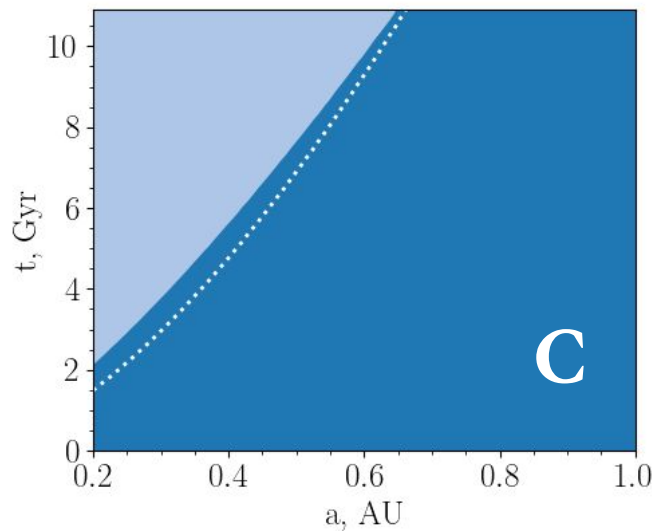
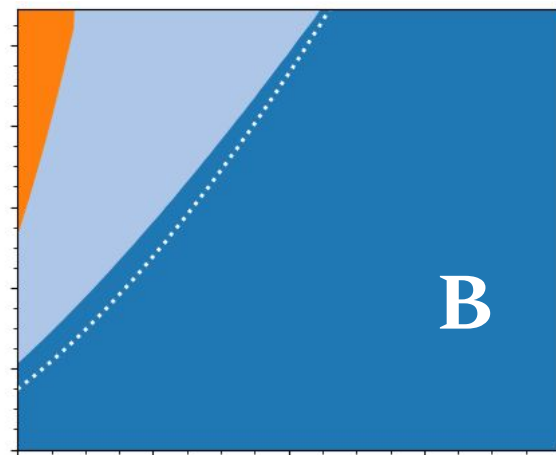
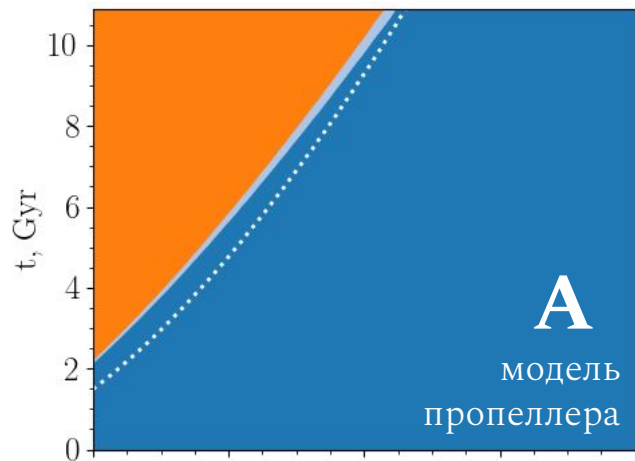
- эжектор
- пропеллер
- аккректор



Большая полуось



НЗ с магнитным полем
 $B = 10^{12}$ Гс

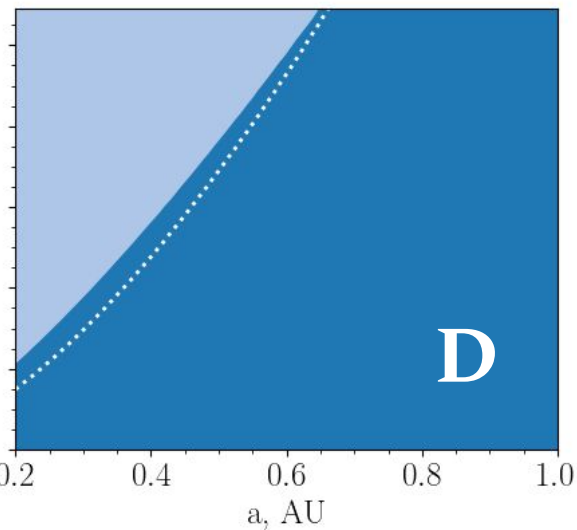
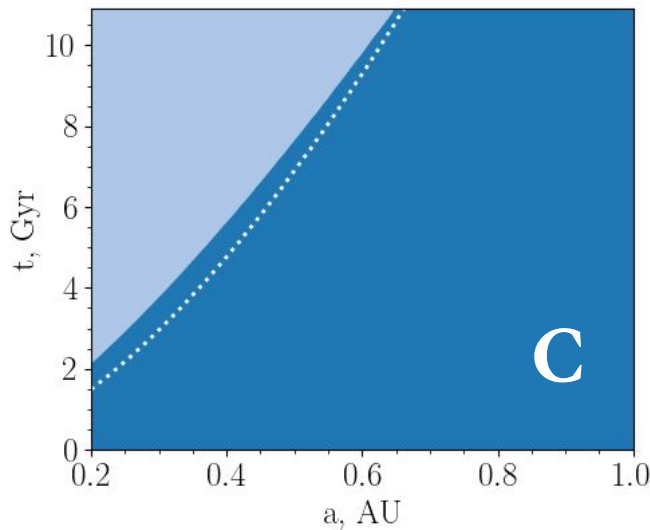
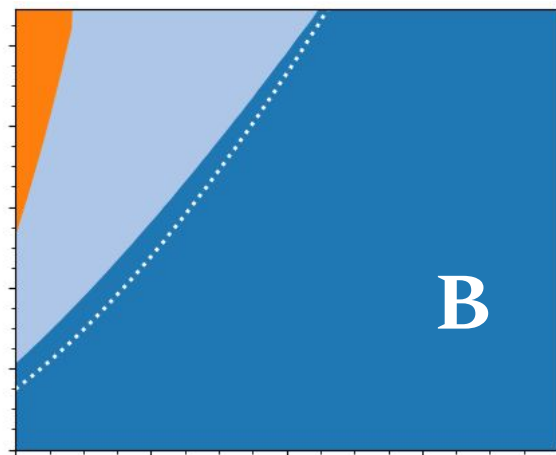
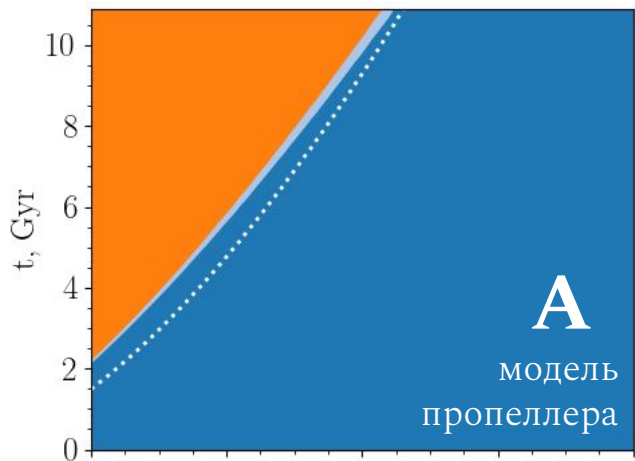


Результаты

Стадия
эжектора
заканчивается
за 10 млрд. лет
только для НЗ
ближе 1 а.е. с
полем больше
 10^{12} Гс

2409.00714

arXiv

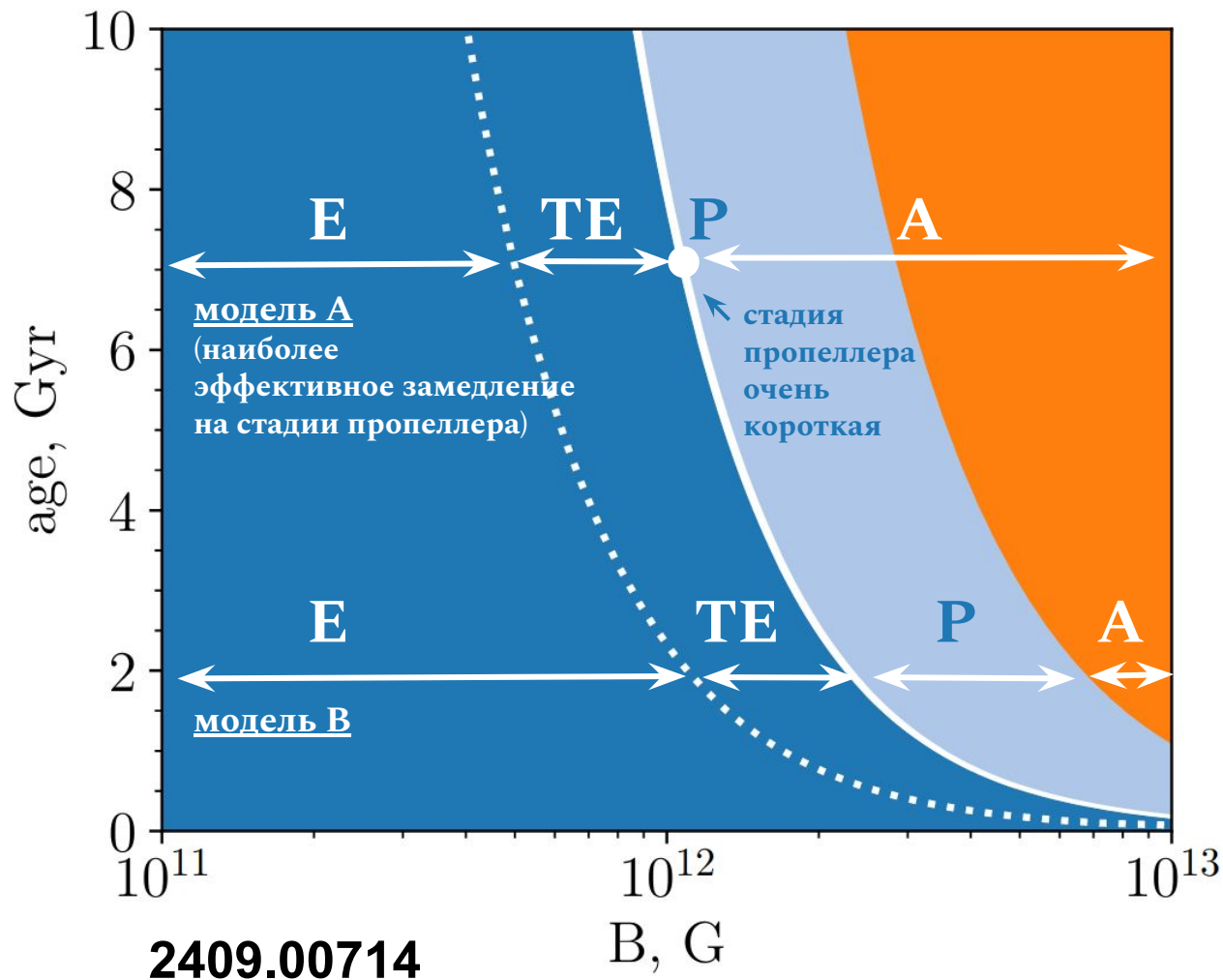


Магнитное поле

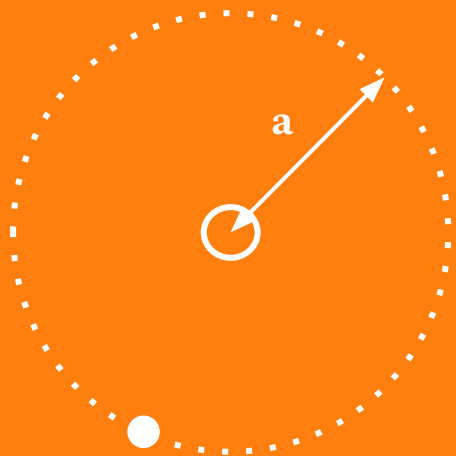


НЗ на круговой орбите $a = 1$ а.е.

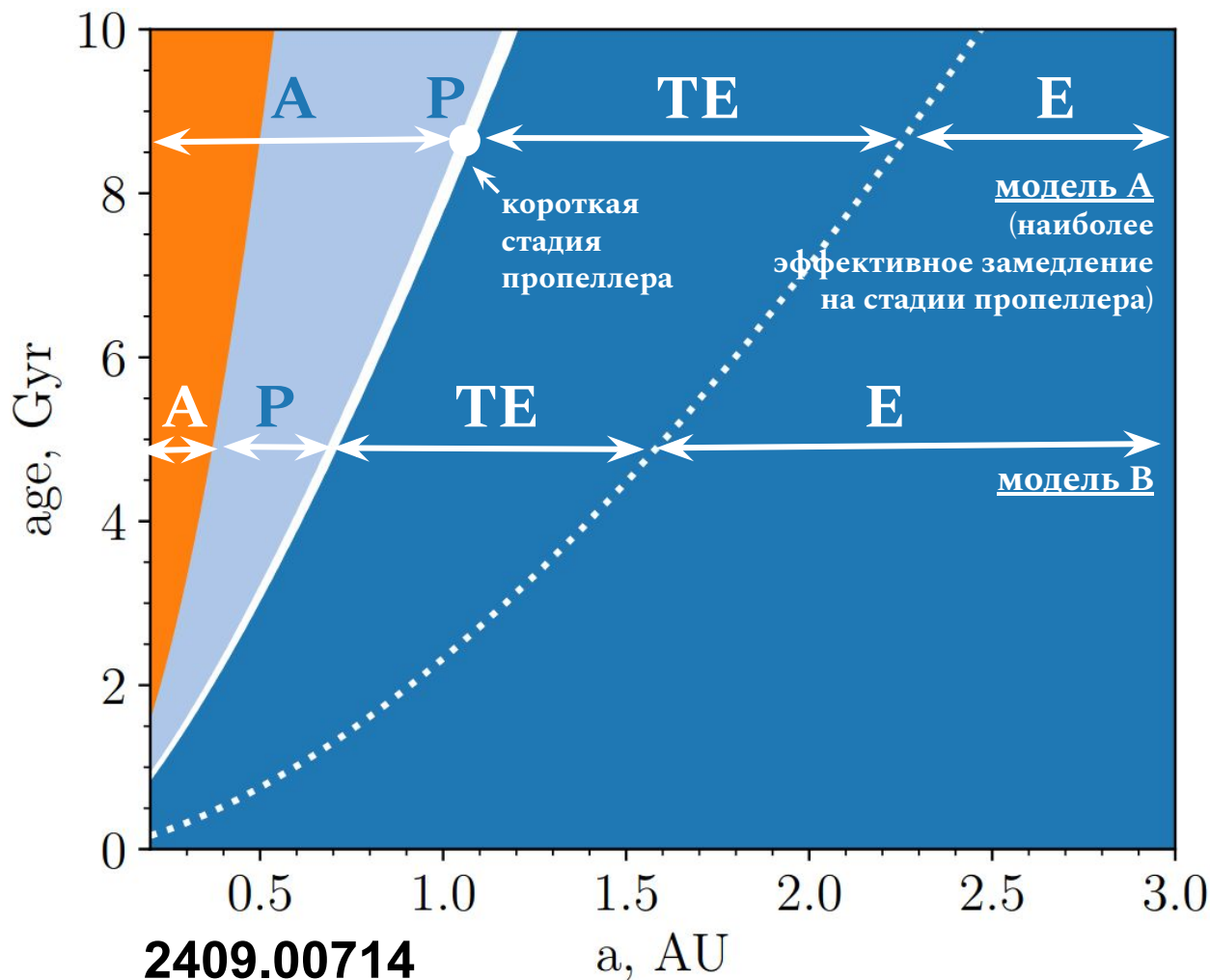
Показаны две модели пропеллера: А и В



Большая полуось



НЗ с магнитным полем
 $B = 10^{12}$ Гс
Показаны две модели
пропеллера: А и В



Темп аккреции
(если отнять 26 порядков,
будет в M_☉/год)

$$\dot{M} = 4\pi (GM)^2 \rho_0 v^{-3}$$
$$\dot{M} \simeq 10^{11} \, n v_{10}^{-3} \, \text{г с}^{-1}$$

Время жизни эжектора

$$t_{\text{Е}}(\mu = const) \sim 10^9 \mu_{30}^{-1} n^{-1/2} v_{10} \, \text{лет}$$

Оценка магнитного поля
эжектора

$$\frac{B}{10^{12} \, \text{Гс}} \approx \sqrt{\left(\frac{P}{1 \, \text{с}}\right) \left(\frac{\dot{P}}{10^{-15} \, \text{с/с}}\right)}$$

Критические периоды

$$P_{\text{EP}} = \frac{2\pi}{c} \left(\frac{\xi \mu^2}{4\dot{M}v} \right)^{1/4}$$

$$P_{\text{PA}} = \pi \left(\frac{\mu^2 \sqrt{2}}{GM\dot{M}v^2} \right)^{1/3}$$

Расширенная таблица моделей пропеллера

Model	The braking torque K	R_m , if $R_m < R_G$	R_m , if $R_m > R_G$	R_{Sh}^{env}
A1	$\dot{M}\omega R_m^2$	$[\mu^2 v R_G^{1/2} / (2\dot{M}\omega^2)]^{2/13}$	$[\mu^2 v R_G^2 / (2\dot{M}\omega^2)]^{1/8}$	$R_G [c^4 \dot{M} v / (\xi \mu^2 \omega^4)]^2$
A	$\dot{M}\omega R_m^2$	$R_A^{7/9} R_G^{2/9}$	$[\mu^2 R_G^2 / (2\dot{M} v)]^{1/6}$	$R_G [\xi \mu^2 \omega^4 / (c^4 \dot{M} v)]^2$
B	$\dot{M}\sqrt{2GM R_m}$			
C	$\dot{M}\max(v^2, v_{ff}^2(R_m)) / (2\omega)$			
D	$\dot{M}v^2 / (2\omega)$			

Альфвеновский радиус

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

радиус грав. захвата

$$R_G = \frac{2GM}{v^2}$$