

# Планеты вокруг радиопульсаров

Сергей Попов

Одним из самых важных открытий последних 20 лет стало обнаружение экзопланет.

Сейчас специализированные наземные программы и спутники существенно увеличили число известных планет у других звезд.

На данный момент >5000 планет ([exoplanet.eu](http://exoplanet.eu)) плюс несколько тысяч кандидатов.

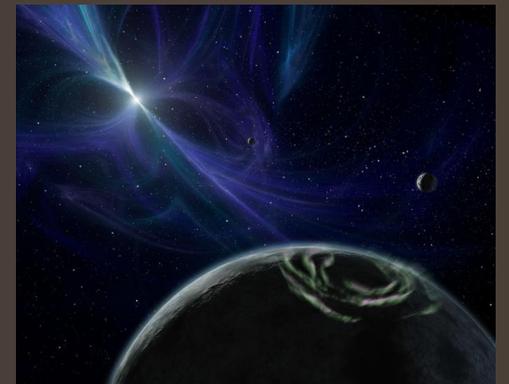
## Экзопланеты



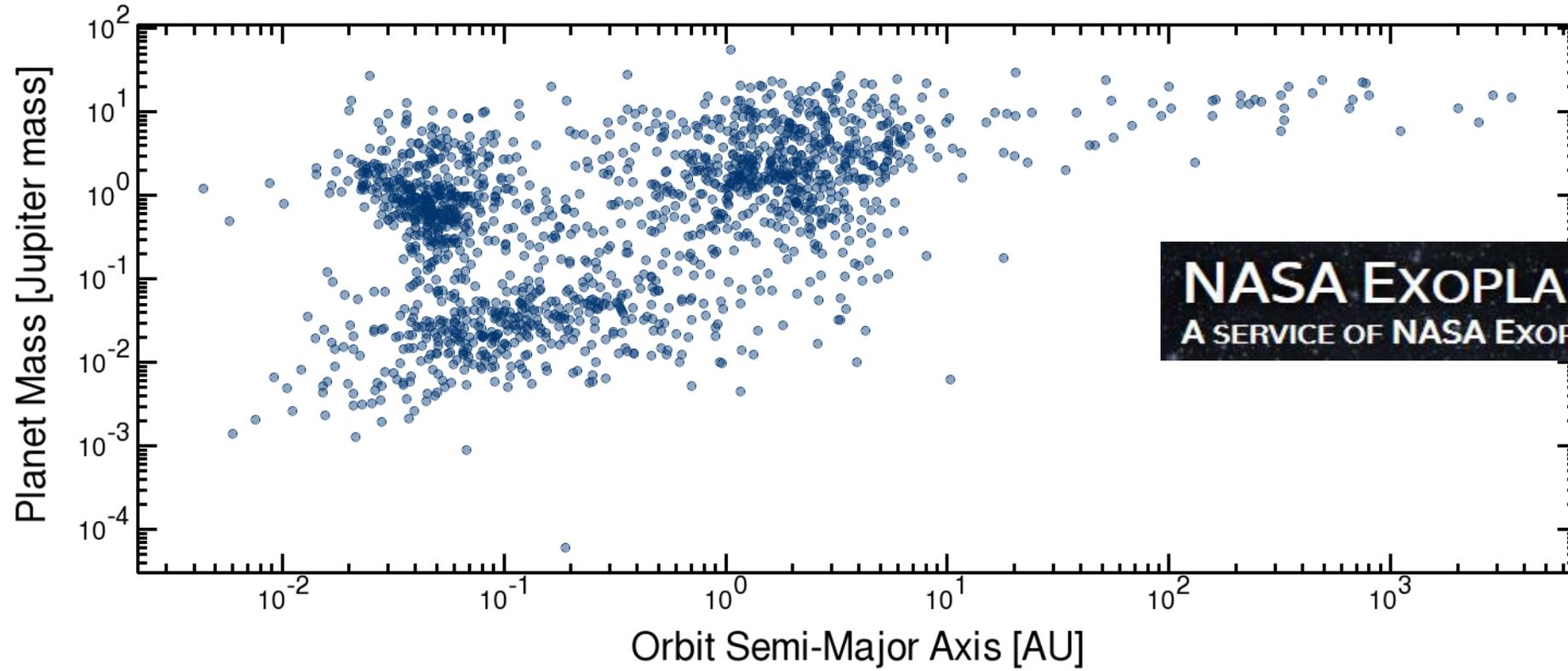
Область быстро развивается и с точки зрения новых наблюдений (и постройки приборов), и с точки зрения теории (т.к. оказалось, что многое мы не понимали или понимали не так).

# История открытия

- Первая надежно подтвержденная планета, вращающаяся вокруг другой нормальной звезды (51 Пегаса), была открыта в 1995 году Майором и Кело. В результате конкурса имён МАС планета получила название Димидий (Dimidium).
- Однако еще в 1992 году надежнейшее обнаружение планеты было сделано Вольцшаном и Фрейлом, но вращалась она вокруг ... радиопульсара! Планета PSR B1257+12с получила имя Полтергейст.
- В 1988 году появилась работа Кэмпбелла и др., в которой говорилось о планетном кандидате, но надежно подтвердить его удалось только в 2003 году.
- Наконец, в 1989 году Латам и др. открыли спутник одной из звезд, у которого долго масса была оценена недостаточно точно, чтобы сказать, планета это или бурый карлик. Теперь мы знаем – что это бурый карлик (1910.07835).

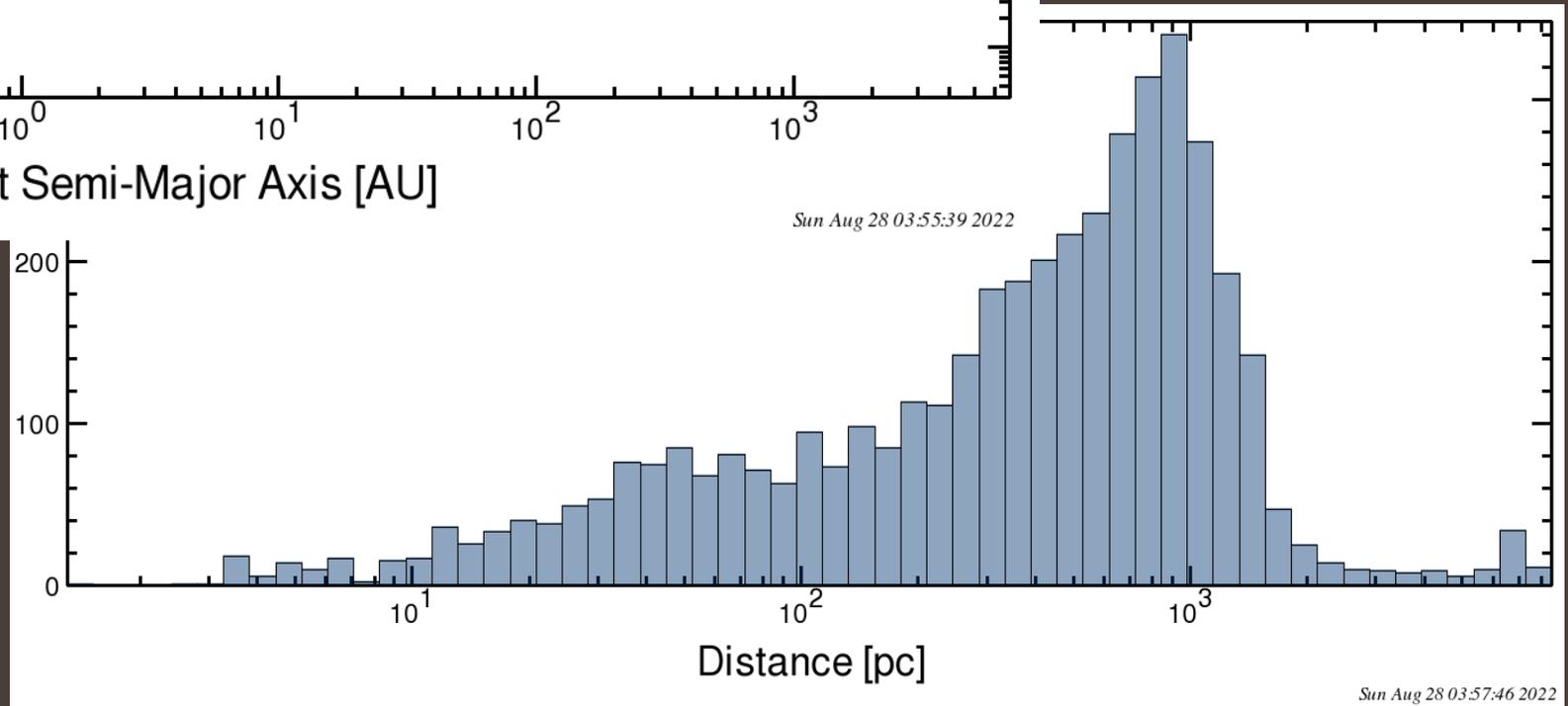


# Confirmed Planets



**NASA EXOPLANET ARCHIVE**  
A SERVICE OF NASA EXOPLANET SCIENCE INSTITUTE

Такие разные  
экзопланеты



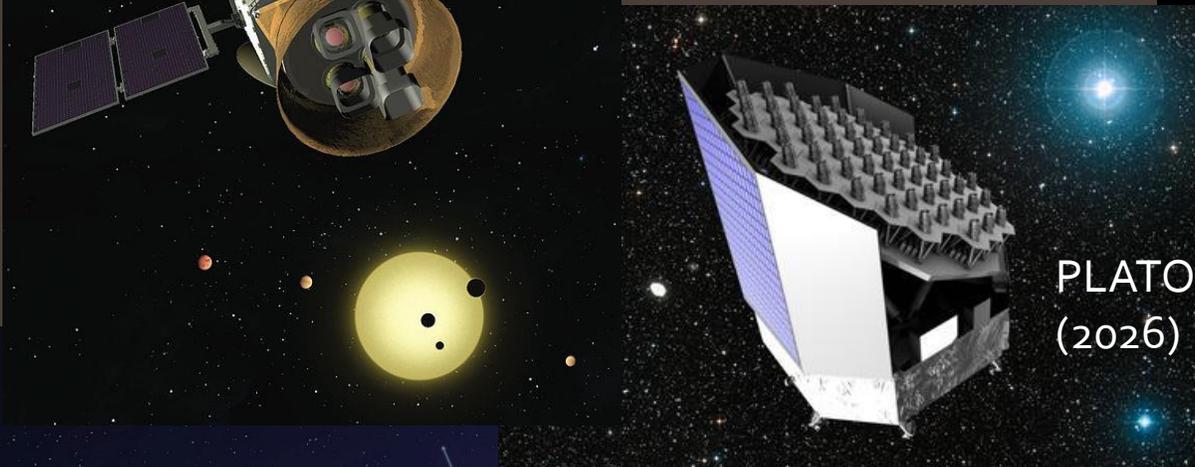
Sun Aug 28 03:57:46 2022

# Новые наблюдения

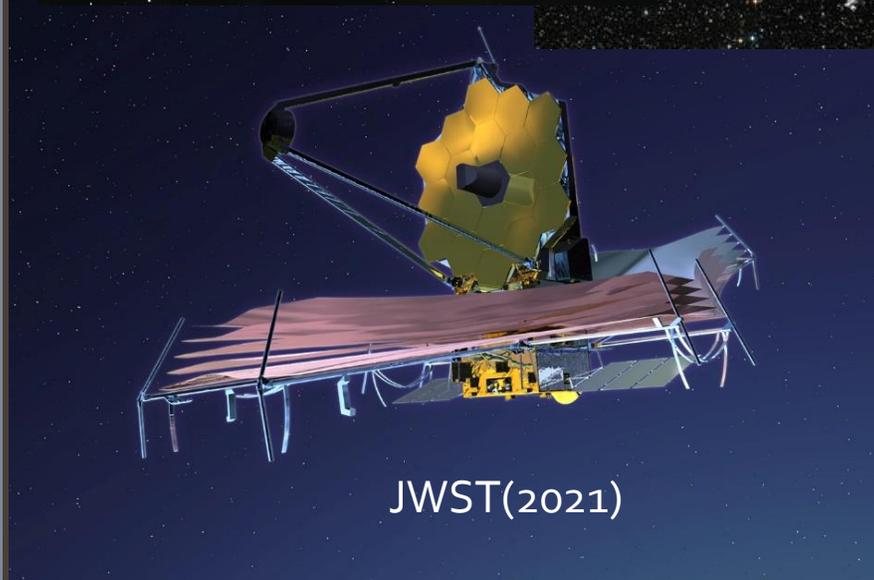
TESS  
(2018)



CHEOPS  
(2019)



PLATO  
(2026)

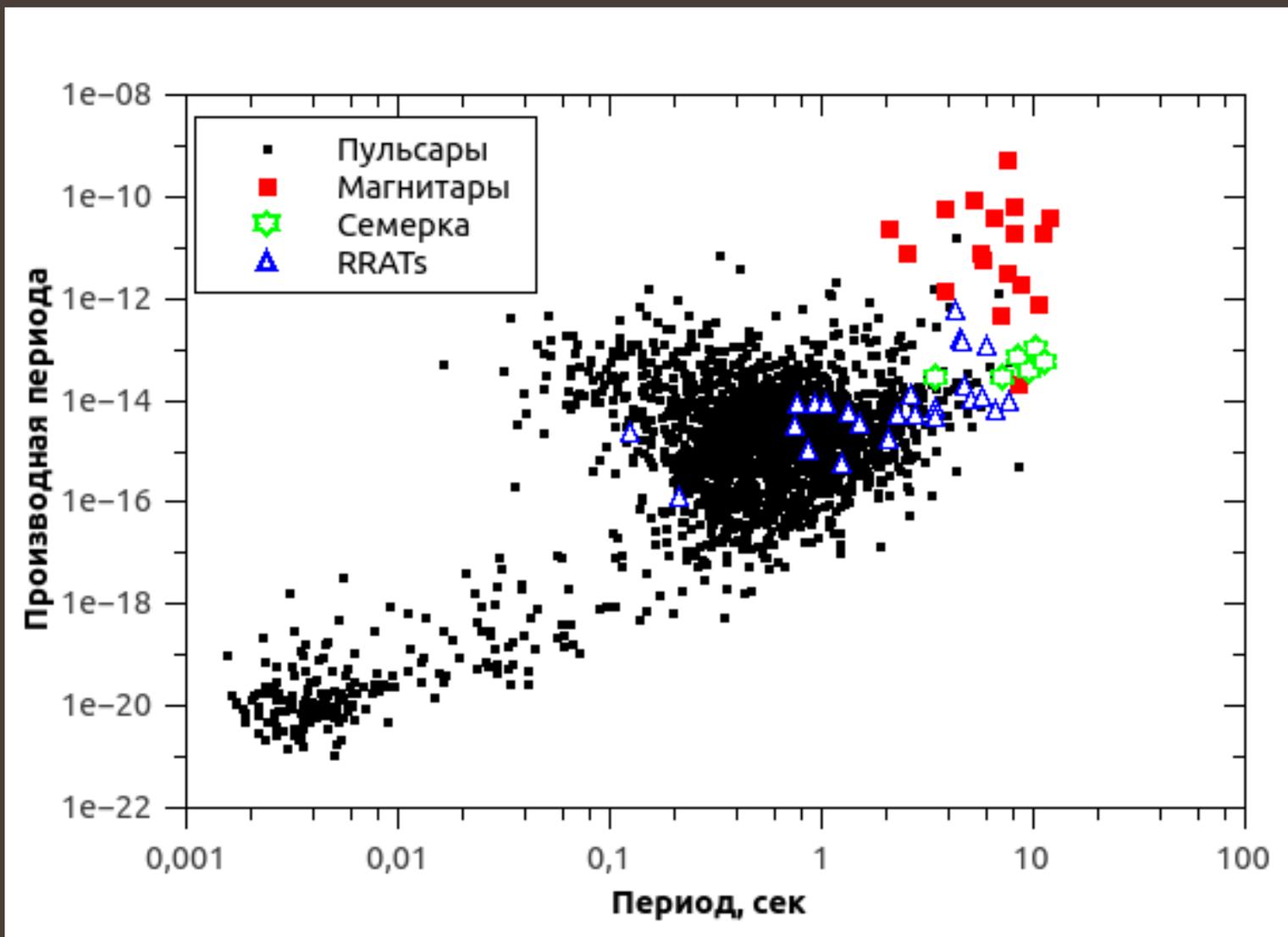


JWST(2021)

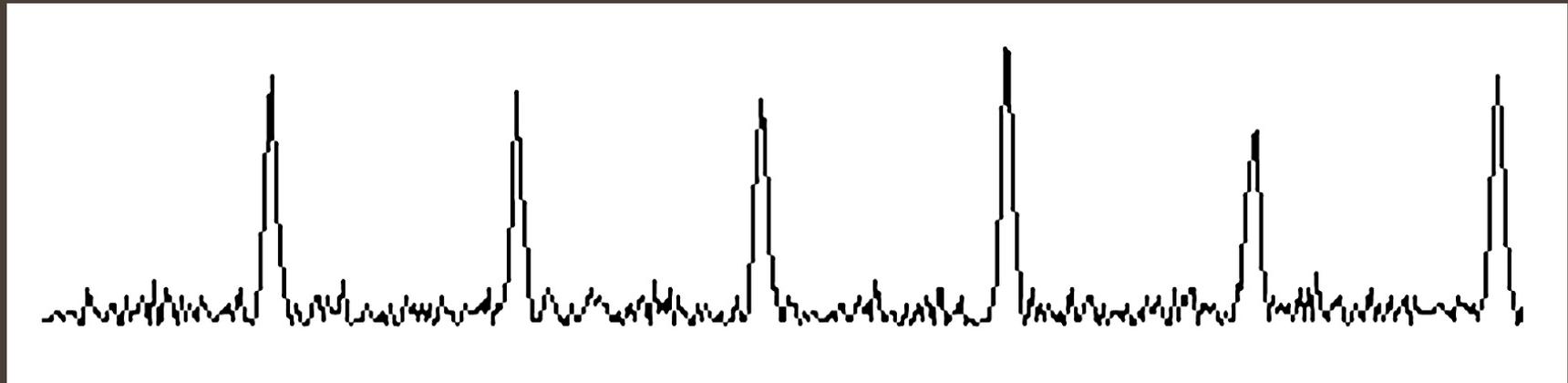


E-ELT  
(2027)

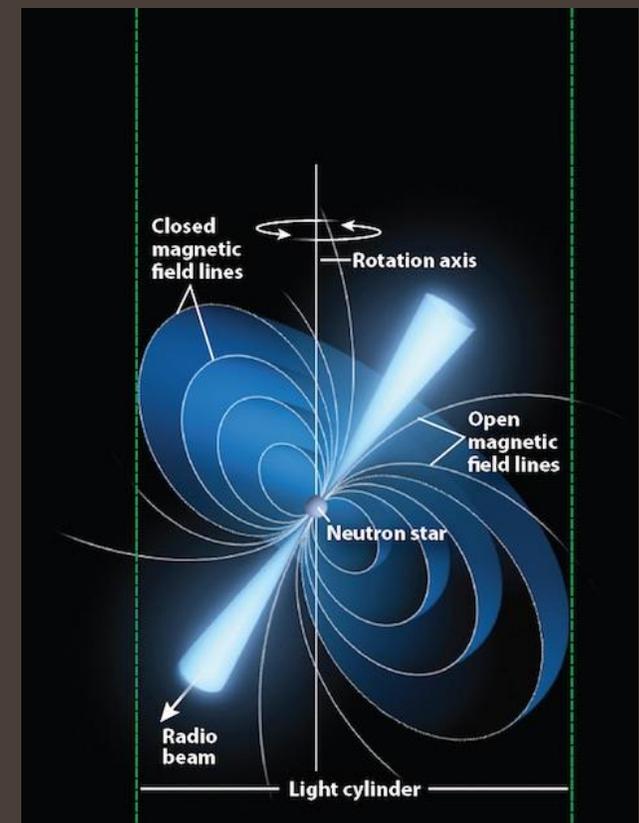
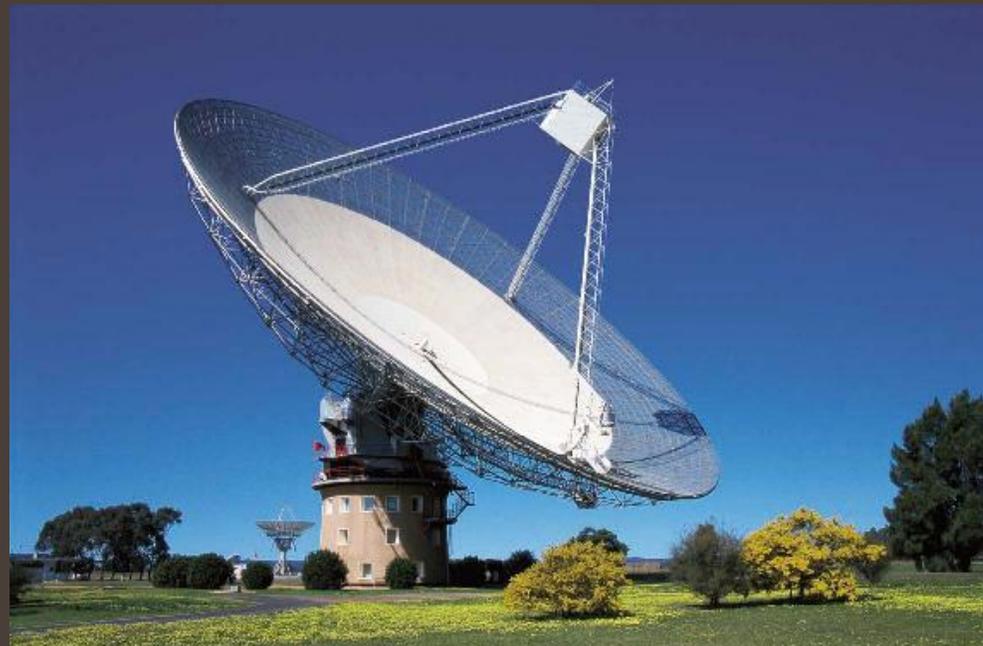
# Нейтронные звезды вообще и радиопульсары в частности



# Радиопульсары

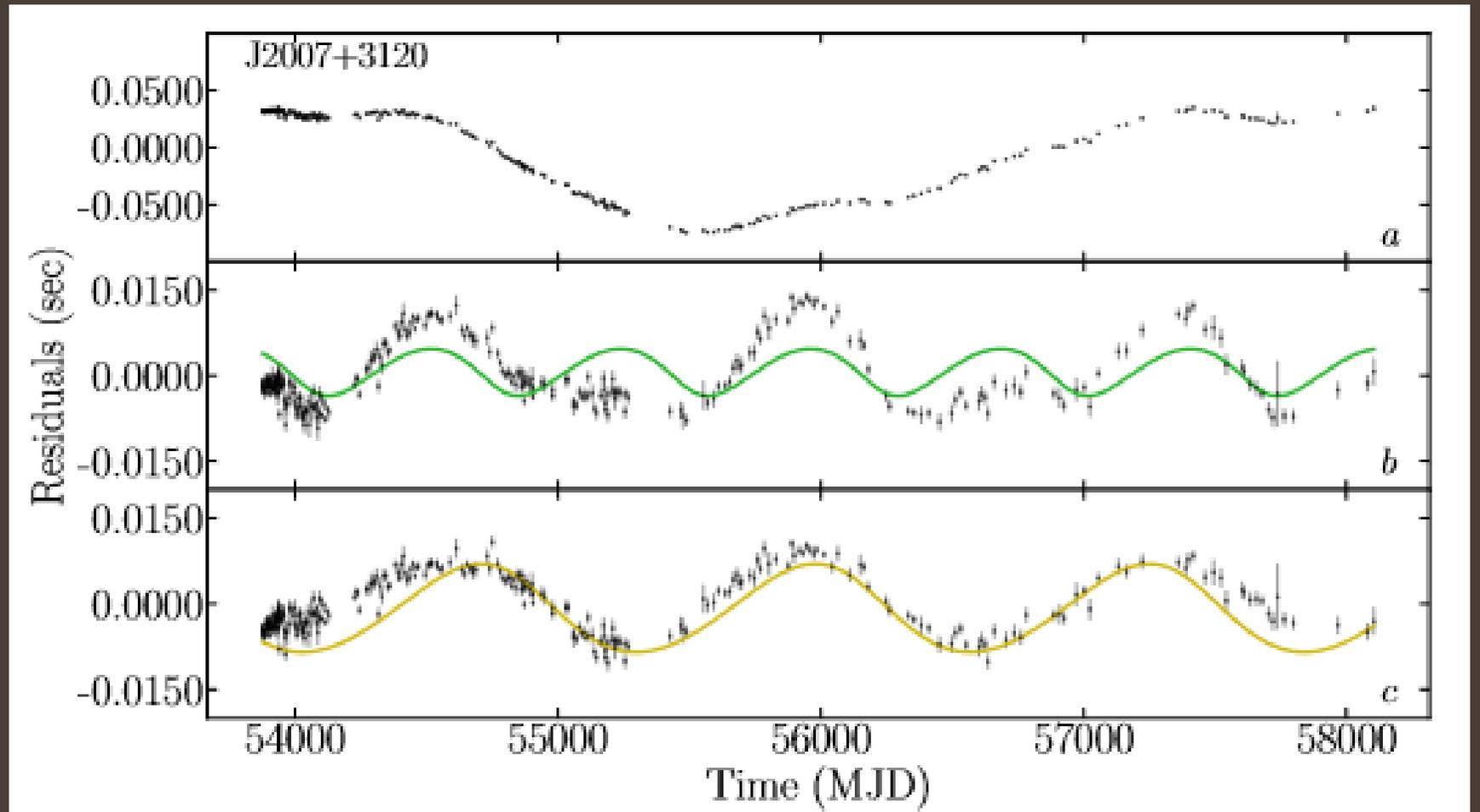


Известно более 2500 пульсаров.  
В Галактике их должно быть  
порядка 100 000.



# Новый большой поиск планет у пульсаров

800 pulsars observed at Jodrell Bank.  
Only 15 candidates, and just one good: PSR J2007+3120.



# Caltech catalogue

Just most guaranteed objects which can be really classified as planet are included.

Planet Name	Host Name	Default Parameter Set	Discovery Method	Discovery Year	Discovery Facility	Planetary Parameter Reference	Orbital Period [days]	Orbit Semi-Major Axis [au]	Planet Mass or Mass* $\sin(i)$ [Earth Mass]	Eccentricity
<input type="text"/>	<input type="text" value="PSR"/>	<input type="text" value="=1"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
PSR B0329+54 b	PSR B0329+54	1	Pulsar Timing	2017	Multiple Facilities	<a href="#">Starovoit &amp; Rodin 2017</a>	10140±11	10.26±0.07	1.97±0.19	0.236±0.011
PSR B1257+12 b	PSR B1257+12	1	Pulsar Timing	1994	Arecibo Observat	<a href="#">Konacki and Wolszczan 2003</a>	25.262±0.003	0.19	0.020±0.002	0
PSR B1257+12 c	PSR B1257+12	1	Pulsar Timing	1992	Arecibo Observat	<a href="#">Konacki and Wolszczan 2003</a>	66.5419±0.0001	0.36	4.3±0.2	0.0186±0.0002
PSR B1257+12 d	PSR B1257+12	1	Pulsar Timing	1992	Arecibo Observat	<a href="#">Konacki and Wolszczan 2003</a>	98.2114±0.0002	0.46	3.9±0.2	
PSR B1620-26 b	PSR B1620-26	1	Pulsar Timing	2003	Hubble Space Te	<a href="#">Sigurdsson et al. 2003</a>		23	795±318	
PSR J1719-1438 b	PSR J1719-1438	1	Pulsar Timing	2011	Parkes Observat	<a href="#">Bailes et al. 2011</a>	0.090706293±0.00000000	0.0044	>382.80	<0.06
PSR J2322-2650 b	PSR J2322-2650	1	Pulsar Timing	2017	Parkes Observat	<a href="#">Spiewak et al. 2018</a>	0.322963997±0.00000000	0.0102	252.6±0.1	<0.0017

Exoplanet.eu

Planet	Mass ( $M_{\text{Jup}}$ )	Radius ( $R_{\text{Jup}}$ )	Period (day)	$a$ (AU)	$e$	$i$ (deg)	Ang. dist. (arcsec)	Discovery
PSR J2055+3829 b	39	—	0.12959037293	—	0.000014	—	—	2019
PSR 1719-14 b	1	0.4	0.090706293	0.0044	0.06	—	—	2011
PSR J1544+4937 b	—	—	0.1207729895	0.00537	—	—	—	2013
PSR J1446-4701 b	23	—	0.27766607732	0.0093	—	—	—	2012
PSR J1502-6752 b	26	—	2.48445723	0.04	—	—	—	2012
PSR B1620-26 (AB) b	2.5	—	36525	23	—	—	0.006053	2003
PSR B0943+10 c	—	—	1460	2.9	—	—	—	2014
PSR B0943+10 b	—	—	730	1.8	—	—	—	2014
PSR B0329+54 b	—	—	10139.34	10.26	0.236	—	—	2017
PSR 0636 b	—	—	0.067	—	—	—	—	2016
PSR B1957+20 b	22	—	0.38	—	—	—	—	1988
PSR J1807-2459 A b	9.4	—	0.07	—	0	—	—	2000
PSR J2241-5236 b	12	—	0.1456722395	—	0	—	—	2011
PSR J2051-0827 b	28.3	—	0.099110266	—	0	—	—	1996
PSR 1257 12 d	0.012	—	98.2114	0.46	0.0252	47	0.00092	1992
PSR 1257 12 c	0.013	—	66.5419	0.36	0.0186	53	0.00072	1992
PSR 1257 12 b	0.00007	—	25.262	0.19	0	—	0.00038	1992

All published objects with planetary (or similar) masses are included.

# Список объектов планетной массы вокруг радиопульсаров

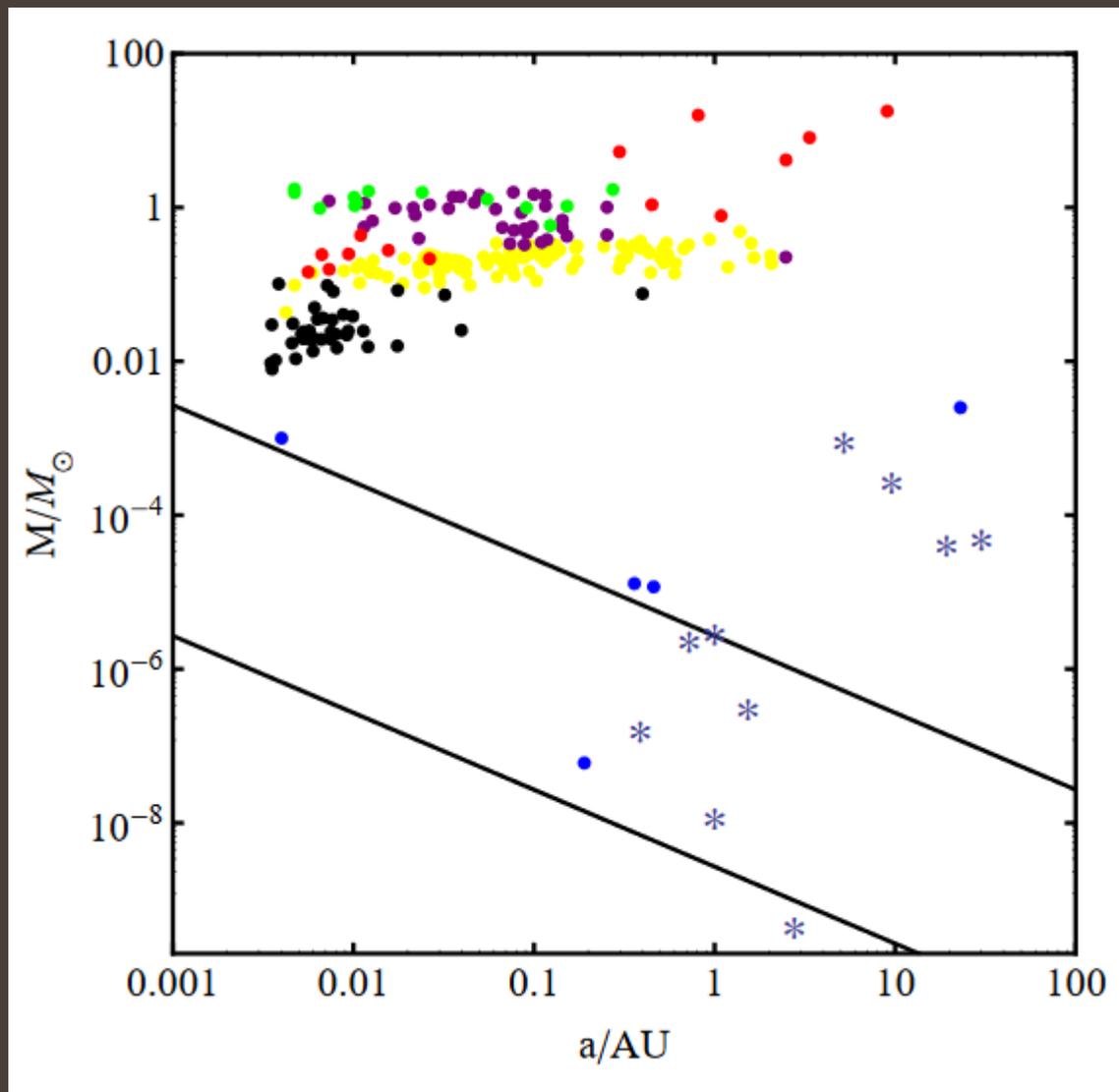
Название	Масса, $M_J$	Период, дни	полуось, а.е.	Год
<a href="#">PSR 1257 +12 b</a>	7e-05	25.262	0.19	1994
<a href="#">PSR 1257 +12 c</a>	0.013	66.5419	0.36	1992
<a href="#">PSR 1257 +12 d</a>	0.012	98.2114	0.46	1992
<a href="#">PSR 1719-14 b</a>	1.0	0.090706293	0.0044	2011
<a href="#">PSR B0329+54 b</a>	0.0062	10139.34	10.26	2017
<a href="#">PSR B0943+10 b</a>	2.8	730.0	1.8	2014
<a href="#">PSR B0943+10 c</a>	2.6	1460.0	2.9	2014
<a href="#">PSR B1620-26 (AB) b</a>	2.5	36525.0	23.0	2003
<a href="#">PSR B1957+20 b</a>	22.0	0.38	—	1988
<a href="#">PSR 0636 b</a>	8.0	0.067	—	2016
<a href="#">PSR J1807-2459 A b</a>	9.4	0.07	—	2000
<a href="#">PSR J2051-0827 b</a>	28.3	0.099110266	—	1996
<a href="#">PSR J2241-5236 b</a>	12.0	0.1456722395	—	2011
<a href="#">PSR J2322-2650 b</a>	~1	0.32	0.0102	2017

+ еще 3 бурых карлика (по массе) в каталоге exoplanet.eu (21/09/2020)

# В чем разница?

Название		Масса, $M_J$	Год открытия
<a href="#">PSR 1257+12 b</a>	mPSR	7e-05	1992
<a href="#">PSR 1257+12 c</a>	mPSR	0.013	1992
<a href="#">PSR 1257+12 d</a>	mPSR	0.012	1992
<a href="#">PSR 1719-14 b</a>	mPSR, destroyed WD?, evaporated?	1.0	2011 arXiv: 1108.5201
<a href="#">PSR B0329+54 b</a>	Pushchino	0.0062	2017 arXiv:1710.01153
<a href="#">PSR B0943+10 b</a>	Doubtful, Pushchino	2.8	2014
<a href="#">PSR B0943+10 c</a>		2.6	2014
<a href="#">PSR B1620-26 (AB) b</a>	Globular cluster, triple system with a WD	2.5	2003
<a href="#">PSR B1957+20 b</a>	mPSR, evaporation	22.0	1988
<a href="#">PSR 0636 b</a>	mPSR, black widow	8.0	2016 arXiv: 1602.00655
<a href="#">PSR J1807-2459 A b</a>	mPSR, GC	9.4	2000 astro-ph/0010243
<a href="#">PSR J2051-0827 b</a>	mPSR, evaporating	28.3	1996
<a href="#">PSR J2241-5236 b</a>	mPSR, stripped WD	12.0	2011 arXiv: 1102.0648
<a href="#">PSR J2322-2650</a>	mPSR, black widow?	~1	2017 arXiv: 1712.04445

Компаньоны  
радиопульсаров:  
обычные звезды,  
нейтронные  
звезды, планеты,  
остатки чего-то  
и белые карлики



Красные – звезды,  
зеленые – НЗ,  
фиолетовые – белые карлики  
(CO и NeOMg),  
Желтые – гелиевые БК,  
синие – планеты,  
черные – маломассивные  
тела, видимо,  
являющиеся  
остатками  
разрушения  
компаньонов,  
«снежинки» – планеты  
Солнечной  
системы.

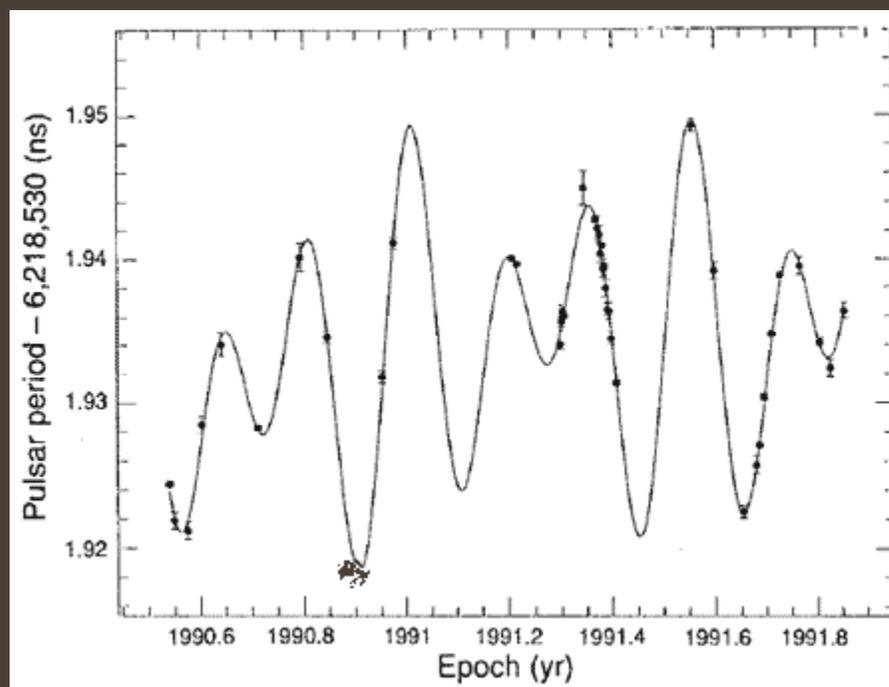
$$M_{\text{planet}} \sin(i) \approx 0.90 \left( \frac{\tau_{\text{pl}}}{1 \text{ ms}} \right) \left( \frac{a}{1 \text{ AU}} \right)^{-1} M_{\oplus}$$

Для нормальных  $\tau_{\text{pl}}=1 \text{ ms}$ ,  
для миллисекундных –  $1 \mu\text{s}$ .

# Первые планеты вокруг пульсара

Период пульсара 0.006 сек.

Companion (in order from star)	Mass	Semimajor axis (AU)	Orbital period (days)	Eccentricity	Inclination
<b>A (b / Draugr)</b>	$0.020 \pm 0.002 M_{\oplus}$	0.19	$25.262 \pm 0.003$	0.0	$\sim 50^{\circ}$
<b>B (c / Poltergeist)</b>	$4.3 \pm 0.2 M_{\oplus}$	0.36	$66.5419 \pm 0.0001$	$0.0186 \pm 0.0002$	$53^{\circ}$
<b>C (d / Phobetor)</b>	$3.9 \pm 0.2 M_{\oplus}$	0.46	$98.2114 \pm 0.0002$	$0.0252 \pm 0.0002$	$47^{\circ}$



Wolszczan & Frail (1992, 1994)

Прецизионные измерения времени прихода импульсов пульсара позволили выявить неоднородности, связанные с присутствием трех легких планет в этой системе.

Орбиты планет лежат примерно в одной плоскости.

Не исключено, что этот пульсар молодой, а не раскрученный!  
Это важно для выбора механизма формирования планет (0908.0736).

# PSR B1620-26



Пульсар (нейтронная звезда) в паре с белым карликом. Вокруг этой пары крутится планета с массой 2.5 массы Юпитера.

Предполагается, что планета со звездой были захвачены нейтронной звездой в двойной системе. Партнер нейтронной звезды был вышвырнут. Затем оставшаяся звезда превратилась в белого карлика, и сформировалась наблюдаемая сейчас система.

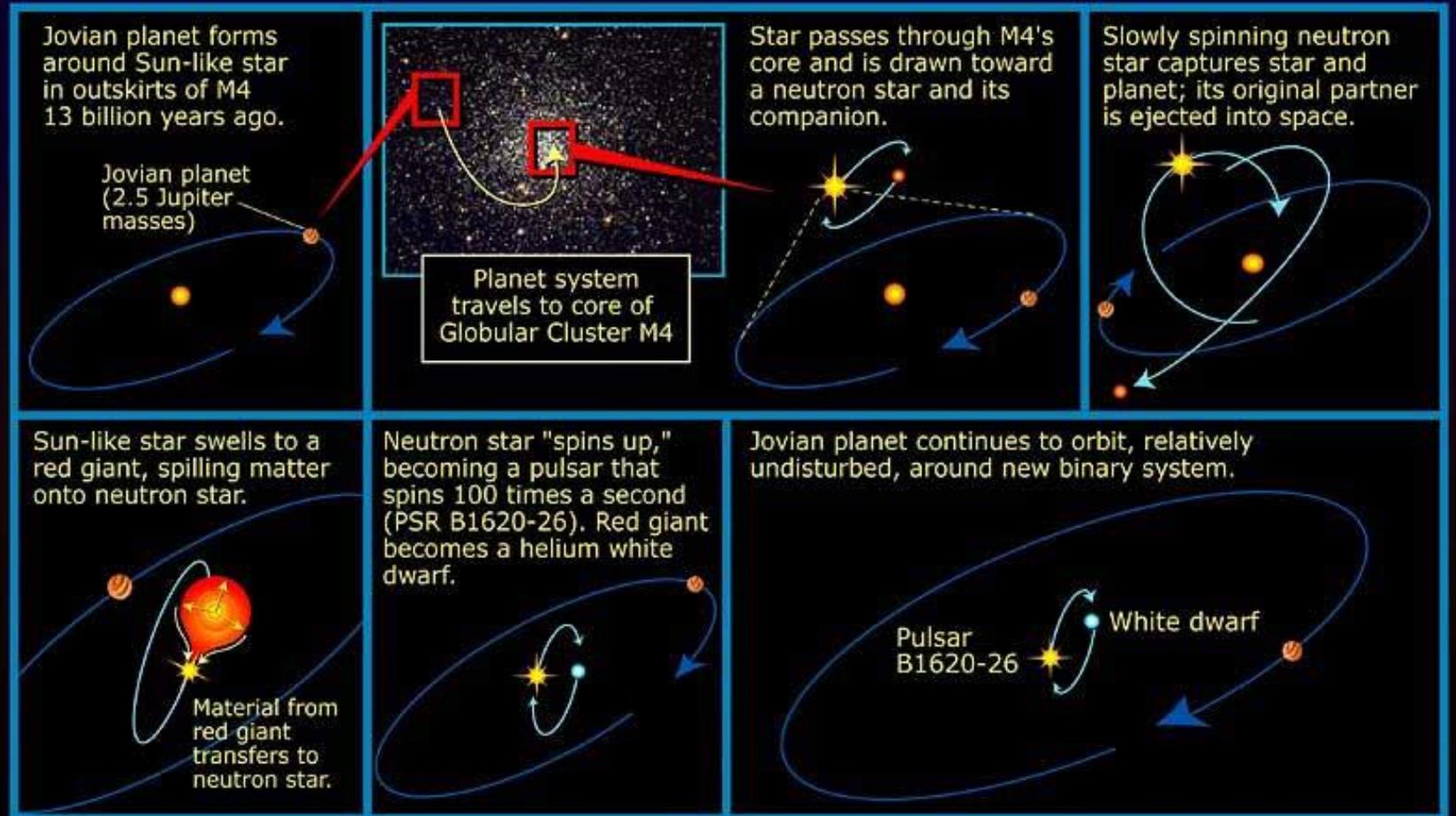
Шаровое скопление M<sub>4</sub>



# Пульсар, белый карлик и планета

Тройная система в шаровой скоплении M4:  
пульсар PSR B1620-26, белый карлик и планета.

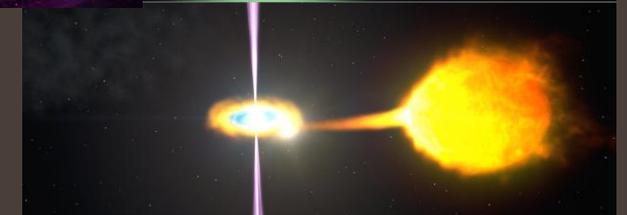
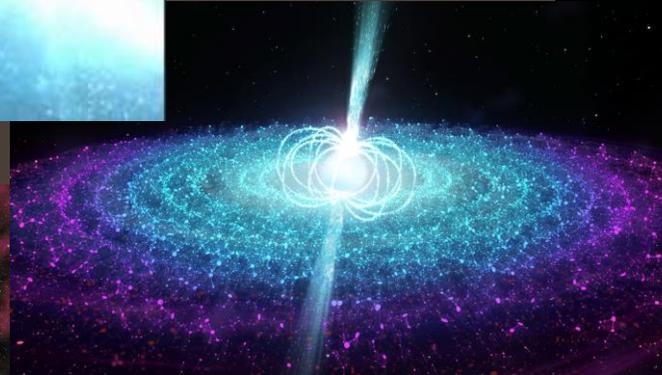
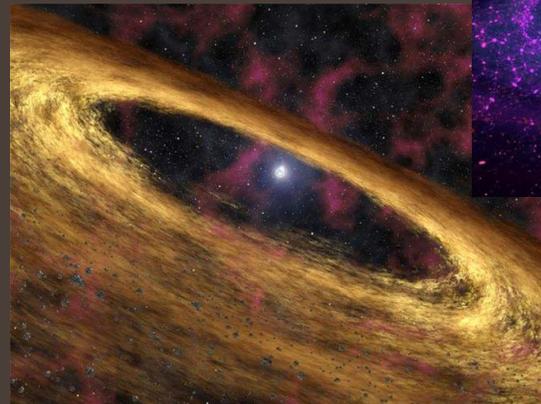
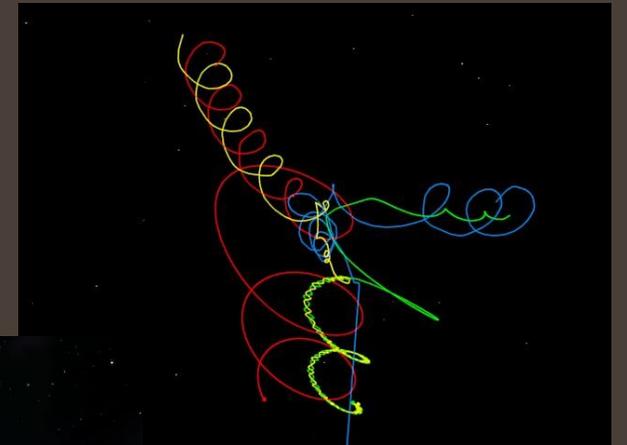
## Jovian planet in Globular Cluster M4: Calm bystander in stellar drama



Старый миллисекундный пульсар с периодом 0.011 мсек.

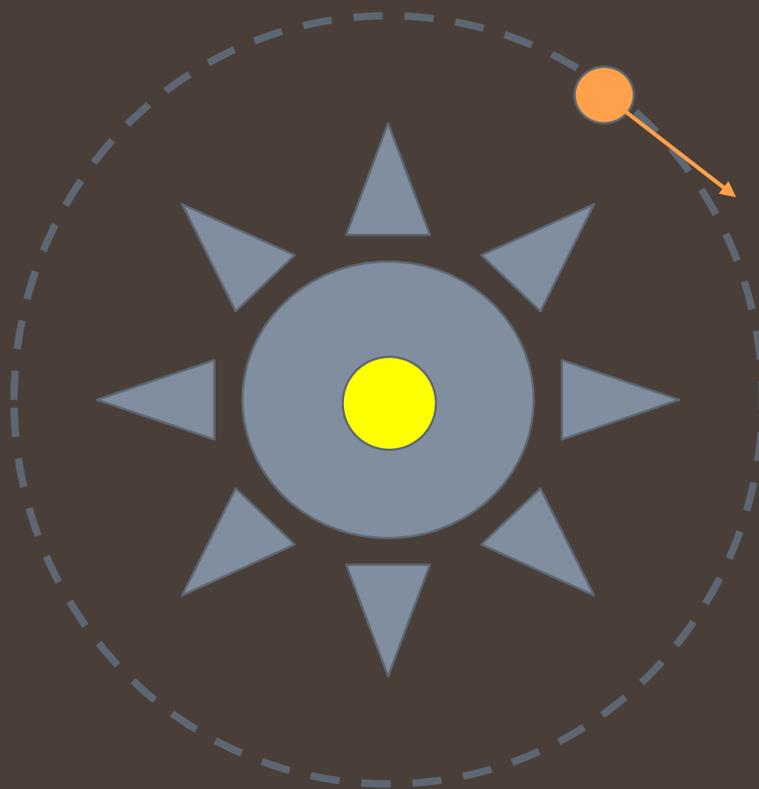
# Механизмы формирования

- Выжившие планеты (поколение 1)
- Возвратная аккреция (поколение 2)
- Образование после разрушения компаньона (поколение 3)
- Испарение или перетекание компаньона («черная вдова»)
- Захват или обмен при тесном взаимодействии

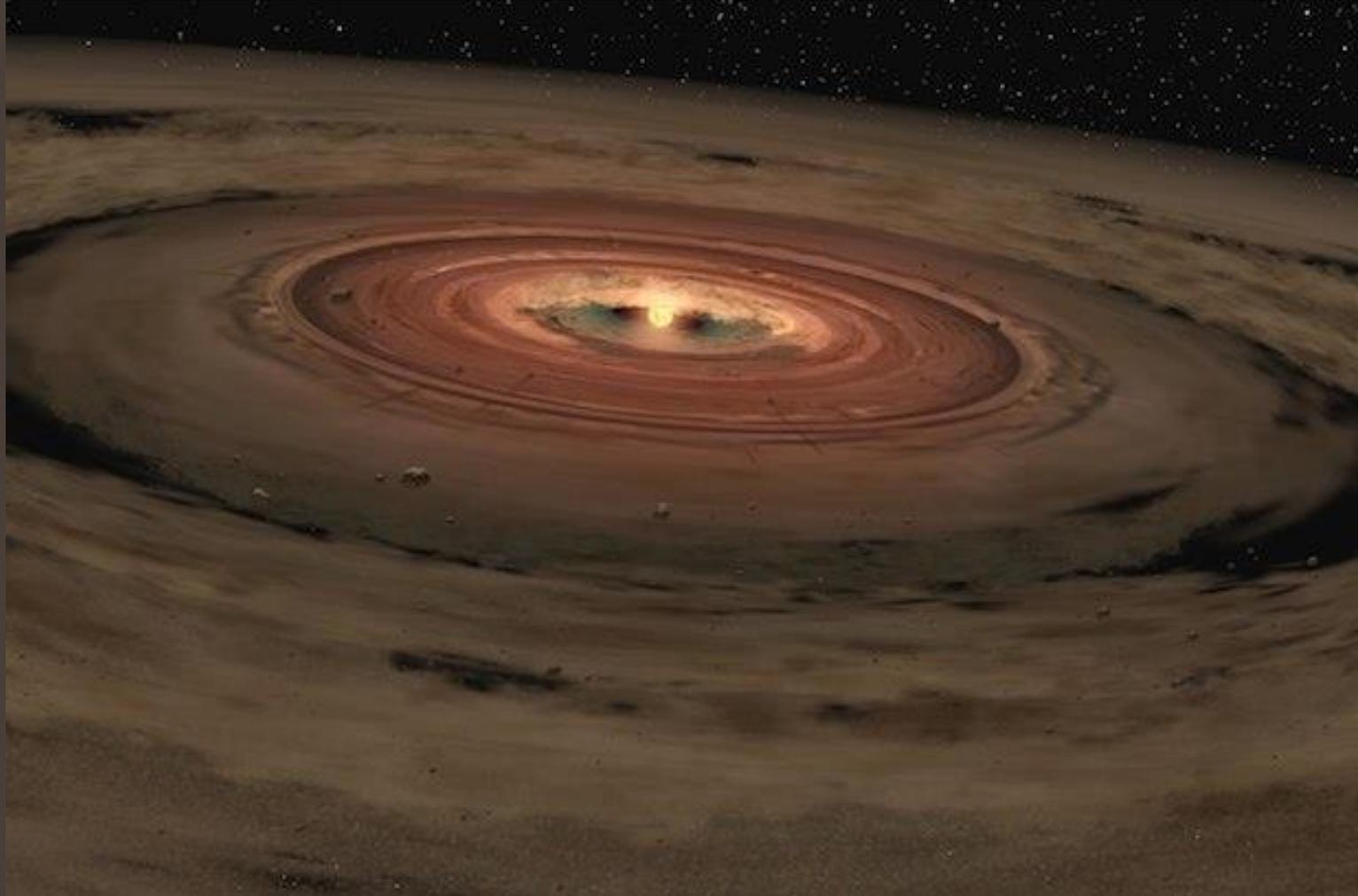


## Распад системы после взрыва сверхновой

У массивных звезд редко встречаются планеты (возможно, из-за большой УФ светимости, разрушающей диск).  
Даже если планеты сформировались, то все с  $a < 4$  а.е. будут поглощены гигантом.  
При взрыве сверхновой быстро сбрасывается большая масса, что чаще всего приводит к разрушению системы.  
Выжившие планеты должны иметь большие эксцентриситеты и полуоси.



Масса захваченного вещества 0.001-0.1 массы Солнца.  
Это типичная для протопланетного диска масса.  
Но момента импульса (углового момента) гораздо меньше.



Возвратная  
аккреция

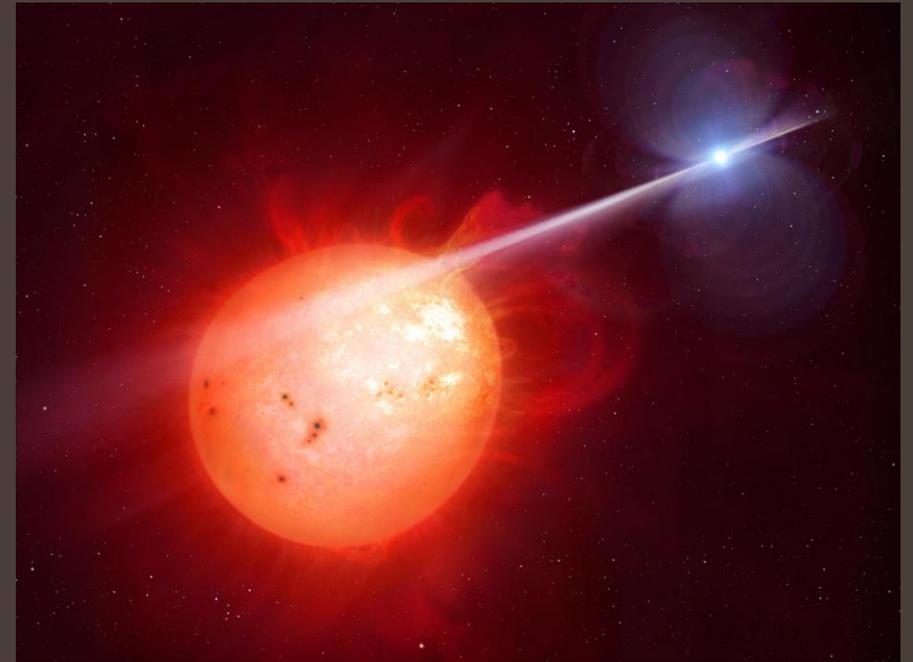
# Разрушение компаньона радиопульсара

Радиопульсар постепенно испаряет своего соседа. Полностью конвективный (красный карлик) или вырожденный (белый карлик) компаньон заполняет полость Роша и разрушается, если его радиус растёт быстрее, чем полость Роша.

Образуется диск с большим удельным моментом импульса. В нём могут формироваться планеты.

Испарение соседа также возможно. Но в этом случае диск получается не слишком массивным.

Пульсары с маломассивными компаньонами формируются редко. Во-первых, маловероятно большое отношение масс. Во-вторых, такой системе труднее выжить после взрыва сверхновой.

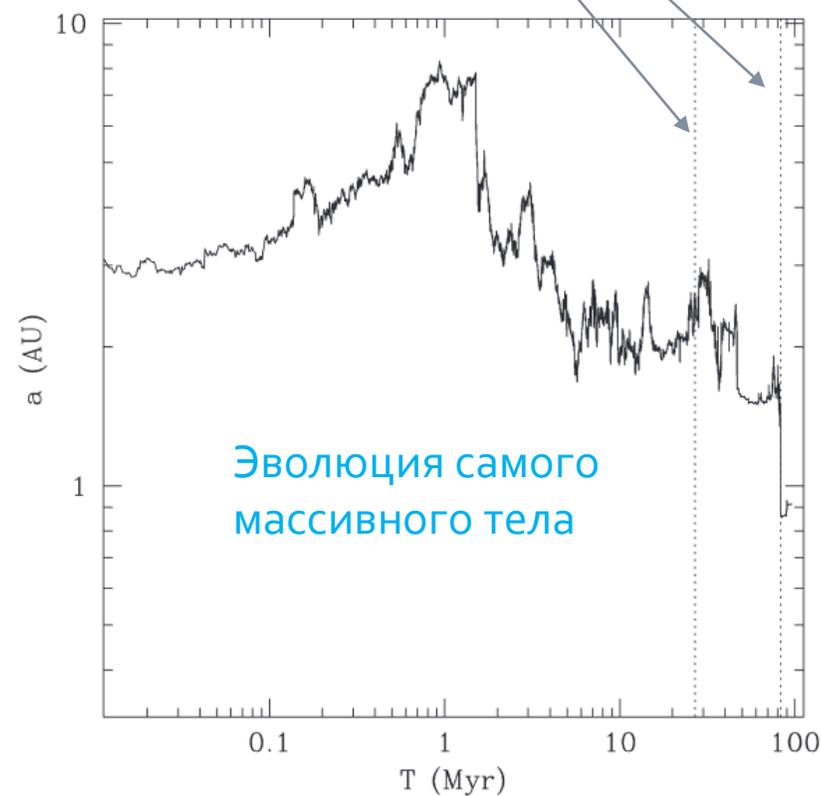
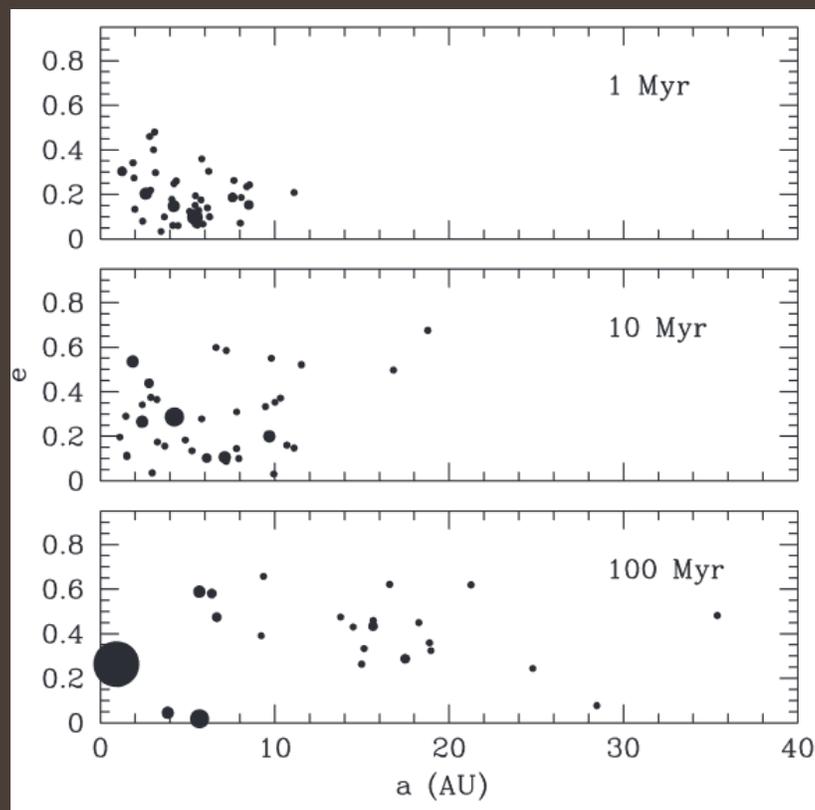


Также возможно интенсивное взаимодействие с компаньоном из-за кика при рождении НЗ.

Диск с большим угловым моментом вокруг молодой НЗ.  
Образование – разрушение компаньона приливом  
при близком прохождении НЗ после сильного кика.

Слишком поздно,  
чтобы стать Юпитером:  
в диске уже нет газа  
5 масс Земли 10 масс

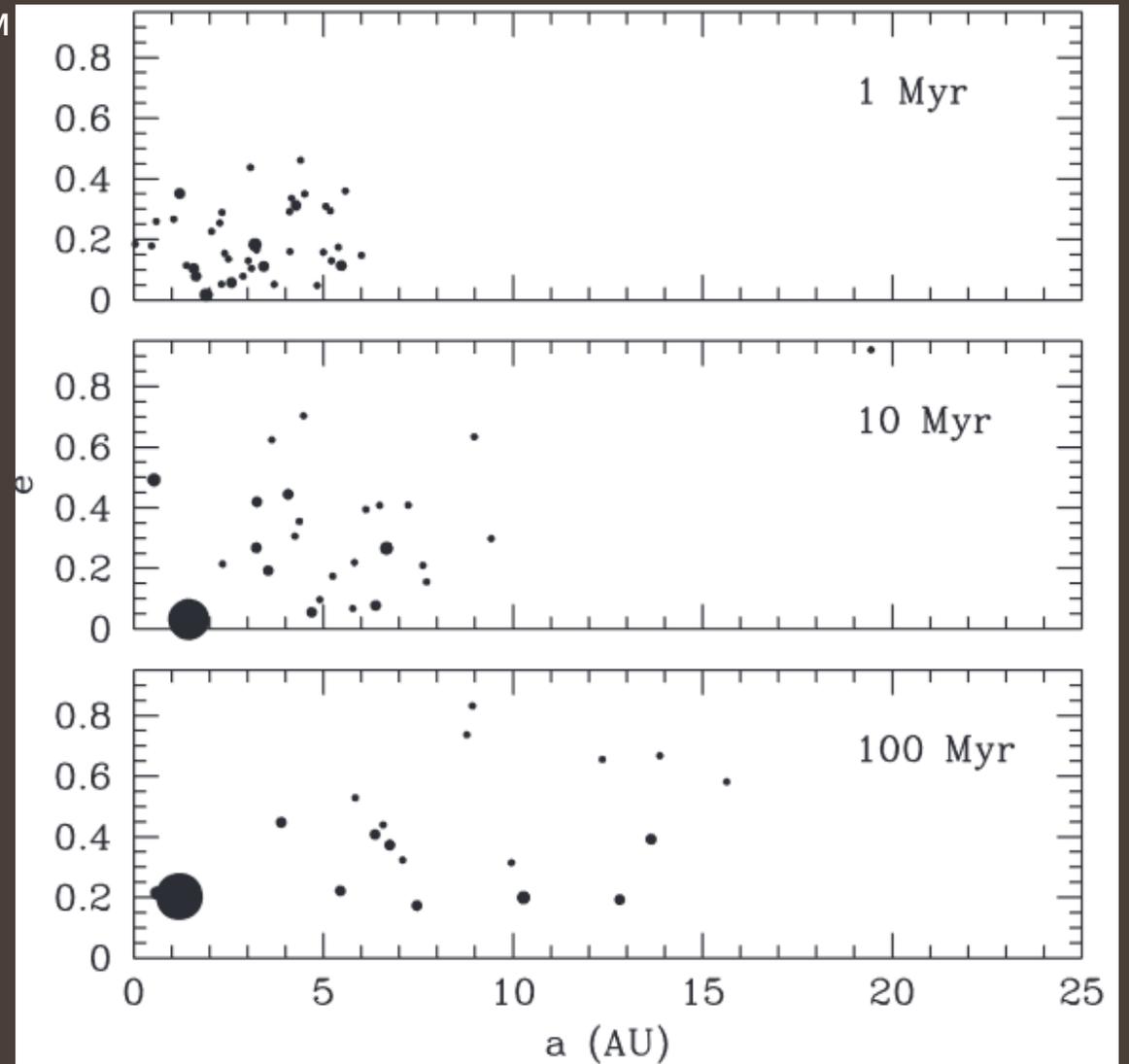
# Модель формирования планет вокруг PSR 1257+12



# Модель формирования планет вокруг PSR 1257+12

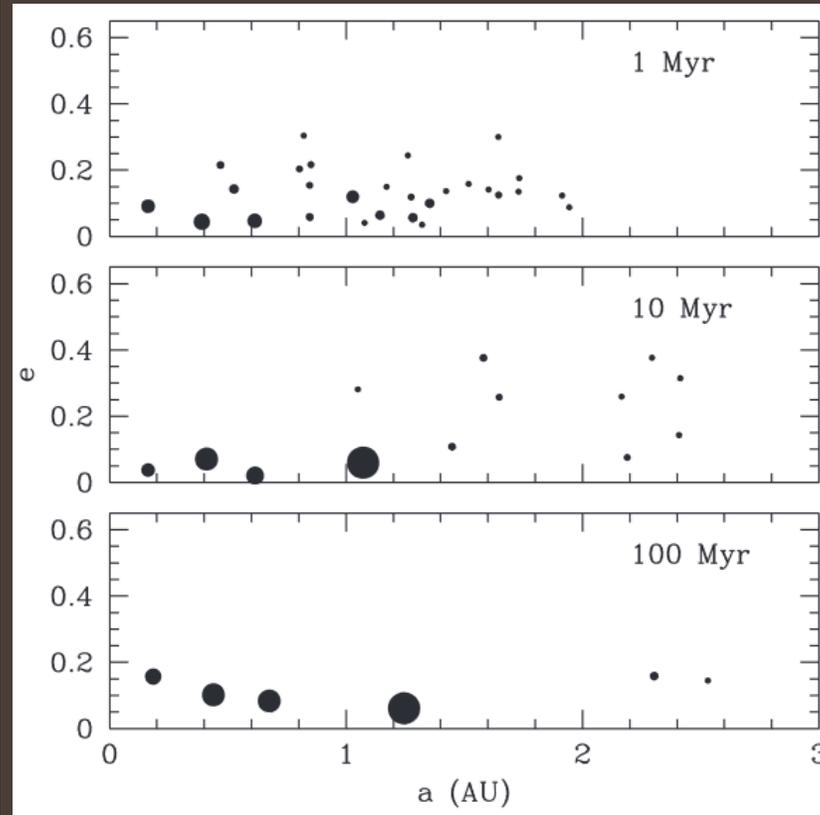
Диск с на порядок меньшим  
орбитальным моментом.

Массивный объект имеет  
массу порядка 12 земных.

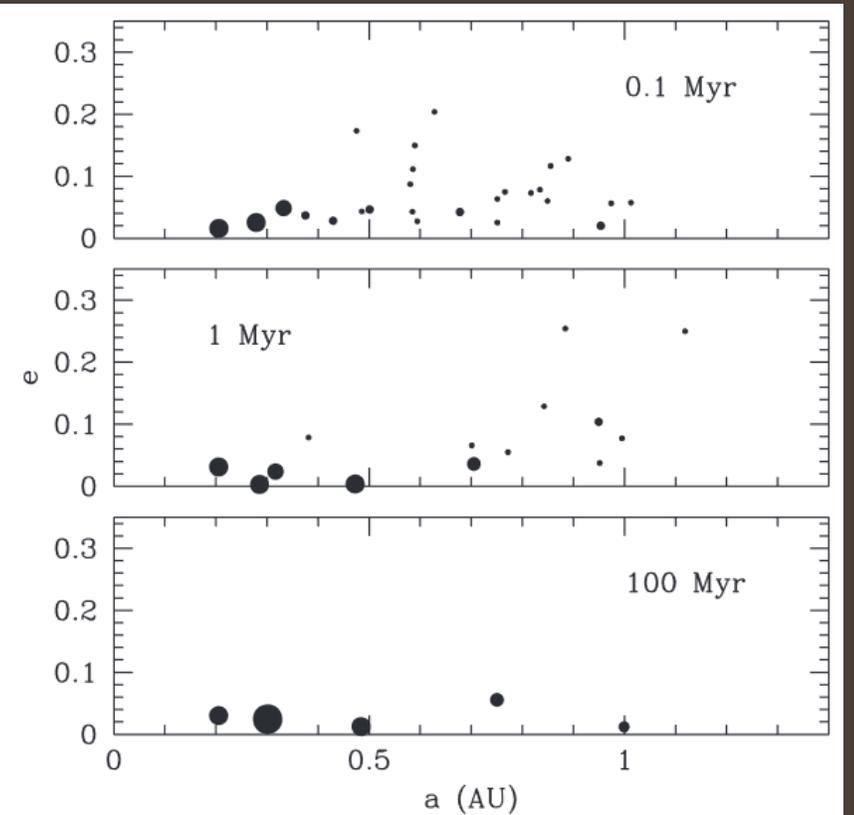


# Модель формирования планет вокруг PSR 1257+12

Диск с еще на два порядка меньшим орбитальным моментом.  
Образование – возвратная аккреция (fall-back).



Полностью вязкий диск  
(fully viscous disk)

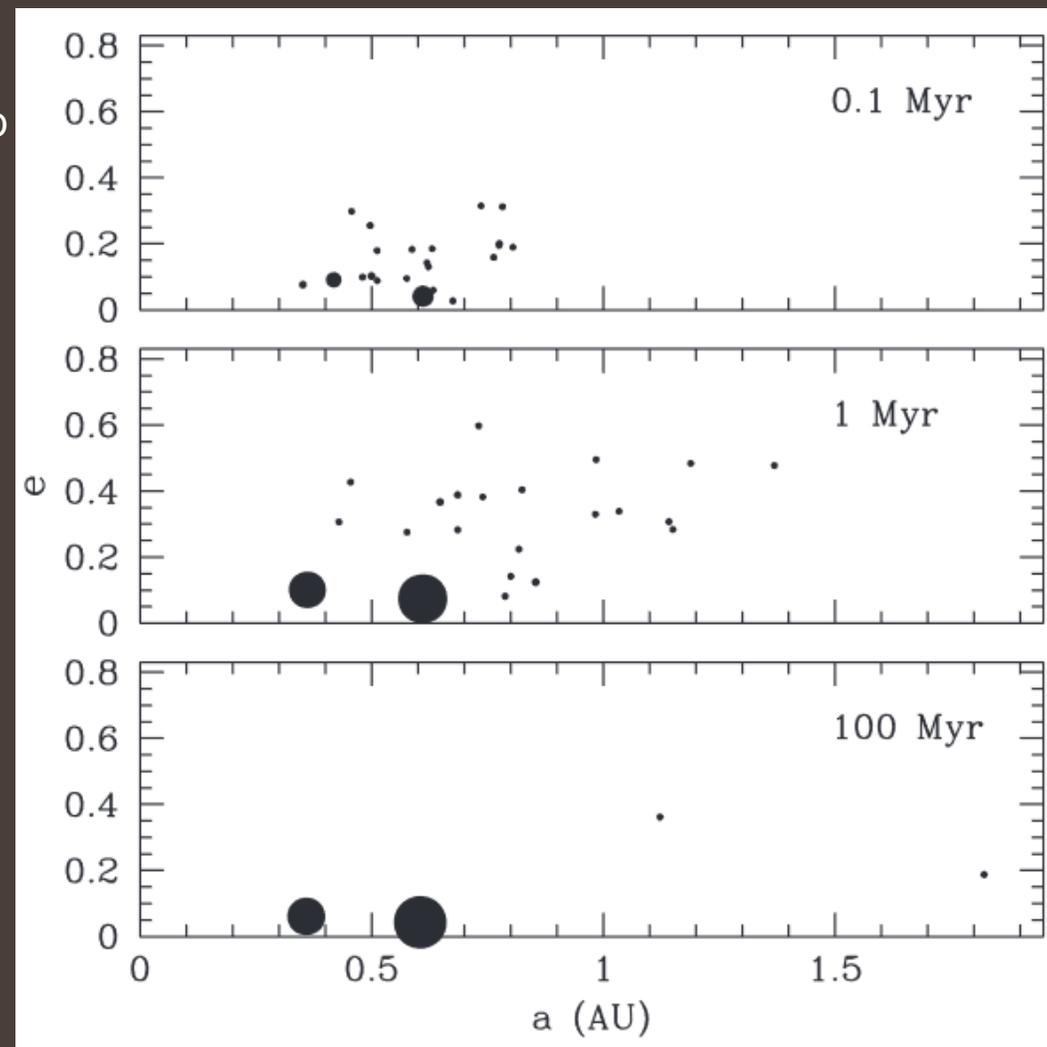


Слоевая аккреция  
(layered accretion)

# Модель формирования планет вокруг PSR 1257+12

Диск с низким орбитальным моментом и вещество в узком кольце  $0.4 < r < 0.6$  а.е.

Такая конфигурация дает систему планет, более похожую на наблюдаемую, хотя и тут есть заметные отличия.



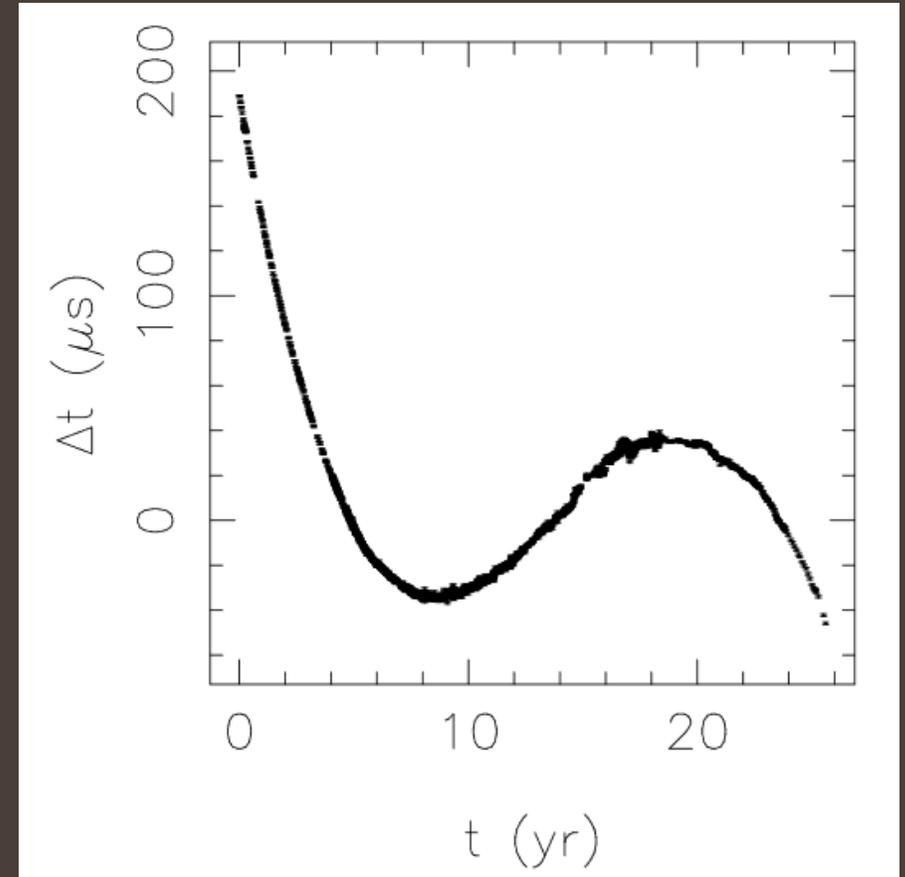
# Пульсар и пояс астероидов?

PSR J1937+21. Миллисекундный пульсар  $P=0.0016$  сек.  
Полная масса пояса  $<0.05$  массы Земли

Вблизи пульсара астероиды будут активно испаряться под действием излучения.

Кроме того, может быть важен эффект Ярковского.

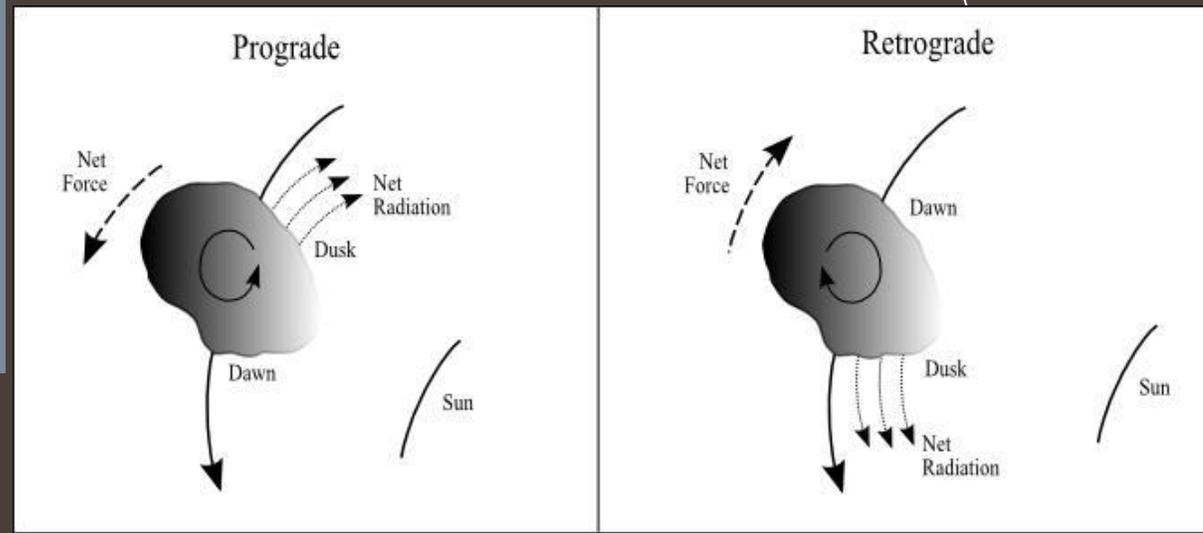
Пояс астероидов может образоваться после разрушения компаньона (белого карлика, например), испарявшегося под действием излучения радиопульсара.



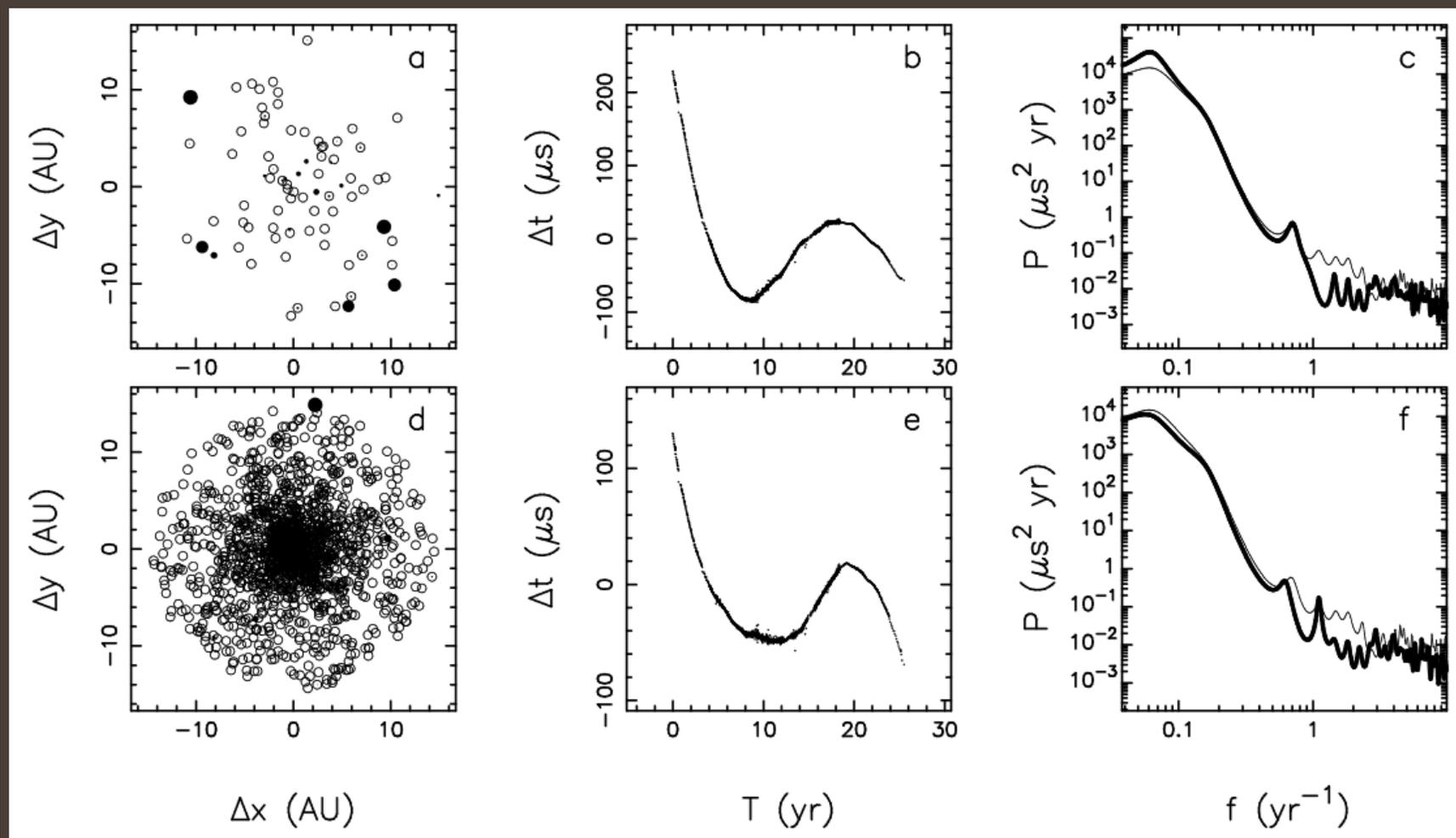
# Эффект Ярковского

При таком вращении горячая часть будет разгонять объект. Т.е., орбита будет раскручивающейся спиралью.

При обратном вращении тело будет тормозиться и приближаться к звезде.



# Моделирование вариаций за счет пояса астероидов



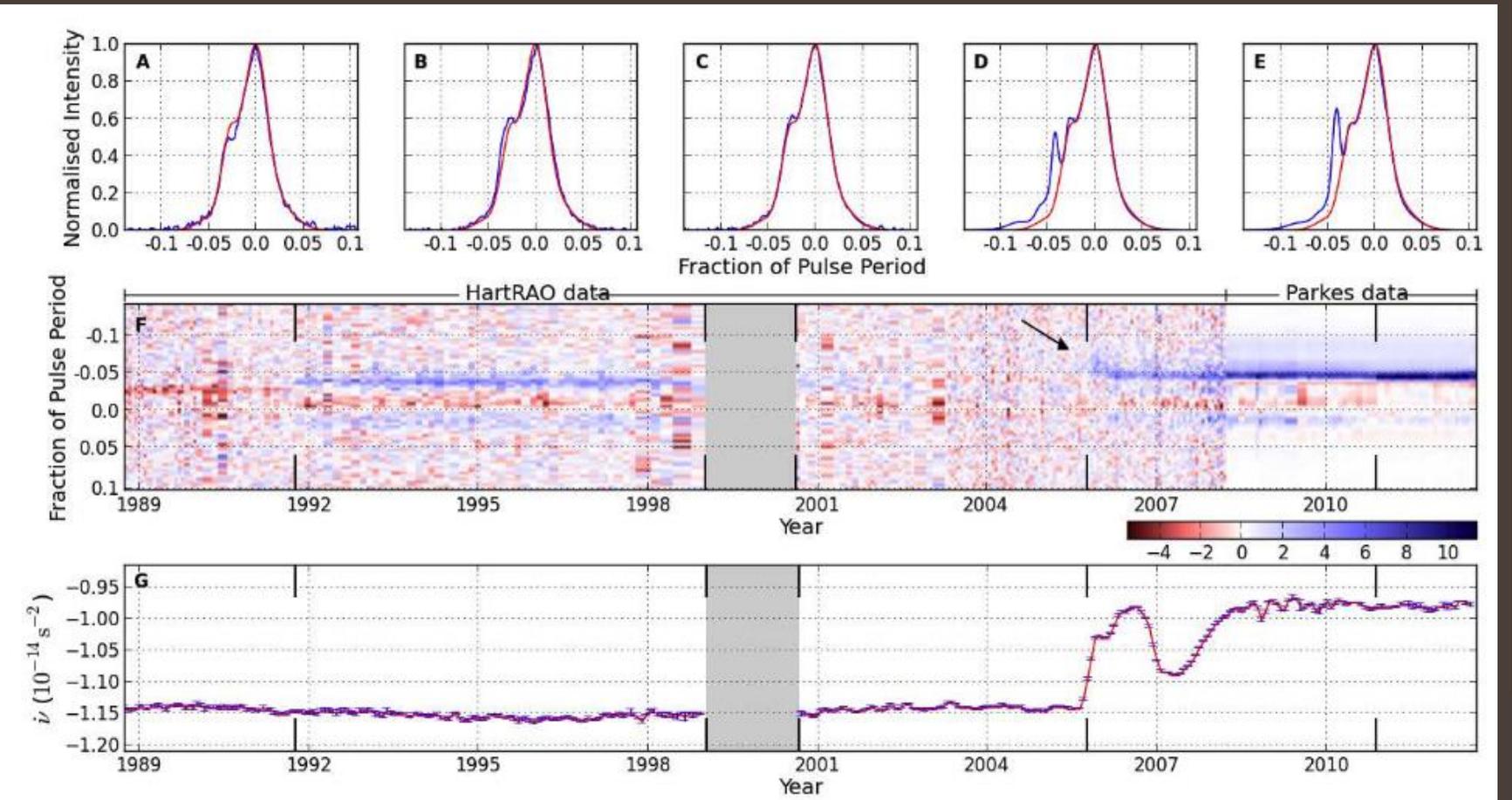
Лучшие модели пояса астероидов с точки зрения описания данных.  
Черные кружки – более массивные объекты.

Пульсар и пояс астероидов-2?  
Выпадение астероидов на пульсар?

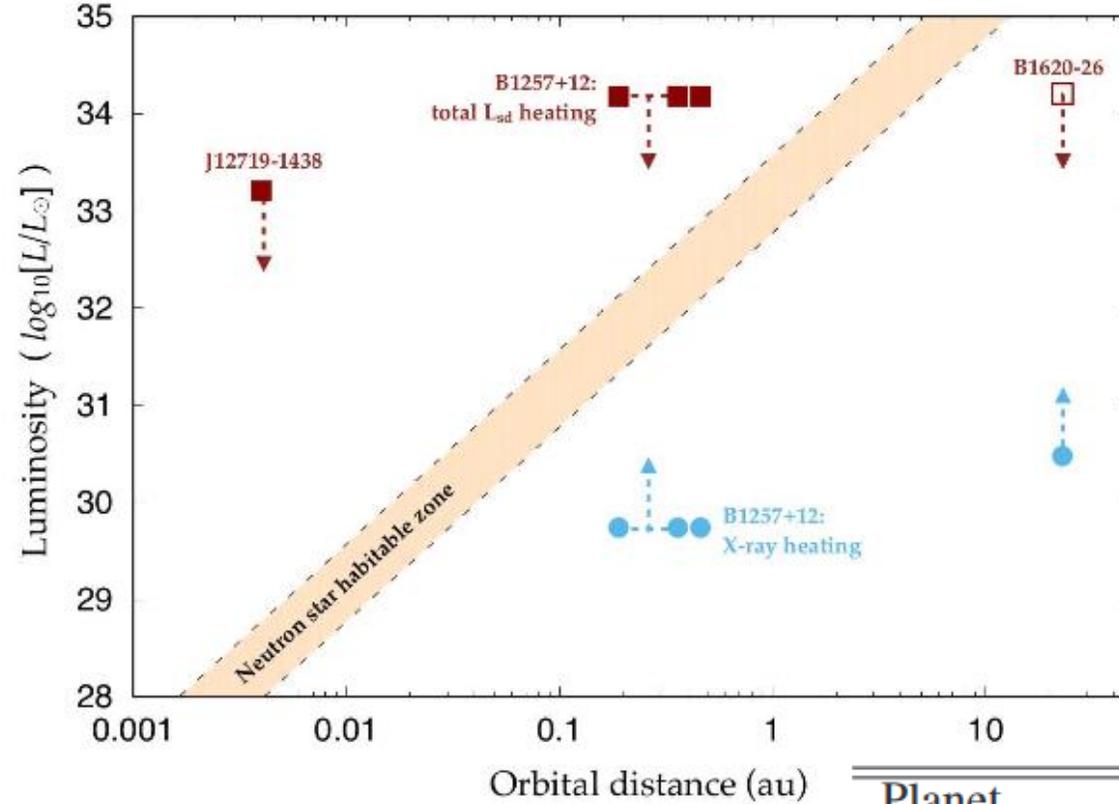
PSR J0738-4042

Нормальный пульсар. Период 0.375 сек.

На протяжении длительного времени наблюдались эпизоды, когда резко менялся темп замедления пульсара и свойства его излучения.



# Обитаемые планеты у пульсаров?



Магнитное поле планеты может предотвратить потерю атмосферы.

Planet	Mass ( $M_{\oplus}$ )	$T_{\min}$ (K)	$T_{\max}$ (K)
PSR B1257+12 b	0.02	70	899
PSR B1257+12 c	4.3	51	652
PSR B1257+12 d	3.9	45	577
PSR B1620-26 b	795	10	83
PSR J1719-1438 b	318	NA	3540

## Итого:

- У радиопульсаров наблюдаются компаньоны планетных масс.
- По всей видимости, основная масса объектов – это единичные остатки более массивных компаньонов, разрушенных (в основном – испаренных) пульсаром.
- Особняком стоит несколько систем, где планеты имеют иное происхождение
- Как планеты образуются вокруг пульсаров – не ясно.
- Скорее всего это связано с разрушением относительно массивного компаньона и формированием диска.
- Кроме того, пульсары могут захватывать планеты при тесном взаимодействии (например, в шаровых скоплениях).
- У пары пульсаров возможно наблюдаются «пояса астероидов».



Важные  
статьи  
на сайте  
arXiv.org

0908.0736 **The Pulsar Planets: A Test Case of Terrestrial Planet Assembly**

1609.06409 **Why are pulsar planets rare?**

1705.07688 **Neutron Star Planets: Atmospheric processes and habitability**

2203.01136 **A search for planetary companions around 800 pulsars  
from the Jodrell Bank pulsar timing program**



Cornell University  
Library

arXiv.org