

Планеты вокруг радиопульсаров

Экзопланеты

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.

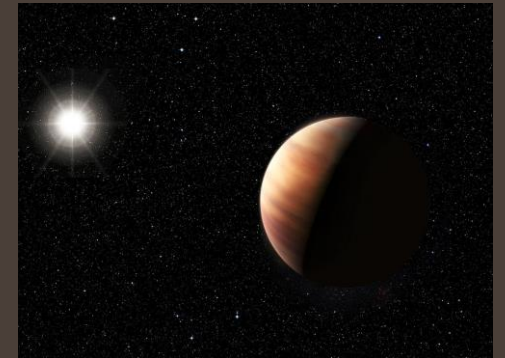
На данный момент >4000 планет (exoplanet.eu) плюс несколько тысяч кандидатов.



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+12c 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.



Такие разные экзопланеты

exoplanets.org

Exoplanets
Data Explorer

Methodology
and FAQ

Exoplanets
Links

California
Planet Survey

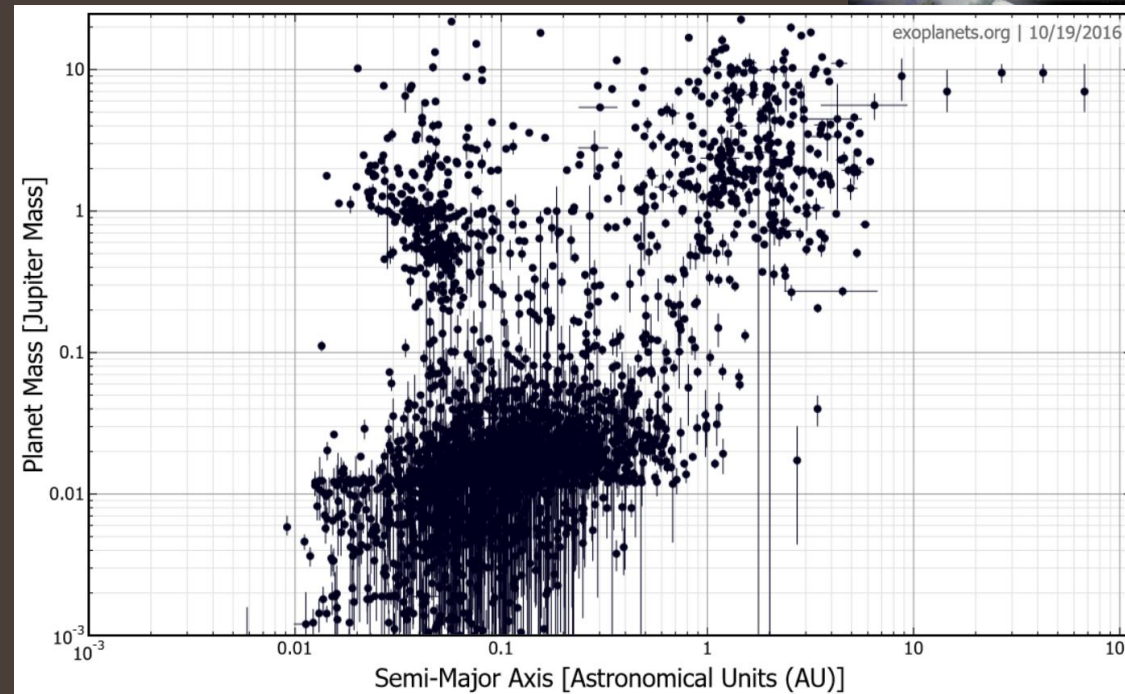
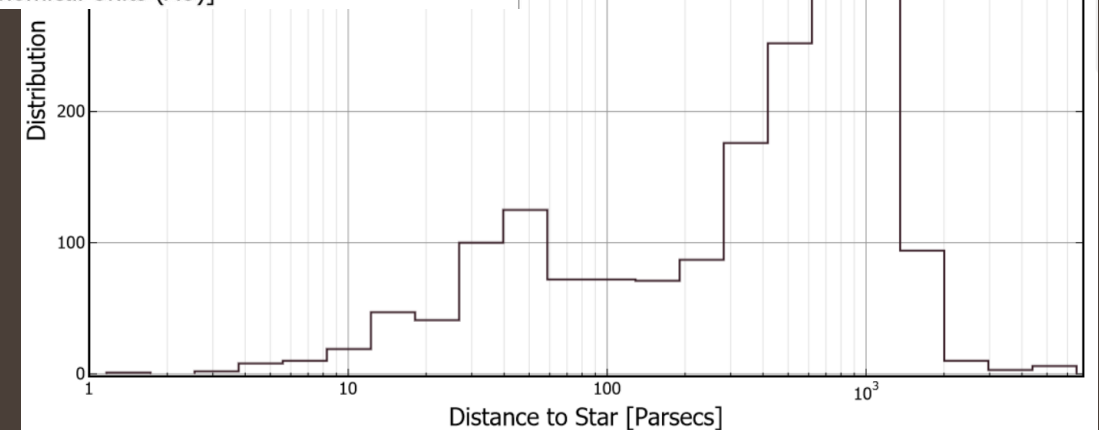


Table	2926	EOD Planets Planets with good orbits listed in the Exoplanet Orbit Database
Plots	25	Other Planets Including microlensing and imaged planets
Search	2951	Total Confirmed Planets
	2503	Unconfirmed Kepler Candidates
	5454	Total Planets Confirmed planets + Kepler Candidates



Новые наблюдения

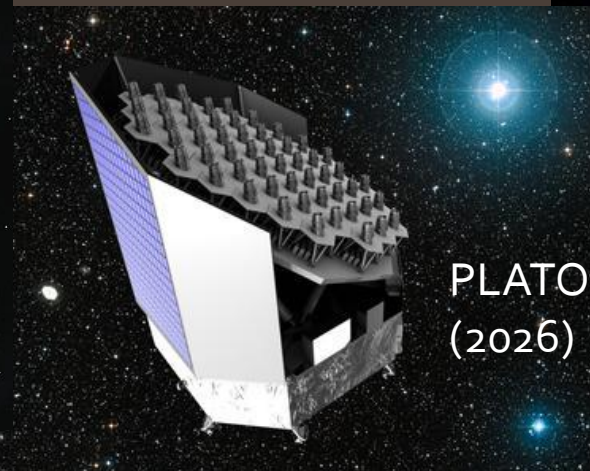
TESS
(2018)



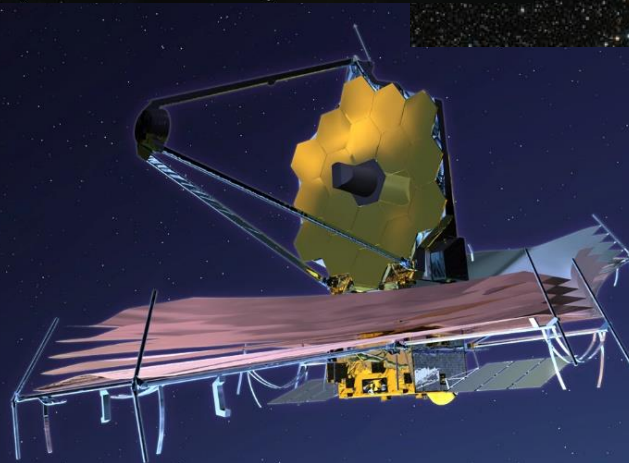
CHEOPS
(2019)



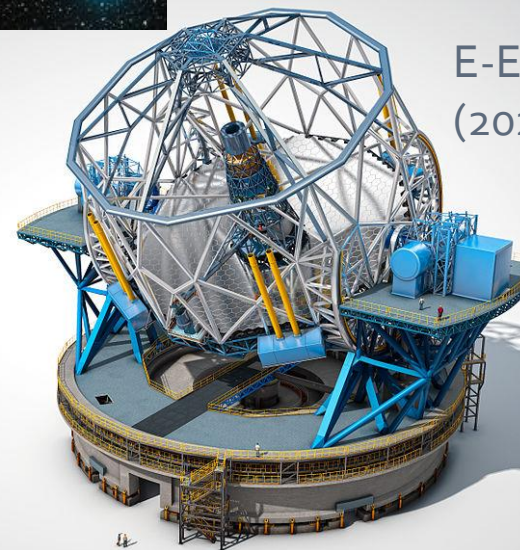
PLATO
(2026)



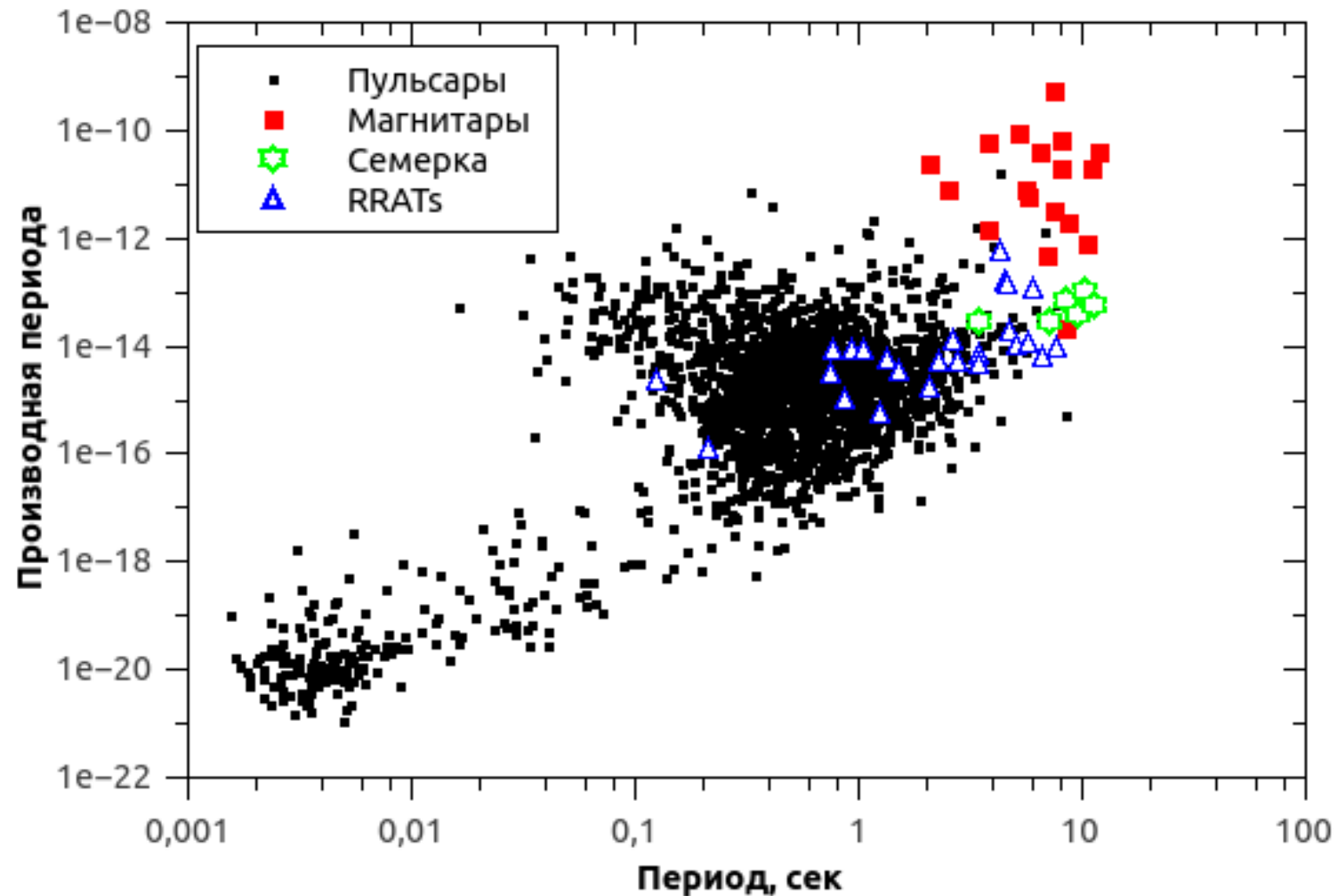
JWST(2022)



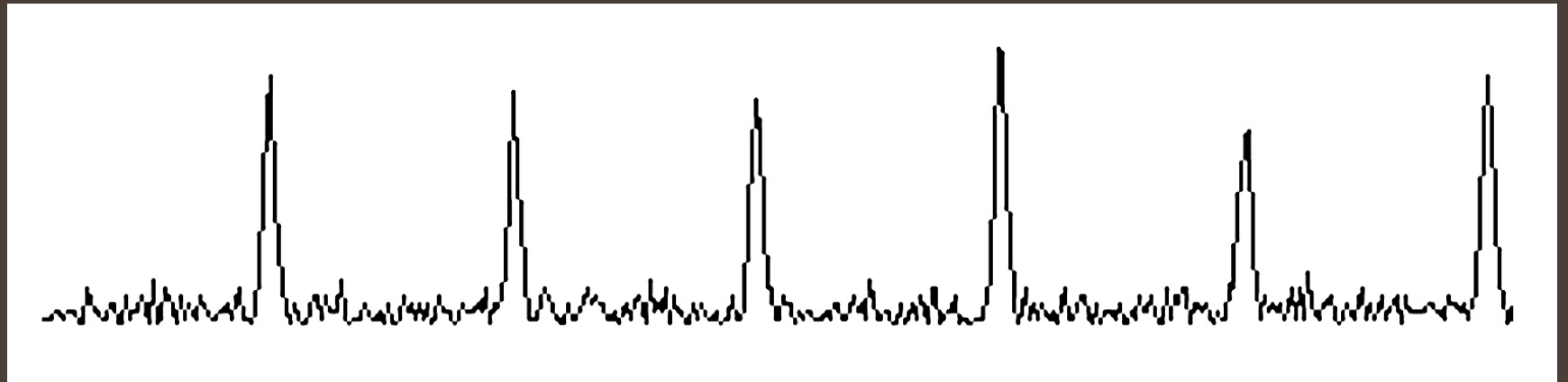
E-ELT
(2025)



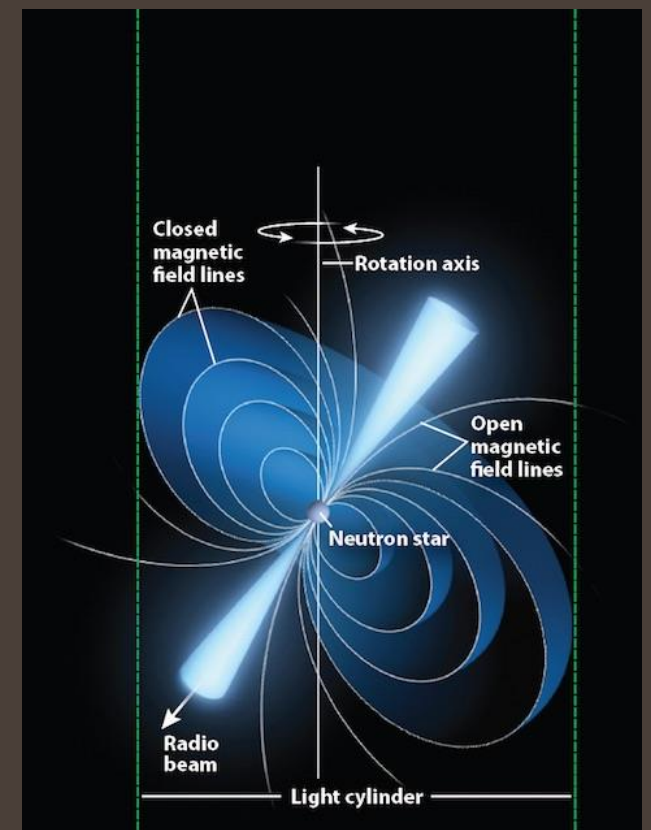
Нейтронные звезды вообще и радиопульсары в частности



Радиопульсары



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



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
PSR B0329+54 b	PSR B0329+54	1	Pulsar Timing	2017	Multiple Facilities	Starovoit & Rodin 2017	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 Observatory	Konacki and Wolszczan 2003	25.262±0.003	0.19	0.020±0.002	0
PSR B1257+12 c	PSR B1257+12	1	Pulsar Timing	1992	Arecibo Observatory	Konacki and Wolszczan 2003	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 Observatory	Konacki and Wolszczan 2003	98.2114±0.0002	0.46	3.9±0.2	
PSR B1620-26 b	PSR B1620-26	1	Pulsar Timing	2003	Hubble Space Telescope	Sigurdsson et al. 2003		23	795±318	
PSR J1719-1438 b	PSR J1719-1438	1	Pulsar Timing	2011	Parkes Observatory	Bailes et al. 2011	0.090706293±0.00000000	0.0044	>382.80	<0.06
PSR J2322-2650 b	PSR J2322-2650	1	Pulsar Timing	2017	Parkes Observatory	Spiewak et al. 2018	0.322963997±0.00000000	0.0102	252.6±0.1	<0.0017

Exoplanet.eu

Planet	Mass (M_{Jup})	Radius (R_{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

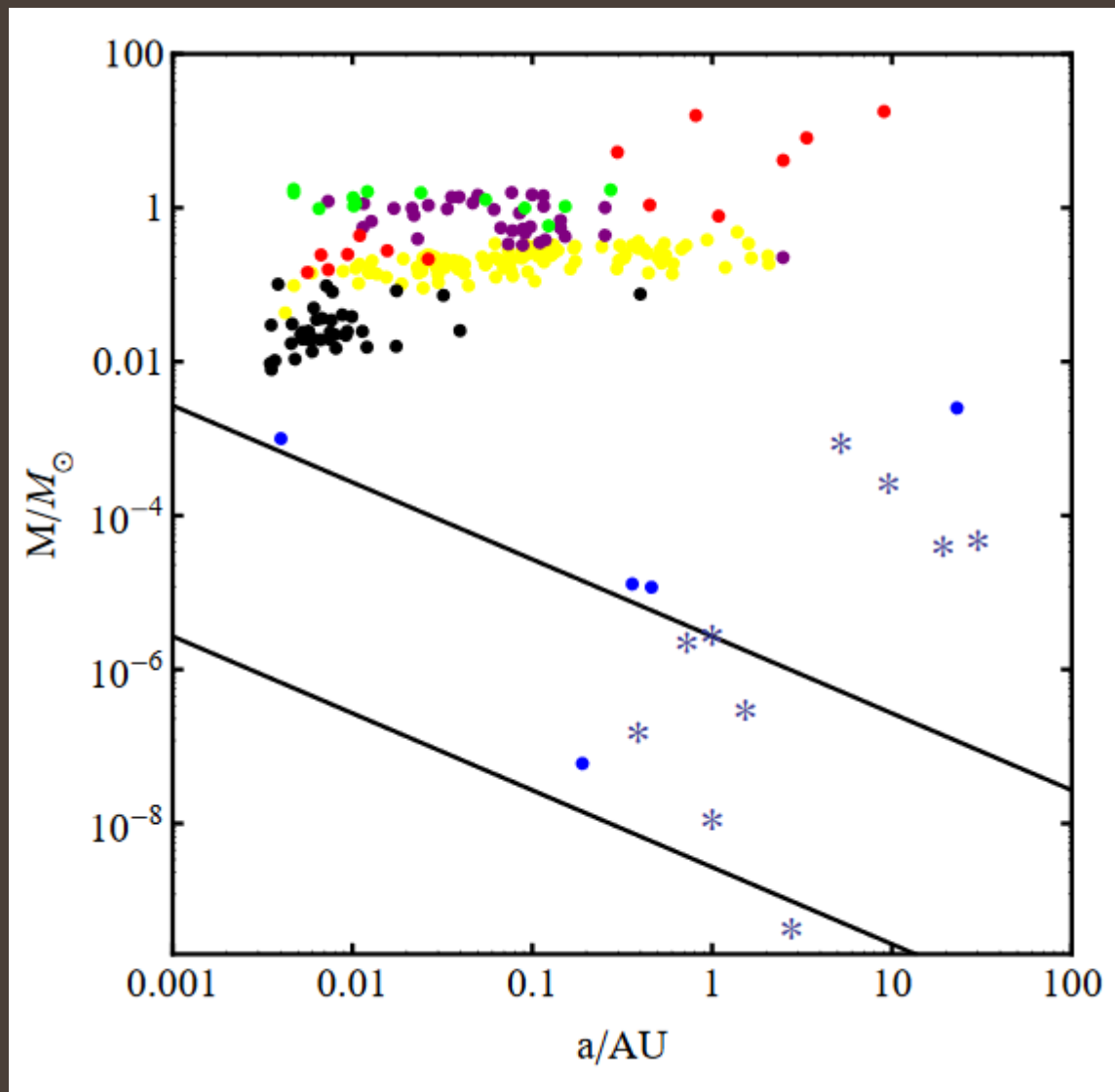
Название	Масса, M_J	Период, дни	полуось, а.е.	Год
PSR 1257 +12 b	7e-05	25.262	0.19	1992
PSR 1257 +12 c	0.013	66.5419	0.36	1992
PSR 1257 +12 d	0.012	98.2114	0.46	1992
PSR 1719-14 b	1.0	0.090706293	0.0044	2011
PSR B0329+54 b	0.0062	10139.34	10.26	2017
PSR B0943+10 b	2.8	730.0	1.8	2014
PSR B0943+10 c	2.6	1460.0	2.9	2014
PSR B1620-26 (AB) b	2.5	36525.0	23.0	2003
PSR B1957+20 b	22.0	0.38	—	1988
PSR 0636 b	8.0	0.067	—	2016
PSR J1807-2459 A b	9.4	0.07	—	2000
PSR J2051-0827 b	28.3	0.099110266	—	1996
PSR J2241-5236 b	12.0	0.1456722395	—	2011
PSR J2322-2650 b	~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
PSR 1257+12 b	mPSR	7e-05	1992
PSR 1257+12 c	mPSR	0.013	1992
PSR 1257+12 d	mPSR	0.012	1992
PSR 1719-14 b	mPSR, destroyed WD?, evaporated?	1.0	2011 arXiv: 1108.5201
PSR B0329+54 b	Pushchino	0.0062	2017 arXiv:1710.01153
PSR B0943+10 b	Doubtful, Pushchino	2.8	2014
PSR B0943+10 c		2.6	2014
PSR B1620-26 (AB) b	Globular cluster, triple system with a WD	2.5	2003
PSR B1957+20 b	mPSR, evaporation	22.0	1988
PSR 0636 b	mPSR, black widow	8.0	2016 arXiv: 1602.00655
PSR J1807-2459 A b	mPSR, GC	9.4	2000 astro-ph/0010243
PSR J2051-0827 b	mPSR, evaporating	28.3	1996
PSR J2241-5236 b	mPSR, stripped WD	12.0	2011 arXiv: 1102.0648
PSR J2322-2650	mPSR, black widow?	~1	2017 arXiv: 1712.04445

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



Красные – звезды,
зеленые – H3,
фиолетовые – белые карлики
(CO и NeOMg),
Желтые – гелиевые БК,
синие – планеты,
черные – маломассивные
тела, видимо,
являющиеся
остатками
разрушения
компаньонов,
«снежинки» – планеты
Солнечной
системы.

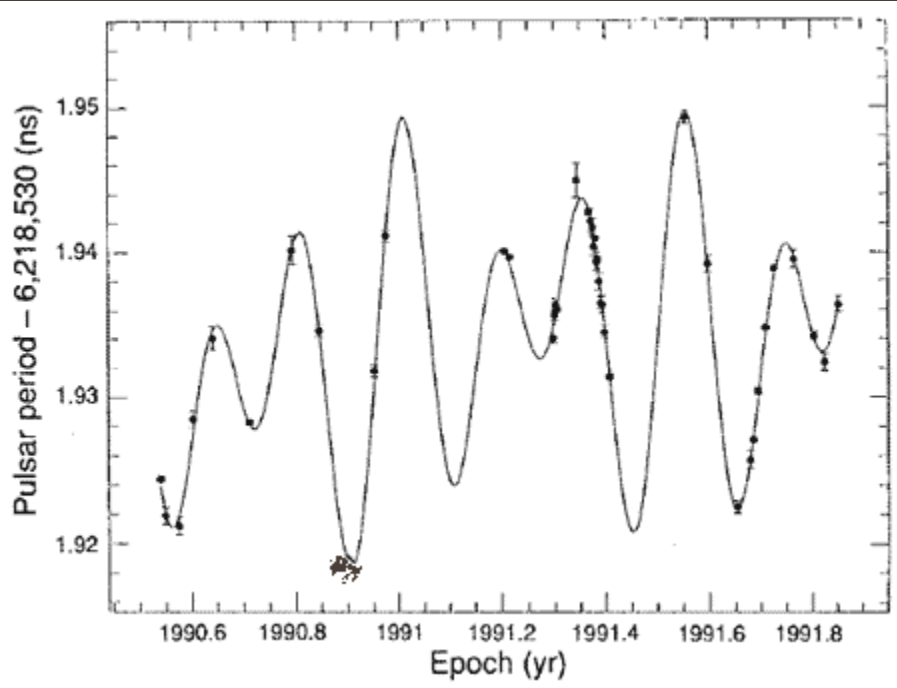
$$M_{\text{planet}} \sin(i) \approx 0.90 \left(\frac{\tau_{\text{pl}}}{1 \text{ ms}} \right) \left(\frac{a}{1 \text{ AU}} \right)^{-1} M_{\oplus}$$

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
A (b / Draugr)	$0.020 \pm 0.002 M_{\oplus}$	0.19	25.262 ± 0.003	0.0	$\sim 50^{\circ}$
B (c / Poltergeist)	$4.3 \pm 0.2 M_{\oplus}$	0.36	66.5419 ± 0.0001	0.0186 ± 0.0002	53°
C (d / Phobetor)	$3.9 \pm 0.2 M_{\oplus}$	0.46	98.2114 ± 0.0002	0.0252 ± 0.0002	47°



Wolszczan & Frail (1992)

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.

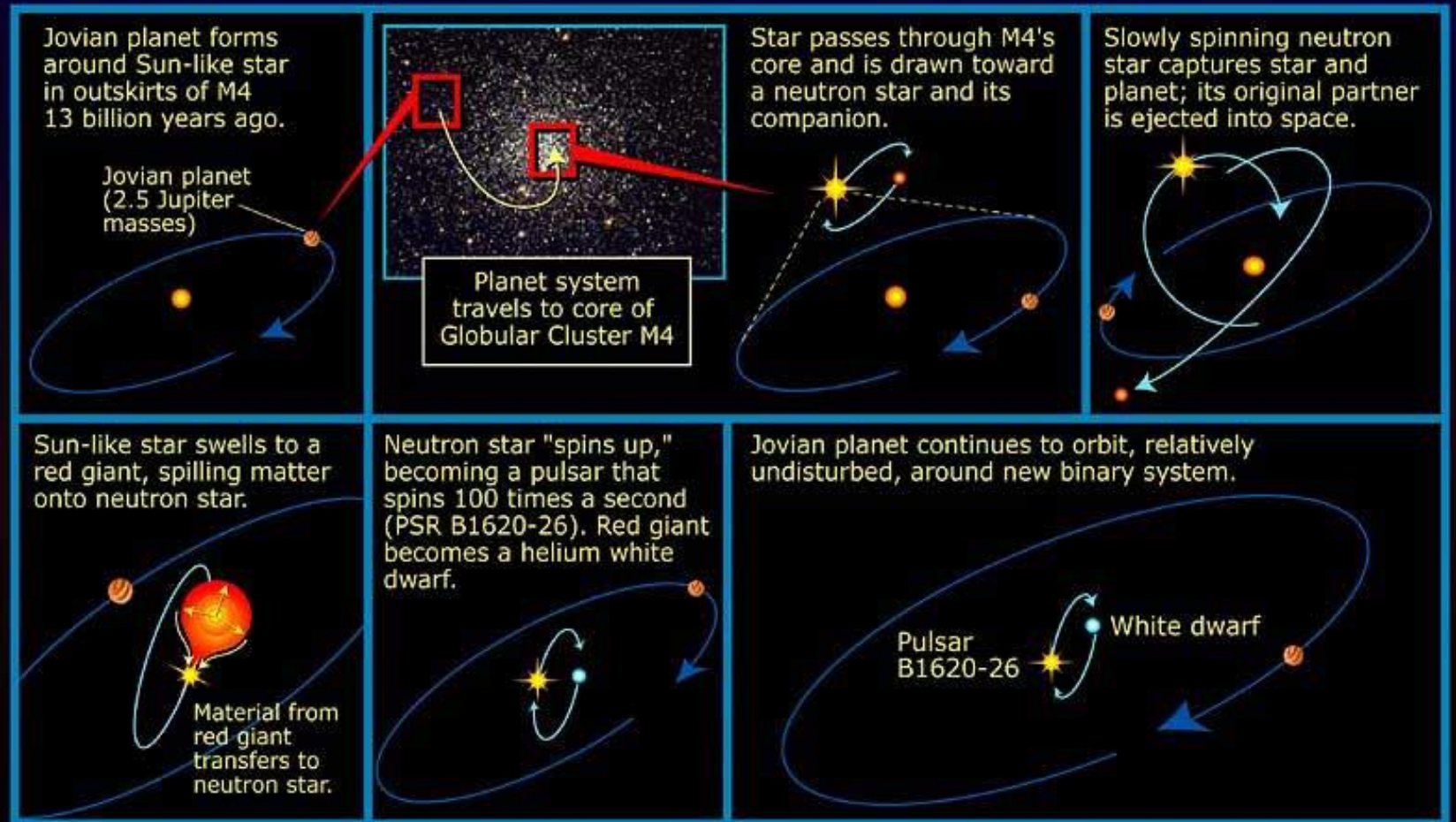
Шаровое скопление M₄



Пульсар, белый карлик и планета

Тройная система в шаровой скоплении М4:
пульсар PSR B1620-26, белый карлик и планета.

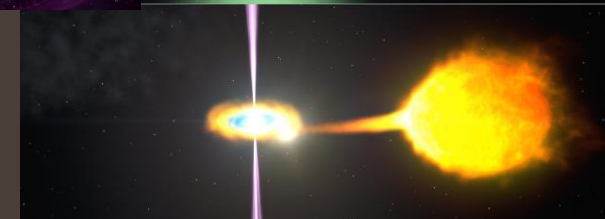
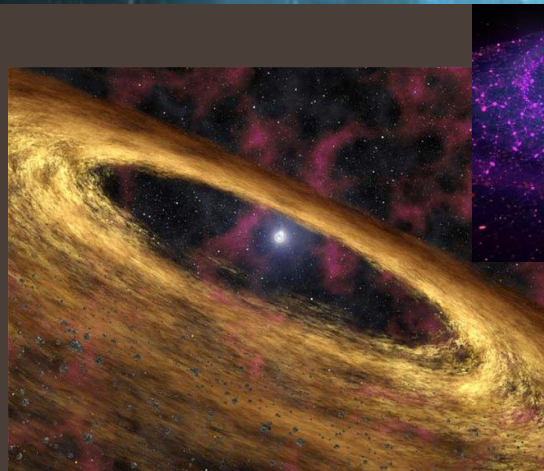
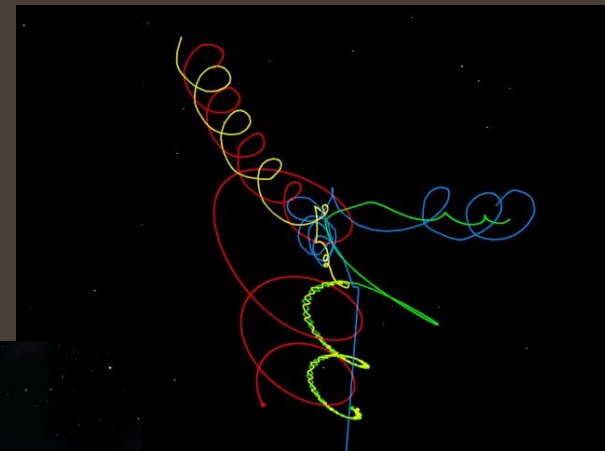
Jovian planet in Globular Cluster M4: Calm bystander in stellar drama



Старый миллисекундный пульсар с периодом 0.011 мсек.

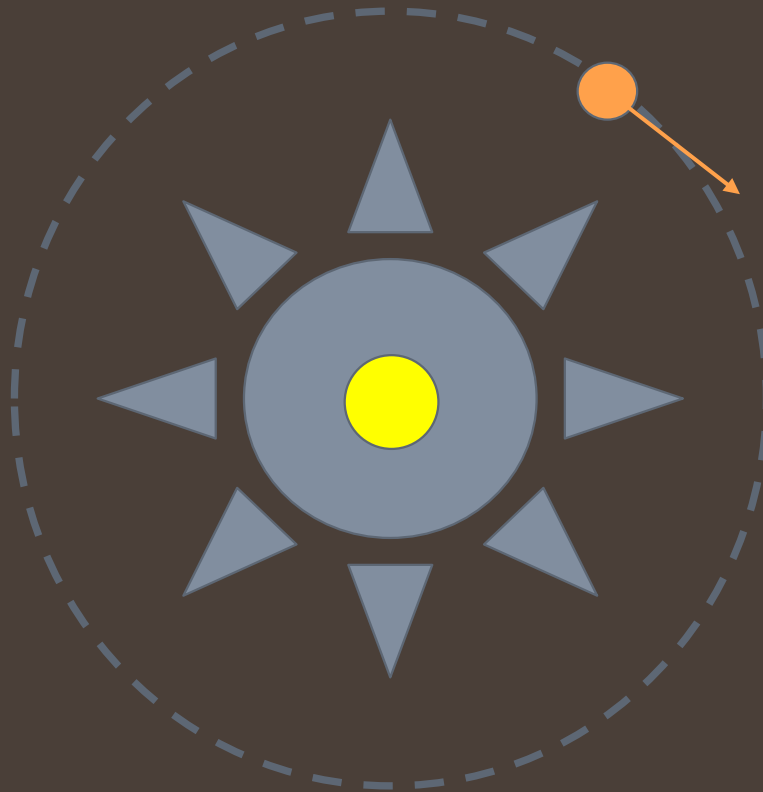
Механизмы формирования

- 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



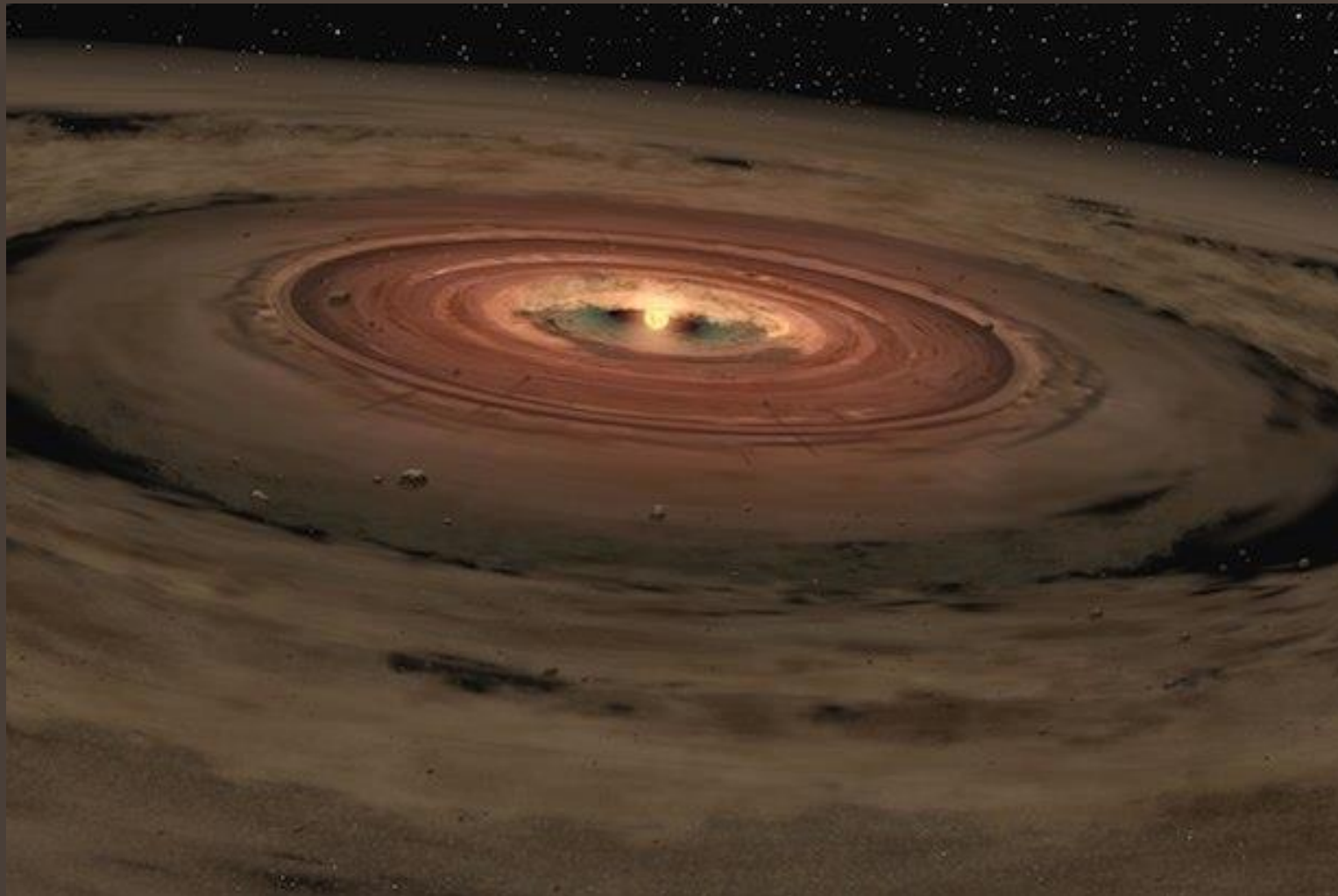
Распад системы после взрыва сверхновой

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.



Возвратная аккреция

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



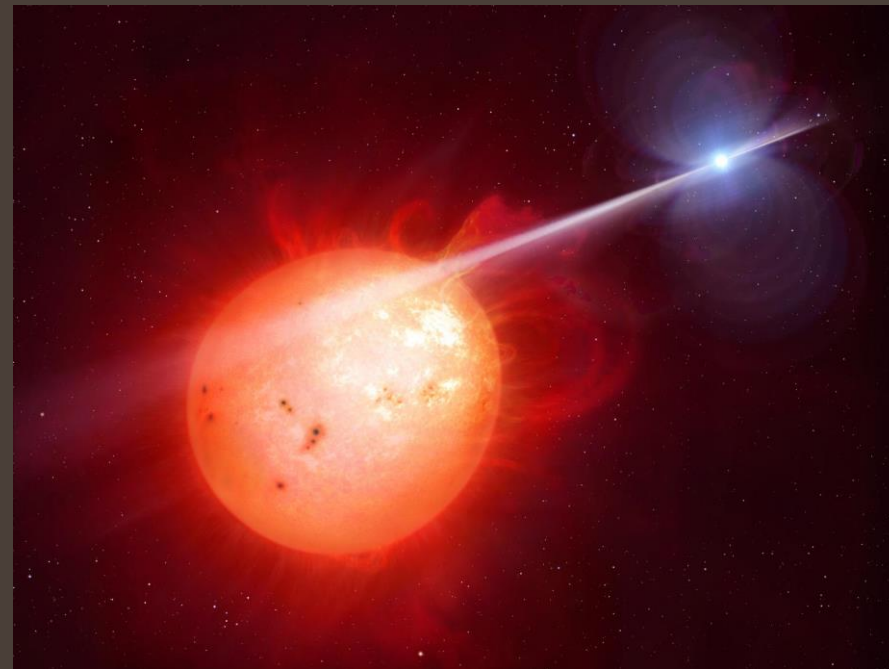
Разрушение компаньона радиопульсара

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.

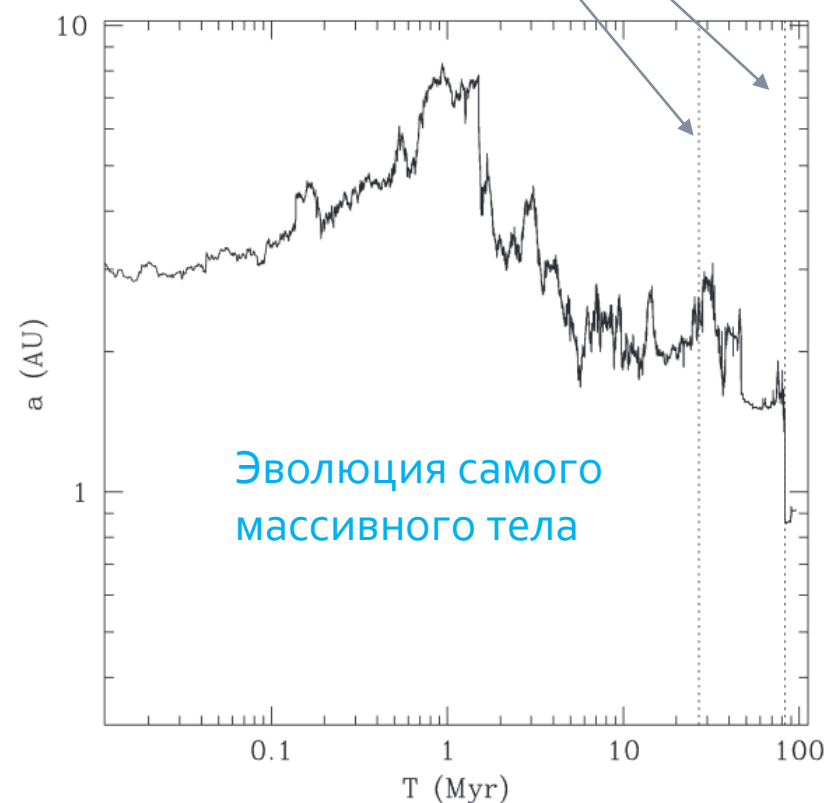
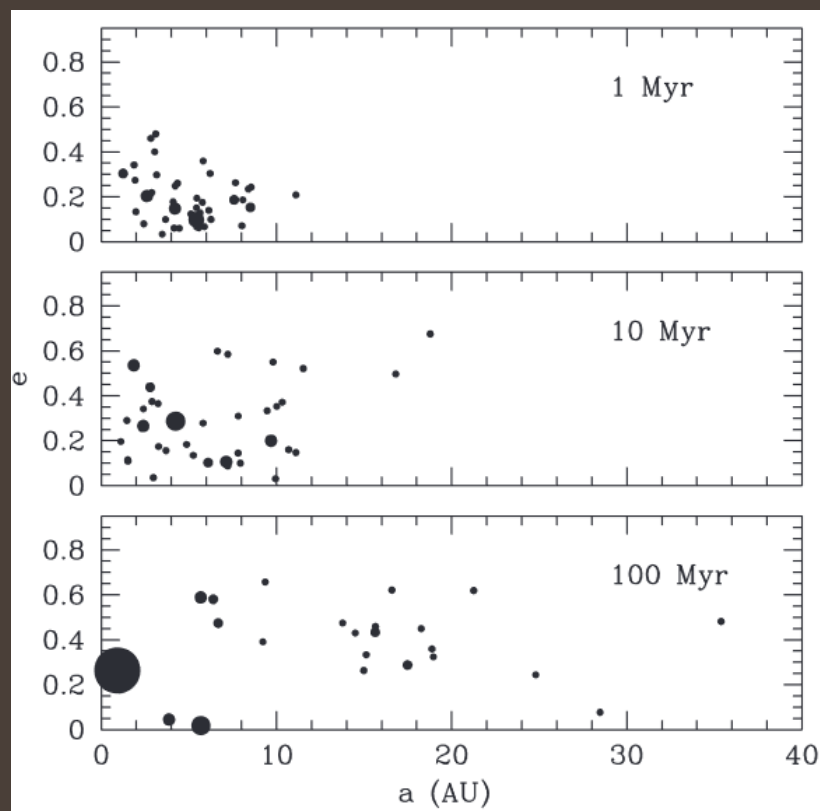
Пульсары с маломассивными компаньонами формируются редко. Во-первых, маловероятно большое отношение масс. Во-вторых, такой системе труднее выжить после взрыва сверхновой.



Модель формирования планет вокруг PSR 1257+12

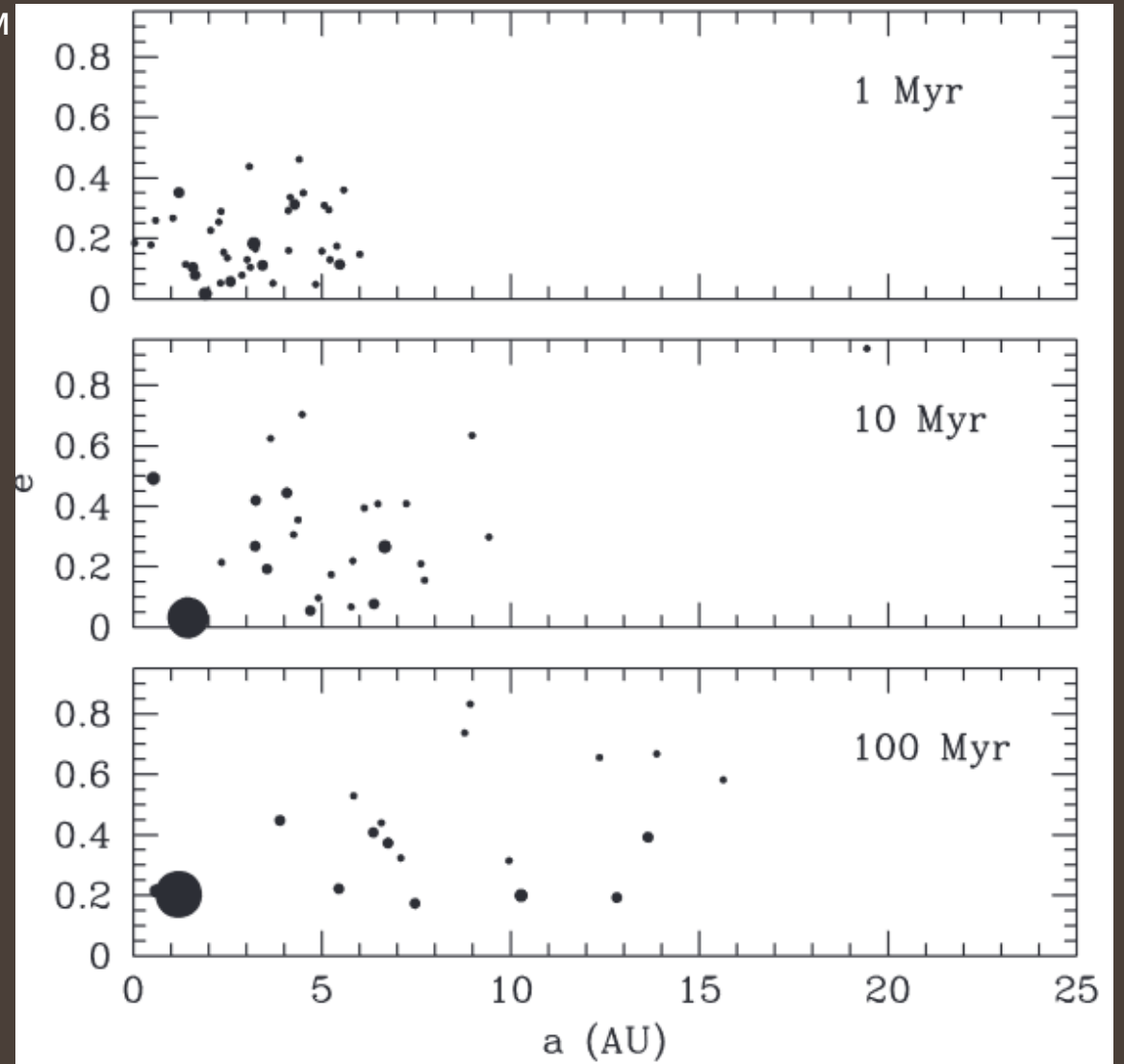
Диск с большим угловым моментом вокруг молодой НЗ.
Образование – разрушение компаньона приливом
при близком прохождении НЗ после сильного кика.

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



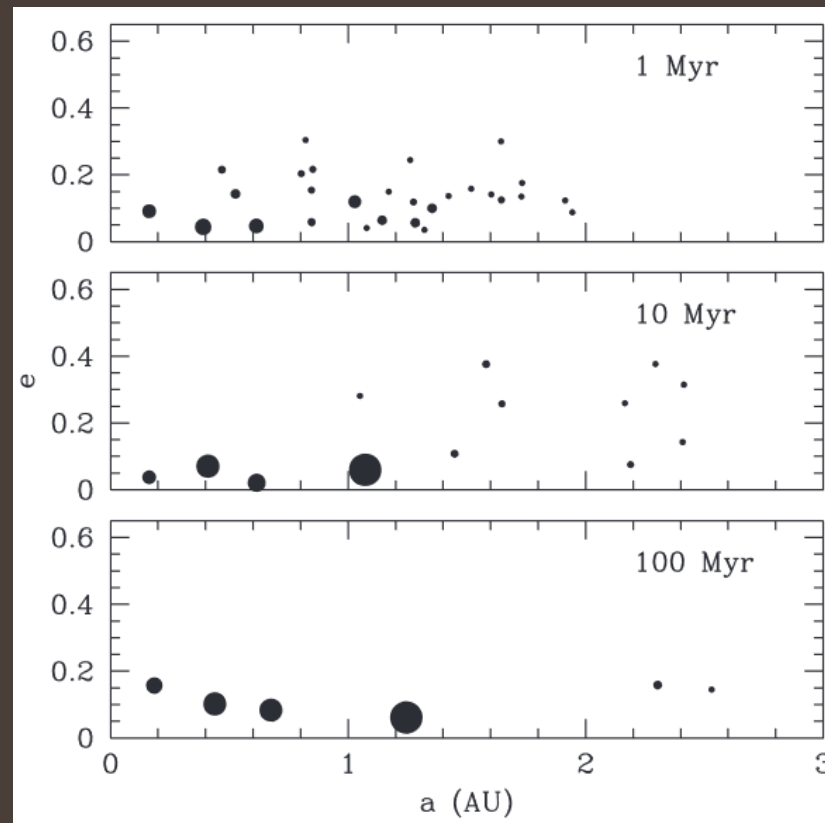
Модель формирования планет вокруг PSR 1257+12

Диск с на порядок меньшим
орбитальным моментом.

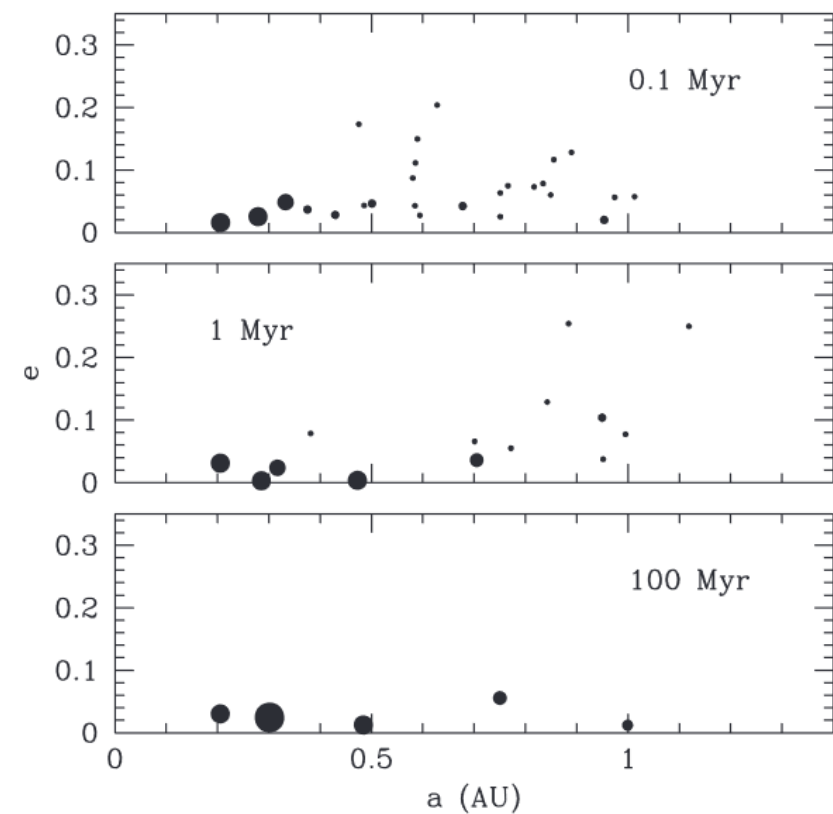


Модель формирования планет вокруг PSR 1257+12

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



Полностью вязкий диск
(fully viscous disk)

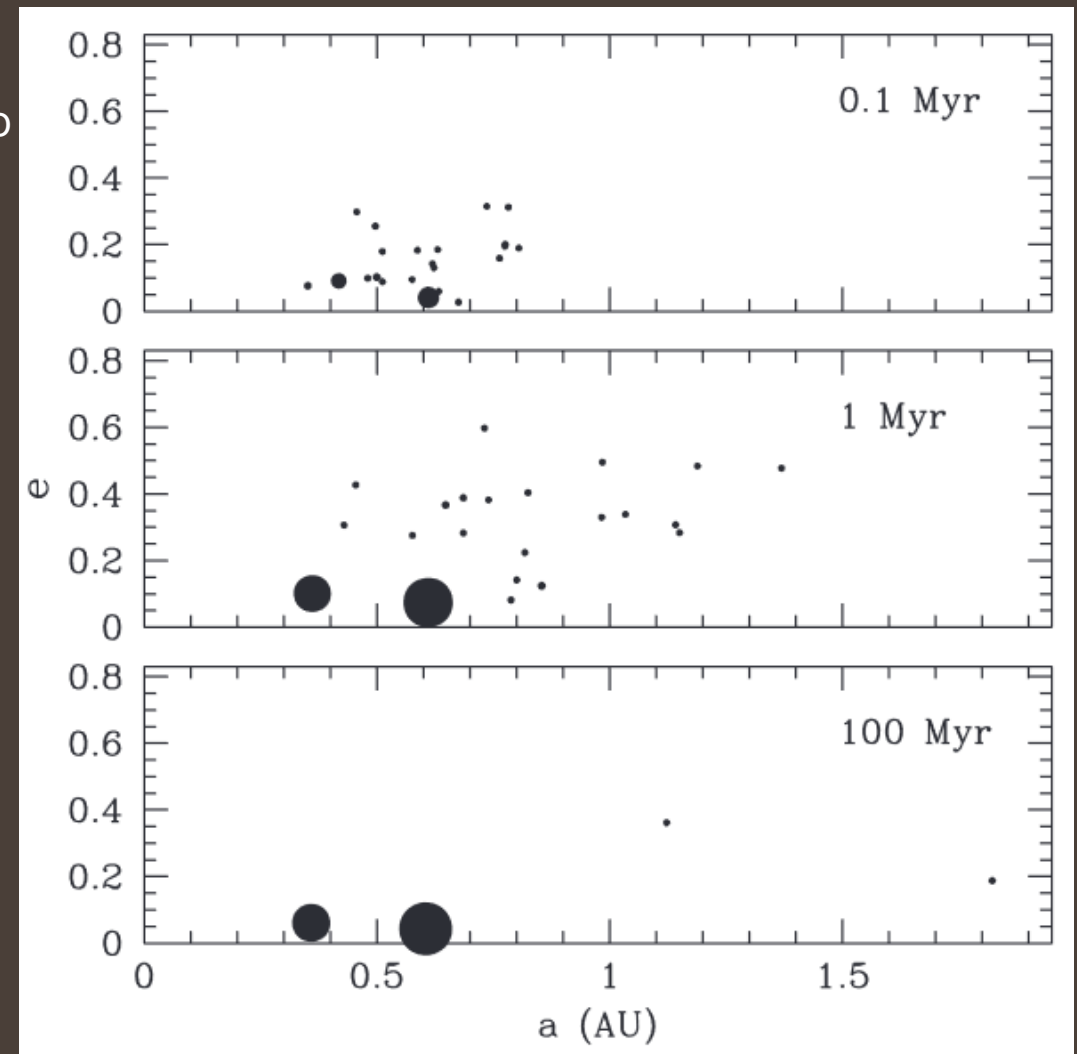


Слоевая аккреция
(layered accretion)

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.



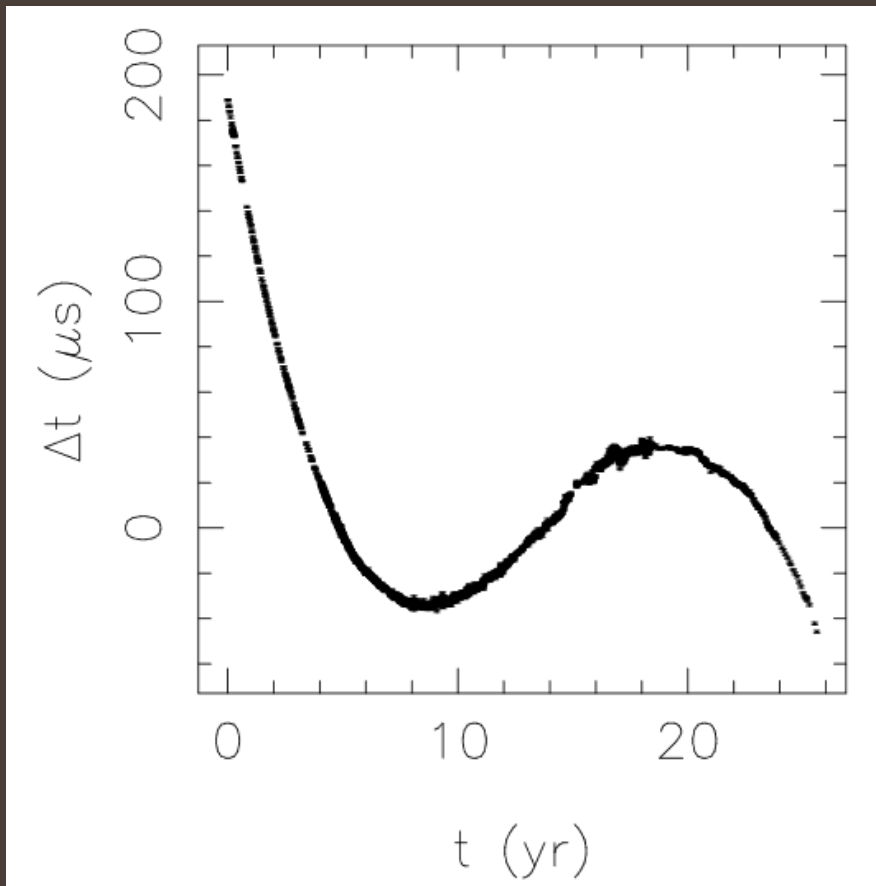
Пульсар и пояс астероидов?

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.

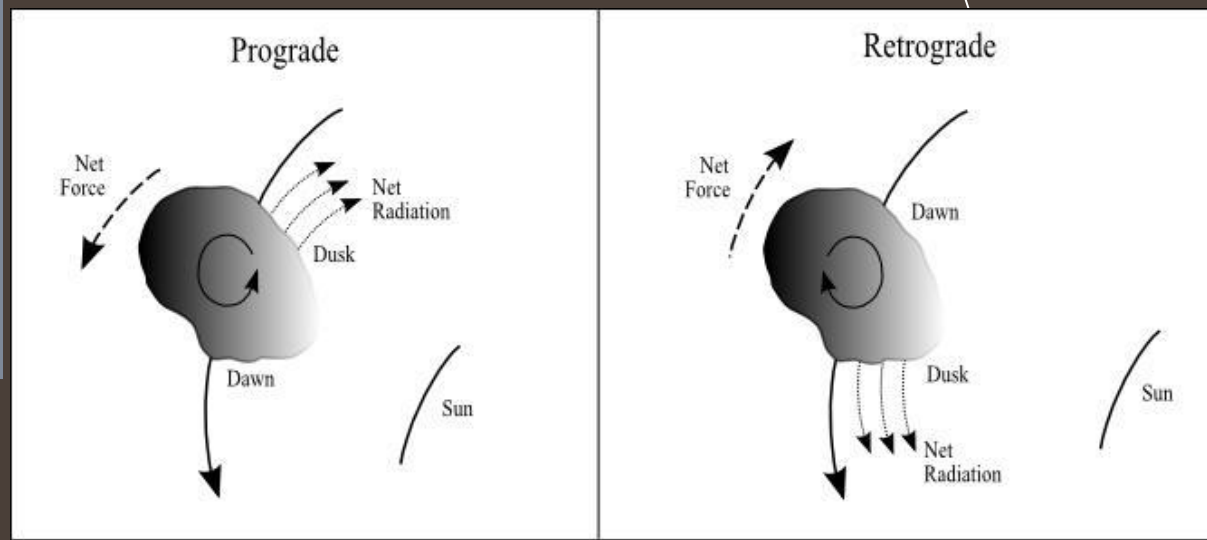
Пояс астероидов может образоваться
после разрушения компаньона
(белого карлика, например),
испарявшегося под действием
излучения радиопульсара.



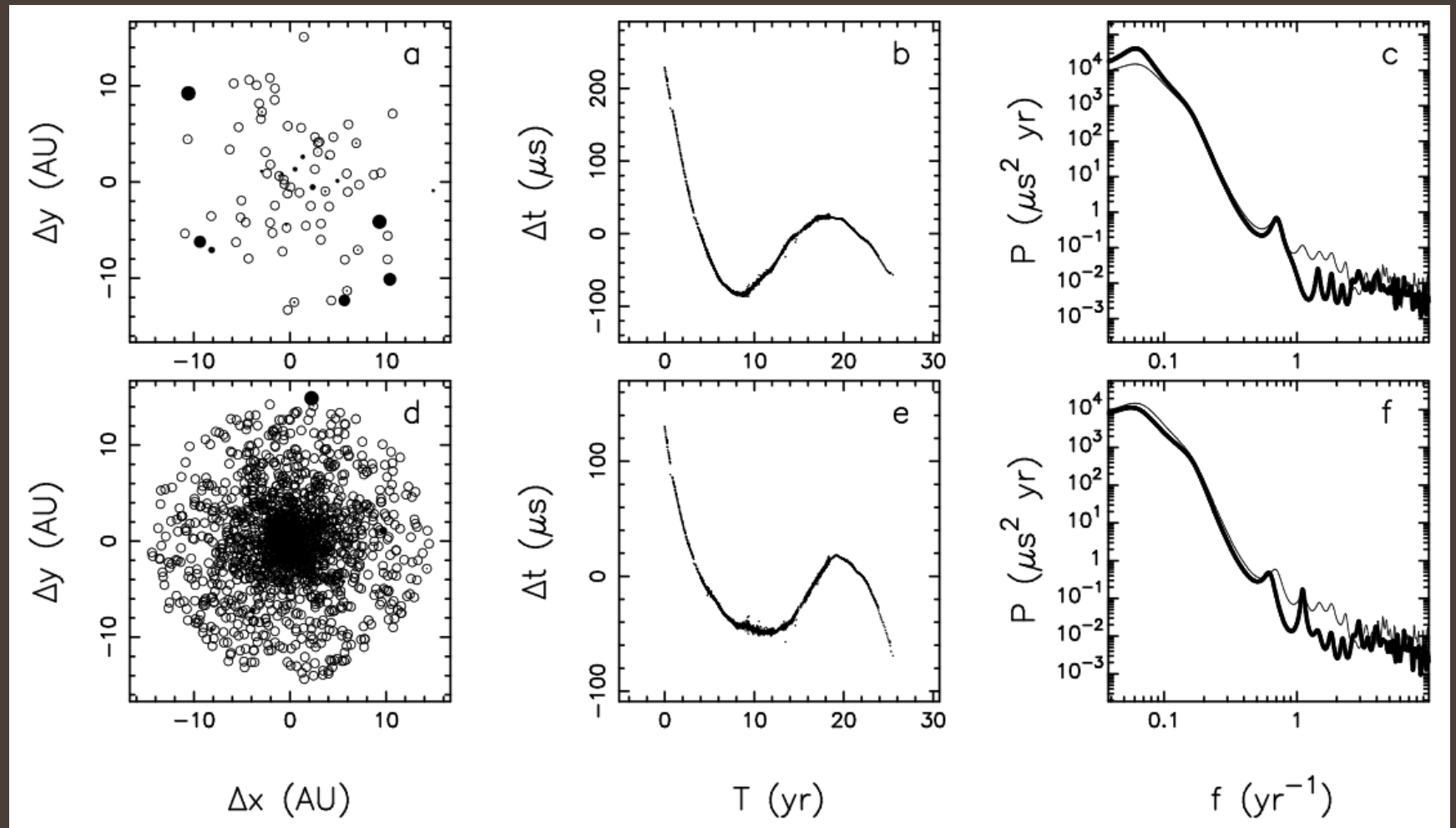
Эффект Ярковского

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



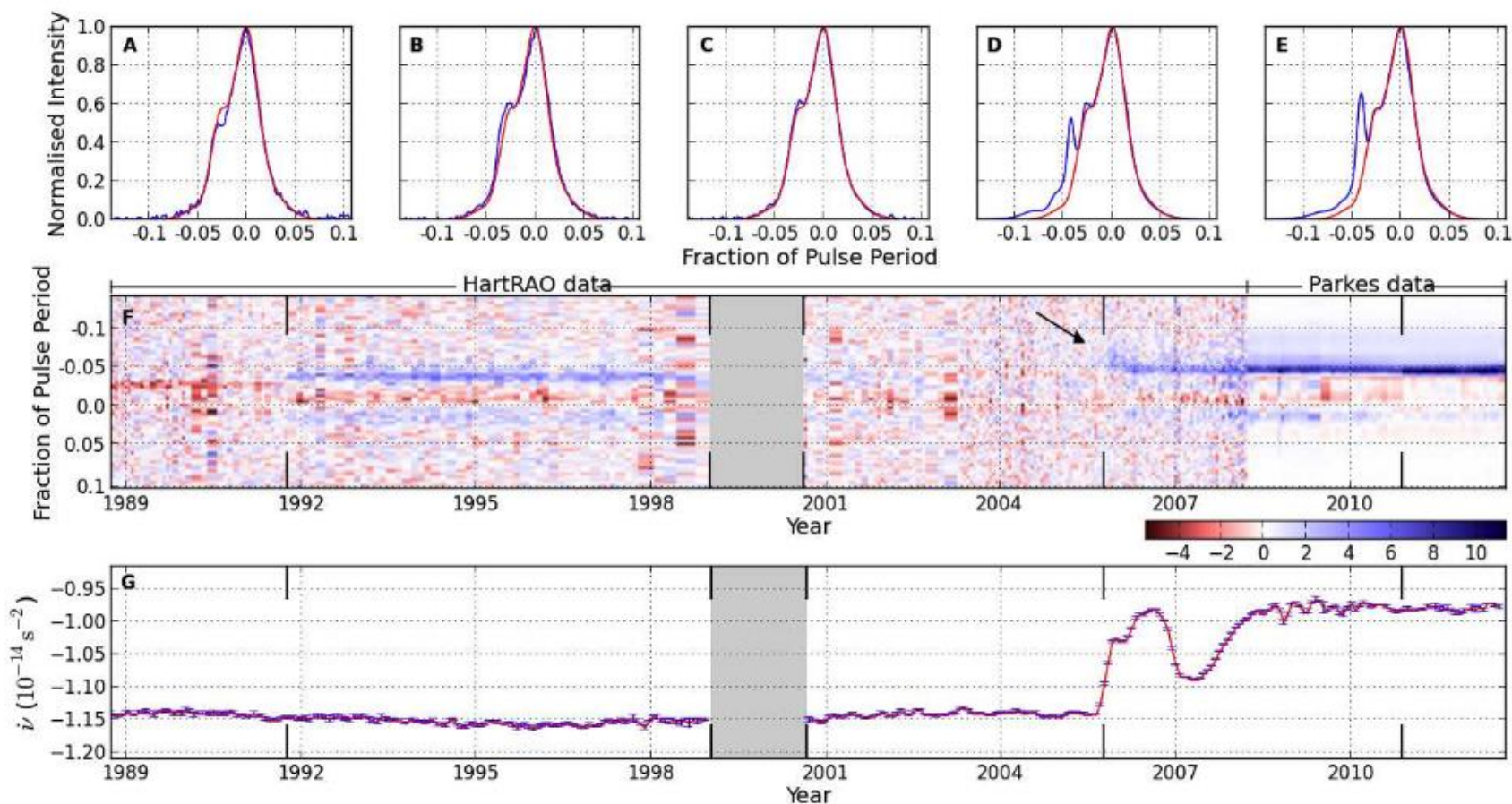
Лучшие модели пояса астероидов с точки зрения описания данных.
Черные кружки – более массивные объекты.

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

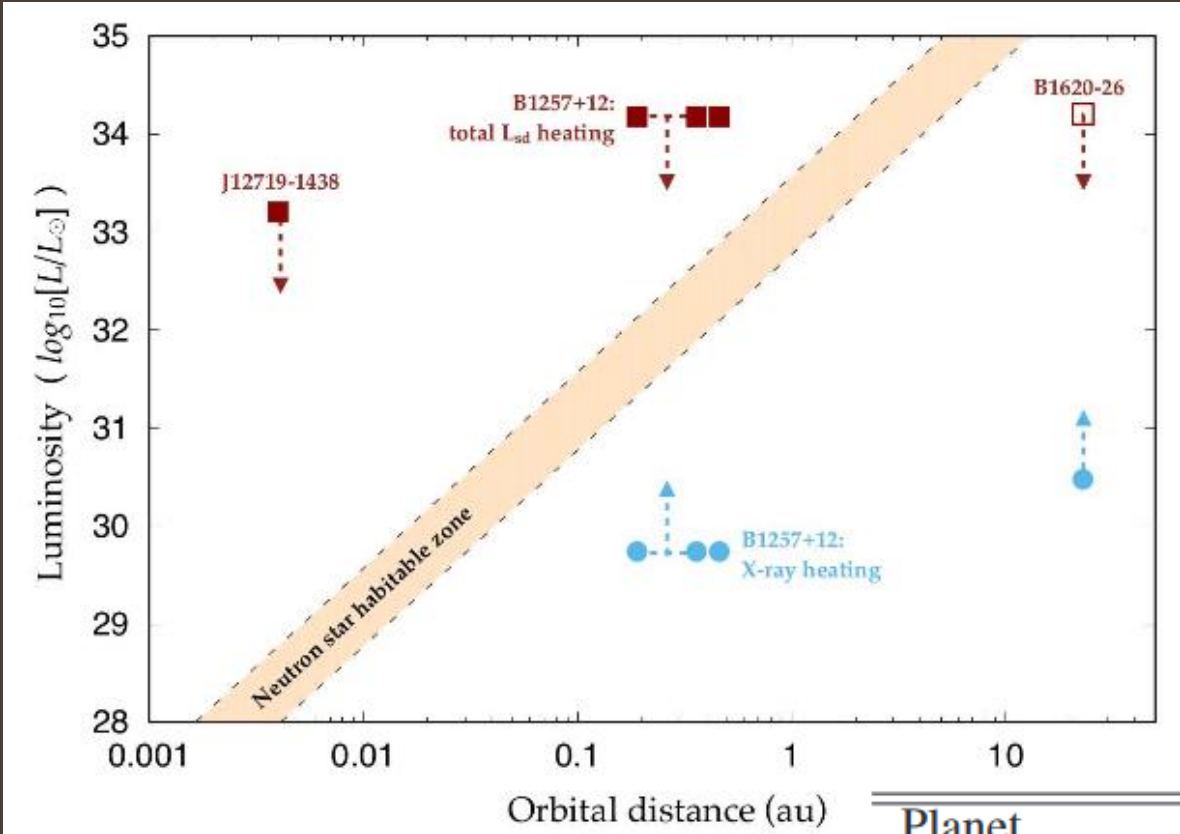
PSR J0738–4042

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?

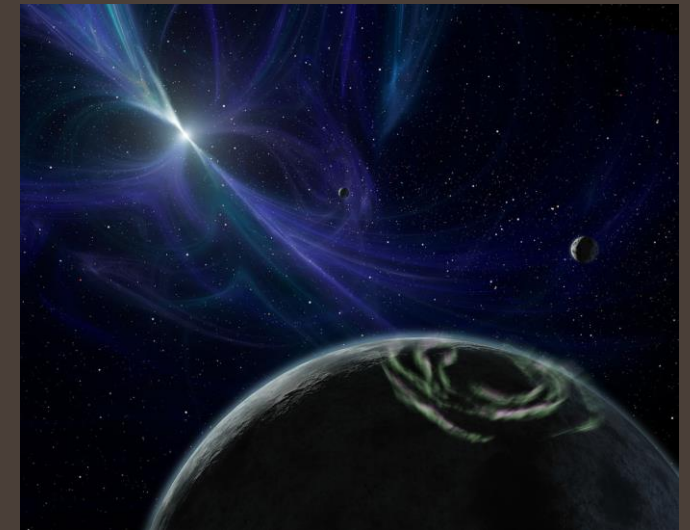


Магнитное поле планеты может предотвратить потерю атмосферы.

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**



Cornell University
Library

arXiv.org