

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.



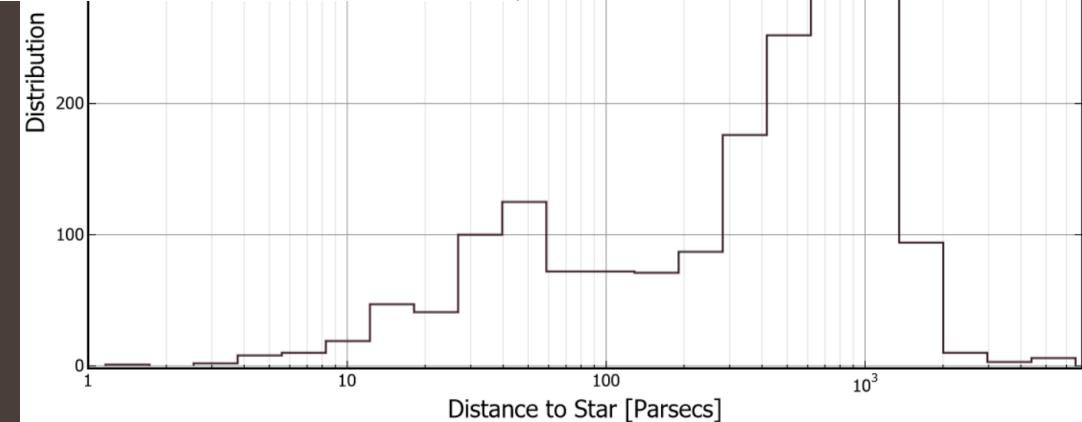
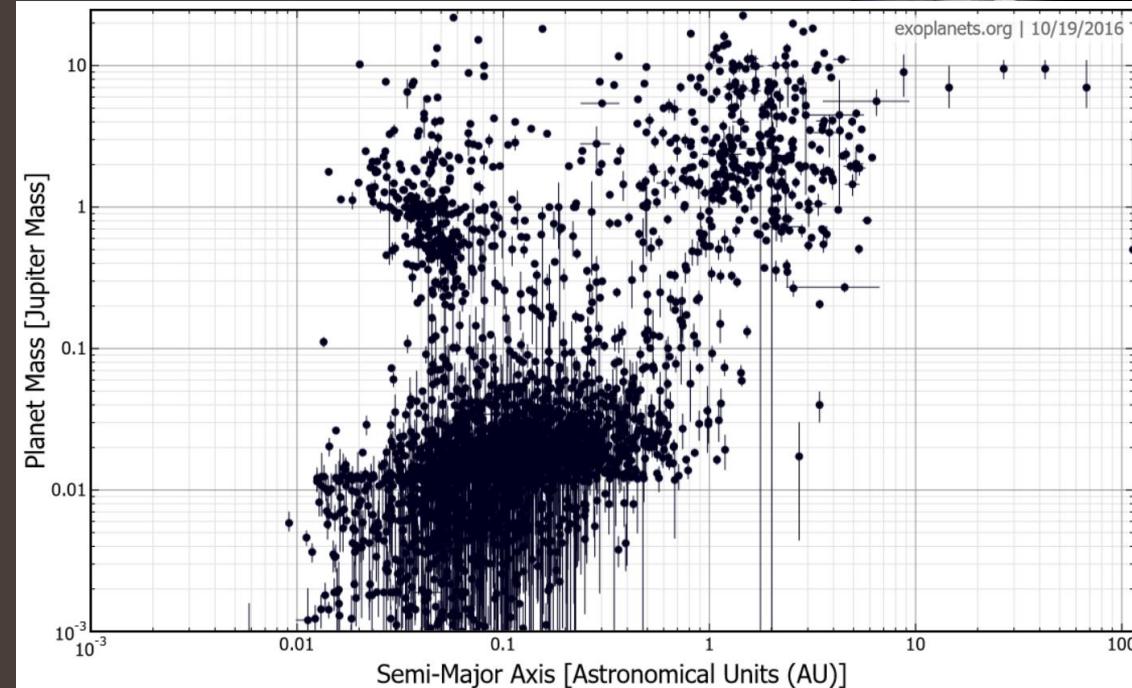
Область быстро развивается и с точки зрения новых наблюдений (и постройки приборов), и с точки зрения теории (т.к. оказалось, что многое мы не понимали или понимали не так).

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 до сих пор масса оценена недостаточно точно, чтобы сказать, планета это или бурый карлик.



Такие разные экзопланеты



Table

Plots

Search BETA

EOD Planets
2926
Planets with good orbits listed
in the Exoplanet Orbit
Database

Other Planets
25
Including microlensing and
imaged planets

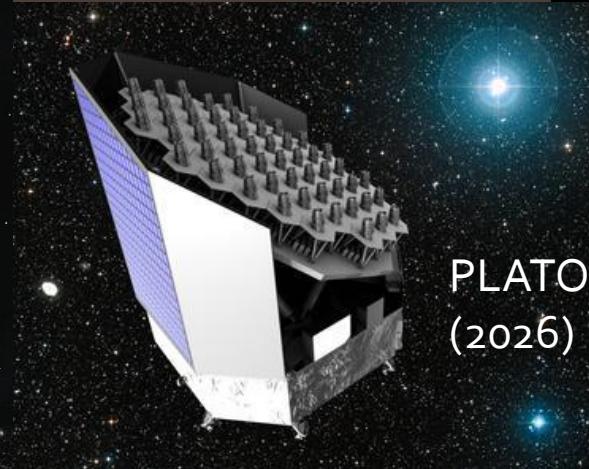
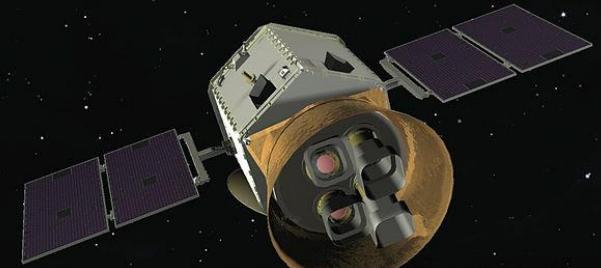
Total Confirmed
Planets
2951
Planets

Unconfirmed Kepler
Candidates
2503
Total Planets

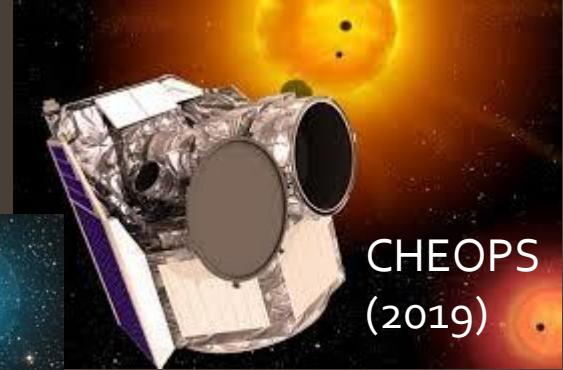
5454
Confirmed planets + Kepler

Новые наблюдения

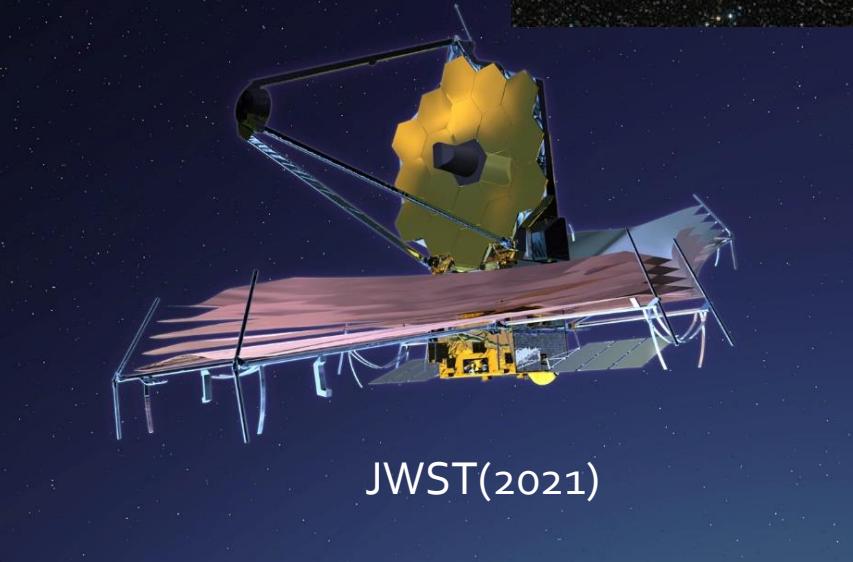
TESS



PLATO
(2026)



CHEOPS
(2019)

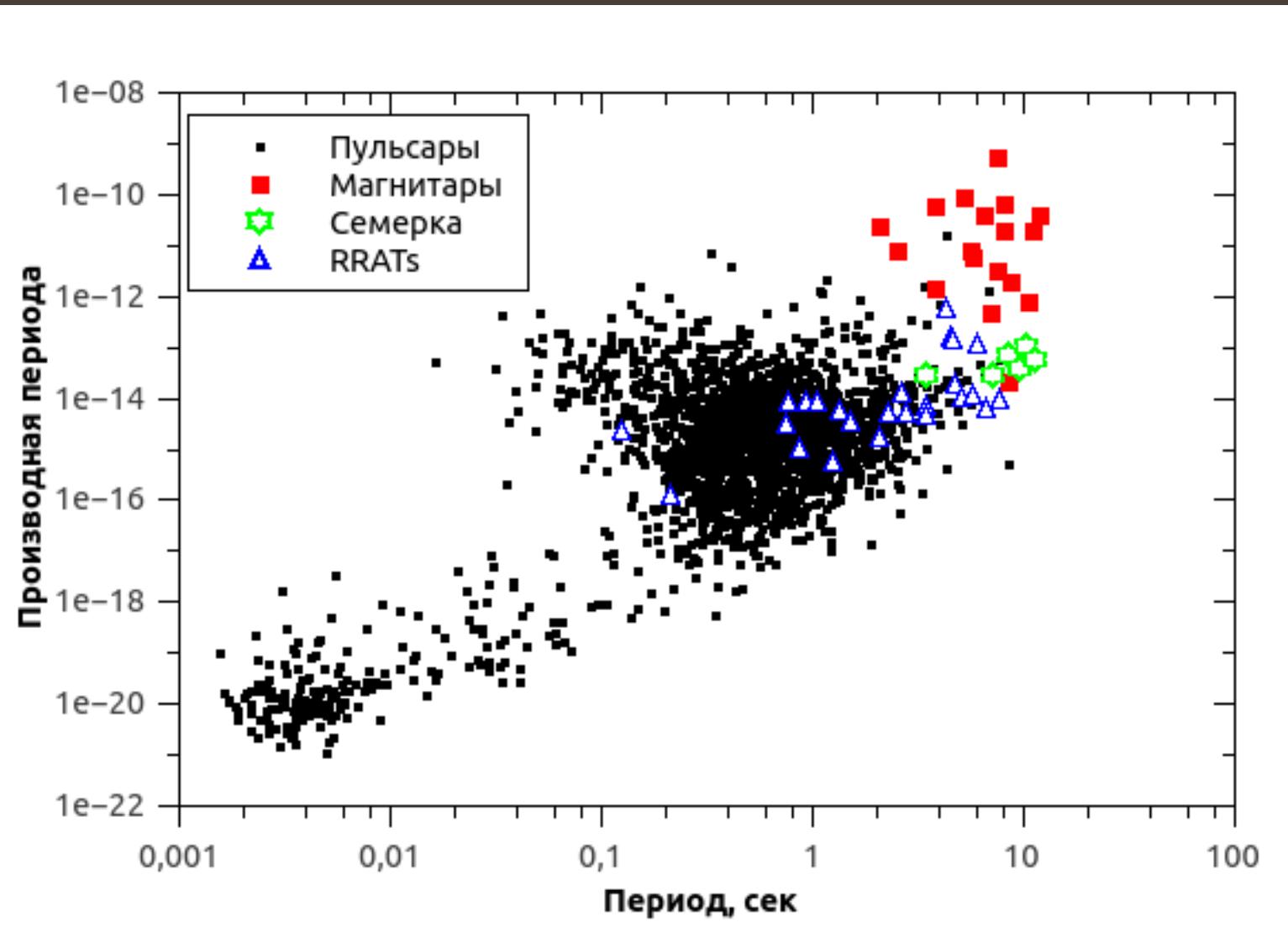


JWST(2021)

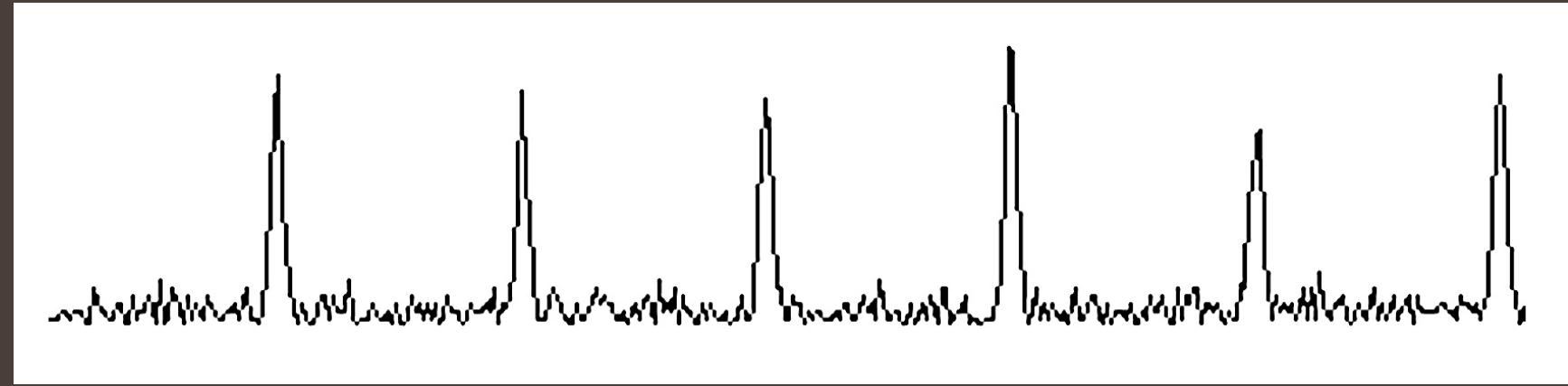


E-ELT
(2025)

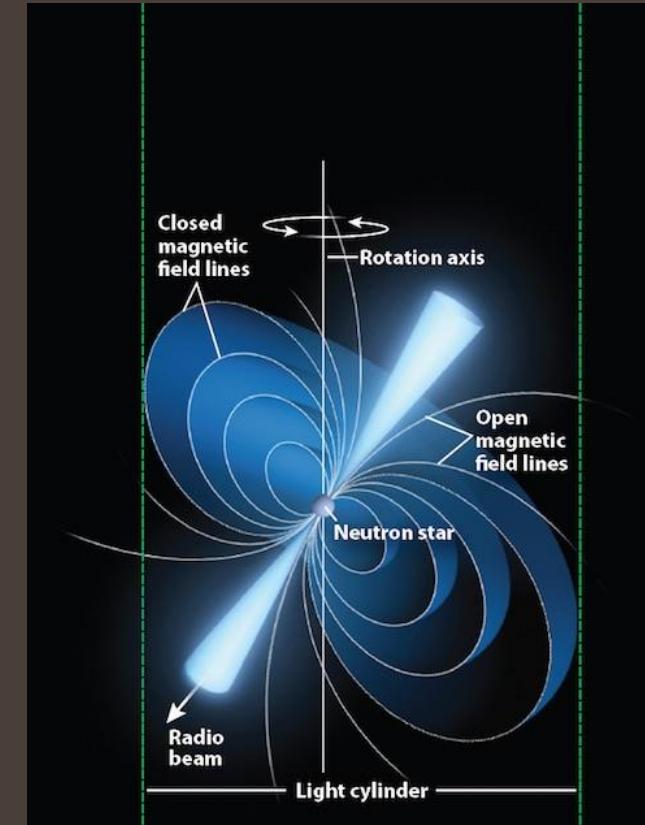
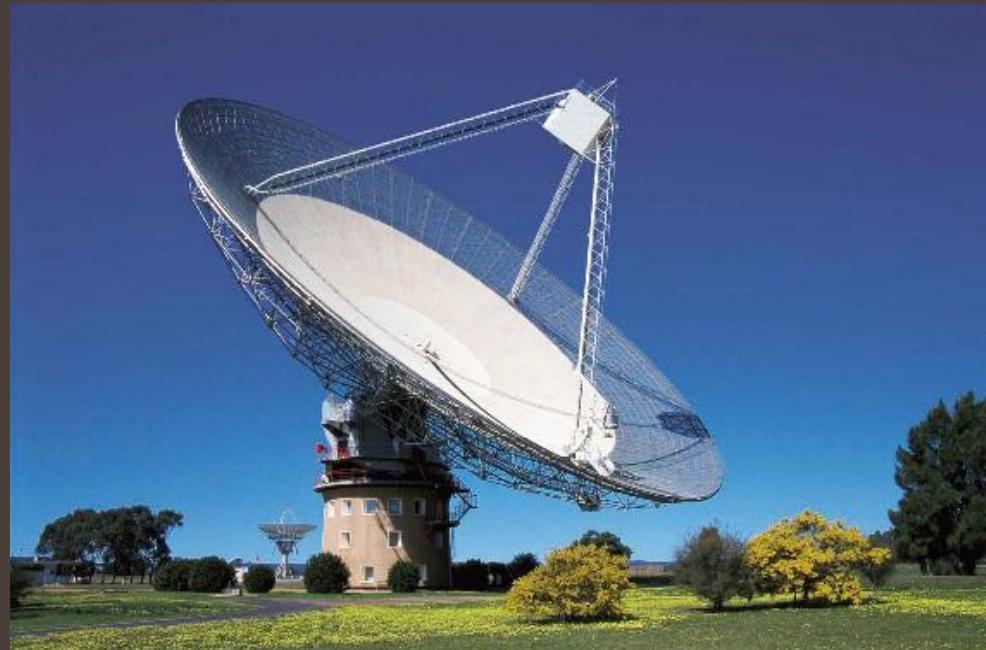
Нейтронные звезды вообще и радиопульсары в частности



Радиопульсары



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



NASA

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

| Host Name | Planet Letter | Planet Name | Discovery Method | Orbital Period [days] | Orbit Semi-Major Axis [AU] | Planet Mass or M*sin(i) [Jupiter mass] | Distance [pc] | Stellar Mass [Solar mass] | Stellar Radius [Solar radii] | Discovery |
|----------------|---------------|----------------|------------------|------------------------|----------------------------|--|-----------------------------------|---------------------------|------------------------------|---------------------|
| PSR | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | |
| PSR B1257+12 | b | PSR B1257+12 b | Pulsar Timing | 25.262±0.003 | 0.19 | 6.3e-05±6.3e-06 | 600±100 | 1.4 | | Arecibo Observatory |
| PSR B1257+12 | c | PSR B1257+12 c | Pulsar Timing | 66.5419±0.0001 | 0.36 | 0.014±0.001 | 600±100 | 1.4 | | Arecibo Observatory |
| PSR B1257+12 | d | PSR B1257+12 d | Pulsar Timing | 98.2114±0.0002 | 0.46 | 0.012±0.001 | 600±100 | 1.4 | | Arecibo Observatory |
| PSR B1620-26 | b | PSR B1620-26 b | Pulsar Timing | | 23 | 2.5±1.0 | | 1.35 | | Hubble Space Teles |
| PSR J1719-1438 | b | PSR J1719-1438 | Pulsar Timing | 0.090706293±0.00000000 | 0.0044 | >1.20 | 1200±300 | 1.4 | 0.04 | Parkes Observatory |
| PSR J2322-2650 | b | PSR J2322-2650 | Pulsar Timing | 0.322963997±0.00000000 | 0.0102 | 0.7949±0.0002 | 230 ⁺⁹⁰ ₋₅₀ | 1.4 | | Parkes Observatory |

| Planet | Mass (M _{Jup}) | Period (day) | <i>a</i> (AU) | <i>e</i> | Discovery |
|---------------------|-----------------------------|-----------------|------------------|----------|-----------|
| PSR 1719-14 b | 1 | 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 | — | 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 | 1992 |
| PSR 1257 12 c | 0.013 | 66.5419 | 0.36 | 0.0186 | 1992 |
| PSR 1257 12 b | 0.00007 | 25.262 | 0.19 | 0 | 1992 |

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

Список объектов планетной массы вокруг радиопульсаров

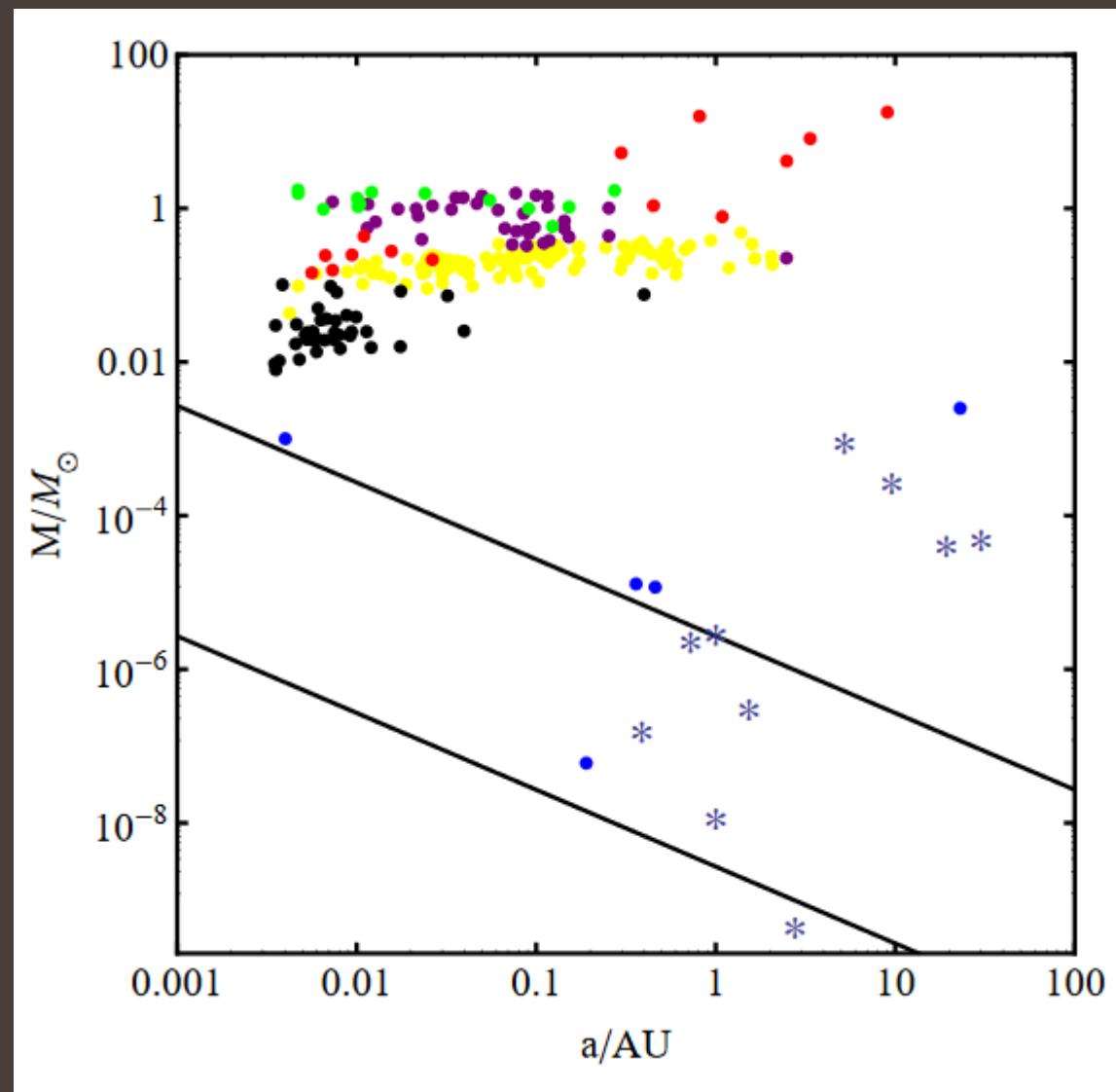
| Название | Масса, M_J | Период, дни | полусось, е.а. | Год |
|-------------------------------------|--------------|--------------|----------------|------|
| PSR 1257+12 b | 7e-05 | 25.262 | 0.19 | 1992 |
| PSR 1257+12 c | 0.013 | 66.5419 | 0.36 | 1992 |
| PSR 1257+12 d | 0.012 | 98.2114 | 0.46 | 1992 |
| 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 | — | 2017 |

+ еще 3 бурых карлика (по массе) в каталоге exoplanet.eu (01/10/2019)

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 | Doubtful, 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



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

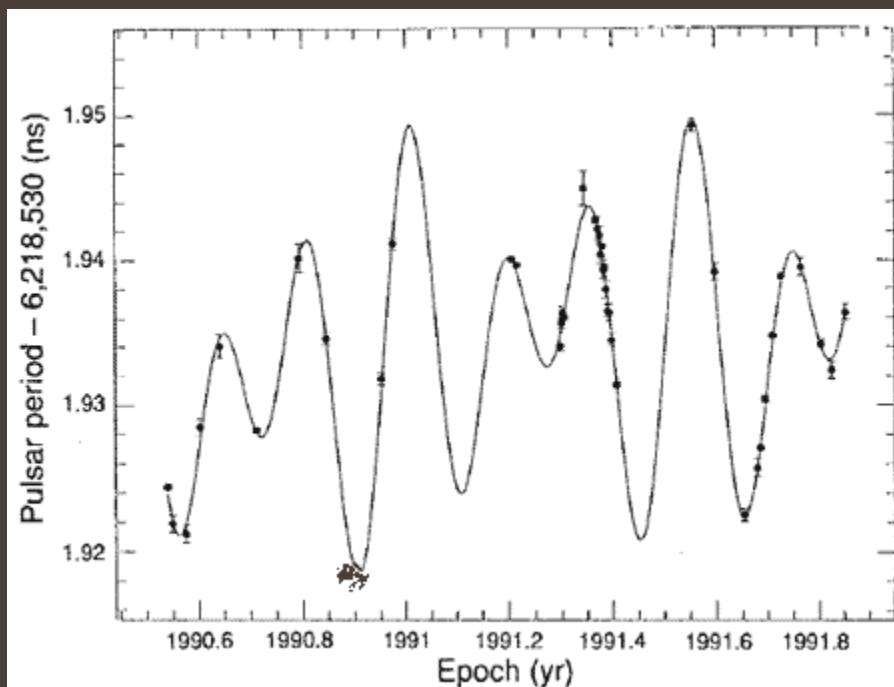
Для нормальных $\tau_{\text{pl}} = 1 \text{ ms}$,
для миллисекундных – $1 \mu\text{s}$.

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.

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)

Прецезионные измерение 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.

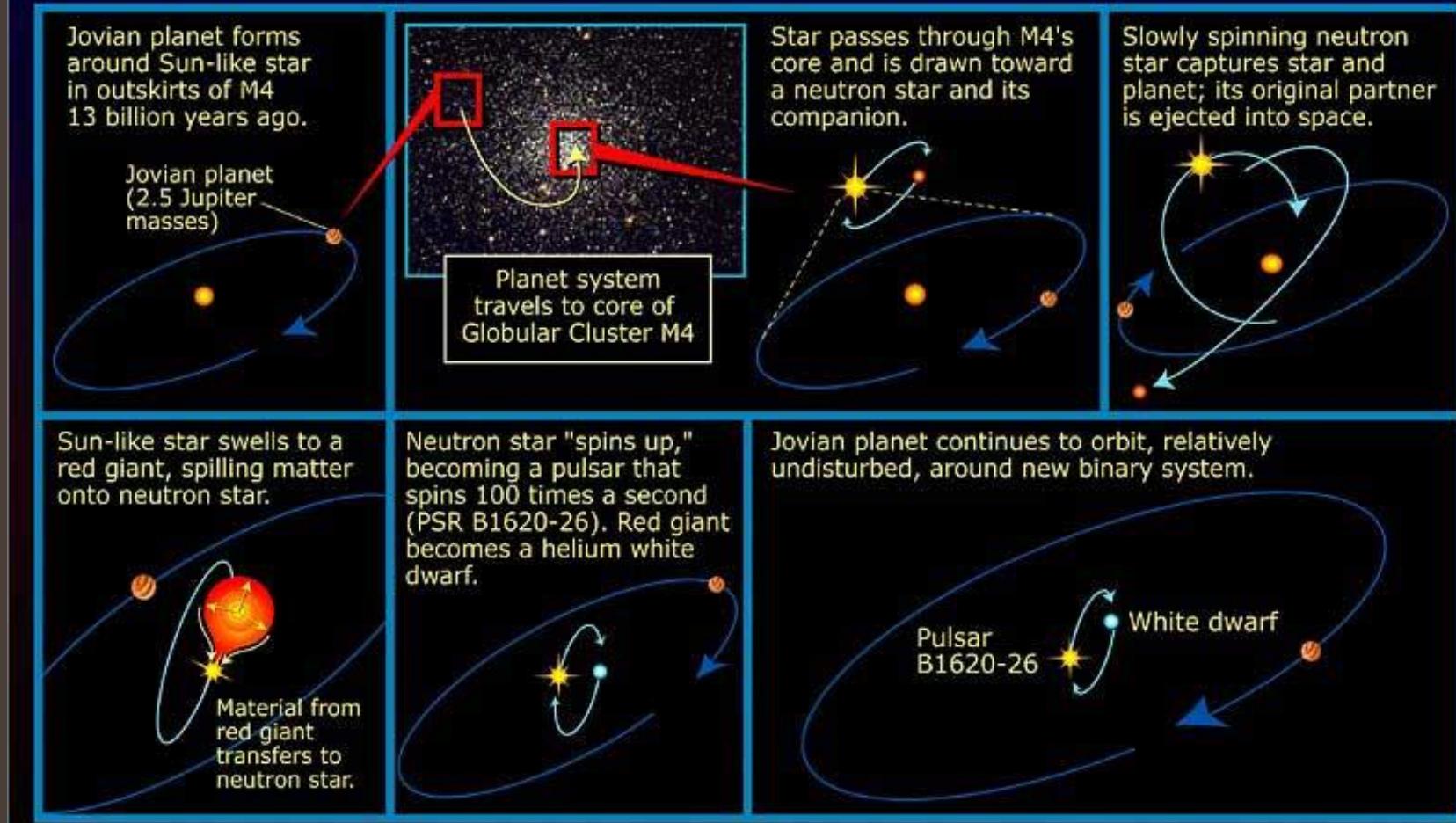
Шаровое скопление M₄



Пульсар, белый карлик и планета

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

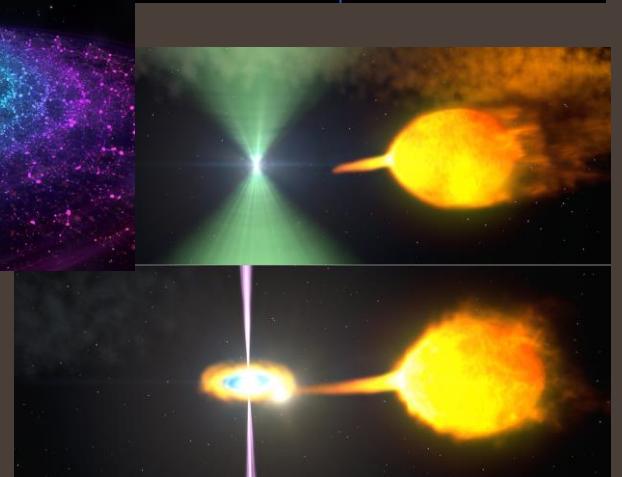
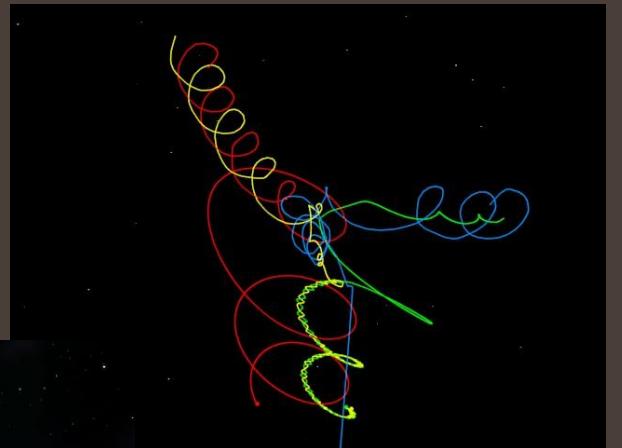
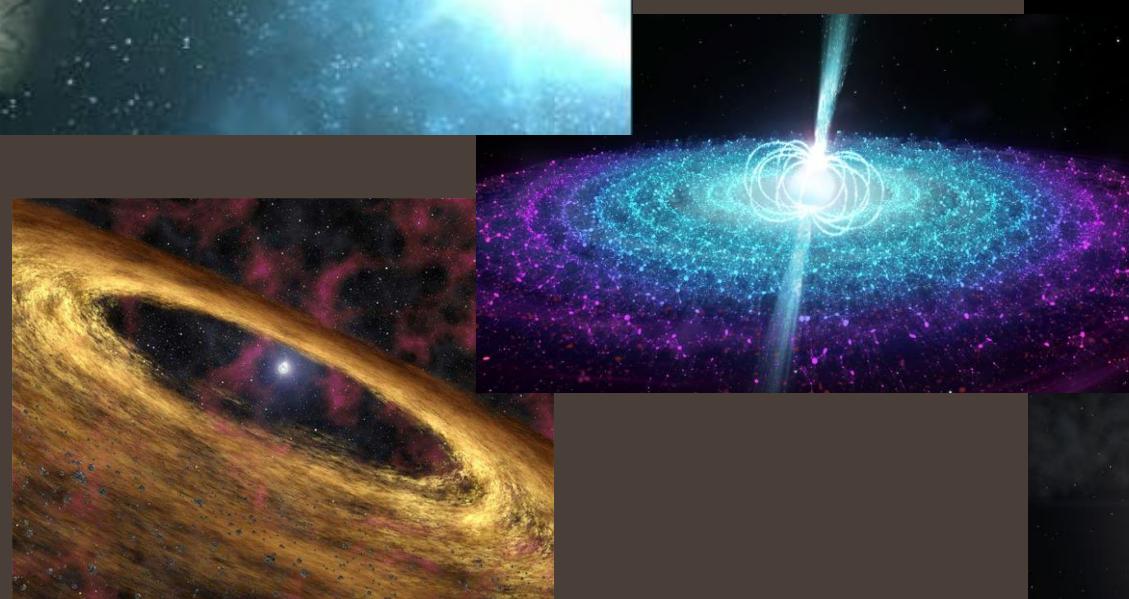
Jovian planet in Globular Cluster M4: Calm bystander in stellar drama



Старый миллисекундный пульсар с периодом 0.011 мсек.

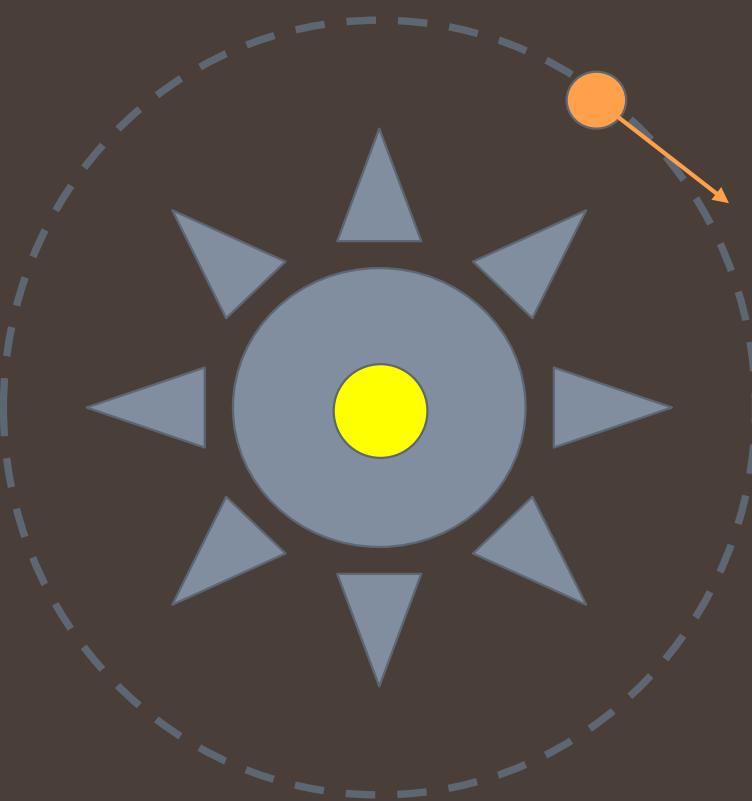
Механизмы формирования

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



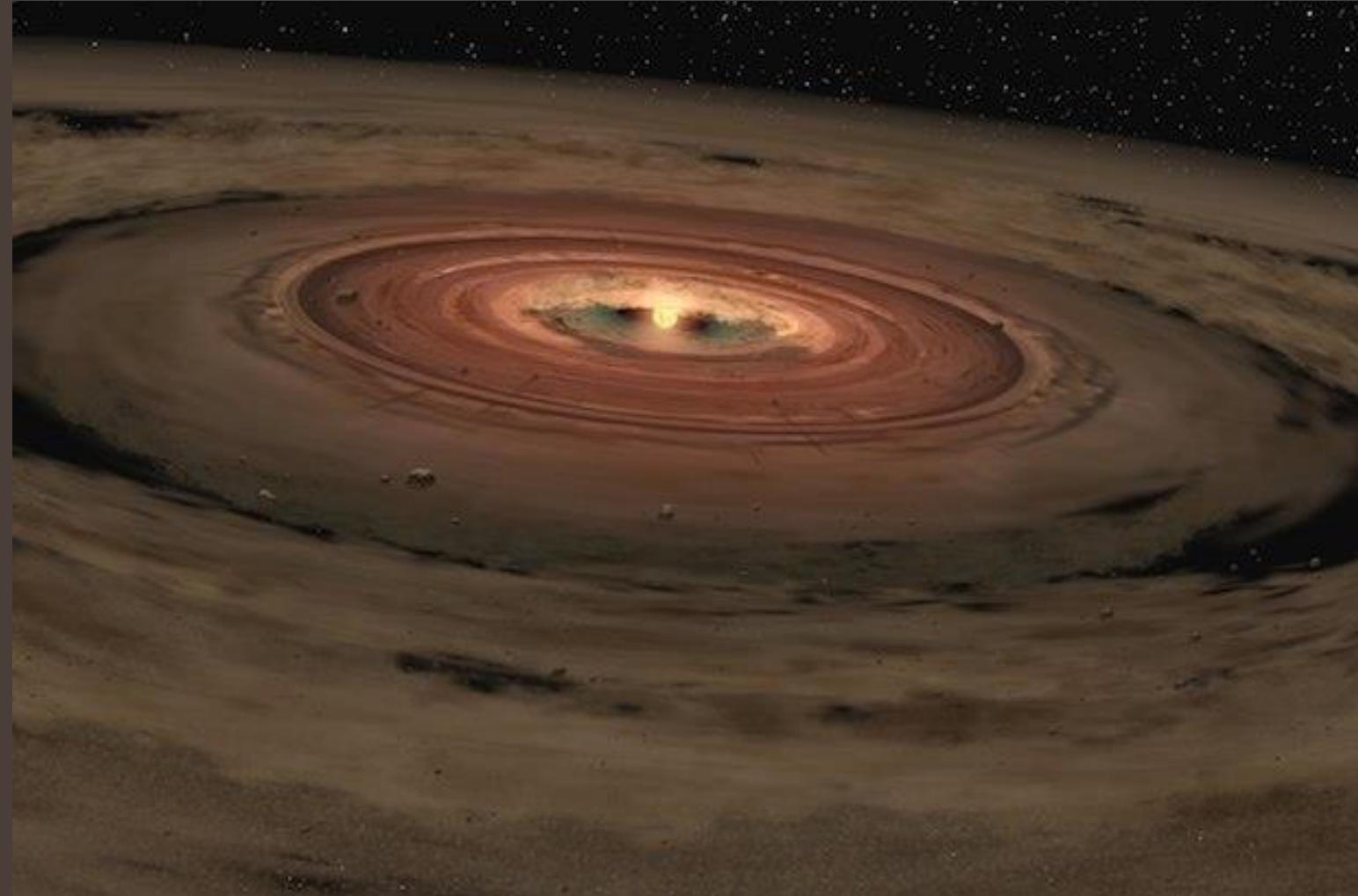
Распад системы после взрыва сверхновой

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 акреция

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



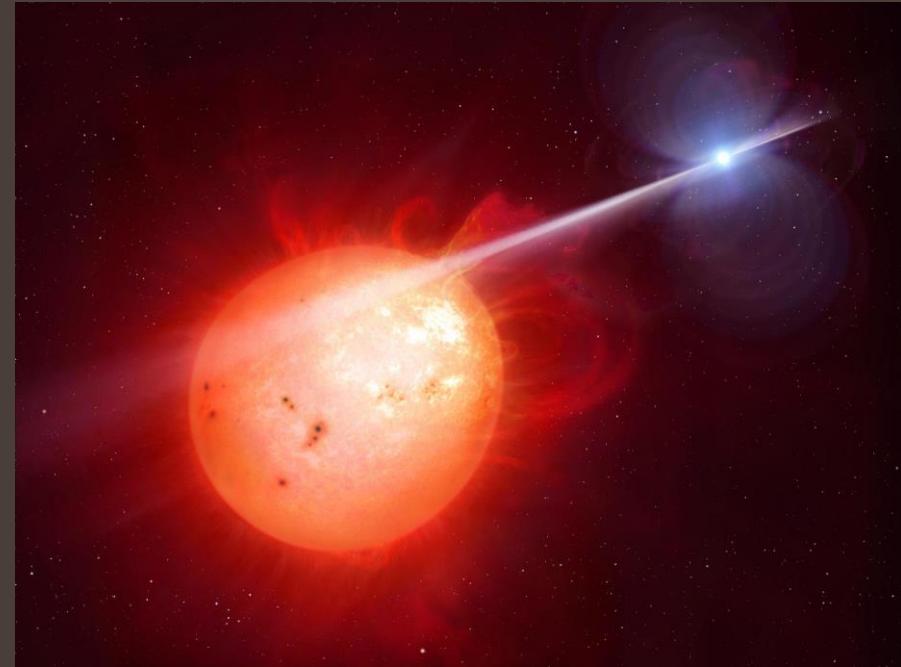
Разрушение компаньона радиопульсара

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

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

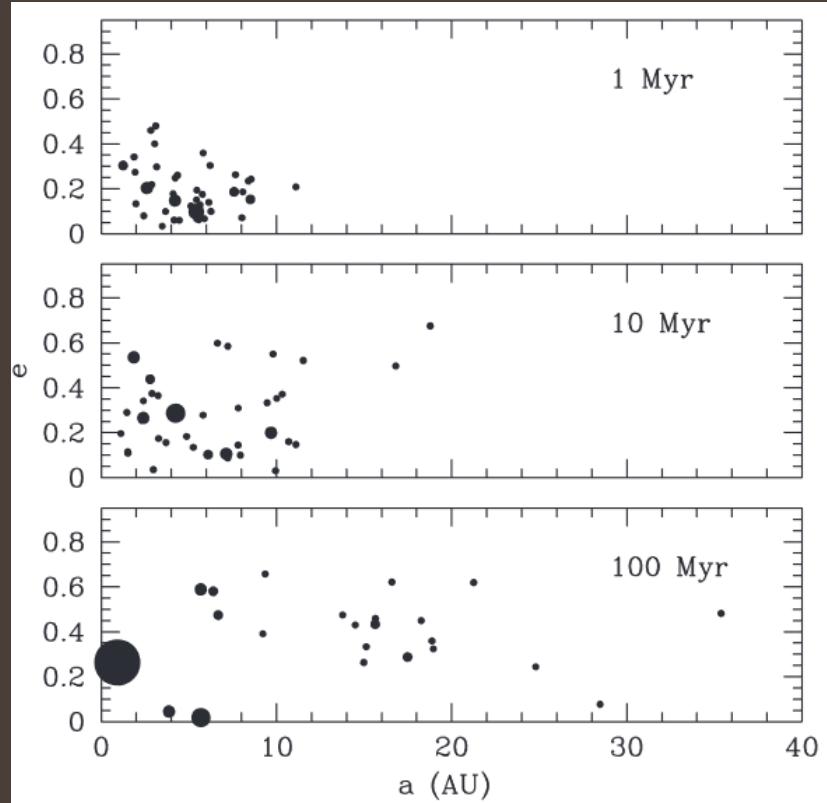
Испарение соседа также возможно. Но в этом случае диск получается не слишком массивным.

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



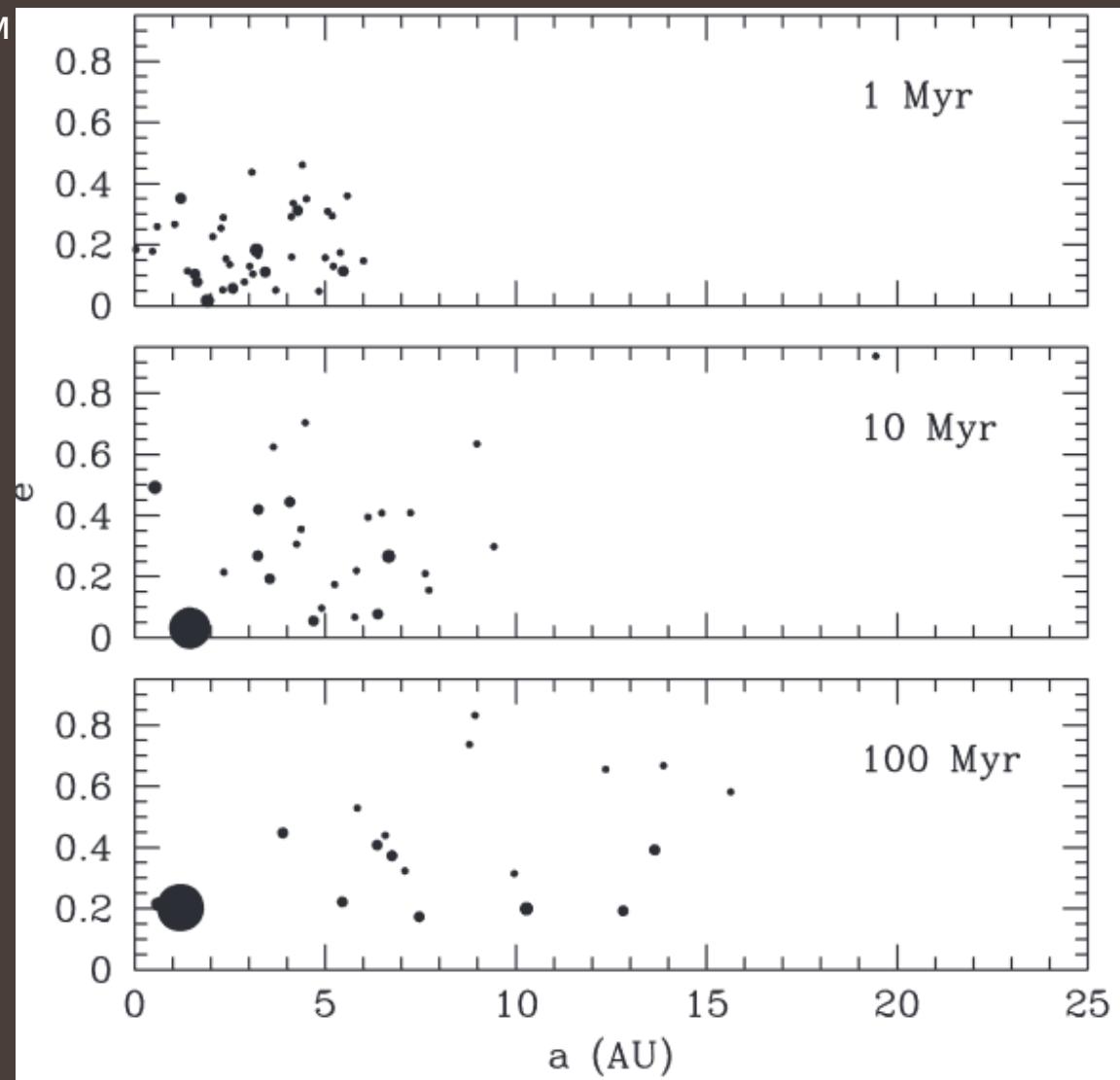
Модель формирования планет вокруг PSR 1257+12

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



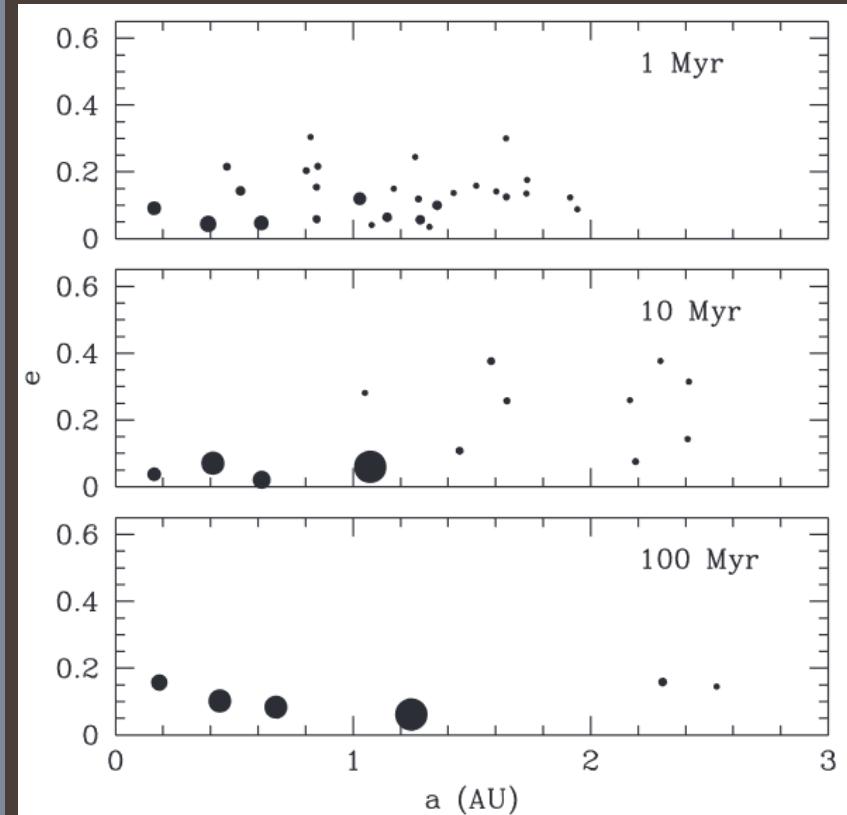
Модель формирования планет вокруг PSR 1257+12

Диск с на порядок меньшим
орбитальным моментом.

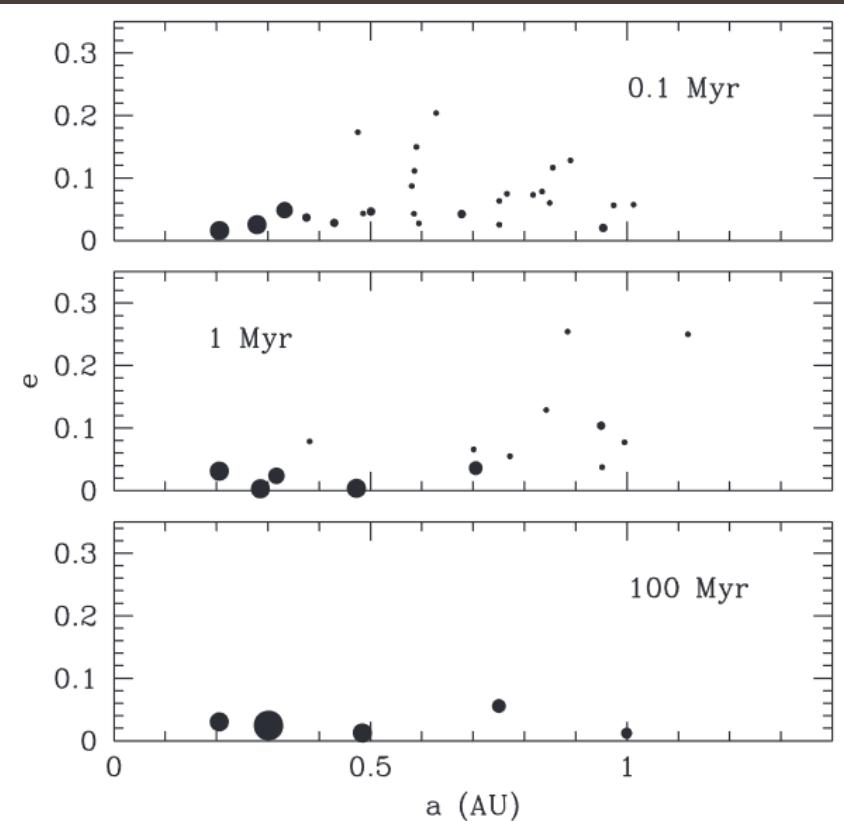


Модель формирования планет вокруг PSR 1257+12

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



Полностью вязкий диск
(fully viscous disk)

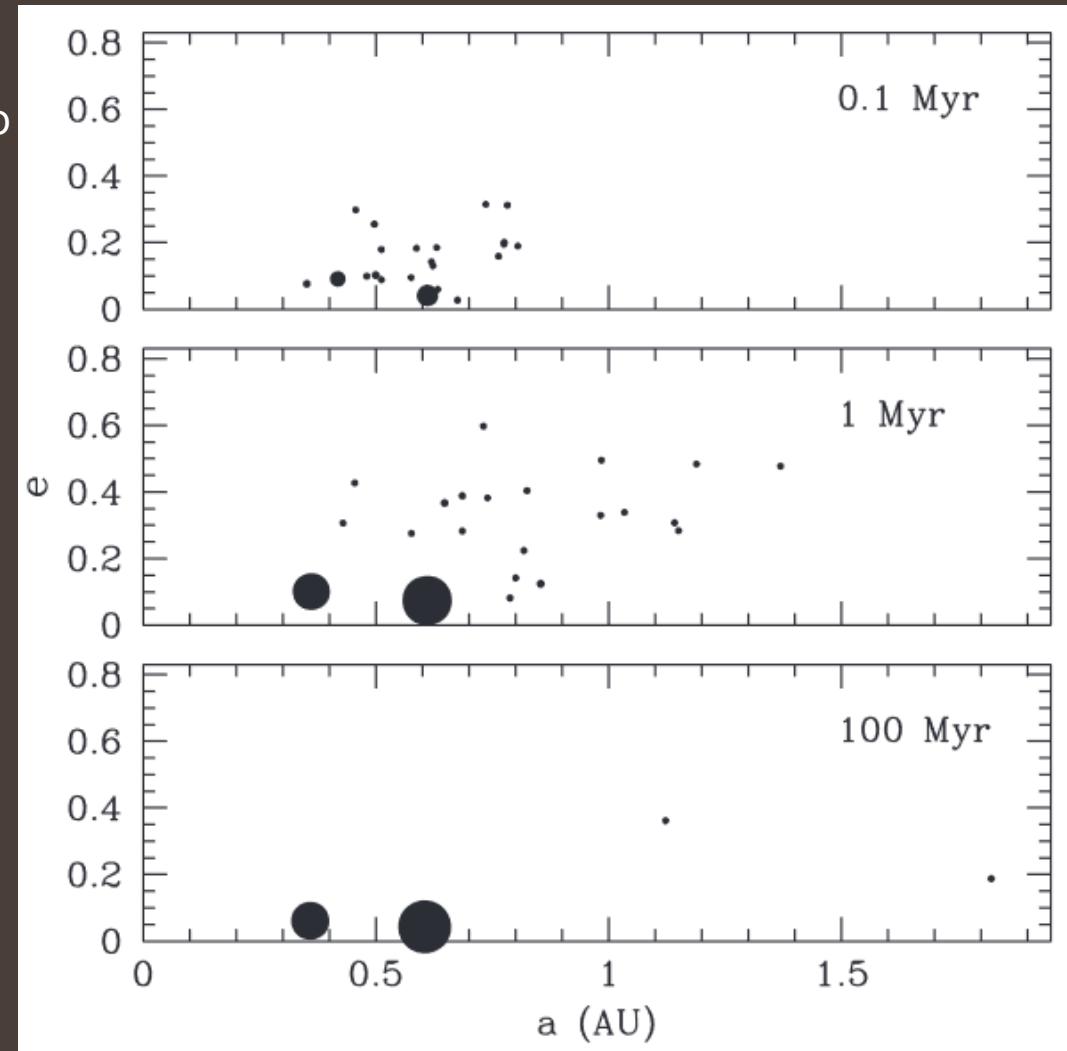


Слоевая аккреция
(layered accretion)

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.



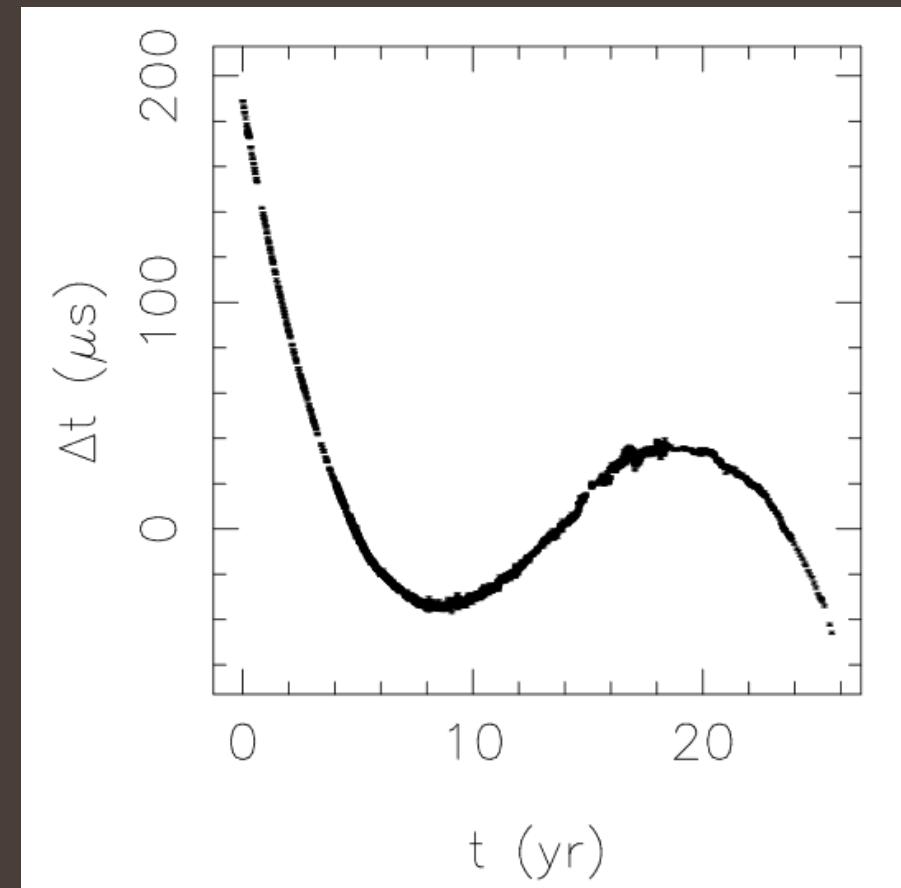
Пульсар и пояс астероидов?

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

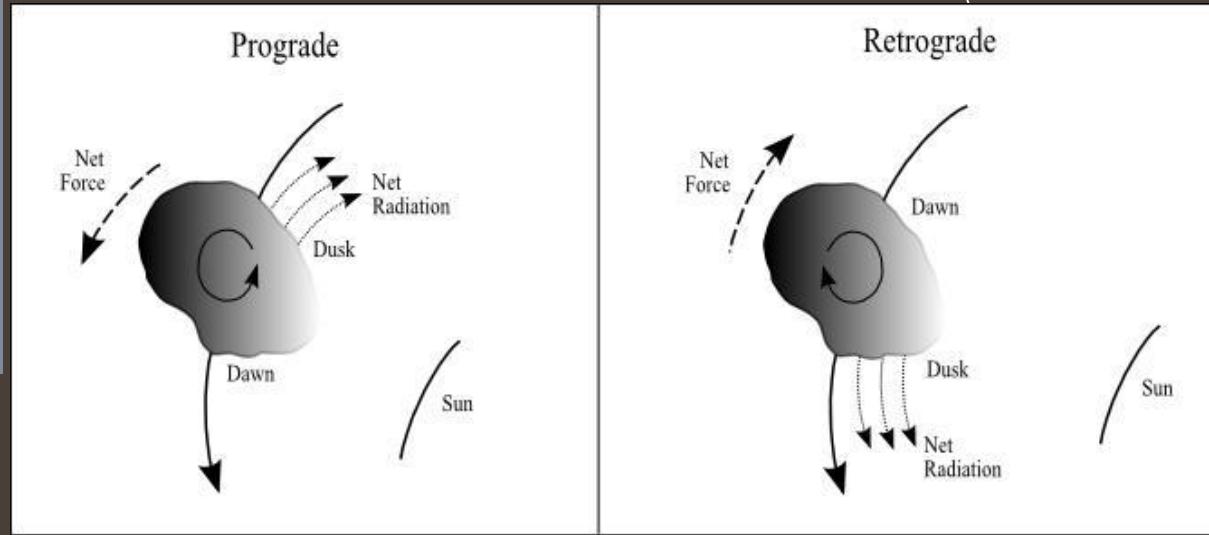
Вблизи пульсара астероиды
будут активно испаряться
под действием излучения.

Кроме того, может быть важен
эффект Ярковского.

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



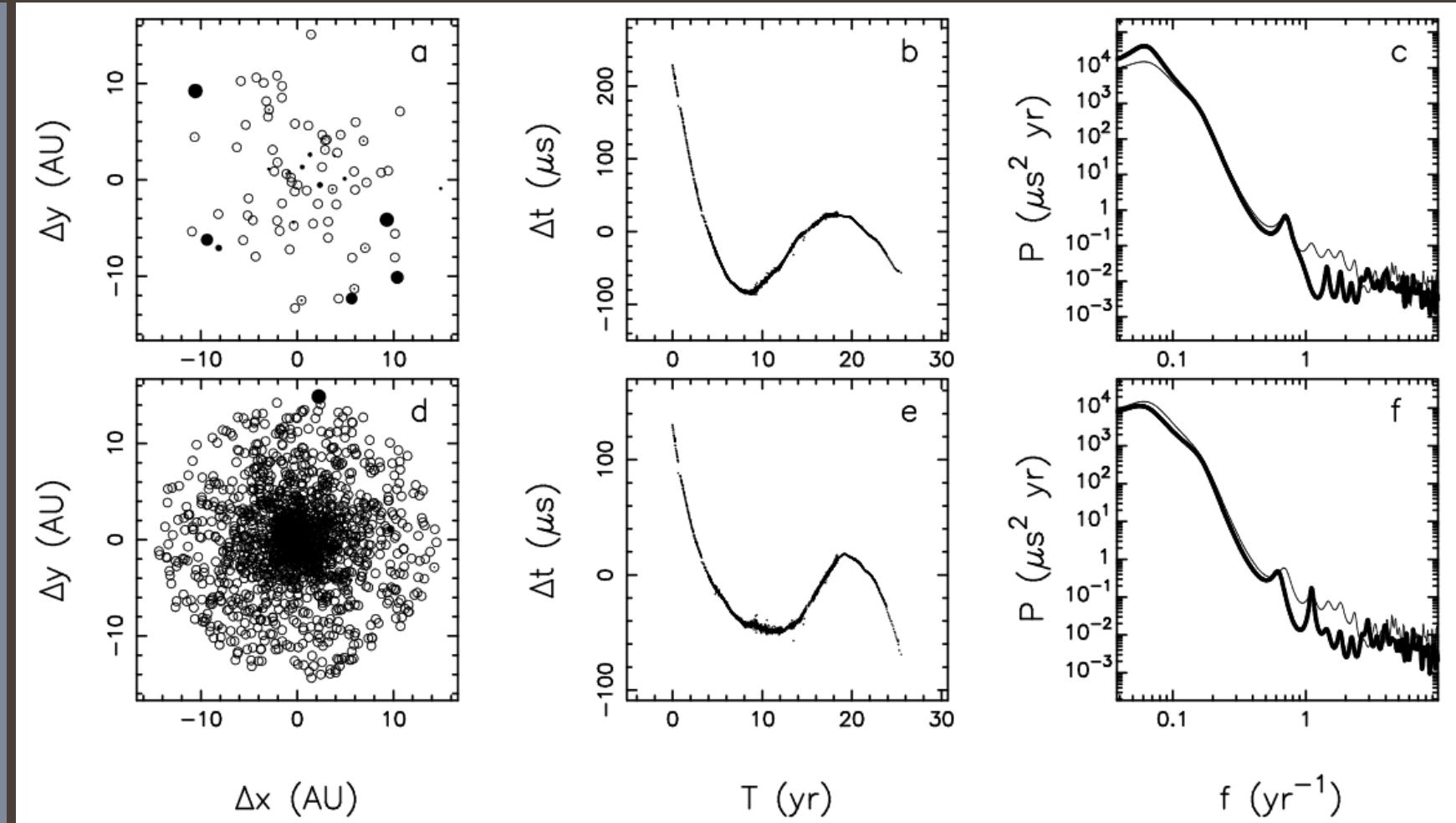
Эффект Ярковского



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



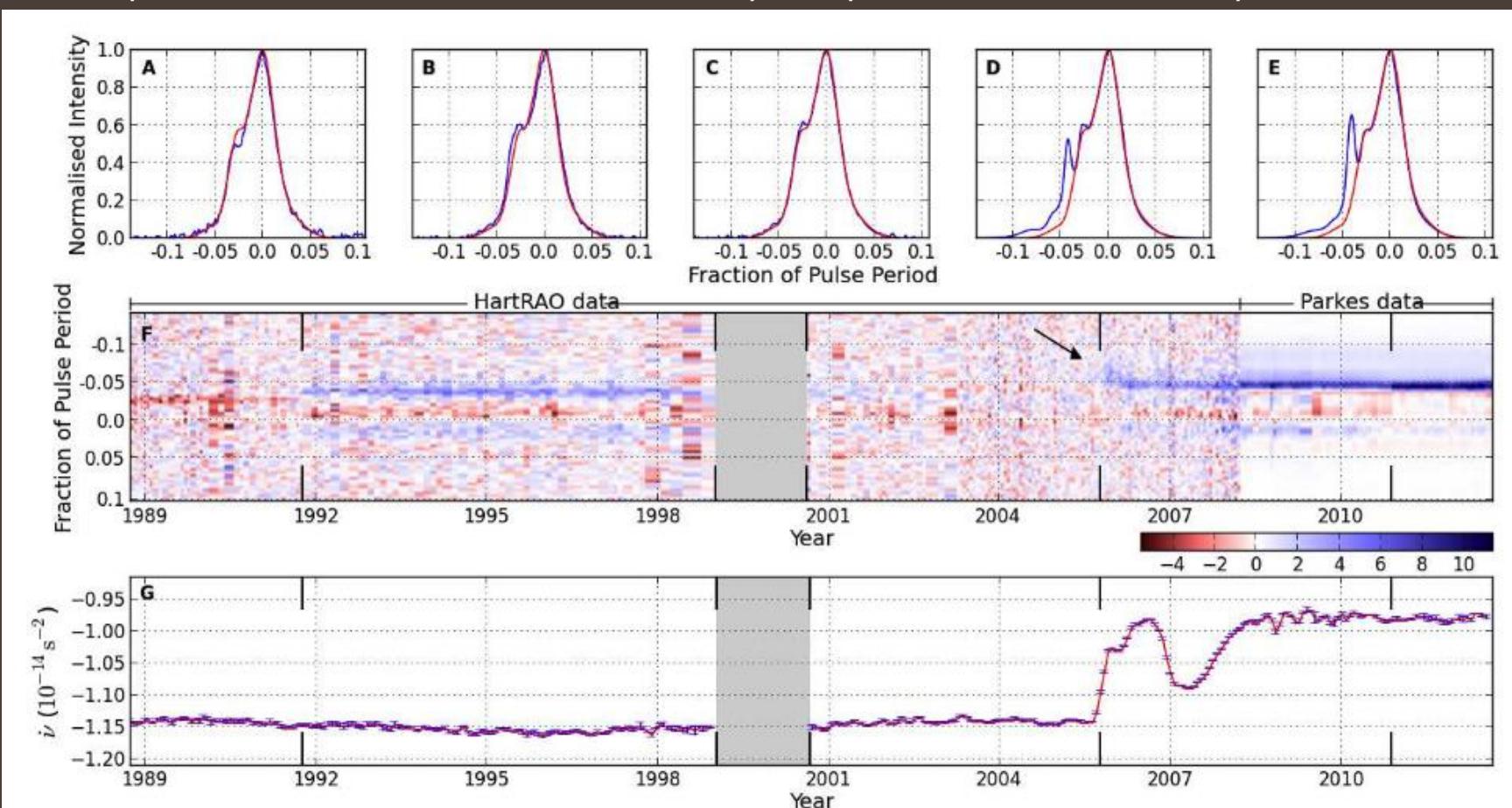
Лучшие модели пояса астероидов с точки зрения описания данных.
Черные кружки – более массивные объекты.

Пульсар и пояс астероидов-2?

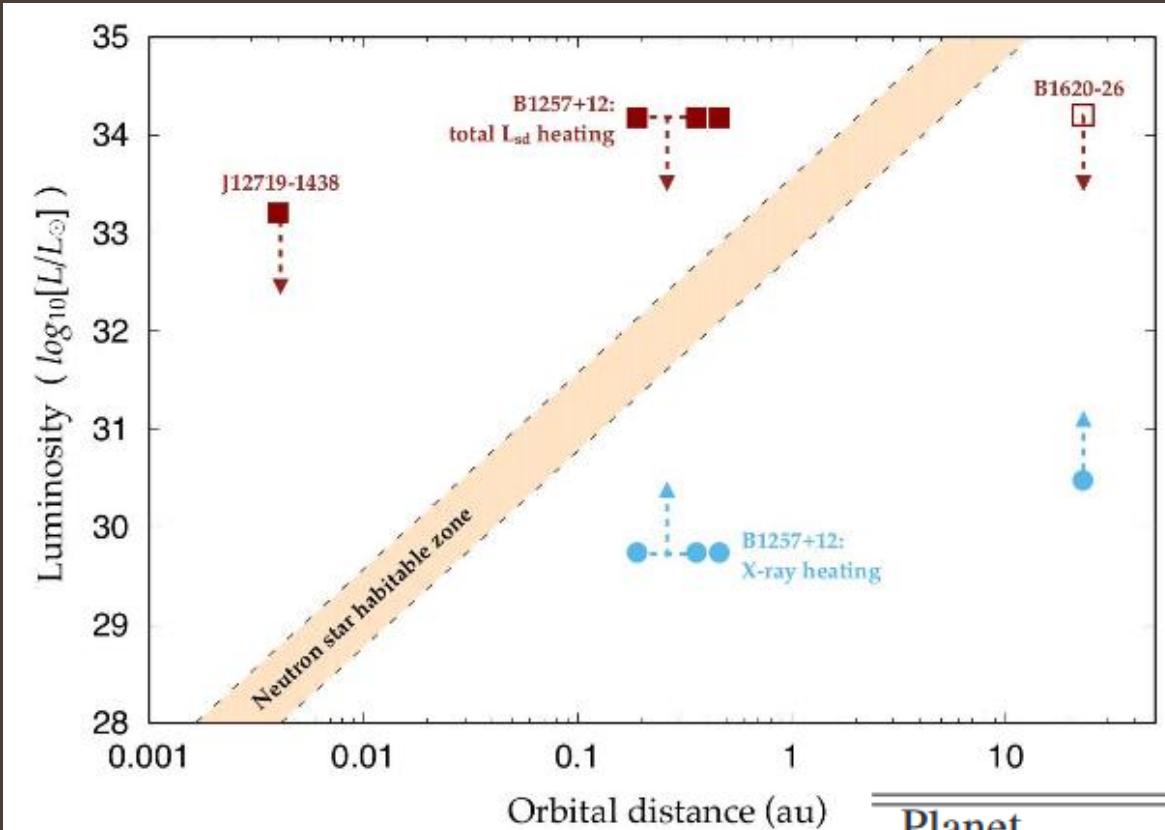
PSR J0738–4042

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?

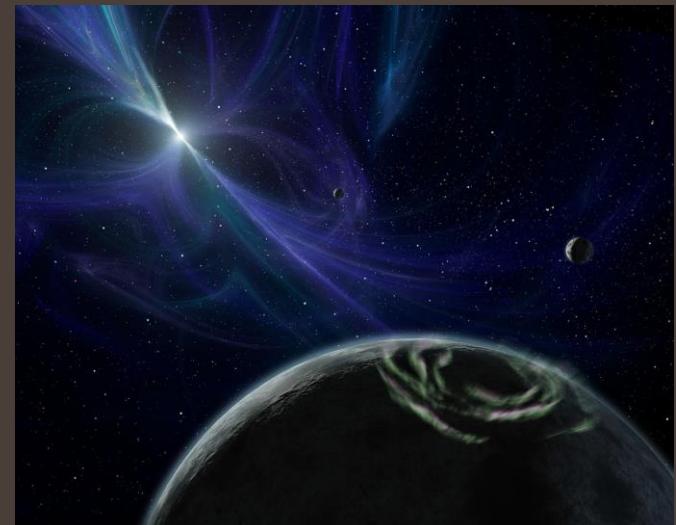


Магнитное поле планеты может предотвратить потерю атмосферы.

| 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](https://arxiv.org)

[0908.0736 The Pulsar Planets: A Test Case of Terrestrial Planet Assembly](https://arxiv.org/abs/0908.0736)

[1609.06409 Why are pulsar planets rare?](https://arxiv.org/abs/1609.06409)

[1705.07688 Neutron Star Planets: Atmospheric processes and habitability](https://arxiv.org/abs/1705.07688)



Cornell University
Library

[arXiv.org](https://arxiv.org)