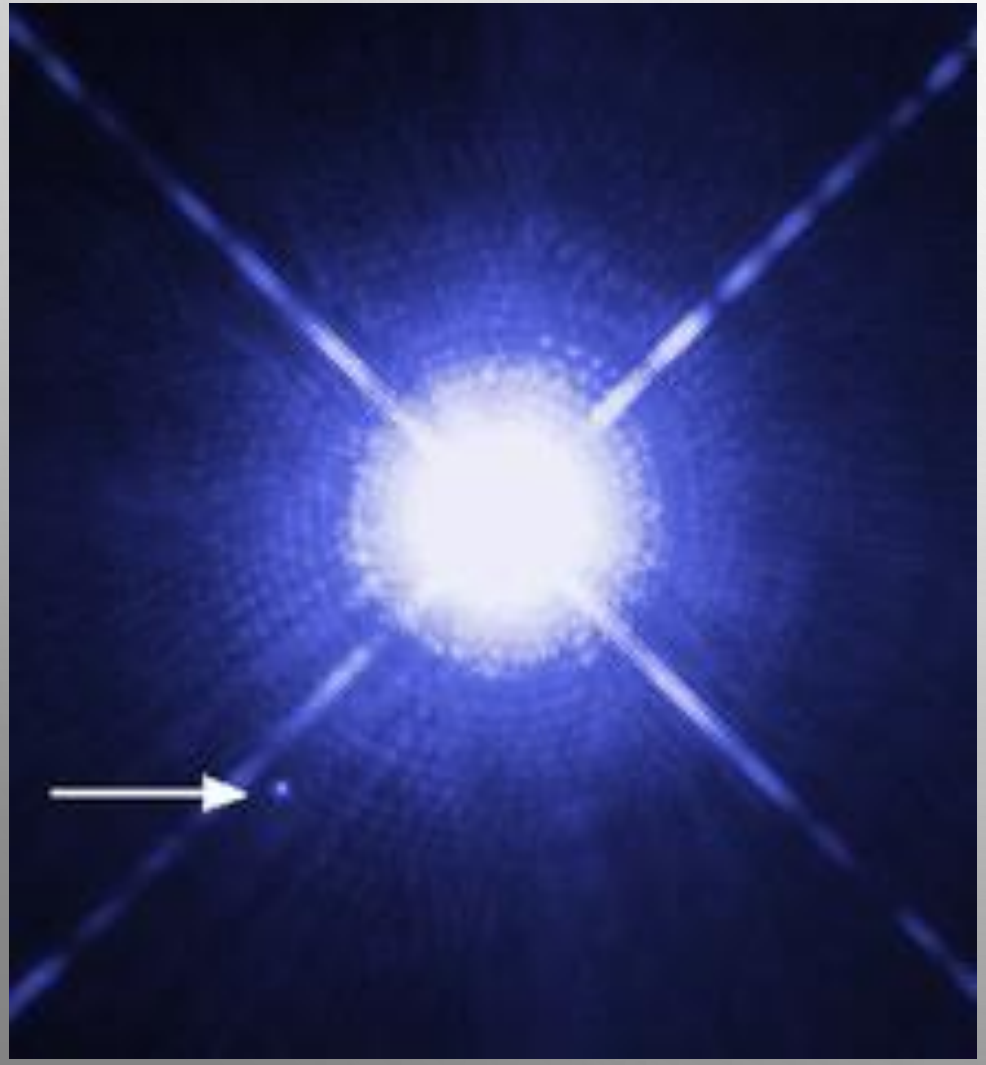
БЕЛЫЕ КАРЛИКИ, СВЕРХНОВЫЕ, НЕЙТРОННЫЕ ЗВЕЗДЫ И ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

СЕРГЕЙ ПОПОВ
(ГАИШ МГУ)

НЕОБЫЧНЫЕ КОМПАКТНЫЕ ЗВЕЗДЫ



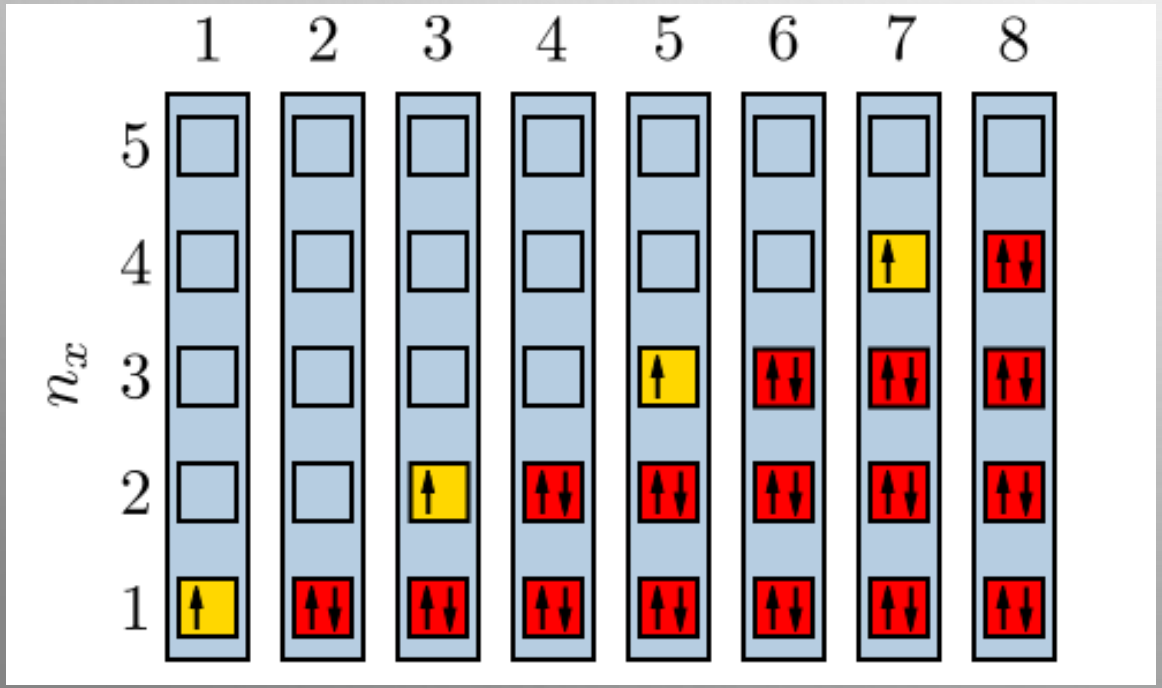
Измерения температур, масс и радиусов для источников в двойных системах позволило надежно доказать существование массивных компактных объектов с относительно высокой температурой.

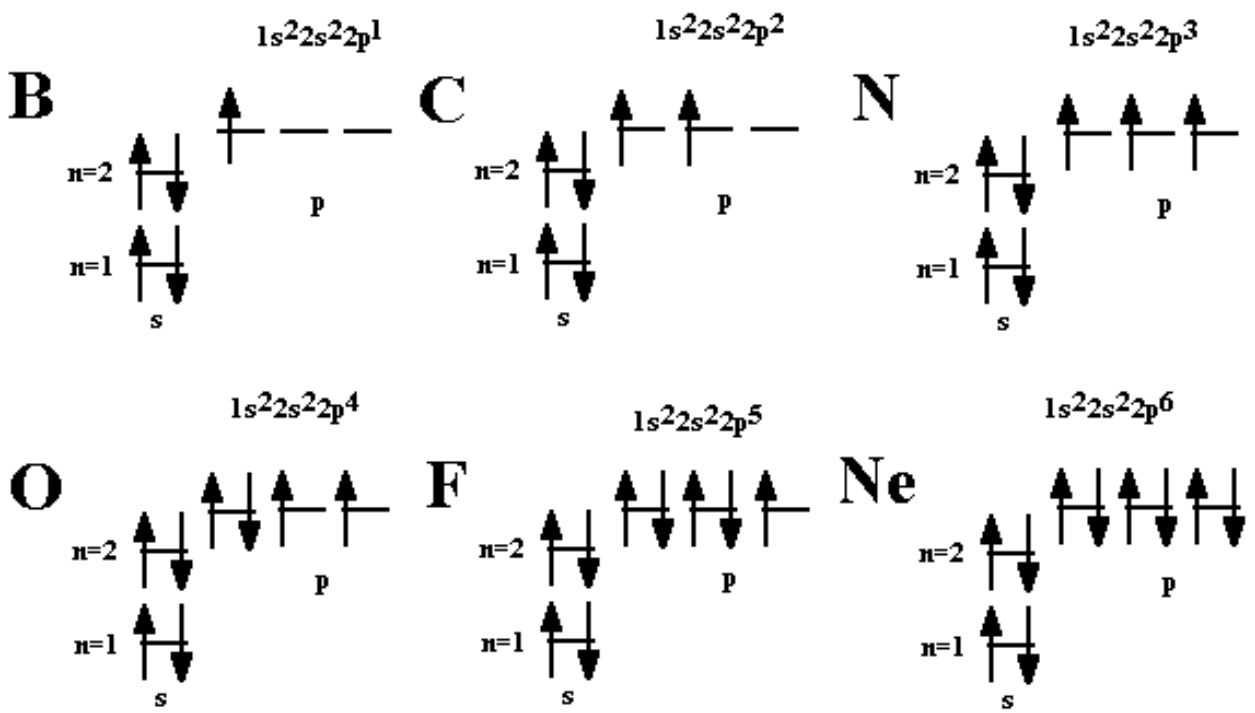
При массе порядка солнечной они имеют массу порядка земной.

Для объяснения природы этих объектов понадобилась квантовая механика.

ЗАПРЕТ ПАУЛИ

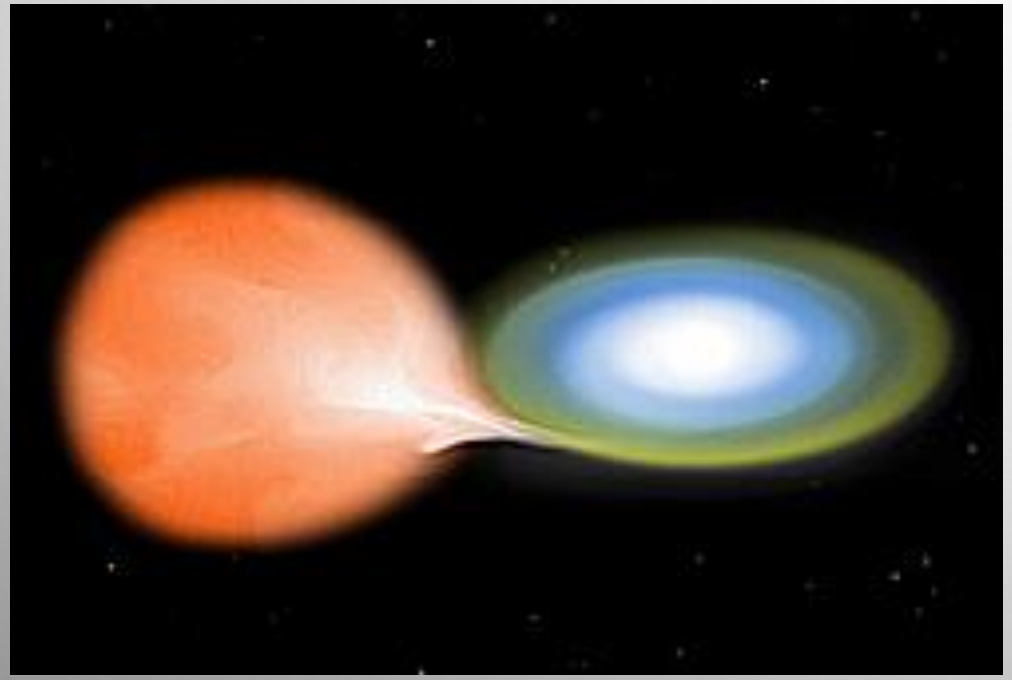
Два фермиона не могут иметь одинаковые волновые функции (не могут находиться в одном квантовом состоянии).



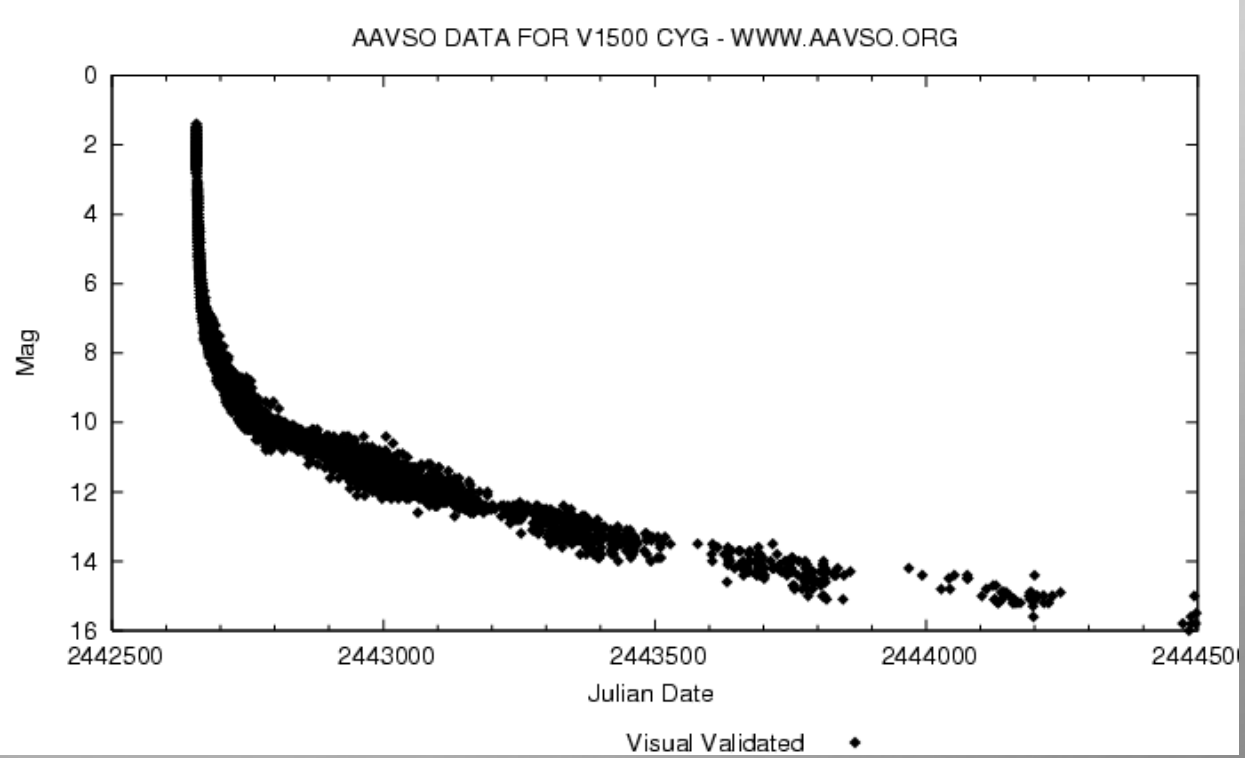


www.boundless.com

НОВЫЕ ЗВЕЗДЫ

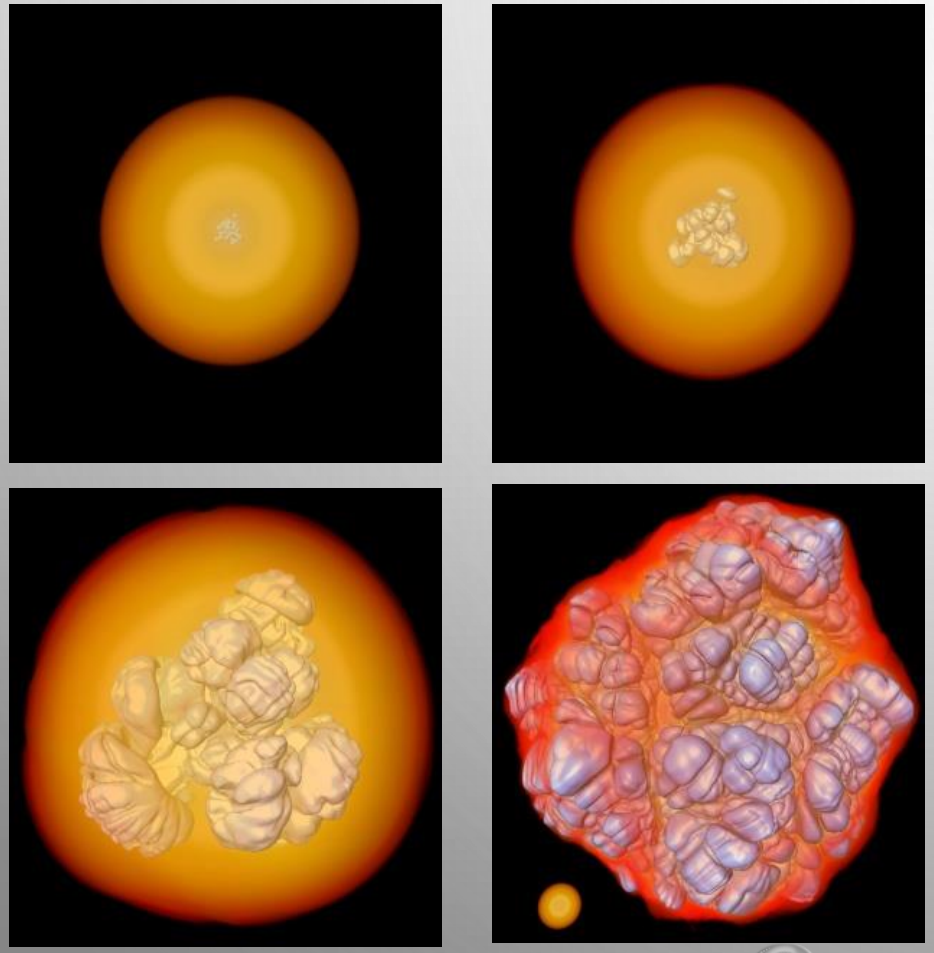


Термоядерное взрывное горение водорода



Перетекающее вещество накапливается
на поверхности белого карлика,
пока не происходит взрыв.

ВЗРЫВ SN IA



(Roepke et al.)

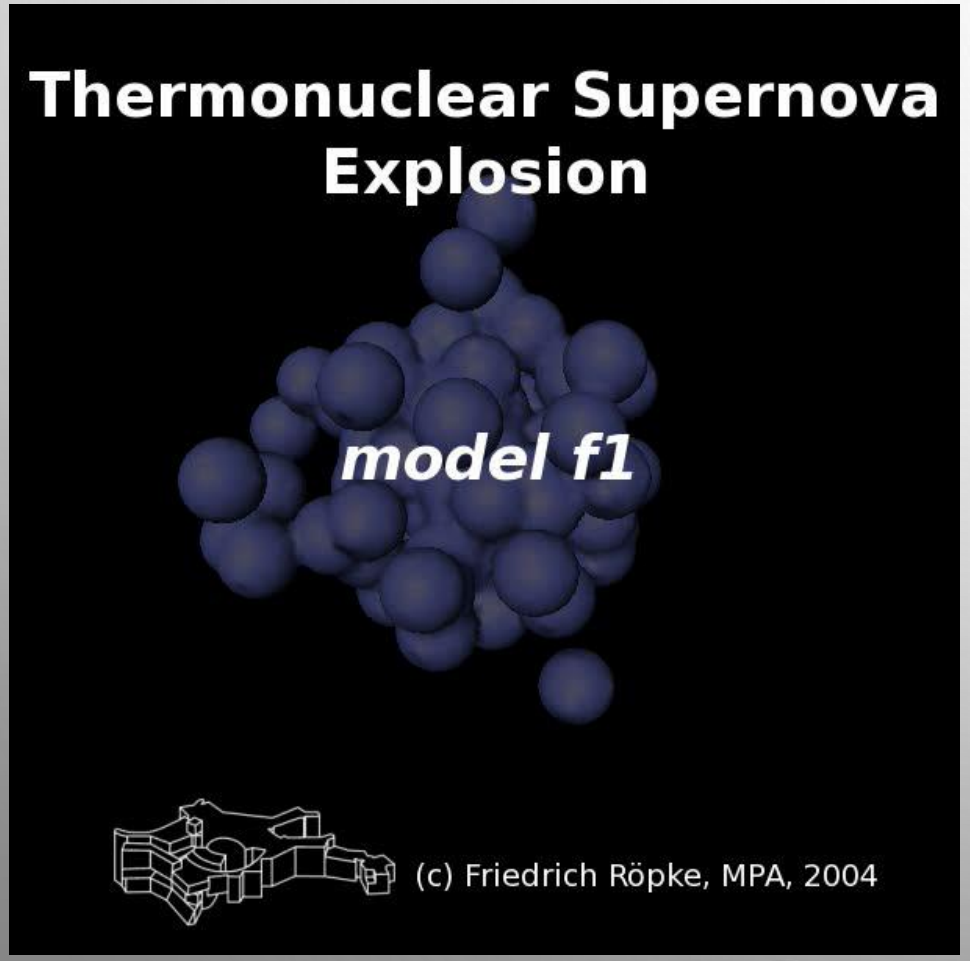
Достигнув критической массы,
белые карлики взрываются
(термоядерное горение углерода и кислорода).

Это термоядерный взрыв,
полностью разрушающий объект.

Наблюдения именно таких сверхновых
привели к открытию темной энергии.

Они также очень важны для
синтеза многих тяжелых элементов.

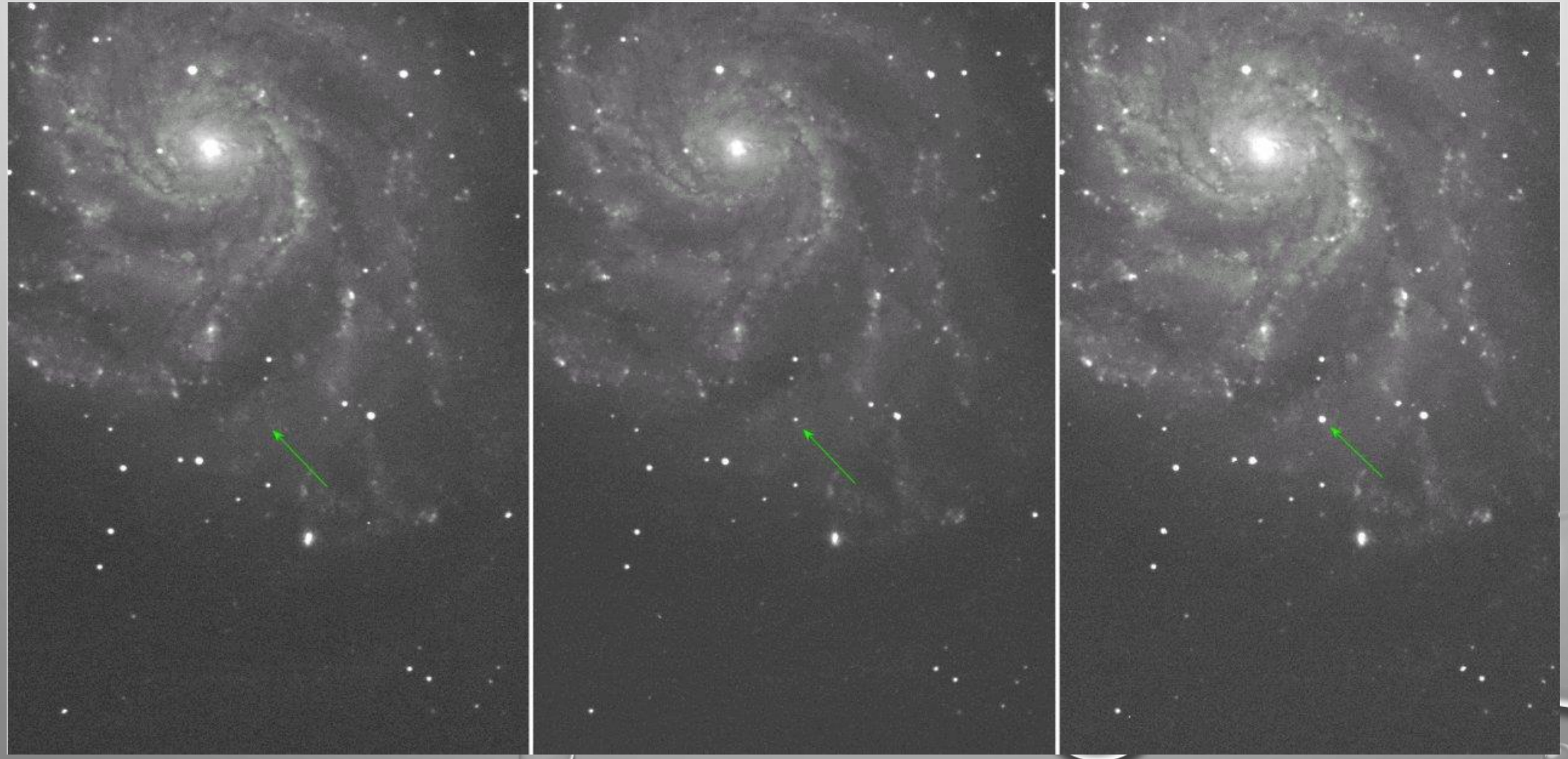
ВЗРЫВ СВЕРХНОВОЙ ТИПА IA



Взрыв происходит, если в белом карлике начинается неустойчивое термоядерное горение углерода.

Масса белого карлика может достичь предела или в результате аккреции, или в результате слияния двух карликов.

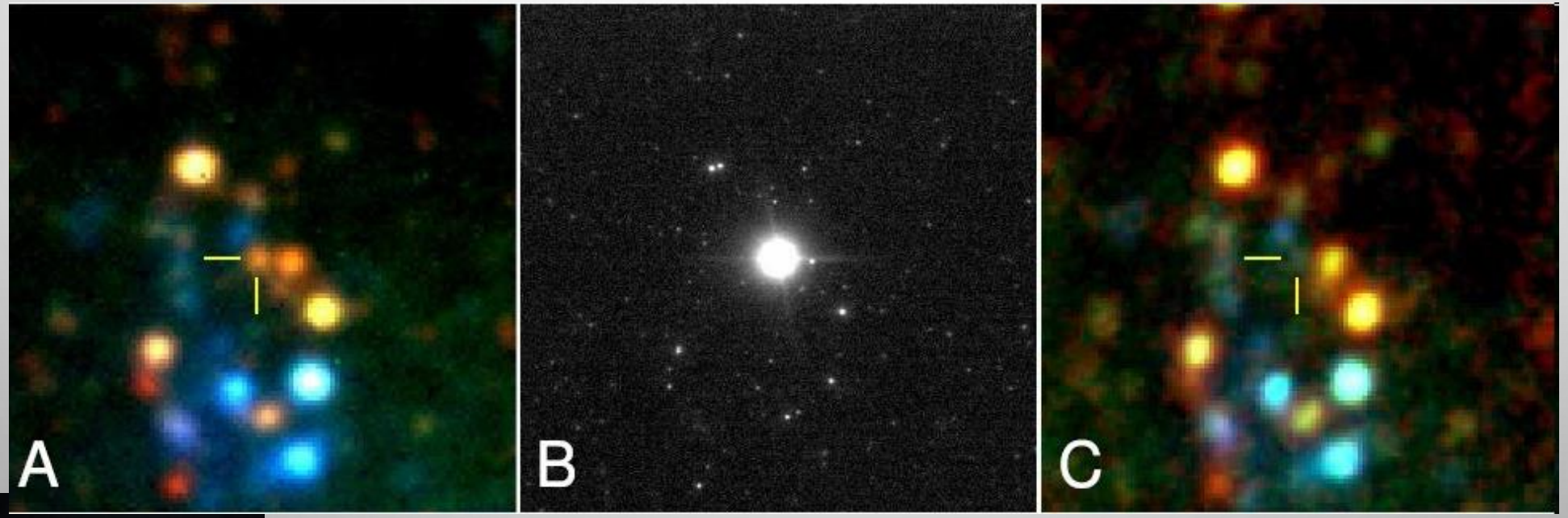
СВЕРХНОВАЯ IA В БЛИЗКОЙ ГАЛАКТИКЕ



1110.6201

Галактика M101. 6.4 Мпк. Самая близкая сверхновая Ia за последние 25 лет.

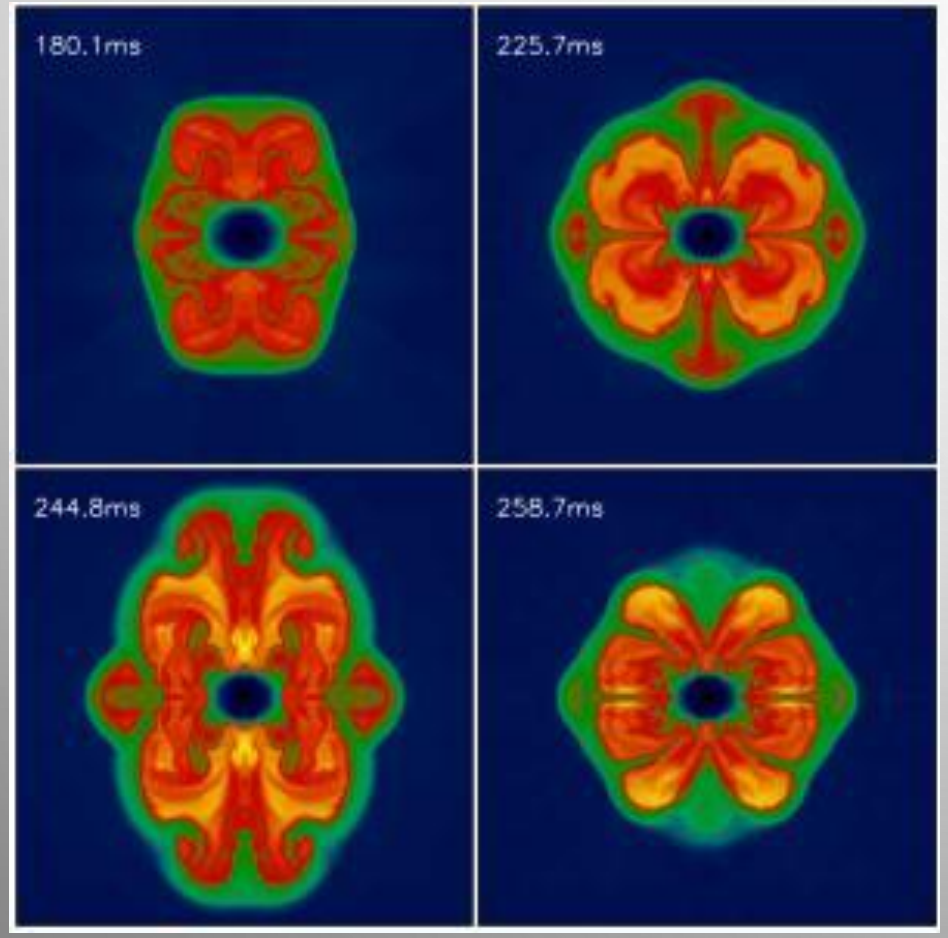
СВЕРХНОВЫЕ



Жизнь массивной звезды заканчивается колоссальным взрывом – сверхновой. Также взрываться могут белые карлики, если они стали слишком тяжелыми.

На короткое время звезда становится ярче целой галактики!

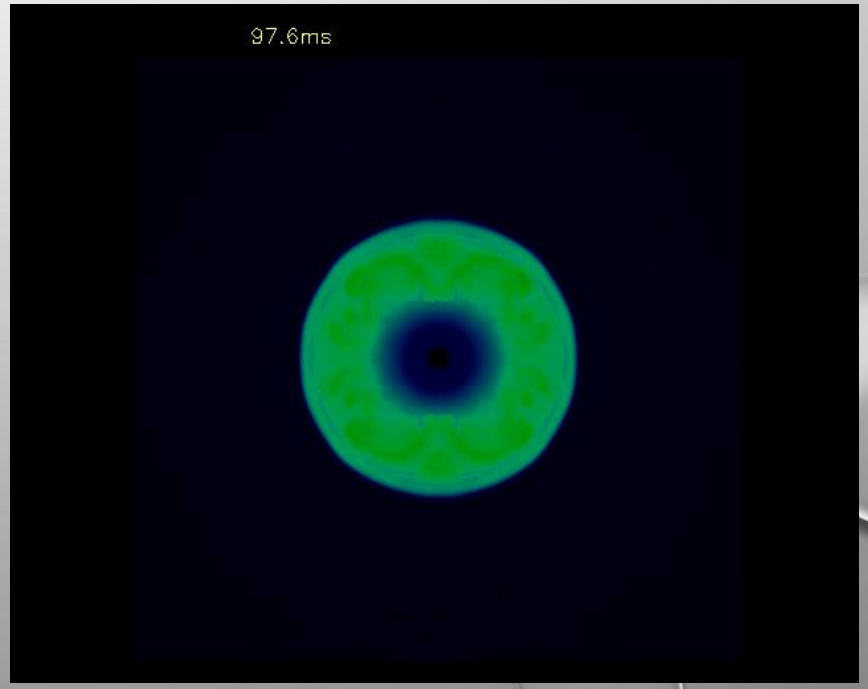
ВЗРЫВ СВЕРХНОВОЙ



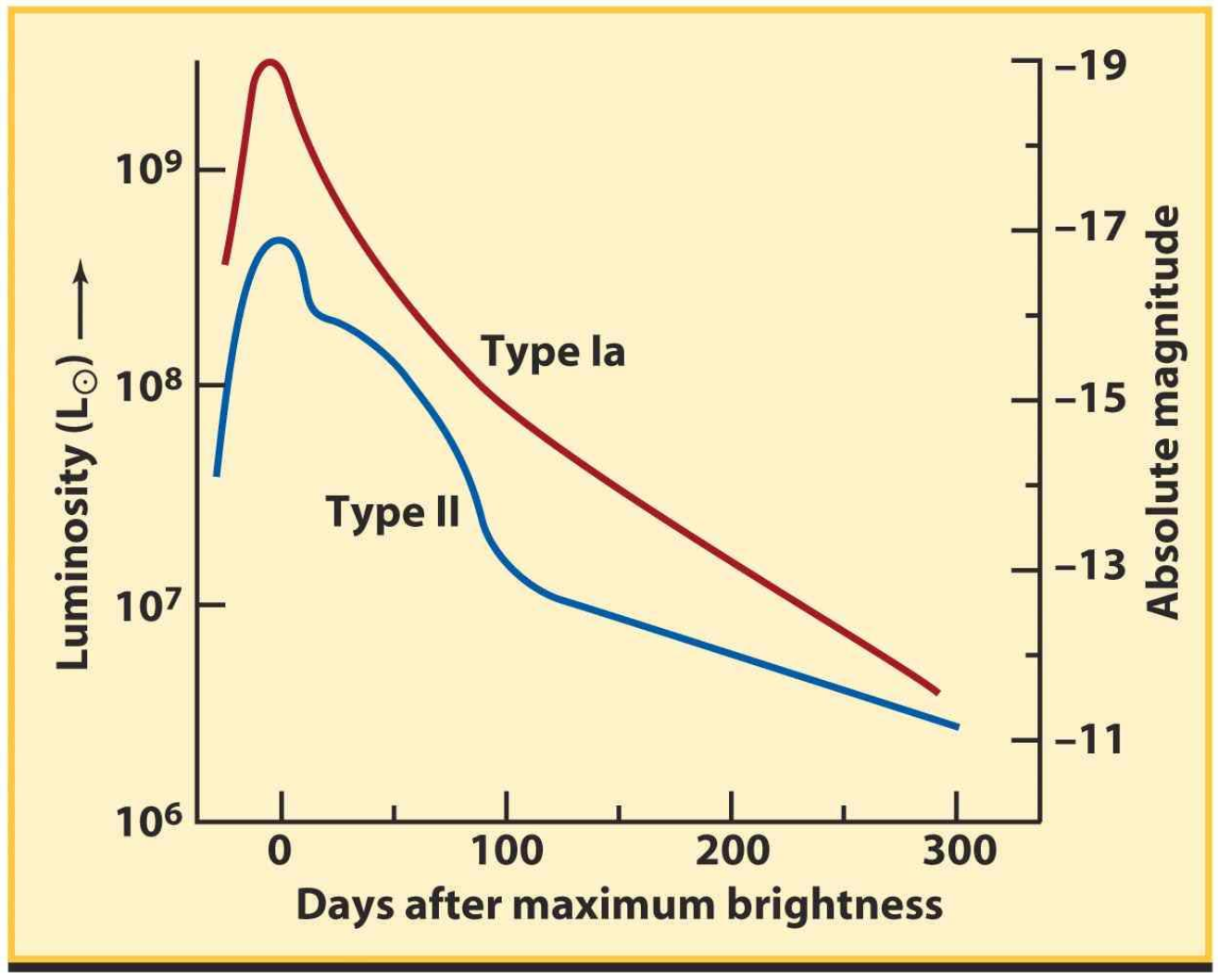
(Buras, Janka et al.)

Расчеты взрывов сверхновых можно смело отнести к числу самых сложных задач

- термоядерные реакции
- магнитные поля
- гидродинамика
- нейтрино
- эффекты теории относит.



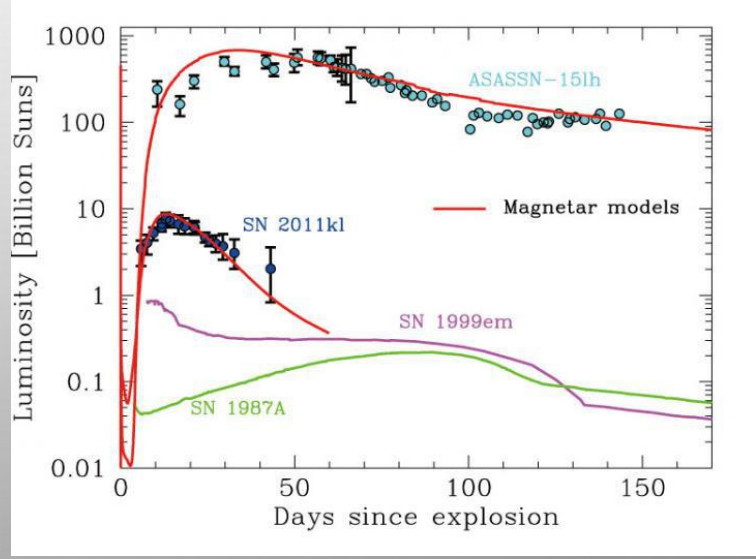
КРИВАЯ БЛЕСКА СВЕРХНОВОЙ



http://pics-about-space.com

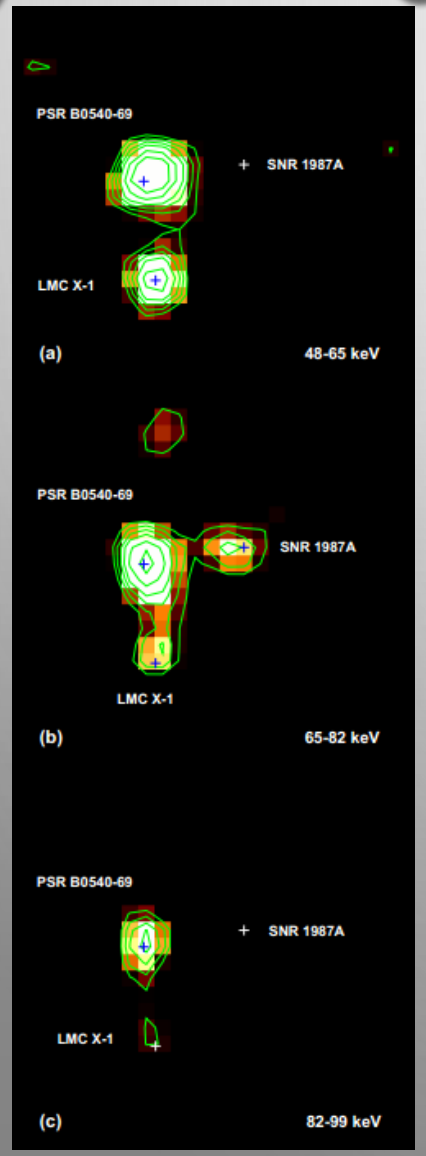
В течение сотен дней после коллапса сверхновая видна в основном за счет распада радиоактивных элементов.

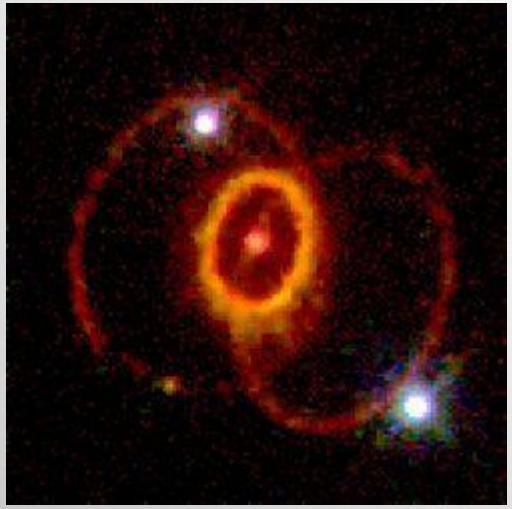
На ранних стадиях также могут быть дополнительные источники энергии.



Bersten et al.

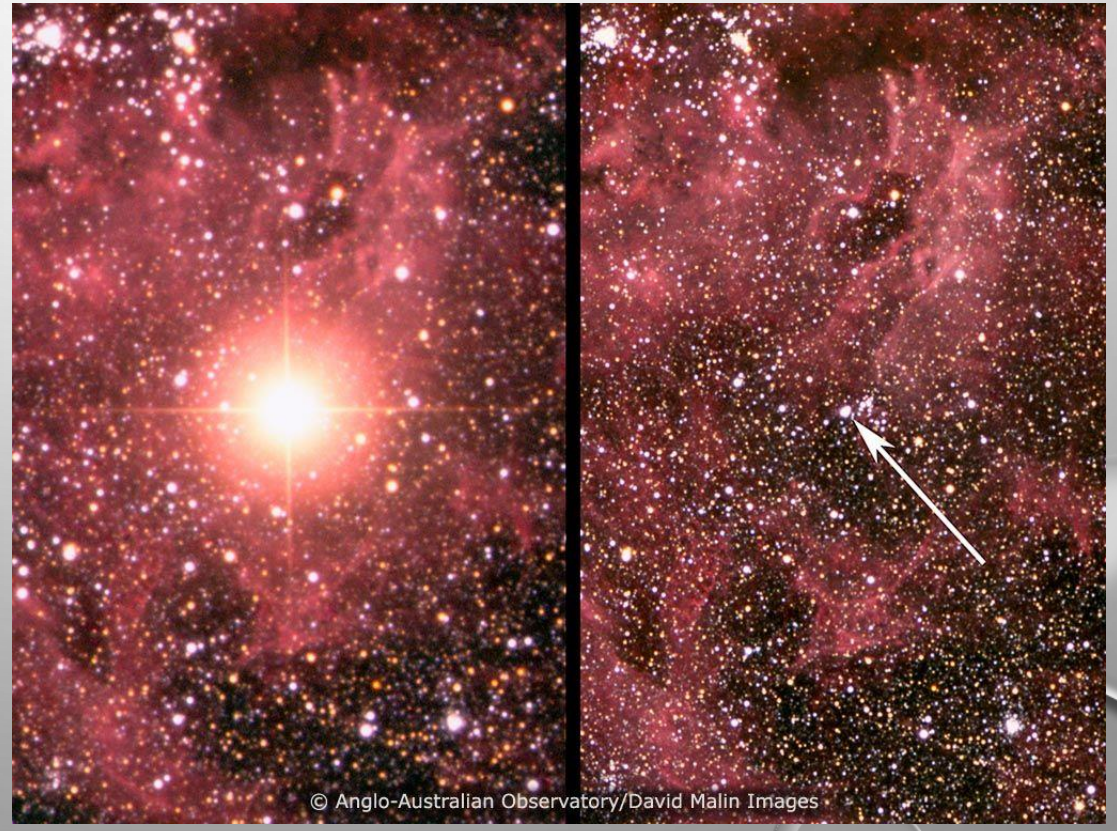
ТИТАН В СВЕРХНОВОЙ 1987A





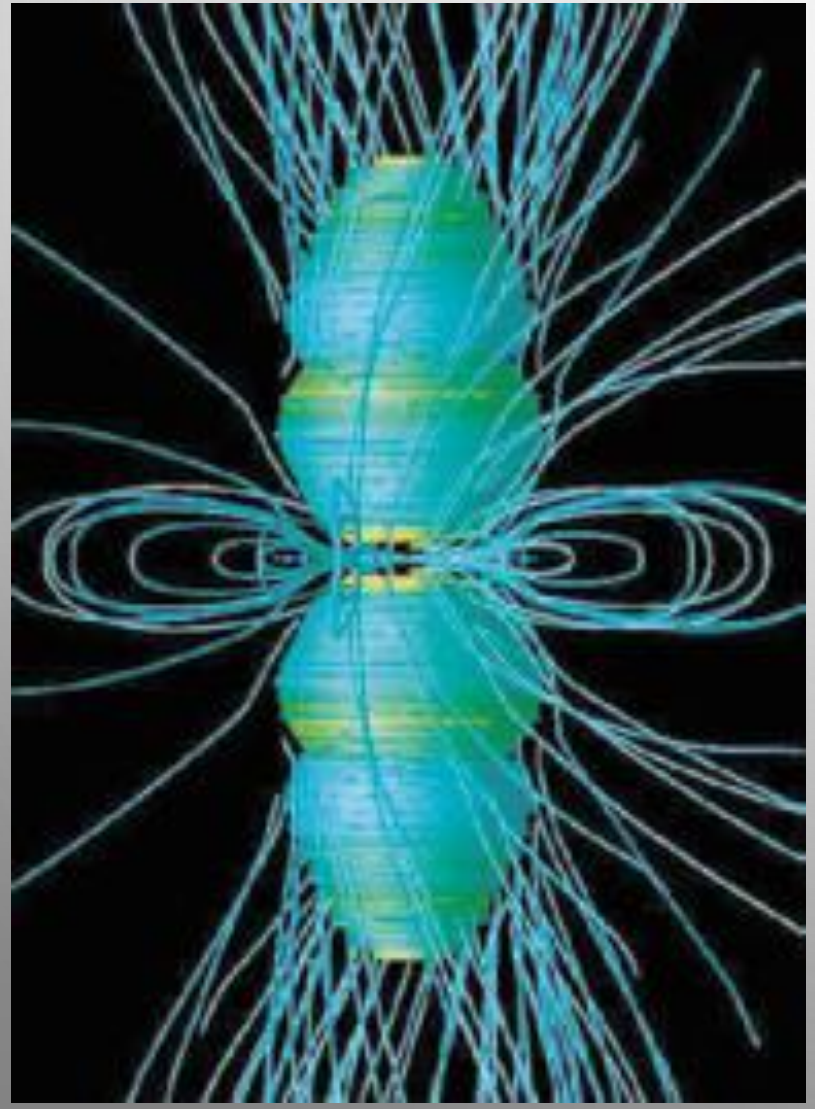
Наблюдения на спутнике INTEGRAL позволили обнаружить излучение от распада титана-44 в остатке сверхновой 1987A.

Именно распад титана-44 отвечает за свечение остатка на определенном этапе эволюции.



1211.2656

ПРОГРЕСС В ИЗУЧЕНИИ СВЕРХНОВЫХ



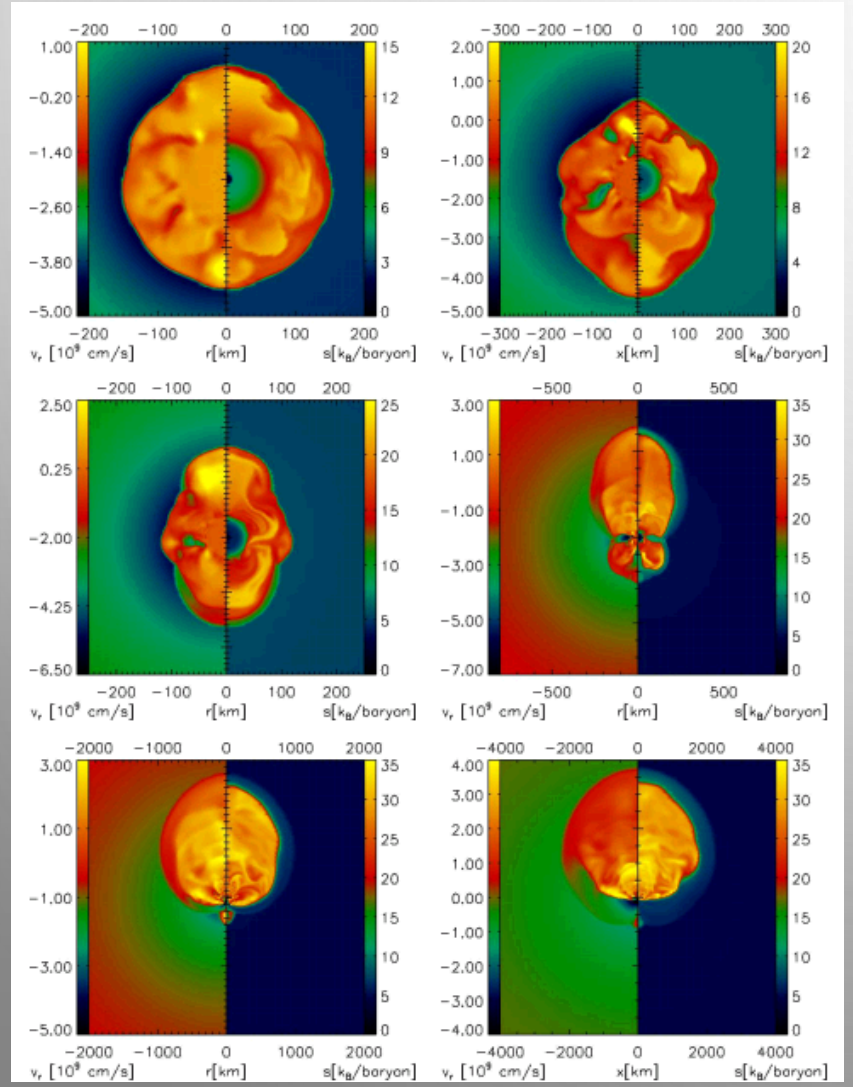
Теория

- Более мощные компьютеры позволят считать в деталях
- Учет многих эффектов сразу

Наблюдения

- Наблюдения нейтрино
- Наблюдения очень ранних стадий вспышки сразу в нескольких диапазонах спектра

НАКОНЕЦ–ТО СВЕРХНОВАЯ ВЗОРВАЛАСЬ В КОМПЬЮТЕРЕ!

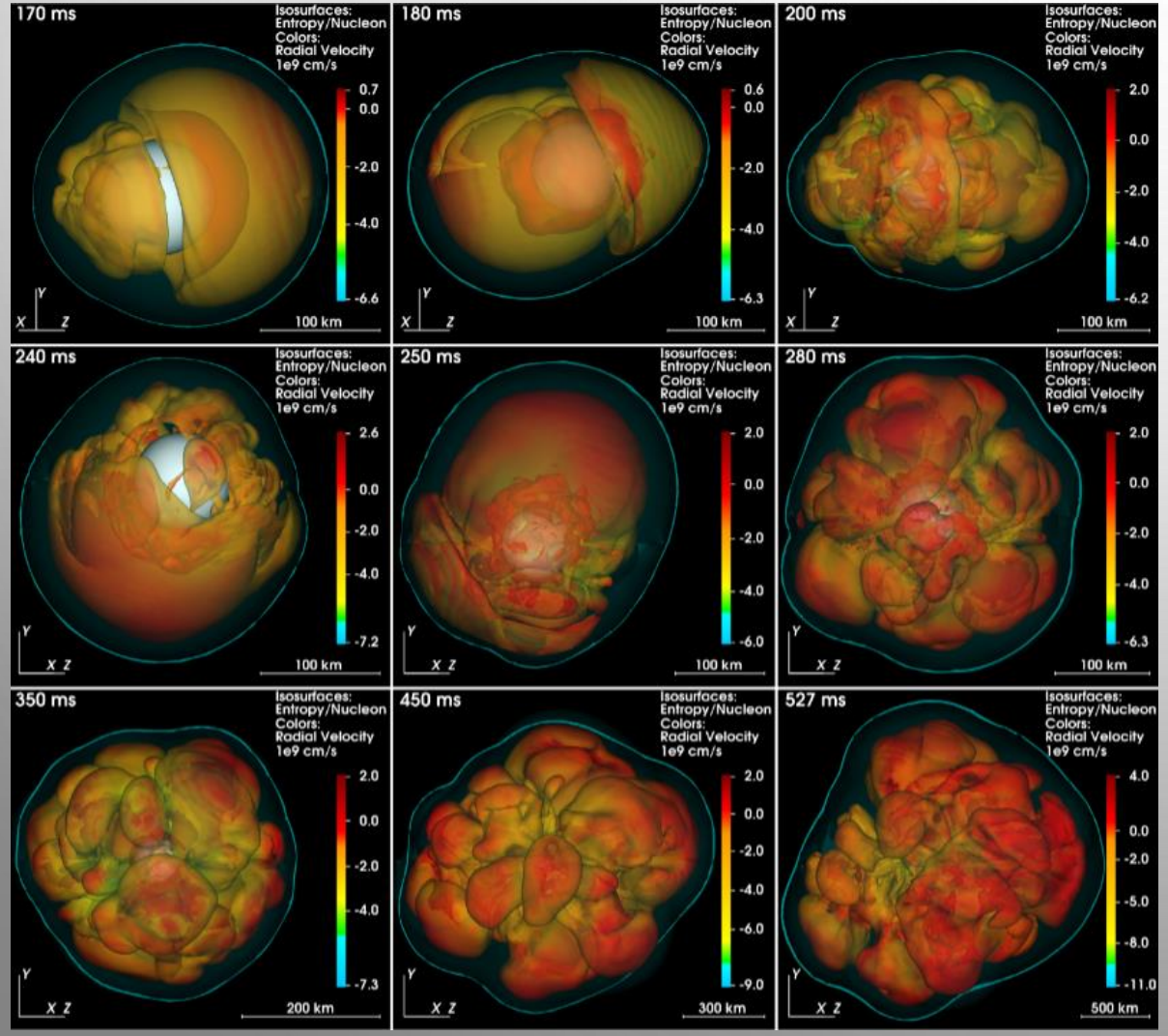


Учет эффектов ОТО позволил получить взрыв сверхновой в рамках новых двумерных расчетов.

Но в трехмерных расчетах не все так хорошо.

1202.0815

СТРАННЫЕ КВАРКИ И СВЕРХНОВЫЕ

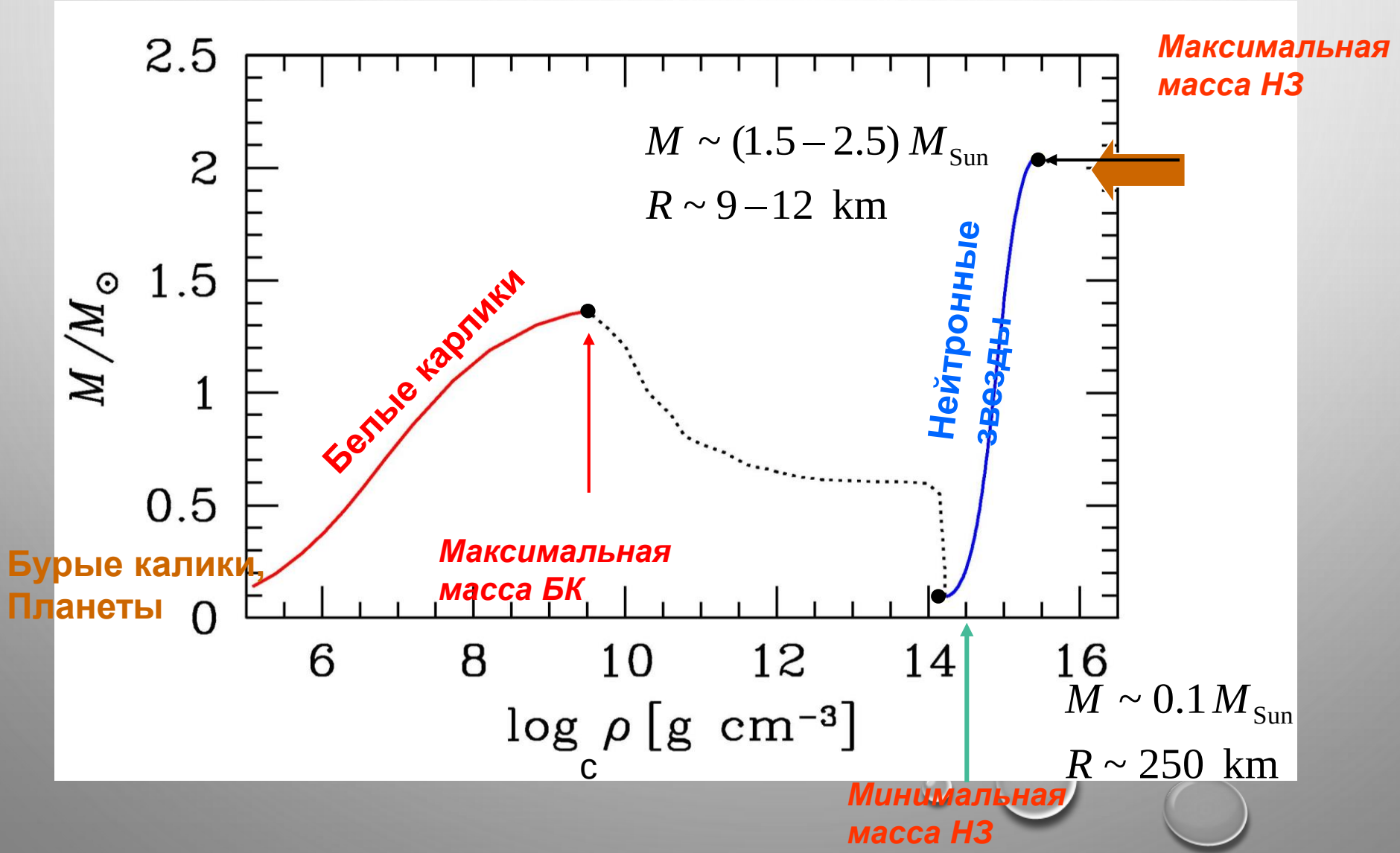


Авторы добавили в расчеты процессы с участием странных кварков.

Это помогло взорвать звезду с массой 20 солнечных в трехмерном (!) расчете.

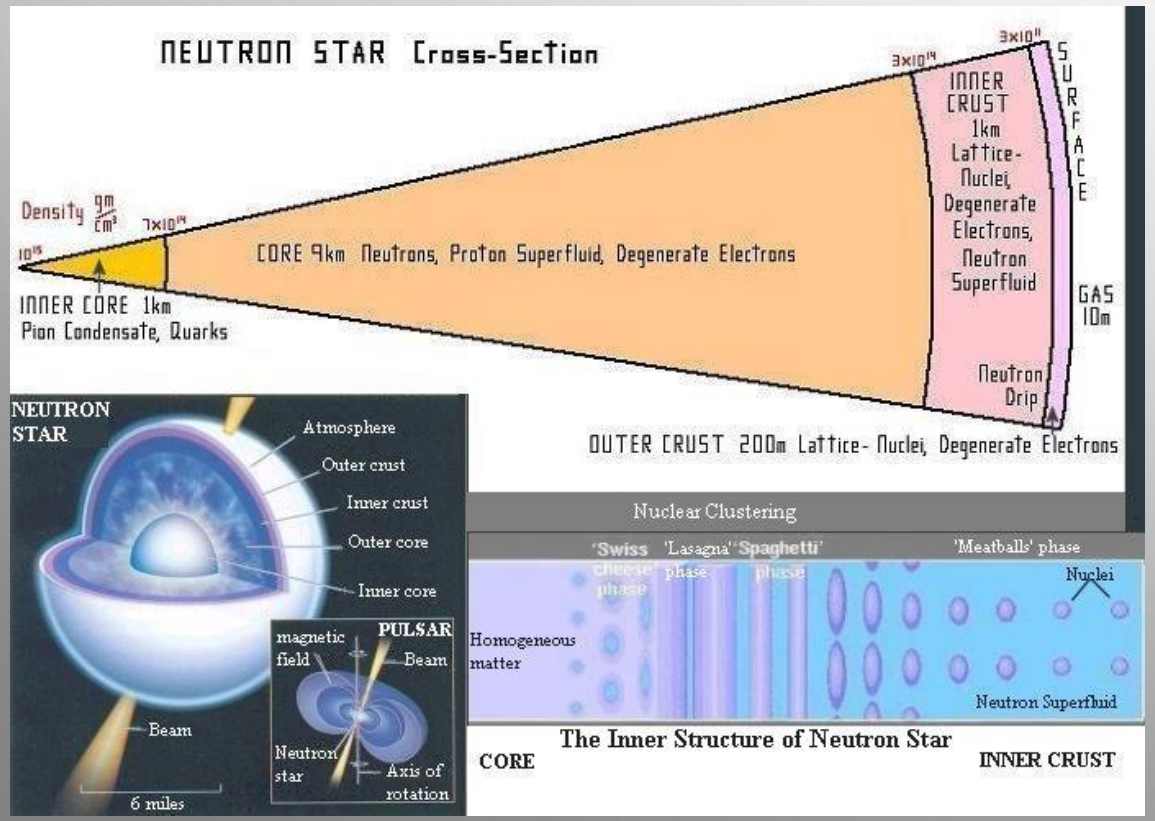
1504.07631

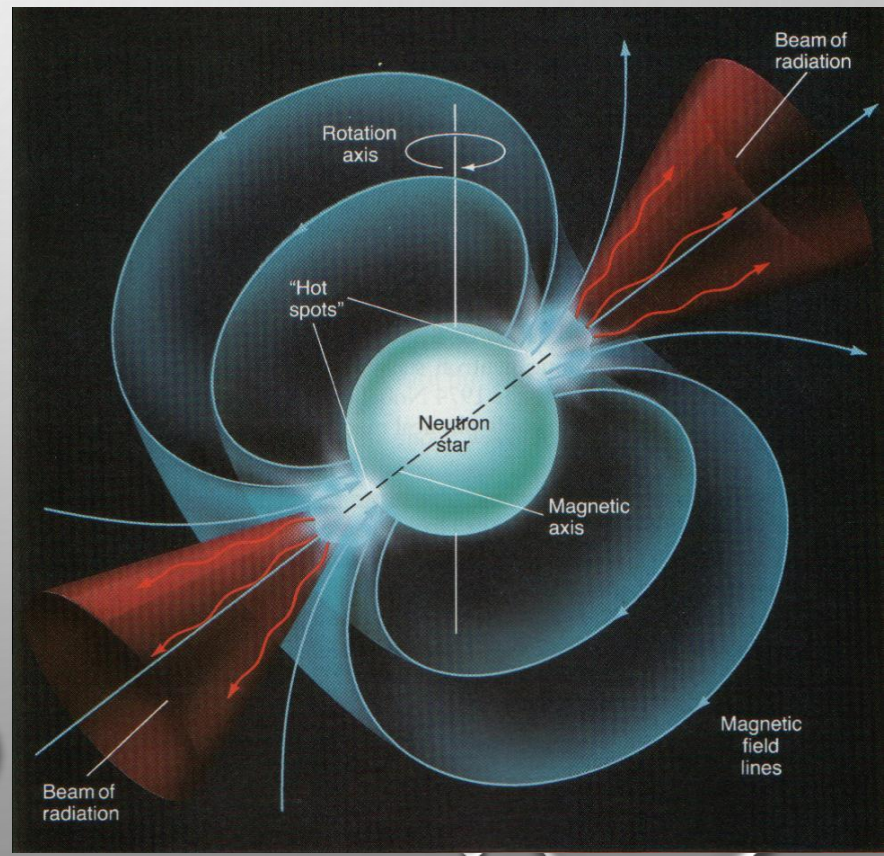
МАССЫ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД И БЕЛЫХ КАРЛИКОВ



НЕЙТРОННЫЕ ЗВЕЗДЫ – ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Сверхсильные магнитные поля (больше швингеровского)
- Сильная гравитация (радиус порядка 3-4 шварцшильдовских)
- Сверхплотное вещество (в центре плотность выше ядерной)





ПРЕДСКАЗАНИЕ …

Нейтронные звезды были предсказаны в 30-е гг.

Л.Д. Ландау: Звезда-ядро

Бааде и Цвикки: нейтронные звезды и сверхновые

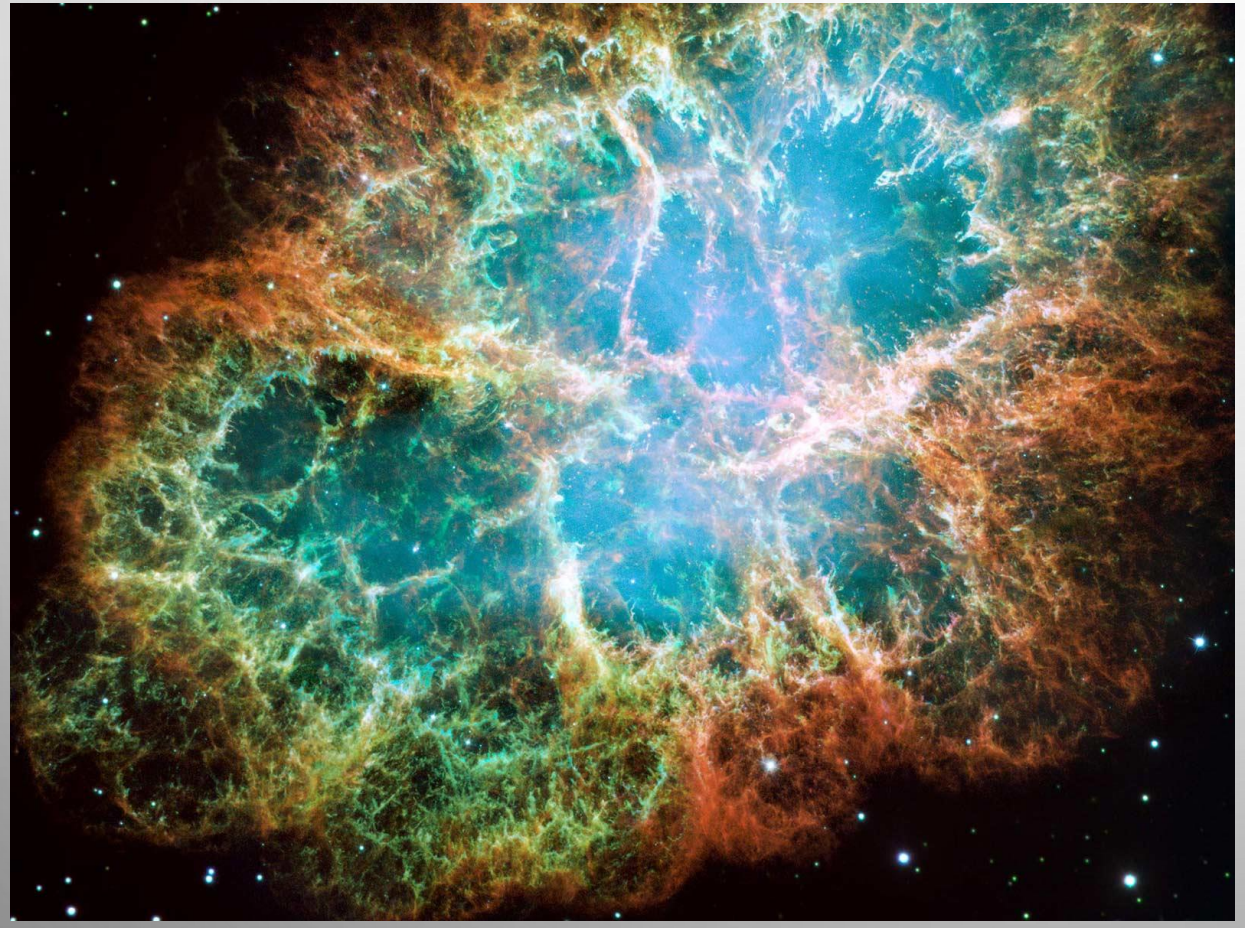
Ландау

Бааде

Цвикки

История предсказания хорошо описана в статье Яковлев и др. 2013 http://ufn.ru/ru/articles/2013/3/f/

РОЖДЕНИЕ



Крабовидная туманность – плерион. Внутри находится один из самых известных радиопульсаров.

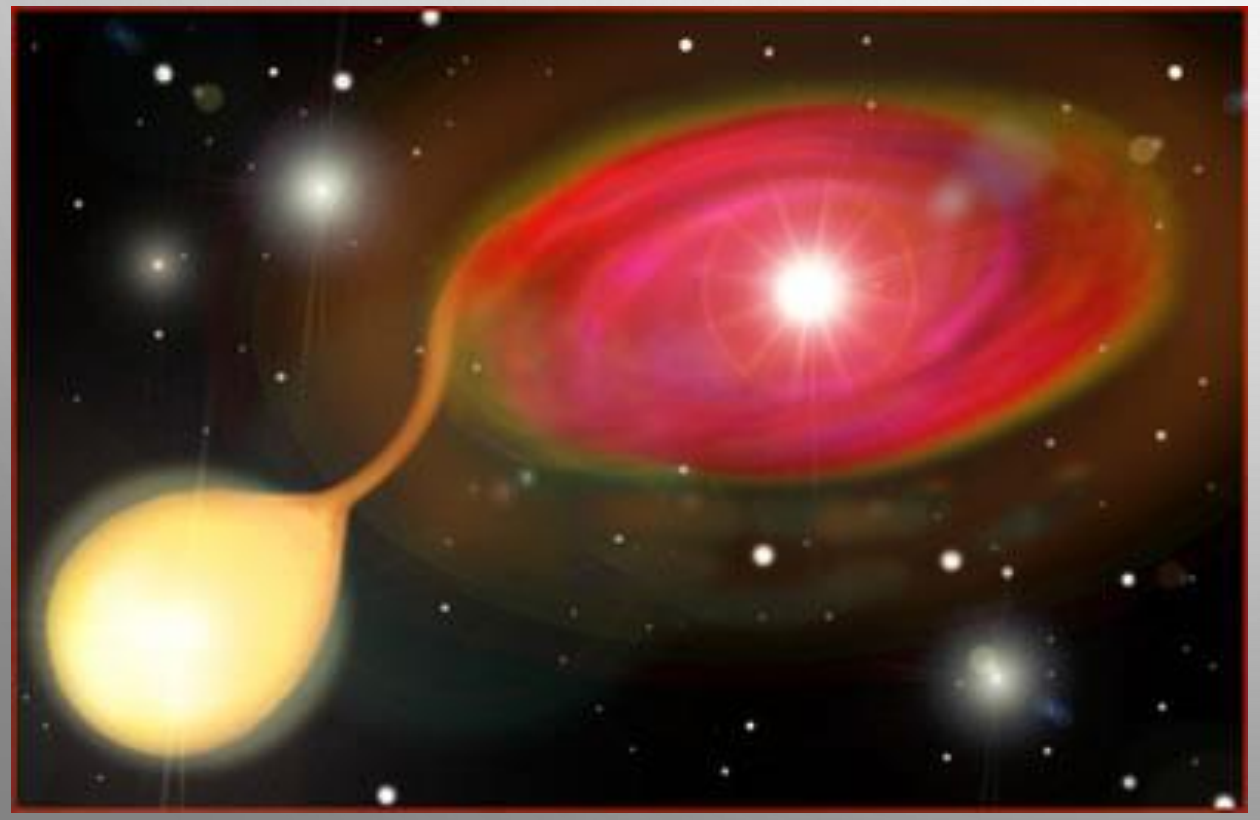
Нейтронные звезды рождаются в результате взрыва ядра массивной звезды в конце ее эволюции.
Это называют сверхновой.

На месте взрыва остается компактный объект – например, нейтронная звезда и т.н. остаток взрыва сверхновой – расширяющаяся туманность. Внутри туманности может существовать плерион.
Эта часть туманности видна из-за накачки энергии нейтронной звездой

СТАРЫЙ ЗООПАРК НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД

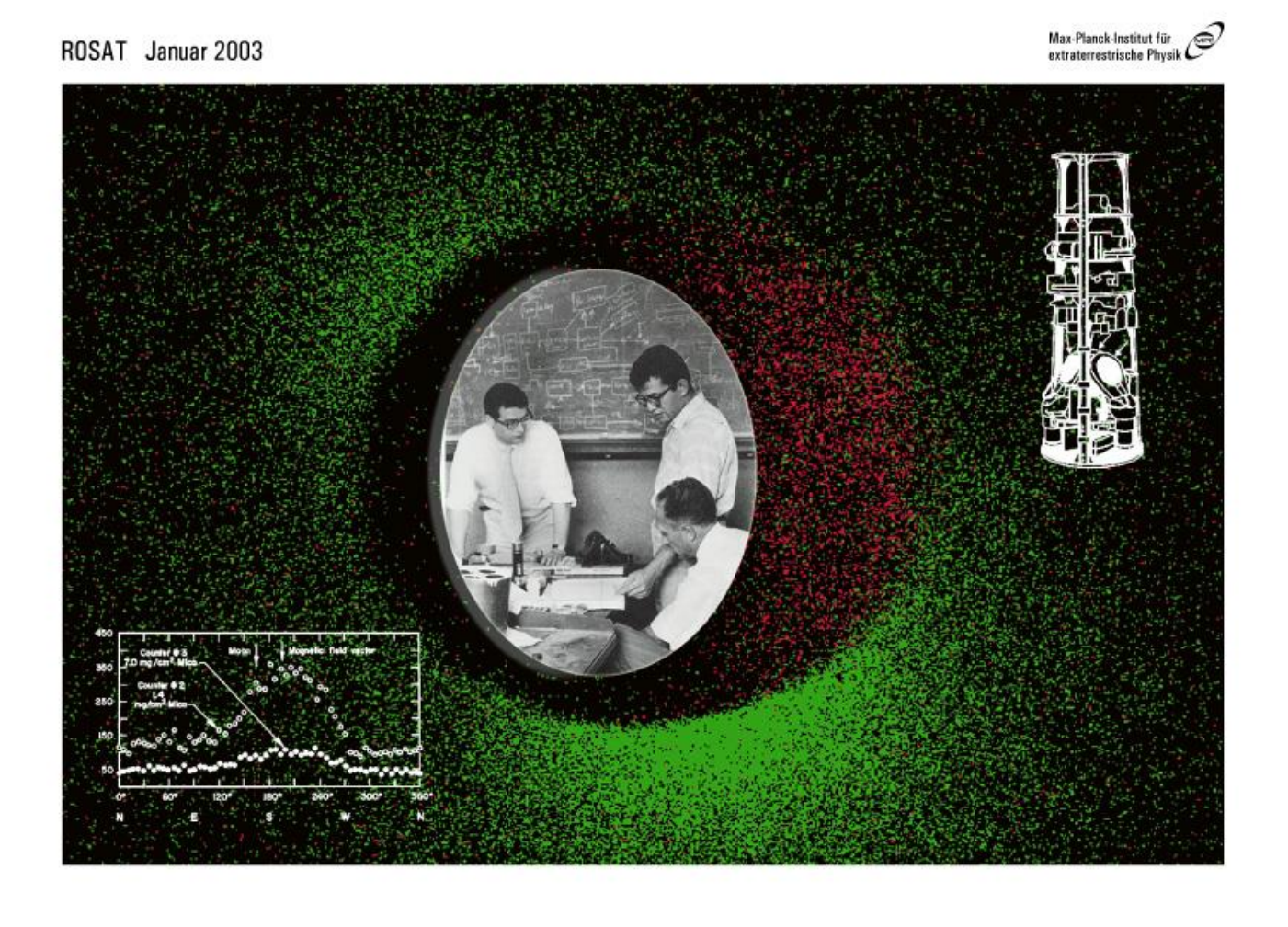
В 60-е гг. были открыты первые рентгеновские источники.

Это были НЗ в тесных двойных системах, НО ...
.... их «не узнали»....



Сейчас известны сотни
рентгеновских двойных
с нейтронными звездами
в нашей и других галактиках.

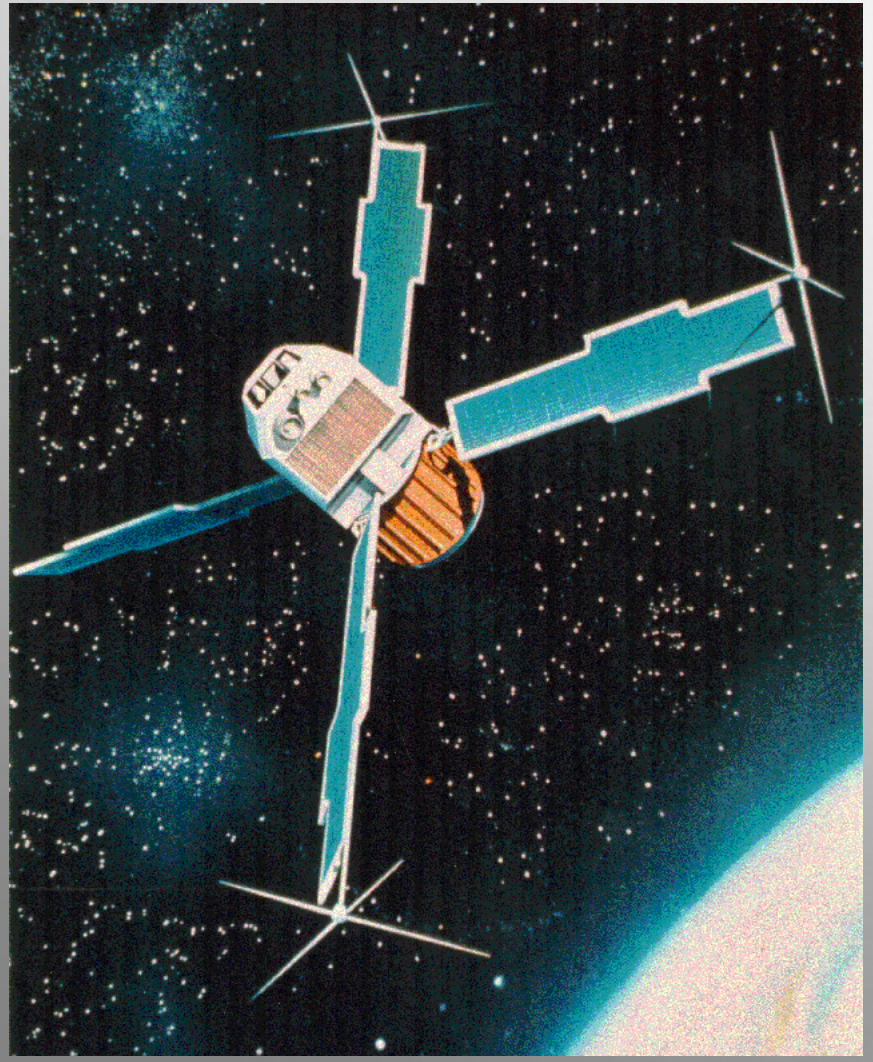
РАКЕТНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ SCO X-1



Giacconi, Gursky et al. 1962 год

В 2002 г. Р.Джиаккони получил Нобелевскую премию по физике.

UHURU

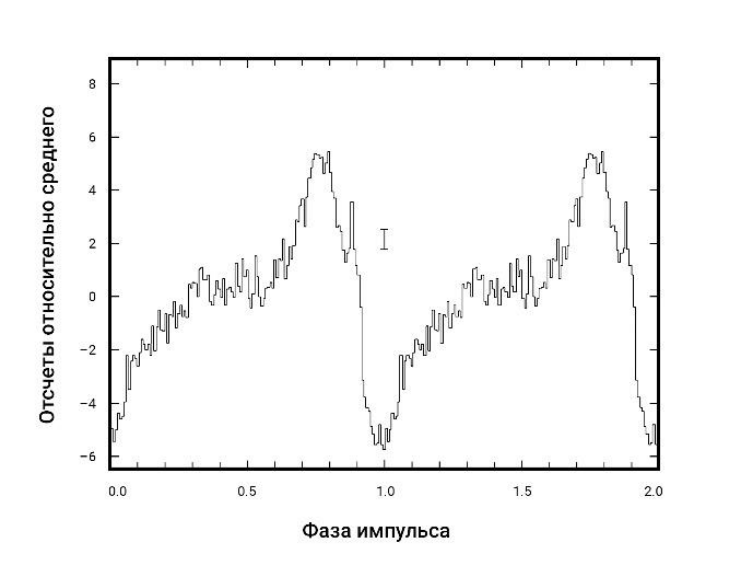


Спутник запущен 12 декабря 1970 г.
Закончил работу в марте 1973 г.

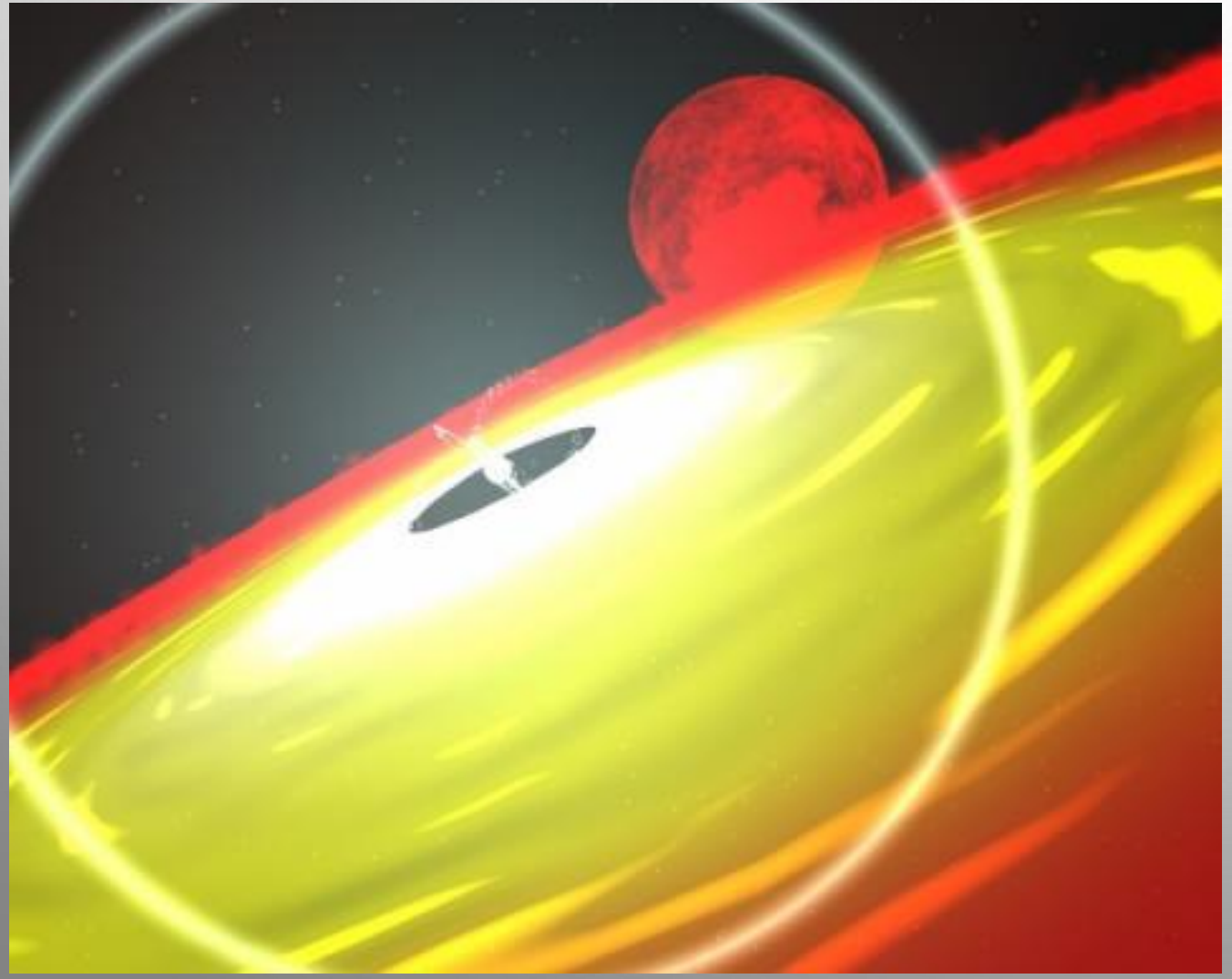
Другое название SAS-1

2-20 кэВ

Первый полный обзор неба.
339 источника.



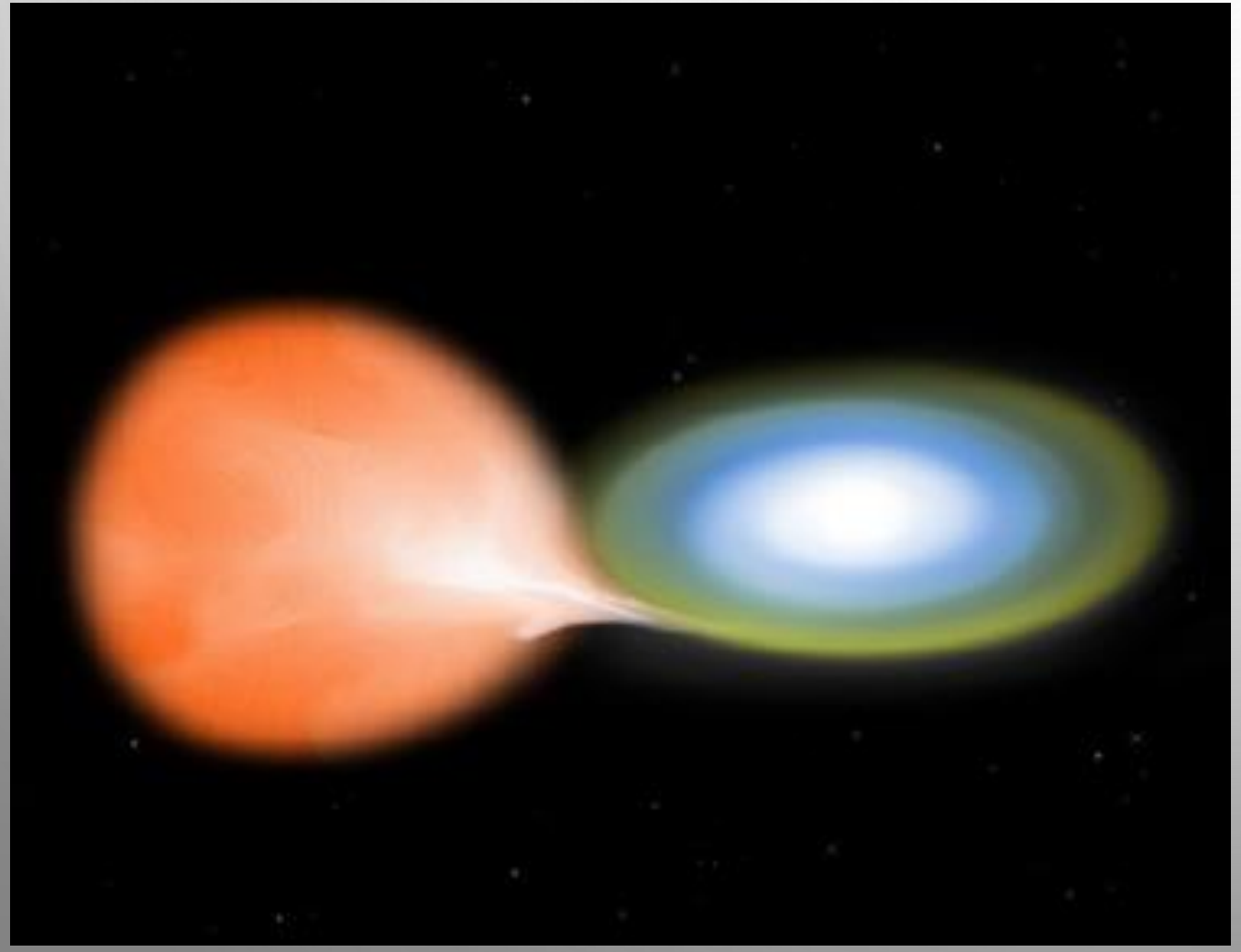
АККРЕЦИЯ В ТЕСНЫХ ДВОЙНЫХ



Аккреция – самый мощный источник энергии в мире из тех, что могут давать большой выход энергии.

При падении вещества на нейтронную звезду выделяется до 10% от mc^2

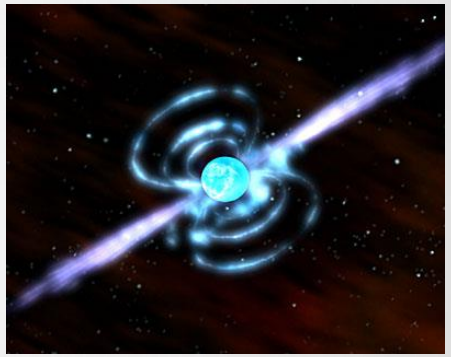
ТЕСНЫЕ ДВОЙНЫЕ СИСТЕМЫ



Около ½ массивных звезд входит в двойные системы.

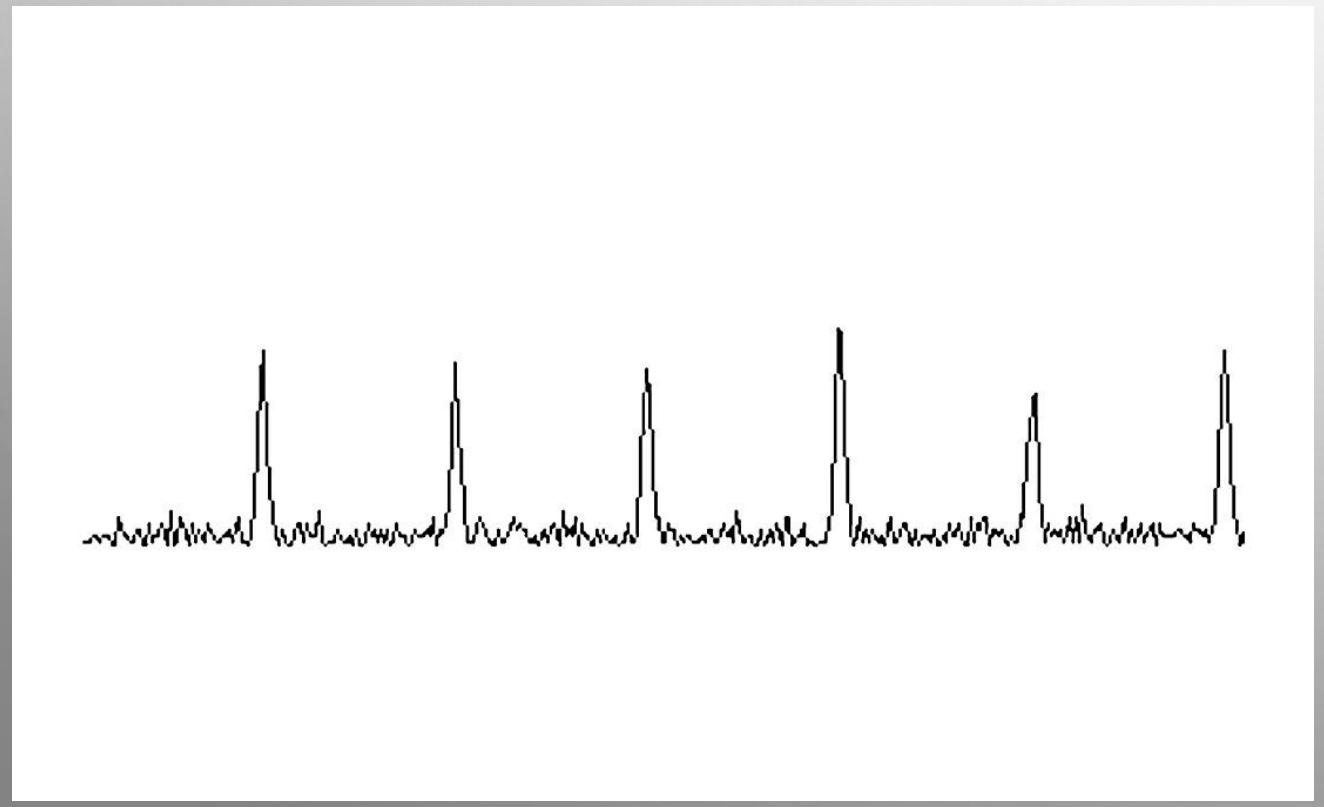
Сейчас в тесных двойных системах известны многие сотни нейтронных звезд.

ОТКРЫТИЕ !!!!

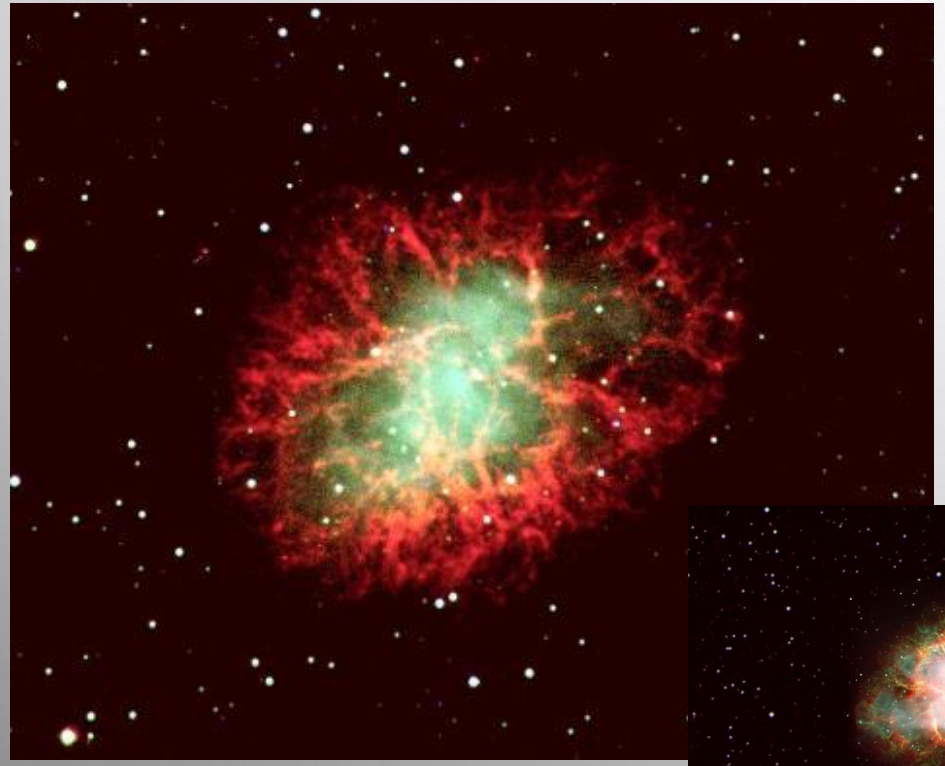


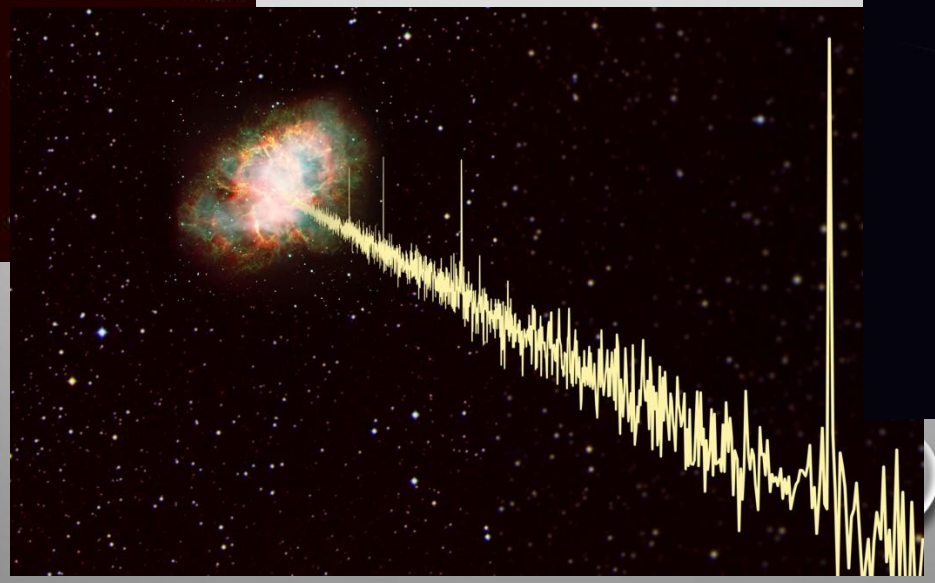
1967: Джоселин Белл. Радиопульсары.

Серендипическое открытие.



ПУЛЬСАР В КРАБОВИДНОЙ ТУМАННОСТИ





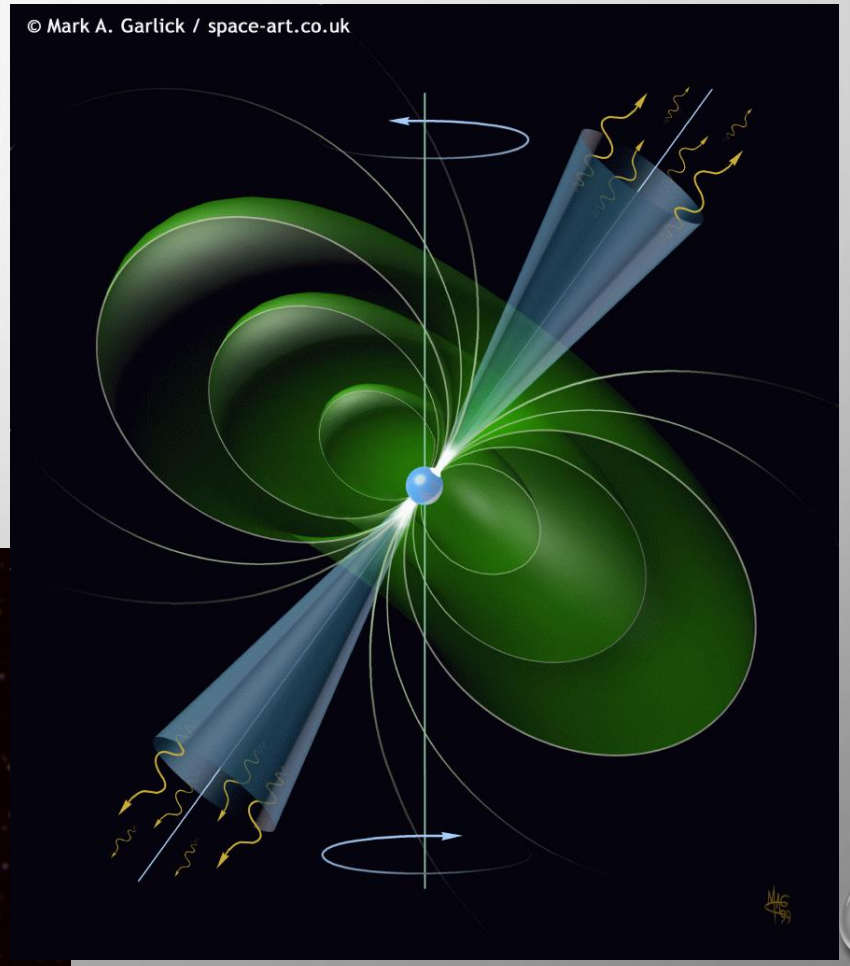
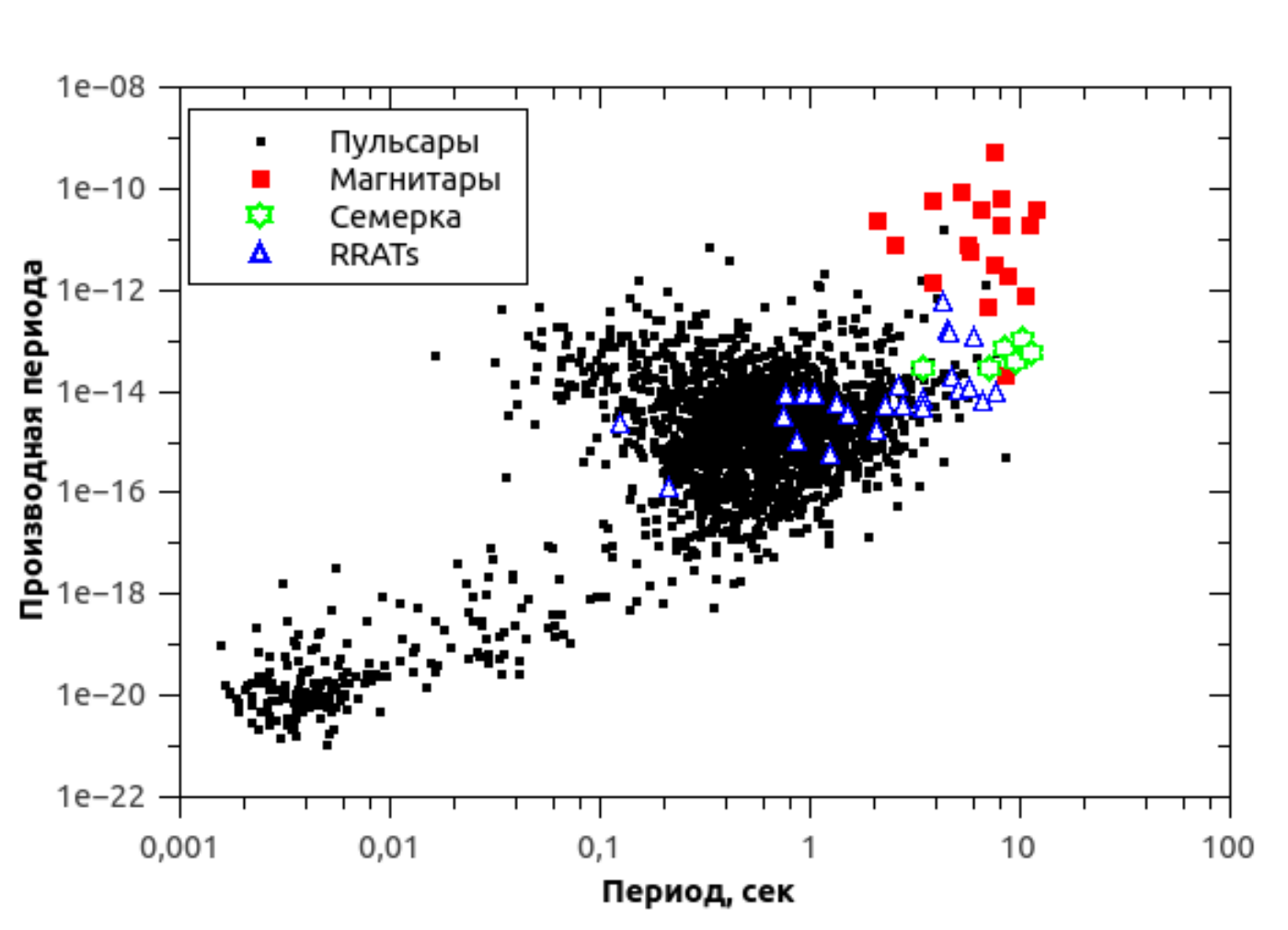
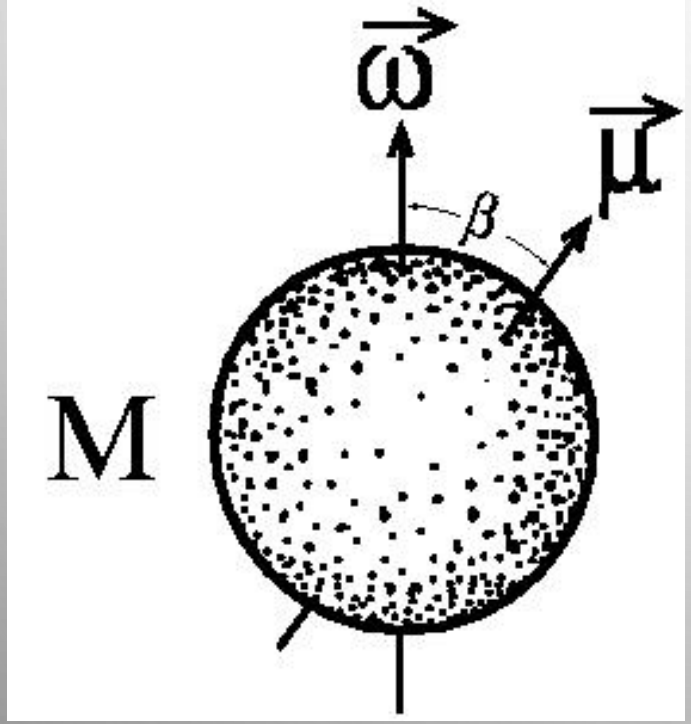


ДИАГРАММА ПЕРИОД – ПРОИЗВОДНАЯ ПЕРИОДА



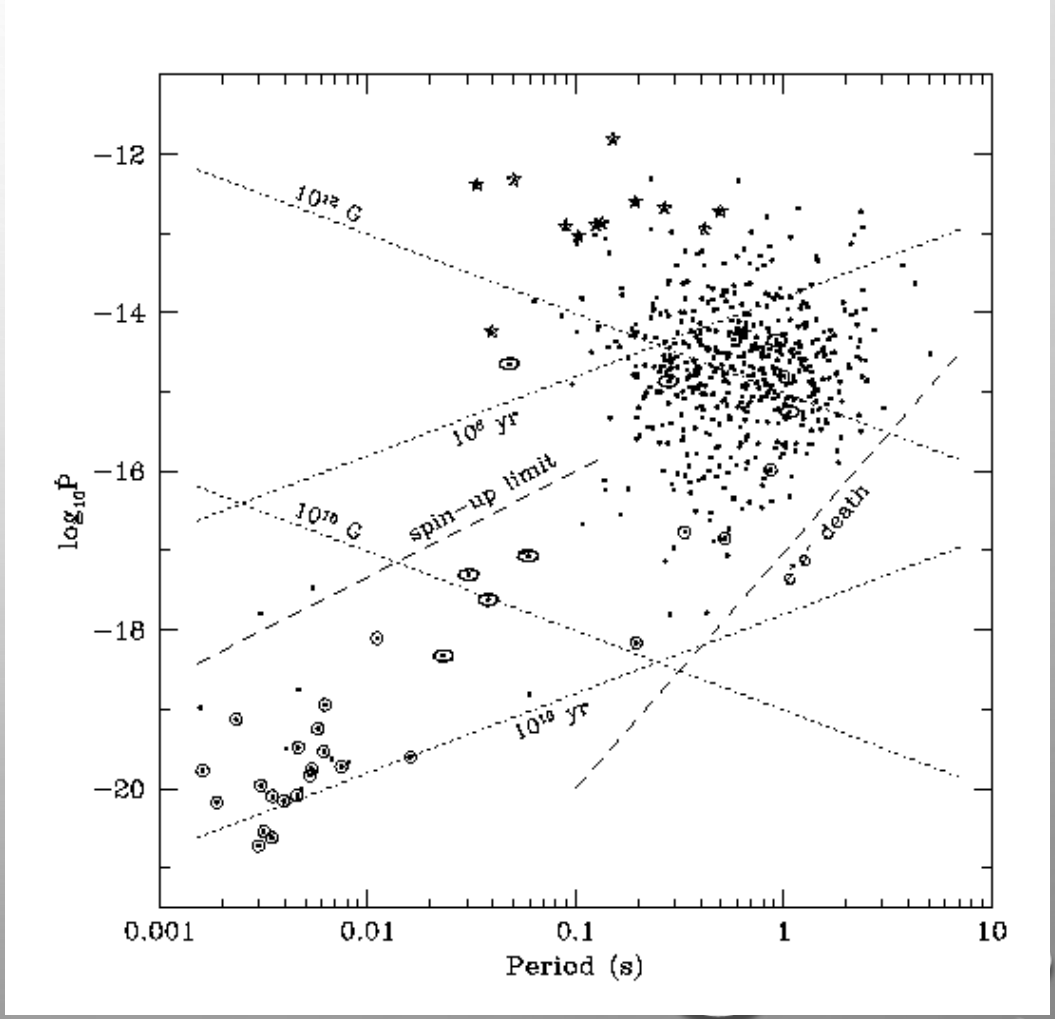
На диаграмме представлены только прямо наблюдаемые величины, которые легко и очень точно измеряются.

МАГНИТНЫЙ РОТАТОР

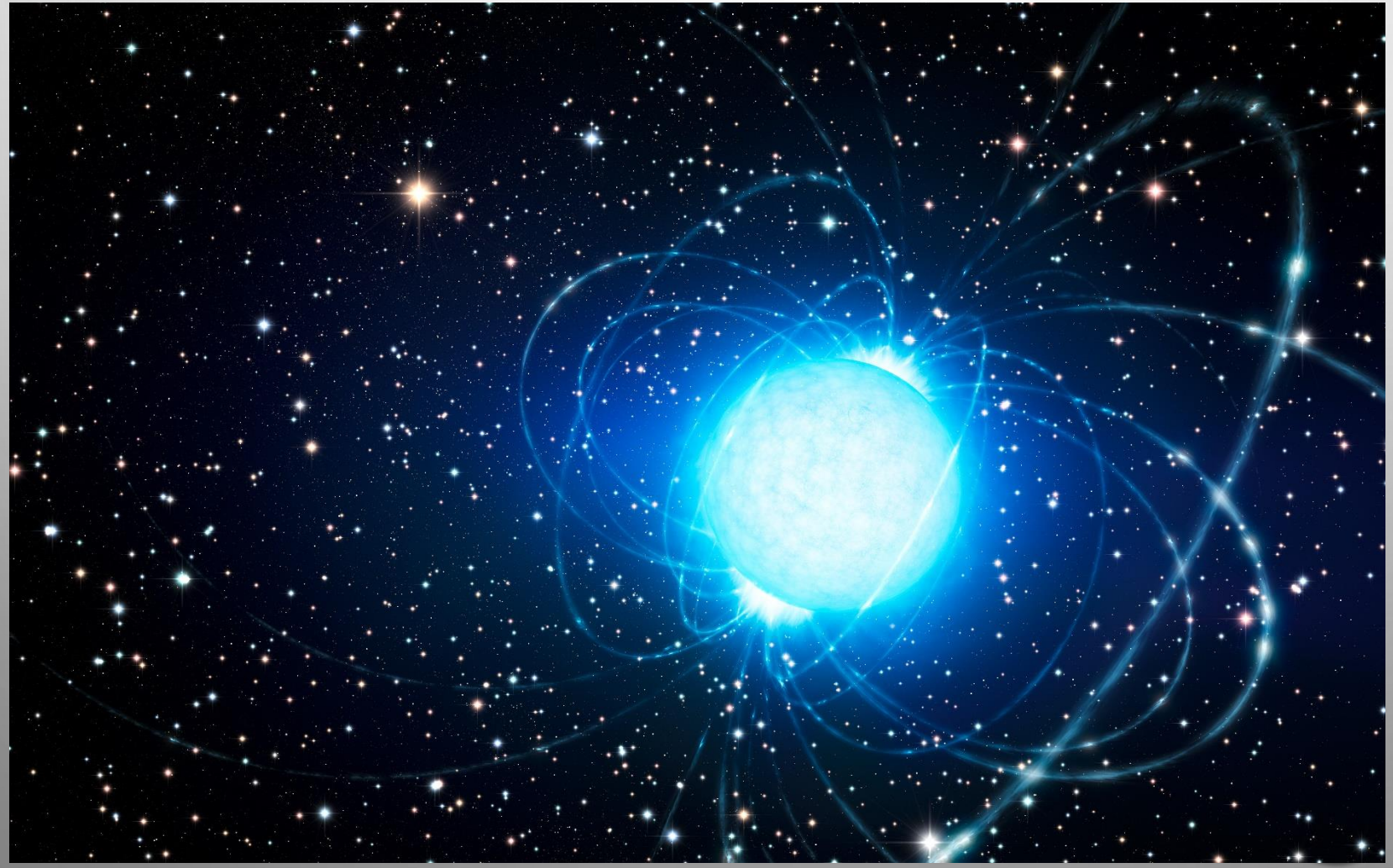


$$L_m = \frac{2}{3}\frac{\mu^2\omega^4}{c^3}\sin^2\beta = \kappa_t\frac{\mu^2}{R_l^3}\omega\,,$$

$$B \sim 3.2\times10^{19}\,(PdP/dt)^{1/2}\ \mathrm{G}.$$



МАГНИТНОЕ ПОЛЕ И ВРАЩЕНИЕ



$$t_p = \frac{2\tau_c}{n-1}\left[1-\left(\frac{P_0}{P}\right)^{n-1}\right]$$

Характеристический возраст.
Предполагая, что начальный период вращения пульсара мал, а индекс торможения n равен 3 (как в магито-дипольной формуле), мы можем получить оценку возраста.

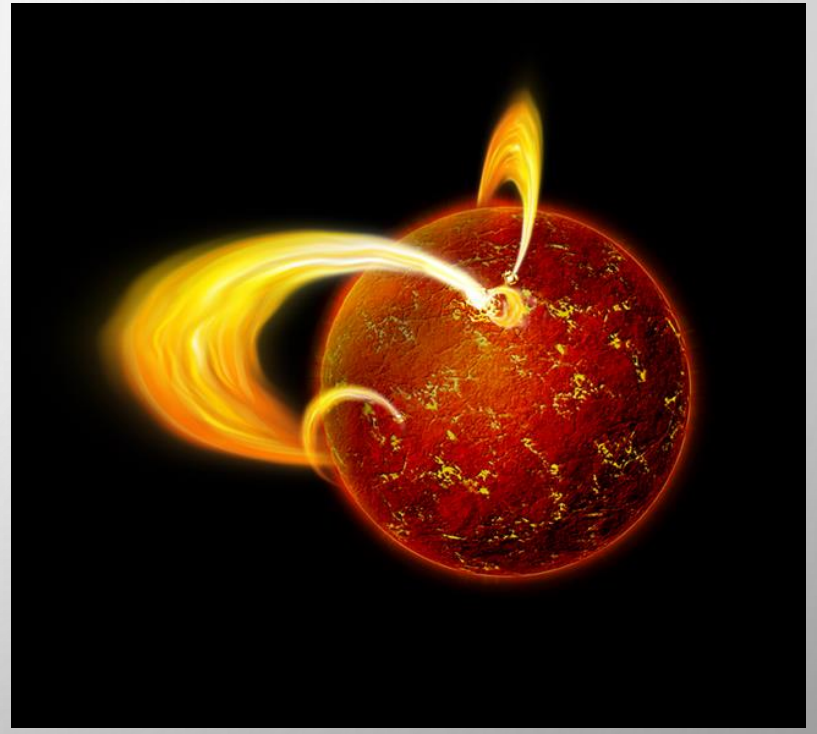
НОВЫЙ ЗООПАРК НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД

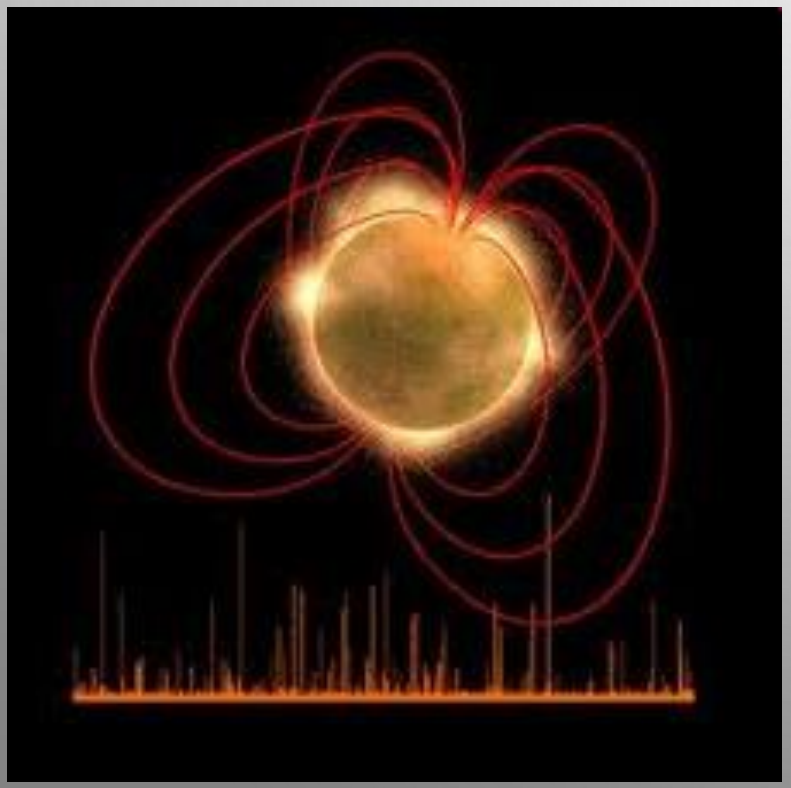
В последние 15 лет стало ясно, что нейтронные звезды могут рождаться очень разными, совсем непохожими на обычные радиопульсары типа Краба.

- Компактные рентгеновские источники в остатках сверхновых
- Аномальные рентгенов. пульсары
- Источники мягких повторяющихся гамма-всплесков
- Великолепная семерка
- Гамма источники
- Транзиентные радиоисточники...

МАГНИТАРЫ

Нейтронные звезды, чья активность в основном связана с выделением энергии магнитного поля.
Обычно поля очень велики.



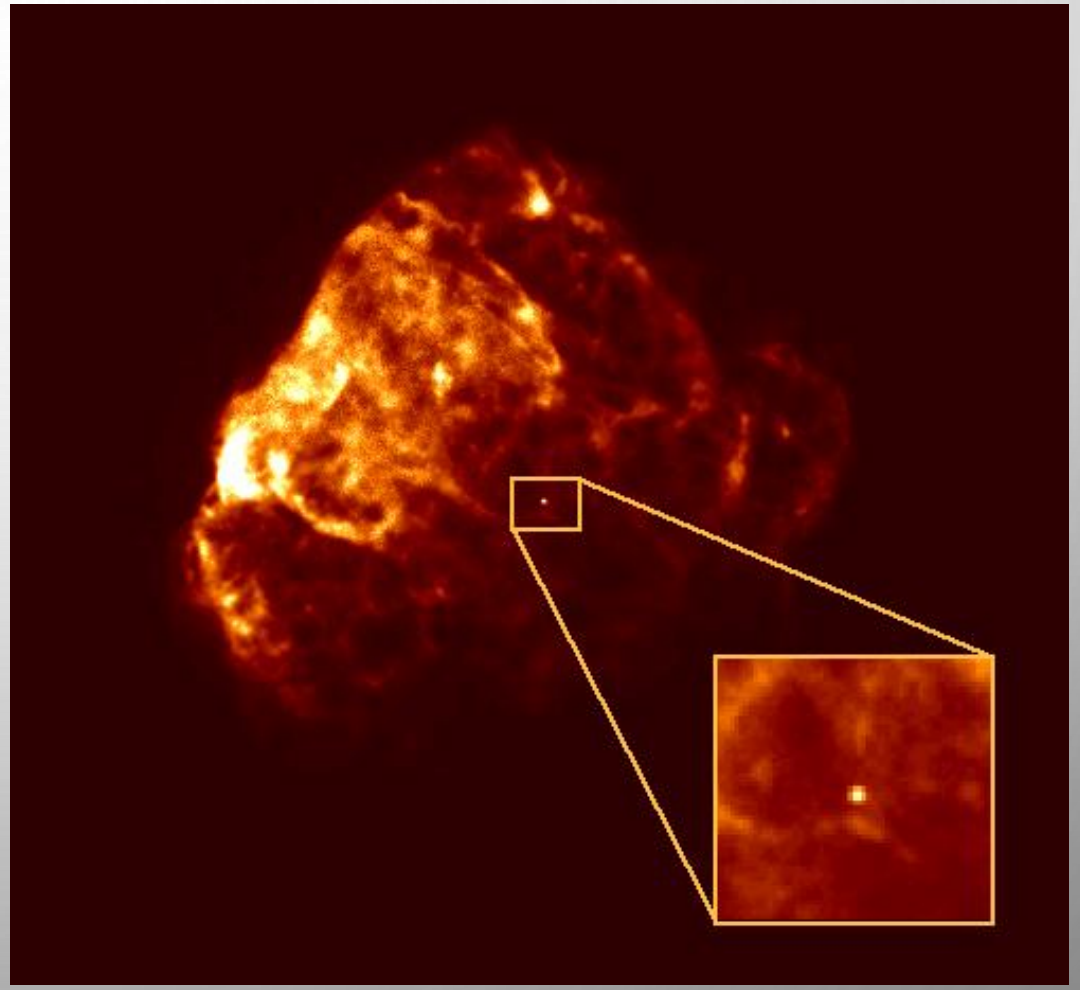


Основными кандидатами в магнитары являются аномальные рентгеновские пульсары и источники мягких повторяющихся гамма-всплесков.

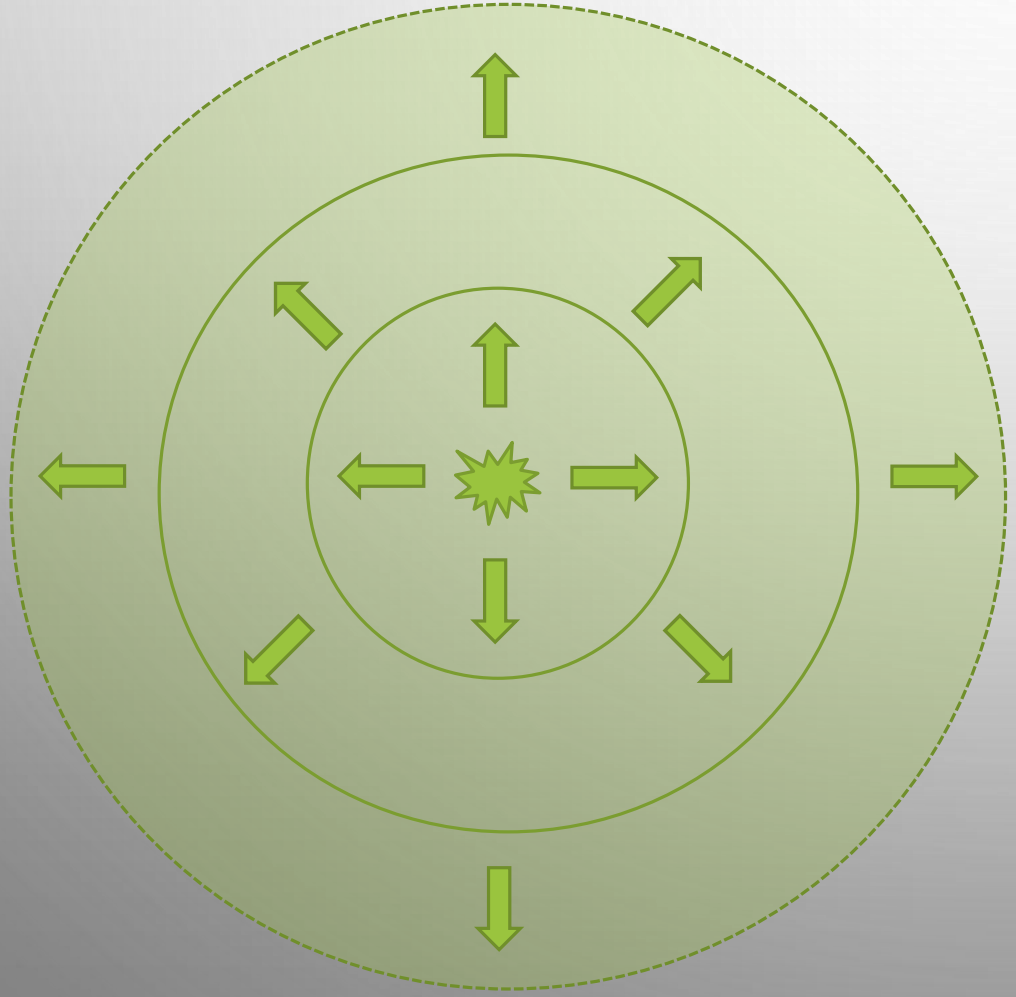
Магнитные поля 10^{14}–10^{15} Гс

Расходуется энергия магнитного поля.
Иногда – постепенно, иногда – в виде вспышек.

ЦЕНТРАЛЬНЫЕ КОМПАКТНЫЕ ОБЪЕКТЫ В ОСТАТКАХ СВЕРХНОВЫХ



РАСШИРЕНИЕ ОСТАТКА

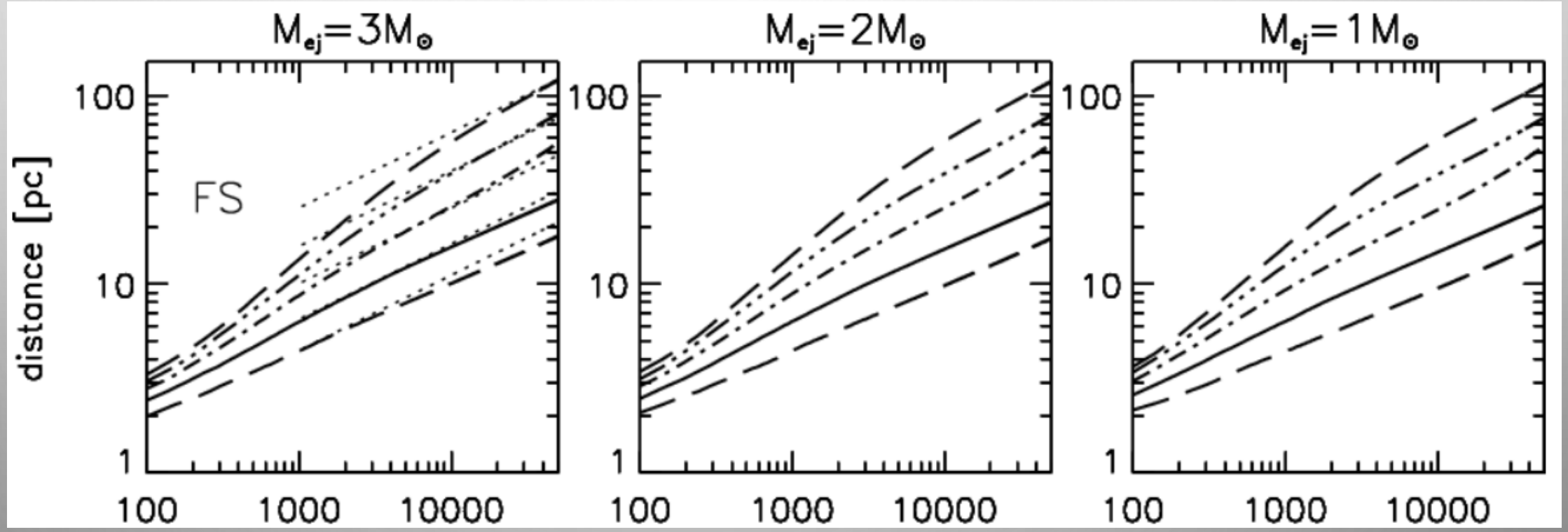


Построены модели для расширения остатков в разной среде.

1. Свободный разлет $r \sim t^{6/7}$
2. Нагребание вещества $r \sim t^{2/5}$
3. Торможение

ЧИСЛЕННЫЕ МОДЕЛИ

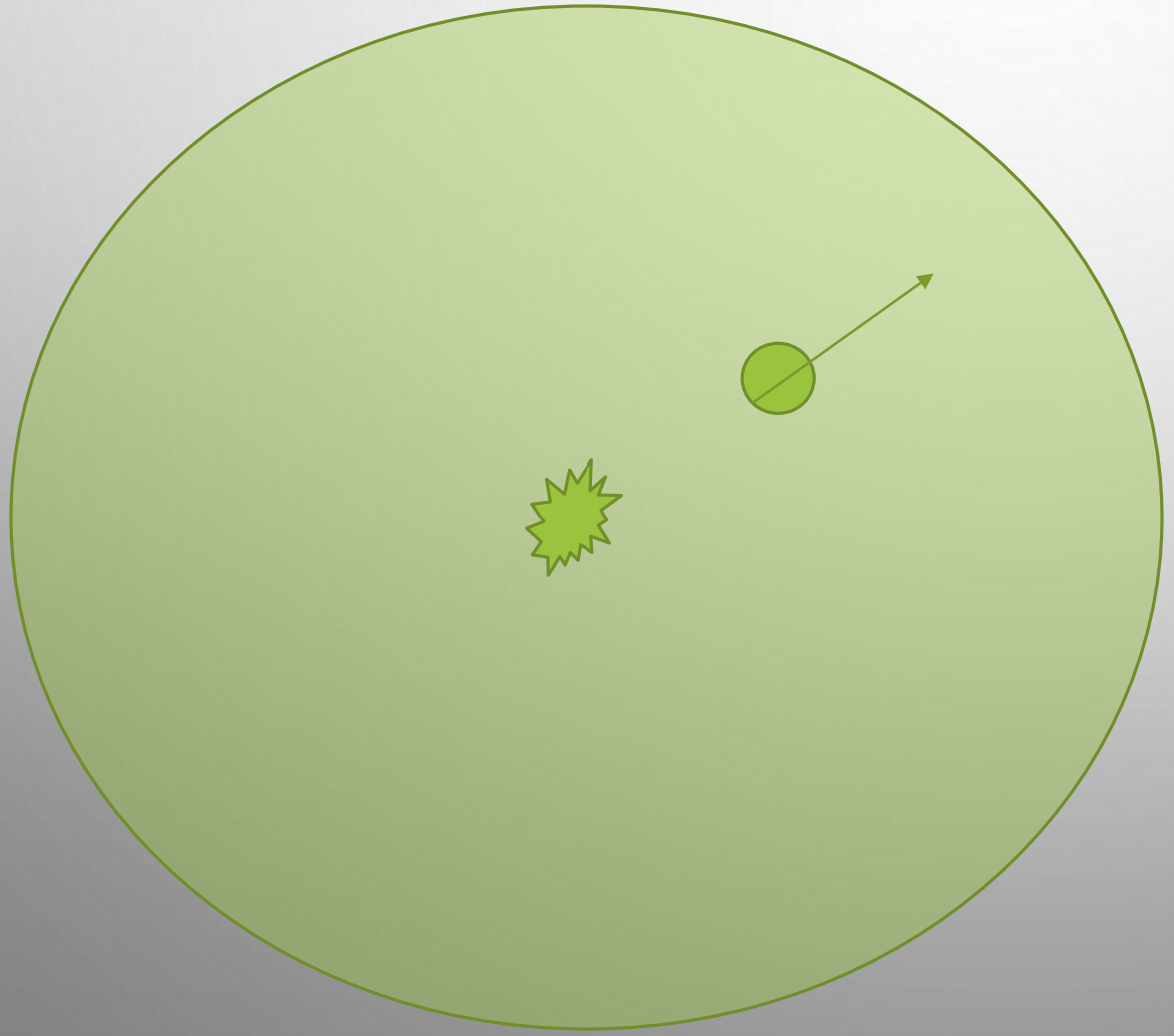
Ferreira, de Jager (2008)



Виден выход на т.н. седовскую стадию (ее наклон показан пунктиром $r \sim t^{2/5}$).
Разные кривые построены для разных плотностей МЗС (от 10^{-23} г/см^3).

Наблюдаемые параметры остатка позволяют оценить его возраст.

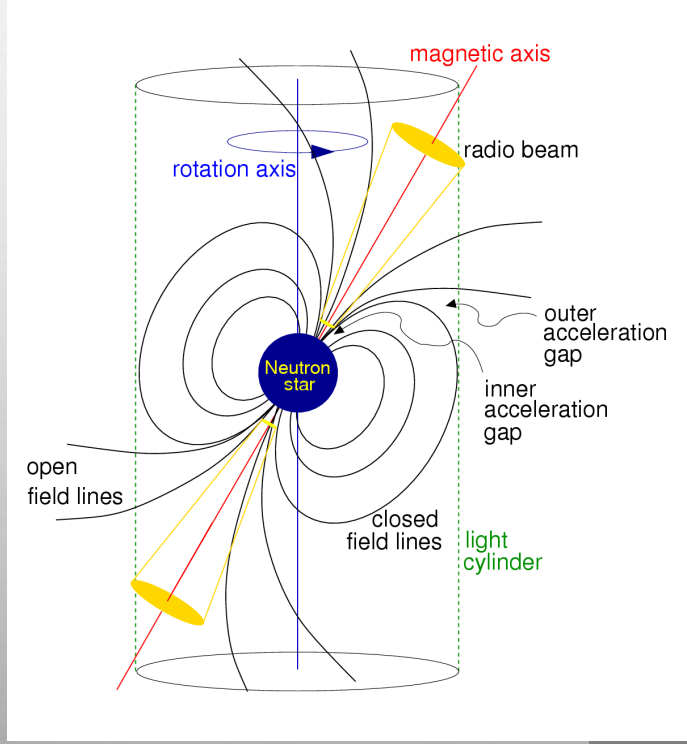
СМЕЩЕНИЕ НЕЙТРОННОЙ ЗВЕЗДЫ

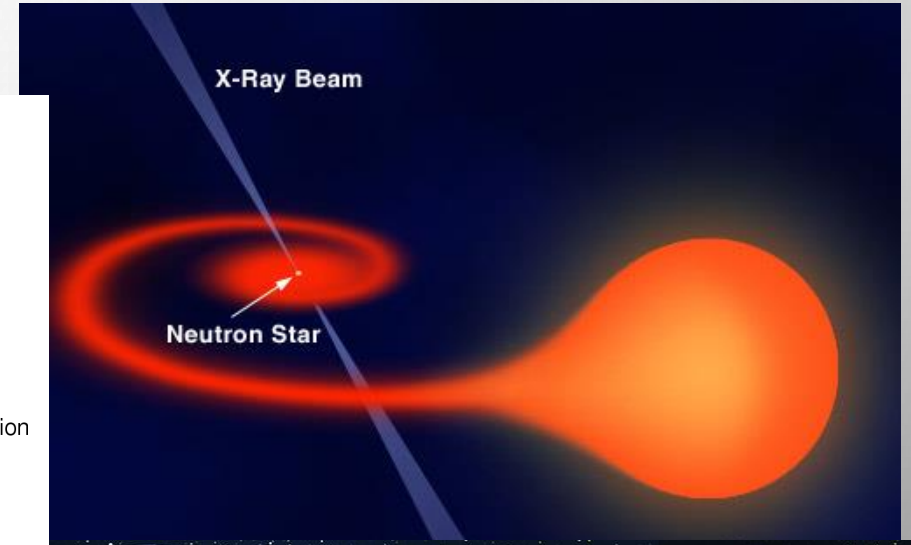


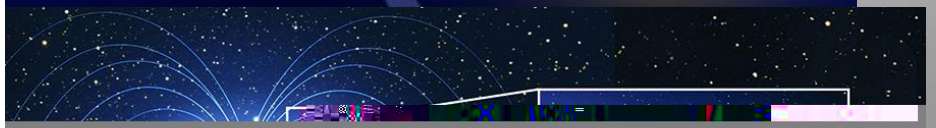
Если можно определить место взрыва, то можно:
- или, зная возраст, определить скорость,
- или, зная скорость, определить возраст

ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД

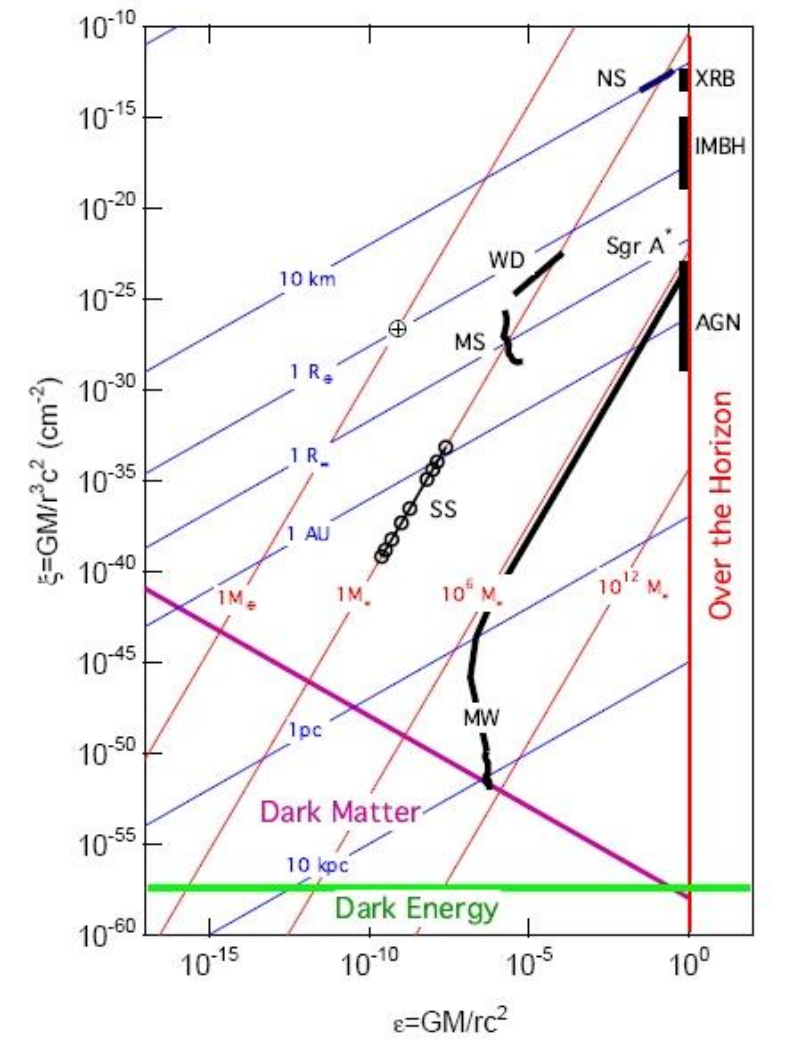
- Вращение
- Аккреция
- Затухание токов (магнитное поле)
- Тепловая энергия



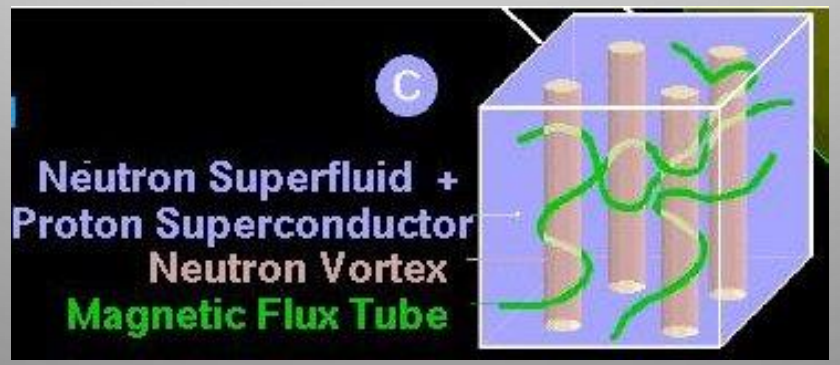


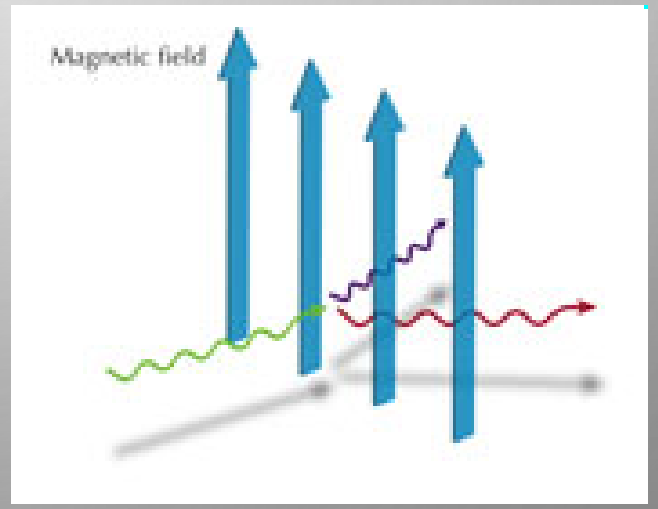


ЧЕМ ВАЖНЫ



- Инструменты для физиков и астрофизиков
  - радиопульсары – тесты теорий гравитации
  - регистрация гравитационных волн
  - точное время
- Теория поведения вещества при высокой плотности – квантовая хромодинамика
- Процессы в сильном магнитном поле



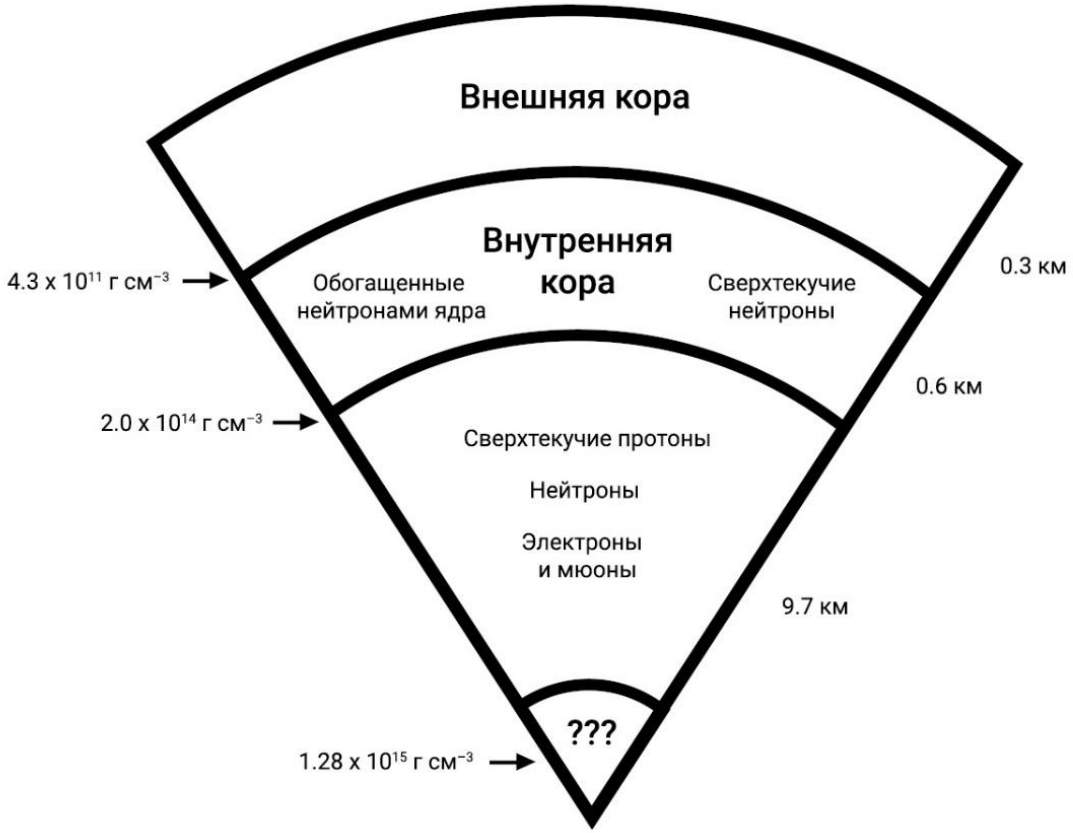


ОРИЕНТАЦИЯ СПУТНИКОВ ПО РЕНТГЕНОВСКИМ ПУЛЬСАРАМ

http://www.nrl.navy.mil

Все ведущие космические агентства в мире (включая российское) сейчас работают над созданием систем навигации, основанных на наблюдении рентгеновского излучения стабильных одиночных пульсаров.

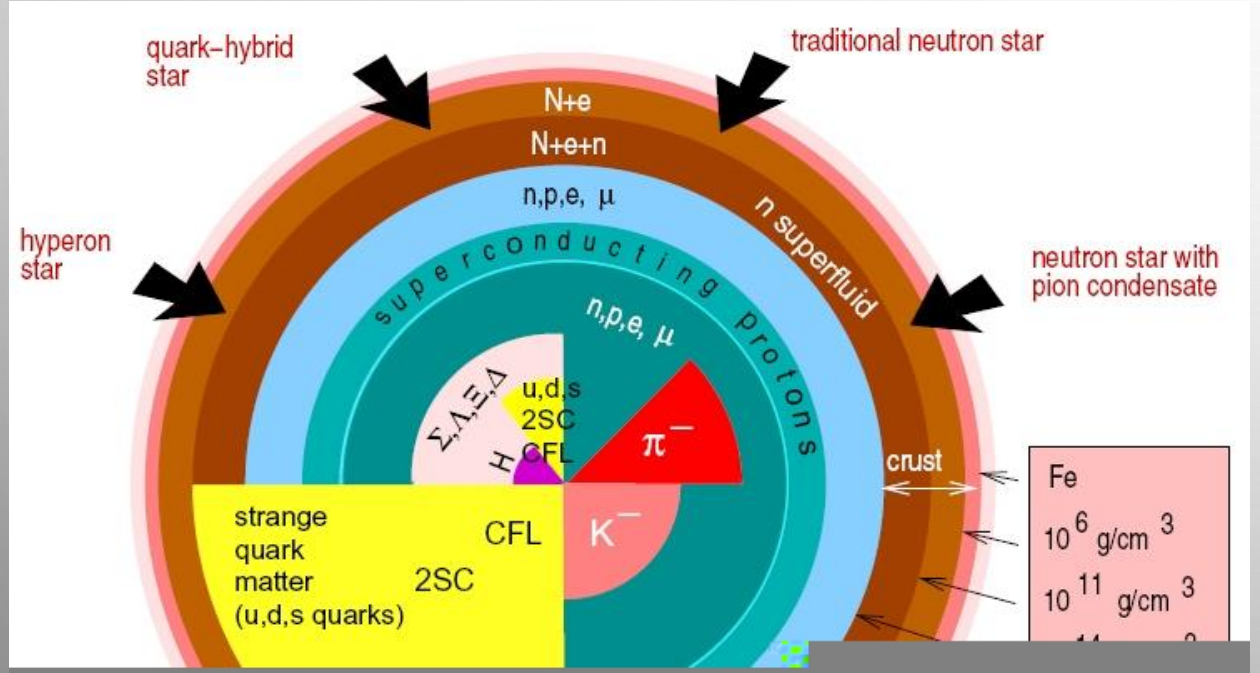
ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ



МНОЖЕСТВО ВАРИАНТОВ И СЛОЕВ

ЗАГАДКА НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД

В недрах – очень плотное вещество.
Мы плохо понимаем, как ведет себя вещество при такой плотности.



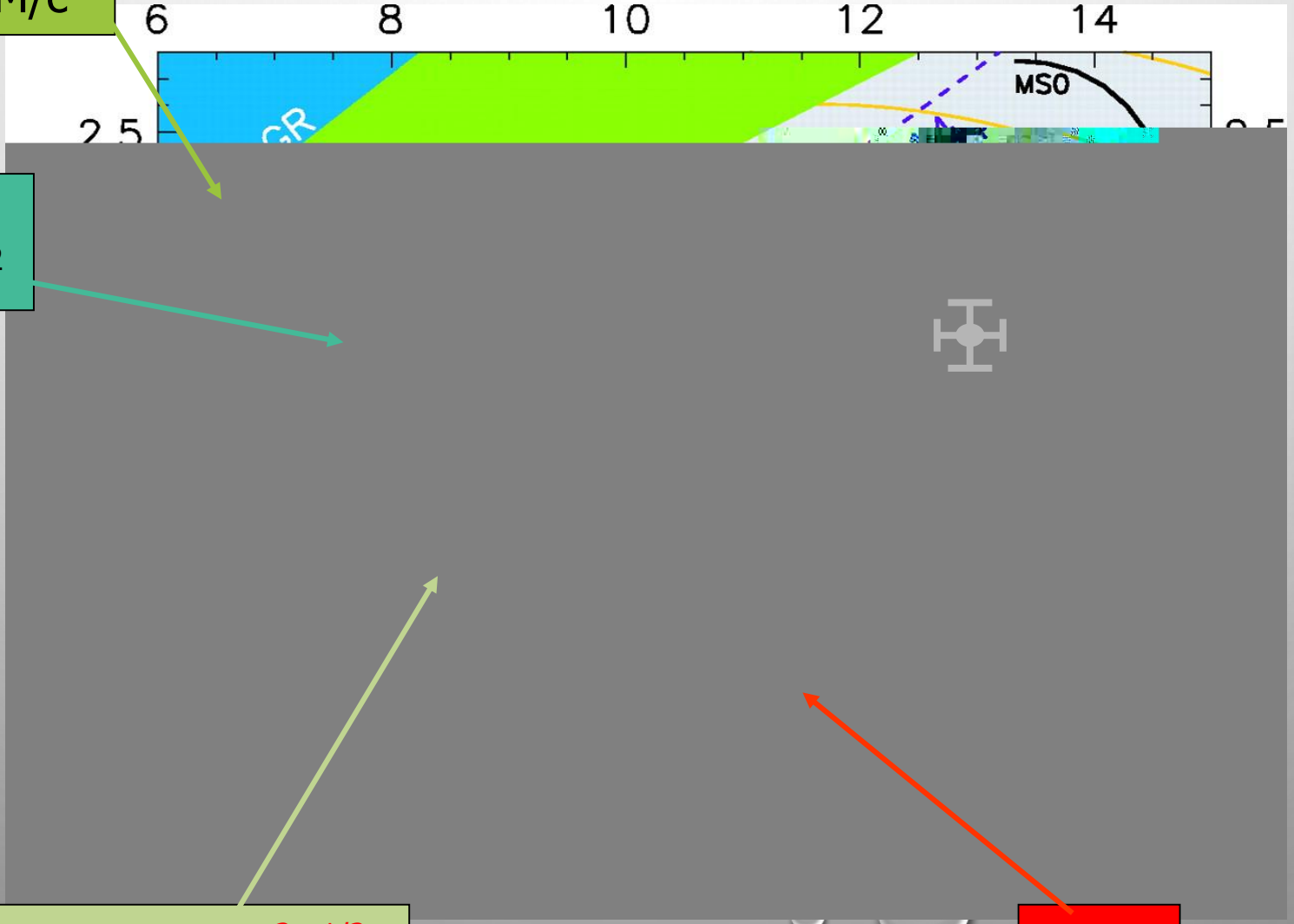
- Обычные нейтронные звезды
- Пионный конденсат
- Каонный конденсат
- Странные звезды
- Гиперонные звезды
- Гибридные звезды

АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- **Масса** → В двойных, особенно с радиопульсарами. В будущем – и по линзированию.
- **Радиус** → У одиночных остывающих НЗ, у барстеров в двойных, у двойных с QPO.
- **Красное смещение (M/R)** → По наблюдениям спектральных линий
- **Температура** → Одиночные остывающие НЗ и некоторые двойные (прогрев коры)
- **Момент инерции** → По радиопульсарам (в будущем)
- **Гравитационная и барионная массы** → В системах из двух нейтронных звезд, если будут хорошие данные по звездам.
- **Предельное вращ.** → Миллисекундные пульсары

МАССА–РАДИУС

$R=2GM/c^2$

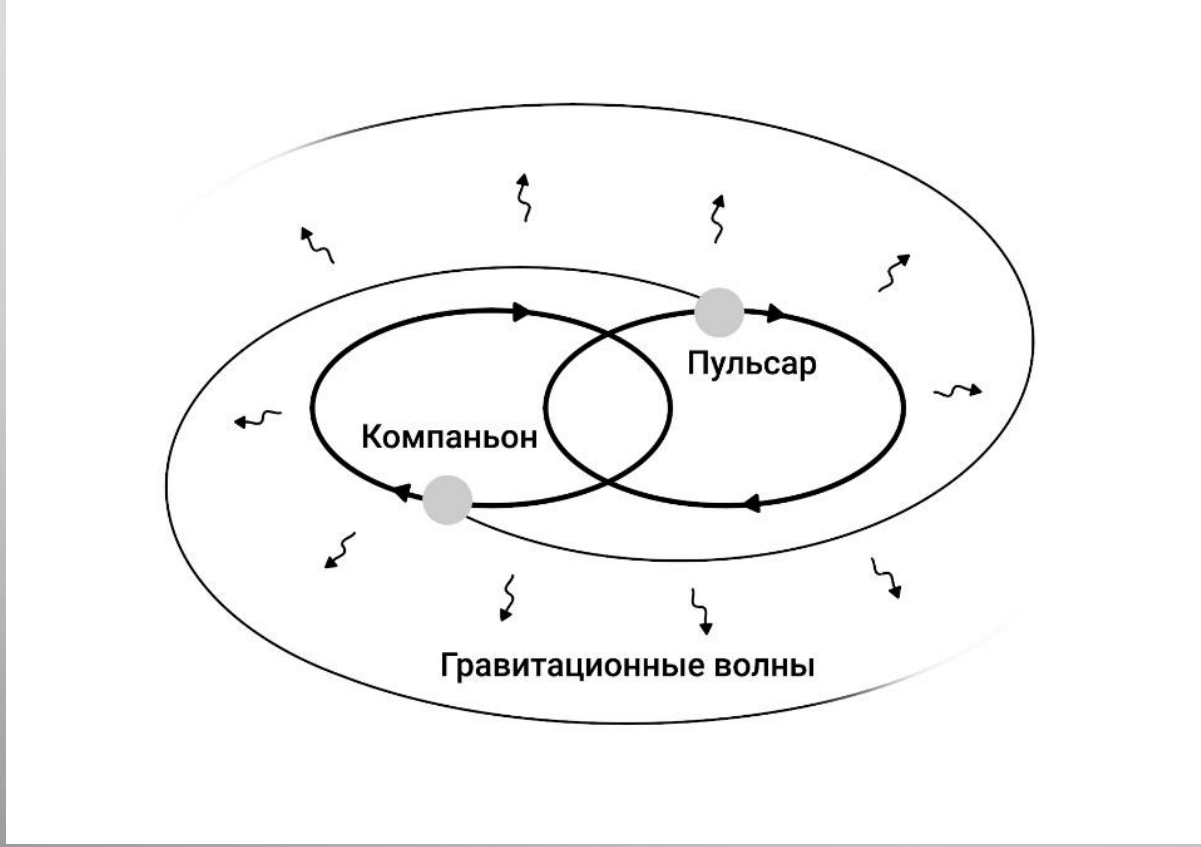


$P=\rho$
$R\sim3GM/c^2$

$R_\infty=R(1-2GM/Rc^2)^{-1/2}$

$\omega=\omega_K$

ДВОЙНЫЕ ПУЛЬСАРЫ



$$\frac{d\Delta_{E\odot}}{dt} = \sum_i \frac{Gm_i}{c^2 r_i} + \frac{v_\oplus^2}{2c^2} - \text{constant} .$$

$$\Delta_{S\odot} = -\frac{2GM_\odot}{c^3} \log (1 + \cos \theta) ,$$

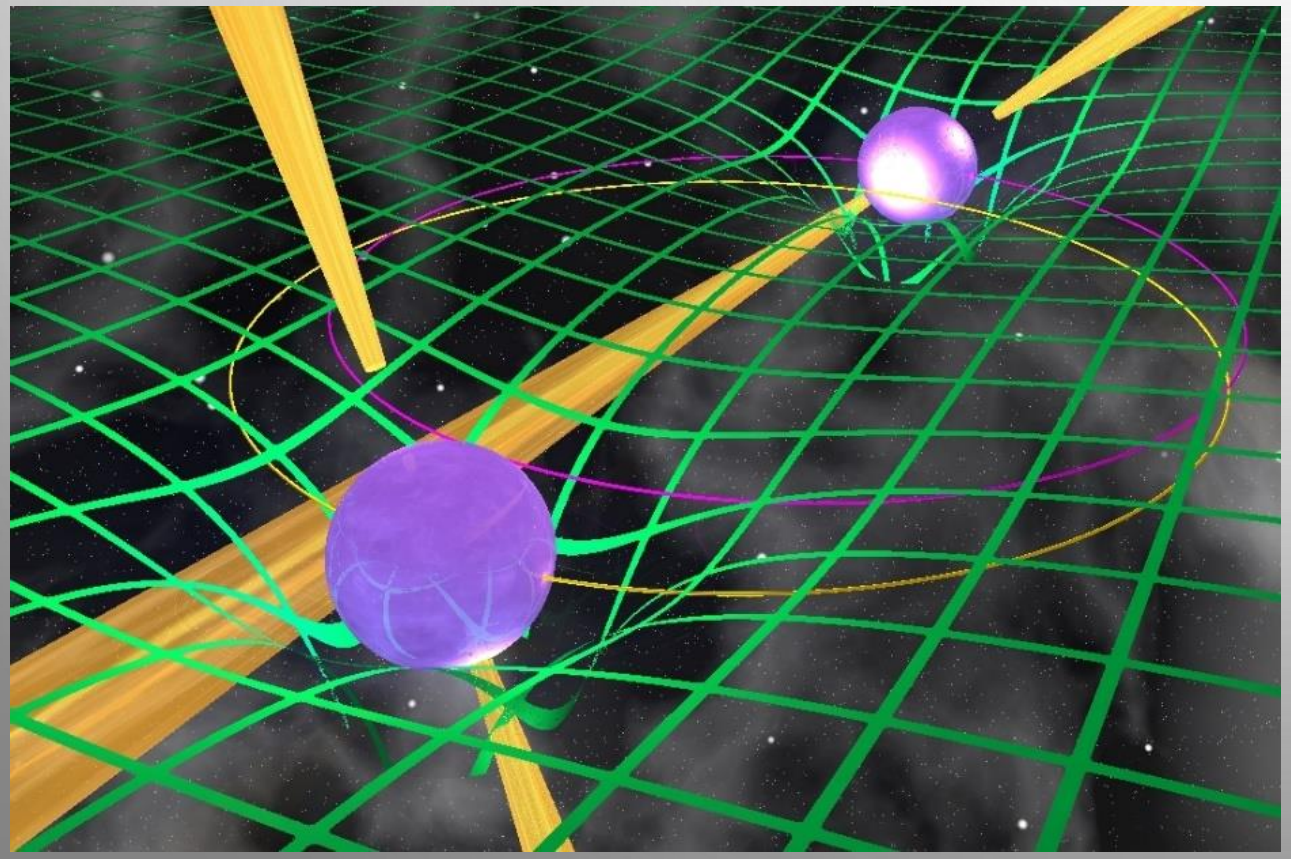
Наблюдения двойных радиопульсаров позволяют определять массы нейтронных звезд с очень высокой точностью благодаря наблюдению ряда эффектов Общем теории относительности.

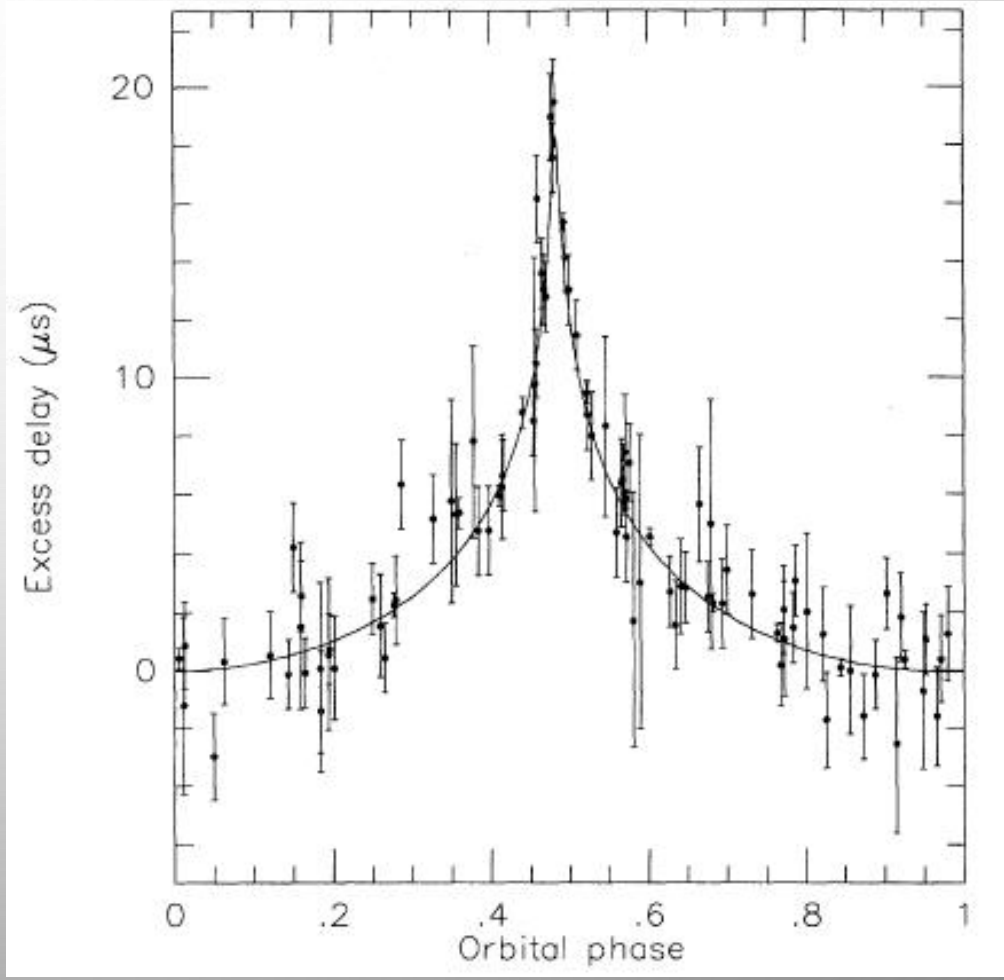
$$\begin{aligned} T = {} & t_{\text{obs}} - t_0 + \Delta_C - D/f^2 + \Delta_{R\odot}(\alpha, \delta, \mu_\alpha, \mu_\delta, \pi) \\ & + \Delta_{E\odot} - \Delta_{S\odot}(\alpha, \delta) \\ & - \Delta_R(x, e, P_b, T_0, \omega, \dot{\omega}, \dot{P}_b) - \Delta_E(\gamma) - \Delta_S(r, s) \end{aligned}$$

ЗАДЕРЖКА ШАПИРО

$$\Delta_S = -2r \log(1 - s \cos[2\pi(\phi - \phi_0)])$$

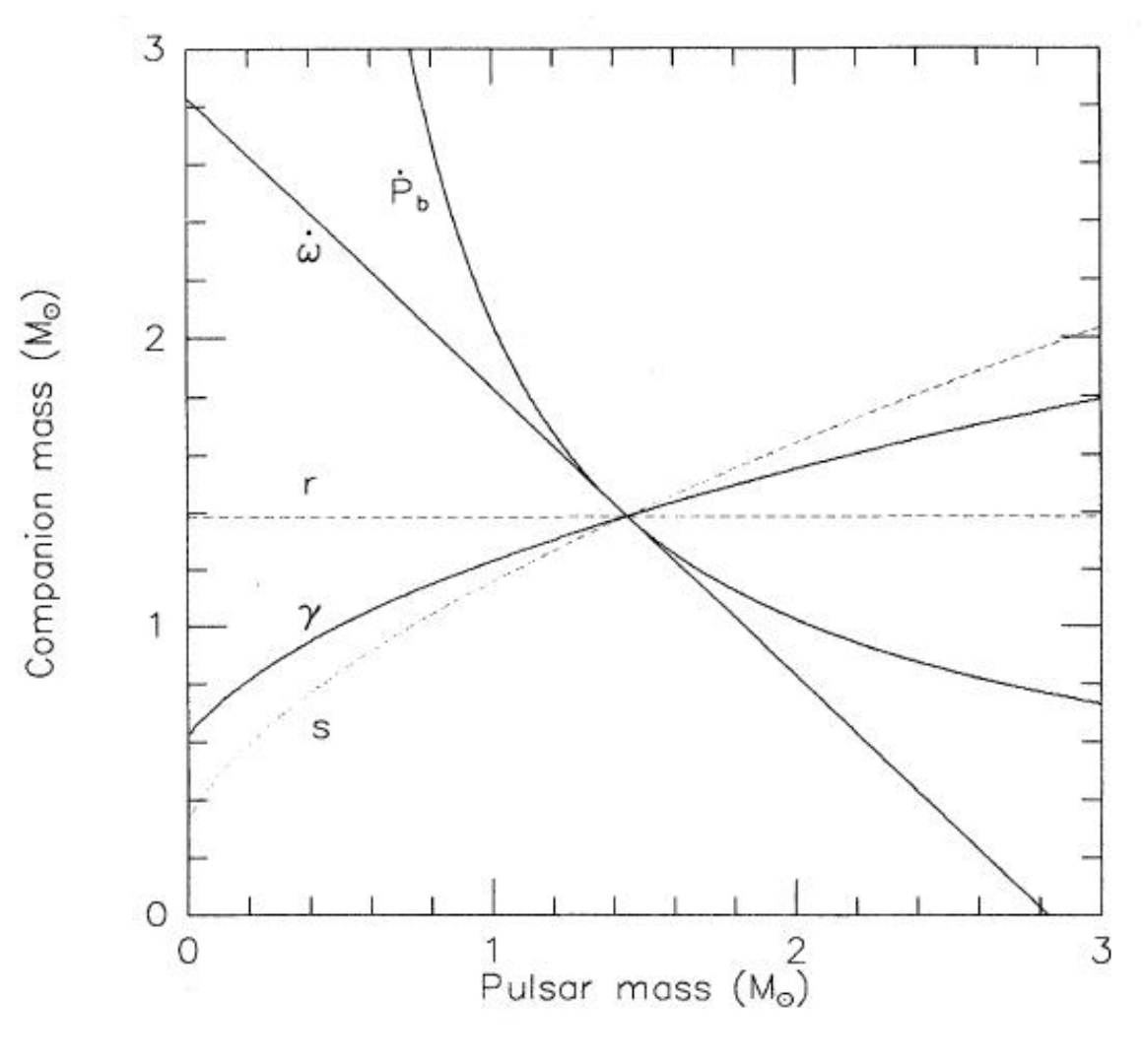
Электромагнитным волнам требуется больше времени, чтобы достичь наблюдателя, если пространство искривлено.





PSR 1855+09 (Taylor, Nobel lecture)

ИЗМЕРЕНИЯ МАССЫ

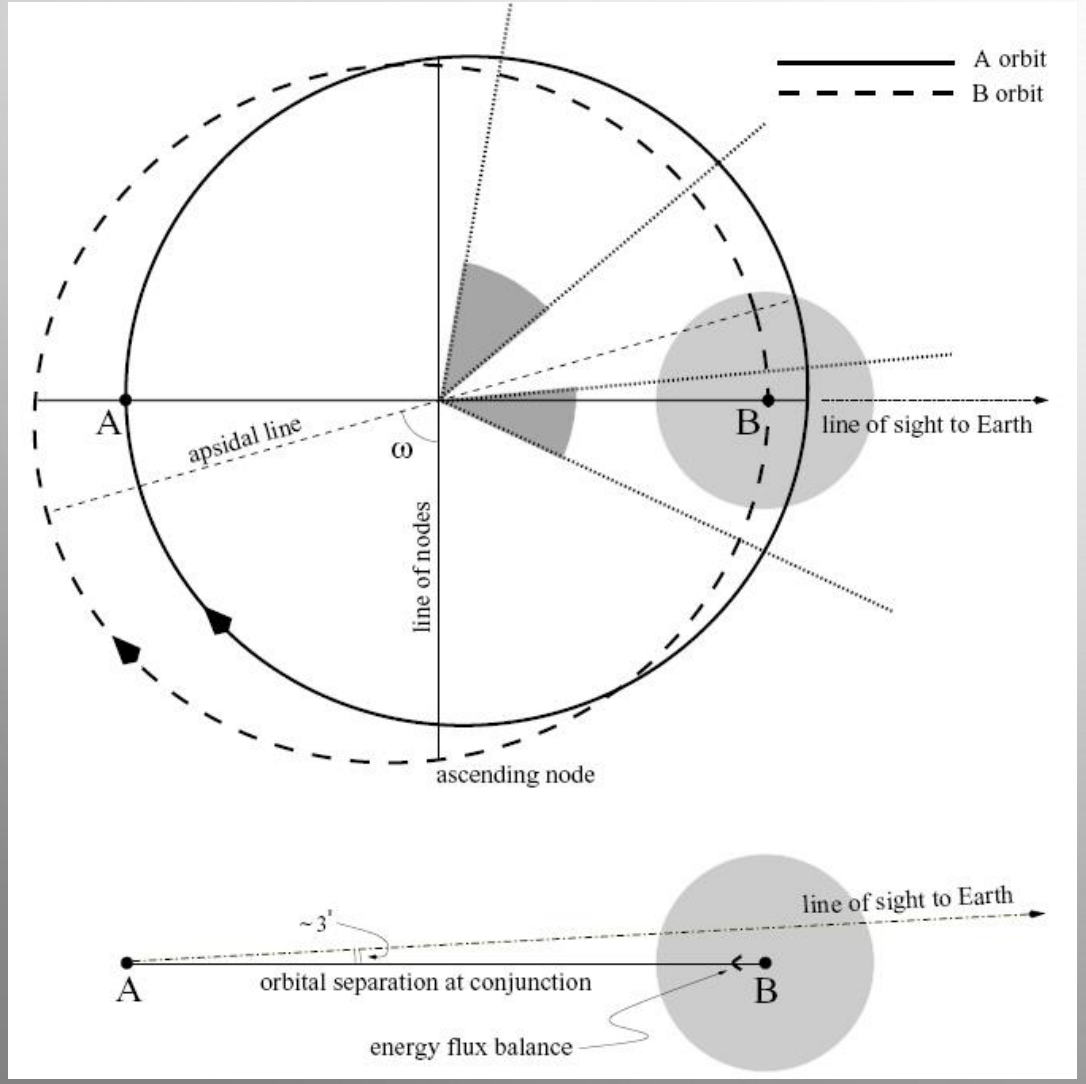


PSR 1913+16

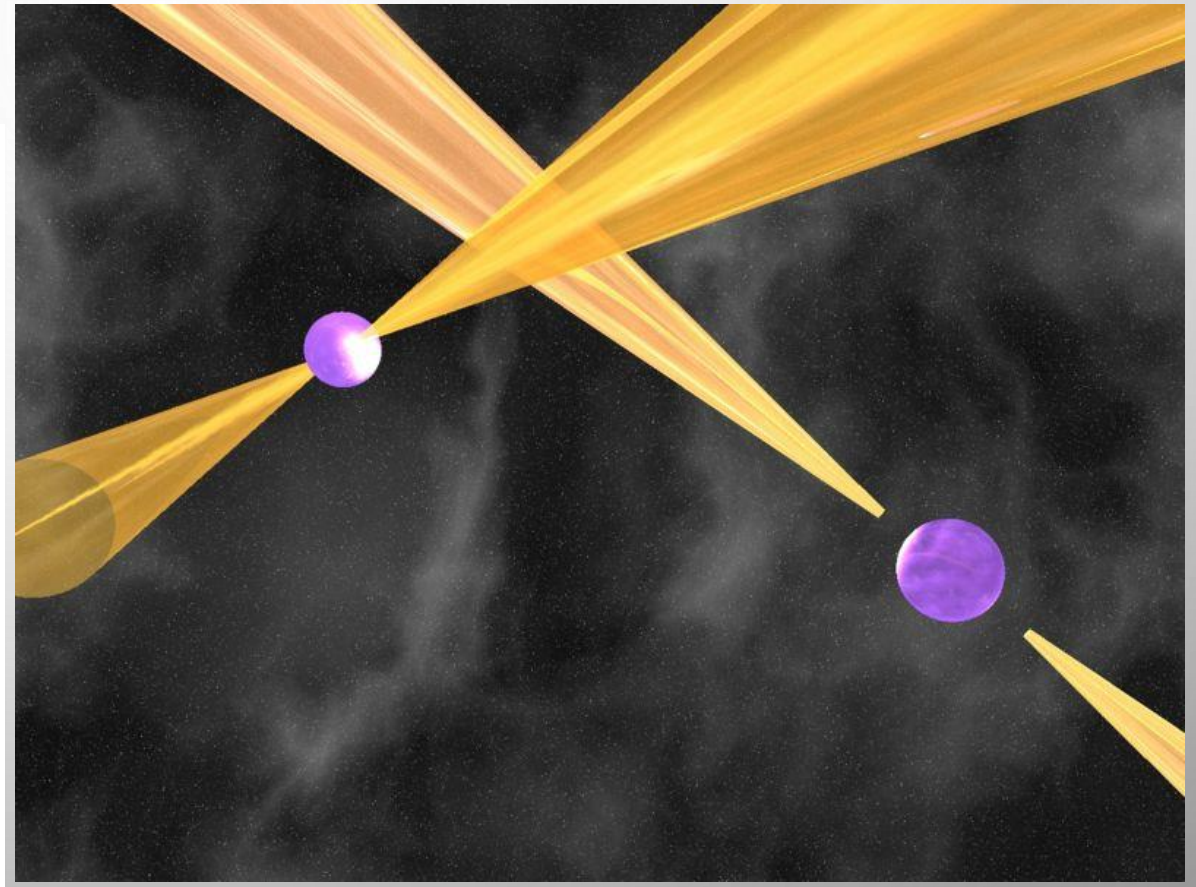
(Taylor)

Наблюдение сразу нескольких эффектов позволяет измерить массы обеих звезд с очень высокой точностью. Иногда до 0.001 массы Солнца.

ДВОЙНОЙ PSR J0737−3039

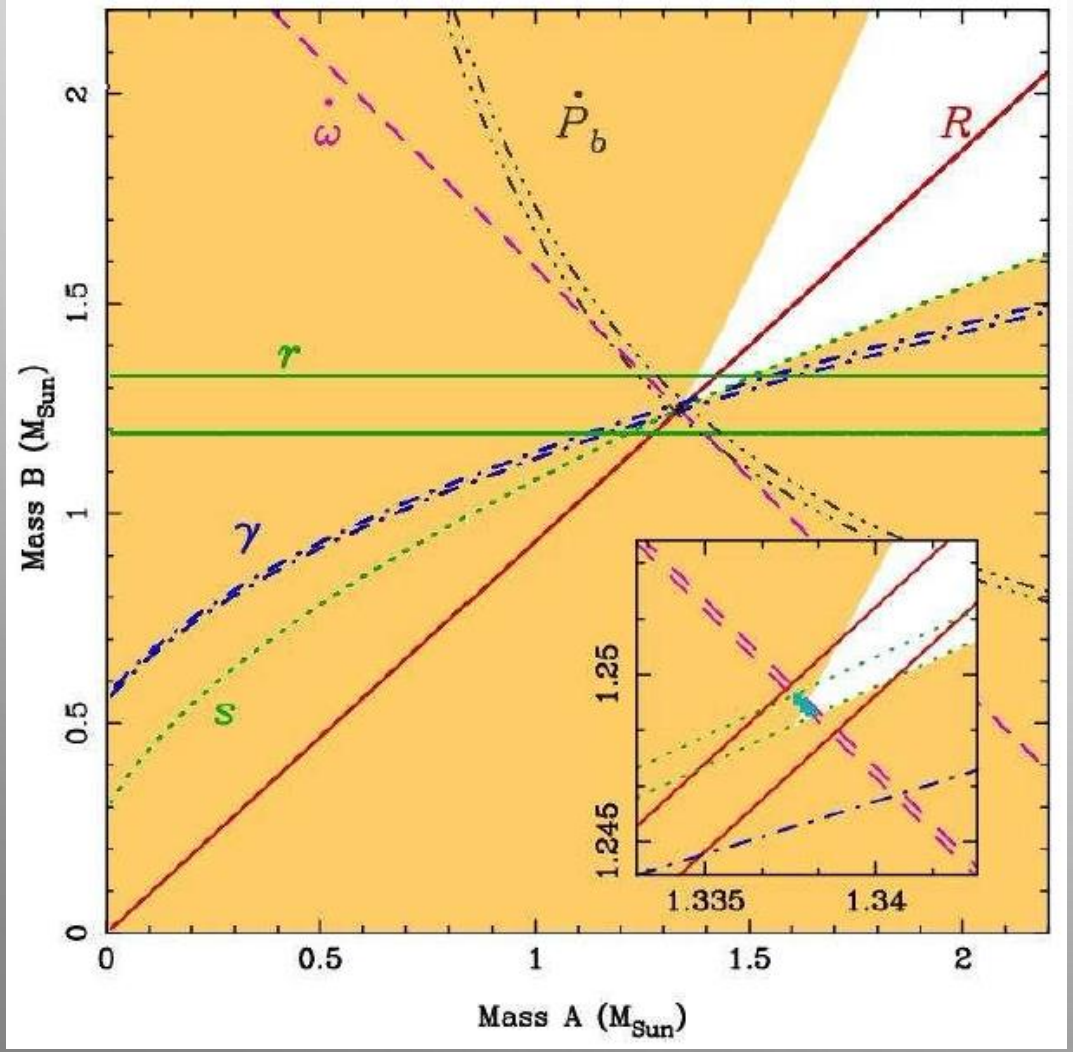


(Lyne et al. astro-ph/0401086)



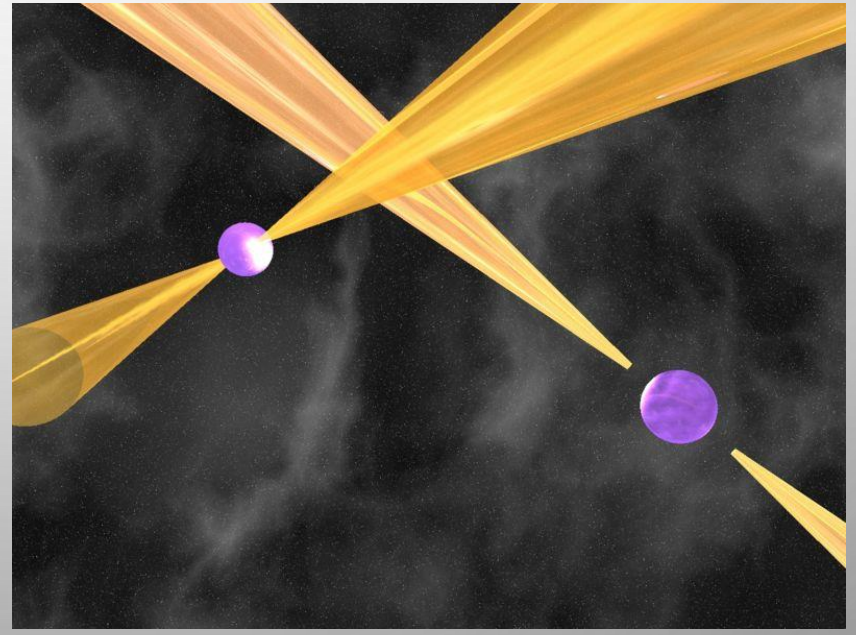
Уникальная система,
открытая в 2003 г.

МАССА PSR J0737-3039



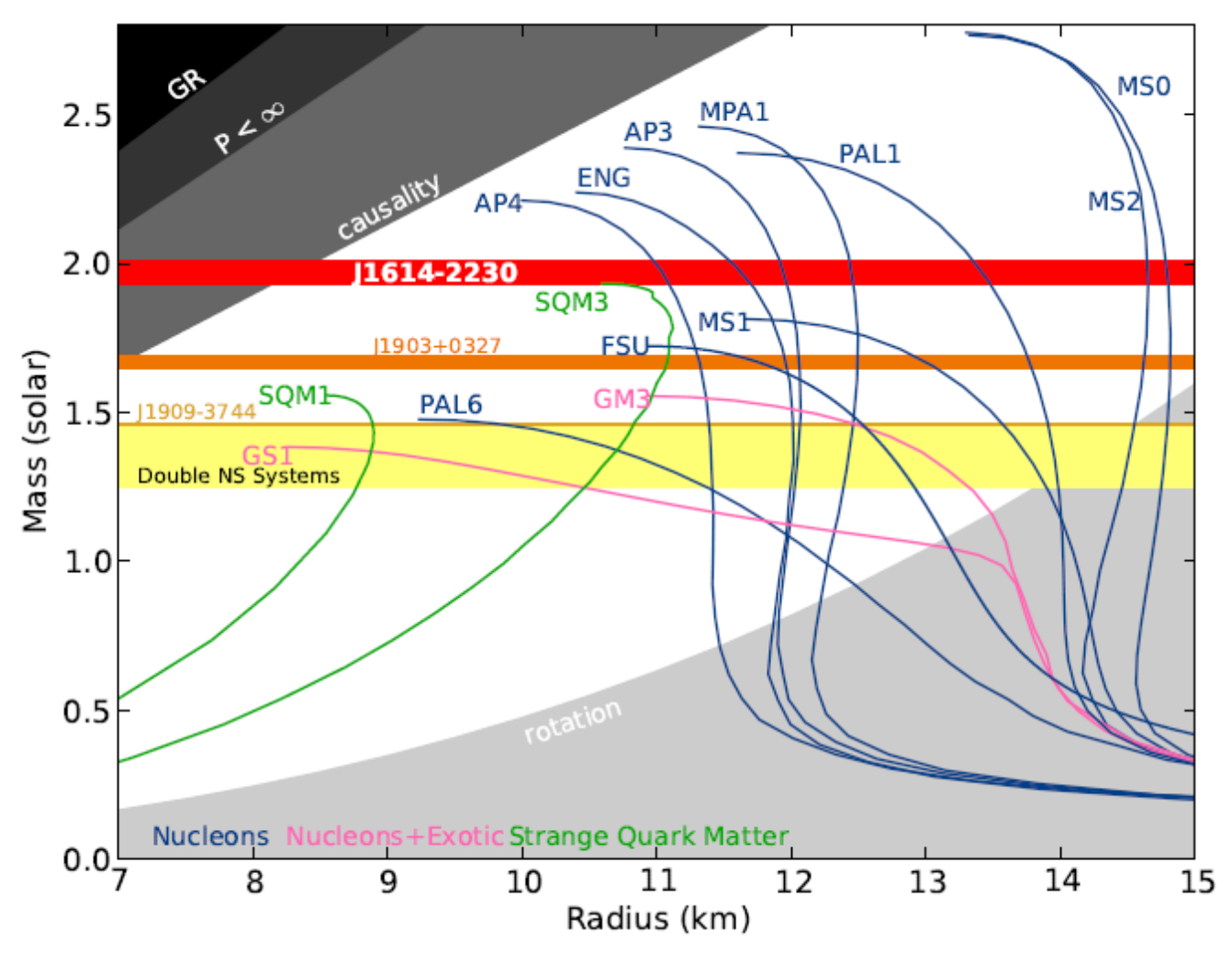
Наиболее точные значения.

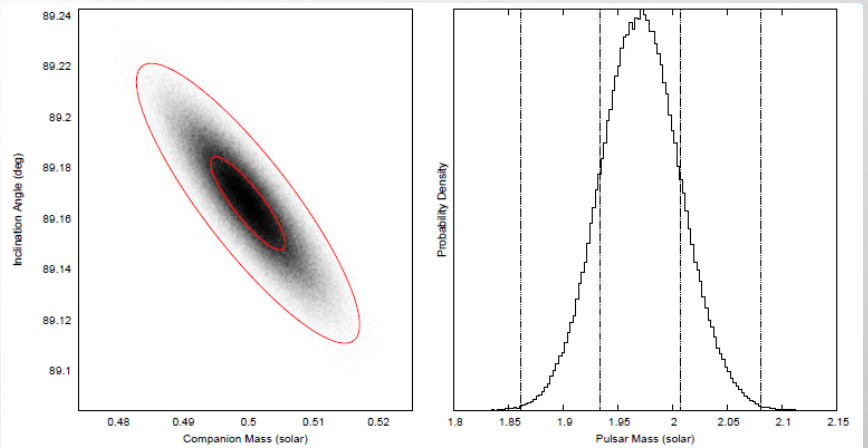
Это очень тесная система,
где наблюдается два радиопульсара.



astro-ph/0609417

ПОЧЕМУ ВАЖНО ИСКАТЬ МАССИВНЫЕ НЕЙТРОННЫЕ ЗВЕЗДЫ?

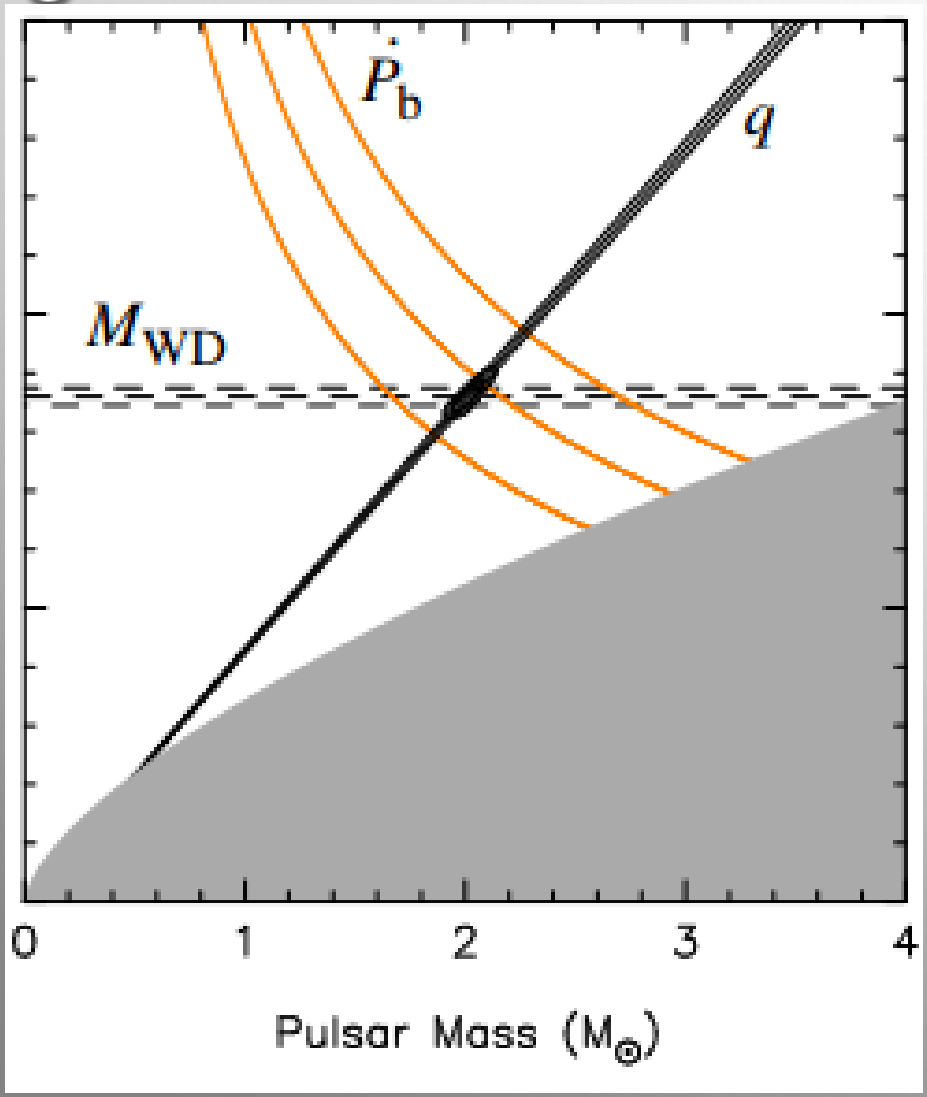




Чем больше масса – тем сильнее сжато вещество в недрах нейтронной звезды.

Мы плохо знаем, как ведет себя вещество при плотности в 10-20 раз выше ядерной.
Сколько выдержит до коллапса в черную дыру?

НЕЙТРОННАЯ ЗВЕЗДА С МАССОЙ 2.01 МАССЫ СОЛНЦА



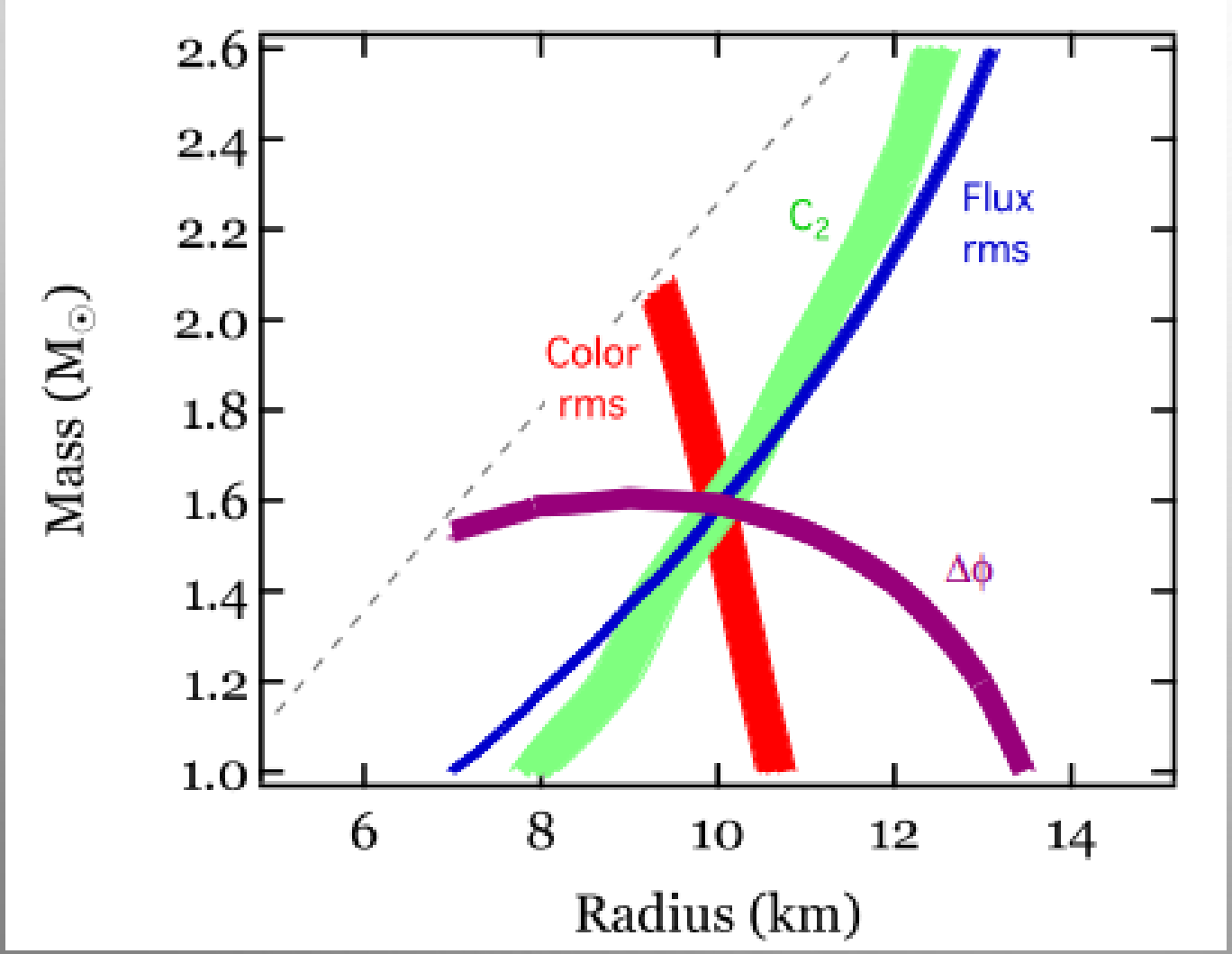
1304.6875

PSR J0348+0432
39 мсек, 2.46 часа - орбитальный
Компаньон – белый карлик

Оценка массы нейтронной звезды:
1.97 – 2.05 масс Солнца (68.27%)
1.90 – 2.18 масс Солнца (99.73%)

Система идеальна для проверок теорий гравитации, т.к. очень компактна.

БУДУЩИЕ РЕНТГЕНОВСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ



1311.1571

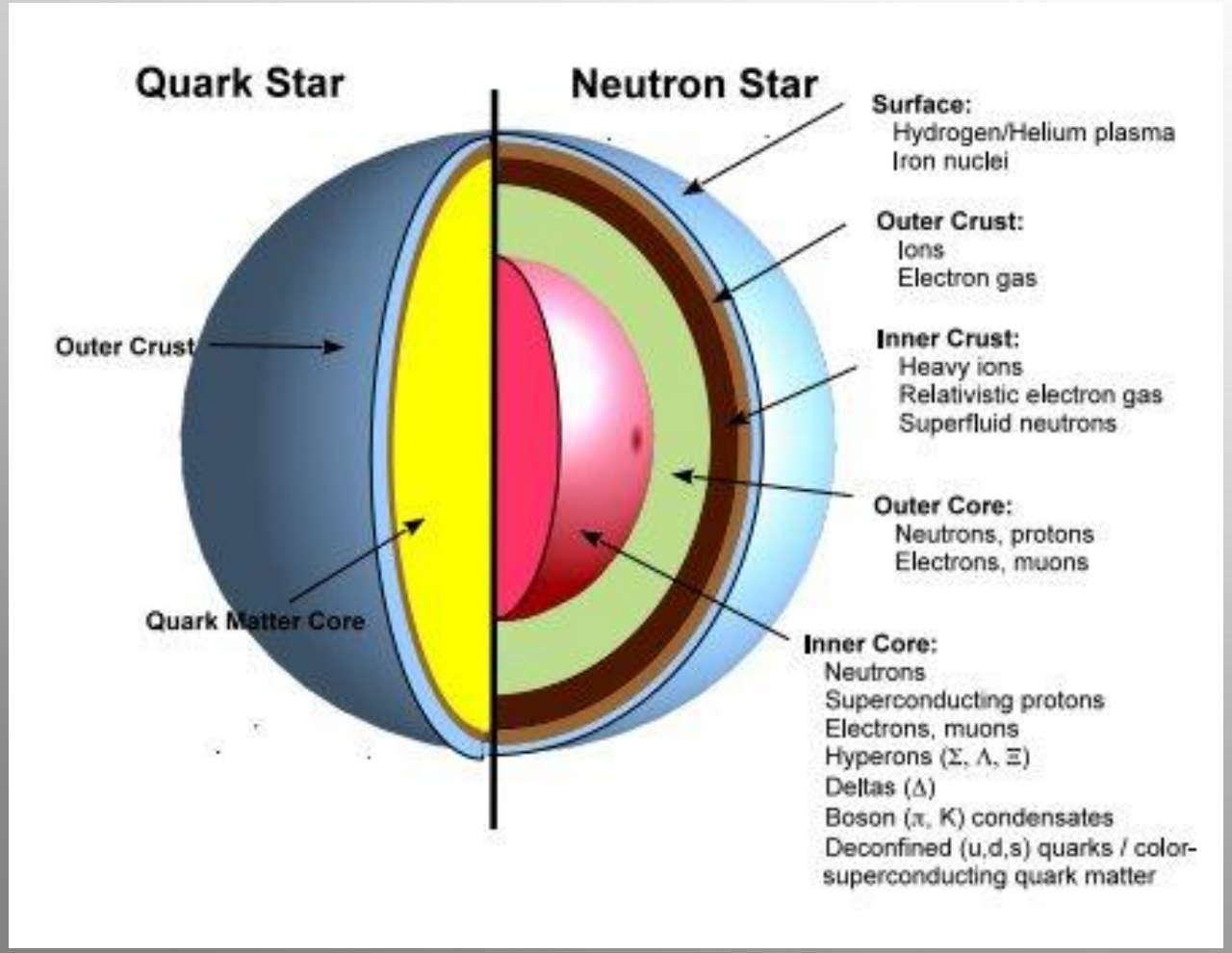
Возможно, что на будущих аппаратах NICER и LOFT можно будет очень точно измерять сразу и массу, и радиус хотя бы для небольшого числа звезд.

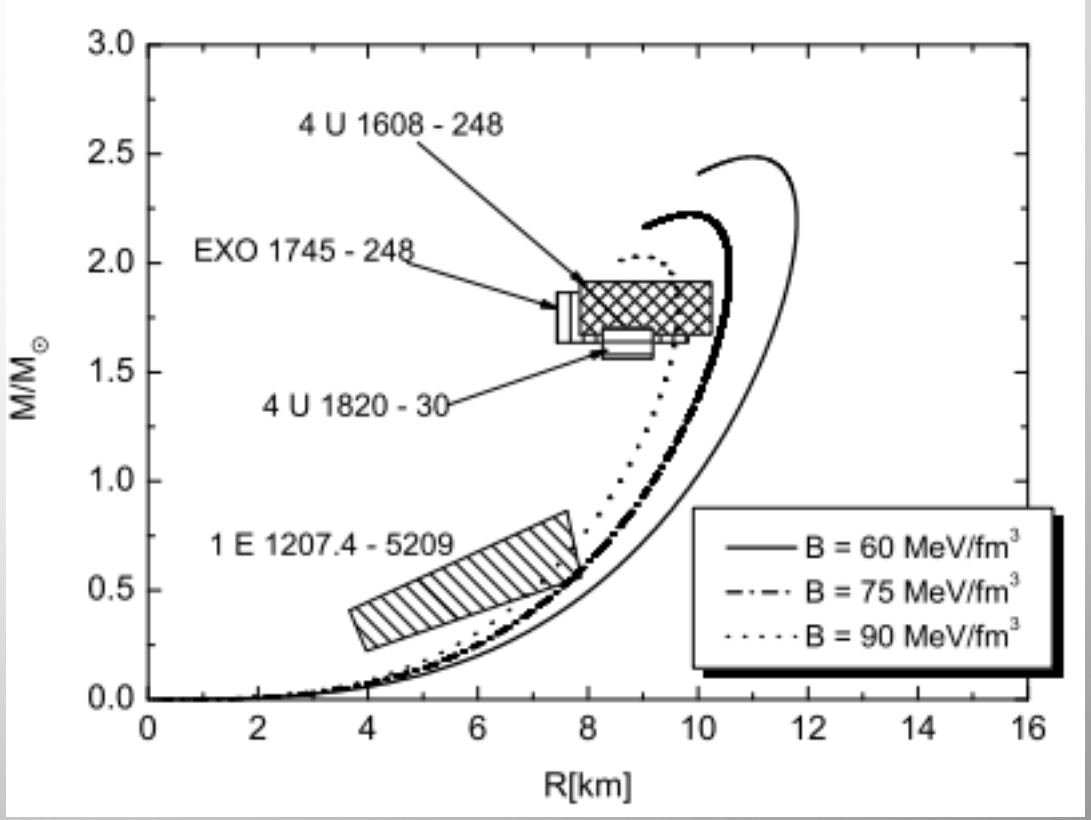
Данные основаны в первую очередь на анализе профиля импульса.

Надо наблюдать звезды с короткими периодами и накопить от них очень много фотонов (~миллион).

КВАРКОВЫЕ ЗВЕЗДЫ

В отличие от нейтронных звезд
кварковые удерживаются не гравитацией,
а ядерными силами. Нет минимальной массы.

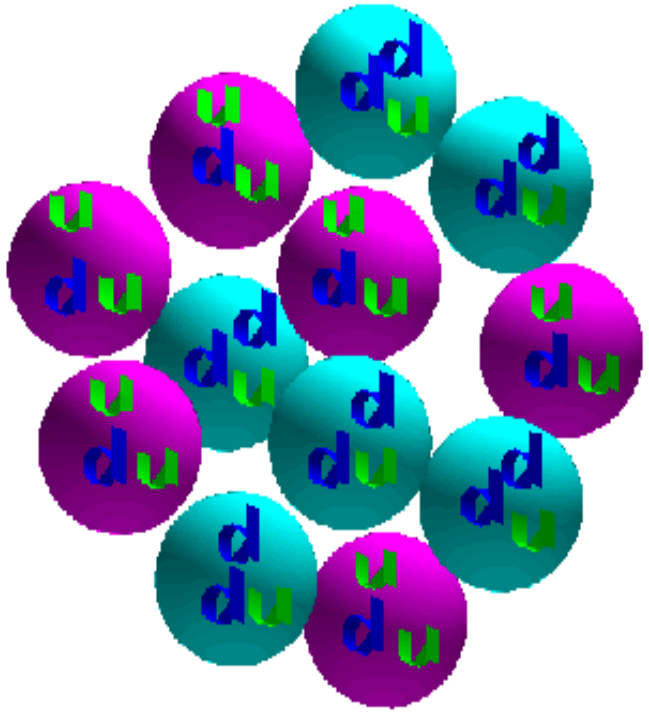


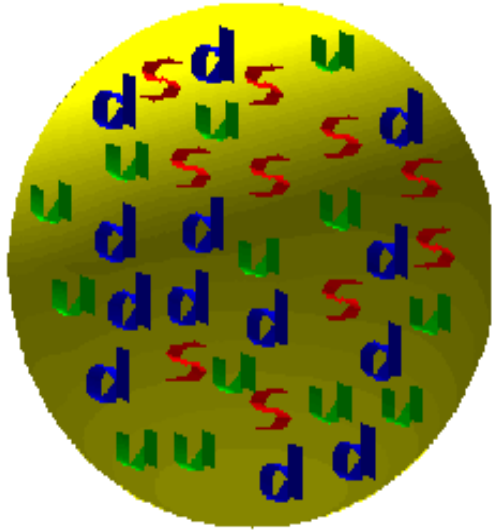


1210.1910

СТРАННОЕ ВЕЩЕСТВО И СТРАПЕЛЬКИ

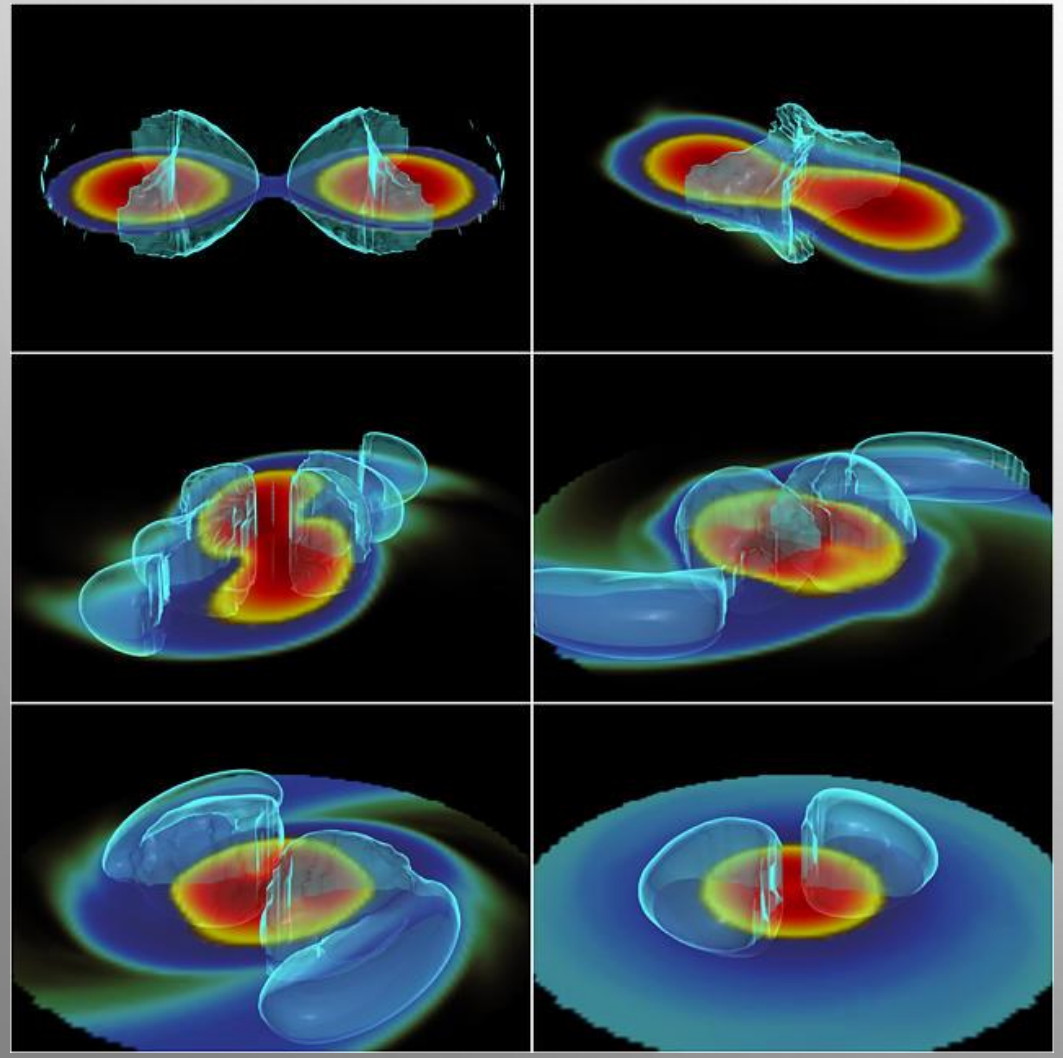
Кварковое вещество – «самодостаточно».
Для его устойчивости не нужна гравитация.
Т.е., могут существовать как странные звезды,
Так и маленькие комочки, капельки.





Страпельки могут встречаться в космических лучах.
Это будут частицы с большой массой, но с зарядом относительно небольшим.

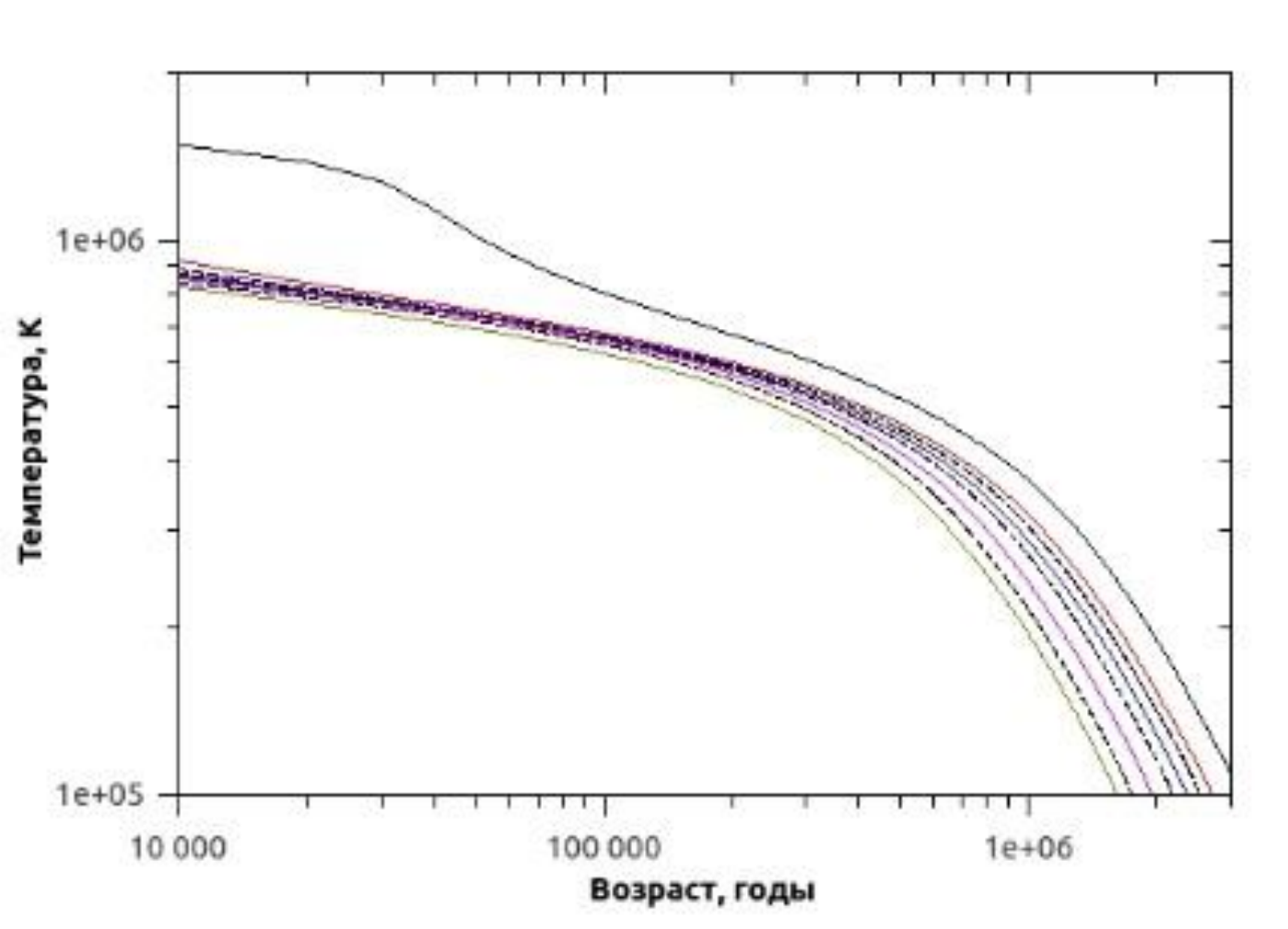
СТРАННАЯ КВАРКОВАЯ ЭПИДЕМИЯ



Если в недрах компактных объектов есть кварковое вещество, то после слияний оно будет выбрасываться. Далее, страпельки могут попадать в другие нейтронные звезды, превращая их в кварковые…

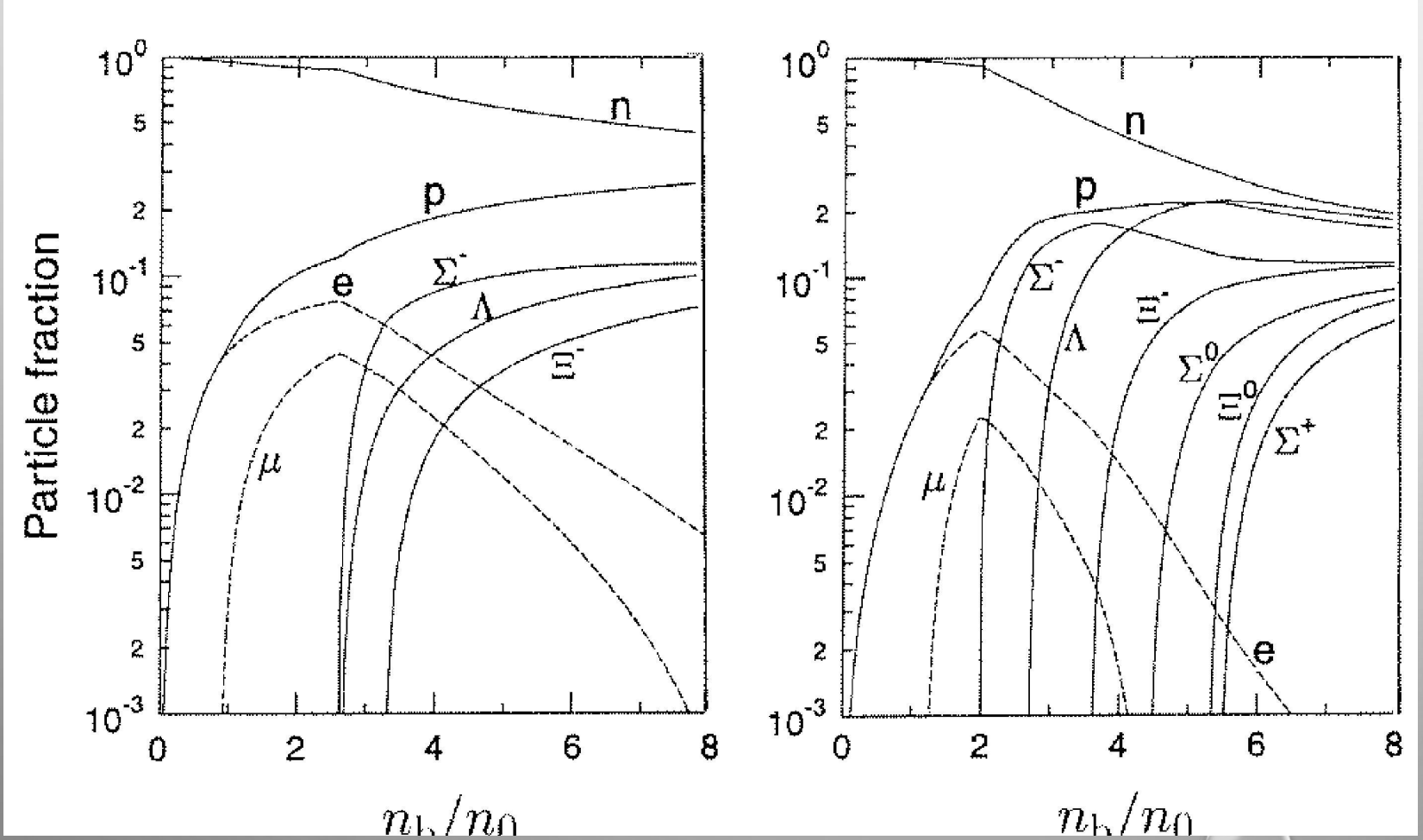
AMS на МКС

ОСТЫВАНИЕ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД



Рождаясь очень горячими, нейтронные звезды остывают со временем в начале за счет излучения нейтрино, а затем – за счет излучения фотонов с поврехности.

ЧАСТИЦЫ ВНУТРИ

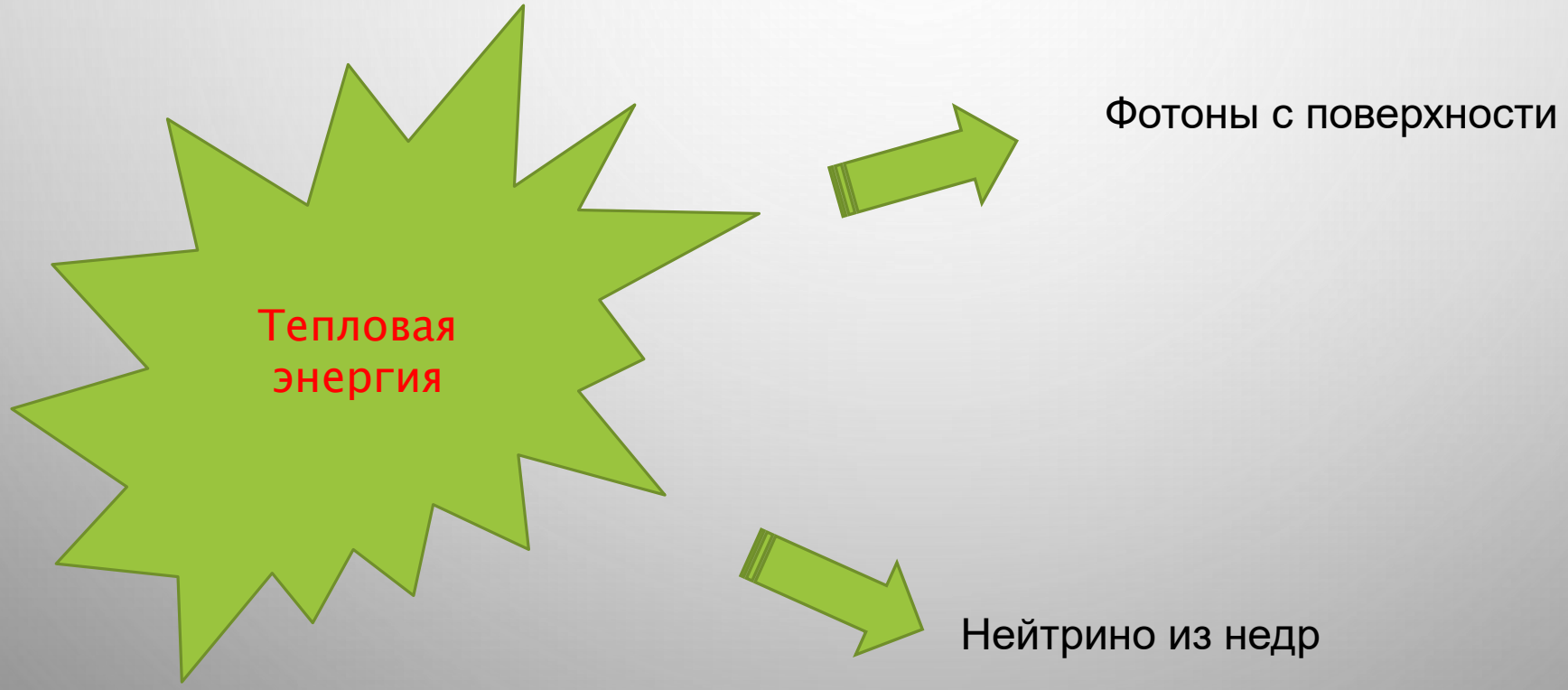


Существует множество моделей внутреннего строения компактных звезд. Каждой из них соответствует совя зависимость содержания разных частиц с глубиной.

Effective chiral model of Hanauske et al. (2000)

Relativistic mean-field model TM1 of Sugahara & Toki (1971)

ТЕПЛОПОТЕРИ



Недра очень горячие – порядка миллиарда градусов.
Поверхность гораздо холоднее – миллион и меньше.

ОСНОВНЫЕ НЕЙТРИННЫЕ ПРОЦЕССЫ

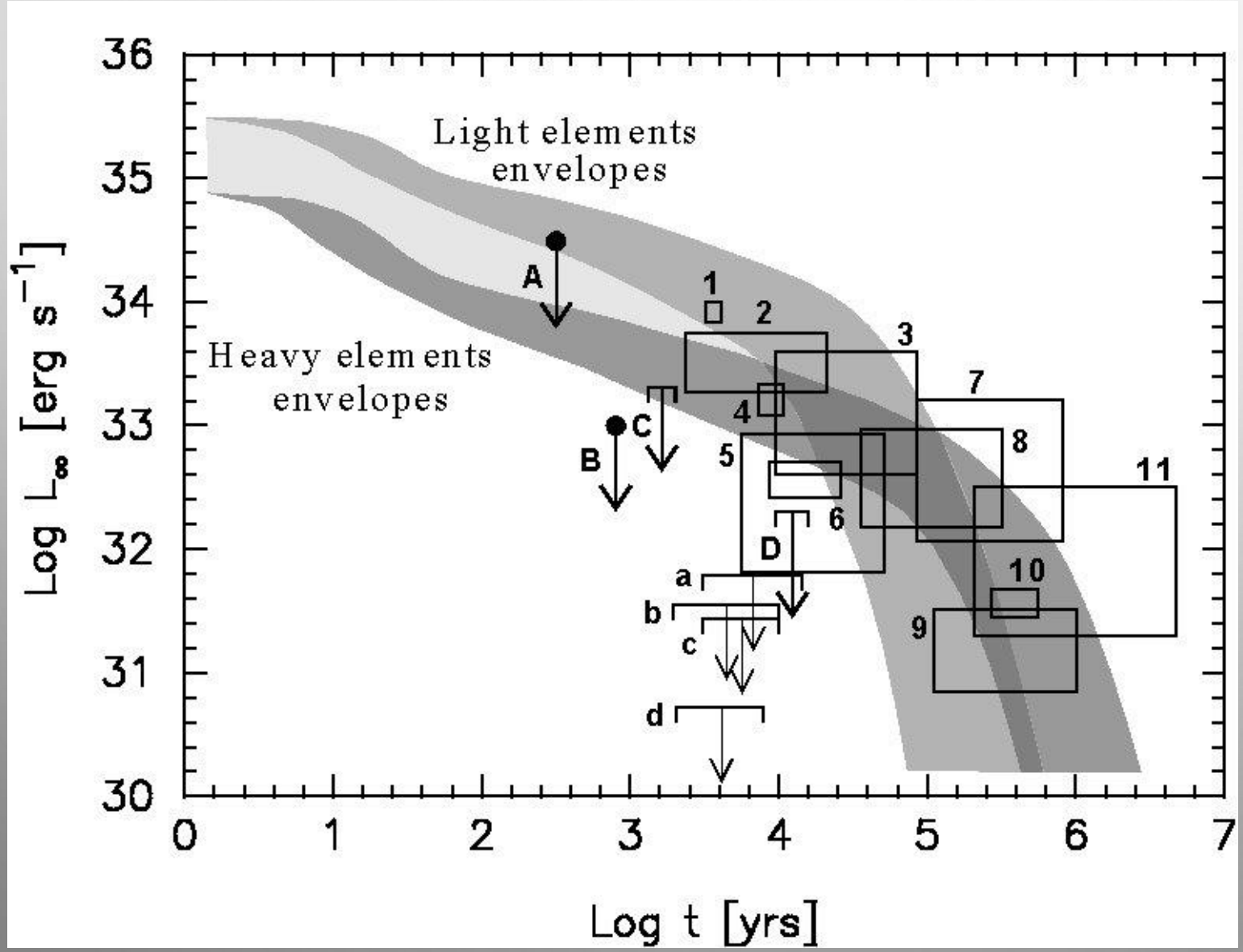
(Yakovlev & Pethick astro-ph/0402143)

Model	Process	Q_{f}, erg cm^{-3} s^{-1}
Nucleon matter	$n \to pe\bar{\nu} \quad pe \to n\nu$	$10^{26} - 3 \times 10^{27}$
Pion condensate	$\tilde{N} \to \tilde{N}e\bar{\nu} \quad \tilde{N}e \to \tilde{N}\nu$	$10^{23} - 10^{26}$
Kaon condensate	$\tilde{B} \to \tilde{B}e\bar{\nu} \quad \tilde{B}e \to \tilde{B}\nu$	$10^{23} - 10^{24}$
Quark matter	$d \to ue\bar{\nu} \quad ue \to d\nu$	$10^{23} - 10^{24}$

Process		Q_{s}, erg cm^{-3} s^{-1}
Modified Urca	$nN \to pNe\bar{\nu} \quad pNe \to nN\nu$	$10^{20} - 3 \times 10^{21}$
Bremsstrahlung	$NN \to NN\nu\bar{\nu}$	$10^{19} - 10^{20}$

$$Q_{\mathrm{slow}} = Q_{\mathrm{s}} T_9^8, \qquad Q_{\mathrm{fast}} = Q_{\mathrm{f}} T_9^6,$$

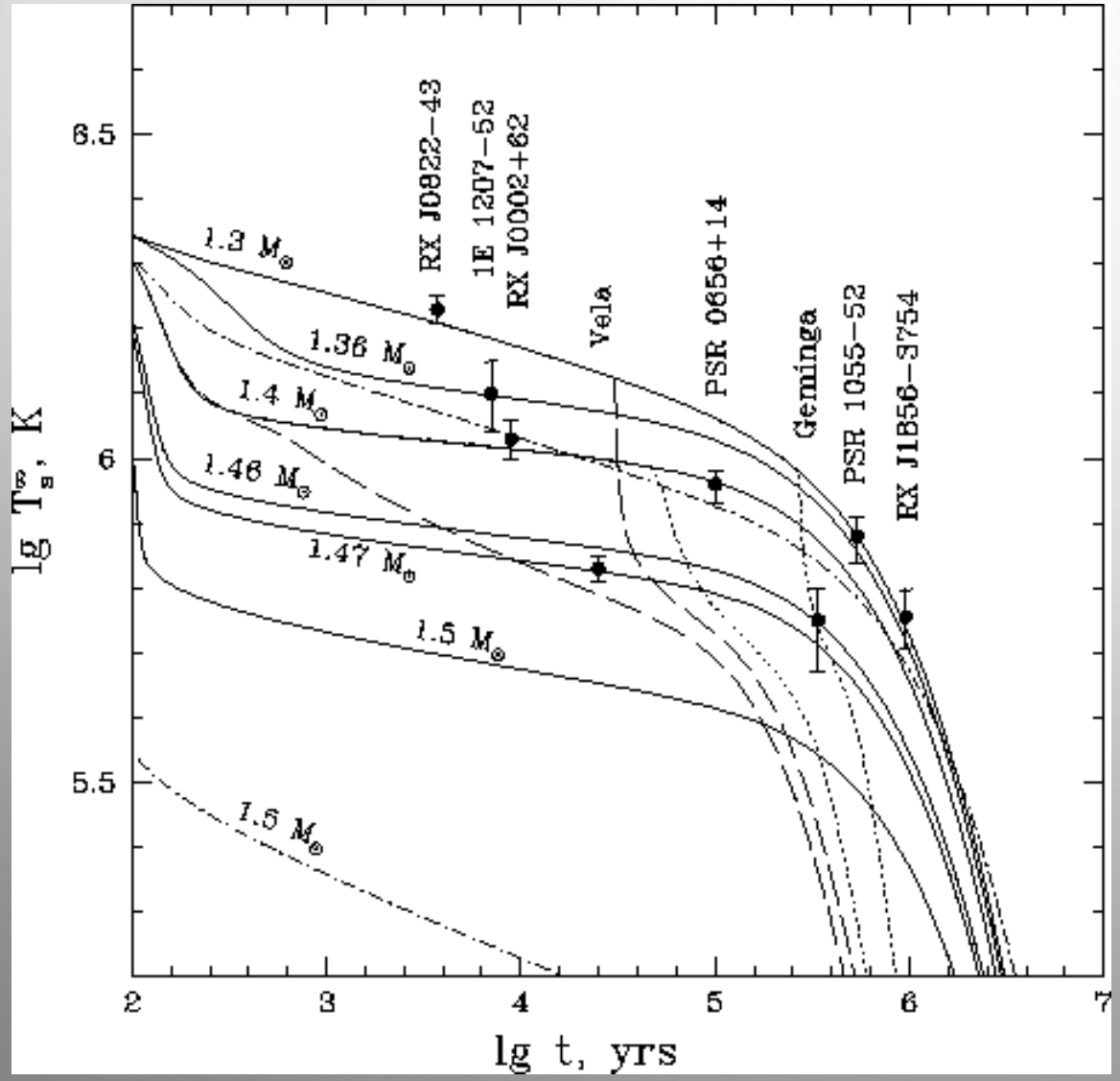
КРИВЫЕ ОСТЫВАНИЯ



Теоретические кривые необходимо сопоставлять с данными наблюдений.

Page, Geppert, Weber
astro-ph/0508056

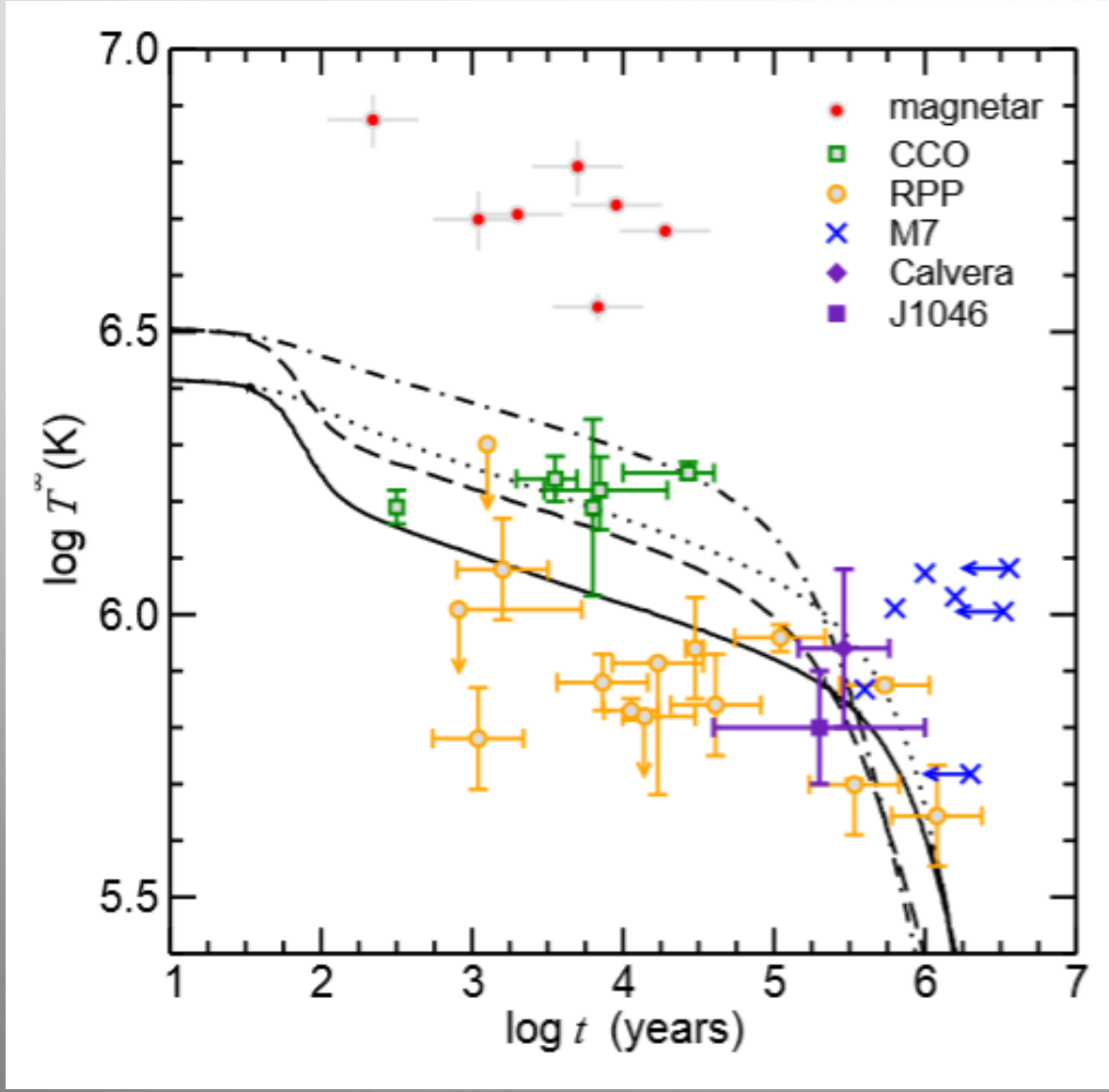
ТЕМПЕРАТУРА И ВОЗРАСТ



Kaminker et al. (2001)

В некотором интервале возрастов измерение температуры может дать возможность оценить возраст звезды.

НАГРЕВ



Возраст по температуре нельзя оценить, если у нейтронной звезды есть дополнительный подогрев.

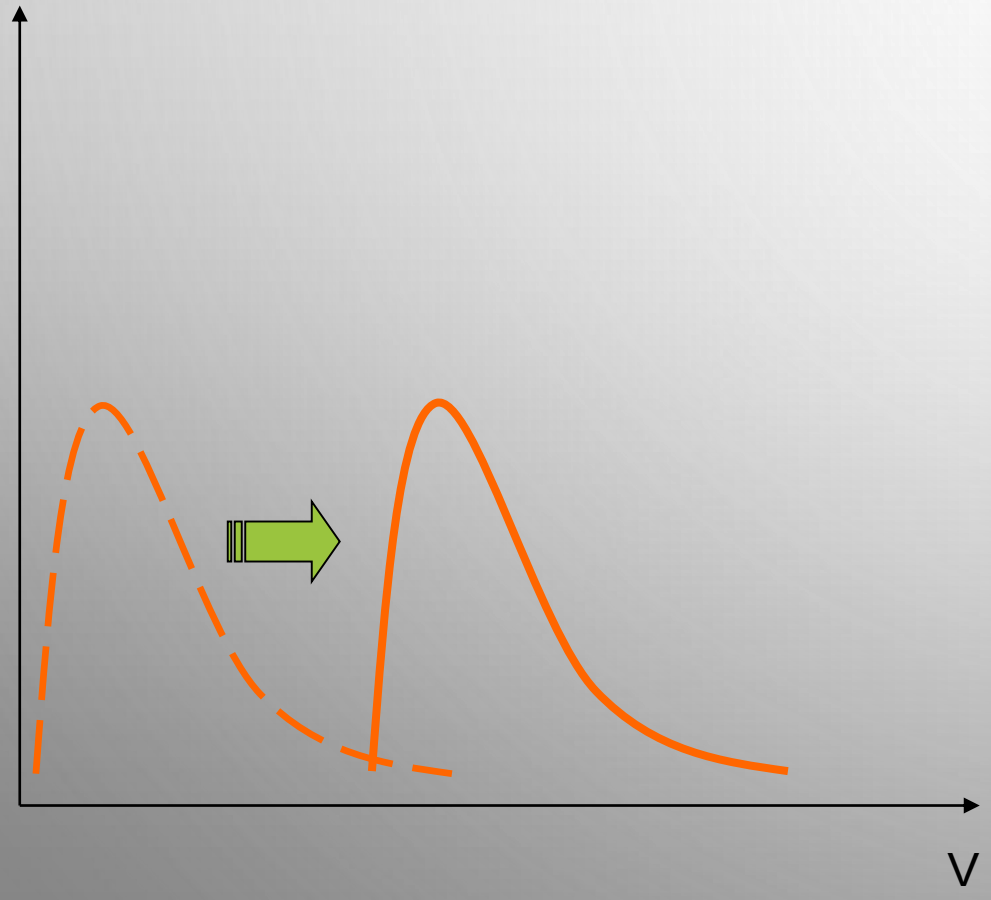
Такой есть у магнитаров. Он связан с затуханием электрических токов, текущих в коре этих нейтронных звезд.

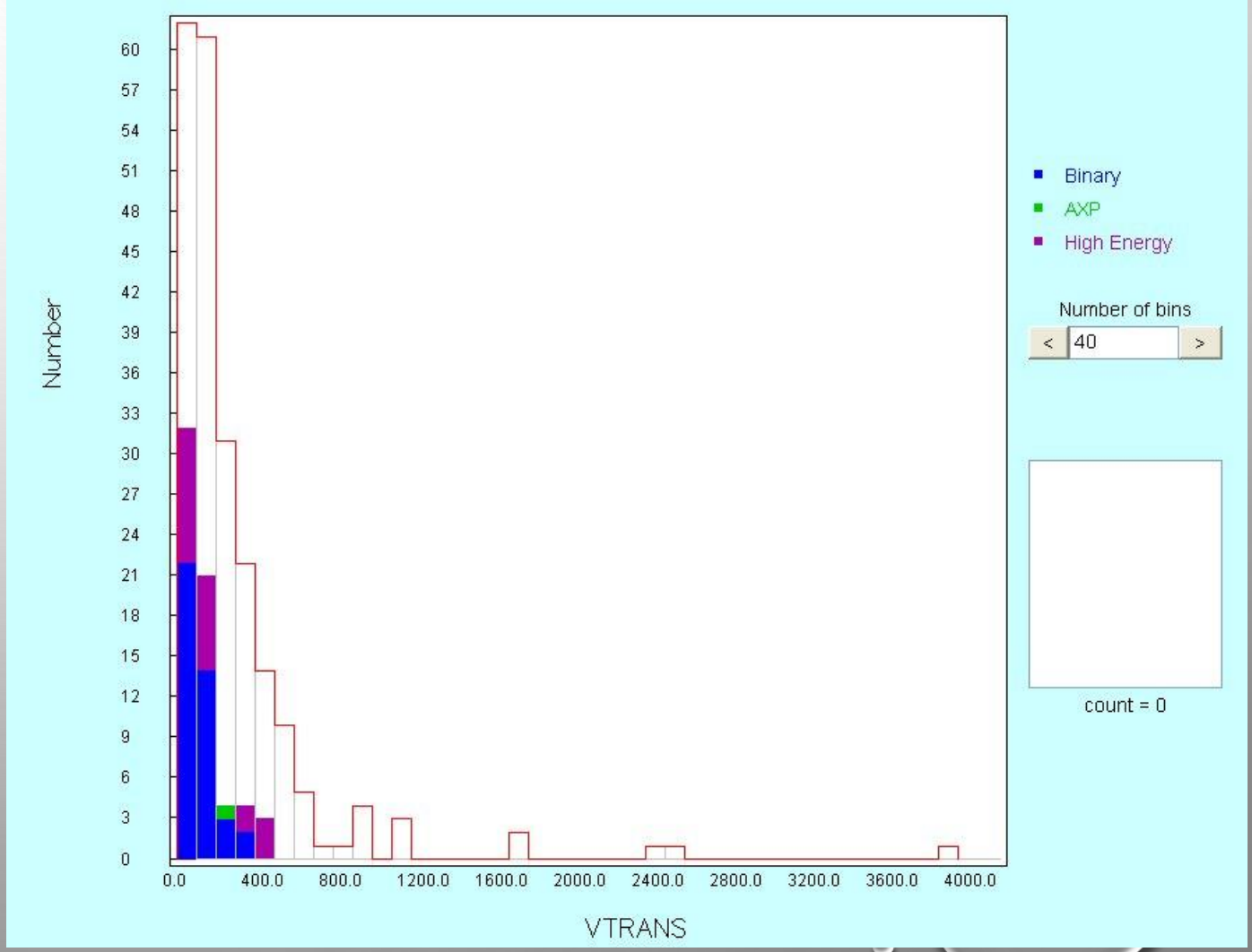
1508.05246

КИНЕМАТИЧЕСКИЙ ВОЗРАСТ

Если мы знаем,
где объекты родились,
то по их современному положению
и скоростям
можно определить возраст.

СКОРОСТИ

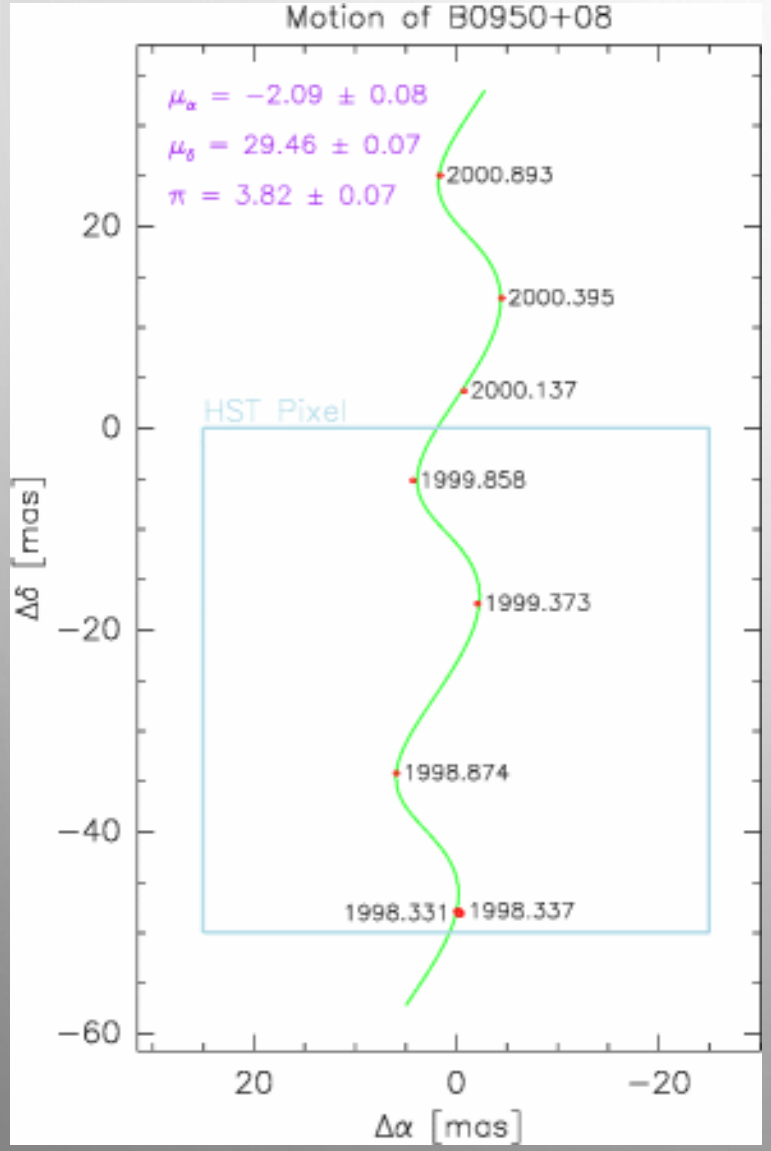




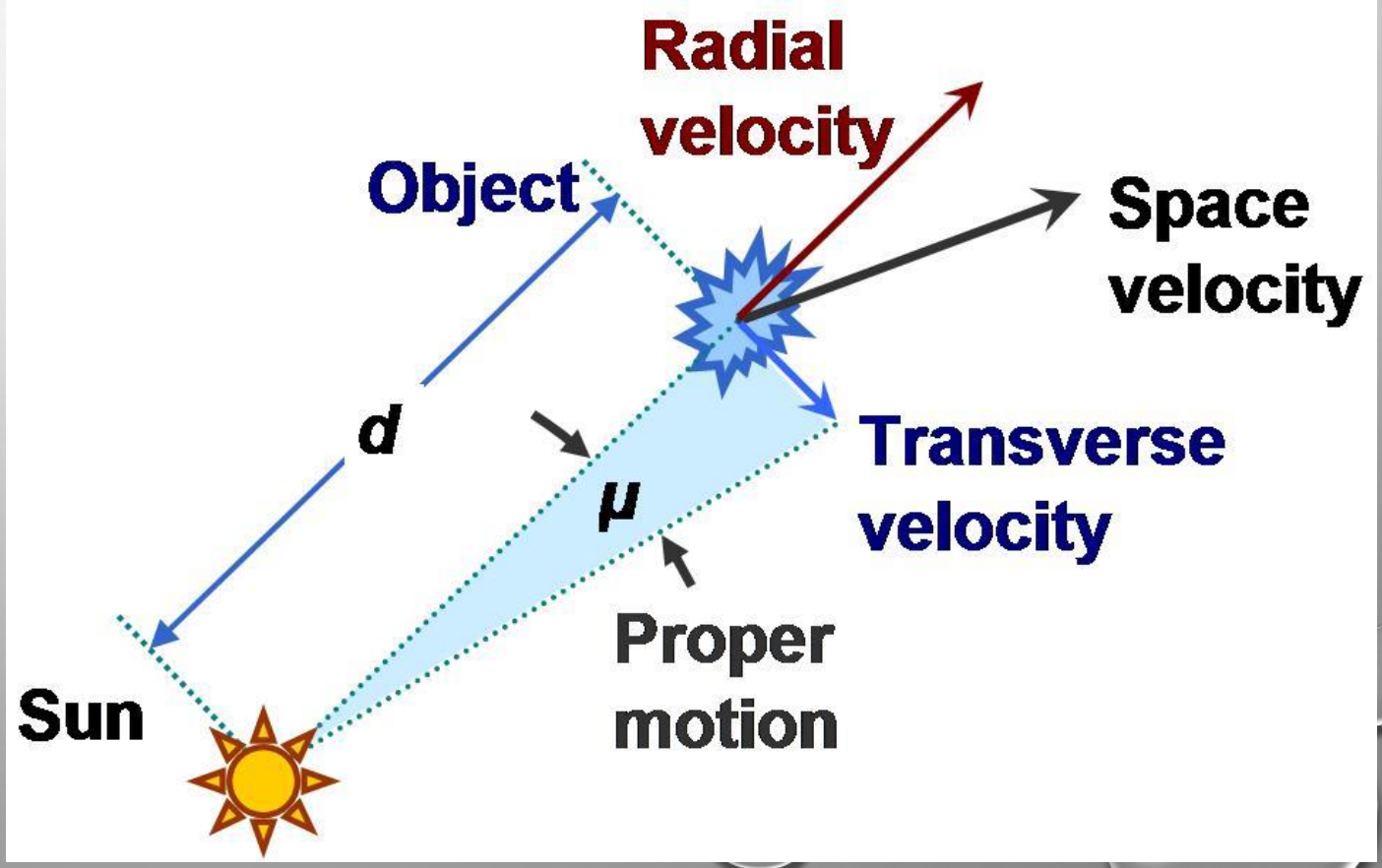
Прародители имеют скорости ~10-30 км/с
А пульсары имеют скорости ~100-500 км/с

ДВИЖЕНИЕ ПУЛЬСАРОВ

http://www.astro.cornell.edu/~shami/psrvlb/



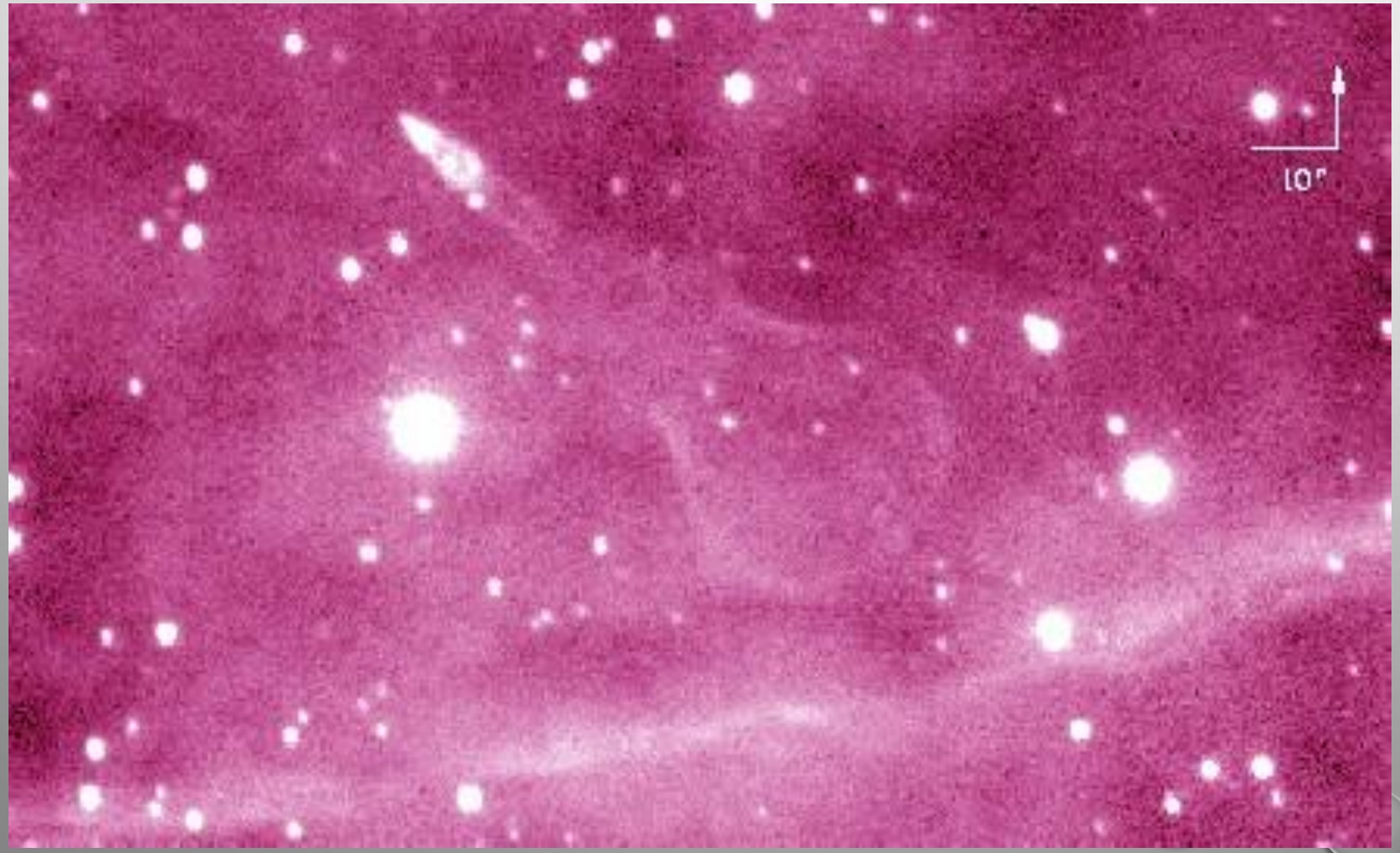
Пульсары имеют большие скорости.
Это измеряют по их собственному движению.



Википедия

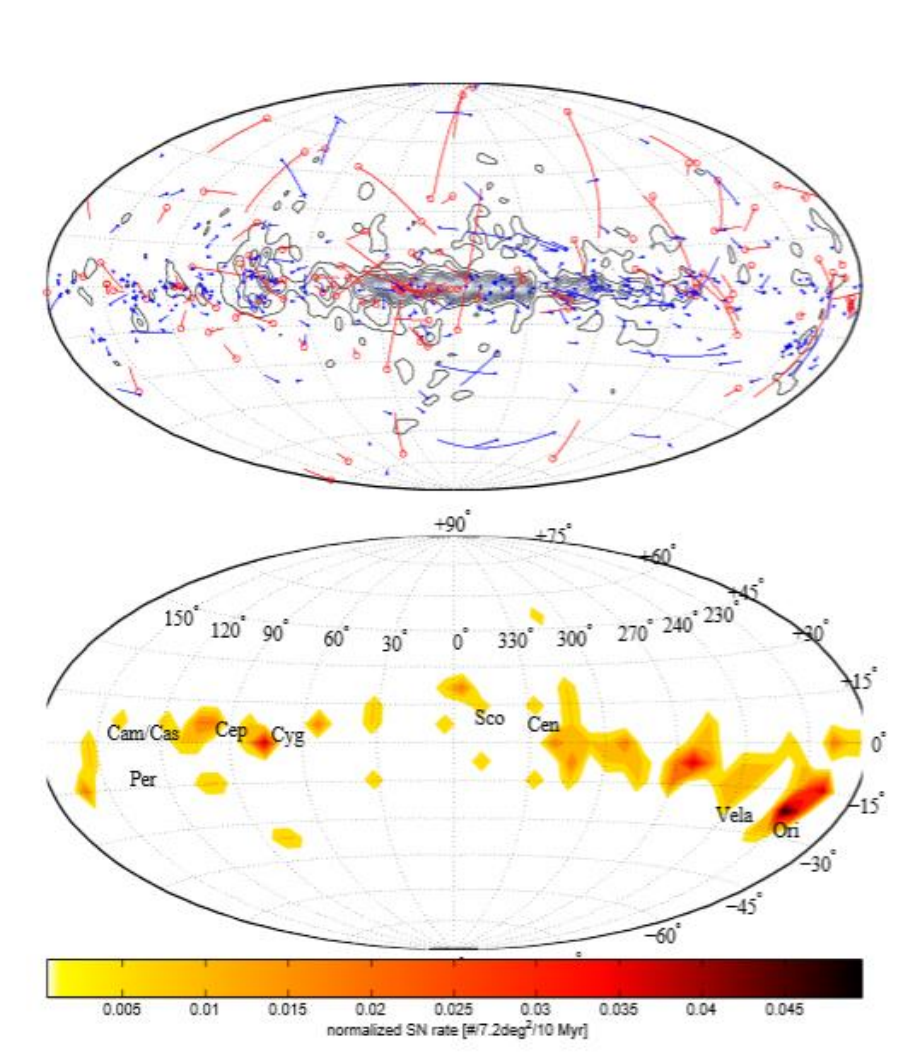
СКОРОСТИ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД В ТУМАННОСТЯХ

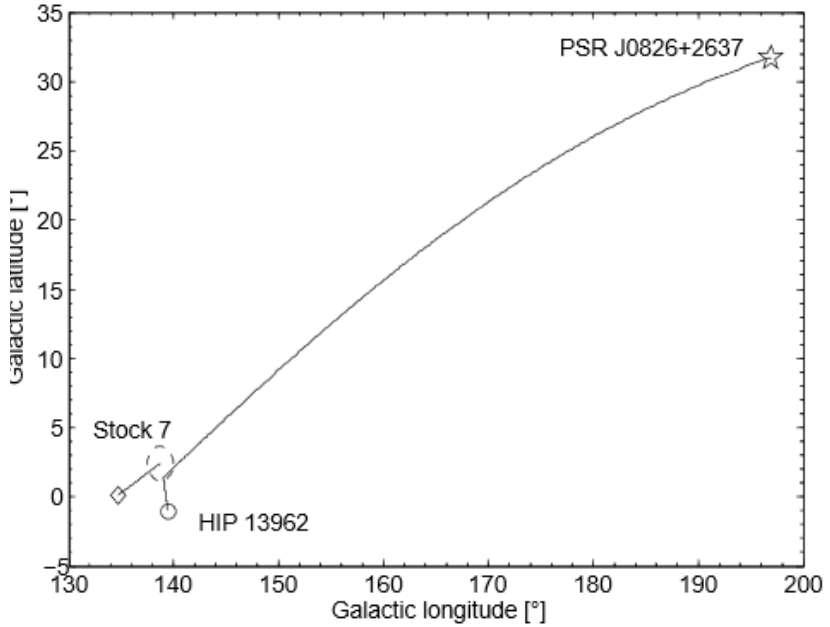
http://www.astro.cornell.edu/~shami/guitar/

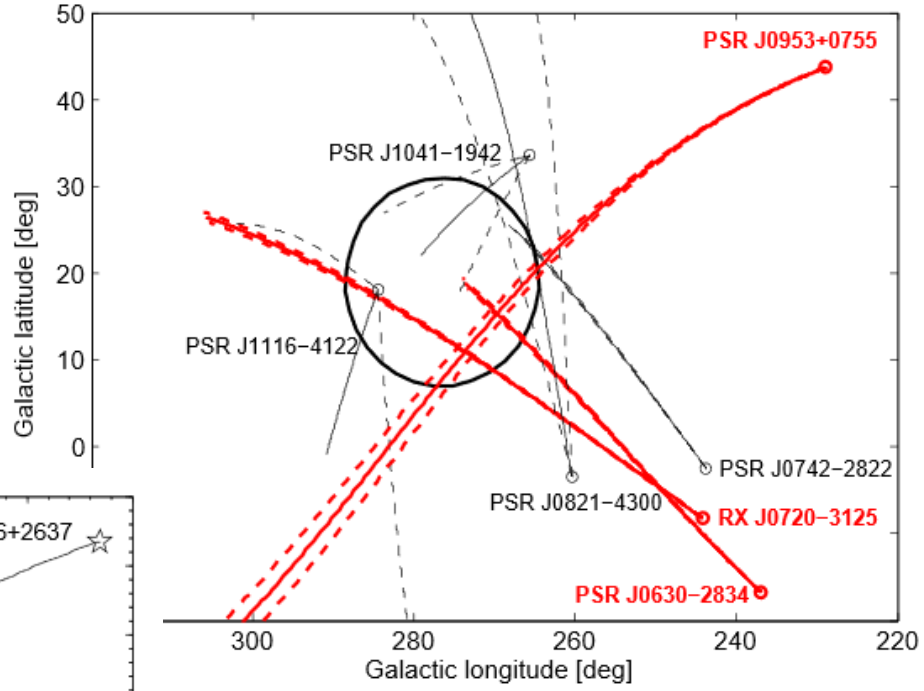


Также можно измерять скорости нейтронных звезд по свойствам туманности, по смещению от центра остатка и по рентгеновским наблюдениям.

ТРАЕКТОРИИ И МЕСТА РОЖДЕНИЯ





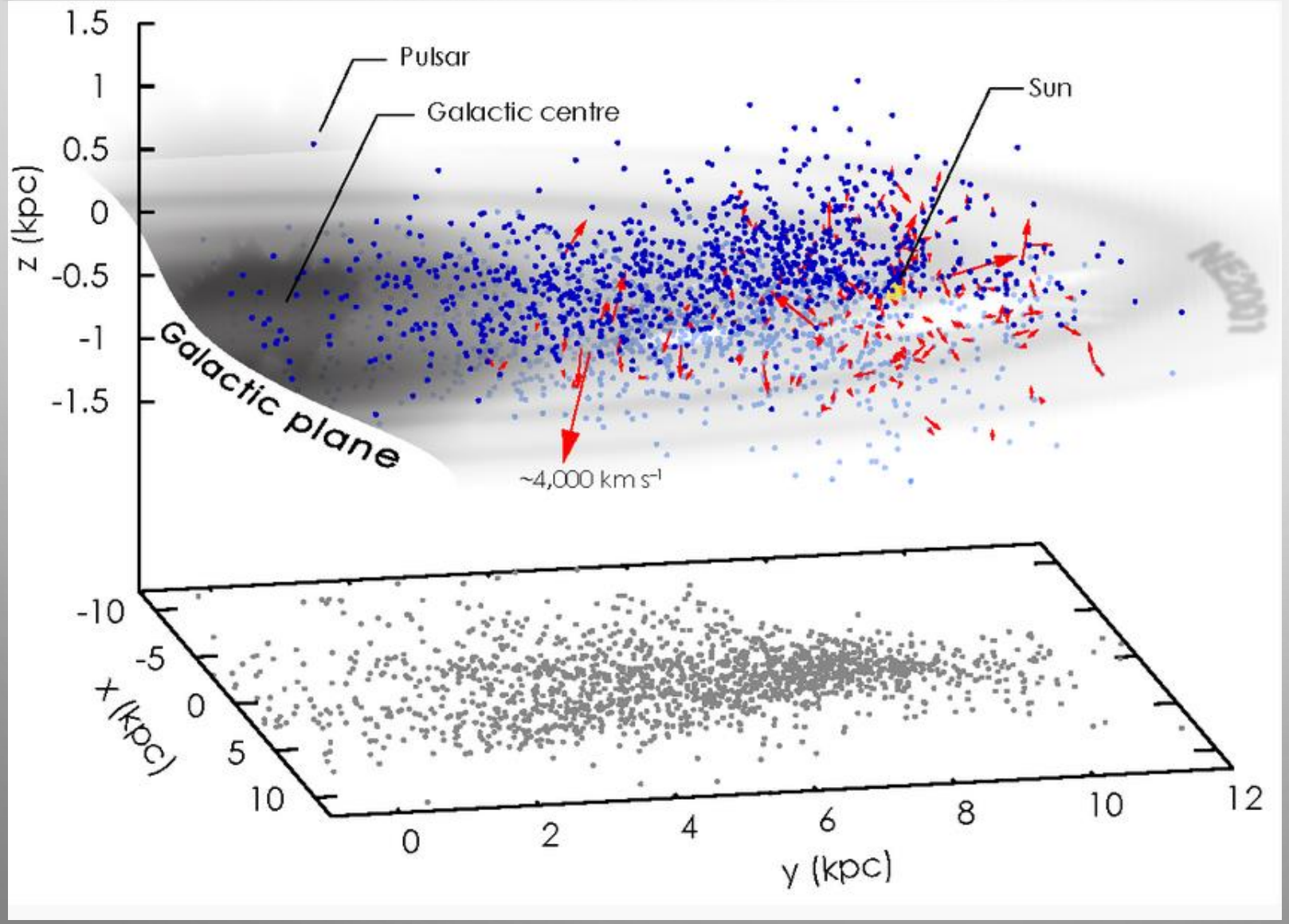


1202.1388

1401.4678

1307.5616

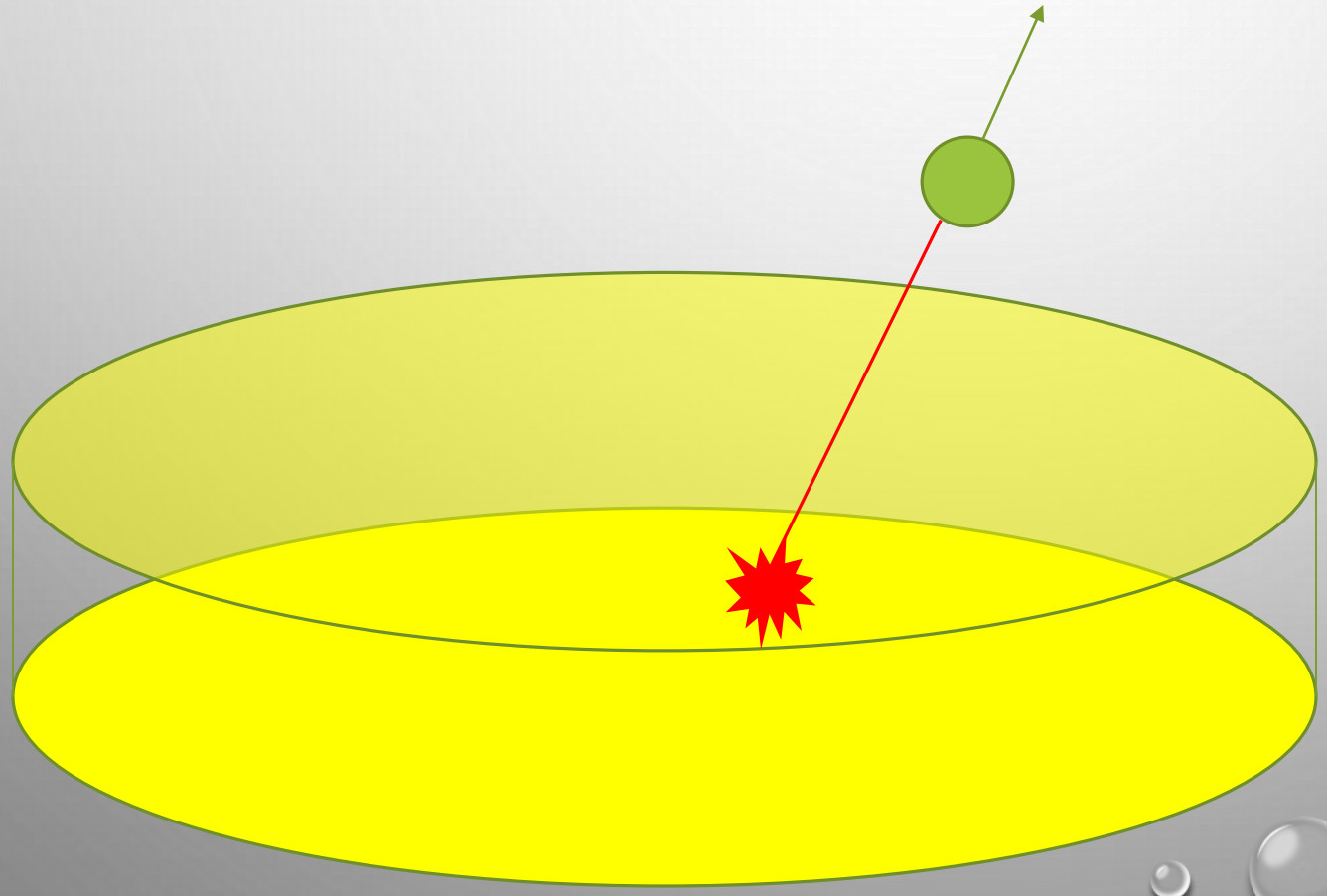
ПУЛЬСАРЫ В ГАЛАКТИКЕ



http://www.mpifr-bonn.mpg.de/research/fundamental/birthproperties

Пульсары рождаются в диске. А в диске они концентрируются к спиральным ветвям.

ПУЛЬСАРЫ ИЗ ДИСКА

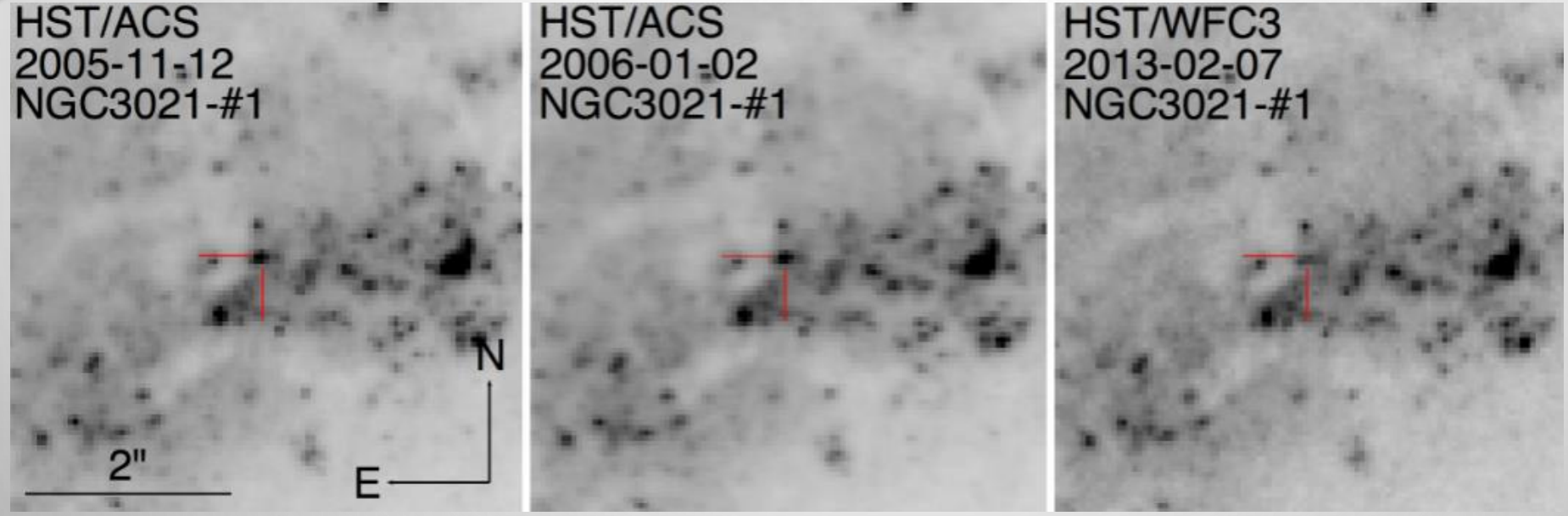


Для оценки кинематического возраста часто удобно считать, что пульсар родился в плоскости Галактики.

Т.о., зная современное положение нейтронной звезды, ее скорость и место рождения, можно определить ее возраст.

УШЕДШИЕ БЕЗ ШУМА

1507.05823



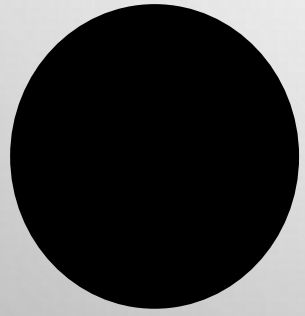
Звезда исчезла без взрыва сверхновой.

Авторы искали и нашли случай, когда массивная звезда исчезла, а никакой сверхновой не было видно. Они используют архивные данные Хаббловского телескопа для поиска исчезнувших (без взрыва) массивных звезд. Исследовано 15 галактик. Выделено несколько кандидатов. Детальный анализ показал, что одно событие действительно очень похоже на исчезновение желтого сверхгиганта (масса около 25-30 масс Солнца) без взрыва. Это примерно то, что и ожидалось, т.е., пусть и на очень низкой статистике, но подтверждает идею о "тихом коллапсе" некоторых массивных звезд. Хотя в статье приведен лишь один хороший кандидат, доля таких событий может быть довольно большой.

ЧТО ТАКОЕ ЧЕРНАЯ ДЫРА?

Для физика

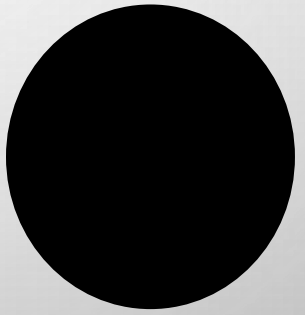
Обладает определенными внутренними свойствами



Объект, обладающий горизонтом.

Для астронома

Обладает определенными внешними проявлениями



Компактное (размер горизонта) массивное тело, не проявляющее признаков наличия поверхности, и чьи недра недоступны для наблюдений.

ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ЧЕРНЫХ ДЫР: ДВА РЕАЛЬНЫХ И ДВА ГИПОТЕТИЧЕСКИХ

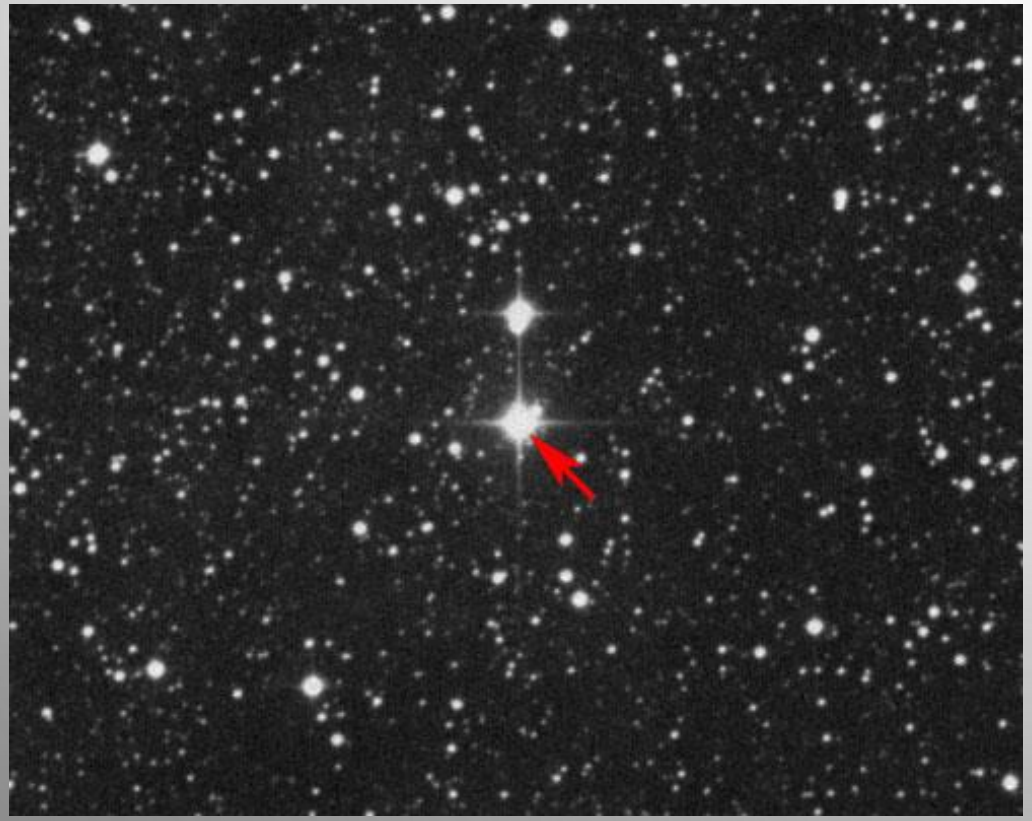
Звездные массы

Сверхмассивные

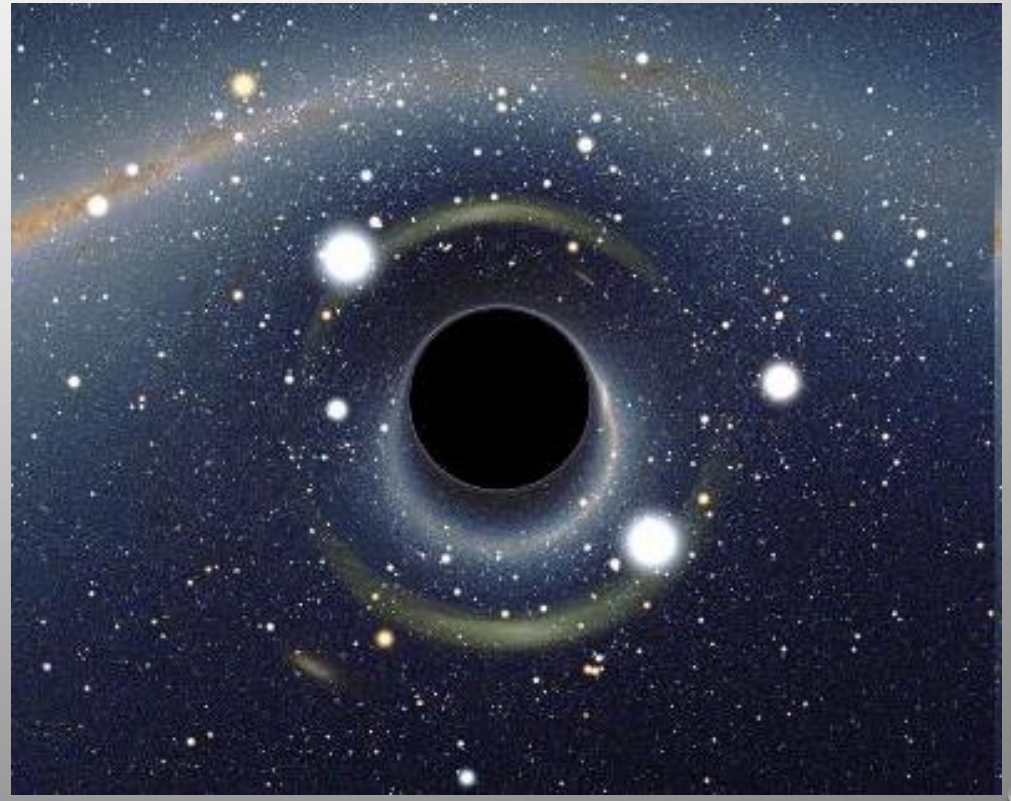
Первичные

Промежуточные

ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ В ДВОЙНЫХ СИСТЕМАХ

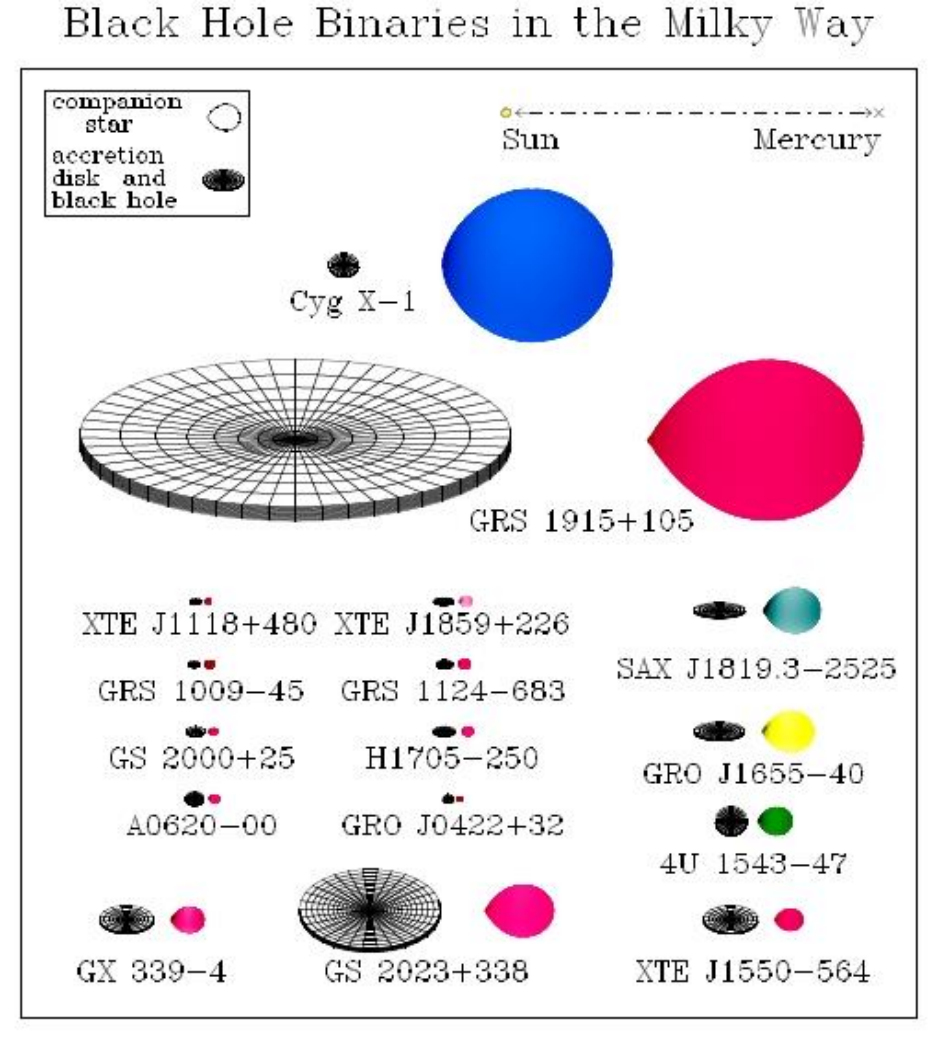


Система Лебедь X-1 была выделена как кандидат в двойную с черной дырой в начале 70-х гг.



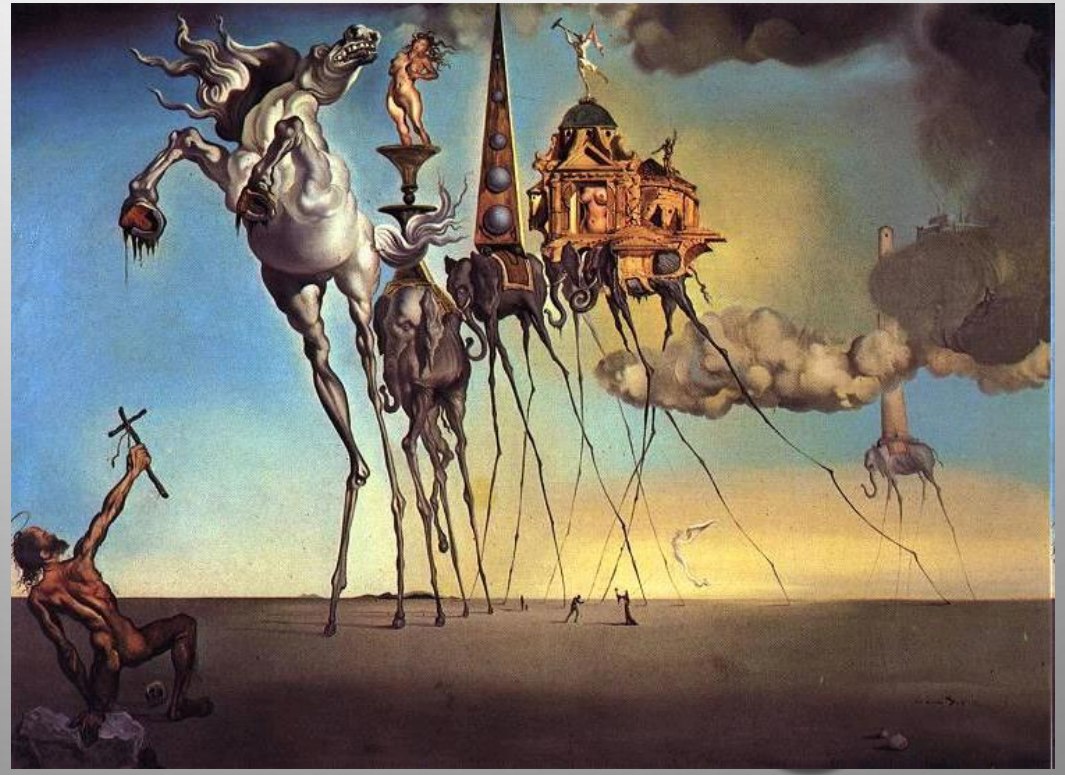
«Черная дыра в источнике Лебедь X-1 – это самая консервативная гипотеза» (Э. Салпитер)

КАНДИДАТЫ В ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

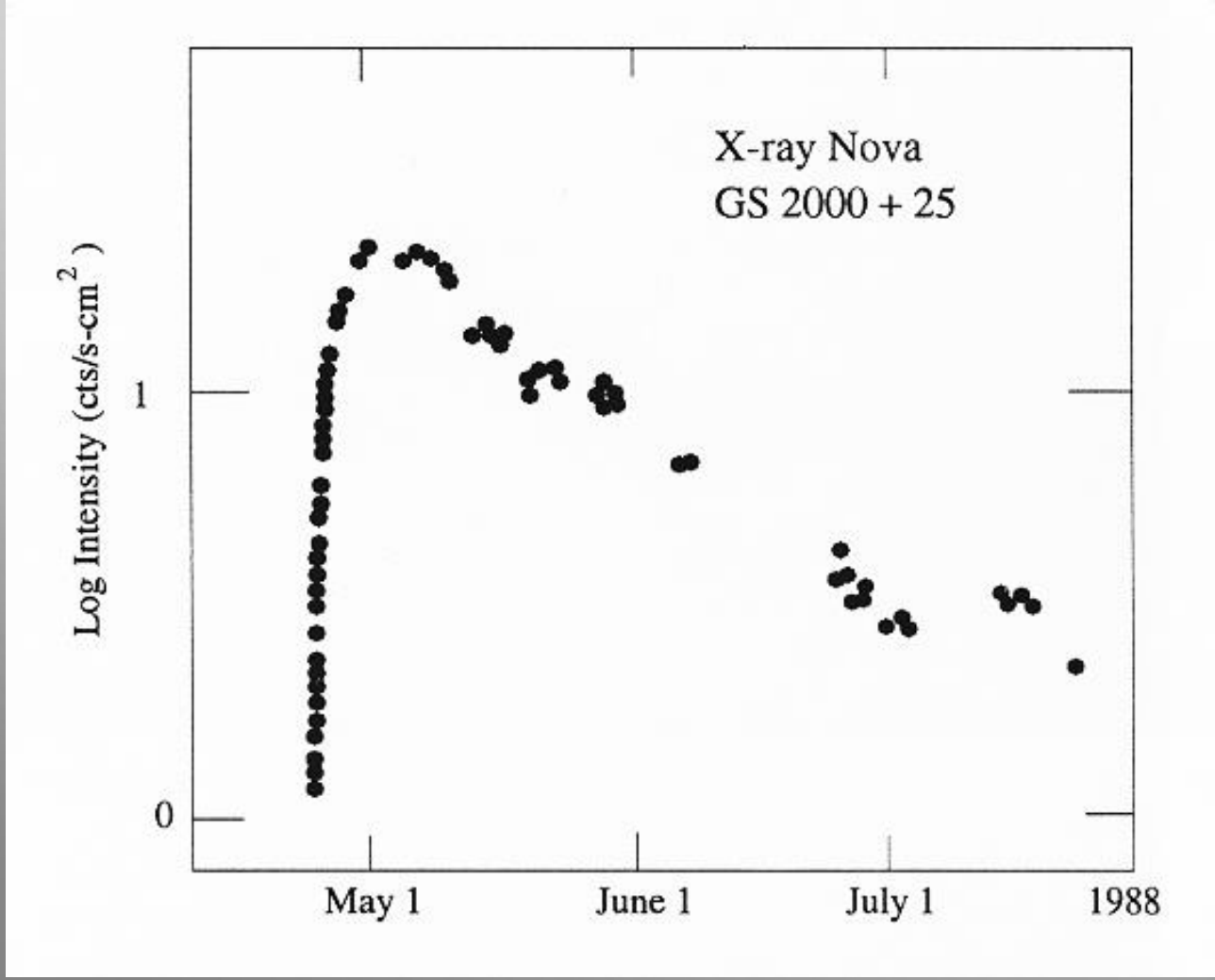


Почему считаем их кандидатами?

- нет пульсаций
- особенности излучения
- ТЯЖЕЛЫЕ!



РЕНТГЕНОВСКИЕ НОВЫЕ



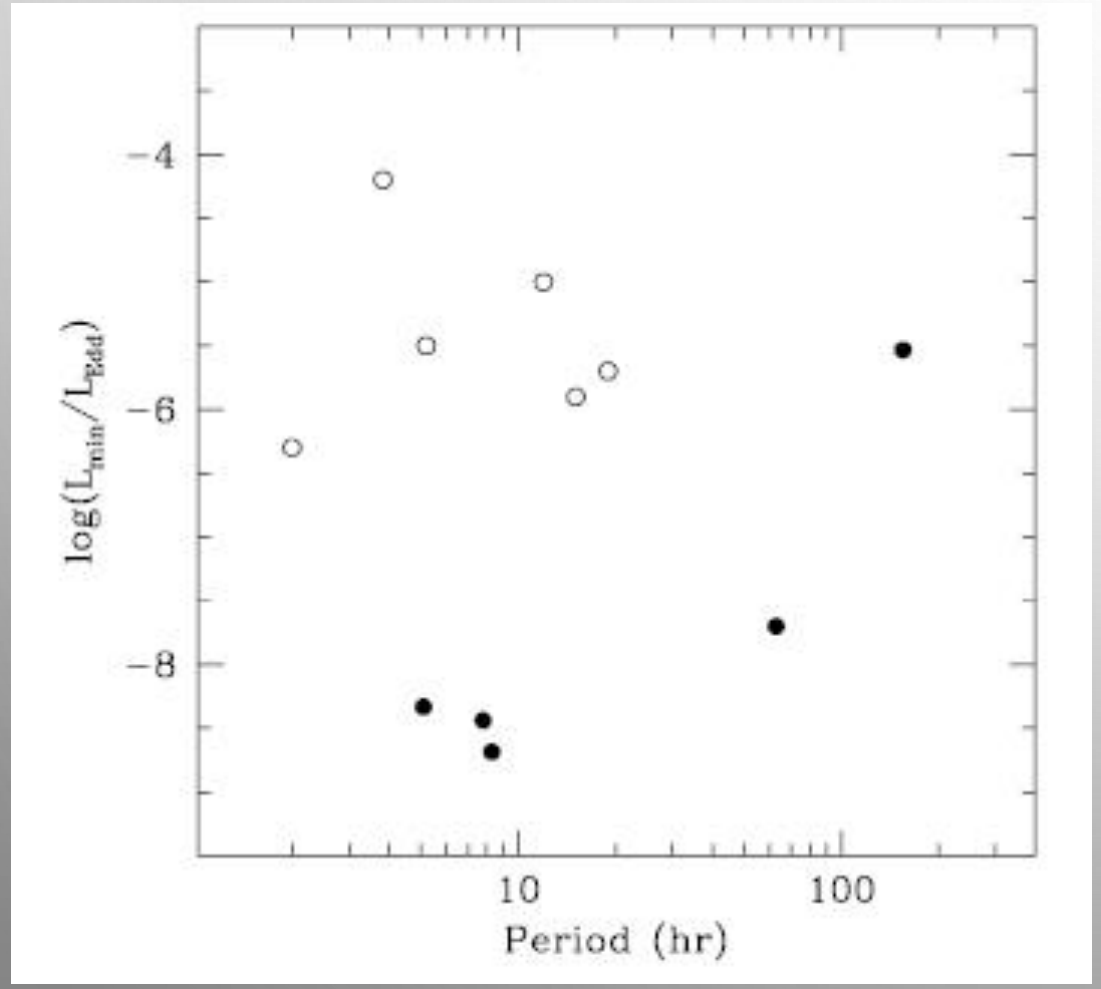
Маломассивные рентгеновские двойные с черными дырами.

Лучшие кандидаты.

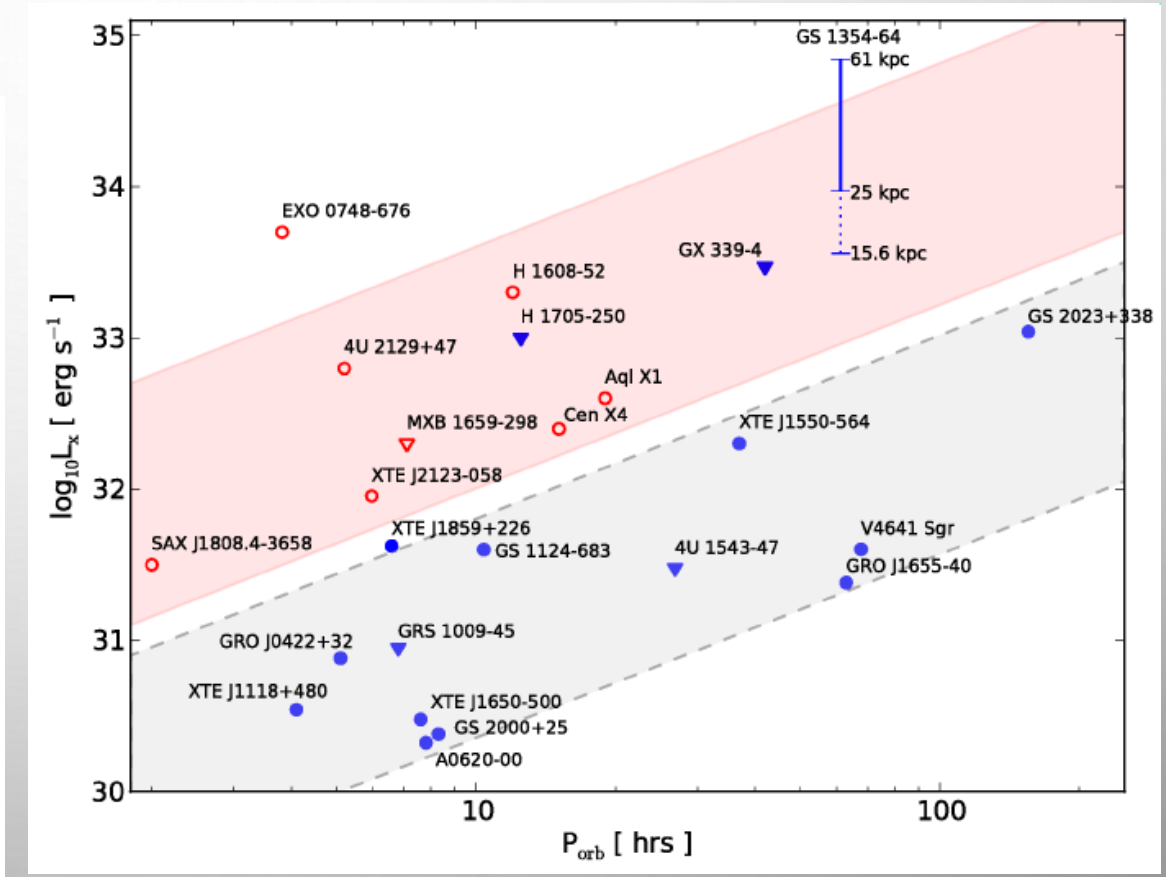
В минимуме можно увидеть вторичный компонент, что позволяет получить хорошую оценку массы черной дыры.

СВЕТИМОСТЬ В СПОКОЙНОМ СОСТОЯНИИ

(Garcia et al. 2001, см. Psaltis astro-ph/0410536)



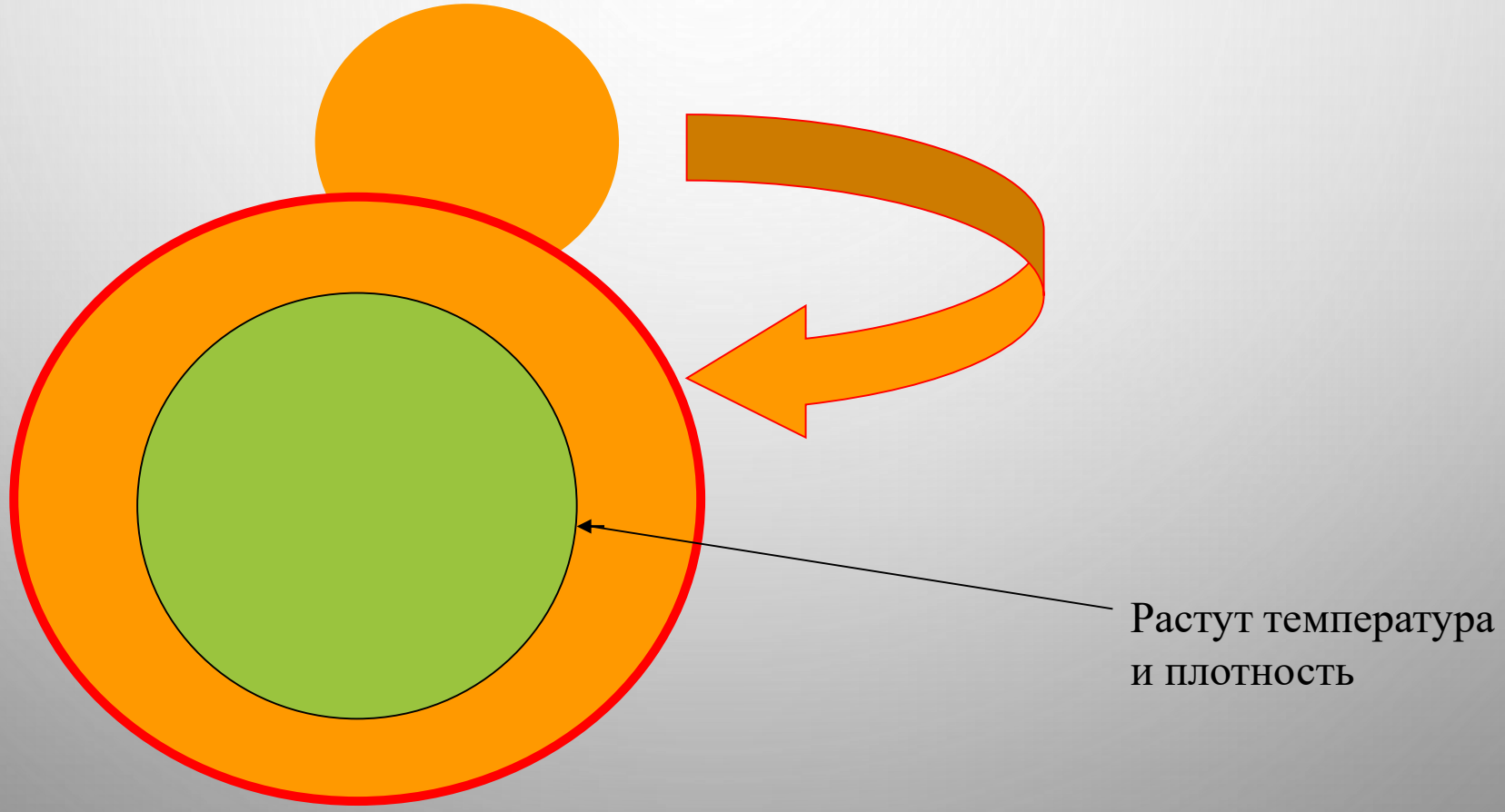
белые – нейтронные звезды черные – черные дыры



Красный – системы с нейтронными звездами
Синие – системы с черные дыры

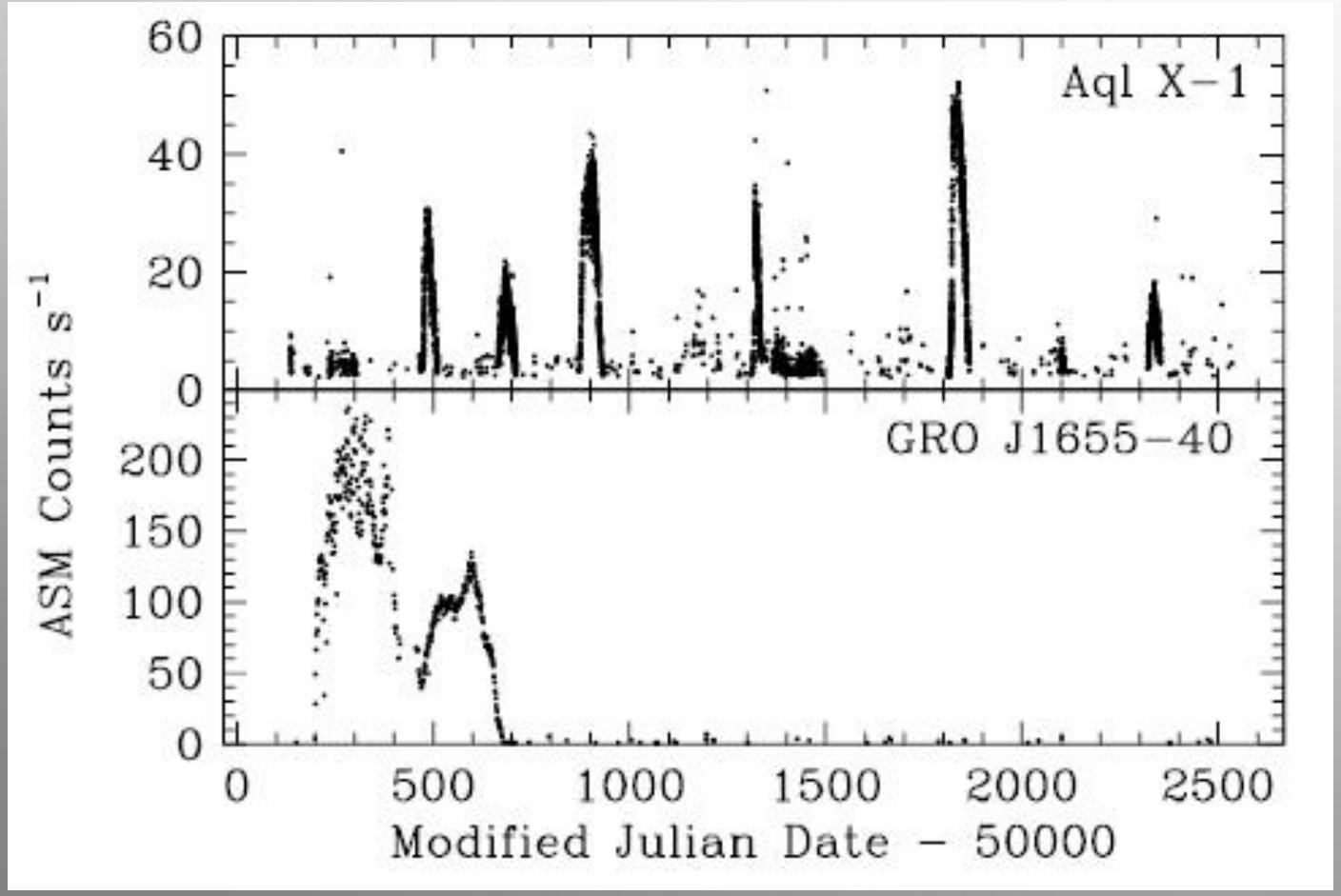
arXiv: 1105.0883

РЕНТГЕНОВСКИЙ БАРСТЕР



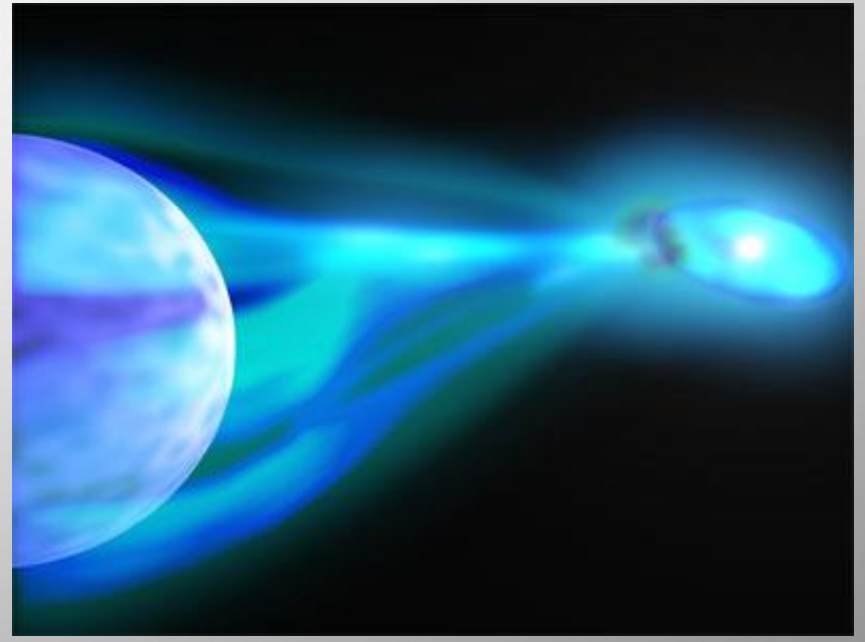
ДВОЙНЫЕ СИСТЕМЫ С ДЫРАМИ И БЕЗ

У кандидатов в черные дыры нет барстерных вспышек, хотя, если бы не было горизонта, то они должны были бы быть в ряде потенциальных альтернативных моделей.

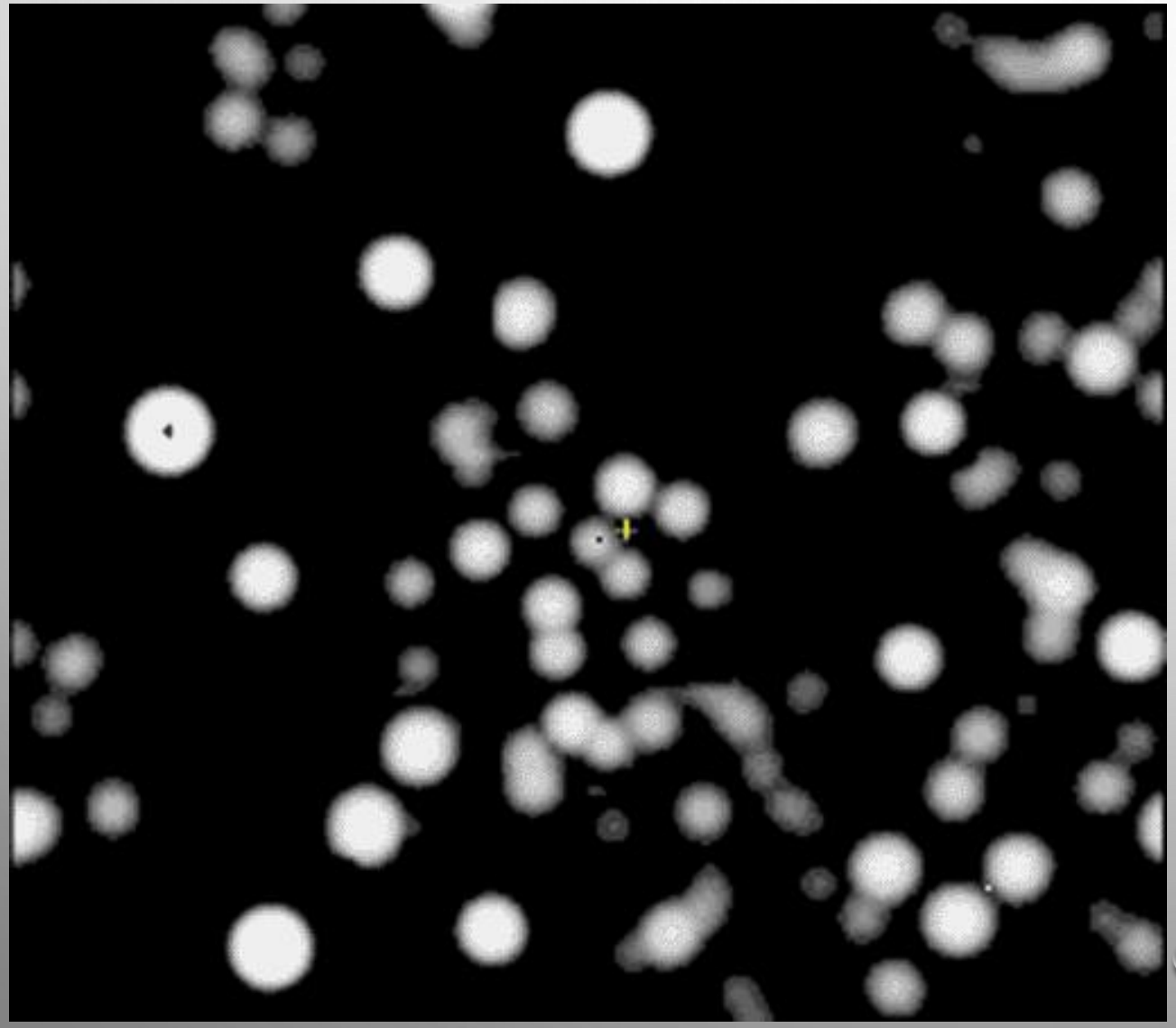


НЗ

ЧД



САМАЯ ДОСТОВЕРНАЯ ЧД – SGR A*

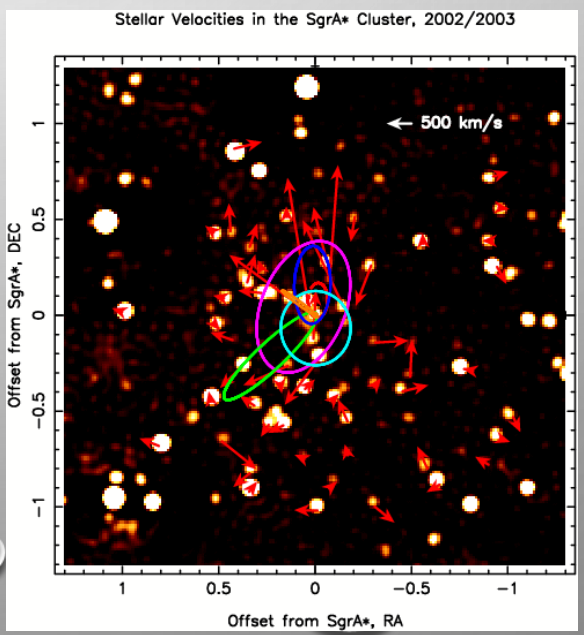


(APOD A. Eckart & R. Genzel)

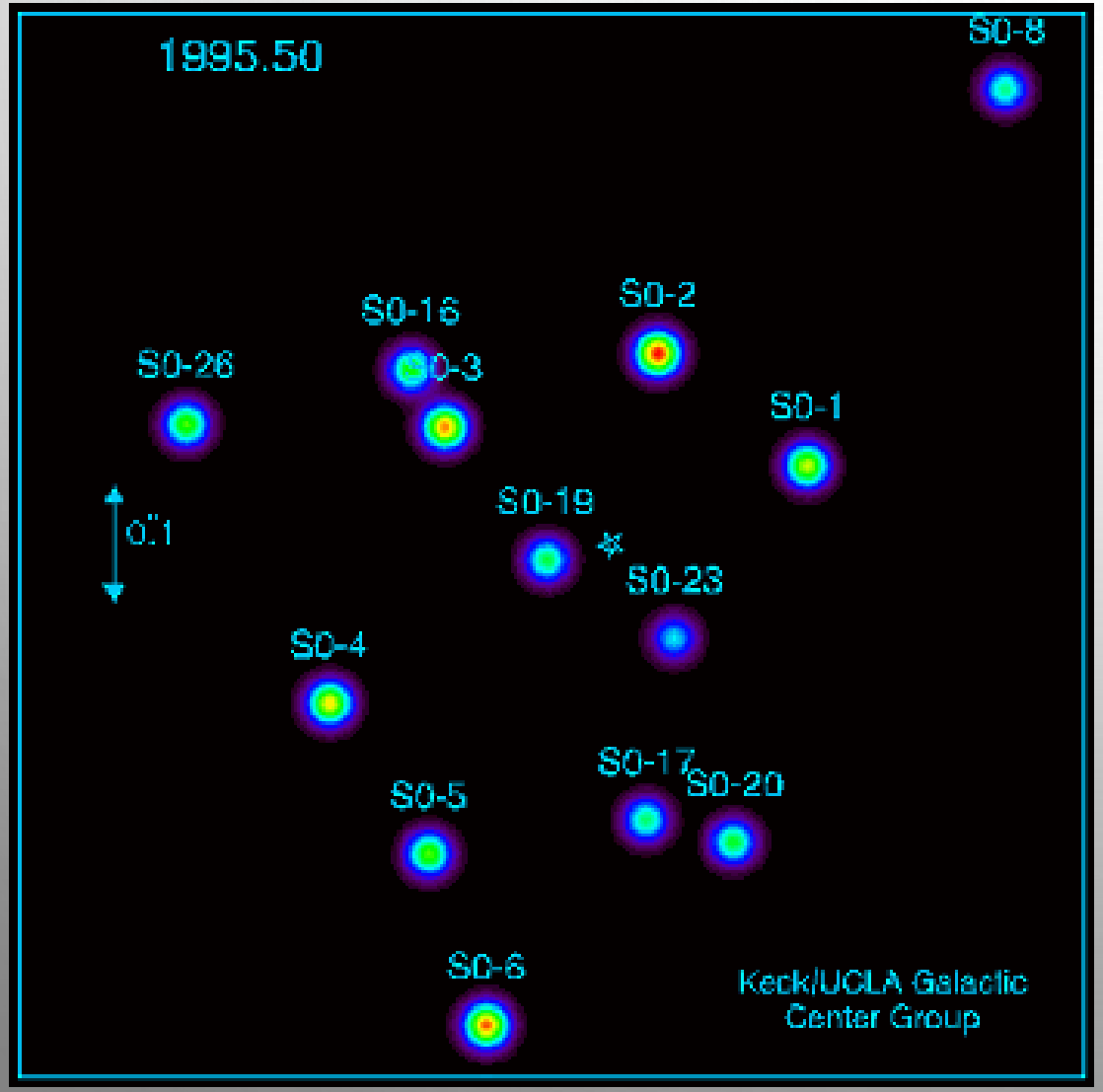
С высокой точностью
мы знаем динамику внутри
центральной угловой секунды.

Оценка массы ЧД ~4 10^6 M_0

Было бы здорово открыть
радиопульсар около Sgr A*

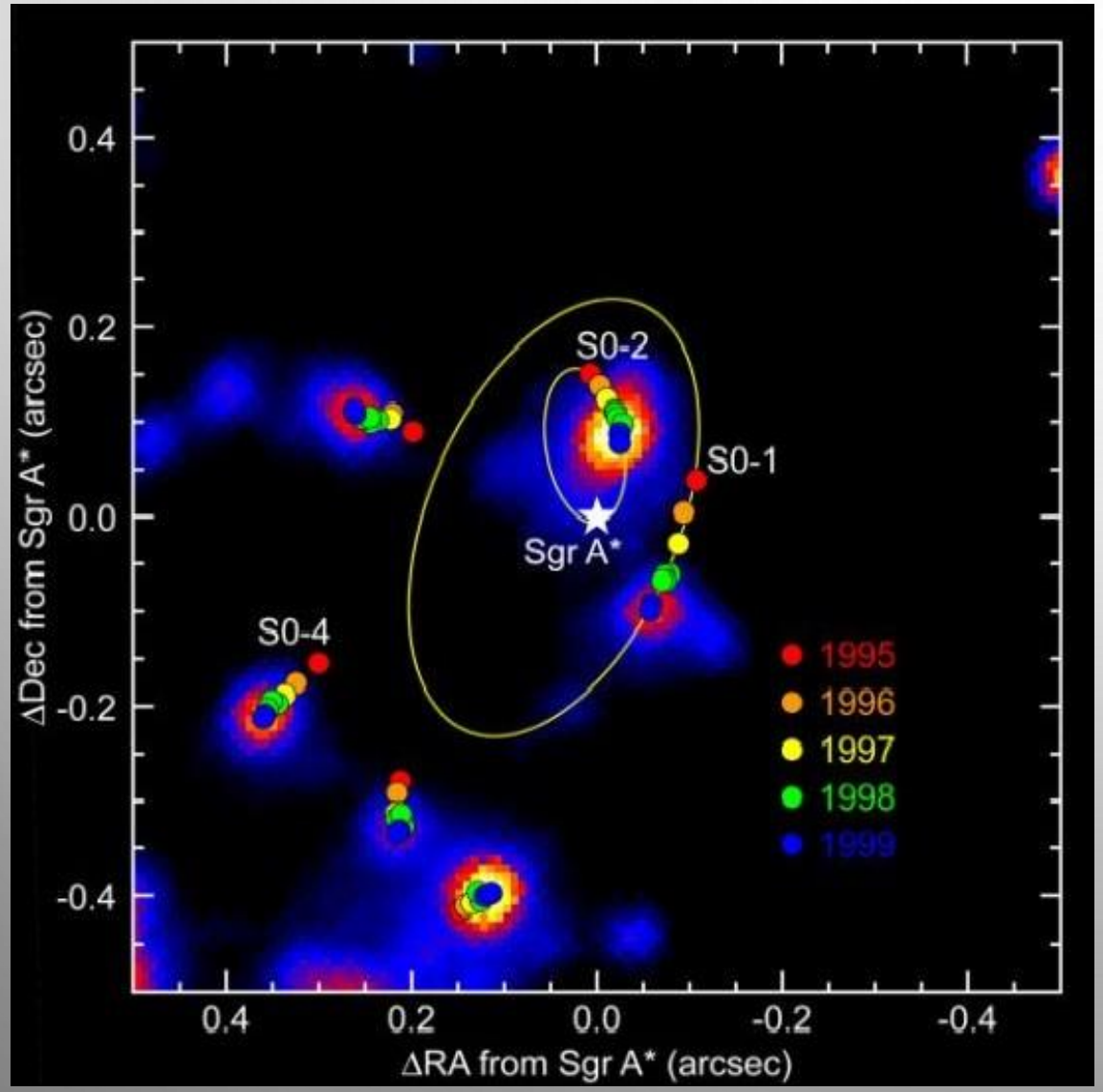


… И ОНА СТАНОВИТСЯ ВСЕ БОЛЕЕ ДОСТОВЕРНОЙ



Наблюдения продолжаются,
и растет число звезд
с известными орбитами.

SGR A*

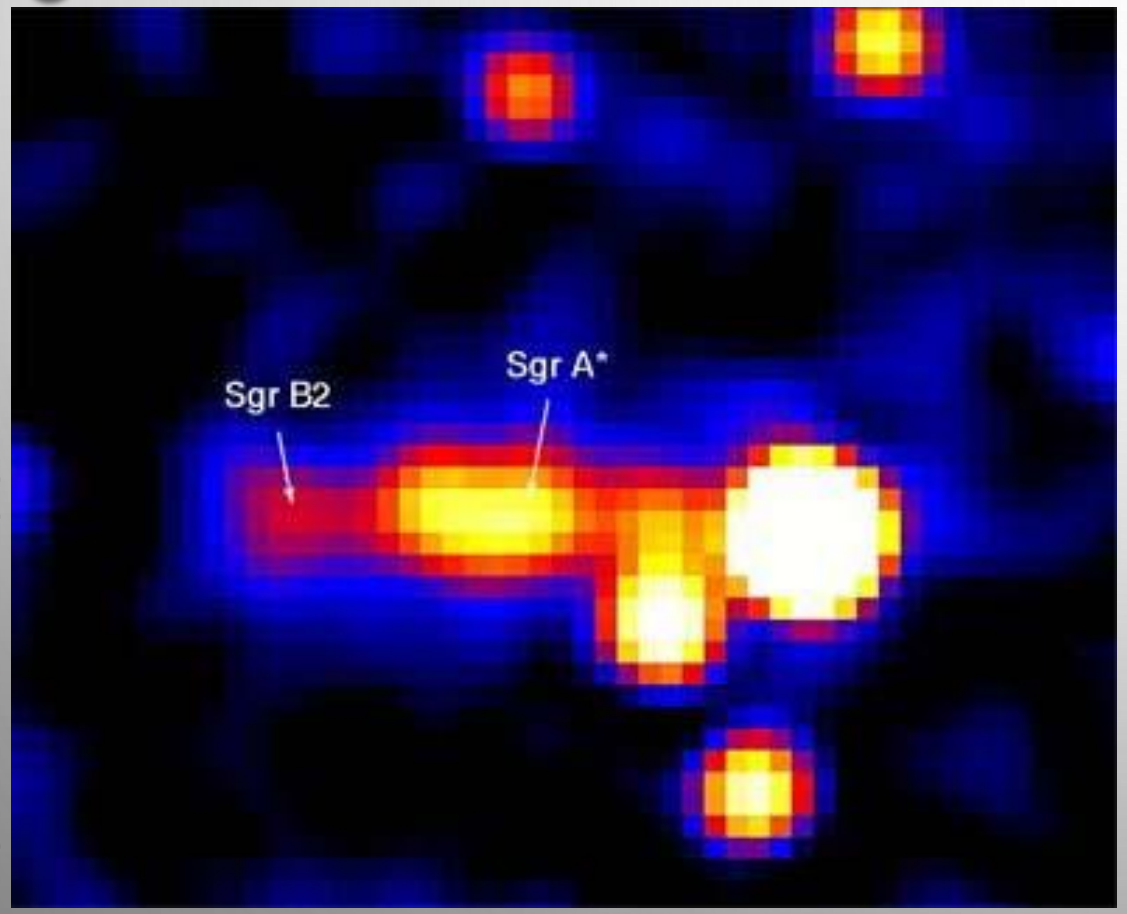


Случай Sgr A* уникален. Благодаря прямым измерениям нескольких звездных орбит стало возможным точно определить массу центрального объекта.

Кроме того, есть жесткий предел на размер центрального объекта, что важно для обсуждения альтернатив.

Звезда SO-2 имеет орбитальный период 15.2 лет и большую полуось примерно 0.005 пк.

НАБЛЮДЕНИЯ НА СПУТНИКЕ INTEGRAL



(Ревнивцев и др.)

Сейчас «наша» черная дыра «молчит», но раньше это было не так.

Считается, что примерно 350 лет назад Sgr A* находился в «высоком» состоянии. Сейчас жесткое излучение от Sgr A* добралось до Sgr B2, который виден за счет флуоресценции.

Область галактического центра регулярно наблюдается на спутнике Integral.

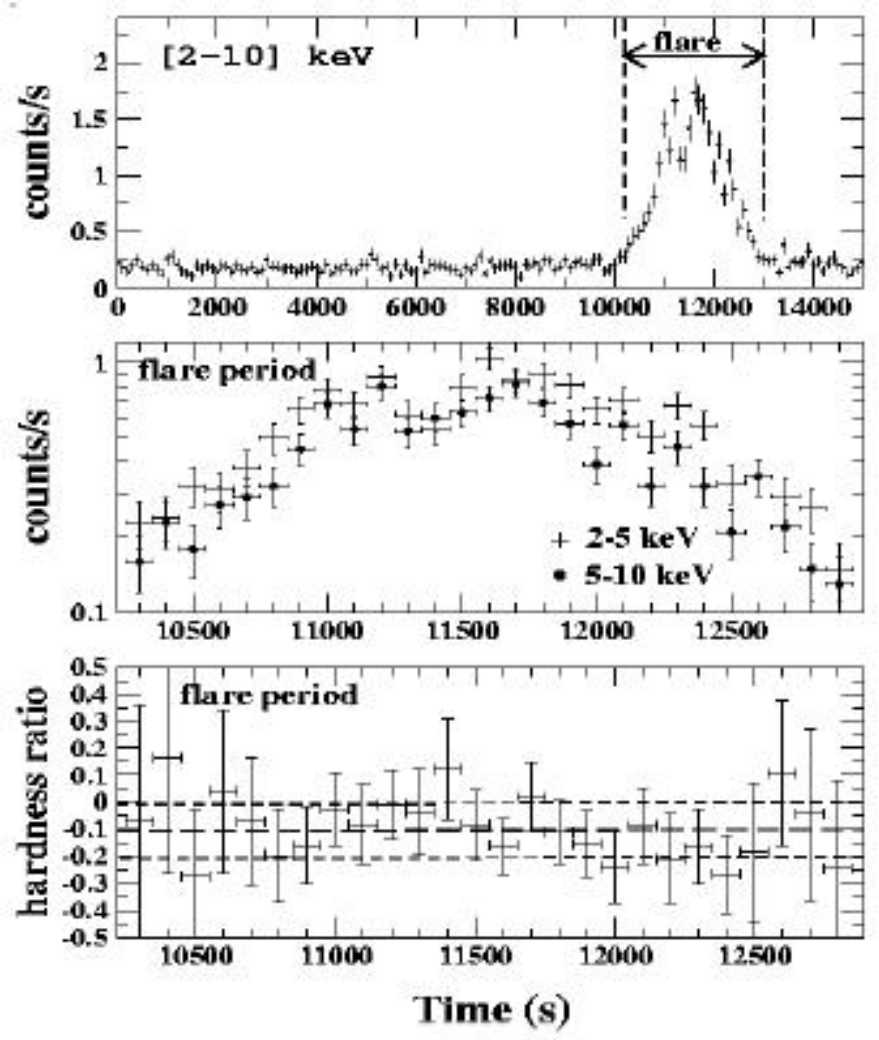
РЕНТГЕНОВСКИЕ ВСПЫШКИ SGR A*

Sgr A* демонстрирует рентгеновские вспышки.

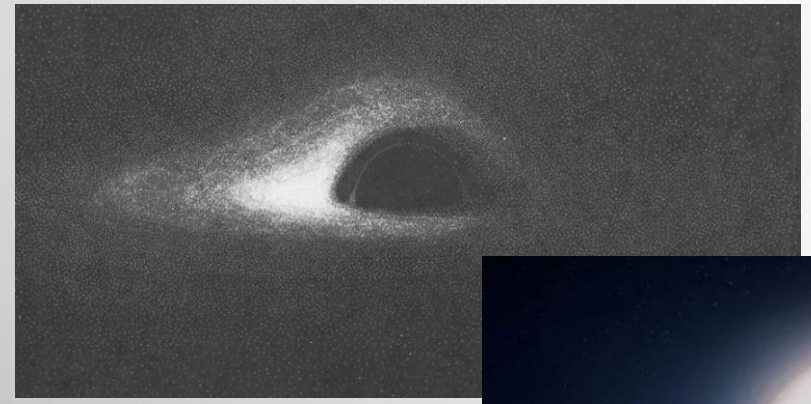
Вспышки происходят примерно раз в день. При этом поток возрастает в несколько раз, а иногда и сильнее.

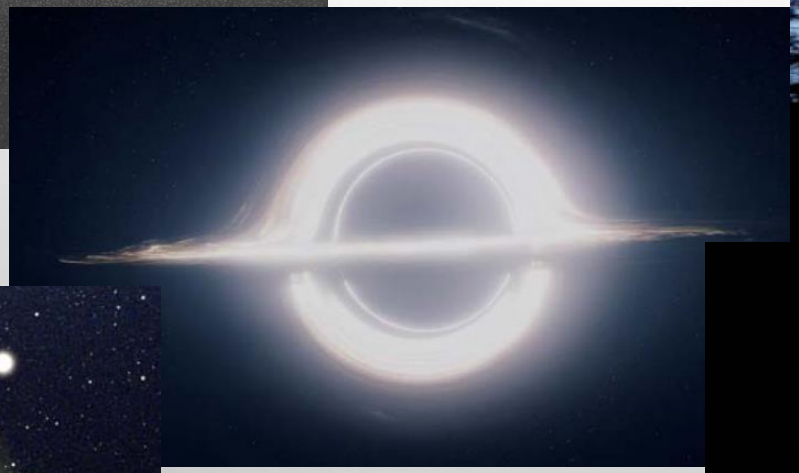
Очень яркая вспышка наблюдалась 3 октября 2002 г. Она длилась 2700 секунд. Поток возрос в 160 раз. Светимость составила 3.6 10^{35} эрг/с.

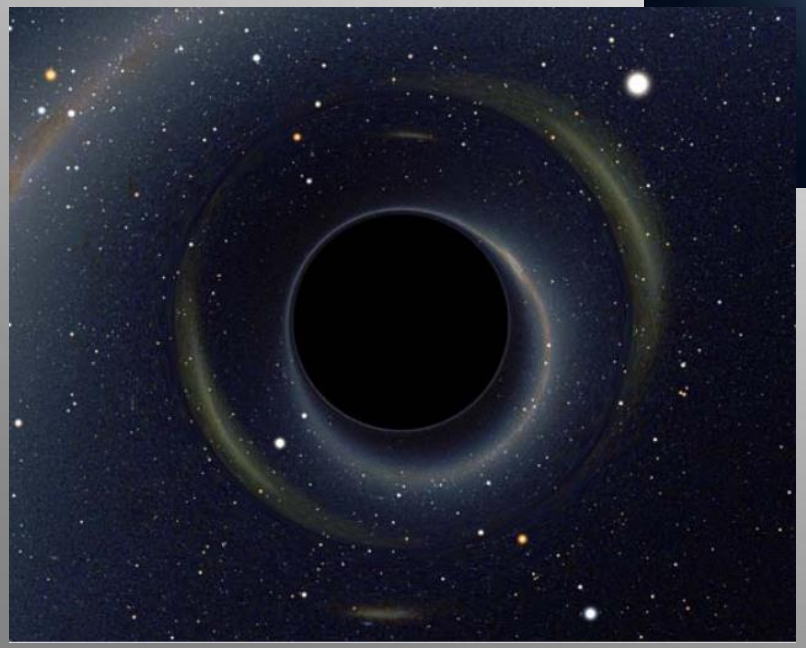
Во вспышке 31 августа 2004 был обнаружен квазипериод 22.2 мин. В рамках простой модели это позволяет оценить скорость вращения черной дыры



ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ЧЕРНЫХ ДЫР

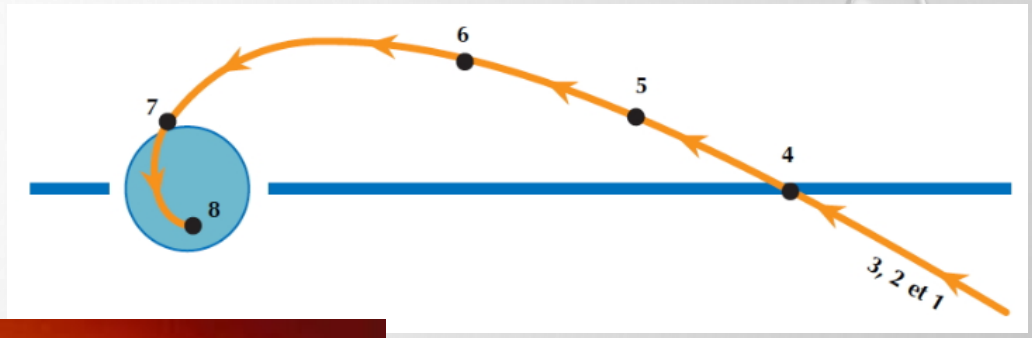


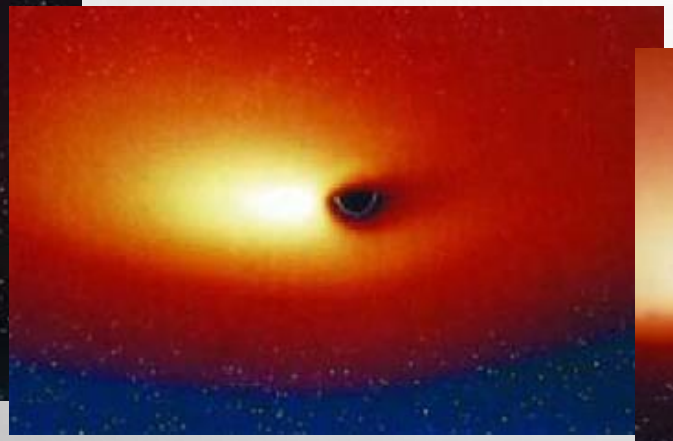


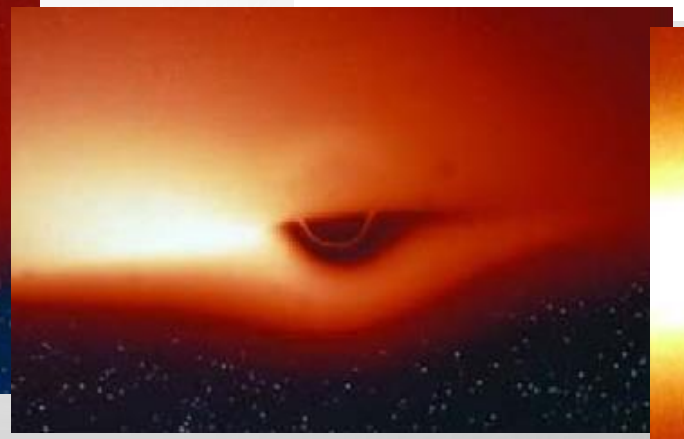


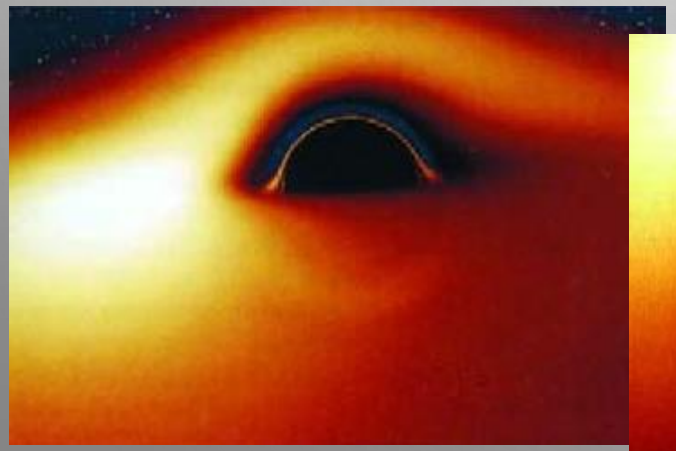
1804.03909

ПАДЕНИЕ В ЧЕРНУЮ ДЫРУ





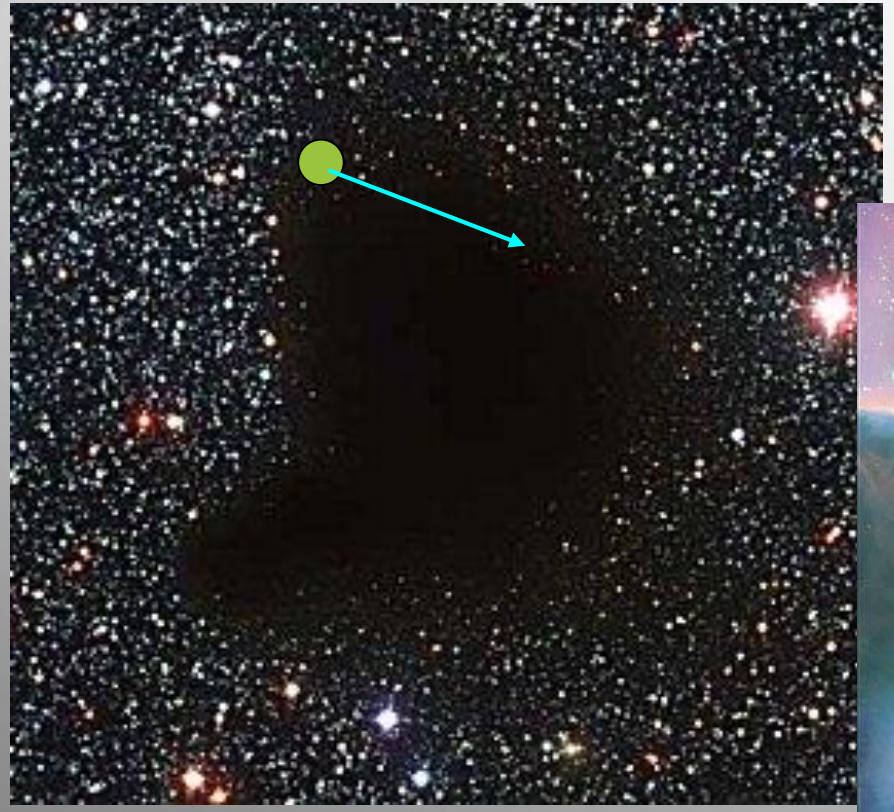


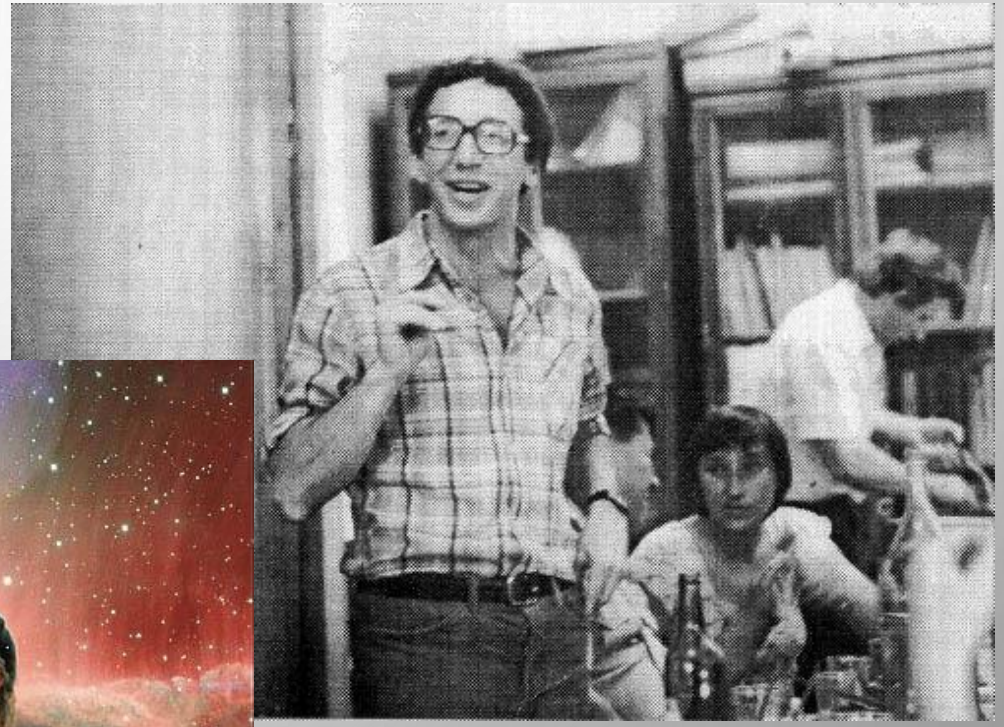


1804.03909

КАК УВИДЕТЬ ОДИНОЧНУЮ ЧЕРНУЮ ДЫРУ?

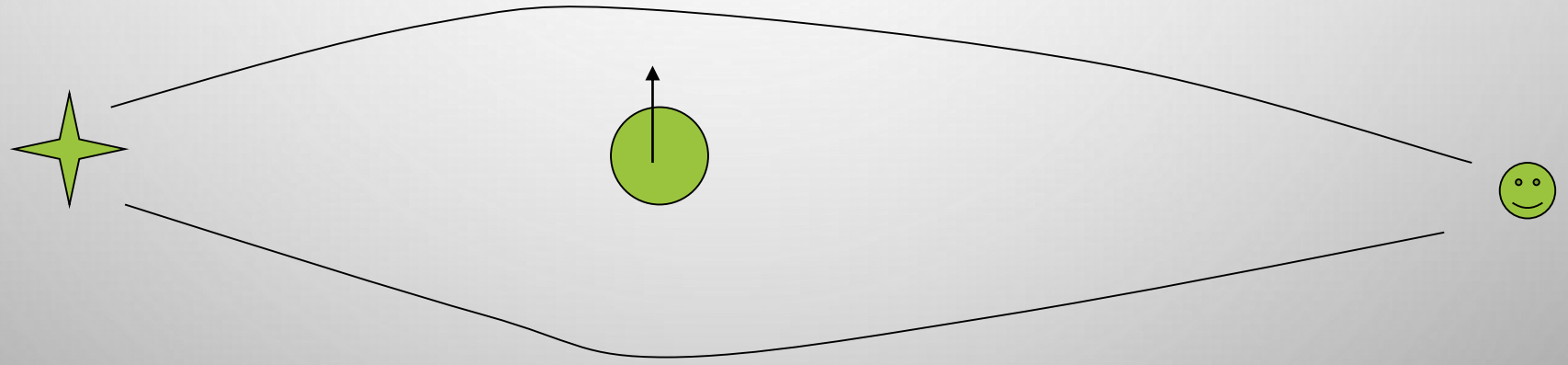
1. Аккреция
2. Микролинзирование



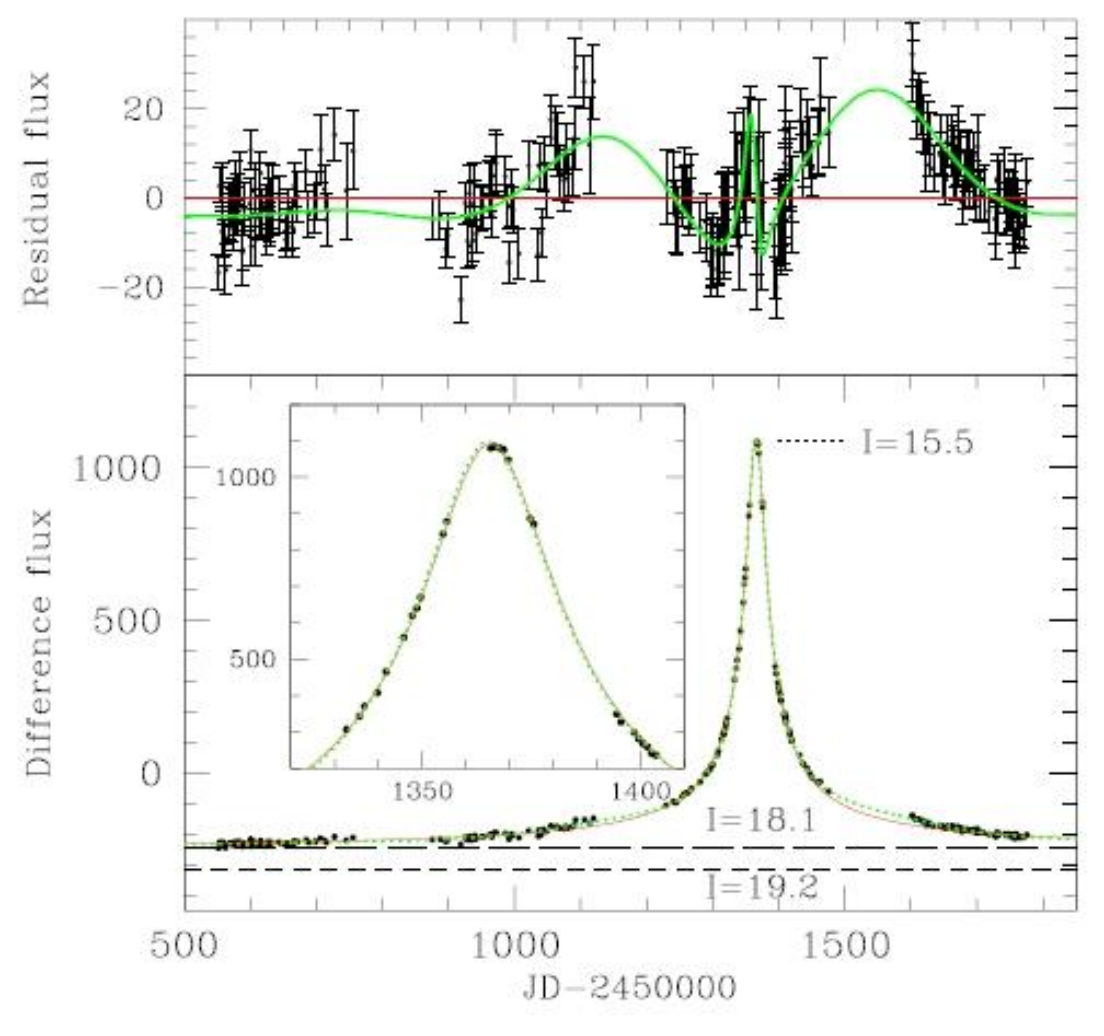


МИКРОЛИНЗИРОВАНИЕ

Скорость, масса, расстояние



МИКРОЛИНЗИРОВАНИЕ И ОДИНОЧНЫЕ ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ



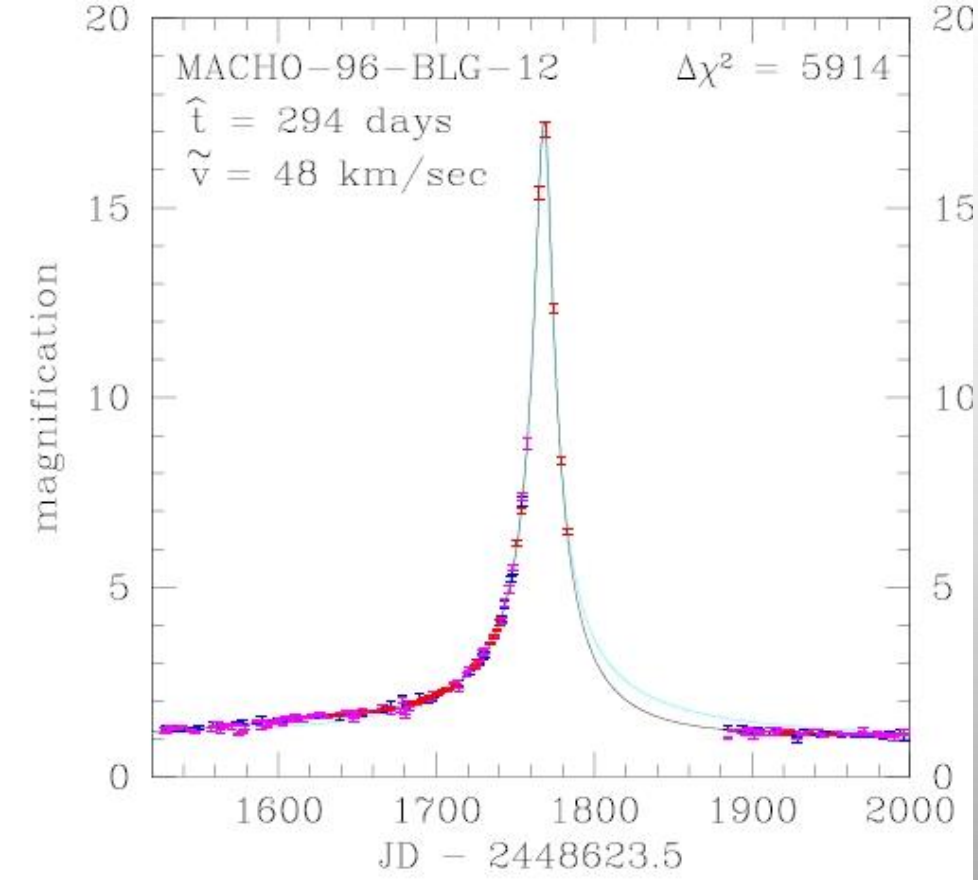
Событие OGLE-1999-BUL-32

Очень длинное событие: 641 дней.

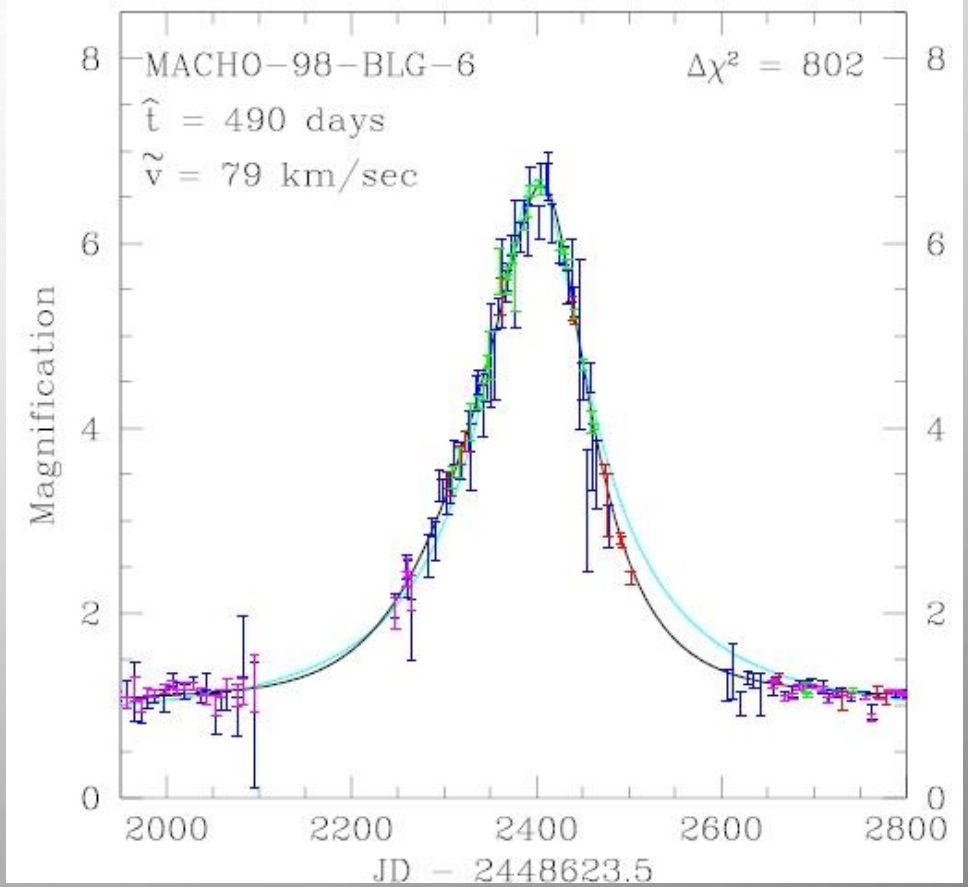
Оценка массы линзы >4 M_0

ПРОЕКТ MACHO

MACHO-96-BLG-6
3-16 масс солнца



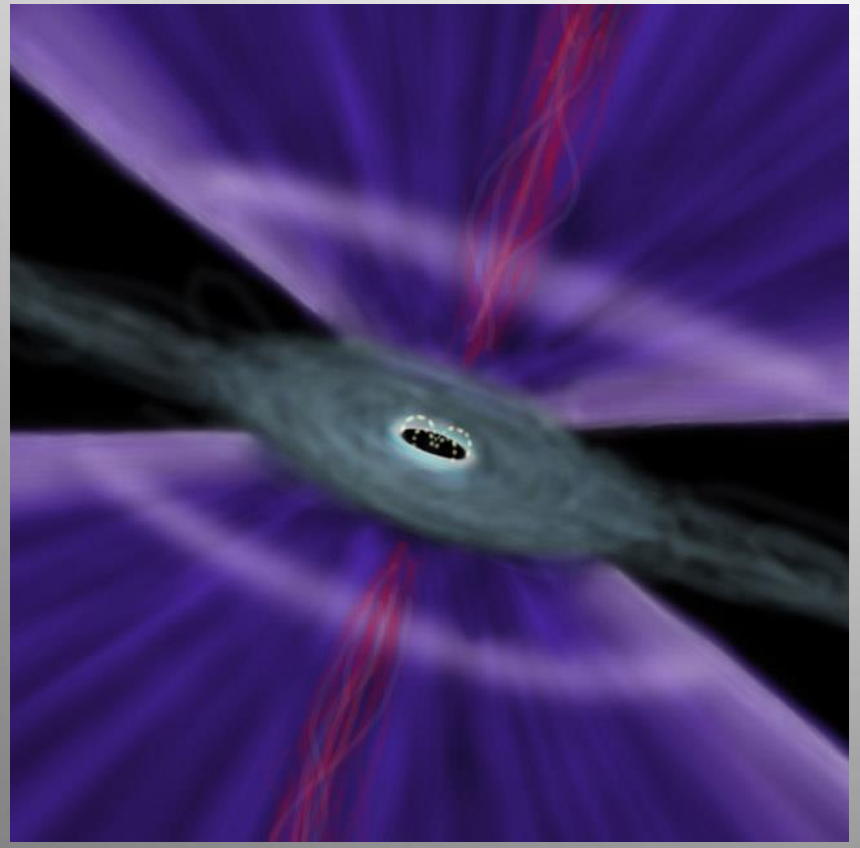
MACHO-98-BLG-6
3-13 массы Солнца

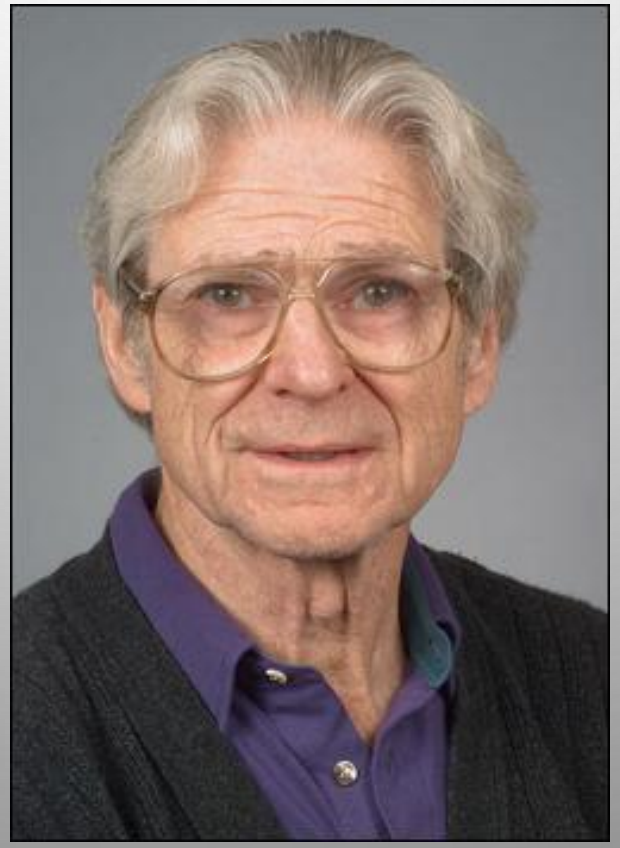


В ЦЕНТРАХ ГАЛАКТИК….

НЕМНОГО ИСТОРИИ …

История начинается в 60-е гг.,
когда были идентифицированы квазары (Шмидт 1963).
Немедленно была высказана гипотеза
об аккреции вещества сверхмассивными черными дырами.
(Солпитер, Зельдович, Новиков, Линден-Белл)

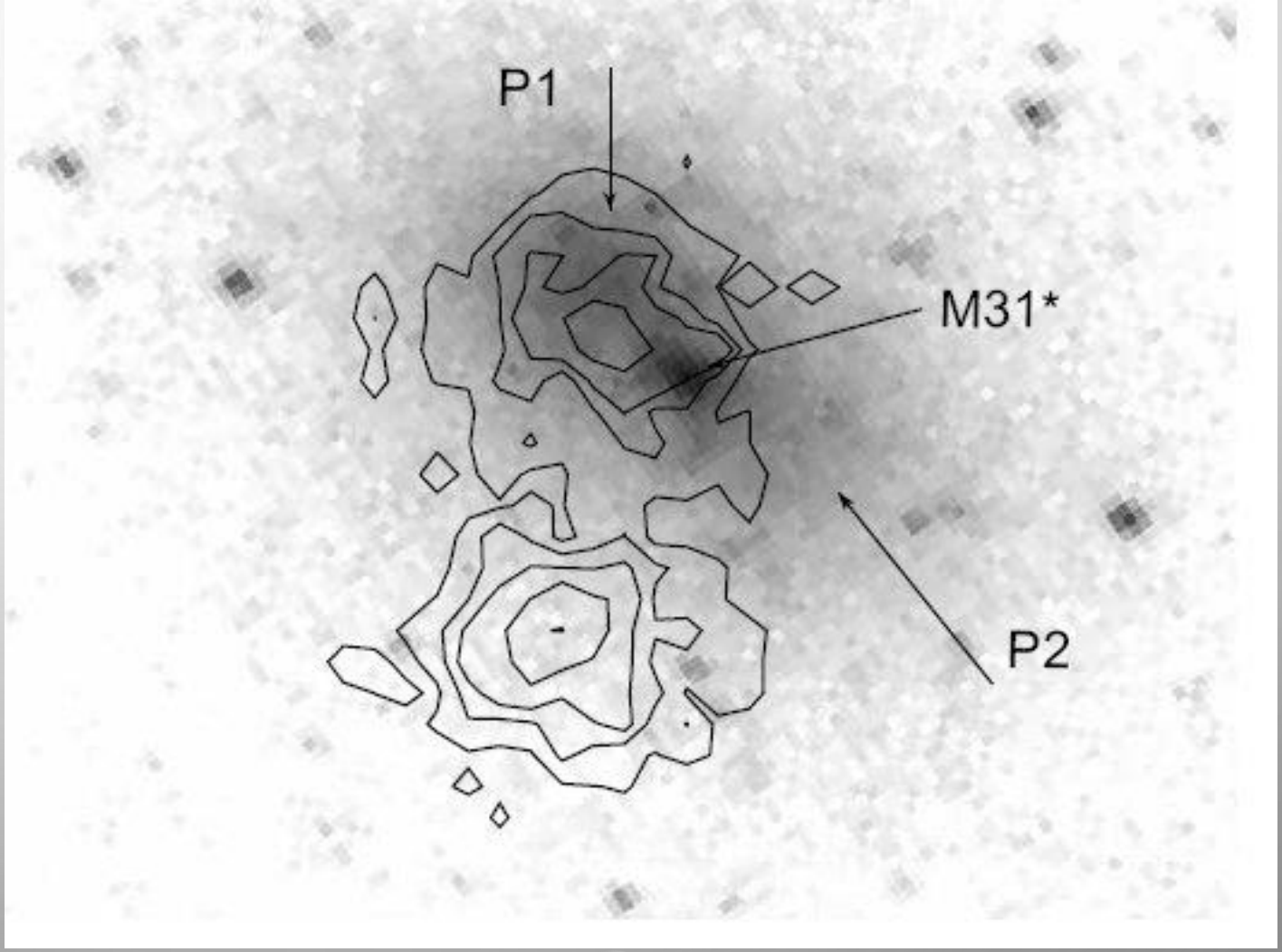




M31

По данным Чандры и Космического телескопа удалось обнаружить сверхмассивную черную дыру в M31

$M \sim 10^8 M_{solar}$
$L_x \sim 10^{36}$ эрг/с

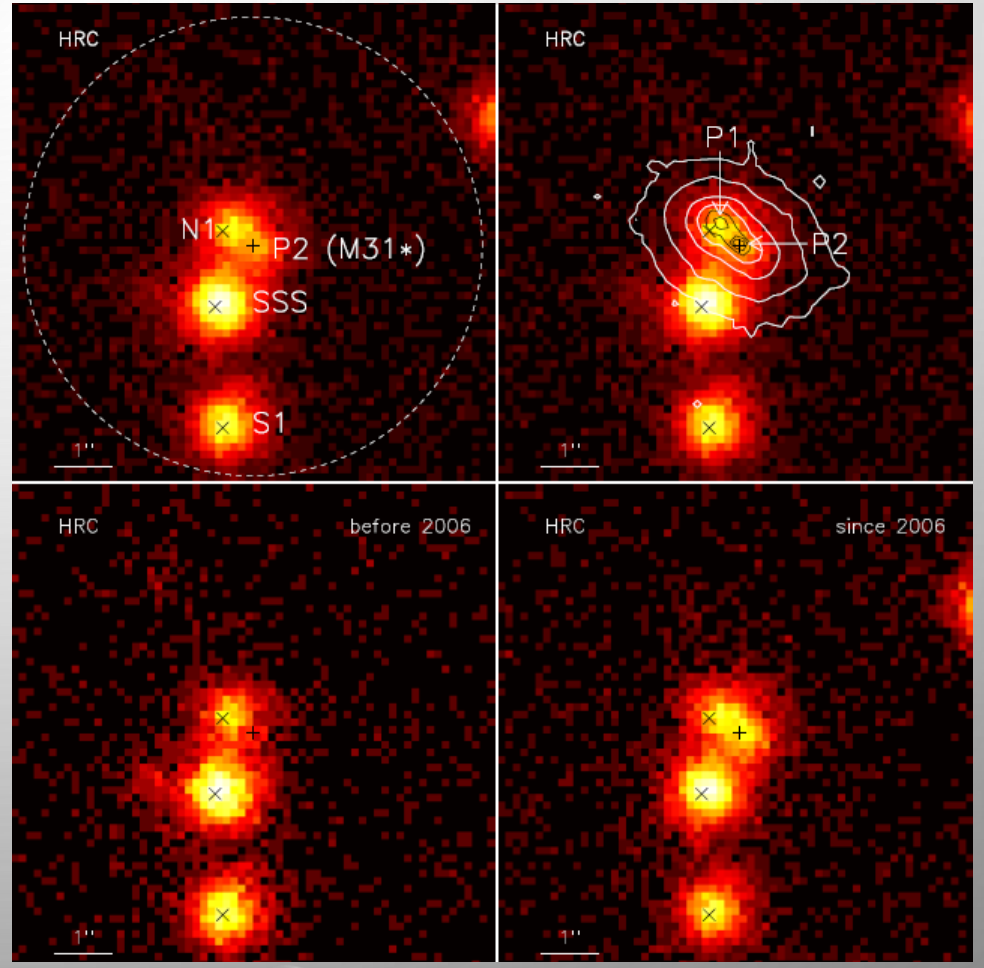


ЧЕРНАЯ ДЫРА В ТУМАННОСТИ АНДРОМЕДЫ

В Туманности Андромеды,
как и в нашей Галактике,
есть сверхмассивная черная дыра.
Причем, в M31 она минимум раз в 10 тяжелее
- ее масса порядка 100 миллионов солнечных.

Так же, как и у нас, "монстр спит":
светимость составляет
миллиардные доли от
предельной, т.н. Эддингтоновской.

Правда, у нас дыра время от времени
"всхрапывает" во сне:
происходят вспышки.
Теперь изменения активности дыры
открыли и в M31.

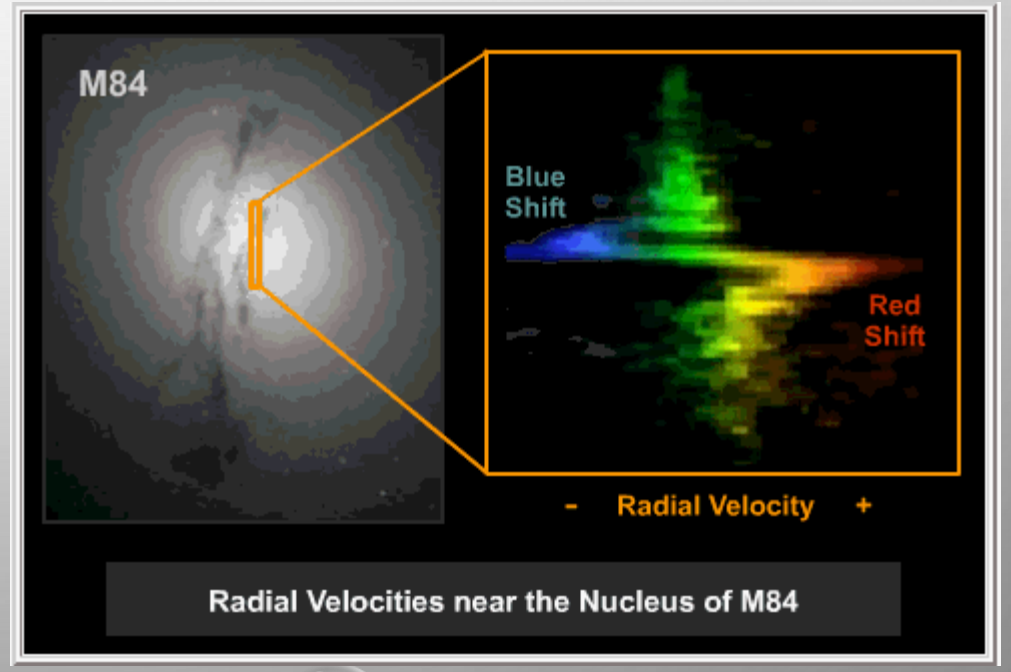


arXiv: 1011.1224

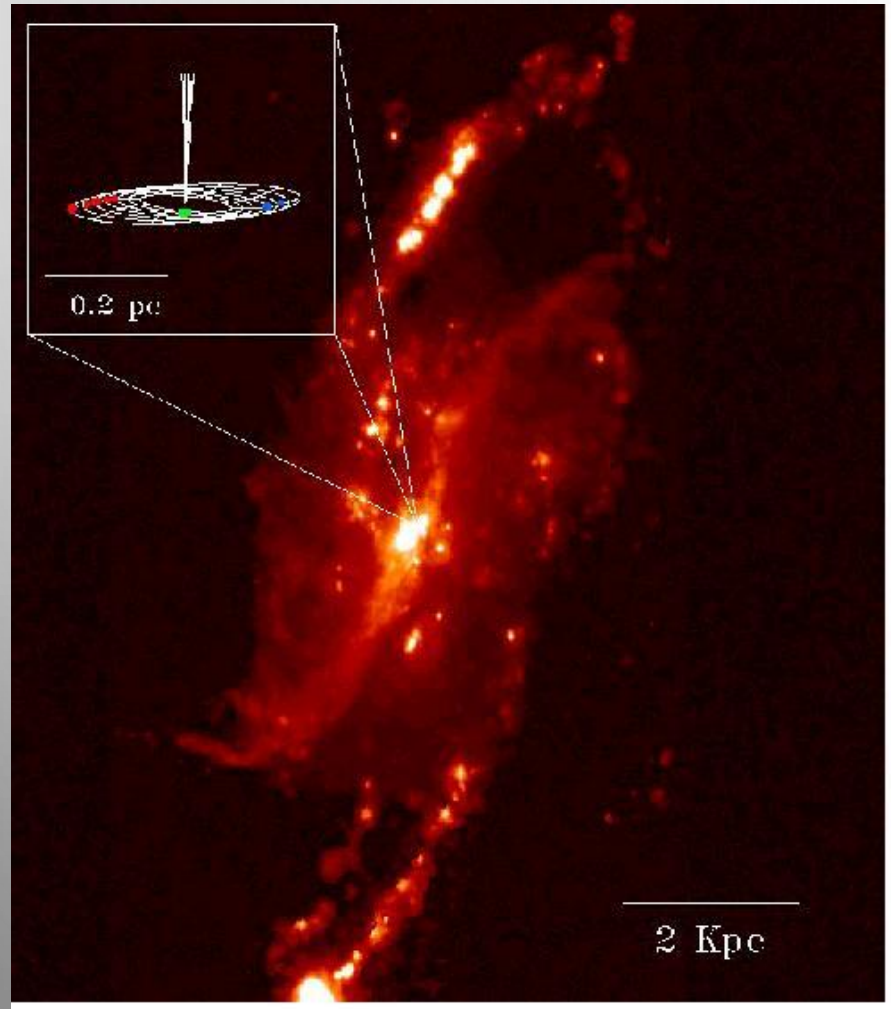
ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАСС СВЕРХМАССИВНЫХ ЧЕРНЫХ ДЫР

- Соотношение между массой черной дыры и массой балджа
- Измерение орбит звезд и мазерных источников
- Кинематика газа
- Профиль звездной плотности
- Реверберационное картирование

Конечно, всегда можно дать верхний предел на массу, исходя из того, что светимость не превосходит критическую (эддингтоновскую).

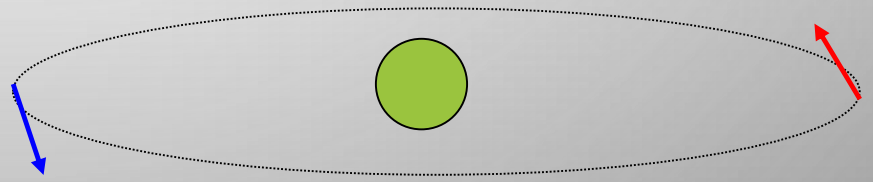


МАЗЕРЫ

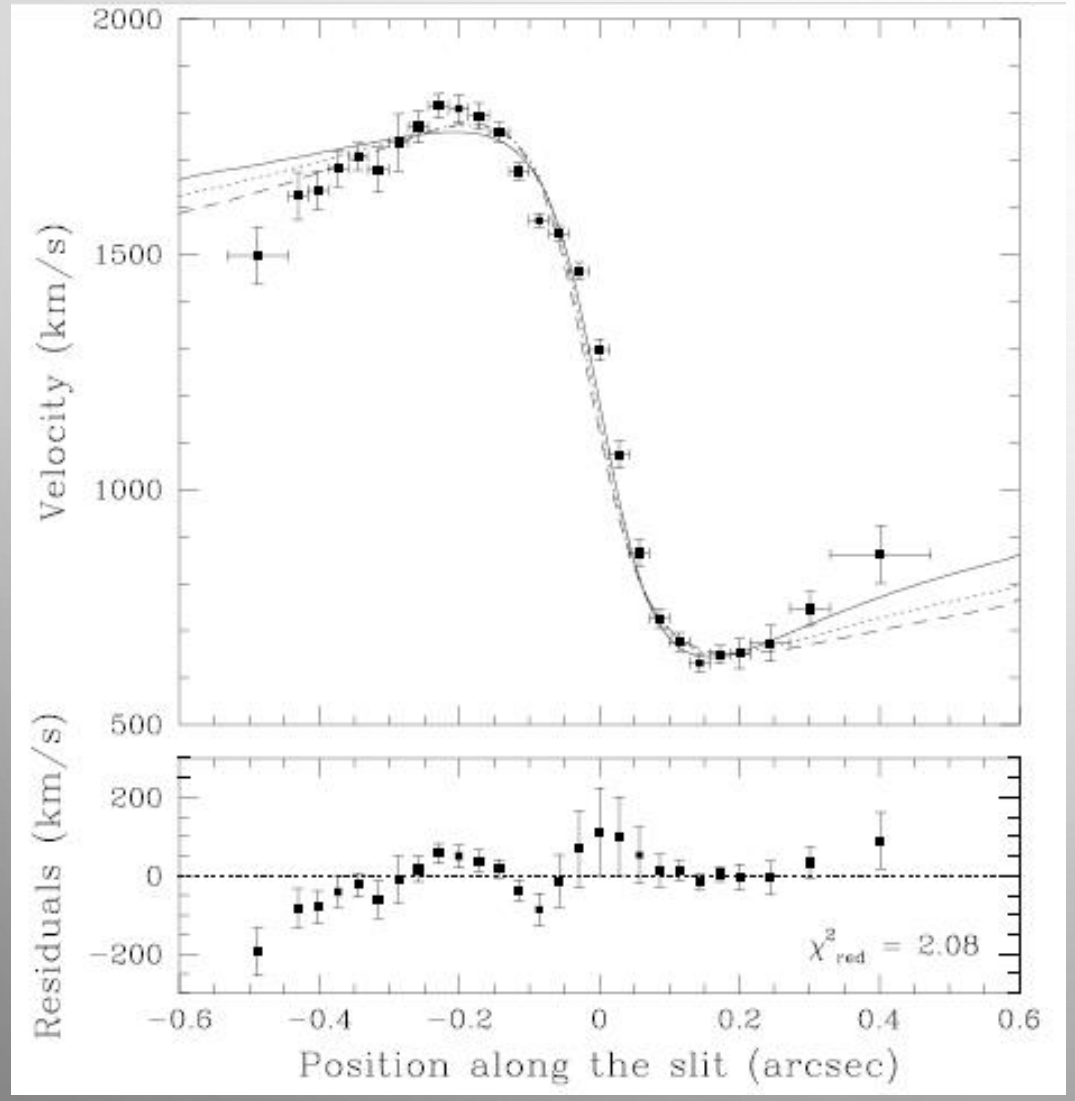


Наблюдая движение мазерных источников в галактике **NGC 4258**, стало возможным измерить массу внутри 0.2 пк.
Получено значение
35-40 миллионов масс Солнца.

Это наиболее точный метод.



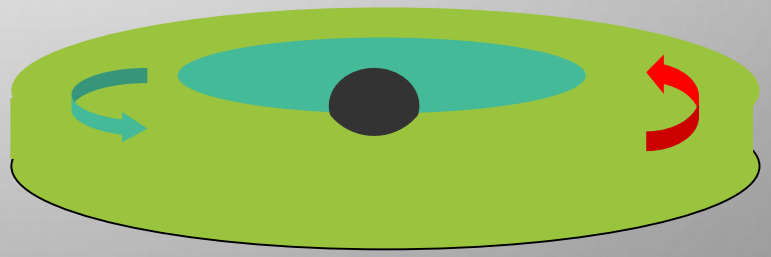
КИНЕМАТИКА ГАЗА



Для M87 скорости газа измерены внутри одной миллисекунды дуги (5pc).

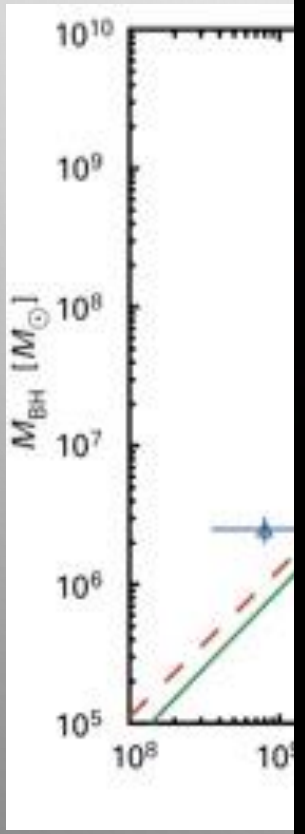
Масса 3 10^9 M_0.

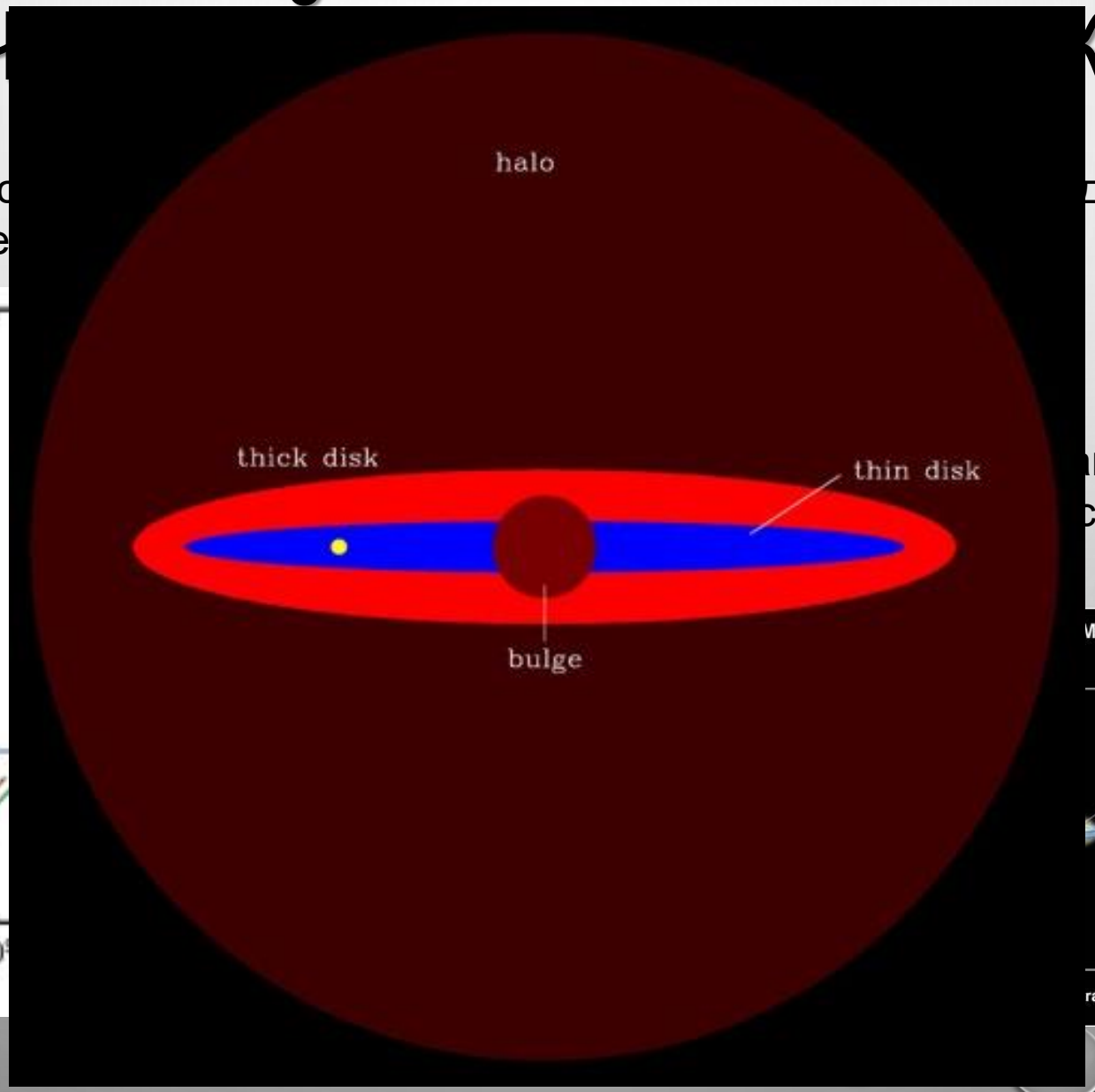
Одна из самых тяжелых черных дыр



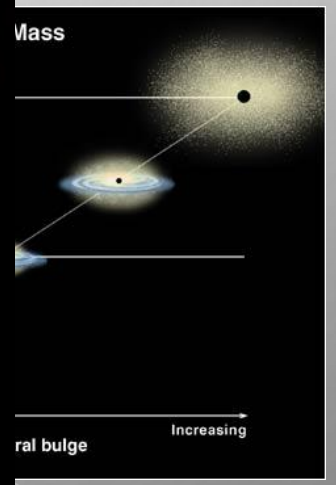
СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ МАССАМИ Ч КА

Согласно с джем
имеет в це

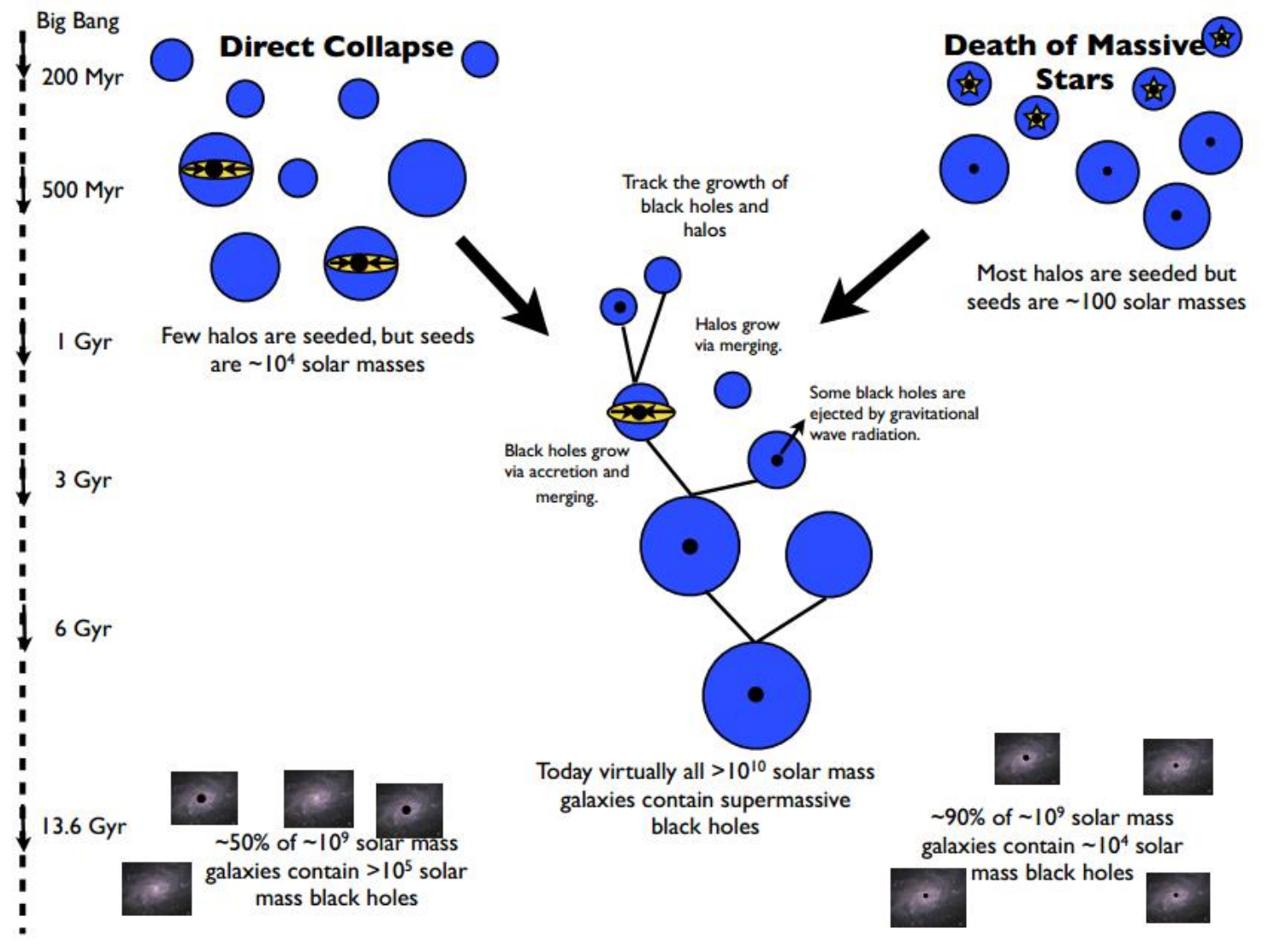




авляет
сятых процента

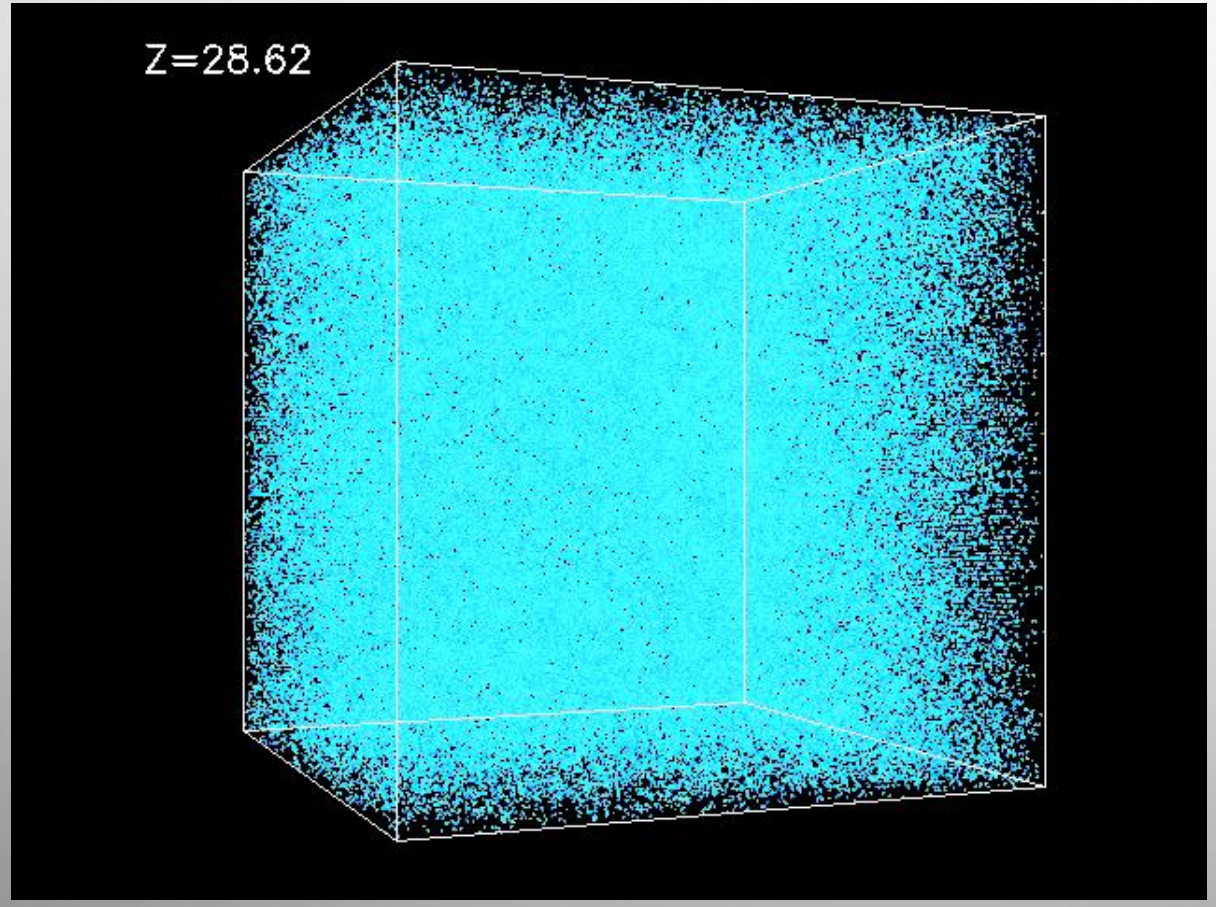


СЦЕНАРИИ ОБРАЗОВАНИЯ И ЭВОЛЮЦИИ МАССИВНЫХ ЧЕРНЫХ ДЫР



1211.7082

КРУПНОМАСШТАБНАЯ СТРУКТУРА



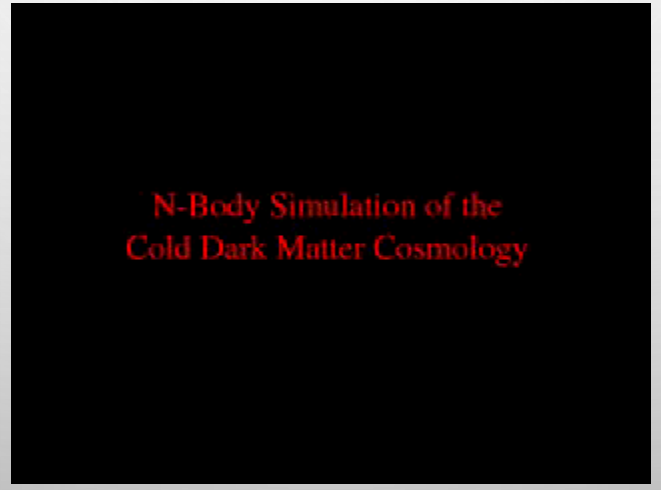
Сегодня стандартной моделью является т.н.

.

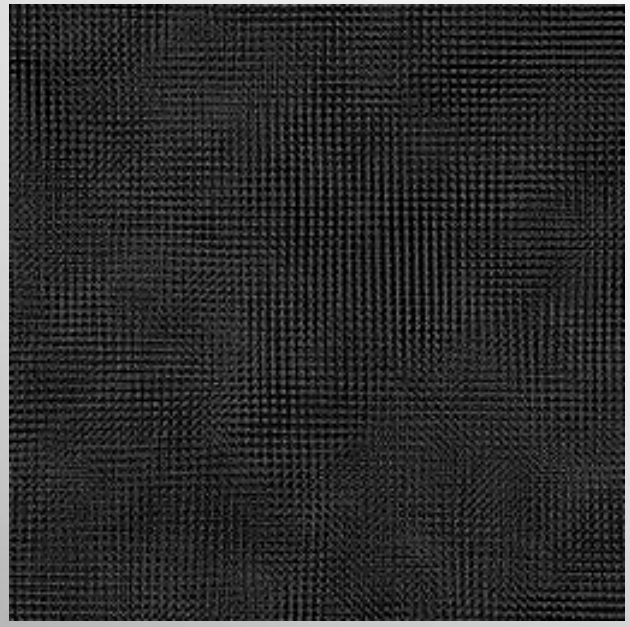
Численное моделирование эволюции крупномасштабной структуры и отдельных «строительных блоков» достигло высокого уровня.

(Kravtsov et al.)

КРУПНОМАСШТАБНАЯ СТРУКТУРА



РОСТ СКОПЛЕНИЯ ГАЛАКТИК

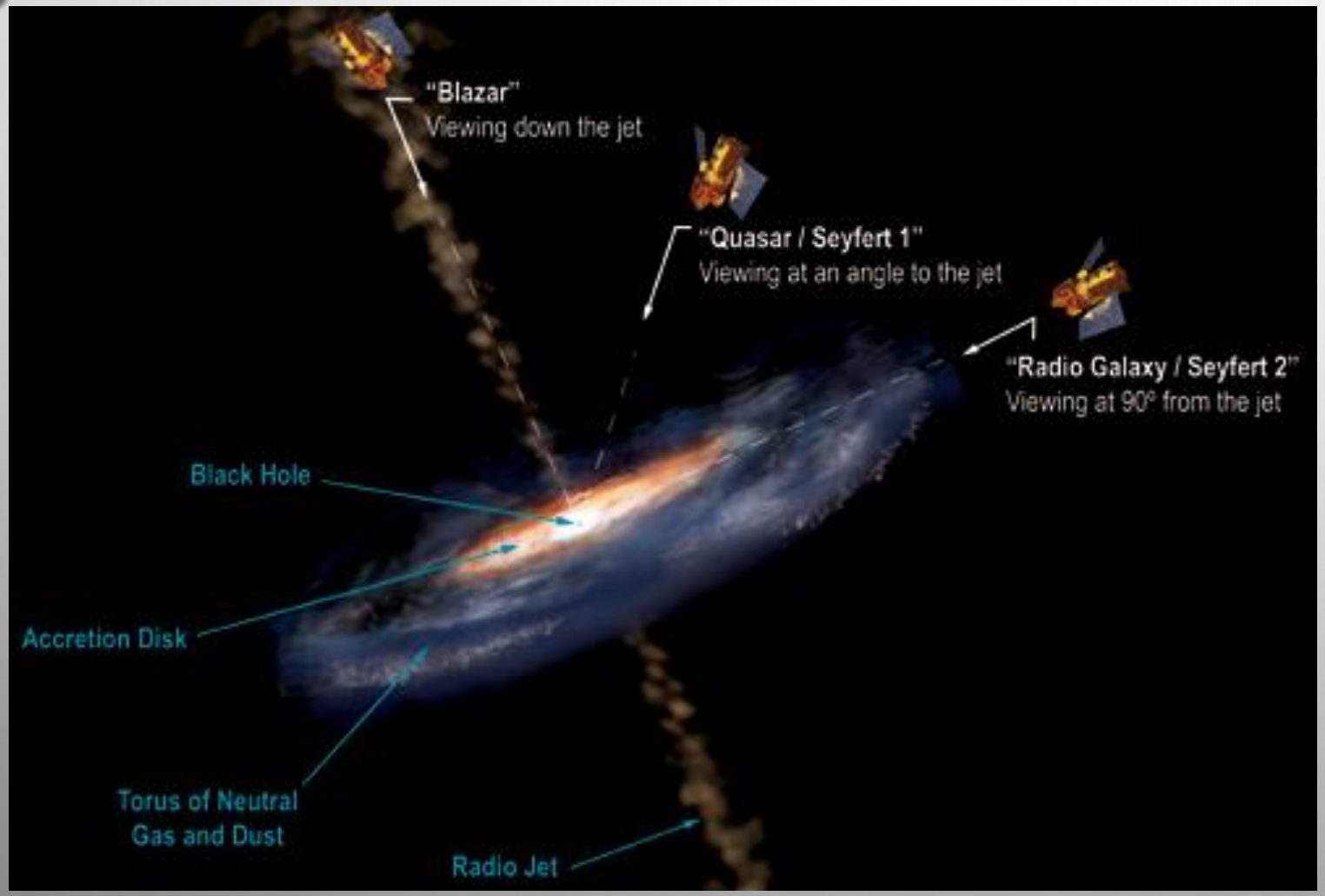


В процессе роста структуры происходят многочисленные слияния «строительных блоков». Каждый из блоков может иметь внутри черную дыру.

После слияния черная дыра медленно двигается к центру новой структуры.

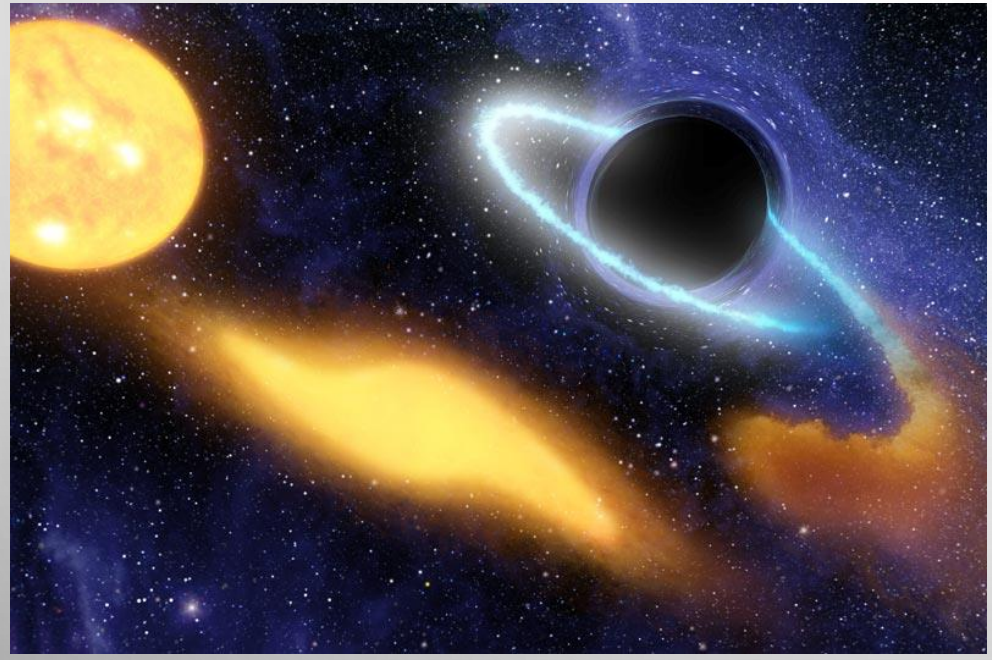
Формирование крупных галактик заканчивается на z~2, после этого происходит только поглощение небольших спутников.

ЕДИНАЯ МОДЕЛЬ

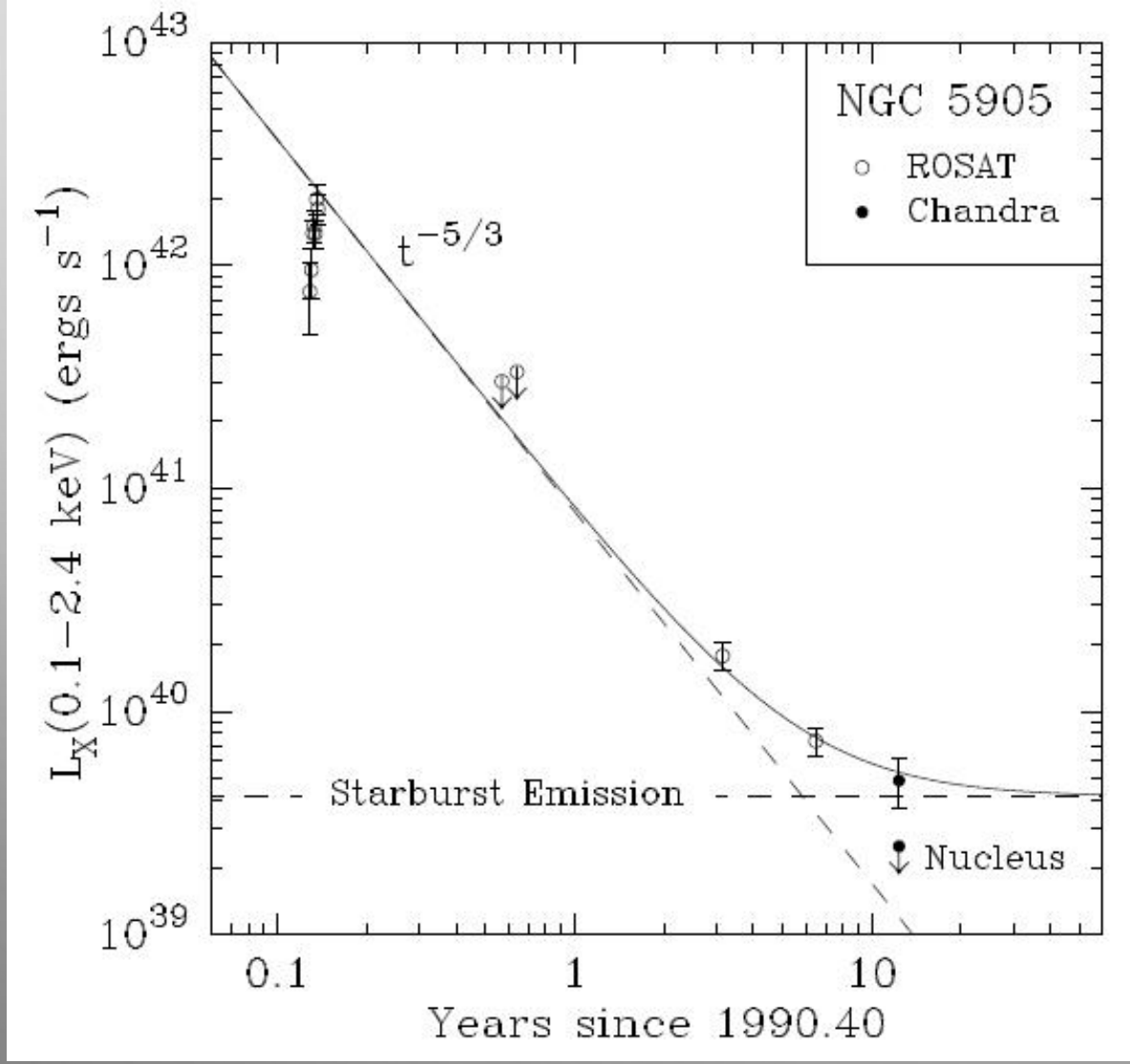


В рамках единой модели свойства различных активных галактик объясняются свойствами тора вокруг черной дыры и его ориентацией.

ПРИЛИВНОЕ РАЗРУШЕНИЕ ЗВЕЗД СВЕРХМАССИВНЫМИ ЧЕРНЫМИ ДЫРАМИ



ВСПЫШКА В NGC 5905

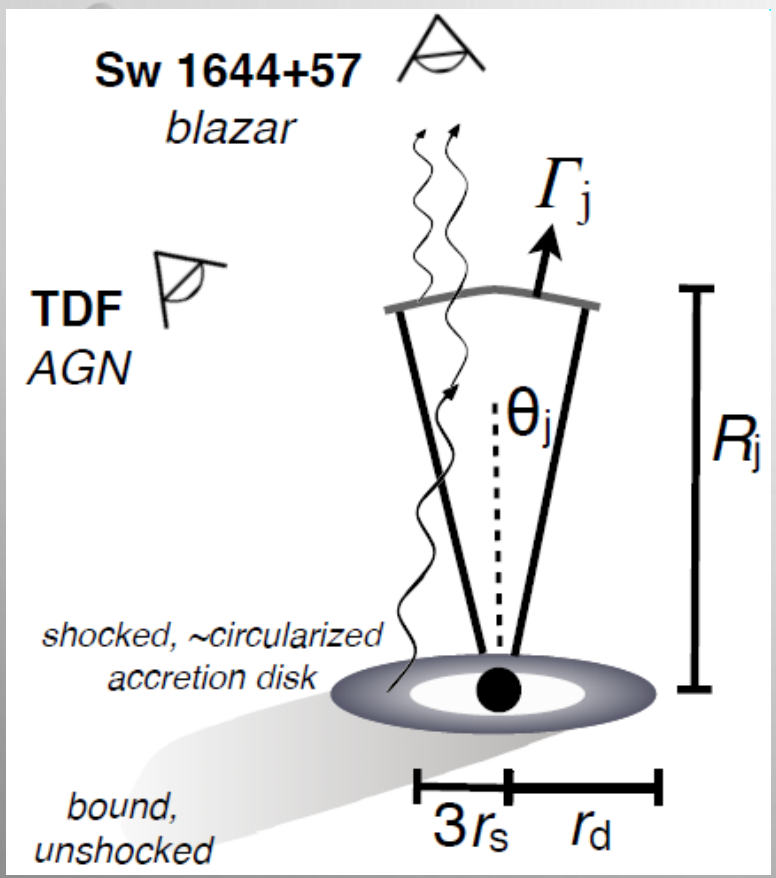


По всей видимости, звезда была разорвана приливными силами.

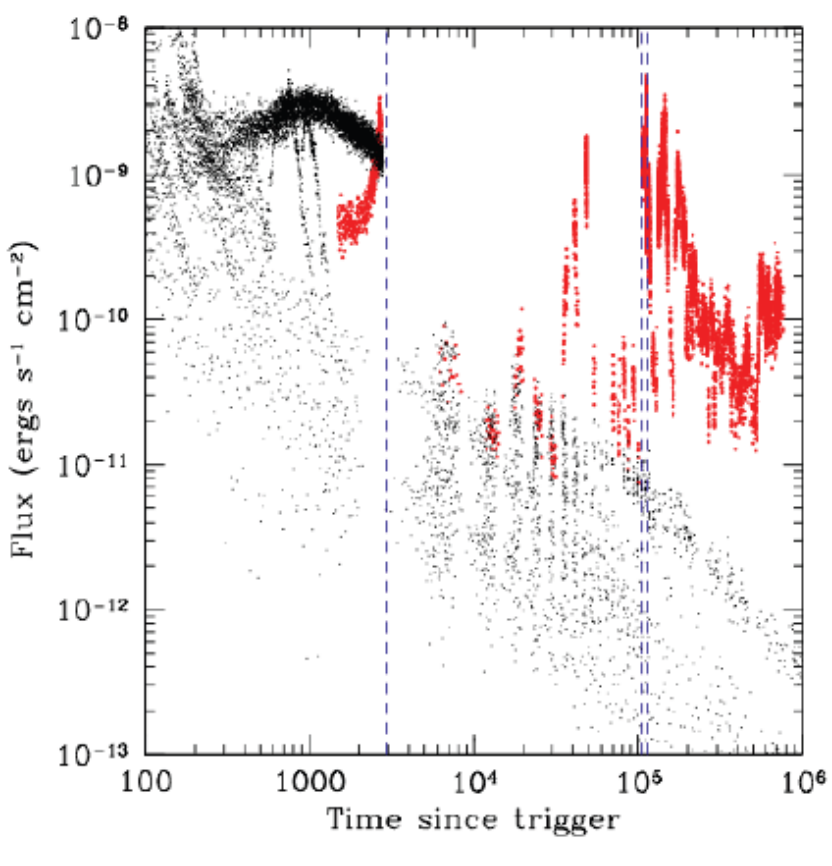
Есть еще два хороших кандидата. Они были открыты спутником ROSAT, а потом наблюдались на HST и Chandra:

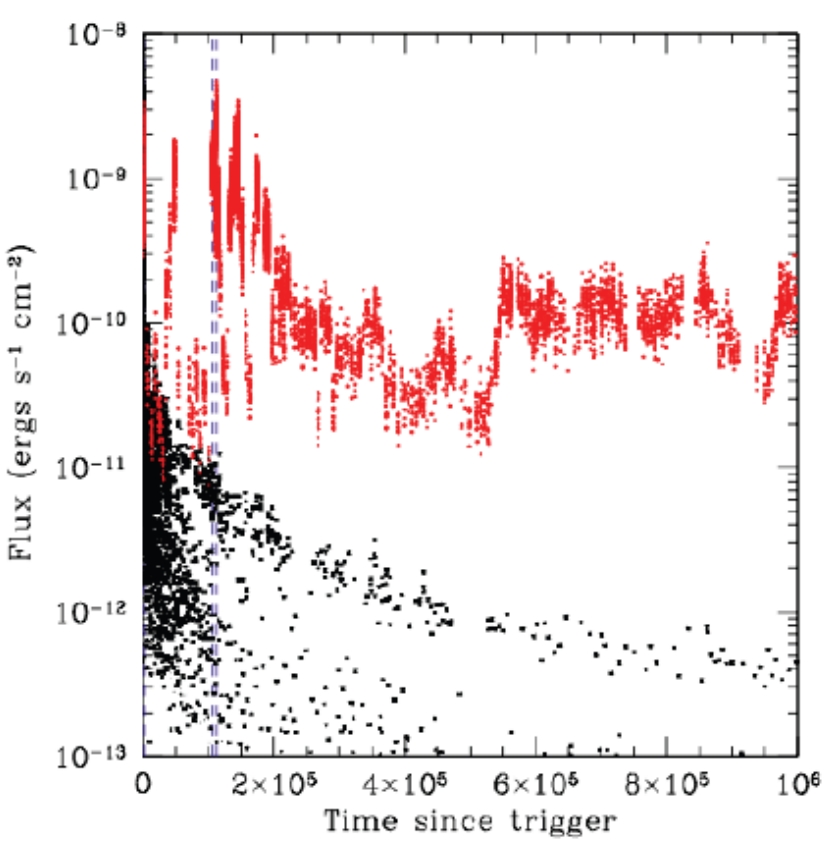
RX J1624.9+7554
RX J1242.6-1119A

ГАММА-ВСПЫШКА SW 1644+57



1104.3257

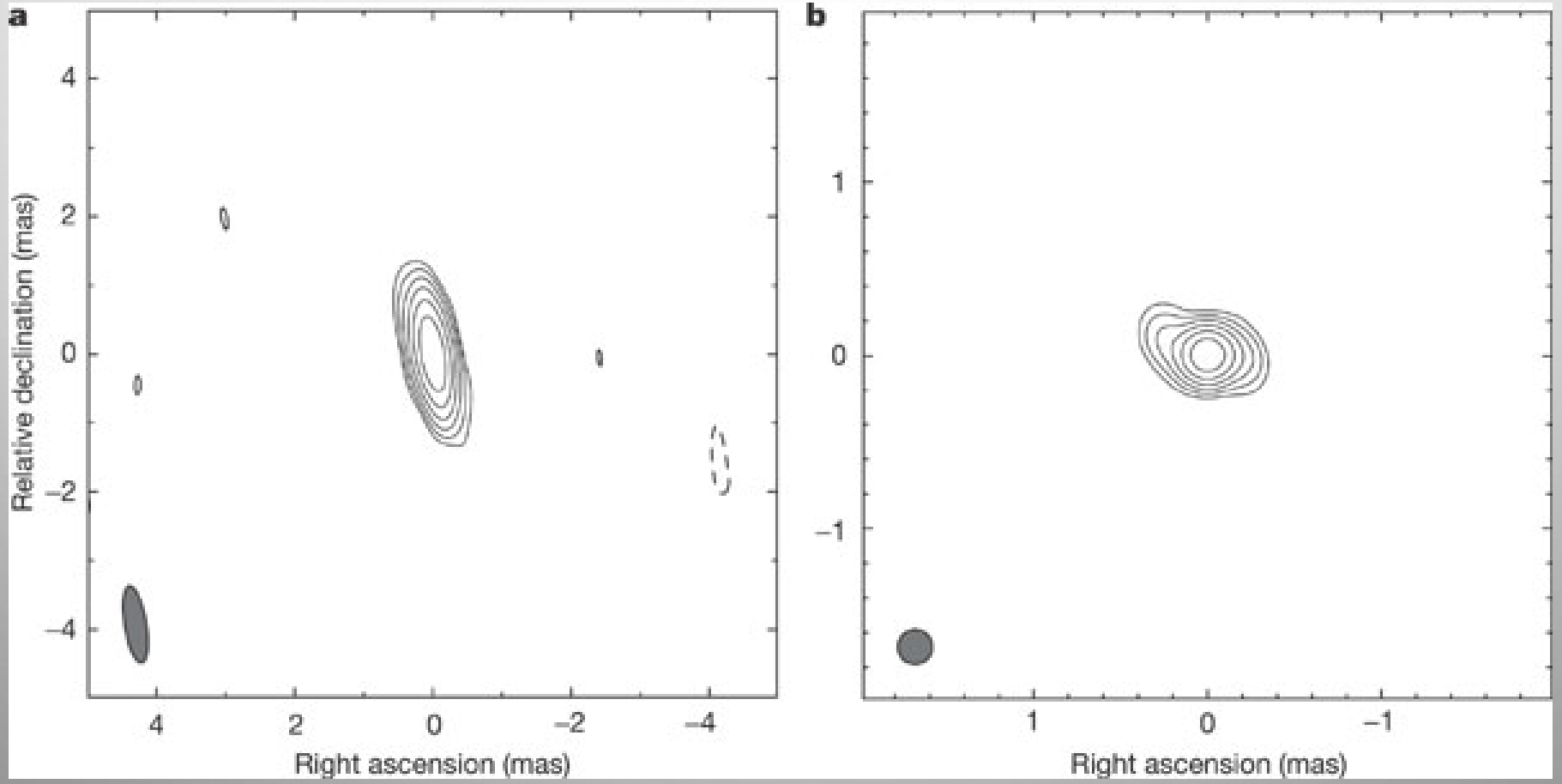




1104.3356

Также известна как GRB 110328A

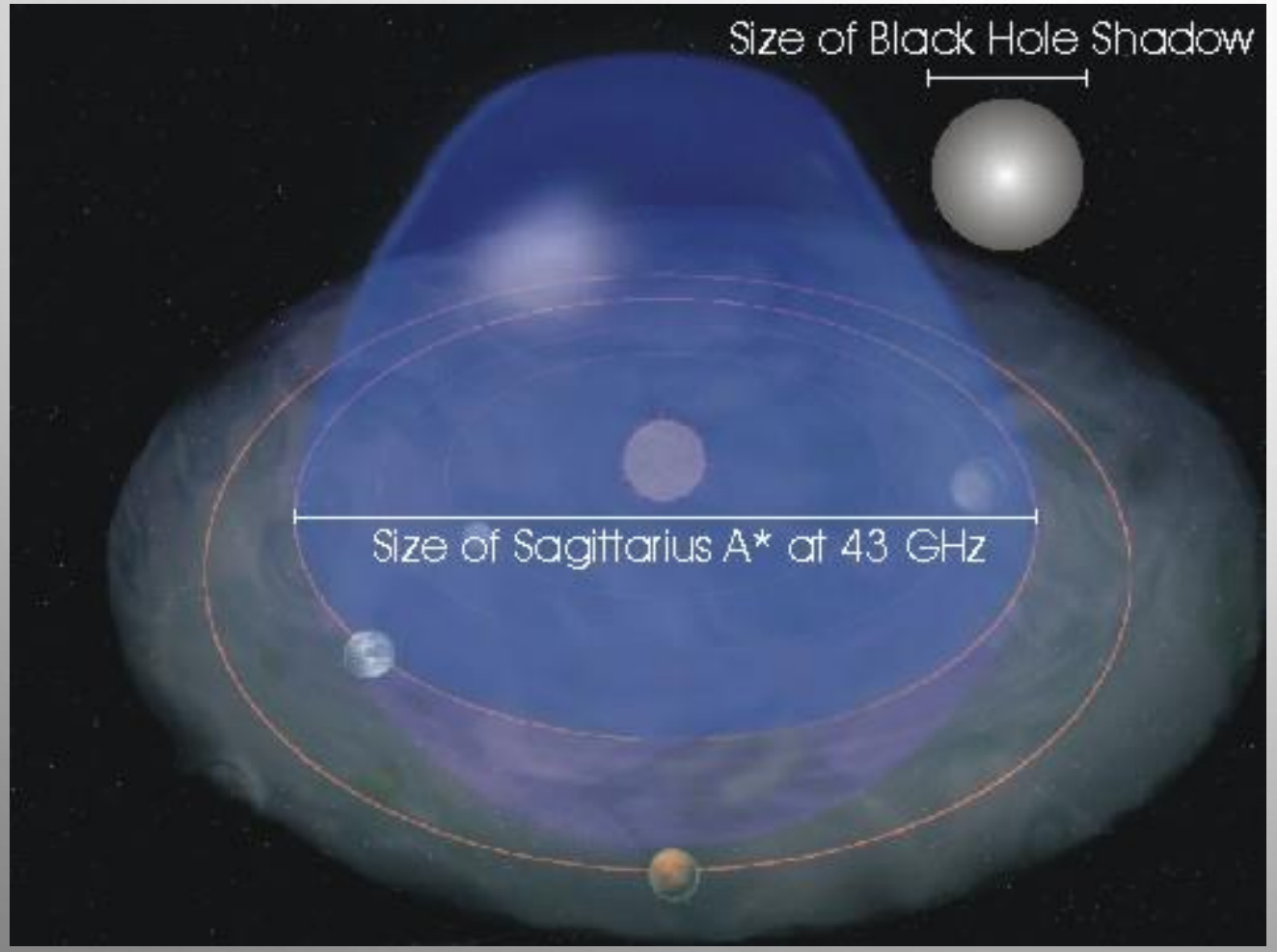
ОГРАНИЧЕНИЯ НА РАЗМЕР SGR A*

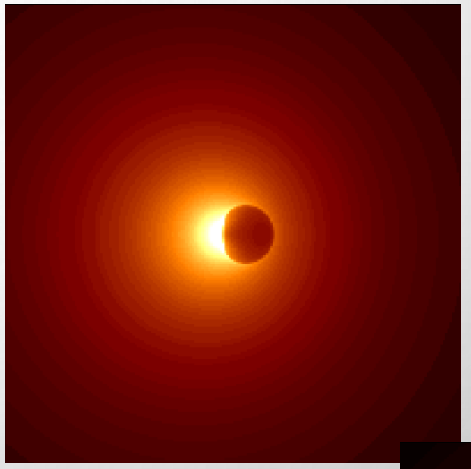


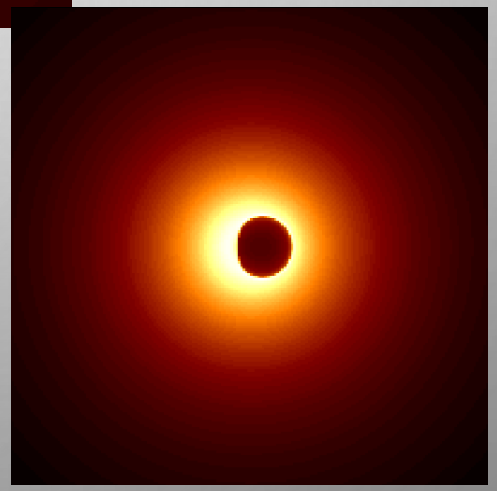
Используя VLBI, удалось получит очень жесткое ограничение на размер источника Sgr A*: 1 а.е.

«ТЕНЬ» ЧЕРНОЙ ДЫРЫ

http://www.astro.ru.nl/~falcke/bh/

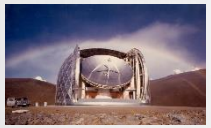


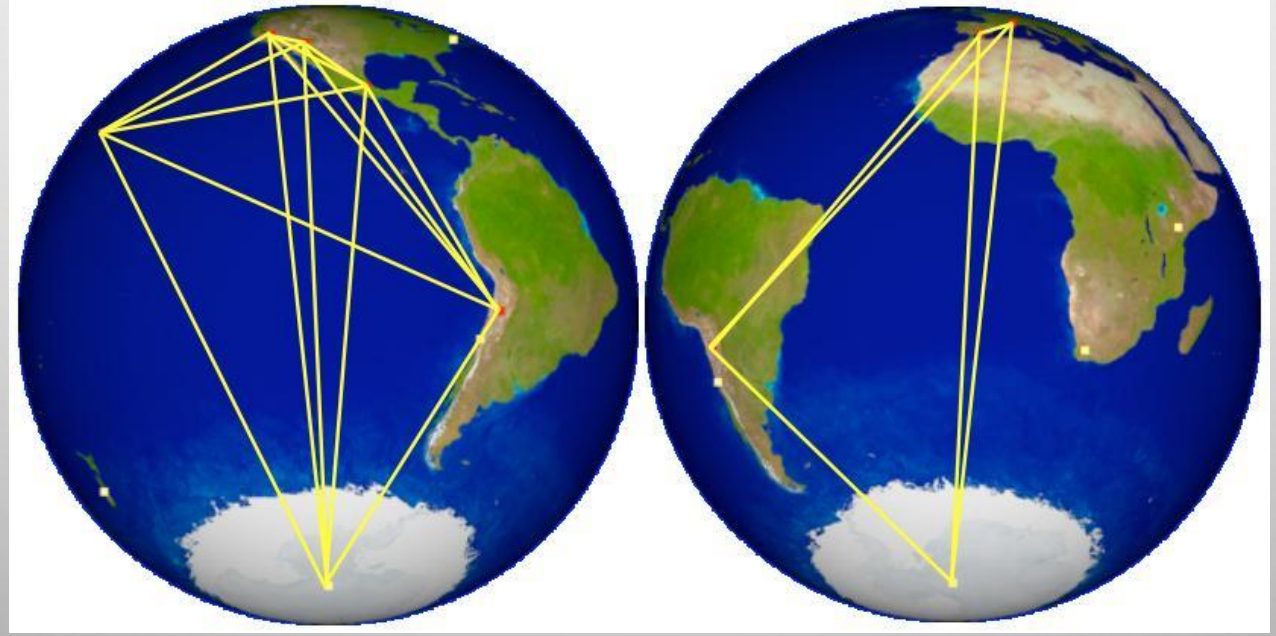


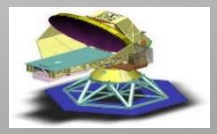


Некоторые детали можно найти в е-принте astro-ph/9912263

EVENT HORIZON TELESCOPE

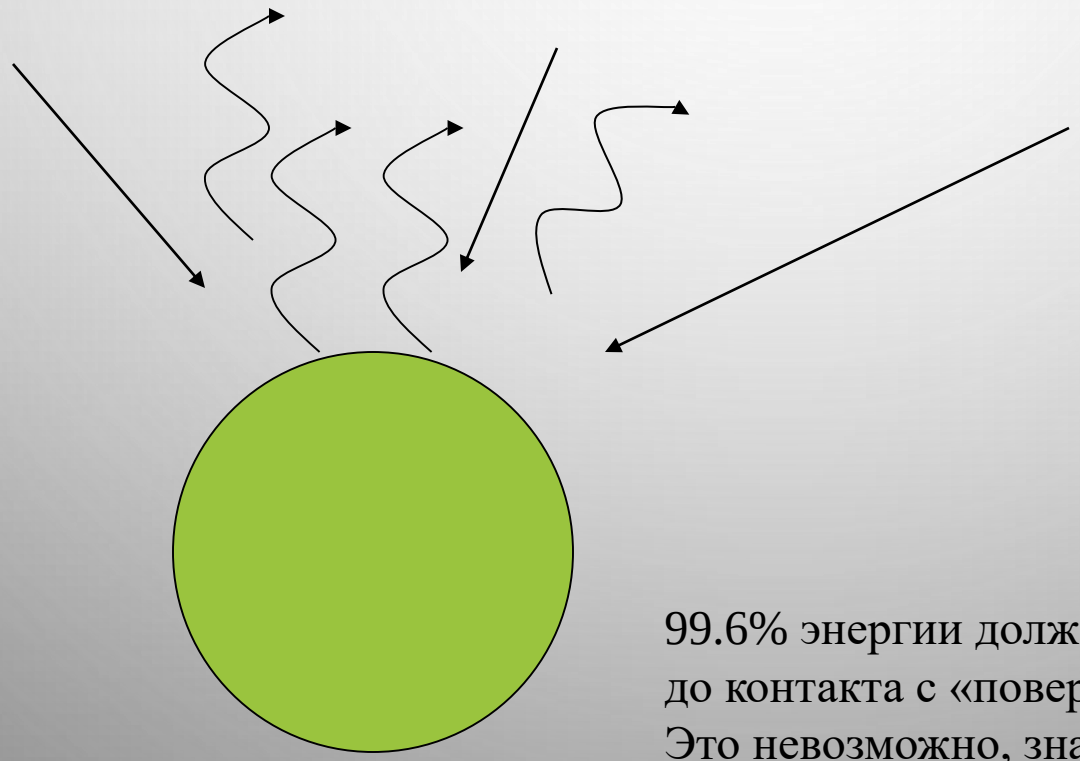






http://eventhorizontelescope.org

В SGR A* НЕТ ПОВЕРХНОСТИ?

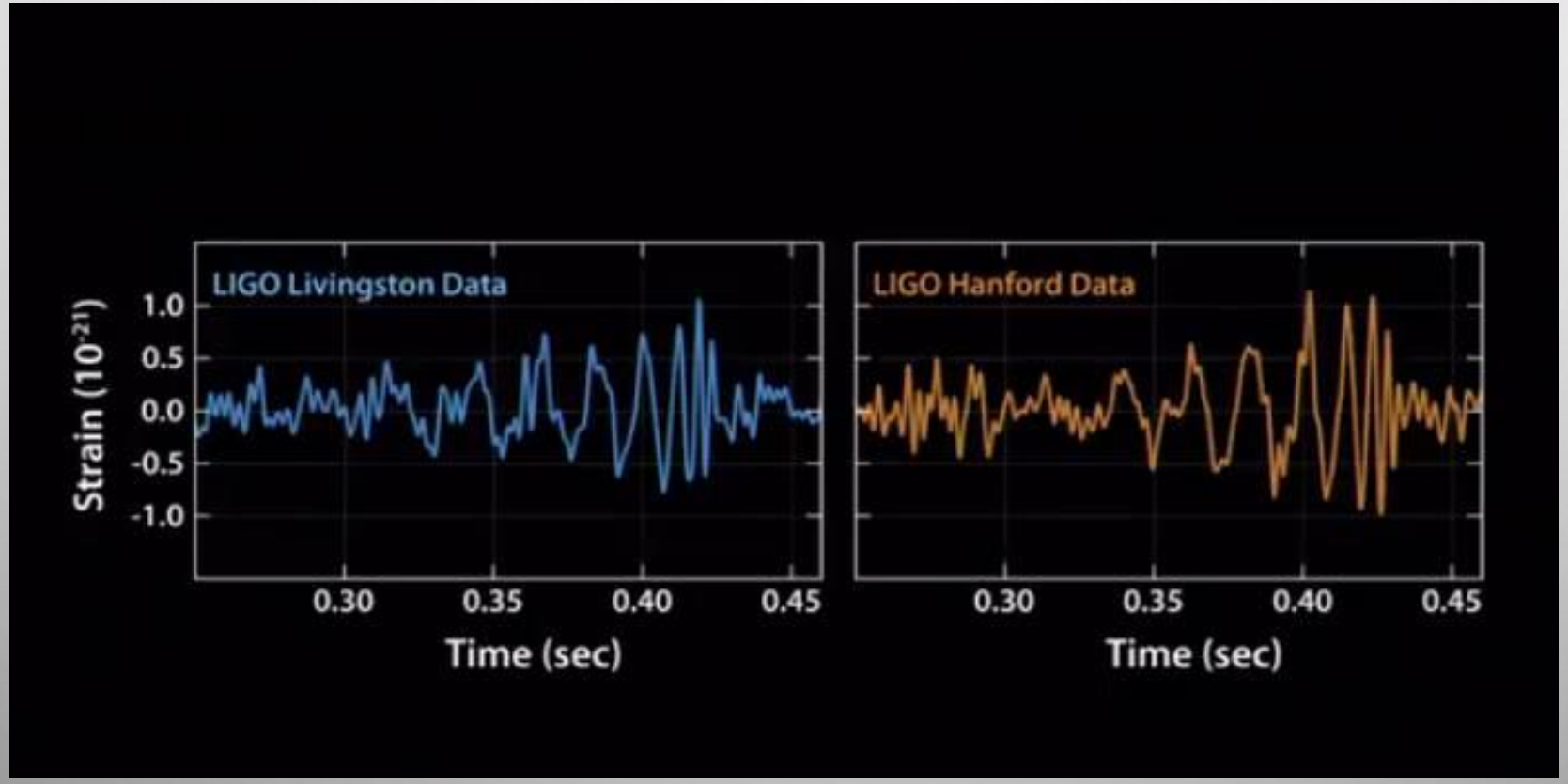


Наблюдается только излучение от потока, но не от поверхности.

Наиболее легко это объясняется наличием горизонта.

99.6% энергии должно выделять в потоке до контакта с «поверхностью».
Это невозможно, значит поверхности нет.

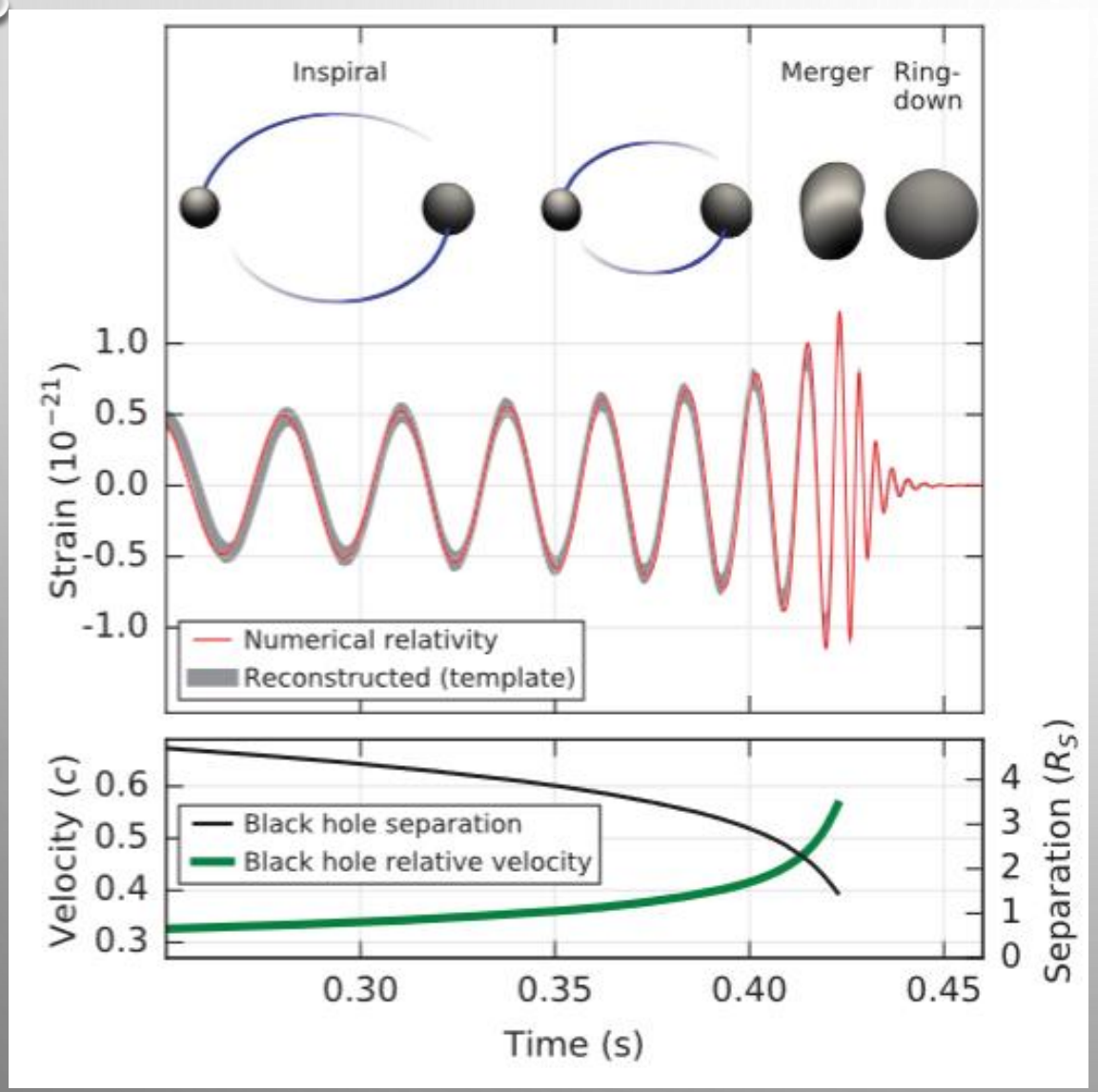
GW150914 13-50 ПО МОСКОВСКОМУ ВРЕМЕНИ



http://www.ligo.org

Официальное объявление 11 февраля 2016 года.
За 16 дней совместных наблюдений двух детекторов
надежно обнаружено одно событий – слияние двух черных дыр в >400 Мпк от нас.

СЛИЯНИЕ ДВУХ ЧЕРНЫХ ДЫР



http://journals.aps.org/prl/pdf/10.1103/PhysRevLett.116.061102

В течение многих лет несколько групп ученых занимались расчетами форм ожидаемых сигналов от слияний нейтронных звезд и черных дыр.

Для нейтронных звезд это сложно, т.к. мы недостаточно точно знаем EoS. Для черных дыр – потому что ОТО плохо поддается прямым численным расчетам.

Тем не менее, удалось достаточно хорошо рассчитать формы сигналов, что критично для распознания слабых всплесков на фоне шумов.

Для поиска на LIGO используется около 250000 рассчитанных форм слияний.

ПАРАМЕТРЫ ПАРЫ ЧЕРНЫХ ДЫР

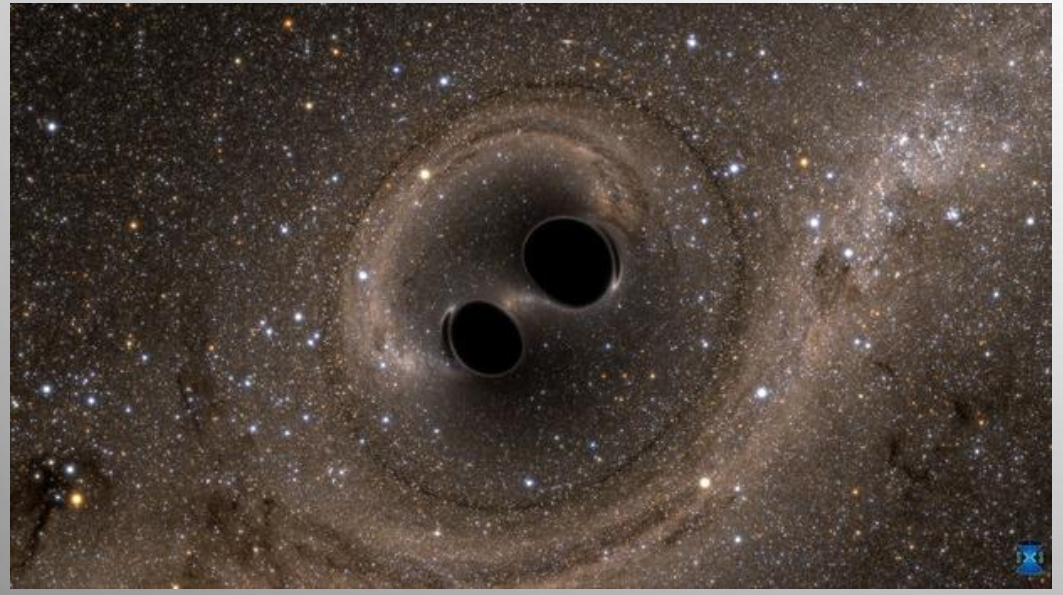
По частоте и форме сигнала можно достаточно точно определить многие параметры.
Высокая масса однозначно говорит о том, что это не могут быть нейтронные звезды.
Отношение сигнал/шум = 24
Достоверность детектирования >5.1 сигма.

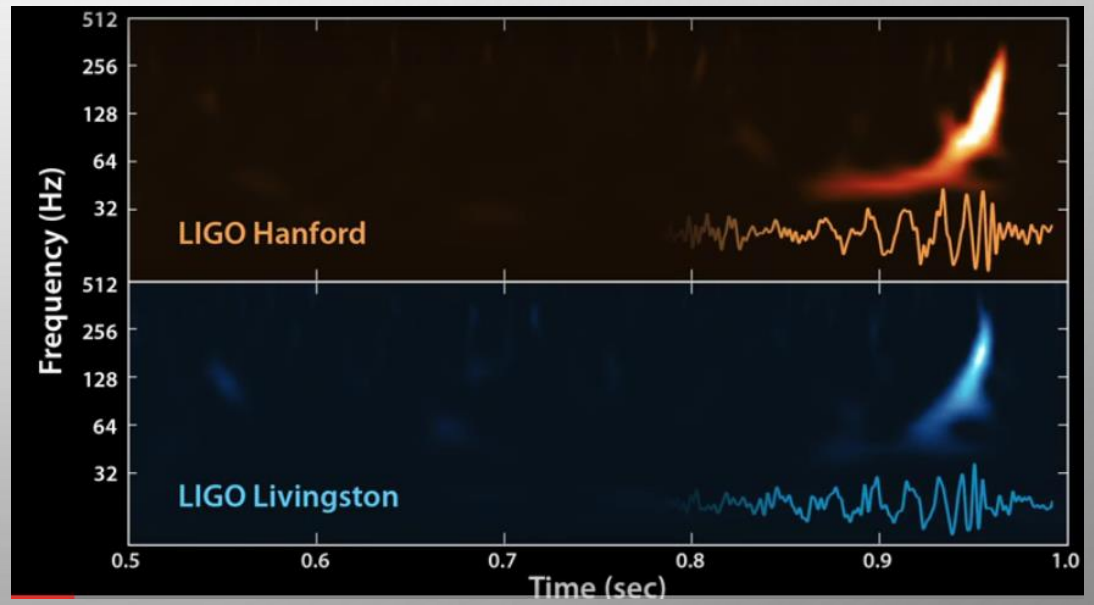
http://journals.aps.org/prl/pdf/10.1103/PhysRevLett.116.061102

СВЕТИМОСТЬ И ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЕ

Примерно три массы Солнца перешло в энергию гравитационных волн.
Максимальная светимость достигла 3.6×10^{56} эрг/с, т.е. 10^{23} светимостей Солнца.

www.ligo.caltech.edu

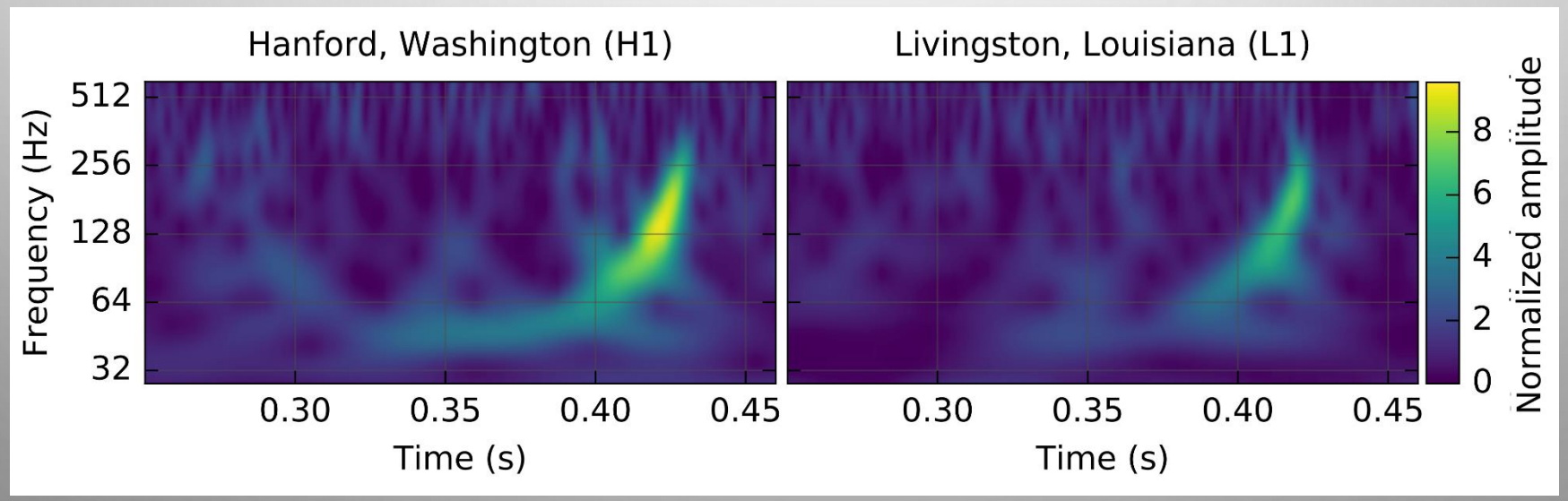




МОЩНОСТЬ

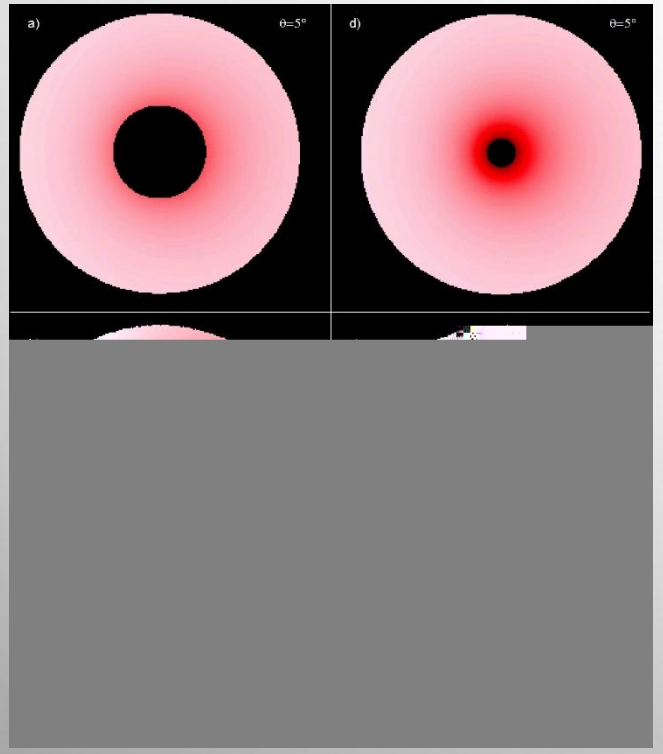
100 000 000 000 000 000 000 000 светимостей Солнца.

Число волос на голове 100 000
Число людей на Земле 10 000 000 000
Число звезд в Галактике 100 000 000 000
Число галактик в видимой части вселенной 100 000 000 000
Число звезд во вселенной 100 000 000 000 000 000 000 000



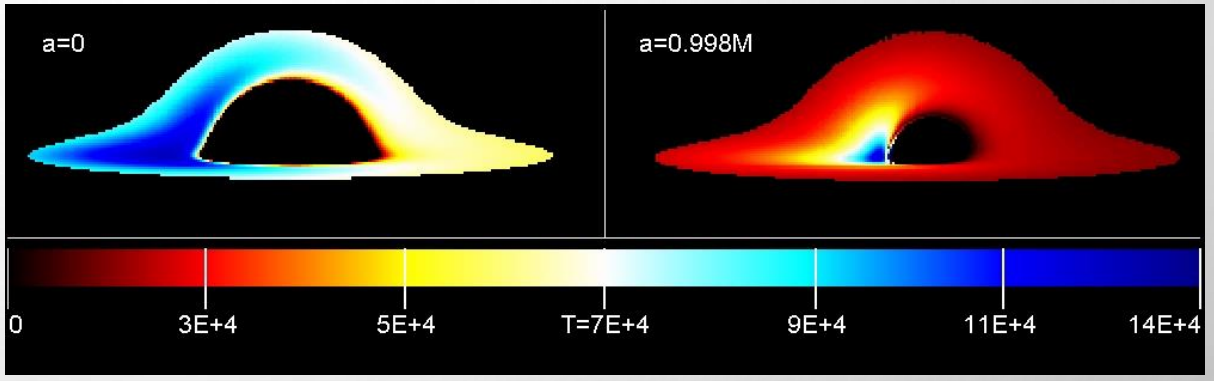
Ligo.org

ДИСКИ ВОКРУГ ЧЕРНЫХ ДЫР: ВЗГЛЯД СО СТОРОНЫ

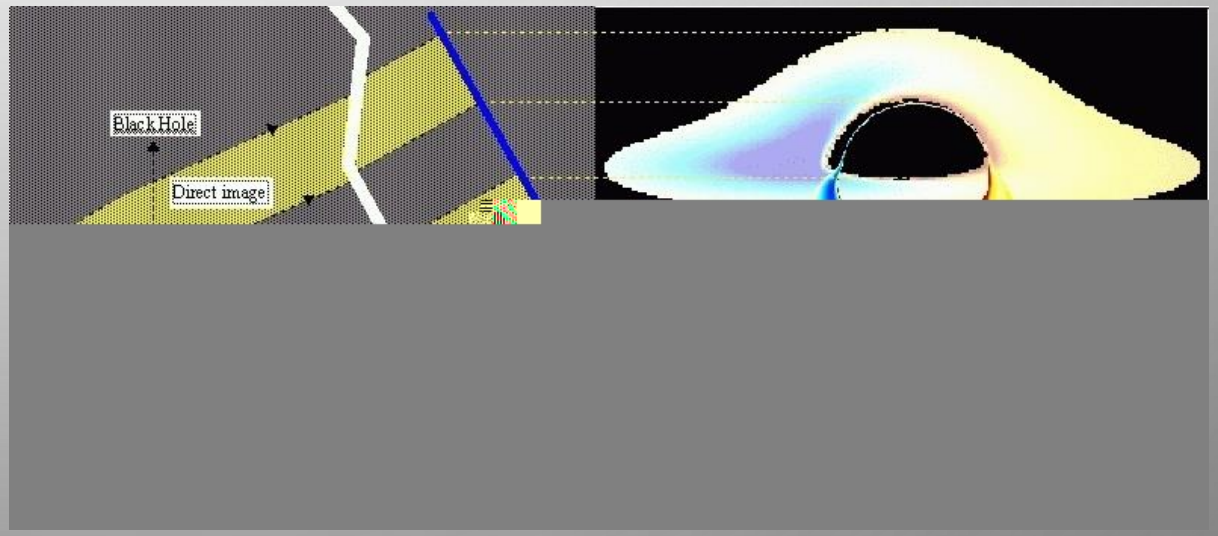


Диски «из бесконечности».
Слева: невращающаяся ЧД,
Справа: вращающаяся.

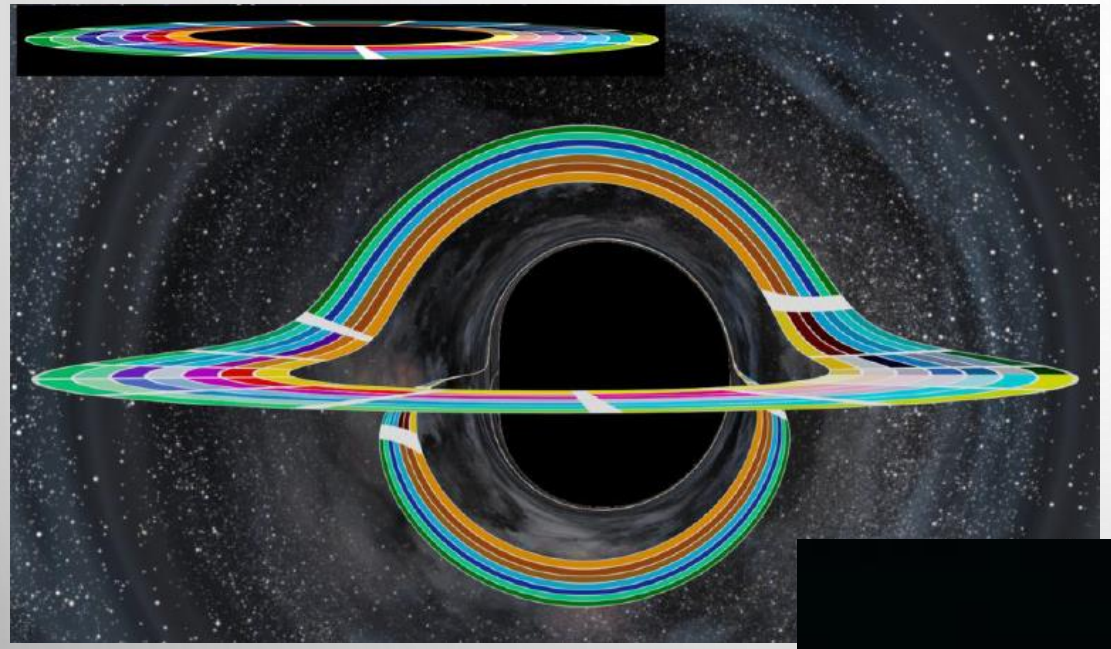
http://web.pd.astro.it/calvani/



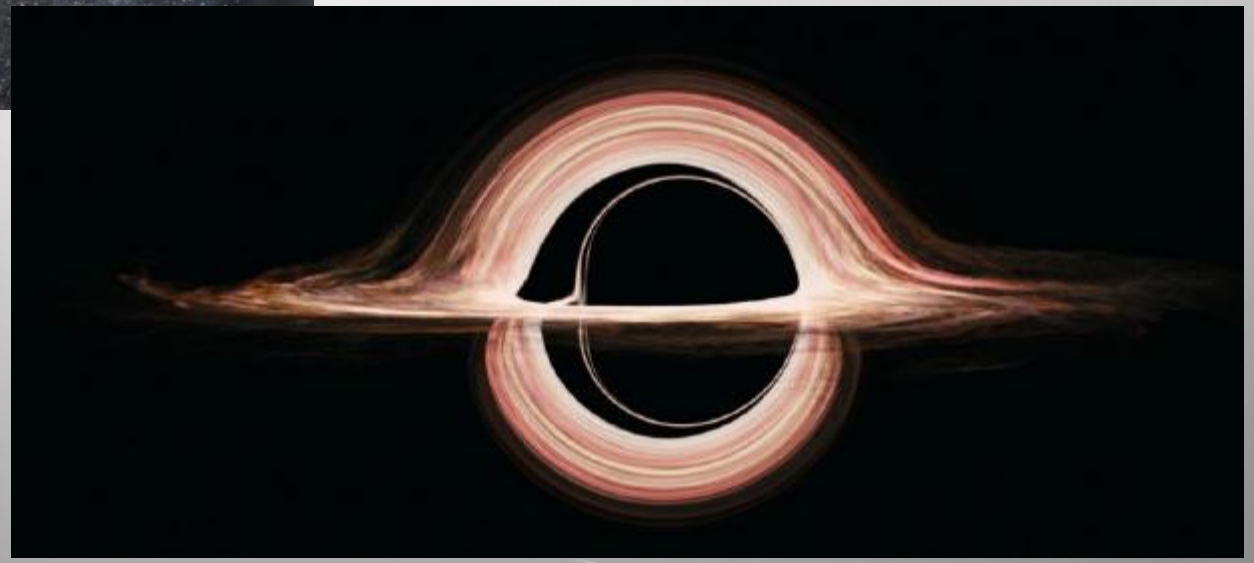
Температура диска



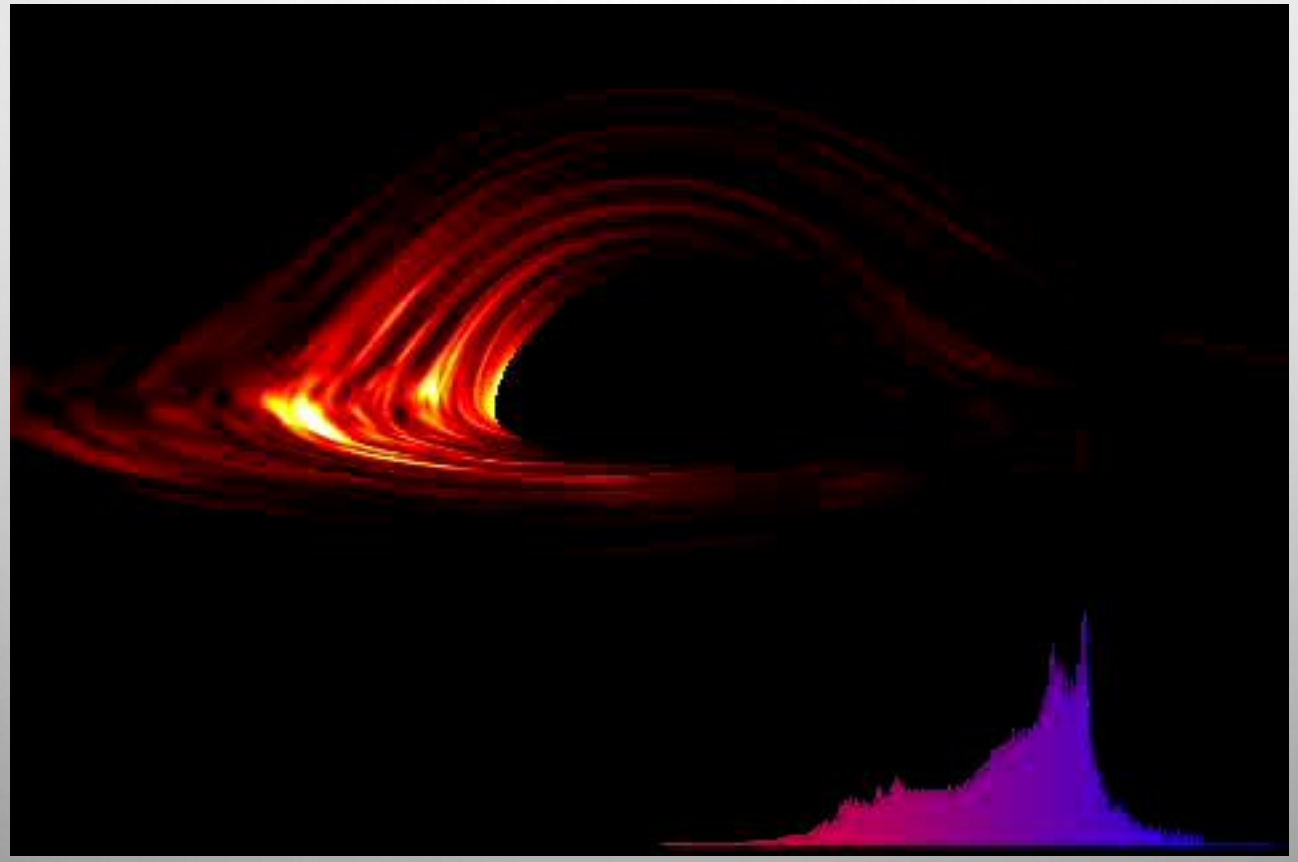
ДИСКИ ИЗ «ИНТЕРСТЕЛЛАРА»



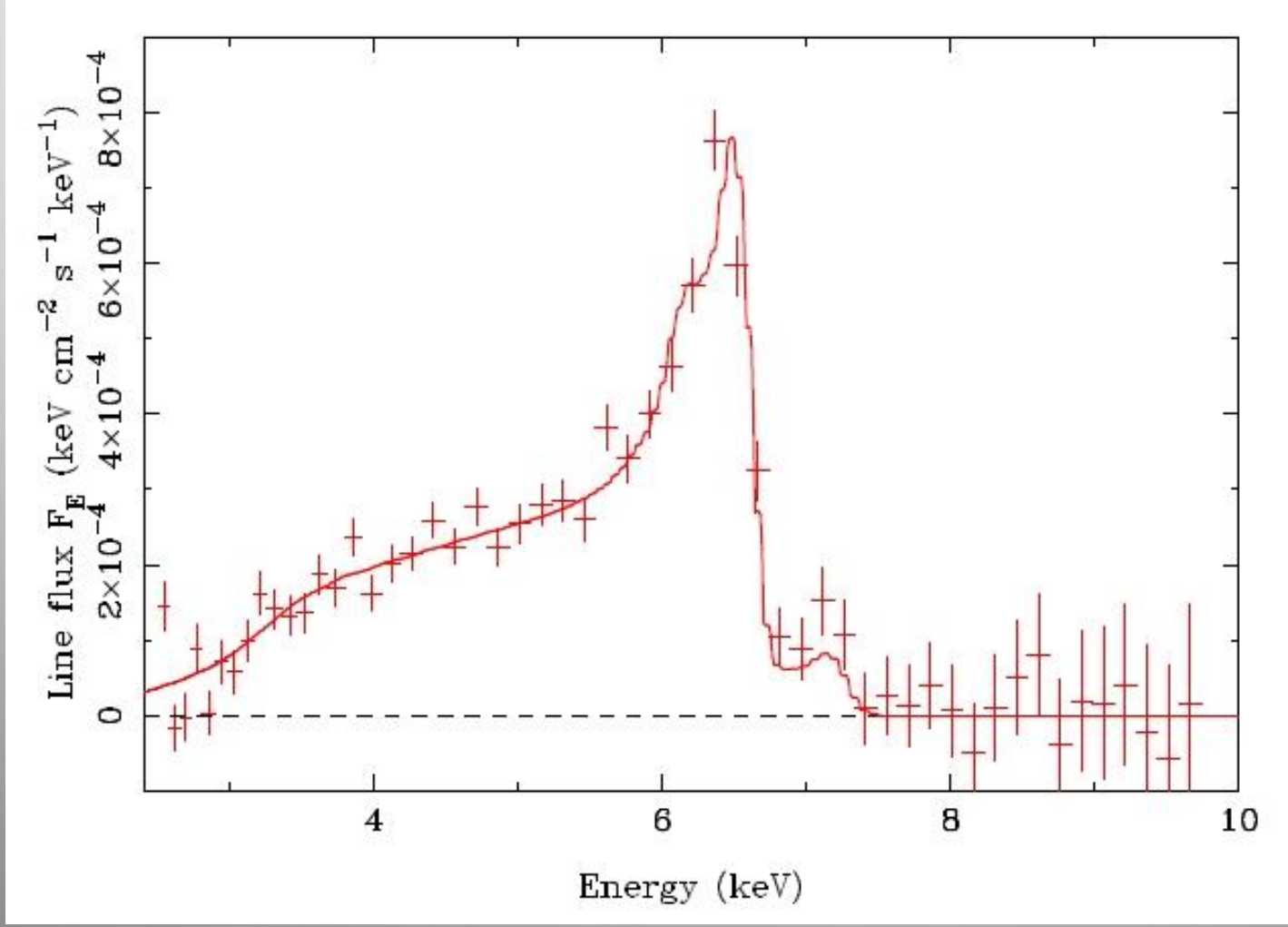
1502.03808



ПРАВИЛЬНЫЙ ДИСК И ЛИНИЯ ЖЕЛЕЗА



ЛИНИИ И ВРАЩЕНИЕ ЧД



Данные XMM-Newton

То, что линия тянется вплоть до энергии менее 4 кэВ, говорит о том, что дыра быстро вращается (тогда диск может подходить ближе к горизонту).