



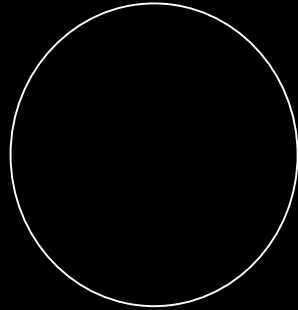
# КАК ОТКРЫТЬ ЧЕРНУЮ ДЫРУ

Сергей Попов

# ЧТО ТАКОЕ ЧЕРНАЯ ДЫРА?

## Для физика

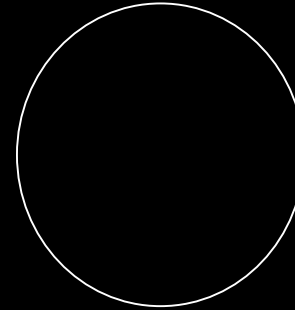
Обладает определенными внутренними свойствами



Объект, обладающий горизонтом.

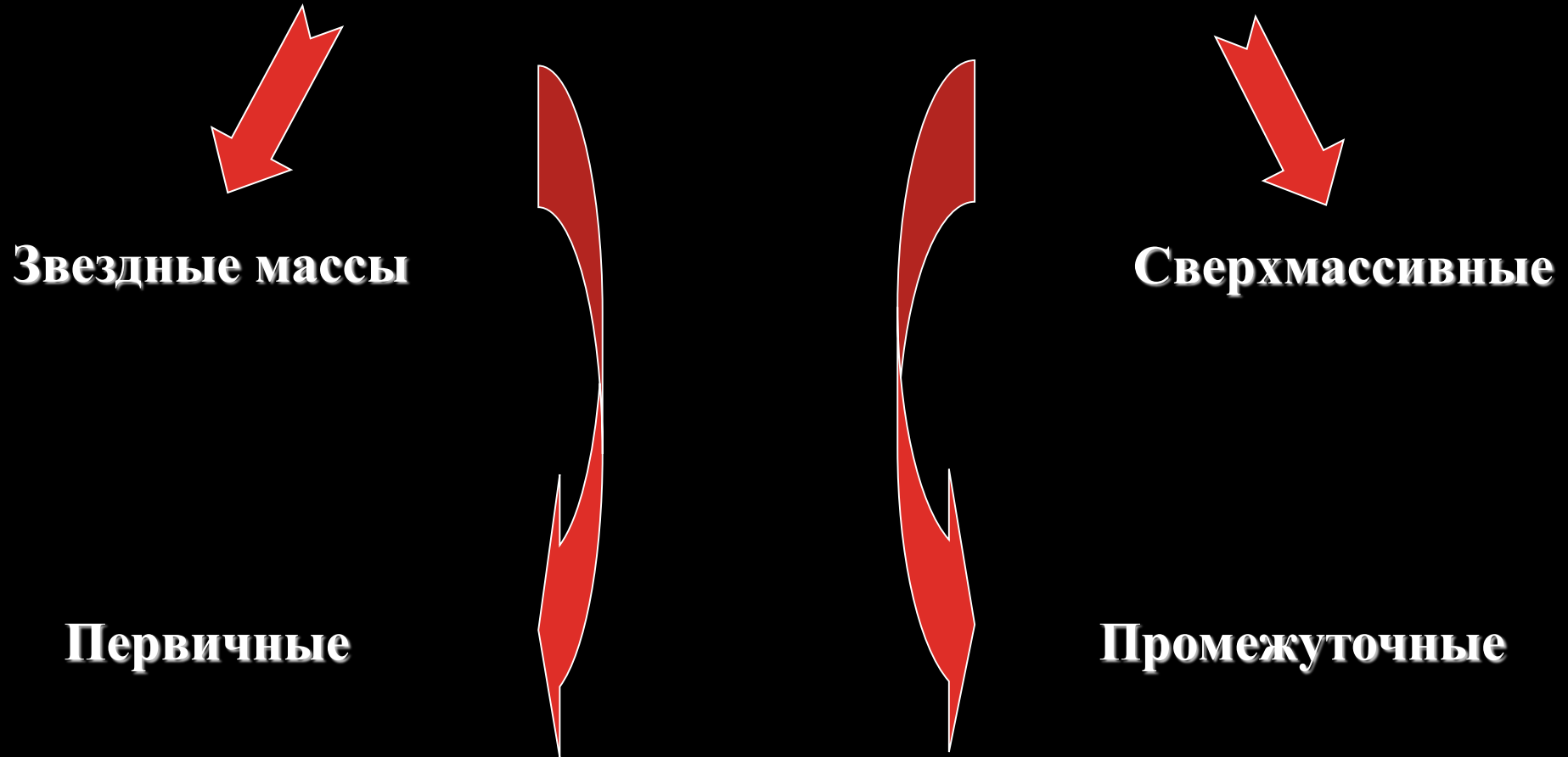
## Для астронома

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



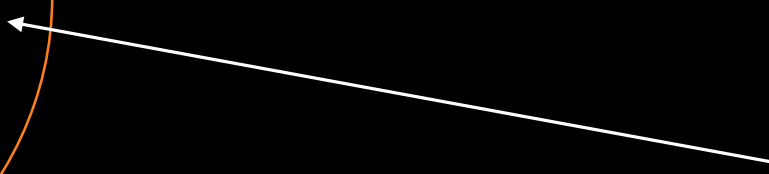
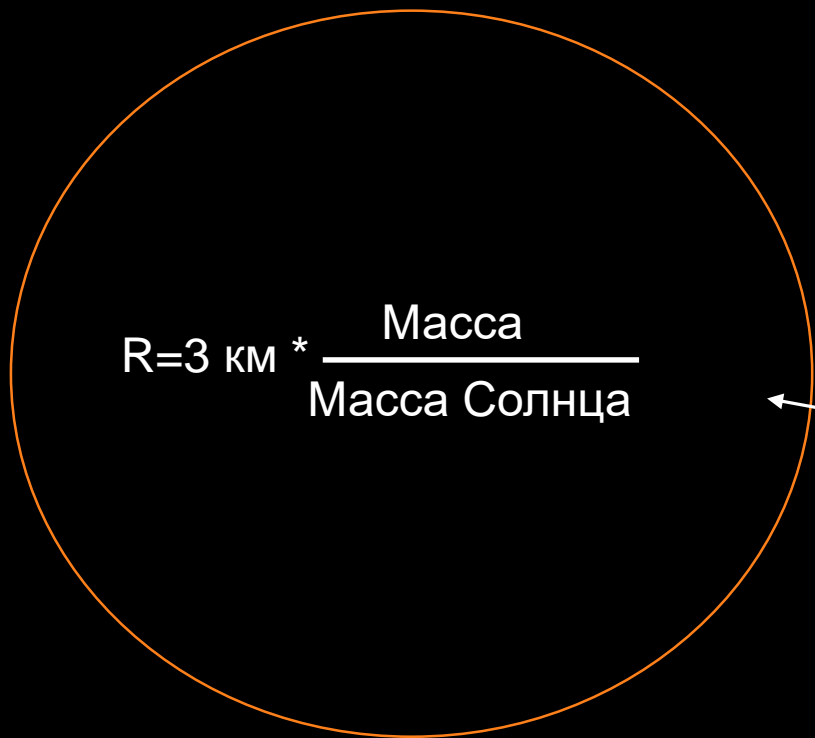
# ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

Маленькие

Массивные

Темные

$$R = 3 \text{ км} * \frac{\text{Масса}}{\text{Масса Солнца}}$$

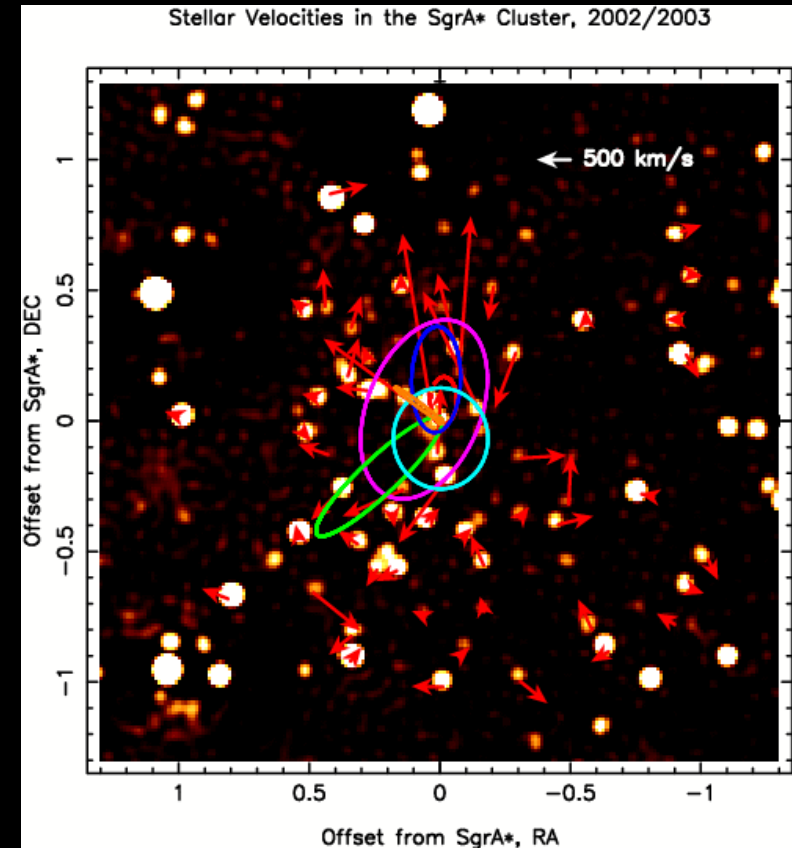


# САМАЯ ДОСТОВЕРНАЯ ЧД – SGR A\*

С высокой точностью мы знаем динамику внутри центральной угловой секунды.

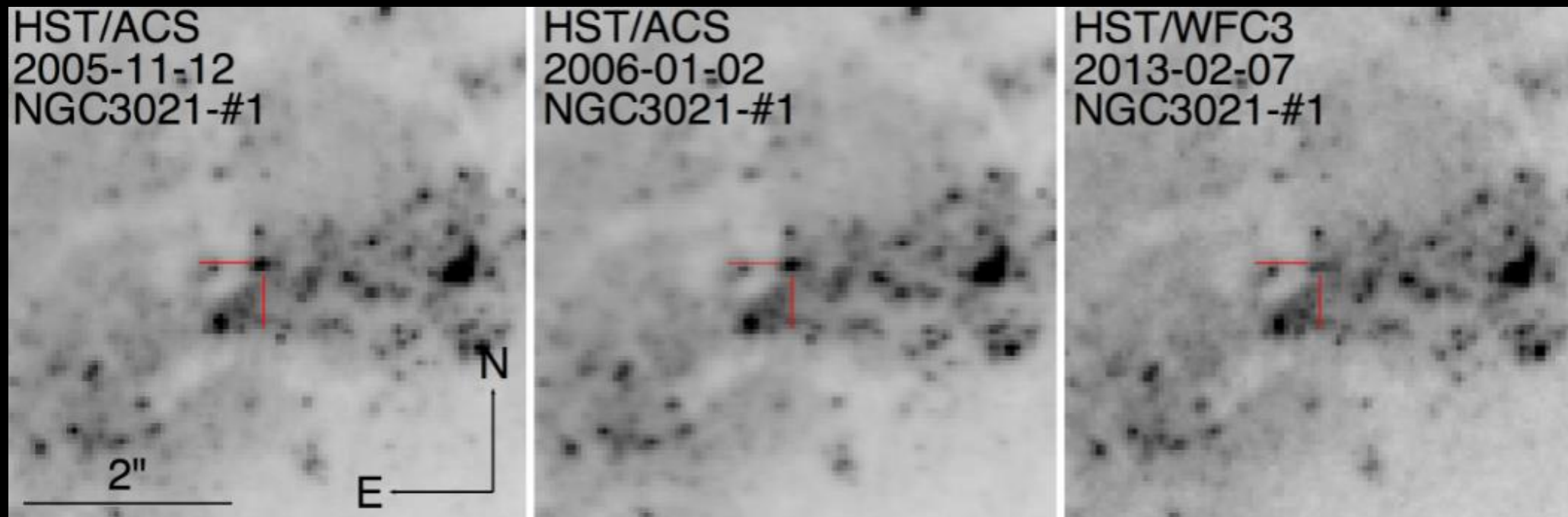
Оценка массы ЧД  $\sim 4 \cdot 10^6 M_{\odot}$

Было бы здорово открыть радиопульсар около Sgr A\*





# УШЕДШИЕ БЕЗ ШУМА



Звезда  
исчезла  
без взрыва  
сверхновой.

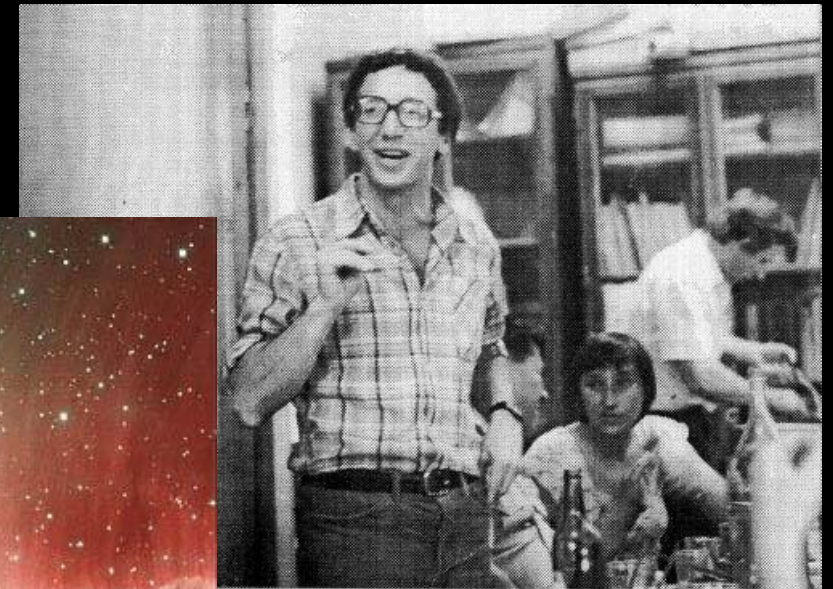
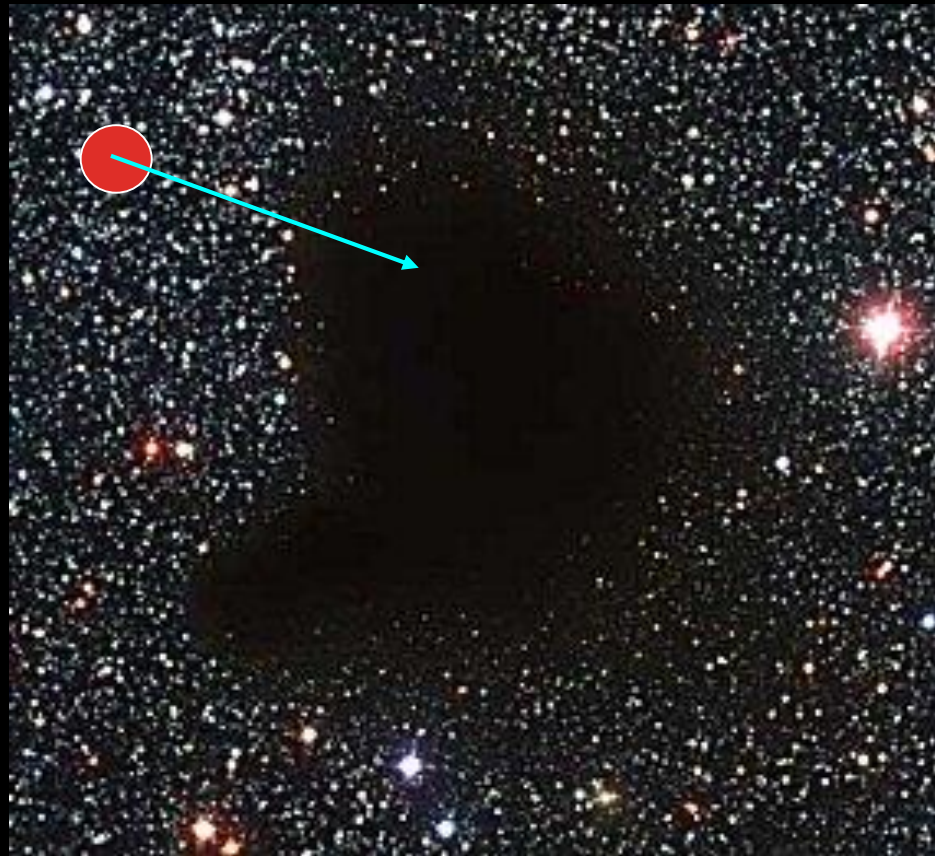
1507.05823

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.



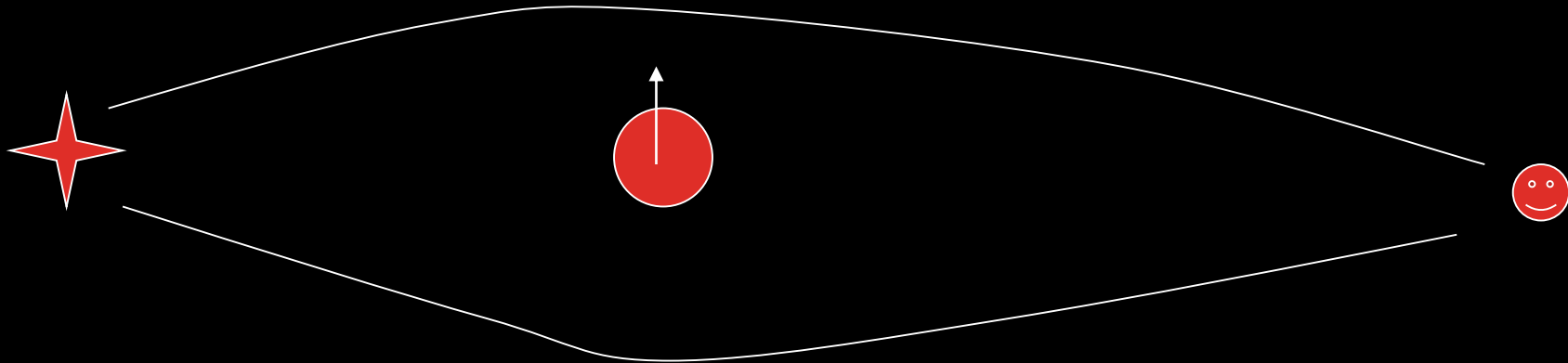
# КАК УВИДЕТЬ ОДИНОЧНУЮ ЧЕРНУЮ ДЫРУ?

1. Аккреция
2. Микролинзирование



# МИКРОЛИНЗИРОВАНИЕ

Скорость, масса, расстояние

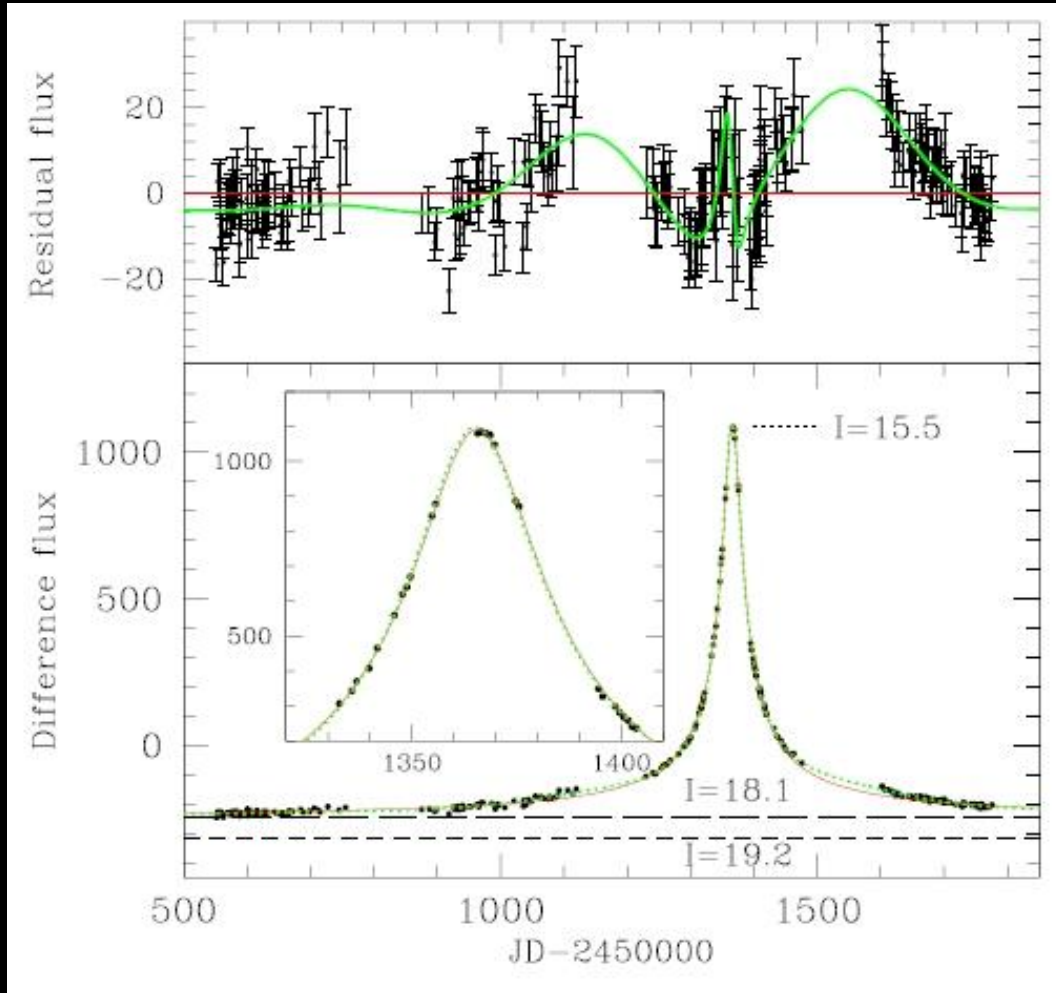


Массивное тело искажает пространство,  
действуя тем самым как собирающая линза.

Мы видим усиление блеска далекого источника,  
когда на луче зрения оказывается массивное тело.



# МИКРОЛИНЗИРОВАНИЕ И ОДИНОЧНЫЕ ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

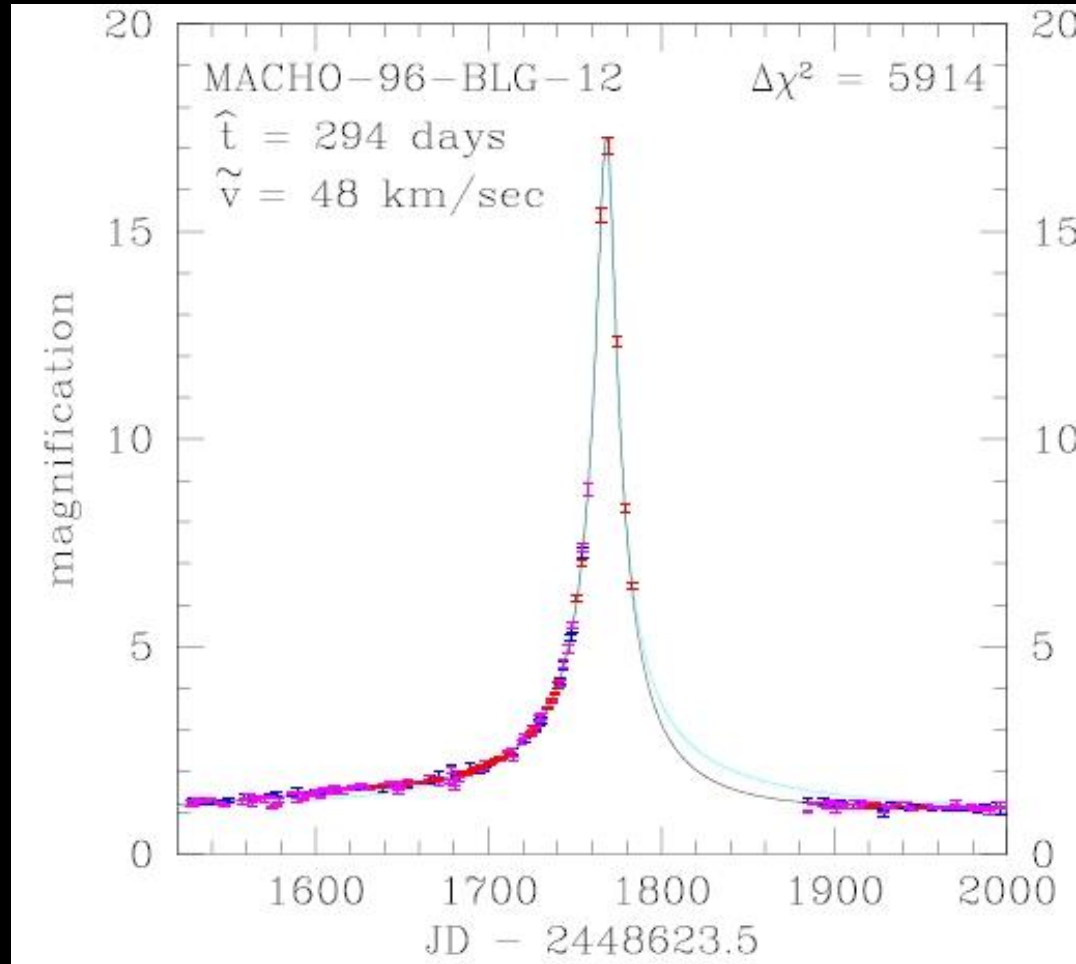


Событие OGLE-1999-BUL-32

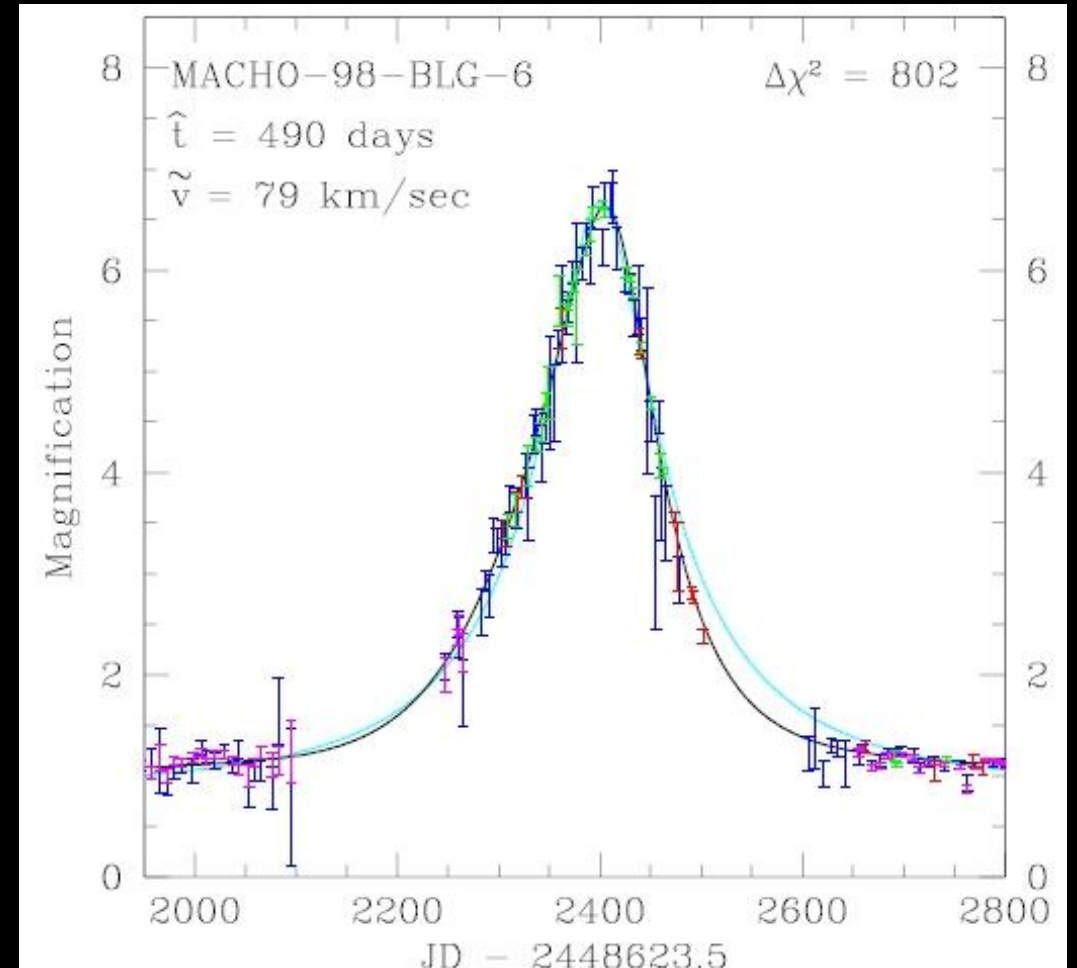
Очень длинное событие: 641 дней.

Оценка массы линзы  $>4 M_{\odot}$

# ПРОЕКТ МАСНО

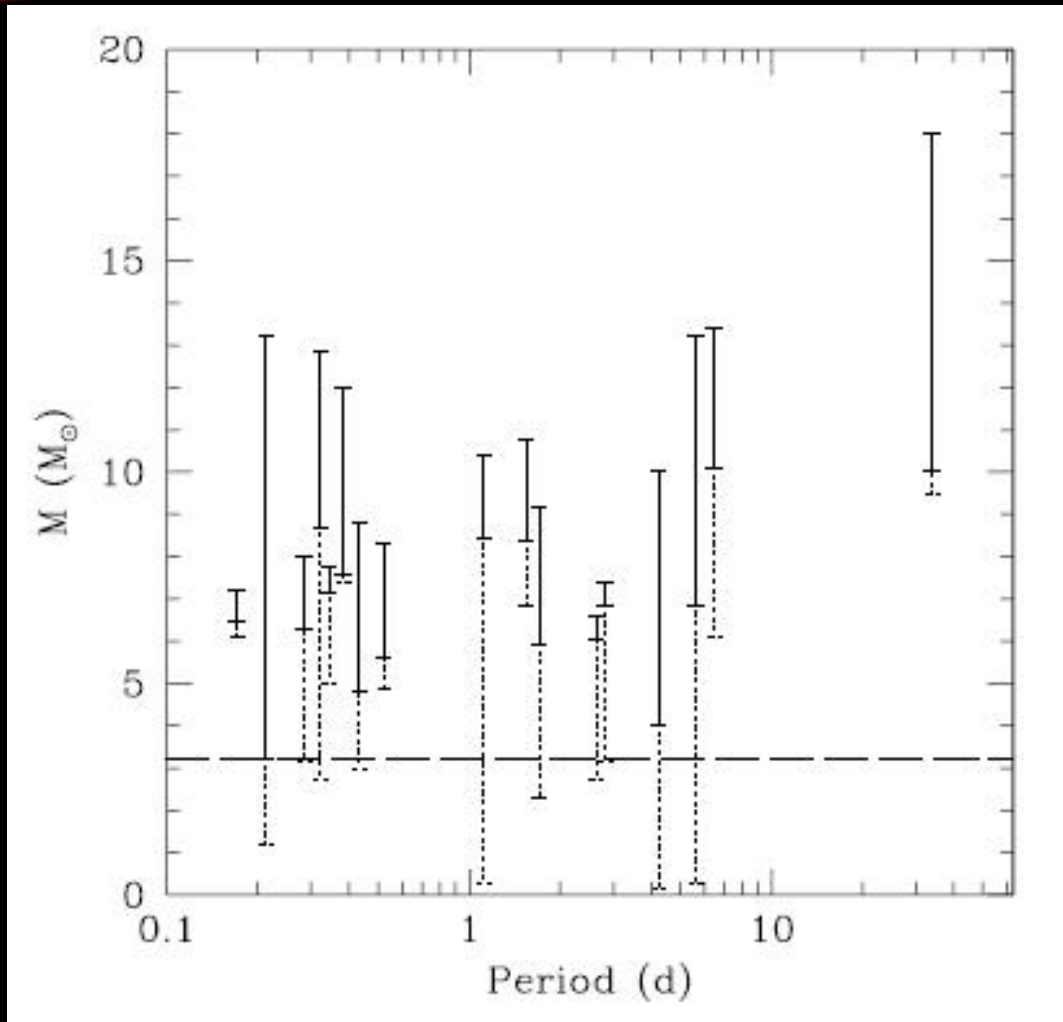


MACHO-96-BLG-6  
3-16 масс солнца

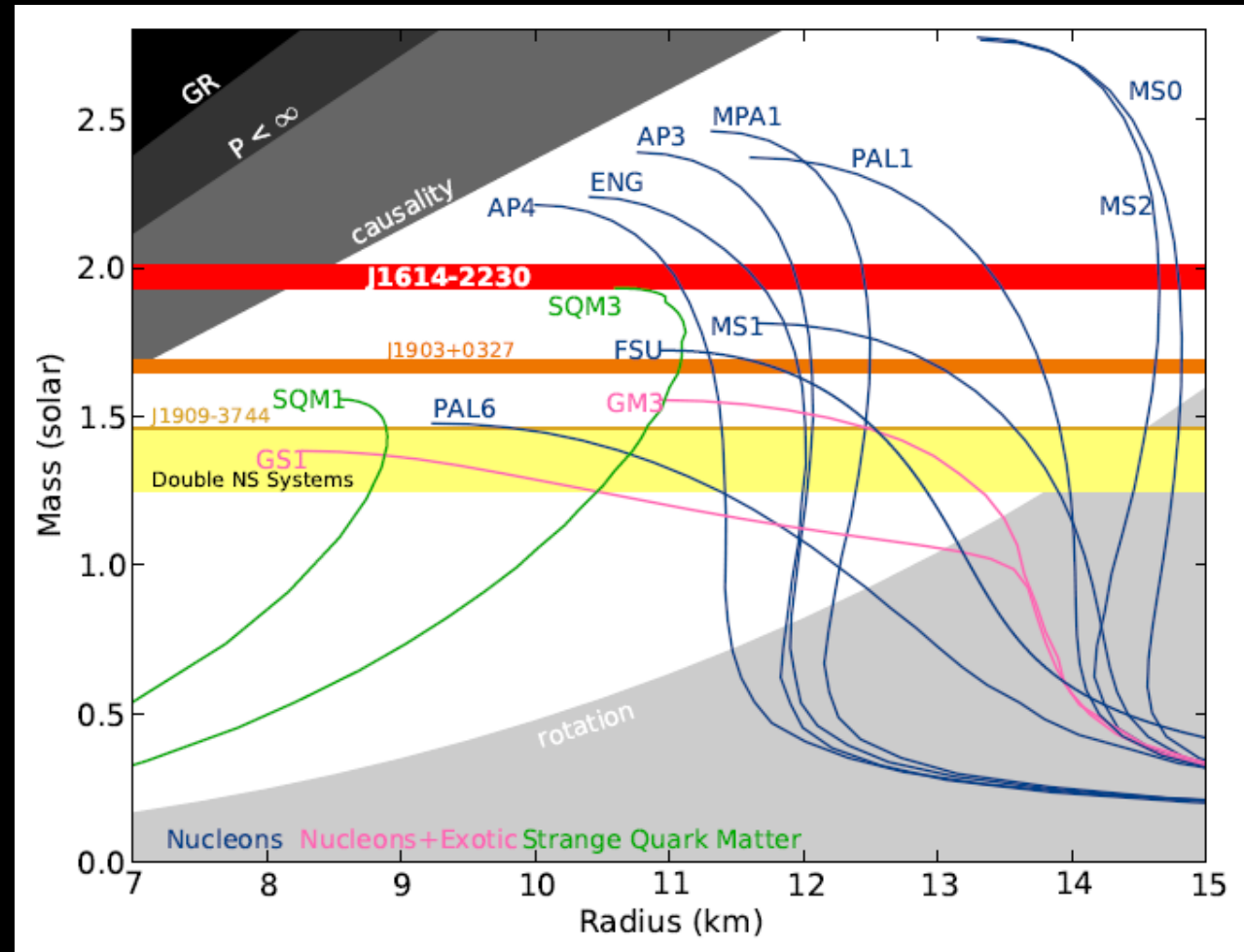


MACHO-98-BLG-6  
3-13 массы Солнца

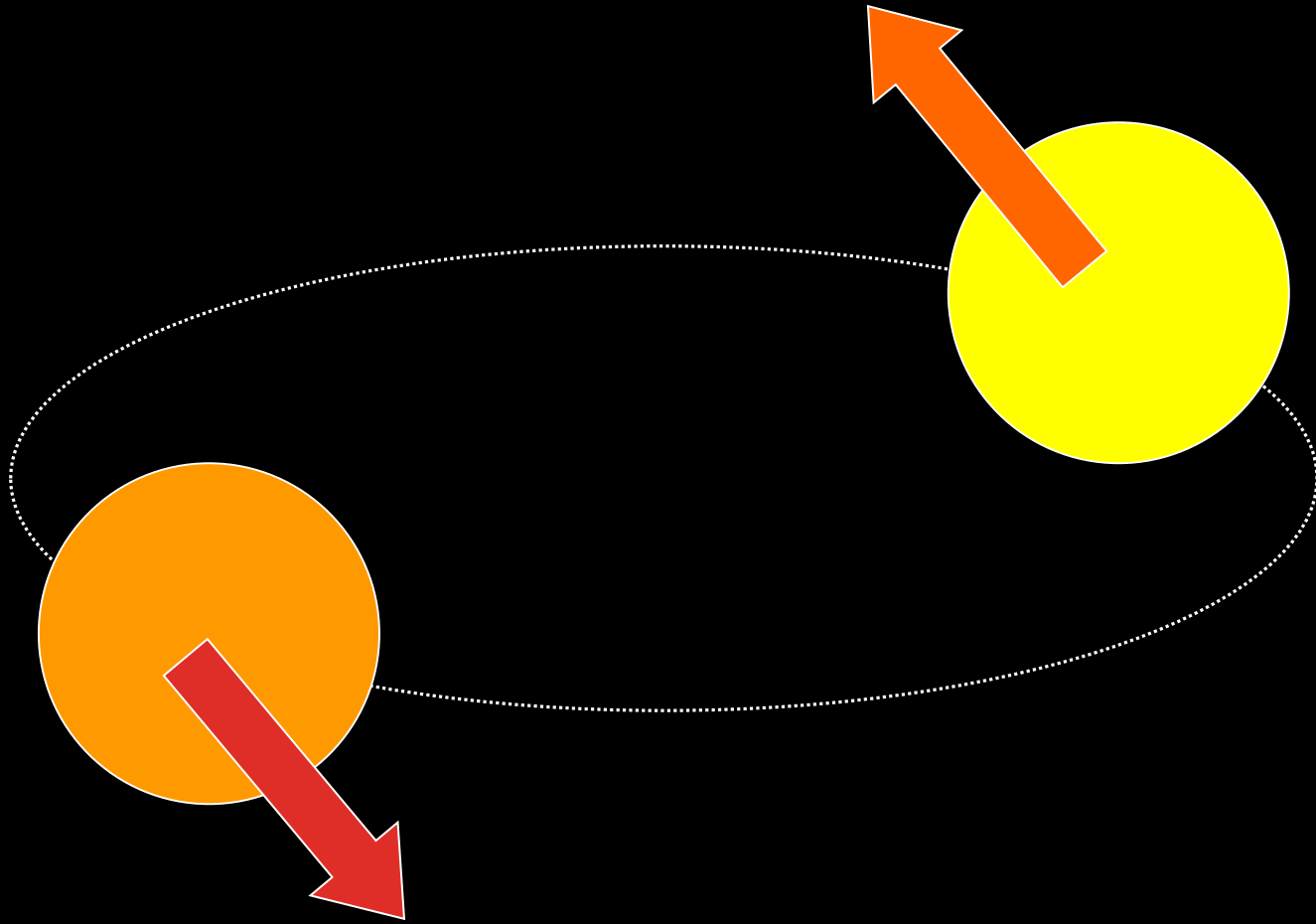
# МАССЫ ЧЕРНЫХ ДЫР



Горизонтальная линия соответствует 3.2 массы Солнца.



# КАК ОПРЕДЕЛЯЮТ МАССЫ?



Измеряем  
скорости объектов и  
орбитальный период.

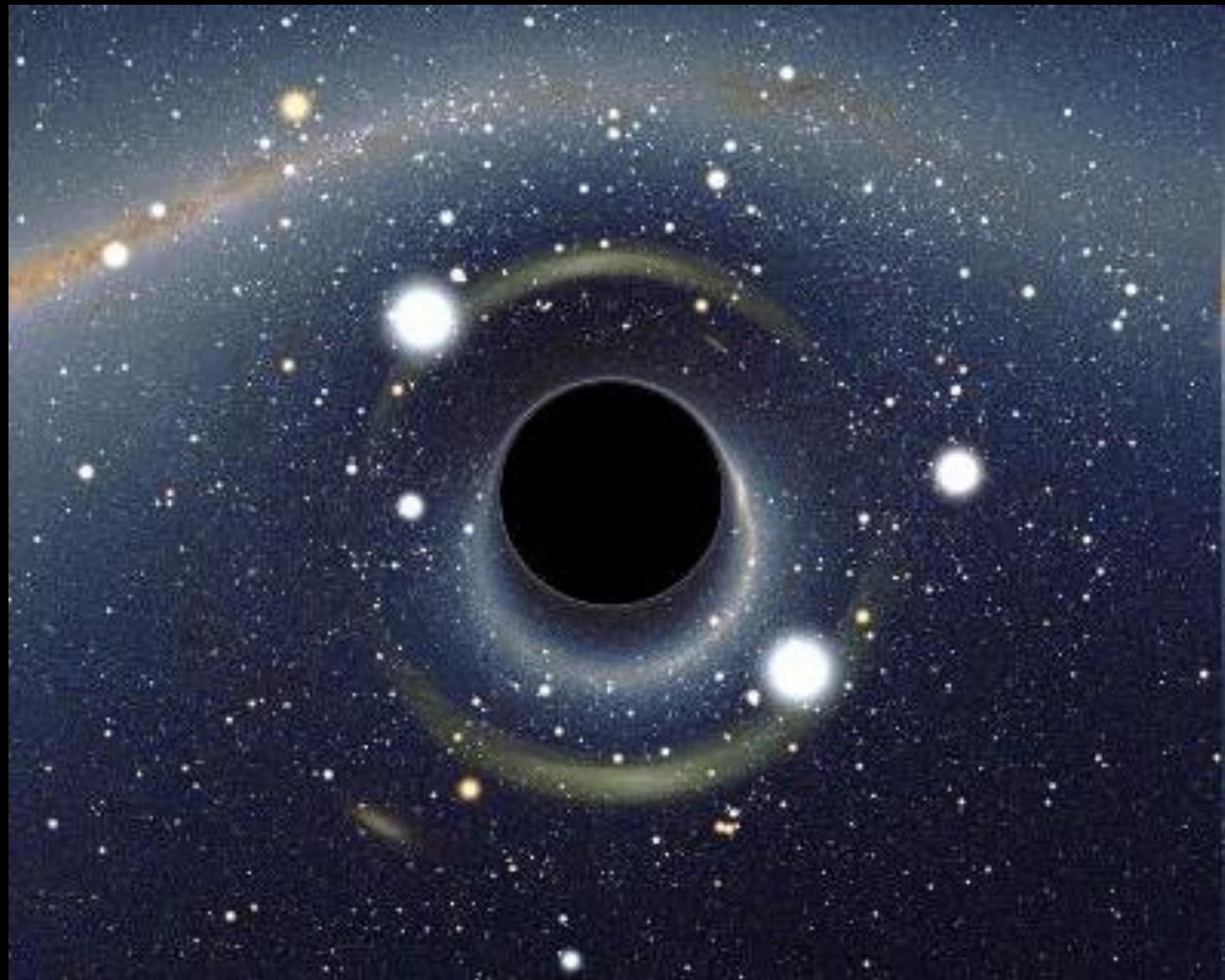
Далее по закону Кеплера  
определяем массы.



# ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ В ДВОЙНЫХ СИСТЕМАХ



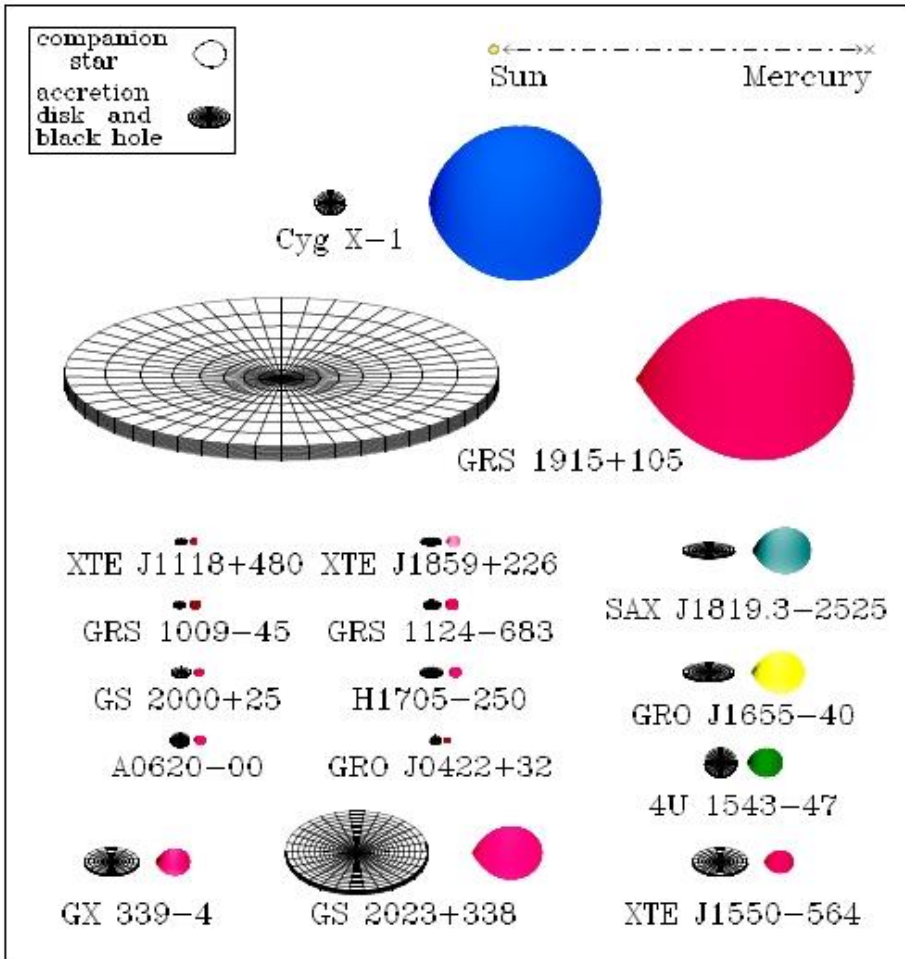
«Черная дыра в источнике Лебедь X-1 –  
это самая консервативная гипотеза»  
(Э. Салпитер)





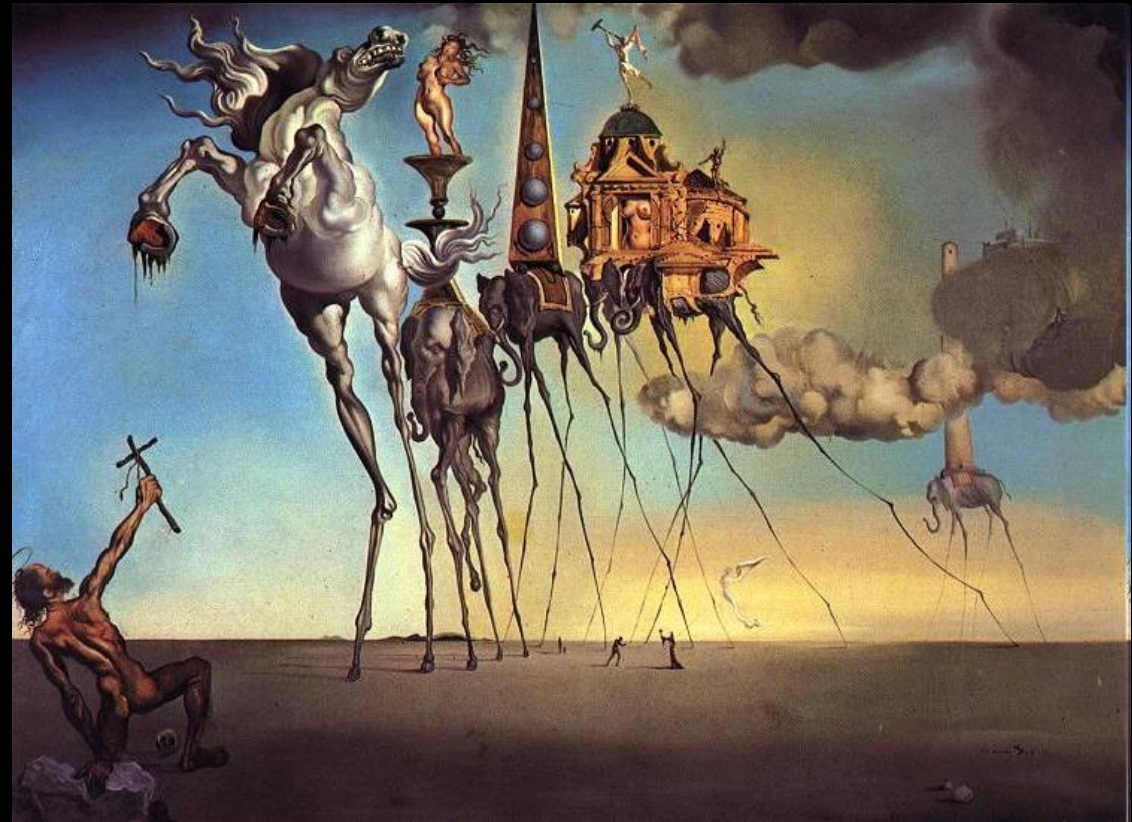
# КАНДИДАТЫ В ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

## Black Hole Binaries in the Milky Way

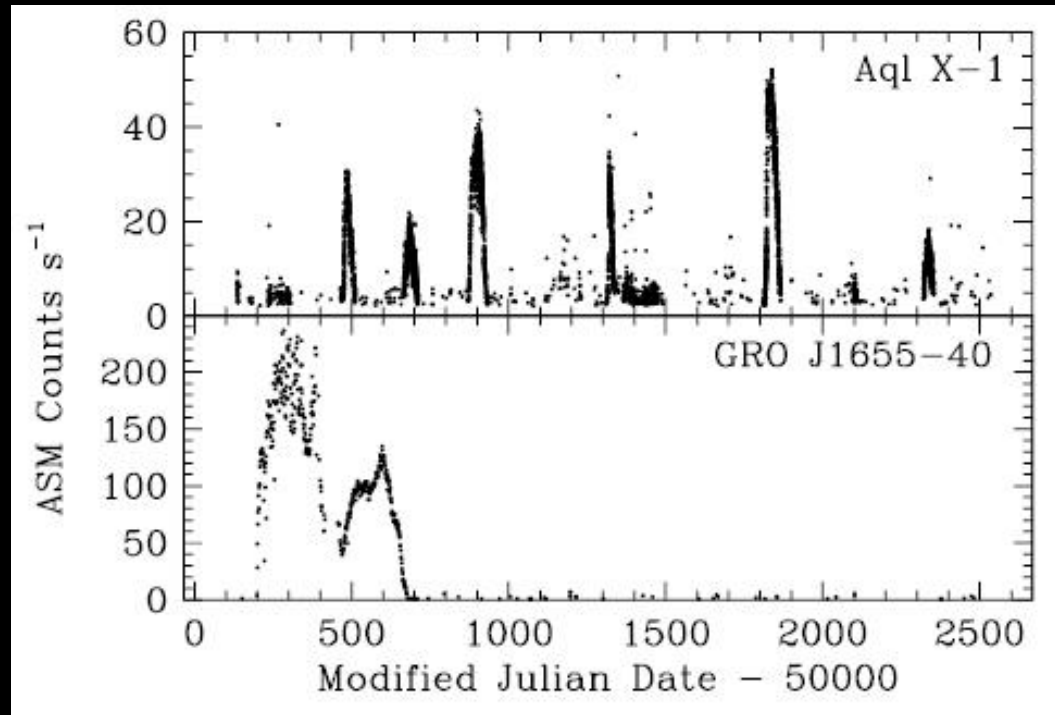


Почему считаем их кандидатами?

- нет пульсаций
- особенности излучения
- **ТЯЖЕЛЫЕ!**



# ДВОЙНЫЕ СИСТЕМЫ



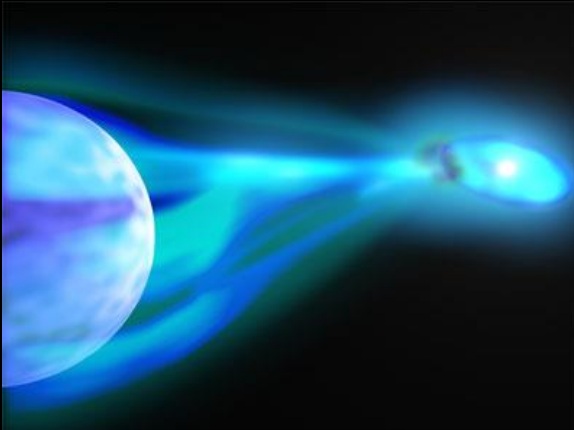
НЗ



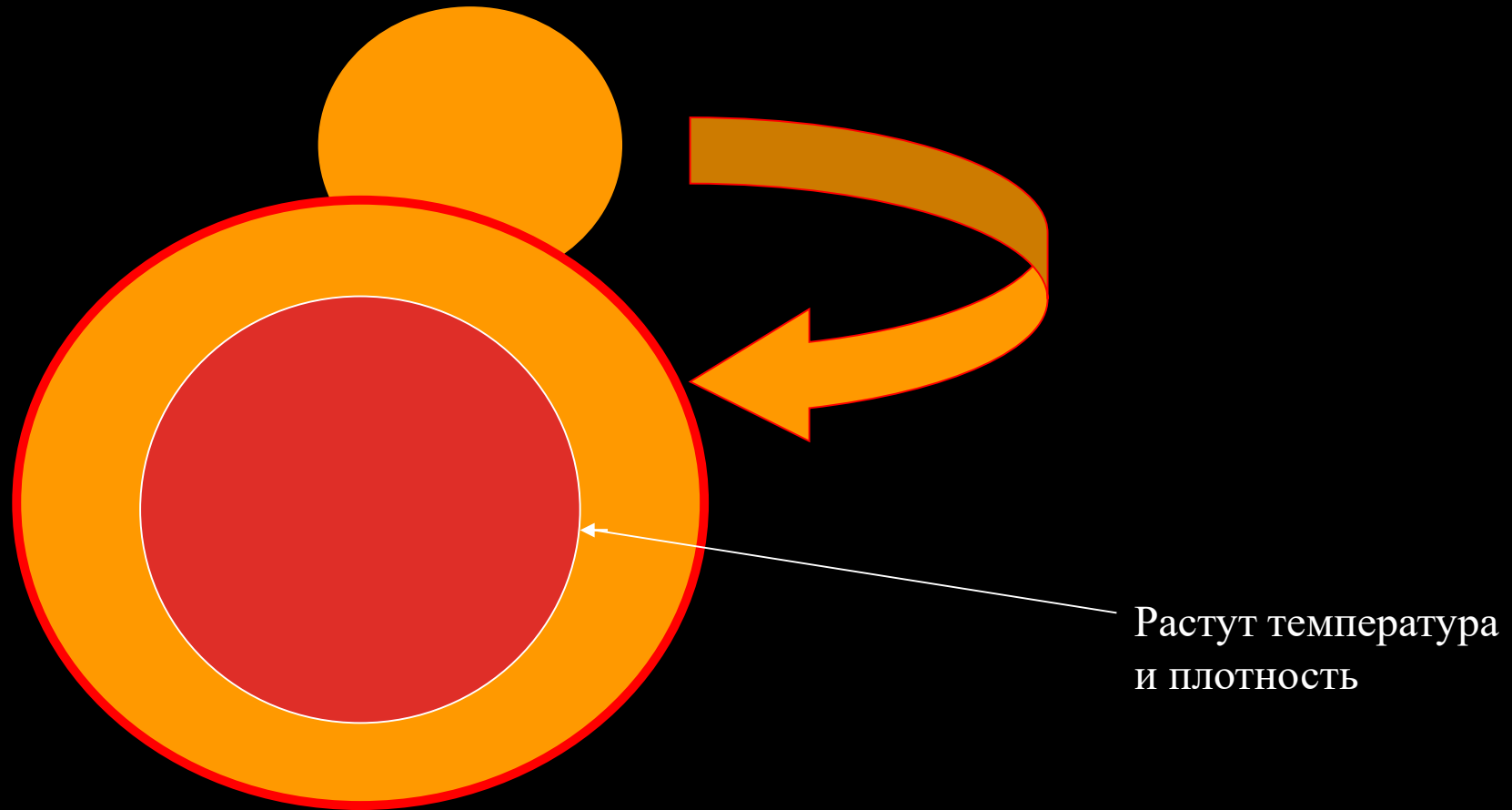
ЧД



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.



# РЕНТГЕНОВСКИЙ БАРСТЕР

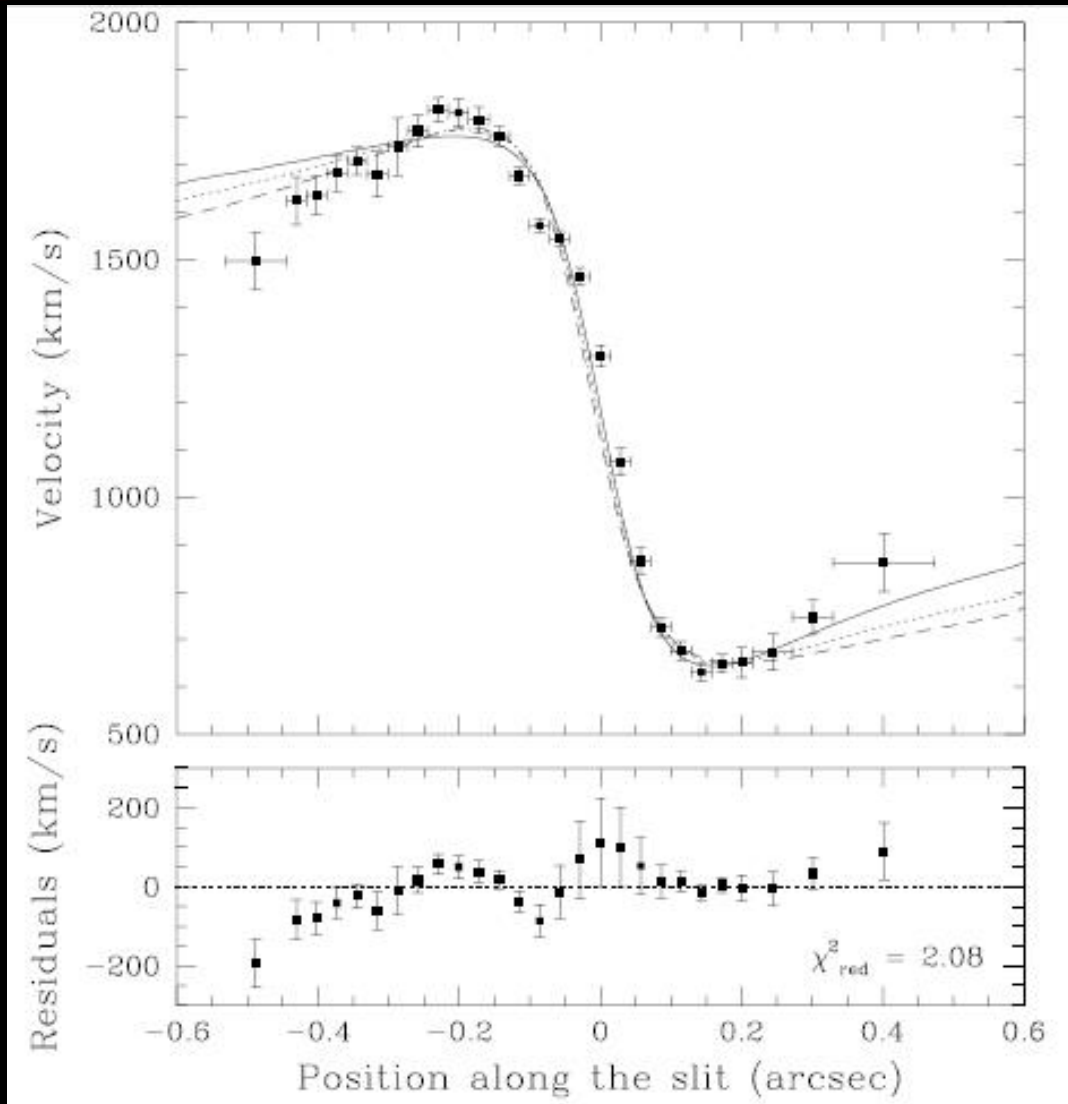




# В ЦЕНТРАХ ГАЛАКТИК....



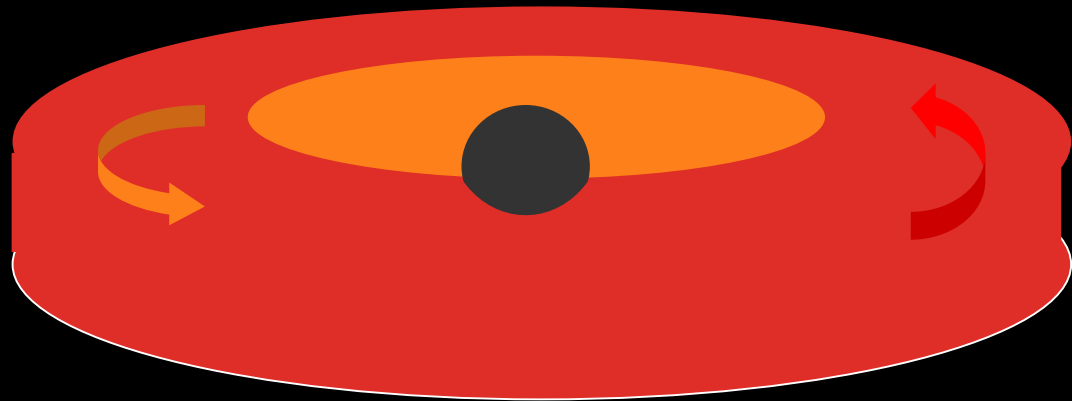
# КИНЕМАТИКА ГАЗА



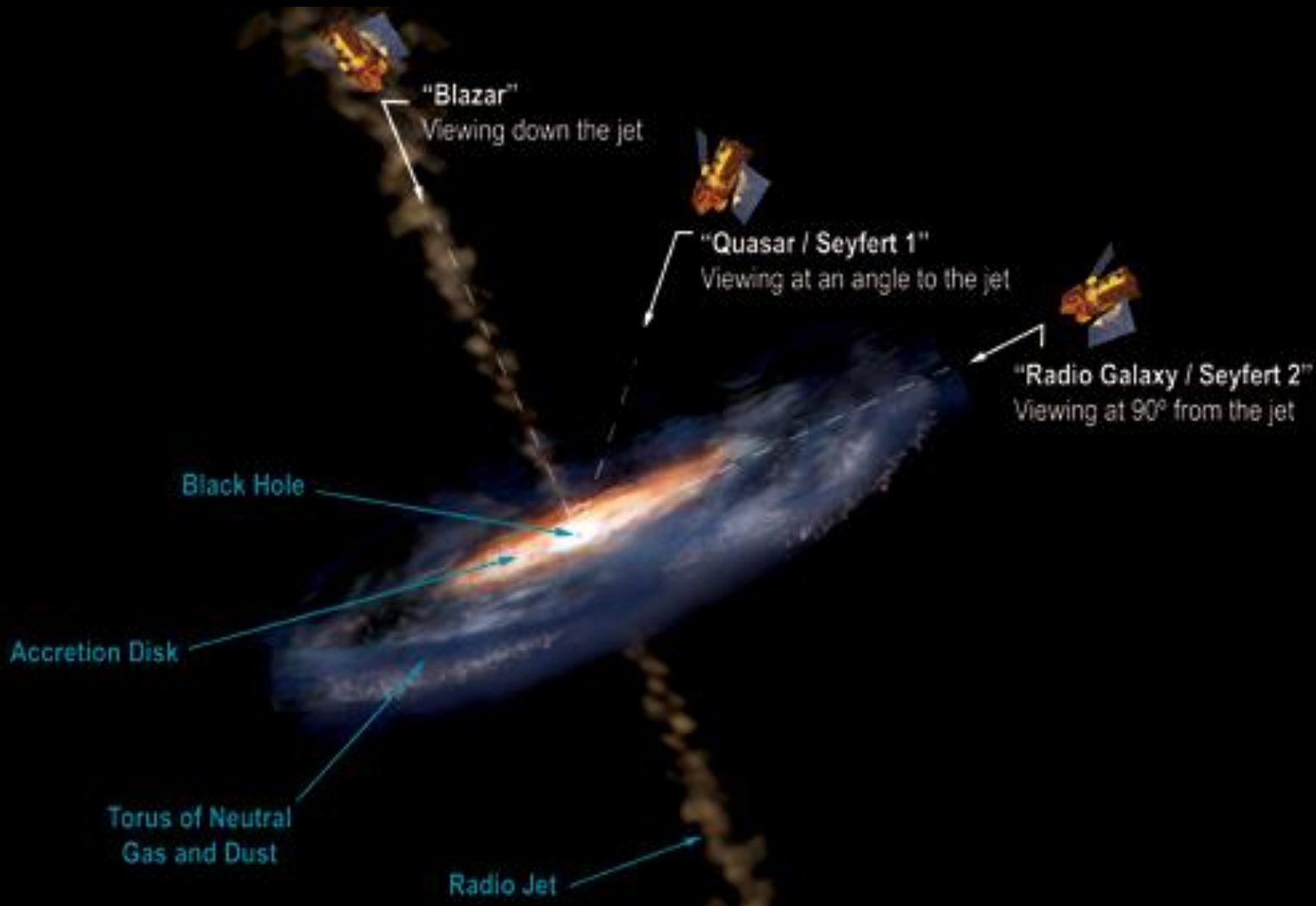
Для M87 скорости газа измерены  
внутри одной миллисекунды дуги  
(5pc).

Масса  $3 \cdot 10^9 M_{\odot}$ .

Одна из самых тяжелых черных дыр



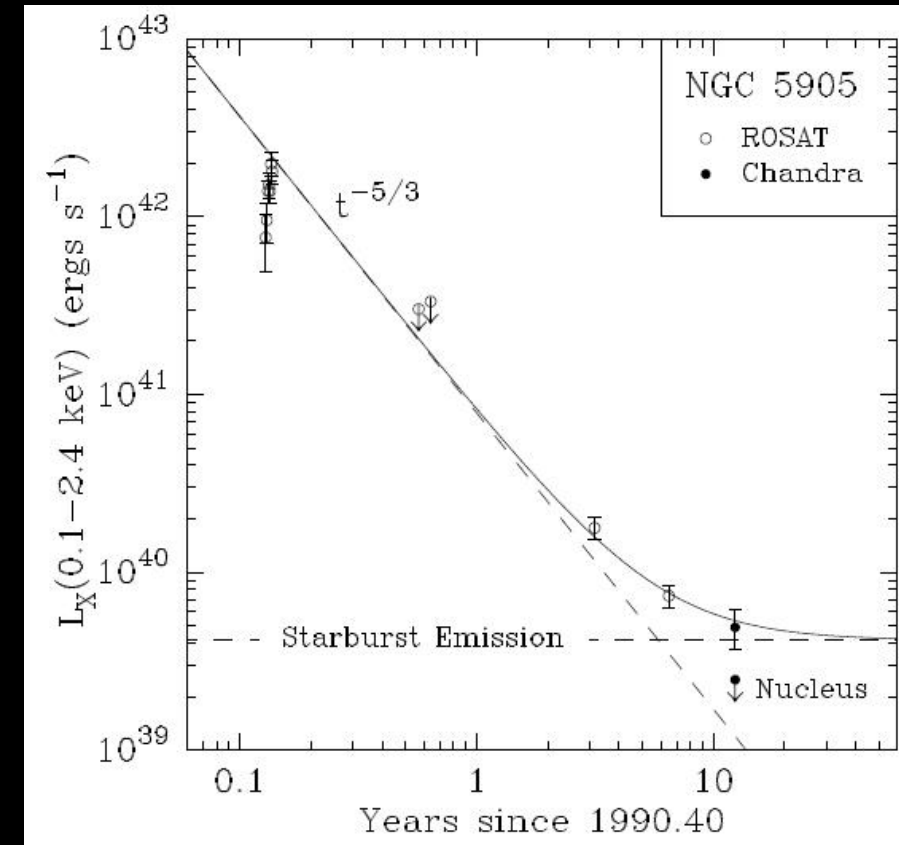
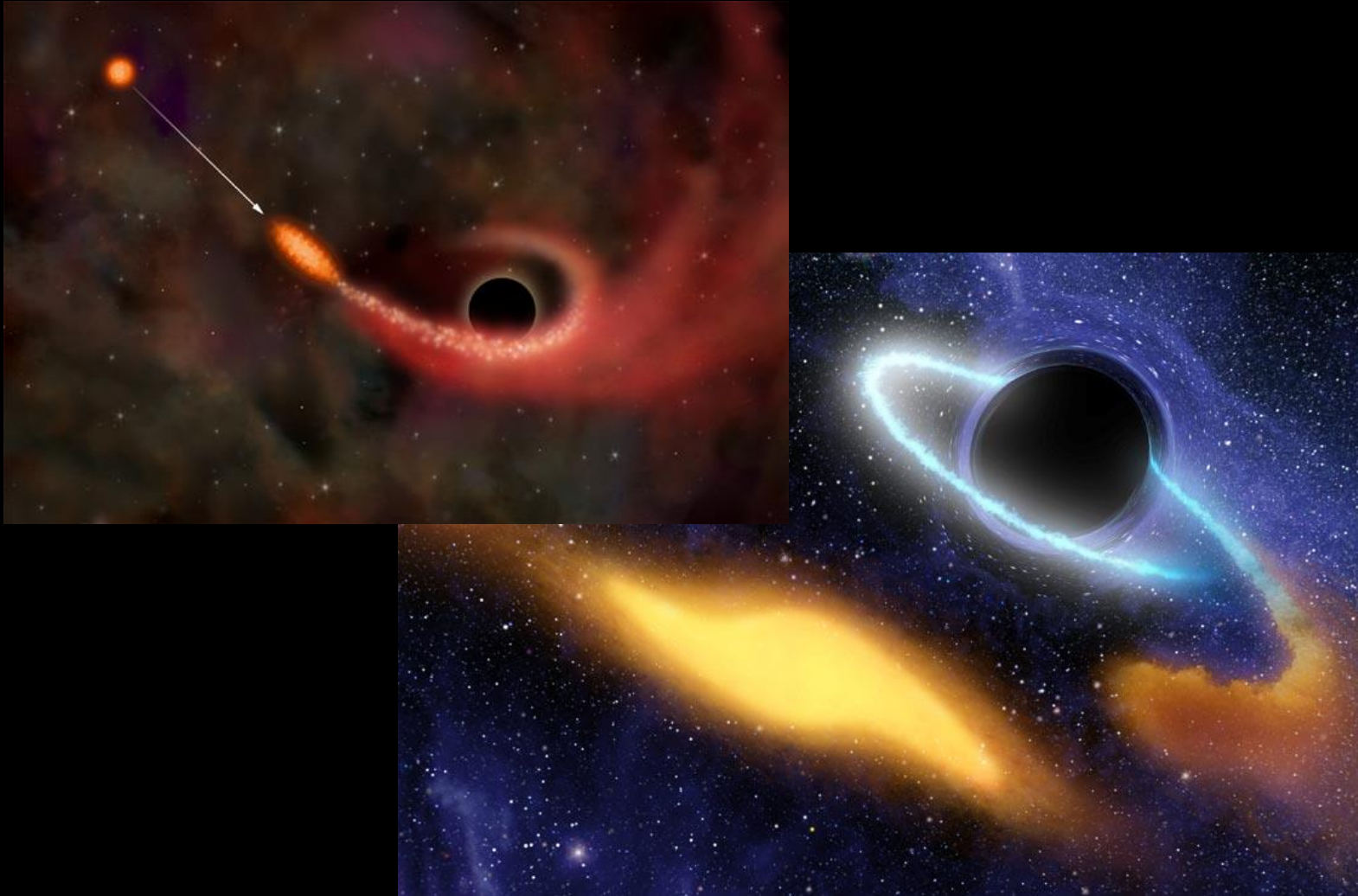
# ЕДИНАЯ МОДЕЛЬ



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

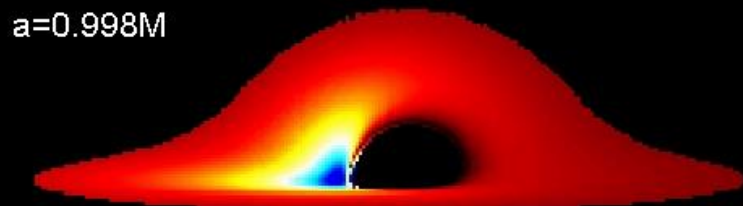
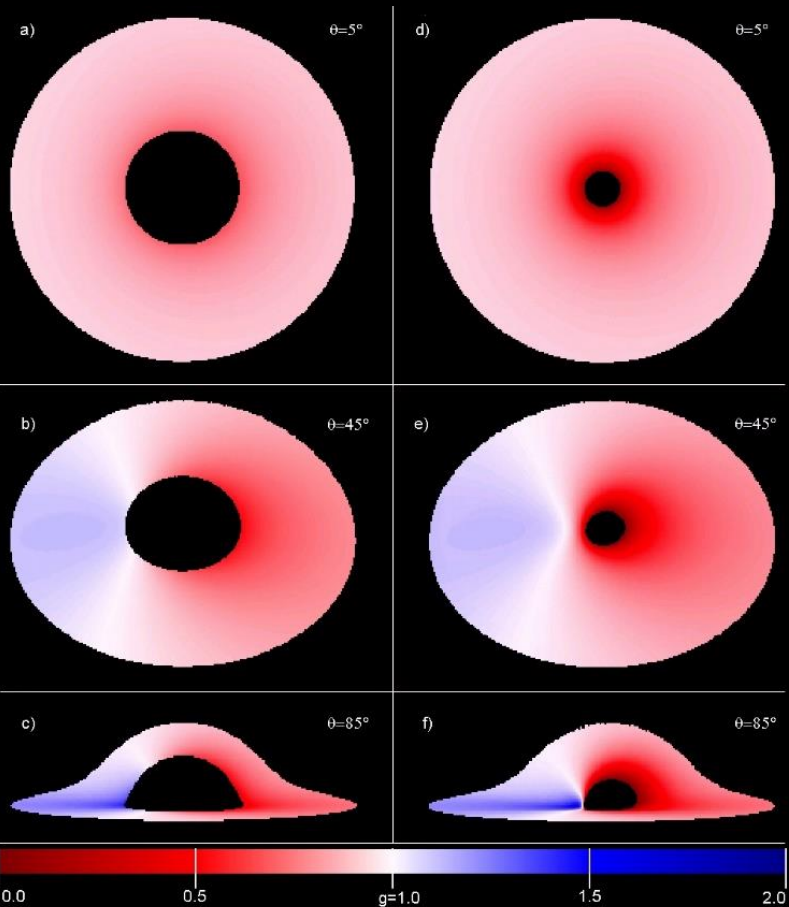


# ПРИЛИВНОЕ РАЗРУШЕНИЕ ЗВЕЗД СВЕРХМАССИВНЫМИ ЧЕРНЫМИ ДЫРАМИ

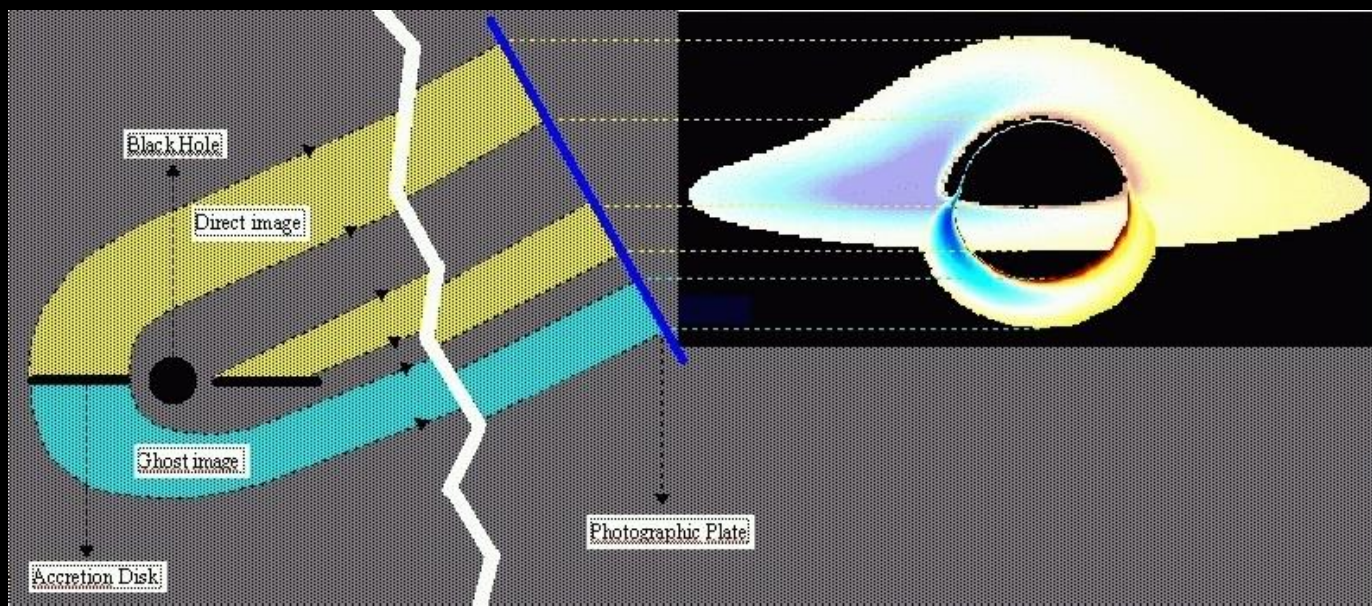




# ДИСКИ ВОКРУГ ЧЕРНЫХ ДЫР: ВЗГЛЯД СО СТОРОНЫ



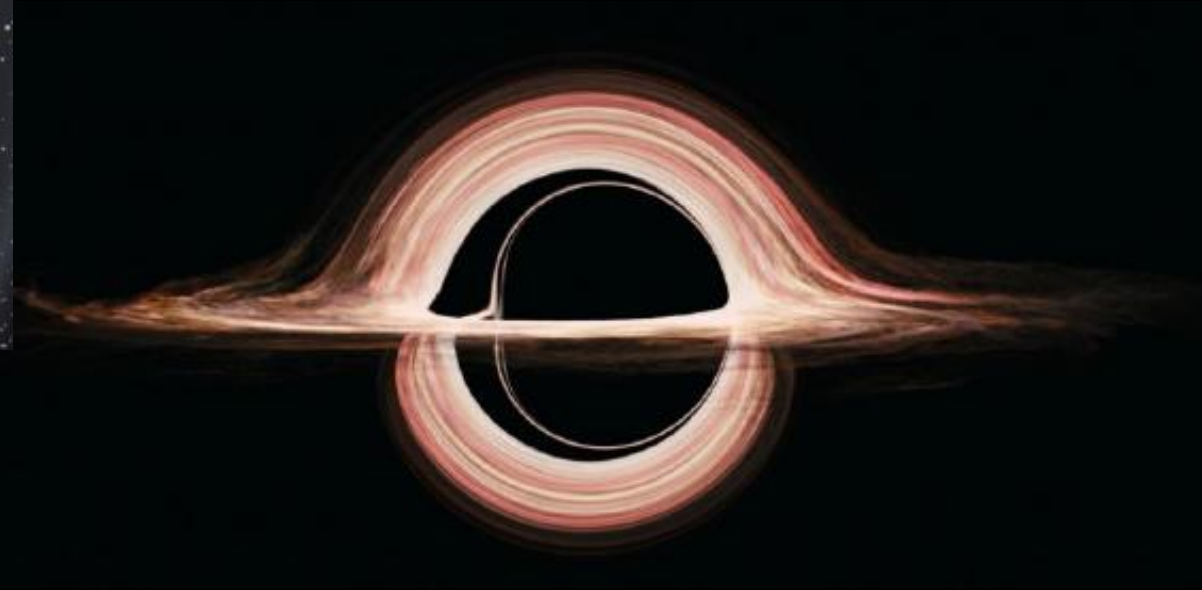
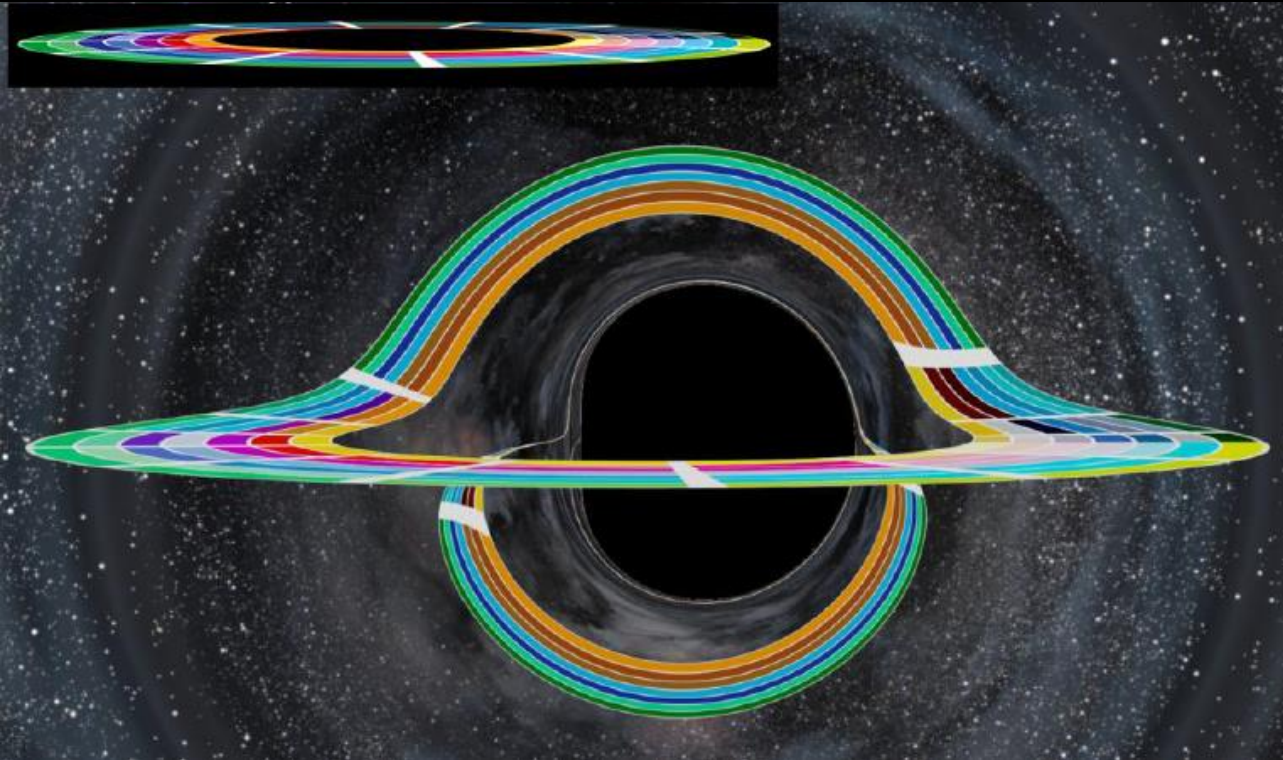
Температура диска



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

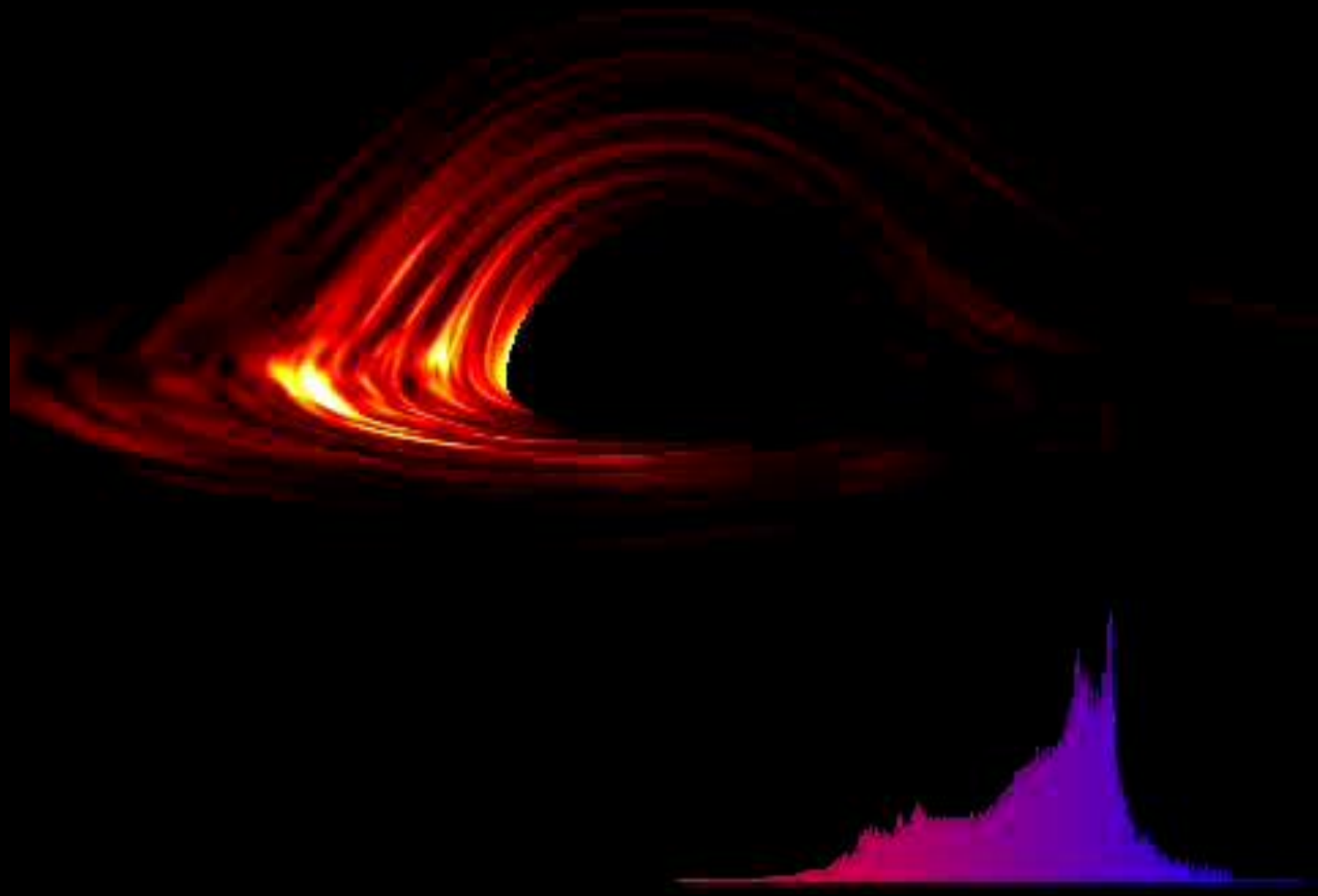


# ДИСКИ ИЗ «ИНТЕРСТЕЛЛАРА»



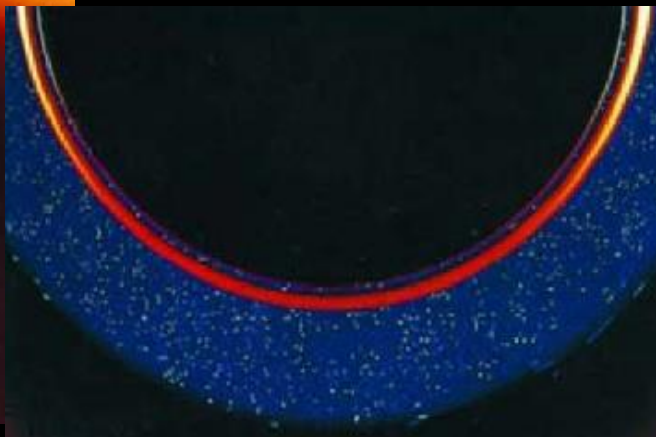
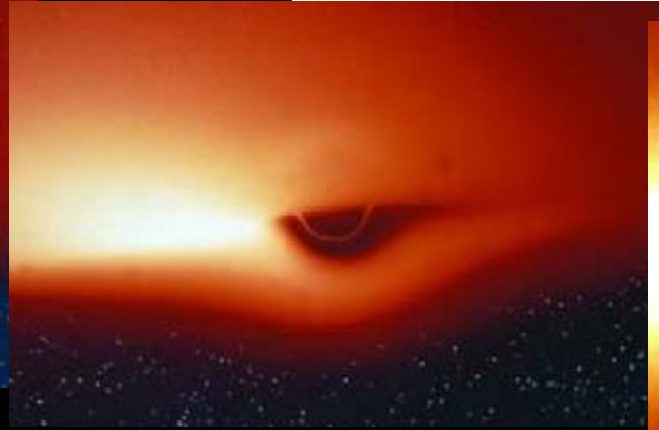
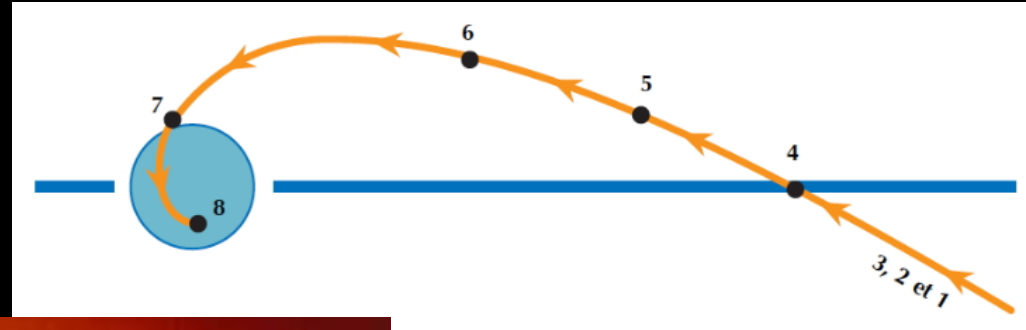
1502.03808

# ПРАВИЛЬНЫЙ ДИСК И ЛИНИЯ ЖЕЛЕЗА





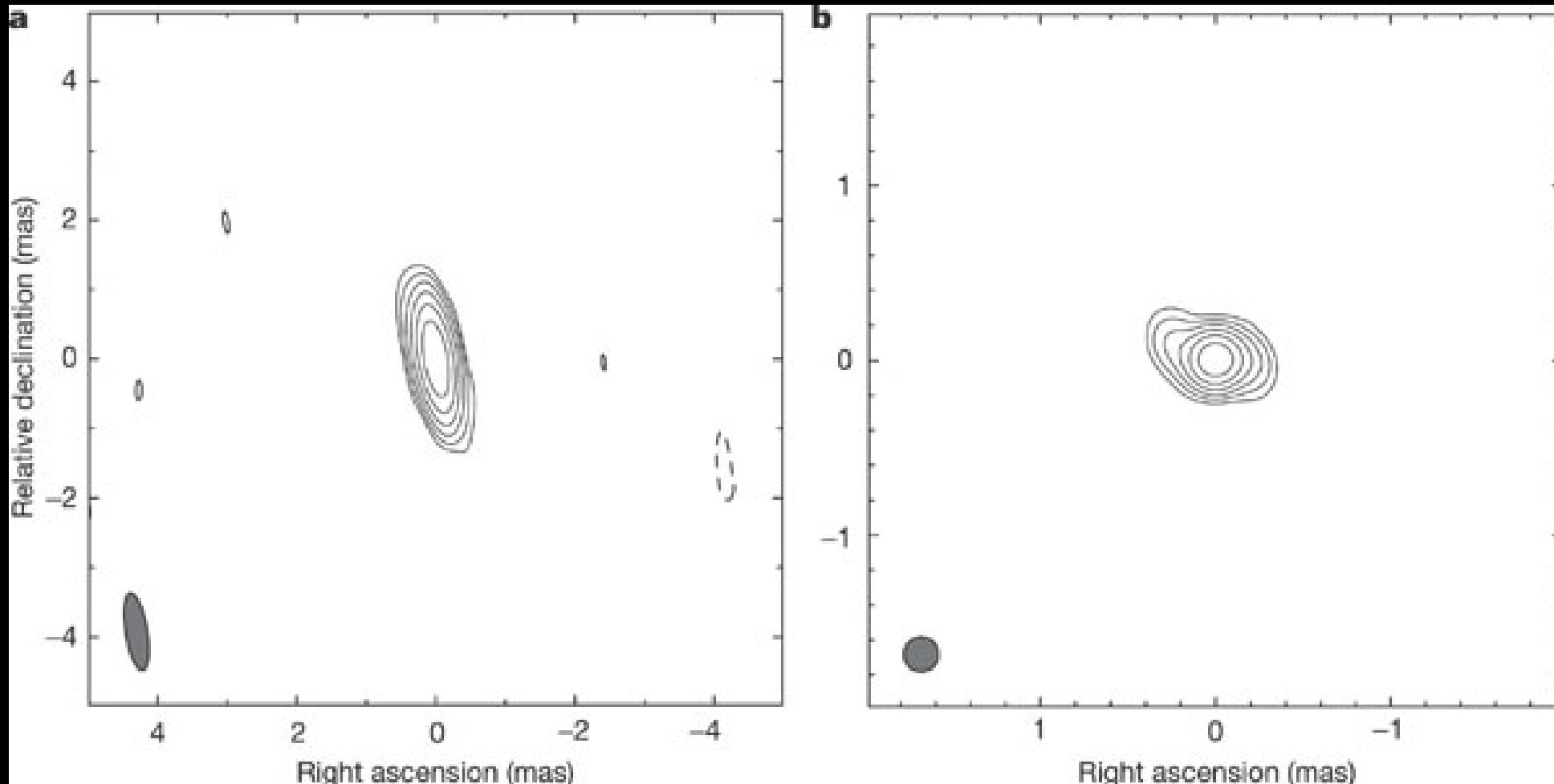
# ПАДЕНИЕ В ЧЕРНУЮ ДЫРУ



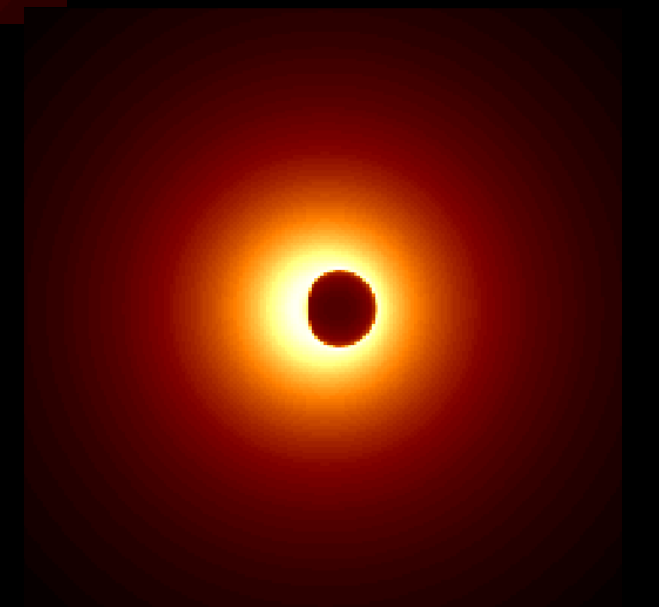
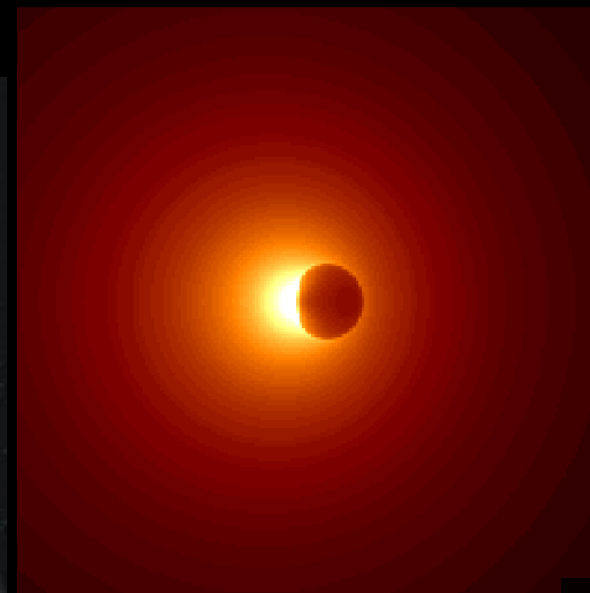
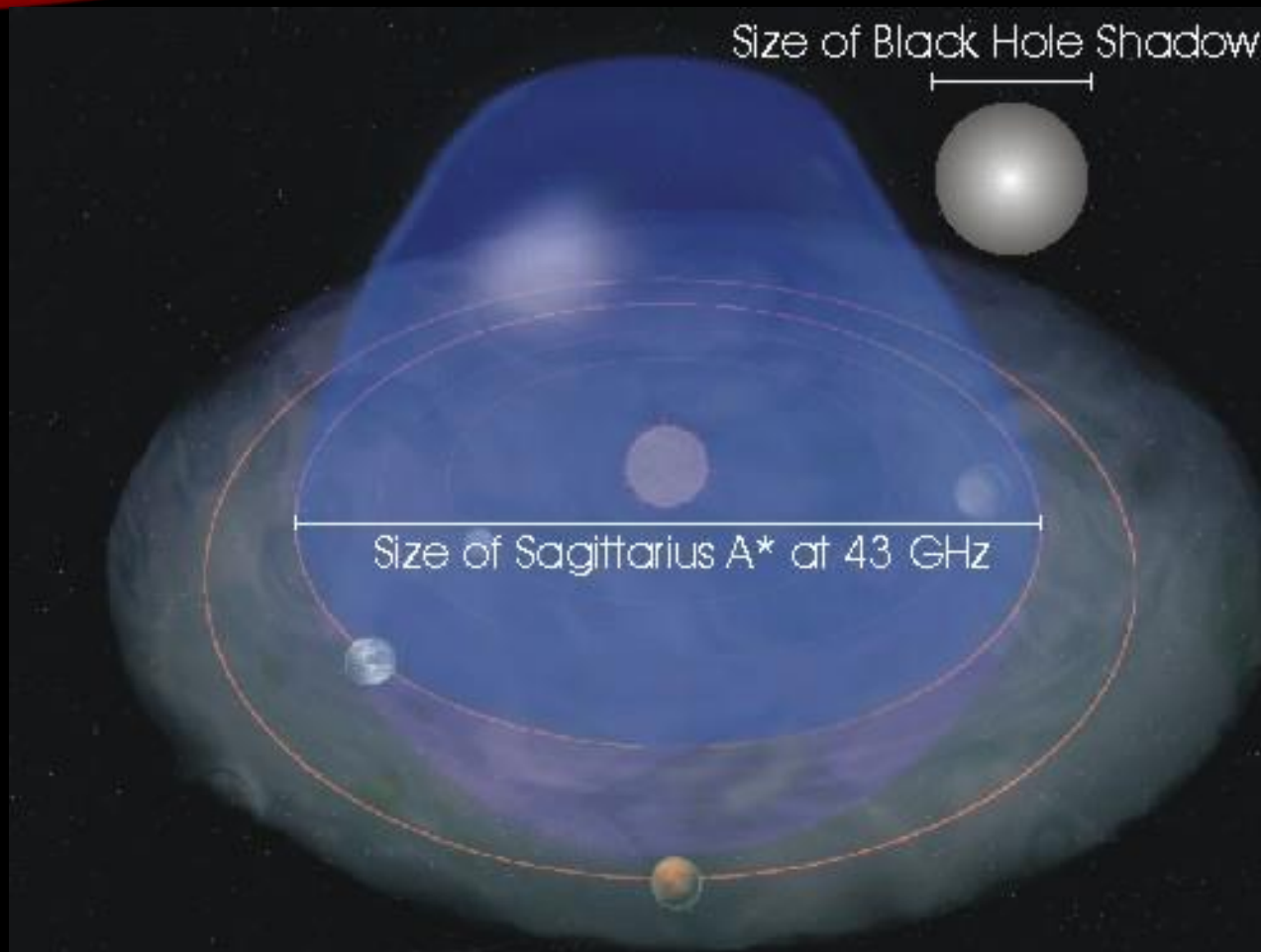


# ОГРАНИЧЕНИЯ НА РАЗМЕР SGR A\*

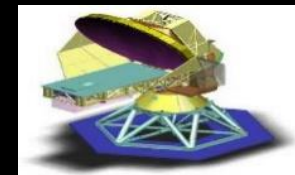
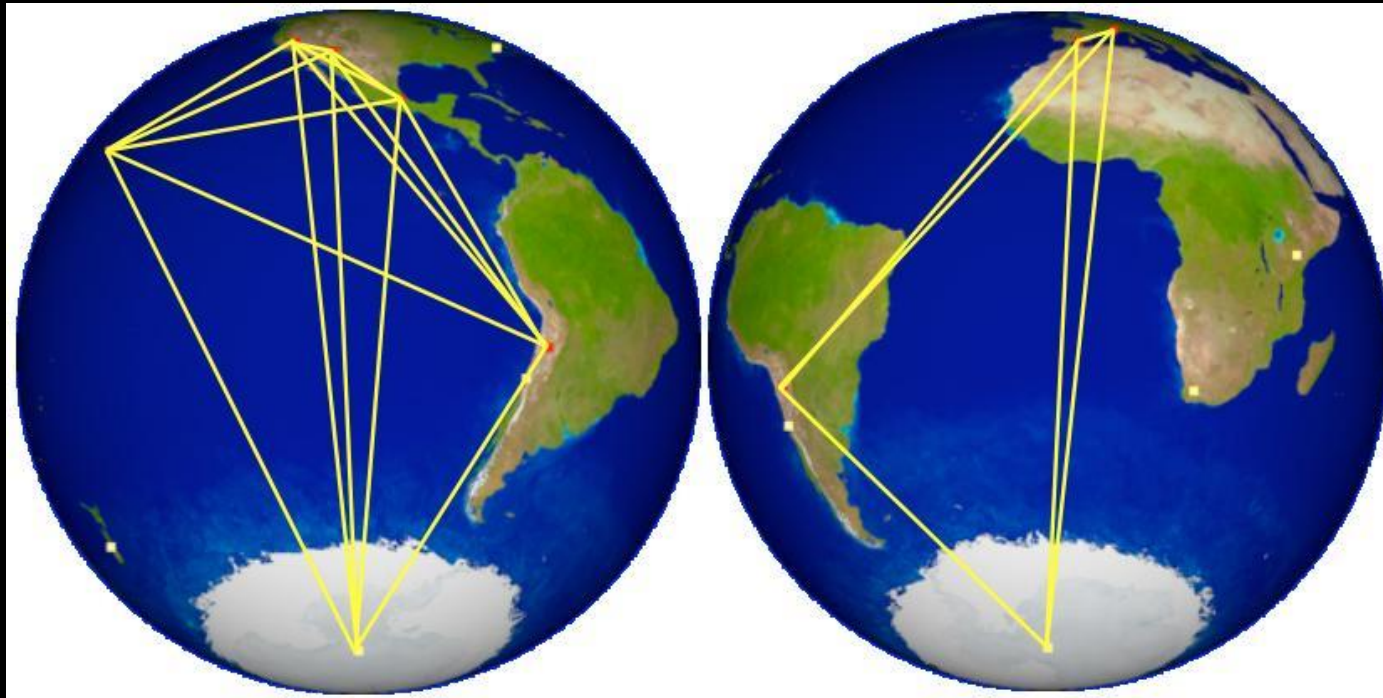
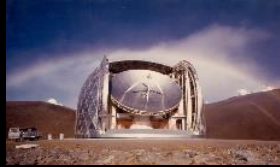
Используя VLBI, удалось получить  
очень жесткое ограничение на размер источника Sgr A\*: 1 а.е.



# «ТЕНЬ» ЧЕРНОЙ ДЫРЫ



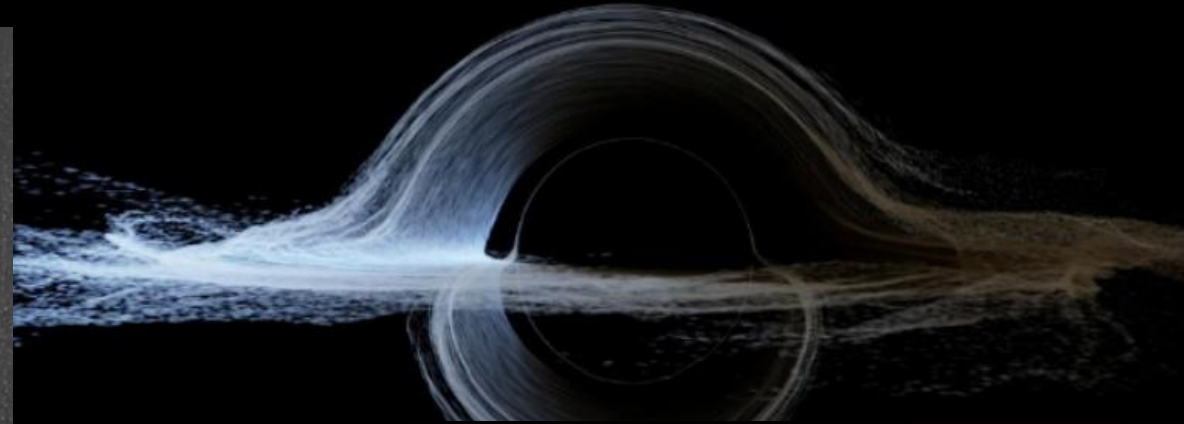
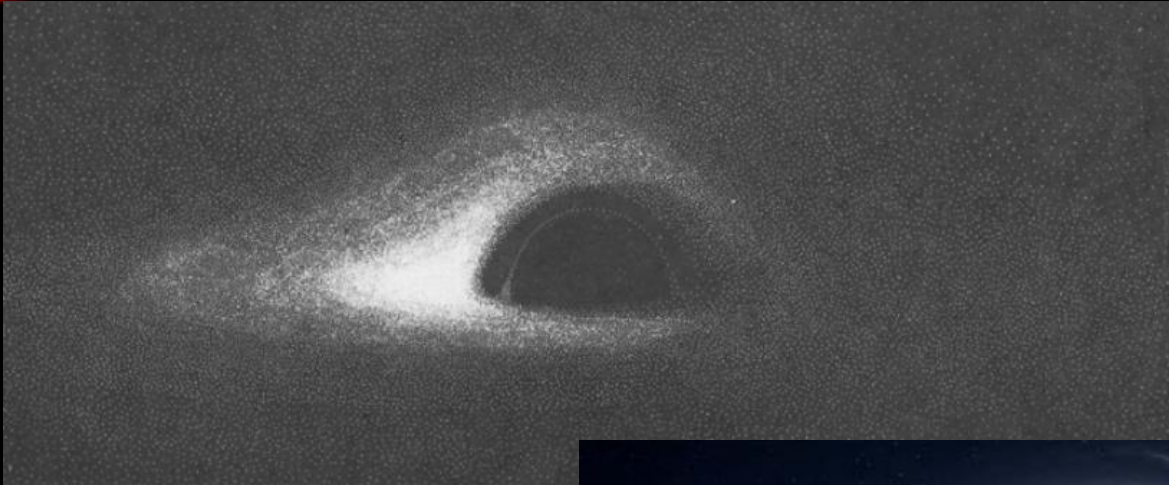
# EVENT HORIZON TELESCOPE



<http://eventhorizontelescope.org>

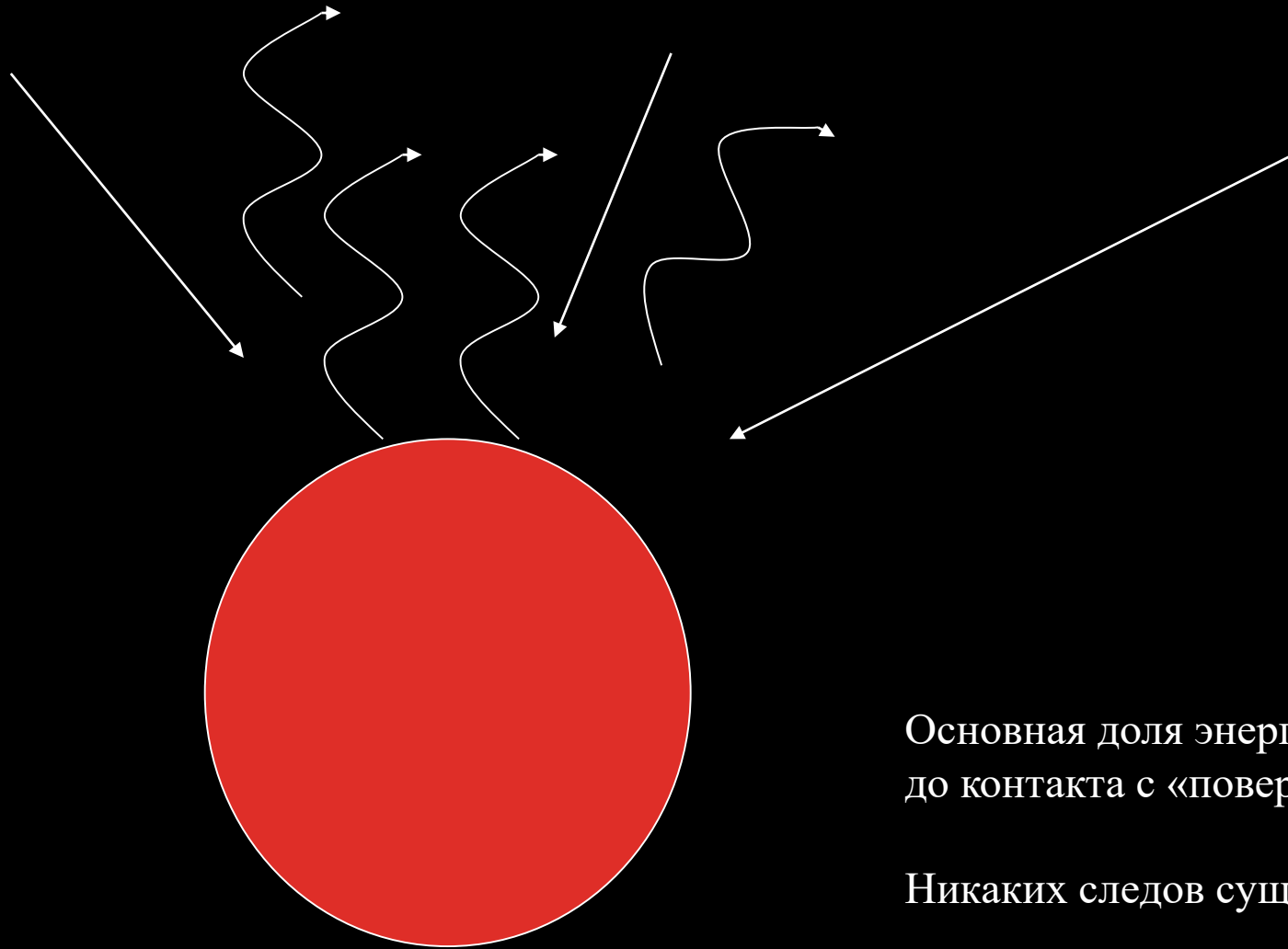


# ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ЧЕРНЫХ ДЫР





# В SGR A\* НЕТ ПОВЕРХНОСТИ?



Наблюдается только излучение от потока, но не от поверхности.

Наиболее легко это объясняется наличием горизонта.

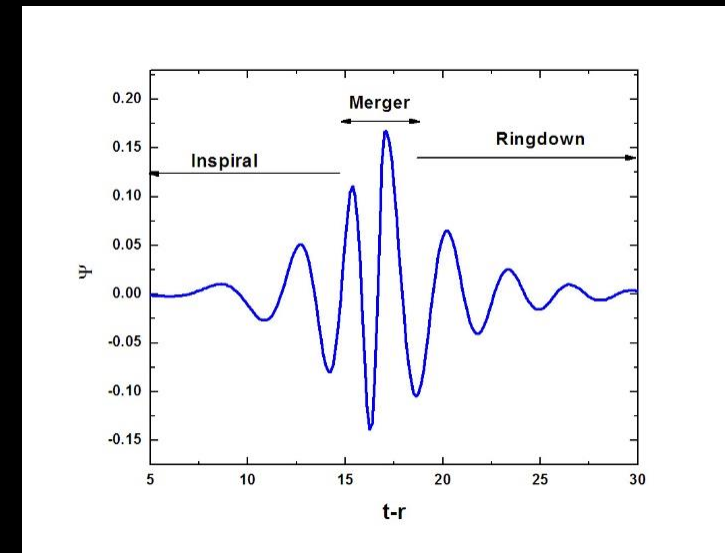
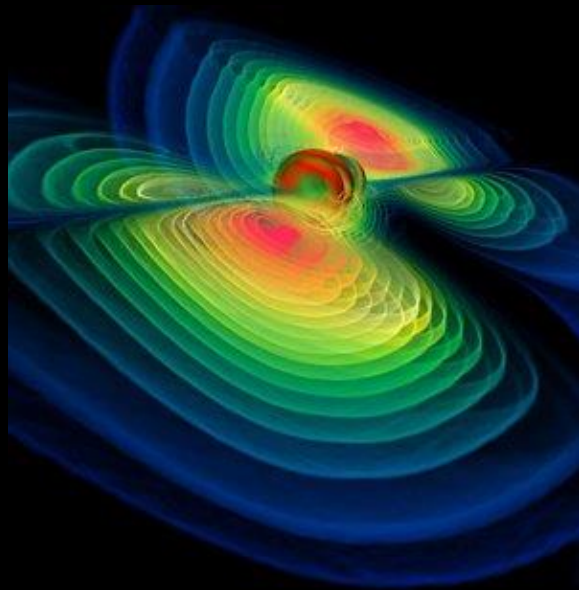
Основная доля энергии выделяется в потоке до контакта с «поверхностью».

Никаких следов существования поверхности не наблюдается!

# КАК УВИДЕТЬ ГОРИЗОНТ?



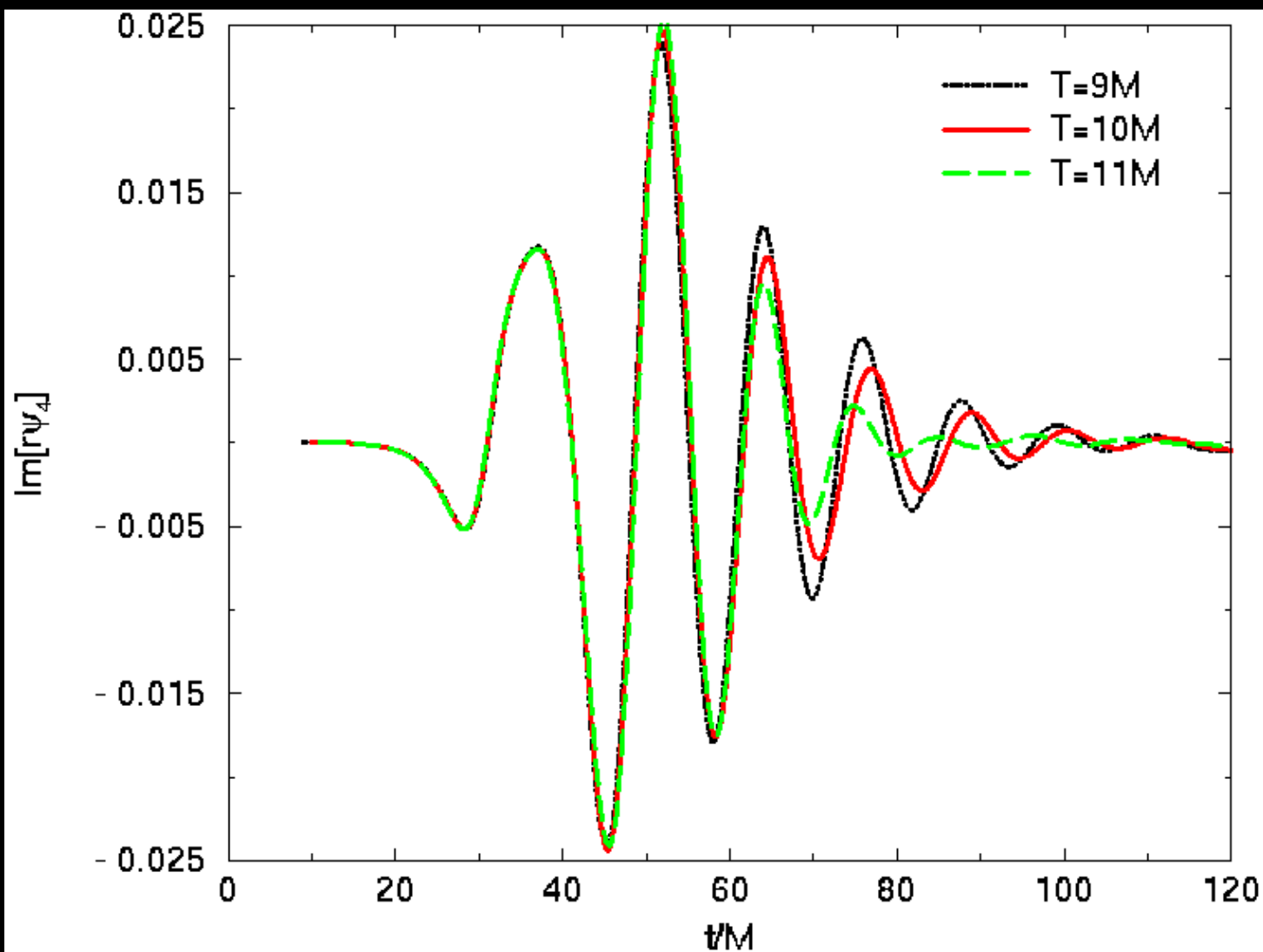
Детектор LIGO



Слияние черных дыр

Первое слияние черных дыр обнаружено на детекторе LIGO в 2015 г. В ближайшие несколько лет (2015-2017) LIGO и VIRGO смогут увидеть слияния многих двойных черных дыр. Можно будет узнать, как взаимодействуют горизонты.

# ПОСЛЕДНИЕ ОРБИТЫ ЧЕРНЫХ ДЫР



Важно уметь  
рассчитывать  
форму сигнала.

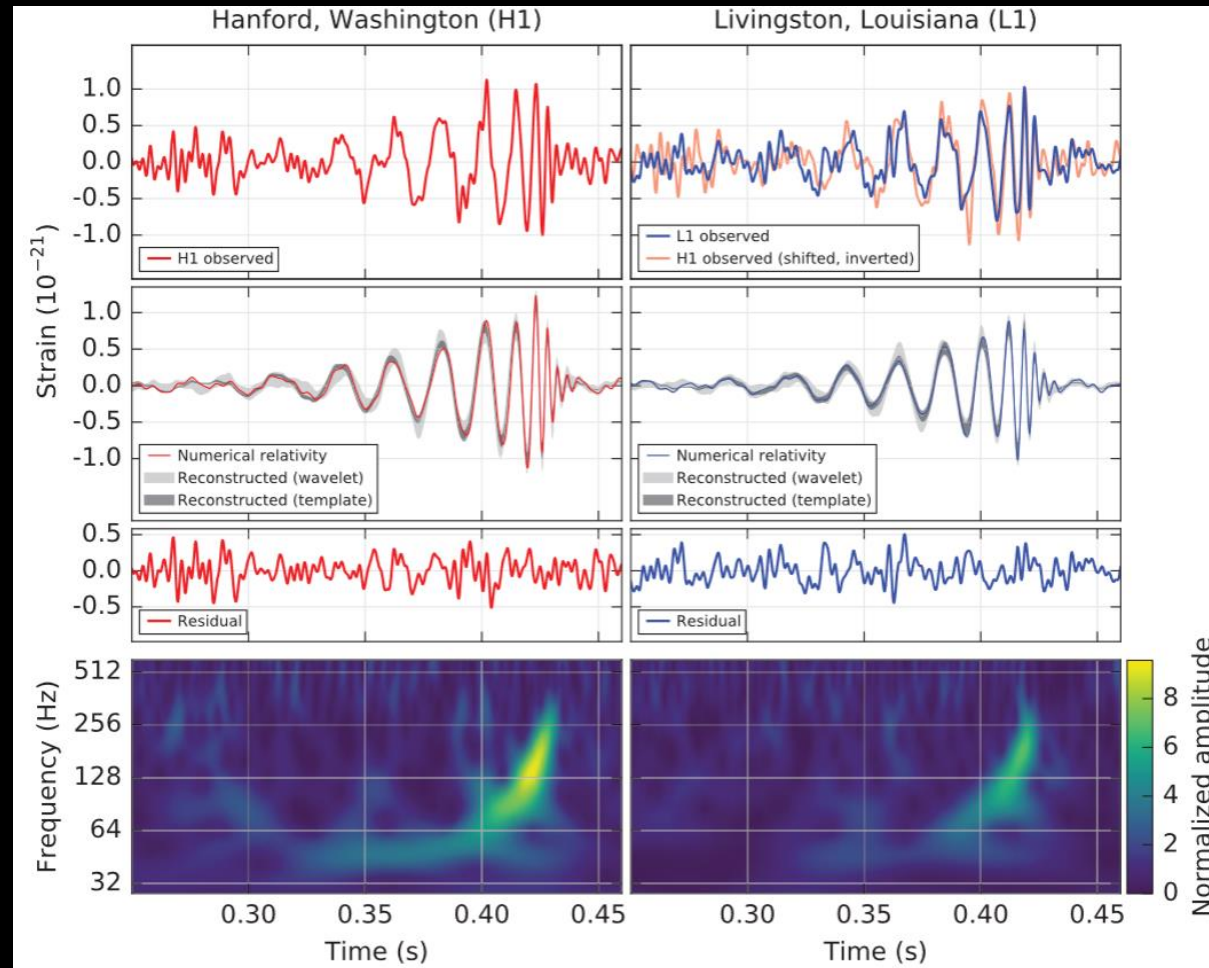
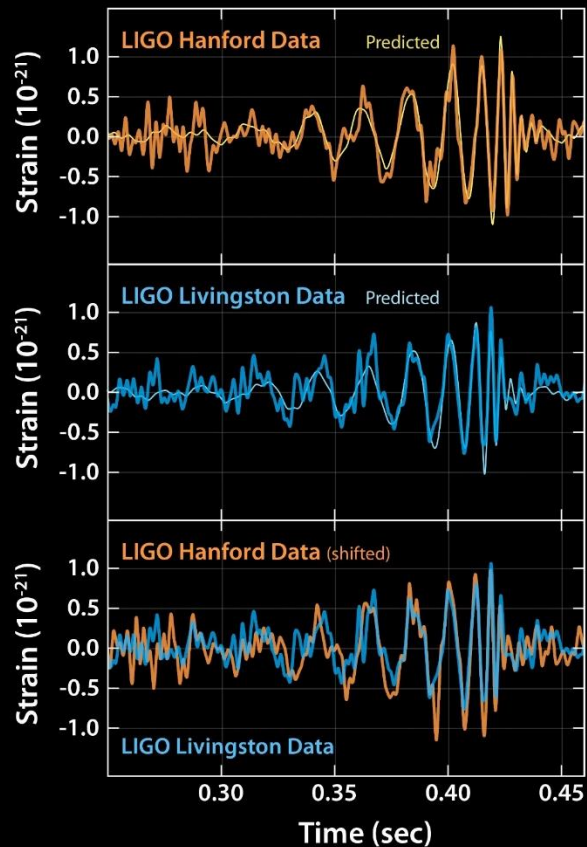
Иначе очень трудно  
выделить слияния на  
фоне шумов.

Слияния двух черных  
дыр дают сигнал,  
не похожий на  
слияние двух  
нейтронных звезд.



# GW150914

## 13-50 ПО МОСКОВСКОМУ ВРЕМЕНИ



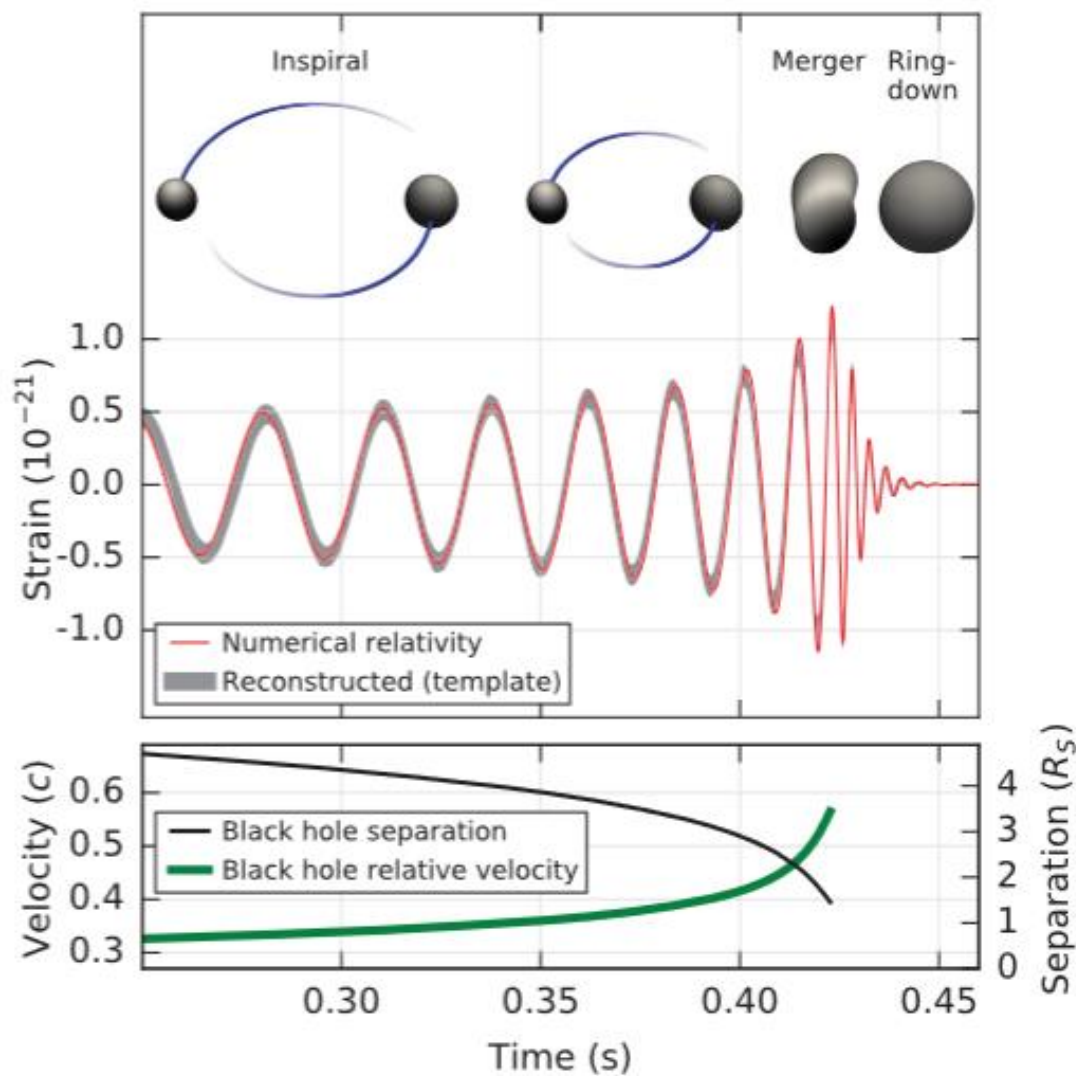
<http://www.ligo.org>

Официальное объявление 11 февраля 2016 года.

За 16 дней совместных наблюдений двух детекторов

надежно обнаружено одно событие – слияние двух черных дыр в  $>400$  Мпк от нас.

# СЛИЯНИЕ ДВУХ ЧЕРНЫХ ДЫР



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 распознавания 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

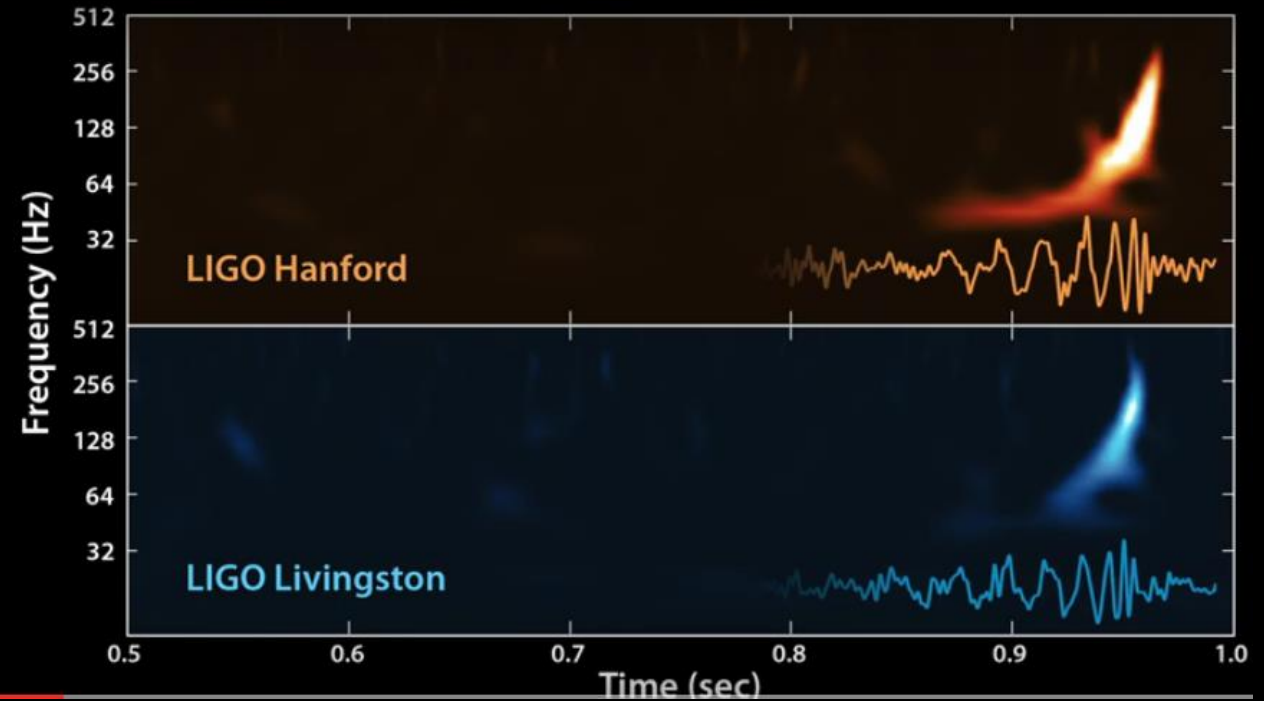
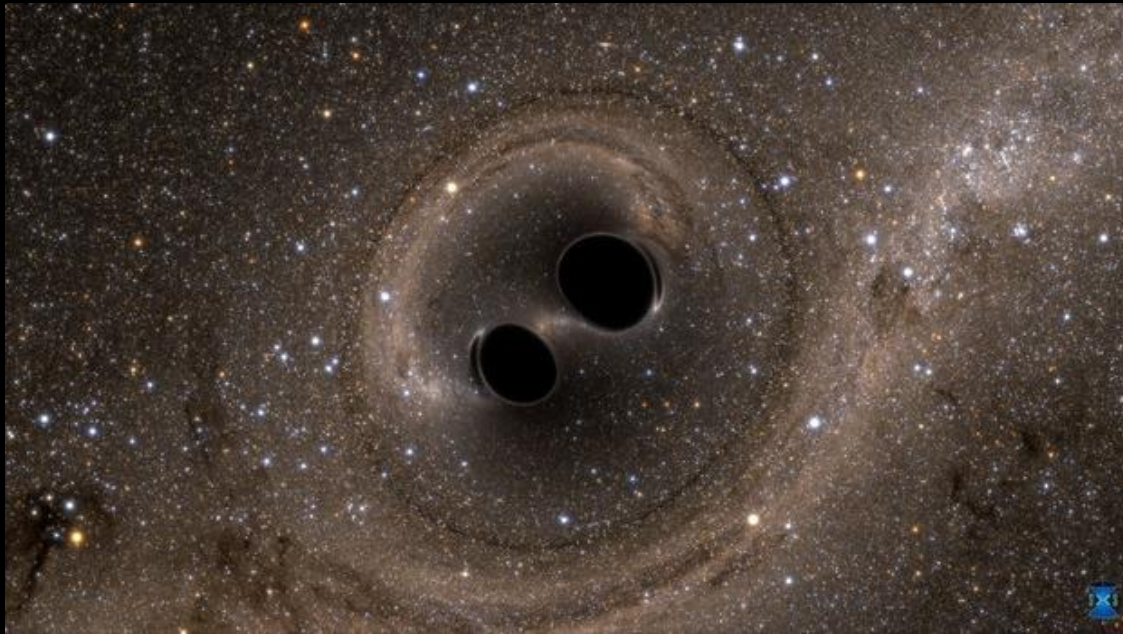
Достоверность детектирования >5.1 сигма.

Primary black hole mass	$36_{-4}^{+5} M_{\odot}$
Secondary black hole mass	$29_{-4}^{+4} M_{\odot}$
Final black hole mass	$62_{-4}^{+4} M_{\odot}$
Final black hole spin	$0.67_{-0.07}^{+0.05}$
Luminosity distance	$410_{-180}^{+160}$ Mpc
Source redshift $z$	$0.09_{-0.04}^{+0.03}$



# СВЕТИМОСТЬ И ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЕ

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



# МОЩНОСТЬ

100 000 000 000 000 000 000 000 светимостей Солнца.

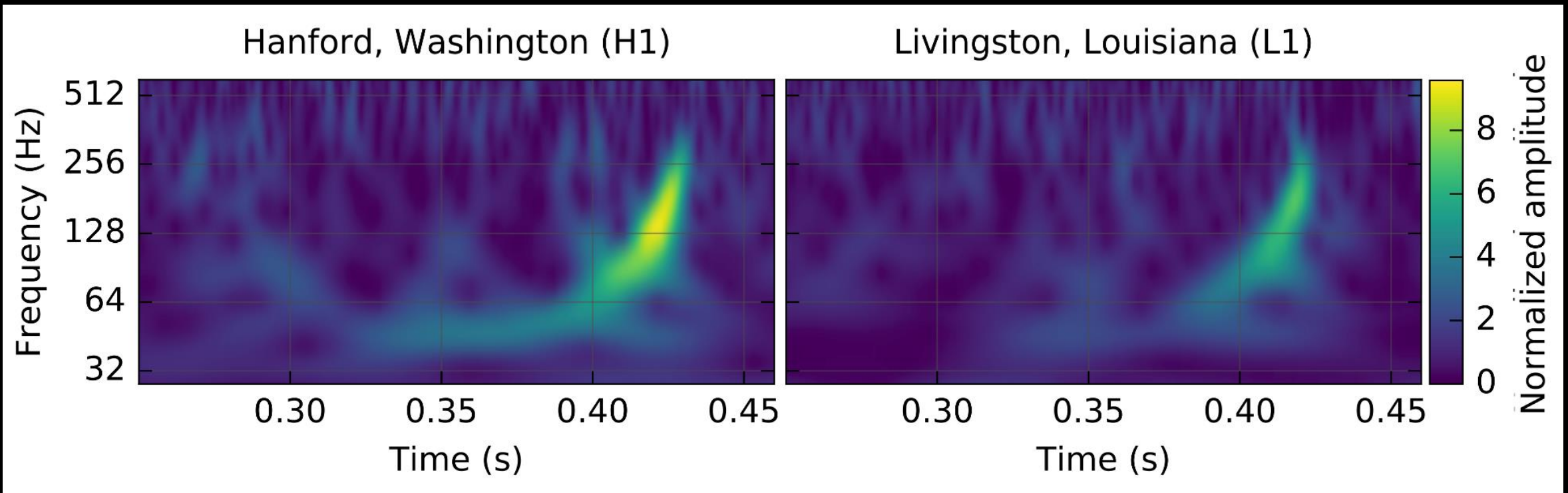
Число волос на голове 100 000

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

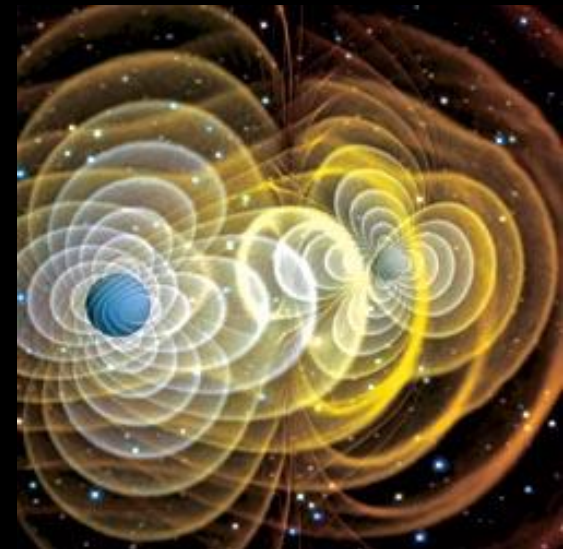
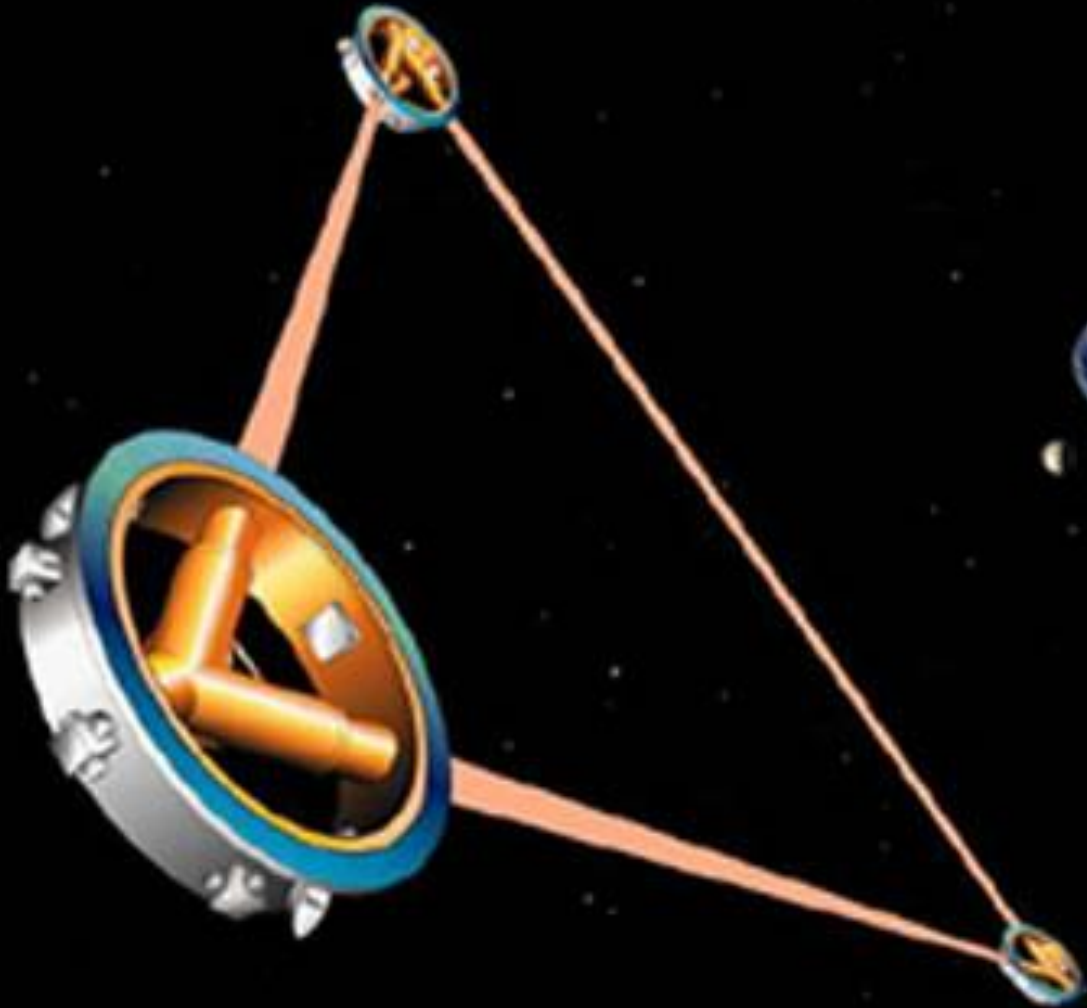
Число звезд во вселенной 100 000 000 000 000 000 000 000



# LISA

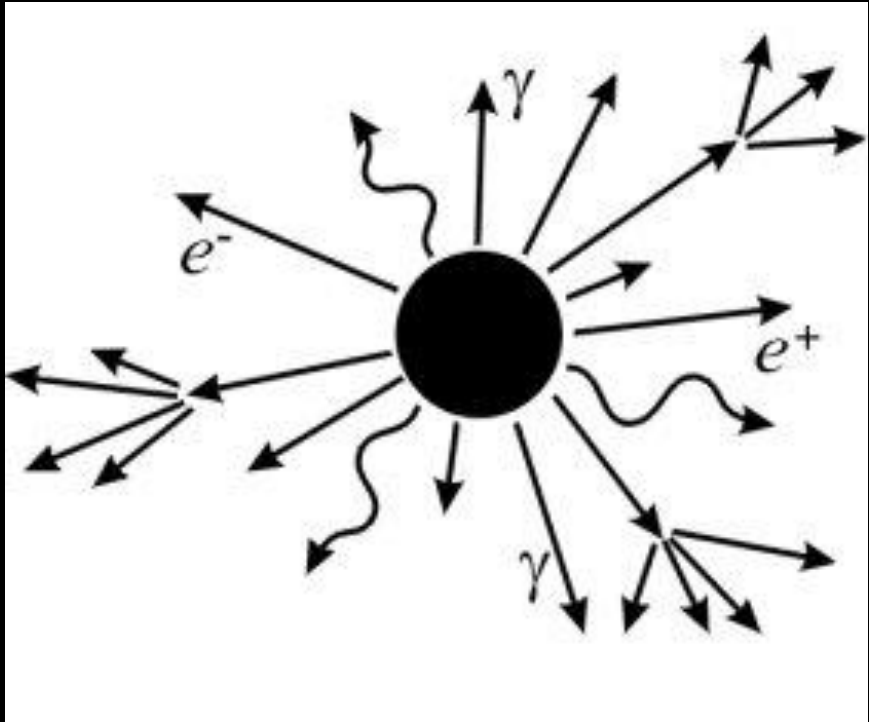
Проект не был одобрен  
в полном виде.  
Но одобрен сокращенный.  
Прототипы.

В отличие от LIGO и VIRGO,  
который ищут сигналы от слияний  
компактных объектов звездных масс,  
LISA будет искать слияния  
сверхмассивных черных дыр.





# ИЗЛУЧЕНИЕ ХОКИНГА

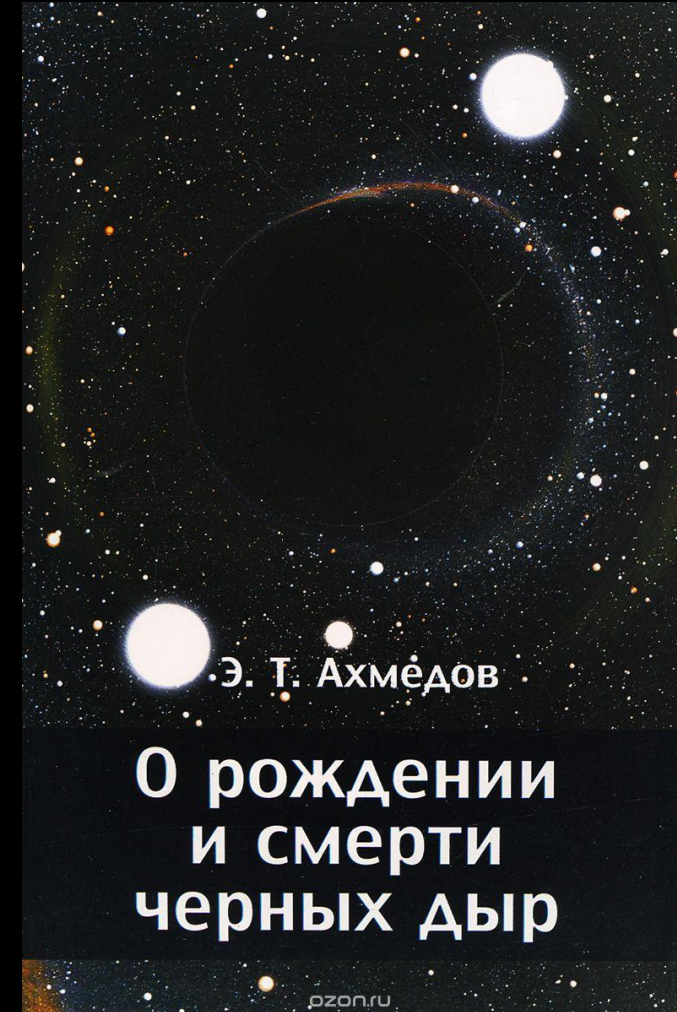


Черные дыры «испаряются».

В зависимости от массы дыры рождаются самые разные частицы, но после серии превращений значительная доля энергии уходит в виде гамма-излучения.

Испарение является существенным процессом лишь для черных дыр малой массы. Идут поиски «следов» первичных черных дыр: Гамма-фон, гамма-вспышки, избыток некоторых античастиц в космических лучах.

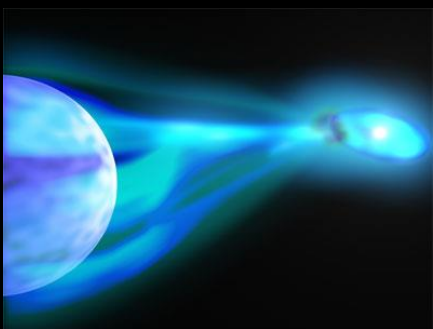
Поиски в радиодиапазоне



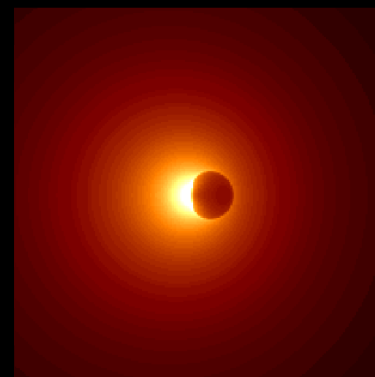
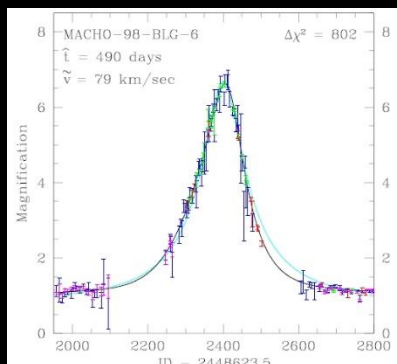
Популярное (но серьезное) изложение есть в брошюре Эмиля Ахмедова.

# ИТАК, КАК ЖЕ ОТКРЫТЬ ЧЕРНУЮ ДЫРУ?

Аккреция

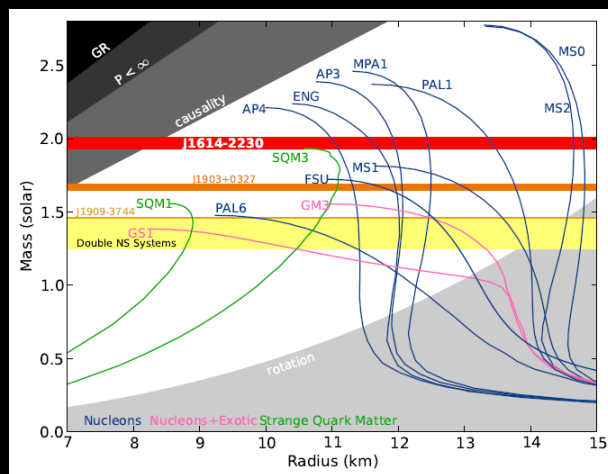


Гравитационное линзирование

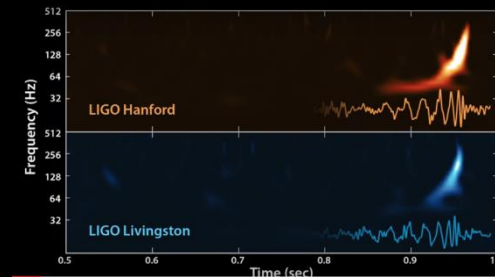


Тень черной дыры

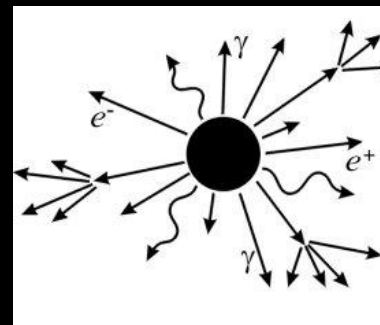
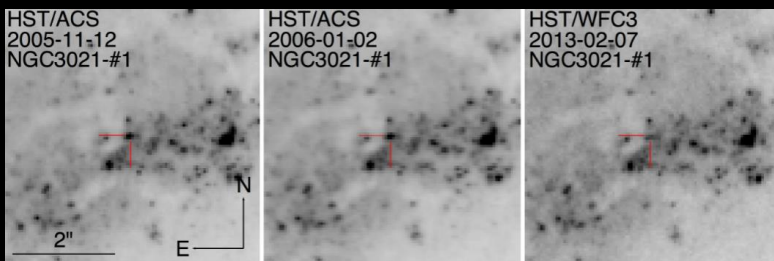
Измерение массы и радиуса



Гравитационные волны



Наблюдения сверхновых и их отсутствия



Испарение черных дыр

XA-XA-XA-XA!!!!