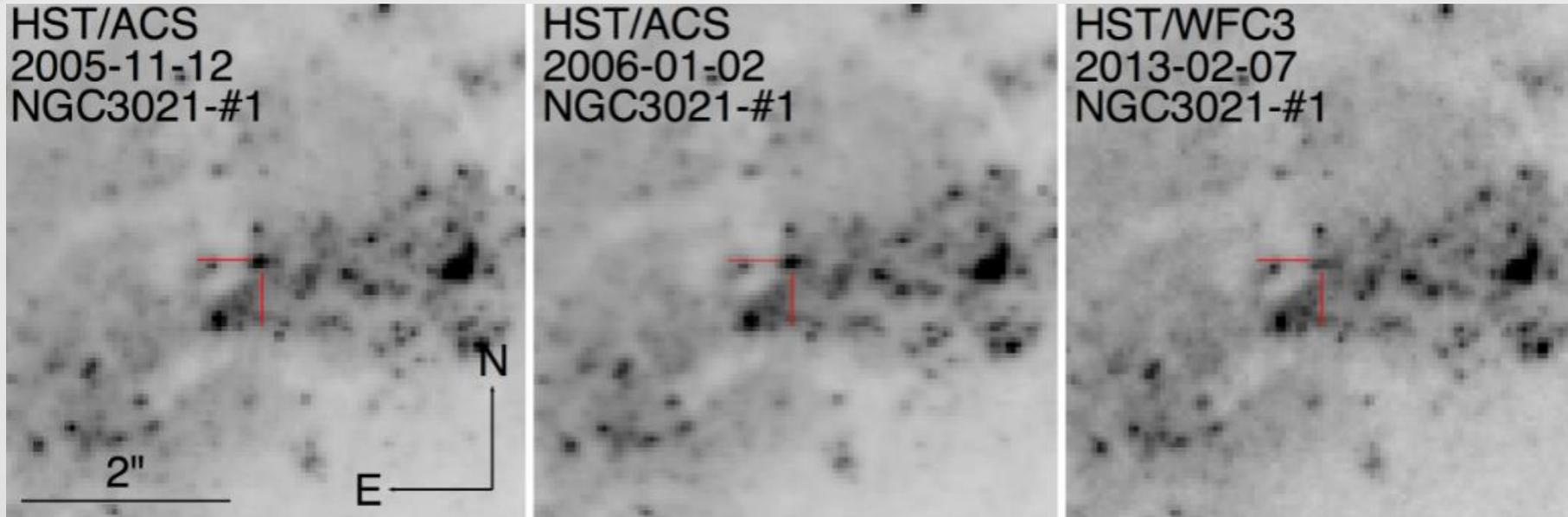




Черные дыры

# Ушедшие без шума



Звезда  
исчезла  
без взрыва  
сверхновой.

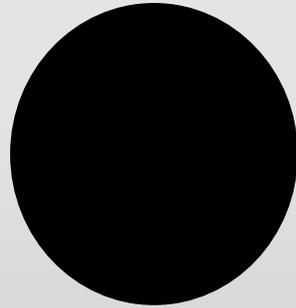
1507.05823

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.

# Что такое черная дыра?

## Для физика

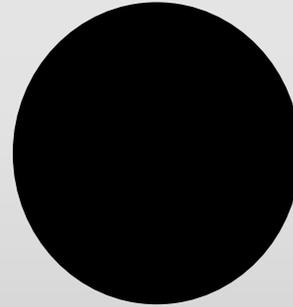
Обладает определенными внутренними свойствами



Объект, обладающий горизонтом.

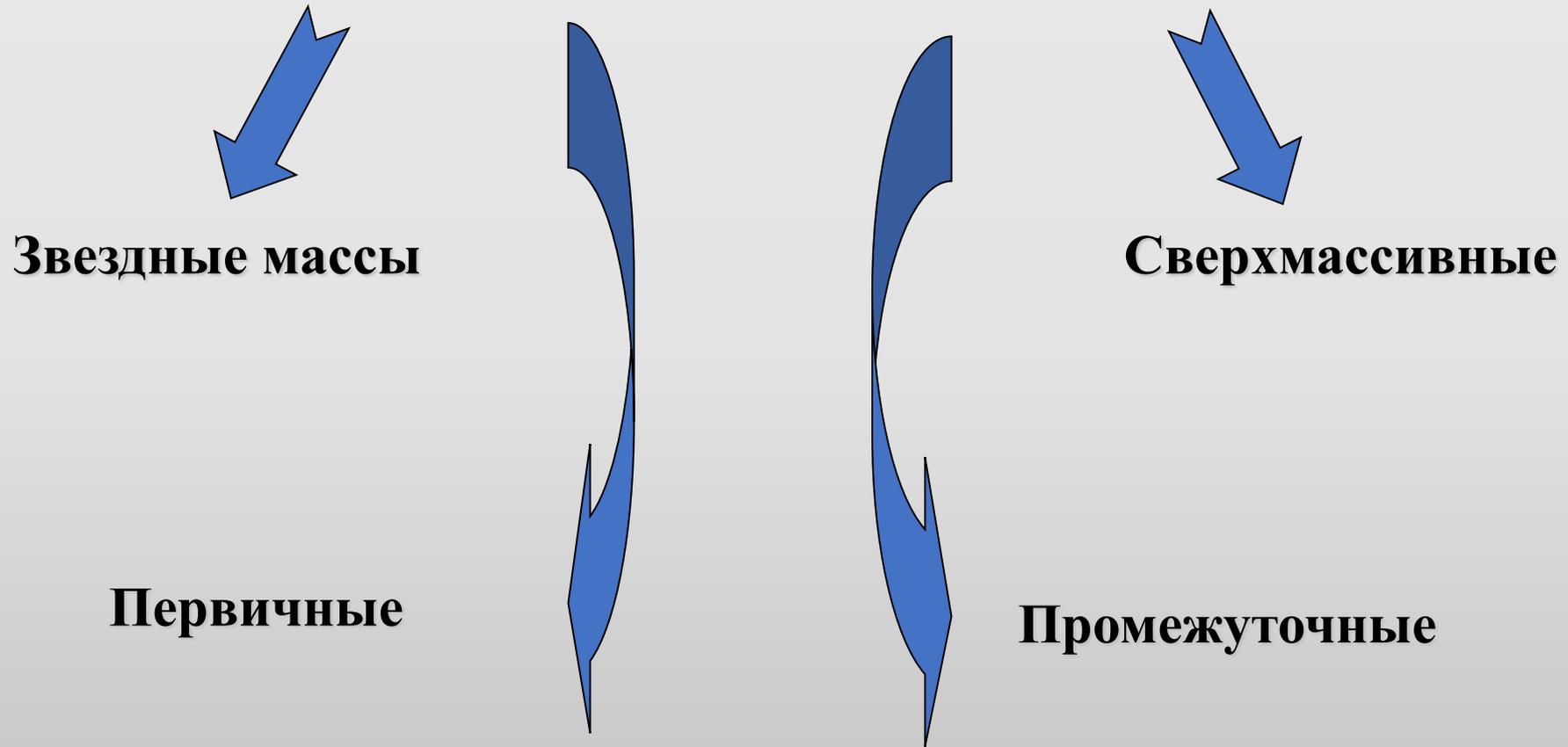
## Для астронома

Обладает определенными внешними проявлениями



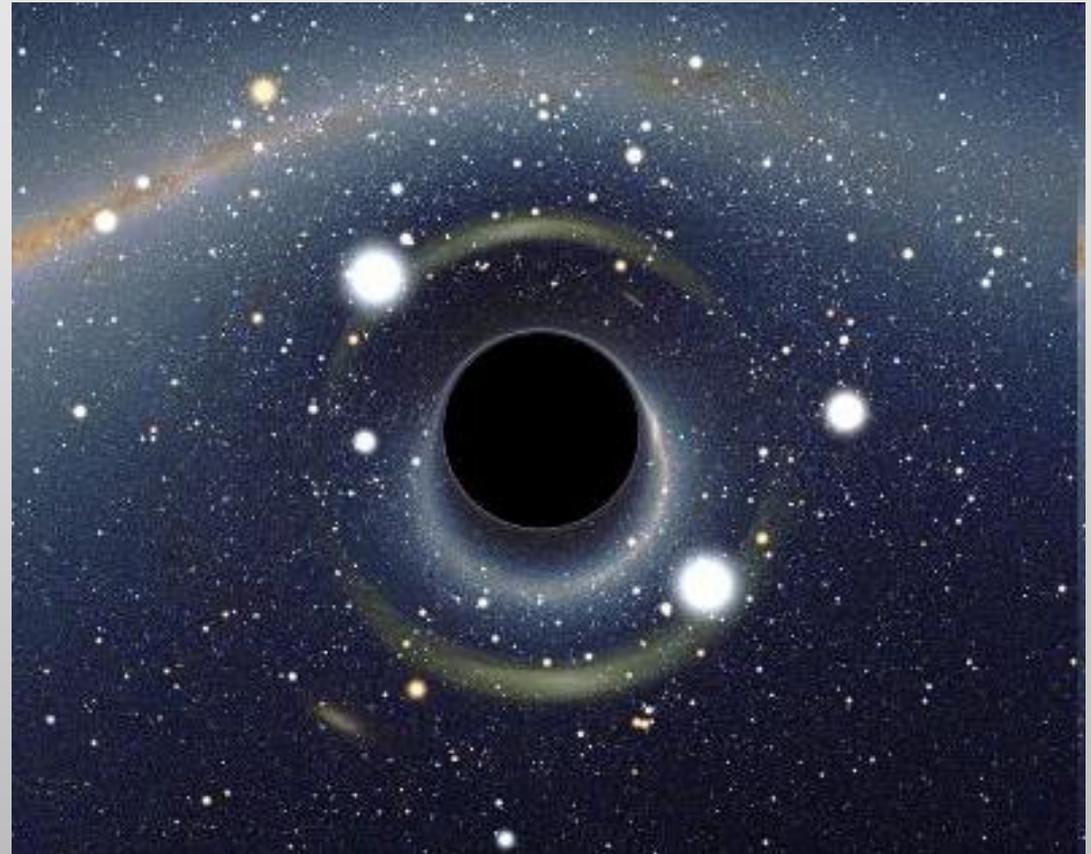
Компактное (размер горизонта) массивное тело, не проявляющее признаков наличия поверхности, и чьи недра недоступны для наблюдений.

# Основные типы черных дыр: два реальных и два гипотетических



# Черные дыры в двойных системах

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

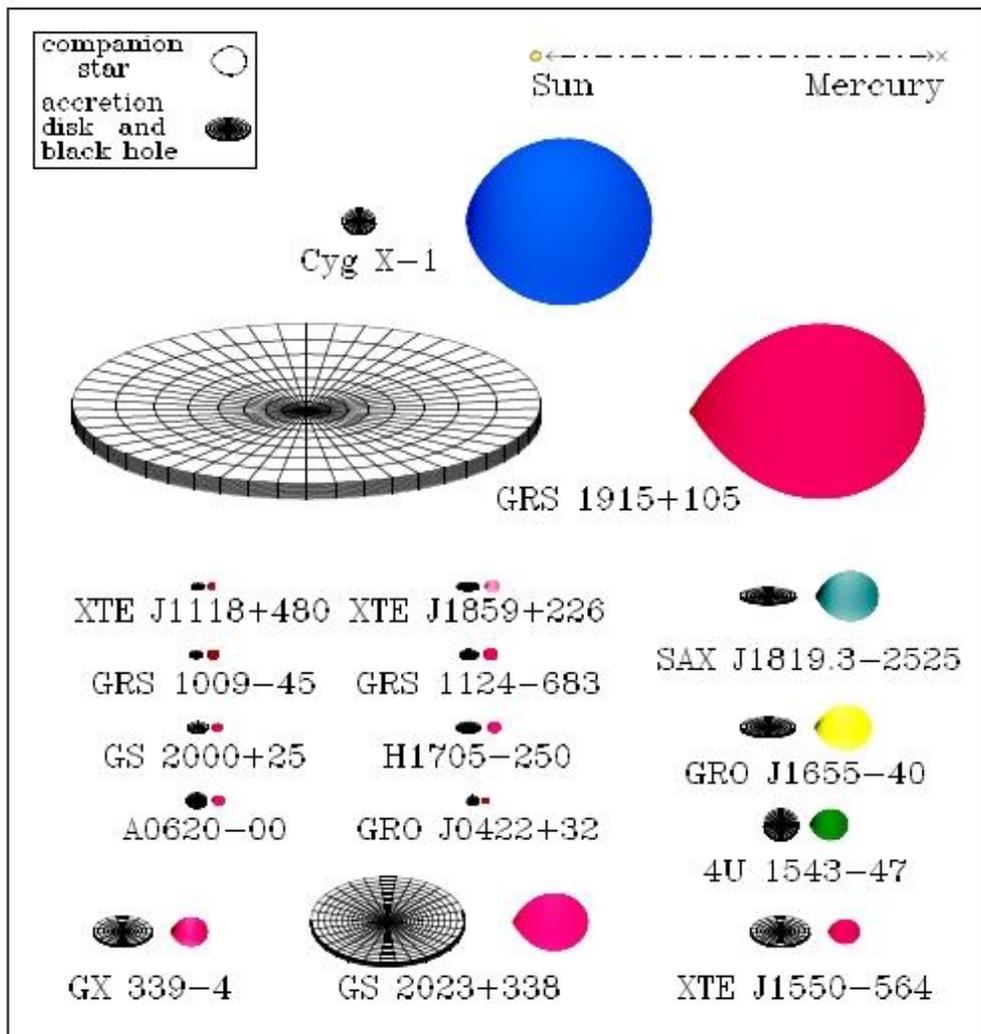


«Черная дыра в источнике Лебедь X-1 – это самая консервативная гипотеза»  
(Э. Салпитер)



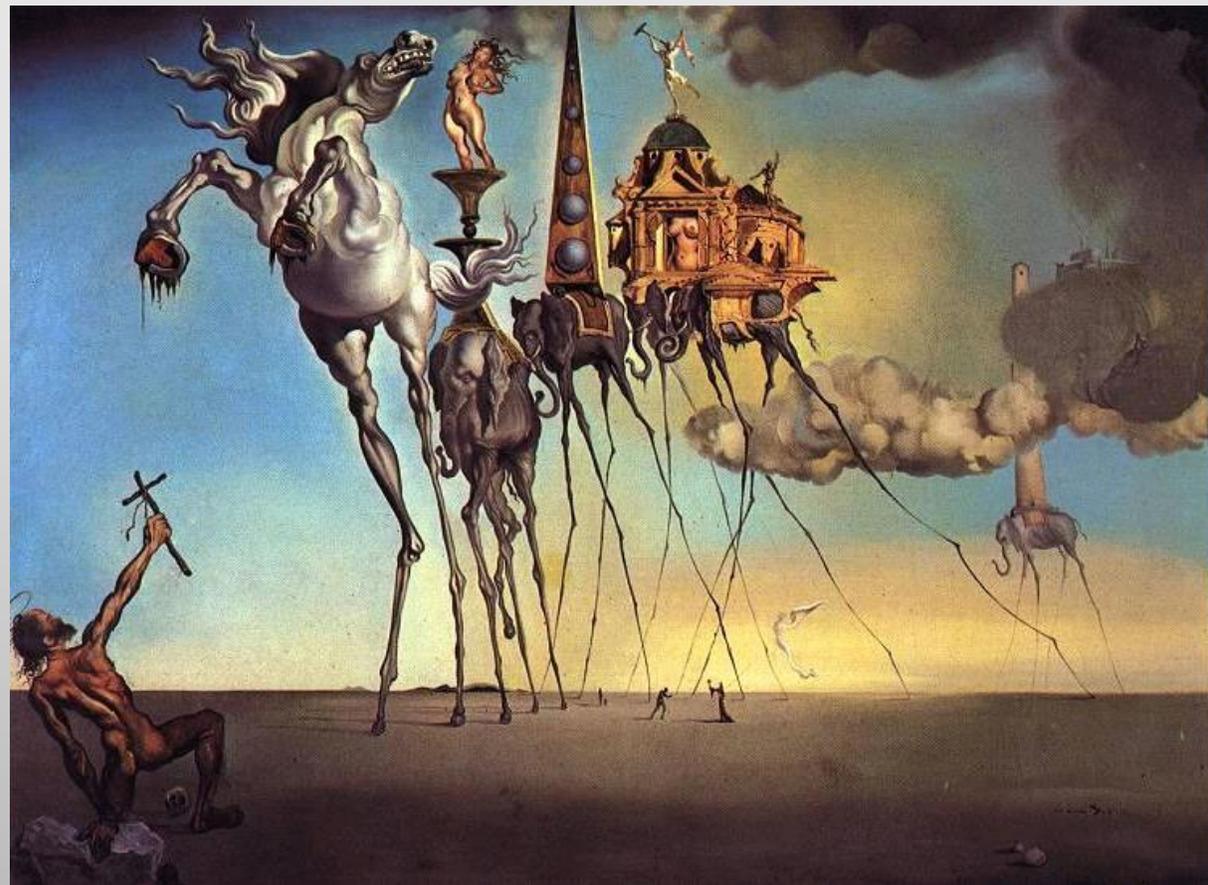
# Кандидаты в черные дыры

## Black Hole Binaries in the Milky Way

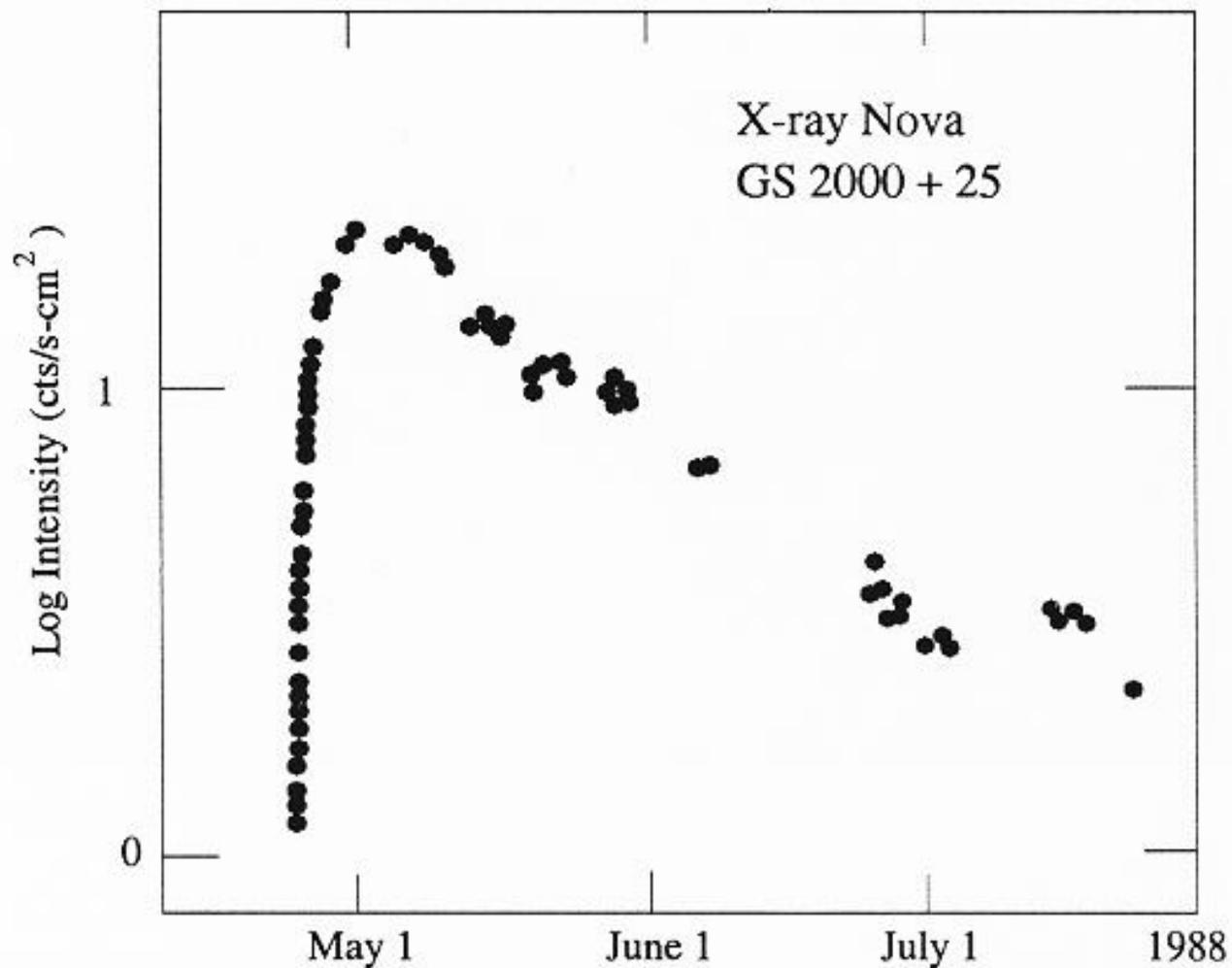


Почему считаем их кандидатами?

- нет пульсаций
- особенности излучения
- ТЯЖЕЛЫЕ!



# Рентгеновские новые

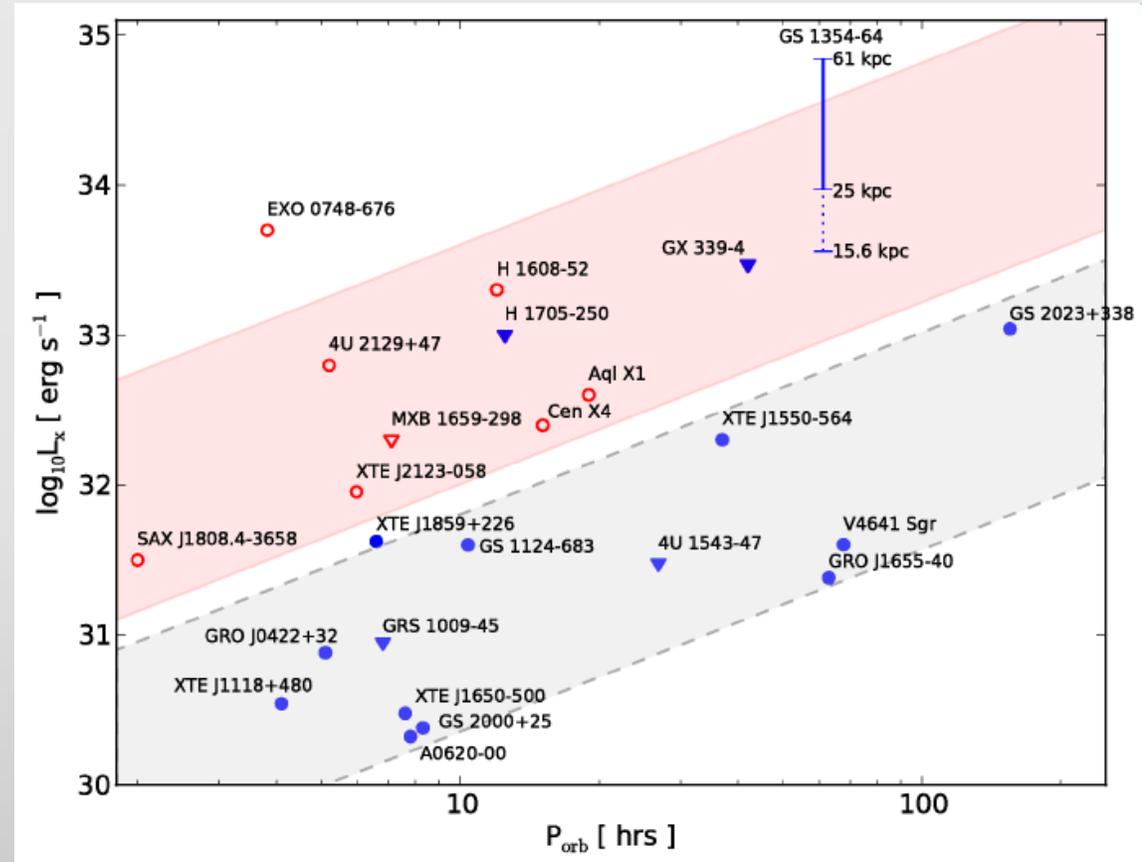
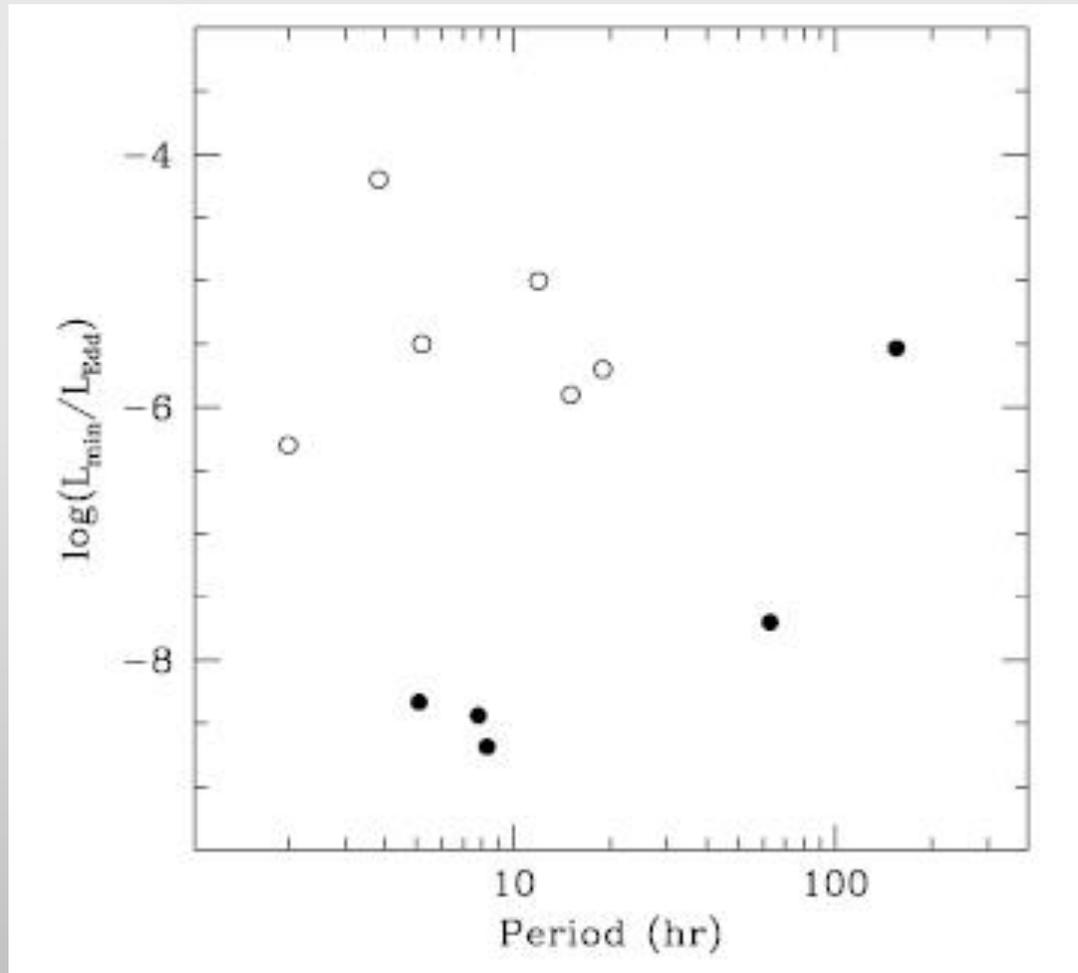


Маломассивные  
рентгеновские двойные  
с черными дырами.

Лучшие кандидаты.

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

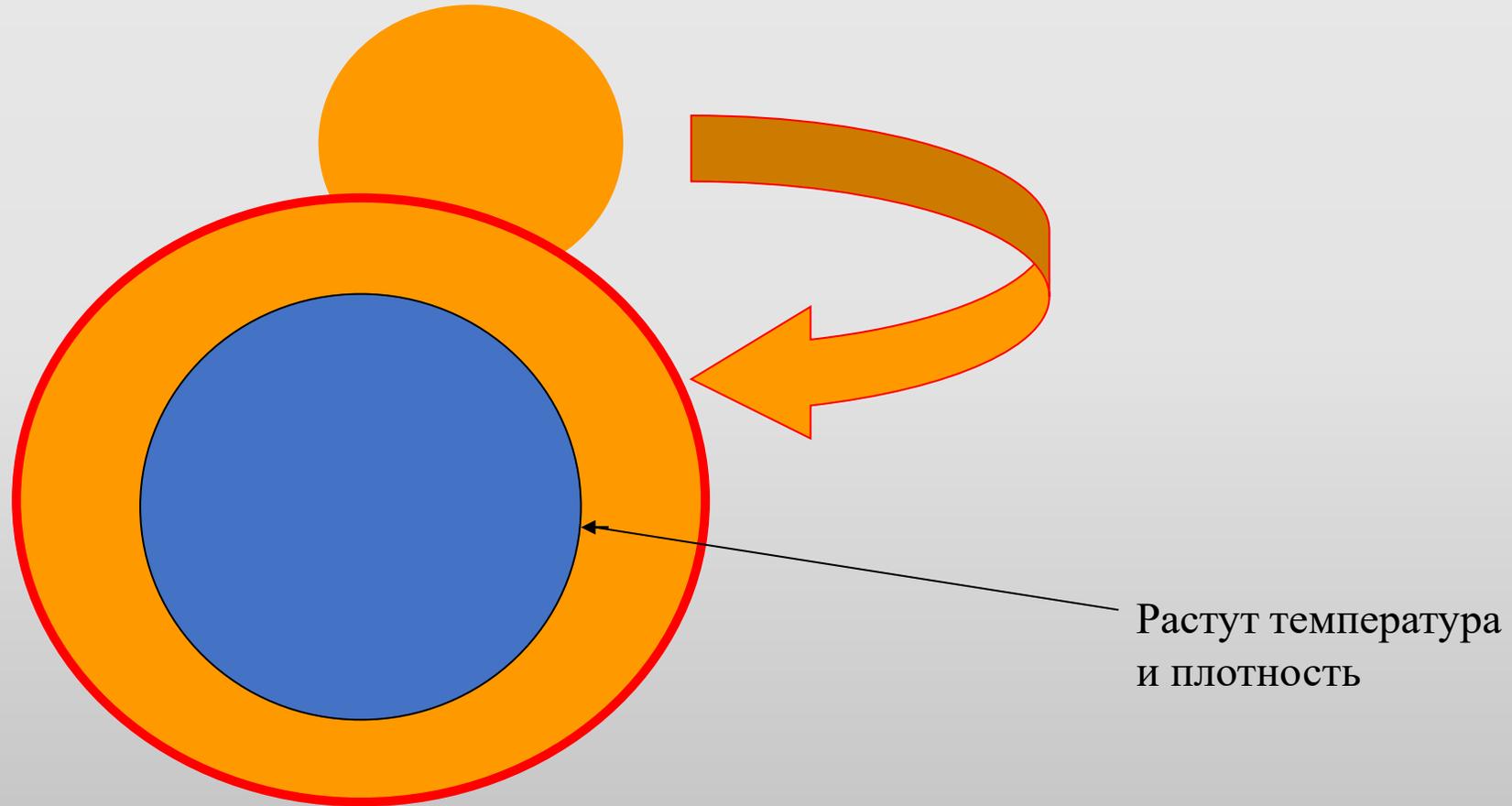
# Светимость в спокойном состоянии



Красный – системы с нейтронными звездами  
 Синие – системы с черными дырами

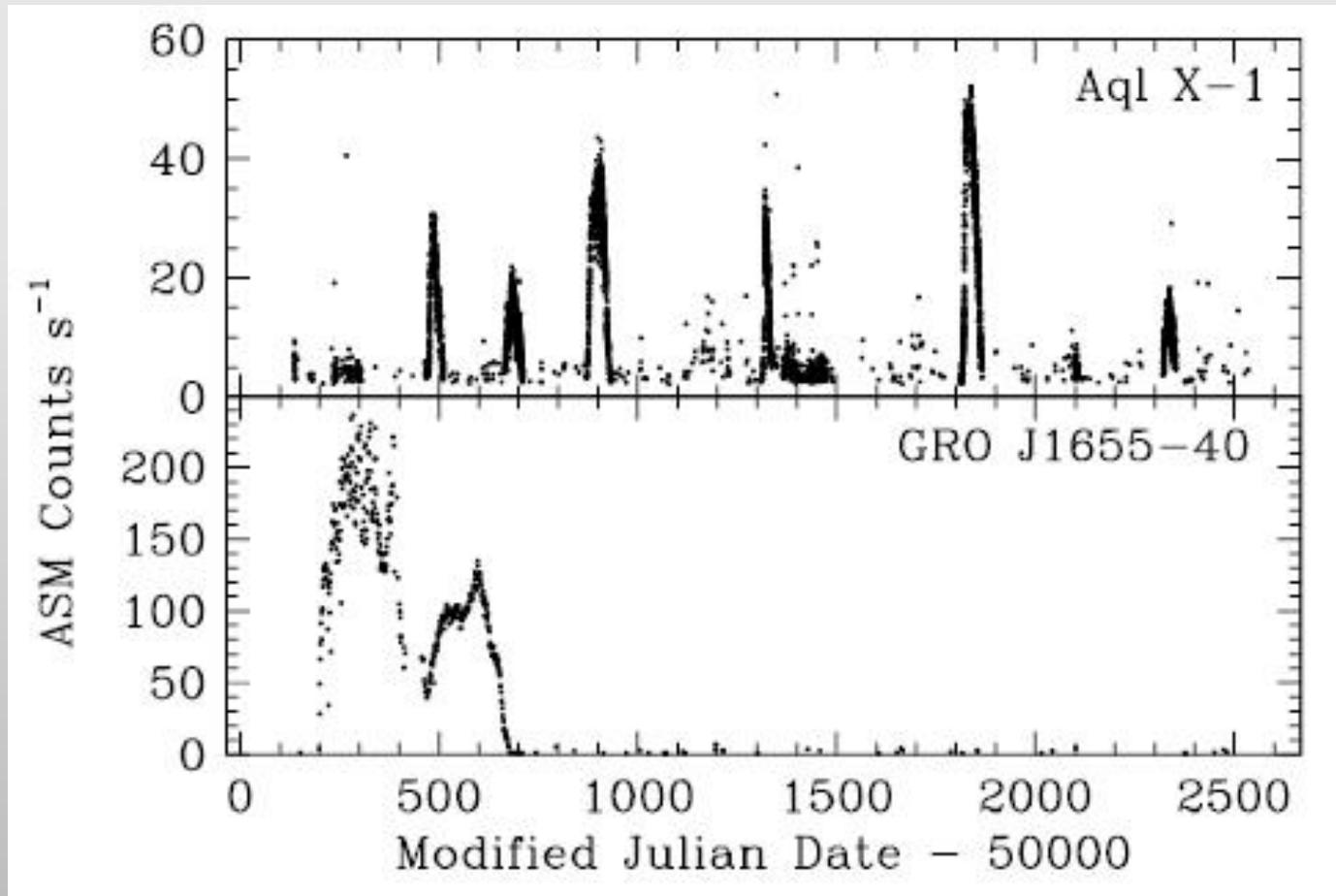
белые – нейтронные звезды черные – черные дыры

# Рентгеновский барстер



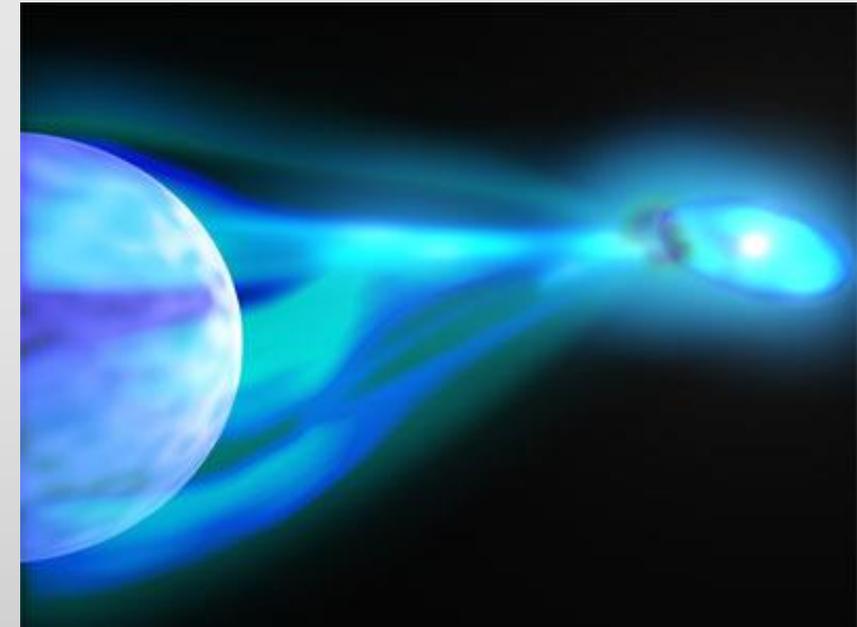
# Двойные системы с дырами и без

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.



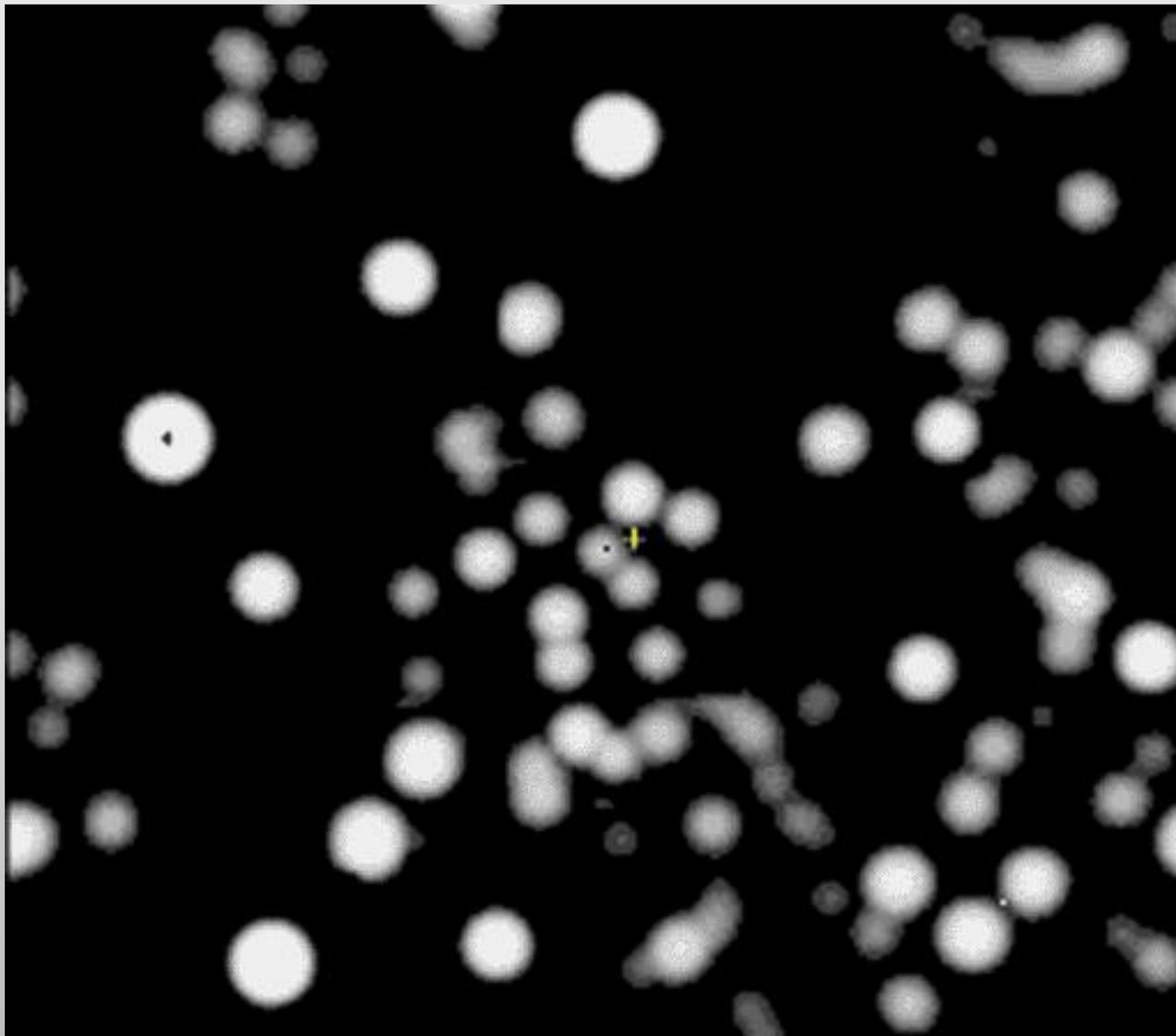
НЗ  
←

ЧД  
←



# Самая достоверная ЧД – Sgr A\*

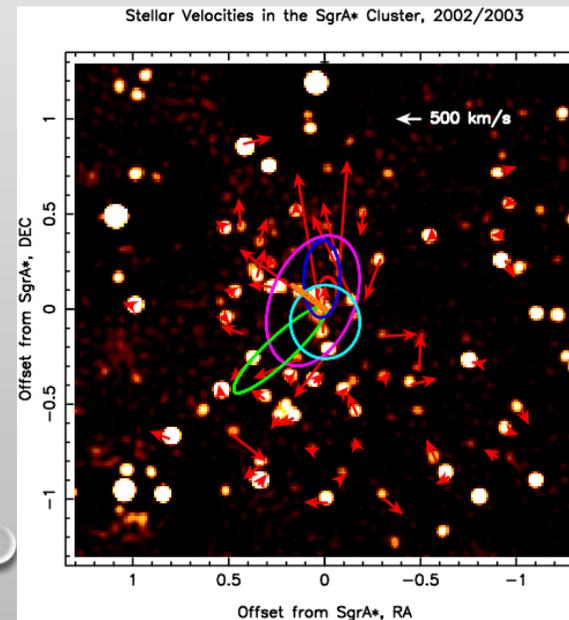
(APOD A. Eckart & R. Genzel )



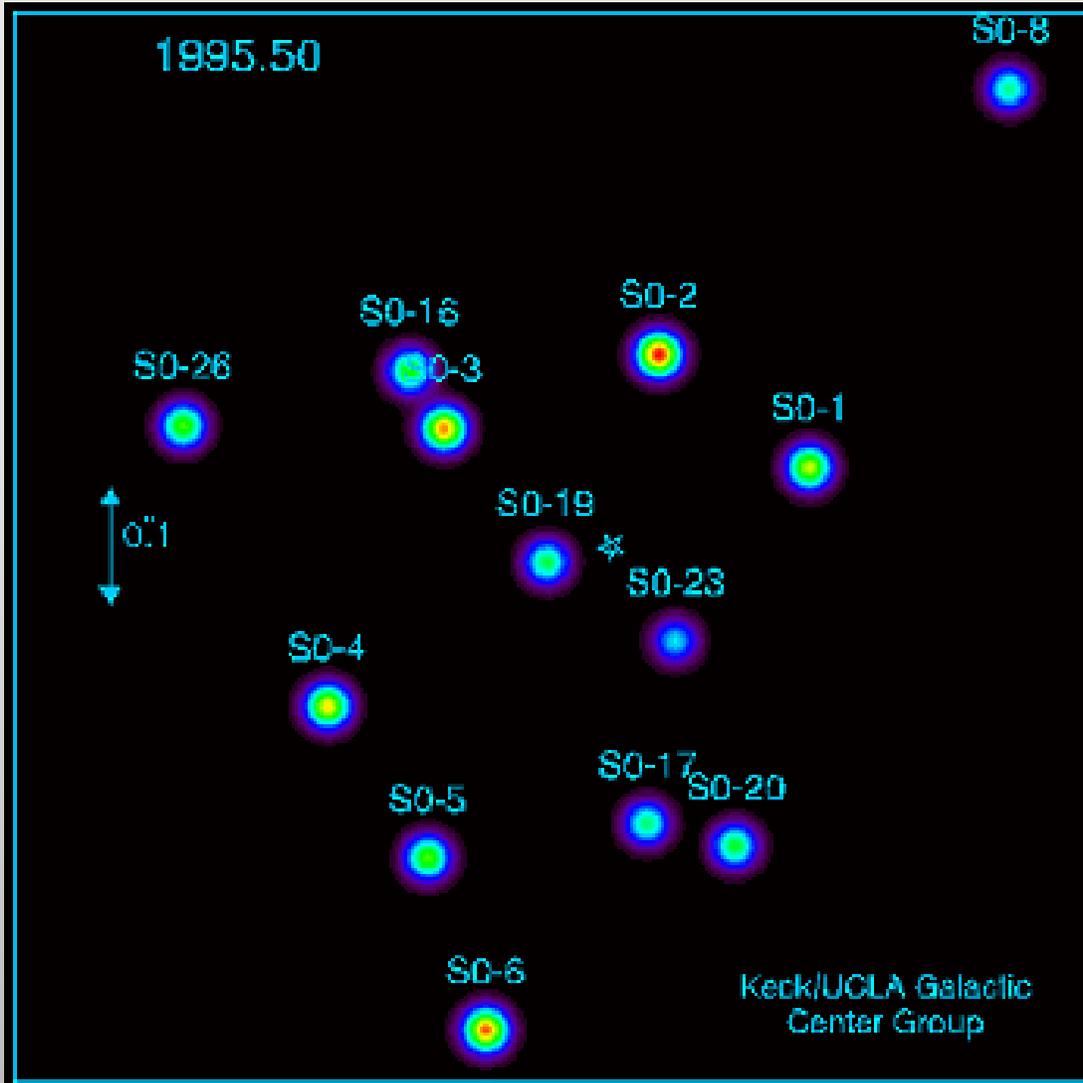
С высокой точностью мы знаем динамику внутри центральной угловой секунды.

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

Было бы здорово открыть радиопульсар около Sgr A\*

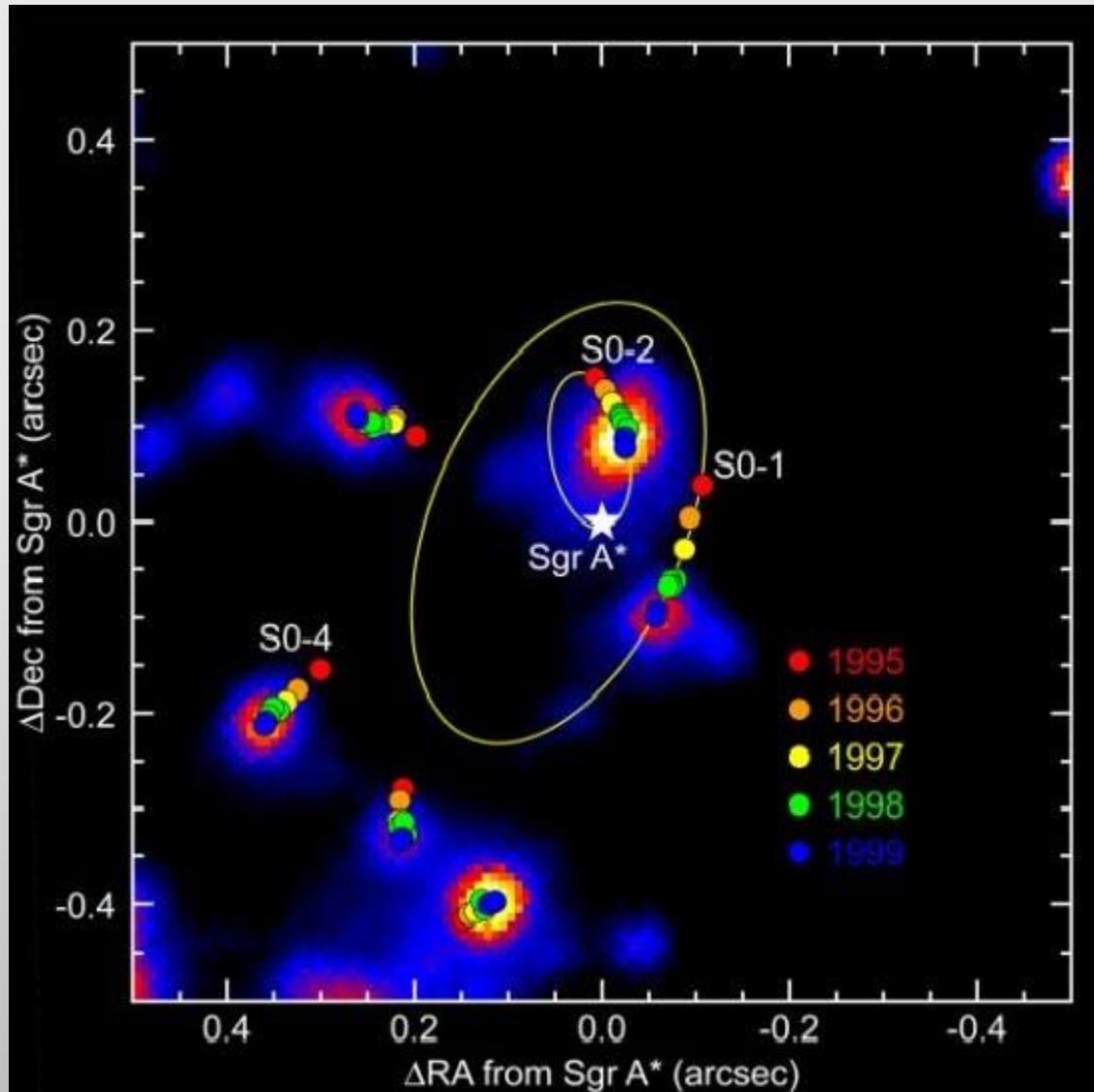


... И она становится все более достоверной



Наблюдения продолжаются,  
и растет число звезд  
с известными орбитами.

# Sgr A\*

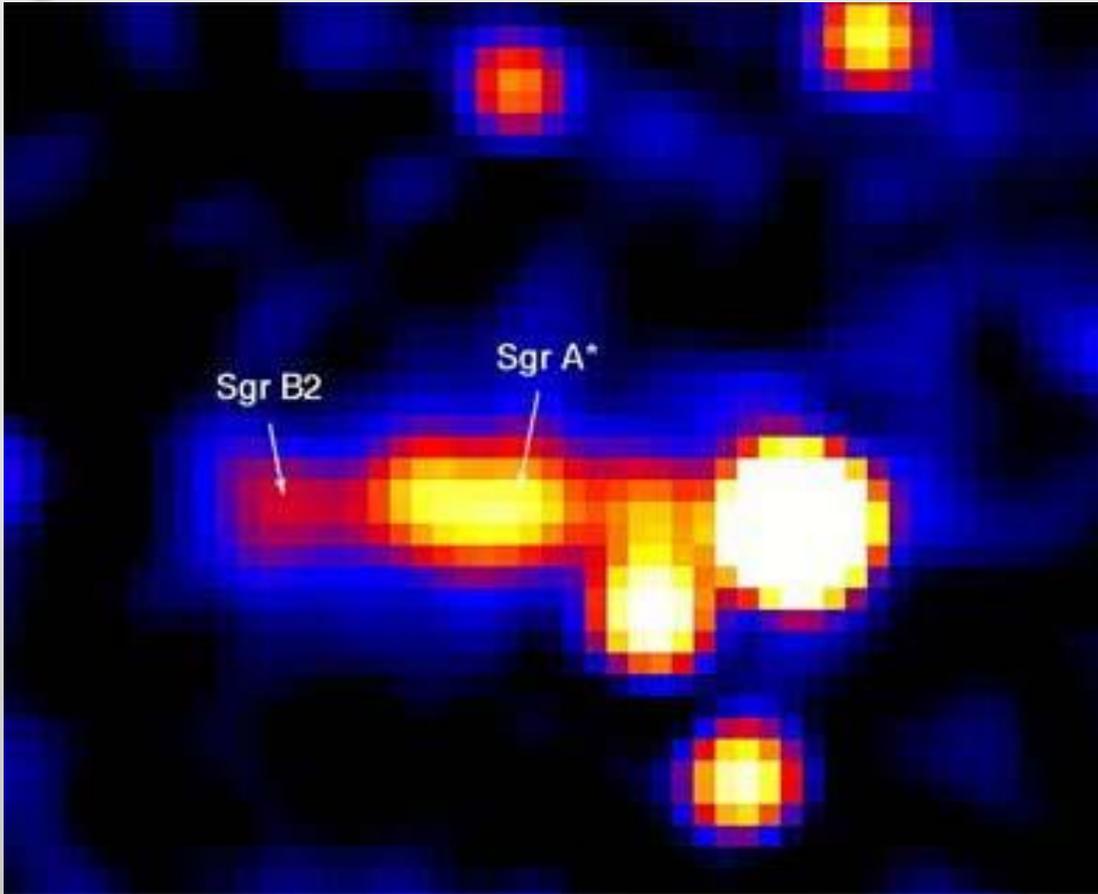


Случай Sgr A\* уникален. Благодаря прямым измерениям нескольких звездных орбит стало возможным точно определить массу центрального объекта.

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

Звезда S0-2 имеет орбитальный период 15.2 лет и большую полуось примерно 0.005 пк.

# • Наблюдения на спутнике Integral



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.**

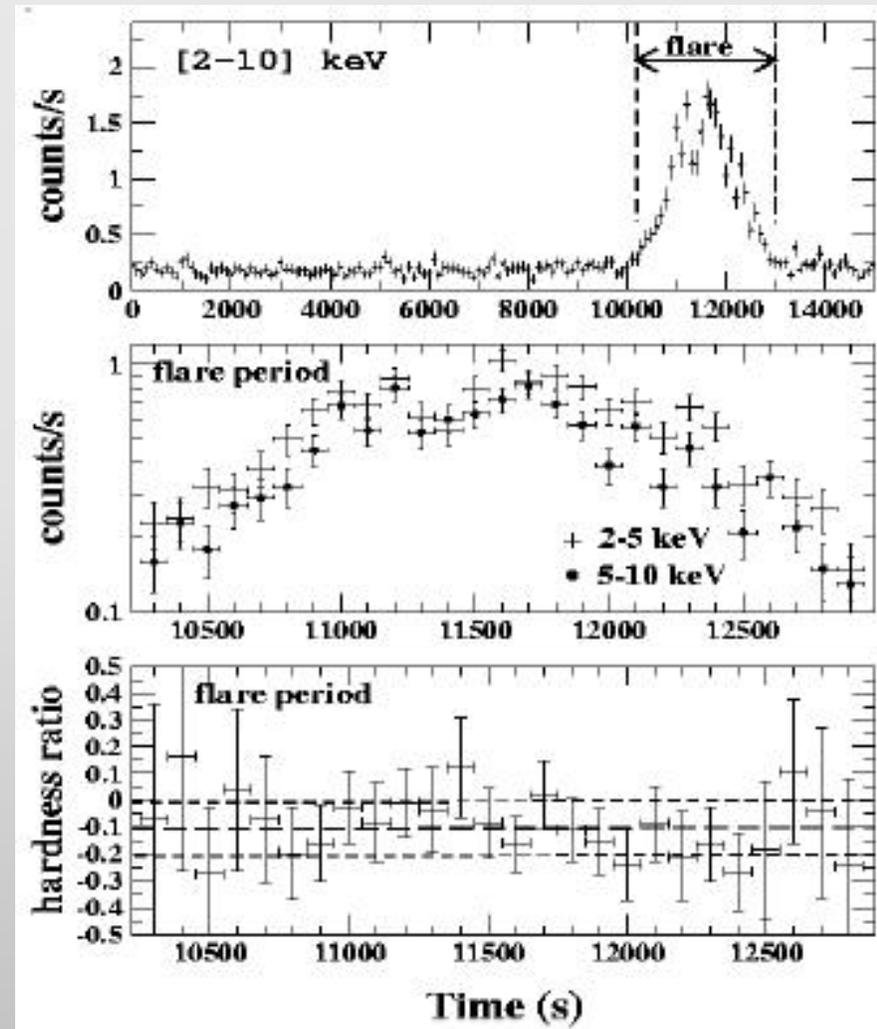
# Рентгеновские вспышки Sgr A\*

Sgr A\* демонстрирует рентгеновские вспышки.

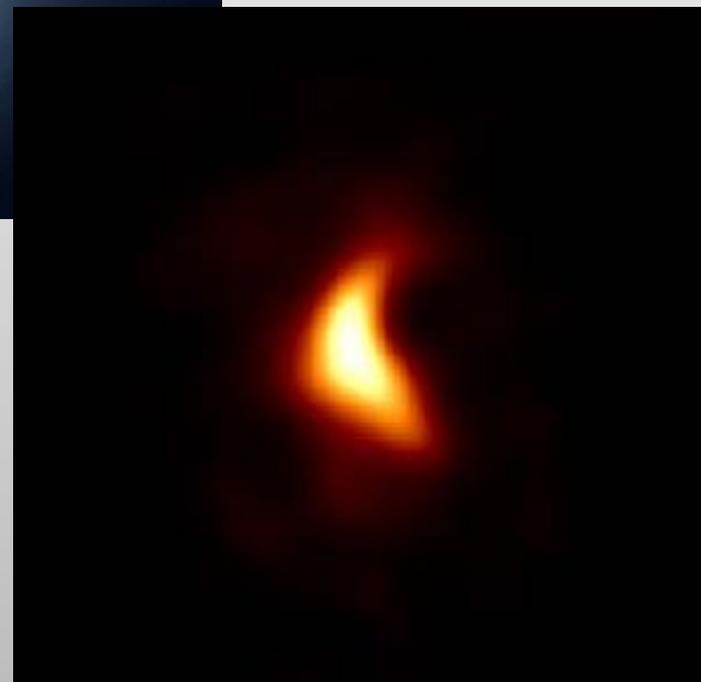
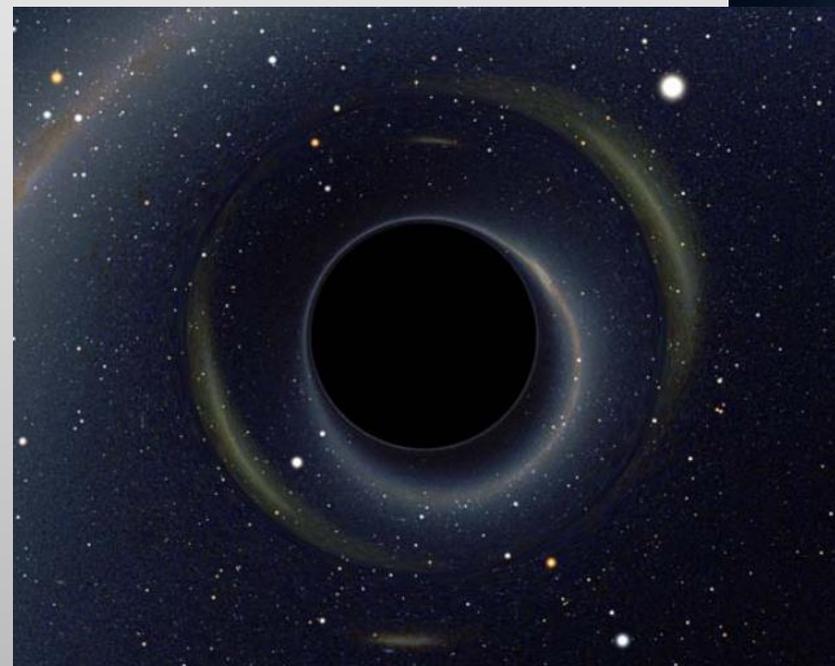
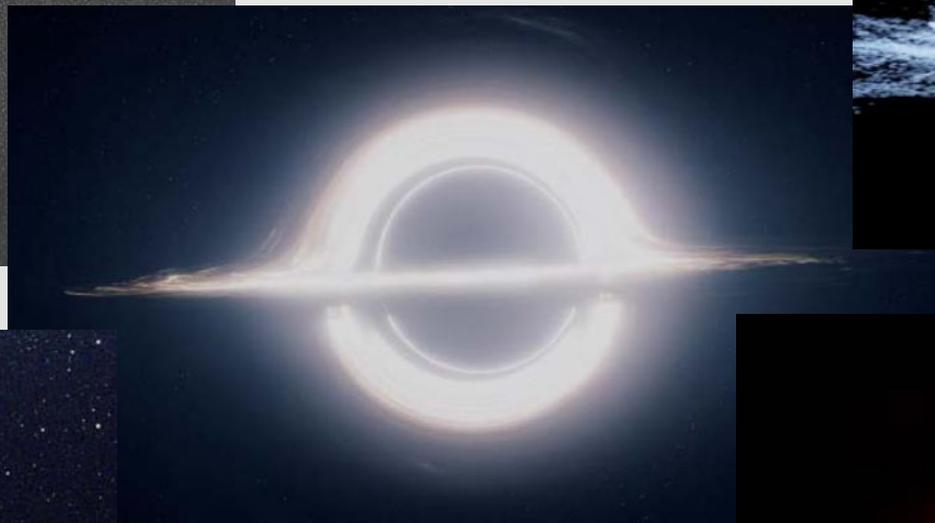
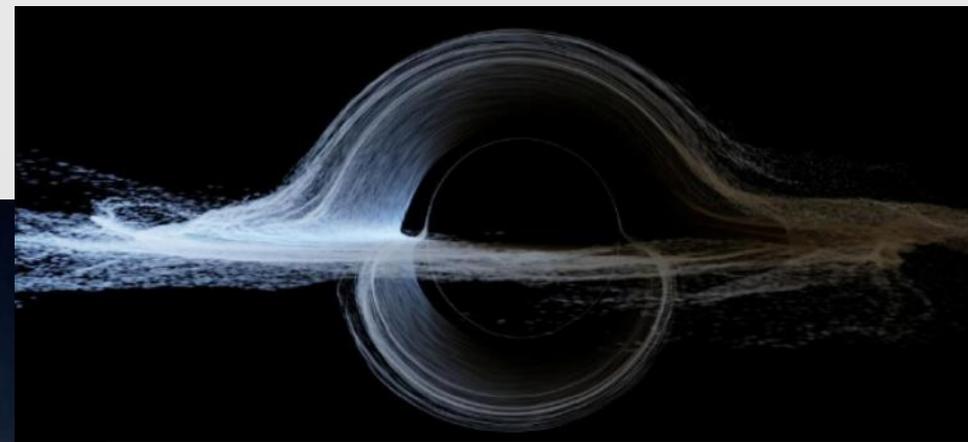
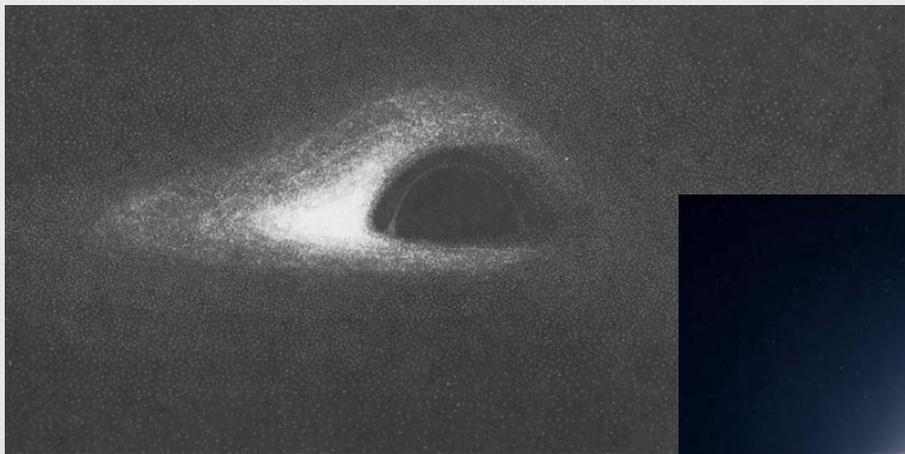
Вспышки происходят примерно раз в день. При этом поток возрастает в несколько раз, а иногда и сильнее.

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

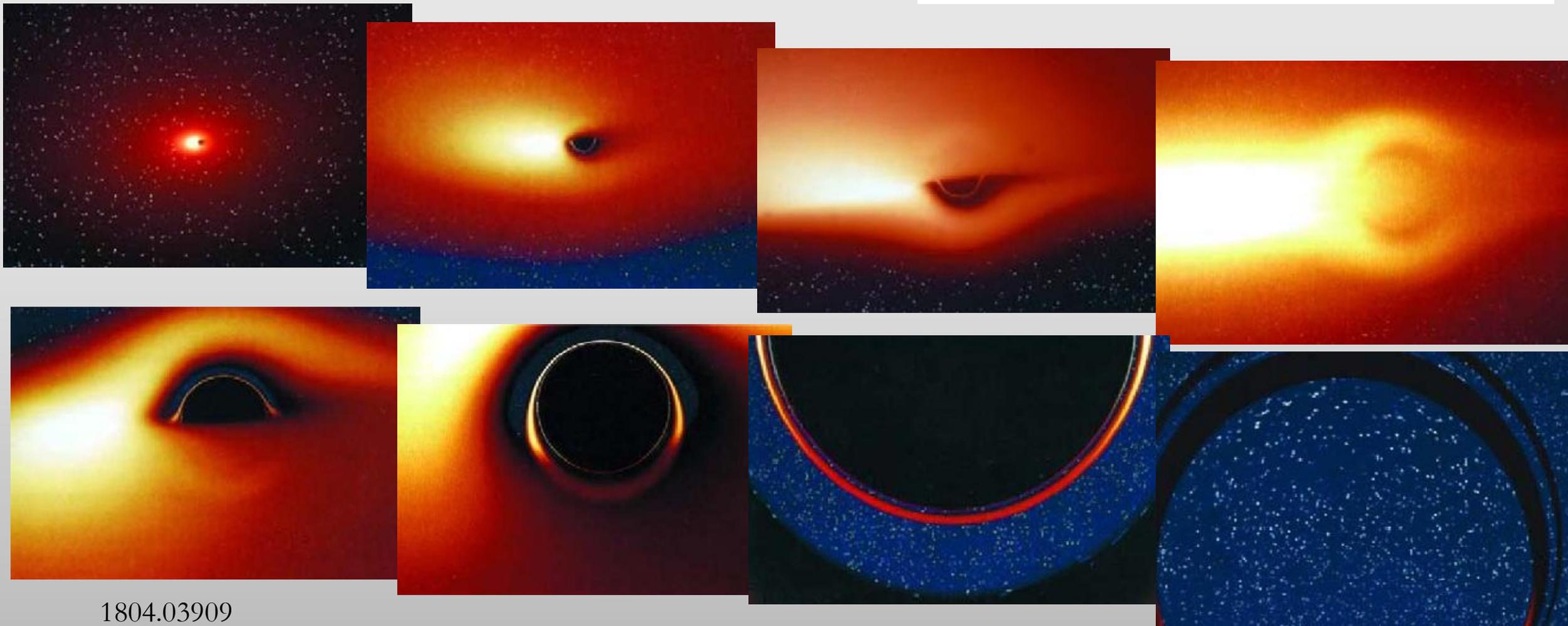
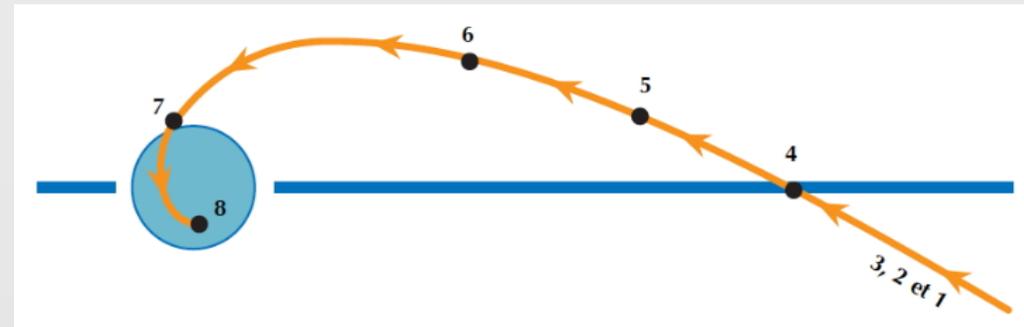
Во вспышке 31 августа 2004 был обнаружен квазипериод 22.2 мин. В рамках простой модели это позволяет оценить скорость вращения черной дыры



# Визуализация черных дыр

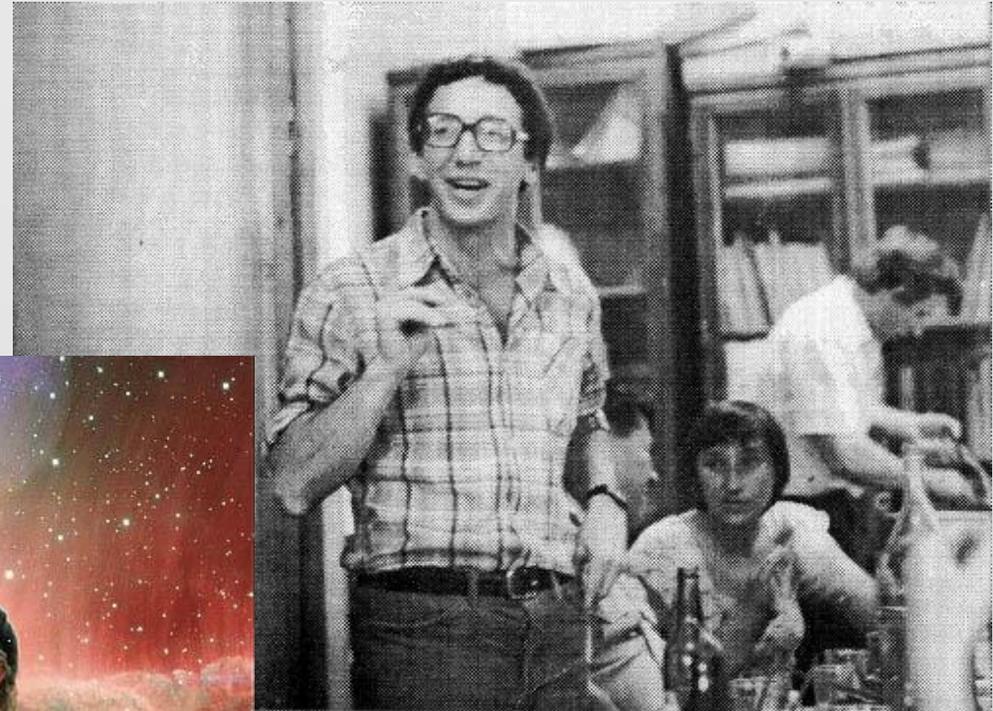
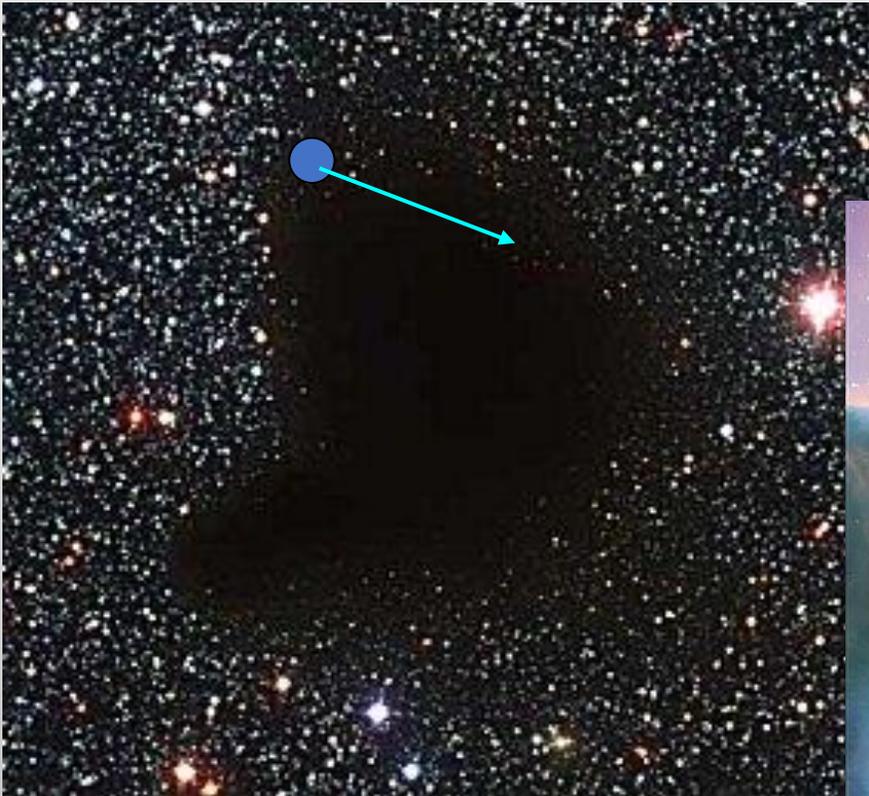


# Падение в черную дыру



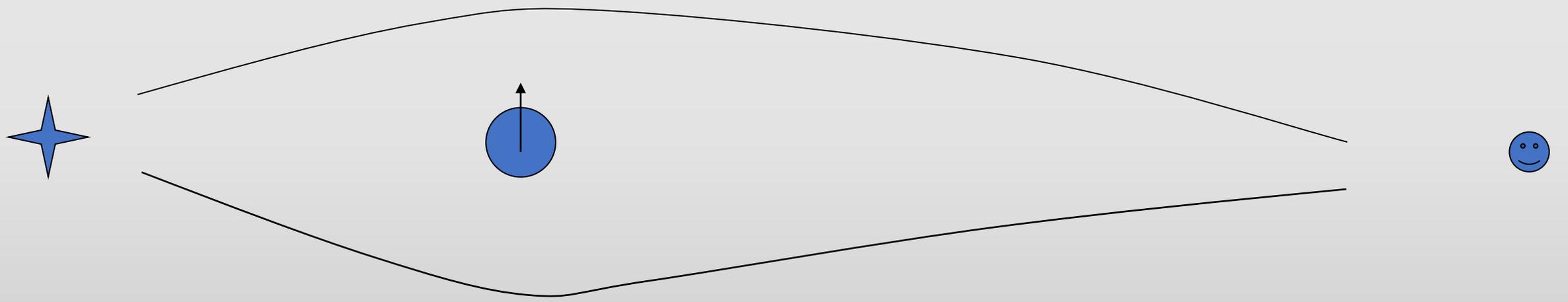
# Как увидеть одиночную черную дыру?

1. Аккреция
2. Микролинзирование

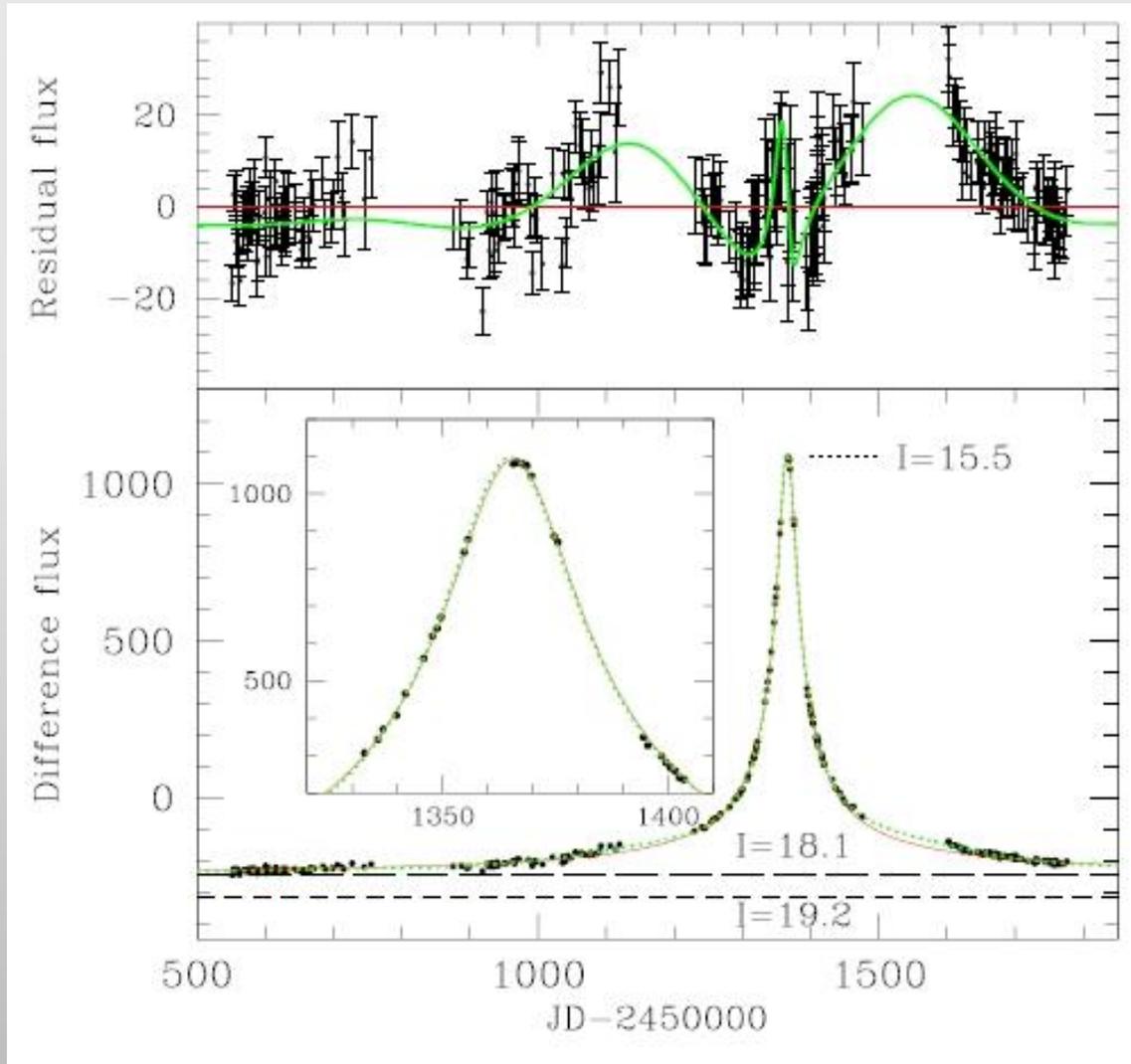


# Микролинзирование

Скорость, масса, расстояние



# Микролинзирование и одиночные черные дыры



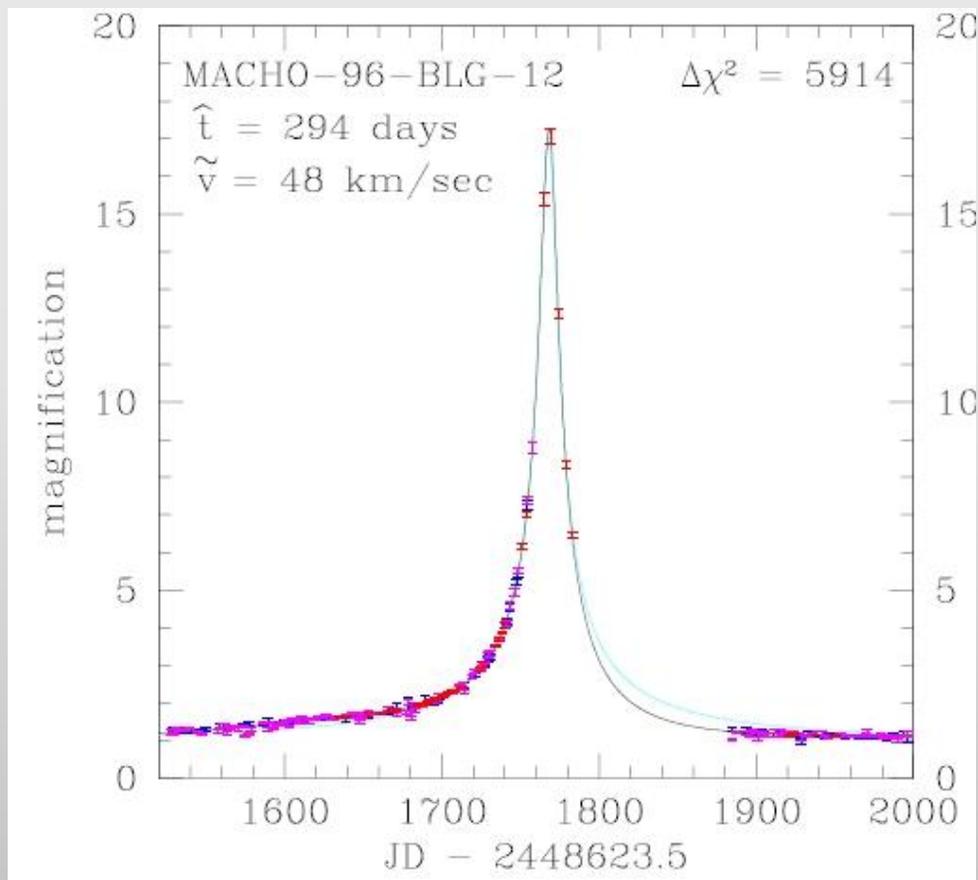
Событие OGLE-1999-BUL-32

Очень длинное событие: 641 дней.

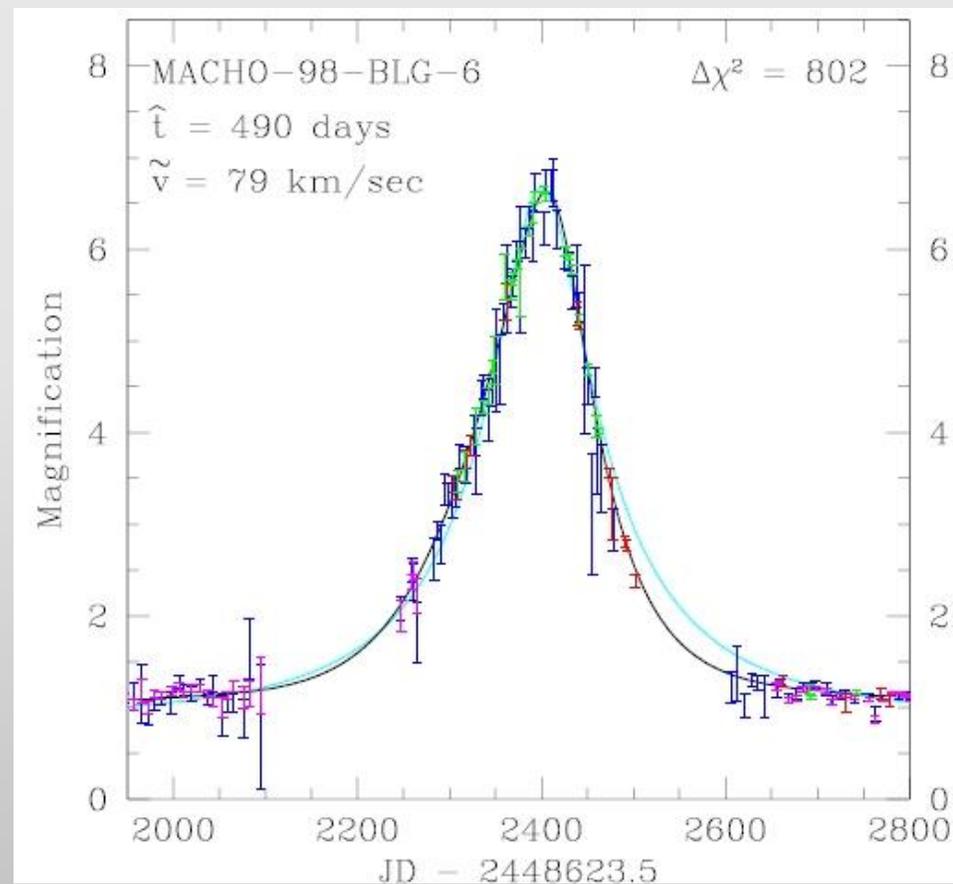
Оценка массы линзы  $>4 M_{\odot}$

# Проект МАСНО

МАСНО-96-BLG-6  
3-16 масс солнца



МАСНО-98-BLG-6  
3-13 массы Солнца

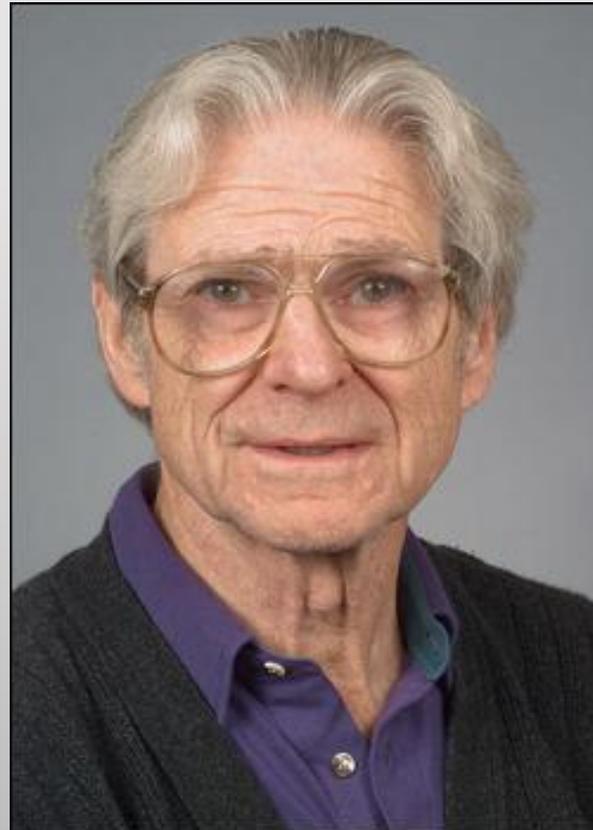
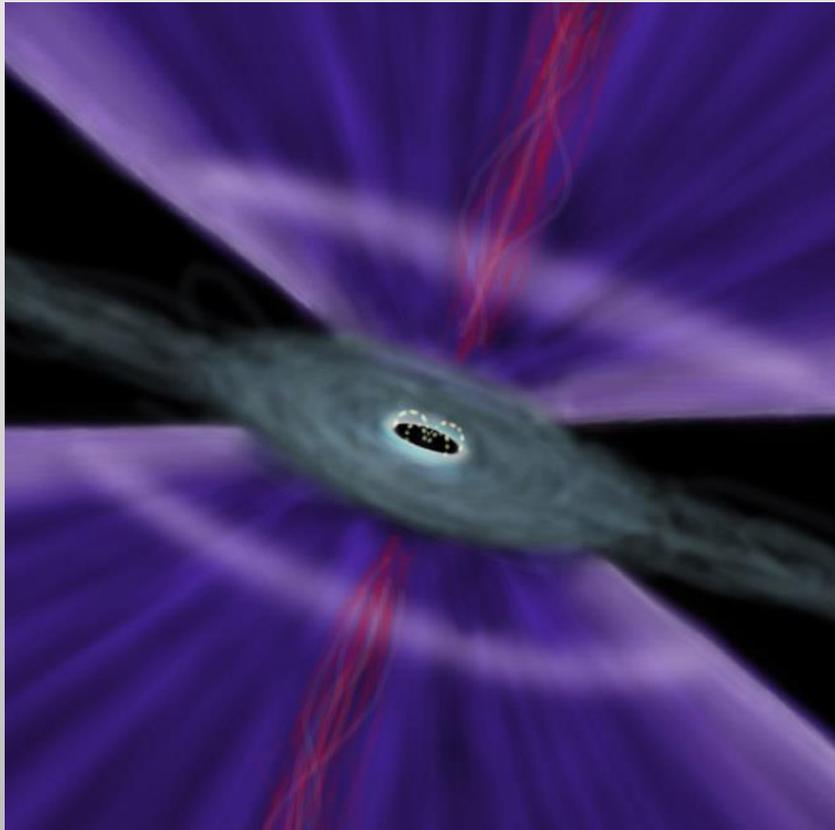


В центрах галактик....



# Немного истории ...

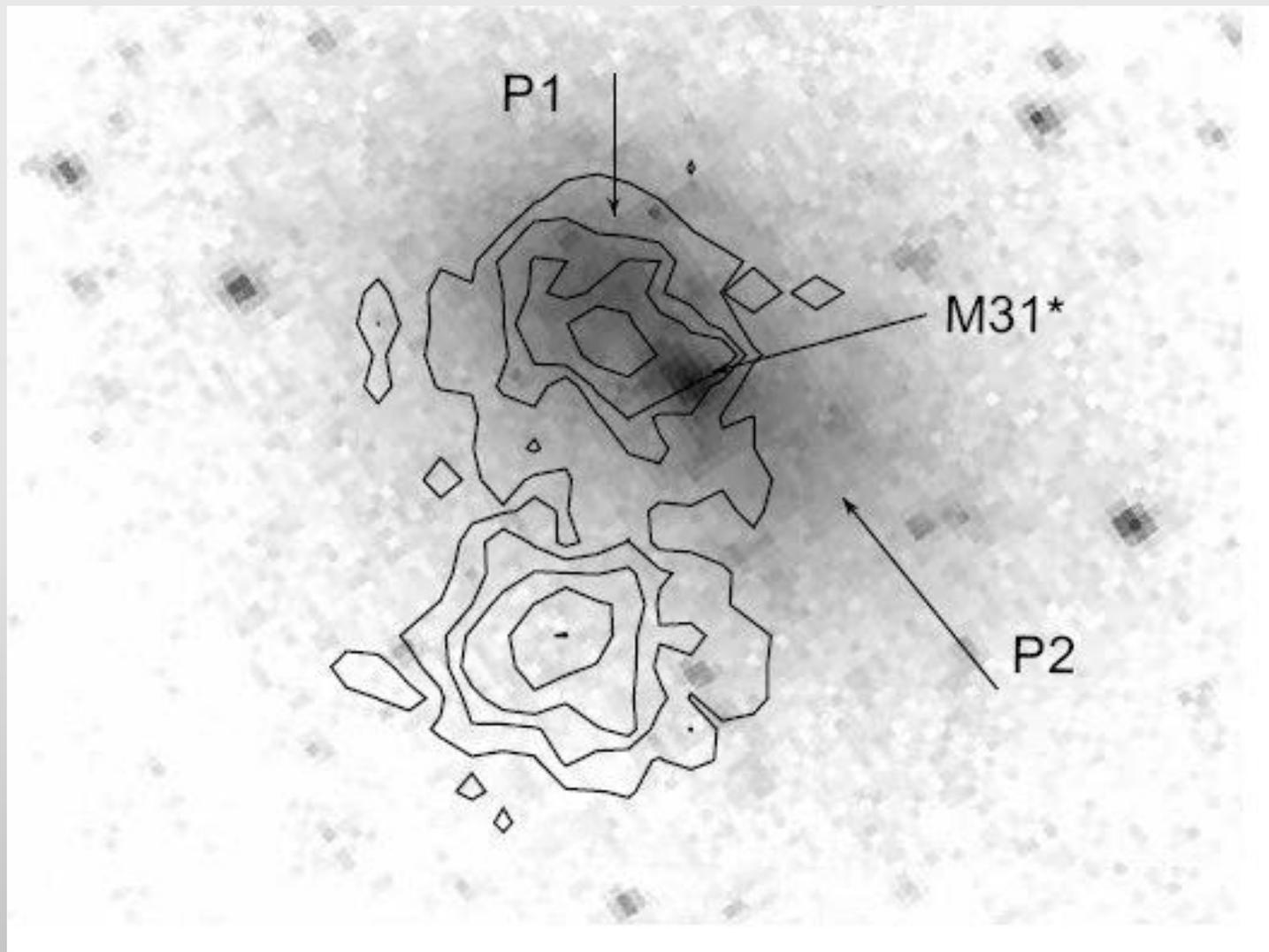
История начинается в 60-е гг.,  
когда были идентифицированы квазары (Шмидт 1963).  
Немедленно была высказана гипотеза  
об аккреции вещества сверхмассивными черными дырами.  
(Солпитер, Зельдович, Новиков, Линден-Белл)



# M31

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

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

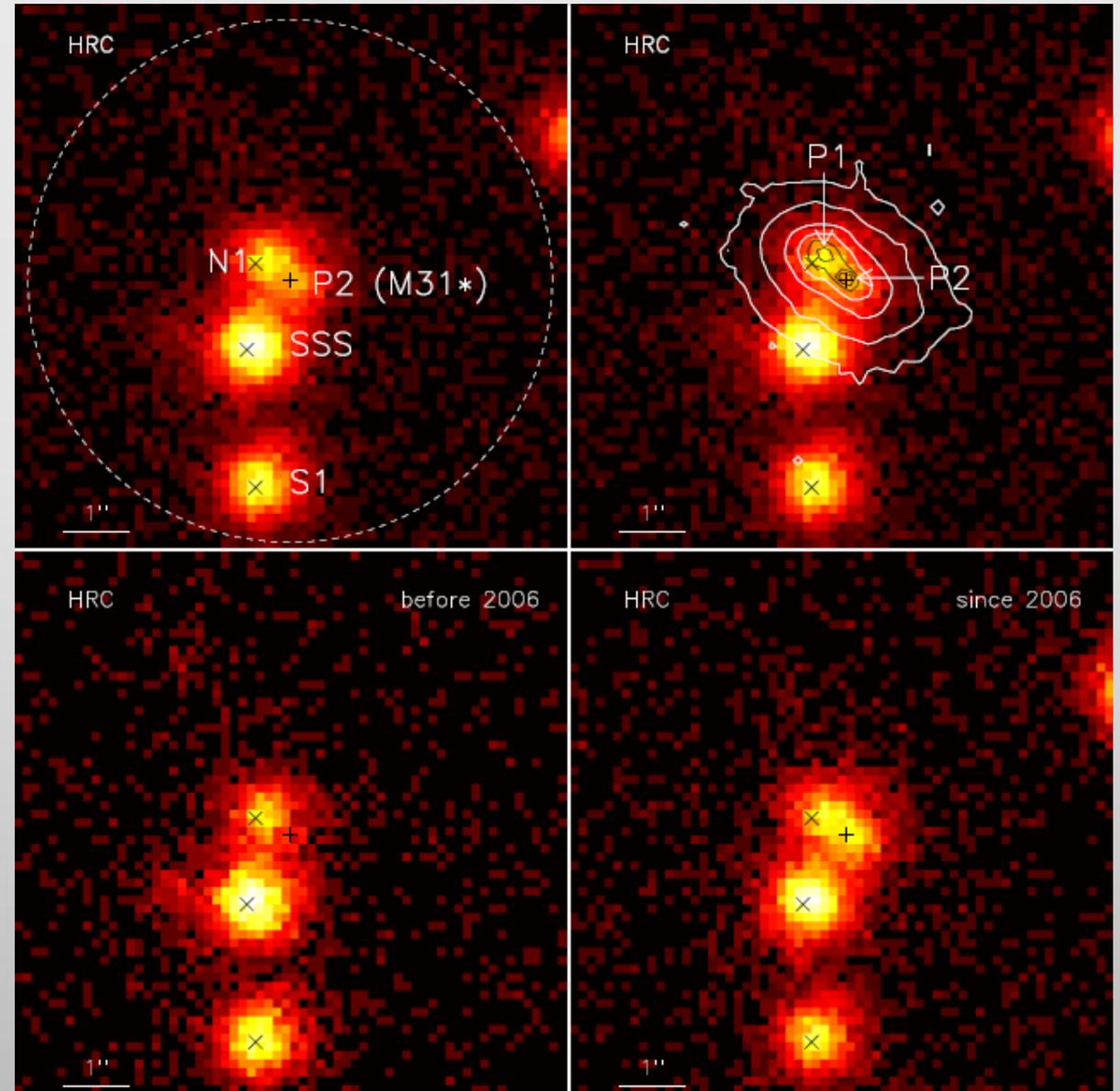


# Черная дыра в Туманности Андромеды

В Туманности Андромеды, как и в нашей Галактике, есть сверхмассивная черная дыра. Причем, в М31 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.

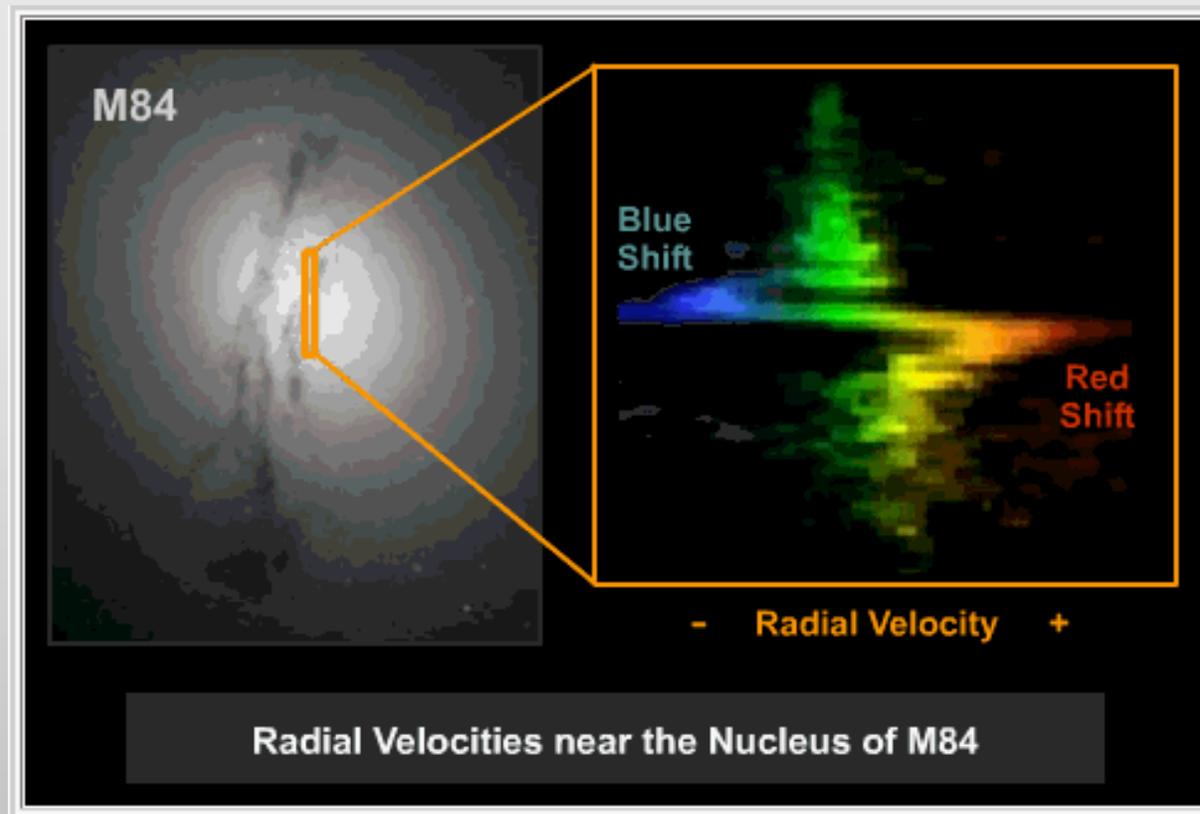
Правда, у нас дыра время от времени "всхрапывает" во сне: происходят вспышки. Теперь изменения активности дыры открыли и в М31.



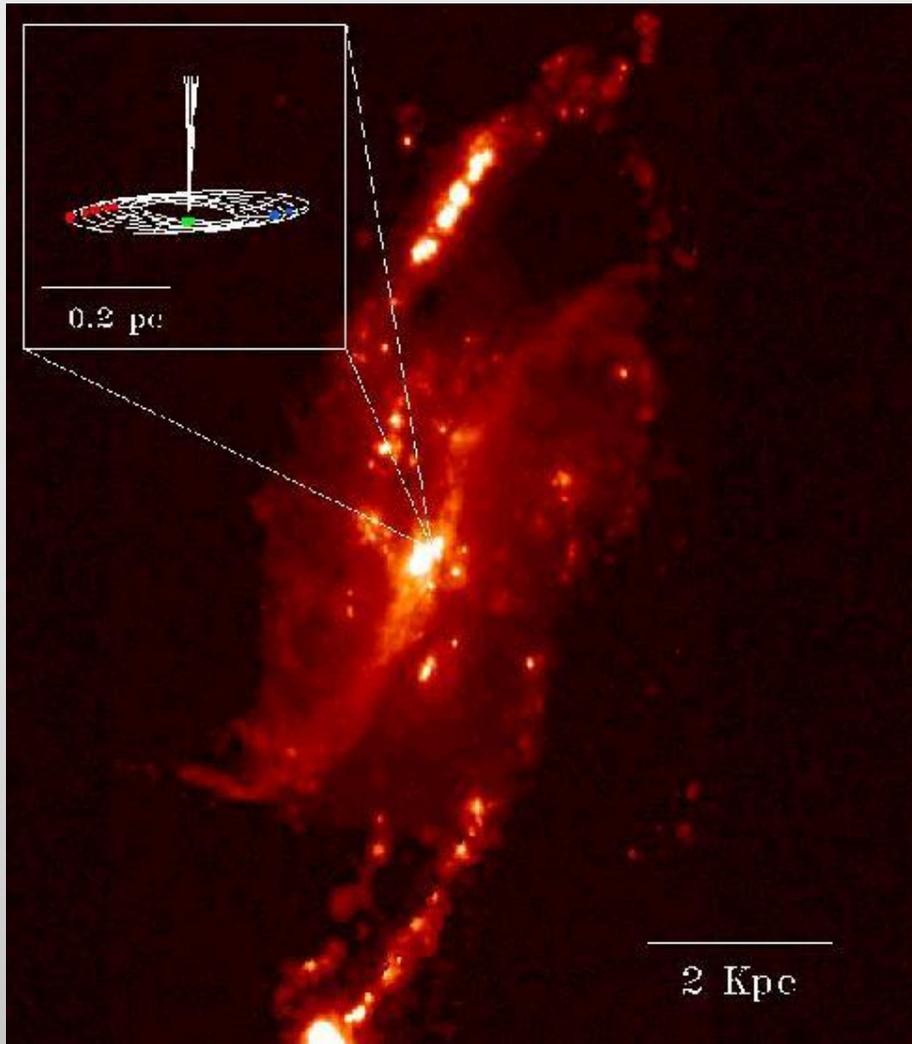
# Определение масс сверхмассивных черных дыр

- 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).

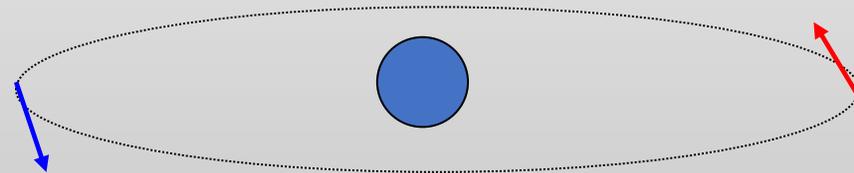


# Мазеры

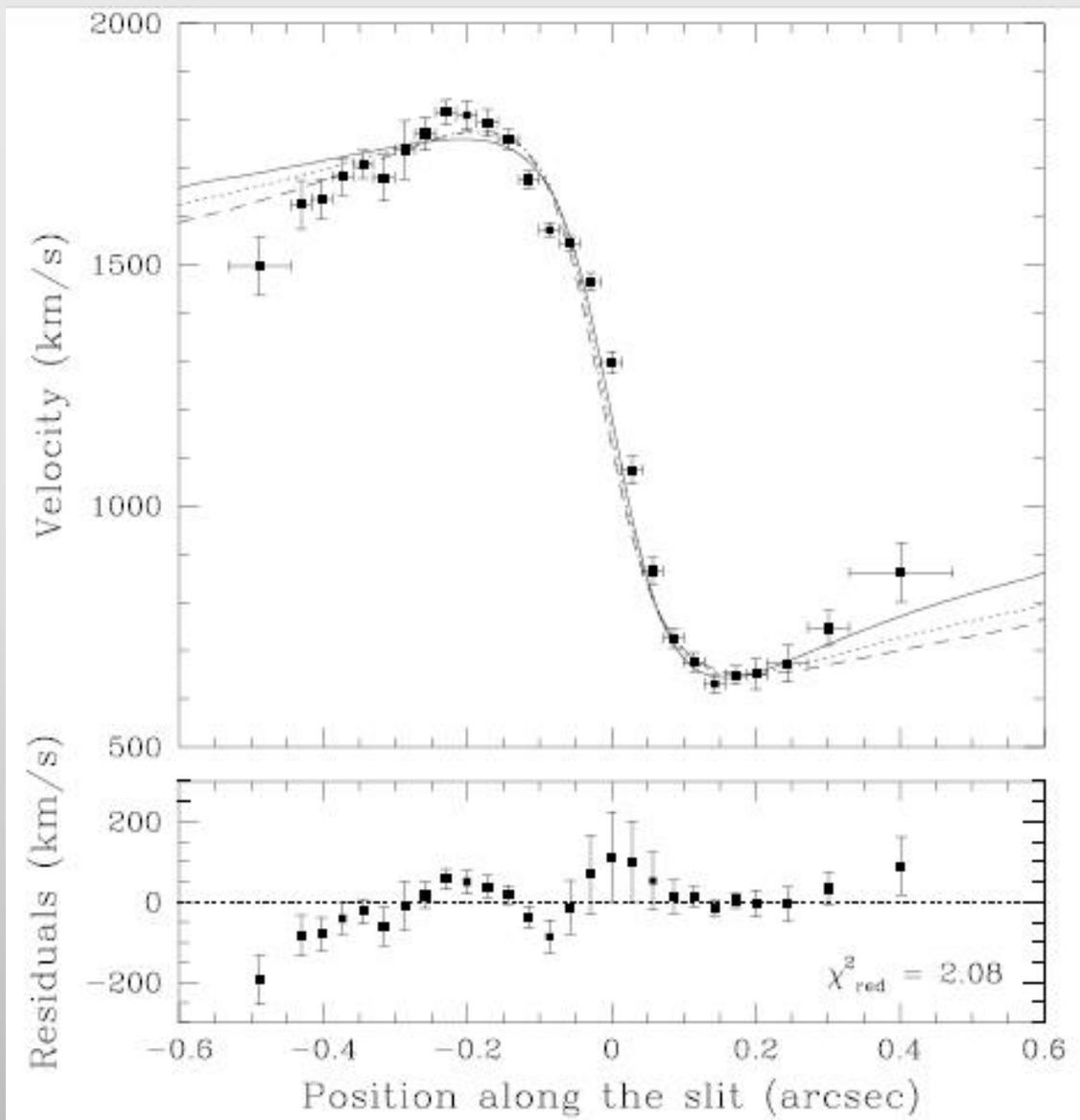


Наблюдая движение мазерных источников в галактике **NGC 4258**, стало возможным измерить массу внутри 0.2 пк. Получено значение 35-40 миллионов масс Солнца.

Это наиболее точный метод.



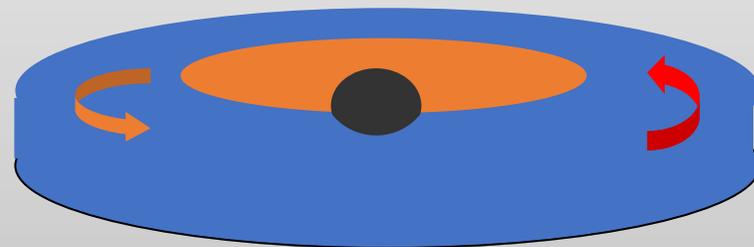
# Кинематика газа



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

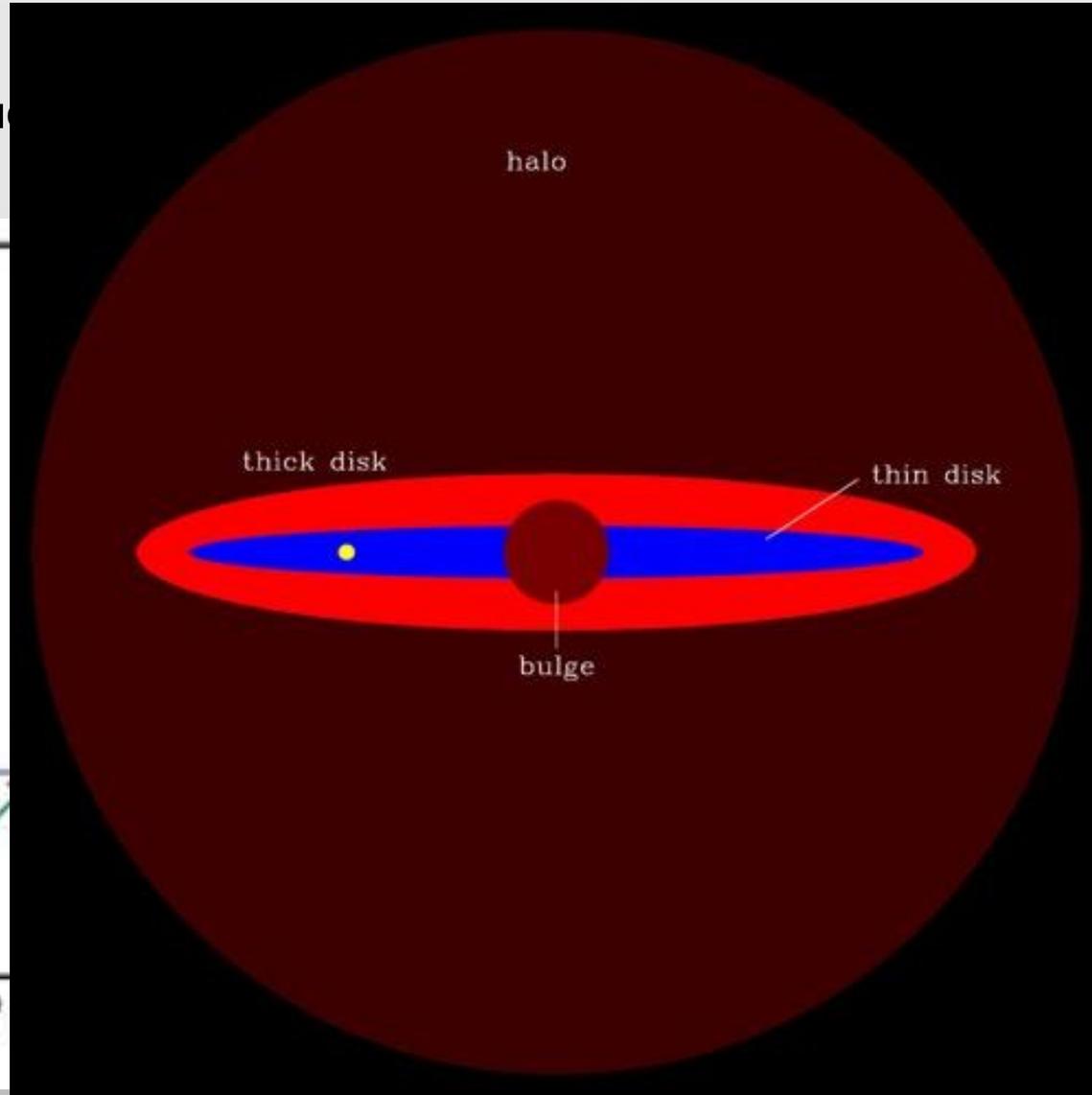
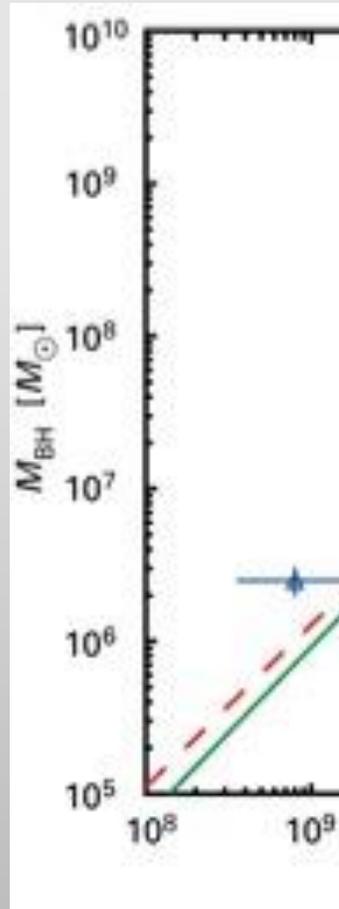
Масса  $3 \cdot 10^9 M_0$ .

Одна из самых тяжелых черных дыр



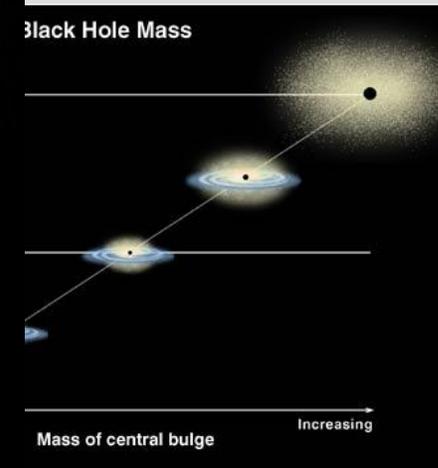
# Соотношение между массами черной дыры и балджа

Согласно исследованиям, черная дыра имеет в

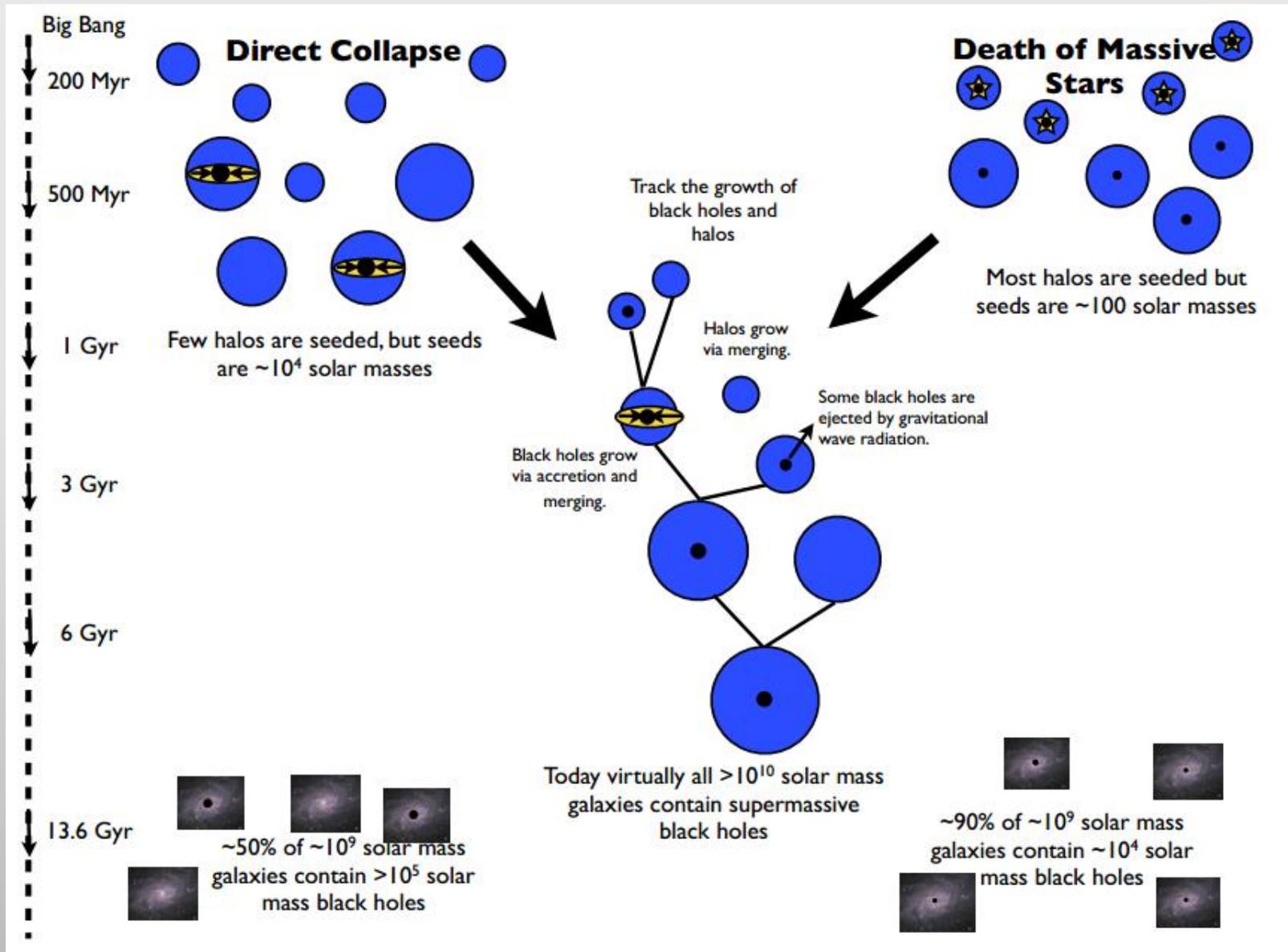


м балджем

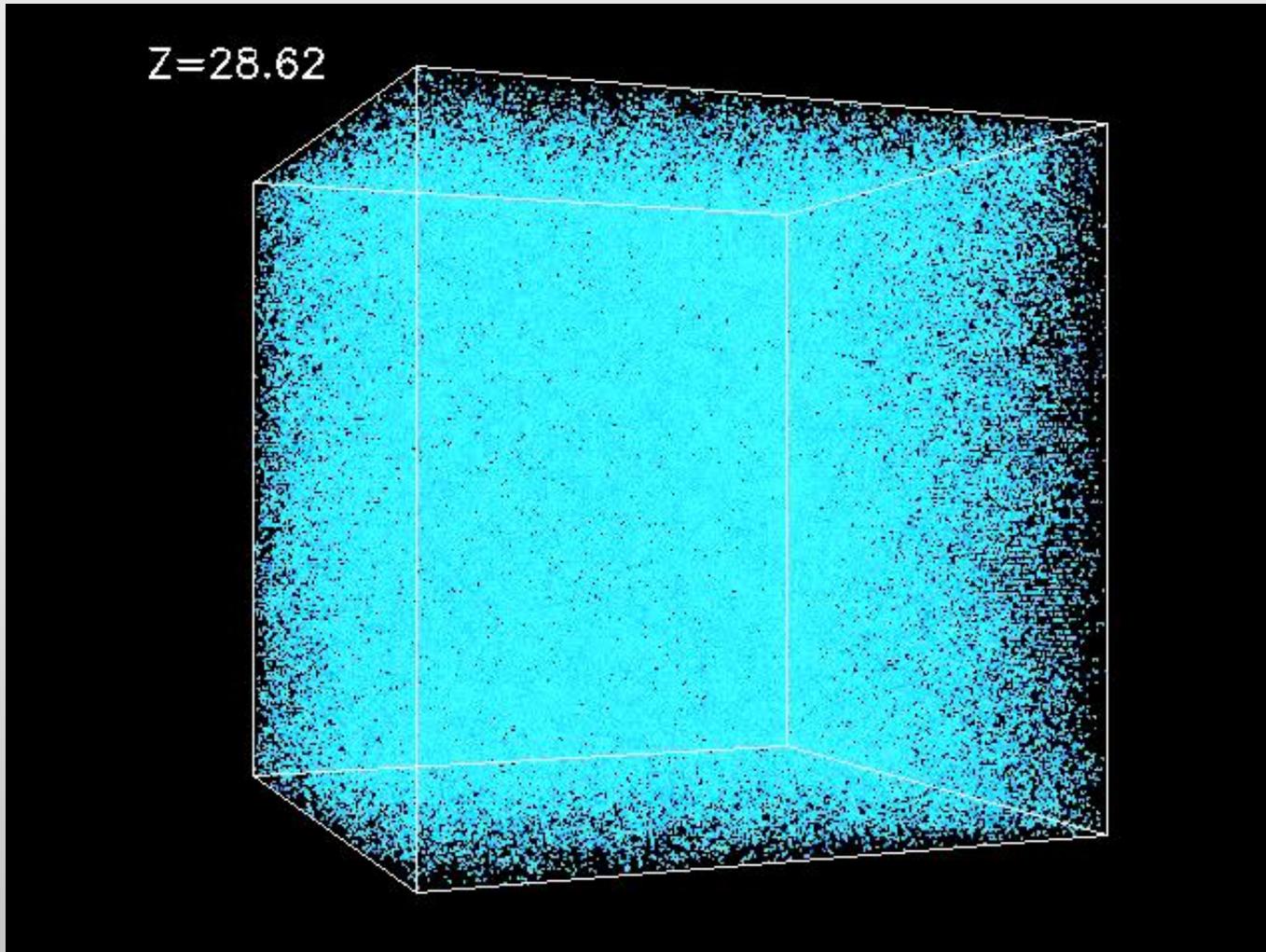
составляет  
их десятых процента



# Сценарии образования и эволюции массивных черных дыр



# Крупномасштабная структура



Сегодня стандартной моделью является т.н. *иерархическая*.

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

**(Kravtsov et al.)**

# Крупномасштабная структура

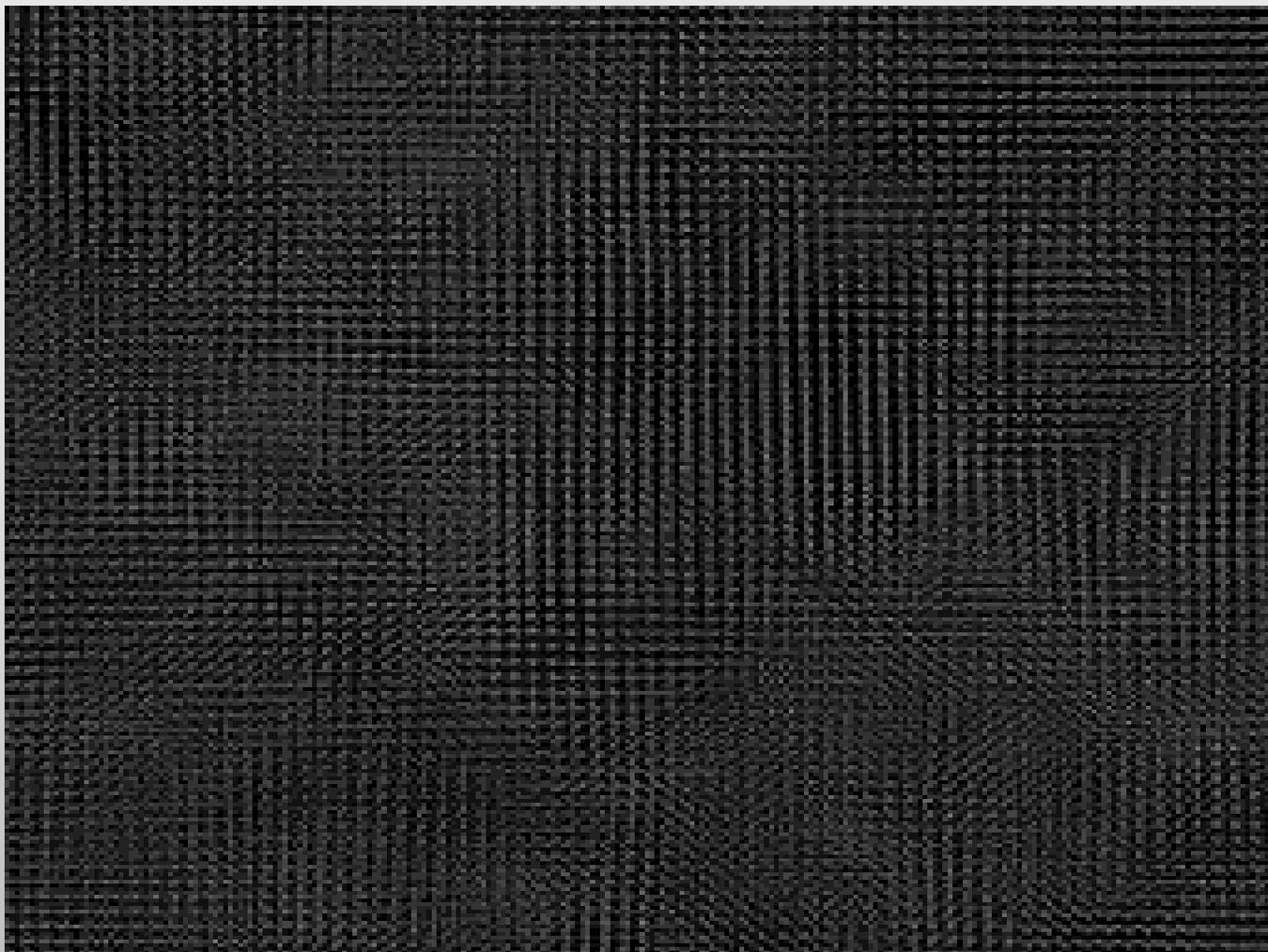
*N-Body Simulation of the  
Cold Dark Matter Cosmology*

# Рост скопления галактик

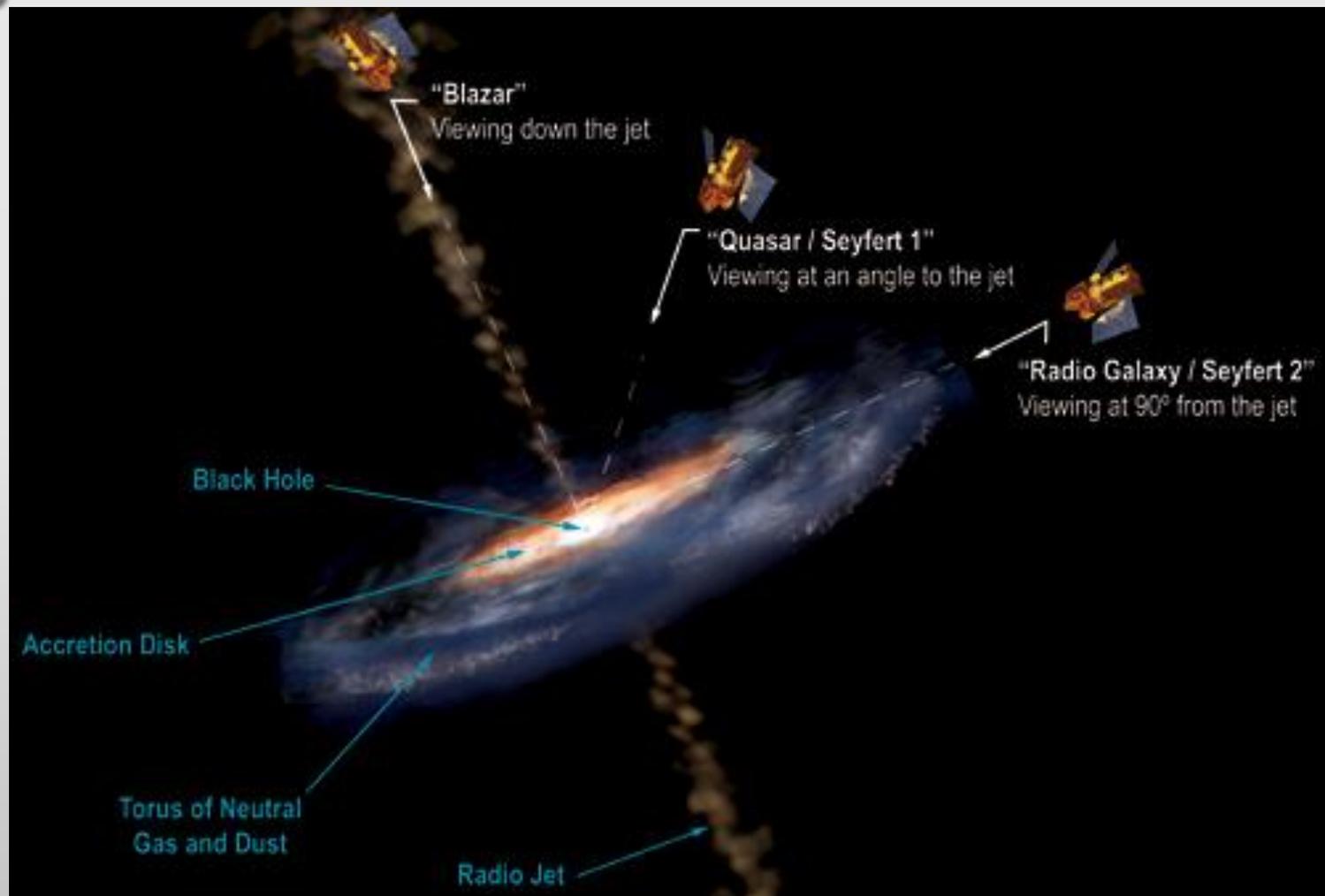
В процессе роста структуры происходят многочисленные слияния «строительных блоков». Каждый из блоков может иметь внутри черную дыру.

После слияния черная дыра медленно движется к центру новой структуры.

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

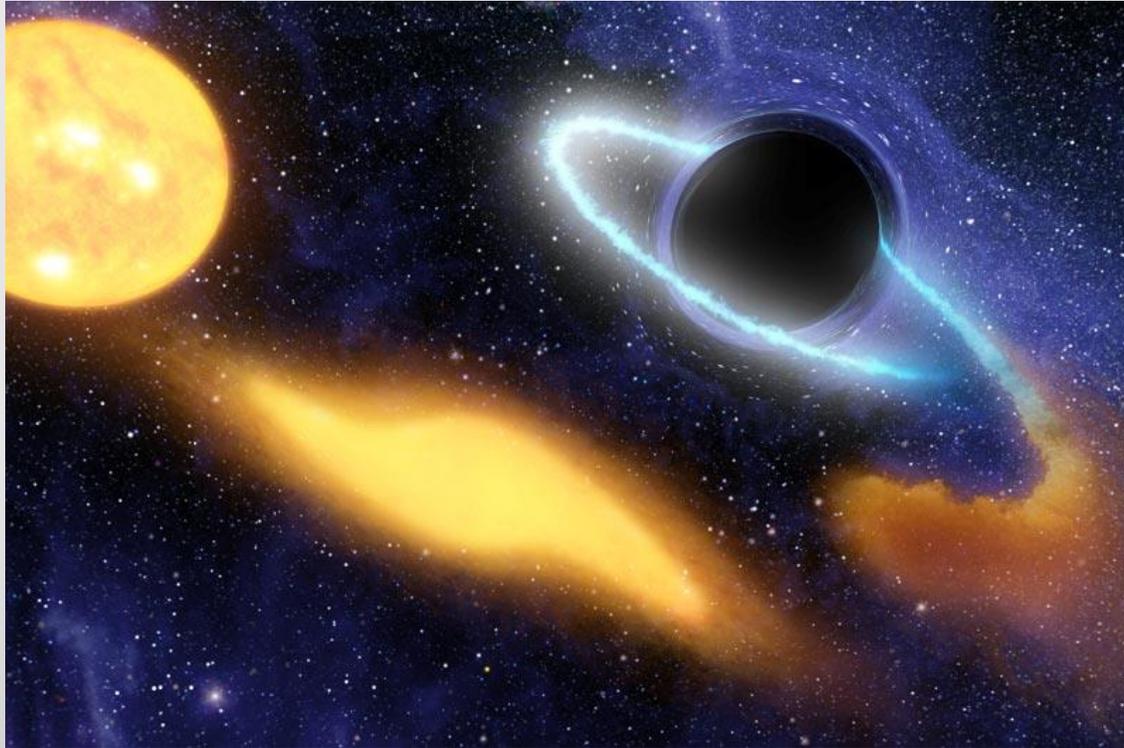


# Единая модель

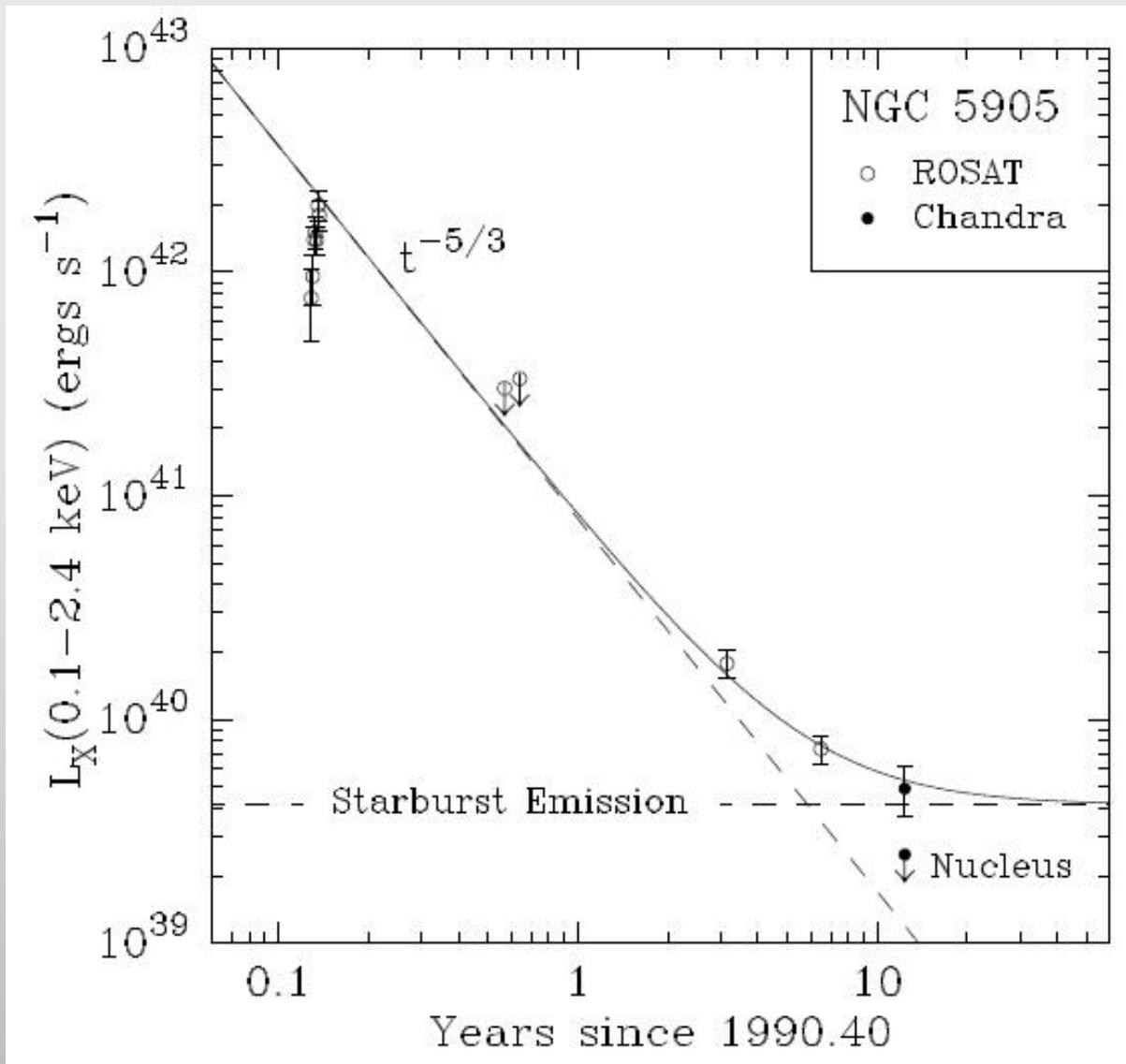


В рамках единой модели свойства различных активных галактик объясняются свойствами тора вокруг черной дыры и его ориентацией.

# Приливное разрушение звезд сверхмассивными черными дырами



# Вспышка в NGC 5905



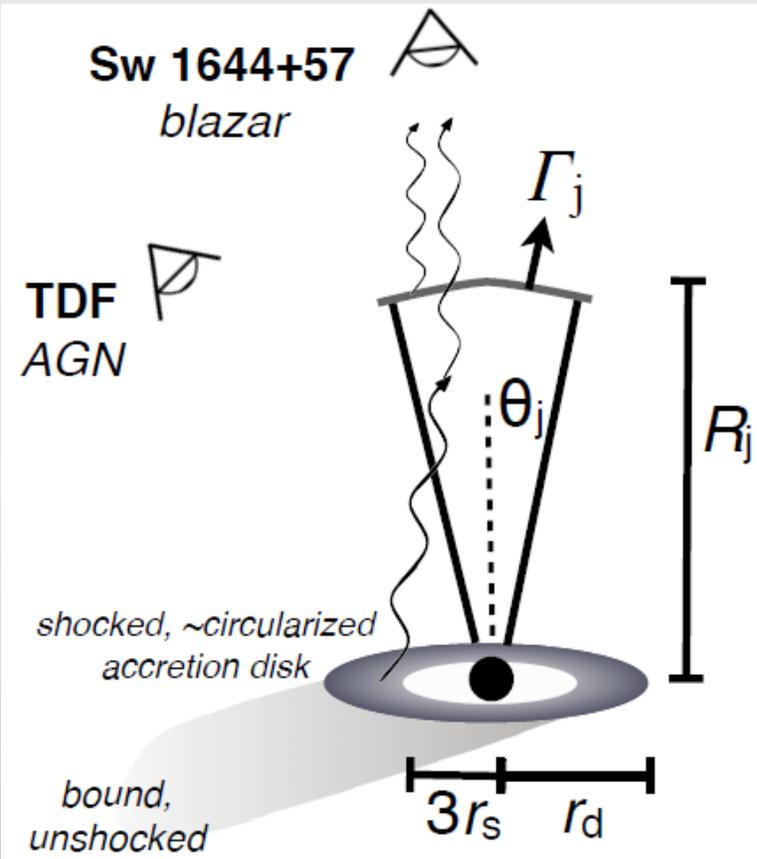
По всей видимости, звезда была разорвана приливными силами.

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

RX J1624.9+7554

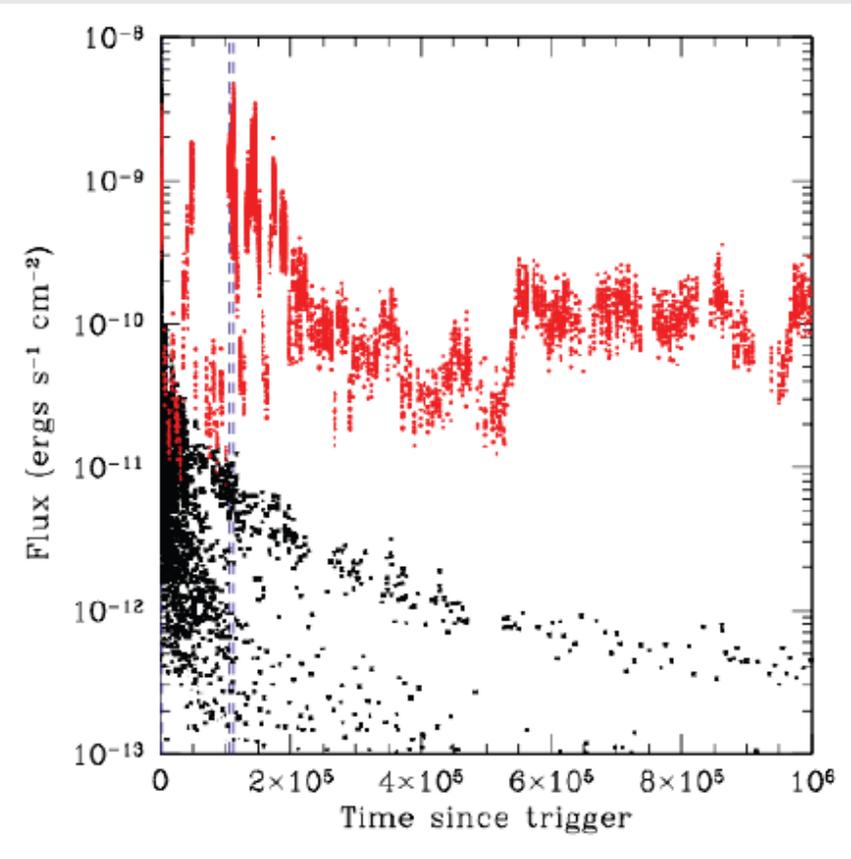
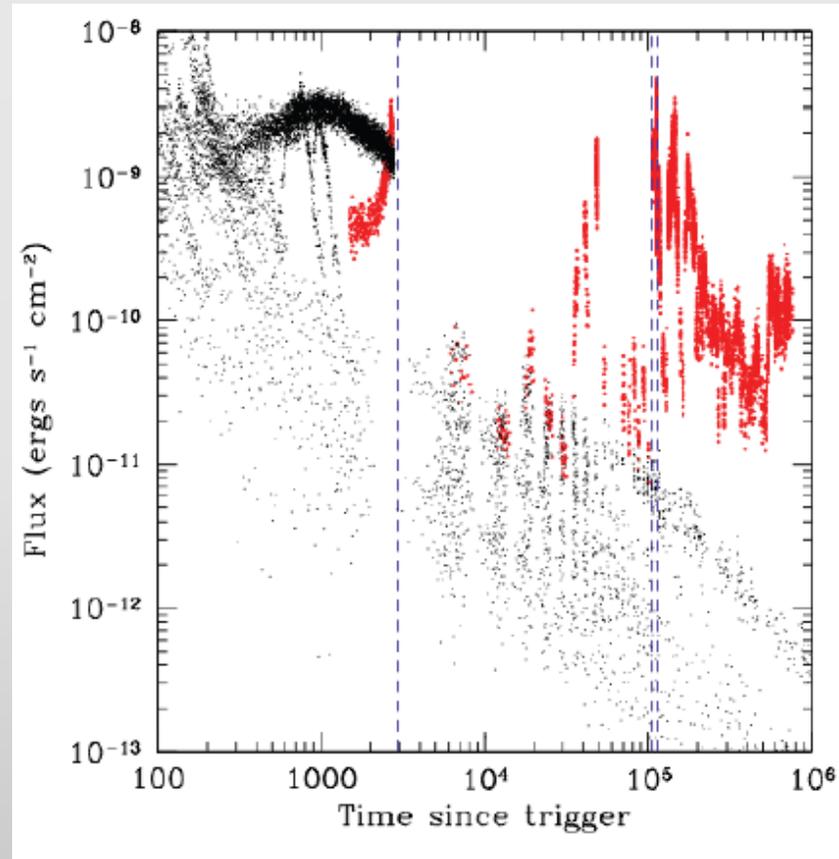
RX J1242.6-1119A

# Гамма-вспышка Sw 1644+57



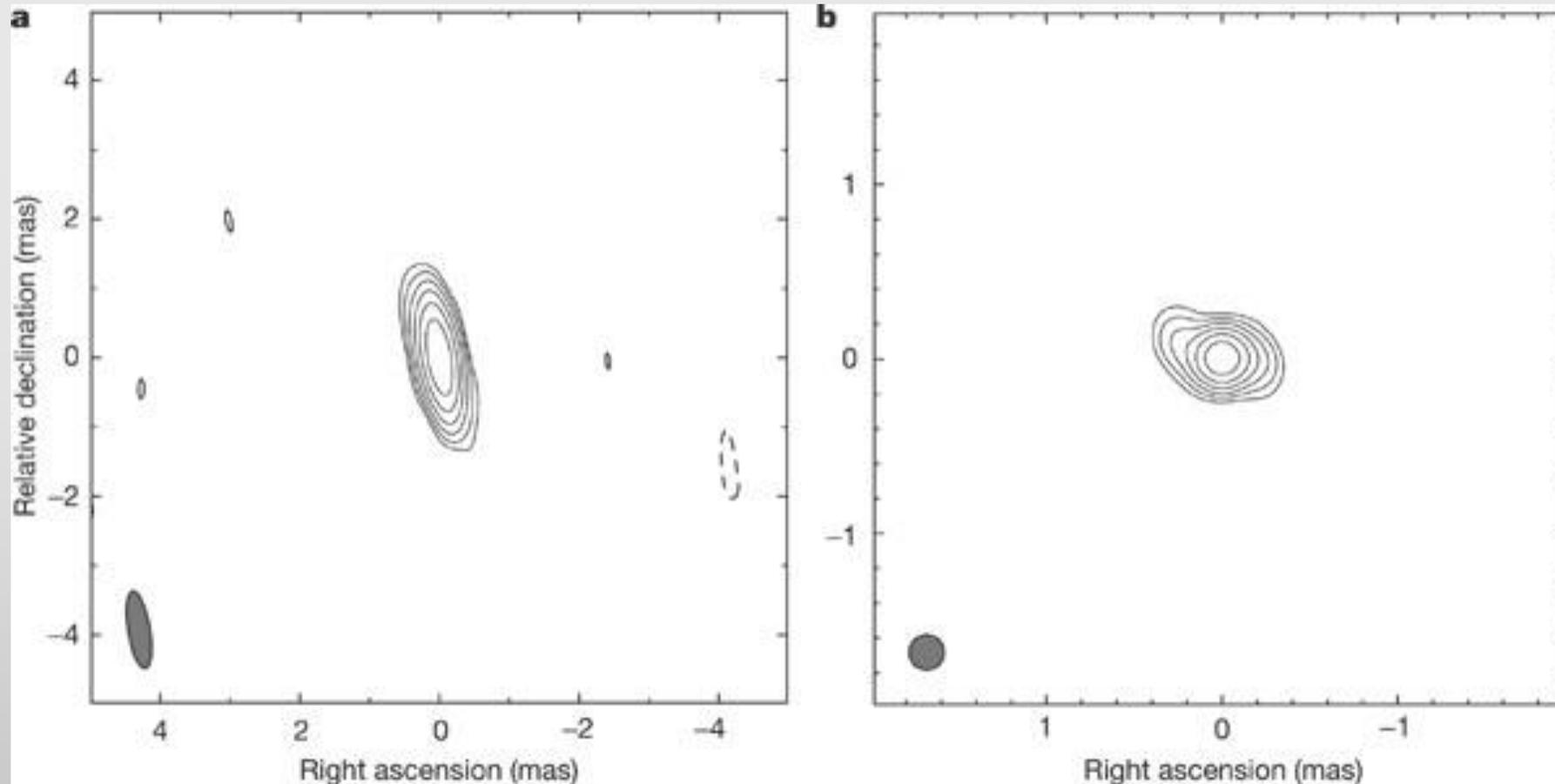
1104.3257

Также известна как GRB 110328A



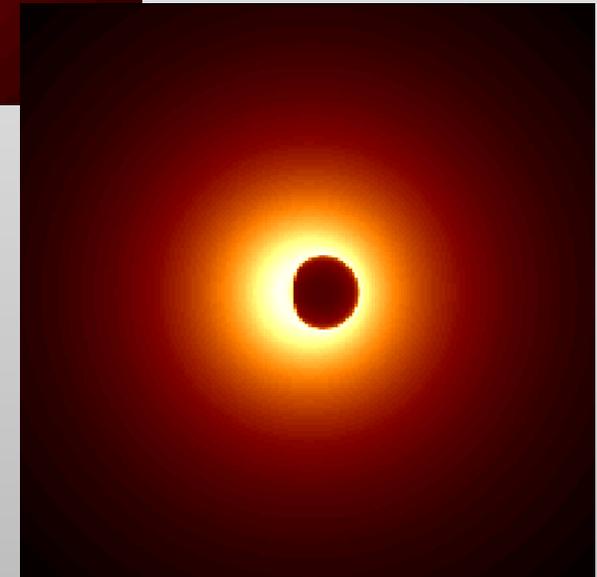
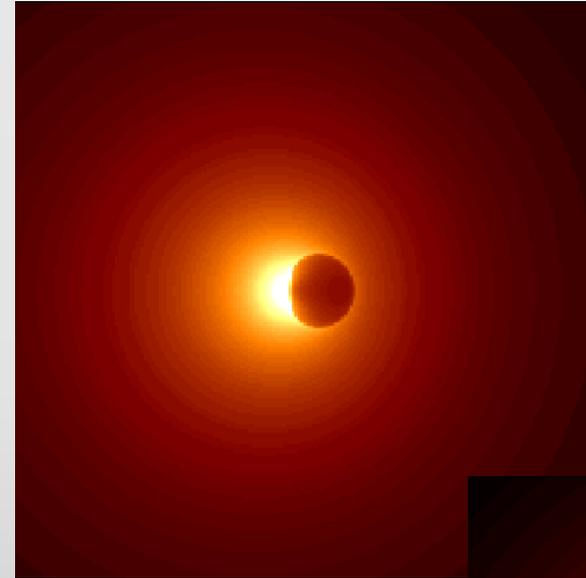
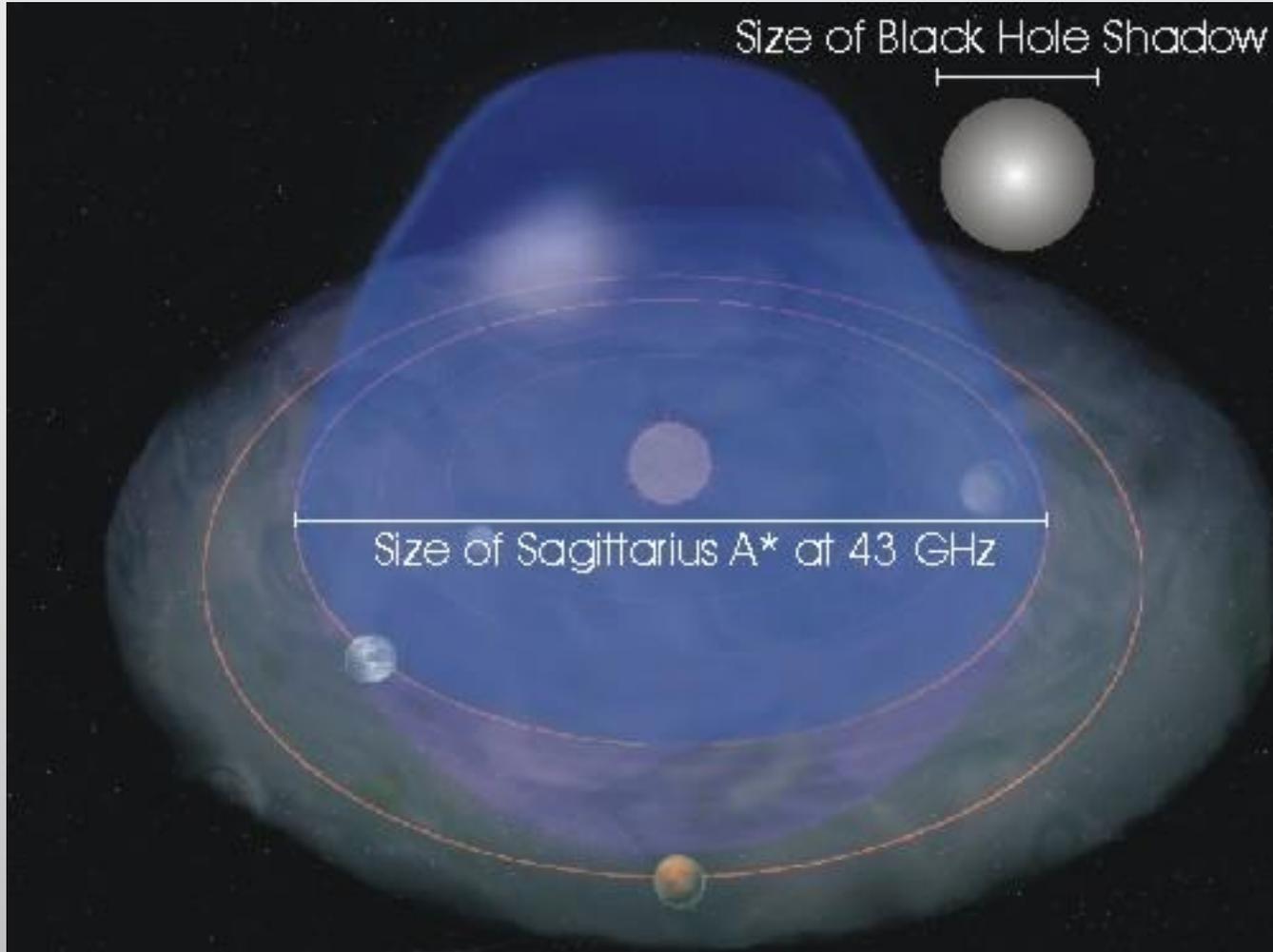
1104.3356

# Ограничения на размер Sgr A\*



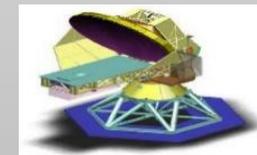
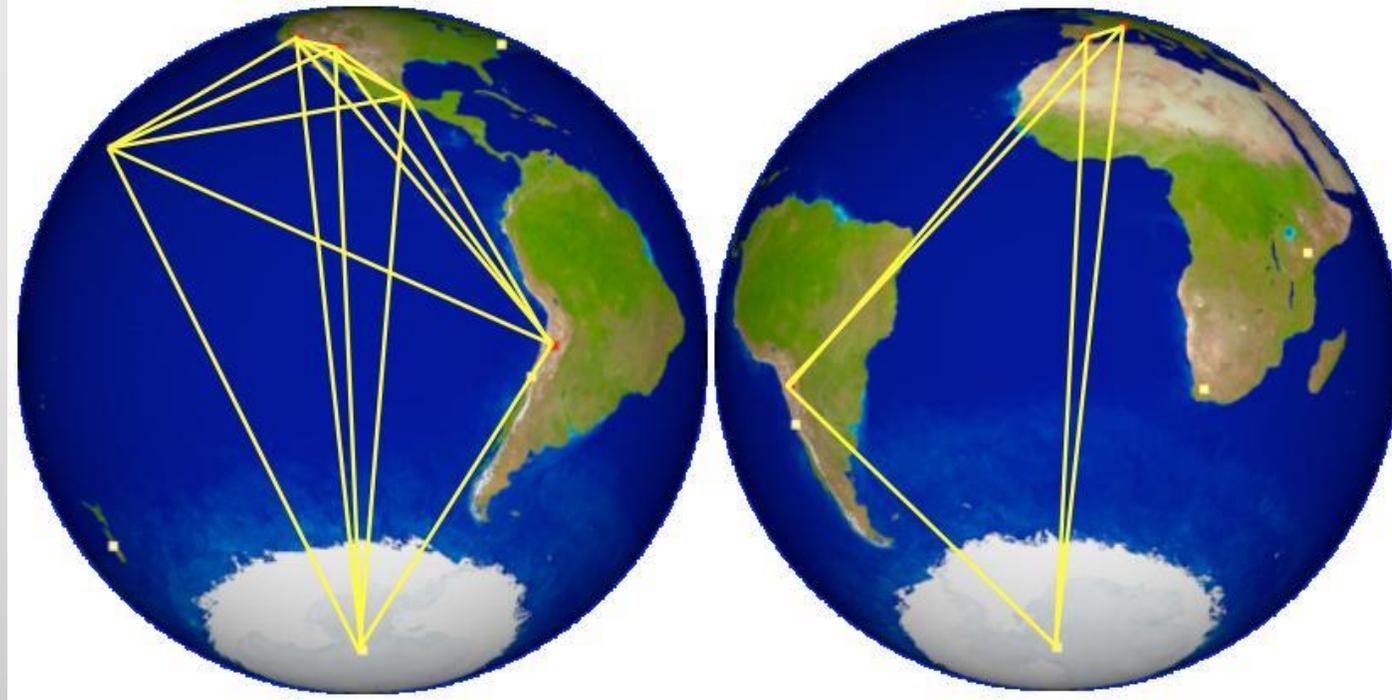
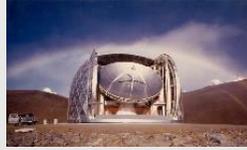
Используя VLBI, удалось получить очень жесткое ограничение на размер источника Sgr A\*: 1 а.е.

# «Тень» черной дыры

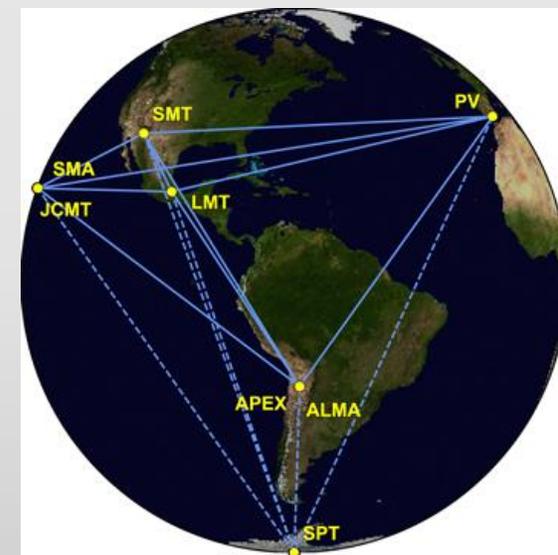
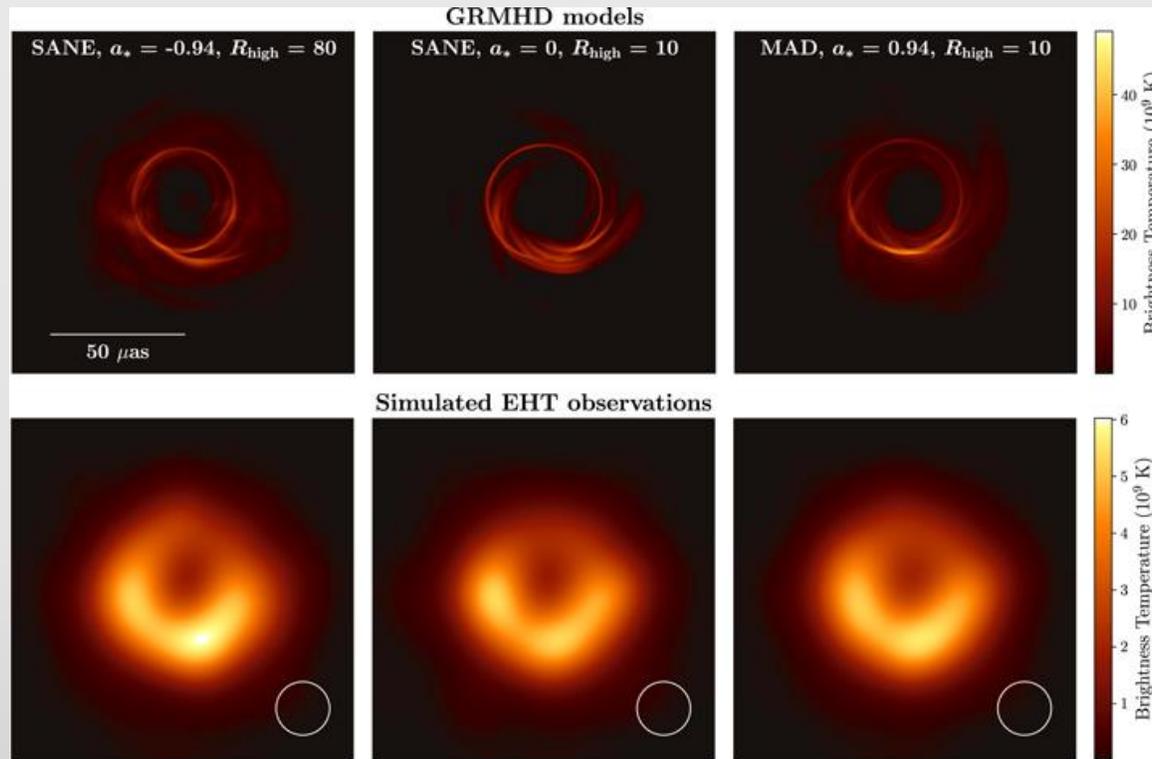
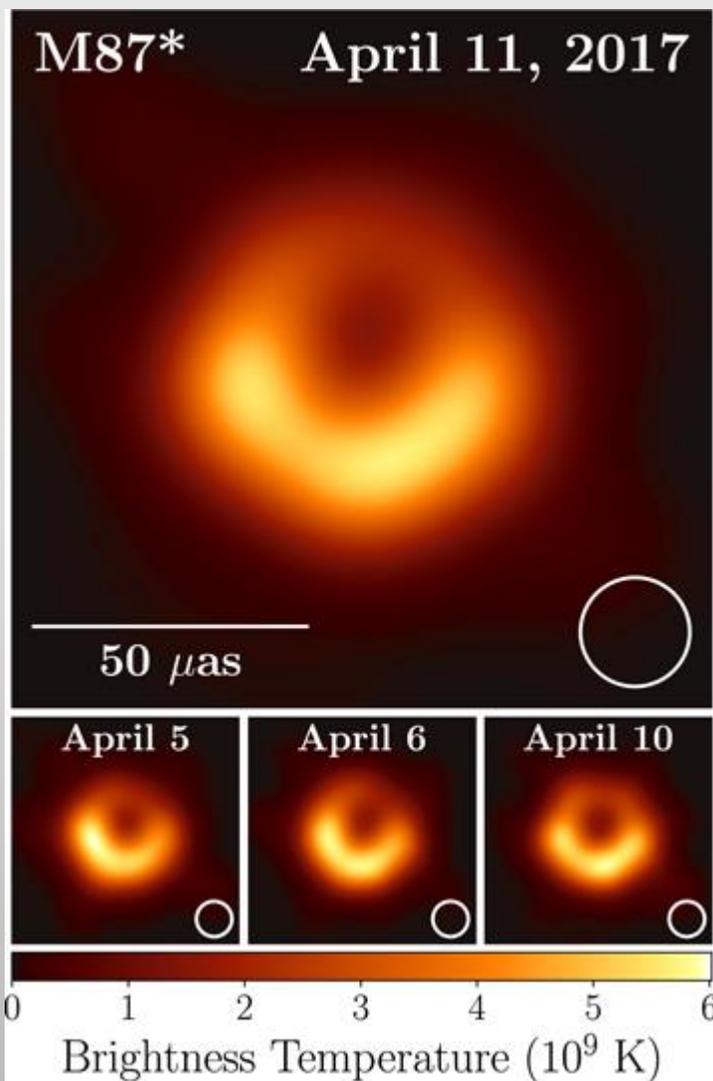


Некоторые детали можно найти в е-принте [astro-ph/9912263](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9912263)

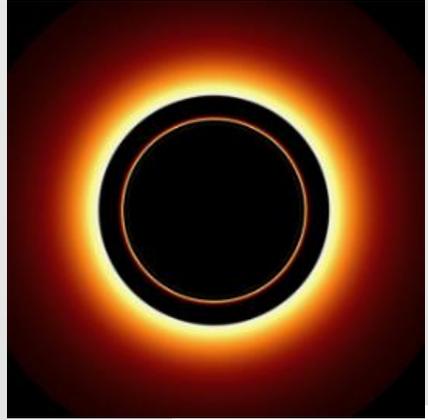
# Event horizon telescope



# Черная дыра в M87

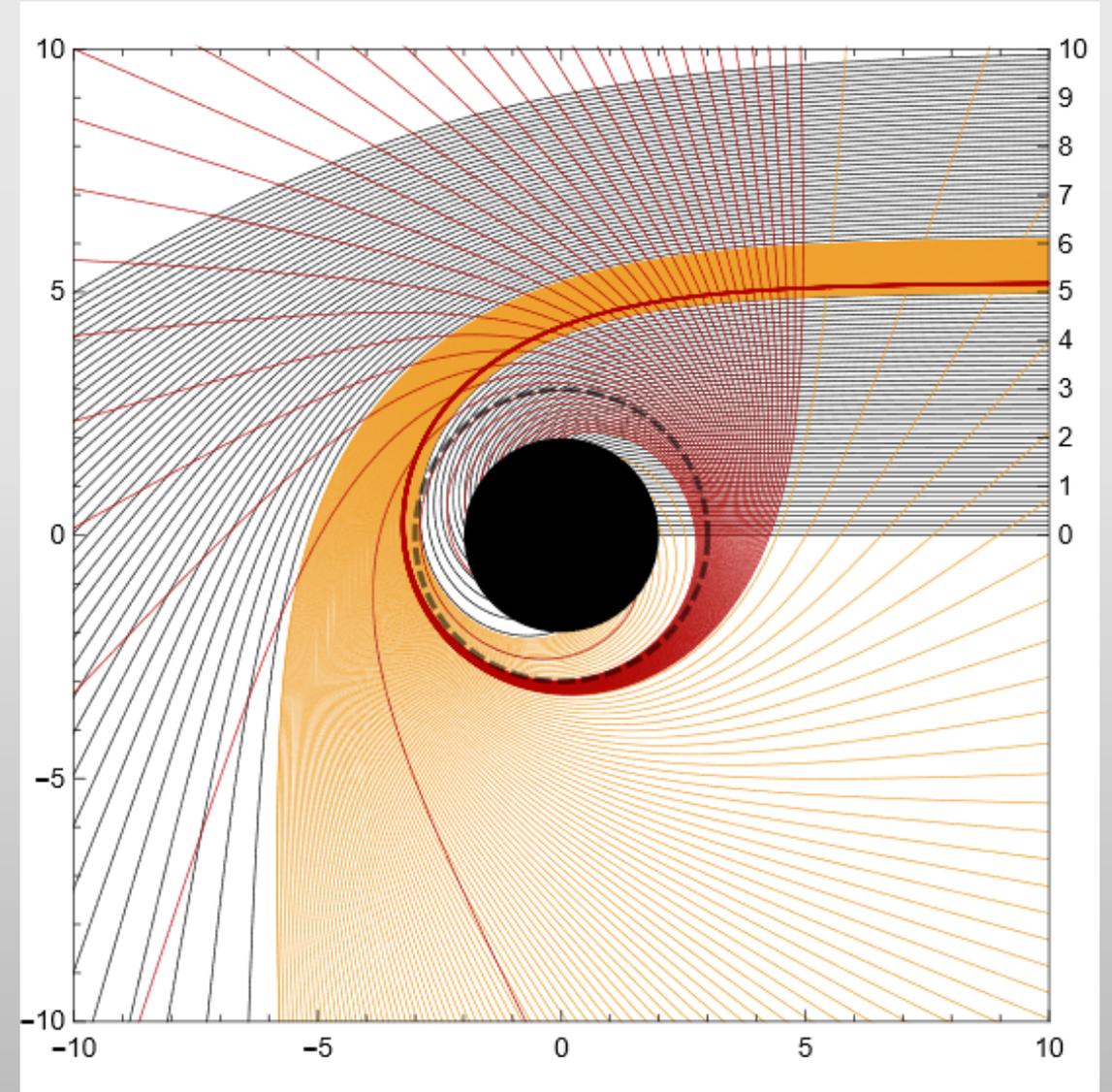
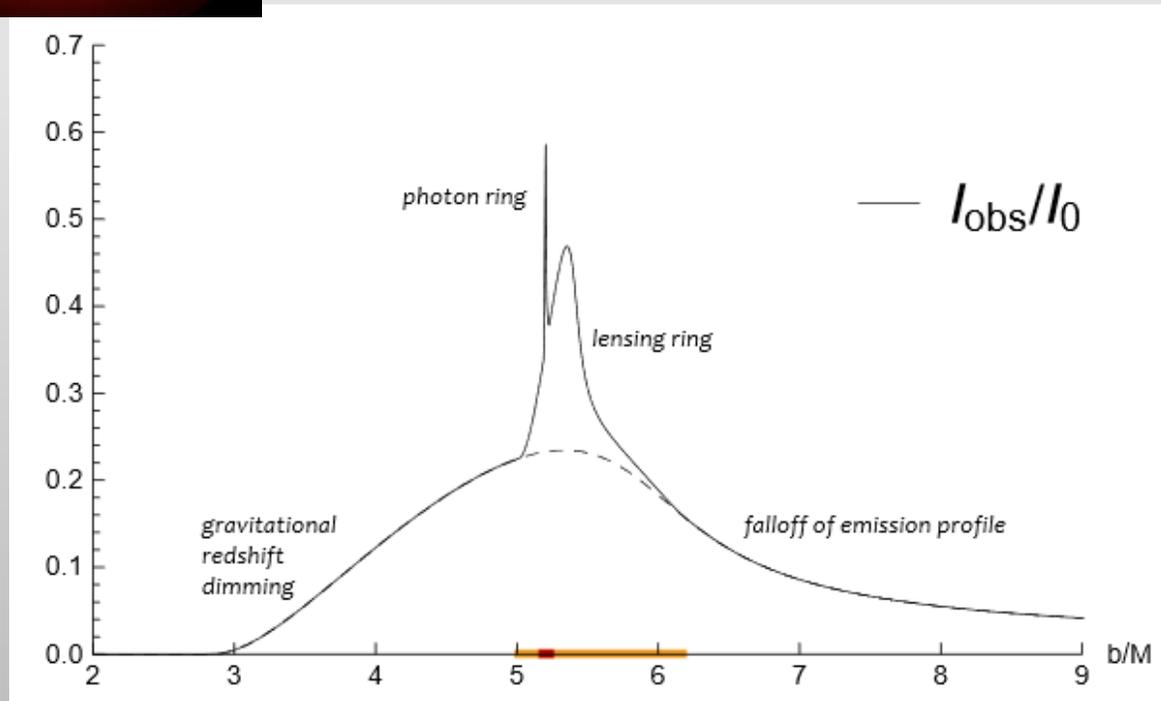


# Тень черной дыры, последняя устойчивая орбита и яркое кольцо

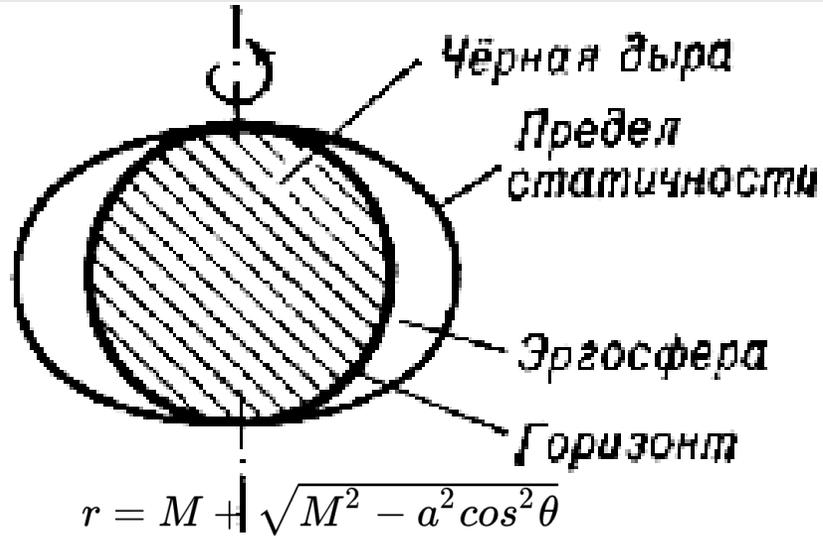


$$R_\infty = R / \sqrt{1 - r_g / R}$$

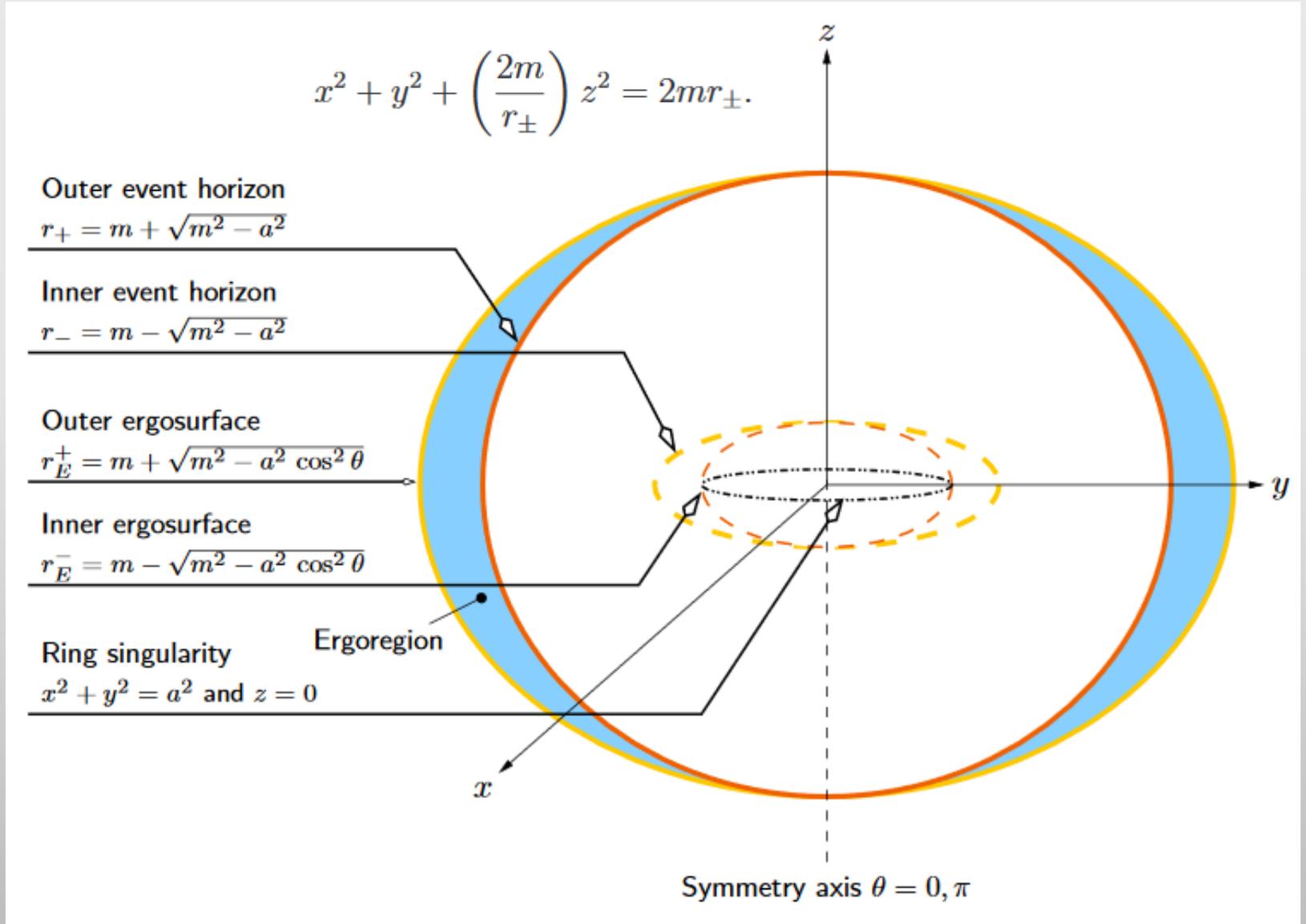
$$b_c = 3\sqrt{3}M$$



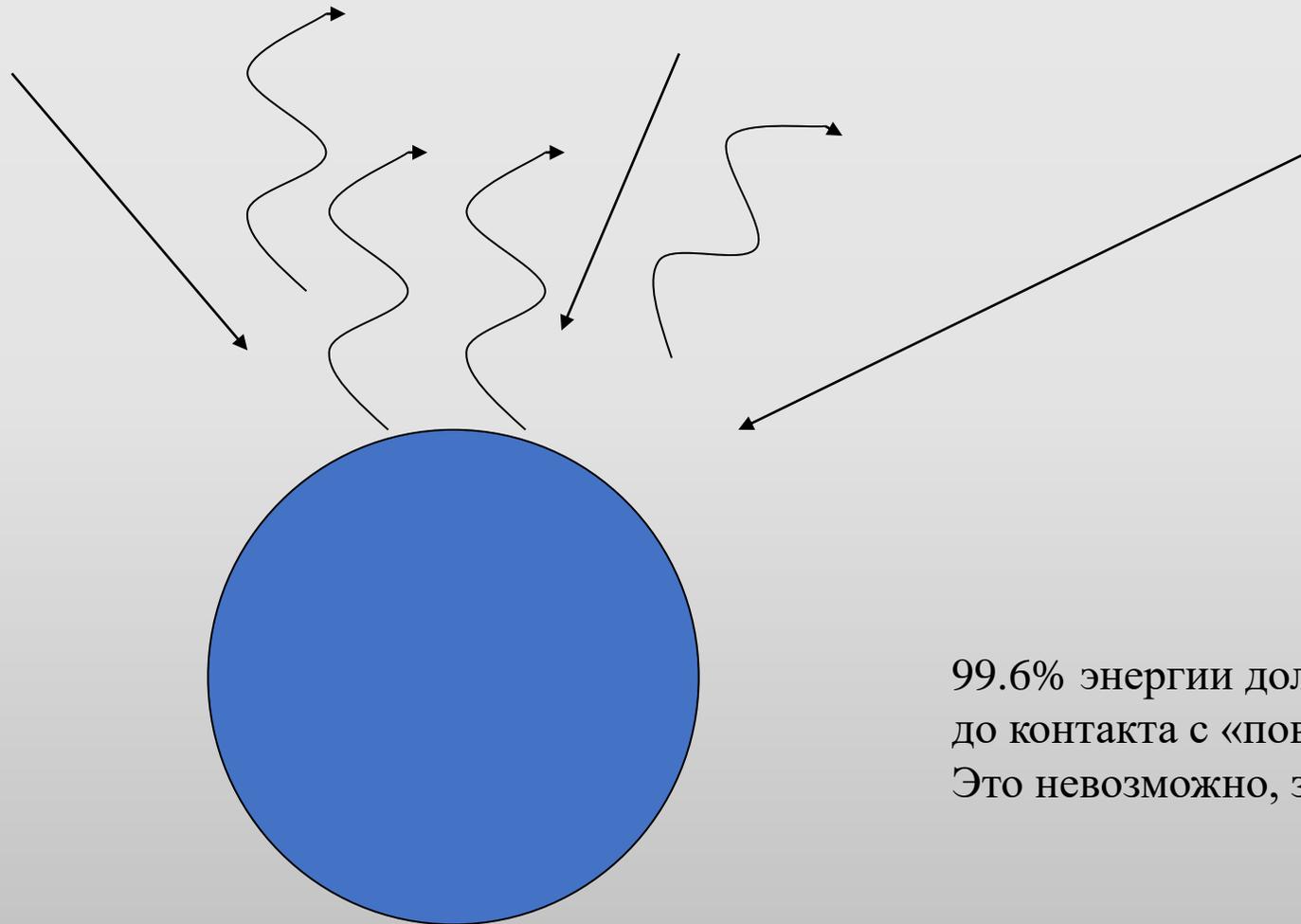
# Вращающиеся черные дыры



<http://www.astronet.ru/db/msg/1188232>



# В Sgr A\* нет поверхности?



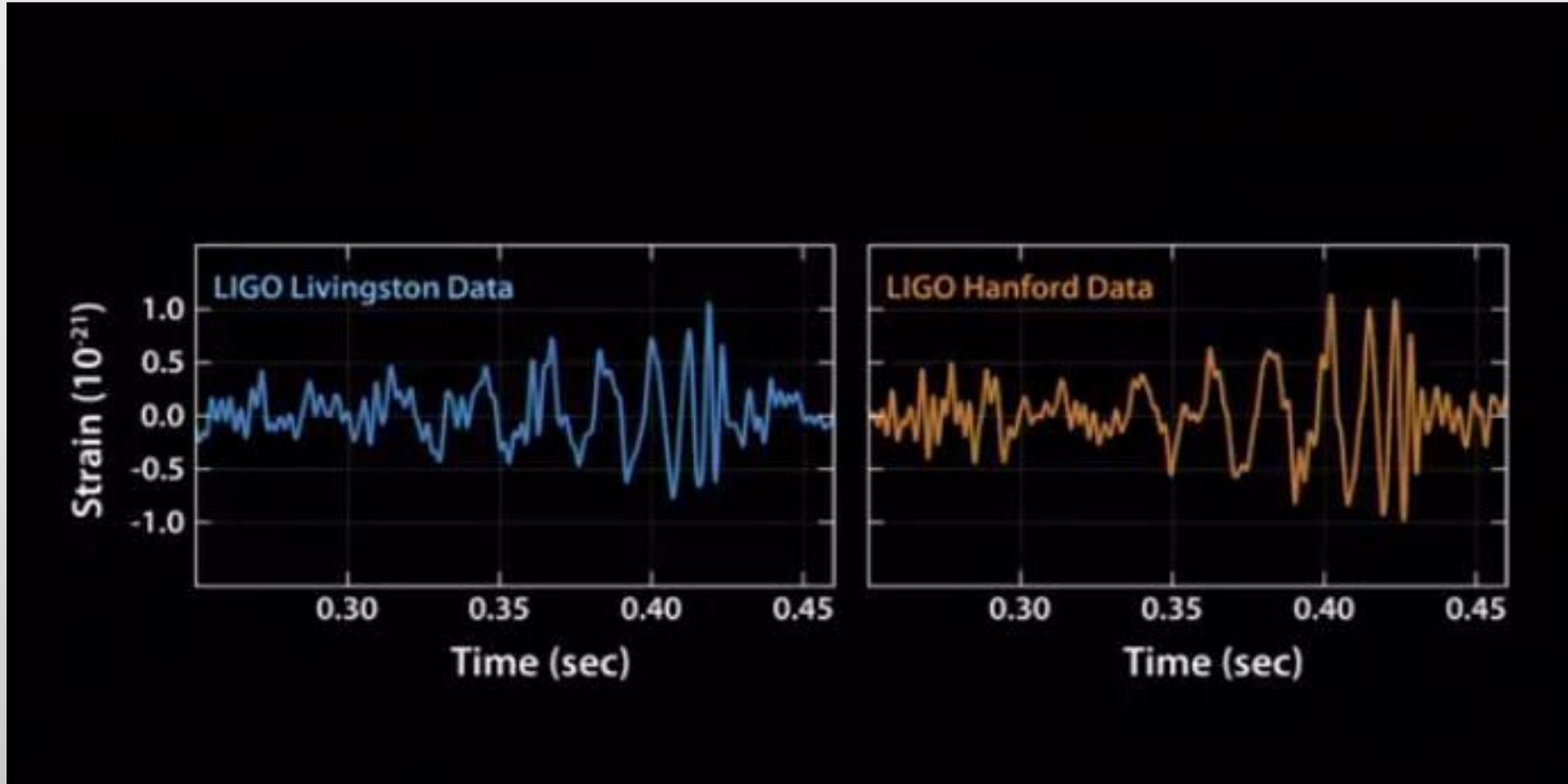
Наблюдается только излучение от потока, но не от поверхности.

Наиболее легко это объясняется наличием горизонта.

99.6% энергии должно выделять в потоке до контакта с «поверхностью».

Это невозможно, значит поверхности нет.

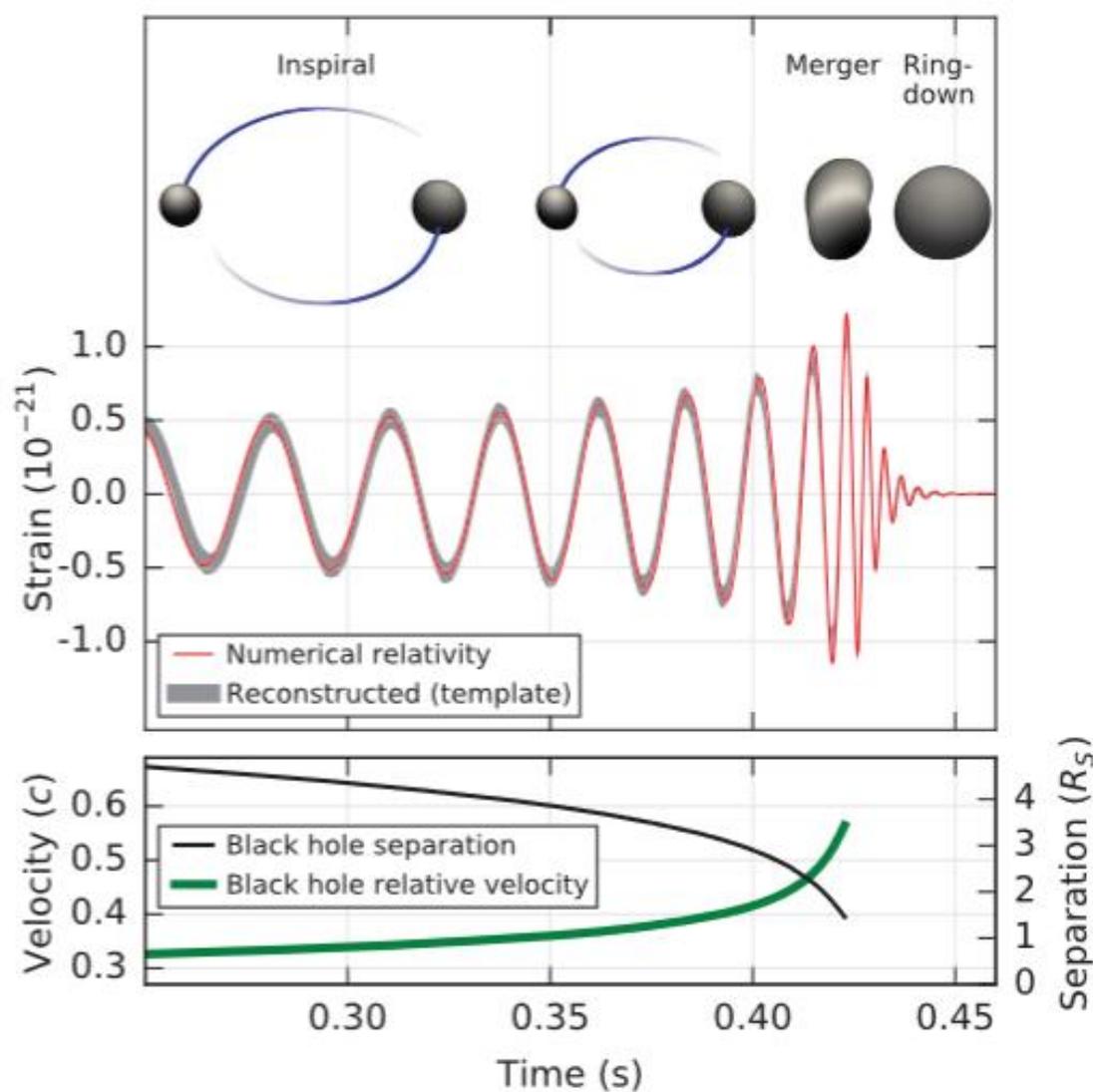
# GW150914 13-50 по Московскому времени



<http://www.ligo.org>

Официальное объявление 11 февраля 2016 года.  
За 16 дней совместных наблюдений двух детекторов  
надежно обнаружено одно 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.

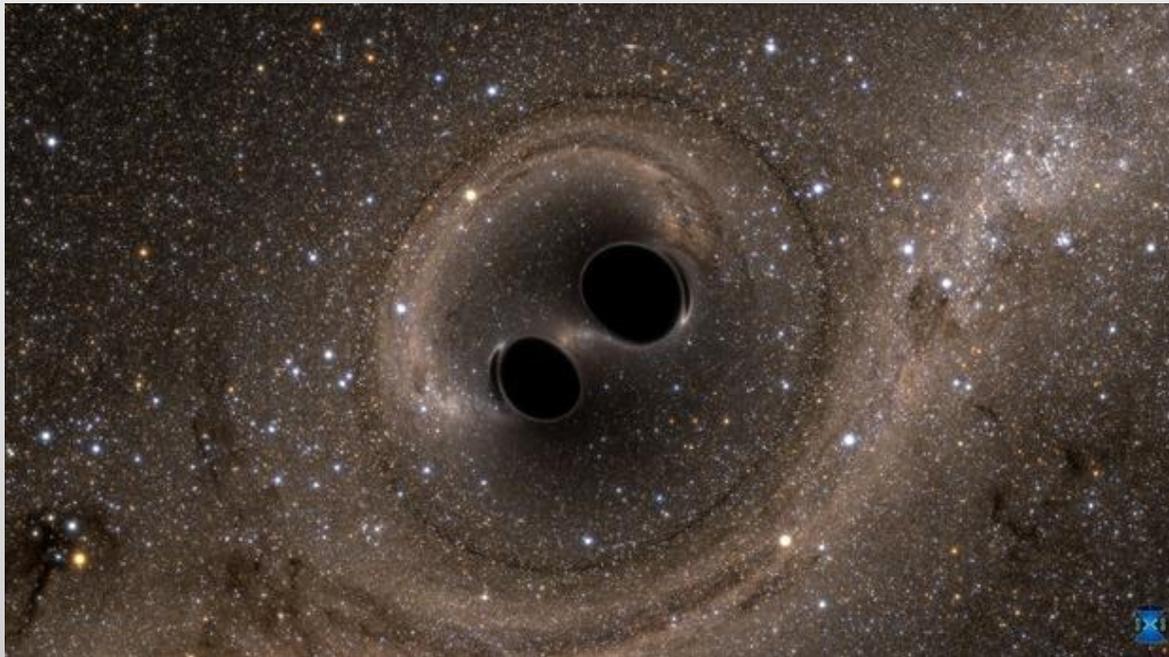
Отношение сигнал/шум = 24

Достоверность детектирования >5.1 сигма.

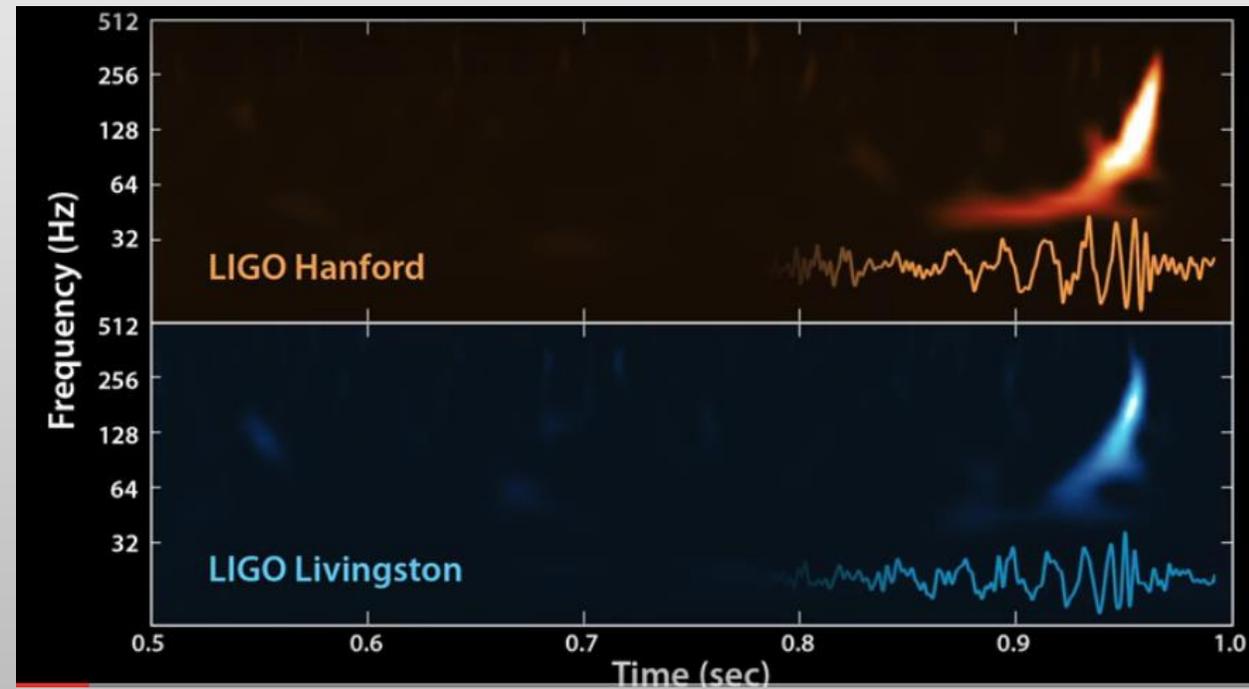
Primary black hole mass	$36_{-4}^{+5} M_{\odot}$
Secondary black hole mass	$29_{-4}^{+4} M_{\odot}$
Final black hole mass	$62_{-4}^{+4} M_{\odot}$
Final black hole spin	$0.67_{-0.07}^{+0.05}$
Luminosity distance	$410_{-180}^{+160} \text{ Mpc}$
Source redshift $z$	$0.09_{-0.04}^{+0.03}$

# 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.



www.ligo.caltech.edu



# Мощность

100 000 000 000 000 000 000 000 светимостей Солнца.

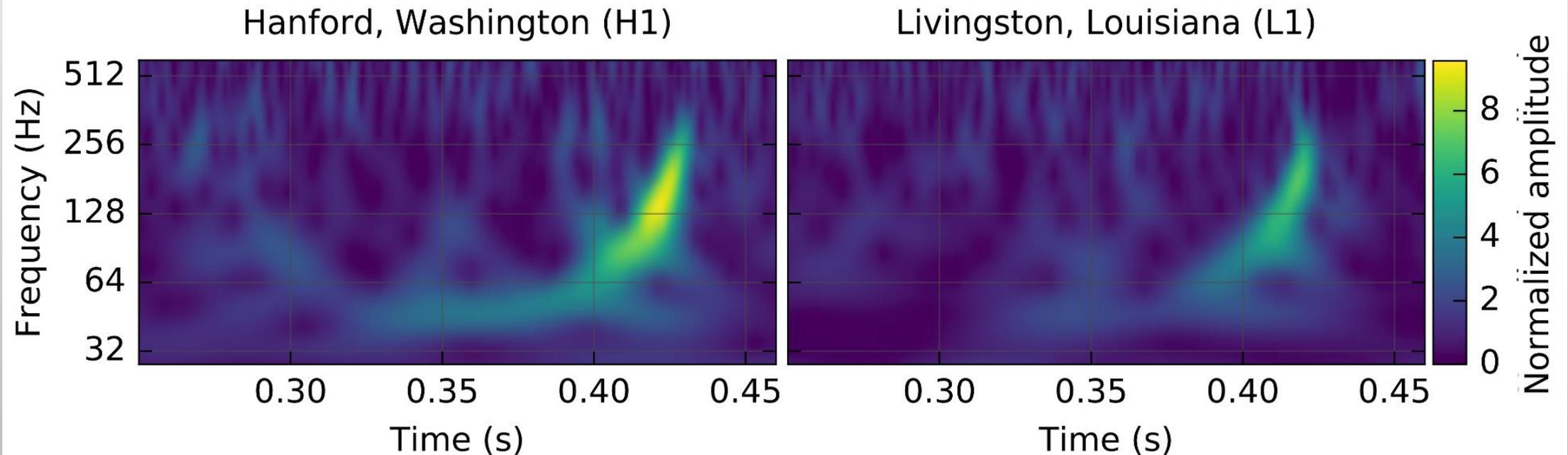
Число волос на голове 100 000

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



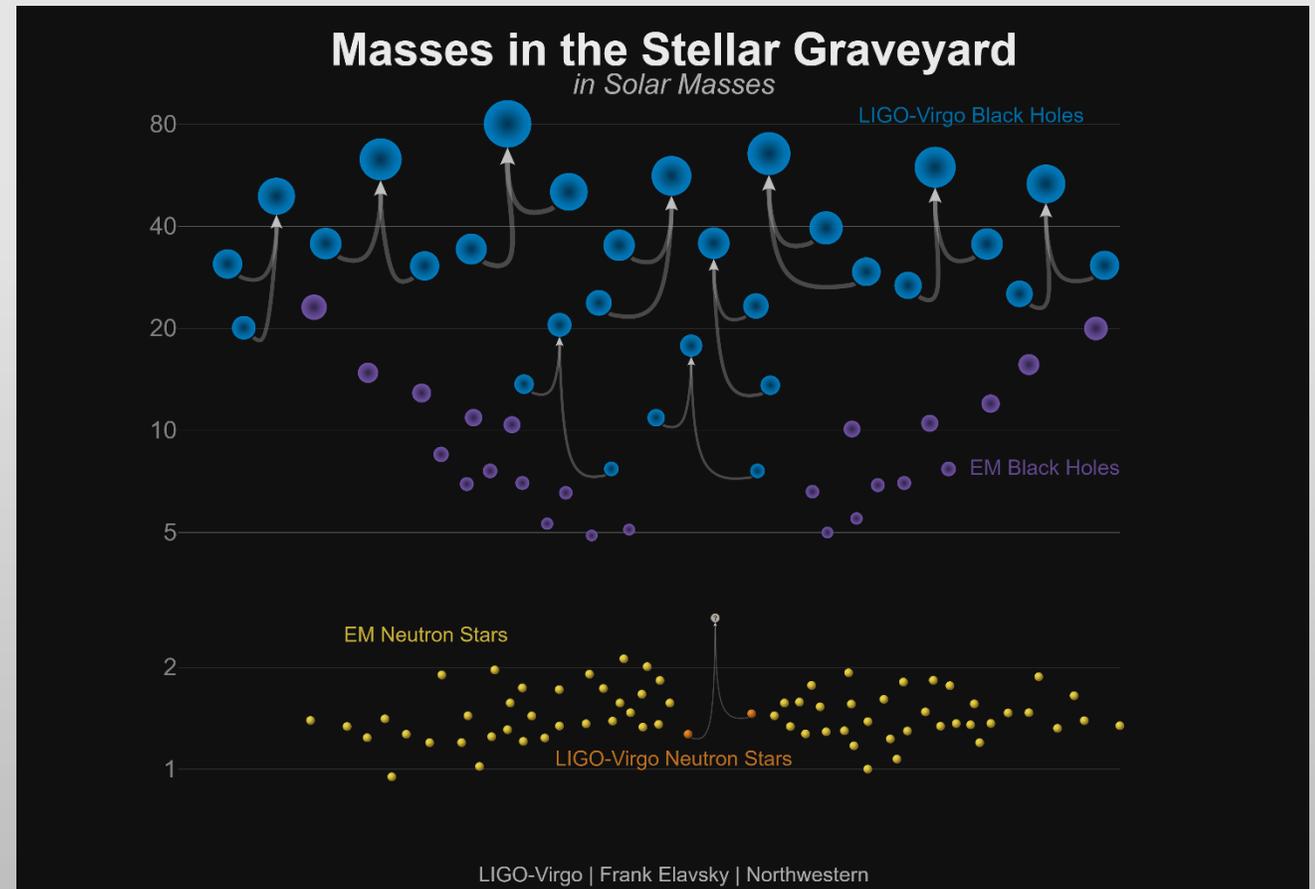
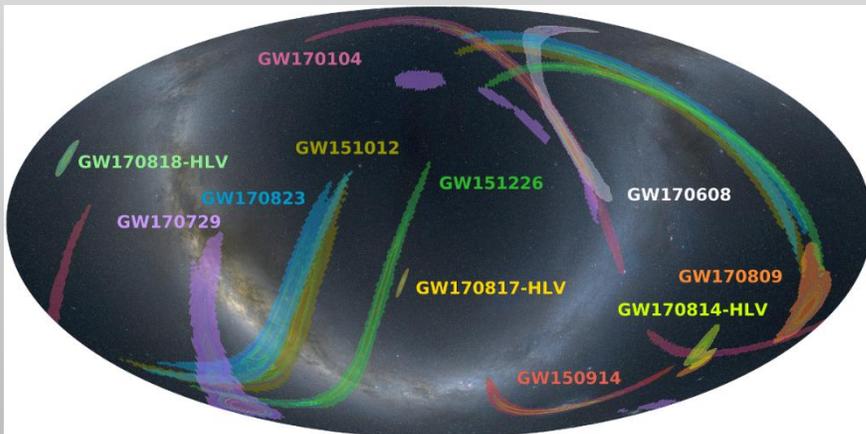
# События LIGO/VIRGO за первые два сеанса

Одиннадцать всплесков (до апреля 2019 г.).

Один из всплесков с нейтронной звездой.

Пять событий – совместно с VIRGO  
(arXiv: 1811.12907, 1811.12940).

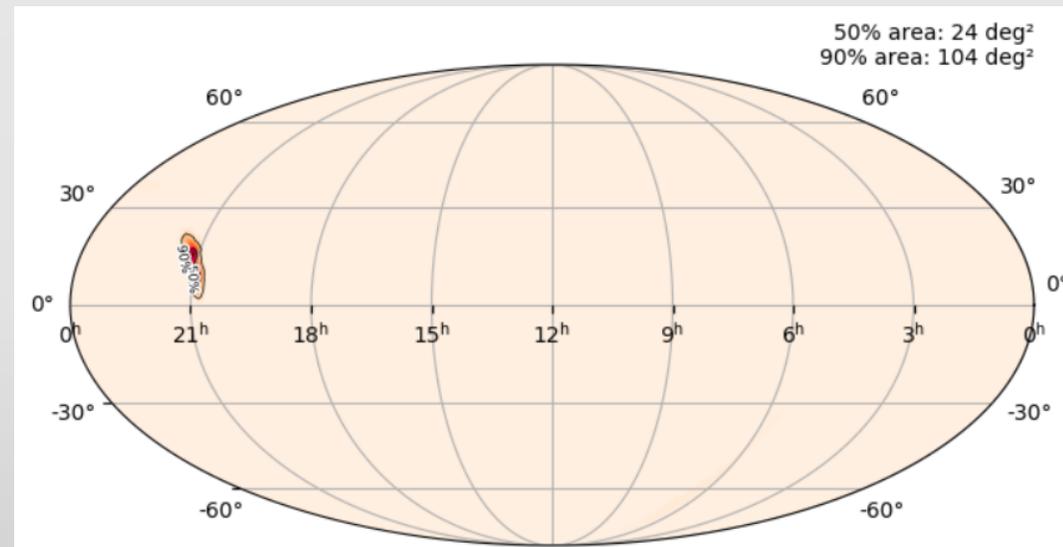
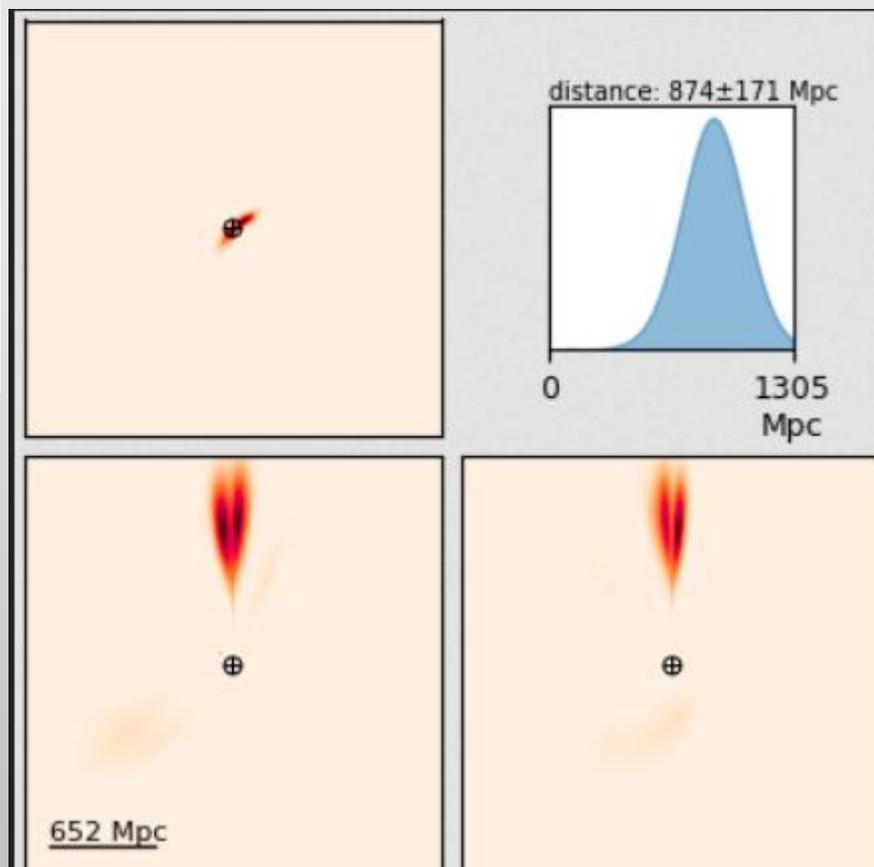
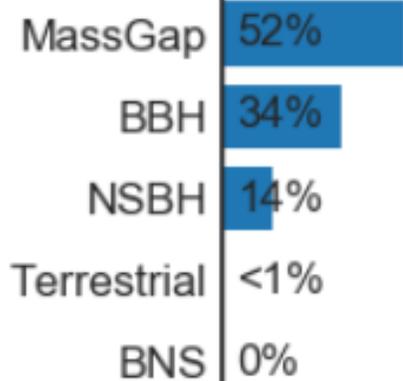
- GW150914
- GW151012
- GW151226
- GW170104
- GW170608
- GW170729
- GW170809 – VIRGO
- GW170814 – VIRGO
- GW170817 – VIRGO, H3
- GW170818 – VIRGO
- GW170823 – VIRGO



# Результаты 2019 года

<https://gracedb.ligo.org/>

Около трех десятков событий за апрель-октябрь

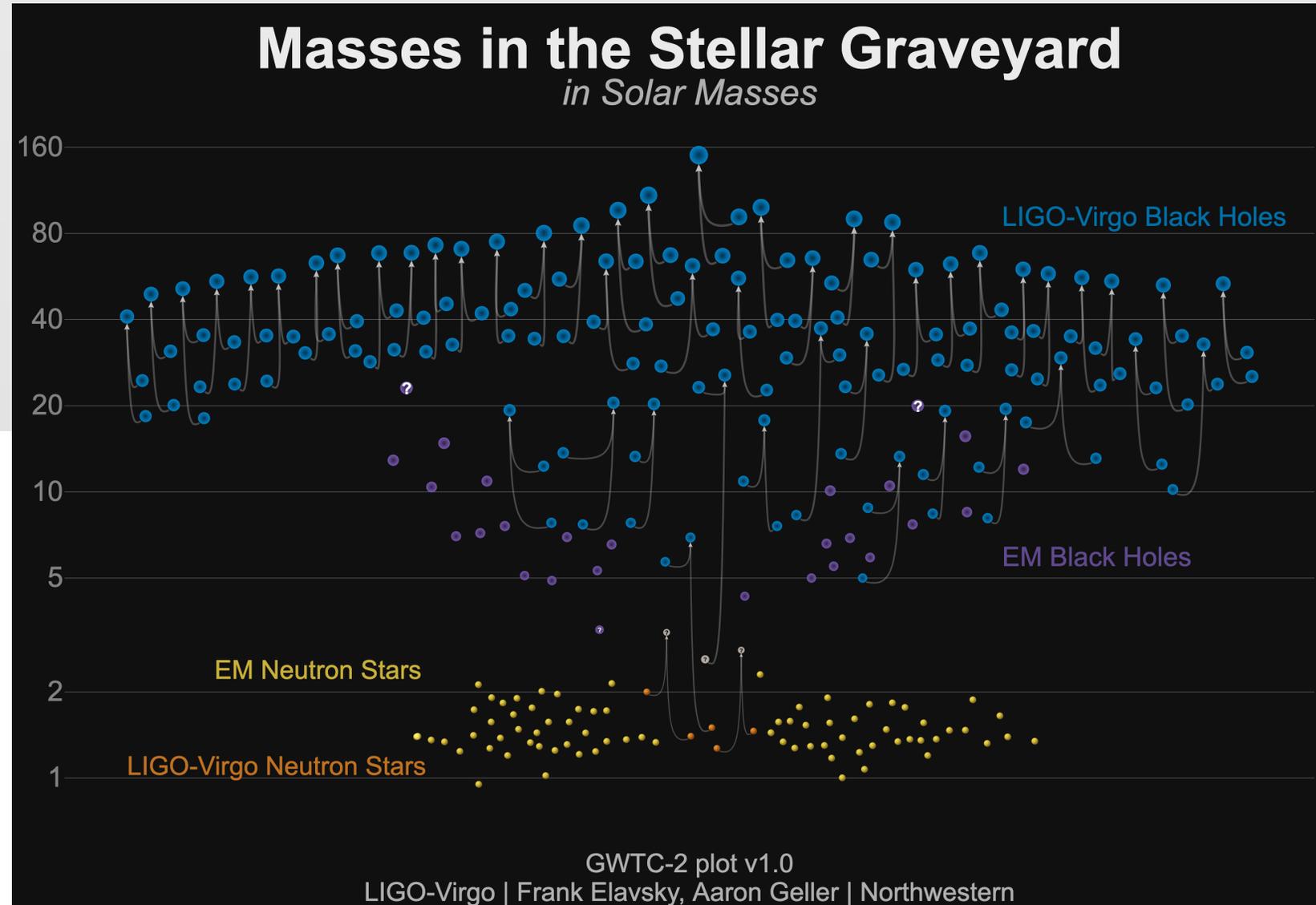
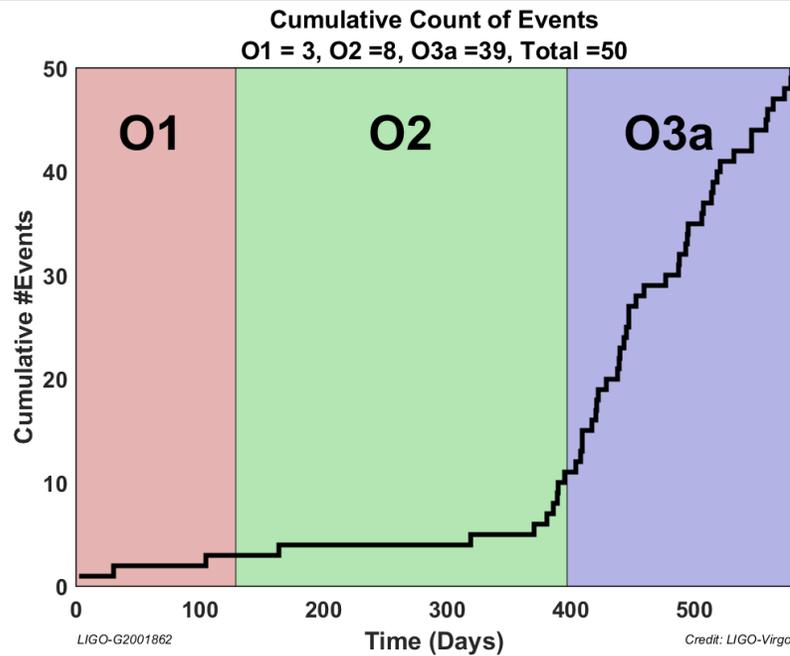


Последующая обработка позволила выявить в данных дополнительные события.

# Второй каталог LIGO/VIRGO

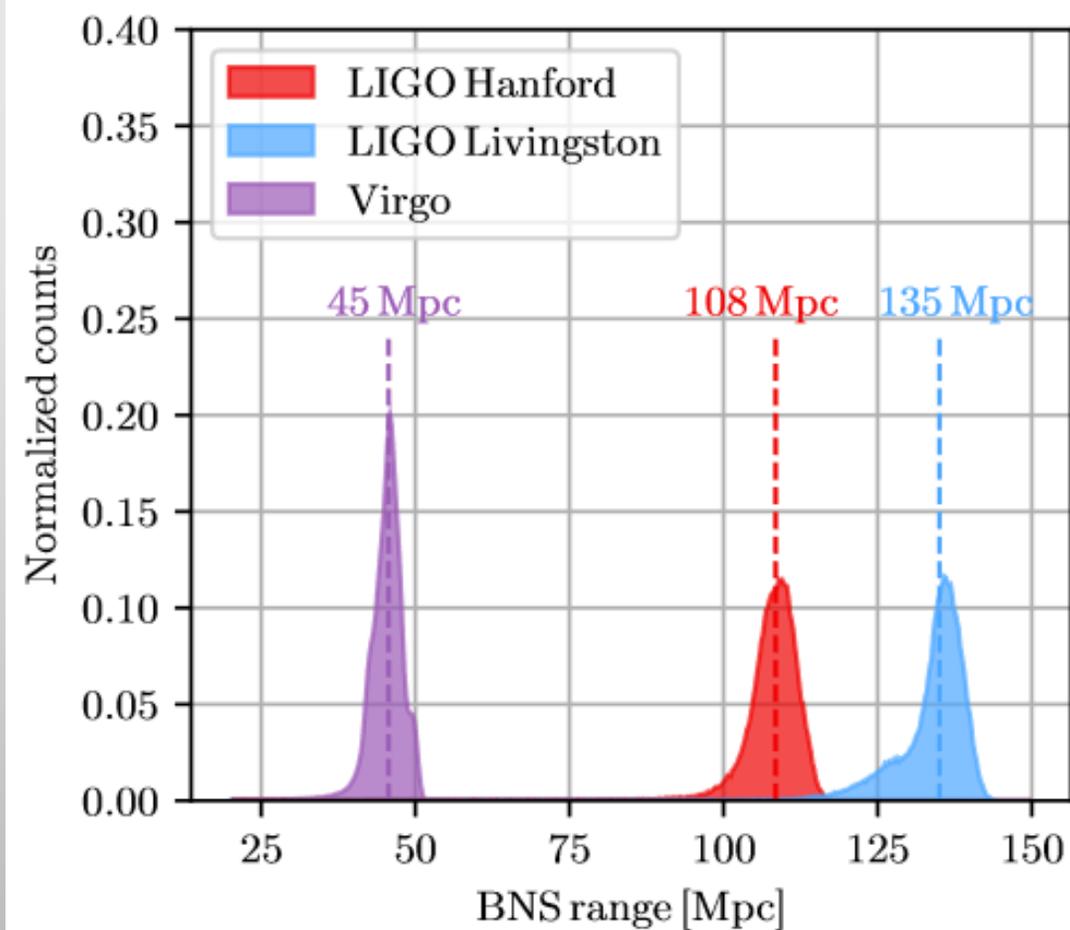
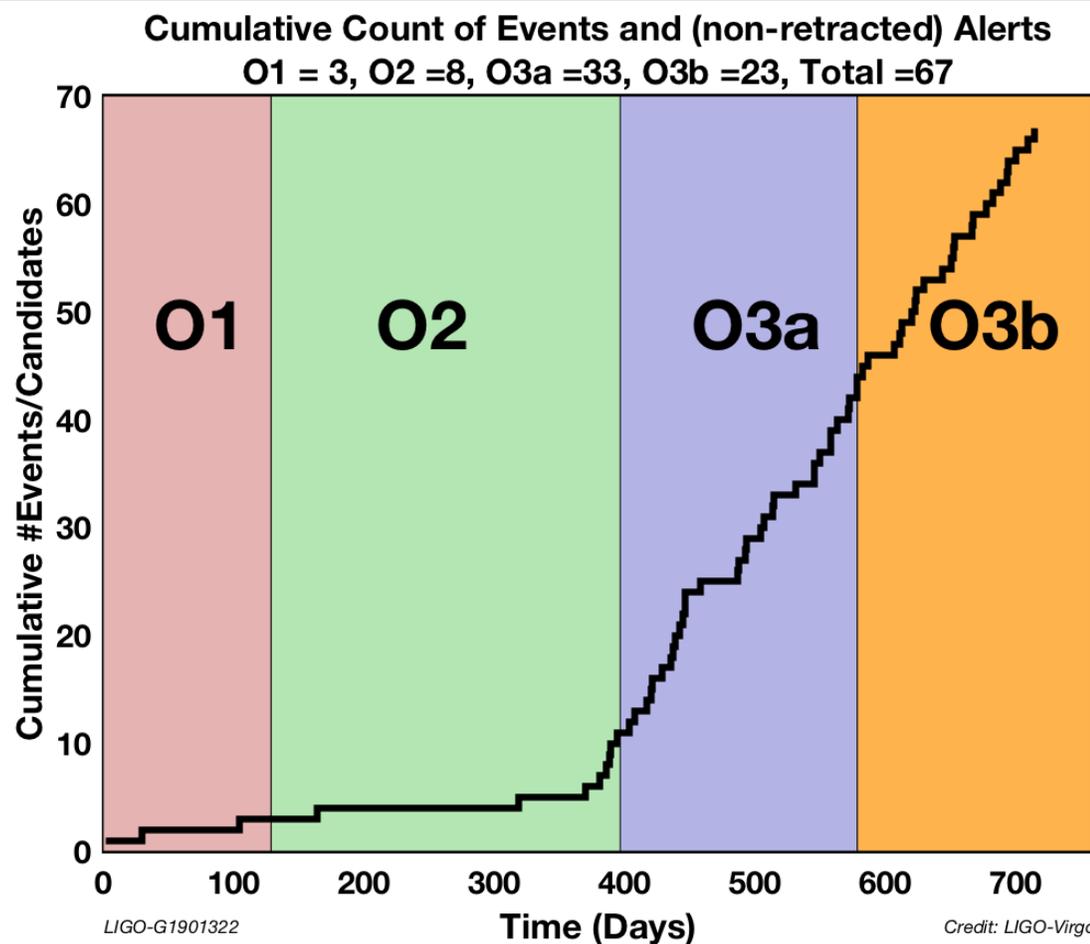
Второй каталог событий LIGO и VIRGO. В него вошло 39 событий из первой половины третьего сеанса (апрель-октябрь 2019), а также 8 событий из ранних сеансов. Всего 47.

2010.14527, 2010.14533



# LIGO/Virgo – 3й научный сеанс

2010.14527



# О3а: параметры

2010.14527

Представлен каталог событий, зарегистрированных в 1м и 2м сеансах, а также за первую половину 3го сеанса – О3а.

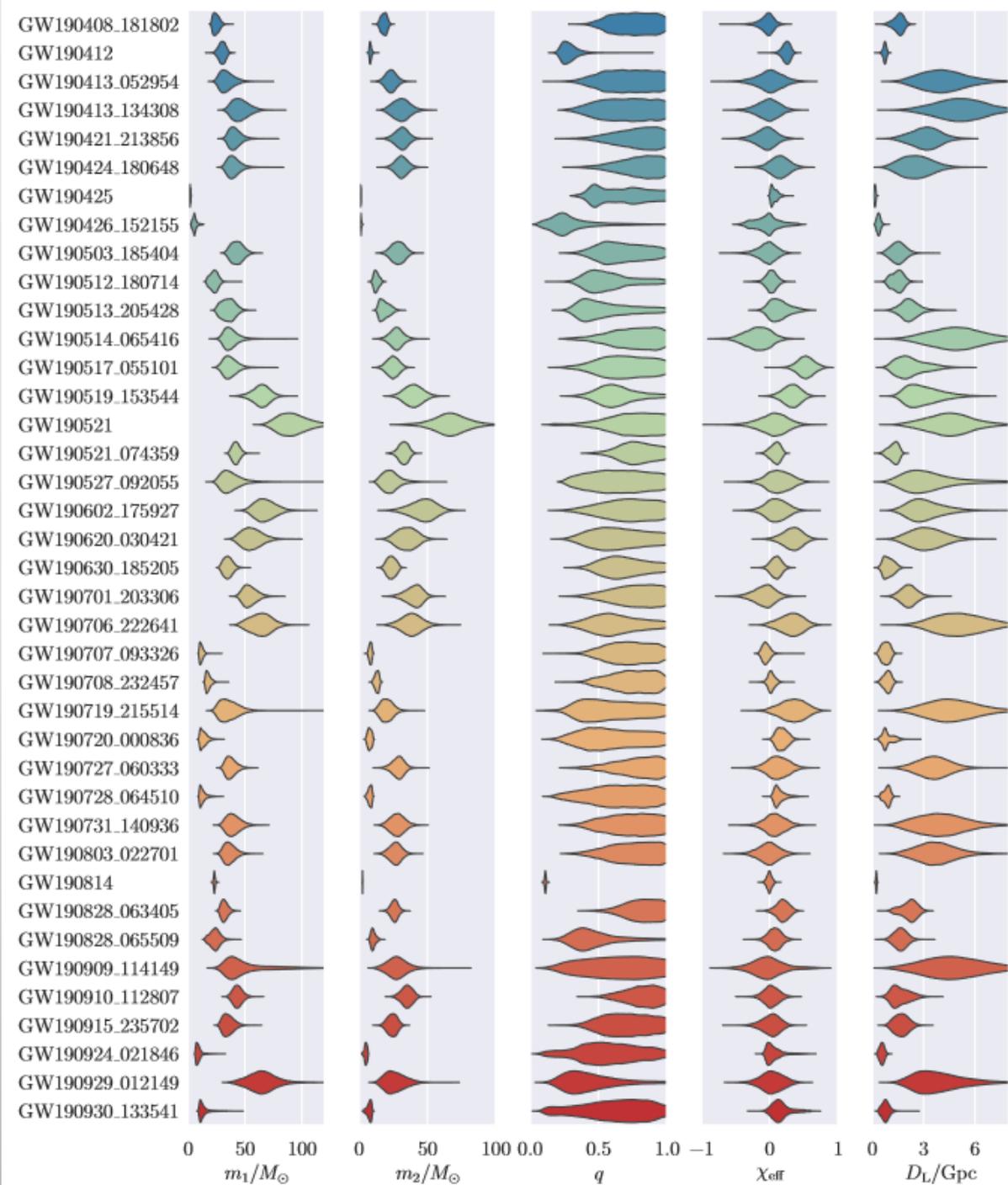
В каталог вошло 39 событий из О3а (апрель-октябрь 2019), а также 8 событий из ранних сеансов.

Всего 47.

Из них 13 представлены впервые – это результат более детальной обработки данных наблюдений.

Из 47 событий: 44 - слияния двух черных дыр и 2 слияния двух нейтронных звезд.

С оставшимся - непонятно (то ли NS-BH, то ли BH-BH).



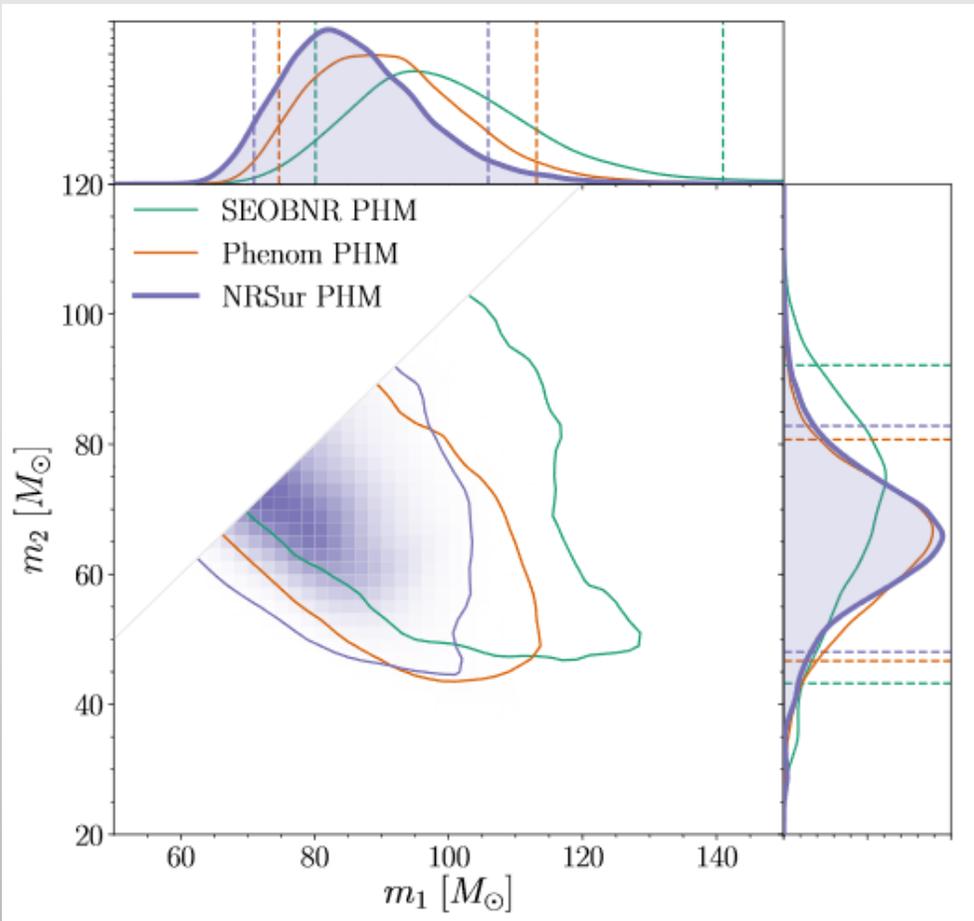
# O3b и полный каталог

O3b – 36 событий  
GWTC-3 – 76  
Всего: 90 событий

События с малой массой в GWTC-3

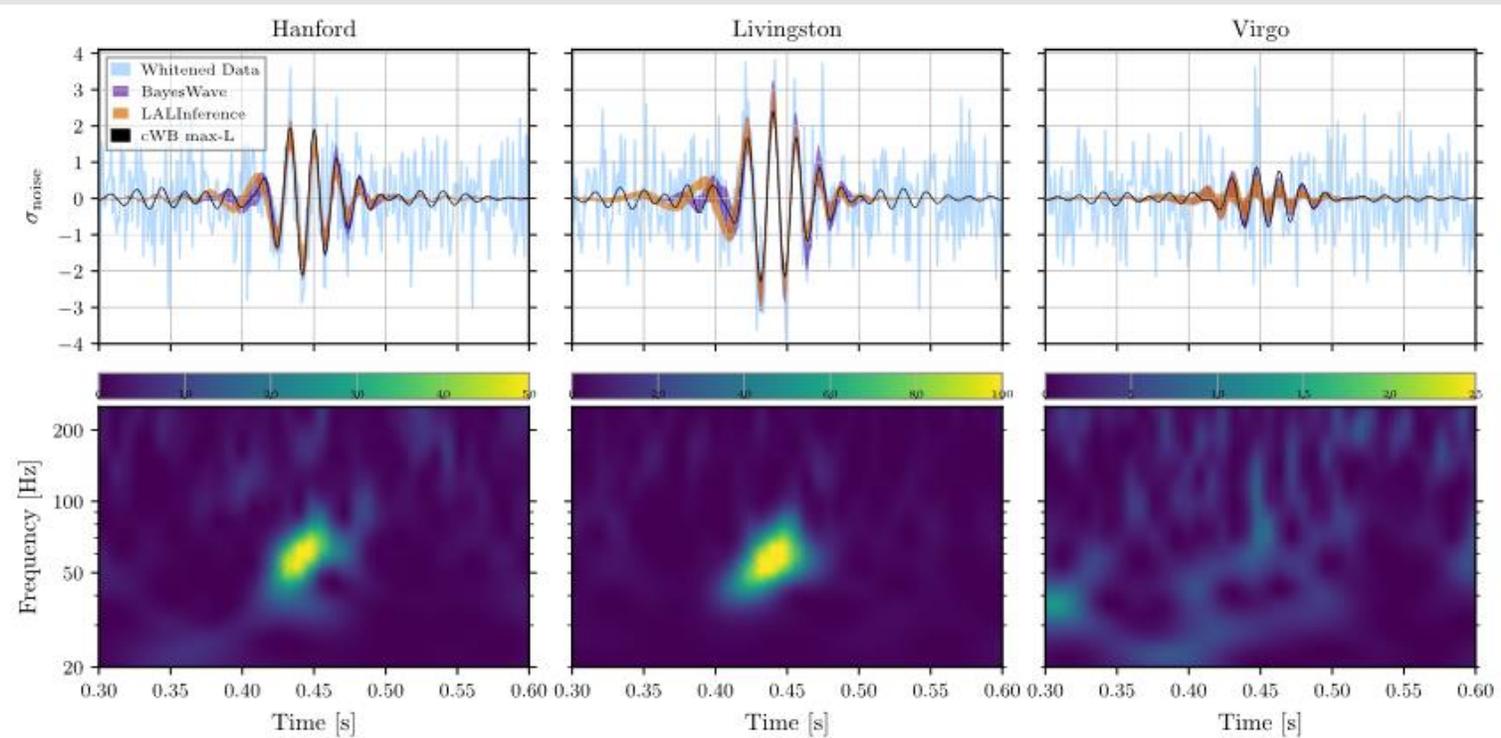
Name	$FAR_{\min}$ ( $\text{yr}^{-1}$ )	$P(m < M_{\max, \text{TOV}})$	$P(m < M_{\text{low}}^{\text{gap}})$	Classification
GW170817	$< 1 \times 10^{-5}$	0.99	0.98	BNS
GW190425	$3.38 \times 10^{-02}$	0.68	0.73	BNS
GW190814	$< 1 \times 10^{-5}$	0.06	0.19	BBH
GW200105	$2.04 \times 10^{-01}$	0.94	0.74	NSBH
GW200115	$< 1 \times 10^{-5}$	0.95	0.97	NSBH
GW190426	$9.12 \times 10^{-01}$	0.82	–	NSBH
GW190917	$6.56 \times 10^{-01}$	0.56	–	NSBH

# Самые массивные (из слившихся)



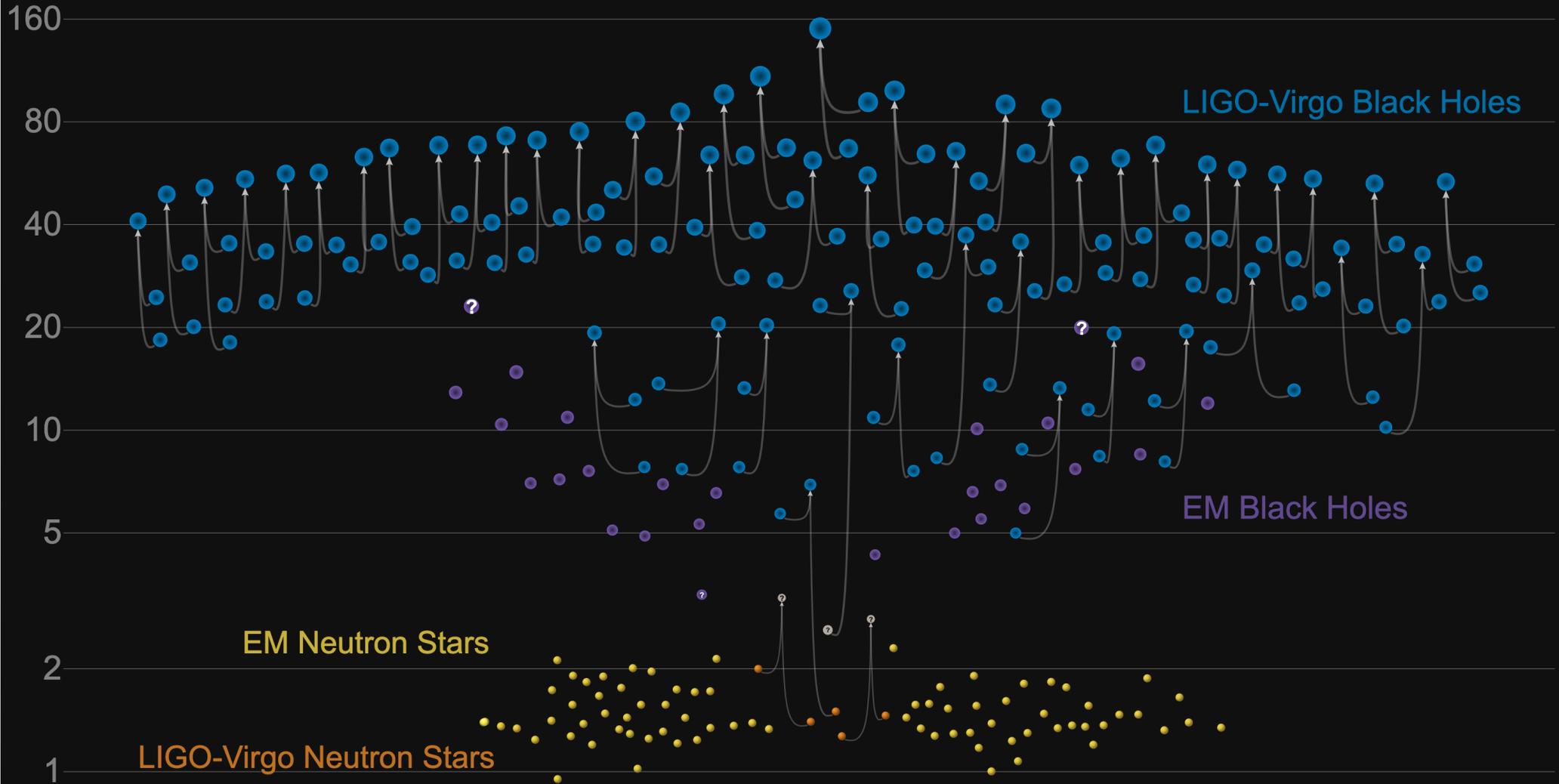
Primary mass  $85^{+21}_{-14} M_{\odot}$   
Secondary mass  $66^{+17}_{-18} M_{\odot}$   
Total mass  $150^{+29}_{-17} M_{\odot}$

2009.01190, 2009.01075



# Masses in the Stellar Graveyard

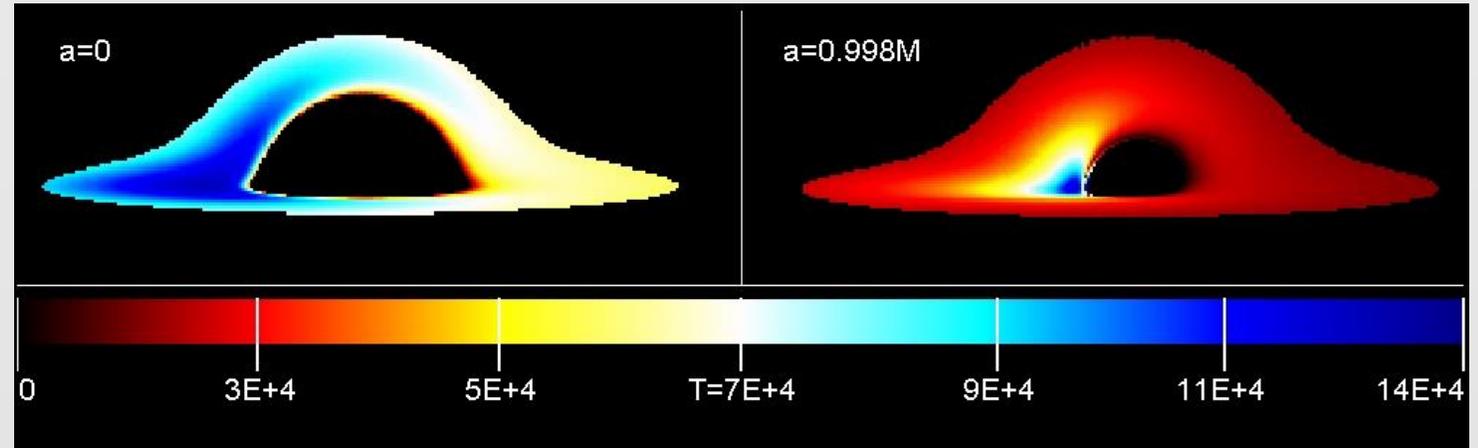
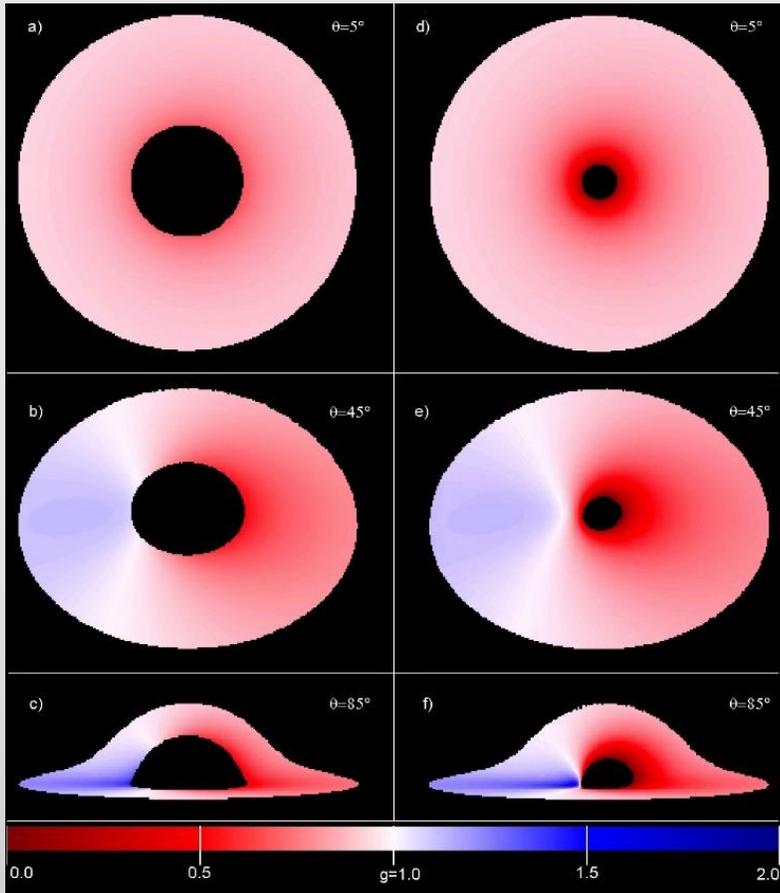
*in Solar Masses*



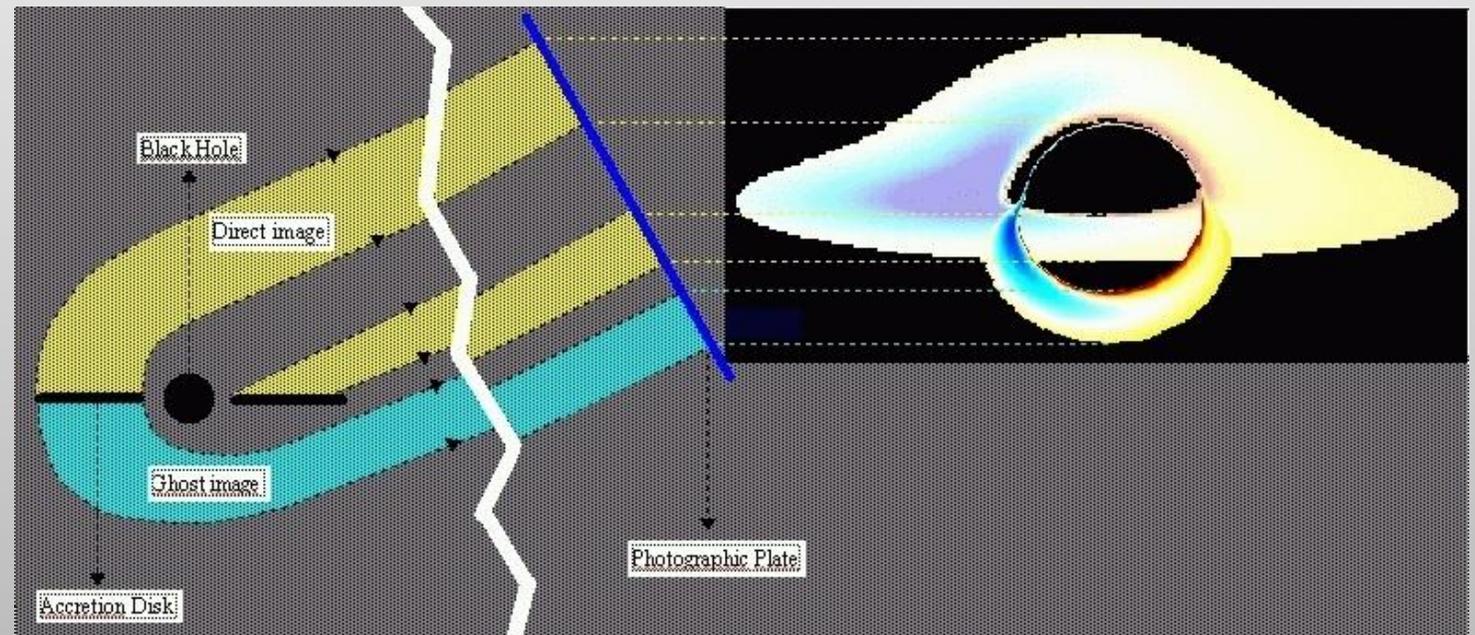
GWTC-2 plot v1.0

LIGO-Virgo | Frank Elavsky, Aaron Geller | Northwestern

# Диски вокруг черных дыр: взгляд со стороны

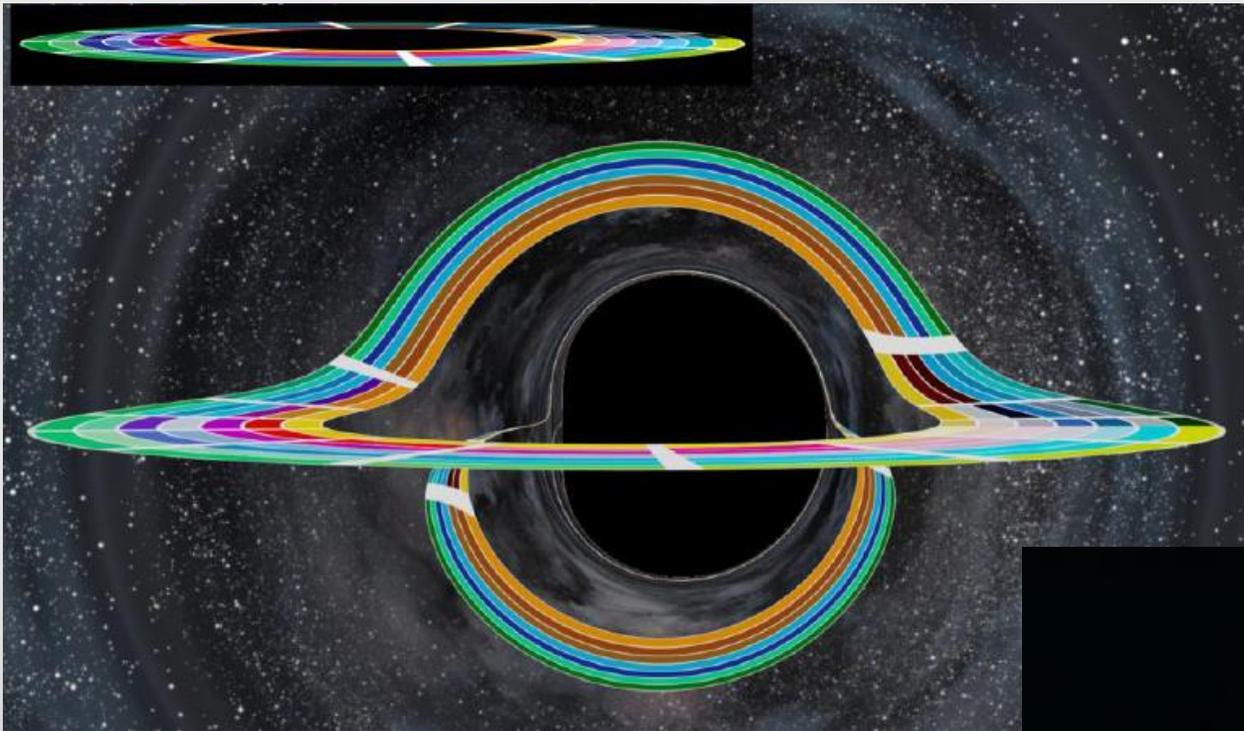


Температура диска

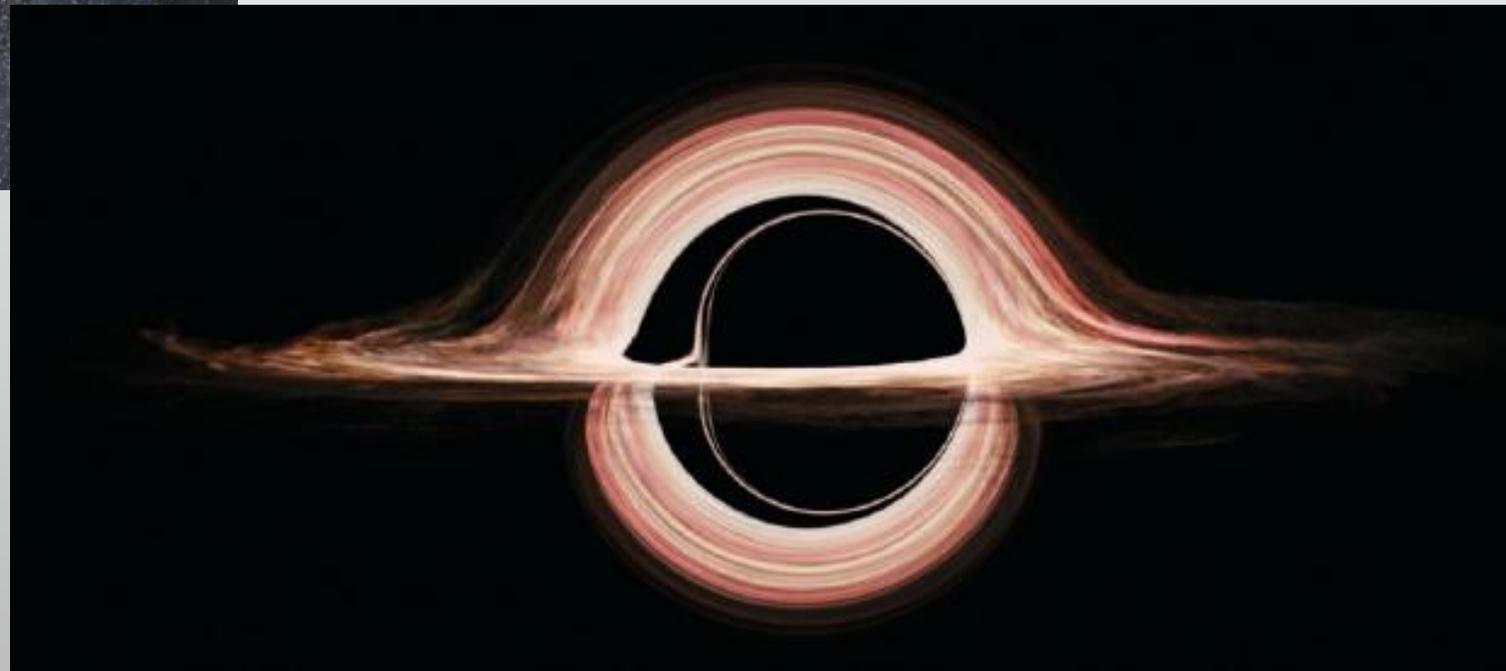


Диски «из бесконечности».  
Слева: неврращающаяся ЧД,  
Справа: вращающаяся.

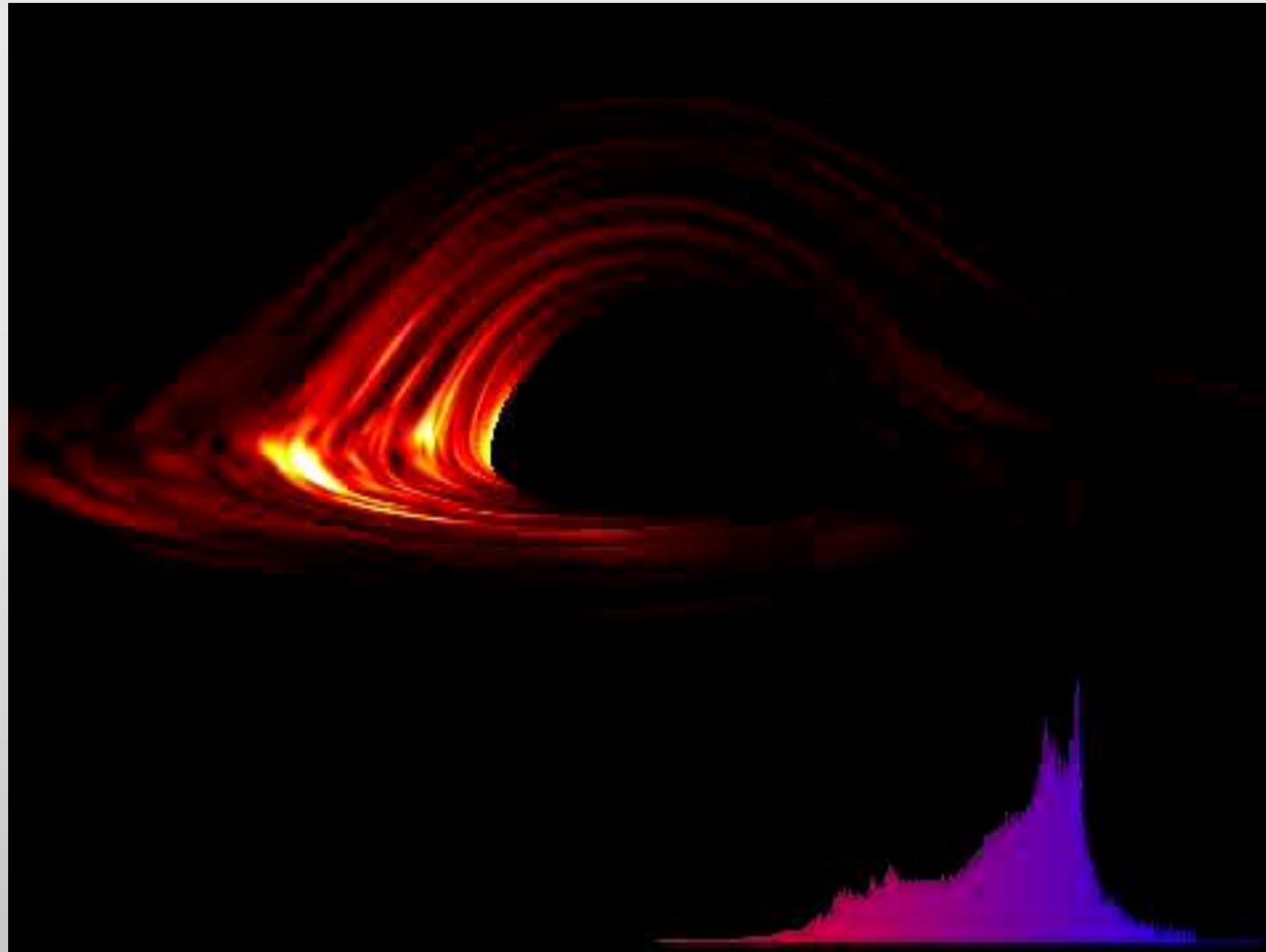
# Диски из «Интерстеллара»



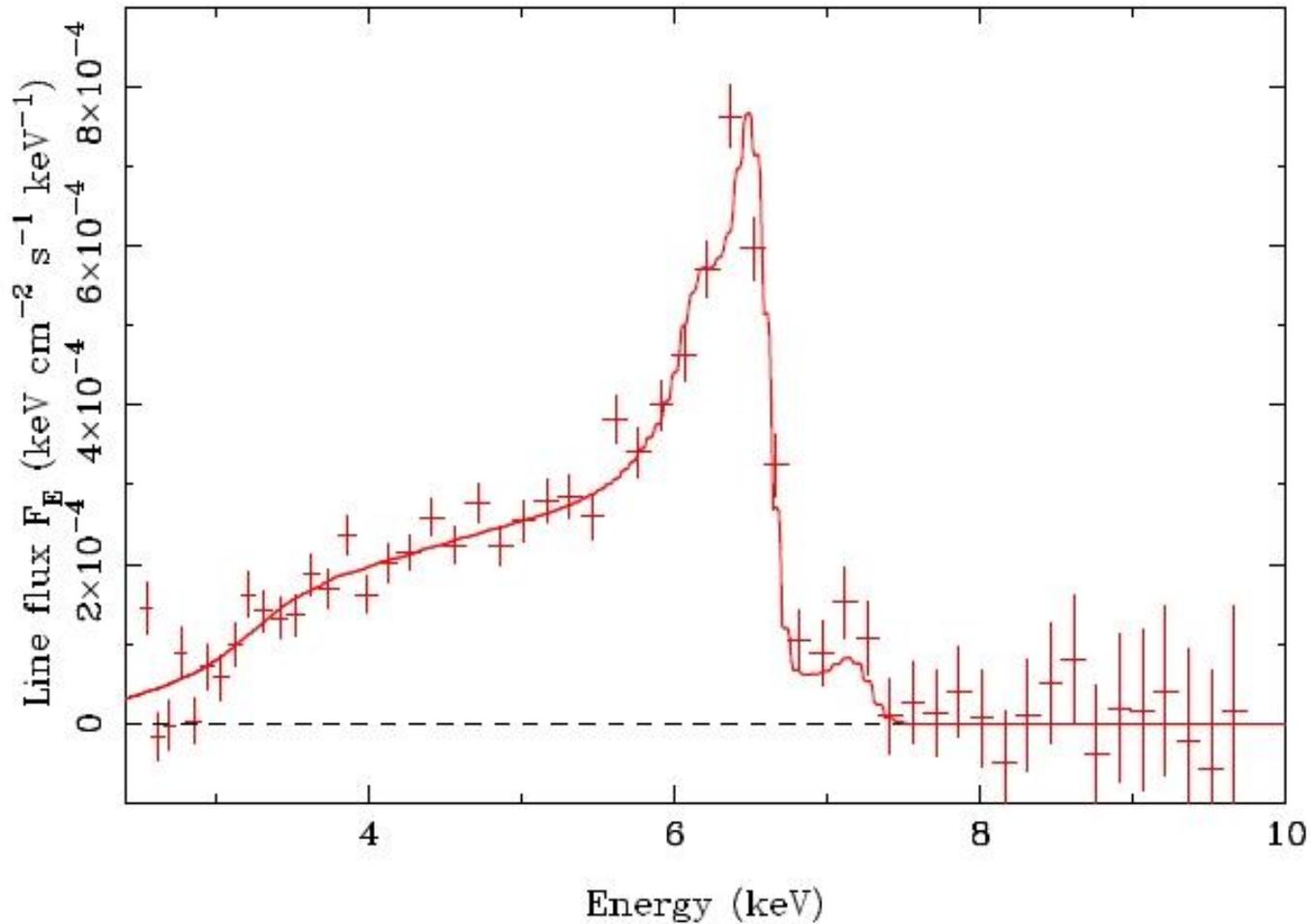
1502.03808



# Правильный диск и линия железа



# 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).