

Астрофизические черные дыры

Их рождение,

жизнь,

слияние,

рост

А смерть только через $> 10^{60}$ лет



Черные дыры до астрофизики высоких энергий

Решение Шварцшильда (1916) – не вращающаяся,
сферически симметричная

$$R_s = 2R_g = 2GM/c^2 \text{ (3 км – для Солнца)}$$

Решение Керра (1963) – вращающаяся

Чисто теоретический объект

**1963 год – открытие квазаров
(красное смещение)**

**1964 год – открытие Лебедя X 1
(суборбитальная ракета)**

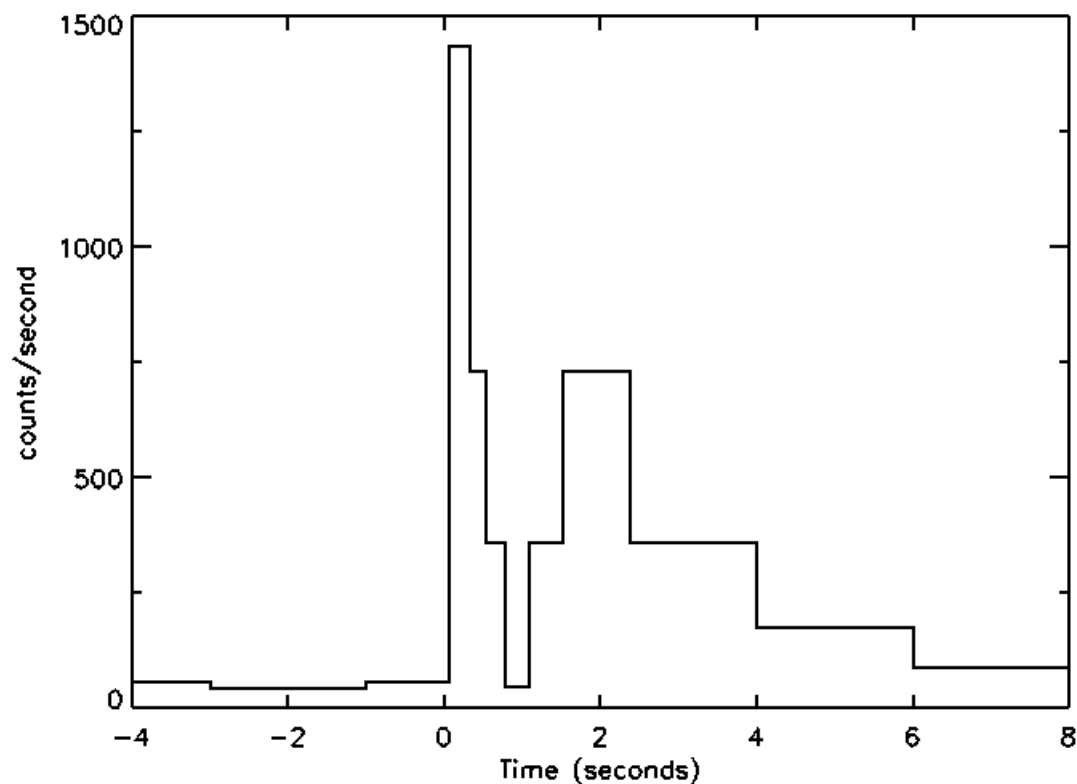
**1973 – 1974 - консенсус по поводу
вышеупомянутых объектов**

Начнем с их рождения



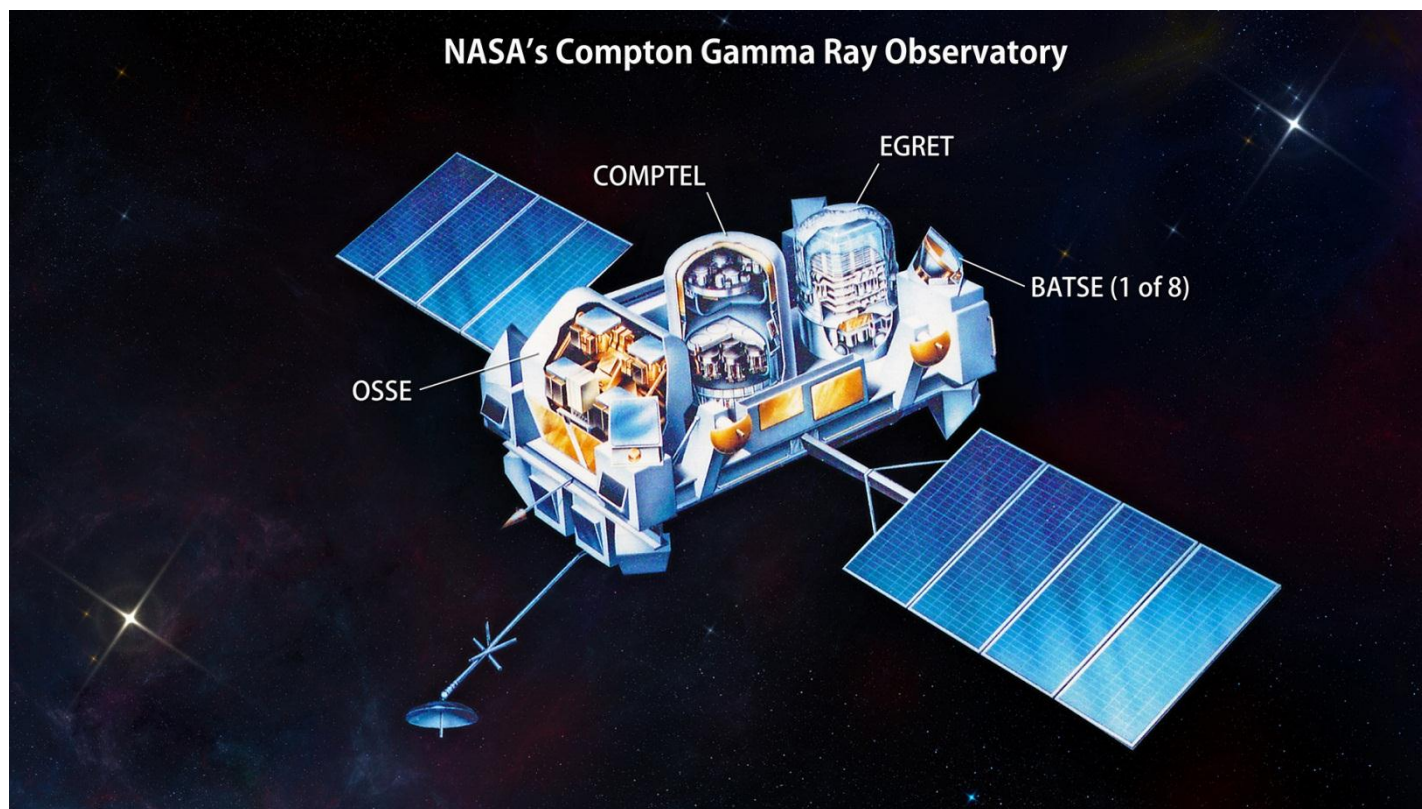
**Спутники VELA –
контроль за
ядерными
испытаниями**

1967 г. Вместо ядерных взрывов VELA видят рентгеновские всплески из далекого космоса

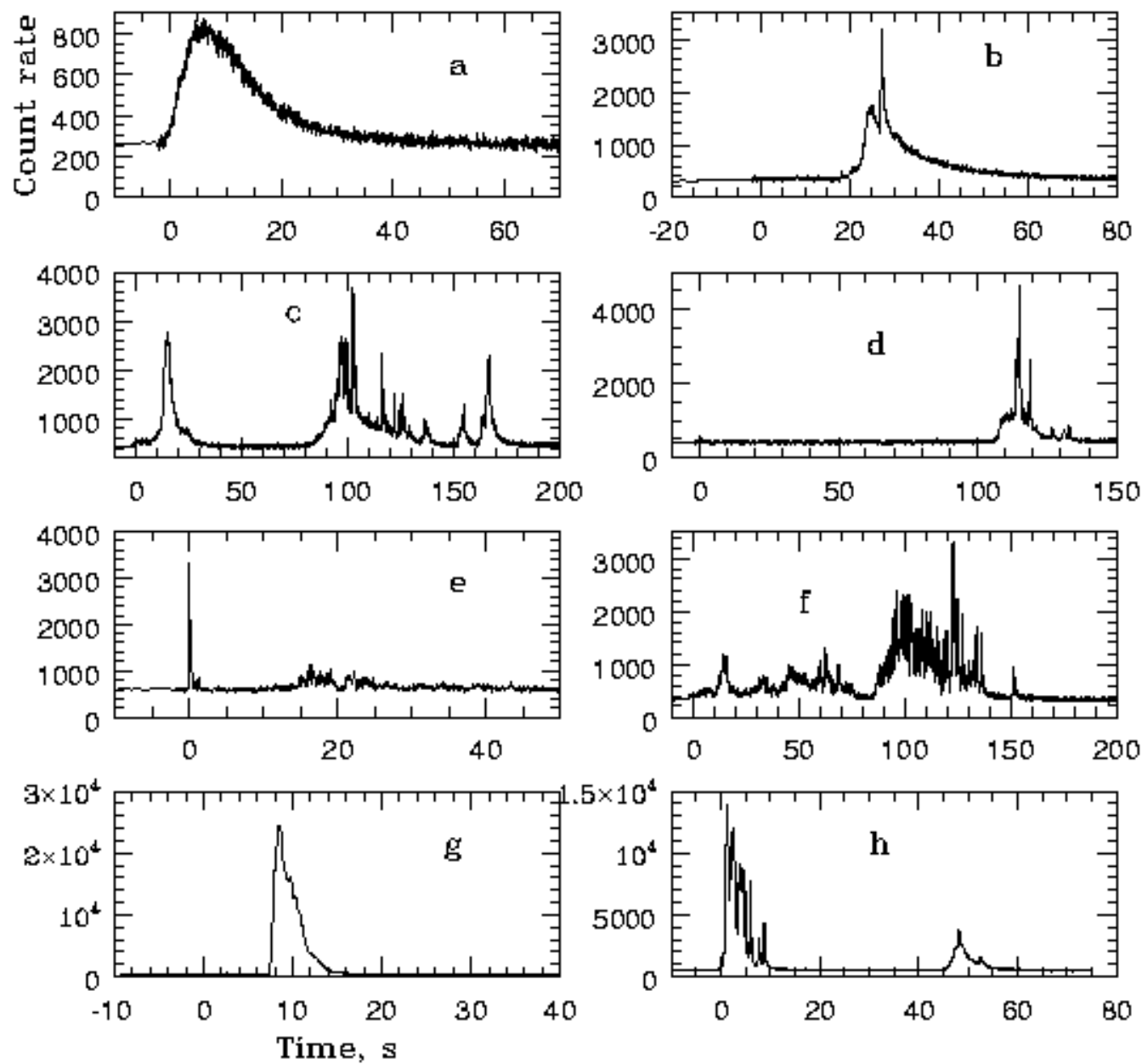


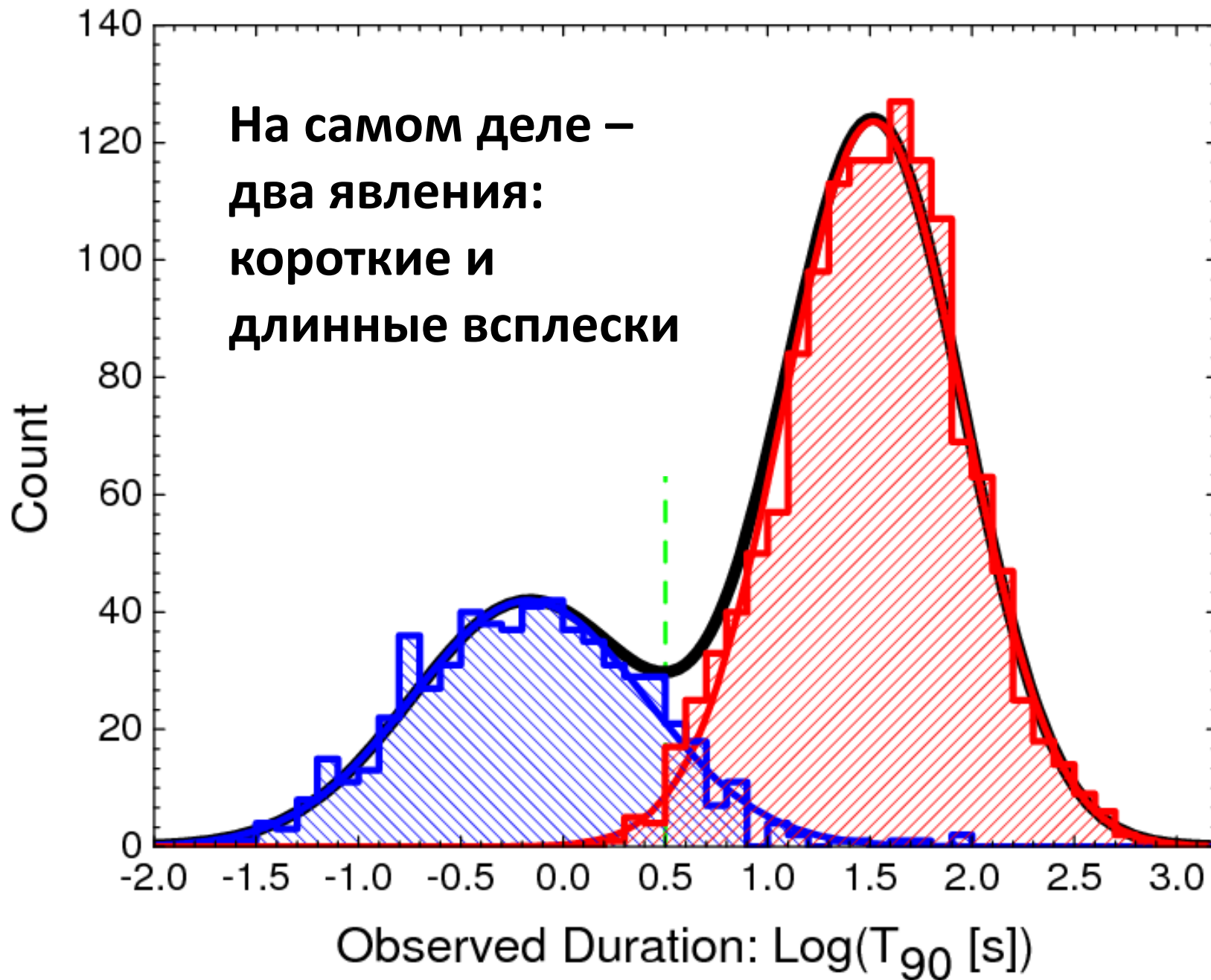
**Прodelки
нейтронных
звезд?**

1991 г. Запуск гамма-обсерватории «Комптон»



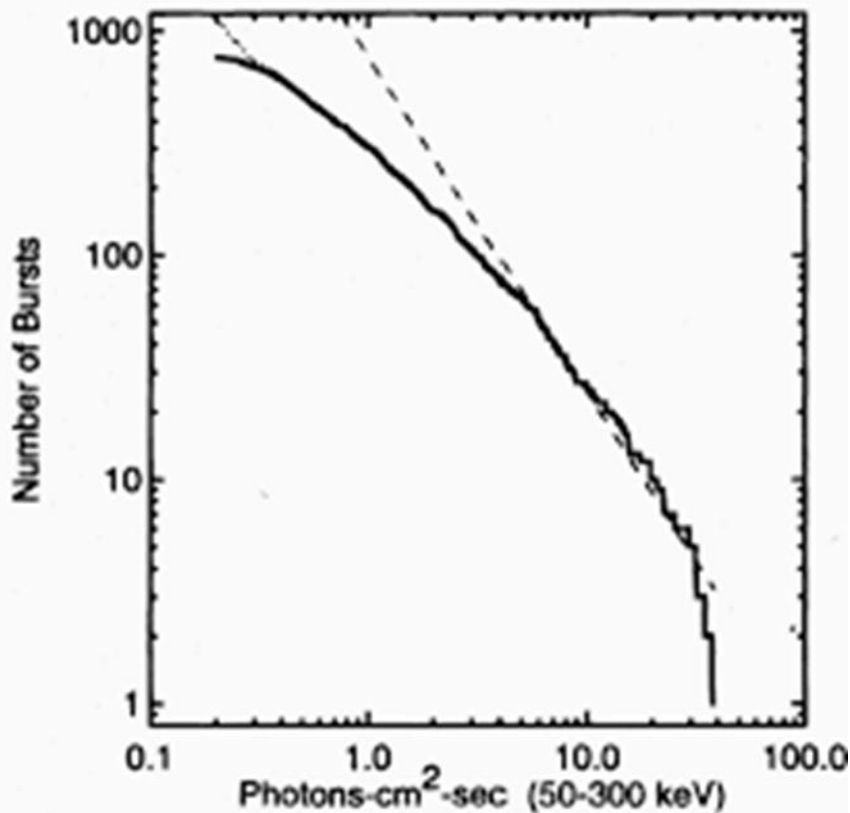
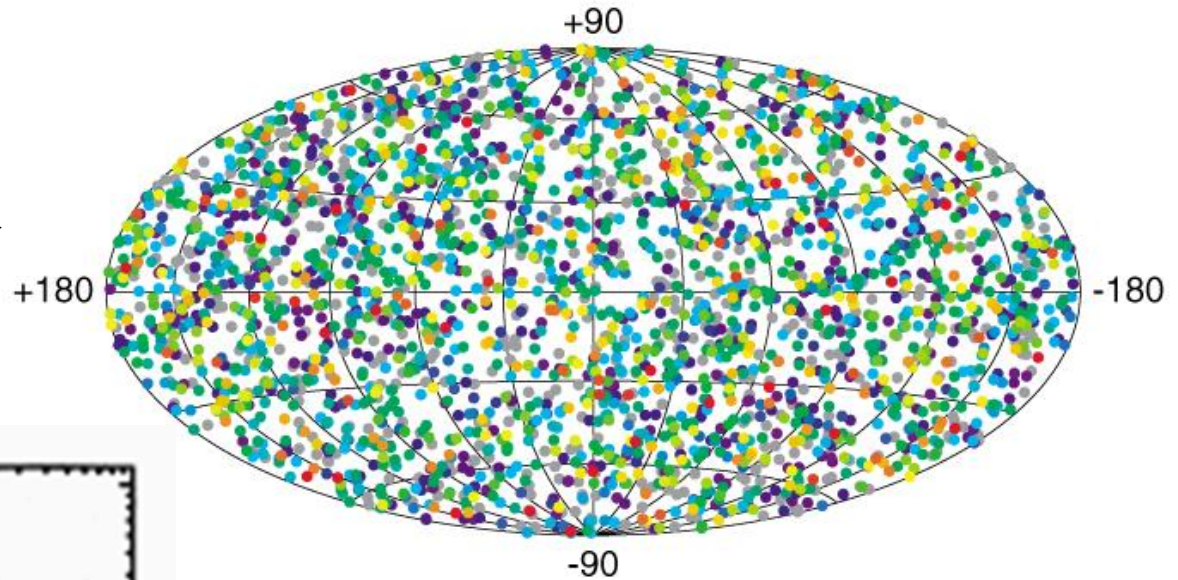
8 детекторов диаметром 50 см по углам





2704 BATSE Gamma-Ray Bursts

Изотропное
распределение по
небу

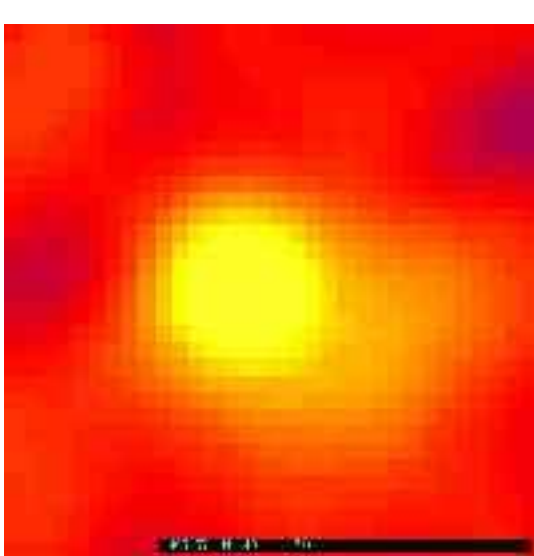


Ограниченное
сферическое облако в
центре которого мы
находимся

Откуда они? Что это такое???

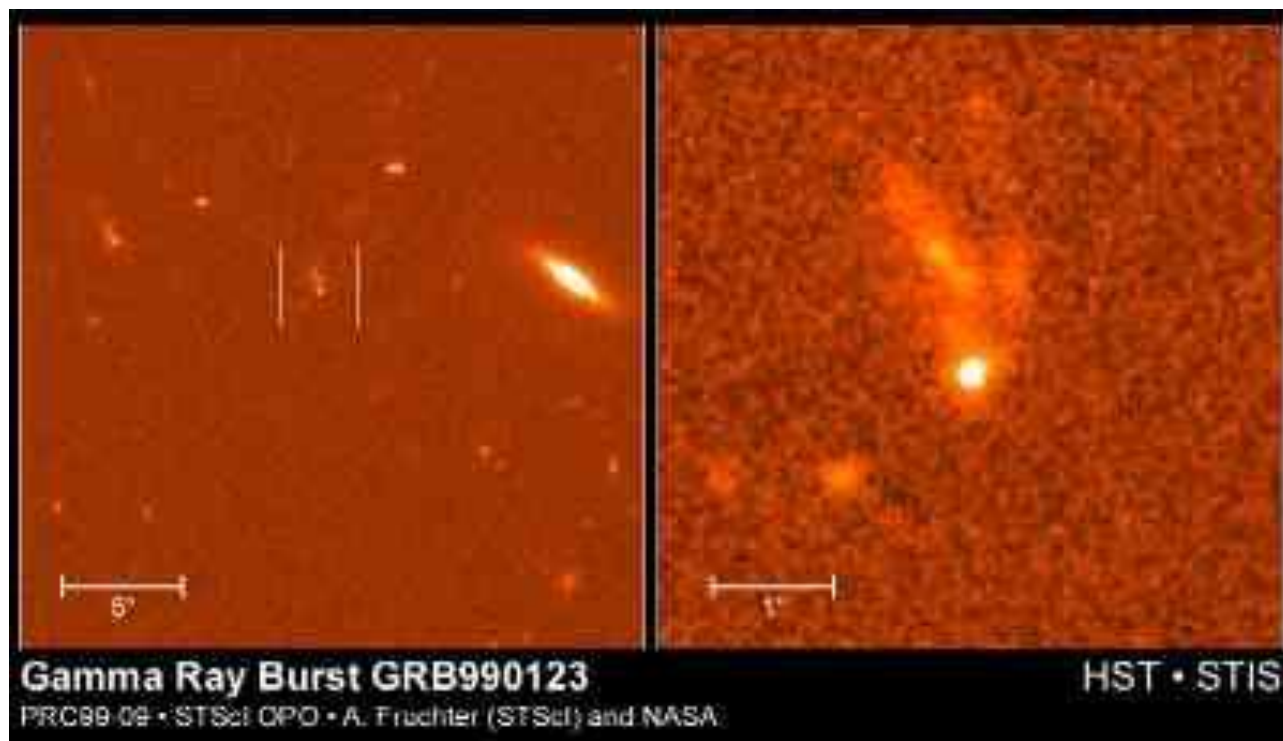
Что за облако?

- 1. Кометное облако Оорта. Нет механизма.**
- 2. Большое гало Галактики из нейтронных звезд. Механизм в принципе есть**
- 3. Видимая часть Вселенной. Механизм должен быть неправдоподобно мощным. 10^{53} эрг за секунды. Почти масса покоя Солнца**



**1997г. Итальянский спутник Верро-SAX
успел навестись на всплеск рентгеновским
телескопом и засечь источник в мягком
рентгене**

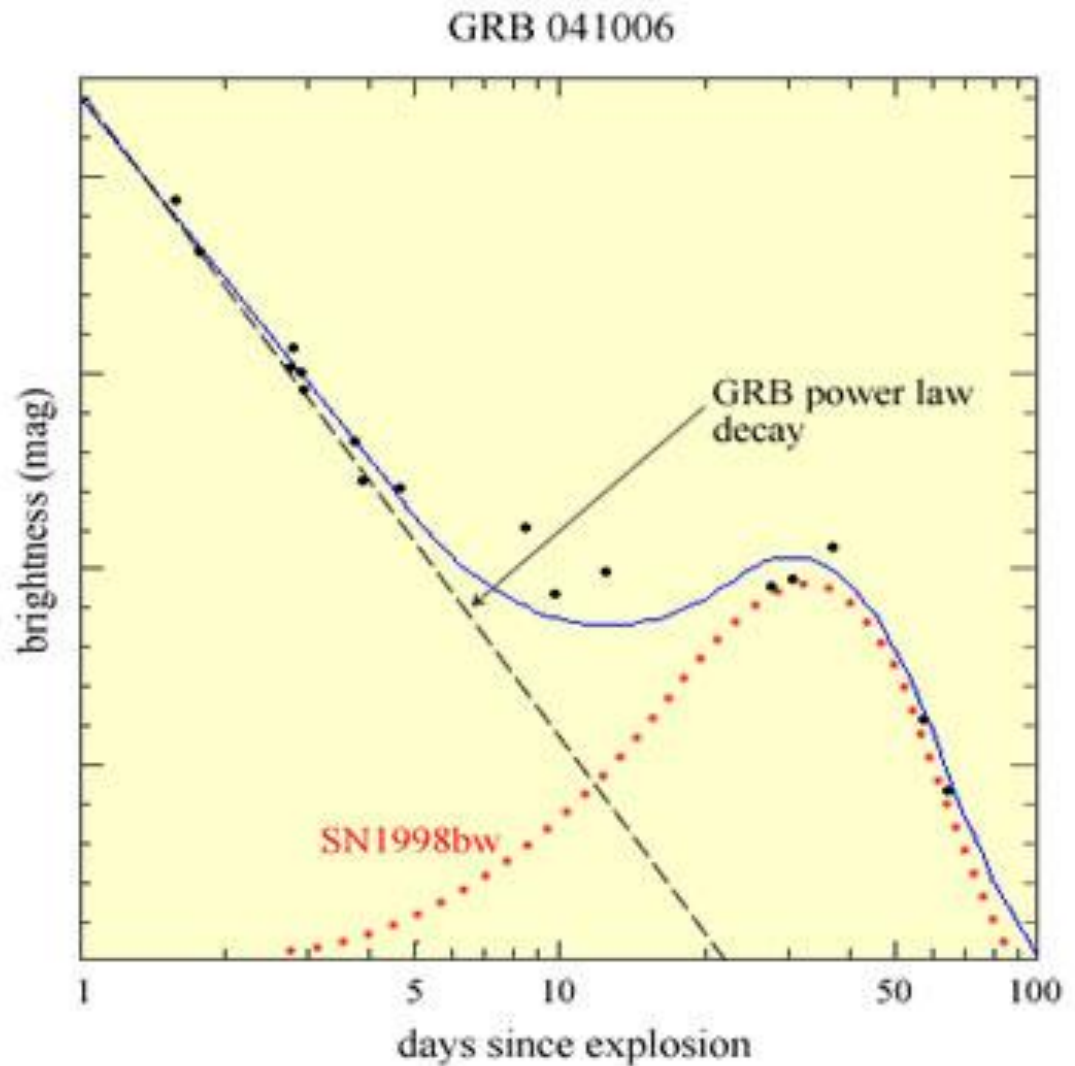
**По его наводке наземные оптические
телескопы нашли оптическое
послесвечение и хозяйскую галактику $z = 0.695$**



За гамма-всплеском идет сверхновая

В 1997 г. увидели
«нашлепку» на
кривой блеска
послесвечения

В 1998 г.
полноценная
сверхновая на
месте гамма-
всплеска
Тип Ic



Статистика: только 0.001 от сверхновых данного типа сопровождается гамма-всплеском.

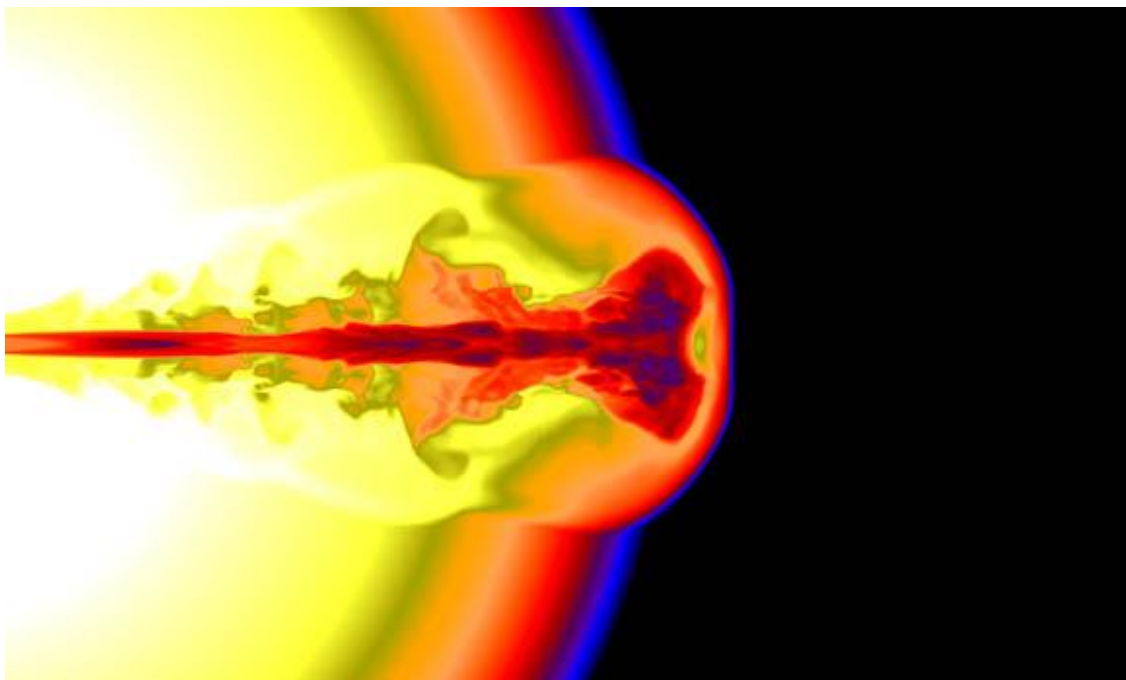
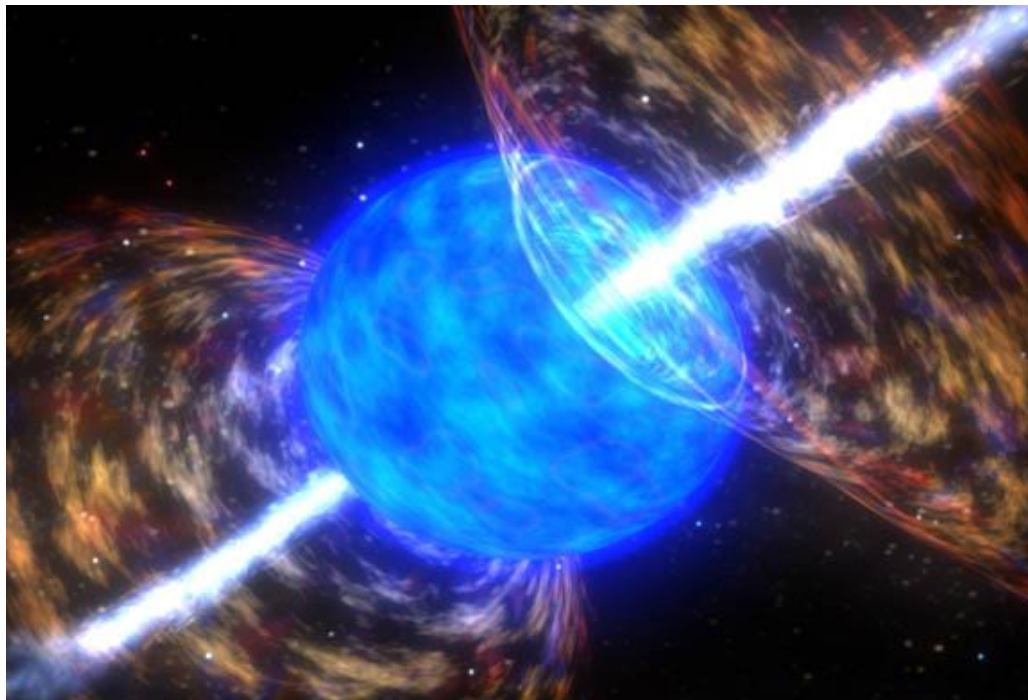
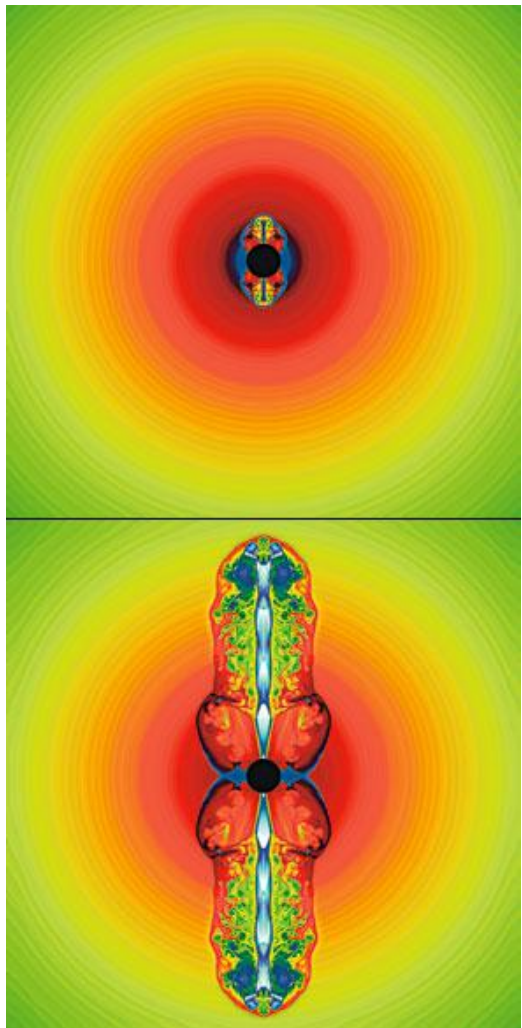
Значит, гамма-излучение идет в конусе с телесным углом 0.01

Значит энергию надо поделить на 1000

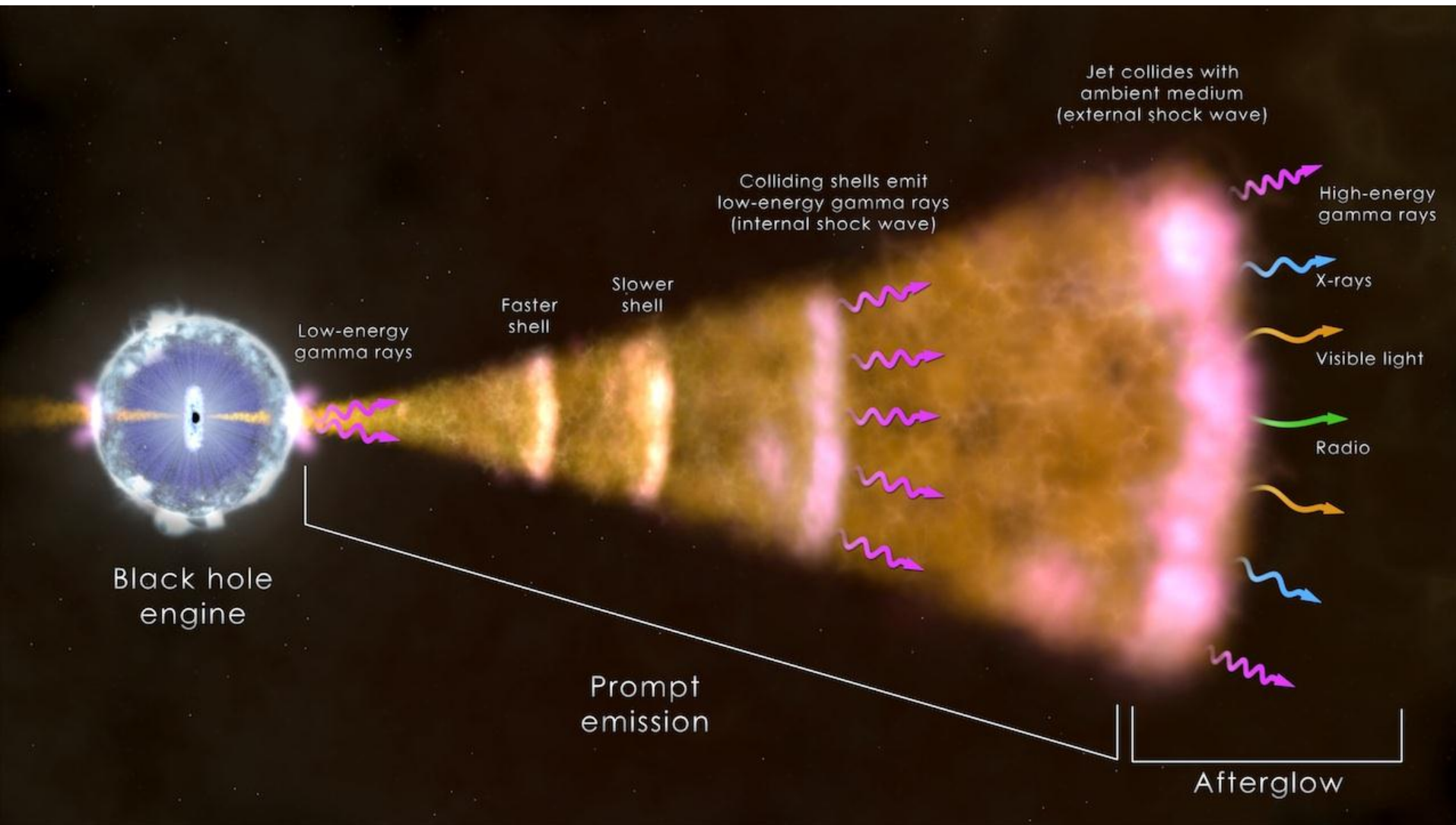
Сценарий:

- Внутренности звезды теряют устойчивость и коллапсируют**
- в центре образуется намагниченный диск из вещества нейтронной звезды**
- в самом центре растет черная дыра**
- диск испускает джет, который за секунду прожигает толщу звезды и вырывается наружу**

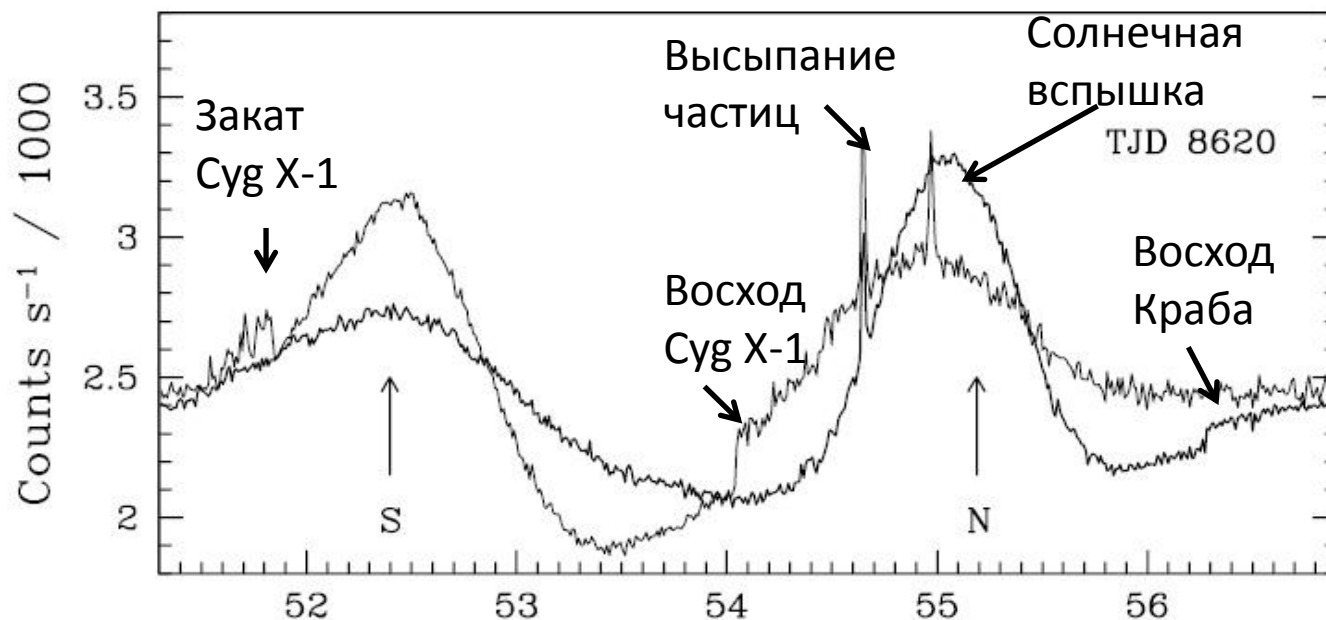
Смерть Большой звезды – рождение черной дыры



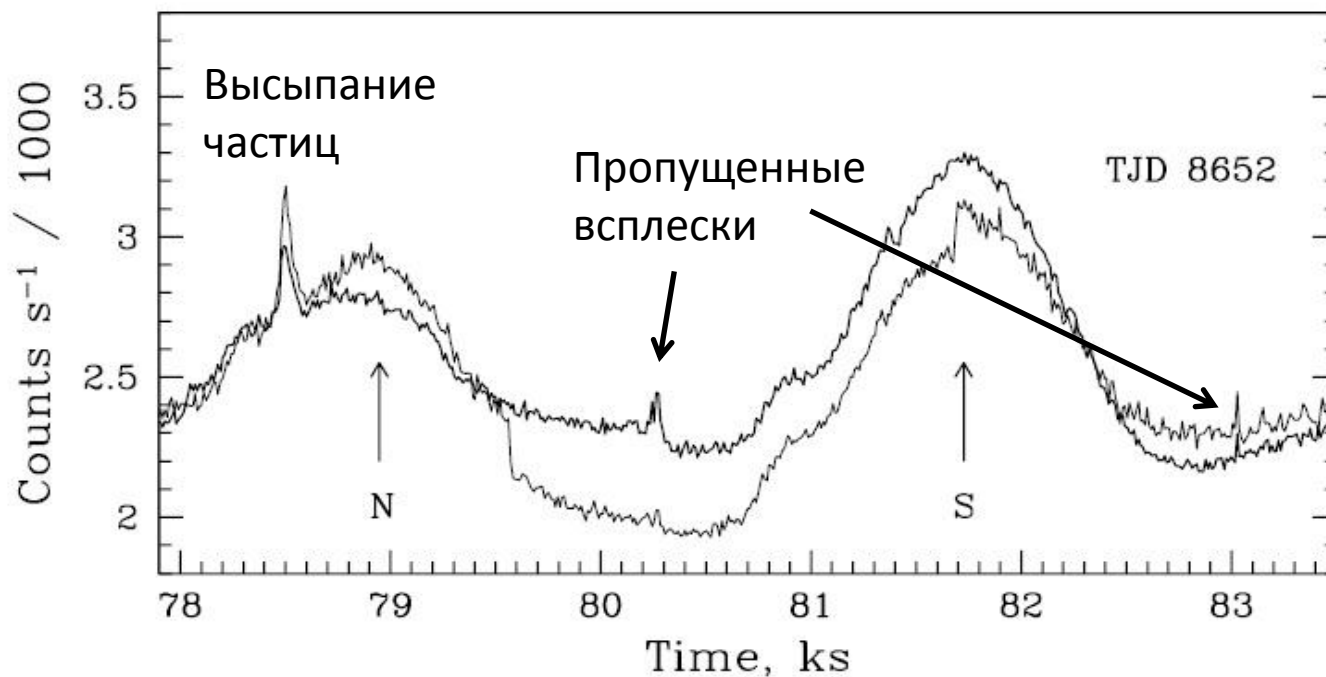
Как излучают гамма-всплески?



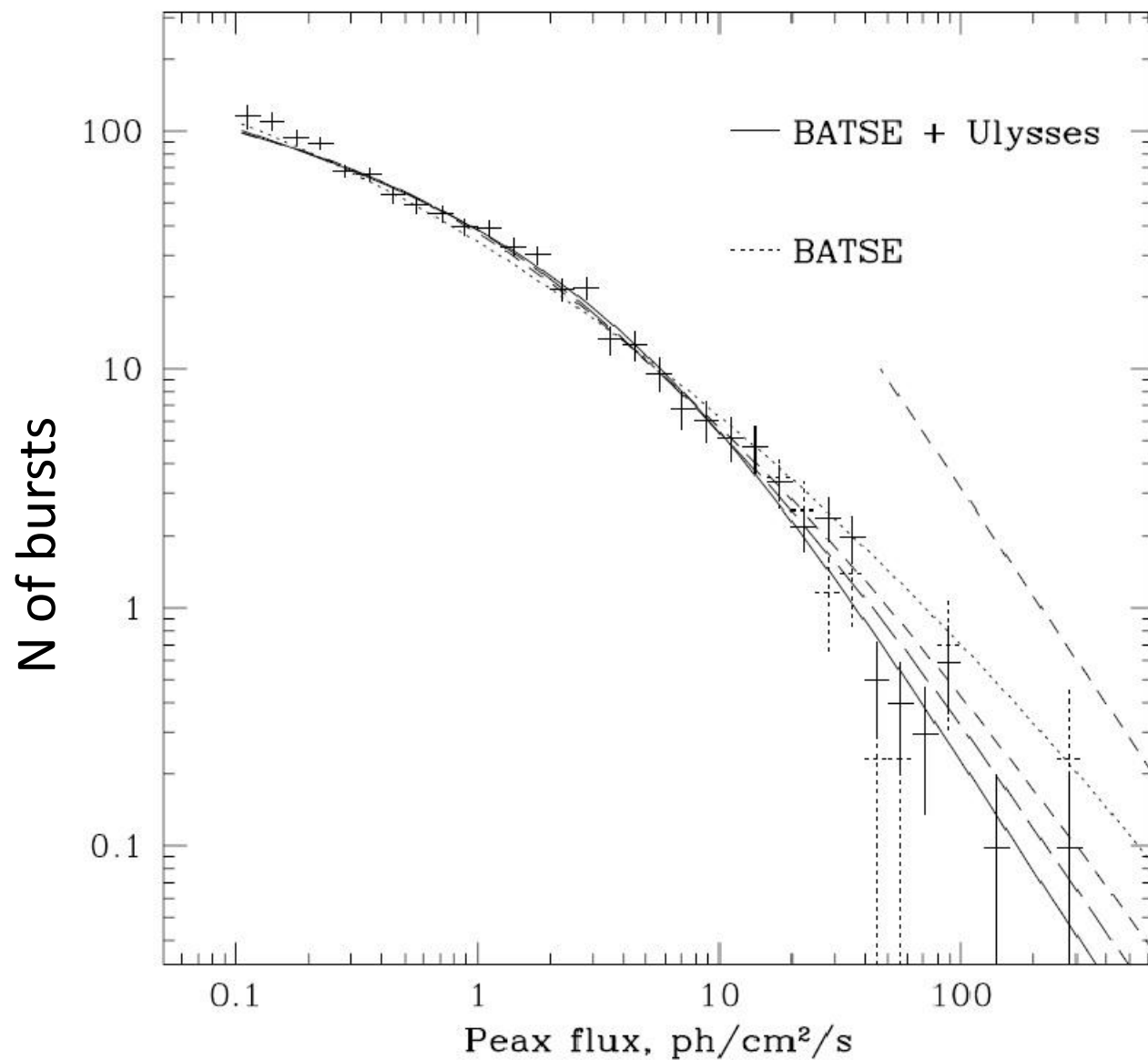
Stern, Tikhomirova, Kompaneets, Poutanen, Svensson, 2001



1800
НОВЫХ
ГАММА-
ВСПЛЕСКОВ



Stern, Atteia, Hurley, 2001



**Минимум
4000/год**

**Темп упал
минимум в 20
раз**

Что такое короткие всплески? - Слияние нейтронных звезд? – Да (2017)

Число «надпороговых» всплесков – несколько штук в день, > 1000 в год

Вместе с «подпороговыми» – до 10000 в год в пределах горизонта.

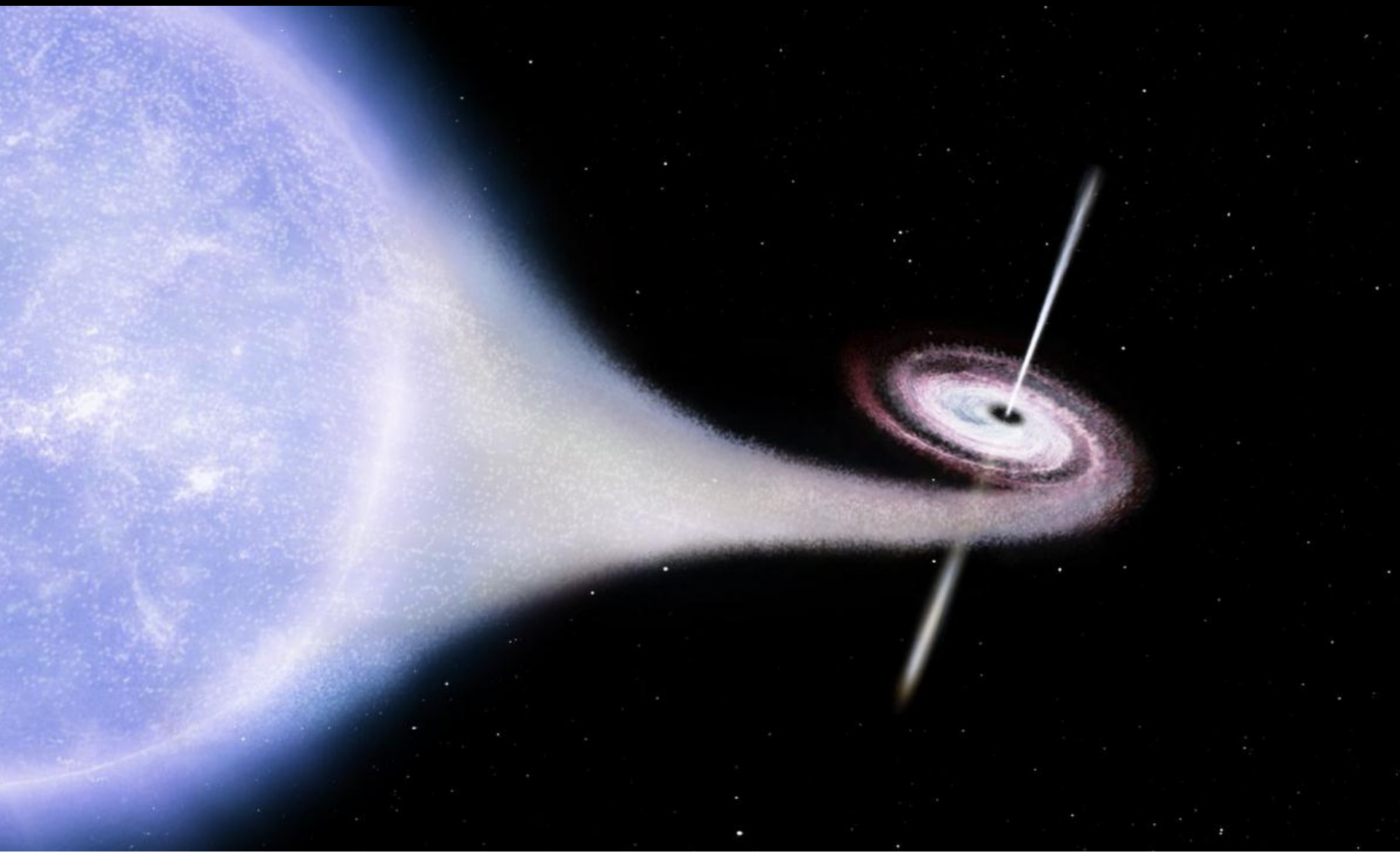
Все ли гамма-всплески сопровождаются сверхновой? – Видимо нет

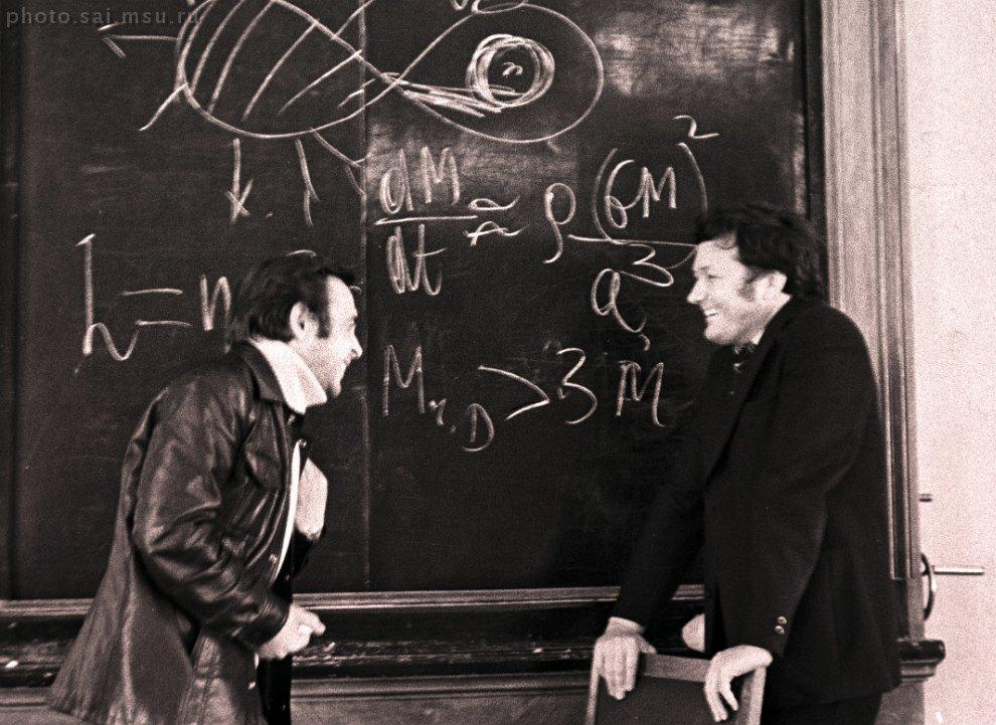
Всегда ли образование черных дыр сопровождается гамма-всплеском? - Нет

А как же динозавры?

- 1. Гамма-всплеск в 10 световых годах попадает джетом на нас. Эквивалентно взрыву 20 килотонн на каждом гектаре неба. Все истреблено. Вероятность 10^{-17} /год**
- 2. Гамма-всплеск в 100 световых годах. Тяжелый удар по биосфере. Вероятность 10^{-14} 10^{-13} /год.**
- 3. Гамма-всплеск где-то в Галактике. Электроника на спутниках вылетает, тяжелая магнитная буря, астрофизики все-равно празднуют.
Вероятность 10^{-7} - 10^{-6} /год**

Черные дыры излучают





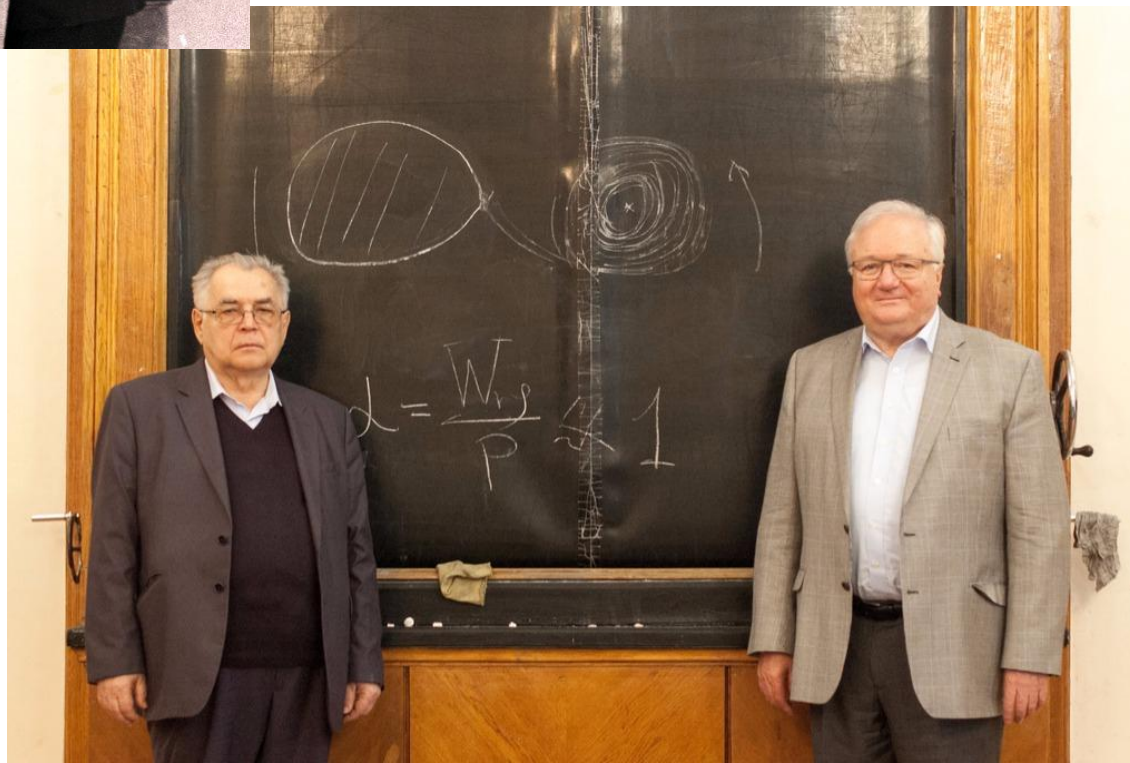
**Николай Шакура,
Рашид Сюняев 1973**

**Теория аккреционных
дисков**

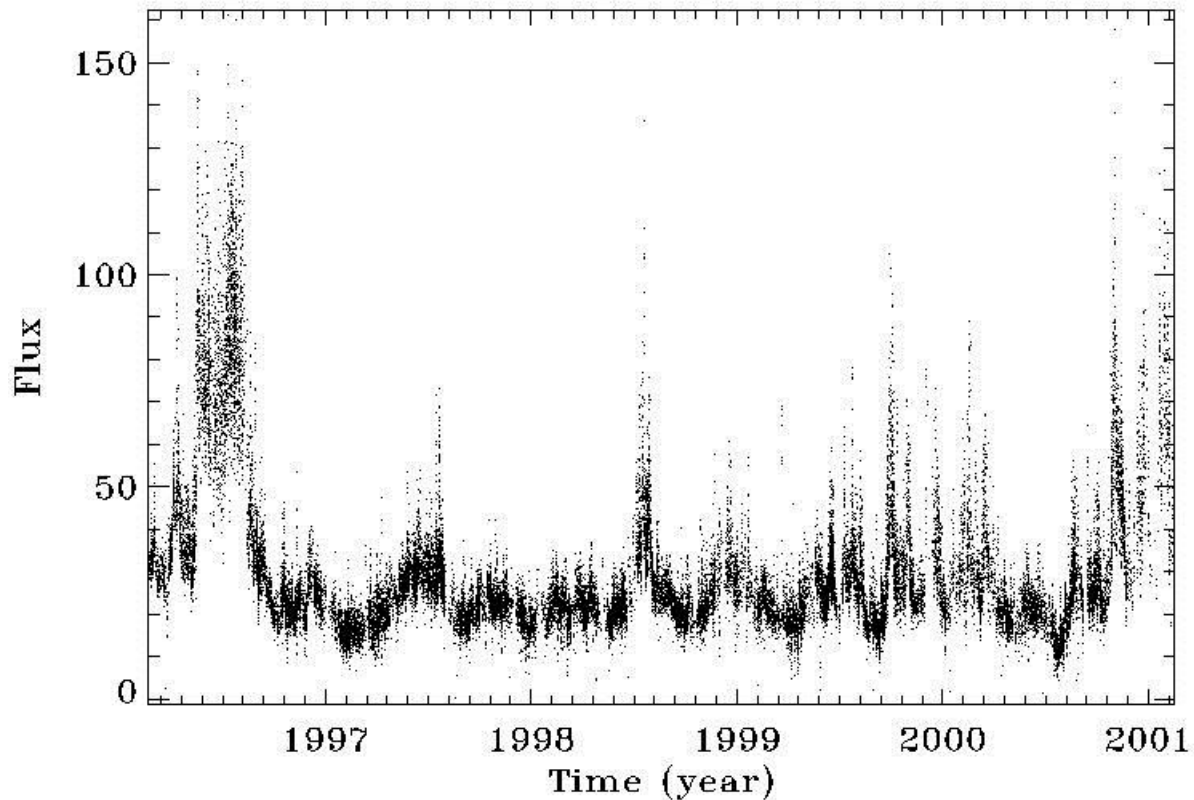
Госпремия 2017

α – диск

**Около 8000
цитирований**

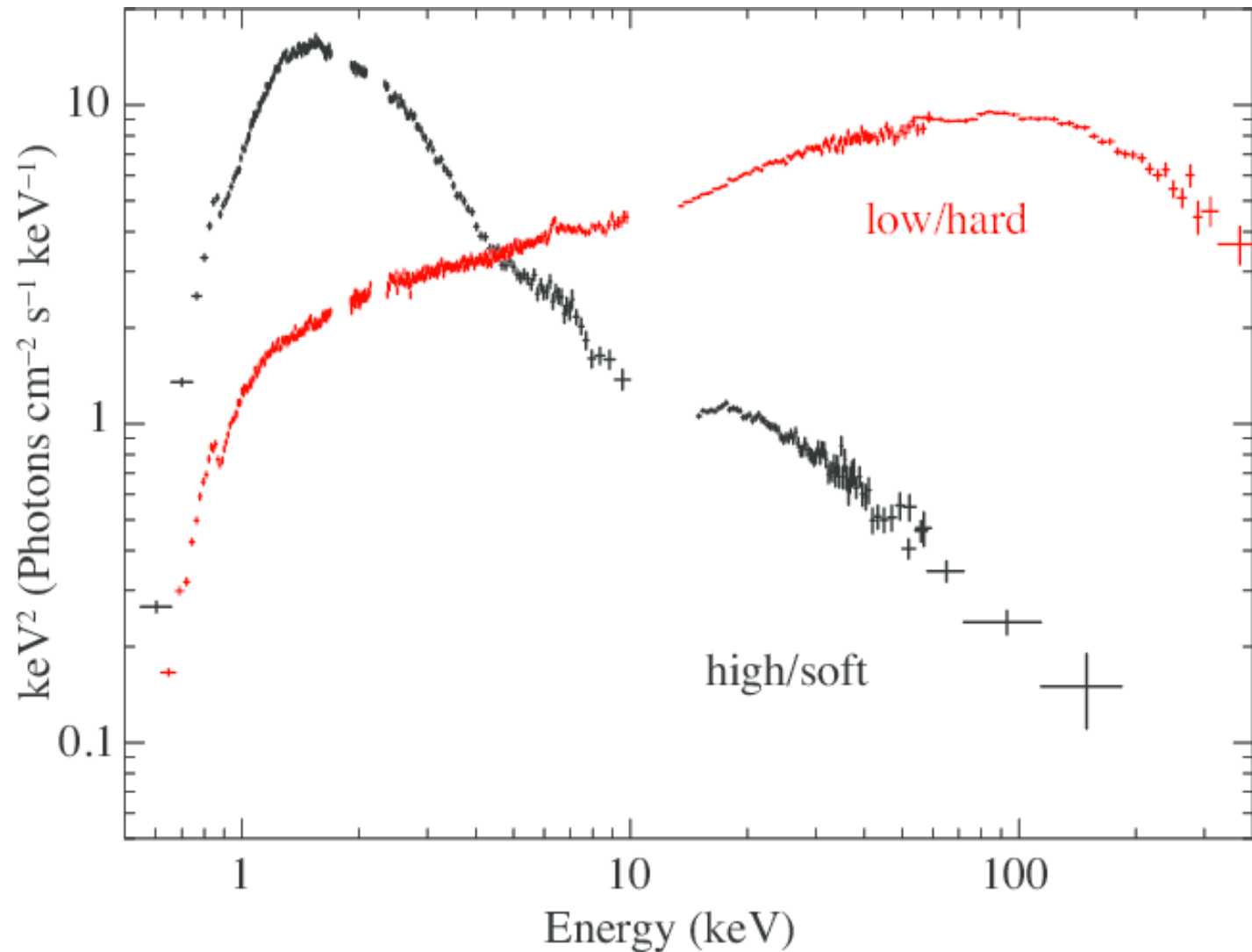


Gyg X-1 - (1964) – ближайшая (6000 световых лет) двойная система с черной дырой $10 M_{\odot}$

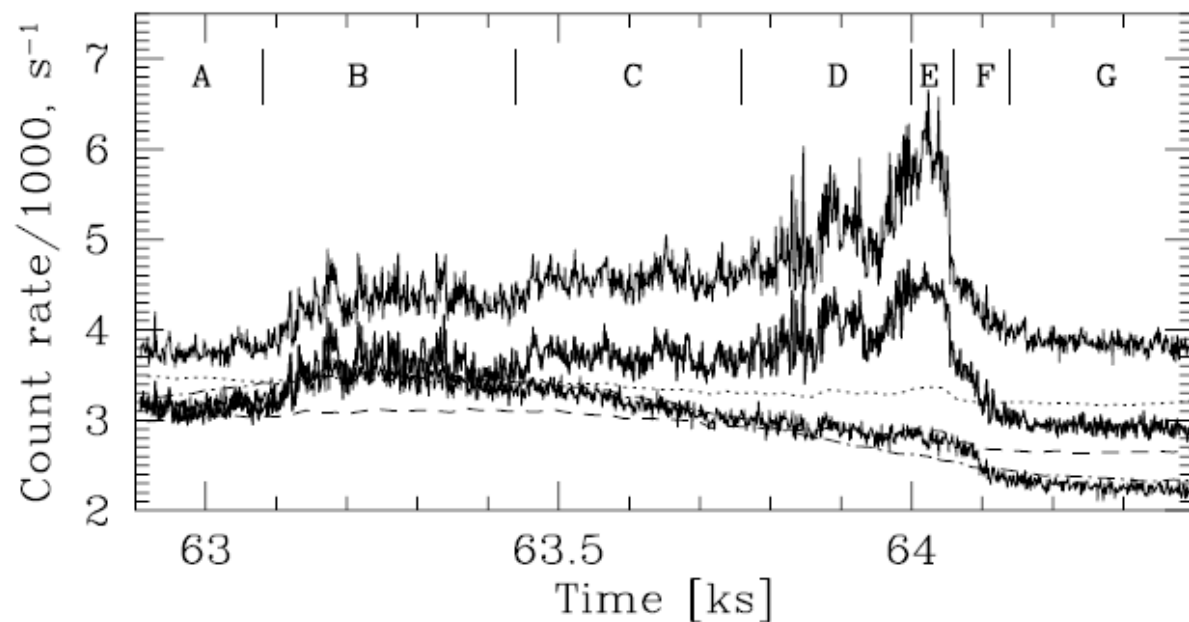
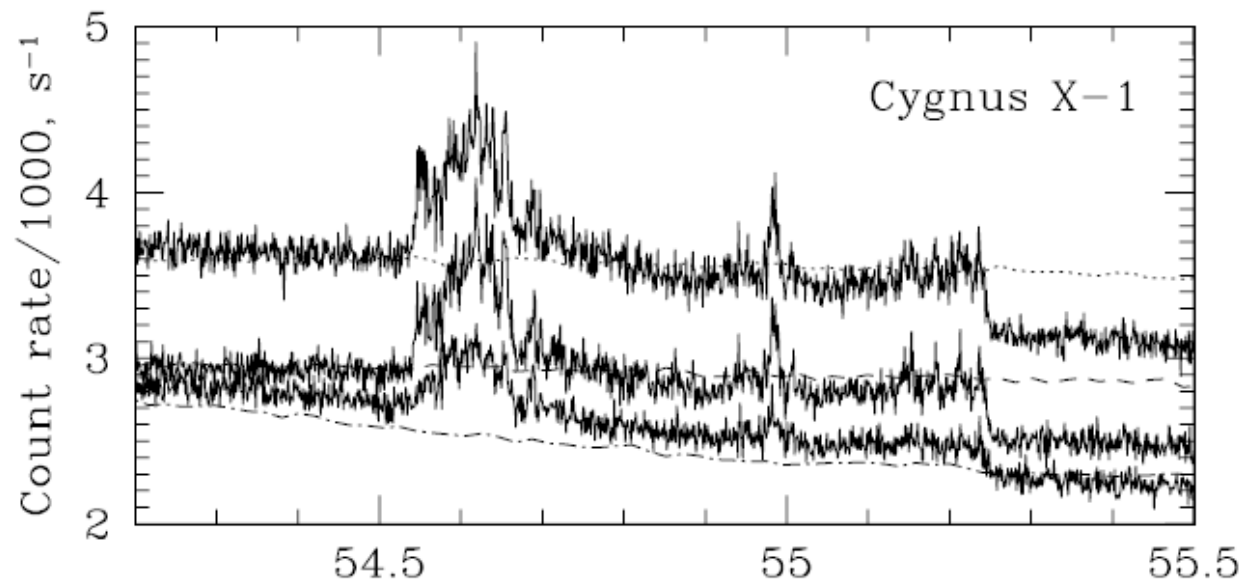


**Два состояния – мягкое яркое, жесткое тусклое
Температура 1 кэВ (10 000 000K). Переменность до 1мс**

Две моды излучения – два состояния диска



Выплески до 10^{38} эрг/с по 1 – 10 минут
(Штерн, Белобородов, 2001)



В Галактике известно всего 15 рентгеновских двойных с предполагаемой черной дырой (с нейтронной звездой гораздо больше)

Всего в Галактике порядка миллиона черных дыр

Есть черные дыры звездной массы ($< 100 M_{\odot}$) и сверхмассивные ($> 100\,000 M_{\odot}$) в центрах галактик
Между ними - пробел

ULX – очень яркие рентгеновские двойные 10^{39} - 10^{41} эрг/с
(видны в других галактиках) Промежуточные массы?
Есть кандидат на $10000 M_{\odot}$

**Но это далеко не вся история
про черные дыры звездной массы!**

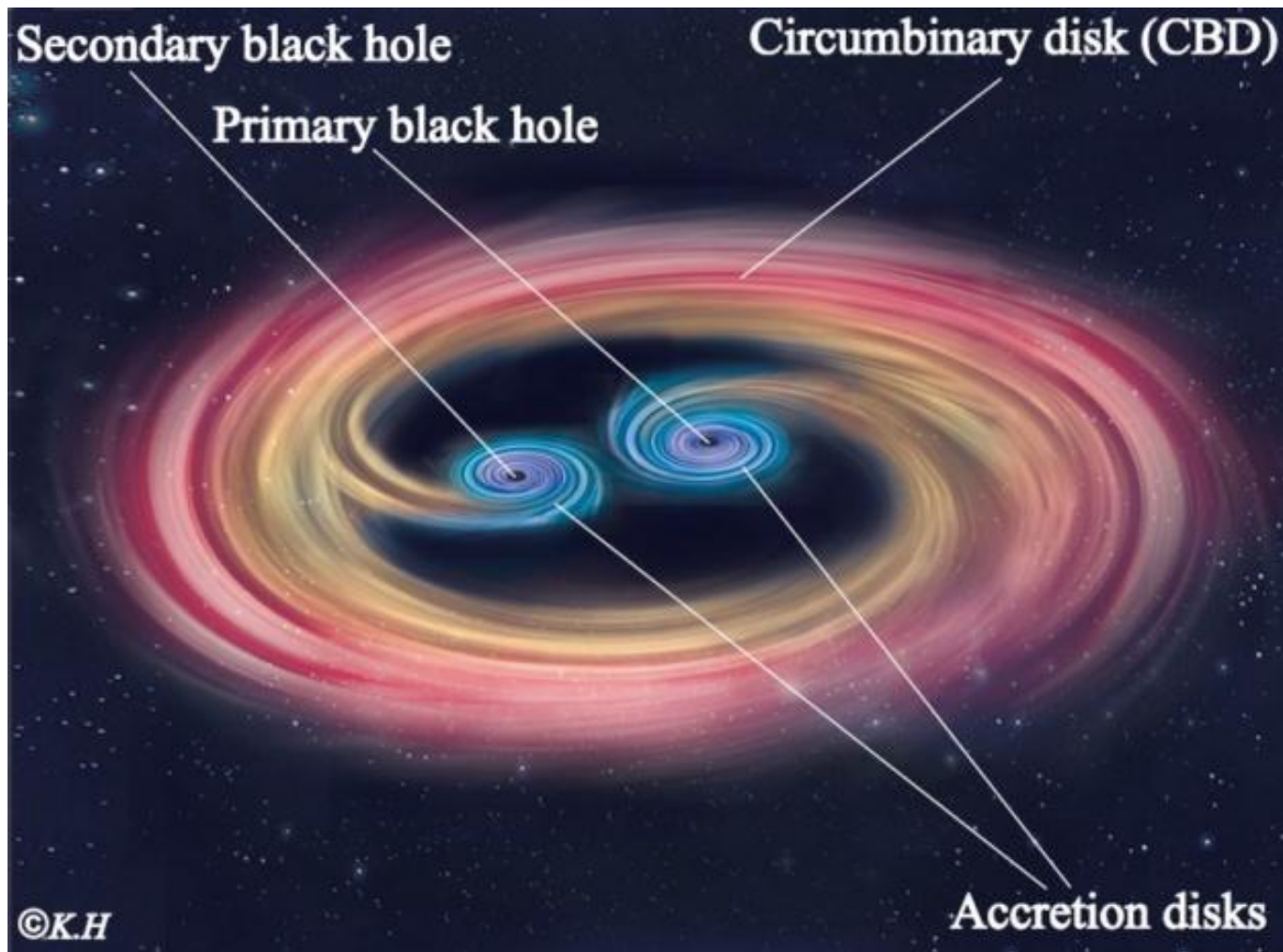


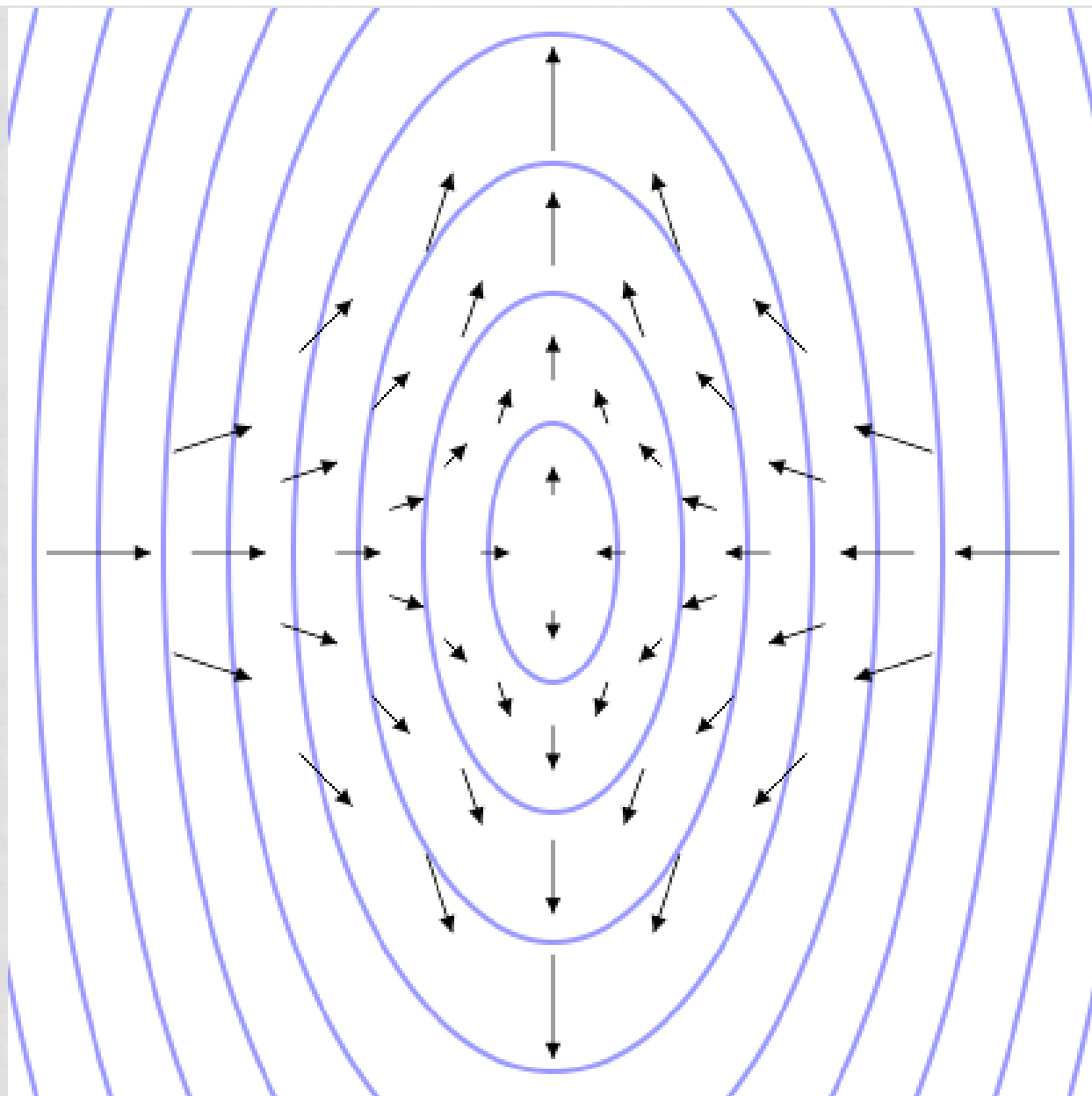
Черные дыры

сливаются

Двойные черные дыры

В системе Лебедь X-1 скоро взорвется и вторая звезда-гигант.
Так образуются двойные черные дыры





Гравитационные волны

Амплитуда гравитационных волн

A_0 - амплитуда в источнике ~ 0.1

**R_0 – размер источника (для 30 масс
Солнца $\sim 100 \text{ км} = 10^7 \text{ см}$)**

R - Расстояние до источника $\sim 10^{27} \text{ см}$

Амплитуда

$$**A = A_0 R_0/R = 10^{-21}**$$

Лазерный интерферометр LIGO

Идея: М.Е. Герценштейн и В.И. Пустовойт (1962)



Надо измерять относительные смещения 10^{-22} см

На базе 4 км $2 \cdot 10^{-16}$ см
(размер атома 10^{-8} см, размер протона 10^{-13} см)

Свет наматывает 200 оборотов туда-сюда,
получаем 10^{-14} см

Длина волны света лазера 10^{-4} см

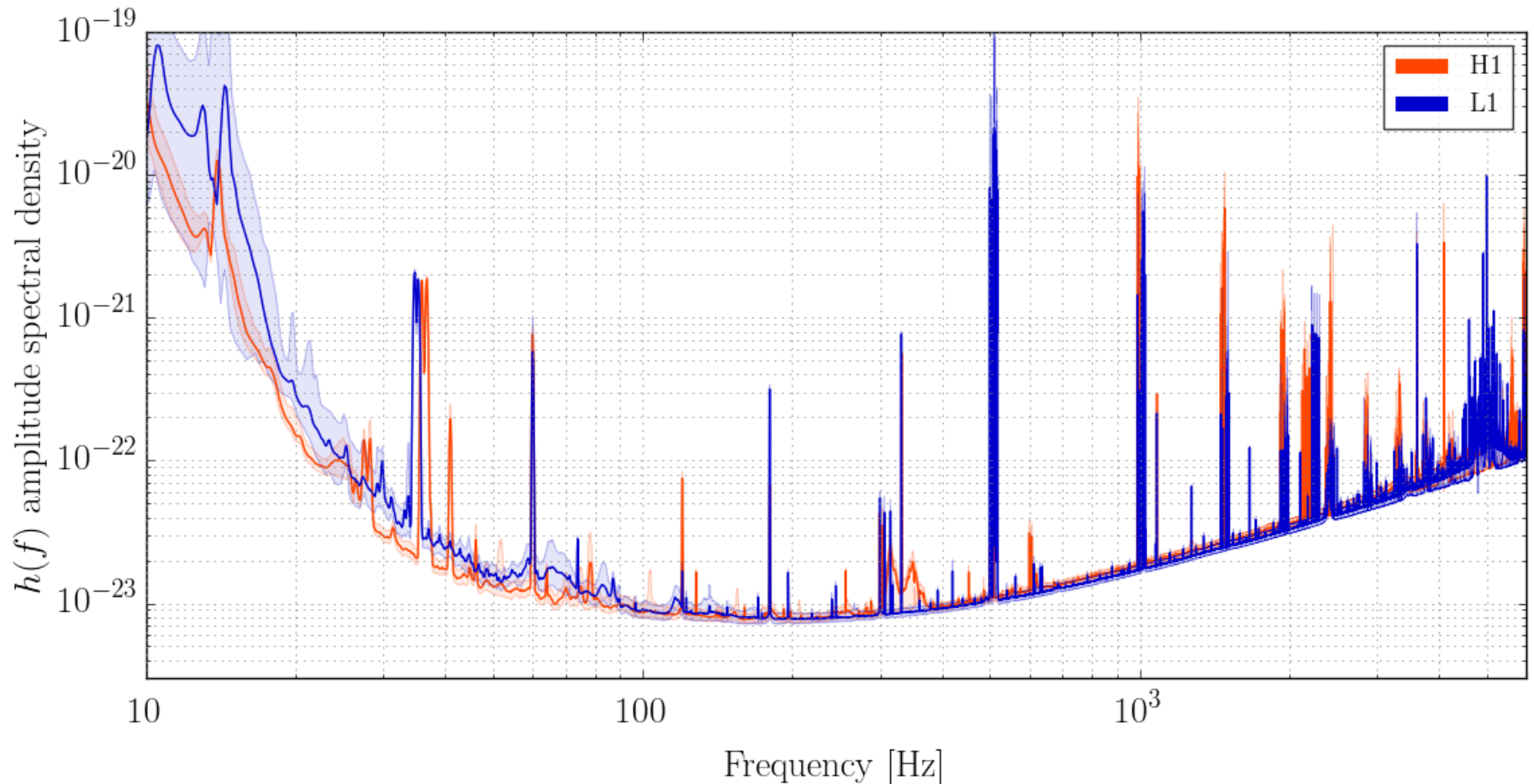
Надо ловить сдвиг фазы на 10^{-10}

Все это делается!

Вокруг шумы - сейсмика, велосипедисты, звуки

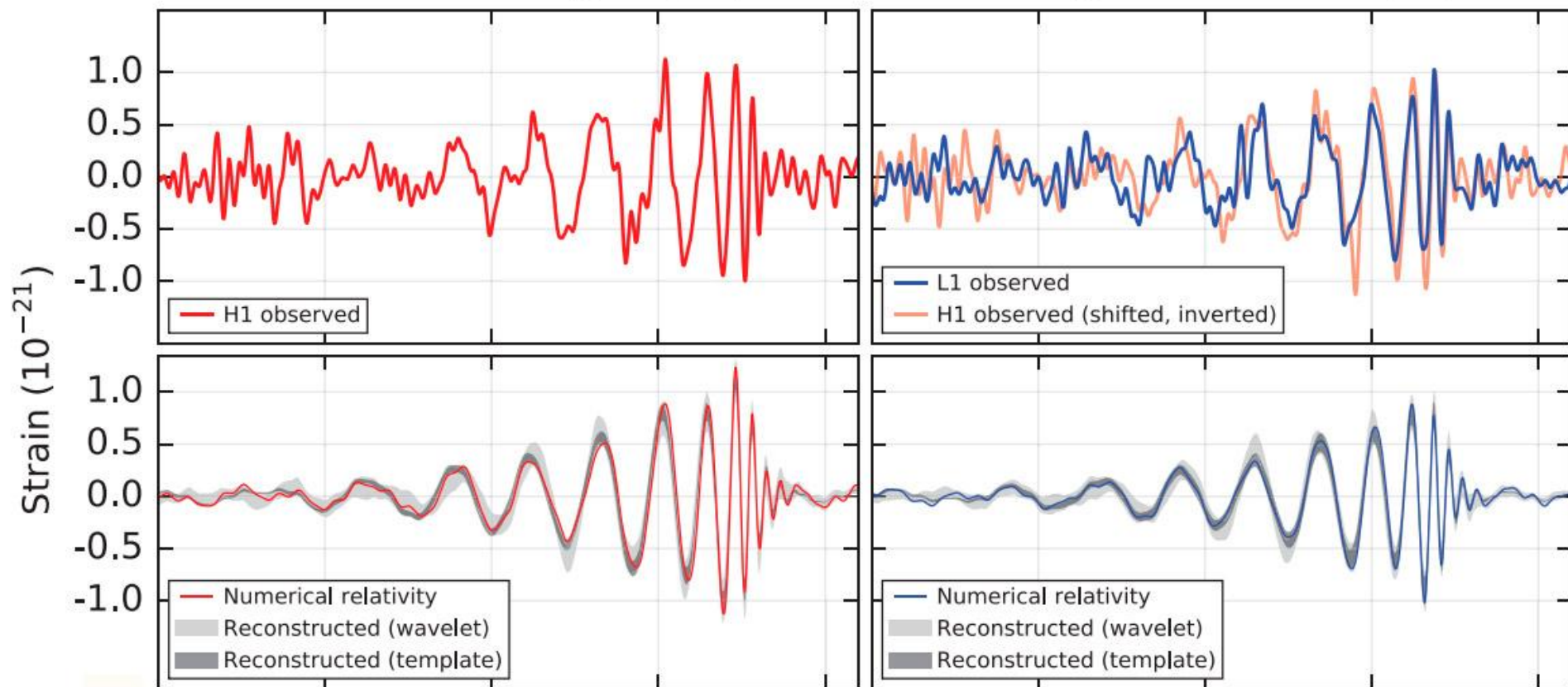
Надо загнать шумы в узкие частотные резонансы

Отсюда - сапфировые зеркала, кварцевые нити

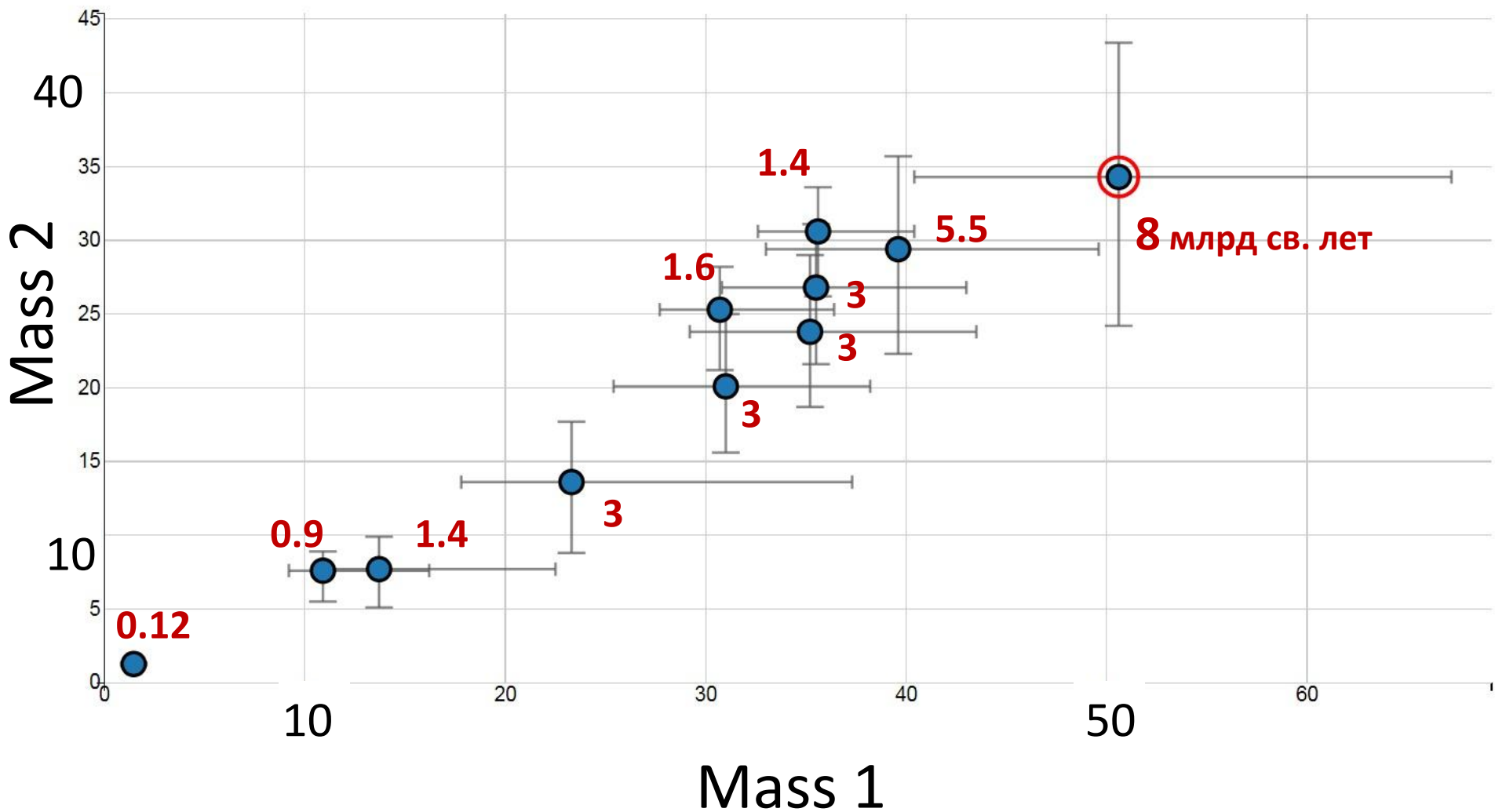


Hanford, Washington (H1)

Livingston, Louisiana (L1)

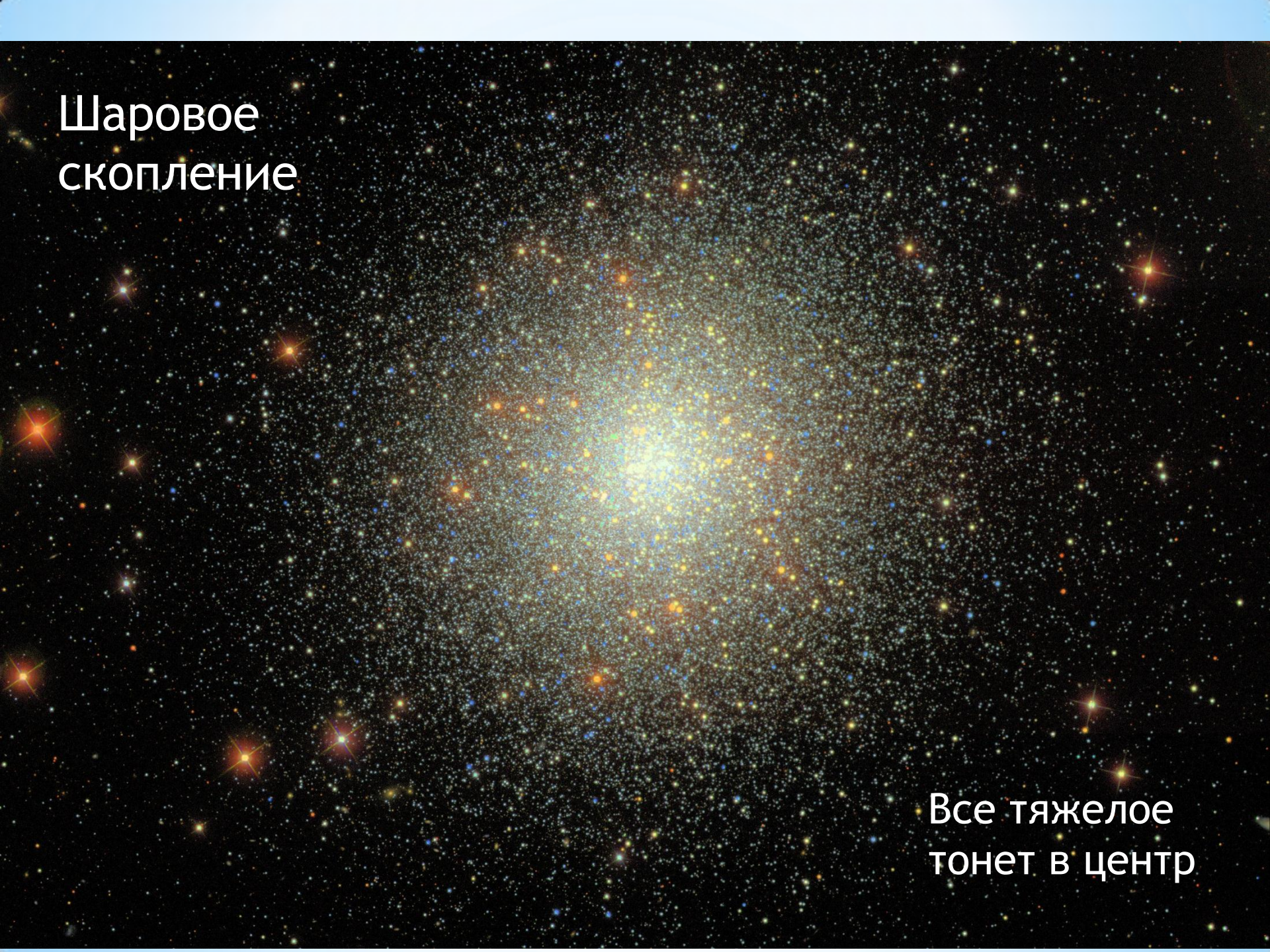


11 гравитационно-волновых событий



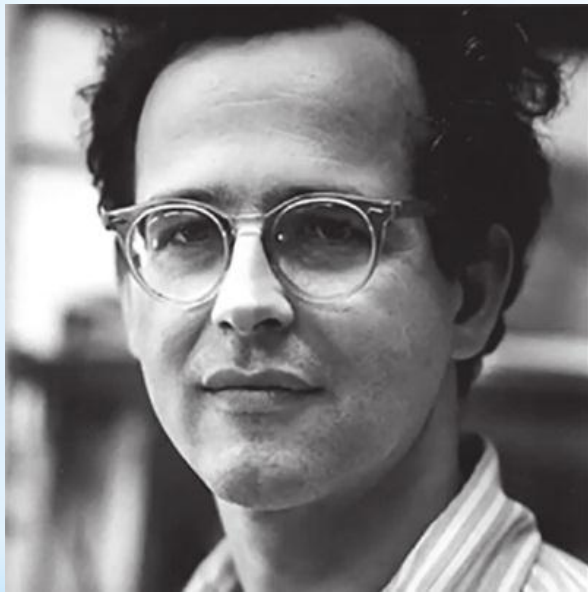
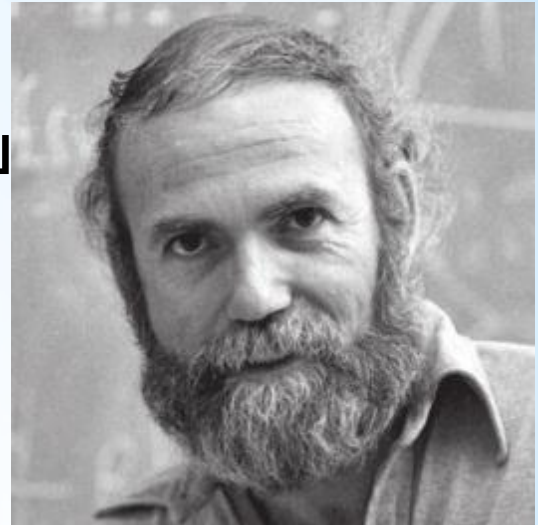
Шаровое скопление

Все тяжелое
тонет в центр

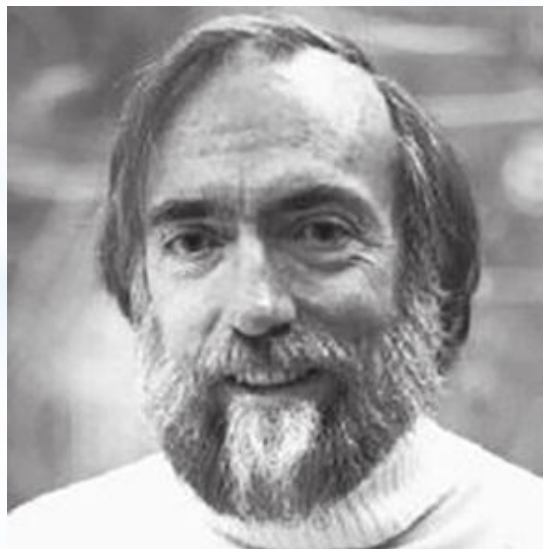


Нобелевская премия по физике 2017

Барри
Бариш



Райнер Вайс



Кип Торн



Черные дыры растут

Quasar - quasi stellar radio source

Звезда синего цвета, с радиоизлучением и с непонятным спектром

В 1963 Маартен Шмидт догадывается, что это нормальные спектры с огромным красным смещением

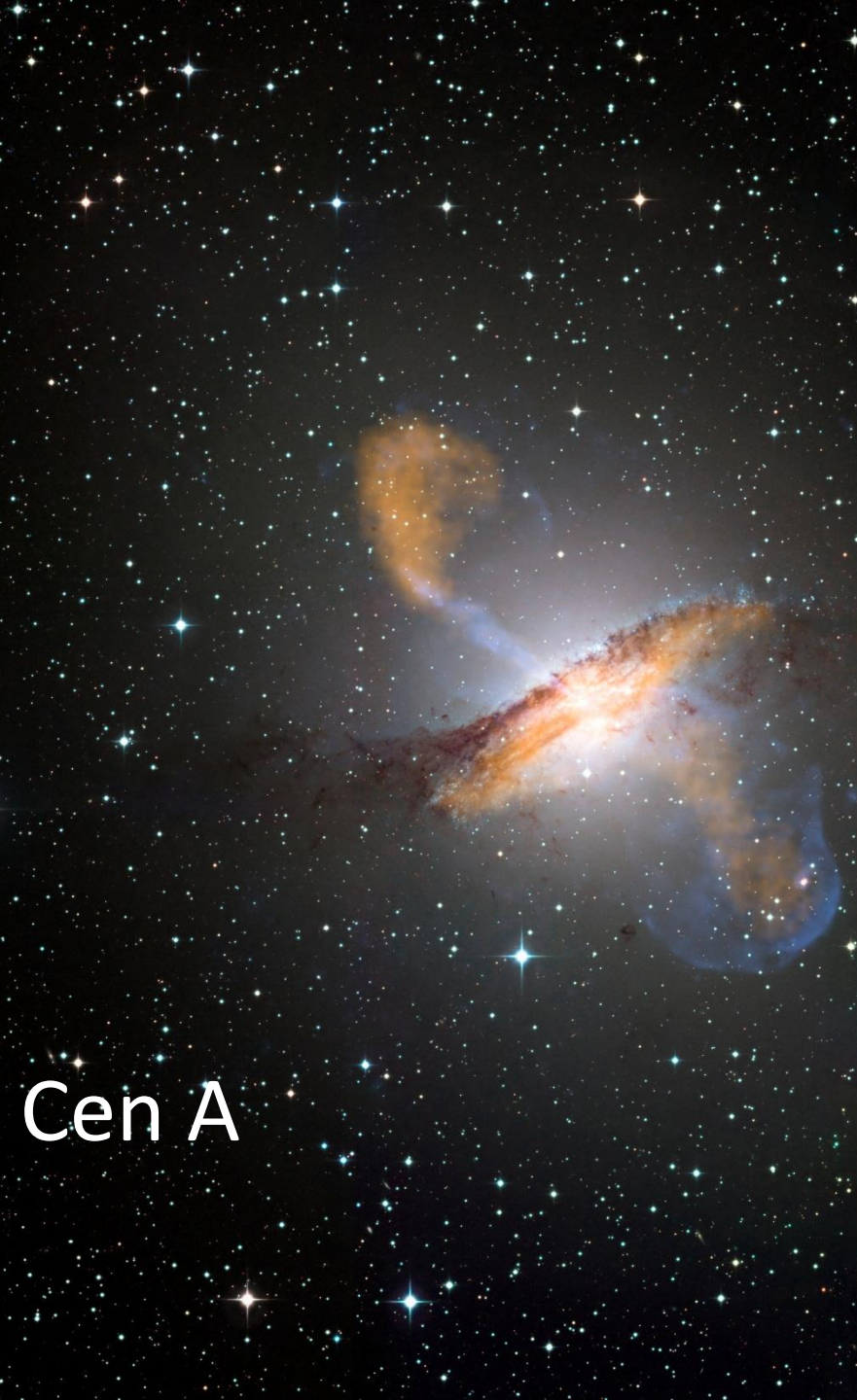


Ближайший яркий квазар 3C 273

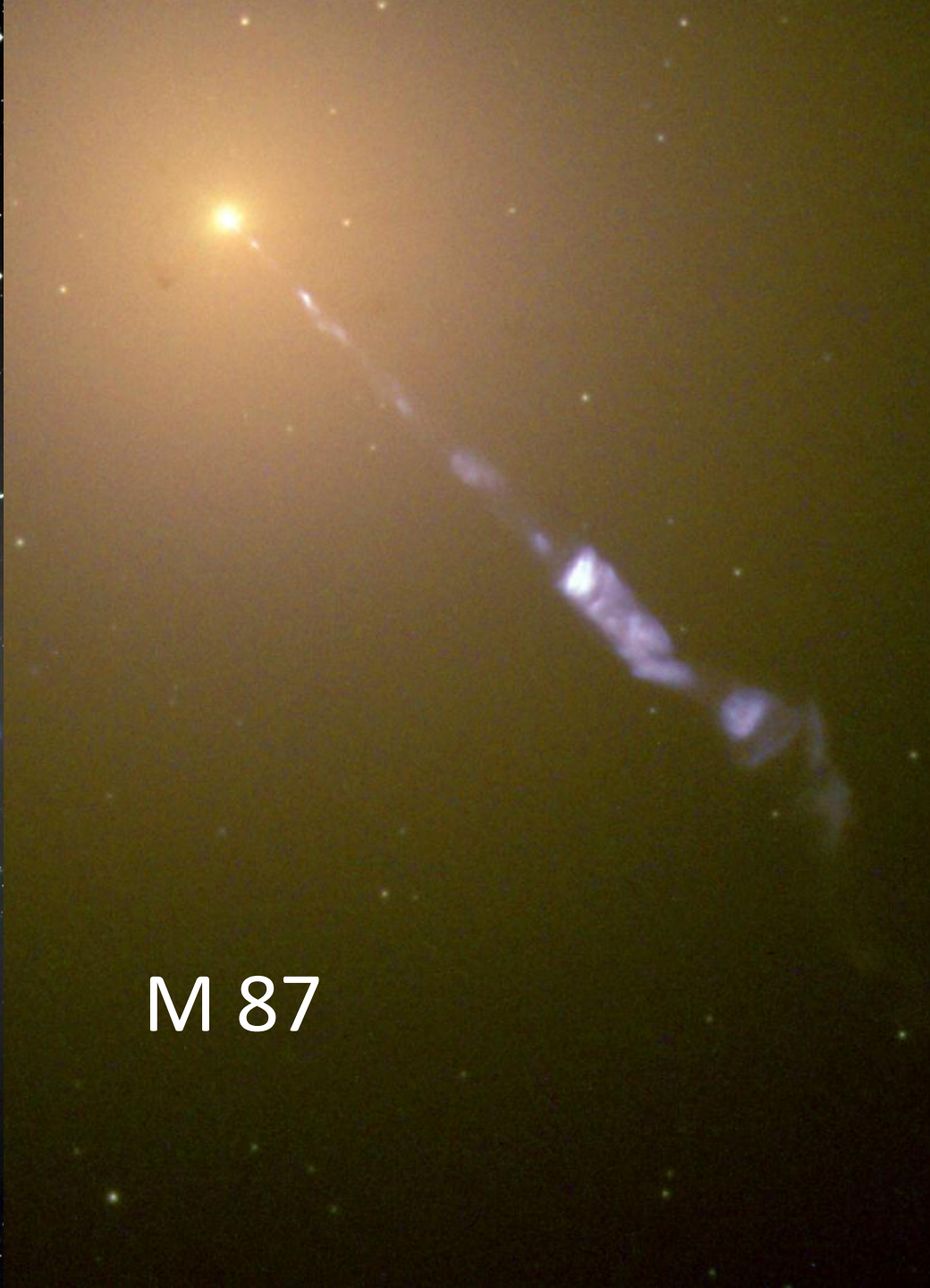


$z = 0.158$

2.44 млрд св. лет



Cen A



M 87

Зоология:

Радио-шумные квазары

Радио-тихие квазары

Блазары

BL – Лас (лацертиды)

Активные ядра галактик

Сейфертовские I

Сейфертовские II

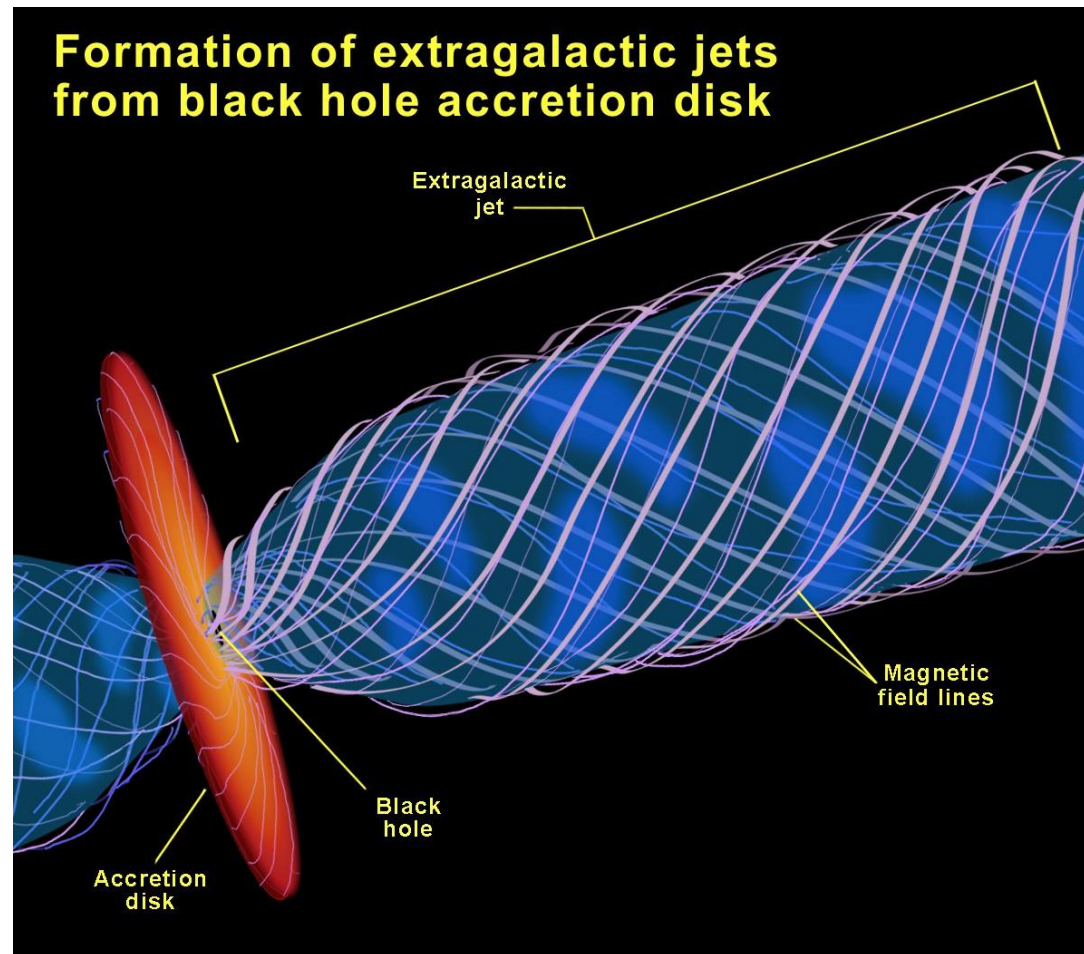
Сейфертовские 1.5

Радиогалактики

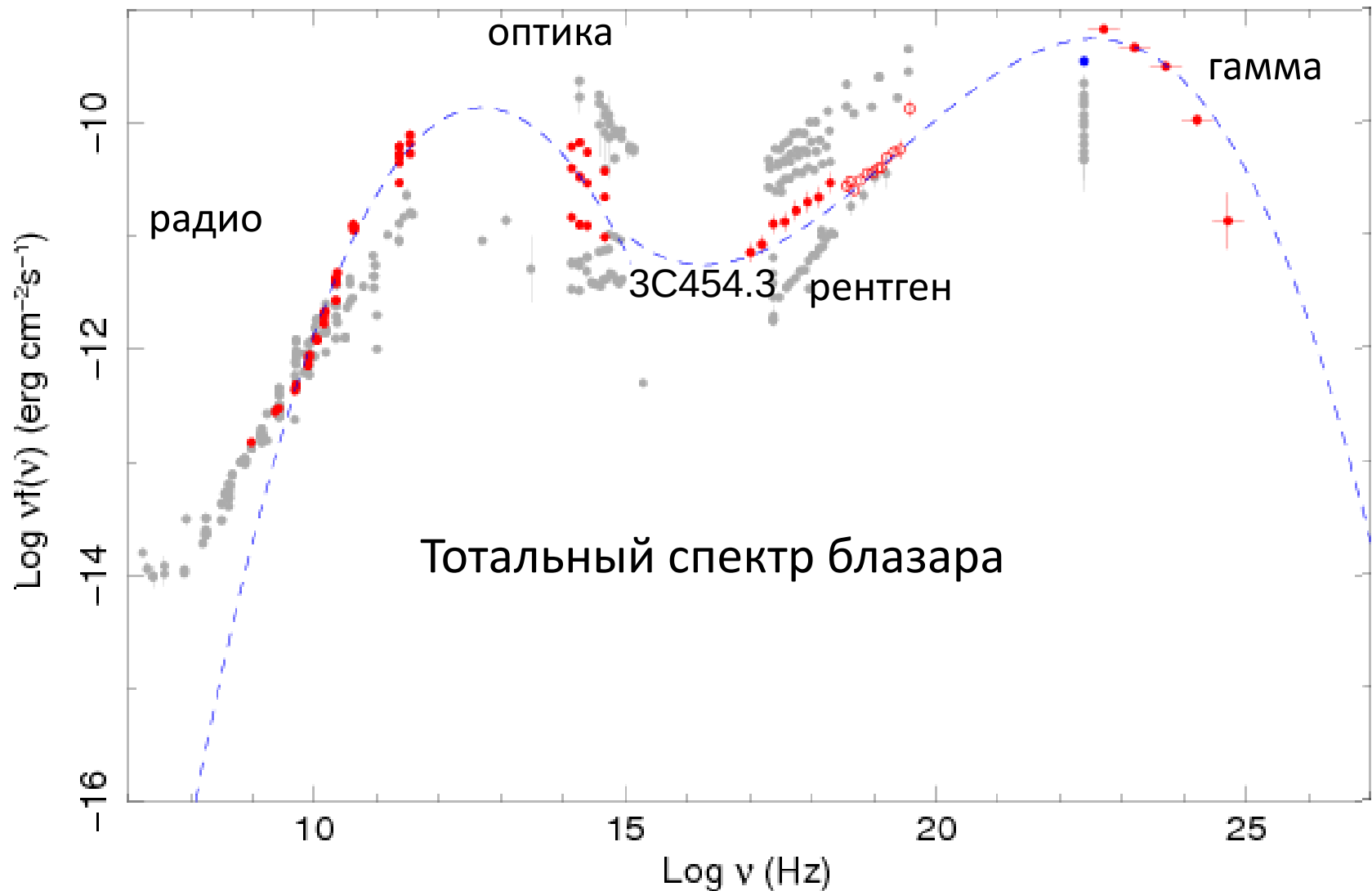
На самом деле все это –

Черные дыры с аккреционным диском

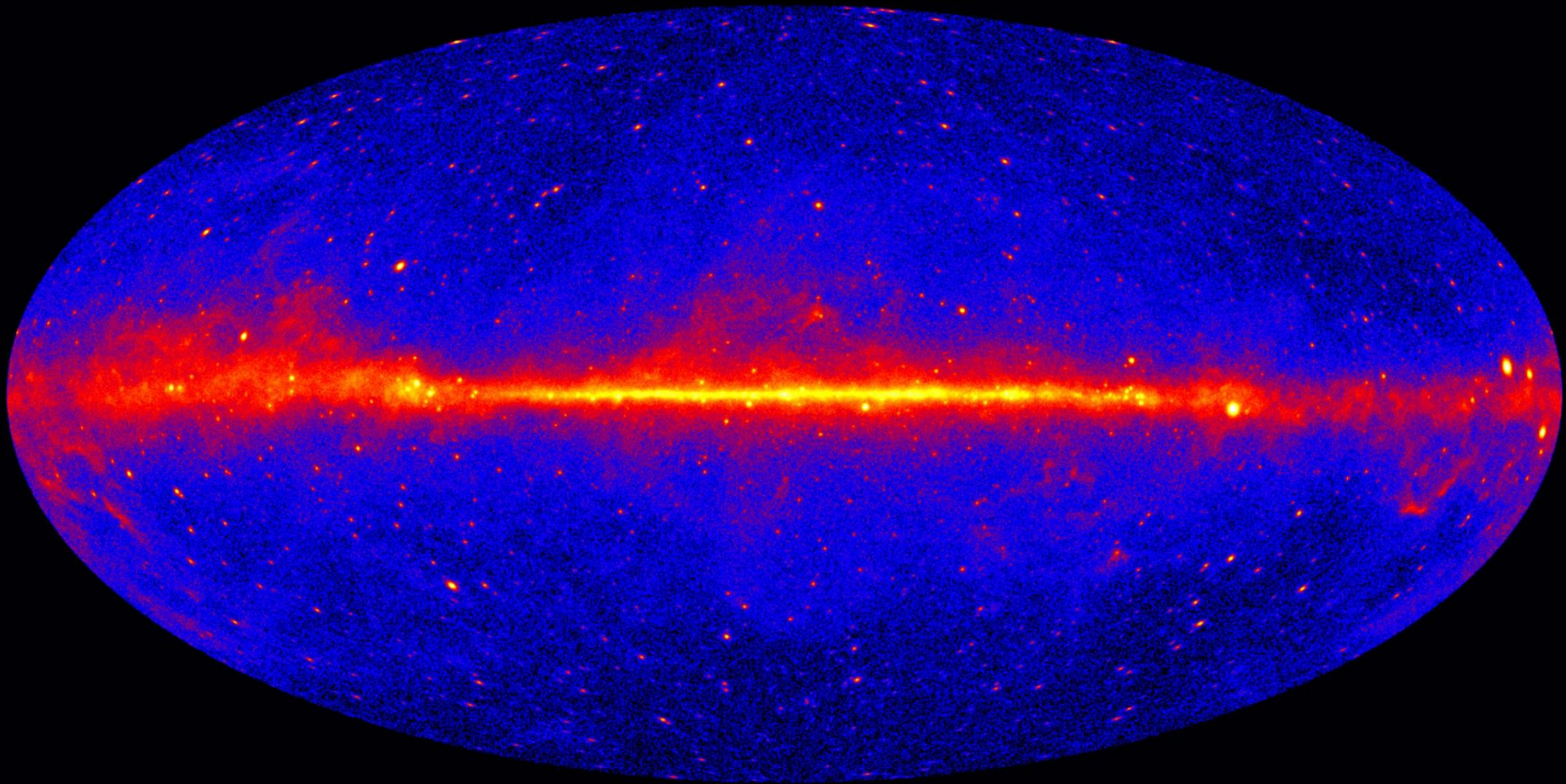
с джетом или без, по-разному ориентированные



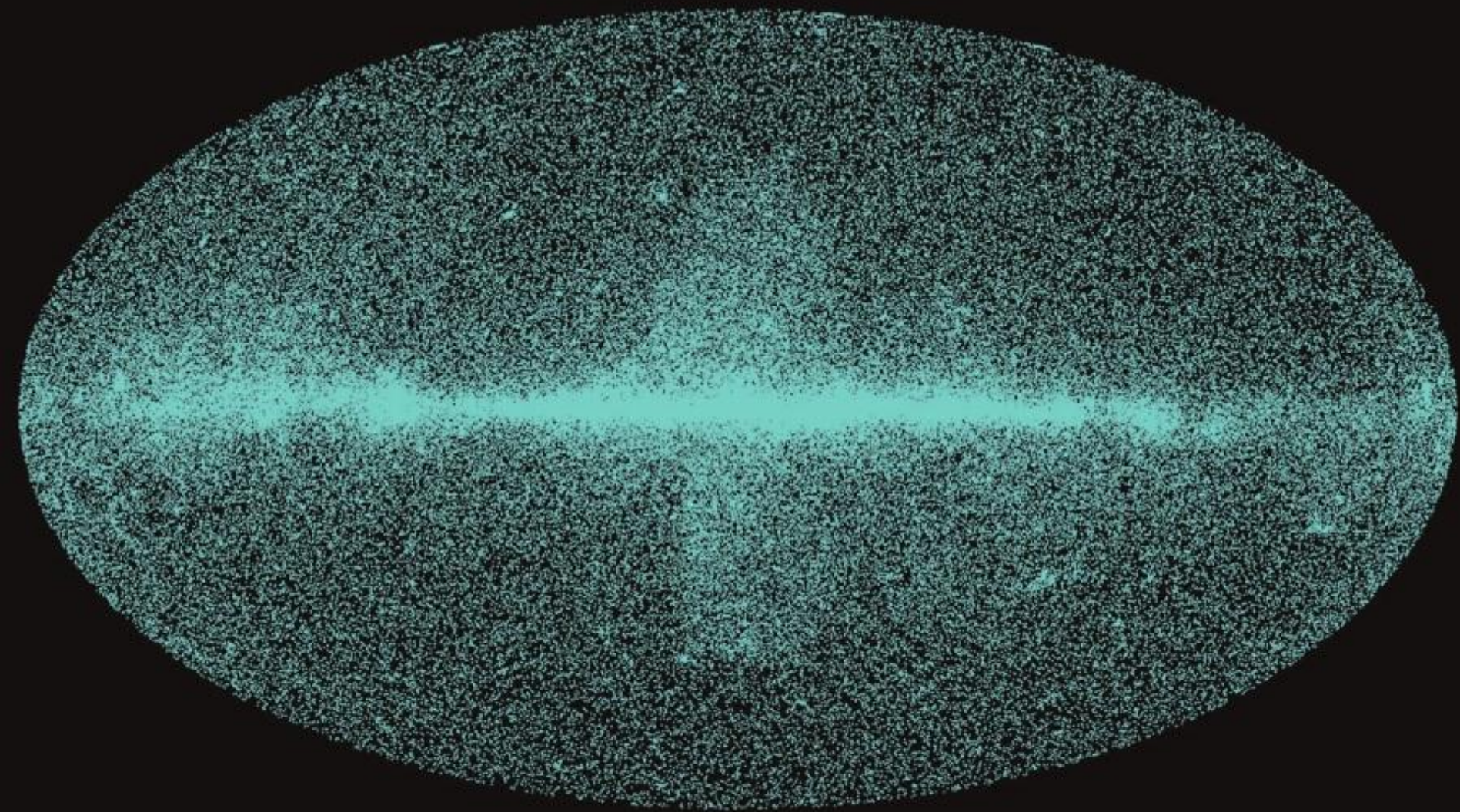
А если джет направлен прямо на нас?
Видим блазар!

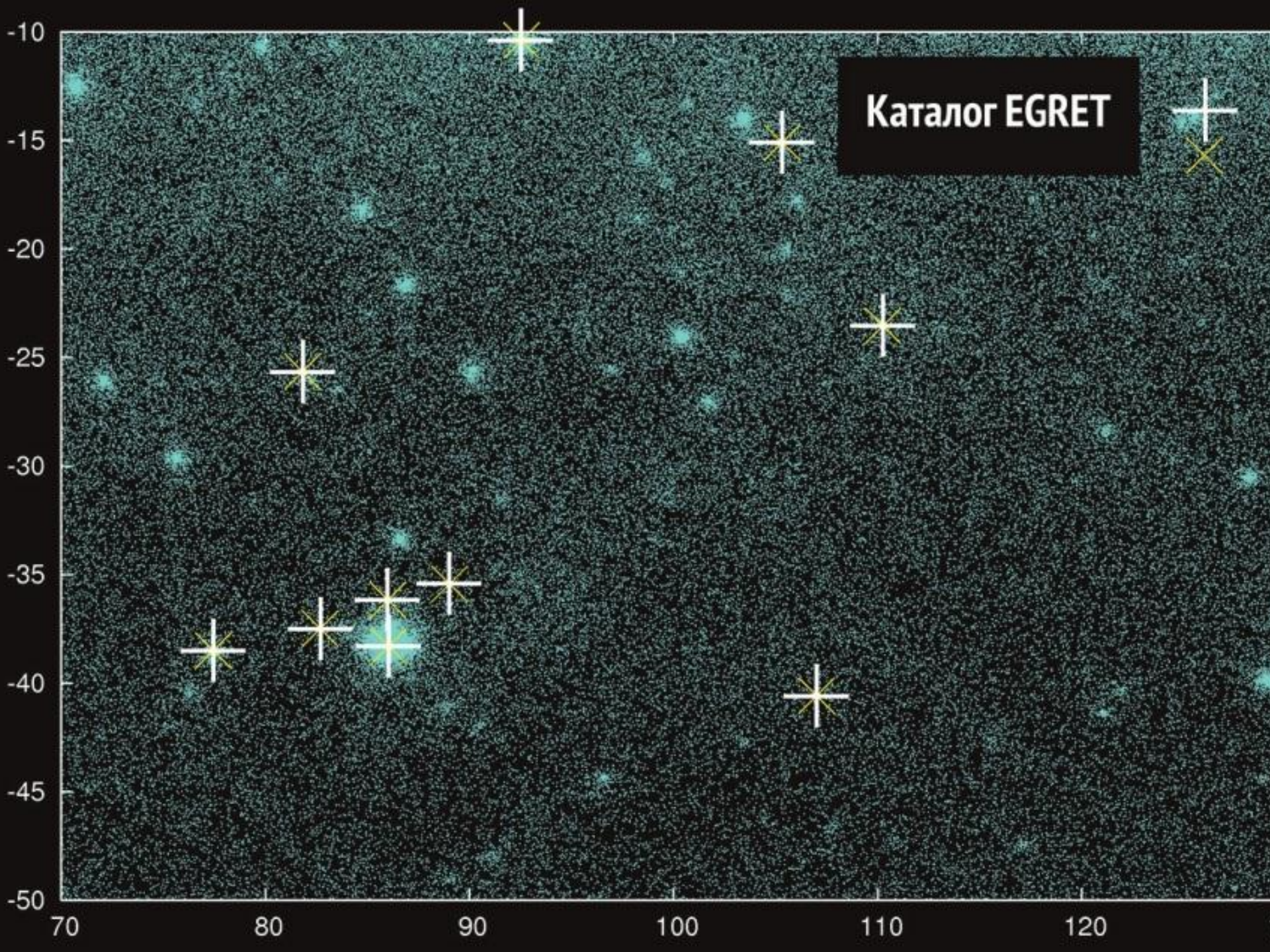


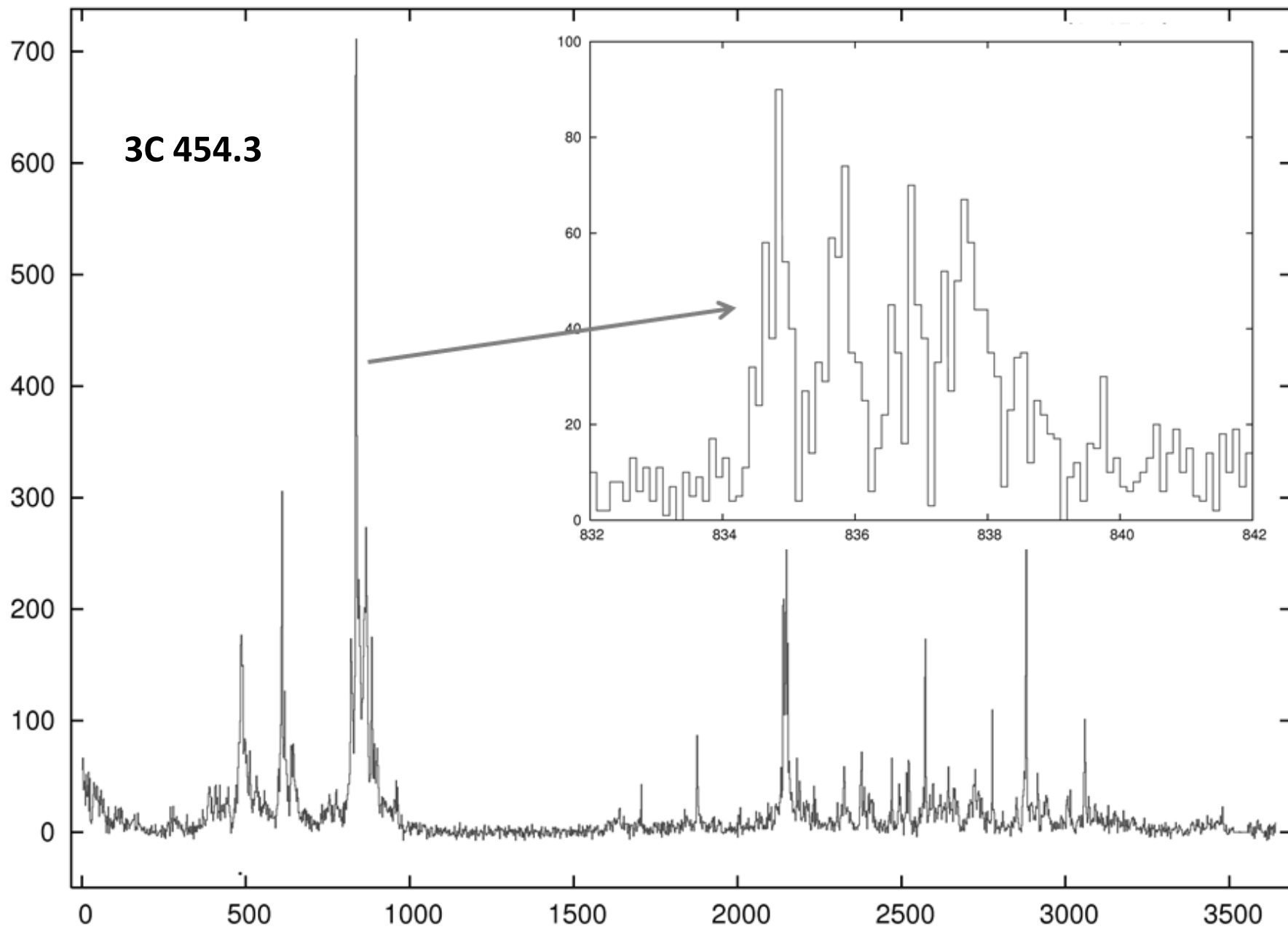
Небо «Ферми»

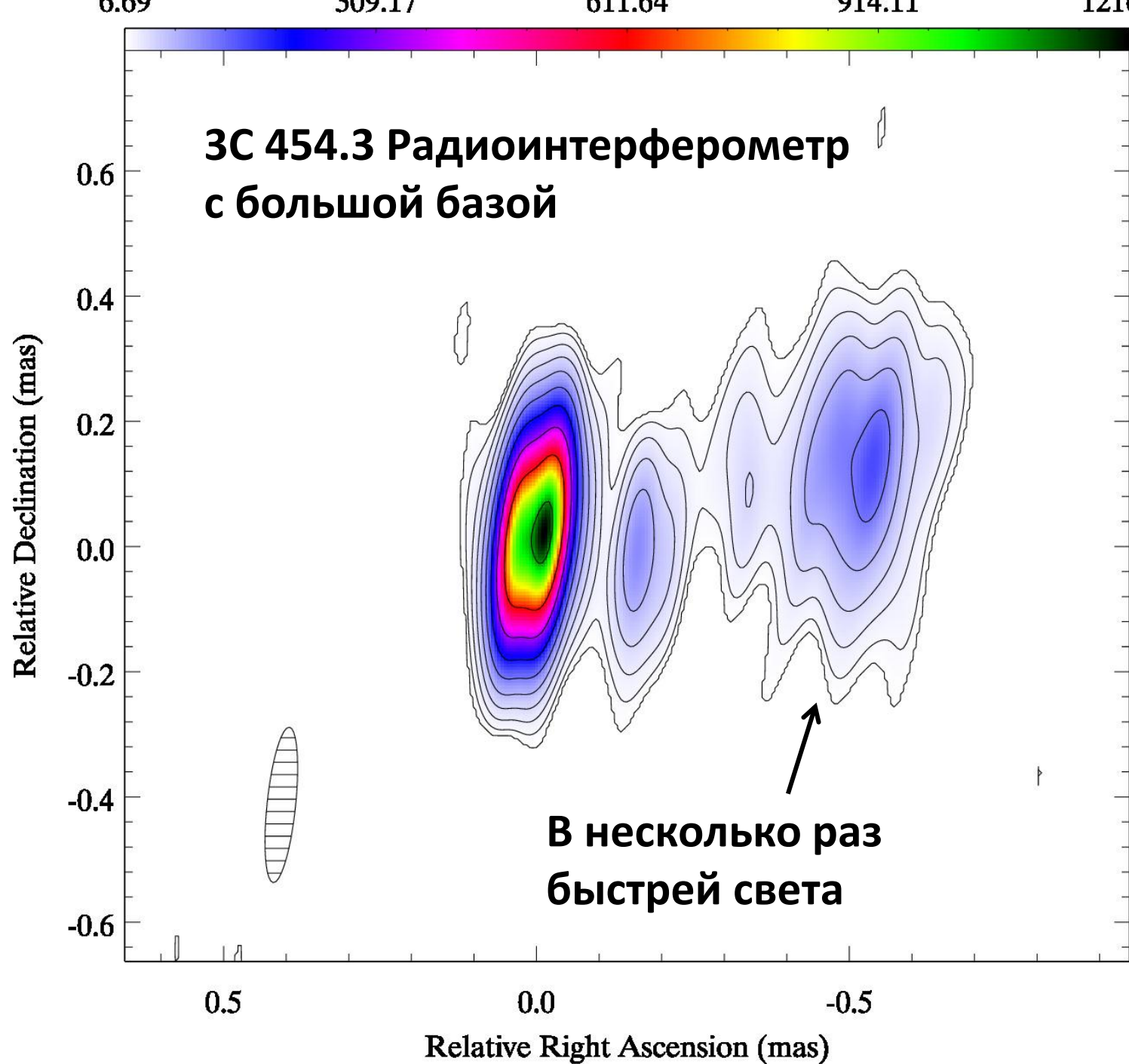


$> 6 \text{ TeV}$







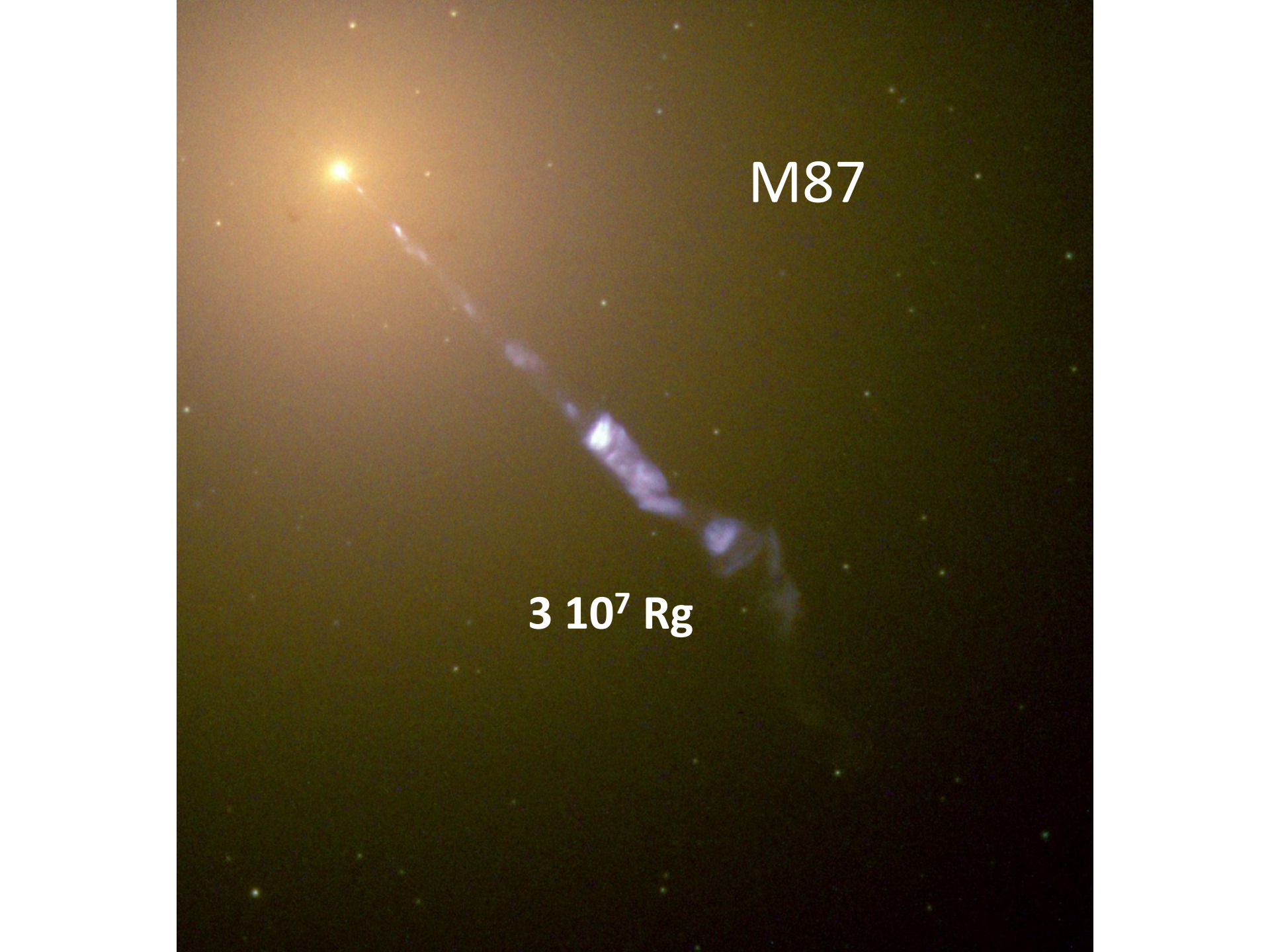


Peak Total Intensity 1.2166 Jy/beam (first cont. at 6.60 mJy/beam)

Прямое наблюдение процессов вблизи горизонта

Звездные черные дыры : $R_s \sim 10^{-15}$ радиана
(земная бактерия с Луны)

M87 (6 млрд $M_\odot$), центр Галактики (4млн $M_\odot$: $R_s \sim 10^{-10}$ радиана)
(человеческий волос в толщину с 500 километров)

A deep-field astronomical image of the galaxy M87 (Messier 87) in the constellation Virgo. The galaxy is a bright, elliptical, yellowish-white object in the upper left. A long, narrow, blueish-purple jet of plasma extends from the center of the galaxy towards the lower right. The background is dark with many small, distant stars.

M87

$3 \cdot 10^7 \text{ Rg}$

Класс: BL-Lac (бывший квазар)

$$L_{\text{jet}} \sim 10^{42} - 10^{44} \text{ эрг/с}$$

$$L_{\text{disk}} \sim 10^{40} - 10^{42} \text{ эрг/с}$$

**Оптически тонкий, геометрически толстый
диск с очень неэффективным высвечиванием
(ADAF).**

**Электронная температура много меньше
протонной.**

Важные размеры

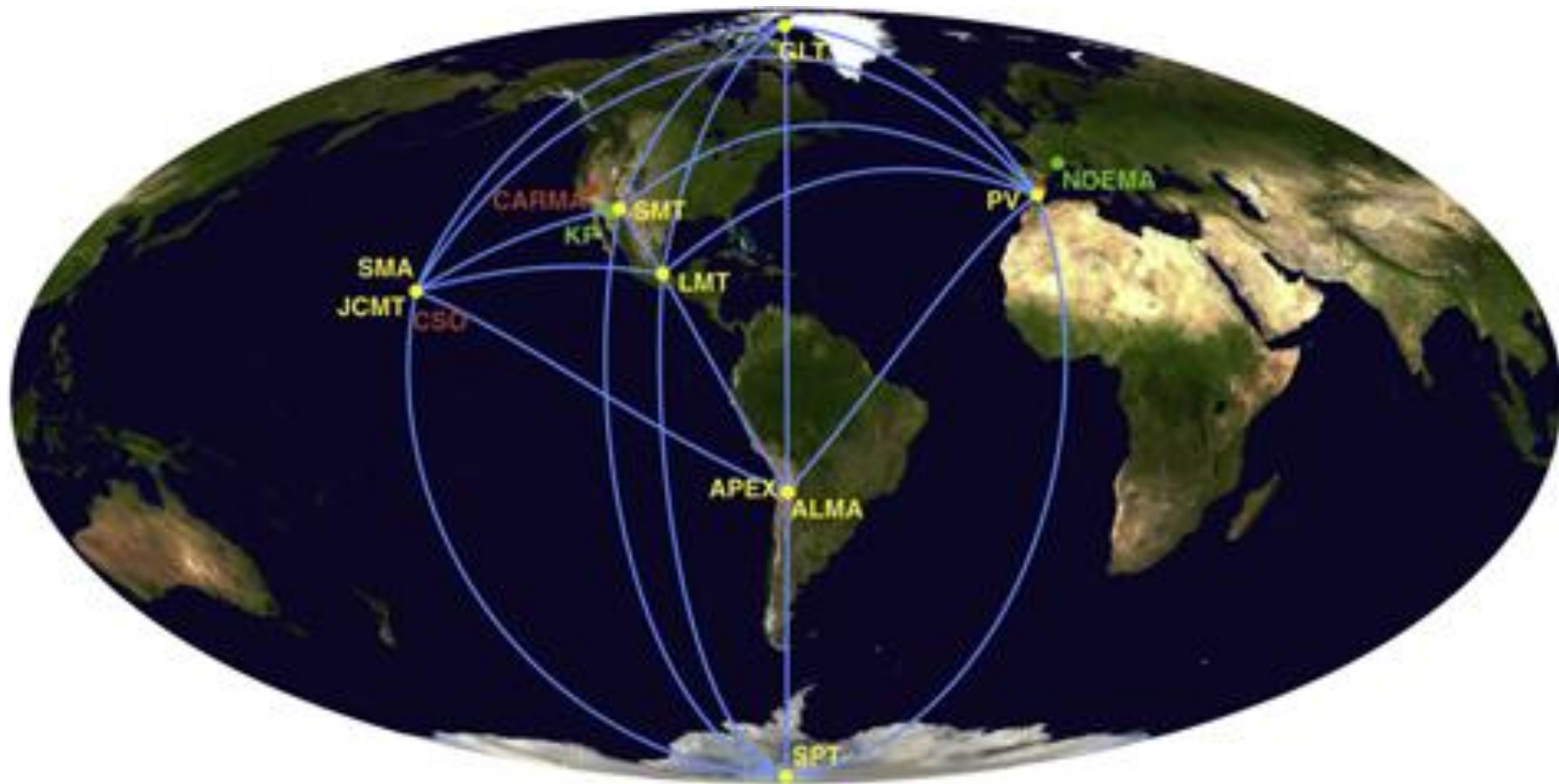
Горизонт событий предельной черной дыры $R_g \sim 4$ угловых микросекунды

Радиус фотонной сферы: $R_{ph} = 3R_g$.
(Фотон, пролетающий ближе, чем R_{ph} , попадет в черную дыру; пролетающий дальше — улетит на бесконечность; летящий точно на R_{ph} — будет циркулировать по круговой орбите).

Радиус тени черной дыры $R_{sh} = \sqrt{3} R_{ph} = 5.2 R_g = 20 \mu\text{arcs}$

Дифракционное разрешение $20 \mu\text{arcs}$

4 дня, 5, 6, 10, 11 апреля 2017. 2 петабайта данных



Фотонная сфера

К наблюдателю

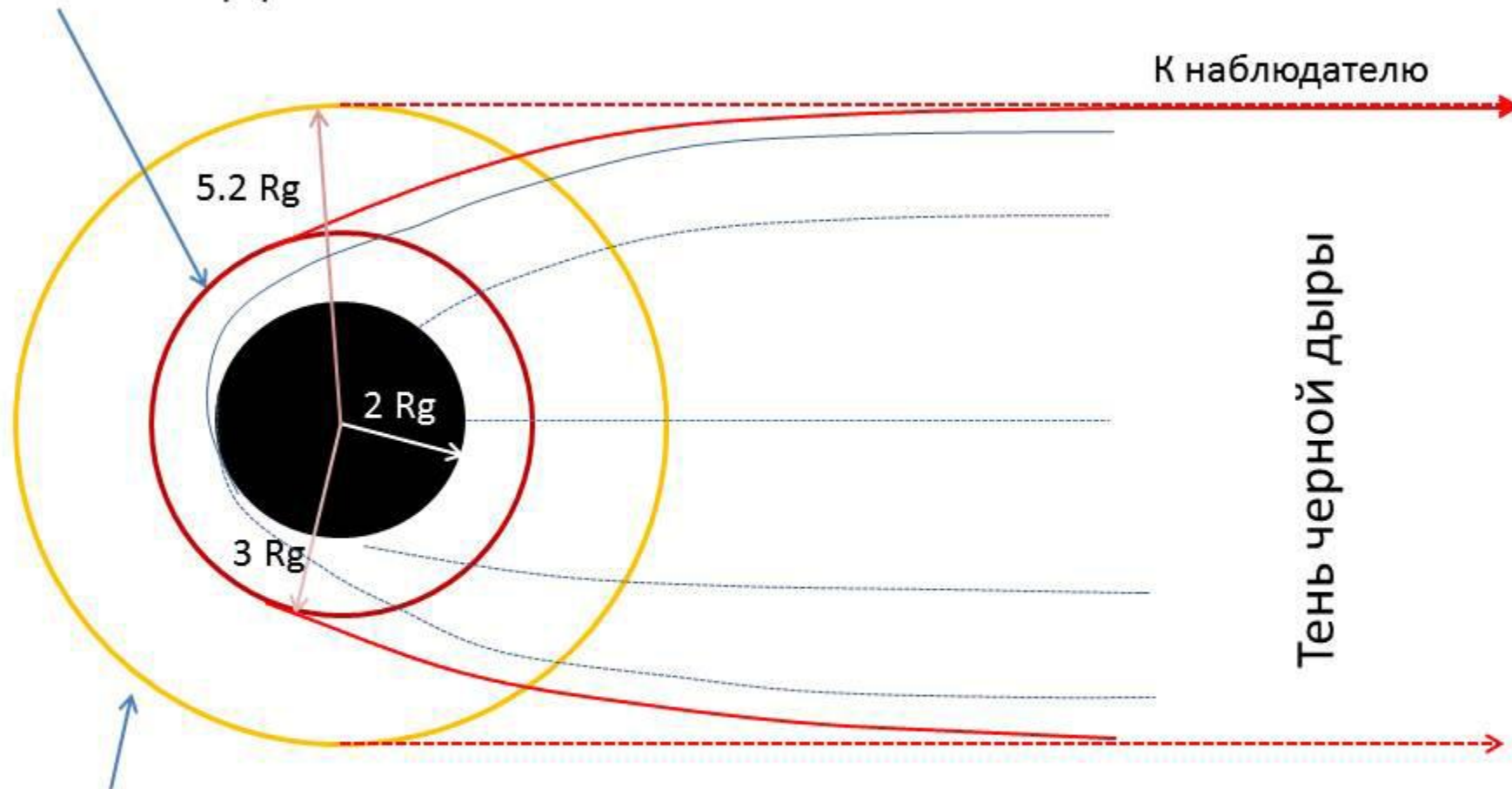
$5.2 R_g$

$2 R_g$

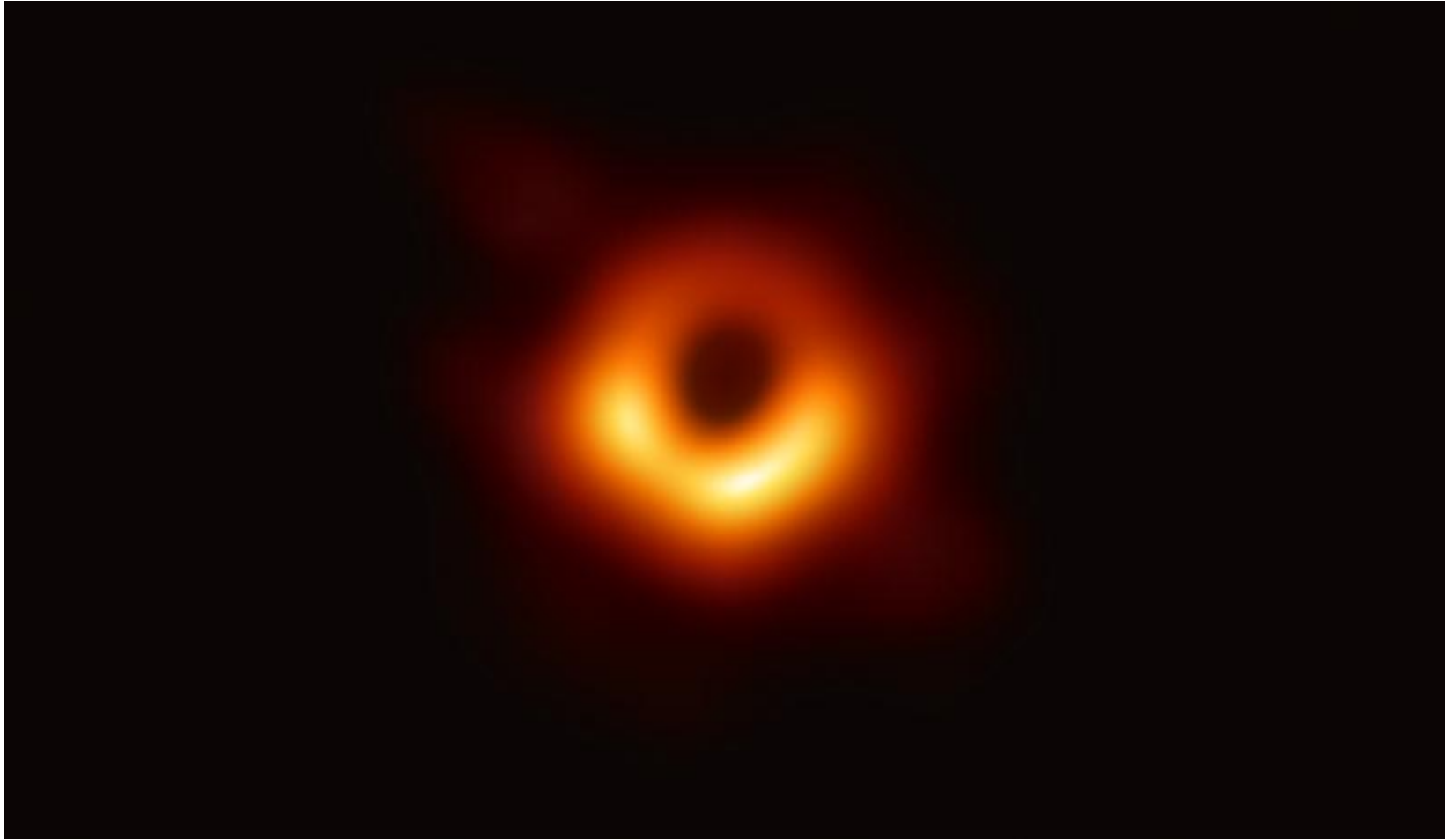
$3 R_g$

Тень черной дыры

Линзированный образ фотонной сферы



M87



M87*

April 11, 2017

От нас

К нам

12 R_g

50 μ as

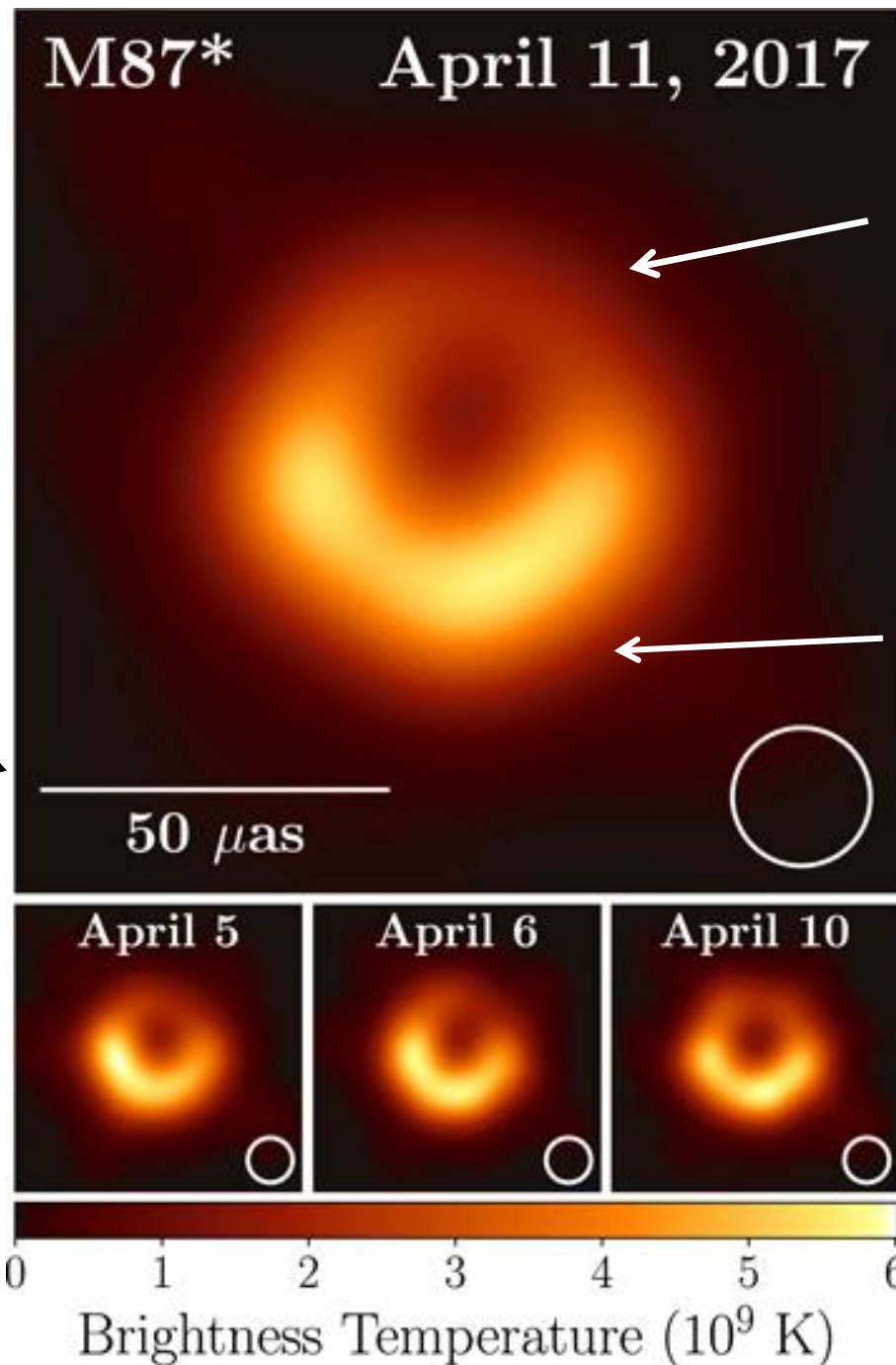
April 5

April 6

April 10

0 1 2 3 4 5 6

Brightness Temperature (10^9 K)



Что в сухом остатке

1. Огромный PR-эффект
2. Независимая оценка массы – устранение двусмысленности
3. Информация по аккреционному диску, отброшены некоторые варианты, в частности, однотемпературный диск.
4. Не проходит $a = 0$, но проходит как $a = 0.5$, так и $a = 0.95$

Проблема для черной дыры в центре нашей галактики:
слишком быстрая переменность

Светлое будущее: Миллиметр