

Космические гамма-всплески и современная Астрофизика

Алексей Позаненко

Институт космических исследований,
Москва

30.01.2021

С чем могут быть связаны гамма-всплески ?

- Гиперновые – сверхновые (SN) особого типа
- Килоновые – аналог сверхновых но с синтезом более тяжелых элементов ($> \text{Fe}$, например Au и т.д.)
- Источники гравитационного излучения (BNS)
- Испарение первичных черных дыр ?
- Быстрые радиовсплески (FRB) ?
- Что-то еще ?

Сенсации?

- ▣ Гамма-всплеск убил динозавров (Да/Нет)
- ▣ Гамма-всплеск привел к землетрясению и цунами в ЮВА 27 декабря 2004 г. (Да/Нет)
- ▣ Гамма-всплески – единственные источники благородных металлов во Вселенной (золото, платина...) (Да/Нет)
- ▣ Гамма-всплеск можно наблюдать с земли невооруженным глазом (Да/Нет)

Сенсации?

- ▣ Гамма-всплеск убил динозавров (Да/Нет)
- ▣ Гамма-всплеск привел к землетрясению и цунами в ЮВА 27 декабря 2004г. (Да/Нет)
- ▣ Гамма-всплески – единственные источники благородных металлов во Вселенной (золото, платина...) (Да/Нет)
- ▣ Гамма-всплеск можно наблюдать с земли невооруженным глазом (Да/Нет)

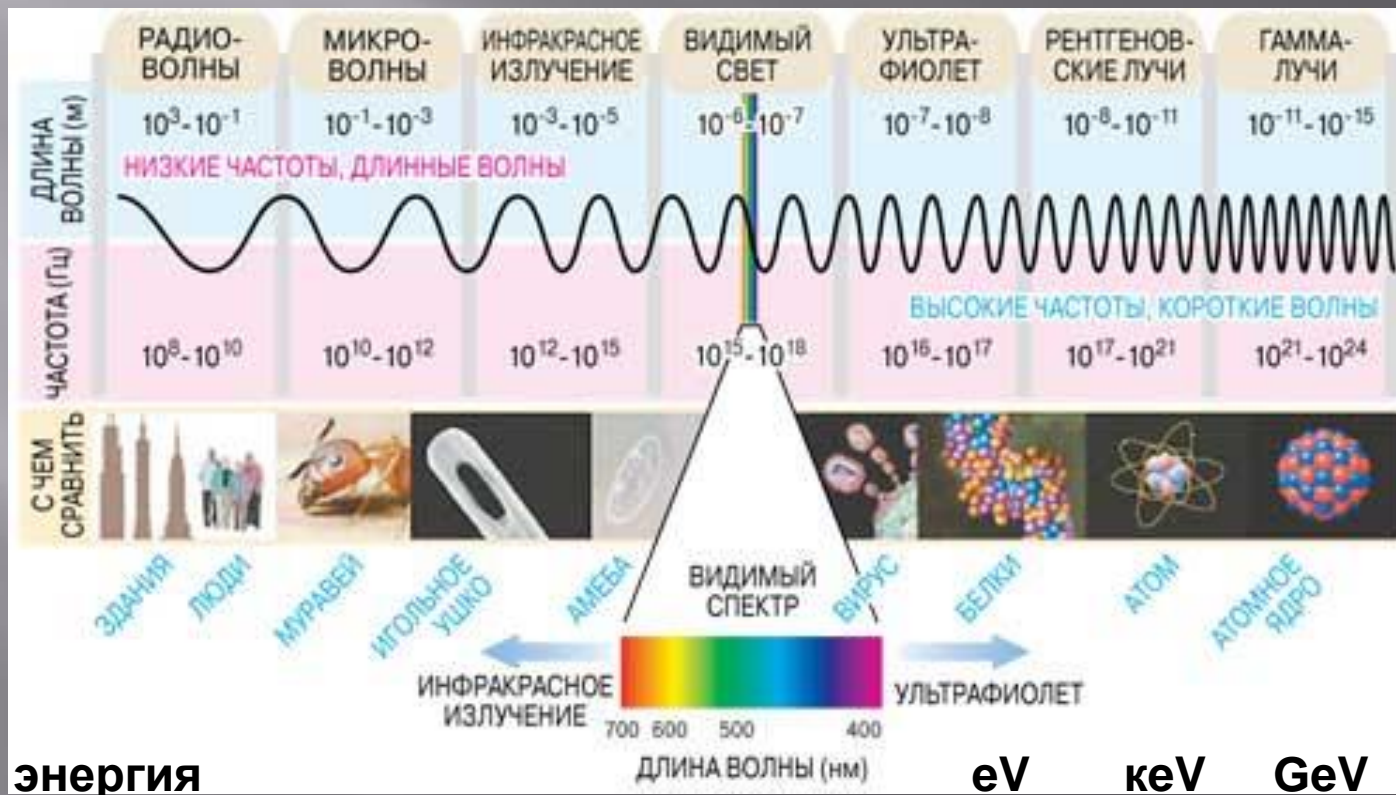
Gamma-Ray Burst 2003

<https://youtu.be/U1EkJXpBo4A>

Гордон - 285 - Гамма-всплески



Спектр электромагнитного излучения



Рекорды гамма-всплесков

- ▣ Ярчайшее явление в гамма-диапазоне на интервале всего нескольких секунд
- ▣ Энерговыделение в эл.магн. диапазоне $\sim 10^{54}$ эрг
- ▣ Одни из самых удаленных объектов Вселенной ($z=11$), наблюдаемые непосредственно
- ▣ Излучение - от радио диапазона (500 МГц) до сверхвысоких энергий 1 TeV
- ▣ Источники регистрируемых гравитационных волн (LIGO/Virgo)

План

- ▣ Гамма-всплески – История и свойства
- ▣ Гамма-всплески и джеты
- ▣ Гамма-всплески и сверхновые
- ▣ Гамма-всплески и килоновые
- ▣ Гамма-всплески и источники гравитационного излучения
- ▣ Гамма-всплески и ранняя Вселенная
- ▣ Гамма-всплески и гипотетические астрофизические объекты – первичные черные дыры, кротовые норы...
- ▣ Гамма-всплески – нерешенные задачи и где их решать

Открытие гамма-всплесков: первая публикация и первый всплеск

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 182:L85-L88, 1973 June 1
© 1973. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

OBSERVATIONS OF GAMMA-RAY BURSTS OF COSMIC ORIGIN

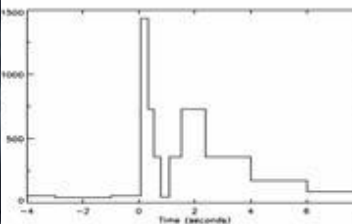
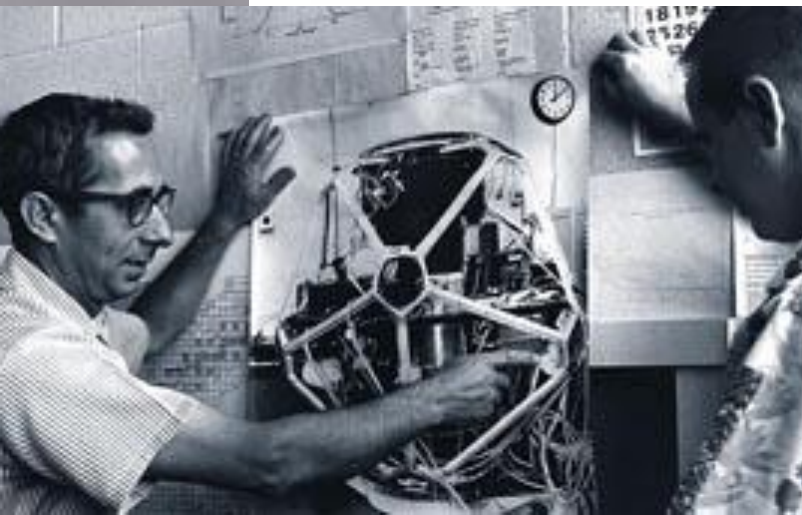
RAY W. KLEBESADEL, IAN B. STRONG, AND ROY A. OLSON

University of California, Los Alamos Scientific Laboratory, Los Alamos, New Mexico
Received 1973 March 16; revised 1973 April 2

ABSTRACT

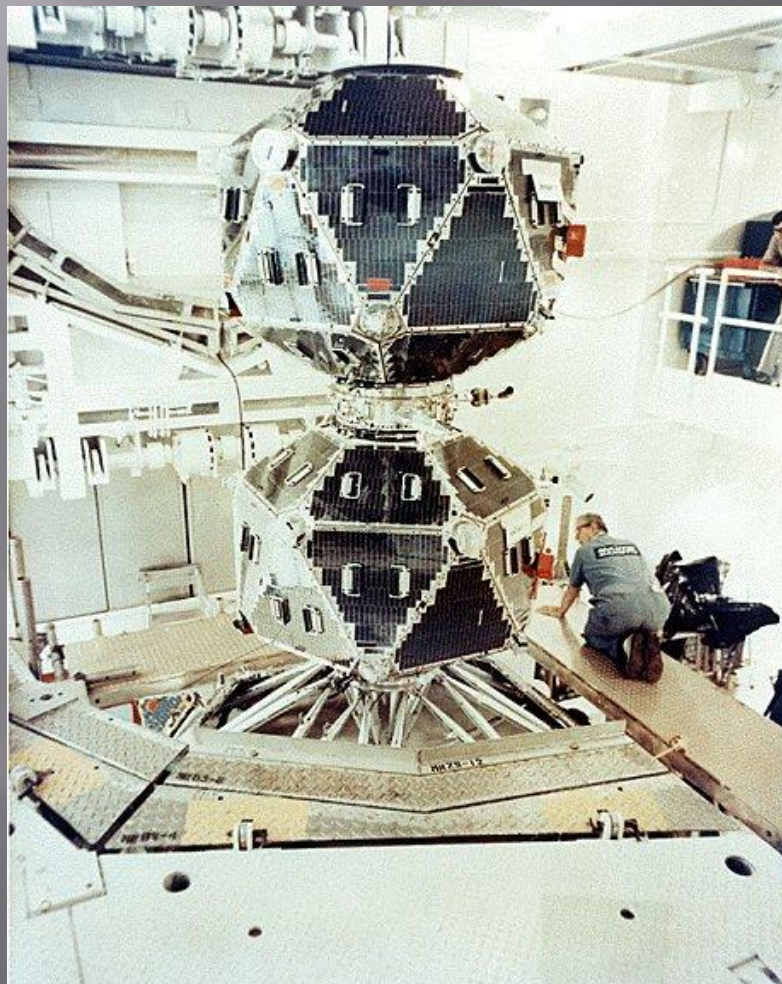
Sixteen short bursts of photons in the energy range 0.2–1.5 MeV have been observed between 1969 July and 1972 July using widely separated spacecraft. Burst durations ranged from less than 0.1 s to ~ 30 s, and time-integrated flux densities from $\sim 10^{-5}$ ergs cm^{-2} to $\sim 2 \times 10^{-4}$ ergs cm^{-2} in the energy range given. Significant time structure within bursts was observed. Directional information eliminates the Earth and Sun as sources.

R.Klebesadel

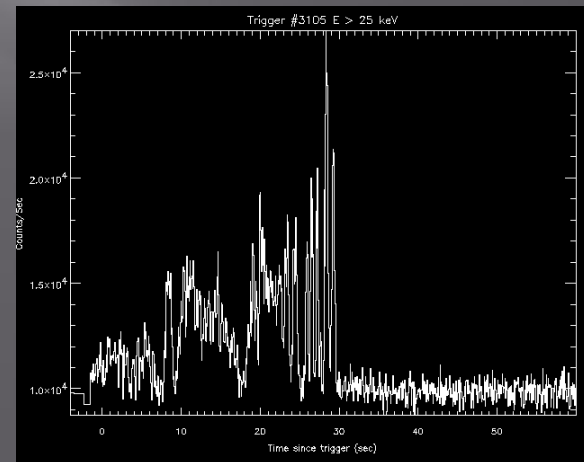
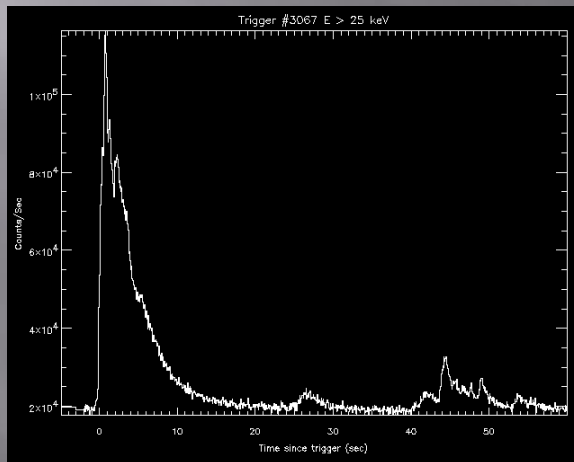
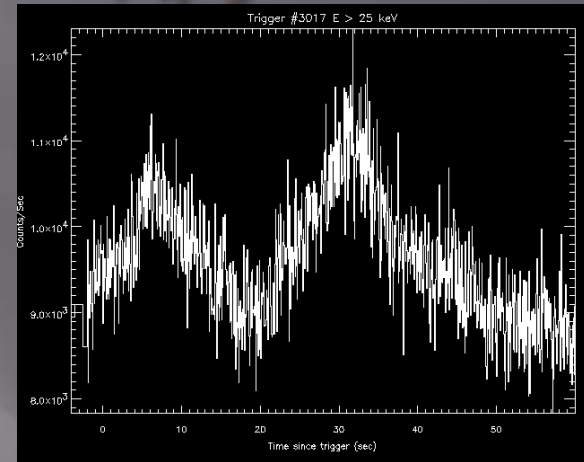
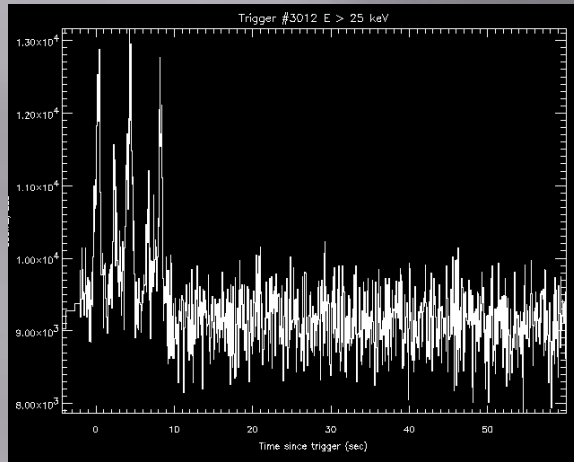


D. McComb

*Vela satellites (1967-1975): контроль за
испытаниями ядерного оружия в трех средах
Открытие GRB*

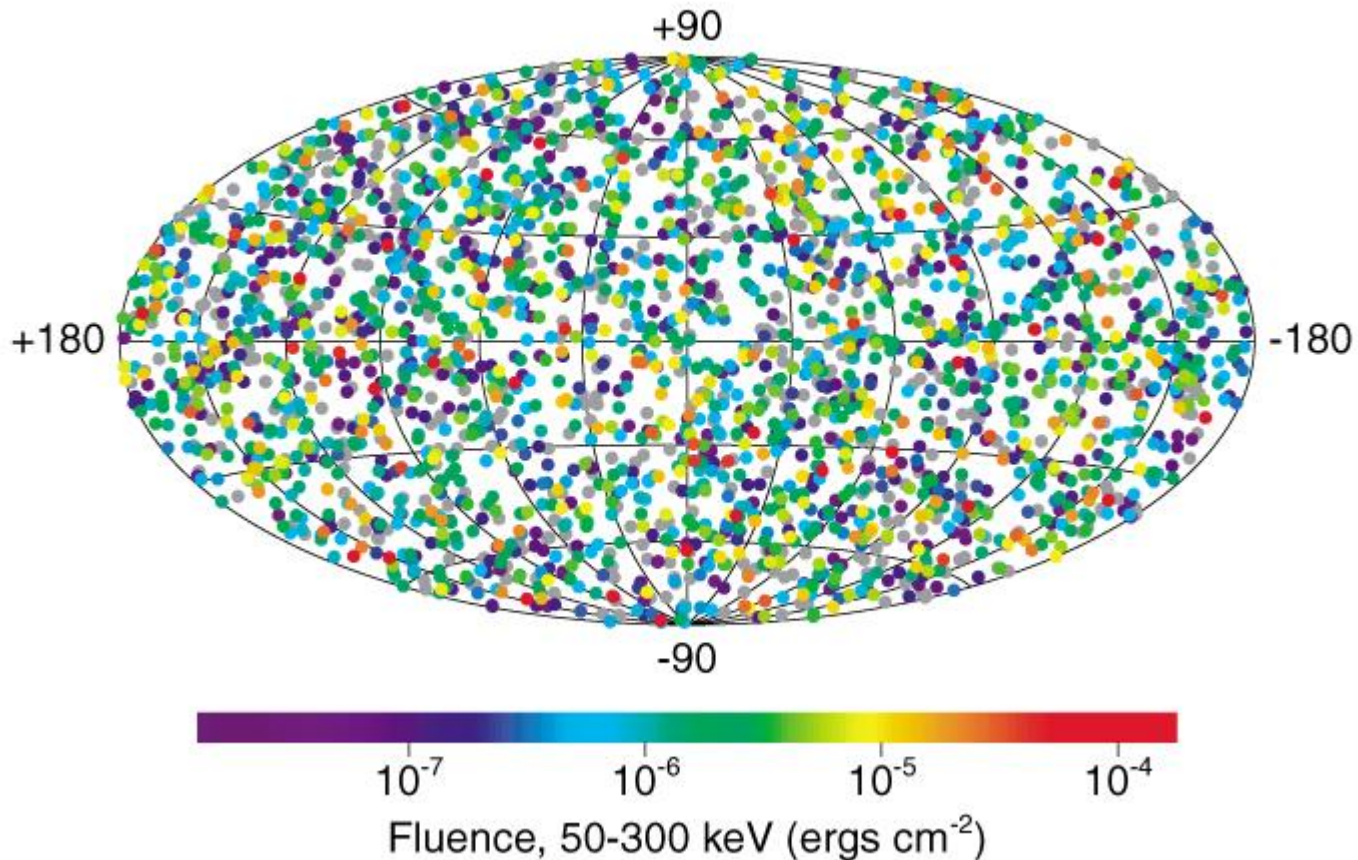


Кривые блеска гамма-всплесков в гамма-диапазоне. Не ни одного похожего друг на друга!



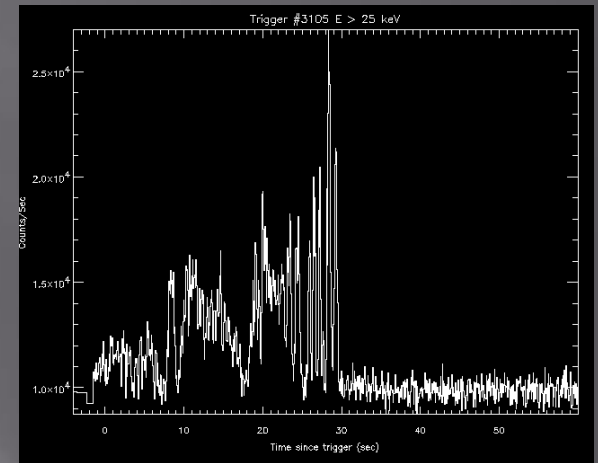
Изотропия распределения источников по небесной сфере

2704 BATSE Gamma-Ray Bursts



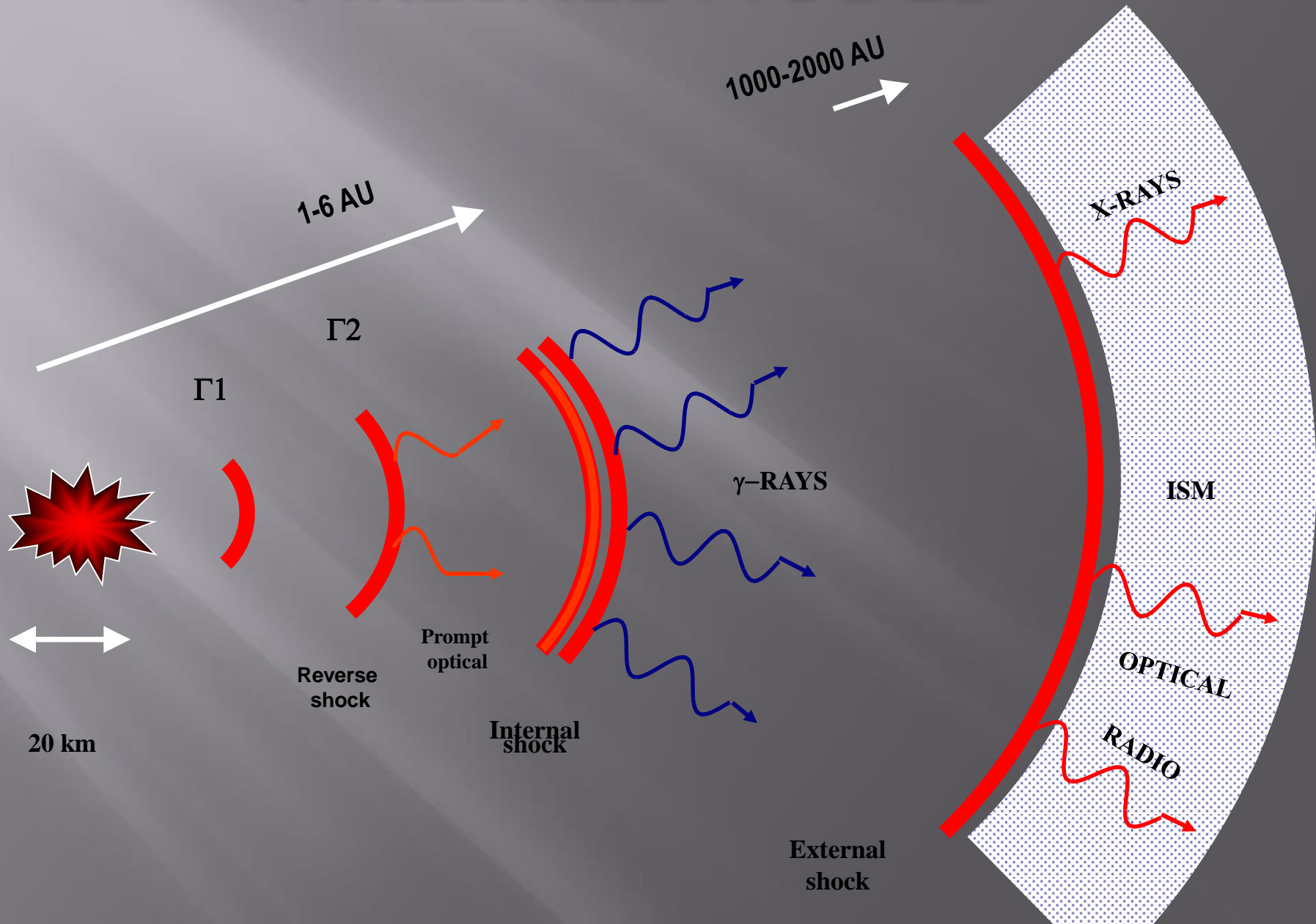
Оценки размера излучающей области исходя из переменности

Переменность сигнала $dT \sim 1$ ms

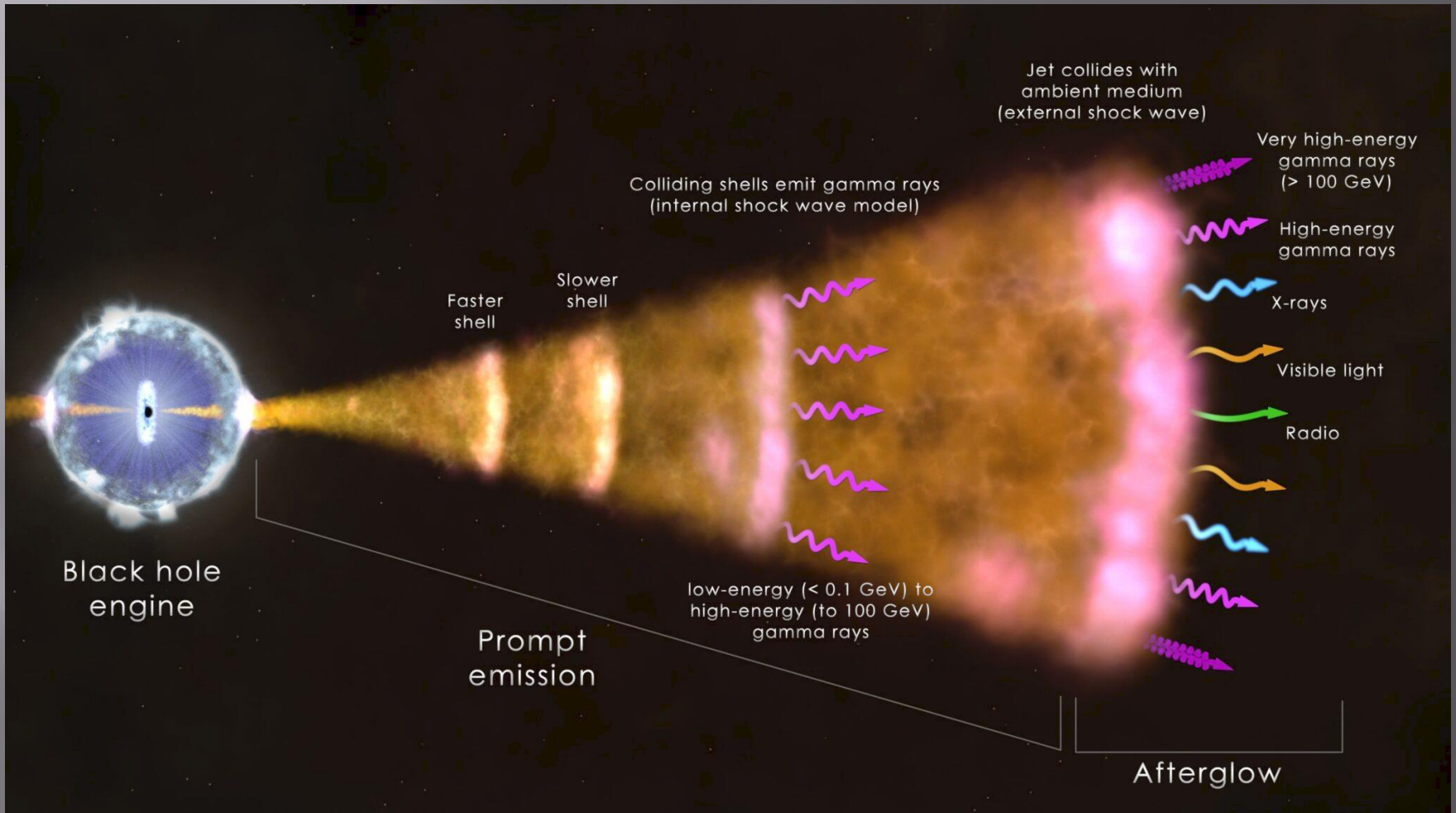


Из принципа причинности – оценка размера излучающей области не может быть более $c \cdot dT$
 $\sim 3 \cdot 10^7$ cm (30 км)

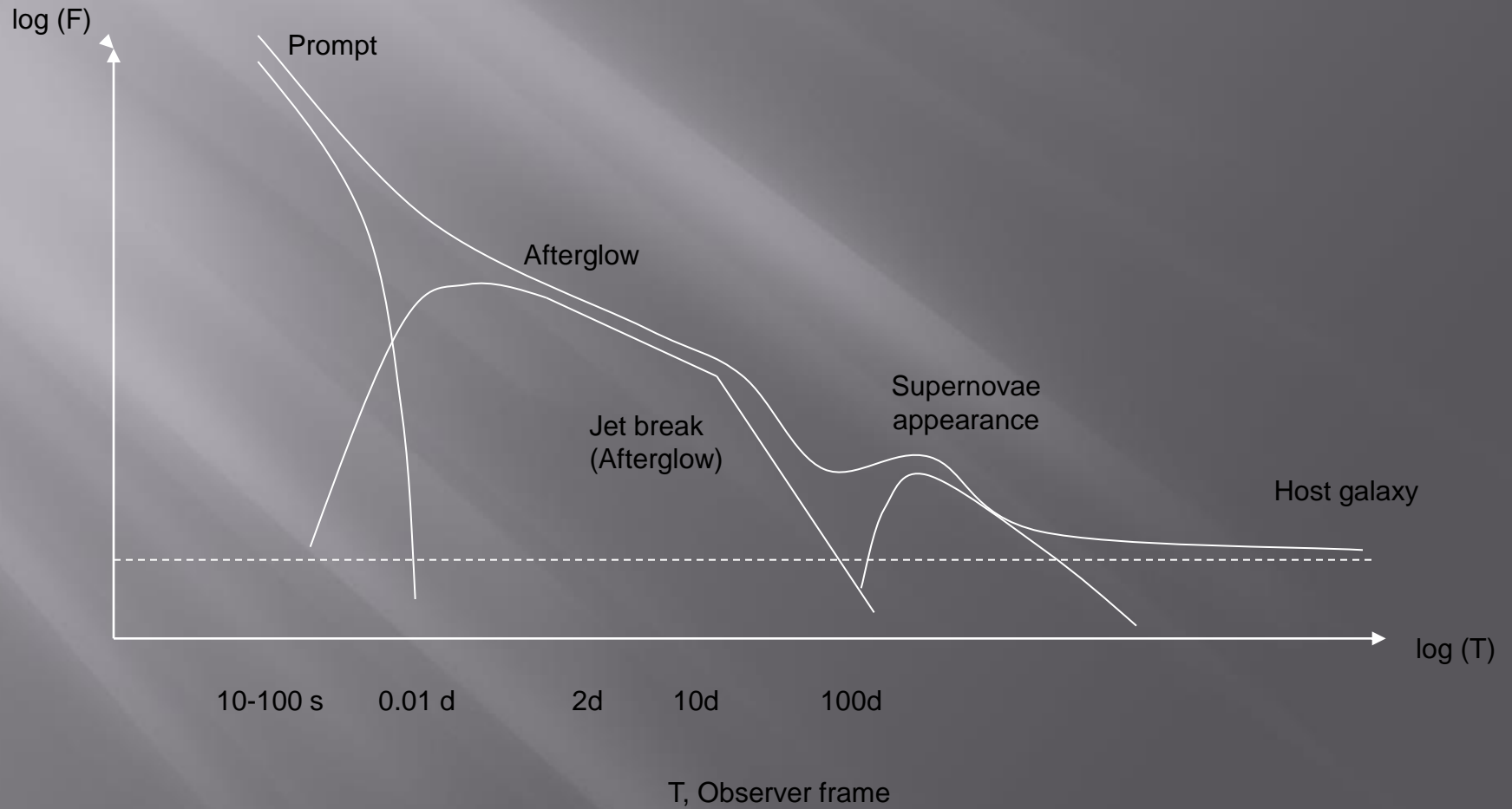
FIREBALL MODEL



GRB jet

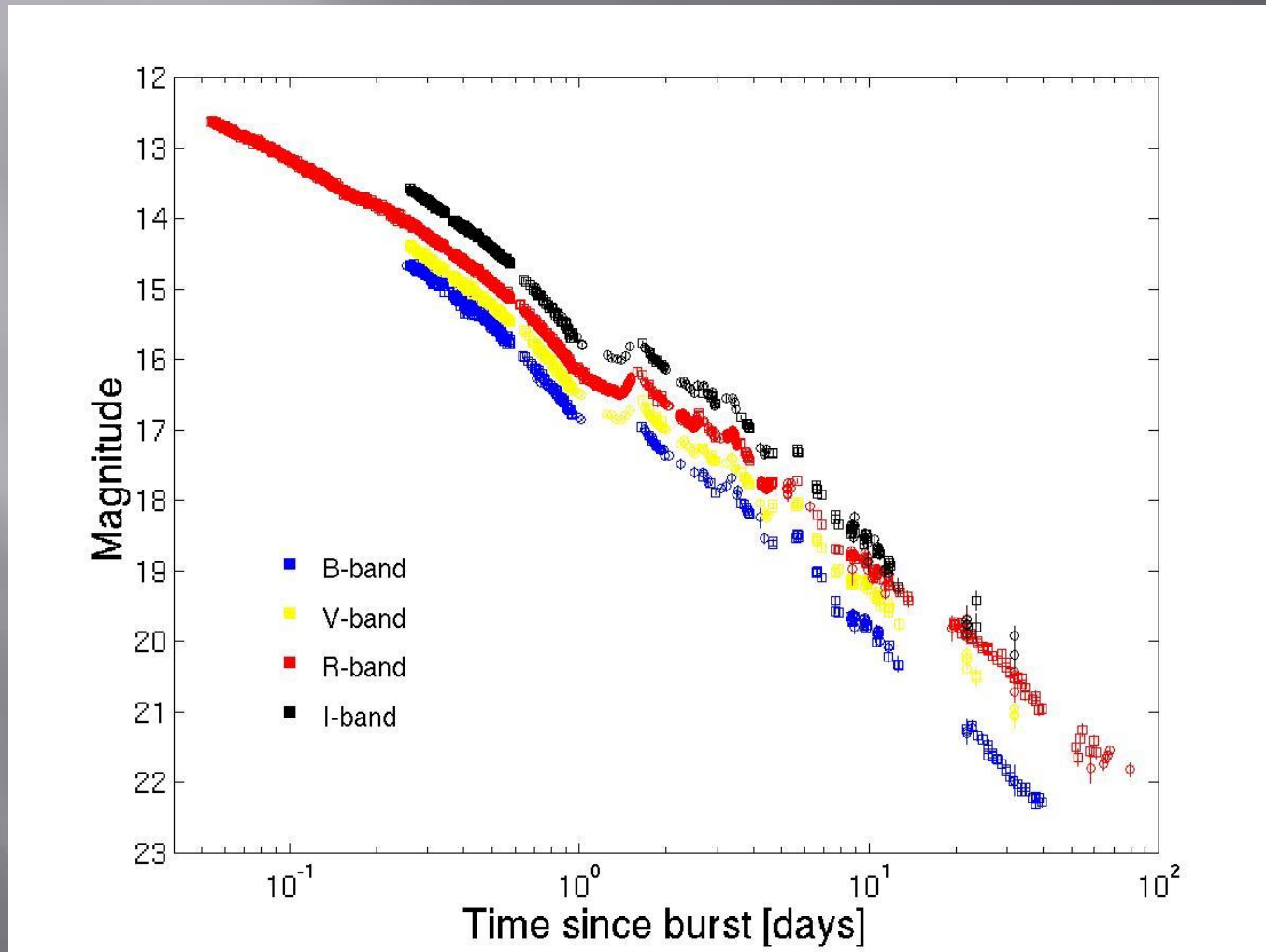


Typical light curve (optic)



GRB 030329

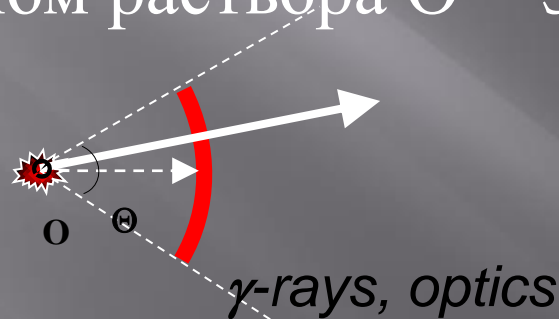
More or less “standard” afterglow



Оценка энергетики

Полная оценка полной излученной энергии 10^{54} эрг
– огромная величина

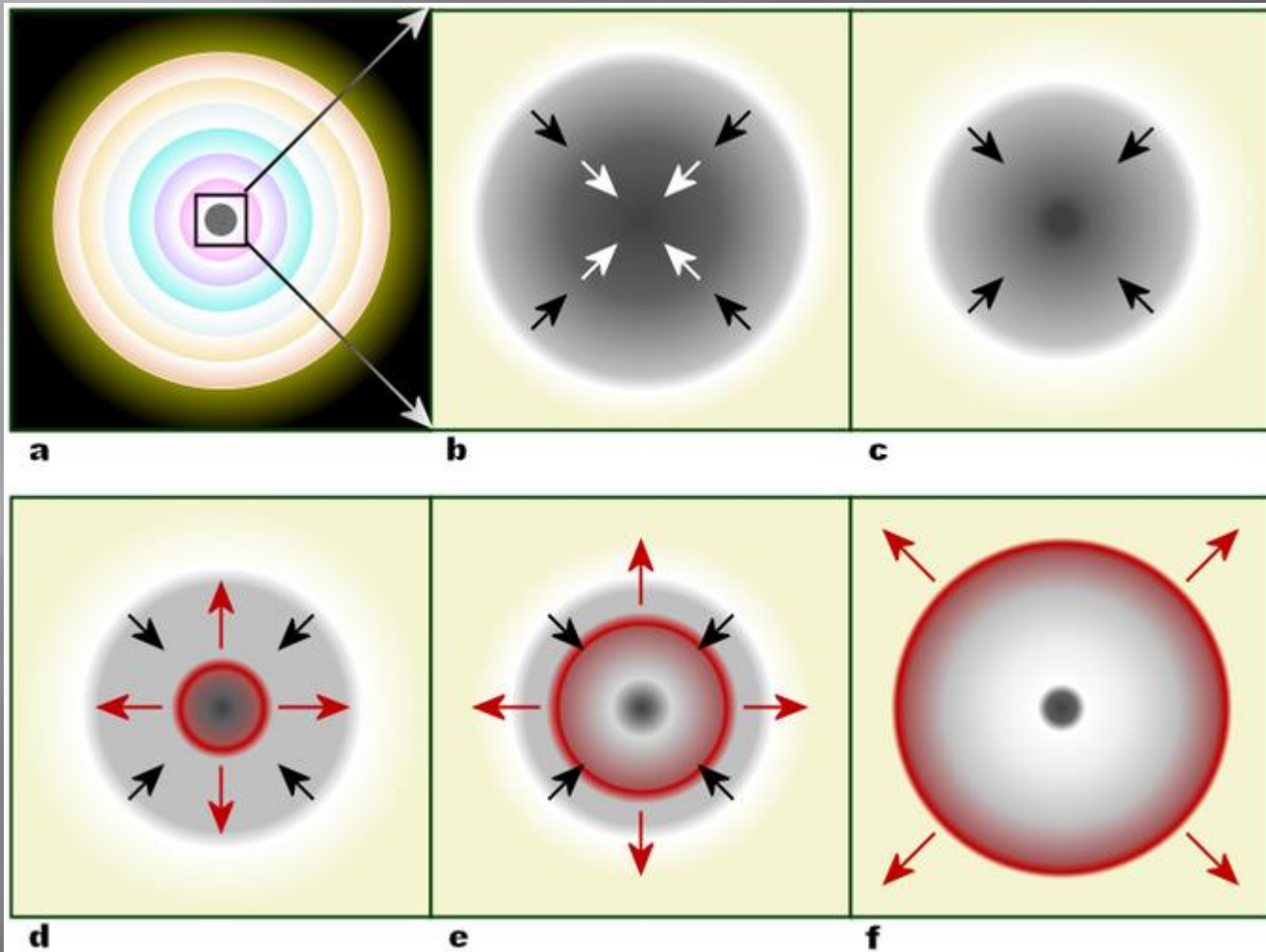
Если предположить, что излучение происходит в
конусе с углом раствора $\Theta \sim 5$ градусов



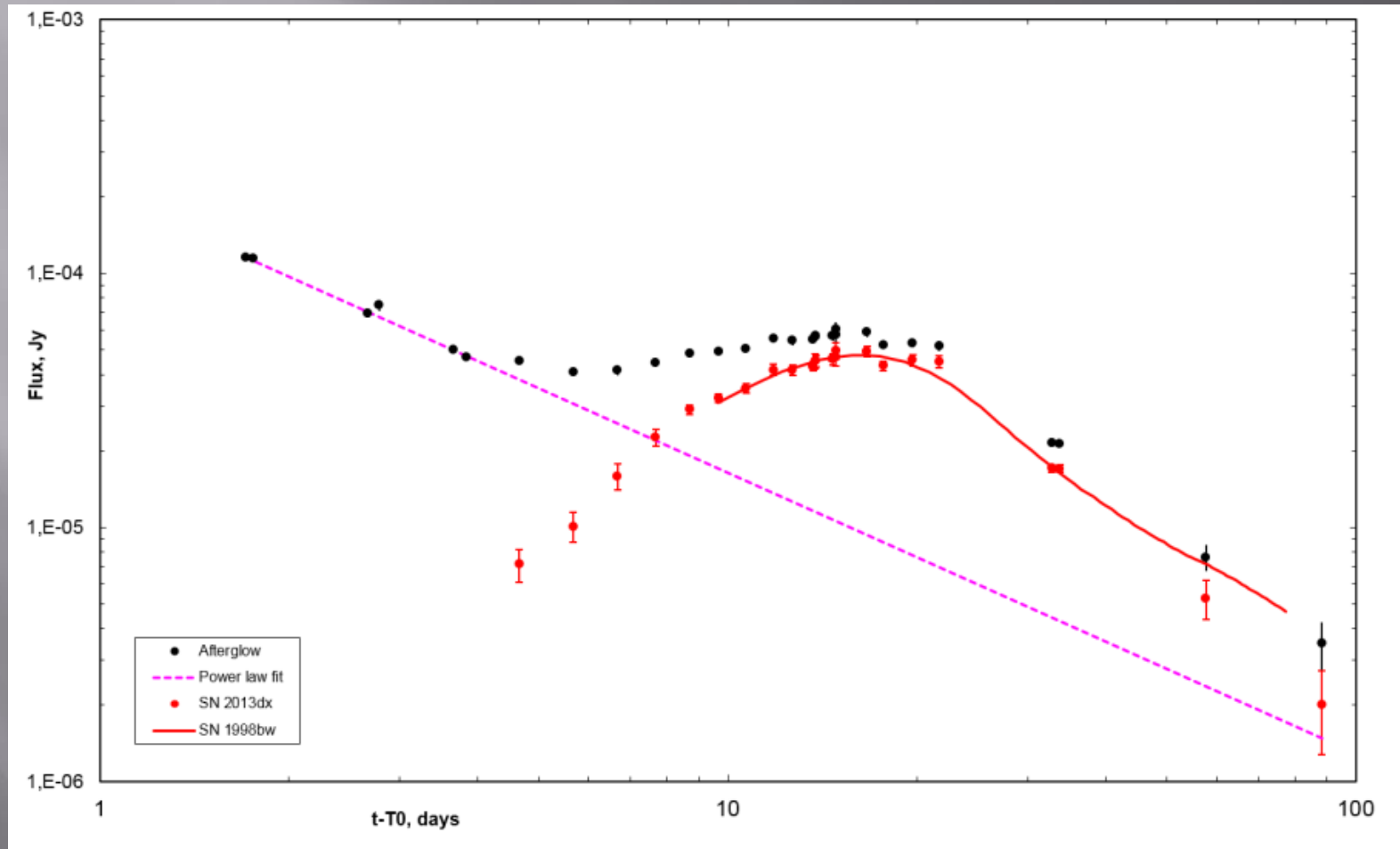
то энергия излучения $10^{54} * \Theta^2 / 4\pi \sim 6 * 10^{50}$ эрг -

Это уже сравнимо с энергией взрыва сверхновых с
коллапсирующим ядром

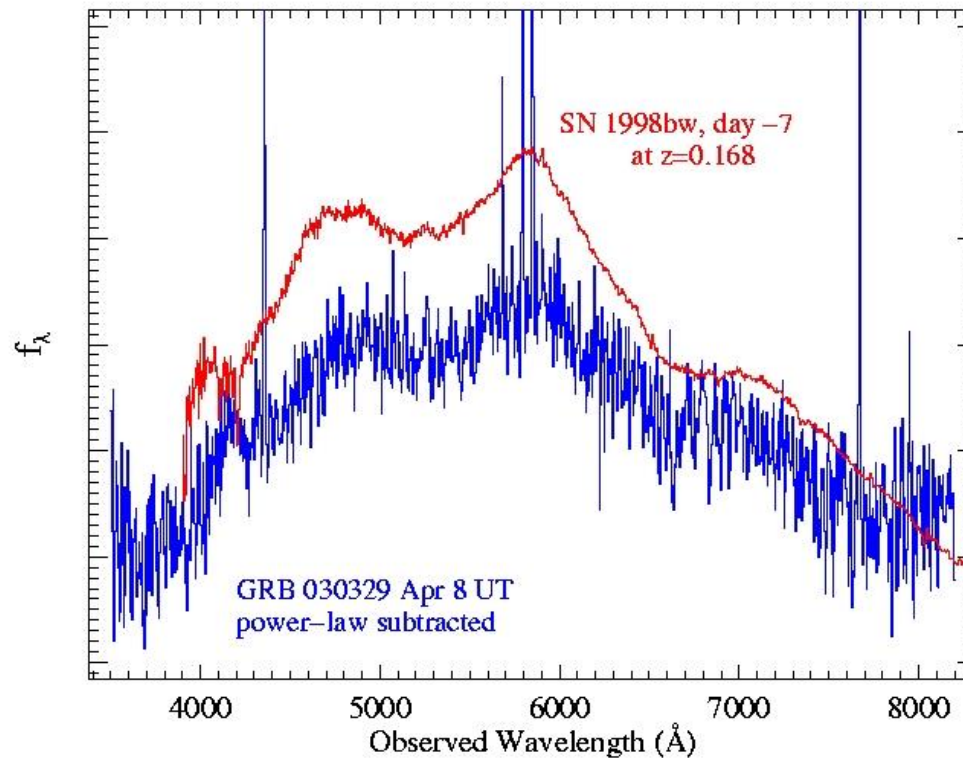
Сверхновые с коллапсирующим ядром



SN 2013dx/GRB 130702



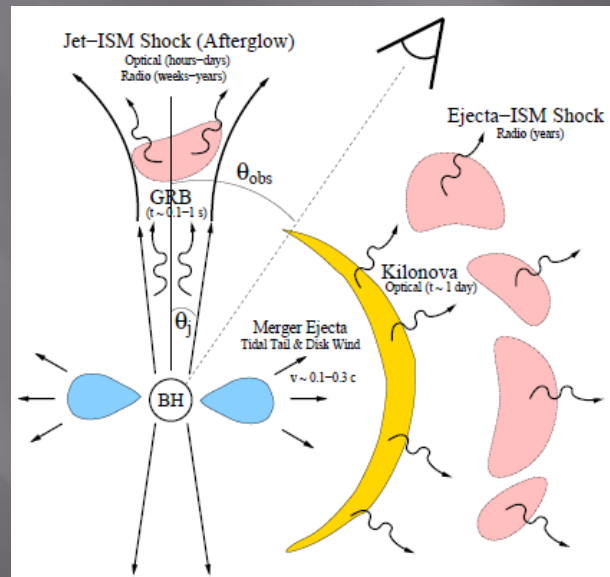
GRB/SN connections: GRB 030329 spectroscopy similarity of SN spectrum



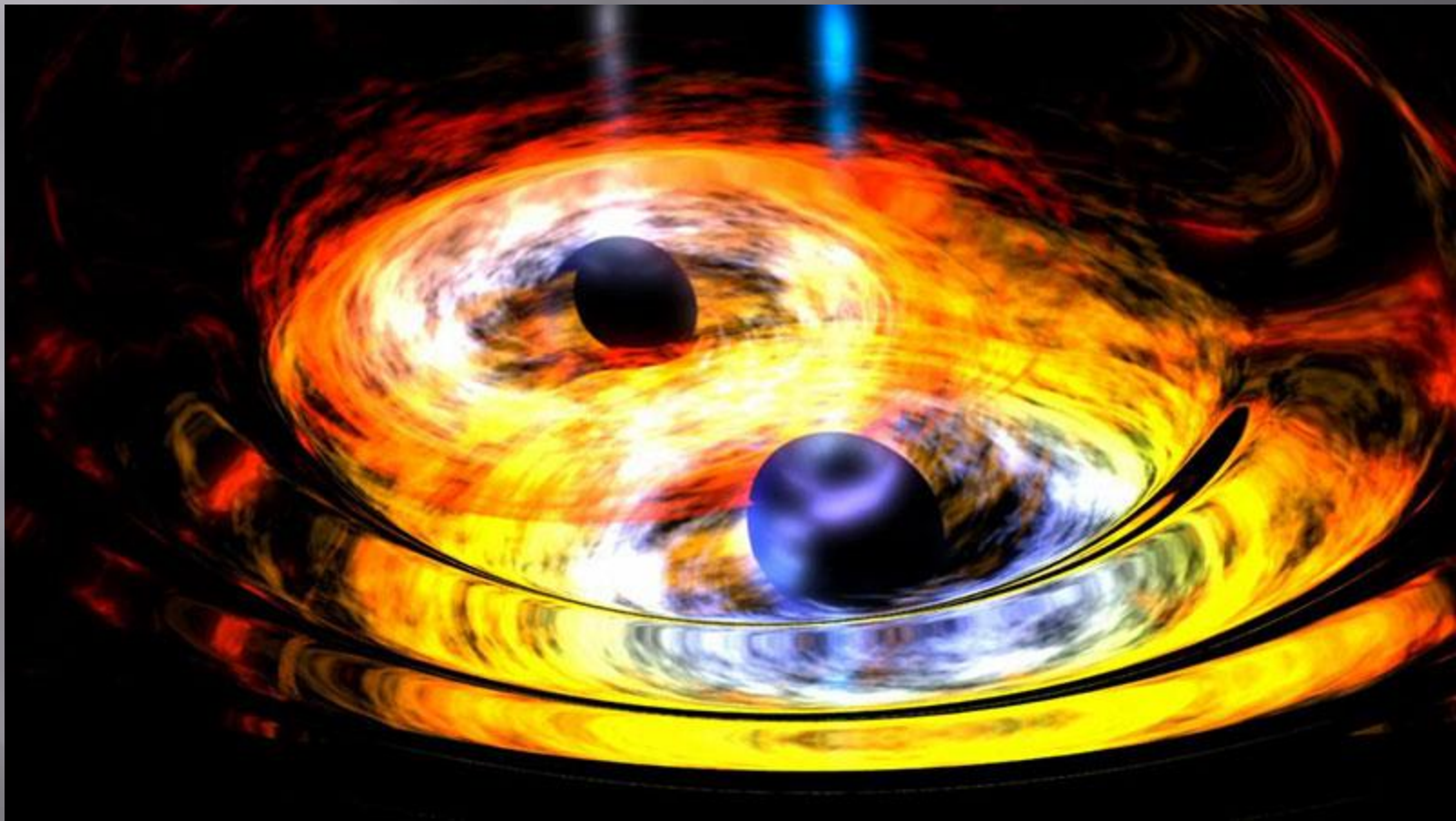
Почему не все Сверхновые с
коллапсирующим ядром
порождают гамма-всплески?

Короткий и длинные гамма-всплески

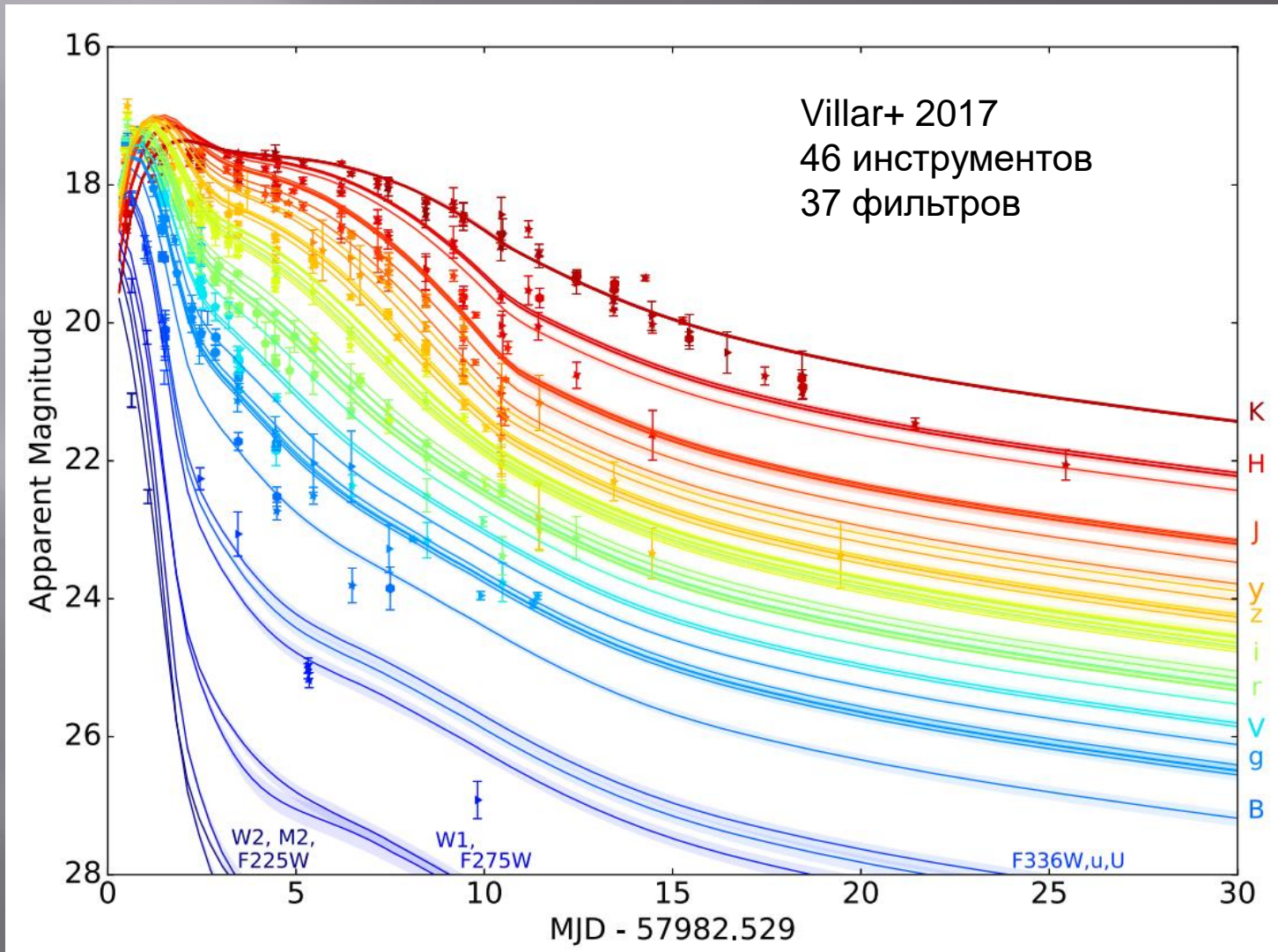
- Длинные – связаны со сверхновыми с коллапсирующим ядром
- Короткие – со слиянием двойной системы нейтронных звезд



Килоновые



Килоновая AT2017gfo (оптический компонент GW170817)

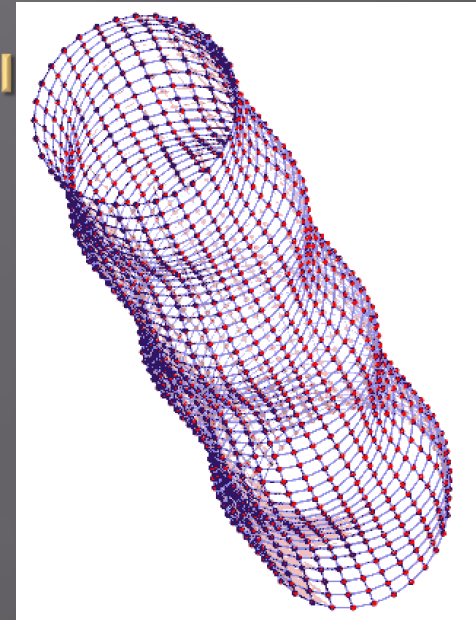
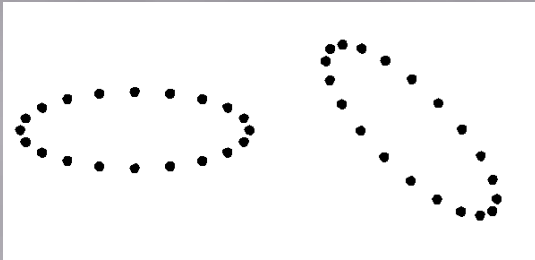


Физика Килоновых?
Влияние на нуклеосинтез
тяжелых элементов во
вселенной?

Гравитационные волны и GRB

Гравитационные волны

- Возмущения метрики («рябь») пространства-времени при движении массивных тел с переменным ускорением
- Распространяются в пространстве со скоростью света
- Вызывают приливную деформацию тел
- Имеют вид поперечных волн с двумя независимыми компонентами (поляризация)

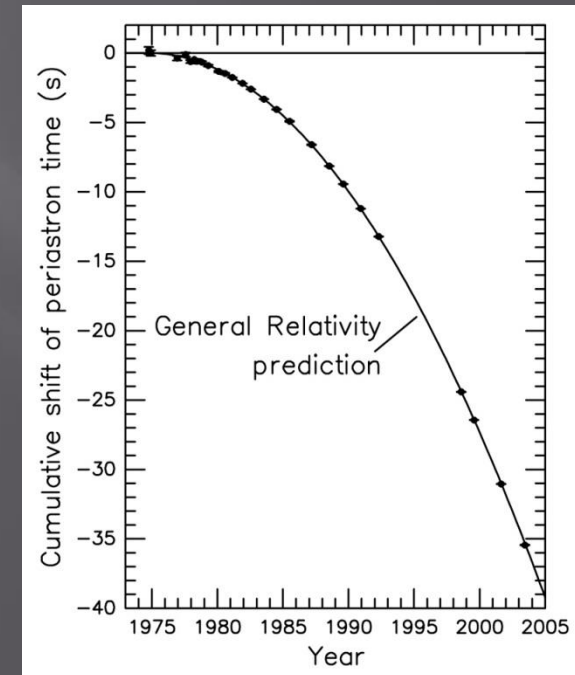


Относительная амплитуда деформаций

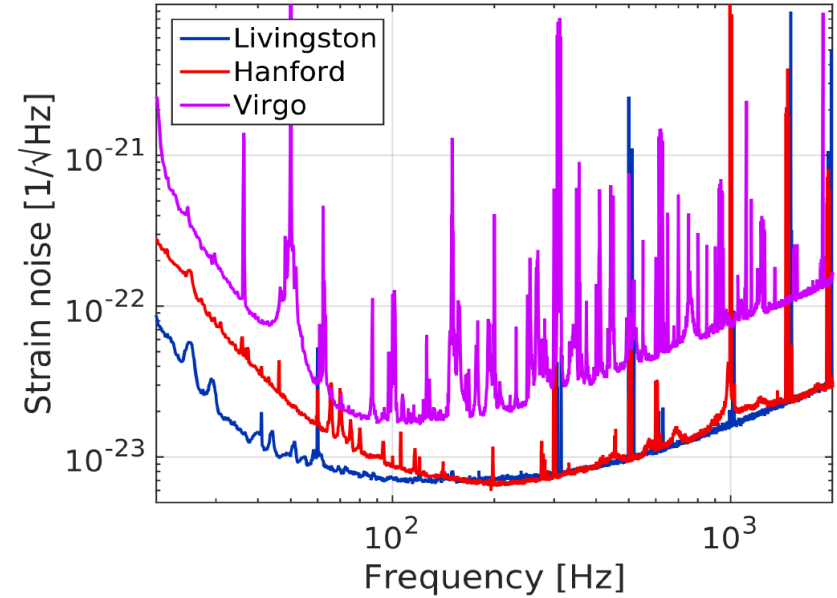
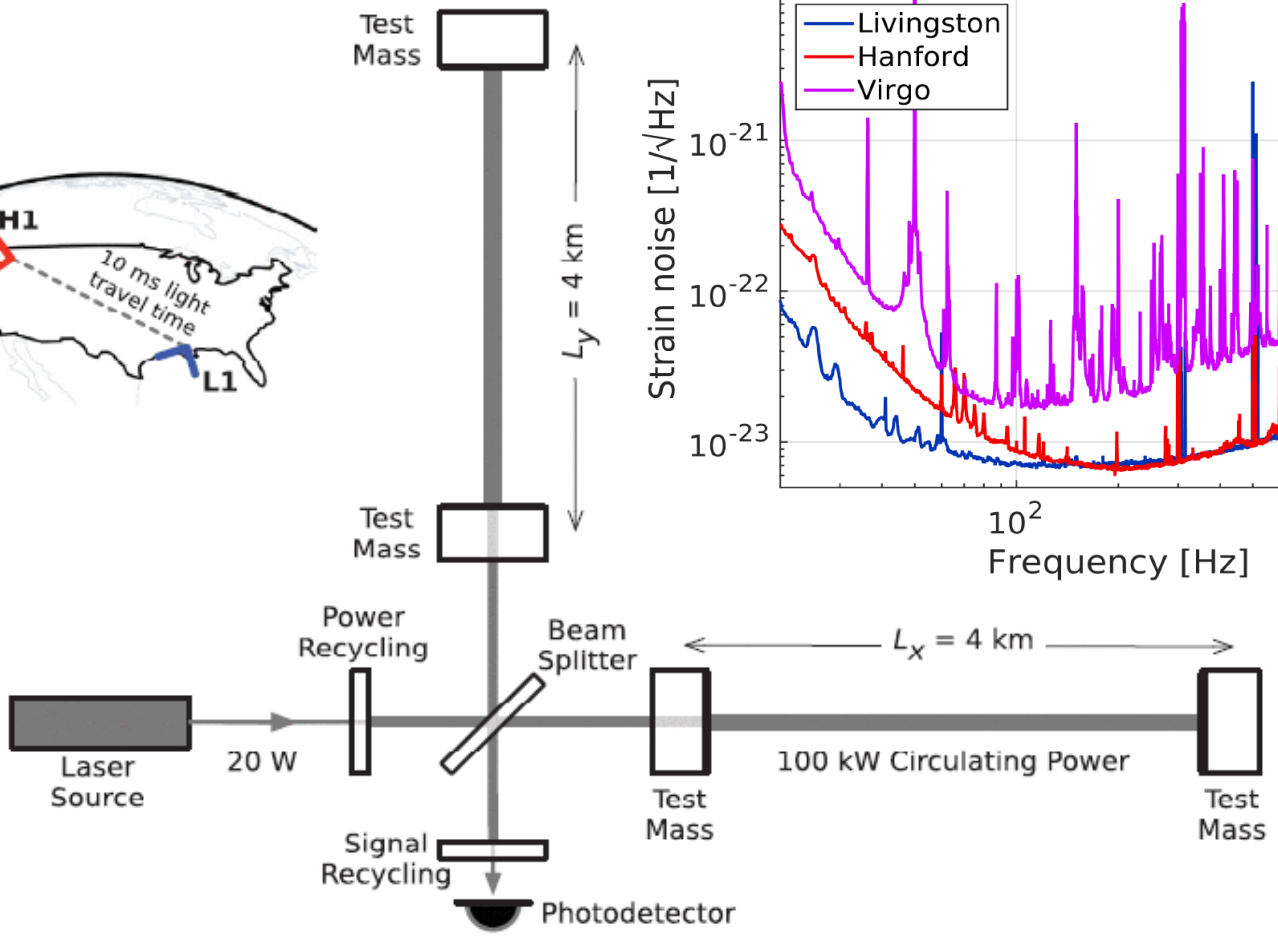
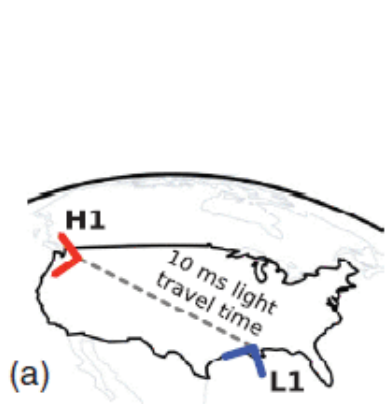
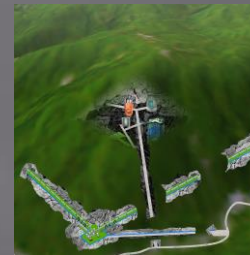
$$h_{jk}^{GW} \sim 10^{-21} \left(\frac{E_{kin}}{M_{\odot} c^2} \right) \left(\frac{100 \text{ Mpc}}{r} \right)$$

Косвенно обнаружены в двойном пульсаре (слияние через 300 млн. лет)

PSR B1913+16

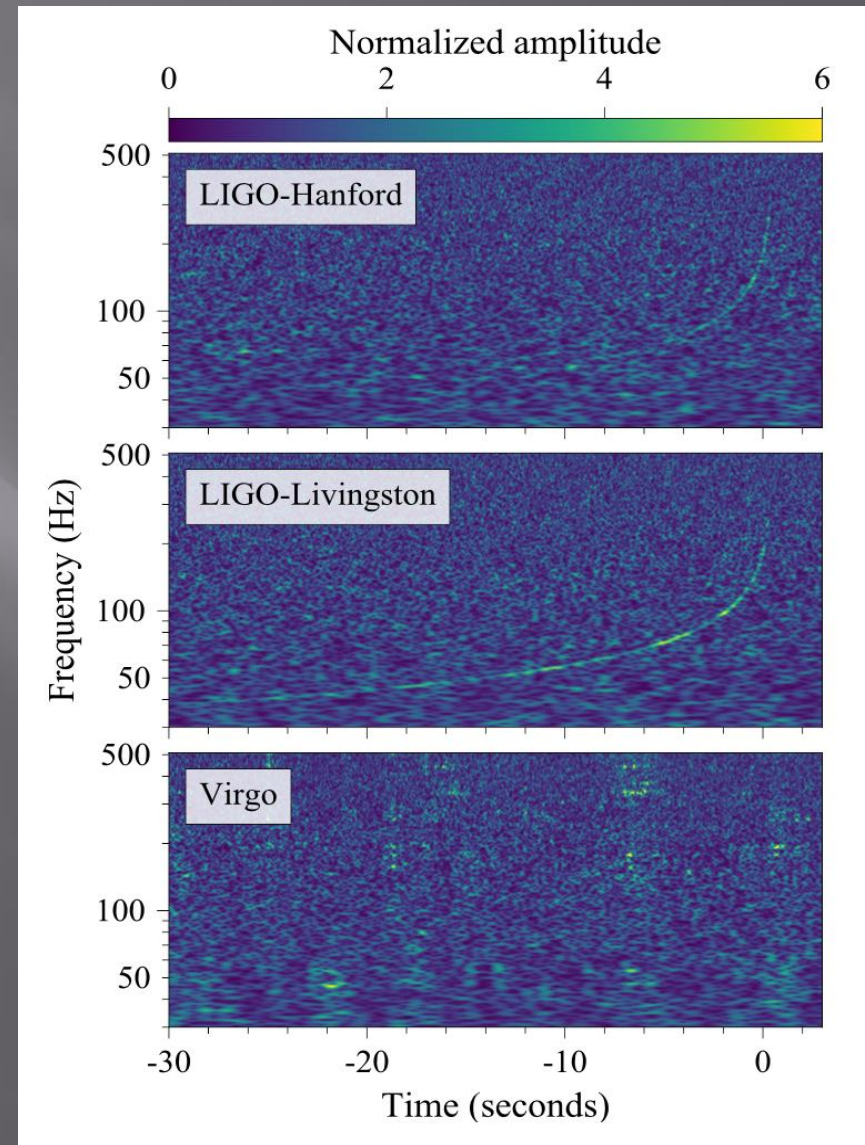
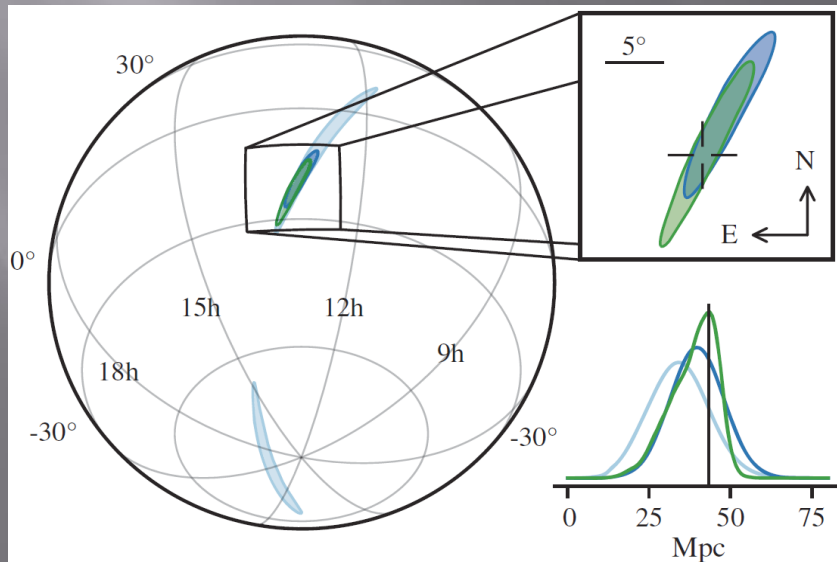


Эксперименты LIGO/Virgo



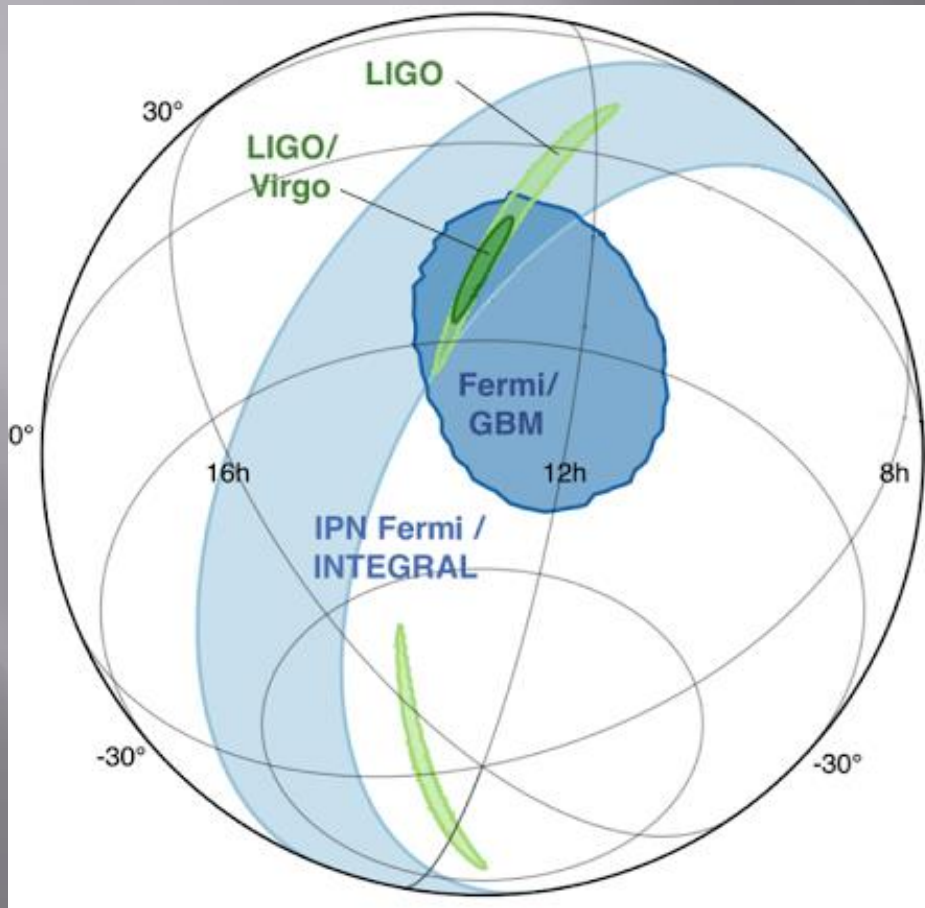
Регистрация гравитационных волн

- 17 августа 2017 UTC 12:41:04.4
- Отсутствие сигнала в Virgo позволило ограничить область локализации до 28 кв. гр.
- Масса системы = 2.74 M_{\odot} - две НЗ!
- Возможный источник короткого гамма-всплеска!

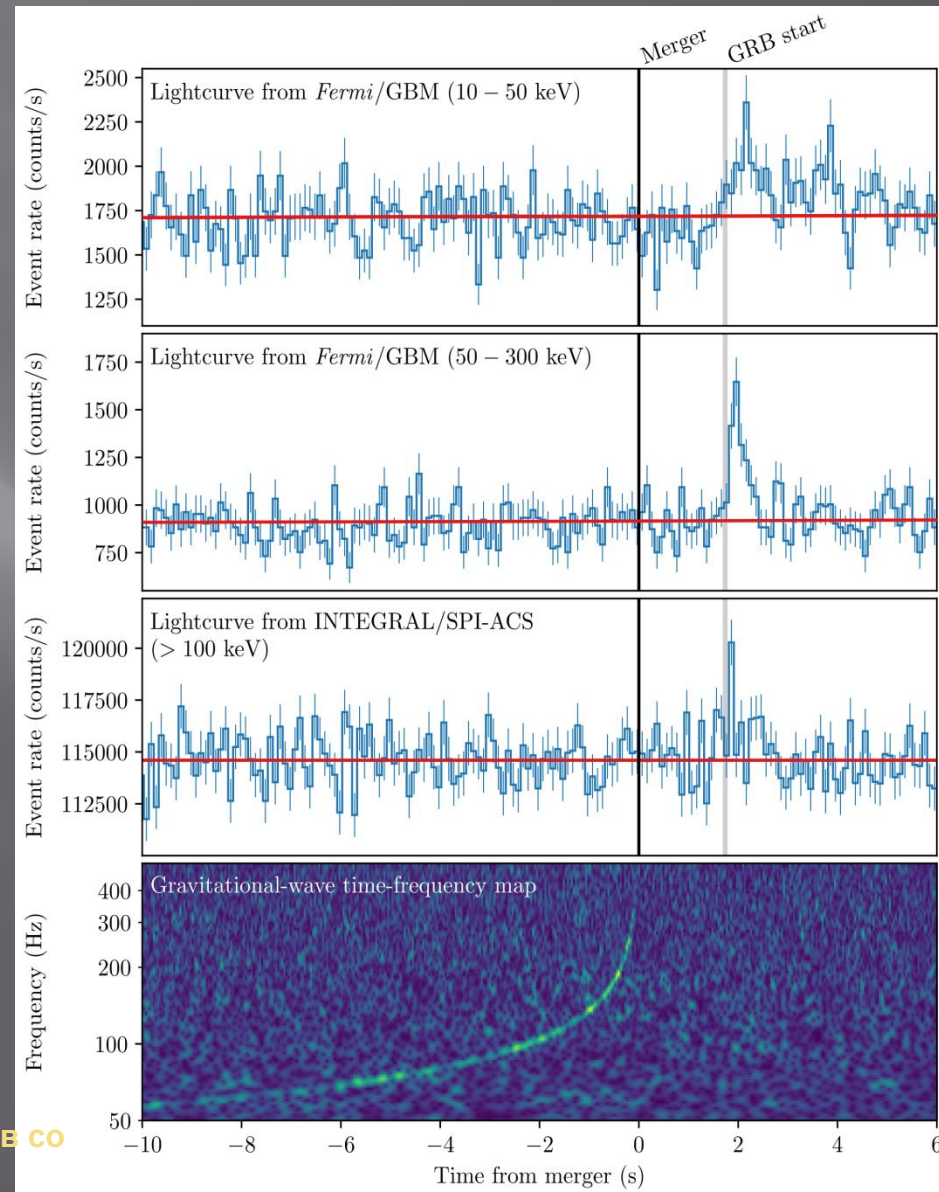


Регистрация гамма-всплеска GRB 170817A

Через 1.7 с после слияния двух НЗ
GBM/Fermi и SPI-ACS/INTEGRAL
зарегистрировали гамма-всплеск



Впервые подтверждена связь коротких гамма-всплесков со слиянием двух нейтронных звезд!



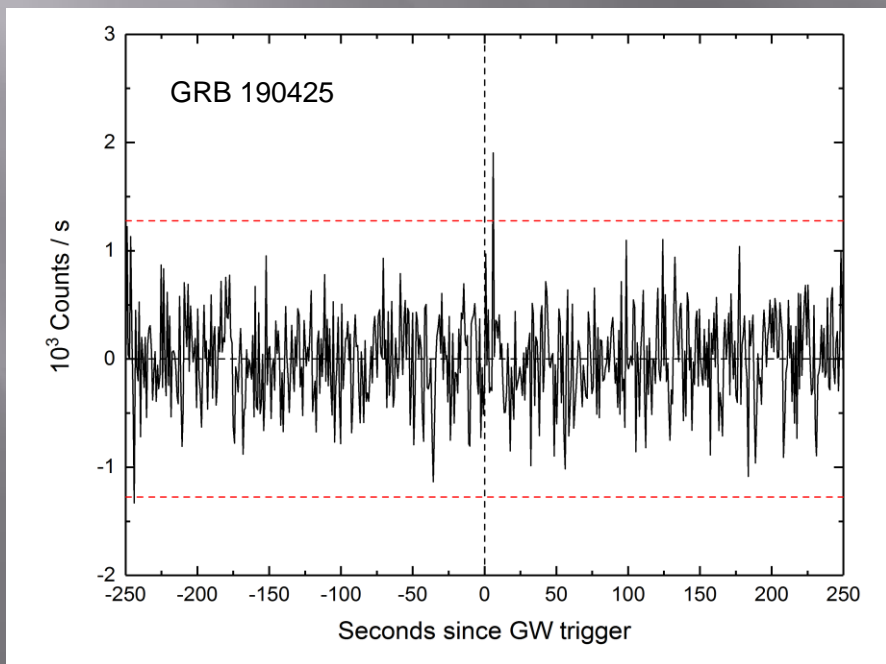
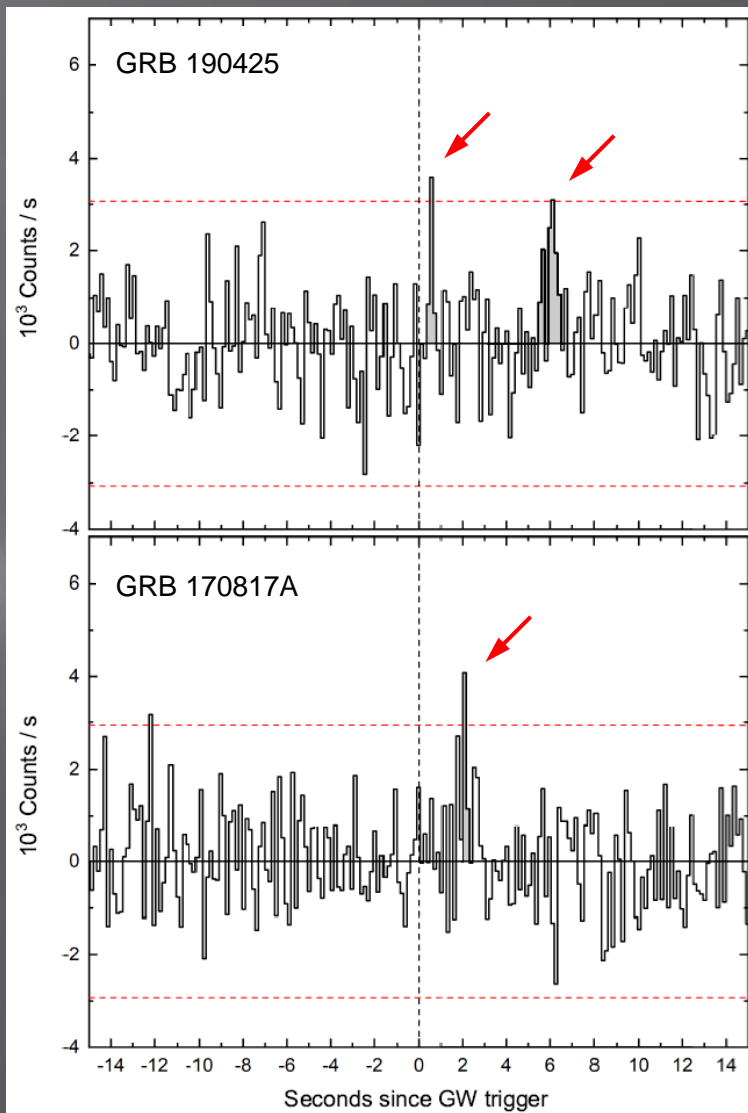
Регистрация гамма-всплеска GRB 190425

Гамма-всплеск GRB 190425 обнаружен через 0.5 с после слияния в данных SPI-ACS/INTEGRAL

Состоит из двух эпизодов излучения

Стат. значимость 5.5σ ($FAR = 6.4 \times 10^{-5}$ событий в сек). Вероятность появления флуктуации в этом «месте» $P = 1.6 \times 10^{-4}$

SPI-ACS/INTEGRAL



Гравитационные волны и GRB

- ▣ Гравитационно волновой астрономии всего 5 лет! (2015 --)
- ▣ Всего 2 гамма-всплеска в гамма-диапазоне
- ▣ Всего 1 оптический компонент (килоновая от GW 170817)

(гипотетические) первичные черные дыры

- ▣ Образовались сразу после Большого Взрыва

- ▣ Возможные проявления и применения:

- ▣ темная материя (для ПЧД с массами от 10^{14} кг до 10^{23} кг)

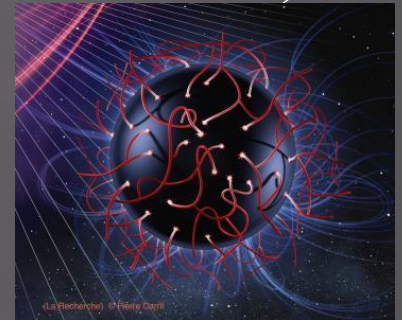
- ▣ -

- ▣ излучение Хоукинга (испарение ПЧД)

- ▣ сверхкороткие (короче 10 нс) гамма-всплески

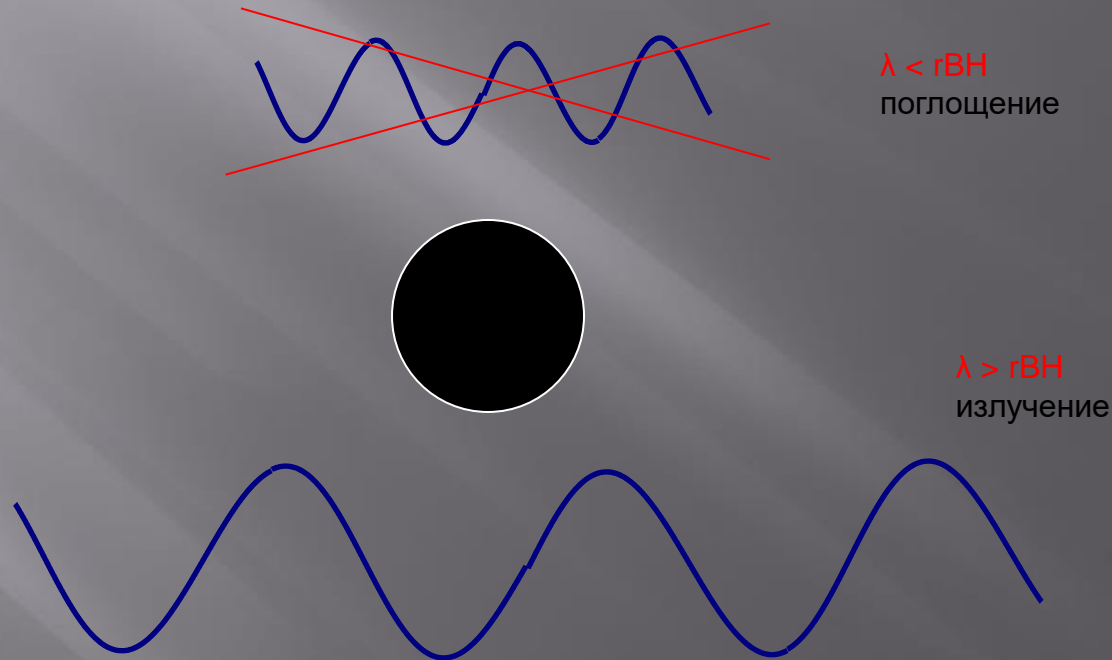
- ▣ интерференционные картины в кривых блеска гамма-всплесков

- ▣ «рябь» на поверхности звезды при прохождении ПЧД сквозь звезду



Черные дыры испаряются

(Hawking, 74)



$$T_{BH} = \frac{\hbar c^3}{8\pi k G M} \approx 1,227 \cdot 10^{23} \text{ К} \cdot \left(\frac{M}{1 \text{ kg}} \right)^{-1} \approx 6,169 \cdot 10^{-8} \text{ К} \cdot \frac{M_{\odot}}{M},$$

Испарение – квантовый эффект

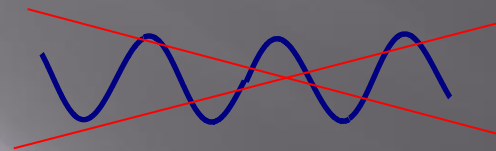
$T_{\text{ПЧД}}$ из физических соображений

$$\lambda \sim 2r_g$$

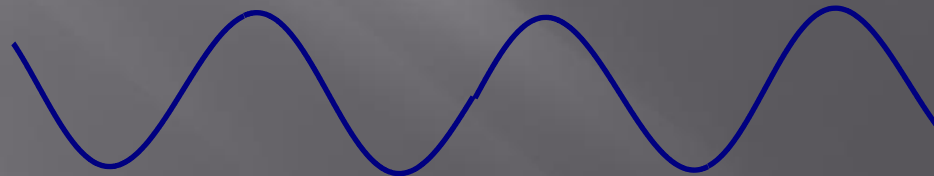
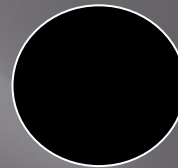
$$r_g = 2GM/c^2$$

$$E = h\nu = hc/\lambda$$

$$h\nu_{\text{max}} \sim 3kT$$



$\lambda < r_{\text{ВН}}$
поглощение



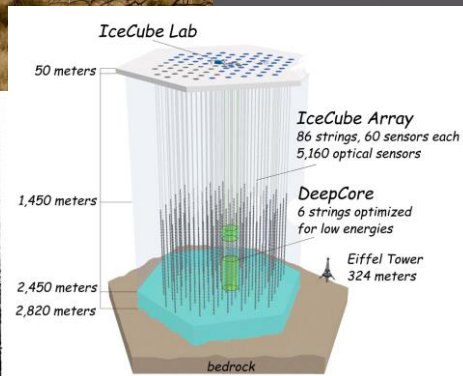
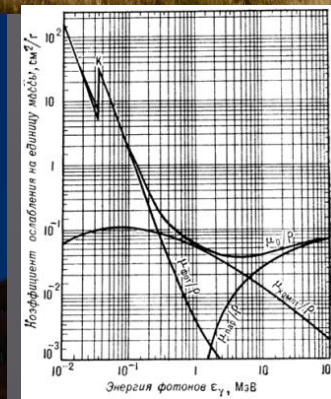
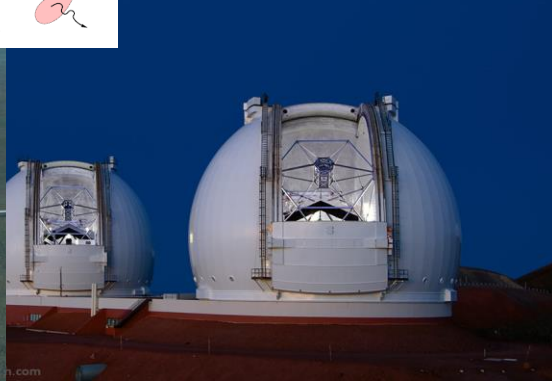
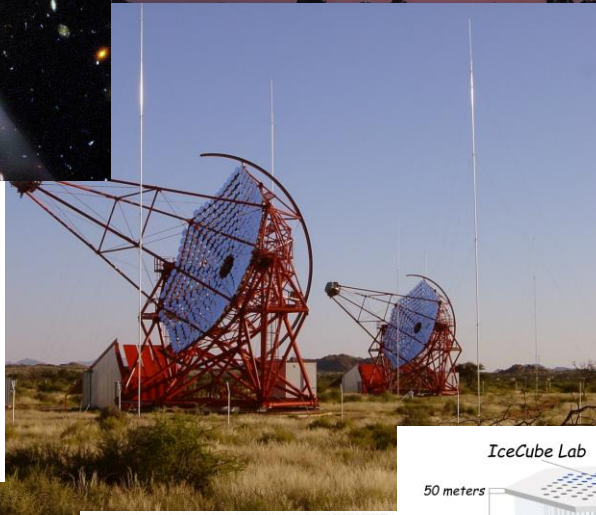
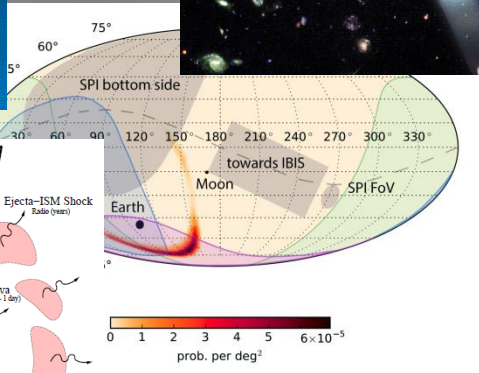
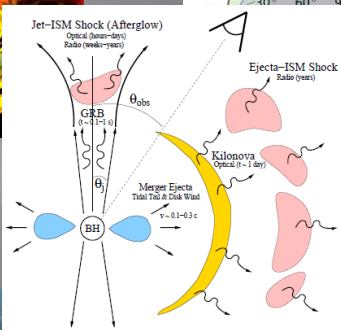
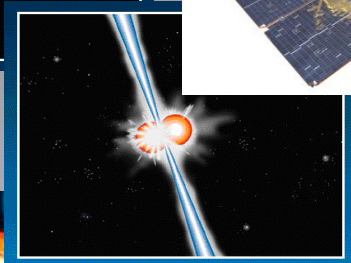
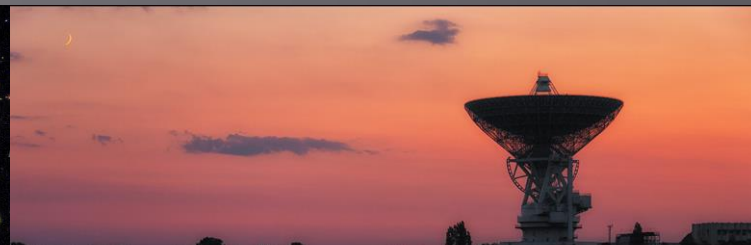
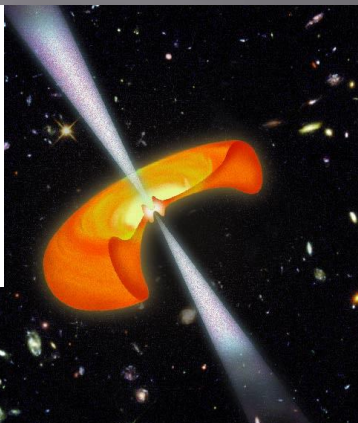
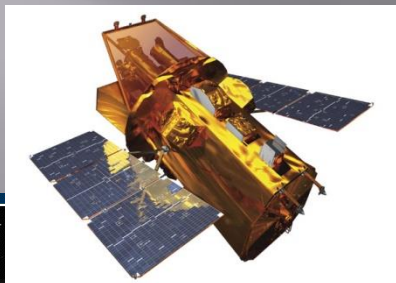
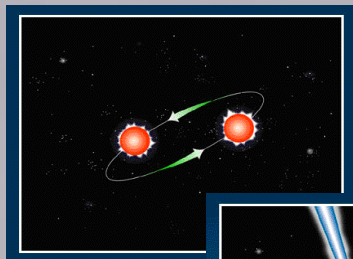
$\lambda > r_{\text{ВН}}$
излучение

$$T \sim \hbar c^3 / 2kGM \text{ vs. } T_{\text{ПЧД}} = \hbar c^3 / 8\pi kGM$$

Зачем исследовать гамма-всплески ?

- ▣ Проверить законы теоретической физики
- ▣ Проверить постоянство физических констант
- ▣ Исследовать физические процессы в недостижимых на Земле условиях
- ▣ Выяснить процессы нуклеосинтеза тяжелых элементов
- ▣ Выяснить, представляют ли они угрозу человечеству и как защититься?

Как исследуют гамма-всплески ?



Как исследуют гамма-всплески ?

- ▣ Наблюдения из космоса гамма- телескопами
- ▣ Наблюдения с Земли
 - Оптическими телескопами
 - Радиотелескопами
 - Черенковскими телескопами (VHE)
- ▣ Поиск гамма-всплесков, сопровождающих гравитационно-волновые события
LIGO/Virgo/KAGRA
- ▣ Моделирование процессов взрыва, генерации и переноса излучения

Где исследуют GRB?

ИКИ РАН

- Космические гамма-всплески. Астрономические наблюдения в оптическом диапазоне, обработка данных гамма- и рентгеновских телескопов. Моделирование физических процессов излучения гамма-всплесков.
-
- Электромагнитные компоненты гравитационно-волновых источников. Поиск наблюдения и моделирование электромагнитных компонентов гравитационно-волновых событий LIGO/Virgo/KAGRA. Разработка алгоритмов и программ для работы с большими данными, получаемых в оптических наблюдениях наземных и космических телескопов.
-
- Подготовка космических экспериментов для регистрации космических гамма-всплесков (GRB) и гамма-вспышек Земного происхождения (TGF).