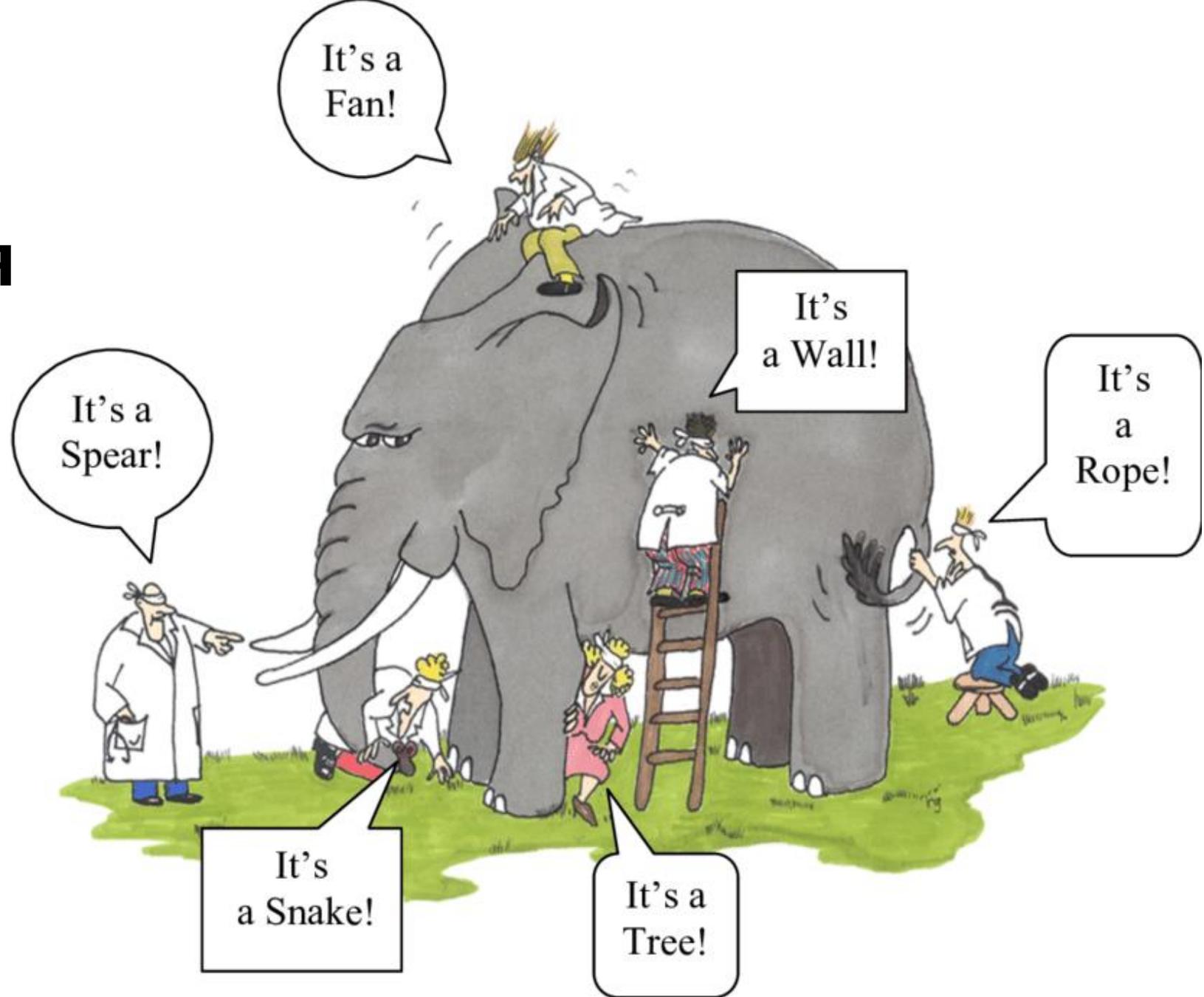


Лекция 4

Многоканальная астрономия

ФФ НГУ, 2024

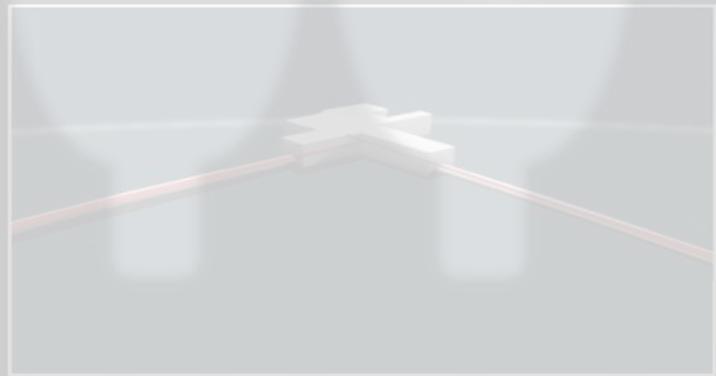


Многоканальная астрономия

Multimessenger astronomy

1. Весь электромагнитный спектр (всеволновая астрономия)
2. Космические лучи (сверх-)высоких энергий (γ , e , p , α)
3. Нейтринная астрономия
4. Гравитационные волны
5. ???

Gravitational waves



Gravitational-wave observatory

LIGO
Hanford

LIGO Livingston

GEO600
Germany

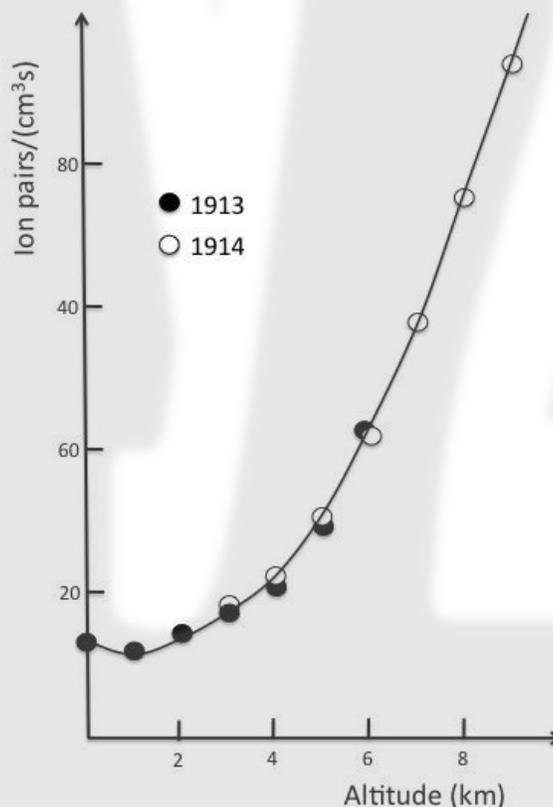
Virgo, EGO, Italy

Electromagnetic waves

Космические лучи: открытие

В начале XX века было обнаружено, что существует источник ионизации, приводящий к медленной разрядке электроскопа.

В 1912 году Виктор Гесс провел серию точных измерений изменения интенсивности ионизации с высотой и надежно установил космическое происхождение источника.



"for his discovery of cosmic radiation"

Космические лучи

– объект и инструмент исследования

1. Новый канал информации о Вселенной
2. Происхождение (источники) космических частиц
3. КЛ – естественные ускорители частиц – изучение физики элементарных частиц



Photo from the Nobel Foundation archive.
Carl David Anderson
Prize share: 1/2

1936

"for his discovery of the positron"

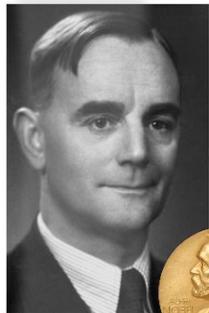


Photo from the Nobel Foundation archive.
Cecil Powell

1950

"for his development of the photographic method of studying nuclear processes and his discoveries regarding mesons made with this method"



Photo from the Nobel Foundation archive.
Emilio Gino Segrè
Prize share: 1/2

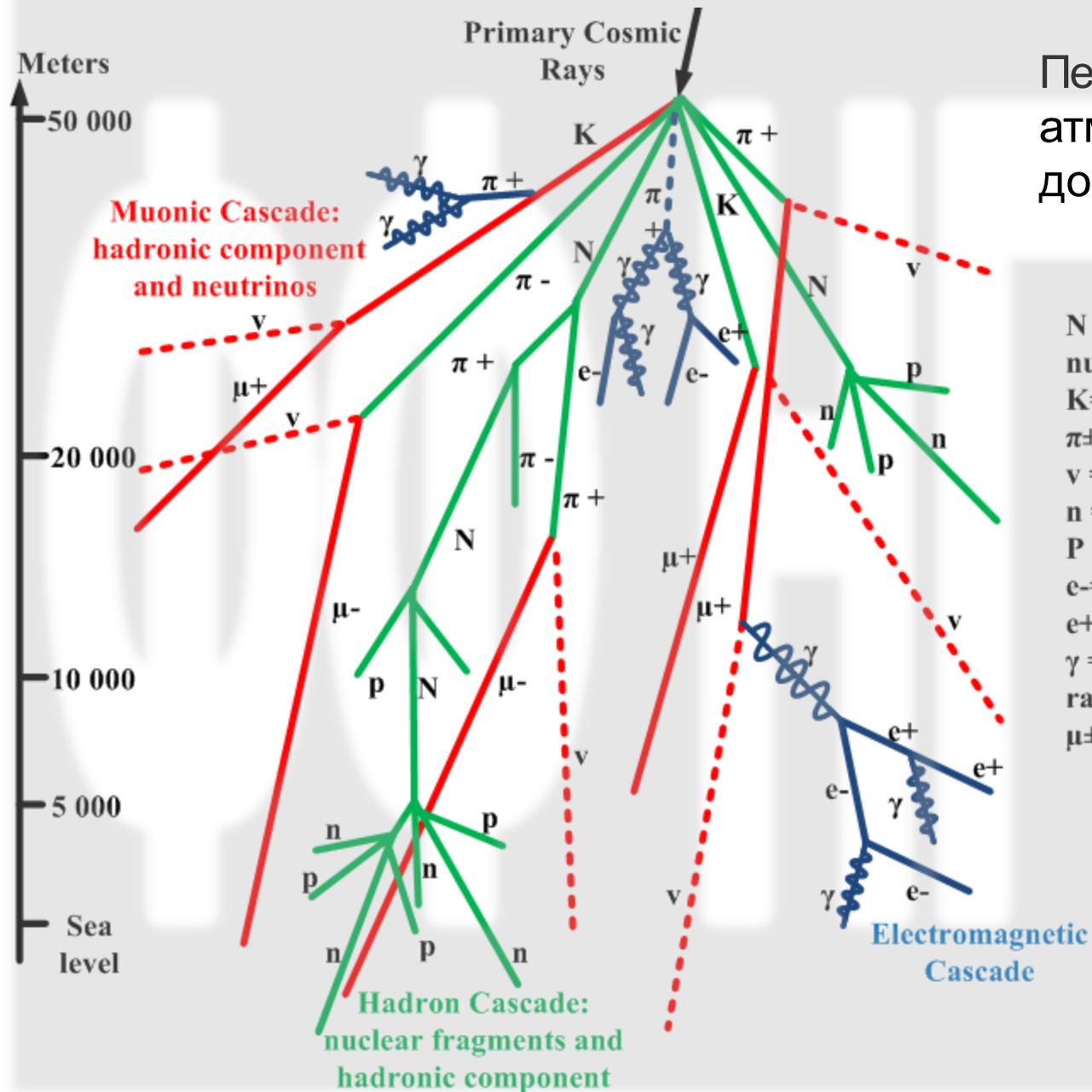
Photo from the Nobel Foundation archive.
Owen Chamberlain
Prize share: 1/2

1959

"for their discovery of the antiproton"

+ множество других открытий в физике элементарных частиц, которые хоть и не были отмечены НП, заложили основы ФЭЧ и привели к созданию Стандартной модели взаимодействий элементарных частиц.

Космические лучи



Первичные космические лучи взаимодействуют с атмосферой и поверхности Земли практически не достигают.

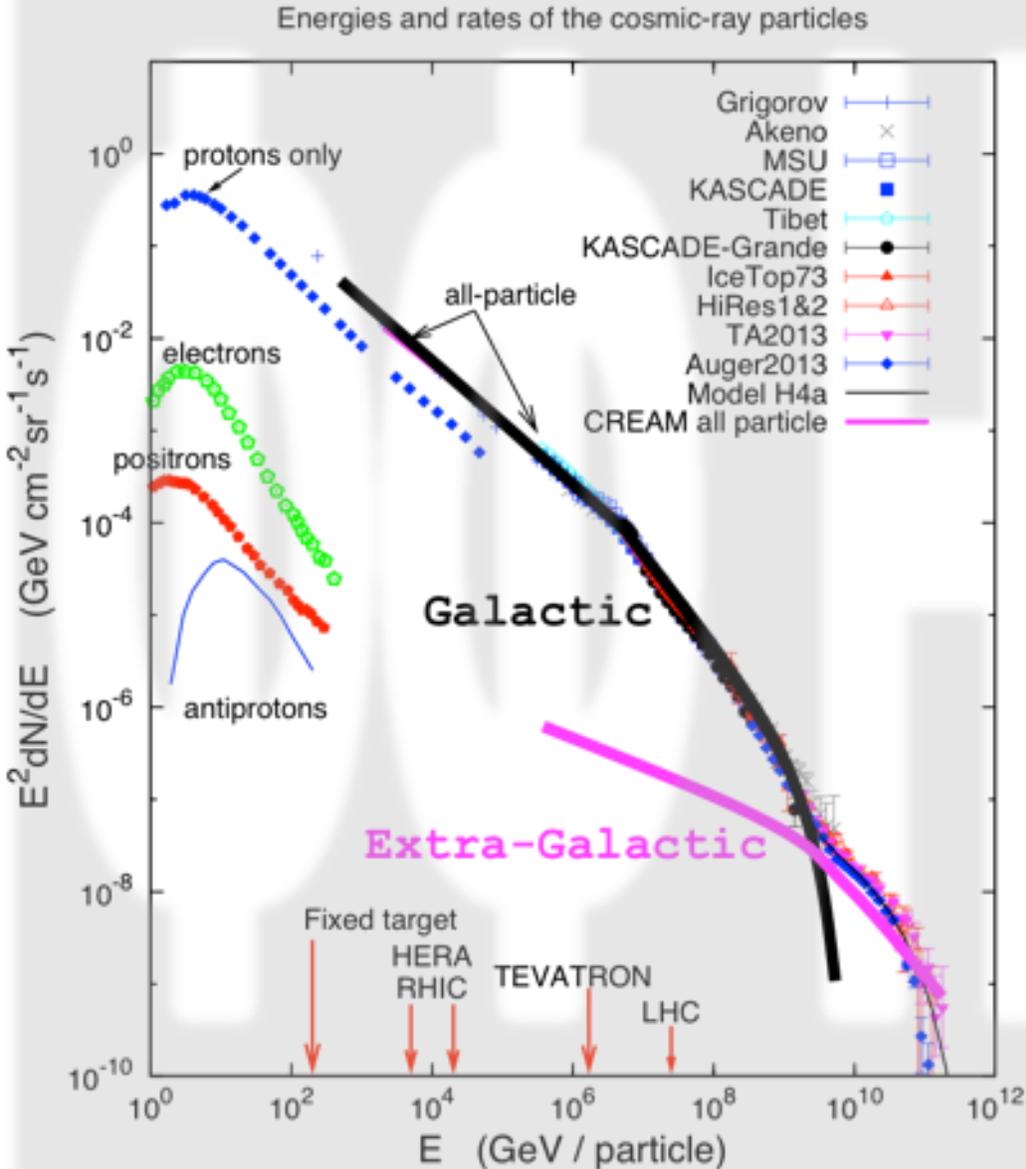
На уровне моря основной состав вторичных частиц – мюоны (70%) и электроны (30%).

Средний поток ~ 1 частица/дм²·с.

Методы изучения космических частиц:

- орбитальные станции;
- аэростаты;
- наземные установки;

Космические лучи: спектр



Основной состав космических лучей – протоны (~90%), α -частицы (~8%), ядра более тяжелых элементов (~1%) и электроны (~1%). В очень малых долях присутствуют фотоны и античастицы (позитроны, антипротоны).

Энергетический спектр космических частиц простирается на много порядков, до 10^{20} эВ \approx 16 Дж.

Источником частиц малых энергий являются звезды (звездный ветер).

Галактические космические лучи в основном образуются при взрывах сверхновых.

Космические лучи: спектр

Из-за наличия магнитных полей галактического масштаба, не все заряженные частицы могут покинуть пределы той галактики, где они образовались.

Поэтому заряженные космические лучи предельно высоких энергий, скорее всего имеют внегалактическое происхождение.

Чтобы достигнуть Земли, они проходят космологические расстояния.

Оценочная задача

$$qB = \frac{\gamma mc}{R} = \frac{E}{Rc}$$

$$E = kBRc \quad \text{эВ}$$

$$k \sim 1/2$$

– частицы не летят строго поперек поля

$$R \sim 1 \text{ Кпк}$$

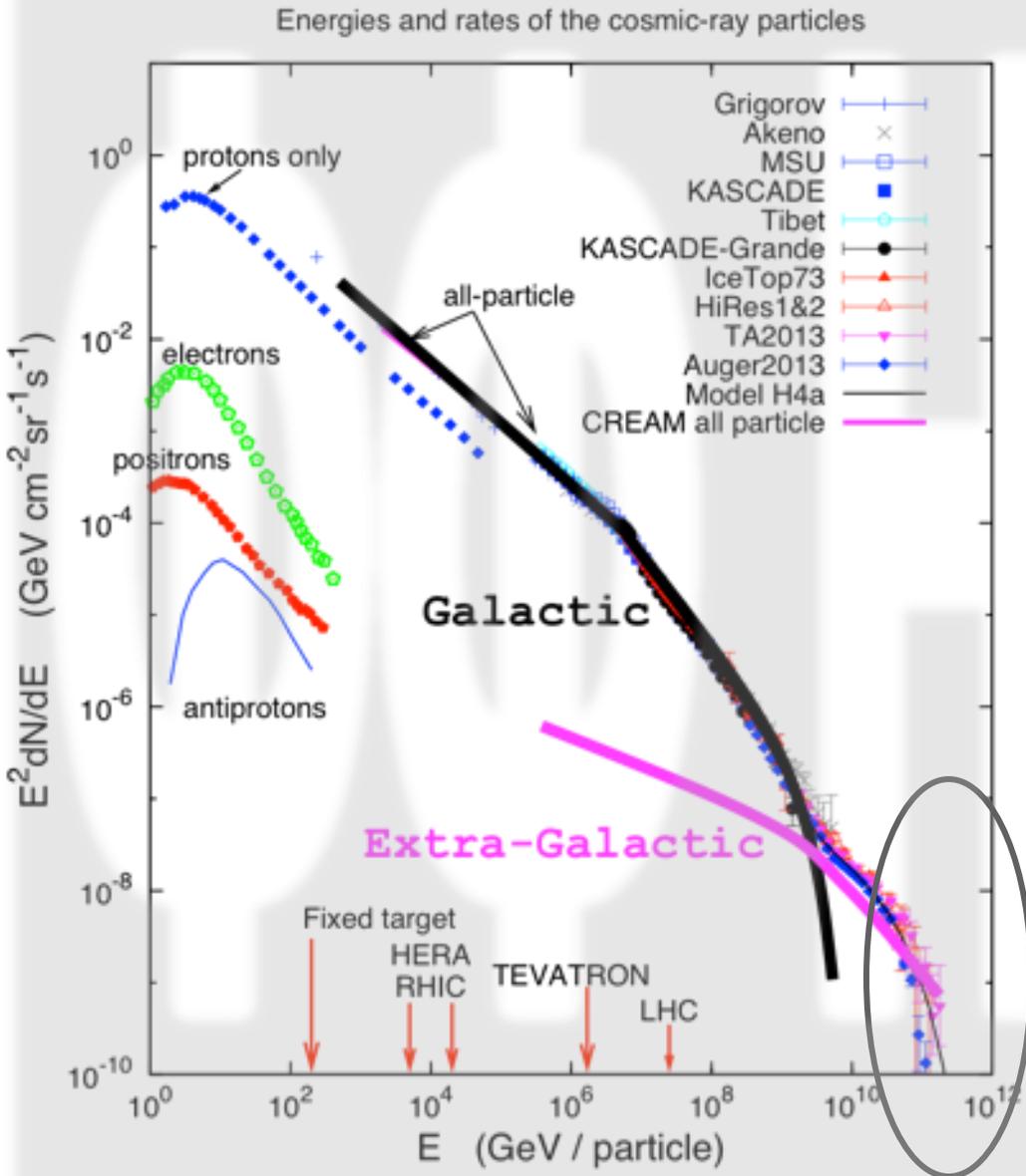
– толщина диска галактики

$$B \sim 10^{-9} \text{ Тл}$$

– галактическое магнитное поле

$$E \sim 5 \times 10^{18} \quad \text{эВ}$$

Космические лучи: спектр



Основной состав космических лучей – протоны (~90%), α -частицы (~8%), ядра более тяжелых элементов (~1%) и электроны (~1%). В очень малых долях присутствуют фотоны и античастицы (позитроны, антипротоны).

Энергетический спектр космических частиц простирается на много порядков, до 10^{20} эВ \approx 16 Дж.

Источником частиц малых энергий являются звезды (звездный ветер).

Галактические космические лучи в основном образуются при взрывах сверхновых.

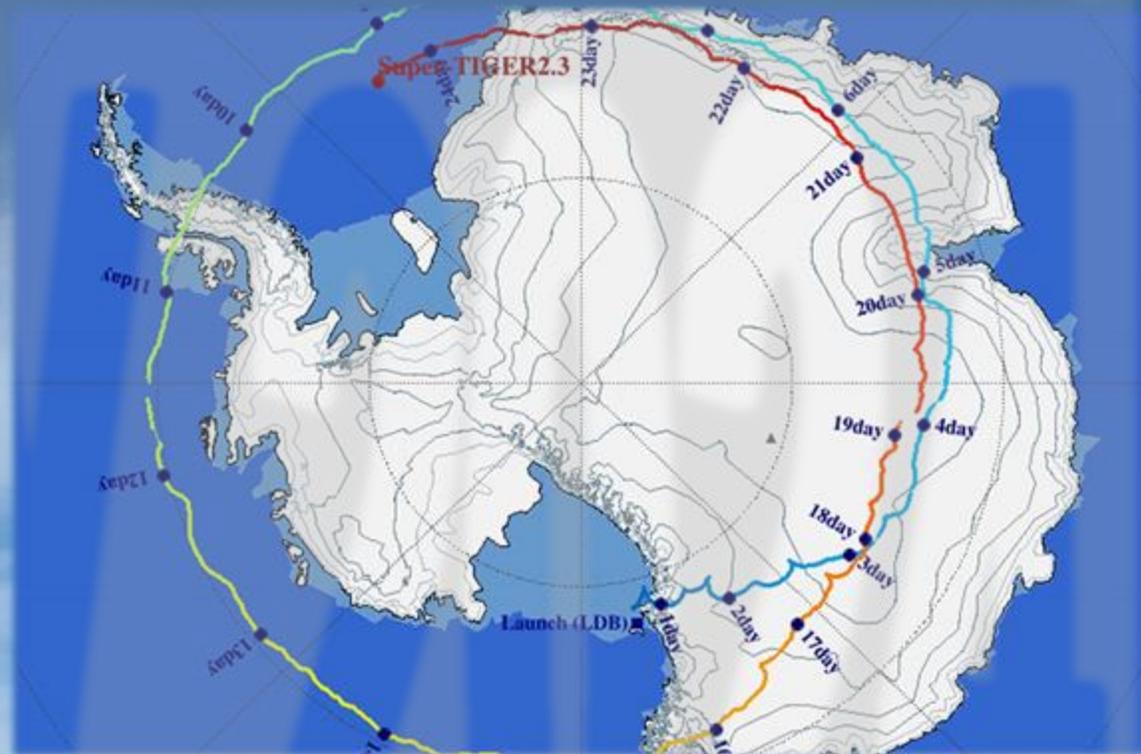
Источники частиц сверхвысоких энергий надежно не установлены (предположительно квазары).

Максимальная **наблюдаемая** энергия космических частиц ограничивается эффектом Грейзина-Зацепина-Кузьмина (GZK).

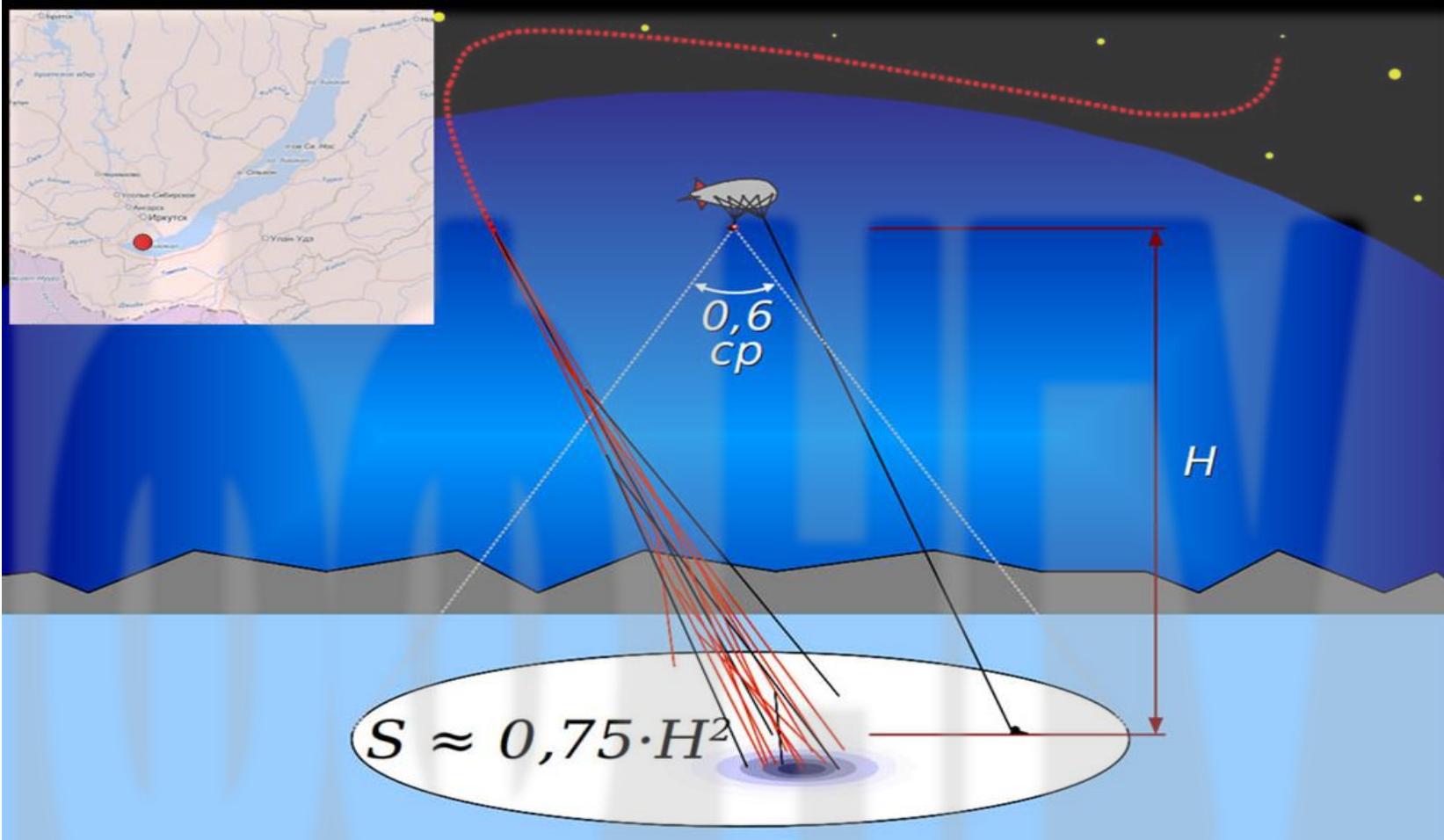
Космические лучи в небе

Большинство экспериментов по изучению космических лучей с помощью стратосферных шаров проводится в Антарктиде.

Шар поднимается на высоту до 40 км, что позволяет регистрировать первичные космические частицы.



Благодаря арктическому полярному вихрю, шар может находиться в воздухе десятки суток, летая по круговой траектории вокруг южного полюса.



Эксперимент СФЕРА на озере Байкал. Космические частицы высоких энергий создают ливень в атмосфере.



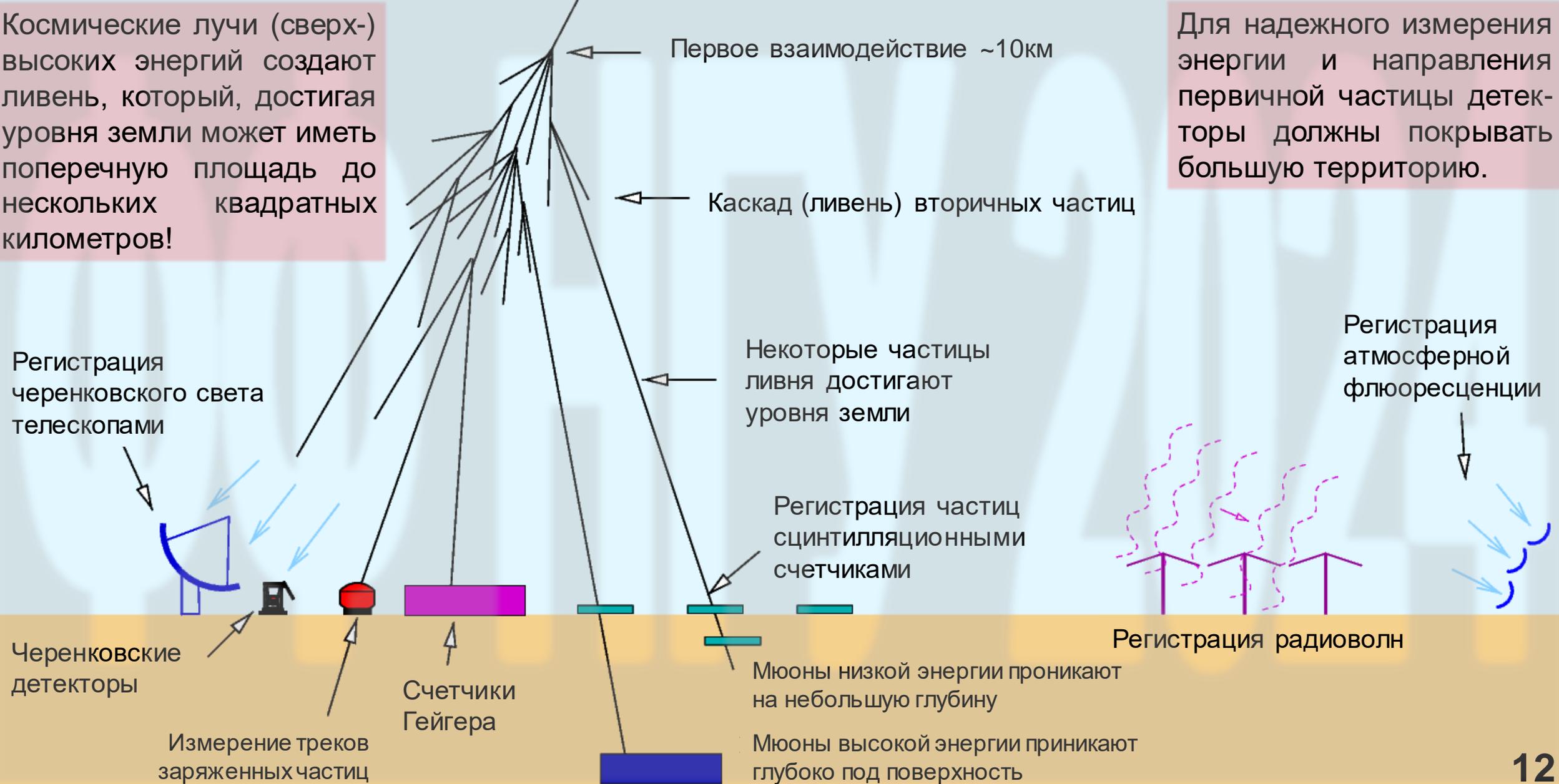
Аппаратура на аэростате регистрирует черенковский свет ливня, отраженный от снега на поверхности земли.



Космические лучи на земле

Космические лучи (сверх-)высоких энергий создают ливень, который, достигая уровня земли может иметь поперечную площадь до нескольких квадратных километров!

Для надежного измерения энергии и направления первичной частицы детекторы должны покрывать большую территорию.

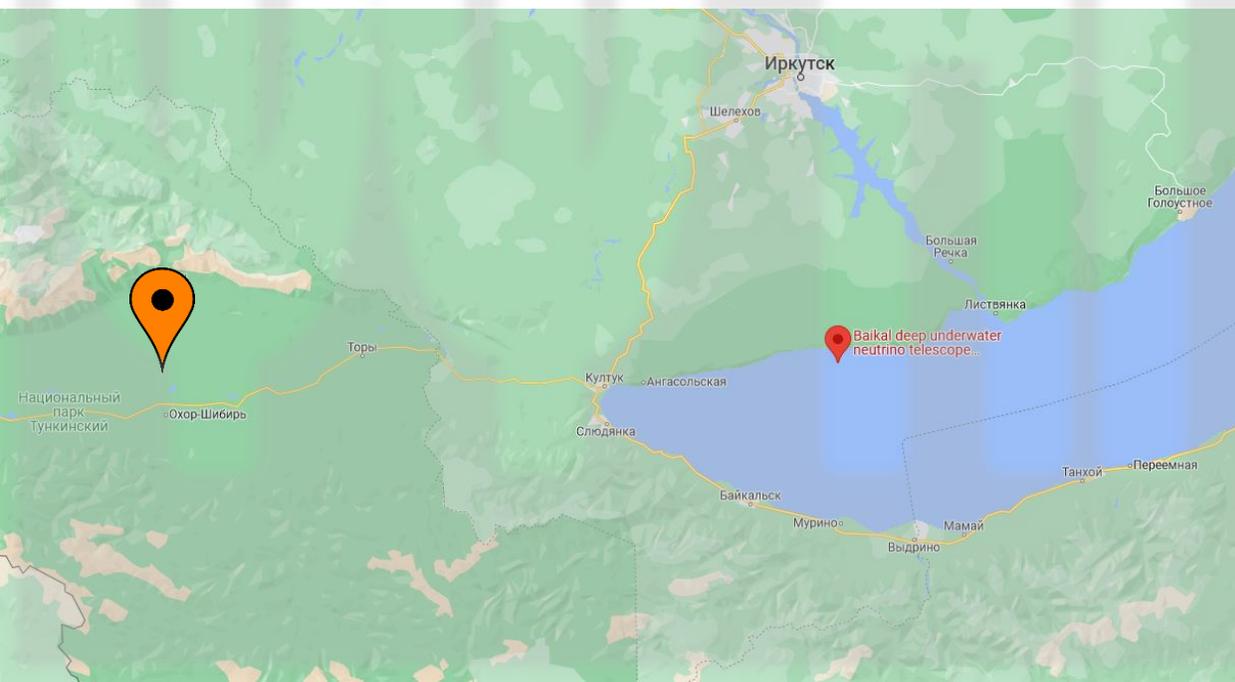


Космические лучи: ТАЙГА

Тункинская долина, недалеко от Иркутска и оз. Байкал.

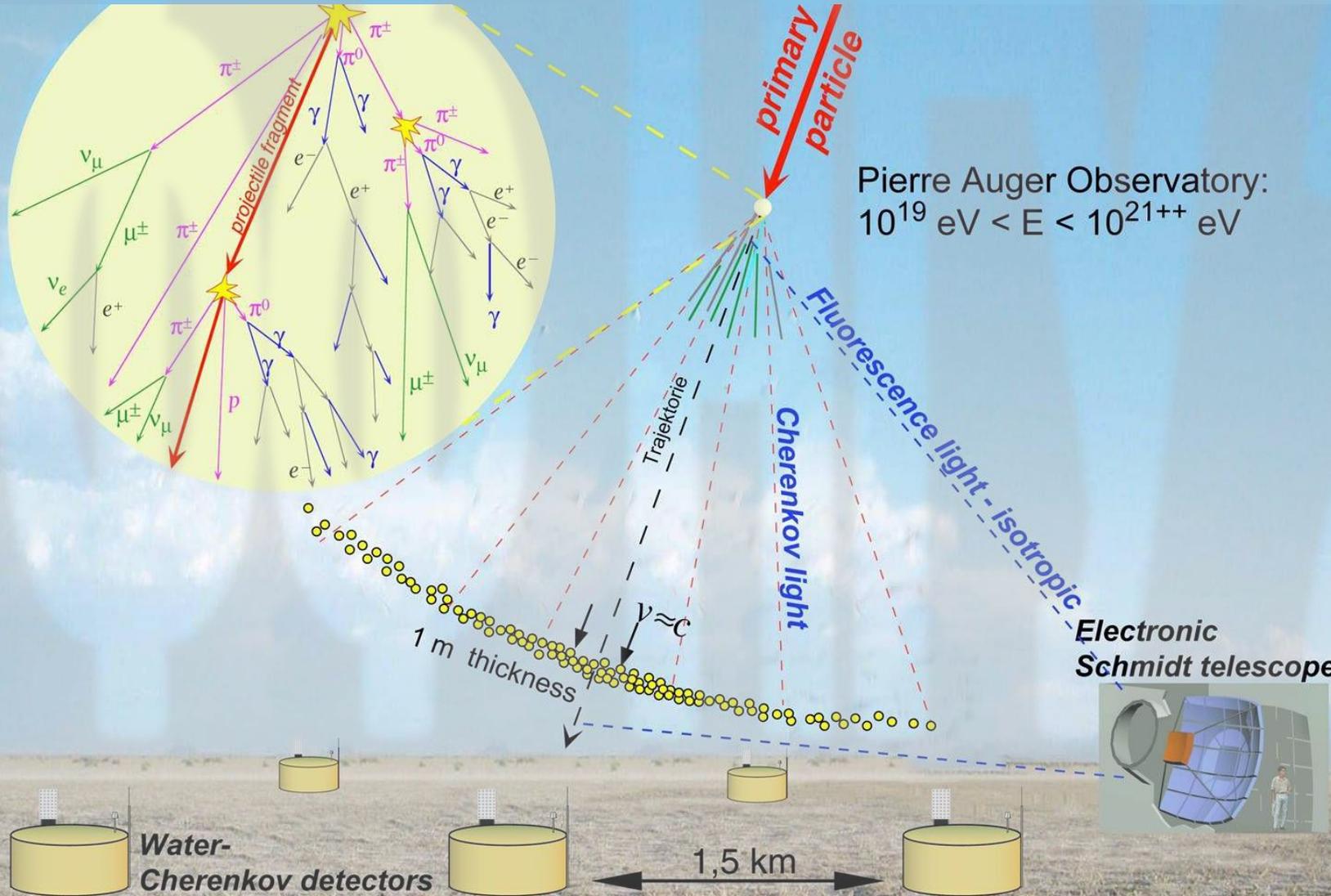
Регистрация космических лучей в оптическом диапазоне (черенковское излучение) и заряженная компонента ливня (электроны и мюоны).

НГУ (лаборатория Е.Кравченко) участвует в эксперименте.



Космические лучи: Pierre Auger

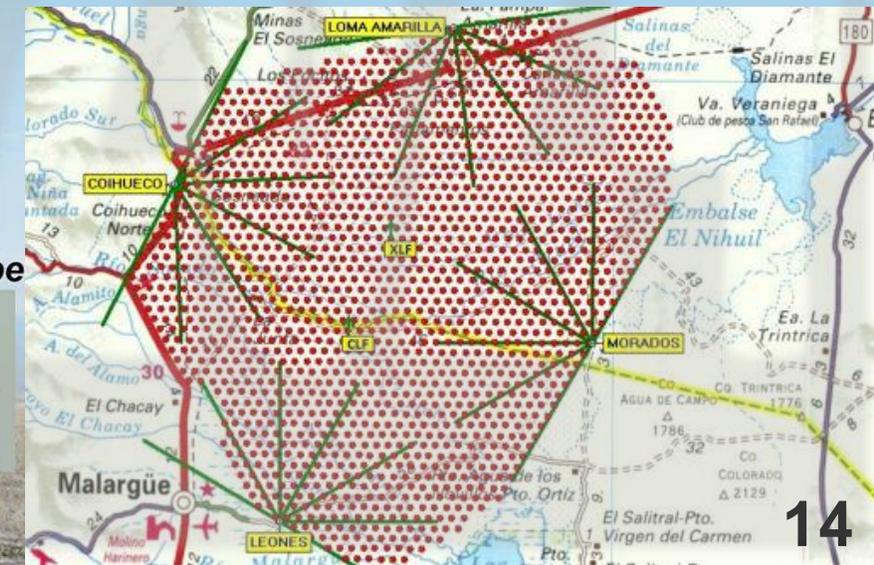
Один из крупнейших экспериментов по изучению космических лучей – обсерватория им. Пьера Оже (Pierre Auger). Расположена в Бразилии (Auger South, 3000 км²) и в Колорадо (Auger North 10000 км²).



Pierre Auger Observatory:
 $10^{19} \text{ eV} < E < 10^{21++} \text{ eV}$

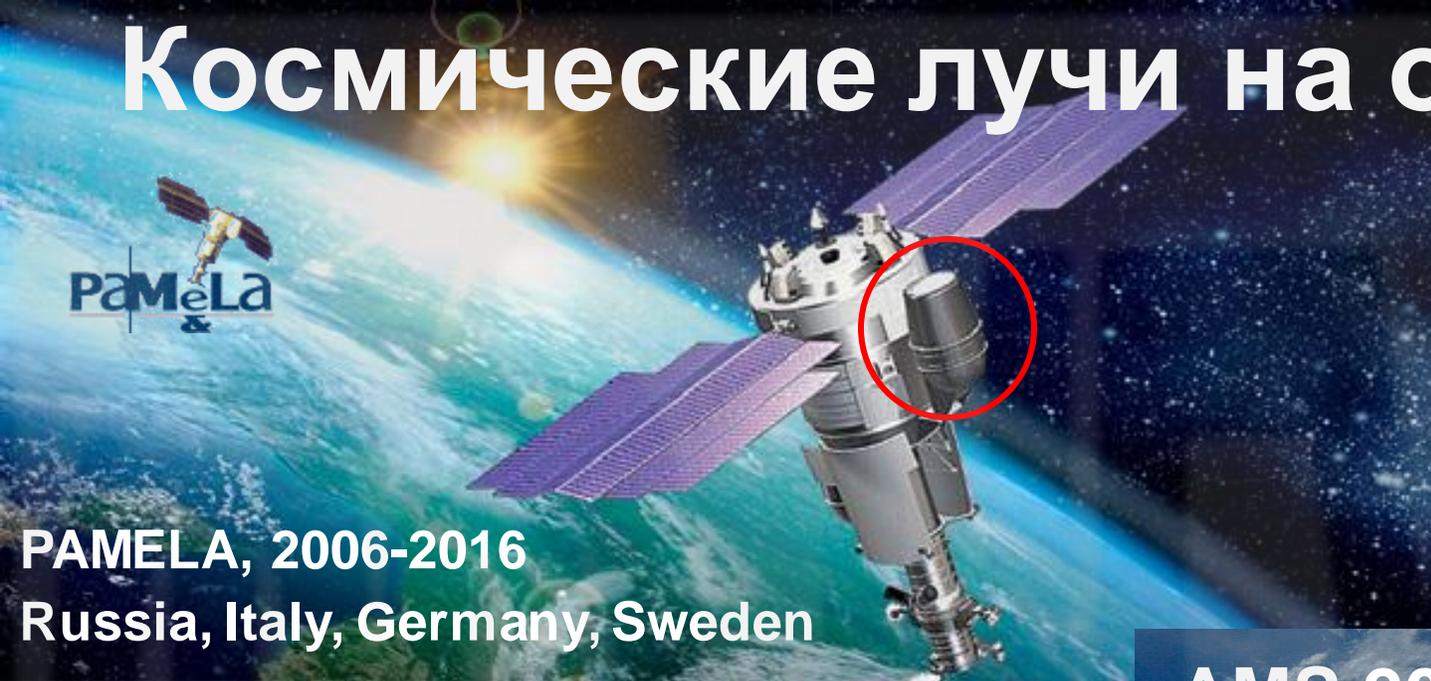
Основная задача – регистрация космических частиц сверхвысоких энергий ($>10^{18}$ эВ).

Средний поток таких частиц:
1 частица/км² · 100 лет.



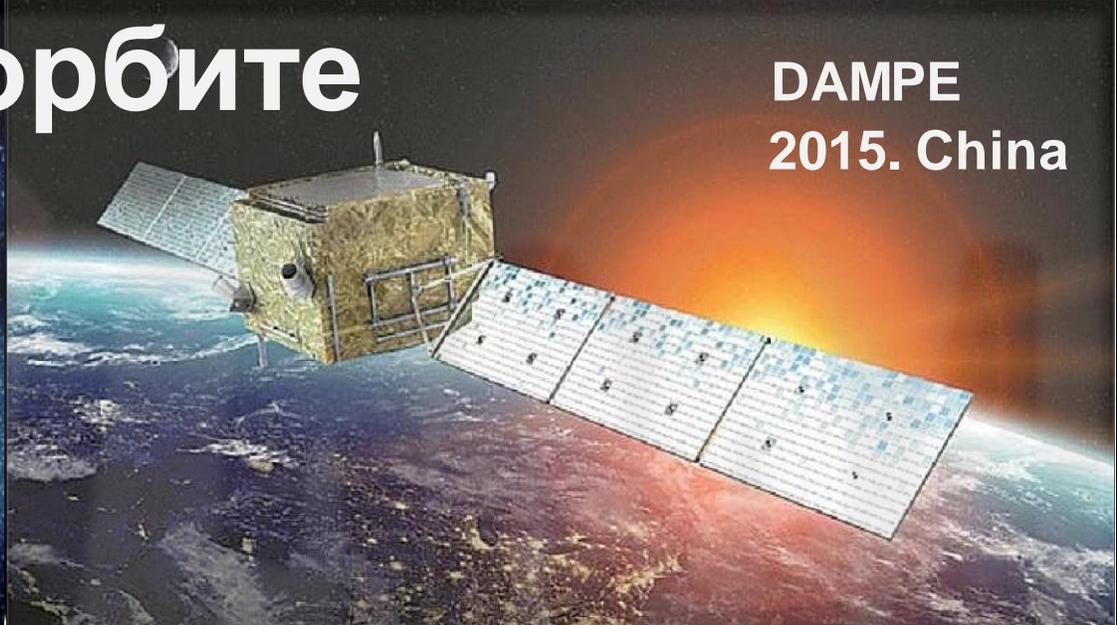
Космические лучи на орбите

DAMPE
2015. China



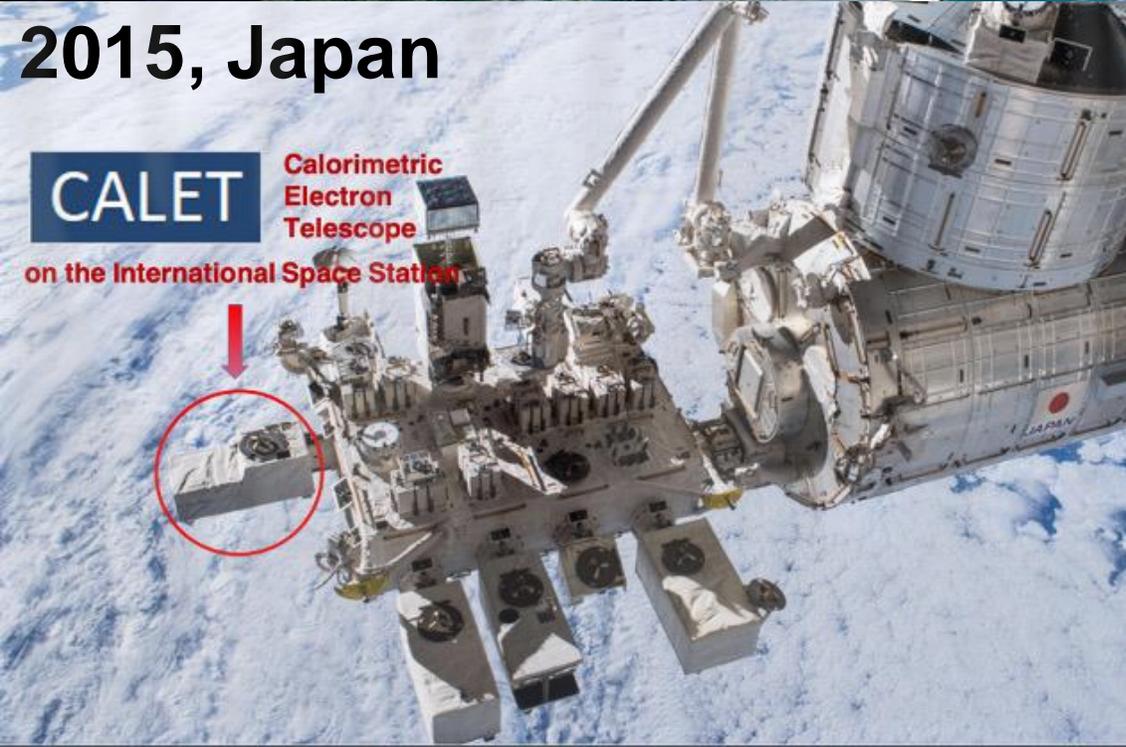
PAMELA

PAMELA, 2006-2016
Russia, Italy, Germany, Sweden

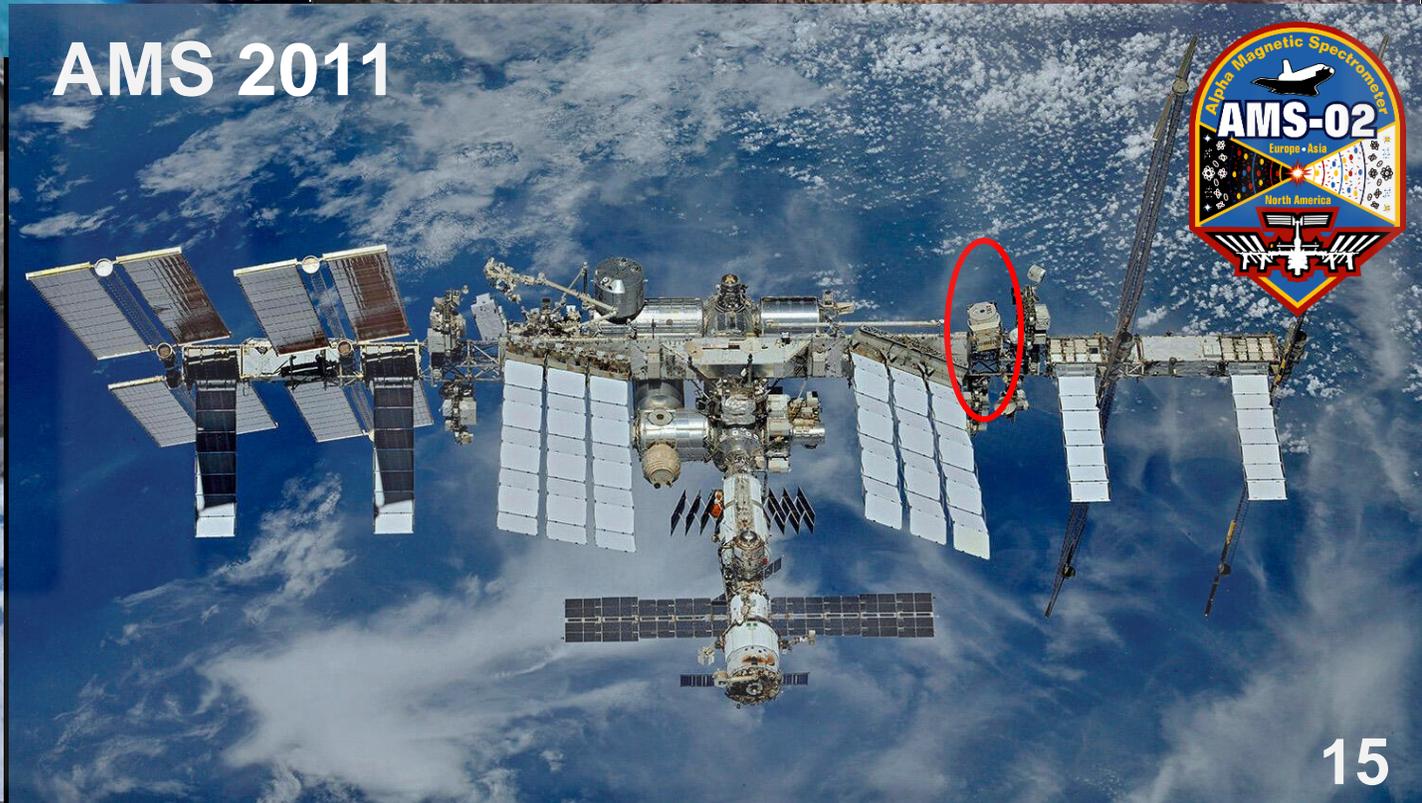


2015, Japan

CALET
Calorimetric
Electron
Telescope
on the International Space Station



AMS 2011



Космические лучи на орбите

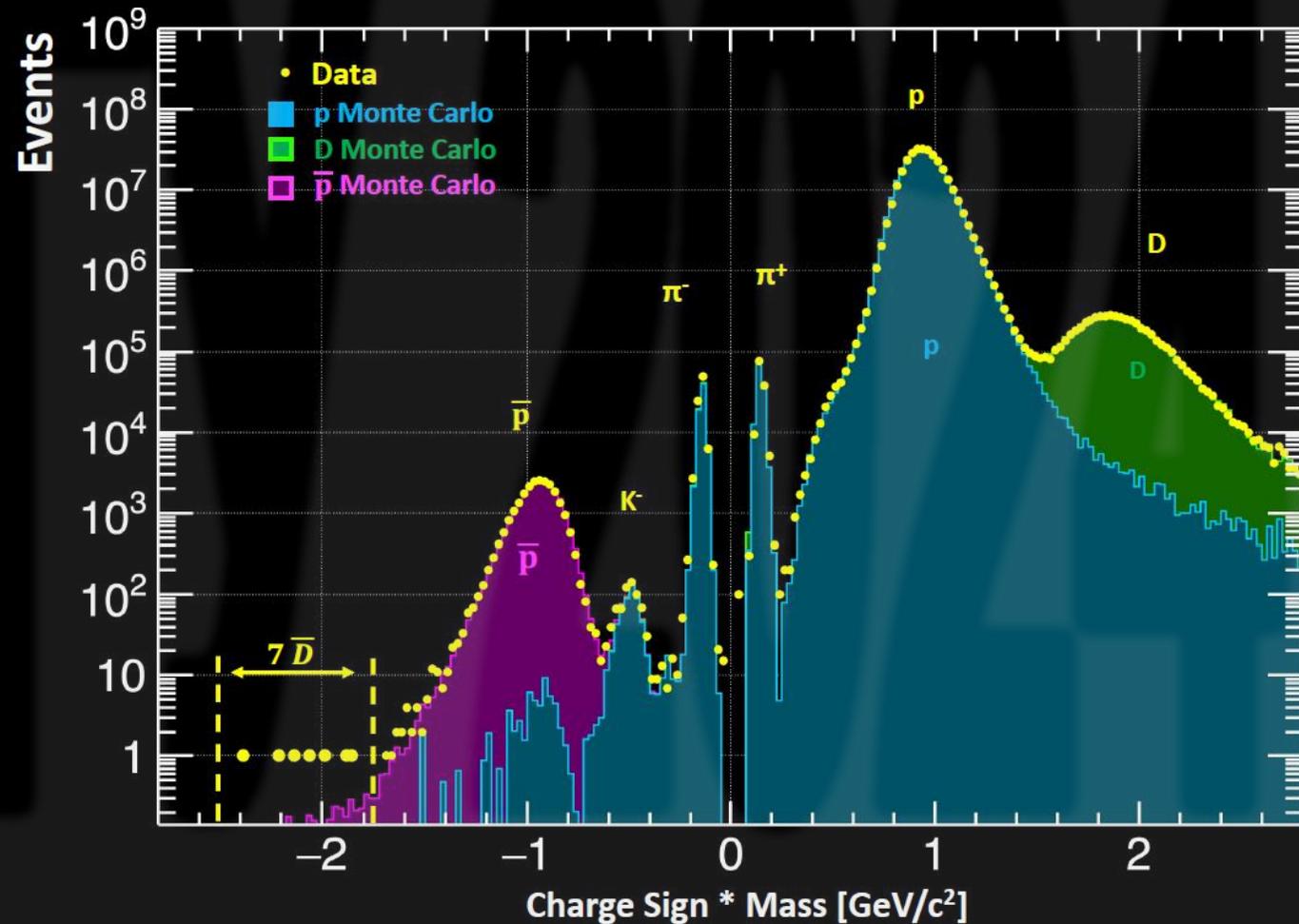
Основной задачей AMS является детальное изучение параметров (поток, спектр) античастиц (позитронов, антипротонов), поиск более тяжелых антиядер (антигелий) и темной материи.

С 2011 по 2023 годы детектор AMS зарегистрировал $>220 \times 10^9$ заряженных частиц.

Среди них

- 3.9×10^6 позитронов;
- 1.1×10^6 антипротонов;
- 7 ядер антидейтерия;
- 2 возможных события антигелия!

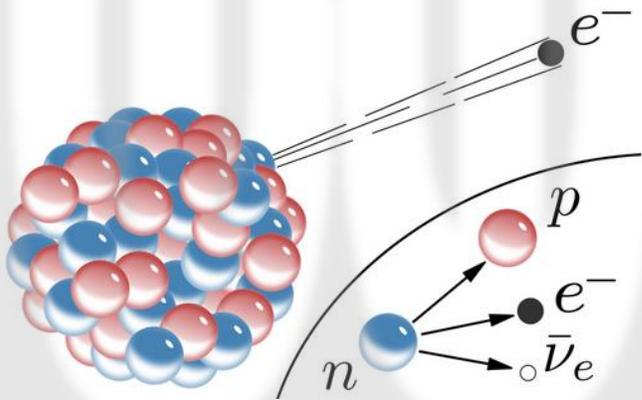
Планируется продолжить работу детектора до 2030 года. Если результаты по антигелию подтвердятся, их будет трудно объяснить в рамках существующих моделей.



Нейтрино

В начале XX века считалось, что β -распад ядер идет за счет двухчастичного перехода $n \rightarrow p + e^-$, а значит электрон должен быть монохроматичным.

Однако в 1914 году Дж. Чедвик экспериментально показал, что при β -распаде энергия электрона имеет непрерывное распределение.



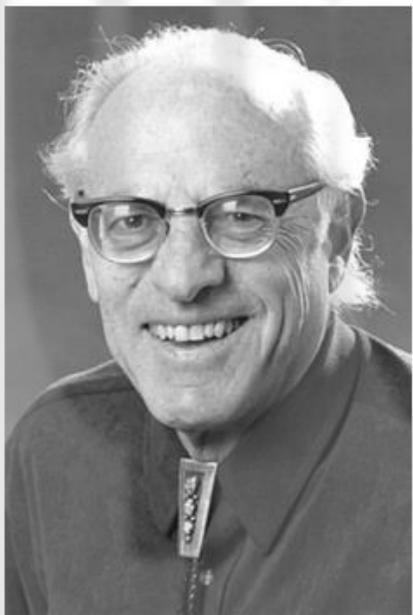
В 1930 В. Паули предположил, что при β -распаде испускается еще одна легкая нейтральная частица, которую он назвал нейтрино. Тогда реакция β -распада нейтрона запишется как



В настоящее время экспериментально подтверждено существование трех типов (анти-) нейтрино: ν_e , ν_μ и ν_τ .

Нейтрино: эксперимент

В 1953 году, используя реактор как источник (тогда еще гипотетических) антинейтрино С.Сowan и F.Reines начали эксперимент (проект «Полтергейст») по экспериментальному обнаружению антинейтрино при помощи реакции обратного β -распада



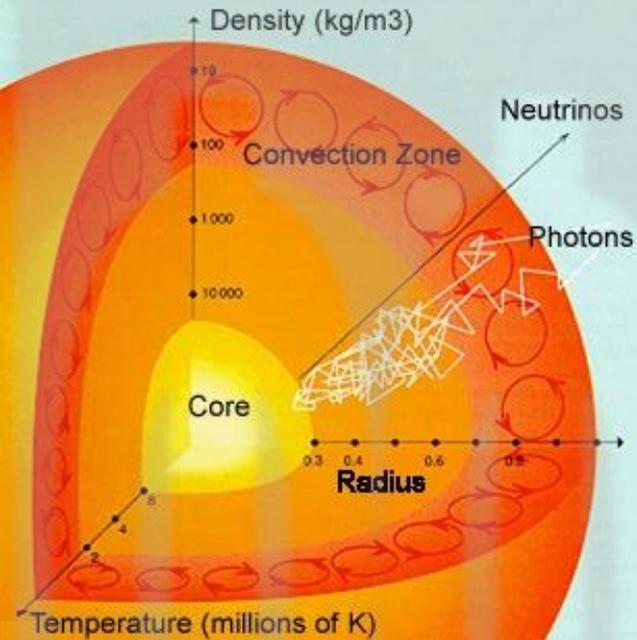
© University of California
Regents
Frederick Reines



(С.Сowans умер в 1974 году)



Солнце как источник нейтрино



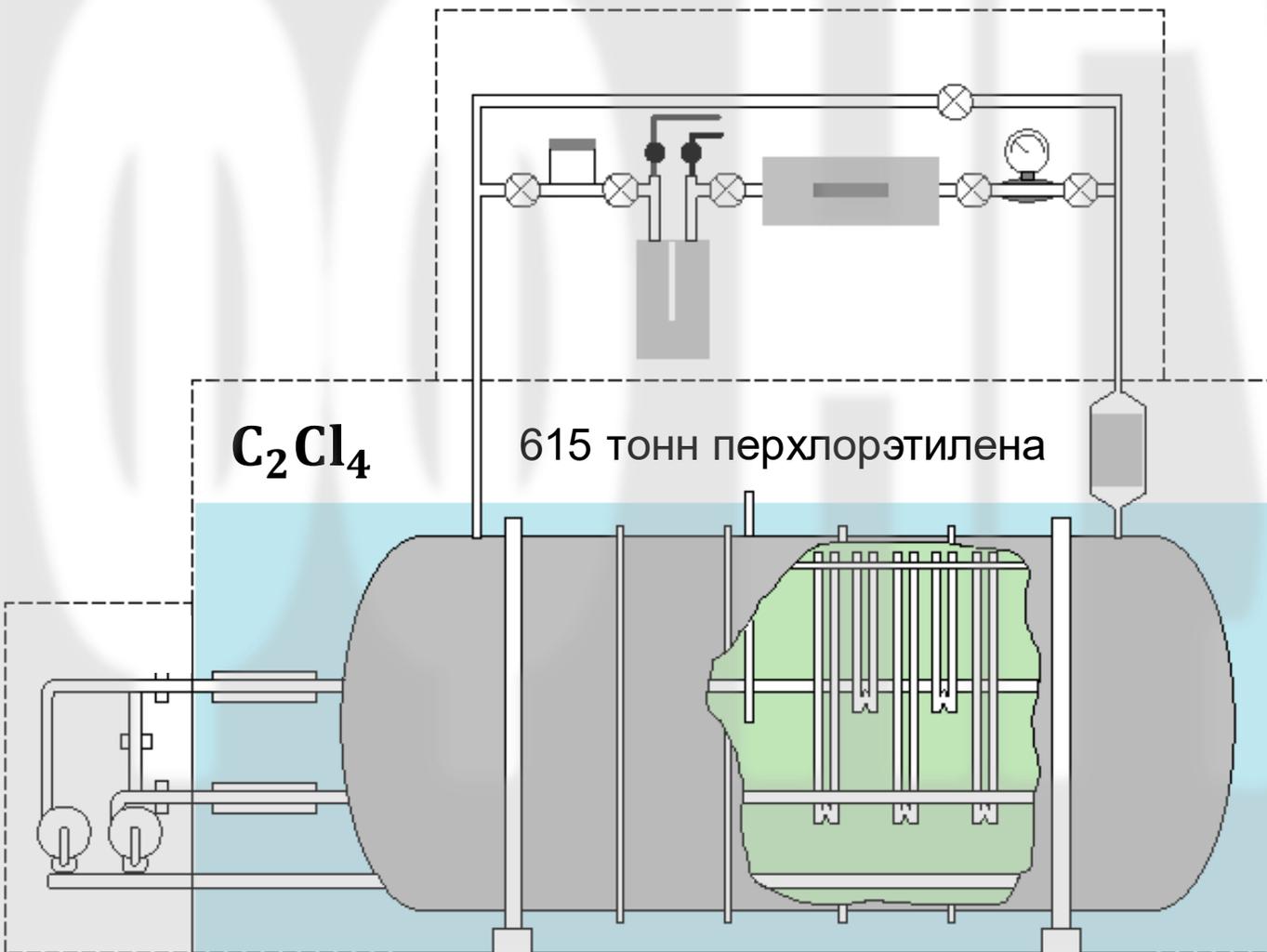
Источником энергии звезд типа Солнце является термоядерное «горение» водорода (**будем подробно обсуждать позднее**). В результате образуется огромное количество нейтрино, которые из-за очень слабого взаимодействия с веществом (практически) беспрепятственно покидают Солнце.

Расчеты показывают (**рассмотрим позднее**), что поток солнечных нейтрино на Земле составляет порядка 70×10^9 частиц/см²/с.

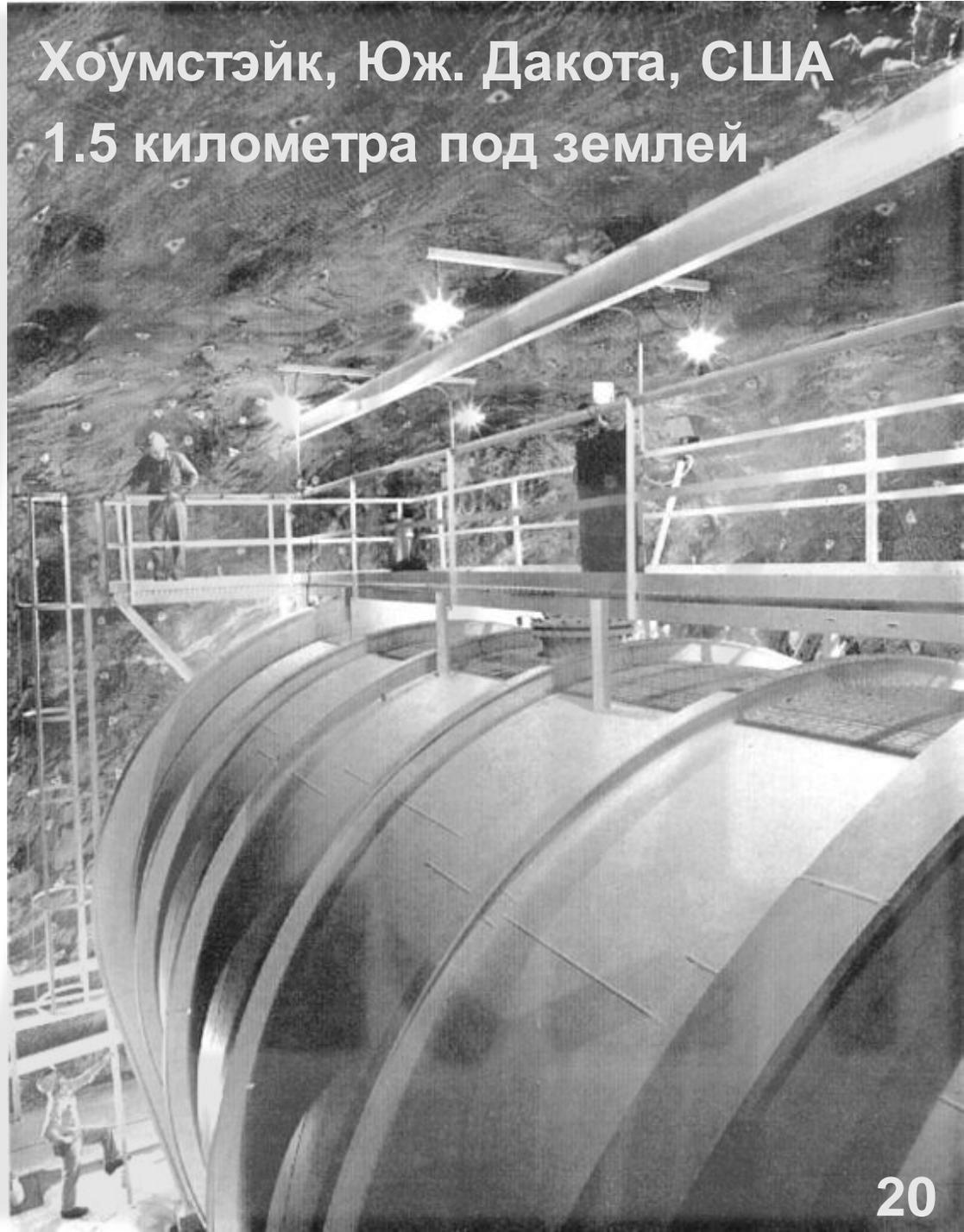


Нейтрино от Солнца

Эксперимент Р. Дэвиса (1967...)



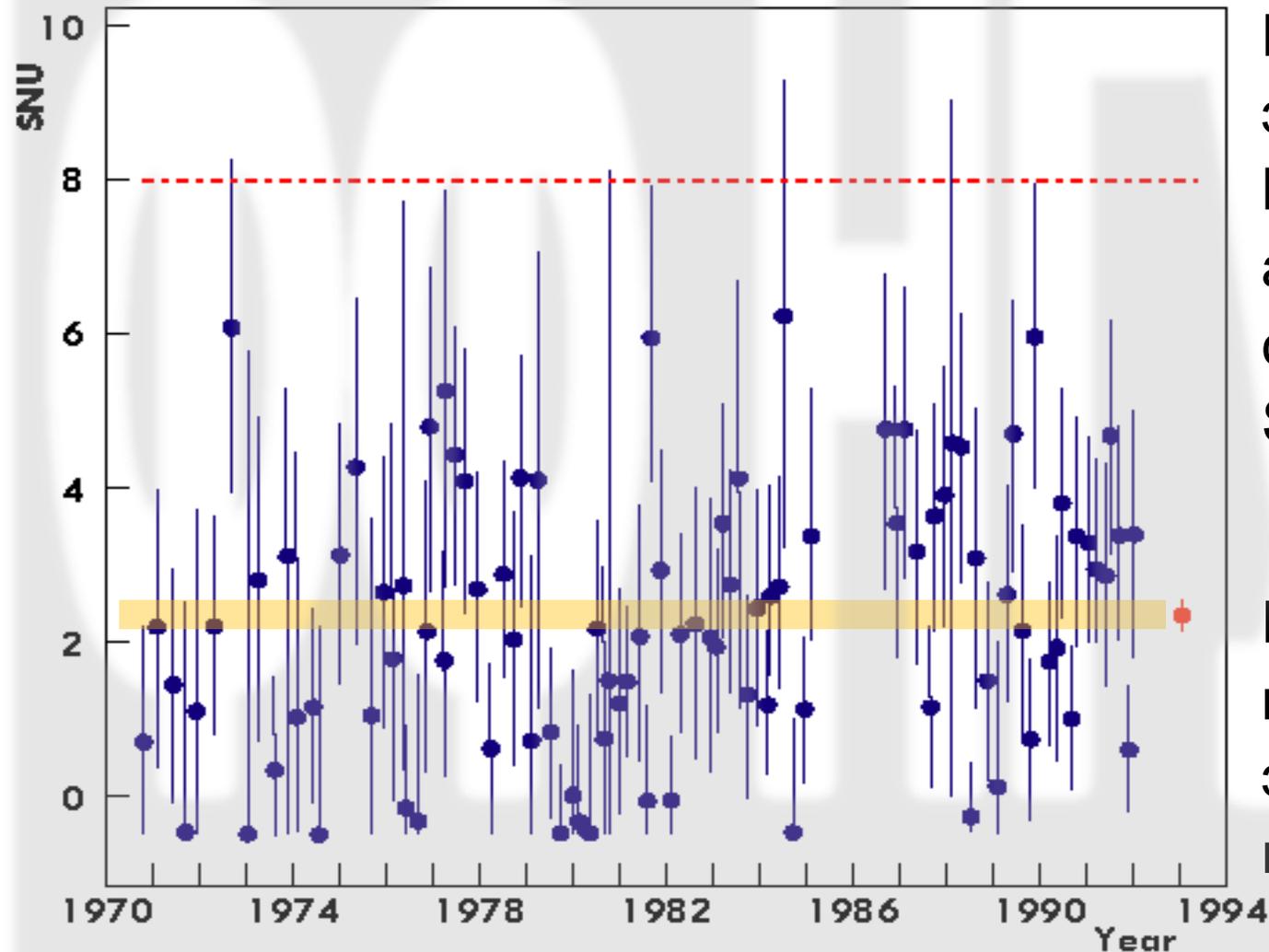
Хоумстэйк, Юж. Дакота, США
1.5 километра под землей





Проблема солнечных нейтрино

1 SNU = 1 взаимодействие в сек. на 10^{36} атомов.



Результаты измерений Р. Дэвиса в эксперименте Homestake за 25 лет. Всего было зарегистрировано 2200 атомов ^{37}Ar , что соответствует среднему потоку нейтрино 2.56 ± 0.23 SNU при ожидаемом значении 8 SNU.

Когда все мыслимые проверки и перепроверки не выявили проблем в эксперименте, настало время задуматься о правильности теории...



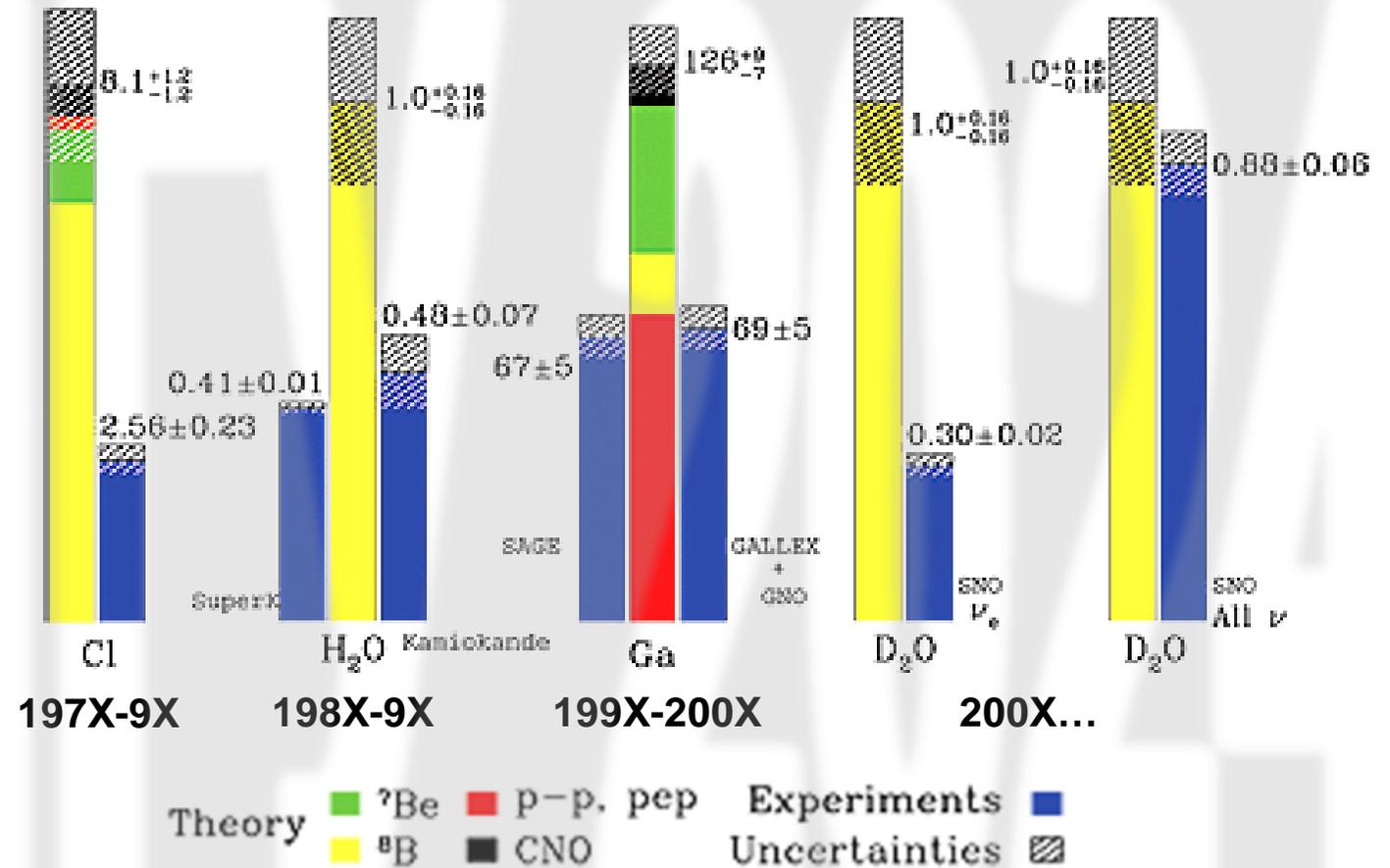
Проблема солнечных нейтрино

arXiv:hep-ph/0412068

Теория Солнца не могла быть неправильной ТАК сильно (в три раза).

Существует три типа нейтрино, но эксперимент Дэвиса чувствителен только к одному типу нейтрино.

А что если нейтрино могут менять свой тип, пока летят от Солнца к Земле?



Сравнение результатов измерения потока солнечных нейтрино с теоретическими расчетами J.N.Bahcall. Возможность регистрировать все типы нейтрино в эксперименте SNO позволило окончательно решить «проблему солнечных нейтрино» в 2001 году => осцилляции нейтрино.

Детекторы нейтрино: КАМИОКАНДЕ



Первая версия эксперимента начала работу в конце 80-ых.

Эксперимент KamiokaNDE представляет собой цистерну диаметром 39 и высотой 41 метр заполненную сверхчистой водой (50000 тонн) и размещенную на 1000 метров под землей для защиты от космических лучей.

При рассеянии нейтрино на электроны происходит ионизация, электрон, в свою очередь, при движении в воде производит черенковское излучение.

Черенковский свет регистрируется >10000 фотоумножителями. Измеряется энергия и направление нейтрино.

Детекторы нейтрино: КАМИОКАНДЕ

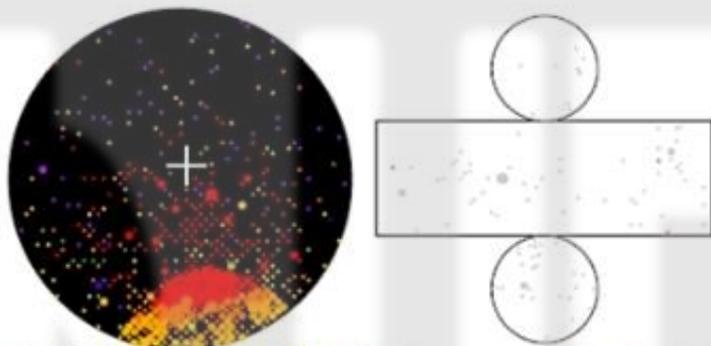
The image shows the interior of the Kamiokande neutrino detector, a large cylindrical cavern. The walls and ceiling are covered in a dense grid of photomultiplier tubes (PMTs), which appear as a shimmering, textured surface. Several bright lights are visible on the ceiling, and a blue object is suspended from the ceiling by ropes. In the foreground, a small boat is visible on the water surface, and another larger boat is on the right side. The overall atmosphere is dark and industrial.

Эксперимент КАМИОКАНДЕ (Япония)

Детекторы нейтрино: КАМИОКАНДЕ

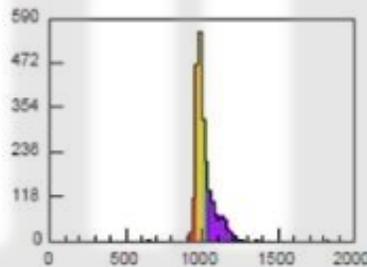
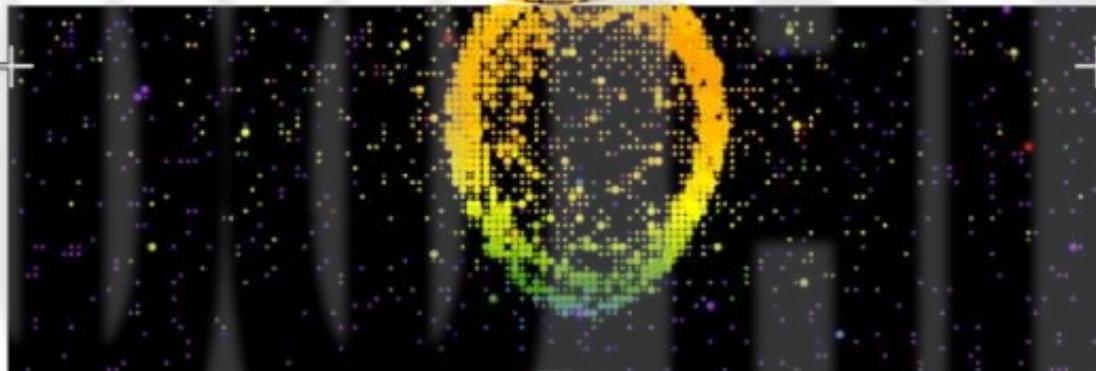
Super-Kamiokande

Run 3062 Event 475360
96-11-08:12:07:30
Inner: 2305 hits, 7763 pE
Outer: 5 hits, 4 pE (in-time)
Trigger ID: 0x03
D wall: 601.2 cm
PC μ -like, $p = 1088.0$ MeV/c



Time (ns)

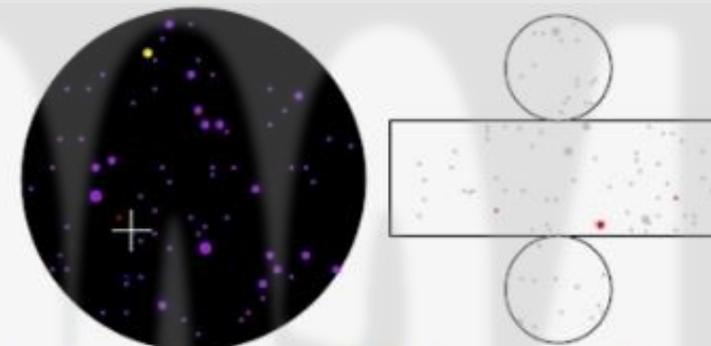
- < 971
- 971- 977
- 977- 983
- 983- 989
- 989- 995
- 995-1001
- 1001-1007
- 1007-1013
- 1013-1019
- 1019-1025
- 1025-1031
- 1031-1037
- 1037-1043
- 1043-1049
- 1049-1055
- >1055



Times (ns)

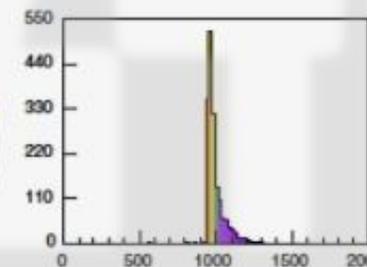
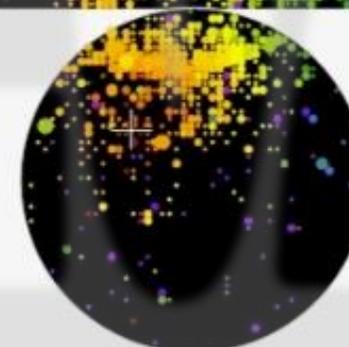
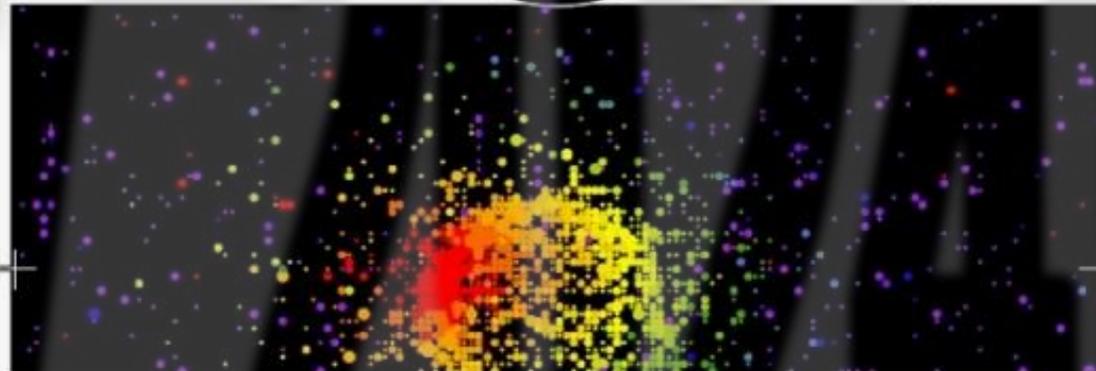
Super-Kamiokande

Run 3013 Event 149004
96-10-24:19:39:51
Inner: 1763 hits, 4003 pE
Outer: 3 hits, 5 pE (in-time)
Trigger ID: 0x03
D wall: 897.4 cm
PC e -like, $p = 463.8$ MeV/c



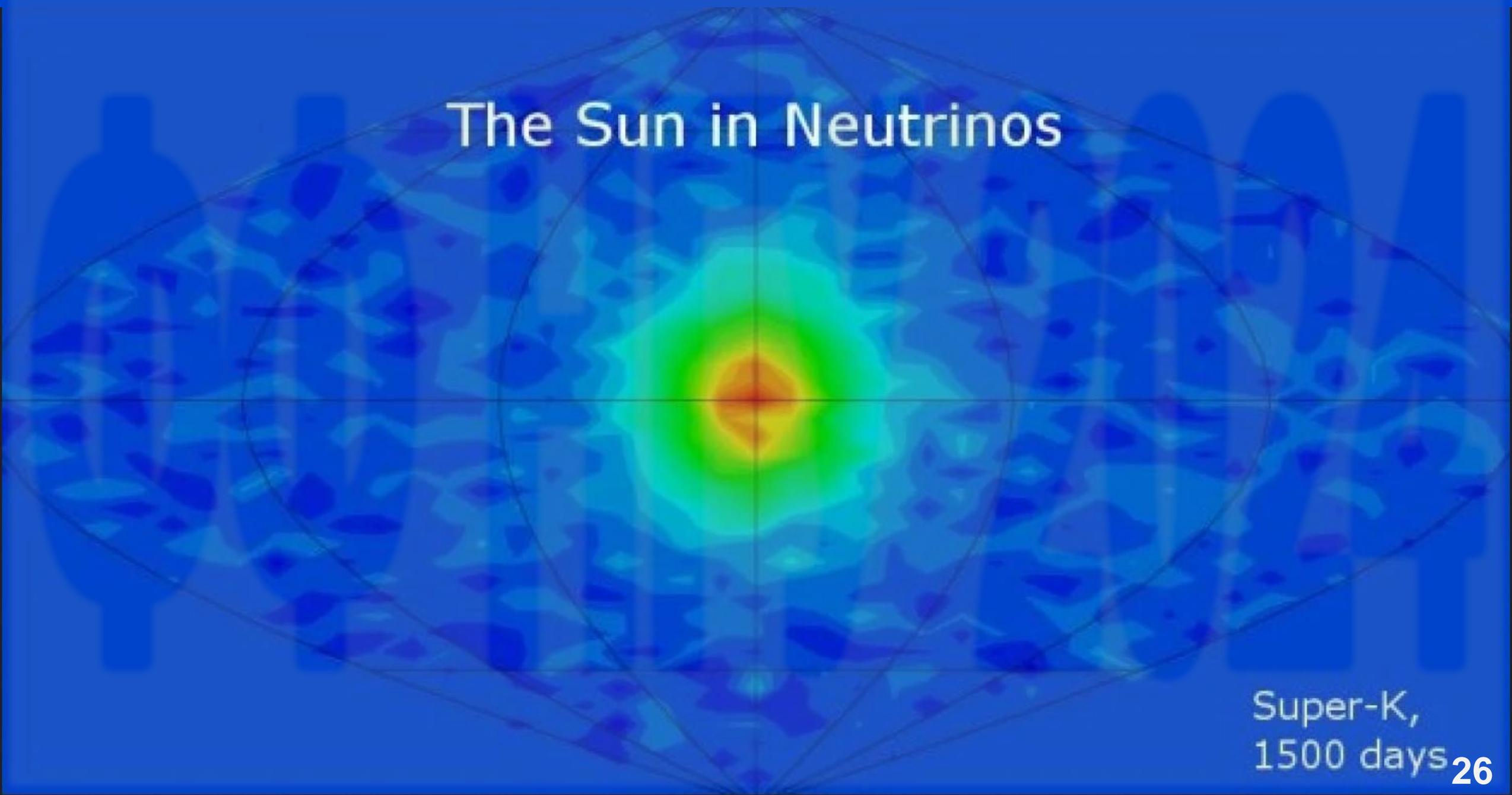
Time (ns)

- < 958
- 958- 963
- 963- 968
- 968- 973
- 973- 978
- 978- 983
- 983- 988
- 988- 993
- 993- 998
- 998-1003
- 1003-1008
- 1008-1013
- 1013-1018
- 1018-1023
- 1023-1028
- >1028



Times (ns)

The Sun in Neutrinos



Super-K,
1500 days **26**

Сверхновая SN1987A

ДО

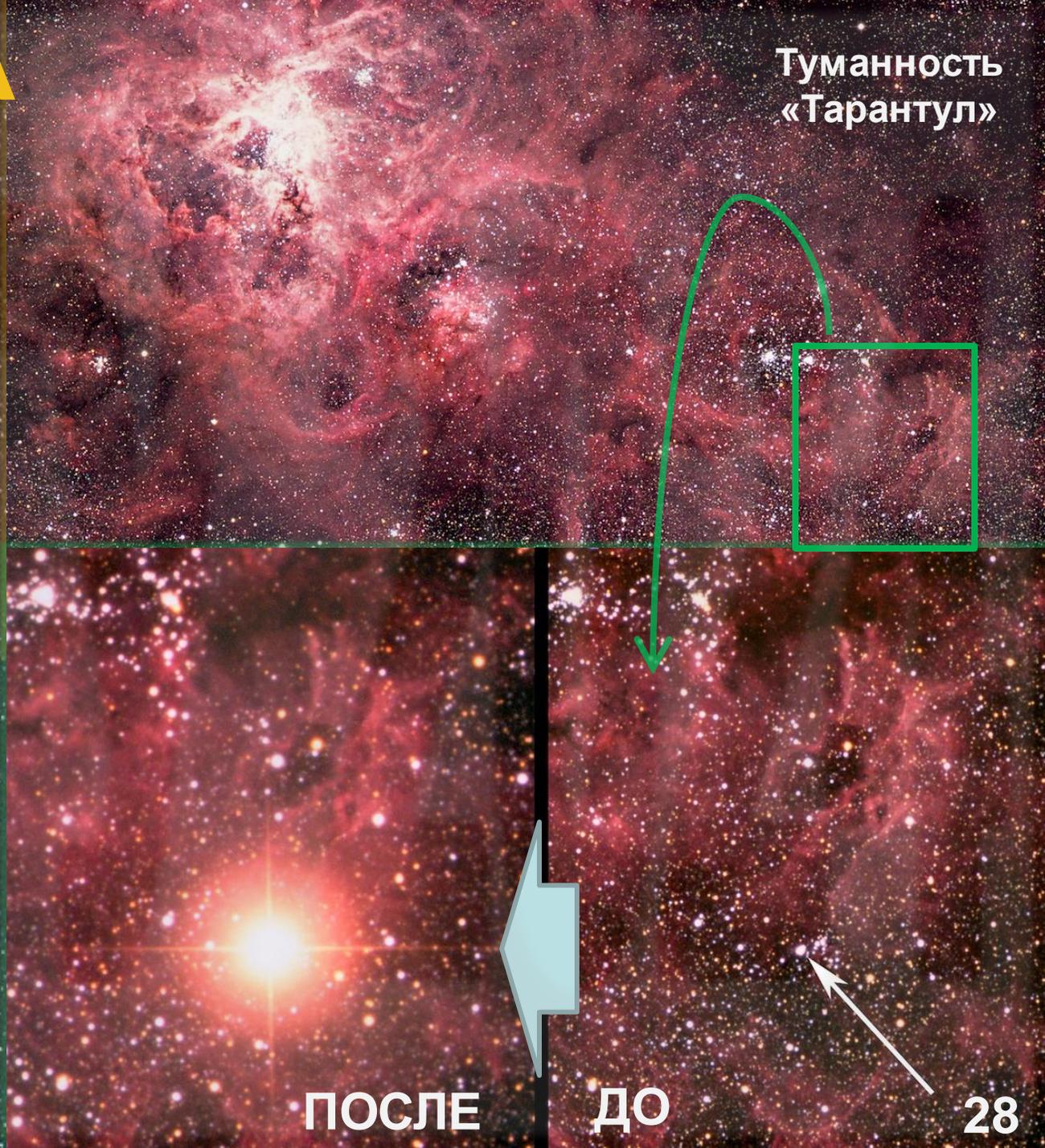
ПОСЛЕ

Большое Магелланово Облако – карликовая галактика, спутник Млечного Пути.

Сверхновая SN1987A



Большое Магелланово Облако – карликовая галактика, спутник Млечного Пути.



Туманность «Тарантул»

ПОСЛЕ

ДО

28

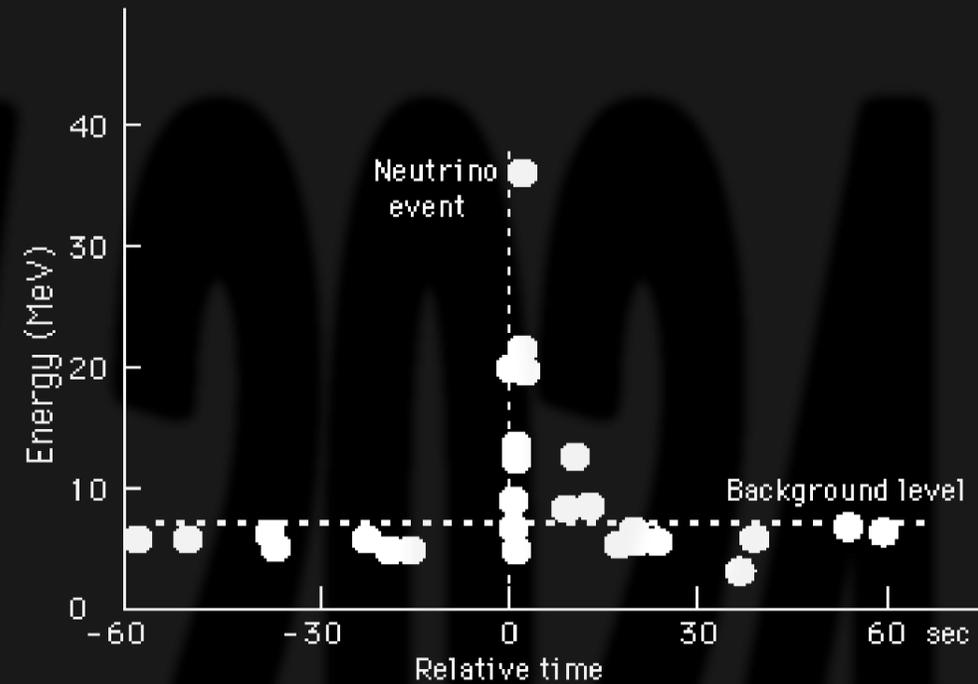
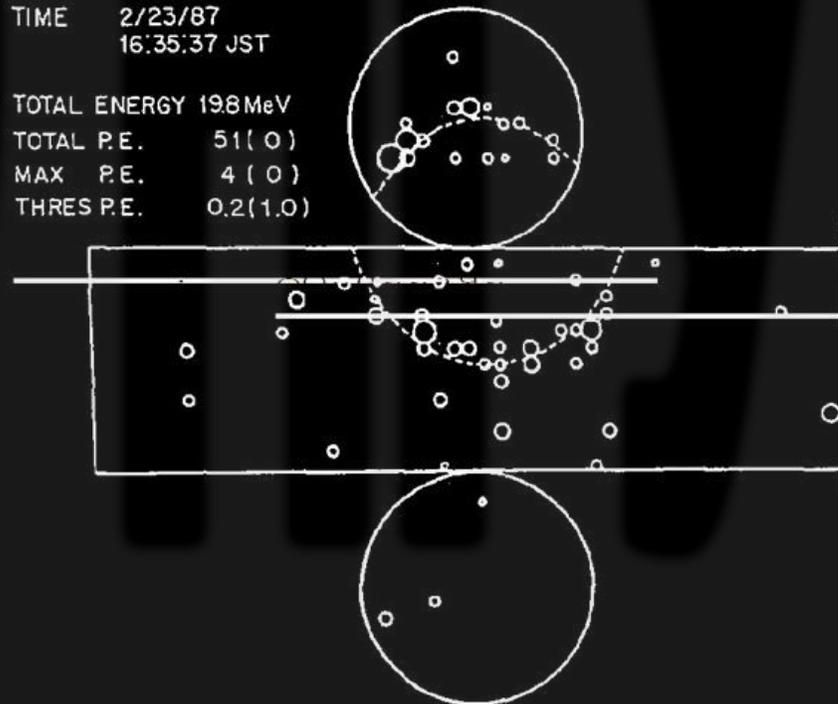
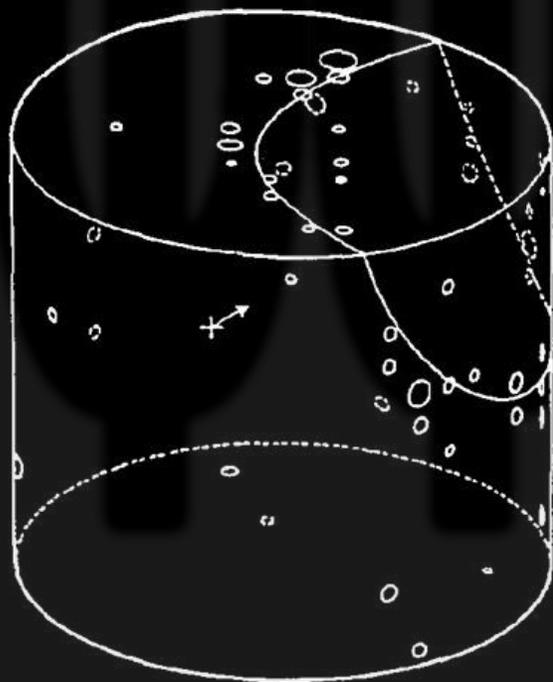
Сверхновая SN1987A

Первое наблюдение (анти-) нейтрино астрофизического происхождения!

KAMIOKANDE 2

NUM 9
RUN 1892
EVENT 139372
TIME 2/23/87
16:35:37 JST

TOTAL ENERGY 198 MeV
TOTAL P.E. 51(0)
MAX P.E. 4(0)
THRES P.E. 0.2(1.0)



12 частиц за
13 секунд

Сверхновая SN1987A

23 февраля 1987 в 7:35 GMT детектор Kamiokande (Япония) в течение 13 секунд зарегистрировал 11 антинейтрино от вспышки сверхновой 1987A в Большом Магеллановом Облаке. Одновременно было зарегистрировано 8 антинейтрино детектором IMB (США) и еще 5 – нейтринной обсерваторией Баксан (СССР).

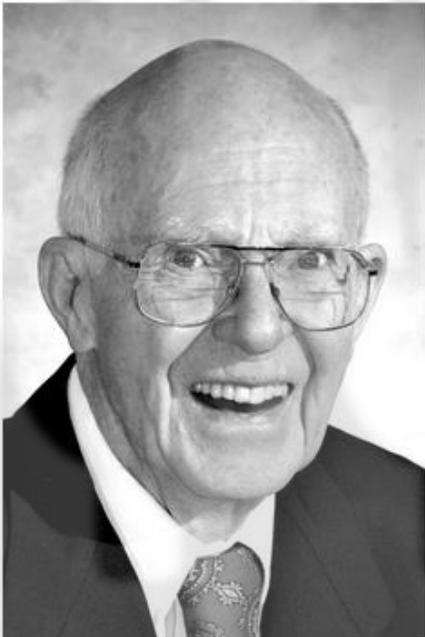
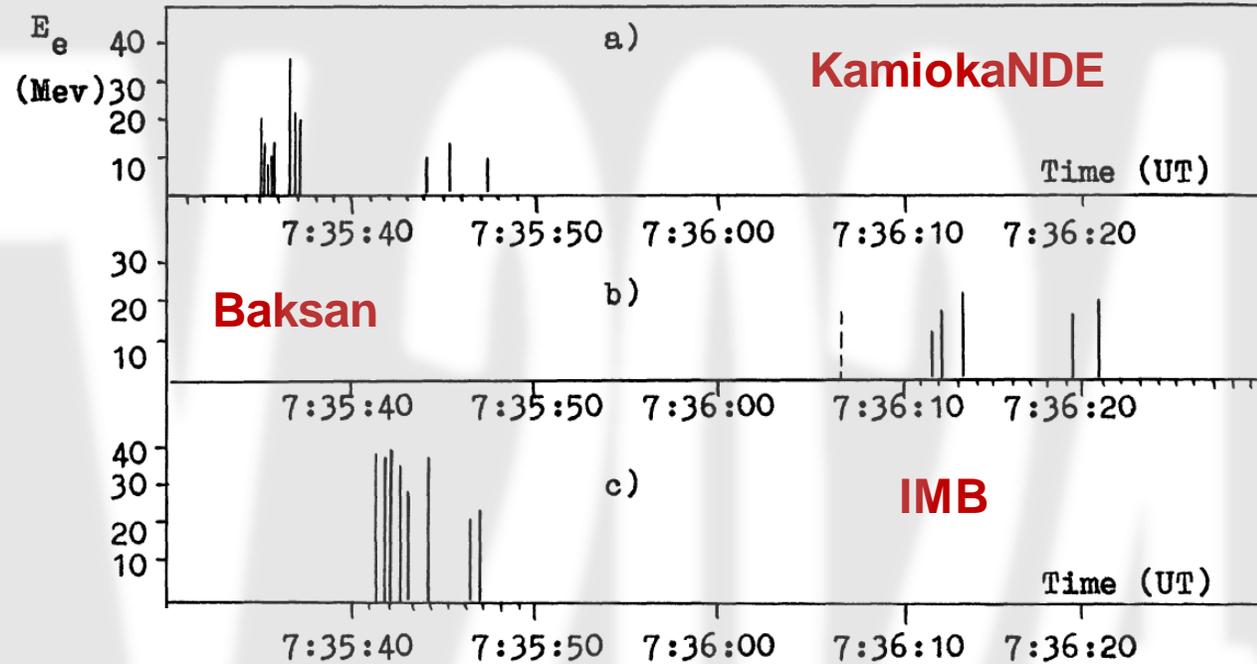


Photo from the Nobel Foundation archive.

Raymond Davis Jr.



Photo from the Nobel Foundation archive.

Masatoshi Koshiba

"for pioneering contributions to astrophysics, in particular for the detection of cosmic neutrinos"



2002

Нейтринная обсерватория IceCube



Начало строительства – 2005 г.

С 2010 года – работа в полном объеме.

Помимо астрофизики, много важных результатов по ФЭЧ.



IceCube Laboratory

Data is collected here and sent by satellite to the data warehouse at UW–Madison



Digital Optical Module (DOM)

5,160 DOMs deployed in the ice

50 m

Ice Top

1450 m

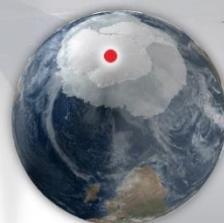
2450 m

86 strings of DOMs, set 125 meters apart

IceCube detector

DeepCore

Antarctic bedrock

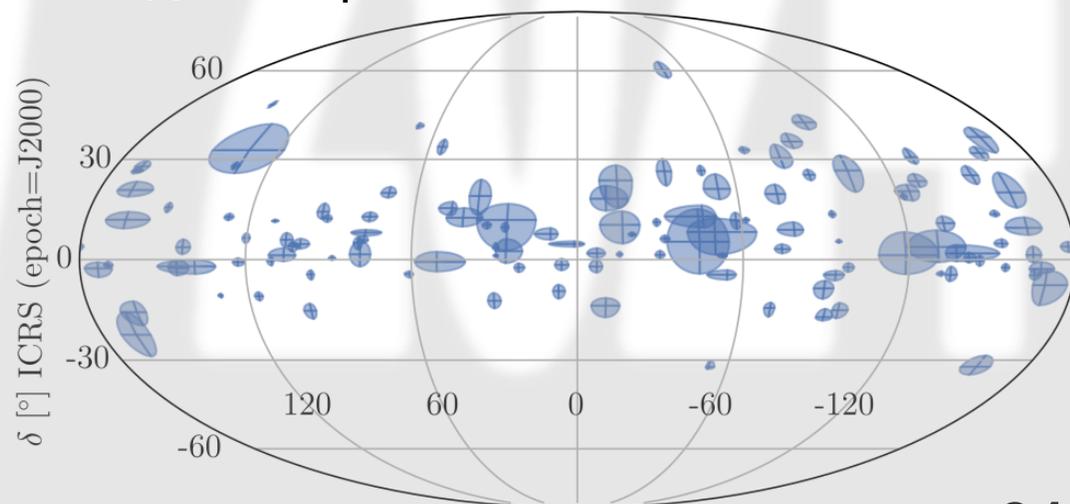


Amundsen–Scott South Pole Station, Antarctica

60 DOMs on each string

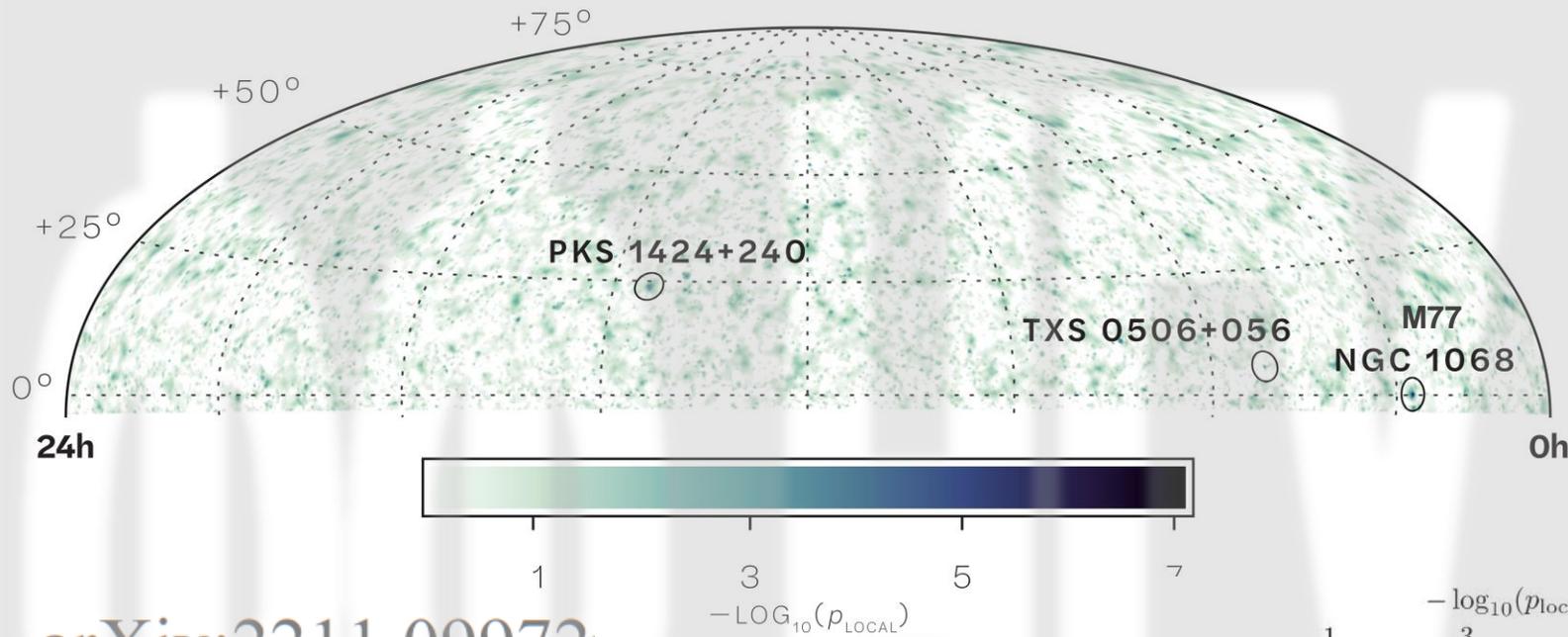
DOMs are 17 meters apart

δ [°] ICRS (epoch=J2000)



α [°] ICRS (epoch=J2000)

Нейтринная обсерватория: IceCube

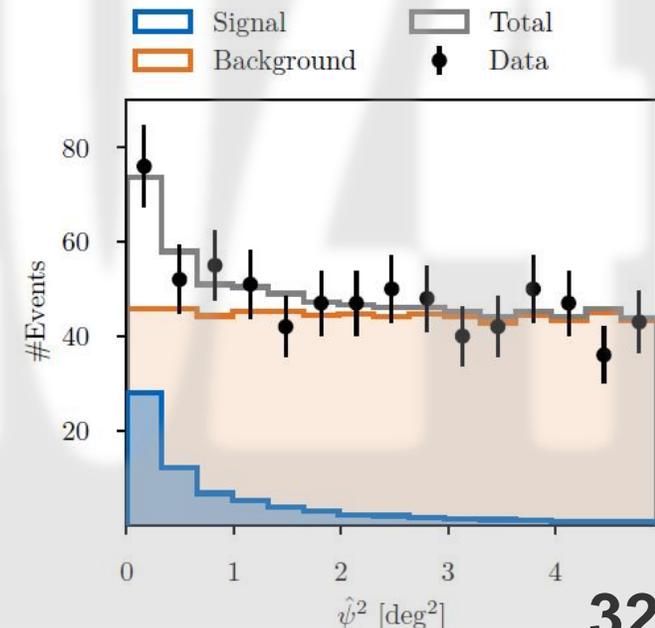
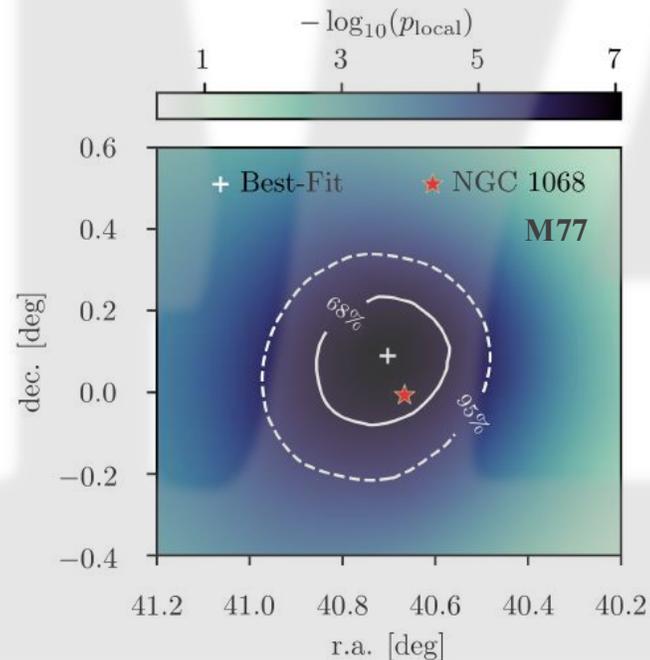


Карта распределения нейтринных событий для северной части неба. Кружками отмечены три наиболее «яркие» кандидата в точечные источники.

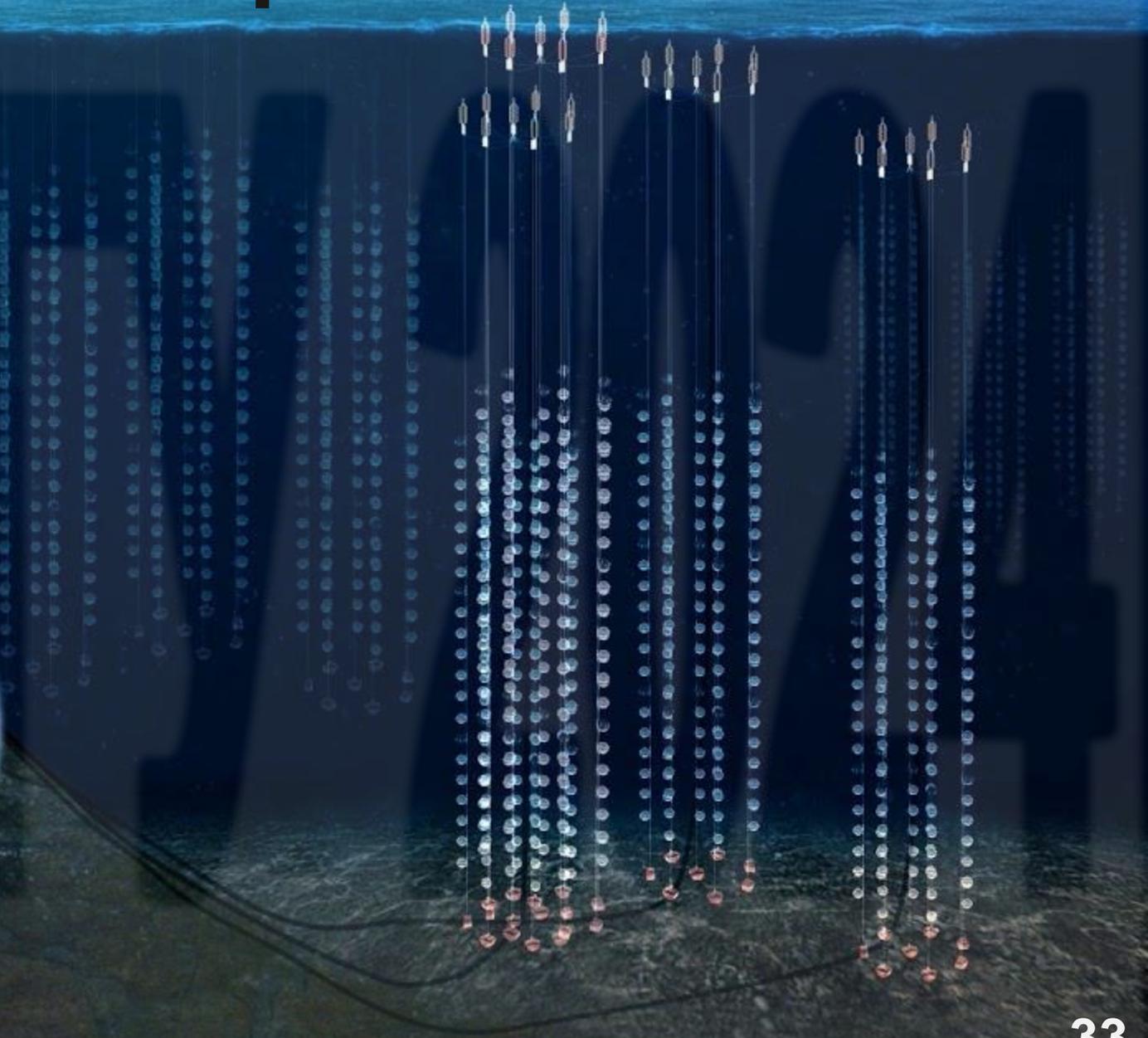
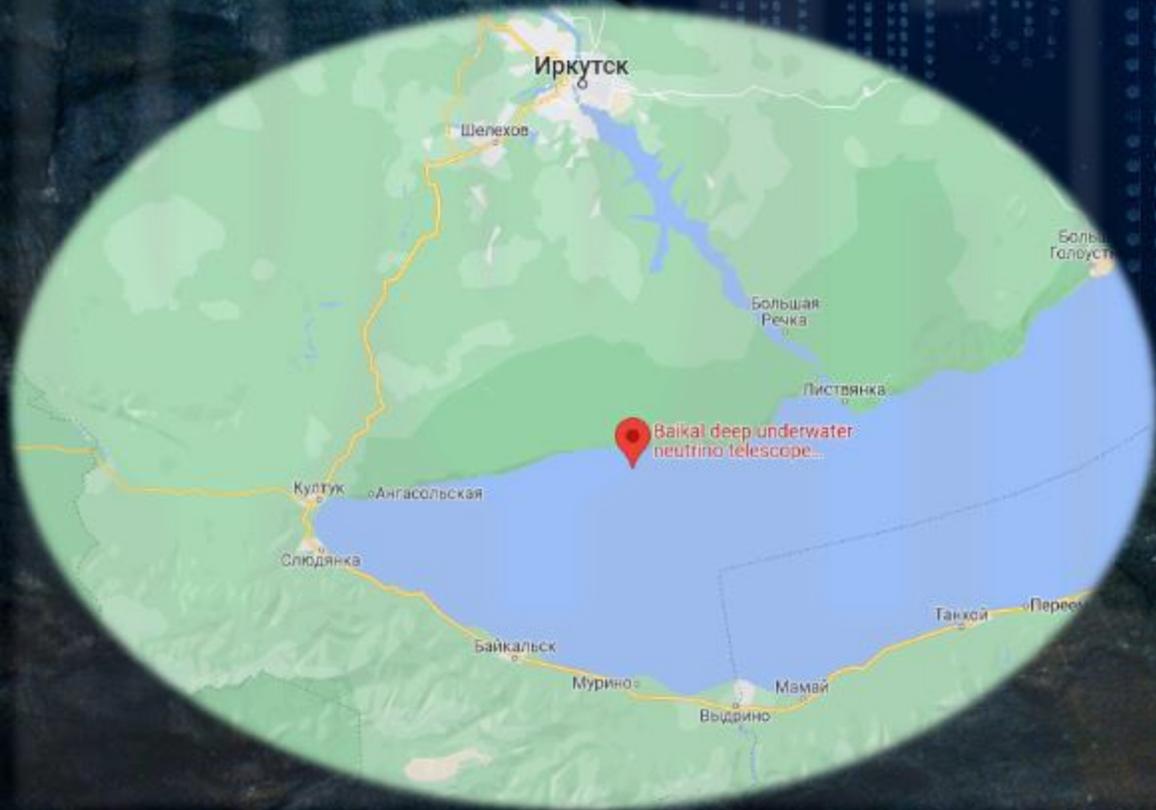
arXiv:2211.09972

Область неба вокруг наиболее «яркого» источника (отмеченного крестиком) вблизи галактики NGC1068 (отмечена звездой).

Справа показано распределение по углу между направлением на NGC1068 и восстановленное направление нейтринных событий.



Нейтринная обсерватория БАИКАЛ-GVD



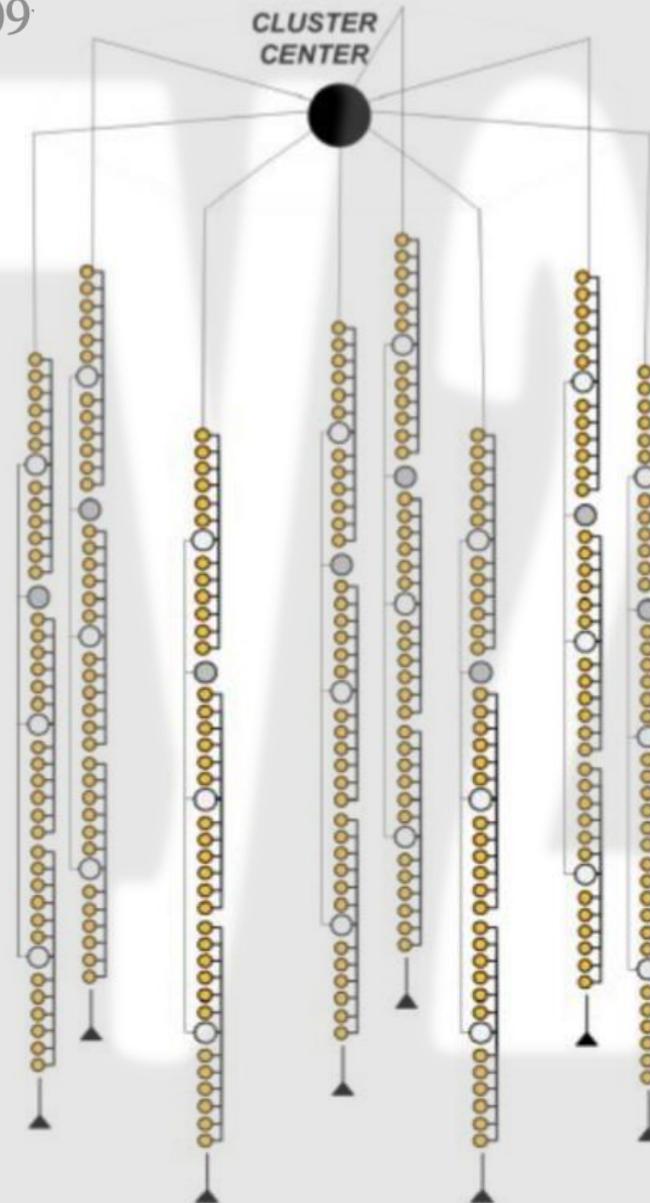
Нейтринная обсерватория BAIKAL-GVD



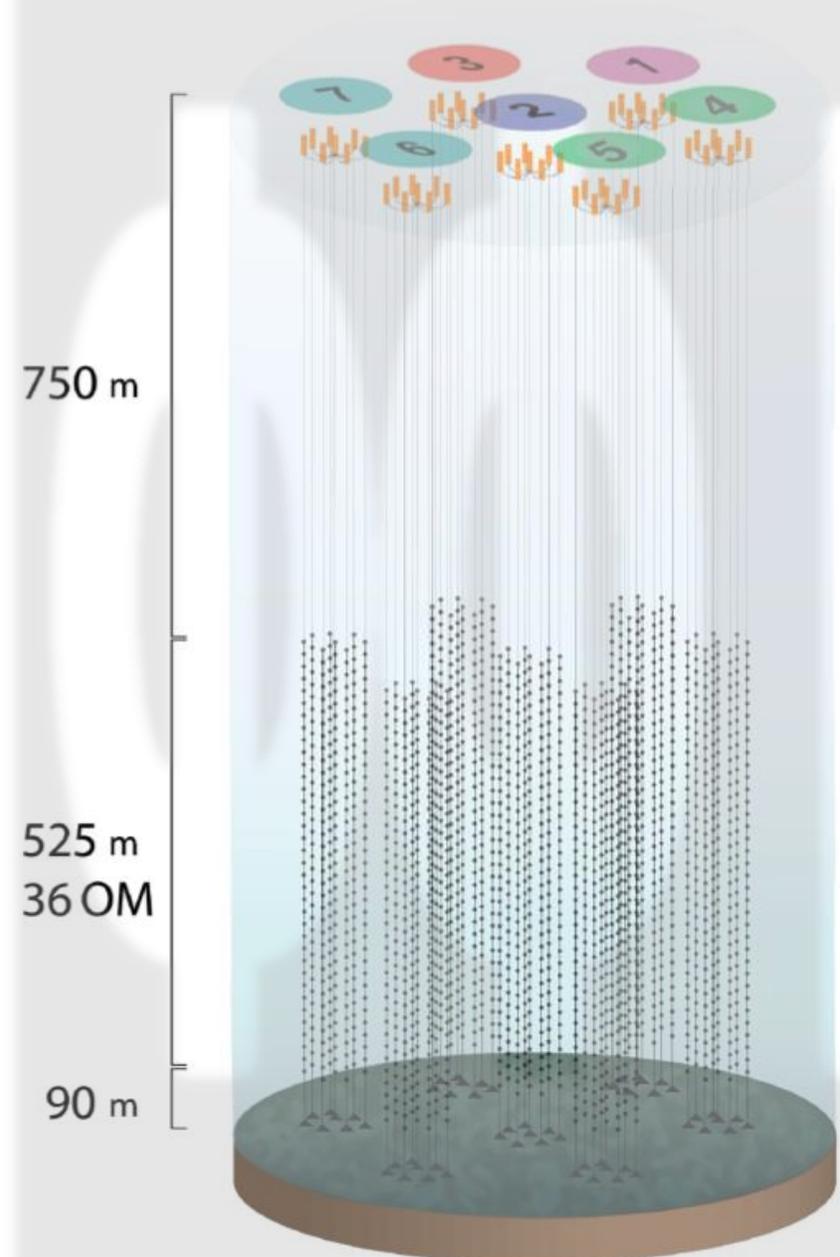
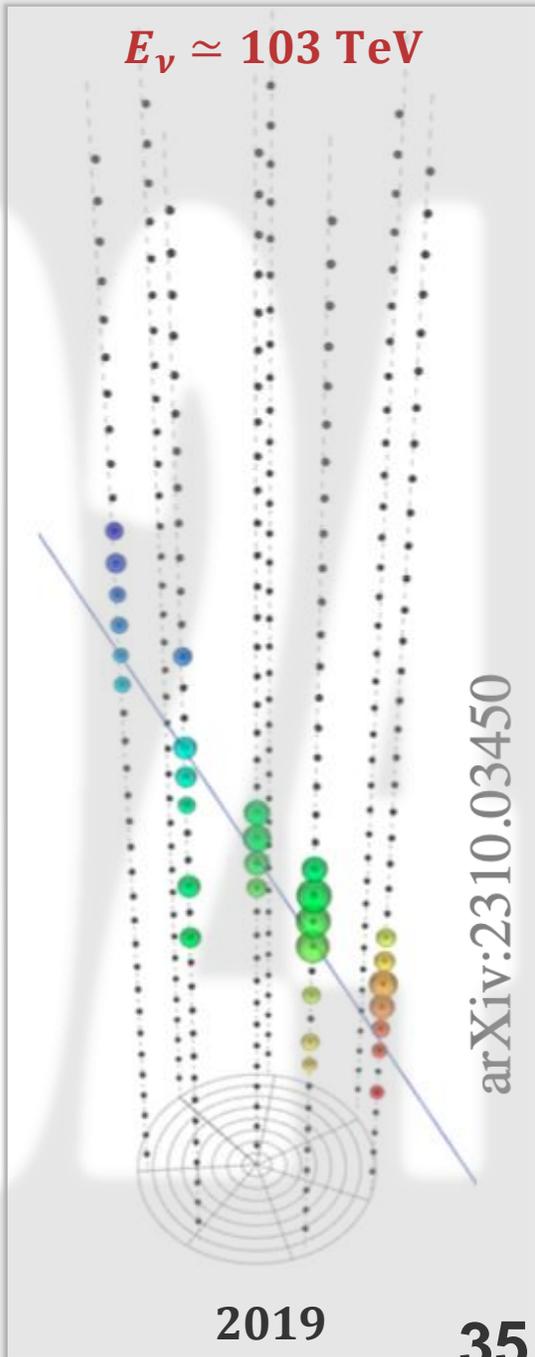
Нейтринная обсерватория BAIKAL-GVD

arXiv:2011.09209

- 1 - 2016
- 2 - 2017
- 3 - 2018
- 4,5 - 2019
- 6,7 - 2020



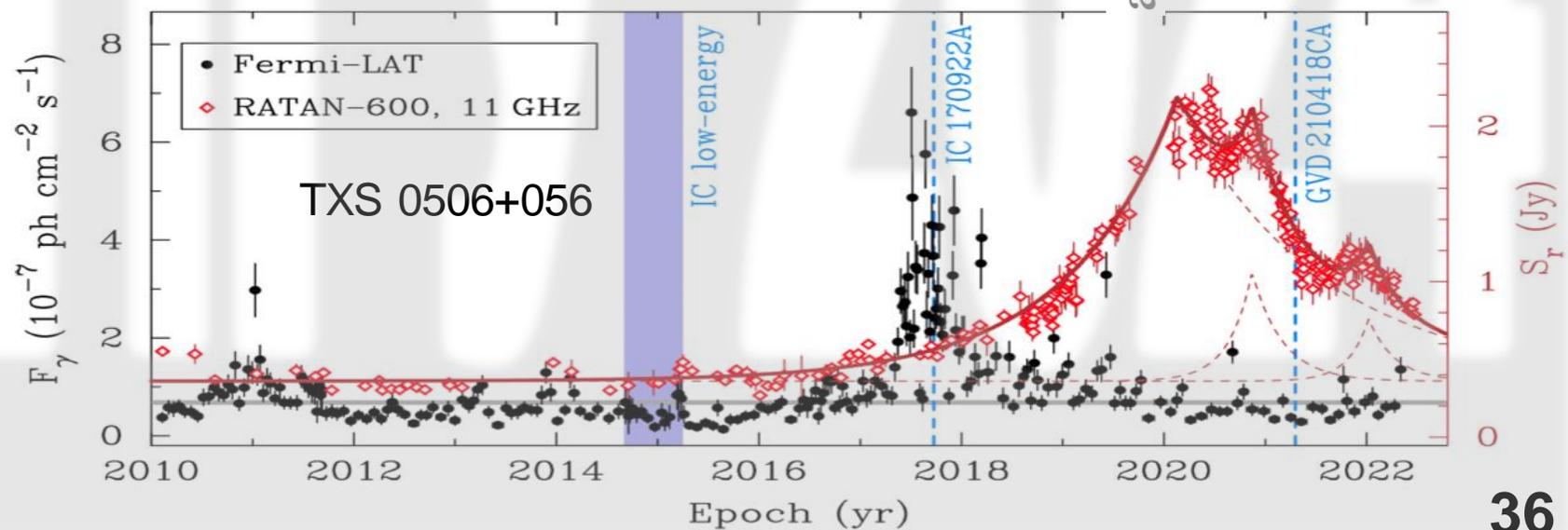
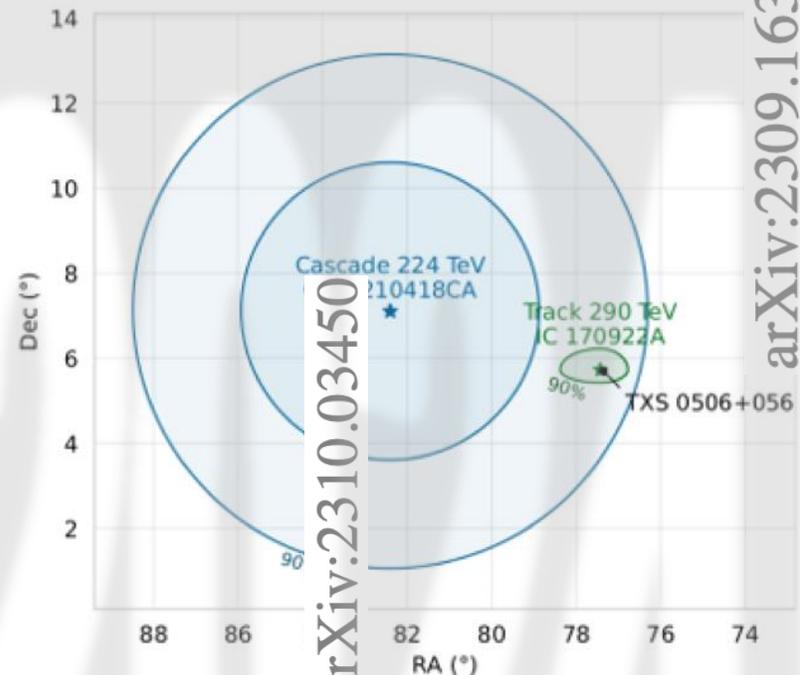
$E_\nu \approx 103 \text{ TeV}$



Нейтринная обсерватория БАИКАЛ-GVD

Первые результаты:

Экваториальные координаты блазара TXS 0506+056, событие IC-170922A IceCube (290 TeV), и событие Baikal-GVD с энергией (224 TeV) GVD-210418CA.



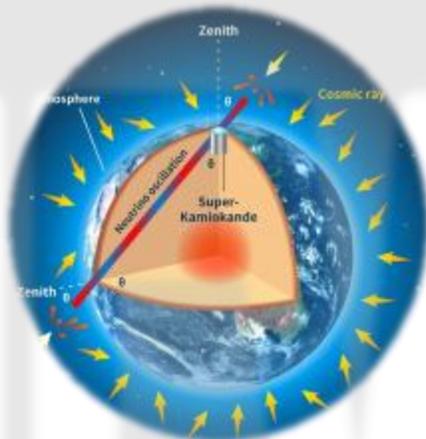
$\theta \approx 126^\circ$

2019

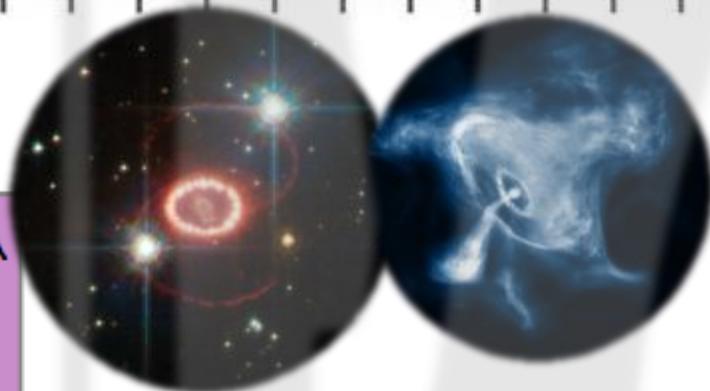
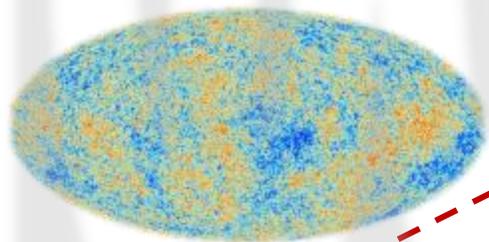
36

arXiv:2309.16310

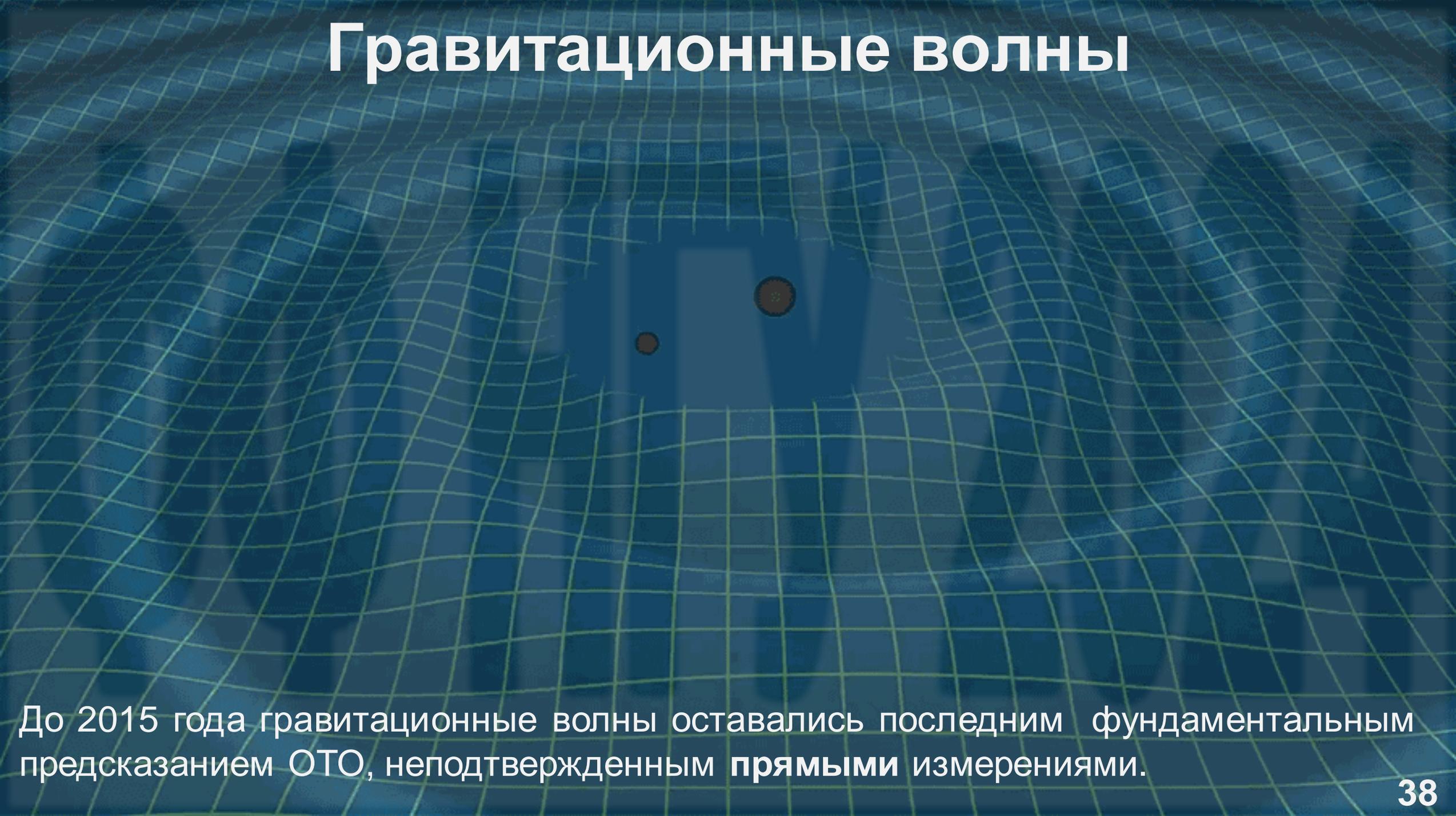
Источники и детекторы нейтрино



10^{-6} 10^{-3} 1 10^3 10^6 10^9 10^{12} 10^{15} 10^{18} 10^{21} 10^{24} 10^{27} eV



Гравитационные волны



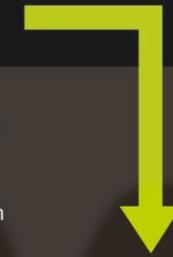
До 2015 года гравитационные волны оставались последним фундаментальным предсказанием ОТО, неподтвержденным **прямыми** измерениями.

GRAVITATIONAL WAVES: TIMELINE TO DISCOVERY



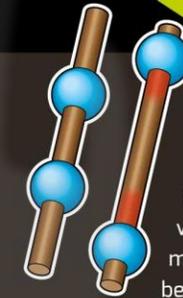
1916 ▶

Albert Einstein first proposes the existence of gravitational waves as part of his general theory of relativity. Many researchers doubt that they exist at all, believing them to be a mathematical quirk.



1962

Russian scientists ME Gertsenshtein and VI Pustovoi published a paper proposing 'interferometers' as a way to detect gravitational waves.



← 1957

Physicists Felix Pirani, Hermann Bondi, and Richard Feynman predict that gravitational waves might be detected by a 'sticky bead argument'. The idea being that if a gravitational wave passed through a stick with a bead on it, it would cause the bead to move back and forth and heat up both the bead and stick with the friction generated.

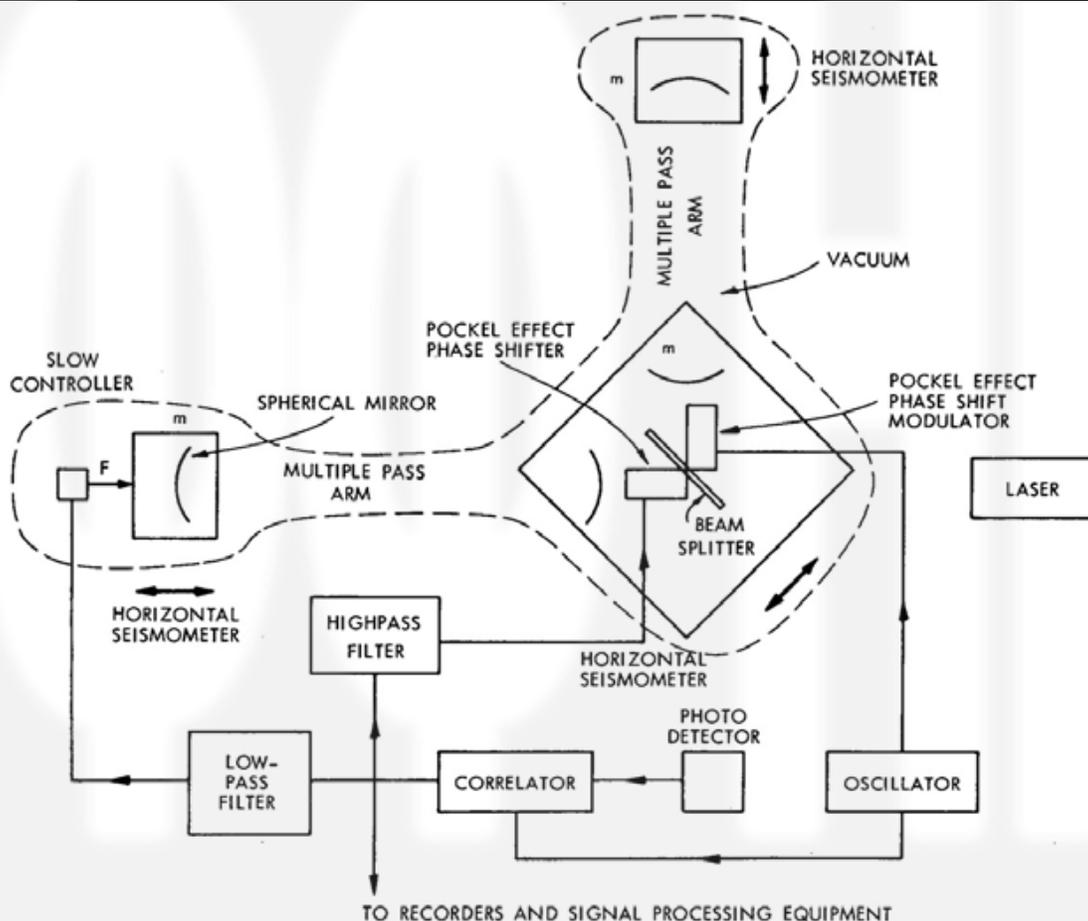


Fig. V-20. Proposed antenna.

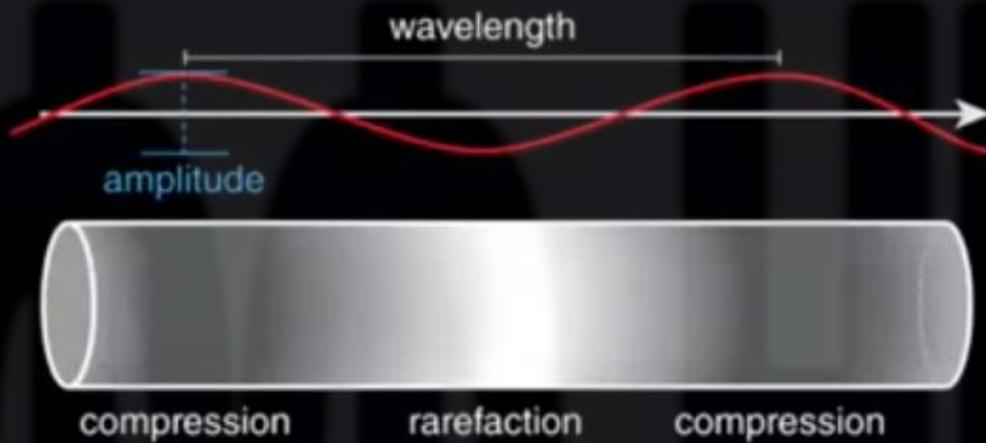
В 1962 г. советские физики В.И. Пустовойт и М.Е. Герценштейн впервые предложили идею регистрации гравитационных волн на основе оптического интерферометра типа Майкельсона.

Первая оценка чувствительности

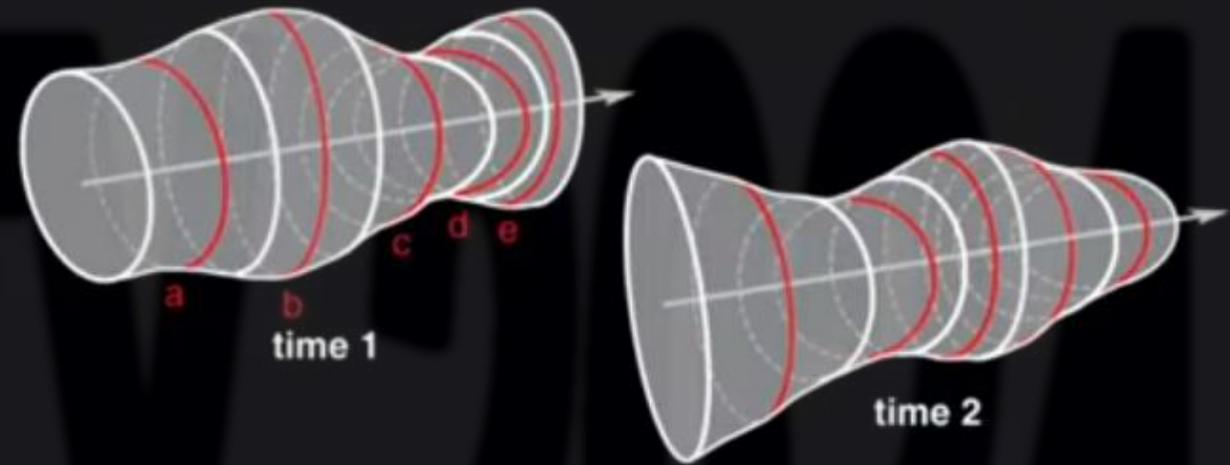
$$\Delta l/l \approx 10^{-14} \dots 10^{-17}$$

The Family of Wave Forms

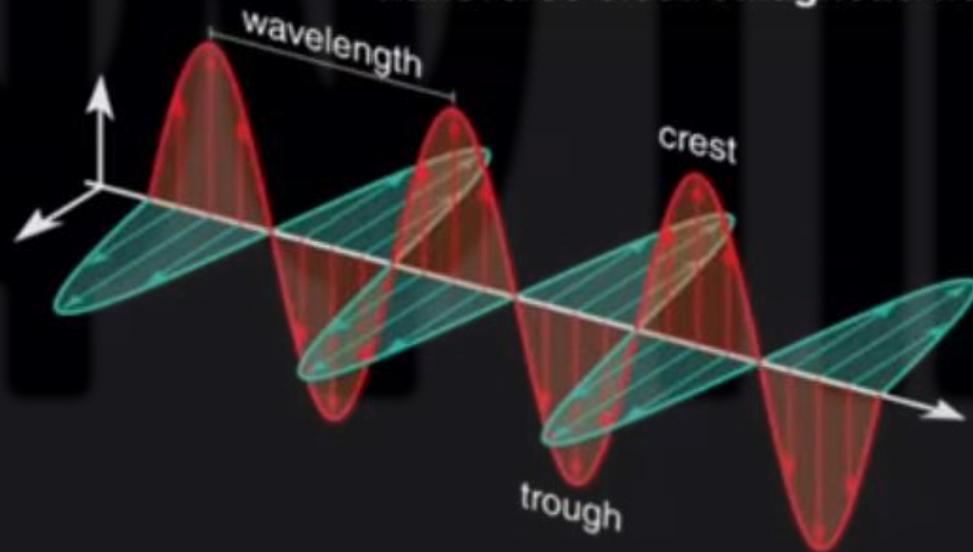
longitudinal pressure wave



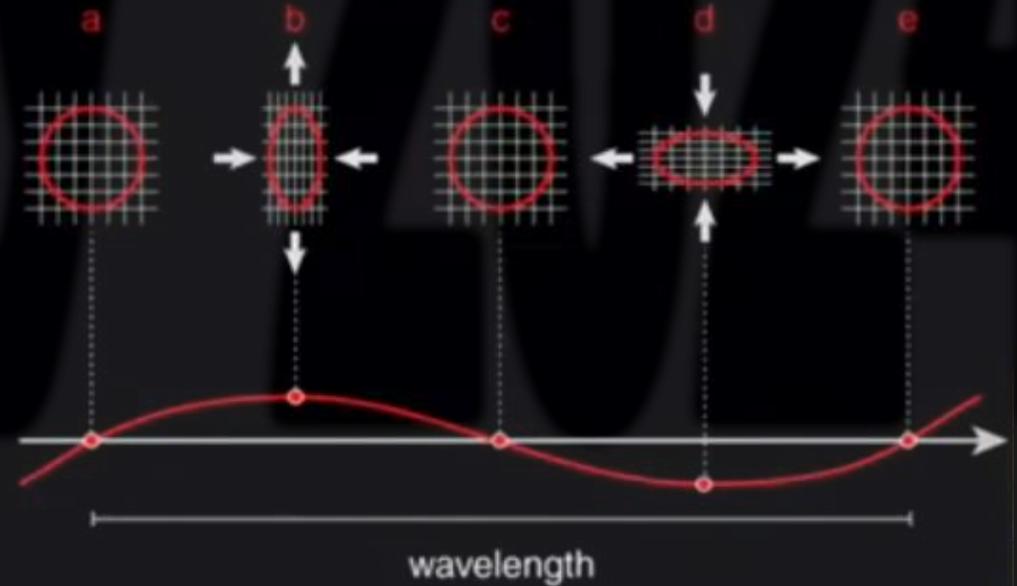
transverse gravitational wave

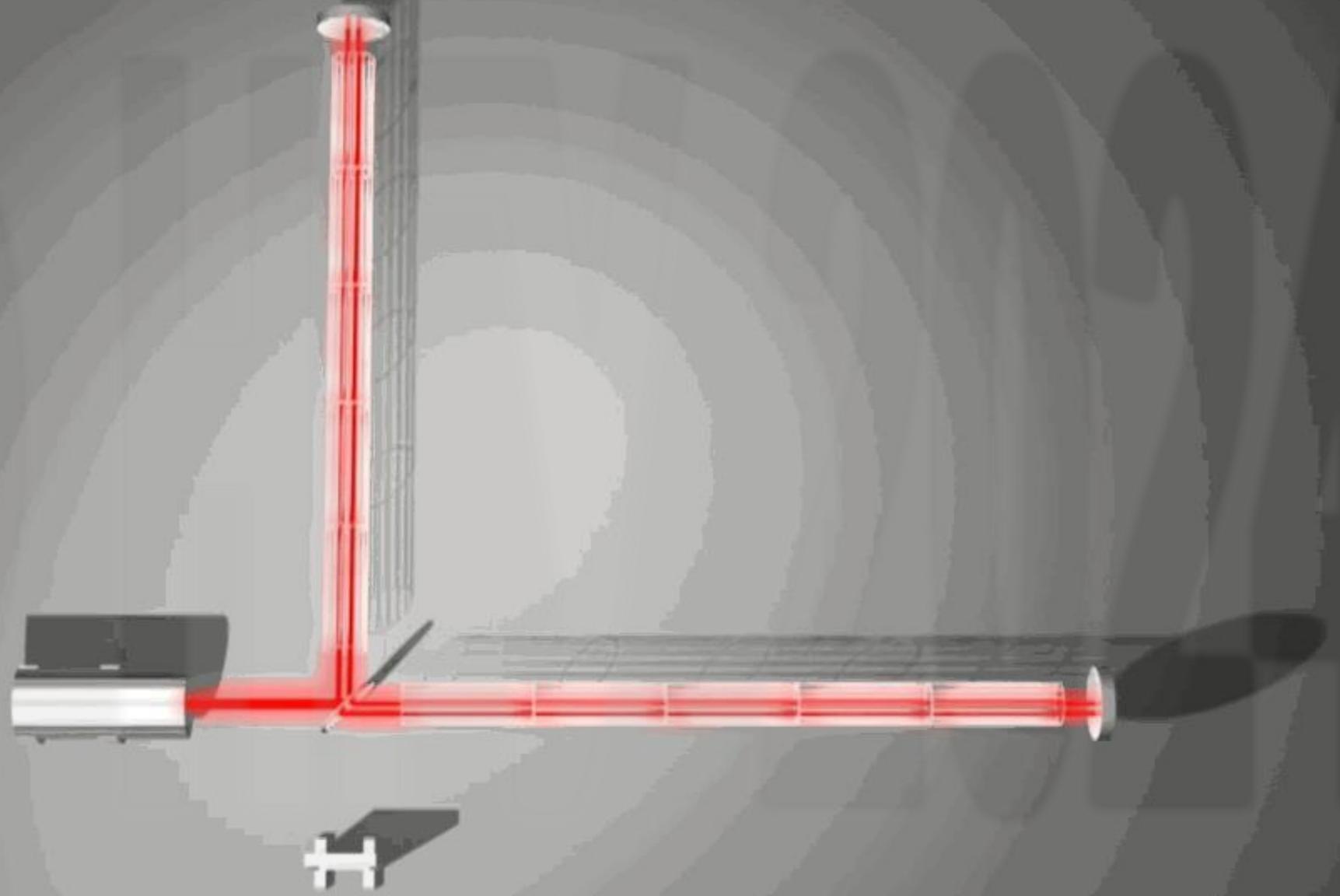


transverse electromagnetic wave



wave cross-sections (rotated)





GRAVITATIONAL WAVES: TIMELINE TO DISCOVERY

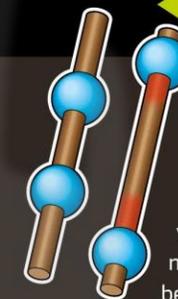


1916 ▶

Albert Einstein first proposes the existence of gravitational waves as part of his general theory of relativity. Many researchers doubt that they exist at all, believing them to be a mathematical quirk.



1957



Physicists Felix Pirani, Hermann Bondi, and Richard Feynman predict that gravitational waves might be detected by a 'sticky bead argument'. The idea being that if a gravitational wave passed through a stick with a bead on it, it would cause the bead to move back and forth and heat up both the bead and stick with the friction generated.

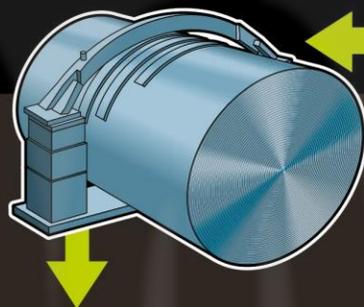
1962

Russian scientists ME Gertsenshtein and VI Pustovoit published a paper proposing 'interferometers' as a way to detect gravitational waves.

1967

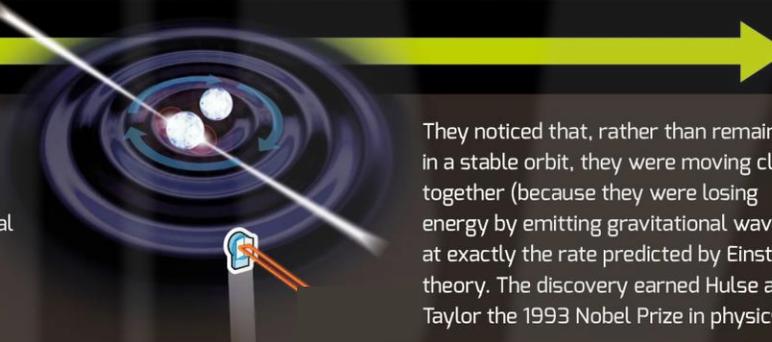
Rainer Weiss (one of LIGO's co-founders) proposes a method that would use laser beams to measure the stretching and squashing of space caused by a passing gravitational wave. They were working independently of ME Gertsenshtein and VI Pustovoit, who proposed something similar in 1962.

1969



Joseph Weber claims to have detected gravitational waves using a device called a resonant bar detector, but no one can replicate his results.

1978



They noticed that, rather than remaining in a stable orbit, they were moving closer together (because they were losing energy by emitting gravitational waves) at exactly the rate predicted by Einstein's theory. The discovery earned Hulse and Taylor the 1993 Nobel Prize in physics.

Russell Hulse and Joseph Taylor provide the first experimental evidence for the existence of gravitational waves by observing two neutron stars orbiting each other (a binary system).

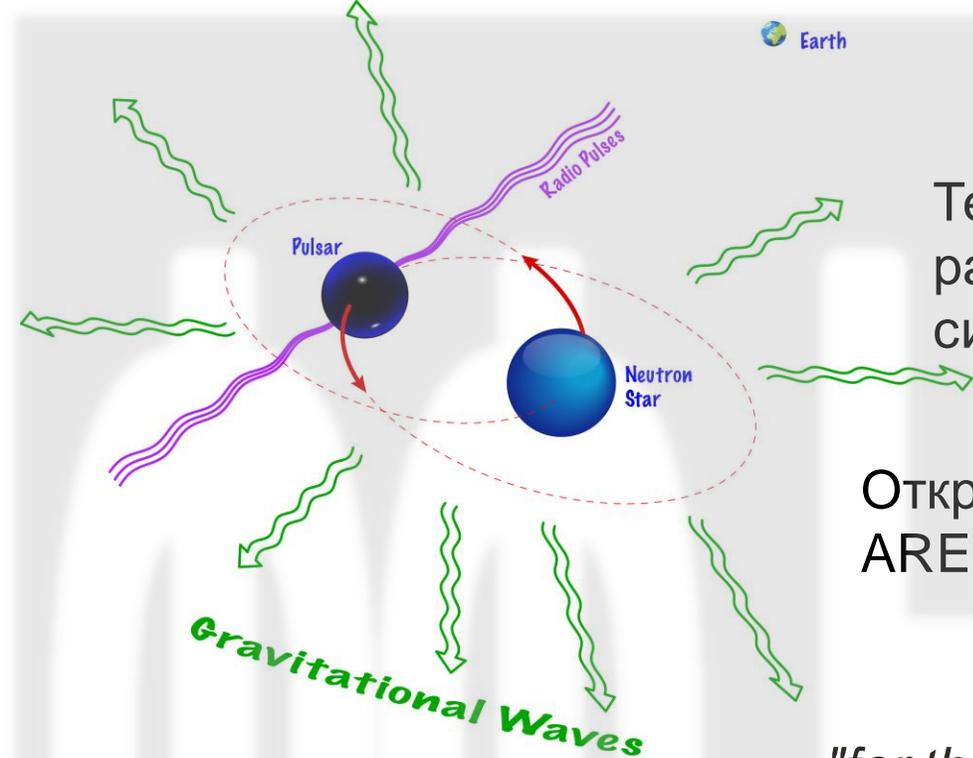
1974 ▶

Rainer Weiss meets physicist Kip Thorne and convinces Thorne that a laser-based instrument would give them the best chance of finding gravitational waves. They start working on the project that would become LIGO.

R. Hulse J. Taylor обнаружили первое указание на потерю энергии за счет излучения гравитационных волн в двойной системе нейтронных звезд.

Гравитационные волны

Тесная двойная система нейтронных звезд, одна из которых – радио-пульсар PSR 1913 + 16. Из-за быстрого вращения система теряет энергию на излучение гравитационных волн.



Открыт с радио телескопом Arecibo в 1974 году.

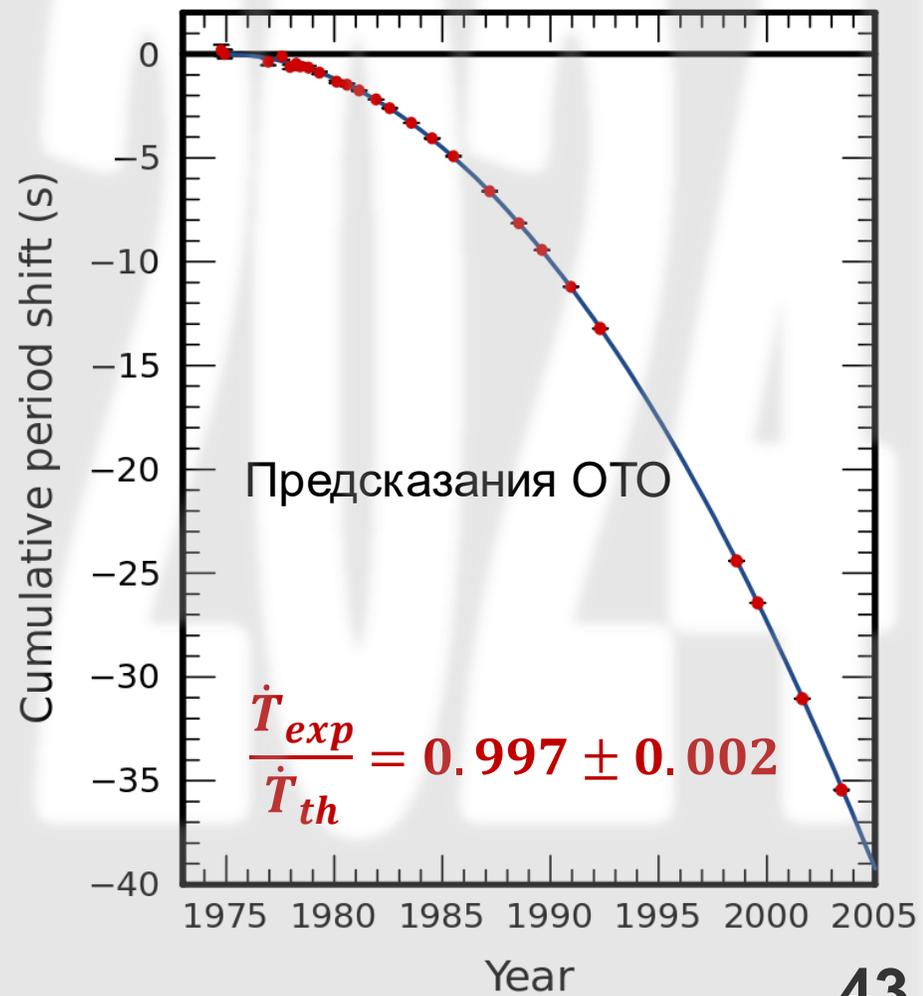
"for the discovery of a new type of pulsar, a discovery that has opened up new possibilities for the study of gravitation"



Photo from the Nobel Foundation archive.
Russell A. Hulse



Photo from the Nobel Foundation archive.
Joseph H. Taylor Jr.



GRAVITATIONAL WAVES: TIMELINE TO DISCOVERY

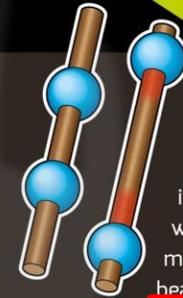


1916 ▶

Albert Einstein first proposes the existence of gravitational waves as part of his general theory of relativity. Many researchers doubt that they exist at all, believing them to be a mathematical quirk.



1957



Physicists Felix Pirani, Hermann Bondi, and Richard Feynman predict that gravitational waves might be detected by a 'sticky bead argument'. The idea being that if a gravitational wave passed through a stick with a bead on it, it would cause the bead to move back and forth and heat up both the head and stick with the friction generated.

Russian scientists ME Gertsenshtein and VI Pustovoit published a paper proposing 'interferometers' as a way to detect gravitational waves.

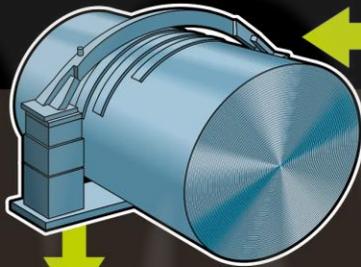
1962

Rainer Weiss (one of LIGO's co-founders) proposes a method that would use laser beams to measure the stretching and squashing of space caused by a passing gravitational wave. They were working independently of ME Gertsenshtein and VI Pustovoit, who proposed something similar in 1962.

1967

Joseph Weber claims to have detected gravitational waves using a device called a resonant bar detector, but no one can replicate his results.

1969



1974 ▶

Rainer Weiss meets physicist Kip Thorne and convinces Thorne that a laser-based instrument would give them the best chance of finding gravitational waves. They start working on the project that would become LIGO.

1978

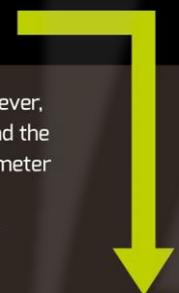
Russell Hulse and Joseph Taylor provide the first experimental evidence for the existence of gravitational waves by observing two neutron stars orbiting each other (a binary system).



They noticed that, rather than remaining in a stable orbit, they were moving closer together (because they were losing energy by emitting gravitational waves) at exactly the rate predicted by Einstein's theory. The discovery earned Hulse and Taylor the 1993 Nobel Prize in physics.

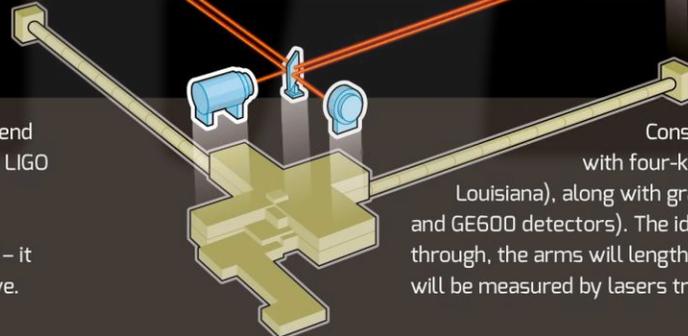
1984

Kip Thorne, Ronald Drever, and Rainer Weiss found the LIGO (Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory) Project.



1990s

Construction begins on LIGO – two L-shaped detectors with four-kilometre-long arms (one in Washington and one in Louisiana), along with gravitational wave detectors in Europe (the VIRGO and GEMO detectors). The idea being that, when a gravitational wave passes through, the arms will lengthen and shorten by a fraction – the precise shift will be measured by lasers travelling along the arms.



2001

LIGO begins operations. At the end of its run in 2010, as expected, LIGO had found no evidence of gravitational waves. LIGO had proved the technology worked – it just needed to be more sensitive.

2007

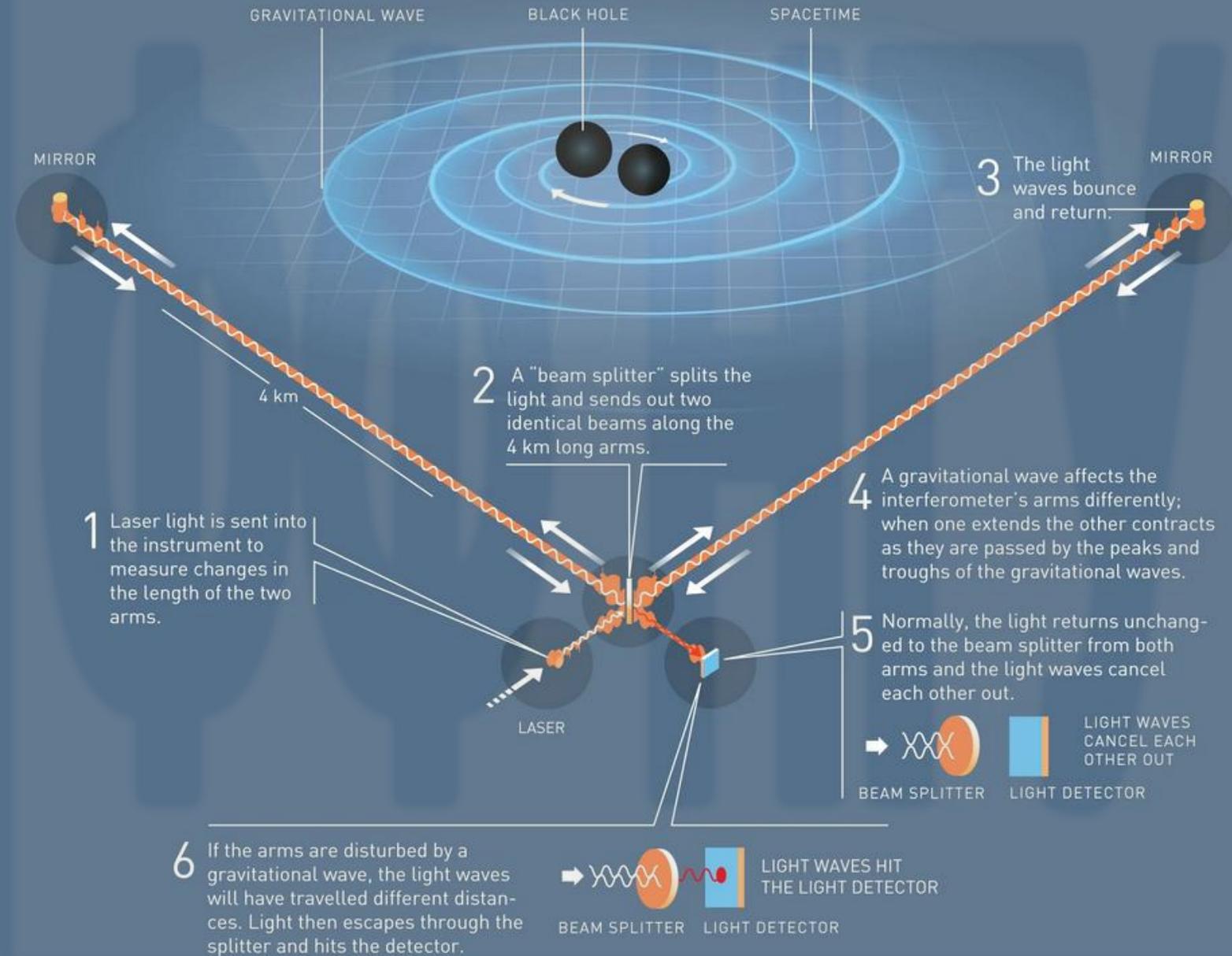
The VIRGO laser interferometer based in Italy, designed to detect gravitational waves begins operation.

NEXT PAGE



Детекторы LIGO

Чувствительность к относительному изменению длины плечей $\sim 10^{-22}$!



2010 → **2011** ▶ **2015**

LIGO begins upgrades to become Advanced LIGO. This new facility will be ten times more sensitive than the old one, and includes technology from the UK-German GEO600 detector and from Australia.

VIRGO upgrade commences that will eventually improve the sensitivity by a factor of ten.

In September, Advanced LIGO begins its first engineering and test run. Although only operating at less than half its final sensitivity, it detects its first gravitational wave event on September 14.

К 2015 году был завершен очередной этап модернизации детекторов LIGO в результате чего чувствительность повысилась в 10 раз и приблизилась к пороговому уровню регистрации.

В сентябре 2015 года начался двухнедельный сеанс работы в тестовом режиме для настройки оборудования и программного обеспечения.

Для тестирования алгоритмов поиска сигнала, в поток реальных данных случайным образом подмешивался смоделированный сигнал, поэтому никто не удивлялся, что время от времени система сообщала о найденных «сигналах». О том, в какие моменты, и какие сигналы подмешивались в данные знало только два человека...

2010



LIGO begins upgrades to become Advanced LIGO. This new facility will be ten times more sensitive than the old one, and includes technology from the UK-German GEO600 detector and from Australia.

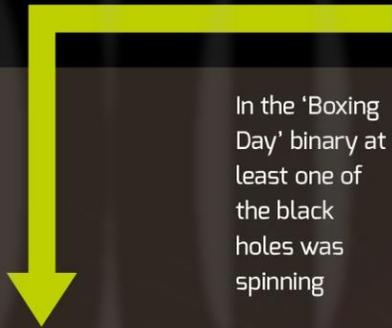
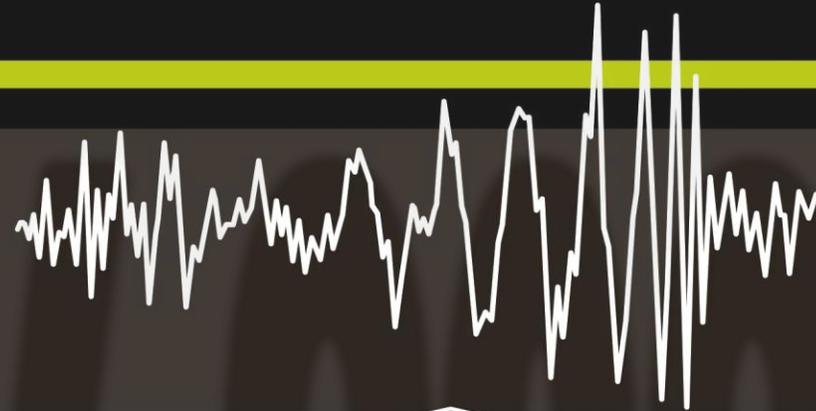
2011



VIRGO upgrade commences that will eventually improve the sensitivity by a factor of ten.

2015

In September, Advanced LIGO begins its first engineering and test run. Although only operating at less than half its final sensitivity, it detects its first gravitational wave event on September 14.



In the 'Boxing Day' binary at least one of the black holes was spinning



2015

On December 26, Advanced LIGO makes a second observation of gravitational waves. This time from two black holes, 14 and 8 times the mass of the Sun, merging into a more massive spinning single black hole 21 times the mass of the Sun.



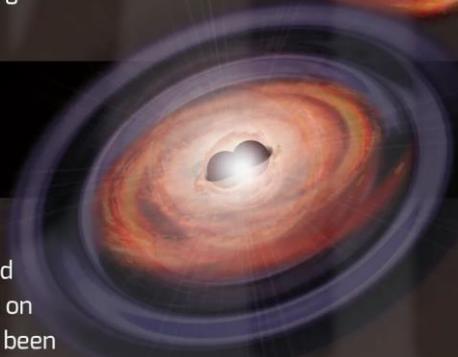
2015

LISA Pathfinder is launched – a test bed mission for the first space-based gravitational wave detector. LISA Pathfinder will test technology for the planned LISA (Laser Interferometer Space Antenna) mission.

2016



In February, the LIGO Scientific Collaboration announce that they had indeed detected gravitational waves on September 14, 2015. The waves had been created by two black holes, spiralling in toward each other and merging into a single black hole.



2016

On June 15, the Boxing Day event is announced. This new observation indicates that there is a rich population of binary black holes in the Universe, whose properties are gradually starting to emerge. Gravitational-wave astronomy is no longer a field of single detections, but of regular observations. This discovery transforms the LIGO detector into a true astronomical observatory.



THE FUTURE

Following Advanced LIGO going on-line in 2017, a third LIGO detector is due for completion in India in 2024. In the 2030s more sensitive ground-based detectors are foreseen, and LISA will be launched. LISA will extend our capabilities to 'listen' to new kinds of dark phenomena in the Universe.

GW150914 10:50 GMT

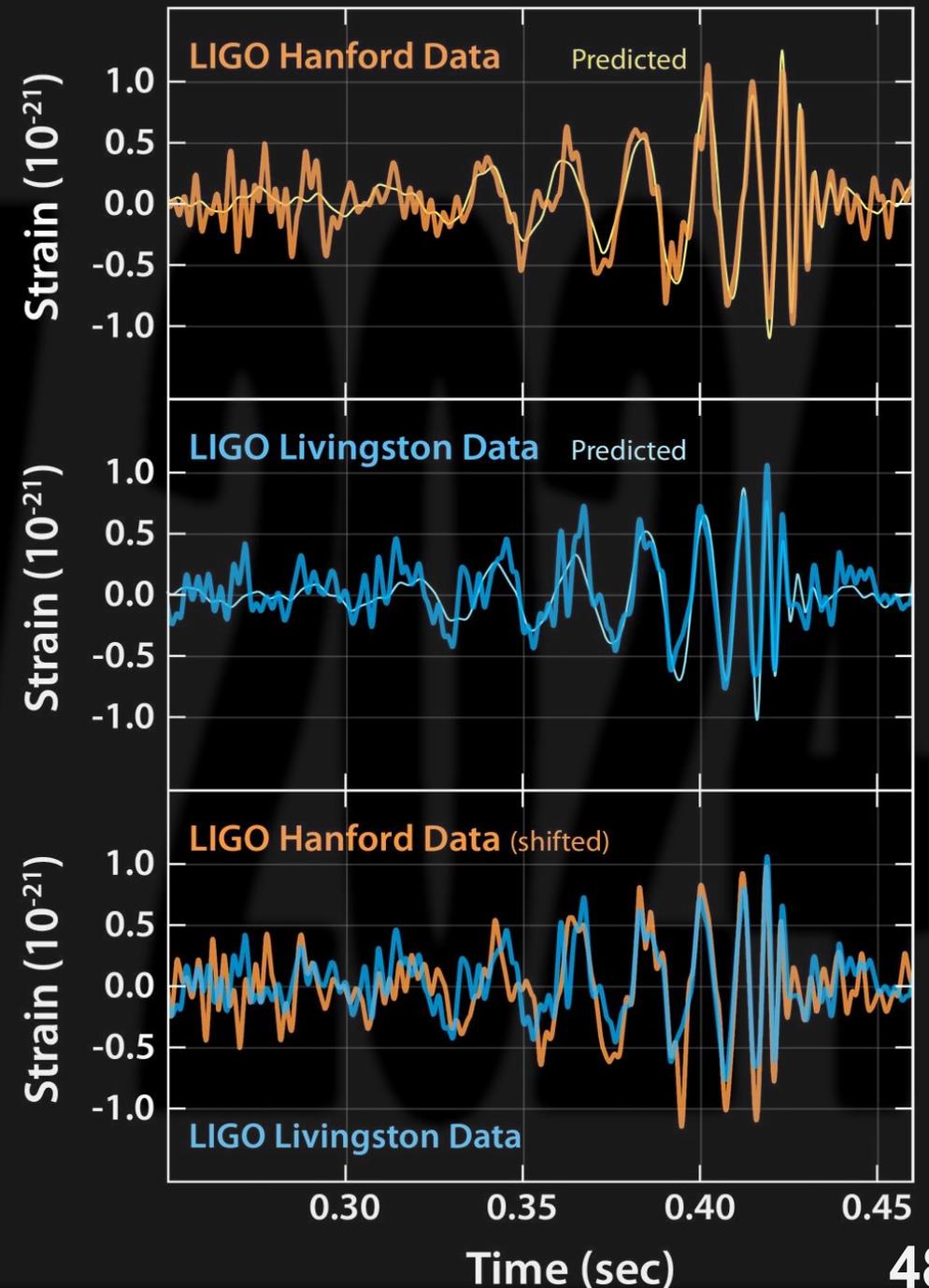
Первое надежно зарегистрированное событие гравитационных волн!

Зарегистрировано 10 импульсов от последних пяти оборотов

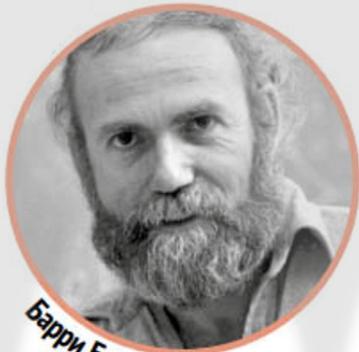
Слияние двух черных дыр с начальными массами 29 и 36 солнечных масс, на расстоянии 400 Мпк от нас.

В результате образовалась черная дыра массой 62 солнечных масс. Энергия, эквивалентная трем солнечным массам, излучилась в виде гравитационных волн за 0.2 секунды!!!

В это время светимость системы в ГВ была больше светимости нашей галактики в ЭМ в 5×10^{11} раз!



Гравитационные волны

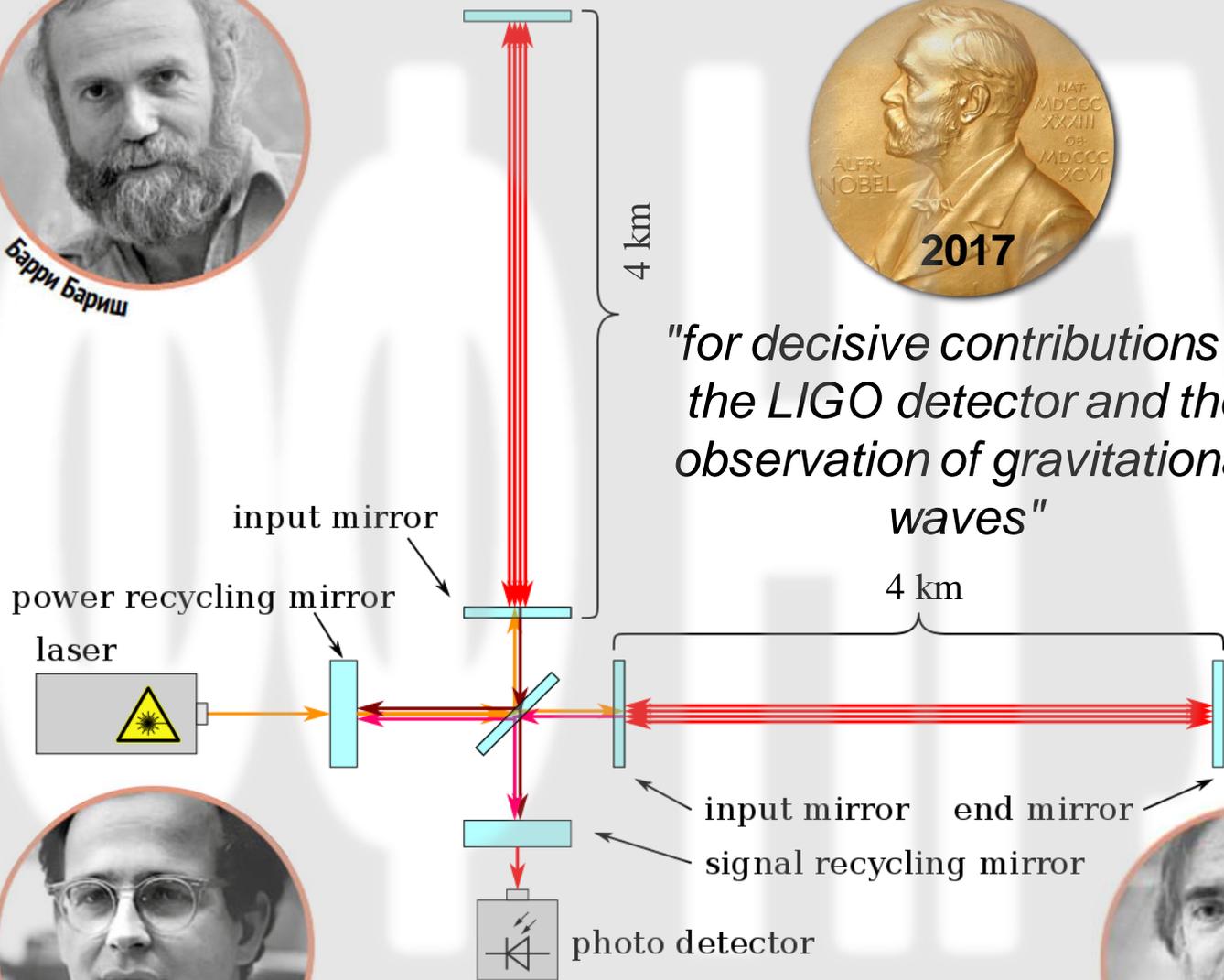


Барри Барिश

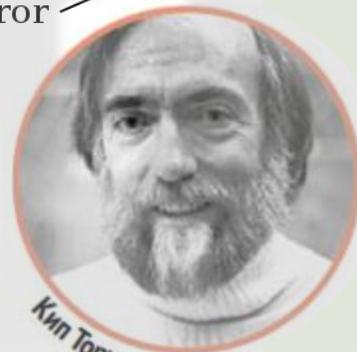


2017

"for decisive contributions to the LIGO detector and the observation of gravitational waves"



Райнер Вайс



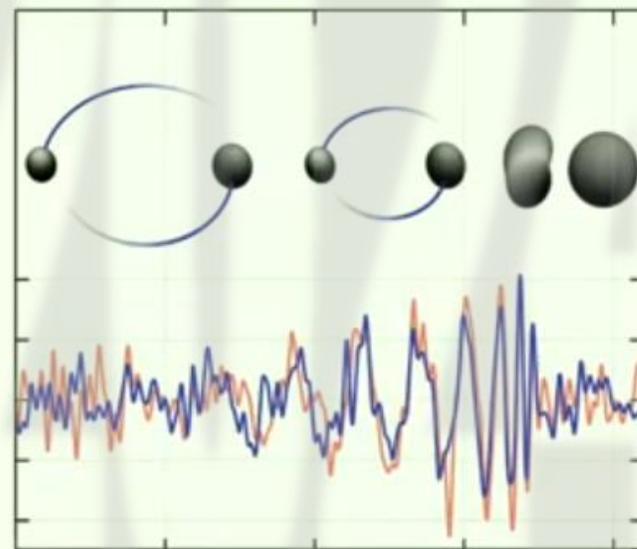
Кип Торн

PHYSICAL
REVIEW
LETTERS

Member Subscription Code:
Library or Other Institutional Use Prohibited Until 2017

Articles published week ending

12 FEBRUARY 2016

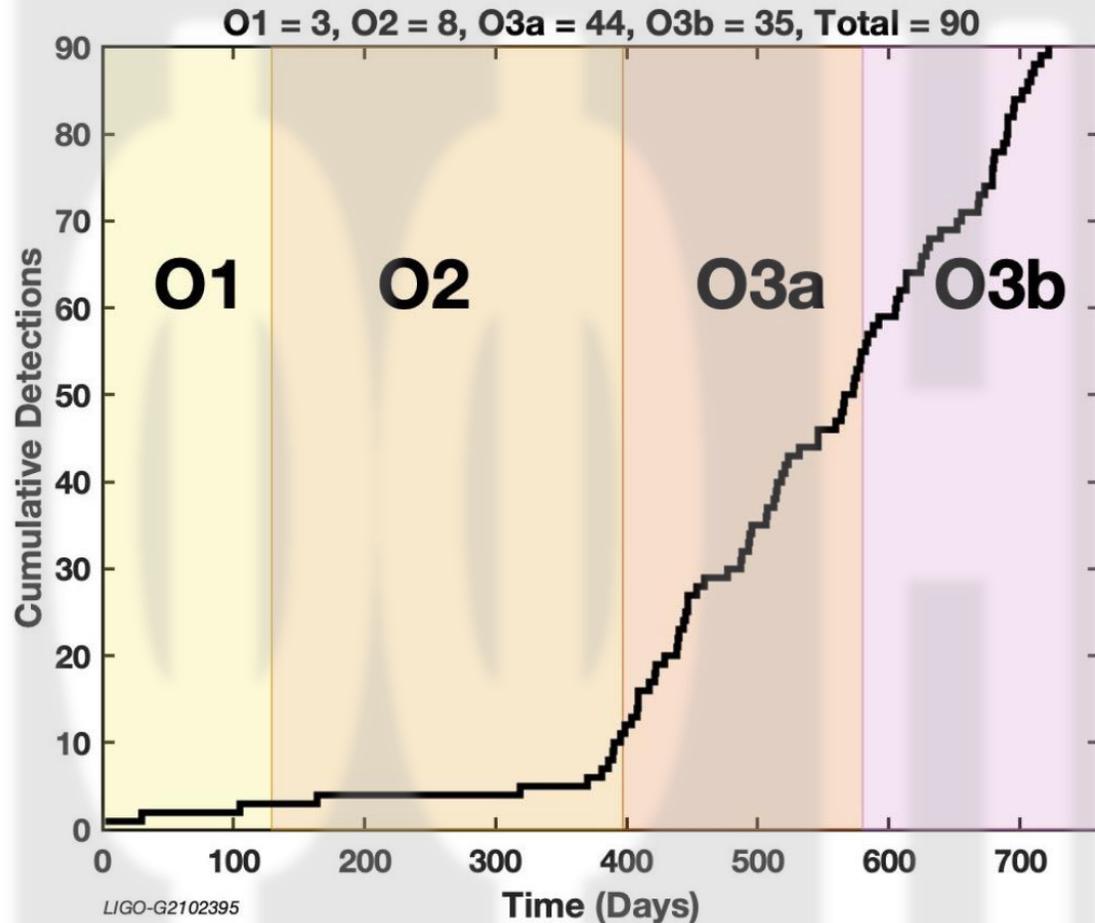


Published by
American Physical Society

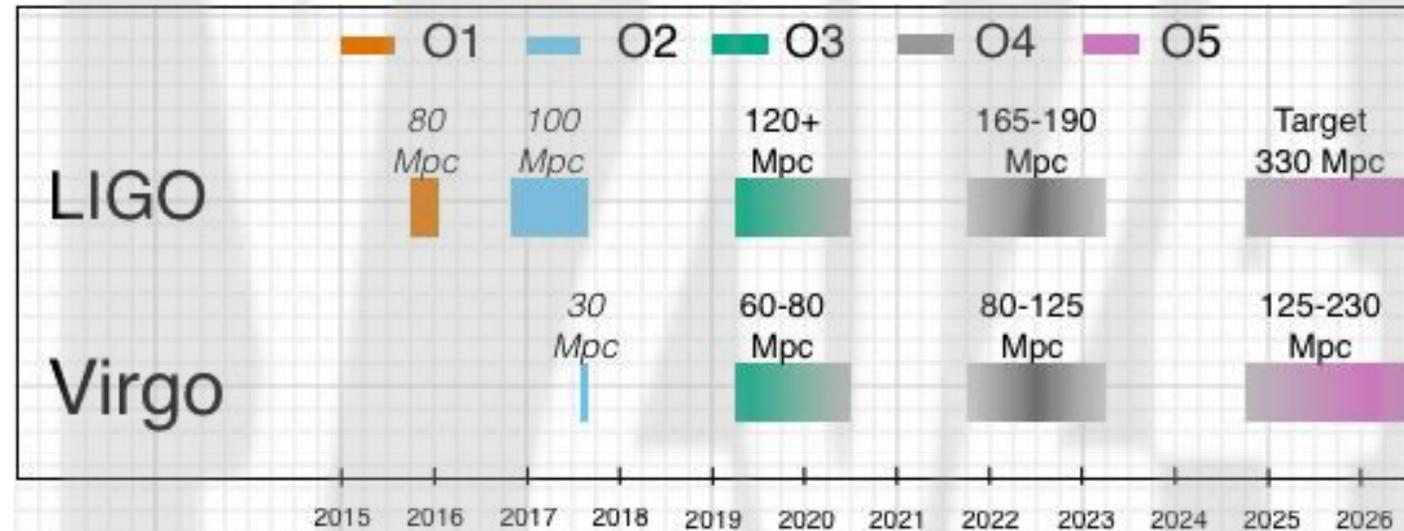
APS
physics

Volume 116, Number 6

Гравитационные волны



С повышением чувствительности установок LIGO и Virgo (аналогичный детектор в Италии), интенсивность наблюдения событий слияния компактных объектов растет.



В ближайшие несколько лет планируется очередная модернизация (повышение чувствительности) детекторов LIGO и VIRGO, а также расширение сети приемников.

Operational
Under Construction
Planned

LIGO Hanford

LIGO Livingston

GEO600

VIRGO

LIGO India

KAGRA

Gravitational Wave Observatories

Сверхдлинные гравитационные волны



По современным оценкам, в центре большинства массивных галактик находятся сверхмассивные черные дыры. При слиянии галактик центральные сверхмассивные ЧД могут образовывать двойные системы с большим периодом обращения, в результате чего система излучает гравитационные волны в низкочастотном диапазоне ($\sim 10^{-9}$ Гц).

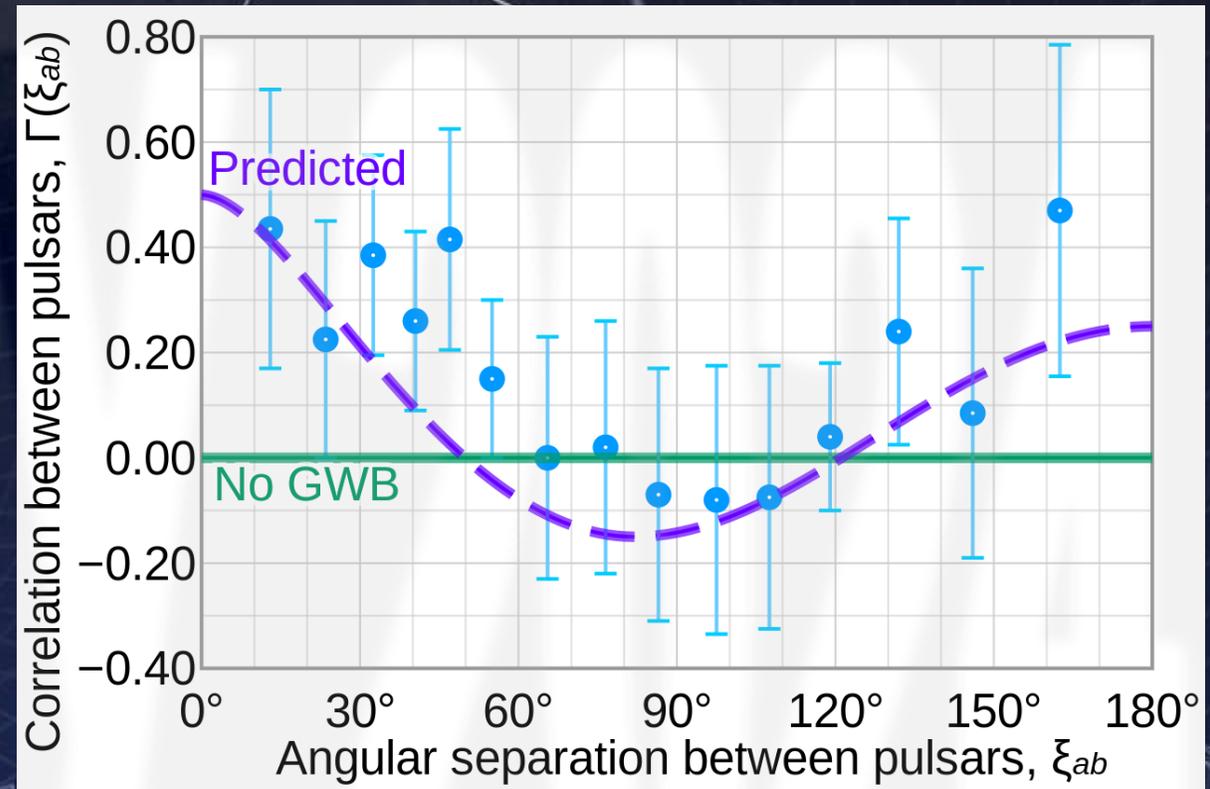
Для регистрации таких гравитационных волн был предложен метод пульсарного тайминга – долговременное отслеживание корреляций в вариациях времени прихода сигналов от системы большого числа радио-пульсаров.

Сверхдлинные гравитационные волны

В 2020 году, после 12 лет измерений с использованием 67 пульсаров, эксперимент NANOGrav анонсировал первое указание на наблюдение сигнала от сверхдлинных гравитационных волн.

К 2023 году уже четыре PTA эксперимента сообщили о своих результатах.

Достигнутая точность еще не позволяет с надежностью утверждать о наблюдении, скорее является демонстрацией применимости данной методики.



Einstein-Telescope

ET
EINSTEIN
TELESCOPE

10 km arm length

Equilateral triangle

200m – 300 m underground

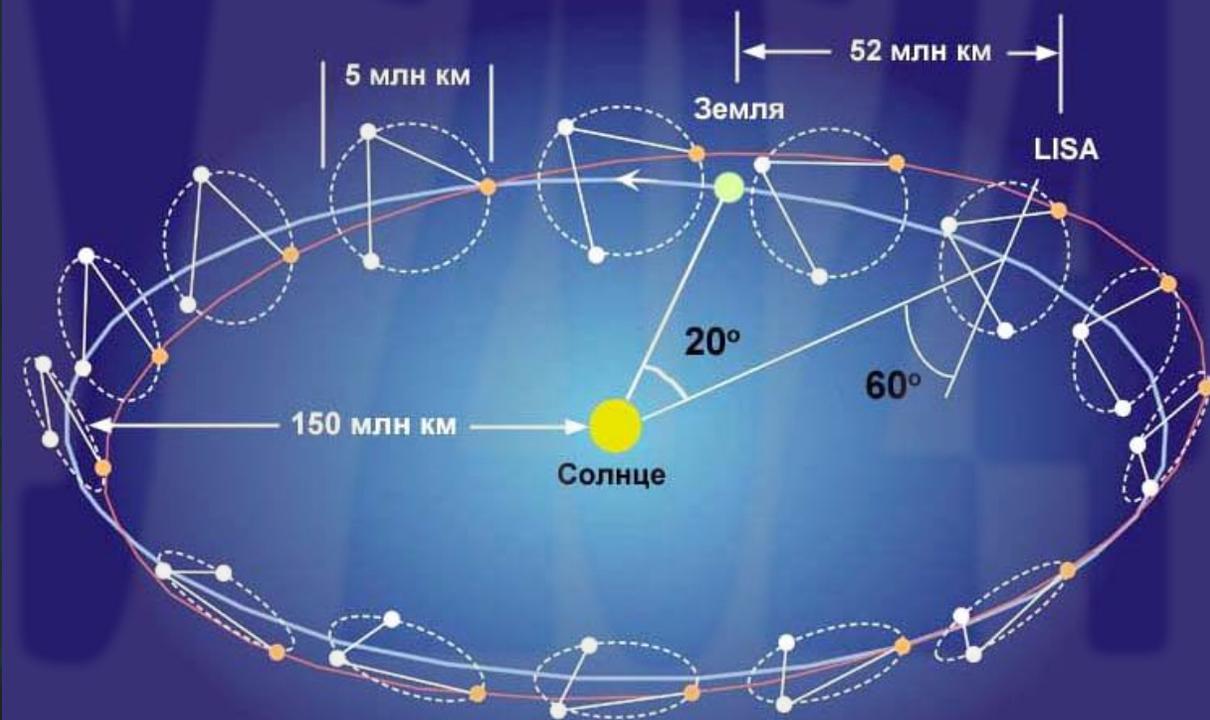
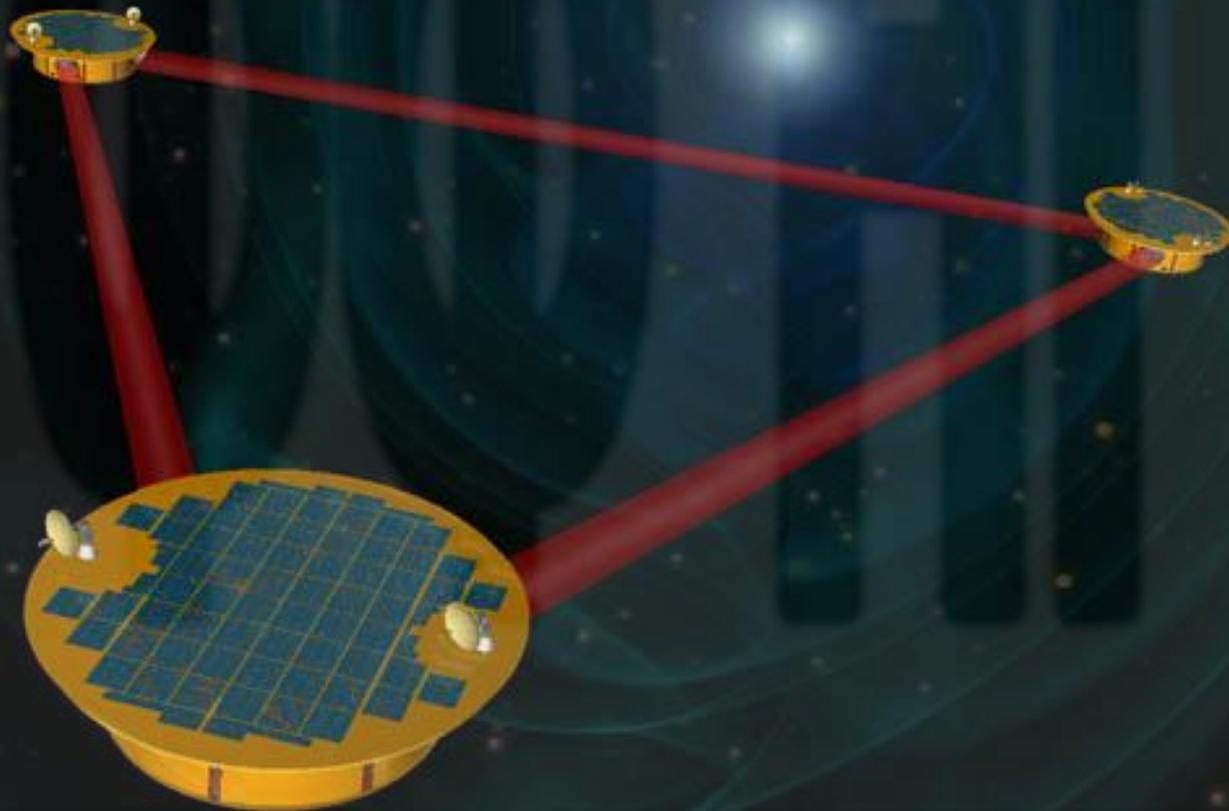
Three detectors / 2 interferometers each

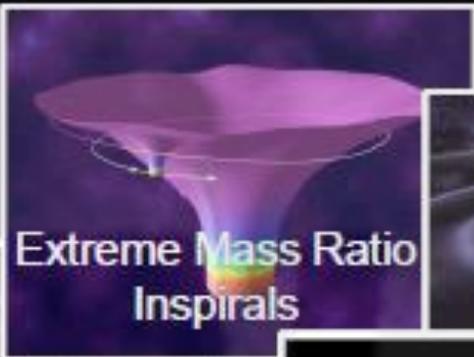
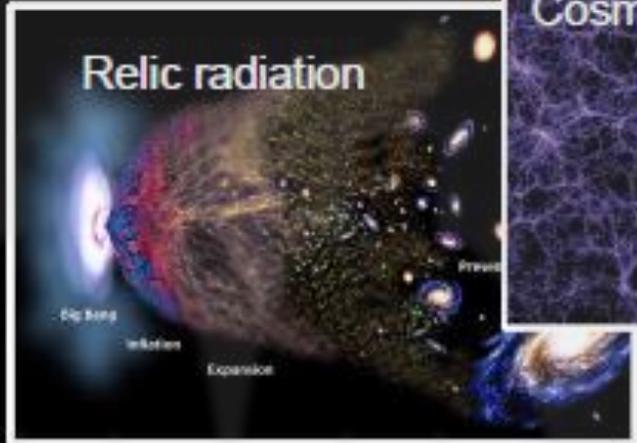
Laser Interferometer Space Antenna

Совместный проект NASA и ESA с 2011 года.

В 2015 году NASA вышло из проекта.

Возможный срок реализации – 203X.



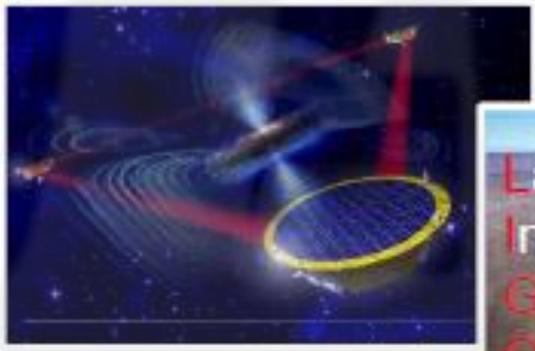


Inflation Probe

Pulsar timing

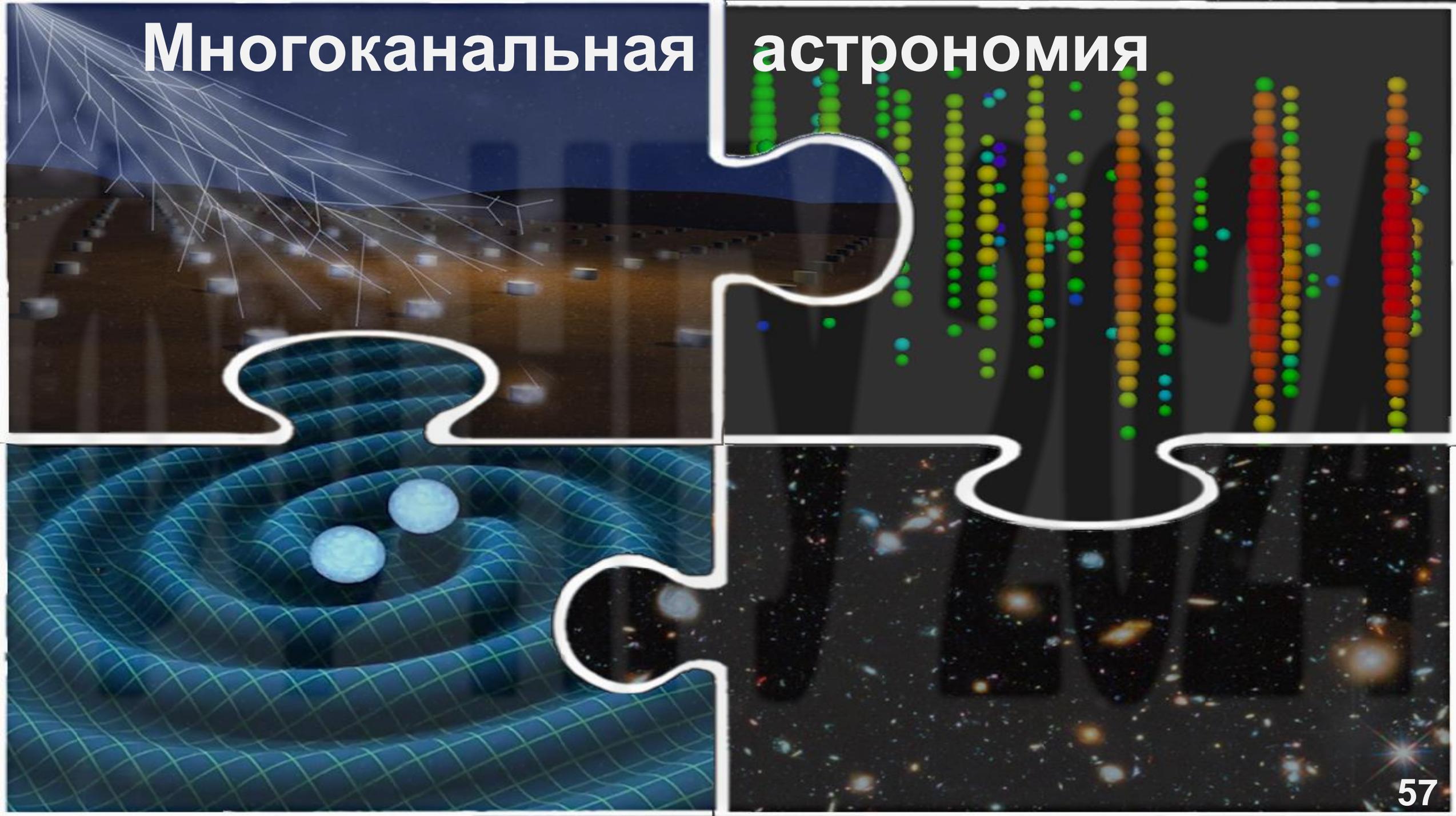
Space detectors

Ground interferometers



Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory

Многоканальная астрономия

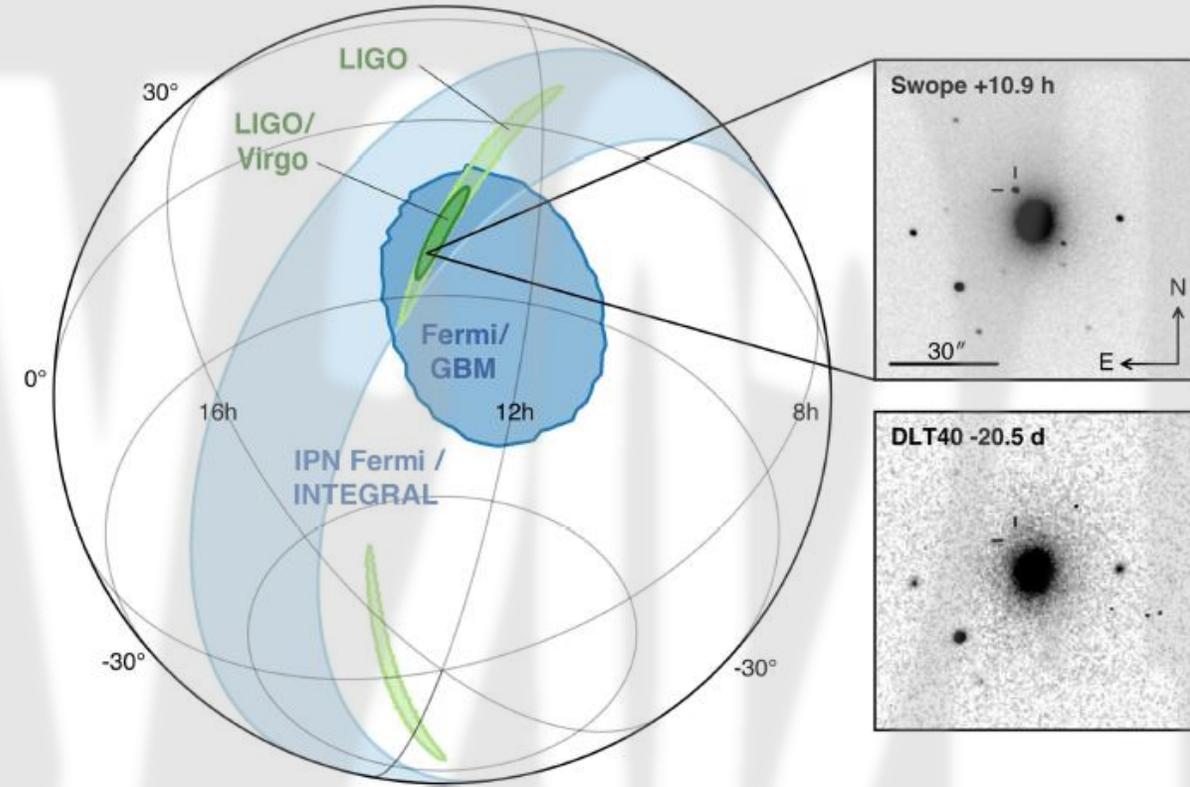
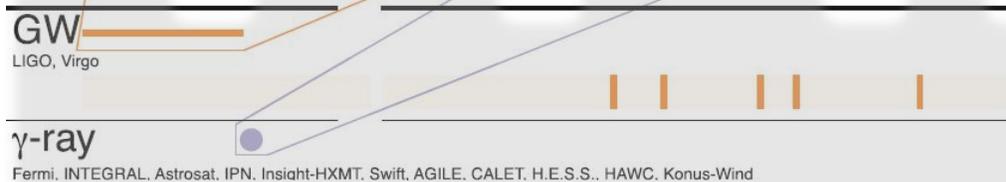
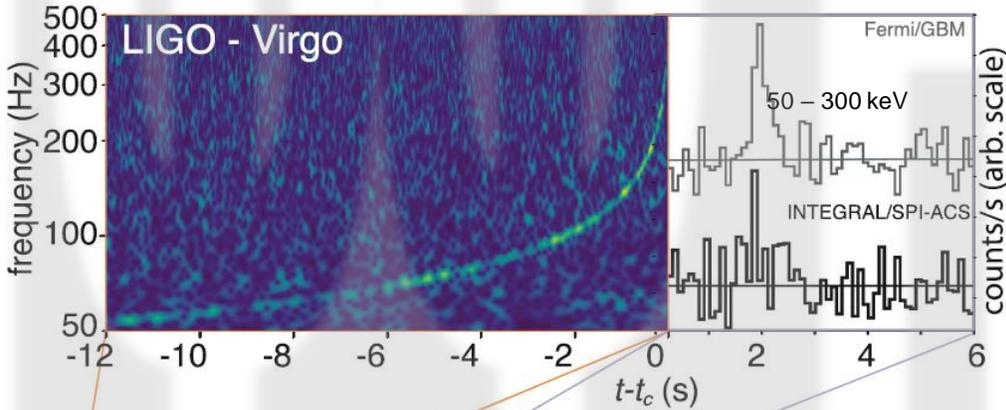


Многоканальная астрономия: GW170817

arXiv:2012.04810

First Multimessenger Observations of a Neutron Star Merger

17 августа 2017 года в 12:41:04.4 UTC обсерватории LIGO и VIRGO зарегистрировали гравитационную волну GW170817, предположительно от слияния двух нейтронных звезд.



Всего через 1.74 ± 0.05 секунды сигнал был зарегистрирован гамма обсерваториями Fermi и INTEGRAL.

В оптическом диапазоне первая регистрация сигнала телескопом Swope через 10.9 часов – точная идентификация источника – галактика NGC 4993 (расстояние 40.7 Мпк).

Многоканальная астрономия: GW170817

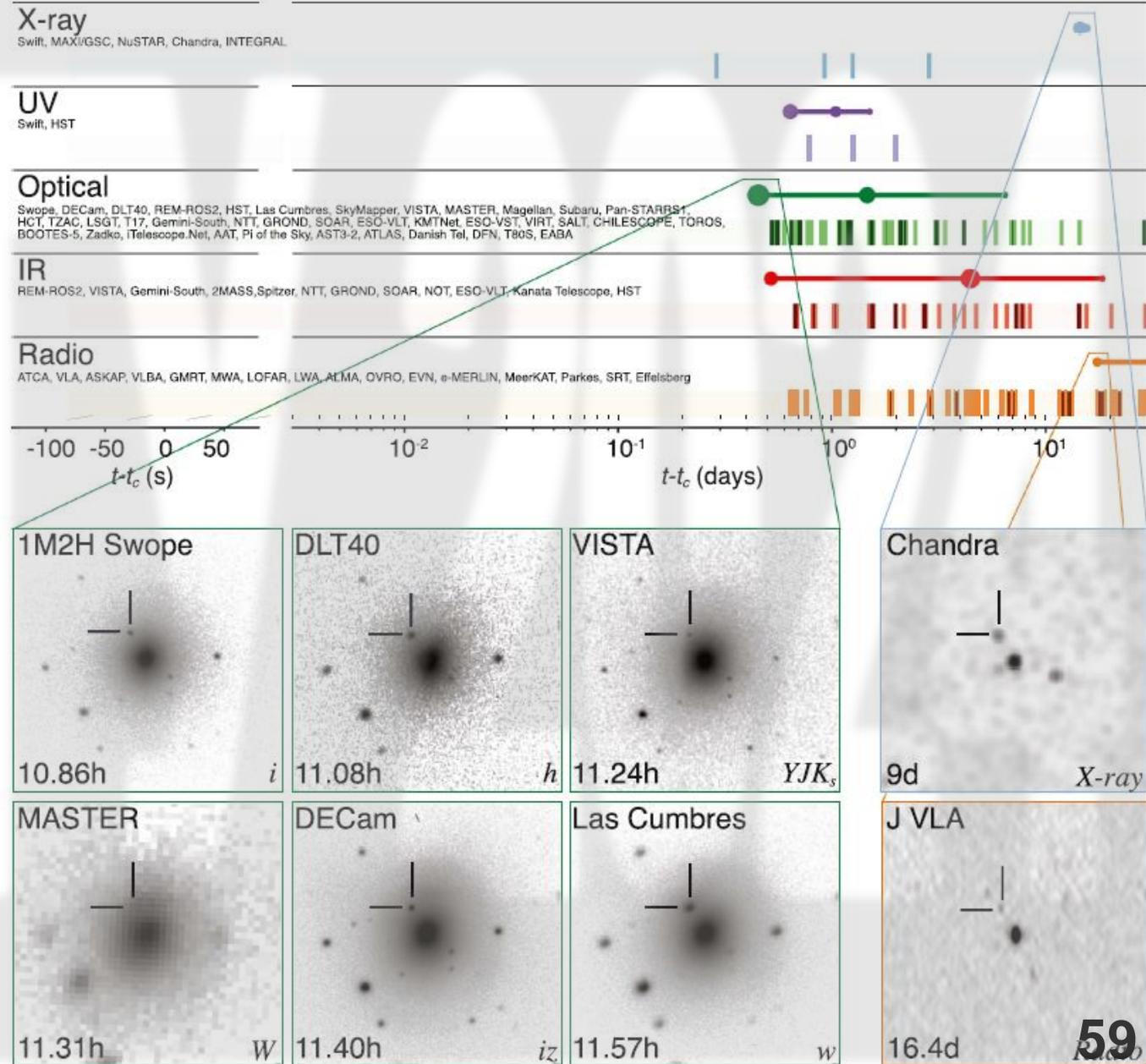
First Multimessenger Observations of a Neutron Star Merger

arXiv:2012.04810

В оптическом диапазоне первая регистрация сигнала телескопом Swope через 10.9 часов + еще 5 телескопов в течение часа.

В рентгеновском диапазоне сигнал не был виден в течение 8.9 суток после первой регистрации. Первый сигнал зарегистрирован спутником Chandra.

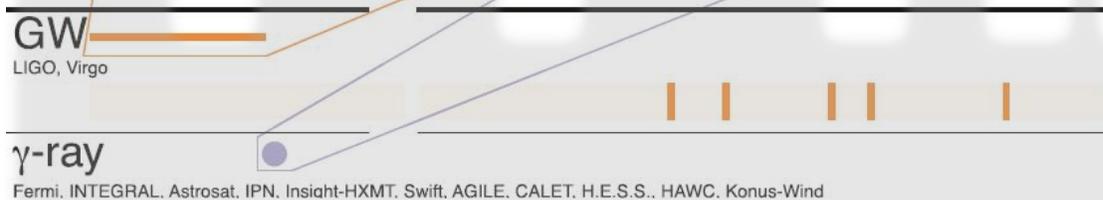
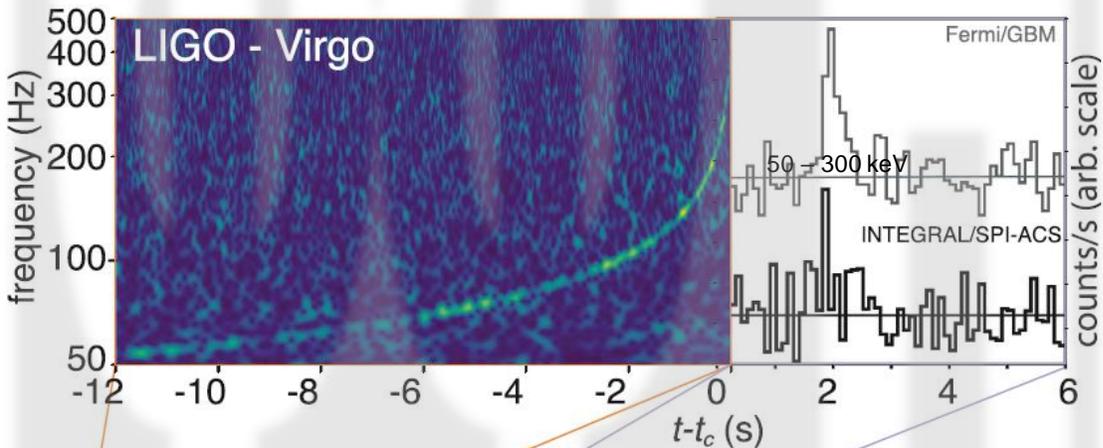
Через 16.4 суток сигнал зарегистрирован в радиодиапазоне радиотелескопом VLA.



Многоканальная астрономия: GW170817

arXiv:2012.04810

First Multimessenger Observations of a Neutron Star Merger



Расстояние до NGC 4993: $d \approx 40.7$ Мпк

Задержка ЭМ сигнала: $\Delta t \approx 1.74$ с

$$\Delta t = \frac{d}{c} - \frac{d}{v_{\text{грав}}} = \frac{d}{c} \cdot \frac{v_{\text{грав}} - c}{c}$$

$$\frac{v_{\text{грав}} - c}{c} \leq \frac{c \Delta t}{d} =$$

$$= \frac{1.74}{40.7 \times 10^6 \times 3.26 \times 3.15 \times 10^7} \approx 4 \times 10^{-16}$$

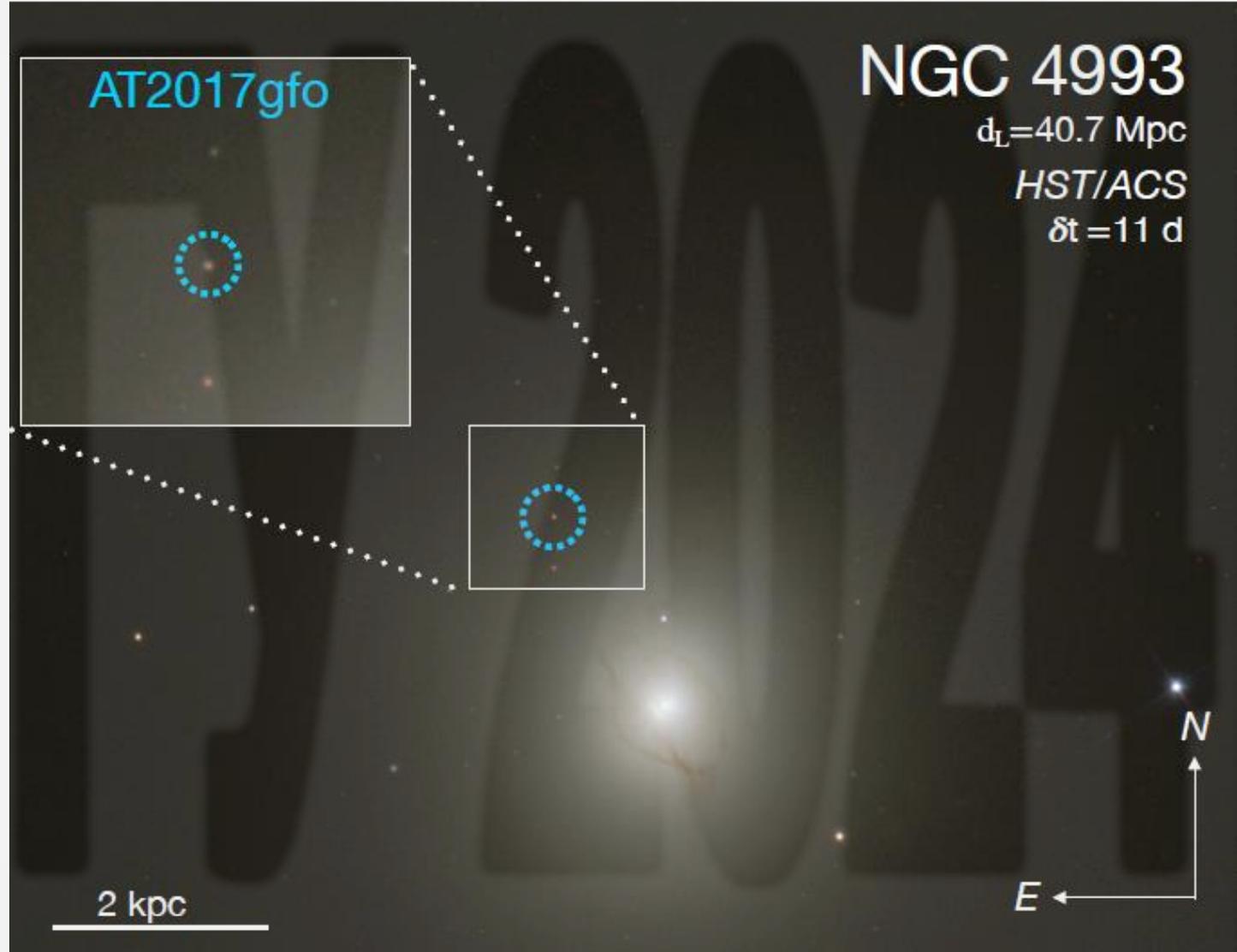
Сразу на 14 порядков лучше, чем лучшее предыдущее ограничение!

Многоканальная астрономия: GW170817

First Multimessenger Observations of a Neutron Star Merger

arXiv:2012.04810

- ✓ Первое наблюдение гравитационных волн от слияния нейтронных звезд.
- ✓ Впервые источник гравитационного события точно локализован.
- ✓ Первое совместное наблюдение события в гравитационном и ЭМ спектрах.
- ✓ Первое подтверждение, что источником по крайней мере части SGRB событий является слияние нейтронных звезд.



Многоканальная астрономия

Multimessenger astronomy

1. Весь электромагнитный спектр (всеволновая астрономия)
2. Космические лучи (сверх-)высоких энергий (γ , e , p , α)
3. Нейтринная астрономия
4. Гравитационные волны

Gravitational waves

Для повышения эффективности, анализ результатов наблюдения ГВ и γ -вспышек, оптике, проводится в режиме реального времени и генерируются alert-сигналы для возможности оперативного подключения других каналов.

Gravitational-wave observatory

LIGO
Hanford

LIGO Livingston

Germany

Virgo, EGO, Italy