

# АСТРОНОМИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ. III. ВНЕ ЭМ СПЕКТРА

Сергей Попов

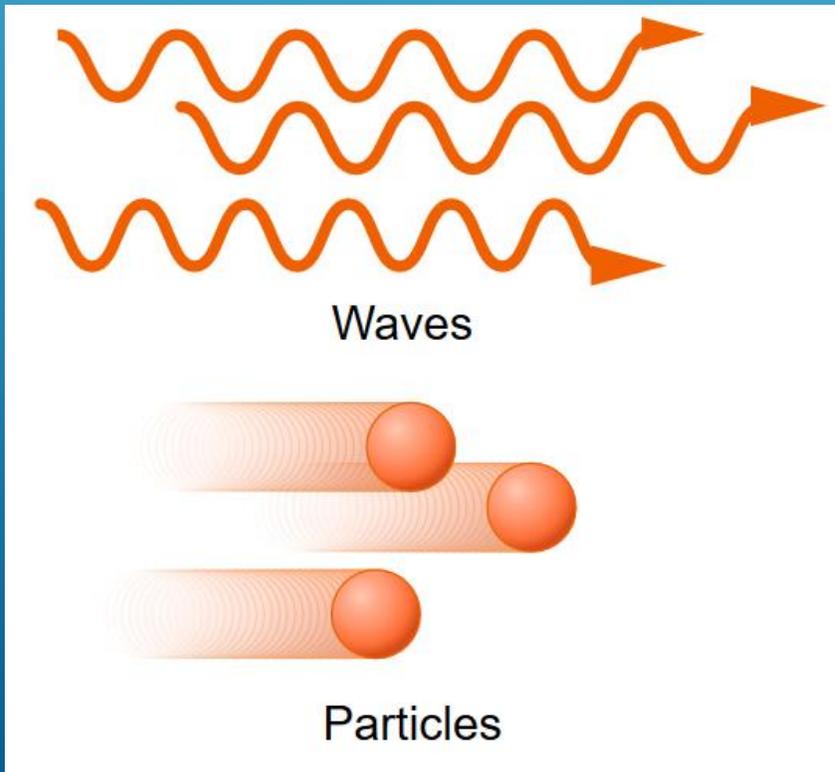
A decorative graphic consisting of several parallel white lines of varying thicknesses, slanted diagonally from the bottom-left towards the top-right, set against a blue gradient background.

# НЕ ТОЛЬКО ЭЛЕКТРО-МАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

От космических объектов приходит не только электромагнитное излучение.

На Землю прилетают различные частицы: протоны, электроны, нейтрино ...

Кроме того, существуют т.н. гравитационные волны.



# О ЧЕМ РАССКАЗЫВАЮТ КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ И ПОЧЕМУ ОНИ ВАЖНЫ

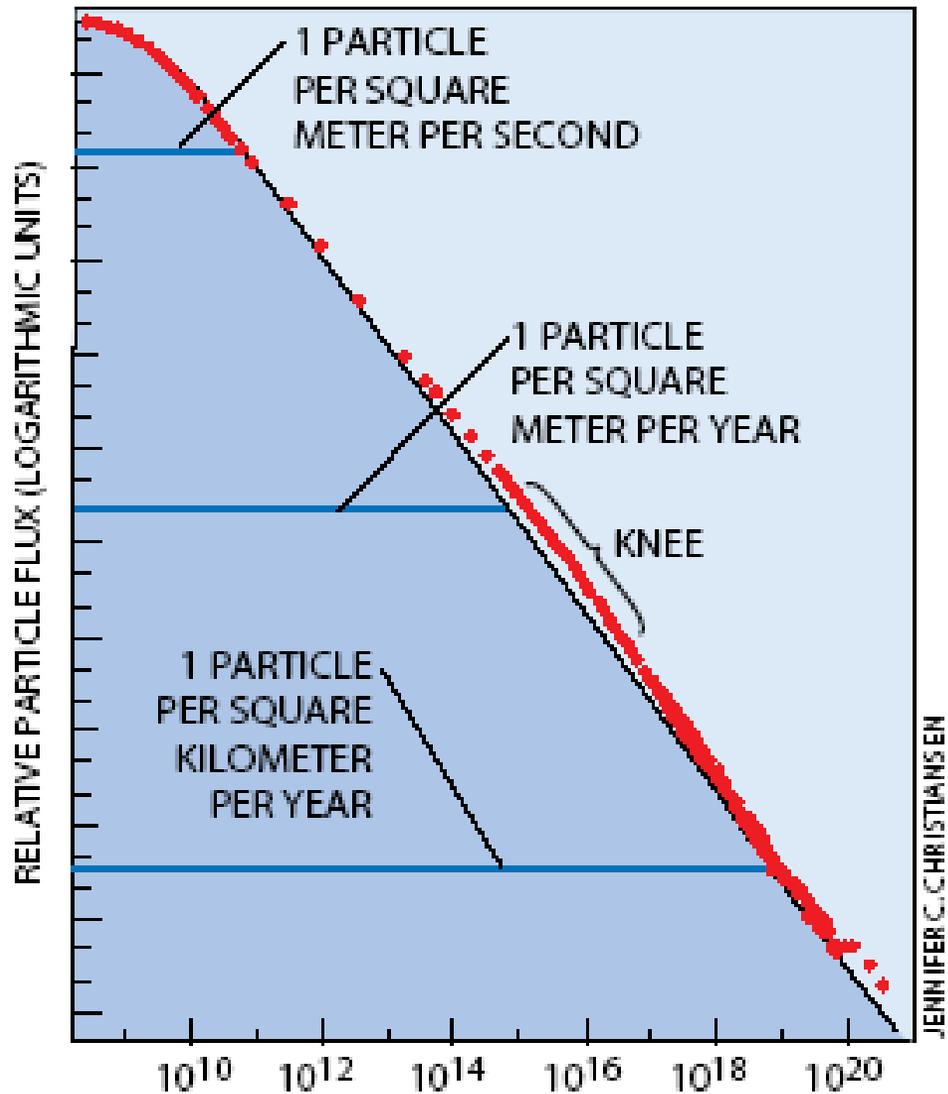
**Космические лучи –  
это одновременно и объект, и инструмент исследования.**

1. Новый канал информации.
2. Вопрос о происхождении и эволюции.
3. Открытие новых частиц. Естественные ускорители.
4. В Галактике КЛ динамически важны.  
Их плотность энергии порядка энергии магнитного поля и тепловой энергии газа.



# СПЕКТР КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Scientific American, (c) 1998



На 90% космические лучи состоят из протонов, на 10% - из альфа-частиц, остальное – более тяжелые ядра, электроны, и тд.

Для первичных КЛ у Земли:  
 $I=0.2-0.3$  частиц/(см<sup>2</sup> с ср)  
 $N=10^{-10}$  частиц/см<sup>3</sup>  
 $W=10^{-12}$  эрг/см<sup>3</sup>=1 эВ/см<sup>3</sup>

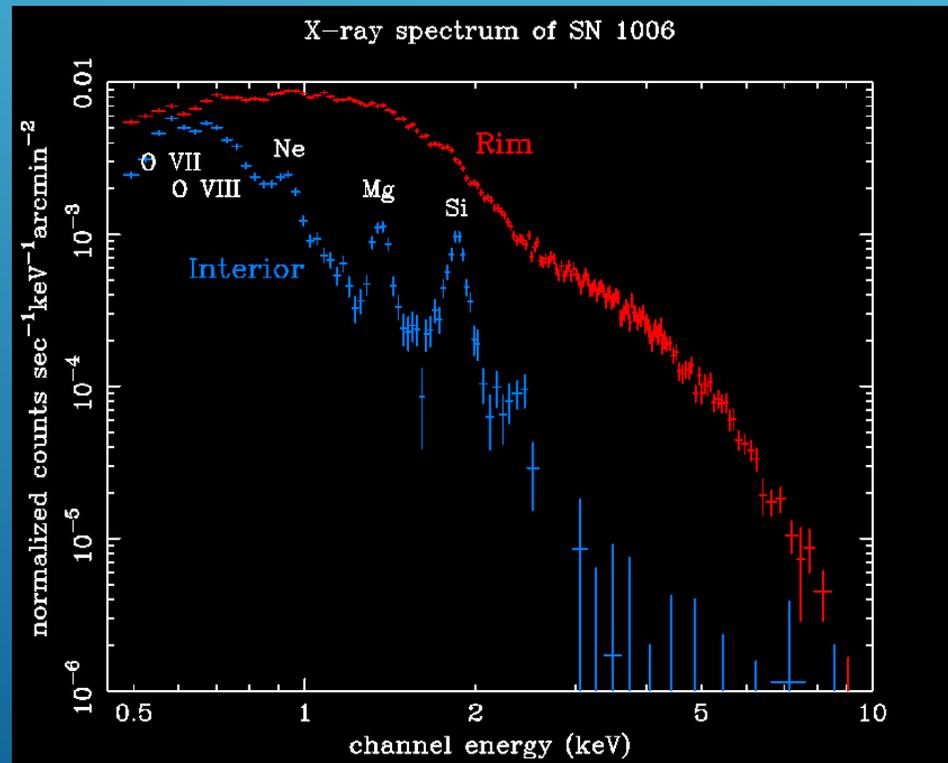
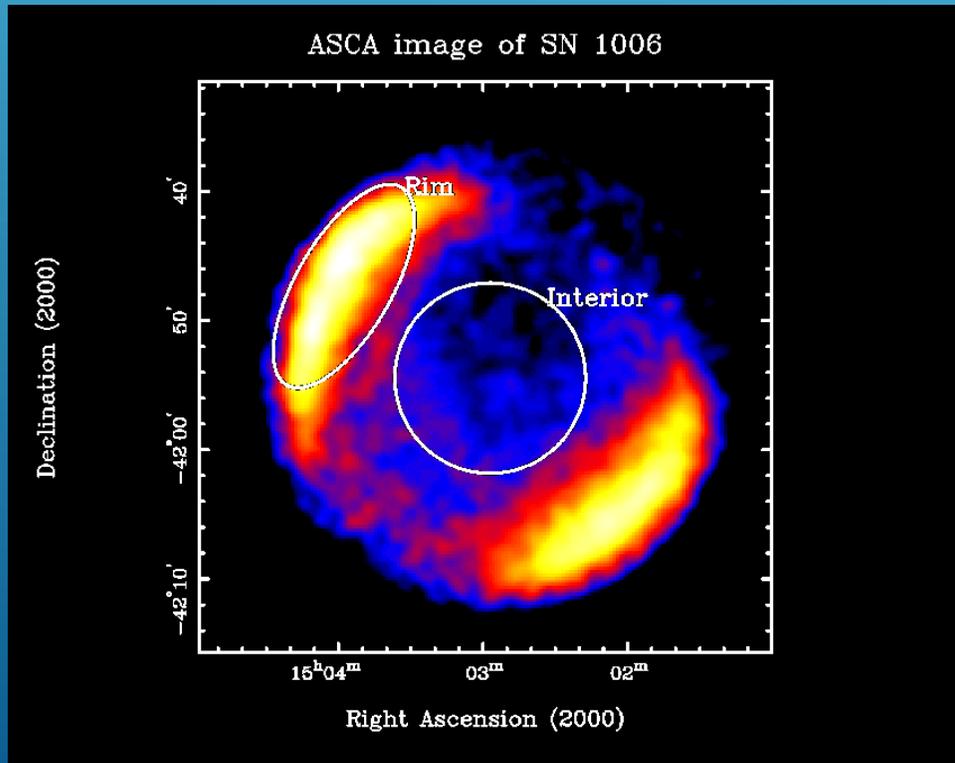
Первичные КЛ поверхности Земли практически никогда не достигают (лишь около 1%).

Вторичные частицы: на 70% мюоны и на 30% электроны и позитроны.

# ПРОИСХОЖДЕНИЕ

Галактические космические лучи в основном связаны с остатками сверхновых.

Рентгеновское излучение остатка сверхновой SN1006 говорит о наличии электронов с энергиями 100-200 ТэВ!



# «УДЕРЖАНИЕ» КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ГАЛАКТИКЕ

Межзвездная среда заполнена магнитным полем  $\sim 10\mu\text{Гс}$ .  
Плотность энергии космических лучей порядка плотности энергии (давления) магнитного поля  $B^2/8\pi$ .

Минимальный характерный размер – толщина диска Галактики.  
 $300 \text{ пк} \sim 10^{21} \text{ см}$ .

Рассмотрим основную компоненту космических лучей – протоны.

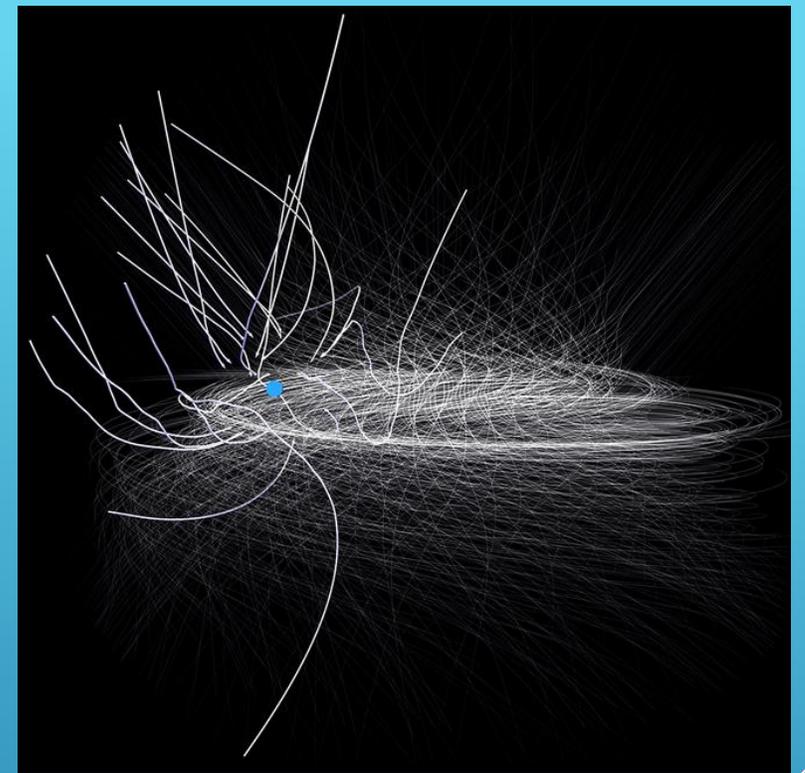
Кривизна траектории заряженной частицы в магнитном поле

$$r_H \sim E/eH \quad 1\text{eV} = 1.6 \cdot 10^{-12} \text{ эрг}$$

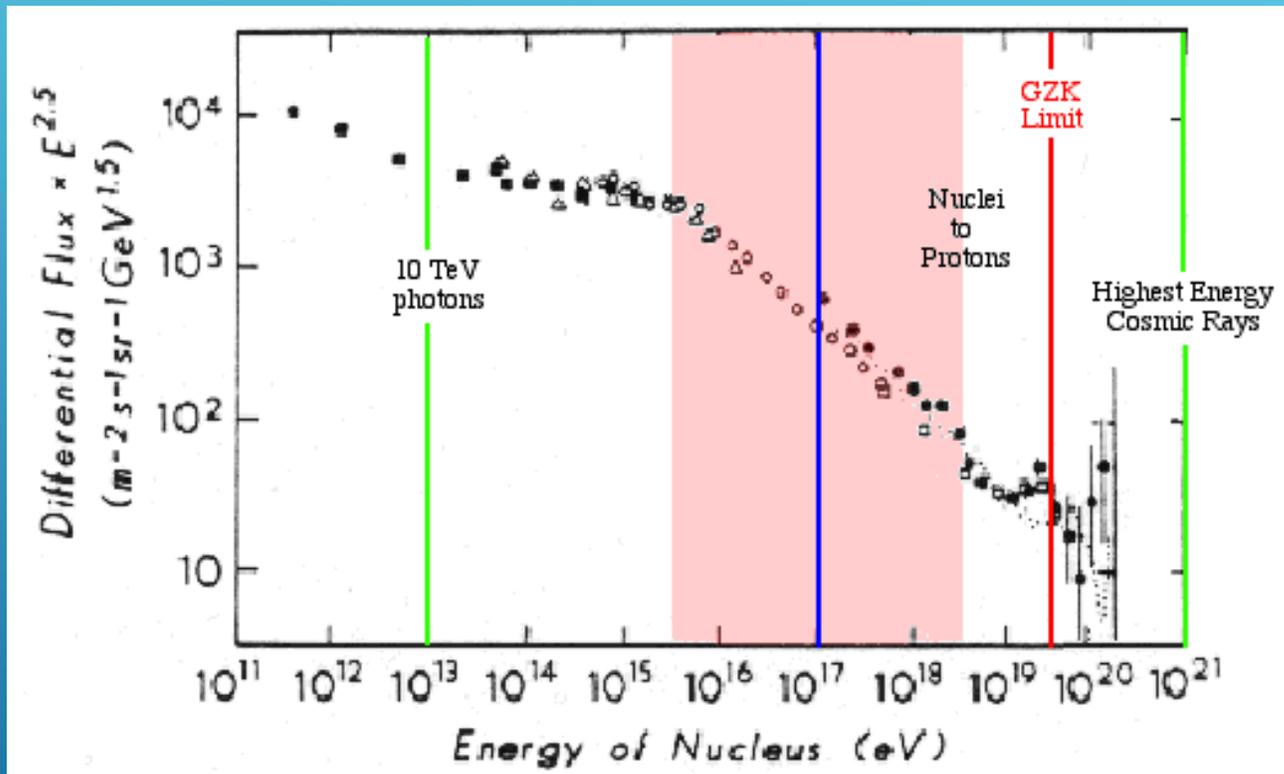
$$r_H = 3.3 \cdot 10^{12} \text{ см } E_{\text{Gev}} H_{\mu\text{G}}^{-1}$$

При  $E > 3 \cdot 10^{18} \text{ eV}$  частица сразу покидает диск Галактики.

В реальности уже при  $E > 10^{15} \text{ eV}$  частицы могут довольно быстро покидать диск.

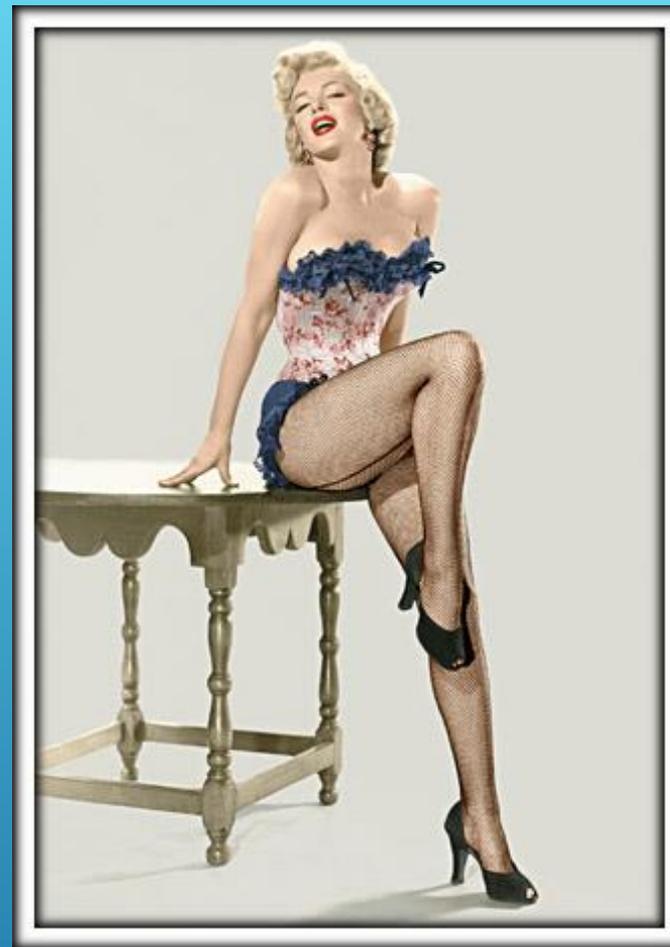


# «КОЛЕНО»

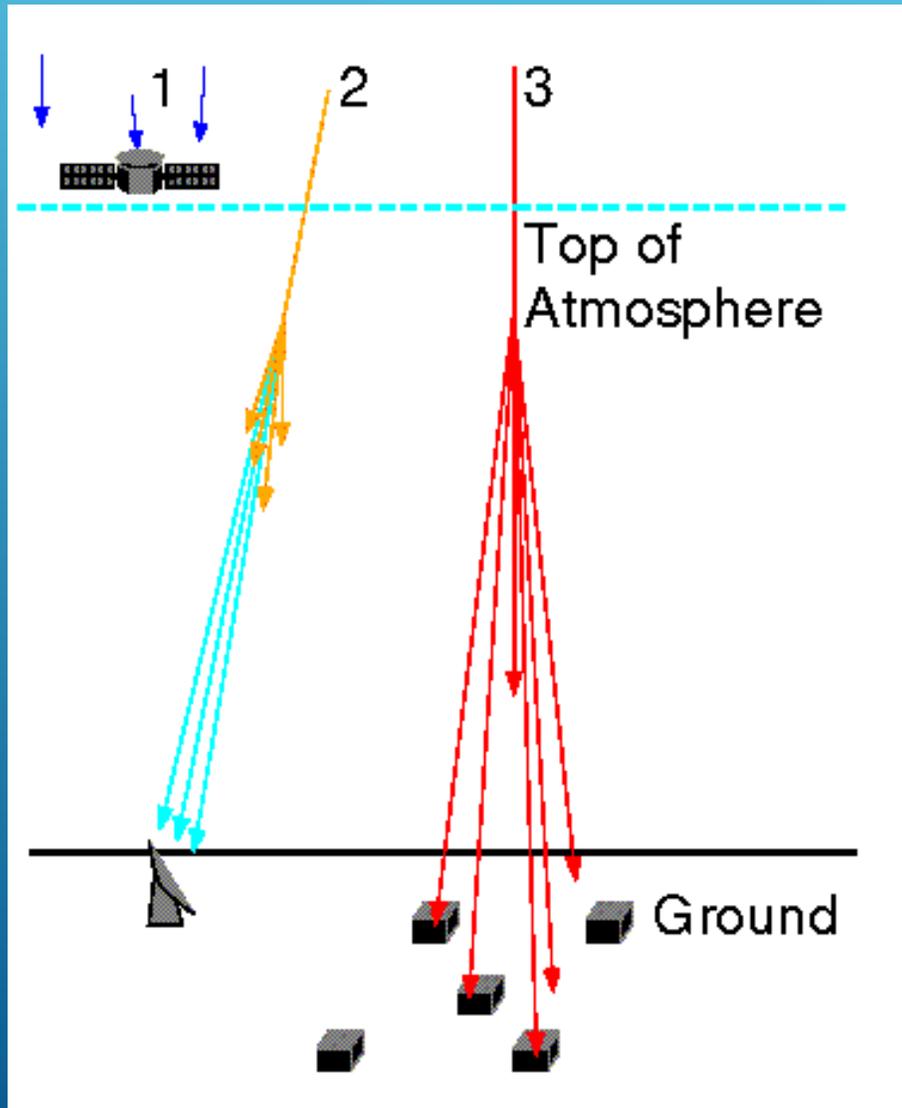


Христиансен и Куликов 1958  
 $3 \cdot 10^{15}$  эВ

Вероятно на энергиях выше и ниже  
«колена» работают разные механизмы

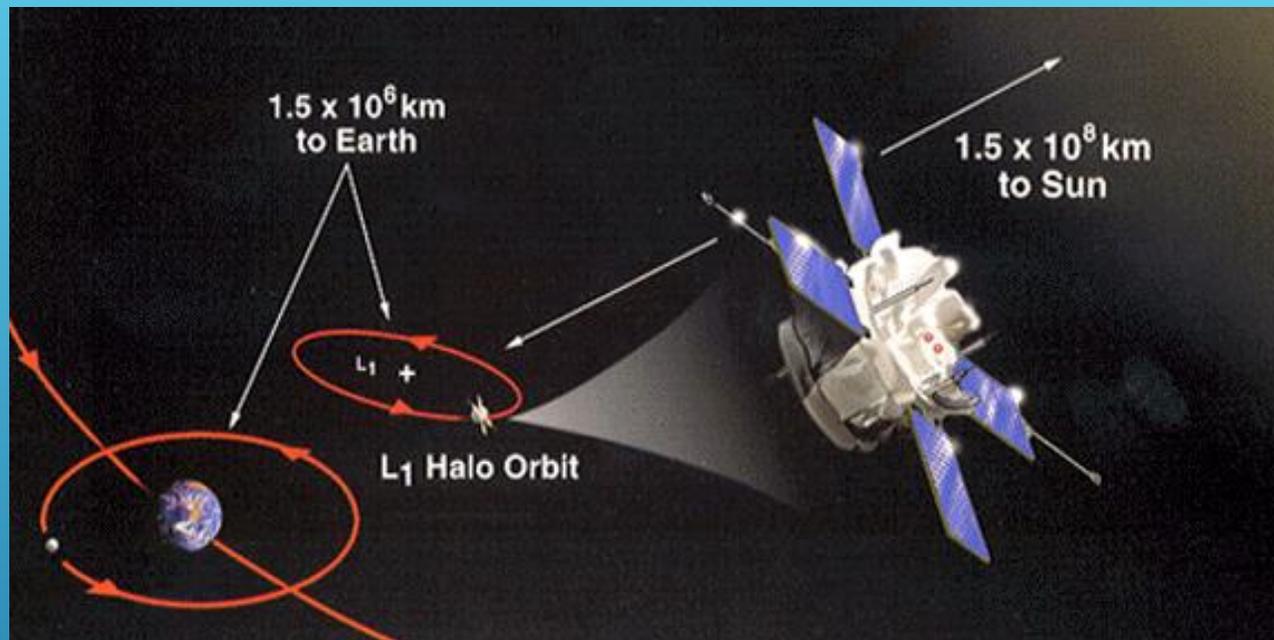


# РЕГИСТРАЦИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ



- Можно регистрировать первичные космические лучи над атмосферой на космических аппаратах, или же в самой верхней атмосфере на баллонах
- Можно регистрировать оптическое излучение, возникающее при взаимодействии первичных частиц с атмосферой
- Наконец, можно регистрировать сами вторичные частицы наземными детекторами

# КОСМИЧЕСКИЕ ДЕТЕКТОРЫ



Advanced Composition Explorer (ACE)

Регистрация первичных космических лучей. Речь идет о не слишком больших энергиях, т.к. надо, чтобы на небольшой детектор попадало достаточно много частиц.

# НАБЛЮДЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

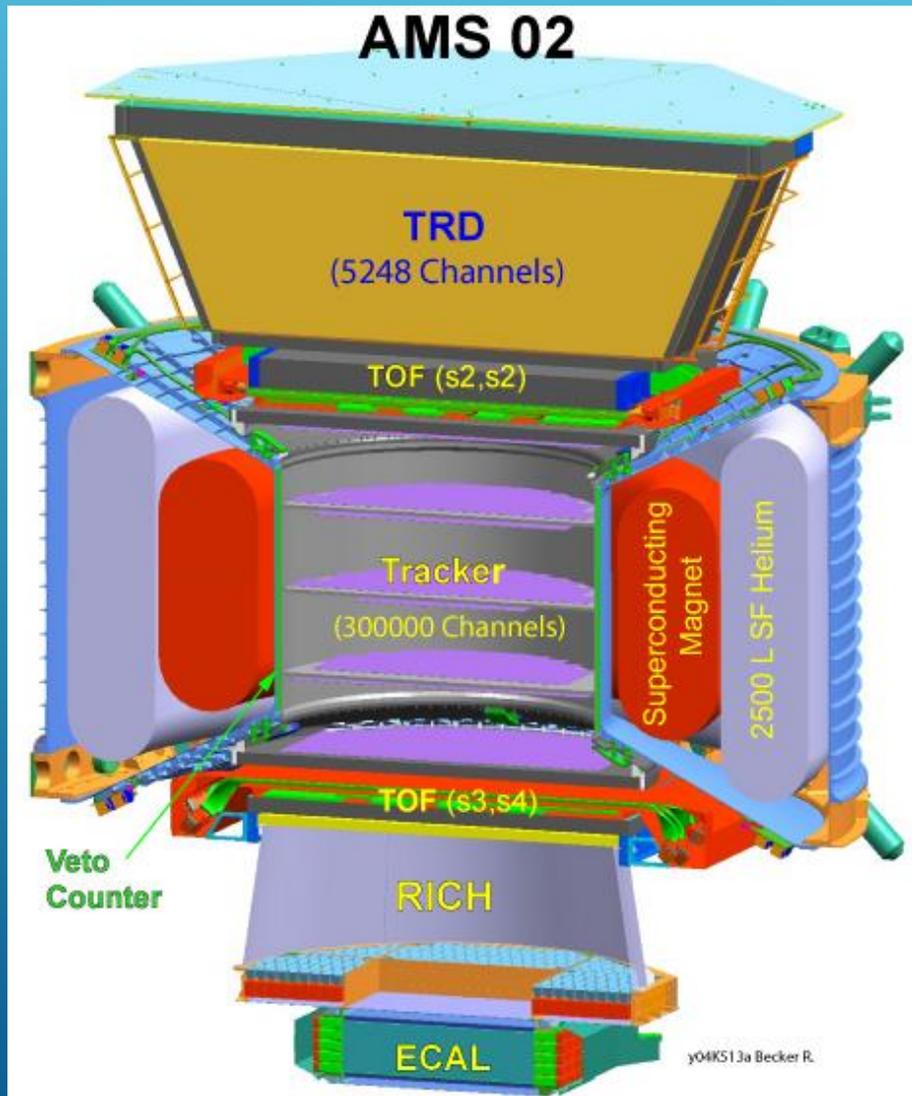


РАМЕЛА



Полеты Гесса (1912 г.)

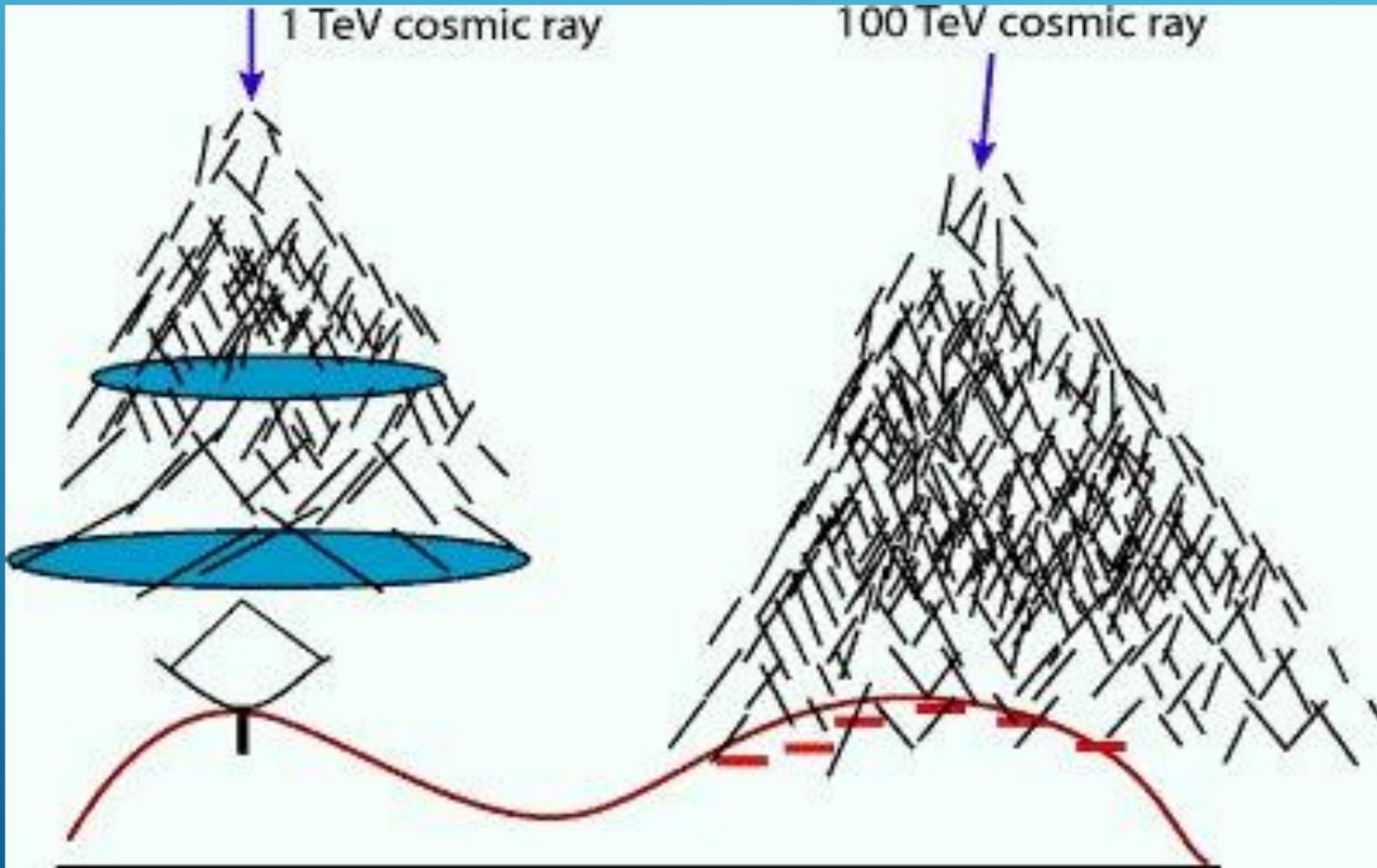
# AMS 02



Интересен поиск экзотических Частиц с помощью этих детекторов. Капли кваркового вещества («стрпельки» - strangelets) «Кентавры».

# НАЗЕМНЫЕ МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Регистрация гамма-излучения и космических лучей путем наблюдения черенковского света (слева)



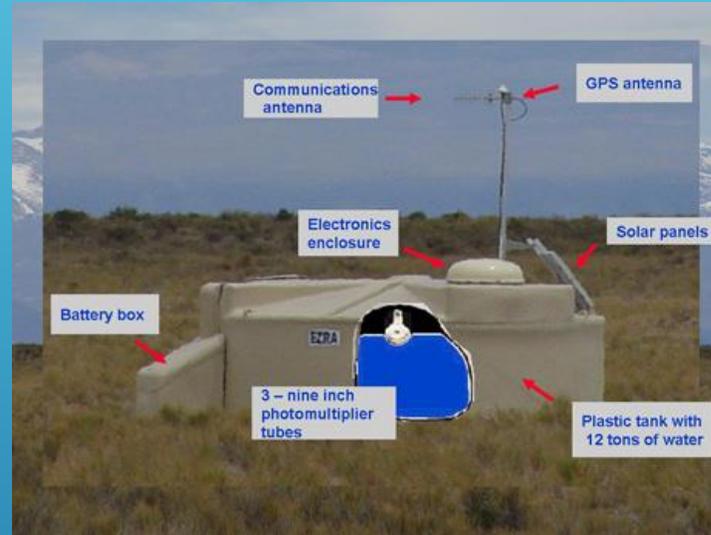
Регистрация вторичных частиц наземными детекторами (справа)

# МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Регистрация флуоресценции



Регистрация вторичных частиц  
(электронов или мюонов)

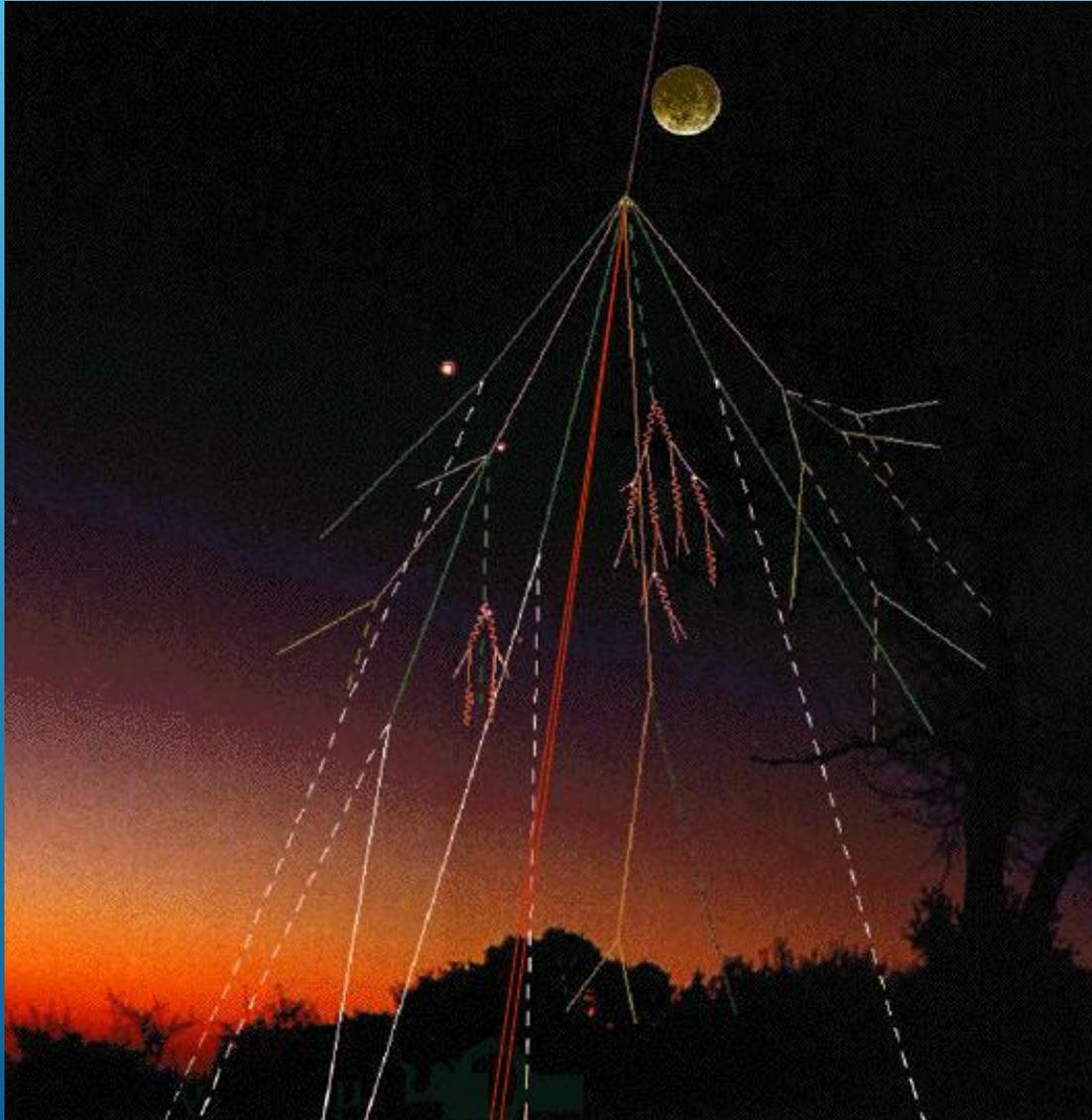


Черенковский детектор  
обсерватории им. Оже

Мюонный детектор ⇒  
эксперимента AGASA

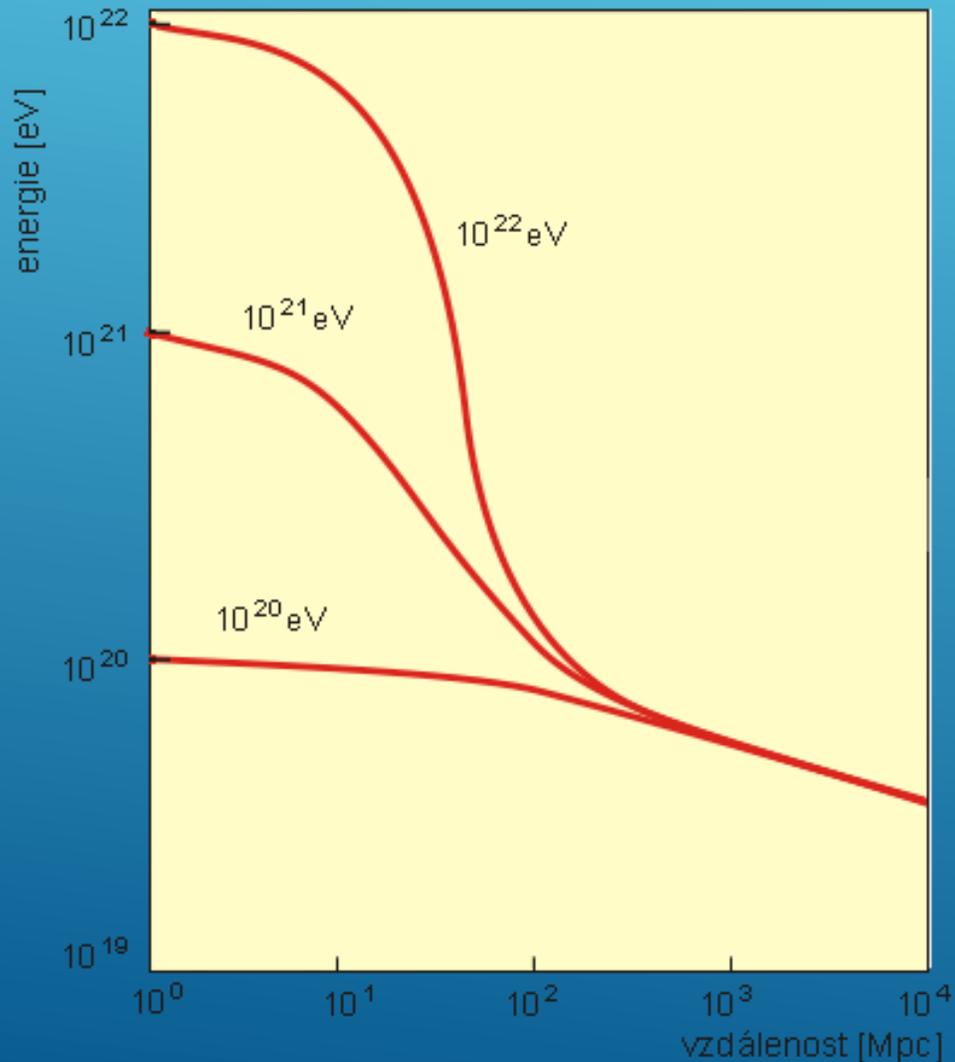


# ШИРОКИЕ АТМОСФЕРНЫЕ ЛИВНИ



Пьер Оже  
30-е гг. 20 века

# КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ



Взаимодействие протонов с фотонами реликтового излучения приводит к рождению электрон-позитронных пар или пионов.

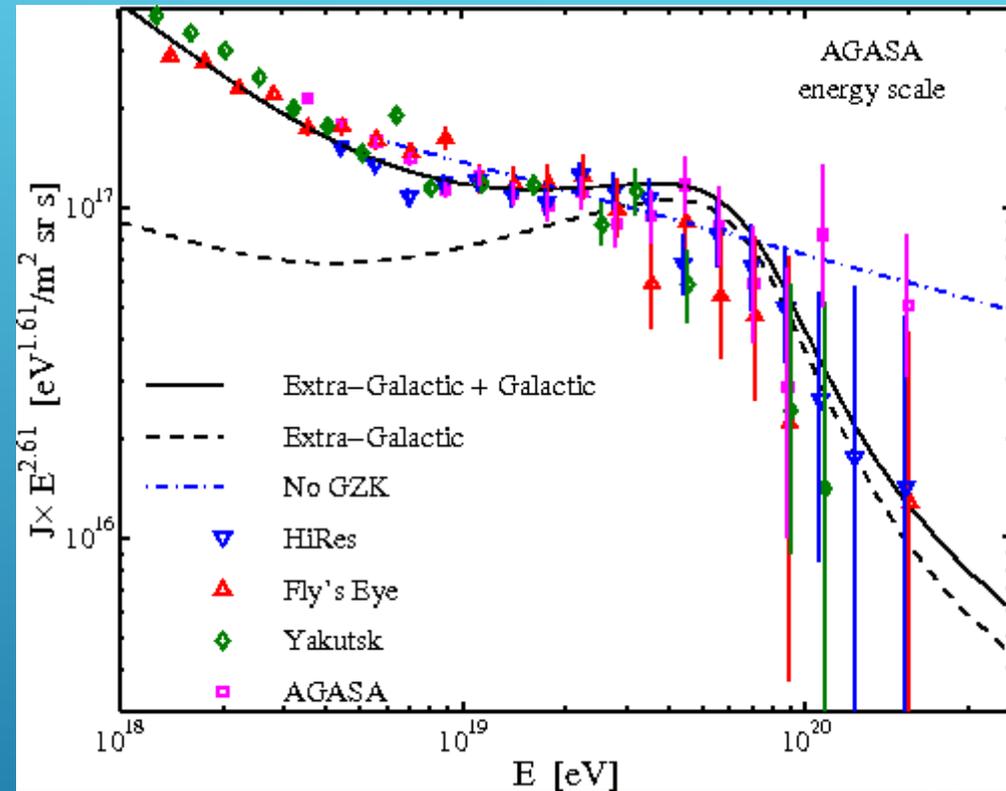
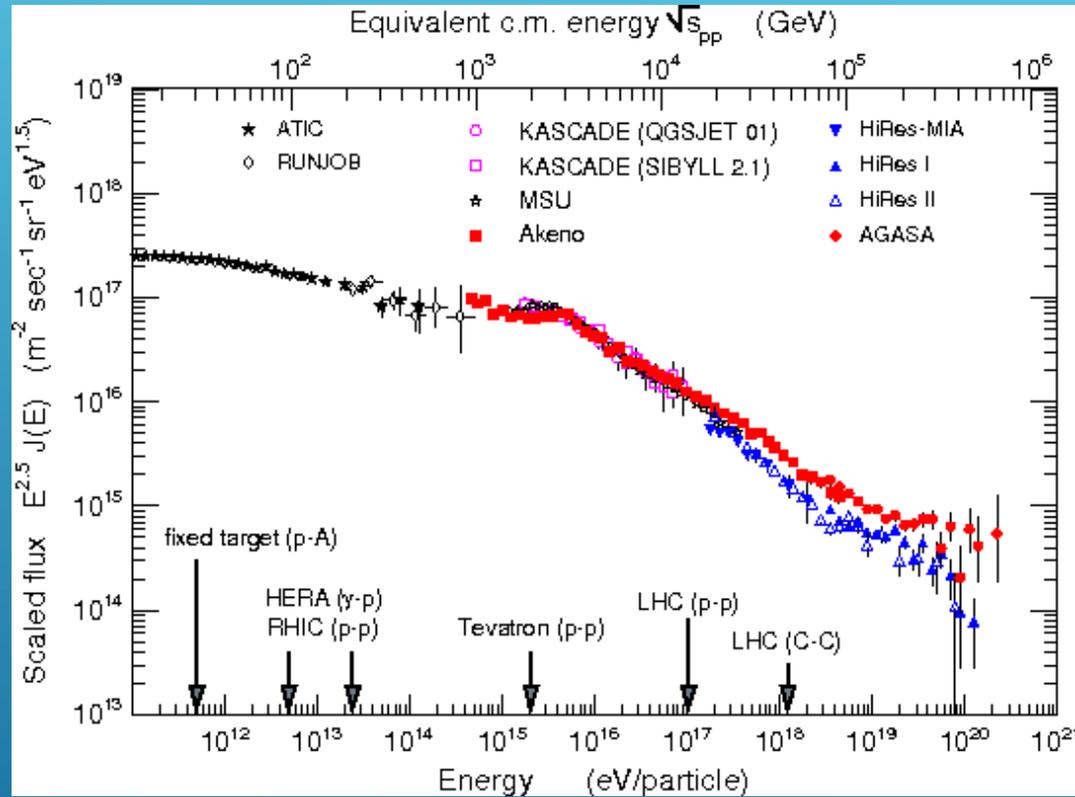
Другие частицы КЛ (ядра более тяжелых элементов, нейтроны), а также гамма-кванты также теряют энергию при взаимодействии с реликтовыми и ИК фотонами.

Это должно приводить к малому числу частиц КЛ с энергией выше  $10^{20}$  эВ.

Это т.н. ГЗК-завал.

Тем не менее, очень энергичные частицы видят!

# ГЗК ЗАВАЛ В СПЕКТРЕ

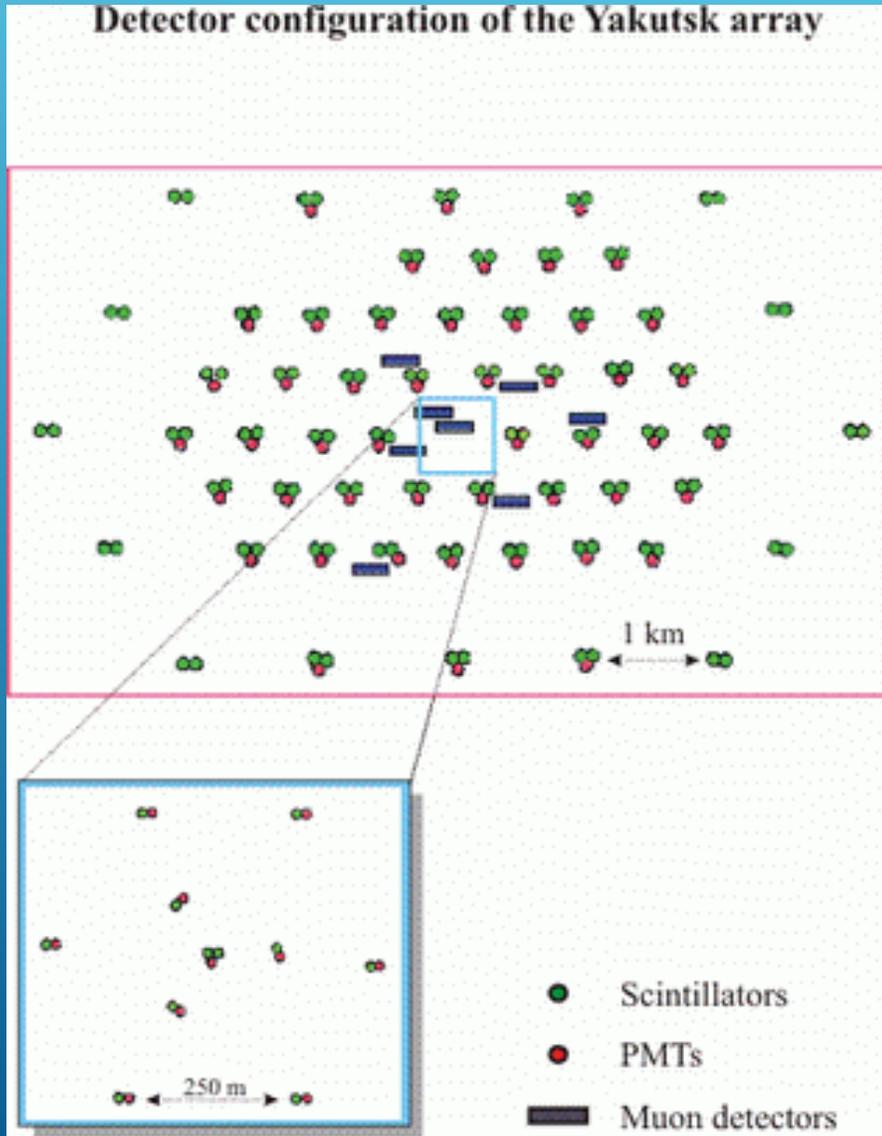


Взаимодействие КЛ с фотонами реликтового излучения и ИК фотонами.

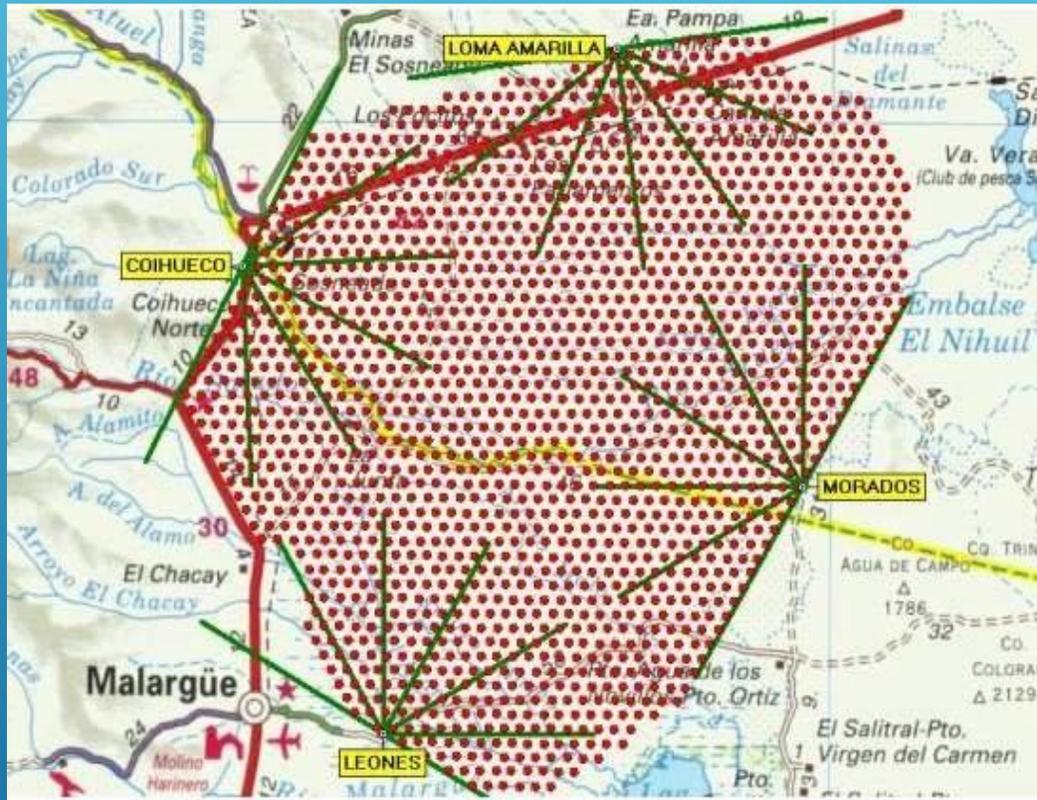
Грейзен-Зацепин-Кузьмин. 60-е гг.

# ЯКУТСКАЯ УСТАНОВКА

Работает с 60-х годов.  
Используется две методики для регистрации сигнала.



# ОБСЕРВАТОРИЯ ИМЕНИ ОЖЕ

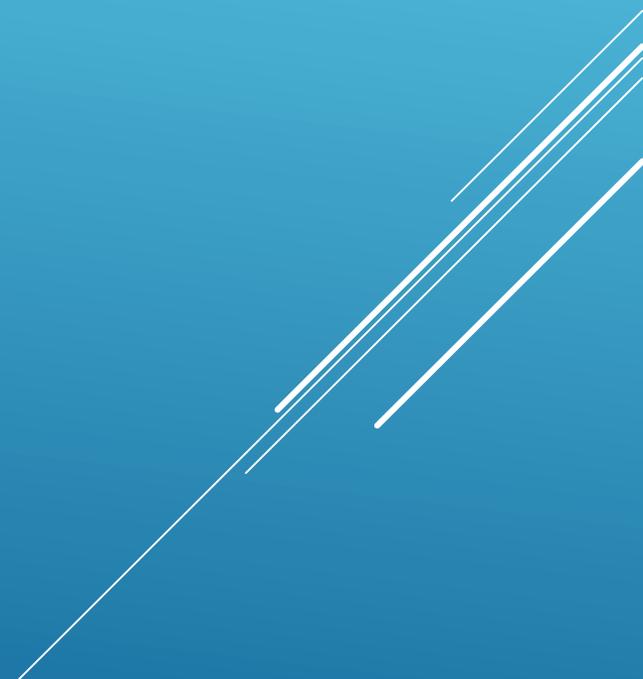


Более 1000 наземных детекторов.  
Плюс 24 телескопа.

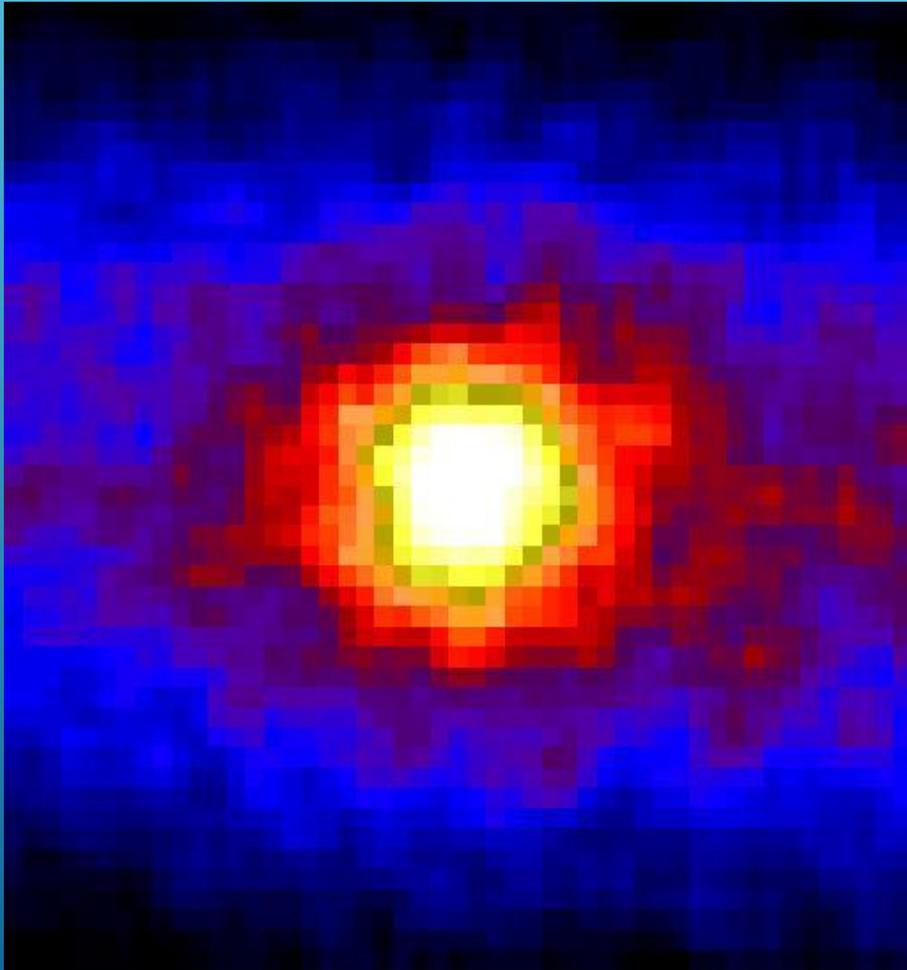
# КОСМИЧЕСКИЕ ПРОЕКТЫ



Возможно, что следующим шагом в изучении космических лучей сверхвысоких энергий будет запуск специальных космических аппаратов.



# НЕЙТРИННАЯ АСТРОФИЗИКА



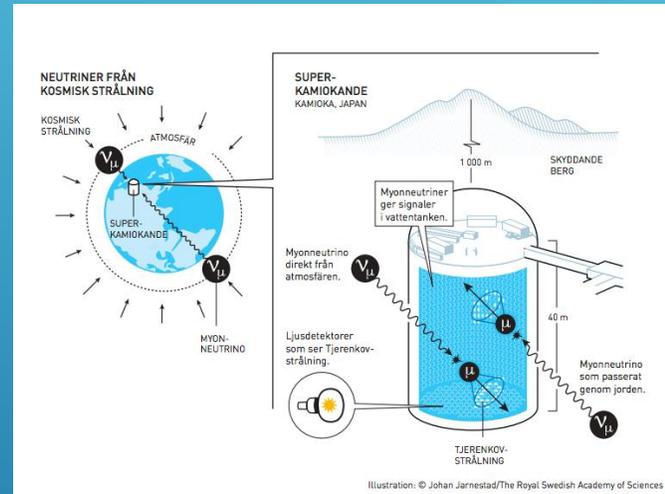
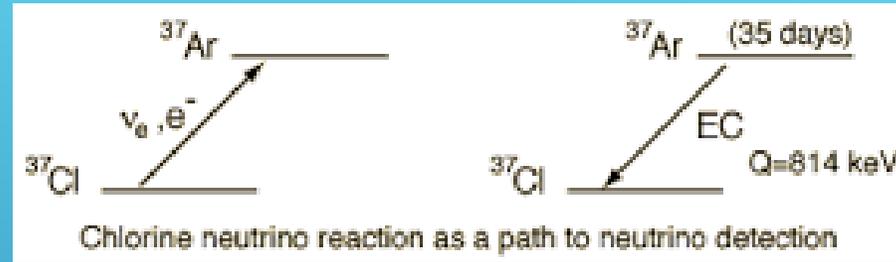
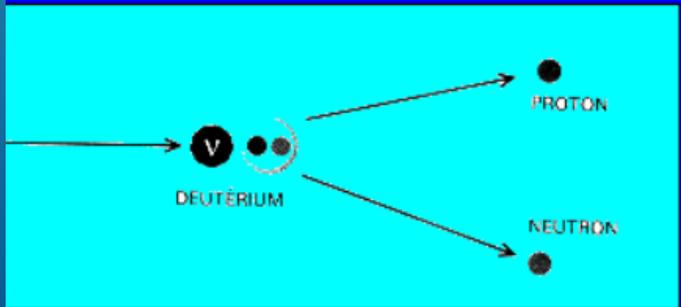
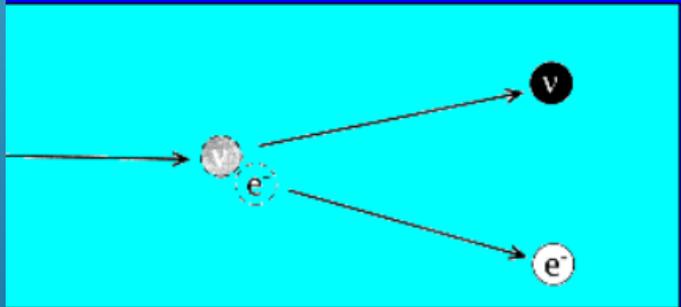
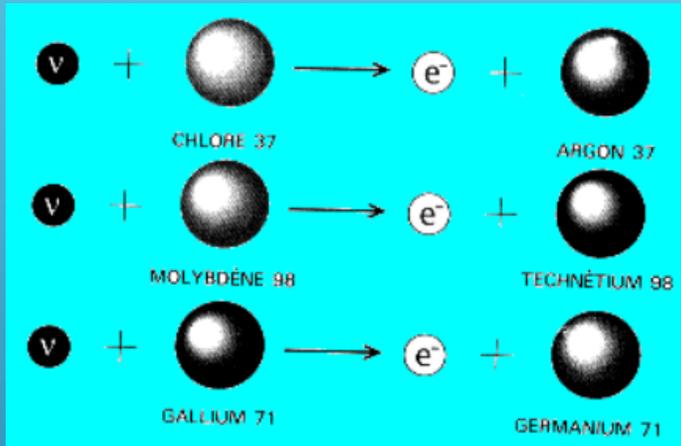
Нейтрино от Солнца



Нейтрино от взрывов сверхновых

# НЕЙТРИННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

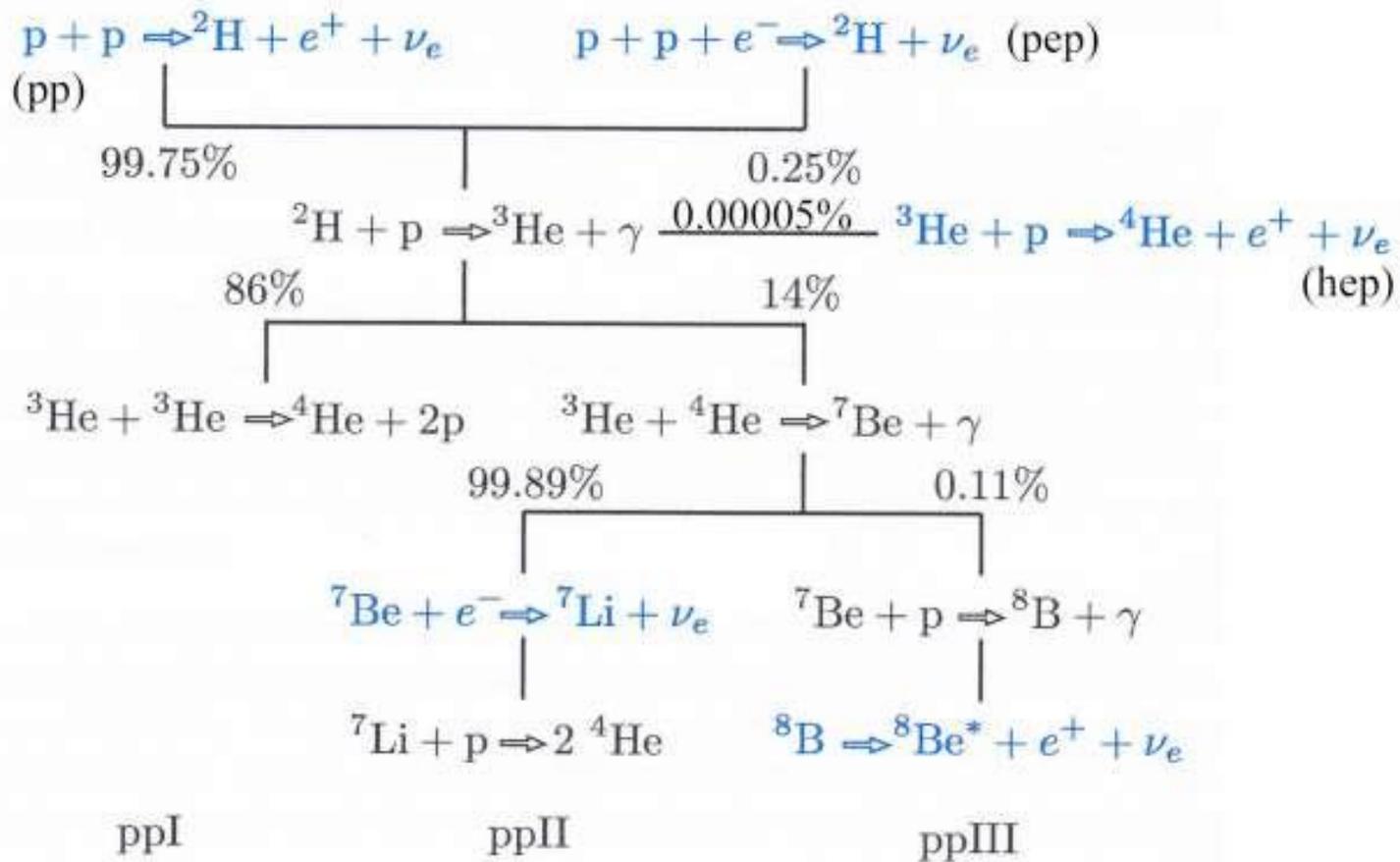
http://lappweb.in2p3.fr/neutrinos/anexp.html



CC Charged Current Reaction	$\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$	$E_{\text{threshold}} = 1.4 \text{ MeV}$
NC Neutral Current Reaction	$\nu_x + d \rightarrow \nu_x + p + n$	$E_{\text{threshold}} = 2.2 \text{ MeV}$
ES Elastic Scattering Reaction	$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$	$E_{\text{threshold}} \approx 0$

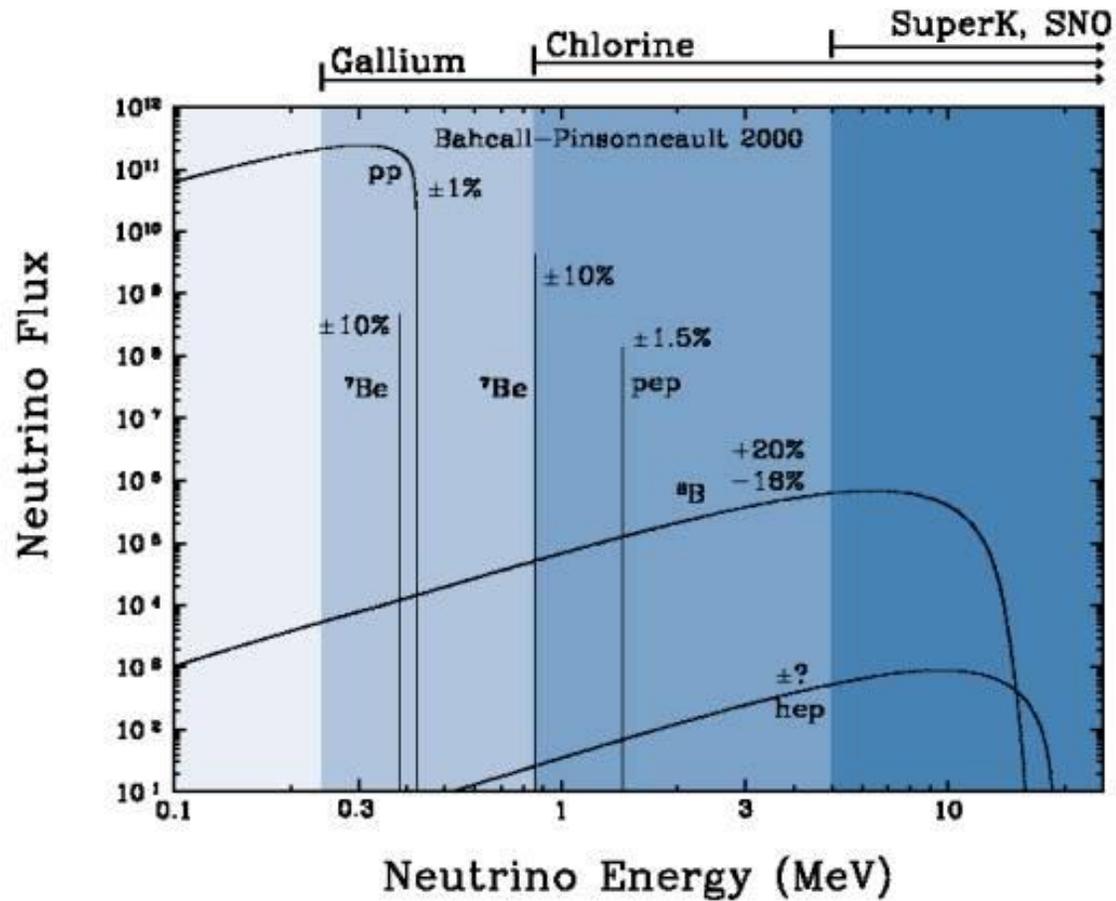
*x denotes that this reaction will take place with any neutrino.*

# СОЛНЕЧНЫЕ НЕЙТРИНО



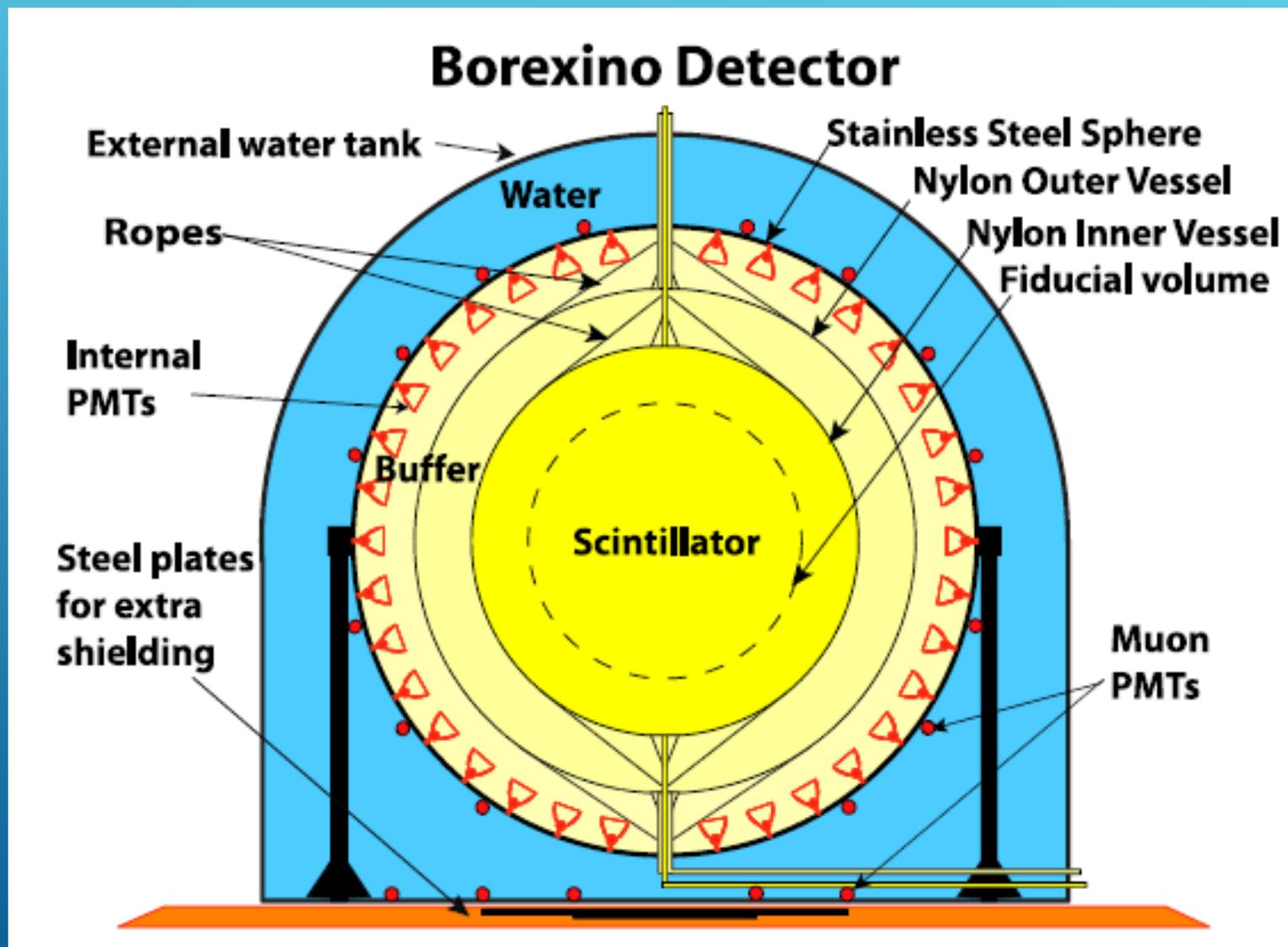
В ряде термоядерных реакций часть энергии уносится нейтрино. Важно, что эти частицы свободно покидают Солнце. Т.е., они несут информацию об условиях в солнечных недрах «сейчас».

# РЕГИСТРАЦИЯ НЕЙТРИНО



Нейтрино очень трудно регистрировать. Особенно на низких энергиях.  
Не так уж давно удалось зарегистрировать солнечные pp нейтрино.

# БОРЕКСИНО

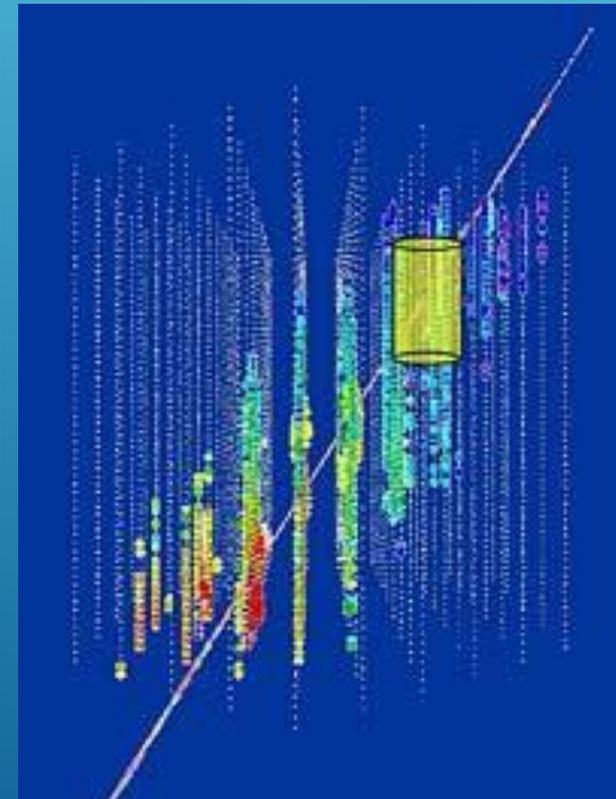
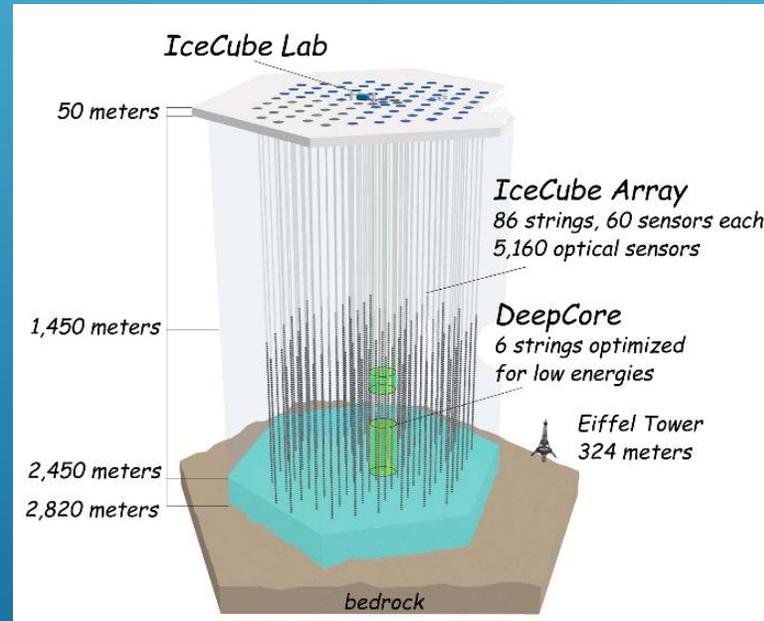
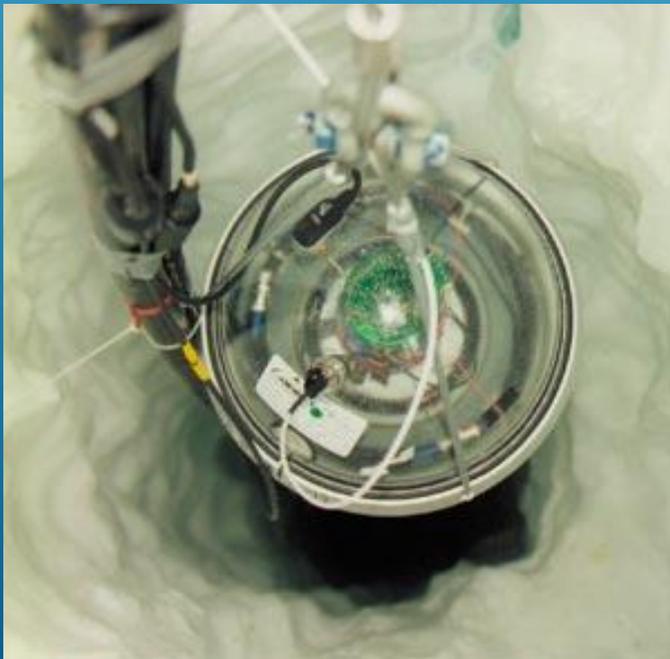
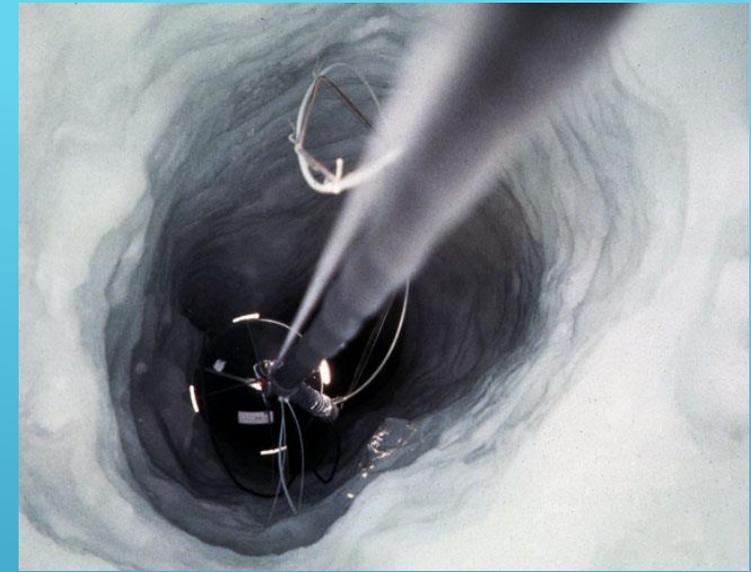


Благодаря достижению очень низкого уровня шума на энергиях ниже 1 МэВ впервые удалось увидеть нейтрино от pp- реакции.

# НАБЛЮДЕНИЯ НЕЙТРИНО



Эксперименты AMANDA  
и IceCube в Антарктиде

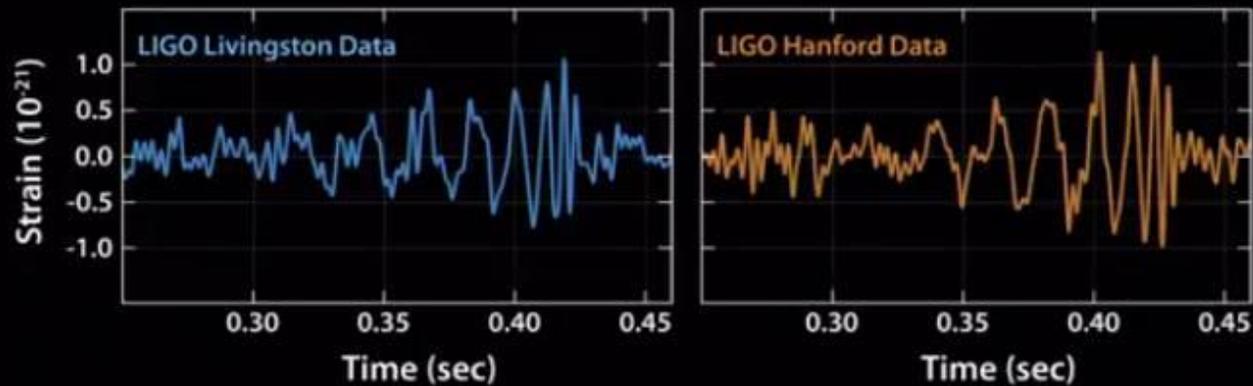


# ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ



Предсказаны Общей теорией относительности.

Возникают при слиянии нейтронных звезд и черных дыр.  
А также при вращении нейтронных звезд и  
при эволюции тесных двойных звезд.



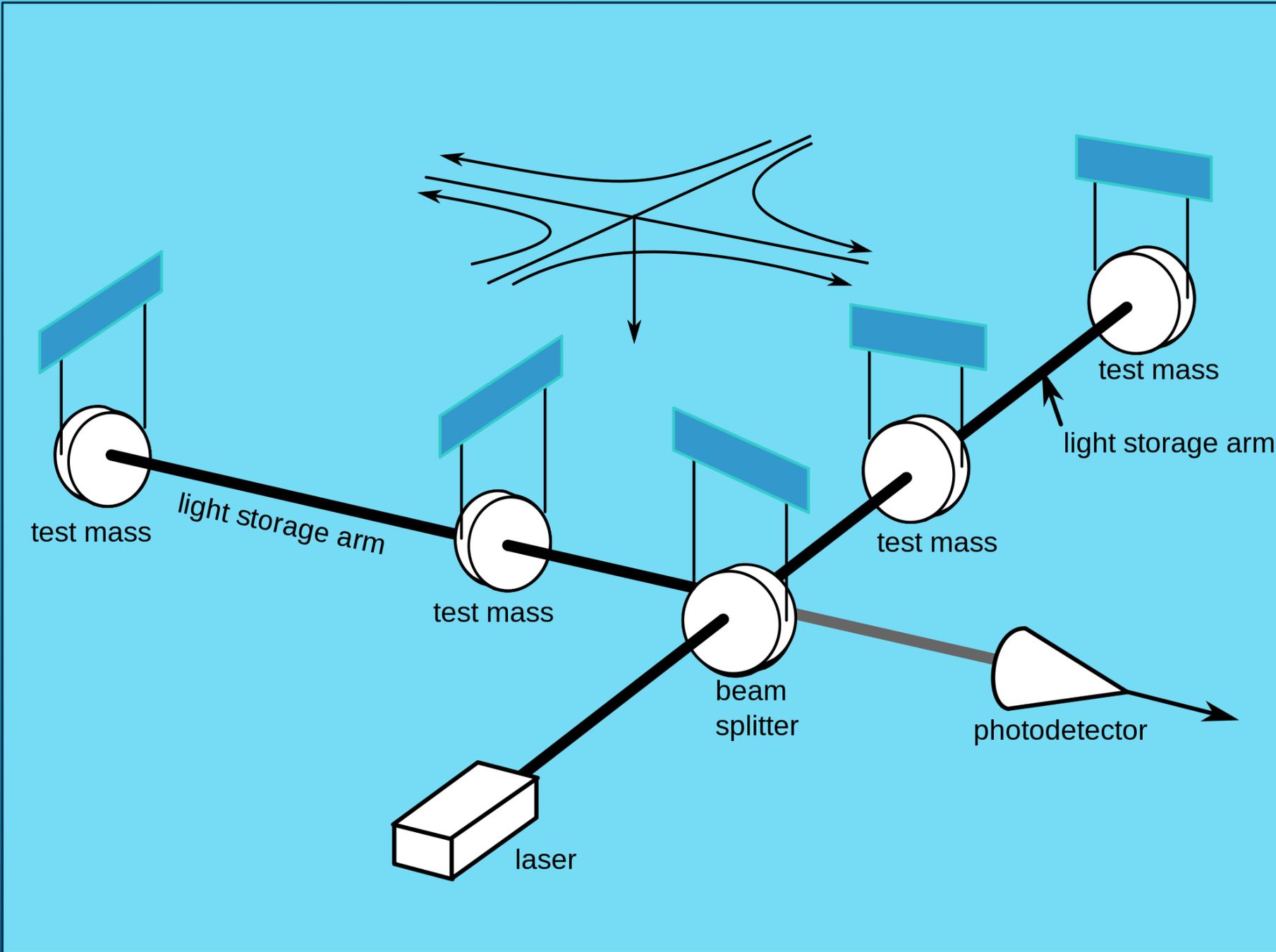
# ДЕТЕКТОРЫ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН



Первый детектор Вебера



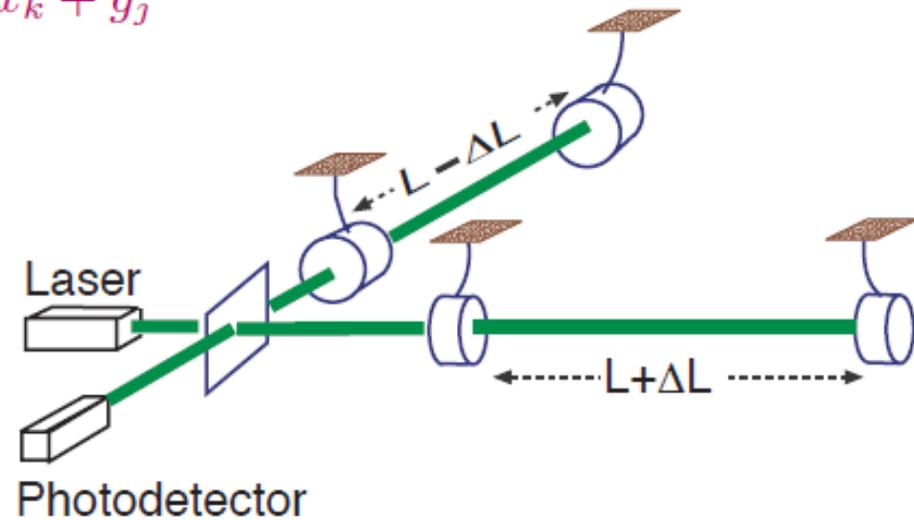
Эксперимент VIRGO



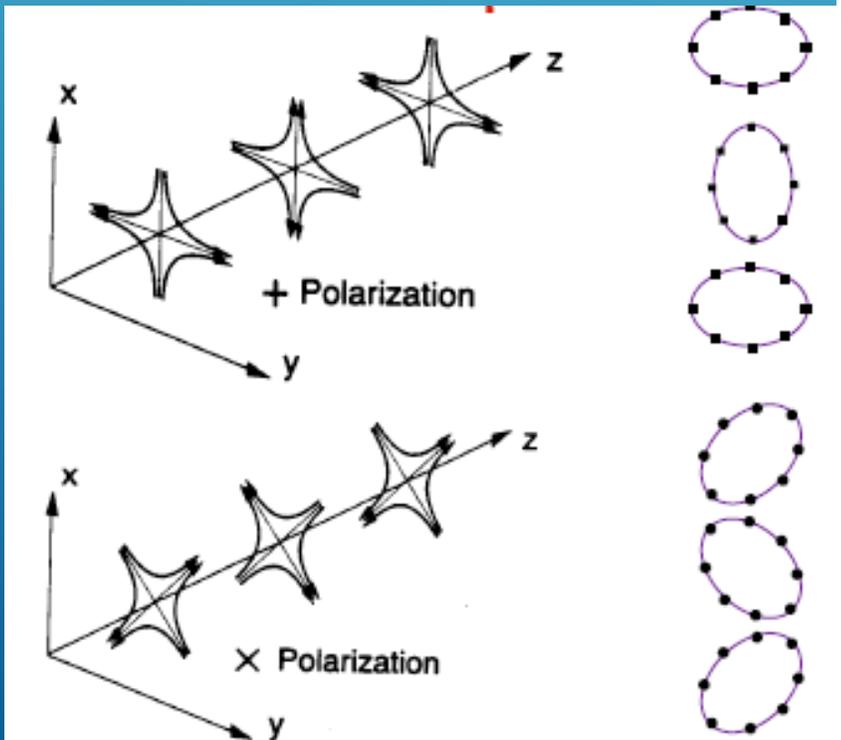
# ИЗМЕНЕНИЕ ДЛИНЫ ПЛЕЧ

Прохождение гравитационной волны вызывает приливные силы. Меняется длина плеч интерферометра. Это можно измерить.

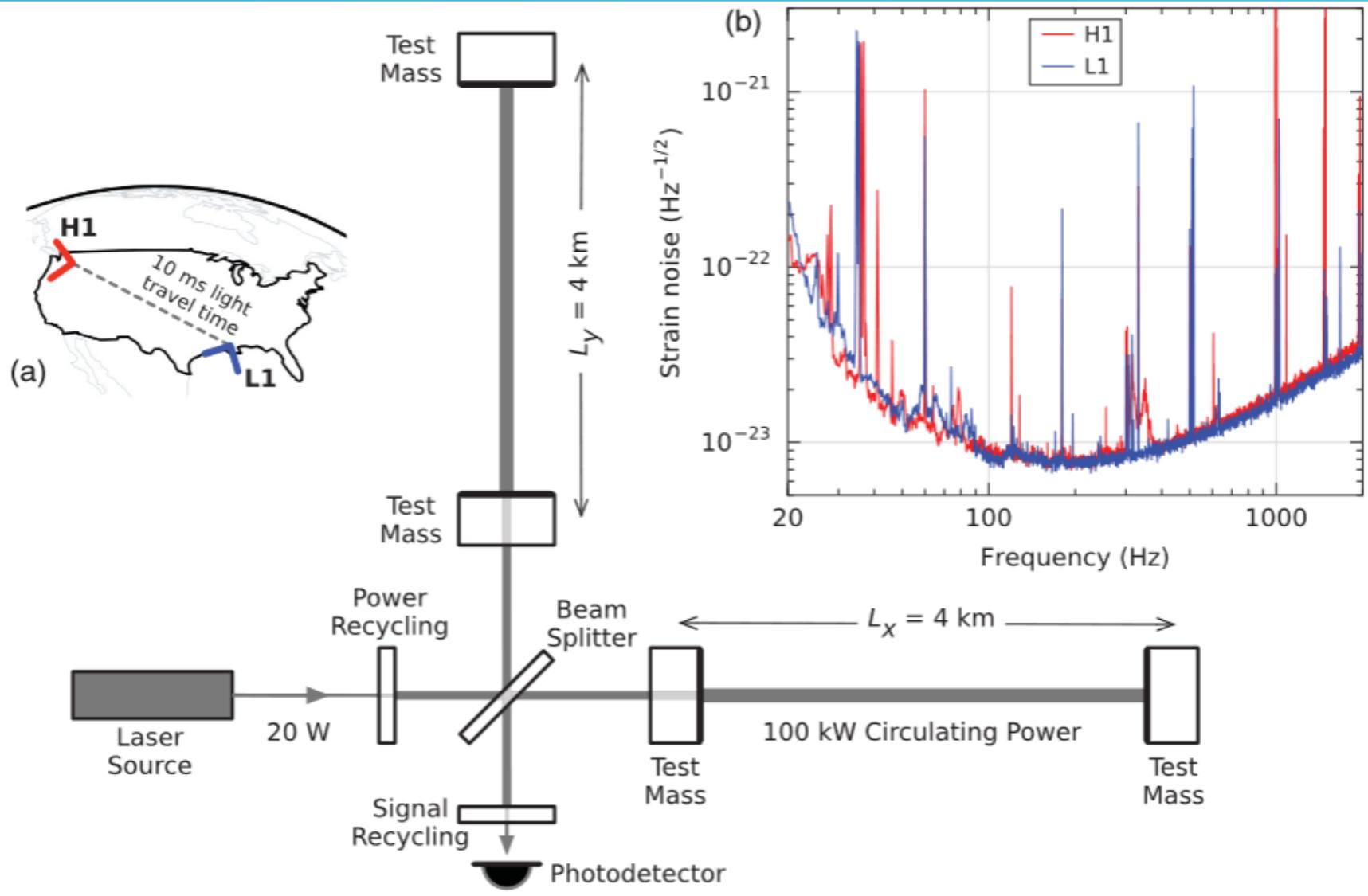
$$\ddot{x}_j = \frac{1}{2} \ddot{h}_{jk}^{GW} x_k + g_j$$



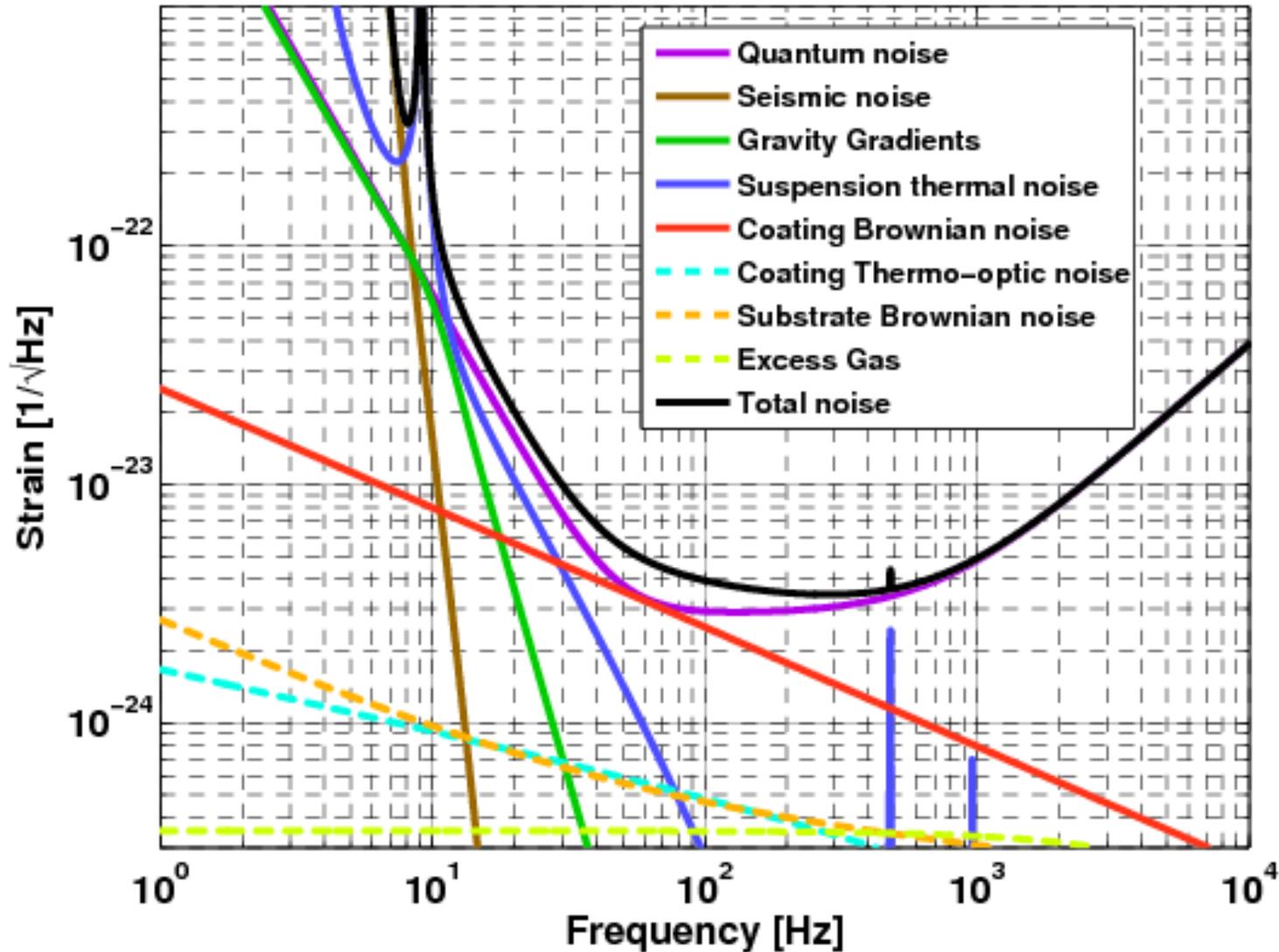
Относительное изменение длины плеч пропорционально амплитуде гравитационной волны. Измерение происходит довольно сложным способом.



# ДЕТЕКТОРЫ И ИХ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ



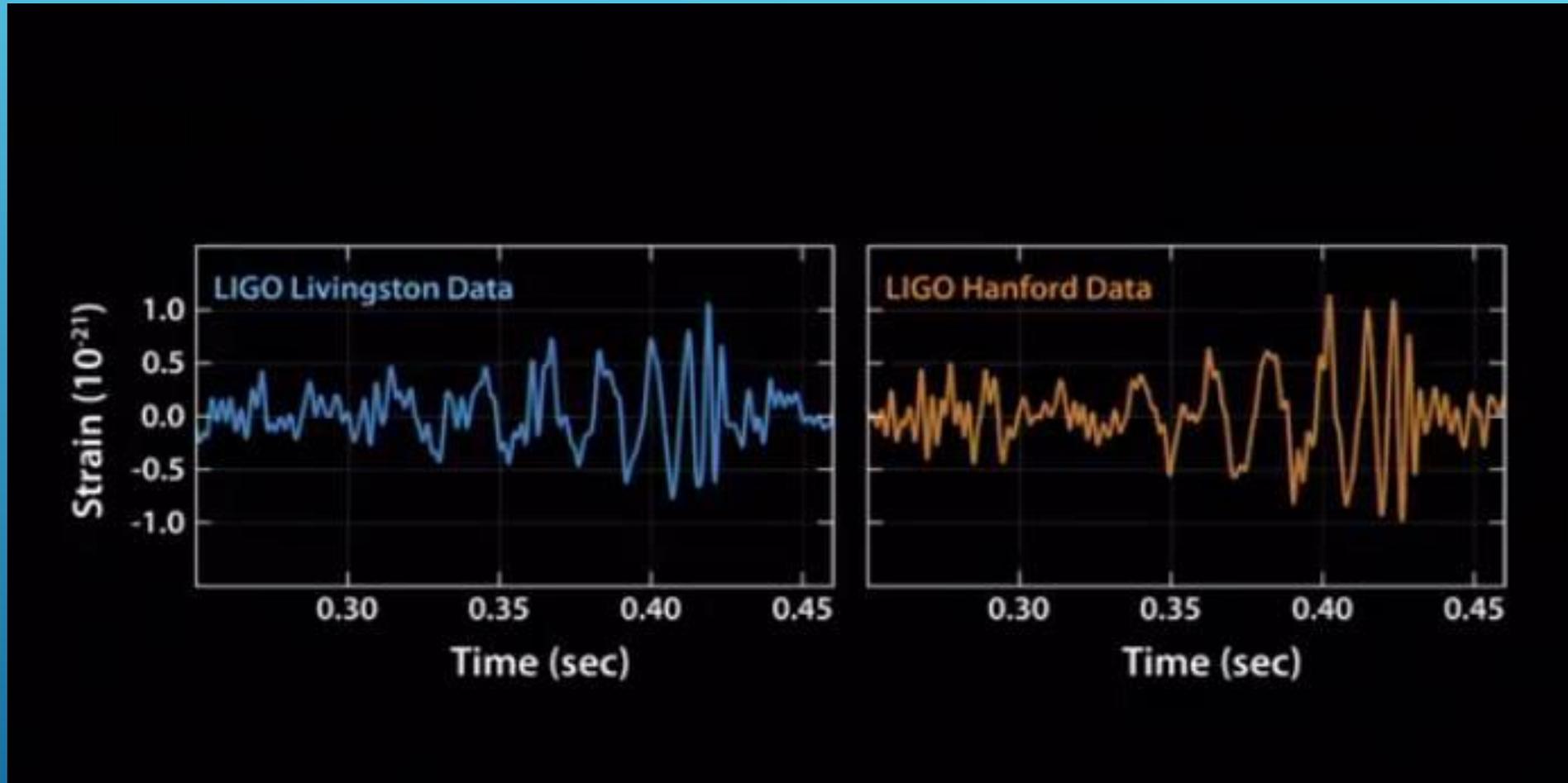
# РАЗНООБРАЗНЫЕ ШУМЫ



Влияют как внешние шумы, так и шумы самого детектора.

Совершенствование инструментов в первую очередь связано с борьбой с шумами.

# GW150914 13-50 ПО МОСКОВСКОМУ ВРЕМЕНИ

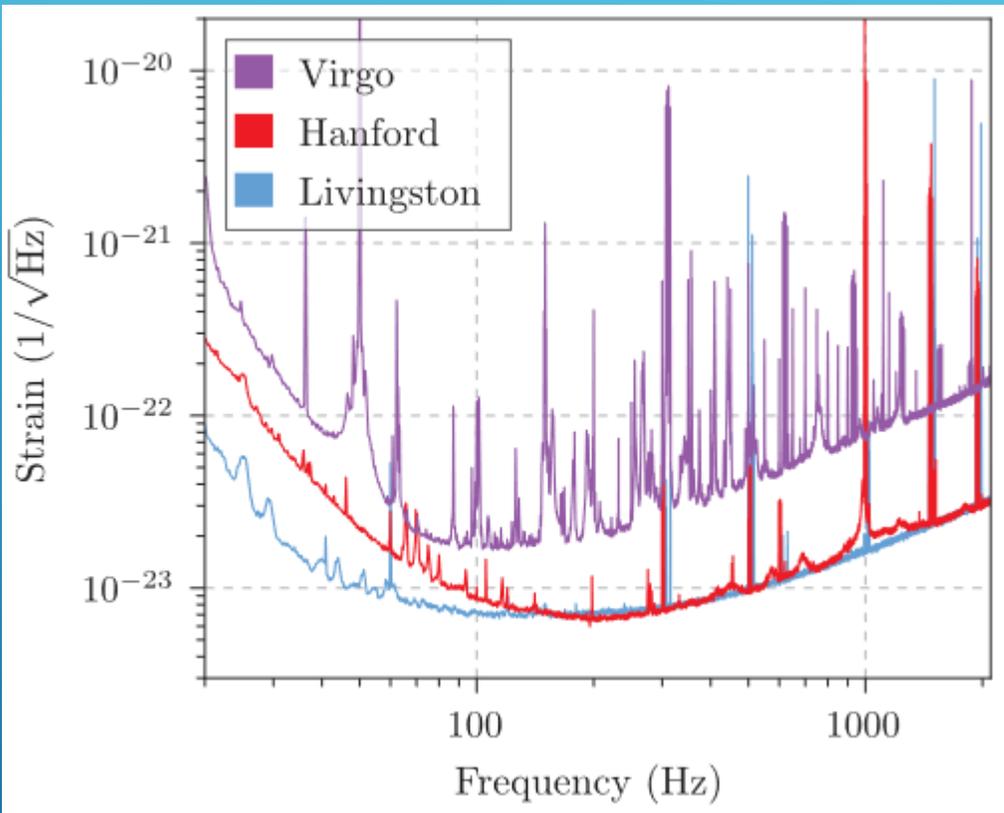


Официальное объявление 11 февраля 2016 года.  
За 16 дней совместных наблюдений двух детекторов  
надежно обнаружено одно событие – слияние двух черных дыр в  $>400$  Мпк от нас.

# LIGO+VIRGO=.... ?

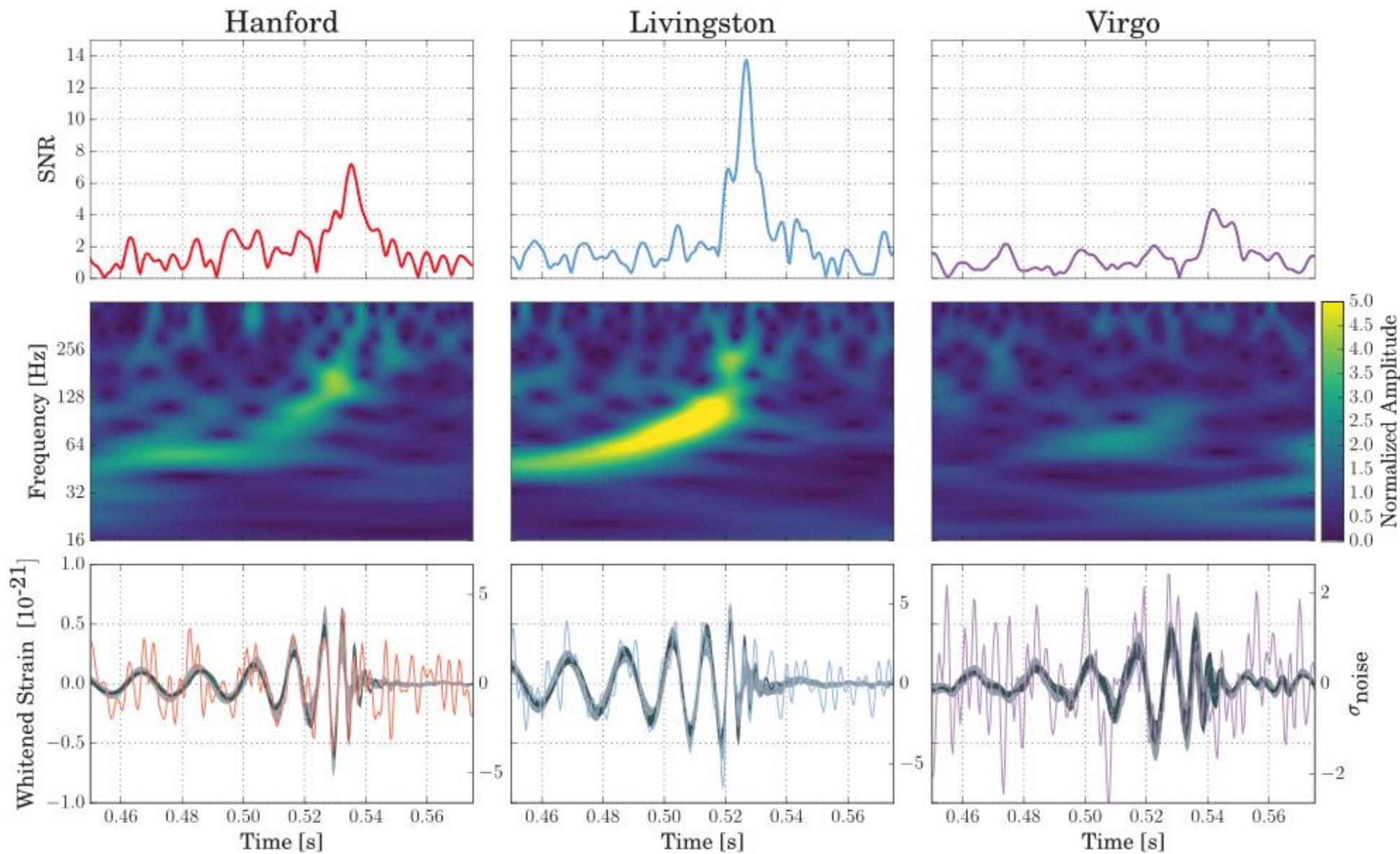
В 2017 году впервые прошли сеансы совместной (одновременной) работы двух детекторов LIGO и детектора VIRGO после серьезной модернизации (и, т.о., увеличения чувствительности) всех трех.

Это позволило точнее определять координаты всплесков на небе.

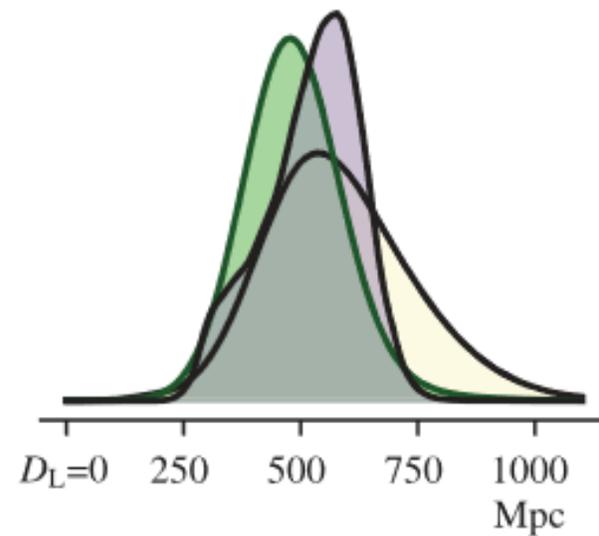
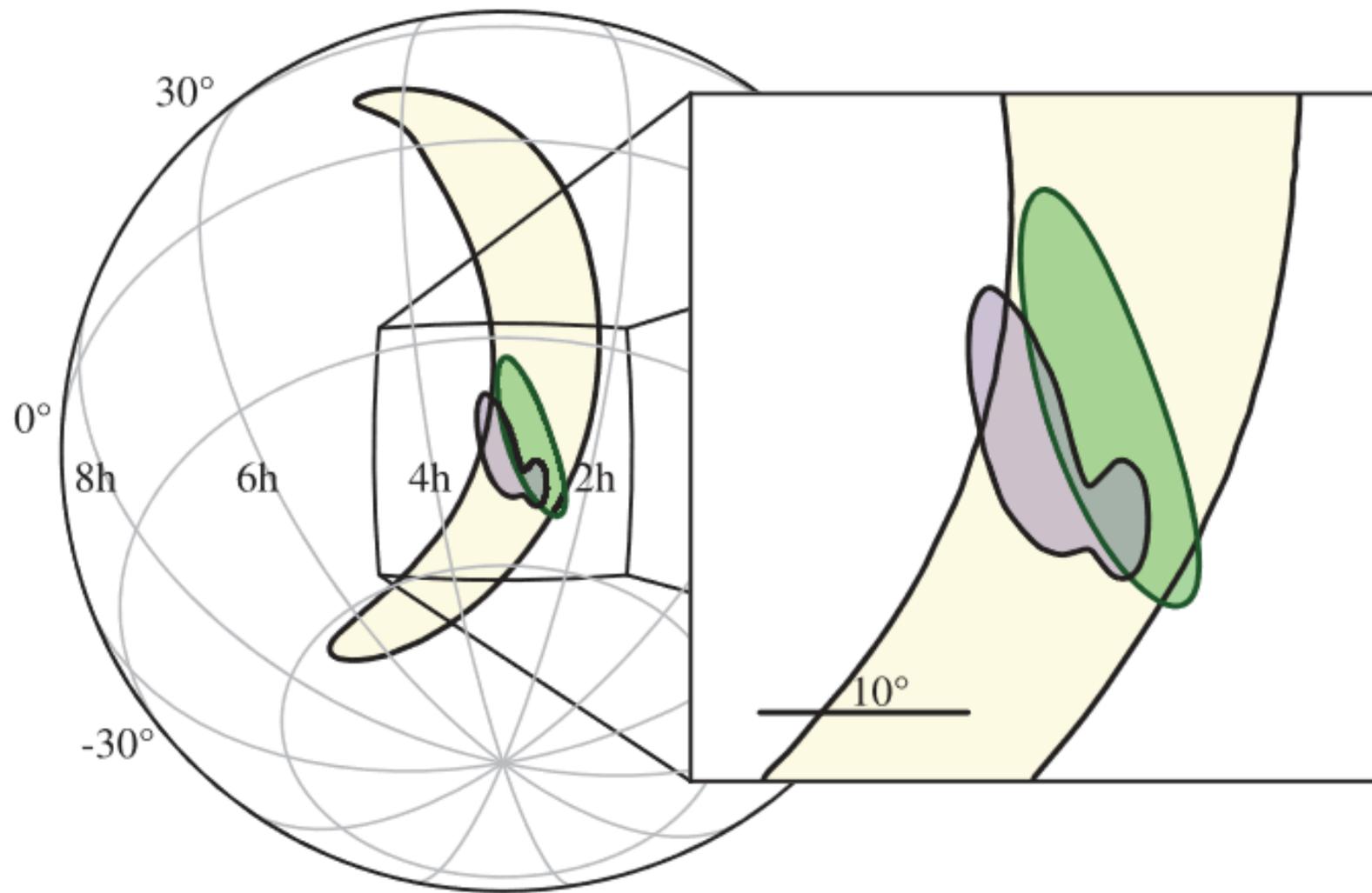


1709.09660

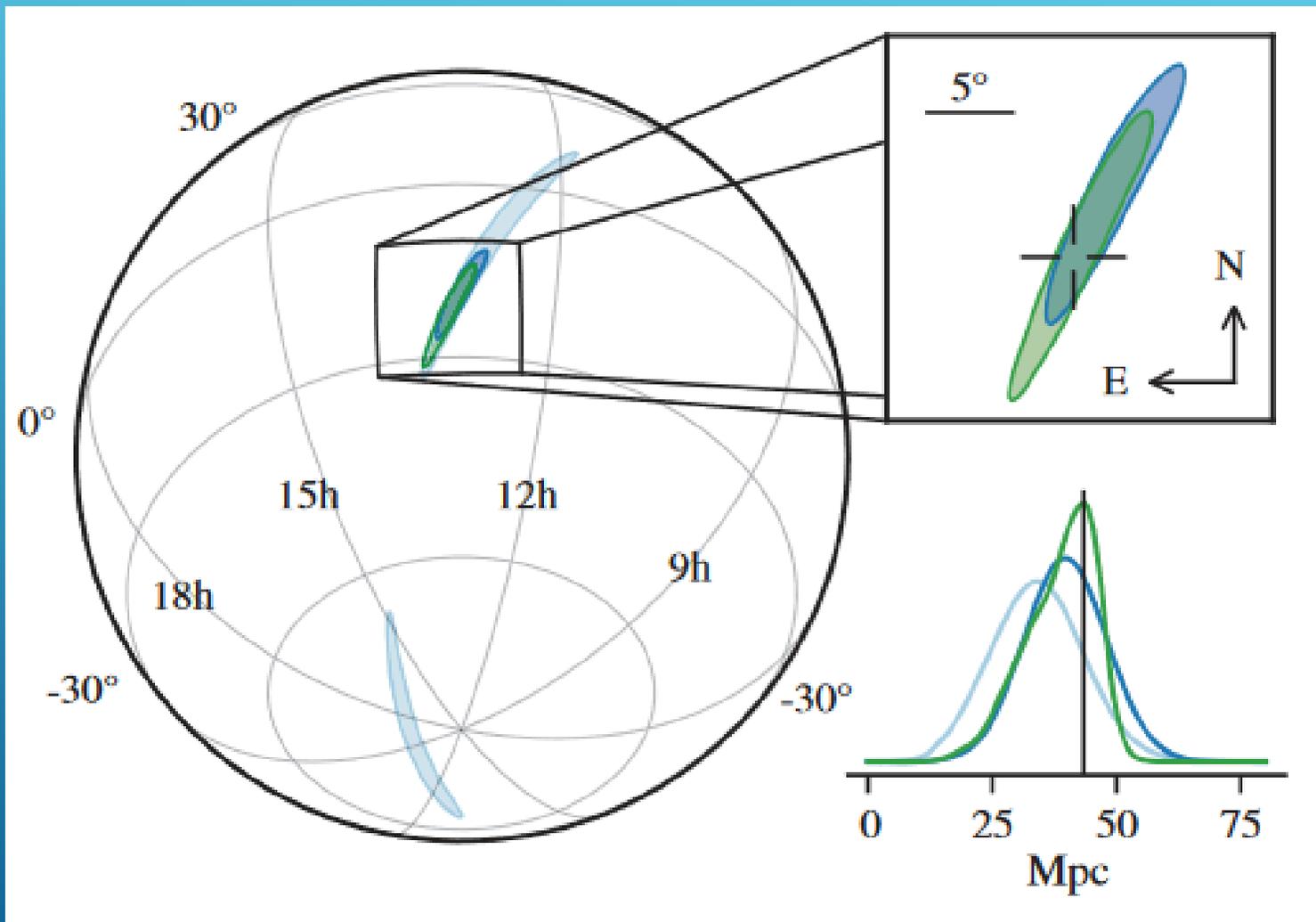




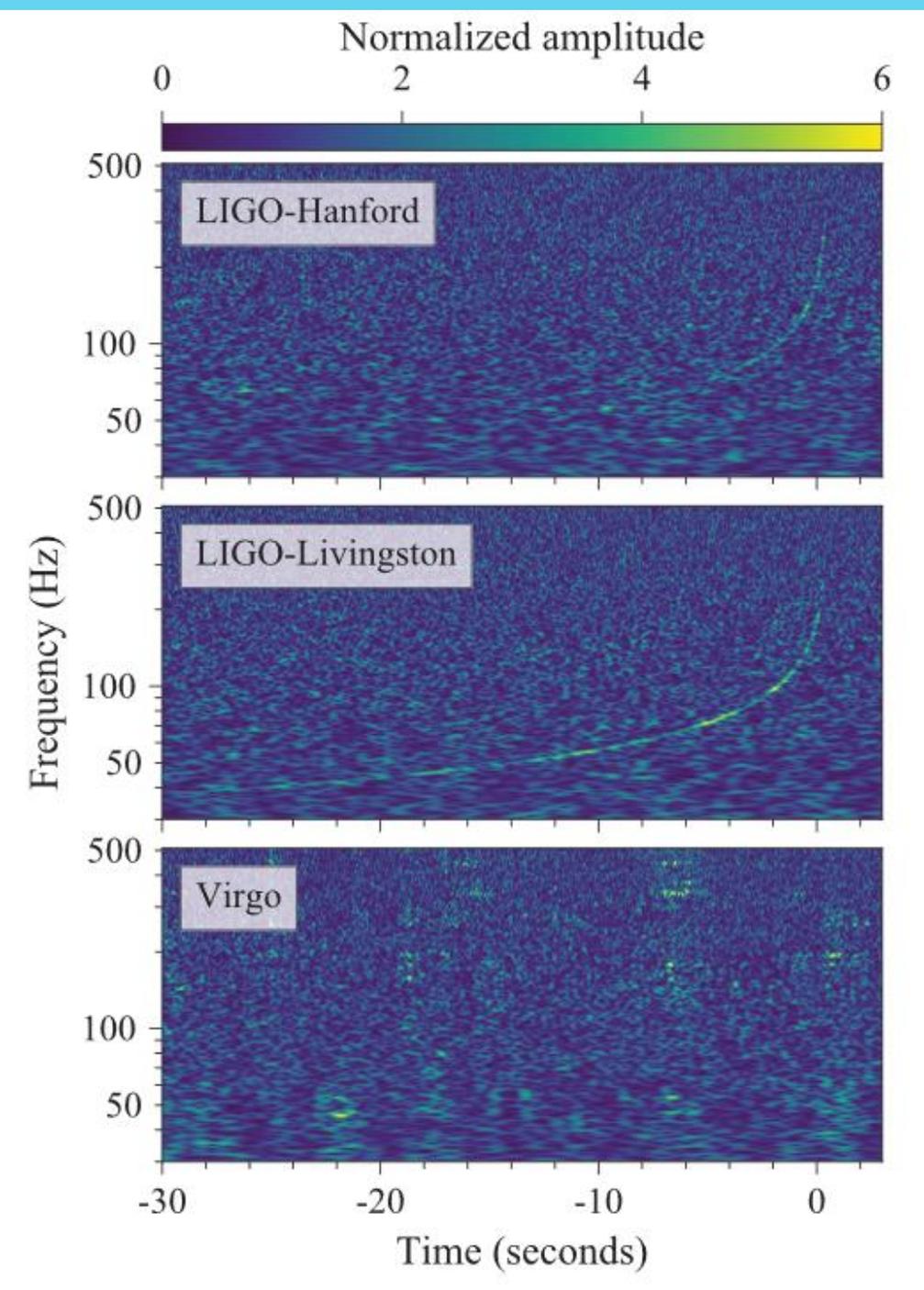
# БЫСТРАЯ И ТОЧНАЯ ЛОКАЛИЗАЦИЯ



# ВСПЛЕСК С НЗ



1710.05832



# ПАРАМЕТРЫ ДВОЙНОЙ СИСТЕМЫ

	Low-spin priors ( $ \chi  \leq 0.05$ )	High-spin priors ( $ \chi  \leq 0.89$ )
Primary mass $m_1$	1.36–1.60 $M_\odot$	1.36–2.26 $M_\odot$
Secondary mass $m_2$	1.17–1.36 $M_\odot$	0.86–1.36 $M_\odot$
Chirp mass $\mathcal{M}$	$1.188^{+0.004}_{-0.002} M_\odot$	$1.188^{+0.004}_{-0.002} M_\odot$
Mass ratio $m_2/m_1$	0.7–1.0	0.4–1.0
Total mass $m_{\text{tot}}$	$2.74^{+0.04}_{-0.01} M_\odot$	$2.82^{+0.47}_{-0.09} M_\odot$
Radiated energy $E_{\text{rad}}$	$> 0.025 M_\odot c^2$	$> 0.025 M_\odot c^2$
Luminosity distance $D_L$	$40^{+8}_{-14}$ Mpc	$40^{+8}_{-14}$ Mpc
Viewing angle $\Theta$	$\leq 55^\circ$	$\leq 56^\circ$
Using NGC 4993 location	$\leq 28^\circ$	$\leq 28^\circ$
Combined dimensionless tidal deformability $\tilde{\Lambda}$	$\leq 800$	$\leq 700$
Dimensionless tidal deformability $\Lambda(1.4M_\odot)$	$\leq 800$	$\leq 1400$

1710.05832

# КЛЮЧЕВЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

- Доказательство связи коротких гамма-всплесков со слияниями нейтронных звезд
- Прямые наблюдения, позволяющие изучать нуклеосинтез при слияниях нейтронных звезд
- Данные по уравнению состояния нейтронных звезд
- Измерение постоянной Хаббла
- Тест принципа эквивалентности
- Тест лоренц-инвариантности
- Измерение скорости распространения гравитационных волн

О фундаментальной физике по GW170817 см. 1710.05834

# ИТАК .....

Астрономия – наблюдательная наука.

Наблюдения идут во всех диапазонах спектра.

Для многих видов наблюдений детекторы необходимо выводить в космос.

Наблюдают не только электромагнитные волны, но и различные виды частиц.

Открыты гравитационные волны.

