



Физика нейтрино.
Второй сезон

МАРК ШИРЧЕНКО

- ❖ 1931 – Предположение о существовании
- ❖ 1934 – Переименование
- ❖ 1959 – Открытие
- ❖ 1962 – Нейтрино бывают разных типов
- ❖ 1968 – Детектирование нейтрино от Солнца
- ❖ 1988 – Дефицит солнечных нейтрино
- ❖ 1989 – Существование трех типов нейтрино
- ❖ 2001 – Доказательство существования осцилляций нейтрино – нейтрино массивны



Нейтрино всё ещё хранит свои загадки

масса→	$\approx 2.3 \text{ МэВ}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ ГэВ}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ ГэВ}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ ГэВ}/c^2$
заряд→	2/3	2/3	2/3	0	0
спин→	1/2	1/2	1/2	1	0
	u верхний	c очарованный	t истинный	g глюон	H бозон Хиггса
КВАРКИ	$\approx 4.8 \text{ МэВ}/c^2$	$\approx 95 \text{ МэВ}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ ГэВ}/c^2$	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	d нижний	s странный	b прелестный	γ фотон	
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ МэВ}/c^2$	$1.777 \text{ ГэВ}/c^2$	$91.2 \text{ ГэВ}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	e электрон	μ мюон	τ тау	Z Z бозон	
ЛЕПТОНЫ	$< 2.2 \text{ эВ}/c^2$	$< 0.17 \text{ МэВ}/c^2$	$< 15.5 \text{ МэВ}/c^2$	$80.4 \text{ ГэВ}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	ν_e электронное нейтрино	ν_μ мюонное нейтрино	ν_τ тау нейтрино	W W бозон	
				КАЛИБРОВОЧНЫЕ БОЗОНЫ	

- Малая (но не нулевая!) масса
- Нейтрино \neq ? = Антинейтрино (Majorana/Dirac)
- *S:V:T:A:P* (правые нейтрино?)
- Реликтовые нейтрино ($400 \nu/cm^3$)
- Электромагнитные свойства (Магнитный Момент ?)
- Осцилляции
- Стерильное состояние
- Йерархия

Осцилляции нейтрино

- Явление известно давно (Б.Понтекорво предсказал).
- Удаляясь от источника, нейтрино *как бы* превращается из одного вида в другой и обратно («меняет окраску»).
- Нобелевская премия 2015 г. – за экспериментальное открытие осцилляций.

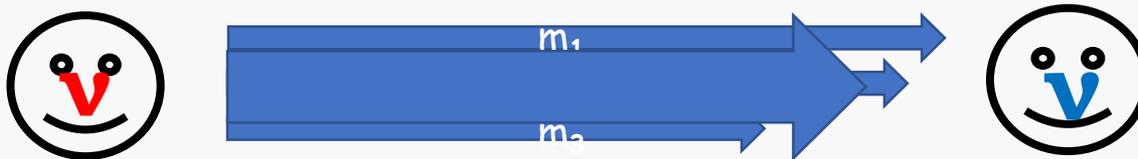


Осцилляции нейтрино

- Считается, что волновая функция нейтрино состоит из 3 компонентов, соответствующих разным массам: m_1 , m_2 , m_3 .

$$\left. \begin{matrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{matrix} \right\} = \left\{ \begin{matrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{matrix} \right.$$

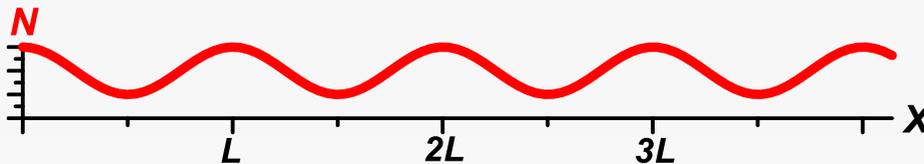
- Складываясь по-разному (в разных фазах), эти компоненты образуют электронное, мюонное или тау нейтрино: ν_e , ν_μ , ν_τ .
- Рассмотрим, например, электронное нейтрино, которое с фиксированной энергией E вылетело из источника и движется в направлении X .



- Поскольку массы $m_1 \neq m_2 \neq m_3$, то и скорости распространения этих компонентов волновой функции для данной энергии E тоже различны.
- Поэтому за время t набегает ненулевая разность хода, и фазы сложения этих трех компонентов начинают отличаться от исходных. Теперь нейтрино «частично сменило окраску» и уже не является чисто электронным

Осцилляции нейтрино

- Итак, пройдя какое-то расстояние, ν_e будет выглядеть уже не как ν_e , а как смесь $\nu_e + \nu_\mu + \nu_\tau$. Еще через какое-то время сдвиг фаз достигнет 2π , и все снова вернется на круги своя.
- Если у нас есть детектор, «заточенный» на регистрацию именно электронных нейтрино, то, измеряя их поток на разном расстоянии X от источника, мы с удивлением увидим осцилляции: количество отсчетов N сначала уменьшится (по сравнению с законом $1/X^2$), потом снова вернется, и т. д.

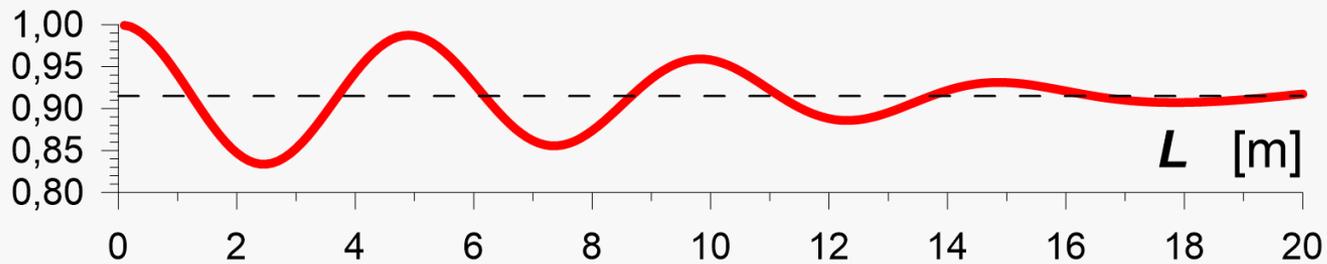


- Глубина таких осцилляций зависит от параметра $\sin^2 2\theta$, а период L — от энергии E и разности масс состояний, между которыми происходит осцилляция — Δm^2 . Если есть осцилляции $\Rightarrow \Delta m^2 \neq 0 \Rightarrow$ есть ненулевая масса!!!
- Вероятность «выживания» нейтрино определенного вида (флейвора):

$$p(\nu_e \rightarrow \nu_e) = 1 - \sin^2(2\theta) \cdot \sin^2 \left(1.267 \frac{\Delta m^2 \cdot L}{E} \right)$$

Осцилляции нейтрино

- Если нейтрино не монохроматичны, то вместо одной синусоиды получается целый набор с разными частотами. Если в самом начале они все синфазны, то с ростом дистанции все «размывается» и асимптотически сводится просто к заниженному значению N .



- Размытие возрастает при увеличении размеров источника и/или детектора, а также при ухудшении энергетического разрешения.

ПМНС-матрица

Общий вид

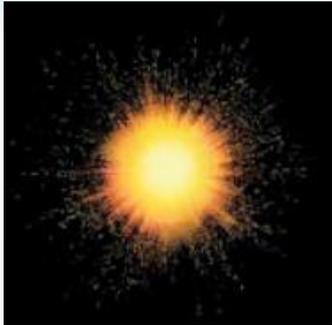
$$\begin{matrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{matrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} (m_1 \quad m_2 \quad m_3)$$

Игры с представлением

$$\begin{aligned}
 U &= \begin{bmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{i\alpha_1/2} & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\alpha_2/2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{i\alpha_1/2} & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\alpha_2/2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},
 \end{aligned}$$

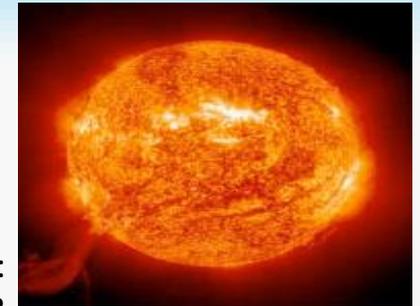
Углы смешивания (арrows point to $c_{13}, s_{13}e^{-i\delta}, -s_{13}e^{i\delta}, c_{12}, s_{12}$)
 CP-нарушающая фаза (arrow points to $-i\delta$)
 Майорановские фазы (arrows point to $e^{i\alpha_1/2}, e^{i\alpha_2/2}$)

Какие бывают нейтрино?



Реликтовые нейтрино
(остались от Большого Взрыва):

$E=0.0004$ эВ
«нейтринный газ»



Солнечные нейтрино:
 7×10^{10} 1/см²/с $E < 20$ МэВ

Атмосферные нейтрино:
~ ТэВ



Нейтрино от ускорителей:
до ГэВ



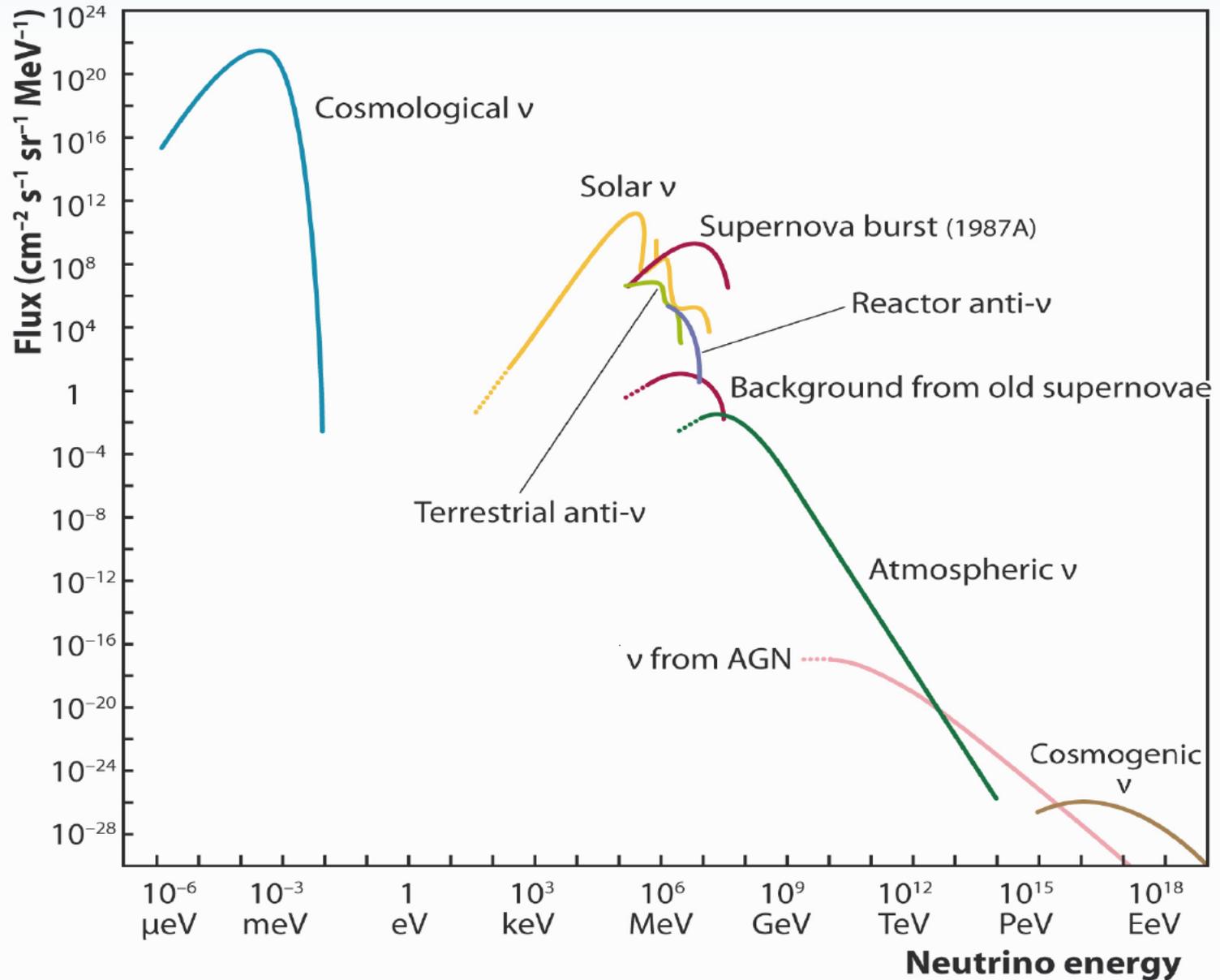
Реакторные
анти-нейтрино:

$E < 10$ МэВ

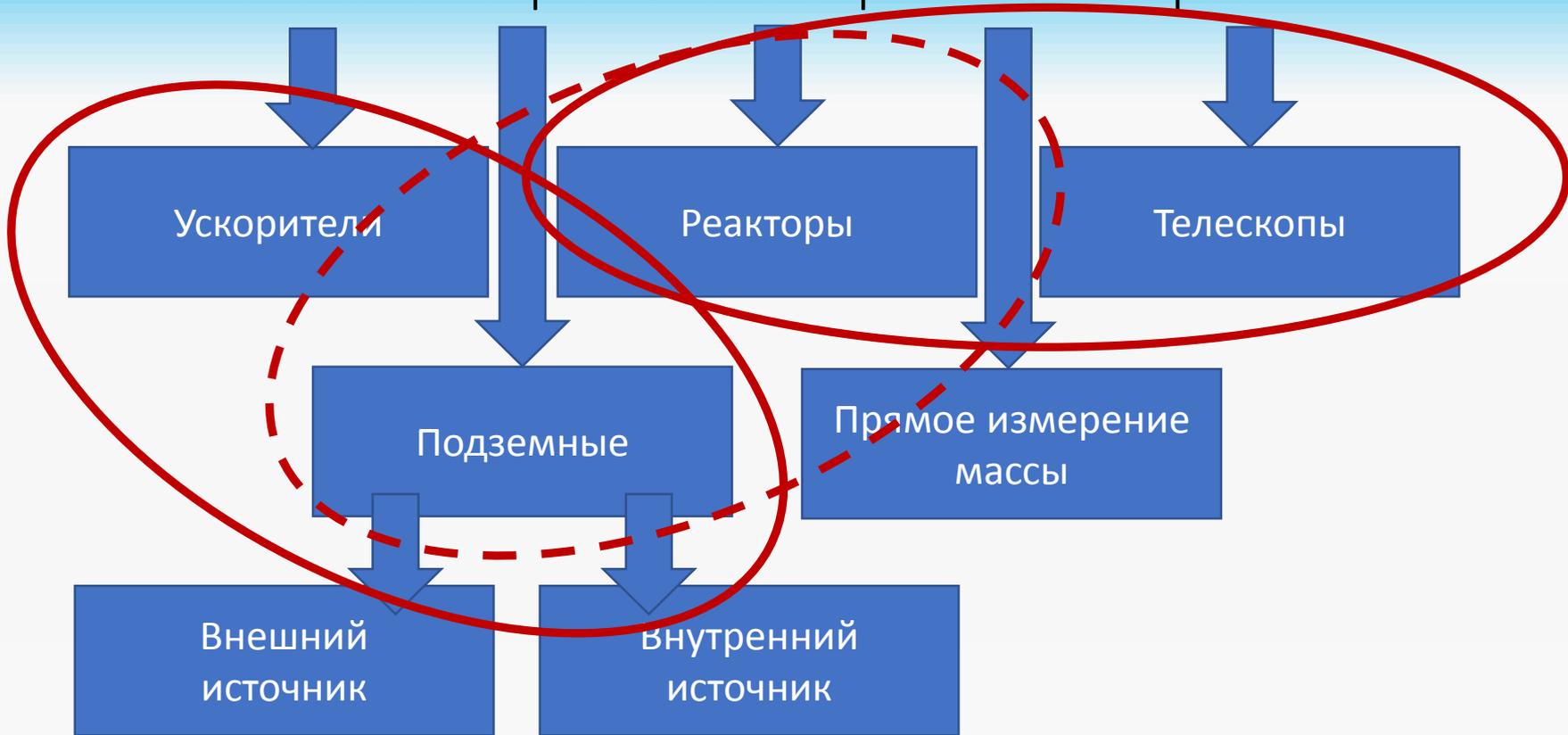
Космические нейтрино, ПэВ – ЭэВ



Энергетический спектр



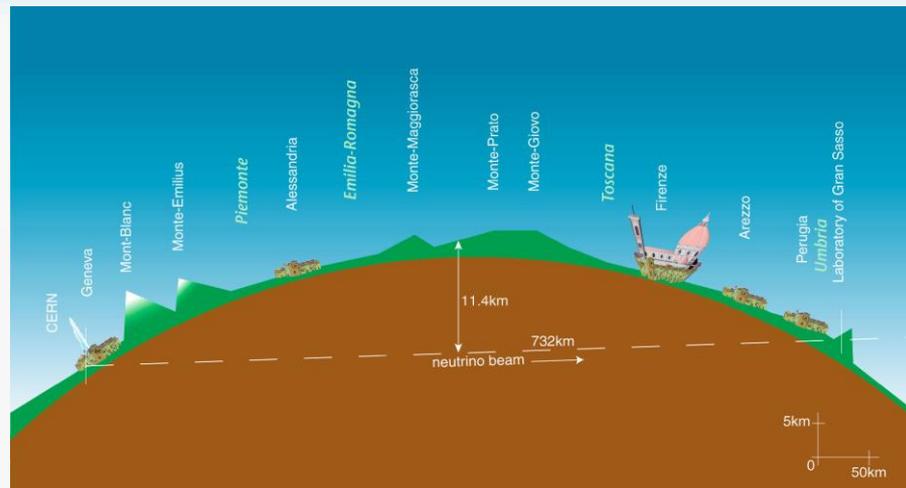
Типы экспериментов в физике нейтрино



V·T·E		Neutrino detectors, experiments, and facilities		[hide]
Discoveries	Cowan–Reines (ν_e) · Lederman–Schwartz–Steinberger (ν_μ) · DONUT (ν_τ) · Neutrino oscillation · SN 1987 neutrino burst			
Operating (divided by primary neutrino source)	Astronomical	ANITA · ANTARES · BDUNT · Borexino · BUST · HALO · IceCube · LVD · NEVOD · SAGE · Super-Kamiokande · SNEWS		
	Reactor	Daya Bay · Double Chooz · KamLAND · RENO · STEREO		
	Accelerator	ICARUS (Fermilab) · MicroBooNE · MINERvA · MiniBooNE · NA61/SHINE · NOvA · NuMI · T2K · COHERENT		
	$0\nu\beta\beta$	AMoRE · COBRA · CUORE · EXO · GERDA · KamLAND-Zen · MAJORANA · NEXT · PandaX · XMASS		
	Other	KATRIN · WITCH		
Construction	ANNIE · ARA · ARIANNA · BEST · DUNE · JUNO · KM3NeT · SNO+ · SuperNEMO			
Retired	AMANDA · CDHS · Chooz · CNGS · Cuoricino · DONUT · ERPM · GALLEX · Gargamelle · GNO · Heidelberg-Moscow · Homestake · ICARUS · IGEX · IMB · K2K · Kamiokande · KARMEN · KGF · LSND · MACRO · MINOS · MINOS+ · NARC · NEMO · OPERA · RICE · SciBooNE · SNO · Soudan 2 · Utah			
Proposed	CUPID · GRAND · Hyper-Kamiokande · INO · LAGUNA · LEGEND · LENA · Neutrino Factory · nEXO · Nucifer · SBND · UNO · JEM-EUSO · WATCHMAN			
Cancelled	DUMAND Project · Long Baseline Neutrino Experiment · NEMO Project · NESTOR Project · SOX · BOREX			
See also	BNO · Kamioka Observatory · LNGS · SNOLAB · List of neutrino experiments			

Opera

(Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus)



Цель	проверка осцилляций $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$
Идея	пучок ν_{μ} от SPS в LNGS
Рабочее тело	150 000 фотоэмульсионных ячеек
Расстояние	732 км
Участники	200 ч/36 инст/13 стран

Measurement of the neutrino velocity with the OPERA detector in the CNGS beam

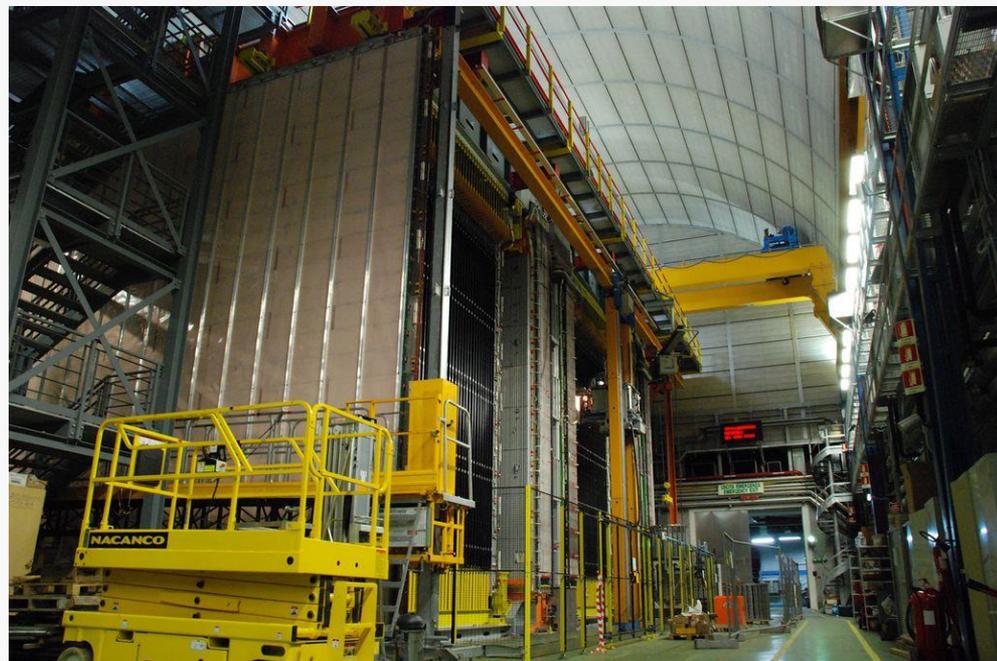
Abstract

The OPERA neutrino experiment at the underground Gran Sasso Laboratory has measured the velocity of neutrinos from the CERN CNGS beam over a baseline of about 730 km with much higher accuracy than previous studies conducted with accelerator neutrinos. The measurement is based on high-statistics data taken by OPERA in the years 2009, 2010 and 2011. Dedicated upgrades of the CNGS timing system and of the OPERA detector, as well as a high precision geodesy campaign for the measurement of the neutrino baseline, allowed reaching comparable systematic and statistical accuracies. An early arrival time of CNGS muon neutrinos with respect to the one computed assuming the speed of light in vacuum of $(60.7 \pm 6.9 \text{ (stat.)} \pm 7.4 \text{ (sys.)})$ ns was measured. This anomaly corresponds to a relative difference of the muon neutrino velocity with respect to the speed of light $(v-c)/c = (2.48 \pm 0.28 \text{ (stat.)} \pm 0.30 \text{ (sys.)}) \times 10^{-5}$.

1. Introduction

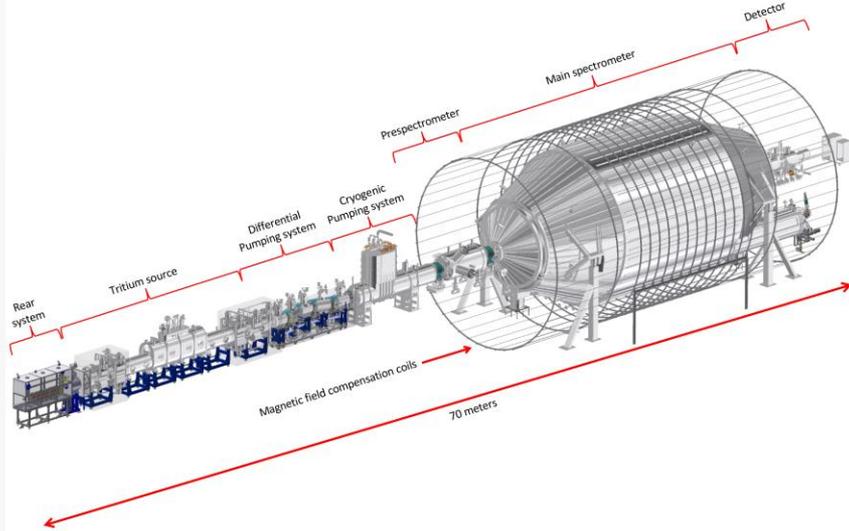
The OPERA neutrino experiment [1] at the underground Gran Sasso Laboratory (LNGS) was designed to perform the first detection of neutrino oscillations in direct appearance mode in the $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$ channel, the signature being the identification of the τ lepton created by its charged current (CC) interaction [2].

In addition to its main goal, the experiment is well suited to determine the neutrino velocity with high accuracy through the measurement of the time of flight and the distance between the source of the CNGS neutrino beam at CERN (CERN Neutrino beam to Gran Sasso) [3] and the OPERA detector at LNGS. For CNGS neutrino energies, $\langle E_{\nu} \rangle = 17$ GeV, the relative deviation from the speed of light c of the neutrino velocity due to its finite rest mass is expected to be smaller than 10^{-19} , even assuming the mass of the heaviest neutrino *eigenstate* to be as large as 2 eV . Hence, a large deviation of the neutrino velocity from c would be a striking result.



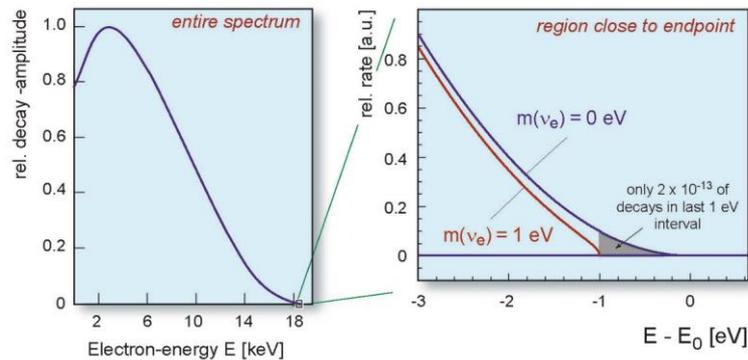
Katrin

Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment



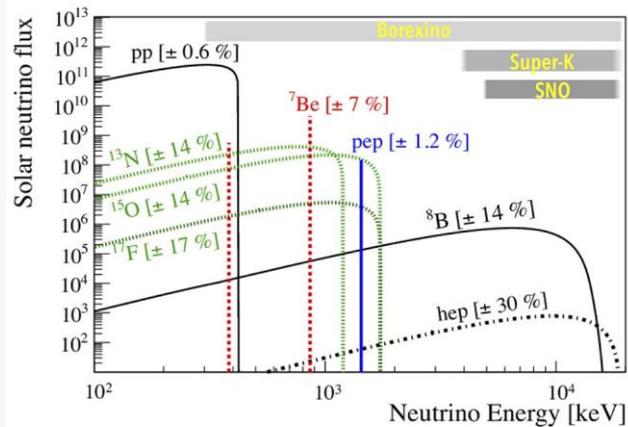
Цель	прямое измерение массы нейтрино
Идея	Измерение "хвоста" бета спектра
Рабочее тело	MAC-E-Filters
Расстояние	0
Участники	20 инст/7 стран

$$m_e < 1.1 \text{ эВ}$$



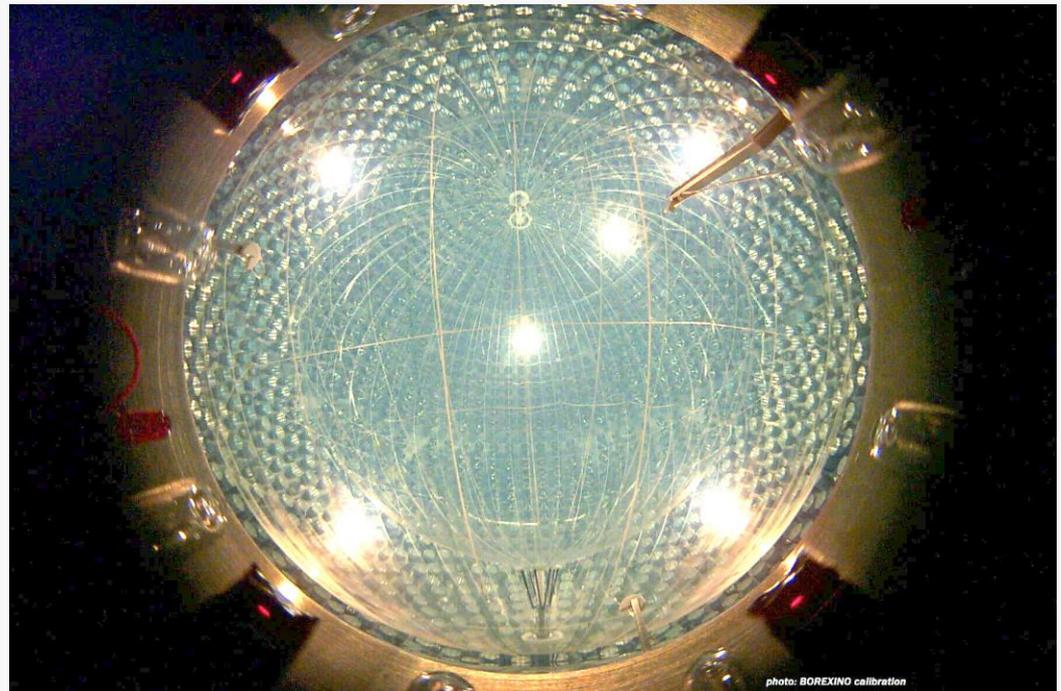
BOREXINO

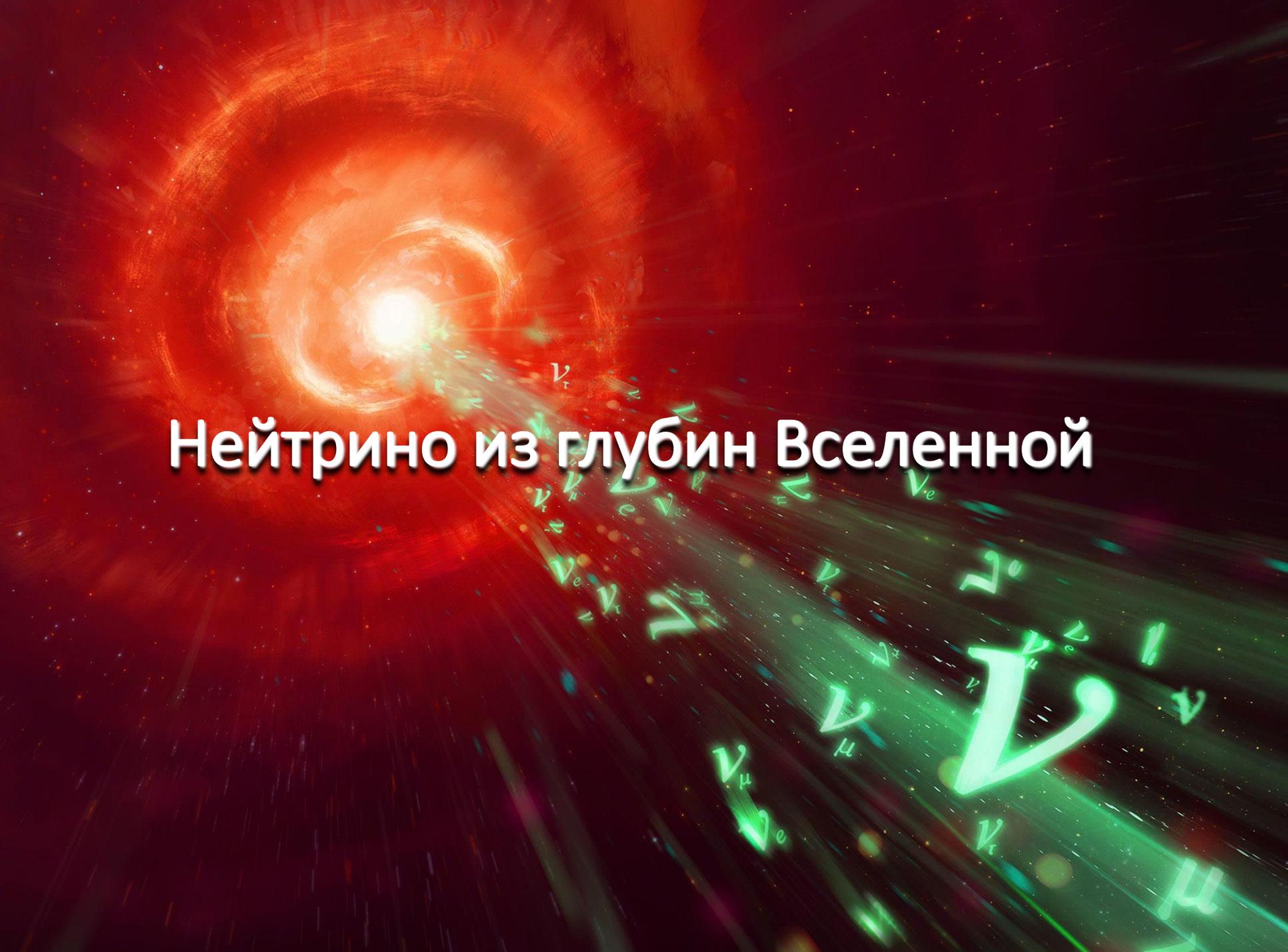
BORon solar neutrino Experiment (small)



Цель	измерение индивидуальных вкладов солнечных нейтрино
Идея	Сцинтилляции при отсутствии фона
Рабочее тело	Сверхчистый сцинтилляционный калориметр
Расстояние	140 000 000 км
Участники	160 ф/29 инст/7 стран

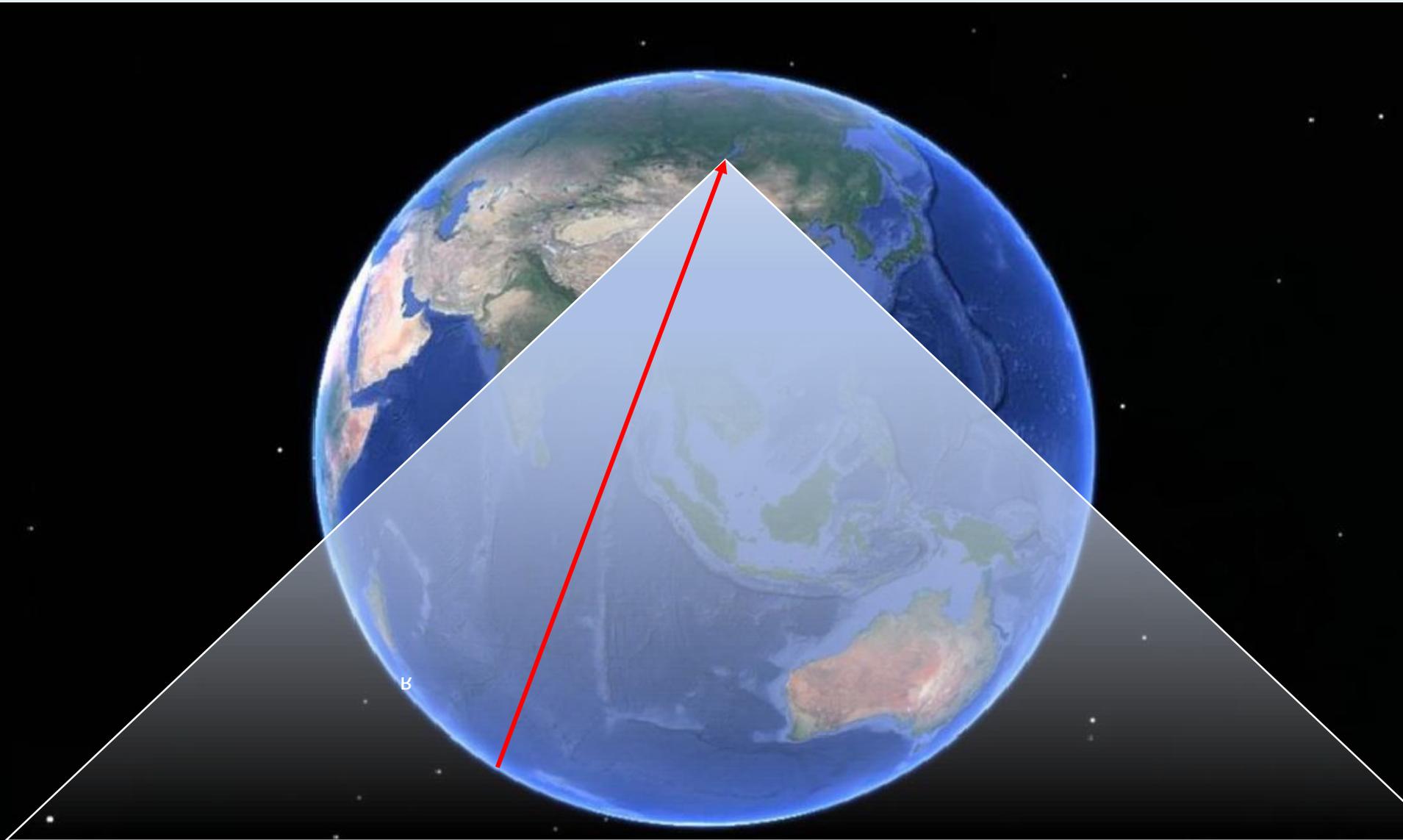
- Изучение PP-цикла
- Поиск нейтрино от Гамма-всплесков
- Изучение годовых модуляция потока нейтрино
- Исследование процессов образования геонейтрино
- Измерение магнитного момента нейтрино





Нейтрино из глубин Вселенной

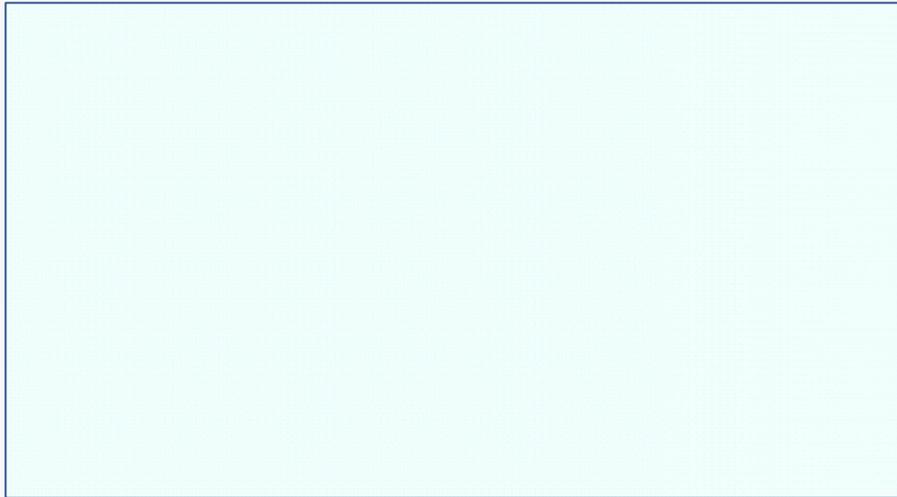
Космические нейтрино



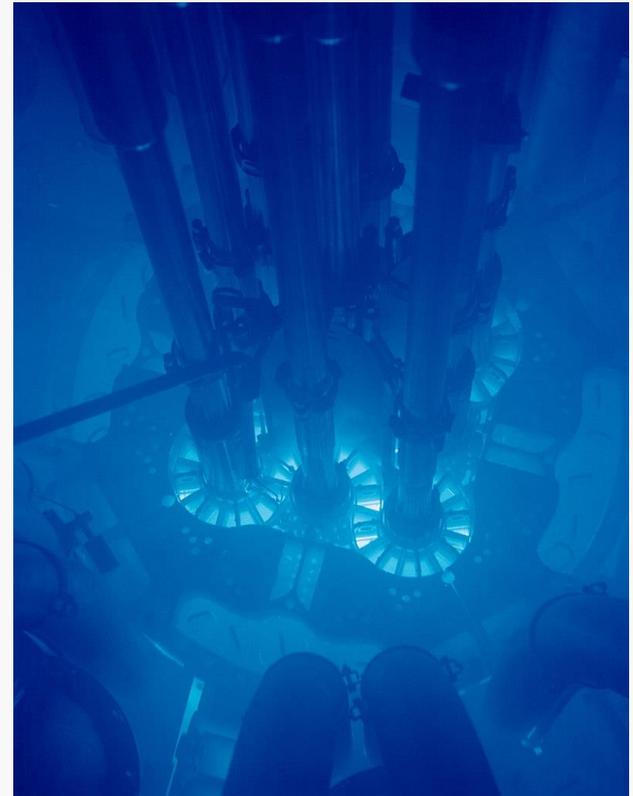
Идея регистрации – черенковское излучение

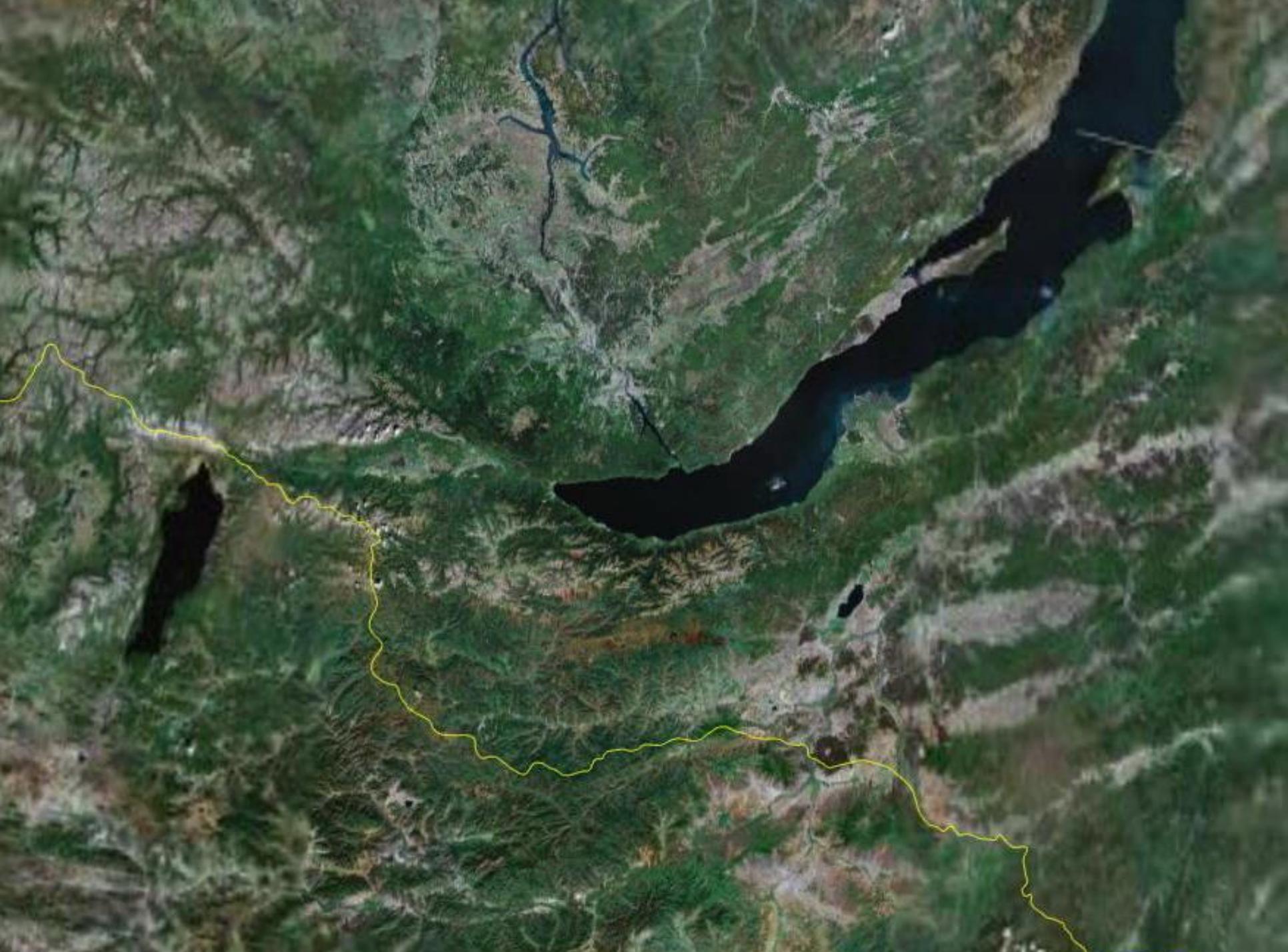
- Нейтрино передаёт энергию вторичным частицам – мюонам.
- Мюоны обладают достаточной энергией, чтобы лететь быстрее скорости света в среде

$$\cos \theta_c = \frac{c}{nv}$$

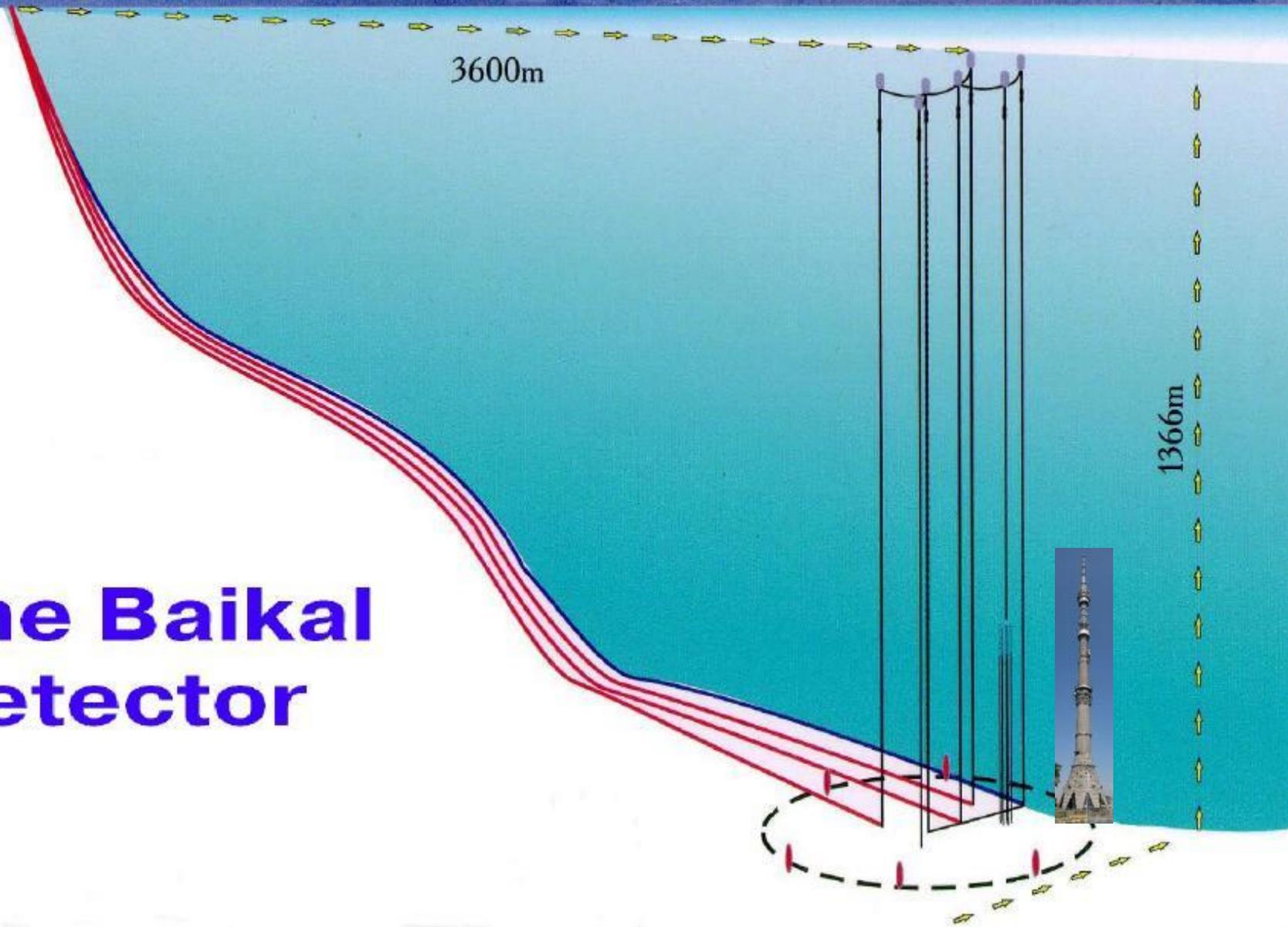


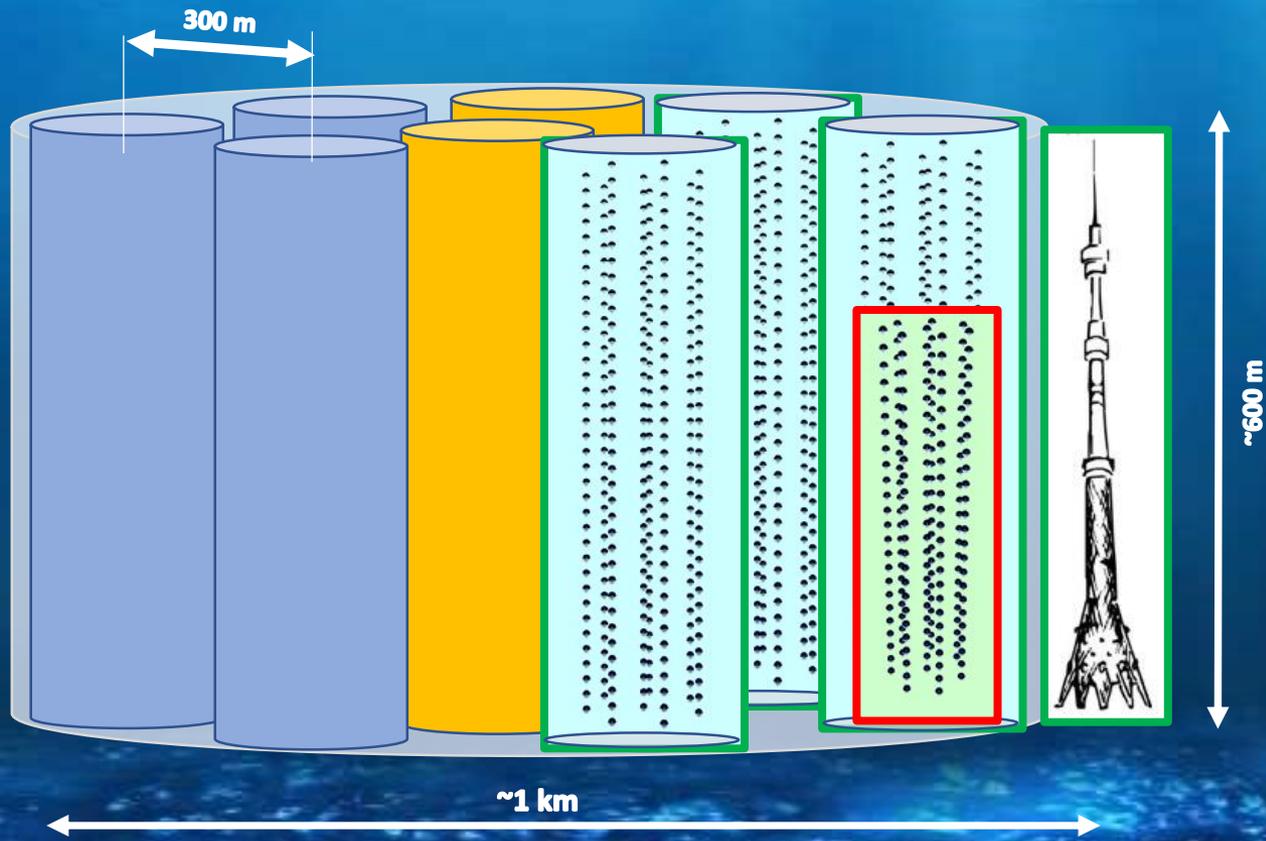
Нам нужен подходящий объём чистой прозрачной жидкости

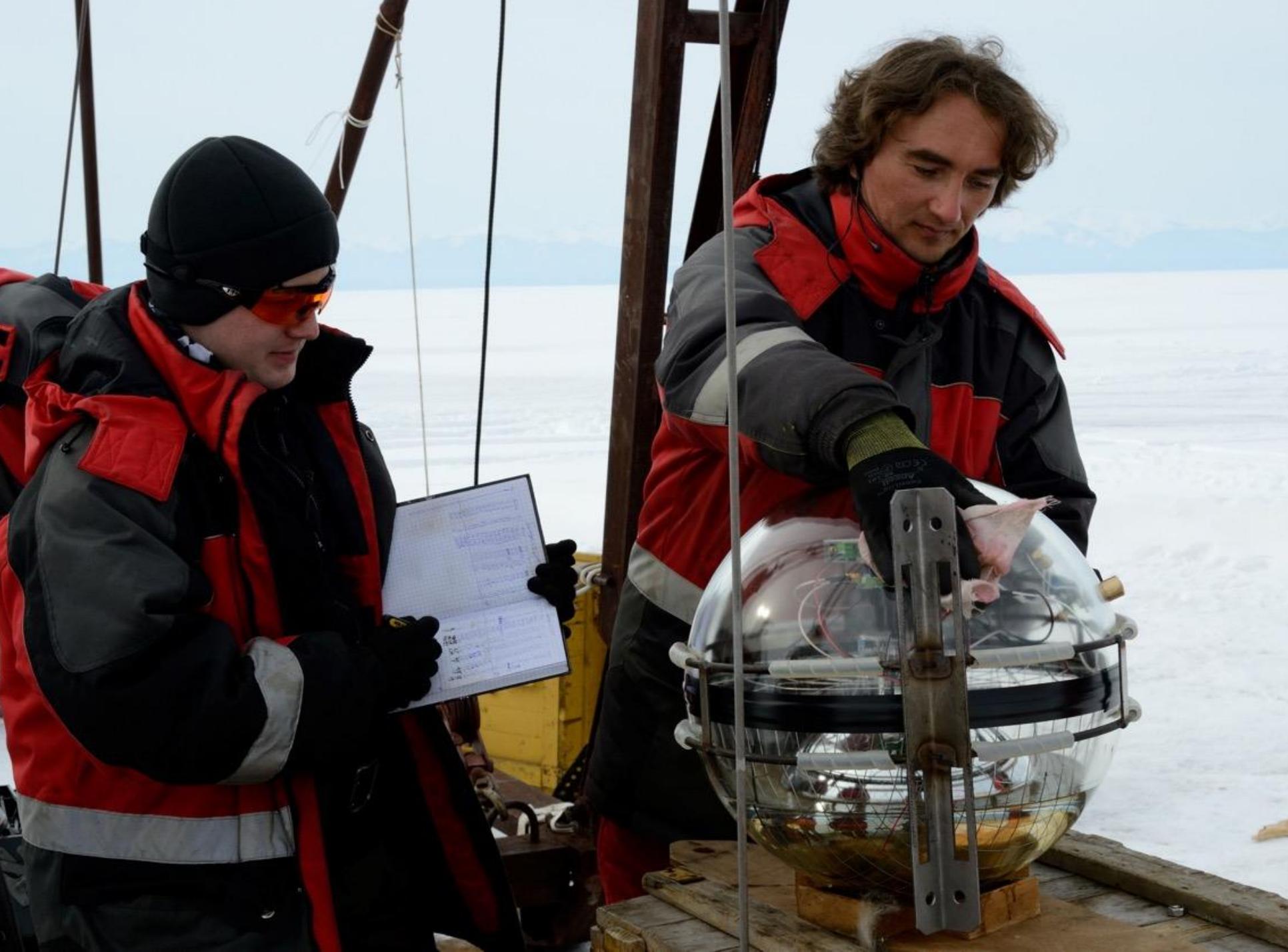


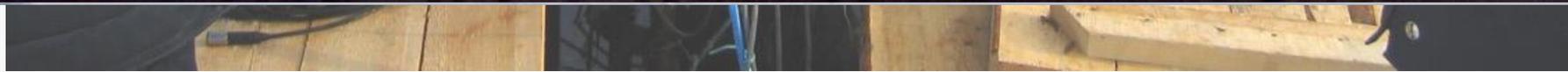


The Baikal Detector

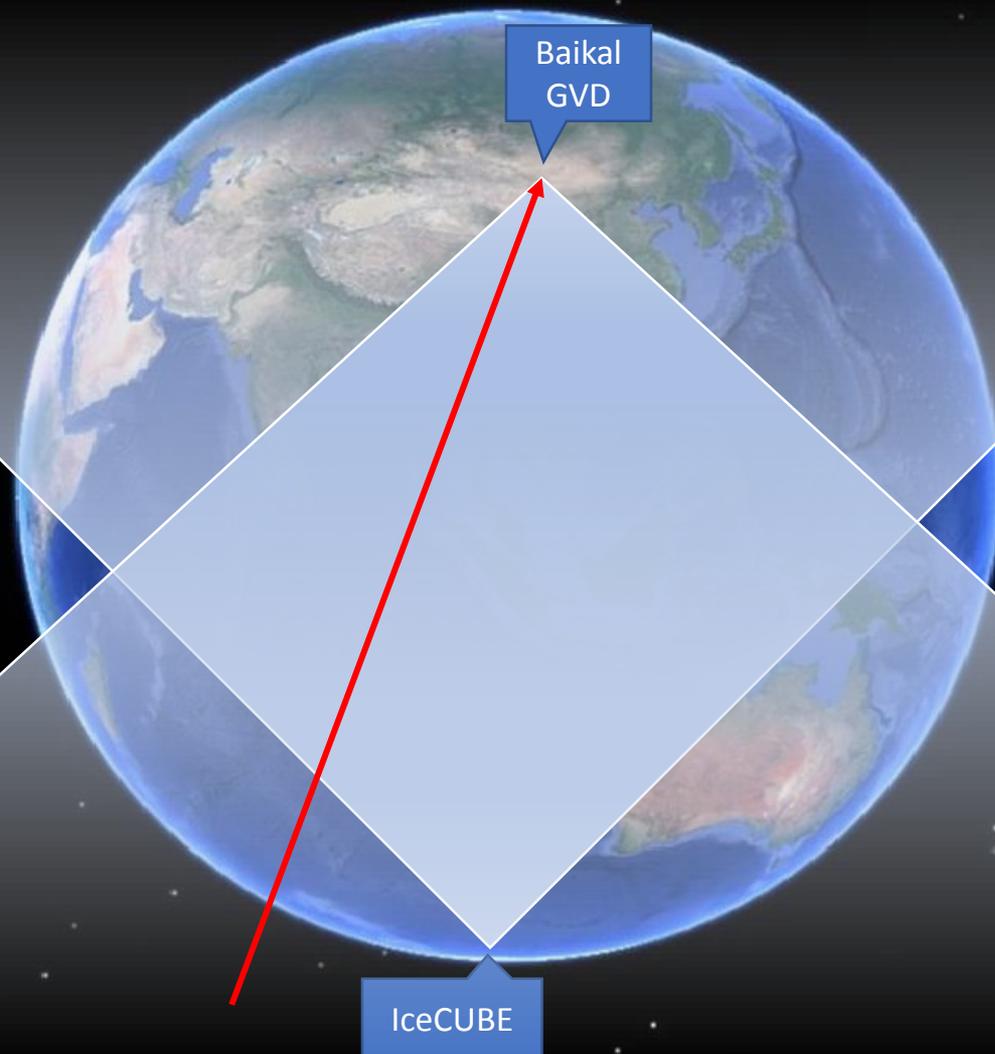








Глобальная нейтринная сеть



Байкальский нейтринный телескоп



Multi-messenger astronomy

Event type	Electromagnetic	Cosmic rays	Gravitational waves	Neutrinos	Example
Solar flare	yes	yes	-	-	SOL1942-02-28
Supernova	yes	-	predicted	yes	SN 1987A
Neutron star merger	yes	-	yes	predicted	GW170817
Blazar	yes	-	-	yes	TXS 0506+056



Первое обнаружение нейтрино от блазара

RESEARCH

RESEARCH ARTICLE

NEUTRINO ASTROPHYSICS

Neutrino emission from the direction of the blazar TXS 0506+056 prior to the IceCube-170922A alert

KIceCube Collaboration¹*

A high-energy neutrino event detected by IceCube on 22 September 2017 was coincident in direction and time with a gamma-ray flare from the blazar TXS 0506+056. Prompted by this association, we investigated 9.3 years of IceCube neutrino observations to search for excess emission at the position of the blazar. We found an excess of high-energy neutrino events, with respect to atmospheric backgrounds, at that position between September 2014 and March 2018. Allowing for time-variable flux, this constitutes 3.5σ evidence for neutrino emission from the direction of TXS 0506+056, independent of and prior to the 2017 flaring episode. This suggests that blazars are identifiable sources of the high-energy astrophysical neutrino flux.

The origin of the highest-energy cosmic rays is believed to be extragalactic (1), but their acceleration sites remains unidentified. High-energy neutrinos are expected to be produced in or near the acceleration sites when cosmic rays interact with matter and ambient light, producing charged mesons that decay into neutrinos and other particles. Unlike cosmic rays, neutrinos can travel through the Universe unimpeded by interactions with other particles and undetected by magnetic fields, providing a means to identify and study the extreme environments producing cosmic rays (2). Blazars, subclasses of active galactic nuclei with powerful relativistic jets pointed close to our line of sight (3), are prominent candidate sources of such high-energy neutrino emission (4–6). The electromagnetic emission of blazars is observed to be highly variable on time scales from minutes to years (7, 8).

The IceCube Neutrino Observatory (IC) is a high-energy neutrino detector occupying an instrumented volume of 1 km³ within the Antarctic ice sheet at the Amundsen-Scott South Pole Station. The detector consists of an array of 86 vertical strings, nominally spaced 125 m apart and descending to a depth of approximately 2450 m in the ice. The bottom 1 km of each string is equipped with 60 optical sensors that record Cherenkov light emitted by relativistic charged particles passing through the optically transparent ice. When high-energy muon neutrinos interact with the ice, they can create relativistic muons that travel many kilometers, creating a track-like series of Cherenkov photons recorded when they pass through the array. This allows the reconstruction of the original neutrino direction with a median angular uncertainty of 0.2° for a neutrino energy of ~30 TeV (or 0.2° at 1 PeV) (2, 10).

IceCube discovered the existence of a diffuse flux of high-energy astrophysical neutrinos in 2013 (4, 15). Measurements of the energy spectrum have been refined (6, 17), indicating that the neutrino spectrum extends above several PeV. However, analysis of neutrino observations have not succeeded in identifying individual sources of high-energy neutrinos (2, 18). This suggests that the sources are distributed across the sky and that even the brightest individual sources contribute only a small fraction of the total observed flux.

Recently, the detection of a high-energy neutrino by IceCube, together with observations in gamma rays and at other wavelengths, indicates that blazar TXS 0506+056, located at right ascension (RA) 77.2802° and declination (Dec) +6.6939° (J2000 equinox) (9) may be an identifiable diffuse source of high-energy neutrinos (20). The neutrino-candidate event, IceCube-170922A, was detected on 22 September 2017, detected by the Extremely High Energy (EHE) online event filter (21), and reported as a public alert (22). This alert is currently used at a rate of about four per year, and are based on well-reconstructed, high-energy muon-track events. The selection threshold is set at approximately half of the events are estimated to be astrophysical in nature, the rest being atmospheric background events. After the alert was sent, further studies refined the directional reconstruction, with best-fitting coordinates of RA 77.43±1.6° and Dec +5.72±1.2° (degrees). J2000, 90% containment region). The most probable neutrino energy was estimated to be 290 TeV, with a 90% confidence level lower limit of 83 TeV (20).

It was soon determined that the direction of IceCube-170922A was consistent with the location of TXS 0506+056 and coincident with a state of enhanced gamma-ray activity observed since April 2017 (23) by the Large Area Telescope (LAT) on the Fermi Gamma-ray Space Telescope (24). Follow-up observations of the blazar led to the detection of gamma rays with energies up to 400 GeV by the Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov (MAGIC) Telescope (25, 26). IceCube-170922A and the electromagnetic observations are described in detail in (20). The significance of the spatial and temporal coincidence of the high-energy neutrino and the blazar flare is estimated to be at the 3σ level (20). On the basis of this result, we consider the hypothesis that the blazar TXS 0506+056 has been a source of high-energy neutrinos beyond that angle event.

Searching for neutrino emission

IceCube monitors the whole sky and has maintained essentially continuous observations since 5 April 2008. Searches for neutrino point sources using two model-independent methods, a time-integrated and a time-dependent unbinned maximum likelihood analysis, have previously been published for the data collected between 2008 and 2015 (12, 18, 27). Here, we analyze the same 7-year data sample supplemented with additional data collected from May 2015 until October 2017 (2). The data span 9.3 years and consist of all detected events, corresponding to changing detector configurations, data-taking conditions, and improved event selections (Table 1).

The northern sky, where TXS 0506+056 is located, is observed through Earth by IceCube. Approximately 70,000 neutrino-induced muon tracks are recorded each year from the best-sphere of the sky after passing the final event selection criteria. Fewer than 1% of these events originate from astrophysical neutrinos; the rest majority are background events caused by neutralization of high-energy γ -TeV created secondary ray interactions in the atmosphere over other locations on Earth. However, for an astrophysical muon-neutrino flux where the differential number of neutrinos with energy E scales as $dN/dE \propto E^{-2}$, the distribution of muon energy is different than for the background atmospheric neutrino flux, which scales as E^{-3} (27). This allows for further discriminating power in point source searches besides directional-only measures.

A high-significance point source detection (12, 18) can require fewer than one, or as many as 30, signal events to stand out from the background, depending on the energy spectrum and the direction of events in time. To search for a neutrino signal at the coordinates of TXS 0506+056, we apply the standard time-binomial analysis (28) and time-dependent analysis (29) that have been used in past searches (2, 18, 27). The time-binomial analysis is an unbinned maximum likelihood ratio method to search for an excess number of events consistent with a point source at a specified location, given the angular distance and angular uncertainty of each event. Energy information is included in the definition of the likelihood, assuming a power-law energy spectrum $E^{-\alpha}$, with the spectral index γ

*IceCube Collaboration authors and affiliations are listed in the supplementary material.
DOI: 10.1126/science.1254040

KIceCube Collaboration, Science 361, 140–151 (2018) 13 July 2018

DOI: 10.1126/science.1254040

От подводно-подлёдных экспериментов...

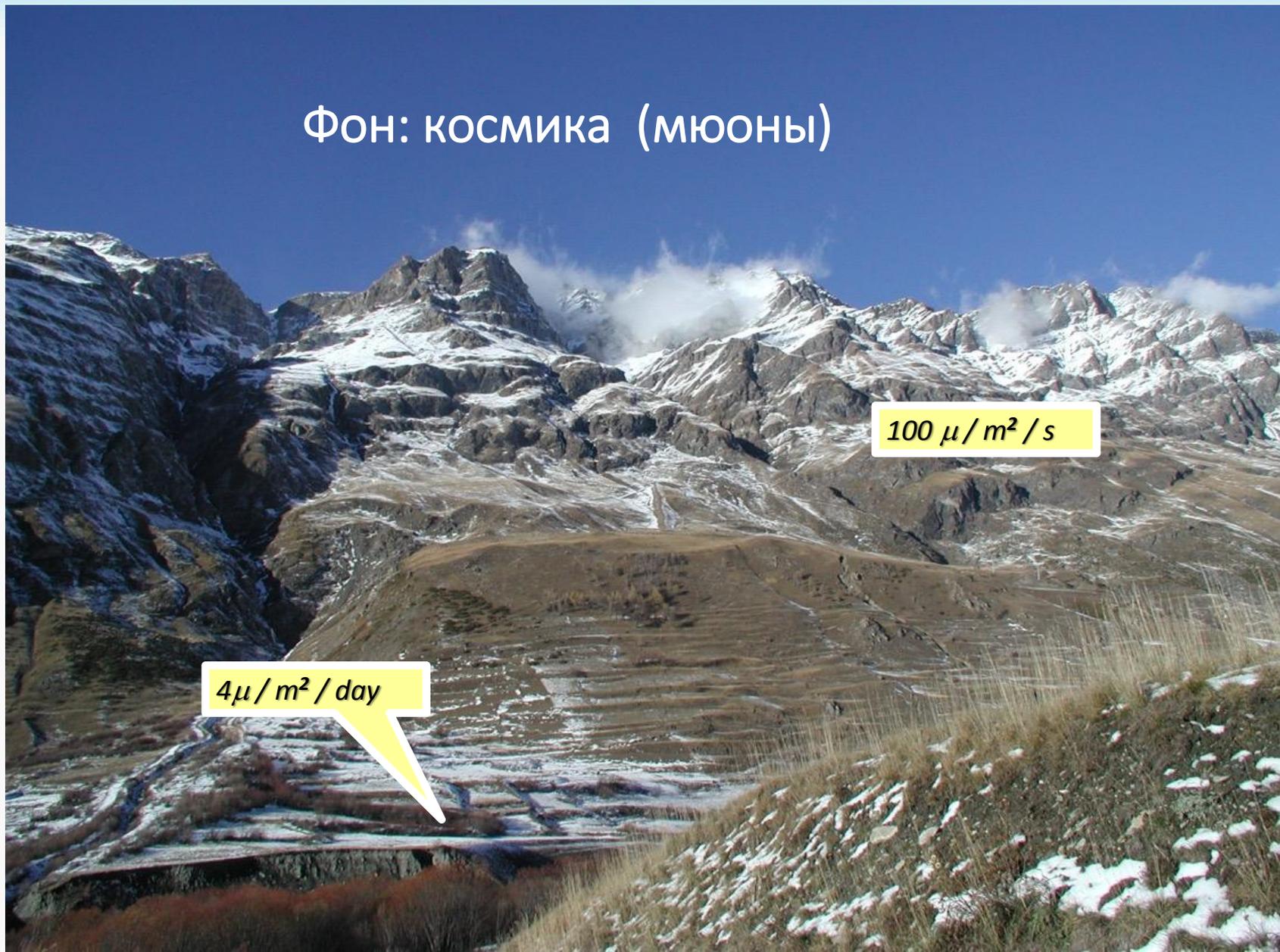


... К ПОДЗЕМНЫМ

Фон: космика (мюоны)

$100 \mu / m^2 / s$

$4 \mu / m^2 / day$



Отдел ядерной спектроскопии и радиохимии

- EDELWEISS → EURECA

Dark Matter

- NEMO

2β (^{100}Mo , ^{82}Se , ^{116}Cd , ...)

- SuperNEMO

2β (^{82}Se and/or ^{150}Nd)

- TGV

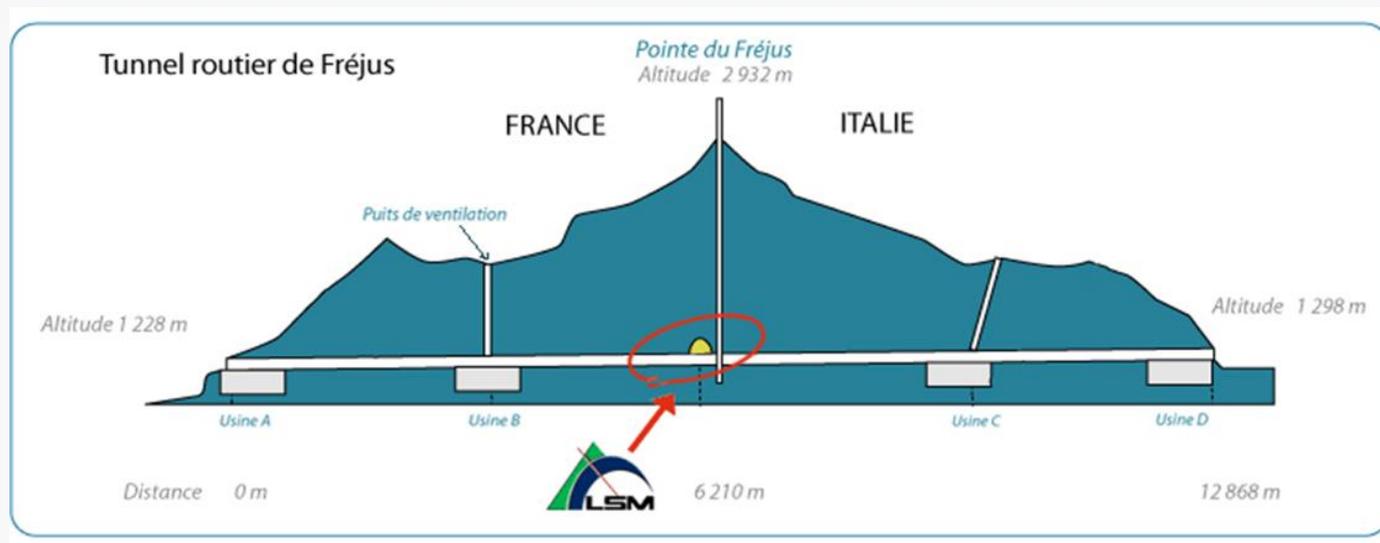
2β (^{48}Ca) 2ε (^{106}Cd)

- GERDA + Majorana

2β (^{76}Ge)

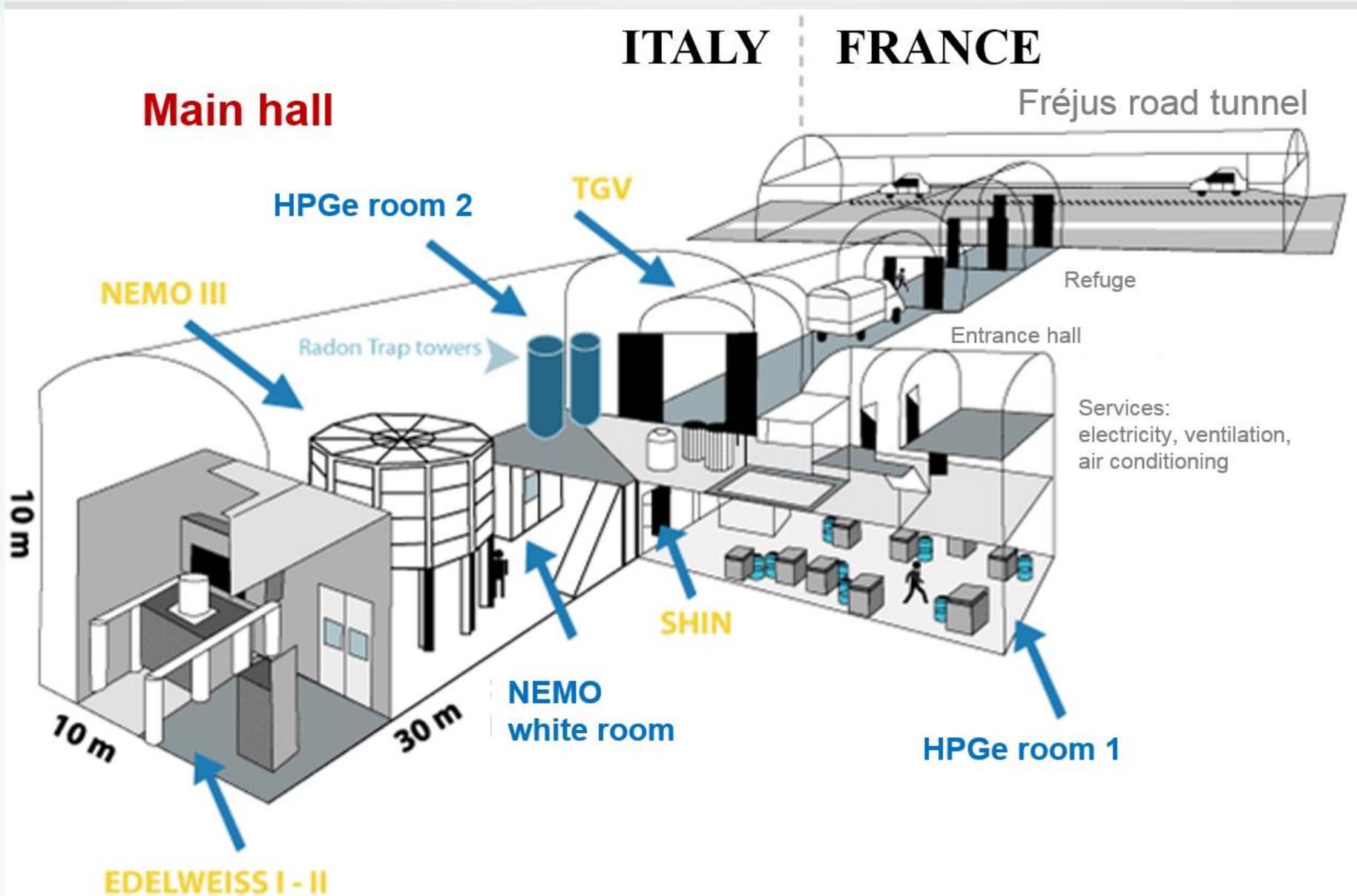
- Legend

2β (^{76}Ge)





LSM – Laboratoire Souterrain de Modane

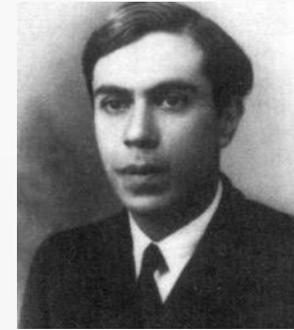


Двойной бета - распад



Paul Dirac

$$\bar{\nu} \neq \nu$$



Ettore Majorana

$$\bar{\nu} \equiv \nu$$

$$T_{1/2} > 10^{20} \text{ лет}$$

В 2β -эксперименте ловится не само нейтрино, а пара электронов, и уже по их энергии делается вывод о свойствах нейтрино (является ли оно майорановским, и если да – то какова его масса)

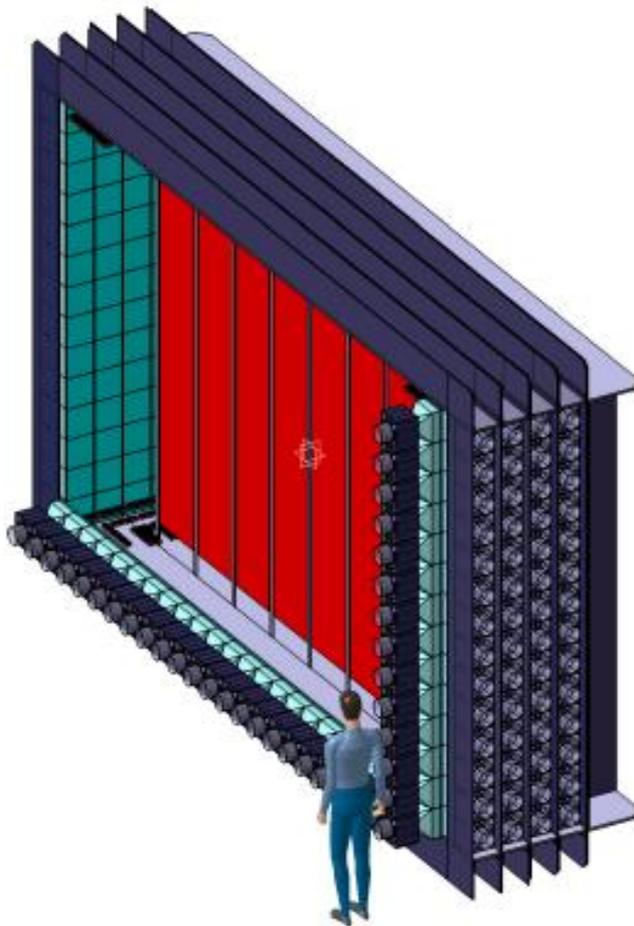
Радиационная чистота – ключевой фактор

$$T_{1/2} \sim 10^{26} > N_A = 6 \cdot 10^{23} \rightarrow \mathbf{1 \text{ распад в } 50 \text{ кг в год!}}$$

SuperNEMO Demonstrator Module

20 tons

Radon emanation into tracker must be $< 1.5 \text{ mBq}$



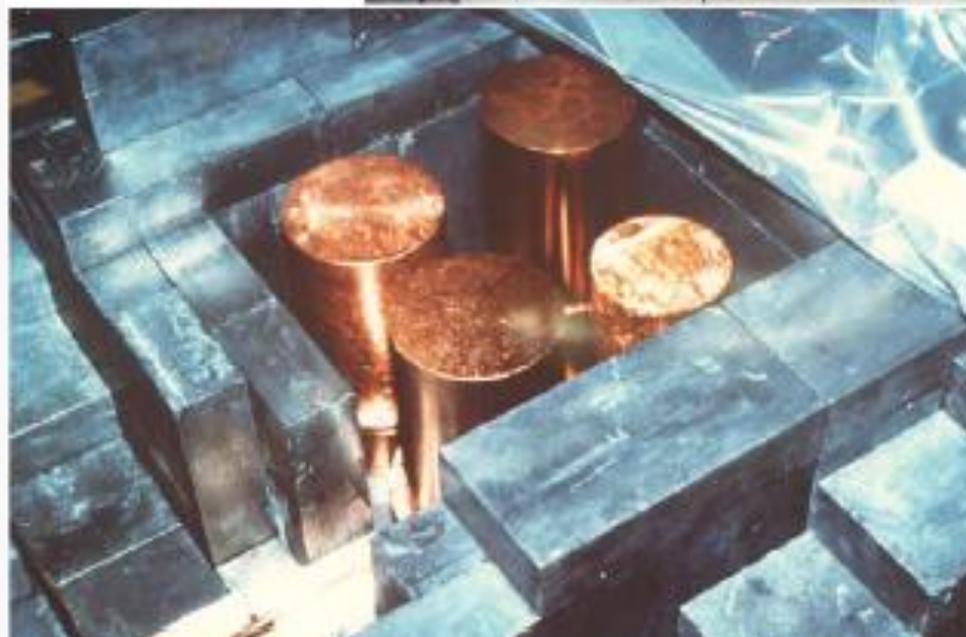
Brazil Nut

4 grams

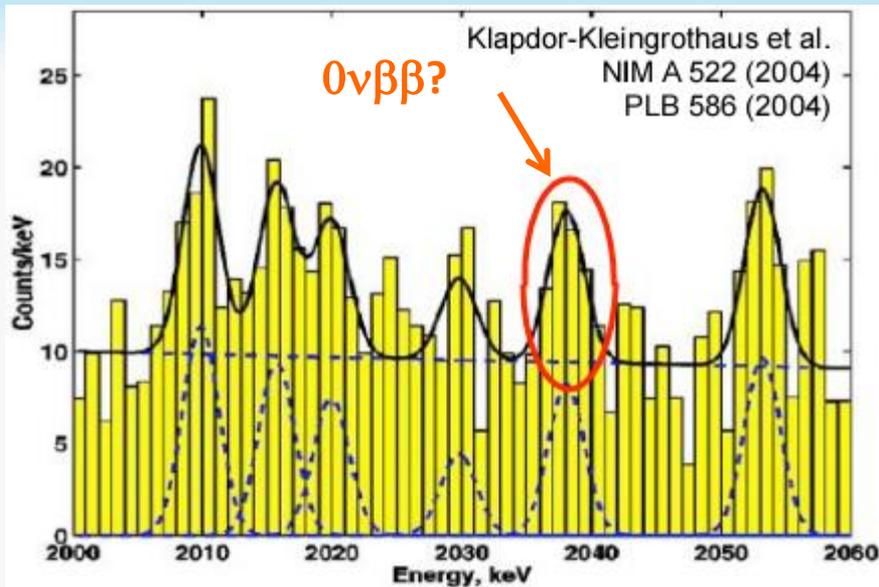
400 mBq of Radium decays



Эксперимент Гейдельберг - Москва

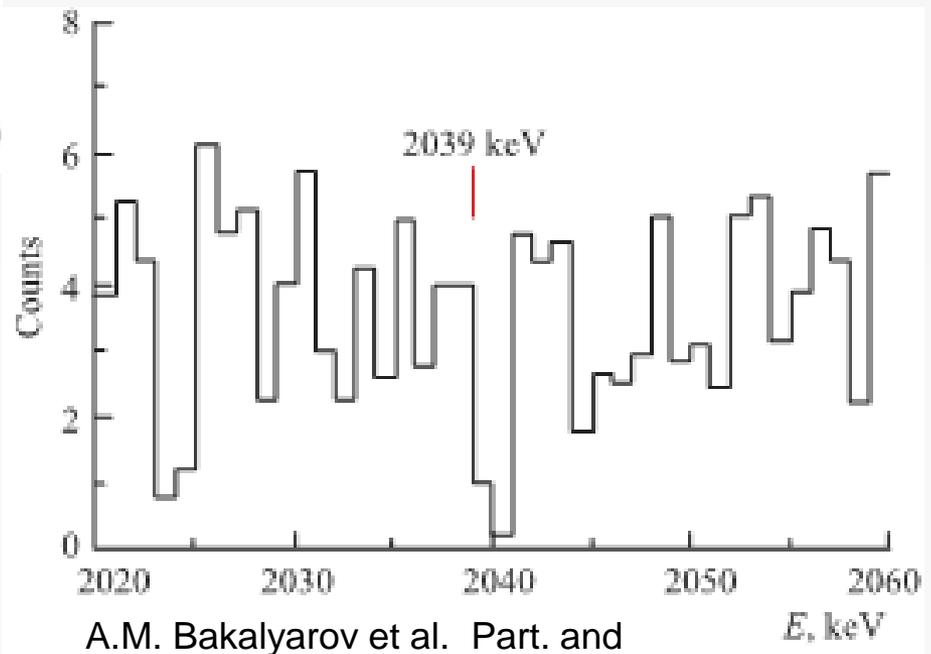


Двойной бета-распад обнаружен?



Тот же спектр, представленный
московской группой, но без
проблемных детекторов

Набранная статистика 1995 – 2001



A.M. Bakalyarov et al. Part. and
Nucl., Lett. 125, 21 (2005)

По утверждению лидера коллаборации
 $0\nu\beta\beta$ обнаружен с уровнем
достоверности 4.2σ

Набранная статистика – 71 кг x год
(1993 – 2003)

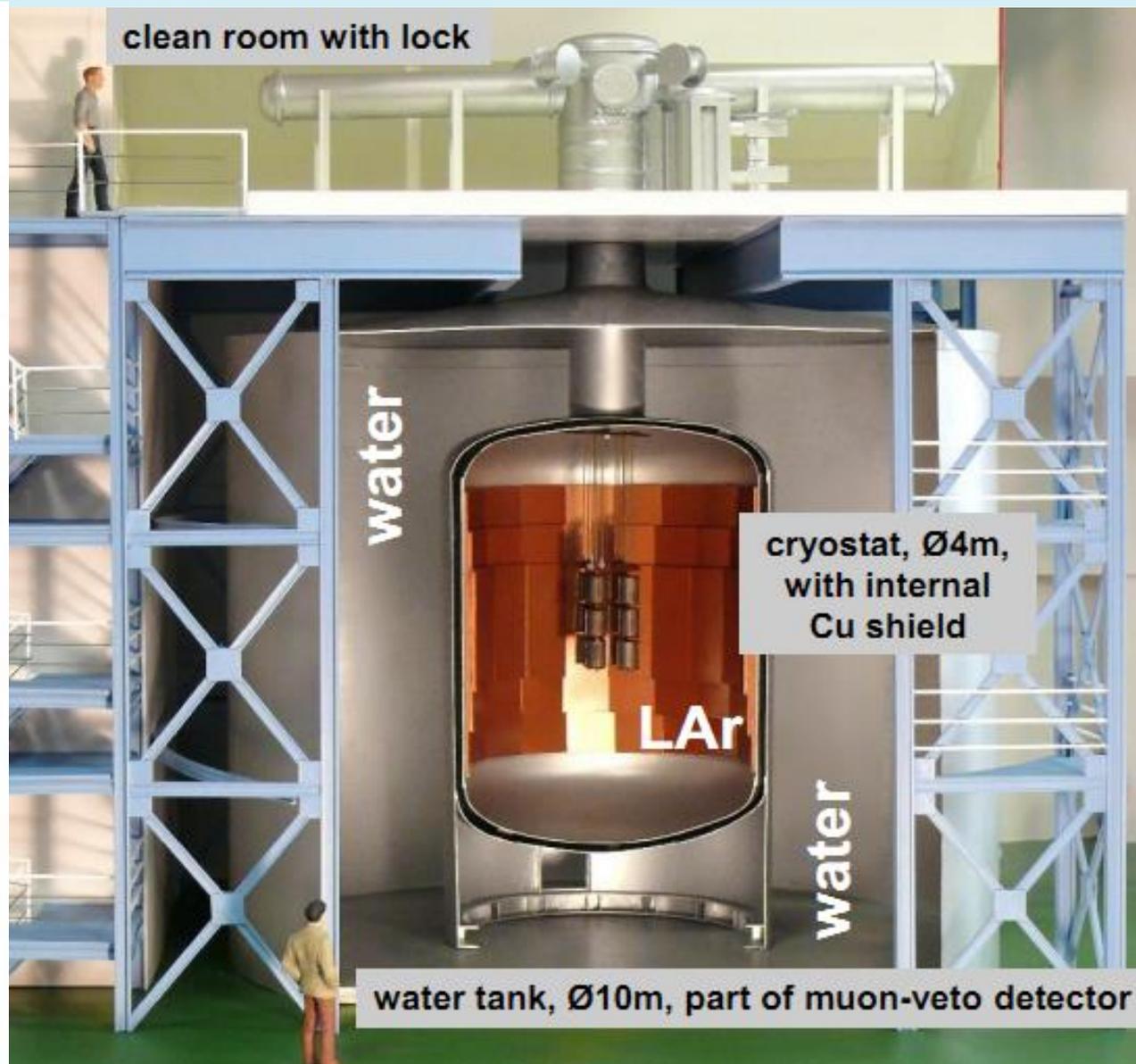
$$T_{1/2}^{0\nu\beta\beta} = 1.5 \times 10^{25} \text{ y}$$

$$\langle m_{\nu} \rangle = 0.2 - 0.45 \text{ eV}$$

GERDA (GERmanium Detector Array)



^{76}Ge

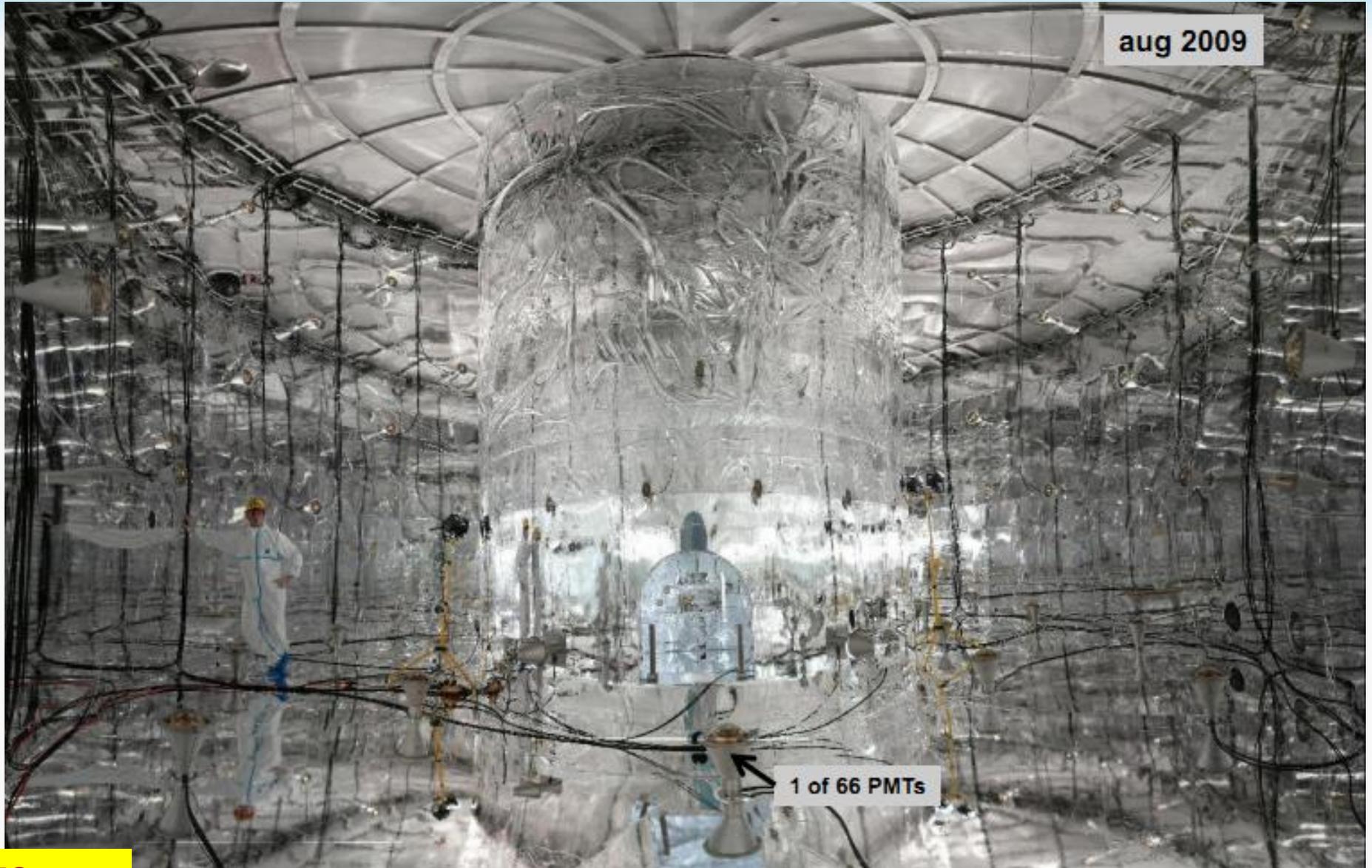


Установка детекторного объёма



^{76}Ge

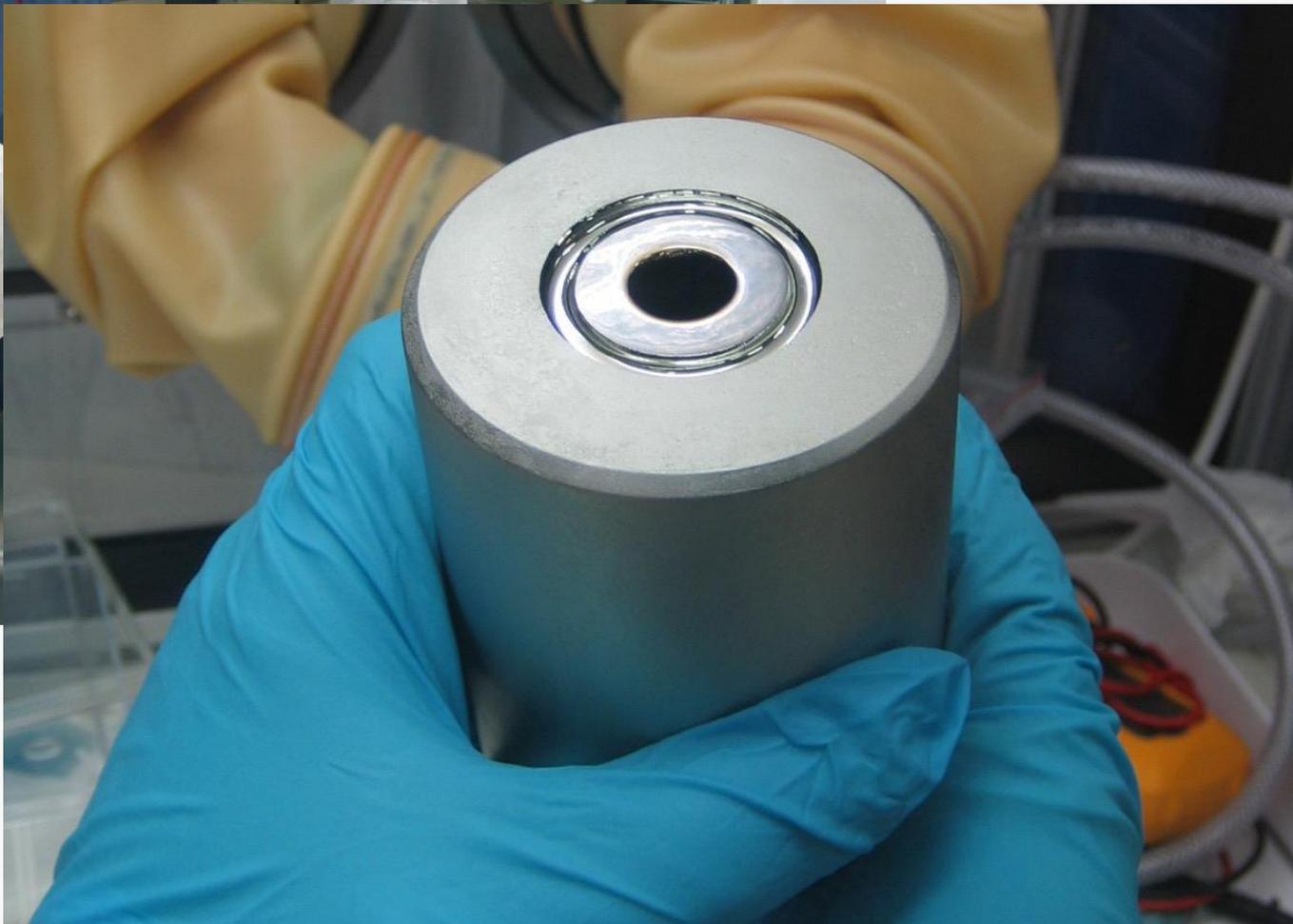
«Внутренности» криостата



aug 2009

1 of 66 PMTs

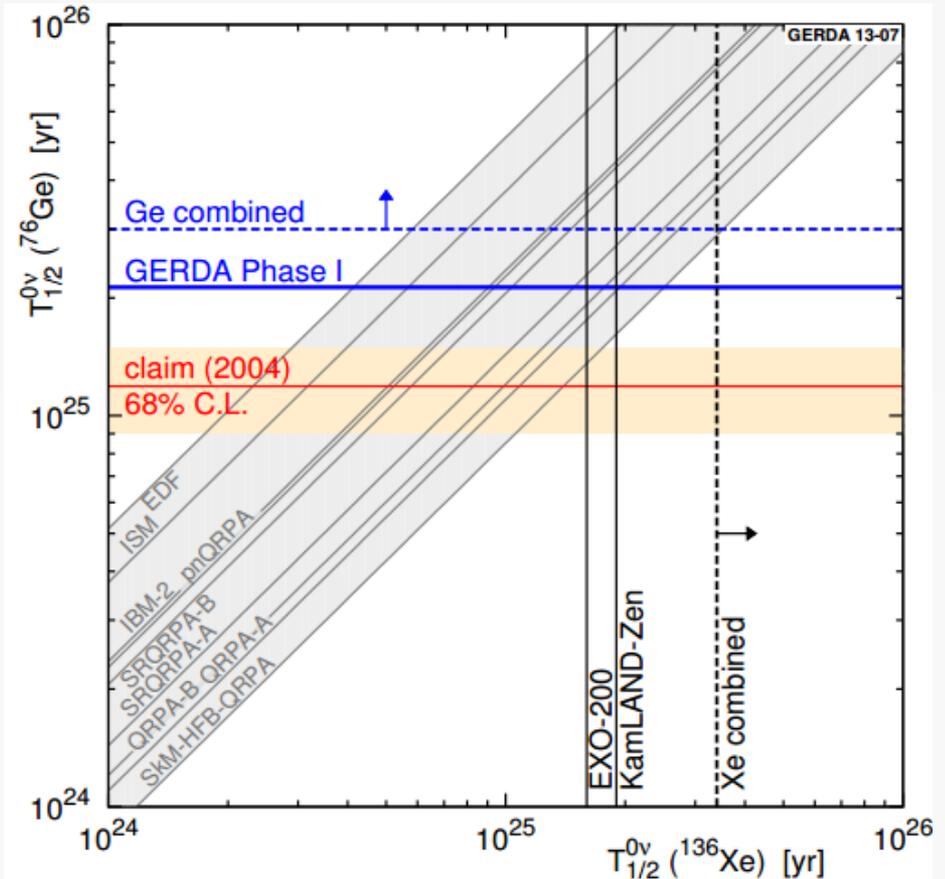
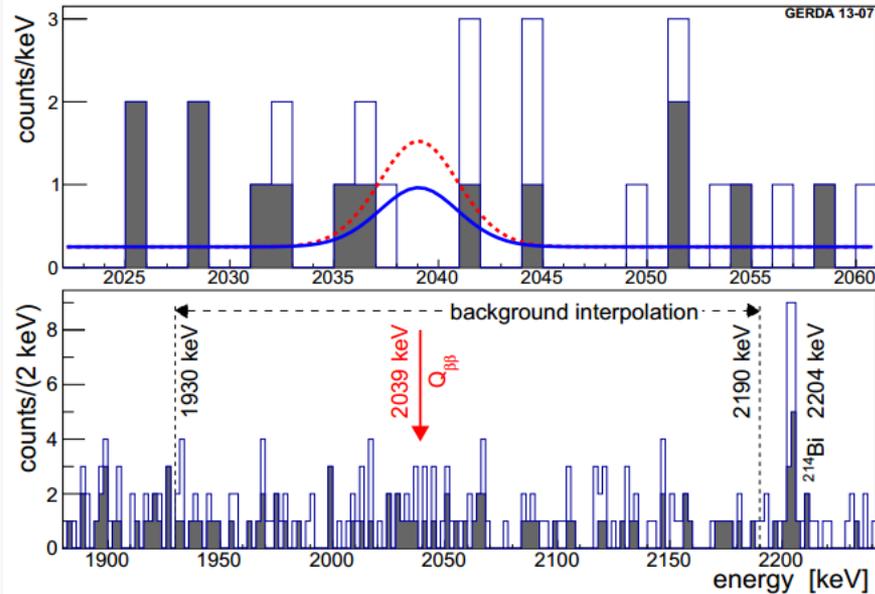
^{76}Ge



Первые результаты

arXiv:1307.4720v1 [nucl-ex] 17 Jul 2013

Results on neutrinoless double beta decay of ^{76}Ge from GERDA Phase I



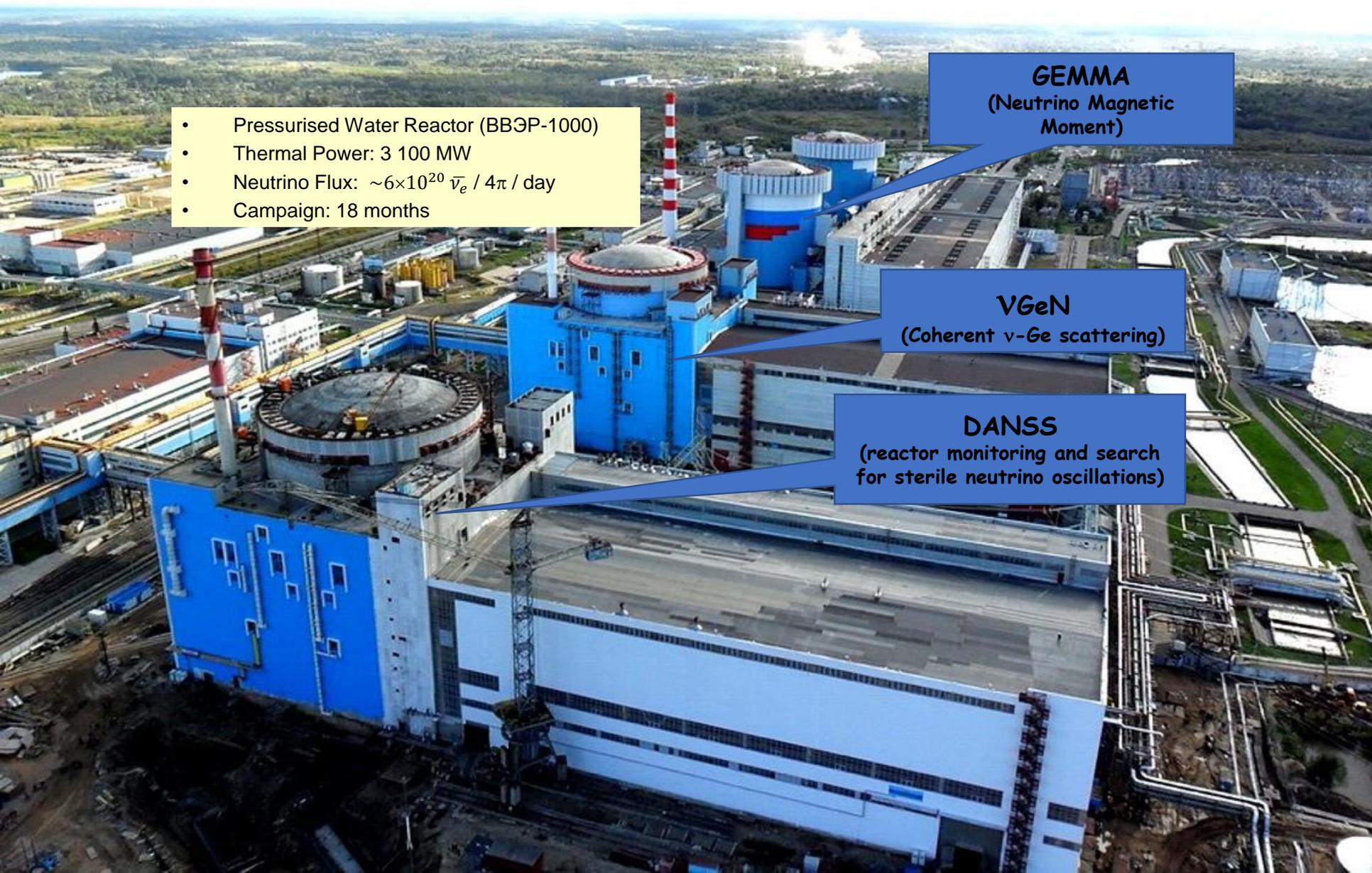
Реакторные эксперименты на Калининской АЭС

- Pressurised Water Reactor (BBЭР-1000)
- Thermal Power: 3 100 MW
- Neutrino Flux: $\sim 6 \times 10^{20} \bar{\nu}_e / 4\pi / \text{day}$
- Campaign: 18 months

GEMMA
(Neutrino Magnetic Moment)

VGeN
(Coherent ν -Ge scattering)

DANSS
(reactor monitoring and search for sterile neutrino oscillations)



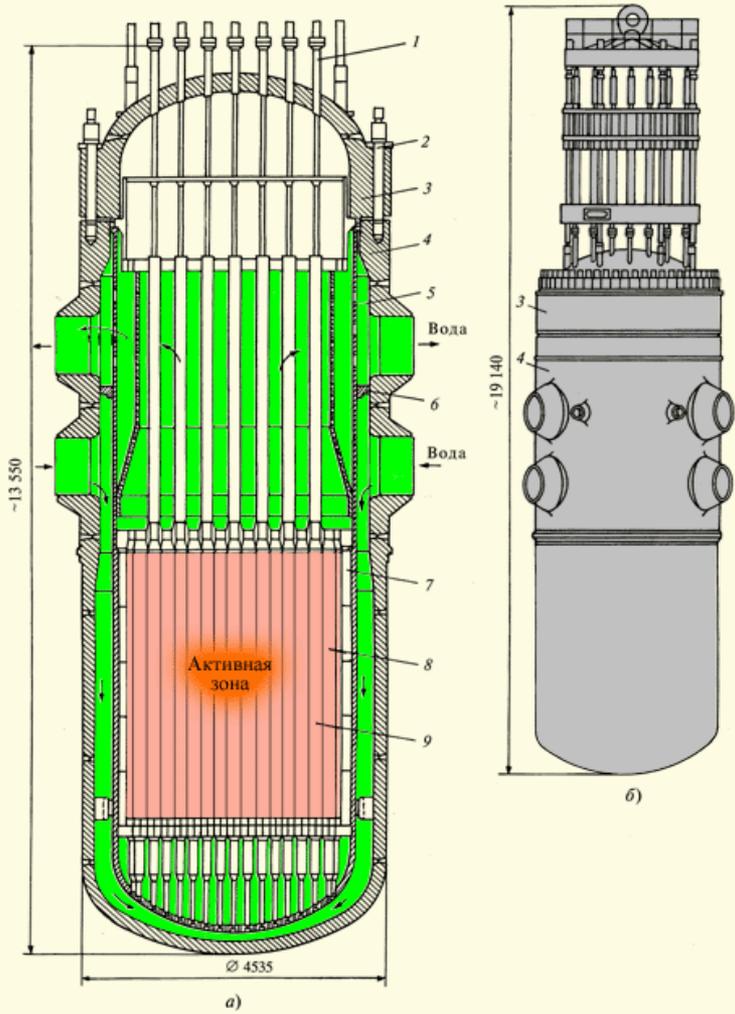


Рис. 5.4. Ядерный реактор ВВЭР-1000

- Стандартный 3GW_{th} ВВЭР-1000
- Активная зона: $\text{Ø}3.12 \text{ m} \times h 3.70 \text{ m}$
- Топливо (70 тонн): $^{238}\text{U} + ^{235}\text{U}(3.3-5.0)\%$
- Поток антинейтрино $\sim 6 \times 10^{20} \text{ } \tilde{\nu}/\text{сек}/4\pi$
 $5 \times 10^{13} \text{ } \tilde{\nu}/\text{сек}/\text{cm}^2 @10 \text{ м от центра}$
- Кампания: 1.5 года
- Перегрузка топлива: 50 дней (OFF – измерение фона)
- За год сгорает 1500 кг ^{235}U
- и нарабатывается 311 кг ^{239}Pu
- это изменяет (на $\sim 10\%$)
 поток и энергетический спектр
 испускаемых нейтрино

Прямая регистрация реакторных нейтрино

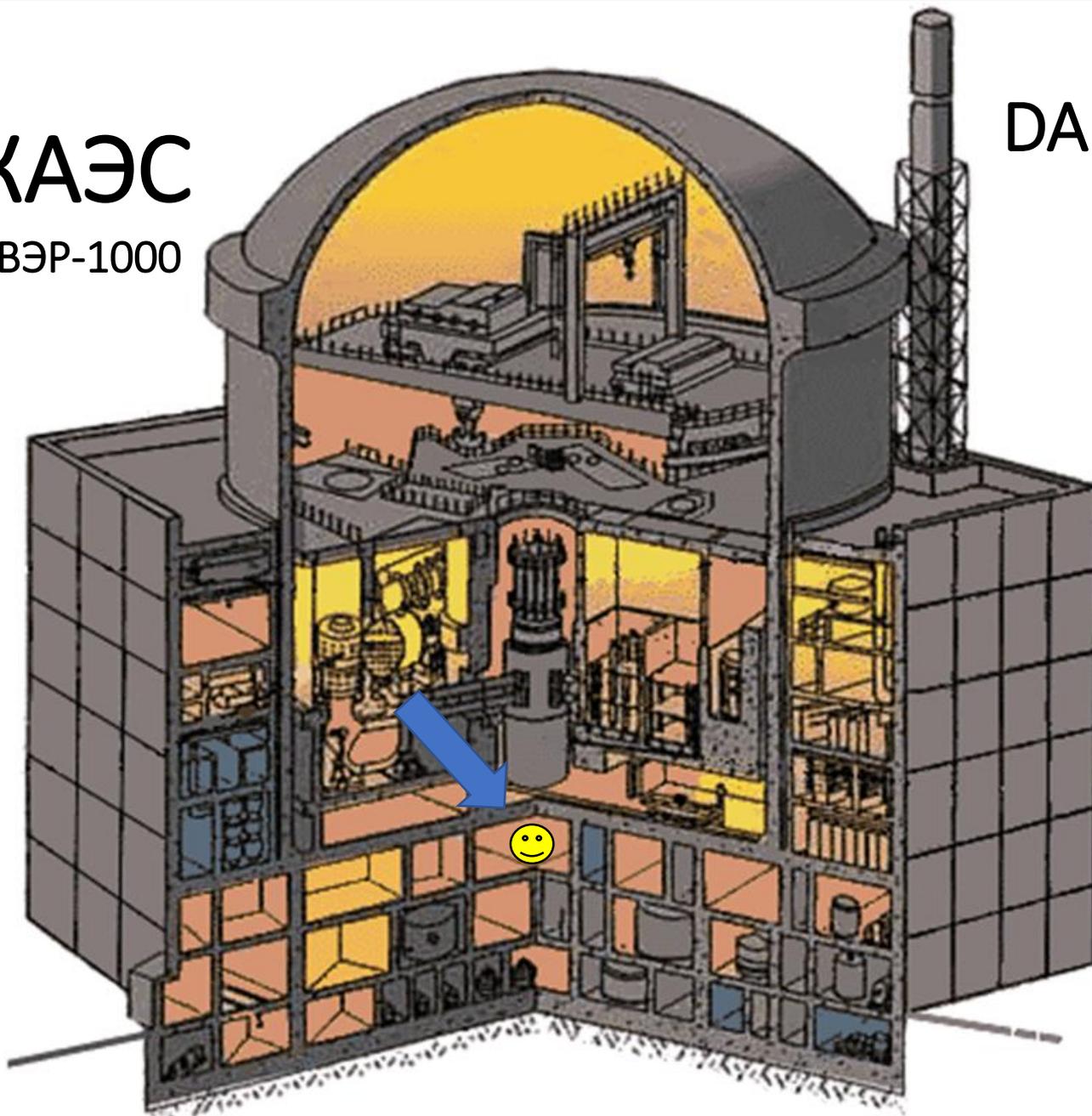
- *Измерение мощности реактора (N_ν)*
- *Определение состава топлива (E_ν)*
- *Изучение сечения (ν -e) рассеяния*

- 
- *Мониторинг работы реактора (томография?)
в режиме реального времени (on-line)*
 - *Контроль наработки оружейного ^{239}Pu
(задачи по нераспространению)*

КАЭС

ВВЭР-1000

DANSS



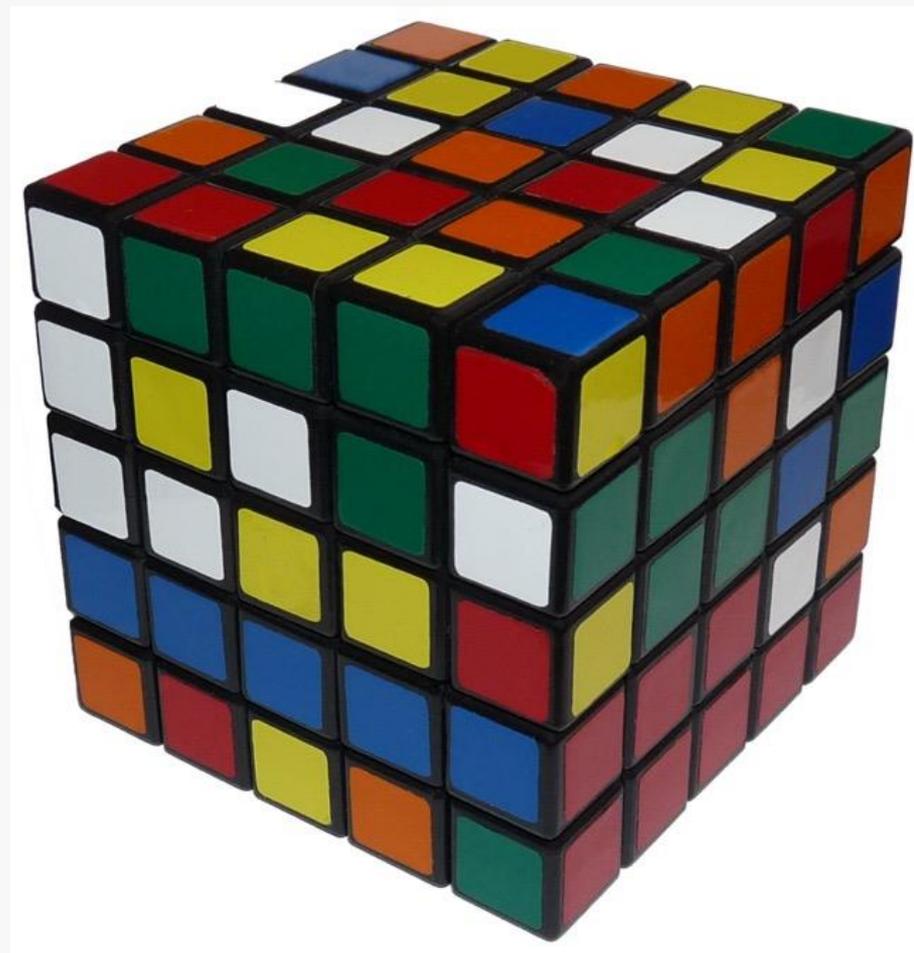
Обычно для регистрации нейтрино нужна, как минимум, тонна жидкого сцинтиллятора

- *Огнеопасный*
- *Взрывоопасный*
- *Токсичный*
- *Летучий*
- ...



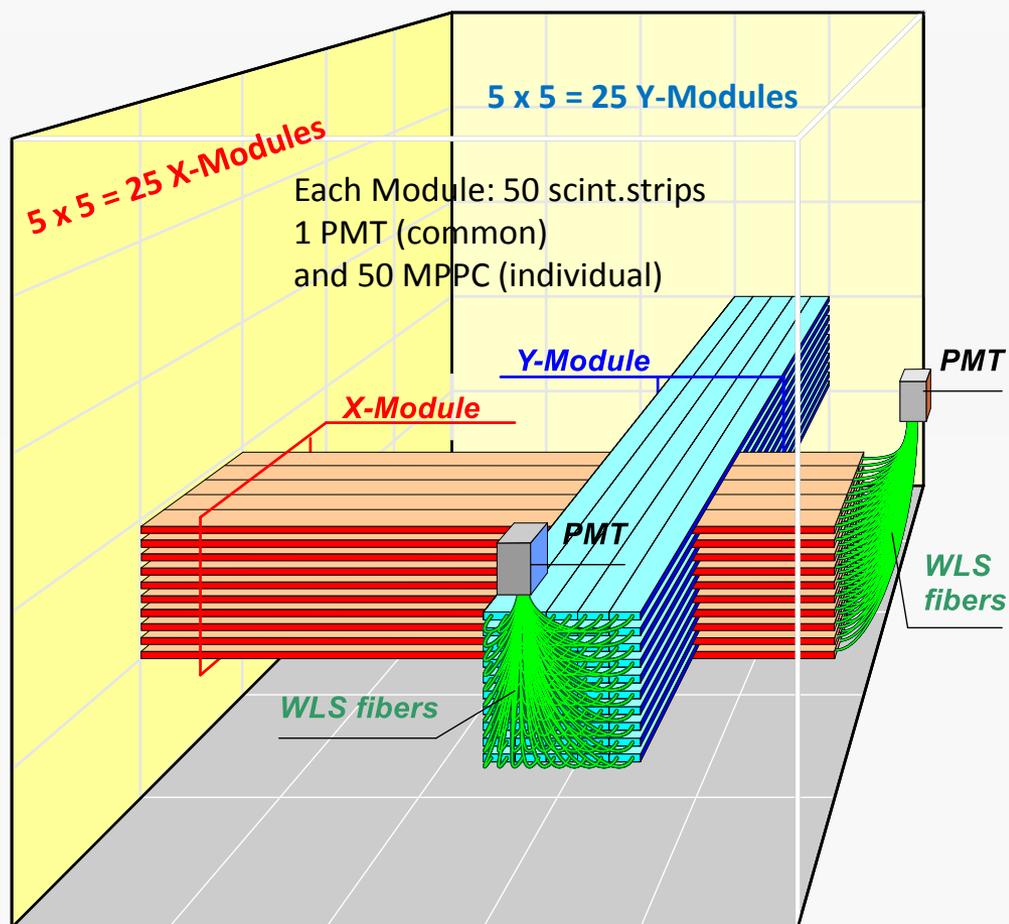
Вместо этого мы используем сцинтиллятор
пластмассовый, на основе полистирола

- сегментированный
- со слоями Gd



Detector of AntiNeutrino based on Solid State Scintillator

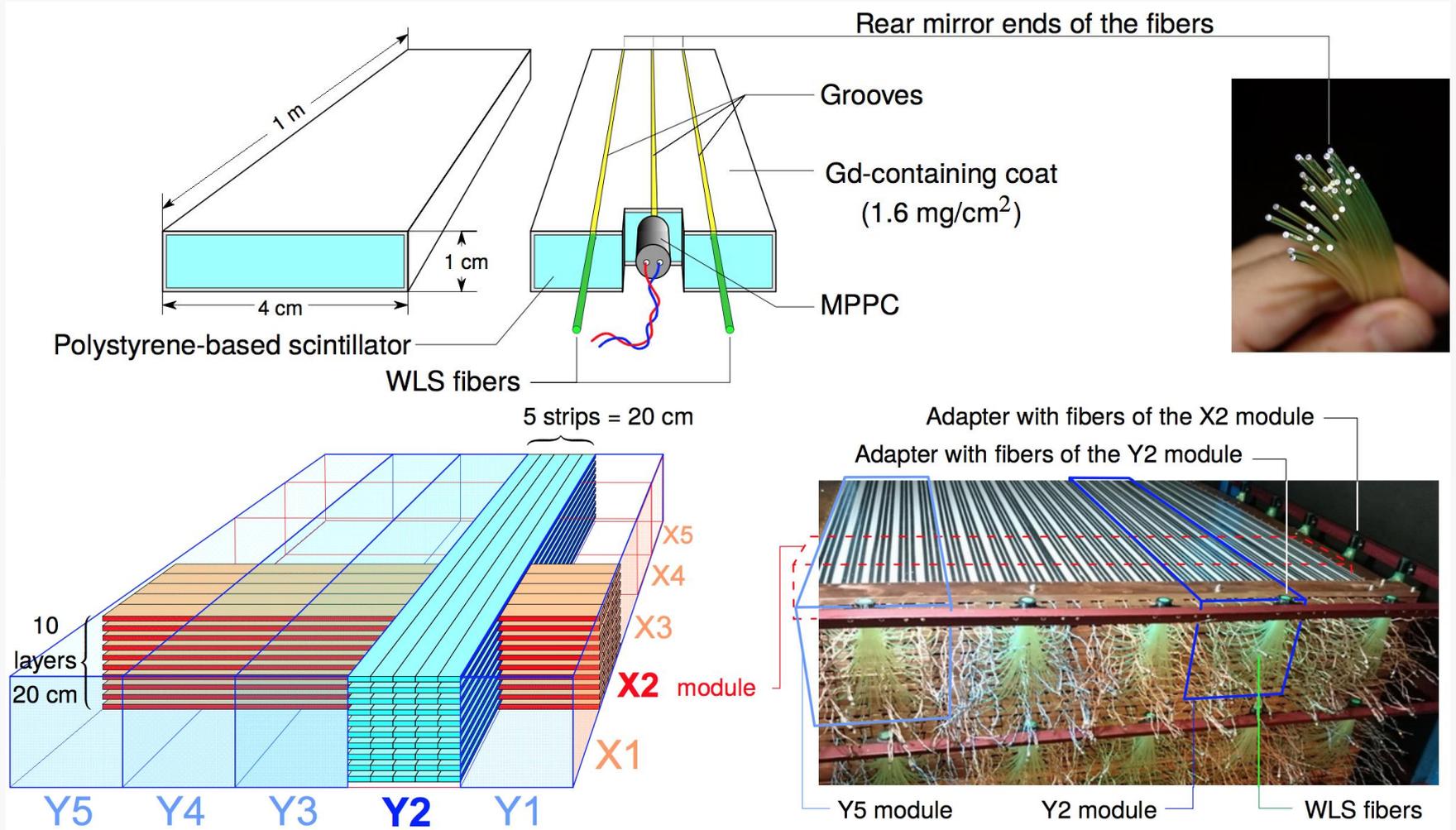
Нейтринный детектор DANSS



2500 пластмассовых
сцинтилляторов
общим объемом 1 м³

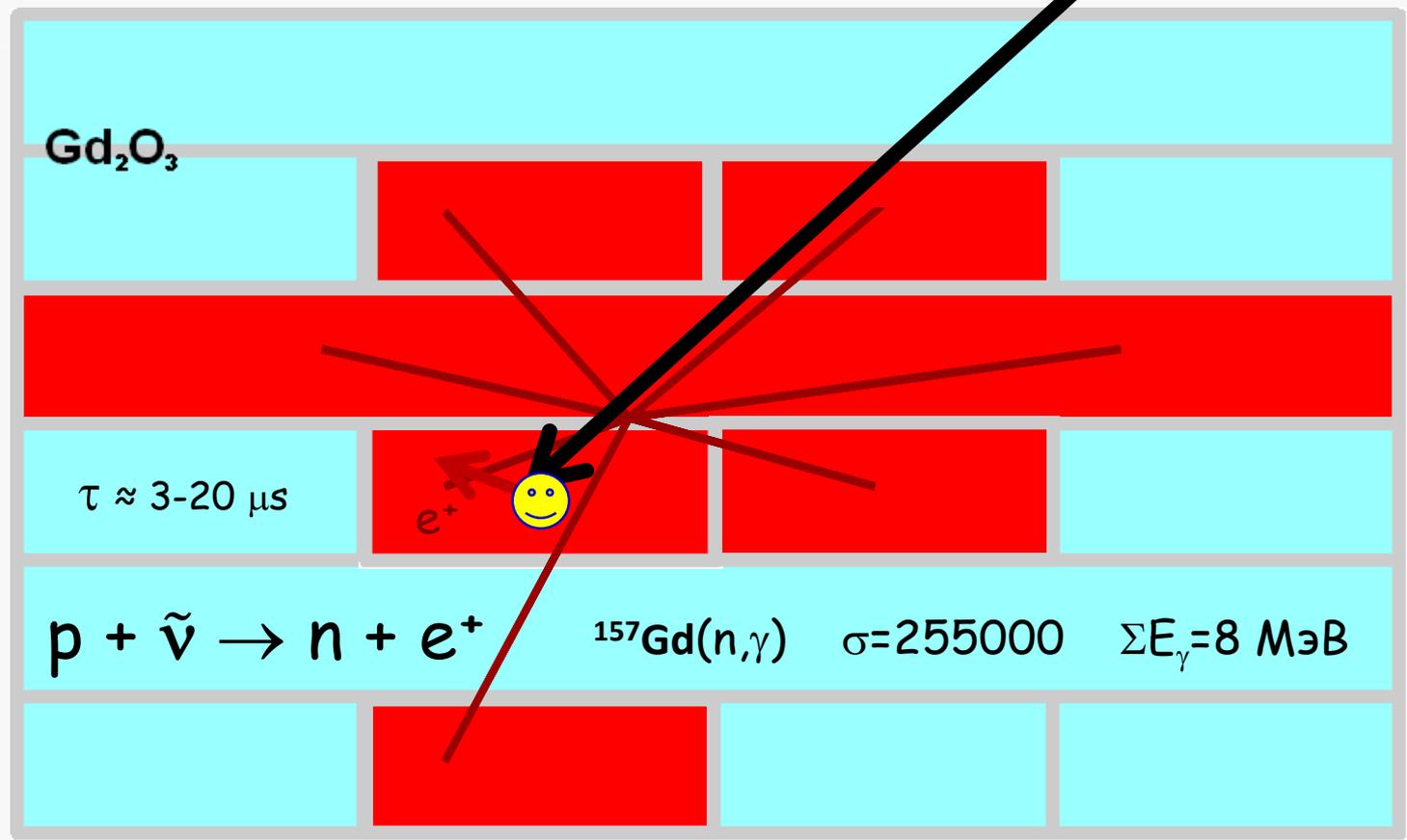
Съем сигнала: 50 ФЭУ и 2500
MPPC(SiPM)

Сцинтилляционная ячейка – «стрип»

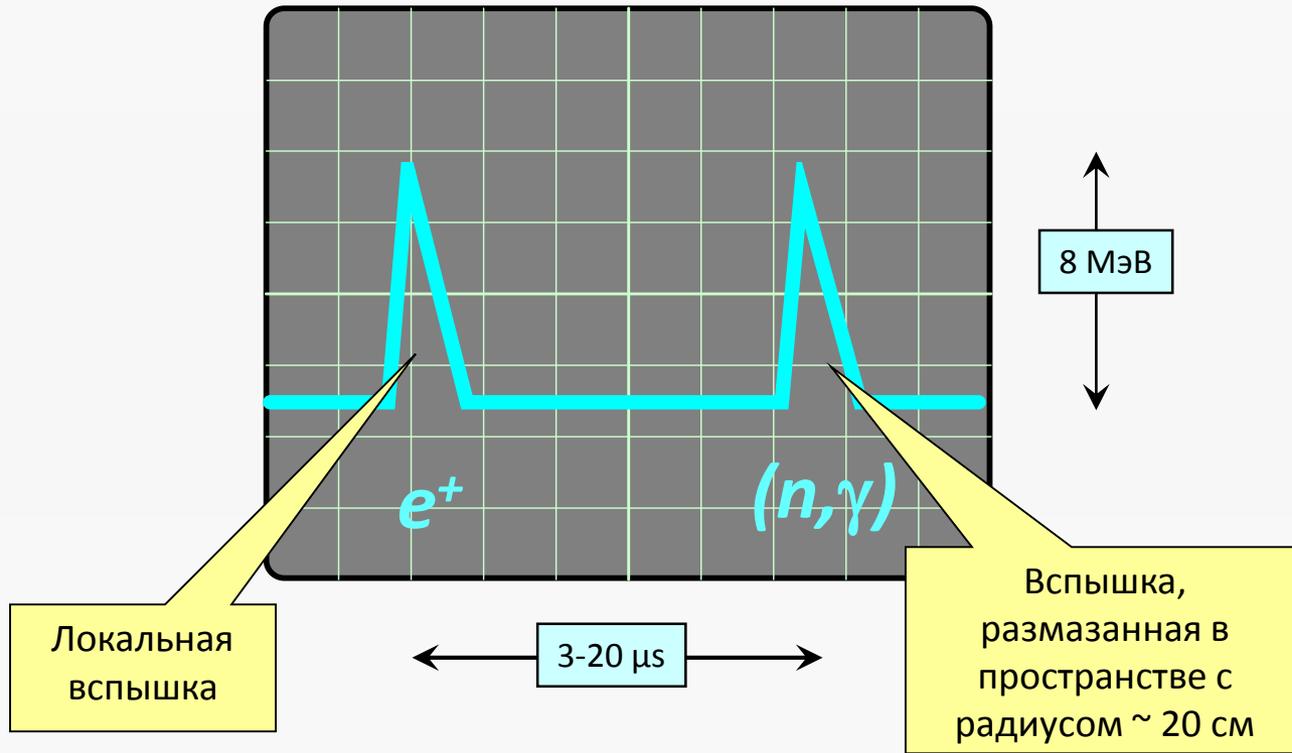


Принцип регистрации – обратный бета-распад

секционированный пласт. сцинтиллятор с Gd-слоями



Сигнатура IBD-события



Реакторная антинейтринная аномалия

The Reactor Antineutrino Anomaly

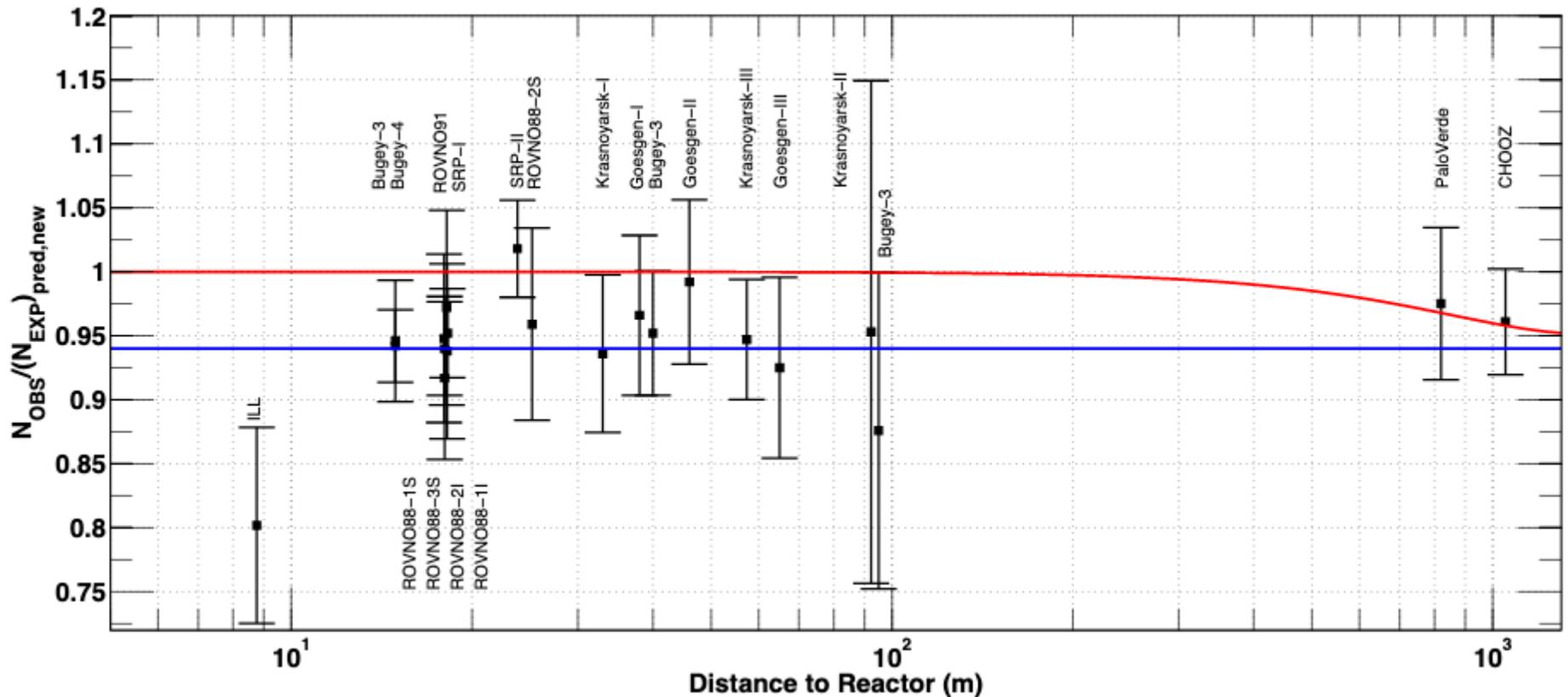
G. Mention,¹ M. Fechner,¹ Th. Lasserre,^{1,2,*} Th. A. Mueller,³ D. Lhuillier,³ M. Cribier,^{1,2} and A. Letourneau³

¹CEA, Irfu, SPP, Centre de Saclay, F-91191 Gif-sur-Yvette, France

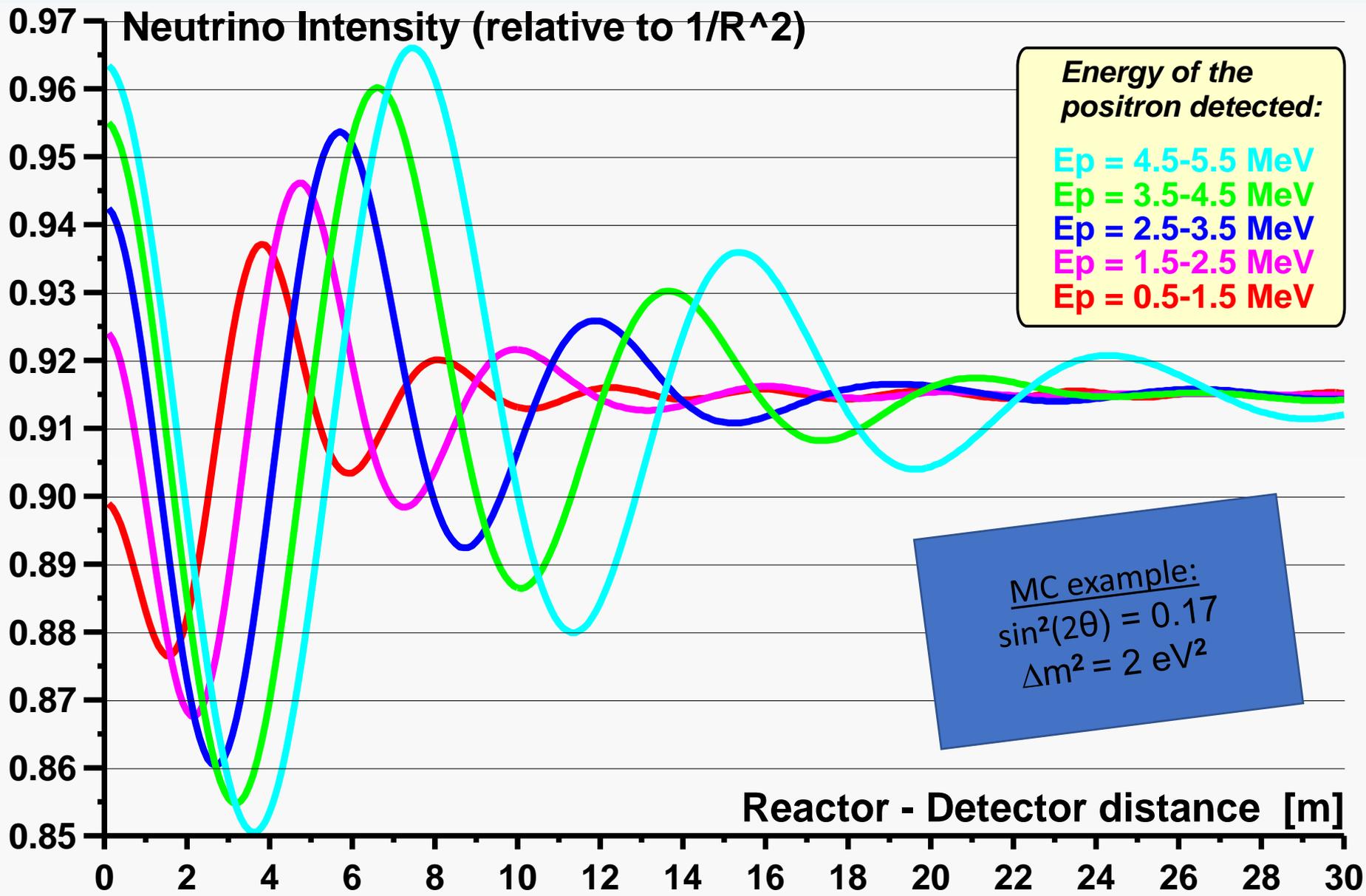
²Astroparticule et Cosmologie APC, 10 rue Alice Domon et Léonie Duquet, 75205 Paris cedex 13, France

³CEA, Irfu, SPhN, Centre de Saclay, F-91191 Gif-sur-Yvette, France

(Dated: March 24, 2011)



Осцилляции нейтрино на коротких расстояниях



Прямая регистрация реакторных нейтрино

- *Измерение мощности реактора (N_ν)*
- *Определение состава топлива (E_ν)*
- *Изучение сечения (ν -e) рассеяния*

- 
- *Мониторинг работы реактора (томография?)
в режиме реального времени (on-line)*
 - *Контроль наработки оружейного ^{239}Pu
(задачи по нераспространению)*

Изменение расстояния до реактора

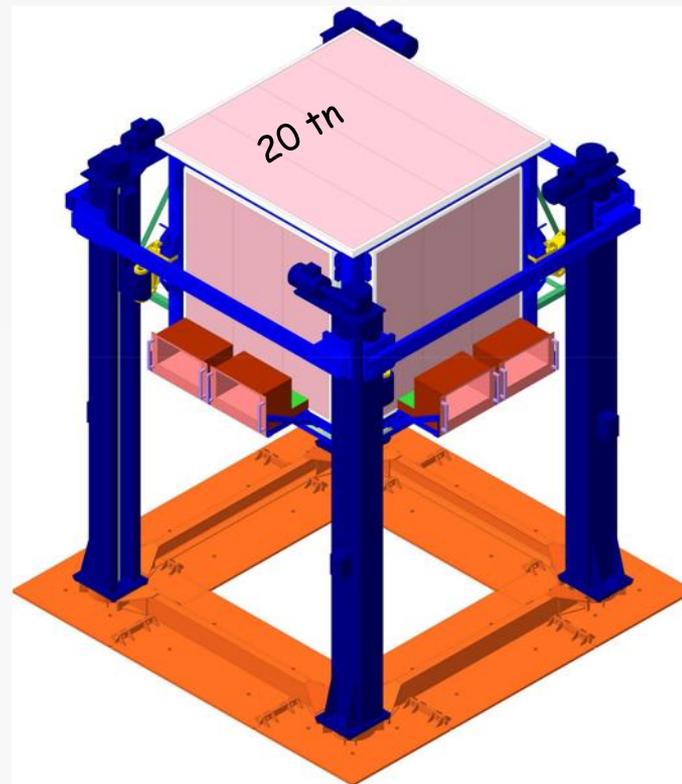
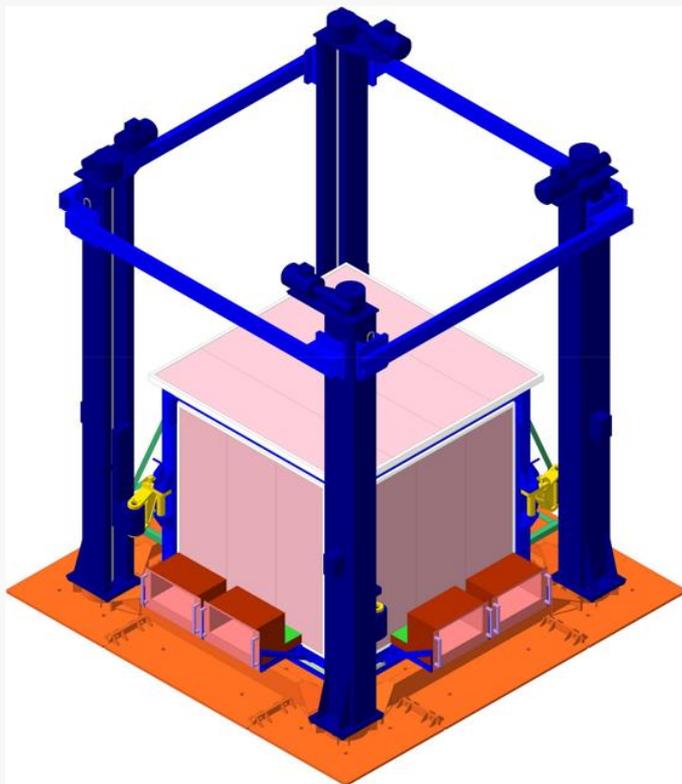
Dn
L=12.7 m
2.7 days



Md
L=11.7 m
2.3 days



Up
L=10.7 m
2.0 days



Сборка

Aug 2015

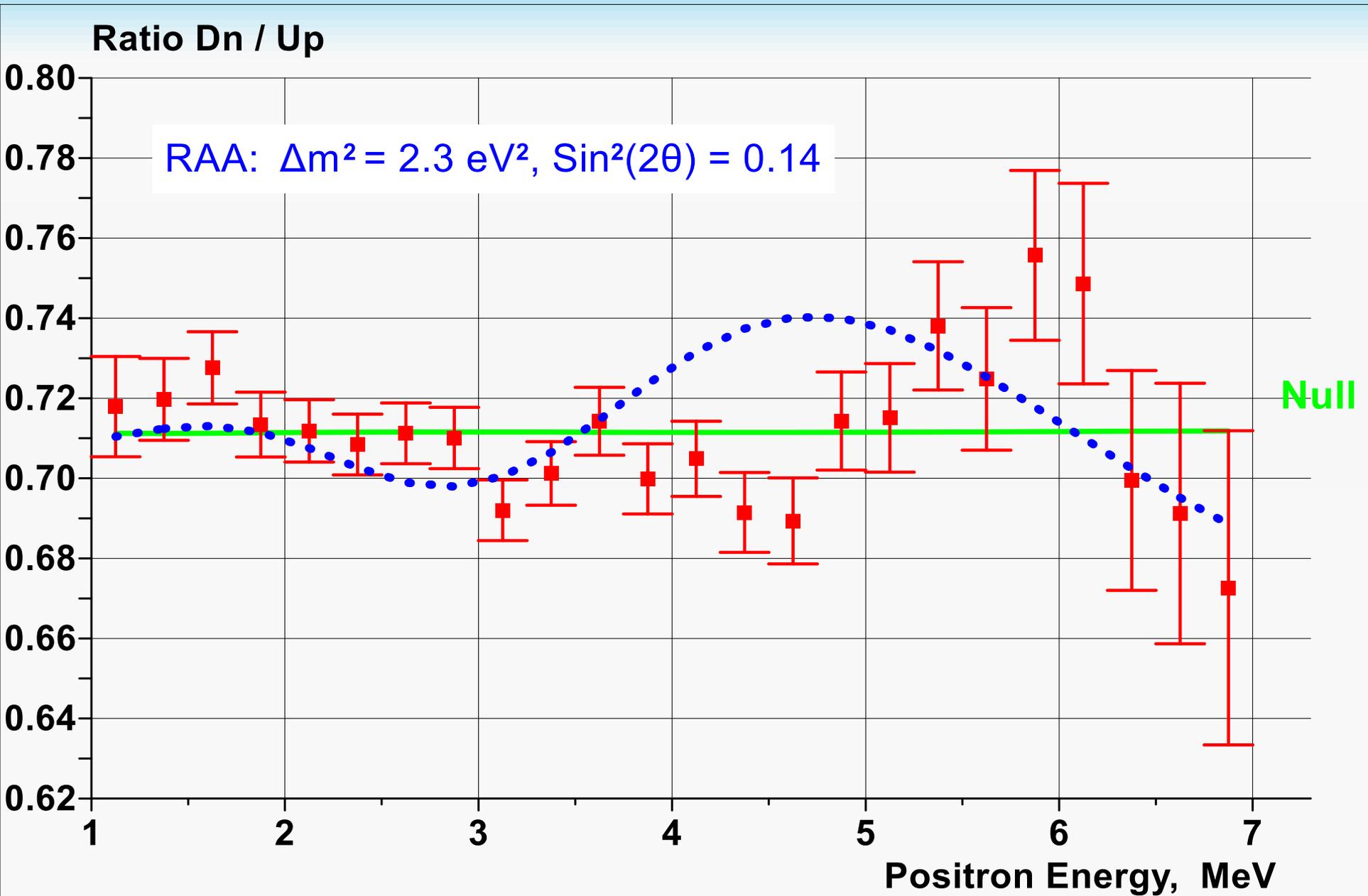
Lifting gear



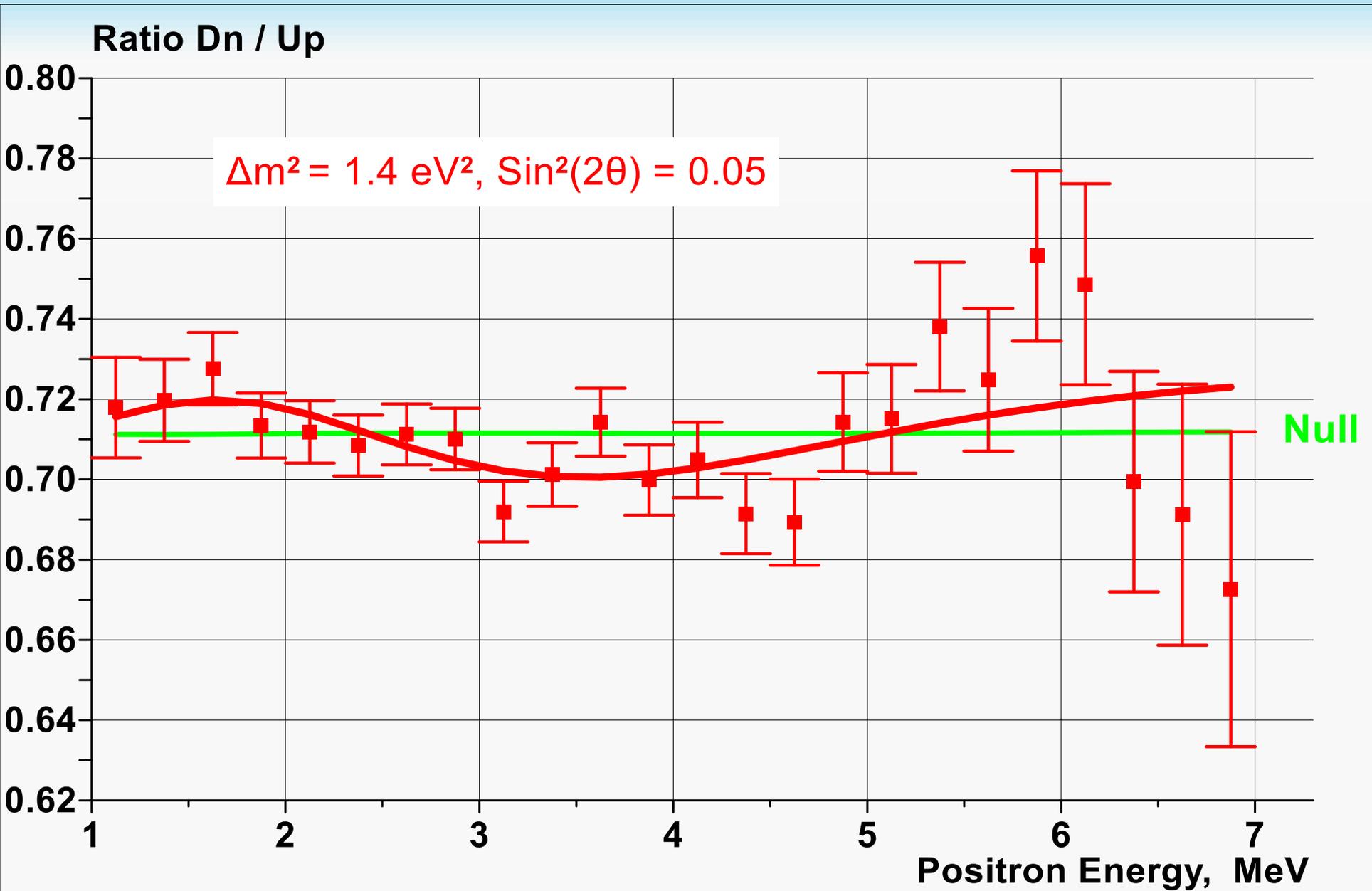
*Scintillator strips of
the 1st section*



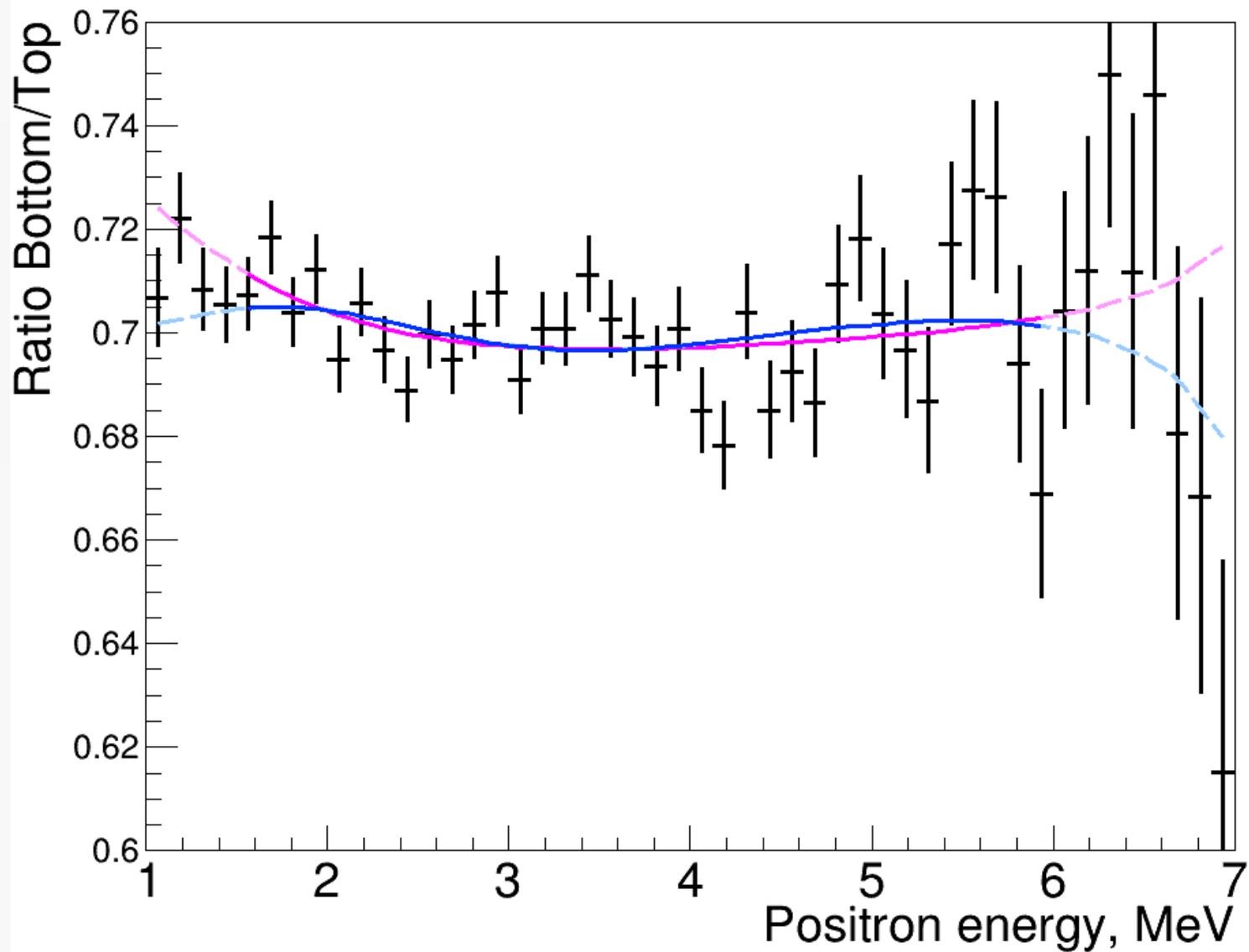
Предварительный результат



Другие осцилляции?



Результаты – 2019



Возможные применения

Нейтринная
астрономия



Объяснение
отсутствия
антиматерии



Исследования
главного
«атомного реактора»



Переговоры
с инопланетянами



Нераспространение
ядерного оружия



Скоростные
коммуникации



Поиск залежей
полезных ископаемых



Вячеслав
Егоров



02.10.1953 – 07.07.2019

Дни физики



Весна. Около дня рождения ОЯИЯ – 26 марта

Контакты

Марк Ширченко – ОИЯИ ЛЯП НЭОЯСиРХ

Mark.Shirchenko@jinr.ru

+7-915-107-44-22

<https://www.facebook.com/mshirchenko>

<https://vk.com/mshirchenko>