

LENA- нейтринная обсерватория будущего

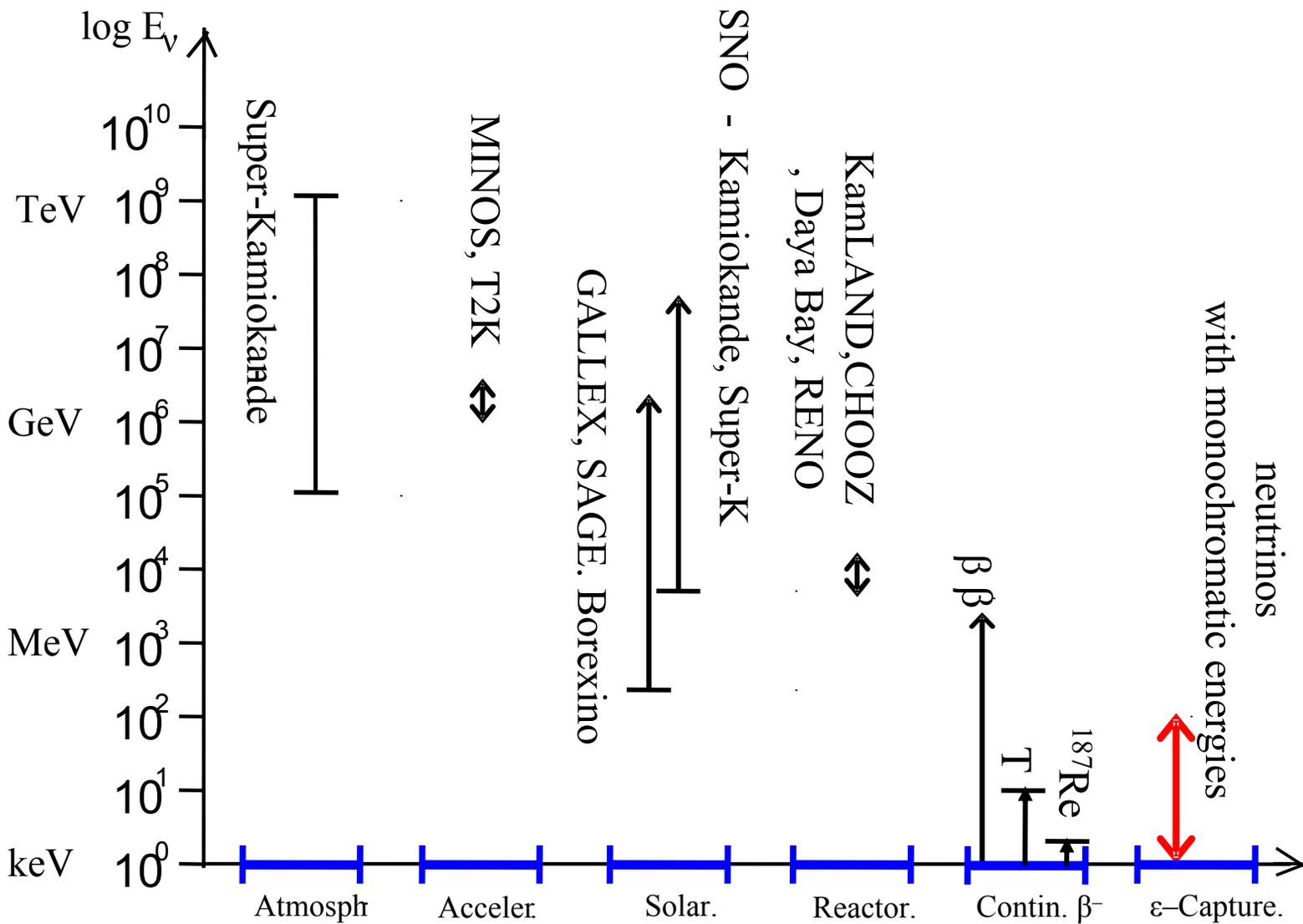
Ю.Н. Новиков

ПИЯФ

Семинар ОФВЭ ПИЯФ

10 апреля 2012 г.

Диапазон энергий нейтрино, охваченный различными детекторами



Задачи будущего детектора нейтрино

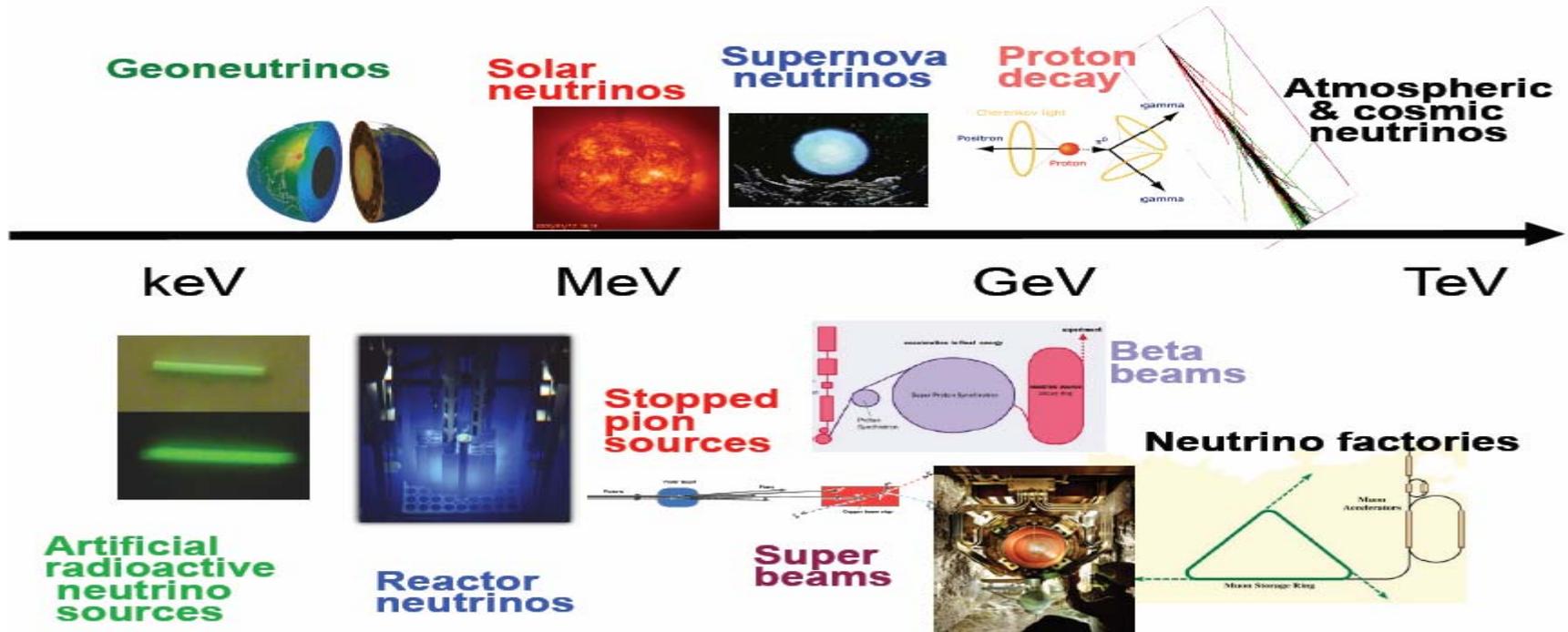
- охватить как можно больший энергетический диапазон для возможности изучения процессов в различных астро- и гео-физических объектах → **нейтрино как способ исследований космоса,**
- изучить свойства самих нейтрино в этом диапазоне энергий → **нейтрино само как объект исследований**

**Какие эксперименты призваны
решить эти проблемы?**

LAGUNA

Large Apparatus for Grand Unification and
Neutrino Astrophysics

Предмет исследований и технические возможности



Пан-европейская коллаборация LAGUNA-LBNO



~300 members (open)

France

CEA
CNRS-IN2P3
Sofregaz*

Spain

LSC
UA Madrid
CSIC/IFIC
ACCIONA*

Romania

IFIN-HH
University Bucharest

Germany

TU Munich
University Hamburg
Max-Planck-Gesellschaft
Aachen
University Tübingen

Denmark

Aahrus

Switzerland

University Bern
University Geneva
ETH Zürich (coordinator)
Lombardi Engineering*

United Kingdom

Imperial College London
Durham
Oxford
QMUL
Liverpool
Sheffield
Sussex
RAL
Warwick
Technodyne Ltd*
Alan Auld Ltd*
Ryhal Engineering*

Italy

AGT*

Finland

University Jyväskylä
University Helsinki
University Oulu
Rockplan Oy Ltd*

Poland

IFJ PAN
IPJ
University Silesia
Wroclaw UT
KGHM CUPRUM*

Russia

INR
PNPI

CERN

Greece

Demokritos

Japan

KEK

USA

Virginia Tech

(*=industrial partners)

Опции детекторов LAGUNA

MEMPHYS

2x 330kt

220'000
8-10"
PMTs

64 m

103 m

LENA 50kt

55'000
8" PMTs

100 m

26 m

GLACIER 100kt

up to $\Phi \approx 70\text{ m}$

up to $h = 20\text{ m}$
Max drift length

Bubble chamber like imaging well matched to CN2PY beam, high efficiency and strong background suppression

Challenging technology, worldwide R&D (EU,US,Japan) with several prototypes of small scale; extrapolation based on industry support

Underground experience from ICARUS T600 @ LNGS

Proposal to bring ICARUS T600 to CERN → what will be the next milestone for underground LAr TPCs ?

Extensive experience from SK, K2K, T2K, adequate for single ring QE events: low efficiency for CN2PY baseline & limited background suppression

Experience from Borexino

MC studies on CN2PY beam event reconstruction

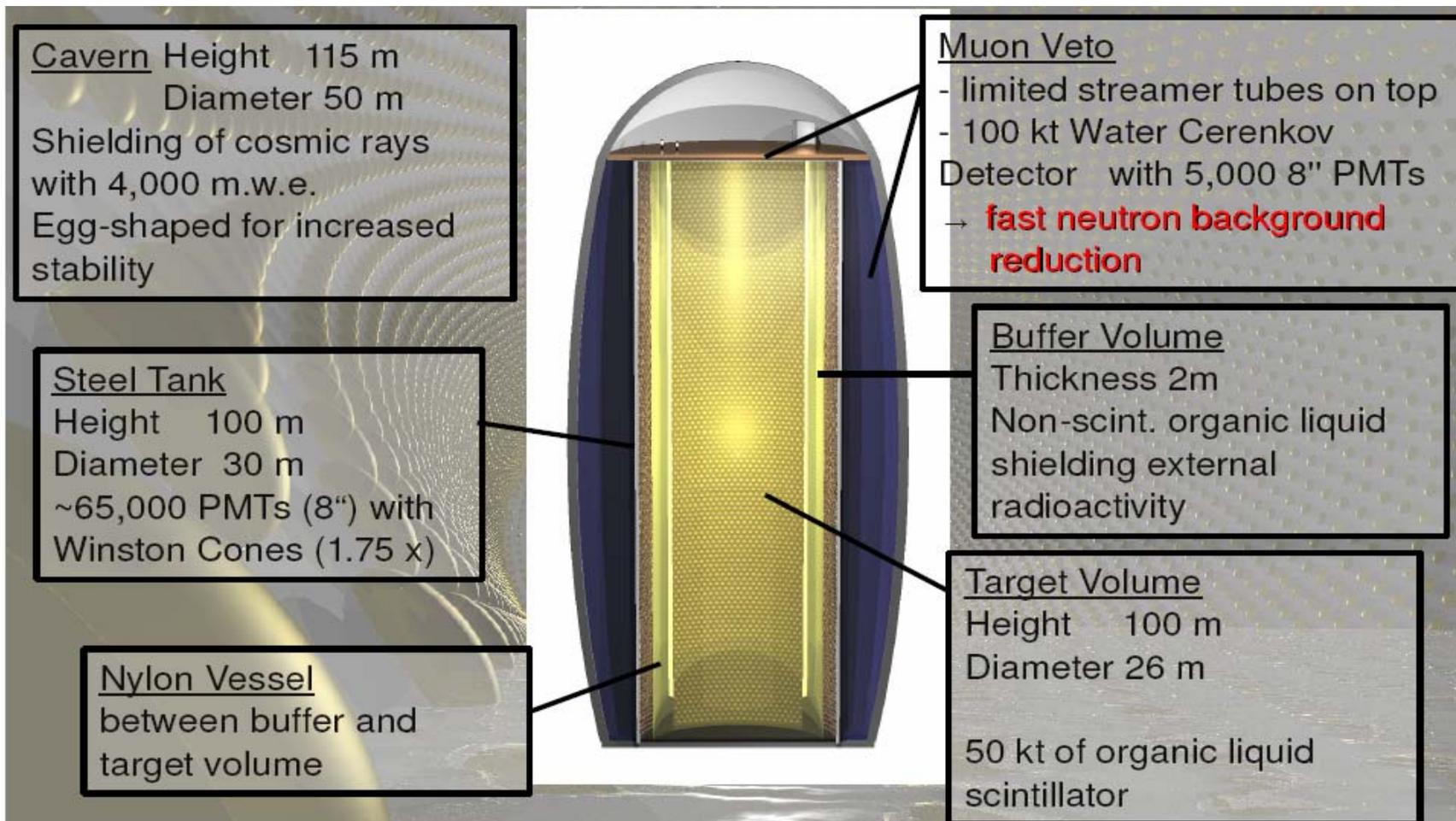
Background suppression to be further studied

Underground experience from ICARUS T600 @ LNGS

Proposal to bring ICARUS T600 to CERN → what will be the next milestone for underground LAr TPCs ?

Детектор с жидким сцинтиллятором LENA

Скелетная схема LENA (Low Energy Neutrino Astronomy)



Одинакового роста!



Коллаборация LENA как часть консорциума LAGUNA

The next-generation liquid-scintillator neutrino observatory LENA

Michael Wurm,^{1,2,*} John F. Beacom,³ Leonid B. Bezrukov,⁴ Daniel Bick,² Johannes Blümer,⁵ Sandhya Choubey,⁶ Christian Ciemniak,¹ Davide D'Angelo,⁷ Basudeb Dasgupta,³ Amol Dighe,⁸ Grigorij Domogatsky,⁴ Steve Dye,⁹ Sergey Eliseev,¹⁰ Timo Enqvist,¹¹ Alexey Erykalov,¹⁰ Franz von Feilitzsch,¹ Gianni Fiorentini,¹² Tobias Fischer,¹³ Marianne Göger-Neff,¹ Peter Grabmayr,¹⁴ Caren Hagner,² Dominikus Hellgartner,¹ Johannes Hissa,¹¹ Shunsaku Horiuchi,³ Hans-Thomas Janka,¹⁵ Claude Jaupart,¹⁶ Josef Jochum,¹⁴ Tuomo Kalliokoski,¹⁷ Pasi Kuusiniemi,¹¹ Tobias Lachenmaier,¹⁴ Ionel Lazanu,¹⁸ John G. Learned,¹⁹ Timo Lewke,¹ Paolo Lombardi,⁷ Sebastian Lorenz,² Bayarto Lubsandorzhev,^{4,14} Livia Ludhova,⁷ Kai Loo,¹⁷ Jukka Maalampi,¹⁷ Fabio Mantovani,¹² Michela Marafini,²⁰ Jelena Maricic,²¹ Teresa Marrodán Undagoitia,²² William F. McDonough,²³ Lino Miramonti,⁷ Alessandro Mirizzi,²⁴ Quirin Meindl,¹ Olga Mena,²⁵ Randolph Möllenberg,¹ Rolf Nahnauer,²⁶ Dmitry Nesterenko,¹⁰ Yuri N. Novikov,¹⁰ Guido Nuijten,²⁷ Lothar Oberauer,¹ Sandip Pakvasa,²⁸ Sergio Palomares-Ruiz,²⁹ Marco Pallavicini,³⁰ Silvia Pascoli,³¹ Thomas Patzak,²⁰ Juha Peltoniemi,³² Walter Potzel,¹ Tomi Rähkä,¹¹ Georg G. Raffelt,³³ Gioacchino Ranucci,⁷ Soebur Razzaque,³⁴ Kari Rummukainen,³⁵ Juho Sarkamo,¹¹ Valerij Sinev,⁴ Christian Spiering,²⁶ Achim Stahl,³⁶ Felicitas Thorne,¹ Marc Tippmann,¹ Alessandra Tonazzo,²⁰ Wladyslaw H. Trzaska,¹⁷ John D. Vergados,³⁷ Christopher Wiebusch,³⁶ and Jürgen Winter¹

arXiv:1104.5620

**97 people from 37 universities and
institutes in different 13 countries!**

Физические задачи проекта LENA

Распад протона

Нейтрино высоких и сверхвысоких энергий (ГэВ):

- Атмосферные нейтрино,
- Осцилляции высокоэнергетичных нейтрино

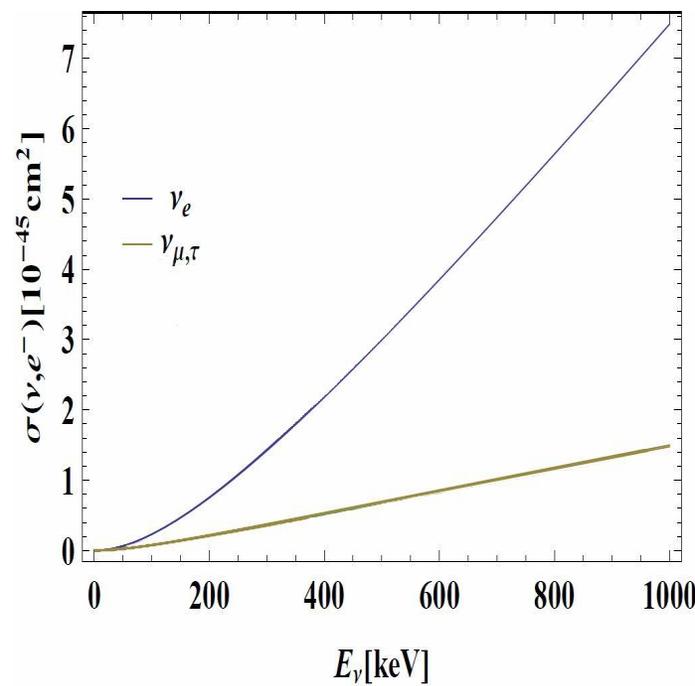
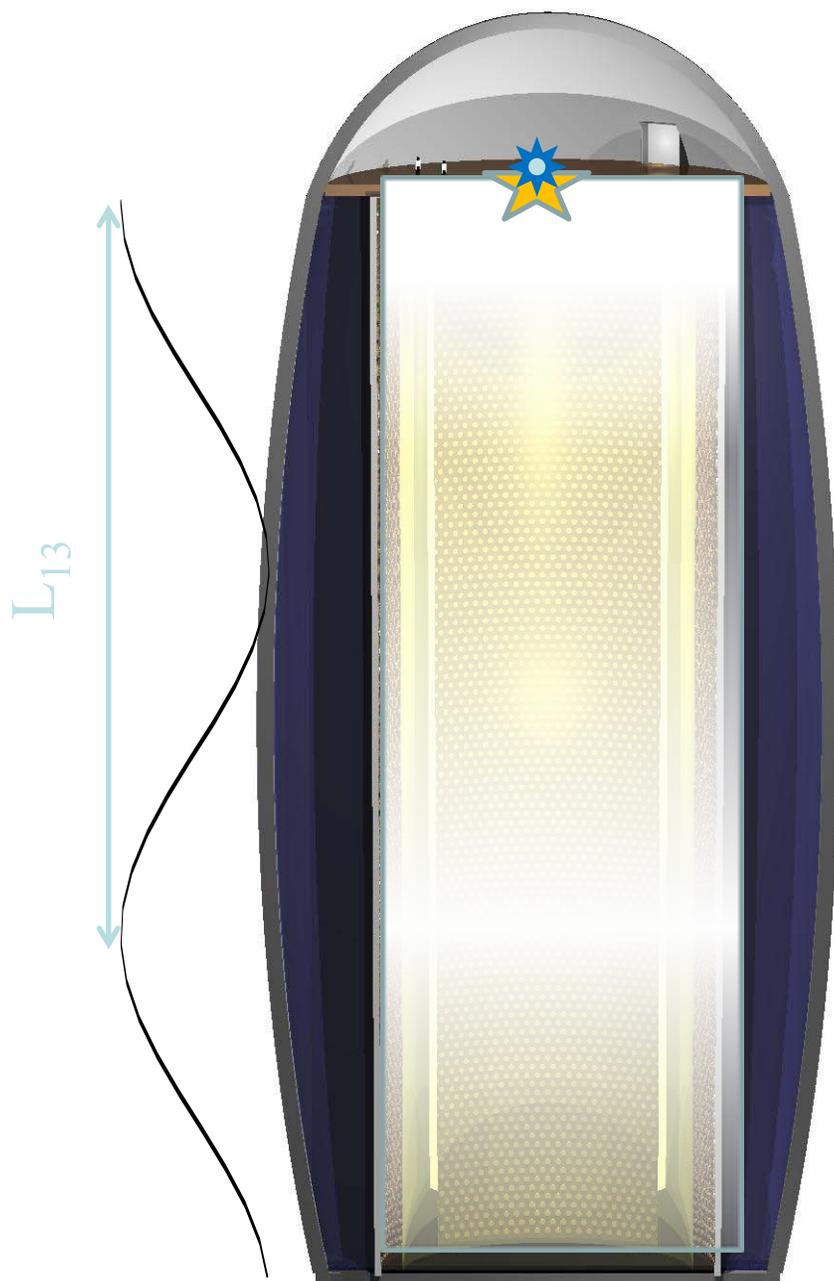
Средне- и Низкоэнергетичные нейтрино:

- Нейтрино из галактических сверхновых,
- Нейтрино от аннигиляции тёмной материи,
- Солнечные нейтрино,
- Гео(земные) нейтрино,
- Реакторные нейтрино

Нейтрино сверхнизких энергий:

- Нейтринная осциллометрия

Нейтринная осциллометрия-прямое наблюдение осцилляций нейтрино



Вероятность осцилляций

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_e) \approx 1 - \chi(E_\nu) \left[\sin^2 2\theta_{12} \sin^2 \left(\pi \frac{L}{L_{12}} \right) + \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \left(\pi \frac{L}{L_{13}} \right) \right] - \sum_{n=3}^{n=4} \sin^2 2\theta_{1n} \sin^2 \left(\pi \frac{L}{L_{1n}} \right)$$

$$L_{ij} = \frac{4\pi E_\nu}{m_i^2 - m_j^2} \quad L_{ij}[\text{m}] = \frac{2.48 \cdot E_\nu[\text{MeV}]}{\Delta m_{ij}^2[\text{eV}^2]}$$

“Расхождение” различных электронных длин осцилляций L_{ei}

$$\Delta m_{12}^2 = 7.5 \times 10^{-5} (\text{eV})^2 \quad \rightarrow \quad L_{12}/E_\nu = 3.3 \times 10^6$$

$$\Delta m_{13}^2 = 2.5 \times 10^{-3} (\text{eV})^2 \quad \rightarrow \quad L_{13}/E_\nu = 10^3$$

$$\Delta m_{14}^2 = 1 (\text{eV})^2 \quad \rightarrow \quad L_{14}/E_\nu = 2.5$$

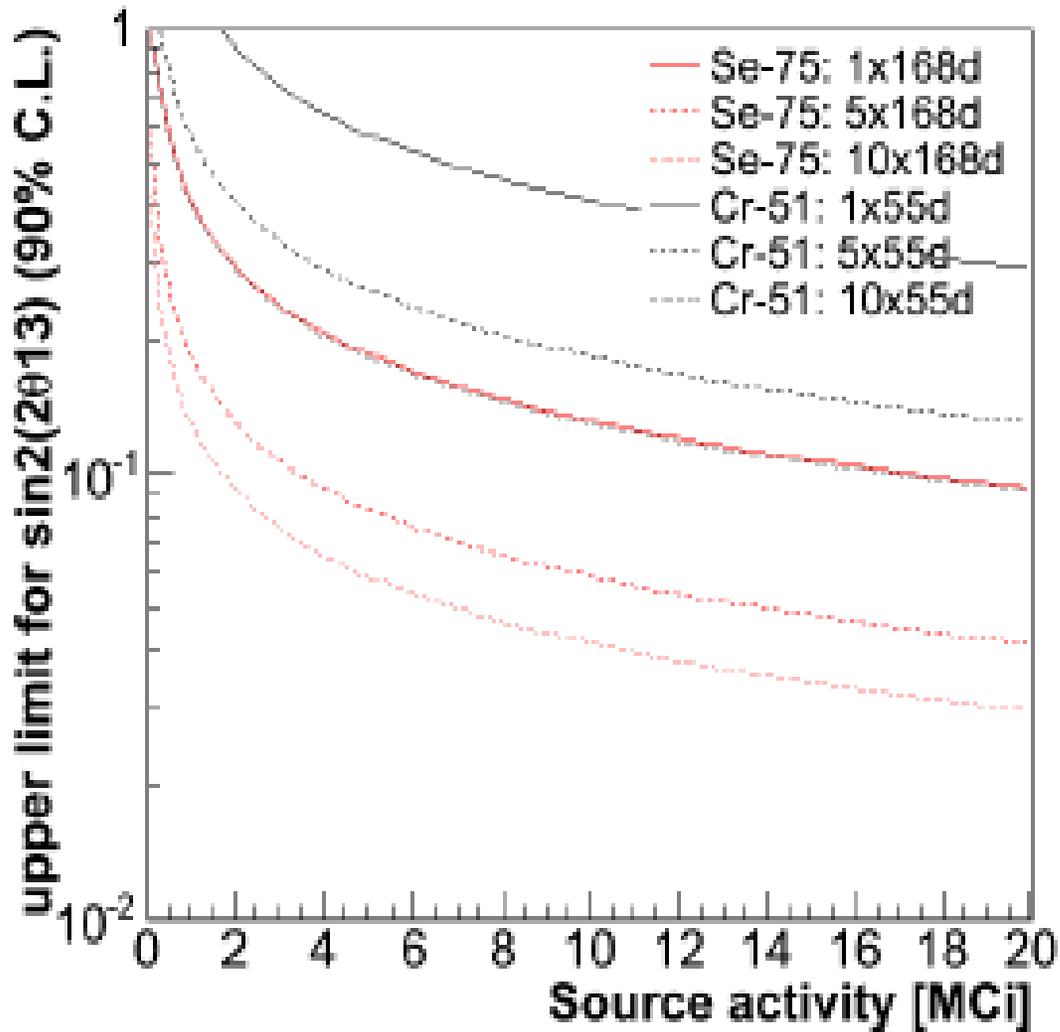
Кандидаты на нейтринную осциллометрию

Nuclide	$T_{1/2}$ [d]	Q_{EC} [keV]	E_ν [keV]	$E_{e, \max}$ [keV]	Target material	ν -intensity [kg ⁻¹ s ⁻¹]
³⁷ Ar	35	814	811 (100%)	617	⁴⁰ Ca, Ar	8.3x10 ¹⁵
⁵¹ Cr	28	753	747 (90%)	560	⁵⁰ Cr	2.3x10 ¹⁶
⁷⁵ Se	120	863	450 (96%)	287	Se	1.1x10 ¹⁴
¹¹³ Sn	116	1037	617 (98%)	436	Sn	8x10 ¹¹
¹⁴⁵ Sm	340	616	510 (91%)	340	Sm	2x10 ¹²
¹⁶⁹ Yb	32	910	470 (83%)	304	Yb	1.1x10 ¹⁵

Осциллометрия с «активными» моноэнергичными нейтрино

Чувствительность к $\sin^2(2\theta_{13})$.

Текущее значение $\sin^2(2\theta_{13})=0.10(2)$



[Yu. Novikov et al.
arXiv:1110.2983]

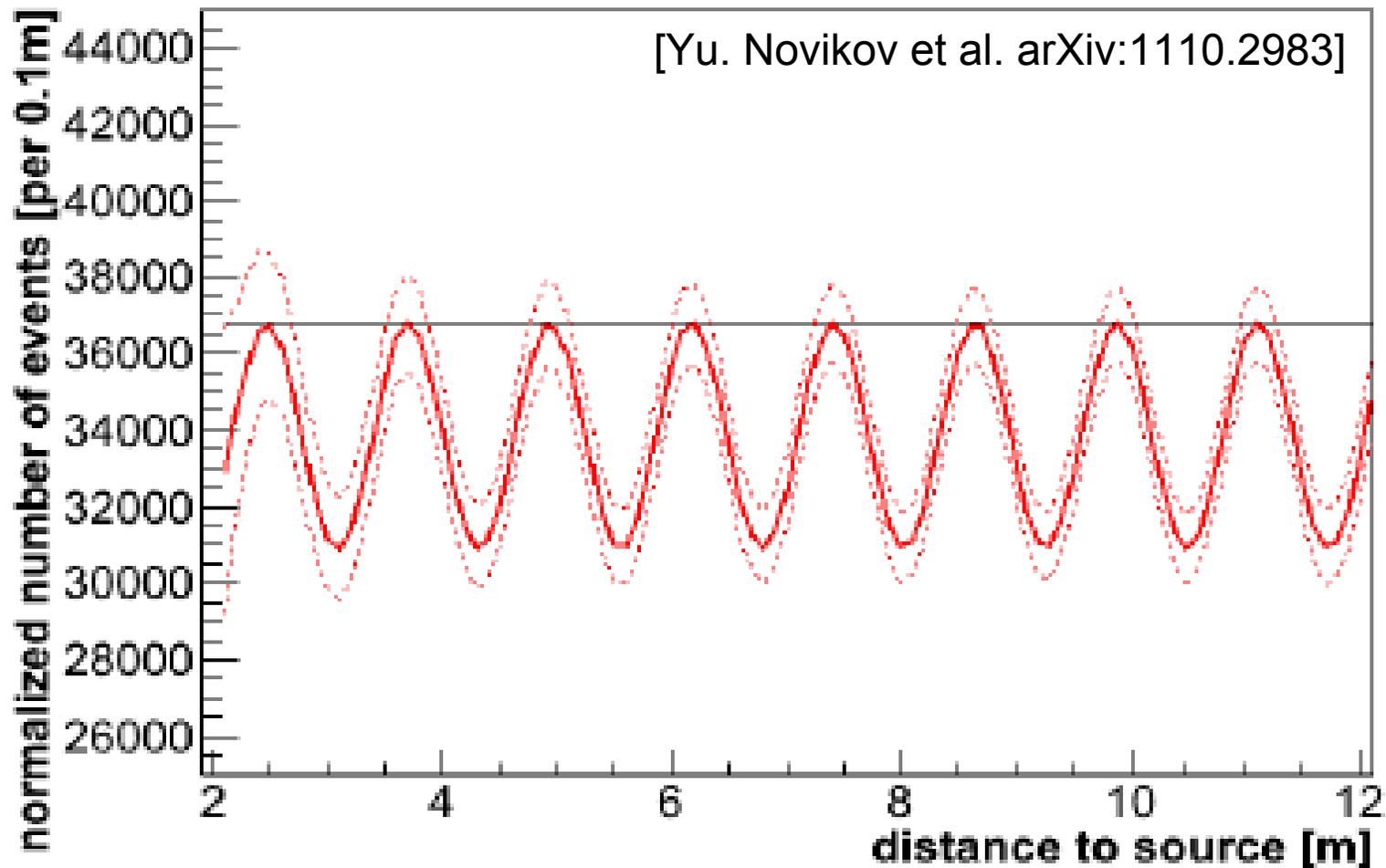
Осциллометрия со стерильными нейтрино

Изучение стерильных нейтрино на LENA

Neutrino states (i,f)	Δm_{ij}^2 (eV) ²	$\sin^2(2\theta_{ij})$	L_{ij} (m)
1,2	7.6×10^{-5}	0.85	$\approx 32 E_\nu$ (keV)
1,3	2.4×10^{-3}	< 0.15	$\approx E_\nu$ (keV)
1,4	$\approx 0.5 - 5$	≈ 0.15	$\approx 5 E_\nu (10^{-3} - 10^{-4})$
1,5	$\approx 0.9 - 1.6$?	$\approx 10^{-3} E_\nu (2.8-1.6)$
1,6 (?)	?	?	?

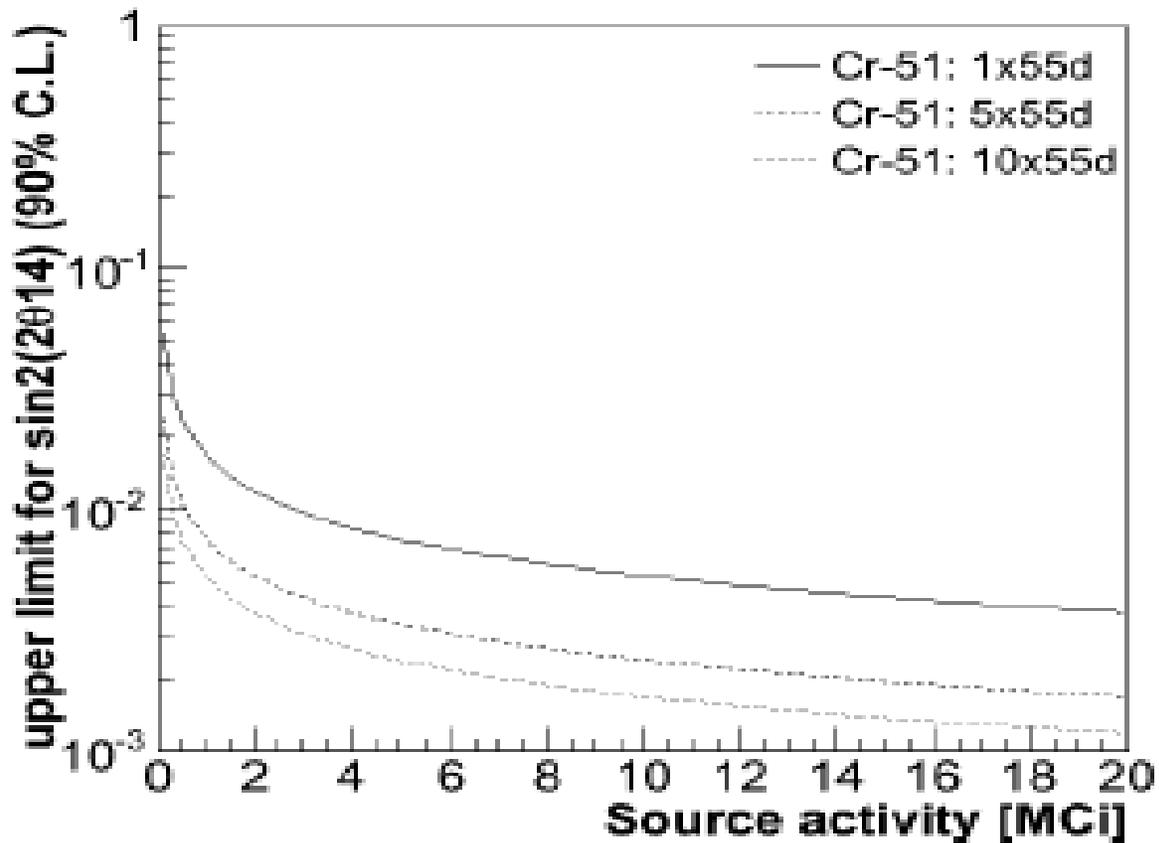
Оциллометрия со стерильными нейтрино

(Источник в 5МCi ^{51}Cr в течение 55-дней)



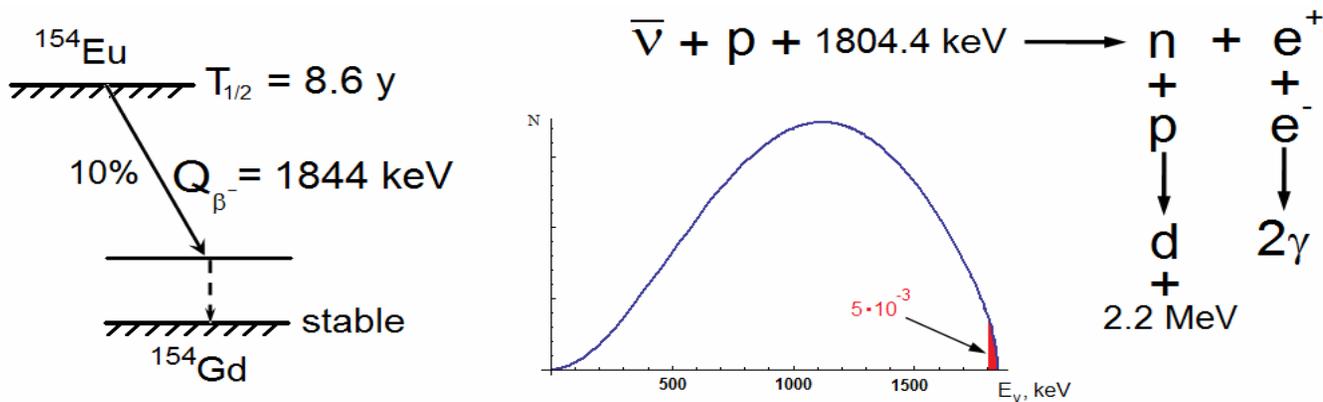
Чувствительность к θ_{14}

[Yu. Novikov et al. arXiv:1110.2983]

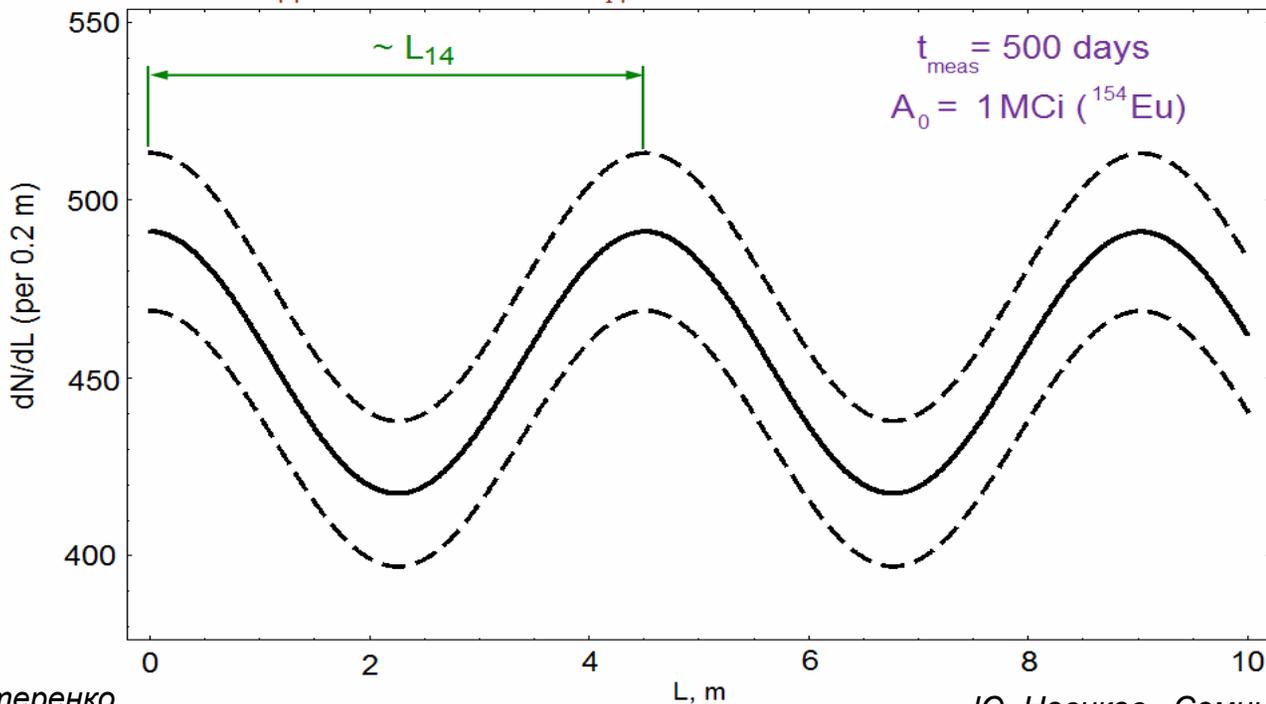


Осцилляции со стерильными антинейтрино

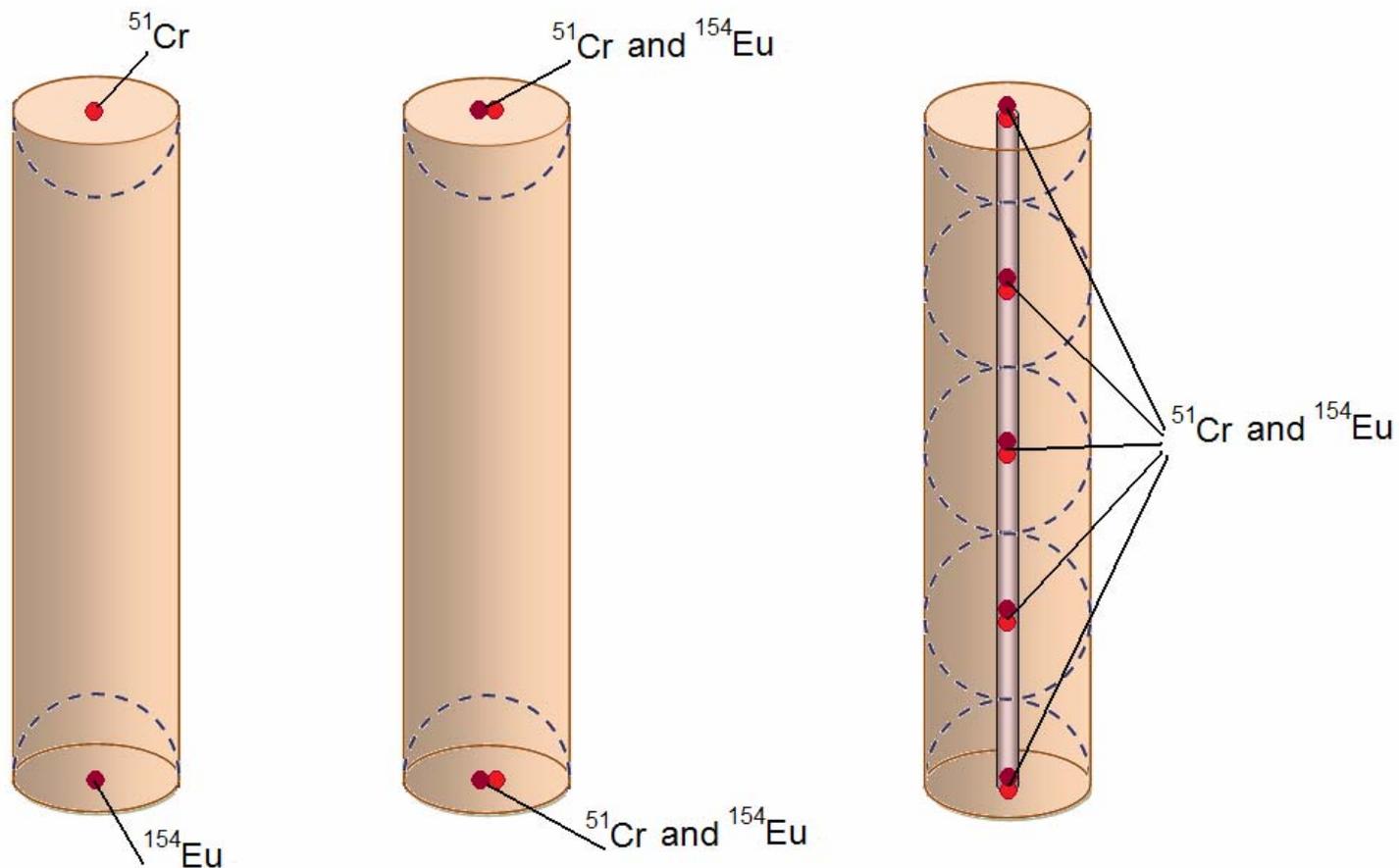
Использование обратного бета-распада для осциллометрии антинейтрино



If $\Delta m_{14}^2 = 1 \text{ eV}^2$, $\sin^2 2\theta_{14} = 0.15$



«Разбиение» цилиндра LENA для многофункциональных измерений

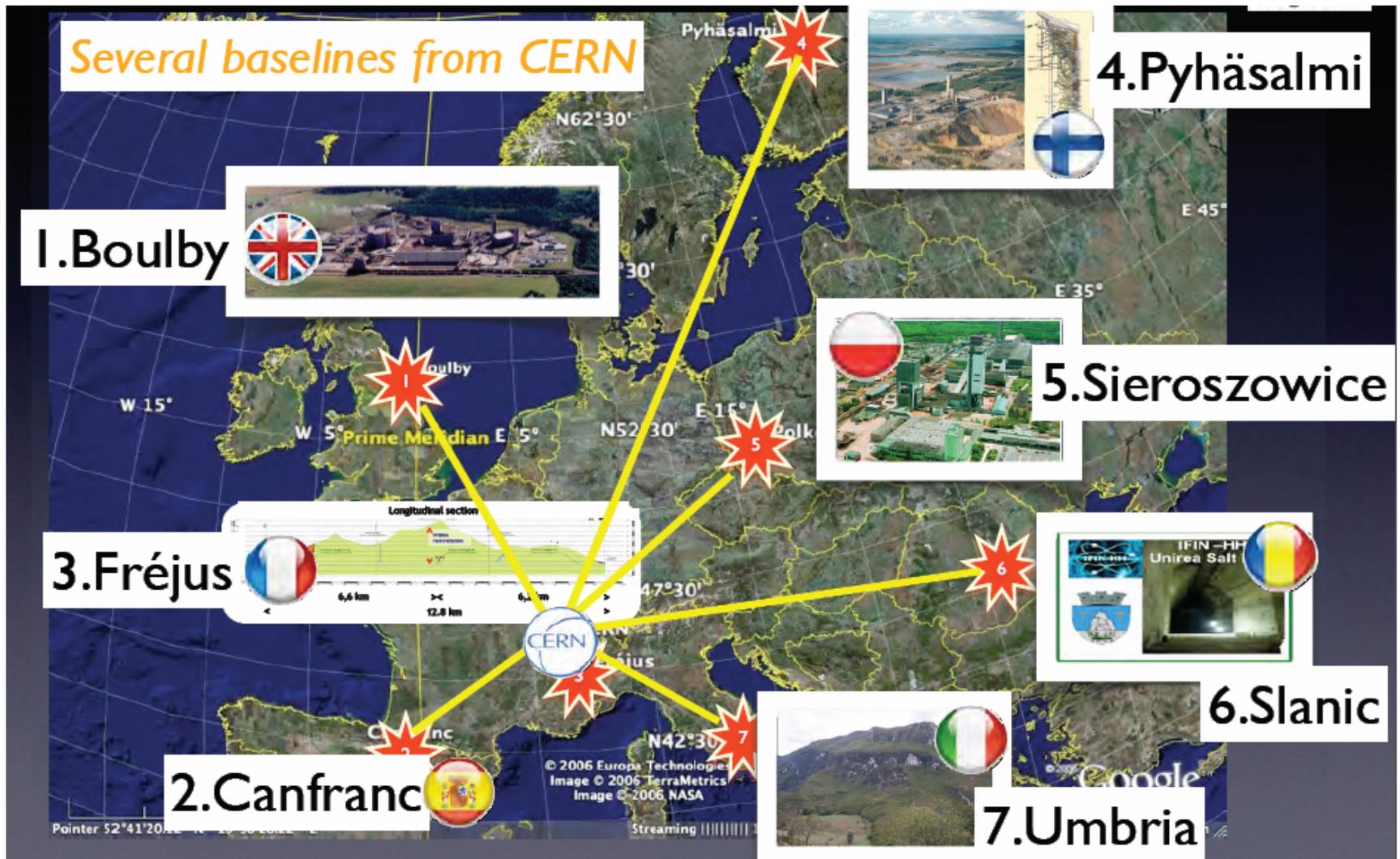


Роль осциллометрии в нейтринных исследованиях

- Прямое наблюдение явления осцилляций нейтрино.
- Определение угла смешивания нейтрино θ_{13} и длины осцилляций L_{13} в вакууме в одном эксперименте (LENA).
- Проверка справедливости соотношения $L_{13}[\text{m}] = Q_\nu[\text{keV}]$ и корректности “глобального анализа”.
- Поиск стерильных нейтрино в самом широком диапазоне масс Δm_{1i}^2 от 0.02 до 2 eV² (“анатомия стерилизации”).
- Одновременное наблюдение осцилляций нейтрино и антинейтрино – путь к проверке нарушения СРТ.

Опции мест расположения детекторов

Семь изученных площадок в Европе для расположения детекторов LAGUNA



Шахта Пихасалми в Финляндии



- ▶ CUPP : Centre for Underground Physics in Pyhäsalmi (www.cupp.fi)
- ▶ Location: $63^{\circ} 39' 31''\text{N} - 26^{\circ} 02' 48''\text{E}$
- ▶ Distances (by roads)
 - ▶ Oulu – 165 km
 - ▶ Jyväskylä – 180 km
 - ▶ Helsinki – 450 km
- ▶ Distance to CERN 2300 km
- ▶ Good traffic connections
 - ▶ the main highway:
Helsinki – Jyväskylä – Oulu – ...
 - ▶ the second busiest airport in Oulu
 - ▶ rail yard at the mine
- ▶ Inhabitants: ~ 6000

Один из залов шахты в Пюхасалми на глубине 1400 м

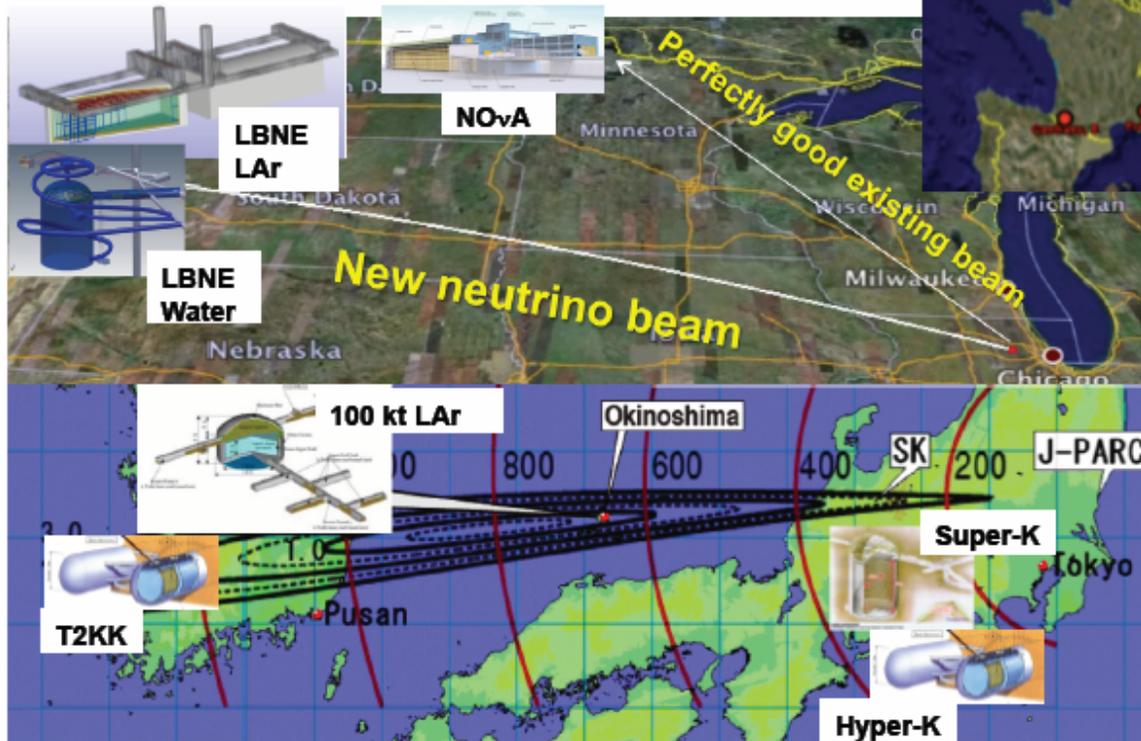


Успехов!
СПАСИБО

Back-up

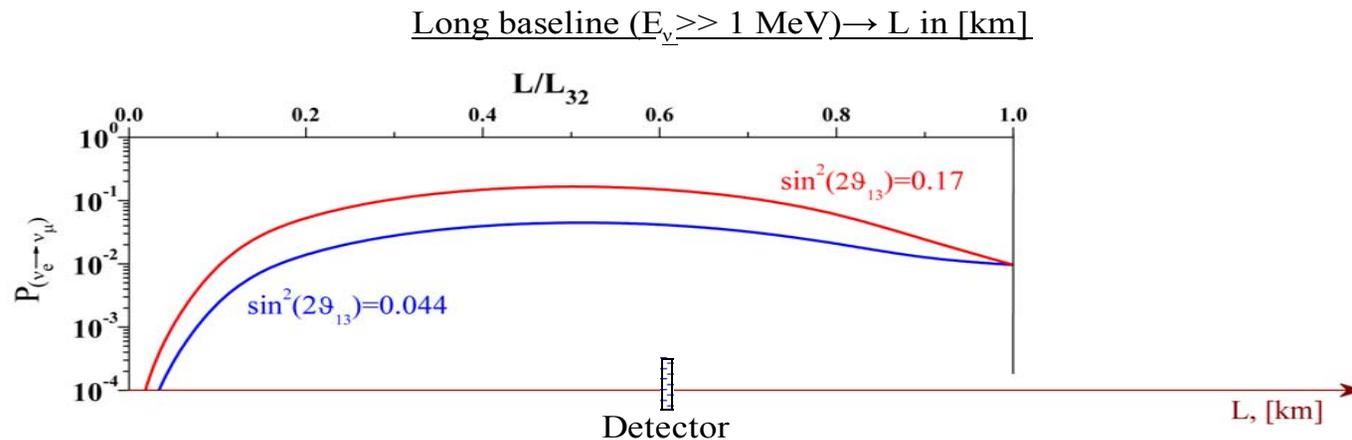
Several programs working towards long baseline oscillation programs

US, Japan, Europe

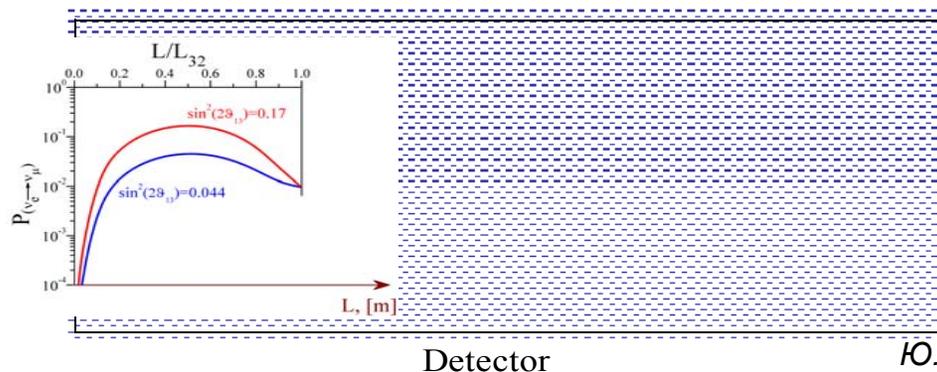


**And more future ideas:
 β beams,
 ν factories,
 cyclotrons,...**

Сравнение «одноточечной осцилляции» (на возникновение или исчезновение) с осциллометрией в пределах размеров детектора, включающей и возникновение, и исчезновение аромата нейтрино и не зависящей от эффекта массы среды



Short baseline ($E_\nu \ll 1 \text{ MeV} \rightarrow L \text{ in [m]}$) - **oscillometry**



Термин осциллометрии был введён в работе

J.D. Vergados, and Yu.N. Novikov. “*Exploring new features of neutrino oscillations with very low energy monoenergetic neutrinos*”.

Nucl. Phys. B **839** (2010) pp.1-20

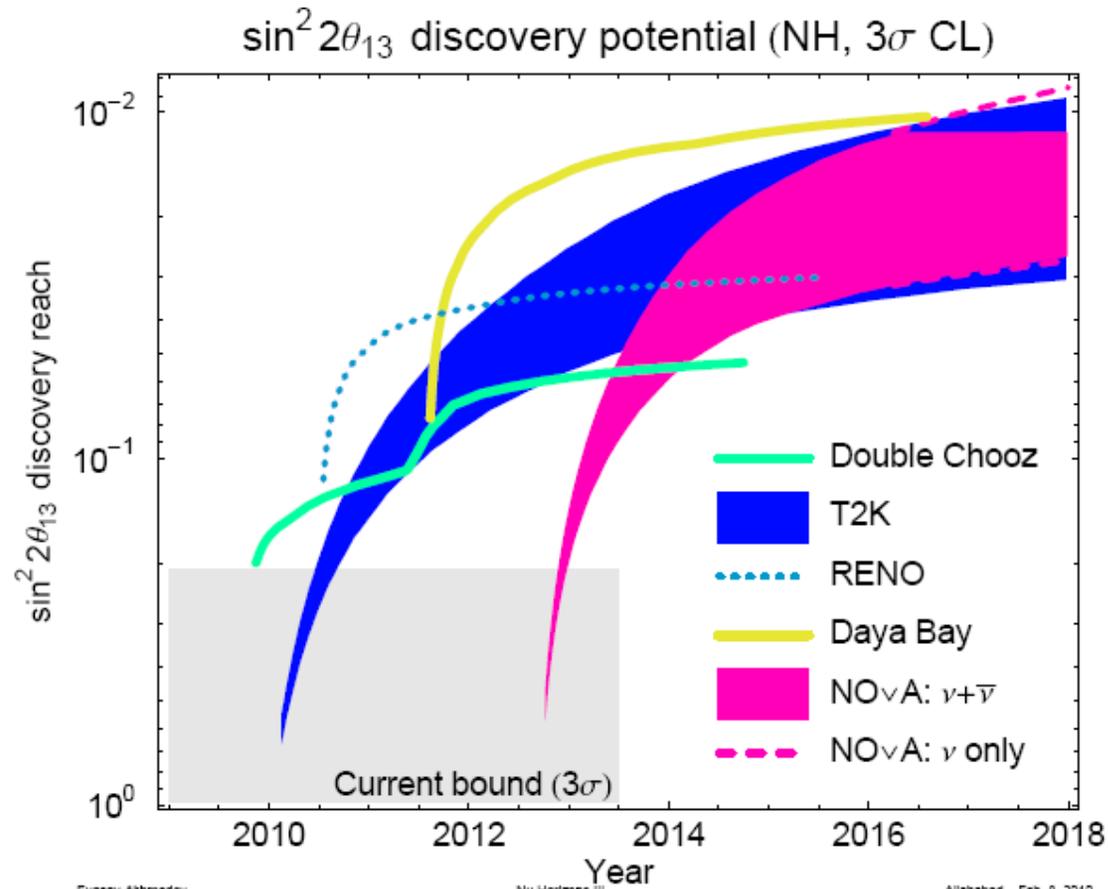
Далее метод подробно рассматривался в работах:

- Yu.N. Novikov, T. Enqvist, A.N. Erykalov, F. v.Feilitzsch, J. Hissa, K. Loo, D.A. Nesterenko, L. Oberauer, F. Thorne, W. Trzaska, J.D. Vergados, M. Wurm.
“*Neutrino oscillometry at the next generation neutrino observatory*”.
arXiv:1110.2983, 14 October, 2011
- J.D. Vergados, Y. Giomataris, and Yu.N. Novikov., “*On the search of sterile neutrinos by oscillometry measurements.*”
arXiv:1105.3654v1, 18 May 2011.
- J.D. Vergados, Y. Giomataris, and Yu.N. Novikov, “*Probing the fourth neutrino existence by neutral current oscillometry in the spherical gaseous TPC.*”
Nucl. Phys. B **854** (2012) 54.

Требования к методу осциллометрии

- Моноэнергетичный источник нейтрино малых энергий (< 1 МэВ) \rightarrow от источников с электронным захватом
- Регистрация рассеяния нейтрино на электронах мишени (жидкого сцинтиллятора). В этом случае сечение рассеяния электронного нейтрино на электронах мишени во много раз превосходит сечение рассеяния мюонного и тау-нейтрино
- Из-за ничтожно малых сечений рассеяния ($\sim 10^{-45}$ см²) мишень должна быть как можно больших размеров (> 50 кт) и источник нейтрино максимально интенсивным (> 5 МСi).

Потенциал различных установок в определении θ_{13}



PH, M. Lindner, T. Schwetz, W. Winter, arXiv:0907.1894

Уникальные возможности осциллометрии с использованием детектора LENA

1. Многопрофильность детектора:

- Одновременная экспозиция нейтринного и антинейтринного источника (*цель- проверка CP-нарушения*).
- Одновременное определение параметров смешивания 13, 14, 15 ... и т.д. анализом отдельных функциональных частей детектора (*цель-зондирование стерильности и «анатомическое» исследование стерилизации*).
- Одновременное измерение углов смешивания θ_{1i} и соответствующих им длин осцилляций L_{1i} (*цель - проверка корректности «глобального анализа»*).

2. Использование «возобновляемых» источников нейтрино/антинейтрино

- Тщательный контроль свойств источников и геометрии облучения.
- Возможность прямого измерения фона при отсутствии источника (в промежутках между рабочими экспозициями)