

LENA- нейтринная обсерватория будущего

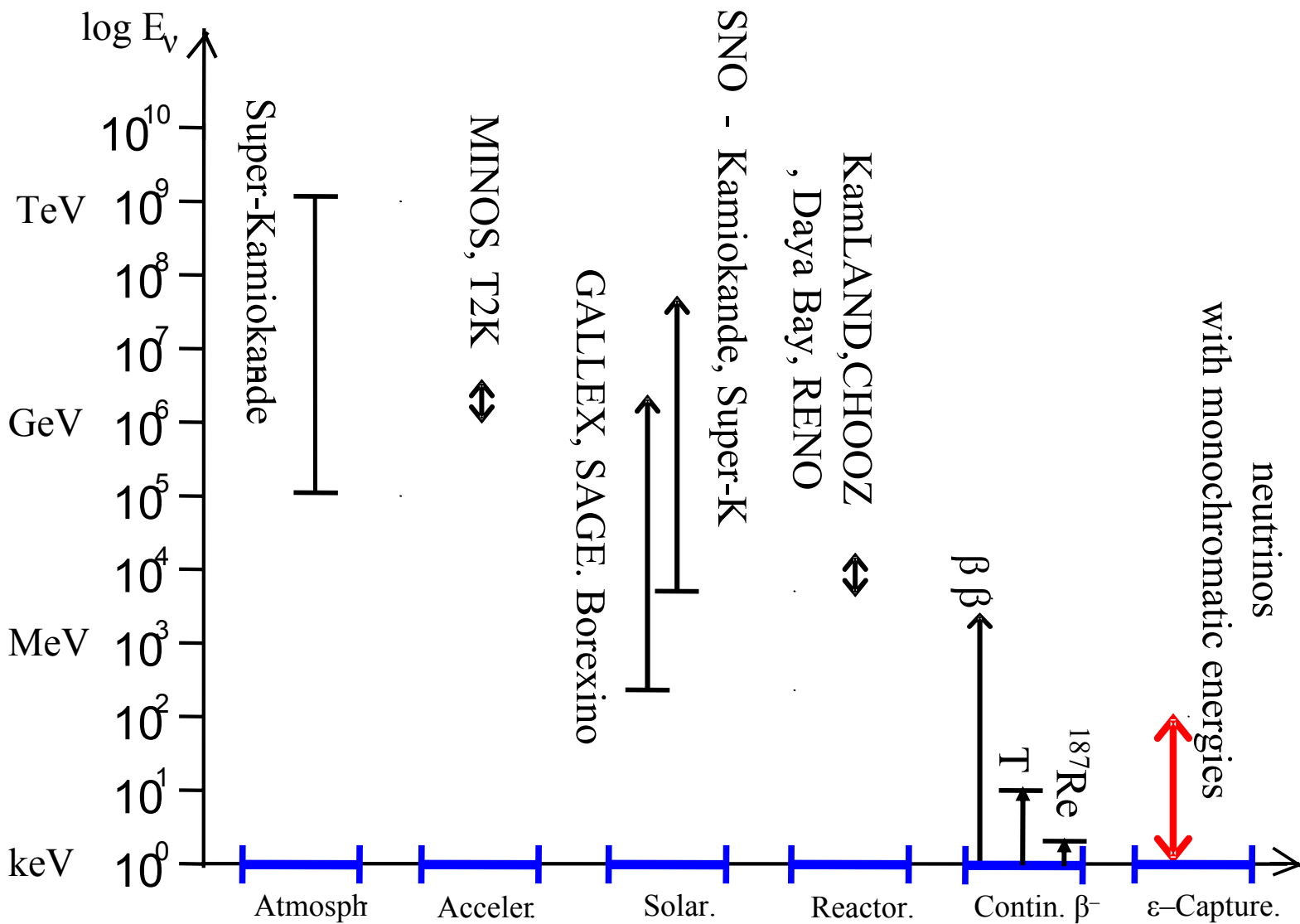
Ю.Н. Новиков

ПИЯФ

Семинар ОФВЭ ПИЯФ

10 апреля 2012 г.

Диапазон энергий нейтрино, охваченный различными детекторами



Задачи будущего детектора нейтрино

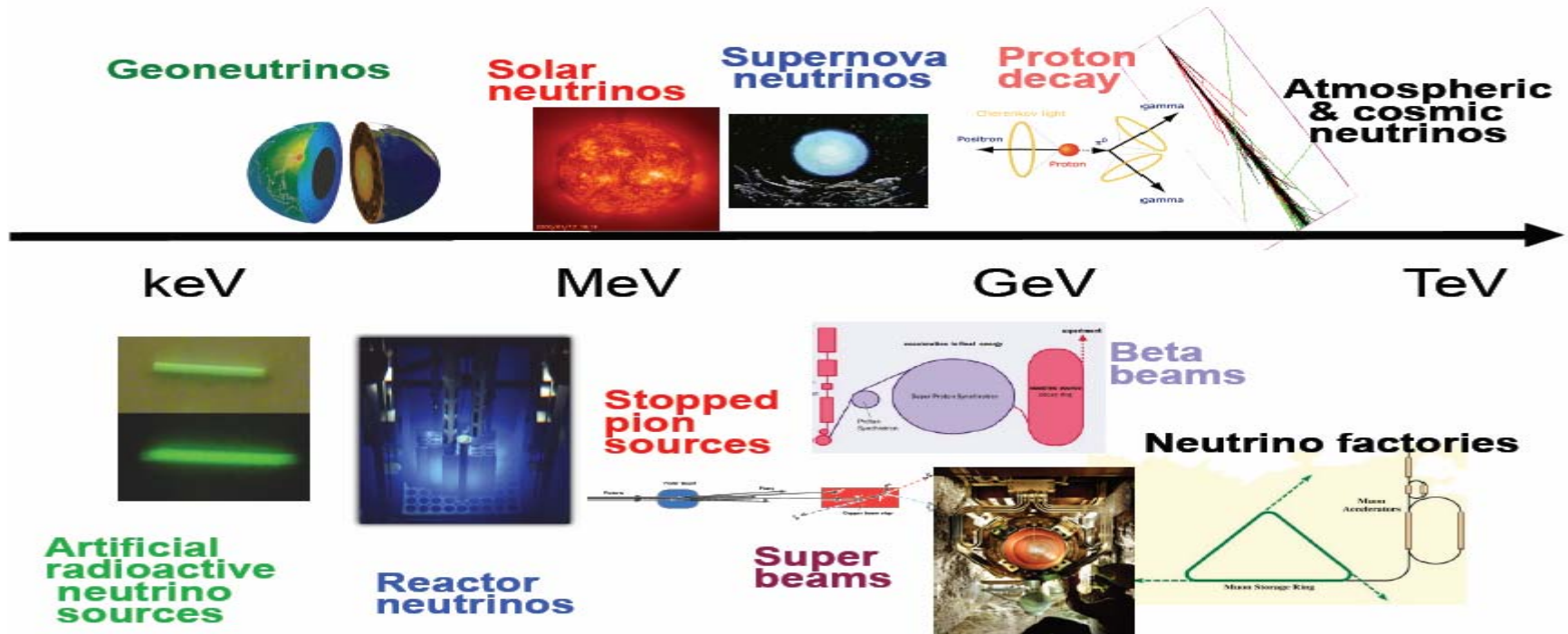
- охватить как можно больший энергетический диапазон для возможности изучения процессов в различных астро- и гео-физических объектах → **нейтрино как способ исследований космоса,**
- изучить свойства самих нейтрино в этом диапазоне энергий → **нейтрино само как объект исследований**

**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

100 m

55'000
8'' PMTs

26 m

GLACIER 100kt

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

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

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

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

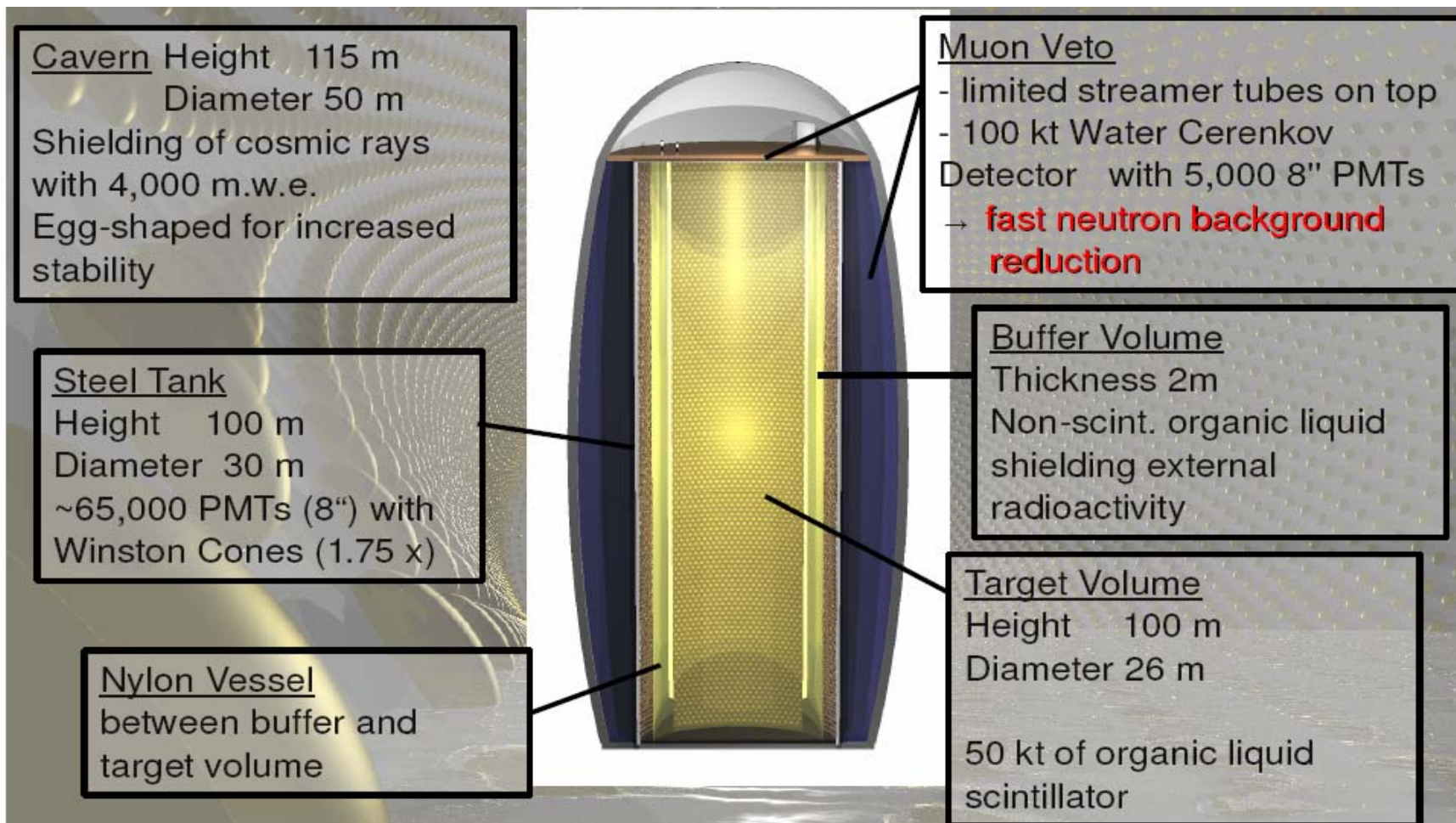
Challenging technology, worldwide R&D (EU,US,Japan) with several prototypes of small scale; extrapolation based on industry support

Underground experience from ICARUS T600 @ LNGS

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

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 Nahnhauer,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

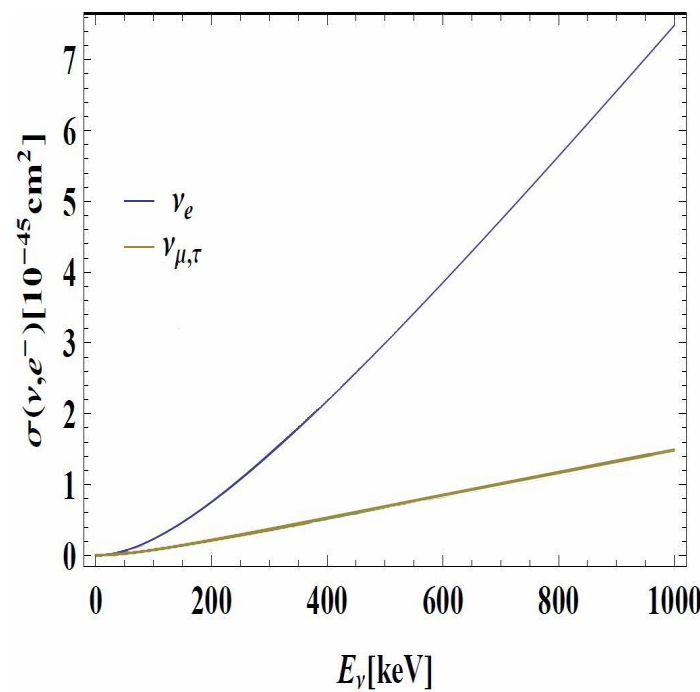
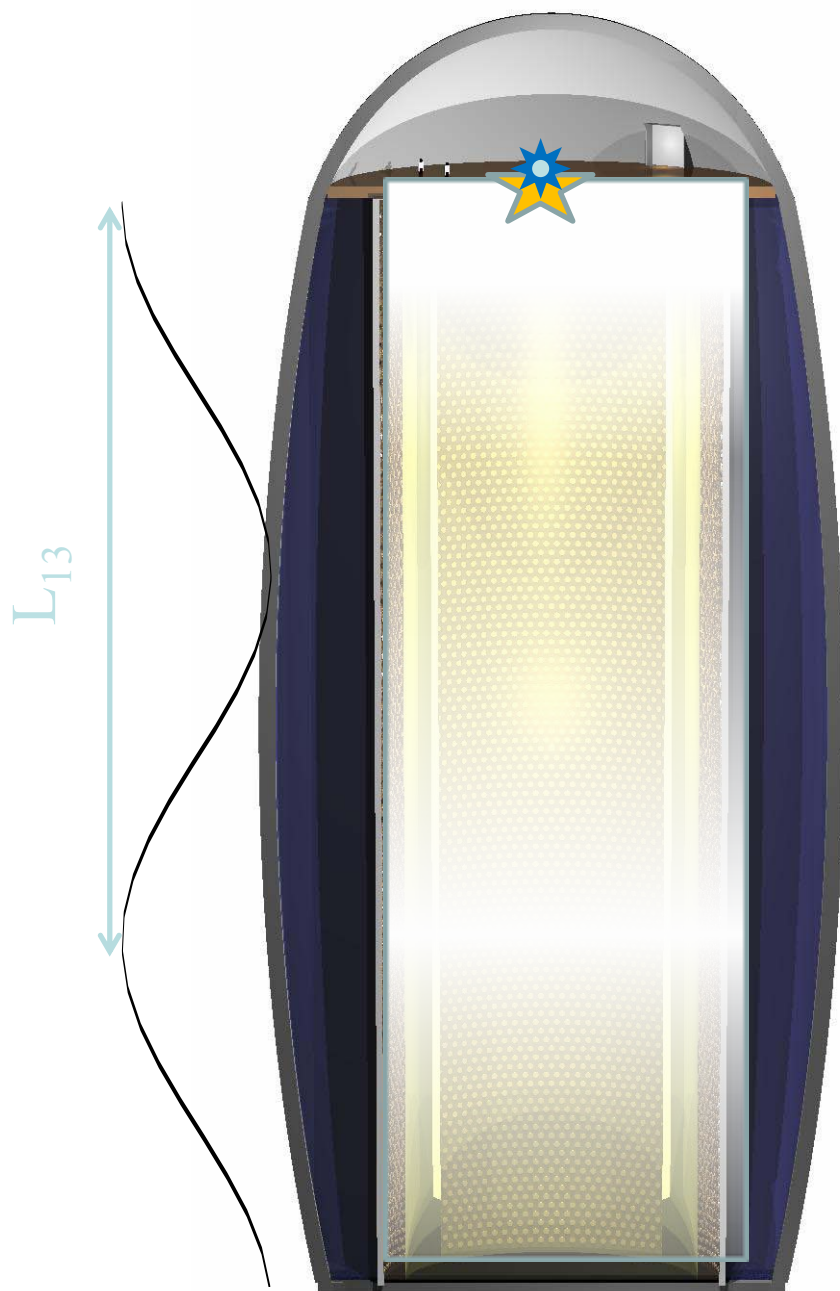
Средне- и Низкоэнергетичные нейтрино:

- 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}

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

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

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

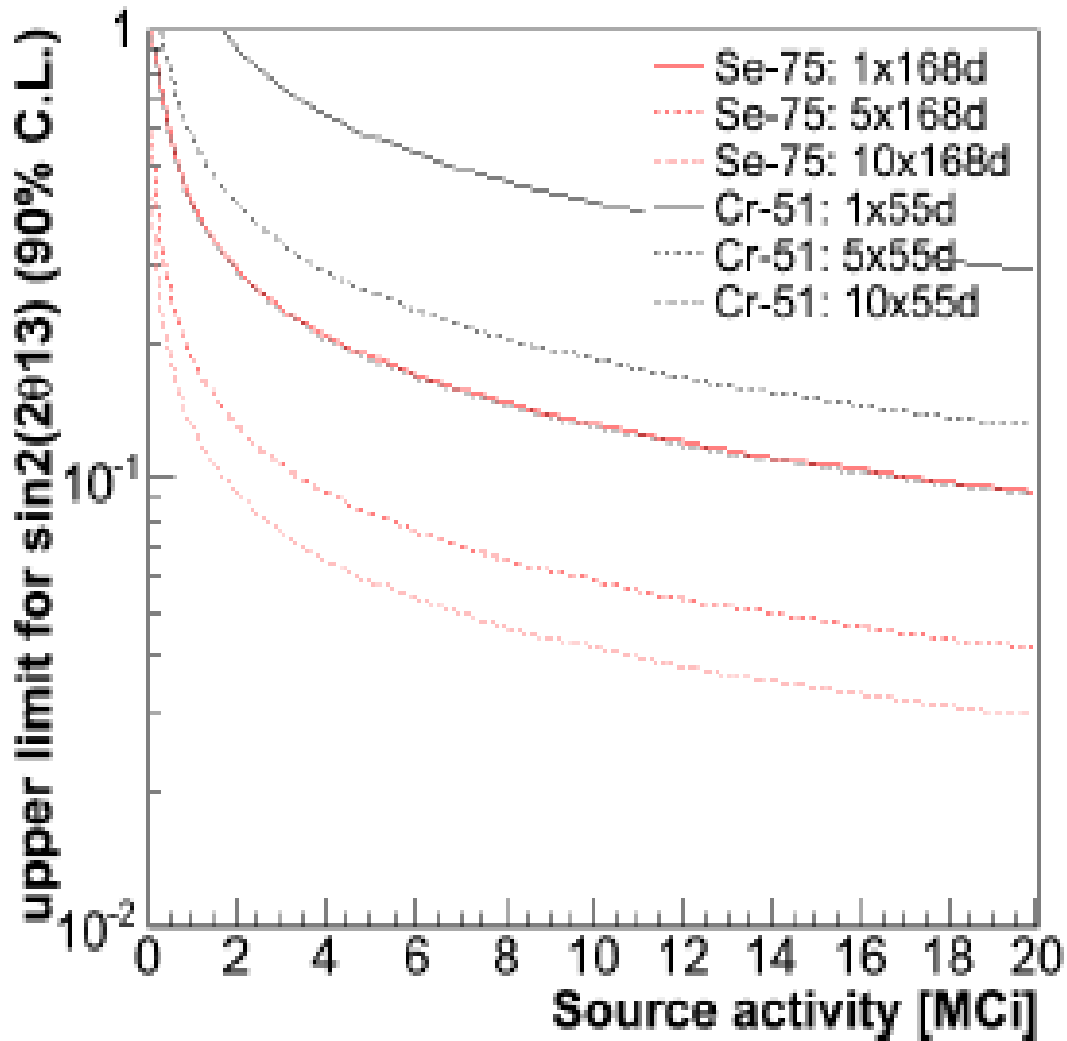
Кандидаты на нейтринную осциллометрию

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]

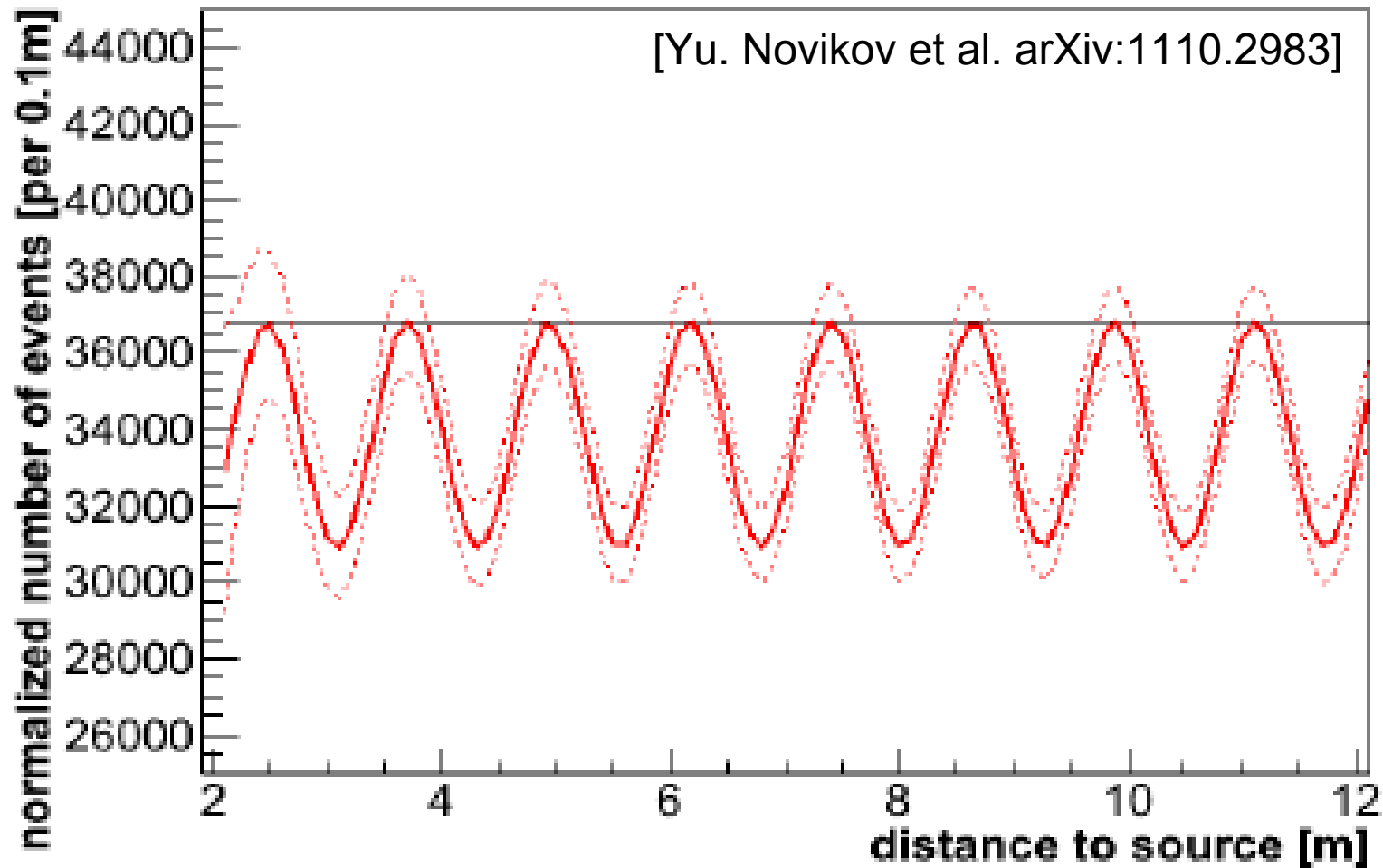
Осциллометрия со стерильными нейтрино

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 (?)	?	?	?

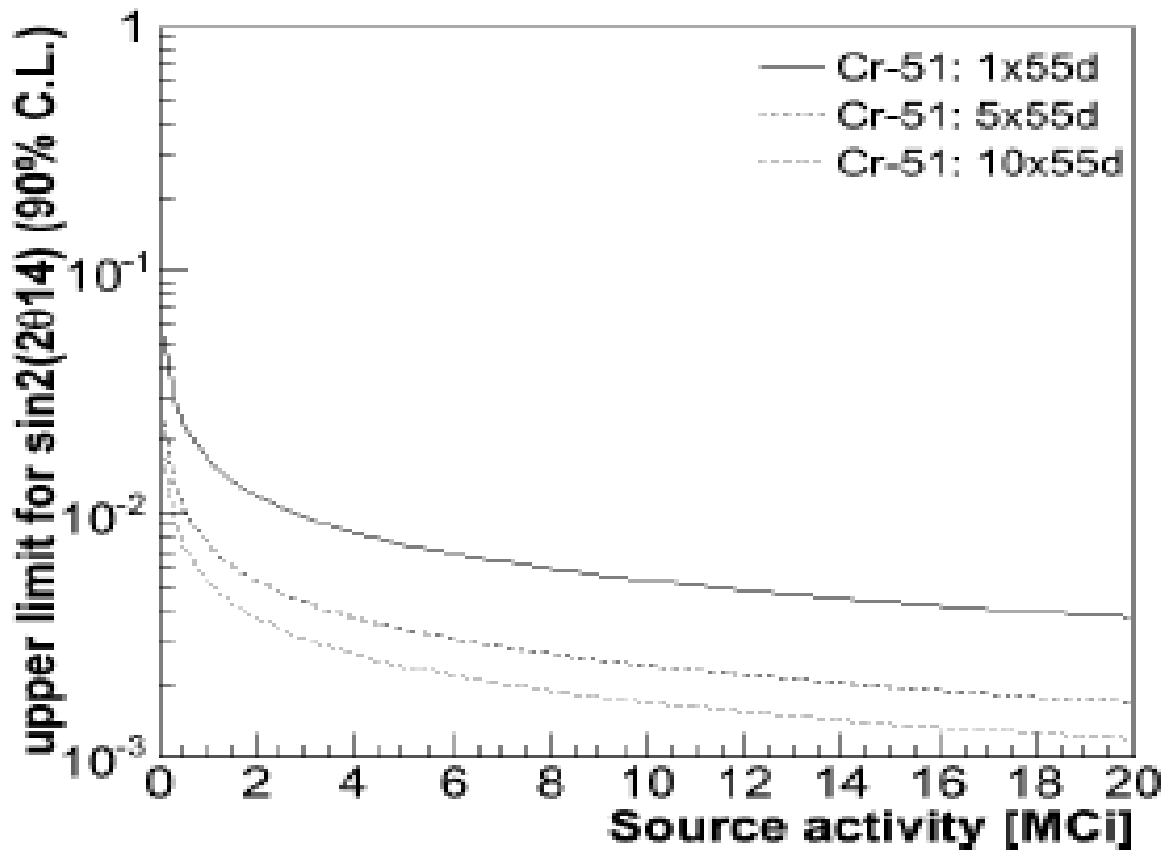
Осциллометрия со стерильными нейтрино

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



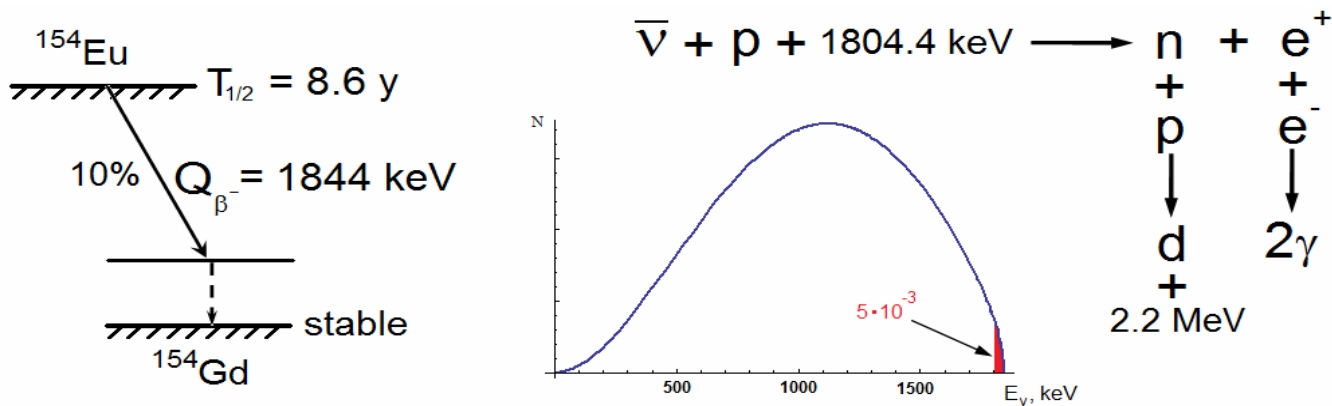
Чувствительность к θ_{14}

[Yu. Novikov et al. arXiv:1110.2983]

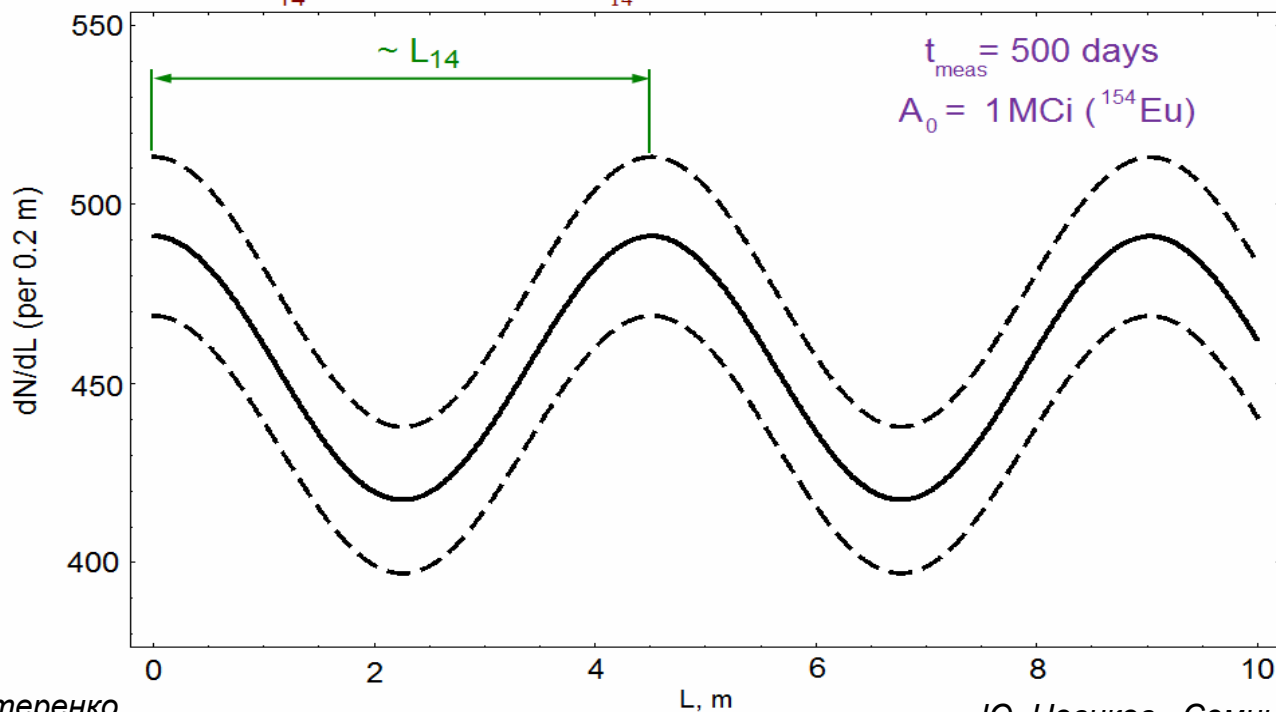


Осцилляции со стерильными антинейтрино

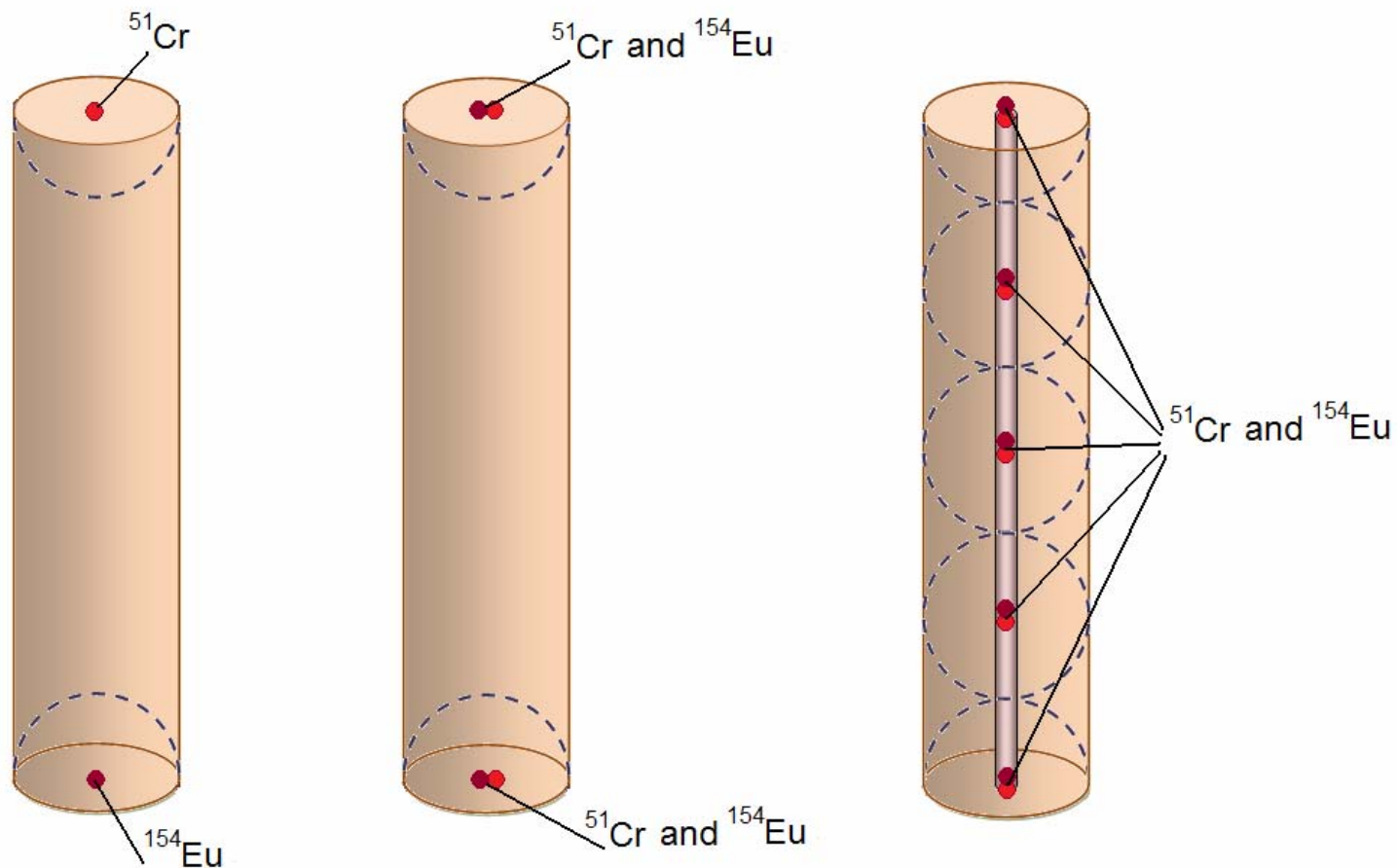
Использование обратного бета-распада для осциллометрии антинейтрино



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



«Разбиение» цилиндра LENA для многофункциональных измерений

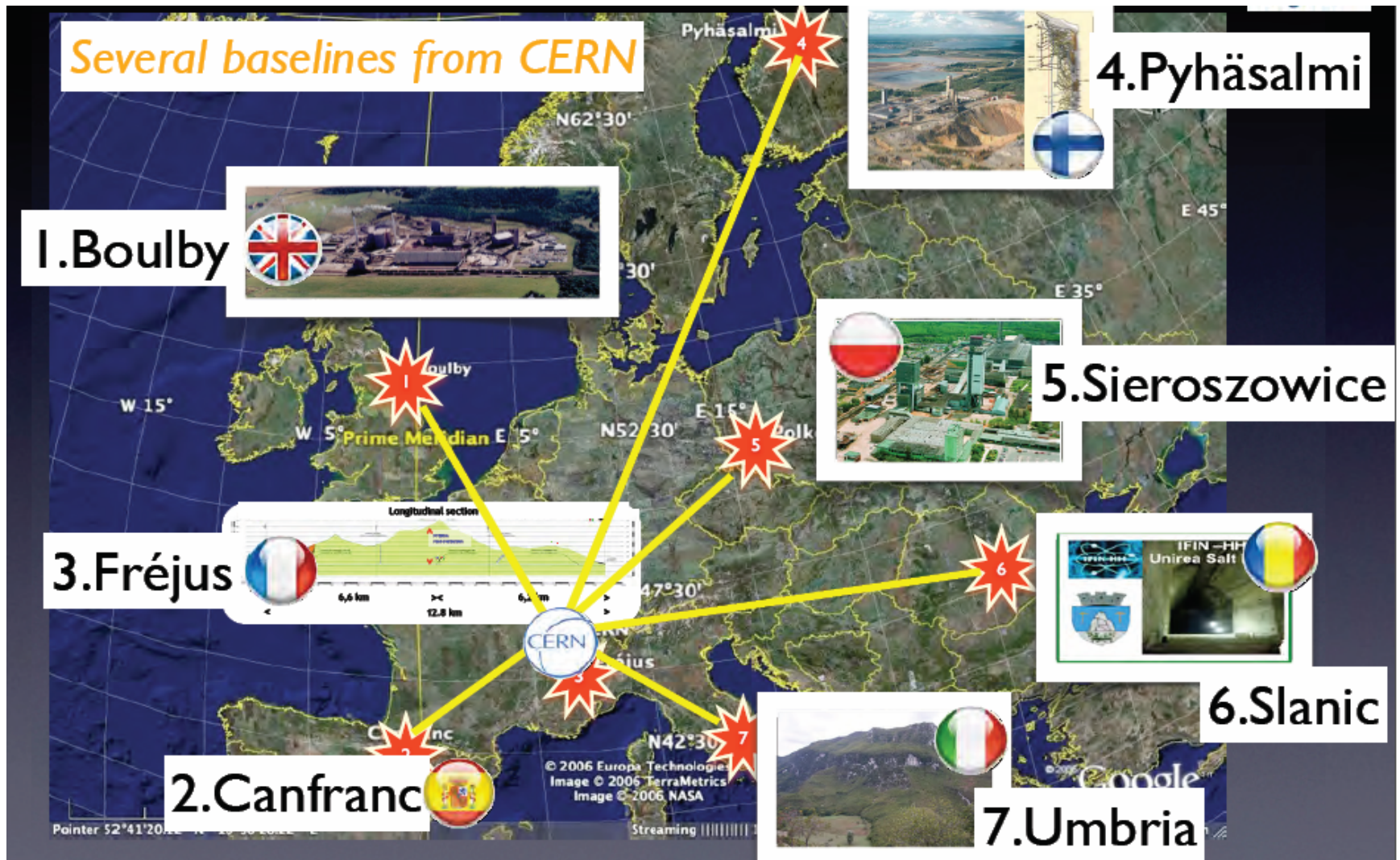


Роль осциллометрии в нейтринных исследованиях

- 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 eV^2 (“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

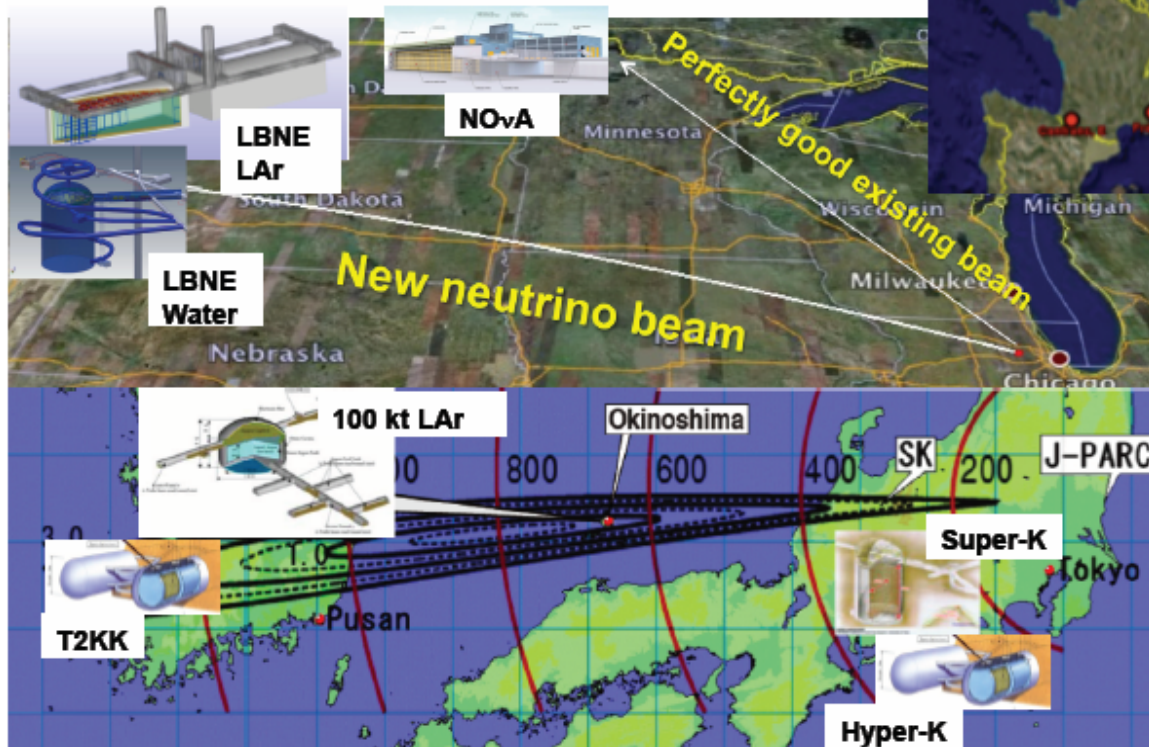


Успехов!
СПАСИБО

Back-up

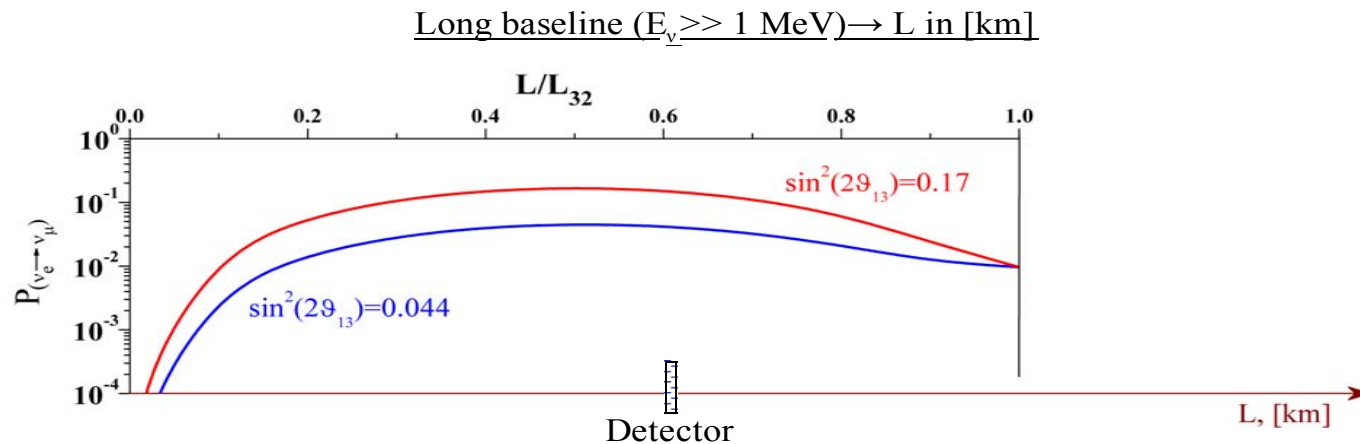
Several programs working towards long baseline oscillation programs

US, Japan, Europe

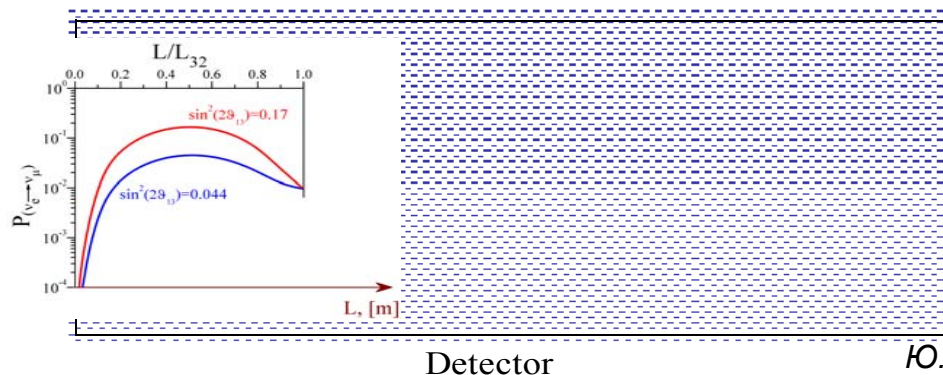


**And more future ideas:
β beams,
ν factories,
cyclotrons,...**

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

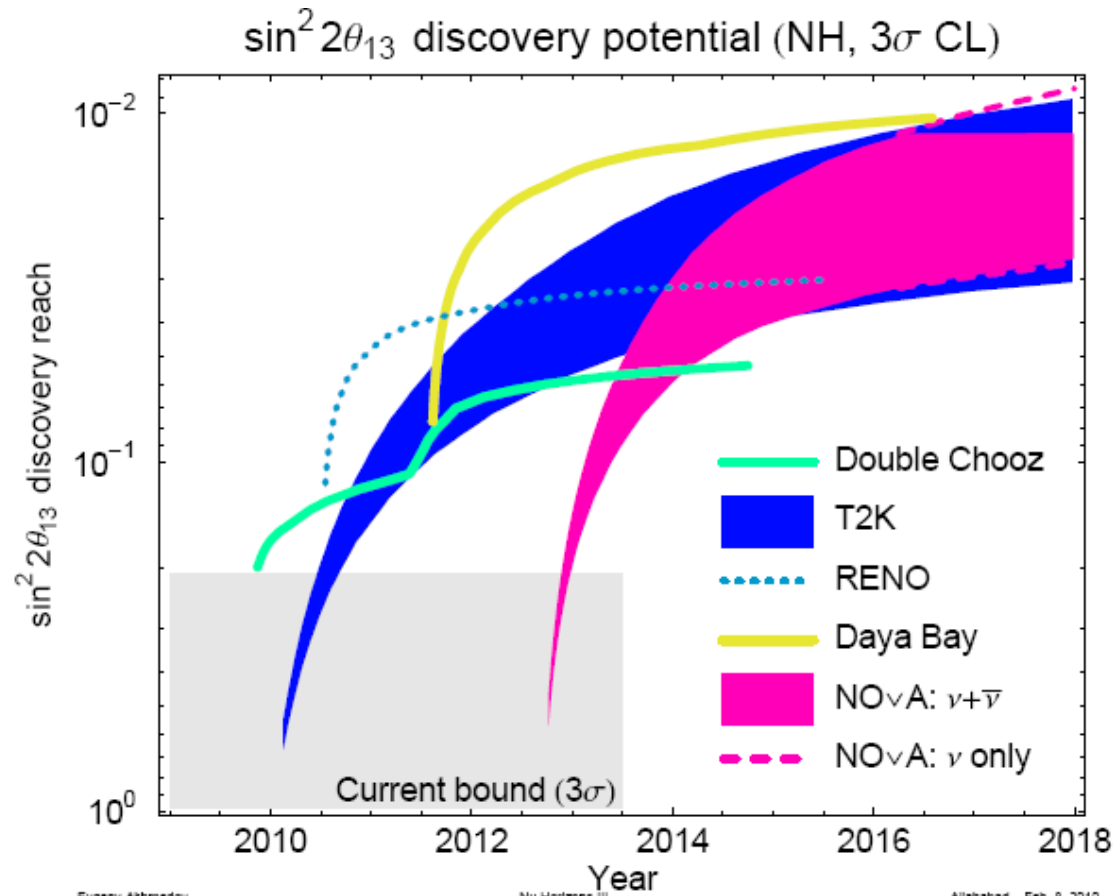
Далее метод подробно рассматривался в работах:

- 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)