

Нейтринные установки будущего поколения

Ю.Н. Новиков

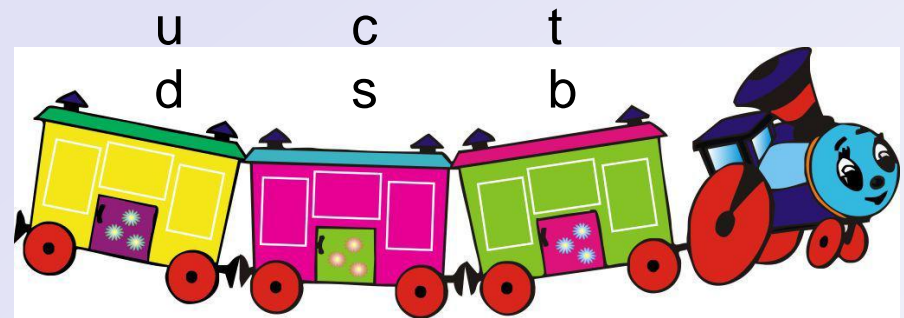
ПИЯФ

*Объединённый семинар ОФВЭ-ОТФ ПИЯФ
12 января 2012 г.*

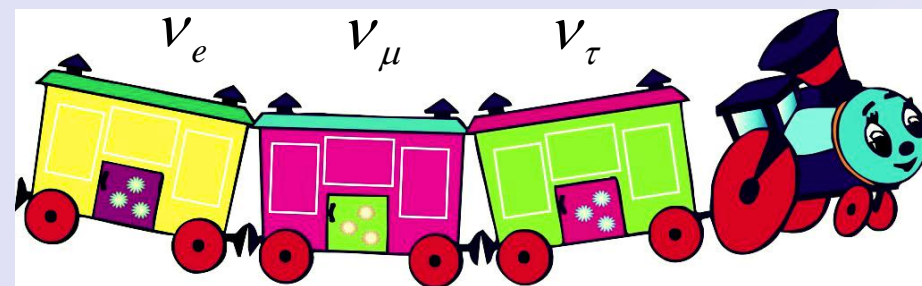
С НОВЫМ ГОДОМ!



Бозон Хиггса

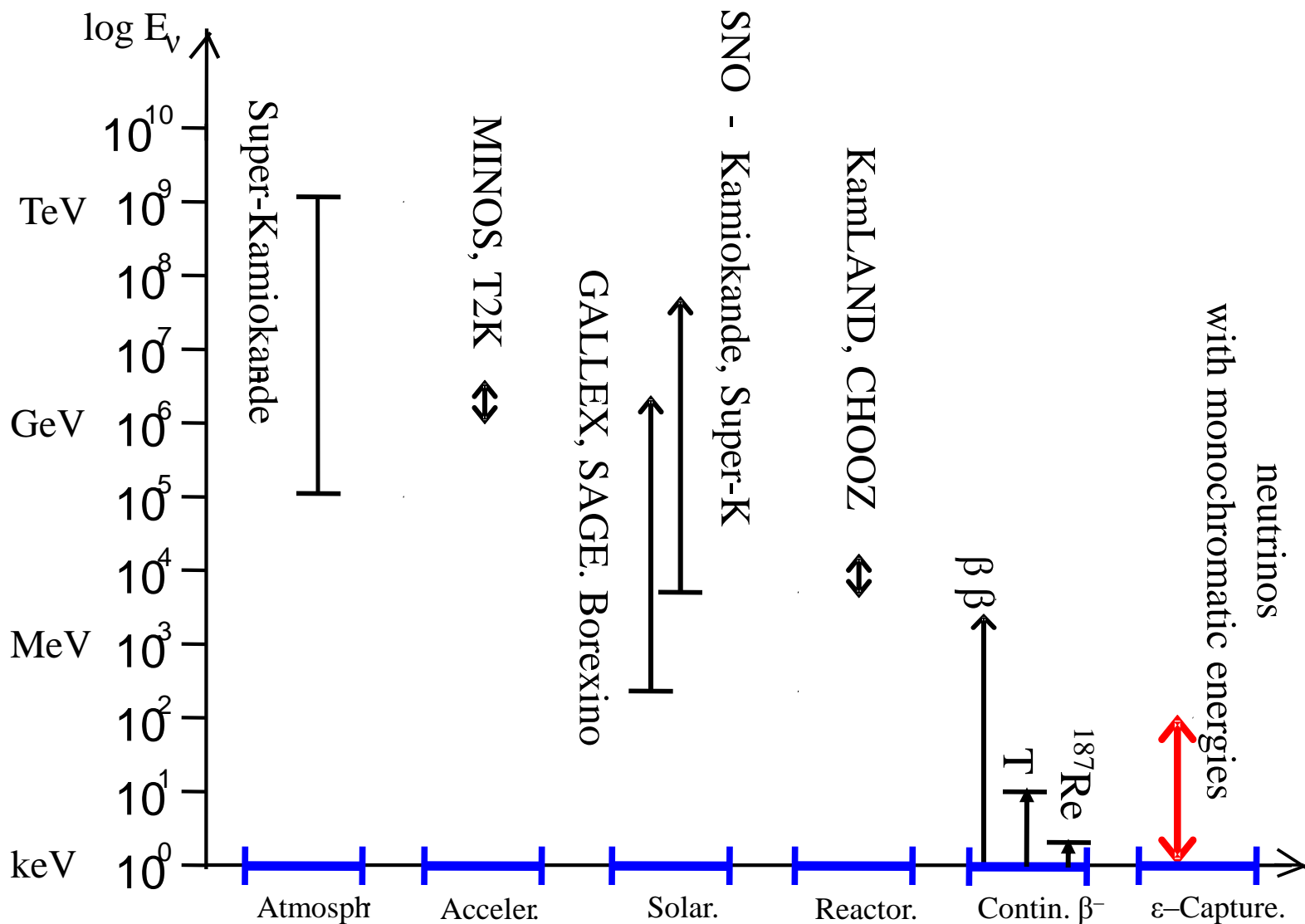


Нейтрино



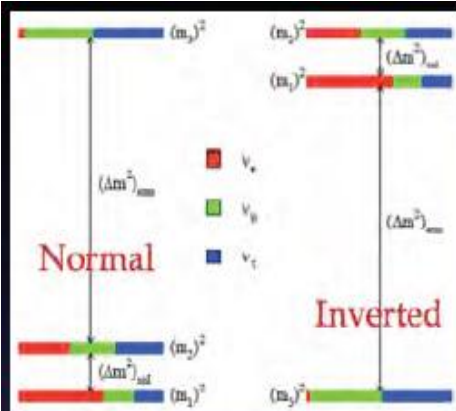
t

Диапазон энергий нейтрино, охваченных различными детекторами



«Глобальная» информация о свойствах нейтрино

$|\nu_a\rangle = \sum U_{ai}^* |\nu_i\rangle$ {a-> e,μ,τ-ароматы нейтрино; i-> 1,2,3-собственные функции, которым соответствуют собственные значения масс m_1, m_2, m_3 }



Δm_{31}^2 Neutrino masses squared differences Δm_{21}^2

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & e^{-i\delta} s_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -e^{i\delta} s_{13} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Schwetz, Tortola, Valle, New J.Phys. 10:113011,2008

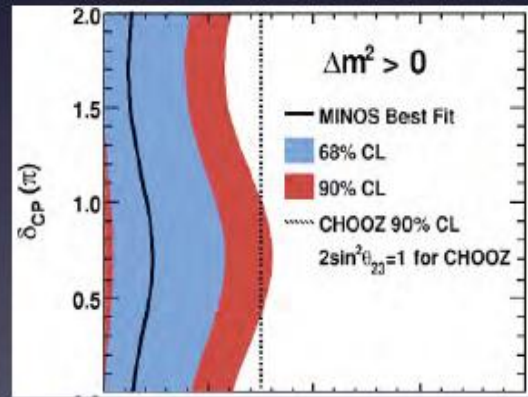
$$\Delta m_{21}^2 = (7.65_{-0.20}^{+0.23}) 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$\sin^2 \theta_{12} = 0.304_{-0.016}^{+0.022}$$

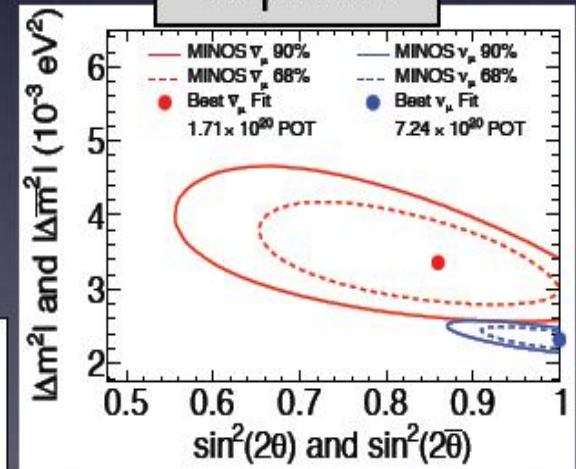
$$|\Delta m_{31}^2| = (2.40_{-0.11}^{+0.12}) 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\sin^2 \theta_{23} = 0.50_{-0.06}^{+0.07}$$

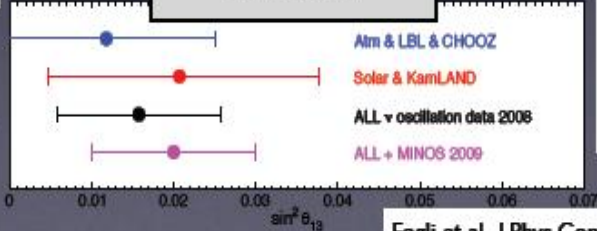
$$\sin^2 \theta_{13} < 0.056 @ 3\sigma$$



Surprises !



Hints !



$\sin^2(2\theta_{13}) < 0.12$ normal hierarchy
 $\sin^2(2\theta_{13}) < 0.20$ inverted hierarchy

Dedicated experiments to explore $\sin^2 2\theta_{13} > 0.01$ in the coming years !

Fogli et al., J.Phys.Conf.Ser.203:012103,2010

Вероятность осцилляций

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

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

“Расхождение” различных электронных длин осцилляций L_{ei}

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

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

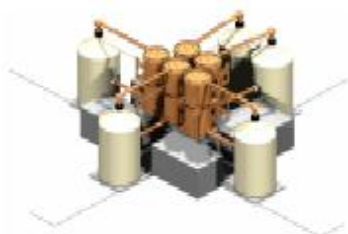
$$\Delta m_{14}^2 = 1 (\text{eV})^2 \quad \rightarrow \quad L_{14}/E_\nu = 2.5$$

Открытые вопросы нейтринной физики

- Каковы абсолютные значения масс нейтрино m_i ?
- Какова абсолютная масса электронного нейтрино?
- Сколько поколений нейтрино ?
- Существуют ли «стерильные» нейтрино?
- Существуют ли тяжёлые правовинтовые нейтрино (see-saw)?
- Каково происхождение массы нейтрино?
- Нарушается ли CP-чётность в слабом взаимодействии?
- Наблюдаются ли безнейтринные двойные бета-превращения ($\beta\beta$ или $\epsilon\epsilon$), т.е. является ли нейтрино Майорановской частицей, нарушающей закон сохранения лептонного заряда ?
- Каков магнитный момент нейтрино?
- Каковы точные значения параметров матрицы смешивания U ?
- Каков вклад нейтрино в тёмную материю?
- Какова роль нейтрино в различных астрофизических процессах?
....и множество других “производных” вопросов

**Какие эксперименты призваны
ответить на эти вопросы ?**

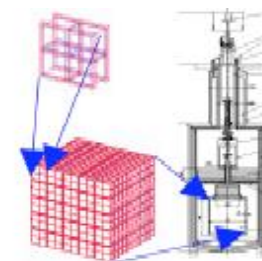
Проекты поиска безнейтринного двойного бета-распада с чувствительностью $\approx 10^{26}$ лет



Majorana

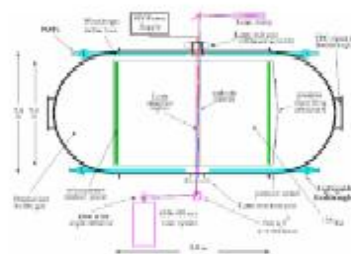
EXO

CUORE	TeO₂ Crystal bolometers
EXO	Liquid Xe TPC, daughter tag
GERDA	Bare Ge detectors in $\overline{\text{LN}}$ LAr
Majorana	Ge det. in traditional cryostat
MOON	Scint. sandwiching Mo foils
SuperNEMO	Foils, tracking and scint.

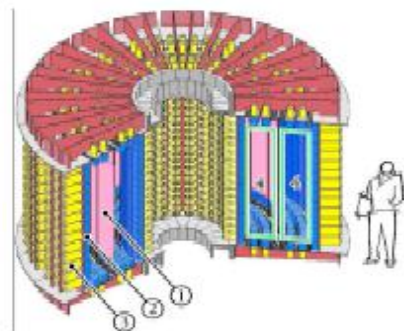


CUORE

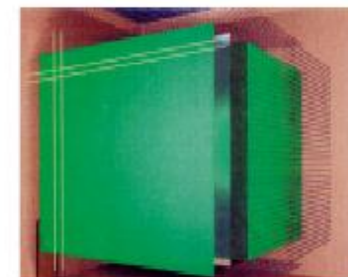
MOON



NEMO



GERDA

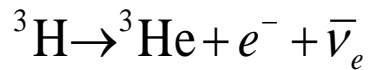


Courtesy of P. Vogel

Определение массы антинейтрино (с точностью до 0.2 эВ)

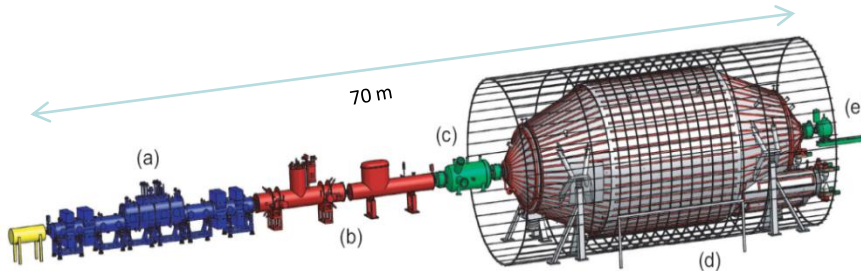
KATRIN

Electron mass spectrometer



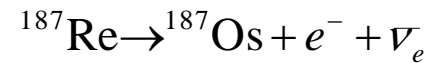
$$Q_{\beta} = 18.6 \text{ keV}$$

$$\tau_{1/2} = 12.3 \text{ y}$$



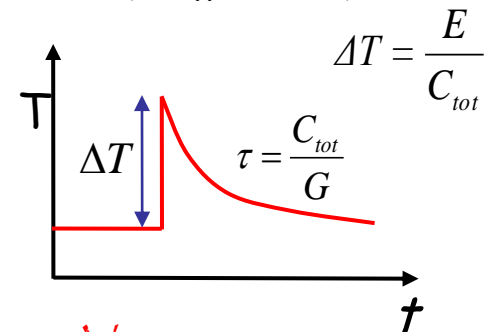
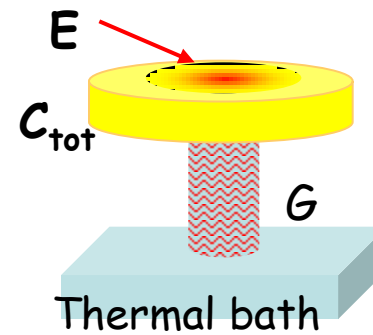
MARE

Low temperature Microcalorimeters



$$Q_{\beta} = 2.5 \text{ keV}$$

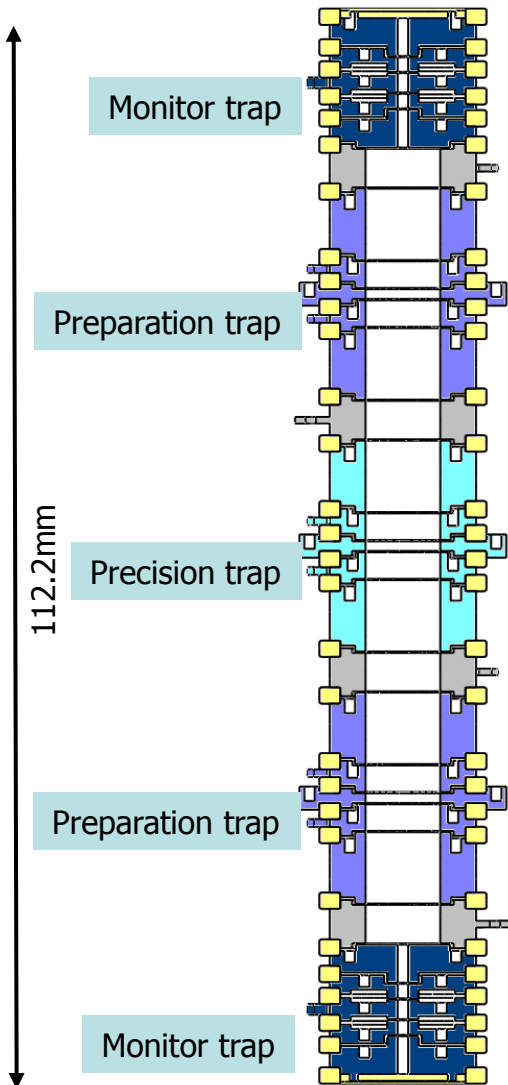
$$\tau_{1/2} = 4 \cdot 10^{10} \text{ y}$$



Very sensitive
temperature sensor

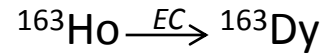
Определение массы нейтрино

PENTATRAP



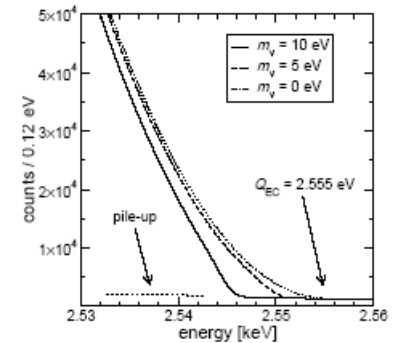
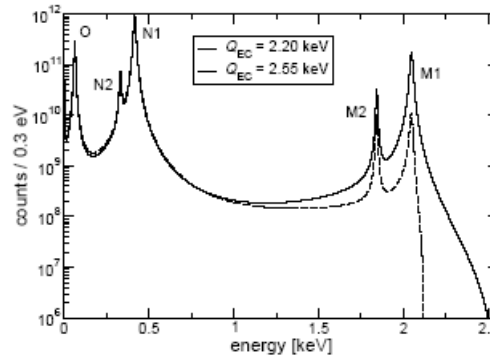
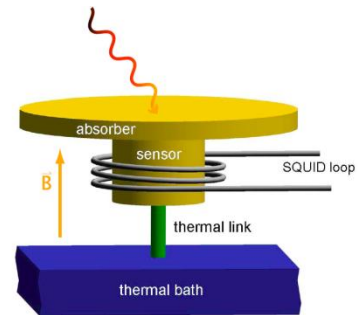
+

Микрокалориметры



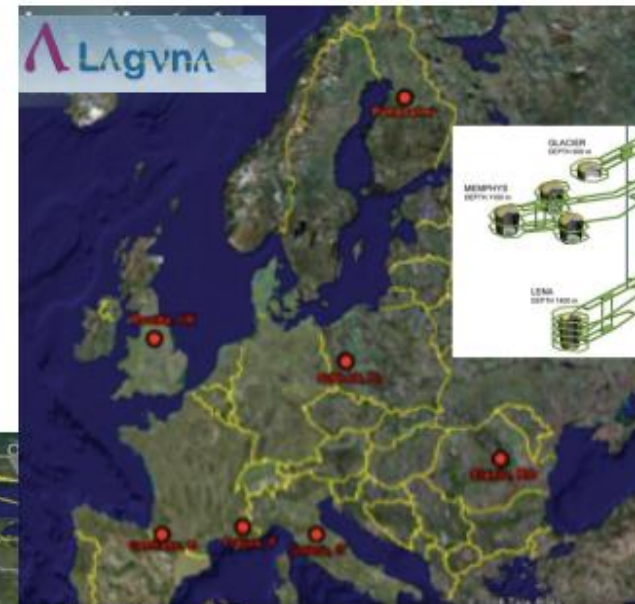
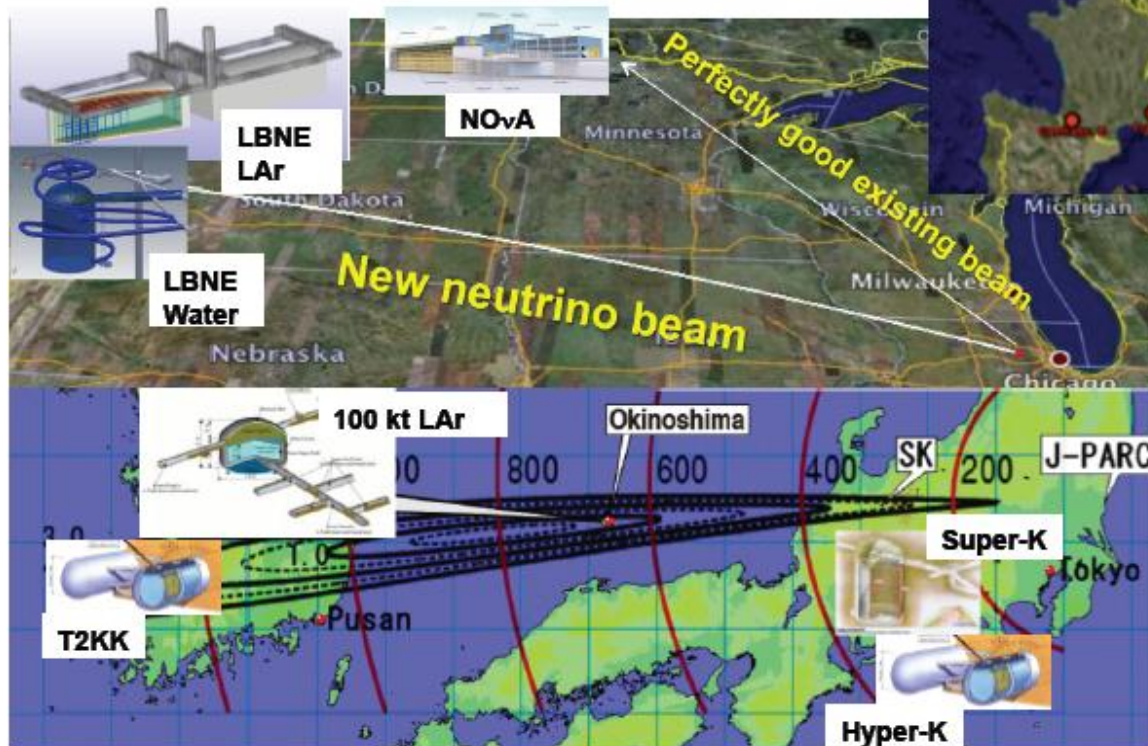
$$Q_{EC} = 2.5 \text{ keV}$$

$$\tau_{1/2} = 4.6 \cdot 10^3 \text{ y}$$



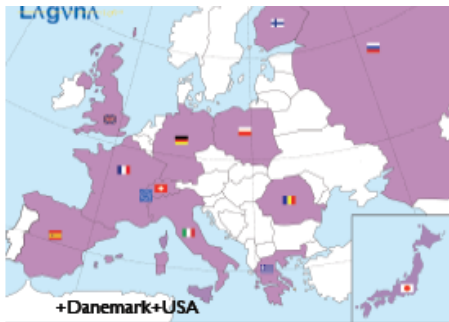
Several programs working towards long baseline oscillation programs

US, Japan, Europe



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

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*

Russia

INR
PNPI

CERN

Poland

IFJ PAN
IPJ
University Silesia
Wroclaw UT
KGHM CUPRUM*

Japan

KEK

Greece

Demokritos

USA

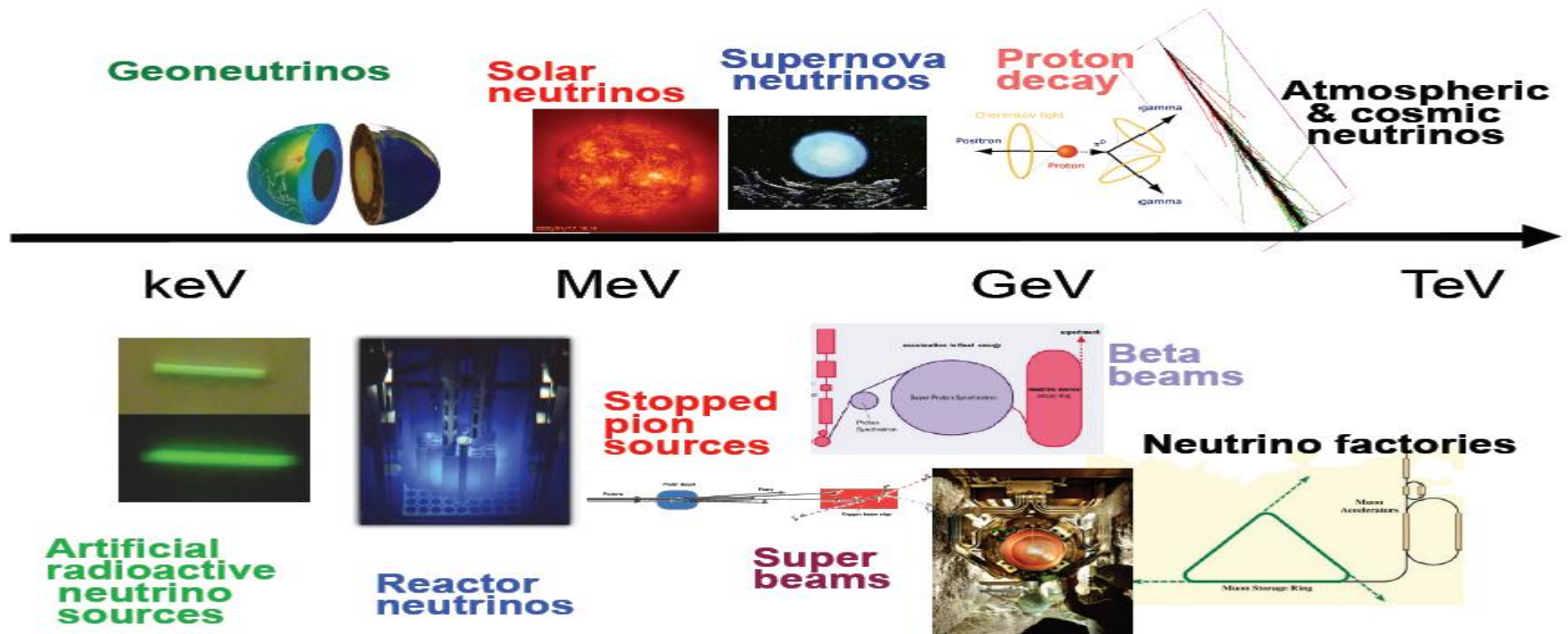
Virginia Tech

(*=industrial partners)

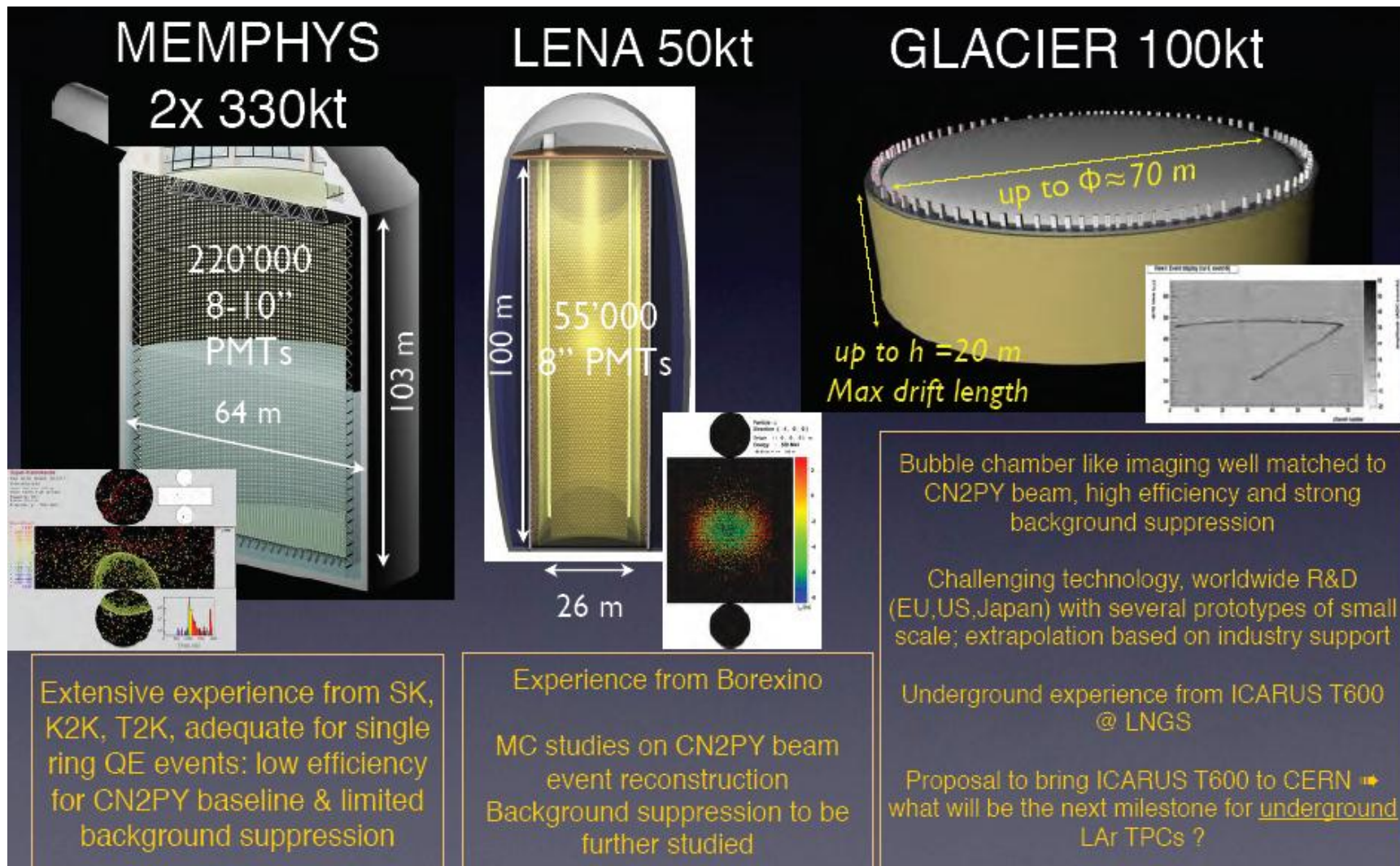
LAGUNA

Large Apparatus for Grand Unification and
Neutrino Astrophysics

Предмет исследований и технические возможности



Опции детекторов LAGUNA



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

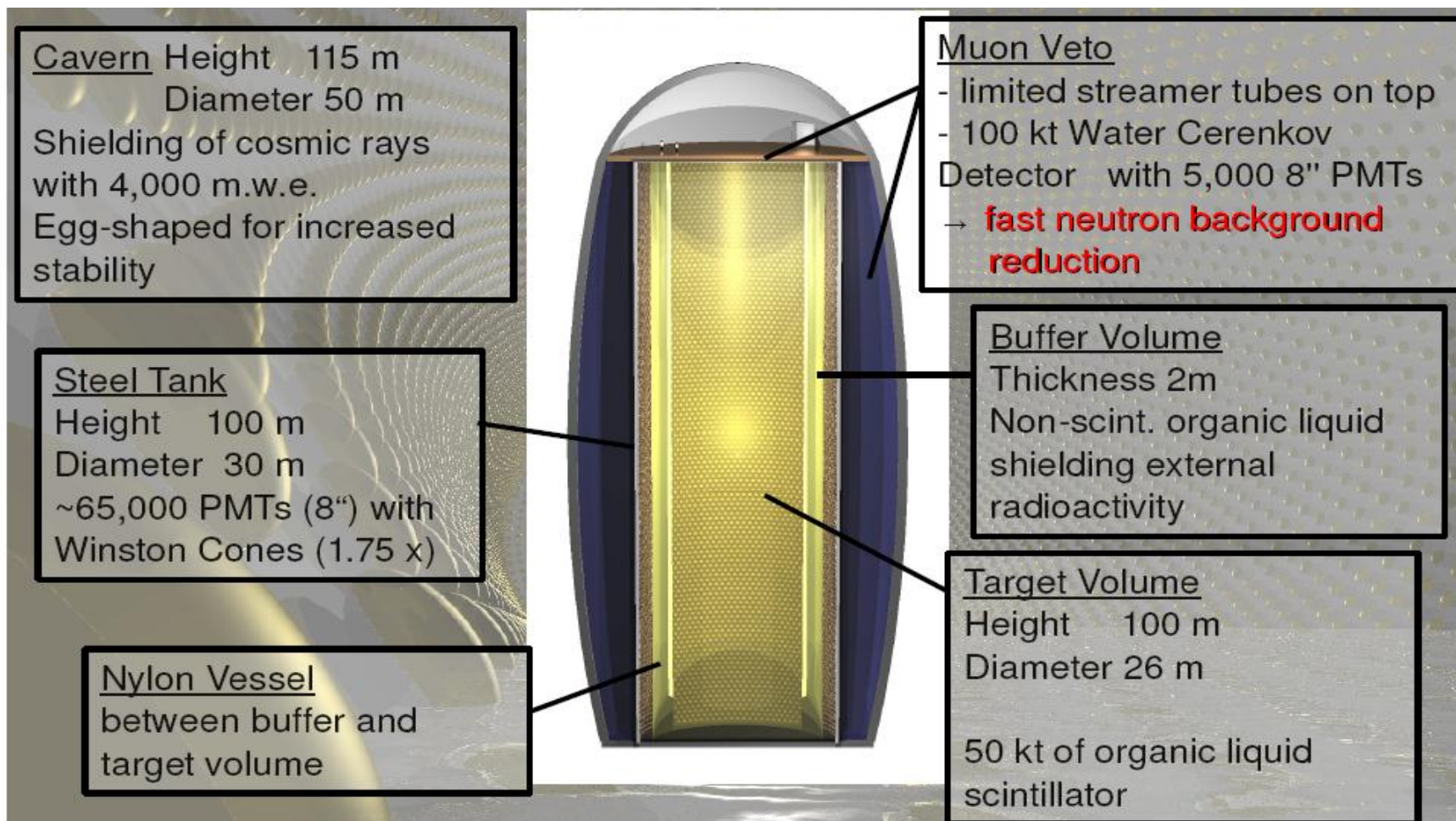
Proposal to bring ICARUS T600 to CERN → what will be the next milestone for underground LAr TPCs ?

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

Детектор с жидким сцинтиллятором LENA

Скелетная схема LENA (Low Energy Neutrino Astronomy)



Эх, 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 Grigoriy 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

Термин осциллометрии был введён в работе

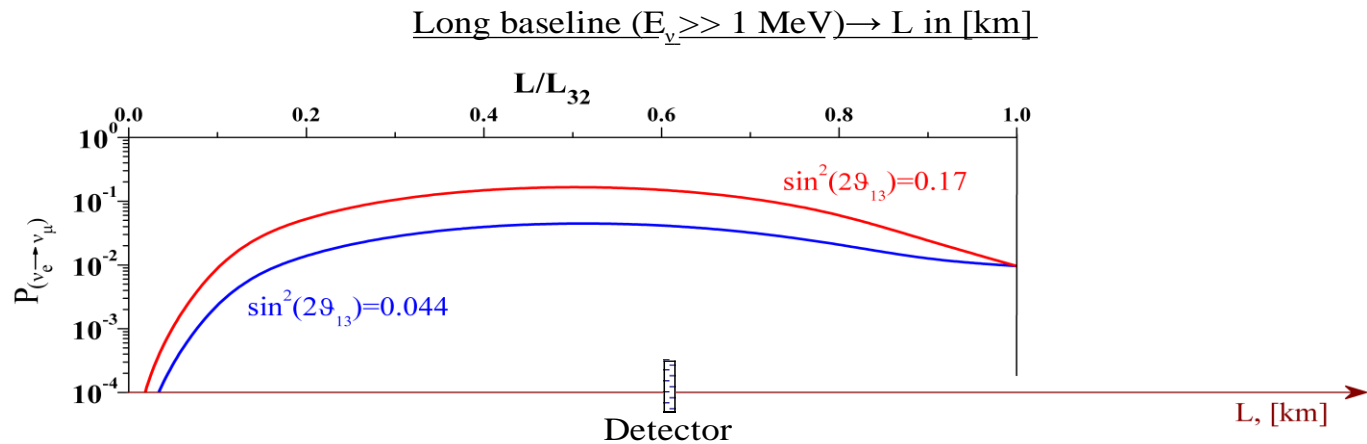
J.D. Vergados, and Yu.N. Novikov. “*Exploring new features of neutrino oscillations with very low energy monoenergetic neutrinos*”.

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

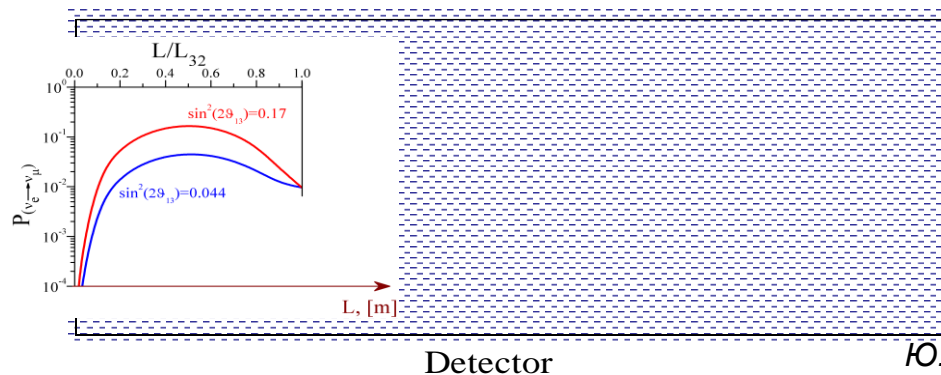
Далее метод подробно рассматривался в работах:

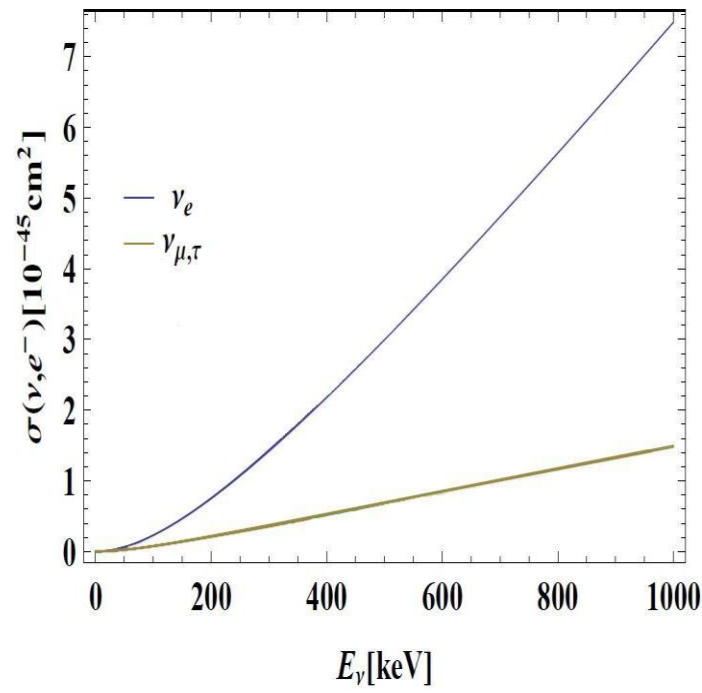
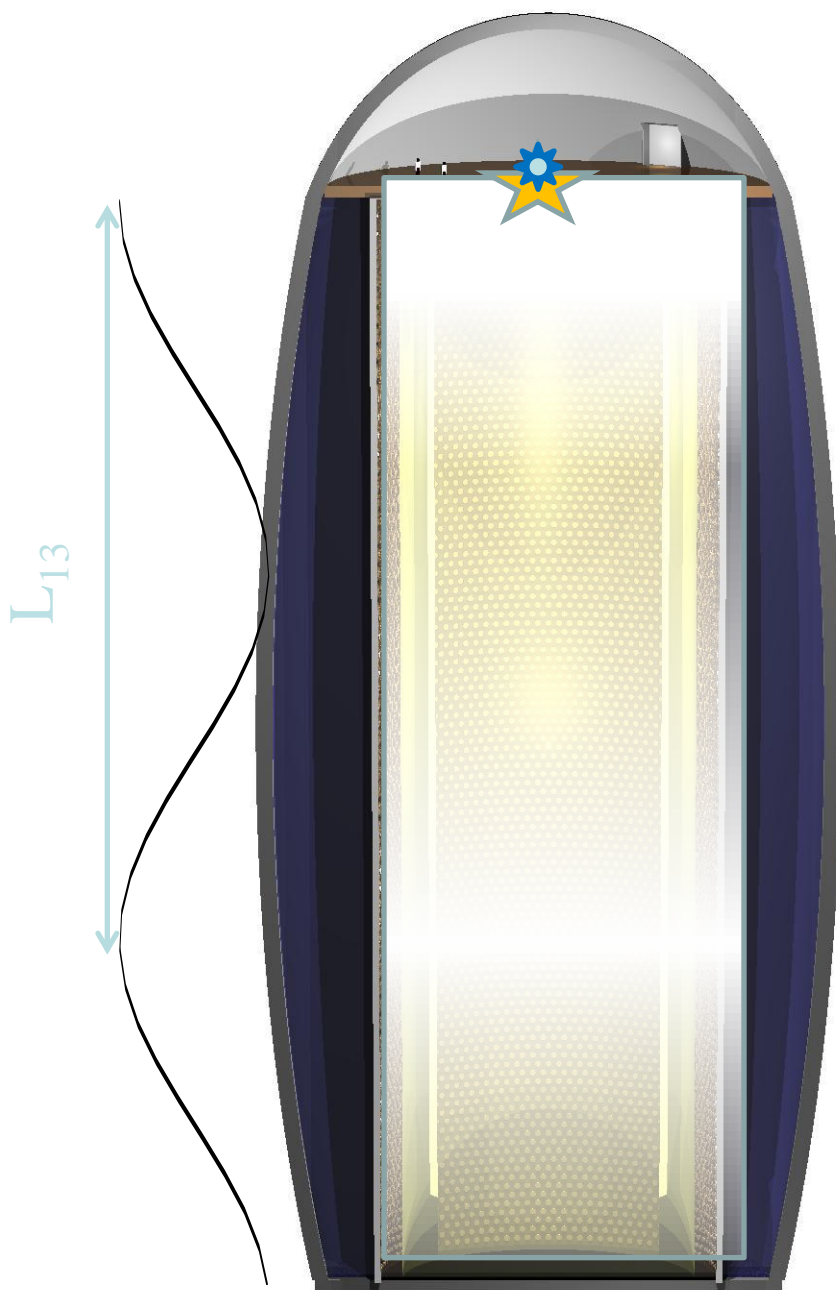
- Yu.N. Novikov, T. Enqvist, A.N. Erykalov, F. v.Feilitzsch, J. Hissa, K. Loo, D.A. Nesterenko, L. Oberauer, F. Thorne, W. Trzaska, J.D. Vergados, M. Wurm. “*Neutrino oscillometry at the next generation neutrino observatory*”.
arXiv:1110.2983, 14 October, 2011
- J.D. Vergados, Y. Giomataris, and Yu.N. 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.

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 in [m] - **oscillometry**





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).

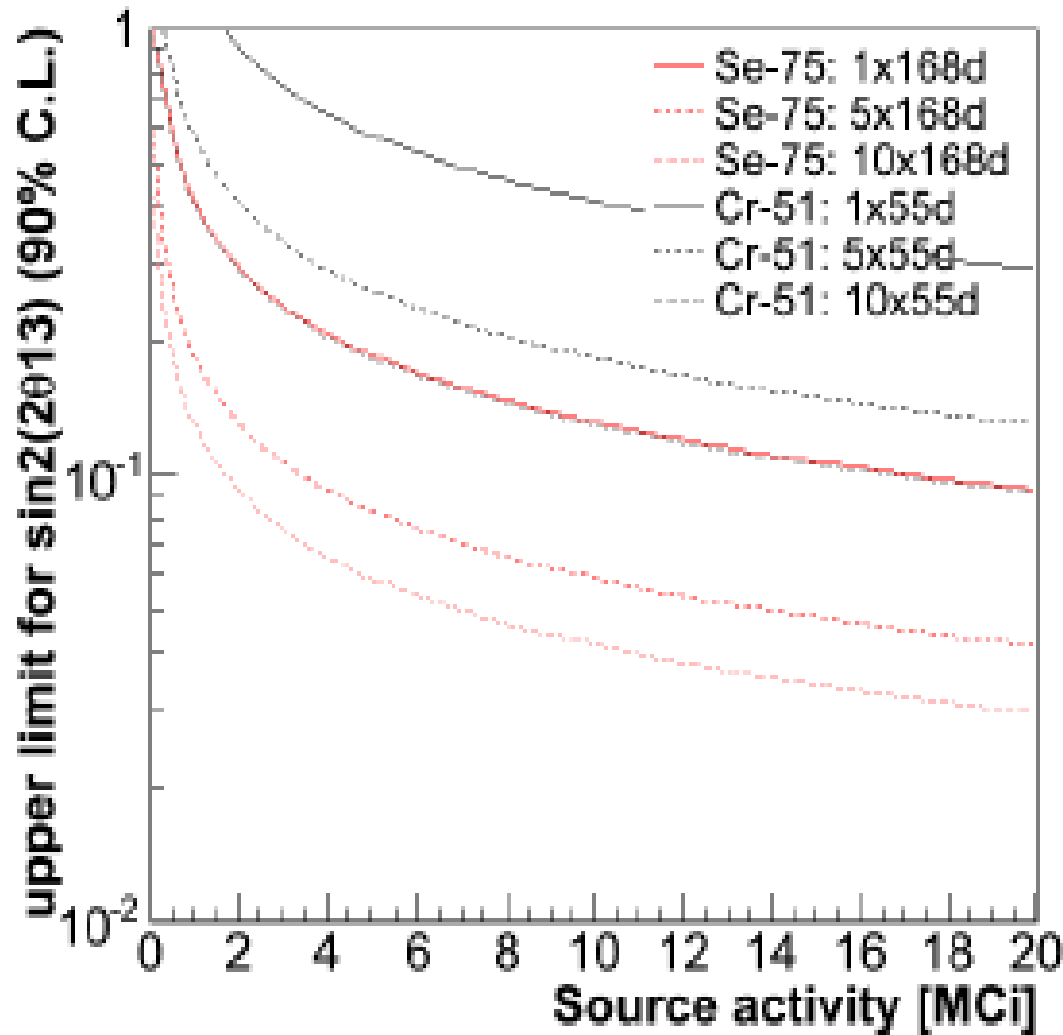
Кандидаты на нейтринную осциллометрию

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

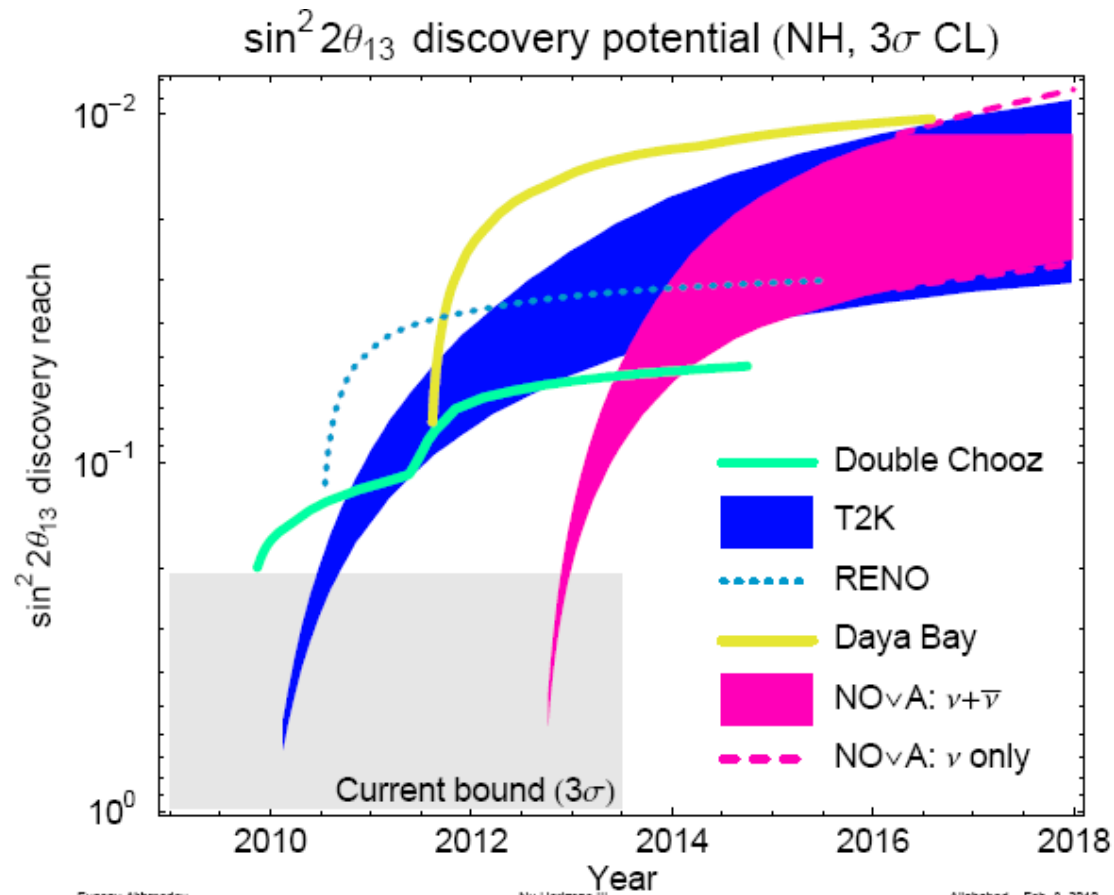
Чувствительность к $\sin^2(2\theta_{13})$.

Текущее значение из «глобального» анализа: $\sin^2(2\theta_{13}) < 0.15$



[Yu. Novikov et al.
arXiv:1110.2983]

Потенциал различных установок в определении θ_{13}



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

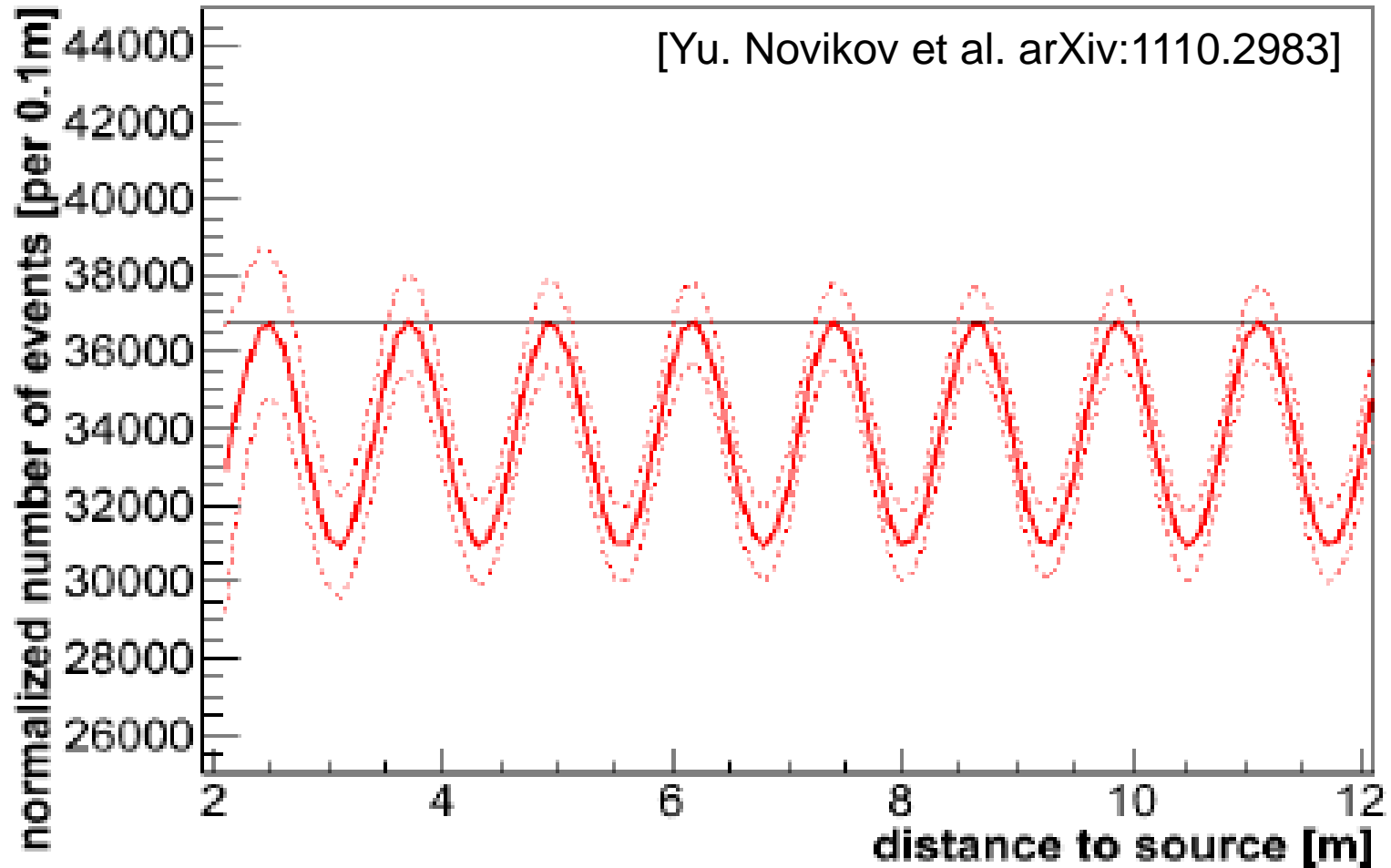
Осциллометрия со стерильными нейтрино

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 (?)	?	?	?

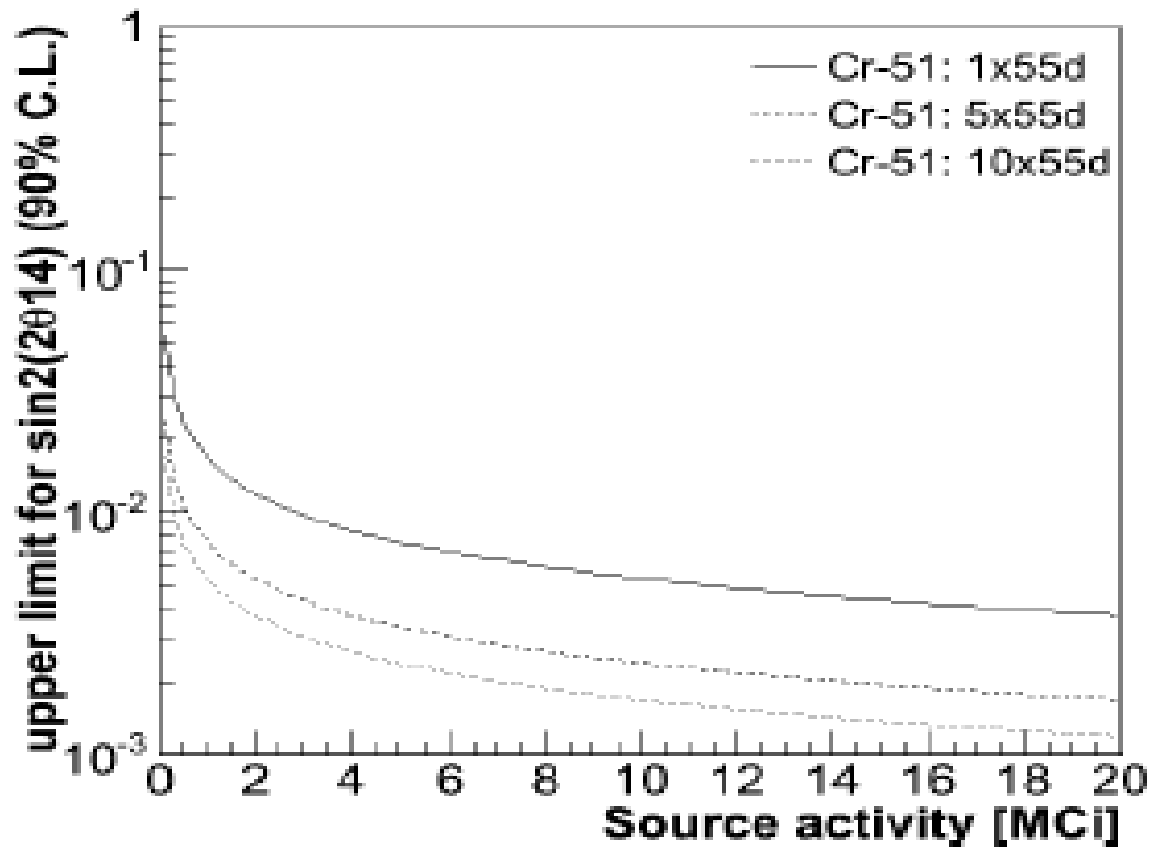
Оциллометрия со стерильными нейтрино

(Источник в 5МСi 51Cr в течение 55-дней)



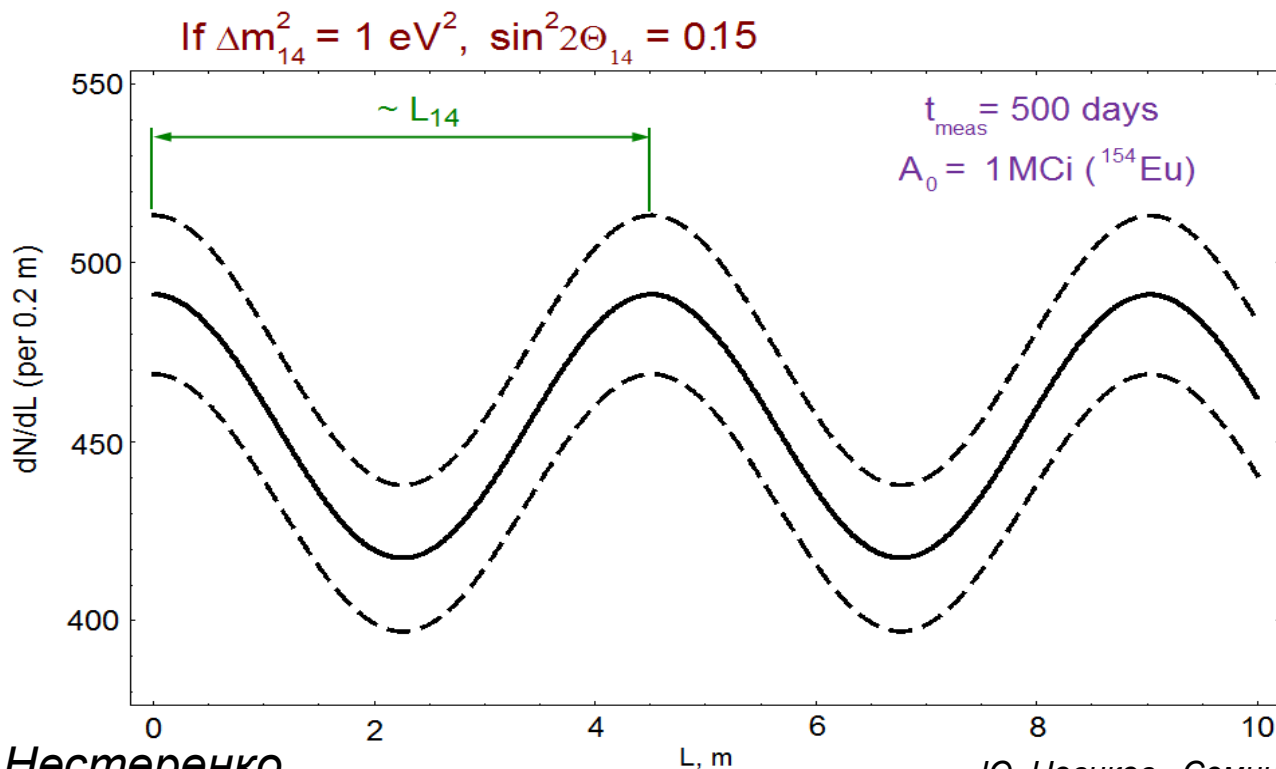
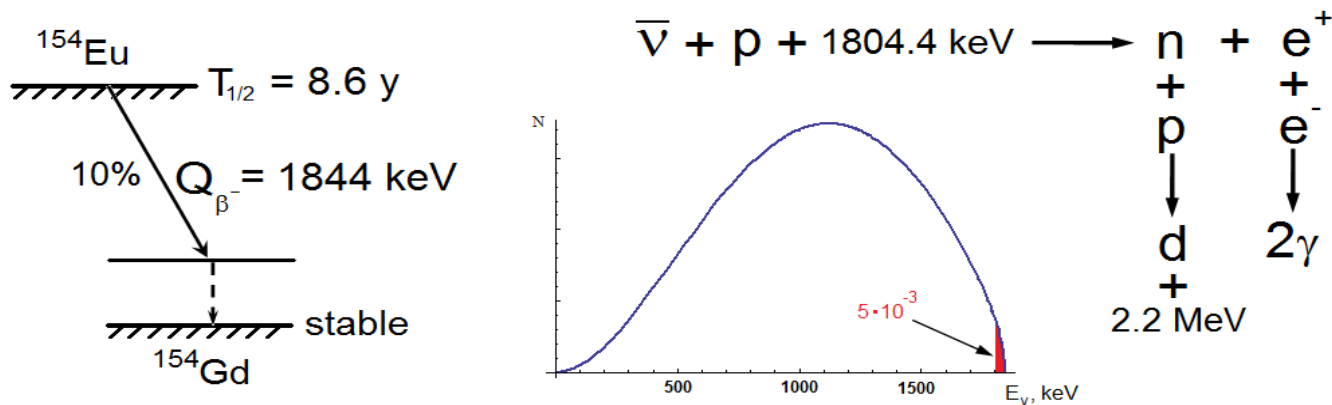
Чувствительность к θ_{14}

[Yu. Novikov et al. arXiv:1110.2983]

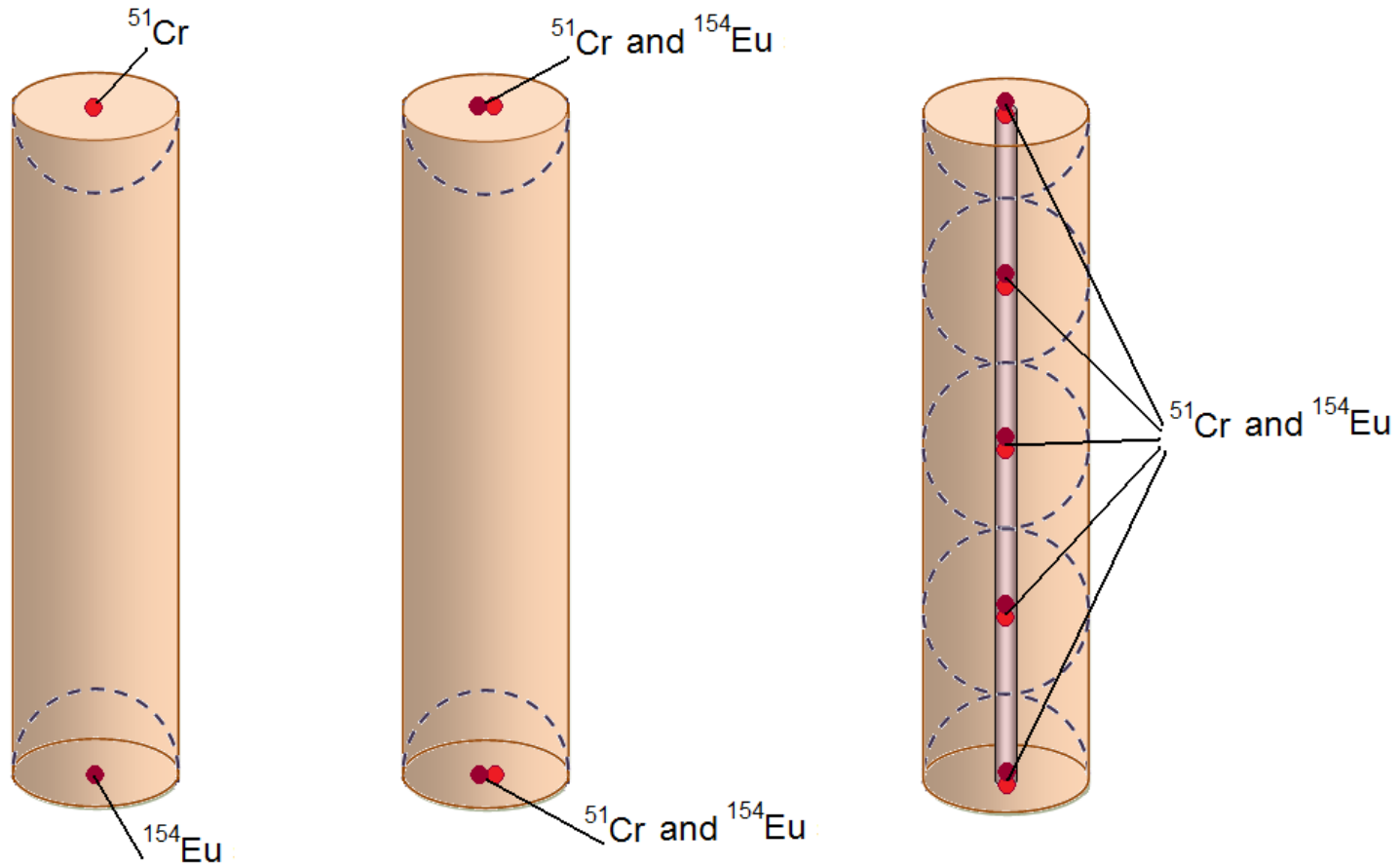


Осцилляции со стерильными антинейтрино

Использование обратного бета-распада для осциллометрии антинейтрино



«Разбиение» цилиндра LENA для многофункциональных измерений



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

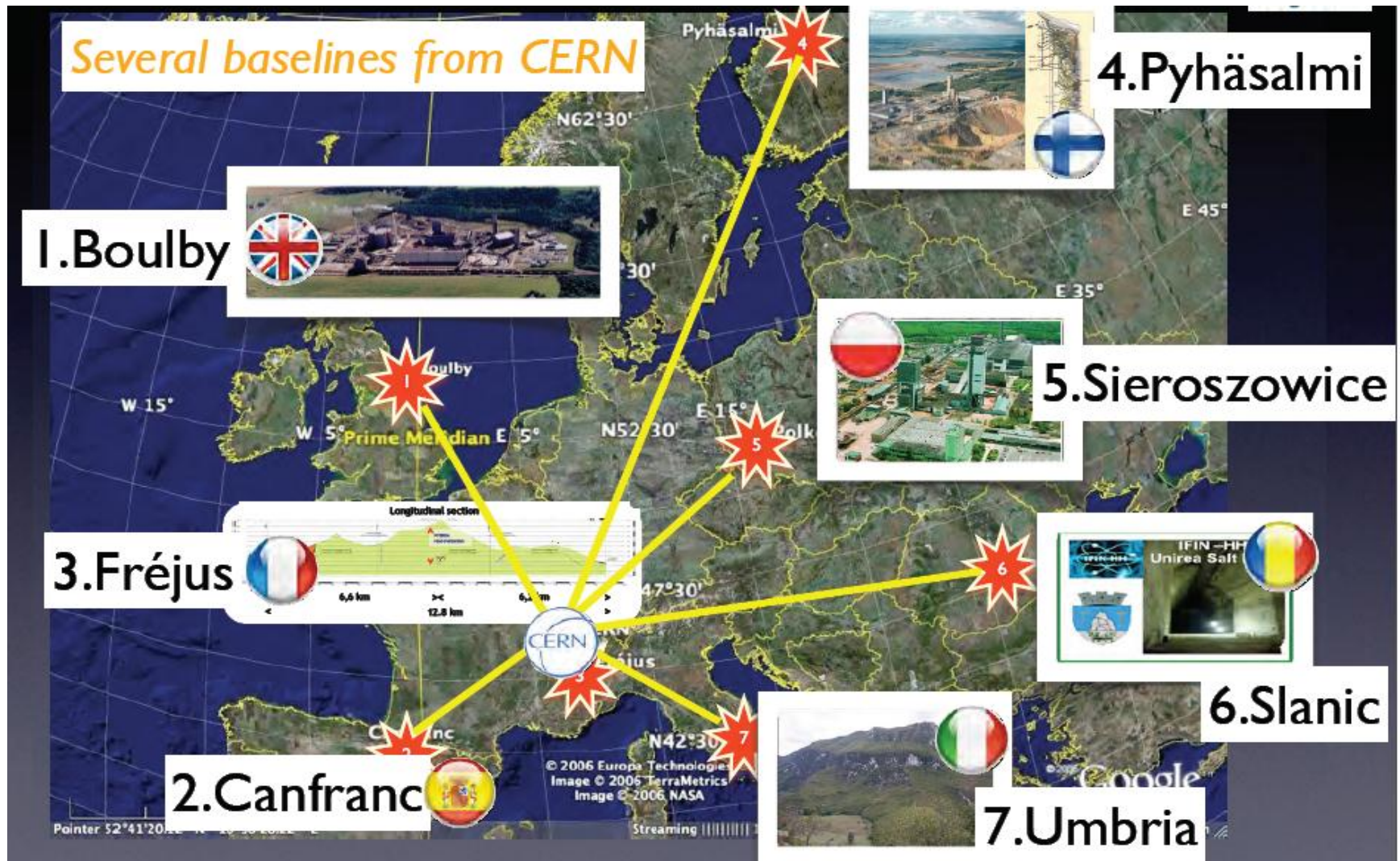
- Тщательный контроль свойств источников и геометрии облучения.
- Возможность прямого измерения фона при отсутствии источника (в промежутках между рабочими экспозициями)

Роль осциллометрии в нейтринных исследованиях

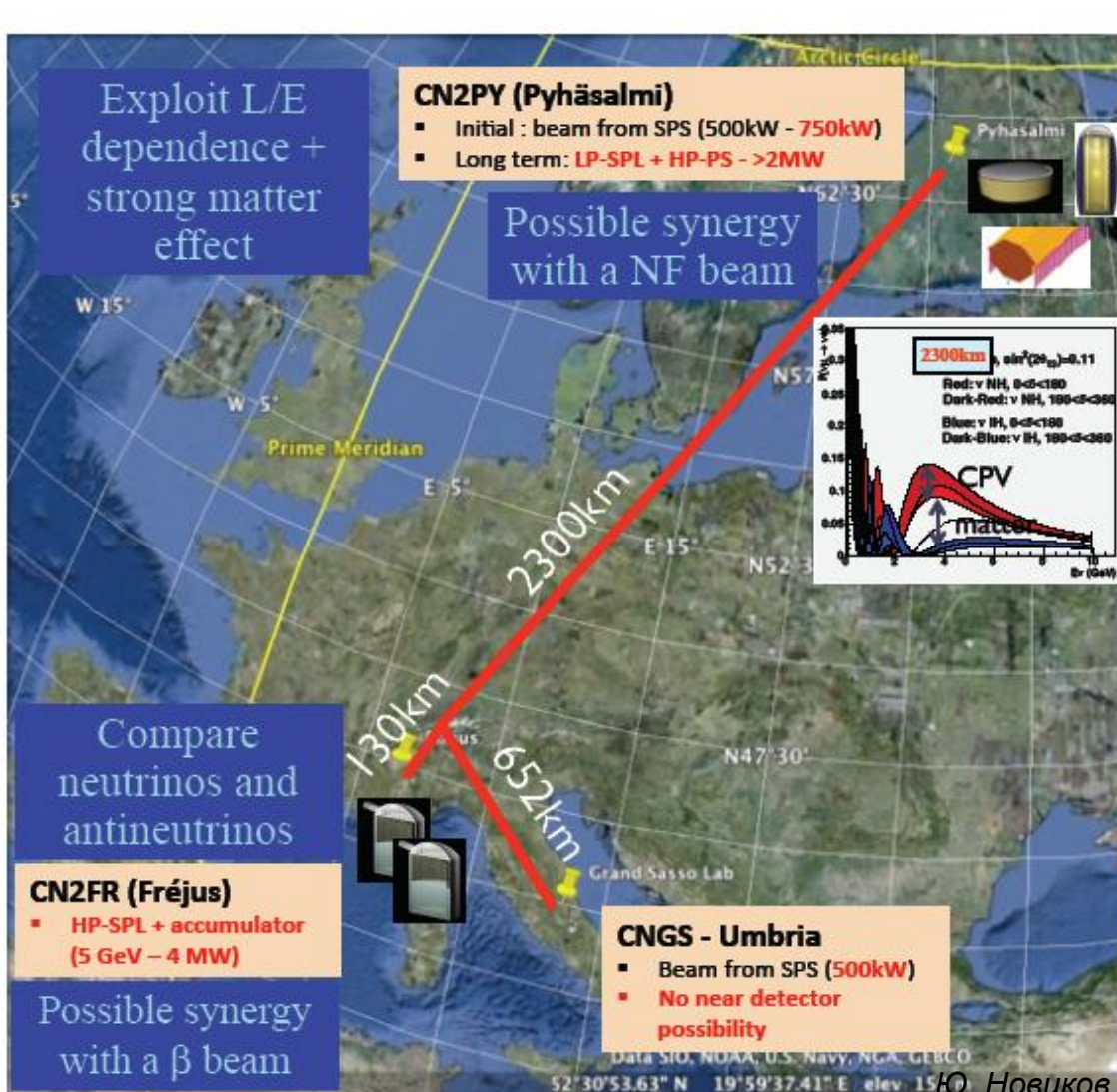
- Прямое наблюдение явления осцилляций нейтрино.
- Определение угла смешивания θ_{13} и длины осцилляций L_{13} в вакууме в одном эксперименте (LENA).
- Проверка справедливости соотношения $L_{13}[\text{m}] = Q_\nu[\text{keV}]$ и корректности “глобального анализа”.
- Поиск стерильных нейтрино в самом 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 CP.

Опции мест расположения детекторов

Семь изученных площадок в Европе для расположения детекторов LAGUNA



После жарких дискуссий остались: Три пучка → три шахты → три детектора



Шахта Пихасалми в Финляндии

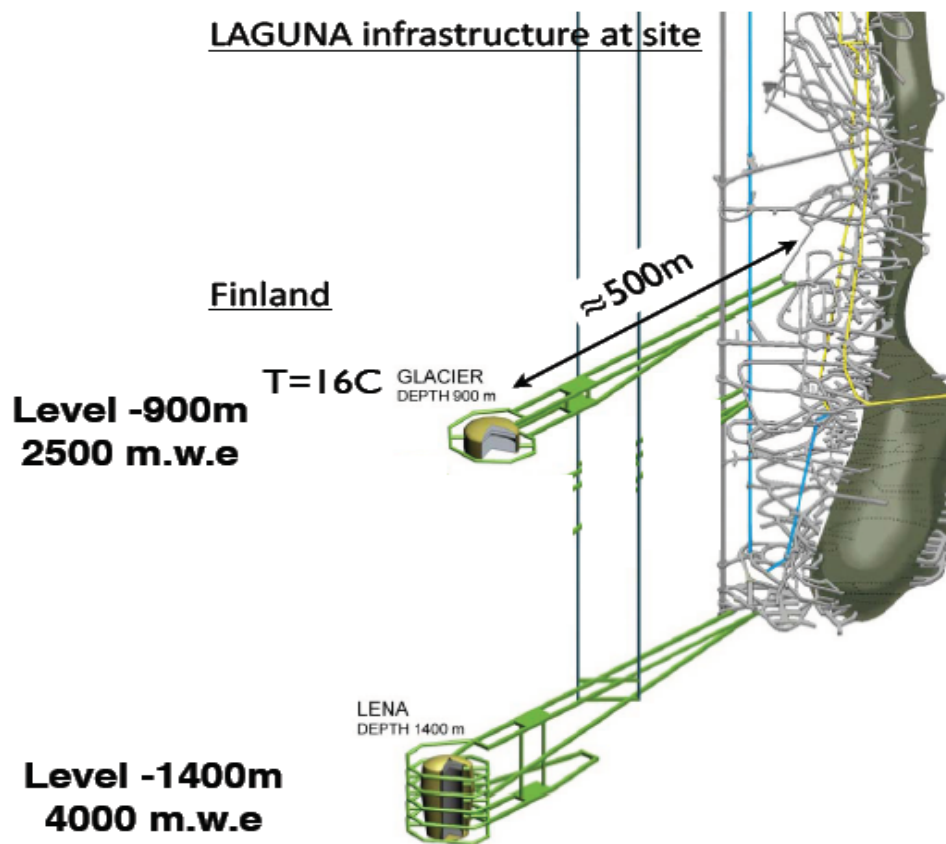


- ▶ CUPP : Centre for Underground Physics in Pyhäsalmi (www.cupp.fi)
- ▶ Location: $63^{\circ} 39' 31''\text{N} - 26^{\circ} 02' 48''\text{E}$
- ▶ Distances (by roads)
 - ▶ Oulu – 165 km
 - ▶ Jyväskylä – 180 km
 - ▶ Helsinki – 450 km
- ▶ Distance to CERN 2300 km
- ▶ Good traffic connections
 - ▶ the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

Преимущества шахты Пихасалми и расположение детекторов LENA и GLACIER

Main advantages for LAGUNA:

- *existing working mine with very high standards*
- *existing decline tunnel access to deepest level*
- *very little environmental water*
- *efficient rock disposal*
- *sufficient ventilation*
- *supply routes for construction*
- *existing pipe lines for liquids*
- *existing underground repair shops*
- *mine closure foreseen around 2018; plan to hand over from mine owner to LAGUNA (more after January 2012)*



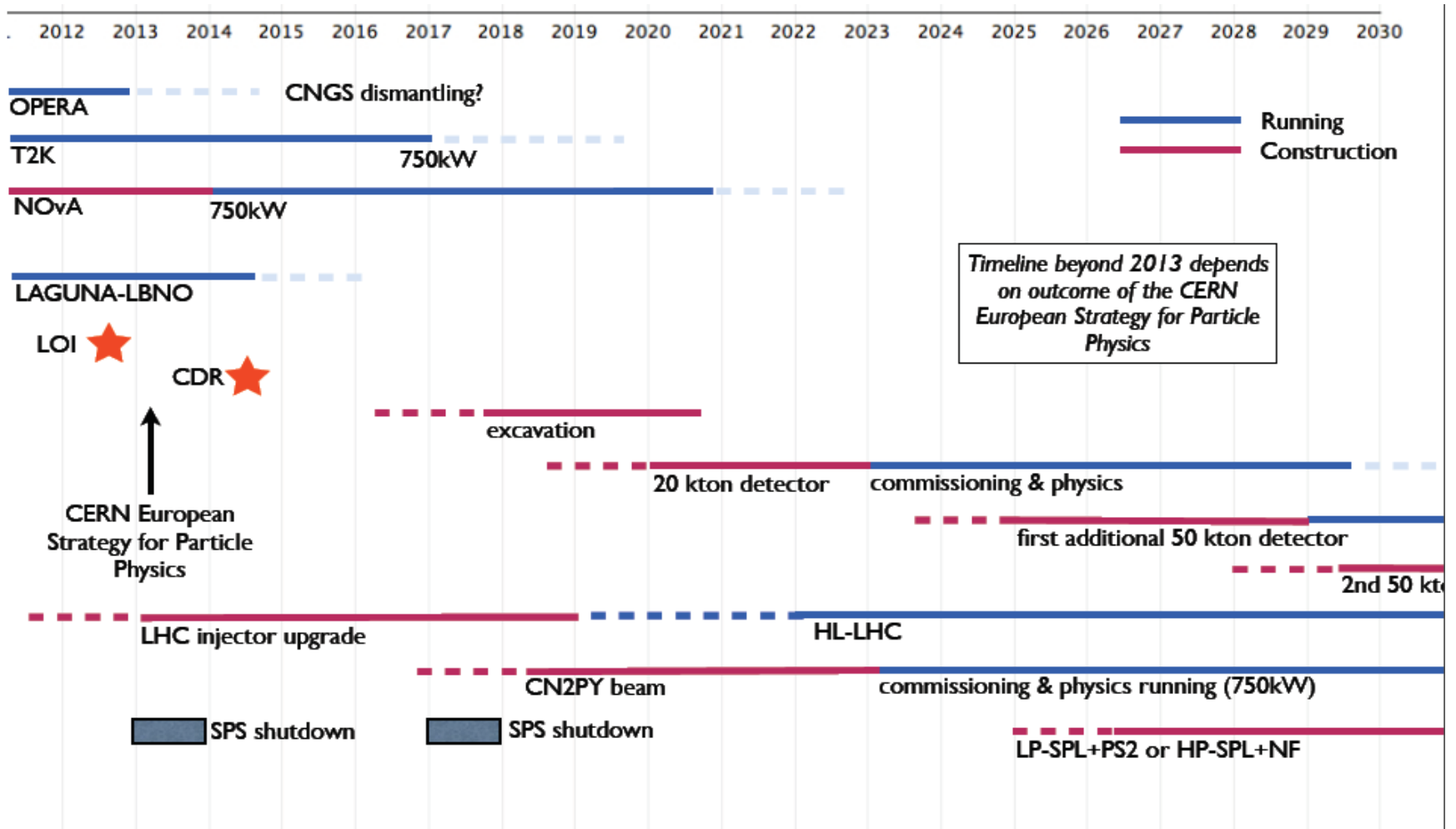
Один из залов шахты в Пюхасалми на глубине 1400 м





Pyhäsaumi is at the bimagic or magic distance from all 3 labs delivering neutrino beams!

График реализации проекта LAGUNA



SEVENTH FRAMEWORK PROGRAMME



Project acronym: LAGUNA-LBNO

Project full title: " Design of a pan-European Infrastructure for Large Apparatus studying Grand Unification, Neutrino Astrophysics and Long Baseline Neutrino Oscillations "

Grant agreement no: 284518

Version date: 2011-07-14

Subtask 5.5.3 Man-made low energy neutrinos and oscillometry. Y. Novikov (PNPI) will lead the study of the physics reach and experimental challenges of these setups. Man-made low energy neutrinos such as reactor neutrinos and neutrinos generated by portable accelerators allow us to study the values of mass squared differences and mixing angles, in particular the precise measurement of the theta solar and determination of theta13. Low energy mono-energetic neutrinos following electron capture by the nucleus can be used for precise measurement of the mixing angle theta13. This subtask will focus on the study of low energy man-made neutrinos (sources, detection and physics impact) in the LAGUNA detector options.

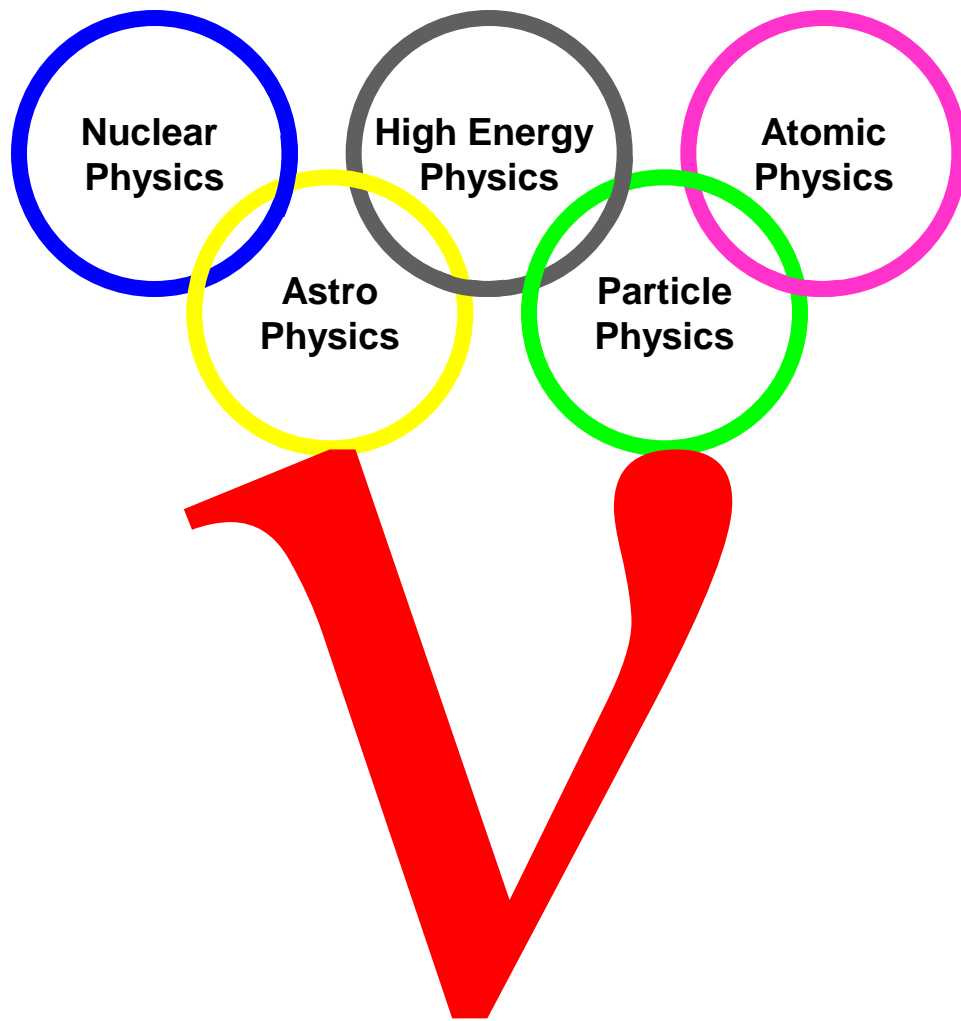
FP7 GRANT AGREEMENT
ANNEX IV - FORM A - ACCESSION OF BENEFICIARIES TO THE GRANT AGREEMENT

B.P. Konstantinov PETERSBURG NUCLEAR PHYSICS INSTITUTE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES, represented for the purpose hereof by Vladimir Samsonov, Director of Petersburg Nuclear Physics Institute (PNPI), or his authorised representative, established in Orlova Roshcha 1, Gatchina, 188300, Russian Federation acting as its legal authorised representative, hereby consents to become a beneficiary ("beneficiary no. 39") to grant agreement N° 284518 (relating to project "Design of a pan-European Infrastructure for Large Apparatus studying Grand Unification, Neutrino Astrophysics and Long Baseline Neutrino Oscillations") concluded between the European Commission and Eidgenössische Technische Hochschule Zürich established in Raemistrasse - 101, ZUERICH, 8092, Switzerland and accepts in accordance with the provisions of the aforementioned grant agreement all the rights and obligations of a beneficiary.

Done in 3 copies, of which one shall be kept by the coordinator and one by B.P. Konstantinov PETERSBURG NUCLEAR PHYSICS INSTITUTE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES, the third being sent to the Commission by the coordinator in accordance with Articles 1.1 and 1.2 and Article 8 of the grant agreement.

B.P. Konstantinov PETERSBURG NUCLEAR PHYSICS INSTITUTE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich Prof. Roland Soffwart p.p. Agatha Keller
<u>Vladimir Samsonov</u> Name of legal representative(s) Name of legal representative(s)
<u>[Signature]</u> Signature of legal representative(s)	<u>[Signature]</u> Signature of legal representative(s)
<u>25.08.11</u> Date	<u>07.08.2011</u> Date
..... Stamp of the organisation Stamp of the organisation





Fortes Fortuna juvat !!!

Успехов!
СПАСИБО