

Отчет по программе фундаментальных
исследований за 2013 г.
**"ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА МАТЕРИИ
И АСТРОФИЗИКА".**

Лаборатория ЭМДН ИЯИ РАН

**Проект: Физика нейтрино на больших
подземных сцинтилляционных детекторах
и поиск нейтринного излучения от
гравитационного коллапса звезд**

Ряжская О.Г., 2014 г.

По данным полученным за 36 лет работы нейтринного детектора АСД (Артемовская Научная станция) и российско-итальянского нейтринного детектора LVD (Научная лаборатория Гран Сассо, Италия) установлено самое лучшее в настоящее время экспериментальное ограничение на частоту нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звёзд в Галактике: менее 1 события за 15.64 года на 90% уровне достоверности.

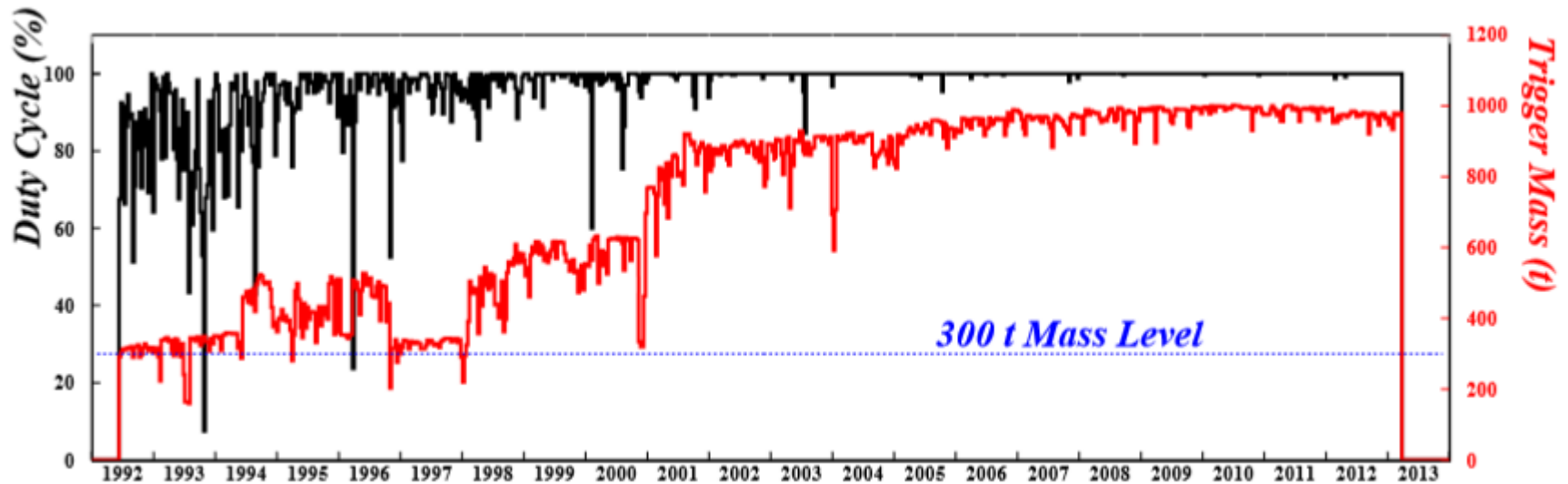


LVD



АСД

Large Volume Detector



Чистое время работы (%) и активная масса $M(t)$ установки LVD.

1992 год – запуск первой башни T1,

1996 год – запуск второй башни T2,

2002 год – работа всех трех башен установки.

Reactions for scintillation and Cherenkov counters

$$\tilde{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n \quad \sigma_{\tilde{\nu}_e p} \sim 9.3 E_{e^+}^2 \cdot 10^{-44} \text{ cm}^2 \quad E_{e^+} \gg 0.5 \text{ MeV}$$

$$\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^- \quad \sigma_{\nu_e e^-} \sim 9.4 E_{\nu_e} \cdot 10^{-45} \text{ cm}^2$$

$$\nu_i + e^- \rightarrow \nu_i + e^- \quad \sigma_{\nu_i e^-} \sim 1.6 E_{\nu_i} \cdot 10^{-45} \text{ cm}^2$$

$$\tilde{\nu}_i + e^- \rightarrow \tilde{\nu}_i + e^- \quad \sigma_{\tilde{\nu}_i e^-} \sim 1.3 E_{\tilde{\nu}_i} \cdot 10^{-45} \text{ cm}^2$$

$$\begin{aligned} \nu + {}^{12}\text{C} &\rightarrow {}^{12}\text{C}^* + \nu - 15.1 \text{ MeV} & \bar{\sigma}_{\nu_e}(\bar{E}_{\nu_e} = 1 \text{ MeV}) &= 0.016 \cdot 10^{-28} \text{ cm}^2 \\ &\downarrow & \bar{\sigma}_{\mu, e}(\bar{E}_{\nu_\mu} = 2 \text{ MeV}) &= 1.2 \cdot 10^{-28} \text{ cm}^2 \\ &{}^{12}\text{C} + \gamma (15.1 \text{ MeV}) \end{aligned}$$

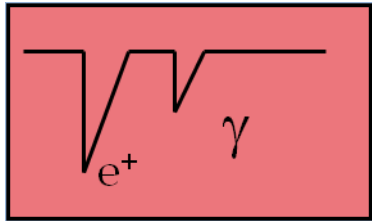
$$\begin{aligned} \nu_e + {}^{12}\text{C} &\rightarrow {}^{12}\text{N} + e^- \\ &\downarrow \\ &{}^{12}\text{C} + e^+ + \nu_e \end{aligned} \quad E_{th} = 1.34 \text{ MeV} \quad \tau = 1.59 \text{ ms}$$

$$\begin{aligned} \tilde{\nu}_e + {}^{12}\text{C} &\rightarrow {}^{12}\text{B} + e^+ \\ &\downarrow \\ &{}^{12}\text{C} + e^- + \tilde{\nu}_e \end{aligned} \quad E_{th} = 1.41 \text{ MeV} \quad \tau = 2.93 \text{ ms}$$

АСД и LVD

могут детектировать все типы нейтрино

$$\tilde{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$$



$$\left. \begin{array}{l} n + \underline{p} \rightarrow d + \gamma \quad (E_\gamma = 2.2 \text{ MeV}) \\ n + {}^{56}\text{Fe} \rightarrow {}^{57}\text{Fe} + \sum \gamma \quad (E_\gamma = 10.16 \text{ MeV}) \end{array} \right\} \tau \approx 185 \mu\text{s}$$

$$n + {}^{35}\text{Cl} \rightarrow {}^{36}\text{Cl} + \sum \gamma \quad (E_\gamma = 8.56 \text{ MeV}, \bar{k}_\gamma = 3.1) \quad \tau \approx 170 \mu\text{s}$$

$$\nu_e + {}^{56}_{26}\text{Fe} \rightarrow {}^{56}_{27}\text{Co}^* + e^-, \quad {}^{56}\text{Co}^* \rightarrow {}^{56}\text{Co} + \sum \gamma, \quad E_\gamma = 7 \div 11 \text{ MeV}$$

$$\nu_i + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\text{C}^* + \nu_i, \quad (i = e, \mu, \tau); \quad {}^{12}\text{C}^* \rightarrow {}^{12}\text{C} + \gamma, \quad E_\gamma = 15.1 \text{ MeV}$$

Основные детекторы в современной службе поиска звездных коллапсов

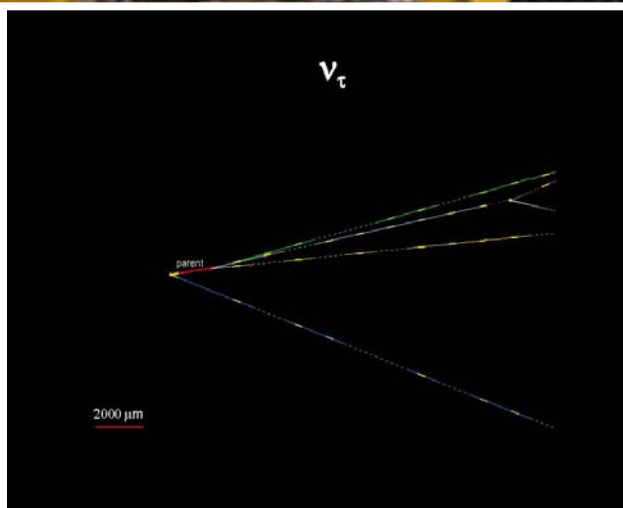
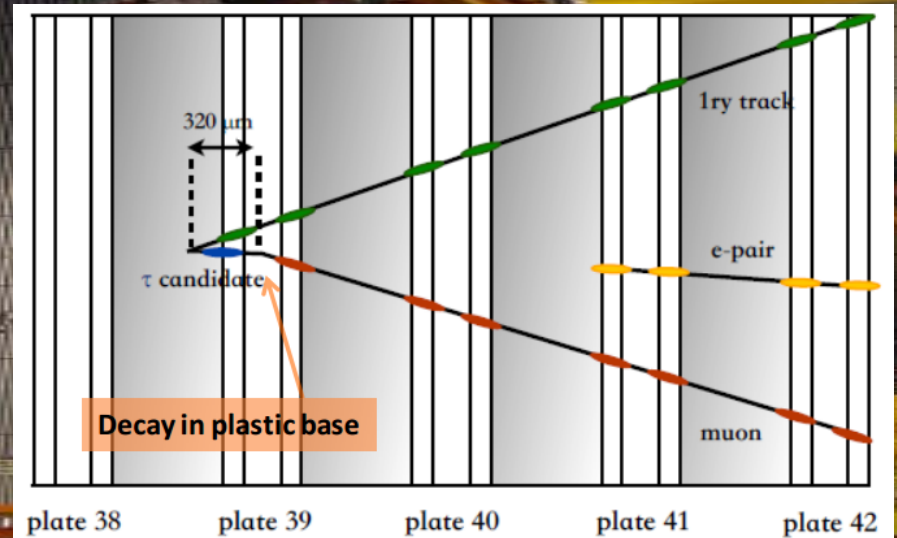
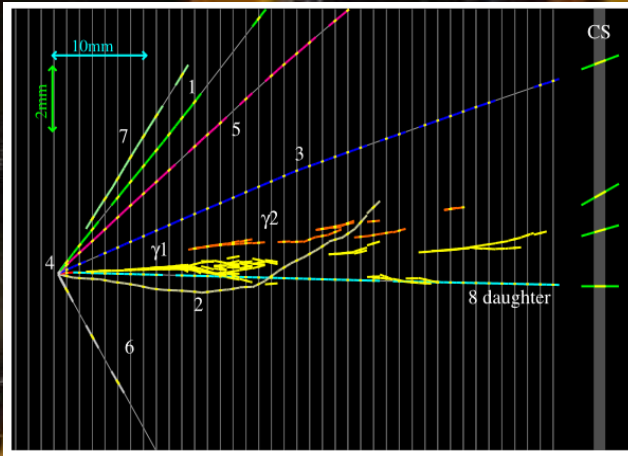
Детектор	Страна *	Масса и тип мишени	Число $N_{\bar{\nu}_e}$ (МСК)**	Число N_{ν_e} (МВК)***
АСД	Россия	0,1 кт ЖС, 1 кт NaCl	57	44
БПСТ	Россия	0,2 кт ЖС, 0,16 кт Fe	67	8
KamLAND	Япония, США	1 кт ЖС	500	180
Borexino	Италия	0,3 кт ЖС	120	60
LVD	Россия, Италия	1 кт ЖС, 1 кт Fe	500	410
SuperK	Япония, США	22,5 кт H ₂ O	9400	650

* Страна (страны), осуществившая разработку и сооружение детектора.

** Число регистрируемых электронных антинейтрино согласно МСК.

*** Число регистрируемых электронных нейтрино для первой стадии коллапса согласно МВК при условии вспышки сверхновой типа SN1987A в центре Галактики.

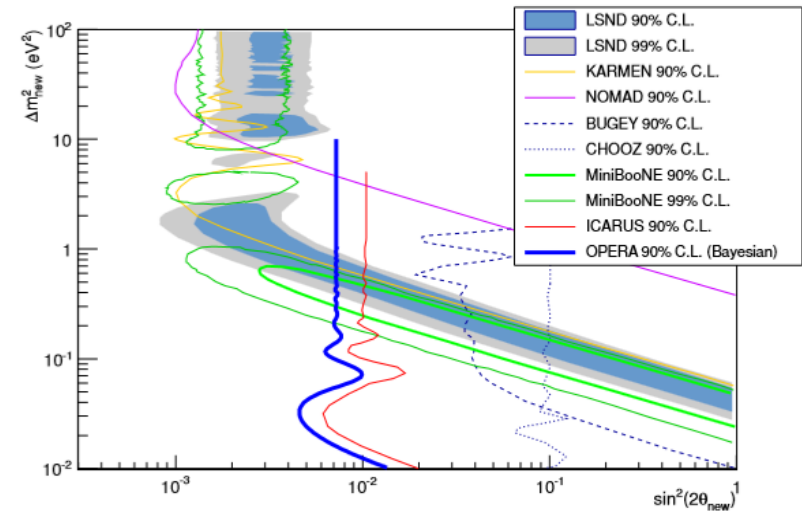
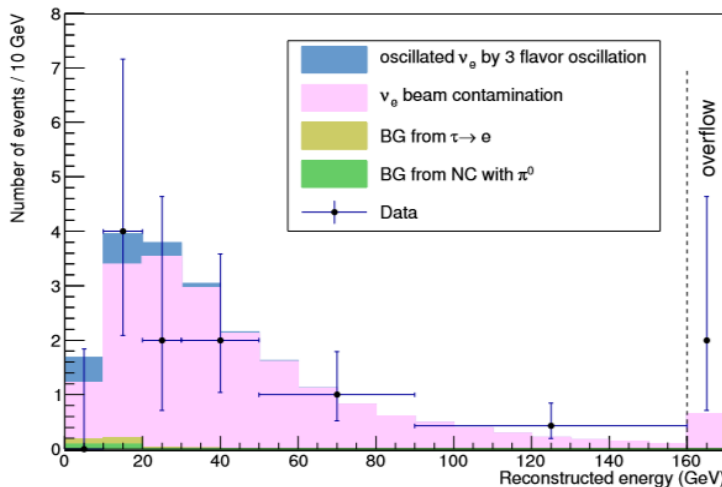
OPERA — обнаружение третьего кандидата



К настоящему времени в эксперименте OPERA обнаружено три события-кандидата на взаимодействие ν_τ в эмульсионном детекторе в каналах распада $\tau \rightarrow h$, $\tau \rightarrow 3h$ и $\tau \rightarrow \mu$ (в канале распада $\tau \rightarrow e$ к настоящему моменту не обнаружено ни одного события-кандидата).

OPERA

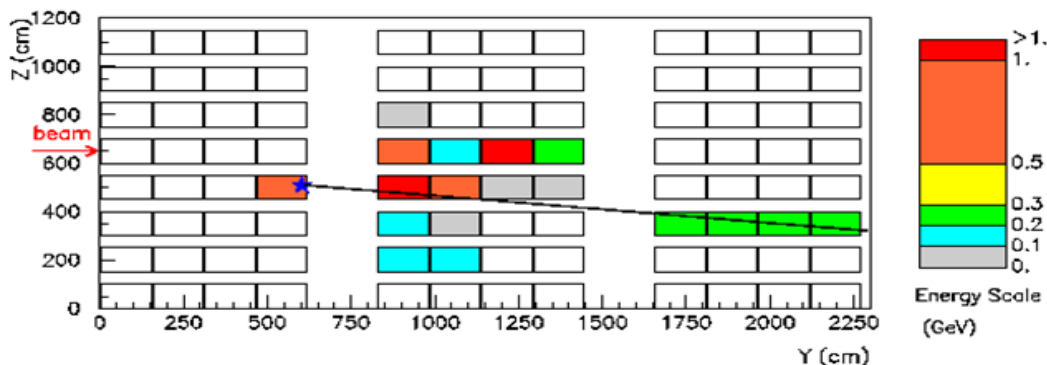
• В эксперименте OPERA получен первый результат по поиску осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ по данным работы CNGS пучка мюонных нейтрино 2008-2009 годов. Данные сопоставимы с неосцилляционной гипотезой в модели смешивания нейтрино трех ароматов. Получено ограничение на параметры углов смешивания в случае нестандартных осцилляций: $\sin^2(2\theta_{\text{new}}) < 7.2 \times 10^{-3}$ (при $\Delta m_{\text{new}}^2 > 0.1 \text{ eV}^2$) на 90% уровне достоверности.



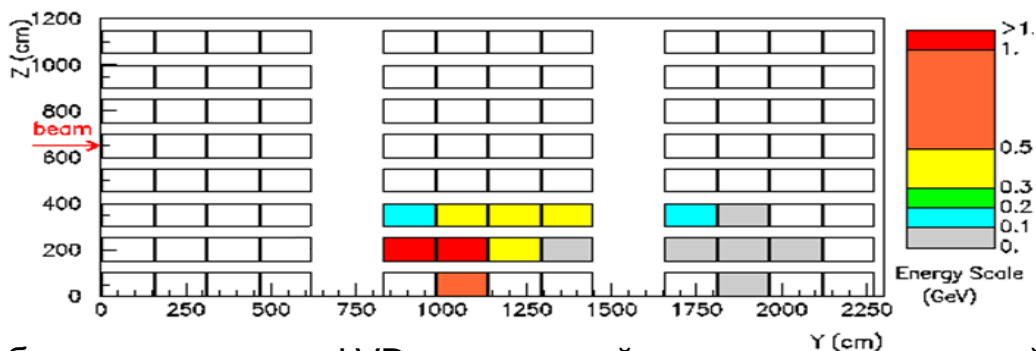
Энергетическое распределение наблюдаемых событий от ν_e -взаимодействий (точки с ошибками) в сравнении с рассчитанными спектрами от фона (розовая, коричневая и зеленая гистограмма), синяя гистограмма – распределение событий в случае осцилляций в стандартной модели смешивания трех ароматов

Диаграмма ограничений для параметров нестандартных $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ осцилляций, полученных с использованием метода Байеса

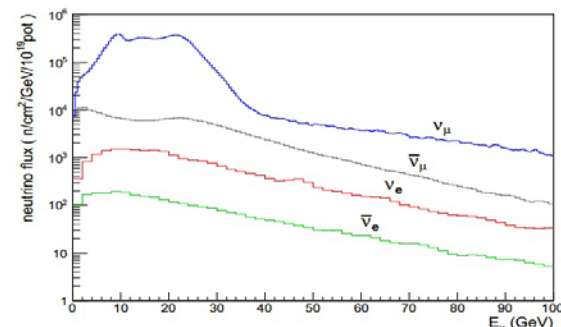
- По результатам обработки данных 2009-2011 эксперимента LVD получены первые результаты по поиску осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ в CNGS пучке мюонных нейтрино. Модульная структура установки позволяет определить топологию событий и разделить события от электронного и мюонного нейтрино. Доля кандидатов на регистрацию ν_e в CNGS мюоном пучке составляет $\delta = 504/60776 = 0.8\%$, величину близкую к доле электронных нейтрино в пучке.



Событие в установке LVD – взаимодействие мюонного нейтрино.



Событие в установке LVD – взаимодействие электронного нейтрино



Спектры электронных и мюонных нейтринных, антинейтринных потоков в зависимости от энергии.

План на 2014 год

1. Поддержание детекторов АСД АНС и LVD в работоспособном состоянии.
2. Проведение модернизации детектора АСД (замена вышедших из строя фотоумножителей и электроники, введение в строй новой системы безопасности);
3. Нейтринная астрофизика. Продолжение работ по непрерывной регистрации и обработке информации по поиску всех типов нейтринного излучения от коллапсирующих звезд на детекторах АСД и LVD. Изучение свойств нейтрино при условии вспышки Сверхновой в Галактике, либо установление предела на частоту коллапсов.
4. Создание поисковой сети EUROSNEWS (Создание и запуск в работу программного обеспечения для анализа информации по поиску нейтринного излучения от коллапсирующих звезд в режиме реального времени и для передачи сообщений от экспериментальных установок ИЯИ РАН в глобальную базу данных о коллапсах).
5. Изучение потока атмосферных мюонов и нейтрино вблизи горизонта, изучение мюонных групп (LVD, OPERA);
6. Изучение фона, создаваемого мюонами космических лучей и естественной радиоактивностью (LVD);
7. Изучение нейтронов (энергетических спектров и пространственных распределений), создаваемых мюонами атмосферного происхождения в горизонтальном направлении и мюонами, генерированными атмосферными нейтрино в горизонтальном направлении (LVD, OPERA).

Новая тема

Проект программы фундаментальных исследований
Президиума РАН Фундаментальные свойства материи и
астрофизика - изучение свойств нейтрино на детекторах ИЯИ
РАН

1. Идентификация и разделение событий электронных и мюонных нейтрино в детекторе LVD, связанных с прохождением CNGS пучка из ЦЕРН по данным 2008-2013.
Разработка программ обработки LVD данных и симуляция их с помощью пакета GEANT.
2. Поиск коррелированных событий на больших сцинтилляционных детекторах LVD, АСД и БПСТ по программе регистрации нейтринного излучения от коллапсов звезд.

Список опубликованных работ в 2013 г.

1. N. Agafonova et al. OPERA Collaboration, **New results on $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ appearance with the OPERA experiment in the CNGS beam**, JHEP 11 (2013) 036, arXiv:1308.2553
2. N. Agafonova et al. OPERA Collaboration, **Search for $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ oscillations with the OPERA experiment in the CNGS beam**, JHEP 07 (2013) 004, <http://arxiv.org/abs/1303.3953>
3. О.Г. Рязжская, «**Об экспериментах в подземной физике**», УФН т.183, №3 (2013), с.317-323
4. T. Adam et al. (OPERA Coll.) **Measurement of the neutrino velocity with the OPERA detector in the CNGS beam using the 2012 dedicat.** JHEP 01 (2013) 153
5. V. Dadykin and O. Ryazhskaya. **Search for neutrino radiation from collapsing stars and the sensitivity of experiments to the different types of neutrinos.** Particle Physics at the Tercentenary of Mikhail Lomonosov Proceedings of the Fifteenth Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics/ ed. by Alexander I. Studenikin. - Singapore: World Scientific, 2013. p. 190
6. V. V. Ashikhmin, K. V. Manukovskiy, O. G. Ryazhskaya, I. R. Shakiryanova and A. V. Yudin, for LVD Collaboration. **Supernova neutrino type identification with adding sodium chloride in LVD.** Particle Physics at the Tercentenary of Mikhail Lomonosov Proceedings of the Fifteenth Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics/ ed. by Alexander I. Studenikin. - Singapore: World Scientific, 2013. p. 199.
7. F. Pupilli, on behalf of the OPERA Collaboration. **Search for n_τ interactions with the nuclear emulsion films of the OPERA experiment.** Particle Physics at the Tercentenary of Mikhail Lomonosov Proceedings of the Fifteenth Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics/ ed. by Alexander I. Studenikin. - Singapore: World Scientific, 2013. p. 116
8. R. Rescigno, on behalf of the OPERA Collaboration. **The electronic detectors of the hybrid OPERA neutrino experiment.** Particle Physics at the Tercentenary of Mikhail Lomonosov Proceedings of the Fifteenth Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics/ ed. by Alexander I. Studenikin. - Singapore: World Scientific, 2013. p. 120.
9. Н. Ю. Агафонова и др. (Коллаборация LVD), **Нейтроны, генерированные мюонами на установке LVD**, Известия РАН сер. Физ. 2013, 77 N11, 1587-1590
10. Н. Ю. Агафонова и др. (Коллаборация LVD), **Изучение взаимодействия нейтронов с поваренной солью в детекторе LVD**, Известия РАН сер. Физ., 2013, 77 N11, 1591-1593
11. Р.И. Еникеев и др. **Поиск нейтринного излучения от коллапсирующих звезд на Артемовском сцинтилляционном детекторе**, Известия РАН сер. Физ., 2013, 77 N 11, 1594-1596
12. N.Yu. Agafonova et al. (LVD Collaboration), **Study of neutron interactions with NaCl in LVD**, 2013 J. Phys.: Conf. Ser. 409, 012140
13. N.Yu. Agafonova et al. (LVD Collaboration), **Neutrons produced by muons in LVD: Monte Carlo Simulation**, 2013 J. Phys.: Conf. Ser. 409, 012139
14. Н.Ю. Агафонова и др., **Поиск осцилляций нейтрино в канале $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ с помощью гибридного детектора эксперимента OPERA**, Физика Элементарных частиц и Атомного ядра, 2013, Vol. 44, No. 4., Дубна, (Eng: Physics of Particles and Nuclei, 2013, Vol. 44, No. 4, pp. 703–727)

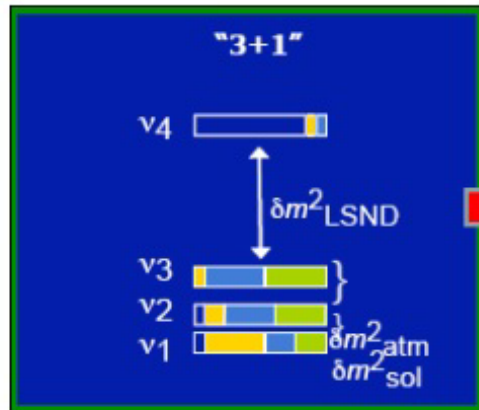
Стерильные нейтрино ?

Combined analysis of anomalies:

- реакторные данные
- Ga эксперименты
- LSND и MiniBooNe,



$$|\Delta m^2| > 1.0 \text{ эВ}^2$$
$$\sin^2 2\theta_{\text{new}} \approx 0.17$$



$$\Delta m^2_{34} \sim 1 \text{ эВ}^2 \Rightarrow \text{4-е нейтрино?}$$

...но из Стандартной модели и LEP данных



три типа легких активных нейтрино

Гипотеза стерильных нейтрино

Стерильные нейтрино ν_s

- могут рождаться в ранней Вселенной благодаря смешиванию с активными нейтрино
- не участвуют в слабых взаимодействиях
- могут иметь левую или правую спиральность
- четвертое массовое состояние
- ν_s ($m_s \geq 1 \text{ кэВ}$, $\theta \leq 10^{-4}$) кандидаты в теплую темную материю