



**Нобелевская премия по
физике 2015 года.**

А.В. Дербин

Петербургский институт ядерной физики

**"for the discovery of neutrino oscillations,
which shows that neutrinos have mass"**

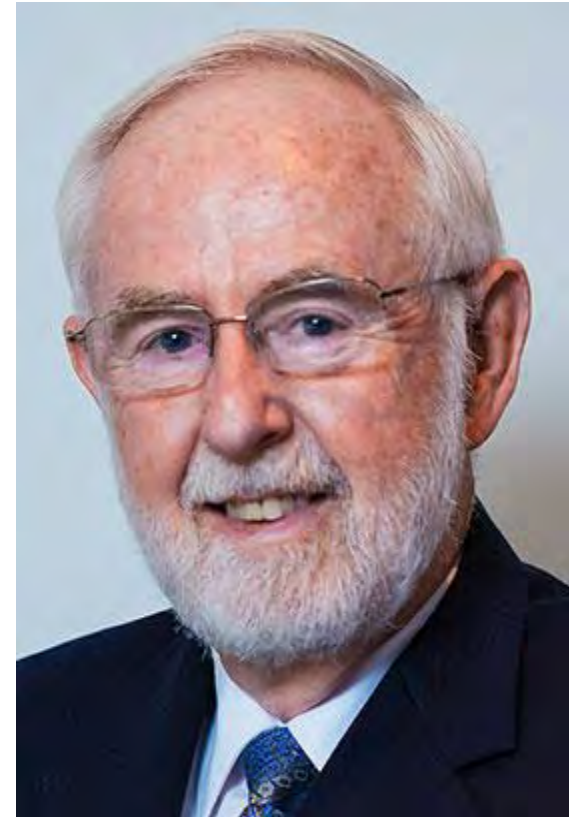


Такааки Кадзита

Takaaki Kajita

*56(39)лет, Университет Токио,
Япония*

Лидер коллаборации S-K



Артур Брюс Макдоналд

Arthur B. McDonald

*73(59) года, Университет
Кингстона, Канада,*

Лидер коллаборации SNO

Super-Kamiokande & SNO Collaborations

Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos

The Super-Kamiokande Collaboration

Y.Fukuda^a, T.Hayakawa^a, E.Ichihara^a, K.Inoue^a, K.Ishihara^a, H.Ishino^a, Y.Itow^a, T.Kajita^a, J.Kameda^a, S.Kasuga^a, K.Kobayashi^a, Y.Kobayashi^a, Y.Koshio^a, M.Miura^a, M.Nakahata^a, S.Nakayama^a, A.Okada^a, K.Okumura^a, N.Sakurai^a, M.Shiozawa^a, Y.Suzuki^a, Y.Takeuchi^a, Y.Totsuka^a, S.Yamada^a, M.Earl^b, A.Habig^b, E.Kearns^b, M.D.Messier^b, K.Scholberg^b, J.L.Stone^b, L.R.Sulak^b, C.W.Walter^b, M.Goldhaber^c, T.Barszczak^d, D.Casper^d, W.Gajewski^d, P.G.Halverson^{d,*}, J.Hsu^d, W.R.Kropp^d, L.R.Price^d, F.Reines^d, M.Smy^d, H.W.Sobel^d, M.R.Vagstad^d, K.S.Ganezer^e, W.E.Keig^e, R.W.Ellsworth^f, S.Tasaka^f, J.W.Flanagan^{h,i}, A.Kibayashi^h, J.C.Boyd^h, S.Matsuno^h, V.J.Stenger^h, D.Takemori^h, T.Ishiiⁱ, J.Kanzakiⁱ, T.Kobayashiⁱ, S.Mineⁱ, Y.Suzumuraⁱ, K.Nishikawaⁱ, Y.Oyamaⁱ, A.Sakaiⁱ, M.Sakudaⁱ, O.Sasakiⁱ, S.Ehigo^j, M.Kobayashi^j, T.Suzuki^j, T.J.Haines^{k,l}, E.Blaufuss^l, B.K.Kim^l, R.Sanford^l, R.Svoboda^l, M.L.Chen^m, J.A.Boyer^m, J.A.Boyer^m, G.W.Sullivan^m, J.Hill^m, C.K.Jungⁿ, K.Martensⁿ, C.Maugerⁿ, C.McGeeⁿ, E.Sharkeyⁿ, S.Virenⁿ, C.Yanagisawaⁿ, W.Doki^o, K.Miyano^o, H.Okazawa^o, C.Saji^o, M.Nakahata^o, Y.Kishimoto^o, M.Takita^p, T.Yamaguchi^p, M.Yoshida^p, S.B.Kim^q, M.Etoh^r, T.Hirata^r, A.Hayakawa^r, T.Hasegawa^r, S.Hatakeyama^r, T.Iwamoto^r, M.Koga^r, T.Maruyama^r, T.Hasegawa^r, J.Shin^r, Y.Suzuki^r, F.Tsushima^r, M.Koshiba^s, M.Nemoto^s, K.Nishijima^t, T.Futagane^t, Y.Hayashi^t, Y.Hanaya^t, K.Kaneyuki^t, Y.Watanabe^t, D.Kielczewska^{u,v}, R.A.Doyle^w, J.S.George^w, J.Stachyra^w, L.L.Wai^{x,y,z}, R.J.Wilkes^w, K.K.Young^w

^aInstitute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo, Tanashi, Tokyo 188-8502, Japan
^bDepartment of Physics, Boston University, Boston, MA 02215, USA
^cPhysics Department, Brookhaven National Laboratory, Upton, NY 11973, USA
^dDepartment of Physics and Astronomy, University of California, Irvine, Irvine, CA 92697-4575, USA
^eDepartment of Physics, California State University, Dominguez Hills, Carson, CA 90747, USA
^fDepartment of Physics, George Mason University, Fairfax, VA 22030, USA
^gDepartment of Physics, Gifu University, Gifu, Gifu 501-1193, Japan
^hDepartment of Physics and Astronomy, University of Hawaii, Honolulu, HI 96822, USA
ⁱInstitute of Particle and Nuclear Studies, High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan
^jDepartment of Physics, Kobe University, Kobe, Hyogo 657-8501, Japan
^kPhysics Division, P-23, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM 87544, USA
^lDepartment of Physics and Astronomy, Louisiana State University, Baton Rouge, LA 70803, USA
^mDepartment of Physics, University of Maryland, College Park, MD 20742, USA
ⁿDepartment of Physics and Astronomy, State University of New York, Stony Brook, NY 11794-3800, USA
^oDepartment of Physics, Niigata University, Niigata, Niigata 950-2181, Japan
^pDepartment of Physics, Osaka University, Toyonaka, Osaka 560-0043, Japan
^qDepartment of Physics, Seoul National University, Seoul, Korea
^rDepartment of Physics, Tohoku University, Sendai, Miyagi 980-8578, Japan
^sThe University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan
^tDepartment of Physics, University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan
^uDepartment of Physics, Tokyo Institute of Technology, Meguro, Tokyo 152-8551, Japan
^vInstitute of Experimental Physics, Warsaw University, 00-681 Warsaw, Poland
^wDepartment of Physics, University of Washington, Seattle, WA 98195-1560, USA

Direct Evidence for Neutrino Flavor Transformation from Neutral-Current Interactions in the Sudbury Neutrino Observatory

Q.R. Ahmad¹⁷, R.C. Allen⁴, T.C. Andersen⁶, J.D. Anglin¹⁰, J.C. Barton^{11,*}, E.W. Beier¹², M. Bercovitch¹⁰, J. Bigu⁷, S.D. Biller¹¹, R.A. Black¹¹, I. Blevis⁵, R.J. Boardman¹¹, J. Boger³, E. Bonvin¹⁴, M.G. Boulay^{9,14}, M.G. Bowler¹¹, T.J. Bowles⁹, S.J. Brice^{9,11}, M.C. Browne^{17,9}, T.V. Bullard¹⁷, G. Bühler⁴, J. Cameron¹¹, Y.D. Chan⁸, H.H. Chen⁴, B.M. Chen¹⁴, X. Chen^{8,11}, B.T. Cleveland¹¹, E.T.H. Clifford¹⁴, J.H.M. Cowan⁷, D.F. Cowen¹², G.A. Cox¹⁷, X. Dai¹¹, F. Dahnke-Veress⁵, W.F. Davidson¹⁰, P.J. Doe^{17,9,4}, G. Doucas¹¹, M.R. Dragowsky^{9,8}, C.A. Duba¹⁷, F.A. Duncan¹⁴, M. Dunford¹², J.A. Dunmore¹¹, E.D. Earle^{14,1}, S.R. Elliott^{17,9}, H.C. Evans¹⁴, G.T. Ewan¹⁴, J. Farine^{7,5}, H. Fergani¹¹, A.P. Ferraris¹¹, R.J. Ford¹⁴, J.A. Formaggio¹⁷, M.M. Fowler⁹, K. Frame¹¹, E.D. Frank¹², W. Frati¹², N. Gagnon^{11,9,8,17}, J.V. Germani¹⁷, S. Gil², K. Graham¹⁴, D.R. Grant⁵, R.L. Hahn³, A.L. Hallin¹⁴, E.D. Hallman⁷, A.S. Hamer^{9,14}, A.A. Hamian¹⁷, W.B. Handler¹⁴, R.U. Haq⁷, C.K. Hargrove⁵, P.J. Harvey¹⁴, R. Hazama¹⁷, K.M. Heeger¹⁷, W.J. Heintzelman¹², J. Heise^{2,9}, R.L. Helmer^{16,2}, J.D. Hepburn¹⁴, H. Heron¹¹, J. Hewett⁷, A. Hime¹⁰, J. Howe¹⁷, J.G. Hlykawy⁷, M.C.P. Isaac⁸, P. Jagam⁶, N.A. Jelley¹¹, C. Jillings¹⁴, G. Jonkmans^{7,11}, J. Kazkaz¹⁷, P.T. Keener¹², J.R. Klein¹², A.B. Knox¹¹, R.J. Komar², R. Kouzes¹³, T. Kutter¹⁷, M. Kyba¹², J. Law⁶, I.T. Lawson⁶, M. Lay¹¹, H.W. Lee¹⁴, K.T. Lesko⁸, J.R. Leslie¹⁴, I. Levine⁵, J. Llorente¹⁴, S. Luoma⁷, J. Lyon¹¹, S. Majerus¹¹, H.B. Mak¹⁴, J. Maneira¹⁴, J. Manor¹⁷, A.D. Marino⁸, N. M. McIntyre¹², A.B. McFarland^{14,13}, D.S. McDonald¹², K. McFarlane⁵, G. McGregor¹¹, R. Meijer Drees¹⁷, G. Miller¹⁰, G.G. Miller¹⁰, J. Milnor¹¹, B.A. Moffat¹⁴, M. Moorhead¹¹, C.W. Nally², M.S. Neubauer¹², P. Nefzger¹², H. O'Connell¹⁴, A.J. Noble^{16,5}, E.B. Norman⁸, V.M. Novikov⁵, M. O'Neill⁵, C.E. Okada⁵, F.W. Ollerhead⁶, M. Orlandi¹⁴, J.L. Orrell¹⁷, S.M. Oser¹², A.W.P. Poon^{8,17,2,9}, T.J. Radcliffe¹⁴, A.R. Ragusa¹², B.C. Roberts¹², R.G.H. Robertson^{17,9}, S.S.E. Rosendahl⁸, J.K. Rowley³, V.L. Rusy¹², Saeed¹², K.K. Schep¹², L.H. Schweninger⁷, A. Schülke¹⁶, H. Seifert^{7,17,9}, M. Shatkay⁵, J.J. Simons¹², C.J. Sims¹¹, D. Sindt^{16,16}, P. Skensved¹⁴, A.R. Smith⁸, M.W.E. Smith¹⁷, T. Spreitzer¹², N. Starinsky⁵, T.D. Stecker¹², G. Stokstad⁸, L.C. Stonehill¹⁷, R.S. Storey^{10,11}, B. Sur^{11,14}, R. Tafirout⁷, N. Tagg^{6,11}, N.W. Tamm¹², R.K. Taplin¹¹, M.M. Thorman¹¹, P.M. Thornewell¹¹, P.T. Trent¹¹, Y.I. Tserkovnyak², R. Van Berg¹², T.R.G. Van de Water^{9,12}, C.J. Virtue⁷, C.E. Waltham², D.X. Wang⁶, D.L. Wark^{15,11,9}, N. West¹¹, J.B. Wilhelm⁹, J.F. Wilkerson^{17,9}, J.R. Wilson¹¹, P. Wittich¹², J.M. Wouters⁹ and M. Yeh³

(SNO Collaboration)

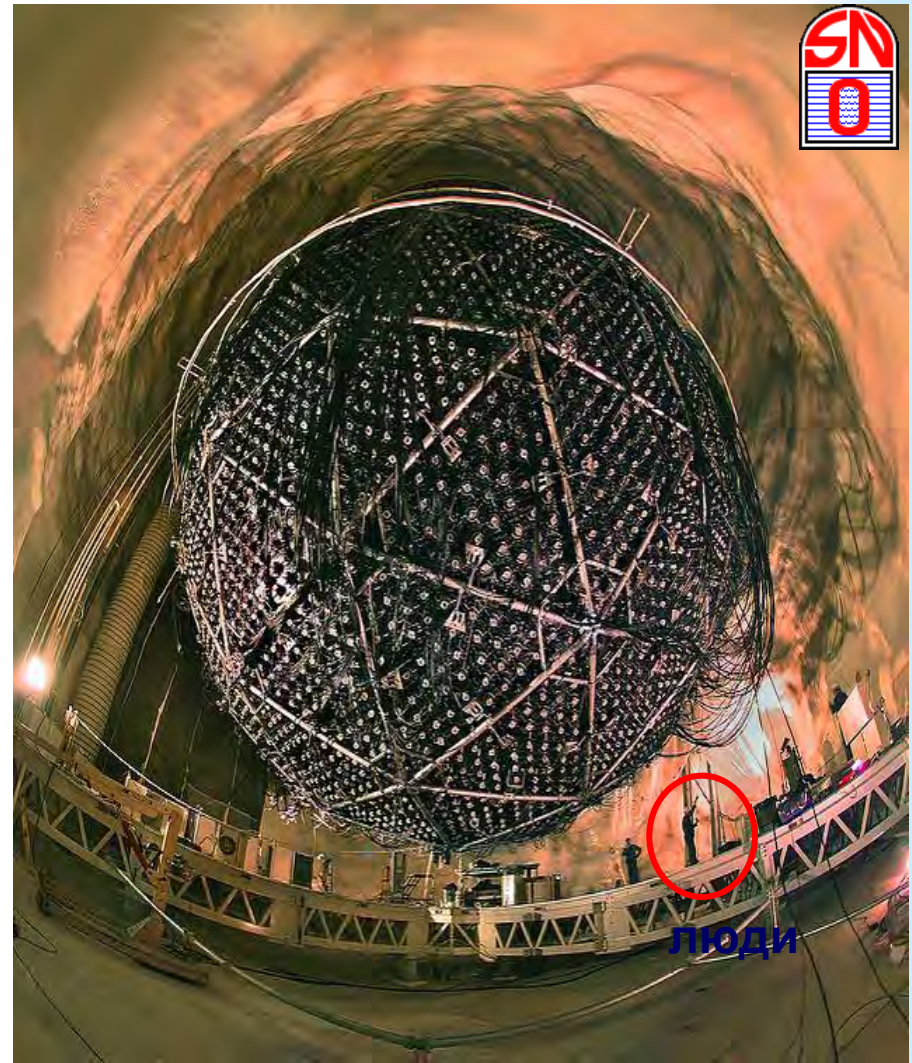
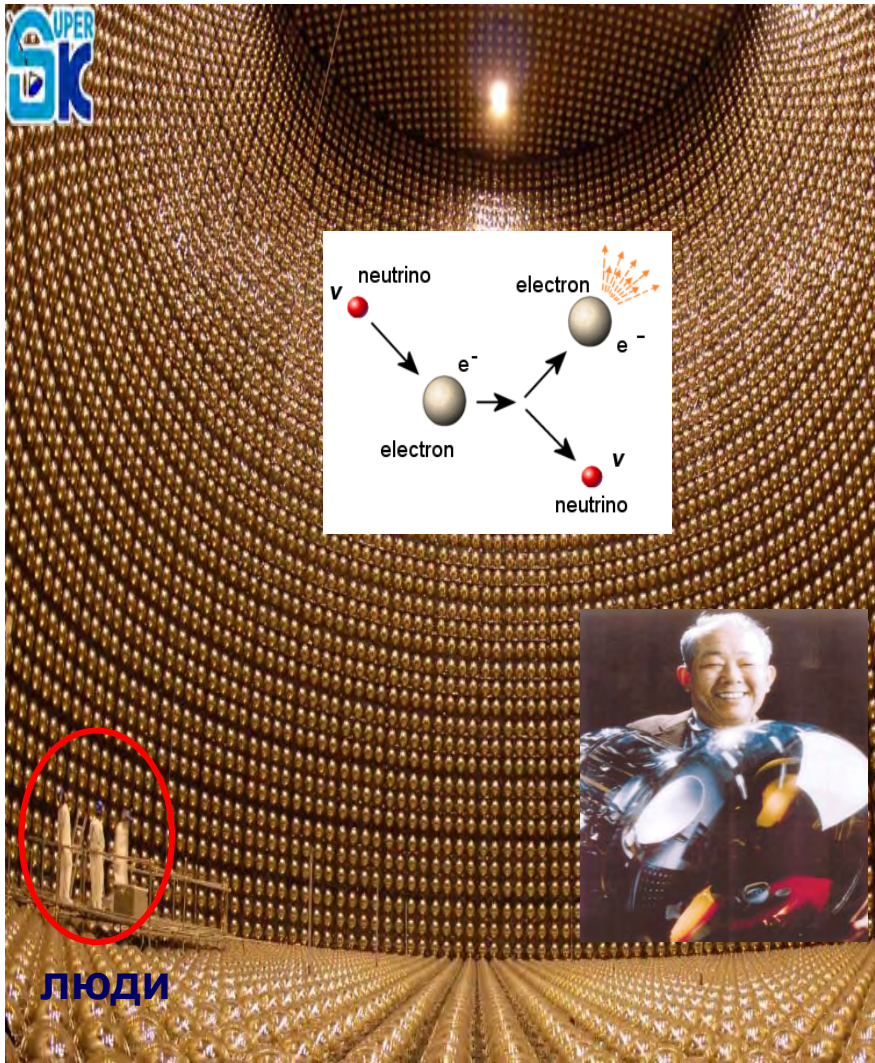
¹ Atomic Energy of Canada, Limited, Chalk River Laboratories, Chalk River, ON K0J 1J0, Canada
² Department of Physics and Astronomy, University of British Columbia, Vancouver, BC V6T 1Z1 Canada
³ Chemistry Department, Brookhaven National Laboratory, Upton, NY 11973-5000
⁴ Department of Physics, University of California, Irvine, CA 92717
⁵ Carleton University, Ottawa, Ontario K1S 5B6 Canada
⁶ Physics Department, University of Guelph, Guelph, Ontario N1G 2W1 Canada
⁷ Department of Physics and Astronomy, Laurentian University, Sudbury, Ontario P3E 2C6 Canada
⁸ Institute for Nuclear and Particle Physics and Nuclear Science Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720
⁹ Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM 87545
¹⁰ National Research Council of Canada, Ottawa, ON K1A 0R6, Canada
¹¹ Department of Physics, University of Oxford, Denys Wilkinson Building, Keble Road, Oxford, OX1 3RH, UK
¹² Department of Physics, Pennsylvania State University, University Park, PA 19104-6396
¹³ Department of Physics, Princeton University, Princeton, NJ 08544
¹⁴ Department of Physics, University of Toronto, Toronto, Ontario M5S 1A5, Canada
¹⁵ Rutherford Appleton Laboratory, Chilton, Didcot, Oxon, OX11 0QX, and University of Sussex, Physics and Astronomy Department, Brighton BN1 9QH, UK
¹⁶ TRIUMF, 4004 Wesbrook Mall, Vancouver, BC V6T 2A3, Canada
¹⁷ Center for Experimental Nuclear Physics and Astrophysics, and Department of Physics, University of Washington, Seattle, WA 98195

23 институтами
120 авторов
1998
Открытие осцилляций
атмосферных нейтрино

17 институтами
180 авторов
2002
Открытие осцилляций
солнечных нейтрино

Обе премии присуждены за работы, выполненные большими коллективами

Два детектора: S-КамиокаNDe и SNO



Работы выполнены на двух крупных экспериментальных установках
S-K: $d = 39$ м $h = 41$ м ФЭУ 11000 **SNO: сфера $d = 12$ м ФЭУ 9500**

СМ = лептоны+кварки+бозоны

e	μ	τ
ν_e	ν_μ	ν_τ

u	c	t
d	s	b

γ	Z	W^\pm	g	H^0
----------	-----	---------	-----	-------

ЛЕПТОНЫ:
Три электрона
Три нейтрино

КВАРКИ:
Образуют p , n , π ,
но не вылетают

БОЗОНЫ:
осуществляют
взаимодействие

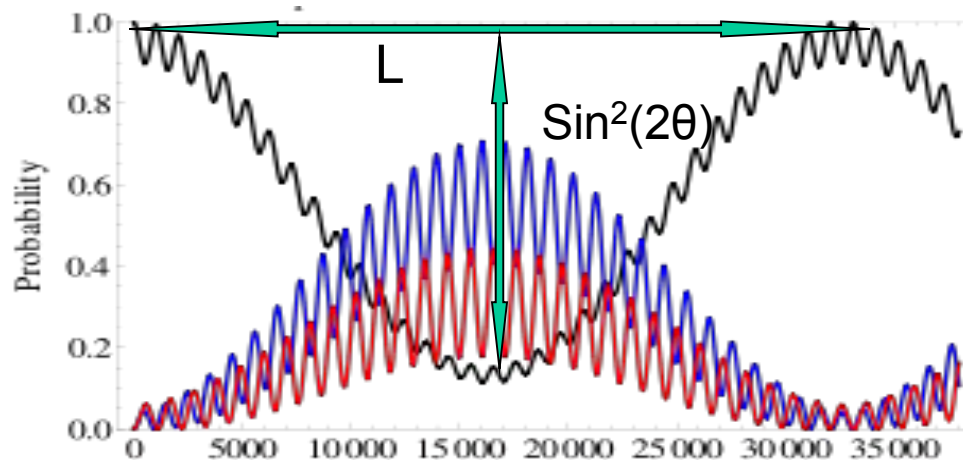
Премии выданы за разрешение 2 загадок, связанных с нейтрино. Как это часто бывает результаты измерений не совпали с предсказаниями теории.

Смешивание и осцилляции нейтрино

PMNS
матрица

$$\begin{bmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{bmatrix}, \quad \begin{pmatrix} 0.8 & 0.5 & 0.1 \\ 0.5 & 0.6 & 0.7 \\ 0.3 & 0.6 & 0.7 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$



$$L(m) = 2.5 \frac{E(\text{MeV})}{\Delta m^2(\text{eV}^2)}$$

$$P_{ee}(x) = 1 - \text{Sin}^2(2\theta) \text{Sin}^2(\pi x/L)$$

Для монохроматических
нейтрино

Флейворные состояния являются суперпозицией массовых состояний, что приводит к осцилляциям, которые описываются Δm^2 и матрицей PMNS.

Осцилляции нейтрино - - макроскопический квантовый эффект



Б. Понтекорво

3.Маки, М.Накагава, С.Саката

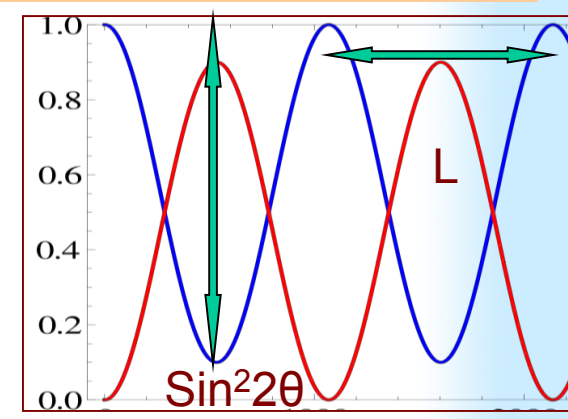
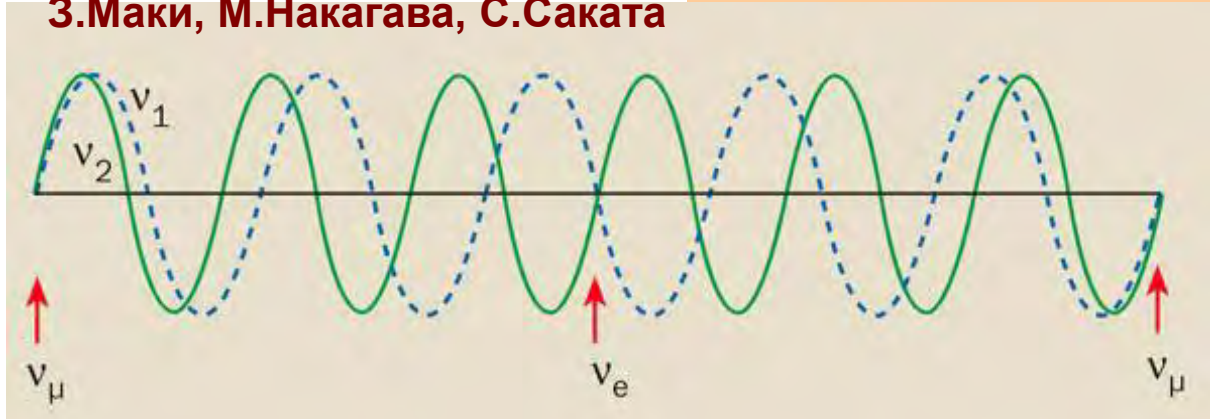
$$| \nu_e \rangle = \cos \theta | \nu_1 \rangle + \sin \theta | \nu_2 \rangle$$

$$| \nu_\mu \rangle = -\sin \theta | \nu_1 \rangle + \cos \theta | \nu_2 \rangle$$

$$L = \frac{4\pi E}{\Delta m^2}$$

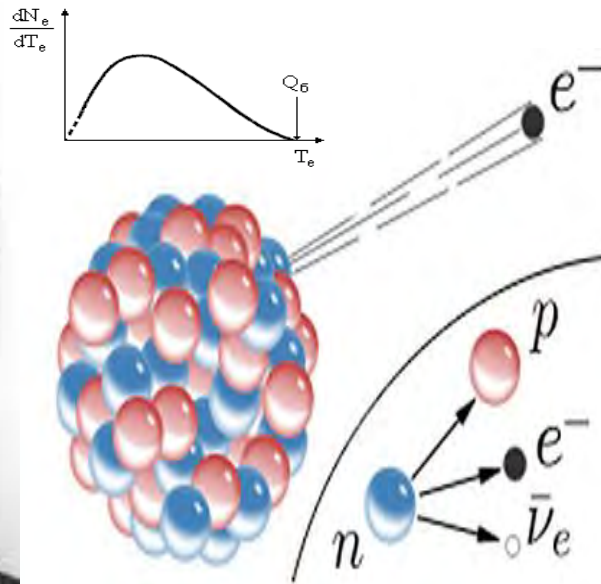
$$| \nu_e(t) \rangle = \cos \theta \cdot \exp(-iE_1 t) | \nu_1 \rangle + \sin \theta \cdot \exp(-iE_2 t) | \nu_2 \rangle$$

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu}(R) = \langle \nu_\mu | \nu_e(t) \rangle = \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\pi R \Delta m^2}{E}\right)$$



Понтекорво первым рассмотрел ν и анти- ν как суперпозицию двух массовых состояний. Параметры осцилляций определяются Δm^2 и $\sin^2 \theta$. Иллюстрация - две волны с разной частотой изображают два типа нейтрино с разной массой. В зависимости от того, складываются они в фазе или в противофазе, суммарный эффект воспринимается как электронное или как мюонное нейтрино. Макроскопический кв. эффект (км).

Нейтрино – история появления -1930 г.



В β -распаде электрон, вылетающий из ядра, должен был иметь фиксированную энергию. ИП Непрерывность спектра электронов β -распада поставила под сомнение закон сохранения энергии настолько остро, что **Нильс Бор** выступил с идеей о несохранении энергии.

Гипотезу о существовании чрезвычайно слабо взаимодействующей с веществом частицы выдвинул 4 декабря 1930 г. **Вольфганг Паули** в письме участникам конференции в Тюбингене:

« **Дорогие радиоактивные дамы и господа!....**

Непрерывный β -спектр тогда стал бы понятным, если предположить, что при β -распаде вместе с электроном испускается ещё и «нейтрон», таким образом, что сумма энергий «нейтрона» и электрона остаётся постоянной....»

Нобелевские премии за нейтрино

1995 г.



Ф. Райнес

1953 – 56 г.г

За экспериментальное
обнаружение нейтрино
«... for the detection of the neutrino»

1988 г.



Л.Ледерман М.Шварц Д.Стейнбергер

1962 г.

За метод нейтринного пучка и
доказательство дублетной структуры
лептонов посредством открытия мюонного
нейтрино
*«... for the neutrino beam method and the
demonstration of the doublet structure of the
leptons through the discovery of the muon
neutrino»*

2002 г.



Р.Девис М.Косиба

1969-90 г.г. 1986-90 г.г.

За пионерский вклад в астрофизику, в
частности за обнаружение космических
нейтрино
*«...for pioneering contributions to astrophysics,
in particular for the detection of cosmic
neutrinos».*

Впервые зарегистрировали 1953 г., в 1962 открыли ν_μ и в 1969 и 1986 – от Солнца

Источники Нейтрино

Реактор

(впервые зарегистрировали ν 's)



Ускоритель

(обнаружили мюонное нейтрино)



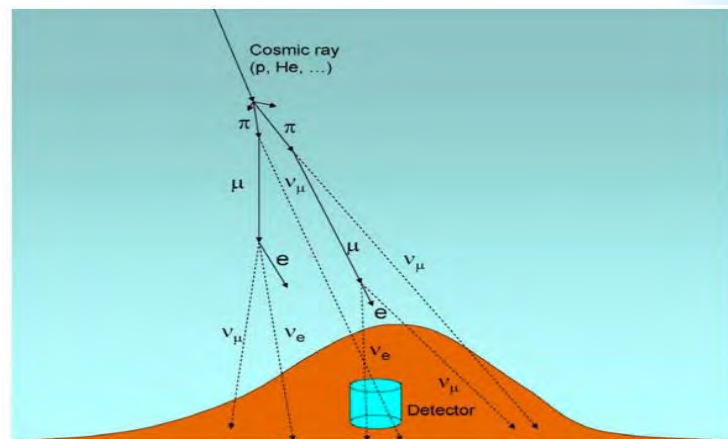
Солнце

(Нехватка солнечных нейтрино)



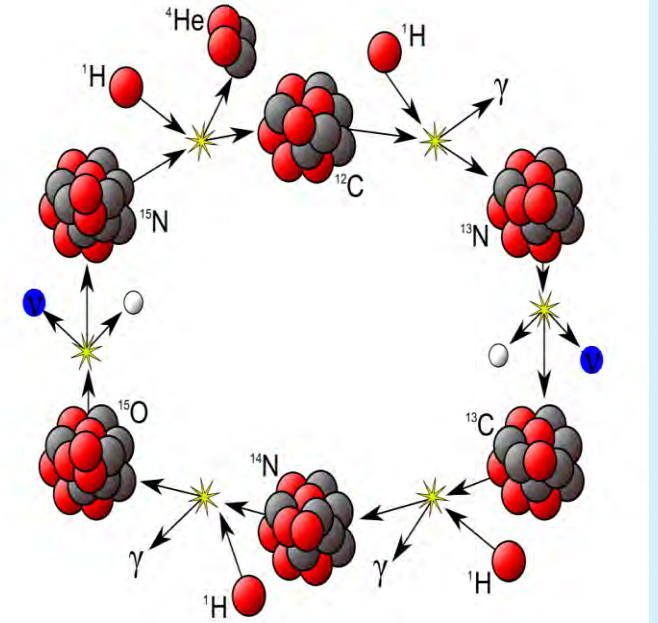
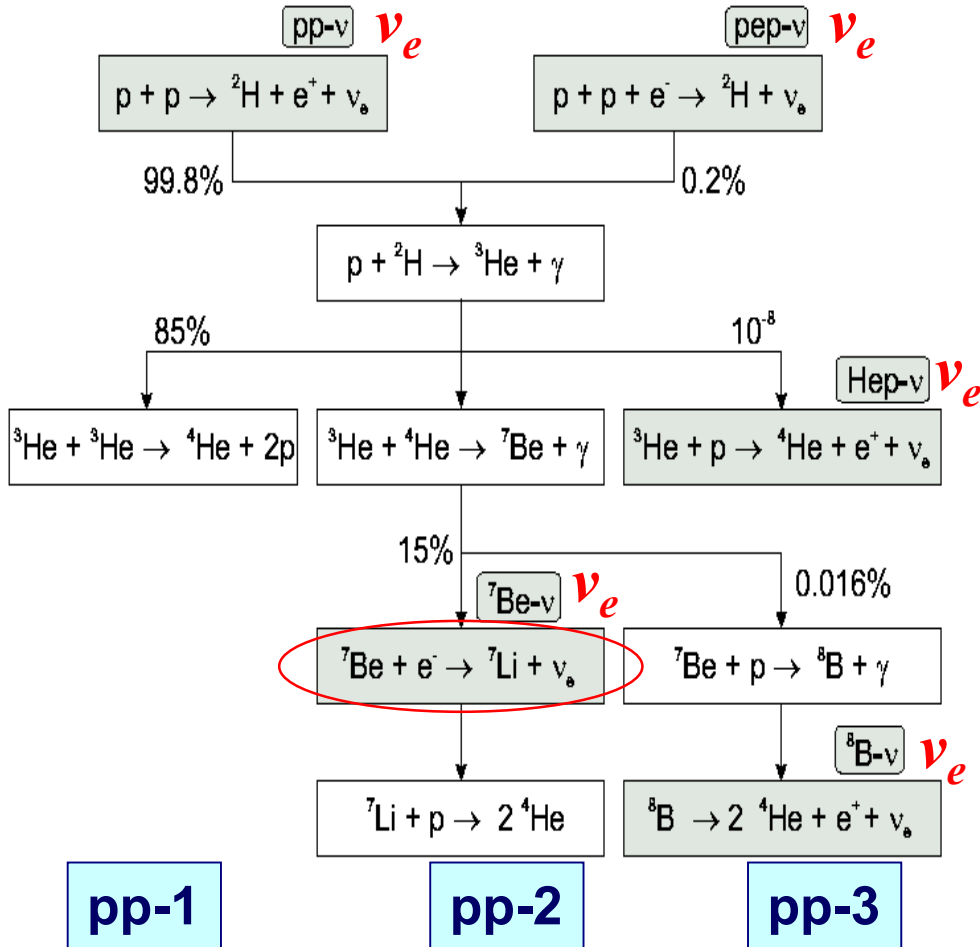
Атмосфера

(неправильное отношение потоков ν_e и ν_μ)



Наиболее мощные источники ν . НП присуждена за открытие осцилляций солнечных и атмосферных нейтрино, которые объяснили 2 проблемы существовавшие 30 и 10 лет.

pp-: $4p \rightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e + (26.7 \text{ МэВ})$ и CNO-цикл

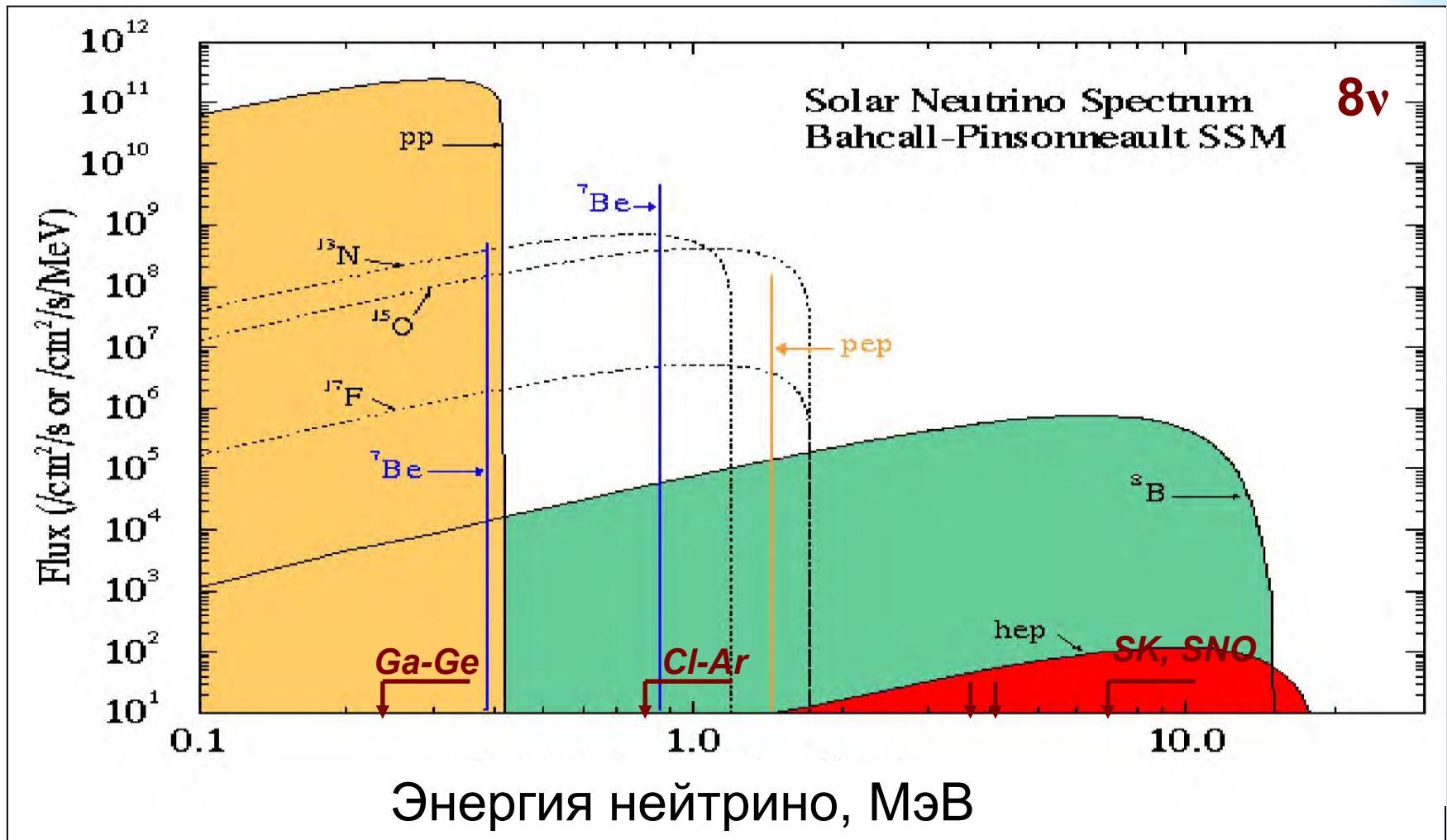


${}^{13}\text{N} \rightarrow {}^{13}\text{C} + e^+ + \nu_e \quad E_0 = 1.2 \text{ MeV}$
 ${}^{15}\text{O} \rightarrow {}^{15}\text{N} + e^+ + \nu_e \quad E_0 = 1.7 \text{ MeV}$
 ${}^{17}\text{F} \rightarrow {}^{17}\text{O} + e^+ + \nu_e \quad E_0 = 1.7 \text{ MeV}$

Излучается 5 нейтрино в pp-цепи и 3 нейтрино в CNO-цикле

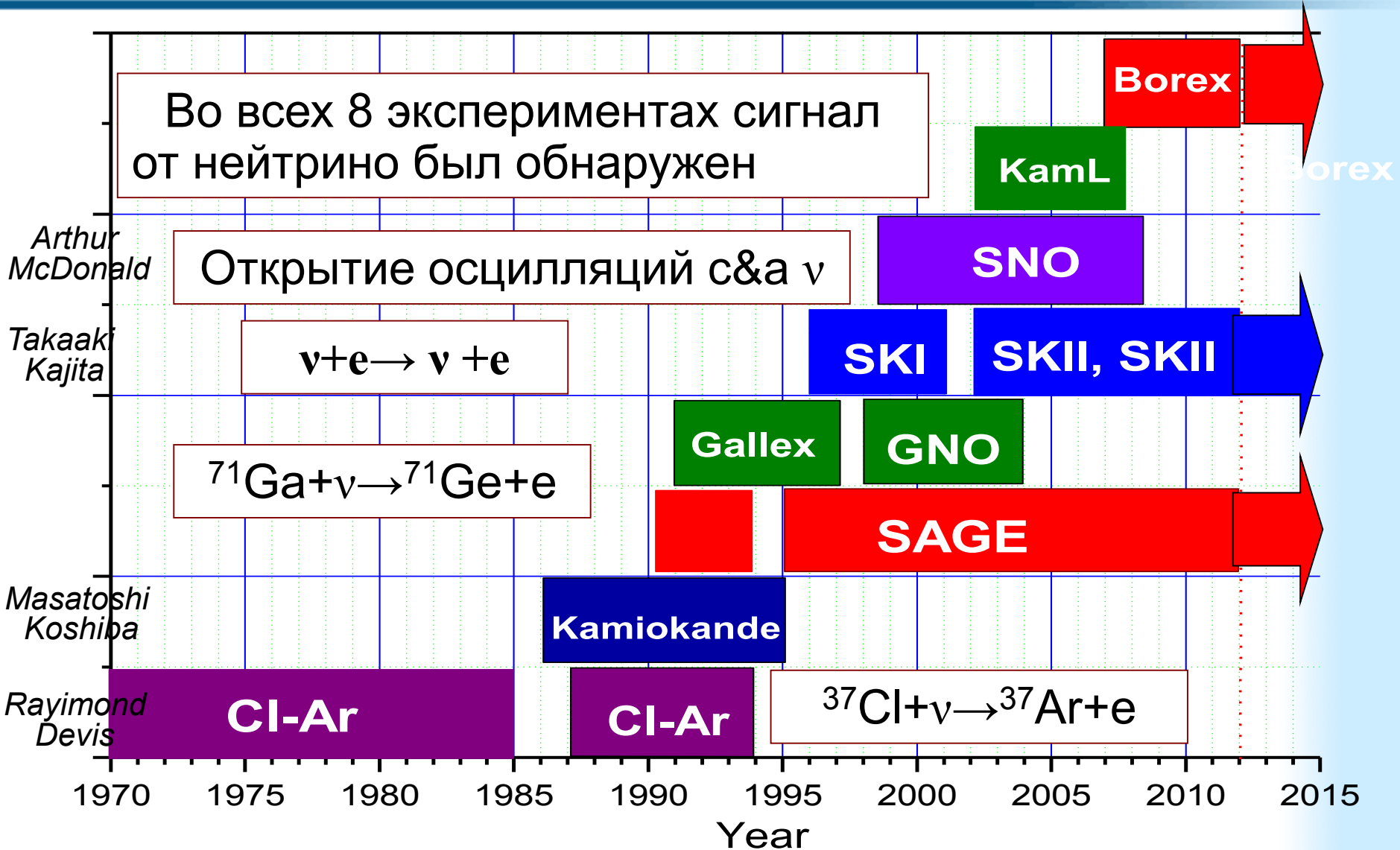
Солнце производит энергию путем превращения водорода в гелий. Полная выделяемая энергия **26.7 МэВ**, из которой **0.6 МэВ** уносят нейтрино. 99% энергии производится в pp-цепи, и менее 1% дает CNO-цикл

Спектры и потоки солнечных нейтрино



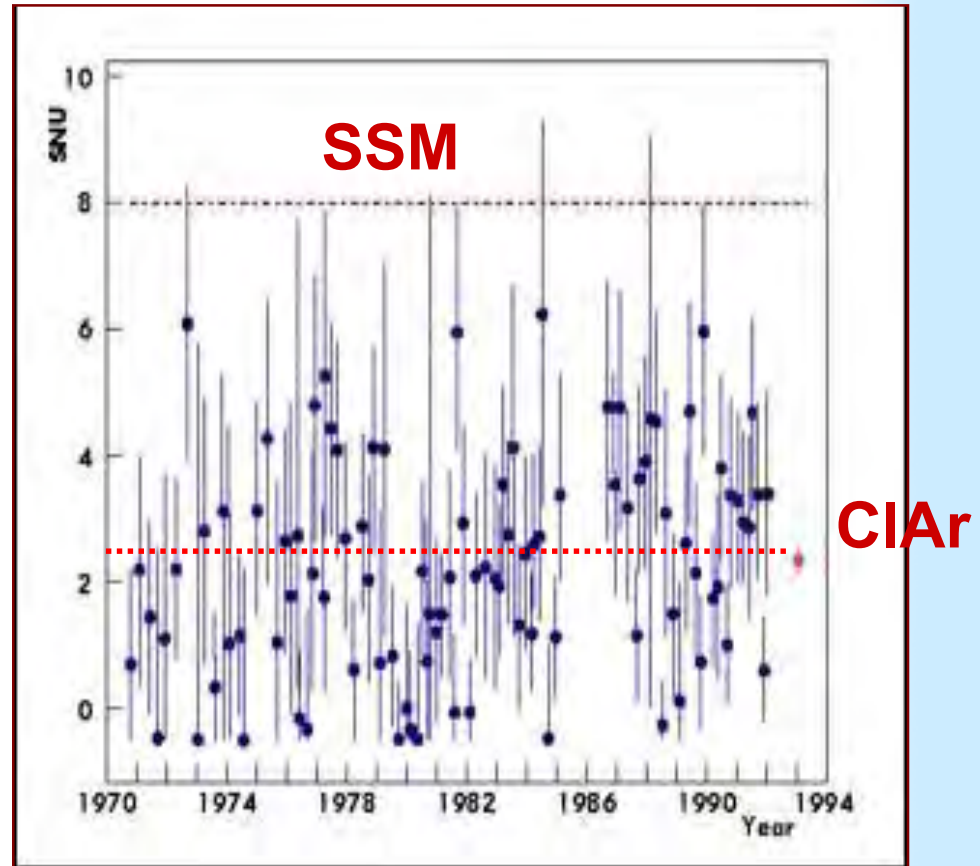
Спектры и потоки нейтрино были вычислены на основе Солнечной Модели. Непр. и моно. Наиболее интенсивный поток pp-нейтрино составляет $6 \cdot 10^{10}$ $\nu/\text{cm}^2/\text{сек}$, ^7Be – нейтрино – $5 \cdot 10^9$, ^8B -нейтрино - $6 \cdot 10^6$. Реактор – 10^{13} $\nu/\text{cm}^2/\text{сек}$.

Хронология детекторов солнечных нейтрино



Солнечные нейтрино регистрировались 3-мя радиохимическими и 5 RT детекторами

Cl-Ar детектор: $\nu_e + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^-$



Нехватка нейтрино впервые обнаружилась в Cl-Ar эксперименте Дэвиса. Метод регистрации предложил Б. Понтекорво. Измеренная скорость образования ${}^{37}\text{Ar}$ (5 ат /месяц 615 т) составила $\sim 1/3$ от предсказываемой ССМ. Возникает проблема солнечных нейтрино.

SAGE, GALLEX/GNO: $\nu_e + {}^{71}\text{Ga} \rightarrow {}^{71}\text{Ge} + e^-$

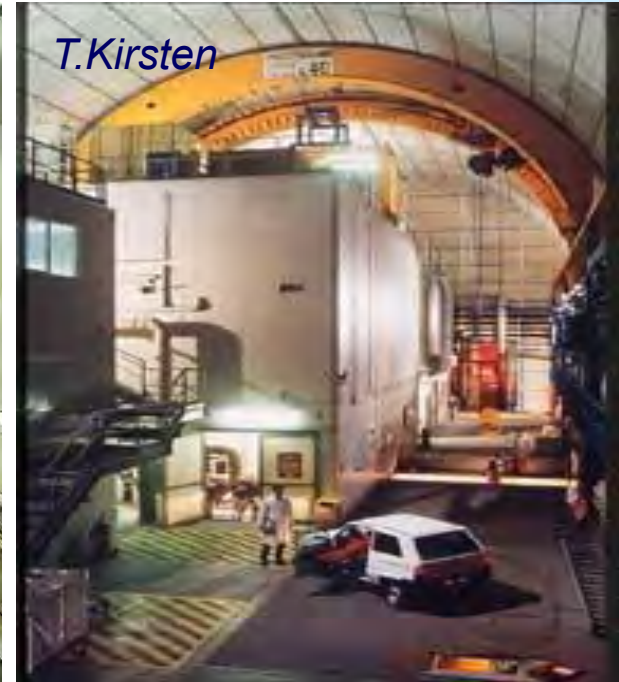
SAGE - радиохимический Ga-Ge эксперимент в Баксанской нейтринной обсерватории продолжает измерения

GALLEX/GNO в Гран Сассо 1991-2003

Г.Т. Зацепин, В.Н. Гаврин



T.Kirsten



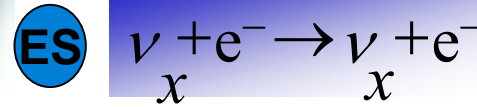
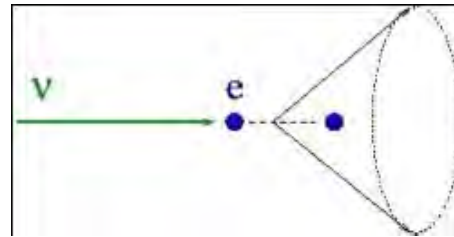
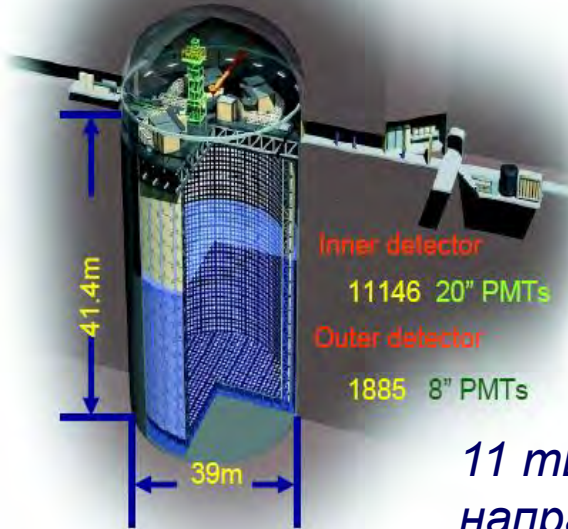
$65.4^{+3.1}_{-3.0} \quad ^{+2.6}_{-2.8} \text{ SNU}$

предложил
В. Кузьмин

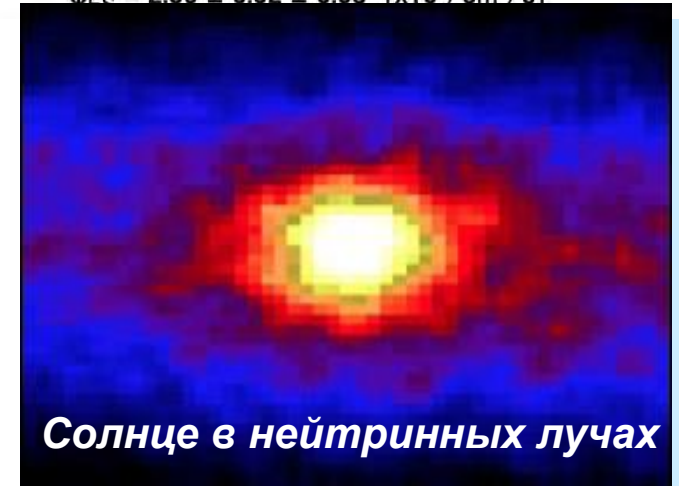
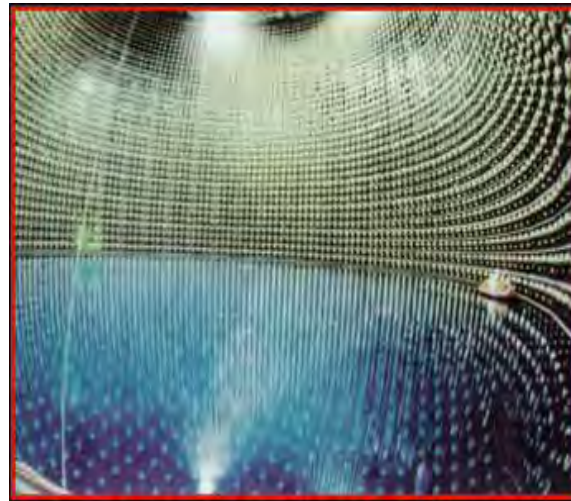
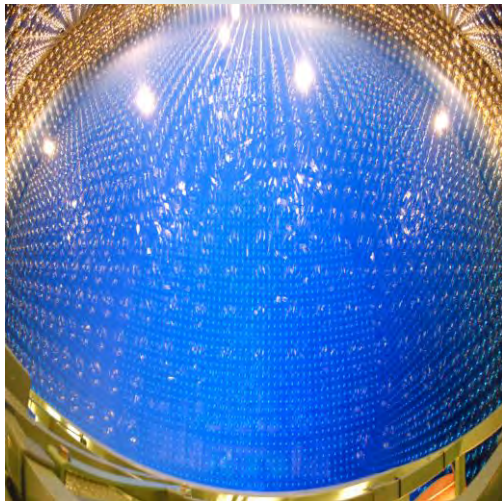
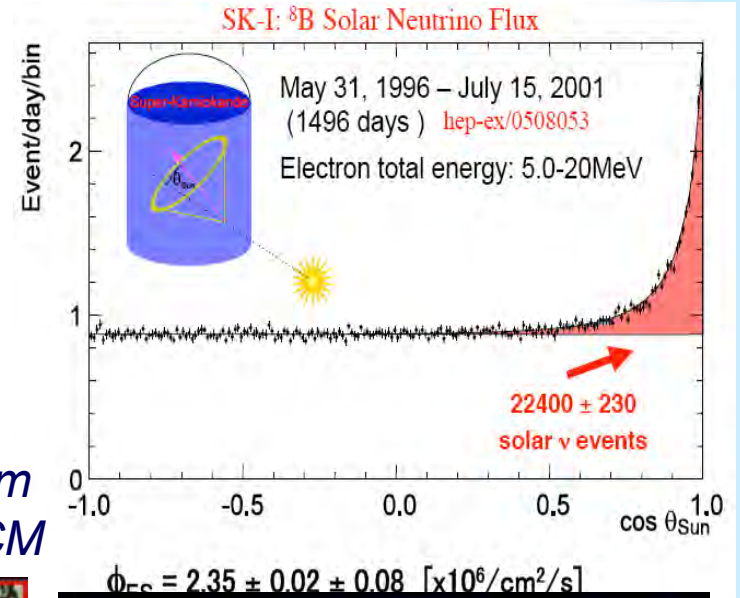
$67.6^{+4.0}_{-4.0} \quad ^{+3.2}_{-3.2} \text{ SNU}$

Детекторы SAGE и GALLEX (1990 г.), массой 50 и 30 т, в которых ν превращали Ga в Ge, подтвердили дефицит нейтрино, но величина не **0.33**, а **0.55**

Kamiokande, S-Kamiokande – H₂O детектор



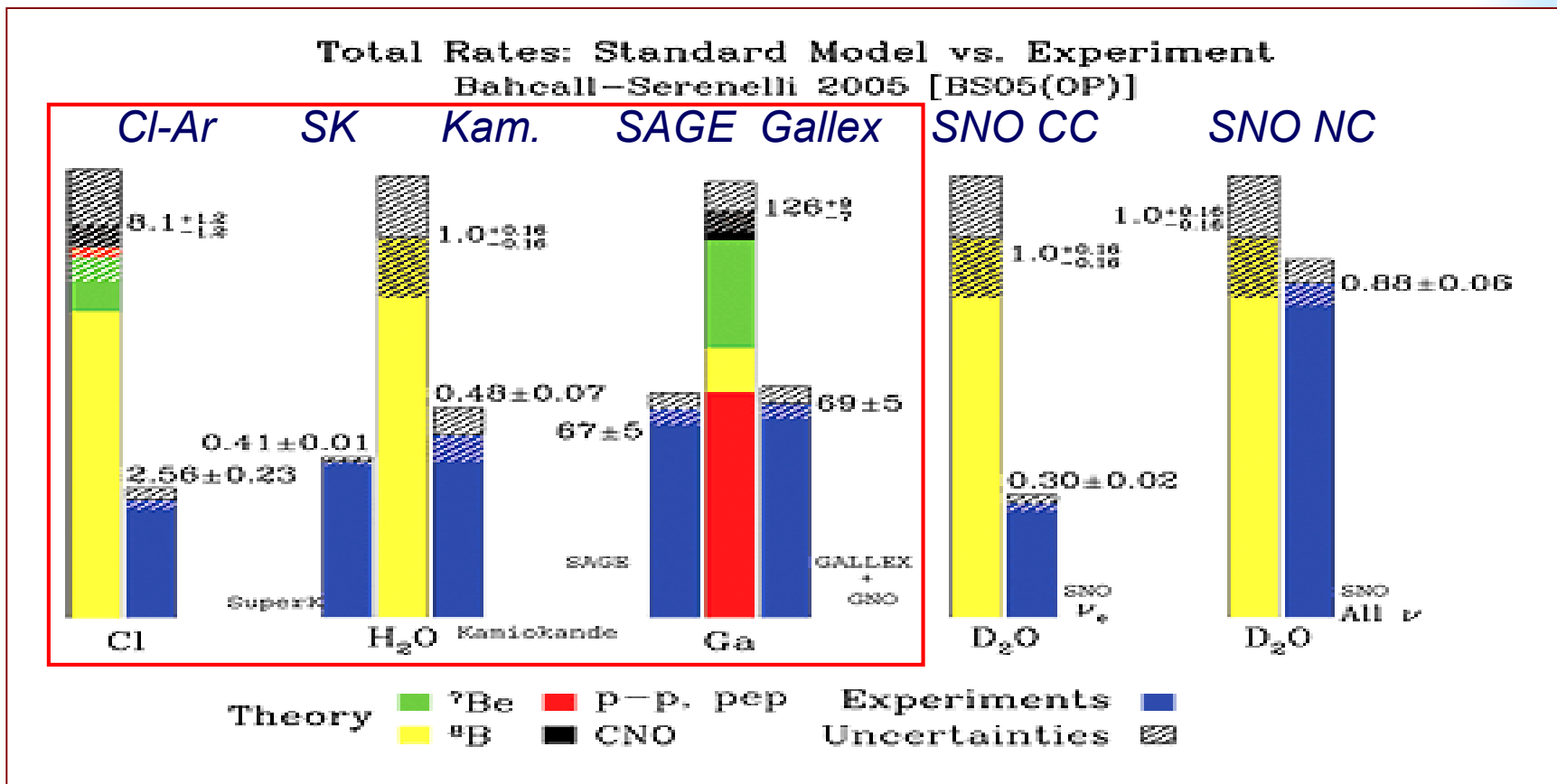
11 тыс. ФЭУ регистрируют направление и $\sim R = 0.45$ CCM



Недостаток (**0.45 CCM**) был подтвержден черенковскими детекторами K и S-K. Ситуация была сложной – для разных детекторов дефицит был разный.

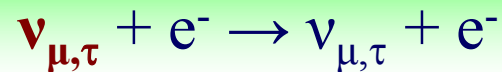
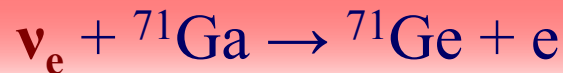
Проблема солнечных нейтрино

1. **Потоки нейтрино, измеренные Cl-Ar, Ga-Ge, K и SK лежат в интервале (0.3-0.6) от ожидаемых в СМ и не согласуются между собой.**
2. **Различные детекторы регистрируют разные части нейтринного спектра**
3. **Детекторы Cl-Ar и Ga-Ge регистрируют только электронные ν , SK и Kamiockande регистрирует нейтрино всех типов, однако $\sigma_{\nu_e} / \sigma_{\nu_{\mu}} = 7$.**

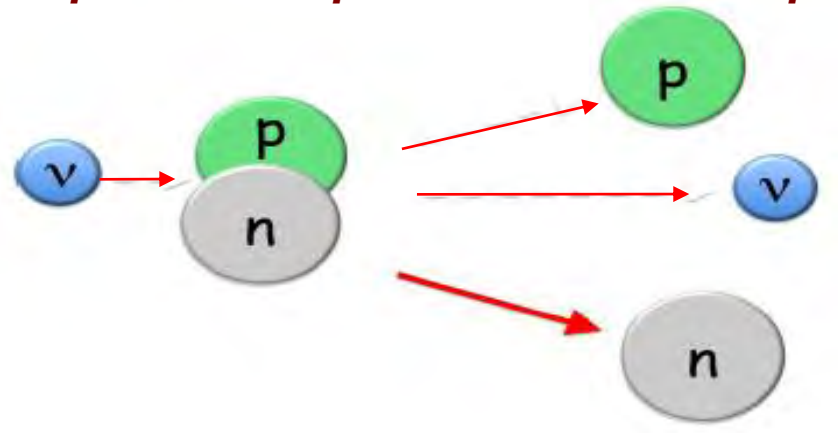
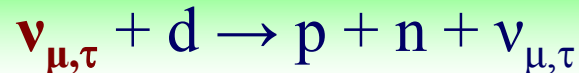
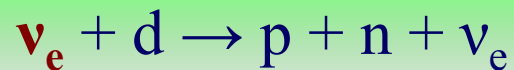
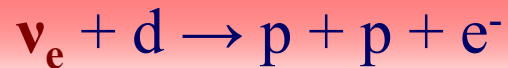


Детектор на тяжелой воде - SNO

Cl-Ar и Ga-Ge детекторы регистрировали только электронное нейтрино. KamiokaNDE и S-KamiokaNDE, в основном (86%), регистрировали e-нейтрино

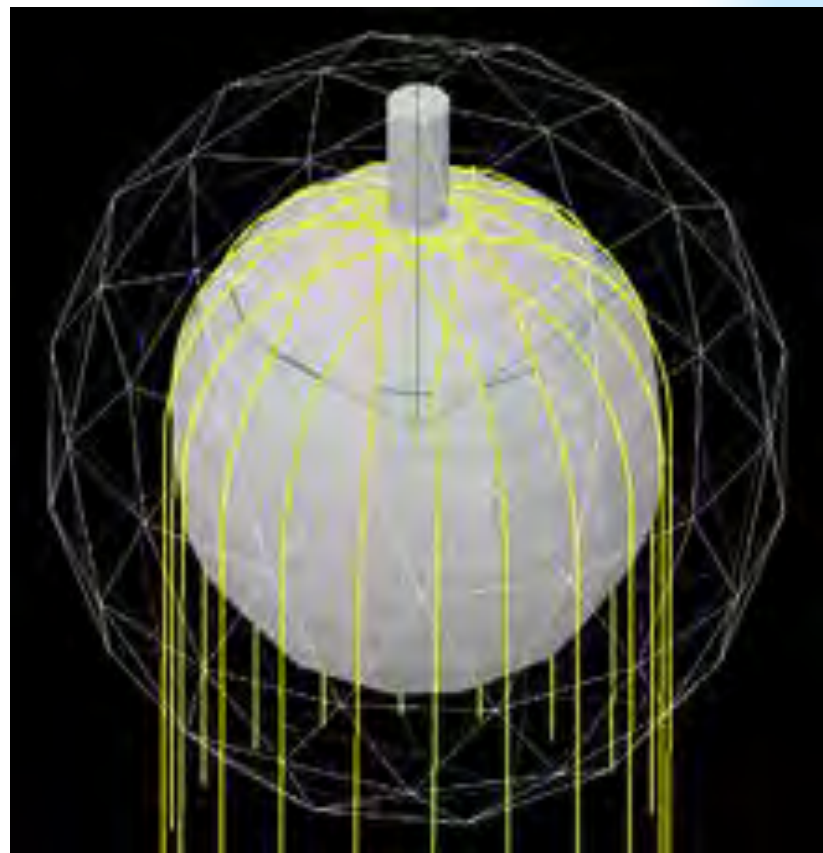


взаимодействие с дейтроном – ядром дейтерия -изотопа водорода



Решающий шаг сделан в эксперименте SNO (А. Макдоналд) Появилась реакция, которая имеет одинаковую вероятность (сечение) для нейтрино любого типа – развал ядра дейтрона нейтральными токами. И это реакция имела характерный признак – появление нейтрона.

SNO - детектор с тяжелой водой



SNO расположена на глубине 6 000 м.в.э. SNO содержит 1 кт D₂O в акриловой сфере d=12 м. 9500 ФЭУ смонтированы на ажурной конструкции d=17 м и обеспечивают 60 % геометрическую эффективность. Пустота, внутри которой находится акриловая сфера, заполнена 70 кт воды, для поддержки сферы и для подавления внешней γ - и n -активности.

SNO - Sudbury Neutrino Observatory

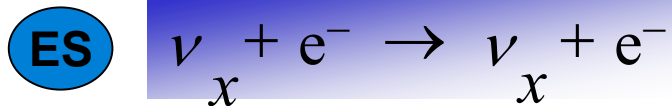
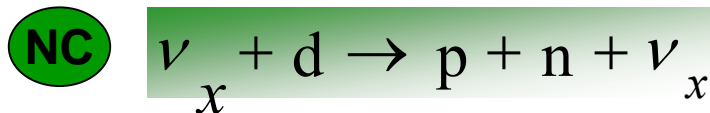
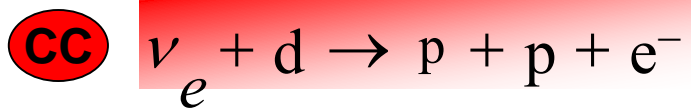
1000 тонн D_2O

9500 ФЭУ (~60% поверхности)

1700 тонн внутренняя защита H_2O

5300 тонн внешней защиты H_2O

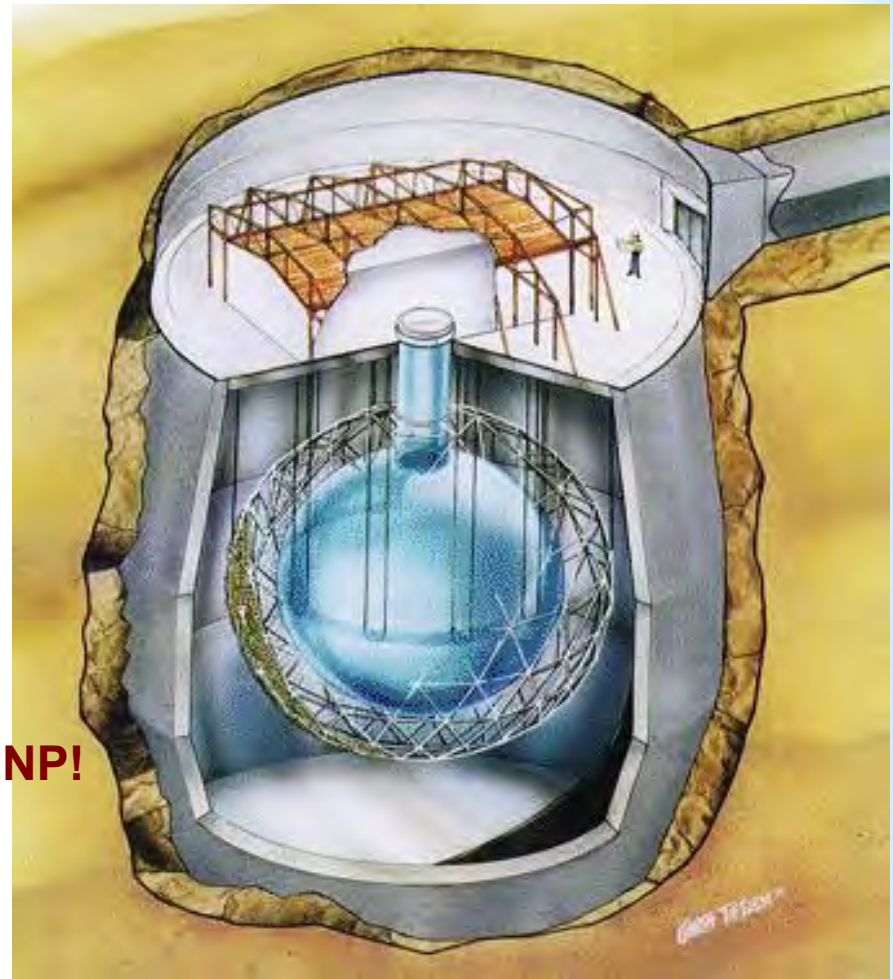
глубина: 6000 м.в.э..



$$\frac{\phi_{CC}}{\phi_{NC}} = 0.340 \pm 0.023_{(stat.)}^{+0.029}_{-0.031}$$

$$\phi_{NC} = (4.94 \pm 0.21_{(stat.)}^{+0.38}_{-0.34}) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

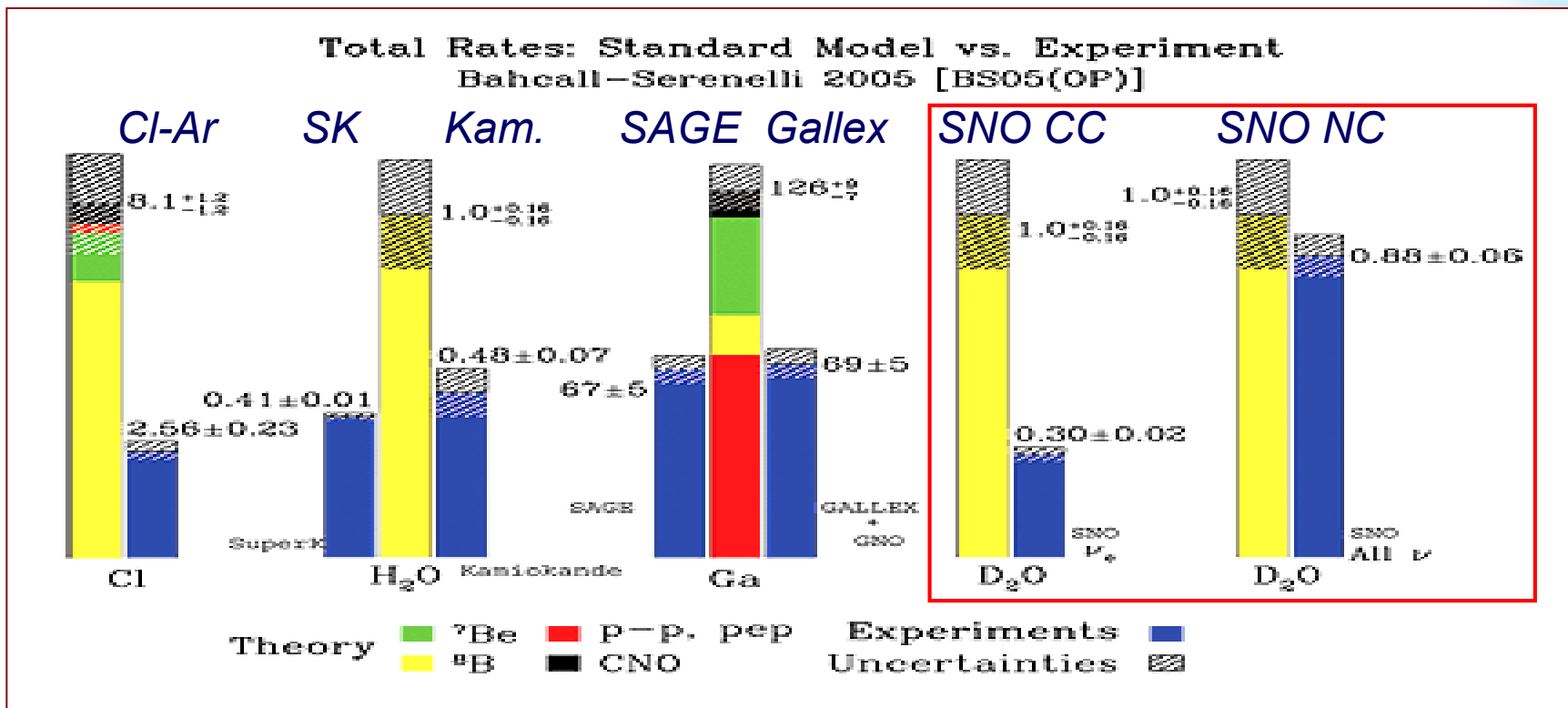
NP!



Детектор работал с мая 1999 по ноябрь 2006. Первый результат, опубликованный в 2002 году, показал, что нейтрино осциллируют. Поток ν_e -нейтрино, зарегистрированных через нейтральный ток, соответствует предсказаниям ССМ, через заряженный ~ 1/3 от ССМ. **Cl- и ^3He -вариант для ν_e**

SNO 2002 – нейтрино меняет флейвор!

1. Поток нейтрино, измеренные Cl-Ar, Ga-Ge, SK лежат в интервале (0.3-0.6) от ожидаемых в ССМ и не согласуются между собой.
2. Различные детекторы регистрируют разные части нейтринного спектра
3. Детекторы Cl-Ar и Ga-Ge регистрируют только электронные ν , SK регистрирует нейтрино всех типов, однако $\sigma_{\nu_e} / \sigma_{\nu_{\mu}} = 7$.



Синий – эксперимент. Результат SNO для нейтрального тока совпал с предсказаниями ССМ. Доля ν_e составила 1/3 от общего потока нейтрино.

Осцилляции солнечных ν после SNO

После результата **SNO** стало ясно, что ν_e превращаются в ν_μ и ν_τ . Но вопросы оставались:

1) каковы параметры осцилляций Δm_{12}^2 и $\text{Sin}^2\theta_{12}$? Какое решение LMA или LOW правильное?

2) почему и как доля ν_e , достигающих Земли, зависит от энергии нейтрино?

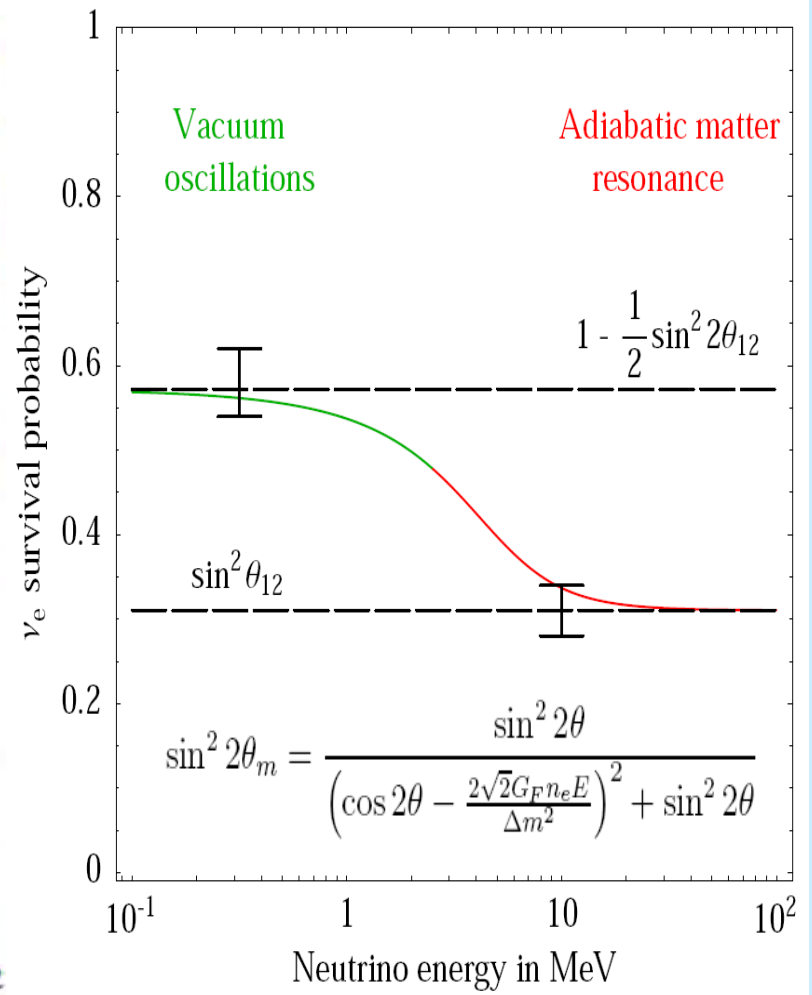
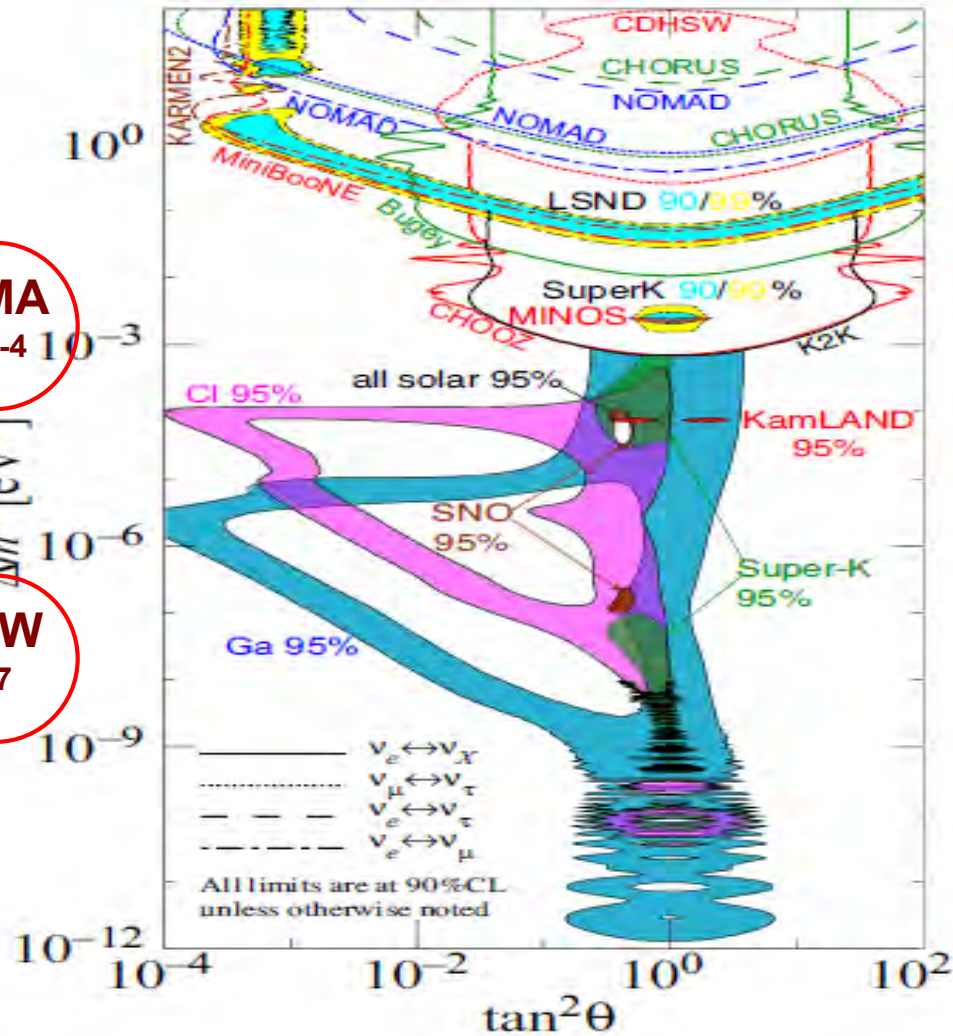
1) эксперимент KamLAND подтвердил LMA MSW решение для антинейтрино и определил $\text{Sin}^2(2\theta)$ и Δm^2 . Эксперимент Borexino подтвердил LMA решение для нейтрино.

2) теоретические работы С.Михеева, А.Смирнова и И. Вольфенштейна по осцилляциям в веществе Солнца, основанные на работе Б. Понтекорво и В. Грибова по осцилляциям в вакууме, предсказали поведение вероятности наблюдения электронных нейтрино от энергии. Эта зависимость была измерена SK, SNO, SAGE, GALLEX и BOREXINO.

LMA MSW

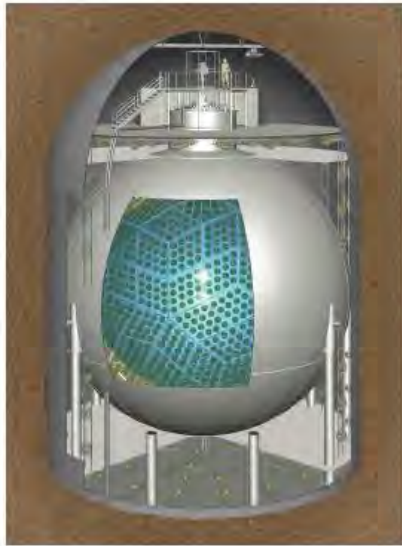
Осцилляционные решения для солнечных нейтрино

LMA
 10^{-4}
 LOW
 10^{-7}

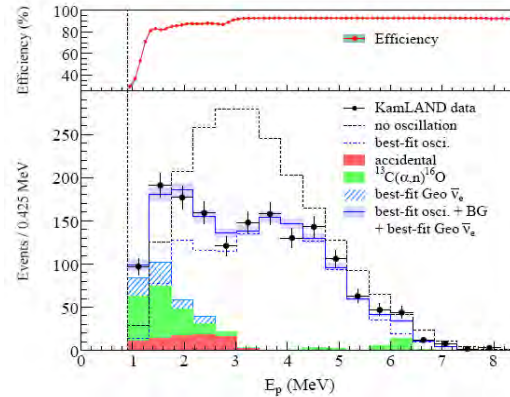
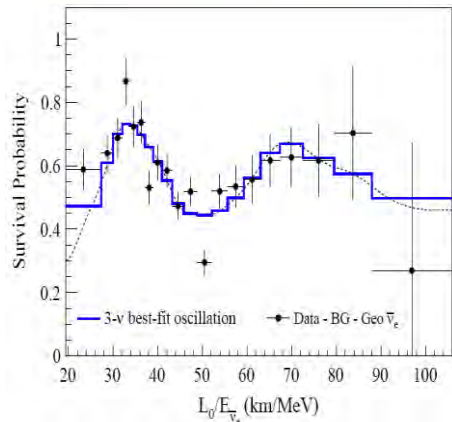


После SNO оставались 2 решения. Плюс модель спин-флейворной прецессии. Зависимость P_{ee} (вероятность «выживания») от энергии нейтрино.

KamLAND – детектор реакторных антинейтрино

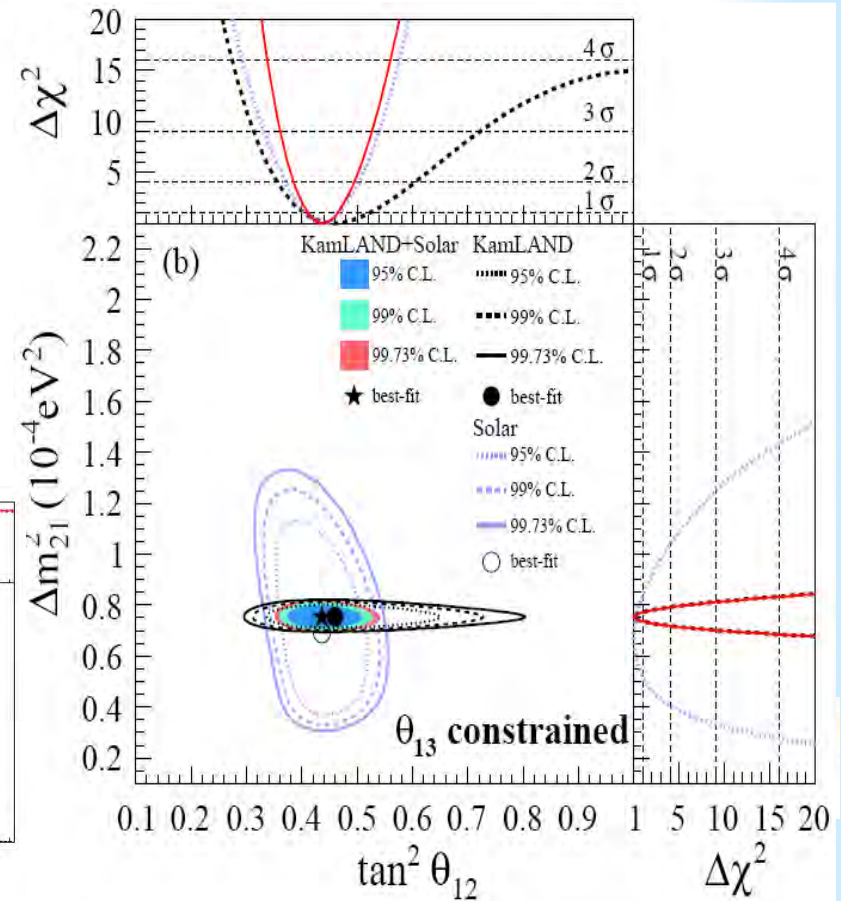


- 1 kton of liquid scintillator
 - 80% dodecane, 20% pseudocumene
 - 1.36 ± 0.03 g/l of PPO
 - density: 0.78 g/cm³
- Spherical balloon
 - radius: 6.5m
 - thickness: $135 \mu\text{m}$
- Stainless-steel Sphere
 - radius: 9m
 - 1879 PMTs
 - 1325 new 17" PMTs
 - 554 old 20" PMTs (Kamiokande)
- Outer detector
 - 3.2 kton water-Cherenkov



$$\Delta m_{21}^2 = (7.53 \pm 0.18) \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$\text{Sin}^2(2\theta_{12}) = 0.846 \pm 0.021$$



KamLAND (1км) начал измерения в 2002 и через 145 дней представил первый результат, который выбрал LMA решение для антинейтрино.

Грибов, Понтекорво - Михеев, Смирнов

Volume 28B, number 7

PHYSICS LETTERS

20 January 1969

Для объяснения Cl-Ar результата угол смешивания близок к максимальному $\theta \approx \pi/4$ и больше, чем в кварковом секторе

NEUTRINO ASTRONOMY AND LEPTON CHARGE

V. GRIBOV* and B. PONTECORVO

Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, USSR

Received 20 December 1968

It is shown that lepton nonconservation might lead to a decrease in the number of detectable solar neutrinos at the earth surface, because of $\nu_e \rightleftharpoons \nu_\mu$ oscillations, similar to $K^0 \rightleftharpoons \bar{K}^0$ oscillations. Equations are presented describing such oscillations for the case when there exist only four neutrino states.

ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА
JOURNAL OF NUCLEAR PHYSICS
т. 42, вып. 6(12), 1985

Для объяснения Cl-Ar результата угол смешивания мал $\theta \approx 0.01$, но за счет MSW-эффекта подавление потока ν_e

РЕЗОНАНСНОЕ УСИЛЕНИЕ ОСЦИЛЛЯЦИЙ В ВЕЩЕСТВЕ И СПЕКТРОСКОПИЯ СОЛНЕЧНЫХ НЕЙТРИНО

МИХЕЕВ С. П., СМИРНОВ А. Ю.

ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ АН СССР

(Поступила в редакцию 4 декабря 1984 г.)

Вещество может усиливать нейтринные осцилляции (увеличивать параметр смешивания $\sin^2 2\theta_m$). При малых углах смешивания в вакууме усиление носит резонансный характер по энергиям нейтрино или по плотности среды. В широком интервале осцилляционных параметров $\Delta m^2 = 10^{-4} \div 10^{-8}$ эВ² и $\sin^2 2\theta > 10^{-4}$ этот резонансный эффект существен для солнечных нейтрино. Он приводит к сильному подавлению нейтринного потока даже при малых $\sin^2 2\theta$.

$$\nu(x, t) = \exp[i(px - Et)] | \nu(0) \rangle \quad ipx \Rightarrow ipxn \quad n_i = 1 + (2\pi N / p^2) f_i(0)$$

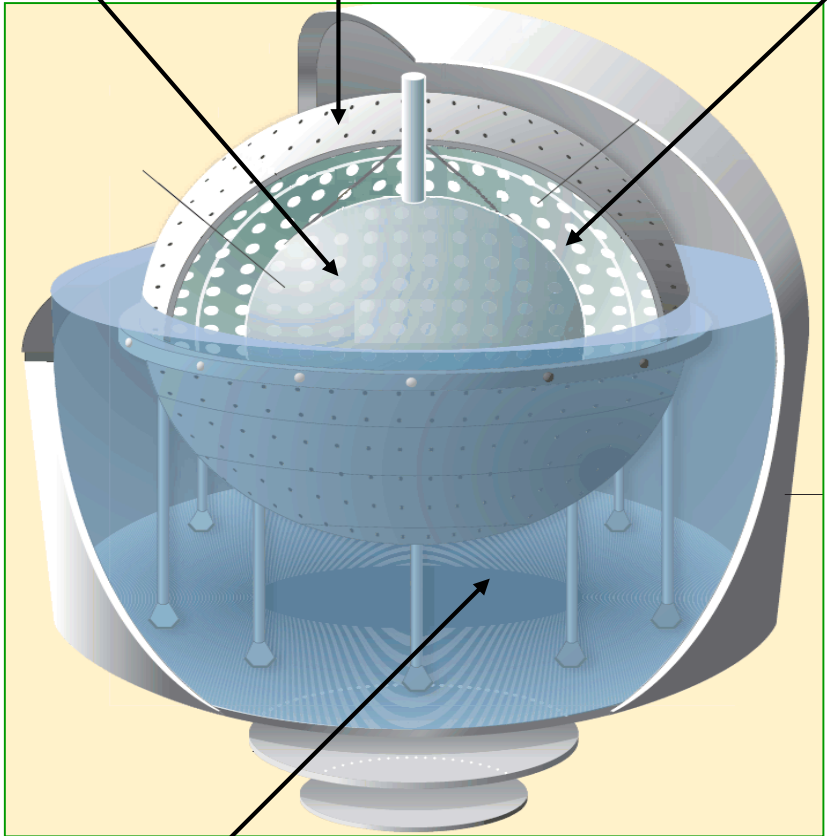
$P_{ee}(E)$ Вместе, обе работы решают проблему солнечных нейтрино

Детектор БОРЕКСИНО (BOREXINO)

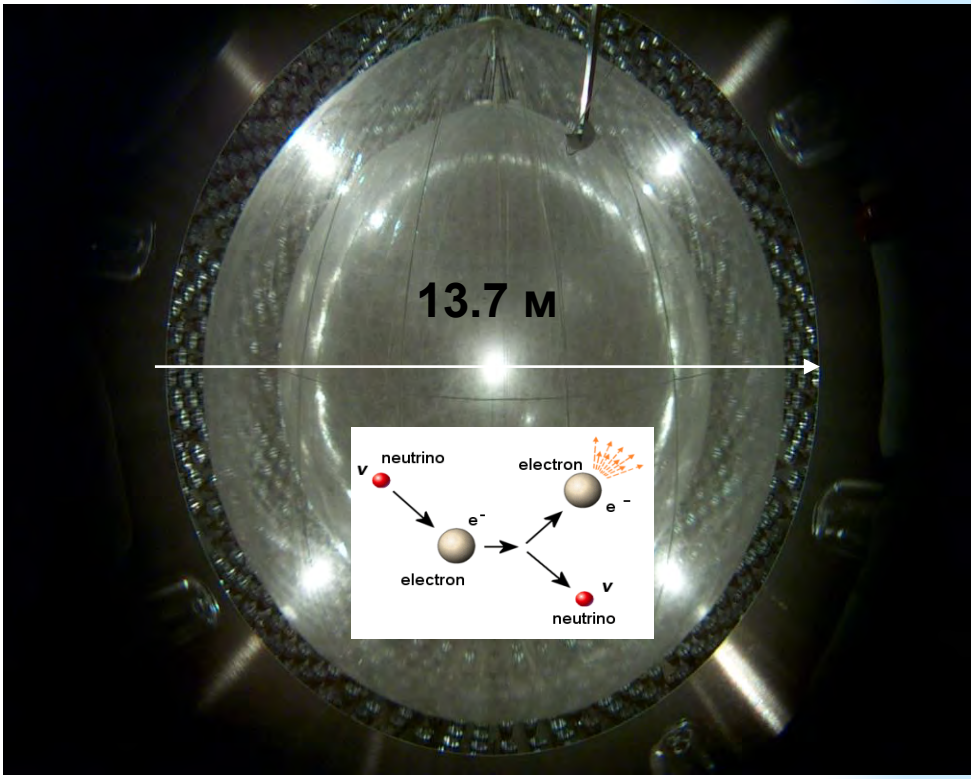
278 т. PC+PPO
(1,5 г/л)

Стальная сфера (R=6,85 м)
- 2212 8" ФЭУ;
- 1350 м³ PC+DMP (5,0 г/л)

Две 125 мкм нейлоновые сферы:
- R=4,25 м; - R=5,5 м (Rn-барьер)



2100 м³ водяной бак: R=9 м, H=16,9 м;
- 208 ФЭУ в воде, смотрящих наружу;
- защита от μ , γ и n



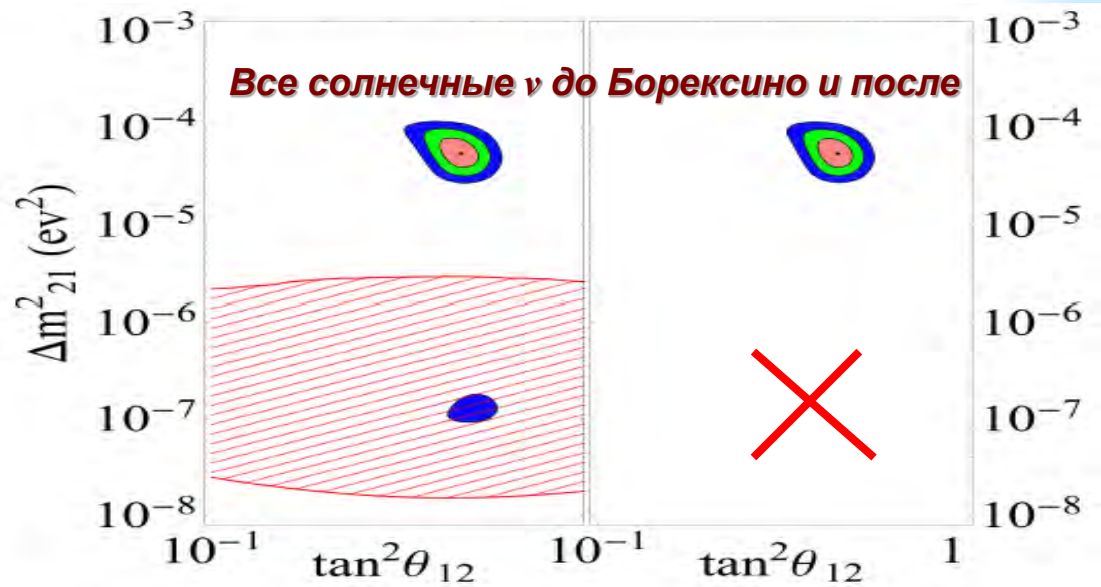
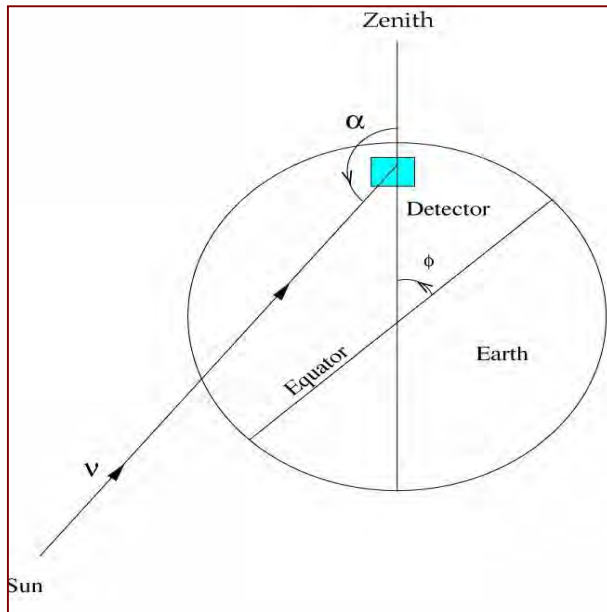
Сцинтилляционный детектор с рекордной степенью очистки PC, созданный для регистрации низкоэнергетических ν . Выбор LMA для нейтрино и определение P_{ee} .

Осцилляции ${}^7\text{Be}$ -нейтрино в Земле (эффект день-ночь)

${}^8\text{B}$ нейтрино **MSW LMA** предсказывает $\sim 2\%$ асимметрию $A_{\text{dn}} = 2(R_n - R_d)/(R_n + R_d)$

Измеренные значения - SNO : $A_{\text{nd}} = 0.037 \pm 0.040$ SKI: $A_{\text{nd}} = 0.021 \pm 0.020$

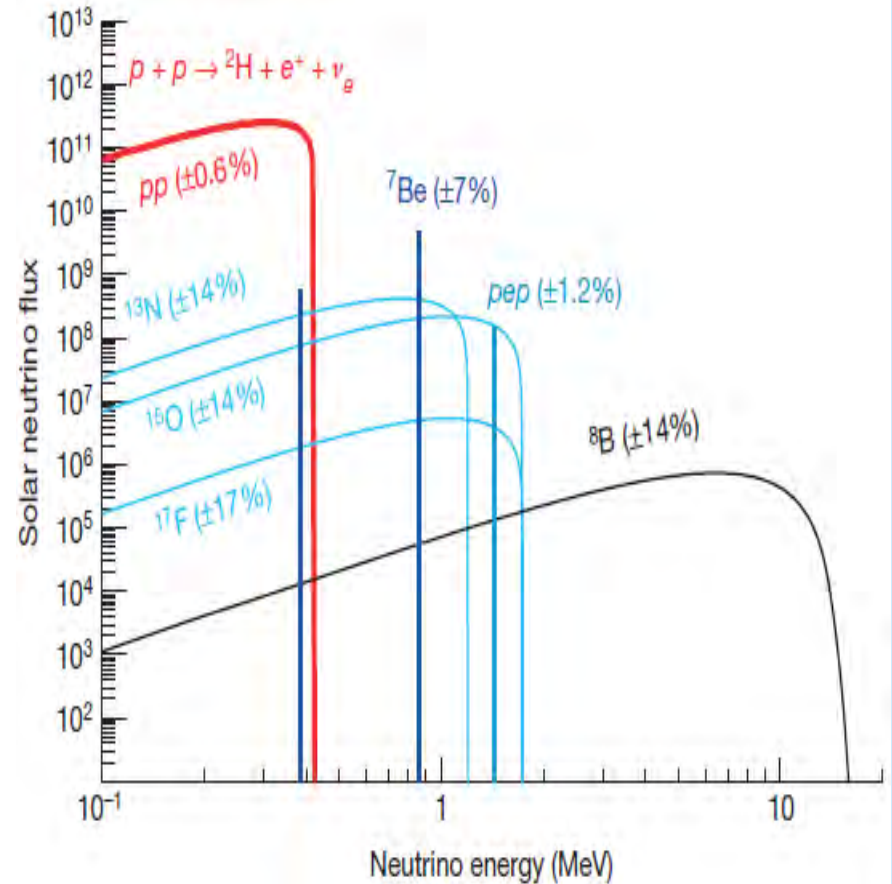
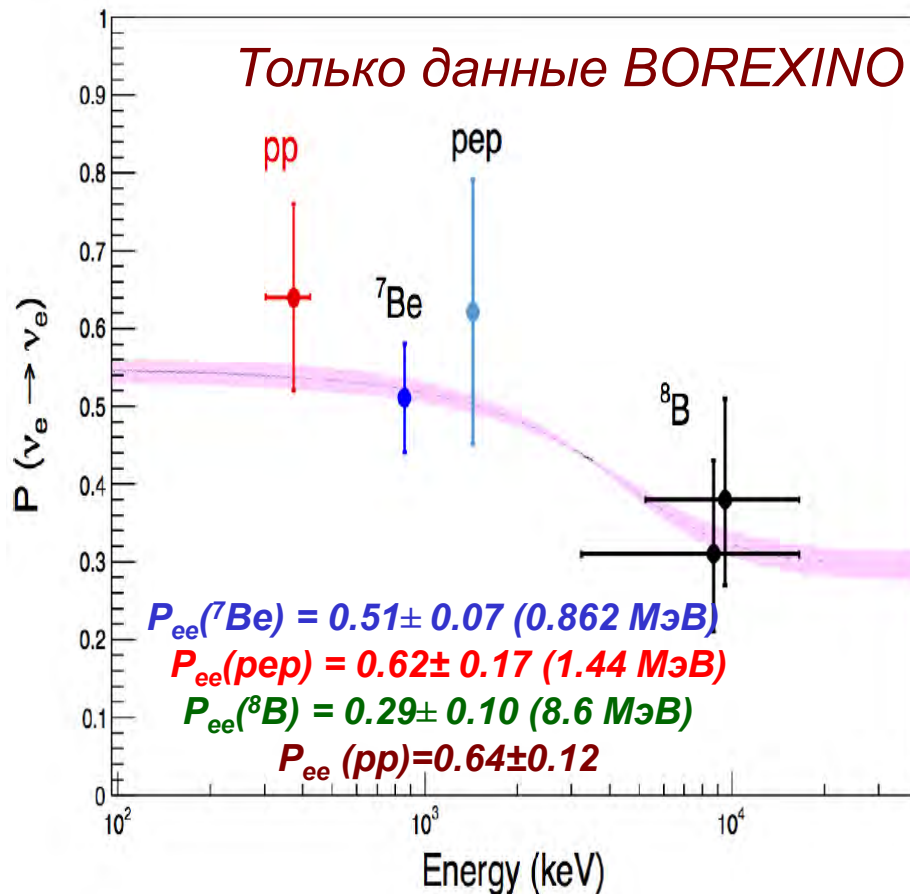
${}^7\text{Be}$ нейтрино **MSW LMA** $A_{\text{dn}} = +0.1\%$ **MSW LOW** $A_{\text{dn}} = (11-80)\%$



Не обнаружено асимметрии в энергетическом и угловом распределении на уровне $A_{\text{dn}} = 0.001 \pm 0.012 \pm 0.007$. Решение **LOW** отвергается на 8.5σ .

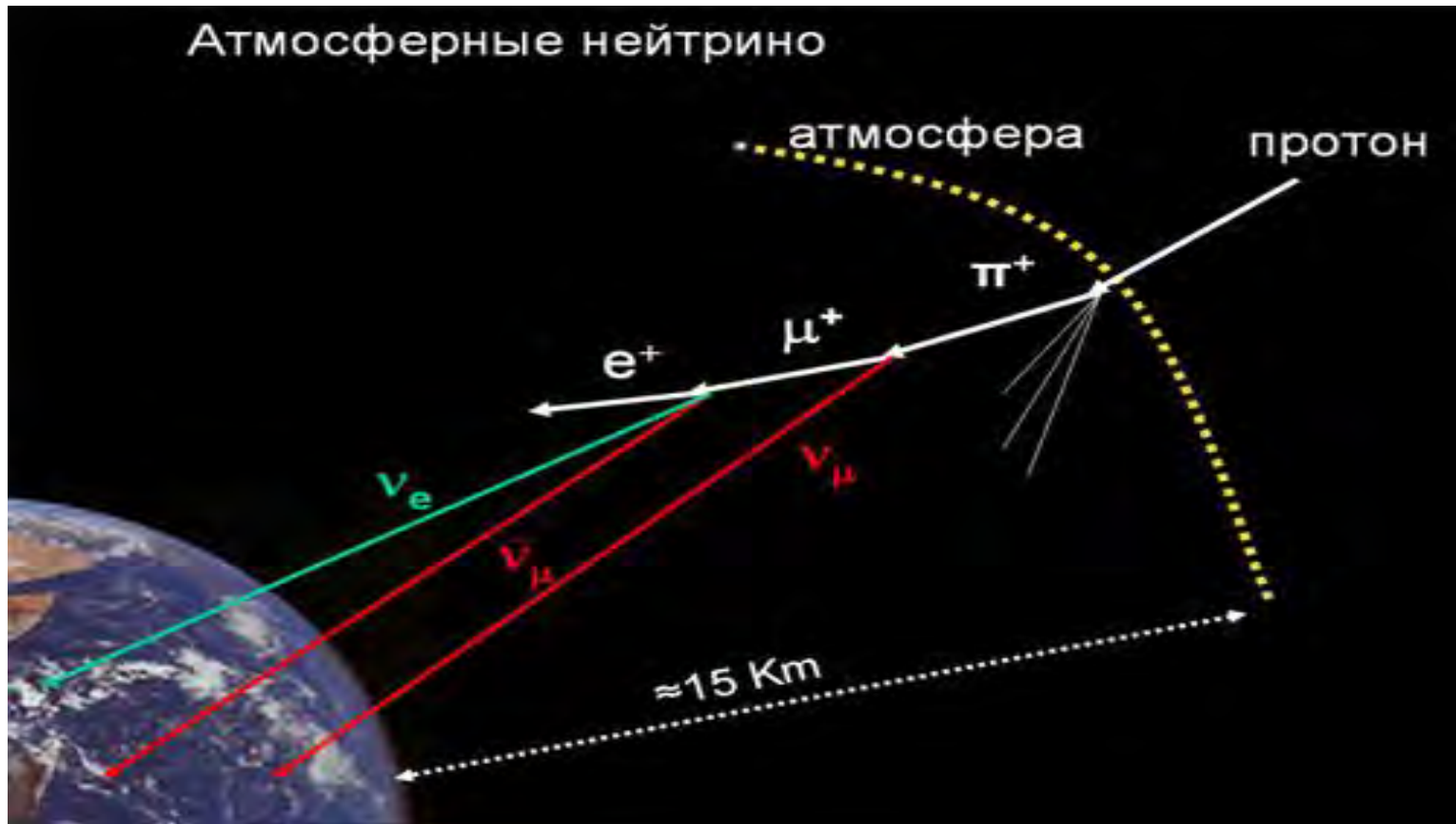
LMA решение устанавливается без предположения о CPT-сохранении в нейтринном секторе

Вероятность «выживания» электронного нейтрино



Borexino измерил потоки и спектры всех солнечных нейтрино из pp -цепочки. Впервые в одном эксперименте определены доли электронных нейтрино для энергетических интервалов с различным влиянием вакуумных осцилляций и осцилляций в веществе. **LMA MSW осцилляционное решение!**

Аномалия атмосферных нейтрино



В атмосферу Земли входит поток космического излучения, в основном, протоны (93%), поток которых составляет $\sim 1300 \text{ м}^{-2}\text{ср}^{-1}\text{с}^{-1}$, далее следуют α -частицы (6%) и более тяжелые ядра. Ожидаемое соотношение ν_e -нейтрино к ν_μ -нейтрино должно быть 2 (два) (даже больше, часть мюонов не успевает распасться). Однако отношение $R(\mu/e) = \text{Измеренное } (\mu/e) / \text{предсказанное } (\mu/e) = 0.658 \pm 0.016 \pm 0.035$. Мюонные нейтрино пропадают.

Два детектора видели эту аномалию



MACRO (Monopole, Astrophysics and Cosmic Ray Observatory). Большой прямоугольный модулярный детектор ($76.9 \times 12.3 \times 9.9 \text{ м}^3$). Расположен в Гран-Сассо.



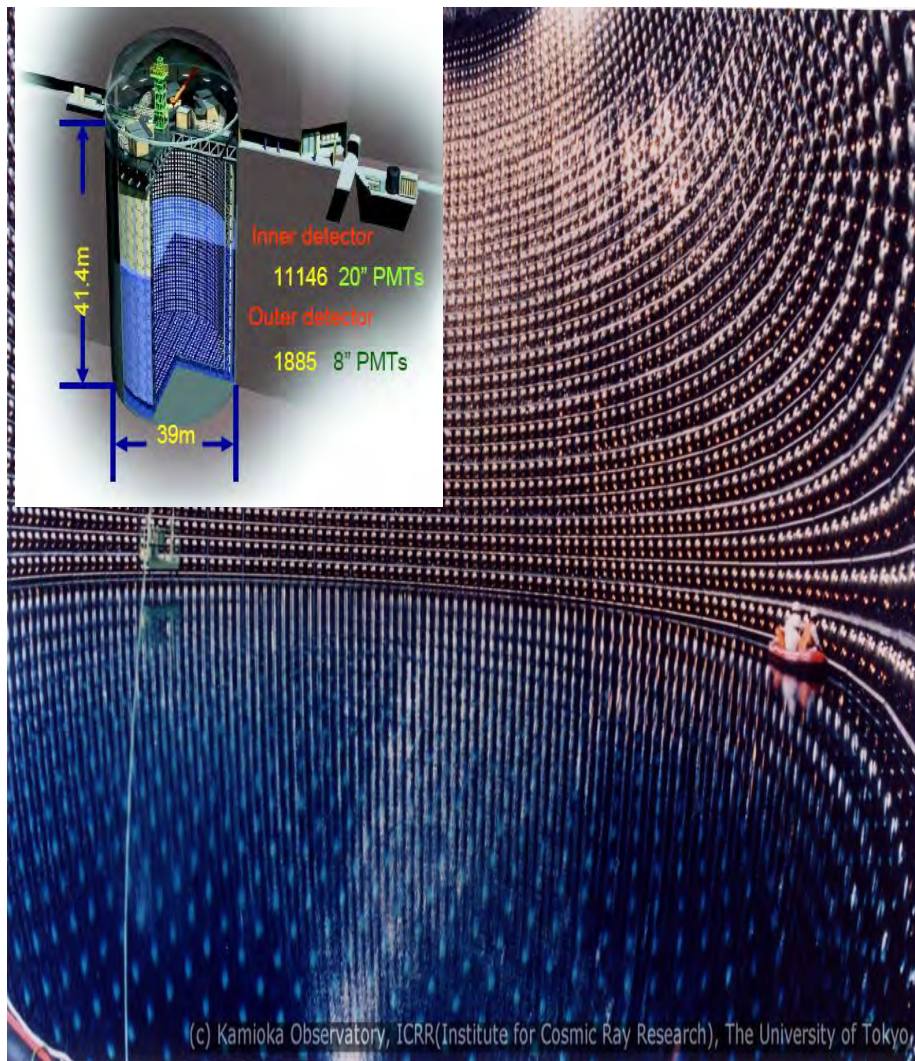
KamiokanNDE (Kamioka Neutron Decay Experiment) 3 тыс. тонн H_2O , цилиндр высотой 16 м и диаметром 16 м, 1050 ФЭУ.

Эксперимент	Экспозиция, 10^3 т год^{-1}	$R'_{\text{exp}}/R_{\text{cal}}$
IMB-3	7,7	а) $0,54 \pm 0,05$
		б) $0,64 \pm 0,07$
Kamiokande II	4,92	а) $0,60 \pm 0,06$
		б) $0,69 \pm 0,06$
Frejus	2,0	$0,87 \pm 0,13$
Soudan II	1,0	$0,64 \pm 0,19$
NUSEX	0,5	$0,96 \pm 0,29$

Неопределенность потоков и формы спекта, а также сечений образования усложняет задачу

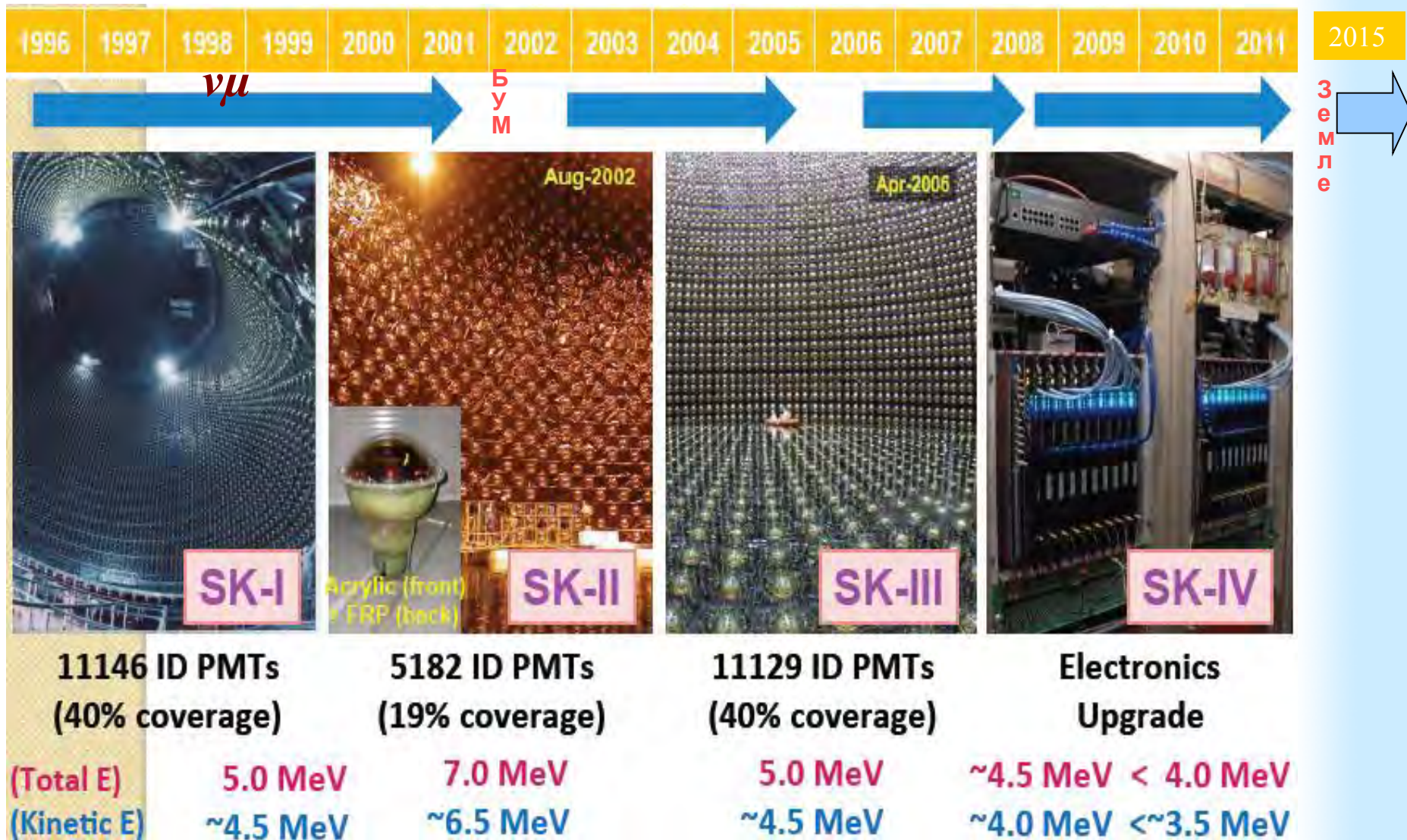
Крупные (кВт) детекторы, созданные в 80-е годы для поиска распада протона (который предсказывали теории Великого объединения), пытались исследовать эту аномалию. Некоторые (IMB, KamiokaNDEII, MACRO) видели, другие такие как Frijus, NUSEX, не видели. Наиболее четко это удалось сделать коллаборации Super-KamiokaNDE с новым 50 кВт детектором.

Детектор Super-KamiokaNDe



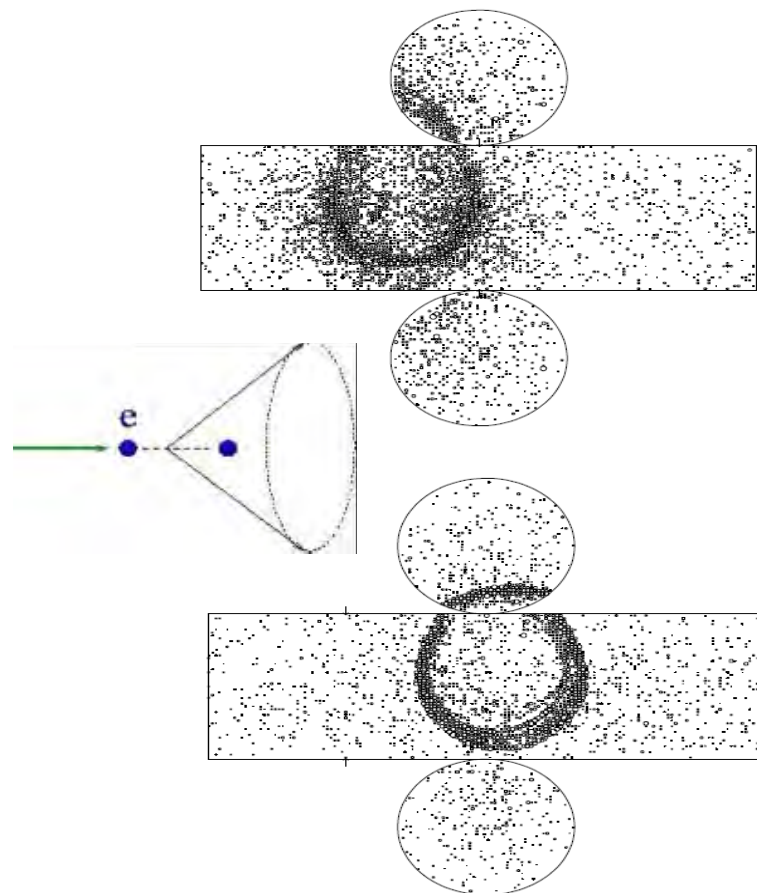
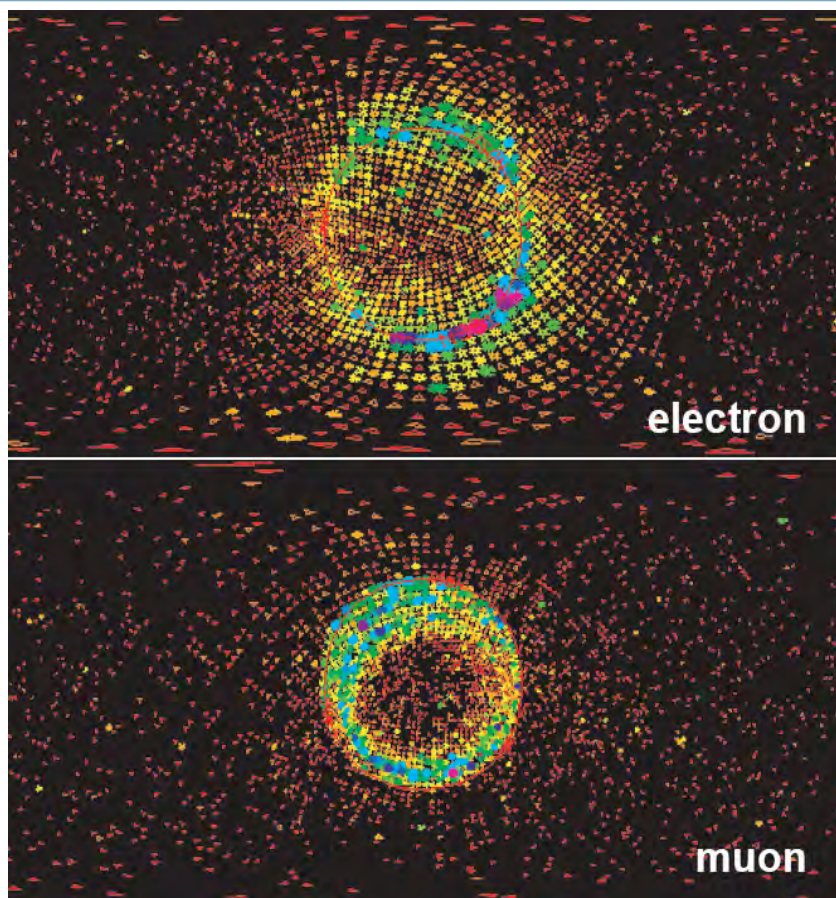
Заполнение детектора и монтаж верхних ФЭУ

Понижение порога регистрации за 19 лет



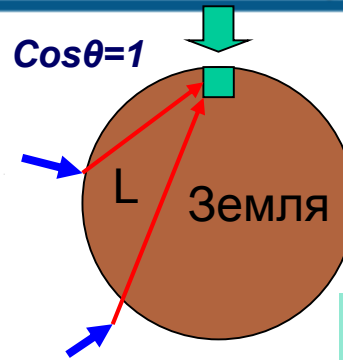
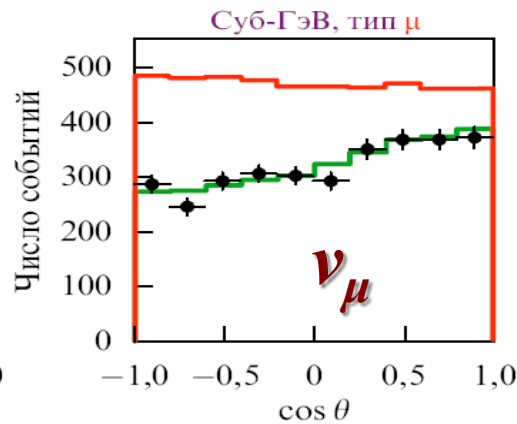
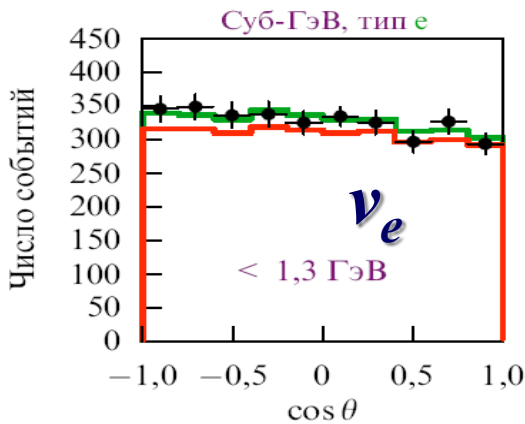
Порог Катиоканде составлял 7.5 МэВ. Порог SK опустился ниже 4 МэВ. 2 инцидента.

Черенковские детекторы могут различить взаимодействие ν_e от ν_μ



Если частица движется быстрее скорости света в среде, наблюдается излучение **Вавилова-Черенкова**. Это излучение фотонов (в том числе в видимой области) в виде конуса. Поскольку мюон (который появляется при взаимодействии μ -нейтрино, имеет большую массу его конус более четкий чем диффузный конус электрона.

Решающий аргумент S-K: Поток ($\nu_{\mu,e}$) vs L и (L/E)

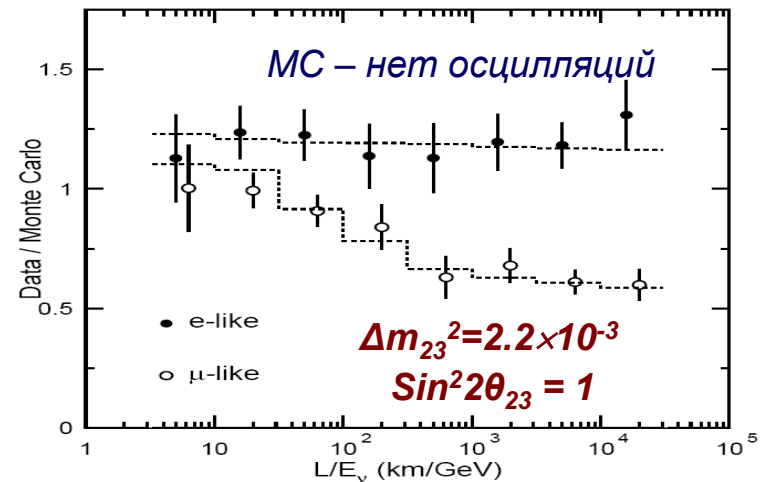
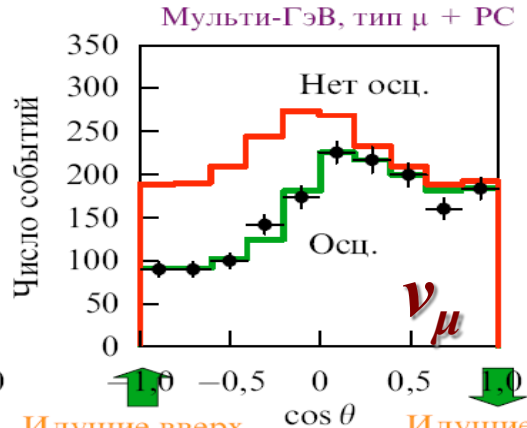
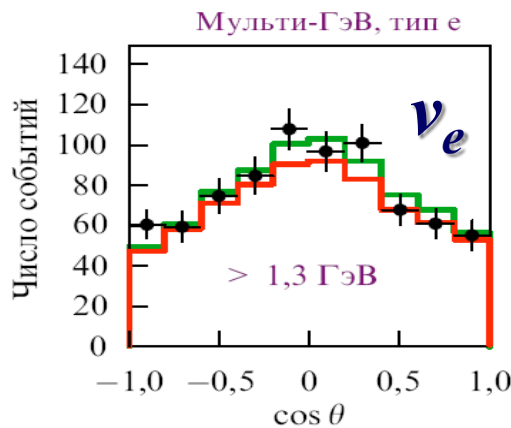


$$L(\text{км}) = 2.5 \frac{E(\text{МэВ})}{\Delta m^2(\text{эВ}^2)}$$

$$\Delta m_{23}^2 = 2.2 \times 10^{-3}$$

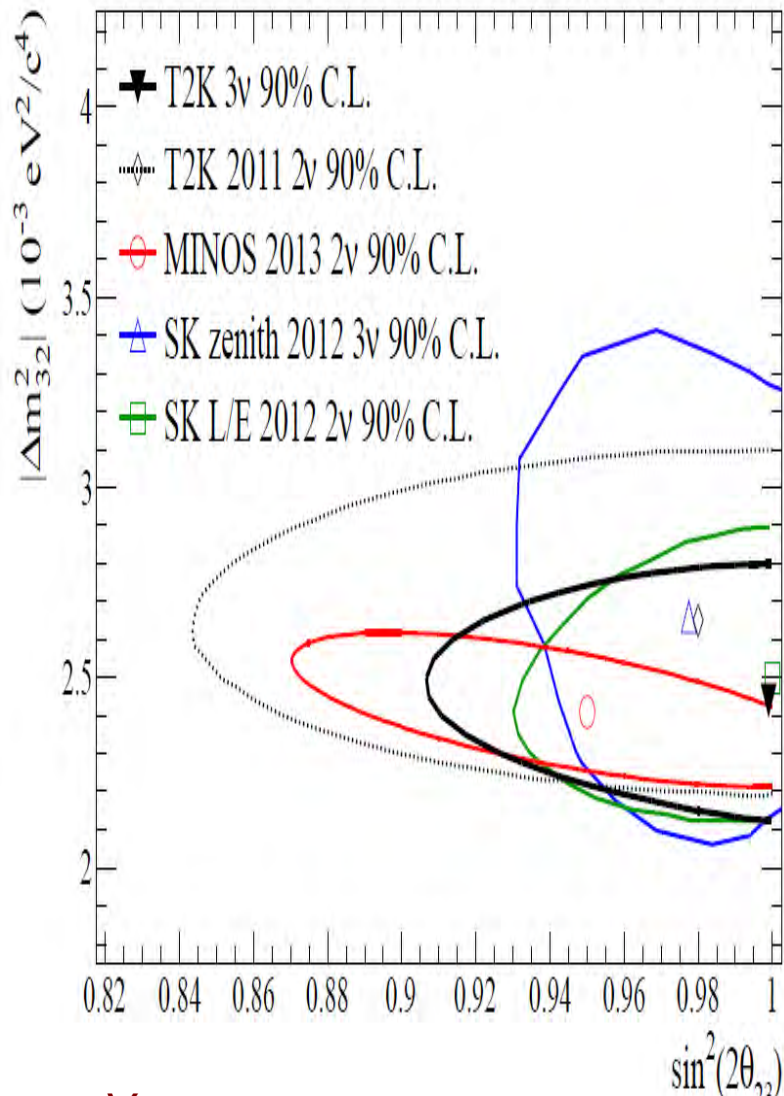
$$\sin^2 2\theta_{23} = 1$$

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_e) = 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\pi R}{L}\right)$$



S-K измерил с высокой точностью (3ЕЗ соб./год) зависимость скорости счета ν_{μ} и ν_e от расстояния L до точки возникновения (от зенитного угла). Нейтрино, пришедшие сверху, проходят расстояние около 20 км. Нейтрино снизу проходят 13000 км. Зависимость потока от отношения L/E позволила определить осцилляционные параметры $\Delta m_{23}^2 = 2.2 \times 10^{-3}$ и $\sin^2(2\theta_{23}) = 1$.

Измерение Δm_{23}^2 и θ_{23} в экспериментах MINOS, T2K, OPERA



$$L(\text{km}) = 2.5 \frac{1 \text{ E}(\text{GeV})}{2.4 \times 10^{-3} (\text{eV}^2)} = 1000(\text{km})$$

$$\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau \text{ и } \nu_e$$



MINOS



OPERA

Ускорительные эксперименты подходят для определения Δm_{23}^2 и θ_{23}

Осцилляции солнечных и атмосферных ν 's:

Позволили измерить две разности масс:

$$\Delta m_{21}^2 = m_2^2 - m_1^2 = (7.53 \pm 0.18) \times 10^{-5} \text{ эВ}^2$$

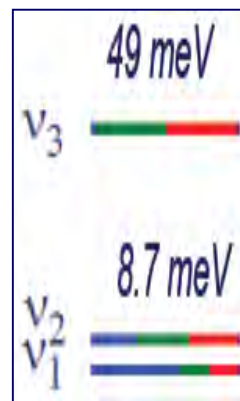
$$\Delta m_{32}^2 = |m_3^2 - m_2^2| = (2.42 \pm 0.06) \times 10^{-3} \text{ эВ}^2$$

и два угла смешивания:

$$\sin^2(2\theta_{12}) = 0.846 \pm 0.021; \theta_{12} = 33.4^\circ$$

$$\sin^2(2\theta_{23}) = 0.999^{+0.001}_{-0.018}; \theta_{23} = 44.1^\circ$$

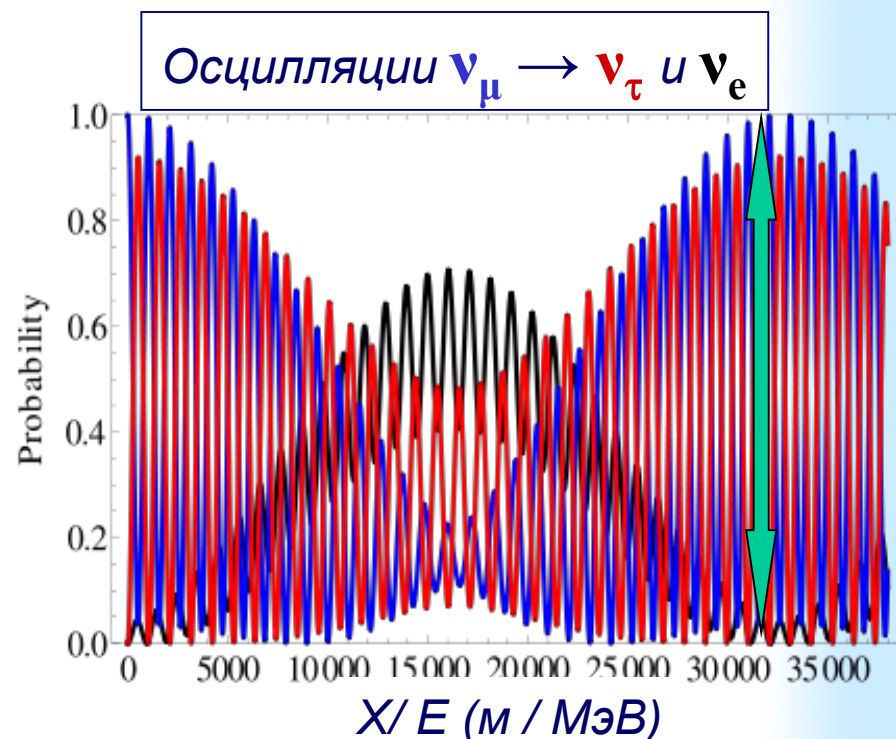
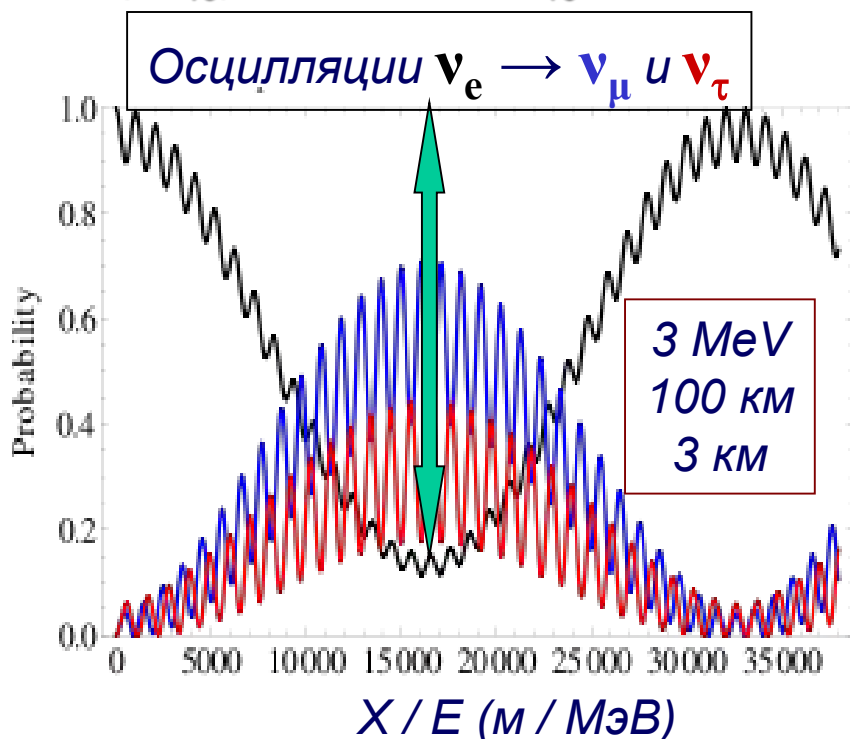
$$\sin^2(2\theta_{13}) = 0.085 \pm 0.5; \theta_{13} = 8.5^\circ$$



$$L(M) = 2.5 \frac{E(M\text{эВ})}{\Delta m^2(\text{эВ}^2)}$$

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_e) = 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\pi R}{L}\right)$$

$$\begin{bmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{bmatrix}$$



Стерильное нейтрино

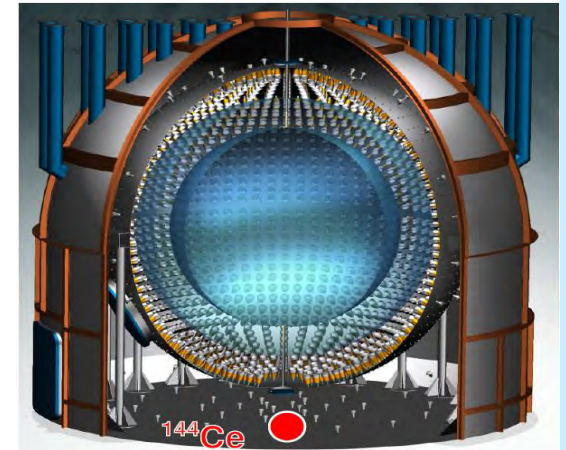
История с осцилляциями нейтрино не заканчивается. Вот уже 5 лет как физики вновь активно готовят эксперименты по поиску осцилляций в новое, **стерильное состояние нейтрино**

- 1) В ускорительных экспериментах в пучках мюонных (анти)нейтрино появляются лишние электронные (анти)нейтрино
- 2) В реакторных экспериментах и в экспериментах с искусственными источниками нейтрино пропадают электронные (анти)нейтрино

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \\ \nu_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} & U_{e4} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} & U_{\mu4} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} & U_{\tau4} \\ U_{s1} & U_{s2} & U_{s3} & U_{s4} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \\ \nu_4 \end{pmatrix}$$

ν_4 — $m = 1 \text{ эВ?}$
 ν_3 —
 ν_2 —
 ν_1 —

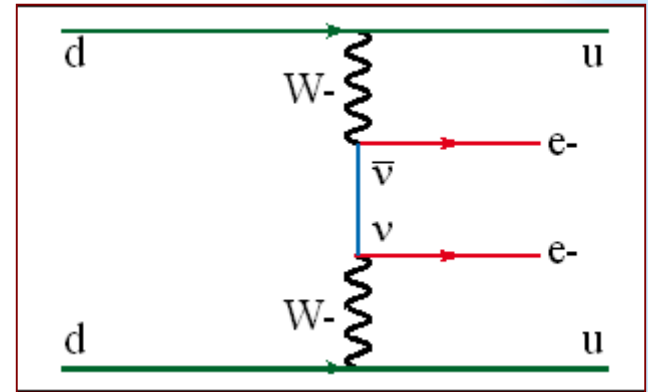
$L \sim 5-10 \text{ м}$



В Россия эксперименты проводятся на Калининской АЭС и реакторе СМ-3 (Димитровград), с Ga-Ge детектором SAGE в БНО. ПИЯФ участвует в эксперименте **BOREXINO** в Гранн-Сассо, куда в конце этого года ПО МАЯК (Челябинск) доставит искусственный источник ^{144}Ce - ^{144}Pr . В ближайшие годы могут появиться новости «нобелевского» уровня.

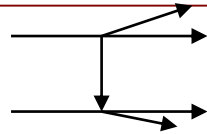
5 главных вопросов к ν

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$



1. Дирак / Майорана

$0\nu\beta\beta$ -распад



2. Абсолютные значения масс

$m < 2.2 \text{ эВ}$ ^3H $0.4\text{-}0.7 \text{ эВ}$ $\beta\beta$

3. Иерархия масс

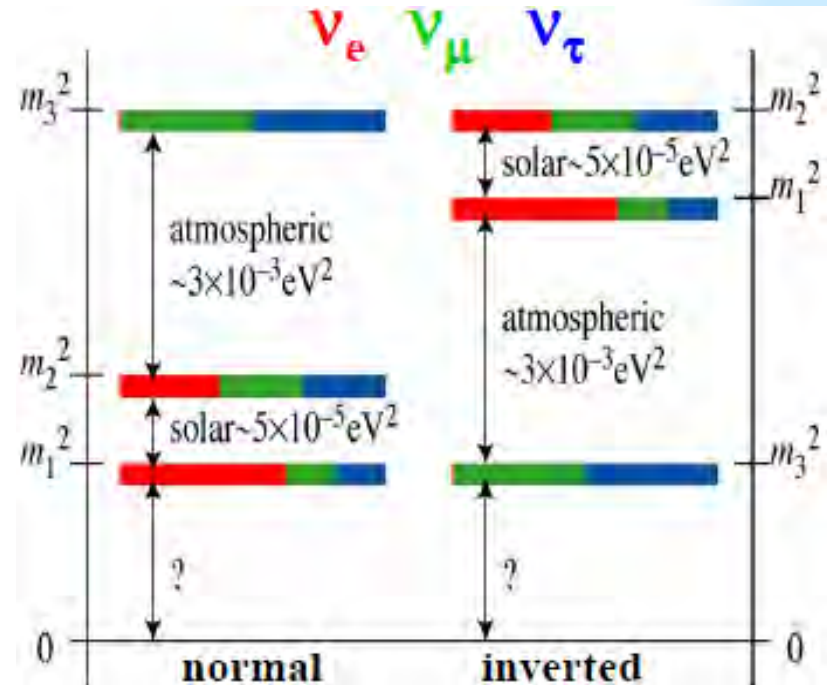
прямая, обратная или вырожденная

4. CP-несохранение

Θ_{13} отличен от нуля

5. Стерильное нейтрино

существует хотя бы одно?



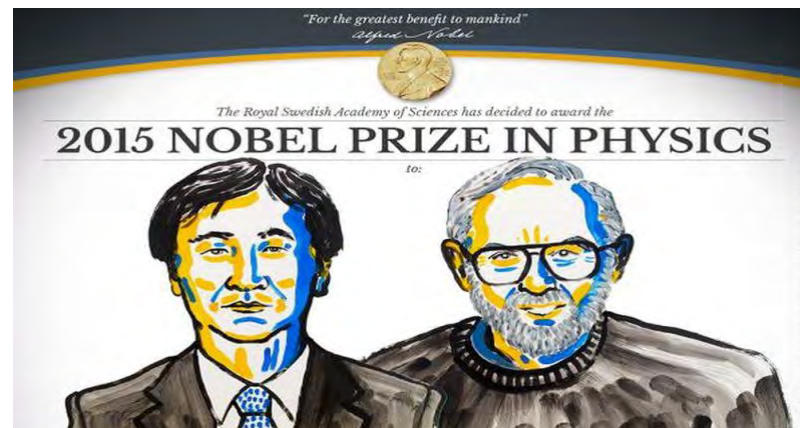
Спасибо за внимание!

За время моего доклада через каждого из Вас пролетело $\sim 10^{17}$ нейтрино

(90% это солнечные pp-нейтрино: $0.6 \nu_e$, $0.2 \nu_\mu$, $0.2 \nu_\tau$)

Вероятность, что одно из них столкнулось с одним из Ваших электронов составляет $P \approx 0.1\%$

Возможно, в зале присутствует человек, изменивший направление нейтрино!

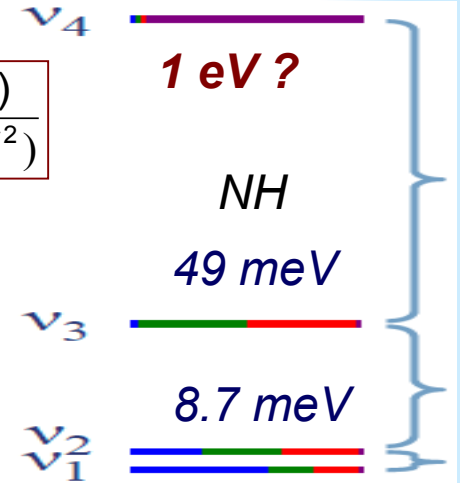


Смешивание и осцилляции нейтрино

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \\ \nu_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} & U_{e4} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} & U_{\mu4} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} & U_{\tau4} \\ U_{s1} & U_{s2} & U_{s3} & U_{s4} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \\ \nu_4 \end{pmatrix}$$

$$L(\text{m}) = 2.5 \frac{E(\text{MeV})}{\Delta m^2(\text{eV}^2)}$$

$E = 3 \text{ MeV}$
 $L = 100 \text{ км}$
 $L = 3 \text{ км}$
 $L = 7 \text{ м}$



Измерены две разности кв. масс:

$$\Delta m_{21}^2 = (7.53 \pm 0.18) \times 10^{-5} \text{ эВ}^2$$

$$|\Delta m_{32}^2| = (2.42 \pm 0.06) \times 10^{-3} \text{ эВ}^2$$

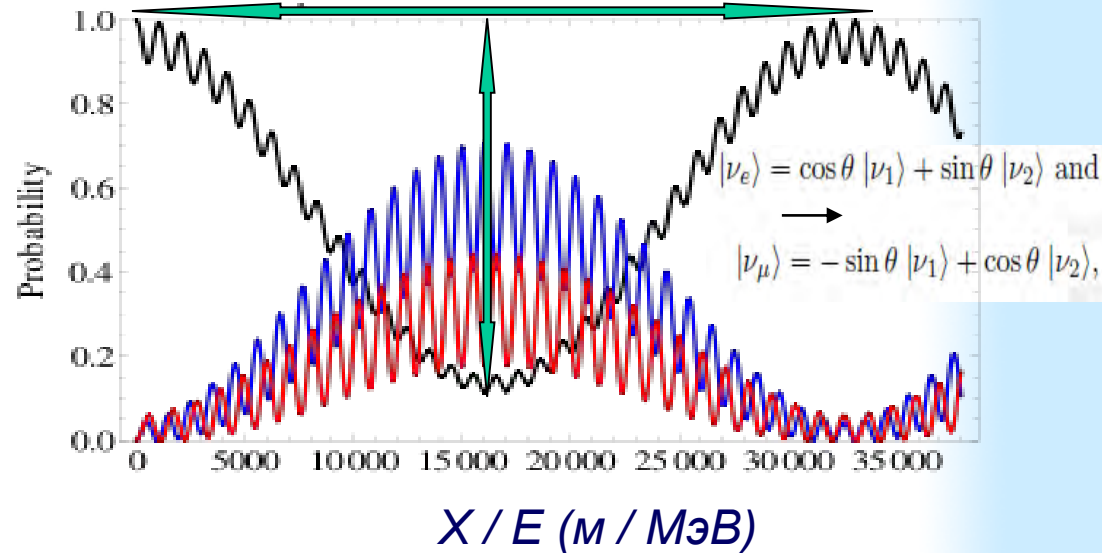
и три угла смешивания:

$$\sin^2(2\theta_{12}) = 0.846 \pm 0.021; \theta_{12} = (35.7)^\circ$$

$$\sin^2(2\theta_{23}) = 0.999^{+0.001}_{-0.018}; \theta_{23} = (45.0)^\circ$$

$$\sin^2(2\theta_{13}) = 0.085 \pm 0.5; \theta_{12} = (8.5)^\circ$$

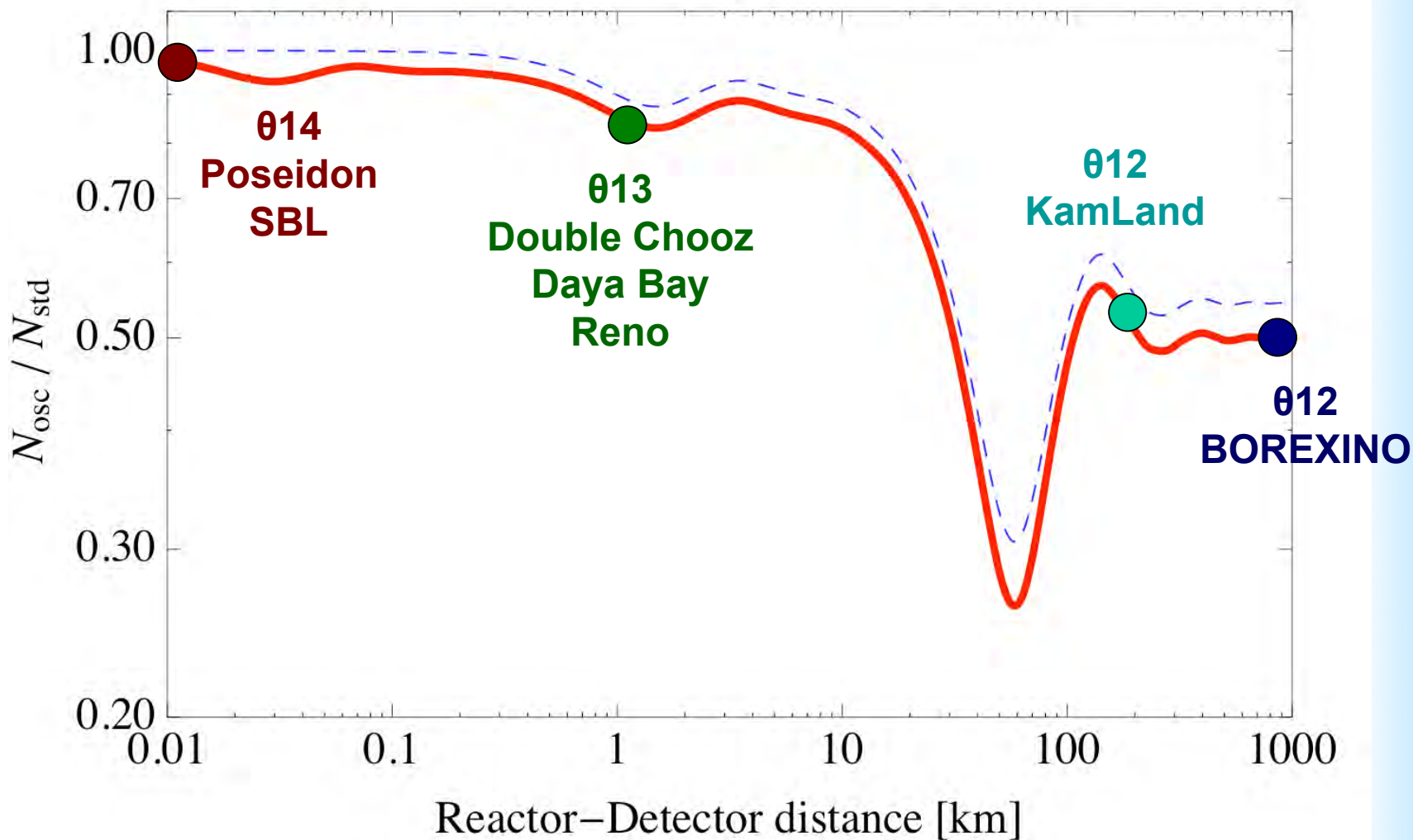
$$P = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2(1.27 \Delta m^2 (L/E))$$



$$P_{ee} = 1 - \cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{12} \sin^2 \Delta_{21} - \sin^2 2\theta_{13} (\cos^2 \theta_{12} \sin^2 \Delta_{31} + \sin^2 \theta_{12} \sin^2 \Delta_{32})$$

$$\Delta_{ij} = 1.267 \Delta m_{ij}^2 (\text{eV}^2) L(\text{m}) / E(\text{MeV})$$

Осцилляции реакторных нейтрино



Матрица PMNS

$$\begin{bmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{bmatrix}$$

2 угла смешивания и 2 Δm^2 масс измерены:

$$\tan^2 \theta_{12} = 0.47 \pm 0.06, \quad \theta_{12} = (34 \pm 2)^\circ,$$

$$\sin^2 \theta_{23} = 0.5 \pm 0.15, \quad \theta_{23} = (45 \pm 10)^\circ$$

$$\sin^2 \theta_{13} = 0.025 \pm 0.007, \quad \theta_{13} = (9 \pm 3)^\circ$$

$$|m^2_2 - m^2_1| = (7.6 \pm 0.2) \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$|m^2_3 - m^2_2| = (2.3 \pm 0.2) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

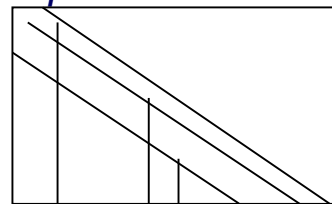
θ_{12} и δm^2_{12} определены из экспериментов с солнечными нейтрино + KamLand

$$\begin{pmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 0 \\ -1/2 & 1/2 & 1/\sqrt{2} \\ 1/2 & -1/2 & 1/\sqrt{2} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{bmatrix}$$

PMNS vs CKM

$$\begin{pmatrix} 0.8 & 0.5 & 0.1 \\ 0.5 & 0.6 & 0.7 \\ 0.3 & 0.6 & 0.7 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 1 & 0.2 & 0.004 \\ 0.2 & 1 & 0.04 \\ 0.008 & 0.04 & 1 \end{pmatrix}$$

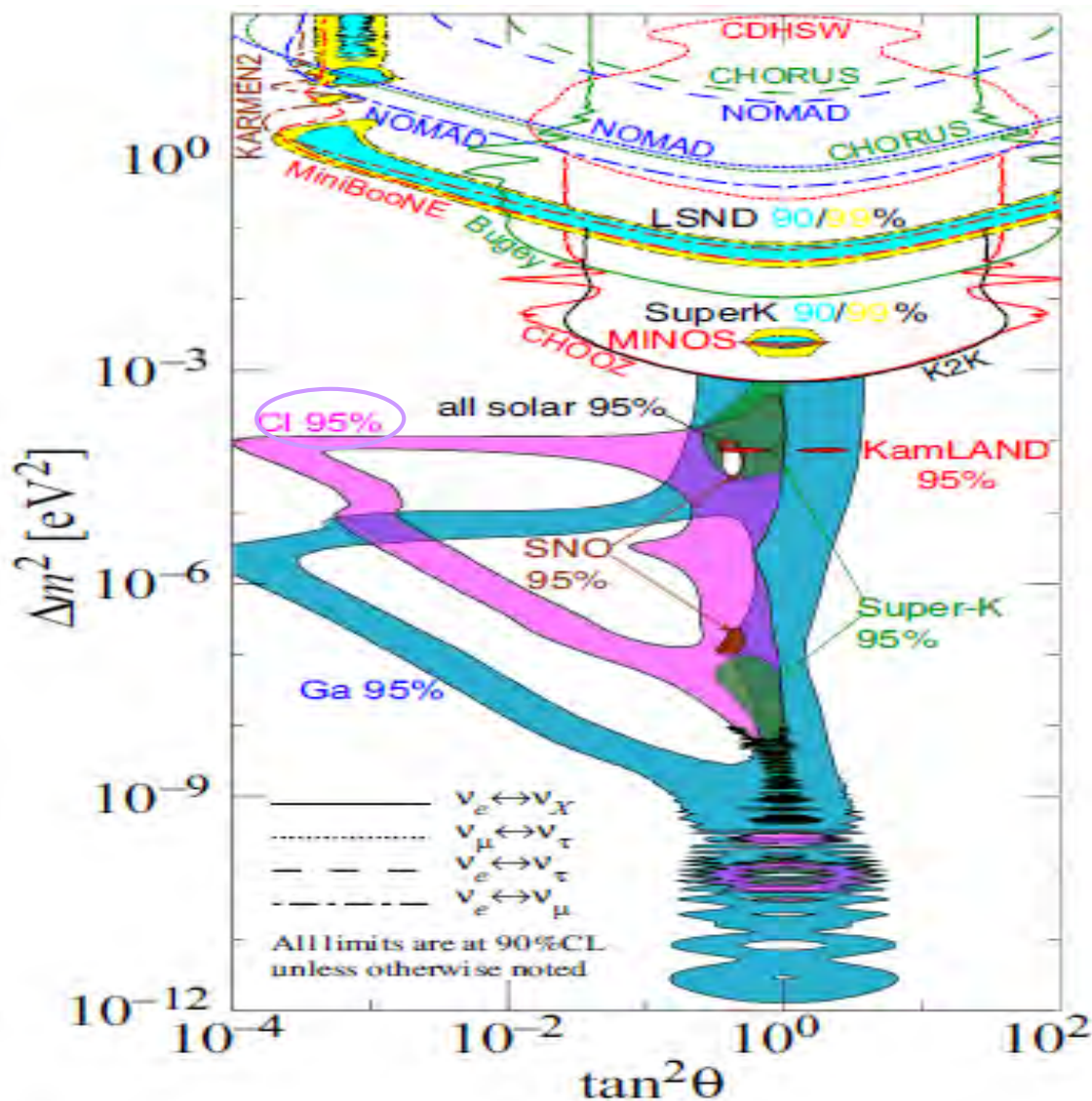
В β -распаде три особенности на графике Кюри



В распаде π -мезона три пика в спектре мюона



Осцилляционные решения для солнечных нейтрино



Эксперименты с
солнечными нейтрино
5 вариантов решений

SMA
VAQ
QVO
LOW
LMA

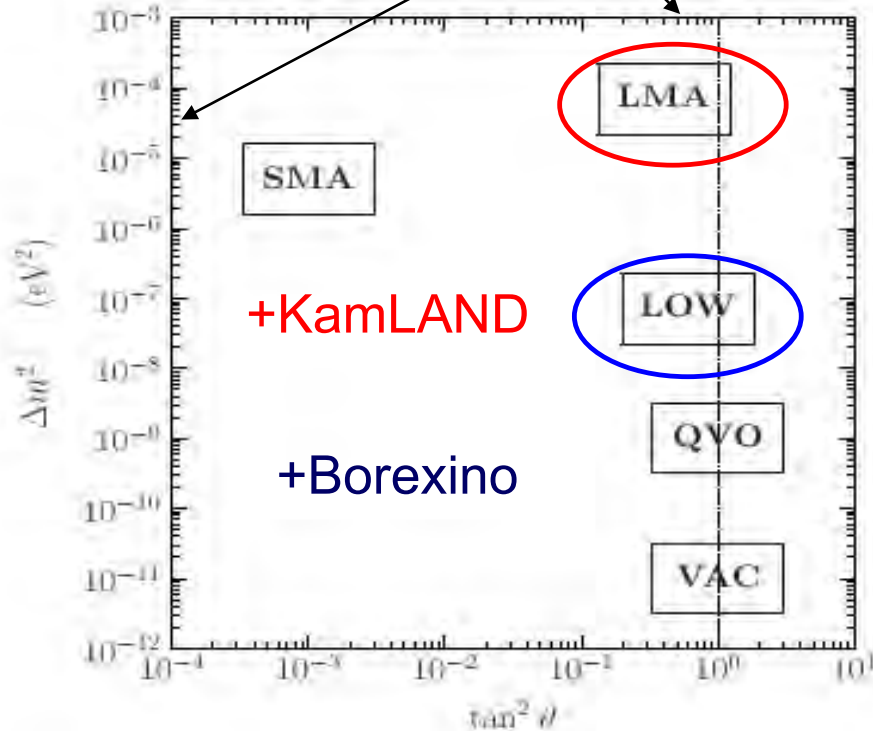
До результата KamLand
модель спин-флэйворной
прецессии, связанной с
магнитными моментами
нейтрино, имела лучшее
согласие с
экспериментальными
данными, чем
осцилляционное решение

Решение = Смешивание нейтрино + осцилляции в веществе = LMA+MSW

Осцилляции в вакууме Понтекорво-Маки-Накагава-Саката

$$\tan^2 \theta_{12} = 0.47 \pm 0.04, \quad \theta_{12} = (34 \pm 1)^\circ,$$

$$|m_2^2 - m_1^2| = (7.6 \pm 0.2) \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

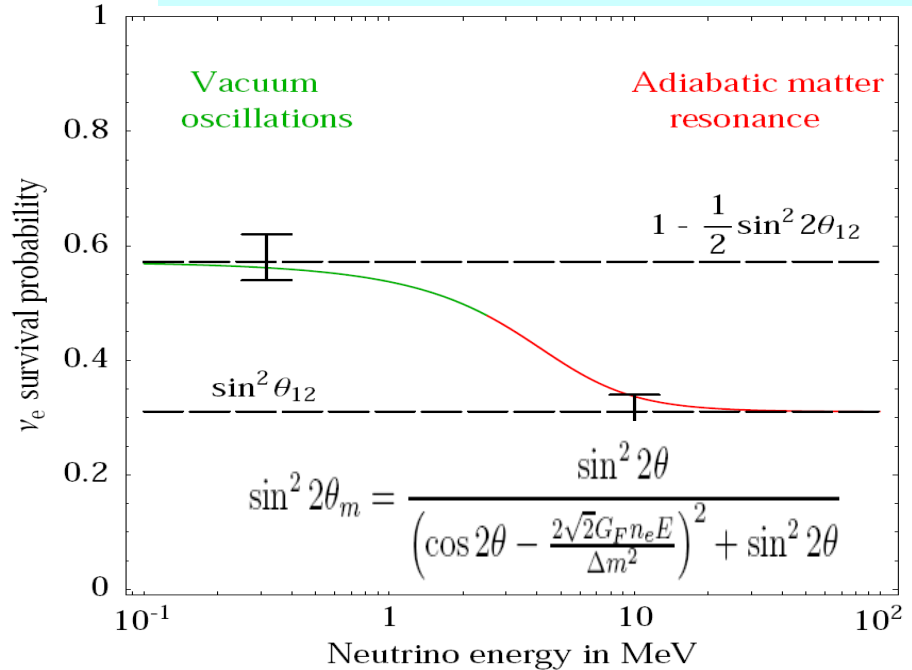


$$\nu_e = \nu_1 \cos \theta_{12} + \nu_2 \sin \theta_{12}$$

Амплитуда = $\sin^2 2\theta_{12}$

Длина = $(2.5 \text{ km}) \times E [\text{ГэВ}] / \Delta m^2 [\text{эВ}^2]$.

В веществе Солнца Михеев-Смирнов-Вольфенштейн

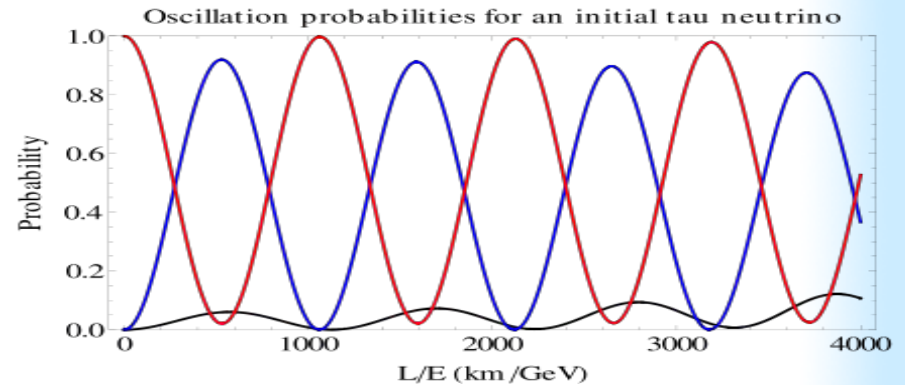
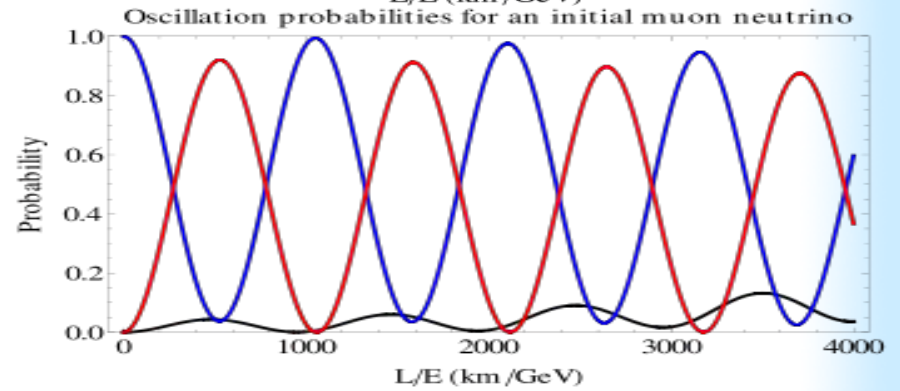
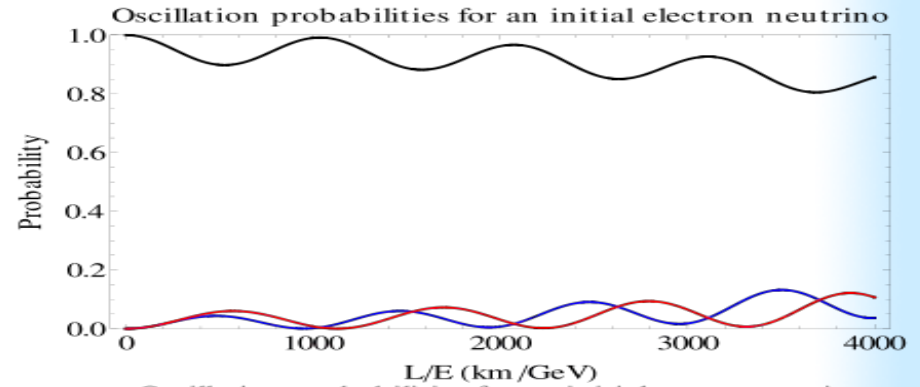
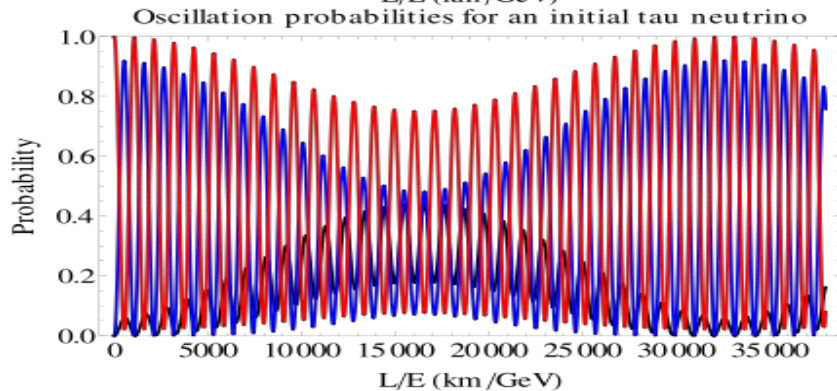
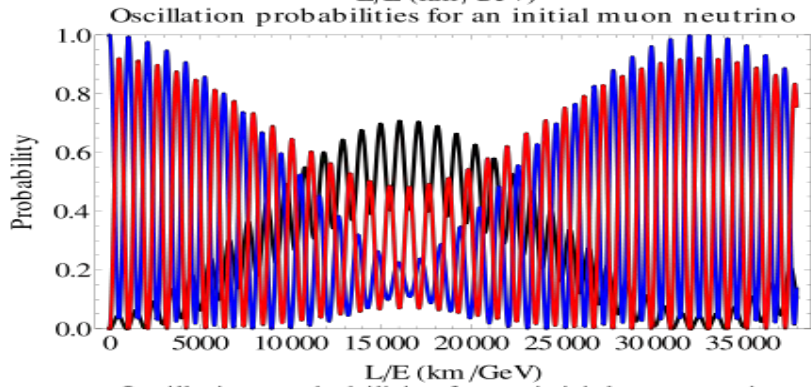
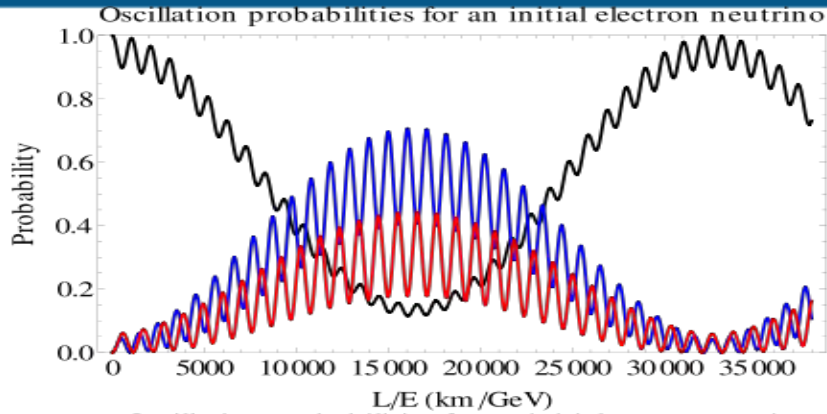


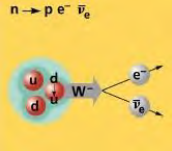
$P_{ee} \equiv P(\nu_e \rightarrow \nu_e) \sim 56 \pm 6 \% \text{ (pp-}\nu\text{)}$.

$P_{ee} \sim 32 \pm 2 \% \text{ (8B-}\nu\text{ SNO)}$;

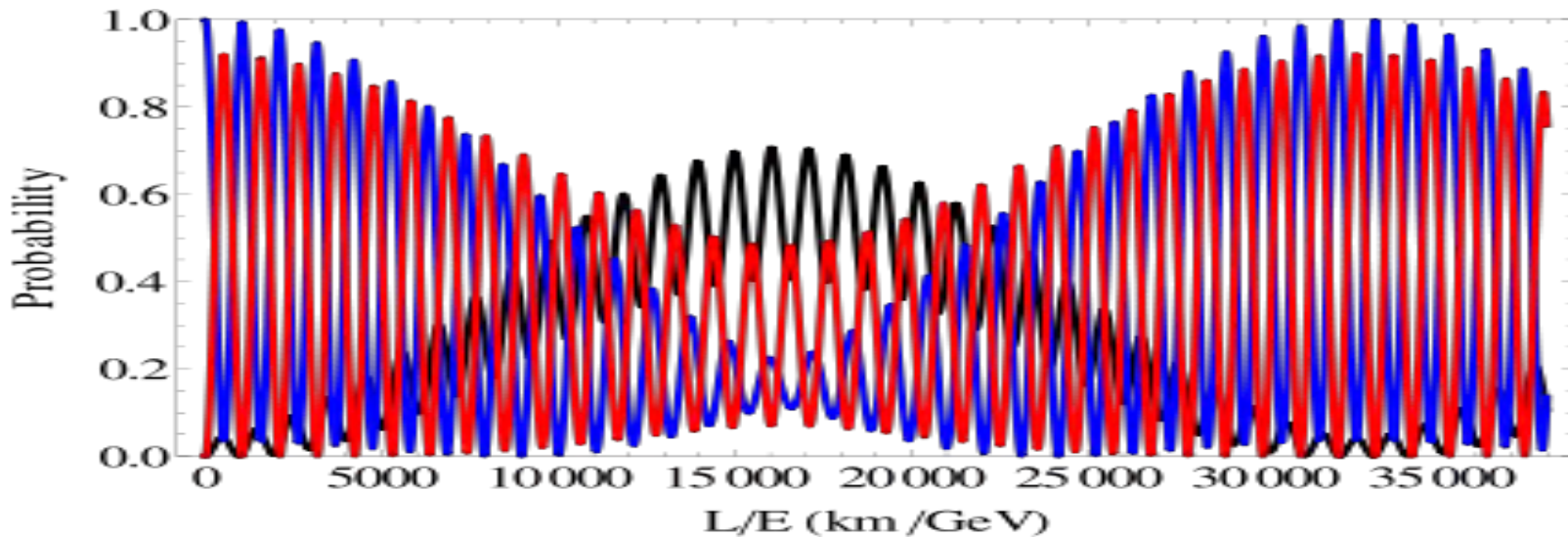
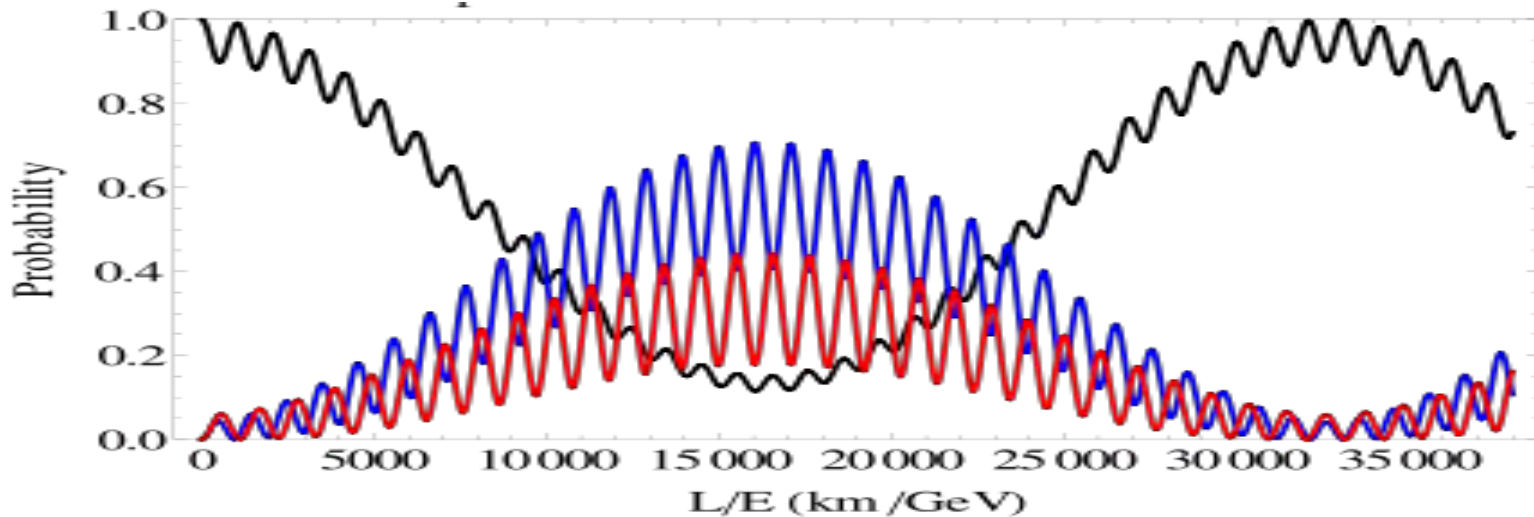
Поведение P_{ee} в области с различным влиянием вакуумных осцилляций и осцилляций в веществе чувствительно к NSI. Важен результат при $E_\nu = 0.86$ и 1.44 МэВ.

Осцилляции нейтрино в случае 3-х типов

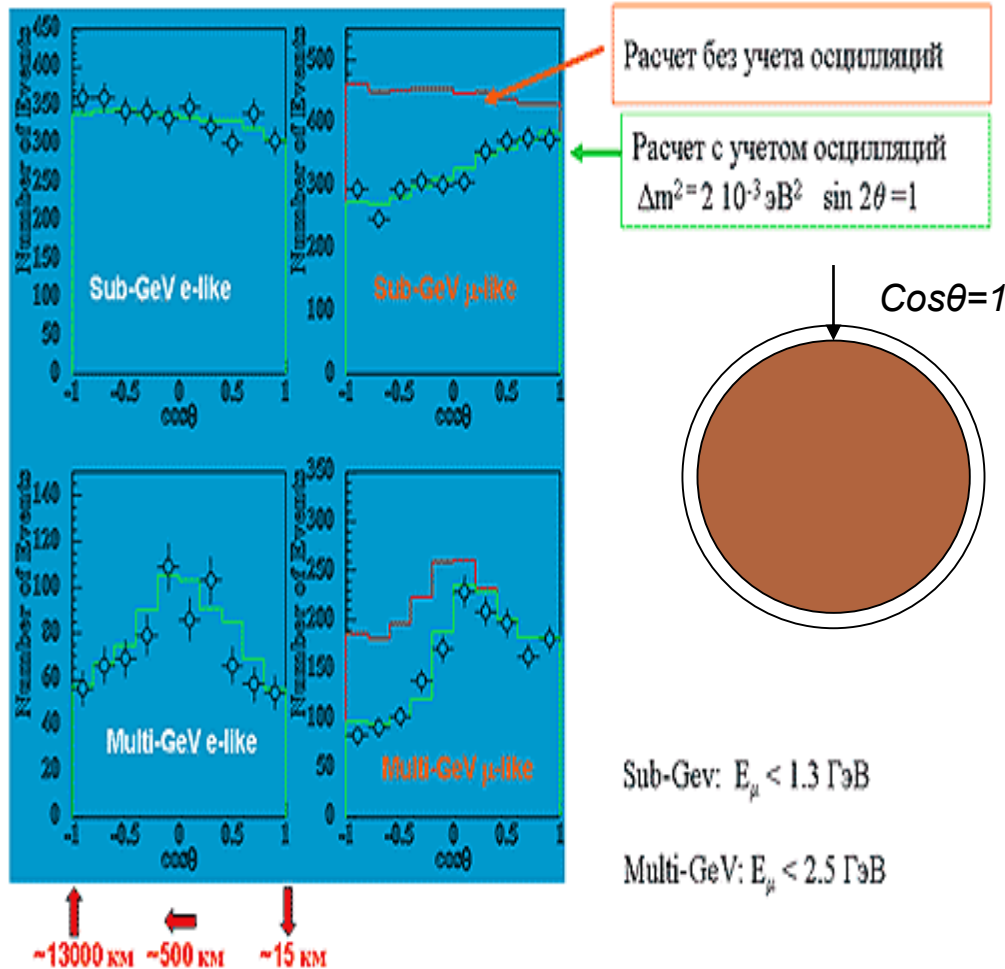




Осцилляции 3-х нейтрино

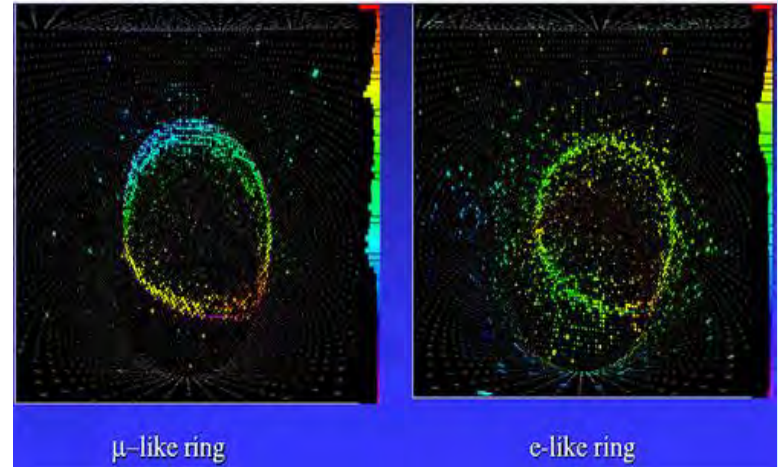


Осцилляции атмосферных нейтрино - $\delta^2 m_{23}$ и θ_{23}



$\nu_{\mu} + N \rightarrow \mu + N$
Событие от мюона

$\nu_e + N \rightarrow e + N$
Событие от электрона



БНО, IMB, Fridjus, SK 1998

$\delta^2 m_{23} = 2.5 \cdot 10^{-3}$

$\theta_{23} = 45^\circ$

$E = 1 \text{ GeV} - L = 1000 \text{ км}$

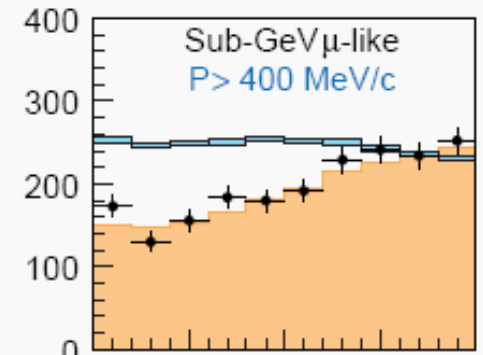
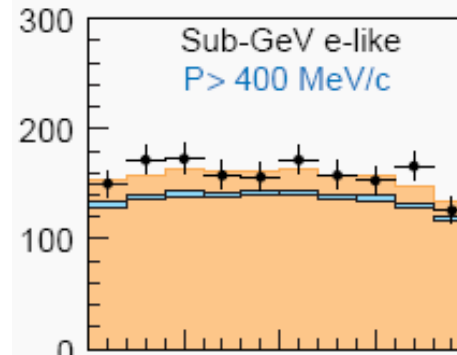
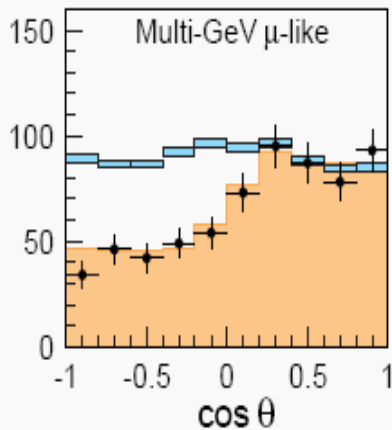
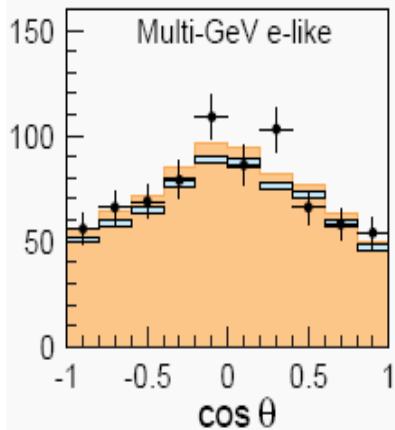
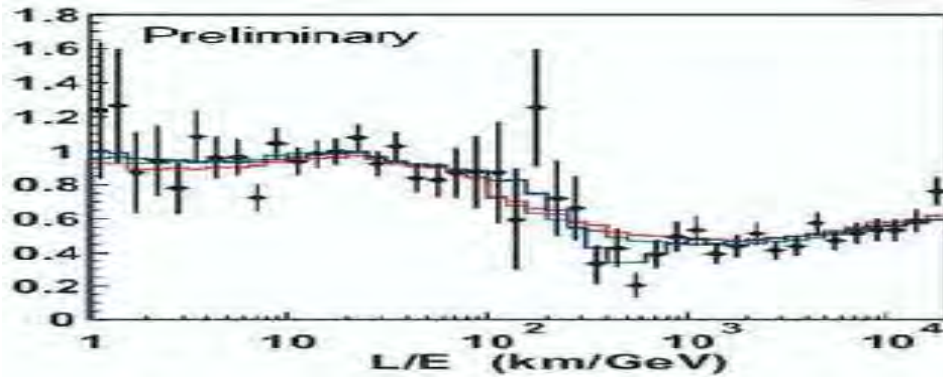
$E = 1 \text{ MeV} - L = 1 \text{ км}$

Chooz $\theta_{13} < 0.15$

Переход в τ -нейтрино

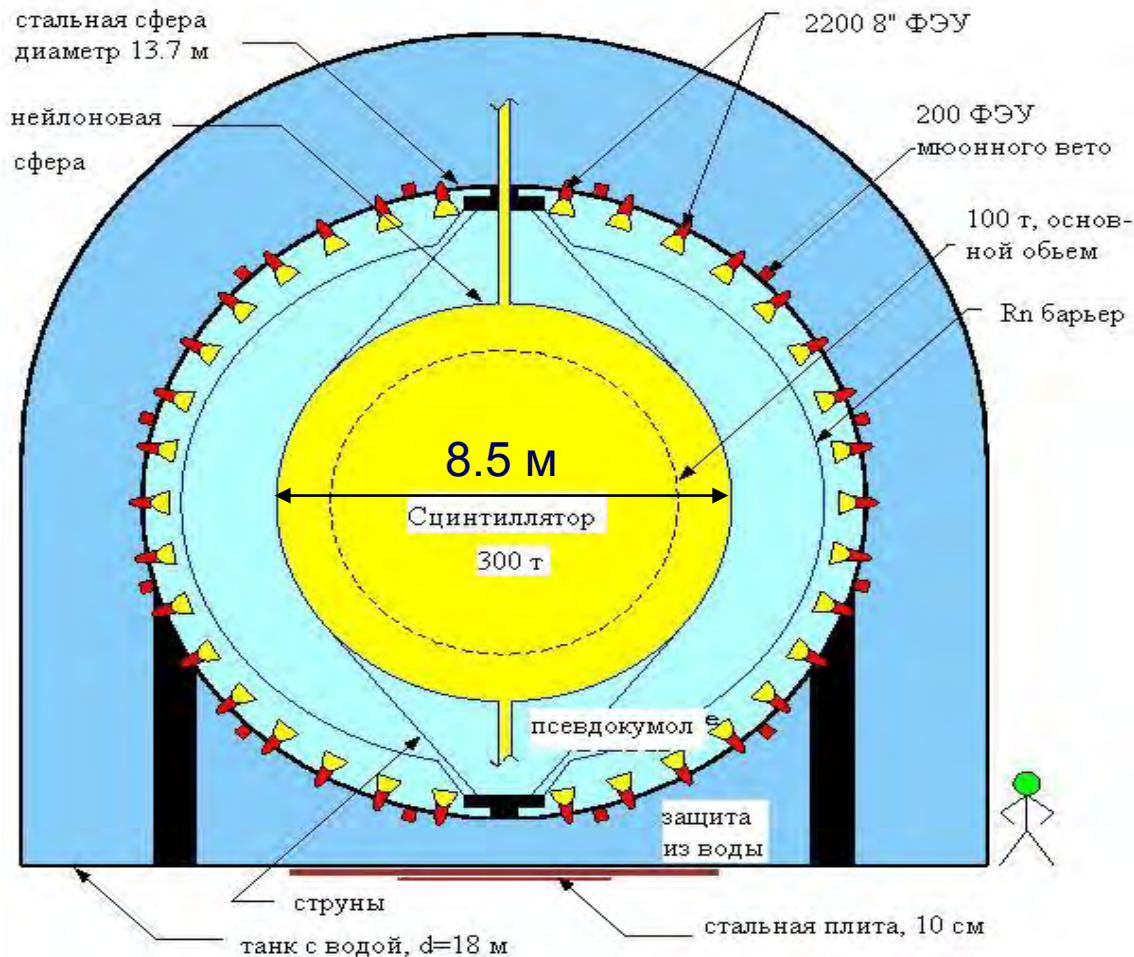
$N \sim E^{-3.7} \text{ К2К, MINOS}$

Решающий аргумент S-K: Поток (ν_μ) vs L и (L/E)



S-K измерила с высокой точностью зависимость отношения e/μ от расстояния L до точки возникновения (от зенитного угла). Нейтрино, пришедшие сверху, проходят мин расстояние около 20 км. Нейтрино снизу проходят 13000 км. Зависимость потока от отношения L/E позволила определить осцилляционные параметры.

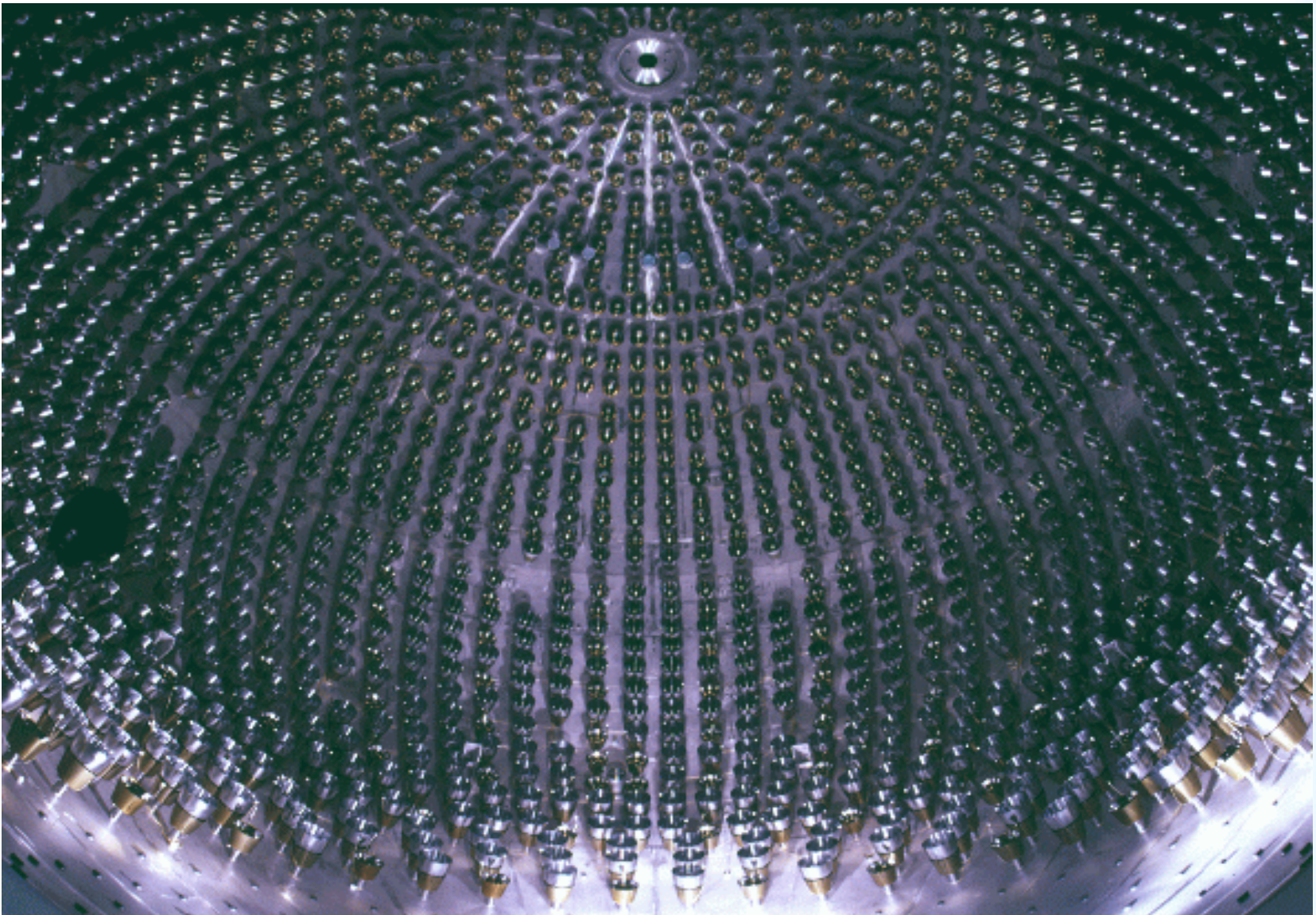
Детектор БОРЕКСИНО



Стальная сфера находится внутри танка, содержащего **2100 т воды**, которая является дополнительной защитой от внешних γ -квантов и нейтронов. Сцинтилляционный свет собирается **2212 ФЭУ** равномерно распределенных по поверхности сферы. Дополнительные **208 ФЭУ** регистрируют Черенковское излучение мюонов в воде.



2212 ФЭУ на поверхности стальной сферы



Нобелевские премии в области нейтрино

- 1) Ф. Райнес, 1995 г. (работа 1953 – 56 г.г.), За первую регистрацию нейтрино (от реактора). Нейтрино должны пройти расстояние от Земли до Солнца (150 млн км), заполненное водой, 10^7 (10 миллионов) раз, чтобы провзаимодействовать с протоном (ядром водорода H_2O).
- 2) Дж. Девис, Р. Косиба, 2002 г. (работы 1969-1990 г.г. и 1986-1990 г.г.) За регистрацию нейтрино от Солнца. Радиохимический Cl-Ar детектор и Черенковский детектор KamiokaNDE. Нейтрино от Солнца в 1000 раз меньше чем от реактора, но все равно поток огромен - 6×10^{10} v/cm²c
- 3) Л. Ледерман, М. Шварц, Д. Стейнбергер, 1988 г. (работа 1962 г.). За открытие мюонного нейтрино. Стало два типа нейтрино (электронное и мюонное). Нейтрино рождается и исчезает вместе со «своим» лептоном (электроном и мюоном), вызывает реакции с появлением «своего» лептона.
- 4) Т. Кажита, А. Макдоналд, 2015 г. (работы 1998 г. и 2002 г.) За открытие осцилляций атмосферных и солнечных нейтрино. По пути (со временем) нейтрино одного типа может переходить в нейтрино другого типа (электронное в мюонное и наоборот). Т.О. нейтрино, рожденные со «своим» лептоном, могут вызывать реакции с появлением «чужого» лептона (см.п.3)