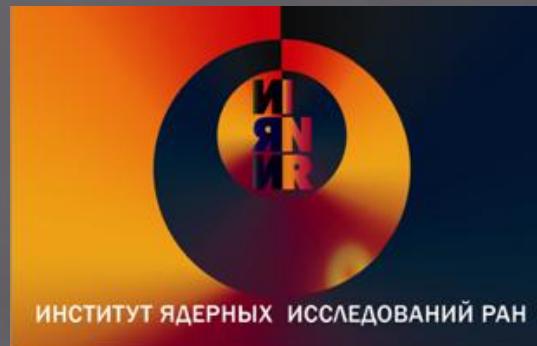




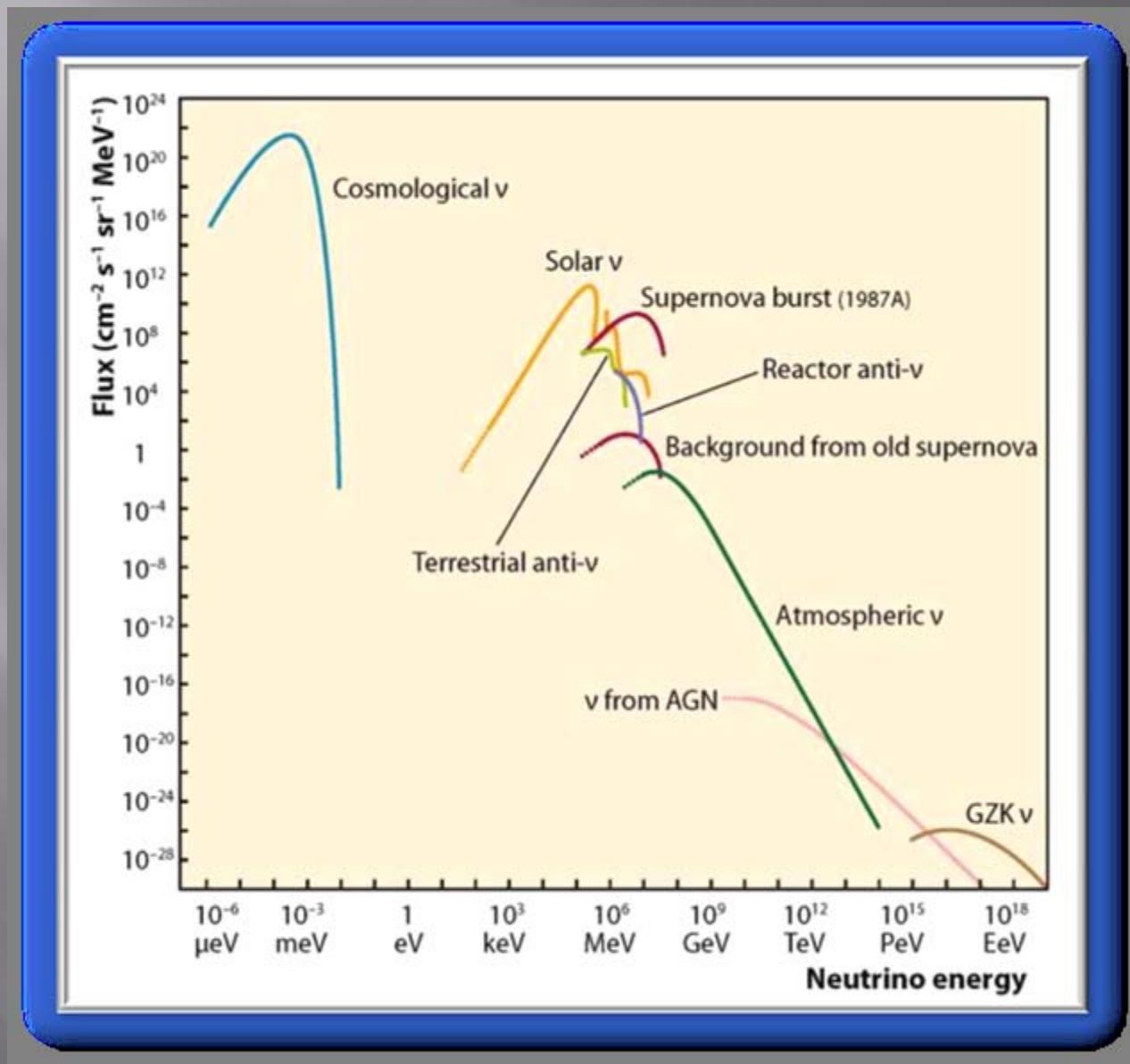
Научный семинар
“Физика нейтрино
и астрофизика”

ПРИРОДНЫЕ ПОТОКИ НЕЙТРИНО
И
ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ
МАССИВНЫХ НЕЙТРИНО

С. П. Михеев



Природные нейтрино



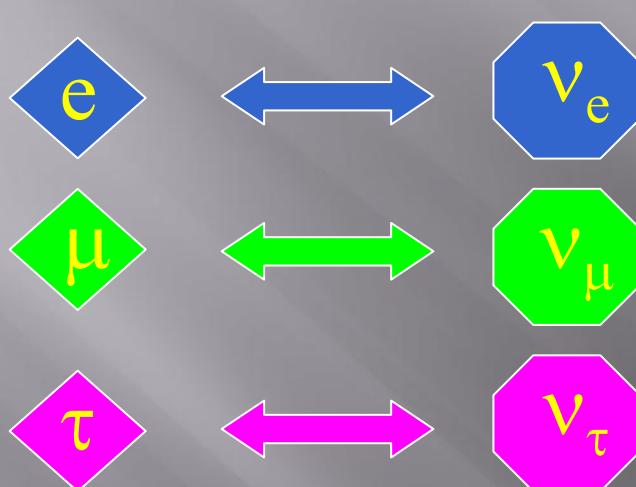
«Стандартная» модель нейтрино

- Существует только три типа легких нейтрино
- Взаимодействия нейтрино описываются стандартной (электрослабой) теорией
- Массы и смешивание нейтрино генерируется в вакууме

A. Yu. Smirnov hep-ph/0702061

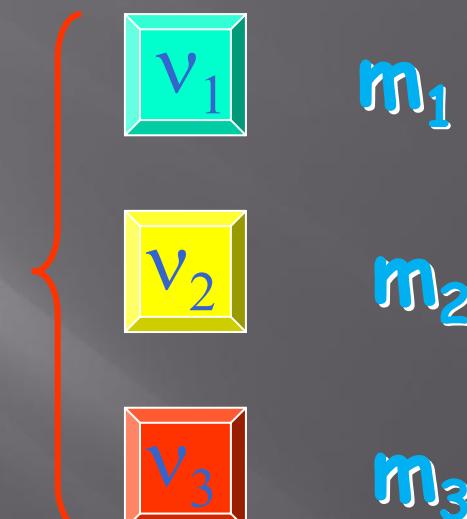
Нейтринные состояния

**Собственные состояния
слабых взаимодействий
(заряженные токи)**



Определенному заряженному лептону соответствует нейтрино определенного аромата (взаимодействуют в парах).

**Собственные массовые
состояния**



смешивание

$$|v_f\rangle = \sum_i U_{fi} |v_i\rangle$$

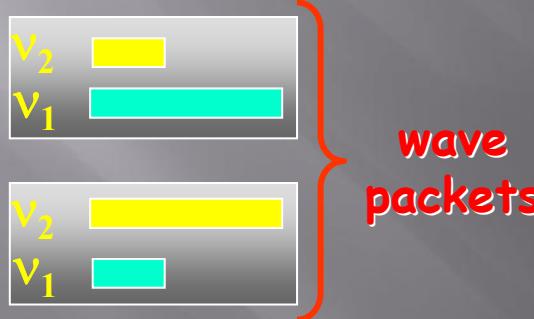
Нейтриновые состояния

$$2\nu \quad U = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}$$

**Когерентная смесь собственных
массовых состояний**

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

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



**Ароматный состав собственных
массовых состояний**

$$\nu_2 = \sin\theta \nu_e + \cos\theta \nu_\mu$$

$$\nu_1 = \cos\theta \nu_e - \sin\theta \nu_\mu$$



«Портрет» нейтрино:

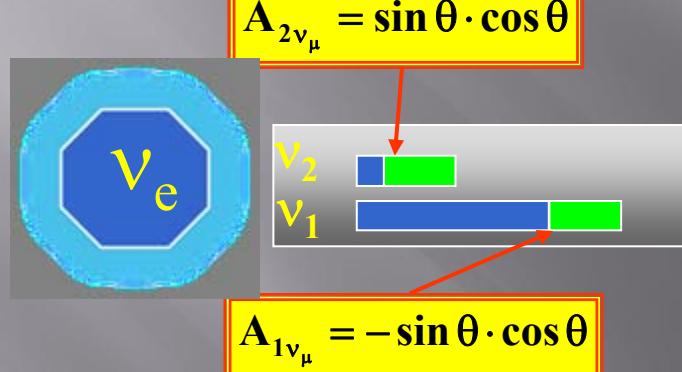


Распространение массивных нейтрино в вакууме

Благодаря разности масс ν_1 и ν_2
имеют разные фазовые скорости

$$\Delta v_{ph} = \frac{\Delta m^2}{2E}$$

$$\Delta\phi = \Delta v_{ph} \cdot t$$



$\Delta\phi$	0	π	2π
$A_{2\mu} + A_{1\mu}$	0	$2\sin\theta \cdot \cos\theta$	0

Амплитуда осцилляций:

$$A_P = (A_{1v_\mu} + A_{2v_\mu})^2 = \sin^2 2\theta$$

Длина осцилляций:

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

Распространение массивных нейтрино в вакууме

Вероятность осцилляций:

$$P_{\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu} = \frac{A_P}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{L_\nu} \right) = \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \frac{\pi x}{L_\nu}$$

I. Осцилляции → эффект возрастания разности фаз
между собственными массовыми состояниями

II. Примеси собственных массовых состояний ν_i в данном
нейтринном состоянии не изменяется во процессе
распространения

III. Ароматы (ароматный состав) собственных массовых
состояний определяется углом смешивания в вакууме

Графическое представление осциляций

Уравнение эволюции:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = (\vec{B} \times \vec{v})$$

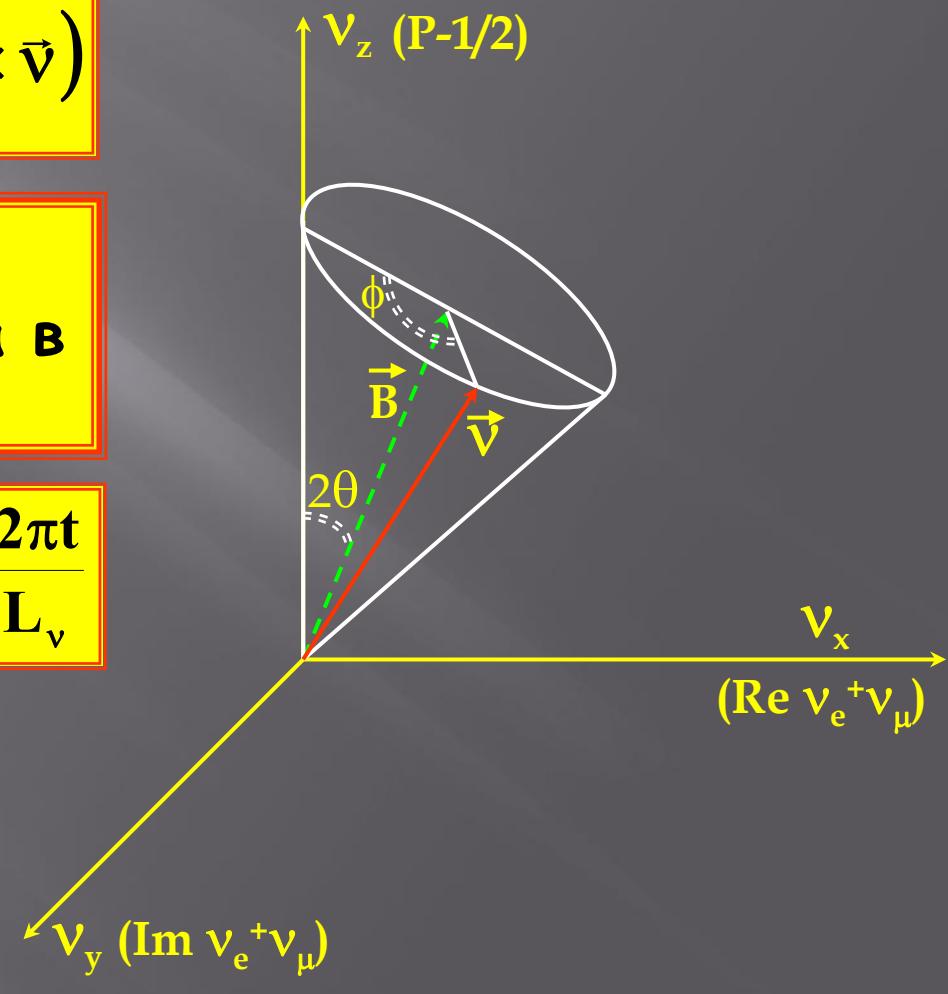
**Аналогия: уравнение
прецессии спина электрона в
магнитном поле**

$$\vec{v} = \left(\operatorname{Re} v_e^+ v_\mu, \operatorname{Im} v_e^+ v_\mu, v_e^+ v_e - \frac{1}{2} \right)$$

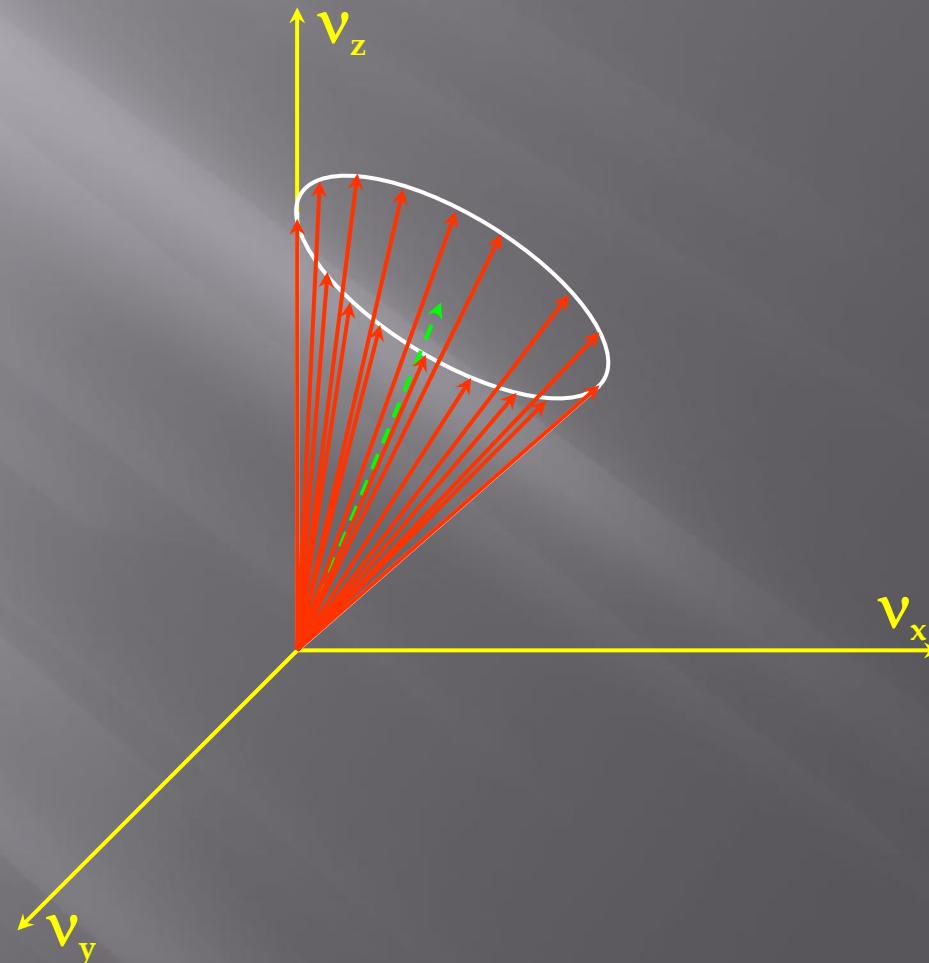
$$\phi = \frac{2\pi t}{L_v}$$

$$\vec{B} = \frac{2\pi}{L_v} (\sin 2\theta, 0, \cos 2\theta)$$

$$P(v_e \leftrightarrow v_{e'}) = v_e^+ v_e = \frac{1}{2}(1 + \cos \theta_Z)$$



Графическое представление осцилляций



Распространение массивных нейтрино в веществе

Некогерентные взаимодействия

- CC & NC неупругое рассеяние
- CC квазиупругое рассеяние
- NC упругое рассеяние с потерей энергии

Когерентные взаимодействия

- CC & NC упругое рассеяние вперед



$$\sigma \sim \frac{G_F^2 s}{\pi} \sim 10^{-43} \text{ cm}^2 \left(\frac{E}{\text{MeV}} \right)^2$$



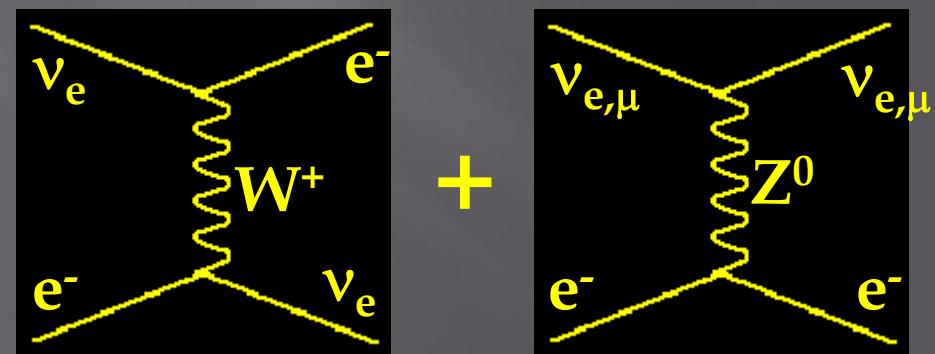
Потенциал

- Поглощение нейтрино (CC)
- Потери энергии нейтрино (NC)
- Регенерация нейтрино (CC)

Потенциал вещества

- При низких энергиях упругое рассеяние вперед (реальная часть амплитуды) доминирует
- Потенциал описывает эффект упругого рассеяния вперед
- Представляет интерес только разность потенциалов для ν_e и ν_μ

Упругое рассеяние вперед →



$$\text{Потенциал: } V = V_e - V_\mu$$

Потенциал вещества

$$V = \langle \Psi | H_{int} | \Psi \rangle$$

Ψ - волновая функция системы нейтрино - среды

H_{int} - Гамильтониан слабых взаимодействий при низких энергиях

$$H_{int} = \frac{G_F}{\sqrt{2}} v_e \gamma^\mu (1 - \gamma_5) v_e \bar{e} \gamma_\mu (g_V + g_A \gamma_5) e$$

(CC рассеяние на электронах)
($g_V = -g_A = 1$)

$$V = \sqrt{2} G_F \frac{n_e}{\sqrt{1 - v_e^2}} \left\{ (1 - \vec{\beta} \vec{v}_e) (1 - \vec{\lambda}_e \vec{v}_e) + \sqrt{1 - v_e^2} \left[\vec{\lambda}_e \vec{\beta} - \frac{(\vec{\beta} \vec{v}_e)(\vec{\lambda}_e \vec{v}_e)}{1 + \sqrt{1 - v_e^2}} \right] \right\}$$

$\vec{\beta}$ - Скорость нейтрино

$\vec{\lambda}_e$ - Вектор поляризации

Неполяризованный и изотропной среды:

$$V = \sqrt{2} G_F n_e$$

Потенциал вещества

$V \sim 10^{-13}$ эВ в Земле при $E = 10$ МэВ

Коэффициент преломления:

$$n - 1 = \frac{V}{p} \quad \left\{ \begin{array}{ll} \sim 10^{-20} & \text{в Земле} \\ < 10^{-18} & \text{в Солнце} \\ \sim 10^{-6} & \text{в нейтронной звезде} \end{array} \right.$$

Длина рефракции:

$$L_0 = \frac{2\pi}{V} = \frac{\sqrt{2\pi}}{G_F n_e}$$

Уравнение эволюции в веществе

$$i \frac{d\mathbf{v}_f}{dt} = H_{tot} \mathbf{v}_f$$

$$\mathbf{v}_f = \begin{pmatrix} v_e \\ v_\mu \end{pmatrix}$$

Полный гамильтониан

вакуум

$$H_{tot} = H_{vac} + V$$

вещество

$$H_{vac} = \frac{1}{2E} \begin{pmatrix} m_1^2 & 0 \\ 0 & m_2^2 \end{pmatrix}$$

$$V = \begin{pmatrix} \sqrt{2}G_F n_e & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$i \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} v_e \\ v_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{\Delta m^2}{2E} \cos 2\theta + \sqrt{2}G_F n_e & \frac{\Delta m^2}{4E} \sin 2\theta \\ \frac{\Delta m^2}{4E} \sin 2\theta & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_e \\ v_\mu \end{pmatrix}$$

Уравнение эволюции в веществе

Вакуум Вещество

■ Эффективный гамильтониан

$$H_{\text{vac}}$$

$$H_{\text{vac}} + V$$

■ Собственное состояние

$$\nu_1, \nu_2$$

$$\nu_{1m}, \nu_{2m}$$

Зависят
от n_e, E

■ Собственное значение

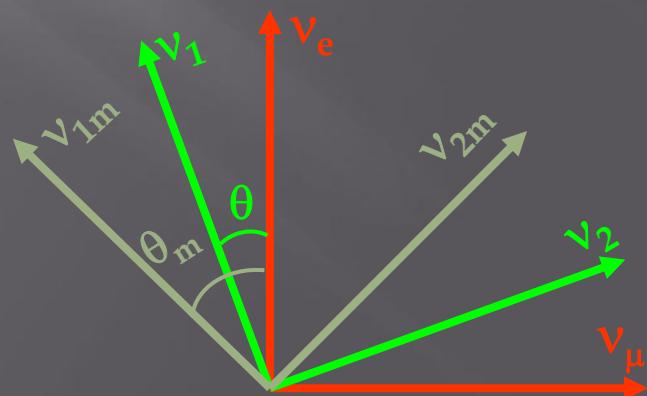
$$m_1^2/2E, m_2^2/2E$$

$$H_{1m}, H_{2m}$$

Угол смешивания
определяет аромат
собственного состояния

$$(\nu_f) \longleftrightarrow \theta \longrightarrow (\nu_i)$$

$$(\nu_f) \longleftrightarrow \theta_m \longrightarrow (\nu_{im})$$



Уравнение эволюции в веществе

Диагонализация гамильтонiana:

■ Смешивание

$$\sin^2 2\theta_m = \frac{\sin^2 2\theta}{\left(\cos 2\theta - \frac{2\sqrt{2}G_F n_e E}{\Delta m^2} \right)^2 + \sin^2 2\theta}$$

■ Разность собственных значений

$$H_2 - H_1 = \frac{\Delta m^2}{2E} \sqrt{\left(\cos 2\theta - \frac{2\sqrt{2}G_F n_e E}{\Delta m^2} \right)^2 + \sin^2 2\theta}$$

■ Условие резонанса

$$\sqrt{2}G_F n_e = \frac{\Delta m^2}{2E} \cos 2\theta$$

В резонансе:

$$\sin^2 2\theta_m = 1 \quad \text{Смешивание максимально}$$

$$H_2 - H_1 = \frac{\Delta m^2}{2E} \sin 2\theta \quad \text{Разность собственных значений минимальна}$$

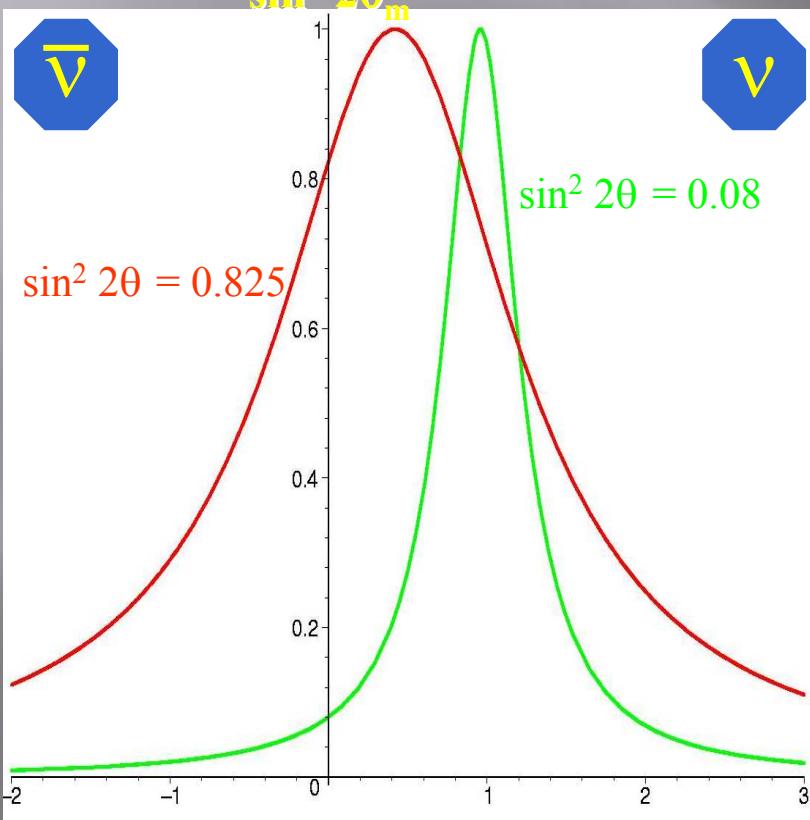
$$H_e = H_\mu \quad \text{Пересечение уровней}$$

Резонанс

При

$$\frac{L_v}{L_0} = \cos 2\theta$$

$$\sin^2 2\theta_m = 1$$



Полуширина резонанса: $\Delta\left(\frac{L_v}{L_0}\right) = \sin 2\theta = \left(\frac{L_v}{L_0}\right)_R \tan 2\theta$

$$E_R = \frac{\Delta m^2 \cos 2\theta}{2\sqrt{2}G_F n_e}$$

Резонансная энергия:

$$\Delta(E_R) = E_R \operatorname{tg} 2\theta$$

$$n_R = \frac{\Delta m^2 \cos 2\theta}{2\sqrt{2}G_F E}$$

Резонансная плотность:

$$\Delta(n_R) = n_R \operatorname{tg} 2\theta$$

$$\frac{L_v}{L_0} \sim n_e E$$

Резонансный слой:

$$n_e = n_R \pm \Delta(n_R)$$

Резонанс

Пересечение уровней:

Зависимость собственных значений от потенциала (плотности)

$$\frac{L_v}{L_0} = \frac{2EV}{\Delta m^2}$$

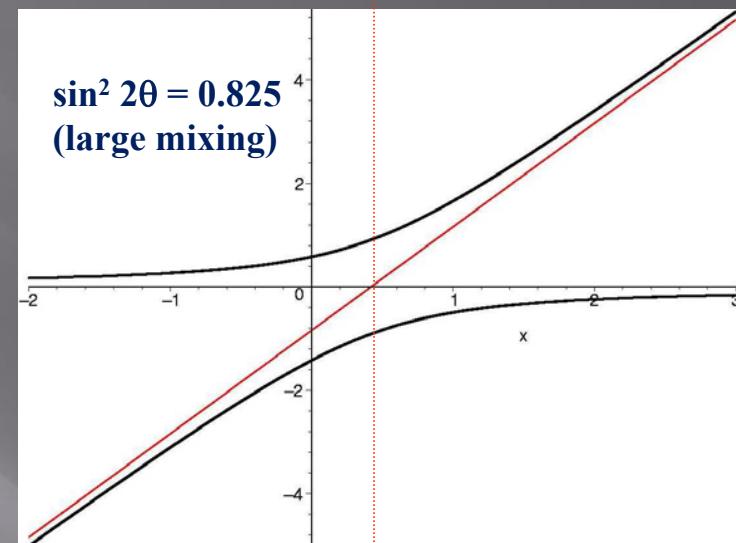
V. Rubakov, private comm.
N. Cabibbo, Savonlinna 1985
H. Bethe, PRL 57 (1986) 1271

$$\frac{L_v}{L_0} = \cos 2\theta$$

Резонанс в точке пересечения уровней

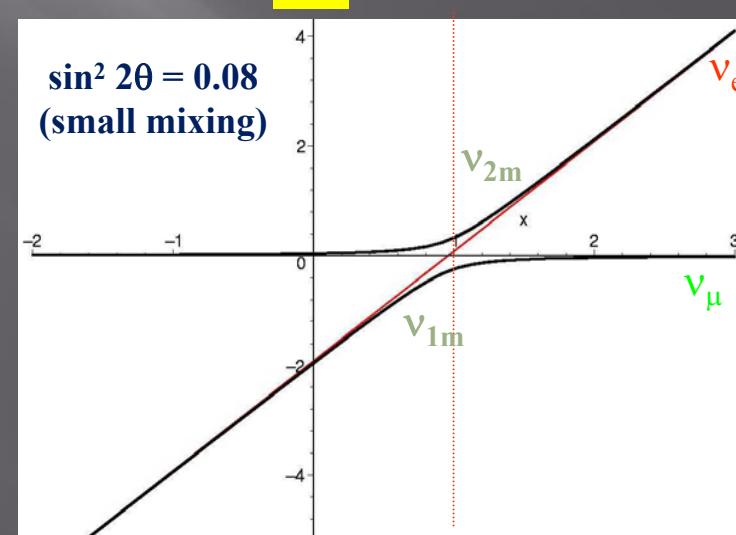
- расстояние между уровнями минимально
- длина осцилляций максимальна

При максимальном смещении: $n_r = 0$



$$\frac{L_v}{L_0} \sim n_e E$$

H



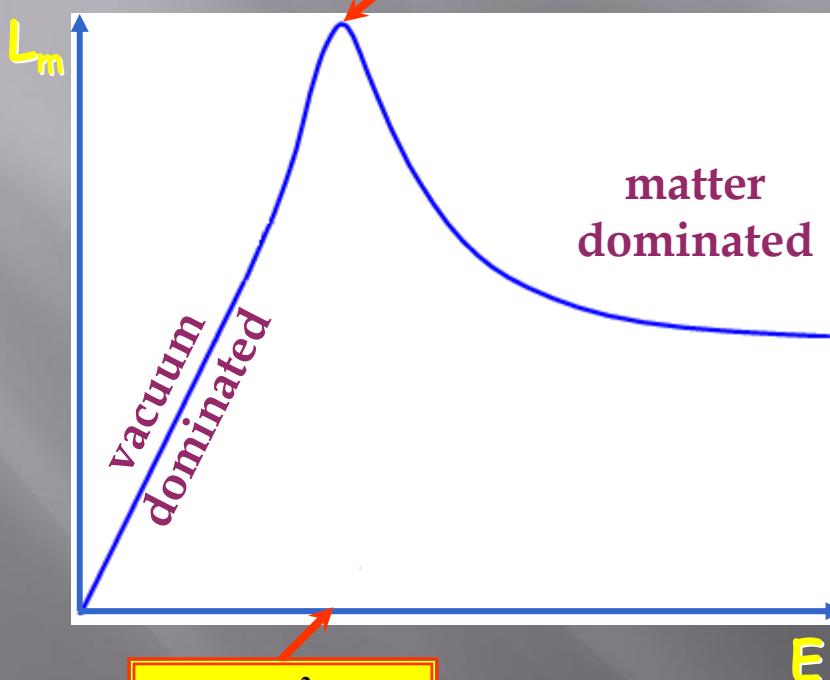
$$\frac{L_v}{L_0} \sim n_e E$$

Резонанс

Длина осцилляций в веществе:

$$L_m = \frac{2\pi}{H_2 - H_1} = \frac{4\pi E}{\Delta m^2} \left(\left(\cos 2\theta - \frac{2\sqrt{2}G_F n_e E}{\Delta m^2} \right)^2 + \sin^2 2\theta \right)^{-\frac{1}{2}}$$

$$L_m = \frac{L_v}{\sin 2\theta}$$



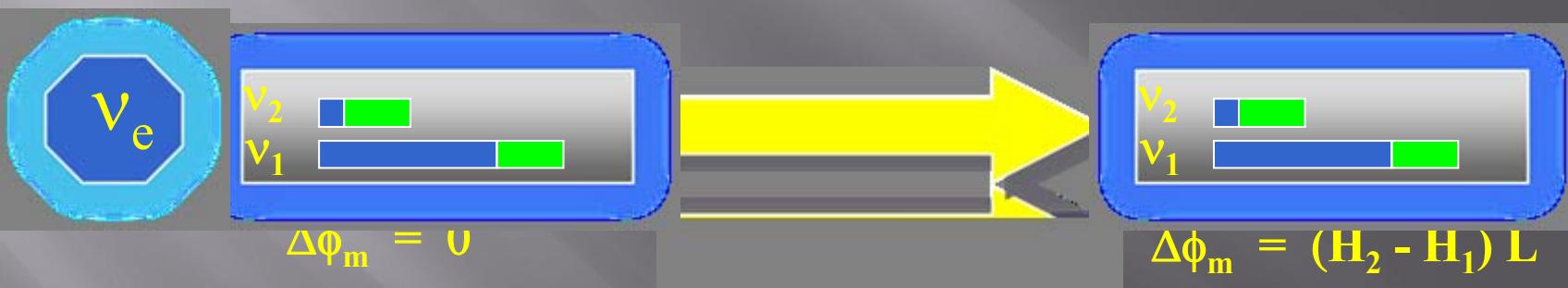
$$L_0 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}G_F n_e}$$

$$E_R = \frac{\Delta m^2 \cos 2\theta}{2\sqrt{2}G_F n_e}$$

Осцилляции в веществе

Постоянная плотность

- Ароматы собственных состояний не изменяются
 - Примеси собственных массовых состояний не изменяются: нет $\nu_{1m} \leftrightarrow \nu_{2m}$ переходов
 - монотонное возрастание разности фаз между собственными состояниями $\Delta\phi_m$
- $\left. \right\} \rightarrow$ Осцилляции как в вакууме



Параметры осцилляций (длина и амплитуда)
Определяются смешиванием в веществе и
разностью уровней в веществе

$\sin^2 2\theta_m, L_m$
вместо
 $\sin^2 2\theta, L_\nu$

Осцилляции в веществе

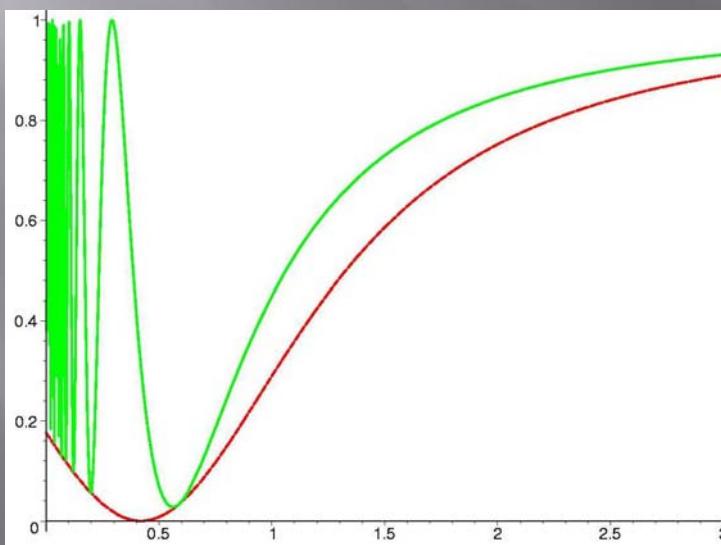
Постоянная плотность: Резонансное усиление осцилляций



$$\sin^2 2\theta = 0.824$$

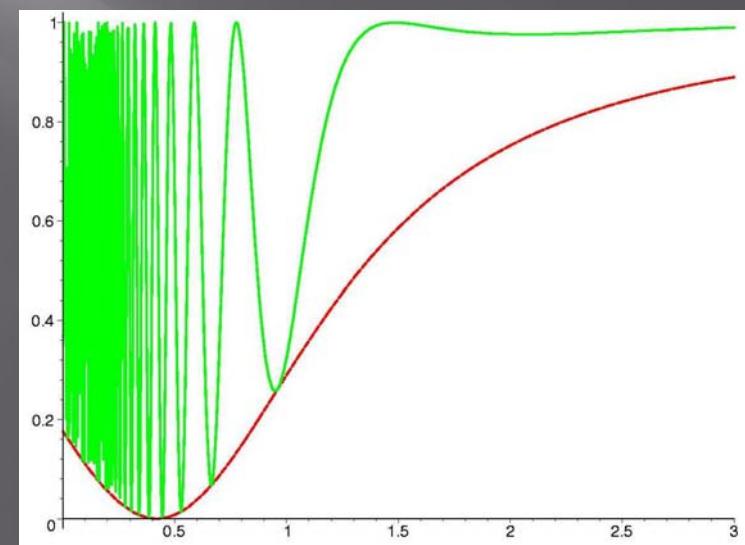
«тонкий» слой

$$L = L_0/\pi$$



$$\sim E/E_R$$

«толстый» слой $L = 10L_0/\pi$



$$\sim E/E_R$$

Осцилляции в веществе

Постоянная плотность: Резонансное усиление осцилляций



$F_0(E)$

Источник

v_e



Слой вещества с постоянной плотностью длиной L

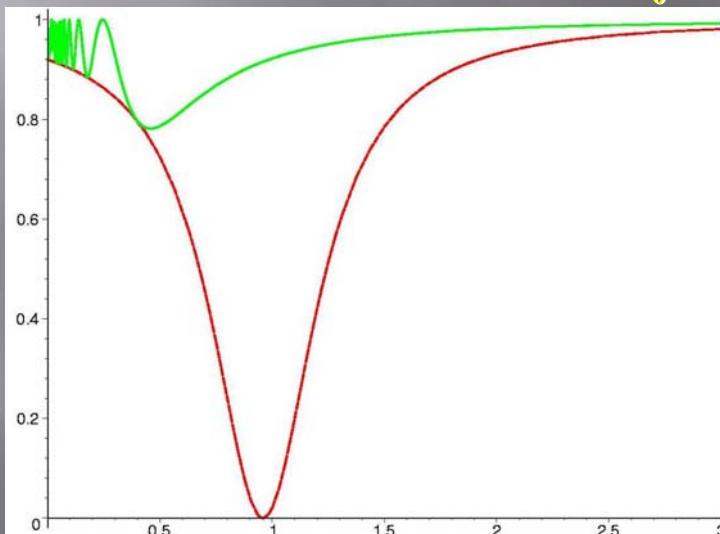
$F(E)$

Детектор

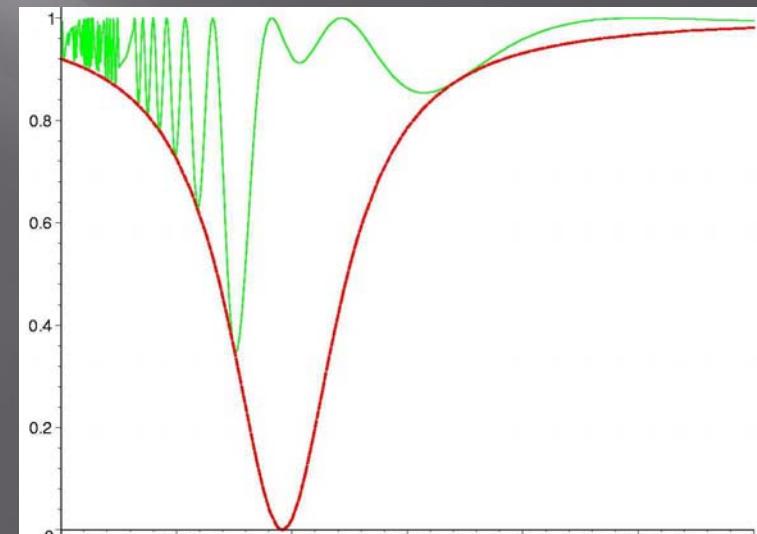
$$\sin^2 2\theta = 0.08$$

«тонкий» слой

$$L = L_0/\pi$$

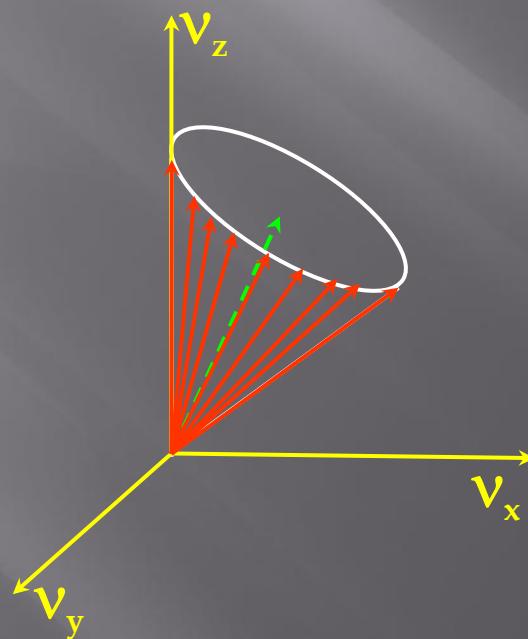
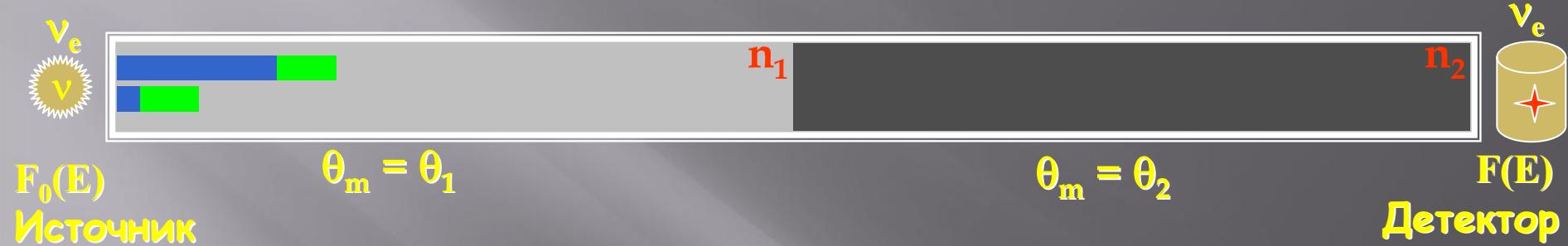


«толстый» слой $L = 10L_0/\pi$



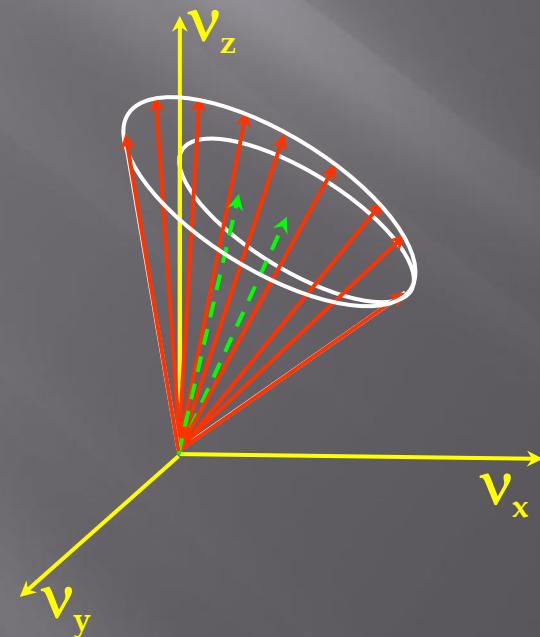
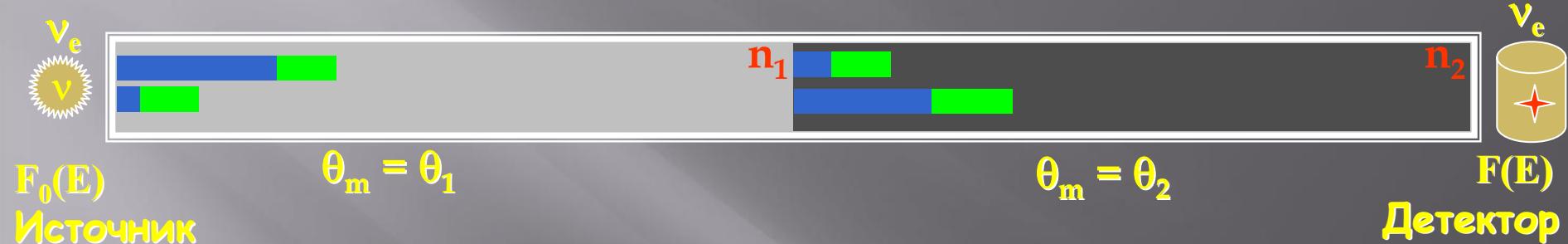
Осцилляции в веществе

Скачок плотности



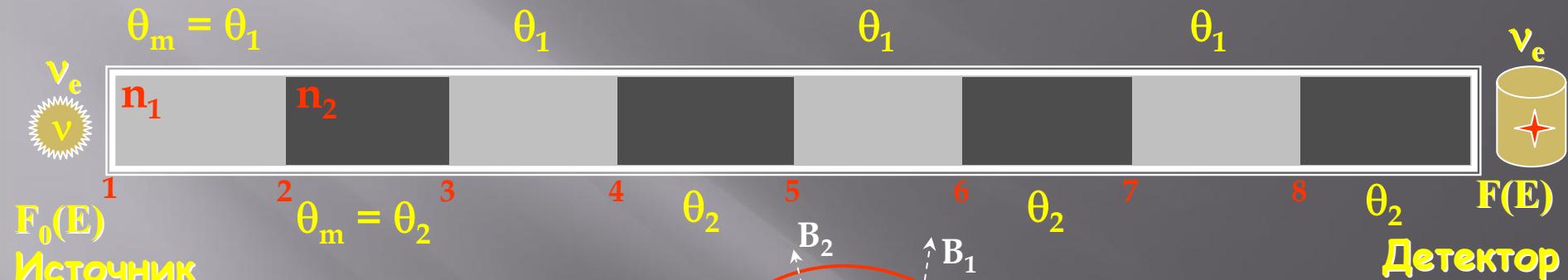
Осцилляции в веществе

Скачок плотности



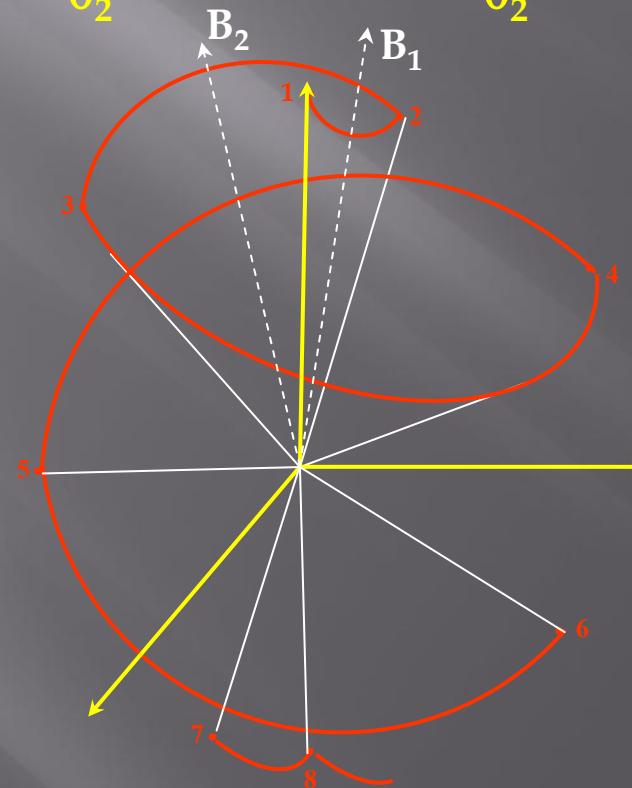
Осцилляции в веществе

Скачок плотности: параметрический резонанс



Усиление происходит при выполнении определенных условий для фазы осцилляций.

При этом не требуется ни большого смешивания в вакууме, ни увеличение смешивания в веществе.



$$\Phi_1 = \Phi_2 = \pi$$

Осцилляции в веществе

Неоднородная среда

$$i \frac{dv_f}{dt} = H_{\text{tot}} v_f$$

$$v_f = \begin{pmatrix} v_e \\ v_\mu \end{pmatrix}$$

В среде с переменной плотностью гамильтониан зависит от времени: $H_{\text{tot}} = H_{\text{tot}}(n_e(t))$. Уравнения движения собственных состояний, v_m , не расщепляются.

$$v_f = U(\theta_m)v_m$$

$$v_m = \begin{pmatrix} v_{1m} \\ v_{2m} \end{pmatrix}$$

$$i \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} v_{1m} \\ v_{2m} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & i \frac{d\theta_m}{dt} \\ -i \frac{d\theta_m}{dt} & H_2 - H_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{1m} \\ v_{2m} \end{pmatrix}$$

$$\theta_m = \theta_m(n_e(t))$$

Гамильтониан недиагонален \Rightarrow нет расщепления уравнений



Переходы $v_{1m} \Leftrightarrow v_{2m}$

Осцилляции в веществе

Неоднородная среда: *адиабатичность*

Можно пренебречь переходами $v_{1m} \leftrightarrow v_{2m}$, если плотность меняется достаточно медленно

Условие адиабатичности:

$$\left| \frac{d\theta_m}{dt} \right| \ll 1$$

$$H_2 - H_1$$

Параметр адиабатичности:

$$\gamma = \frac{\Delta m^2}{2E} \frac{\sin^2 2\Theta}{\cos 2\Theta} \frac{1}{n_e \left(\frac{dn_e}{dr} \right)}$$

$\gamma \gg 1$

Осцилляции в веществе

Неоднородная среда: *адиабатичность*

Условие адиабатичности:

$$\frac{\left| \frac{d\theta_m}{dt} \right|}{H_2 - H_1} \ll 1$$

Переходами между собственными массовыми состояниями можно пренебречь

$$v_{1m} \leftrightarrow v_{2m}$$

В резонансном слое:

- угол смешивания изменяется быстро
- Расщепление уровней минимально

Внешние условия (плотность)
изменяются медленно и
система имеет достаточно
времени чтобы подстроиться

Собственные состояния
распространяются
независимо

$$\Delta r_R > L_R$$

$L_R = L_v / \sin 2\theta$ длина
осцилляций в резонансе

$$\Delta r_R = \frac{n_R \operatorname{tg} 2\theta}{\left(\frac{dn}{dx} \right)_R}$$

Ширина
резонансного слоя

Осцилляции в веществе

Неоднородная среда: *адиабатическая конверсия*

Начальное состояние:

$$v(0) = v_e = \cos \theta_m^0 v_{1m}(0) + \sin \theta_m^0 v_{2m}(0)$$

**Адиабатическая
конверсия к
нулевой плотности:**

$$\begin{aligned} v_{1m}(0) &\rightarrow v_1 \\ v_{2m}(0) &\rightarrow v_2 \end{aligned}$$

Конечное состояние:

$$v(f) = \cos \theta_m^0 v_1 + \sin \theta_m^0 v_2$$

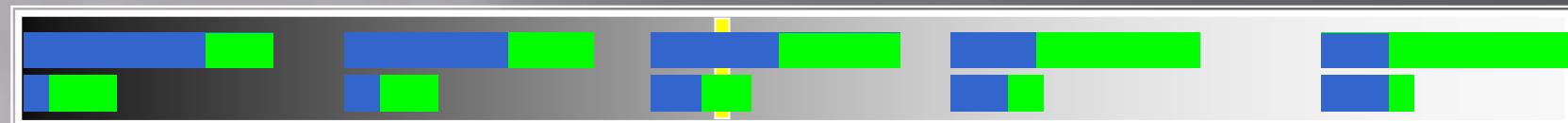
Усредненная вероятность обнаружить v_e :

$$P = \langle v_e | v(f) \rangle^2 = (\cos \theta \cos \theta_m^0)^2 + (\sin \theta \sin \theta_m^0)^2 = \sin^2 \theta + \cos 2\theta \cos^2 \theta_m^0$$

Осцилляции в веществе

Неоднородная среда: адабатическая конверсия

Резонанс

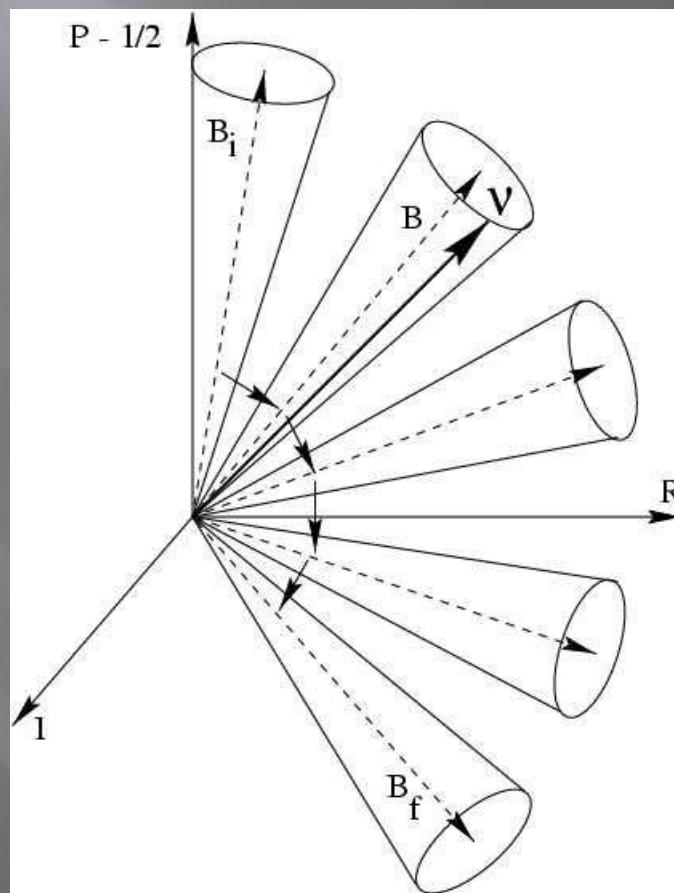


- ароматы собственных состояний изменяются в соответствии с изменением плотности
 - определяется θ_m
- примеси собственных состояний v_{1m} v_{2m} , не изменяются
 - фиксированы смешиванием в точке рождения
- Разность фаз возрастает
 - в соответствии с расщеплением уровней, которое изменяется с плотностью

Эффект обусловлен изменением аромата собственных состояний в веществе с переменной плотностью

Осцилляции в веществе

Неоднородная среда: *адиабатическая конверсия*

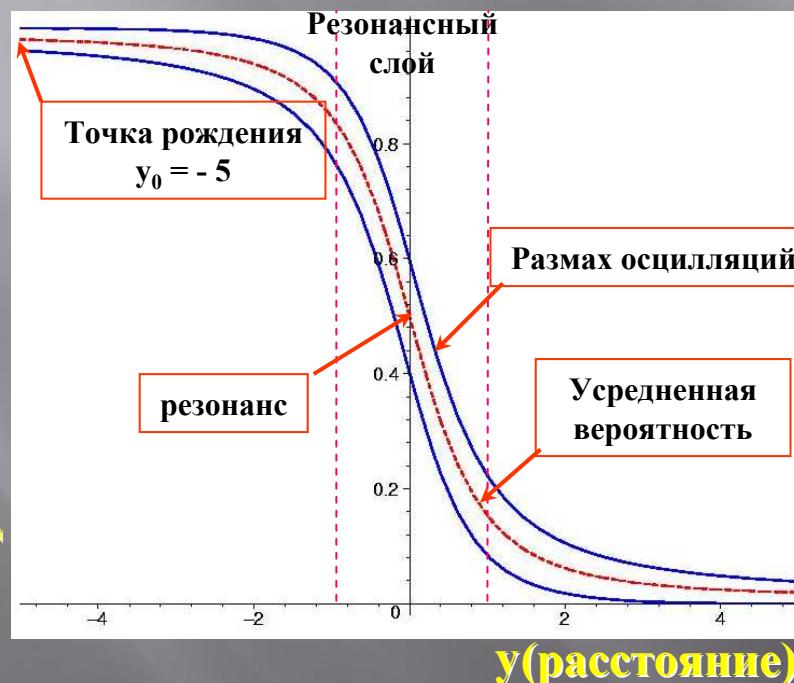


Осцилляции в веществе

Неоднородная среда: адабатическая конверсия
Зависимость от начальных условий

Картина адабатической конверсии
универсальна как функция переменной:

$$y = \frac{n_R - n}{\Delta n_R}$$



Нет явной зависимости от параметров осцилляций, распределения плотности и т.д.
Важна только начальная величина y_0 .

$y_0 < -1$ Безосцилляционная конверсия

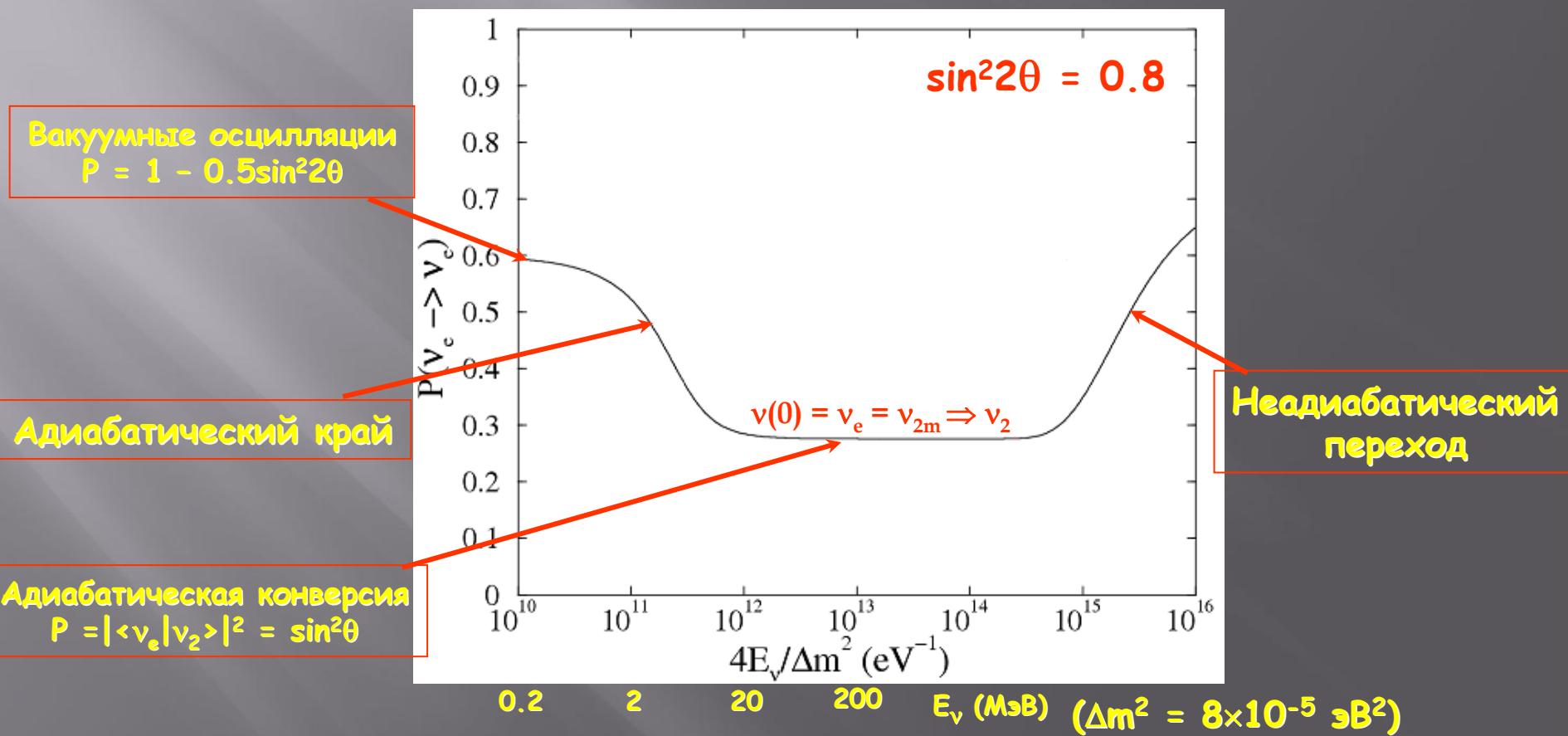
$y_0 = -1 \div 1$ Комбинация конверсии
и осцилляций

$y_0 > 1$ Осцилляции с незначительным
влиянием вещества

Осцилляции в веществе

Неоднородная среда: адабатическая конверсия

Усредненная вероятность выживания



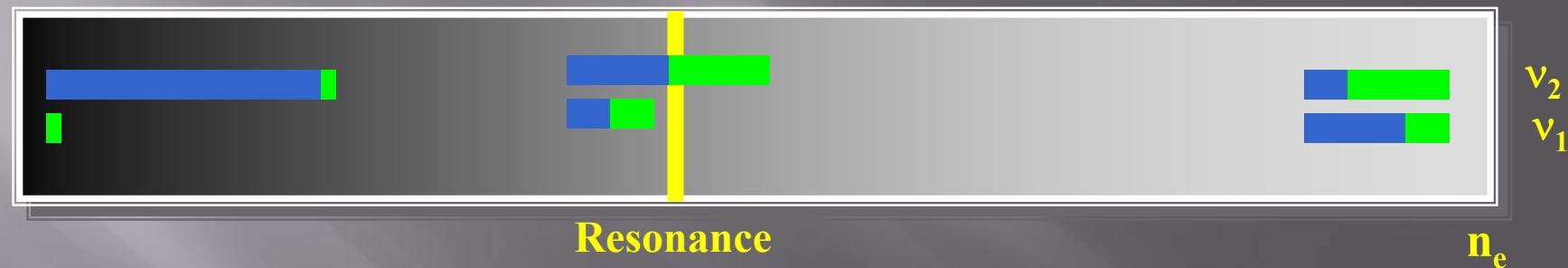
Осцилляции в веществе

Неоднородная среда: неадиабатическая конверсия

Быстрое изменение плотности

$$\nu_{2m} \Leftrightarrow \nu_{1m}$$

$$n_0 \gg n_R$$

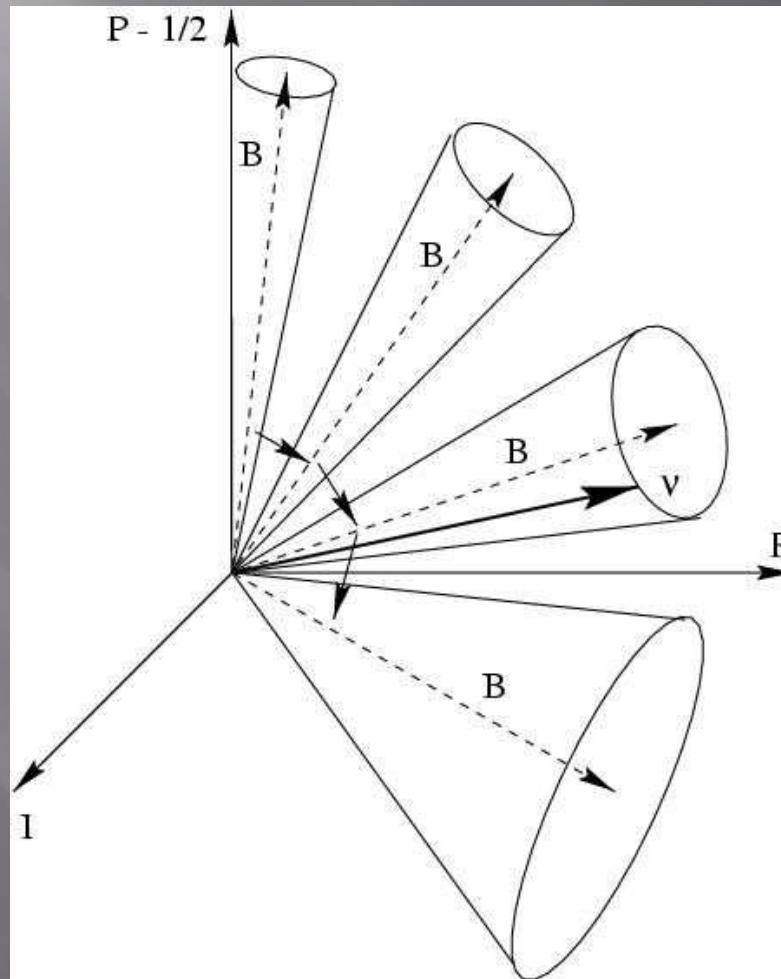


- Происходят переходы $\nu_{1m} \Leftrightarrow \nu_{2m}$. примеси собственных состояний изменяются
- Ароматы собственных состояний изменяются с изменением плотности
- Разность фаз собственных состояний изменяется, приводя к осцилляциям

$$\phi = (H_1 - H_2) t$$

Осцилляции в веществе

Неоднородная среда: неадиабатическая конверсия



Осцилляции/конверсия

Оба процесса требуют смешивания, конверсия обычно сопровождается осцилляциями

Осцилляции

- Вакуум или однородная среда с постоянными параметрами
- Разность фаз между собственными состояниями возрастает

$$\phi$$

Адиабатическая конверсия

- Неоднородная среда и/или среда с изменяющимися во времени параметрами
- Изменение смешивания в среде = изменение аромата собственных состояний

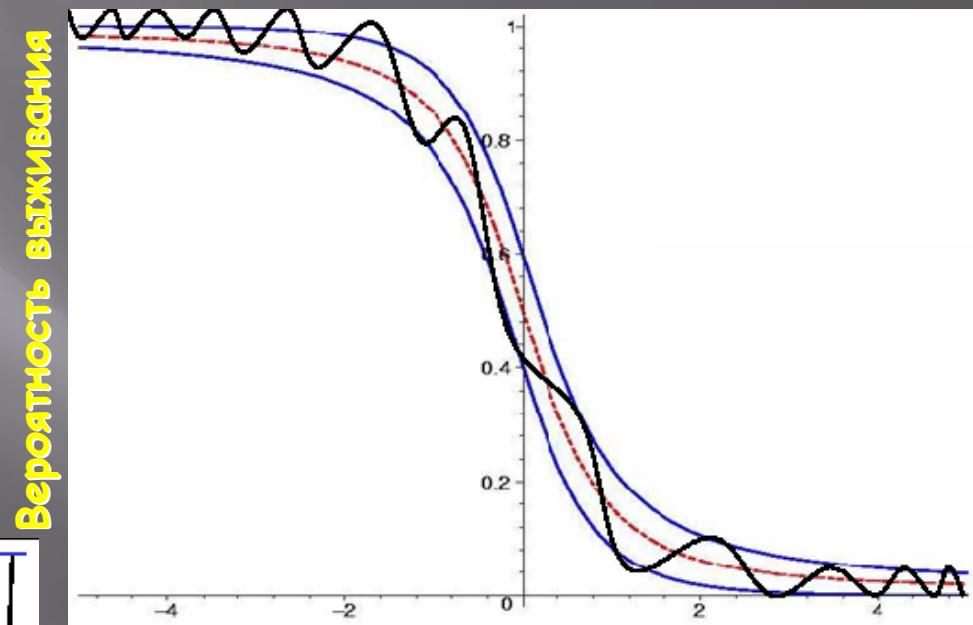
$$\theta_m$$

**В неоднородной среде:
комбинация двух процессов**

Осцилляции/конверсия

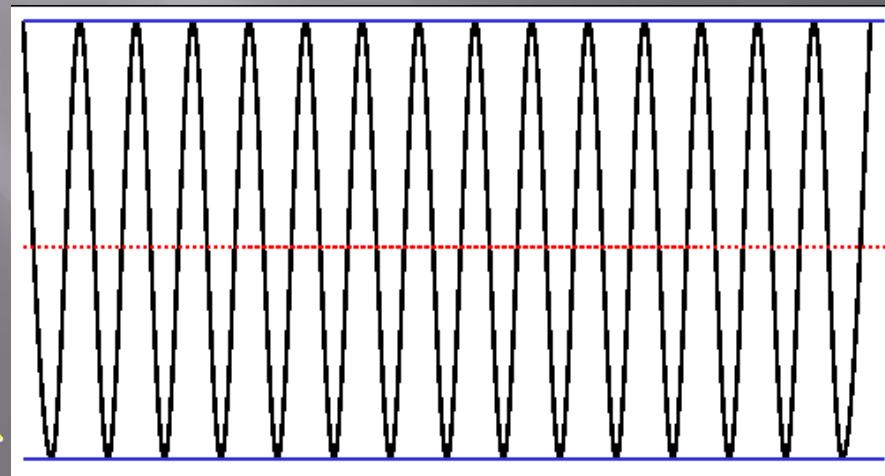
*пространственная
картина*

Адиабатическая конверсия



Вероятность выживания

Осцилляции



Вероятность выживания

$2\nu \Rightarrow 3\nu$

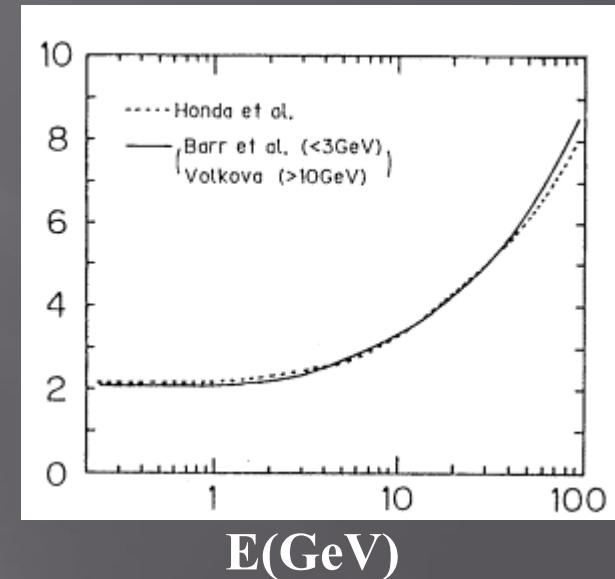
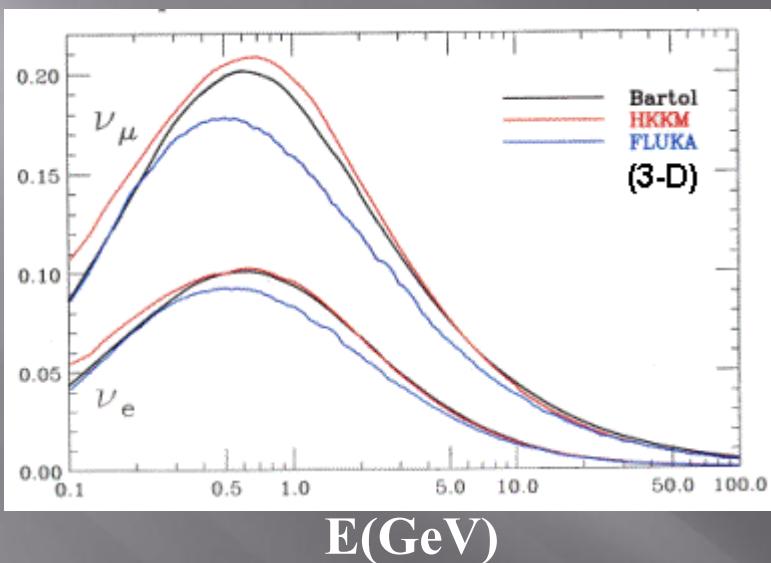
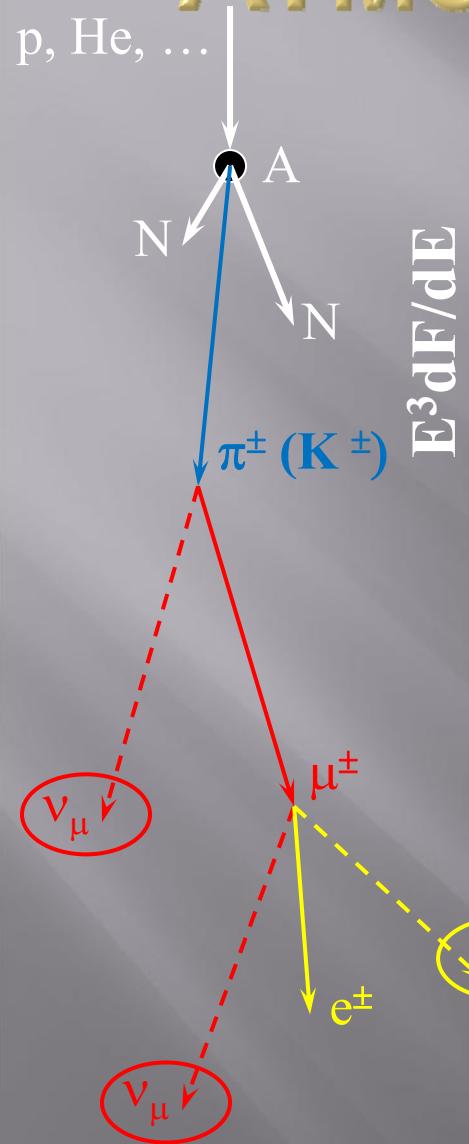
Существует 3 типа нейтрино: ν_e , ν_μ , $\nu_\tau \Rightarrow$
3 угла смешивания ($\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$) и фаза CP
нарушения определяют матрицу смешивания

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

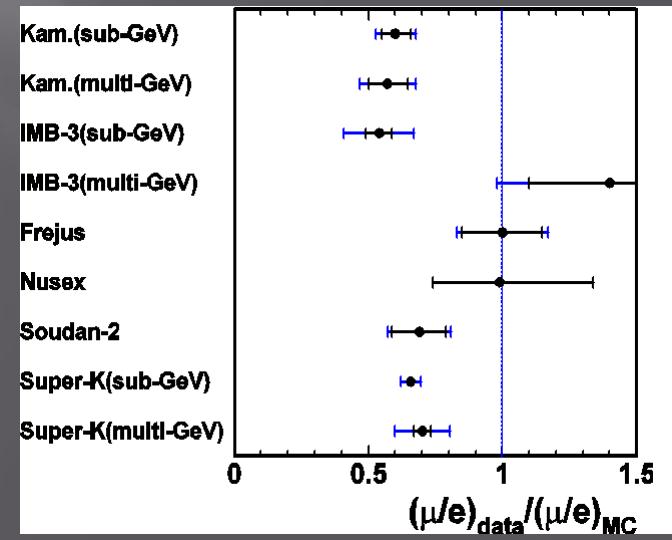
$$c_{ij} = \cos \theta_{ij}$$

$$s_{ij} = \sin \theta_{ij}$$

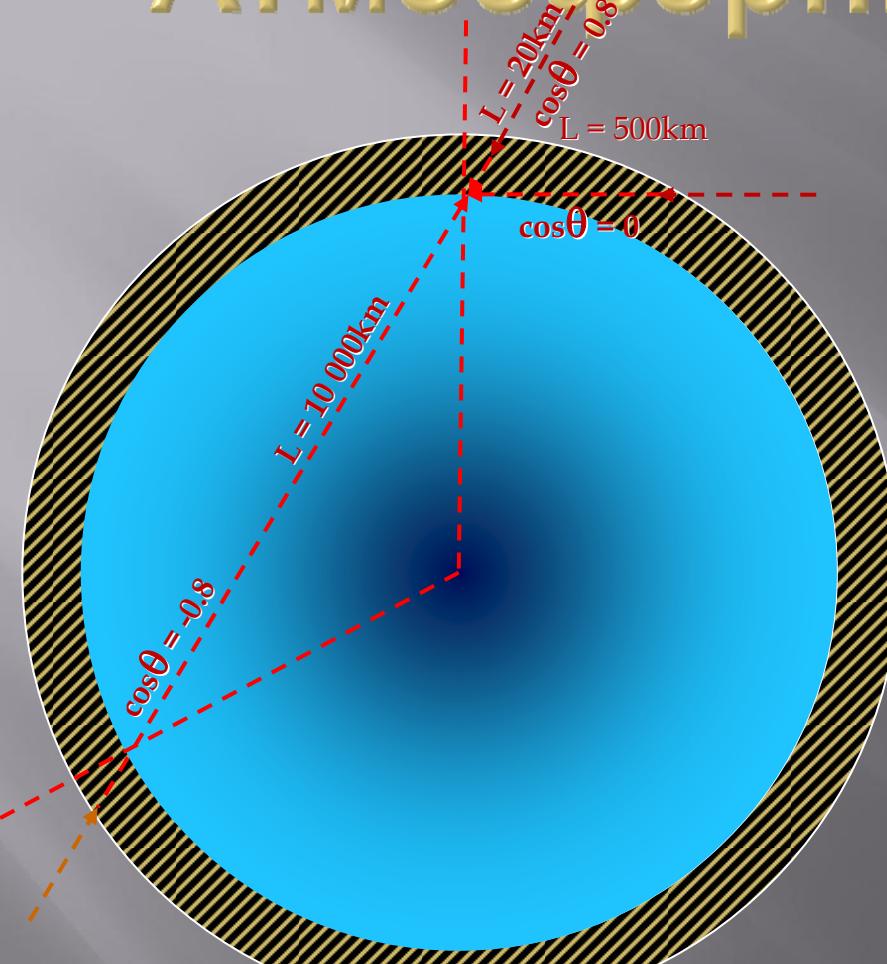
Атмосферные нейтрино



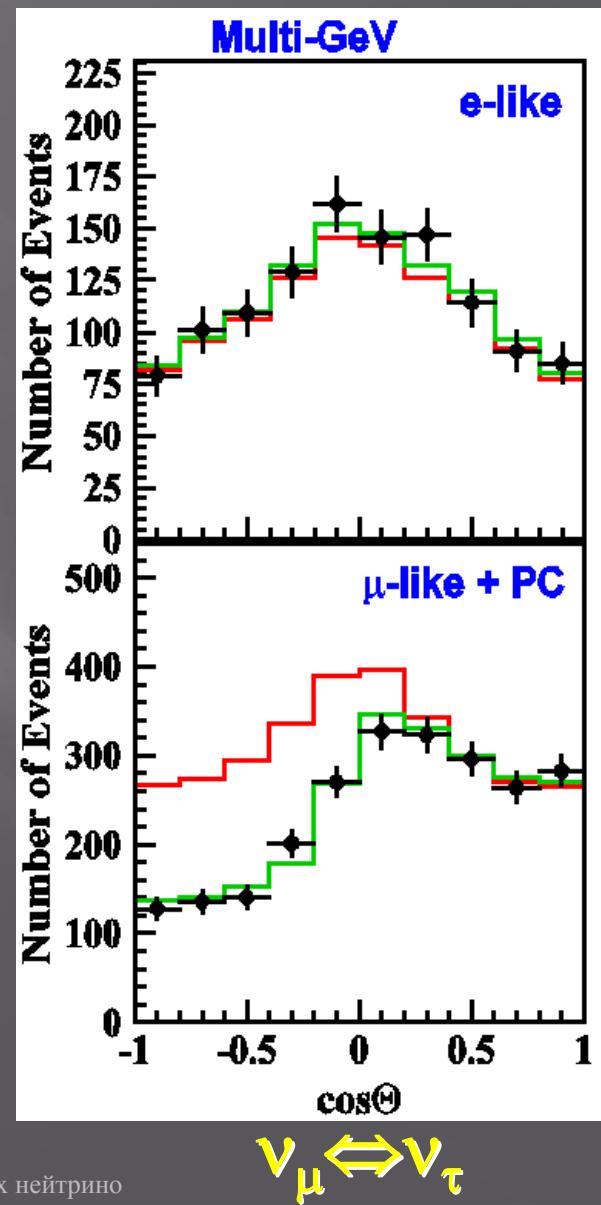
$$R = \frac{(\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu)}{(\nu_e + \bar{\nu}_e)} = 2$$



Атмосферные нейтрино

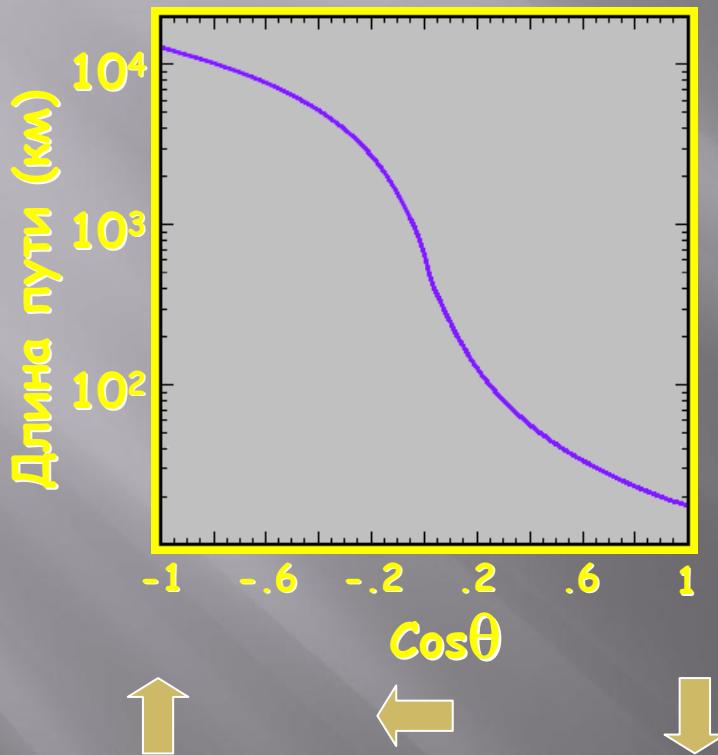


**Поток не изотропный, однако он
симметричный относительно
сверху/снизу.**

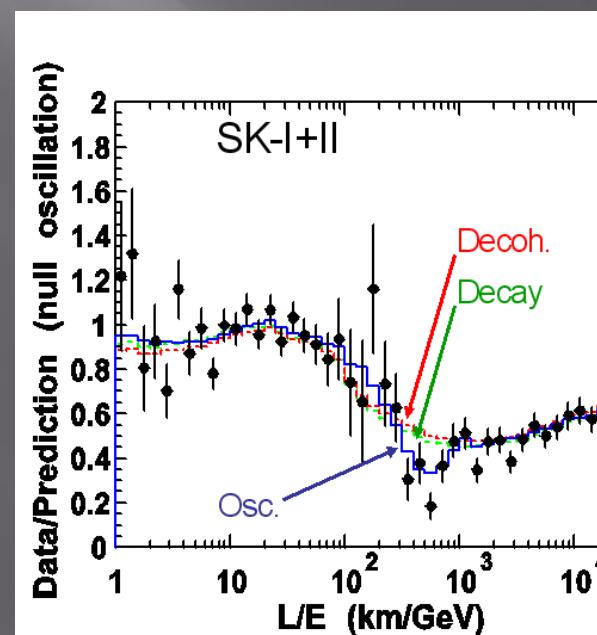
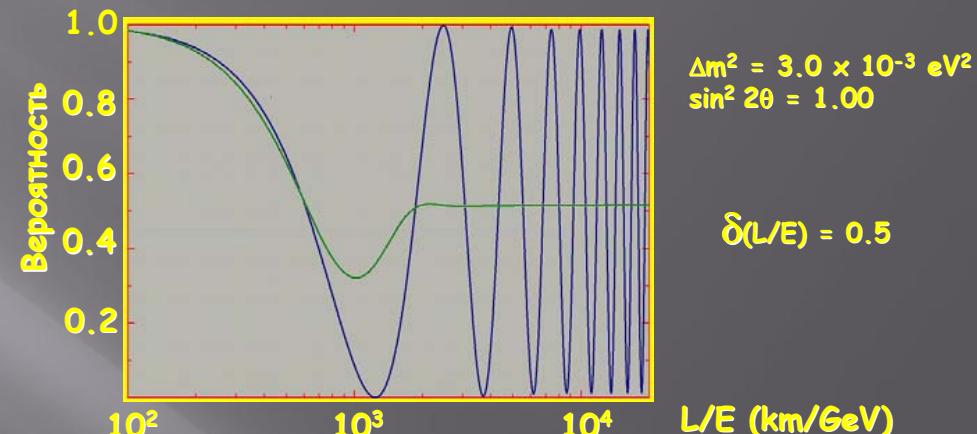


Атмосферные нейтрино

$$P(\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m^2 (eV^2) L(km)}{E(GeV)} \right)$$



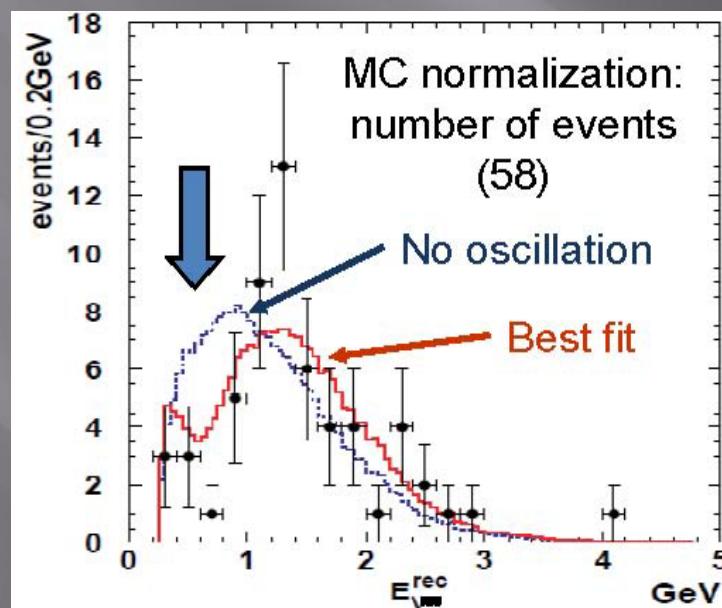
Величина L/E для атмосферных нейтрино изменяется от 0.1 (10 км/100 ГэВ) до 10^4 (10⁴ км/1 ГэВ).



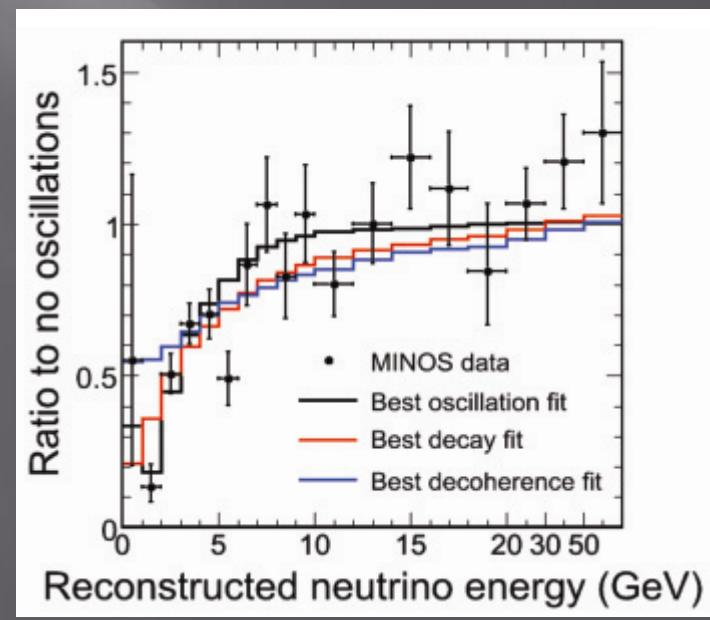
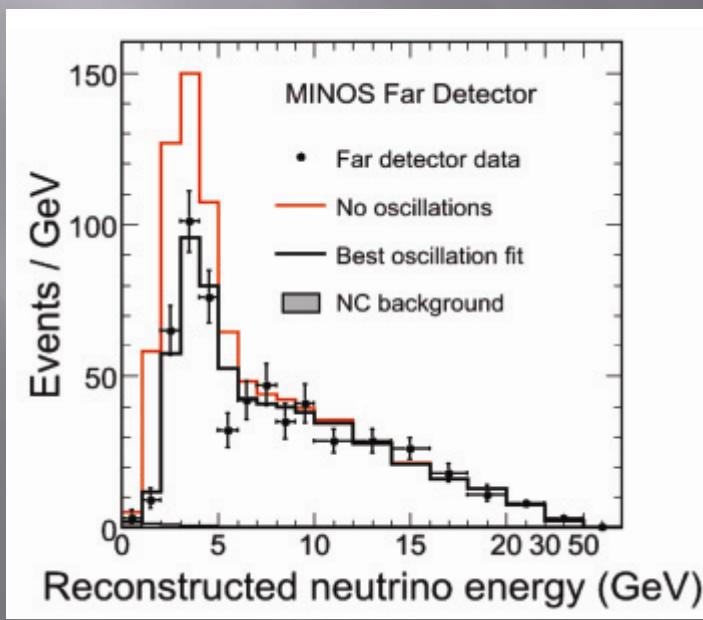
параметры:
 $\Delta m^2 = 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$
 $\sin^2 2\theta = 1.00$

Атмосферные нейтрино

K2K



Атмосферные нейтрино



Атмосферные нейтрино

OPERA



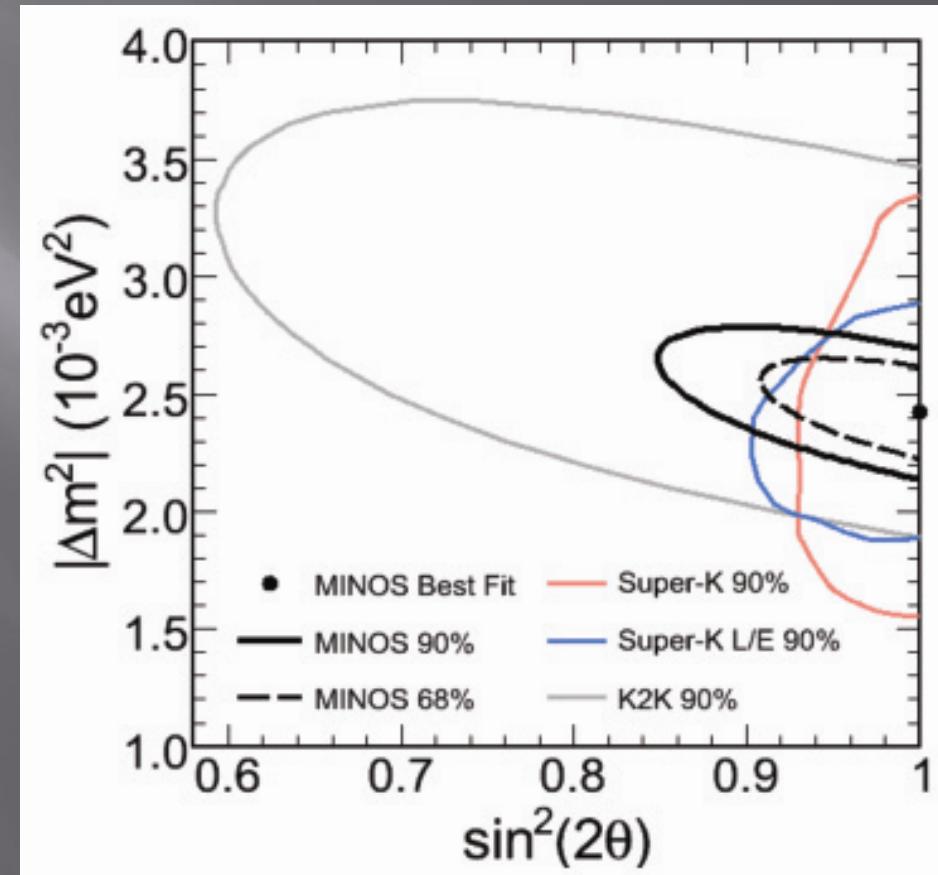
Атмосферные нейтрино

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) = \sin^2 2\theta \sin 2(1.27 \Delta m_{23}^2 L/E)$$

$$|\Delta m^2| = (2.43 \pm 0.13) \times 10^{-3} \text{ eV}^2 \text{ (68% c.l.)}$$

$$\sin^2 2\theta > 0.90 \text{ (90% c.l.)}$$

Physical Review Letters 101 131802
(arXiv:hep-ex/0806.2237)



Солнечные нейтрино

Адиабатическая
конверсия в веществе
Солнца

$$\rho : (150 \rightarrow 0) \text{ г/см}^3$$



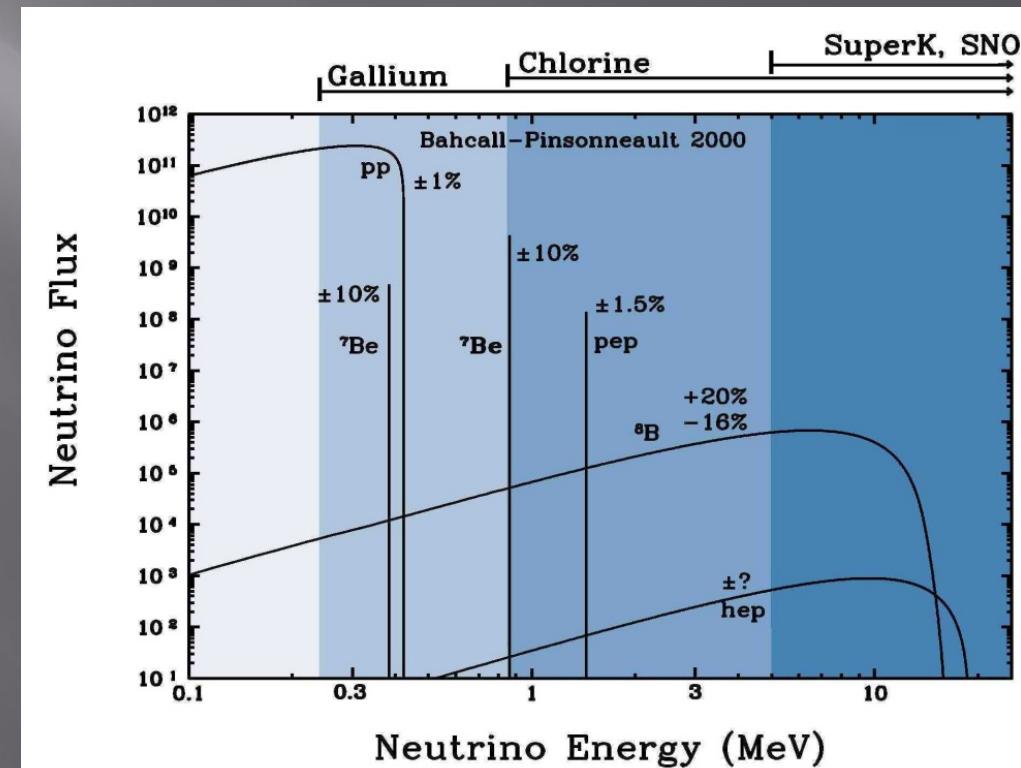
ν_e

Параметр адиабатичности $\gamma \sim 10^4$

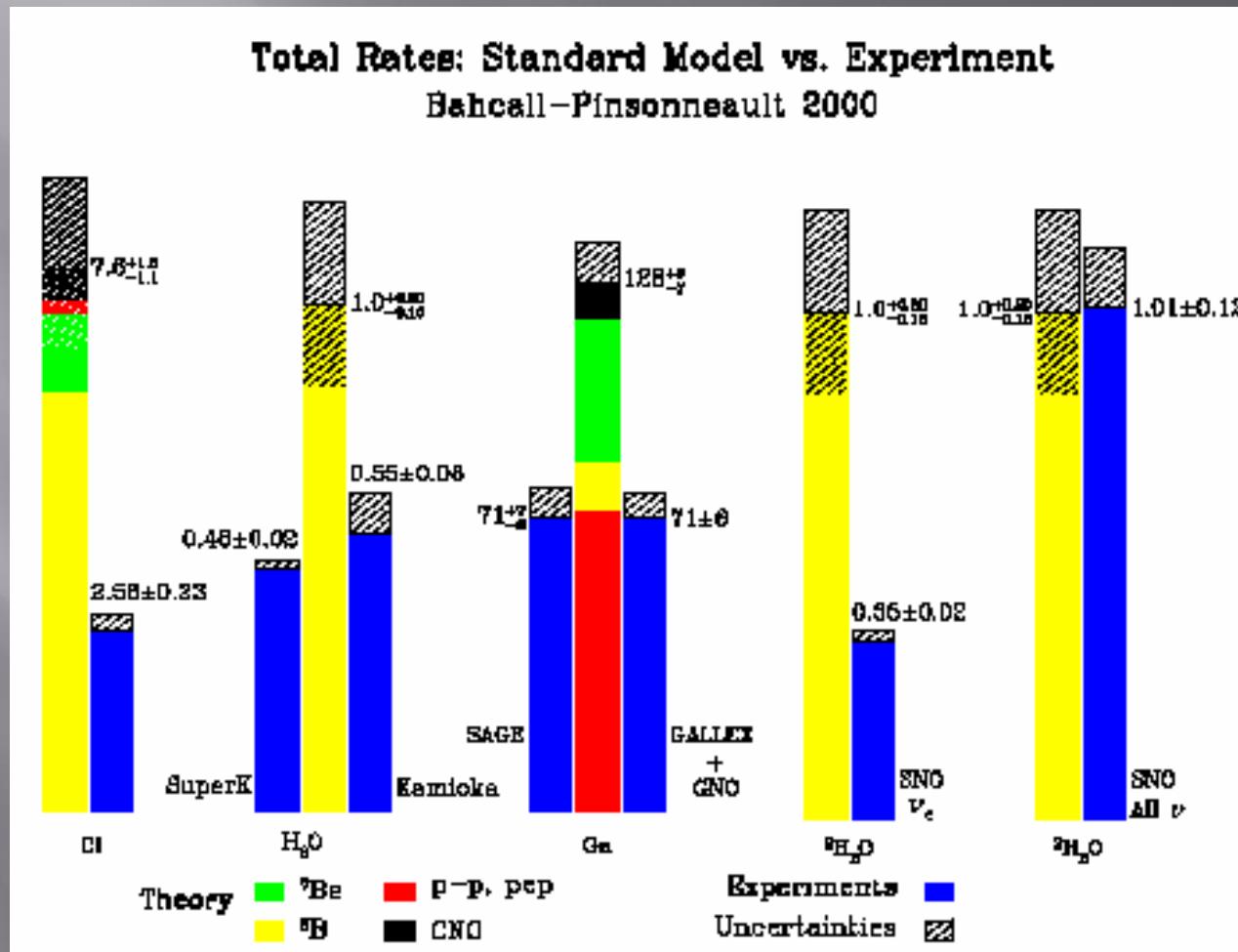


Только электронные нейтрино

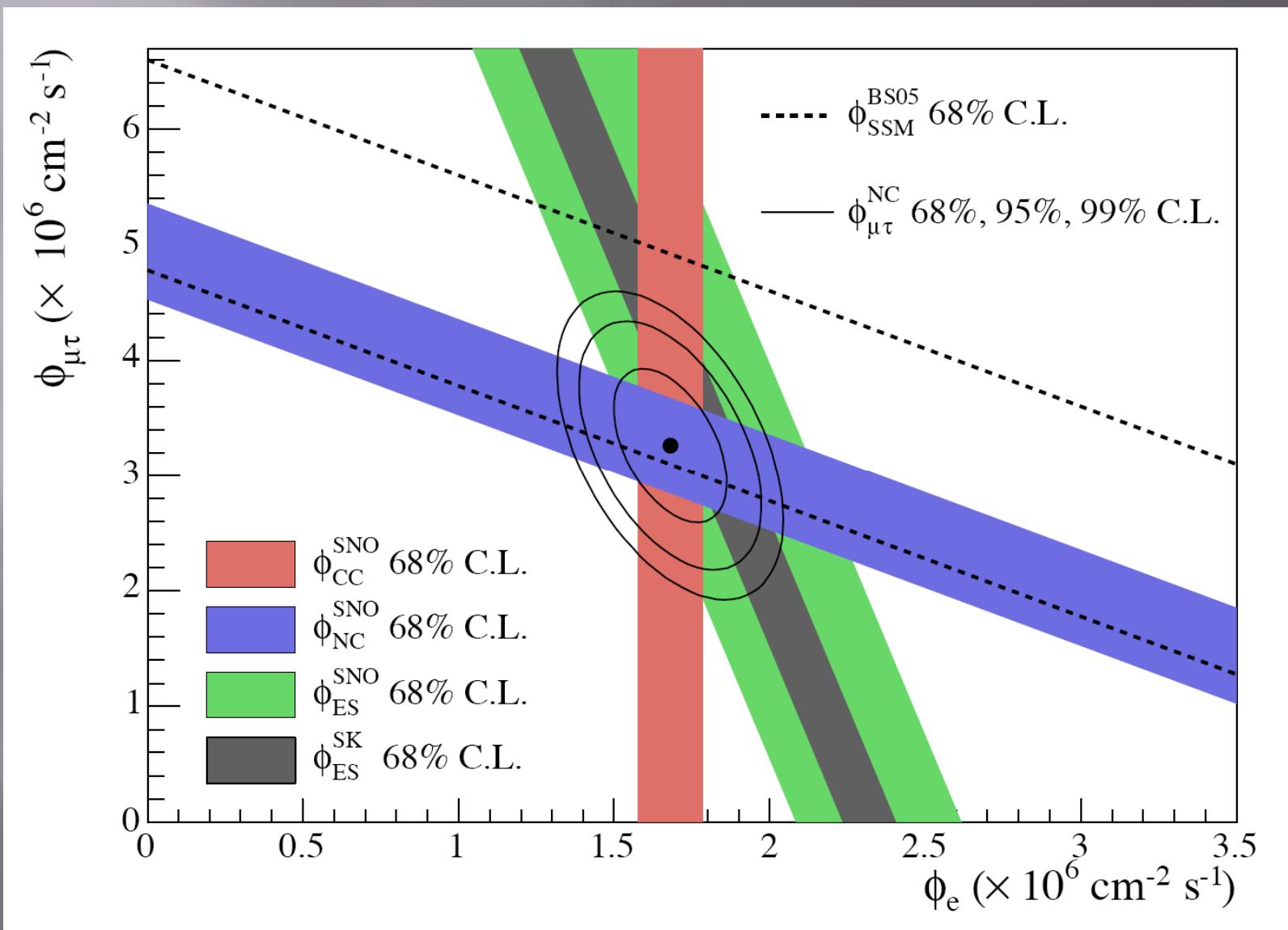
J.N. Bahcall



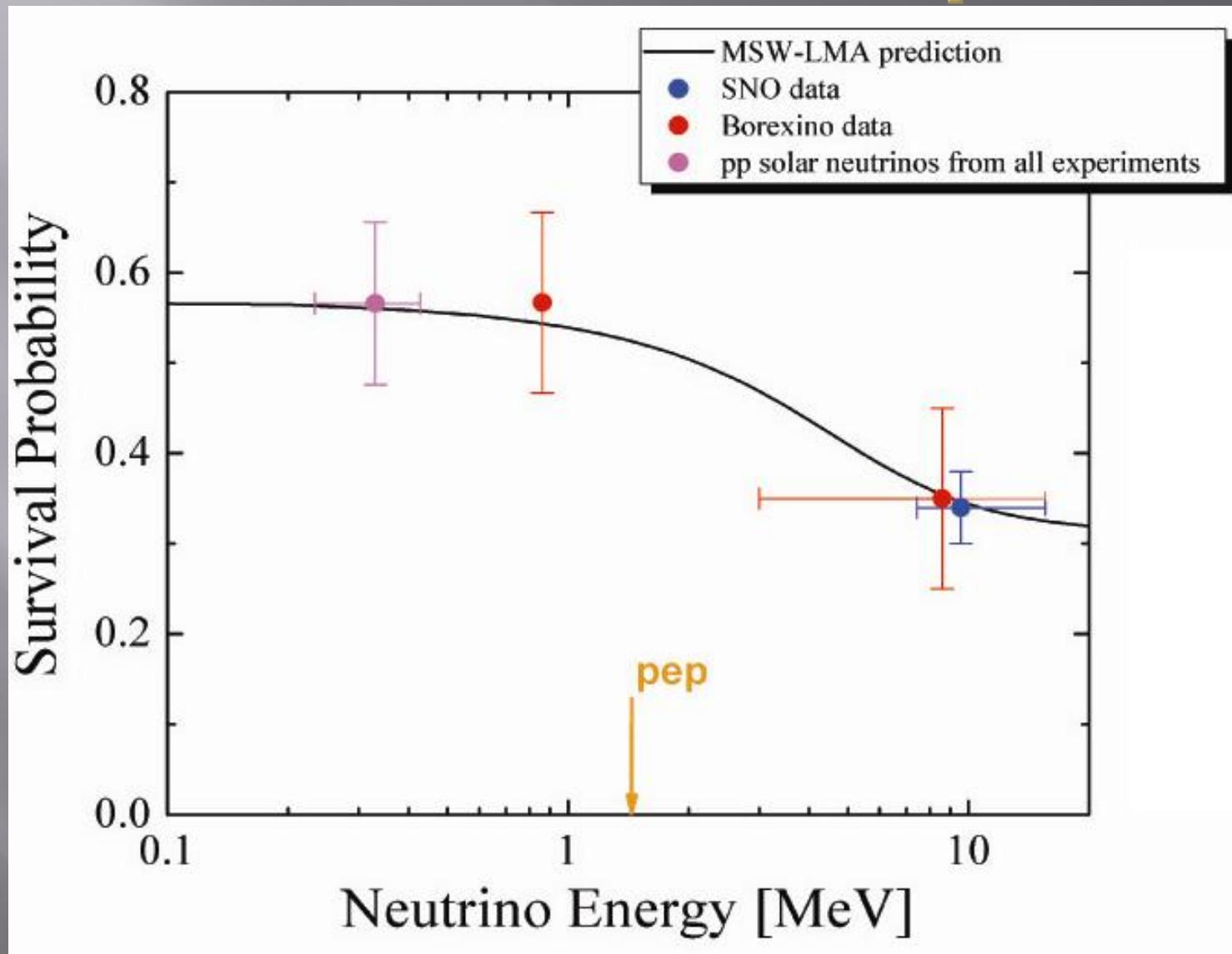
Солнечные нейтрино



Солнечные нейтрино



Солнечные нейтрино

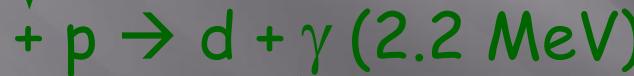


Солнечные нейтрино

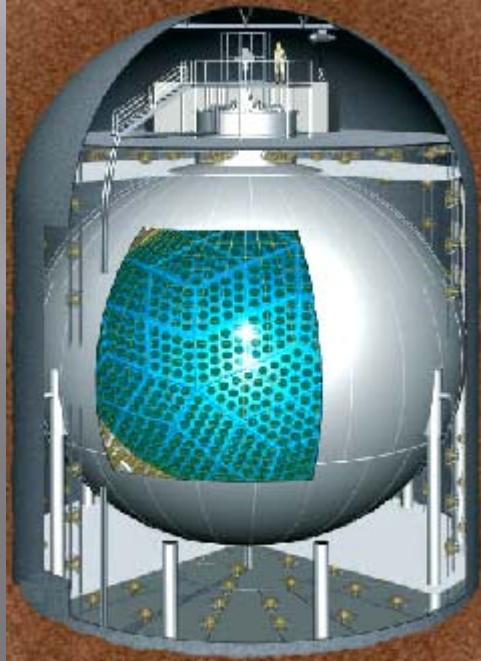
Эксперимент KamLAND

Измерение потока $\bar{\nu}_e$ от реакторов на расстоянии ≈ 180 км

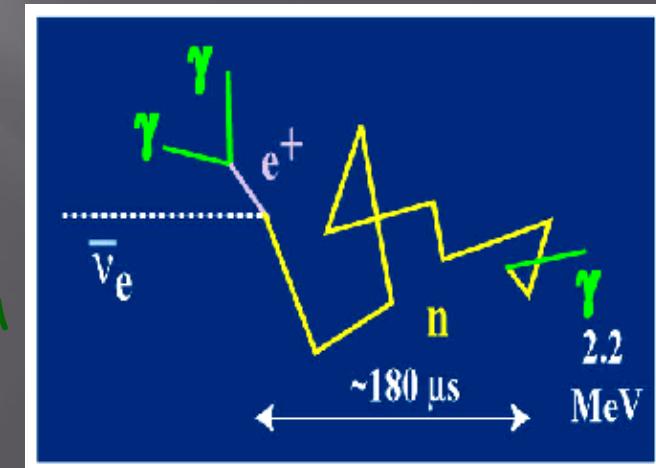
прямой сигнал



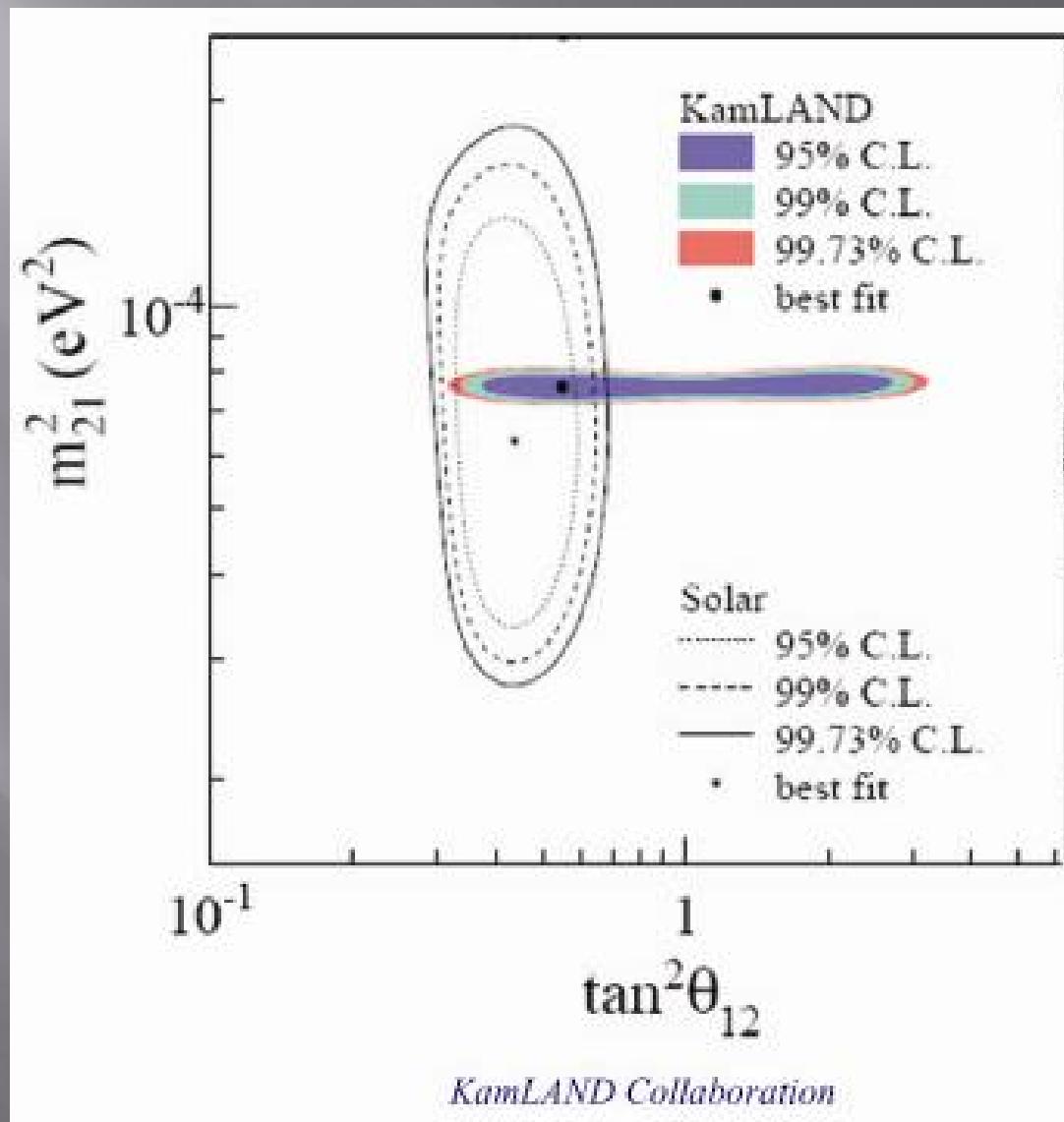
Задержанный
сигнал



Сфера диаметром 13 м
1000 тонн жидкого
сцинтиллятора



Солнечные нейтрино



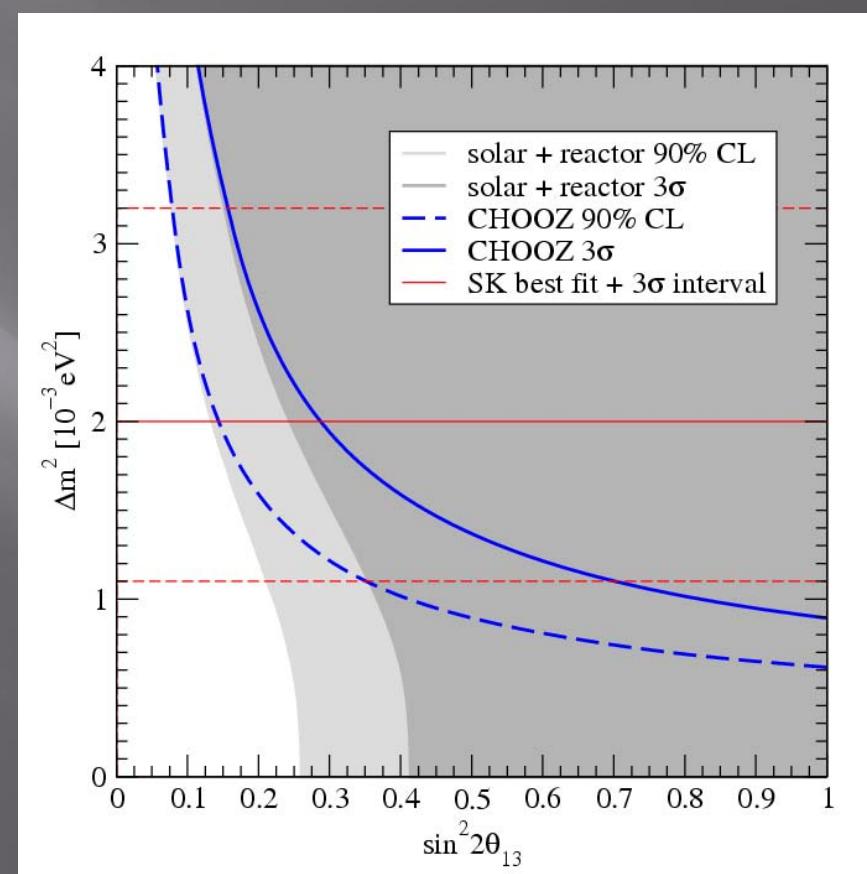
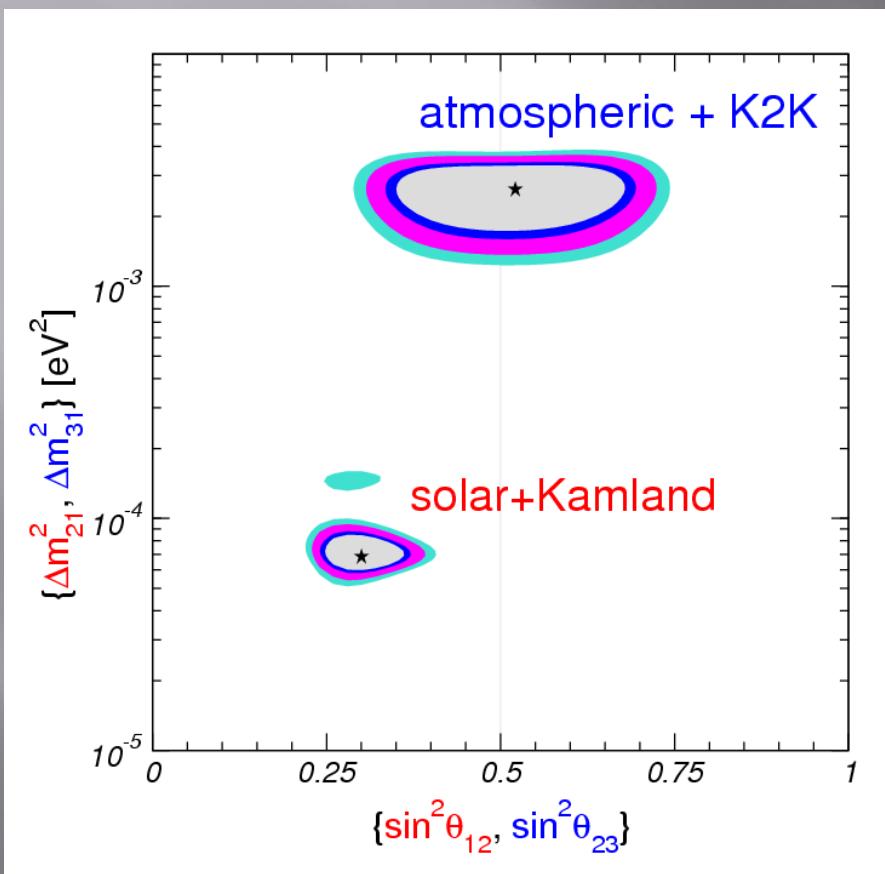
Оscилляции солнечных нейтрино
 Δm_{21}^2 $(5.4 \times 10^{-5} \div 9.5 \times 10^{-5}) \text{ eV}^2$
 $\sin^2 2\theta_{12}$ $(0.71 \div 0.95)$

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

$$c_{ij} = \cos \theta_{ij}$$

$$s_{ij} = \sin \theta_{ij}$$

Оscилляции атмосферных нейтрино
 Δm_{32}^2 $(1.3 \times 10^{-3} \div 3.0 \times 10^{-3}) \text{ eV}^2$
 θ_{23} $\sin^2 2\theta > 0.9$



Солнечные нейтрино

Солнечные нейтрино

Адиабатическая конверсия (MSW)

Эффект вещества доминирует
(по крайней мере при высоких
энергиях)

Без осцилляционные
переходы, фаза осцилляций не
имеет значения

Формула адиабатической конверсии

Реакторные нейтрино

Осцилляции в вакууме

Эффект вещества очень мал

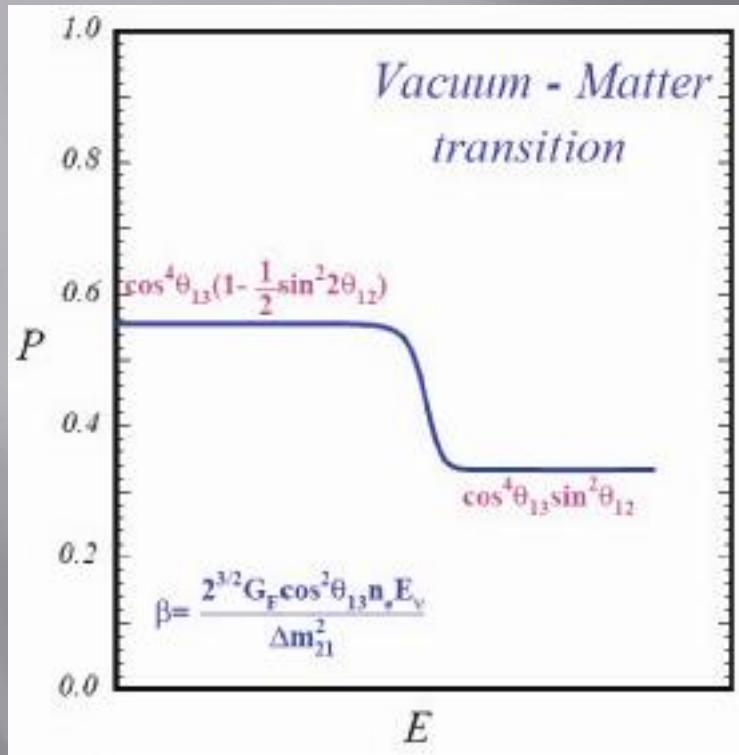
Фаза осцилляций определяет
наблюдаемый эффект

Формула осцилляций в вакууме

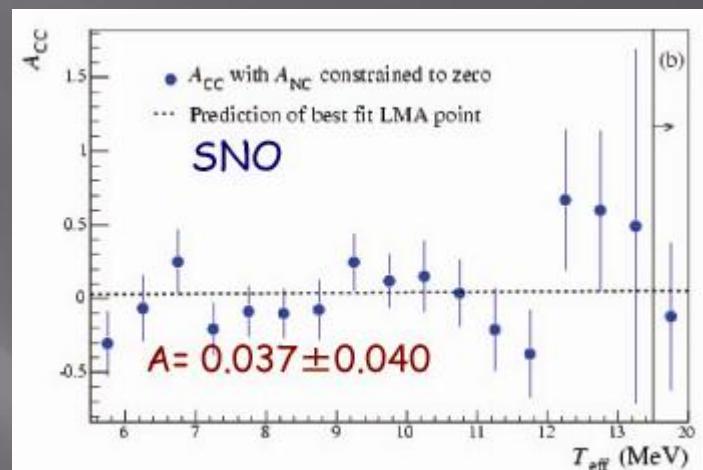
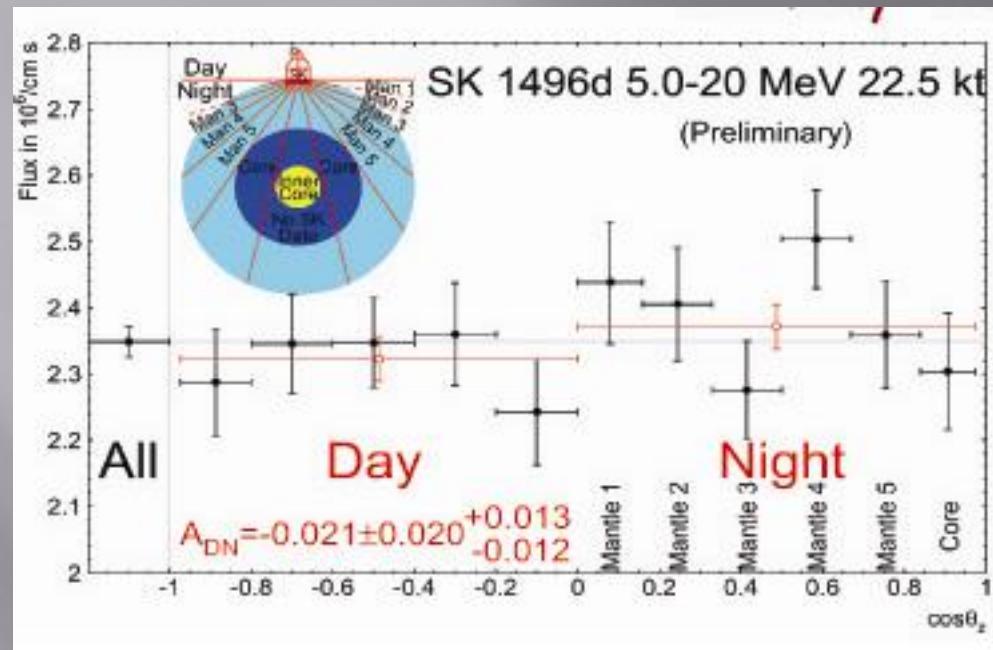
$$\Delta m^2; \theta$$

Совпадение этих параметров определенных из данных
по солнечным нейтрино и из эксперимента KamLAND
подтверждает правильность теории

Солнечные нейтрино



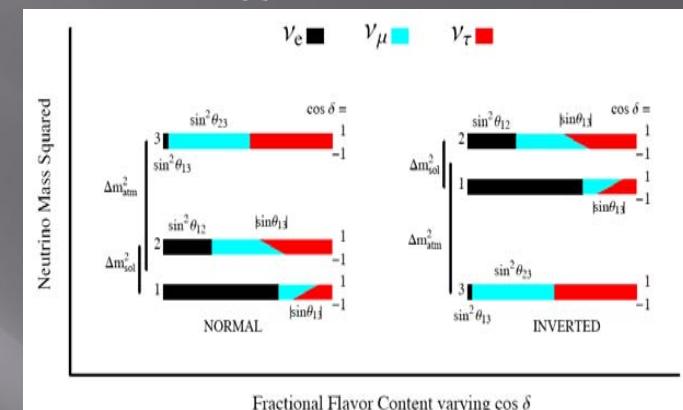
Солнечные нейтрино



Атмосферные нейтрино

Стандартный список проблем

- Дирак или Майорана тип?
- Какова абсолютная масса?
- Каков знак Δm_{31}^2 ?
- Насколько мал θ_{13} ?
- Насколько точно $\theta_{23} = 45^\circ$?
- Если нет, то каково значение $< 45^\circ$ или $> 45^\circ$?
- Существует ли СР нарушение в лептонном секторе?
- ...

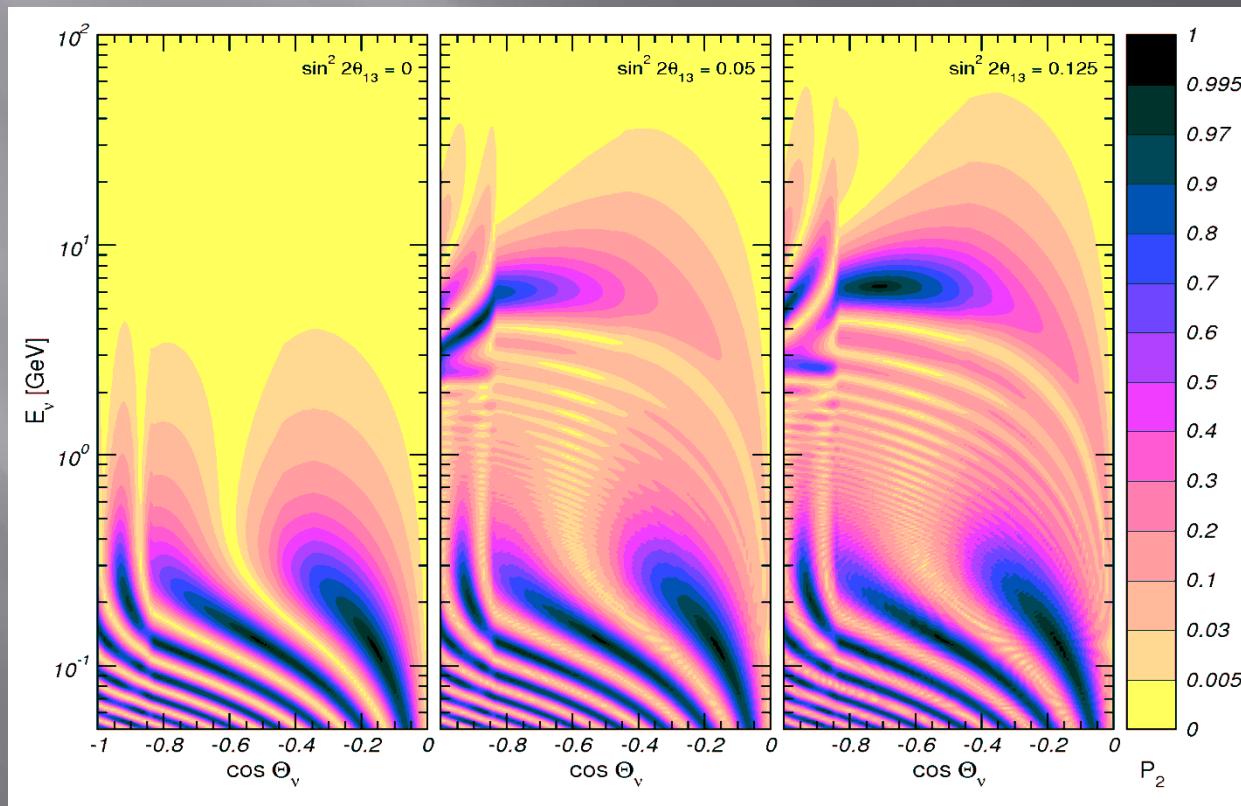


Эксперименты с природными потоками нейтрино могут помочь решить часть этих проблем.

Атмосферные нейтрино

Контуры равных вероятностей в (Θ_ν, E_ν) плоскости

$P(\nu_e \Leftrightarrow \nu_\mu)$ зависимость от $\sin^2 2\theta_{13}$



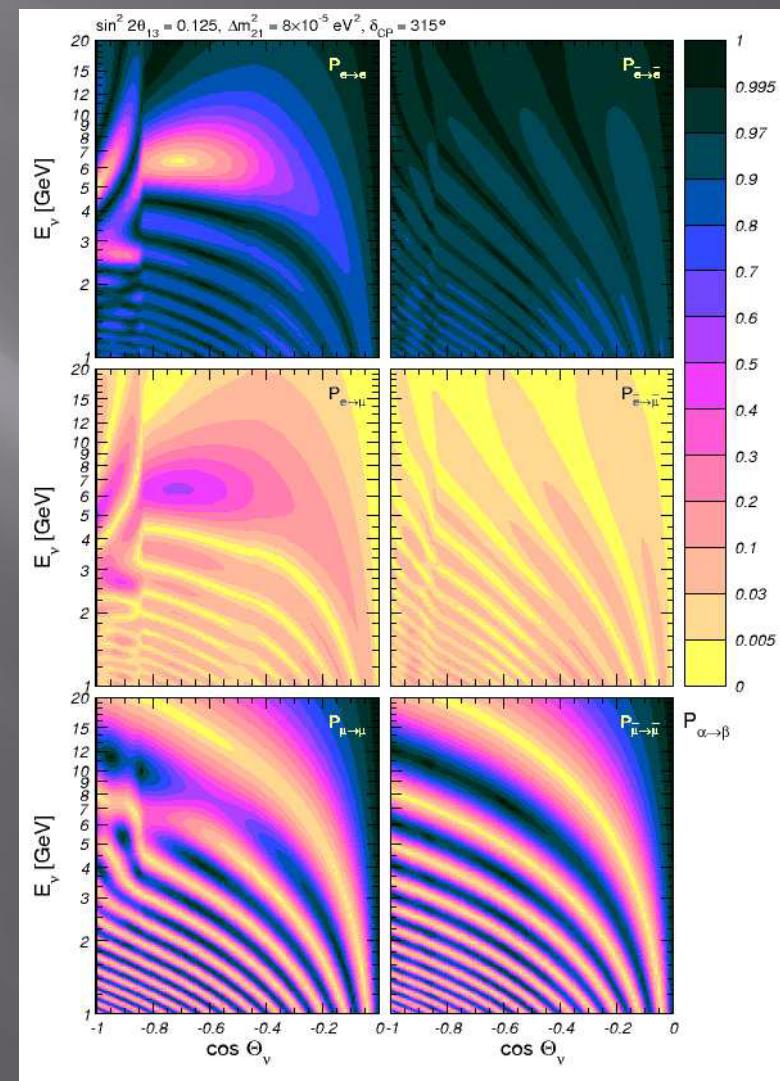
E. Akhmedov, M. Maltoni, A. Smirnov hep-ph/0612285

Атмосферные нейтрино

Контуры равных вероятностей в (Θ_ν, E_ν) плоскости

зависимость от δ_{CP}

E. Akhmedov, M.
Maltoni, A. Smirnov
[hep-ph/0612285](#)



Солнечные нейтрино

Дальнейшие возможности

Физика нейтрино

- Уточнение значений параметров нейтринных осцилляций
- Асимметрия день/ночь = регенерация ν_e в веществе Земли
- Фактор подавления потока нейтрино в области энергий $1 \div 2$ МэВ

Физика Солнца

- Роль СНО цикла
- Прецизионное измерение потока pp нейтрино
- Измерение потока $\bar{\nu}_e$ нейтрино

Нейтрино от сверхновой

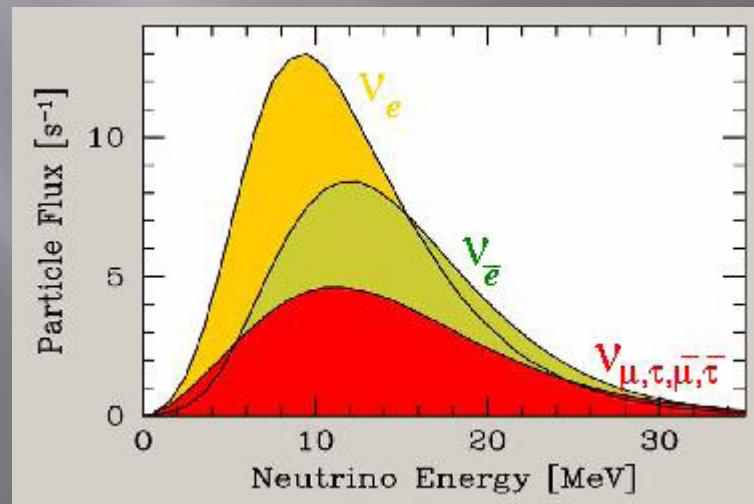
Гравитационный коллапс звезды → Ударная волна

Нейтронизация: излучаются ν_e 10 мсек

Охлаждение через излучение нейтрино

Длительность ~ 10 сек

99% энергии звезды излучается в нейтрино



- Energy hierarchy: $\langle E_0(\nu_e) \rangle < \langle E_0(\bar{\nu}_e) \rangle < \langle E_0(\nu_\mu) \rangle$
- $\langle E_0(\nu_e) \rangle \approx 10\text{--}12 \text{ MeV}$
 $\langle E_0(\bar{\nu}_e) \rangle \approx 13\text{--}16 \text{ MeV}$
 $\langle E_0(\nu_\mu) \rangle \approx 15\text{--}25 \text{ MeV}$

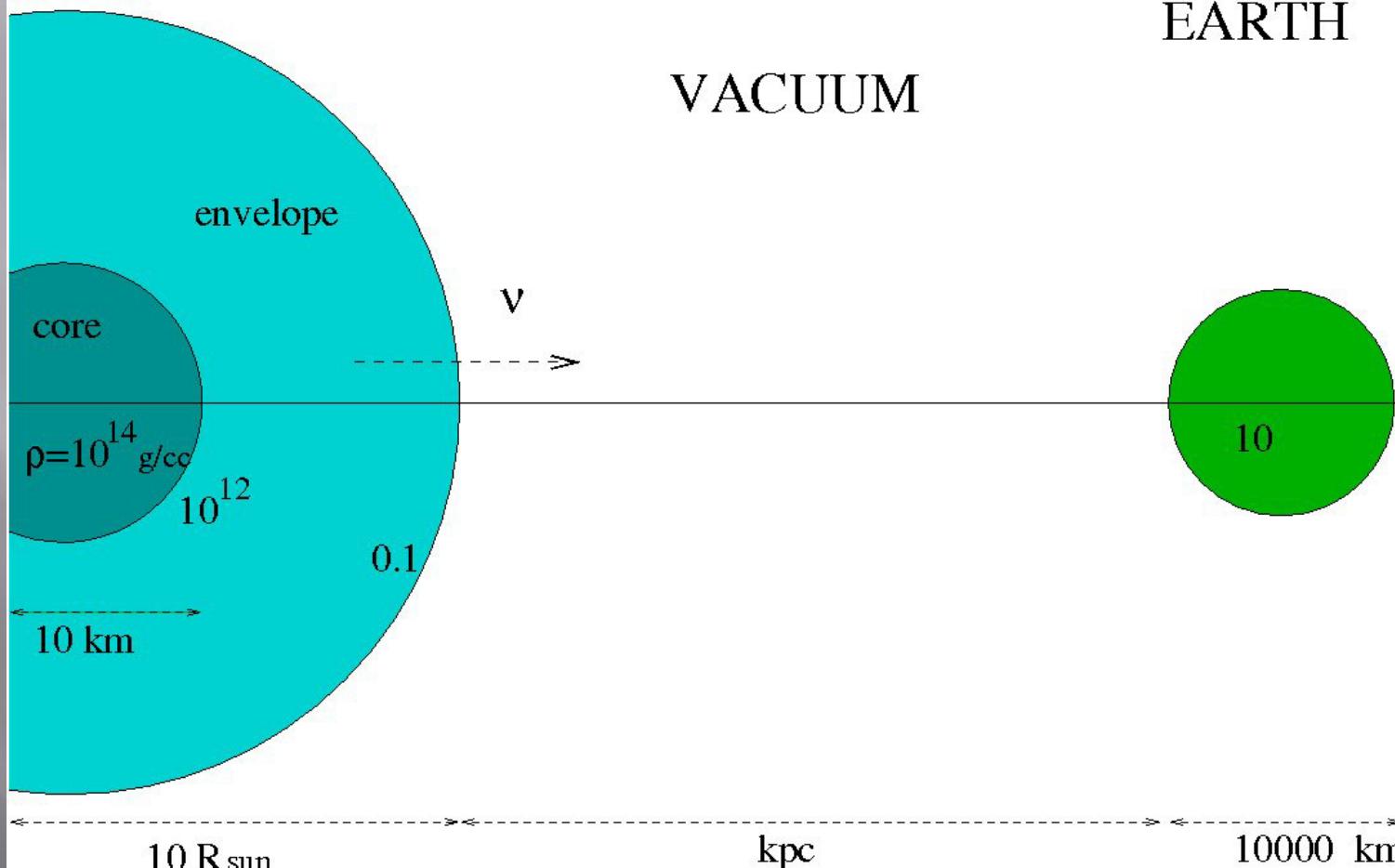
ν_χ : any linear combination of ν_μ and ν_τ

Нейтрино от сверхновой

SUPERNOVA

EARTH

VACUUM





Нейтрино от сверхновой

Внутри сверхновой: конверсия

Коллективные эффекты и MSW конверсия

Между звездой и Землей: нет переходов

Собственные массовые состояния распространяются независимо

Внутри Земли: осцилляции

Эффект вещества (если детектор заслонен Землей)

Нейтрино от сверхновой

Nonlinear effects due to $\nu - \nu$ coherent interactions

- Large neutrino density \Rightarrow substantial $\nu - \nu$ potential

$$H = H_{\text{vac}} + H_{\text{MSW}} + H_{\nu\nu}$$

$$H_{\text{vac}}(\vec{\rho}) = M^2/(2\rho)$$

$$H_{\text{MSW}} = \sqrt{2}G_F n_e \text{diag}(1, 0, 0)$$

$$H_{\nu\nu}(\vec{\rho}) = \sqrt{2}G_F \int \frac{d^3 q}{(2\pi)^3} (1 - \cos \theta_{pq}) (\rho(\vec{q}) - \bar{\rho}(\vec{q}))$$

- $d\rho/dt = i[H(\rho), \rho] \Rightarrow$ Nonlinear effects !
- General formalism:

J. Pantaleone, M. Thomson-II, McKellar, V.A.Kostelecky, S. Samuel,

G. Sigl, G.G.Raffelt, et al., (1992-1994)

Numerical simulations in SN context:

H. Duan, G. Fuller, J. Carlson, Y. Qian, PRL 97, 241101 (2006)

A. Dighe
TAUP2009

Нейтрино от сверхновой

“Collective” effects: qualitatively new phenomena

Synchronized oscillations:

ν and $\bar{\nu}$ of all energies oscillate with the same frequency

S. Pastor, G. Raffelt and D. Semikoz, PRD66, 063011 (2002)

Bipolar oscillations:

Coherent $\nu_\theta \bar{\nu}_\theta \leftrightarrow \nu_x \bar{\nu}_x$ oscillations in inverted hierarchy even for extremely small θ_{13}

S. Hannestad, G. Raffelt, G. Sigl, Y. Wong, PRD74, 105010 (2006)

Spectral split:

ν_e and ν_x ($\bar{\nu}_e$ and $\bar{\nu}_x$) spectra interchange completely, only within certain energy ranges, depending on the mass ordering.

G. Raffelt, A. Smirnov, PRD76, 081301 (2007); PRD76, 125008 (2007)

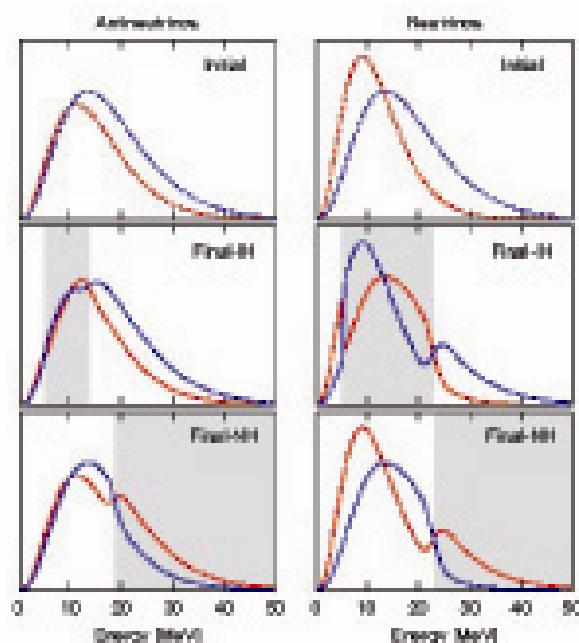
B. Dasgupta, AD, G. Raffelt, A. Smirnov, arXiv:0904.3542 [hep-ph], PRL

A. Dighe
TAUP2009

Нейтрино от сверхновой

Spectral split

cooling-phase Garching fluxes



B. Desgupta, AD, G. Raffelt, A. Smirnov, arXiv:0904.3642 [hep-ph], PRD

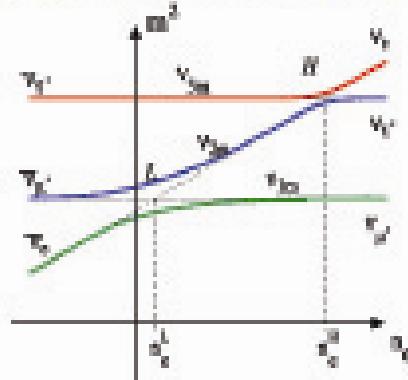


A. Dighe
TAUP2009

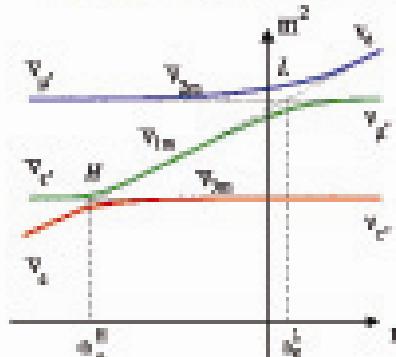
Нейтрино от сверхновой

MSW Resonances inside a SN

Normal mass ordering



Inverted mass ordering



AD, A.Smirnov, PRD62, 033007 (2000)

H resonance: $(\Delta m_{\text{atm}}^2, \theta_{13})$, $\rho \sim 10^3\text{--}10^4$ g/cc

- In $\nu(\bar{\nu})$ for normal (inverted) hierarchy
- Adiabatic (non-adiabatic) for $\sin^2 \theta_{13} \gtrsim 10^{-3}$ ($\lesssim 10^{-5}$)

L resonance: $(\Delta m_\odot^2, \theta_\odot)$, $\rho \sim 10\text{--}100$ g/cc

- Always adiabatic, always in ν

A. Dighe
TAUP2009

Нейтрино от сверхновой

Fluxes arriving at the Earth

Mixture of initial fluxes:

$$\begin{aligned} F_{\nu_\theta} &= p F_{\nu_\theta}^0 + (1-p) F_{\nu_X}^0, \\ F_{\bar{\nu}_\theta} &= \bar{p} F_{\bar{\nu}_\theta}^0 + (1-\bar{p}) F_{\bar{\nu}_X}^0, \end{aligned}$$

Survival probabilities for almost-hierarchical fluxes
(Livermore, early time Garching) [\[AHP\]](#)

Hierarchy	$\sin^2 \theta_{13}$	p	\bar{p}
A Normal	Large	0	$\sin^2 \theta_\odot$
B Inverted	Large	$\cos^2 \theta_\odot \parallel 0$	$\cos^2 \theta_\odot$
C Normal	Small	$\sin^2 \theta_\odot$	$\cos^2 \theta_\odot$
D Inverted	Small	$\cos^2 \theta_\odot \parallel 0$	0

- “Small”: $\sin^2 \theta_{13} \lesssim 10^{-5}$, “Large”: $\sin^2 \theta_{13} \gtrsim 10^{-3}$.
- All four scenarios separable in principle !!

B. Dasgupta, AD, PRD 77, 113002 (2008)

Navigation icons: back, forward, search, etc.

A. Dighe
TAUP2009

Нейтрино от сверхновой

Earth matter effects

- If F_{ν_1} and F_{ν_2} reach the earth,

$$F_{\nu_\mu}^D(L) - F_{\nu_\mu}^D(0) = (F_{\nu_2} - F_{\nu_1}) \times \sin 2\theta_{12}^\oplus \sin(2\theta_{12}^\oplus - 2\theta_{12}) \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E} \right)$$

(Sign changes for antineutrinos)

- Nonzero Earth matter effects require

- Neutrinos: $\rho \neq 0$
- Antineutrinos: $\hat{\rho} \neq 0$

A. Dighe
TAUP2009

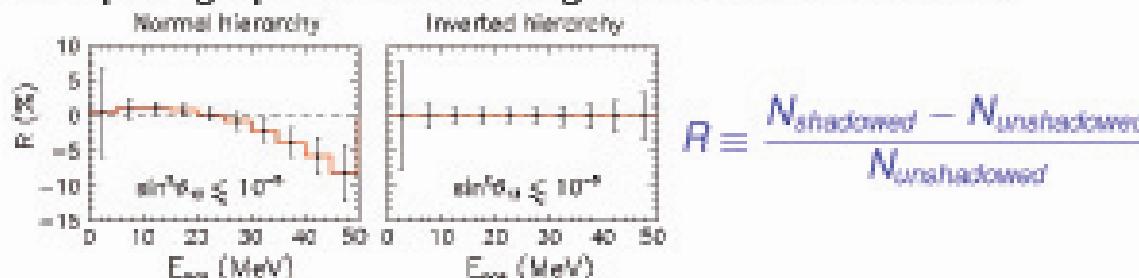
Нейтрино от сверхновой

Comparison between two detectors

- Ratio of luminosities at IceCube and a megaton water Cherenkov, as a function of time

AD, M. Kiel, G. Raffelt, JCAP 0306:005 (2007)

- Comparing spectra at two megaton water Cherenkovs



B. Dasgupta, AD, A. Melfi, PRL 101, 171801 (2008)

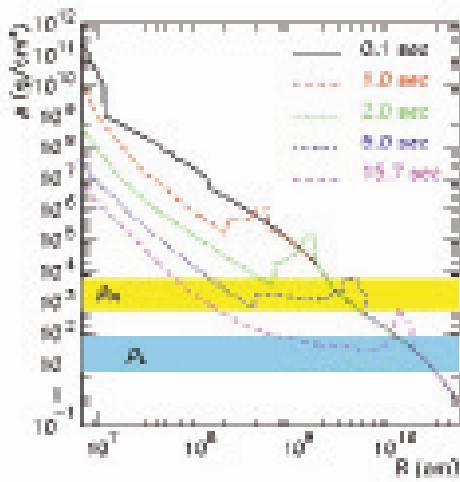
Robust experimental signature AHF

- Earth effects can distinguish hierarchies even for $\theta_{13} \lesssim 10^{-10}$

Нейтрино от сверхновой

Shock wave and adiabaticity breaking

When shock wave passes through a resonance region
(density ρ_H or ρ_L):



- adiabatic resonances may become momentarily non-adiabatic
- Sharp changes in the final spectra even if the primary spectra change smoothly

R. C. Behnke, D. M. Fular, astro-ph/0204300

G. L. Fogli, E. Lisi, D. Montanino and A. Mirizzi, PRD 68, 093005 (2003)

A. Dighe
TAUP2009

Нейтрино от сверхновой

Identifying neutrino mixing scenario

Four distinguishable scenarios: AHF

Hierarchy	$\sin^2 \theta_{13}$	Survival probability		Shock, atmospheric effects				
		P	\bar{P}	ν_2	$\bar{\nu}_2$	ν_3	$\bar{\nu}_3$	
A	Normal	$\gtrsim 10^{-3}$	0	$\cos^2 \theta_{13}$	✓	✓	X	✓
B	Inverted	$\gtrsim 10^{-3}$	$\cos^2 \theta_{13} \parallel 0$	$\cos^2 \theta_{13}$	X	✓	X	✓
C	Normal	$\lesssim 10^{-5}$	$\sin^2 \theta_{13}$	$\cos^2 \theta_{13}$	X	X	✓	✓
D	Inverted	$\lesssim 10^{-5}$	$\cos^2 \theta_{13} \parallel 0$	0	X	X	X	X

- In principle, hierarchy can be identified even for extremely small θ_{13} values
- Robust signals exist:

- Spectral split in neutrinos present for IH, absent for NH

H.Duan, G.M.Fuller, J.Carlson and Y.Q.Zheng, PRL, 99, 241802 (2007)

- Earth matter effects in antineutrinos present in IH, absent for NH.

B.Dasgupta, AD, A. Mirizzi, PRL 101, 171801 (2008)

All this true if fluxes are AHF (early time simulations agree)

A. Dighe
TAUP2009