

С.И. Синеговский, ИГУ

# 1. Нейтринное излучение Солнца

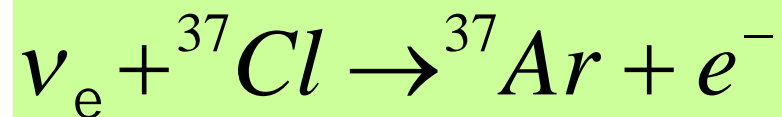
# Мотивация интереса к нейтрино от Солнца

Russel (1919), Eddington (1920, 1926), Weiszacker (1930), Critchfield и др. (1930), Gamov (1938), Chandrasekar (1939) Bethe (1939), Fowler (1984) :

Ядерные реакции могут быть источником энергии звезд. Эта энергия медленно переносится за счет излучения к поверхности звезды.

Малая часть этой энергии (для Солнца - около 3%) согласно расчетам должна уноситься нейтрино, выходящими прямо из центра, минуя радиационный перенос.

Raymond Davis, 1967: проверка правильности гипотезы и расчета стандартной солнечной модели (John Bahcall)



1 ядро/день

# Стандартная модель Солнца

- Солнечная энергия генерируется в ядерных реакциях: 98% в pp-цикле и 2% в CNO-цикле (Bethe, 1939; Salpeter, 1952; Fowler, 1954; Bahcall, 1982)
- Солнце находится в состоянии гидростатического равновесия
- Химический состав фотосферы наследует первоначальный состав Солнца - периода высокой конвективности и однородности
- Транспорт энергии от центральных областей к поверхности - преимущественно радиационный

## Параметры:

$$T = (15.55 \pm 0.15) \cdot 10^6 \text{ К}$$

$$\rho_c = 146.2 \text{ г/см}^3$$

$$R = 6.961 \cdot 10^{10} \text{ см}$$

$$L_S = (3.846 \pm 0.008) \cdot 10^{33} \text{ эрг} \cdot \text{с}^{-1}$$

$$M = 1.9889 \cdot 10^{33} \text{ г}$$

$$\varepsilon_c = 17.6 \text{ эрг/(г} \cdot \text{сек)}$$

$$t = 4.59 \text{ Глет}$$

На глубине  $R/2$   
(модель):

$$\rho_c = 1.3 \text{ г/см}^3$$

$$P = 6 \cdot 10^8 \text{ атм}$$

$$T = 3.4 \cdot 10^6 \text{ К}$$

# Уравнения звездной структуры

$$\frac{dM(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r) \quad 1$$

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{G_N M(r)}{r^2} \rho(r) \quad 2$$

$$\frac{dL(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r) [\varepsilon(r) - T \dot{s}(r)] \quad 3$$

$$\frac{dT}{dr} = -\frac{3\kappa \rho(r) L(r)}{16\pi c \tilde{\sigma} r^2 T^3} \quad 4$$

или

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left( \frac{r^2}{\rho(r)} \frac{dP}{dr} \right) = -4\pi G_N \rho(r) \quad 5$$

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left( \frac{r^2}{\kappa \rho(r)} \frac{dP_{ph}}{dr} \right) = -\frac{\varepsilon}{c} \rho(r) \quad 6$$

## Диффузионное приближение для радиационного переноса энергии

$$\vec{j} = -D \vec{\nabla} u \quad D = D_{ph} = \frac{c \ell_{ph}}{3}, \quad \ell_{ph} = \frac{1}{\kappa \rho}, \quad \kappa \sim \kappa_T = \frac{\sigma_T}{m_p}$$

Если  $u = \tilde{\sigma} T^4$ , то  $L(r) = 4\pi r^2 j(r) = -\frac{4c\tilde{\sigma}}{3\kappa\rho} T^3 \frac{dT}{dr}$ ,

и  $\frac{dT}{dr} = -\frac{3\kappa\rho(r)L(r)}{16\pi c\tilde{\sigma} r^2 T^3}$  (см. 4)

Оценка времени диффузии фотона из центра Солнца до фотосферы:

$$t_{diff} \sim R^2 / D_{ph} \approx 2 \cdot 10^4 \left( \frac{\rho}{10 \text{ гсм}^{-3}} \right) \text{ лет} \quad (\kappa_T = 0.4 \text{ см}^2 / \text{г})$$

(Сравни  $t_v \sim R/c \sim 2 \text{ сек}$ )

Уравнения структуры дополняют уравнениями состояния:

$$P = P(\rho, T, X, Y, Z)$$

$$\varepsilon = \varepsilon(\rho, T, X, Y, Z)$$

$$X=0.7, Y=0.28, Z=0.02$$

$$\kappa = \kappa(\rho, T, X, Y, Z)$$

Граничные условия:

$$r \rightarrow 0$$

$$\frac{dP}{dr}, \frac{d\rho}{dr} \rightarrow 0$$

$$r \rightarrow R$$

$$m \rightarrow M, \int \frac{dP}{\rho} = \frac{G_N m}{r} + const$$

# Скорости ядерных реакций

$$R_{ij} = \frac{n_i n_j}{1 + \delta_{ij}} \langle \sigma v \rangle, \quad \sigma(E) \equiv \frac{S(E)}{E} \exp(-2\pi\eta),$$

$$\langle \sigma v \rangle = \left( \frac{8}{\pi \mu (kT)^3} \right)^{1/2} \int_{E_0}^{\infty} dE S(E) \exp(-2\pi\eta - E/kT)$$

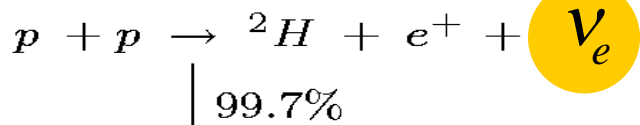
Кулоновский барьер:  $U_c = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r} = Z_1 Z_2 \alpha \frac{\hbar c}{r} \cong 1.5 Z_1 Z_2 \text{ МэВ}$

Подбарьерный переход:

$$K_G = \exp(-2\pi\eta) - \text{фактор Гамова}, \quad \eta = Z_1 Z_2 (e^2 / \hbar v)$$

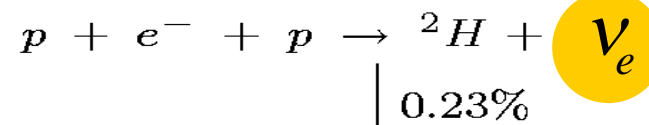
$$E_0 / U_c \sim 10^{-3} \rightarrow \text{Max} [K_G(E) \times \exp(-E/kT)]$$



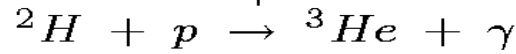


$$E_\nu^{pp} \leq E_\nu^{\max} = (2m_p - m_d - m_e)c^2 = 0.42 \text{ M}\text{\AA}B$$

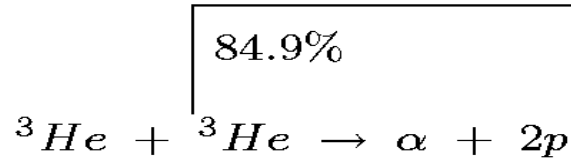
$$\bar{E}_\nu^{pp} = 0.26 \text{ M}\text{\AA}B$$



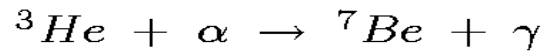
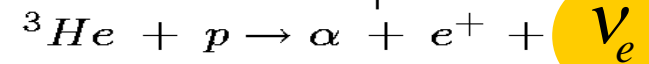
$$E_\nu^{pep} = (2m_p + m_e - m_d)c^2 = 1.442 \text{ M}\text{\AA}B$$



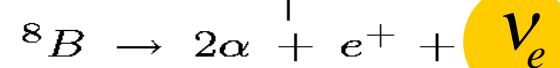
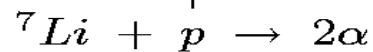
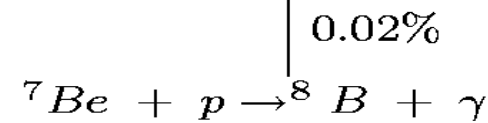
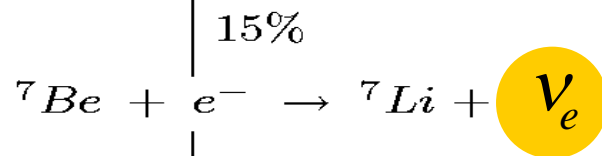
$$E_\nu^{hep} \leq (m_{{}^3\text{He}} + m_p - m_\alpha - m_e)c^2 = 18.77 \text{ M}\text{\AA}B$$



15%



$$E_\nu^{Be} = (M_{{}^7\text{Be}} - M_{{}^7\text{Li}} + m_e)c^2 = 0.862 \text{ M}\text{\AA}B \text{ (90\%)} \text{ u } 0.383 \text{ M}\text{\AA}B \text{ (10\%)}$$



$$E_\nu^B \leq (M_{{}^8\text{B}} - 2m_\alpha - m_e)c^2 = 14 \text{ M}\text{\AA}B$$

# CNO-ЦИКЛ

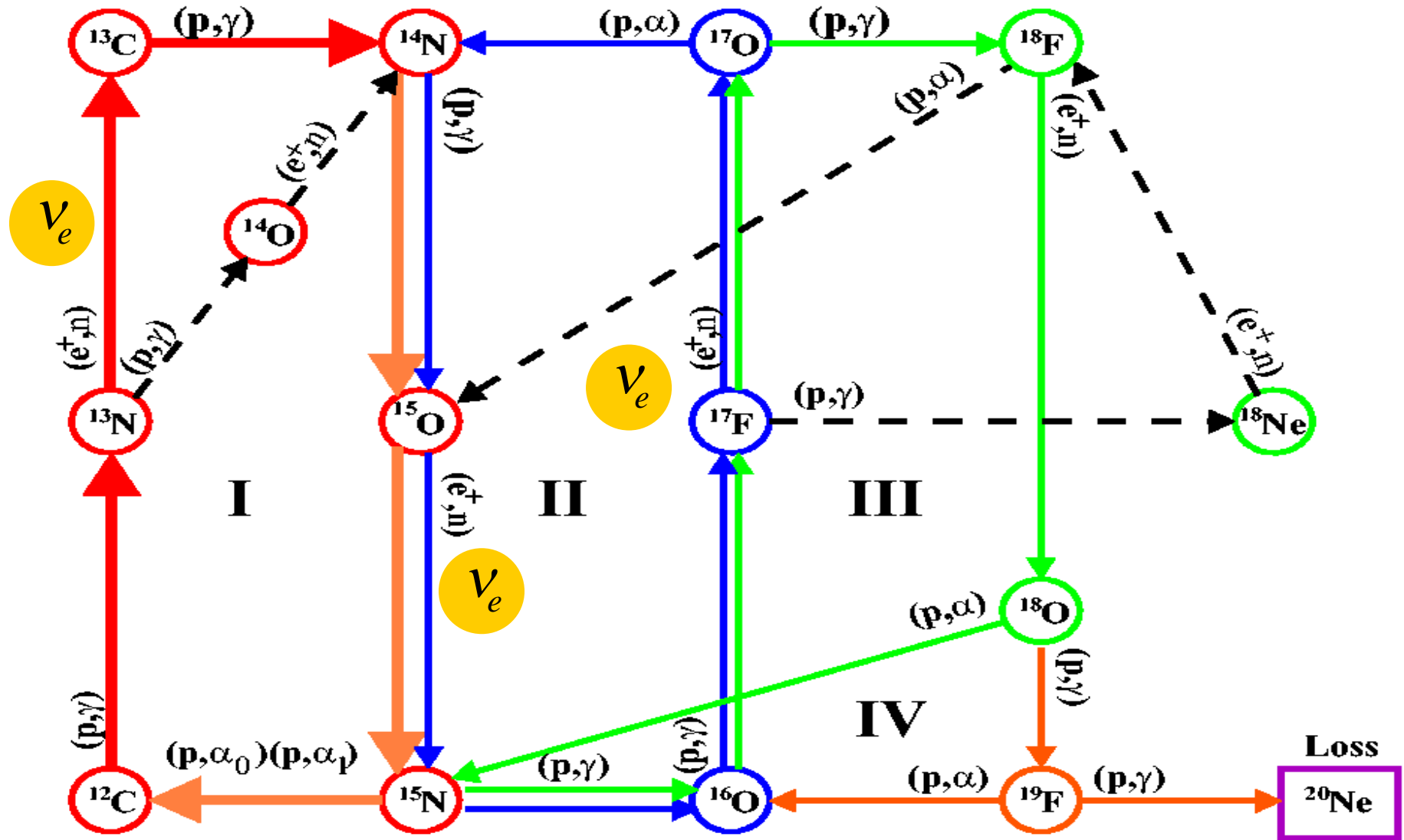


Схема CNO-реакций. Ширина линий соответствует скорости реакций.

Термоядерные реакции - единственно возможный источник, способный обеспечить светимость звезды в течение Глет



$$Q = \Delta m \cdot c^2 - \langle E_\nu \rangle = 26.73 \text{ МэВ} \quad \Delta m \cdot c^2 = 27.3 \text{ МэВ}$$

Коэфф. конверсии массы

$$\eta = \frac{\Delta m}{4m_p} = 0.007 \quad (\sim 7 \text{ МэВ} / \text{нуклон} \approx 6.5 \cdot 10^{18} \text{ эрг} / \text{г})$$

обеспечивает требуемое энерговыделение

$$\Delta E = t \cdot L_s \sim 6 \cdot 10^{50} \text{ эрг (за } \sim 5 \text{ Глет)}$$

$$\frac{\Delta E}{M} = 3 \cdot 10^{17} \text{ эрг} / \text{г}$$

$$t_{\text{shine}} \sim \eta \frac{X \cdot Mc^2}{L_s}$$

с запасом - в течение  $\sim 10$  Глет (!)

## Оценка потока солнечных нейтрино вблизи поверхности Земли

$$L_s = (3.846 \pm 0.008) \cdot 10^{33} \text{ эрг} \cdot \text{с}^{-1}$$

$$1 \text{ a.e.} = 1.49597870 \cdot 10^{13} \text{ см}$$

$$4p \rightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e, \quad Q = 26.73 \text{ МэВ}$$

$$\dot{N}_\nu = \frac{2L_s}{Q} \cong 1.8 \cdot 10^{38} \text{ с}^{-1}, \quad \Phi_\nu = \frac{\dot{N}_\nu}{4\pi(1\text{a.e.})^2} \approx 6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$$

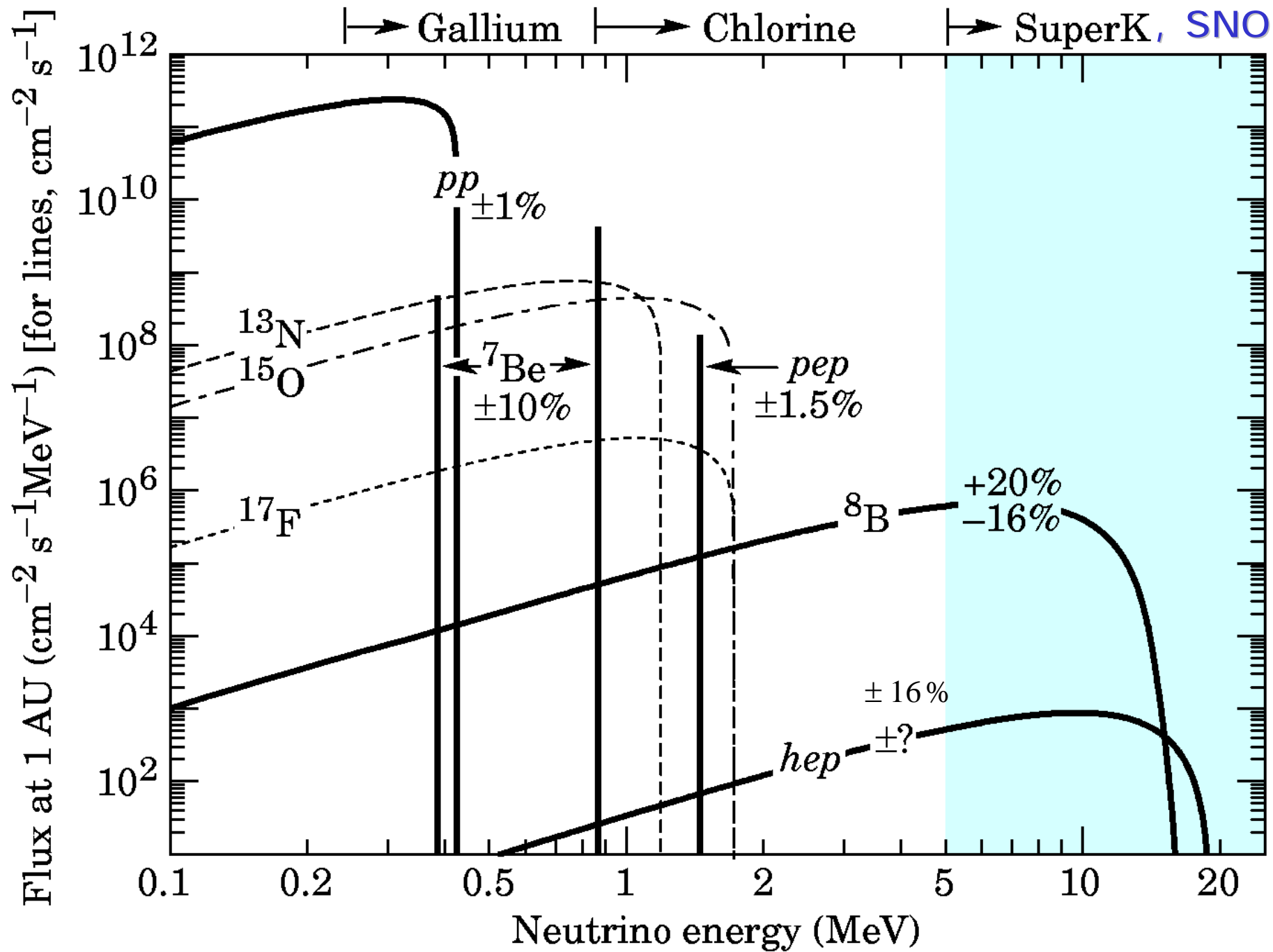
# Потоки солнечных нейтрино вблизи Земли (расчет в ССМ)

BP00

Reaction	Label	Flux ( $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ )
$p + p \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu_e$	<i>pp</i>	$5.95 \times 10^{10}$
$p + e^- + p \rightarrow {}^2\text{H} + \nu_e$	<i>pep</i>	$1.40 \times 10^8$
${}^3\text{He} + p \rightarrow {}^4\text{He} + e^+ + \nu_e$	<i>hep</i>	$9.3 \times 10^3$
${}^7\text{Be} + e^- \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu_e$	${}^7\text{Be}$	$4.77 \times 10^9$
${}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be}^* + e^+ + \nu_e$	${}^8\text{B}$	$5.05 \times 10^6$

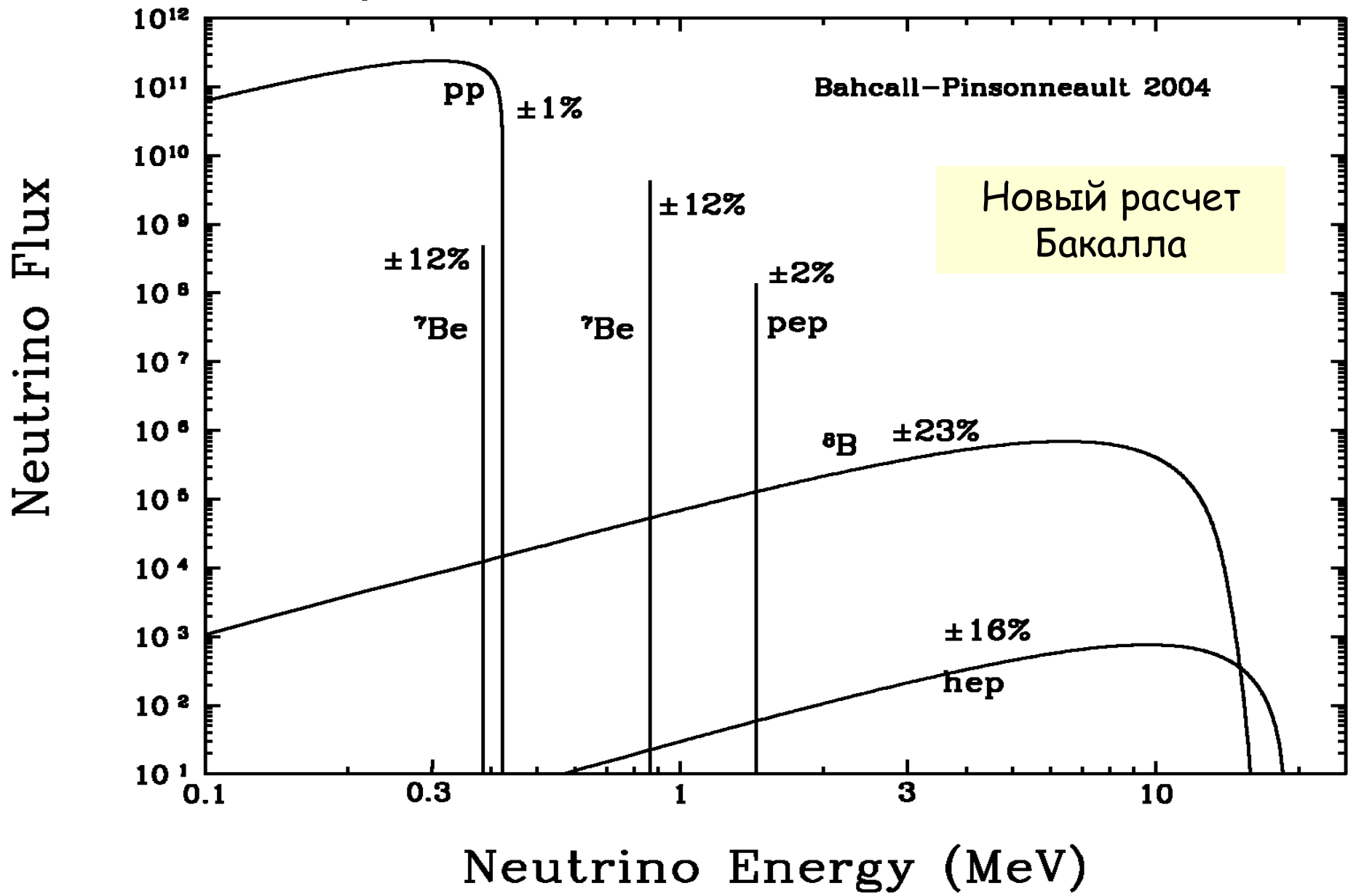
# Эксперименты с солнечными нейтрино

- CL-Ar  $\nu_e + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^-$   $E_{th} = 0.814 \text{ МэВ}$   
 $\nu_e + {}^{71}\text{Ga} \rightarrow {}^{71}\text{Ge} + e^-$
- Ga-Ge (GALLEX, SAGE, GNO)  $E_{th} = 0.233 \text{ МэВ}$
- Kamiokande, S-K  $\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$   $E_\nu > 5 \text{ МэВ}$
- SNO CC, NC, ES  $E_\nu > 5 \text{ МэВ}$



$(\text{cm}^{-2} \text{c}^{-1} M_{\odot} B^{-1})$

Gallium Chlorine SuperK, SNO





Source	BP04	BP04+	BP00	Nucl	EOS	Comp	$^{14}\text{N}$	$\text{cm}^{-2} \cdot \text{c}^{-1}$
pp	5.94 ( $\pm 0.01$ )	5.99	5.95	5.94	5.95	6.00	5.98	$\times 10^{10}$
pep	1.40 ( $\pm 0.02$ )	1.42	1.40	1.40	1.40	1.42	1.42	$\times 10^8$
hep	7.88 ( $\pm 0.16$ )	8.04	9.24	7.88	9.23	9.44	7.93	$\times 10^3$
$^7\text{Be}$	4.86 ( $\pm 0.12$ )	4.65	4.77	4.84	4.79	4.56	4.86	$\times 10^9$
$^8\text{B}$	5.82 ( $\pm 0.23$ )	5.28	5.05	5.79	5.08	4.62	5.77	$\times 10^6$
$^{13}\text{N}$	5.71 ( $1_{-0.35}^{+0.37}$ )	4.06	5.48	5.69	5.51	3.88	3.23	$\times 10^8$
$^{15}\text{O}$	5.03 ( $1_{-0.39}^{+0.43}$ )	3.54	4.80	5.01	4.82	3.36	2.54	$\times 10^8$
$^{17}\text{F}$	5.91 ( $1_{-0.44}^{+0.44}$ )	3.97	5.63	5.88	5.66	3.77	5.85	$\times 10^6$
Cl	$85_{-1.8}^{+1.8}$	7.7	7.6	8.5	7.6	6.9	8.2	
Ga	$131_{-10}^{+12}$	126	128	130	129	123	127	

Измеренные значения:  $(2.6 \pm 0.2)$  SNU - Cl-Ar ;  
 $(69 \pm 4)$  SNU - Ga-Ge.

experiment	$\frac{obsvd}{BPB00}$	composition
Cl	$0.335 \pm 0.029$	${}^8B$ (75%), ${}^7Be$ (15%)
Ga	$0.584 \pm 0.039$	$pp$ (55%), ${}^7Be$ (25%), ${}^8B$ (10%)
SK	$0.459 \pm 0.017$	${}^8B$ (100%)
SNO(CC)	$0.347 \pm 0.027$	${}^8B$ (100%)
SNO(ES)	$0.473 \pm 0.074$	${}^8B$ (100%)
SNO(NC)	$1.008 \pm 0.122$	${}^8B$ (100%)

Experiment	Observable (# Data)	Measured/SM
Chlorine	Average Rate (1)	[CC]= $0.34 \pm 0.03$
SAGE+GALLEX/GNO <sup>†</sup>	Average Rate (1)	[CC]= $0.54 \pm 0.03$
Super-Kamiokande	Zenith Spectrum (44)	[ES]= $0.465 \pm 0.015$
SNO (pure D2O phase)	Day-night Spectrum (34)	[CC]= $0.35 \pm 0.02$ [ES]= $0.47 \pm 0.05$ [NC]= $1.01 \pm 0.13$
SNO (salt phase)	Average Rates (3)	[CC]= $0.32 \pm 0.02$ [ES]= $0.44 \pm 0.06$ [NC]= $1.03 \pm 0.09$
KamLAND	Spectrum (13)	[CC]= $0.61 \pm 0.09$

<sup>†</sup> SAGE rate:  $69.1^{+4.3}_{-4.2} \pm^{+3.8}_{-3.4}$  SNU [7]; GALLEX/GNO rate:  $69.3 \pm 4.1 \pm 3.6$  SNU

# SNO

Sudbury Neutrino Observatory

Located in Ontario, Canada

2039 m underground

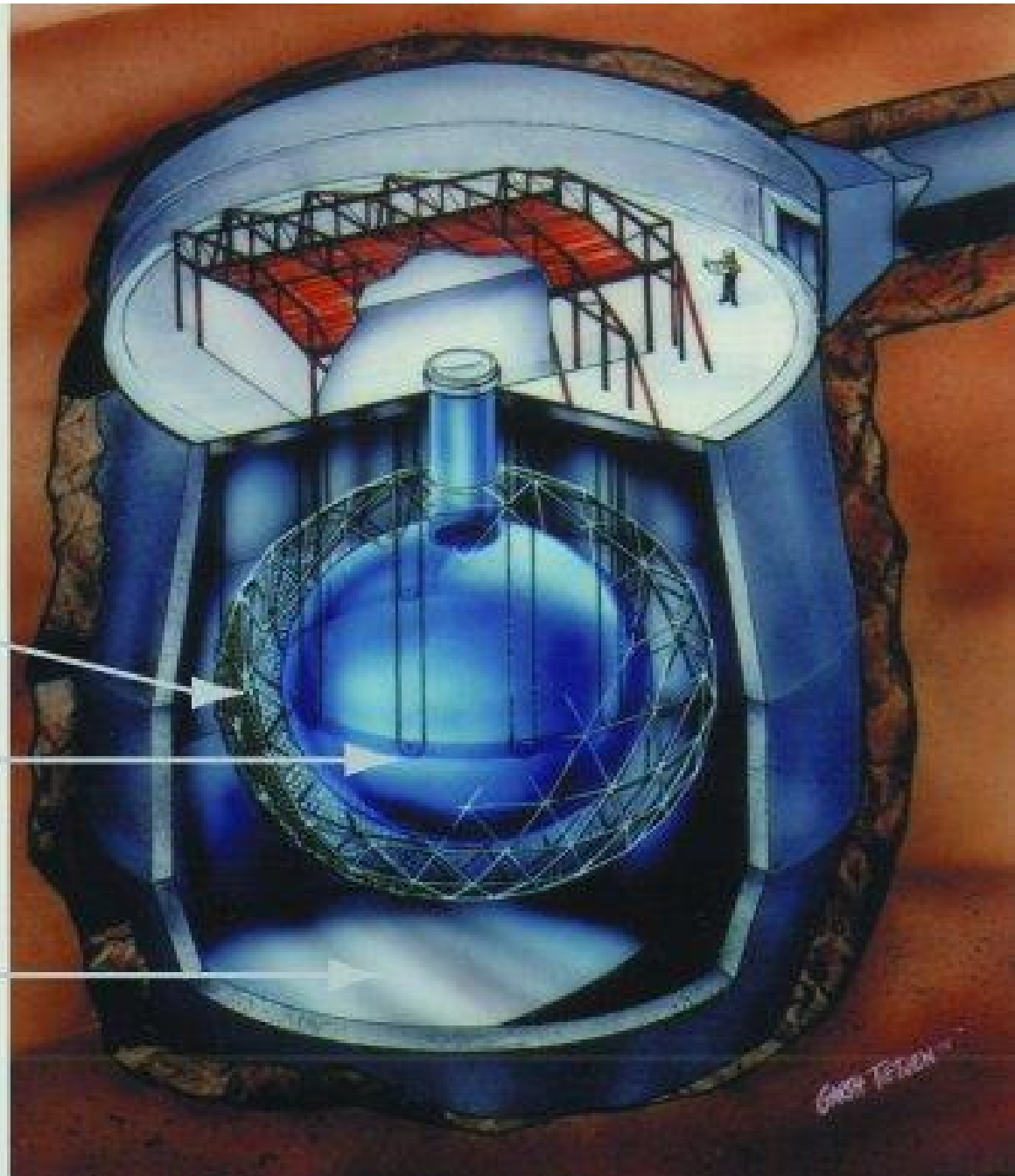
$10^{11}$  m to Sun

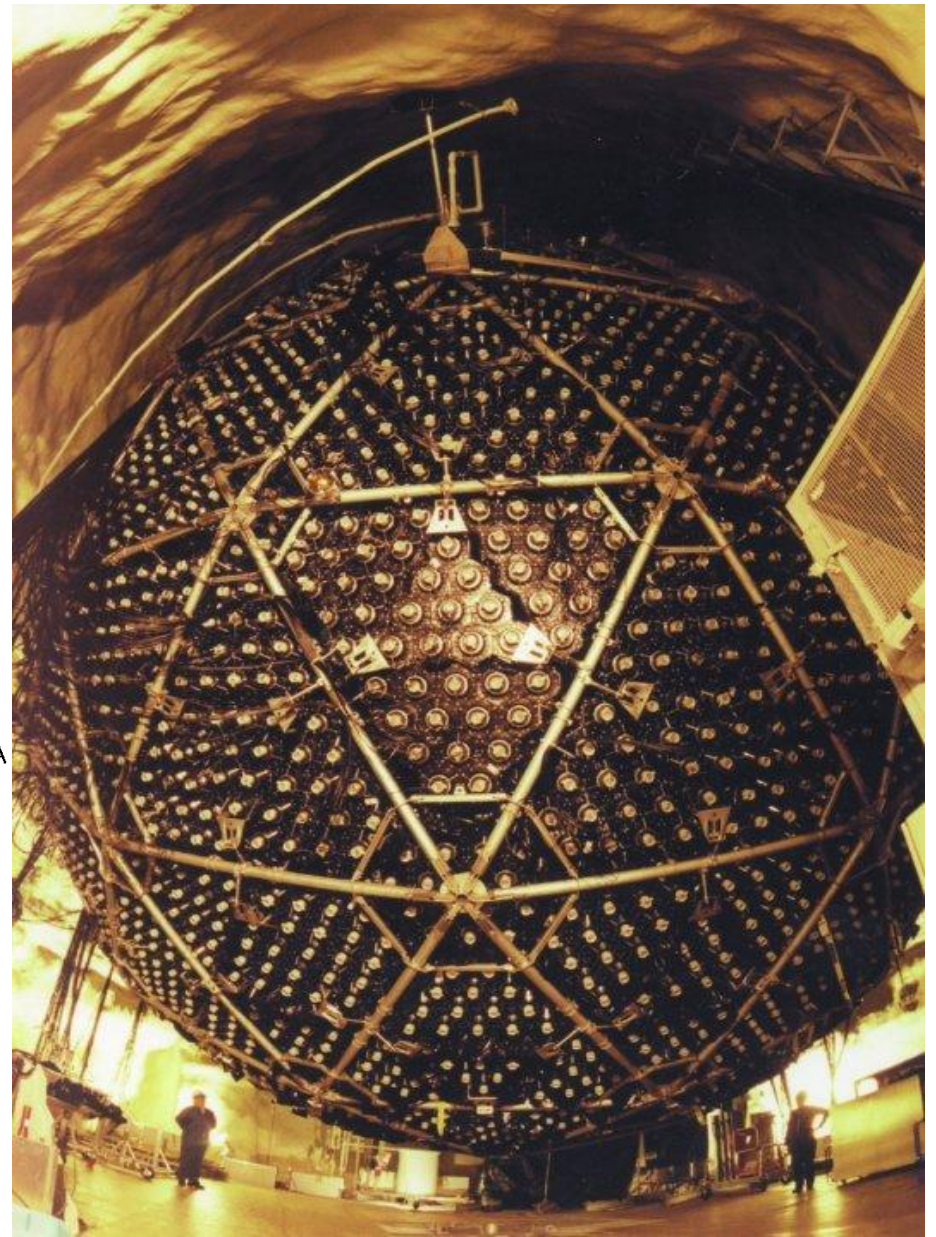
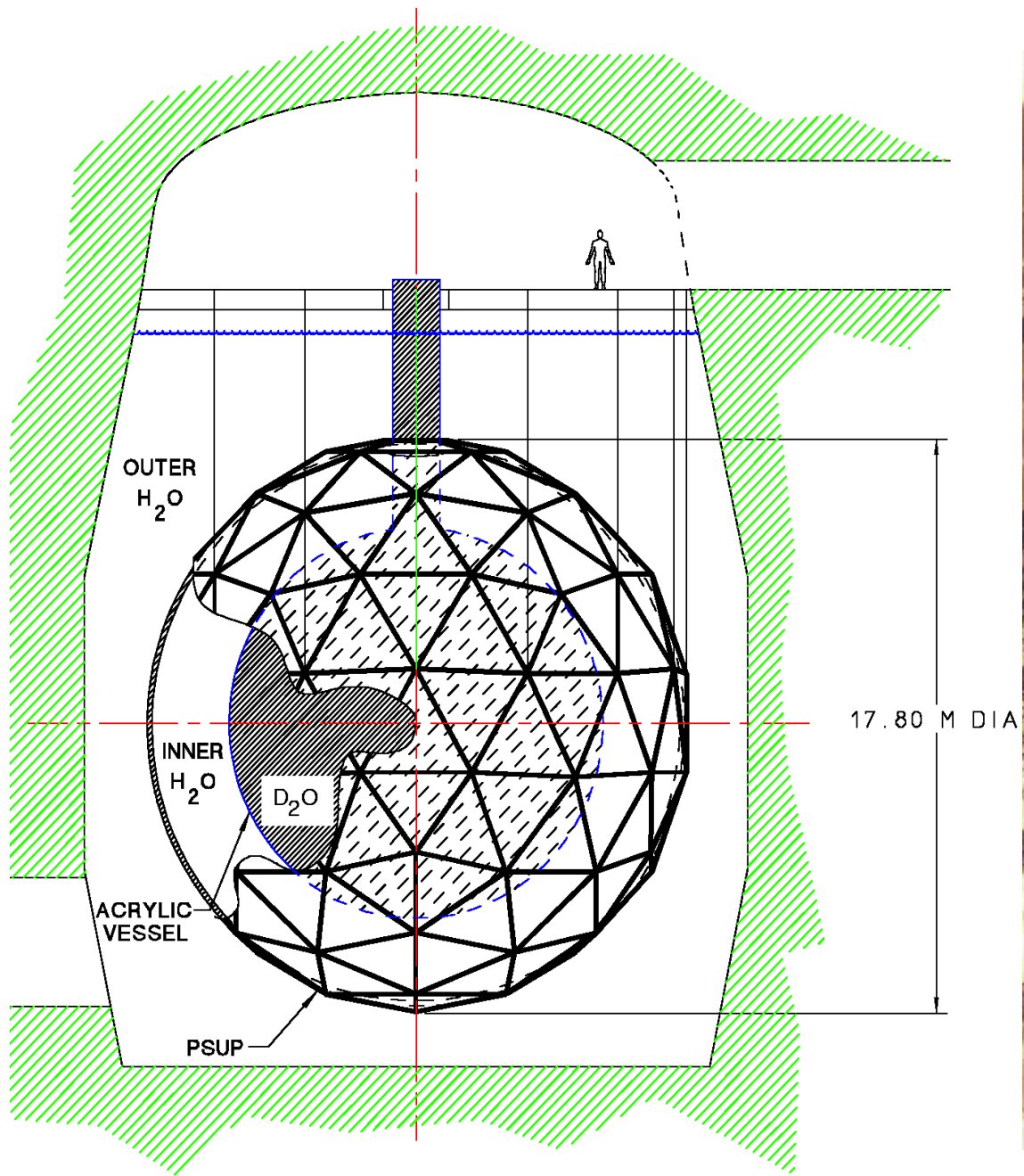


9500 photomultiplier tubes

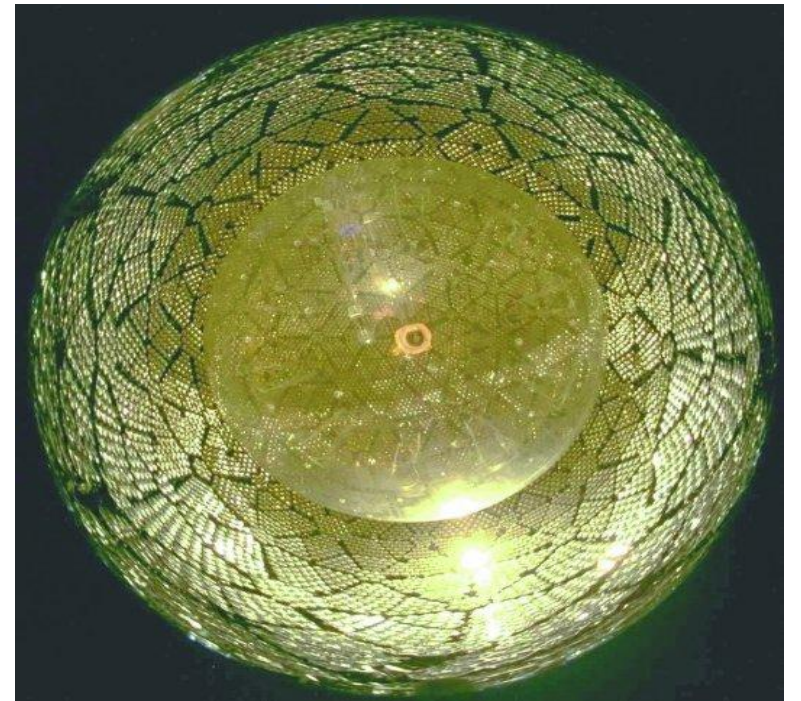
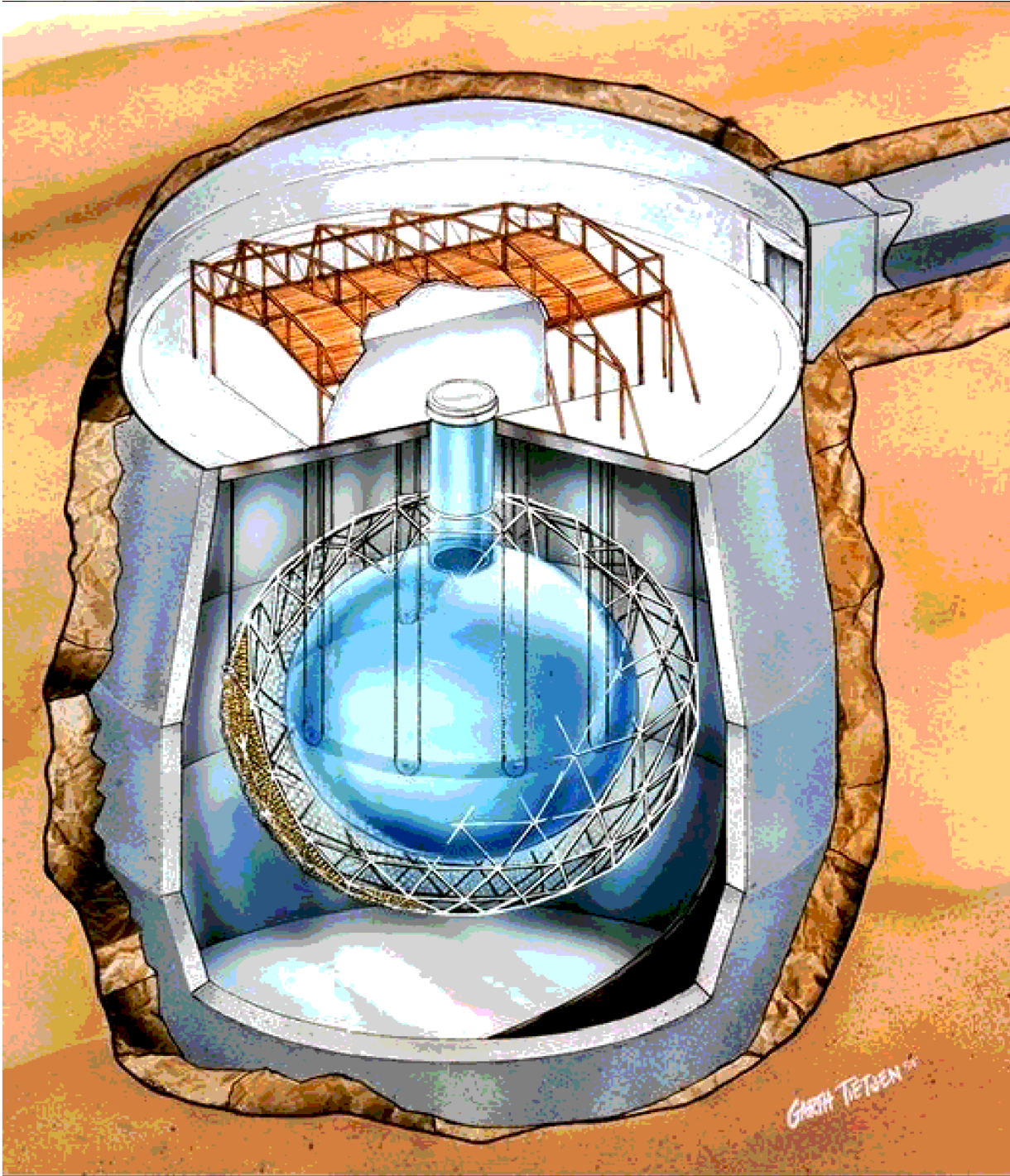
Acrylic vessel containing  
1000 tonnes of heavy water

7000 tonnes of ultra-pure  
light water for shielding  
and support



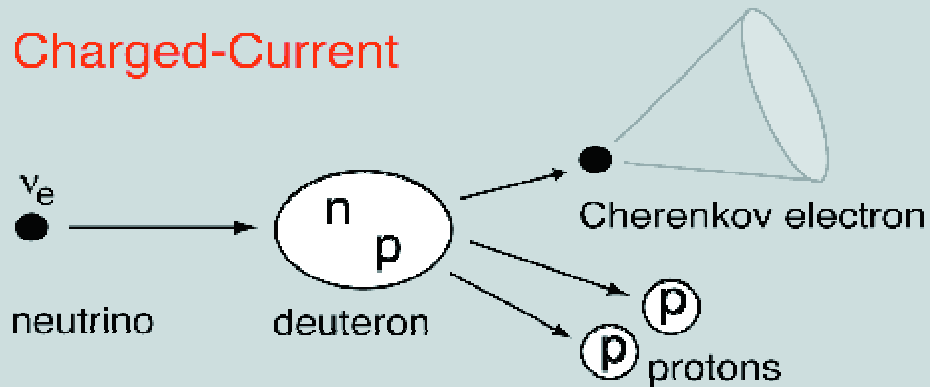






## Neutrino Reactions on Deuterium

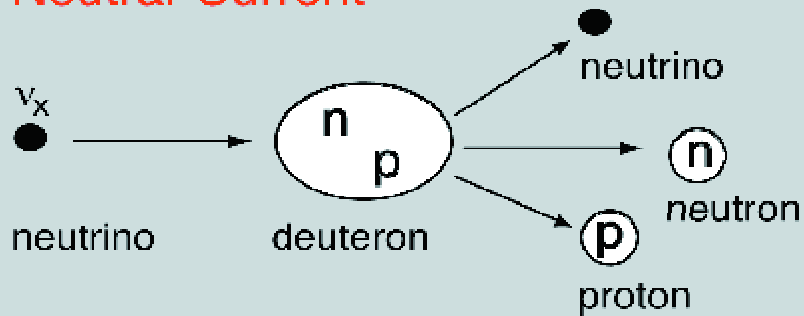
### Charged-Current



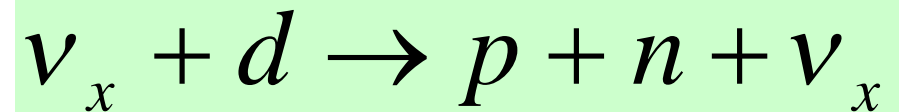
CC



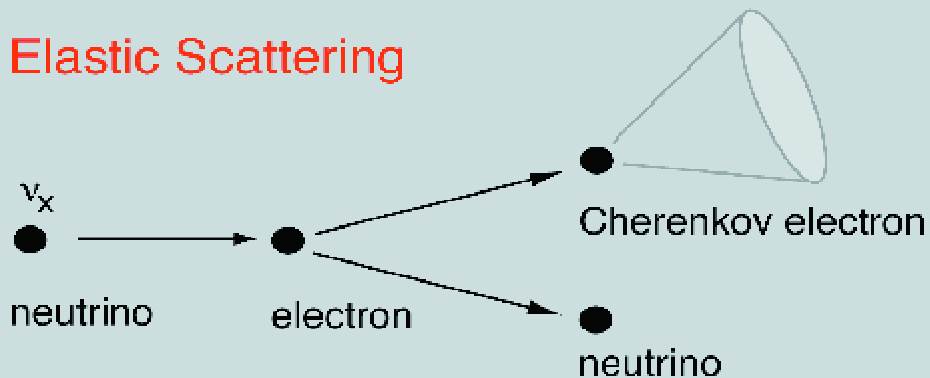
### Neutral-Current



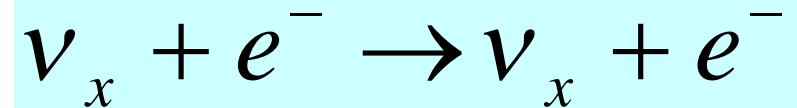
NC



### Elastic Scattering



ES



Поток борных нейтрино (для кинетической энергии электрона выше порога  $T > T_{th} = 5$  МэВ), измеренный трех реакциях SNO (в ед.  $10^6 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ ) в предположении, что форма спектра нейтрино (CCM) сохраняется

$$\phi_{CC}^{SNO} = 1.76^{+0.06}_{0.05}(\text{stat.})^{+0.09}_{0.09} (\text{syst.})$$

$$\phi_{ES}^{SNO} = 2.39^{+0.24}_{0.23}(\text{stat.})^{+0.12}_{0.12} (\text{syst.})$$

$$\phi_{NC}^{SNO} = 5.09^{+0.44}_{0.43}(\text{stat.})^{+0.46}_{0.43} (\text{syst.}).$$

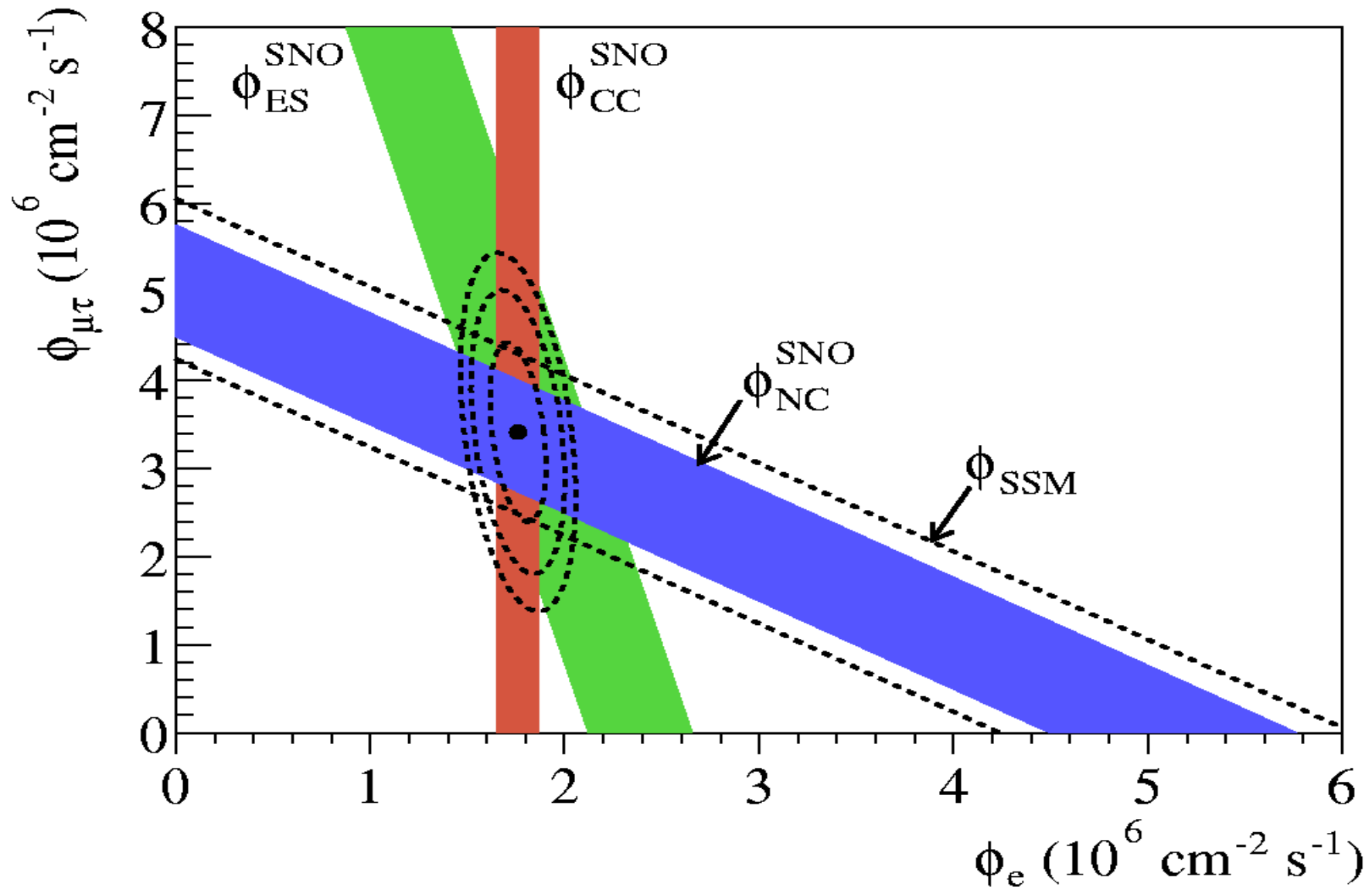
Q.R. Ahmad et al. (SNO Collaboration), Phys. Rev. Lett. 89, 011301 (2002);  
Phys. Rev. Lett. 89, 011302 (2002),  
Phys. Rev. Lett. 87, 071301 (2001),

nucl-ex/0106015

nucl-ex/0204008

nucl-ex/0204009

# Поток борных нейтрино в эксперименте SNO





# Super-Kamiokande

$$\nu_e \rightarrow \nu_x$$

Параметры нейтринных осцилляций с учетом данных всех экспериментов с солнечными нейтрино и измерений KamLAND:

$$\Delta m^2 = (7.2_{-0.5}^{+0.6}) \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2 \quad \text{tg}^2 \theta = 0.38 \pm 0.08.$$

$$\phi_\nu (E > 5 \text{ MeV}) = 2.35 \pm 0.02(\text{stat.}) \pm 0.08(\text{syst.}) [ 10^6/\text{cm}^2/\text{sec} ]$$

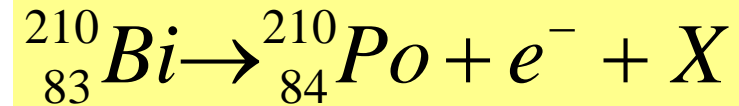
С.И. Синеговский, ИГУ

## II. Смешивание нейтрино

# Открытие нейтрино

Беккерель, 1896 :  
радиоактивность

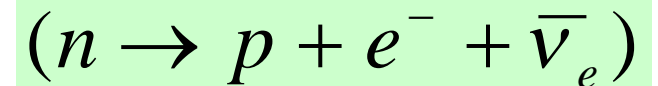
Чадвик, 1914: впервые измерен  
спектр электронов в реакции



Две проблемы - непрерывный спектр электронов  
(сохранение энергии) и спин конечного состояния

Паули, 1930: гипотеза  
"нейтрона" - частицы со  
спином 1/2 нулевой (или  
почти нулевой) массы

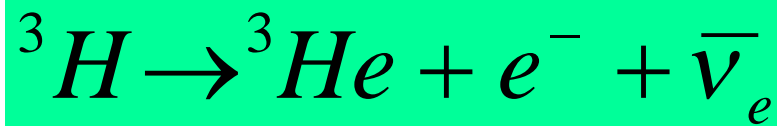
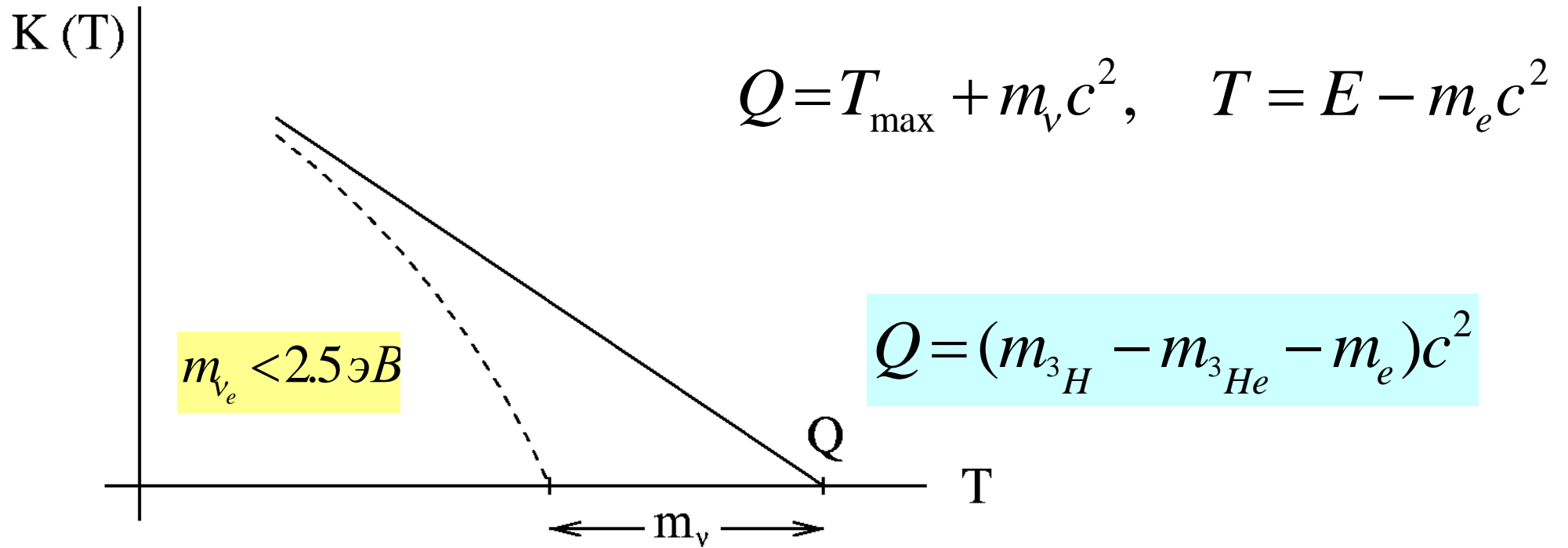
Ферми, 1934: нейтрино, теория  $\beta$ -  
распада (4-фермионного  
взаимодействия)



Вейль, 1929: уравнения для безмассовой частицы со спином 1/2  
(двухкомпонентного спинора), не сохраняющей P-четность

# График Кюри

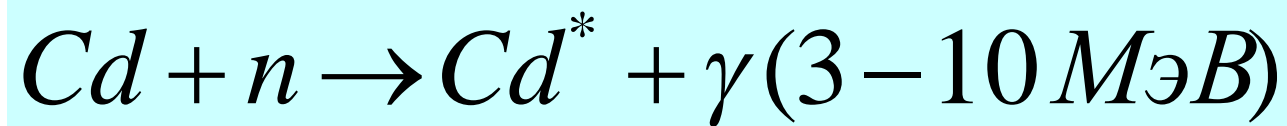
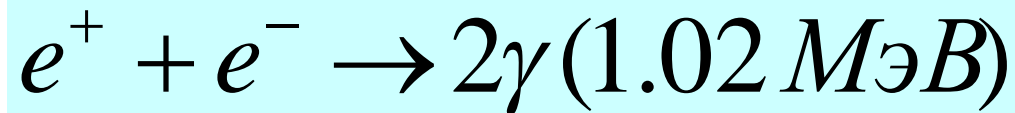
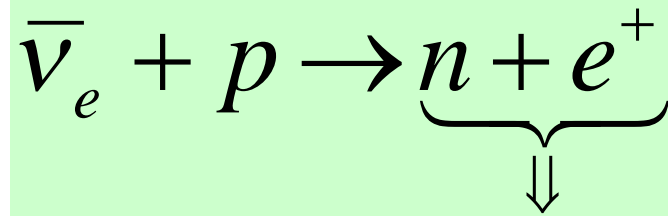
$$K(T) = \sqrt{\frac{dN}{dT} \frac{1}{pEF(E,Z)}} = C \sqrt{(Q-T) \sqrt{(Q-T)^2 - m_\nu^2 c^4}}$$



$$(Q = 18.6 \text{ кэВ})$$

Регистрация нейтрино в реакторных экспериментах:

Коуэн (C. Cowan), Райнес (F. Reines), 1953-1956



F. Reines - Нобелевская премия 1995 (!) года

# Нейтрино в Стандартной Модели

Заряженные и нейтральные лептоны объединены в дублеты; взаимодействие происходит за счет обмена тяжелыми векторными бозонами  $W^\pm$ ,  $Z^0$  (CC и NC)

ЛЕПТОНЫ

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}_L$$

$$e_R^-, \mu_R^-, \tau_R^-$$

CKM: 
$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

КВАРКИ

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L^a, \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_L^a, \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}_L^a$$

$$u_R^a, c_R^a, t_R^a$$

$$d_R^a, s_R^a, b_R^a$$

(a =  $\kappa$ ,  $\lambda$ ,  $\nu$ )

# Нейтринные ароматы

$$L_\ell = \text{const} , \ell = e, \mu, \tau$$

$$n + \nu_e \rightarrow p + e^-$$

$$\text{но не } n + \nu_\mu \not\rightarrow p + e^-$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu,$$

$$\text{но не } \mu^- \not\rightarrow e^- + \gamma$$

$$\mu^- + (A, Z) \not\rightarrow e^- + (A, Z)$$

$2\beta 0\nu$  (?):

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z + 2) + 2e^-$$

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \leftrightarrow \nu_e + n \rightarrow p + e^-$$

# Нейтрино в Стандартной Модели

Заряженные и нейтральные лептоны объединены в дублеты; взаимодействие происходит за счет обмена тяжелыми векторными бозонами  $W^\pm$ ,  $Z^0$  (CC и NC)

ЛЕПТОНЫ

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}_L$$

$$e_R^-, \mu_R^-, \tau_R^-$$

CKM: 
$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

КВАРКИ

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L^a, \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_L^a, \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}_L^a$$

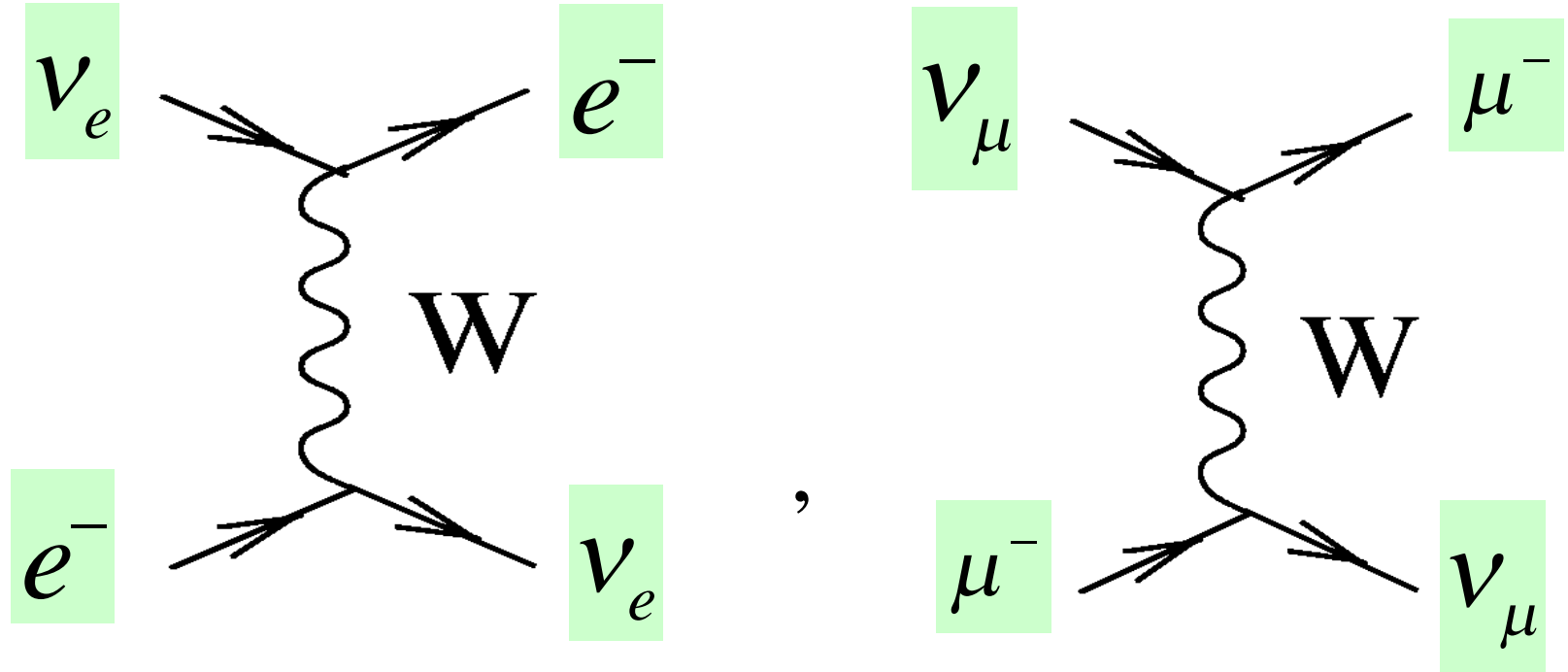
$$u_R^a, c_R^a, t_R^a$$

$$d_R^a, s_R^a, b_R^a$$

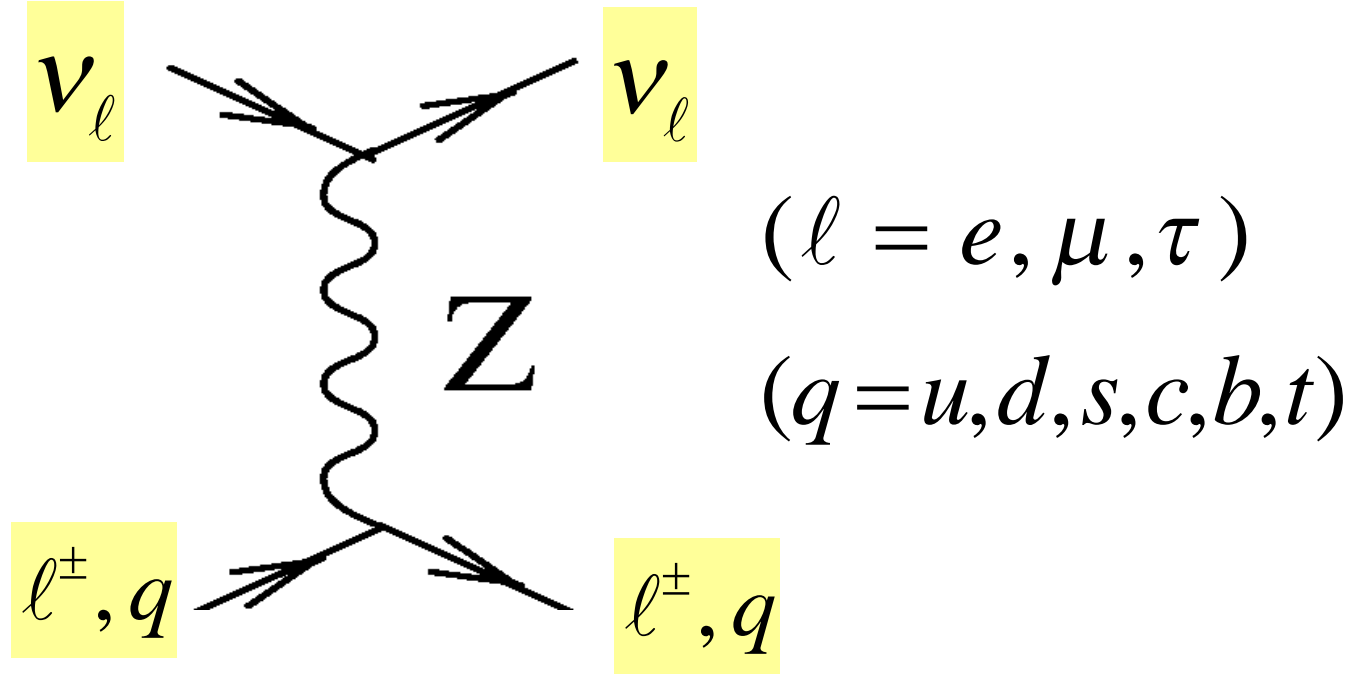
(a =  $\kappa$ ,  $\lambda$ ,  $\nu$ )

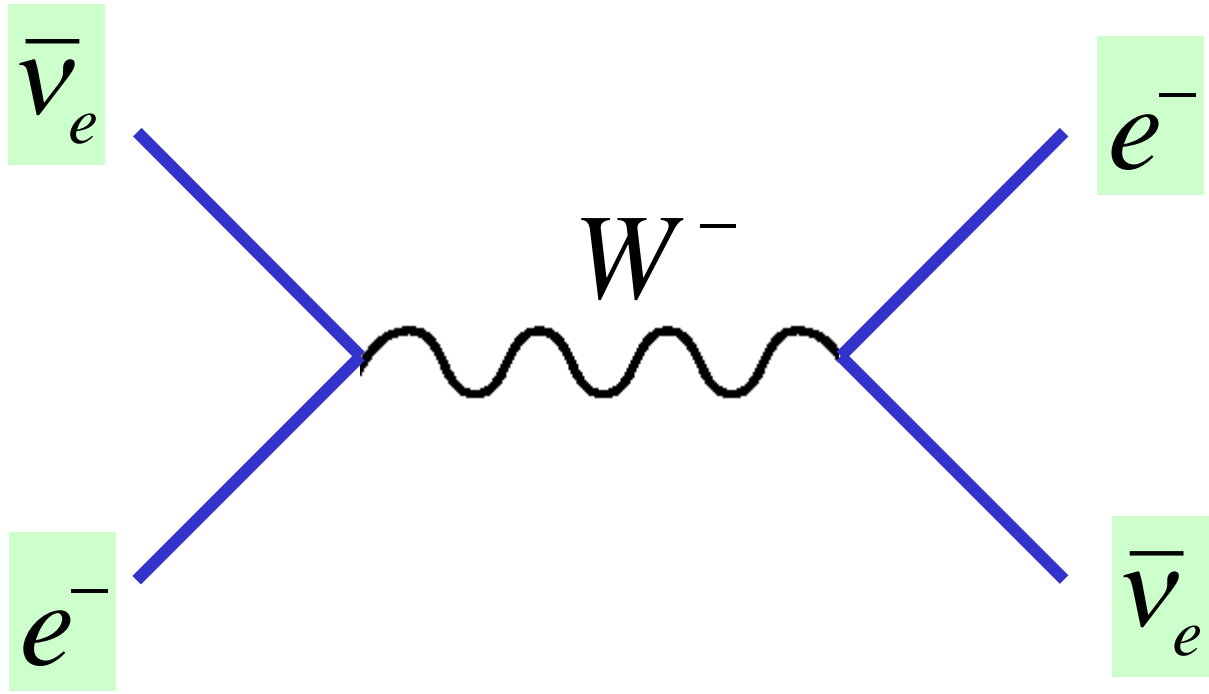


CC



NC





# Гипотеза смешивания нейтрино

Б.Понтекорво, 1958:  $\nu_\ell$  - суперпозиция двух майорановских нейтрино с определенными массами (аналогия с нейтральными  $K^0$ -мезонами)

$$|K_L\rangle, |K_S\rangle$$

- состояния с определенной массой и временем жизни

$$|K^0\rangle, |\bar{K}^0\rangle$$

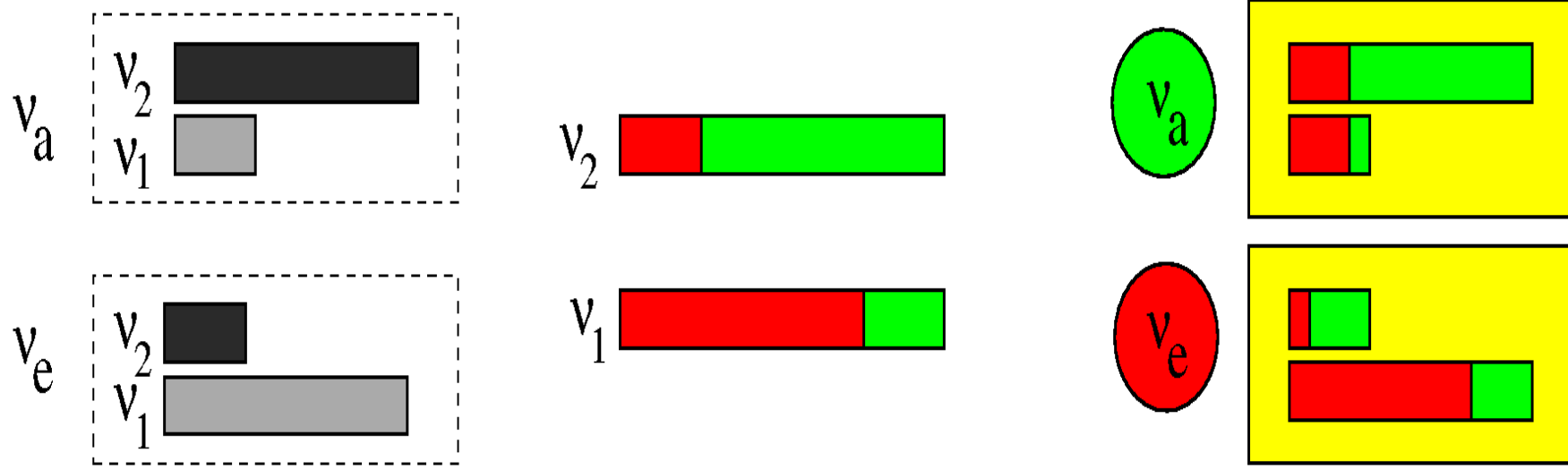
- состояния с определенной странностью

Z.Maki, M.Nakagawa, S.Sakata, 1962 : осцилляции флейвора

$$\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$$

когерентные смеси состояний с определенными массами

$$\nu_1, \nu_2, \nu_3$$



Состояния нейтрино с определенным ароматом (флейвором) ( $\nu_e$ ,  $\nu_a$ ) как комбинация состояний с определенной массой  $\nu_1$ ,  $\nu_2$

Справа: электронное и неэлектронное нейтрино как комбинации массовых состояний, для которых показан флейворный состав.

## Смешивание в вакууме: общий случай

$$|\nu_\ell\rangle_t = e^{-iHt} |\nu_\ell\rangle = \sum_k U_{\ell k}^* e^{-iE_k t} |\nu_k\rangle$$

$$UU^+ = I \quad \text{или} \\ \sum_k U_{\ell k} U_{k\ell'}^* = \delta_{\ell\ell'}$$

$$|\nu_\ell\rangle_t = \sum_{\ell'=e,\mu,\tau} |\nu_{\ell'}\rangle A(\nu_\ell \rightarrow \nu_{\ell'})$$

$$E_k = \sqrt{\vec{p}^2 + m_k^2} \approx p + \frac{m_k^2}{2p}$$

$$A(\nu_\ell \rightarrow \nu_{\ell'}) = \sum_k U_{\ell'k} e^{-iE_k t} U_{\ell k}^*$$

$$\Delta m_{k1}^2 = m_k^2 - m_1^2 \quad (m_1 < m_2 < m_3)$$

$$P(\nu_\ell \rightarrow \nu_{\ell'}) = |A|^2 = \left| \delta_{\ell'\ell} + \sum_k U_{\ell'k} \left[ \exp\left(-i\Delta m_{k1}^2 \frac{L}{2p}\right) - 1 \right] U_{\ell k}^* \right|^2$$

$$L = ct = t(c=1) \quad (\text{смешиванию } \bar{\nu} \text{ отвечает } U \rightarrow U^*)$$

# Двухнейтринное смешивание

$$| \nu_{\ell} \rangle = \sum_{k=1,2} U_{\ell k} | \nu_k \rangle, \quad (\ell = e, \mu)$$

1

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

$$\begin{aligned} | \nu_e \rangle &= \cos \theta | \nu_1 \rangle + \sin \theta | \nu_2 \rangle \\ | \nu_{\mu} \rangle &= -\sin \theta | \nu_1 \rangle + \cos \theta | \nu_2 \rangle \end{aligned}$$

2

$$\begin{aligned} | \nu_1 \rangle &= \cos \theta | \nu_e \rangle - \sin \theta | \nu_{\mu} \rangle \\ | \nu_2 \rangle &= \sin \theta | \nu_e \rangle + \cos \theta | \nu_{\mu} \rangle \end{aligned}$$

3

# Осцилляции нейтрино в вакууме

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = \frac{1}{2} \sin^2 2\theta \left( 1 - \cos \frac{2\pi L}{\ell_\nu} \right) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left( \frac{\pi L}{\ell_\nu} \right),$$

4

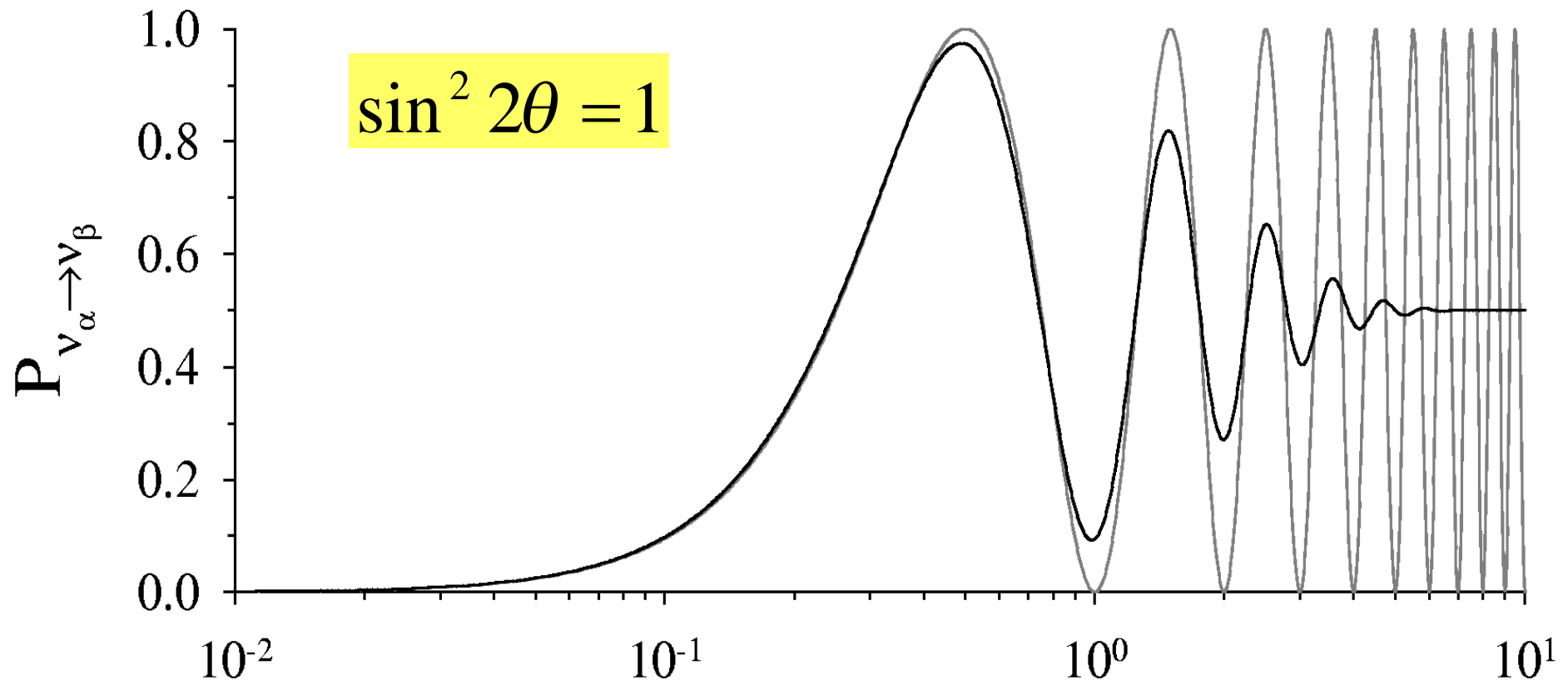
$$\ell_\nu = \frac{4\pi p \hbar c}{\Delta m^2 c^3} = \frac{4\pi E}{\Delta m^2} = \frac{2.48 \cdot E / (1 \text{ ГэВ})}{\Delta m^2 / (1 \text{ эВ}^2)} \text{ км} \quad \text{- длина осцилляций}$$

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\alpha) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left( \frac{1.27 \Delta m^2 / 1 \text{ эВ}^2}{E_\nu / 1 \text{ ГэВ}} L / 1 \text{ км} \right)$$

5

Три кинематические области:

- $L \ll \ell_\nu$ ,  $\sin x \sim x$  и эффект осцилляций мал, даже если велик угол смешивания;
- $L \sim \ell_\nu$ , могут наблюдаться истинные осцилляции
- $L \gg \ell_\nu$  последний множитель в (5) становится быстроосциллирующим, и наблюдаться может только средний эффект, пропорциональный  $\sin^2 2\theta$



$$\Delta m^2 L / 4 \pi E = L / \ell_\nu$$

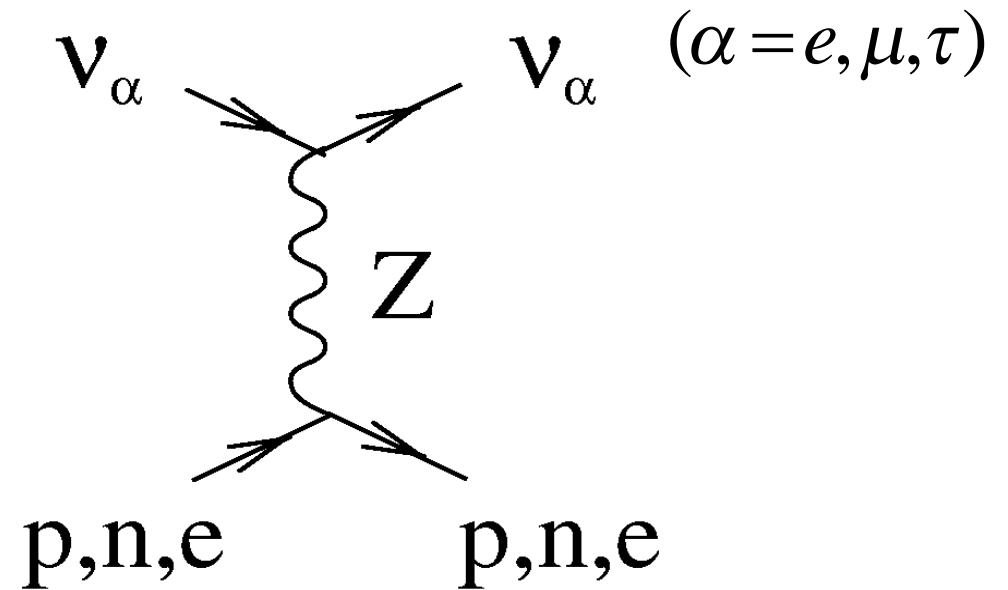
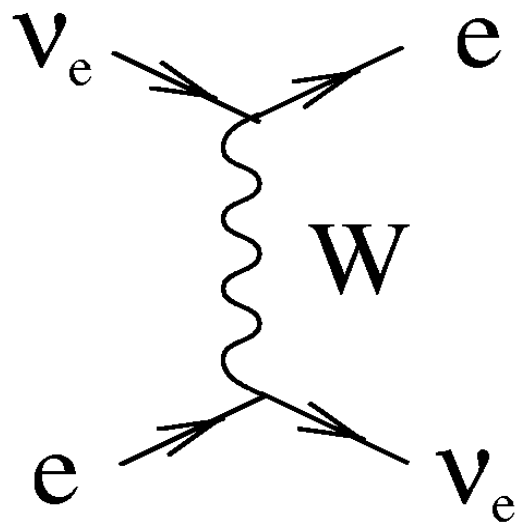
Жирная линия - результат усреднения по энергии с гауссовым распределением ( $\sigma = E/10$ )



$$\ell_{\nu} = 2.48 \frac{E / 1 \text{ МэВ}}{\Delta m^2 / (1 \text{ эВ}^2)}, \text{ м}$$

	$E_{\nu}, \text{ МэВ}$	$L_{\text{max}}, \text{ м}$	$\Delta m_{\text{min}}^2, \text{ эВ}^2$
Реактор (SBL, LBL)	1 - 5	$10^2 - 2 \cdot 10^5$	$2.5 \cdot 10^{-2} - 5 \cdot 10^{-5}$
Мезонная фабрика	10	$10^2$	0.25
Ускорители	$10^3$	$10^3 - 10^6$	$1 \cdot 10^{-3}$
Атмосферные нейтрино	$10^3$	$10^7$	$2.5 \cdot 10^{-4}$
Солнце	0.2	$1.5 \cdot 10^{11}$	$4 \cdot 10^{-12}$

# Взаимодействие нейтрино с веществом



$$V = V_e - V_a = \sqrt{2}G_F n_e \quad n_{ref} - 1 = \frac{V}{p} \quad \text{- показатель преломления}$$

$$n_{ref} = 1 + \frac{2\pi n_e}{p^2} f_{ee}(0)$$

$$l_o = \frac{2\pi}{V}$$

# Переход от вакуумного смешивания к осцилляциям в веществе. Эффект MSW

$$\sin 2\theta \rightarrow \sin 2\theta_m = \frac{\sin 2\theta}{\sqrt{1 - 2(\ell_v / \ell_0) \cos 2\theta + (\ell_v / \ell_0)^2}},$$

6

$$\ell_v \rightarrow \ell_m = \frac{\ell_v}{\sqrt{1 - 2(\ell_v / \ell_0) \cos 2\theta + (\ell_v / \ell_0)^2}},$$

7

$$\ell_0 = \frac{\pi \sqrt{2}}{G_F n_e} \approx \frac{2.5 \cdot 10^4}{Y_e \rho_e (\text{г/см}^2)} \text{ км},$$

- длина рефракции  
 $Y_e$  числр электронов/нуклон

8

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_e) = 1 - \sin^2 2\theta_m \sin^2 \frac{\pi L}{\ell_m}$$

формула  
Вольфенштейна

9

# Резонанс Михеева-Смирнова

При  $\frac{\ell_v}{\ell_0} = \cos 2\theta$  амплитуда осцилляций  $\sin 2\theta_m \rightarrow 1$

и  $P(\nu_e \rightarrow \nu_x) = \sin^2\left(\frac{\pi L}{\ell_v}\right)$

$$\ell_m = \frac{\ell_v}{|\sin 2\theta|}$$

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_x) \approx \sin^2 2\theta \sin^2\left(\frac{\pi L}{\ell_v}\right)$$

$$\frac{\ell_v}{\ell_0} \ll 1$$

практически не  
отличается от  
вакуума

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_x) \approx \left(\frac{\ell_0}{\ell_v}\right)^2 \sin^2 2\theta \sin^2\left(\frac{\pi L}{\ell_0}\right)$$

$$\frac{\ell_v}{\ell_0} \gg 1$$

подавление  
осцилляций

Для центральной области Солнца:

$$\beta = \frac{2\sqrt{2}G_F n_e E_\nu}{\Delta m^2} = 0.22$$

для  $E = 1 \text{ МэВ}$ ,  $\theta_{13} = 0$ ,  $\Delta m^2 = 7 \cdot 10^{-5} \text{ эВ}^2$

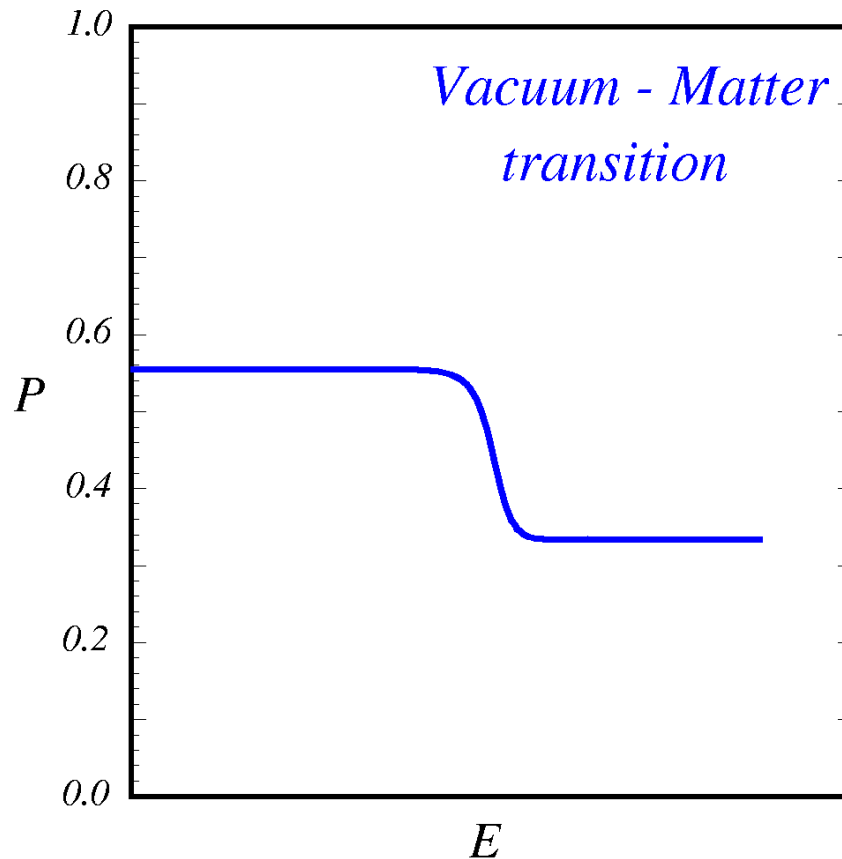
Если  $\beta < \cos 2\theta_{12} \sim 0.4$ ,

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_e) = \cos^4 \theta_{13} \left(1 - \frac{1}{2} \sin^2 2\theta_{12}\right) \quad (\text{вакуум})$$

Если  $\beta > 1$

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_e) = \cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{12} \quad (\text{MSW})$$

$E^{(\text{crit})} = 1.8 \text{ MeV} (^8\text{B}); 2.2 \text{ MeV} (^7\text{Be}); 3.3 \text{ MeV} (\text{pp}).$



В предельных случаях

$$\beta < \cos 2\theta_{12}$$

и

$$\beta > 1$$

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_e) \approx \text{const}$$

## Связь плотностей электронов и нуклонов

$$n_e = \frac{\rho Y_e}{m_p} = \mu_e \rho,$$

$$\mu_e = \frac{Y_e}{m_p}$$

$$Y_e = \frac{n_e}{n_p} - \text{число электронов на нуклон},$$

$$\rho = m_p n_p - \text{плотность вещества}$$

# Трехнейтринное смешивание в веществе

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{i\alpha_1/2} \nu_1 \\ e^{i\alpha_2/2} \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

$$i \frac{d}{dx} \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \left[ -U \begin{pmatrix} p_1 & 0 & 0 \\ 0 & p_2 & 0 \\ 0 & 0 & p_3 \end{pmatrix} U^+ + \begin{pmatrix} V(x) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \right] \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$$

$$p_k = \sqrt{E^2 - m_k^2} \cong E - m_k^2 / (2E)$$

$V = V_e - V_a = \sqrt{2}G_F n_e$  - эфф. потенциал  $CC$ - взаимодействия  $\nu_e$  с электронами вещества

$V_{\mu\tau} \sim 10^{-5} V$  за счет NC ( радиационные ю поправки) Е.Х.Ахмедов, УФН 174 (2004) 121



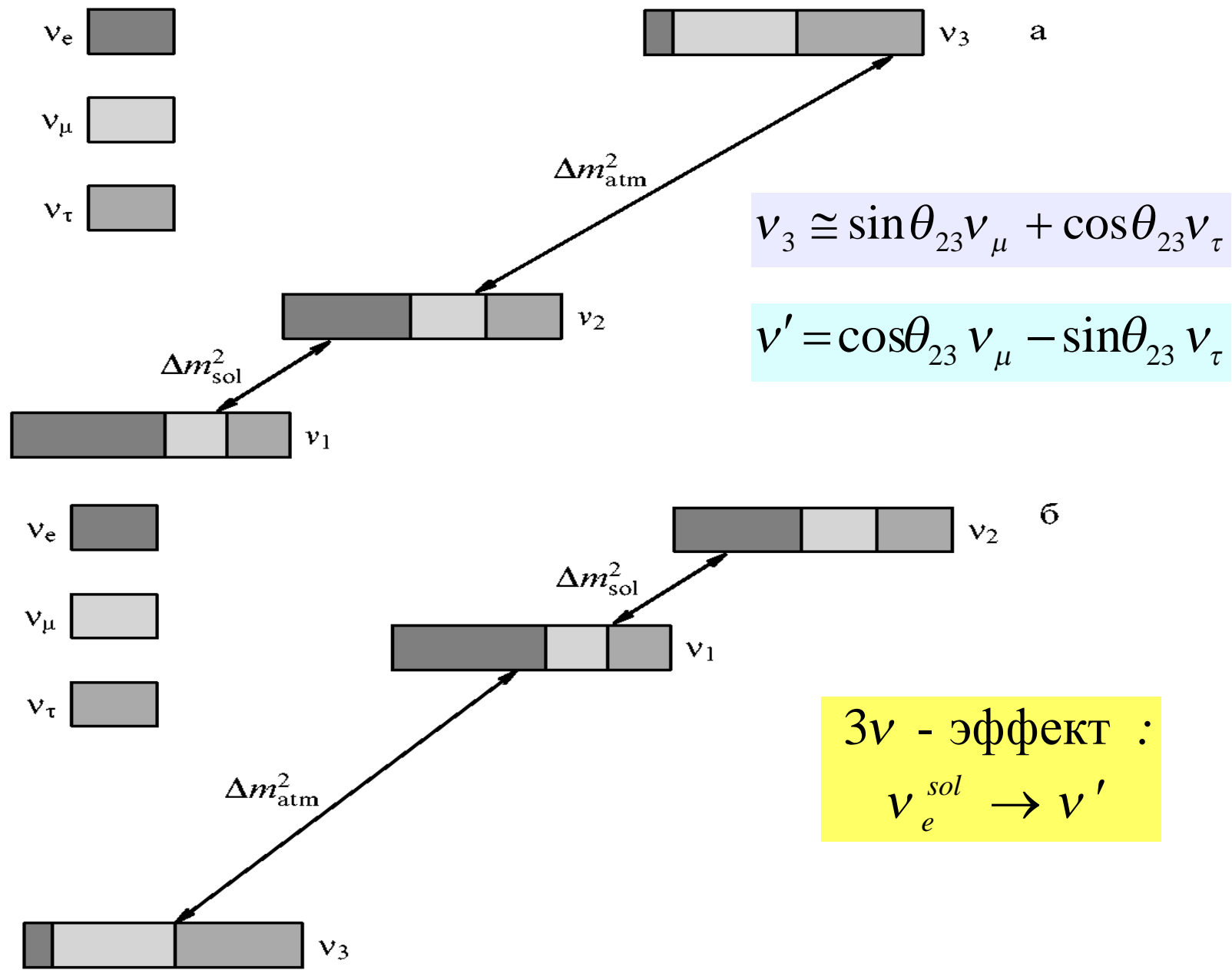


Рис. 1. Нормальная (а) и обратная (б) иерархии масс нейтрино.

## Среда с постоянной плотностью

$$\varepsilon = \Delta m_{21}^2 / \Delta m_{31}^2 = \Delta m_{sol}^2 / \Delta m_{atm}^2 \ll 1 \quad |U_{e3}| = \sin \theta_{13} \leq 0.2$$

3ν-эффекты в смешивании солнечных нейтрино

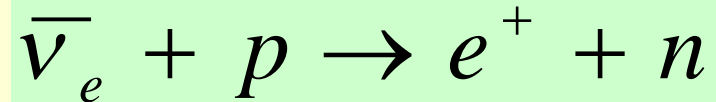
$$\nu_3 \cong \sin \theta_{23} \nu_\mu + \cos \theta_{23} \nu_\tau \quad \nu' = \cos \theta_{23} \nu_\mu - \sin \theta_{23} \nu_\tau \quad (\text{ортогональная})$$

$$\nu_e^{sol} \rightarrow \nu' \cong \frac{1}{\sqrt{2}} (\nu_\mu - \nu_\tau)$$

# Эксперименты с реакторными и ускорительными нейтрино

- LSND

- KamLAND



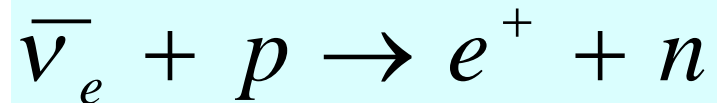
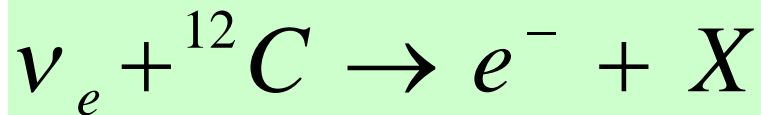
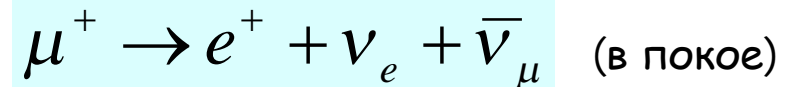
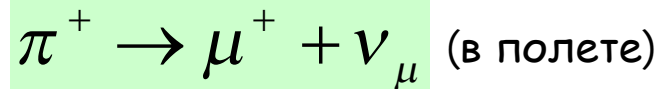
- CHOOZ

- K2K: long-baseline neutrino oscillation experiment



# Эксперимент LSND (LAMPF)

Изучение  $\bar{\nu}_\mu (\nu_\mu) \rightarrow \bar{\nu}_e (\nu_e)$  осцилляций



Зарегистрирован избыток  $e^+$  с энергиями 20-60 МэВ

$$51.0^{+20.2}_{-19.50} \pm 8.0$$

что отвечает

$$P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) = (3.1 \pm 1.2 \pm 0.5) \cdot 10^{-3}$$

Зарегистрировано 40  $e^-$  (60-200 МэВ) вместо ожидавшегося фона

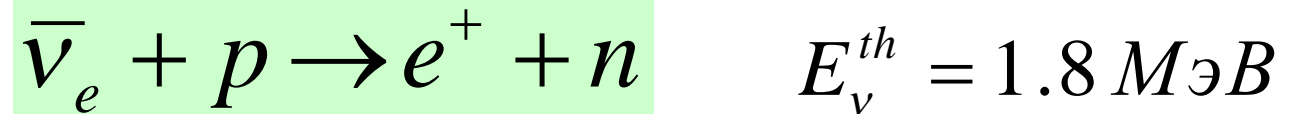
что соответствует

$$21.9 \pm 2.1$$

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = (2.6 \pm 1.0 \pm 0.5) \cdot 10^{-3}$$

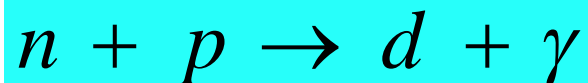
# KamLAND

(Kamioka Liquid scintillator AntiNeutrino Detector)



Детектор (внутренний) - 1200 м<sup>3</sup> жидкого сцинтиллятора (на глубине 1 км=2700 м в. э. в шахте Kamioka), 1879 ФЭУ (1325 новых PMT, 17 дюймов, и 554 старых, 20 дюймов - от S-K); 80% потока нейтрино - от реакторов на расстоянии 175±35 км (от 140 до 210 км).  $E_{\nu th}=1.8$  МэВ, ожидаемый поток нейтрино ~ 10<sup>6</sup> (см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup>). Набор данных - с 2001 г.

Сигнатура: первый сигнал  $e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$  (по 0.511 МэВ) и второй (в совпадении с задержкой ~ 200 мкс) -  $\gamma$ -квант 2.2 МэВ от захвата теплового нейтрона протоном



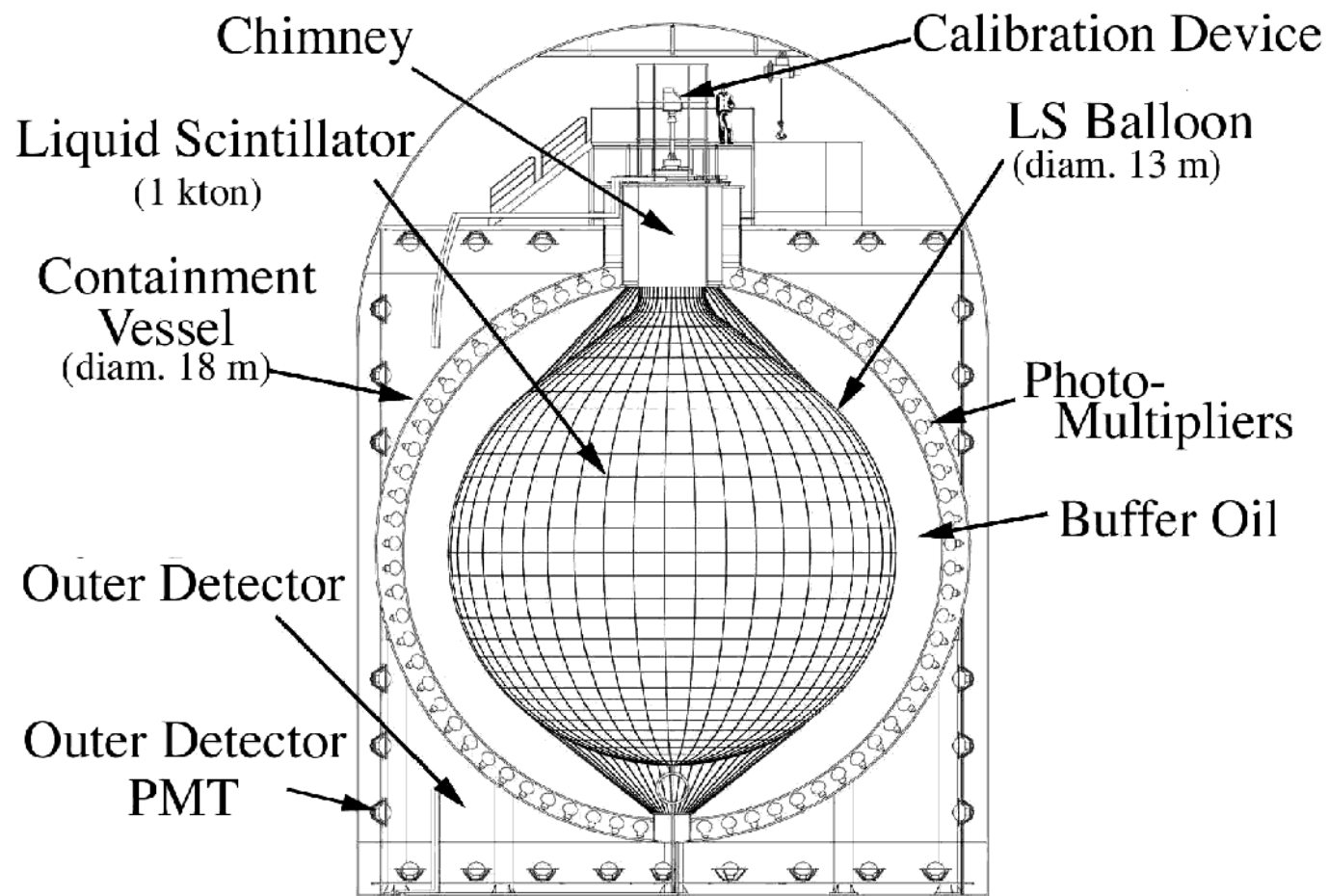


FIG. 1: Schematic diagram of the KamLAND detector

# Результаты измерений в эксперименте KamLAND

KamLAND Collaboration, Phys.Rev.Lett. 90, 02180 (2003)

Гео-нейтрино (от  $\beta$ -распада  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$ ):

$$1 \text{ МэВ} \leq E_{\bar{\nu}_e} \leq 2.4 \text{ МэВ}$$

$$\frac{N_{obs} - N_{BG}}{N_{expected}} = 0.611 \pm 0.085(\text{stat}) \pm 0.041(\text{syst}).$$

Ожидалось (без НО)  
86.8  $\pm$  5.6 событий

$$2.6 \text{ МэВ} \leq E_{\bar{\nu}_e} \leq 8.0 \text{ МэВ}$$

Наблюдалось  
54 события

$$0.86 < \sin^2 2\theta_{12} < 1.0$$

Ограничение на поток  $\bar{\nu}_e$  от Солнца:  $\phi_{\bar{\nu}_e} < 3.7 \cdot 10^2 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$

$$8.3 \text{ МэВ} \leq E_{\bar{\nu}_e} \leq 14.8 \text{ МэВ},$$

$$P(\nu_e \rightarrow \bar{\nu}_e) = 2.8 \cdot 10^{-4}$$

Наилучший фит (с учетом данных KamLAND)

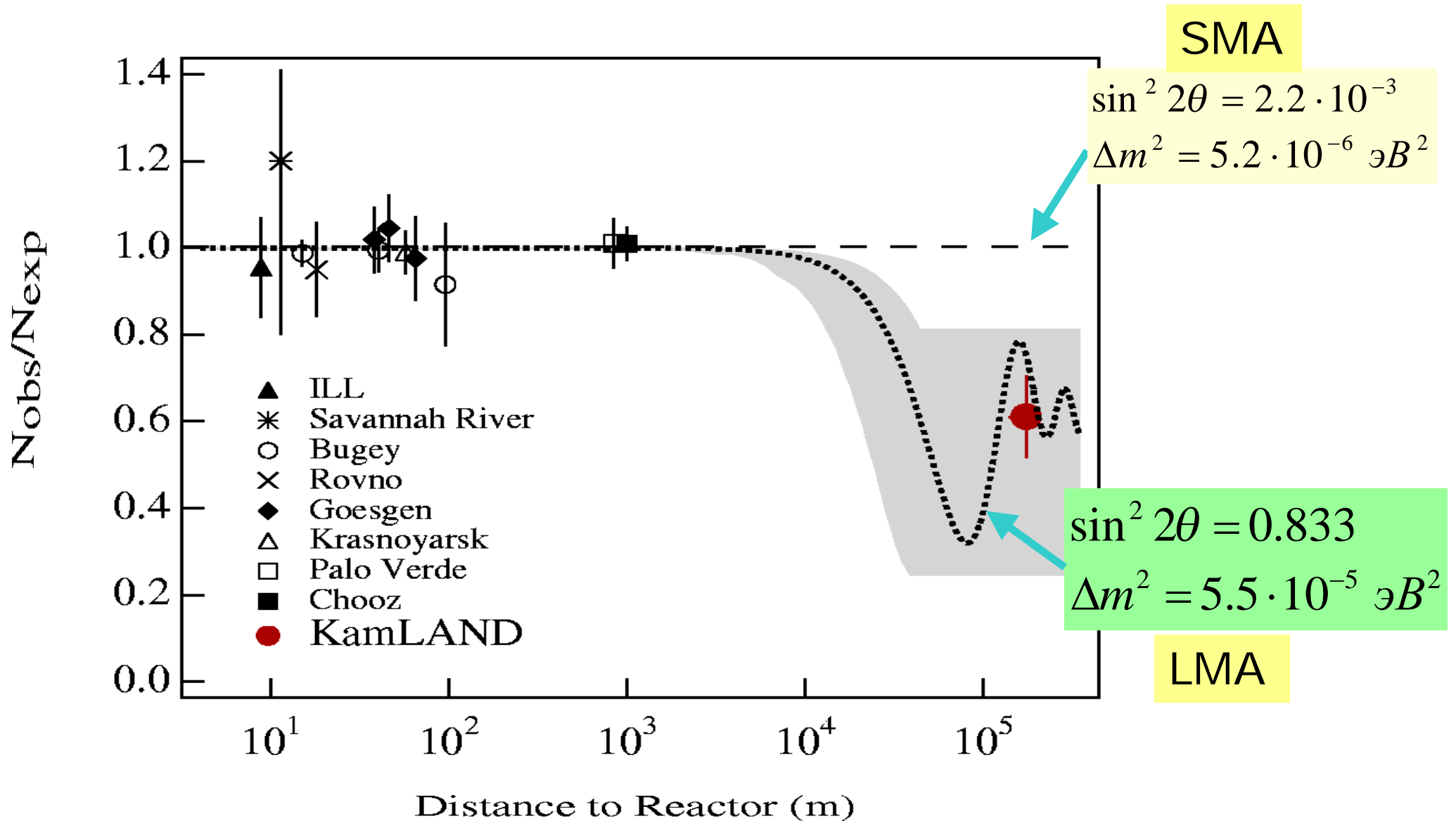
LMA

$$\Delta m^2 = (7.3^{+0.4}_{-0.6}) \cdot 10^{-5} \text{ эВ}^2$$

$$\text{tg}^2 \theta_{12} = 0.41 \pm 0.05$$

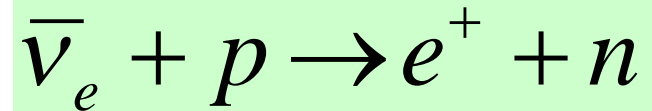


# KamLAND



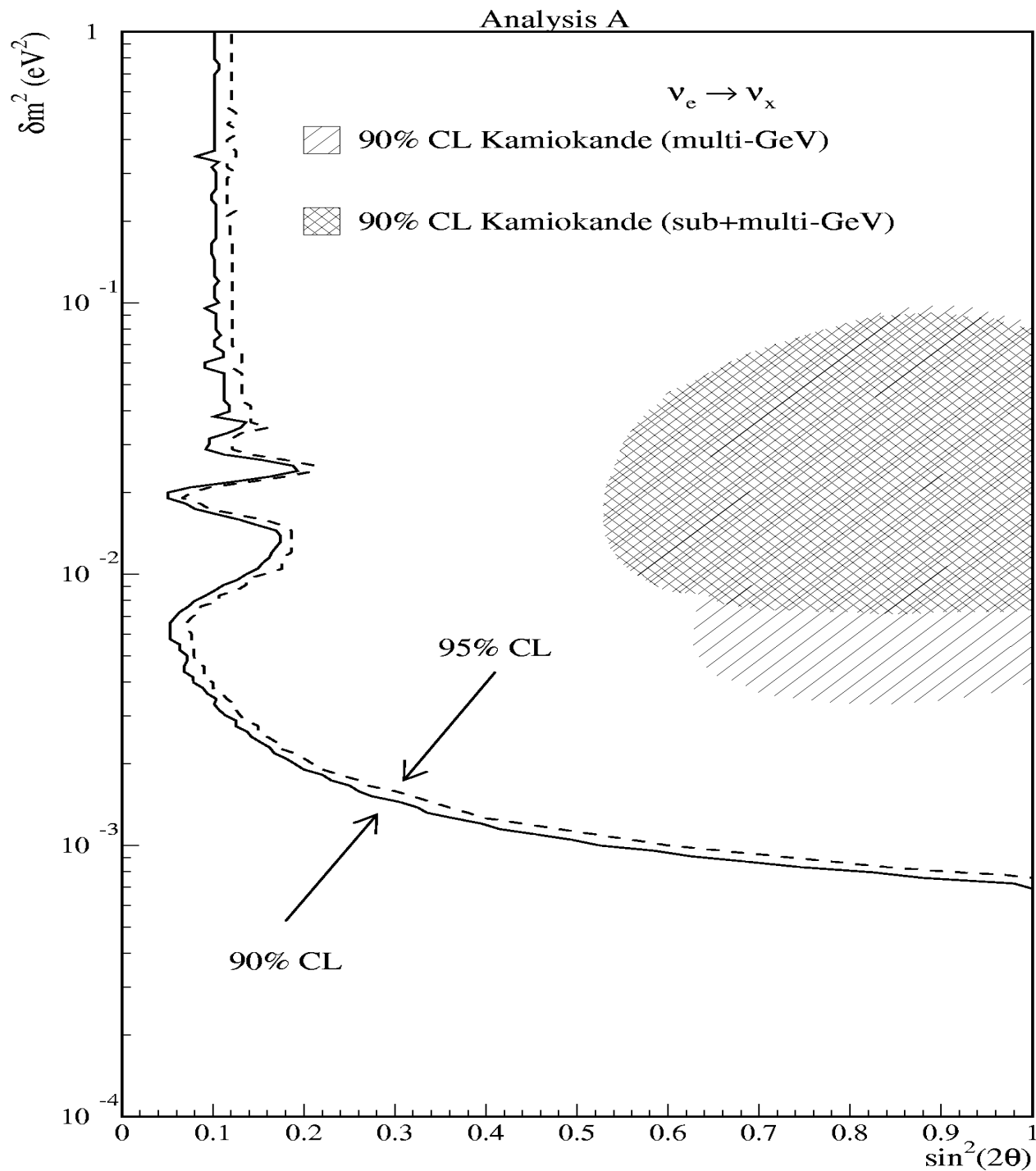
# CHOOZ - реакторный эксперимент

CHOOZ collaboration, M. Apollonio et al. , Phys. Lett. B466, 415 (1999);  
hep-ex/9907037



Триггер: первый сигнал от  $e^+ e^- \rightarrow \gamma\gamma$  и второй (с задержкой) от захвата нейтрона ядром сцинтиллятора  $^{157}\text{Gd}$  (77%) -  $\gamma$ -квант 7.77 МэВ или  $^{155}\text{Gd}$  (23%) - 8.31 MeV).

$$\langle E \rangle \approx 3 \text{ МэВ}, \quad L \approx 1 \text{ км}$$



Результат

CHOOZ

$$\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_x$$

$$\Delta m^2 > 7 \cdot 10^{-4} \text{ эВ}^2$$

$$\sin^2 2\theta = 0.1$$

# K2K: long-baseline neutrino oscillation experiment

M.Ahn, et al. Phys. Rev.Lett .90, 041501 (2003) Takanobu Ishii, hep-ex/0406055

$$CC: \nu_{\mu} + N \rightarrow \mu^{-} + X$$

Пучок  $\nu_{\mu}$  с  $E \sim 1.3$  ГэВ от КЕК (12 ГэВ- ускоритель) to Kamioka (шахта, S-K),  $L=250$  км;

Зарегистрировано **56** событий, ожидалось

$$80.1^{+6.2}_{-5.4}$$

В предположении  $2\nu$ -смешивания

$$\nu_{\mu} \leftrightarrow \nu_{\tau}$$

:

$$\Delta m^2 = 2.8 \cdot 10^{-3} \text{ эВ}^2$$

$$\sin^2 2\theta = 1.0$$

# “See-saw”-механизм

M.Gell-Mann, P. Ramond, R.Slansky, 1979

В see-saw четырехкомпонентное дираковское нейтрино массы  $M_D$  расщепляется в пару двухкомпонентных майрановских нейтрино. Одно из этих нейтрино имеет малую массу  $m_\nu$ ; оно отождествляется с наблюдаемым легким нейтрино.

Другое нейтрино ( $N^M$ ) имеет большую массу (в соответствии со шкалой “новой физики” - за пределами СМ) и ненаблюдаемо: тяжелые майрановские нейтрино стерильны по отношению к стандартным слабым взаимодействиям.

Характер расщепления таков, что  $m_\nu \sim M_D^2 / M_{N^M}$

Например:  $m_\nu \sim 1 \text{ эВ}$ ,  $M_D = m_e$ , и  $M_{N^M} \sim 10^3 \text{ ГэВ}$

(see-saw переводится как “качели”)

The end