

# Нейтрино от сверхновых.

Олег Лычковский  
ИТЭФ, МФТИ

# План

- Что мы знаем о нейтрино?
- Предсверхновая и сверхновая.  
Генерация нейтринных потоков.
- Флейворные переходы нейтрино в веществе.
- Нейтринный сигнал от сверхновой:  
иерархия масс и  $\theta_{13}$ , ударная волна
- SN1987A: нейтринный сигнал, гипотеза двухэтапного коллапса

# Что мы знаем о нейтрино?

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

$$\theta_{23} \approx 45^\circ \quad \text{или} \quad \theta_{23} \approx 135^\circ$$

$$\theta_{12} \approx 34^\circ \quad \Delta m_{12}^2 \approx 0.8 \cdot 10^{-4} \text{ eV}^2$$

$$\theta_{13} < 13^\circ \quad |\Delta m_{23}^2| \approx 25 \cdot 10^{-4} \text{ eV}^2$$

$$m_i < 2.2 \text{ eV}$$

$$\delta = ? \quad \theta_{13} = ? \quad m_i = ?$$

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

# Типичная звезда - прародительница сверхновой

$M > 8-10 M_{\odot}$ ,  $R \sim 10^8$  км

слоистая структура

железное ядро:

$M_{\text{Ch}} = (1.2-2.0)$ ,  $R_{\text{Fe}} \sim 10^4$  км

плотность  $\sim 10^{10}$  г/см<sup>3</sup>,  $T \sim 1$  МэВ

концентрация электронов  $n_e \sim 10^{34}$  см<sup>-3</sup>

энергия Ферми электронов

$$\mu = (3\pi^2 n_e)^{1/3} \sim 10 \text{ МэВ}$$

# Коллапс

- Полная выделяющаяся энергия = гравитационная энергия связи:  
 $(3-5) \cdot 10^{53}$  эрг
- Кинетическая энергия разлета:  $\sim 10^{51}$  эрг  
**99% энергии уносится нейтрино!**
- Железное ядро коллапсирует практически независимо от оболочки
- Образование протонейтронной звезды:  
 $\sim 0.1$  с
- Охлаждение протонейтронной звезды:  
15-30 с

# Генерация нейтринных потоков

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

$$e^{-} + (A, Z) \rightarrow \nu_e + (A, Z - 1)$$

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

$$e^{+} + (A, Z) \rightarrow \bar{\nu}_e + (A, Z + 1)$$

$$e^{-} + e^{+} \rightarrow \nu_l + \bar{\nu}_l$$

$$A + A' \rightarrow A + A' + \nu_l + \bar{\nu}_l$$

$$\gamma^{*} \rightarrow \nu_l + \bar{\nu}_l$$

# Коллапс

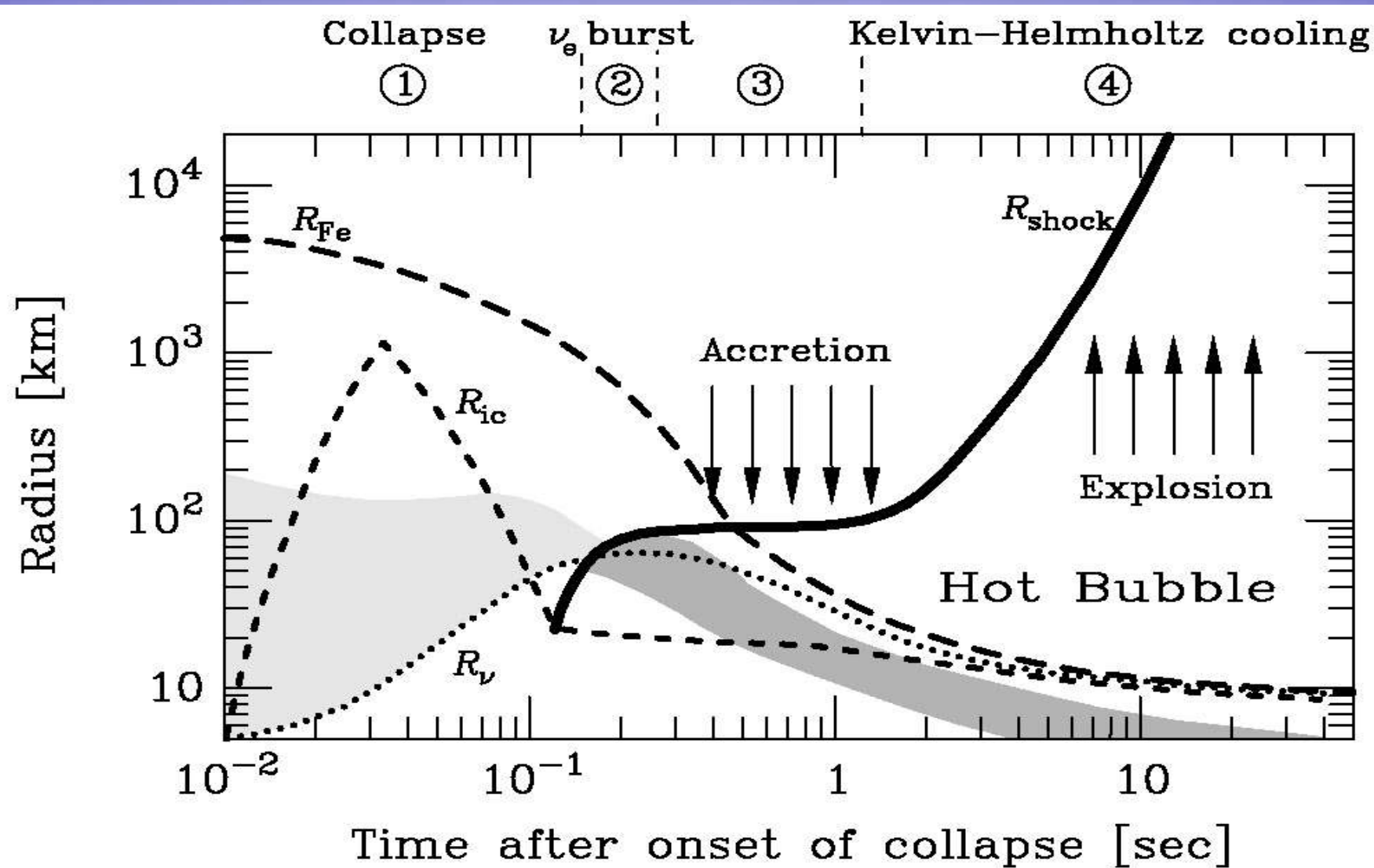


рис. из G.Raffelt, hep-ph 0208024

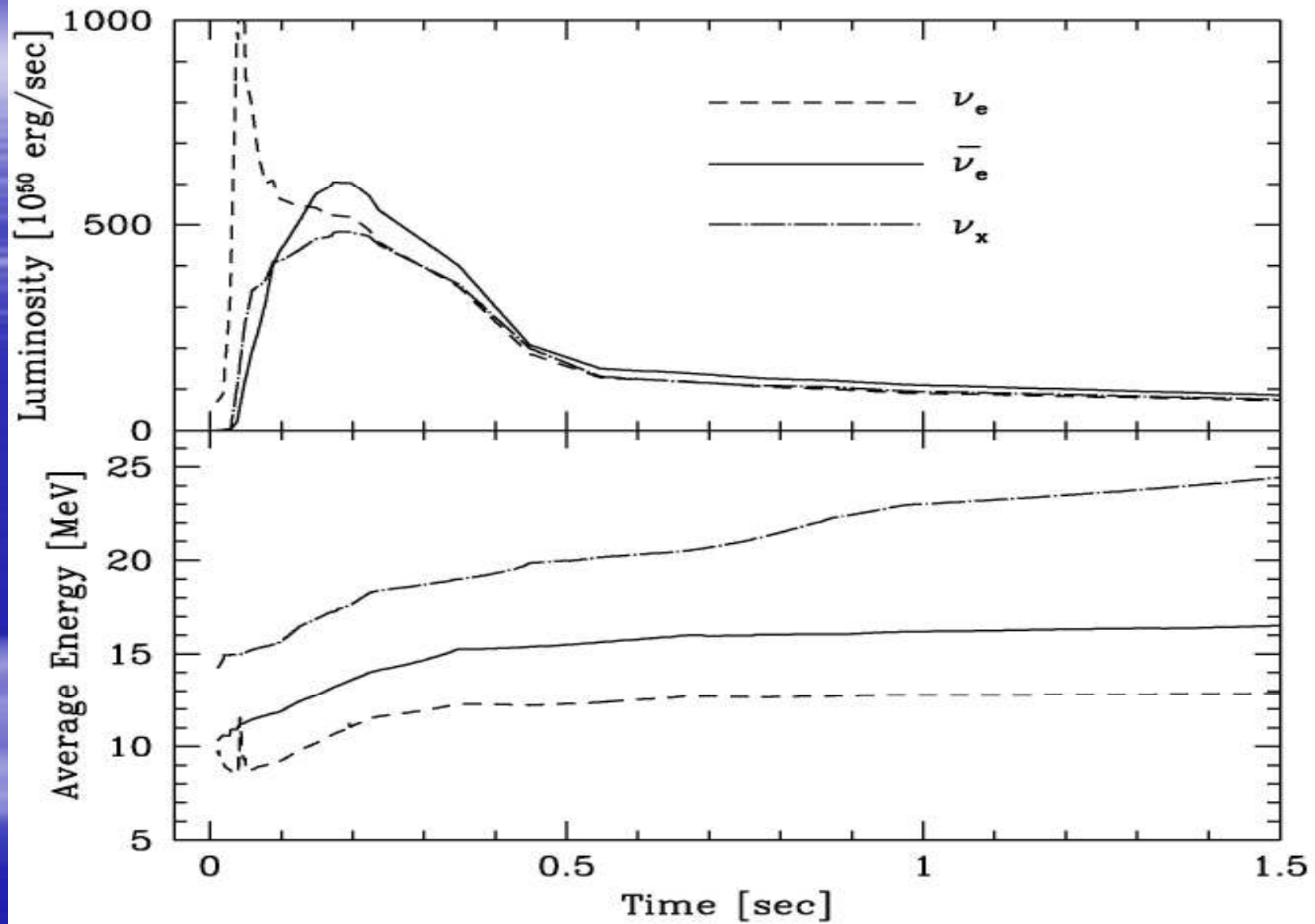


рис. из Totani et al., Astrophys.J., 496 (1998) 216



# Нейтрино в веществе (MSW-эффект)

Четырехфермионное взаимодействие  $e$  с  $\nu_e$  через заряженный ток:

$$L_{\text{int}} = \frac{G_F}{\sqrt{2}} \bar{\nu}_e \gamma^\mu (1 + \gamma^5) e \bar{e} \gamma_\mu (1 + \gamma^5) \nu_e$$

$$V = -\langle L_{\text{int}} \rangle = \sqrt{2} G_F n_e,$$

$$n_e > 0 \text{ для } \nu_e, \quad n_e < 0 \text{ для } \bar{\nu}_e$$

# Нейтрино в веществе с $n_e = \text{const}$

$$\hat{H}_0 | \nu_i \rangle = \left( p + \frac{m_i^2}{2p} \right) | \nu_i \rangle$$

$$\hat{V} | \nu_e \rangle = \sqrt{2} G_F n_e | \nu_e \rangle$$

Найдем такие  $| \nu_i^{eff} \rangle$ , что

$$(\hat{H}_0 + \hat{V}) | \nu_i^{eff} \rangle = \left( p + \frac{m_{i\text{eff}}^2}{2p} \right) | \nu_i^{eff} \rangle$$

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U^{eff} \begin{pmatrix} \nu_1^{eff} \\ \nu_2^{eff} \\ \nu_3^{eff} \end{pmatrix}$$

# Нейтрино в веществе с $n_e = \text{const}$

В случае двух флейворов

$$\sin 2\theta^{eff} = \frac{\sin 2\theta}{\sqrt{(\cos 2\theta - \xi)^2 + \sin^2 2\theta}}$$

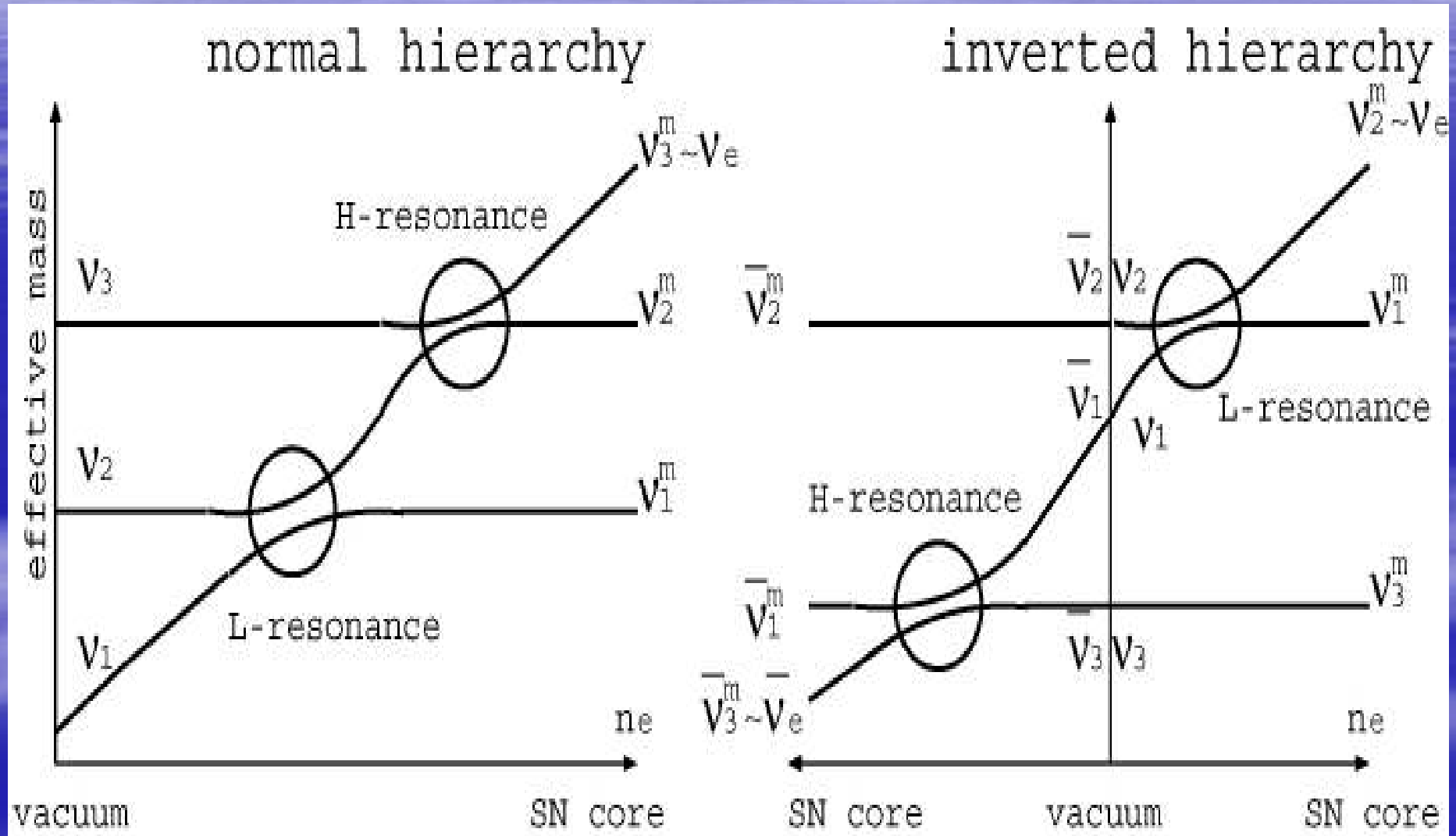
$$\Delta m_{eff}^2 = \Delta m^2 \sqrt{(\cos 2\theta - \xi)^2 + \sin^2 2\theta}$$

$$\xi \equiv \frac{2\sqrt{2}G_F n_e E_\nu}{\Delta m^2}$$

Резонанс:  $\xi = 1$ ,  $\Delta m_{eff}^2 = \Delta m^2 |\sin 2\theta|$ ,  $|\theta^{eff}| = \pi / 4$

Большая  $n_e$ :  $\xi \gg 1$ :  $\theta^{eff} = 0$ ,  $\frac{\Delta m_{eff}^2}{2E} = \sqrt{2}G_F n_e \frac{\Delta m^2}{|\Delta m^2|}$

# Схема пересечения уровней



# Нейтрино в веществе $n_e = n_e(r)$

$$\nu(r) = \psi_1(r)\nu_1^{eff}(r) + \psi_2(r)\nu_2^{eff}(r)$$

Уравнение Шредингера:

$$i \frac{d}{dr} \begin{pmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{\Delta m_{eff}^2}{4E} & -i \frac{d\theta^{eff}}{dr} \\ i \frac{d\theta^{eff}}{dr} & \frac{\Delta m_{eff}^2}{4E} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \end{pmatrix}$$

Параметр адиабатичности:  $\gamma = \frac{|\Delta m_{eff}^2|}{4E} \left| \frac{d\theta^{eff}}{dr} \right|^{-1}$

Адиабатическое приближение:  $\gamma \gg 1$

# Нейтрино в веществе сверхновой

- Адиабатичность везде, кроме, возможно, резонансных точек
- Иерархия масс обеспечивает два независимых резонанса:

$$\text{H-резонанс: } \sqrt{2}G_F n_e(r_H) = \frac{\Delta m_{31}^2}{2E_\nu} \cos 2\theta_{13}$$

$$\text{L-резонанс: } \sqrt{2}G_F n_e(r_L) = \frac{\Delta m_{21}^2}{2E_\nu} \cos 2\theta_{12}$$

$$r_H = (3 - 5) \cdot 10^4 \text{ км}$$

$$r_L = (8 - 15) \cdot 10^4 \text{ км}$$

# Условия адиабатичности резонансов

В резонансе 
$$\gamma = \frac{\Delta m^2 \sin 2\theta \tan 2\theta}{E_\nu} \left( \frac{d \ln n_e}{dr} \right)^{-1}$$

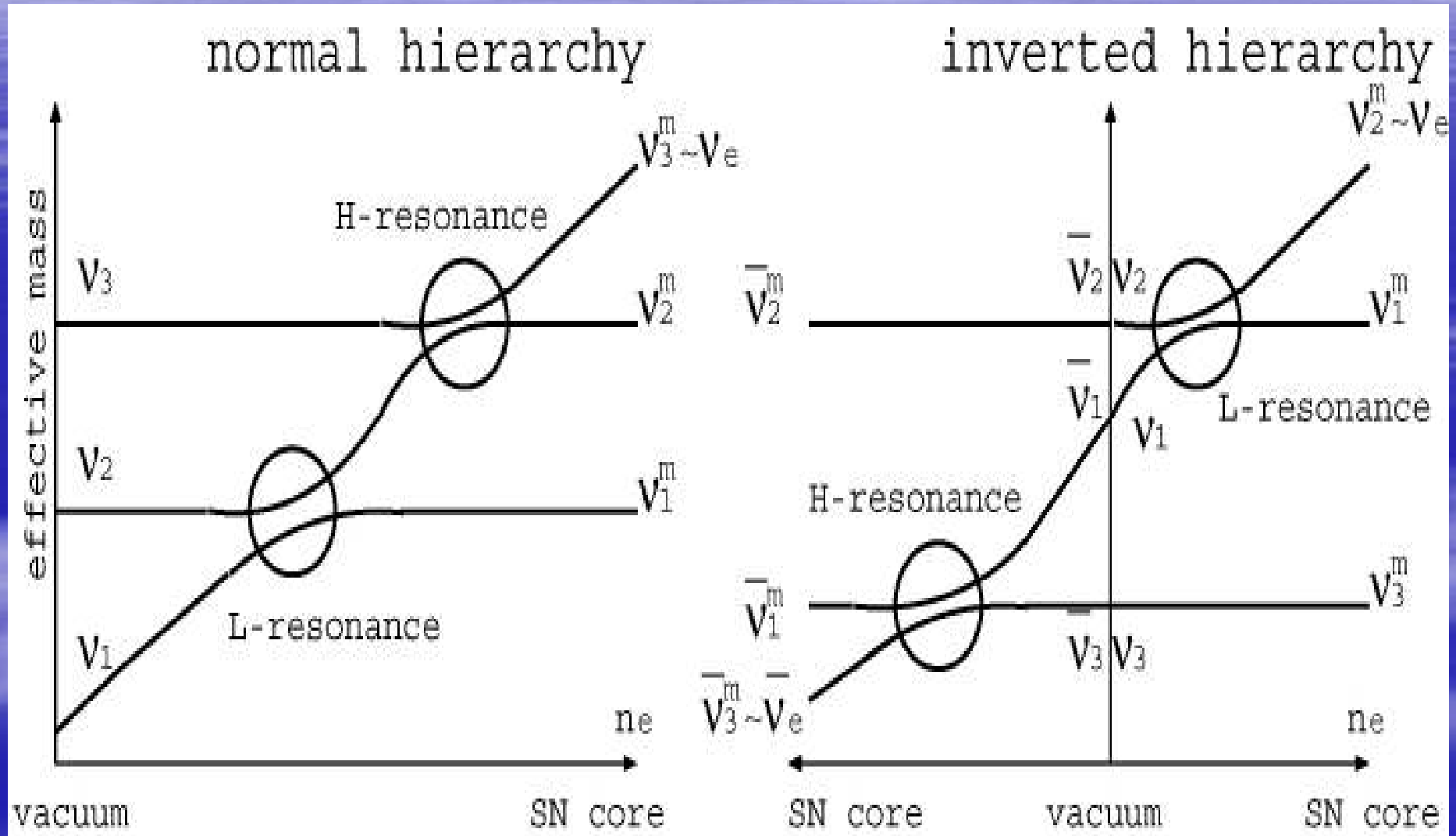
Для  $n_e = n_0 r^{-3}$  
$$\gamma_L = 2.5 \cdot 10^4 \cdot (10 \text{ МэВ} / E_\nu)^{2/3} \gg 1$$

**L-резонанс всегда адиабатичен!**

$$\gamma_H = 10^3 \cdot \frac{\sin^2 2\theta_{13}}{(\cos 2\theta_{13})^{4/3}} \cdot (10 \text{ МэВ} / E_\nu)^{2/3}$$

**Адиабатичность H-резонанса зависит от  $\theta_{13}$ !**

# Схема пересечения уровней





# Потоки нейтрино в детекторе

Начальные потоки:  $F_e^0$ ,  $F_{\bar{e}}^0$

$$F_x^0 \equiv F_\mu^0 = F_{\bar{\mu}}^0 = F_\tau^0 = F_{\bar{\tau}}^0$$

$$F_e = pF_e^0 + (1-p)F_x^0$$

$$F_{\bar{e}} = \bar{p}F_{\bar{e}}^0 + (1-\bar{p})F_x^0$$

$$4F_x = (1-p)F_e^0 + (1-\bar{p})F_{\bar{e}}^0 + (2+p+\bar{p})F_x^0$$

$$p \equiv |U_{e2}|^2 P_H + |U_{e3}|^2 (1-P_H) \approx |U_{e2}|^2 P_H$$

$$\bar{p} \equiv |U_{e1}|^2 \bar{P}_H + |U_{e3}|^2 (1-\bar{P}_H) \approx |U_{e1}|^2 \bar{P}_H$$

# Иерархия масс и $\theta_{13}$

	NH, <b>L</b>	IH, <b>L</b>	NH and IH, <b>S</b>
$P_H$	0	1	1
$\bar{P}_H$	1	0	1

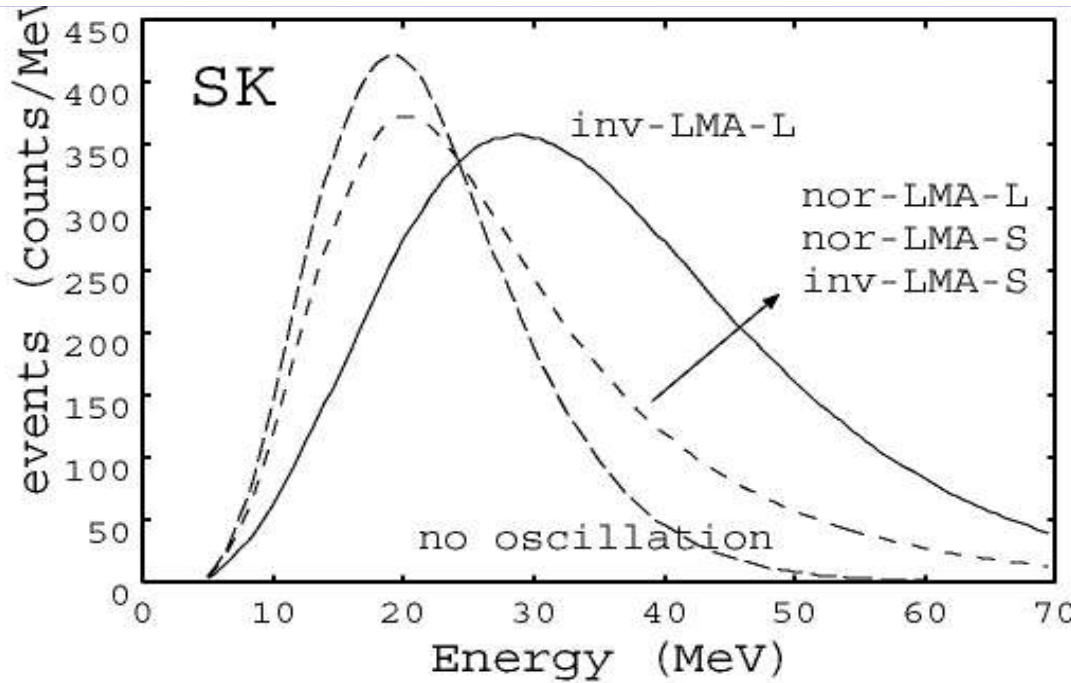
NH=Normal Hierarchy, IH=Inverted Hierarchy

**L**=Large  $\theta_{13}$  :  $\theta_{13} > 0.03$

**S**=Small  $\theta_{13}$  :  $\theta_{13} < 0.003$

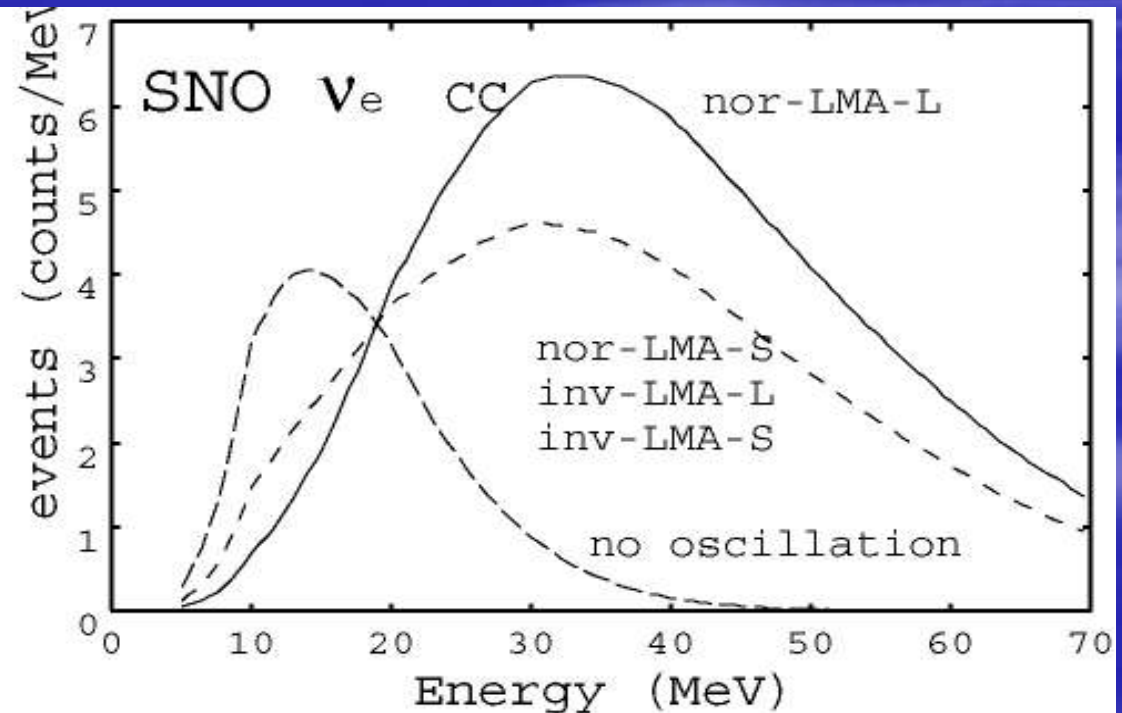
Takahashi, Sato,  
hep-ph/0205070

$R=10$  кПК

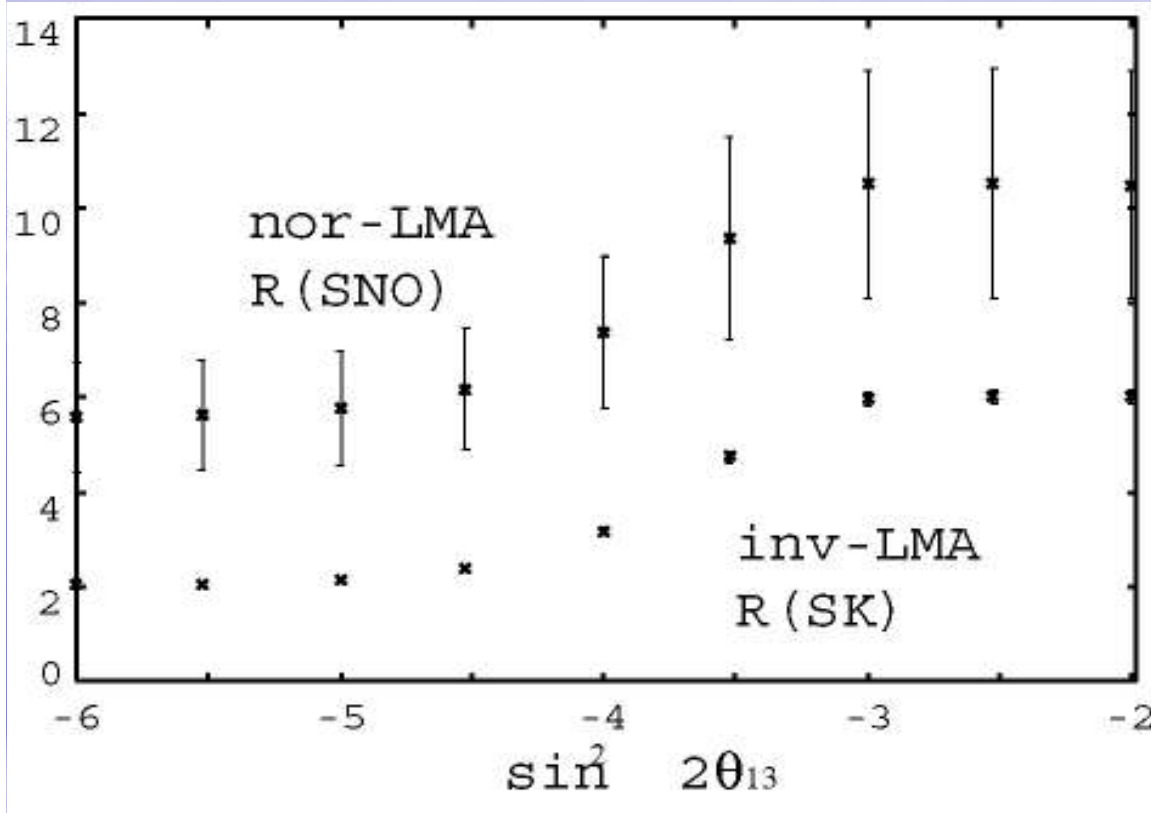


SK чувствительна к  $\bar{\nu}_e$

SNO чувствительна как  
к  $\bar{\nu}_e$ , так и к  $\nu_e$



# Измерение $\theta_{13}$



В интервале  
 $0.003 < \theta_{13} < 0.015$

$(0.06^\circ < \theta_{13} < 1^\circ)$

при IH

$\theta_{13}$

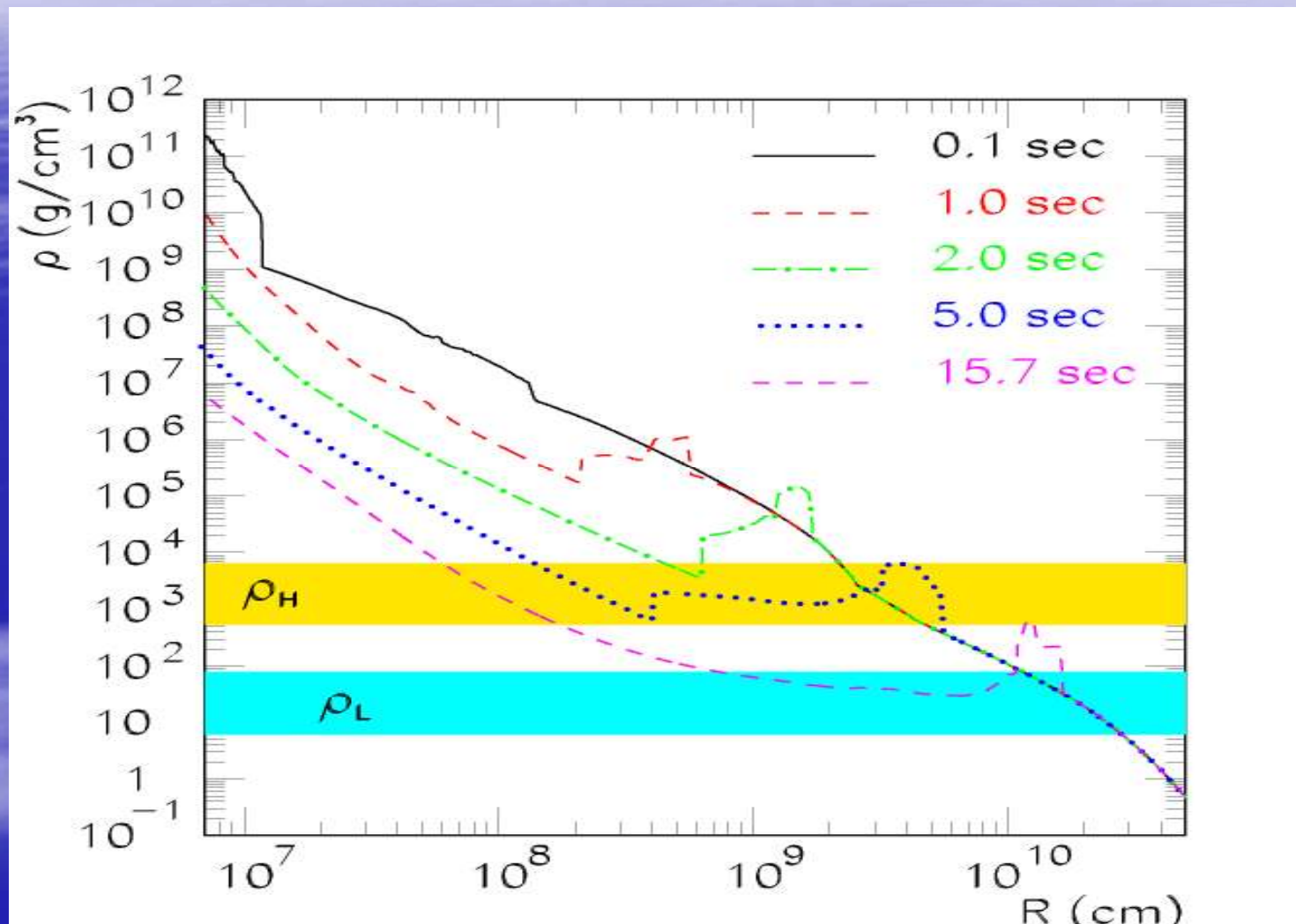
МОЖНО

**измерить!**

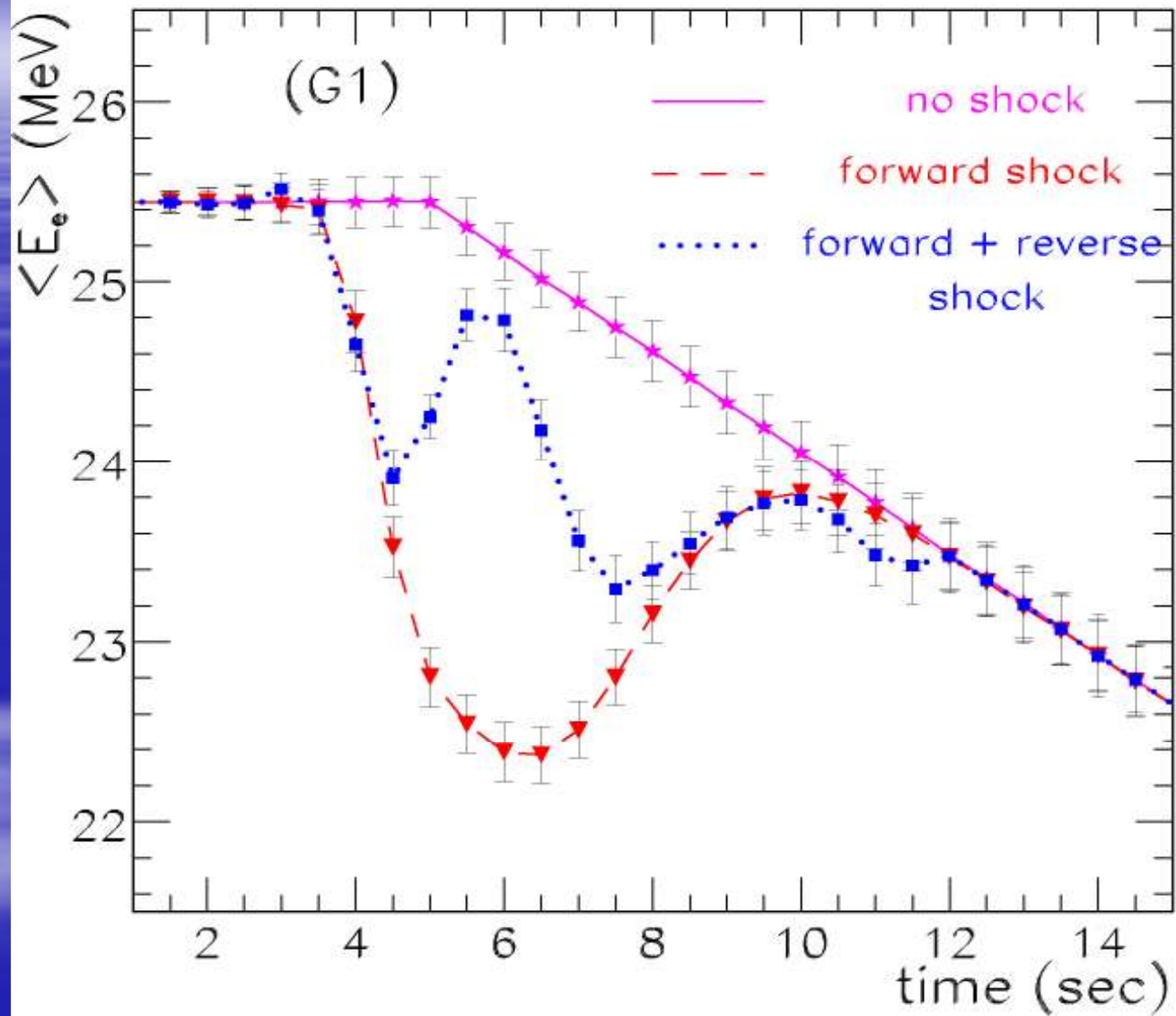
Takahashi, Sato, hep-ph/0205070

$$R \equiv \frac{\text{кол-во событий при } 20 \text{ МэВ} < E_\nu < 70 \text{ МэВ}}{\text{кол-во событий при } 5 \text{ МэВ} < E_\nu < 20 \text{ МэВ}}$$

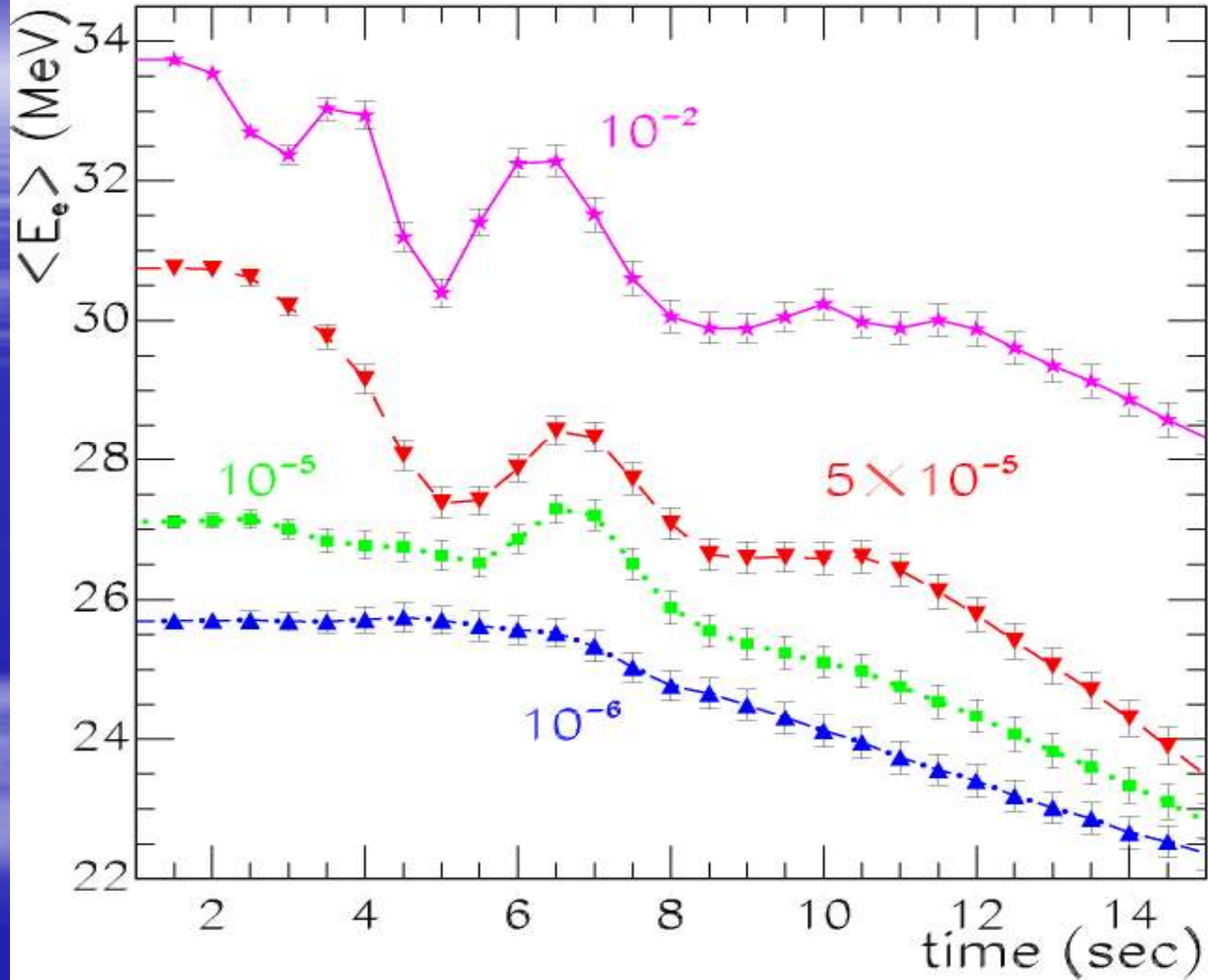
# Ударная волна в сверхновой и нейтринный сигнал



Ударная волна взрыва достигает резонансов за 2-20 с !  
(Schirato, Fuller, astro-ph/0205390)



Tomas et al., astro-ph/0407132



Tomas et al., astro-ph/0407132

# Нейтринный сигнал от SN1987A

Детектор	тип	рабочее вещество	2:52	7:35
LSD	сцинт.	$C_nH_{2n}$ 90 т Fe 200 т	5	2
KII	черенк.	$H_2O$ 2140 т	3	12
IMB	черенк.	$H_2O$ 5000 т	0	8
БСТ	сцинт.	$C_nH_{2n}$ 200 т	1	6





	LSD	KII
$\Sigma_{\nu_e}^{eff}, 10^{-10} \text{ cm}^2$	6	5
$\Sigma_{\bar{\nu}_e}^{eff}, 10^{-10} \text{ cm}^2$	8	150

На первом этапе  
коллапса

$$F_{\nu_e} \gg F_{\bar{\nu}_e}$$

# Случай нормальной иерархии,

$$\theta_{13} > 0.03$$

H-резонанс абсолютно неадиабатичен

$$F_x^0 \equiv F_{\nu_\mu}^0 = F_{\bar{\nu}_\mu}^0 = F_{\nu_\tau}^0 = F_{\bar{\nu}_\tau}^0 \leq F_{\nu_e}^0, F_{\bar{\nu}_e}^0$$

$$F_{\nu_e} = \sin^2 \theta_{13} F_{\nu_e}^0 + \cos^2 \theta_{13} F_x^0 \approx F_x^0$$

$$F_{\bar{\nu}_e} = \cos^2 \theta_{12} F_{\bar{\nu}_e}^0 + \sin^2 \theta_{12} F_x^0 \geq F_x^0$$

$F_{\nu_e} \leq F_{\bar{\nu}_e}$  – противоречит наблюдениям!

# Ограничение на $\theta_{13}$

	Нормальная иерархия	Обратная иерархия
$\theta_{13} > 0.03$	—	+
$\theta_{13} < 0.03$	+	+

Smirnov, Lunardini, hep-ph/0302033

Lychkovskiy, hep-ph/0604113