

НЕУСКОРИТЕЛЬНАЯ ФИЗИКА ЧАСТИЦ: ЗА ПРЕДЕЛЫ СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ.

1. ВВЕДЕНИЕ. СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ
2. Осциллирующие нейтрино
 - Что такое нейтринные осцилляции
 - Солнечные нейтрино + KamLAND
 - Атмосферные нейтрино
 - О чем говорят нейтринные осцилляции
3. Откуда ждать новостей
 - Космические лучи сверхвысоких энергий
 - Темная материя
4. Заключение

СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ ФИЗИКИ ЧАСТИЦ:

- **ФЕРМИОНЫ:** ТРИ ПОКОЛЕНИЯ
КВАРКОВ И ЛЕПТОНОВ

КВАРКИ: $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$ x 3 ЦВЕТА

ЛЕПТОНЫ: $\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}$

+ АНТИЧАСТИЦЫ.

МАССЫ: $0.5 \div 10 \text{ МэВ}$ $0.1 \div 1.5 \text{ ГэВ}$ $1.5 \div 175 \text{ ГэВ}$
 m_{c^2} e^- t

НЕЙТРИНО НА МНОГО ПОРЯДКОВ ЛЕГЧЕ.

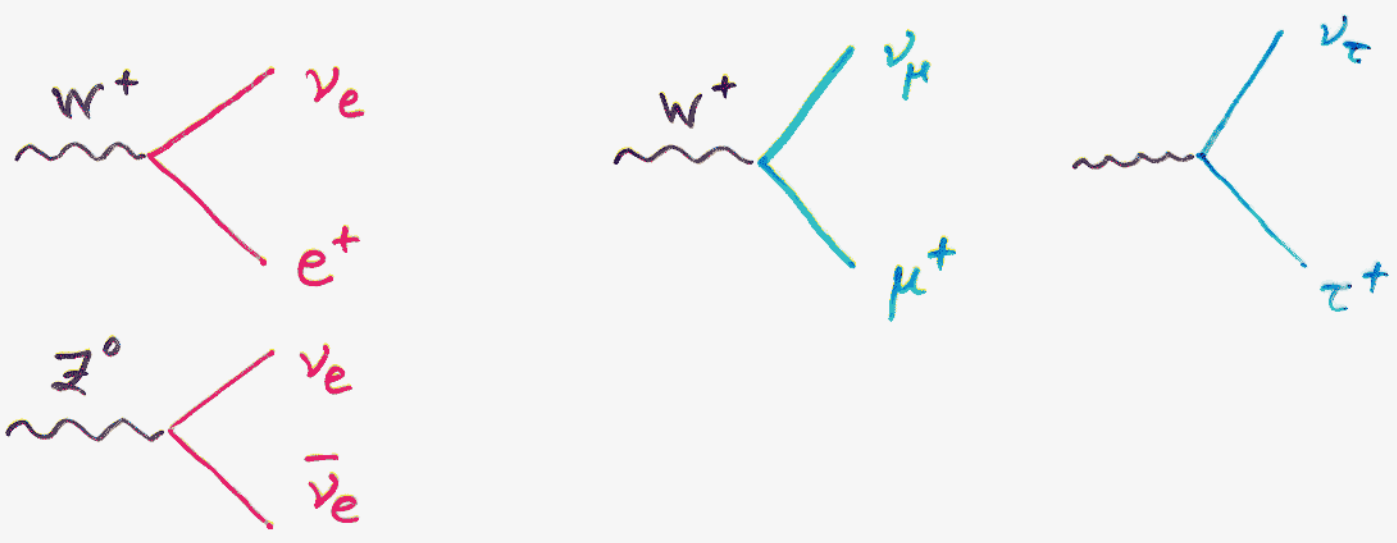
СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ \Leftrightarrow БЕЗМАССОВЫЕ НЕЙТРИНО.

• ВЕКТОРНЫЕ БОЗОНЫ:

- фотон ; $m_\gamma = 0 \Leftrightarrow$ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
- глюоны: $m_G = 0 \Leftrightarrow$ СИЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
- W^\pm, Z : $m_W = 80 \text{ ГэВ}$ $m_Z = 91 \text{ ГэВ}$ \Leftrightarrow СЛАБЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

НЕДОСТАЮЩЕЕ ЗВЕНО: БОЗОН ХИГГСА.

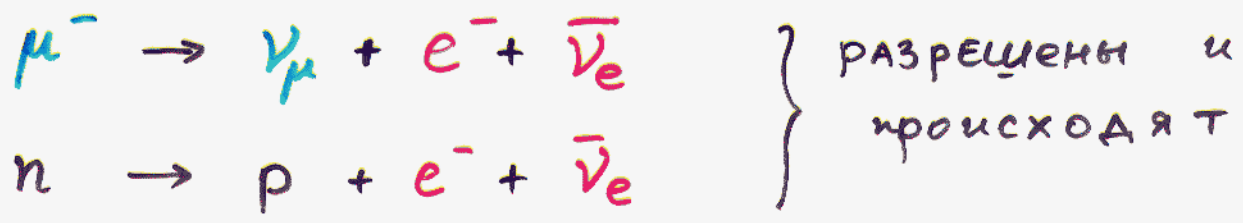
Нейтрино КАЖДОГО типа рождается в паре со "своим" ЛЕПТОНОМ:



• Сохранение лептонных чисел в Станд. Модели

$$L_e = (N_{e^-} + N_{\nu_e}) - (N_{e^+} + N_{\bar{\nu}_e})$$

L_μ , L_τ - сохраняются в СМ



$\mu \rightarrow e + \gamma$ запрещен
 эксперимент: $Br(\mu \rightarrow e \gamma) < 1.2 \times 10^{-11}$

Нейтринные осцилляции \Leftrightarrow нарушение сохранения лептонных чисел.

- Сохранение барионного числа

$$B = \frac{1}{3} (N_q - N_{\bar{q}})$$



протон стабилен в Станд. Модели

Эксперимент: $\tau_p > 1.6 \cdot 10^{33}$ лет
 ($p \rightarrow e^+ \pi^0$)

КАК ОБРАЗОВАЛАСЬ БАРИОННАЯ АСИММЕТРИЯ
 ВСЕЛЕННОЙ ?

Сахаров '67
 Кузьмин '69

Нейтринные осцилляции \Rightarrow указание на ответ.

Нейтринные осцилляции

(5)

Локтекорво

происходит, если

- Нейтрино имеют массы
- $|\nu_e\rangle$, $|\nu_\mu\rangle$, $|\nu_\tau\rangle$ - линейные комбинации (в смысле квантовой механики) состояний с определенной массой

В момент образования

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

\nearrow МАССА m_1 \nearrow МАССА m_2

Эволюция

$$|\nu_1\rangle \rightarrow e^{-iE_1 t} |\nu_1\rangle$$

$$|\nu_2\rangle \rightarrow e^{-iE_2 t} |\nu_2\rangle$$

$$E_1 = \sqrt{\vec{p}^2 + m_1^2} = p + \frac{m_1^2}{2p}$$

$$E_2 = p + \frac{m_2^2}{2p}$$

$$\Delta m^2 = m_2^2 - m_1^2$$

$$|\Psi(t)\rangle = e^{-i(p + \frac{m_1^2}{2p})t} \times \left[\cos \theta |\nu_1\rangle + \sin \theta e^{-i \frac{\Delta m^2}{2p} t} |\nu_2\rangle \right]$$

Вероятность того, что ν_e останется электронным нейтрино

(6)

$$|\langle \nu_e | \Psi(t) \rangle|^2 = 1 - \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \frac{\Delta m^2 \cdot t}{p}$$

в вакууме

$$= 1 - \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \frac{\Delta m^2 \cdot L}{E_\nu}$$

• Параметры осцилляции:

θ : угол смешивания

$$\Delta m^2 = m_2^2 - m_1^2$$

• Электронное нейтрино перестает быть электронным при достаточно большом расстоянии L от источника, если энергия E_ν не слишком велика.

(аналогично для ν_μ)

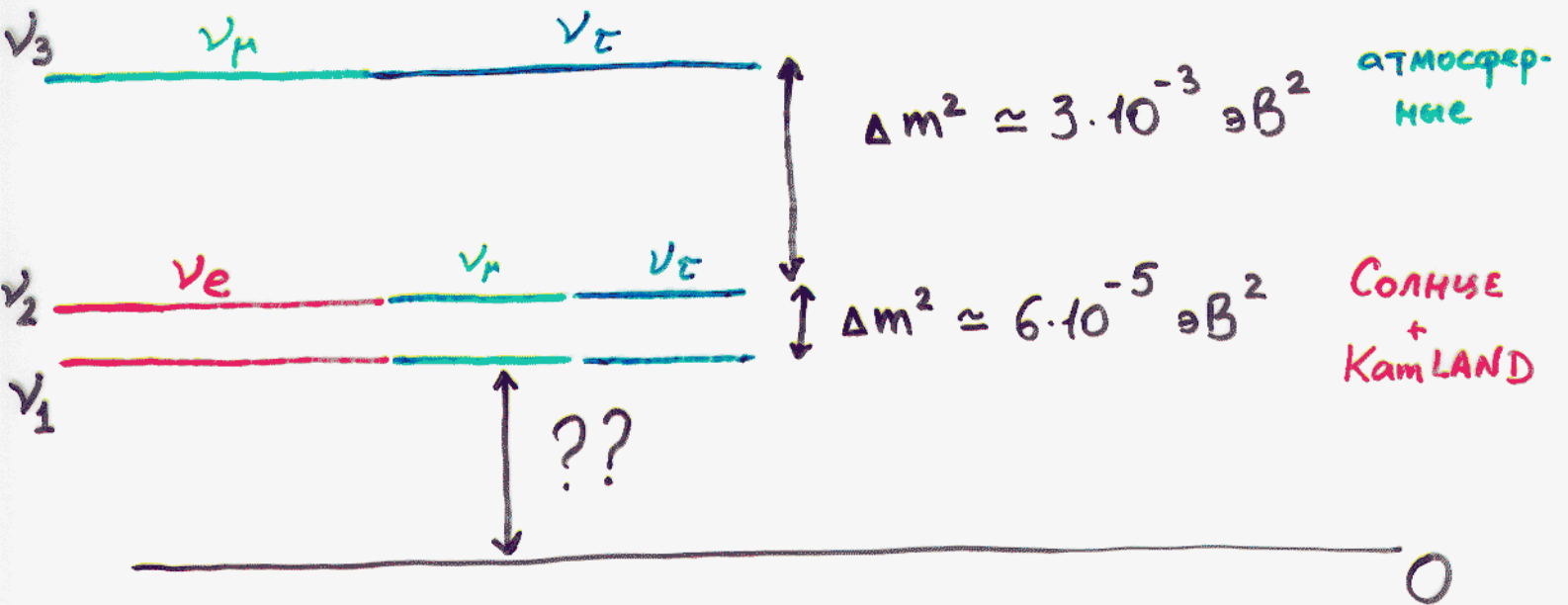
• Дополнительный эффект в веществе: появление "показателя преломления" для ν_e

Волфенштейн;
Михеев, Смирнов.
(MSW)

Источники: ν_e : Солнце

$\bar{\nu}_e$: реакторы

$\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$: "атмосфера".



Абсолютные значения масс неизвестны.

Ограничения:

модельно-независимое
[форма β -спектра в распаде трития]

$$m_{\nu_e} < 2.2 \text{ эВ}$$

Троицк
Майнц

майорановская
[безнейтринный 2β -распад]

$$m_{\nu_e} \lesssim 0.4 \text{ эВ}$$

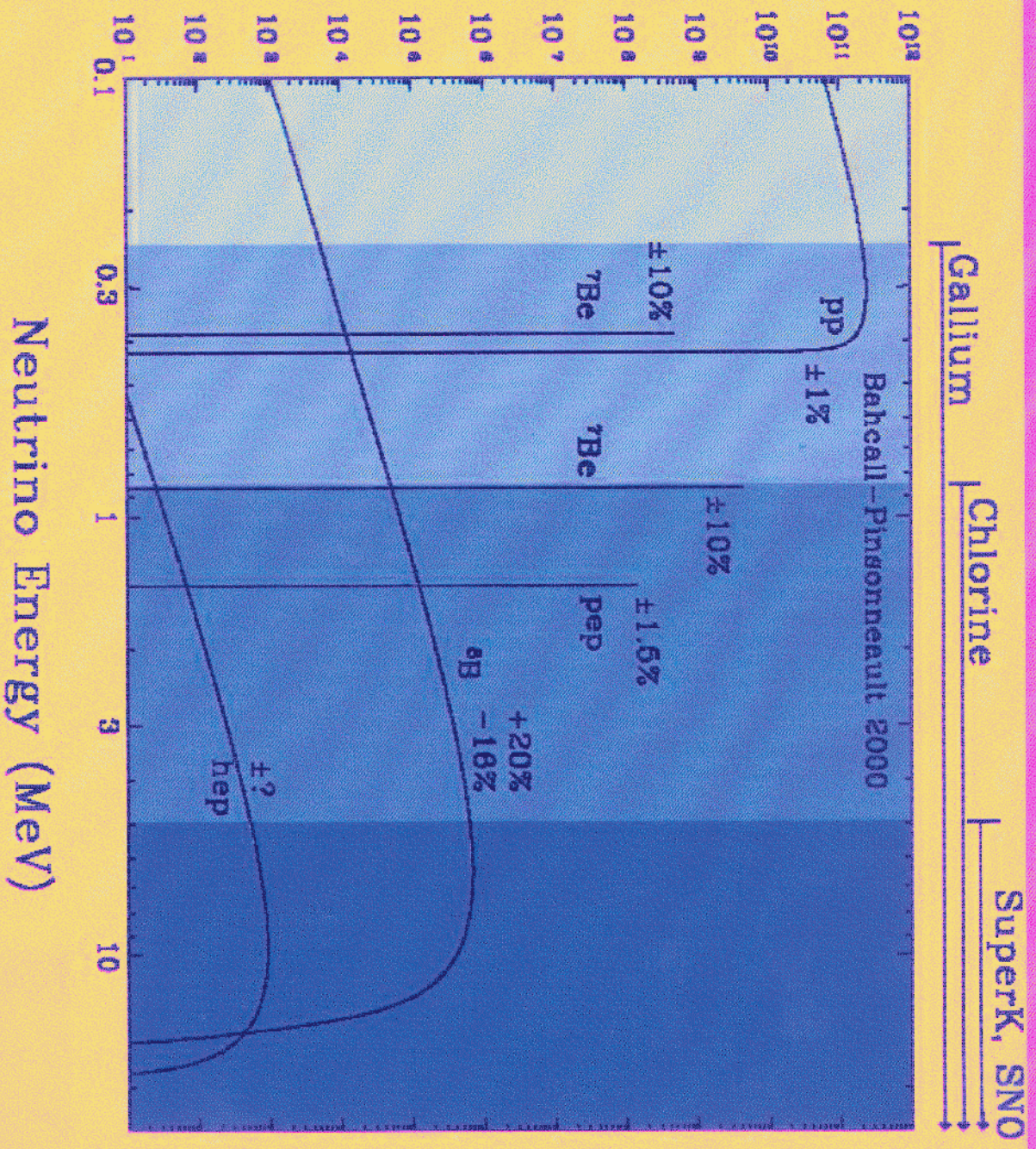
Heidelberg - Moscow

- Лептонные числа не сохраняются
- Чем объясняются столь малые массы нейтрино?
 $m_\nu \lesssim 10^{-6} m_{e^-}$



spectra

Neutrino Flux



ДЕТЕКТОРЫ: МАЛЫЕ СЕЧЕНИЯ
НЕЙТРИННЫХ РЕАКЦИЙ
при низких энергиях



РЕДКИЕ СОБЫТИЯ



- Низкофоновые условия
(подземные лаборатории)

- Большая масса мишени Рус.

РАДИОХИМИЧЕСКИЕ

РЕЗУЛЬТАТ / ССМ

- HOMESTAKE $\nu_e + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + 8\text{e}^- + \dots$ США 0.33 ± 0.03
- SAGE $\nu_e + {}^{71}\text{Ga} \rightarrow {}^{71}\text{Ge} + \text{pp} + \dots$ Россия
США 0.55 ± 0.05
- GALLEX/GNO $\text{pp} + \dots$ Италия
Германия,
Франция, США 0.55 ± 0.05

ЧЕРЕНКОВСКИЕ

- KAMIOKANDE $\nu + e^- \rightarrow \nu + e^-$ Япония 0.54 ± 0.07
 - SUPER-K 8B Япония
США 0.47 ± 0.02
- ν_e осциллируют!
- SNO $\nu + e^- \rightarrow \nu + e^-$ Канада
 $\nu + \text{D} \rightarrow \text{p} + \text{p} + e^-$ США

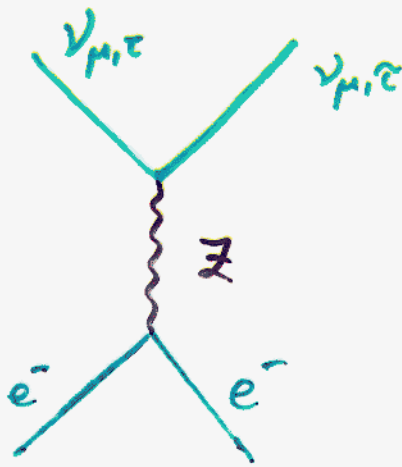
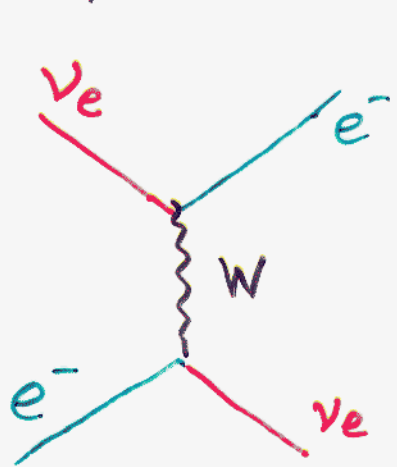
Лето 2001:

SNO:

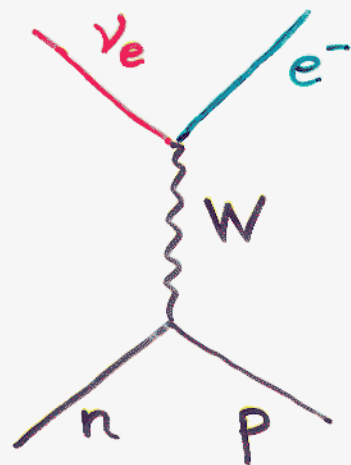
- подтвердил "недостаток" ^8B нейтрино

SNO + Super-K : поток ν_μ, ν_τ от Солнца

Super-K



SNO



ИЗМЕРЯЕТ

(поток ν_e) + 0.154 · (поток $\nu_{\mu,\tau}$)

ИЗМЕРЯЕТ ПОТОК

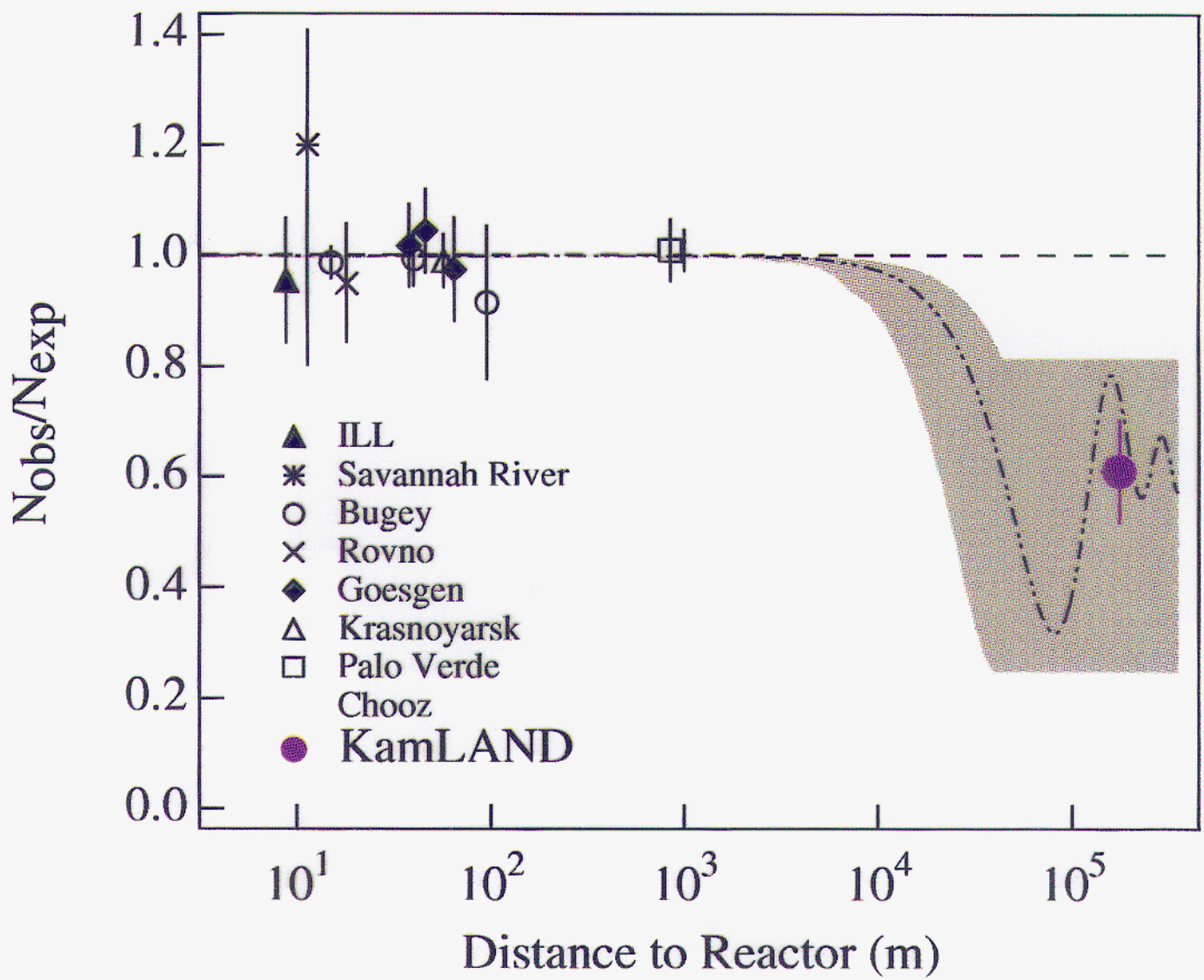
ν_e ТОЛЬКО

- ν_e осциллируют в $\nu_{\mu,\tau}$
- Толстый поток нейтрино всех типов согласуется со Стандартной Солнечной моделью

Все солнечные эксперименты вместе:

параметры осцилляций $\nu_e \rightarrow \nu_{\mu,\tau}$

MSW ВАЖЕН!



KamLAND (6 дек. 2002)

(12)

- Сцинтилляционный детектор, 1000 тонн в камере Kamiokande Япония США
- Измерение потока $\bar{\nu}_e$ от ~ 26 реакторов на расстоянии $138 \div 214$ км.



↓
γ-кванты

↘ захват ⇒
задержанные γ

Рис.

Солнечные нейтрино + KamLAND:

ν_e осциллируют в $\nu_{\mu, \tau}$

$$\Delta m^2 = (4 \div 8) \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$\sin^2 2\theta = 0.7 \div 1$$

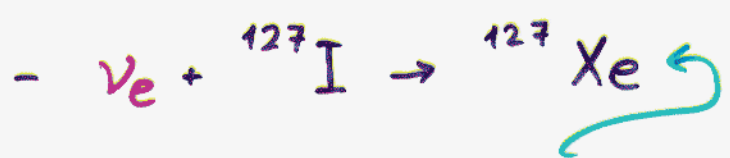
↑
в основном из Ga

Неисследованная область солнечных нейтрино:

Промежуточные энергии
(вокруг линии $\approx 7 \text{Be}$)

- Borexino

- KamLAND



Сечение неизвестно

Измерение с помощью
искусственного источника
нейтрино ${}^{37}\text{Ar}$

Проект РАН - Минатом, идет

Атмосферные нейтрино

Рис.

- Абсолютные потоки предсказываются не очень точно

- $\frac{\nu_e}{\nu_\mu}$, угловые распределения предсказываются точно.

- В детекторе Super-K:



Выглядят по-разному
Рис.

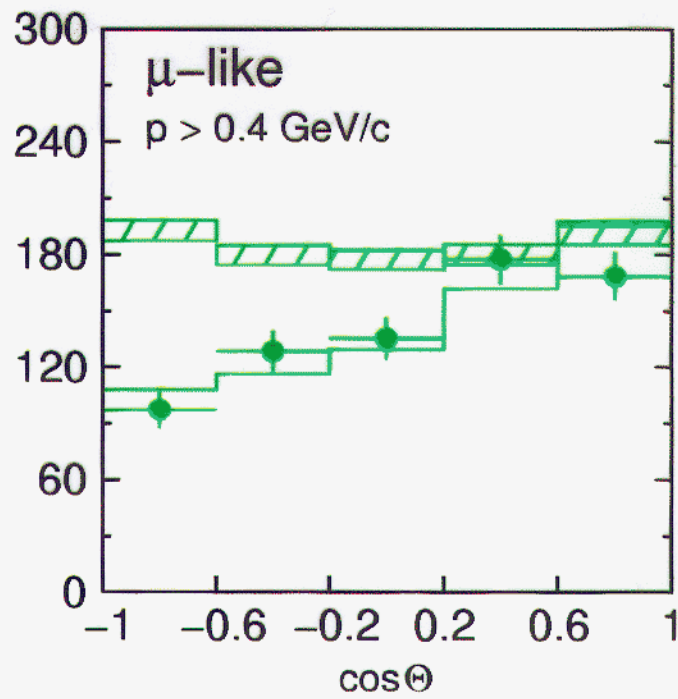
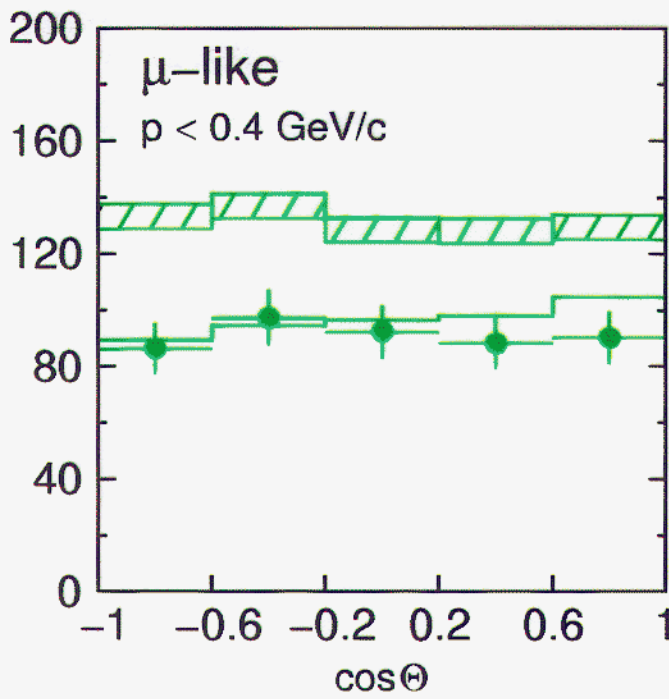
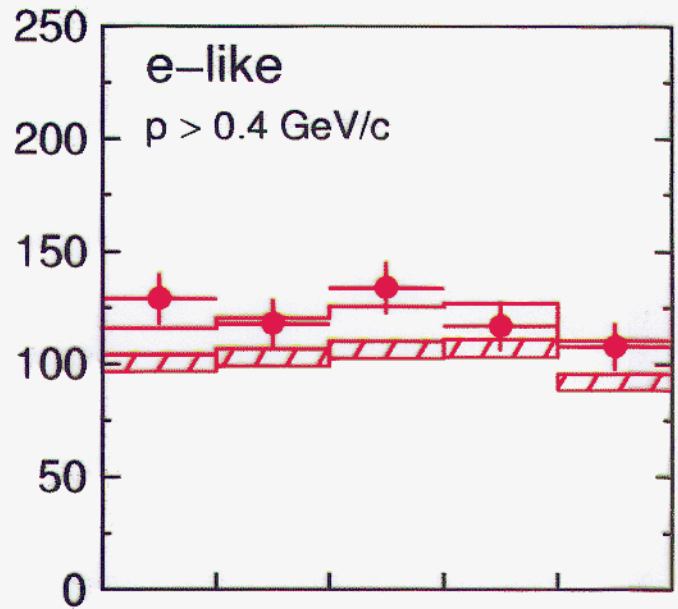
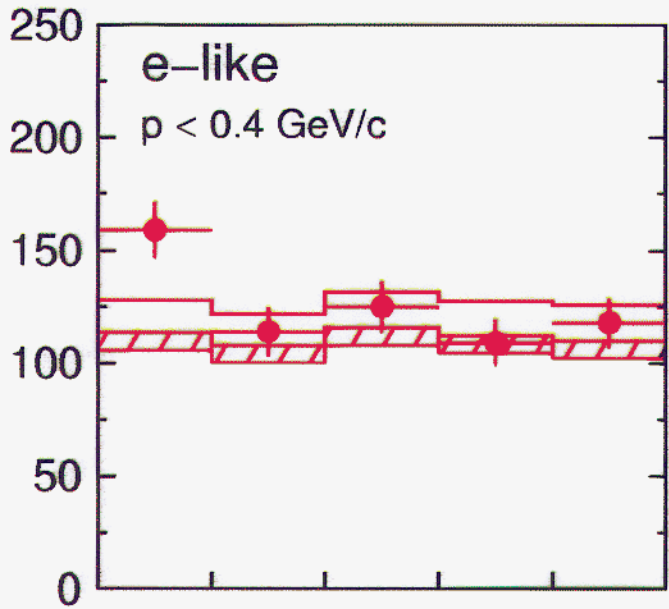
РЕЗУЛЬТАТ:

$\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ осцилляции с

$$\Delta m^2 = (0.5 \div 6) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\sin^2 2\theta = 0.8 \div 1.0$$

sub-GeV



(15)

Чем объясняются отклонения массы нейтрино?

Стандартная модель: массы появляются благодаря конденсату Хиггса (а la эффект Мейсснера)

$$m_W = g \langle \phi \rangle$$

$$m_{e^-} = h \langle \phi \rangle$$

Для нейтрино это невозможно из-за калибровочной инвариантности.

Нужны нейтральные партнеры N



$$\Downarrow$$
$$m_\nu \sim \frac{(h \langle \phi \rangle)^2}{M_N} \sim \frac{m_{e^-}^2}{M_N}$$

\Downarrow

Новый масштаб энергий

$$M_N \sim 10^8 \div 10^{10} \text{ ГэВ}$$

Вероятный источник
барьонной асимметрии Вселенной:

Распады N в ранней Вселенной



CP - нарушение в нейтринном секторе



$$n_{\nu} \neq n_{\bar{\nu}}$$

Генерируется лептонная асимметрия
в ранней Вселенной.

Взаимодействия Стандартной Модели:
переработка лептонной асимметрии
в барьонную.

Будущее:

(17)

- Завершение нейтринной спектроскопии Солнца
Подземные эксперименты
- Подтверждение осцилляций $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$
Ускорительные нейтрино, длинная база
- Поиск CP-нарушения в нейтринных осцилляциях
- Измерение массы нейтрино распад триция 2β -распад

В худшем случае $m_{\nu_e} \sim 10^{-2}$ эВ
почти наверняка майорановская

Откуда ждать новостей?

(18)

- Космические лучи сверхвысоких энергий.

Не должно быть при $E > 10^{20}$ эВ

Обрезание ГЗК

Грейзен - Зацепин - Кузьмин



↑
реликтовые
фотоны, $2.7^\circ K$

По-видимому, есть!

Рис.



Новые астрофизические
объекты
(ускорение до $E_p \sim 10^{24}$ эВ!)



Новые
переносчики
(новые
частицы)



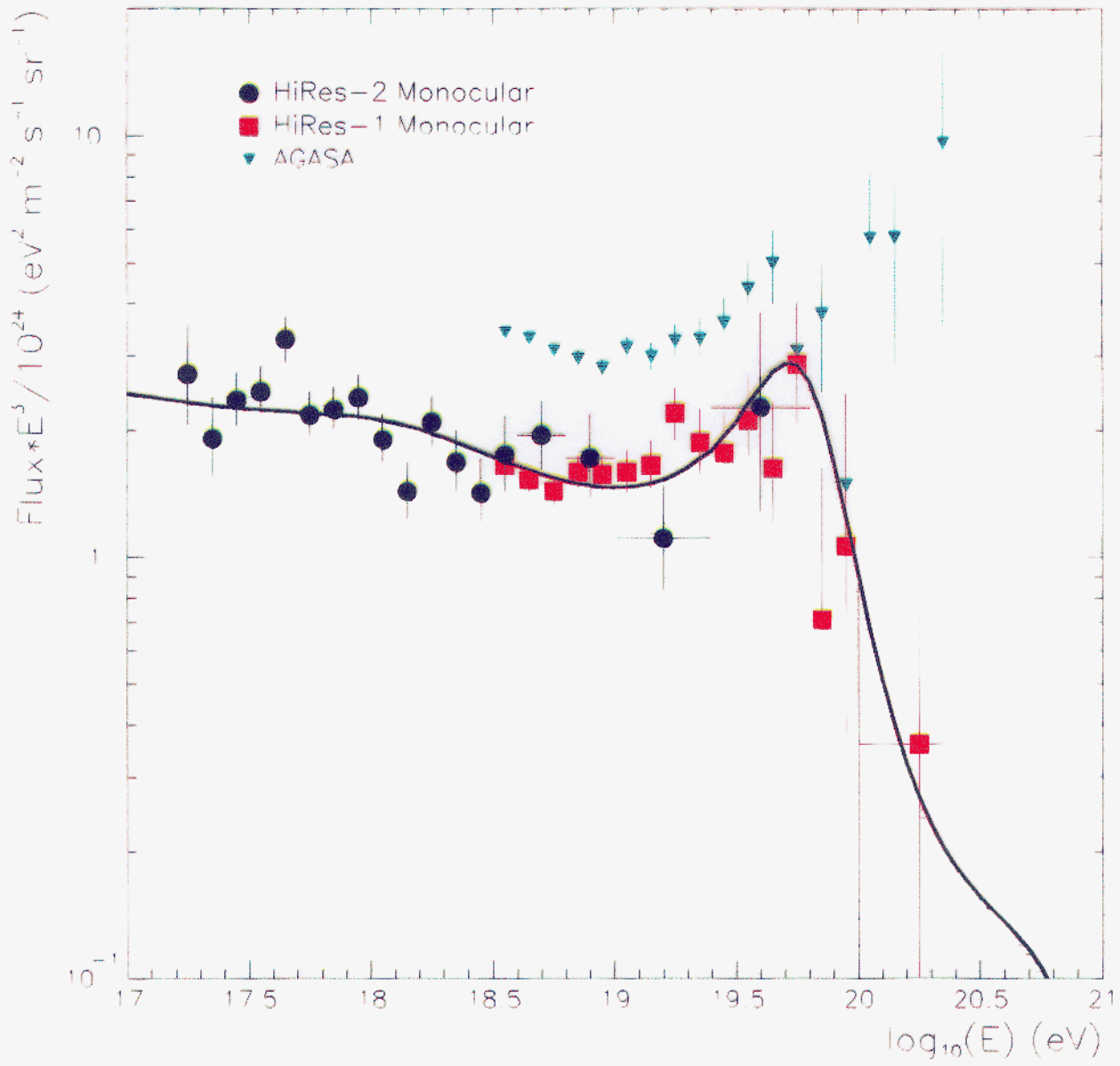
Новые
источники
(тяжелые
реликтовые
частицы, ...)

- Измерение спектра при $E > 10^{20}$ эВ
ШАЛ-100; Pierre Auger, OWL, EUSO, ...

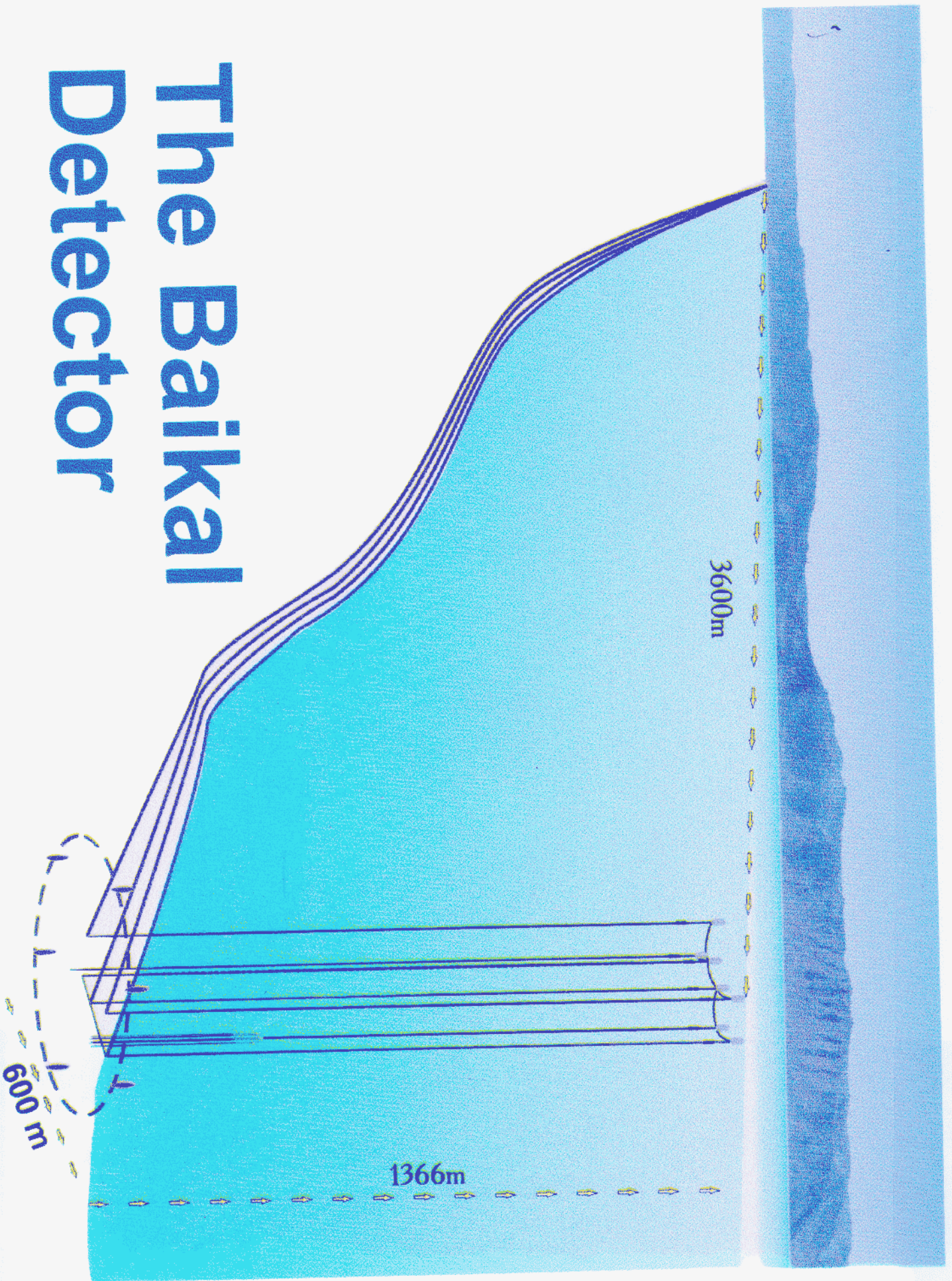
- Измерение потока нейтрино
высоких энергий
Байкал, Amanda, Antares, ...

Рис.

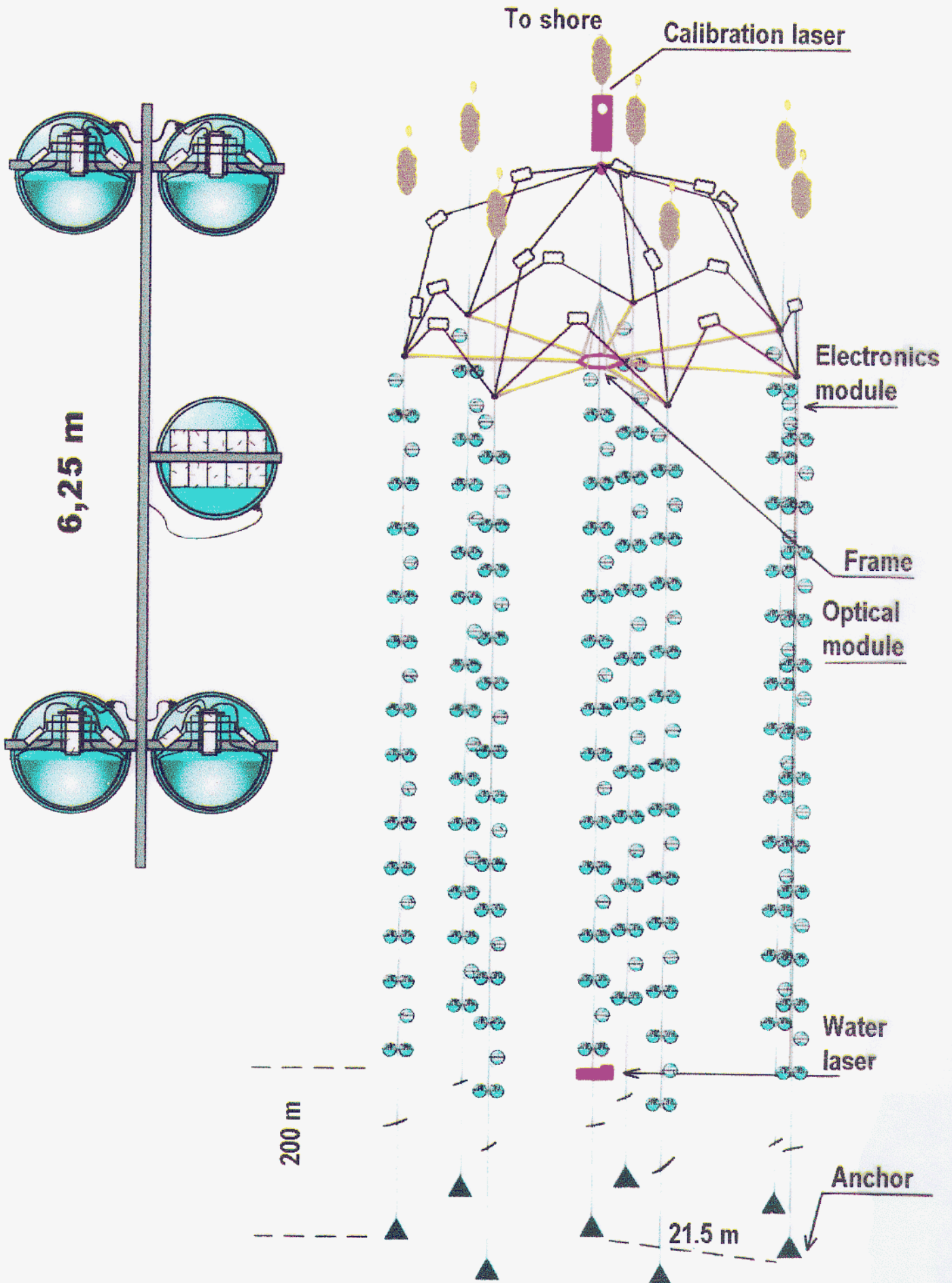
T. Abu-Zayyad et al
astro-ph/0208301

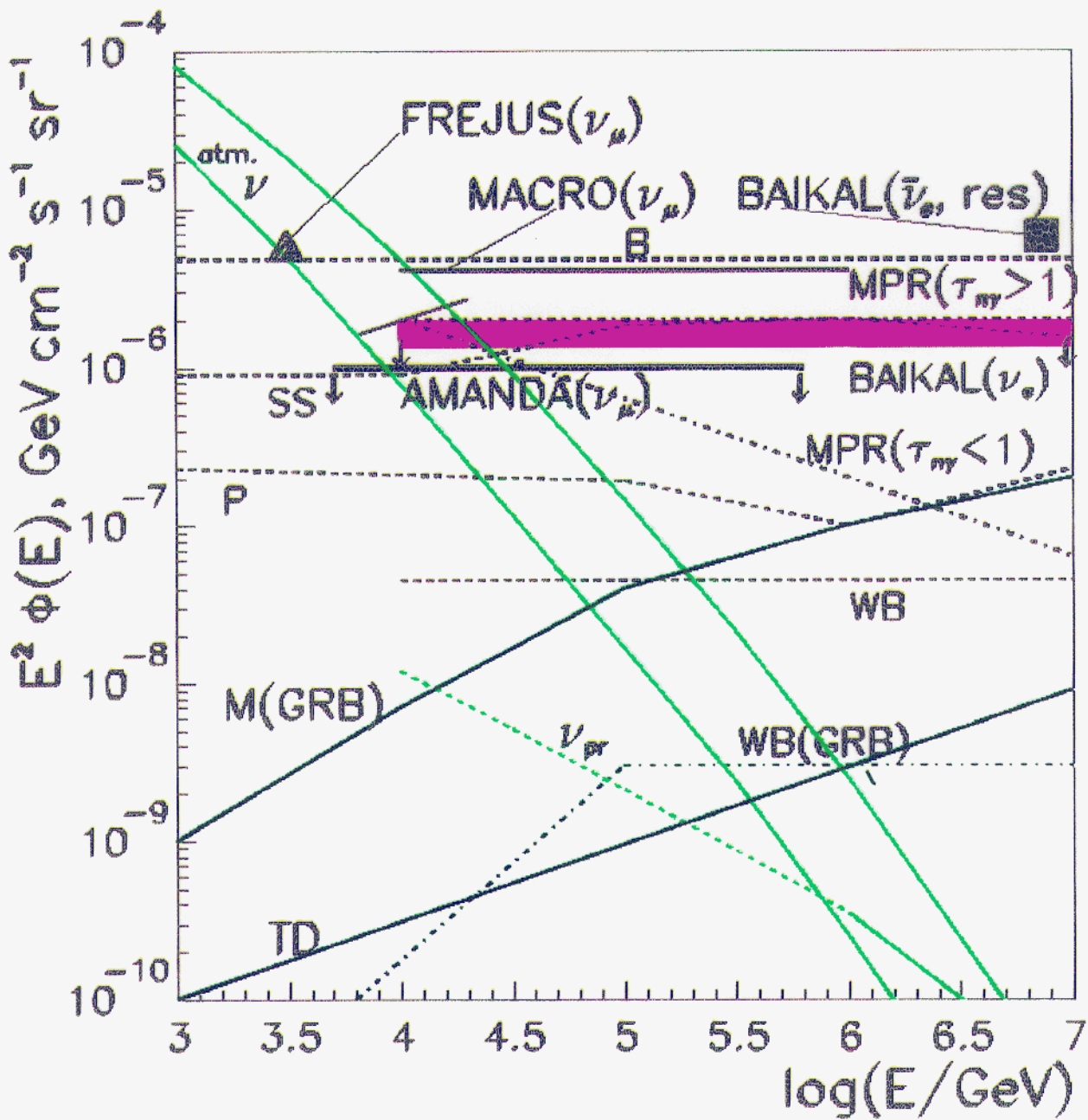


The Baikal Detector



NEUTRINO TELESCOPE NT-200





● Темная материя

Обнаружена астрономией и космологией

- Кривые вращения галактик
- Массы скоплений галактик
- Теория/наблюдения крупномасштабной структуры Вселенной

Новые стабильные слабо взаимодействующие частицы.

Масштаб масс 100 ÷ 1000 ГэВ =>

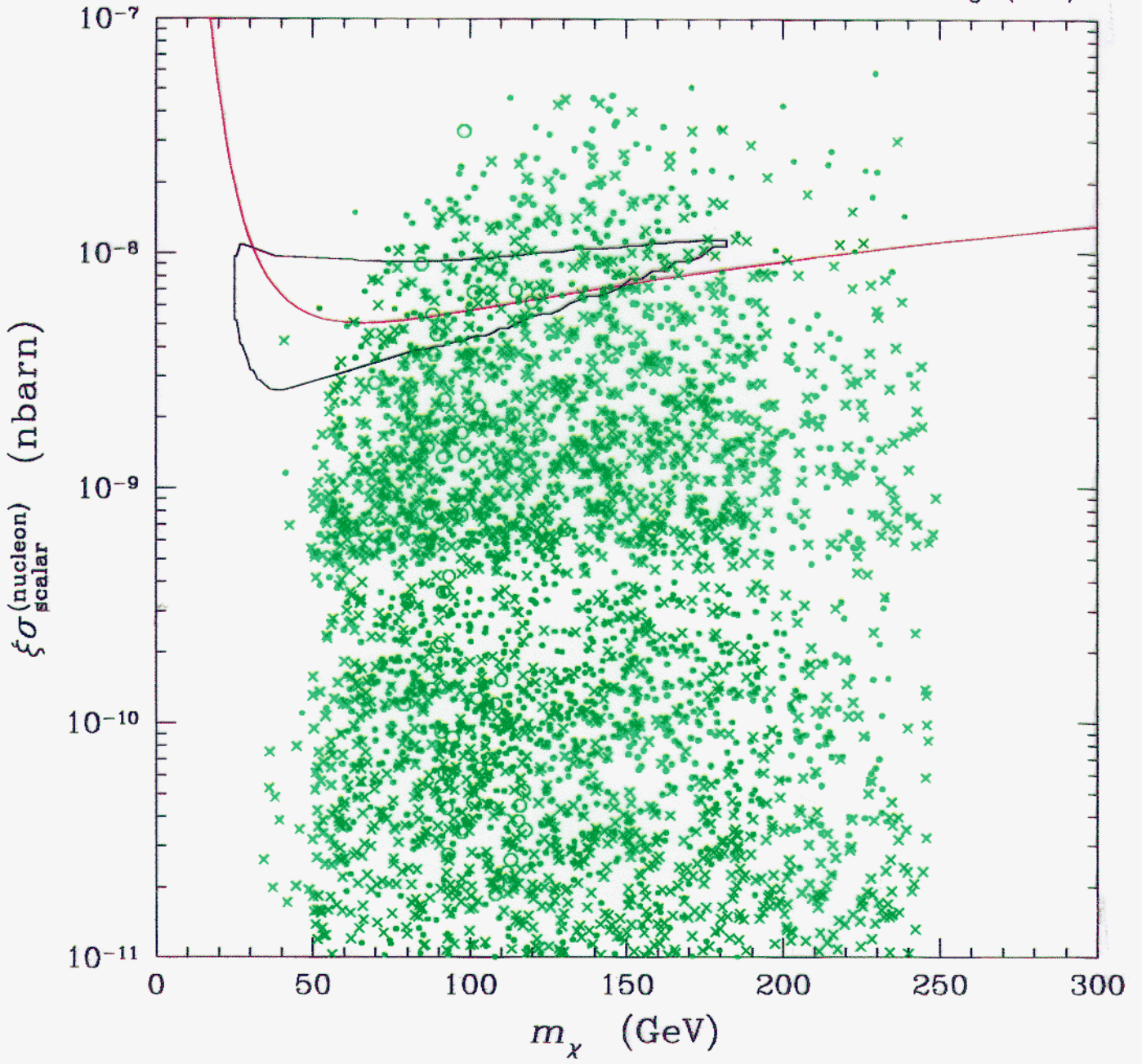
тогда $\Omega_{\text{DARK}} = \frac{\rho_{\text{DARK}}}{\rho_c} \approx 0.3$ без

подгонки параметров.

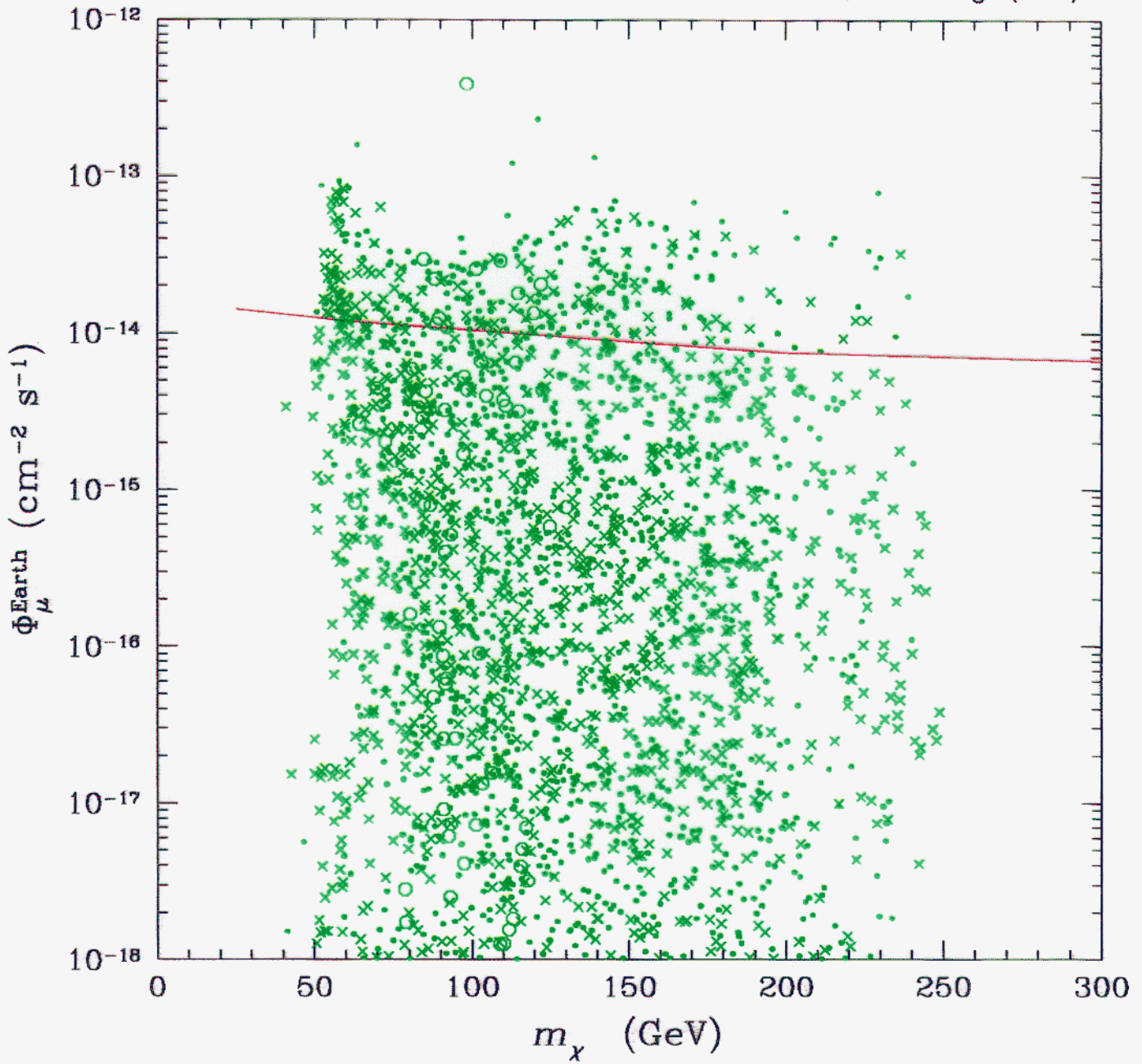
- Прямые поиски в низкоэнергетических экспериментах Рис.

- Аннигиляция в центре Земли/Солнца
 ↓
 нейтрино высоких энергий из центра Земли/Солнца Рис.

- Позитроны, антипротоны в космических лучах
 Детекторы в космосе.



DAMA, CRESST



БАКСАНСКИЙ СВЯЩ. ТЕЛЕСКОП, MACRO,
Super-K,
Байкал, Amanda

ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ

БОЛЕЕ ОТДАЛЕННЫЕ / ЭКЗОТИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ

- РАСПАД ПРОТОНА
- МАГНИТНЫЙ МОНОПОЛЬ
- НЕСОХРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА \Leftrightarrow РАСПАД ЭЛЕКТРОНА
- НАРУШЕНИЕ ЛОРЕНЦ-ИНВАРИАНТНОСТИ, ПРИНЦИПА ПАУЛИ, ...
- $\mu \rightarrow e \gamma$, $\mu - e$ КОНВЕРСИЯ
- МАГНИТНЫЙ МОМЕНТ НЕЙТРИНО

ФИЗИКА НА СВЕРХМАЛЫХ РАСТОЯНИЯХ:

\Downarrow
ВЫСОКИЕ ЭНЕРГИИ

\Downarrow
РЕДКИЕ ПРОЦЕССЫ

ОБЛАСТЬ НЕУСКОРТЕЛЬНОЙ ФИЗИКИ ЧАСТИЦ
ВОЗМОЖНОСТИ ПРОДЕМОНСТРИРОВАНЫ, РАЗВИТИЕ НЕИЗБЕЖНО