



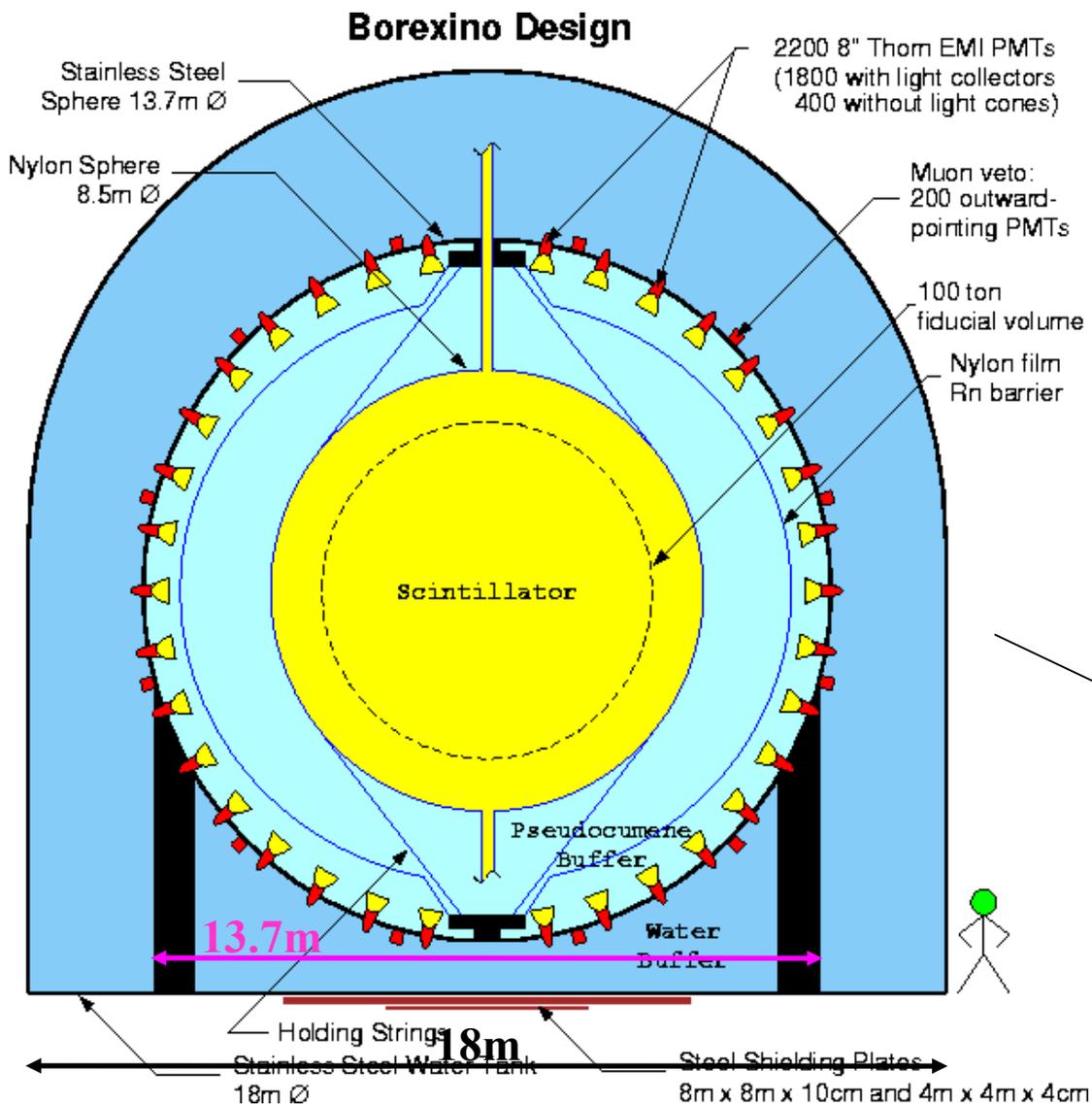
**Экспериментальные  
ограничения на эффективный  
магнитный момент солнечных  
нейтрино по данным детектора  
Борексино**

**Денис Кораблев  
(ЛЯП ОИЯИ)**

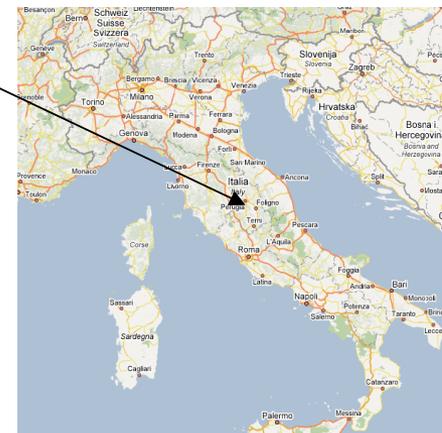
Объединенный семинар ЛЯП — МГУ по физике нейтрино

2 Ноября 2010

# БОРЕКСИНО: детектор



- 278 т жидкого органического сцинтиллятора РС + РРО(1.5 г/л)
- регистрация (ν,е)-рассеяния с порогом 200 кэВ
- внешний мюонный детектор

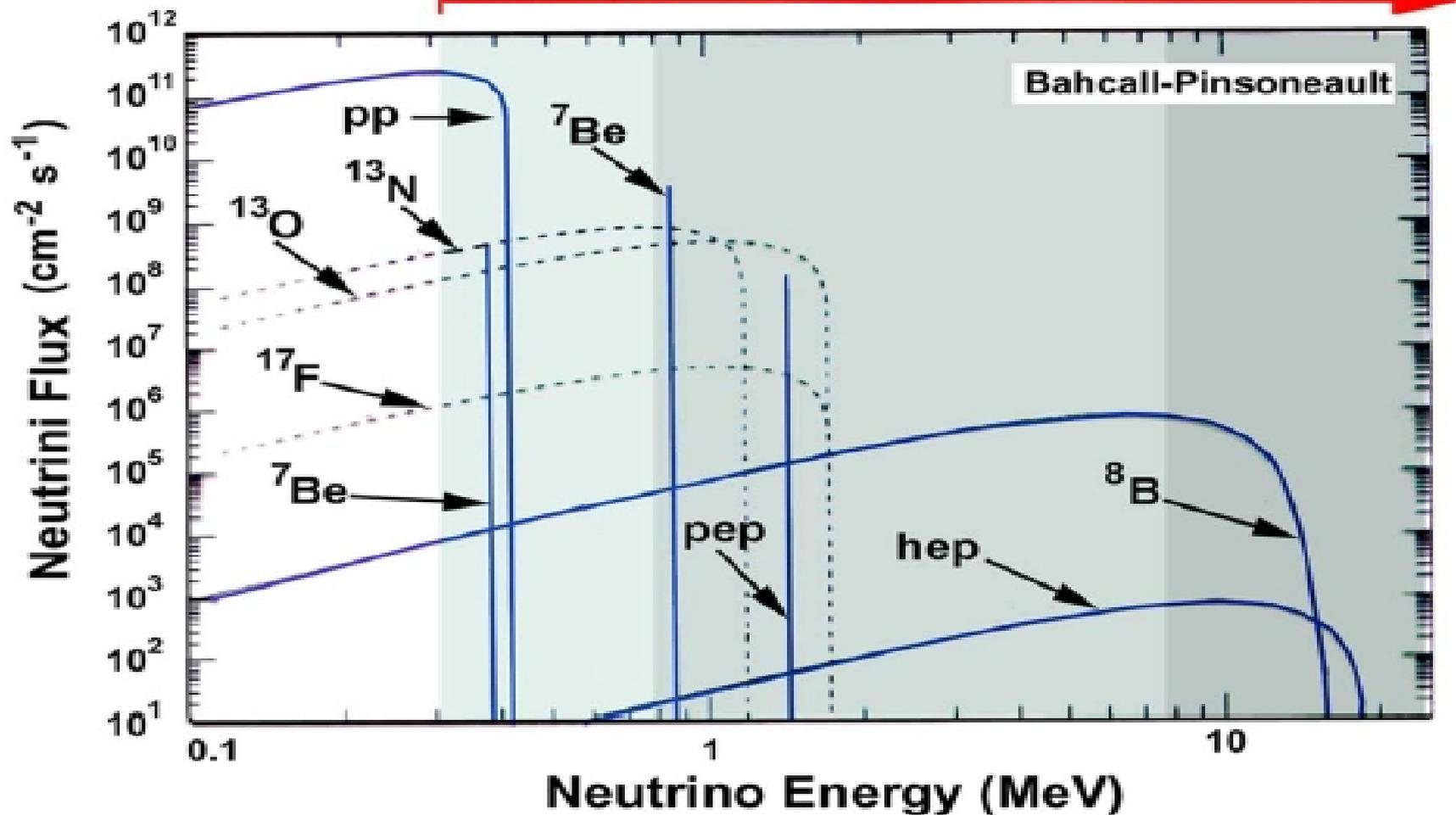


SuperK, SNO (6,5 МэВ)

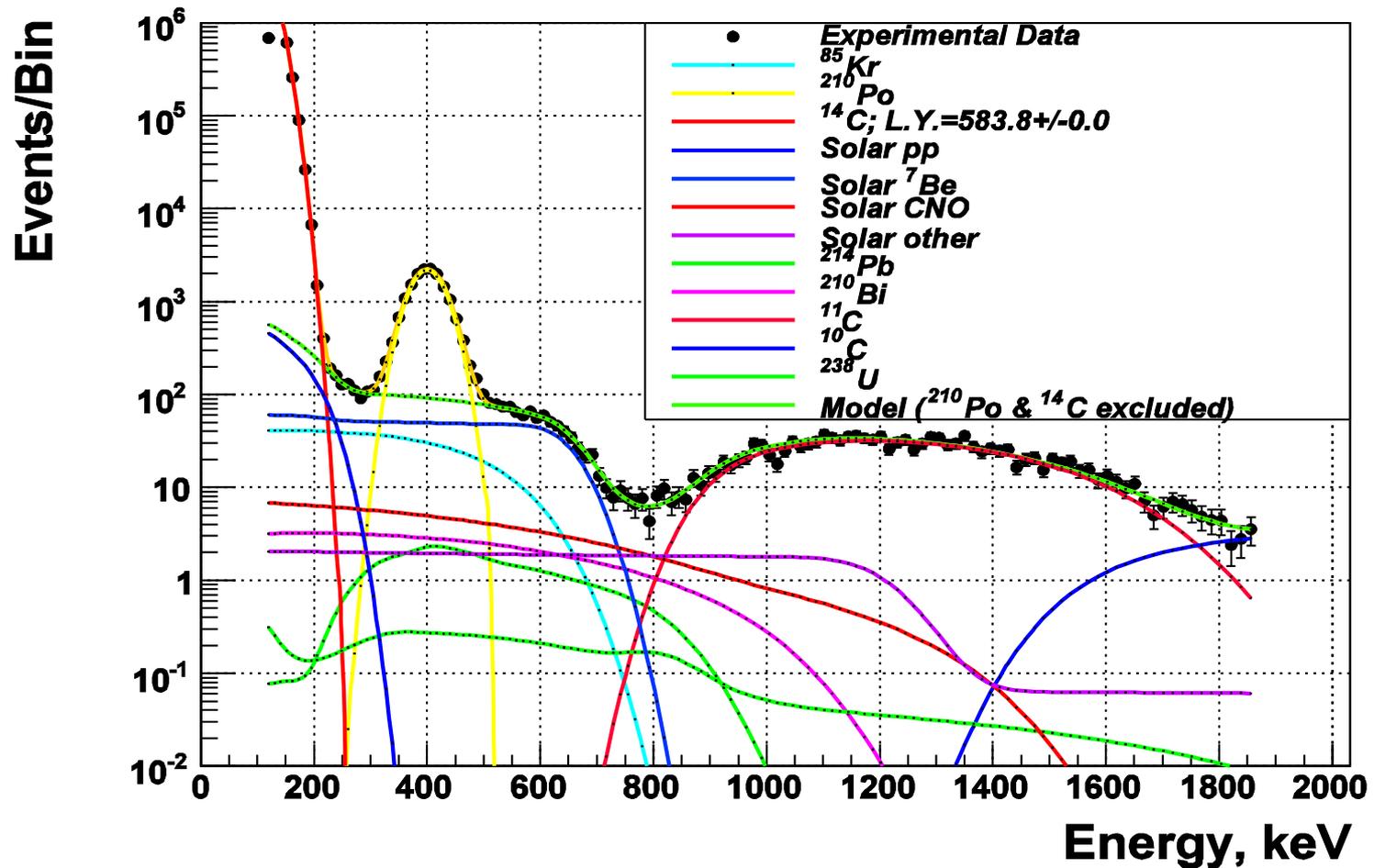
Kamiokande II (7,5 МэВ)

Cl (0,81 МэВ)

Ga (0,23 МэВ)

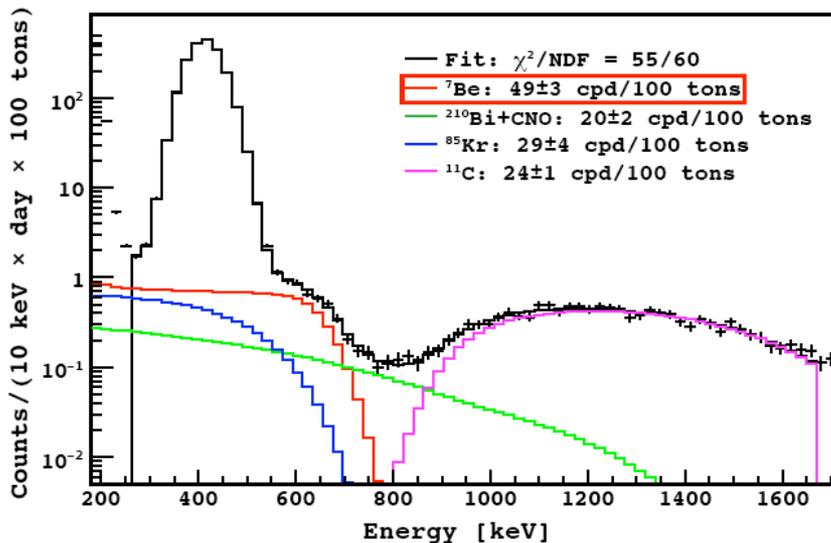


# Экспериментальный спектр Борексино

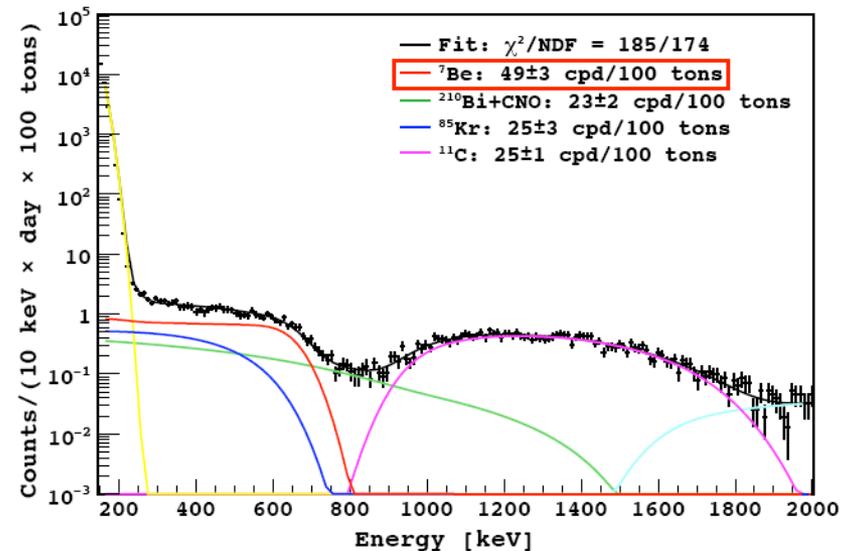


# “Direct Measurement of the ${}^7\text{Be}$ Solar Neutrino Flux with 192 Days of Borexino Data” PRL 101, 091302 (2008).

## $49 \pm 3_{\text{stat}} \pm 4_{\text{syst}}$ cpd/100 t



Основной источник систематической ошибки – ошибка в определении FV (устранен после настройки алгоритма реконструкции с использованием данных калибровочных кампаний).



Фит с использованием  $\alpha$ - $\beta$  дискриминации

# Магнитный момент нейтрино

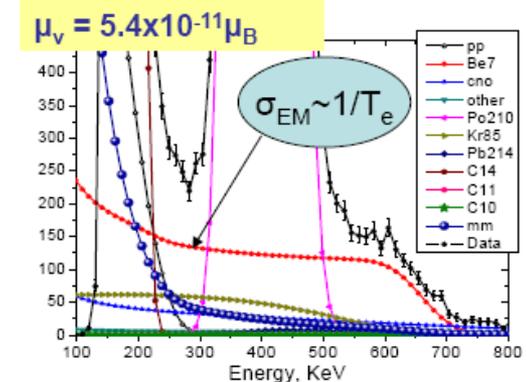
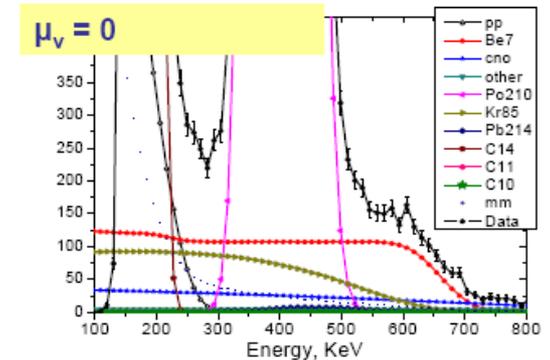
С теоретической точки зрения м.м. безмассового дираковского нейтрино должен равняться нулю точно так же, как и м.м. майорановского нейтрино, массивного или безмассового. Массивное дираковское нейтрино должно обладать небольшим м.м.:

$$\mu_\nu \approx 3.2 \times 10^{-19} \left( \frac{m_\nu}{1 \text{ эВ}} \right) \mu_B$$

ограничение на м.м. может быть найдено изучением формы спектра

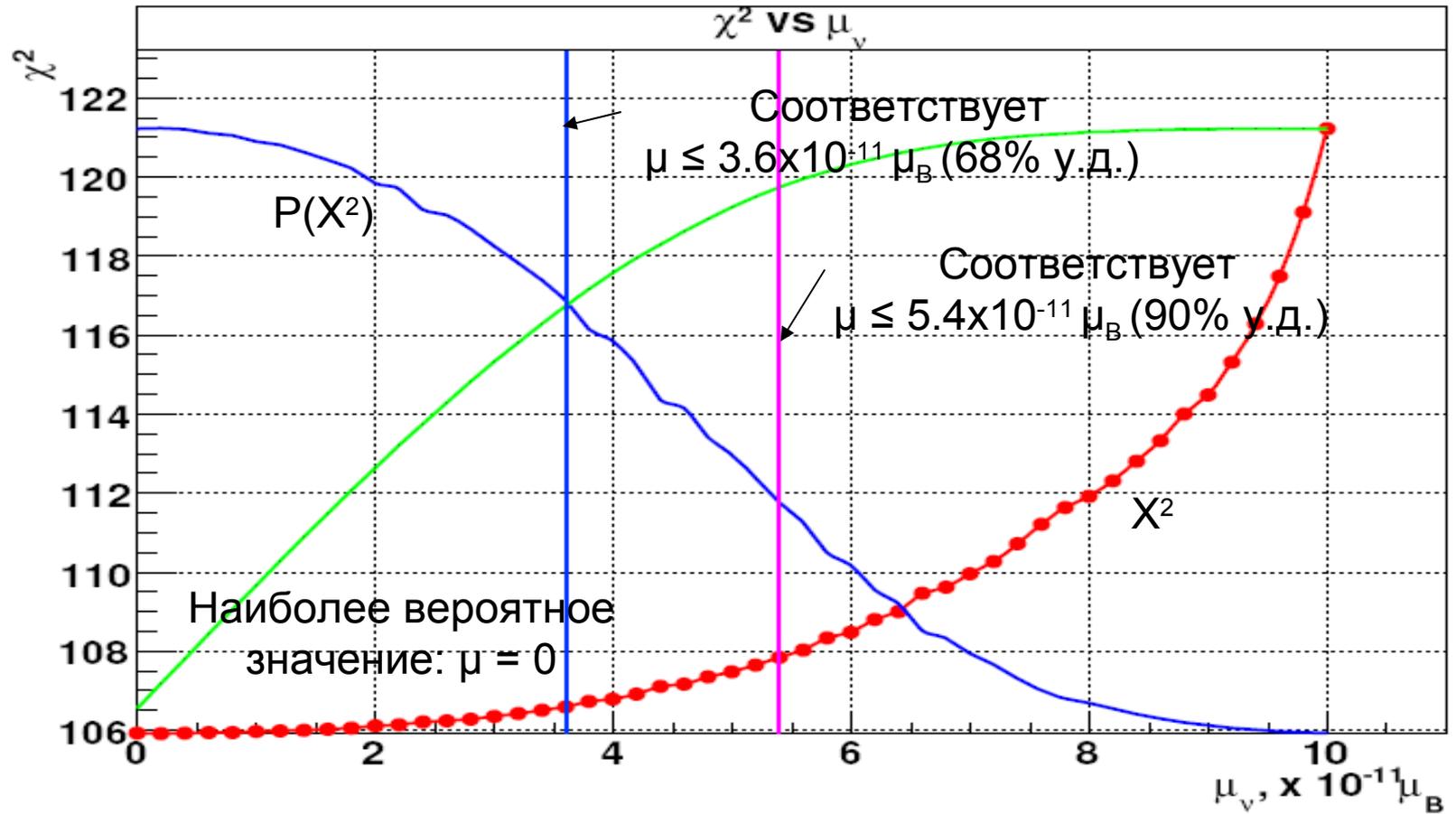
$$\left( \frac{d\sigma}{dT} \right)_W = \frac{2G_F^2 m_e}{\pi} \left[ g_L^2 + g_R^2 \left( 1 - \frac{T}{E_\nu} \right)^2 - g_L g_R \frac{m_e T}{E_\nu^2} \right]$$

$$\left( \frac{d\sigma}{dT} \right)_{EM} = \mu_\nu^2 \frac{\pi \alpha_{em}^2}{m_e^2} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{E_\nu} \right)$$



На ~200- дневной статистике:

профиль  $\chi^2$  и вероятность  $P(\chi^2)$ . Все параметры свободны.



Ограничения на эфф.магнитный момент

$$\mu_{\text{eff}} < 5.4 \cdot 10^{-11} \mu_B \quad 90\% \text{ у.д.}$$

Смешивание нейтрино приводит к эффективным магнитным моментам, в общем случае, зависящим от энергии нейтрино и расстояния до источника

$$\mu_{eff}^2 = \sum_j \left| \sum_k \mu_{jk} A_k(E_\nu, L) \right|^2$$

В случае MSW имеем дело с эфф.м.м. [впервые в J.F.Веасом, P.Vogel, Phys.Rev.Lett.83 (1999)]:

$$(\mu_{eff}^2)_{MSW} = P_1 (\mu_{11}^2 + \mu_{12}^2 + \mu_{13}^2) + (1 - P_1) (\mu_{21}^2 + \mu_{22}^2 + \mu_{23}^2)$$

Для флэйворных компонент м.м.  $\mu_{eff}$  можно записать как [см., например, Montanino et al.PRD 77, 093011(2008)] :

$$(\mu_{eff}^2)_{MSW} = P_{ee} \mu_e^2 + (1 - P_{ee}) (\cos^2 \theta_{23} \mu_\mu^2 + \sin^2 \theta_{23} \mu_\tau^2)$$

где  $P_{ee} = 0.552 \pm 0.016$  - вероятность выживания  $\nu_e$  при  $E = 0.863$  MeV,  $\sin^2 \theta_{23} = 0.5^{+0.07}_{-0.06}$

Выражения для  $\mu_{eff}$  содержат сумму положительно определенных членов → можно получить ограничения для каждого из членов.

$P_1$  и  $P_{ee}$  зависят от энергии нейтрино

# Пределы на магнитный момент $\mu$ и $\tau$ – нейтрино

С использованием ограничения на  $\mu_e$  эксперимента Gemma:

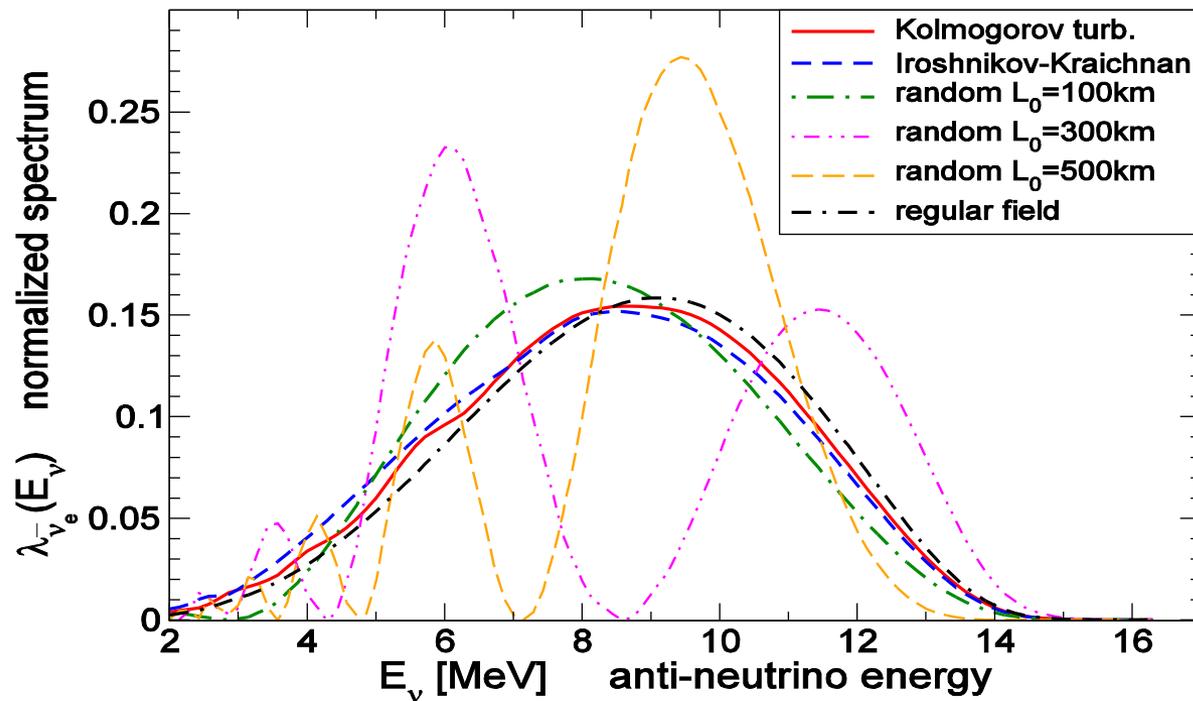
$$\mu_\mu < 12 \times 10^{-11} \mu_B$$

$$\mu_\tau < 12.5 \times 10^{-11} \mu_B$$

Лучшие пределы на магнитный момент нейтрино:

- $\mu_e < 3.2 \times 10^{-11} \mu_B$  by GEMMA (elastic scattering)
- $\mu_\mu < 68 \times 10^{-11} \mu_B$  by LSND (elastic scattering)
- $\mu_\tau < 39000 \times 10^{-11} \mu_B$  by DONUT (elastic scattering)

Проявлением большого м.м. нейтрино может быть присутствие антинейтрино в нейтринном спектре от Солнца. Интерес к поиску огромного по меркам СМ ( $10^{-11}\mu_B$ ) м.м. нейтрино был вызван проблемой солнечных нейтрино. До эксперимента KamLand модель спин-флэйворной прецессии имела лучшее согласие с экспериментальными данными, чем осцилляционное решение.

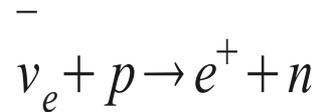


Появление антинейтрино в случайных солнечных магнитных полях (сценарий спин-флэйворной конверсии,  $\mu_{\nu} \sim 10^{12} \mu_B$ ).

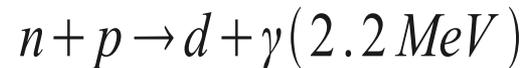
O.G.Miranda, T.I.Rashba, A.I.Rez, J.W.F.Valle, Paris-2004

# Регистрация антинейтрино

- Обратный бета распад [сечение  $\sim 10^{-42}$  см<sup>2</sup>]

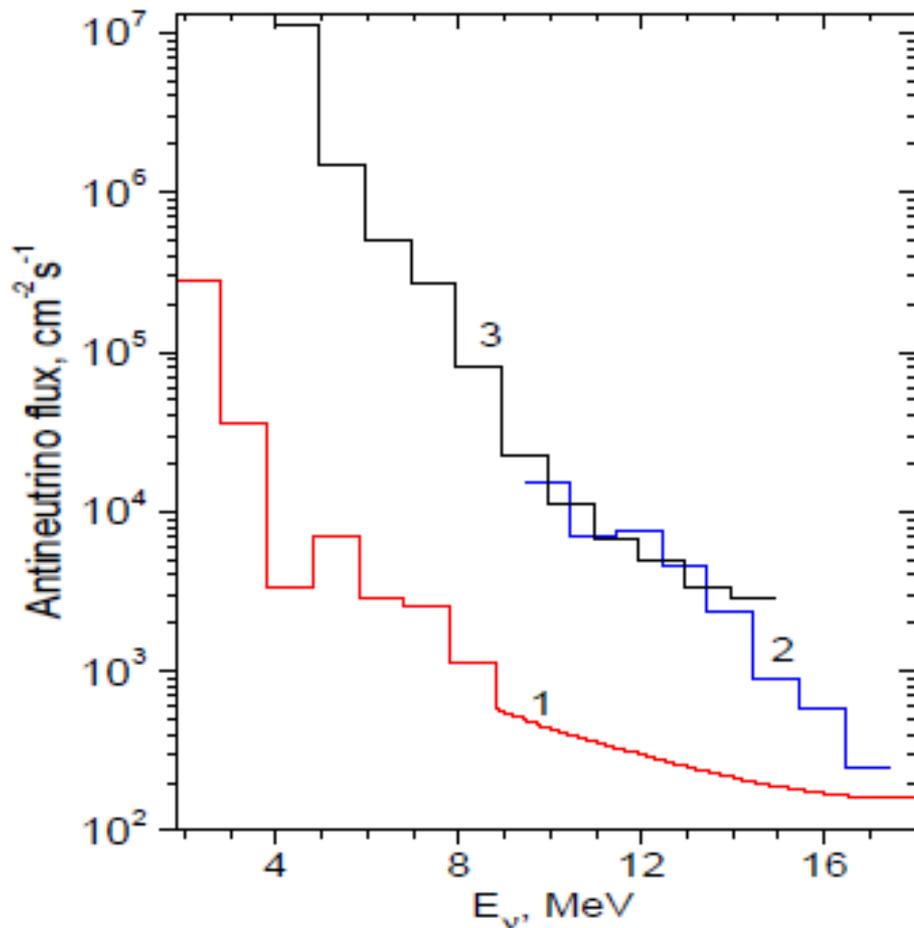


↓  $\approx 250 \mu s$



- $E_{\text{visible}} = E_{\nu} - 0.78 \text{ MeV} [E_{\nu} > 1.8 \text{ MeV}]$

# Существуют ли солнечные антинейтрино ?



Верхние пределы на потоки  
антинейтрино:

- 1 – Borexino
- 2 – SuperKamioKaNDE
- 3 – SNO

Пределы установлены в  
предположении минимально  
радиоогенной Земли

Для <sup>8</sup>B нейтрино (в предположении  
“плоской” по энергии вероятности  
конверсии) получено ограничение:

$$P_{\nu \rightarrow \bar{\nu}} < 1.3 \cdot 10^{-4}$$

# Предел на поток антинейтрино позволяет нам установить предел на магнитный момент антинейтрино:

$$\mu_{\bar{\nu}} < 7.4 \times 10^{-7} \left( \frac{P_{\nu \rightarrow \bar{\nu}}}{\sin^2 \theta_{12}} \right)^{1/2} \times \frac{\mu_B}{B_{\perp} [kG]} \quad \text{E.Kh. Akhmedov and J. Pulido, Phys. Lett. B 553 (2003) 7}$$

$B_{\perp}$  - поперечная компонента магнитного поля солнца на расстоянии  $0.05 R_{\odot}$

Используя экспериментальные ограничения:

$$\sin^2 \theta_{12} = 0.86$$

$$P_{\nu \rightarrow \bar{\nu}} < 1.3 \cdot 10^{-4}$$



$$\mu_{\bar{\nu}} < 9 \times 10^{-9} \times B_{\perp}^{-1} \mu_B$$

Солнечная физика предсказывает  $B_{\perp}$  в диапазоне 600 G - 7 MG.

При максимальном значении  $B_{\perp}$  получается предел:

$$\mu_{\bar{\nu}} < 1.4 \times 10^{-12} \mu_B$$

# Лучшие экспериментальные пределы на сегодня

- **TEXONO:**  $\mu_\nu < 7.4 \cdot 10^{-11} \mu_B$ , 90% C.L.

H. T. Wong et al., TEXONO collaboration, PHYSICAL REVIEW D **75**, 012001 (2007)

**“Search of neutrino magnetic moments with a high-purity germanium detector at the Kuo-Sheng nuclear power station”**

- **GEMMA:**  $\mu_\nu < 3.2 \cdot 10^{-11} \mu_B$ , 90% C.L.

A.G. Beda et al., arXiv:1005.2736 (2010)

**“Upper limit on the neutrino magnetic moment from three years of data from the GEMMA spectrometer”**

- **SuperK:**  $\mu_{\text{eff}} < 11 \cdot 10^{-11} \mu_B$ , 90% C.L.

D.W. Liu et al., *Phys. Rev. Lett.* **93**, 021802 (2004)

**“Limits on the Neutrino Magnetic Moment using 1496 Days of Super Kamiokande-I Solar Neutrino Data”**

- **Borexino:**  $\mu_{\text{eff}} < 5.4 \cdot 10^{-11} \mu_B$ , 90% C.L.

Borexino coll., PRL **101**, 091302 (2008).

**“Direct Measurement of the  $^7\text{Be}$  Solar Neutrino Flux with 192 Days of Borexino Data”**

# Заключение

На данных Борексино за 192 дня установлено новое ограничение на эффективный м.м. солнечных нейтрино:

$$\mu_{\text{eff}} < 5.4 \cdot 10^{-11} \mu_{\text{B}} \quad 90\% \text{ у.д.}$$

Полученный предел не зависит ни от точности определения активного объема сцинтиллятора, ни от параметров осцилляций, ни от абсолютной величины потока солнечных нейтрино, так как результат определяется исключительно формой спектра.

Увеличением статистики позволит получить независимые ограничения на вклад  $^{85}\text{Kr}$  и, как следствие, улучшить ограничение на  $\mu_{\text{eff}}$ .

Получено лучшее ограничение на конверсию солнечных  $^8\text{B}$  нейтрино в антинейтрино:

$$P_{\nu \rightarrow \bar{\nu}} < 1.3 \cdot 10^{-4}$$