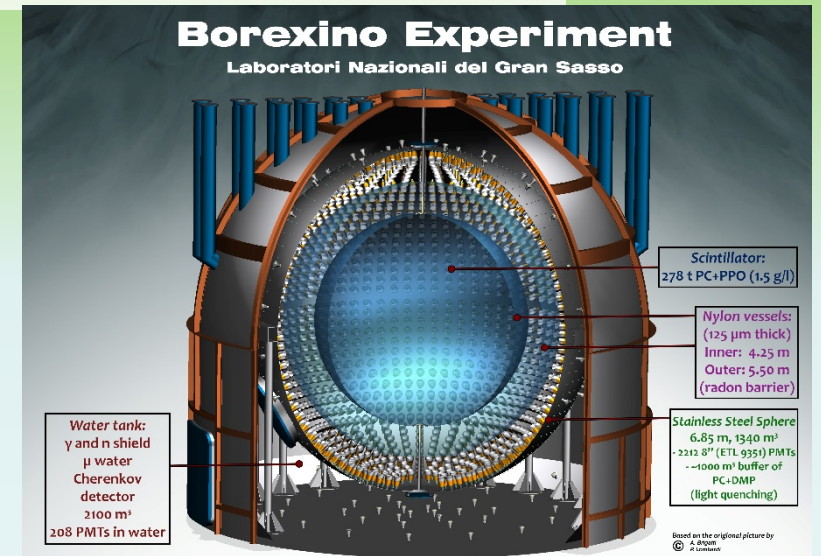


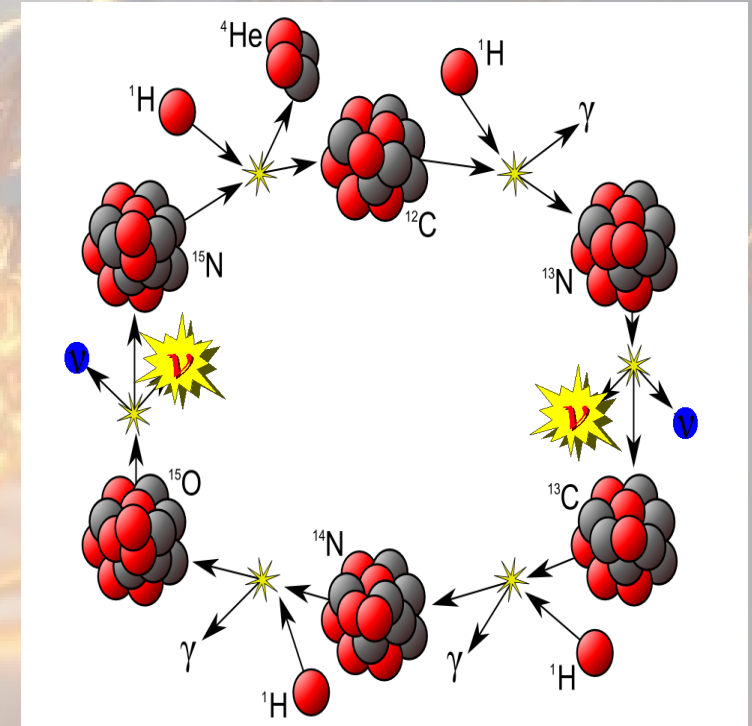
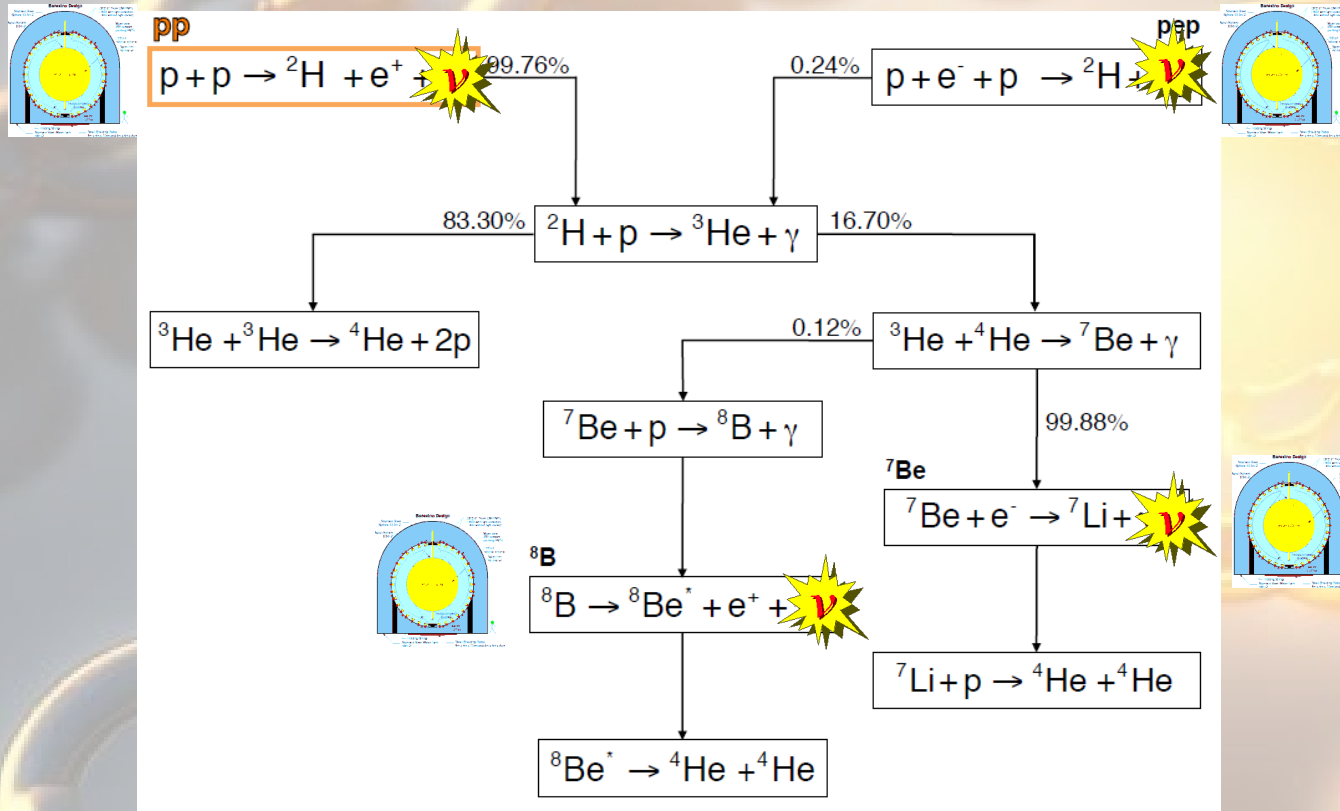
Прямое измерение потока солнечных ν -нейтрино в эксперименте Borexino



Смирнов О.Ю. (ЛЯП)

Общелабораторный семинар 31 января 2024 г.

Цепи солнечных реакций



Доминирует в массивных звездах (в Солнце ~1% светимости)

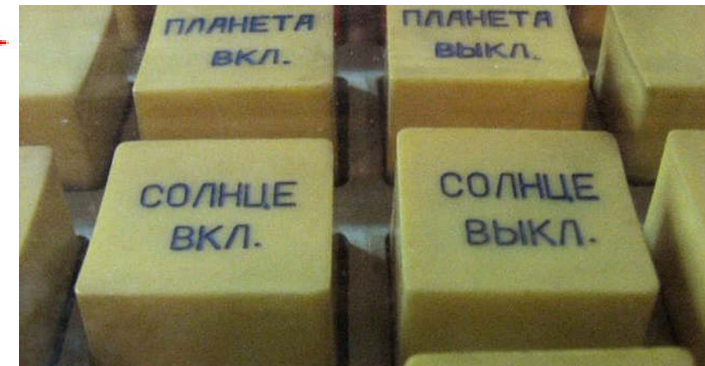
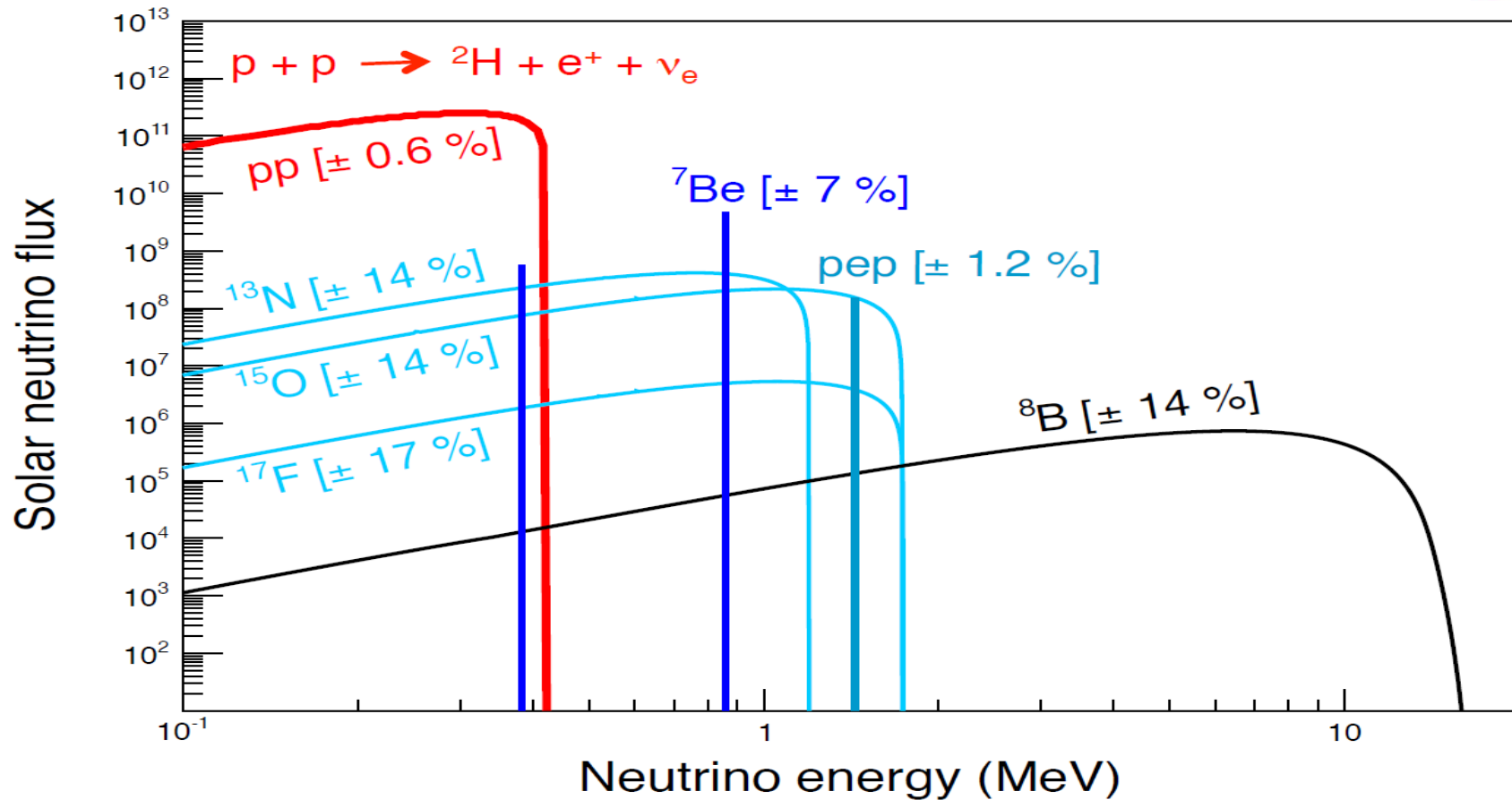
Поток CNO-нейтрино очень чувствителен к распространенности солнечных элементов.

SuperK, SNO (6,5 МэВ)

Kamiokande II (7,5 МэВ)

Cl (0,81 МэВ)

Ga (0,23 МэВ)



50 соб/день/100 тонн (упругое рассеяние ν_e и ν_μ на e^-)

Низкая энергия \rightarrow нет Черенковского изл. \rightarrow нет чувствительности к направлению
Нет других меток \rightarrow

требуется чрезвычайно чистый сцинтиллятор

Список (неполный) экспериментов по поиску pp-нейтрино

Проект (ссылка)	Метод	Порог [кэВ]	Разрешение по энергии	Масса [т]	Реакция	pp соб [д ⁻¹]
LENS [240]	¹⁷⁶ Yb ЖС	301 (ν)	7% @ 1 MeV	20% ¹⁷⁶ Yb((8%))	$^{176}\text{Yb} + \nu_e \rightarrow$ $^{176}\text{Lu} + e^-$	0,5
INDIUM [241]	¹¹⁵ In ЖС	118(ν)	5-10% @1 МэВ	4	$^{115}\text{In} + \nu_e \rightarrow$ $^{115}\text{Sn}^*(613) + e^-$	1,0
GENIUS [242]	⁷⁶ Ge упр.расс.	11(e ⁻)	0,3%	1	$\nu + e^- \rightarrow$	1,8
		59(ν)	@ 300 keV	10	$\nu + e^-$	18
HERON [243; 244]	сверхтек. ⁴ He ротоны/фононы+УФ	50(e ⁻)	8,3%	10	$\nu + e^- \rightarrow$	14
		141(ν)	@364 кэВ		$\nu + e^-$	
XMASS [245]	LXe сцинт.	50(e ⁻)	17,5%	10	$\nu + e^- \rightarrow$	14
		141(ν)	@ 100 кэВ		$\nu + e^-$	
CLEAN [246]	LNe	20(e ⁻)		135	$\nu + e^- \rightarrow$	7.2
		82(ν)			$\nu + e^-$	
HELLAZ [247]	He (5 атм), ВПК	100(e ⁻) 217(ν)	6% @800 кэВ	2000 м ³	$\nu + e^- \rightarrow$ $\nu + e^-$	7
MOON [248]	дрейф. камеры	168(ν)	12,4% ПППВ @ 1 МэВ	3,3	$\nu_e + ^{100}\text{Mo} \rightarrow$ $^{100}\text{Tc} + e^-$	1.1
MUNU [249]	ВПК,CF ₄ направл.	100(e ⁻)	16% ПППВ	0,74	$\nu + e^- \rightarrow$	0.5
		217(ν)	@ 1 МэВ	(200 м ³)	$\nu + e^-$	
NEON [250]	He,Ne сцинт.	20(e ⁻)	16% ПППВ	10	$\nu + e^- \rightarrow$	18
		82(ν)	@ 100 кэВ		$\nu + e^-$	
10 т ЖС [2; 3]	ЖС	170(e ⁻) 310(ν)	10,5 кэВ @ 200 кэВ	10	$\nu + e^- \rightarrow$ $\nu + e^-$	1,8
Borexino [7]	ЖС	165(e ⁻) 305(ν)	5% @1 МэВ	278 (75,5 ДО)	$\nu + e^- \rightarrow$ $\nu + e^-$	13.6
Serappis [9]	ЖС	50(e ⁻) ~140(ν)	2,2% @1 МэВ	20 (9,3 ДО)	$\nu + e^- \rightarrow$ $\nu + e^-$	12,5
Darwin [251]	LXe ВПК (ДФ)	1(e ⁻) 17(ν)	32% @1 кэВ	50,0 (40 ДО)	$\nu + e^- \rightarrow$ $\nu + e^-$	40

Smirnov, O. Yu. et al., Search for the solar pp-neutrinos with an upgrade of the CTF detector, *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.*, v.118 (2002) 448

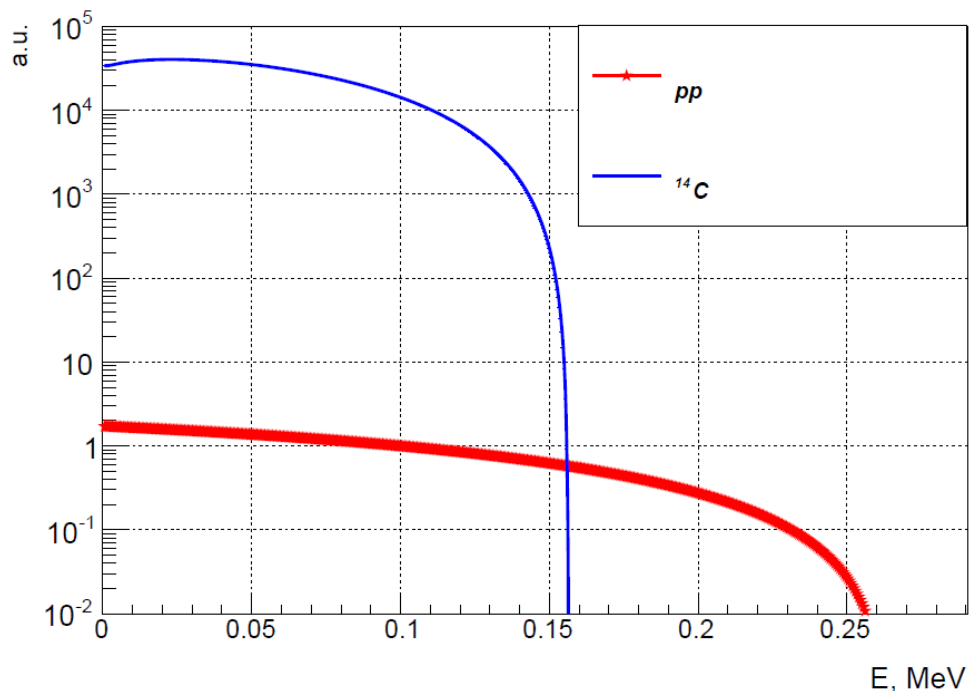
Smirnov, O. Yu. et al., Search for solar p p neutrinos with an upgrade of CTF detector *Phys.Atom.Nucl.* 66 (2003) 712-723

Smirnov, O. Yu. et al., On the possibility of detecting solar pp neutrino with a large volume liquid organic scintillator detector *Phys.Atom.Nucl.* 67 (2004) 2066-2072

Potential for a precision measurement of solar pp neutrinos in the Serappis experiment, *Eur.Phys.J.C* 82 (2022) 9, 779

Почему спектральное измерение потока ν -нейтрино в принципе возможно в ЖС?

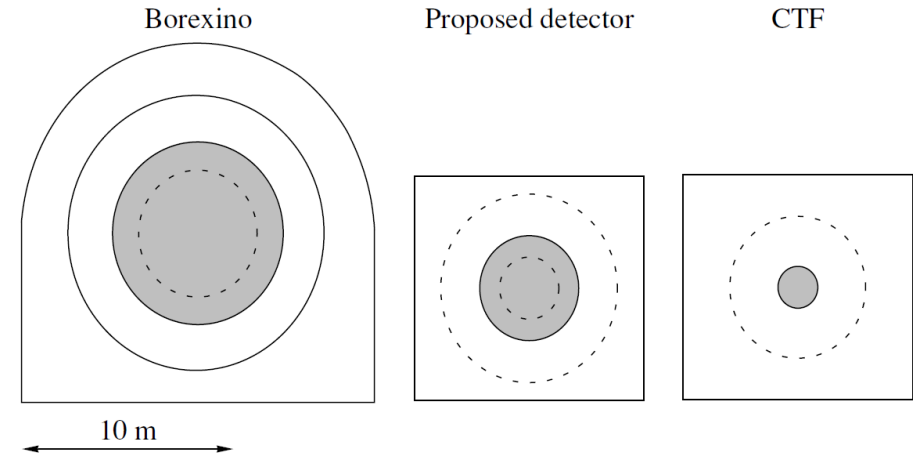
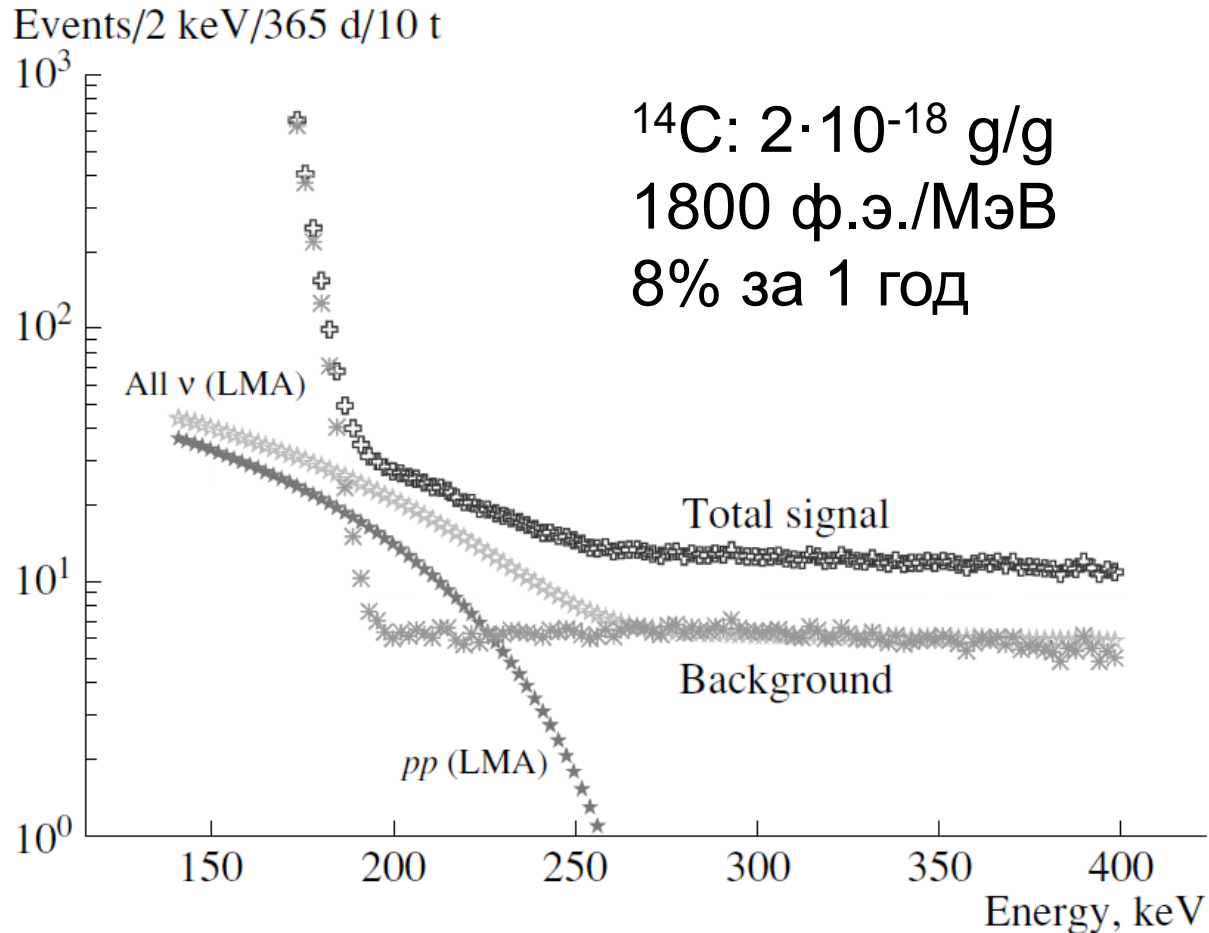
- Спектр электронов отдачи : 264 кэВ
- Доминирующий фон – β -распады ^{14}C : $E_0=156$ кэВ
- Спектры остальных идентифицированных фонов практически постоянны при низких энергиях



Измерение возможно:

- 1) Низкий порог по энергии
- 2) Хорошее энергетическое разрешение (~10% at 200 кэВ)
- 3) Низкий радиоактивный фон
- 4) Содержание ^{14}C достаточно мало (хвост+наложение)

Оценки для 10-тонного детектора



Преимущества маленького детектора:

- легче обеспечить светосбор
- мал счет наложения сигналов ^{14}C

Полномасштабный детектор Borexino тогда казался не совсем подходящим инструментом из-за малого световыхода

Borexino и pp-нейтрино

Сразу после запуска Borexino в 2007 году стало ясно, что он обеспечивает световыход фактически в два раза превышающий ожидаемый, при этом чистота сцинтиллятора по ряду показателей также оказалась намного выше предусмотренной техническими требованиями по основной задаче измерения бериллиевых солнечных нейтрино.

Первые оценки чувствительности Borexino к потоку pp-нейтрино на основе реальных данных я представил на совещании коллаборации, приуроченной к запуску детектора, через два дня после начала набора данных. Реальное измерение было опубликовано через 7 лет, подтвердив первые оценки.

Borexino: ^{14}C , Light yield,
Energy Resolution

O.Smirnov

Borexino general meeting
May 18, 2007

Conclusions

- 1) ^{14}C content is at the level of 2.5×10^{-18} g/g;
- 2) L.Y. and energy resolution is better than in CTF, for "Charge" variable it is 490 p.e./MeV;
- 3) The charge scale calibration is good;
- 4) More work is needed to understand the detector's energy resolution;
- 5) With actual resolution we can hope to achieve sensitivity to pp- neutrinos

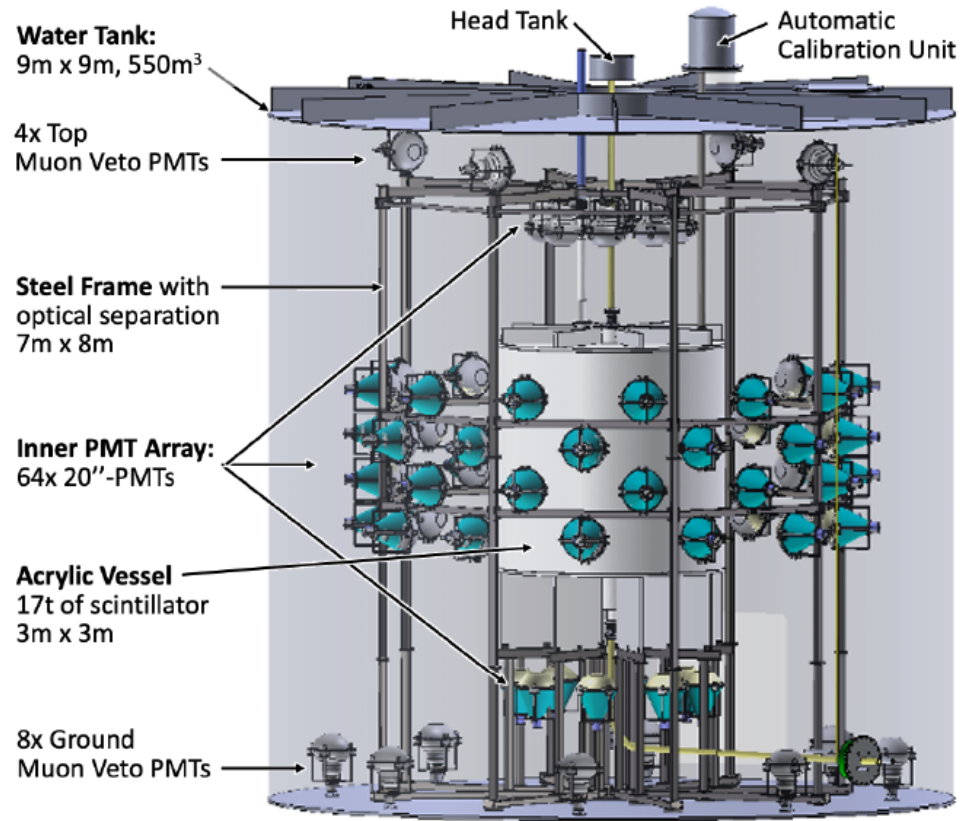


Fig. 1: Layout of the OSIRIS setup.

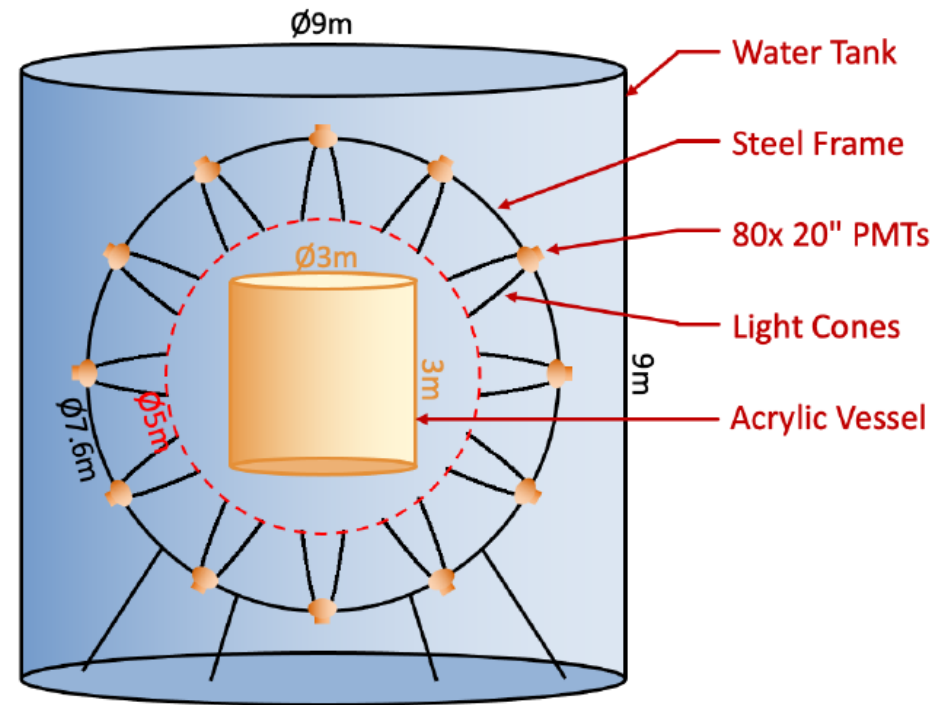
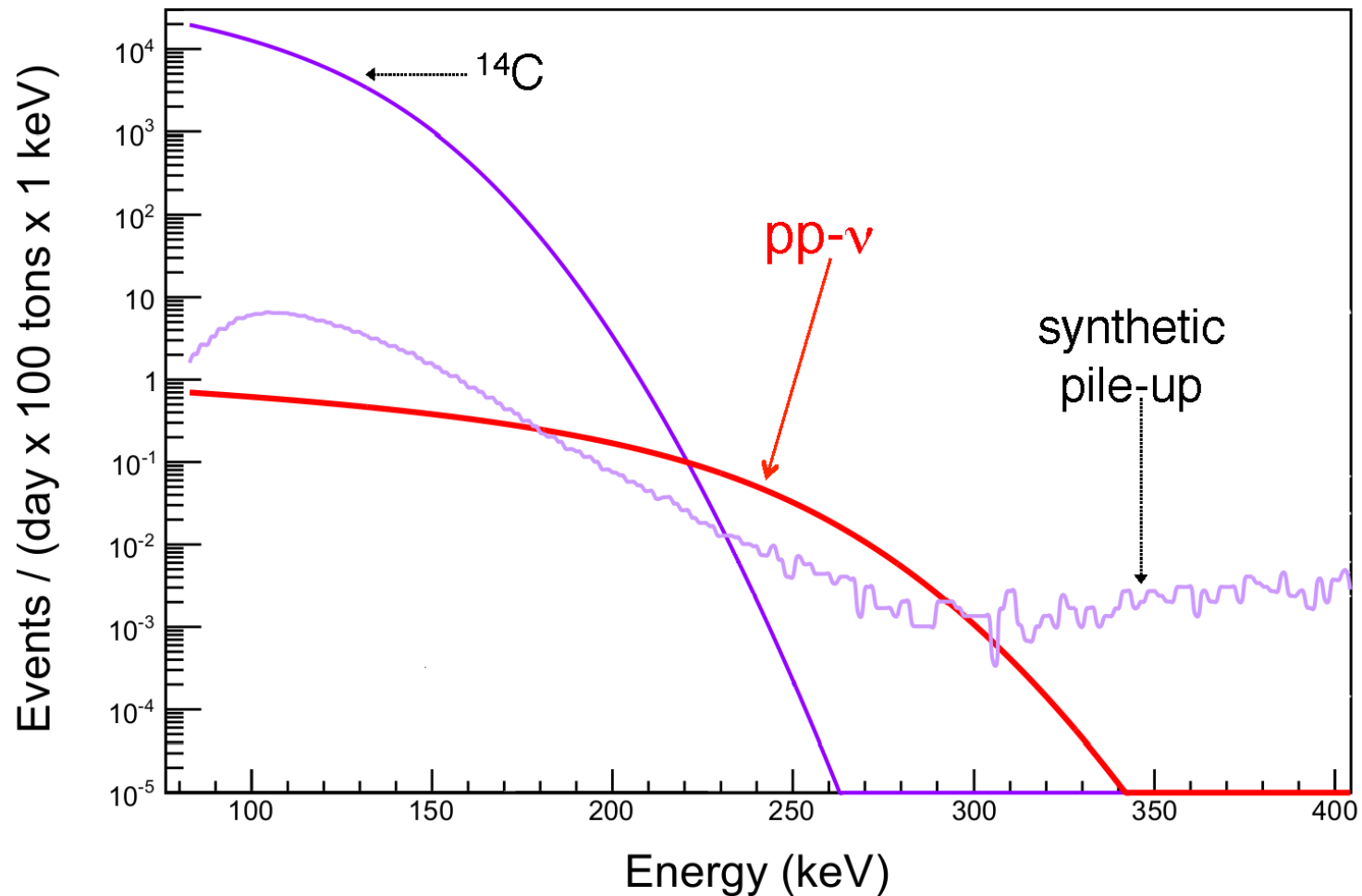
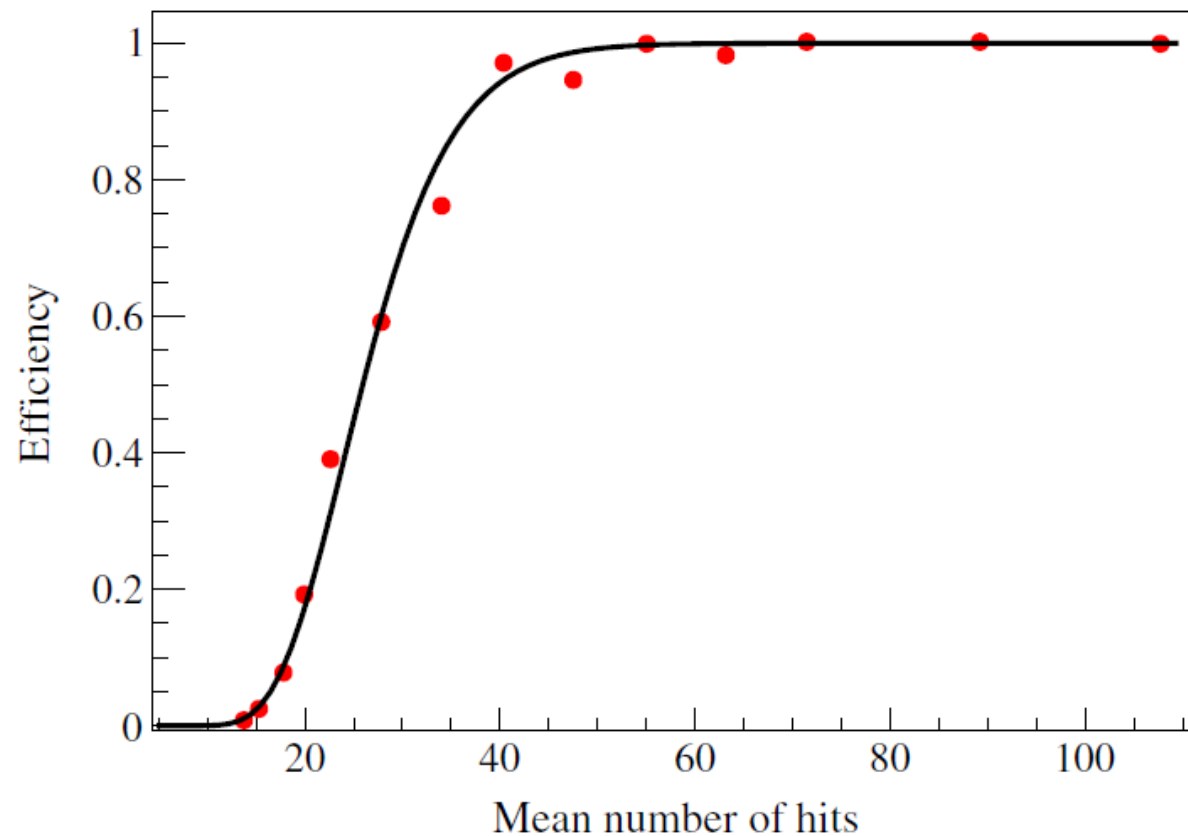


Fig. 2: Conceptual layout of the Serappis upgrade. PMTs are moved further from the Acrylic Vessel and equipped with light cones.

Энергетическое разрешение в Borexino + наложение сигналов



Порог по энергии

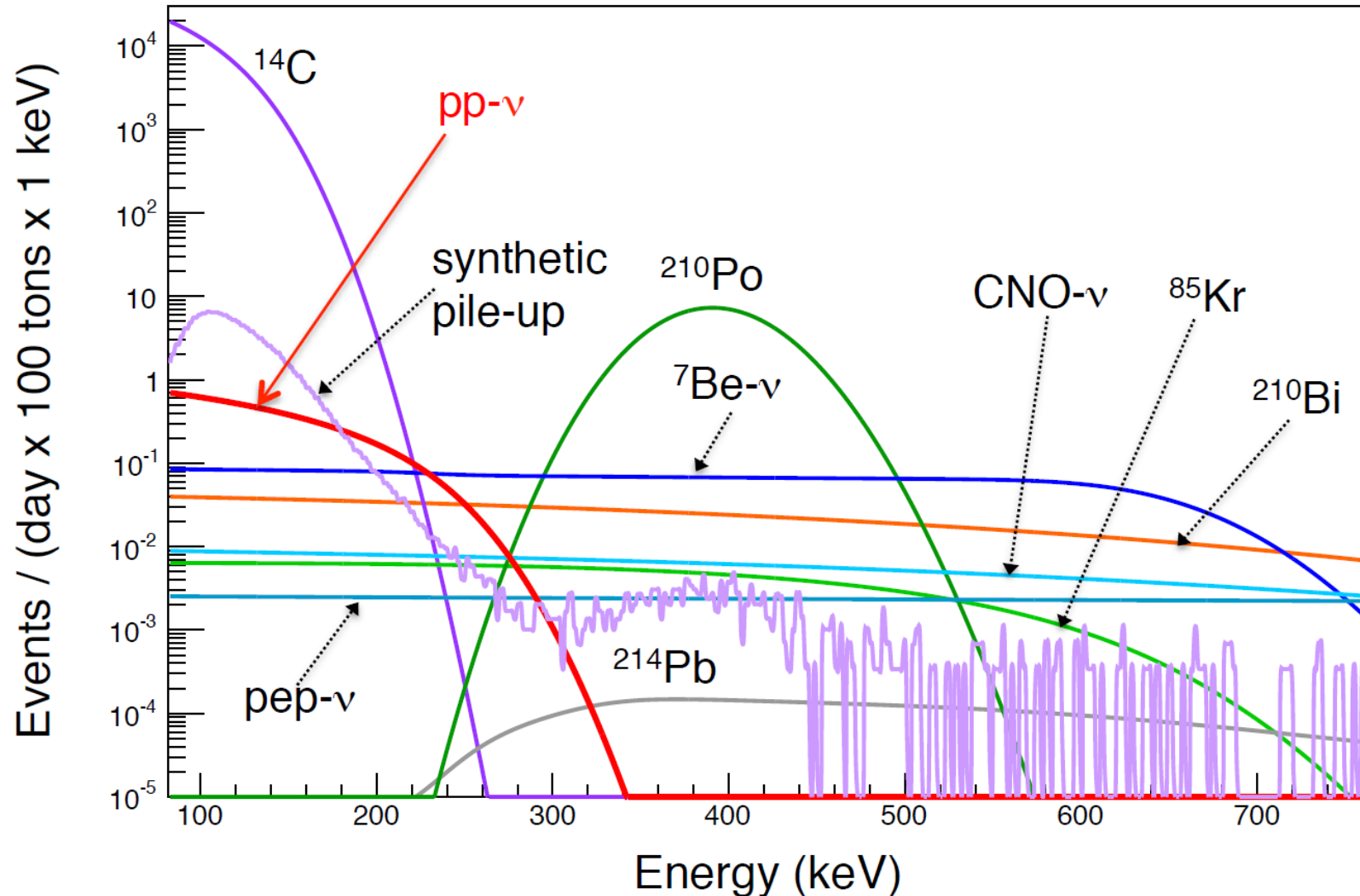


Эффективность срабатывания
триггера

60 hits (из 2000 ФЭУ, ~500 ф.э./МэВ) ~120 кэВ ->
достаточно низкий порог

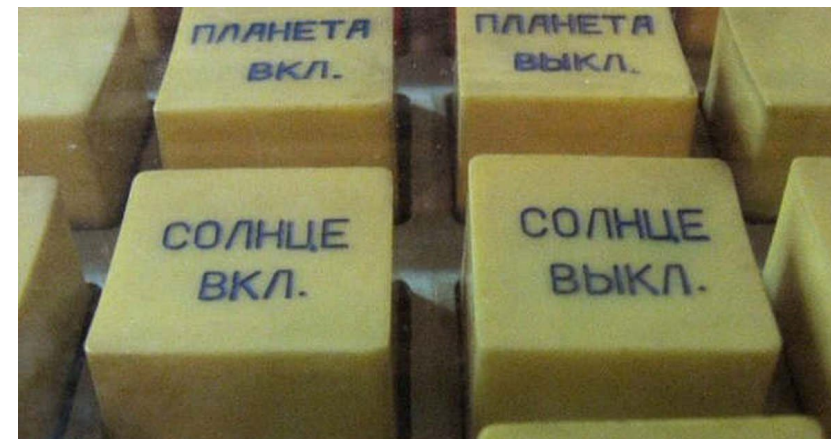
Все спектральные вклады

показана область энергий, использовавшаяся в первом рр-анализе



Выделение вклада pp-нейтрино

- **Скорость счёта событий, вызванных pp-нейтрино, определяется из спектральной подгонки данных**
- **Необходимо обеспечить:**
 - **точное описание спектров всех вкладов**
 - **независимое измерение скоростей счёта ^{14}C и событий наложения**

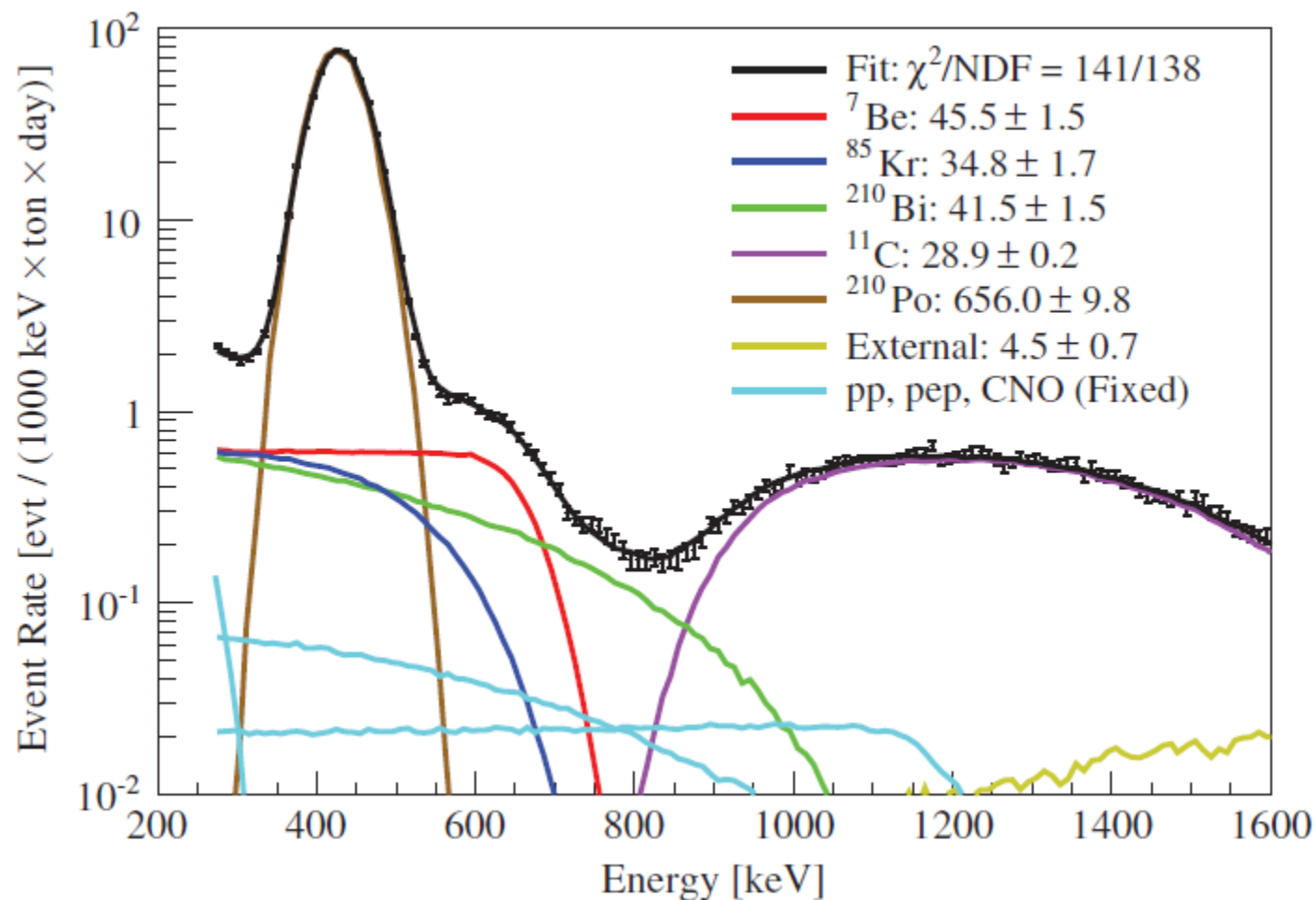


При низких энергиях моделирование методом МК не обеспечивает необходимую точность из-за большой статистики событий ^{14}C , поэтому используется аналитическая модель

Критические элементы при построении подгоночных спектров:

- **аналитическое описание энергетической шкалы**
- **аналитическое описание энергетического разрешения**
- **форма отклика детектора (форма сцинтилляционной линии).**

Поток ${}^7\text{Be}$ нейтрино изучался при $E > E_0({}^{14}\text{C})$



Radiochemical+
Borexino ${}^7\text{Be}$:

$$\Phi(\text{pp}) = (6.14 \pm 0.61) 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ c}^{-1}$$

**“Precision Measurement of the ${}^7\text{Be}$ Solar Neutrino Interaction Rate in Borexino”
PRL 107, 141302 (2011)**

Общий подход к спектральному анализу в Vorexino

- Поскольку наблюдаемой величиной является количество света, выделившееся в событии с энерговыделением E , то и спектральная подгонка осуществляется с использованием одной из доступных переменных, связанных с количеством зарегистрированного света. Такой подход позволяет сохранить статистическую форму отклика детектора.
- Энергия на стадии подгонки не восстанавливается, при необходимости пересчёт в энергию производится после подгонки.

$$Q_{reg} = \sum_i^{N_{PMT}} q_i \Theta(q_i - q_{th_i}) \Theta(t_i - \Delta T)$$

$$Q_{reg}^t(\vec{r}) = \sum_i^{N_{PMT}} q_i \Theta(q_i - q_{th_i}) \Theta(t_i - \text{tof}_i(\vec{r}) + \text{tof}_{min} - \Delta T)$$

$$N_{pm} = \sum_i^{N_{PMT}} \Theta(q_i - q_{th_i}) \Theta(t_i - \Delta T)$$

$$N_{pm}^t(\vec{r}) = \sum_i^{N_{PMT}} \Theta(q_i - q_{th_i}) \Theta(t_i - \text{tof}_i(\vec{r}) + \text{tof}_{min} - \Delta T)$$

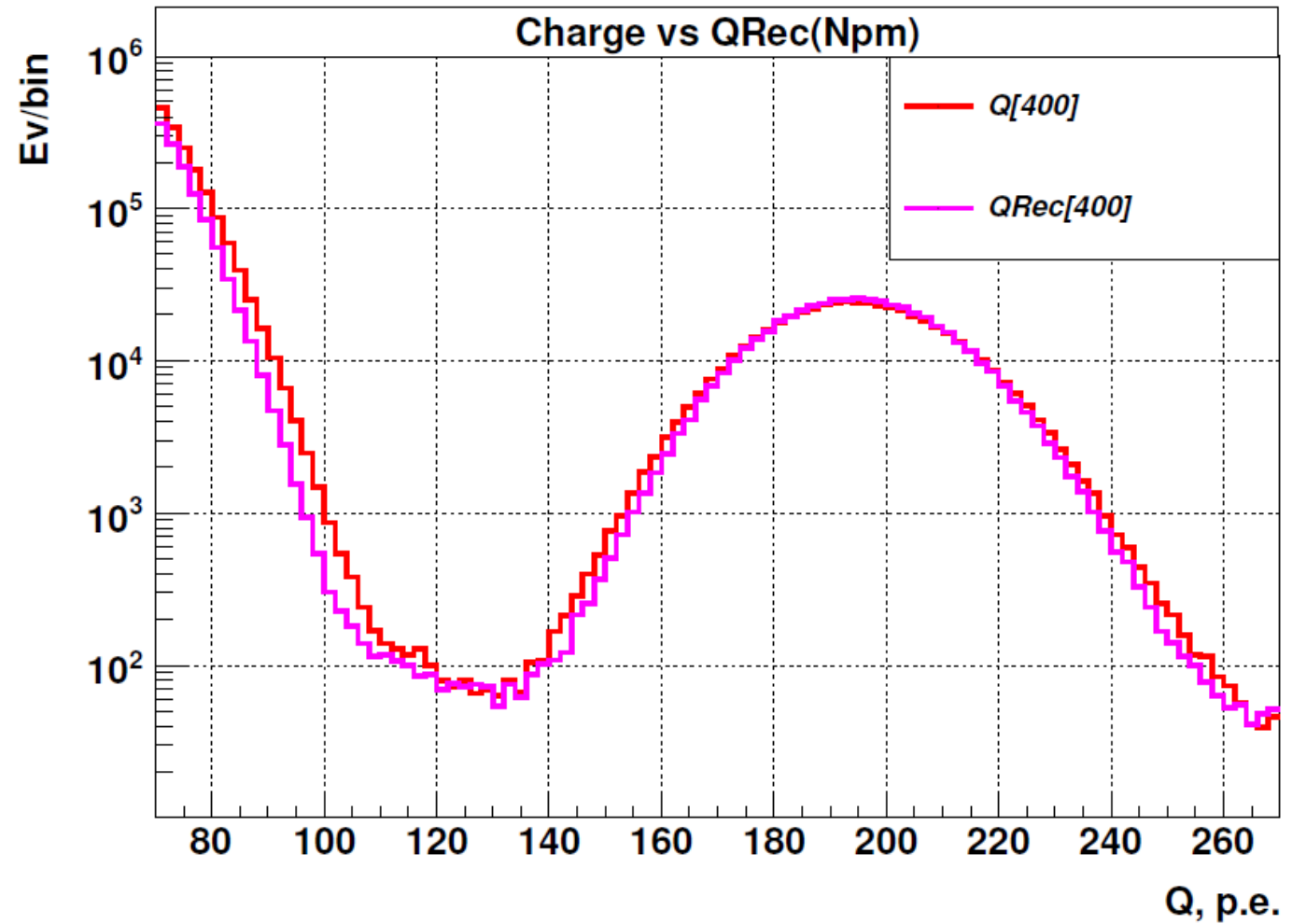
$$Q_0 = A_0 \cdot E \cdot f(k_B, E) + f_{\check{C}} \check{C}(E)$$

$$f_{Det}(\vec{r}) \equiv \frac{Q(\vec{r})}{Q_0}$$

$$Q_0 = N_{PMT} \cdot \mu_0 = -N_{PMT} \log\left(1 - \frac{N_{pm}}{N_{PMT}}\right)$$

Выбор эстиматора энергии

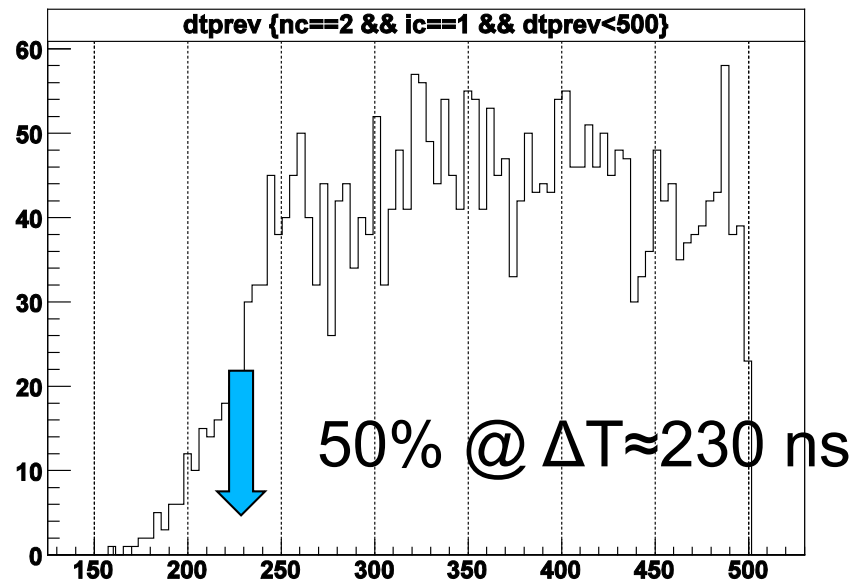
Однозначно N_{pm}



Триггерное окно

- Использовались два триггерных окна с фиксированной шириной и, соответственно, две переменные: **npmts_dt1** and **npmts_d2** (**не эквализованные** на 2000 ФЭУ в первом анализе)
- 230 нс : dt1
- 400 нс : dt2

Разница в светосборе $\approx 1\%$



Два окна позволяют производить перекрестные проверки, так как счёт наложений сигналов пропорционален ΔT , остальные сигналы остаются теми же

Энергетическая шкала

$$Q(E) = LY \cdot E \cdot f(k_B, E)$$

$$npmts = N_{Live} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{Q(E)}{N_{Live}}}}{1 + gc \cdot \frac{Q(E)}{N_{Live}}}$$

$$E \rightarrow Q \rightarrow Npmts$$

(как и в анализе ${}^7\text{Be}$)

Параметры энергетической шкалы (1 свободный):

- **L.Y.** – **свободный** (сравнивается с независимым измерением ${}^{14}\text{C}$ по событиям второго кластера)
- $k_B=0.0109$ см/МэВ – калибровки
- $\langle N_{LivePmts} \rangle$ - **фиксирован** (точный расчёт). Среднее число работающих ФЭУ
- $gc=0.122$ – из МК, **фиксирован** (нет чувствительности при низких энергиях)

Энергетическое разрешение

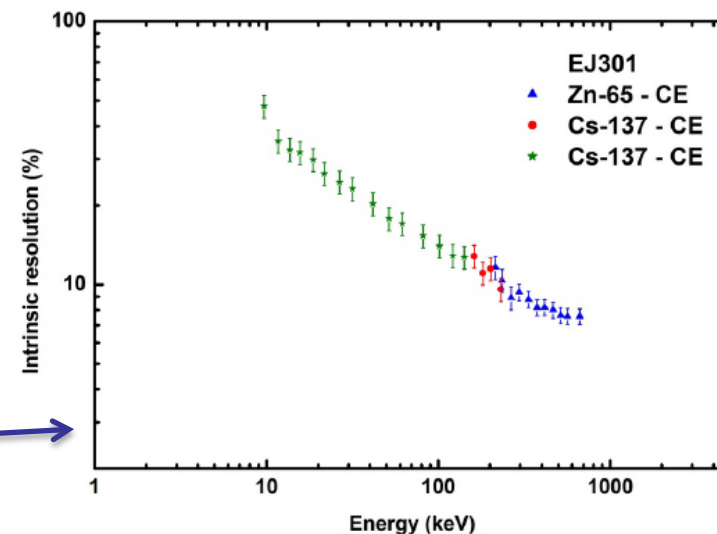
$$\sigma_N^2 = npmts \cdot \left(1 - \frac{npmts}{N_{Live}} (1 + v_1)\right) +$$
$$npmts^2 \cdot (v_T \cdot npmts \cdot (1 + v_f) + v_f) +$$
$$\sigma_{int}^2$$

(почти) как в анализе ${}^7\text{Be}$

Собственная ширина ЖОС!

Параметры разрешения (2 свободных):

- v_T – **свободный**. Пространственная неоднородность счёта числа сработавших ФЭУ, чувствителен к нему вклад ${}^{210}\text{Po}$, при низких энергиях нет чувствительности. Для ${}^{14}\text{C}$ и для ${}^{210}\text{Po}$ одинаков
- σ_{int} – **свободный**. Вклад собственного разрешения ЖОС (избыток относительно $\sqrt{N_{photons}}$) для β -частиц (для α не учитывался).
- v_f – **фиксирован** – (точный расчёт) – относительная дисперсия распределения работающих ФЭУ
- $v_1 = 0.17$ – **фиксирован** (МК) нет чувствительности к параметру



Измерение собственного разрешения ЖОС EJ301.
(из JINST 7 P06011)

Аналитическое описание функции отклика детектора

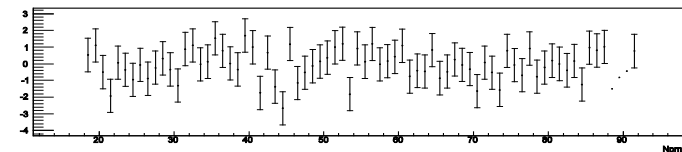
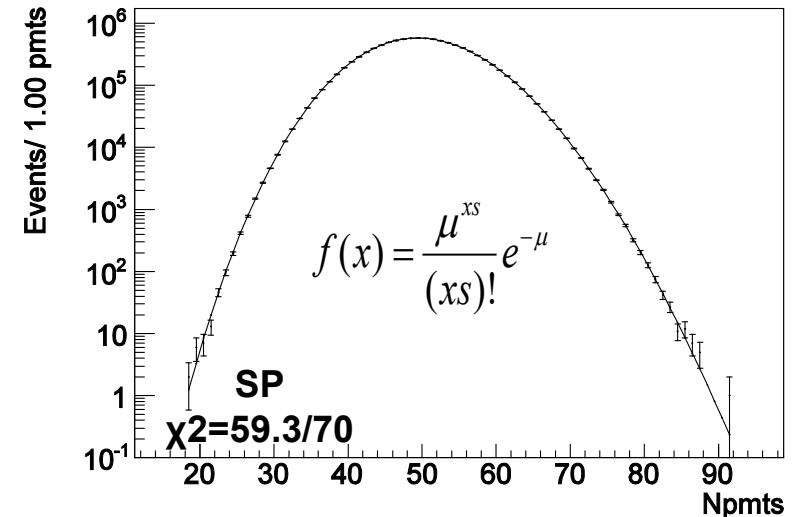
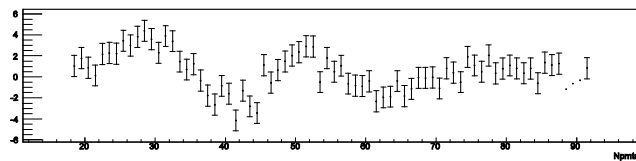
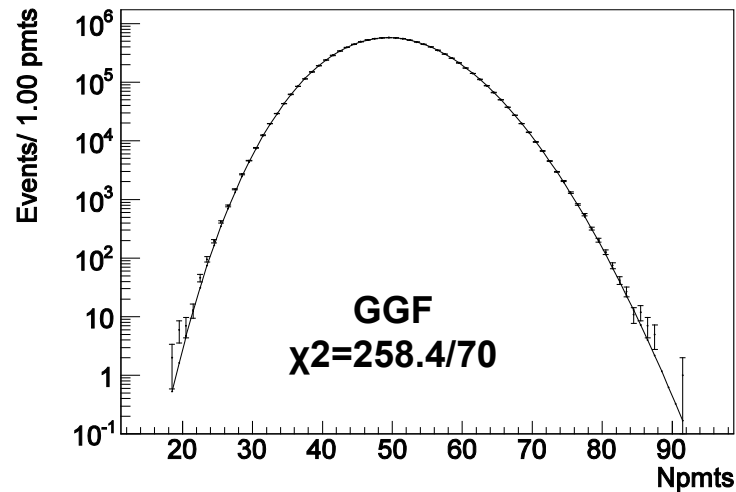
Форма отклика – форма отклика детектора на моноэнергетический источник

Обобщённое гамма-распределение (анализ ${}^7\text{Be}$) заменено масштабируемым распределением Пуассона

Причина: очень большая статистика ${}^{14}\text{C}$ в сравнении со статистикой ${}^{210}\text{Po}$ в анализе ${}^7\text{Be}$

O.Ju. Smirnov, An Approximation of the ideal scintillation detector line shape with generalized gamma distribution, NIM A 595 (2008) 410

10^7 МК событий в ДО
 $\langle N \rangle = 60$



Средние значения и дисперсии обоих распределений совпадают

STF : пик ^{214}Po (эстиматор Q)

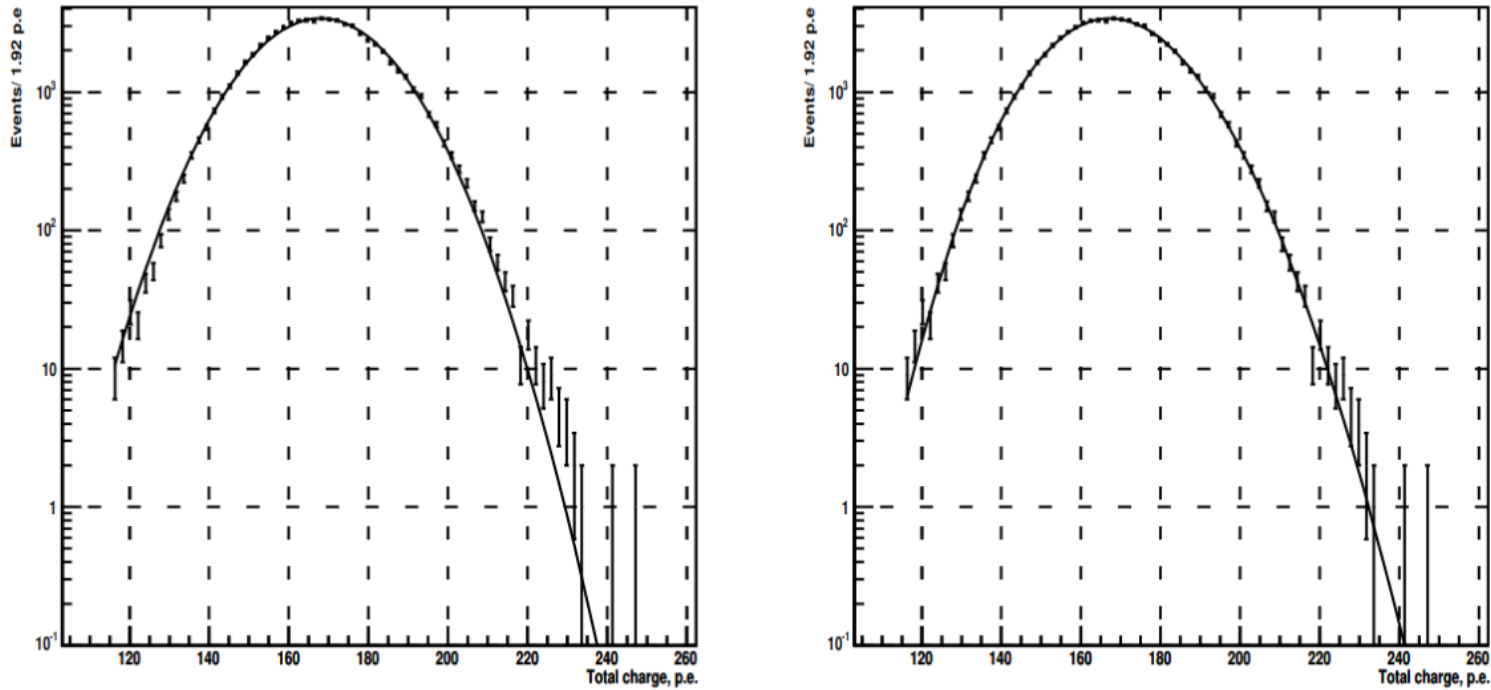
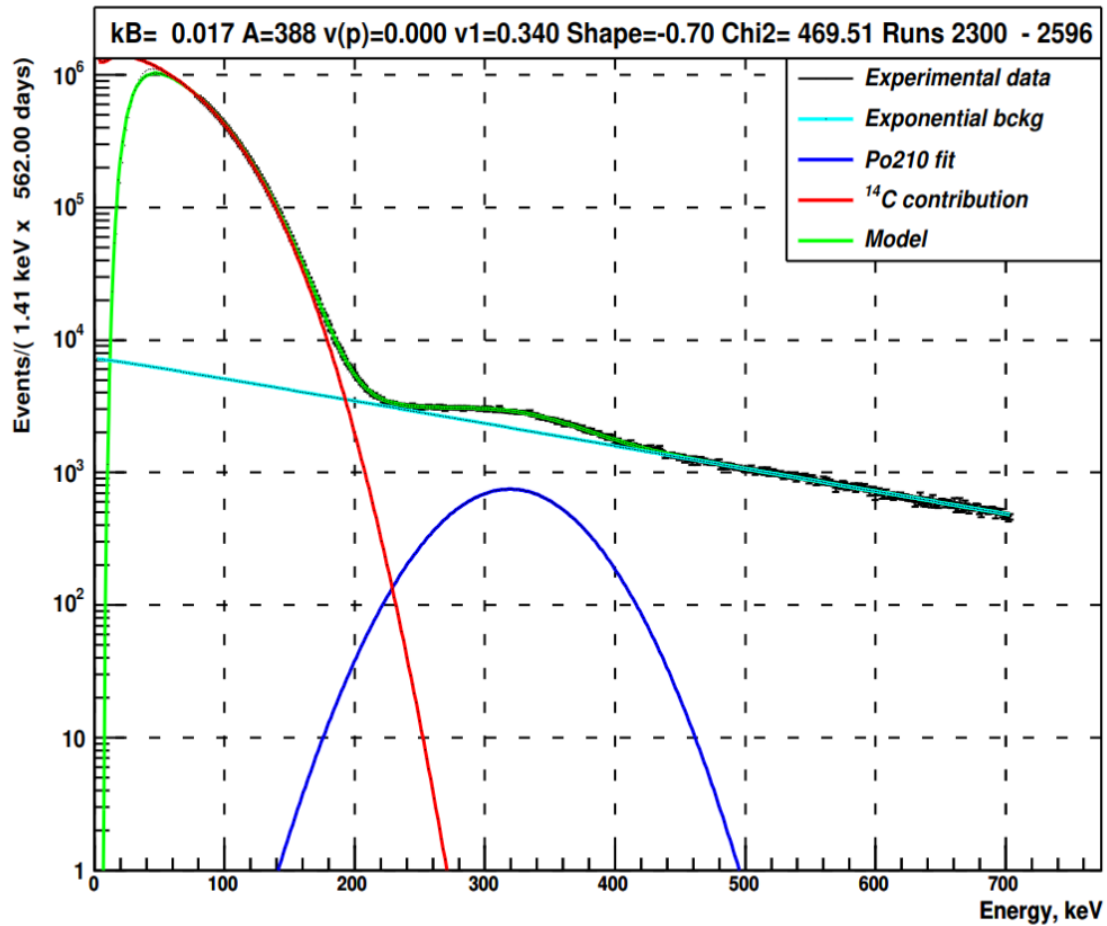
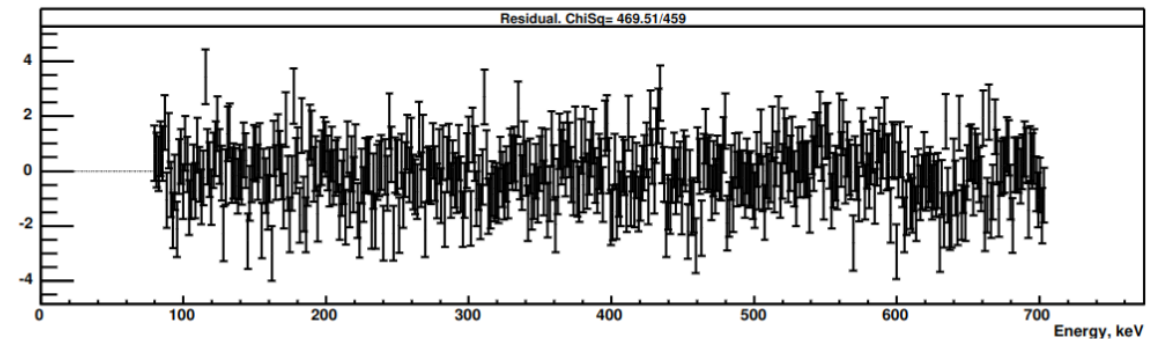
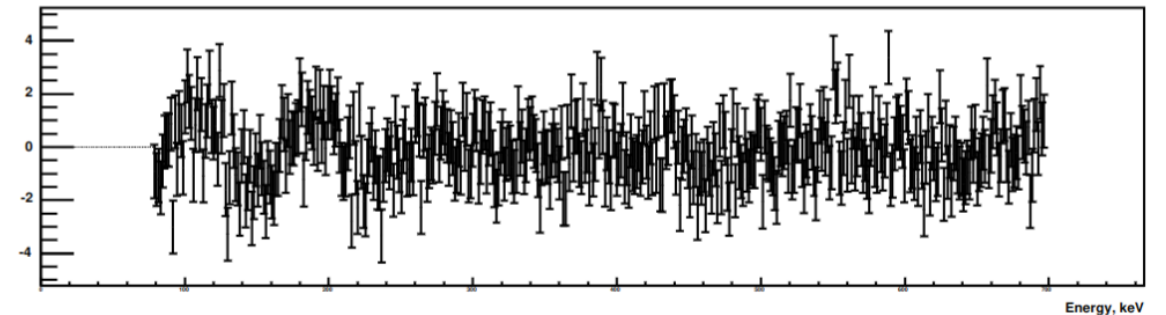


Рисунок Г.4 — Сравнение подгонки реальных данных с использованием нормального (слева) и обобщенного гамма-распределения (справа)

СТФ : спектр (эстиматор Q)

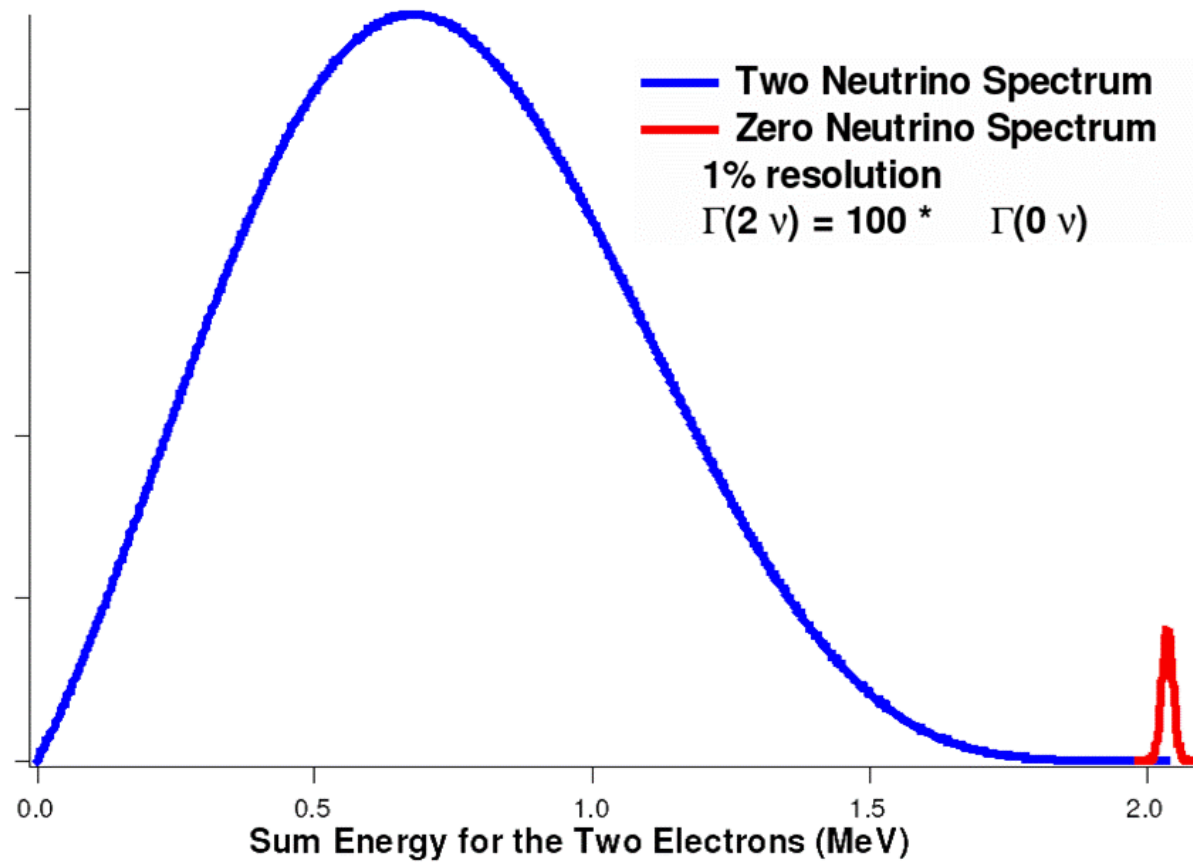


Гаусс



ОГФ

Где ещё?

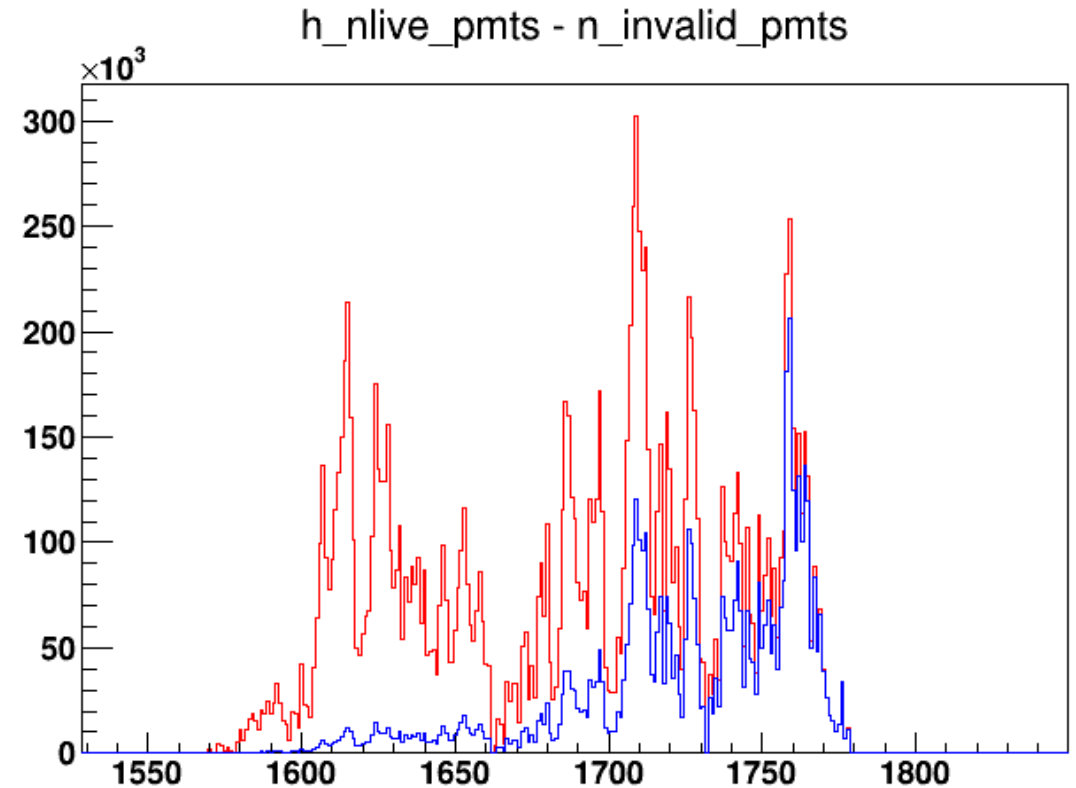


$0\nu\beta\beta$ в ЖОС
(KamLAND-zen, SNO+)

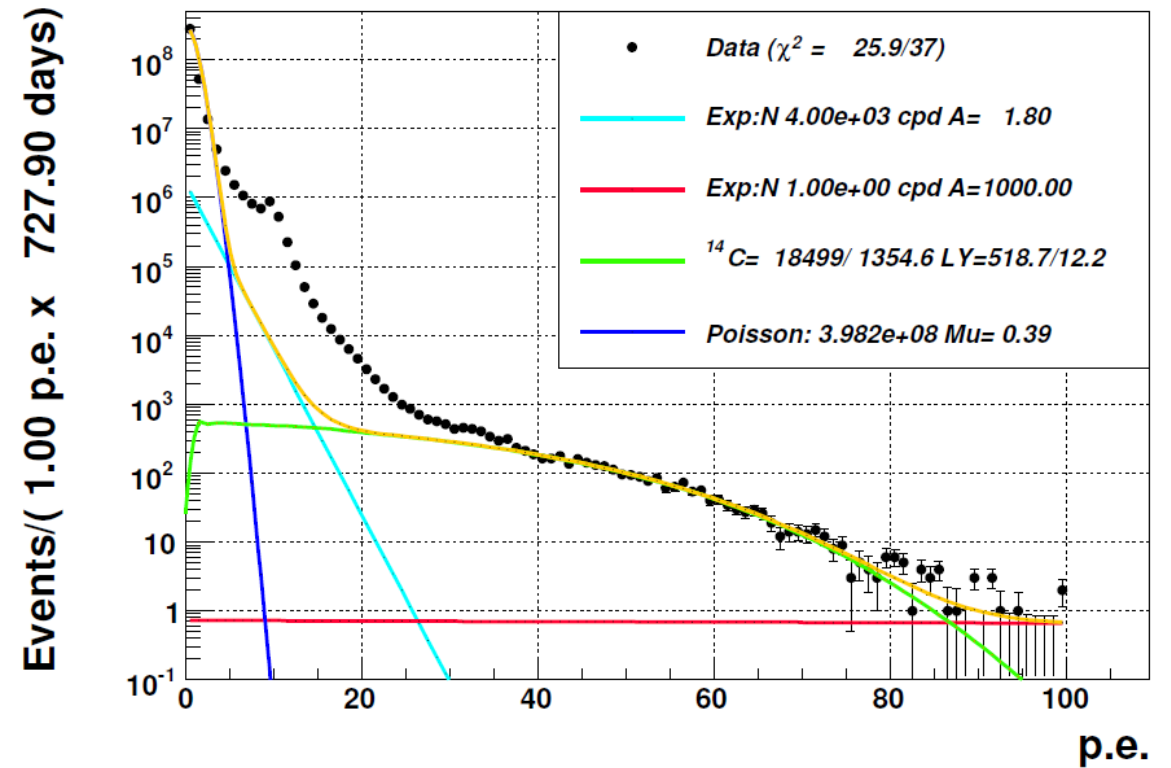
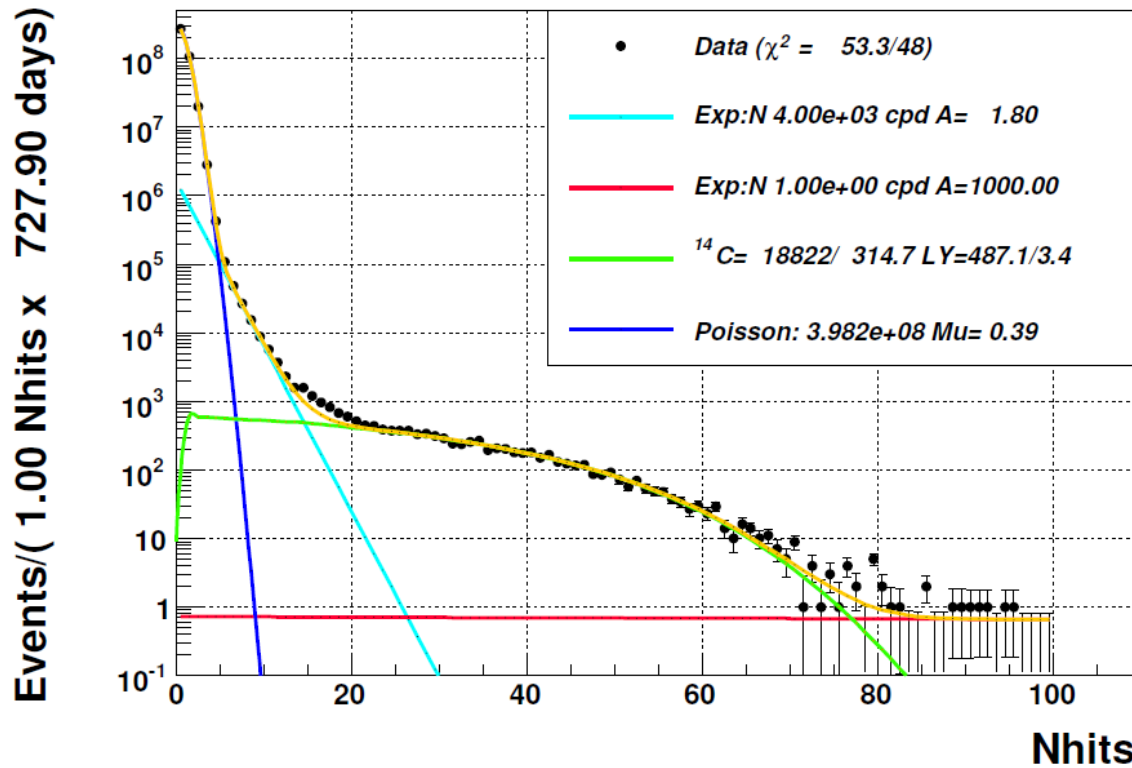
Другие факторы, влияющие на форму отклика детектора

Дополнительный разброс из-за различий в эффективности светосбора по детектору: небольшая по сравнению со “статистической” шириной линии “базовая” форма остается неизменной

Изменения скорости счёта P_0 и уменьшение $N_{LivePmt}$ со временем приводят к более высокому “эффективному” значению LY для P_0 и более низкой “эффективной” дисперсии линии P_0 : может быть рассчитано аналитически ($Fill(1,1) \rightarrow Fill(1, e^{-(t-t_0)/T})$)



Случайная выборка событий (tt64)



скорость счета ^{14}C : 106,8 Бк во всем объеме сцинтиллятора (N_{pm})

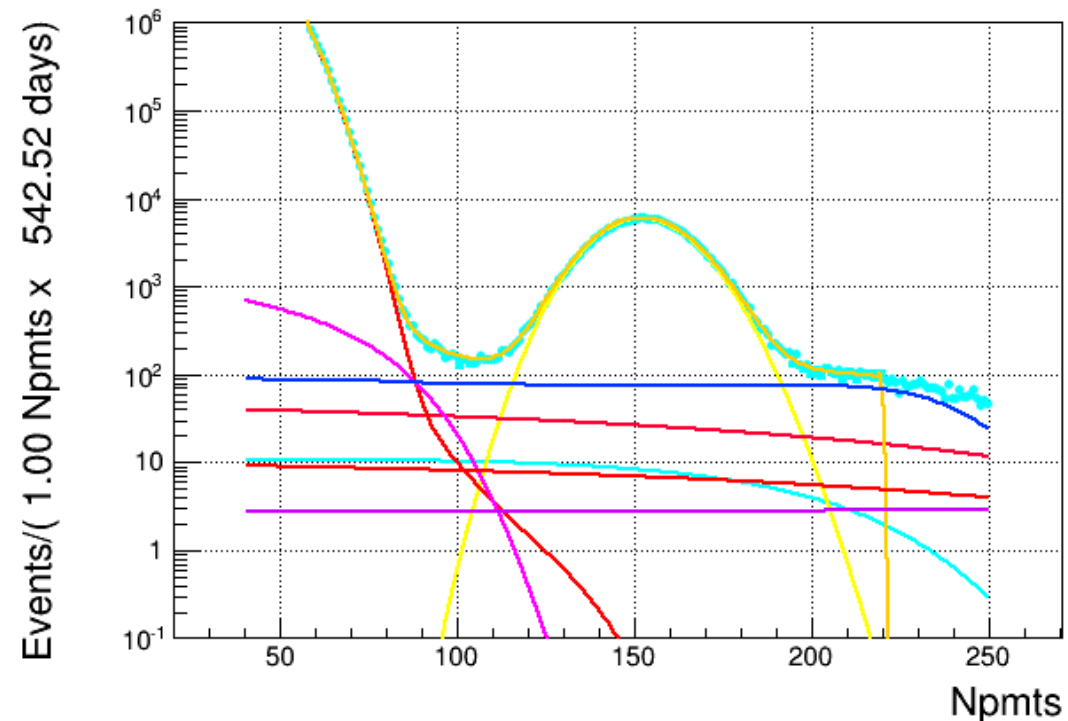
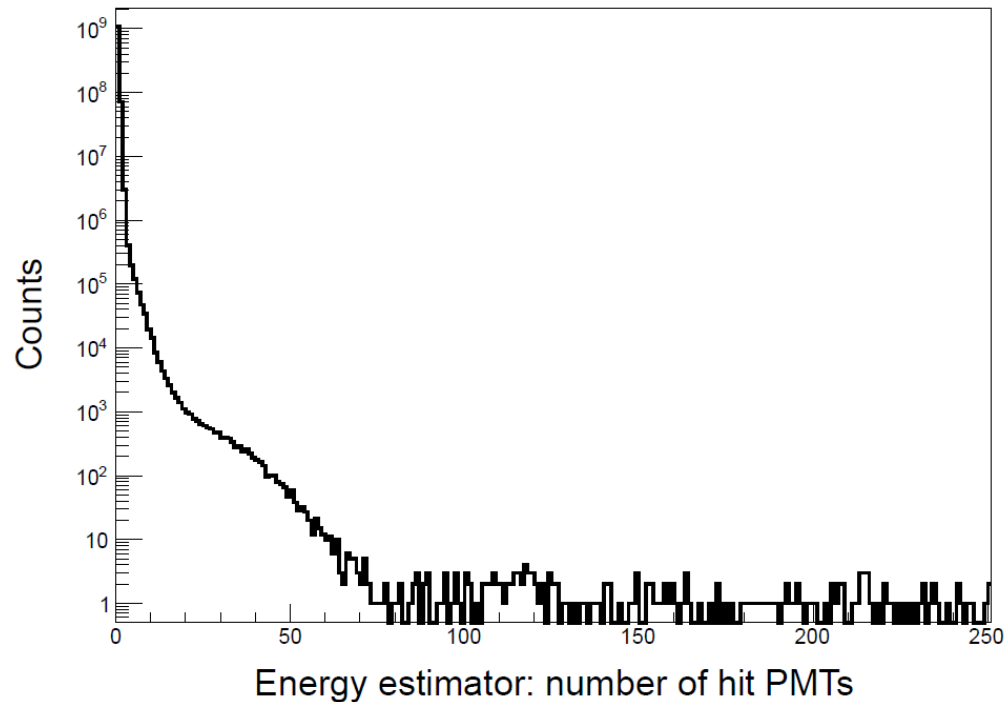
В пересчете на изотопное содержание : $(2,64 \pm 0,04) \cdot 10^{-18}$ г/г ($^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$)

Альтернативный метод построения спектра с наложением сигналов

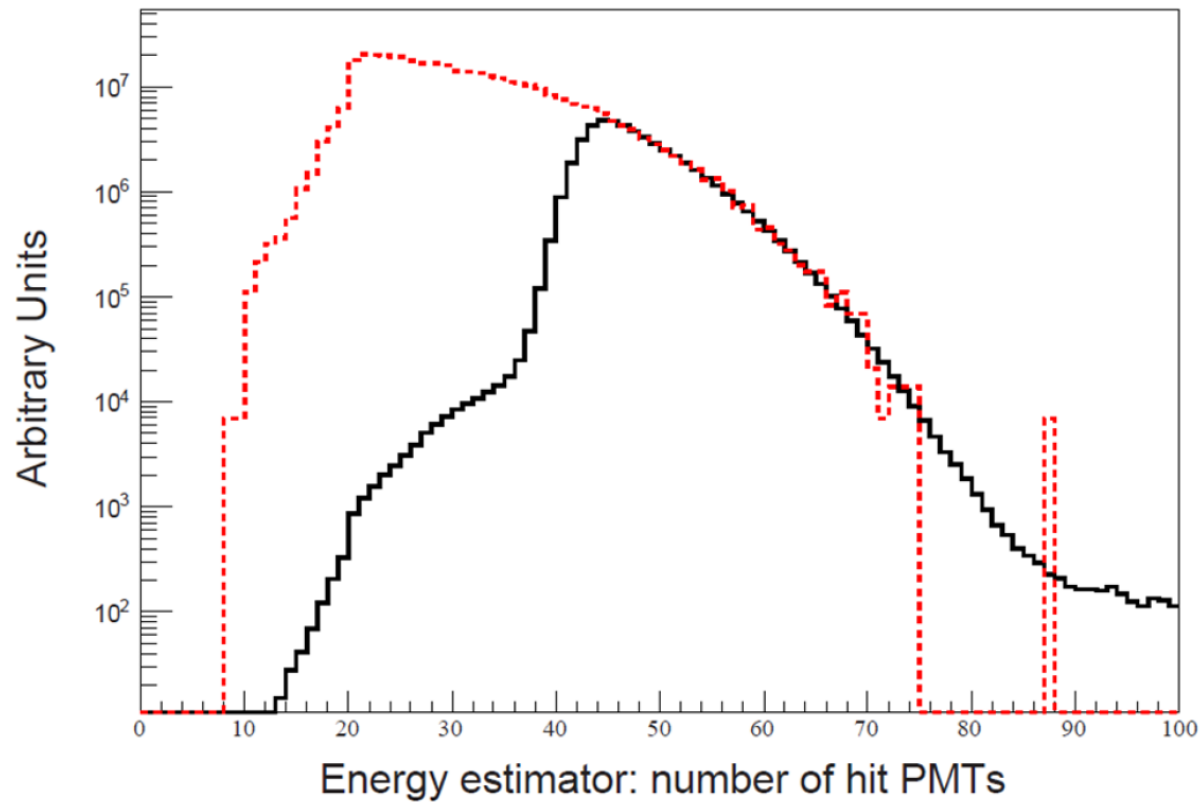
Конволюция со случайной выборкой (“convolution”)

Основной сигнал восстановлен в ДО, случайный – по всему объёму.

Эффект виден хвосте спектра ^{14}C .

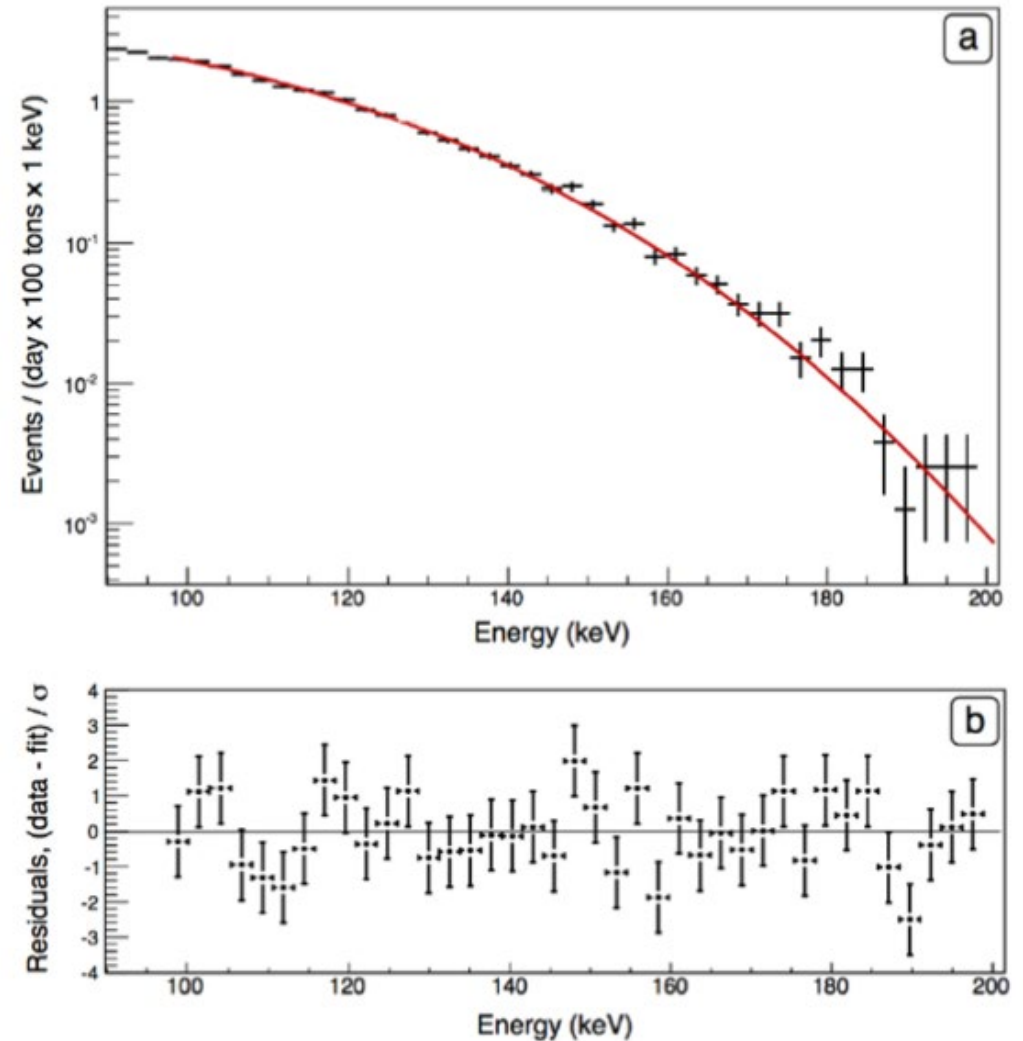


Определение скорости счета событий ^{14}C по событиям из второго кластера



Свободными параметрами подгонки были LY и скорость счёта.

40 ± 1 Бк/100 т ЖС или $(2,7 \pm 0,1) \cdot 10^{-18}$ г/г ($^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$)



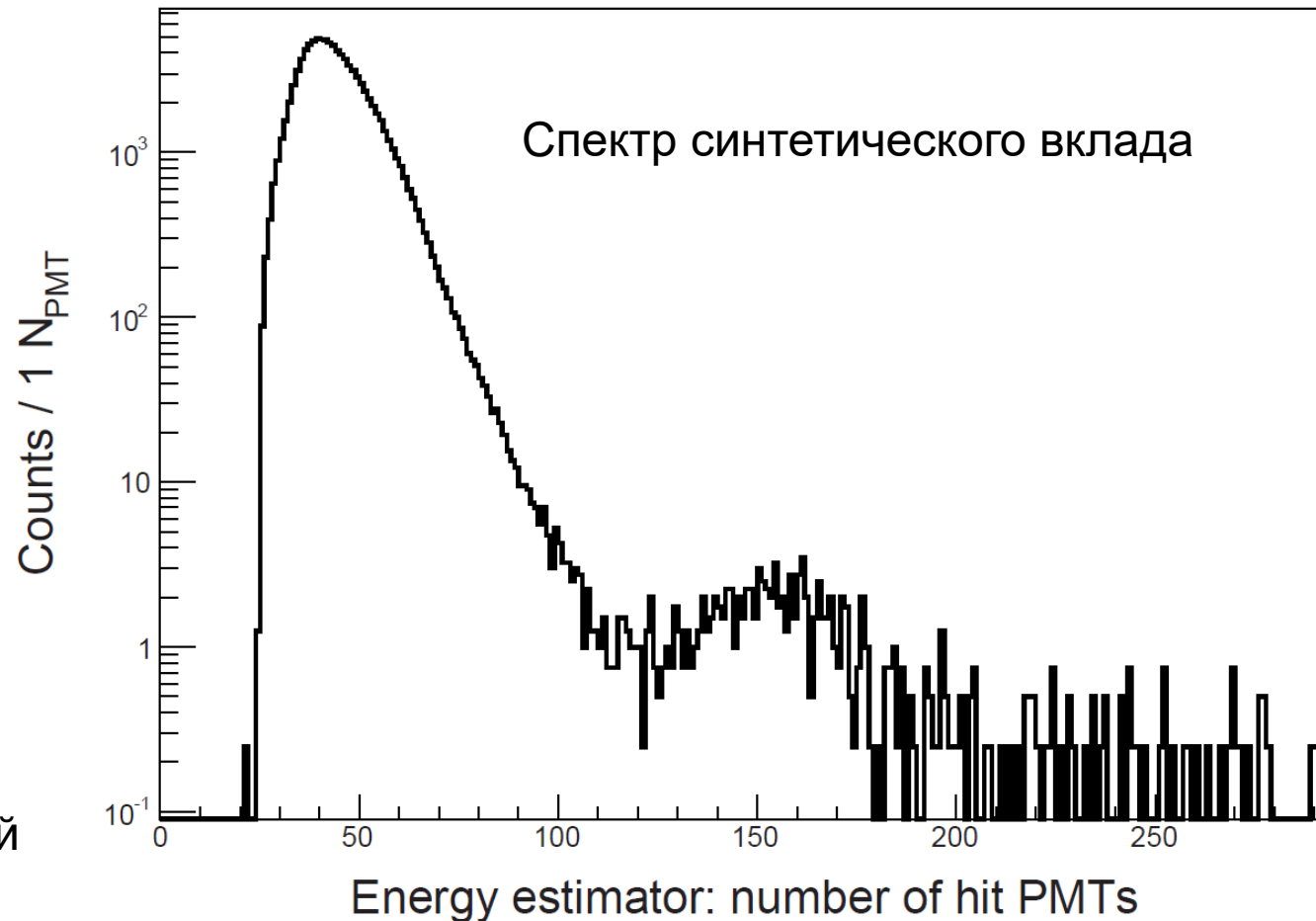
Синтетический спектр сигналов наложения

реальные события без каких-либо отборов искусственно накладываются на случайные выборки данных.

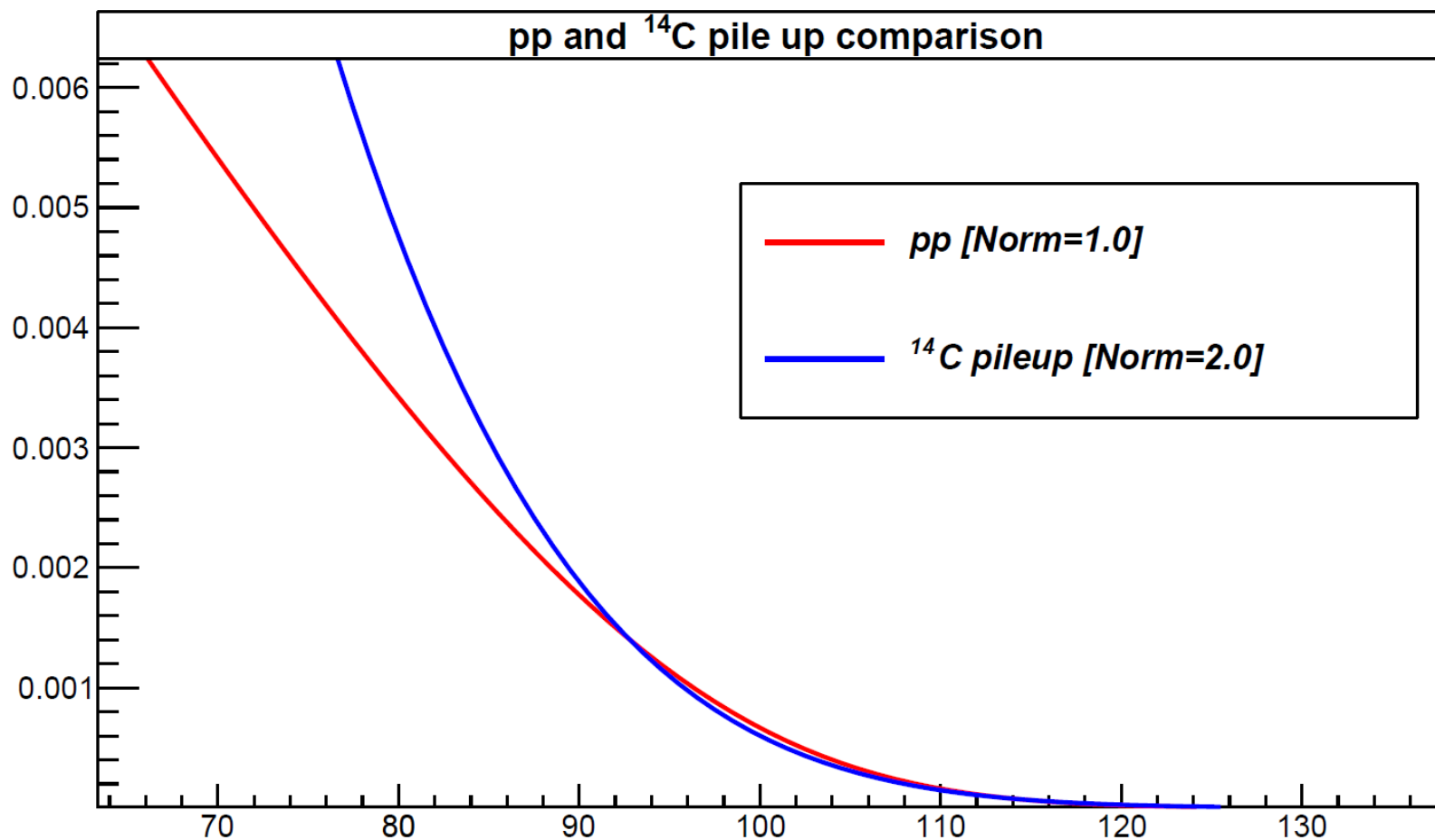
“синтетические” события отбираются и реконструируются с использованием процедуры, применяемой к обычным данным.

Спектр включает события, энергия которых изменяется по отношению к исходному событию более чем на заданное число отсчётов (N_{\min}).

К каждому реальному событию случайная выборка подмешивается четыре раза, итоговый суммарный спектр делится на 4.



Корреляции pp/rip

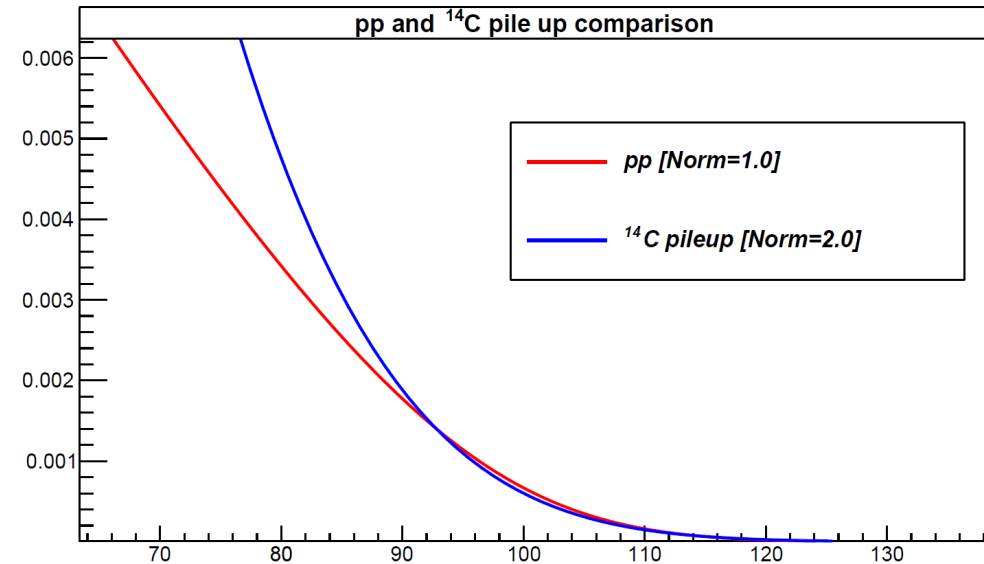


Корреляция $\approx 1:2$

Скорость счёта событий наложения

- $\Delta T = 230$ нс (400 нс)
- $f(^{14}\text{C}) = (40 \pm 1)$ Бк/100 т (ДО)
- $(108 \pm 2,7)$ Бк во всём объёме
- $N = [\Delta T \cdot f(^{14}\text{C}, \text{ДО}) \cdot 8,64 \cdot 10^4] \cdot f(^{14}\text{C}) =$
[230 нс] : $(85,8 \pm 4,3)$ 1/д /100 т
[400 нс] : $(149,3 \pm 7,5)$ 1/д /100 т

(пренебрегли другими вкладами в счёт, как несущественными)



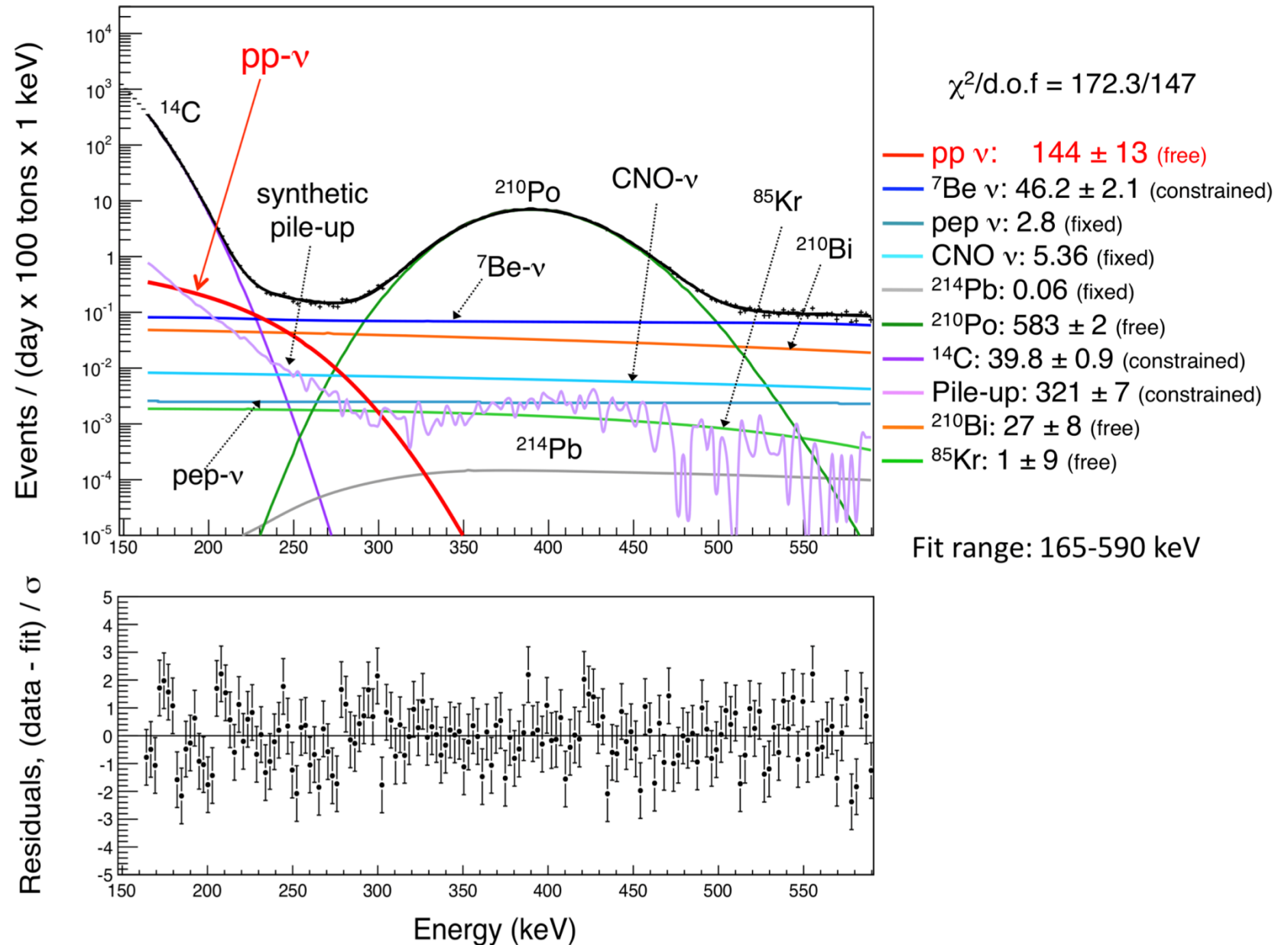
Корреляция $\approx 1:2$

Ожидаемая абсолютная неопределённость на pp-сигнал, связанная с неточностью определения счёта наложений :

$\pm 2,2$ и $\pm 3,8$ (из ≈ 130), $< 3\%$

Результаты стандартной подгонки

- Переменная: npmt_dt1/2
- [60-220 Npmts] ($\approx 165-590$ кэВ)
- Функция отклика: МРП
- **Свободные** спектральные вклады: ^{14}C , ^{210}Bi , ^{210}Po , pp, ^{85}Kr
- **Ограниченные** спектральные вклады: ^7Be , синт.наложение
- **Фиксированные** спектральные вклады: pep+CNO+ ^8B (SSM[HZ]/LMA)
- Параметры энергетической шкалы: LY **free**, k_B **fixed**, f_{eq} **calculated**
- Параметры энергетического разрешения: σ_{int} и v_T **free**; v_f **calculated**
- **Свободные**: LY+2 параметра энергетического разрешения + положение Po position+5 нормировок спектральных вкладов + ограниченные pp и ^7Be
- **9 свободных и 2 (pileup и ^7Be) ограниченных**

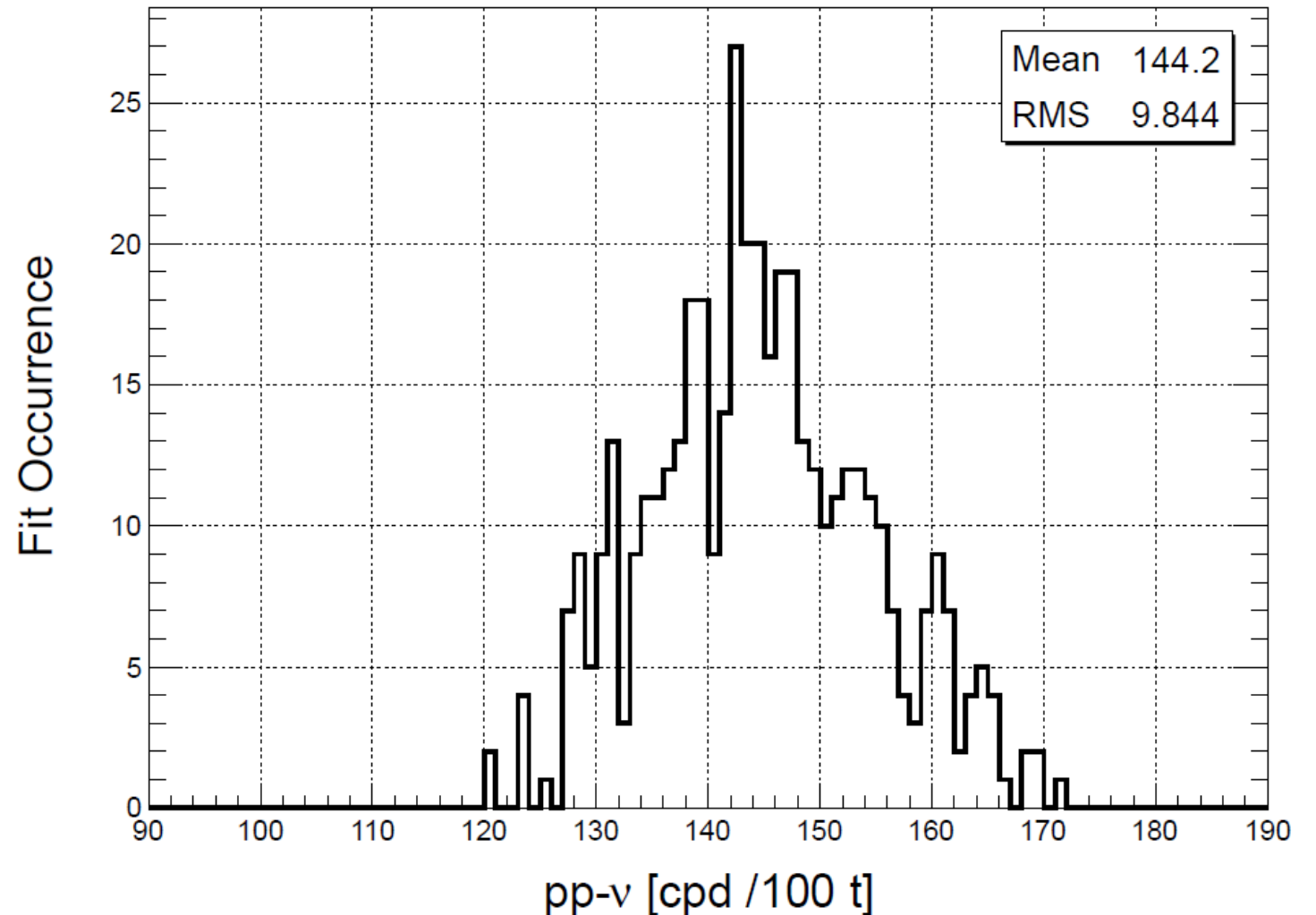


Оценка систематических ошибок

Набор значений получен при изменении условий подгонки, включая диапазон энергий, способ формирования спектра наложения сигналов (синтетического/аналитического) .

Распределение достигает максимума около значения 144 соб/д/100 т.

Оценка консервативна, так как не значения не взвешиваются по качеству подгонки



^{87}Rb ?

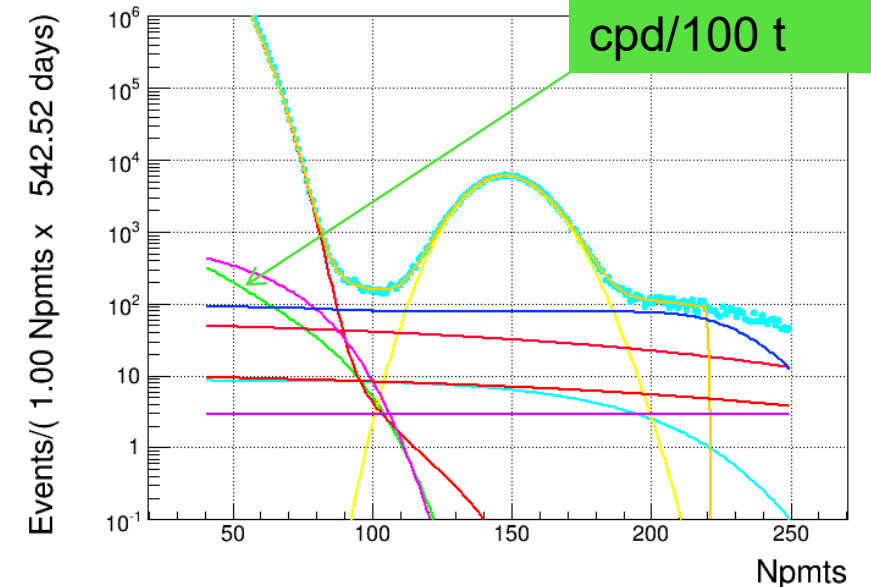


Присутствие ^{87}Rb изменит результат

β -распад ($3/2^-$ в $9/2^+$ основное состояние ^{87}Sr)
 $E_0=283.3$ кэВ

$\Delta\chi^2=+1$
@
100 1/д/100т ^{87}Rb

с соответствующим уменьшением счёта пр-нейтринно 40 /д/100 т



Конечно, стихиями являются земля, вода, огонь и воздух. Но как насчет рубидия? Конечно, вы не можете игнорировать рубидий..

^{87}Rb vs ^{40}K

Rb - двадцать третий по распространенности элемент в земной коре, типичное содержание Rb в $(2-4) \cdot 10^3$ ниже, чем у более распространённого K (который составляет 1,5% от массы земной коры). Принимая во внимание распространённость радиоактивных изотопов: 0,278 для ^{87}Rb против $1,17 \cdot 10^{-4}$ для ^{40}K , и соотношение времён жизни (47,2 против 1,28 миллиардов лет), мы получаем соотношение для типичной активности ^{87}Rb :

$$\frac{\text{Activity}(\text{Rb})}{\text{Activity}(\text{K})} = \frac{\text{abund}({}^{87}\text{Rb})}{\text{abund}({}^{40}\text{K})} \cdot \frac{T_{1/2}^{40\text{K}}}{T_{1/2}^{87\text{Rb}}} \cdot \frac{\text{At}(\text{Rb})}{\text{At}(\text{K})} = 64.5 \cdot \frac{\text{At}(\text{Rb})}{\text{At}(\text{K})}$$

Химия элементов та же, Rb образует все виды солей — большей частью легкорастворимые, можно ожидать тот же коэффициент очистки, если исходить из естественного соотношения Rb/K.

- ^{40}K (пер-анализ) <0.11 соб/д/100 т (68% У.Д.)*

<4.6·10⁻¹⁶ Knat [г/г ЖС]

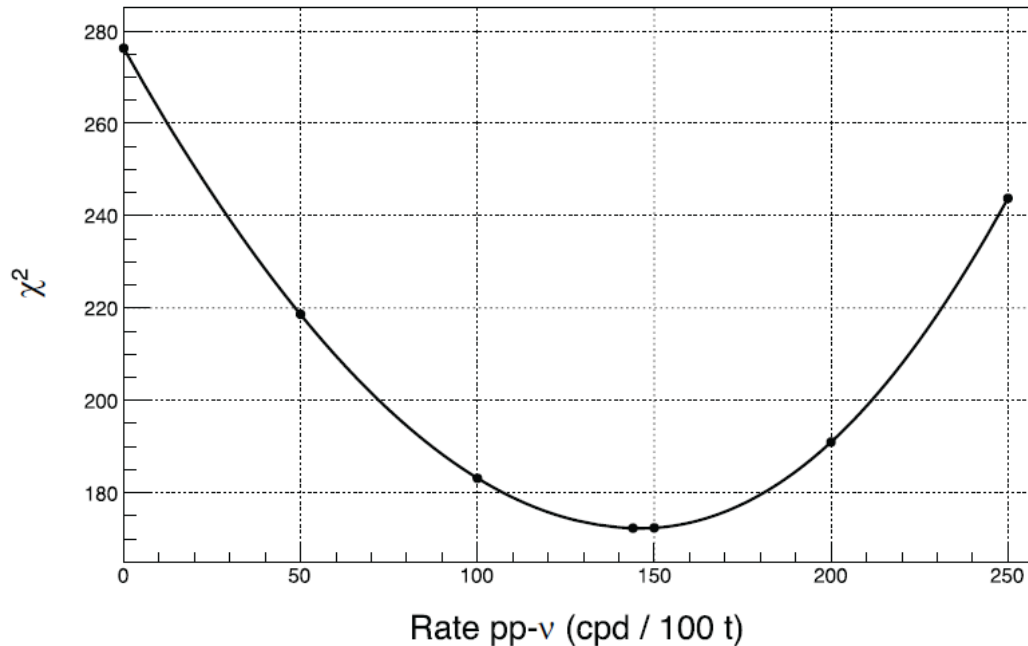
*опубликованное значение <0.4 соб/д/100 т для 95% У.Д. (<1.7·10⁻¹⁵ Knat [г/г ЖС])

Первое измерение потока pp-нейтрино в режиме реального времени с точностью ~11%



$pp = 144 \pm 13$ (стат) ± 10 (сист) соб/д/100 т

Ожидаемое значение (MSW/LMA+SSM/HZ)
 131 ± 2 соб/д/100 т



Измеренный поток pp-нейтрино:

$$(6.6 \pm 0.7) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$$

vs (модели)

$$(5.98 \pm 0.04) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$$

Нулевой сигнал pp исключён на уровне 10σ

До/после 2014

Радиохимическое измерение

$$[\text{pp} + {}^7\text{Be} + \text{CNO} + \text{pcp} + {}^8\text{B}|\text{Ga}] = 66,1 \cdot (1 \pm 0,047) \text{ SNU}.$$

До измерения потока бериллиевых нейтрино:
Gallex/GNO+SAGE + Clorine + SNO

$$\varphi_{\text{pp}}(\text{Ga}) : 22\%$$

+Borexino (${}^7\text{Be}$) [2009]

$$\varphi_{\text{pp}}^{\odot}(\text{Ga}) = 6,0 \cdot (1 \pm 0,14) \times 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$$

Borexino, прямое измерение [2014]:

$$\varphi_{\text{pp}}(\text{Borexino}) = 6,6 \cdot (1 \pm 0,11) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$$

С учётом новых измерений Borexino (CNO, 2023)

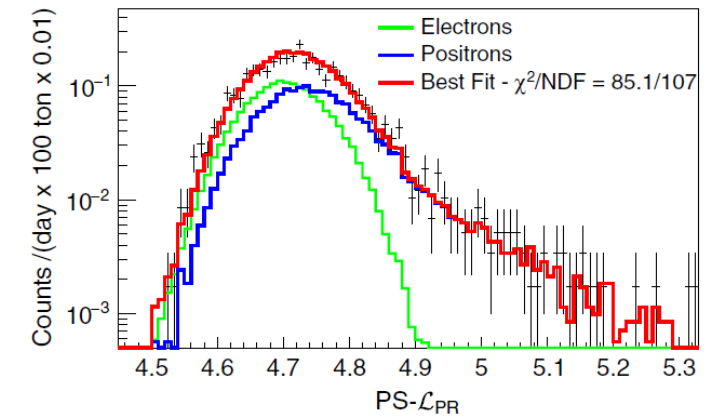
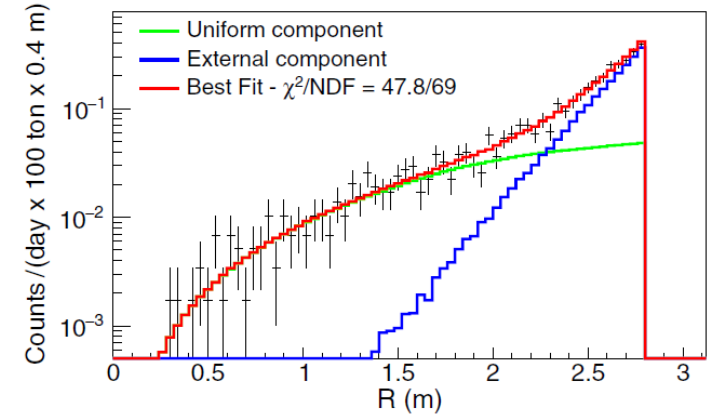
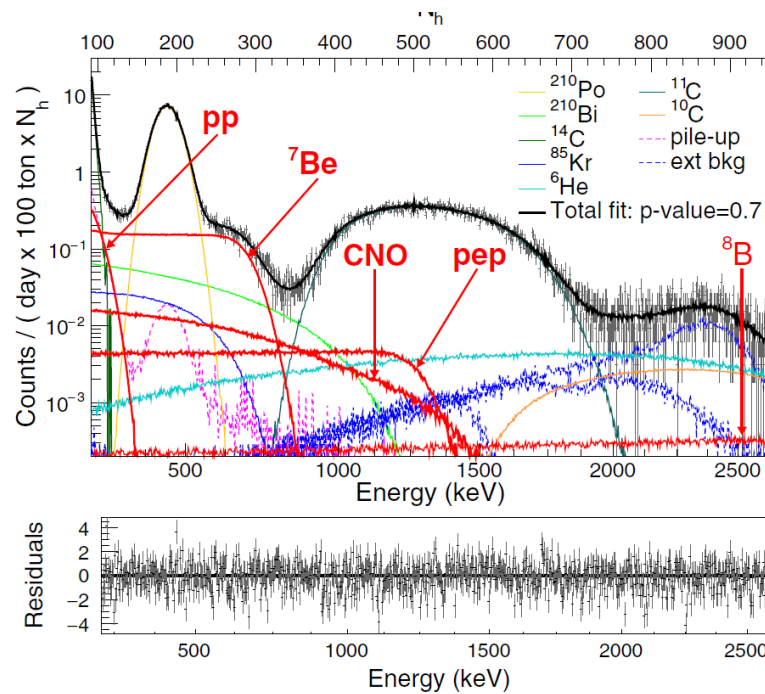
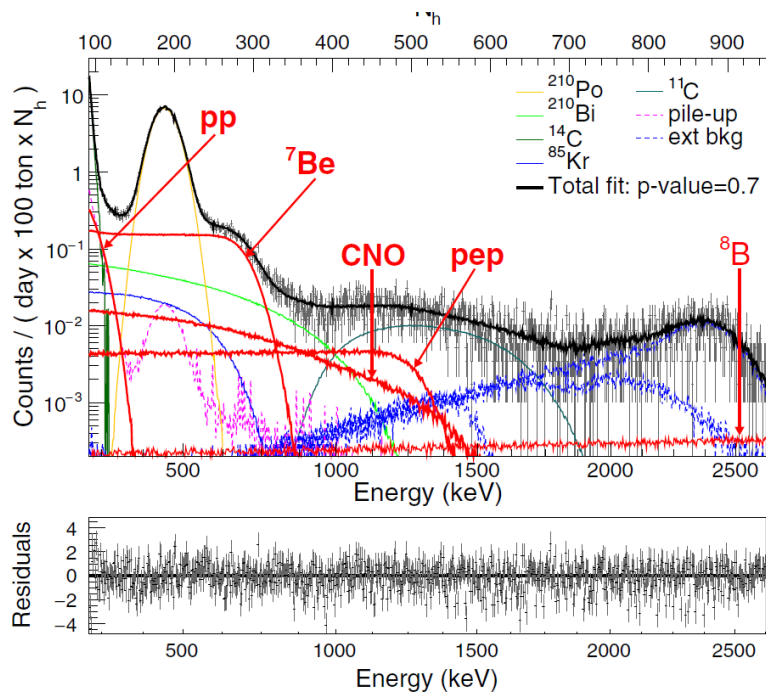
$$\varphi_{\text{pp}}^{\odot}(\text{Ga}) = 6,05 \cdot (1_{-0,083}^{+0,092}) \times 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$$

Прямое измерение Borexino [2019]

$$\varphi_{\text{pp}}^{\odot}(\text{Borexino}) = 6,1(1,0_{-0,12}^{+0,096}) \times 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$$

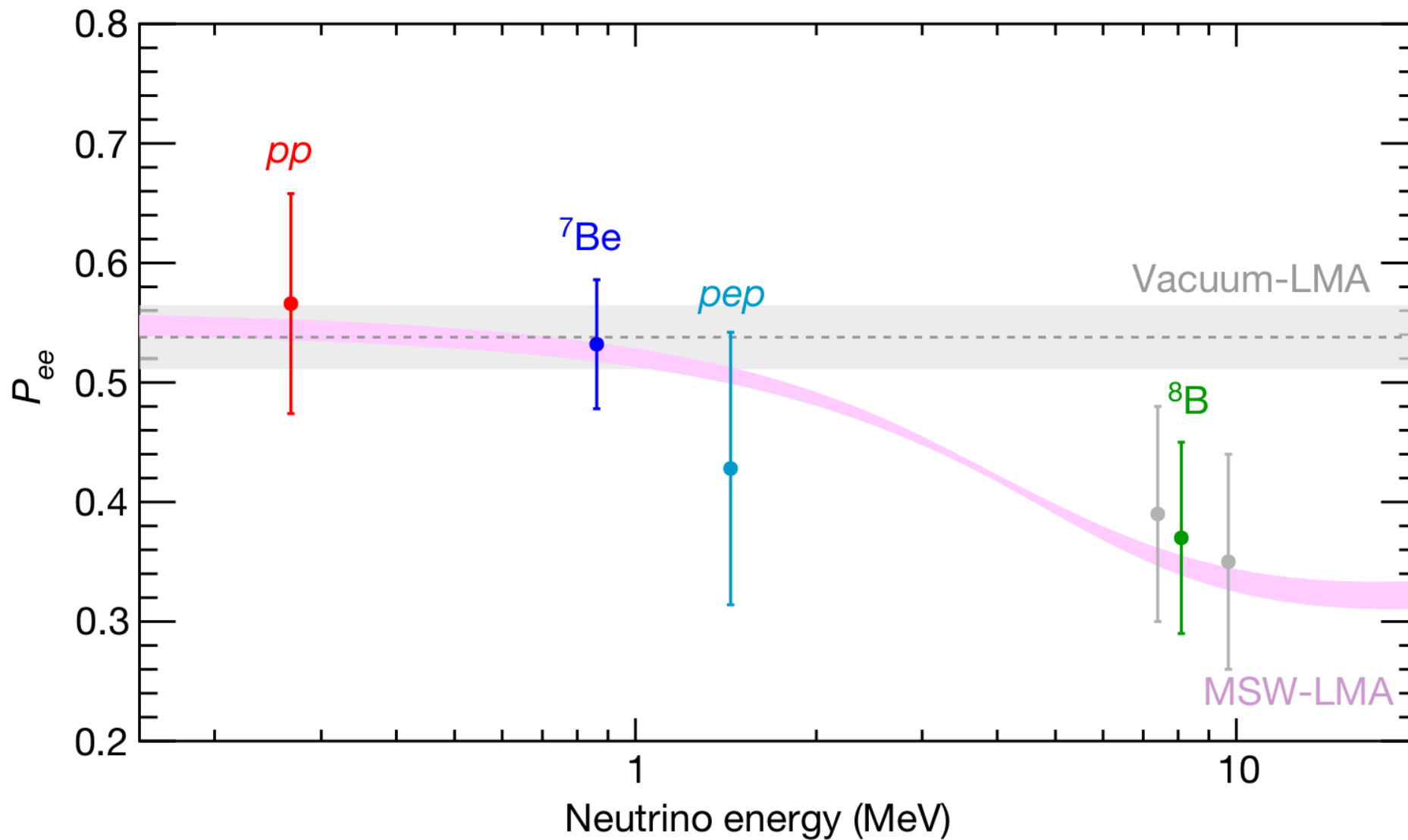
Одновременная подгонка pp+Be+pep

Многопараметрическая подгонка



$$\varphi_{7\text{Be}}^{\odot}(\text{Borexino}) = (4,99 \pm 0,11^{+0,06}_{-0,08}) \times 10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ c}^{-1}$$

Вероятность выживания электронных нейтрино P_{ee}



Собственное разрешение ЖОС

Брайтенбергер [1955], Райт [1954]

$$v(Q) \equiv \left(\frac{\sigma_Q}{Q} \right)^2 = \frac{1 + v_1}{Q} + v(p) + (1 + v(p)) \left[v(N_{ph}) - \frac{1}{N_{ph}} \right]$$

$$\sigma_{N_{ph}}^2(E) \simeq \frac{N_{ph}(E)}{N_{ph}(1)} \sigma_{N_{ph}}^2(1)$$

$$\begin{aligned} v(N_{ph}(E)) &= \frac{\sigma_{N_{ph}}^2(E)}{N_{ph}(E)^2} = \frac{\sigma_{N_{ph}}^2(1)}{N_{ph}(E) \cdot N_{ph}(1)} = \frac{N_{ph}(1) \sigma_{N_{ph}}^2(1)}{N_{ph}(E) N_{ph}^2(1)} \equiv \\ &\equiv \frac{N_{ph}(1) N_{ph}(1) + \delta_{N_{ph}}^2(1)}{N_{ph}(E) N_{ph}^2(1)} = \frac{1}{N_{ph}(E)} + \frac{N_{ph}(1)}{N_{ph}(E)} v_1^{int}. \end{aligned}$$

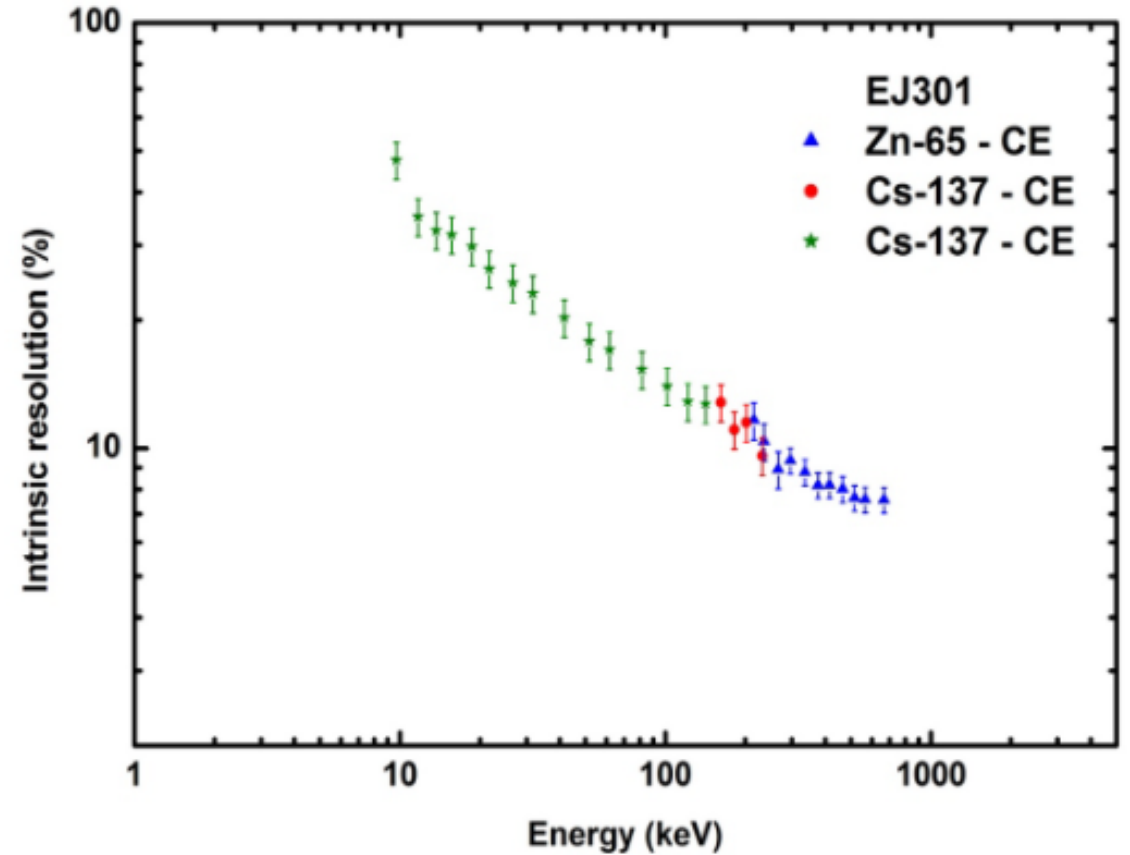
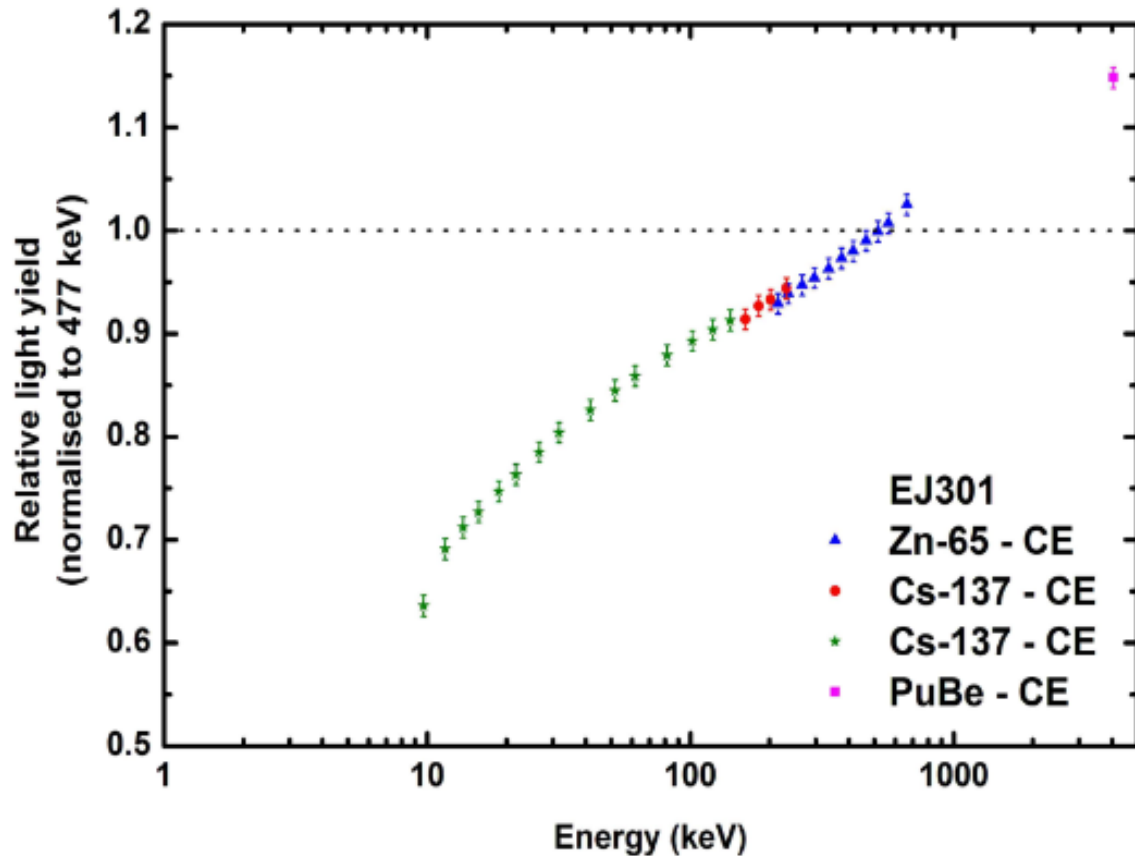
$$N_{ph} = LY_{ph} \cdot E \cdot f_{NL}(E, \dots), \quad Q = LY \cdot E \cdot f_{NL}(E)$$

$$v_1^{int} \equiv \frac{\delta_{N_{ph}}^2(1)}{N_{ph}^2(1)}$$

$$\begin{aligned} v(N_{ph}(E)) - \frac{1}{N_{ph}(E)} &= \frac{f_{NL}(1) \cdot LY_{ph} \cdot 1}{f_{NL}(E) \cdot LY_{ph} \cdot E} v_1^{int} = \\ &= \frac{LY \cdot f_{NL}(1)}{Q} v_1^{int} \equiv \frac{Q_1}{Q} v_1^{int}, \end{aligned}$$

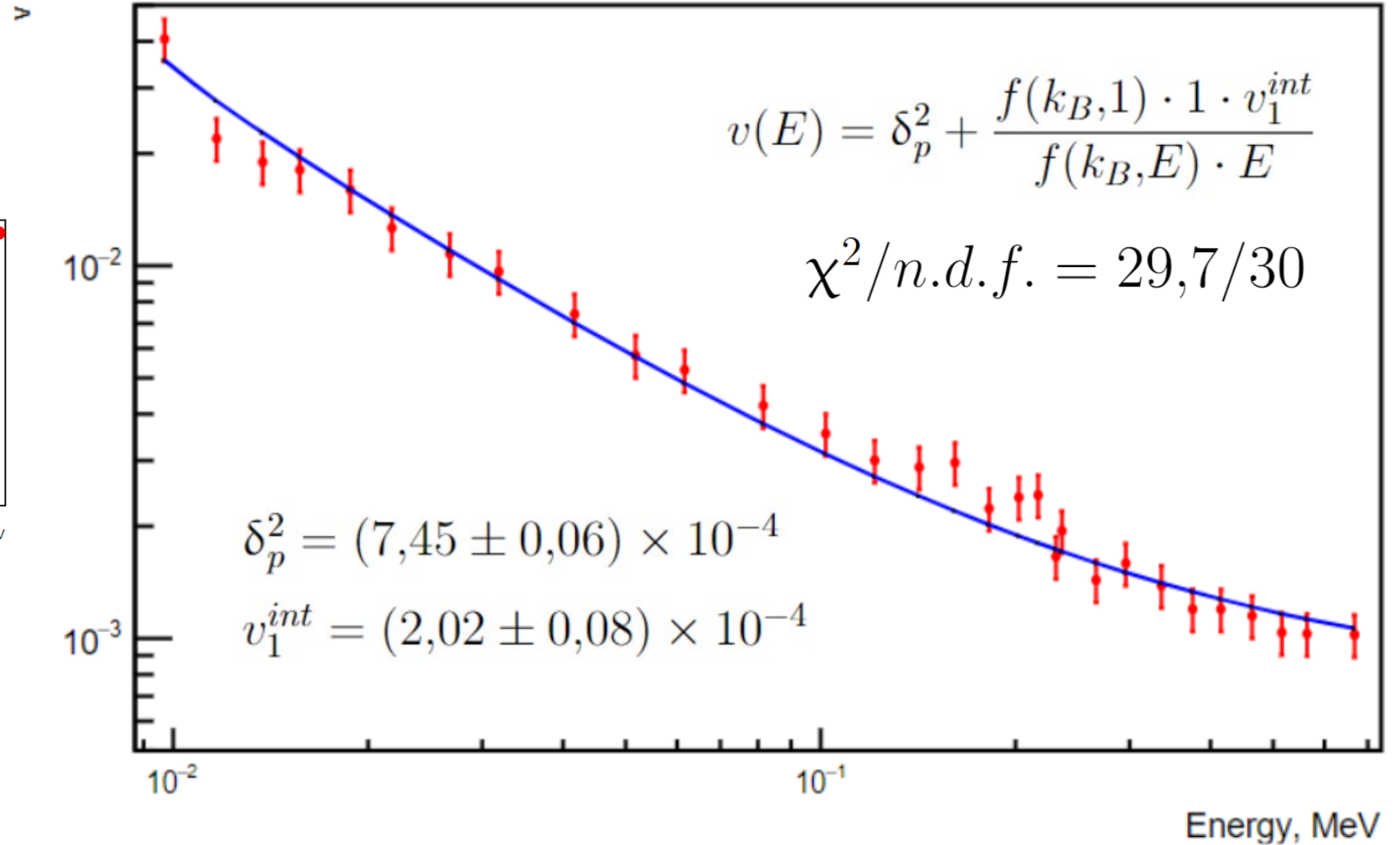
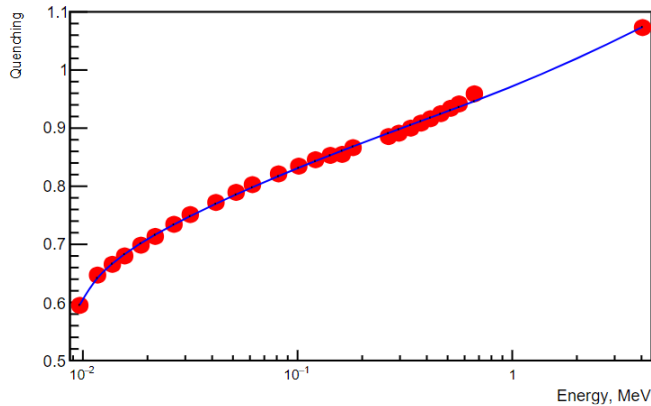
$$v_{int} \equiv \frac{Q_1}{Q} v_1^{int}$$

Прямое измерение

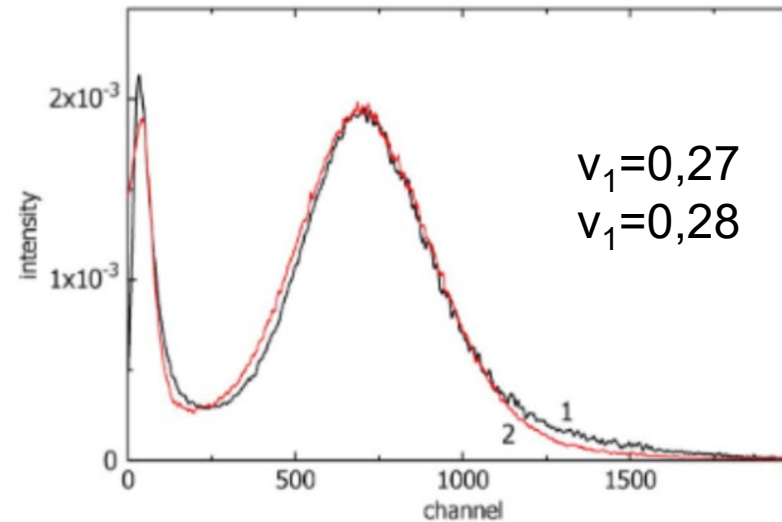
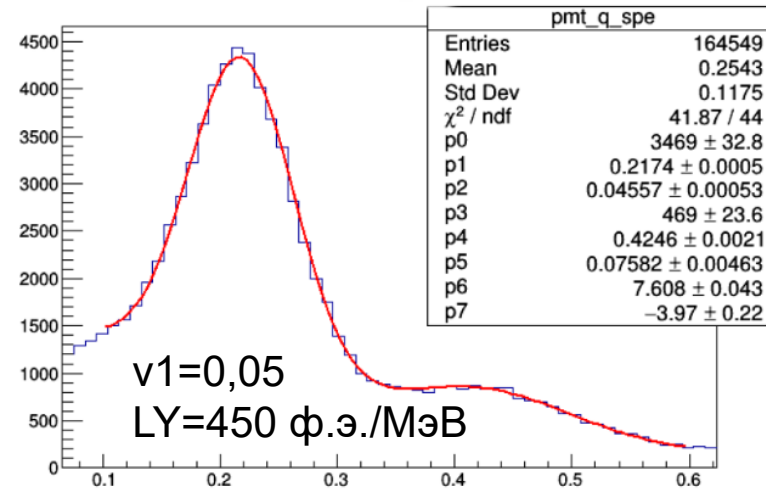
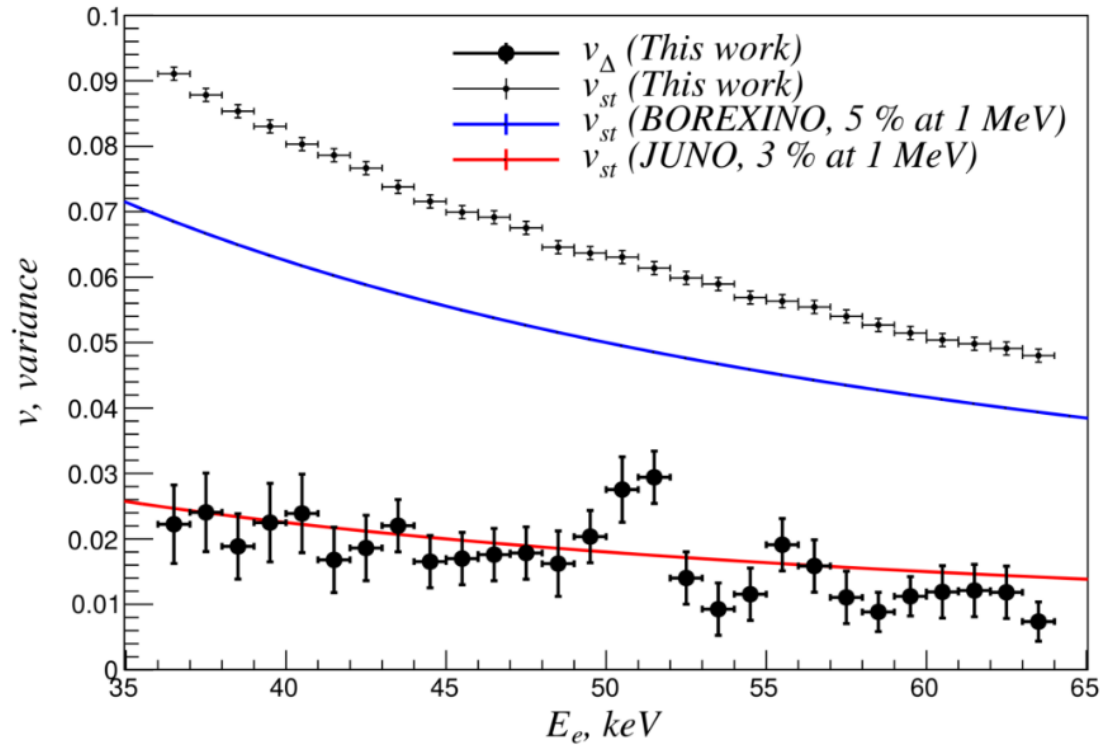


Авторы сознательно пренебрегли возможной неоднородностью светосбора δ_p^2 при представлении своих данных (этот факт подчёркивается в статье), то есть вариация сигнала в измерениях представляет собой сумму постоянной по энергии вариации светосбора и зависящего от энергии вклада собственного разрешения:

Подгонка данных



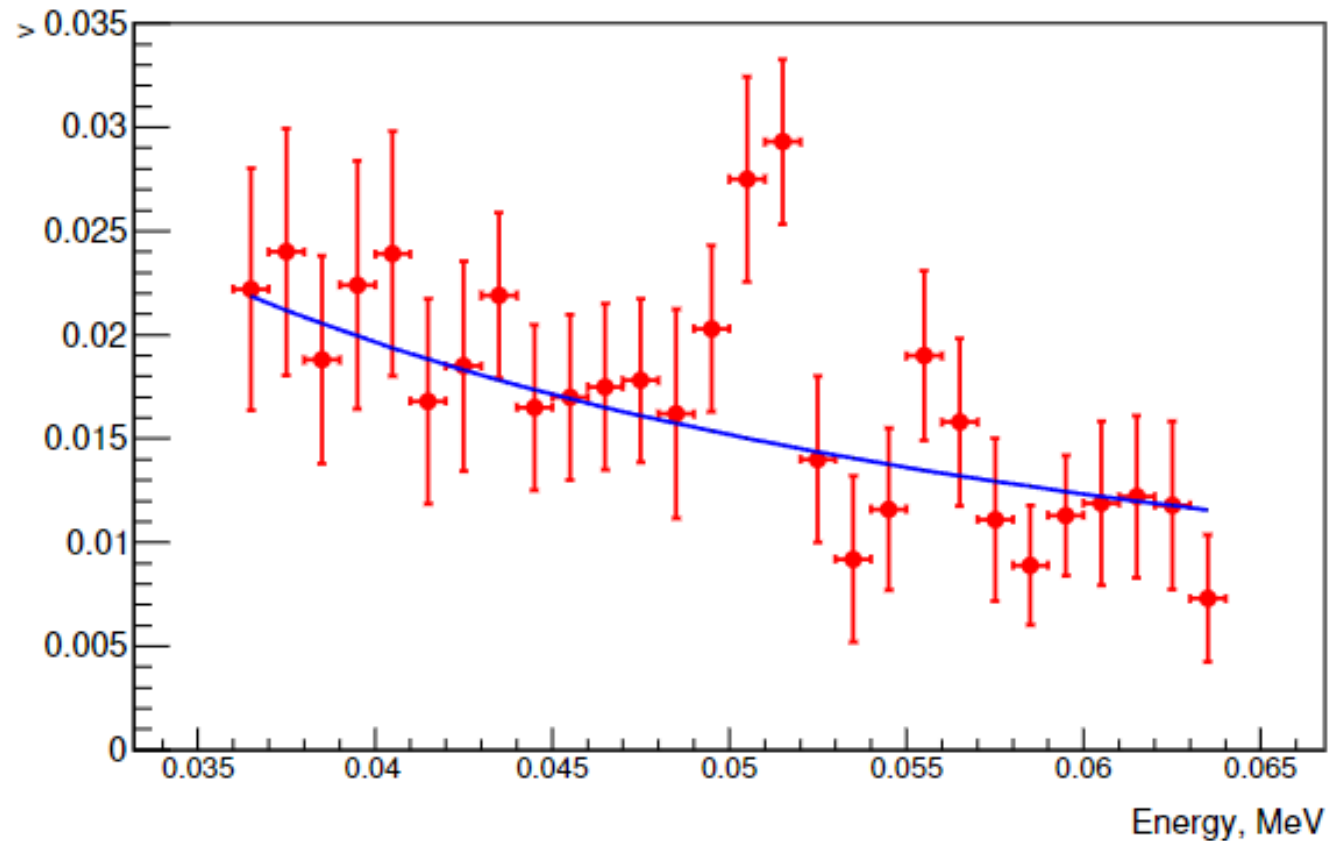
Еще один набор



Измерения энергетического разрешения на комптоновском спектрометре в диапазоне энергий 36-63~эВ из диссертации А.Формозова

Подгонка

$$v = v(p) + \frac{v_1 - 0,05}{450 \cdot E \cdot f(0,0196,E)} + \frac{v_1^{int}}{f(0,0196,E) \cdot E}.$$



$$v(p) = (0 \pm 31) \times 10^{-4};$$
$$v_1 = 0,24 \pm 0,01;$$
$$v_1^{int} = (1,9 \pm 0,4) \times 10^{-4}.$$

Borexino

$$\sigma_{int}^2 = N_{PMT}^2 \bar{p}_0^2 (e^{\mu_0 \mu_1 v_1^{int}} - 1)$$

Приближение для малых μ

$$\sigma_{int}^2 = 10^{-2} v(N) \cdot N.$$

$$v_1^{int} \simeq 10^{-2} \frac{v(N)}{Q_1}$$

$$v(N) = 11,5 \pm 1,0 \text{ [2019]}$$

$$v_1^{int} = (2,2 \pm 0,2) 10^{-4}$$

$$\sigma_{int} = 1,69 \pm 0,23 \text{ и } LY = 420,1 \pm 1,4 \quad \text{[2014]}$$

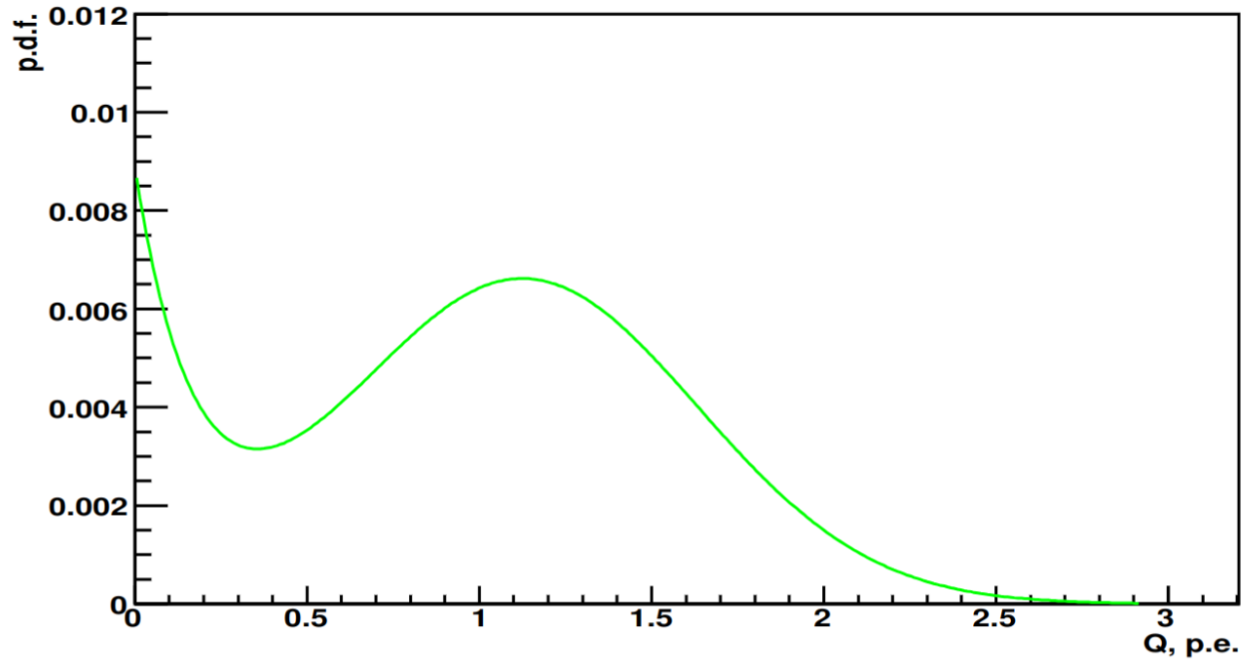
$$\sigma_{int}^2 = N Q_1 v_1^{int}$$

$$v_1^{int} \simeq (1,7 \pm 0,5) \times 10^{-4}$$

Все доступные данные

Источник	ЖОС	оригинальное значение	v_1^{int} $\times 10^{-4}$	$R_{int}(1 \text{ МэВ})$ %
Формозов [184]	LAB+1,5 г/л PPO	$35 < E < 65 \text{ кэВ}$	$1,9 \pm 0,4$	$1,4 \pm 0,15$
Денг [181]	LAB+2,5 г/л PPO + 3 мг/л бис-MSB	$1,83 \pm 0,06\%$ @ 0,976 МэВ	$3,3 \pm 0,2$	$1,82 \pm 0,06$
Свидерский [182]	EJ301 ($\text{C}_6\text{H}_4(\text{CH}_3)_2$)	$10 < E < 667 \text{ кэВ}$	$2,02 \pm 0,08$	$1,42 \pm 0,03$
Borexino [12]	PS + 1,5 г/л PPO	$v(N) = 11,5 \pm 1$	$2,2 \pm 0,2$	$1,5 \pm 0,1$
Borexino [186]	PS + 1,5 г/л PPO	$\sigma_{int} = 1,69 \pm 0,23$	$1,7 \pm 0,5$	$1,3 \pm 0,3$

Калибровка АЦП



$$q = \frac{adc - ped}{adc_1}, \quad c_i = \frac{\mu'_i}{\mu_i}$$

$$Q' = \sum_i^{N_{PMT}} \mu'_i = Q \cdot \frac{1}{N_{PMT}} \sum_i^{N_{PMT}} c_i s_i = Q \cdot c$$

$$\begin{aligned} \sigma_{Q'}^2 &= \sum_i^{N_{PMT}} \sigma_{\mu'_i}^2 = \sum_i^{N_{PMT}} \frac{(\mu'_i)^2}{\mu_i^2} \sigma_{\mu_i}^2 = \sum_i^{N_{PMT}} c_i^2 ((1 + v_{1_i})\mu_i + v(p)_i \mu_i^2 + \dots) = \\ &= \langle c_i^2 \rangle \sigma_Q^2 = c^2 (1 + v(c)) \sigma_Q^2. \end{aligned}$$

Дисперсия сигнала Q_{eq}

Брайтенбергер [1955], Райт [1954]

$$v(Q) \equiv \left(\frac{\sigma_Q}{Q} \right)^2 = \frac{1 + v_1}{Q} + v(p) + (1 + v(p)) \left[v(N_{ph}) - \frac{1}{N_{ph}} \right]$$

$$\sigma_{Q_{eq}}^2 = (1 + v(c)) \left[f_{eq} \cdot c \cdot (1 + v_1^{Det}) Q_{eq} + f_{eq} Q_1 v_1^{int} c (1 + v(p)) (1 + v(f_{Det})) Q_{eq} + v(f_{Det}) Q_{eq}^2 + f_{eq} \frac{v(p)}{N_{PMT}} (1 + v(f_{Det})) Q_{eq}^2 \right] + N_D \bar{q}_D (1 + \bar{v}_D) f_{eq}.$$

Сферическая симметрия детектора не нужна.

Дисперсия относительной чувствительности ФЭУ отсутствует, так как она включена в определение $v(f_{Det})$

Получены более точные выражения для N_{eq}

$$Q(E) = LY \cdot E \cdot f(k_B, E)$$

$$npmts = N_{Live} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{Q(E)}{N_{Live}}}}{1 + gc \cdot \frac{Q(E)}{N_{Live}}}$$

$$\overline{N_{pm}} \simeq N_{PMT} (1 - e^{-\bar{\mu}(1 - \frac{\bar{\mu}}{2} v(\mu))} (1 + p_t \bar{\mu})).$$

$$v(\mu) \equiv v(s) + \overline{v(p)} + (1 + \overline{v(p)}) \frac{\mu_1 f_G}{\bar{\mu}} v_1^{int} + v(f_{pm}) - \frac{\bar{\mu}}{3} a(f_{pm})$$

Сферически симметричный детектор

$$\sigma_N^2 = npmts \cdot (1 - \frac{npmts}{N_{Live}} (1 + v_1)) +$$

$$npmts^2 \cdot (v_T \cdot npmts \cdot (1 + v_f) + v_f) +$$

$$\sigma_{int}^2$$

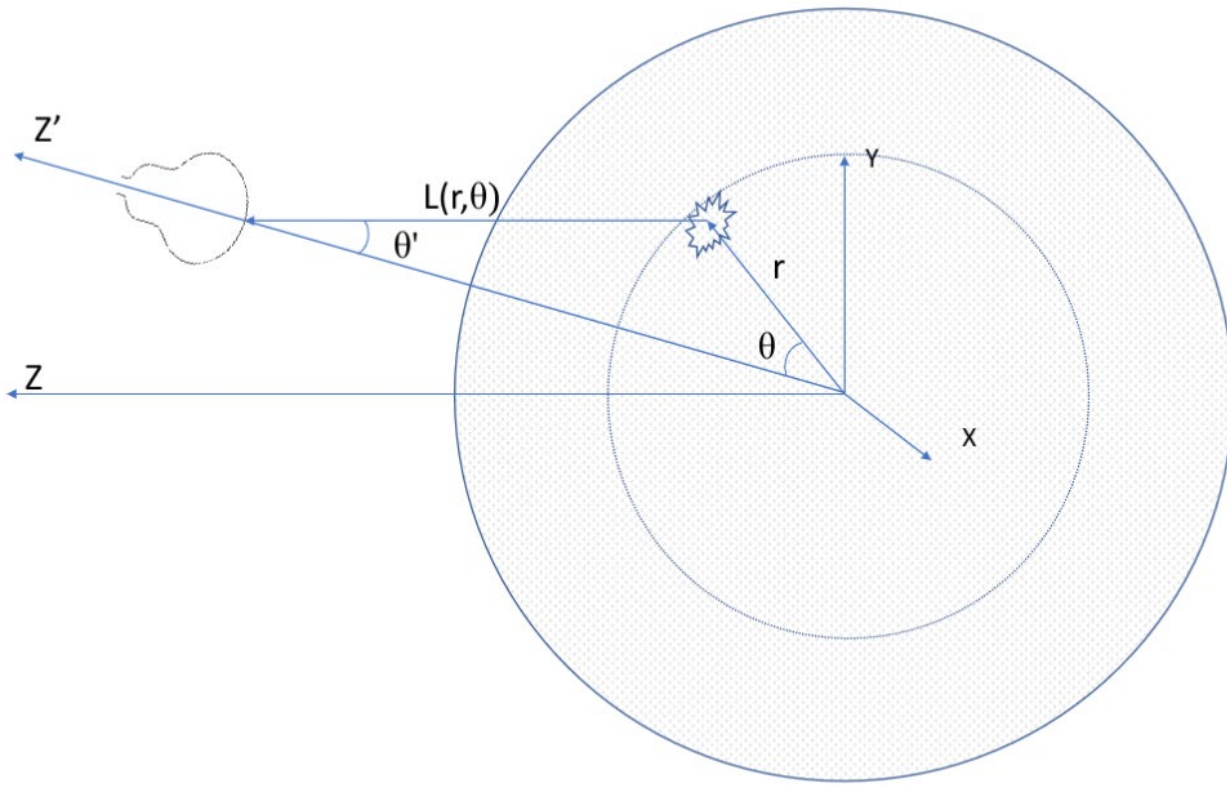
$$\sigma_{N_{eq}}^2 = f_{eq} \cdot N_{PMT} \bar{p}_0 [1 - \bar{p}_0 e^{\mu^2 v(\mu)} + N_{PMT} \bar{p}_0 [e^{\mu \mu_1 v_1^{int} + \mu^2 v(f_{Det})} - 1] \frac{1}{f_{eq}}] +$$

$$v_T^0 \cdot N_{eq}^3 \cdot \langle \frac{1}{f_{eq}} \rangle,$$

$$v(\mu) = \frac{\mu_1}{\bar{\mu}} v_1^{int} + \frac{\overline{v(p)}}{N_{PMT}} + v(s) + v(f_{Det}) + v(f) - \bar{\mu} a(f).$$

Быстрое моделирование сферического детектора

Готовый рецепт для МК

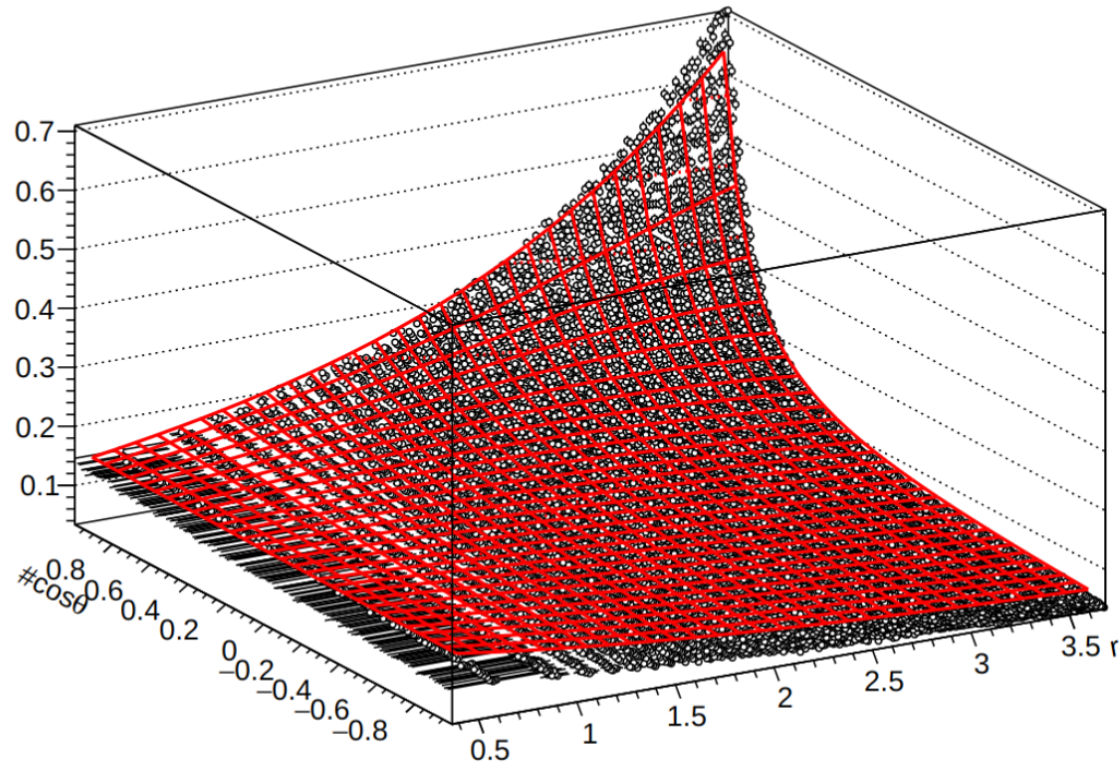


$$Q = \sum_i^{N_{PMT}} \mu_i = \sum_i^{N_{PMT}} \mu_0 s_i f_{pm}(r, \cos \theta_i) \text{ ф.э.},$$

$$f_{Det}(\vec{r}) \equiv \frac{Q(\vec{r})}{Q_0}$$

$$f_{Det}(\vec{r}) = \frac{1}{N_{PMT}} \sum_i s_i f_{pm}(r, \cos \theta_i)$$

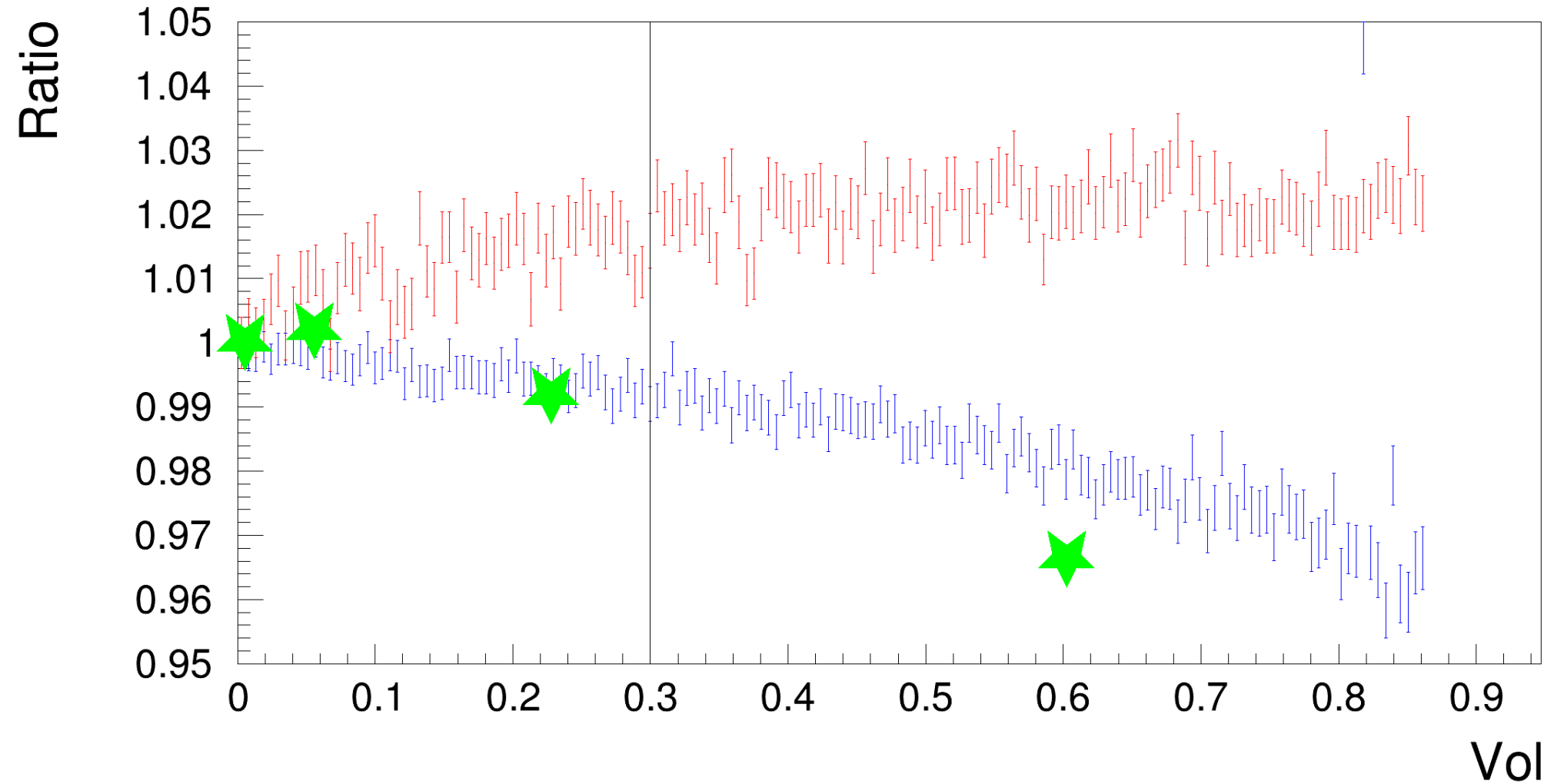
Карта светосбора : $f_{pm}(r, \theta)$



$$f_{pm}(r, \cos \theta) = f_0 \frac{L(r, \cos \theta)^2}{L_0^2} \cos^n \theta' (r, \theta) e^{-\frac{L(r, \cos \theta) - L_0}{L_{abs}}}$$

	f_0	n	$L_{abs}, \text{ м}$	χ^2
Данные, ФЭУ(К)	$0,113 \pm 0,001$	$1,544 \pm 0,004$	$18,46 \pm 0,06$	23507/23997
МК, ФЭУ(К)	$1,004 \pm 0,001$	$1,314 \pm 0,007$	$17,27 \pm 0,07$	22945/23998
Данные, ФЭУ(БК)	$0,0734 \pm 0,0001$	$1,24 \pm 0,01$	18,46 (фикс)	24116/23998
МК, ФЭУ(БК)	$0,978 \pm 0,002$	$0,94 \pm 0,02$	17,27 (фикс)	22675/23998

Сравнение полного и быстрого МК с данными



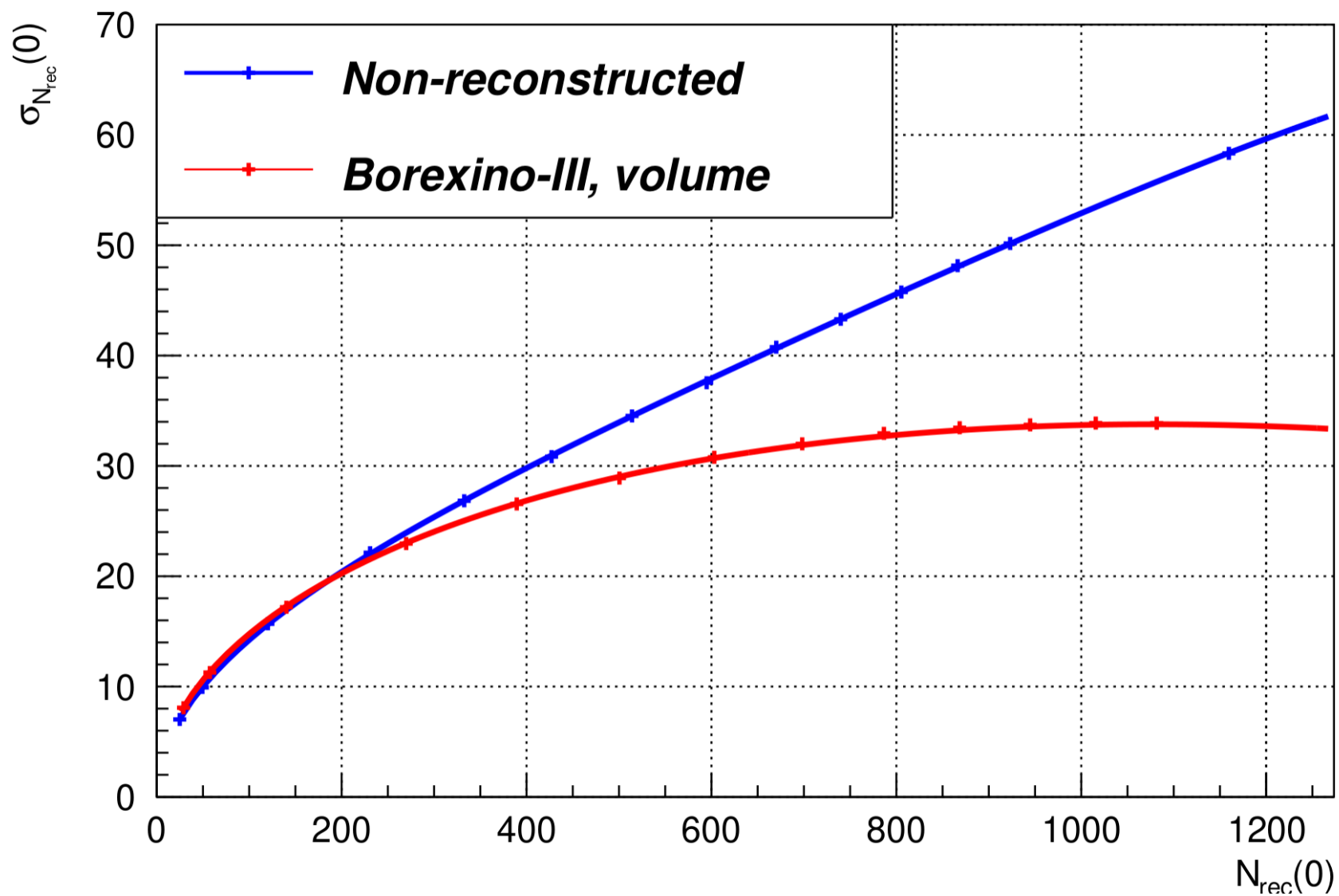
Компенсация пространственных эффектов

$$Q^{Rec} = f_{eq} \frac{Q(x,y,z)}{f_{Det}(\vec{r})}, \quad f_{Det}(\vec{r}) = \frac{1}{N_{equiv}} \sum_i s_i f_{pm}(r, \theta_i(\vec{r}))$$

$$N_{corr} = f_{nc}(\mu_0, \vec{r}) \cdot N^{eq}(\vec{r}) \quad f_{nc}(\mu_0, \vec{r}) \equiv \frac{\langle p_1 \rangle}{\langle p_1(\vec{r}) \rangle} = \frac{\sum (1 - e^{-s_i \cdot \mu_0})}{\sum (1 - e^{-s_i \cdot \mu_0} f_{pm}(r, \theta_i(\vec{r}))});$$

$$N^{Rec} = f_{nc}^{pt}(\mu_0, \vec{r}) \cdot N^{eq}(\vec{r}) \quad f_{nc}^{pt}(\mu_0, \vec{r}) \equiv \frac{\langle p_1^{th} \rangle}{\langle p_1^{th}(\vec{r}) \rangle} \simeq \frac{\sum (1 - e^{-s_i \cdot \mu_0} \cdot (1 + p_t \cdot s_i \cdot \mu_0))}{\sum (1 - e^{-s_i \cdot \mu_0} \cdot f_{pm}(r, \theta_i(\vec{r})) \cdot (1 + p_t \cdot s_i \cdot \mu_0 \cdot f_{pm}(r, \theta_i(\vec{r})))}$$

Пример



Многопараметрическая подгонка с использованием квазинезависимых эстиматоров

Параметры общие для Q и N

Параметр	Типичное значение	Статус	Оценка
A_0	575	0	
f_G	$\simeq 1,00$	0	МК
f_{eq}		1	расчёт
p_t	$0,12 \div 0,17$	1	измерения
$v(s)$	$4,5 \times 10^{-2}$	1	оценка
$v(p)$	2×10^{-2}	0	
$v_1(N)$	$(1,7 \div 3,3) \cdot 10^{-4}$	0	измерения
$v(f_{Det})$	$\simeq (4 \div 30) \cdot 10^{-4}$	0/1	МК
$E(^{210}\text{Po})$	$\simeq 400$ кэВ	0/1	
$v(^{210}\text{Po})$	$\simeq (4 \div 30) \cdot 10^{-4}$	0/1	
f_{511}	0,88	0	
$v(f_{511})$	$\simeq (2 \div 3) \cdot 10^{-4}$	1	
k_B	0,0109 см/МэВ	1	измерение
$f_{\check{c}}$	$\sim 1 \div 2$	0	

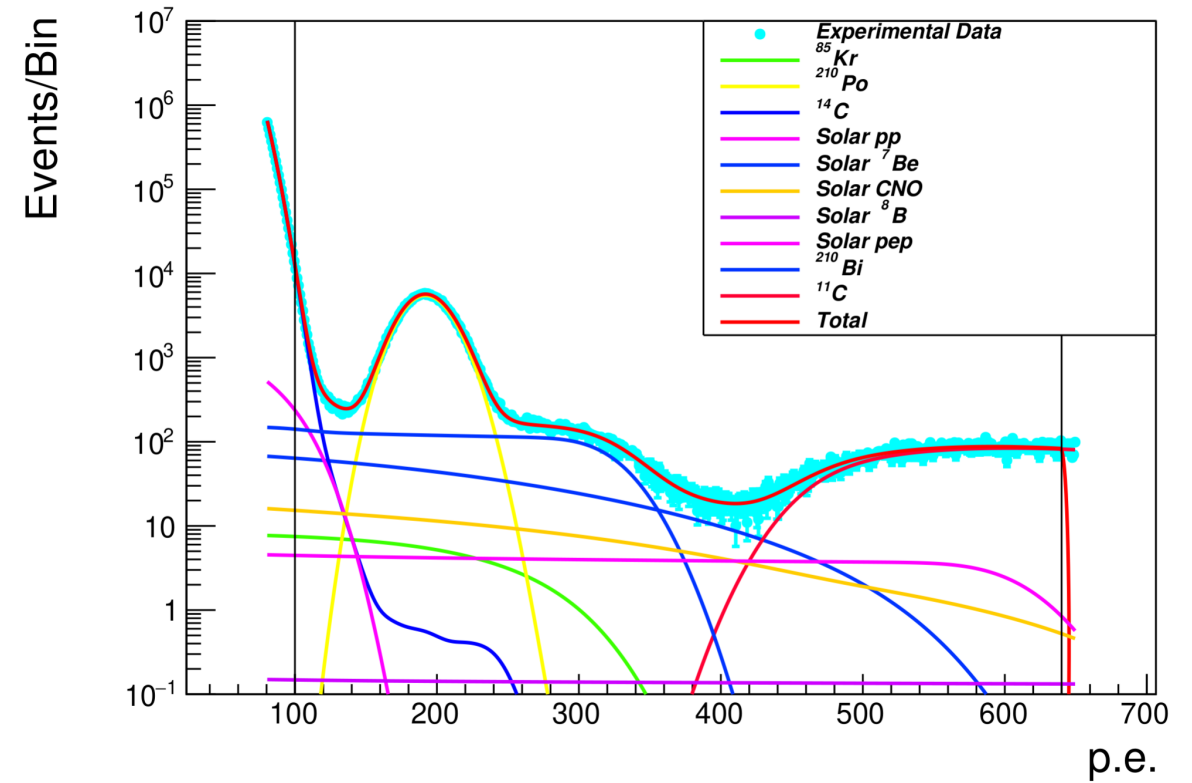
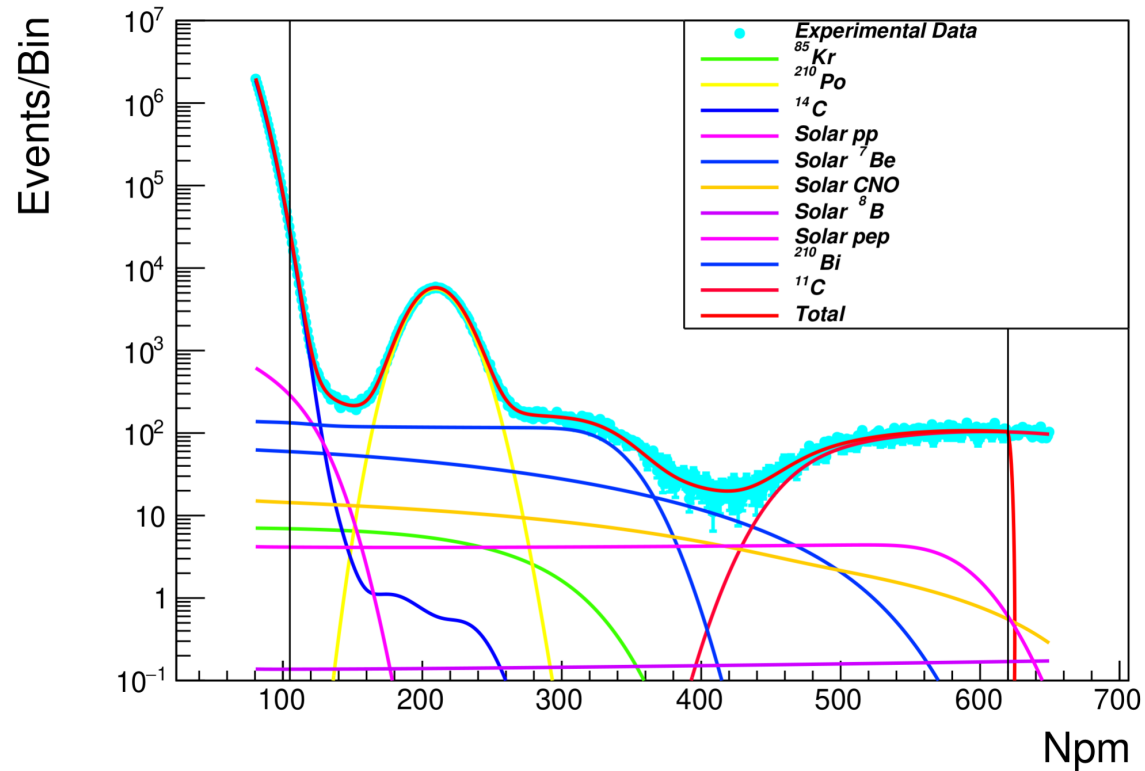
Специфичные параметры для Q или N

Параметр	Переменная	Типичное значение	Статус	Комментарий
c	Q	0,86	0	оценка
$v(c)$	Q	0,02	1	оценка
q_t	Q	$0,01 \div 0,02$	1	расчёт
v_1^{Det}	Q	0,34	1	оценка
$v(f_{pm})$	N	0,23	0/1	МК
$a(f_{pm})$	N	0,23	0/1	МК
v^T	N		0/1	МК
$\overline{f_{nc}}$	N^{Rec}	$\simeq 1,00$	0/1	

Спектры для квазинезависимых величин Q и N ведут себя как набор независимых данных

Многопараметрическая подгонка позволяет избавиться от корреляций между параметрами

Пример многопараметрической подгонки с использованием квази независи́мых эстиматоров



Заключение

1. Показана принципиальная достижимость чувствительности к солнечным pp-нейтрино для ЖС детектора;
2. В режиме реального времени измерен поток солнечных pp-нейтрино, составивший $(6,1 \pm 0,5^{+0,3}_{-0,5}) \times 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$;
3. В режиме реального времени измерен поток солнечных бериллиевых нейтрино, составивший $(4,99 \pm 0,11^{+0,06}_{-0,08}) \times 10^9 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ (для суммы по обеим линиям ${}^7\text{Be}$);
4. Из совместного анализа галлий-германиевых экспериментов и допустимых отклонений в спектрах солнечных бериллиевых и pp-нейтрино получен предел на эффективный магнитный момент нейтрино;
5. Разработаны модели, описывающие одноэлектронный зарядовый и временной спектры ФЭУ;
6. Предложена феноменологическая однопараметрическая модель, описывающая собственное разрешение ЖОС;
7. Измерена одна из самых низких в истории исследований концентраций ${}^{14}\text{C}$ с точностью ≈ 5 ;
8. Предложена аналитическая модель для параметризации эффекта ионизационного гашения и модель для параметризации вклада черенковского излучения;
9. Разработана детальная аналитическая модель для описания энергетического разрешения ЖС детектора с большим количеством ФЭУ включающая все возможные вклады в ширину отклика;
10. Идентифицирован вклад неточности калибровки АЦП в фотоэлектронах в энергетическое разрешение ЖС детектора;
11. Разработана аналитическая модель для описания формы отклика ЖС детектора на основе обобщённого гамма-распределения для зарядовых эстиматоров энергии;
12. Разработана аналитическая модель для описания формы отклика ЖС детектора на основе непрерывного масштабированного распределения Пуассона для эстиматоров энергии на основе количества сработавших ФЭУ в событии;
13. Предложена аналитическая модель для восстановления энергии по количеству сработавших ФЭУ;
- Разработана методика быстрого моделирования сферического ЖС детектора на основе карт светосбора для одного ФЭУ;
14. Сконструированы оптимальные эстиматоры энергии для неоднородного по светосбору сферического детектора в условиях сменяющимся во времени количеством работающих ФЭУ;
15. Предложена методика одновременного использования квазинезависимых эстиматоров энергии для спектральной подгонки;