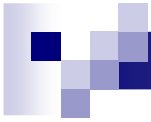




**Старые данные с «Бочки» в русле
возможной новой физики нейтрино:
верхний предел на дополнительные
тяжёлые состояния**

Владислав Пантуев, Александр Нозик и Ко



Рассуждения о возможном наличии дополнительных состояний нейтрино стали уже учебными

Particle Data Group

$$|\nu_l\rangle = \sum_j U_{lj}^* |\nu_j; \tilde{p}_j\rangle, \quad l = e, \mu, \tau,$$

If the number n of massive neutrinos ν_j is bigger than 3 due to a mixing between the active flavour and sterile neutrinos, one will have additional relations similar to that in Eq. (13.5) for the state vectors of the (predominantly LH) sterile antineutrinos. In the case of just one RH sterile neutrino field $\nu_{sR}(x)$, for instance, we will have in addition to Eq. (13.5):

$$|\bar{\nu}_{sL}\rangle = \sum_{j=1}^4 U_{sj}^* |\nu_j; \tilde{p}_j\rangle \cong \sum_{j=1}^4 U_{sj}^* |\nu_j, L; \tilde{p}_j\rangle, \quad (13.6)$$

where the neutrino mixing matrix U is now a 4×4 unitary matrix.

LEP experiments through the measurement of the invisible width of the Z boson $N_a = 2.9840 \pm 0.0082$

Yu.I. Izotov, T.X. Thuan, arxiv:1001.4440.

По распространённости ^4He на стадии ядерного синтеза во время большого взрыва эффективное число нейтрино должно быть увеличено:

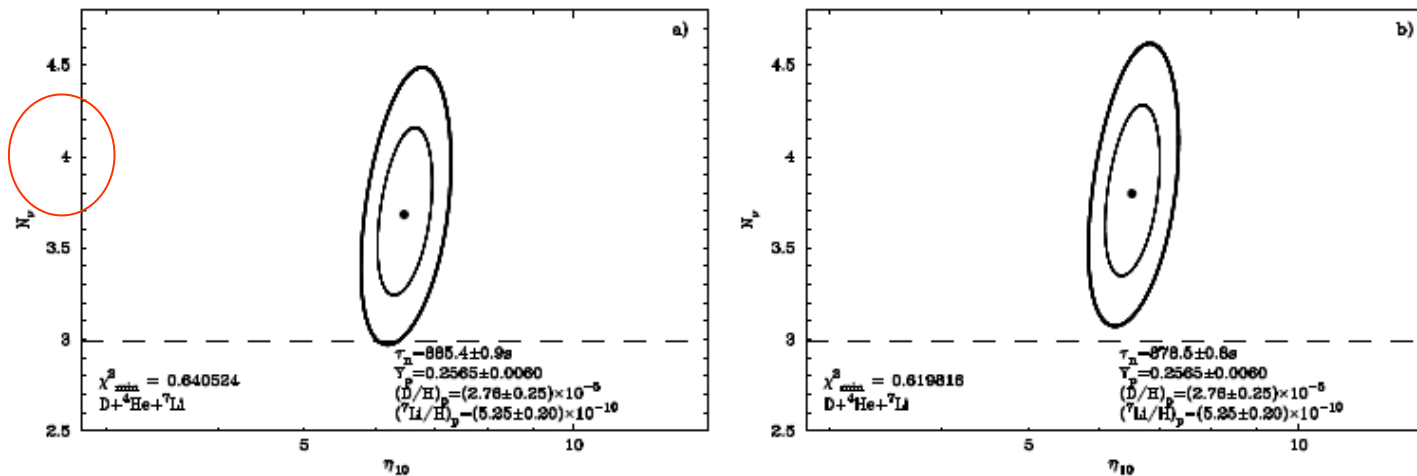


FIG. 2.— a) Joint fits to the baryon-to-photon number ratio, η_{10} , and the equivalent number of light neutrino species N_ν , using a χ^2 analysis with the code developed by Fiorentini et al. (1998). and Lisi et al. (1999). The value of the primordial He abundance has been set to $Y_p = 0.2565$ (this paper), that of $(D/H)_p$ is taken from Pettini et al. (2008) and that of $(^7\text{Li}/H)_p$ from 5yr WMAP measurements Dunkley et al. (2009). A neutron lifetime $\tau_n = 885.4 \pm 0.9\text{s}$ from Arzumanov et al. (2000) has been adopted. Thin and thick solid lines represent respectively 1σ and 2σ deviations. The experimental value $N_\nu = 2.993$ (Caso et al. 1998) is shown by the dashed line. b) The same as in (a), but with a neutron lifetime $\tau_n = 878.5 \pm 0.8\text{s}$ (Serebrov et al. 2005, 2008).

The Reactor Antineutrino Anomaly

G. Mention,¹ M. Fechner,¹ Th. Lasserre,^{1,2,*} Th. A. Mueller,³ D. Lhuillier,³ M. Cribier,^{1,2} and A. Letourneau³

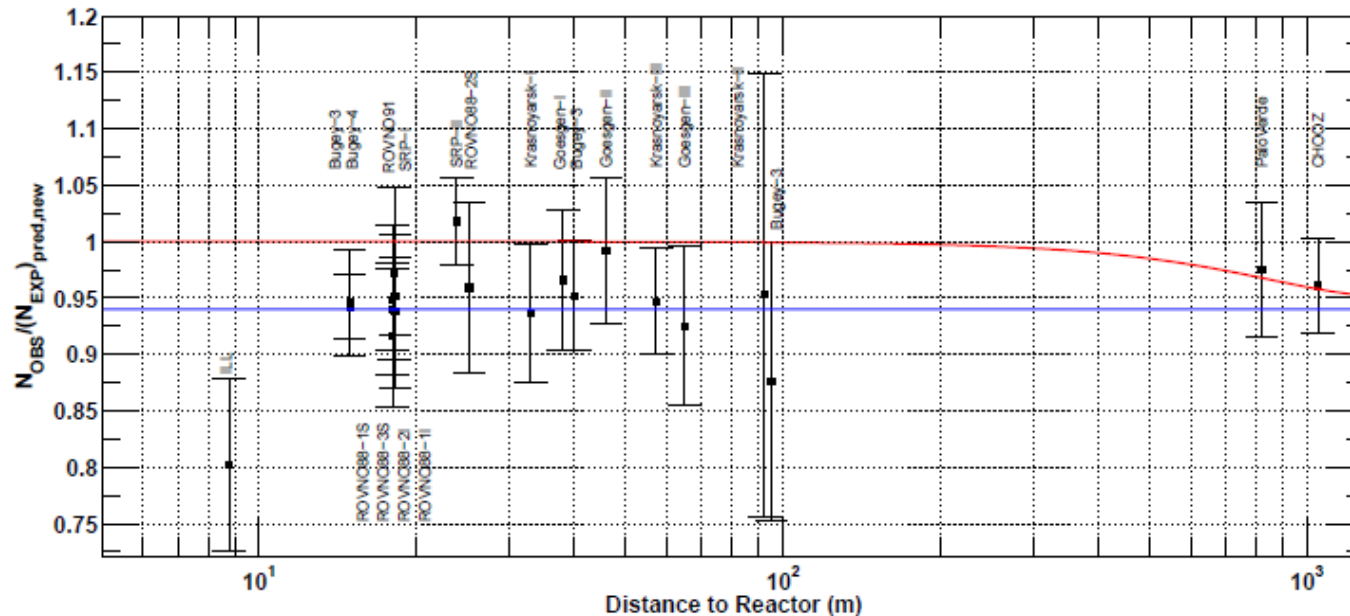
¹CEA, Irfu, SPP, Centre de Saclay, F-91191 Gif-sur-Yvette, France

²Astroparticule et Cosmologie APC, 10 rue Alice Domon et Léonie Duquet, 75205 Paris cedex 13, France

³CEA, Irfu, SPhN, Centre de Saclay, F-91191 Gif-sur-Yvette, France

(Dated: August 9, 2011)

Recently, new reactor antineutrino spectra have been provided for ^{235}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu , and ^{238}U , increasing the mean flux by about 3 percent. To a good approximation, this reevaluation applies to all reactor neutrino experiments. The synthesis of published experiments at reactor-detector distances < 100 m leads to a ratio of observed event rate to predicted rate of 0.976 ± 0.024 . With our new flux evaluation, this ratio shifts to 0.943 ± 0.023 , leading to a deviation from unity at 98.6% C.L. which we call the reactor antineutrino anomaly. The compatibility of our results with the existence of a fourth non-standard neutrino state driving neutrino oscillations at short distances is discussed. The combined analysis of reactor data, gallium solar neutrino calibration experiments, and MiniBooNE- ν data disfavors the no-oscillation hypothesis at 99.8% C.L. The oscillation parameters are such that $|\Delta m_{\text{new}}^2| > 1.5 \text{ eV}^2$ (95%) and $\sin^2(2\theta_{\text{new}}) = 0.14 \pm 0.08$ (95%). Constraints on the θ_{13} neutrino mixing angle are revised.



Hints for High $\Delta m^2 \sim 1 \text{ eV}^2$ Oscillation $\square$ Sterile Neutrinos? or Something Else?

• Positive indications:

- LSND/MiniBooNE $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ appearance signal
- MiniBooNE low-energy excess ($\nu_\mu \rightarrow \nu_e$?)
- Reactor disappearance anomaly ($\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_x$)
- Gallex-Sage reduced calibration source rate (ν_e disappearance?)

• Negative indications:

- CDHS and MiniBooNE restrictions on ν_μ disappearance
- MiniBooNE restrictions on ν_μ disappearance
- Karmen restrictions on $\nu_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$
- Other negative results

Experiments with $\Delta m^2 \sim 1 \text{ eV}^2$ sensitivity							
Positive indications				Negative indications			
		Channel	L/E (m/MeV)			Channel	L/E (m/MeV)
LSND (DAR) $\bar{\nu}_\mu$	Appear	$\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$	30 / [20-55]	Karmen2 (DAR) $\bar{\nu}_\mu$	Appear	$\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$	17 / [20-55]
LSND (DIF) ν_μ	Appear.	$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$	30 / [20-55]	MiniBooNE ν_μ	Appear.	$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$	541 / [475-1500]
MiniBooNE ν_μ (low En)	Appear	$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$	541 / [200-475]	MiniBooNE -NuMI ν_μ	Appear	$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$	745 / ~800
MiniBooNE $\nu_\mu \bar{\nu}_\mu$	Appear.	$\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$	541 / [200-3000]	Karmen ν_e	Disappear.	$\nu_e \rightarrow \nu_x$	17 / [20-55]
Gallium	Disappear	$\nu_e \rightarrow \nu_x$	1 / 0.75	MiniBooNE $\nu_\mu \bar{\nu}_\mu$	Disappear	$\nu_\mu \rightarrow \nu_x$	541 / [200-3000]
Reactor (new)	Disappear.	$\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_x$	[9-100] / 4	CDHS	Disappear.	$\nu_\mu \rightarrow \nu_x$	[130-885] / 1000
				Bugey	Disappear.	$\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_x$	[15-95] / 4
				Chooz	Disappear.	$\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_x$	1050 54

Предлагается также вводить несколько стерильных нейтрино...

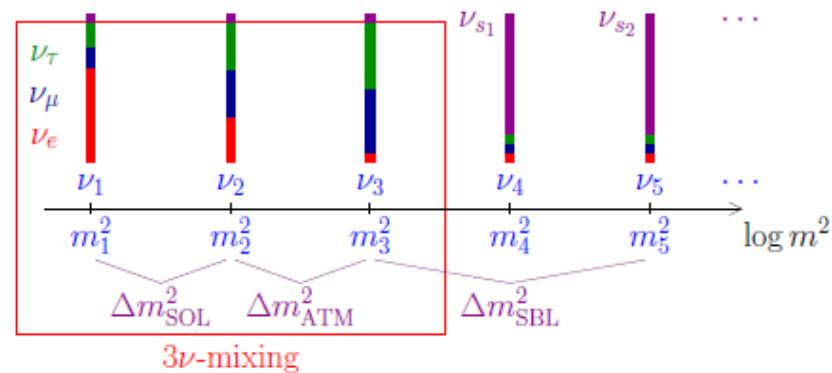


Figure 1. Schematic description of the neutrino spectrum beyond three-neutrino mixing with one or more relatively heavy additional massive neutrinos which are mainly sterile.

Carlo Giunti, arxiv:1110.3914

Смешивание в случае существования стерильных нейтрино

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} & U_{e \text{ sterile}} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} & U_{\mu \text{ sterile}} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} & U_{\tau \text{ sterile}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \\ \nu_{\text{sterile}} \end{pmatrix}$$

$$\text{sterile neutrino: } U_{e \text{ sterile}}, U_{\mu \text{ sterile}}, U_{\tau \text{ sterile}} \ll 1$$

for $m(\nu_1) \approx m(\nu_2) \approx m(\nu_3)$:

$$\nu_e = \cos^2(\theta) \nu_{1,2,3} + \sin^2(\theta) \nu_{\text{sterile}}$$

Попытка использовать наши данные для оценки ограничений на стерильные нейтрино:

Carlo Giunti and Marco Laveder, arxiv:1005.4599

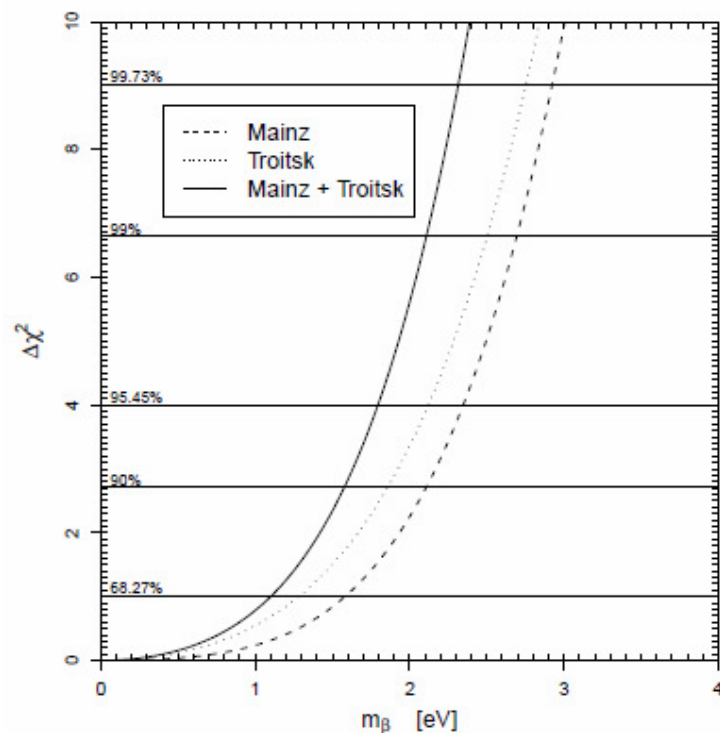
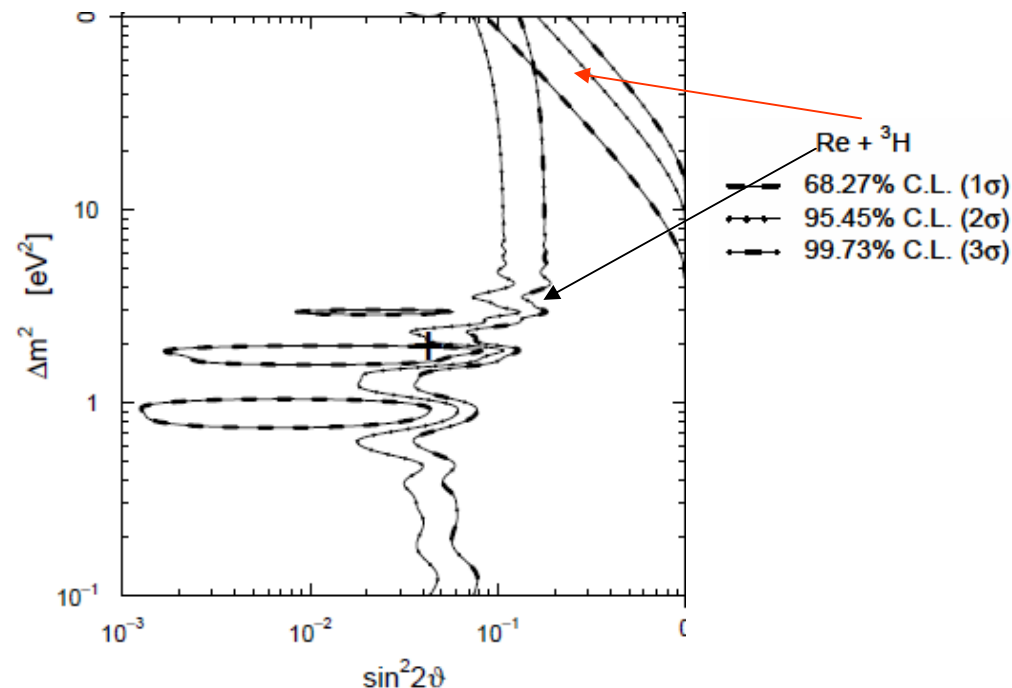


FIG. 5. $\Delta\chi^2$ as a function of m_β . The horizontal lines correspond to the indicated value of confidence level. The dashed and dotted lines have been obtained, respectively, from the results in Eqs. (20) and (21) of the Mainz and Troitsk Tritium β -decay experiments. The solid line is the result of the combined fit.



Сопоставление
реакторных данных и по
распадам трития

Мы заявляли о проблеме стерильных нейтрино ещё в марте 2011....

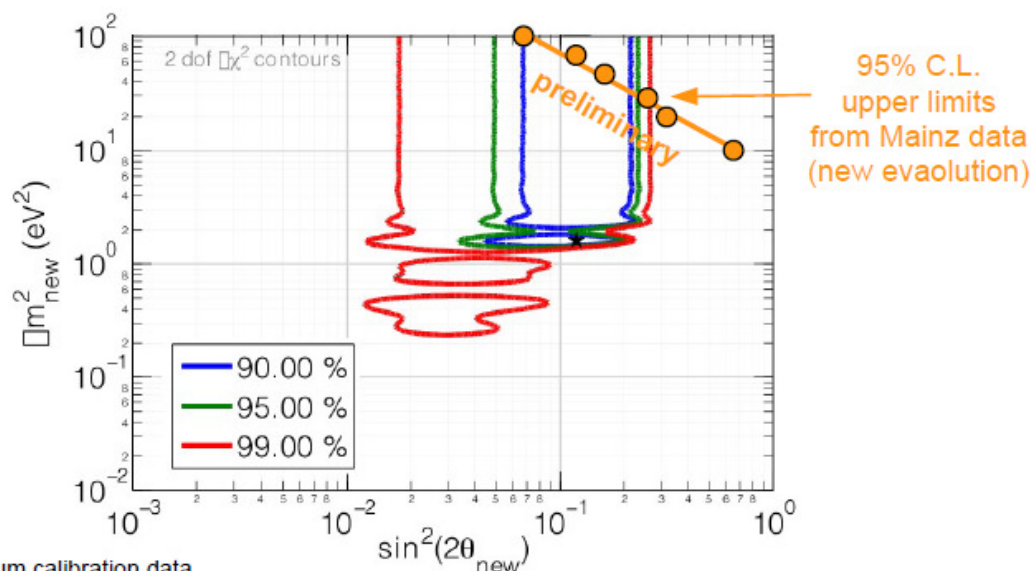
Майнц уже проводит обработку своих старых
спектров: октябрь 2011:



Sterile neutrino limits from the Mainz Neutrino Mass Experiment

Do same analysis (same data sets, same programs, same way to treat systematic uncertainties)
on Mainz phase 2 data as in Ch. Kraus et al., *Euro. Phys. J. C*40 (2005) 447
now only small mass region with more fits and a bit different evaluation program

Слайд с выступления
Christian Weinheimer
на коллаборационном
митинге KATRIN,
октябрь 2011

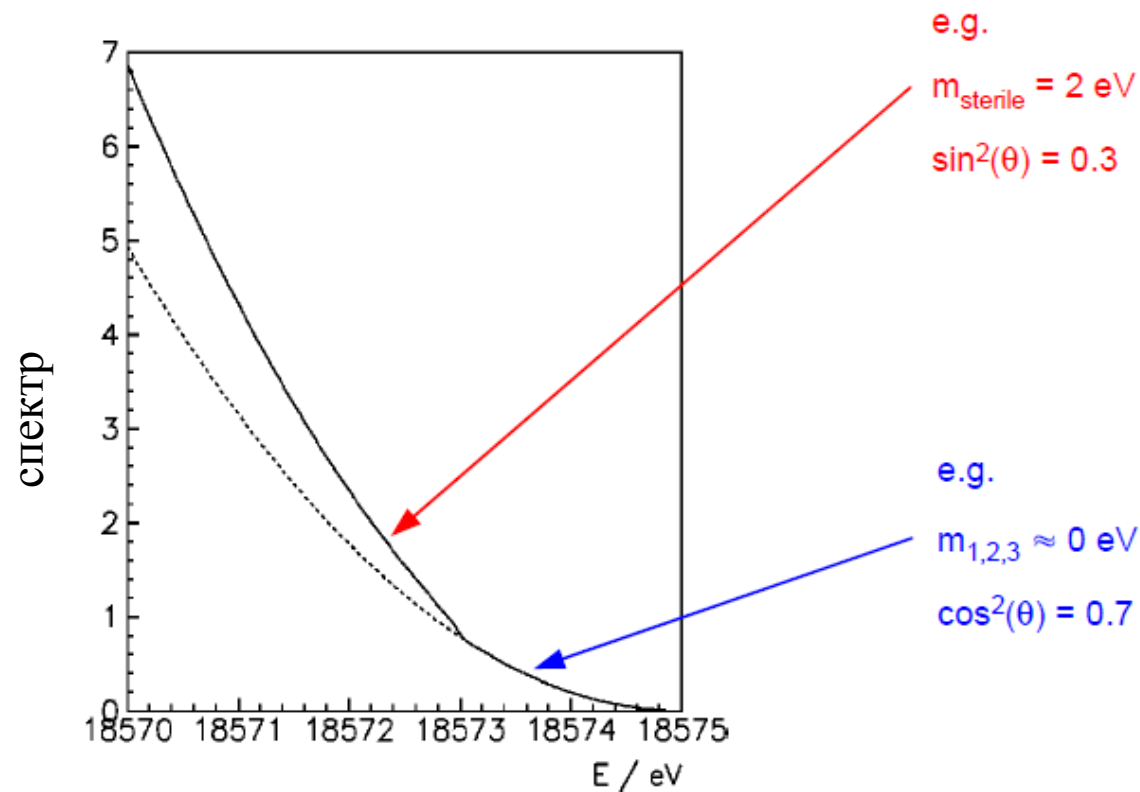


reactor + gallium calibration data
from G. Mention et al., arXiv:1101.2755

(work by Ch. Kraus, A. Singer, K. Valerius, ChW)

Как проявится в бета-спектре распада трития

$$dN/dE = K F(E,Z) p E_{\text{tot}} (E_0 - E_e) \left(\cos^2(\theta) \sqrt{(E_0 - E_e)^2 - m_{1,2,3}^2} + \sin^2(\theta) \sqrt{(E_0 - E_e)^2 - m_{\text{sterile}}^2} \right)$$

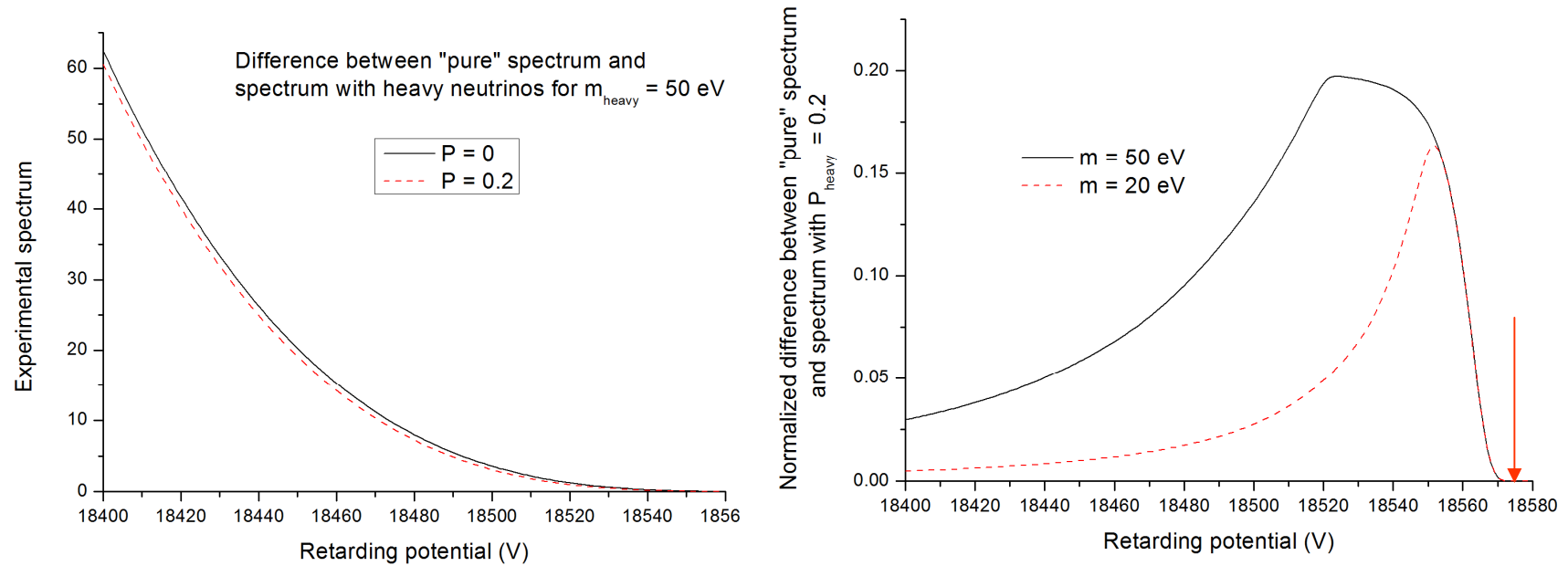


Для фита определяем $m_{123} = 0$

добавляем два параметра:

m_{heavy} и примеси $P_{\text{heavy}} = \sin^2 \theta$

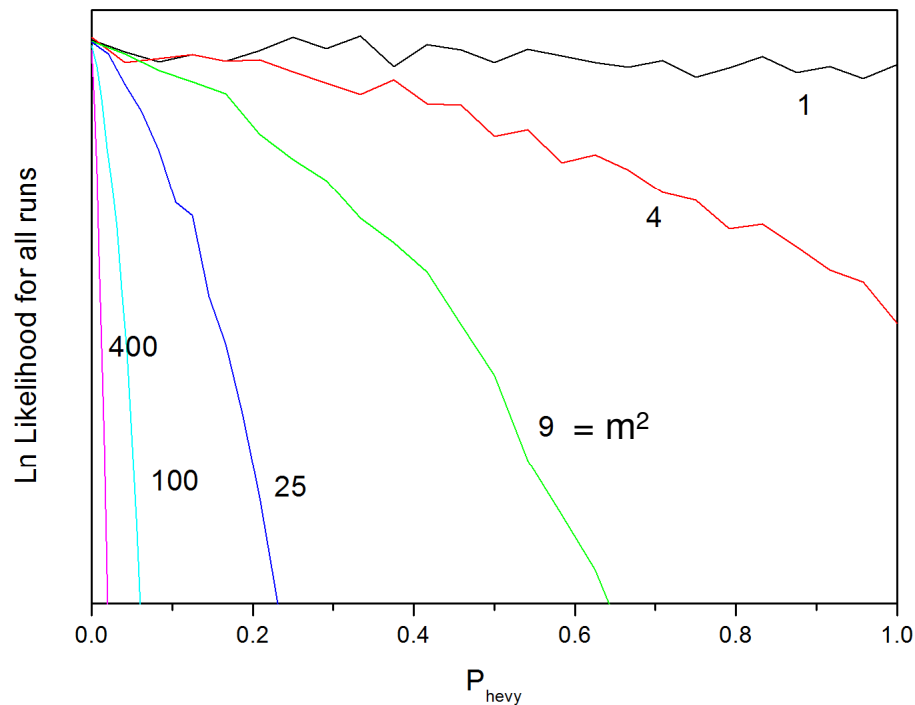
Проверка симулированием:



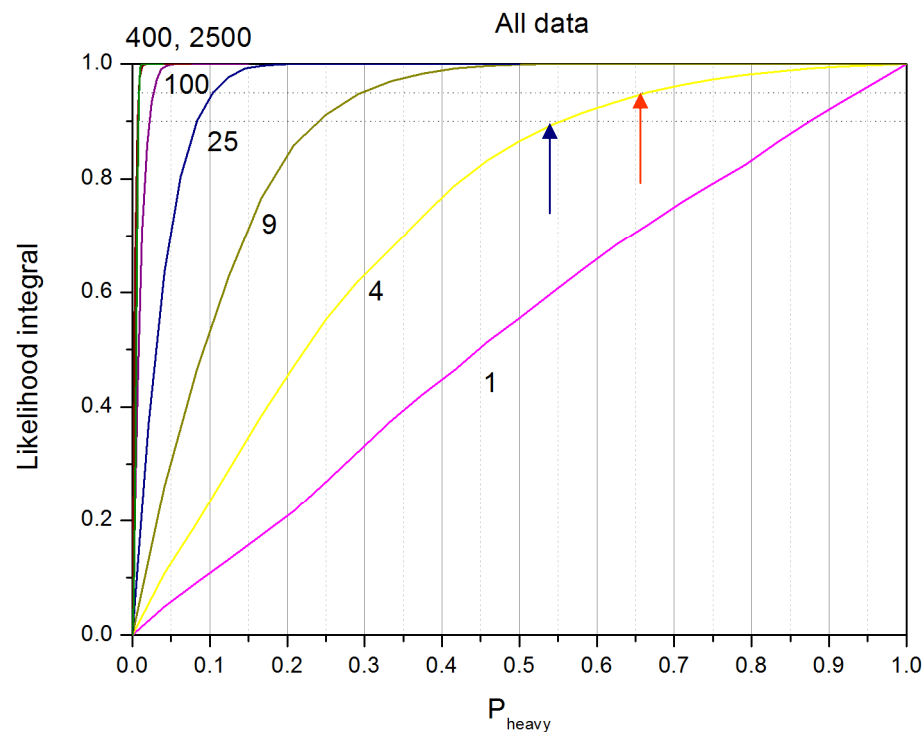
1. Для каждого сеанса при фиксированном значении m_{heavy} строилась функция правдоподобия по P_{heavy} .
2. Суммарная функция правдоподобия вычислялась как произведение функций правдоподобий отдельных сеансов.

$$L_i(P_{\text{heavy}}) = \int L(X_i | P_{\text{heavy}}, N, bkg, E_0) dN d(bkg) dE_0$$

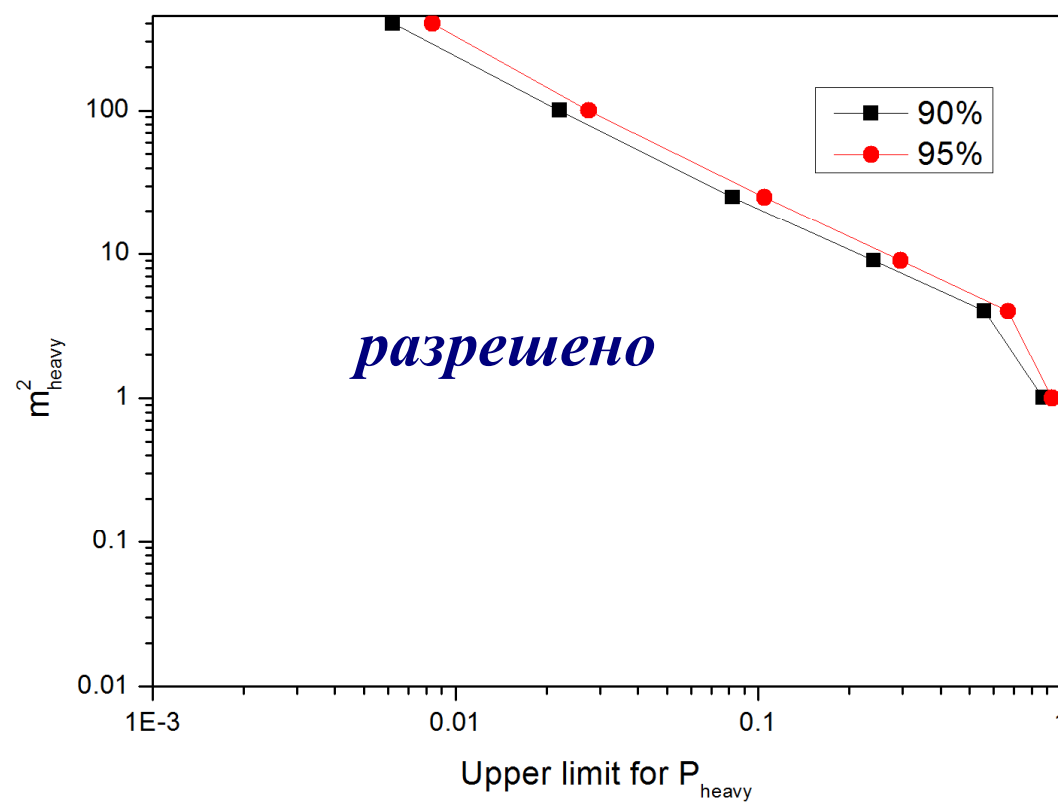
$$L(P_{\text{heavy}}) = \prod_i L_i(P_{\text{heavy}})$$



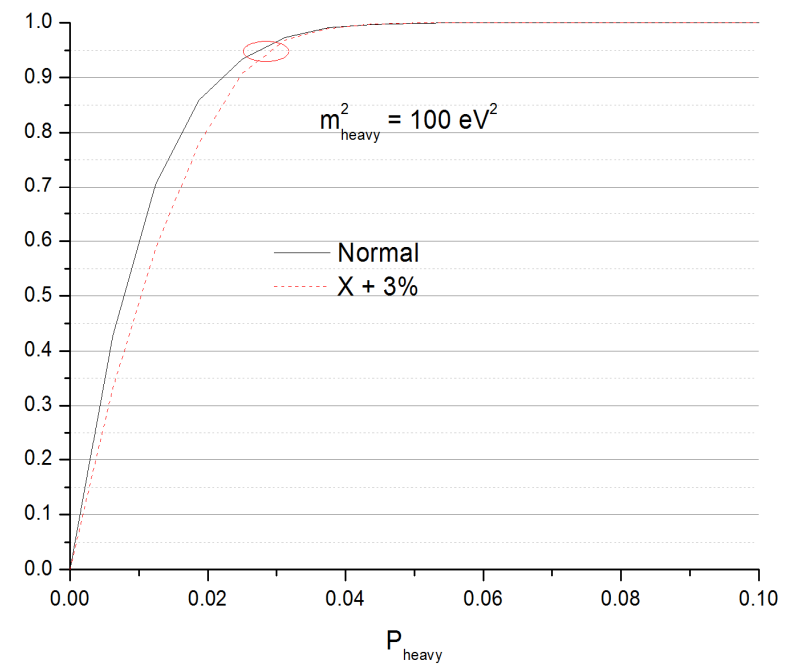
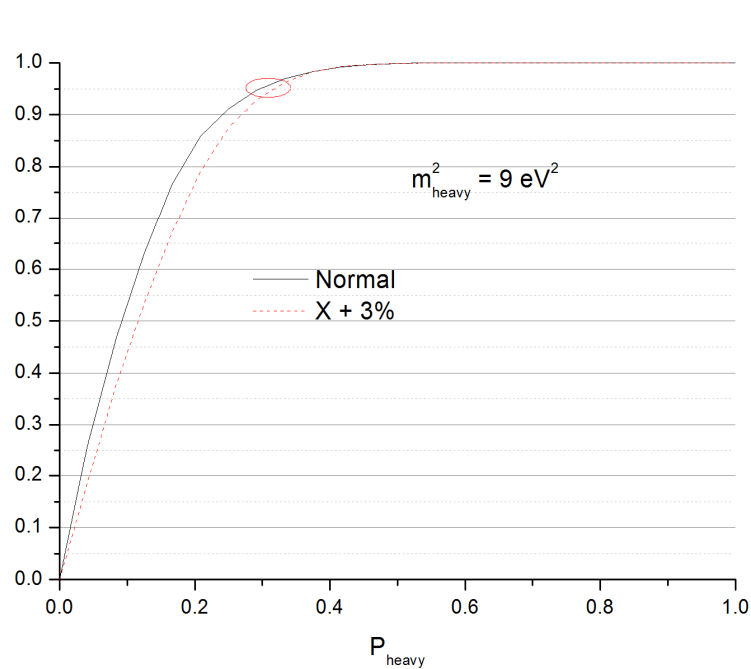
Интегрируется функция правдоподобия до значений 90% и 95%.
Получаем значения верхней границы **вероятной примеси**
тяжёлого нейтрино



Получаем разрешённую область значений массы и примеси

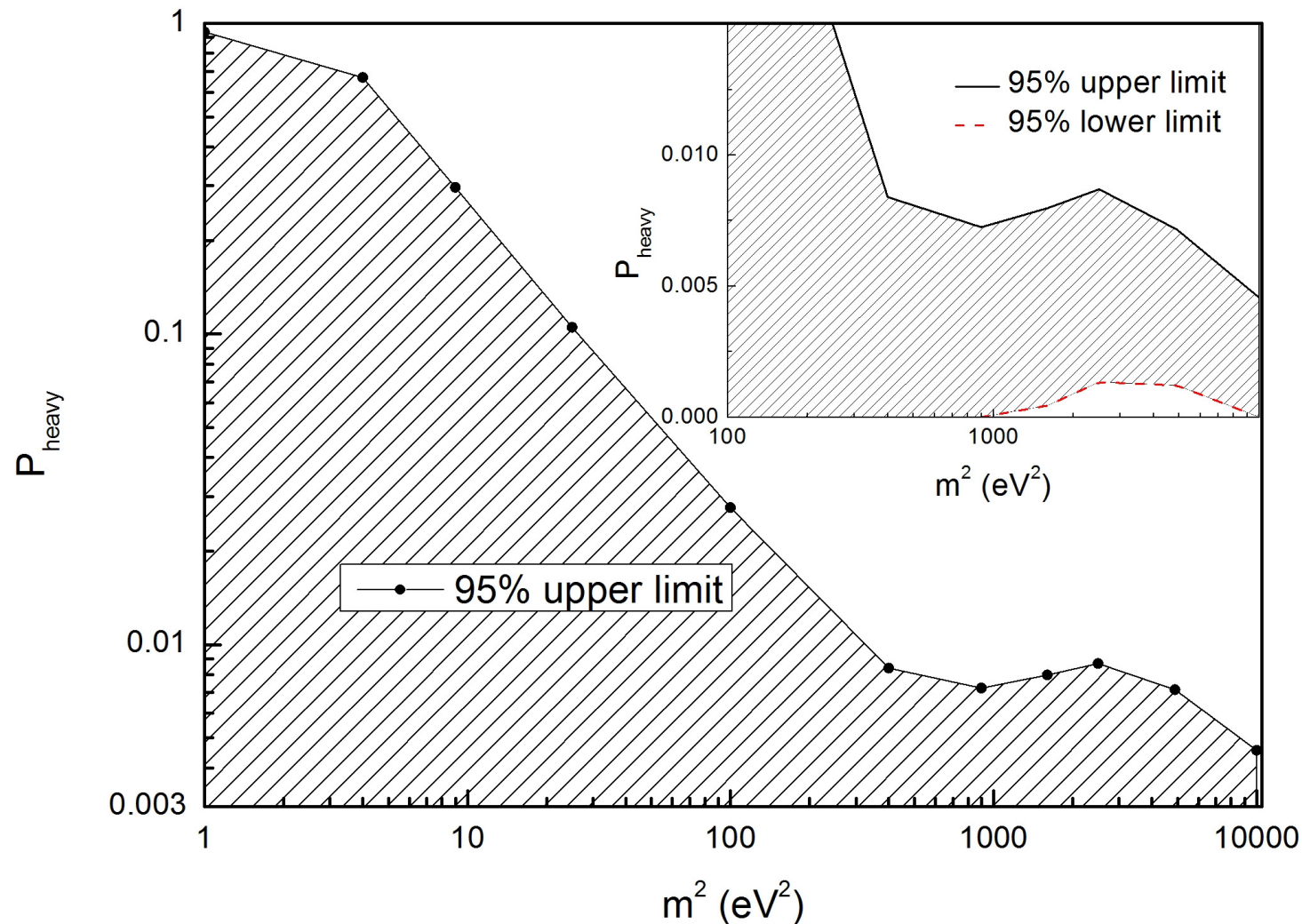


Оценка погрешностей

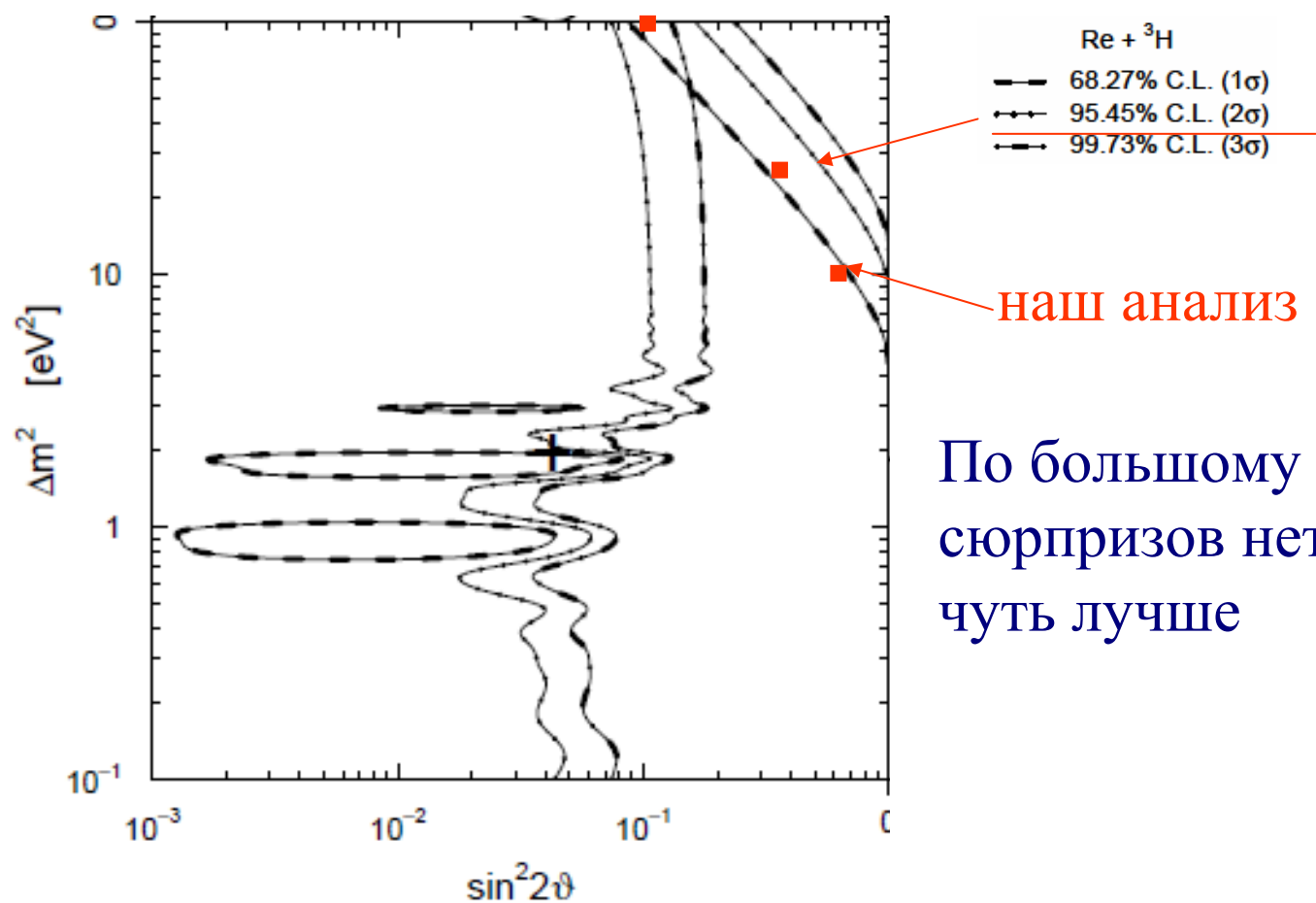


Основная погрешность в оценке толщины/количества вещества в тритиевом источнике. Для предела в 95% её влияние несущественно

Наш результат на верхнюю границу вероятности примеси для разных масс

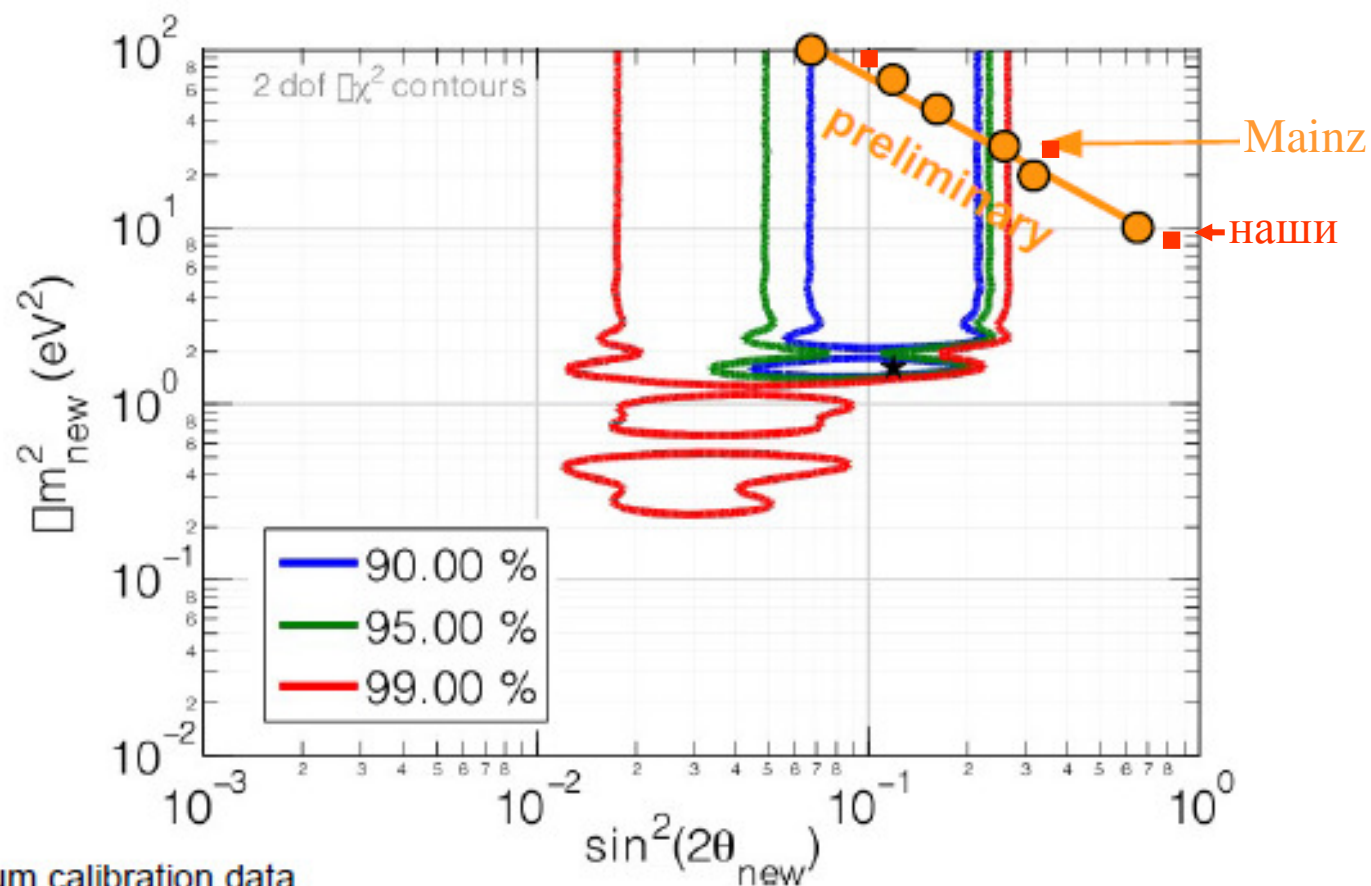


Сравнение *Carlo Giunti* с нашим результатом



По большому счёту,
сюрпризов нет, у нас
чуть лучше

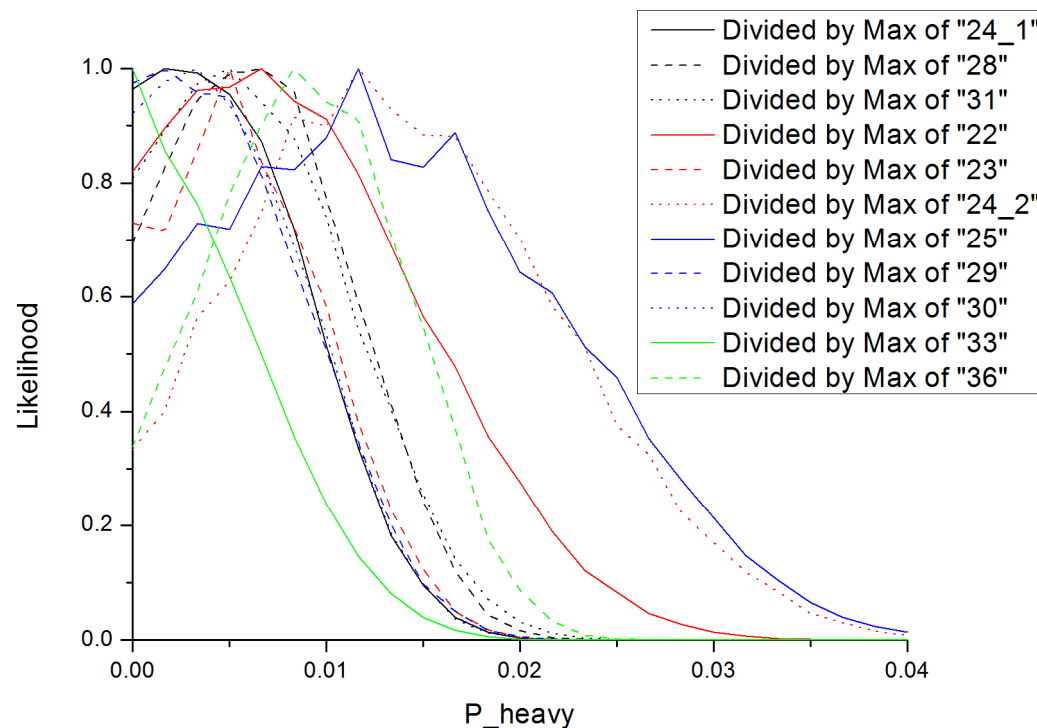
Сравнение с обработкой в Mainz



reactor + gallium calibration data
from G. Mention et al., arXiv:1101.2755

... очень близко

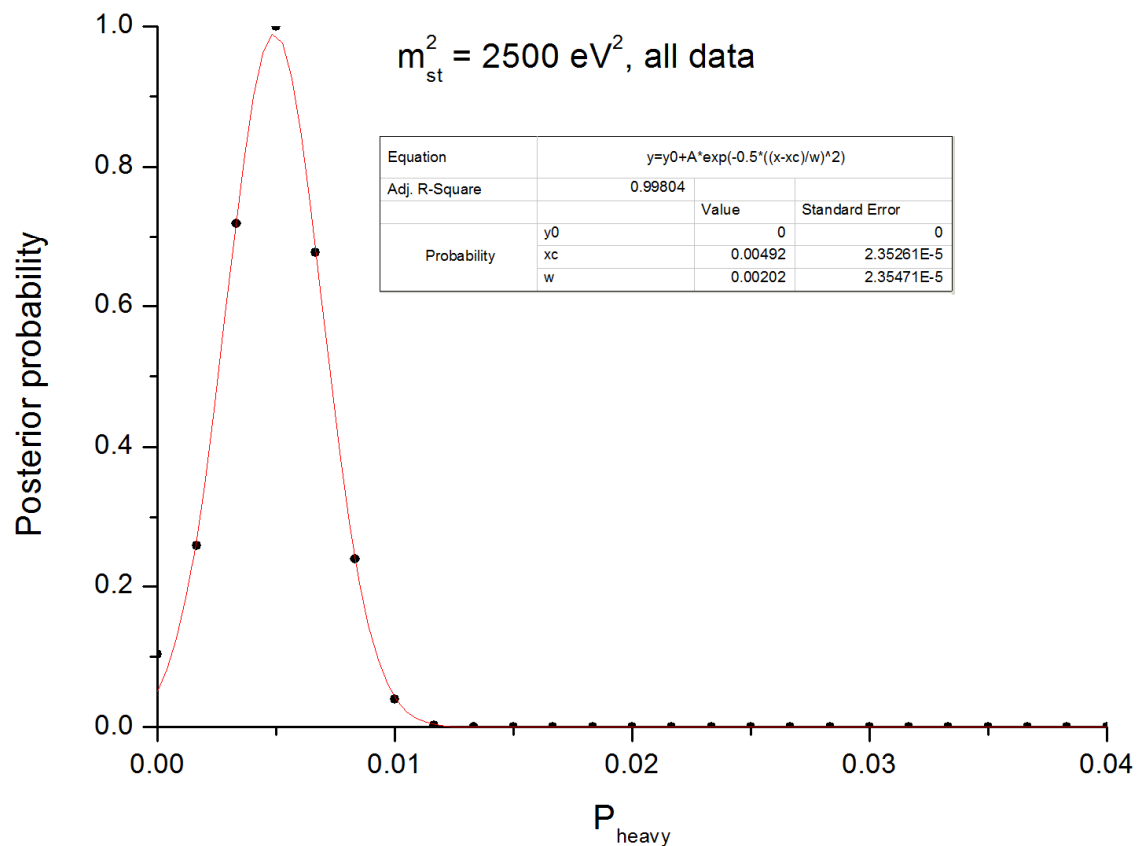
Проблема при массе около 50 эВ:
функции правдоподобия не стремятся в ноль, а дают
значимое значение P_{heavy}



Функция ПП для
разных сеансов
при $m_{\text{heavy}}=50$ эВ

Уменьшение толщины источника только усиливает эффект

Суммирование по всем файлам:



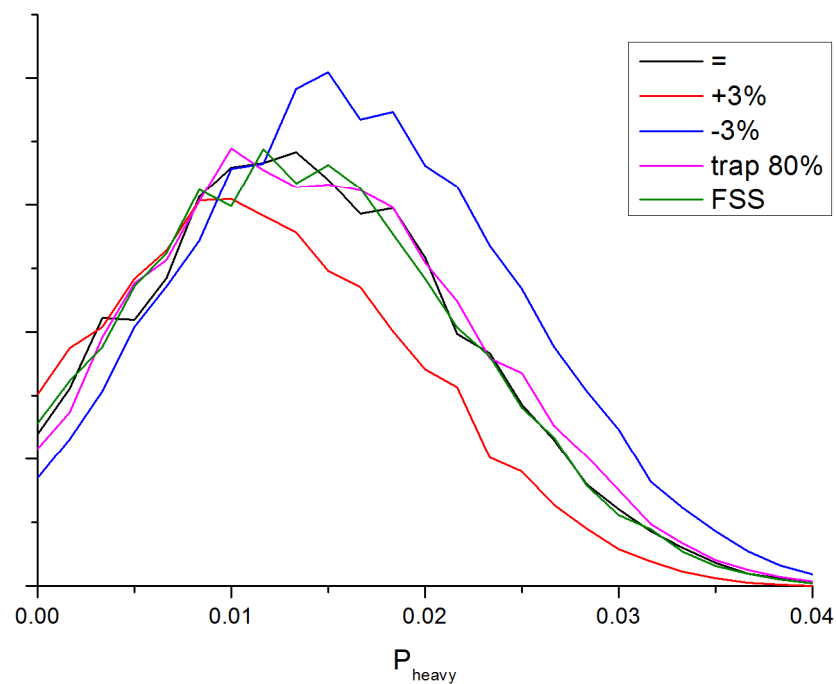
На уровне нашей чувствительности появление такого вклада не влияет на **опубликованную** оценку квадрата массы электронного нейтрино

Проверки на влияние:

толщины источника,

треппинг электронов в источнике,

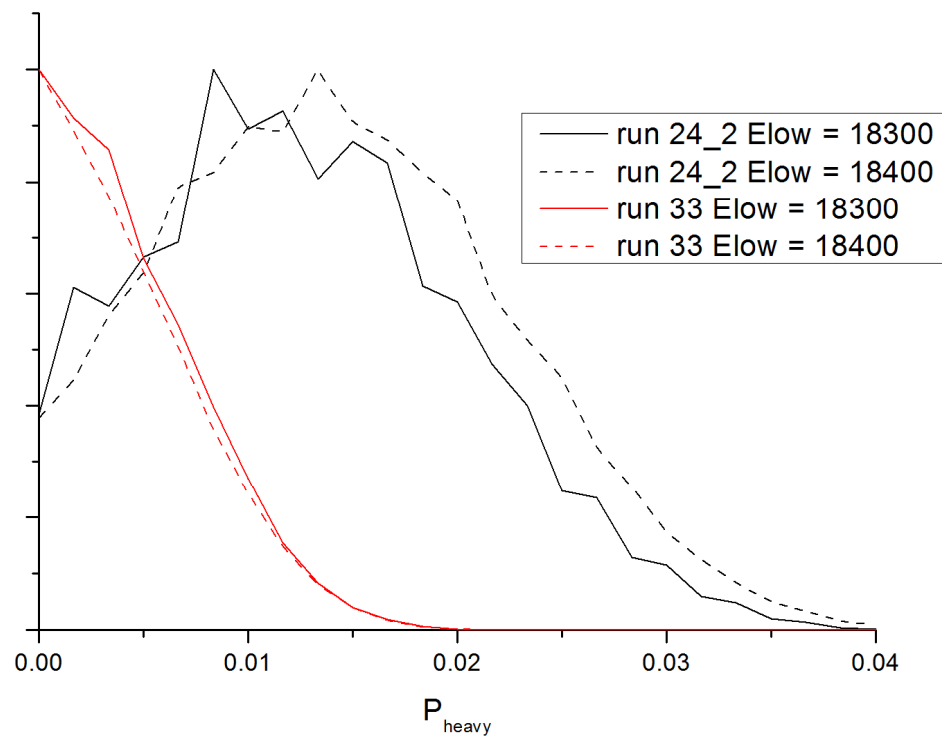
спектр конечных состояний (FSS) дочерней молекулы T^3He



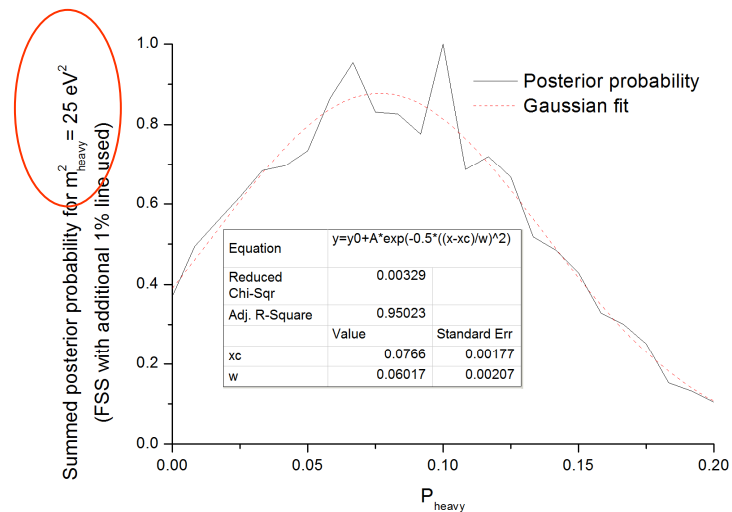
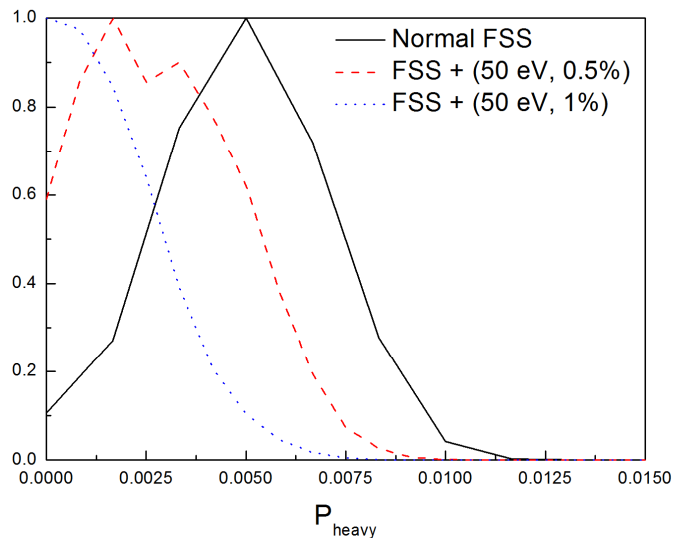
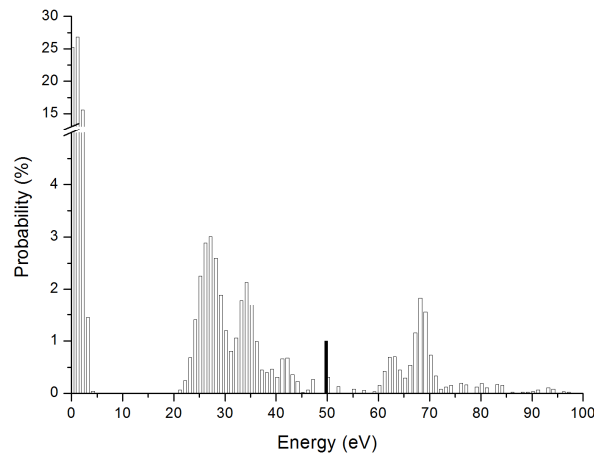
Влияния
практически
нет



Изменение нижней границы с 18400 до 18300 эффекта не даёт



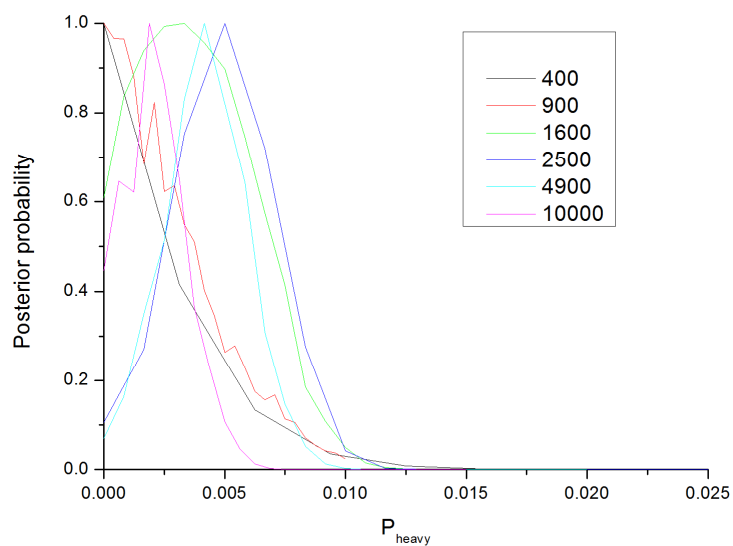
В принципе, известна систематика, которая может убрать пик при 50 эВ – это добавление линии в спектре конечных состояний



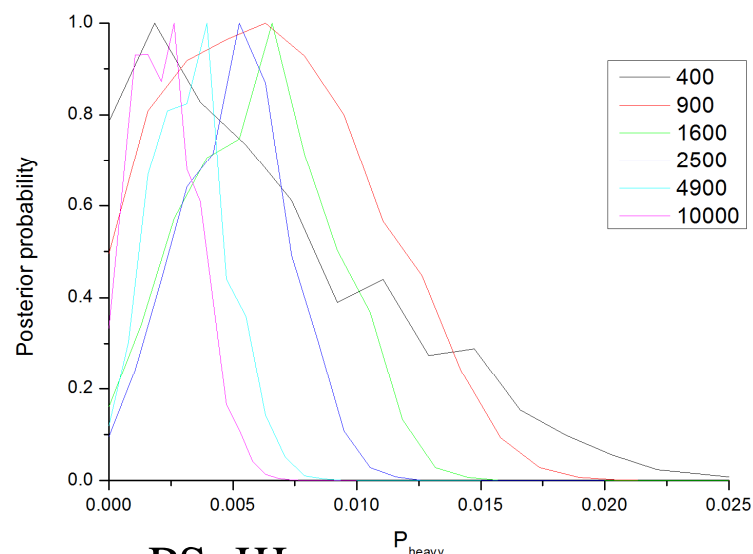
... однако это порождает другие «фантомы» при малых массах

Проверка моделированием, закладывая «руками» примеси разных масс:

Эксперимент



Моделирование



PS. Ширина распределений
определяется статистикой

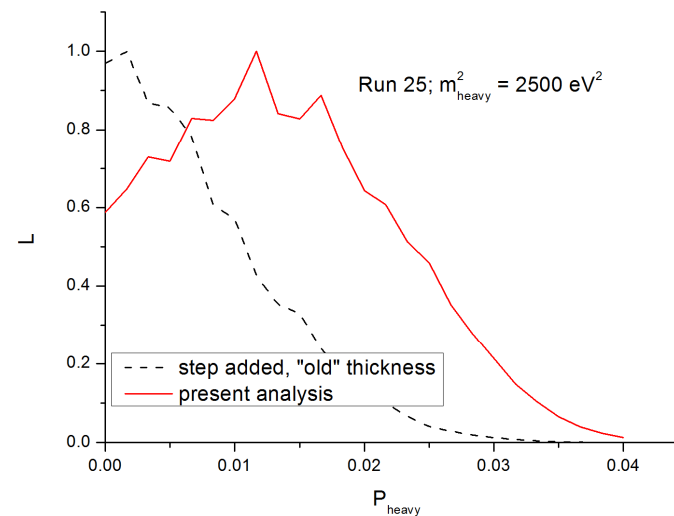
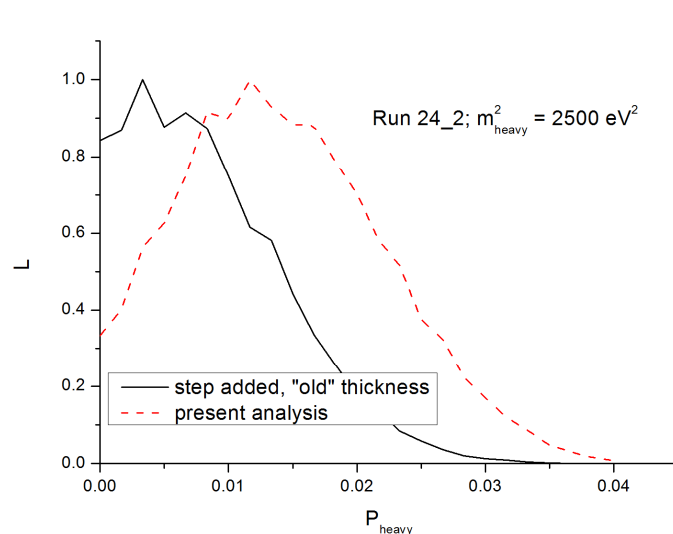
Просто в качестве интриги: вычисление
эффективного вклада массы $\sim 50\text{-}100$ эВ при
вероятности её примеси в ~ 0.005 дают
значение $\sim 0.25\text{-}0.5$ эВ, что совпадает с
эффективной массой в $2\beta 0\nu$ распаде

Heidelberg - Moscow Experiment on Neutrinoless
Double Beta Decay

$$\langle m_\nu \rangle = (0.24 - 0.58) \text{ eV} \quad (99.73\% c.l.) \quad \bullet \bullet \bullet$$

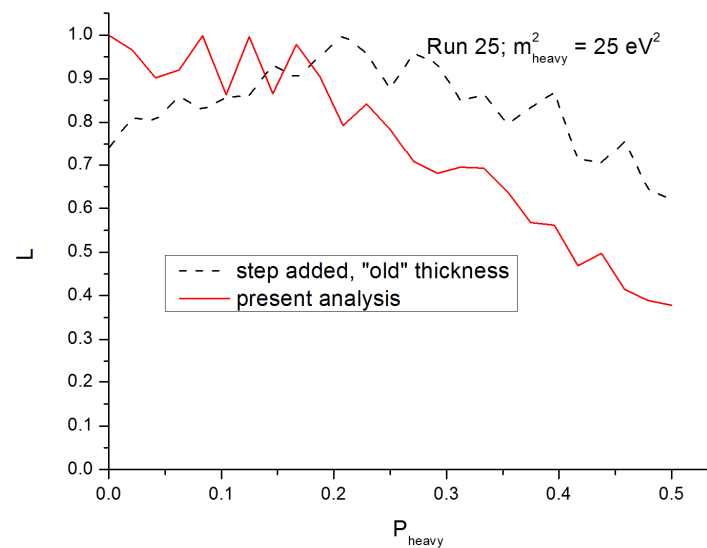
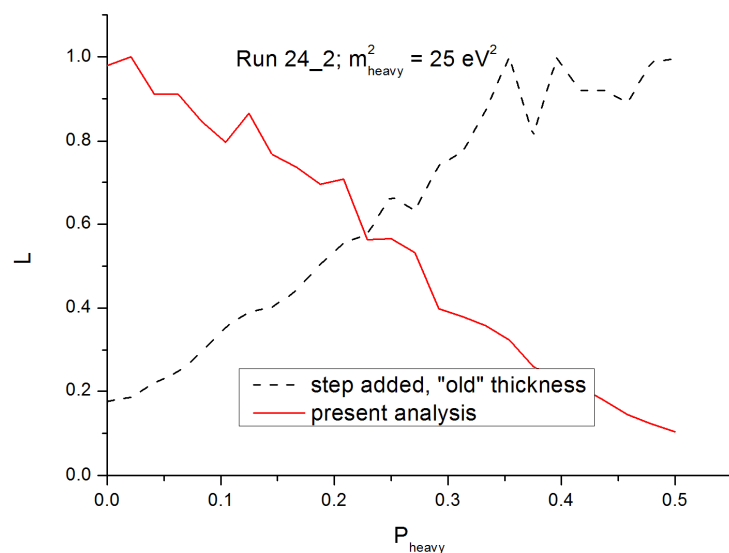


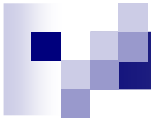
В качестве проверочного упражнения: задать параметры источника трития как в предыдущей обработке (уменьшенная толщина) и добавить «ступеньку»



Пик на 50 эВ уходит...

... но появляется другой на 5 эВ
(это в дополнение, поверх «ступеньки»)





Выводы

- Анализ полученных данных позволяет установить верхние пределы на массу и примесь 4-го нейтрино
- Результат хорошо согласуется с предварительной обработкой в Mainz
- Публикация уже долго тормозится (неприятным) наличием некоего пика при ~ 50 эВ
- Надеемся через неделю узнать, как там Mainz...