

Стерильные нейтрино при регистрации распадов трития в пропорциональном счетчике: систематика и предел на примесь

Абдурашитов Д.Н.

Троицк, ИЯИ РАН, ОЭФ, 18.02.2014

План доклада

- стерильные нейтрино
- излом в спектре электронов трития
- эксперименты с тритием в пропсчетчике
- новый подход: статистика 10^{12} событий
- модельный отклик пропсчетчика,
систематические факторы
- оценка систематического воздействия
- предел на примесь

Стерильные нейтрино

- осцилляции нейтрино – массивность
- правые массивные (стерильные) нейтрино
- выход за рамки СМ – нет указаний на численные значения массы
- LSND, MiniBooNE – легкие (~ 1 эВ)
- диапазон 1-10 кэВ – темная материя

Примесь стерильных n_s в спектре β -распада

$$\frac{dN}{dE} = (1 - |U_{es}|^2) \frac{dN_l}{dE} + |U_{es}|^2 \frac{dN_s}{dE}, \quad \text{где}$$

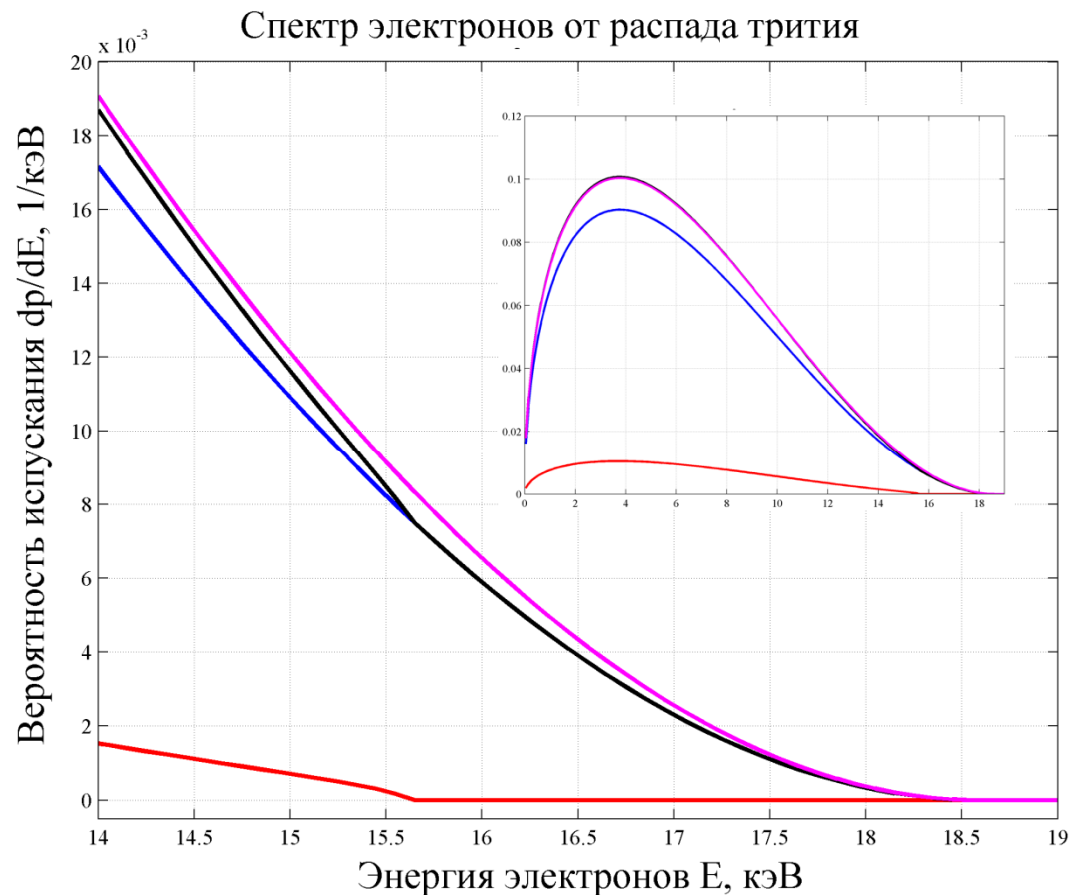
$$\frac{dN_l}{dE} \sim F(Z = 1, E) p E (E_0 - E)^2 \quad \text{— чистый спектр без примеси стерильного нейтрино}$$

и с нулевой массой активного нейтрино, а

$$\frac{dN_s}{dE} \sim F(Z = 1, E) p E (E_0 - E) [(E_0 - E)^2 - (m_s c^2)^2]^{1/2}$$

— чистый примесный спектр со стерильным нейтрино

Искажение спектра электронов



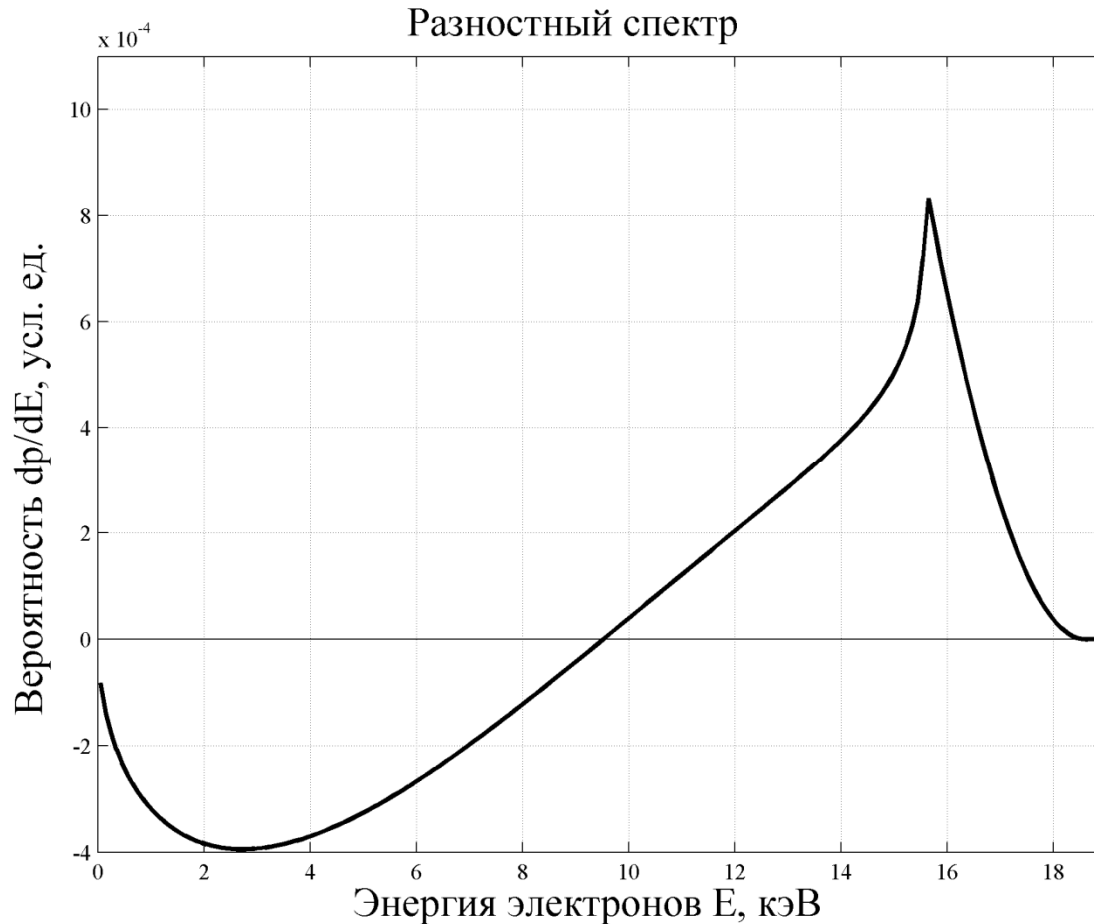
$$M_s = 3 \text{ кэВ}, \quad U^2 = 0.1$$

Цвета:

Лиловый – чистый спектр без примеси; синий – чистый спектр без примеси ($\times 0.9$); красный – чистая примесь ($\times 0.1$); черный – смешанный спектр в соотношении $0.9+0.1$

Разностный спектр

$$M_s = 3 \text{ кэВ}, U^2 = 0.1$$



Искажение во всем диапазоне – можно использовать пропорциональный счетчик с $R \sim 10-15\%$

Тритий – в рабочей смеси – фиксируется вся выделенная энергия электрона

Мера сигнала – I_{dif} = интеграл разности от 10 до 18 кэВ

Амплитуда сигнала

Интервал фитирования	4-10 кэВ
Интервал оценки сигнала	10-18 кэВ
Доля полного спектра на интервале оценки	~60%

M_s , кэВ	1	2	4	6	8
Сигнал I_{dif} в долях от полного спектра	2.7	11	44	100	170

единицы $10^{-3} * U^2$

Пример расчета сигнала для $M_s = 1$ кэВ, $U^2 = 10^{-3}$ и $N = 10^{12}$

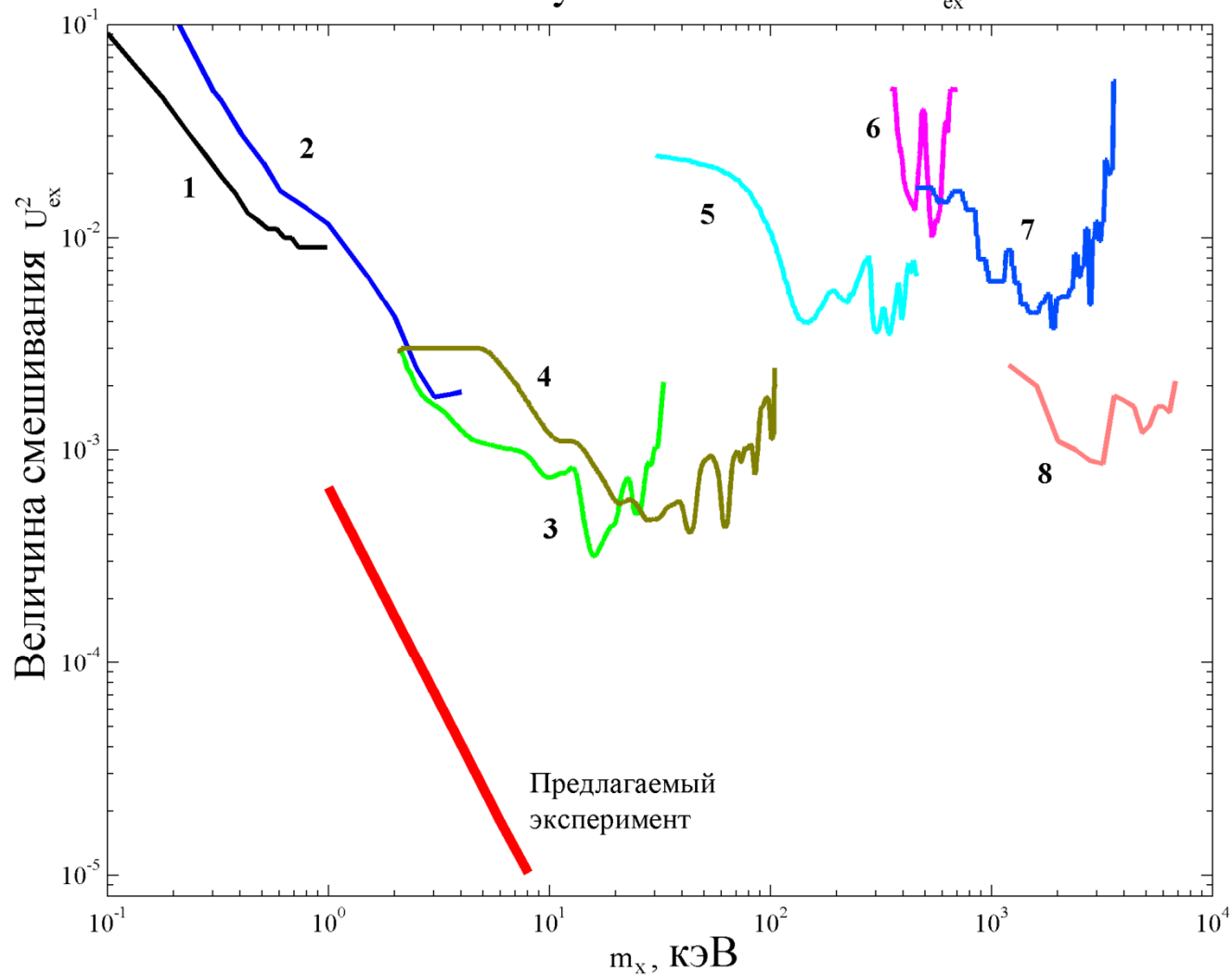
$$I_{dif} = 2.7 * 10^{-3} * 10^{-3} * 10^{12} = 2.7 * 10^{-6} \text{ отсчетов}$$

$$\text{Неопределенность 3-сигма: } 3 * \sqrt{0.3 * 10^{12}} = 1.8 * 10^6 \text{ отсчетов}$$

Сигнал меньше неопределенности --- принимаем за предел

Ткачев И.И., по PDG

Статистическая чувствительность к U_{ex}^2



B.Pontecorvo, 1949

The β Spectrum of ^3H

Phys. Rev., 1949, vol.75, p.983—984.

THE β SPECTRUM OF ^3H

In collaboration with G.C.Hanna

The proportional counter technique previously described [1,2] has been used to study the β spectrum of ^3H , an investigation of which has recently been reported by Curran et al. [3].

The two counters I and II described in Ref.2 were used. The fillings are given in Table 1.

Table 1. Counter fillings used

Gases	Counter I	Counter II
Xenon	50 cm Hg	26 cm Hg
Argon	—	14 cm Hg
Methane	10 cm Hg	10 cm Hg
Hydrogen	~ 1 cm Hg	~ 0.2 cm Hg
^3H	~ 7,000 counts/min	~ 30,000 counts/min
^{37}Ar	—	~ 6,000 counts/min

Both counters were operated at gas multiplication factors of several thousand. The absolute energy scale was obtained by firing into the counter a beam of MoK_α -X-rays (17.4 keV) from a crystal spectrometer. In counter I this beam was parallel to the counter wire, in II perpendicular to it. The assumption that these energy calibrations were representative of the properties of the counter as a whole was checked directly for counter II by measuring the $\text{MoK}_\alpha/^{37}\text{Ar}$ pulse size ratio**, and is inferred for counter I from the agreement between the end point energy determinations in the two counters.

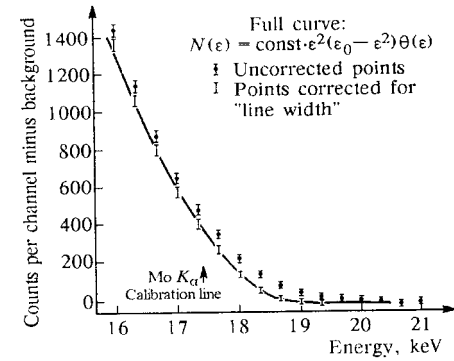


Fig.1. The spectrum of ^3H in the region of the end point

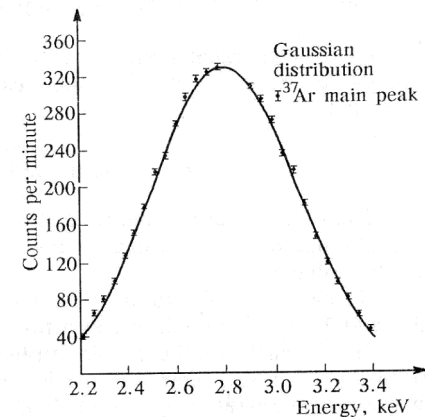


Fig.6. Gaussian distribution of the ^{37}Ar K capture peak

Предел на массу нейтрино ~1 кэВ

Kalbfleisch & Bahran, 1992-1995

Physics Letters B 303 (1993) 355–358
North-Holland

PHYSICS LETTERS B

Experimental limits on heavy neutrinos in tritium beta decay

George R. Kalbfleisch and Moustafa Y. Bahran

Department of Physics and Astronomy, University of Oklahoma, Norman, OK 73019, USA

Received 8 January 1993

A search for a 17 keV neutrino kink in tritium beta decay has been made on a new sample of 430 million decays per keV at electron kinetic energies near 1.5 keV. The new sample contains 40% less wall background than our earlier one. This significantly reduces the wall background systematics. No 17 keV neutrino signal was observed. The 99% confidence level upper limit obtained for the mixing probability is 0.28%. The combined upper limit from both samples is 0.24% (99% CL). In addition, limits less than 0.5% (99% CL) are obtained for other heavy neutrino mass values between 13.5 and 17.5 keV.

M.Y. Bahran, G.R. Kalbfleisch / Physics Letters B 354 (1995) 481–485

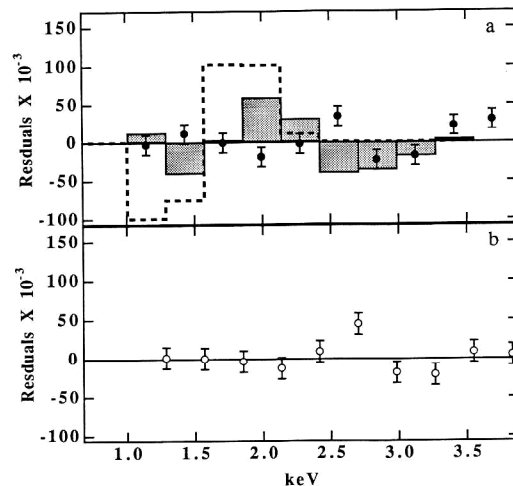


fig. 3. a) The residual spectrum $D(E) - F(E)$ (solid points with errors) for the data of Fig. 2. Also shown is the expected shape of a 0.84% heavy neutrino smeared signal before (dashed histogram) and after (shaded histogram) it undergoes the same functional smooth fit as the data. b) The residual spectrum $D(E) - F(E)$ (open points with errors) for our data shifted by one half bin (0.14 keV). For both (a) and (b), the error bars are for display purposes only and are uncorrelated-diagonal errors “equivalent” to the 68% C.L. “correlated” one standard

Счетчик:

нерж.сталь 1м х диам. 20 см

Смесь: Ar + 10% CH₄, 0.4 атм

Скорость счета: 2000 Гц

483 ~1 месяц измерений, все стабильно, статистика 10⁹ соб

Предел на смешивание для массы 17 кэВ:

~0.3%

Новый подход (Абдурашитов, 2013)

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2006, № 2, с. 1–6

ЭЛЕКТРОНИКА И РАДИОТЕХНИКА

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ БОЛЬШИХ СКОРОСТЕЙ СЧЕТА ДЕТЕКТОРОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЫСОКОЙ ТОЧНОСТЬЮ

© 2006 г. Д. Н. Абдурашитов, В. Н. Гаврин, В. В. Горбачев, Т. В. Ибрагимова,
А. В. Калихов, А. А. Шихин, В. Э. Янц

*Институт ядерных исследований РАН
Россия, 117312, Москва, просп. 60-летия Октября, 7а*

Поступила в редакцию 18.03.2004 г.

На примере измерений скорости счета распадов ^{37}Ag в пропорциональных счетчиках описан метод измерения скоростей счета детекторов до 10^6 с^{-1} с точностью лучше 1% с использованием цифрового осциллографа.

ВВЕДЕНИЕ

При решении многих задач перед исследователями встает проблема точного измерения высоких скоростей счета детекторов. Это касается экспериментов в области физики космических лучей, а также ря-

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВОГО ОСЦИЛЛОГРАФА

Нами разработан метод измерения скоростей счета детекторов до 10^6 с^{-1} (и выше) с использованием цифрового осциллографа. Осциллограф на-

Кварцевый цельнопаяный счетчик

+

цифровой осциллограф

=====

Скорость счета: до 10^6 Гц, статистика 10^{12} соб. за 1 мес измерений

^{27}Ar в счетчике, скорость 10^5 Гц

2

АБДУРАШИТОВ и др.

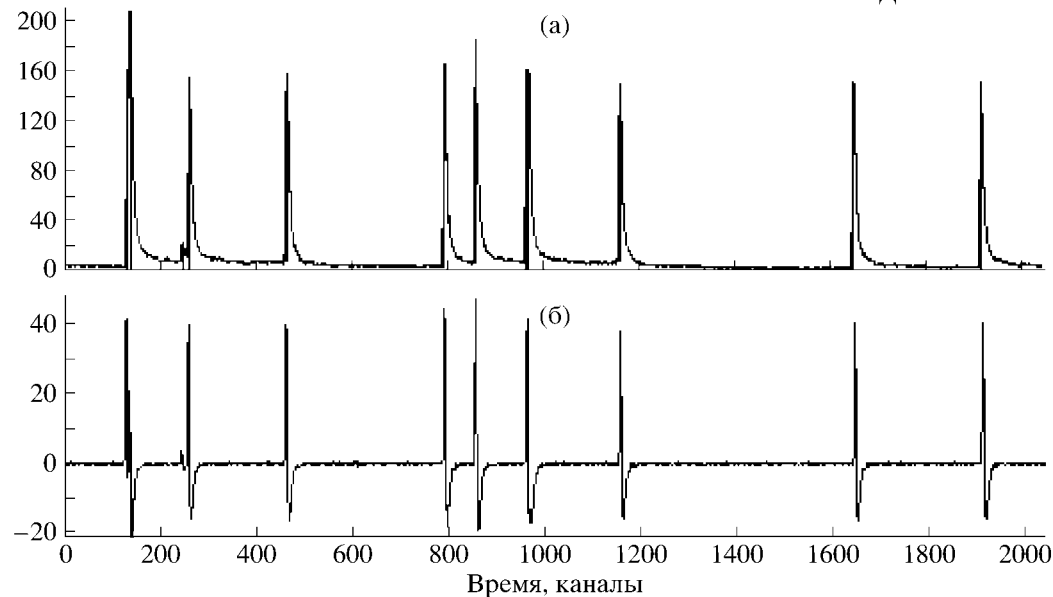


Рис. 1. **а** – пример последовательности импульсов, регистрируемых цифровым осциллографом; **б** – соответствующая последовательность дифференцированных импульсов. Для наглядности кадр ограничен 2048 временными каналами; один канал соответствует временному интервалу 10 нс.

активностью 0.4 МКи [4–6]. Разработка представленного в данной работе метода была обусловлена требованием определения активности источ-

линдрические пропорциональные счетчики объемом 10 см³. Счетчики такого типа описаны в работе [9]. Катодом в них служит тонкая углеродная

Непрерывная запись сигналов дает скорость счета

^{27}Ar в счетчике, скорость 10^5 Гц

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ БОЛЬШИХ СКОРОСТЕЙ СЧЕТА ДЕТЕКТОРОВ

3

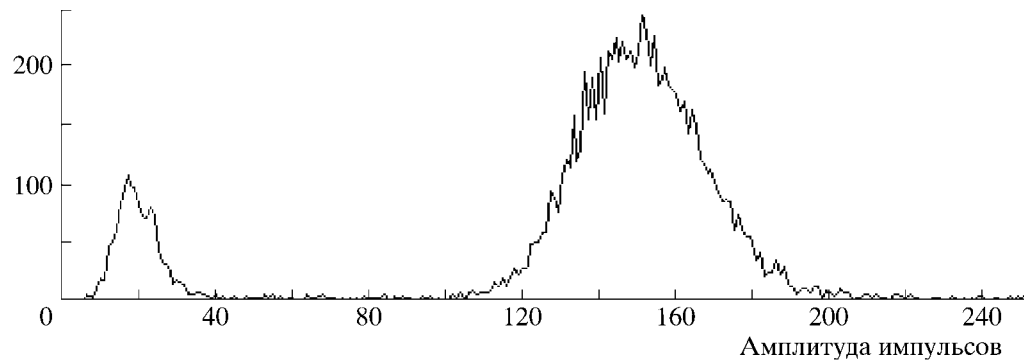


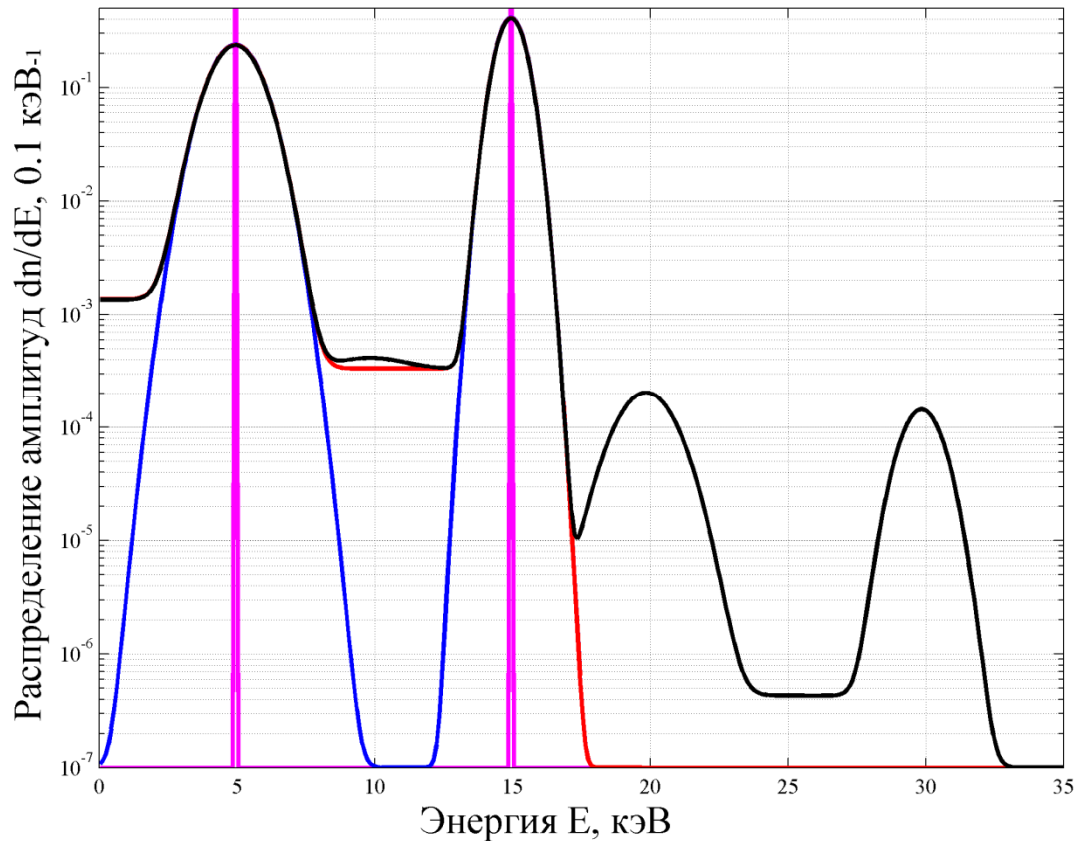
Рис. 2. Спектр импульсов от распада ^{37}Ar в пропорциональном счетчике. Шкала амплитуд ограничена разрешением осциллографа 256 каналов. При том что K -пик находится полностью в пределах диапазона измерений, часть импульсов L -пика не регистрируется из-за введения порога, подавляющего шумы. В правой части рисунка (на краю шкалы) видны импульсы с амплитудой выше верхней границы диапазона измерений, соответствующие наложениям событий типа $K + K$.

Амлитудный спектр:
Подложка в спектре $\sim 1\%$

Модель подложки и наложений

Стеночный и краевой эффекты в пропсметчике формируют подложку в спектре

Отклик счетчика на электроны 5 и 15 кэВ



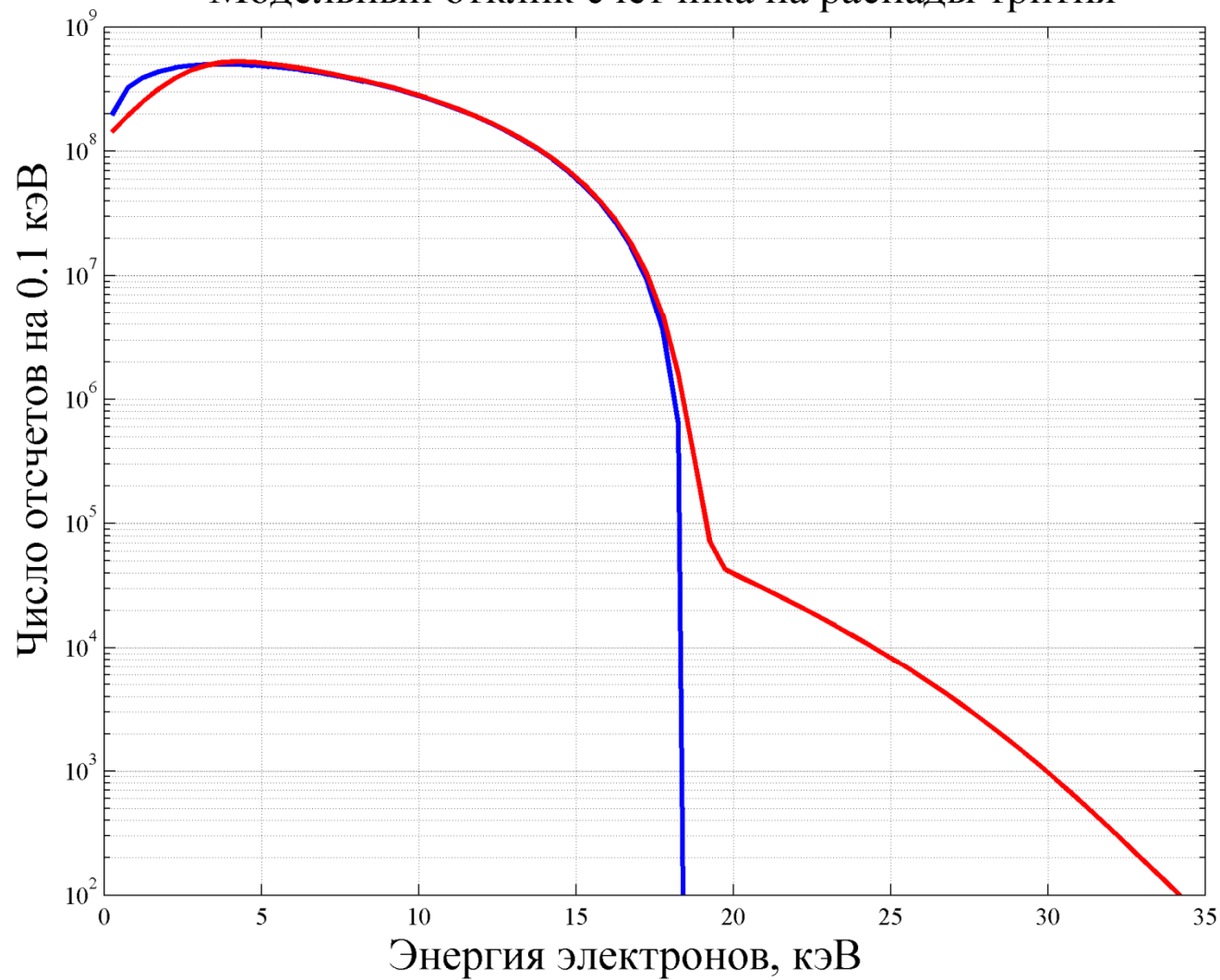
2 линии в спектре:
5 и 15 кэВ

Разрешение на 5.9 кэВ:
 $R=16\%$

Коэффициент подложки:
 $D=0.01$

Доля неразличимых
случайных совпадений:
 $C=0.001$

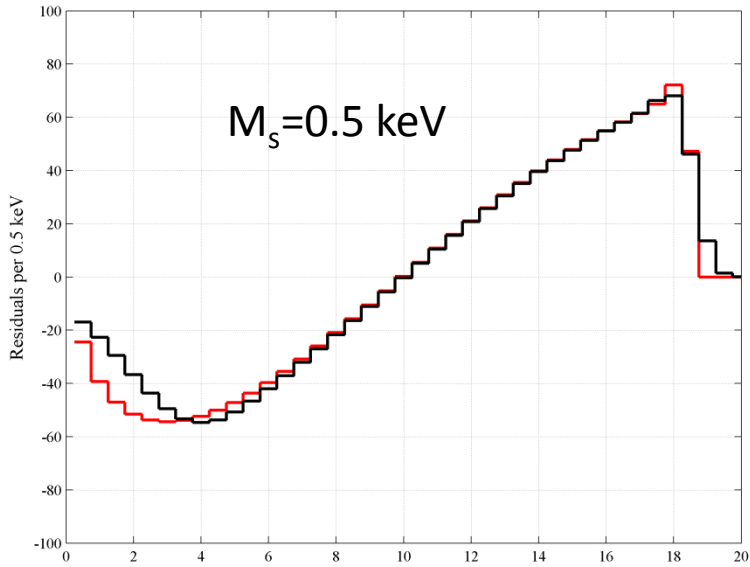
Модельный отклик счетчика на распады трития



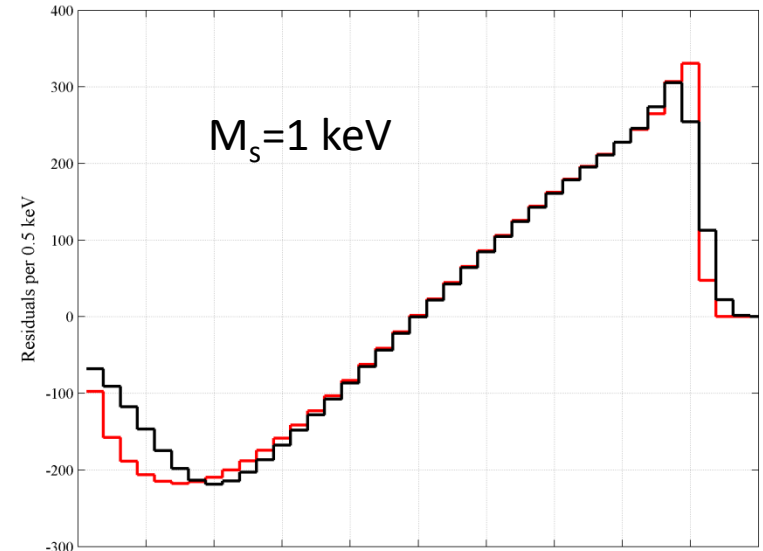
Разрешение 16%, подложка в спектре 1%, наложения 0.1%

Модель разностного спектра

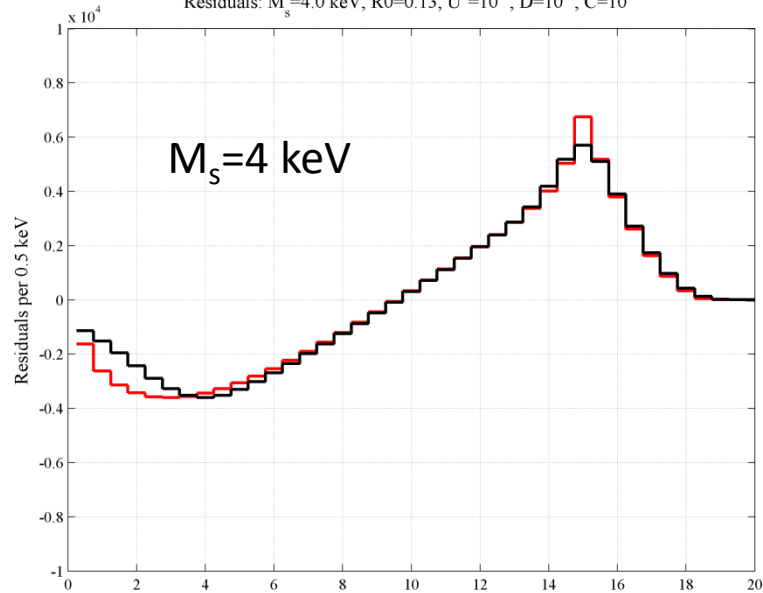
Residuals: $M_s=0.5$ keV, $R0=0.13$, $U^2=10^{-4}$, $D=10^{-3}$, $C=10^{-3}$



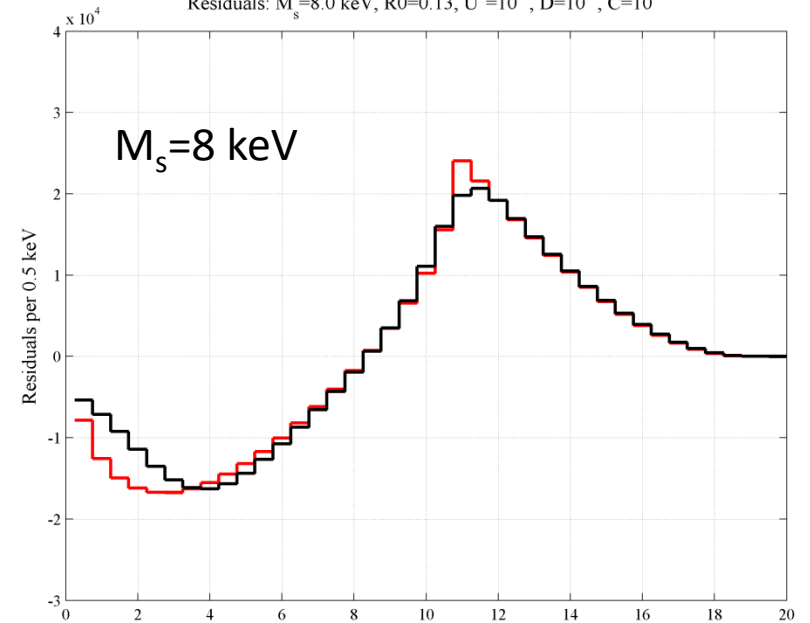
Residuals: $M_s=1.0$ keV, $R0=0.13$, $U^2=10^{-4}$, $D=10^{-3}$, $C=10^{-3}$



Residuals: $M_s=4.0$ keV, $R0=0.13$, $U^2=10^{-4}$, $D=10^{-3}$, $C=10^{-3}$



Residuals: $M_s=8.0$ keV, $R0=0.13$, $U^2=10^{-4}$, $D=10^{-3}$, $C=10^{-3}$



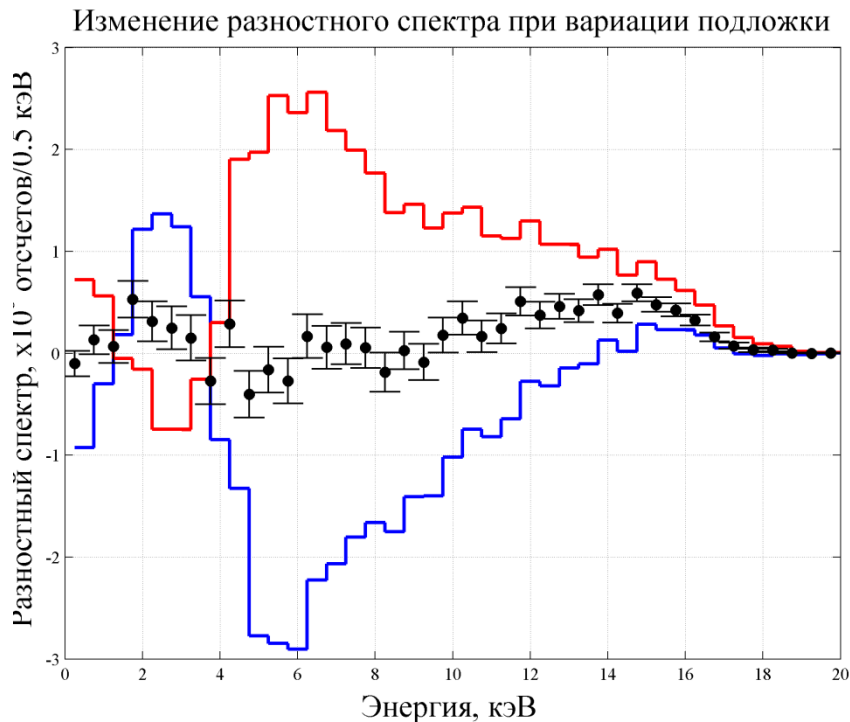
Сигнал для случая $U^2=10^{-4}$ и $N=10^{12}$

$M_s=4$ кэВ, $R=16\%$, значения $D=10^{-2}$, $C=10^{-3}$

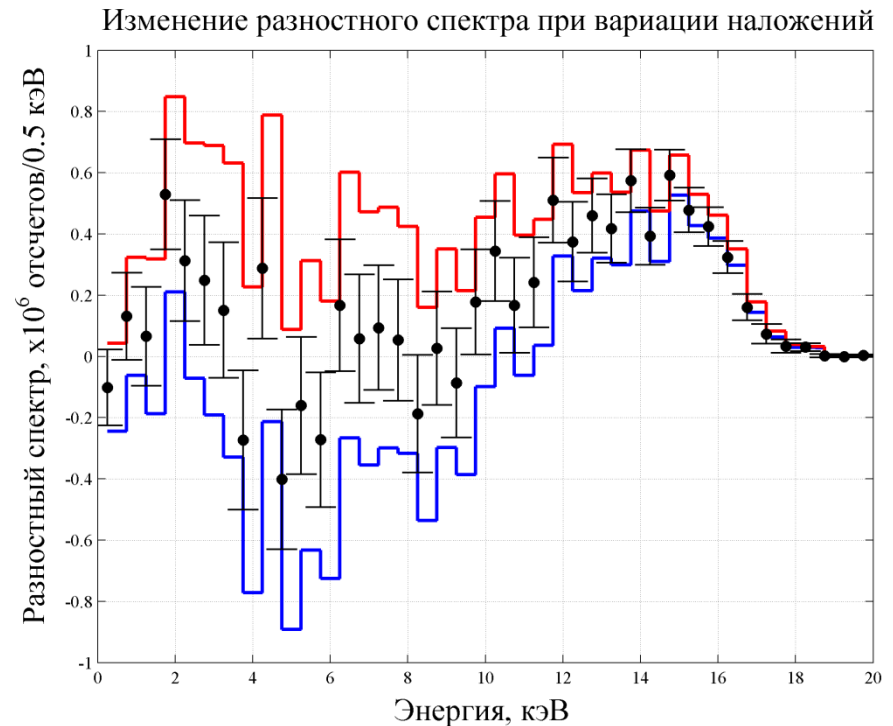
Вариации $\pm 1\%$

Неопределенности – 3-сигма

Вариация подложки



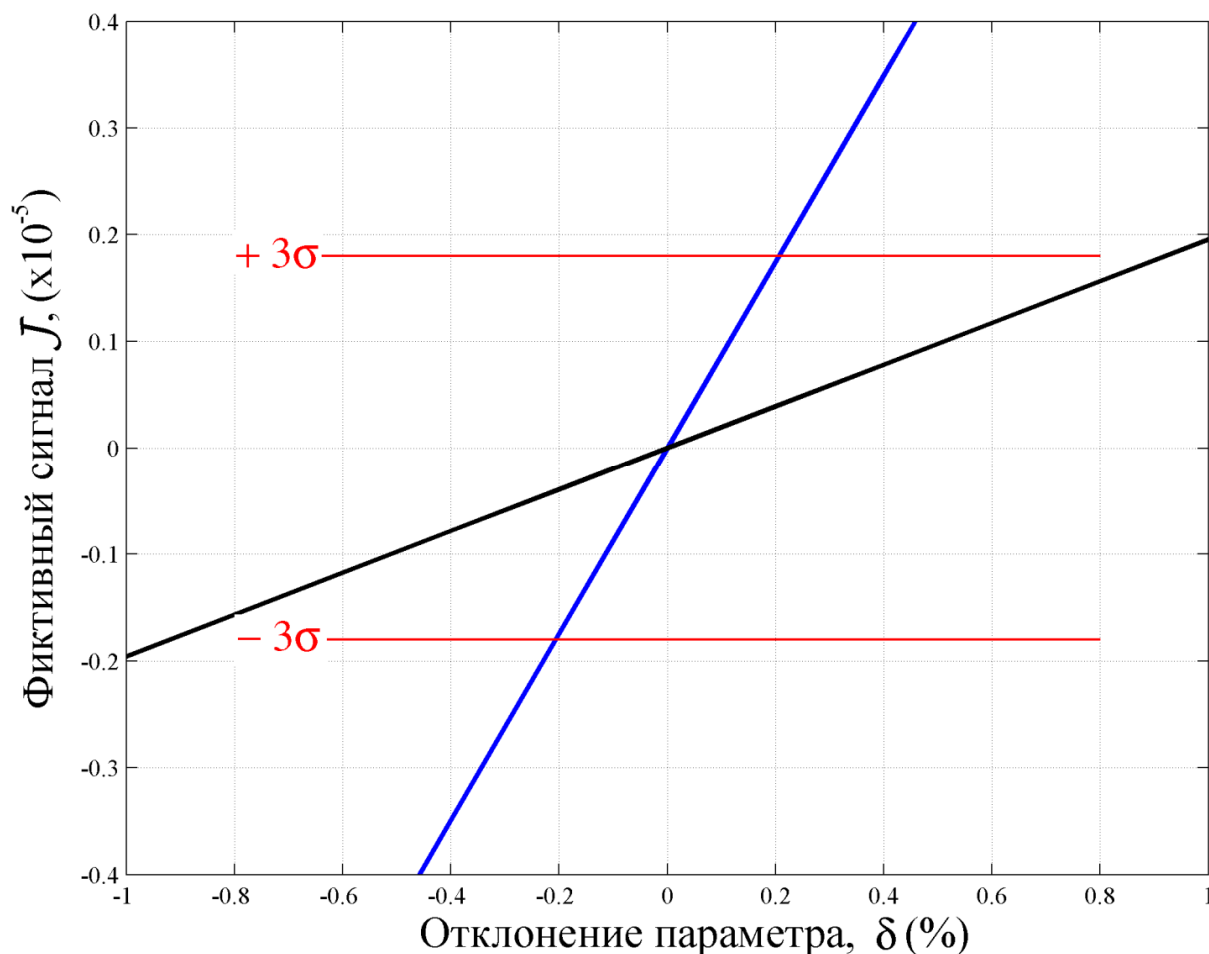
Вариация наложений



Систематика при нулевом сигнале, $N=10^{12}$

Учетные факторы воздействия – прямоугольная подложка и случайные наложения

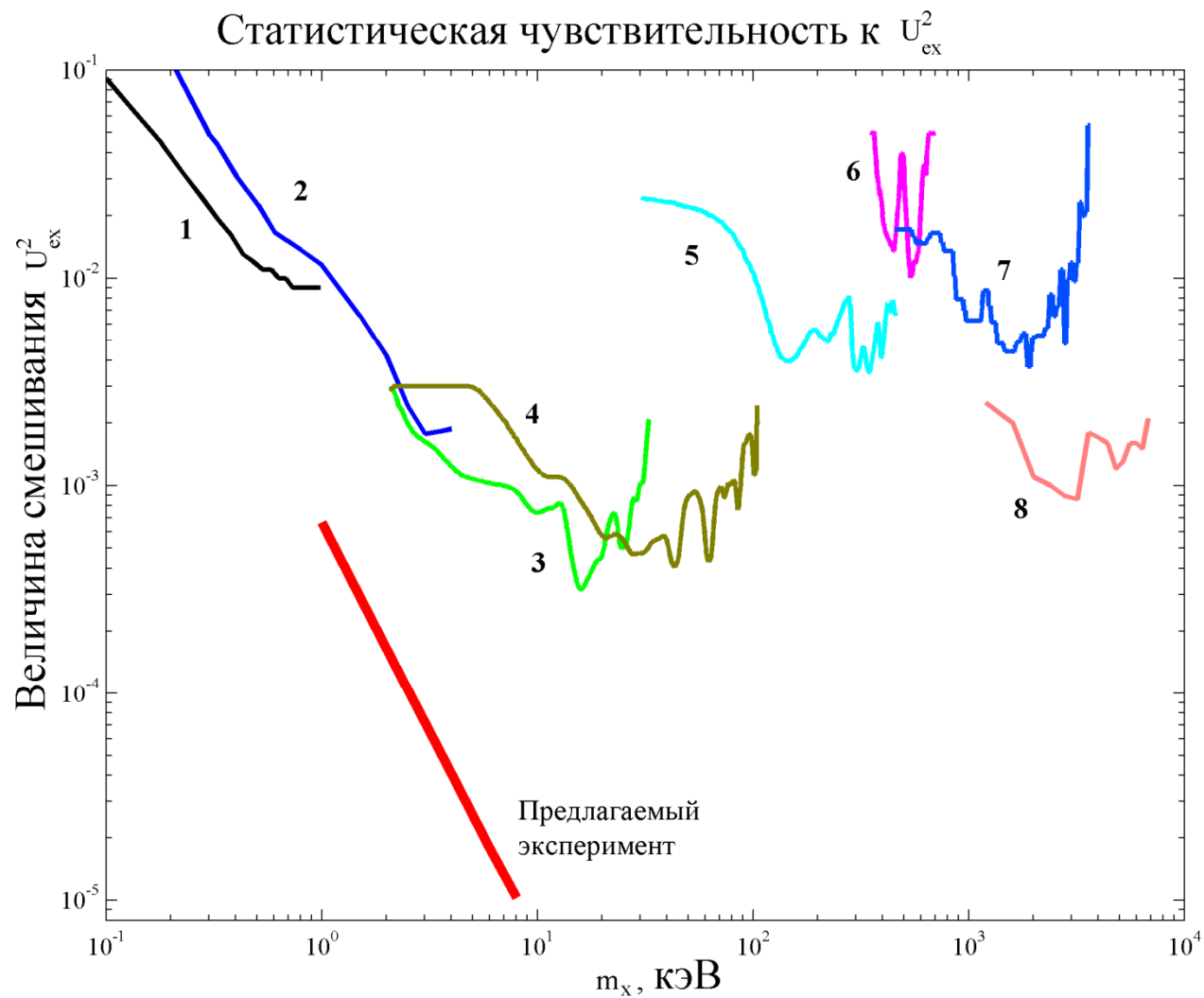
Систематические факторы: $D=1\%$, $C=0.1\%$, $\delta = \pm 1\%$



Неопределенность подложки $\pm 0.2\%$ достигается при калибровке на статистике 10^8

Чувствительность к n_s

Неопределенность на уровне 3-сигма



Выводы

- Новые возможности позволяют набрать за разумное время спектр трития со статистикой 10^{12} ; это дает стат. чувствительность к смешиванию 10^{-3} - 10^{-5} на уровне 3-сигма для масс в диапазоне 1-8 кэВ, что на 1-2 порядка лучше современных ограничений по прямым измерениям
- Предложенный метод анализа – предварителен, рассматриваются другие возможности (вейвлеты, квазиоптимальные веса и пр.)
- Чувствительность метода анализа к систематическим факторам высокая, однако измерить подложку с точностью $\pm 0.2\%$ проблем не представляет

Заключение

Автор выражает признательность И.Ткачеву, Н.Титову, А.Берлеву, Н.Лиховиду, В.Янцу, В.Пантуеву, А.Нозику за плодотворное обсуждение и конструктивную критику

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!