

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

Абдурашитов Д.Н.
БНО, ИЯИ РАН, 30.10.2014

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

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

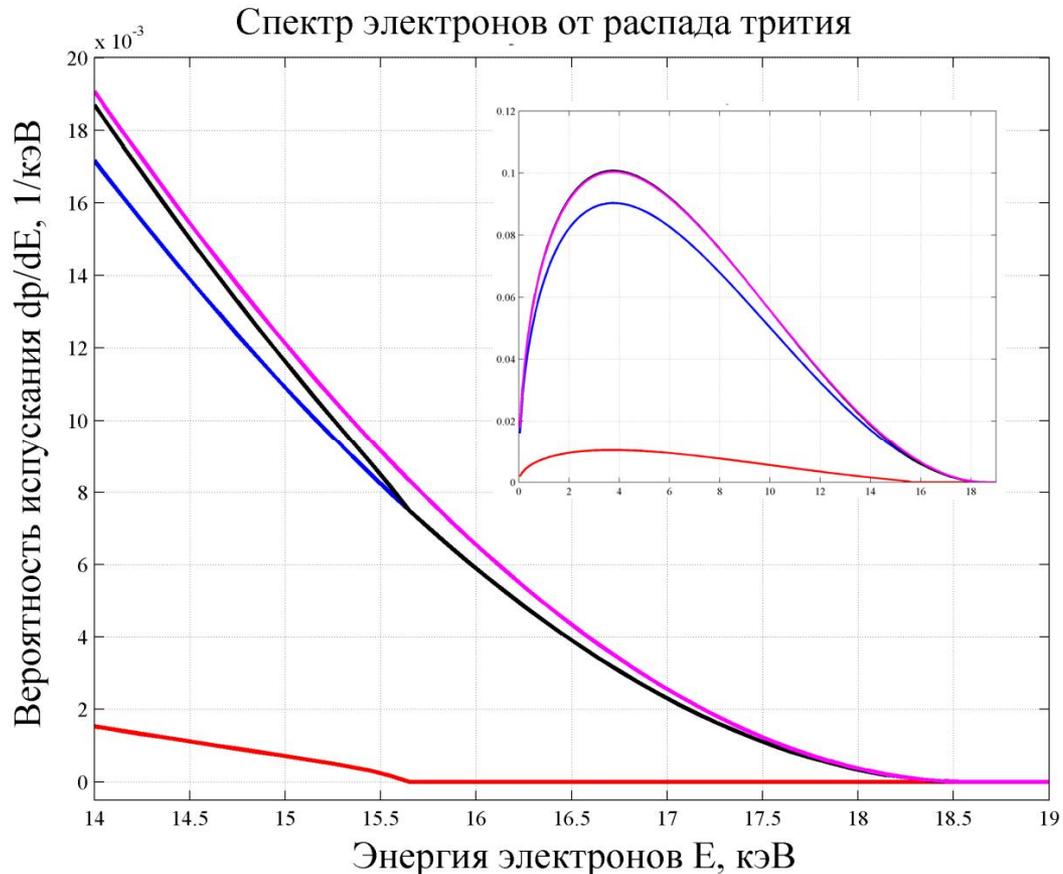
$$\frac{dN_l}{dE} \sim F(Z = 1, E) p E (E_0 - E)^2 \quad \text{— чистый спектр без примеси стерильного нейтрино}$$

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



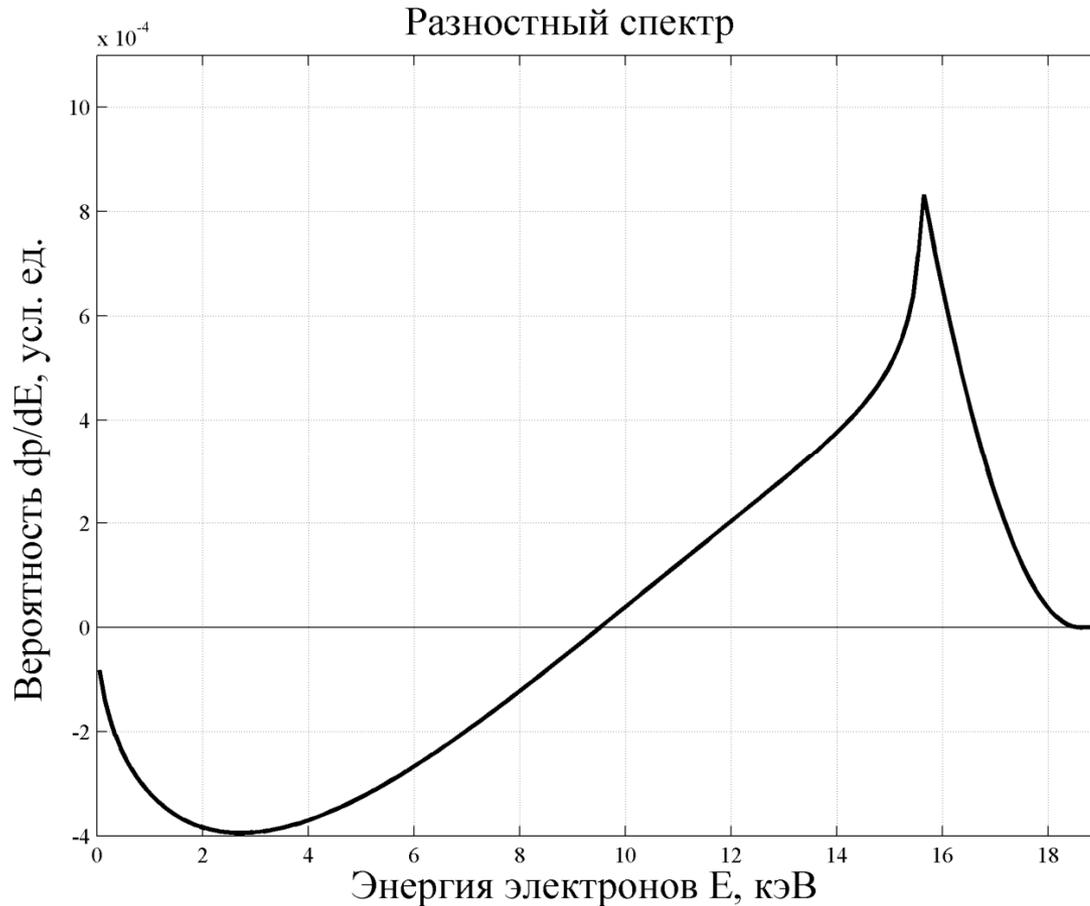
$$M_s = 3 \text{ кэВ}, \quad U^2 = 0.1$$

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 $10^{-3} \cdot U^2$				

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

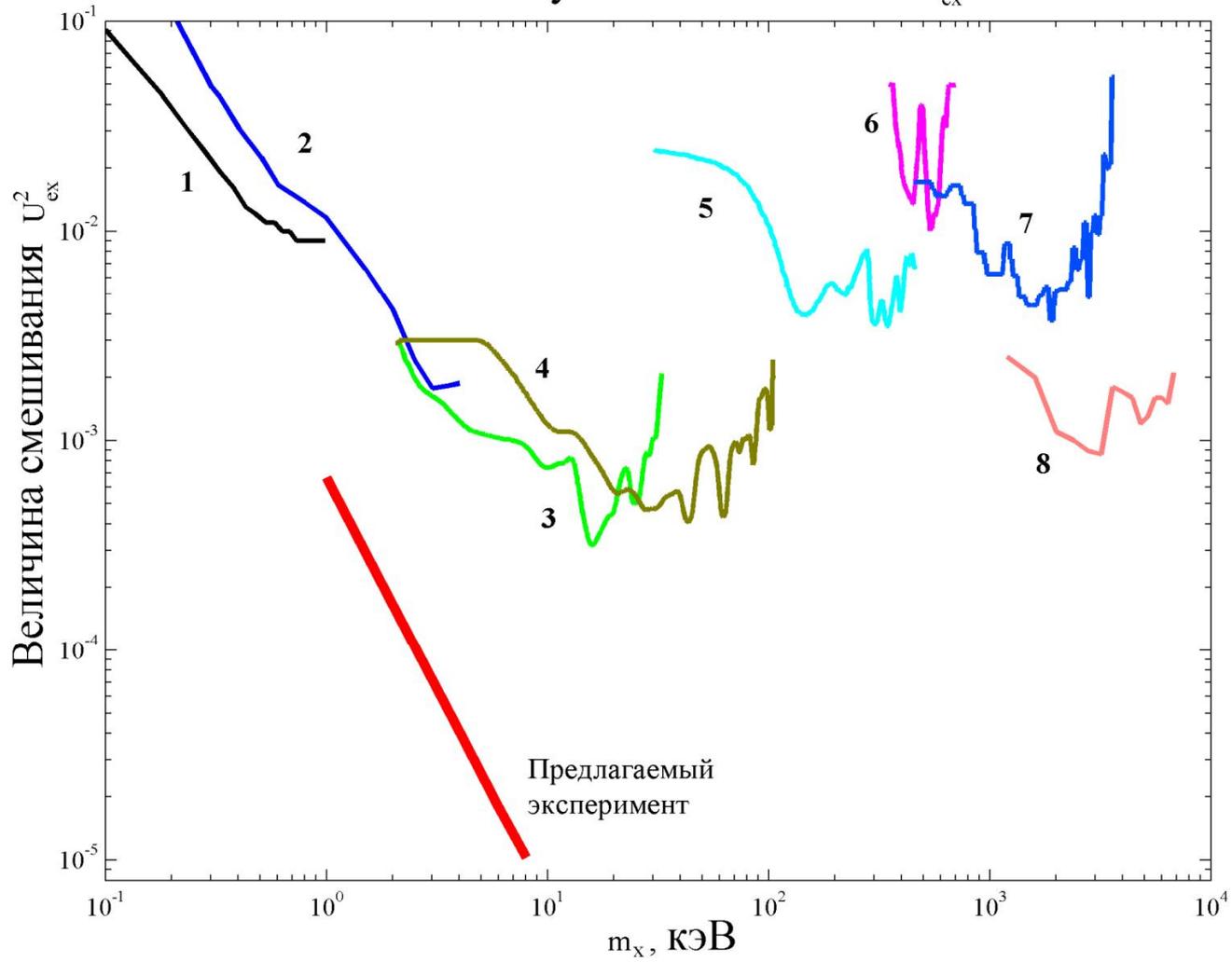
$$I_{dif} = 2.7 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-3} \cdot 10^{12} = 2.7 \cdot 10^6 \text{ отсчетов}$$

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

Сигнал меньше неопределенности --- принимаем за предел

Ткачев И.И., по PDG

Статистическая чувствительность к U_{ex}^2



Статистика 10^{12} событий

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 I.

Table I. 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.

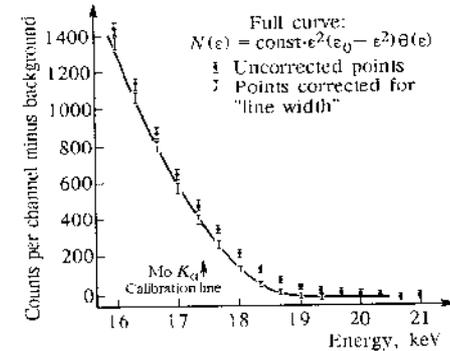


Fig. 1. The spectrum of ^3H in the region of the end point

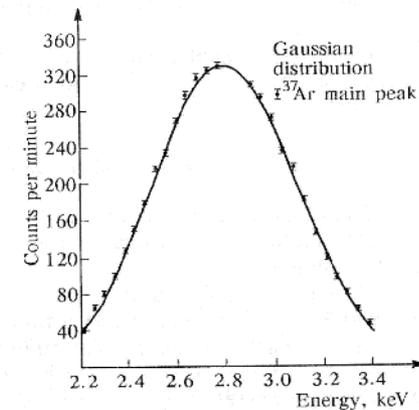


Fig. 6. Gaussian distribution of the ^{37}Ar K capture peak

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

483

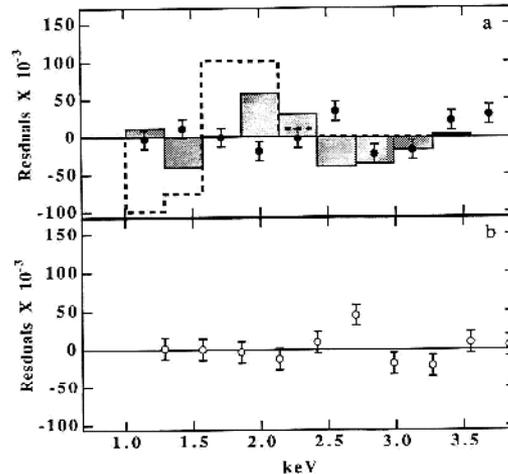


Fig. 3. a) The residual spectrum $D(E) - F(E)$ (solid points with errors) for the data of Fig. 2. Also shown is the expected shape of a 0.84% heavy neutrino smeared signal before (dashed histogram) and after (shaded histogram) it undergoes the same functional smooth fit as the data. b) The residual spectrum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

Счетчик:

нерж.сталь 1 м х диам. 20 см

Смесь: Ar + 10% CH₄, 0.4 атм
с примесью трития

Скорость счета: 2000 Гц

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

Предел на смешивание
для массы 17 кэВ:

~0.3%

Kalbfleisch & Bahran, 1992-1995

Physics Letters B 291 (1992) 336-340

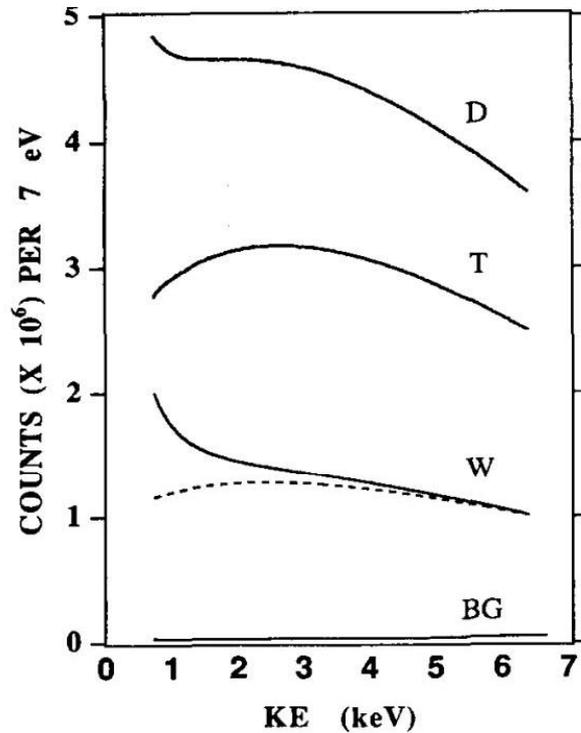


Fig. 1. The summed data samples, with environmental background (BG) subtracted versus electron kinetic energy (KE). The raw tritium data (D) and the subtracted pure tritium gas spectrum (T) obtained by subtracting the scaled wall spectrum (W). The dashed line divides W into *distorted* wall and gas contribu-

distorted wall contribution is about a third of that (see fig. 1).
#9 We believe that it would be constructive for experimental papers to fold their systematic errors point by point in data analysis.

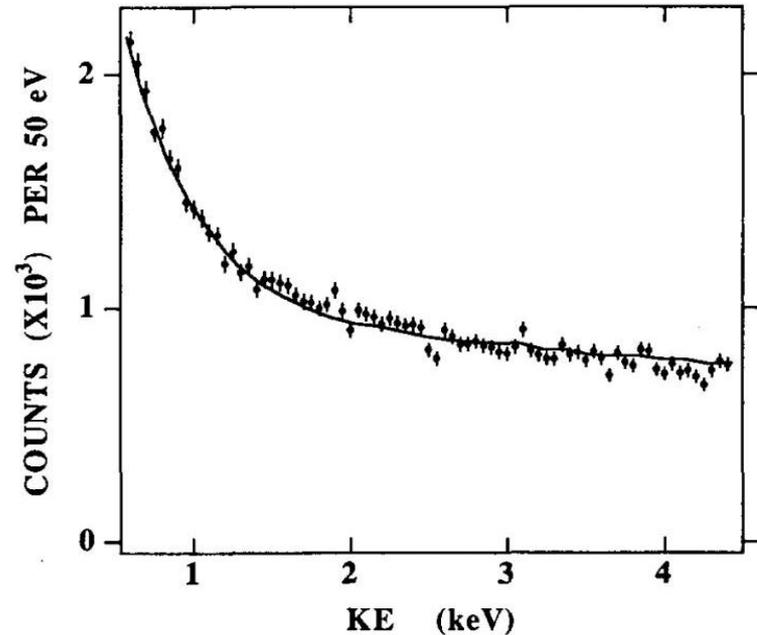


Fig. 2. An example of a *fully* pumped (no residual tritium gas) adsorbed wall spectrum (points with errors) compared to a Monte

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}Ar 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

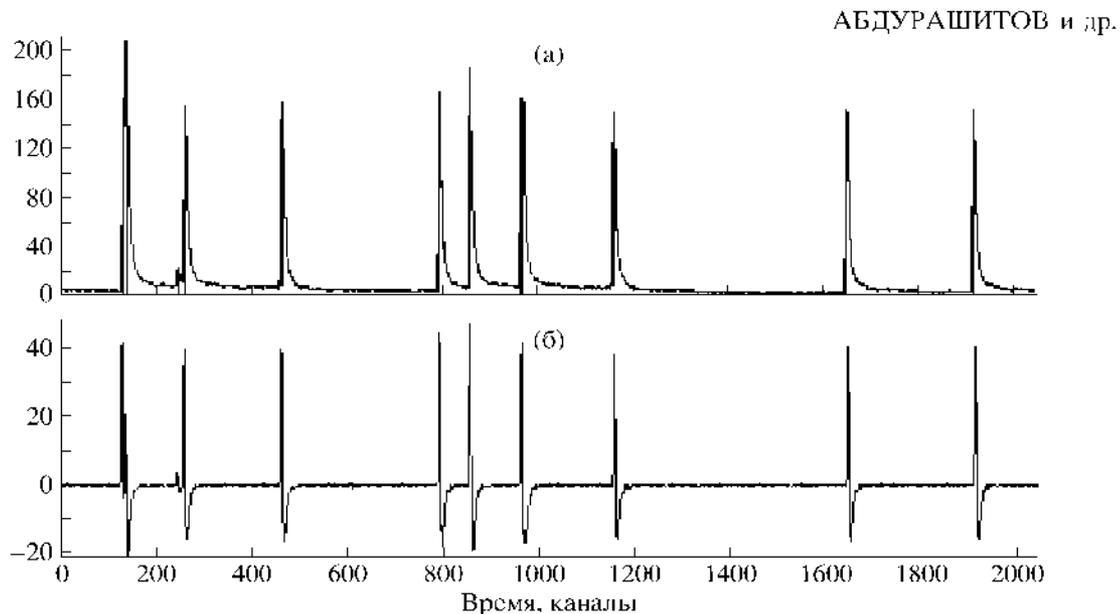


Рис. 1. а – пример последовательности импульсов, регистрируемых цифровым осциллографом; б – соответствующая последовательность дифференцированных импульсов. Для наглядности кадр ограничен 2048 временными каналами; один канал соответствует временному интервалу 10 нс.

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

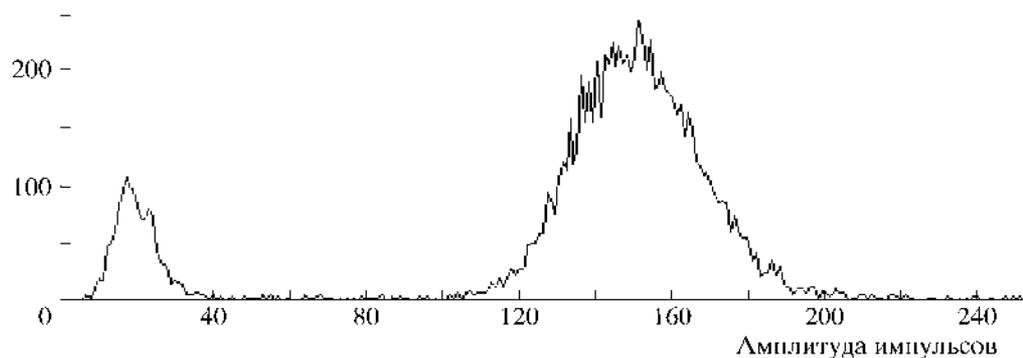


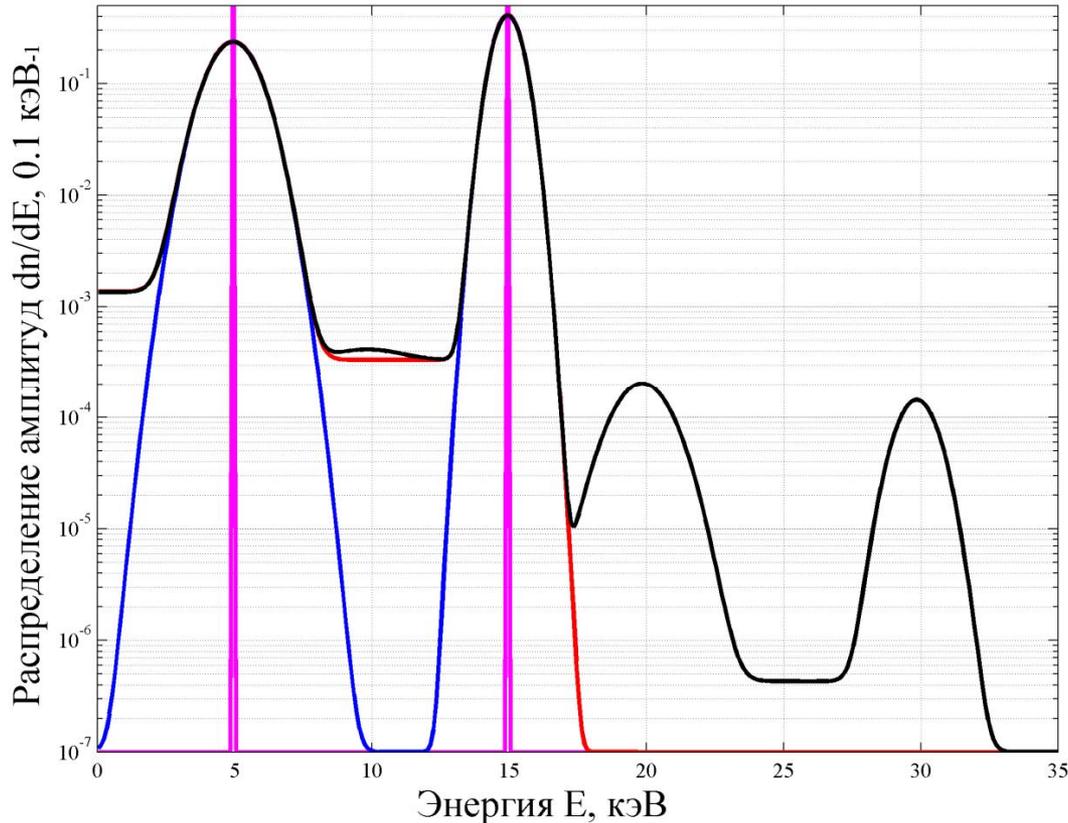
Рис. 2. Спектр импульсов от распада ^{37}Ar в пропорциональном счетчике. Шкала амплитуд ограничена разрешением осциллографа 256 каналов. При том что K -пик находится полностью в пределах диапазона измерений, часть импульсов L -пика не регистрируется из-за введения порога, подавляющего шум. В правой части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

Амлитудный спектр:
Подложка в спектре ~1%

Модель подложки и наложений

Стеночный и краевой эффекты в пропсчетчике формируют подложку в спектре

Отклик счетчика на электроны 5 и 15 кэВ



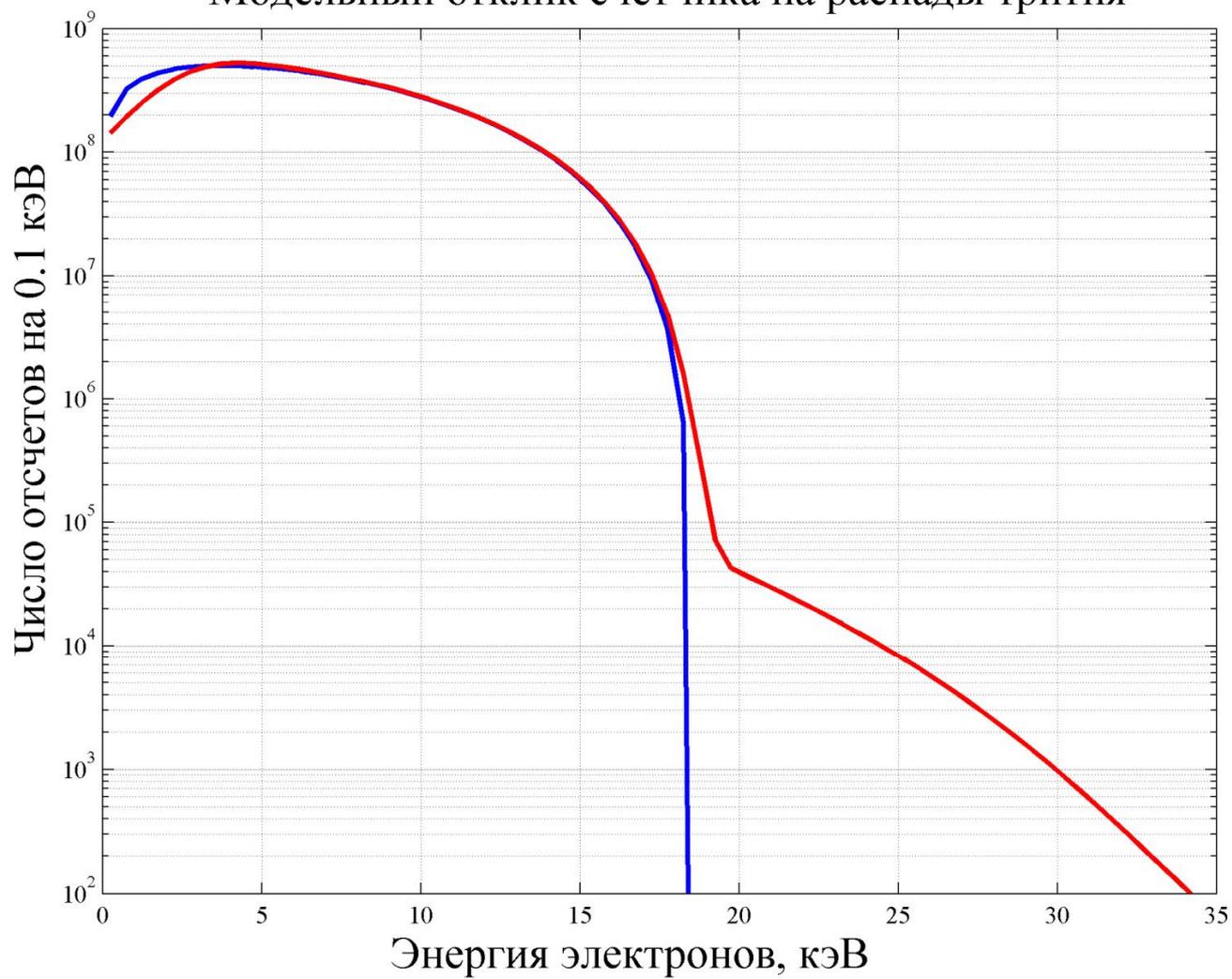
2 линии в спектре:
5 и 15 кэВ

Разрешение на 5.9 кэВ:
 $R=16\%$

Коэффициент подложки:
 $D=0.01$

Доля неразличимых
случайных совпадений:
 $C=0.001$

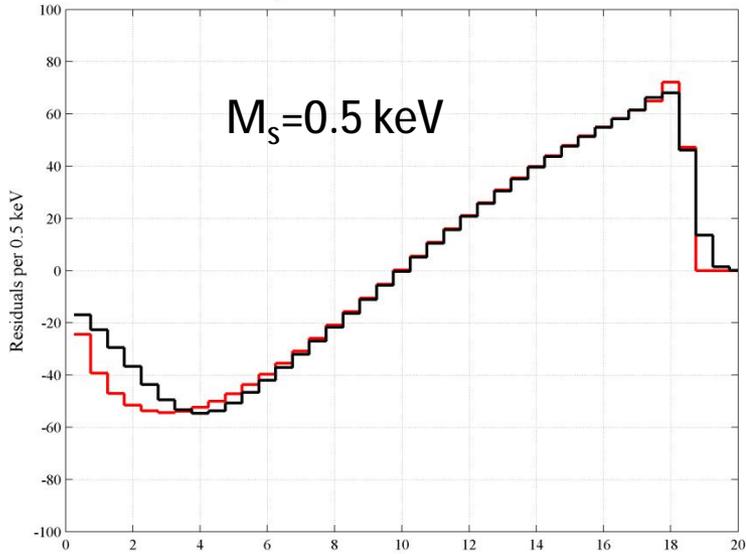
Модельный отклик счетчика на распады трития



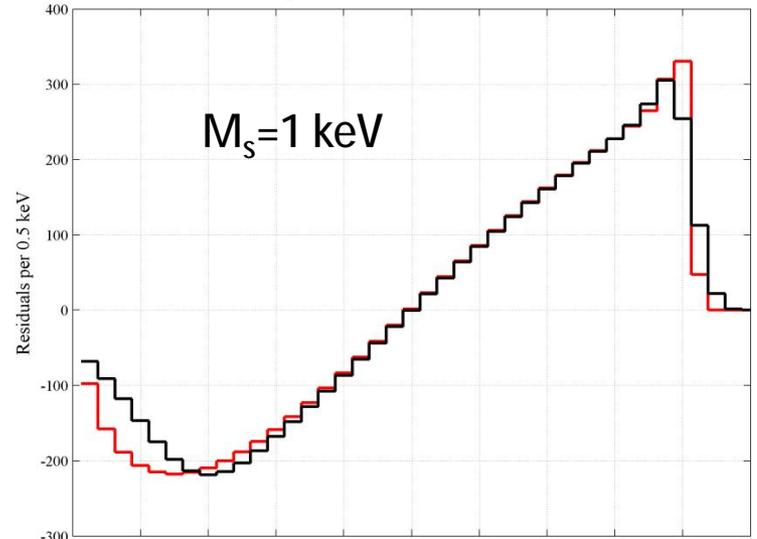
Разрешение 16%, подложка в спектре 1%, наложения 0.1%

Модель разностного спектра

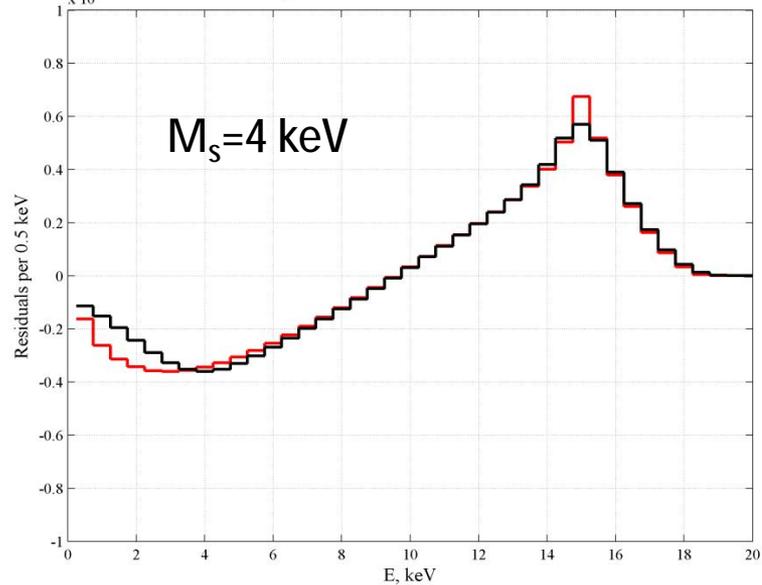
Residuals: $M_s=0.5$ keV, $R_0=0.13$, $U^2=10^{-4}$, $D=10^{-3}$, $C=10^{-3}$



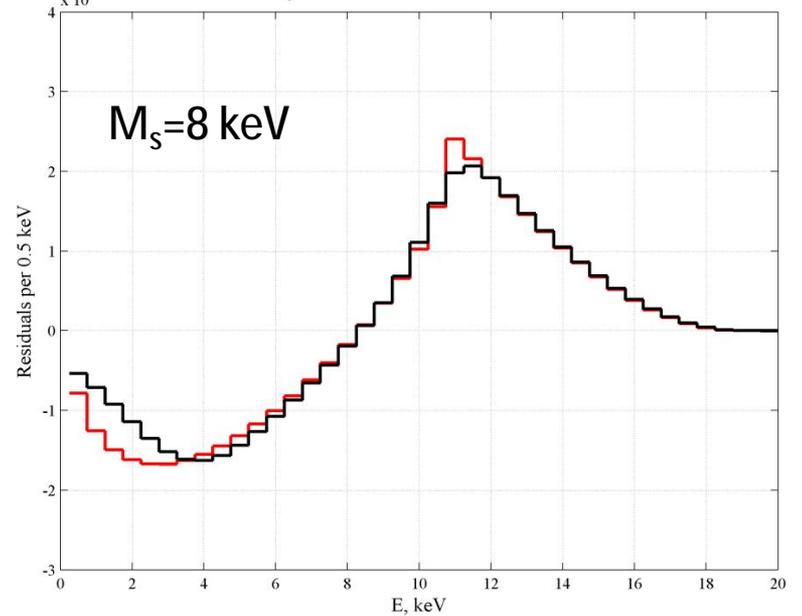
Residuals: $M_s=1.0$ keV, $R_0=0.13$, $U^2=10^{-4}$, $D=10^{-3}$, $C=10^{-3}$



Residuals: $M_s=4.0$ keV, $R_0=0.13$, $U^2=10^{-4}$, $D=10^{-3}$, $C=10^{-3}$



Residuals: $M_s=8.0$ keV, $R_0=0.13$, $U^2=10^{-4}$, $D=10^{-3}$, $C=10^{-3}$



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

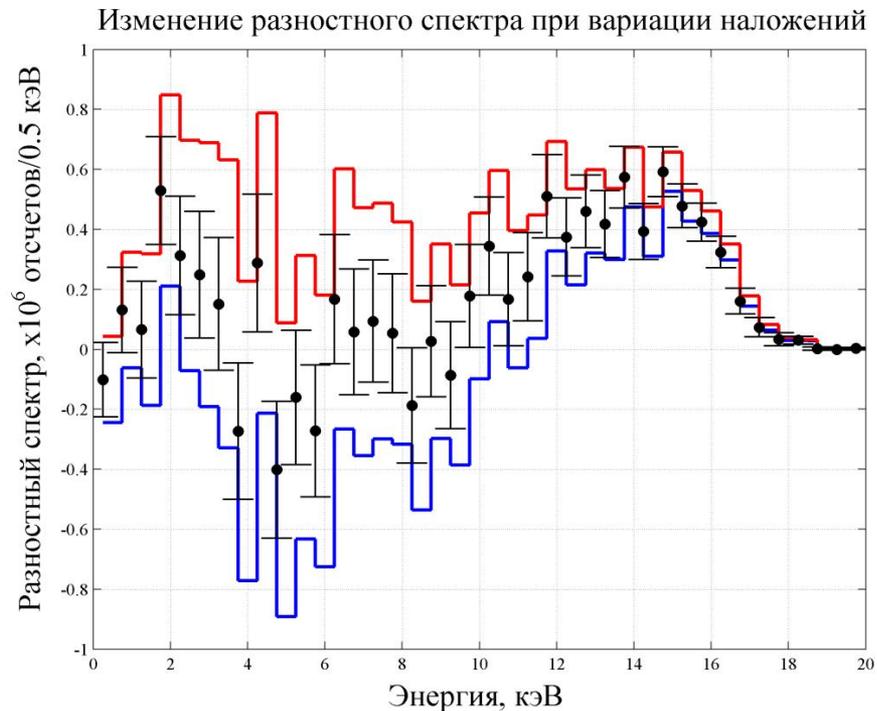
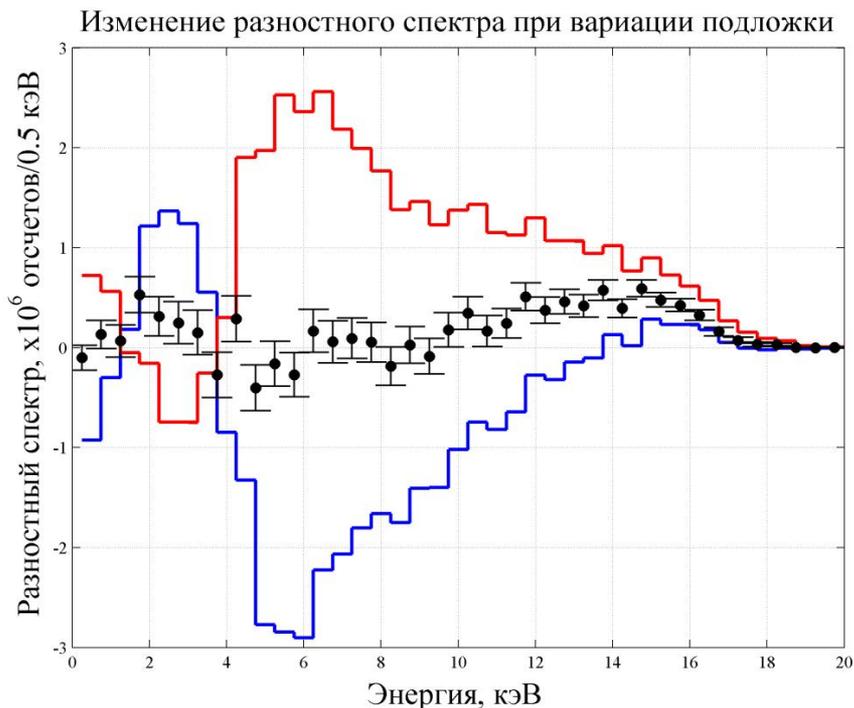
$M_s=4$ кэВ, $R=16\%$, значения $D=10^{-2}$, $C=10^{-3}$

Вариации $\pm 1\%$

Неопределенности – 3-сигма

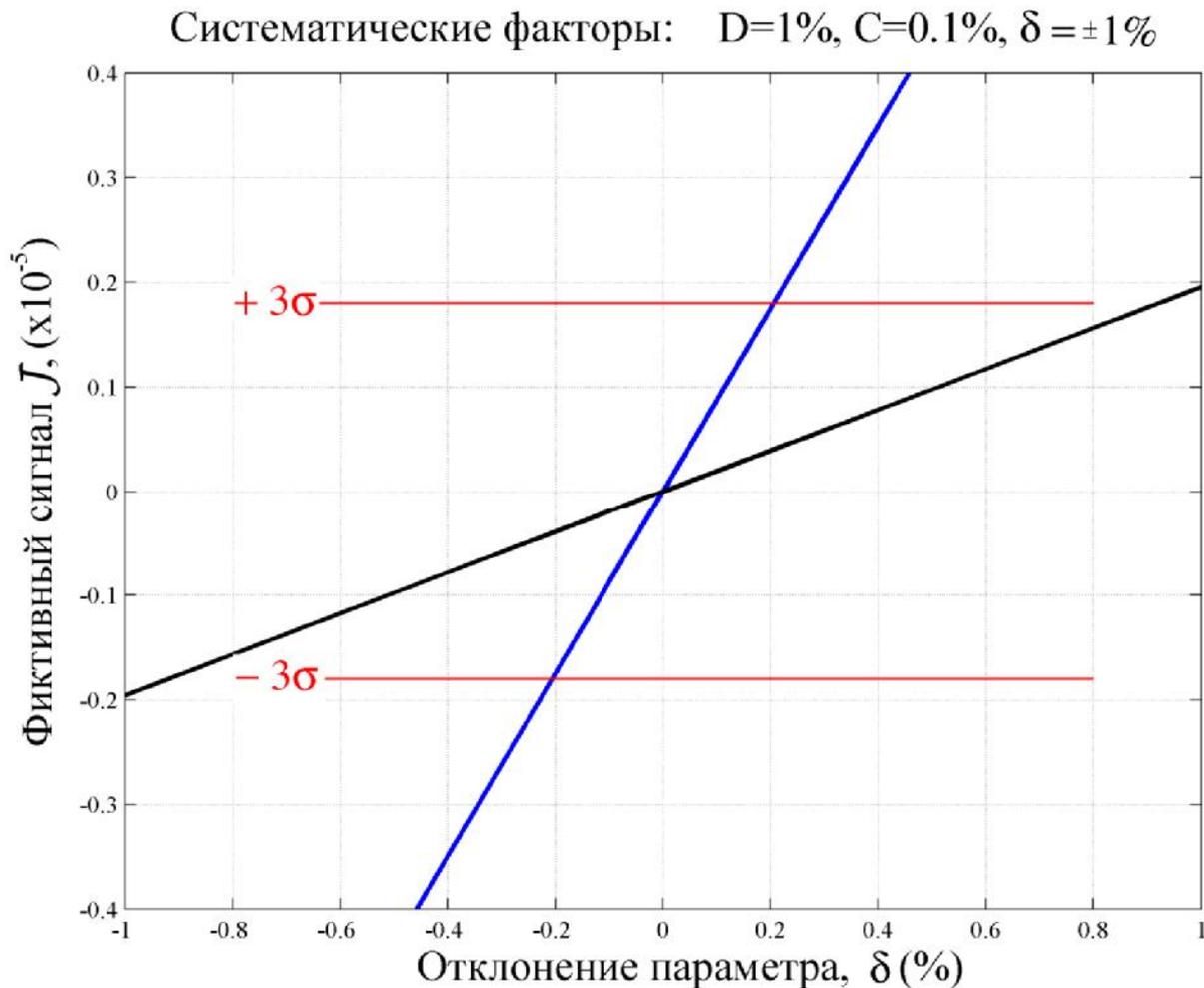
Вариация подложки

Вариация наложений



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

Учетные факторы воздействия – прямоугольная подложка и случайные наложения

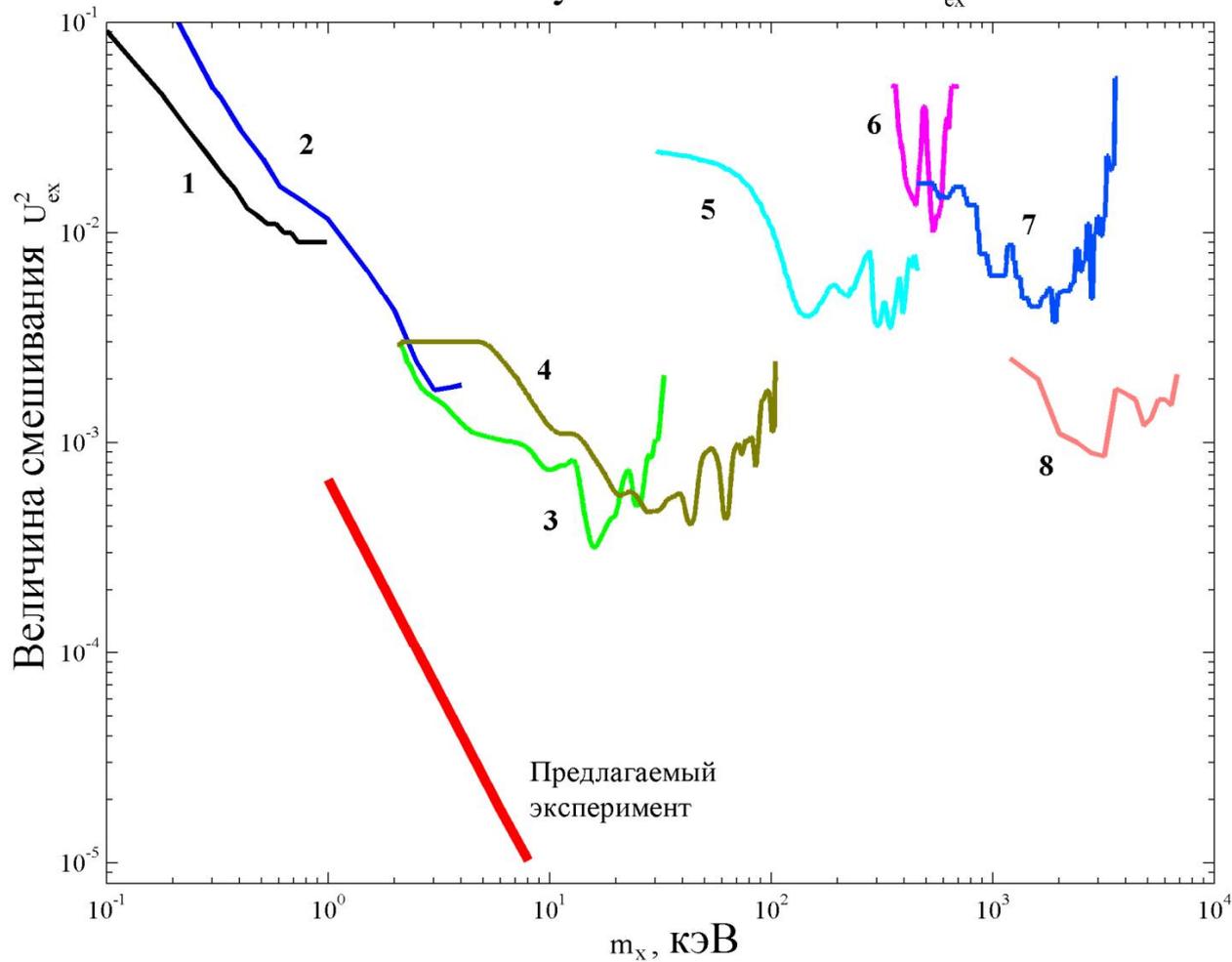


Неопределенность подложки $\pm 0.2\%$ достигается при калибровке на статистике 10^8

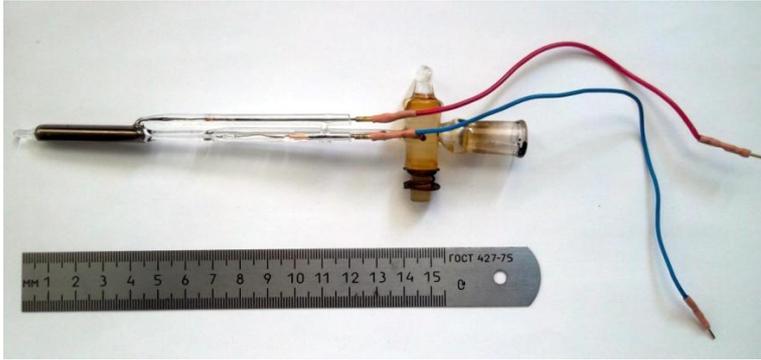
Чувствительность к n_s

Неопределенность на уровне 3-сигма

Статистическая чувствительность к U_{ex}^2



Подложка ^{37}Ar : короткий счетчик

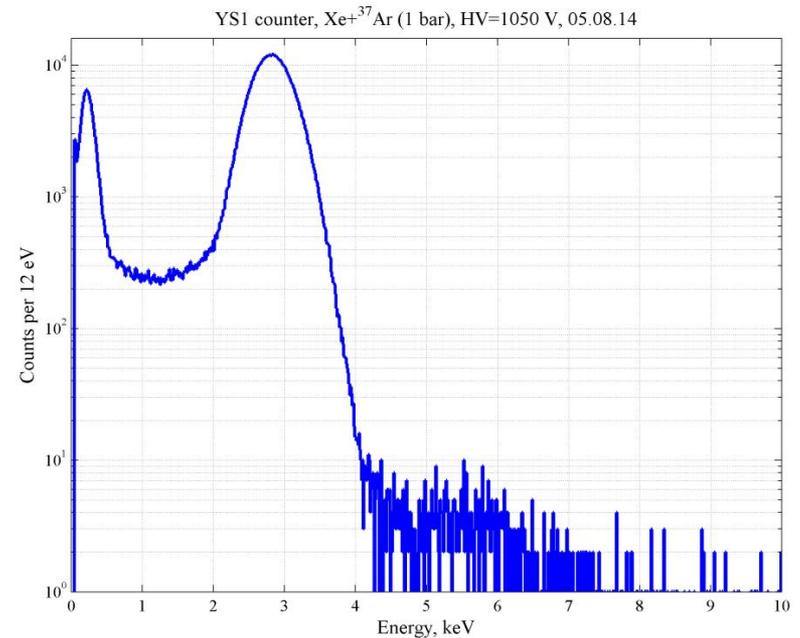
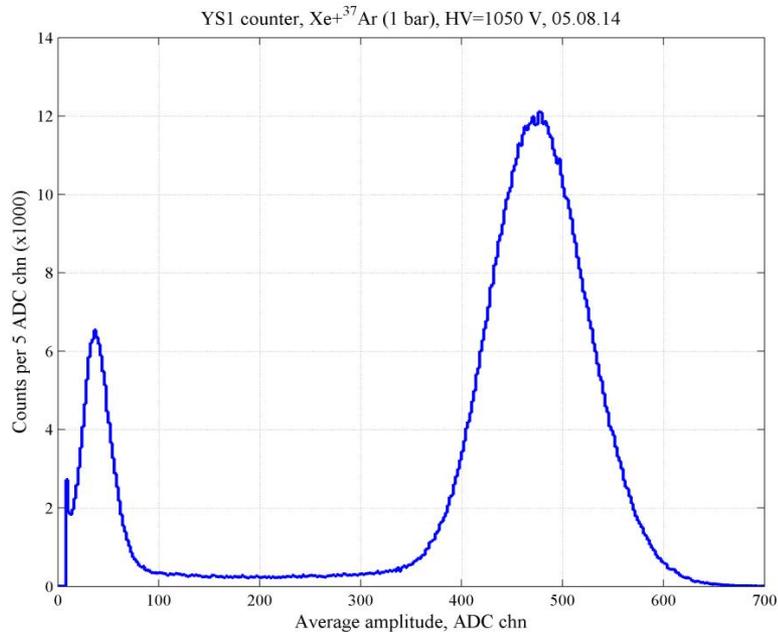


Кварцевый счетчик: $L = 40$ мм, $d = 4$ мм
ЗПУ (А.Шихин) + LAN10-PCI

Смесь: $\text{Xe}+^{37}\text{Ar}$, 760 мм рт ст

Скорость счета ~ 500 с $^{-1}$

Подложка $\sim 7\%$



Подложка ^{37}Ar : длинный счетчик

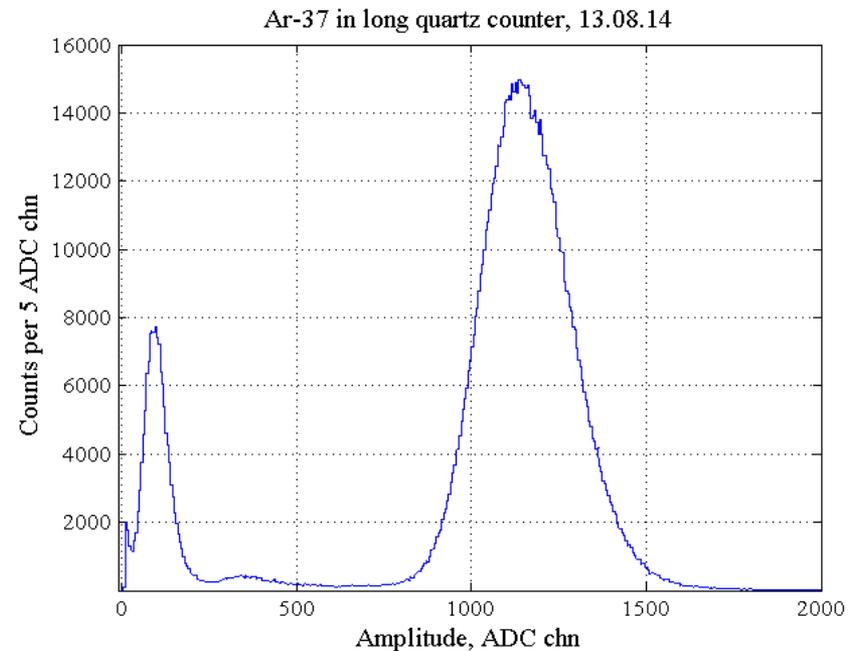
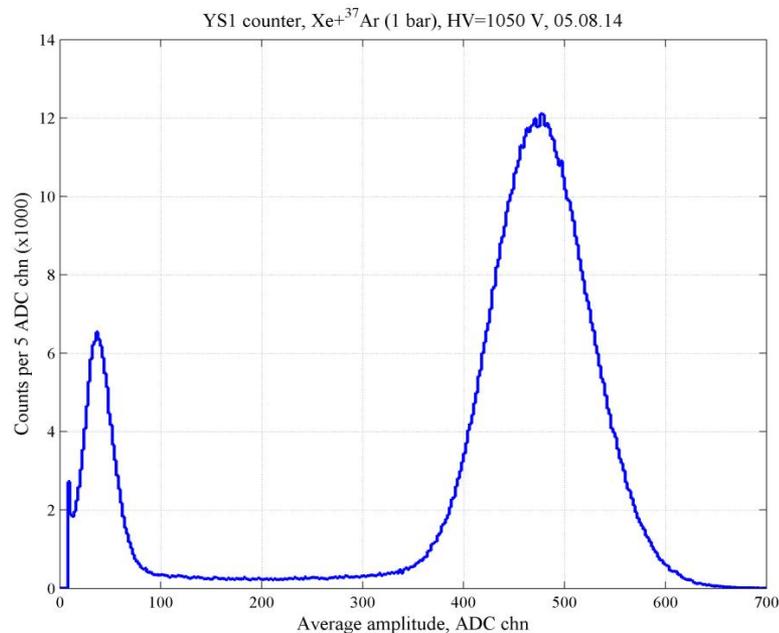
Кварцевый счетчик: $L = 200$ мм, $d = 4$ мм

Смесь: $\text{Xe} + ^{37}\text{Ar}$, 760 мм рт ст, Скорость счета ~ 500 s^{-1} , ььь

Подложка $\sim 3\%$

Краевой эффект снизился в 5 раз (200/40), стеночный не изменился

Тогда стеночный эффект $\sim 2\%$, краевой эффект порядка 1%



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

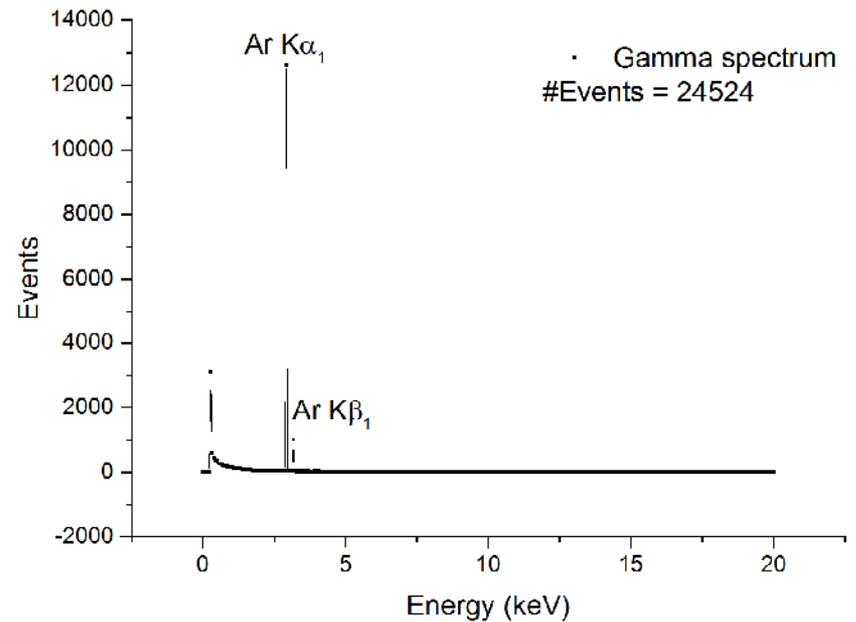
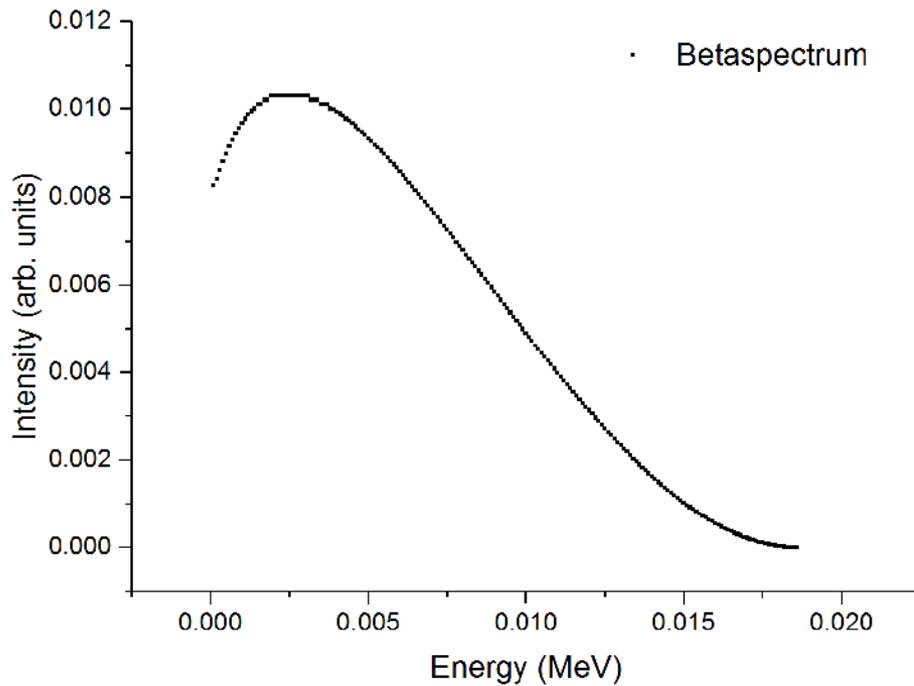
Другие сист. факторы

- возбуждение электронами характеристического рентгена (Ar, Xe)
величина 10^{-3}
- спектр конечных состояний молекул T-³He, H-³He, D-³He
смещение порядка 10..20 эВ, величина 10^{-3}
- тормозное излучение трития
величина $10^{-4} \dots 10^{-3}$

Возбуждение излучения в аргоне

Симуляция возбуждения гамма-излучения в аргоне , GEANT-IV

Статистика 10^7 событий, выход на электрон 0.2%



Заключение

Особая признательность Виктору Янцу

А.Берлев, Н.Лиховид, А.Шихин, А.Калихов

И.Ткачев

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!