

# Измерение спектра антинейтрино $^{40}\text{K}$ из Земли на основе данных измерения потоков нейтрино детектором Борексино

Л. Б. Безруков, В. П. Заварзина, И. С. Карпиков, А. С.  
Курлович, А. К. Межох, С. В. Силаева, В. В. Синёв

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных  
исследований Российской академии наук, г. Москва

А. Ф. Громцева, П. Ю. Наумов

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
образования Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г.  
Москва

2021

# Вопросы, обсуждаемые в докладе

- Измерение потока солнечных нейтрино СНО цикла в Borexino
- Анализ данных эксперимента Borexino по поиску потока  $^{40}\text{K}$  гео- $\nu$

# Измерение потока СНО нейтрино в Borexino

В 2020 году на конференции Neutrino-2020 было объявлено об измерении потока СНО нейтрино детектором Borexino.

Двумя анализами получены значения:

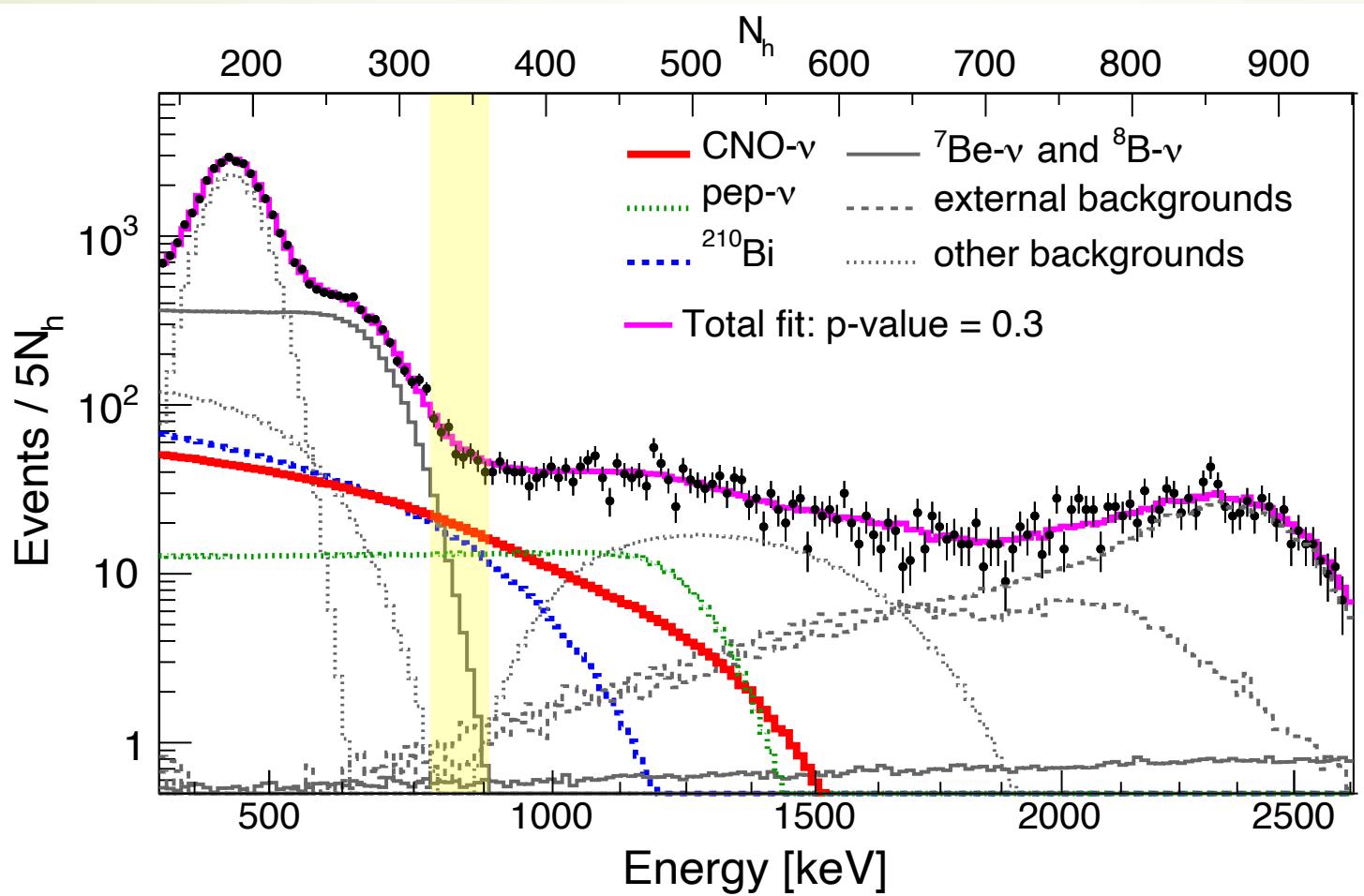
СА:  $5.6 \pm 1.6$  cpd / 100t PC

Почему такая  
разница?

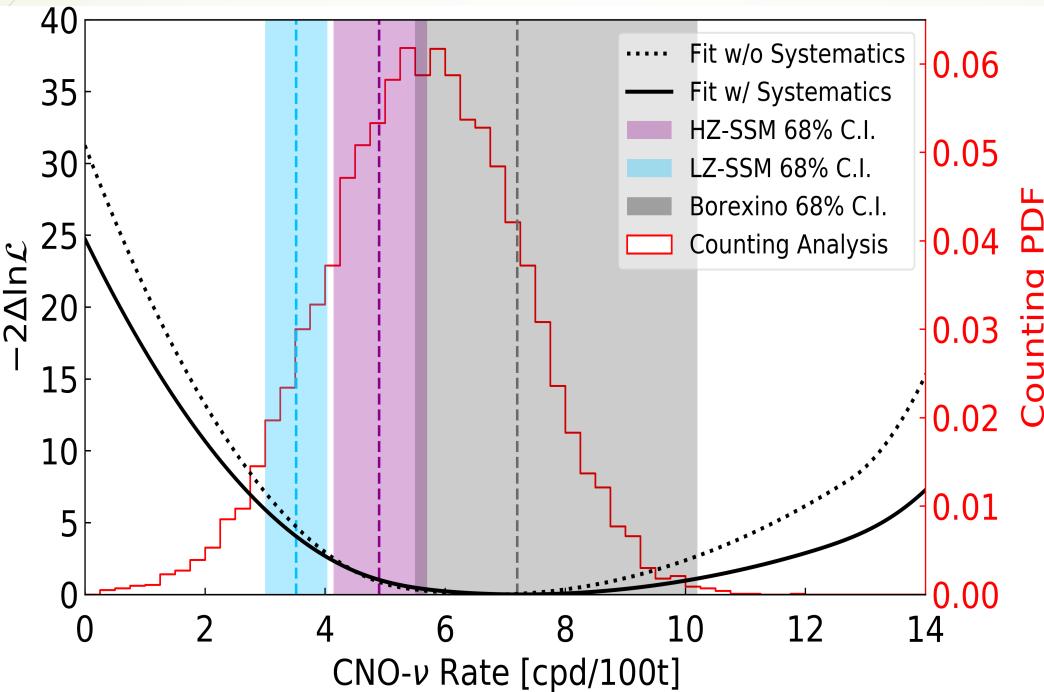
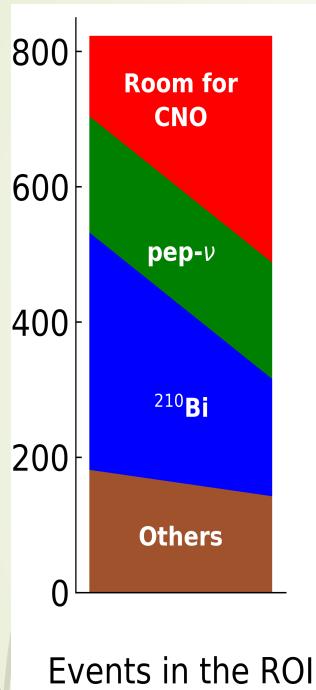
МВ:  $7.2^{+3.0}_{-1.7}$  cpd / 100t PC

Nature **587**, 577 (2020); arXiv: 2006.15115

# Измеренный Borexino спектр за 664 дня



# Counting Analysis (CA)

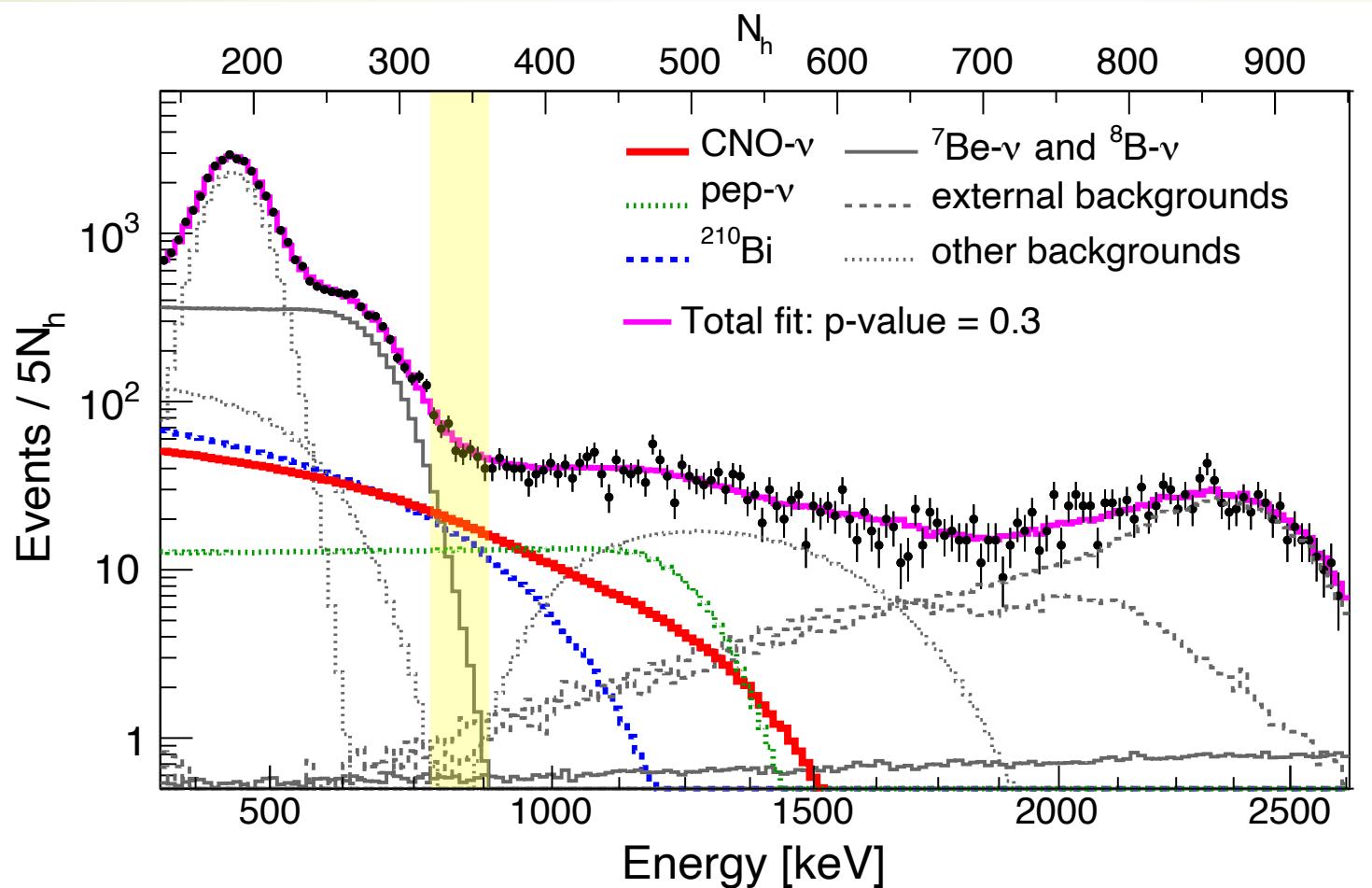


$5.6 \pm 1.6$  cpd / 100t PC

Species ( $S_i$ )	Events	Fraction
N	$823 \pm 28.7$	
$^{210}\text{Bi}$	$261.5 \pm 29.6$	0.31
$\nu(\text{pep})$	$171.7 \pm 2.4$	0.21
$\nu(^7\text{Be})$	$86.8 \pm 2.6$	0.10
$^{11}\text{C}$	$57.9 \pm 5.8$	0.07
Others	$15.6 \pm 1.6$	0.02
$\sum_i S_i$	$593.5 \pm 30.4$	0.71
$N - \sum_i S_i$	$229.5 \pm 41.8$	0.29

**Mean:** 5.637  
**RMS:** 1.599  
**Gaussian fit:**  
 $\mu = 5.631 \pm 0.016$   
 $\sigma = 1.597 \pm 0.011$   
 $\chi^2/\text{ndf} = 38.2/42 = 0.910$

# Multivariate Fit (MV)

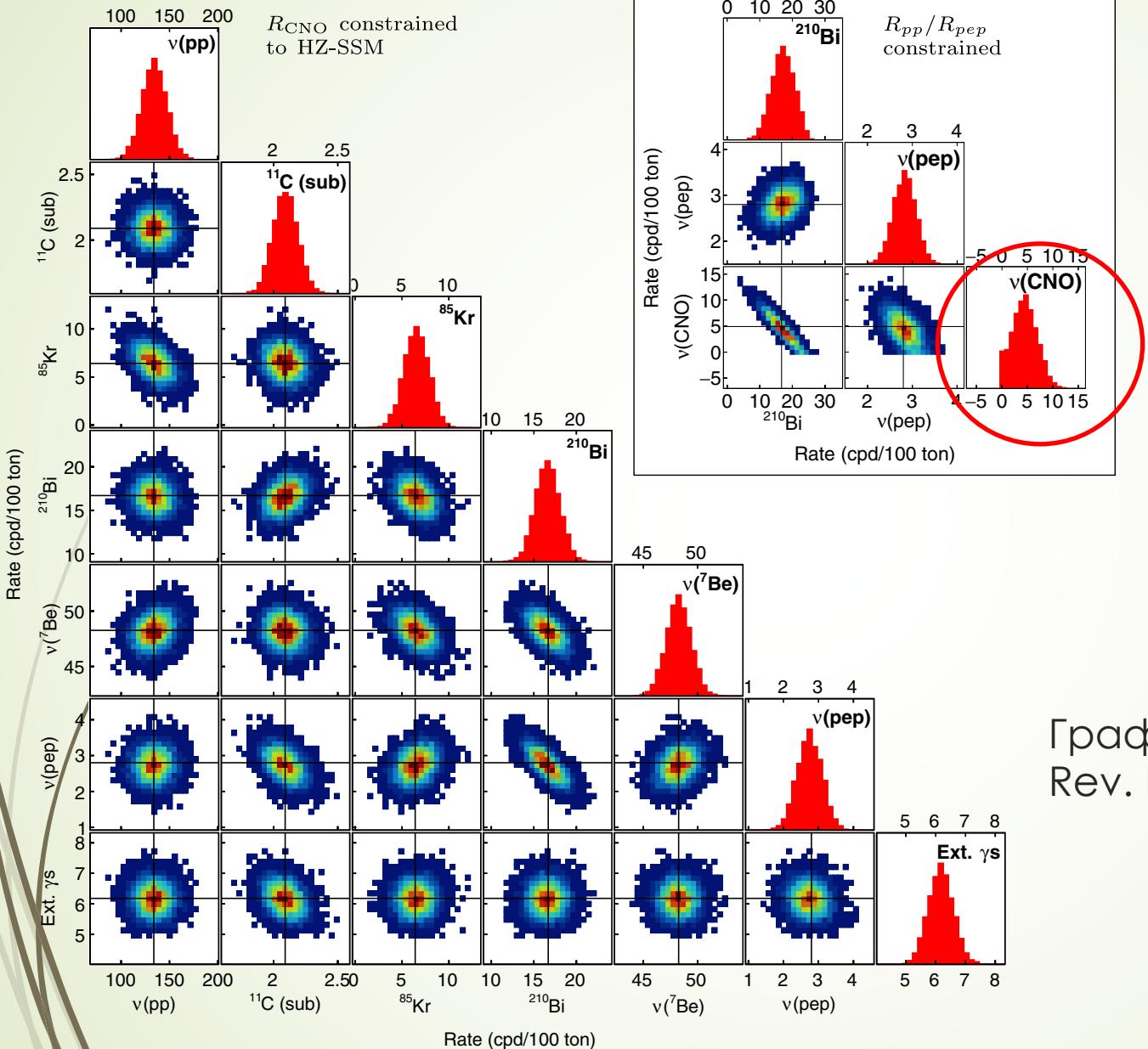


$7.2^{+3.0}_{-1.7}$

cpd / 100t PC

Какое значение точнее 5.6 cpd или 7.2 cpd ?  
Почему на одних и тех же данных получены разные  
значения?  
Как эти значения соотносятся с 4.9 cpd – Hz ?

Была использована неправильная форма  
спектра для СНО нейтрино ?!  
Существует еще какой-то спектр, не учтенный  
в анализе и искажающий спектр СНО ?!



Графики из работы Phys.  
Rev. D100, 082004, 2019

Можно сделать вывод, что присутствует еще какой-то спектр, который складывается со спектром СНО и искажает его форму.

Например, это может быть спектр геонейтрино  $^{40}\text{K}$

Детектор Borexino может, в принципе,  
видеть антинейтрино и нейтрино от  $^{40}\text{K}$

# Как зарегистрировать нейтрино от ${}^{40}\text{K}$ ?

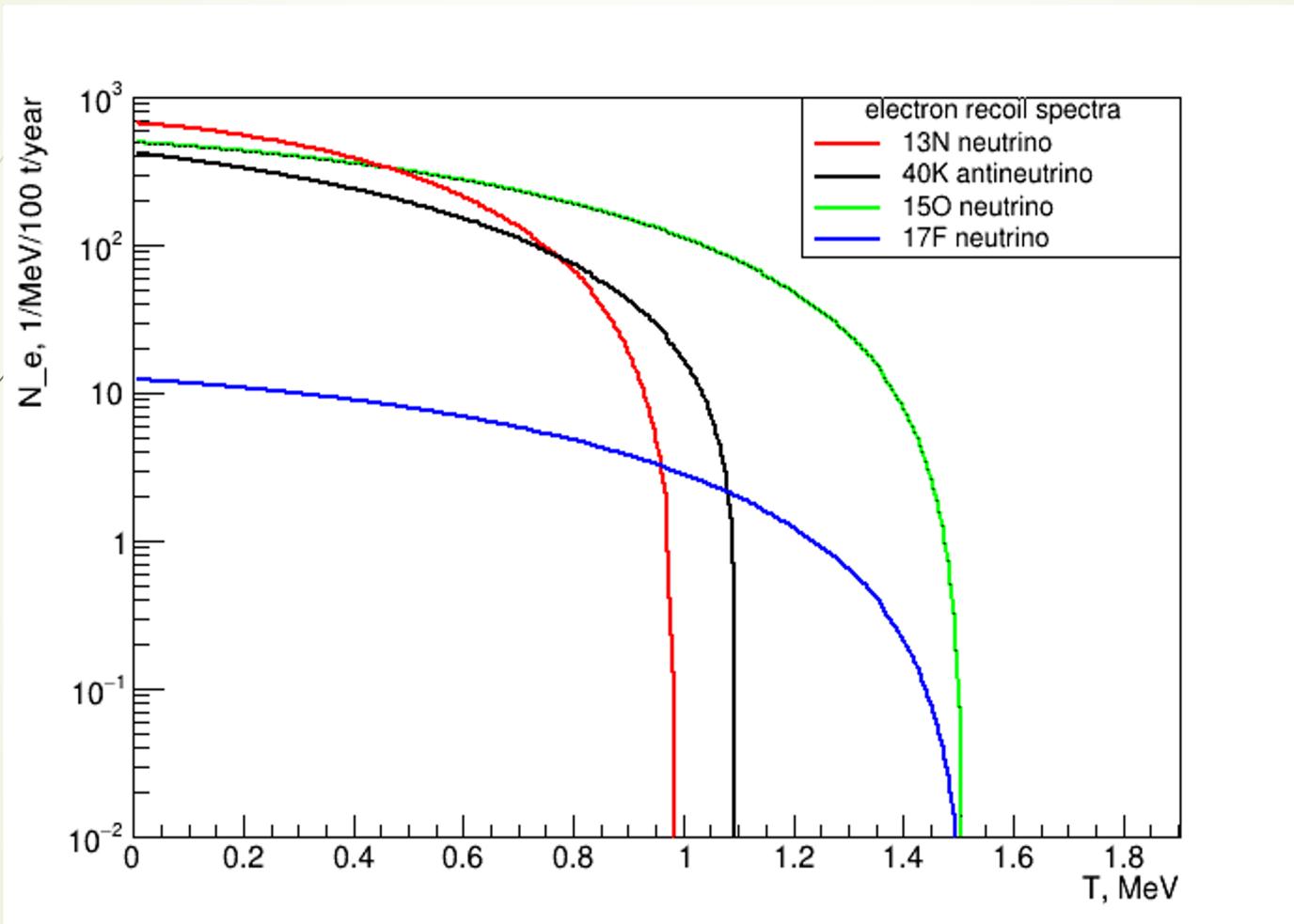
Реакция упругого рассеяния на электронах



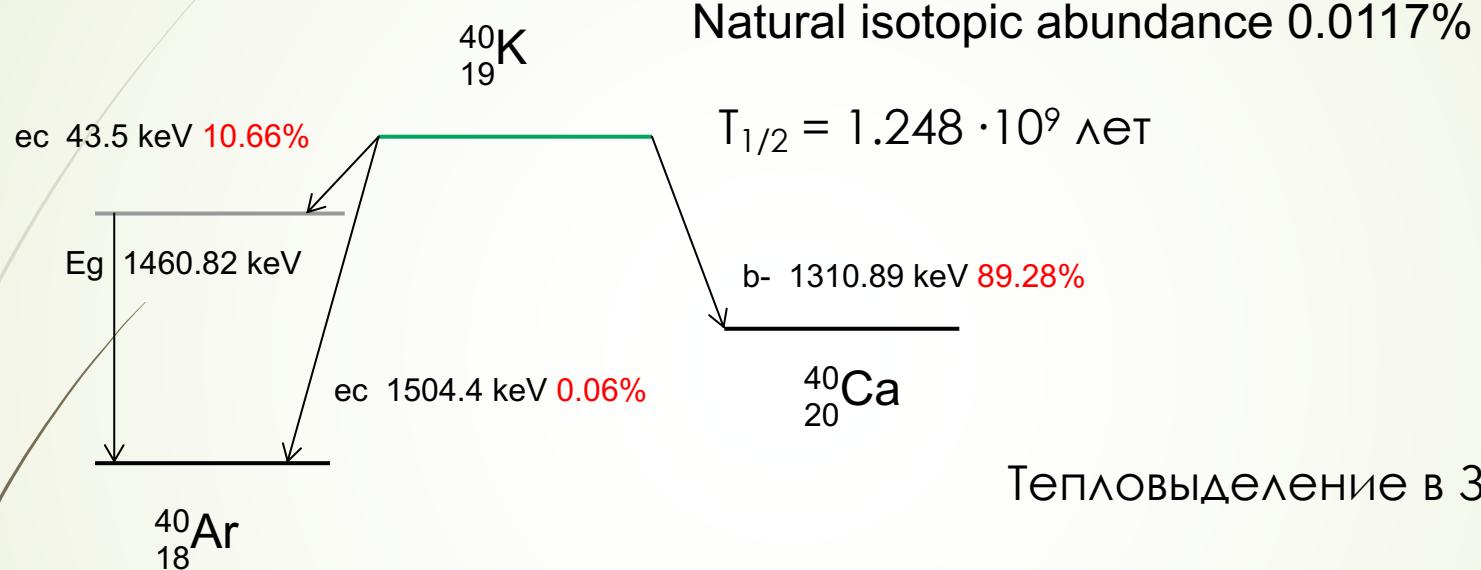
$$\frac{d\sigma^W}{dT} = \frac{g_F^2}{\pi} m \times \left[ (1 + 2x^2)^2 \left(1 - \frac{T}{E}\right)^2 + 4x^2 - 2x^2(1 + 2x^2) \frac{mT}{E^2} \right]$$

$$g_F^2 \frac{m}{\pi} = 4.308 \times 10^{-45} \text{ cm}^2 \quad x^2 = \sin^2 \theta_W = 0.232$$

# Спектры СНО нейтрино и спектр антинейтрино $^{40}\text{K}$ (электроны отдачи)



# Схема распада $^{40}\text{K}$



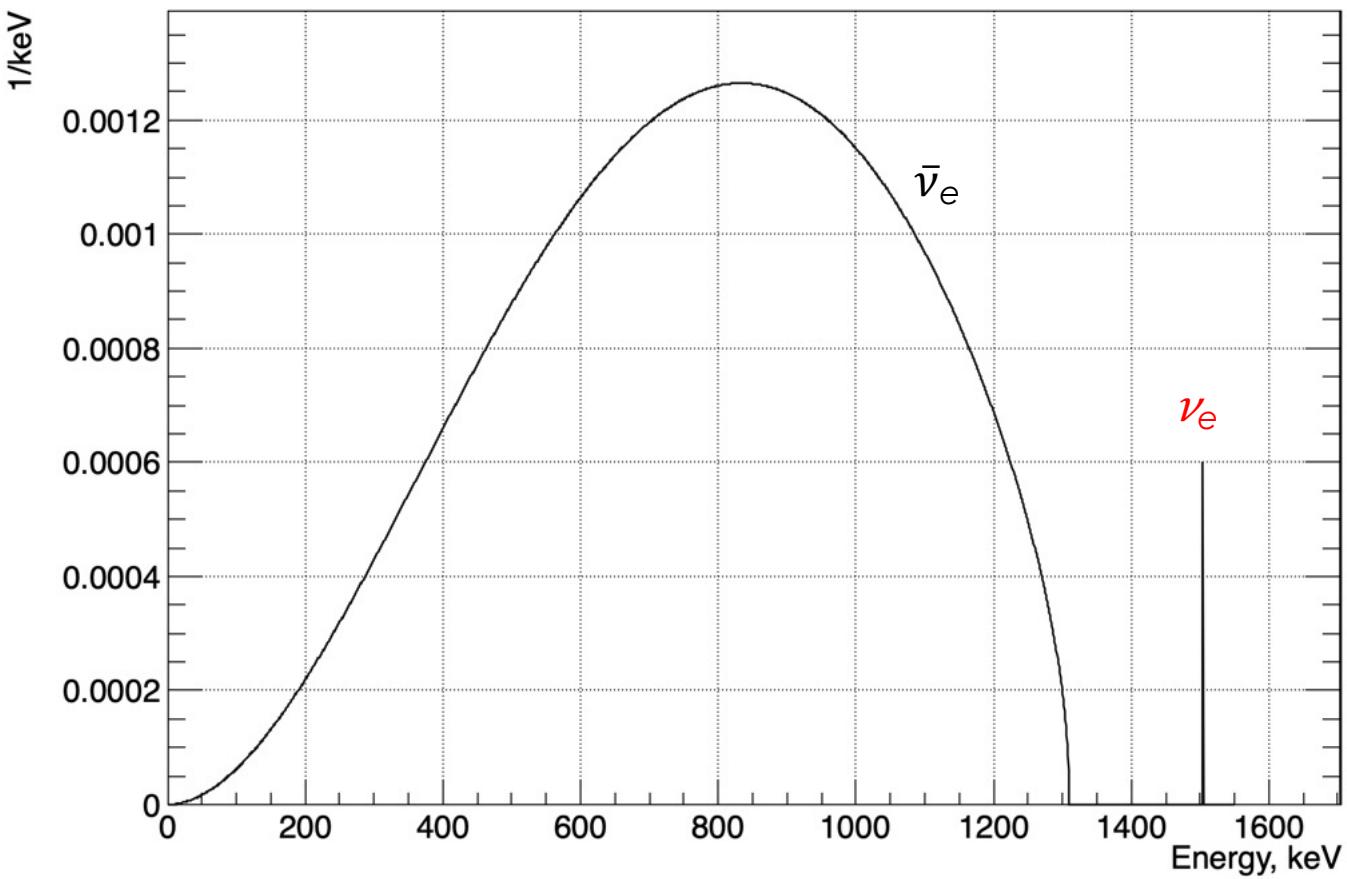
Тепловыделение в Земле

BSE:  $a_{\text{K}} = 0.024\%$  - 5 TW

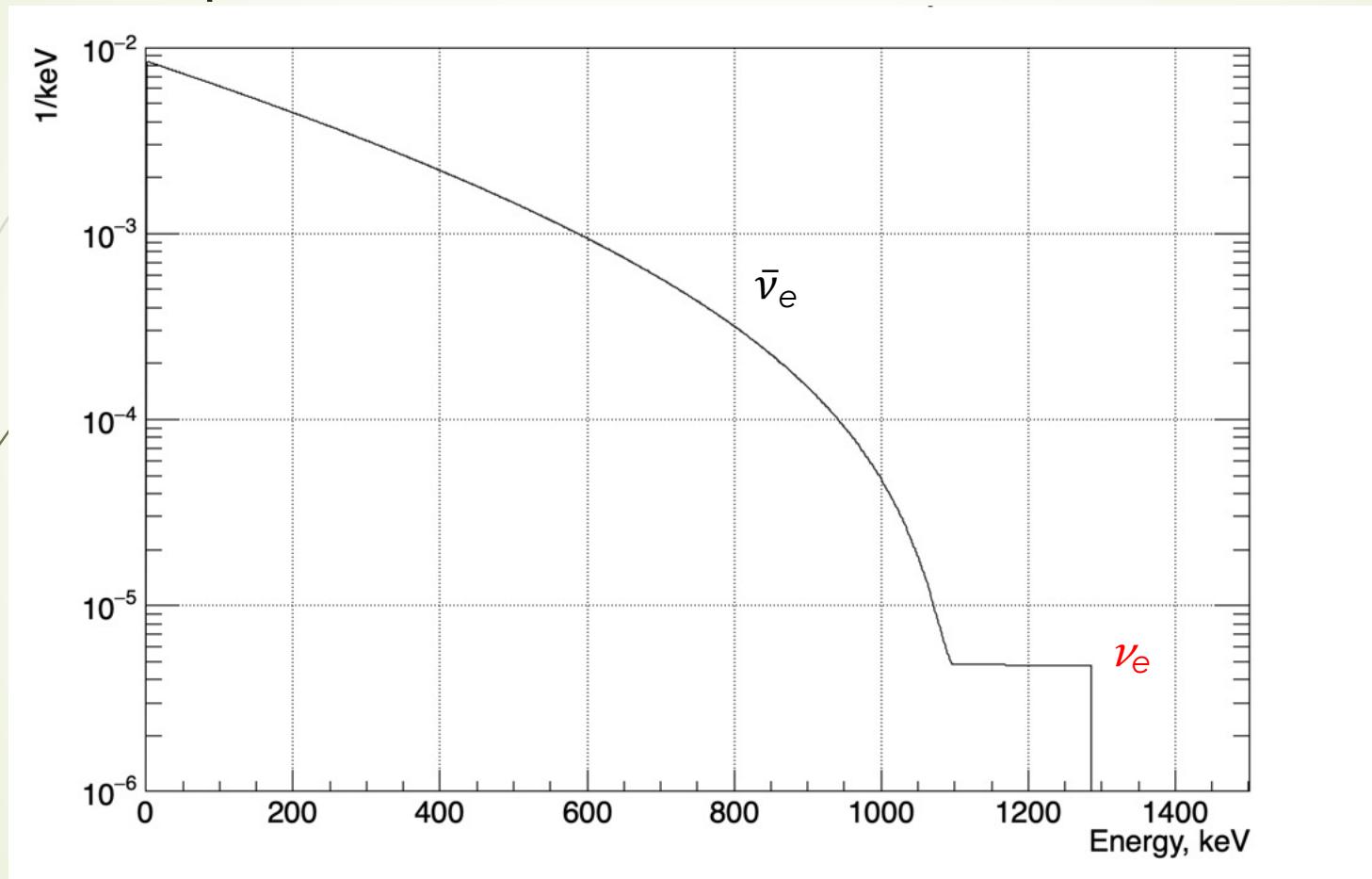
$a_{\text{K}} = 1.0\%$  - 208 TW

От Солнца поступает 118 000 TW

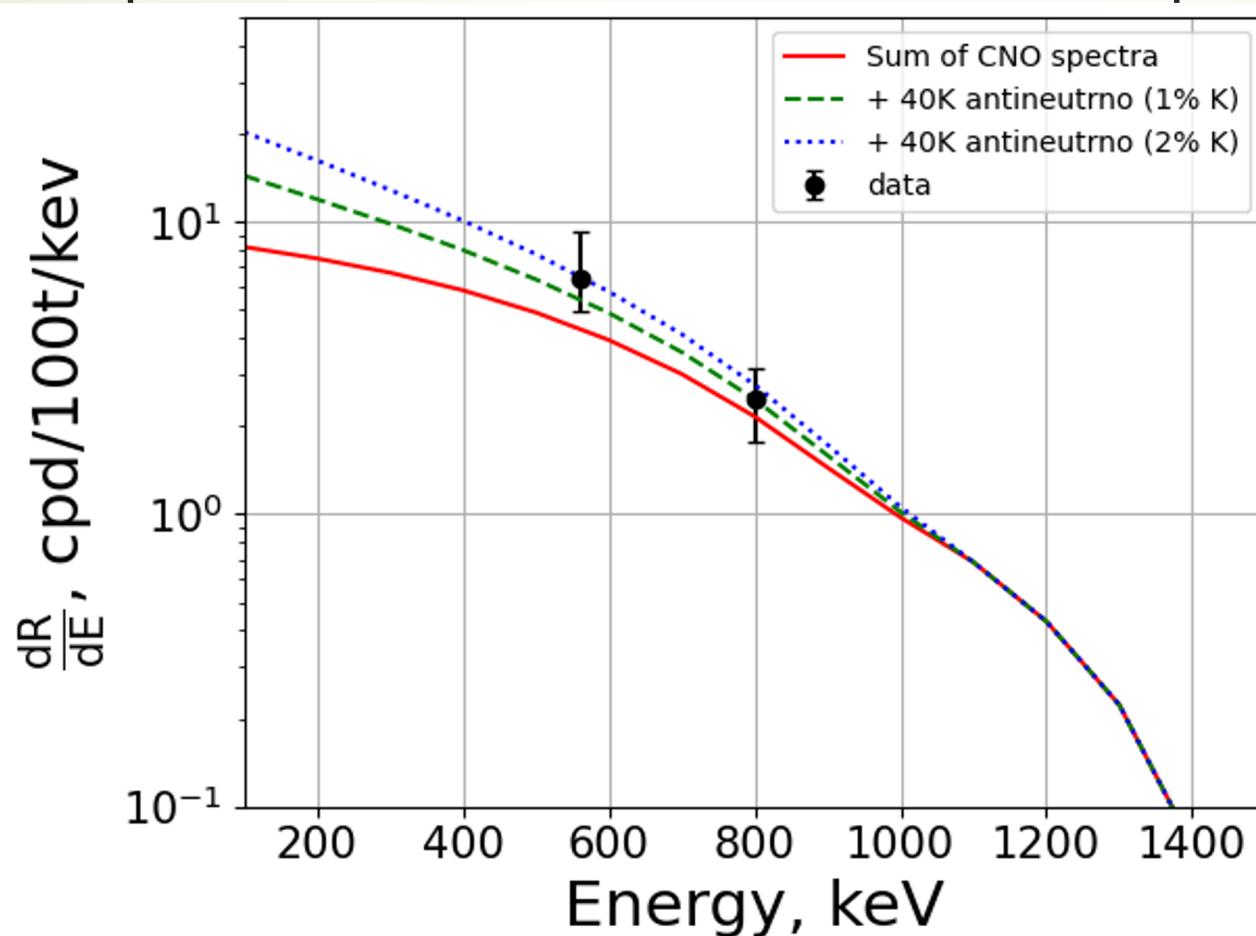
## $^{40}\text{K}$ $\bar{\nu}_e$ and $\nu_e$ spectra



# Полный поток антинейтрино и нейтрино от $^{40}\text{K}$ в виде электронов отдачи



# Предсказанные и наблюденные значения спектра CNO с добавкой спектра $^{40}\text{K}$



CA  $E_{\text{eff}} = 800 \text{ кэВ}$   
MV  $E_{\text{eff}} = 560 \text{ кэВ}$

2004.02533 [hep-ph]

2007.07371 [hep-ph]

Известия РАН. Серия физическая, т. 85,  
№4, 566, 2021

Наш анализ экспериментального спектра,  
полученного коллаборацией Borexino за 664  
дня измерений

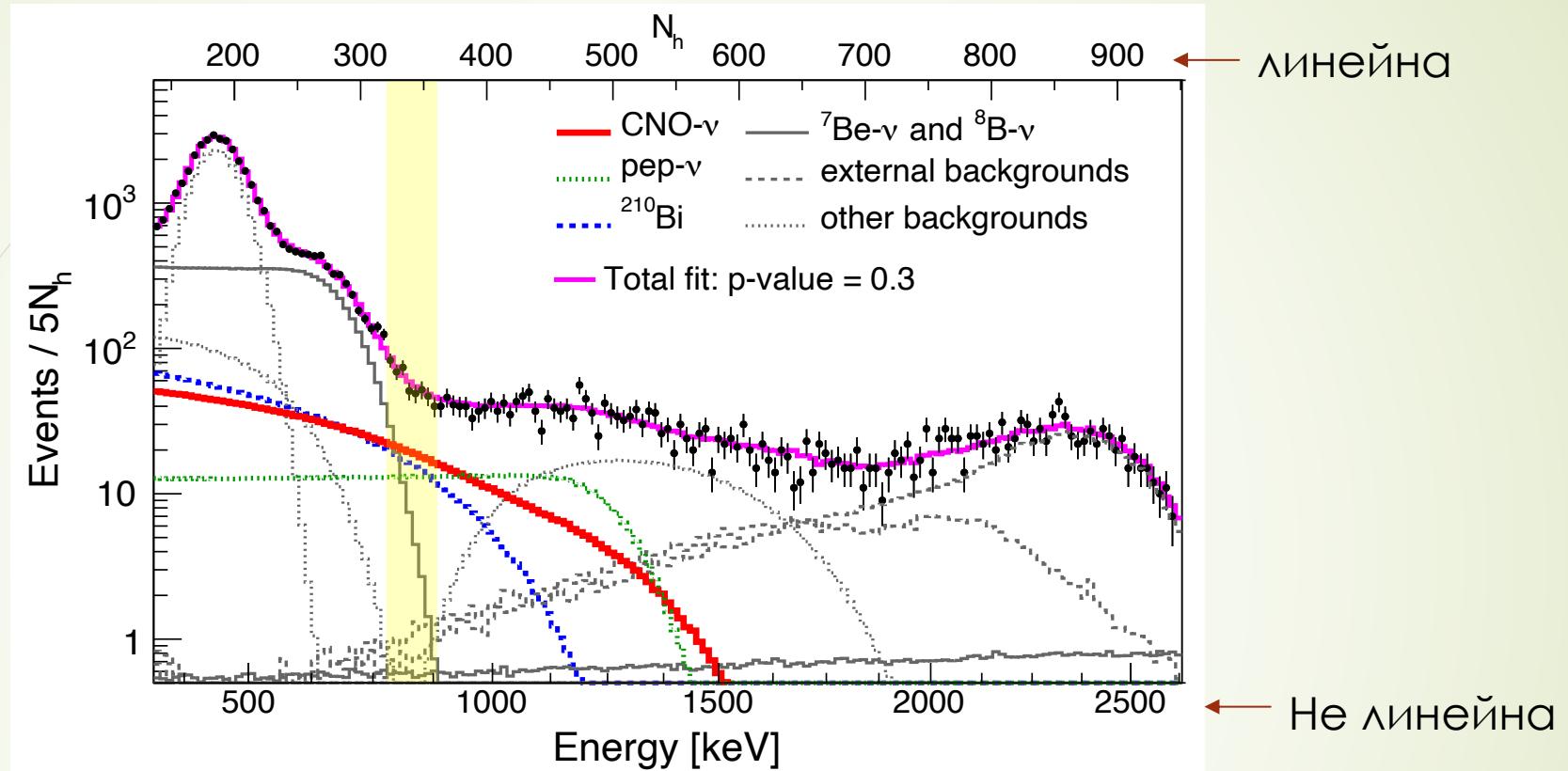


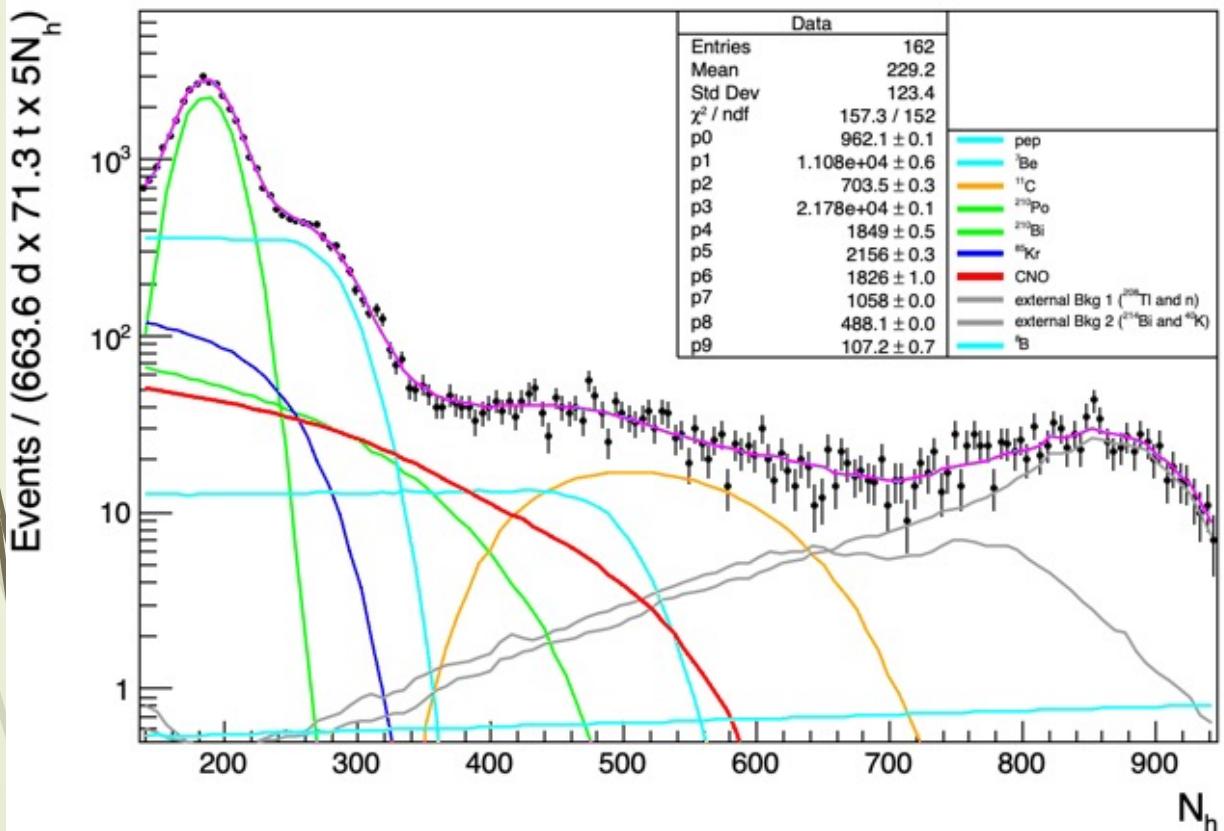
Рисунок 2 из работы Phys. Rev. D 101, 012009 (2020) был оцифрован для использования в анализе.

Оцифрованы все компоненты спектра (всего 10):  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{210}\text{Bi}$ , pep,  $^7\text{Be}$ , CNO,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{11}\text{C}$ ,  $^8\text{B}$ , внешний фон 1 и внешний фон 2.

# Значения параметров подгонки спектра при $\chi^2 = 157.3$

Параметр подгонки	Компонента	Интеграл в диапазоне 320-2675 кэВ	Скорость счета R, 1/(д 100 т)
p0	рер	962.1	$2.74 \pm 0.04$
p1	$^7\text{Be}$	11079.3	$47.7 \pm 0.8$
p2	$^{11}\text{C}$	703.5	$1.6 \pm 0.1$
p3	$^{210}\text{Po}$	21780.8	$260 \pm 3$
p4	$^{210}\text{Bi}$	1849.4	$11.5 \pm 1.3$
p5	$^{85}\text{Kr}$	2156.6	$6.8 \pm 1.8$
p6	CNO	1825.7	$7.2 + 3 - 1.7$
p7	Ext. bkg 1	1058.2	$4.9 \pm 0.8$
p8	Ext. bkg 2	488.1	$2.3 \pm 0.6$
p9	$^8\text{B}$	107.2	0.23

# Повторенный анализ измеренного Borexino спектра со своими фонами



Спектр линеен в  
шкале ф.э.  
162 точки спектра с  
шагом 5 ф.э.  
 $\chi^2 = 157.266$  на 152 dof



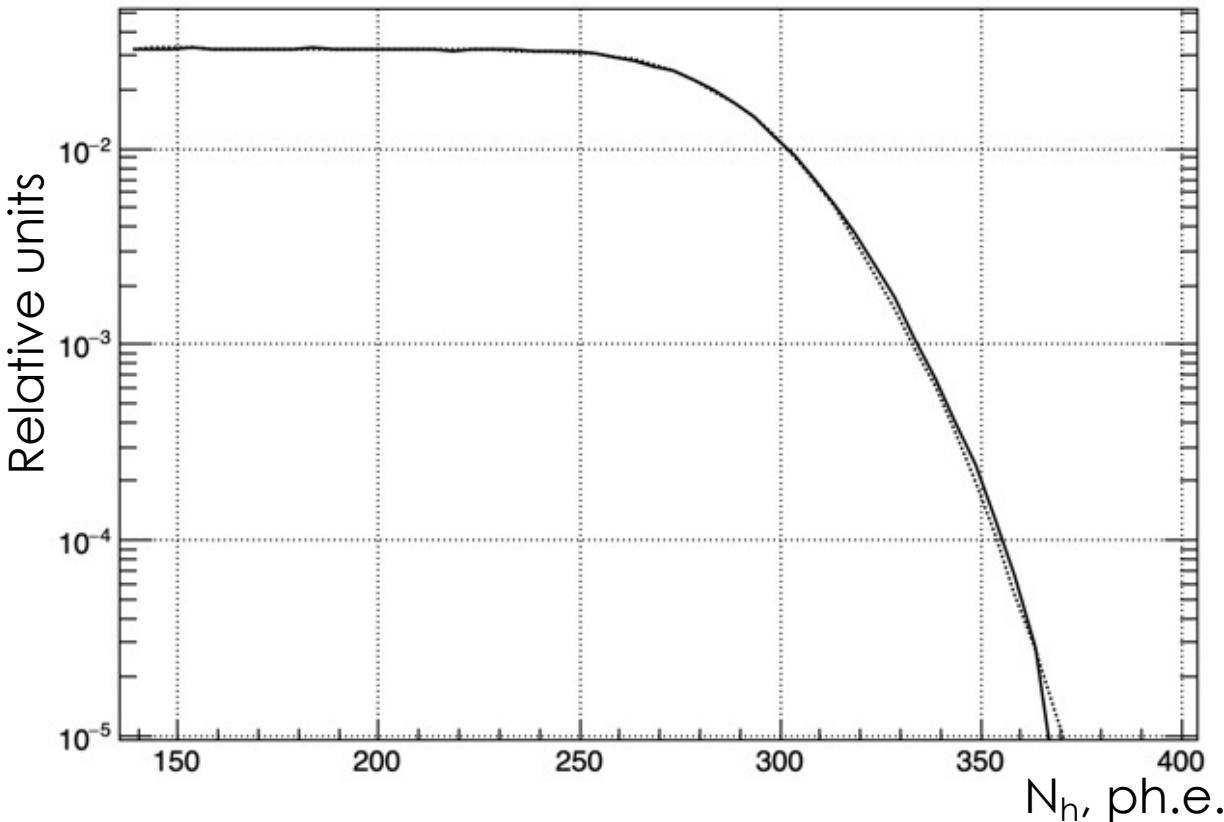
Добавление  $^{40}\text{K}$  в анализ

# Как перейти в шкалу фотоэлектронов?

В работе **PHYS. REV. D 100, 082004 (2019)** описан алгоритм пересчета энергии в наблюдаемое число ф.э.

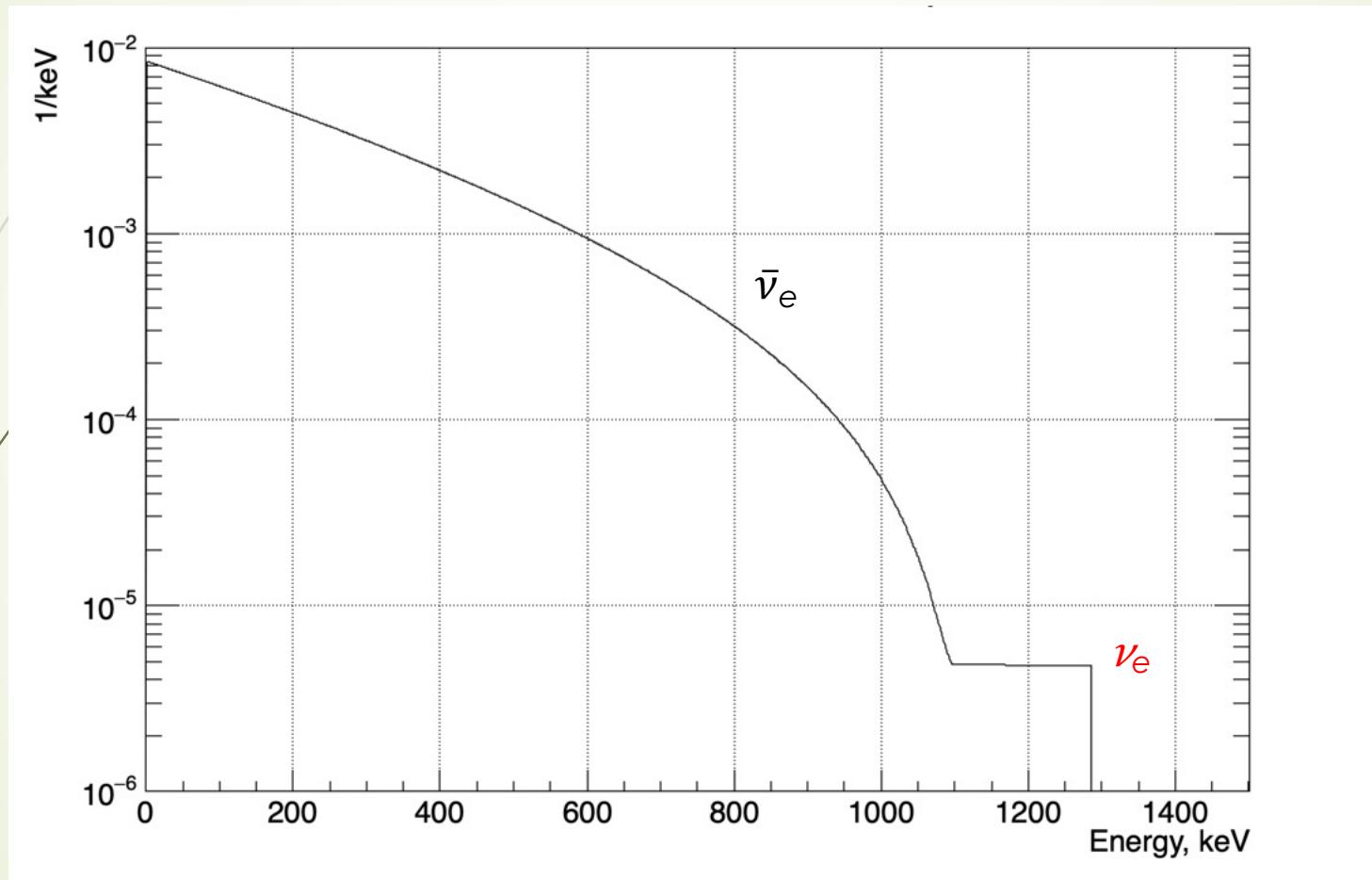
1. вычисляется наблюдаемая энергия с учетом тушения света в сцинтилляторе и добавления черенковского света.
2. Вычисляется среднее число ф.э., соответствующее этой энергии.
3. Размывается это значение по Пуассоновскому закону с вычисленной шириной.

# Сравнение спектра электронов отдачи для нейтрино ${}^7\text{Be}$ в шкале ф.э.

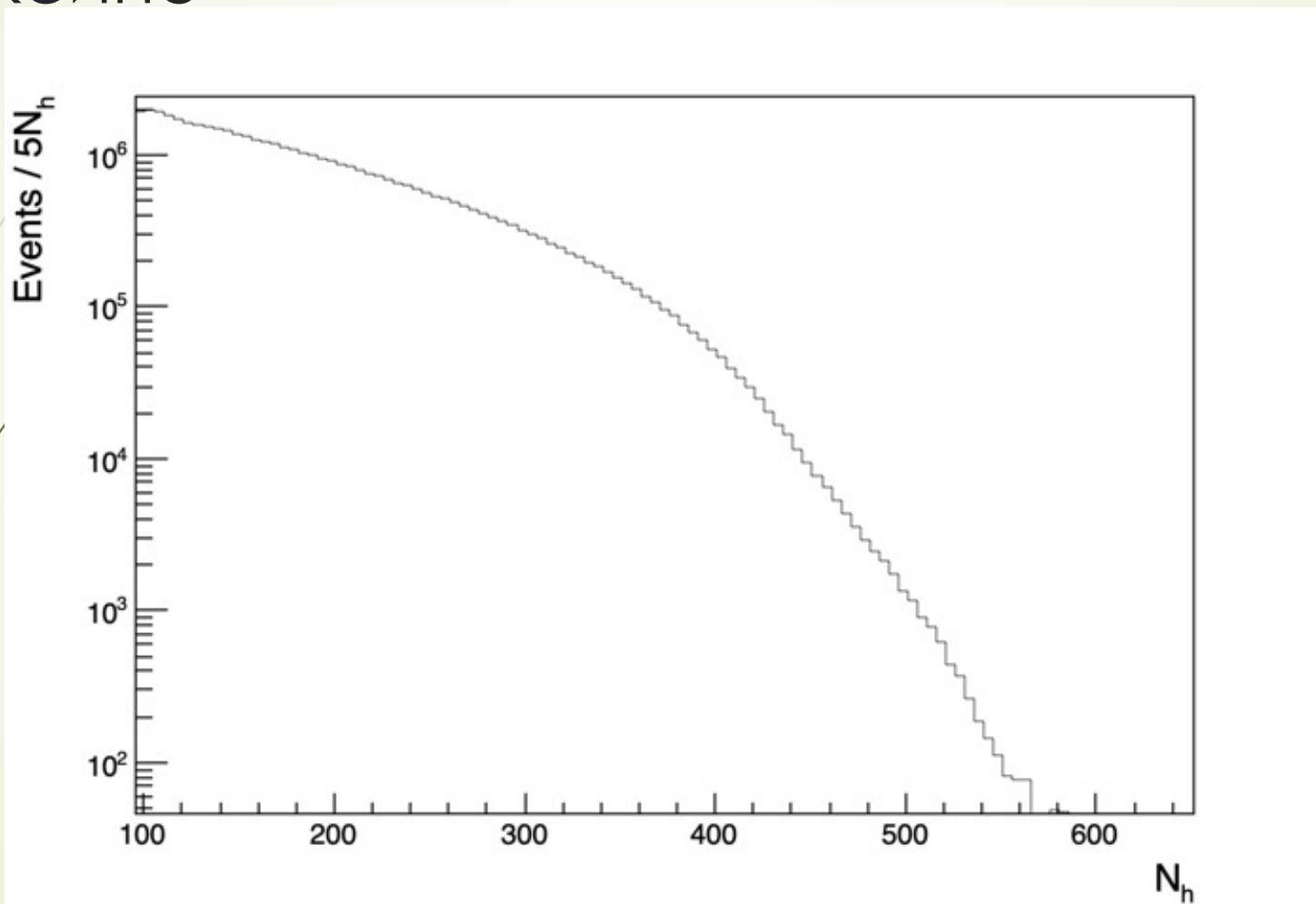


Сплошная – из  
статьи Борексино,  
Пунктир – наш  
расчет

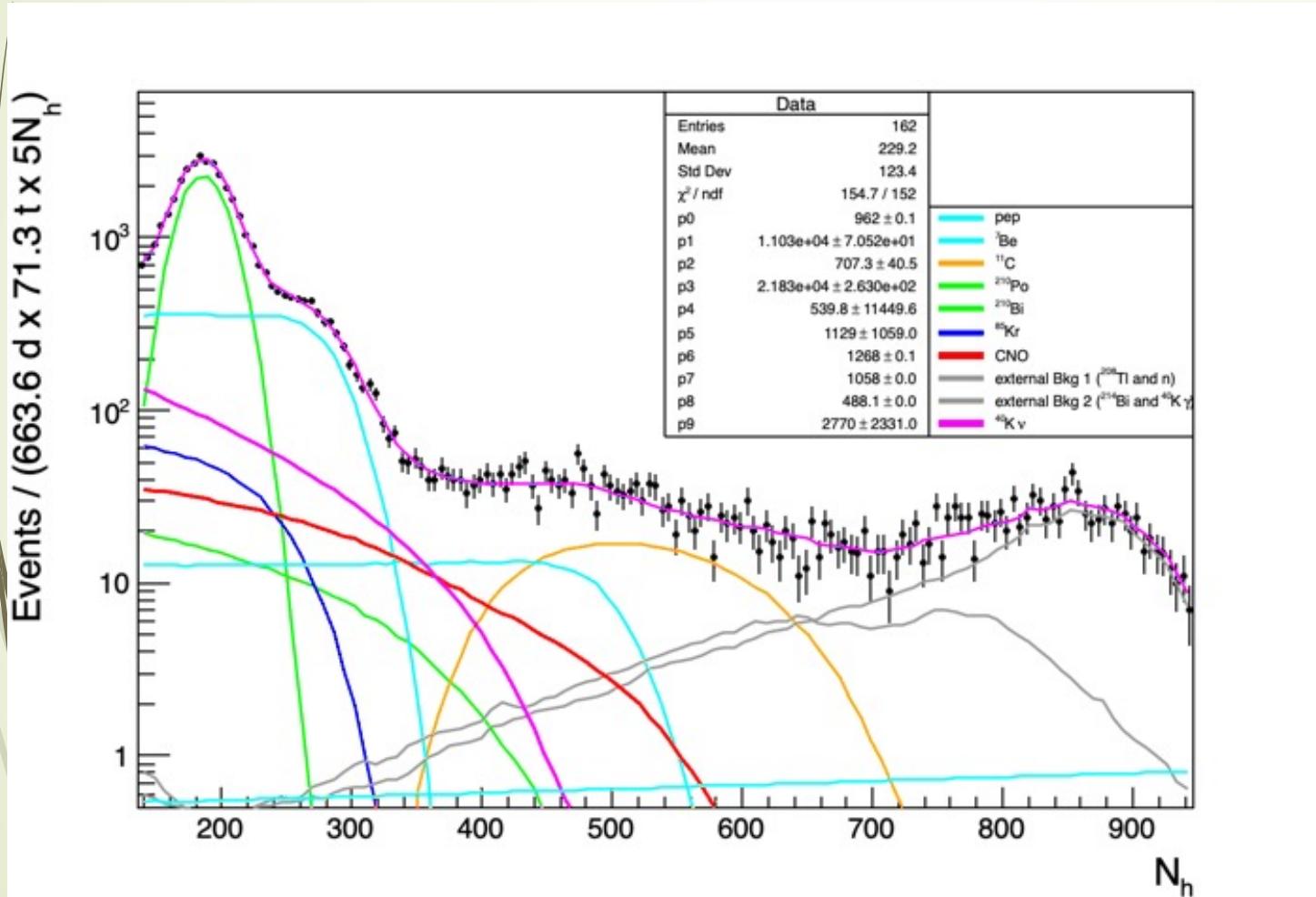
# Полный поток антинейтрино и нейтрино от $^{40}\text{K}$



# Спектр $^{40}\text{K}$ в шкале фотоэлектронов Борексино



$^{40}\text{K}$  – свободный параметр, СНО – модельно выбираемый (3 – 5),  
 3.5 – малая металличность (LZ), 4.9 – большая (HZ).



$$\chi^2 = 154.71 \text{ на } 152 \text{ dof}$$

CNO	5.0
$^{40}\text{K}$	13; <b>5.5%</b>

# Результат проверки гипотезы о наличии $^{40}\text{K}$ скорости счета, $R_i / (\text{d} \times 100 \text{ t})$

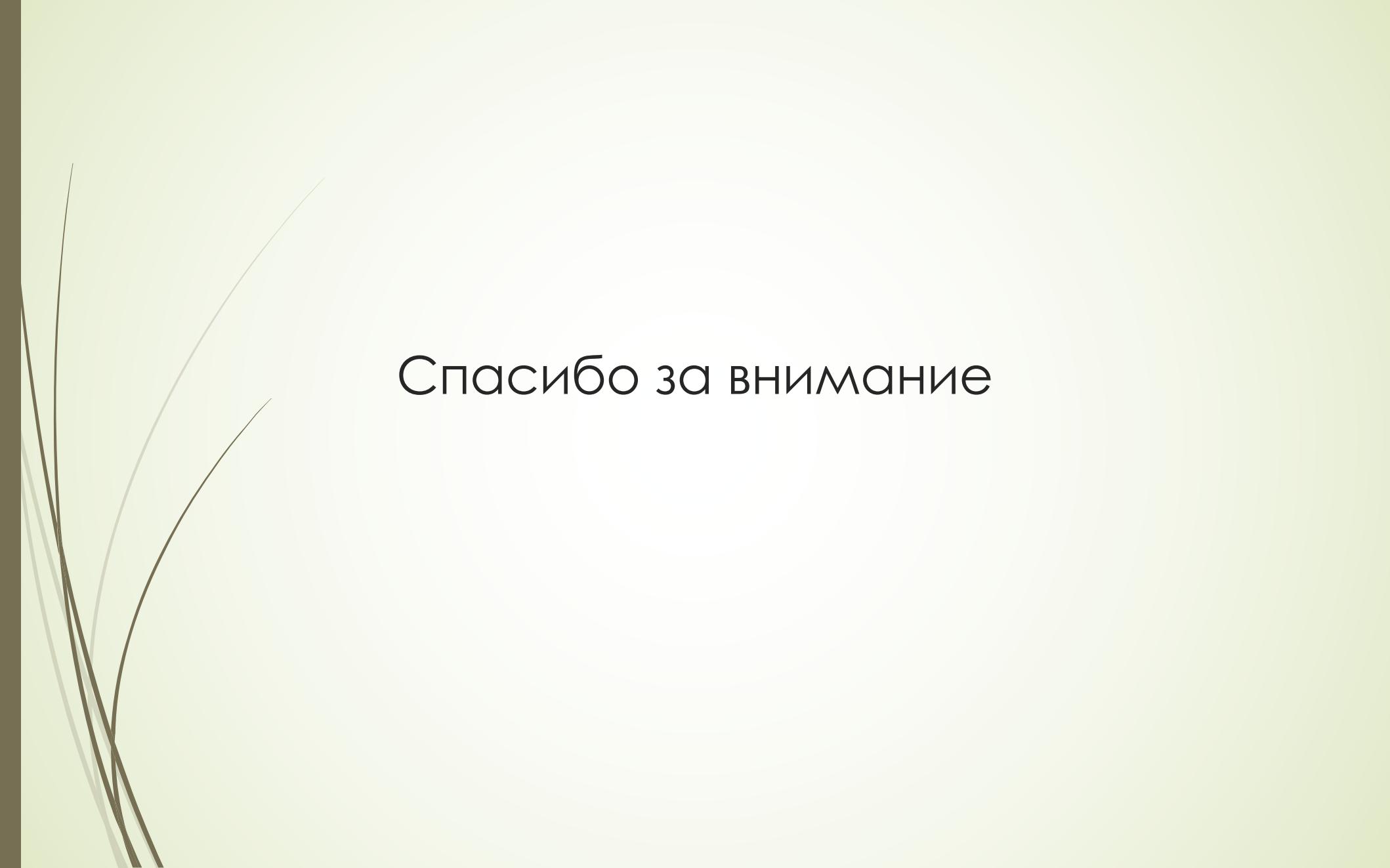
	рер	$^7\text{Be}$	$^{11}\text{C}$	$^{210}\text{Bi}$	$^{85}\text{Kr}$	CNO	$^{40}\text{K} (\%)$	Фон 1	Фон 2	$\chi^2$
<b>1</b>	2.74	$46.6 \pm 1.7$	$1.6 \pm 0.1$	$8.7 \pm 8.6$	$4.2 \pm 3.6$	3	$8.6 \pm 11.2$ (3.7)	4.9	2.5	157.148
<b>2</b>	2.74	$47.0 \pm 1.7$	$1.5 \pm 0.1$	$5.5 \pm 8.2$	$3.8 \pm 3.5$	4	$10.8 \pm 10.9$ (4.6)	4.9	2.5	155.831
<b>3</b>	2.74	$47.3 \pm 1.7$	$1.5 \pm 0.1$	$2.6 \pm 7.9$	$3.6 \pm 3.3$	5	$12.9 \pm 10.5$ (5.5)	4.9	2.5	154.710

# Заключение

- Эксперимент Borexino приводит данные об измерении потока СНО нейтрино, в которых значение потока принимает значения отличающиеся на одно ст.откл. ( $5.6 \pm 1.6$  и  $7.2$ ).
- Выполнен анализ данных Borexino с введением потока  $^{40}\text{K}$ .
- Получено значение скорости счета событий, вызванных потоком антинейтрино и нейтрино от  $^{40}\text{K}$ , в детекторе Борексино:  $\sim 8 - 13$  событий /день на 100 т.
- Значение  $\chi^2$  оказывается меньше при найденном значении событий от  $^{40}\text{K}$ , чем без него. Данные о скорости счета СНО нейтрино согласуются между собой ( $5.6$  и  $5.0$ ).
- Найденное значение скорости счета соответствует  $4 - 5\%$  содержанию калия в Земле.

# Выводы

- Данных одного эксперимента недостаточно, чтобы сделать окончательный вывод об измерении спектра антинейтрино (и нейтрино) от  $^{40}\text{K}$ .
- Необходимо создание нового детектора такого же типа, что и Borexino, но с меньшими собственными фонами и большей статистикой. То есть он должен иметь более чистую пленку, лучшее энергетическое разрешение и более глубокое залегание.
- Необходимо измерить в независимом эксперименте спектр солнечных нейтрино СНО цикла. Для этого подходит детектор с мишенью из  $^{115}\text{In}$  (LENS).
- Необходим поиск ядер, подходящих для измерения спектра антинейтрино  $^{40}\text{K}$ . Подходит  $^3\text{He}$ , но у него слишком малое содержание в естественной смеси.



Спасибо за внимание



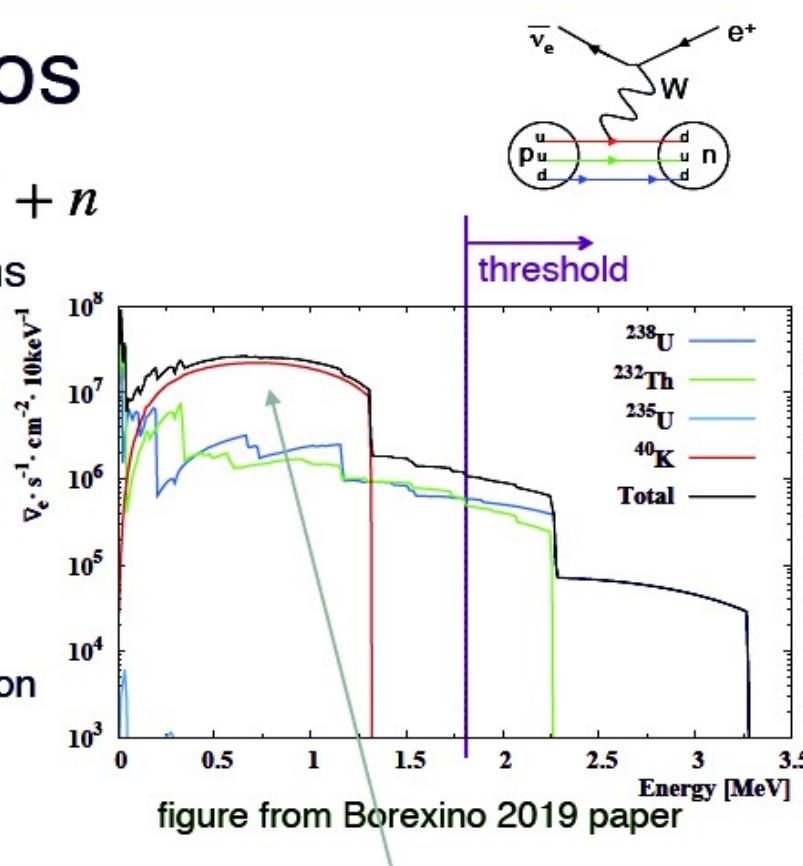
Extra slides

# Радиоактивное тепло: $^{238}\text{U}$ , $^{232}\text{Th}$ , $^{40}\text{K}$ ,... (геонейтрино)

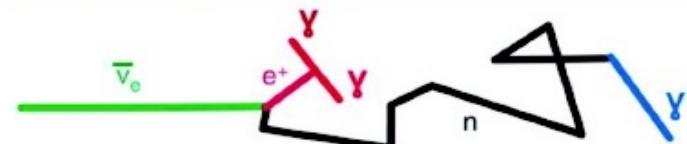
## Detecting Geoneutrinos

□ inverse beta decay:  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$

- “respectable” cross section on protons
- energy threshold  $E > 1.8 \text{ MeV}$
- liquid scintillator is  $\sim\text{CH}_2$  hence lots of protons
  - positron makes first scintillation
  - neutron captures on H
    - mean capture time  $\sim 0.2 \text{ ms}$
  - delayed 2.2 MeV gamma ray from neutron capture makes second scintillation
- distinctive signature helps rejects background counts
  - $e^+$  and  $n$  correlated in time and in position in the liquid scintillator detector



**can't detect  $^{40}\text{K}$  geoneutrinos with this reaction**



Из доклада M. Chen на Neutrino Geoscience 2019

# Important Questions in Geosciences

*related to geoneutrinos*

- what is the radiogenic contribution (U, Th,  $^{40}\text{K}$ ) to heat flow and energetics in the deep Earth? – otherwise inaccessible
  - mantle: convective Urey ratio?
  - geoneutrinos can measure (U and Th for now)
- are the fundamental ideas about Earth's chemical composition and origin correct?
- are the basic models of the composition of the crust correct?
  - geoneutrinos can test which ones are
- distribution of reservoirs in the mantle?
  - homogeneous or layered?
  - lateral variability
- nature of the core-mantle boundary?
- radiogenic elements in the core?
  - in particular potassium
- what is the planetary K/U ratio? if only we could detect  $^{40}\text{K}$  geoneutrinos...



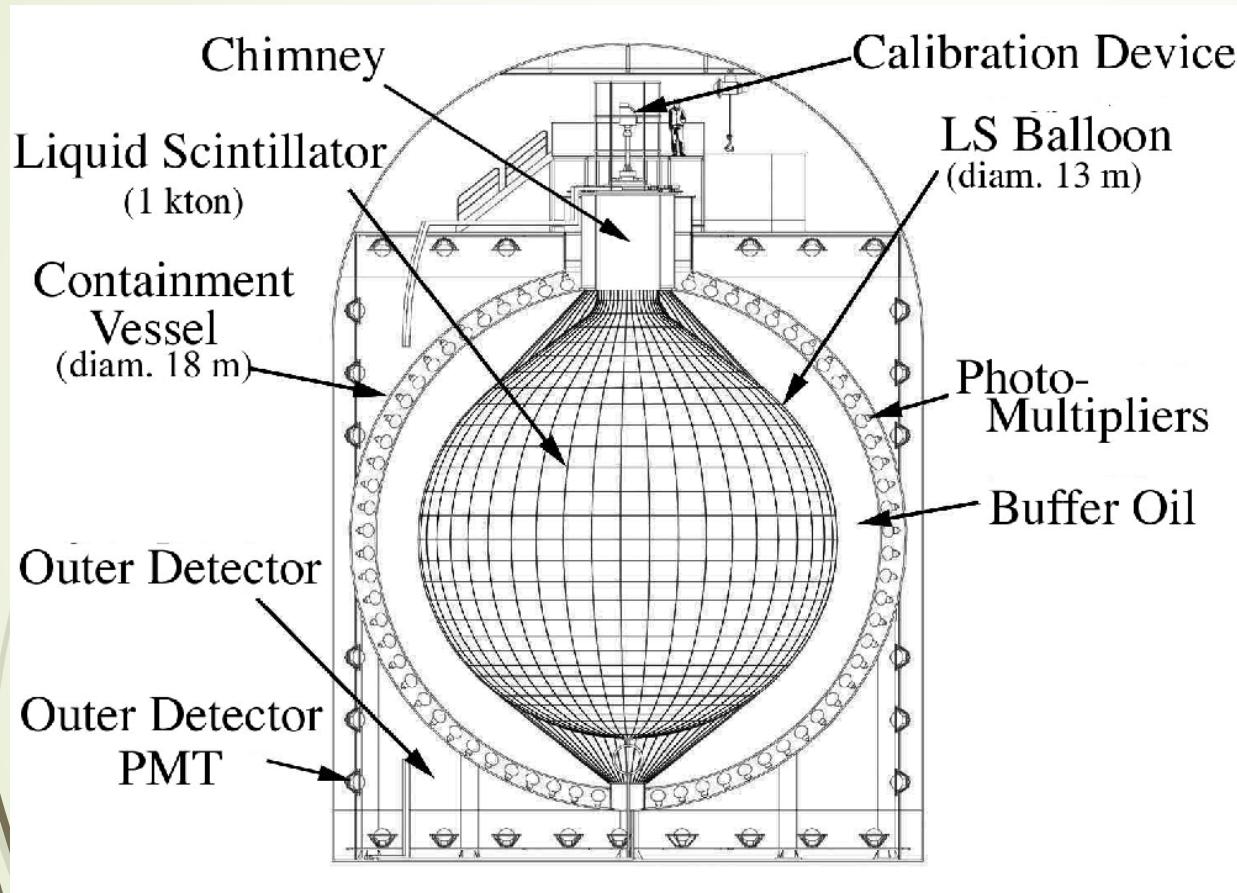
**neutrinos *might* probe**

Из доклада М. Chen на  
Neutrino Geoscience 2019



## Что из генонейтрино уже измерено ?

# KamLAND, Nature 2005



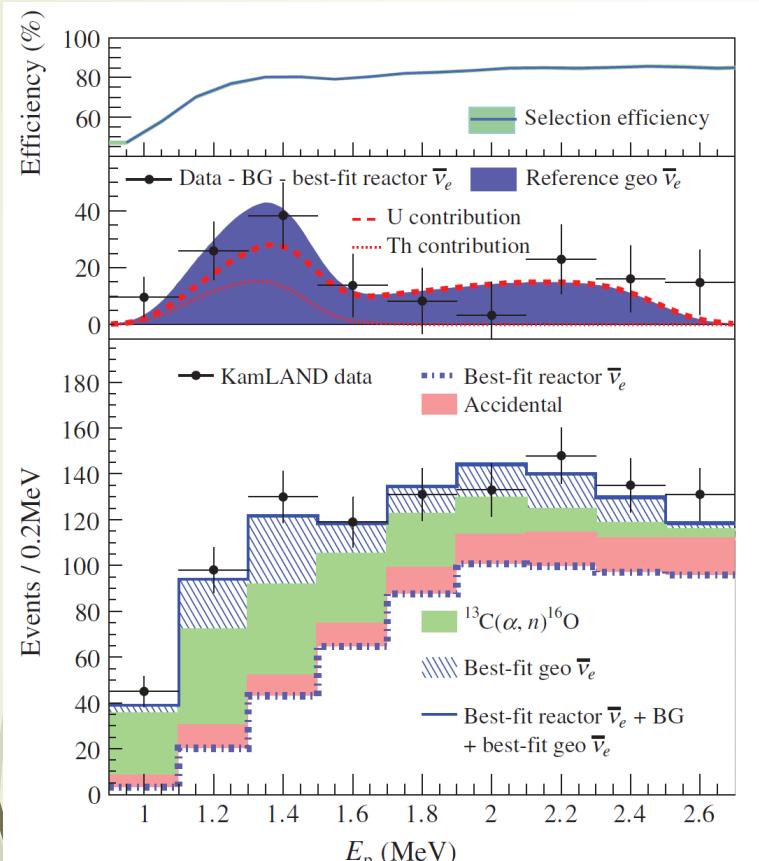
Объем мишени ~1150 м<sup>3</sup>  
жидкого сцинтиллятора  
на основе  
минерального масла  
или 1000 т

Чувствительная область –  
600 т

1910.09321 [hep-ex]

A. Gando, et al.,  
KamLAND  
Collaboration, Phys.  
Rev. D 88 (2013)  
033001

# KamLAND



2013

1130 IBD события за 3901 дня

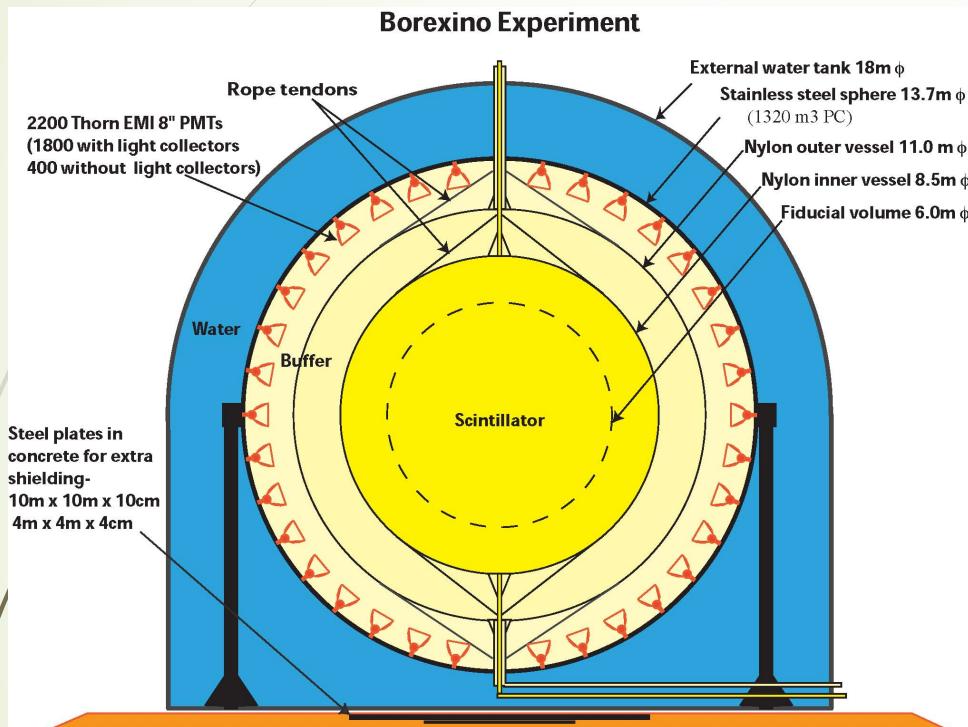
164  $\pm$  26.5 geo

34.9 TNU

1910.09321[hep-ex]

A. Gando, et al., KamLAND  
Collaboration, Phys. Rev. D 88 (2013)  
033001

# Borexino

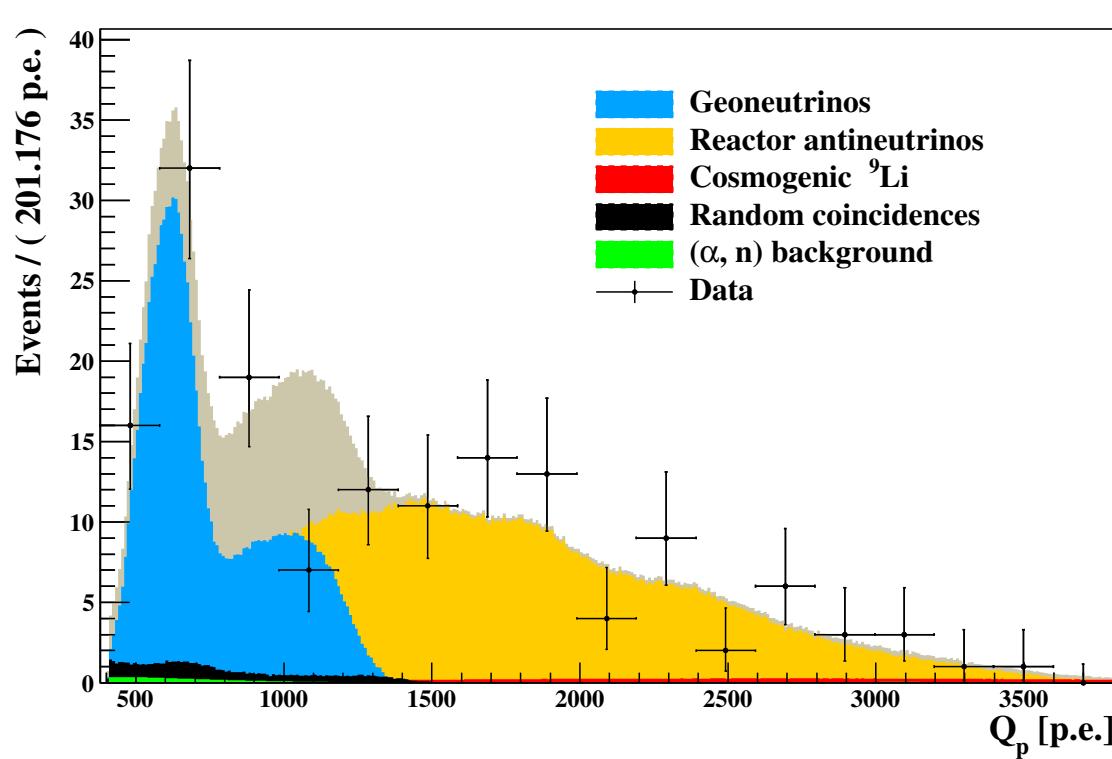


Объем мишени 300 м<sup>3</sup> или  
280 т ЖИДКОГО СЦИНТИЛЛЯТОРА  
на основе PC

Чувствительная область – 100 т

Borexino Collaboration Phys. Rev. D 101, 012009  
(2020); 1009.02257 [hep-ex]

# Borexino



2019

154 IBD события за 3262.74 дня

$51.9 \pm 9$  geo

$92.5 \pm 11$  reactor

$3.3 \pm 1.6$  atmospheric

6 other bkg

46.3 TNU

Borexino Collaboration Phys. Rev. D 101, 012009  
(2020); 1009.02257 [hep-ex]

$^{40}\text{K}$  геонейтрино пока не измерены.

Ищутся методы регистрации, но считается, что поток  $^{40}\text{K}$  очень мал, потому что калия в Земле мало ~0.024%

Но...

Вспомним про измерения детектора Борексино

# Возражения против большого содержания калия в Земле

1. Острова в океане, образованные мантийными извержениями. Мантия обеднена на три порядка калием.
2. Содержание  $^{40}\text{Ar}$  в атмосфере (99.6%). Он весь от  $^{40}\text{K}$ , и весь вышел за миллиарды лет из недр. И его мало!
3. Земля была бы до сих пор расплавлена.

# Ответы на поставленные вопросы

1. Откуда известно с какой глубины пришла порода, образовавшая острова? Определить это невозможно. Сейчас существует точка зрения, что на поверхности оказываются породы с предыдущих эпох, которые каким-то образом выползли (были вынесены) на поверхность.

Вопрос надо ставить по-другому – почему эти породы обеднены калием? Наверняка найдутся ответы.

# Ответы на поставленные вопросы

2. Рассмотрим  $^{40}\text{Ar}$  и спросим – а весь ли он вышел?

В атмосфере Земли присутствуют три изотопа аргона:  $^{36}\text{Ar}$  (0.3365%),  $^{38}\text{Ar}$  (0.0632%) и  $^{40}\text{Ar}$  (99.6003%).

Масса атмосферы  $(5.1352 \pm 0.0003) \cdot 10^{18}$  кг.

Количество ядер  $^{40}\text{Ar}$  в атмосфере  $1.074 \cdot 10^{42}$  Доля распадов  $^{40}\text{K}$  в  $^{40}\text{Ar}$  10.72%.

Начальное количество ядер  $^{40}\text{K}$  в Земле  $1.09 \cdot 10^{43}$  на момент образования Земли.

С учетом его распадов за время существования  $8.75 \cdot 10^{41}$  на сегодня. Итого  $5.81 \cdot 10^{16}$  кг, а в пересчете на природный калий  $4.97 \cdot 10^{20}$  кг.

Получаем  $a_{\text{K}} = 0.008\% < 0.024\%$  (BSE)

Вывод: не весь аргон еще вышел. Какая часть вышла? 1/100?

# Ответы на поставленные вопросы

3. Действительно, Земля бы расплавилась и была бы до сих пор расплавлена, если бы не было других способов теплопередачи кроме кондуктивного.

Есть еще способы передачи тепла, например, горячими газами, идущими сквозь трещины в коре. Мы наблюдаем такую передачу в глубоких шахтах, где температура в верхних слоях оказывается выше, чем в нижних.

Если еще представить теплопередачу за счет выхода водорода из глубинных слоев, то Земля могла и совсем не плавиться. Плавятся только подкоровые области, где идут химические экзотермические реакции от встречи различных элементов.