

Поиск потока гео-антинейтрино от ^{40}K

В.В. Синев^{1,2}, Л.Б. Безруков¹

¹ Институт ядерных исследований РАН

² Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ

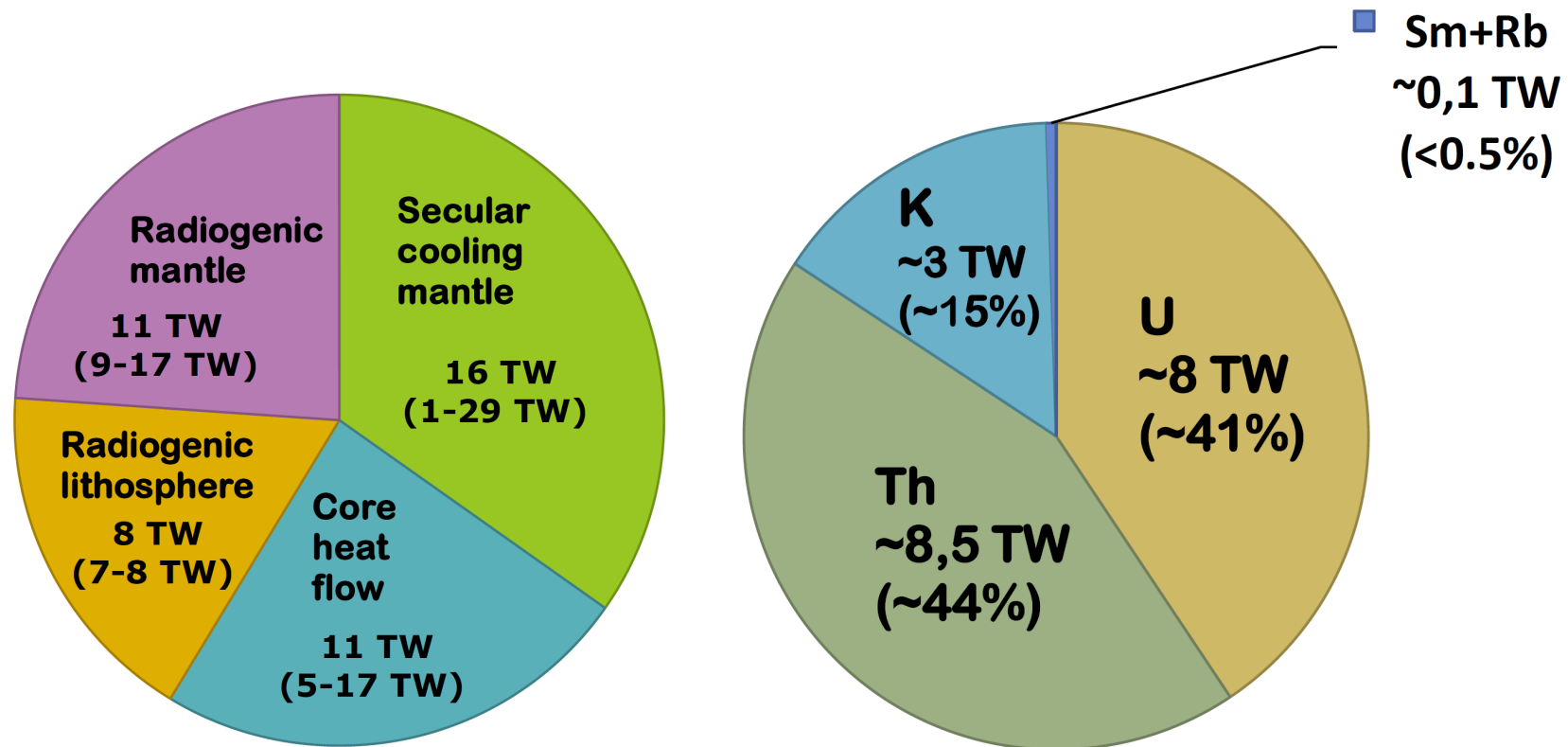
Мотивация

Проверка предсказания композиции Земли с большим содержанием калия.

Определение теплового потока из недр Земли является важной задачей. Он может оказывать влияние на климат наряду с Солнцем.

Какой вклад в тепловой поток вносит радиоактивность?

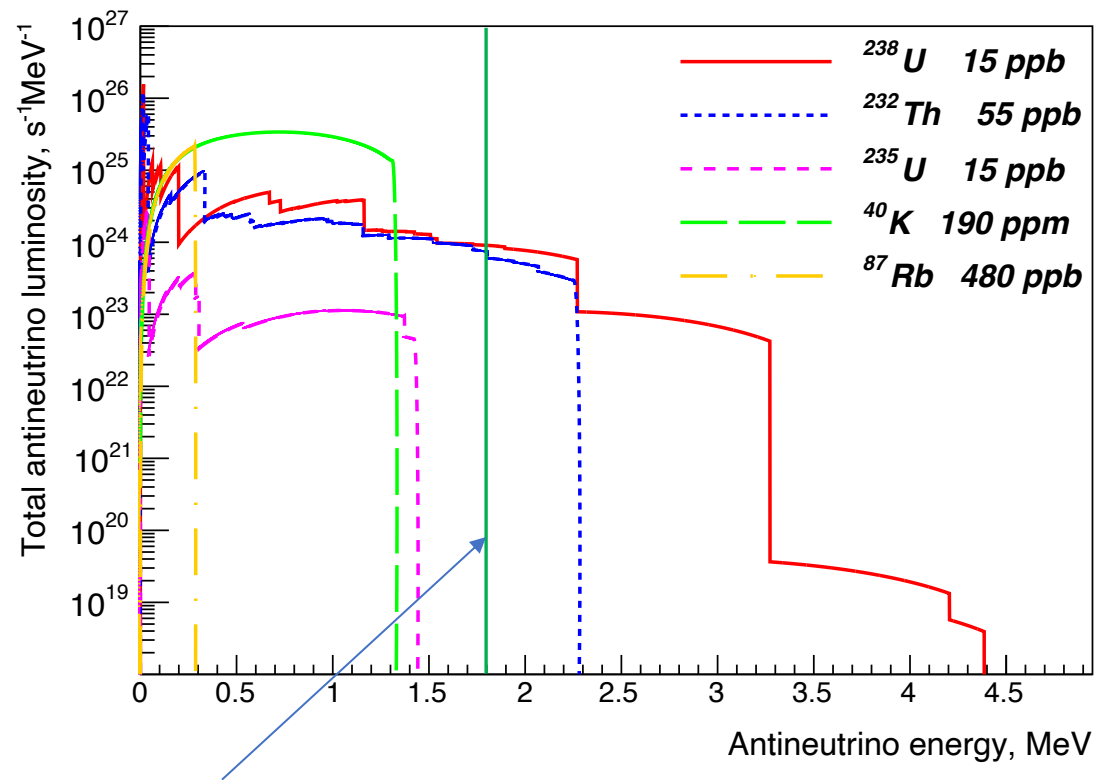
Предполагаемые части теплового потока? По модели BSE



Считается, что полный поток составляет 47 ± 2 ТВт. Радиогенное тепло составляет меньше половины этого потока (19-20 ТВт)

From the talk by Oleg Smirnov

Для определения радиогенной части теплового потока можно зарегистрировать антинейтрино, излучаемое долгоживущими изотопами естественной радиоактивности



Поток антинейтрино от ^{40}K лежит ниже порога регистрации антинейтрино при помощи реакции ОБР 1.8 МэВ

Порог регистрации антинейтрино при помощи реакции ОБР 1.8 МэВ

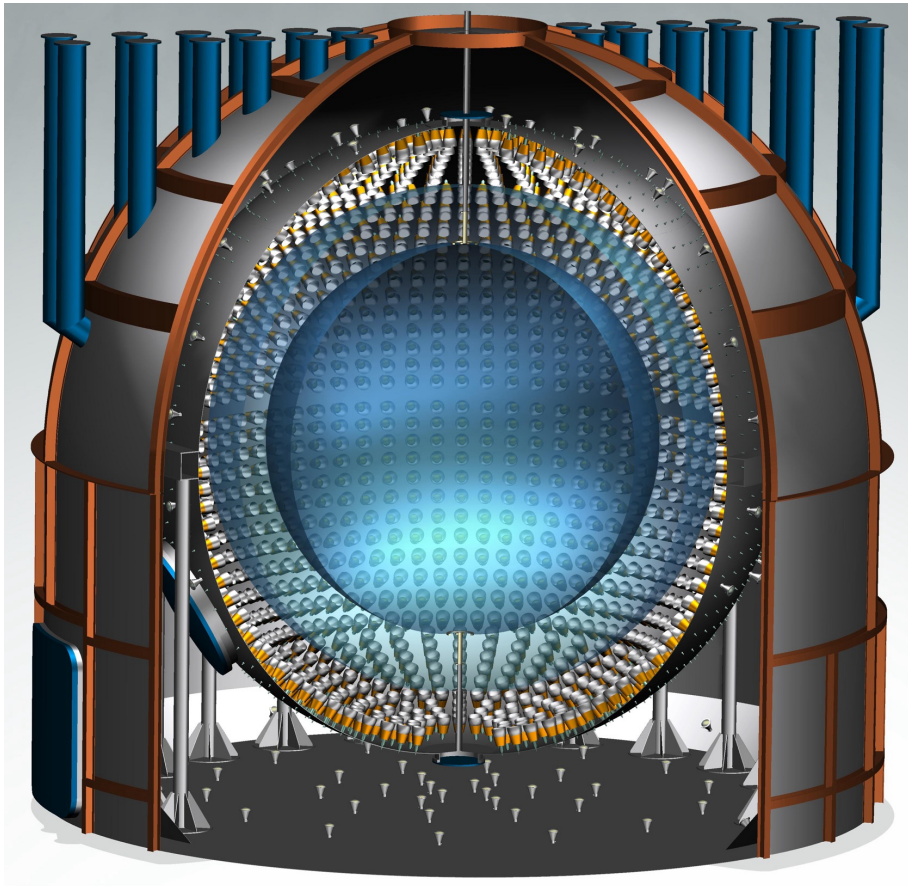
Максимальная энергия спектра антинейтрино ^{40}K (1.3 МэВ) лежит ниже порога регистрации (1.8 МэВ) ОБР.

Однако, реакция рассеяния на электроме имеет порогом энергию связи электрона на оболочке ($\sim\text{eV}$).

Детектор, который может измерять потоки нейтрино, используя реакцию рассеяния на электроме существует.

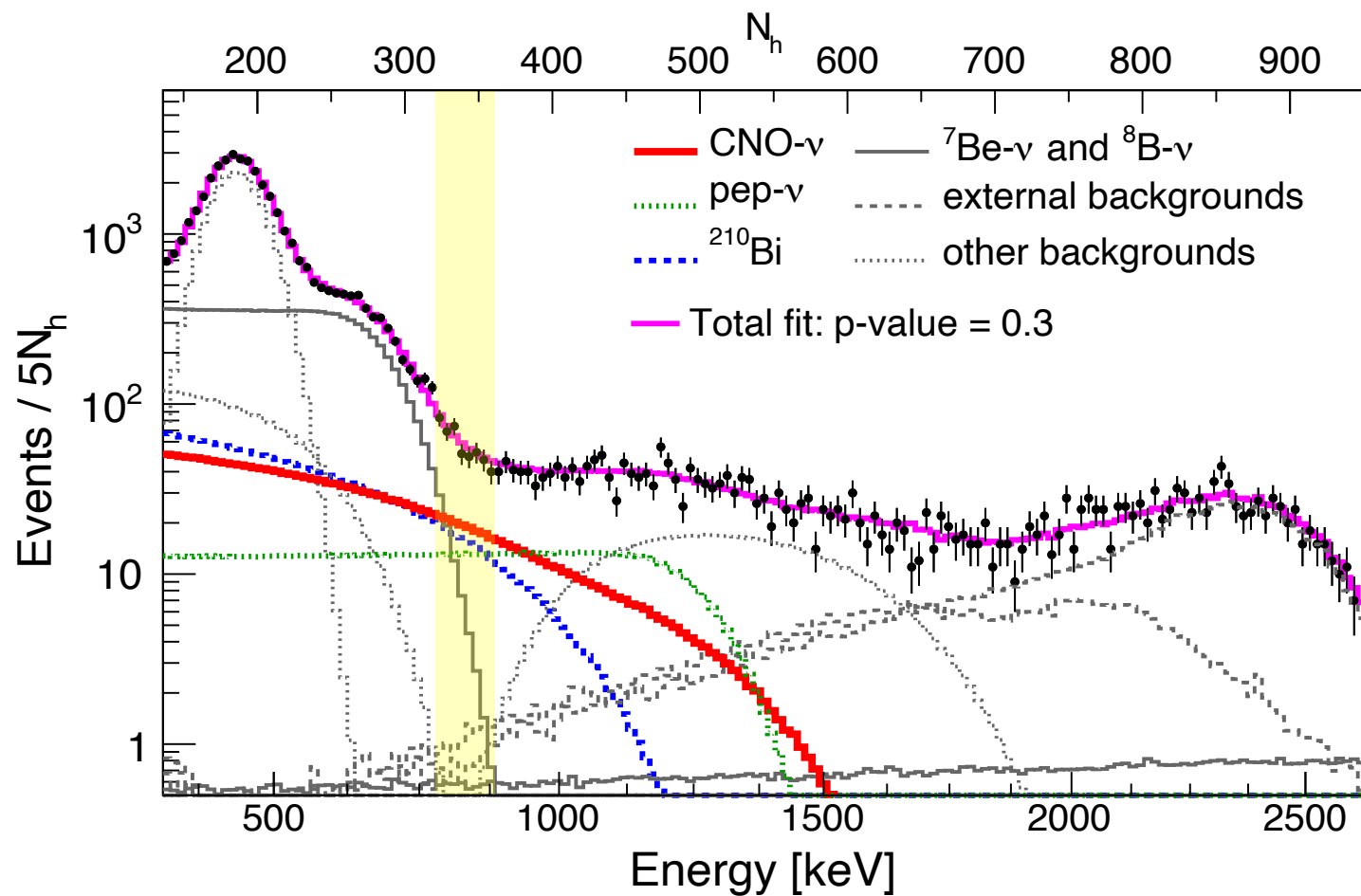
Это детектор Борексино!

Детектор нейтрино и антинейтрино – Борексино в ЛНГС, Италия



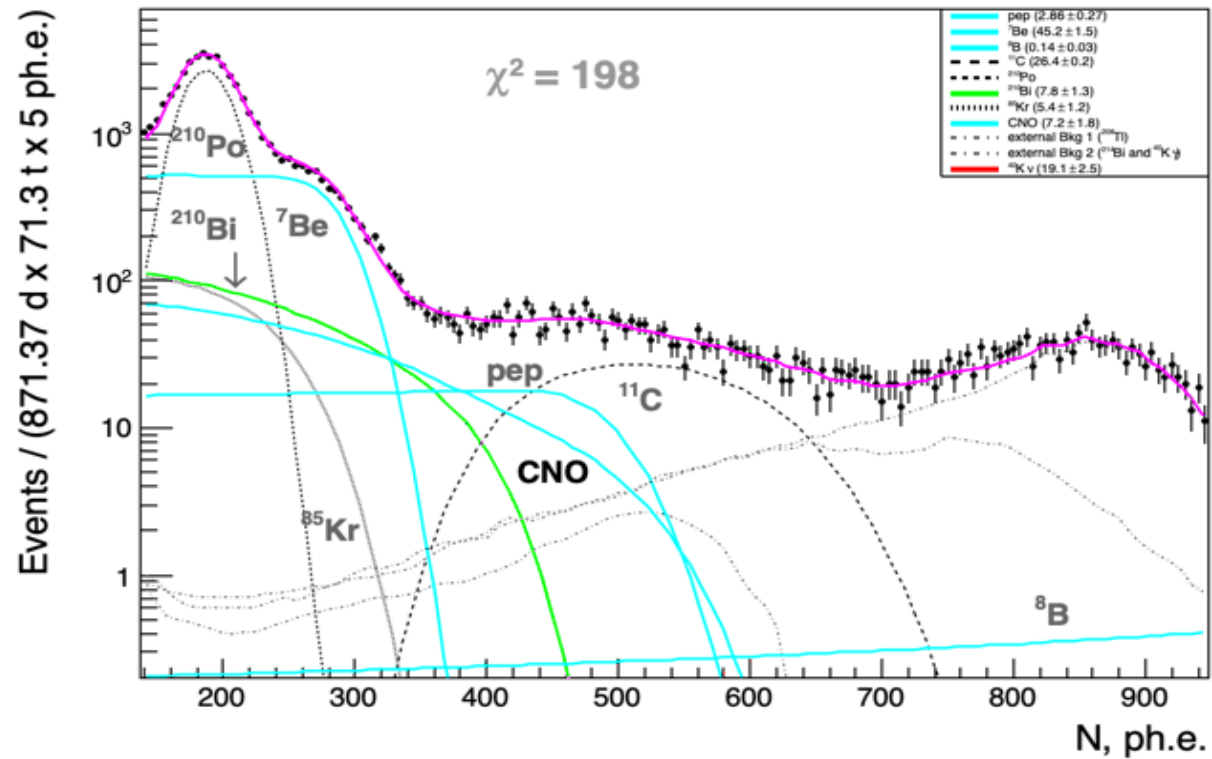
- Детектор расположен в лаборатории Гран Сассо в Италии. Глубина 4200 м.в.э.
- Сцинтиллятор объемом 315 м³ помещен в тонкую (125 мкм) нейлоновую пленку.
- Регистрируются одиночные события, вызываемые различными источниками, главным образом нейтрино от Солнца.
- Из-за относительно высокой загрязненности пленки радиоактивностью чувствительный объем пришлось уменьшить до 73 т.

Результат измерения Борексино в 2022 г.



$R_{\text{CNO}} = 6.7$ событий в день/100 т

Наш анализ данных Борексино



Повторение анализа Борексино

Спектр одиночных событий в детекторе Борексино и его компоненты

NZ модель $\chi^2 = 198$

$R_{\text{CNO}} = 6.7 - 7.0$ событий в день/100 т

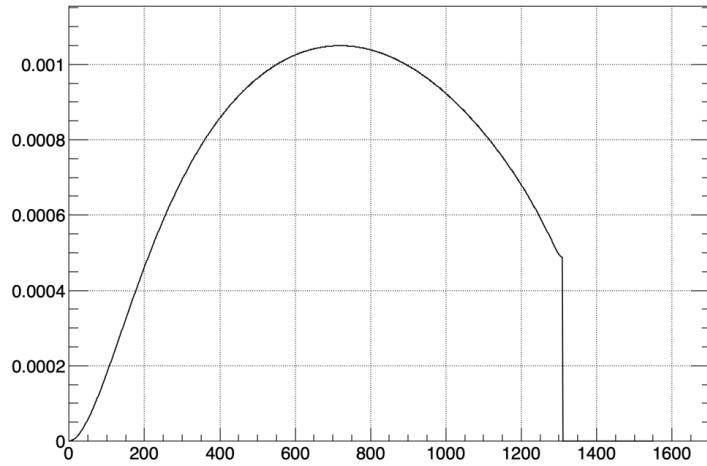
$R_{40\text{K}} = 0$ событий в день/100 т

Коллаборация Борексино не использует в анализе потоки геоантинейтрино, считая их слишком маленькими и не влияющими на результаты измерения потоков солнечных нейтрино.

Однако, большое содержание калия в Земле предсказывается одной из моделей Земли. Это модель – богатая водородом Земля.

Мы добавили в анализ все геоантинейтринные потоки

^{40}K



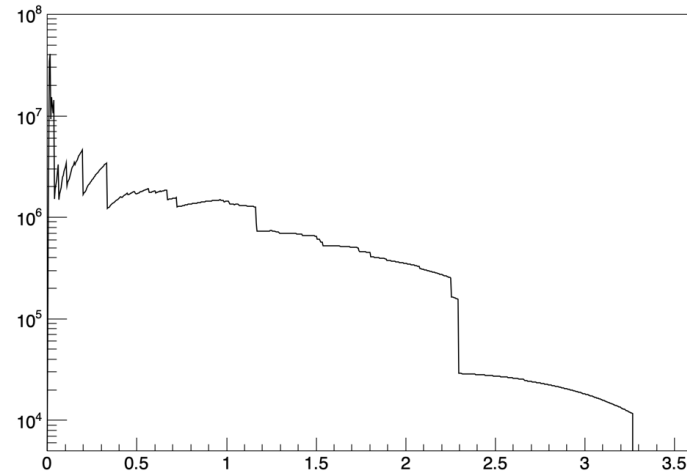
E, keV

$$\sim 10^6 - 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ c}^{-1}$$

$$R_{\text{IBD}} = 0$$

$$R_{\text{rec}} = 0.06 - 5 \text{ d}^{-1}$$

$^{232}\text{Th}, ^{238}\text{U}$



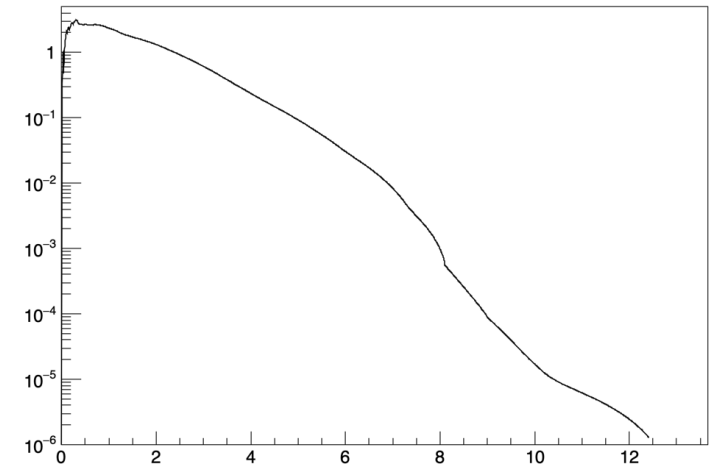
E, MeV

$$\sim 7 \times 10^4 \text{ cm}^{-2} \text{ c}^{-1}$$

$$R_{\text{IBD}} = 4 \text{ y}^{-1}$$

$$R_{\text{rec}} = 0.01 - 0.1 \text{ d}^{-1}$$

Реакторные



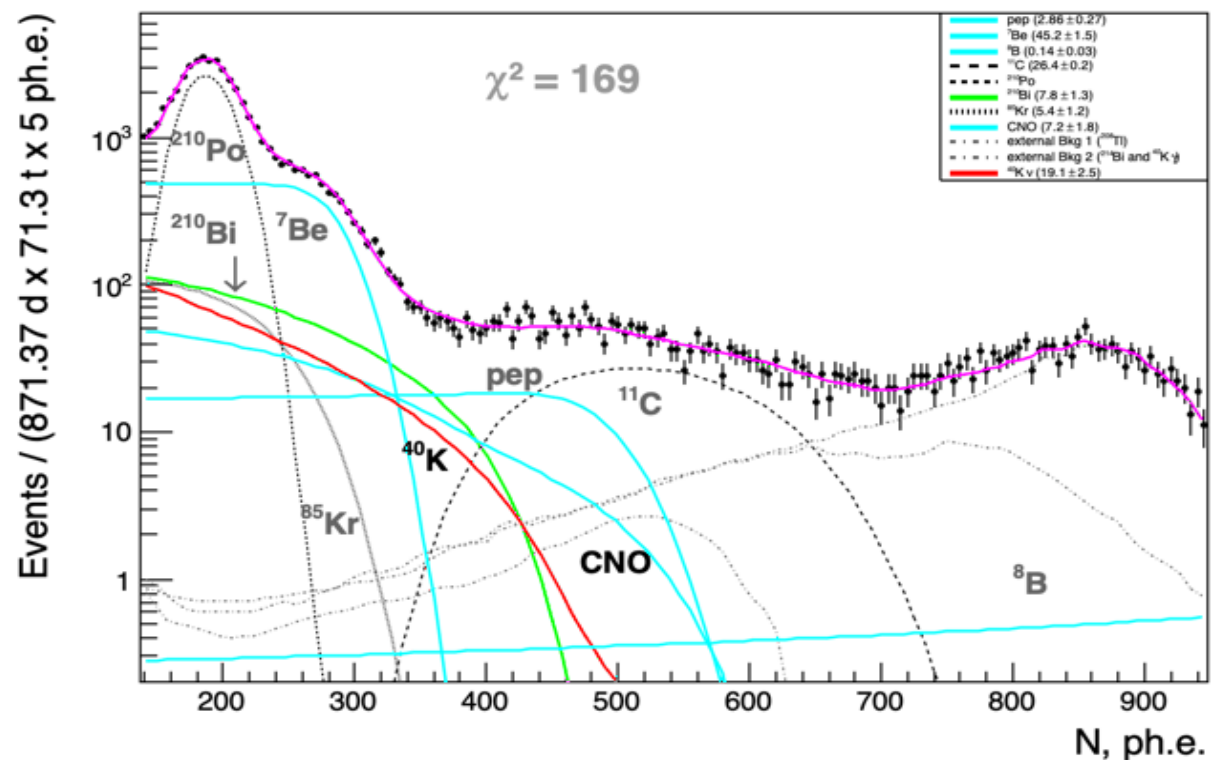
E, MeV

$$\sim 3.5 \times 10^4 \text{ cm}^{-2} \text{ c}^{-1}$$

$$R_{\text{IBD}} = 10 \text{ y}^{-1}$$

$$R_{\text{rec}} = 0.001 - 0.01 \text{ d}^{-1}$$

Введение в анализ спектра событий ^{40}K



Спектр одиночных событий в детекторе Борексино и его компоненты.

Если добавить спектр ^{40}K , то улучшается χ^2 и потоки солнечных нейтрино согласуются с одной солнечной моделью

LZ модель $\chi^2 = 169$

$R_{\text{CNO}} = 5$ событий в день/100 т
 $R_{^{40}\text{K}} = 11$ событий в день/100 т

Результат нашего анализа

R, число соб./ день 100t

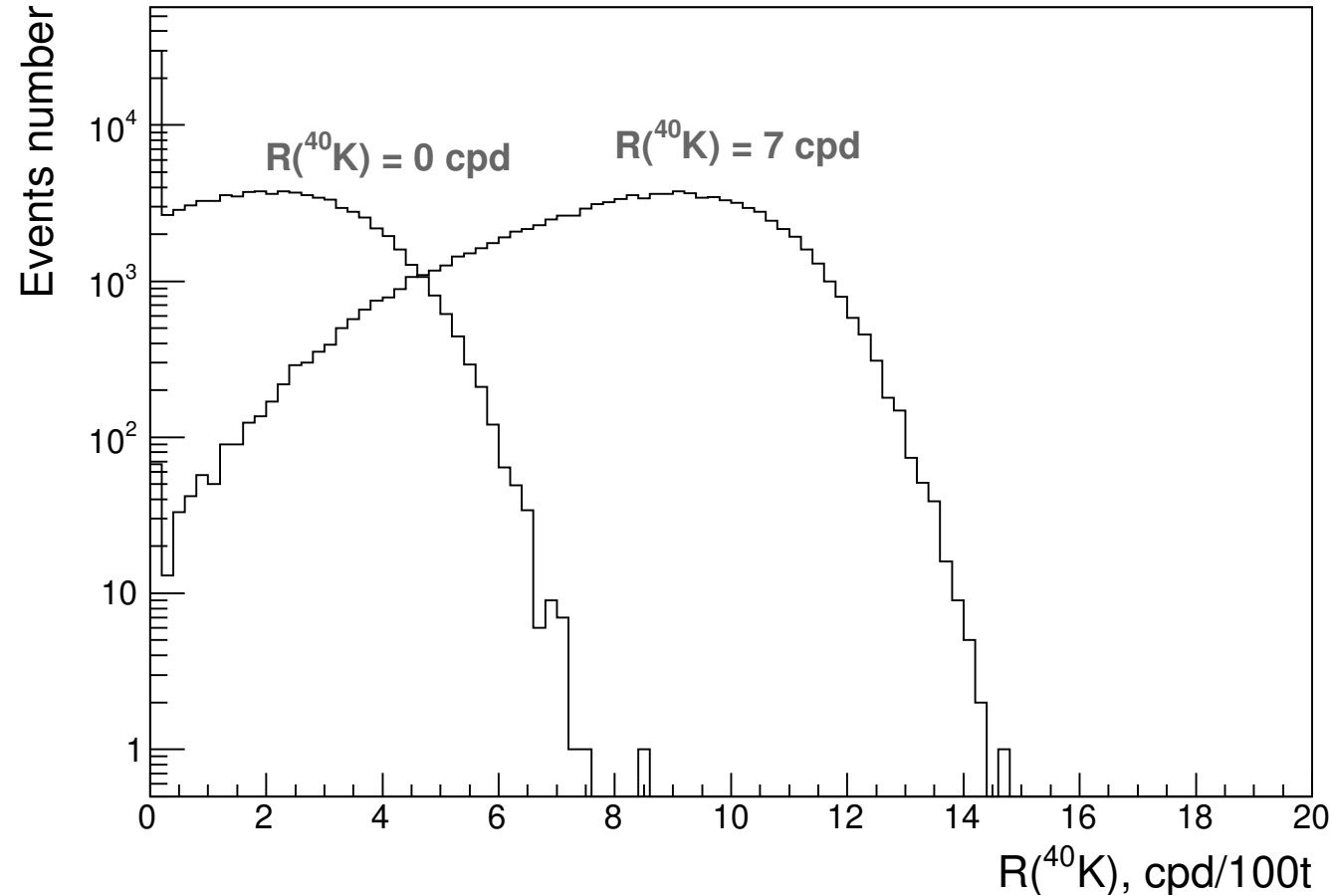
		Borexino	LZ	HZ	INR
солнечные	пер	2.7 ± 0.04	2.8	2.7	2.8 ± 0.3
	${}^7\text{Be}$	48 ± 2	44	48	45.4 ± 1.6
	CNO	6.7 ± 1.6	3.5	5.0	2.6 ± 0.6
	${}^8\text{B}$	0.15	0.12	0.18	0.12 ± 0.05
гео	${}^{40}\text{K}$	0			< 11.

При введении геоантинейтринного и реакторного спектров поток борных нейтрино автоматически занимает свою нишу, в то время как без них он стремится занулиться. В силу их малости они действительно становятся очень маленькими. В то время, как спектр ${}^{40}\text{K}$ наоборот стремится увеличиться.

Последовательность анализа с введением ^{40}K

$^7\text{Be}(862)$	пер	^8B	CNO	^{40}K	χ^2
48.4 ± 1.2	2.74	0.16	7.6 ± 1.2	0	198.405
45.9 ± 1.3	2.74	0.16	4.4 ± 0.6	11	170.834
45.4 ± 1.6	2.8 ± 0.3	0.12 ± 0.05	5.2 ± 1.6	11	169.075
43.6 ± 1.5	2.9 ± 0.3	0.14 ± 0.05	2.6 ± 0.6	19.1 ± 2.5	161.102

Виртуальный эксперимент



Разыгрывались спектры «Борексина» при различных скоростях счета источников, чтобы понять какова вероятность симитировать большую скорость счета калийных событий.

пер, ^7Be , CNO, ^{210}Bi , ^{210}Po , ^{208}Tl , ^{214}Bi , ^{40}K , ^{11}C , ^{85}Kr

Большая металличность Солнца и отсутствие калия к Земле не могут симитировать большое значение скорости счета от ^{40}K , полученное в анализе 11 соб./день.

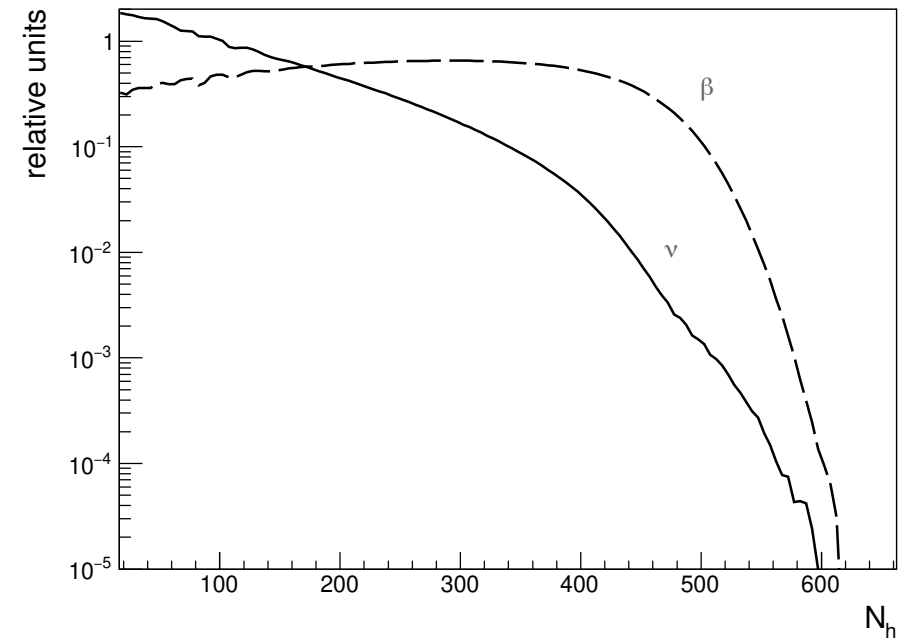
Замена спектра для анализа ^{40}K

Спектр нейтринных событий от ^{40}K заменен на бета-спектр ^{40}K .

В результате минимизации χ^2

бета-спектр отвергается!

Нейтринный спектр обнаруживается!



Недавно была опубликована статья Борексино, подтверждающая их анализ по CNO нейтрино, использующая отбор событий с направлением на Солнце

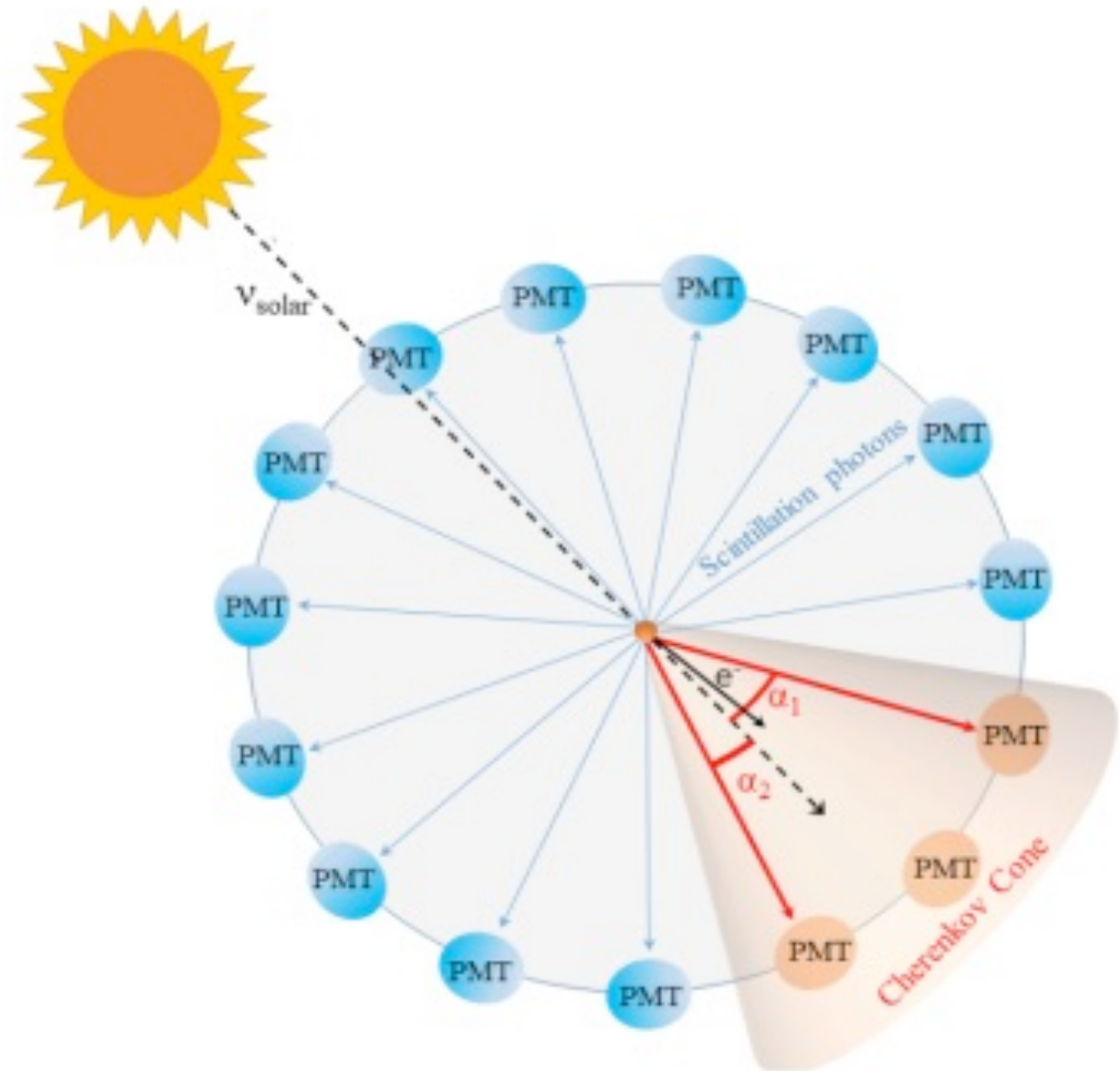
“Combined directional and spectral analysis of solar neutrinos from Carbon-Nitrogen-Oxygen fusion cycle with Borexino Experiment” Proceedings of Science, 2023. The European Physical Society Conference on High Energy Physics (EPS-HEP2023) 21-25 August 2023, Hamburg, Germany

$$6.7_{-0.8}^{+1.2} \text{ (stat. + syst.) cpd/100 t}$$

Однако, в этом анализе фиксировалось значения пер потока, соответствующее HZ.

То есть анализ все равно является модельным.

Final results of Borexino on CNO solar neutrinos
D. Basilico, et al. (Borexino collaboration) PHYSICAL REVIEW D 108, 102005 (2023)



Выводы

- **Калия в Земле много!**
- **Солнце молодое!**
- Обнаружено аномально большое количество калия в Земле $\sim 3.5\%$.
- Введение геонейтрино от ^{40}K позволяет согласовать потоки солнечных нейтрино в единую модель (LZ).
- Тепловой поток не стабилен, а может меняться с течением времени.
- Тепловой поток \neq тепловыделение!

Спасибо за внимание!

Extra slides

Что такое геонейтрино?

Земля содержит долгоживущие радиоактивные элементы в разной концентрации и, возможно, расположенные локально в разных областях планеты.

К таким элементам относятся уран ($^{238,235}\text{U}$), торий (^{232}Th) и калий (^{40}K).

$$a_{\text{U}} \approx 2 \times 10^{-8} \text{ г/г}$$

$$a_{\text{Th}} \approx 8 \times 10^{-8} \text{ г/г}$$

$$a_{\text{K}} \approx 1.5\text{-}2 \times 10^{-2} \text{ г/г, но содержание } ^{40}\text{K} \text{ в природной смеси } 0.0117\%$$

Что мы наблюдаем на Земле сейчас?

- Усиление дегазации → увеличение парникового эффекта за счёт водных паров, усиление вулканизма, повышение концентрации CO₂, увеличение пожаров.
- Быстрый нагрев океана и атмосферы.
- Увеличение частоты землетрясений, появление разломов в земной коре.

Всё это можно объяснить в рамках одной модели –
Гидридной модели Земли.

Не исключено влияние изменение положения оси вращения Земли

Тепловыделение от радиоактивных элементов

BSE

Элемент	a, part	M, kg	H, TW	part = M/M(U)
U	2×10^{-8}	0.81×10^{17}	7.6	1
Th	7.8×10^{-8}	3.16×10^{17}	8.5	3.9
K	2.28×10^{-4}	0.49×10^{21}	1.8	1.14×10^4
Всего			18	
Измерение			47	

$$H = 9.5 M(U) + 2.7 M(Th) + 3.6 M(K)$$

Если $a_K = 0.01$, $H(K) = 205$ ТВт

?

Аргументы в пользу малого потока

Откуда взялось значение $a_K = 0.024\%$ в BSE?

a_K в коре (1.0 – 2.6) %

$$M_3 = 5,9726 \cdot 10^{24} \text{ кг}$$

Масса коры 0,473% общей массы Земли. $M_{\text{коры}} = 2,83 \cdot 10^{22} \text{ кг}$,
 $M_{\text{калия}} = 7,06 \cdot 10^{20} \text{ кг}$

a_K в Земле получается **0.012%**, но, с учетом некоторого содержания в мантии, увеличивают эту величину вдвое и получают **0.024%**.

Еще одна оценка содержания калия в Земле

Земная атмосфера состоит из:

N_2 – 78.08 %

O_2 – 20.95 %

Ar – 0.93 %. **Изотоп ^{40}Ar !**

CO_2 – 0.03 %

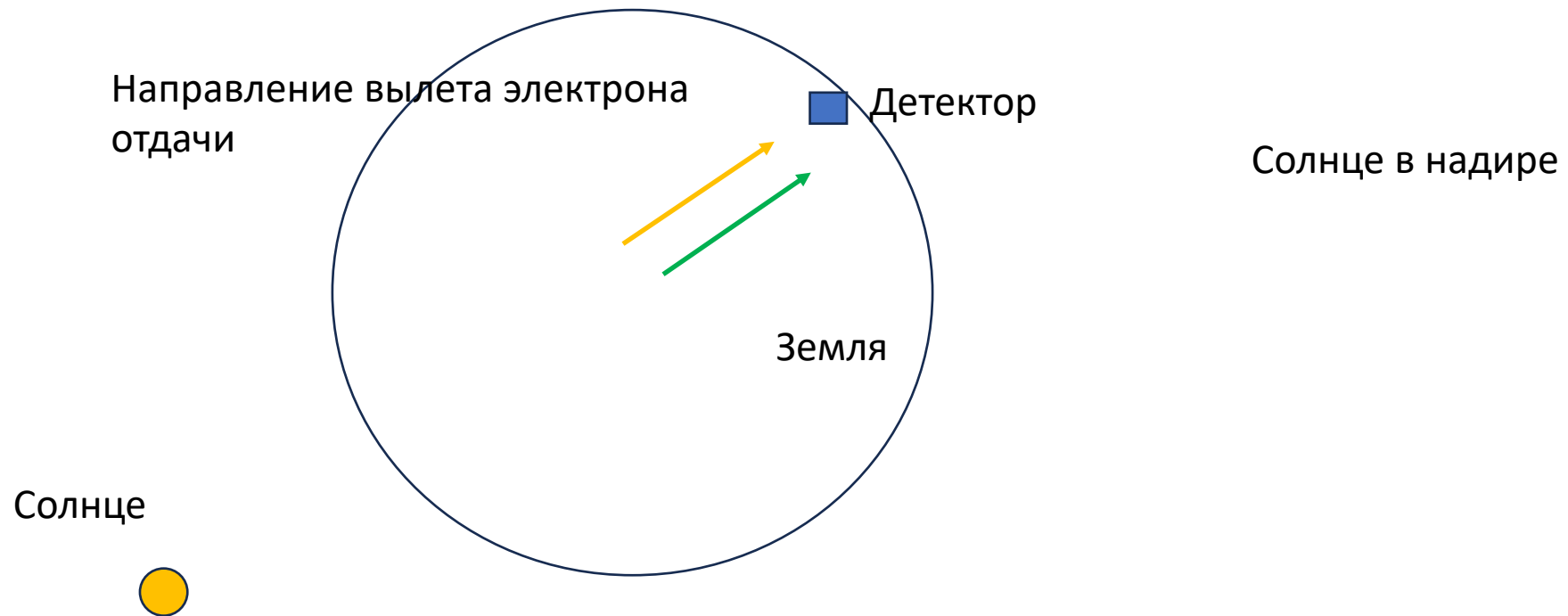
H_2O – (0.1 – 1.5) %

$M_{атм} = 5.15 \cdot 10^{18}$ кг – значит $M_{арг} = 4.79 \cdot 10^{16}$ кг. Считается, что это все от распада ^{40}K , так как этот изотоп тоже имеет массу 40. Этот калий распался за 4.5 млрд лет. Значит осталось еще калия $N(t) = N_0 e^{-t/\tau}$. Если посчитать, то получается **$3.36 \cdot 10^{19}$** кг. Это сравнимо с **$4.9 \cdot 10^{20}$** кг согласно BSE, если считать, что вышла только **1/10 часть** всего аргона из Земли.

Выделение направления на Солнце не сильно уменьшает долю потока антинейтрино из Земли



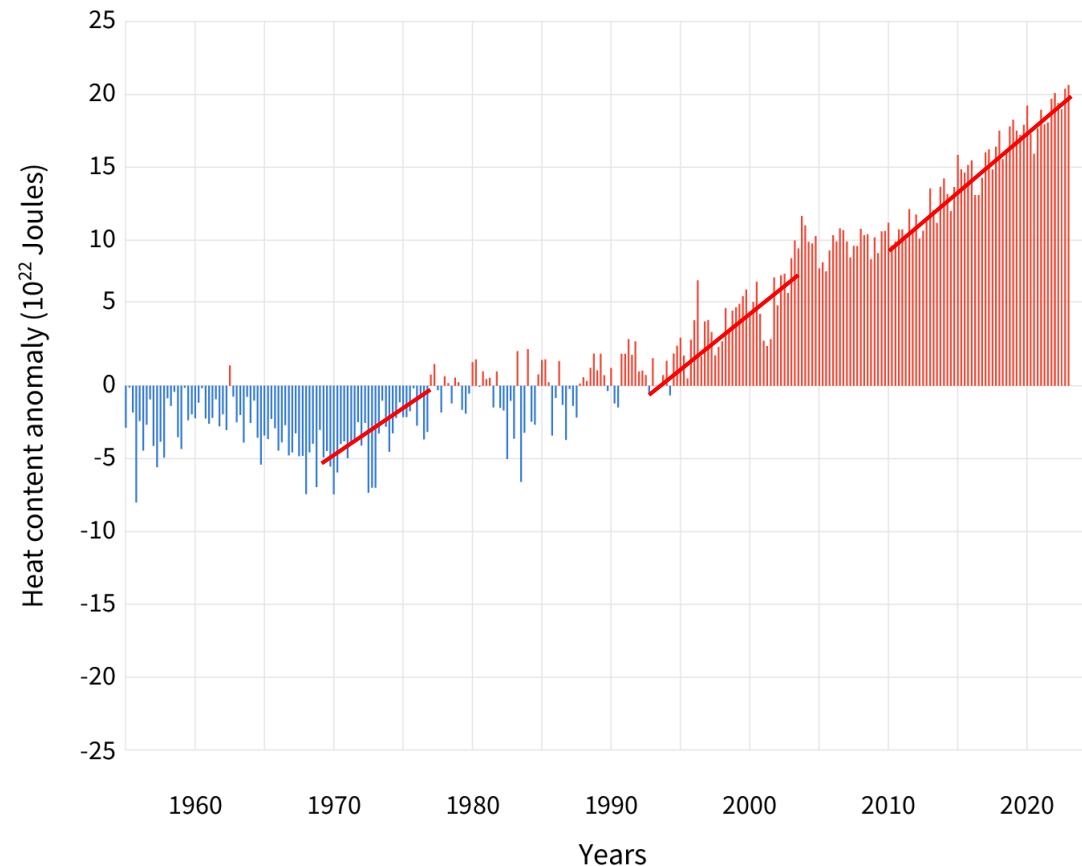
Выделение направления на Солнце не сильно уменьшает долю потока антинейтрино из Земли



Аргументы в пользу большого потока

Энергия, накопленная в верхнем слое мирового океана (до 700 м)

OCEAN HEAT COMPARED TO AVERAGE



$$W = \Delta E / \Delta t,$$

$$\Delta E = 1.1 \times 10^{23} \text{ Дж}$$

$$\Delta t = 13 \text{ лет}$$

$$W = 268 \text{ ТВТ}$$

$$W = 202 \text{ ТВТ}$$

$$W = 226 \text{ ТВТ}$$

Косвенные данные

- Измерение теплового потока на Луне американскими астронавтами
- Измерение температуры Луны внутри при помощи радиоволн