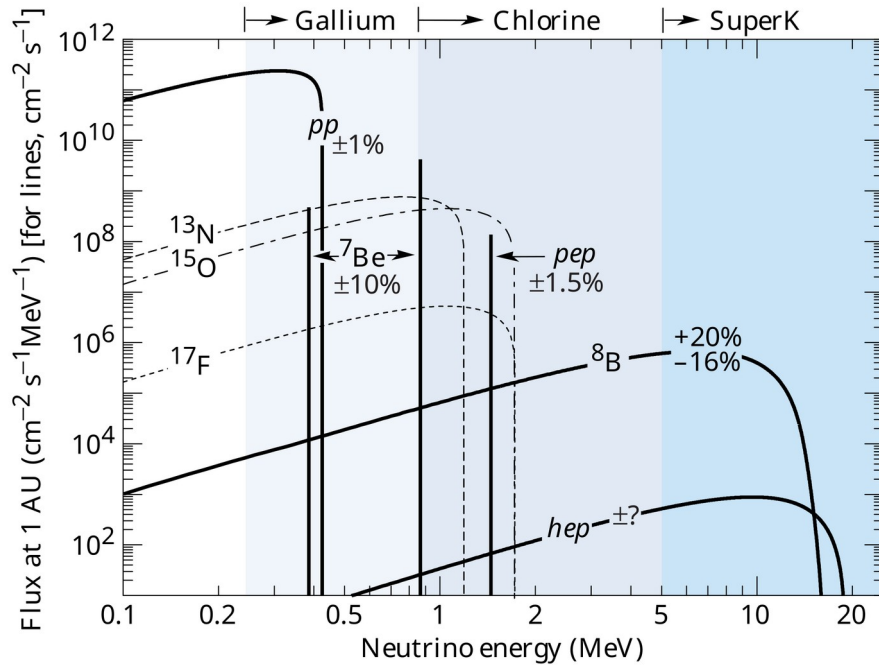


Открытие нейтринных осцилляций

Евгений Юско, M24-114

Солнечные нейтрино



pp	$p p \rightarrow d e^+ \nu_e$
pep	$p e^- p \rightarrow d \nu_e$
hep	$^3\text{He} p \rightarrow ^4\text{He} e^+ \nu_e$
^7Be	$^7\text{Be} e^- \rightarrow ^7\text{Li} \nu_e \gamma$
^8B	$^8\text{B} \rightarrow ^8\text{Be}^* e^+ \nu_e$
^{13}N	$^{13}\text{N} \rightarrow ^{13}\text{C} e^+ \nu_e$
^{15}O	$^{15}\text{O} \rightarrow ^{15}\text{N} e^+ \nu_e$
^{17}F	$^{17}\text{F} \rightarrow ^{17}\text{O} e^+ \nu_e$

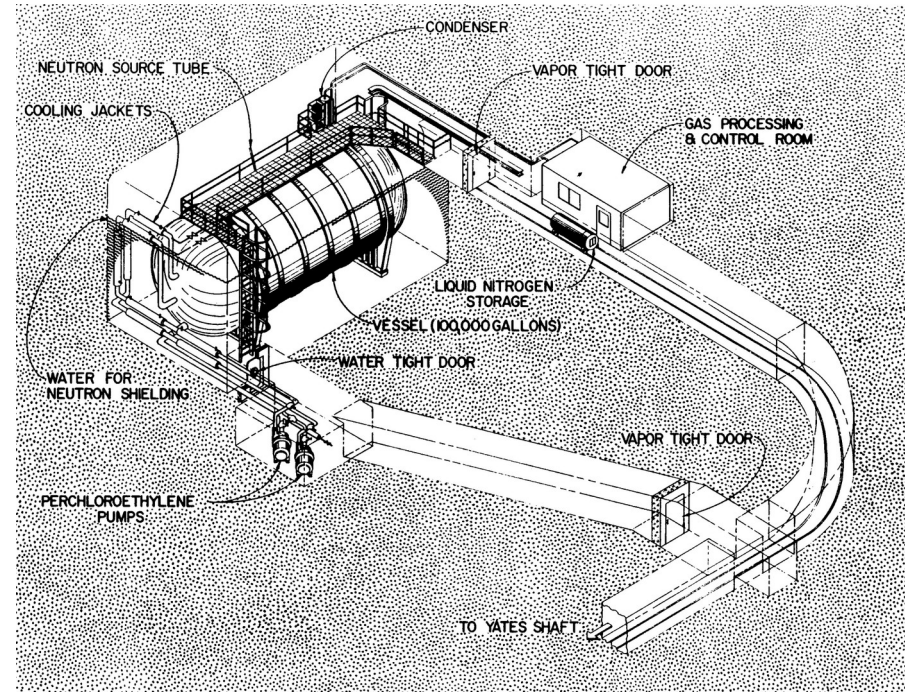
Детектор Homestake

- Бывший золотой рудник Хоумстейк (г. Лид, Юж. Дакота, США).
- Глубина — 4200 м водного эквивалента.
- Обратный бета-распад:
 - $\nu_e + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^-$.
 - Порог — 0,814 МэВ.
- Подсчёт образовавшихся атомов ${}^{37}\text{Ar}$ по их активности ($T_{1/2} = 35$ сут).



Детектор Homestake

- Цилиндрическая горизонтальная ёмкость (Ø 6,1 м, длиной в 14,6 м).
- Содержит 615 т C_2Cl_4 .
 - C_2Cl_4 заполняет 95 % объёма, остальные 5 % заполнены гелием.
- Требования к ёмкости:
 - полная герметичность (недопустимо попадание аргона из атмосферы);
 - минимальная радиоактивность материала.



Распад аргона

- Электронный захват:
 - $^{37}\text{Ar} + e^- \rightarrow ^{37}\text{Cl} + \nu_e$ ($T_{1/2} = 35$ сут).
- Регистрируются электроны Оже и рентгеновские кванты.
- Захват с К-оболочки: суммарная энергия 2,823 кэВ:
 - 81,5 %: 3–5 электронов Оже.
 - 8,7 %: Оже + рентген (регистрируются 10 % квантов).

Захват	%	Энергия Оже, кэВ	Энергия рентг., кэВ
K	81,5	2,823	0,0
L	8,9	0,270	0,0
K	2,7	0,202	2,621
K	5,5	0,201	2,622
M	0,9	0,018	0,0
K	0,5	0,007	2,816

Измерение потока

$$N_{\text{Cl}} \sum_i \phi_i \sigma_i = \frac{N_c \lambda}{\varepsilon_e \varepsilon_c (1 - e^{-\lambda t_{\text{exp}}})} - p_{\text{ns}}$$

- N_{Cl} — число атомов ^{37}Cl .
- ϕ_i, σ_i — поток солнечных нейтрино и сечение реакции $^{37}\text{Cl}(\nu_e, e^-)^{37}\text{Ar}$ (сумма по реакциям рождения нейтрино).
- N_c — измеренное число распадов.
- ε_e — эффективность извлечения атомов аргона.
- ε_c — эффективность подсчёта распадов.
- $\lambda = 0,0198$ сут.
- t_{exp} — время экспозиции.
- p_{ns} — счёт распадов аргона несолнечного происхождения.

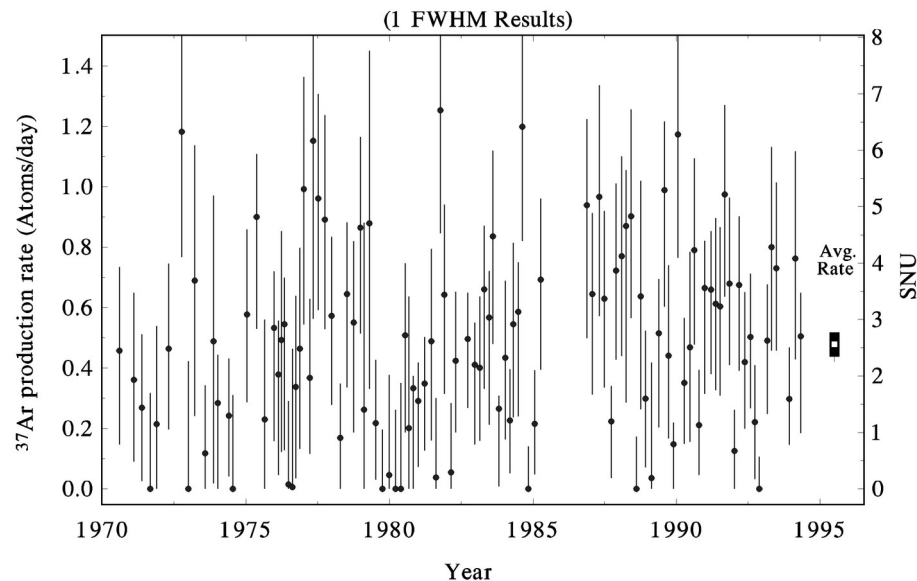
Основные фоны

Регистрация солнечных нейтрино — не единственный процесс, приводящий к появлению атомов ^{37}Ar в детекторе.

- Космические лучи: $0,047 \pm 0,013 \text{ сут}^{-1}$.
- Нейтроны от α -распадов в породе:
 - $0,05 \pm 0,025 \text{ сут}^{-1}$;
 - $< 0,002 \text{ сут}^{-1}$ (если детектор окружён слоем водной защиты в 1 м);
 - $0,03 \pm 0,025 \text{ сут}^{-1}$ (если детектор окружён слоем защиты из жидкого сцинтиллятора в 30 см).
- α -распады внутри детектора: $< 0,017 \text{ сут}^{-1}$.

Результаты

- $2,56 \pm 0,16 \pm 0,16$ SNU.
- Теоретическое значение:
 $9,3 \pm 1,3$ SNU.
- Противоречие!
- Установлен верхний предел на
поток солнечных ν_e :
 $(2,25 \pm 0,21) \times 10^6 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.



1 SNU (Solar Neutrino Unit) = 10^{-36} захватов нейтрино на атом в секунду.

Гипотеза Понтекорво

- Б. Понтекорво для объяснения дефицита предложил механизм нейтринных осцилляций.
- Пусть существует 3 аромата нейтрино: ν_e , ν_μ , ν_τ .
- Состояния $|\nu_\alpha\rangle$ с определённым ароматом ($\alpha = e, \mu, \tau$) не имеют определённой массы, я являются суперпозицией массовых состояний $|\nu_i\rangle$ ($i = 1, 2, 3$):

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i}^* |\nu_i\rangle \quad U = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix}$$

- Матрица смешивания U — матрица Понтекорво — Маки — Накагавы — Сакаты.

Осцилляции нейтрино

- Рассмотрим эволюцию состояния $|\nu_\alpha\rangle$:

$$|\nu_\alpha(t)\rangle = \sum_i U_{\alpha i}^* |\nu_i(t)\rangle \quad |\nu_i(t)\rangle = e^{-iE_i t} |\nu_i\rangle$$

$$P_{\alpha\beta} = |\langle \nu_\beta | \nu_\alpha(t) \rangle|^2 = \left| \sum_{i,j} U_{\alpha i}^* U_{\beta j} \langle \nu_j | \nu_i(t) \rangle \right|^2$$

- $P_{\alpha\beta}$ описывает вероятность, что нейтрино аромата α спустя время t будет зарегистрировано как имеющее аромат β .

SNO

- Sudbury Neutrino Observatory (Садбери, Канада).
- Задача — измерить электронную и неэлектронную компоненты солнечного нейтринного потока.
 - Ненулевая неэлектронная компонента — свидетельство существования осцилляций.
- Регистрация черенковского излучения в тяжёлой воде (D_2O).
- Глубина — 6010 м водного эквивалента.



Регистрация нейтрино

$$\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$$

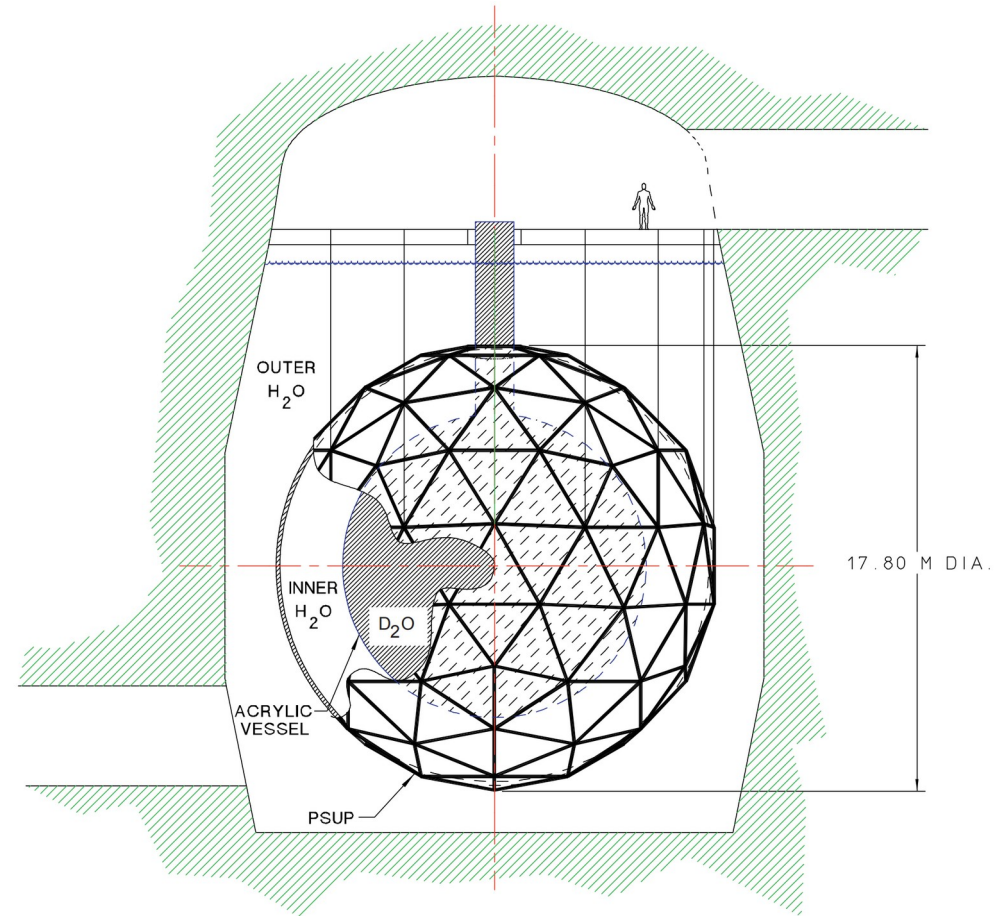
$$\nu_x + d \rightarrow p + n + \nu_x$$

$$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$$

- | | | |
|---|--|--|
| <ul style="list-style-type: none">• Заряженный ток (CC).• Только ν_e.• Порог — 1,4 МэВ.• Регистрируется e^-.<ul style="list-style-type: none">– Энергия связана с энергией ν_e. | <ul style="list-style-type: none">• Нейтральный ток (NC).• Все ν_x.• Порог — 2,2 МэВ.• Регистрируется n.<ul style="list-style-type: none">– Захват дейтерием и испускание γ-кванта с энергией 6,25 МэВ. | <ul style="list-style-type: none">• Упругое рассеяние (ES).• Все ν_x, но для ν_e сечение больше.• Регистрируется e^-.<ul style="list-style-type: none">– Направление связано с направлением ν_e. |
|---|--|--|

Конструкция детектора

- Прозрачная акриловая сфера (Ø 12 м), заполненная 1000 т сверхчистой D_2O .
- 9456 ФЭУ размещены на сфере Ø 17,8 м.
- Вся конструкция погружена в сверхчистую H_2O (1700 т + 5700 т).



Вода

- Высокие требования к чистоте воды.
- Сопротивление H_2O после очистки — $18,2 \text{ МОм} \cdot \text{см}$.
- Вода должна быть изолирована от воздуха в лаборатории, чтобы избежать попадания в неё радона.

Изотопный состав D_2O

- Водород:
 - ^2D : 99,917 %
 - ^3T : 0,097 мкКи/кг
- Кислород:
 - ^{17}O : 0,17 %
 - ^{18}O : 0,71 %

ФЭУ

- 9438 ФЭУ, направленных внутрь.
 - Эффективное покрытие фотокатодов — 54 %.
- 91 ФЭУ, направленный наружу.
 - Регистрация мюонов и других внешних источников.
- Магнитное поле Земли (55 мкТл) снижает эффективность ФЭУ на 18 %.
 - Установлены магниты, компенсирующие вертикальную компоненту поля.
 - Остаточное поле — 19 мкТл, что снижает эффективность ФЭУ на 2,5 %.
- Выделение 1 МэВ \Rightarrow около 8 зарегистрированных фотоэлектронов.

Отбор данных

На примере предварительных данных CC + ES (240,95 суток).

- Восстановление вершины и направления частицы.
- Восстановление эффективной энергии T_{eff} .
 - Энергетическое разрешение (МэВ):

$$\sigma_E \approx \left(-0,46 + 0,55\sqrt{E_e} + 0,009E_e \right)$$

Шаг	Число событий
Полное число событий	355 320 964
Триггер на нейтрино	143 756 178
≥ 30 сработавших ФЭУ	6 372 899
Приборные шумы	1 842 491
Мюоны	1 809 979
Высокоуровневые критерии	923 717
Доверительный объём	17 884
Энергетический порог	1169
Итого	1169

Отбор данных

На примере предварительных данных CC + ES (240,95 суток).

- Исключаются события в пределах 20 с после прохождения мюона.
- Доверительный объём — шар радиуса 5,5 м.
- Энергетический порог:
 $T_{\text{eff}} \geq 6,75 \text{ МэВ}$.

Шаг	Число событий
Полное число событий	355 320 964
Триггер на нейтрино	143 756 178
≥ 30 сработавших ФЭУ	6 372 899
Приборные шумы	1 842 491
Мюоны	1 809 979
Высокоуровневые критерии	923 717
Доверительный объём	17 884
Энергетический порог	1169
Итого	1169

Учёт NC

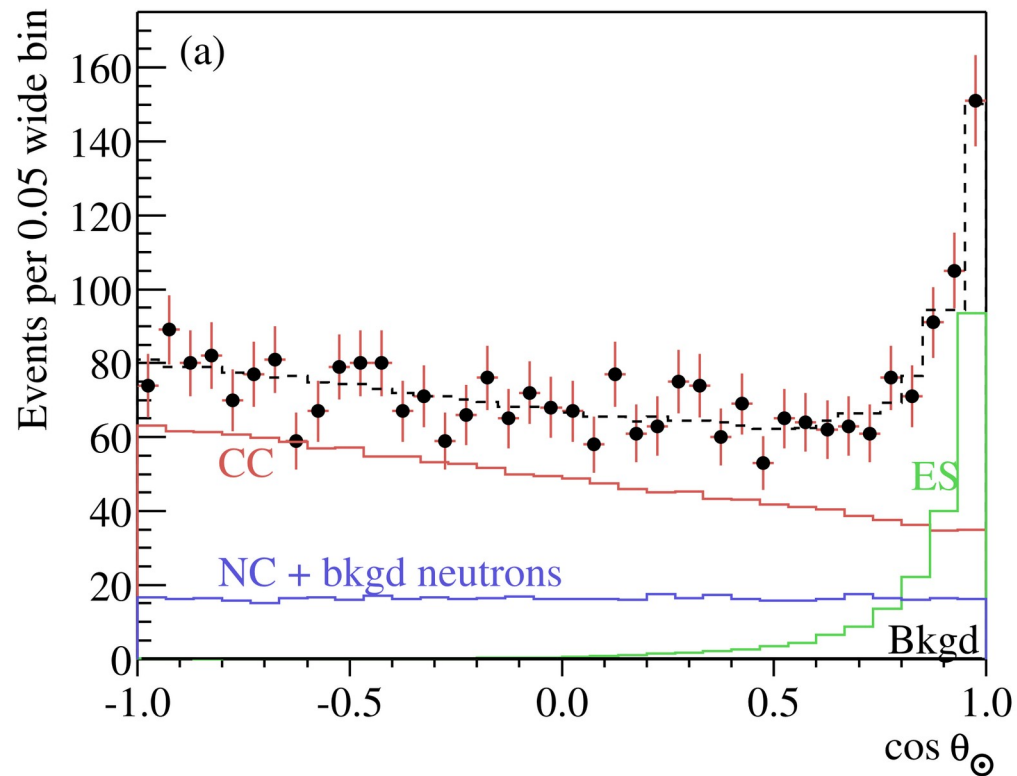
- Полный набор данных CC + NC + ES (306,4 сут).
- Изменён энергетический порог: $T_{\text{eff}} \geq 5 \text{ МэВ}$.
 - Энергетическое разрешение:
$$\sigma_T \approx \left(-0,068 + 0,33\sqrt{T_e} + 0,043T_e \right)$$
- Добавлен критерий отбора для подавления нейтронного фона, связанного с космическими лучами.
 - Исключаются события, в которых сработало более 60 ФЭУ.
- Итого — 2928 событий.

Фоны

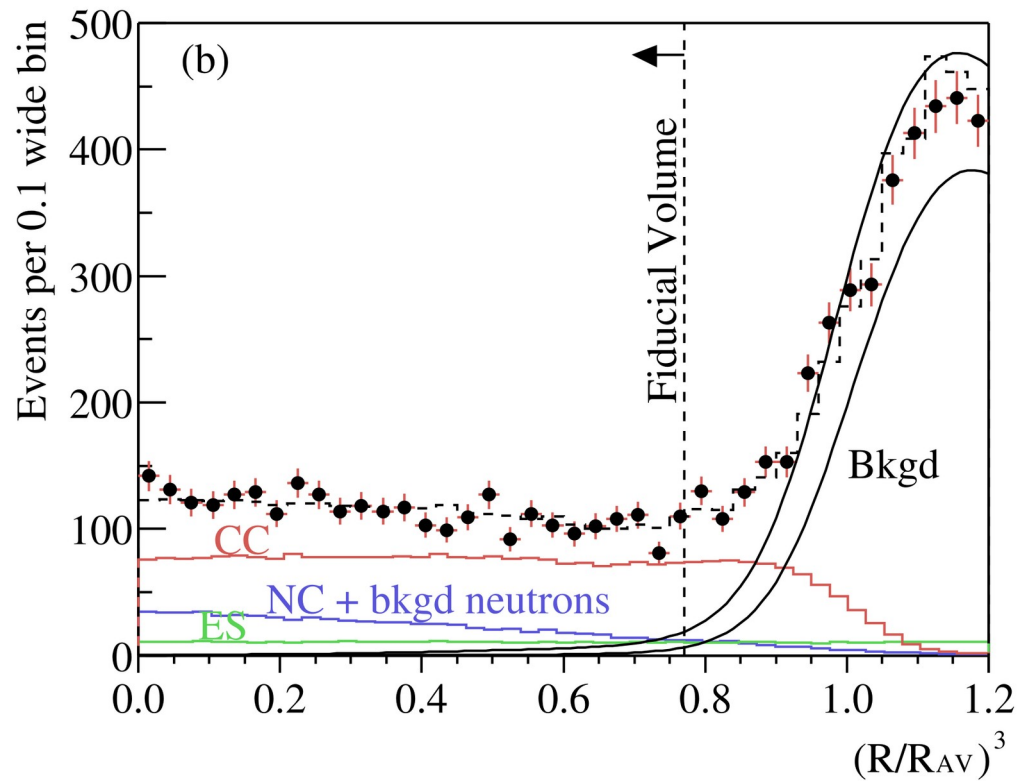
Нейтронный	
Источник	События
Фоторасщепление в D ₂ O	44 ⁺⁸ ₋₉
Фоторасщепление в H ₂ O и AC	27 ⁺⁸ ₋₉
Атмосферные ν и μ ниже черенковского порога	4 \pm 1
Деление	\ll 1
² H(α , α)pn	2 \pm 0,4
¹⁷ O(α ,n)	\ll 1
Земные и реакторные $\bar{\nu}$	1 ⁺³ ₋₁
Внешние нейтроны	\ll 1
Итого нейтронного фона	78\pm12

Черенковский	
Источник	События
D ₂ O	20 ⁺¹³ ₋₆
H ₂ O	3 ⁺⁴ ₋₃
AC	6 ⁺³ ₋₆
ФЭУ	16 ⁺¹¹ ₋₈
Итого черенковского фона	45⁺¹⁸₋₁₂

Результаты

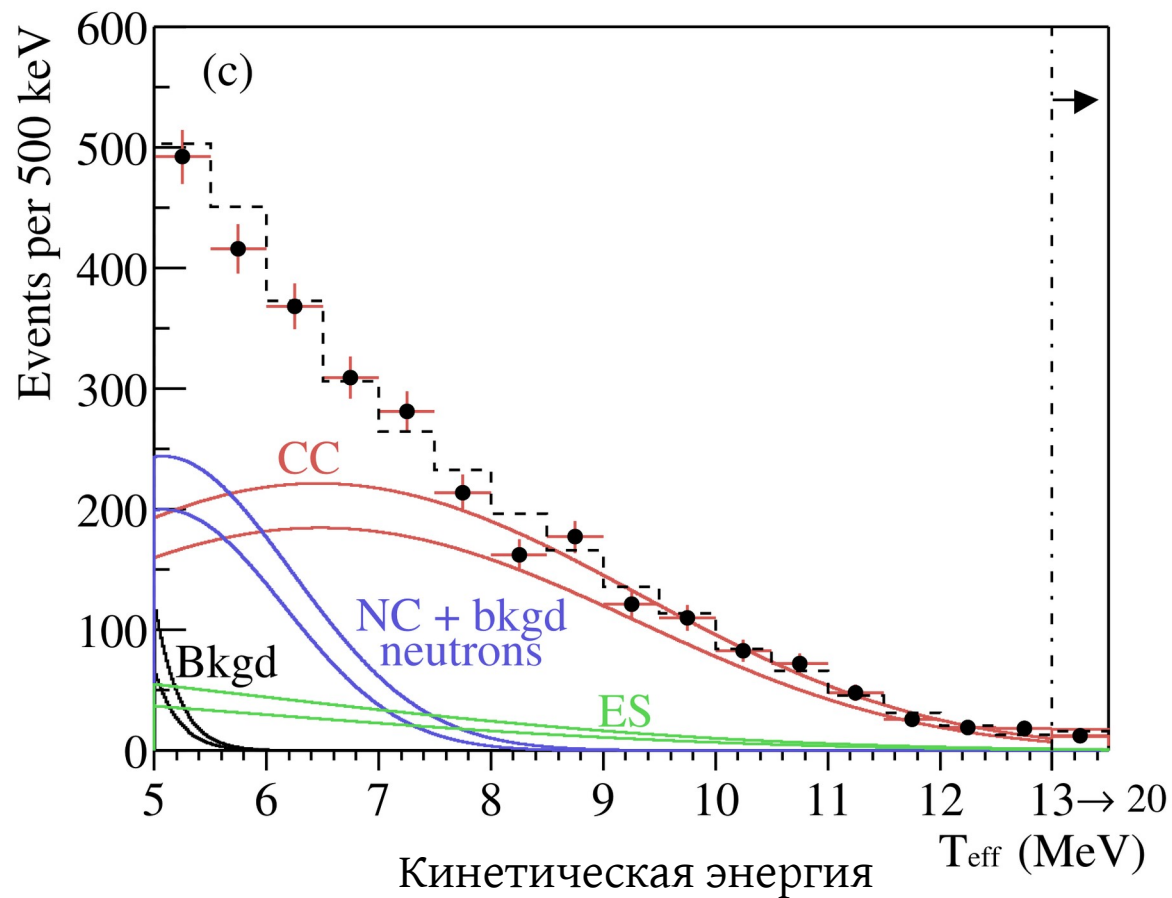


Направление относительно направления
от Солнца



Радиальная координата

Результаты



Результаты

- Потоки даны в единицах $10^6 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

$$\phi_{\text{CC}} = 1,76^{+0,06+0,09}_{-0,05-0,09}$$

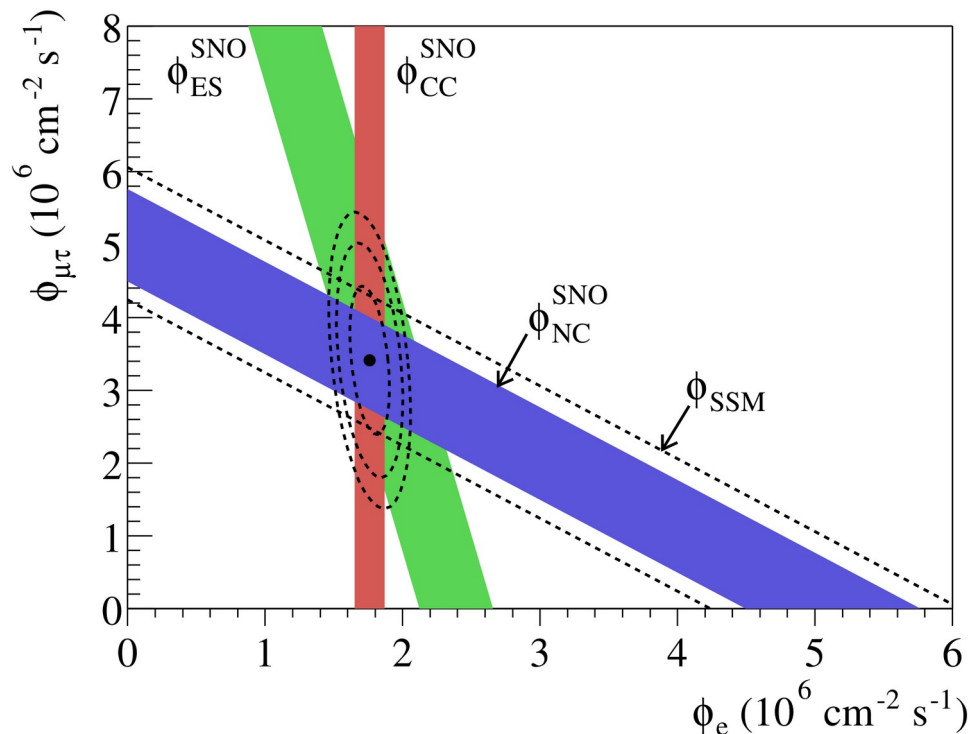
$$\phi_{\text{ES}} = 2,39^{+0,24+0,12}_{-0,23-0,12}$$

$$\phi_{\text{NC}} = 5,09^{+0,44+0,46}_{-0,43-0,43}$$

$$\phi_e = 1,76^{+0,05+0,09}_{-0,05-0,09}$$

$$\phi_{\mu\tau} = 3,41^{+0,45+0,48}_{-0,45-0,45}$$

$\nearrow > 0 (5,3 \sigma)$



Систематические неопределённости

Источник	$\phi(\text{CC})$ (%)	$\phi(\text{NC})$ (%)	$\phi(\mu\tau)$ (%)
Энергетическая шкала*	-4,2; +4,3	-6,2; +6,1	-10,4; +10,3
Энергетическое разрешение*	-0,9; +0,0	-0,0; +4,4	-0,0; +6,8
Энергетическая нелинейность*	$\pm 0,1$	$\pm 0,4$	$\pm 0,6$
Вершинное разрешение*	$\pm 0,0$	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$
Вершинная точность	-2,8; +2,9	$\pm 1,8$	$\pm 1,4$
Угловое разрешение	-0,2; +0,2	-0,3; +0,3	-0,3; +0,3
Фоторасщепление от внутренних источников*	$\pm 0,0$	-1,5; +1,6	-2,0; +2,2
Фоторасщепление от внешних источников	$\pm 0,1$	-1,0; +1,0	$\pm 1,4$
Черенковский шум от D_2O *	-0,1; +0,2	-2,6; +1,2	-3,7; +1,7
Черенковский шум от H_2O	$\pm 0,0$	-0,2; +0,4	-0,2; +0,6
Черенковский шум от АС	$\pm 0,0$	-0,2; +0,2	-0,3; +0,3
Черенковский шум от ФЭУ*	$\pm 0,1$	-2,1; +1,6	-3,0; +2,2
Нейтронный захват	$\pm 0,0$	-4,0; +3,6	-5,8; +5,2
Критерии отбора	-0,2; +0,4	-0,2; +0,4	-0,2; +0,4
Экспериментальная неопределённость	-5,2; +5,2	-8,5; +9,1	-13,2; +14,1
Сечение	$\pm 1,8$	$\pm 1,3$	$\pm 1,4$

*Антикорреляции между CC и NC

- Neutrino Masses, Mixing, and Oscillations / S. Naval [et al.] Particle Data Group // Physics Review D. – 2024.
- Measurement of the Solar Electron Neutrino Flux with the Homestake Chlorine Detector / B. T. Cleveland, T. Daily, R. Davis [et al.] // The Astrophysical Journal. – 1998. – Vol. 496, № 1. – P. 505–526.
- Solar Neutrinos / K. Hagiwara [et al.] Particle Data Group // Physics Review D. – 2002. – Vol. 66, № 1.
- The Sudbury Neutrino Observatory / J. Boger, R. L. Hahn, J. K. Rowley [et al.] The SNO Collaboration // Nuclear Instruments and Methods A. – 2000. – Vol. 449, № 1–2. – P. 172–207.
- Measurement of the Rate of $\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$ Interactions Produced by ^8B Solar Neutrinos at the Sudbury Neutrino Observatory / Q. R. Ahmad, R. C. Allen, T. C. Andersen [et al.] The SNO Collaboration // Physical Review Letters. – 2001. – Vol. 87, № 7.
- Direct Evidence for Neutrino Flavor Transformation from Neutral-Current Interactions in the Sudbury Neutrino Observatory / Q. R. Ahmad, R. C. Allen, T. C. Andersen [et al.] The SNO Collaboration // Physical Review Letters. – 2002. – Vol. 89, № 1.