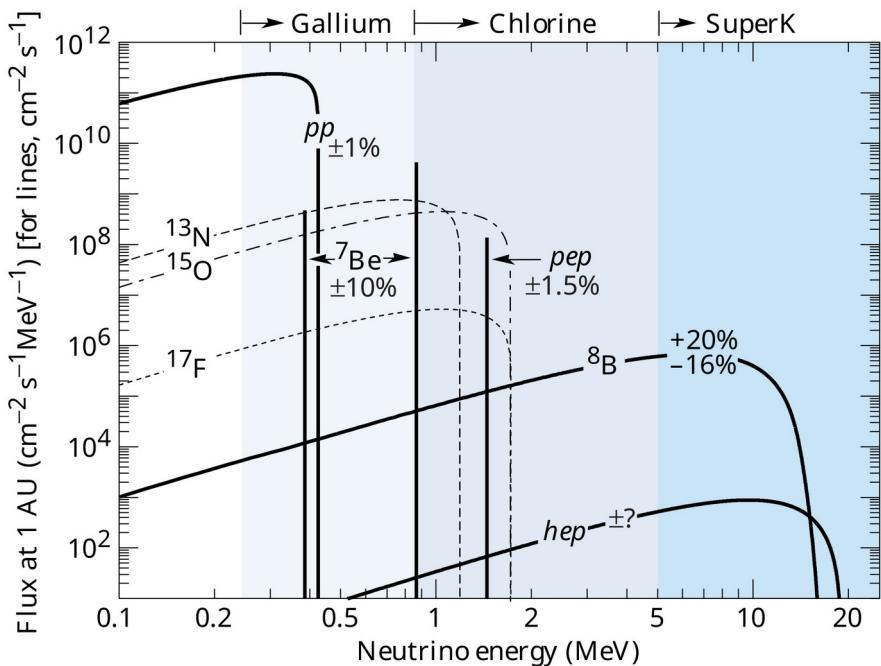


# **Открытие нейтринных осцилляций**

**Евгений Юско, М24-114**

# Солнечные нейтрино



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

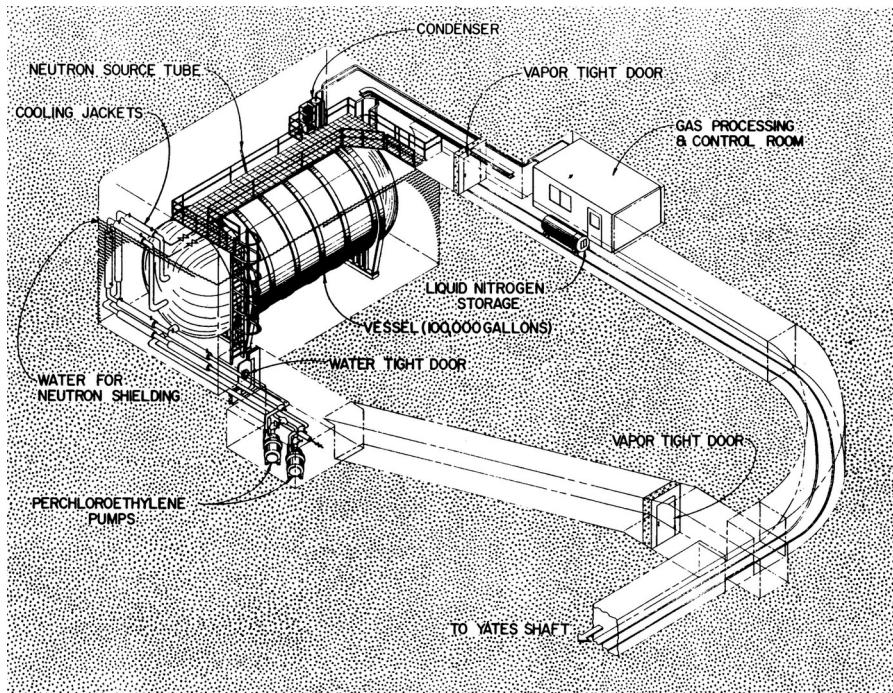
# Детектор Homestake

- 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 ( $\varnothing$  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 K-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

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

- $N_{\text{Cl}}$  — число атомов  $^{37}\text{Cl}$ .
- $\phi_i, \sigma_i$  — 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.
- $\varepsilon_e$  — эффективность извлечения атомов аргона.
- $\varepsilon_c$  — эффективность подсчёта распадов.
- $\lambda = 0,0198$  сут.
- $t_{\text{exp}}$  — время экспозиции.
- $p_{\text{ns}}$  — счёт распадов аргона несолнечного происхождения.

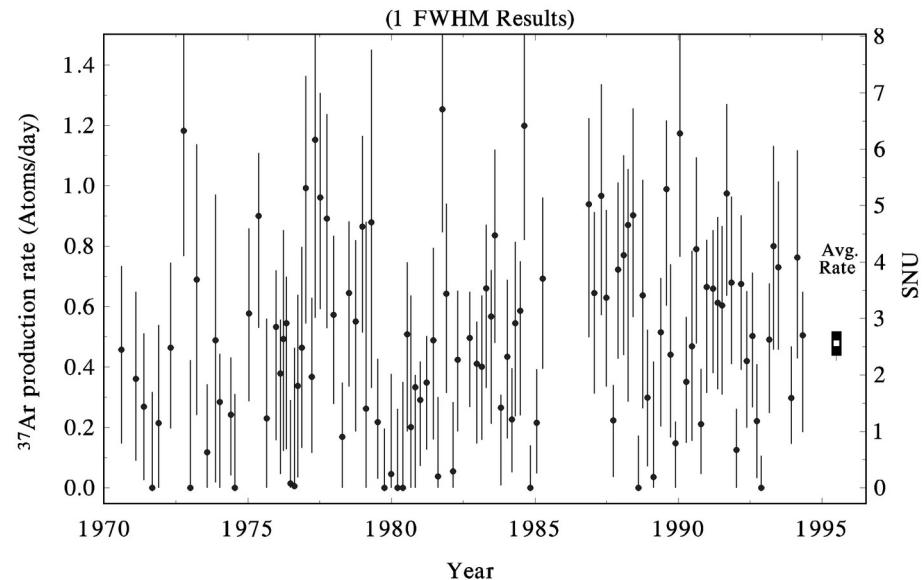
# Основные фоны

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

- Космические лучи:  $0,047 \pm 0,013 \text{ сут}^{-1}$ .
- Нейтроны от  $\alpha$ -распадов в породе:
  - $0,05 \pm 0,025 \text{ сут}^{-1}$ ;
  - $< 0,002 \text{ сут}^{-1}$  (если детектор окружён слоем водной защитой в 1 м);
  - $0,03 \pm 0,025 \text{ сут}^{-1}$  (если детектор окружён слоем защиты из жидкого сцинтиллятора в 30 см).
- $\alpha$ -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  $\nu_e$ :  
 $(2,25 \pm 0,21) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ C}^{-1}$ .



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:  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ .
- Состояния  $|\nu_\alpha\rangle$  с определённым ароматом ( $\alpha = e, \mu, \tau$ ) не имеют определённой массы, я являются суперпозицией массовых состояний  $|\nu_i\rangle$  ( $i = 1, 2, 3$ ):

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i}^* |\nu_i\rangle \quad U = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} \end{pmatrix}$$

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

# Осцилляции нейтрино

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

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

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

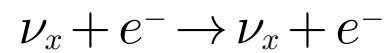
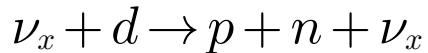
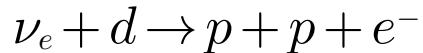
- $P_{\alpha\beta}$  описывает вероятность, что нейтрино аромата  $\alpha$  спустя время  $t$  будет зарегистрировано как имеющее аромат  $\beta$ .

# 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.



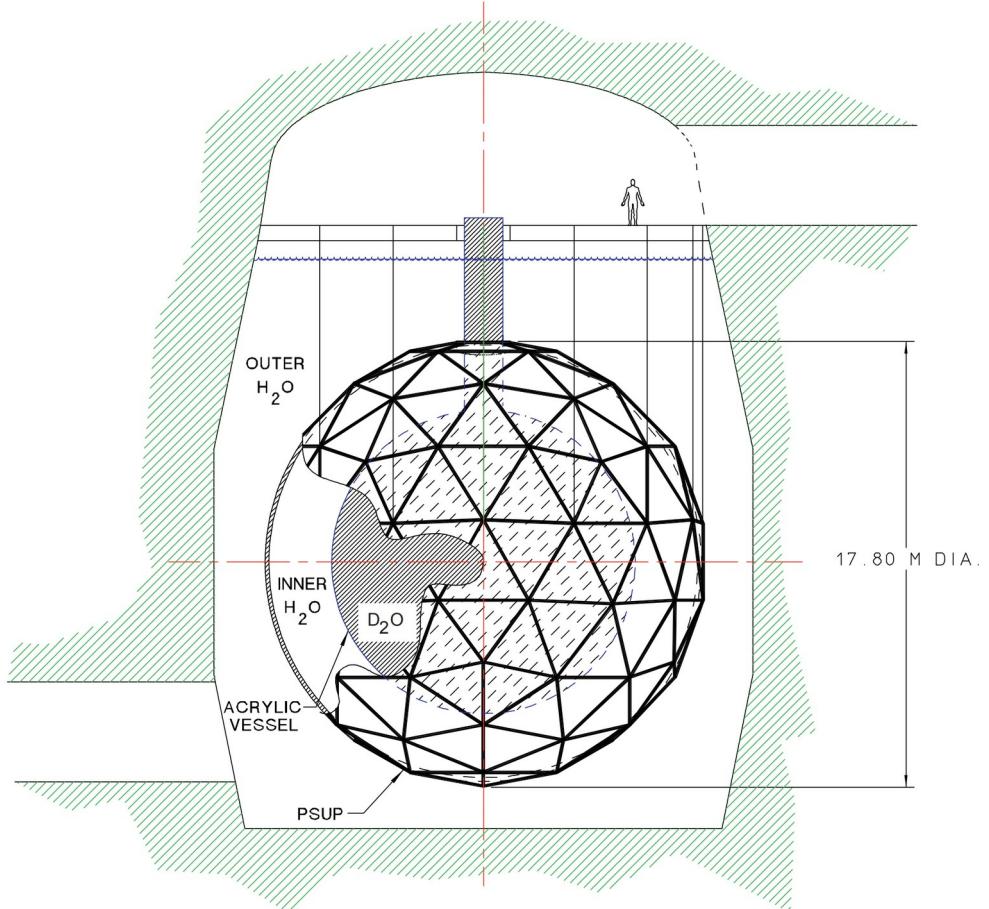
# Регистрация нейтрино



- Заряженный ток (CC).
- Только  $\nu_e$ .
- Порог — 1,4 МэВ.
- Регистрируется  $e^-$ .
  - Энергия связана с энергией  $\nu_e$ .
- Нейтральный ток (NC).
- Все  $\nu_x$ .
- Порог — 2,2 МэВ.
- Регистрируется  $n$ .
  - Захват дейтерием и испускание  $\gamma$ -кванта с энергией 6,25 МэВ.
- Упругое рассеяние (ES).
- Все  $\nu_x$ , но для  $\nu_e$  сечение больше.
- Регистрируется  $e^-$ .
  - Направление связано с направлением  $\nu_e$ .

# Конструкция детектора

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



# Вода

- Высокие требования к чистоте воды.
- Сопротивление  $\text{H}_2\text{O}$  после очистки — 18,2 МОм · см.
- Вода должна быть изолирована от воздуха в лаборатории, чтобы избежать попадания в неё радона.

## Изотопный состав $\text{D}_2\text{O}$

- Водород:
  - $^2\text{D}$ : 99,917 %
  - $^3\text{T}$ : 0,097 мкКи/кг
- Кислород:
  - $^{17}\text{O}$ : 0,17 %
  - $^{18}\text{O}$ : 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  $T_{\text{eff}}$ .
  - 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
$\geq 30$ 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
<b>Итого</b>	<b>1169</b>

# 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
$\geq 30$ 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
<b>Итого</b>	<b>1169</b>

# Учёт NC

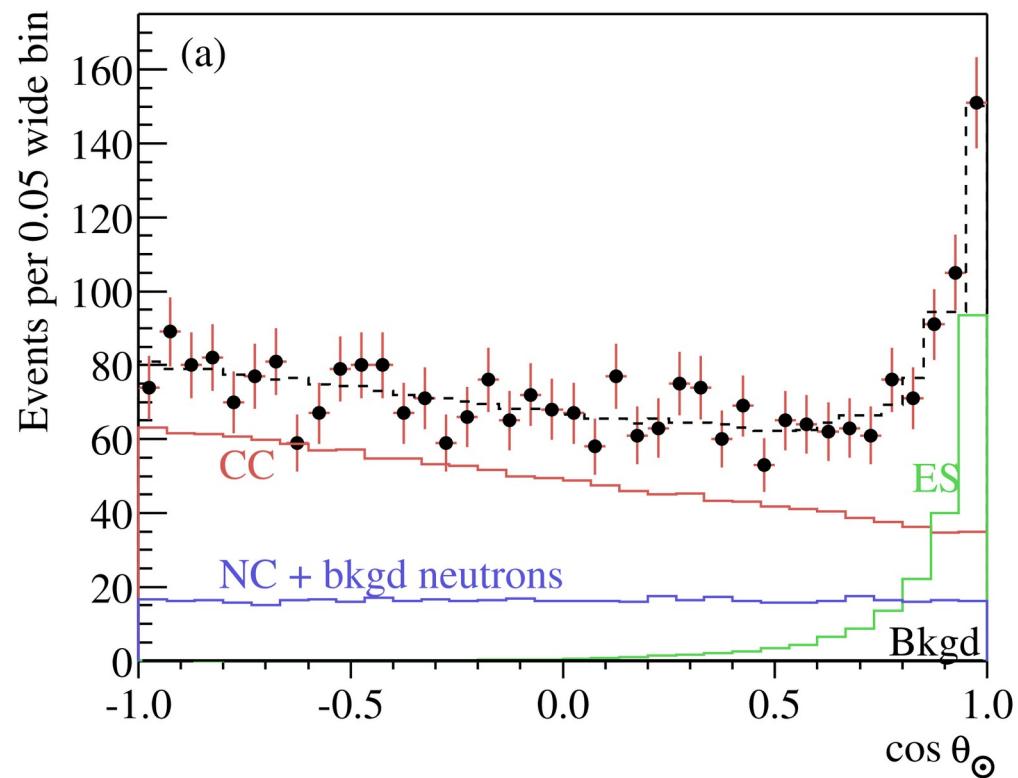
- Полный набор данных CC + NC + ES (306,4 сут).
- Изменён энергетический порог:  $T_{\text{eff}} \geq 5 \text{ МэВ}.$ 
  - Энергетическое разрешение:
$$\sigma_T \approx (-0,068 + 0,33\sqrt{T_e} + 0,043T_e)$$
- Добавлен критерий отбора для подавления нейтронного фона, связанного с космическими лучами.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

# Фоны

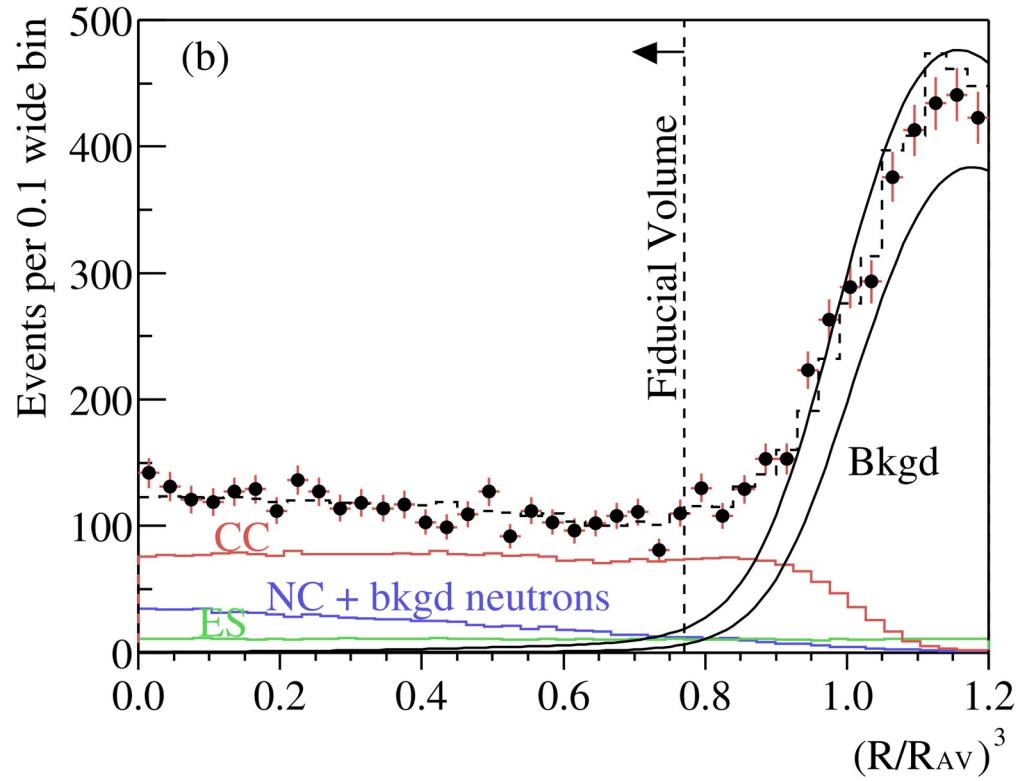
Нейтронный	
Источник	События
Фоторасщепление в D <sub>2</sub> O	44 <sup>+8</sup> <sub>-9</sub>
Фоторасщепление в H <sub>2</sub> O и АС	27 <sup>+8</sup> <sub>-9</sub>
Атмосферные ν и μ ниже черенковского порога	4±1
Деление	«<1
<sup>2</sup> H(α,α)рп	2±0,4
<sup>17</sup> O(α,n)	«<1
Земные и реакторные $\bar{\nu}$	1 <sup>+3</sup> <sub>-1</sub>
Внешние нейтроны	«<1
<b>Итого нейтронного фона</b>	<b>78±12</b>

Черенковский	
Источник	События
D <sub>2</sub> O	20 <sup>+13</sup> <sub>-6</sub>
H <sub>2</sub> O	3 <sup>+4</sup> <sub>-3</sub>
АС	6 <sup>+3</sup> <sub>-6</sub>
ФЭУ	16 <sup>+11</sup> <sub>-8</sub>
<b>Итого черенковского фона</b>	<b>45<sup>+18</sup><sub>-12</sub></b>

# Результаты

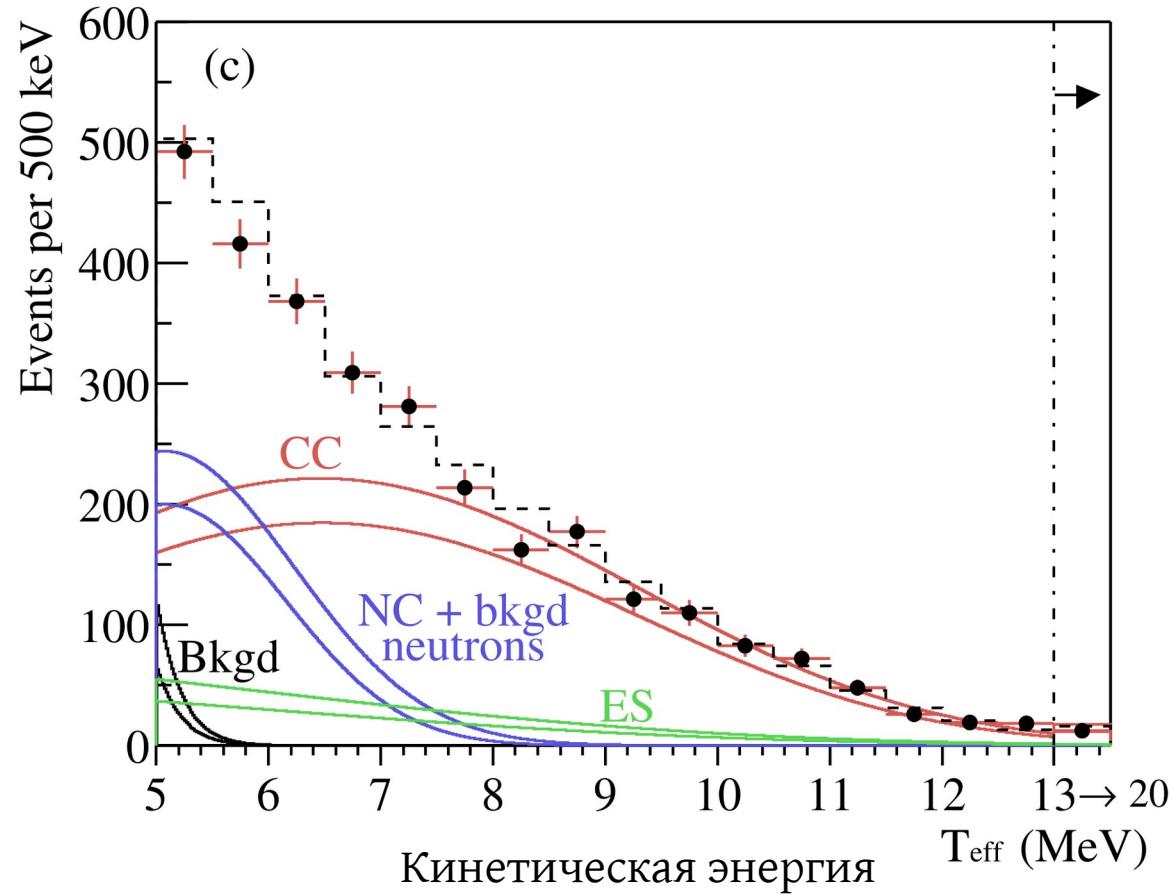


Направление относительно направления  
от Солнца



Радиальная координата

# Результаты



# Результаты

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

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

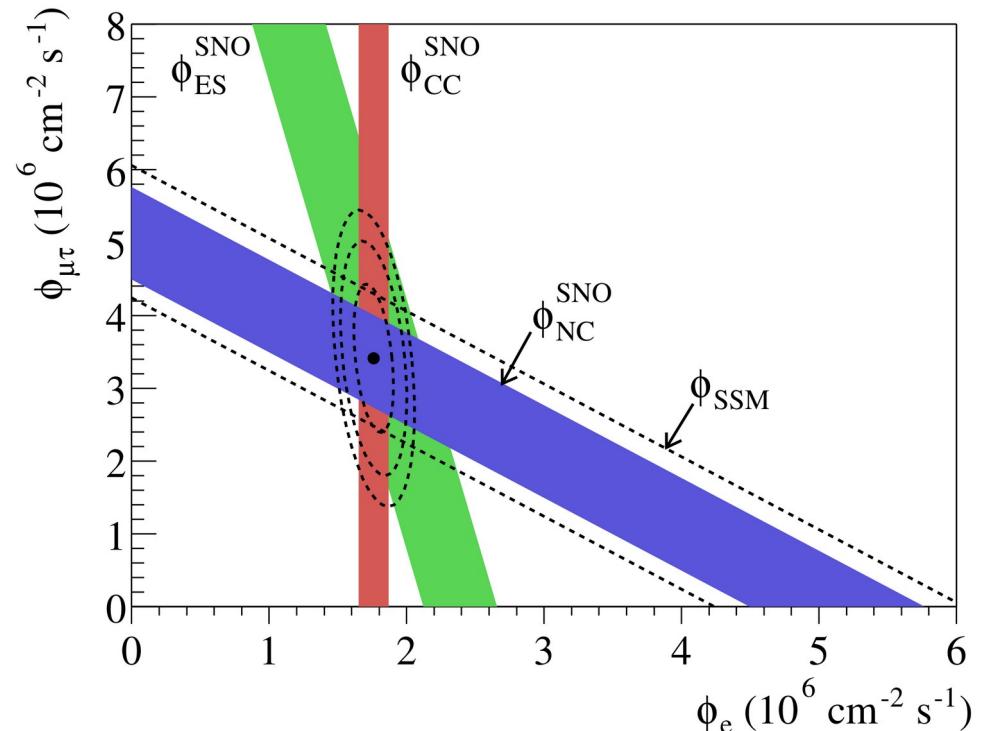
$$\phi_{\text{ES}} = 2,39^{+0,24+0,12}_{-0,23-0,12}$$

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

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

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

↗  $> 0 (5,3 \sigma)$



# Систематические неопределённости

Источник	$\phi(CC) (%)$	$\phi(NC) (%)$	$\phi(\mu\tau) (%)$
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 <sub>2</sub> O*	-0,1; +0,2	-2,6; +1,2	-3,7; +1,7
Черенковский шум от H <sub>2</sub> O	$\pm 0,0$	-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	<b>-5,2; +5,2</b>	<b>-8,5; +9,1</b>	<b>-13,2; +14,1</b>
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  $^{10}\text{B}$  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.