



*Новые галлиевые эксперименты с
искусственными источниками нейтрино*

В. В. Горбачёв¹, В. Н. Гаврин¹, Т. В. Ибрагимова¹, В. А. Матвеев²

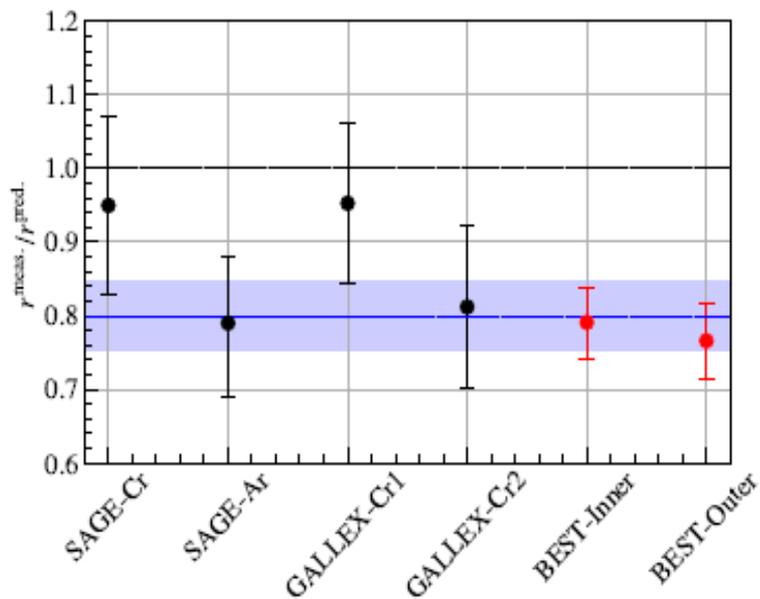
¹ Институт ядерных исследований РАН

² Объединенный институт ядерных исследований

Галлиевые эксперименты

1) Измерения солнечных нейтрино (SAGE, GALLEX-GNO)

2) Калибровочные эксперименты с искусственными источниками нейтрино



Суммарный результат

$$P_{\text{измер}}/P_{\text{ожид}} \equiv R \pm \sigma = 0.80 \pm 0.05 (5.7\%)$$

Галлиевая аномалия

– маленькая скорость захвата нейтрино
в калибровочных экспериментах
SAGE, GALLEX и BEST с источниками
 ^{51}Cr и ^{37}Ar

активностью 0.4-3.4 МКи (до 10^{17} c^{-1})

Возможное объяснение галлиевой аномалии – осцилляции на короткой базе:

$$P_{ee} = 1 - \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m^2 (\text{eV}^2) \cdot L(\text{m})}{E_\nu (\text{MeV})} \right)$$

Схема Ga измерений

Захват нейтрино в Ga мишени: ${}_{31}^{71}\text{Ga} + \nu_e \rightarrow {}_{32}^{71}\text{Ge} + e^{-}$

Радиохимический цикл (ран):

- облучение Ga мишени нейтрино от Солнца (30 сут) или от источника*
- извлечение ${}^{71}\text{Ge}$ из Ga мишени*
- счёт распадов ${}^{71}\text{Ge}$ ($T_{1/2}=11.43$ сут) в пропорциональном счётчике (5 мес)*

Эффективность детектирования нейтрино $\varepsilon \approx 0.5$

Скорости захвата нейтрино:

- от Солнца 1 сут^{-1} в 50 т Ga*
- от источников до 130 сут^{-1} в 48 т Ga (в BEST)*

Отличие Ga экспериментов:

- 1)Малый фон – идёт только от Солнца*
- 2)Чистые захваты нейтрино через заряженные токи (CC)*
- 3)Плотная мишень ($\rho(\text{Ga}) = 6 \text{ г/см}^3$)*
- 4)Малый порог захвата нейтрино ($E_{\text{пор}} = 233 \text{ кэВ}$)*

Эксперимент BEST-2

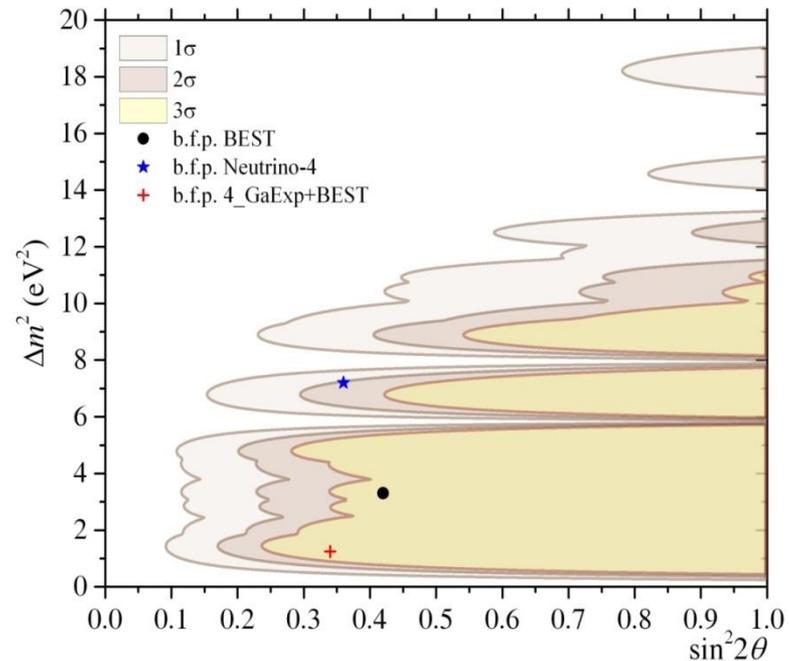
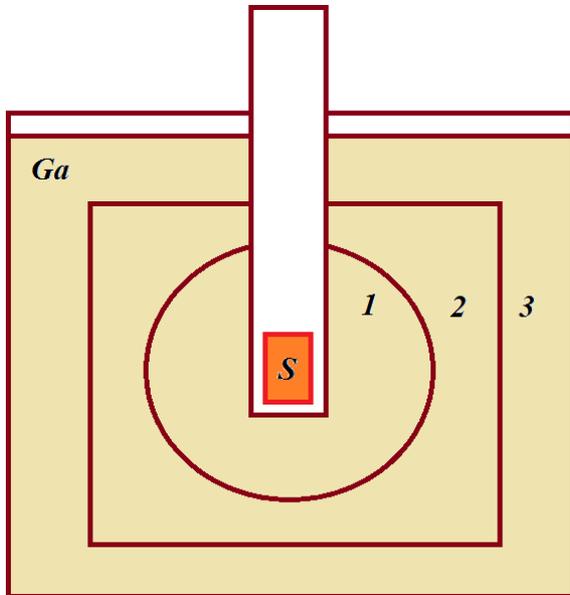
Новый Ga эксперимент с источником

монохроматических электронных нейтрино ^{58}Co , 400кКи

arXiv: 2501.08127, ЖЭТФ-2025

Решение галлиевой аномалии:

- 1) Основная гипотеза – переходы нейтрино в стерильные состояния
- 2) 3 независимых зоны мишени – чувствительная к расстоянию мишень
- 3) Энергия нейтрино 1500 кэВ, в 2 раза выше, чем от ^{51}Cr (750 кэВ)
- 4) Определение параметров осцилляций (Δm^2 , $\sin^2 2\theta$)
- 5) Проверка зависимости галлиевой аномалии от энергии нейтрино



Эксперименты с антинейтринными источниками

Галлиевая мишень не взаимодействует с антинейтрино!

Поэтому нужно предположить переходы $\nu_e \leftrightarrow \bar{\nu}_e$

Почему такие переходы происходят:

1) CPT нарушения

– ограничения из экспериментов по поиску нейтрино в потоке антинейтрино от ядерных реакторов на хлорном радиохимическом детекторе Р.Девиса 0.06 (1σ CL)

– ограничения из экспериментов по поиску антинейтрино от Солнца:

Borexino $1.3 \cdot 10^{-4}$

KamLAND $5.3 \cdot 10^{-5}$

Ожидаются новые ограничения от:

JUNO $9 \cdot 10^{-6}$

Jinping $6 \cdot 10^{-6}$

2) Распад нейтрино

Ф.Боум, П.Фогель. *Физика массивных нейтрино*, М, «Мир», 1990

Г.В.Клапдор-Клайнгротхауз, К.Цюбер. *Астрофизика элементарных частиц*, М, УФН, 2000

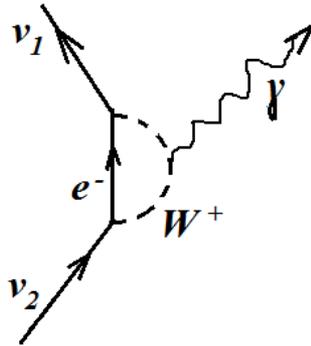
R.N.Mohapatra, P.V.Pal. *Massive Neutrinos in Physics and Astrophysics*, 2004
arXiv: 2405.14826

Примеры распадов нейтрино

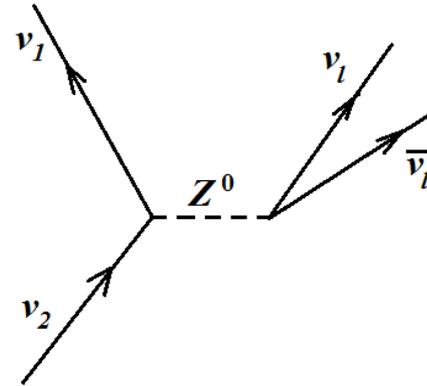
Более тяжёлые массовые состояния ν_h могут быть нестабильны и могут распадаться в более лёгкие

$$\nu_h = \nu_l + X$$

$X = \text{фотон } (\gamma) \text{ или майорон } (\chi)$



$$\nu_h = \nu_l + \nu + \bar{\nu}$$



Напомним, в Ga эксперименте нам нужны переходы в античастицы!

В 3-частичном распаде античастица будет рождаться в паре всегда (не обязательно это будет электронное нейтрино!)

В 2-частичном распаде античастица может родиться только, если нейтрино – майорановская частица:

Фотон или другой бозон со спином $s=1$ меняет направление спина нейтрино

Галлиевые эксперименты «на появление»

Выявление сигнала на некотором фоне

Для m облучений от источника ожидаемое число событий:

$$N(t_1) = \frac{p_0}{\lambda_1 - \lambda_0} \cdot e^{\lambda_1(t_1+t_2)} \cdot (e^{-\lambda_0 t_1} - e^{-\lambda_1 t_1}) \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_1(t_1+t_2) \cdot m}}{1 - e^{-\lambda_1(t_1+t_2)}}$$

p_0 – начальная скорость захвата

λ_0 и λ_1 – постоянные распада ${}^{71}\text{Ge}$ и источника

t_1 и t_2 – время одного облучения и перерыв на извлечение (=1 сут)

Фон: 1) солнечные нейтрино:

$$N_C(t_1) = \frac{p_C}{\lambda_0} \cdot (1 - e^{-\lambda_0 t_1}) \cdot m$$

2) нейтринные линии источника:

$$N_S(t_1) = N(t_1) \times \frac{p_S}{p_0}$$

Солнечные нейтрино – измерены, $p_C = 1.0 \pm 0.05 \text{ сут}^{-1}/50\text{mGa}$

Нейтринные линии источника – p_S можно посчитать по справочным данным

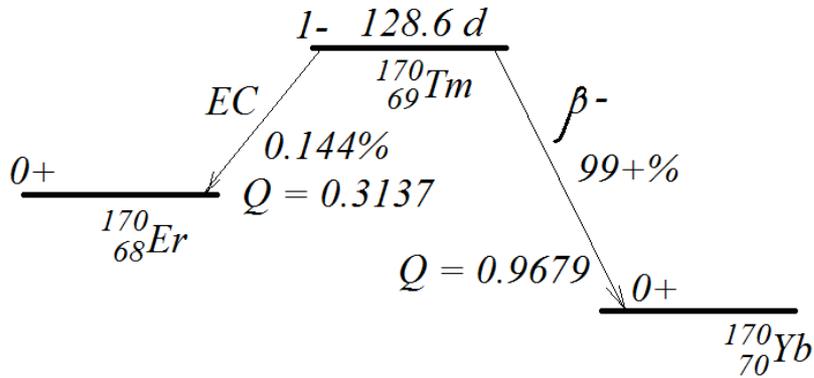
Строим функцию (отношение сигнала к ошибке фона):

$$Y(t_1) = \frac{N(t_1)}{d \cdot \sqrt{N_C(t_1) + N_{source}(t_1)}} \cdot \sqrt{\varepsilon}$$

Положительный сигнал: $Y(t_1) > 1$ на уровне значимости $d \cdot \sigma$

Чувствительность: $Y(t_1) = 1$

Источник ^{170}Tm (туллий)



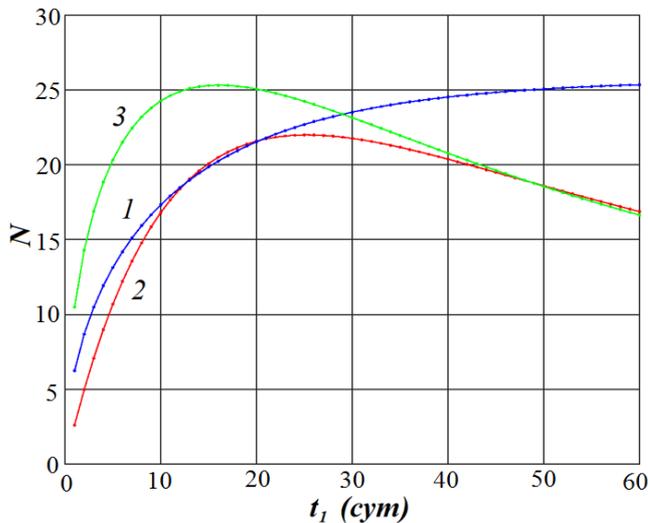
Мы рассчитываем на источник **2 МКи**

Максимальные энергии антинейтрино от источника

$$\frac{Q}{E_{\text{пор}}} = \frac{968}{233} = 4.2$$

$E_{\text{пор}} = 233$ кэВ – пороговая энергия захвата на ^{71}Ga

Средняя энергия анти- ν $E_{\text{ср}} \approx 750$ кэВ



Зависимости количества событий от времени t_1 :

для ошибка фона (2σ) (кривая 1)

для источника ^{170}Tm (кривая 2)

Отношение этих зависимостей (кривая 3, $\times \text{const}$)

Максимум чувствительности (кривые (1) и (2)

касаются друг друга) – при $t_1 = 16$ сут

Нейтринная мода: $f = 0.144\%$, $E_{\text{ню}} = 314$ кэВ, $\sigma = 1.8 \cdot 10^{-45}$ см²

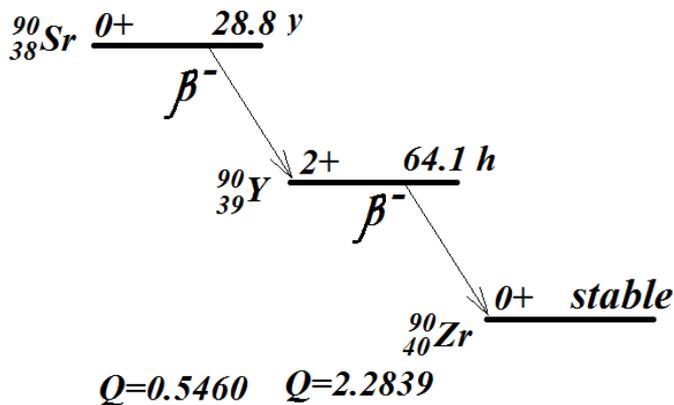
$$p = (A \cdot f) \cdot D \cdot \langle L \rangle \cdot \sigma = 0.037 \text{ сут}^{-1}, 3.7\% \text{ от скорости захвата солнечных } \nu$$

Чувствительность:

$$p_{\text{min}} = 0.28 \text{ сут}^{-1} \text{ для уровня значимости } 2\sigma$$

$$0.41 \text{ сут}^{-1} \text{ для уровня значимости } 3\sigma$$

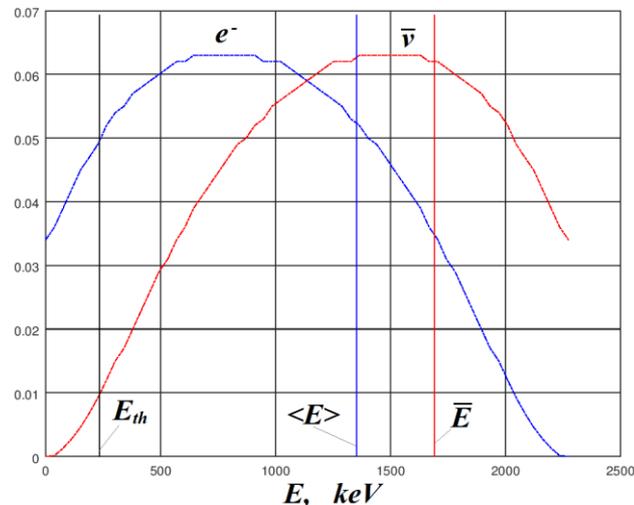
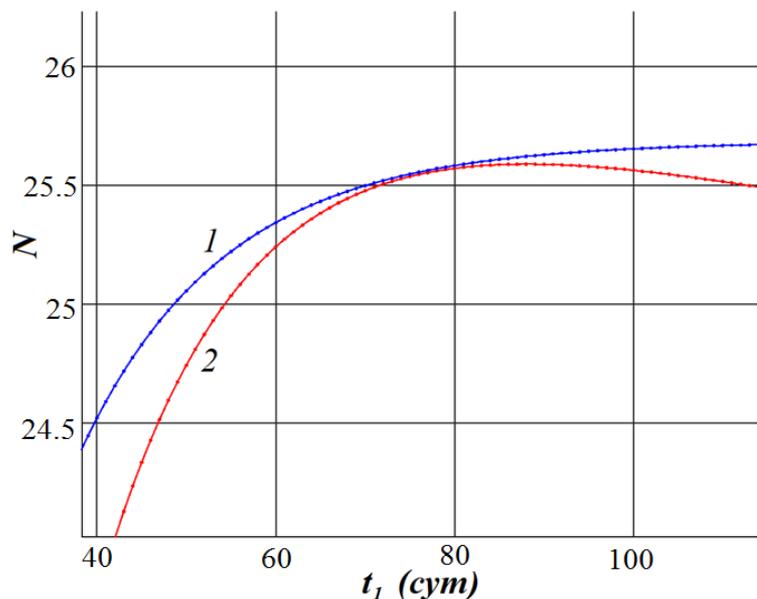
Источник ^{90}Sr (стронций)



Мы рассчитываем на источник **80 кКи**

Максимальные энергии антинейтрино от источника

$$\frac{Q}{E_{\text{пор}}} = \frac{2284}{233} = 9.8$$



Спектр антинейтрино

Средняя энергия анти- ν $E_{\text{ср}} \approx 1690 \text{ кэВ}$

Для $T_{1/2} = 28.8 \text{ лет}$ $t_1 = 77 \text{ сут}$

Для удобства делаем $t_1 = 30 \text{ сут}$ (теряем 6% чувствительности)

Чувствительность:

$R_{\text{min}} = 0.17 \text{ сут}^{-1}$ для уровня значимости 2σ
 0.25 сут^{-1} для уровня значимости 3σ

Скорости счёта в экспериментах

Если бы антинейтрино захватывались с тем же сечением, что и нейтрино, то скорость их захвата была бы равна:

Скорость захвата:
$$p = (A \cdot f) \cdot D \cdot \langle L \rangle \cdot \sigma$$

$D = 2.1 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ – плотность числа атомов ^{71}Ge

$\langle L \rangle = 106 \text{ см}$ – средний пробег нейтрино в галлиевой мишени

^{170}Tm	Q	E	E/2	E/3
E, кэВ	968	752	391	286
$\sigma, \times 10^{-46} \text{ см}^2$	96.9	69.1	23.9	16.0
$p(2\text{МКи}), \text{сут}^{-1}$	137.8	98.3	34.0	22.8

^{90}Sr	Q	E	E/2	E/3
E, кэВ	2284	1692	848	570
$\sigma, \times 10^{-46} \text{ см}^2$	577.5	312.1	81.5	45.7
$p(80\text{кКи}), \text{сут}^{-1}$	32.9	17.8	4.6	2.6

Чувствительность экспериментов

Вероятность перехода $\bar{\nu} \rightarrow \nu$: $\alpha^2 = \frac{\sigma_{\text{эксп}}}{\sigma_{\text{теор}}}$ или $\alpha^2 = \frac{P_{\text{min}}}{p}$

$\alpha^2(i)$ – чувствительность по распаду на i частиц

Источник	Уровень значимости	$\alpha^2(1)$	$\alpha^2(2)$	$\alpha^2(3)$
^{170}Tm	2 σ	0.0028	0.0082	0.012
	3 σ	0.0042	0.012	0.018
^{90}Sr	2 σ	0.0096	0.037	0.065
	3 σ	0.014	0.054	0.096

Т.е. чувствительность по CPT-нарушениям ожидается $\sim 0.3\%$, на порядок хуже, чем в *Borexino*

Чувствительность по распаду нейтрино на 2 частицы – 0.8%
на 3 частицы – 1.2%

Для чего нужно делать эксперимент с источником ^{90}Sr

Если вероятности распада не зависят от энергии, то сигнал от источника ^{90}Sr будет:

$$p_s = p_{Sri} \cdot \alpha_i^2 = p_t \cdot \frac{P_{Sri}}{P_{Tmi}}$$

p_{Sr} – скорость захвата нейтрино со спектром антинейтрино от ^{90}Sr

p_t – скорость захвата, измеренная от источника ^{170}Tm

Отношения скоростей счёта от двух источников: $K_i = \frac{P_{Sri}}{P_{Tmi}}$

i	1	2	3
K_i	0.181	0.135	0.114

Разница ожидаемых скоростей захвата для распадов нейтрино по разным модам составит 18-40%

Мода $i=2$ (распад нейтрино на 2 частицы) будет свидетельствовать о майорановской природе нейтрино

Статистику по ^{90}Sr можно увеличить, проводя повторные эксперименты: Дополнительный эксперимент увеличивает K_i в ~ 1.4 раза

Заключение

- 1. Детектор нейтрино на галлиевой мишени ГГНТ остаётся уникальным инструментом для проведения экспериментов по исследованию свойств нейтрино*
- 2. В эксперименте с источником ^{58}Co активностью 400 кКи будет исследована галлиевая аномалия; исследованы осцилляционные переходы электронных нейтрино в стерильные состояния и будут определены параметры таких переходов в случае, если они находятся в области чувствительности эксперимента; будет исследована зависимость галлиевой аномалии от энергии нейтрино*
- 3. В эксперименте с источником антинейтрино ^{170}Tm активностью 2 МКи будет исследована возможность переходов между нейтрино и антинейтрино, в том числе связанная с распадом нейтрино*
- 4. В эксперименте с источником антинейтрино ^{90}Sr активностью 80 кКи, который предполагается выполнить следом за экспериментом с ^{170}Tm , будет определена мода распада нейтрино. В случае распада на две частицы, это будет свидетельством майорановской природы нейтрино.*