

Исследование ЭМ свойств нейтрино в эксперименте νGeN

Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН,
посвященная 70-летию В.А.Рубакова

Игнатов Георгий для νGeN

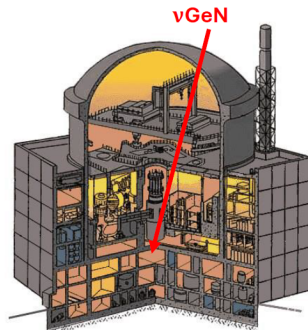
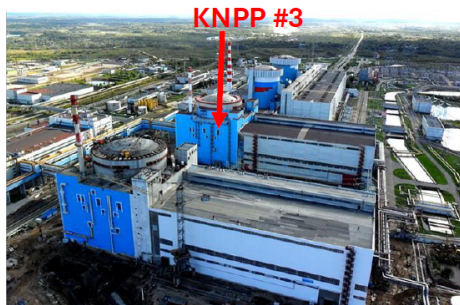
МФТИ, ФИАН

19.02.2025



Эксперимент ν GeN

- Третий энергоблок КАЭС (защита от космики ~ 50 метров в.э.).
- Расстояние от центра активной зоны реактора – 11 метров.
- Поток антинейтрино – $4.4 \times 10^{13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.



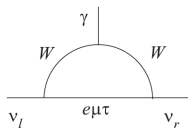
Основные цели эксперимента ν GeN:

- Поиск УКРН (Доклады И.Житникова и Д.Саутнера сегодня);
- **Исследование ЭМ свойств антинейтрино.**

Магнитный момент нейтрино (ММН)

- ММН в минимальных расширениях СМ:

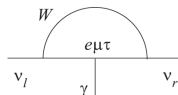
$$\mu_\nu = \frac{3eG_F m_\nu}{8\sqrt{2}\pi^2} \approx 3.2 \times 10^{-19} \left(\frac{m_\nu}{1\text{eV}}\right) \mu_B. \quad (1)$$



- Однако есть модели, допускающие

$$\mu_\nu \sim 10^{-14} \mu_B \text{ (дираковское нейтрино),}$$

$$\mu_\nu \sim 10^{-11} \mu_B \text{ (майорановское нейтрино).}$$



- Некоторые из экспериментальных ограничений на ММН:

Предел, $10^{-11} \mu_B$	C.L.	Эксперимент
28	90%	D-II & COHERENT [P. Coloma et al., 2022]
7.5	90%	CONUS [H. Bonet et al., 2022]
7.4	90%	TEXONO [H.T. Wong et al., 2007]
2.9	90%	GEMMA [A.G. Beda et al., 2013]
0.64	90%	XENONnT [E. Aprile et al., 2022]

- Астрофизические ограничения: $\mu_\nu < 1.2 \times 10^{-12}$ (95% C.L.) [F. Capozzi, 2022].
- Лучшие ограничения ММН в реакторных экспериментах – HPGe детекторы.

Магнитный момент нейтрино (ММН)

- Вклад ММН в $\nu - e$ рассеяние:

$$\frac{d\sigma_{MM}}{dT} = \pi \frac{\alpha^2}{m_e^2} \left(\frac{\mu_\nu}{\mu_B}\right)^2 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{E_\nu}\right). \quad (2)$$

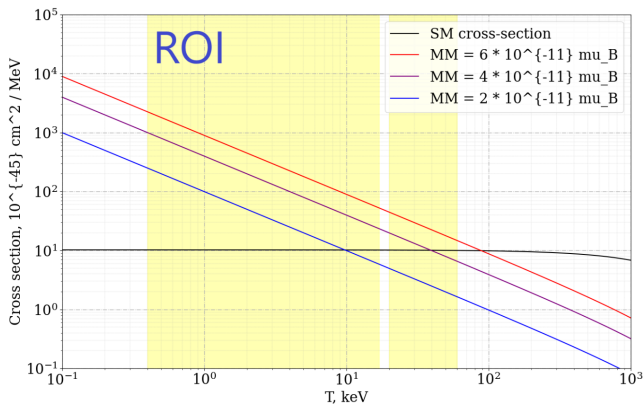


Рис.: Сечения для $E_\nu = 5$ МэВ.

Экспериментальные данные

- *ON*: 140.2 суток, *OFF*: 69.2 суток.
- Собраны в период с октября 2022 по май 2023.

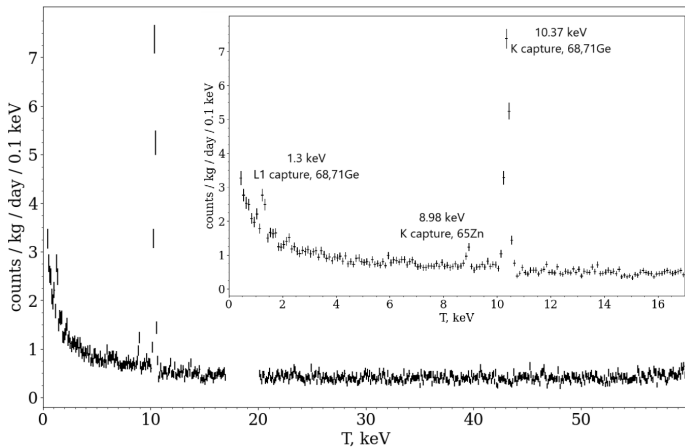
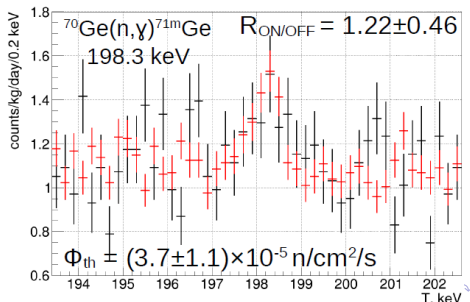
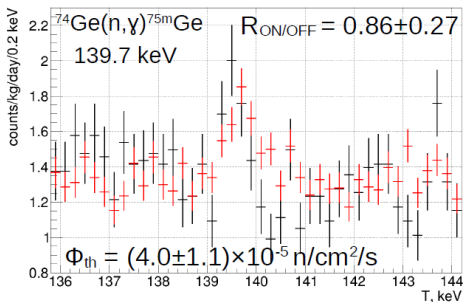
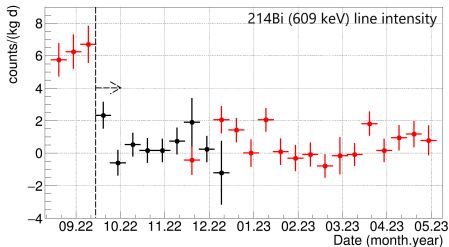


Рис.: Спектр энергодельений в режиме *OFF*.

Стабильность фона

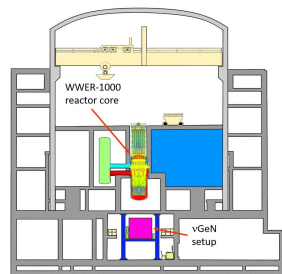
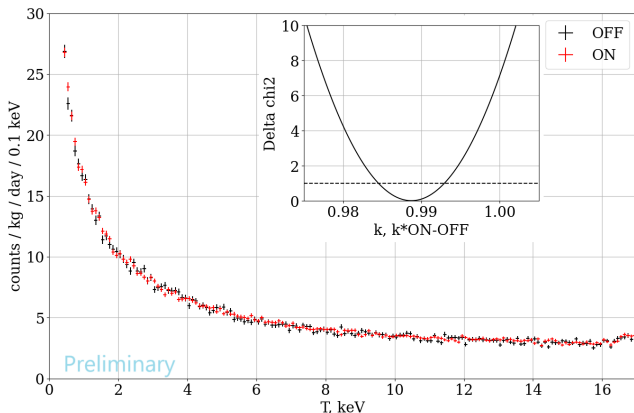
Источники нестабильности:

- Флуктуации радона (график справа+backup).
- Космогенные изотопы в детекторе:
интенсивность $10.37 \text{ кэВ} - ON : 15.4 \pm 0.5$,
 $OFF : 15.2 \pm 0.3$.
- Тепловые (графики снизу) и быстрые (идет анализ) нейтроны.
- Мюоны (след. слайд).



Нестабильность потока мюонов

В период останова реактора объем воды в бассейне меняется → меняется поток μ .
Вклад учитывается штрафным членом при фитировании.

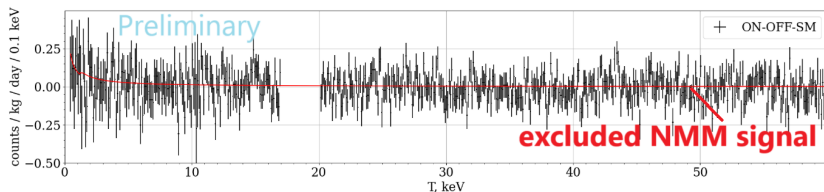


Оцененная разница спектров ON и OFF в области интереса:

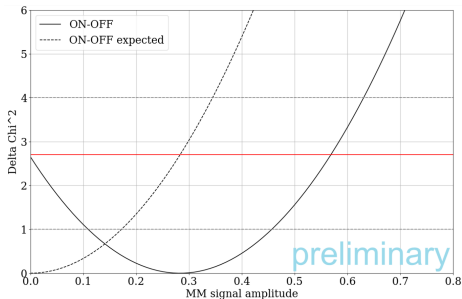
$$\delta = (1.1 \pm 0.3)\%$$

Рис.: Энерговыведения в совпадении с μ вето.

Чувствительность и ограничение



$$\Delta\chi^2 = \sum_i \frac{(ON_i - OFF_i - SM_i - A \times MM_i - B \times MU_i)^2}{\sigma_{ON,i}^2 + \sigma_{OFF,i}^2} + \frac{(B-1)^2}{\sigma_B^2}$$



Чувствительность (90% C.L.):

$$\mu_\nu < 5.3 \times 10^{-11} \mu_B$$

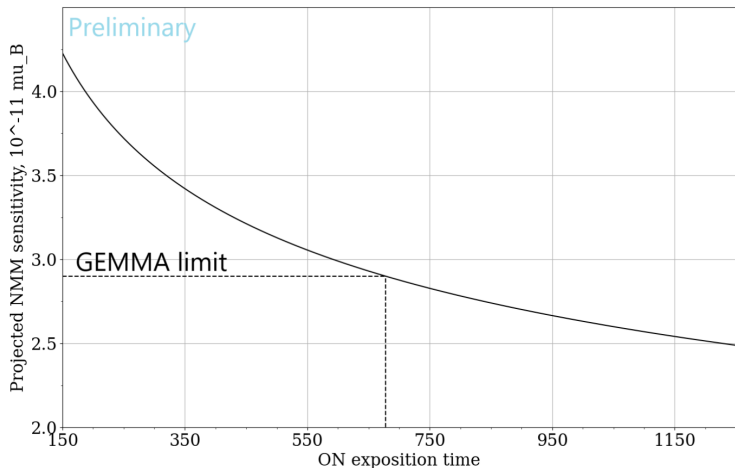
Верхний предел (90% C.L.):

$$\mu_\nu < 7.5 \times 10^{-11} \mu_B$$

$$\leftarrow \text{Amplitude} = (\mu_\nu \times 10^{-12} \mu_B)^2$$

Ожидаемая чувствительность

- Чувствительность к ММН можно оценить как: $\mu_{\nu}^{lim} \sim \sqrt[4]{\frac{Background}{Time}} \sqrt{\frac{1}{Flux}}$.
- Предполагаем идеальную модель фона. На начало 2025 общая экспозиция $ON \sim 1300$ суток.



Предел GEMMA достигается при $T_{ON} \sim 680$ суток.

Миллизаряд нейтрино

- При наличии у нейтрино миллизаряда сечение СМ изменятся:

$$\frac{d\sigma_{SM+Q}}{dT} = \frac{d\sigma_{SM+Q_{ii}}}{dT} + \frac{d\sigma_{SM+Q_{ij}}}{dT}. \quad (3)$$

$$\frac{d\sigma_{SM+Q_{ii}}}{dT} = \frac{d\sigma_{SM}}{dT}, g_V \rightarrow g_V - \frac{\sqrt{2}\pi\alpha}{G_F m_e T} \frac{q_{ii}}{e}. \quad (4)$$

$$\frac{d\sigma_{SM+Q_{ij}}}{dT} = \frac{\pi\alpha^2}{m_e T^2} \left[1 + \left(1 - \frac{T}{E}\right)^2 - \frac{m_e T}{E^2} \right] \left| \frac{q_{ij}}{e} \right|^2. \quad (5)$$

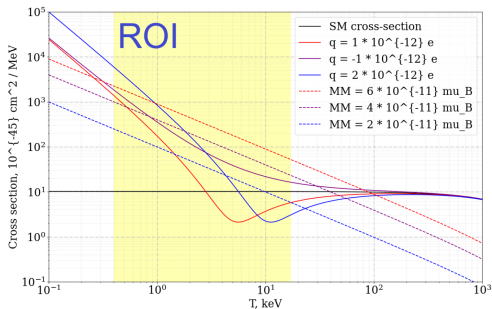
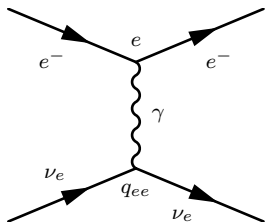
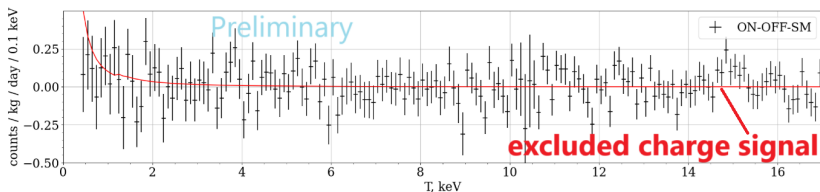
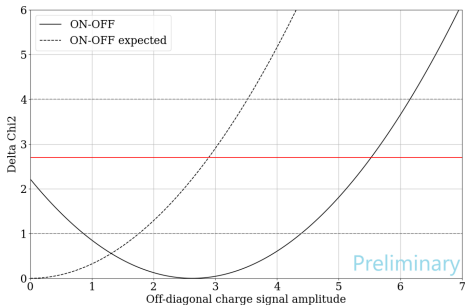


Рис.: Сечения для $E_\nu = 5$ МэВ.

Чувствительность и ограничение



$$\Delta\chi^2 = \sum_i \frac{(ON_i - OFF_i - SM_i - A \times Q_i - B \times MU_i)^2}{\sigma_{ON,i}^2 + \sigma_{OFF,i}^2} + \frac{(B-1)^2}{\sigma_B^2}$$



Чувствительность (90% C.L.):

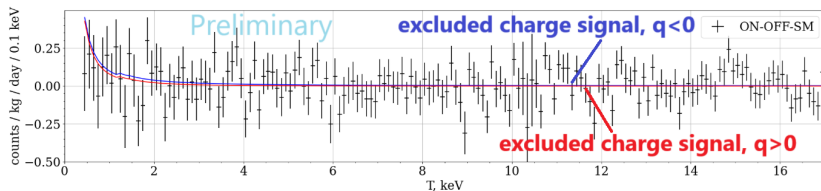
$$|q_{\nu e\mu}|, |q_{\nu e\tau}| < 1.7 \times 10^{-12} e$$

Верхний предел (90% C.L.):

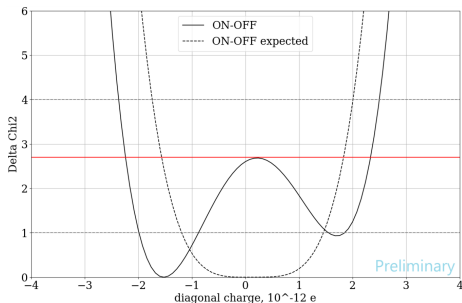
$$|q_{\nu e\mu}|, |q_{\nu e\tau}| < 2.4 \times 10^{-12} e$$

$$\leftarrow \text{Amplitude} = (q_\nu \times 10^{-12} e)^2$$

Чувствительность и ограничение



$$\Delta\chi^2 = \sum_i \frac{(ON_i - OFF_i - \bar{SM}(Q)_i - B \times MU_i)^2}{\sigma_{ON,i}^2 + \sigma_{OFF,i}^2} + \frac{(B-1)^2}{\sigma_B^2}$$



Чувствительность (90% C.L.):

$$q_{\nu_{ee}} \in (-1.6, 1.8) \times 10^{-12} e$$

Верхний предел (90% C.L.):

$$q_{\nu_{ee}} \in (-2.2, 2.3) \times 10^{-12} e$$

Миллизаряд нейтрино, ограничения

- Некоторые из экспериментальных ограничений на миллизаряд:

Предел, $10^{-12}e$	C.L.	Эксперимент
0.224*	90%	LZ [J. Aalbers et al., 2023]
$\sim 9^{**}$	90%	Dresden-II [M. Corona et al., 2022]
$\sim 3.3^{***}$	90%	CONUS [H. Bonet et al., 2022]
2.7*	90%	GEMMA [V.B. Brudanin et al., 2016]
2.1*	90%	TEXONO [J.W. Chen et al., 2014]
2.4	90%	ν GeN

* – в работах нет разделения на q_{ii} и q_{ij} ,

** – в работе множество пределов для разных вариантов квенчинга и моделей спектров реакторных антинейтрино,

*** – в работе приведена оценка по порядку величины.

- Космологические ограничения: $q_{\nu}^{lim} \sim 10^{-35}$ [C. Caprini, 2003] (электронейтральность вселенной).

Заключение

Результаты:

- На основе статистики 140.2 и 69.2 суток *ON* и *OFF* соответственно получены ограничения (90%С.Л.) на величину ММН:

$$|\mu_{\nu_e}| < 7.5 \times 10^{-11} \mu_B$$

и миллизаряда нейтрино:

$$|q_{\nu_{e\mu}}|, |q_{\nu_{e\tau}}| < 2.4 \times 10^{-12} e$$

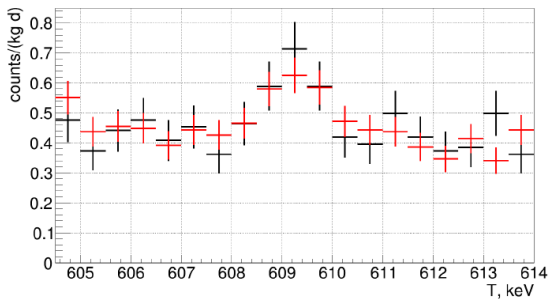
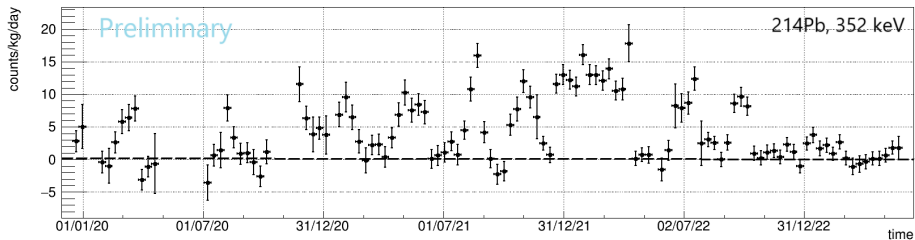
$$q_{\nu_{ee}} \in (-2.2, 2.3) \times 10^{-12} e$$

- Ограничение на ММН соизмеримо с результатами экспериментов CONUS [H. Bonet et al., 2022], TEXONO [H.T. Wong et al., 2007].
- Ограничение на миллизаряд нейтрино второе в мире среди реакторных экспериментов.

Спасибо за внимание!

Backup

Стабильность, радон



Нестабильность потока мюонов

Максимальный вклад вторичных частиц, индуцированных μ ограничен по линии 511 кэВ.

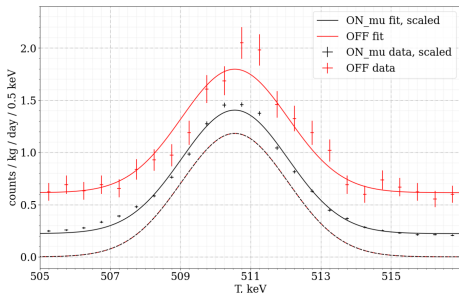


Рис.: Ограничение вклада μ по линии 511 кэВ.

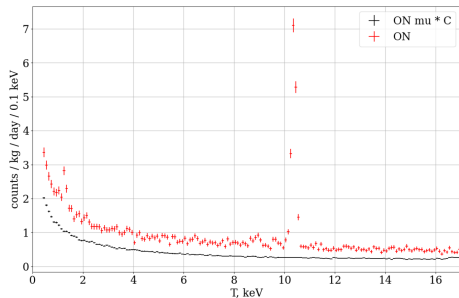


Рис.: ON vs максимальный вклад μ в ROI.

$$\text{Коэффициент скейлинга: } \frac{1}{C} = 16.0$$

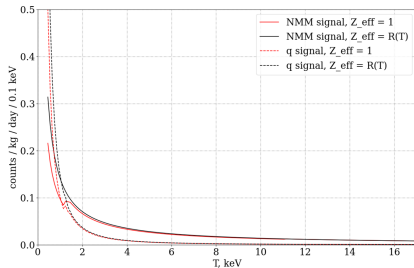
ν GeN & GEMMA

Эксперимент	Масса, кг	Поток, $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$	Порог, кэВ	ON, суток	OFF, суток
ν GeN	1.4	4.4×10^{13}	0.4	140	69
GEMMA	1.5	2.7×10^{13}	2.8	756	187

Эффективный заряд

$R(T)$ – доля электронов, которые после рассеяния могут получить энергию T .

$$R(T) \times 32 = \begin{cases} 32 & , T > 11.103 \text{ кэВ} \\ 30 & , 11.103 \text{ кэВ} \geq T > 1.4146 \text{ кэВ} \\ 28 & , 1.4146 \text{ кэВ} \geq T > 1.2481 \text{ кэВ} \\ 26 & , 1.2481 \text{ кэВ} \geq T > 1.217 \text{ кэВ} \\ 22 & , 1.217 \text{ кэВ} \geq T > 0.1801 \text{ кэВ} \\ \dots & \end{cases}$$



Космогенные изотопы в германии

Изотоп	К		L		M	
	T, кэВ	Br, %	T, кэВ	Br, %	T, кэВ	Br, %
^{71}Ge	10.37	87.6	1.3	10.5	0.16	1.8
^{68}Ge	10.37	86.5	1.3	11.5	0.16	1.8
^{68}Ga	9.66	88.6	1.2	9.8	0.14	1.6
^{65}Zn	8.98	88.6	1.1	9.8	0.122	1.6
^{57}Co	7.11	88.8	0.84	9.6	0.091	1.5
^{55}Fe	6.54	88.6	0.77	9.8	0.082	1.6
^{54}Mn	5.99	89.6	0.7	9.0	0.066	1.4
^{49}V	4.97	89.3	0.56	9.3	0.059	1.4