

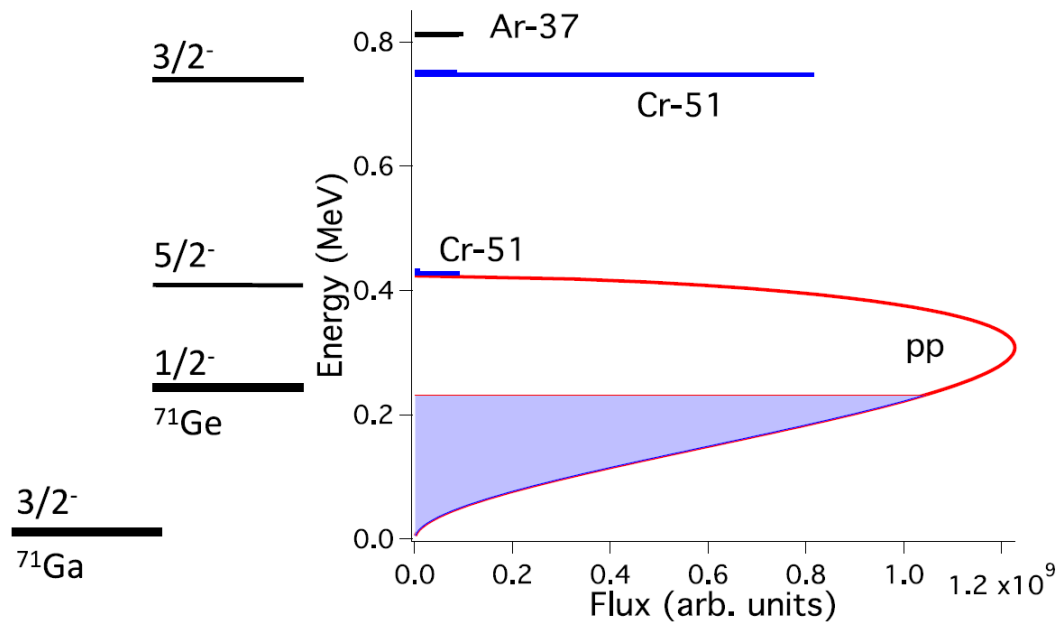
Нейтринная физика и галлий содержащие сцинтилляционные детекторы

Б.К. Лубсандоржиев, В.Н. Гаврин, Н.А. Ушаков, Д.М. Воронин, А.Н. Сидоренков,
А.А. Шихин, А.Н. Фазлиахметов

Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)

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

Галлиевая аномалия

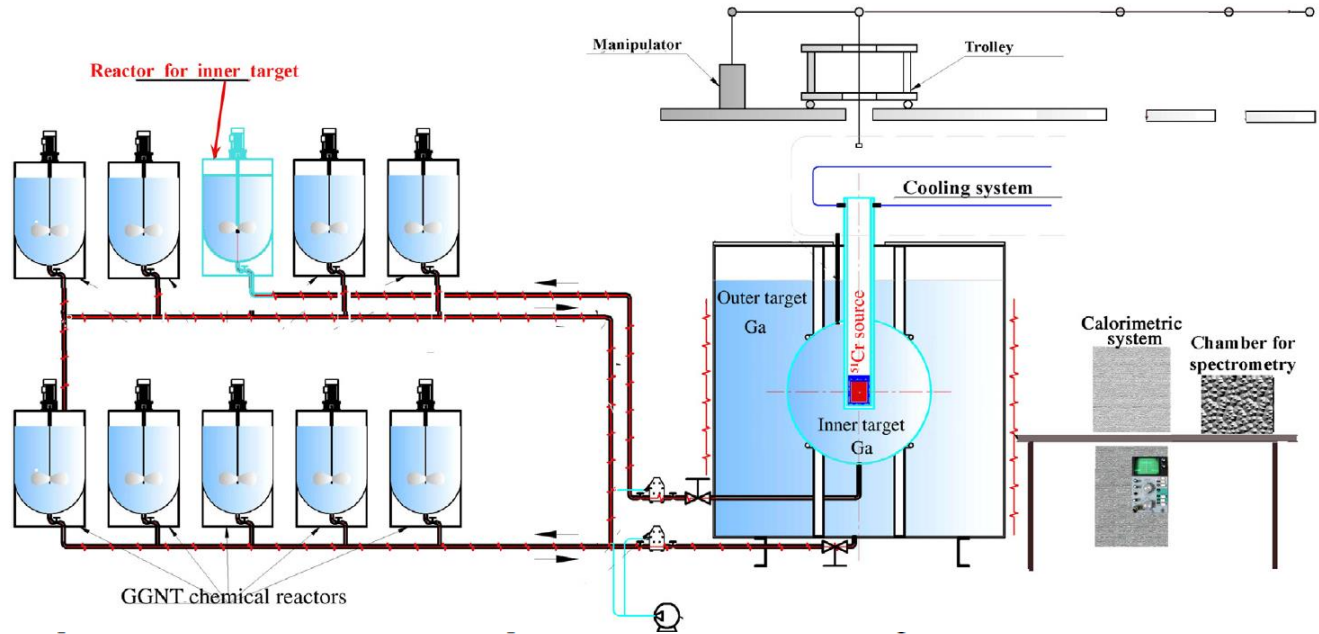


Isotope	$\tau_{1/2}$ (d)	E_ν (keV)	f_{E_ν} (%)
³⁷ Ar	35.0	813.8	1.11 ± 0.01
		813.5	8.66 ± 0.01
		810.7	90.23 ± 0.01
⁵¹ Cr	27.7	752.4	1.40 ± 0.01
		751.8	8.42 ± 0.01
		746.5	80.25 ± 0.01
		432.3	0.15 ± 0.01
		431.7	0.92 ± 0.01
		426.4	8.86 ± 0.01

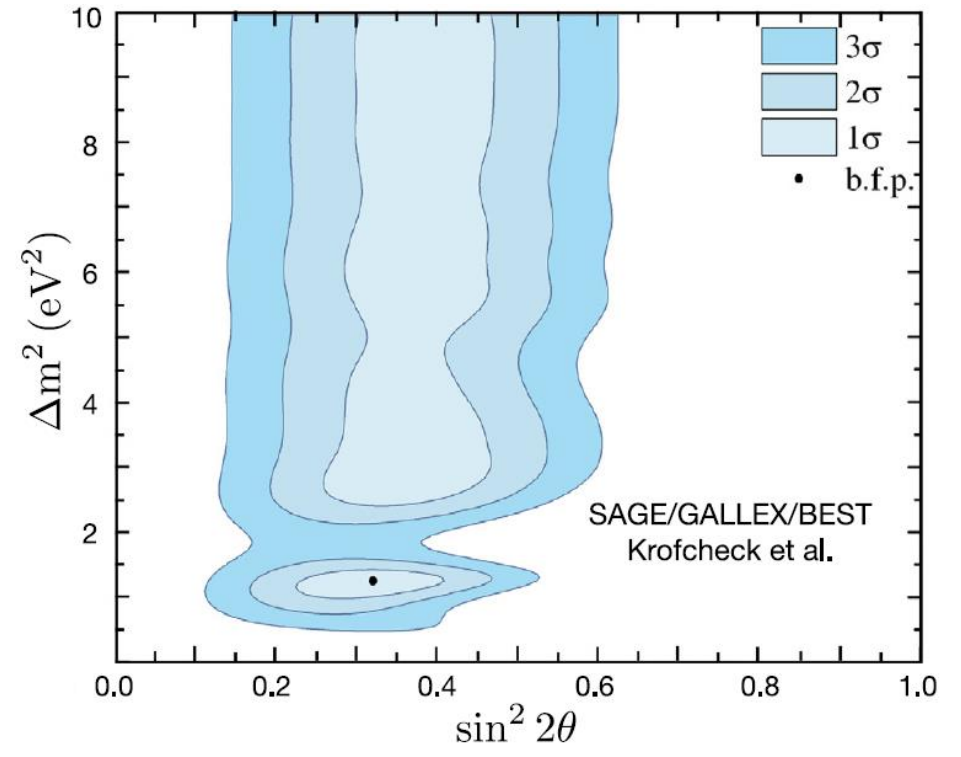
Measurement	Activity (10 ¹⁵ Bq)	Activity (MCi)	Measured/Expected
SAGE Cr	19.11 ± 0.22	0.5166 ± 0.0060 [51]	0.95 ± 0.12 [51,52]
SAGE Ar	15.1 ± 0.7	0.409 ± 0.002 [52]	0.79 ^{+0.09} _{-0.10} [52]
GALLEX Cr-1	63.4 ^{+1.1} _{-1.6} [53]	1.714 ^{+0.03} _{-0.043}	0.953 ± 0.11 [54]
GALLEX Cr-2	69.1 ^{+3.3} _{-2.1} [53]	1.868 ^{+0.09} _{-0.057}	0.812 ^{+0.10} _{-0.11} [54]

The gallium anomaly, *Prog.Part.Nucl.Phys.* 134 (2024), 104082

Эксперимент BEST



Measurement	Activity (10^{15} Bq)	Activity (MCI)	Measured/Expected
SAGE Cr	19.11 ± 0.22	0.5166 ± 0.0060 [51]	0.95 ± 0.12 [51,52]
SAGE Ar	15.1 ± 0.7	0.409 ± 0.002 [52]	$0.79^{+0.09}_{-0.10}$ [52]
GALLEX Cr-1	$63.4^{+1.1}_{-1.6}$ [53]	$1.714^{+0.03}_{-0.043}$	0.953 ± 0.11 [54]
GALLEX Cr-2	$69.1^{+3.3}_{-2.1}$ [53]	$1.868^{+0.09}_{-0.057}$	$0.812^{+0.10}_{-0.11}$ [54]
BEST-inner	116.23 ± 0.03	3.1414 ± 0.008 [1]	0.79 ± 0.05 [1]
BEST-outer	116.23 ± 0.03	3.1414 ± 0.008 [1]	0.77 ± 0.05 [1]



BEST-inner 52.03 ± 0.18 [2] 0-67
 BEST-outer 54.41 ± 0.18 [2] 67-152

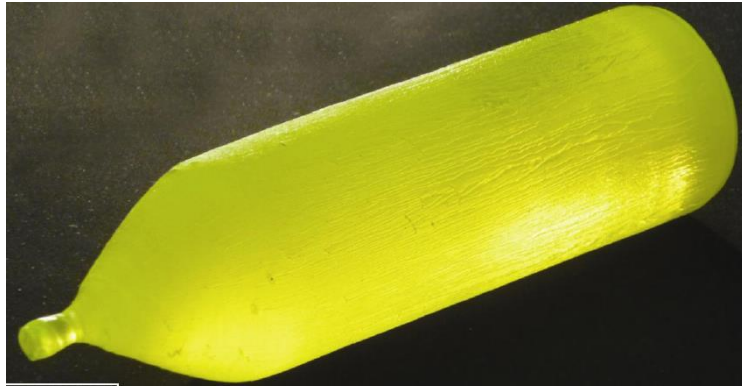
$$\sigma(^{51}\text{Cr}) = \sigma_0(^{51}\text{Cr}) \left[1 + 0.67 \frac{B_1(\text{GT})}{B_0(\text{GT})} + 0.22 \frac{B_2(\text{GT})}{B_0(\text{GT})} \right]$$

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

$\sin^2 2\theta = 0.32, \Delta m^2 = 1.25 \text{ eV}^2$

The gallium anomaly, Prog.Part.Nucl.Phys. 134 (2024), 104082

Сцинтиллятор GAGG(Ce) : on-line эксперимент



GAGG $Gd_3Ga_3Al_2O_{12}:Ce$

гадолиний-алюминий-галлиевый гранат

$\lambda_{max} \sim 520-540$ нм

LY $\sim 30000 - 70000$ γ /МэВ

$\rho \sim 6,63$ г/см³

$\lambda_{att} \sim 60$ см

$n \sim 1,9$ (540 нм)

Негигроскопичен

Кристалл, керамика

Доля Ga – 22% (Ga71 – 8,8%)

- Измерение активности источника Cr51 $\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$

- Измерение сечения захвата на Ga71 $\nu_e + {}^{71}\text{Ga} \rightarrow e^- + {}^{71}\text{Ge}$

- тестирование эффективности радиохимического детектирования

Высокое энергетическое и пространственное разрешение
(1% 510кэВ и 8-9% 9кэВ) (0,6 см)

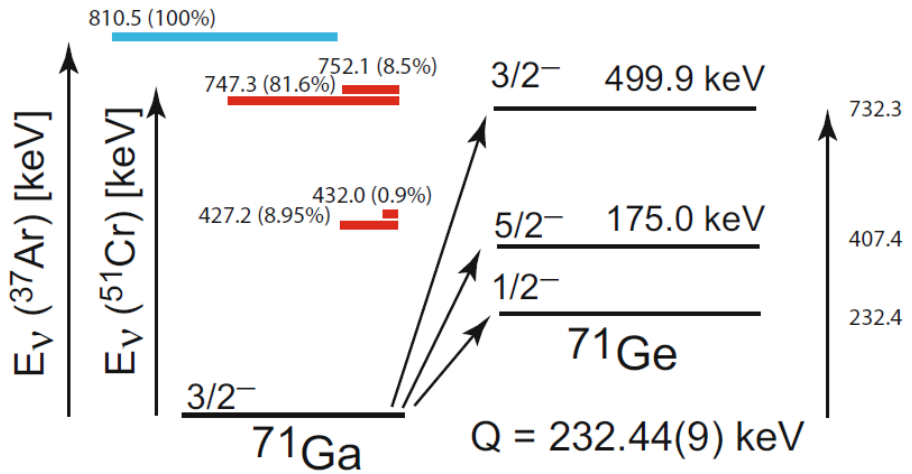
Анализ сигнатуры событий позволит подавить фон от рассеяния нейтрино

И получить отношение сигнал/шум 1:0,15

Testing the gallium anomaly. Patrick Huber

Phys.Rev.D 107 (2023) 9, 096011 DOI: 10.1103/PhysRevD.107.096011

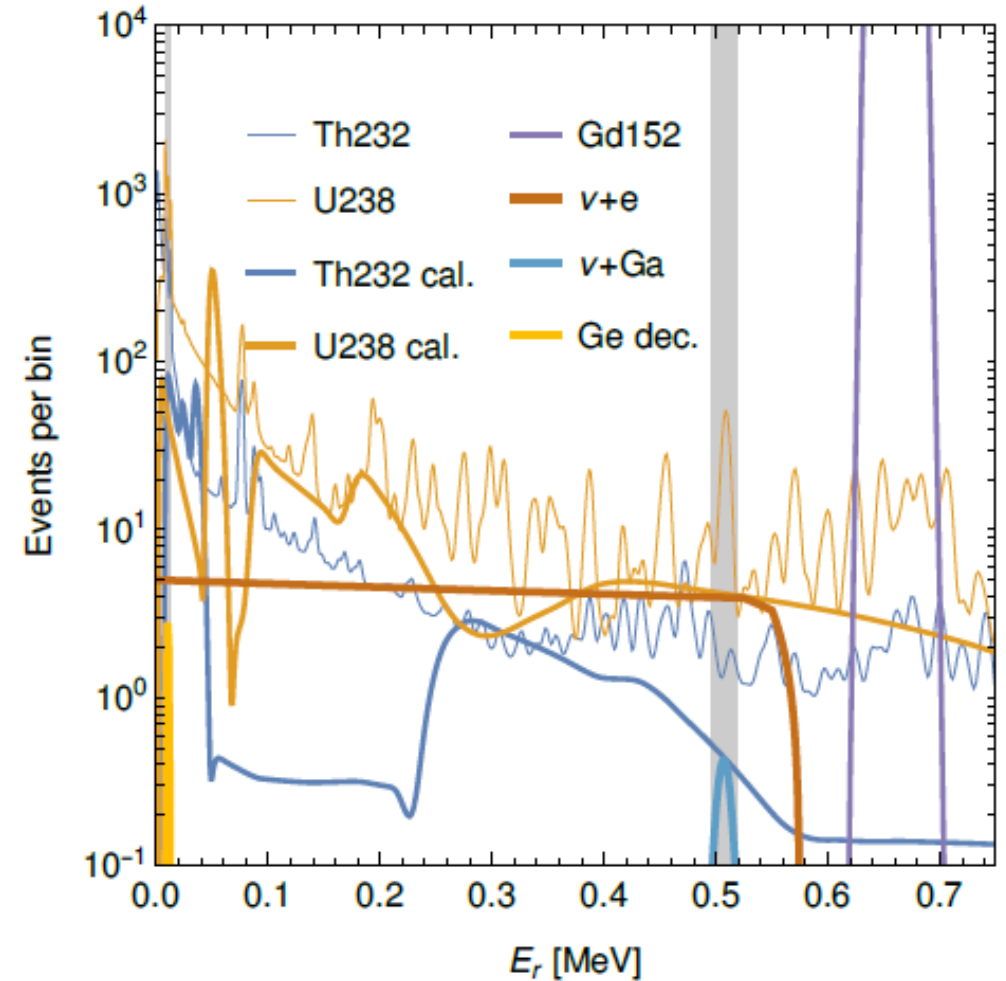
Сцинтиллятор GAGG(Ce) : on-line эксперимент



^{71}Ge E_x [keV]	$B(\text{GT})$ ($\times 10^{-2}$)	
g.s.	8.52{40}	80 %
175	0.34(26)	3.5 %
500	1.76(14)	16.5 %

Детектирование захвата нейтрино:

- вылет электрона с энергией $E_c = E_\nu - Q_c \sim 510 \text{ keV}$
- детектирование $E_s = 10.3 \text{ keV}$ Ожэ-электронов от распада ^{71}Ge ($T_{1/2} = 11.4 \text{ d.}$)



Testing the gallium anomaly. Patrick Huber

Phys.Rev.D 107 (2023) 9, 096011 DOI: 10.1103/PhysRevD.107.096011

Производители GAGG(Ce):

Furukawa (Япония)

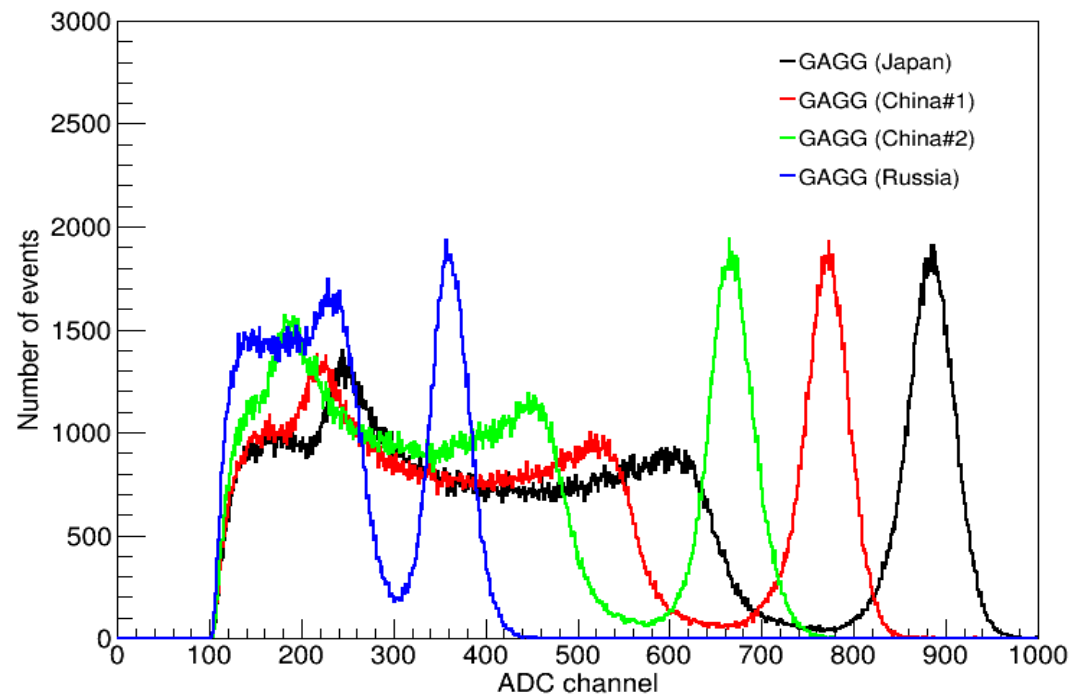
Еpic (Китай)

Hangzhou Shalom (Китай)

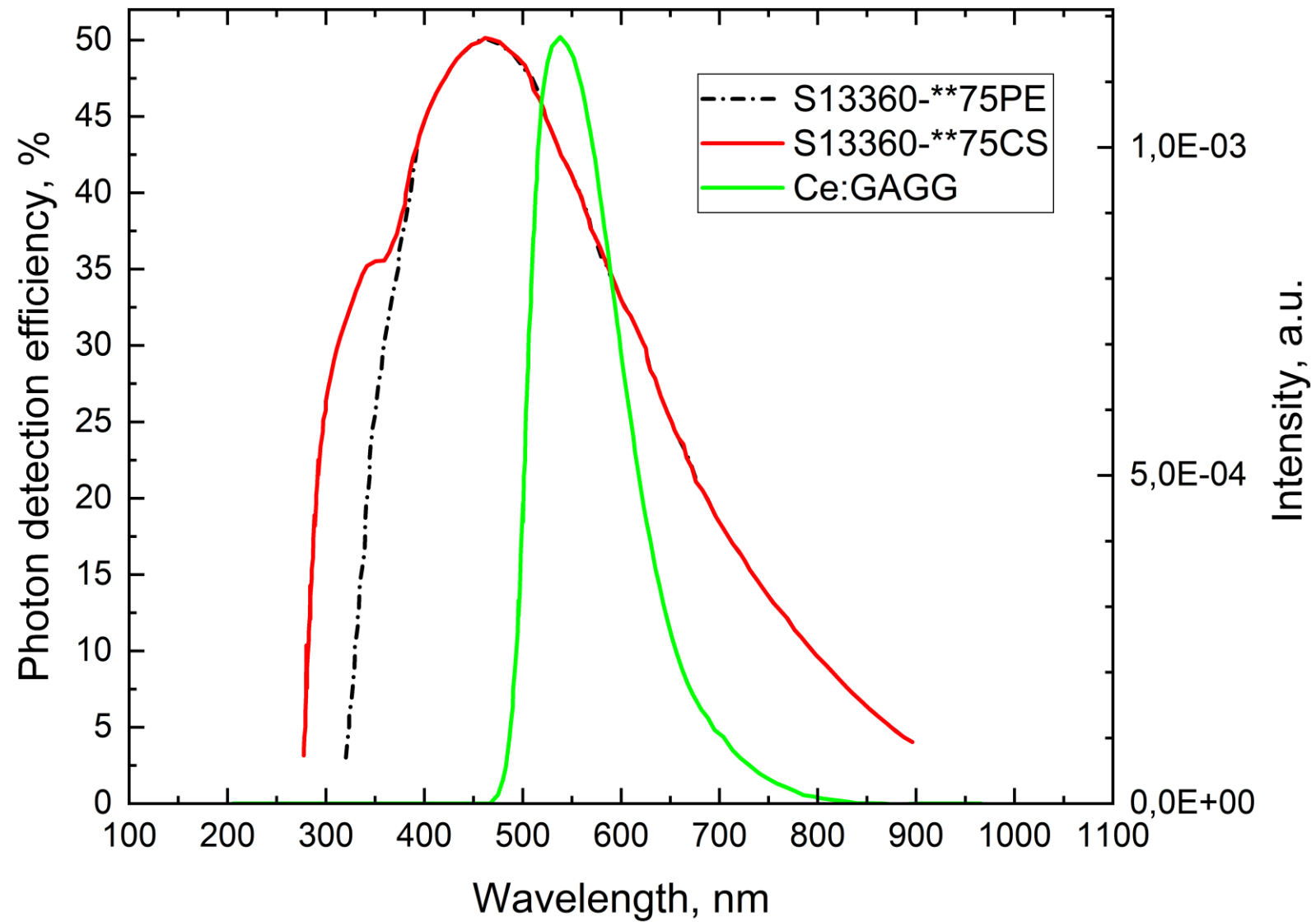
IM (Китай)

Фомос (Россия)

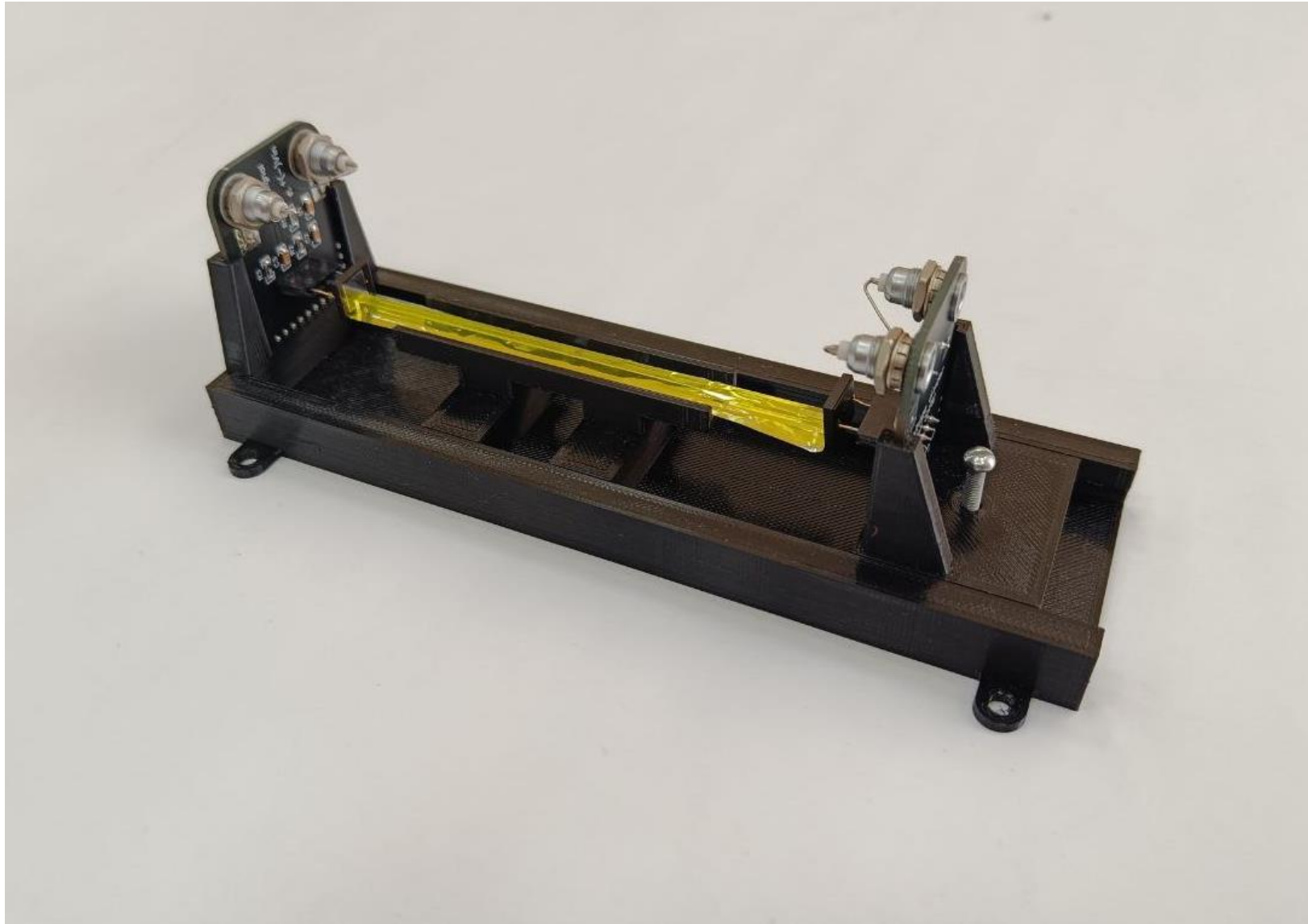
ИНХ СО РАН (Россия)



Образец кристаллического сцинтиллятора	Энергетическое разрешение, %	Световыход, отн. ед.
1. GAGG(Ce)(Япония)	6,77	1
2. GAGG(Ce)(Китай) №1	7,17	0,87
3. GAGG(Ce)(Китай) №2	8,55	0,75
4. GAGG(Ce)(Россия)	13,7	0,41



Прототип ячейки детектора GAGG+2xSiPM



GAGG – 3x3x100 мм³; 5x5x100 мм³

SiPM – MPPC S13360-6075CS

Сцинтиллятор GAGG(Ce) : поиск процесса $0\nu\beta\beta$ в ^{160}Gd

First Study of the PIKACHU Project: Development and Evaluation of High-Purity $\text{Gd}_3\text{Ga}_3\text{Al}_2\text{O}_{12}:\text{Ce}$ Crystals for ^{160}Gd Double Beta Decay Search

Takumi Omori¹, Takashi Iida^{2,*}, Azusa Gando³, Keishi Hosokawa⁴, Kei Kamada^{5,6}, Keita Mizukoshi⁷, Yasuhiro Shoji⁶, Masao Yoshino^{5,6}, Ken-Ichi Fushimi⁸, Hisanori Suzuki¹, and Kotaro Takahashi¹

Quest for double beta decay of ^{160}Gd and Ce isotopes

F.A. Danevich, V.V. Kobychiev, O.A. Ponkratenko, V.I. Tretyak, Yu.G. Zdesenko*

Institute for Nuclear Research, Prospekt Nauki 47, MSP 03680 Kiev, Ukraine

Received 23 November 2000; revised 8 March 2001; accepted 26 March 2001

$\text{Gd}_3\text{Ga}_3\text{Al}_2\text{O}_{12}:\text{Ce}$

Изотопное содержание ^{160}Gd : 21.86 %
В сцинтилляторе GAGG(Ce) содержание ^{160}Gd : ~11 %

^{152}Gd (0,2%) - α -распад с $T \sim 1,1 \times 10^{14}$ лет
 $E_\alpha \sim 2,1$ МэВ

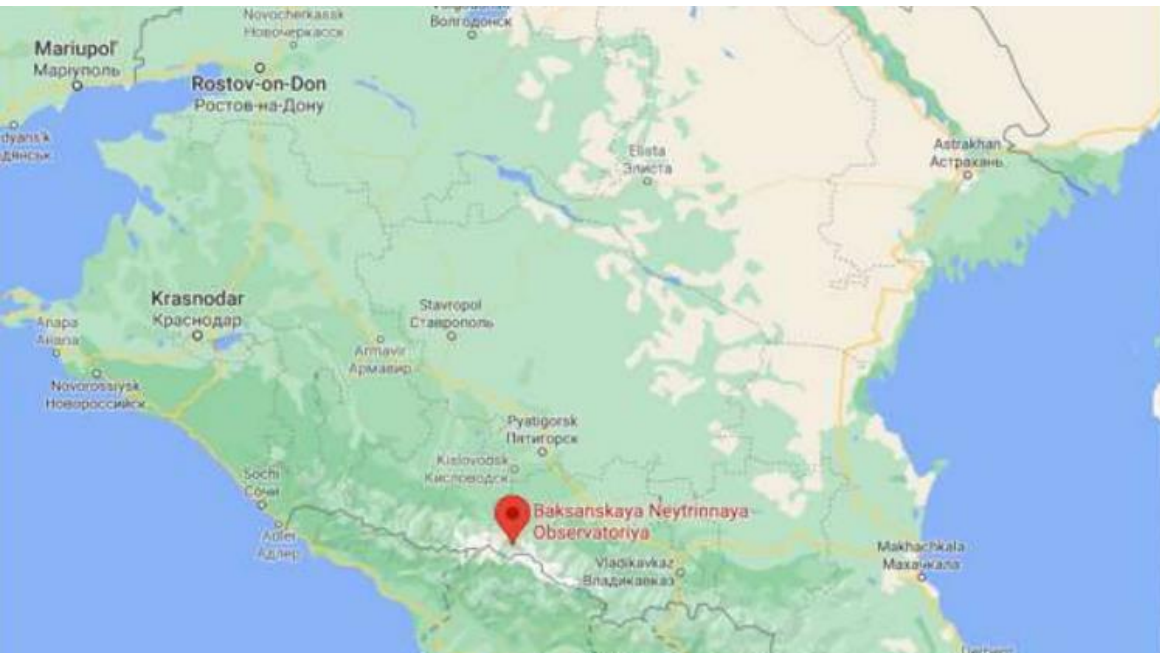
1,5 тонны GAGG – 765 кг Gd

^{160}Gd – 98%? – 765 кг ^{160}Gd

На 2 порядка подавит фон от ^{152}Gd

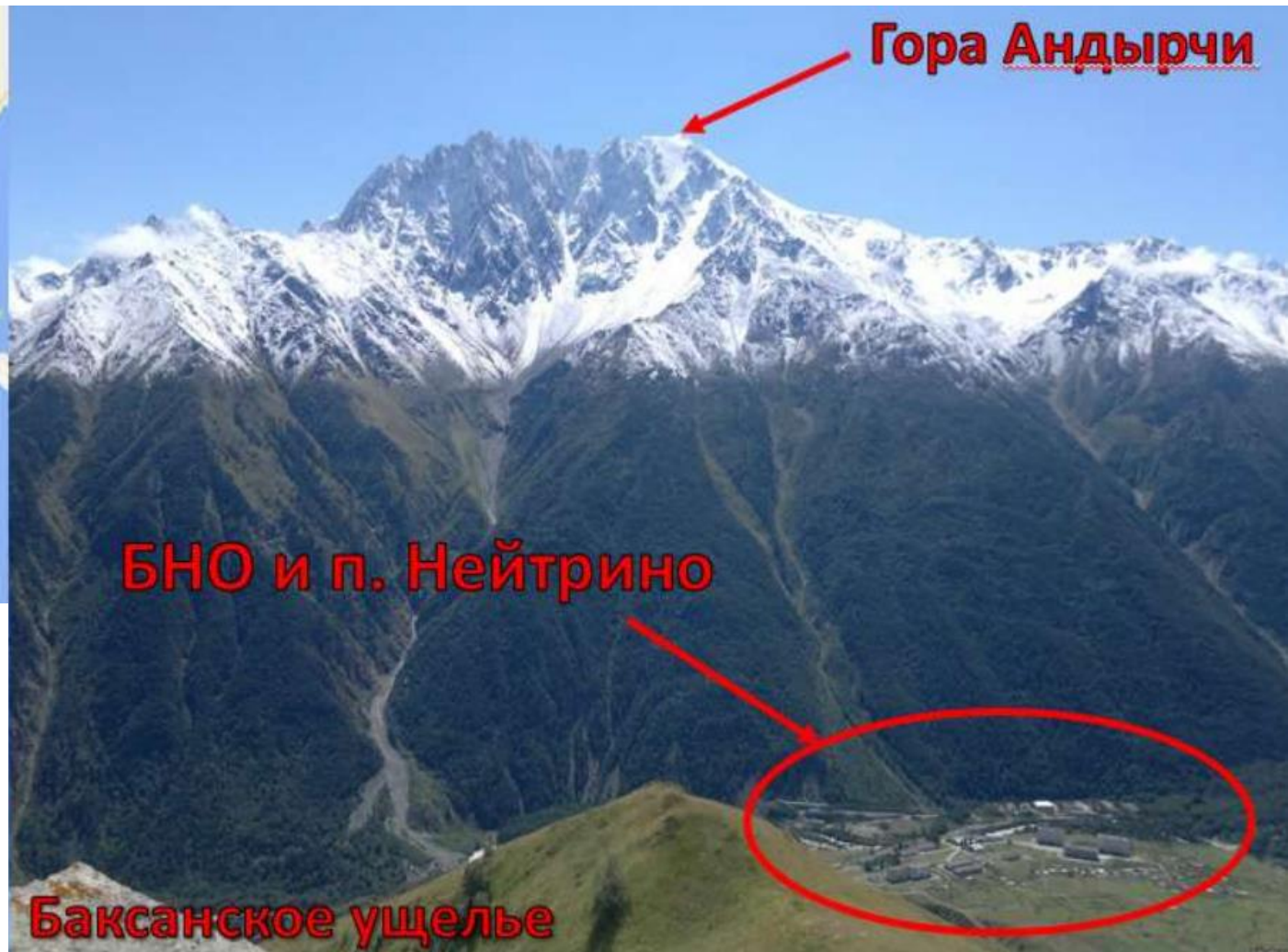
638 г GSO ($\text{Gd}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$) – nGd (325 г) $T_{1/2}^{0\nu} \geq 2.3 \times 10^{21}$ yr

Подземное производство сверхчистых сцинтилляторов

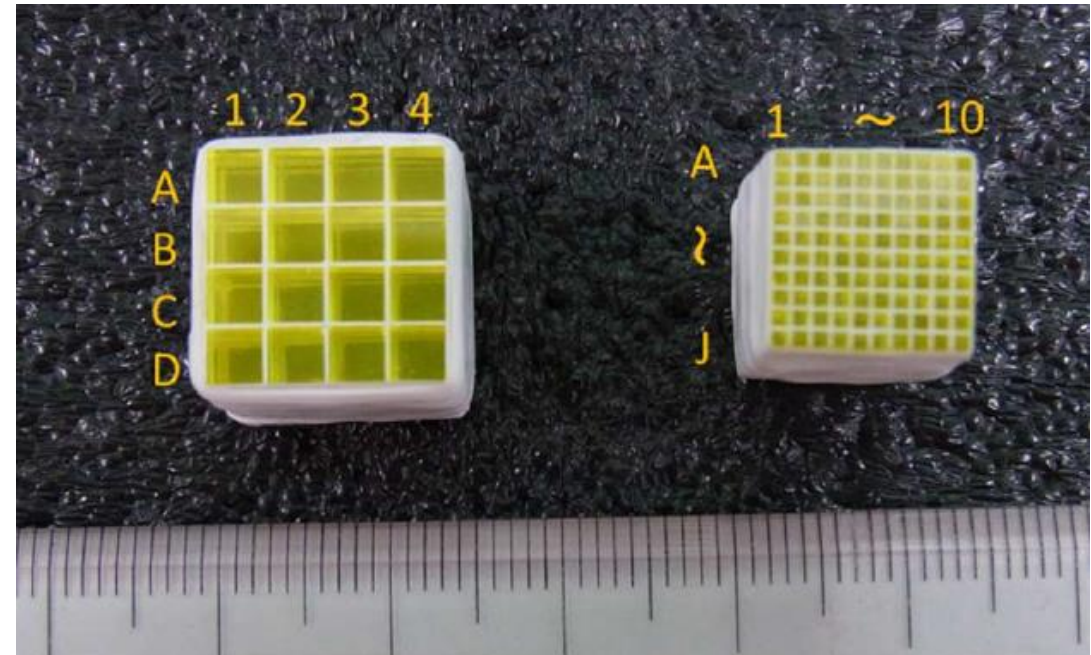
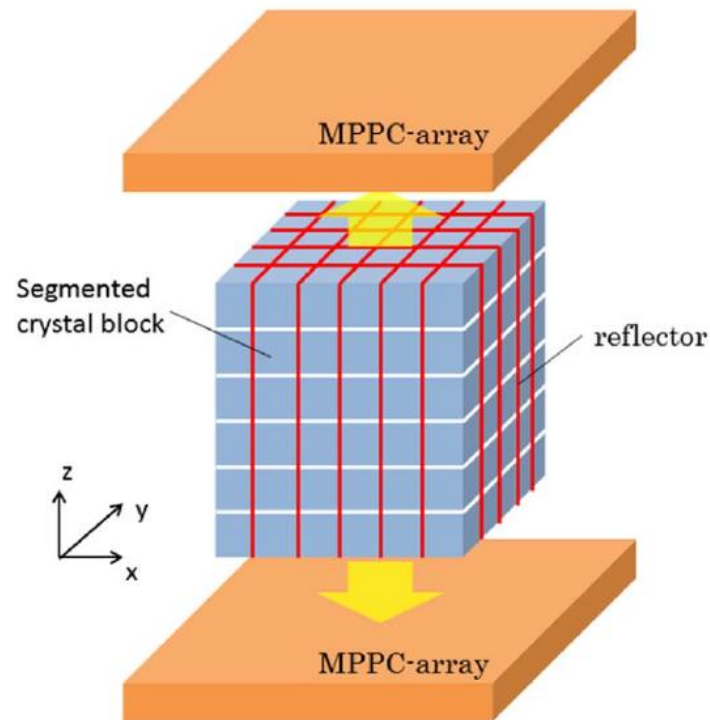


Производство шихты

Рост кристаллов (ростовые
установки ~5-6 млн. р. (пром))



Создание детекторов для позитронно-эмиссионной томографии



S. Yamamoto, J. Kataoka, T. Oshima, Y. Ogata, T. Watabe, H. Ikeda, Y. Kanai, J. Hatazawa, Development of a high resolution gamma camera system using finely grooved GAGG scintillator, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 821 (2016) 28–33.

A. Kishimoto, J. Kataoka, T. Kato, T. Miura, T. Nakamori, K. Kamada, S. Nakamura, K. Sato, Y. Ishikawa, K. Yamamura, N. Kawabata, S. Yamamoto, Development of a Dual-Sided Readout DOI- PET Module Using Large-Area Monolithic MPPC-Arrays, IEEE Transactions on Nuclear Science 60 (2013) 38–43.

Выводы

- Результаты эксперимента BEST подтверждают существование галлиевой аномалии
- Эксперимент с искусственным источником нейтрино и детектором на основе GAGG(Ce) позволит доказать или опровергнуть существование аномалии на уровне достоверности 5σ (при массе детектора 1.5 т. и активности источника аналогичной BEST)
- Мультизадачность: поиск процесса $0\nu\beta\beta$ в ^{160}Gd с помощью сцинтиллятора GAGG(Ce)
 $\text{Gd}_3\text{Ga}_3\text{Al}_2\text{O}_{12}:\text{Ce}$
- Подземное производство сверхчистых сцинтилляторов

Спасибо за внимание!

Пессимистическая оценка

1 г GAGG – 3 USD

1,5 тонны GAGG – 4,5 млн USD

Оптимистическая оценка

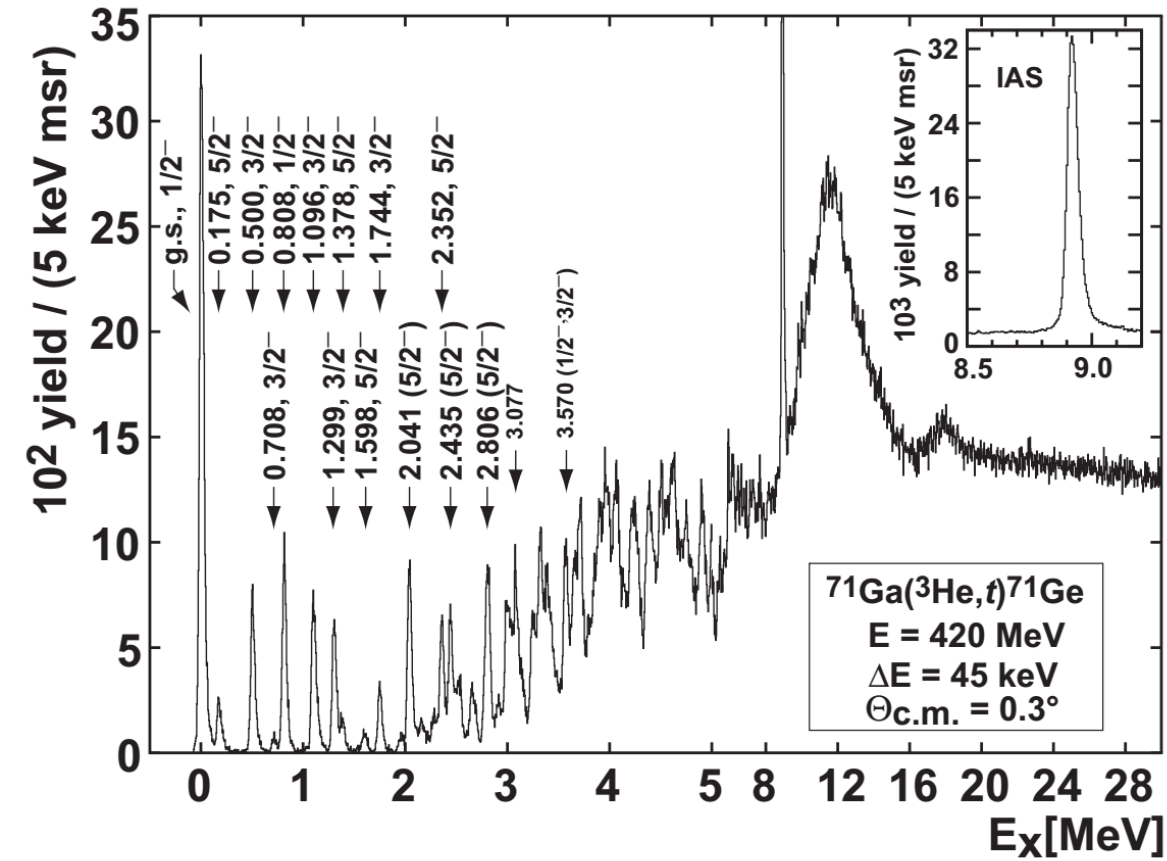
1г GAGG – 1 USD

1,5 тонны GAGG – 1,5 млн USD

1 MPPC – 20 USD (для > 10 тыс.
штук)

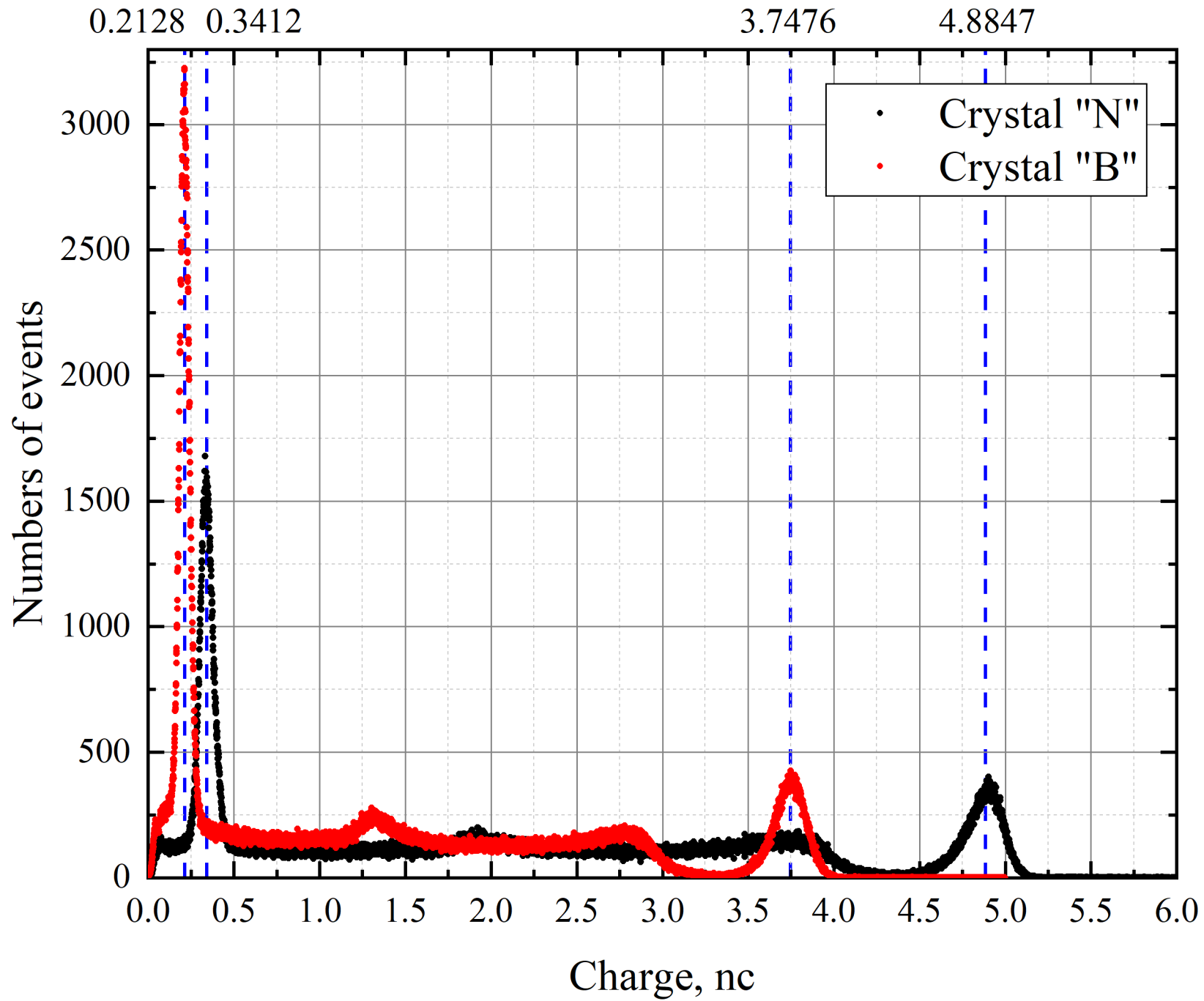
2 – 2,5 м2 SiPMs – 0,800-1 млн
USD

Charge-Exchange Reaction $^{71}\text{Ga}(^3\text{He},t)^{71}\text{Ge}$

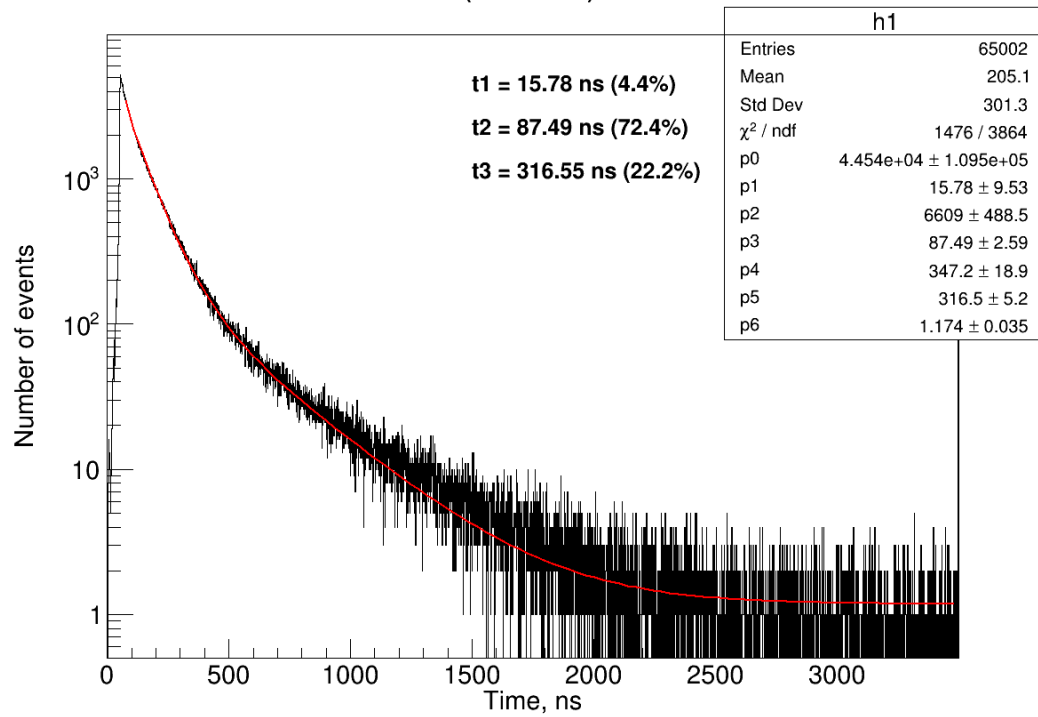


D. Frekers et al. Phys. Rev. C 91, 034608 (2015)

$$\sigma_{discr}(E_\nu) = \frac{1}{\pi} \sum_k G_F^2 \cos^2 \theta_C p_e E_e F(Z, E_e) \left[B(F)_k + \left(\frac{g_A}{g_V} \right)^2 B(GT)_k \right]$$



GAGG (Russia) Cs-137



GAGG (China_W) Cs-137

