

**Результаты эксперимента BEST**  
**(Baksan Experiment on Sterile Transitions)**

**BEST**

[arXiv:2109.11482](https://arxiv.org/abs/2109.11482)

**BEST Collaboration:**

**V. Gavrin\***, V. Barinov, S. Danshin, V. Gorbachev, D. Gorbunov, T. Ibragimova, Yu. Kozlova, L. Kravchuk,  
V. Kuzminov, B. Lubsandorzhev, Yu. Malyshkin, I. Mirmov, A. Shikhin, E. Veretenkin, V. Yants

*Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow 117312, Russia*

**B. Cleveland**

*SNOLAB, Sudbury, ON P3Y 1N2, Canada*

**H. Ejiri**

*Research Center for Nuclear Physics, Osaka University, Osaka, Japan*

**S. Elliott , I. Kim , R. Massarczyk**

*Los Alamos National Laboratory, Los Alamos NM 87545, USA*

**D. Frekers**

*Institut für Kernphysik, Westfälische Wilhelms-Universität Munster, D-48149 Munster, Germany*

**W. Haxton**

*Nuclear Science Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720, USA*

**V. Matveev, G. Trubnikov**

*Joint Institute for Nuclear Research (JINR) Joliot-Curie 6, 141980, Dubna, Moscow Region, Russia*

**J. Nico**

*National Institute of Standards and Technology, 100 Bureau Dr, Gaithersburg, MD 20899, USA*

**A. Petelin, V. Tarasov, A. Zvir**

*JSC “State Scientific Center Research Institute of Atomic Reactors”, Dimitrovgrad, 433510, Russia*

**R. Robertson**

*Center for Experimental Nuclear Physics and Astrophysics, and Department of Physics, University of Washington, Seattle, WA 98195, USA*

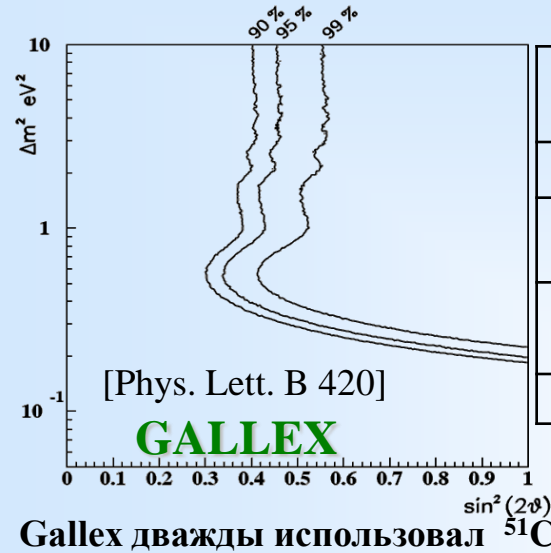
**D. Sinclair**

*Carleton University 1125 Colonel By Drive Ottawa, K1S 5B6, Canada*

**J. Wilkerson**

*Department of Physics and Astronomy, University of North Carolina, Chapel Hill, NC 27599, USA*

# Галлиевые эксперименты с источниками

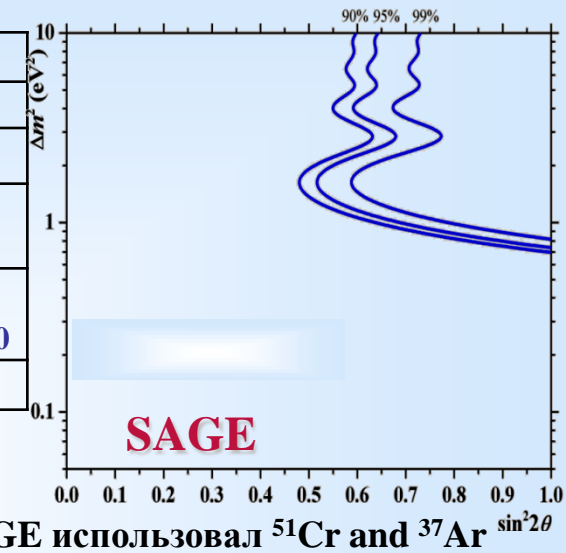


	GALLEX		SAGE	
	m(Ga) = 30 т		m(Ga) = 13 т	
Источник	<sup>51</sup> Cr -1	<sup>51</sup> Cr -2	<sup>51</sup> Cr	<sup>37</sup> Ar
Мощность, МКв	1.714	1.868	0.517	0.409
R = ( <i>p</i> <sub>измер</sub> / <i>p</i> <sub>ожд</sub> )	0.95±0.11	0.81±0.11	0.95±0.1	0.79±0.10
<b>R<sub>comb</sub></b>	<b>0.88 ± 0.08</b>		<b>0.86 ± 0.08</b>	

$$R = p_{\text{измер.}}/p_{\text{ожд.}} = 0.87 \pm 0.05$$

[Bahcall 97]

«Галлиевая аномалия» (2.6σ)

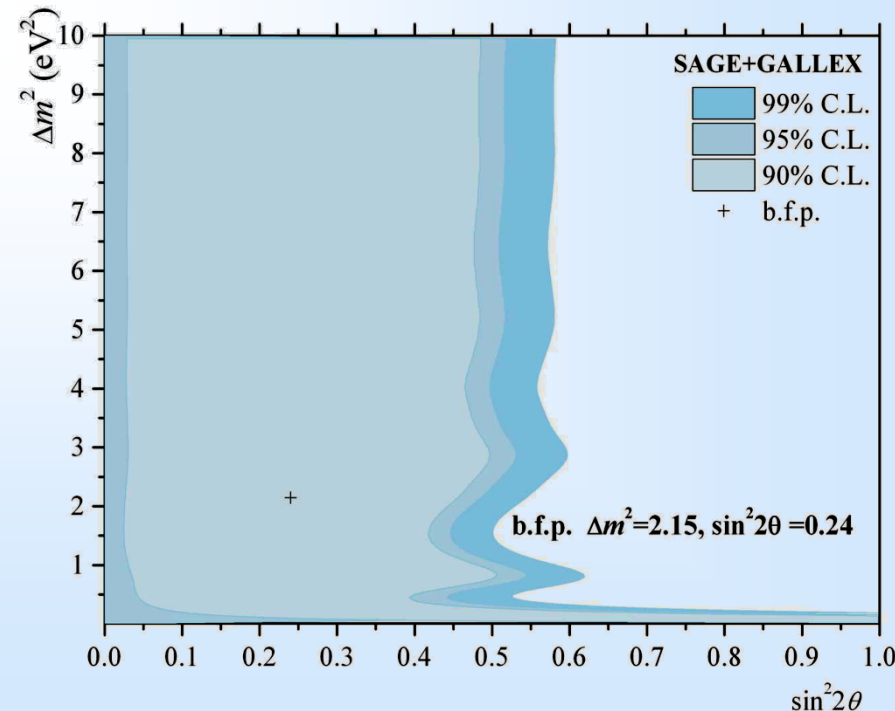


Низкая скорость захвата нейтрино, измеренная в Ga экспериментах с источниками, может быть объяснена в рамках нейтринных осцилляций в предположении переходов из активных в стерильные нейтрино с  $\Delta m^2 \sim 1 \text{эВ}^2$

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

Область допустимых осцилляционных параметров, полученных из 4-х галлиевых экспериментов с источниками в предположении осцилляций в стерильные нейтрино.

b.f.p.  $\Delta m^2 = 2.15 \text{eV}^2$ ,  $\sin^2(2\theta) = 0.24$





## **Consequences of $^{71}\text{Ga}({}^3\text{He}, t) {}^{71}\text{Ge}$ and $Q_{\text{EC}}$ -value measurements:**

- 1. contribution from excited states:  $7.2\% \pm 2.0\%$  (5.1% by Bahcall)<sup>(1)</sup>**

Recent measurement of  $^{71}\text{Ga}({}^3\text{He}, t) {}^{71}\text{Ge}$  (At RCNP, Japan)

- 2.  $Q_{\text{EC}}$  is close to the value employed by Bahcall<sup>(2)</sup> :**

$$233.7 \pm 1.2 \text{ keV} \quad (232.7 \pm 0.15 \text{ keV used by Bahcall)}$$

Penning trap Q-value determination of the  $^{71}\text{Ga}(\nu, e^-) {}^{71}\text{Ge}$  reaction using threshold charge breeding of on-line produced isotopes (at ISAC/TRIUMF Canada)

- 3. the observed discrepancy is **NOT** due to any unknowns in Nuclear Physics.**



**The deficit of neutrinos in the Ga source experiments can be a real physical effect of unknown origin, such as a transition to sterile neutrinos**

$$R_{\text{ave-Frefers}}^{\text{Ga}} = 0.84 \pm 0.05 \quad (2.9\sigma)$$

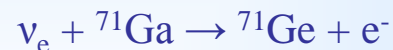
[S Gariazzo, C Giunti, M Laveder, Y F Li, E M Zavanin, arXiv:1507.08204v1 [hep-ph]]

<sup>(1)</sup> D. Frekers, H. Ejiri, H. Akimune et al., Phys. Lett. B 706, 134 (2011)

<sup>(2)</sup> D. Frekers, M. C. Simon, C. Andreoiu, et al., Phys. Lett. B 722, 4–5 (2013)

## Отличительные черты BEST :

- Поиск исчезновения электронных нейтрино через реакцию заряженных токов (CC) :



- Использование компактного, почти монохроматического источника нейтрино хорошо известной активности – наблюдение чистой синусоиды осцилляционных переходов :

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

- Хорошо известная активность источника.
- Возможность исследования зависимости скорости захвата нейтрино на двух расстояниях от источника.
- Исследования с очень короткой базой.
- Практически нулевой фон. В основном от Солнца.

Источник ЗМКи обеспечит количество взаимодействий на Ga в несколько десятков раз превышающее то, что можно ожидать от Солнца.

- Все процедуры извлечения хорошо изучены в солнечных измерениях SAGE на ГГНТ.
- Простая интерпретация результатов.

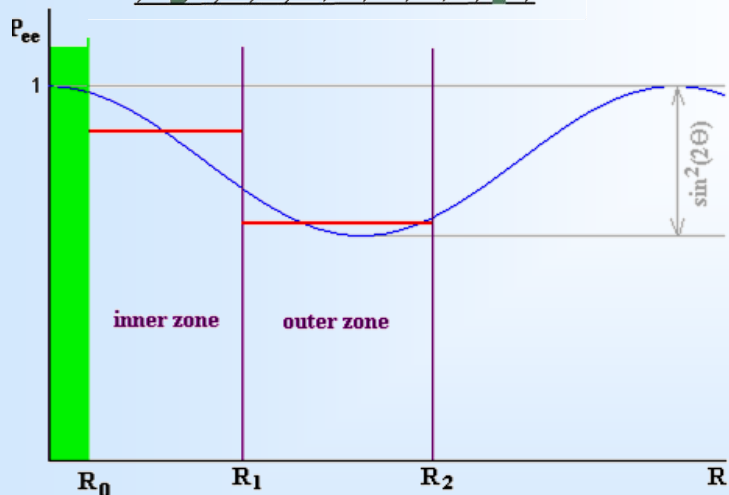
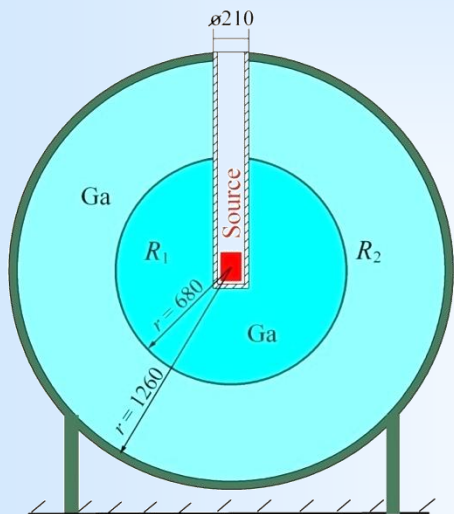
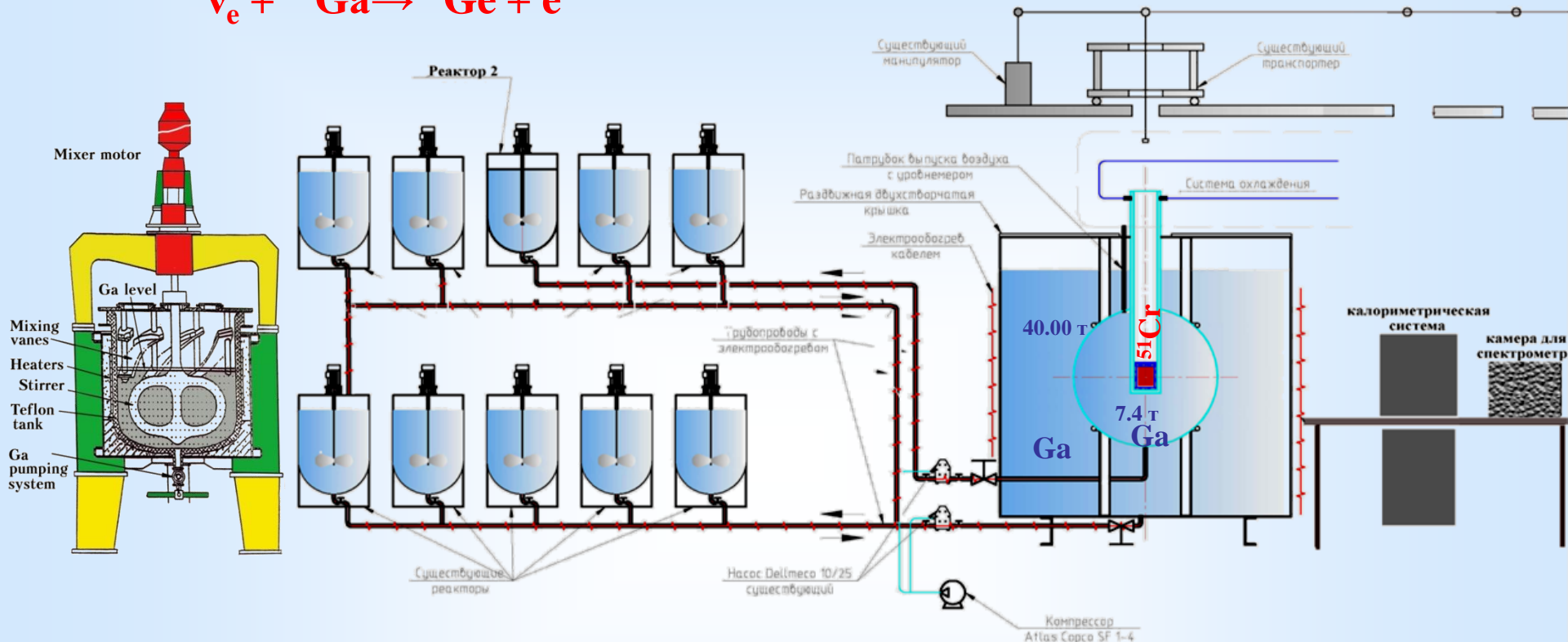
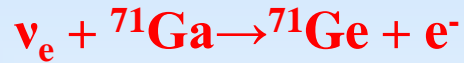


Схема предложенного эксперимента с источником нейтрино.  $R_1$  и  $R_2$  отношение измеренных скоростей захвата к ожидаемым в отсутствие осцилляций скоростям во внутренней и внешней зонах соответственно

# Схема эксперимента BEST

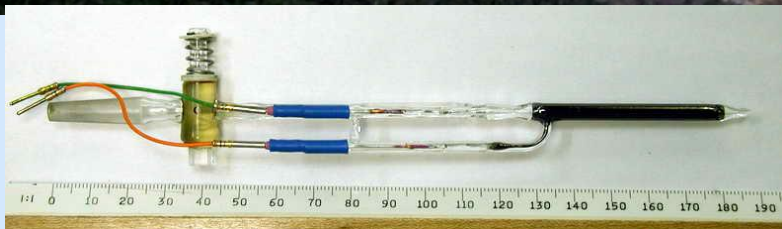


**Извлечение  ${}^{71}\text{Ge}$  (продолжительность 30 часов) :**

- 1) Перекачка галлиевых мишеней в реакторы :  
Inner zone  $\rightarrow$  1 реактор , Outer zone  $\rightarrow$  6 реакторов. ( 4.5 ч )
- 2) Германиевый носитель в форме  $\text{GeCl}_4$  извлекается из металлического галлия каждого реактора в водную фазу.
- 3) Концентрирование водного раствора упариванием. (16ч)
- 4) Синтез  $\text{GeH}_4$  и заполнение счетчиков.
- 5) Счет распадов  ${}^{71}\text{Ge}$ . ( 60 – 150 дней)

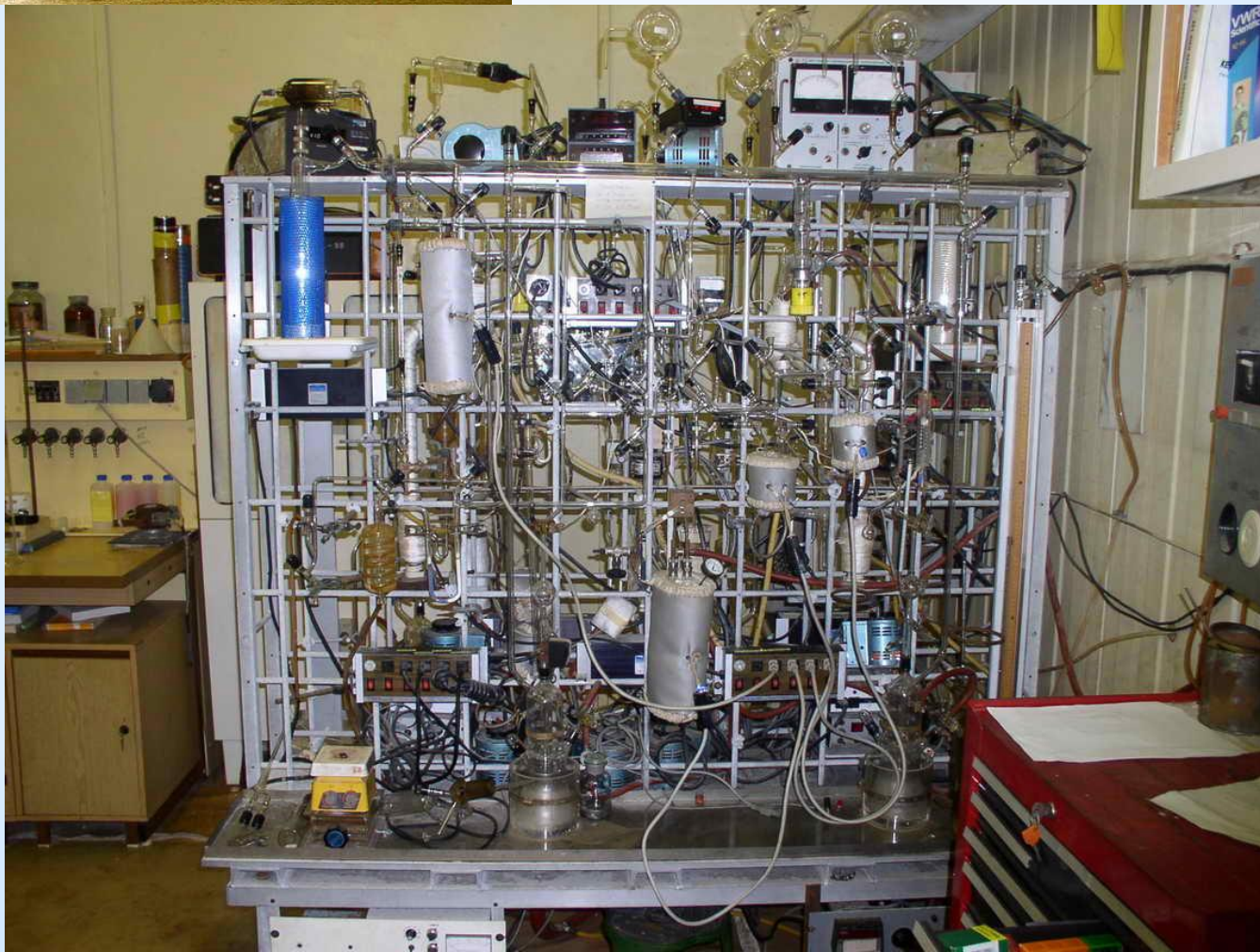
**Измерение активности источника:**

- 1) Перемещение источника в свинцовый контейнер
- 2) Измерение с ППД спектра гамма излучения на расстоянии 21.65 м (1ч)
- 3) Перемещение источника в калориметр
- 4) Измерение тепловыделения источника ( 20-21 ч )



Counter

Installation for synthesis of  $\text{GeH}_4$





## Параметры счета



**SYS3** (14 извлечений)



**SYS2Z** (6 извлечений: 3,5,9)

		Counter filling			Counter efficiency after rise time and energy cuts		Live time (days)		Δ		
Extraction name	Counter name	Pressure (mm Hg)	GeH4 fraction (%)	Syst. Slot	K -peak	L -peak	Day counting began in 2019	K-peak	L-peak	K-peak	L-peak
Cr 1	YCN113	635	9.5	3.4	0.3422	0.3529	197.66	53.788	33.662	0.7648	0.6996
Cr 2	YCT3	635	9.5	3.1	0.3707	0.3525	207.623	54.376	30.640	0.8043	0.6755
Cr 3	YCNA9	640	10.5	Z.4	0.2933	0.3505	217.693	51.070	51.070	0.7650	0.7650
Cr 4	YCT9	635	9.6	3.6	0.3658	0.3492	227.644	52.981	30.423	0.7820	0.3755
Cr 5	YCN41	635	10.0	Z.1	0.3568	0.3331	237.790	147.774	147.774	0.8025	0.8025
Cr 6	YCT4	630	9.0	3.3	0.3585	0.3558	247.597	139.382	131.148	0.8012	0.3843
Cr 7	YCN113	630	10.3	3.4	0.3407	0.3540	257.617	134.985	136.161	0.7977	0.7108
Cr 8	YCT3	640	9.5	3.1	0.3716	0.3519	267.634	129.098	131.802	0.8298	0.8398
Cr 9	YCNA9	635	9.9	Z.4	0.293	0.3587	277.678	155.439	155.439	0.7865	0.7865
Cr 10	YCT9	645	9.5	3.6	0.3677	0.3480	287.625	143.604	146.307	0.7567	0.7905

		Counter filling			Counter efficiency after rise time and energy cuts		Live time (days)		Δ		
Extraction name	Counter name	Pressure (mm Hg)	GeH4 fraction (%)	Syst. Slot	K -peak	L -peak	Day counting began in 2019	K-peak	L-peak	K-peak	L-peak
Cr 11	YCT92	630	8.8	3.5	0.3563	0.3570	197.66	54.478	34.364	0.8102	0.7450
Cr 21	YCT2	640	9.5	3.2	0.3751	0.3556	207.623	53.706	29.834	0.7839	0.6542
Cr 31	YCN43	650	9.3	Z.3	0.3794	0.3565	217.693	50.525	50.525	0.7143	0.7143
Cr 41	YCT97	640	9.2	3.7	0.3691	0.3495	227.644	52.808	29.884	0.7872	0.3672
Cr 51	YCN46	650	9.5	Z.8	0.3698	0.3478	237.790	150.436	150.436	0.7470	0.7470
Cr 61	YCN42	640	9.8	3.8	0.3627	0.3443	247.597	140.143	133.113	0.7717	0.3892
Cr 71	YCT92	640	9.3	3.5	0.3577	0.3560	257.617	129.483	130.843	0.7493	0.6776
Cr 81	YCT2	645	9.5	3.2	0.376	0.3550	267.634	129.060	131.764	0.7754	0.7855
Cr 91	YCN43	640	9.1	Z.3	0.3778	0.3576	277.678	152.034	152.034	0.8019	0.8019
Cr 101	YCT97	650	9.1	3.7	0.3709	0.3483	287.625	144.446	147.014	0.7629	0.7955

В эксперименте BEST использовались 2 счетные системы: **SYS3** и **SYS2Z** ;

и 2 типа счетчиков с катодом из тонкого углеродного слоя, нанесенного на его внутреннюю поверхность :

- **YCT** (ранее исследовались характеристики)

- **YCN** (не исследовались ранее)

В таблицах представлены пиковые эффективности счетчиков, полученные в 2020-2021г.г. из измерений с изотопами  $^{37}\text{Ar}$  и  $^{71}\text{Ge}$ . (доклад В.В. Горбачева)

# Отбор событий-кандидатов на распад германия-71

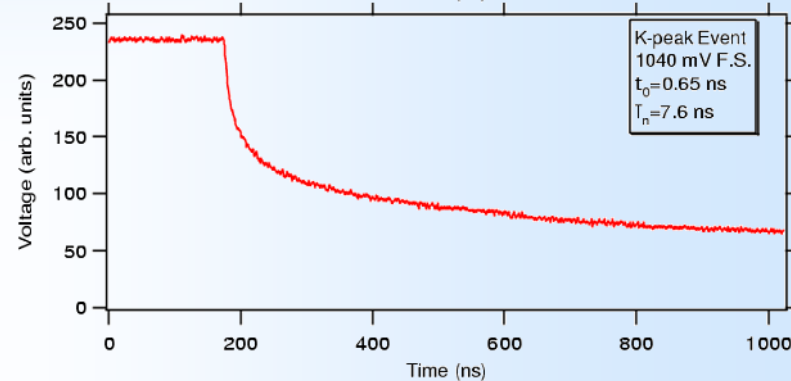
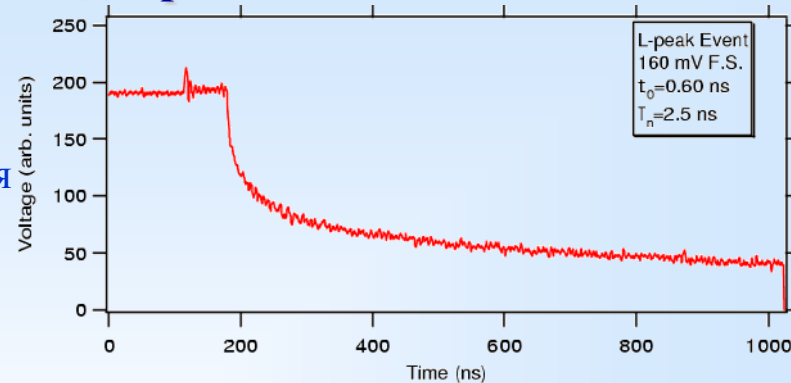
## Определение времени нарастания по форме импульса $T_N$ .

Импульс от события распада  $^{71}\text{Ge}$  имеет время нарастания фронта, соответствующее точечной ионизации.

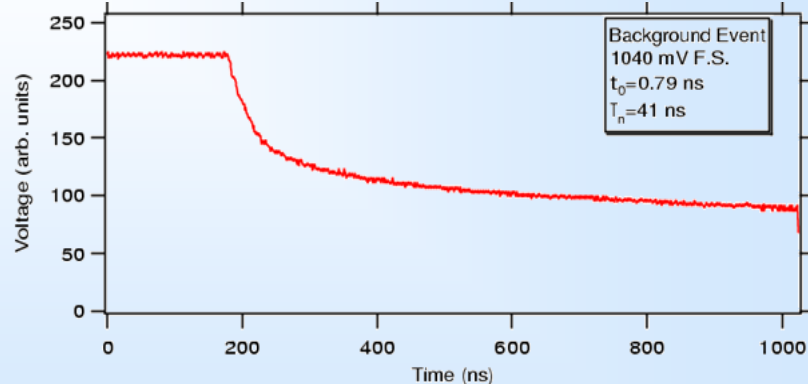
Для точечной ионизации изменение потенциала на аноде цилиндрического пропорционального счетчика описывается формулой Вилкинсона:

$$V(t) = \begin{cases} \frac{V_0}{T_N} \left[ (t+t_0) \cdot \ln\left(1 + \frac{t}{t_0}\right) - t \right], & \text{для } 0 < t < T_N \\ \frac{V_0}{T_N} \left[ T_N \left( \ln\left(\frac{t+t_0-T_N}{t_0}\right) - 1 \right) - (t+t_0) \cdot \ln\left(1 - \frac{T_N}{t+t_0}\right) \right], & \text{для } T_N < t < \infty \end{cases}$$

[NIM A290 (1990) 158]



### Импульсы от распада $^{71}\text{Ge}$ в L и K пиках



### Протяженный импульс

Полная шкала по оси Y имеет 256 каналов, соответствующих:

1.040 В (130 мВ/дел, К-пик) для канала 1 осциллоскопа,

0.160 В (20 мВ/дел, L-пик) для канала 2.

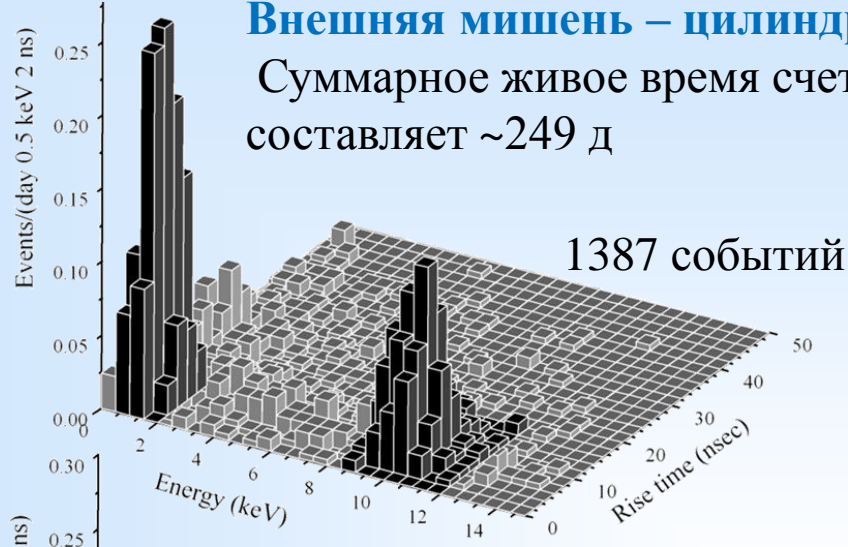
Ось X - 1024 нс.

Осциллограмма каждого импульса имеет 3 участка:

- базовая линия от  $t=0$  до  $t \approx 120$  нс,
- DC офсет (постоянное смещение), который появляется при открывании линейных ворот в момент времени  $t \approx 120$  нс,
- онсет (точка начала) импульса в момент времени  $t \approx 180$  нс.

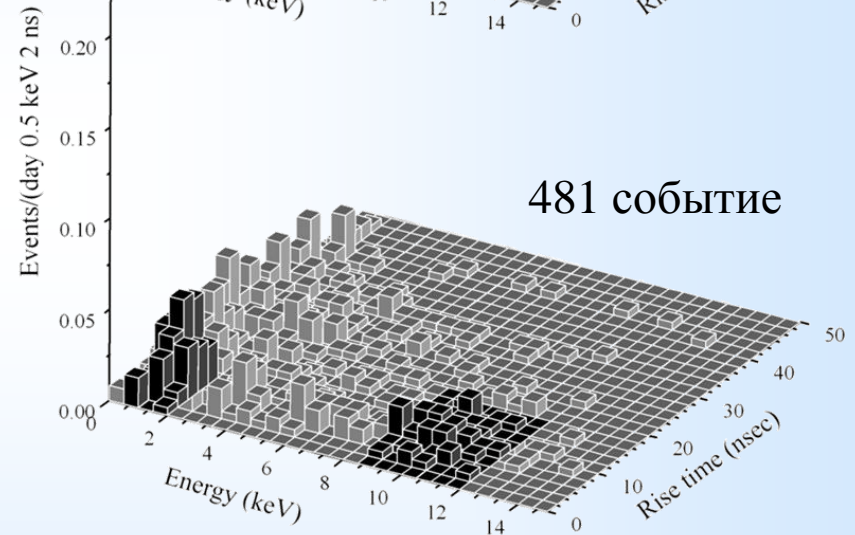
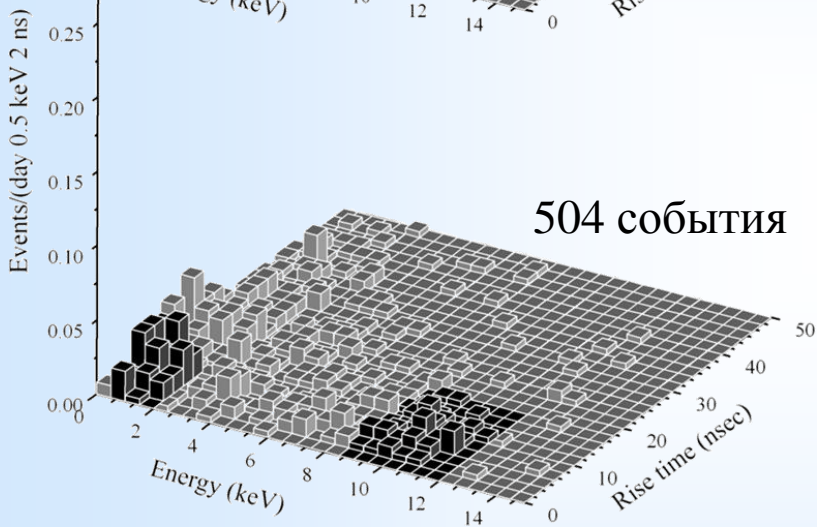
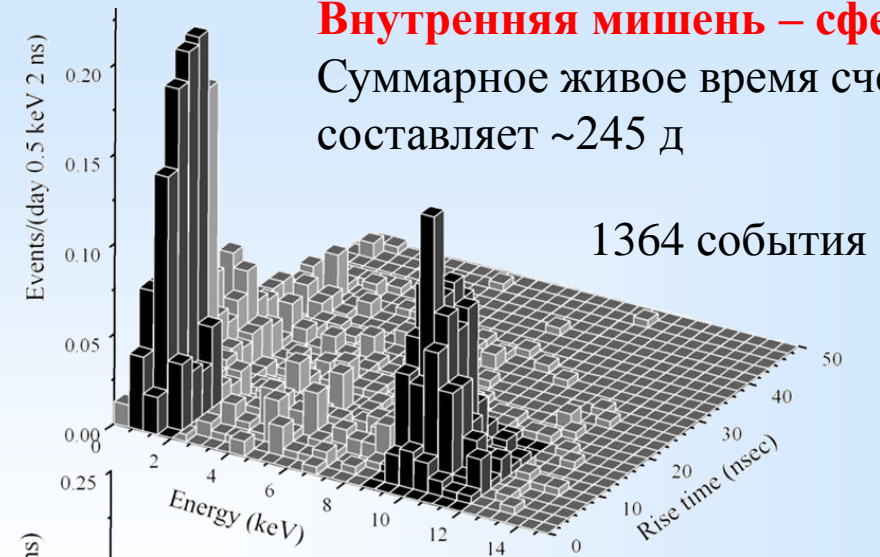
## Внешняя мишень – цилиндр

Суммарное живое время счета составляет ~249 д



## Внутренняя мишень – сфера

Суммарное живое время счета составляет ~245 д

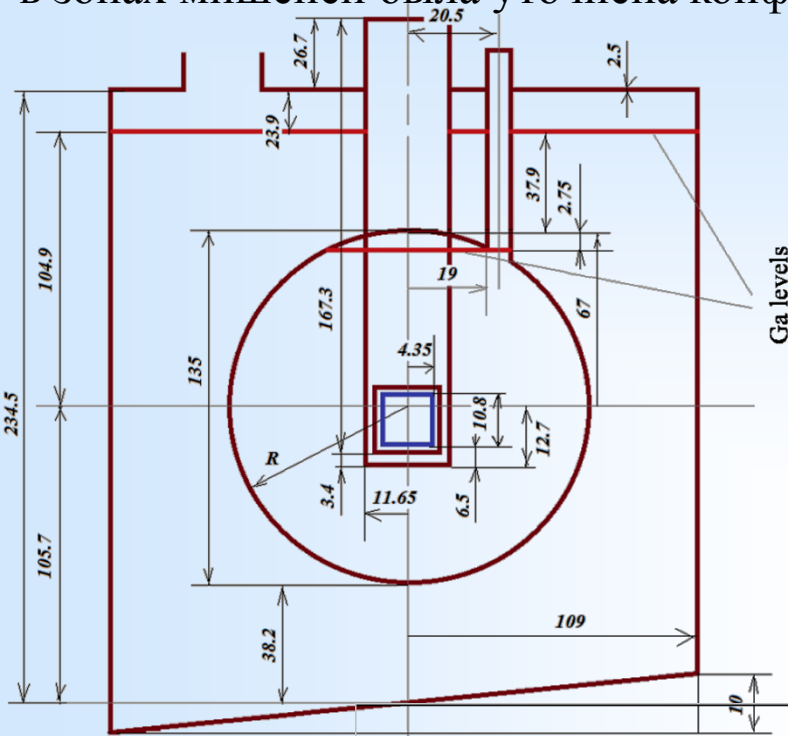


Распределение событий по энергии и времени нарастания импульсов ( $T_N$ ) для всех хромовых ранов.

На верхней панели - все события, зарегистрированные в течение **первых 30 дней счета после извлечения**. Положение L- и K-пигов  $^{71}\text{Ge}$ , определенное по калибровкам, показано темным цветом.

На нижней панели приведена та же гистограмма для всех событий, которые были зарегистрированы в течение такого же живого времени счета **через 40 дней после извлечения**.

Для оценки вкладов систематических неопределенностей в ожидаемые скорости захвата в зонах мишеней была уточнена конфигурация галлиевых мишеней



$$V_{ц} = 6.5561 \text{ м}^3, \text{ Масса} = 39.9593 \text{ т}$$

$$V_{сф} = 1.22545 \text{ м}^3, \text{ Масса} = 7.4691 \text{ т}$$

Для данной геометрии получены длины пробегов в сферической и цилиндрической мишенях, а также соответствующие им ожидаемые скорости образования в начале облучения источником  $^{51}\text{Cr}$  активностью 3.413 МКи

$$\langle L_{\text{Inn}} \rangle = 52.03 \pm 0.04 \text{ см}$$

$$\langle L_{\text{Out}} \rangle = 54.41 \pm 0.01 \text{ см}$$

(ошибки из метода Монте Карло для  $10^7$  событий)

	Значение	Неопределенность	
		Абсолютная	Относительная (%)
Атомная плотность $D = \rho N_0 f_1 / M$			
Плотность Ga, $\rho$ (г Ga/см <sup>3</sup> )	6.095	0.002	0.033
Число Авогадро $N_0$ ( $10^{23}$ ат Ga/моль)	6.0221	0	0
Молекулярный вес Ga $M$ (г Ga/моль)	69.72307	0.00013	0.0002
Атомная плотность $D$ ( $10^{22}$ ат $^{71}\text{Ga}$ /см <sup>3</sup> )	2.1001	0.0008	0.037
Активность источника в исходное время $A$ , МКи	3.414	0.008	0.23
Сечение $\sigma$ [ $10^{-45}$ см <sup>2</sup> / ( $^{71}\text{Ga}$ ат $^{51}\text{Cr}$ распад)], Bahcall	5.81	+0.21,-0.16	+3.6,-2.8
Длина пробега в Ga $\langle L_{\text{Out}} \rangle$ (см)	54.41	0.18	0.3
Длина пробега в Ga $\langle L_{\text{Inn}} \rangle$ (см)	52.03	0.18	0.3
<b>Предполагаемая скорость образования (<math>^{71}\text{Ge}</math> ат/д), <math>R_{\text{Out}}</math></b>	<b>72.59</b>	<b>+2.6,-2.1</b>	<b>+3.6,-2.8</b>
<b>Предполагаемая скорость образования (<math>^{71}\text{Ge}</math> ат/д), <math>R_{\text{Inn}}</math></b>	<b>69.41</b>	<b>+2.5,-2.0</b>	<b>+3.6,-2.8</b>

# Результаты анализа скоростей захвата K+L пиков для каждых 10 извлечений двух мишеней, а также результаты объединенного анализа и ожидаемой скорости захвата.

$$R_{Inn} = 54.9 \pm 2.5 (stat) \quad {}^{+1.43}_{-1.37} (syst) = 54.9 \pm 2.9$$

$$\frac{R_{Inn}}{R_{InnExpect}} = \frac{54.9 \pm 2.9}{69.41^{+2.5}_{-2.0}} = 0.791 \pm 0.05 \quad (4.2\sigma)$$

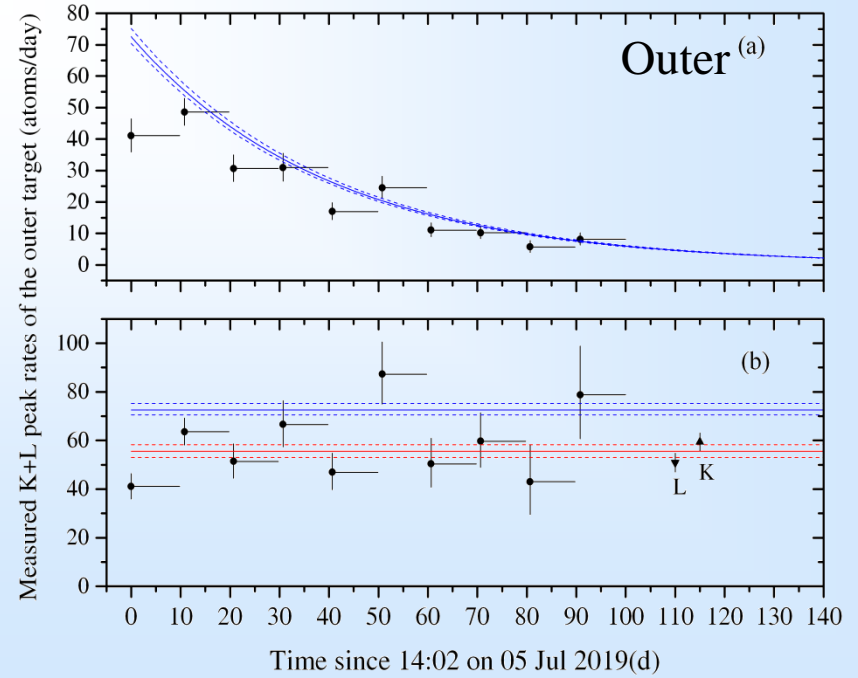
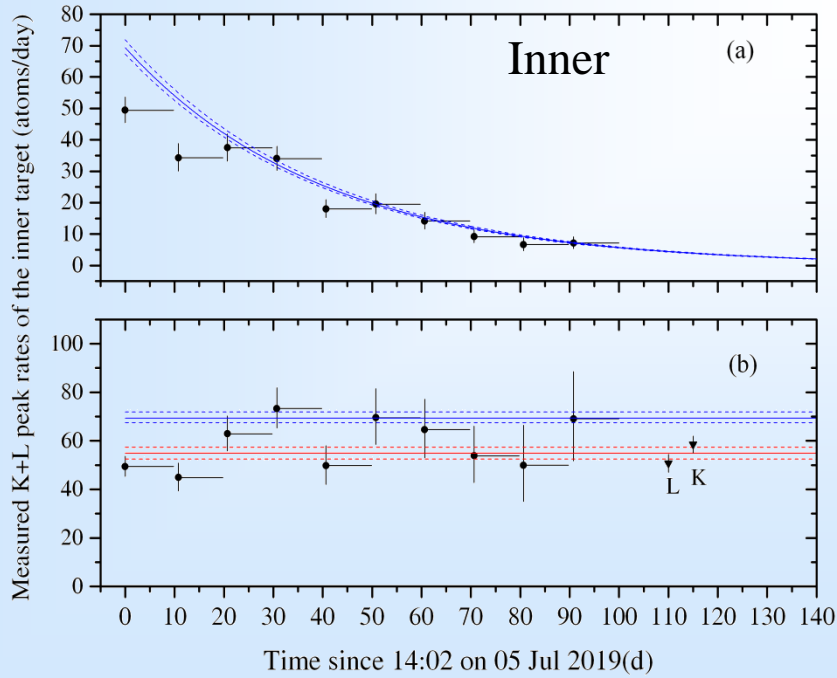
$$R_{Out} = 55.6 \pm 2.7 (stat) \quad {}^{+1.45}_{-1.39} (syst) = 55.6 \pm 3.1$$

$$\frac{R_{Out}}{R_{OutExpect}} = \frac{55.6 \pm 3.1}{72.59^{+2.6}_{-2.1}} = 0.766 \pm 0.05 \quad (4.7\sigma)$$

$$r = \frac{R_{out}}{R_{Inn}} = \frac{0.766 \pm 0.05}{0.791 \pm 0.05} = 0.97 \pm 0.07 \quad \text{Согласуется с 1}$$

TABLE I. A summary of the likelihood fits for the production rate from each extraction, the combined fit of all extractions, and the predicted production rate. The quoted measurement uncertainties are statistical.

Exposure Dates (DoY)	Inner Volume				Outer Volume			
	K+L Candidates	Number fit to ${}^{71}\text{Ge}$	${}^{51}\text{Cr}$ Production Rate (Atoms/d)	Production Rate (Atoms/d)	K+L Candidates	Number fit to ${}^{71}\text{Ge}$	${}^{51}\text{Cr}$ Production Rate (Atoms/d)	Production Rate (Atoms/d)
186.585-196.376	180	176.3	175.5	$49.4^{+4.2}_{-4.0}$	181	133.4	129.6	$41.1^{+5.3}_{-5.2}$
197.362-206.372	129	111.5	107.7	$44.9^{+5.9}_{-5.6}$	174	163.8	158.6	$63.6^{+5.7}_{-5.5}$
207.282-216.374	132	117.6	115.4	$62.9^{+7.4}_{-7.1}$	116	92.5	88.2	$51.4^{+7.3}_{-6.9}$
217.286-226.371	93	87.3	85.6	$73.3^{+8.6}_{-8.0}$	98	82.3	78.9	$66.6^{+9.8}_{-9.2}$
227.258-236.458	134	60.2	58.4	$49.8^{+8.2}_{-7.7}$	120	64.0	59.5	$46.9^{+7.9}_{-7.2}$
237.342-246.369	81	48.8	47.7	$69.5^{+12.0}_{-11.0}$	97	62.3	59.3	$87.3^{+13.2}_{-12.3}$
247.243-256.368	91	45.0	43.9	$64.6^{+12.6}_{-11.6}$	69	38.0	34.4	$50.4^{+10.6}_{-9.6}$
257.241-266.369	59	33.6	32.4	$53.8^{+12.2}_{-11.0}$	68	43.4	39.2	$59.7^{+11.7}_{-10.8}$
267.240-276.369	106	23.7	22.7	$49.9^{+16.5}_{-14.9}$	66	20.2	17.0	$43.0^{+15.3}_{-13.5}$
277.201-286.367	88	25.2	24.3	$69.1^{+19.4}_{-17.3}$	81	31.8	28.0	$78.8^{+20.0}_{-18.1}$
Combined	1093	724.0	708.2	$54.9^{+2.5}_{-2.4}$	1069	738.8	699.8	$55.6^{+2.7}_{-2.6}$
Predicted				$69.41^{+2.5}_{-2.0}$				$72.59^{+2.6}_{-2.1}$



Сечение захвата на Ga нейтрино от  $^{51}\text{Cr}$   
( $10^{-45}$  см $^2$ )

Ref.	Cross section
Bahcall et al. [PRC <b>56</b> , 3391 (1997)]	$5.81^{+0.21}_{-0.16}$
Frekers et al. [PRC <b>91</b> , 034608 (2015)]	5.93
Barinov et al. [PRD <b>97</b> , 073001 (2018)]	$5.910 \pm 0.114$
Konstensalo et al. [PLB <b>795</b> , 542 (2019)]	$5.67 \pm 0.06$
Semenov [Phys. At. Nucl. <b>83</b> , 1549 (2020)]	$5.938 \pm 0.116$

# Осцилляционный анализ

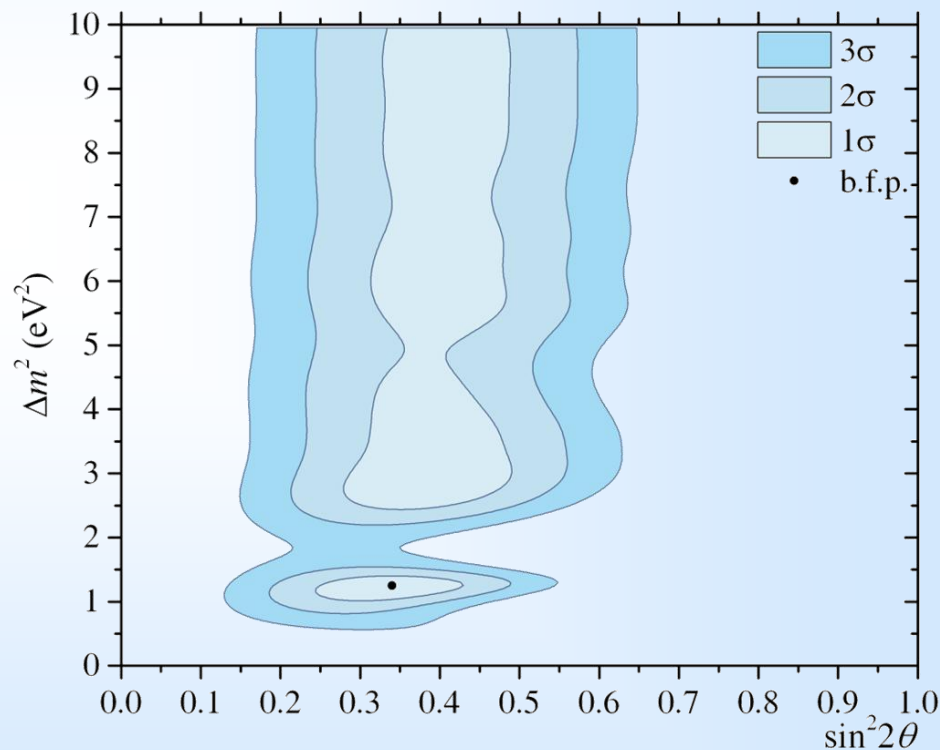
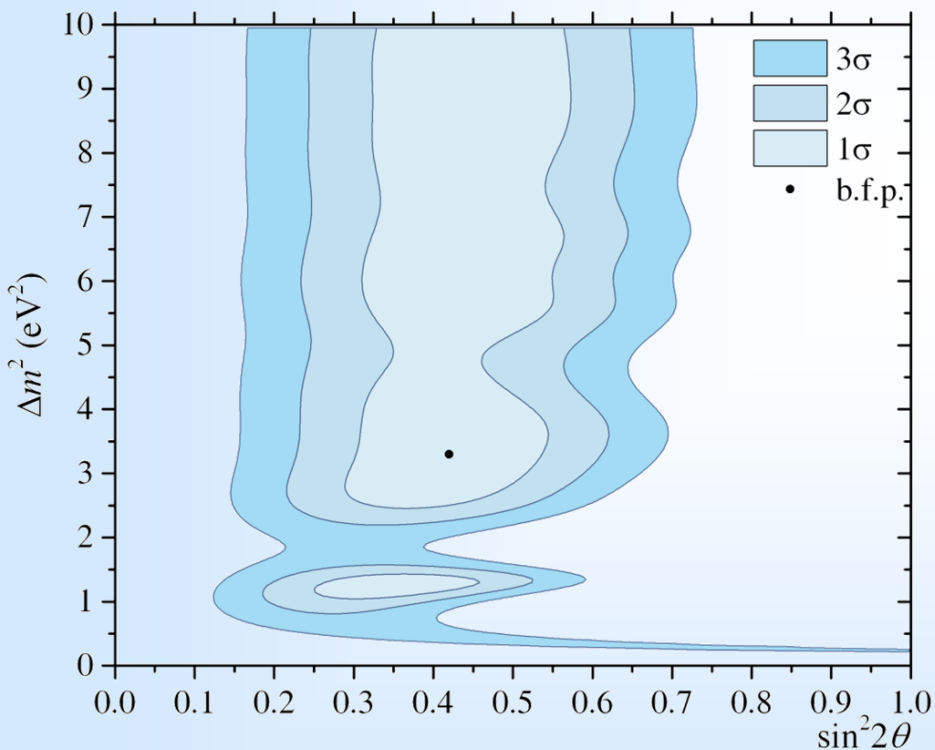
$$\chi^2(\Delta m^2, \sin^2(2\theta)) = (R^{meas} - R^{calc})^T V^{-1} (R^{meas} - R^{calc})$$

$R^{meas}$  - вектор измеренных в эксперименте значений

$R^{calc}(\Delta m^2, \sin^2(2\theta))$  - вектор вычисляемых значений

$V$  - ковариационная матрица ошибок, коррелированные - неопределенности сечения захвата

Вычисленные контуры уровней достоверности, соответствуют  $\Delta\chi^2 \equiv \chi^2 - \chi^2_{min}$  с 2 d.o.f:  $\Delta\chi^2 = 2.30, 6.18, 11.83$  для 68.27% ( $1\sigma$ ), 95.45% ( $2\sigma$ ) и 99.73% ( $3\sigma$ ) C.L., соответственно:

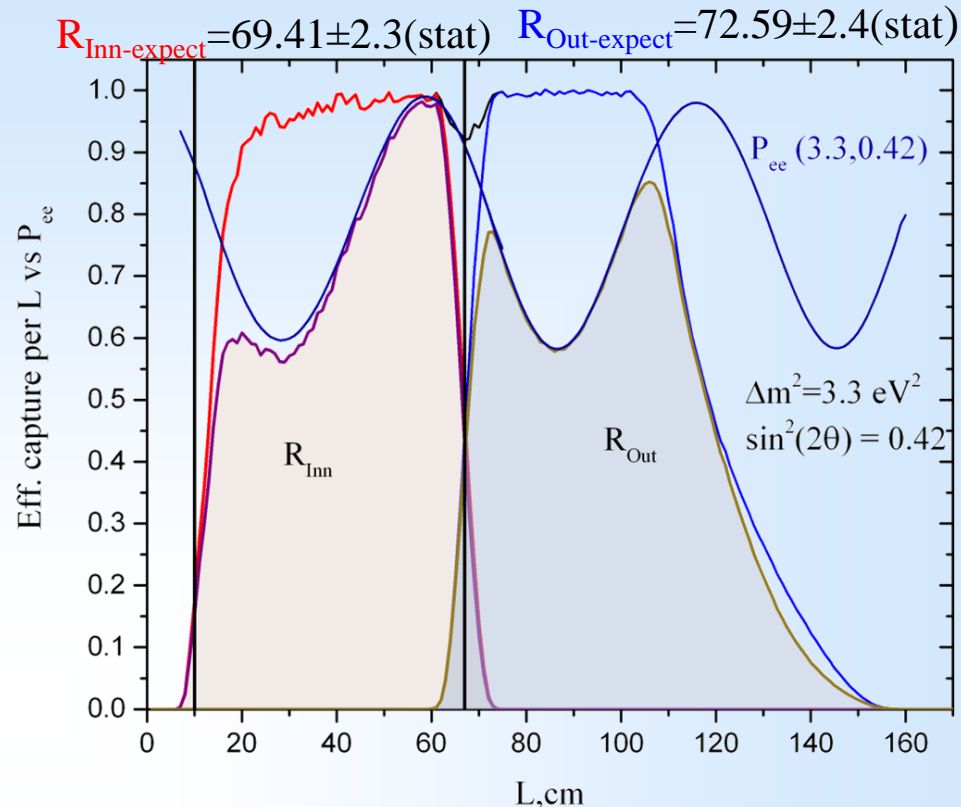
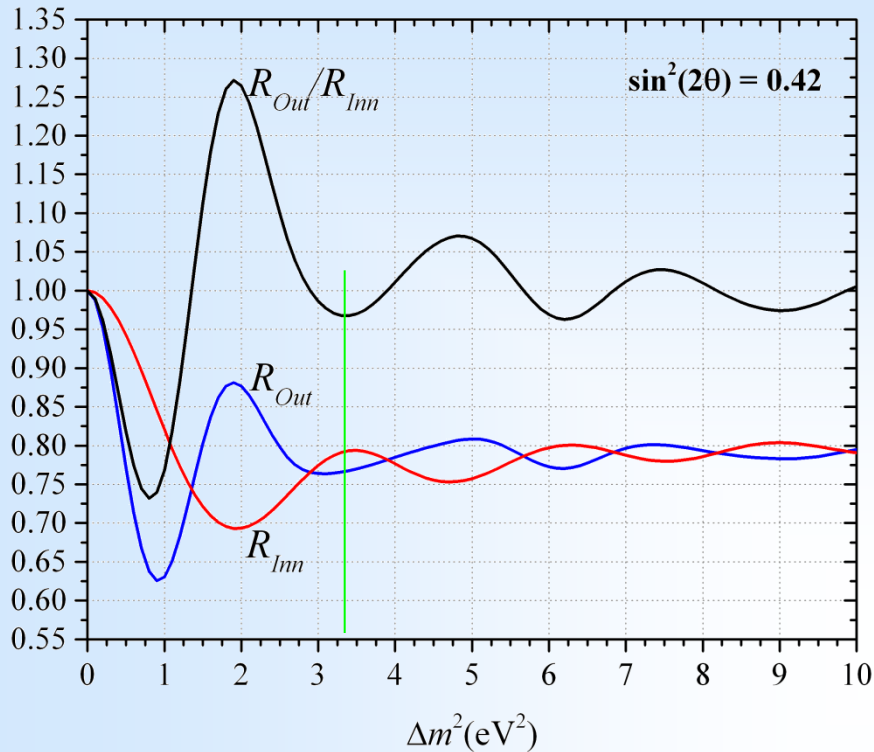


Область допустимых осцилляционных параметров для BEST

b.f.p.  $\Delta m^2 = 3.35$  eV<sup>2</sup>,  $\sin^2(2\theta) = 0.42$

Область допустимых осцилляционных параметров для BEST, SAGE и GALLEX

b.f.p.  $\Delta m^2 = 1.25$  eV<sup>2</sup>,  $\sin^2(2\theta) = 0.34$



из 5000000 М-К симуляций при заданной геометрии мишеней BEST для

$\Delta m^2 = 3.3 \text{ эВ}^2$  и  $\sin^2(2\theta) = 0.42$  :

ср.  $P_{ee}$  в  $R_{Inn} = 0.80$ ,

ср.  $P_{ee}$  в  $R_{Out} = 0.78$ ,

$R_{Out}/R_{Inn} = 0.972$

Из измерений получено:

$R_{Inn-meas} = 54.9 \pm 2.5 \text{ (stat)}$

$R_{Out-meas} = 55.6 \pm 2.7 \text{ (stat)}$

$$r = \frac{R_{out}}{R_{Inn}} = \frac{0.766 \pm 0.05}{0.791 \pm 0.05} = 0.97 \pm 0.07$$

Ожидаемая скорость образования  $^{71}\text{Ge}$  в галлии:

$\rho = D\sigma A \langle L \rangle$  (атомов / день)

$D = \rho N_0 f / M$  - атомная плотность

$\rho$  - плотность Ga (г Ga/cm<sup>3</sup>)

$N_0$  - число Авогадро ( $10^{23}$  ат. Ga/моль)

$f$  - изотопное содержание  $^{71}\text{Ga}$  (ат.  $^{71}\text{Ga}/100$  ат. Ga)

$M$  - молекулярный вес (г Ga/моль)

$\sigma = 5.81 \times 10^{-45} (1^{+0.03}_{-0.04}) \text{ см}^2$  - сечение захвата  $\nu$  [Bahcall],

$A$  - мощность источника

$\langle L \rangle$  - усредненная длина пробега  $\nu$  в объеме Ga:

$\langle L_{Inn} \rangle = 52.03 \pm 0.18 \text{ см}$ ,  $\langle L_{Out} \rangle = 54.41 \pm 0.18 \text{ см}$