

Измерение примесей в материале источника
 ^{51}Cr по анализу спектров фотонов в
эксперименте BEST

В.Горбачёв
ГГНТ, БНО ИЯИ РАН

Эксперимент BEST

Галлиевая аномалия:

Подавление скорости захвата нейтрино в
Ga экспериментах SAGE и GALLEX с
источниками ^{51}Cr и ^{37}Ar

$$R=0.87\pm 0.05$$

Проверка гипотезы стерильных нейтрино:

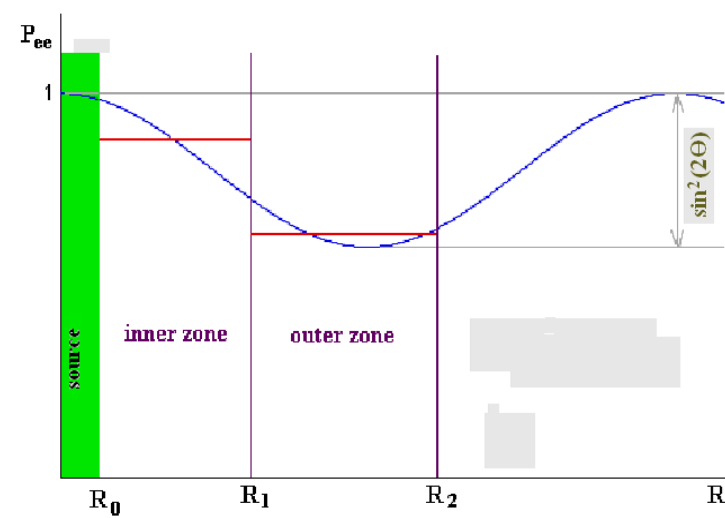
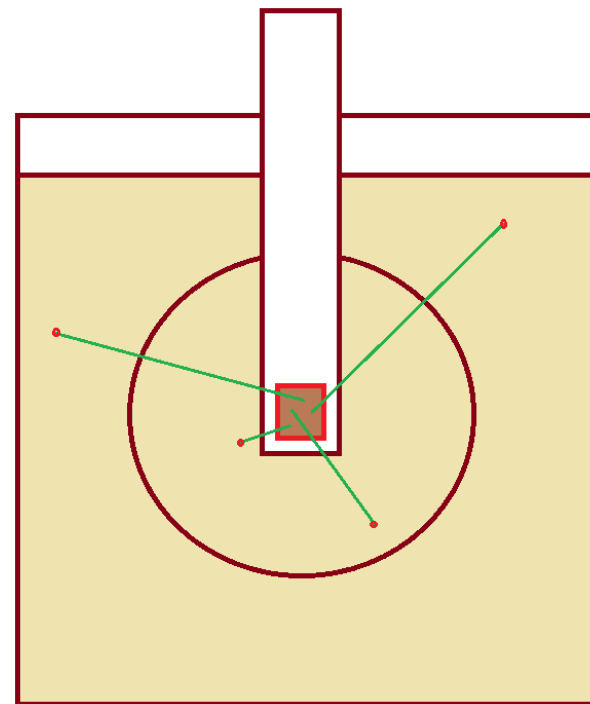
$$P_{ee} = 1 - \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m^2 (eV^2) \cdot L(m)}{E_\nu (MeV)} \right)$$

2-зонная Ga мишень – 7.5 и 42 т

Пробег в каждой зоне ~53 см

Ga эксперименты с источниками на новом
уровне:

- Введена чувствительность к расстоянию (разделение мишени на 2 зоны)
- Увеличена масса мишени (48 т вместо 13 т)
- Более активный источник (3.4 МКи вместо 0.5 МКи)



Источник ^{51}Cr

Нейтринный источник ^{51}Cr

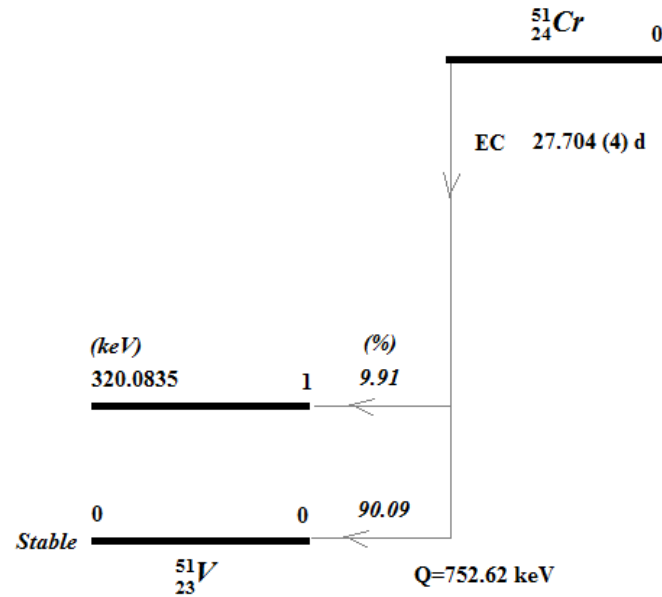
Активность 3.4 МКи

Энергия нейтрино 750 кэВ (90%)
и 430 кэВ (10%, 4.9% Ga сигнала)

Сечение захвата ν_e на ^{71}Ga

$$\sigma = 5.81 \cdot 10^{-45} \text{ см}^2 (+3.6\% -2.8\%)$$

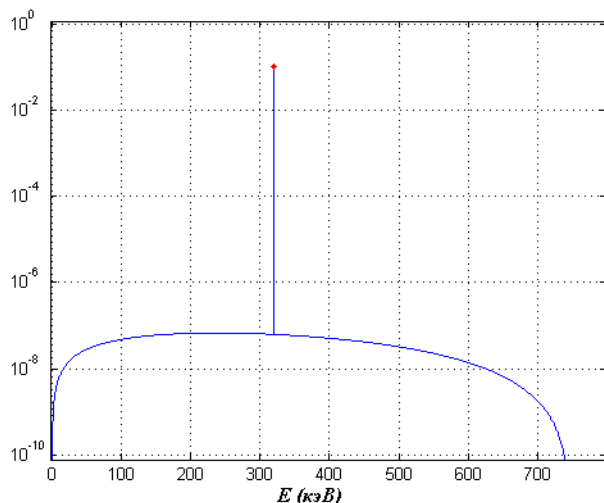
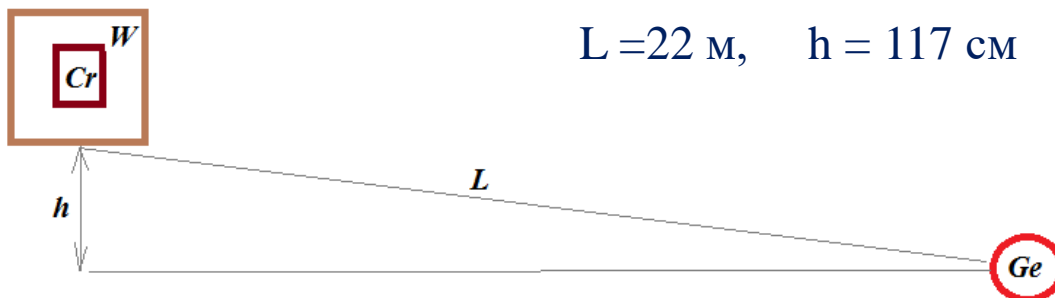
Скорость захвата 70 сут^{-1} в 1 зоне
мишени



Измерения спектров фотонов

Цель:

- 1) Определение вклада примесей в калориметрические измерения активности источника
- 2) Определение активности источника по спектру ВТИ



Расписание измерений спектров

Измерения спектров и калориметрические измерения проводились после каждого облучения 2-зонной Ga мишени нейтрино от источника

В эксперименте BEST проводилось 10 облучений (всего 100 суток с 5 июля 2019)

Облучение Ga (9 суток) +

Перерыв (1 сутки): измерения спектра фотонов (1 час) + калориметрия (~20 час)

Измерения спектров с коллиматорами

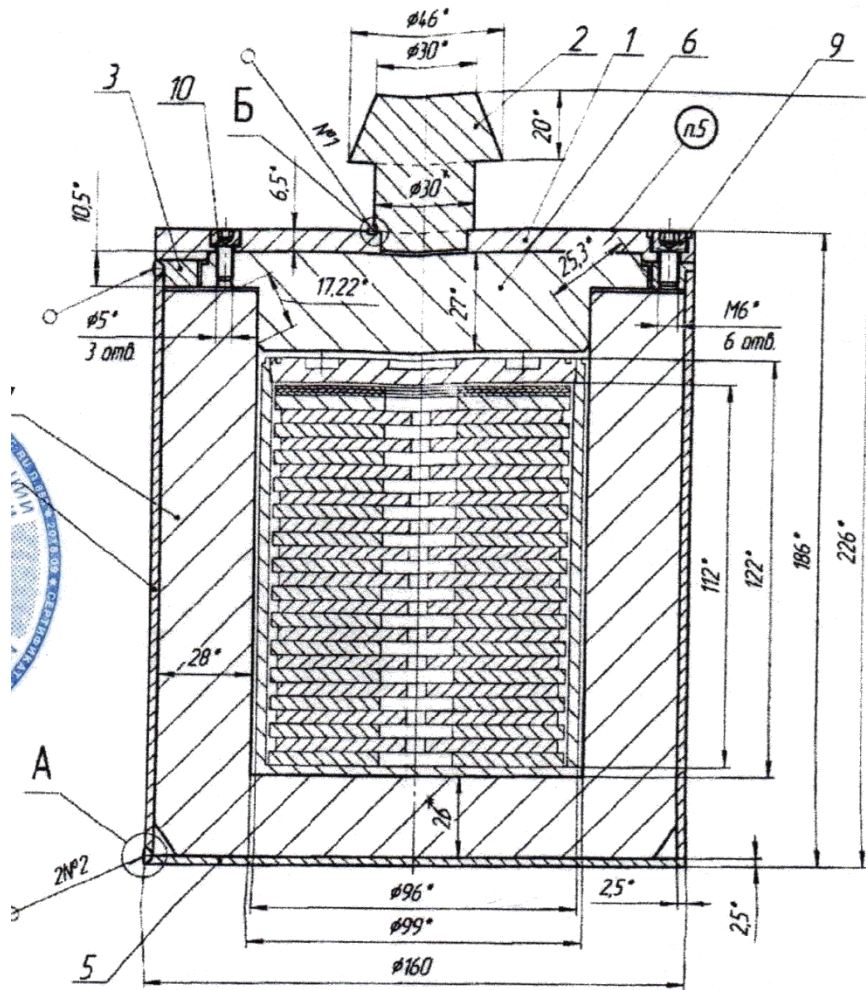
Цилиндрические отверстия в Pb толщиной 10 см

Диаметр отверстий от 3 до 10 мм по мере уменьшения активности источника (за 100 сут активность уменьшилась в 12 раз)

Скорость счёта в ППД 30-50 с⁻¹

Через 135 сут проводились измерения без коллиматора $\nu \sim 150$ с⁻¹

Источник и его защита



Источник 4007.5 г

Обогащение по ^{50}Cr 96.6 % (3869 г)

Набран из 26 дисков толщиной 4 мм $\text{Ø}88 \times 22$ мм и $\text{Ø}84 \times 6$ мм

Биологическая защита

W сплав (W – 95%, Ni – 3%, Cu – 2%)

$\rho=17.6$ г/см³

Толщина 2.8 см

ППД



Ge ППД

Кристалл: $\text{Ø}5.36 \times 4.95$ см

Пассивная защита > 20 см Pb

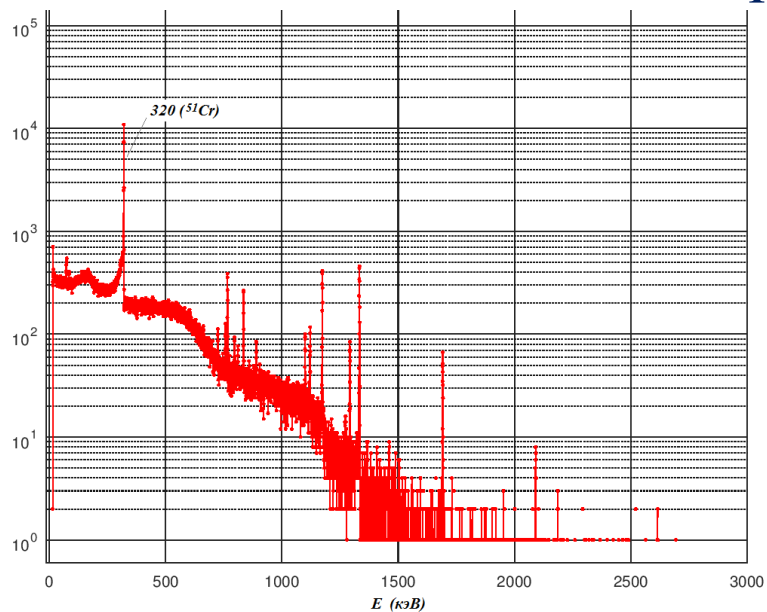
АЦП 8192 канала

Шкала энергий 0 ... 3 МэВ

Фоновая скорость счёта 1.5 с^{-1}

Разрешение 0.13% на линии 1460 кэВ (0.16% на 1 МэВ)

Спектры фотонов

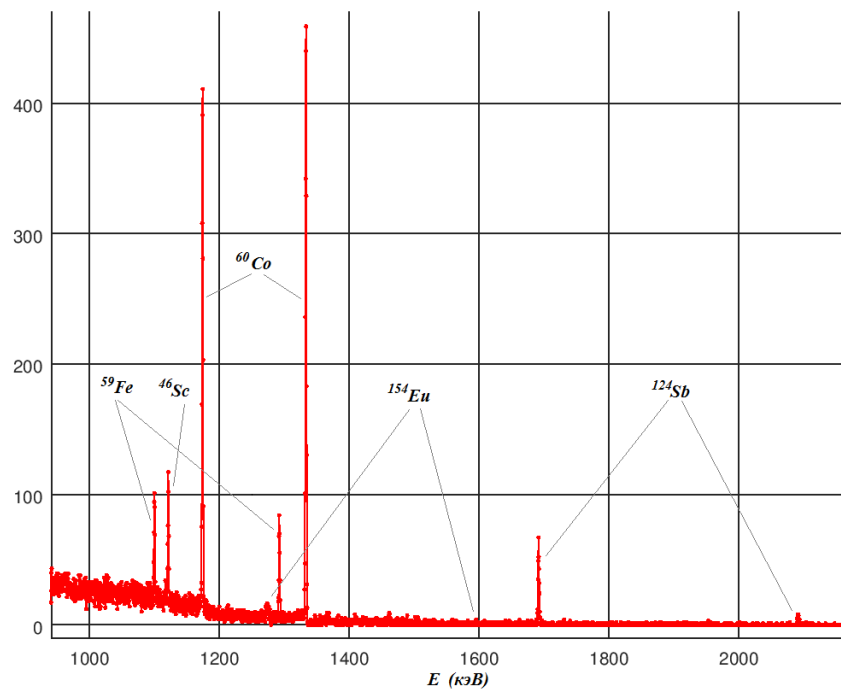
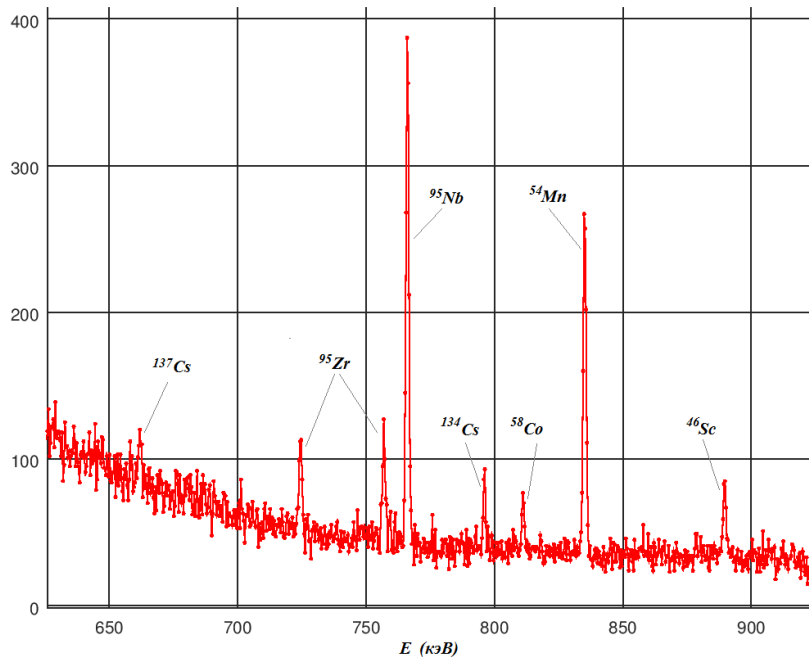


Без коллиматора, через 135 сут
после начала эксперимента
BEST

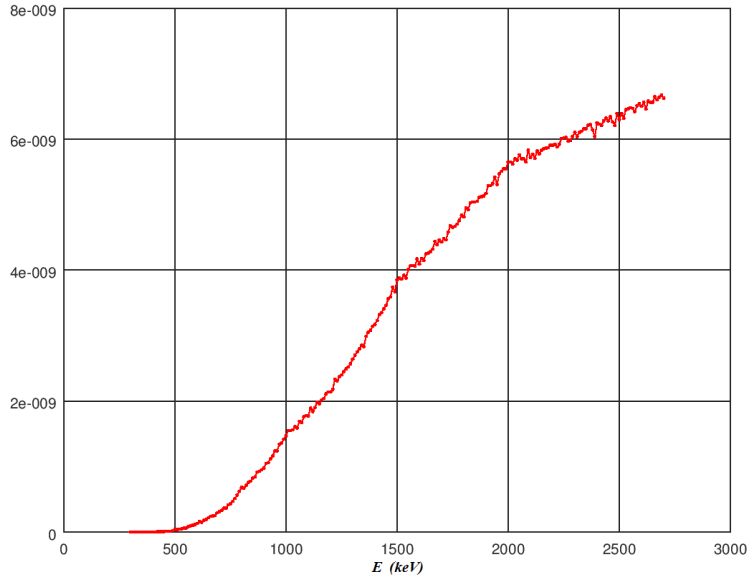
Активность ^{51}Cr упала в 30 раз

С коллиматорами видны только
линии с $E > 1$ МэВ: ^{59}Fe , ^{60}Co ,
 ^{124}Sb , ^{154}Eu

Линии с $E < 1$ МэВ ~ однозначно
идентифицируются

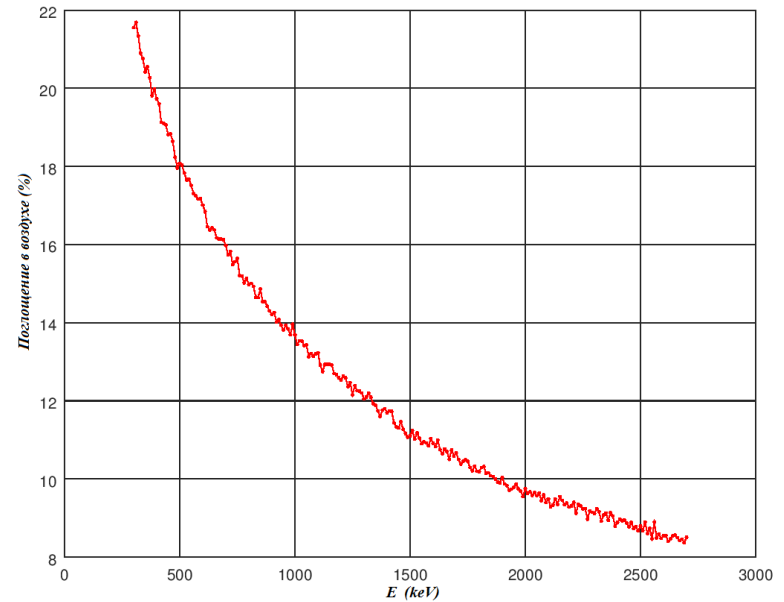


Прохождение фотонов через защиту



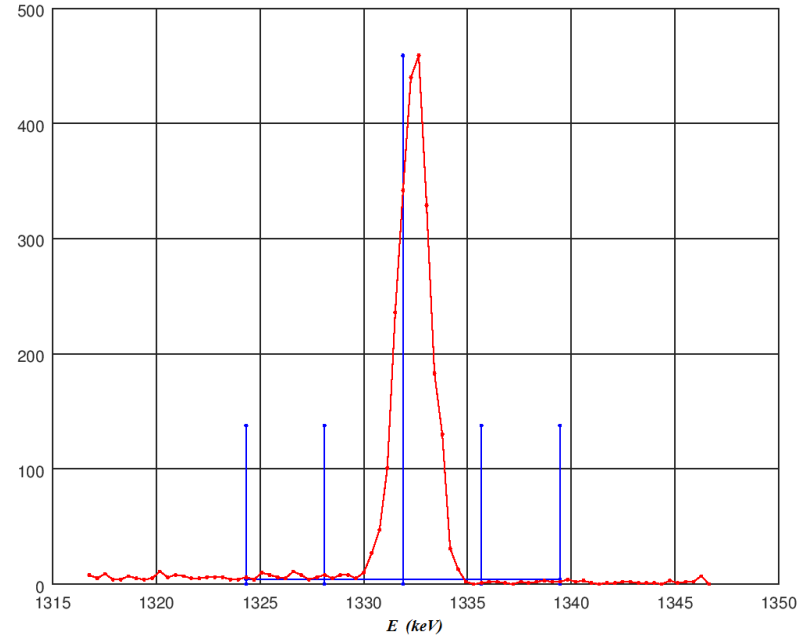
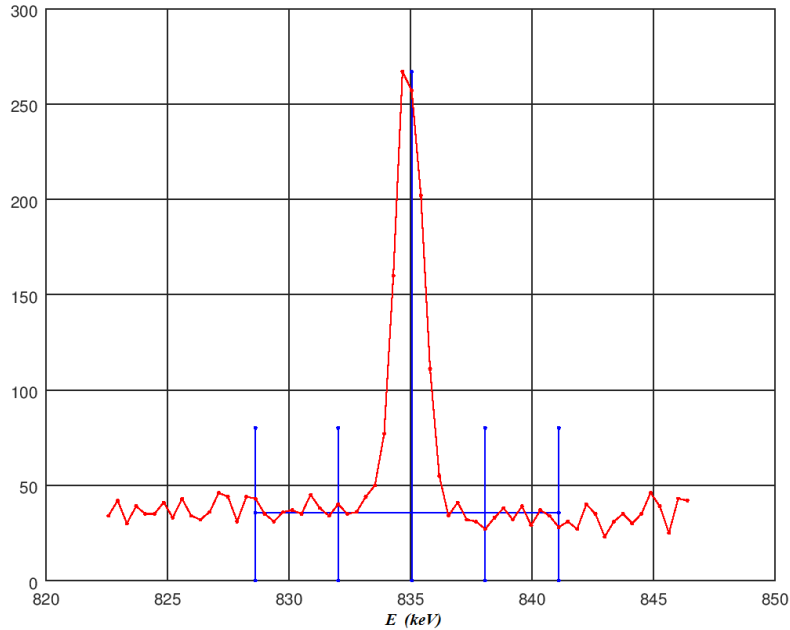
Вероятности регистрации фотонов
из источника в ППД

Считаем, что любое
взаимодействие выводит фотон
из пучка



Взаимодействие с воздухом на 22 м
при 620 мм Нг

Число событий в линиях



Выделяем 4 точки около линии E:

$$(x_1, x_2, x_3, x_4) = E \cdot ((1-4 \cdot R), (1-2 \cdot R), (1+2 \cdot R), (1+4 \cdot R))$$

Число событий в пике + фон: $n_{s1} = N(x_2, x_3)$

Отдельно фон: $n_f = N(x_1, x_2) + N(x_3, x_4)$

Число событий без фона: $n_s = n_{s1} - n_f$

Статистическая ошибка:

$$\sigma = \sqrt{n_{s1} + n_f}$$

ИЗОТОПЫ И ИХ АКТИВНОСТИ

	Изотоп, $T_{1/2}$	Энергия в линии, кэВ	Выход линии, %	n_s	n_f	Активность на 5.07.2019, мКи	W, мВт
1	^{137}Cs 30.05 г	662	85	229	1268	$8.5 \times (1 \pm 0.23)$	0.06
2	^{95}Zr 64 сут	724	11.1	356	768	$60 \times (1 \pm 0.12)$	2.1
		757	54.38	334	748		
3	^{95}Nb 35 сут	766	99.8	1313	682	$87 \times (1 \pm 0.04)$	
4	^{134}Cs 2.06 г	796	85.5	217	626	$3.3 \times (1 \pm 0.18)$	0.041
5	^{58}Co 70.85 сут	811	99.44	141	632	$6.0 \times (1 \pm 0.27)$	0.08
6	^{54}Mn 312 сут	835	100	963	570	$13 \times (1 \pm 0.05)$	0.10
7	^{46}Sc 83.8 сут	889	100	254	569	$5.2 \times (1 \pm 0.10)$	0.07
		1120	100	346	400		
8	^{59}Fe 44.5 сут	1099	57	403	401	$23 \times (1 \pm 0.07)$	0.22
		1291	43.2	383	97		
9	^{60}Co 5.27 г	1173	100	1863	286	$6.6 \times (1 \pm 0.03)$	0.11
		1332	100	2300	85		
10	^{124}Sb 60.2 сут	1690	47.5	341	16	$5.8 \times (1 \pm 0.06)$	0.10
		2091	5.5	49	3		
11	^{140}Ba - ^{140}La 12.76 сут	1595	95	<24>	<3>	$0.78 \times (1 \pm 0.30)$	0.80
12	^{154}Eu 8.6 г	1274	34.9	88	114	$0.86 \times (1 \pm 0.18)$	0.010
		1595	1.8	13	13		
Σ							3.7

Тепловыделение: ^{51}Cr – 36.7 кэВ/распад или 740 Вт/3.4 мКи

Т.е. вклад примесей в тепловыделение $\sim 5 \cdot 10^{-6}$; суммарная систематика калориметрии $\sim 0.2\%$

Ошибки измерений

1. Статистические ошибки – из числа импульсов в линиях и в фоновой подложке

2. Систематическая ошибка от отклонения источника от вертикальной оси при измерениях:

Считаем max отклонение $\pm 5^\circ$ и из-за неопределённости толщины защиты ошибка эффективностей равна

10 % для фотонов с энергиями 600 - 1000 кэВ

3 % для фотонов с энергиями > 1000 кэВ

Других линий, кроме описанных и фоновых от К и цепей U и Th в спектрах – с коллиматорами и без – нет. Поэтому количество возможных короткоживущих примесей, излучающих фотоны с $E > 1000$ кэВ, не превышает количество обнаруживаемых в самых первых измерениях ^{59}Fe , ^{60}Co или ^{124}Sb

Оценка активностей

$$n(t) = \frac{\Phi \cdot \sigma_0 \cdot N_0}{\lambda_1 + \Phi \cdot (\sigma_1 - \sigma_0)} \cdot (e^{-\Phi \sigma_0 t} - e^{-(\lambda_1 + \Phi \cdot \sigma_1)t})$$

$\Phi = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ – средний поток тепловых нейтронов – вычисляем из активности ^{51}Cr (определена из калориметрии)

N_0 – количество облучаемого в реакторе родительского изотопа

λ_1 – постоянная распада изотопа

σ_0 и σ_1 – сечения захвата нейтронов ядрами родительского и измеряемого изотопов (для ^{50}Cr и ^{51}Cr $\sigma_0=15.9 \text{ б}$ и $\sigma_1=10.2 \text{ б}$)

$t=100 \text{ сут}$ – время облучения в реакторе

Пара $^{95}\text{Zr} - ^{95}\text{Nb}$

^{95}Zr (64 сут) 724 кэВ (11.1%) и 757 кэВ (54.4%)

^{95}Nb (35 сут) 766 кэВ (99.8%)

^{95}Nb из распада $^{95}_{40}\text{Zr} \rightarrow ^{95}_{41}\text{Nb} + e^-$

Наработка ^{95}Nb в реакторе:

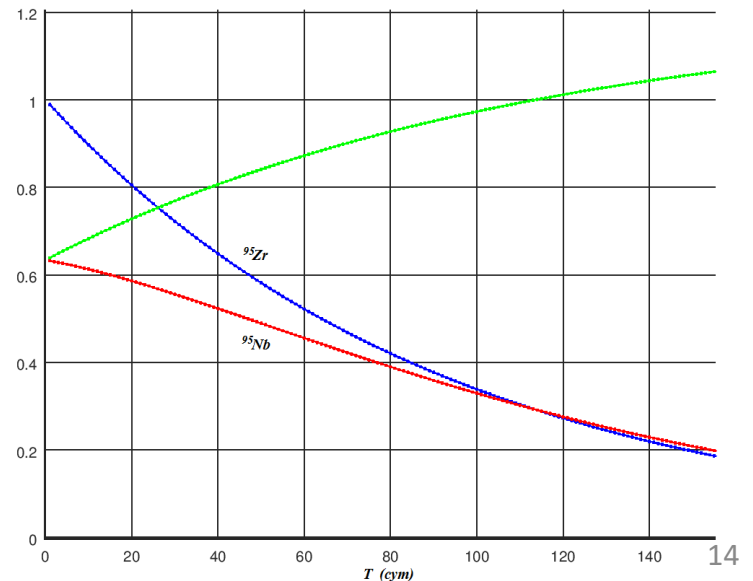
$$n_{\text{Nb}}(t) = \frac{\lambda_1 \cdot \Phi \cdot \sigma_0 \cdot N_0}{\lambda_1 - \Phi \cdot \sigma_0} \cdot \left(\frac{1}{\lambda_2 - \Phi \cdot \sigma_0} \cdot (e^{-\Phi \sigma_0 t} - e^{-\lambda_2 t}) - \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \right)$$

Через 100 сут облучения $n_{\text{Nb}}/n_{\text{Zr}}=0.63$

^{95}Nb в источнике:

$$n_{\text{Nb1}}(t) = n_{\text{Nb0}} \cdot e^{-\lambda_2 t} + \frac{\lambda_1 \cdot n_{\text{Zr0}}}{\lambda_1 - \lambda_2} \cdot (e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_1 t})$$

Через 135 сут в источнике $n_{\text{Nb}}/n_{\text{Zr}} \sim 1$



Массы родительских элементов примесей

	Изотоп	Родительский изотоп, содержание в природной смеси, %	Реакция облучения на изотопе, сечение σ_1 , б	Масса родительского изотопа	Масса элемента	Масса из масс-спектр
1	^{137}Cs	^{136}Xe , 8.9 ^{137}Ba , 11.23	(n, γ) + распад, 0.26 (n,p)	22 мг -	246 мг -	- <400 мкг
2	^{95}Zr	^{94}Zr , 17.33	(n, γ), 0.05	54 мг	312 мг	1.6 мг
3	^{95}Nb	^{95}Zr	β^- распад			
4	^{134}Cs	^{133}Cs , 100	(n, γ), 29	53 мкг	53 мкг	<400 мкг
5	^{58}Co	^{58}Ni , 68.27 ^{59}Co , 100	(n,p) (n,2n)	6.8 мг (189 мкг)	10 мг (189 мкг)	10 мг <400 мкг
6	^{54}Mn	^{54}Fe , 5.8	(n,p)	(8.7 мг)	(150 мг)	360 мг
7	^{46}Sc	^{45}Sc , 100	(n, γ), 17	7.8 мкг	7.8 мкг	<400 мкг
8	^{59}Fe	^{58}Fe , 0.28 ^{59}Co , 100	(n, γ), 1.26 (n,p)	419 мкг (189 мкг)	150 мг (189 мкг)	360 мг <400 мкг
9	^{60}Co	^{59}Co , 100	(n, γ), 18.7	189 мкг	189 мкг	<400 мкг
10	^{124}Sb	^{123}Sb , 42.7	(n, γ), 4.1	83 мкг	195 мкг	<400 мкг
11	^{140}Ba - ^{140}La	^{138}Ba , 71.7	(n, γ) + (n, γ), 0.4 б + 6 б	-	-	<400 мкг
12	^{154}Eu	^{153}Eu , 52.2	(n, γ), 350	11 мкг	22 мкг	<400 мкг

Оценка сечений реакций захвата нейтронов

Считаем, что реакции захвата нейтронов известны для (n,γ) реакций
Косвенно по данным измерений находим сечения (n,p) и $(n,2n)$

Если родительский элемент – железо:

Из $^{58}\text{Fe}(n,\gamma)^{59}\text{Fe}$ находим массу Fe 150 мг

Тогда сечение реакции $^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$ равно $\sigma(n,p) = 0.13$ б

Если родительский элемент – кобальт:

Из $^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60}\text{Co}$ находим массу Co 189 мкг

Тогда сечение реакции $^{59}\text{Co}(n,2n)^{58}\text{Co}$ равно $\sigma(n,2n) < 0.92$ б

Конкретное значение реакции получить не можем, т.к. ^{58}Co
может рождаться в реакции $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$

Масса Ni по спектрометрическим измерениям 10 мг, откуда
 $\sigma(n,p) < 26$ мб

Противоречия в спектрах

3 группы линий с неоднозначной интерпретацией:

- 1) 662 кэВ – распад ^{137}Cs
- 2) 724, 757 и 766 кэВ – ^{95}Zr - ^{95}Nb
- 3) 1596 кэВ – ^{140}Ba - ^{140}La

1) ^{137}Cs в реакторе может образоваться в реакциях:



Но для этого нужно Хе 40 см^3 или Ва $> 400 \text{ мкг}$ (предел из масс-спектрометрии)

2) Масса родительского Zr 312 мг, в 200 раз больше массы из масс-спектроскопии 1.6 мг

Из Zr делалась оболочка для Sr дисков при облучении в реакторе

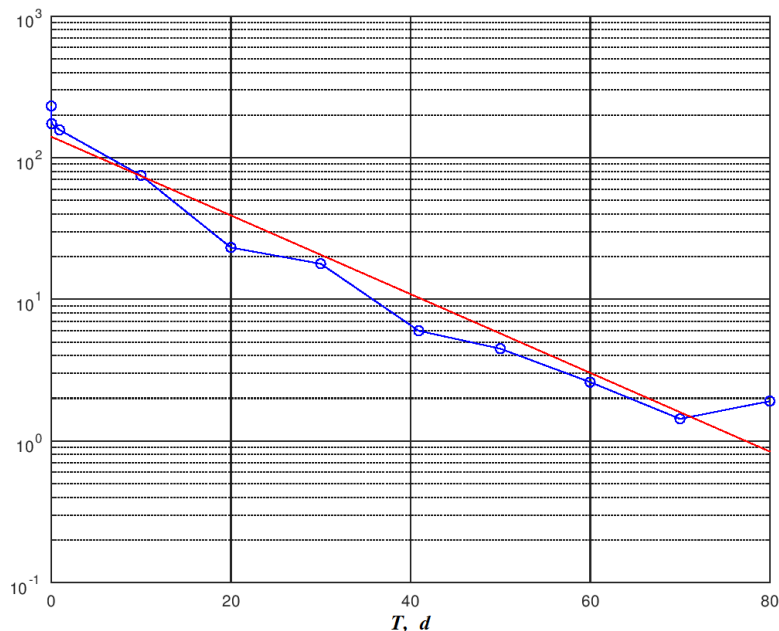
При площади касания $\sim 1800 \text{ см}^2$ средняя толщина перемещённого Zr
 $27 \text{ мкм} = 1000 \text{ ат слоёв}$; $312 \text{ мг Zr} = 48 \text{ мм}^3$

При $T_{\text{пл}} = 1852 \text{ }^\circ\text{C}$ диффузия маловероятна

Возможно, механических перенос Zr на источник в местах с повреждениями кристаллической решётки

Противоречия в спектрах

3) $^{140}\text{Ba} - ^{140}\text{La}$



Изменение скорости счёта в линии 1596 кэВ в измерениях с коллиматорами. Считая, что $v \sim R^2$, приводим все v к $R=3\text{мм}$

$T_{1/2}$ должно быть 10-20 сут

единственный кандидат - ^{140}Ba с $T_{1/2} = 12.76$ сут

Линия 1596 кэВ единственная значимая линия в спектре пары $^{140}\text{Ba}-^{140}\text{La}$

^{140}La рождается из распада ^{140}Ba ,

$T_{1/2}(^{140}\text{La}) = 40.28$ час

^{140}Ba может рождаться в реакторе в последовательных захватах нейтронов:



Но количество Ba в мишени должно быть ~ 0.7 кг

Т.е., видимо, элемент был занесён извне

В открытом источнике, через 135 сут, линия 1596 кэВ (вместе с 1275 кэВ), считаем, излучается ^{154}Eu

^{154}Eu рождается в реакции (n, γ) на ^{153}Eu с $\sigma = 350$ б

Другие изотопы Eu не видны из-за относительно малых сечений рождения

Заключение

1. Проведены измерения спектров
2. Определён вклад β -а примесей в тепловыделение источника
3. Оценен элементный состав и количество примесей в материале источника
4. Показана возможность выявления примесей нейтронной активацией до уровня 10^{-9} г/г
5. Оценены сечения некоторых (n,p) и (n,2n) реакций
6. Показана высокая чистота материала источника