

Эксперименты по поиску двойного безнейтринного бета-распада ($0\nu 2\beta$)

Голубков Д.С.

Потенциал

- Дираковский или Майорановский фермион.
- Нарушение полного лептонного числа
- CP-нарушение в лептонном секторе
- Абсолютная шкала нейтринных масс
- ...

Двойной бета-распад

2 β 2 ν -распад: $(Z, A) \rightarrow (Z + 2, A) + 2e^- + 2\tilde{\nu}_e$, $M_A(Z, A) > M_A(Z+2, A)$

2k-захват: $(Z, A) \rightarrow (Z - 2, A) + 2e^+ + 2\nu_e$, $M_A(Z, A) > M_A(Z-2, A) + 4m_e$

Условие: цепочка $(Z, A) \rightarrow (Z - 1, A) + \beta^- \rightarrow (Z - 2, A) + \beta^-$ энергетически запрещена

- В эксперименте наблюдались только распады с увеличением заряда ядра на две единицы и двойной e-захват для ^{130}Ba .

Двойной безнейтринный бета-распад

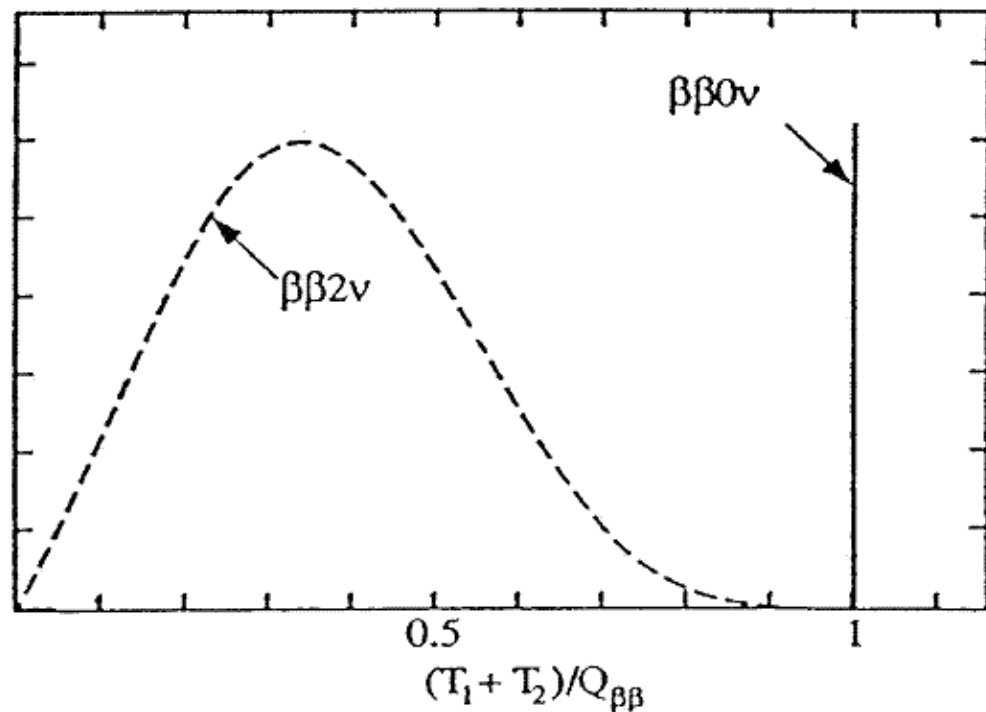
$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \quad \xrightarrow{\nu_e \equiv \bar{\nu}_e} \quad \nu_e + n \rightarrow p + e^-$$

$$0\nu 2\beta\text{-распад:} \quad A(Z, N) \rightarrow A(Z+2, N-2) + 2e^-$$

Необходимо чтобы:

- нейтрино являлось майорановской частицей (т. е. представляло собой собственную античастицу)
- нейтрино обладало массой

Сигнатура $0\nu 2\beta$ -распада



Спектр суммарной кинетической энергии электронов:

$$\left(\frac{dN}{dT} \right)_{2\beta 0\nu} = \delta(T - Q_{2\beta})$$

$$Q_{2\beta} = (M_{(A,Z)} - M_{(A,Z+2)})c^2$$

- δ -функция размывается энергетическим разрешением детектора.

Ядра-кандидаты

Изотоп	$Q_{\beta\beta}$, МэВ	Изотопная распространенность, %	$T_{1/2}(2\nu)$, лет
^{48}Ca	4.271	0.0035	$4.0 \cdot 10^{19}$
^{76}Ge	2.039	7.8	$1.5 \cdot 10^{21}$
^{82}Se	2.995	9.2	$0.9 \cdot 10^{20}$
^{96}Zr	3.35	2.8	$2.3 \cdot 10^{19}$
^{100}Mo	3.034	9.6	$7.3 \cdot 10^{18}$
^{116}Cd	2.802	7.5	$2.8 \cdot 10^{19}$
^{128}Te	0.868	31.7	$2.0 \cdot 10^{24}$
^{130}Te	2.533	33.8	$6.8 \cdot 10^{20}$
^{136}Xe	2.458	8.9	$2.1 \cdot 10^{21}$
^{150}Nd	3.367	5.6	$8.2 \cdot 10^{18}$

Период полураспада

Чувствительность детекторов к $T_{1/2}^{0\nu}$ $0\nu 2\beta$ -распада:

$$T_{1/2}^{0\nu} \sim a\varepsilon \left(\frac{M \cdot t}{B \cdot \Delta E} \right)^{1/2}$$

a – степень обогащения (%)

ε - эффективность детектора

M – масса мишени

t – время измерений

B – фон в единицах числа соб./ (кэВ·кг·год)

ΔE – энергетическое разрешение

Также период полураспада (для Ge) :

$$T_{1/2}^{0\nu} = \left(|M_{GT}|^2 C_1 |\eta|^2 \right)^{-1}$$

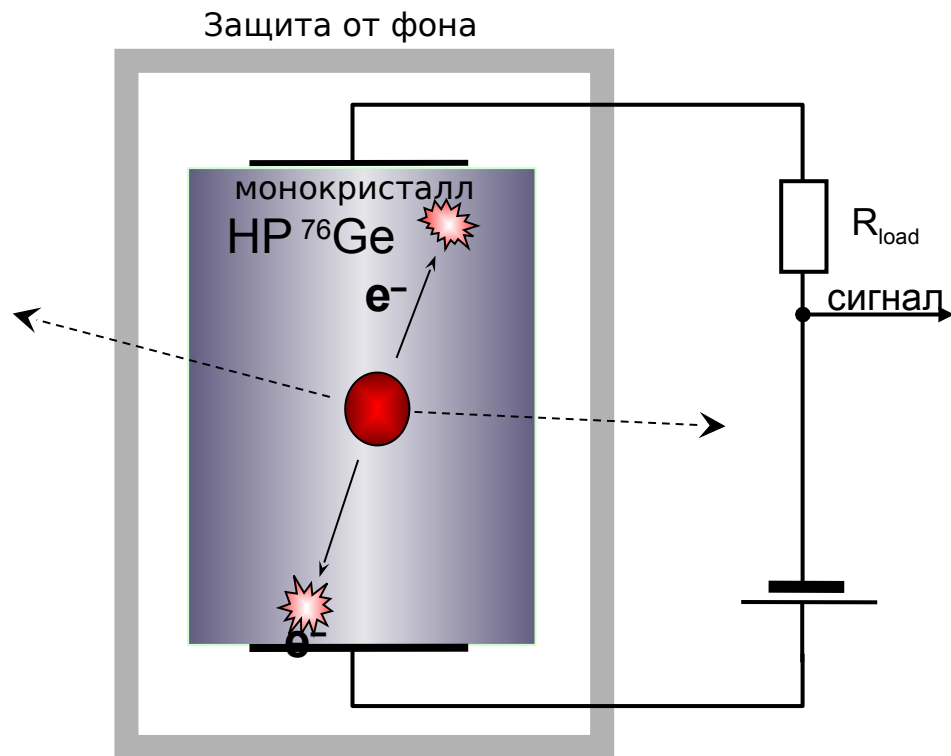
M_{GT} – ядерный матричный элемент

Гамова-Теллера

$C_1 = 7.208 \cdot 10^{-15}$ (для ^{76}Ge)

$\eta = \langle m_\nu \rangle / m_e$, m_ν - масса нейтрино

Эксперимент Heidelberg — Moscow (1990-2003)



- 5 полупроводниковых детекторов (11 кг высокочистого германия)
- Обогащение ^{76}Ge — 86% (в природном 7.8%)
- Лаборатория Гран Сассо (глубина 1400 метров)

Защита от фонов:

- 30 см радиоактивно чистого Pb (от гамма)
- 10 см борированного полиэтилена (от нейтронов)
- активное мюонное вето (от мюонов)

Источники фона

Рассматривались следующие классы фоновых событий:

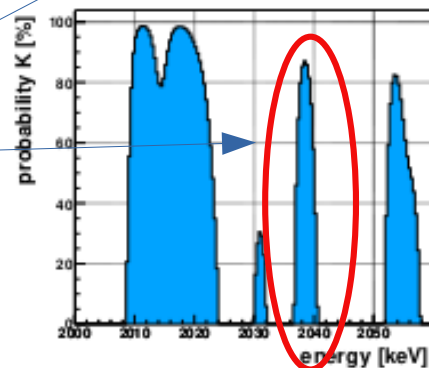
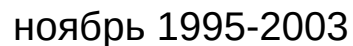
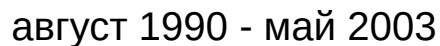
- Собственный фон, связанный с U, Th и ^{40}K
- Антропогенные радионуклиды: ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{125}Sb , ^{207}Bi
- Упругие и неупругие рассеяния нейтронов
- События, непосредственно индуцированные космическими мюонами
- Космогенные радионуклиды

МК-моделирование (GEANT4) всех возможных источников фона, в том числе:

- γ -линии ^{214}Bi в области $Q_{2\beta}(^{76}\text{Ge}) = 2039$ кэВ: 2010.7 кэВ, 2016.7 кэВ, 2021.8 кэВ и 2052.9 кэВ
- Реакции захвата нейтронов: $^{74}\text{Ge}(n,\gamma)^{75}\text{Ge}$ и $^{76}\text{Ge}(n,\gamma)^{77}\text{Ge}$

Уровень фона: ~ 0.17 соб./((кг·год·кэВ)

$\Delta E(2615\text{кэВ}) = 0.1\%$ - энергетическое разрешение



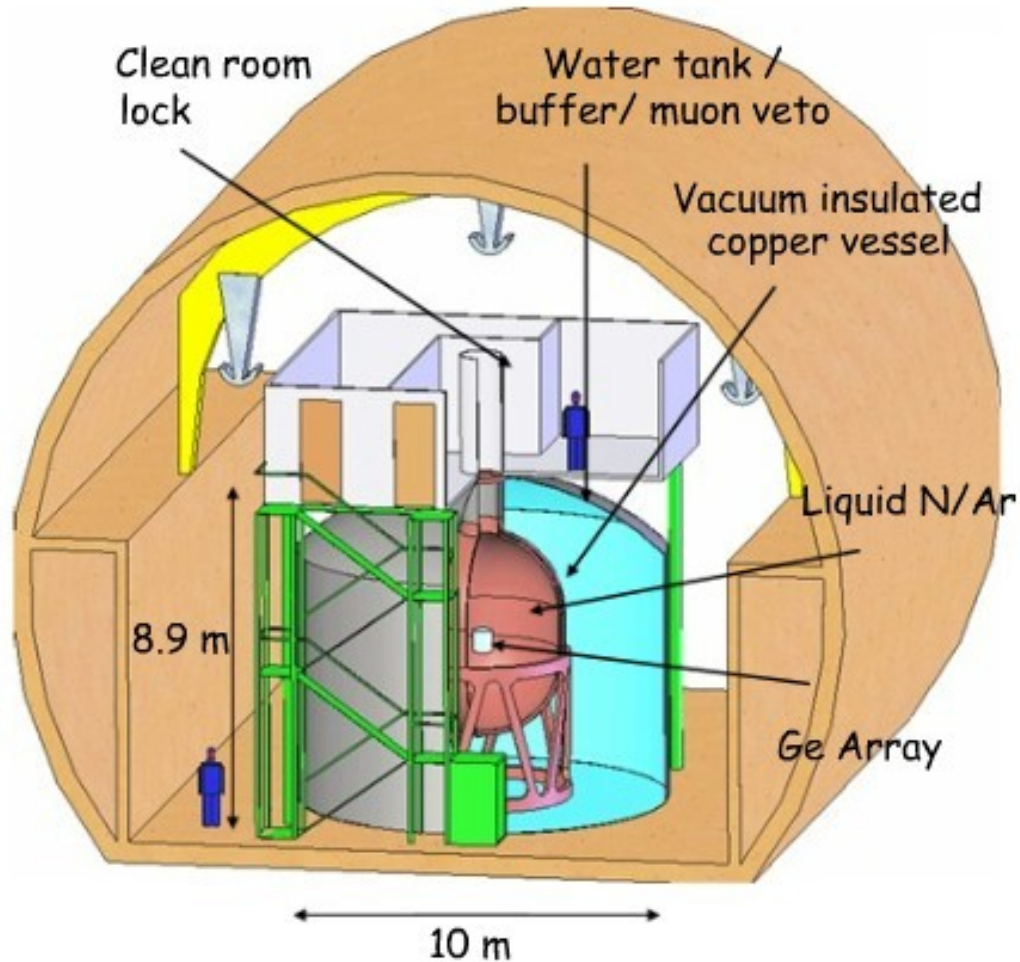
Итоги

- Энергия: $Q_{\beta\beta} = 2038.07 \pm 0.44$ кэВ
- Количество событий: 28.75 ± 6.86
- $T_{1/2} = (0.69 \div 4.18) \cdot 10^{25}$ лет
- $m_\nu = 0.24 \div 0.58$ эВ

Критика:

- Набранная статистика, возможно, не является результатом пуассоновского процесса событий
- В определенные периоды сбора данных были замечены некоторые косяки в работе электроники

Эксперимент GEDRA



- Лаборатория Гран-Сассо (1400м под землёй)
- 8 кристаллов высокочистого германия (86% ^{76}Ge)
- ↓
- Криостат из стали наполненный жидким аргоном с температурой 87 Келвин
- ↓
- Бак с водой, который служит черенковским детектором и щитом (защита от μ , n , γ)

Источники фона

- Космические мюоны
- Внешние γ -кванты от ^{208}Tl (^{232}Th) [$<1 \cdot 10^{-3}$ соб./ (кэВ·кг·год)]
- ^{60}Co (β^- , $T_{1/2} = 5.3$ лет, $E_{\text{max}} = 2824$ кэВ) в кристаллах
- ^{222}Rn в жидком аргоне [$<0.2 \cdot 10^{-3}$ соб./ (кэВ·кг·год)]
- Внешние нейтроны [$<0.05 \cdot 10^{-3}$ соб./ (кэВ·кг·год)]
- $^{42}\text{Ar} \rightarrow ^{42}\text{K}$ (β^- , $T_{1/2} = 12.36$ часов, $E_{\text{max}} = 3525$ кэВ)

Этапы GEDRA 1 и GEDRA 2

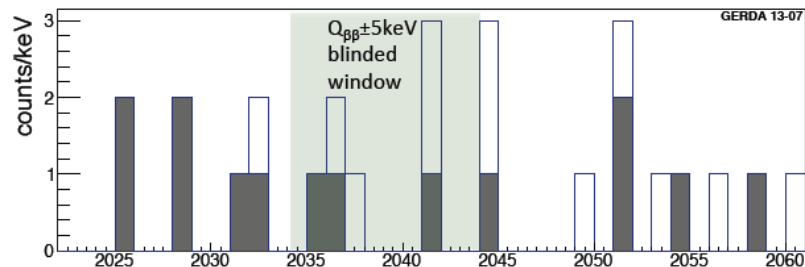
Первый этап:

- 17.9 кг Ge
- Уровень фона ~ 0.01 соб./ (кэВ·кг·год)
- $T_{1/2} > 2.1 \cdot 10^{25}$ лет (2011г. - 2013г.)

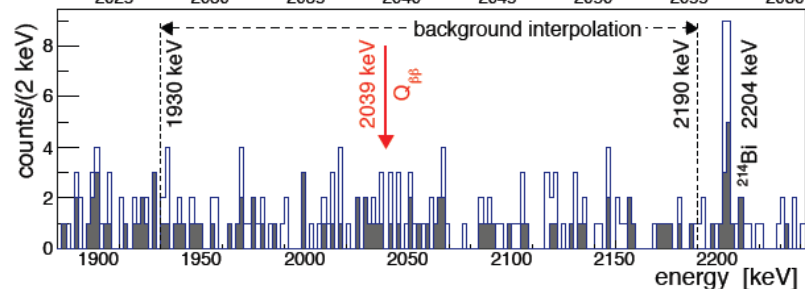
Второй этап:

- 37.5 кг Ge
- Уровень фона - $0.6 \cdot 10^{-3}$ соб./ (кэВ·кг·год)
- $T_{1/2} > 0.9 \cdot 10^{26}$ лет (2018г.)
- Чувствительность к $m_\nu < 0.12$ эВ

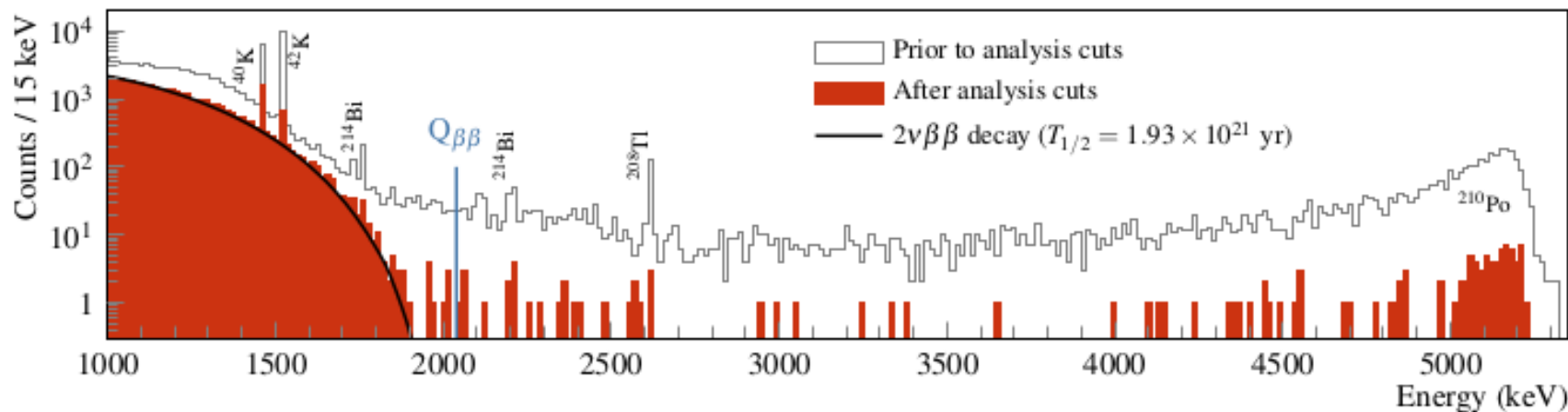
Результаты



PSD — Pulse Shape Discrimination

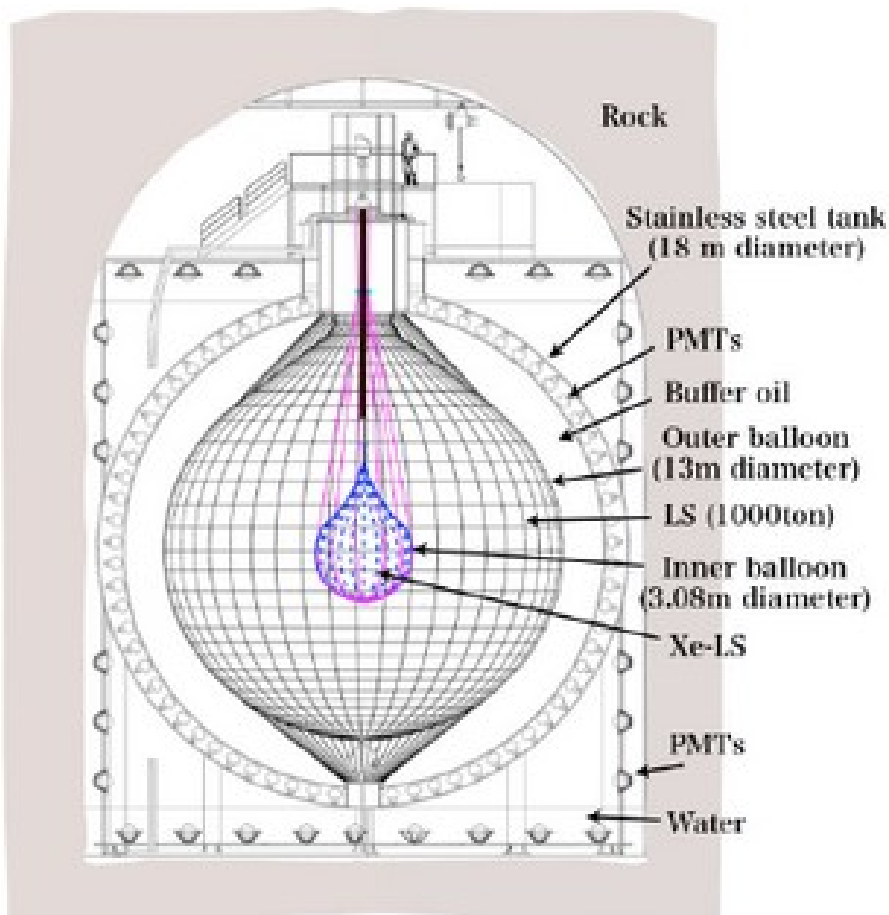


GEDRA-1

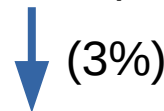


GEDRA-2

Эксперимент KamLAND-Zen



- Обогащенный до 90% ^{136}Xe
($Q_{\beta\beta} = 2458$ кэВ)



- 13 тонн жидкого сцинтиллятора
(додекан + PC + PPO)



- Прозрачный нейлоновый баллон
(толщина 25 мкм, диаметр 3.08 м)

Начался сбор данных с 750 кг ^{136}Xe (2019г.)

Не мешает набору данных по реакторным,
солнечным и гео-нейтрино

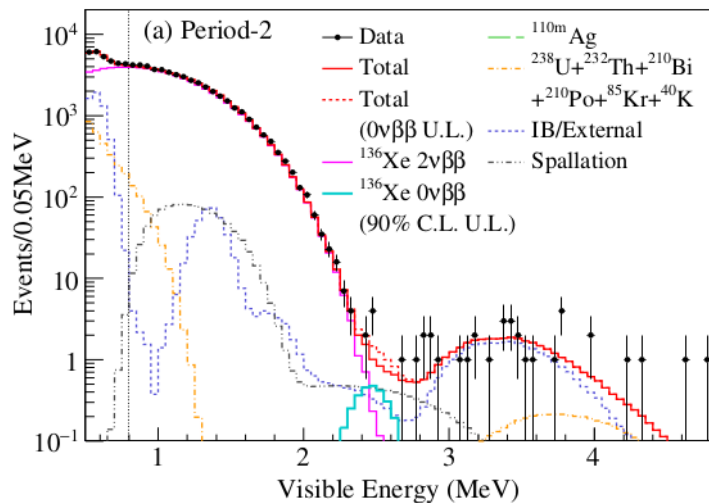
Фоны

	Period-1 (270.7 days)		Period-2 (263.8 days)	
Observed events	22		11	
Background	Estimated	Best-fit	Estimated	Best-fit
$^{136}\text{Xe } 2\nu\beta\beta$	-	5.48	-	5.29
Residual radioactivity in Xe-LS				
$^{214}\text{Bi } (^{238}\text{U series})$	0.23 ± 0.04	0.25	0.028 ± 0.005	0.03
$^{208}\text{Tl } (^{232}\text{Th series})$	-	0.001	-	0.001
^{110m}Ag	-	8.5	-	0.0
External (Radioactivity in IB)				
$^{214}\text{Bi } (^{238}\text{U series})$	-	2.56	-	2.45
$^{208}\text{Tl } (^{232}\text{Th series})$	-	0.02	-	0.03
^{110m}Ag	-	0.003	-	0.002
Spallation products				
^{10}C	2.7 ± 0.7	3.3	2.6 ± 0.7	2.8
^6He	0.07 ± 0.18	0.08	0.07 ± 0.18	0.08
^{12}B	0.15 ± 0.04	0.16	0.14 ± 0.04	0.15
^{137}Xe	0.5 ± 0.2	0.5	0.5 ± 0.2	0.4

Сводка количества наблюдаемых событий, а также фоновых вкладов в области энергий $2.3 < E < 2.7$ МэВ (окно $0\nu\beta\beta$) в сферическом объеме радиусом 1 м для каждого из двух периодов времени.

- $^{110m}\text{Ag } (\beta^-, E_{\max} = 3.01 \text{ МэВ}, \tau = 360 \text{ сут.})$
- $^{136}\text{Xe} + n \rightarrow ^{137}\text{Xe } (\beta^-, E_{\max} = 4.17 \text{ МэВ}, \tau = 5.5 \text{ мин}) + \gamma$

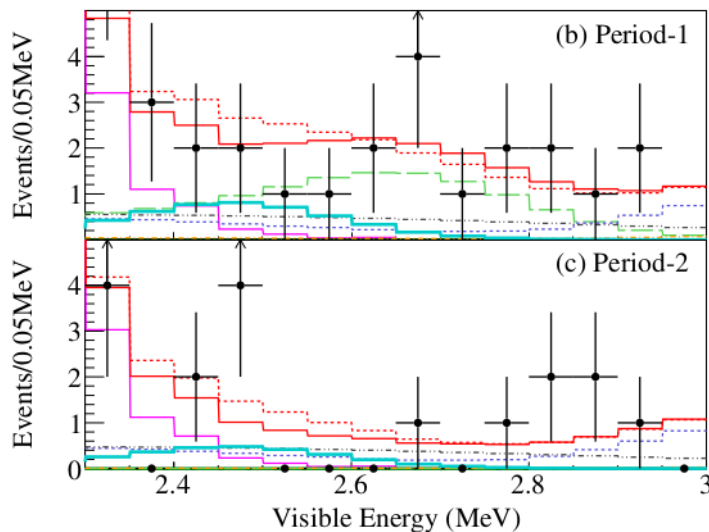
Результаты



(a) Энергетический спектр $\beta\beta$ -кандидатов в сферическом объеме радиусом 1 м. в Период-2, вместе с фонами, спектром распада $2\nu\beta\beta$ и 90% У.Д. верхним пределом распада $0\nu\beta\beta$.

Энергетическое разрешение:

$$\sigma \sim 7.3\% / \sqrt{E(\text{MeV})}$$



(b), (c) Энергетические спектры крупным планом для $2,3 < E < 3,0$ МэВ в Период-1 и Период-2 соответственно.

$$T_{1/2} > 1.07 \times 10^{26} \text{ лет (90\% У.Д.)}$$

2016 г.

Спасибо за внимание