Интенсивный литиевый антинейтринный источник и взрывной нуклеосинтез в нейтронных потоках

Ляшук В.И., ИЯИ РАН, Москва 15 февраля 2018 г.

<u>ЧАСТЬ 1.</u>

Интенсивный литиевый антинейтринный источник





Бланкет в схеме $\text{Li}-\text{D}_2\text{O}$ более компактен в сравнении со схемой $\text{D}_2\text{O}-\text{Li}$ и требует меньшей массы чистого ⁷] В расчетах слой бланкета L_{B} увеличивался до 170 cm and L_{w} – до 30 cm. R_{AZ} = 23 см (как для реактора ПИК); при делении ~один нейтрон с делительным спектром покидал активную зону. Слой D_2O действует как активный замедлитель в $\text{D}_2\text{O}-\text{Li}$ -схеме и как отражатель - в $\text{Li}-\text{D}_2\text{O}$ -схеме. (Yu.S. Lyutostansky, V.I. Lyashuk // Nucl. Sci. and Eng. 1994,v117, p.77-87)

В ИАЭ ранее рассматривалась перспективная идея установки литиевых блоков в импульсный реактор РИНГ: Воробьев Е.Д. и др. Импульсный реактор РИНГ. Препринт ИАЭ, 2384, 1974

ЗАВИСИМОСТЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛИТИЕВОГО БЛАНКЕТА <u>*k* от ЧИСТОТЫ ⁷Li</u>













Схема антинейтринного источника с регулируемым (изменяемым) спектром: обеспечена принудительная циркуляция литий-содержащего вещество бланкета (активируемое нейтронами активной зоны реактора) в замкнутой петле. Вещество с образовавшимся в бланкете 8Li переносится к удаленному накопительному объему (к нейтринному детектору) и далее в непрерывном цикле в литиевый бланкет для последующей циклической активации 7Li(n,γ)Li8. Быстроту циркуляции возможно изменить оперативно без остановки эксперимента, что обеспечит изменение жесткости суммарного нейтринного спектра в детекторе.



ОБОЩЕННАЯ ЖЕСТКОСТЬ СУММАРНОГО \tilde{v}_e -СПЕКТРА

Пусть в точке \vec{r} плотности потоков литиевых антинейтрино и от активной зоны равны $F_{\rm Li}(\vec{r})$ и $F_{\rm AZ}(\vec{r})$.

Принято, что жесткость результирующего $\stackrel{\geq}{\sim} \qquad E_{\tilde{v}_e},$ нейтринного спектра равна <u>единице жесткости</u>, если выполнено отношение $\stackrel{\leftarrow}{-}_{\text{Li}}(\vec{r}) = \frac{1}{\overline{n}_{v}}$ где $\overline{n}_{v} = 6.14$ - число антинейтрино от активной зоны на деление.

Обобщенная жесткость определяется как:

Определение "работает" как для схемы с управляемым антинейтринным спектром, так и для схем с неуправляемым спектром (и численно совпадает с эффективностью литиевого бланкета.



 $H(\vec{r}) = \overline{n_v} \times \frac{T_{\text{Li}}(r)}{E(\vec{r})}$

Lutostansky Yu.S., Lyashuk V.I. // Phys.Atom.Nucl. 2000,v63, p1288; Lyashuk V. I. arXiv: 1609.02934; Lyashuk V. I. // Results in Physics. 2017. V.7. p.1212.

ЗАВИСИМОСТЬ СЕЧЕНИЯ $(\overline{\nu}_e, p)$ — РЕАКЦИИ ОТ ЖЕСТКОСТИ H суммарного антинейтринного спектра



ЗАВИСИМОСТЬ ОШИБОК СЧЕТА В СУММАРНОМ \tilde{v}_e - СПЕКТРЕ (обусловленных ошибками спектра активной зоны) ОТ ЖЕСТКОСТИ *H* СПЕКТРА. "Bump" в реакторном спектре



СЕЧЕНИЕ $(\overline{\nu}_e, d)$ – РЕАКЦИИ КАК ФУНКЦИЯ ЖЕСТКОСТИ HСУММАРНОГО АНТИНЕЙТРИННОГО СПЕКТРА

 $(\tilde{v}_{a}, d \rightarrow n+p+\tilde{v}_{e})$ - neutral (n,p)-channel $(\tilde{v}_{e}, d \rightarrow n+n+e^{+})$ -charged (n,n)-channel $H(\vec{r}) = \overline{n}_{v} \times \frac{F_{\text{Li}}(\vec{r})}{F_{\text{AZ}}(\vec{r})}$ 100 $N_{\tilde{v}_e} = N_{\rm AZ} + H(\vec{r}) \frac{N_{\rm AZ}}{\overline{\pi}},$ cm² / fission) 80 $F_{\bar{v}_e}(\vec{r}) = F_{AZ}(\vec{r}) + H(\vec{r}) \times \frac{F_{AZ}(\vec{r})}{\overline{n}},$ 60 $\sigma_{np}(\vec{r}) = \sigma_{np}^{AZ} + H(\vec{r}) \times \sigma_{np}^{Li}, \quad \rightarrow (n,p) - channel, \overset{\texttt{4}}{\downarrow}$ 40 $\sigma_{nn}(\vec{r}) = \sigma_{nn}^{AZ} + H(\vec{r}) \times \sigma_{nn}^{Li}, \quad \rightarrow (n,n) - channel$ 20 с ростом *H* вклад \tilde{v}_e от 8Li в σ_{np} и σ_{nn} - сечения сильно доминирует над вкладом реакторных \mathcal{V}_e .





ЦИЛИНДРИЧЕСКАЯ ГЕОМЕТРИЯ ИСТОЧНИКА (БЛАНКЕТ, МИШЕНЬ, ТЯЖЕЛОВОДНЫЙ КАНАЛ)

<u>ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЛИТИЕВОГО</u> <u>АНТИНЕЙТРИНННОГО</u> <u>ИСТОЧНИКА В СХЕМЕ</u> <u>ТАНДЕМА С УСКОРИТЕЛЕМ И</u> <u>W, Pb и Bi -МИШЕНЯМИ</u>



(Lyashuk V. I. and Lutostansky Yu. S. arXiv:1503.01280v2)

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫХОДА 8Li В ОБЪЕМЕ БЛАНКЕТА,



-200

-100

100

См

10 200

Lyashuk V.I. Result in Physics, 2016.6. 961; Lyashuk V.I. arXiv:1609.02127 [physics.ins-det]. 2016.

1. Возможный осцилляционный эксперимент на детекторе типа JUNO по поиску стерильных нейтрино



<u>2. Возможный осцилляционный эксперимент на детекторе типа</u> JUNO по поиску стерильных нейтрино

Для Li источника в схеме тандеме с ускорителем проведено моделирование чувствительности (для детектора типа JUNO) Δm^2_{41} от величины $Sin^2(2\theta)$ по схеме (3+1). Учтены: литиевый \tilde{v}_e -спектр, объемное распределение ⁸Li, принято, что 🖧 порог регистрации (\tilde{v}_e, p) равен 3 МэВ. ~ 3 Длительность эксперимента полагалась - 5 🗟 лет при эфф. использовании времени на 83% и эфф. регистрации в детекторе - 0.9. Энергия протонов - 200 МэВ, ток - 1 мА. Итоговая чувствительность представлена на доверительном. уровне 95%.

IsoDAR: Bungau A., et al., Phys. Rev. Lett. 109, 141802 (2012).
PBq (ten kilocurie scale) – 144Ce or 106Ru: M. Cribier, ...V. Kornoukhov, and S. Schönert, Phys. Rev. Lett. 107, 201801 (2011).

J. Kopp, M. Maltoni, and T. Schwetz, Phys. Rev. Lett. **107**, 091801 (2011).



Ожидаемая чувствительность предложений: Lithium blanket через 5 лет и разрешенные области из экспериментов (для PBq эксперимента - через 1 г)

(Ляшук В. И; Лютостанский Ю. С. // Письма в ЖЭТФ, 2016, т103, с.331)

2. ВЫХОД 8Li В ЯЧЕЙКАХ БЛАНКЕТА (на протон) ПРИ ЭНЕРГИИ ПРОТОНОВ 200 МэВ



СХЕМА ЛИТИЕВОГО БЛАНКЕТА, ОКРУЖЕННОГО УГЛЕРОДНЫМ СЛОЕМ



Lyashuk V. I. // Results in Physics. V.6, 2016, p. 961; Lyashuk V.I. arXiv:1609.02127 [physics.ins-det]. 2016 <u>Сечение литиевого</u> <u>бланкета:</u> n1 – мишень,

- n2 ввод пучка протонов,
- n3 D2O -охладитель,
- n4 литиевый бланкет,
- n5 углеродный слой толщиной *L*,
- n6 вода (D2O или H2O).

Предложенная схема позволяет уменьшить массу 7Li в 8.9 раз (до 120-130 кг) в сравнении с исходной, а длину источника сократить в 2.5 раза (до 1.36 м). ВЫХОД 8Li и УТЕЧКИ НЕЙТРОНОВ от ТОЛЩИНЫ БЛАНКЕТА *L* (при чистоте D – 99.9% и 99.9%; при <u>замене внешнего слоя D₂O на H₂O</u>)



Часть 2.

Образование трансуранов в экстремальных нейтронных потоках при взрывном нуклеосинтезе

Part 2

Creation of transuraniums under extremal neutron fluxes of explosive nucleosynthesis

Экспериментальное исследование образования трансурановых элементов в интенсивных нейтронных потоках

Впервые трансурановые элементы были обнаружены в продуктах термоядерного взрыва "**Mike**" в 1952 г с мишенью ²³⁸U. Ядерные и термоядерные взрывы обеспечивают большой поток нейтронов (10²⁴ – 10²⁵ нейтронов/см²) при кратковременной экспозиции (~ <10⁻⁶ с – для реакций захвата) и тем самым являются уникальным инструментом для исследований в ядерной физике.

Для сравнения:

максимальный поток, достигнутый на реакторе **HFIR** – $5.5 * 10^{15}$ нейтронов/с; в ловушке **ПИК** – (по проекту) – $4 \cdot 10^{15}$ нейтр./(см²с), за 1 год работы - $1.2 \cdot 10^{23}$ нейтр./см²;

в ловушке **СМ-2** – $5 \cdot 10^{15}$ нейтр./(см²с);

ИГР – макс. интегр. поток – 1·10¹⁸ нейтр./см²; **ЯГУАР** (импульс. растворный) – 2.5·10¹⁸ нейтр./(см²с)

в импульсе в выводящем канале.

В экспериментах "Цикламен" и "Хач" на мишенях достигнуты интегральные потоки **1.2·10²⁵ нейтр./см²** и **4.5·10²⁵ нейтр./см²**, соответственно.

Программа "Плаушер" США) включала также исследование образования трансурановых элементов в интенсивных нейтронных потоках



r – процесс (rapid) в условиях взрывного нуклеоситеза (интервал нуклеосинтеза t ≤ 10⁻⁶ c)



23

Схема образования трансурановых элементов

$$\frac{\partial N_{z}^{n}}{\partial t} = (\lambda_{\beta}N)_{z-1}^{n+1} + (\lambda_{\alpha}N)_{z+2}^{n+2} + \\
+ \int_{0}^{\infty} F(E,t) \left\{ \left[\sigma_{n,\gamma}N \right]_{z}^{n-1} + \left[\sigma_{n,2n}N \right]_{z}^{n+1} + \left[\sigma_{n,3n}N \right]_{z}^{n+2} \right\} dE - \\
- (\lambda_{\beta}N)_{z}^{n} - (\lambda_{\alpha}N)_{z}^{n} - (\lambda_{f}N)_{z}^{n} - \\
- \int_{0}^{\infty} F(E,t) \left\{ \left[\sigma_{n,\gamma}N \right]_{z}^{n} + \left[\sigma_{n,2n}N \right]_{z}^{n} + \left[\sigma_{n,3n}N \right]_{z}^{n} + \left[\sigma_{n,f}N \right]_{z}^{n} \right\} dE,$$
(1)

где *z* и *n* - заряд и число нейтронов ядра, на котором идет данная реакция; λ_{β} , λ_{α} и λ_{f} - скорости β –, α –распадов и спонтанного деления;

<u>Упрощение схемы для расчетов:</u>

скорости распадов λ_{β} , λ_{α} и λ_{f} много меньше скорости захвата $\lambda_{n,\gamma}$, что позволяет пренебречь вкладами β –, α –распадов и спонтанного деления. Можно пренебречь реакциями (*n*, *f*), (*n*,2*n*), (*n*,3*n*) с учетом температуры процесса и с учетом порогового характера реакций.

Упрощение схемы для расчетов	
Т.к. функция нейтронного источника $F(E,t)$ в данных экспериментах неизвестна, то целесообразно провести свертку по времени и энергии (Δt - время экспозиции):	$\iint_{0} \sum_{E} F(E,t) dE dt = \Delta t \int_{E} \widetilde{F}(E) dE = \Phi , (2)$
В расчетах используется интегральный по времени поток нейтронов <i>Ф[neutron / cm²]</i> с фиксированной энергией в интервале ≈20+30 кэВ (т.е. одногрупповое представление) в соответствии с температурой процесса.	
В данной статической модели система уравнений образования трансурановых элементов (порождаемая уравнениями (1)) становится одногрупповой и принимает вид: (Т.е. данный этап моделирования сводится к расчету реакций многократных захвата нейтронов).	$\begin{cases} \frac{\partial N_{z}^{n}}{\partial t} = -(\lambda_{n,\gamma}N)_{z}^{n} \\ \frac{\partial N_{z}^{n+1}}{\partial t} = (\lambda_{n,\gamma}N)_{z}^{n} - (\lambda_{n,\gamma}N)_{z}^{n+1} \\ \vdots \\ \vdots \\ \frac{\partial N_{z}^{n+i}}{\partial t} = (\lambda_{n,\gamma}N)_{z}^{n-1+i} - (\lambda_{n,\gamma}N)_{z}^{n+i} \end{cases} $ (3)

Yu.S. Lutostansky, V. I. Lyashuk, and I. V. Panov. Calculation of Transuranium Element Synthesis in Intensive Neutron Fluxes under Adiabatic Conditions//Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2010, V.74, No.4, p.504–508. 25

Решение в одногрупповом приближении

Решение для *i*-го изотопа при одном стартовом изотопе (z, n):

$$N_{z}^{n+i} = \lambda_{n,\gamma}^{n} \lambda_{n,\gamma}^{n+1} \dots \lambda_{n,\gamma}^{n+i-1} N_{z}^{n}(0) \sum_{k=n}^{n+i} \frac{\exp(-\lambda_{n,\gamma}^{k}t)}{\prod_{j \neq k} (\lambda_{n,\gamma}^{j} - \lambda_{n,\gamma}^{k})}, \quad (4)$$

$$\frac{\sum_{k=n}^{n+i} \sum_{j \neq k} (\lambda_{n,\gamma}^{j} - \lambda_{n,\gamma}^{k})}{\prod_{j \neq k} (\lambda_{n,\gamma}^{j} - \lambda_{n,\gamma}^{k})}, \quad (4)$$

$$\frac{\sum_{k=n}^{n+i} \sum_{j \neq k} (\lambda_{n,\gamma}^{j} - \lambda_{n,\gamma}^{k})}{\prod_{j \neq k} (\lambda_{n,\gamma}^{j} - \lambda_{n,\gamma}^{k})}, \quad (4)$$

$$\frac{\sum_{j \neq k} \sum_{j \neq k} (\lambda_{n,\gamma}^{j} - \lambda_{n,\gamma}^{j})}{\prod_{j \neq k} (\lambda_{n,\gamma}^{j} - \lambda_{n,\gamma}^{j})}, \quad (4)$$

$$\frac{\sum_{j \neq k} \sum_{j \neq k} (\lambda_{n,\gamma}^{j} - \lambda_{n,\gamma}^{j})}{\prod_{j \neq k} \sum_{j \neq k} \sum_{j$$

26

Эксперимент "Par" (мишень - U238). Нечетно-четный эффект в выходах трансуранов во взрывном нуклеосинтезе.



<u>Эксперимент:</u> при *A* > 250 меняется закономерность в выходах А-четных и А-нечетных ИЗОТОПОВ, т.е., наблюдается нечетно-четный эффект. (Выходы нормированы на выход при *А*=245) В расчетах такая

аномалия не воспроизводится.

Адиабатическое приближение (1)

Расчет образования трансурановых изотопов "в динамике" требует учета изменения сечения (n, γ) -реакции с падением температуры *T* среды при ее адиабатическом расширении.

Функциональную зависимость падения температуры рассматриваемой области (включающей массу мишени из стартового изотопа ²³⁸U) при адиабатическом расширении возможно:

1) задав интервал $T_1 \div T_2$ падения средней энергии поглощаемых нейтронов (т.е. одногрупповое представление энергии нейтронов) при охлаждении вещества вследствие адиабатического расширения во временном промежутке $t_A \div t_B$; **2**) полагая, что линейная скорость разлета вещества = *const* при $t \in [t_A, t_B]$ и **3)** задав показатель адиабаты γ при адиабатическом расширении объема V:

$$T = \left(\frac{const}{V}\right)^{\gamma-1}$$

Полагалось, что многократные захваты идут до момента времени *t*=10-6 с ; область с делящимся веществом имеет радиус $R_0 = 5 \ cm$; показатель адиабаты $\gamma \le 1.5 \div 1.6$.

Алгоритм решения задачи о выходах трансурановых изотопов сводится к разбиению временного промежутка многократных захватов $[t_A, t_B]$ на *m* интервалов и последовательному решению уравнений нуклеосинтеза (3) для каждого временного шага $\Delta t_1, \Delta t_2, \ldots, \Delta t_m$.

Yu.S. Lutostansky, V. I. Lyashuk, and I. V. Panov. Calculation of Transuranium Element Synthesis in Intensive Neutron Fluxes under Adiabatic Conditions//Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2010, V.74, No.4, p.504–508. 28

Адиабатическое приближение (2)

Система уравнений (3) для интервала $\Delta t = [t_1, t_2]$ при $t_1 > t_A$ и $t_2 \le t_B$ имеет следующее решение:

$$\begin{split} N_{z}^{n}(t_{2}) &= N_{z}^{n}(t_{1}) \exp(-\lambda^{n} \Delta t) \\ N_{z}^{n+1}(t_{2}) &= \lambda^{n} N_{z}^{n}(t_{1}) \left(\frac{\exp(-\lambda^{n} \Delta t)}{\lambda^{n+1} - \lambda^{n}} + \frac{\exp(-\lambda^{n+1} \Delta t)}{\lambda^{n} - \lambda^{n+1}} \right) + \\ N_{z}^{n+1}(t_{1}) \exp(-\lambda^{n+1} \Delta t) \\ N_{z}^{n+2}(t_{2}) &= \lambda^{n} \lambda^{n+1} N_{z}^{n}(t_{1}) \left[\frac{\exp(-\lambda^{n} \Delta t)}{(\lambda^{n+1} - \lambda^{n})(\lambda^{n+2} - \lambda^{n})} + \frac{\exp(-\lambda^{n+1} \Delta t)}{(\lambda^{n} - \lambda^{n+1})(\lambda^{n+2} - \lambda^{n+1})} + \right. \\ &\left. \frac{\exp(-\lambda^{n+2} \Delta t)}{(\lambda^{n} - \lambda^{n+2})(\lambda^{n+1} - \lambda^{n+2})} \right] + \lambda^{n+1} N_{z}^{n+1}(t_{1}) \left[\frac{\exp(-\lambda^{n+1} \Delta t)}{\lambda^{n+2} - \lambda^{n+1}} + \frac{\exp(-\lambda^{n+2} \Delta t)}{\lambda^{n+1} - \lambda^{n+2}} \right] + \\ &\left. N_{z}^{n+2}(t_{1}) \exp(-\lambda^{n+2} \Delta t) \right. \\ & \cdot \\ & \cdot \\ &\left. N_{z}^{n+i}(t_{2}) &= \lambda^{n} \lambda^{n+i-1} N_{z}^{n}(t_{1}) \right]_{k=n}^{n+i} \frac{\exp(-\lambda^{n+i-1} \Delta t)}{\prod_{j \neq k} (\lambda^{j} - \lambda^{n+i-1})} + \frac{\exp(-\lambda^{n+i} \Delta t)}{\lambda^{n+i-1} - \lambda^{n+i}} \right] + \end{split}$$

 $N_{z}^{n+i}(t_{1})\exp(-\lambda^{n+i}\Delta t)$,

(8)

Расчет выходов изотопов в эксперименте "Par"с учетом адиабатики



Схема решения. Включение медленной компоненты.

Наличие в экспериментальном устройстве водородсодержащих веществ ведет к быстрому замедлению нейтронов. В потоке нейтронов, облучающих мишень из стартового изотопа, значительную часть составит мягкая компонента. Оценки спектра утечки нейтронов из экспериментального устройства для различных моментов времени в интервале $t = 0 \div 3, 6 \cdot 10^{-7}$ с проведены в работе: Sandmeir H.A., Dupree S.A., Hansen G.E., Nucl.Sci. Eng. 1972, V.48, p.142. В конце данного интервала выход нейтронов с энергией (3-26) кэВ составлял > ~ 0.3 в общем потоке.

В модели нуклеосинтеза полагается, что суммарный нейтронный поток в мишени (стартовый изотоп) состоит из двух потоков *F_{sl}* и *F_{fa}*, (грубая модель).

V. I. Lyashuk. Simulating Transuranium Isotope Yields upon Explosive Nucleosynthesis with Allowance for Elements of Process Dynamics // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics, 2012, Vol. 76, No. 11, pp. 1182–1186.

Выход изотопов в адиабатическом приближении. Учет медленной компоненты

Ввведем определение "ступенчатой" функции:

$$\delta(m,l) = \begin{cases} 1, & \text{если } m \ge (l-1) \\ 0, & \text{если } m < (l-1) \end{cases}$$

где *m*- натуральные числа и ноль, *l* – натуральные числа.

Выражение для $N_z^{n+i}(t_2)$ можно записать в виде:

$$N_{z}^{n+i}(t_{2}) = \sum_{l=1}^{i} \left[\left(\lambda^{n} \right)^{\delta(0,l)} \left(\lambda^{n+1} \right)^{\delta(1,l)} \cdots \left(\lambda^{n+m} \right)^{\delta(m,l)} \cdots \left(\lambda^{n+i-1} \right)^{\delta(i-1,l)} N_{z}^{n+l-1}(t_{1}) \cdot \left(\lambda^{n+i} \right)^{\delta(i-1,l)} \right] + N_{z}^{n+i}(t_{1}) \exp(-\lambda^{n+i} \Delta t) , \qquad (10)$$

где $\delta = \delta(0, l), \delta = \delta(1, l), \dots, \delta = \delta(i-1, l)$ являются показателями степени для $\lambda^{n}, \lambda^{n+1}, \dots, \lambda^{n+i-1}$, соответственно; $m = 0 \div (i - 1)$.

(9)

Модель с медленной компонентой нейтронного потока. Расчеты выходов изотопов в эксперименте "Par"





V. I. Lyashuk. // Bull.of Rus.Ac.of Sci. Phys, 2012, Vol. 76, No. 11, pp. 1182–1186.



Yu. S. Lutostansky, V. I. Lyashuk, and I. V. Panov. Production of Transuranium Elements in a Binary Model under Conditions of Pulse Nucleosynthesis // Bull.of Russ.Ac.Sci. Phys., 2011, V.75, No.4, pp.533–537.



ВЫВОДЫ (Основные результаты). [стр.1].

1. Детально разработаны и сформулированы основные принципы, исполнение которых необходимо для реализации интенсивного антинейтринного источника на основе литиевого бланкета, включая выбор эффективных материалов, ограничение по концентрации примесных изотопов, компановка источника в схеме типа "слойки".

- Проведены детальные расчеты зависимости выходов ⁸Li от ключевых параметров компановки и концентраций. Разработаны варианты литиевого \tilde{v}_e источника с неуправляемым спектром на основе нейтронных источников с делительным и термоядерными спектром (с комбинированным литий-борным бланкетом). 2. Впервые для короткобазовых нейтринных экспериментов предложен источник с управляемым \tilde{v}_e -спектром в схеме с принудительной циркуляцией активируемого литий-содержащего вещества в замкнутой петле. Уникальность схемы обеспечивает плавное управление спектром без остановки эксперимента.

- Введено определение обобщенной жесткости Н результирующего спектра и получены зависимости \tilde{v}_{e} -сечений на дейтроне и протоне от величины обобщенной жесткости Н при разных порогах регистрации.

-Получены аналитическое зависимости для расчетов потоков литиевых антинейтрино и обобщенной жесткости в схеме с управляемым спектром. 3. Впервые показана и подтверждена расчетами возможность принципиального снижения ошибок регистрации (в два раза и более), обусловленных неопределенностями реакторного \tilde{v}_e -спектра.

ВЫВОДЫ (Основные результаты). [стр.2].

<u>3.</u> (продолжение) Получены функциональные зависимости спектральных ошибок от жесткости результирующего \tilde{v}_e -спектра при различных порогах регистрации.

-Продемонстрировано, что работа на управляемом антинейтринном спектре в установке с принудительной циркуляцией литий-содержащего вещества через бланкет вблизи активной зоны позволяет создать высокоинтенсивный \tilde{v}_e - источник в МэВ-ом диапазоне с хорошо определенным спектром для короткобазового осцилляционного эксперимента, используя реактор как интенсивный источник нейтронов.

<u>4.</u> Сформулирована и решена задача уменьшения размеров бланкета при максимизации эффективности бланкета на основе дейтерированных литиевых материалов.

-Проведены детальные расчеты эффективности в бланкетах различного литиевого состава с высоким замещением ¹Н на ²Н для выбора литиевых соединений, обеспечивающих максимальное возрастание выходов ⁸Li. -Полученные функциональные зависимости эффективности дейтерированных материалов и анализ замедляющих свойств позволили (в сравнении с чисто литиевым бланкетом): 1) повысить выход 8Li более, чем в 5 раз при сохранении компактных размеров источника (толщина слоя бланкета $L_B \le \approx 70$ см); 2) резко снизить необходимую массу высокочистого изотопа 7Li (с примесью сильного поглотителя 6Li - менее 0.0002) в десятки и более раз.

ВЫВОДЫ (Основные результаты). [стр.3].

5. Детально разработан и рассчитан нейтринный источник, обеспечивающий чисто литиевый спектр и "запускаемый" в схеме тандема с ускорителем и мишенью. Исследованы характеристики источника на основе тяжеловодного раствора гидроксида лития при работе на различных тяжелых мишенях (W, Pb, Bi) для пучка протонов в интервале энергий *E*n = 50 - 300 МэВ. Для вариантов источника рассчитаны потоки.

-На основе источника в схеме тандема рассмотрена возможная постановка эксперимента по поиску стерильных нейтрино на детекторе JUNO. Получено, что за пять лет проведения эксперимента можно достигнуть чувствительности $Sin^2(2\theta) \le \sim 0.001$ для $\Delta m^2 > 0.2$ eV² на доверительном уровне 95%.

- Впервые предложена эффективная схема компактного литиевого источника на ускорителе с использованием углеродных отражателей и поглощающего слоя легкой воды. Схема позволяет сократить необходимую массу изотопа 7Li до 120-130 кг и уменьшить линейные размеры в 2.5 раза (до 1.3-1.4 м), что важно для короткобазового осцилляционного эксперимента.

ВЫВОДЫ (Основные результаты). [стр.4].

<u>6.</u> Предложена адиабатическая модель образования трансурановых изотопов в условиях взрывного нуклеосинтеза с учетом динамики импульсного процесса. Модельные расчеты продемонстрировали, что учет температурной зависимости сечения нейтронных захватов приводит к улучшению согласия с экспериментальными данными и "работает" в направлении обращения нечетно-четного эффекта, наблюдаемого в выходах трансуранов при массовом числе *A* >250.

7. Предложена двух групповая динамическая модель выхода трансуранов во взрывном нуклеосинтезе с введением медленной компоненты потока. Проведенное моделирование показало, что учет медленной составляющей нейтронного флюенса корректирует выходы трансуранов и однозначно улучшает согласие с экспериментом для изотопов в проблемной области - при *A* > 250, где зарегистрирован эффект инверсных выходов изотопов.
 8. Предложена бинарная динамическая модель для сложного стартового состава, что обеспечило: значительное улучшение согласия расчетов с экспериментом для уран-плутониевой мишени с коррекцией выходов на распады и возможность исследования влияния затравочных добавок на выход трансурановых изотопов.

Благодарю Диссертационный Совет за Внимание ! Большое Всем Спасибо !

1. Лухминский Б.Е., Лютостанский Ю.С., Ляшук В.И., Панов И.В. Программа МАМОНТ для расчета нейтронных полей методом Монте-Карло // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 1989. Вып.2. с.23-25. 2. Лухминский Б.Е., Лютостанский Ю.С., Ляшук В.И., Панов И.В. Модель переноса нейтронов для стандартного вычислительного эксперимента // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы, 1989, вып. 2, стр. 118. 3. Лютостанский Ю.С., Ляшук В.И. Моделирование переноса нейтронов в литиевом бланкете с термоядерным источником // Атомная энергия. 1990. т.68, вып.2. с.135-137.

4. Лютостанский Ю.С., Ляшук В.И. Конвертор реакторных нейтронов в антинейтрино на основе литиевых соединений и их растворов // Атомная энергия, 1990. т.69, вып.2, с.120-122.

5. Лютостанский Ю.С., Ляшук В.И. Панов И.В. Влияние эффекта запаздывающего деления на образование трансурановых элементов // Известия АН СССР. сер.физическая. 1990. Т.54. № 11. с.2137-2141.

6. Lyutostansky Yu.S., Lyashuk V.I. Powerful hard-spectrum neutrino source based on lithium converter of reactor neutrino to antineutrino // Nuclear Science and Engineering. 1994. v.117. p.77-87.

7. Lutostansky Yu.S., Lyashuk V.I. Powerful dynamical neutrino source with a hard spectrum // Phys.Atom.Nucl. 2000. V.63 p.1288-1291; Yad.Fiz. 2000 τ.63. c.1361-1364.

Основные публикаций по результатам диссертации (2)

8. Lutostansky Yu.S., Lyashuk V.I., Antineutrino spectrum from a powerful reactor and neutrino converter system // Phys.Part. Nucl. Lett. 2005. V.2 p.226-229; Pisma Fiz.Elem.Chast.Atom.Yadra. 2005. 127N4. p.60-65.

9. Лютостанский Ю.С., Ляшук В.И., Панов И. В. Расчеты образования трансурановых элементов в интенсивных нейтронных потоках в адиабатических условиях. Изв.РАН. Сер. физическая. 2010, т.74. с.536-540.

10. Лютостанский Ю.С., Ляшук В.И. Концепция мощного антинейтринного источника // Известия РАН. Сер. физическая. 2011. т.75. № 4. с.504-509.

11. Лютостанский Ю.С., Ляшук В. И., Панов И.В. Получение трансурановых элементов в бинарной модели в условиях импульсного нуклеосинтеза // Известия РАН. Сер. физическая, 2011. т.75. № 4. с.569-573.

12. Ляшук В.И. Моделирование выходов трансурановых изотопов во взрывном нуклеосинтезе с учетом элементов динамики процесса // Изв.РАН. сер. физическая. 2012. т.76. № 11. с.1321-1325.

13. Лютостанский Ю.С., Ляшук В.И. Оценка выходов трансурановых нуклидов с массами до А=270 в условиях импульсного нуклеосинтеза // Изв.РАН. сер. физическая. 2012. т.76. № 4. с.520-524.

14. Горбаченко О. М., Кондратьев В. Н., Лютостанский Ю. С., Ляшук В. И., LiB-Нейтронный конвертор для нейтринного источника // Изв.РАН. сер. физическая. 2014. т.78. № 7. с.832–836.

15. Ляшук В. И., Лютостанский Ю. С.. Интенсивный нейтринный источник на основе изотопа 7Li: реакторная и ускорительная реализации // Изв.РАН. сер. физическая. 2015. т.79. № 4. с. 472–477.

16. Ляшук В. И; Лютостанский Ю. С. Антинейтринный источник высокой интенсивности на основе литиевого конвертора. Предложение к перспективному эксперименту по исследованию осцилляций // Письма в ЖЭТФ, 2016, т.103, вып.5 с. 331.

17. Lyashuk V. I. Intensive lithium *ev* -source: Effective solution for accelerator scheme // Results in Physics. V.6, 2016, p. 961.

 Lyashuk V. I. Hard Antineutrino Source Based on a Lithium Blanket: A Version for the Accelerator Target // Particles and Nuclei, Letters. 2017. V.14. No.3. p. 465.
 Lyashuk V. I. Problem of reactor antineutrino spectrum errors and it's alternative solution in the regulated spectrum scheme // Results in Physics. 2017. V.7. p.1212.
 Лютостанский Ю.С., Ляшук В.И. . "О возможности использования конвертора нейтронов в нейтринных экспериментах". Нейтронная физика. т.4. с.182-186 (Материалы I Международной конференции по нейтронной физике, Киев, 14-18 сентября, 1987, М.: ЦНИИатоминформ).

21. Лютостанский Ю.С., Ляшук В.И. Литиевый конвертор реакторных нейтронов в антинейтрино. І. Статический режим работы. М.: ЦНИИатоминформ, Препринт ИТЭФ-66, 1989. С. 1-32.

22. Лютостанский Ю.С., Ляшук В.И. Моделирование спектров нейтронов и накопления трития в литиевом бланкете при энергии источника 14 МэВ (по данным эксперимента в Карлсруэ, ФРГ). Препринт ИТЭФ-61, 1988. М.: ЦНИИатоминформ. С.1-61.

23. Лютостанский Ю.С., Ляшук В.И. Литиевый конвертор реакторных нейтронов в антинейтрино. II. Динамический режим работы. М.: ЦНИИатоминформ, Препринт ИТЭФ-82, 1989. С.1-28.

24. Lyashuk V.I. Taking into consideration the dynamics at creation of transuranium isotopes under the conditions of nuclear explosion. Moscow, ITEP-7-97. 1997. 16 pp. 25. Lyashuk V.I., Lyutostansky Yu.S. The Conception of the powerful dynamic neutrino source with modifiable hard spectrum. Moscow, ITEP-38-97. 1998. 24 pp. 26. Lyashuk V.I. Creation of transuranium isotopes under the conditions of explosive nucleosynthesis. The model with features of dynamics. Moscow, ITEP-46-98. 24 pp. 27. Лютостанский Ю.С., Ляшук В.И. Литиевый конвертор реакторных нейтронов в антинейтрино. III. Конвертор на основе литий-дейтериевых растворов и соединений. М.: ЦНИИатоминформ, Препринт ИТЭФ-147, 1989. С. 1-48. 28. Лютостанский Ю.С., Ляшук В.И. "Использование нейтронных потоков высокой плотности для генерации жестких нейтрино", Сборник "Исследования в гигантских импульсах тепловых нейтронов от импульсных реакторов и в ловушках больших ускорителей", Дубна, 27-29 апреля 2005 г. Труды международного рабочего совещания (Дубна: ОИЯИ, 2005), с.150-175. 29. Лютостанский Ю.С., Ляшук В.И. Возможные источники нейтронов для нейтринной фабрики (обзор). Препринт 12-07, ИТЭФ, М., 2007. 60 стр. 30. Lyashuk V. I., Lutostansky Yu. S.. "Neutron sources for neutrino investigations with the lithium converter". The 4-th Intern.Conference "Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy" (NPAE-Kyiv2012). Proc. Part II. p.462-466.

31. Lyashuk V.I., Lutostansky Yu.S. "Neutron Sources foe Neutrino Factory on the Base of Lithium Convereter". XXI International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei (ISINN-21). Alushta, Ukraine, May 20-25, 2013. Proceeding, Dubna, JINR, 2014, p.156-164.

32. Yu.S. Lutostansky, V.I. Lyashuk. Transfermium Neutron-Rich Nuclei Production in Pulsed Neutron Fluxes of Nuclear Explosions (ISINN-21). XXI Intern. Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei. Alushta, Ukraine, May 20-25, 2013. Proceeding, p.147-155.

33. Lyashuk . V.I., Lutostansky Yu.S. "Neutron Sources for Neutrino Investigations (as Alternative for Nuclear Reactors)". International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei (ISINN-22) (Fundamental Interactions & Neutrons, Nuclear Structure, Ultracold Neutrons, Related Topics), Dubna, May 27–30, 2014, Proceeding, Dubna, JINR, 2015, p.397-405.

34. Lyashuk V. I. and Lutostansky Yu. S.. INTENSIVE NEUTRINO SOURCE ON THE BASE OF LITHIUM CONVERTER. <u>arXiv:1503.01280v2</u>.

35. Lyashuk V. I. High flux lithium antineutrino source with variable hard spectrum. arXiv: 1609.02934 [physics.ins-det]. 2016.

36. Lyashuk V. I. Lithium antineutrino source in the tandem scheme of the ac celerator and neutron producting tungsten target. arXiv:1609.02127. 2016.

37. Lyashuk V. I. High flux lithium antineutrino source with variable hard spectrum. How to decrease the errors of the total spectrum ? arXiv: 1612.08096 [physics.ins-det]. 2017.