Ю.В.Григорьев, А.В.Новиков-Бородин, Ю.В.Рябов

ИССЛЕДОВАНИЕ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ, АКТИВИРУЕМЫХ В ЛИТИЙ- И БОР- БЕРИЛЛИЕВЫХ СМЕСЯХ

Аннотация. Исследуется возможность активации ядерных реакций в смеси лития-6 и бора-10 с бериллием-9. Доминирующие базовые реакции идут по схеме ^{6}Li(n,α) и ^{9}Be(α,n) с репродукцией активирующих частиц и являются цепными. Выделяемая энергия в пересчёте на единицу массы сравнима с энергией распада урана-235 и может быть использована в ядерной энергетике. Анализируется эффективность активации базовых реакций с помощью нейтронов, альфа-частиц, дейтронов и протонов, предлагаются возможности применения базовых реакций на практике: в автономных источниках энергии и в реакторах атомных станций. Коэффициент реактивации базовых цепных реакций зависит от соотношения множественного выхода нейтронов в реакции распада ^{9}Be(α,n+α)^{8}Be и общих потерь активирующих частиц, зависящих от ряда физических и конструктивно-технологических факторов: соотношения концентраций веществ, температуры, геометрии активной зоны и т.д. Предлагается вариант экспериментального исследования параметров базовых реакций на импульсном нейтронном источнике РАДЭКС ИЯИ РАН.

Семинар ОЭФ ИЯИ РАН, 12 октября 2016

Ю.В.Григорьев, А.В.Новиков-Бородин, Ю.В.Рябов

ИССЛЕДОВАНИЕ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ, АКТИВИРУЕМЫХ В ЛИТИЙ- И БОР- БЕРИЛЛИЕВЫХ СМЕСЯХ

ПЛАН ДОКЛАДА

1. Введение: Проблемы ядерной и термоядерной энергетики
2. Базовые реакции в ^{6}Li- и ^{10}B- ^{9}Be смесях
3. Активация базовых реакций
   1. Нейтроны и альфа-частицы
   2. Протоны и дейтроны
4. Эффективность систем активации
5. Практическое применение: автономные источники, гибридные атомные станции, утилизация отходов
6. Экспериментальные исследования на установке РАДЭКС
7. Заключение

Семинар ОЭФ ИЯИ РАН, 12 октября 2016

Введение:
Проблемы ядерной и термоядерной энергетики

1. ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Экология, безопасность, отходы

2. ТЕРМОЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Критерий Лоусона

$$n\tau \approx 10^{14}\ \text{см}^{-3}\ \text{с}$$

$$T=10^{7}\text{-}10^{8}\ {}^{0}\text{K}$$

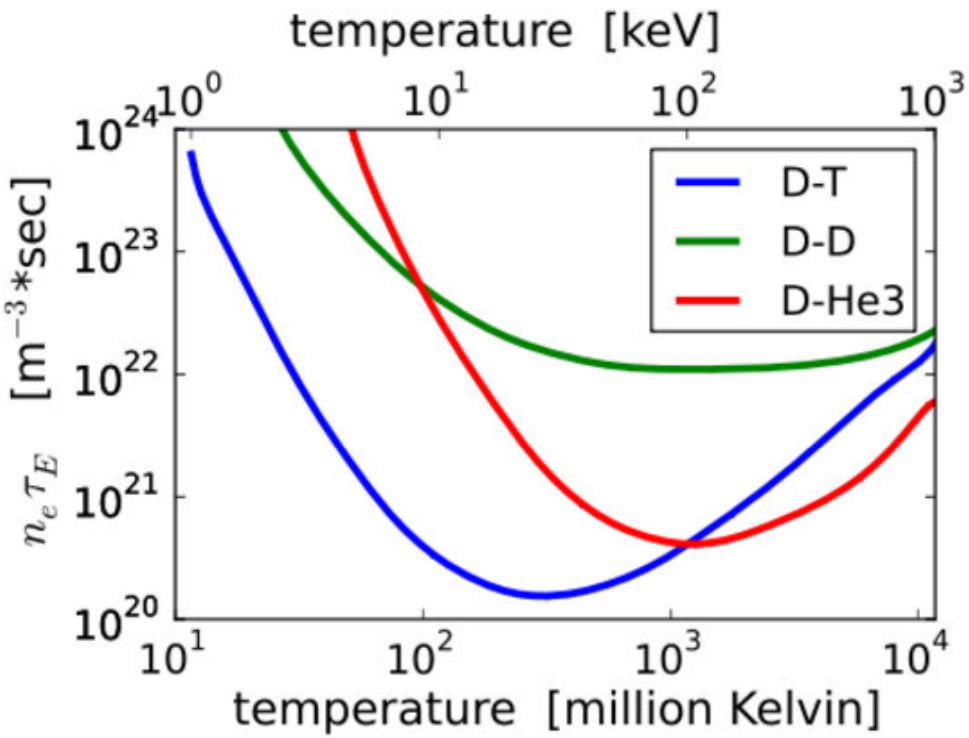
2.1 Квазистационарные системы

$$n \approx 10^{14}\ \text{см}^{-3};\ \tau \approx 1\ \text{с}$$

2.2 Инерциальные системы

$$n \approx 10^{22}\ \text{см}^{-3};\ \tau \approx 10^{-8}\ \text{с}$$

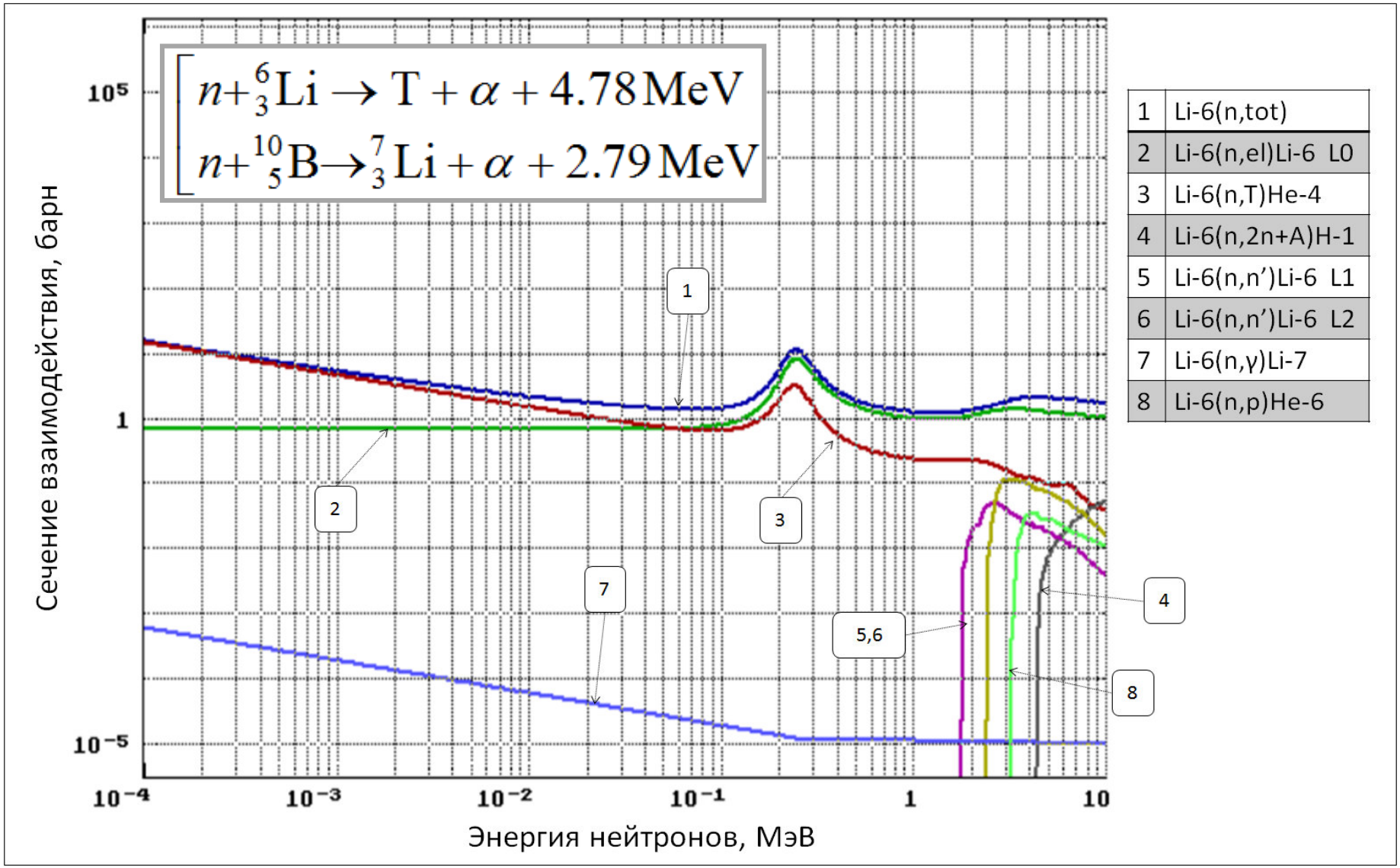
$$\left[\begin{array}{l} p+{}^{11}\text{B} \rightarrow 3\alpha + 8.7\,\text{MeV} \\ \alpha+{}^{11}\text{B} \rightarrow p+{}^{14}\text{C} \end{array}\right.$$



$$\text{D}+\text{T} \rightarrow n+{}^{4}\text{He}+17.589\,\text{MeV}$$

$$\text{D}+{}^{3}\text{He} \rightarrow p+{}^{4}\text{He}+18.353\,\text{MeV}$$

Реакции ^{6}Li(n,….) и ^{10}B(n,…)



1	Li-6(n,tot)
2	Li-6(n,el)Li-6 L0
3	Li-6(n,T)He-4
4	Li-6(n,2n+A)H-1
5	Li-6(n,n')Li-6 L1
6	Li-6(n,n')Li-6 L2
7	Li-6(n,γ)Li-7
8	Li-6(n,p)He-6

Реакции ^{6}Li(n,…) и ^{10}B(n,…)

$$n + {}^{6}_{3}\mathrm{Li} \rightarrow \mathrm{T} + \alpha + 4.78\,\mathrm{MeV} \qquad n + {}^{10}_{5}\mathrm{B} \rightarrow {}^{7}_{3}\mathrm{Li} + \alpha + 2.79\,\mathrm{MeV}$$

	Q,(MeV)	nucleon	Q/nucl	Q_U/Q,(n)
Li-6	4.78	6	0.80	38
B-10	2.79	10	0.279	65
U-235	180	235	0.78	1

Энергия 6 г ^{6}Li = $2.88 \cdot 10^{24}$ МэВ =

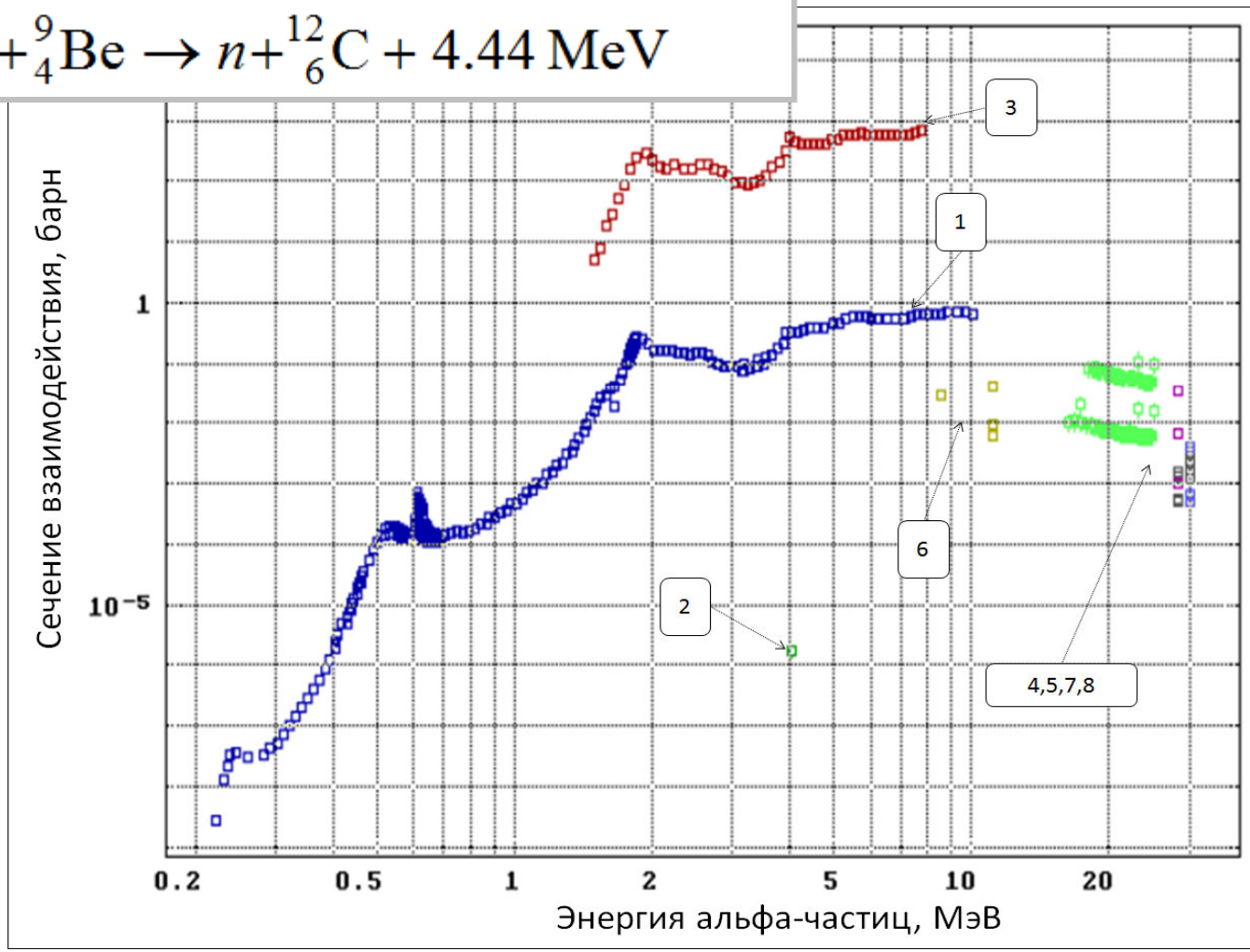
= $4.61 \cdot 10^{5}$ МДж = 128 000 кВт·час

	Th-232	U-233	U-235	U-238	Pu-239
k_n	2.3	2.5	2.4	2.5	2.9

Реакции ^{9}Be(α,n) и ^{6}Li(α,...)

$$\alpha + {}^{9}_{4}\mathrm{Be} \rightarrow n + \alpha + {}^{8}_{4}\mathrm{Be} + 5.70\ \mathrm{MeV}$$

$$\alpha + {}^{9}_{4}\mathrm{Be} \rightarrow n + {}^{12}_{6}\mathrm{C} + 4.44\ \mathrm{MeV}$$



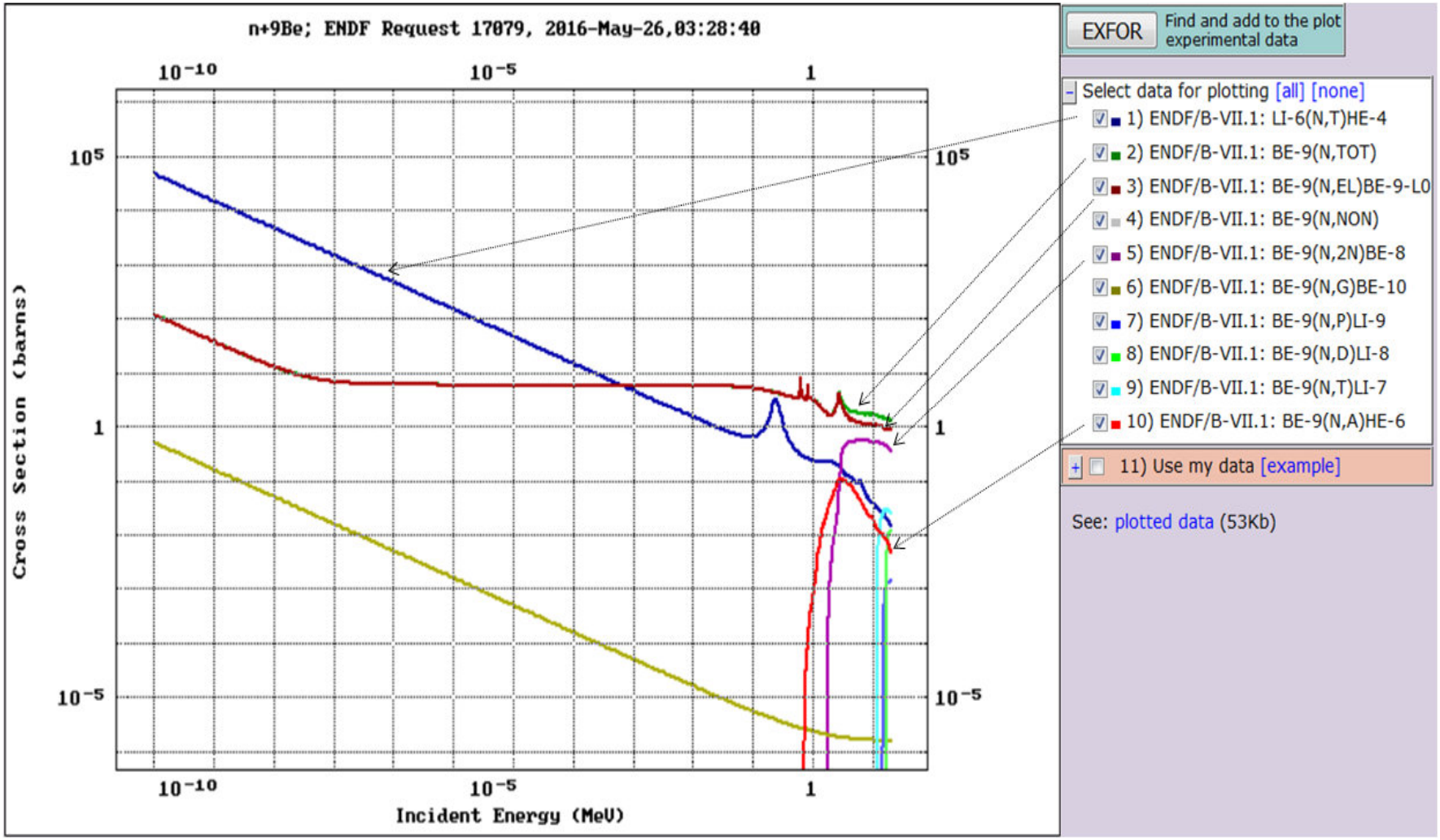
1	Be-9(α,n)C-12
2	Li-6(α,γ)B-10
3	Be-9(α,n+α)Be-8 + + Be-9(α,n)C-12
4	Be-9(α,D)B-11
5	Be-9(α,inl)Be-9
6	Li-6(α,n)B-9
7	Be-9(α,T)B-10
8	Li-6(α,D)Be-8

Реакции $^{9}Be(\alpha,n)$ и $^{6}Li(\alpha,...)$

Таблица 1. Выход энергии, пороговая энергия и кулоновский барьер (α,n) реакций.

Ядра	Содержание в природе (%)	Выход энергии (МэВ)	Пороговая энергия (МэВ)	Кулоновский барьер (МэВ)	Максимальная энергия нейтронов для 5.2 МэВ альфа-частиц (МэВ)
Li-6	7.5	-3.70	6.32	2.1	
Li-7	92.5	-2.79	4.38	2.1	1.7
Be-9	100	+5.70	0	2.6	10.8
B-10	19.8	+1.06	0	3.2	5.9
B-11	80.2	+0.16	0	3.2	5.0

Реакции $^{9}Be(n,...)$ и $^{6}Li(n,...)$



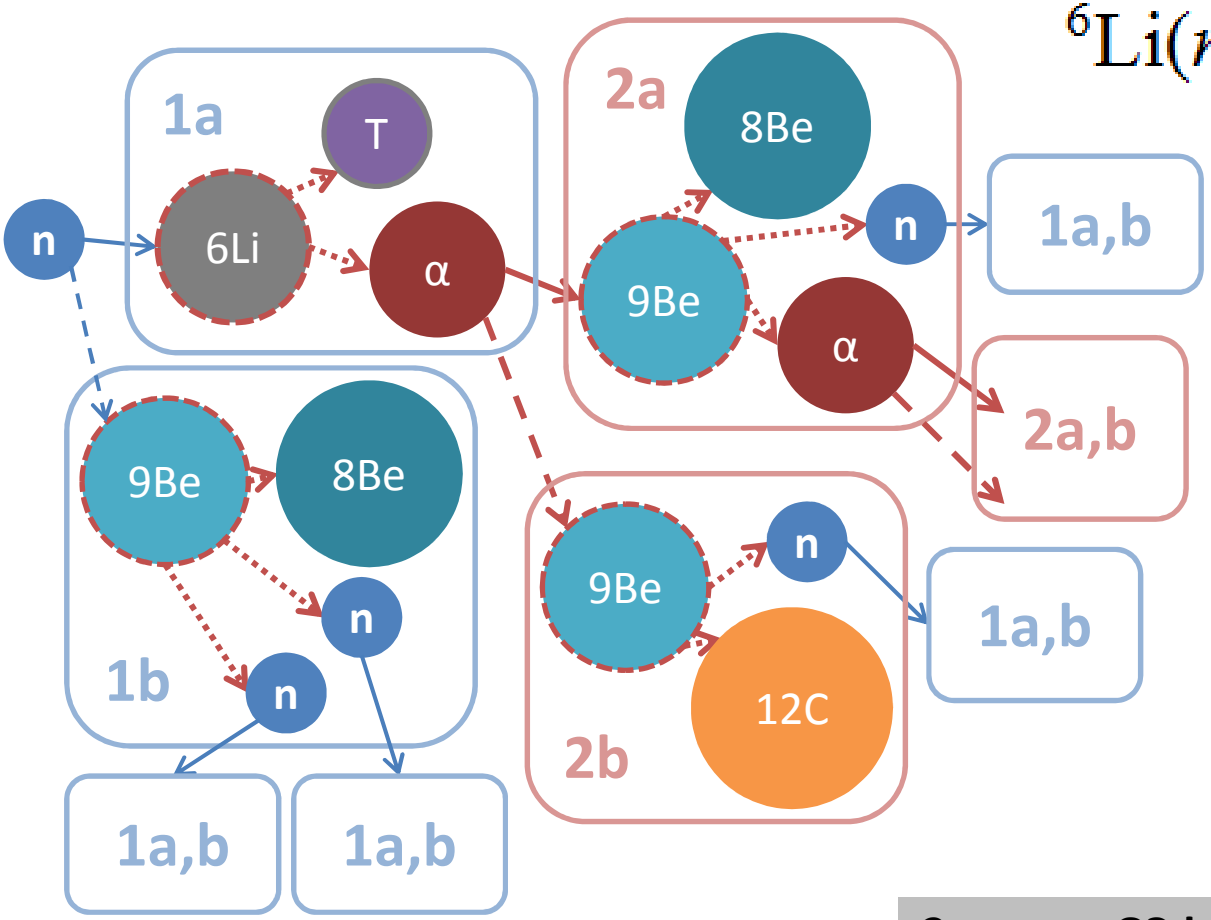
Базовые реакции в ^{6}Li- ^{9}Be смесях

$$n + {}^6_3\mathrm{Li} \rightarrow \mathrm{T} + \alpha + 4.78\,\mathrm{MeV}$$

$$n + {}^9_4\mathrm{Be} \rightarrow 2n + {}^8_4\mathrm{Be}$$

$$\left[\begin{array}{l} \alpha + {}^9_4\mathrm{Be} \rightarrow n + \alpha + {}^8_4\mathrm{Be} + 5.70\,\mathrm{MeV} \\ \alpha + {}^9_4\mathrm{Be} \rightarrow n + {}^{12}_6\mathrm{C} + 4.44\,\mathrm{MeV} \end{array}\right.$$

$$^6\mathrm{Li}(n,\alpha) \rightarrow {}^9\bar{\mathrm{B}}\mathrm{e}(\alpha,n) \rightarrow \ldots$$



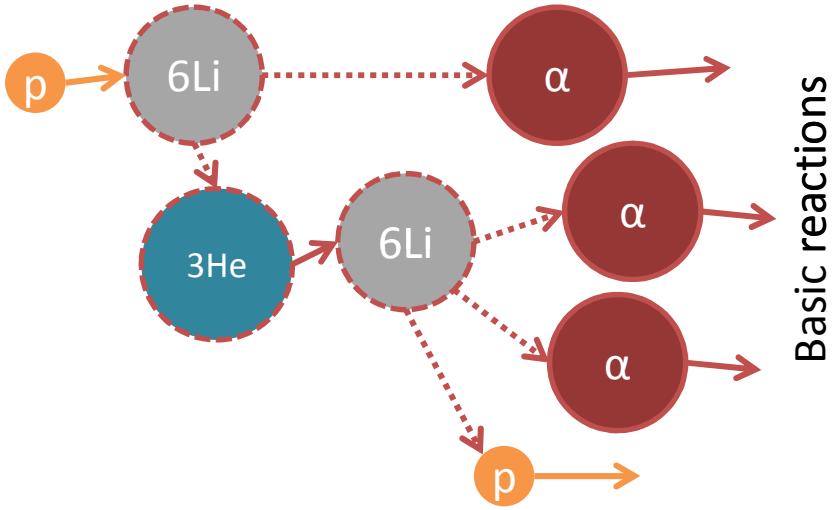
$$k_r = k_n k_\alpha$$

$$I_n^m = I_0 \frac{1 - k_r^m}{1 - k_r}$$

$$I_n^{eff} = I_0 \frac{1}{|1 - k_r|}$$

Активация базовых реакций (протоны)

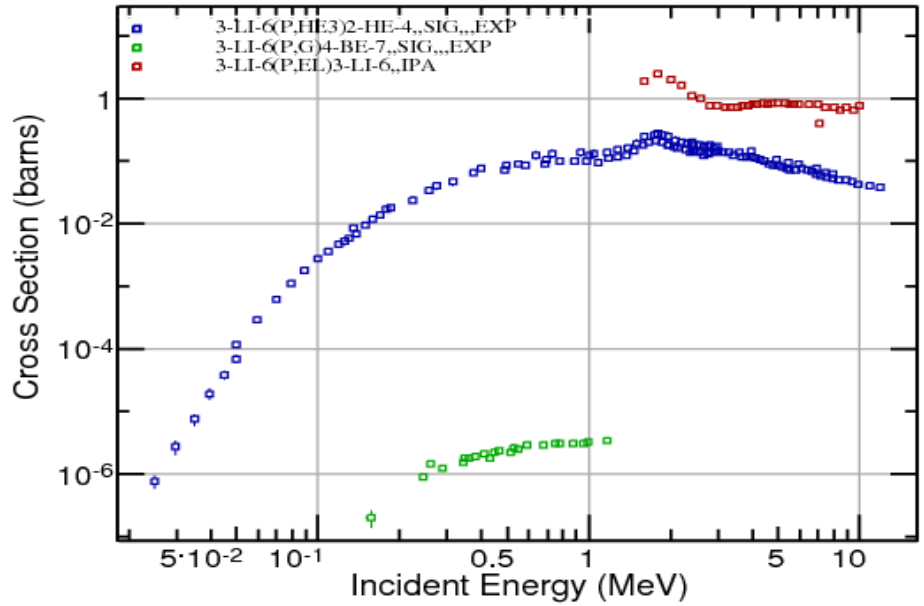
$$\left[\begin{array}{l} p + {}^{6}_{3}Li \rightarrow {}^{3}_{2}He + \alpha + 4.0\ \text{MeV}; \\ {}^{3}_{2}He + {}^{6}_{3}Li \rightarrow 2\alpha + p + 16.9\ \text{MeV}. \end{array}\right.$$

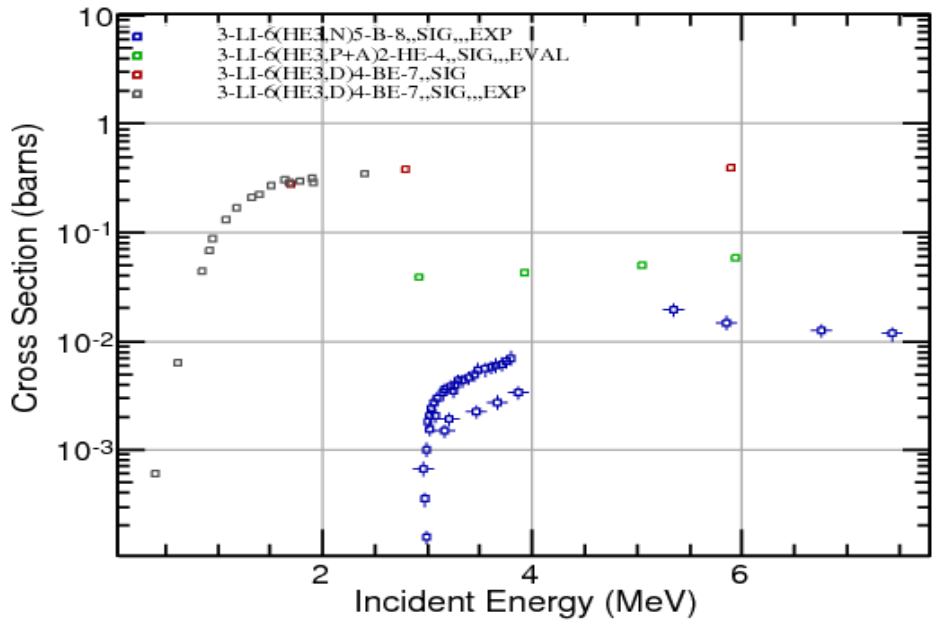


Rival reactions:

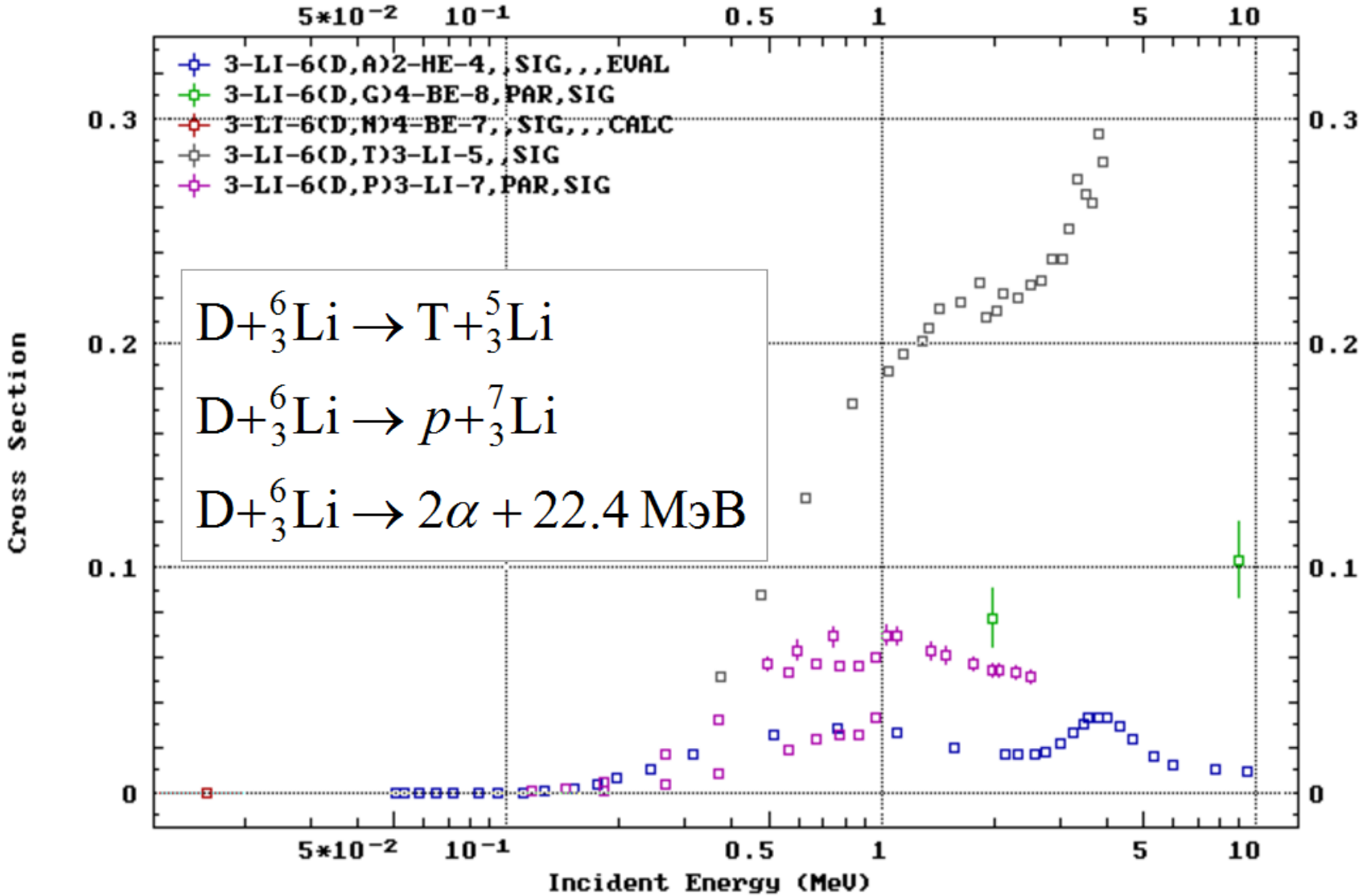
${}^{9}Be(p,2\alpha)D$ +0.56 MeV

${}^{9}Be(p,\alpha){}^{6}Li$ +2.1 MeV





Активация базовых реакций (дейтроны)

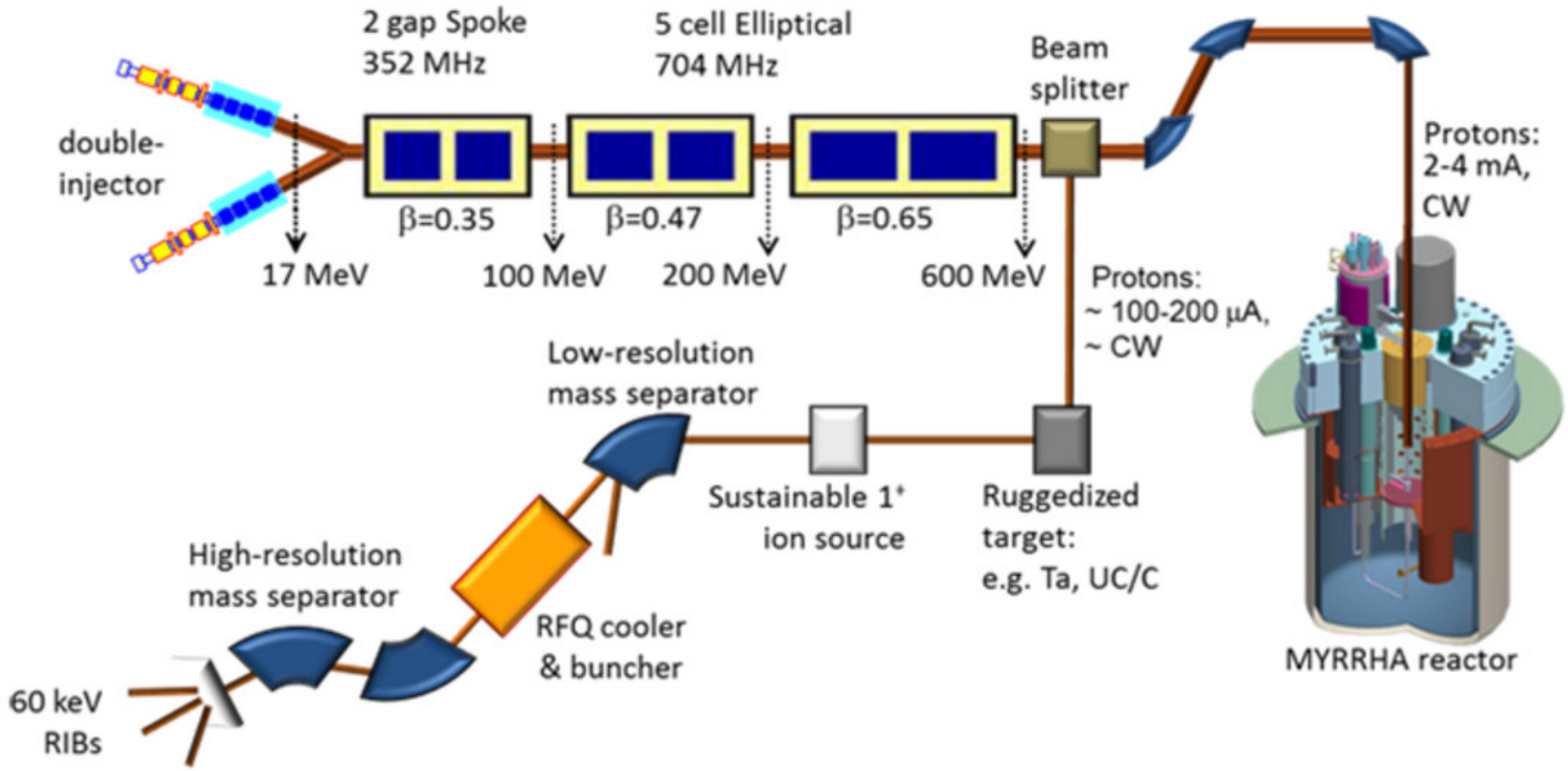


$$D+{}^{6}_{3}Li \rightarrow T+{}^{5}_{3}Li$$

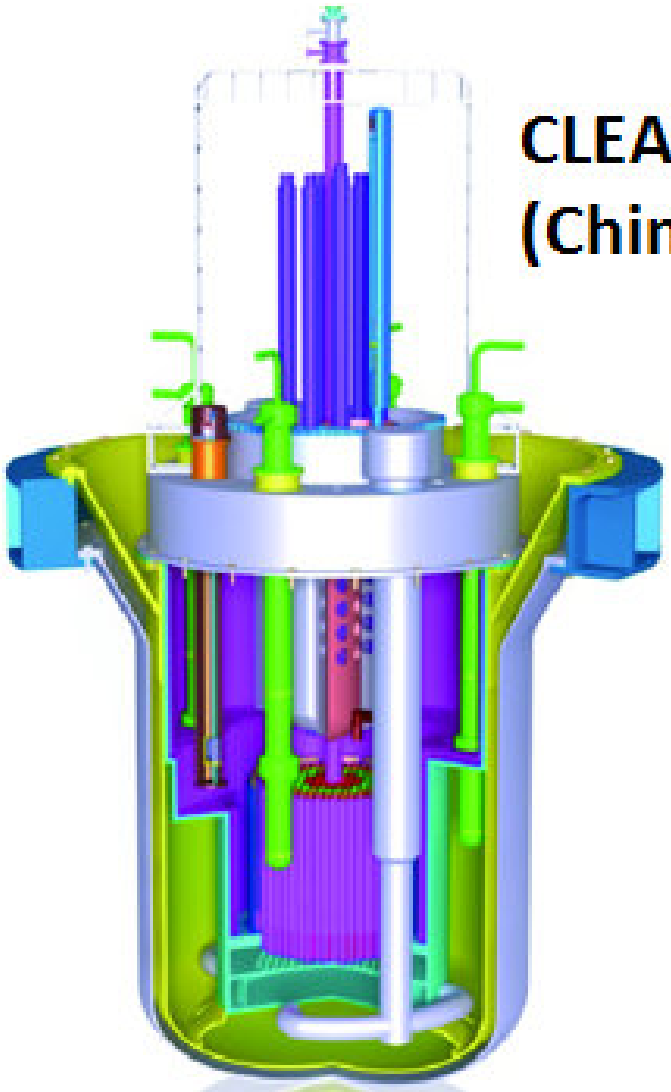
$$D+{}^{6}_{3}Li \rightarrow p+{}^{7}_{3}Li$$

$$D+{}^{6}_{3}Li \rightarrow 2\alpha + 22.4\ \text{МэВ}$$

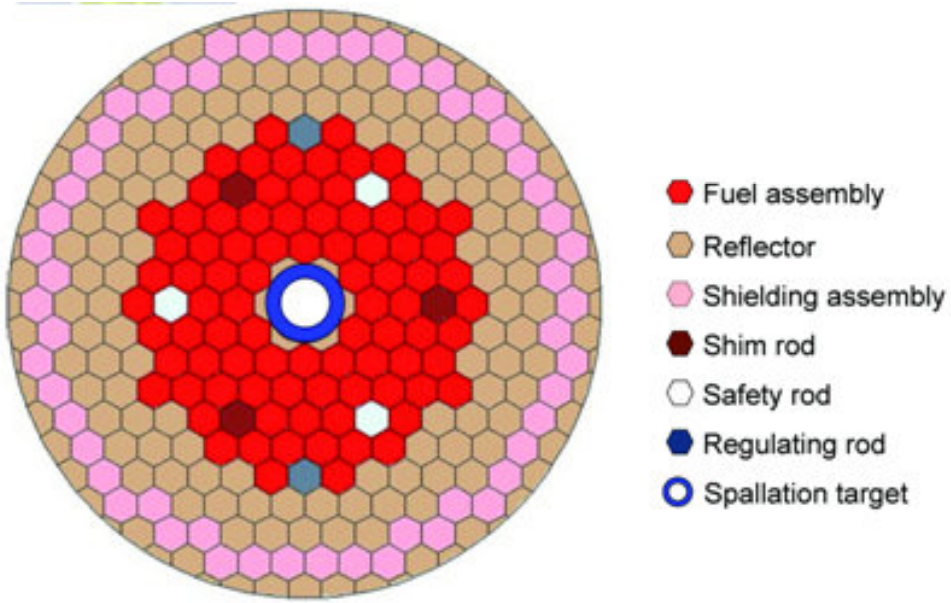
Практическое применение: ADSR системы



Практическое применение: ADSR системы

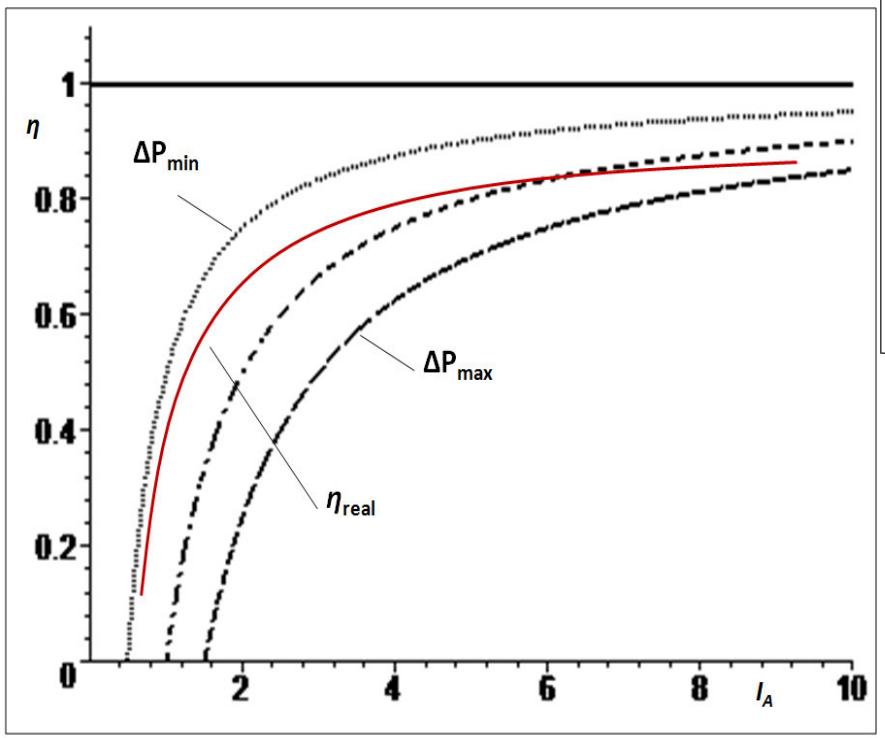


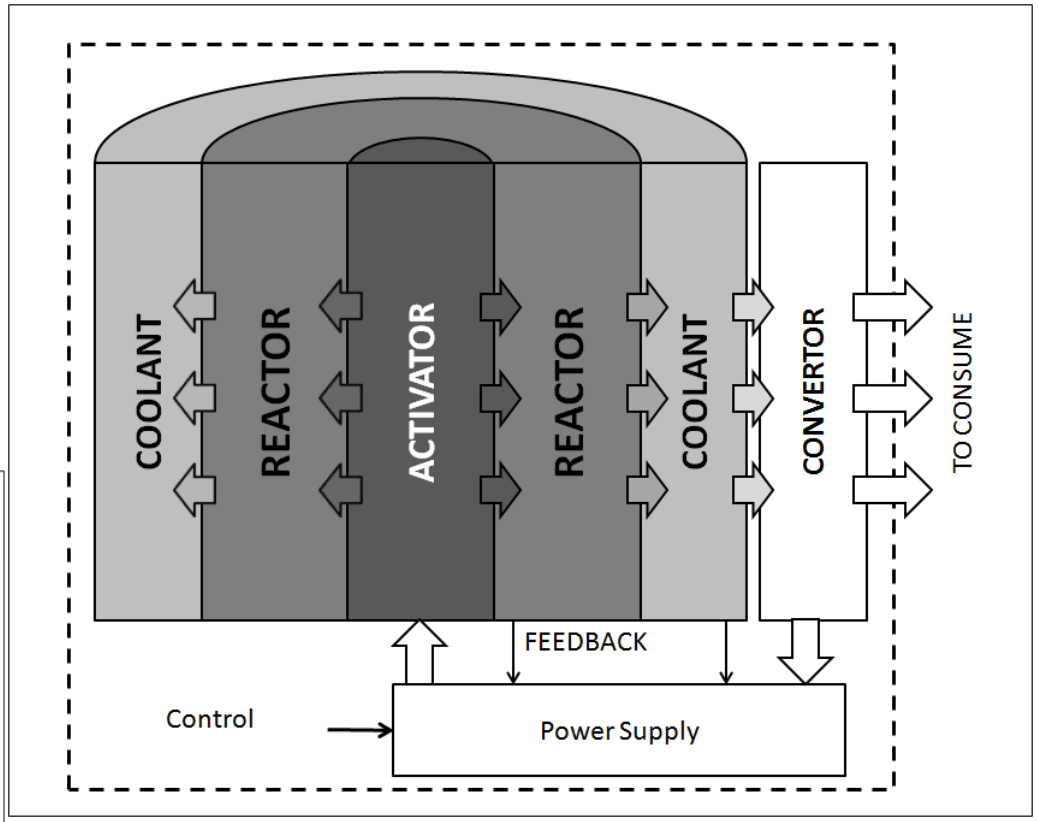
CLEAR-I
(China)



Практическое применение: Эффективность активации

$$\eta = 1 - \Delta P / P \approx 1 - P_0 / P$$
$$= 1 - I_0 / I_A = 1 - J_0 / J_A$$





$$1 - \frac{I_{\max}}{I_A} < \eta < 1 - \frac{I_{\min}}{I_A}$$

Изотопные источники нейтронов

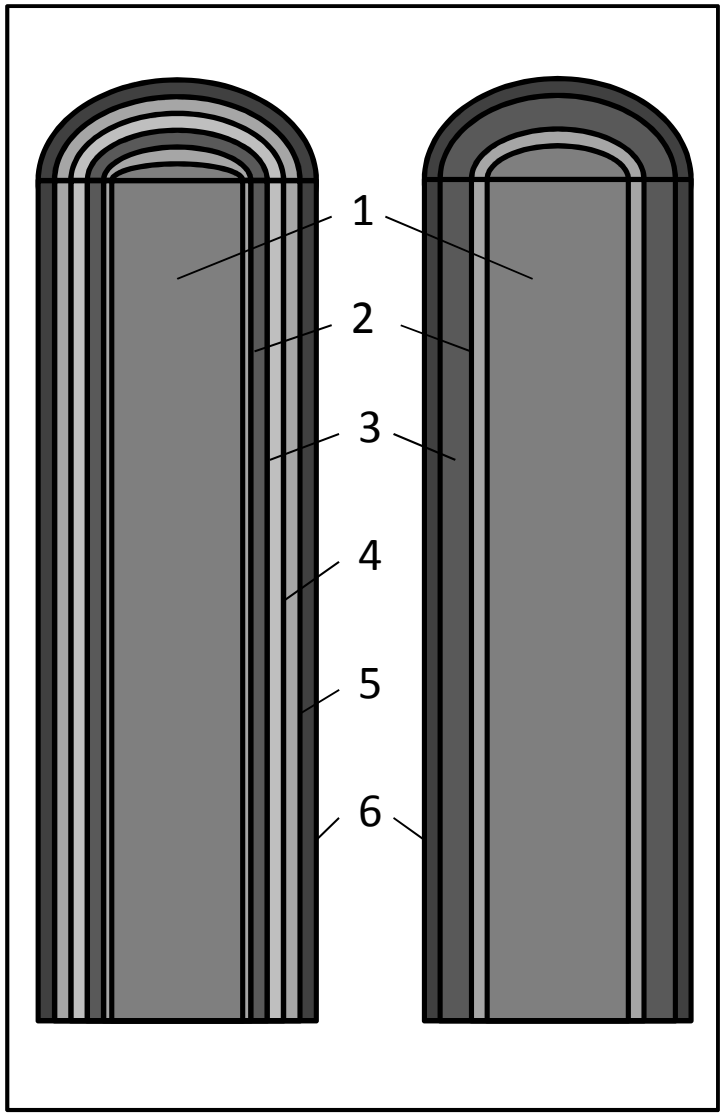
Таблица 2.
Источники нейтронов спонтанного деления.

Изотоп	Период полураспада	Выход нейтронов ($n.c^{-1}г^{-1}$)	Коэффициент размножения нейтронов
Pu-238	87.74 лет	$2.59\cdot10^{3}$	2.21
Pu-240	6560 лет	$1.02\cdot10^{3}$	2.16
Cm-242	163 дней	$2.10\cdot10^{7}$	2.54
Cm-244	18.1 лет	$1.08\cdot10^{7}$	2.72
Bk-249	320 дней	$1.00\cdot10^{5}$	3.40
Cf-252	2.645 года	$2.34\cdot10^{12}$	3.757

Таблица 3.
Характеристики $^{9}Be(\alpha,n)$ источников.

Нуклид	Период полураспада	E_{α} (МэВ)	Выход на 10^{6} альфа ($n.c^{-1}$)	Выход нейтронов ($n.c^{-1}.г^{-1}$)	Энергия нейтронов (МэВ)	γ-доза на 1 м для 10^{6} n/c в мГр/час
Pu-238	89 лет	5.50	-	$4.5\cdot10^{7}$	4.0	<0.01
Pu-239	24110 лет	5.14	65	$1.2\cdot10^{5}$	4.59	≤0.01
Po-210	138 дней	5.30	73	$1.1\cdot10^{10}$	4.54	<0.001
Am-241	433.6 года	5.48	82	$6.5\cdot10^{8}$	4.46	0.01
Cm-242	163 дней	6.10	118	$\sim1\cdot10^{10}$	4.16	<0.01
Cm-244	18.1 лет	5.79	100	$2.5\cdot10^{8}$	4.31	<0.01
Ra-226	1620 лет	7.69-4.77	502	$1.5\cdot10^{7}$	3.94	0.5
Ac-227	22 года	7.36-5.65	702	$1.7\cdot10^{9}$	3.87	0.07

Практическое применение: Автономные источники



Activating Neutron isotope sources

Spontaneous fission

^{252}Cf ($T_{1/2}$=2,645 years).

10 g of ^{252}Cf emits $2.3 \cdot 10^{13}$ neutrons/s ↔ ~50 Wt

Alpha-induced (α,n)

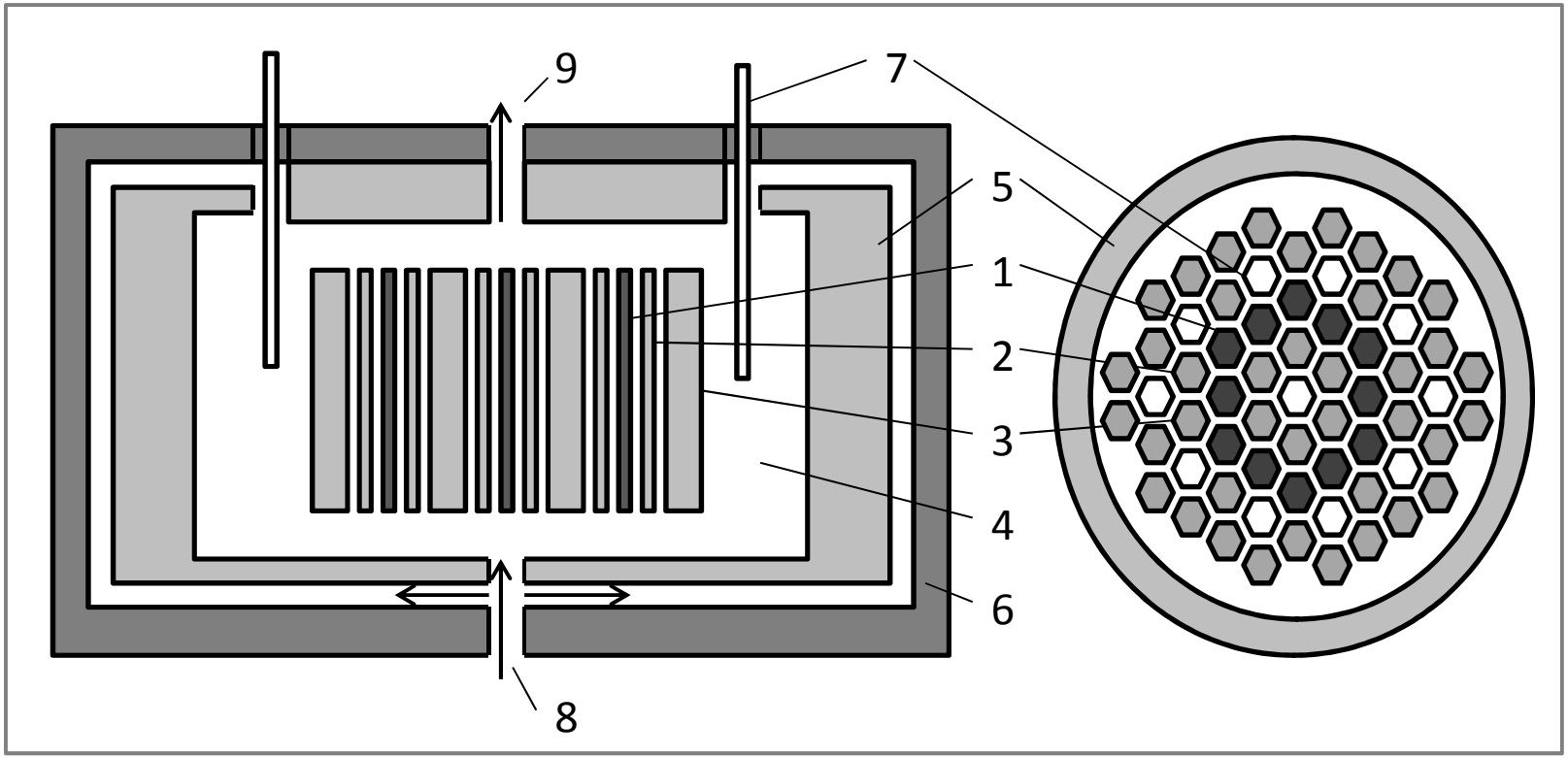
^{210}Po, ^{226}Ra, ^{239}Pu, ^{241}Am, ^{242}Cm (+ ^{9}Be)

Usual neutron flux 10^{7}-10^{9} neutrons per second

Alpha-activity 10 g ^{242}Cm: $8.5 \cdot 10^{14}$ a/s ↔ 1.42 kWt

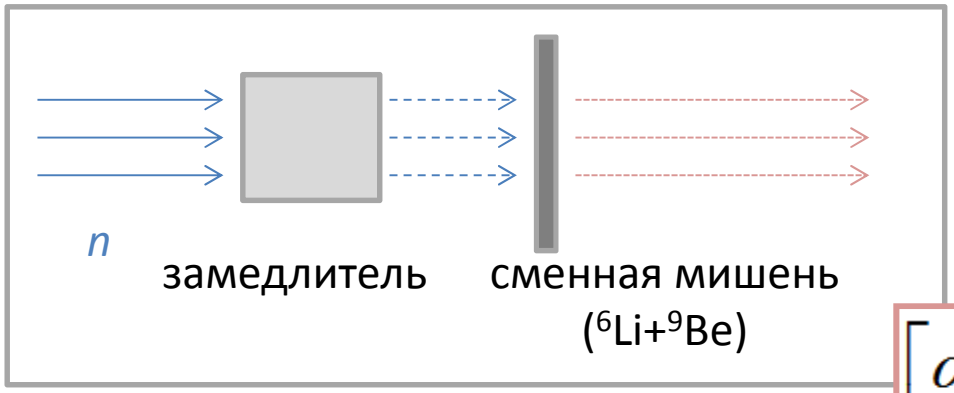
1 - lithium-6 or boron-10 with beryllium-9,
2 - neutron moderator,
3 - activating neutron isotope sources,
4,5 - neutron reflector and absorber,
6 - core vessel.

Практическое применение: Гибридные реакторы



1 - activation pins with uranium or plutonium,
2 - basic pins with lithium-6 or boron-10 with beryllium-9 or without it,
3 – neutron moderators, 4 – the coolant with lithium-6 and beryllium-9,
5 – the neutron reflector, 6 – the reactor vessel, 7 – control rods, 8, 9 – coolant inlet and outlet.

Экспериментальные исследования



$$n + {}^6_3\mathrm{Li} \rightarrow \mathrm{T} + \alpha + 4.78\,\mathrm{MeV}$$

$$n + {}^9_4\mathrm{Be} \rightarrow 2n + {}^8_4\mathrm{Be}$$

$$\alpha + {}^9_4\mathrm{Be} \rightarrow n + \alpha + {}^8_4\mathrm{Be} + 5.70\,\mathrm{MeV}$$

$$\alpha + {}^9_4\mathrm{Be} \rightarrow n + {}^{12}_6\mathrm{C} + 4.44\,\mathrm{MeV}$$

$$^6\mathrm{Li}(n,\alpha) \rightarrow {}^9\mathrm{Be}(\alpha,n) \rightarrow \ldots$$

$$k_r = k_n k_\alpha$$

$$I_n^m = I_0 \frac{1 - k_r^m}{1 - k_r}$$

$$I_n^{eff} = I_0 \frac{1}{|1 - k_r|}$$

Заключение

1 **Базовые цепные реакции**: $^{6}Li(n,\alpha)\rightarrow{}^{9}Be(\alpha,n)\rightarrow$... могут быть активированы в смесях лития-6 или бора-10 с бериллием-9 . Выход энергии на каждом шаге цепочки (~0.73 МэВ/нуклон) сравним с энергией деления урана-235 (~0.78 МэВ/нуклон) .

2 **Коэффициент реактивации** цепных реакций зависит от множественного выхода нейтронов в реакции распада $^{9}Be(\alpha,n+\alpha)^{8}Be$ и от потерь активирующих частиц.

3 **Активация** с помощью нейтронов, альфа-частиц, протонов и дейтронов может быть эффективна, если решена проблема доставки их в зону реакции.

4 **Автономные источники энергии**: для активации базовых реакций могут быть использованы существующие радиоизотопные источники нейтронов.

5 **Гибридные реакторы**: нейтронные поля в реакторах атомных станций можно использовать для активации базовых реакций в стержнях с литий- бериллиевыми смесями или в теплоносителе с литий- бериллиевым расплавом.

6 **Экспериментальные исследования** параметров базовых реакций возможны с помощью TOF-метода на импульсном нейтронном источнике РАДЭКС ИЯИ РАН.

7 **Необходимые и перспективные исследования.**
Зависимость коэффициента реактивации от физических и конструктивно-технологических факторов.
Активация при непосредственном добавлении нейтрон- и альфа- активных изотопов в литий- или бор- бериллиевую смесь.

Ю.В.Григорьев, А.В.Новиков-Бородин, Ю.В.Рябов

ИССЛЕДОВАНИЕ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ, АКТИВИРУЕМЫХ В ЛИТИЙ- И БОР- БЕРИЛЛИЕВЫХ СМЕСЯХ

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Семинар ОЭФ ИЯИ РАН, 12 октября 2016