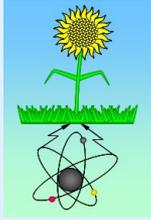


ЯДЕРНАЯ РЕЛЯТИВИСТСКАЯ (ЯРТ) ЭНЕРГЕТИКА – ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕРВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ



Чилап В.В., Солодченкова С.А., Чиненов А.В., Богомоллов А.С., Галанин М.В.,
Дубинкин Б.Н., Колесников В.А., Фонарев Б.И.

Центр физико-технических проектов «Атомэнергомаш», Москва, Россия



Тютюнников С.И., Кадыков М.Г., Фурман В.И., Адам И., Балдин А.А., Берлев
А.И., Владимирова Н.М., Гундорин Н.А., Копач Ю.Н., Краснов В.А., Рогов А.Д.,
Солнышкин А.А.

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия



Хильманович А.М., Марцынкевич Б.А.

Институт физики им. Б.И.Степанова, Минск, Беларусь



Жук И.В., Корнеев С.В., Потапенко А.С., Сафронова А.А., Сорокин В.В.,
Сорокин В.Н.

*Объединенный институт энергетических и ядерных исследований - Сосны,
Минск, Беларусь*



Воронко В.А., Сотников В.В., Артюшенко М.Ю.

Харьковский физико-технический институт, Харьков, Украина



Жданов С. В., Кислицин С.Б.

Институт ядерной физики НЯЦ РК, Алматы, Казахстан

Концепция

**Стратегического инновационного Проекта
в рамках содружества государств**

Россия – Беларусь – Казахстан – Украина

**«Создание на основе ядерных релятивистских
технологий (ЯРТ)**

**демонстрационного прототипа ядерной
релятивистской электростанции (ЯРЭС),
экономически и экологически эффективно
производящей энергию из обедненного урана
и отработанного ядерного топлива (ОЯТ)»**

(Концепция Проекта «ЯРТ-ОЯТ»)

Содержание доклада

- 1. Основные предпосылки и базовые физико-технические принципы ядерной релятивистской (ЯРТ) энергетики.**
- 2. Физические предпосылки схемы ЯРТ.**
- 3. Оценки возможностей ЯРТ-систем для производства энергии и утилизации ОЯТ. Технологические аспекты.**
- 4. Результаты первых экспериментов.**
- 5. От Проекта «Энергия и Трансмутация – РАО» к Проекту «ЯРТ-ОЯТ».**
- 6. Фундаментальные аспекты Проекта.**

Сегодня на практике реализованы 2 способа получения нейтронов в промышленных масштабах:

1. Цепная реакция деления.
2. Электроядерный способ.

На реализации 1-го способа построена современная ядерная энергетика, которая характеризуется:

- 1) использованием в качестве ядерного горючего легкоделящихся материалов – ^{235}U , а в перспективе - ^{239}Pu и ^{233}U ;
- 2) работой с нейтронами спектра деления (средняя энергия спектра ~ 2 МэВ, максимальная ~ 10 МэВ).

В диапазоне энергий нейтронов < 10 МэВ работают две основные неупругие реакции:

- реакция деления (n, f), которая отвечает за непрерывную наработку долгоживущих радиоактивных продуктов деления;
- реакция радиационного захвата (n, γ), которая отвечает за непрерывную наработку актинидов, в частности изотопов плутония.

Классические электроядерные энергетические схемы (ADS)

представляют собой подкритический быстрый реактор с внешним источником нейтронов.

Внешним источником нейтронов является нейтронопроизводящая мишень ограниченного размера, как правило, $\text{Ø}20 \times 60$ см, размещаемая в центре подкритической активной зоны, в которую по протонопроводу через окно ввода поступает узкий протонный пучок с энергией 1 ГэВ из ускорителя.

Стартовая подкритичность активной зоны находится в диапазоне $k_{\text{эфф}} \sim 0,97 \div 0,98$ и обеспечивается «запальным» ураном-235.

В результате спектр нейтронов в активной зоне ADS-установок формируется, также как и в обычном реакторе, в основном нейтронами спектра деления.

В делительном нейтронном спектре пороговые **минорные актиниды «горят» малоэффективно**, поскольку имеют малую вероятность деления, обусловленную их высоким порогом деления (~ 1 МэВ).

Трансмутация же долгоживущих радиоактивных продуктов деления из состава ОЯТ **крайне плохо замыкается** за счет многошаговых реакций, которые приводят к появлению новых долгоживущих радиоактивных изотопов.

Запасов основного топлива традиционной атомной энергетики - ^{235}U - в энергетическом эквиваленте **не больше** чем нефти и газа.

Большие запасы **естественного урана** (^{238}U - 99,3 % и ^{235}U - 0,7%) и **тория** могут обеспечить будущее энергетики.

Однако, в существующих и даже в перспективных реакторах они **«горят» не напрямую**, в силу высокого порога деления ($\sim 1\div 2$ МэВ), **а через** образование и **репроцессинг** промежуточных ядер ^{239}Pu и ^{233}U .

Анализ показывает **существенную ограниченность возможностей традиционных реакторных и классических ADS-систем, основанных на использовании нейтронов спектра деления**, данному самой природой, в решении проблем современной атомной энергетики.

Главные причины такой ограниченности:

- 1. Нерешенность** в рамках современной концепции атомной энергетики **проблемы утилизации** отработанного ядерного топлива (**ОЯТ**).
- 2. Отсутствие запасов сырья (урана-235)** на многие **сотни лет**.

На сегодняшний день единственной **реальной перспективой** кардинального решения проблем современной атомной энергетики представляется **использование более жесткого, чем делительный, спектра нейтронов.**

Для практической реализации этого пути инициативной группой российских и белорусских ученых разработана **принципиально новая схема** электроядерного метода, основанная на ядерных релятивистских технологиях (**ЯРТ**).

Схема ЯРТ нацелена на **формирование максимально жесткого нейтронного спектра** внутри активной зоны (АЗ) ЯРТ-реактора.

Ожидается, что такой спектр позволит **экономически и экологически эффективно** напрямую **«сжигать»** для производства энергии обедненный (отвальный) уран, торий, а также **ОЯТ атомных электростанций без** его сложной и «грязной» **радиохимической** переработки.

Схема ЯРТ основана на реализации следующих базовых принципов

- 1. Использование квазибесконечной активной зоны (АЗ) из природного (обедненного) урана, тория, а также из ОЯТ.*
- 2. Использование в качестве нейтронопроизводящей мишени материала АЗ.*
- 3. Использование сканирующего расходящегося пучка для снижения на несколько порядков плотности энерговыделения в центральной области АЗ, служащей нейтронопроизводящей мишенью.*
- 4. Повышение энергии иницирующего пучка до ~ 10 ГэВ вместо ~ 1 ГэВ в традиционных электроядерных схемах.*
- 5. Реализация технологии компактного модульного трехмерного линейного ускорителя на обратной волне (УЛОВ).*
- 6. Применение для загрузки АЗ шаровых капсулированных тепловыделяющих элементов, изготовленных на основе микротвэльной технологии, из урана, тория, а также из ОЯТ, без его предварительной радиохимической переработки.*
- 7. Использование технологии высокотемпературного гелиевого теплоносителя 1-го контура.*

1-й принцип является основой возможности реализации 2-го и 3-го принципов.

Глубокая подкритичность активной зоны в схеме ЯРТ позволяет на **несколько порядков снизить плотность энерговыделения в центральной области АЗ ЯРТ-реактора - мишени**, в частности, за счет использования сканирующего расходящегося релятивистского пучка.

Это позволяет **в принципе устранить потребность в крайне сложном промежуточном элементе**, который является **непременным атрибутом классической схемы ADS – в ограниченной нейтронопроизводящей мишени**.

4-й принцип – это переход к энергиям протонов (дейтронов?) ~ 10 ГэВ.

Подъем по энергии позволяет снизить на порядок требуемый ток ускорителя при той же мощности пучка и значительно повысить долю его энергии, идущую на генерацию жесткого нейтронного поля в объеме активной зоны.

Это определяется, в частности, возрастанием роли мезонообразования (**в квазибесконечной мишени**) в повышении множественности нейтронов и жесткости нейтронного спектра с ростом энергии пучка.

Оценки ионизационных потерь энергии протоном до начала каскада для различных значений энергии первичного протона

E_0 , ГэВ	0,7	1	1,5	2	3	5	10	15	20	30
ΔE , МэВ	250	229	215	210	215	226	247	258	268	282
E_{in} , ГэВ	0,45	0,77	1,285	1,79	2,785	4,774	9,753	14,75	19,73	29,72

E_0 - энергия налетающего протона, ГэВ, ΔE - ионизационные потери энергии на длине свободного пробега L_{in} , МэВ, E_{in} - энергия частицы, инициирующей каскад, $E_{in} = E_0 - \Delta E$, ГэВ,

$\Delta E/E_0$ - отношение ионизационных потерь на длине свободного пробега до неупругого соударения с атомами мишени к первоначальной энергии частицы, в %.

Если задаться вопросом, что выгоднее иметь: один протон с энергией 10 ГэВ или десять протонов с энергией 1 ГэВ (при одной и той же мощности пучка), то с точки зрения ионизационных потерь понятно, что в первом случае потери составят 247 МэВ, а во втором 2290 МэВ.

5 ÷ 7-й принципы определяют технологическую и физическую возможность реализации **основной идеи схемы ЯРТ**.

Некоторые ожидаемые преимущества схемы ЯРТ:

1. Схема ЯРТ позволит эффективно напрямую «сжигать» для **производства энергии** базовый материал активной зоны - природный (обедненный) уран или **торий**, - без использования урана-235.

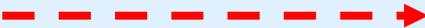
2. В схеме ЯРТ, в отличие от «классических» ADS систем, существенно упрощается решение проблем окна ввода пучка в активную зону и охлаждения нейтронопроизводящей мишени.

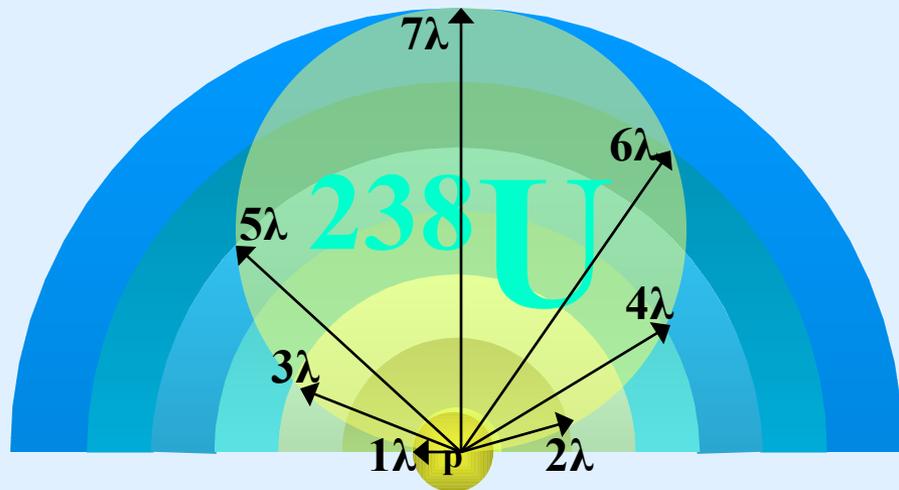
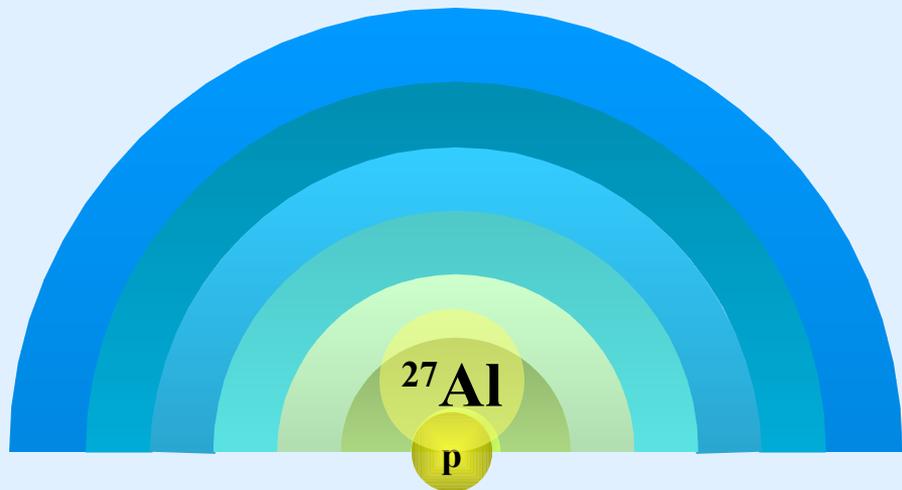
3. **Возможность работы в маневренном режиме.**

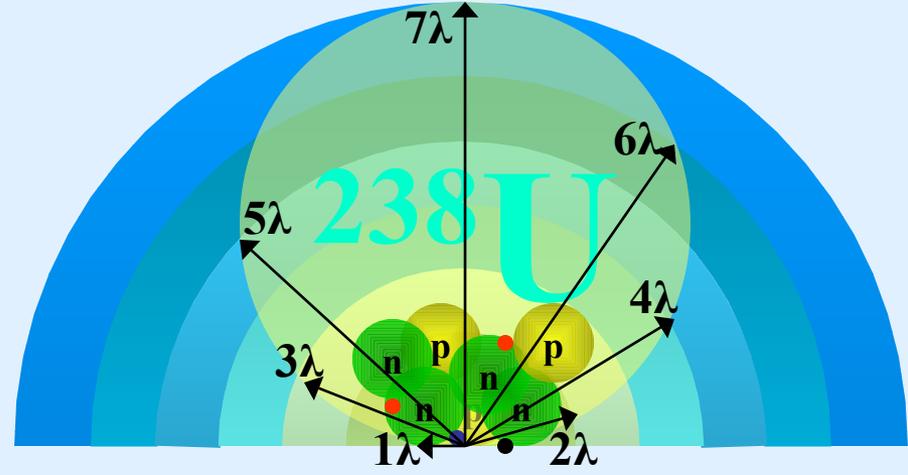
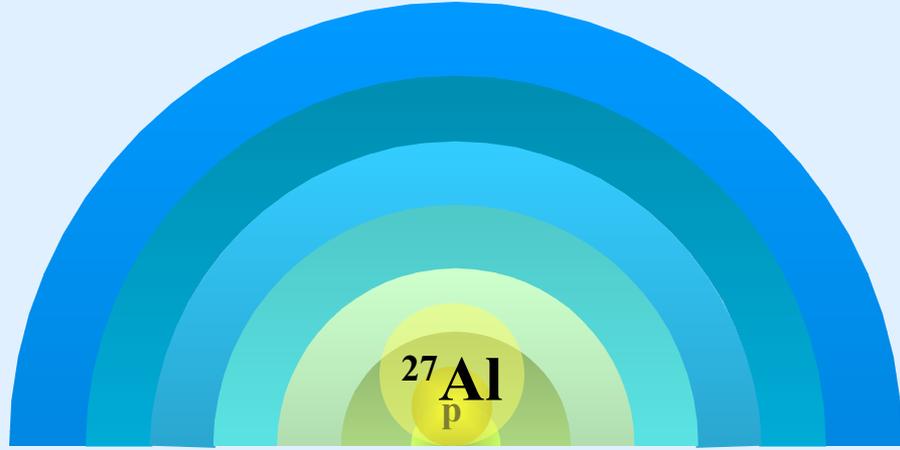
4. Схема ЯРТ обеспечивает **возможность экономически и экологически эффективной утилизации** отработанных тепловыделяющих сборок (ТВС), содержащих отработанное ядерное топливо (**ОЯТ**), **без** их сложной и «грязной» радиохимической переработки и разделения на элементы.

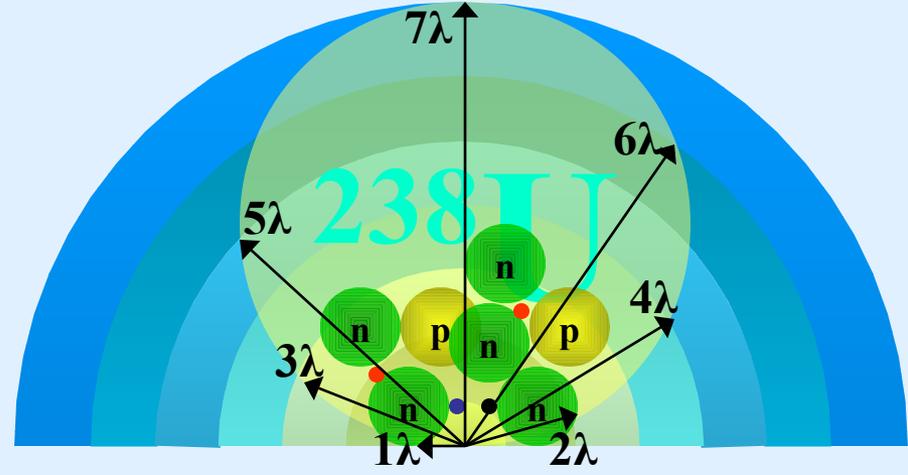
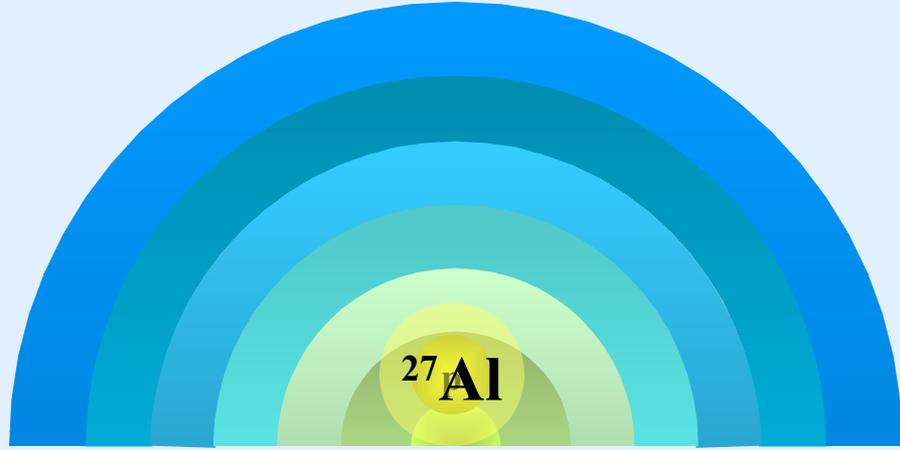
Две последние возможности определяются свойствами каскада.

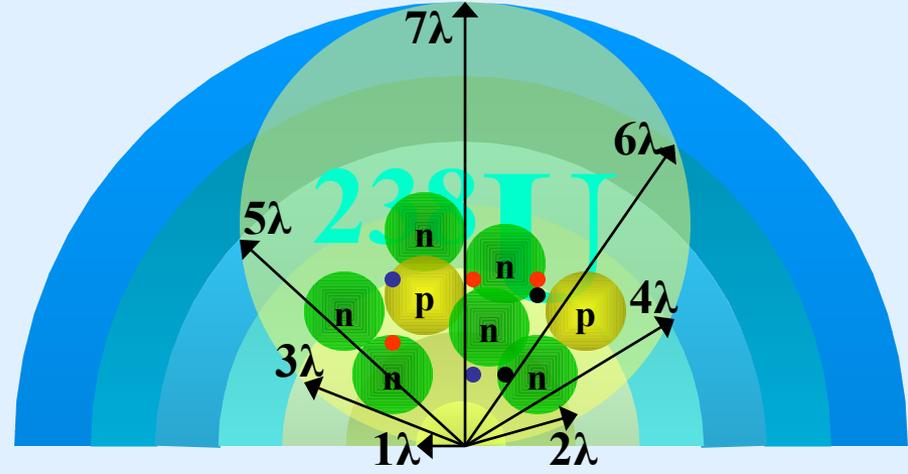
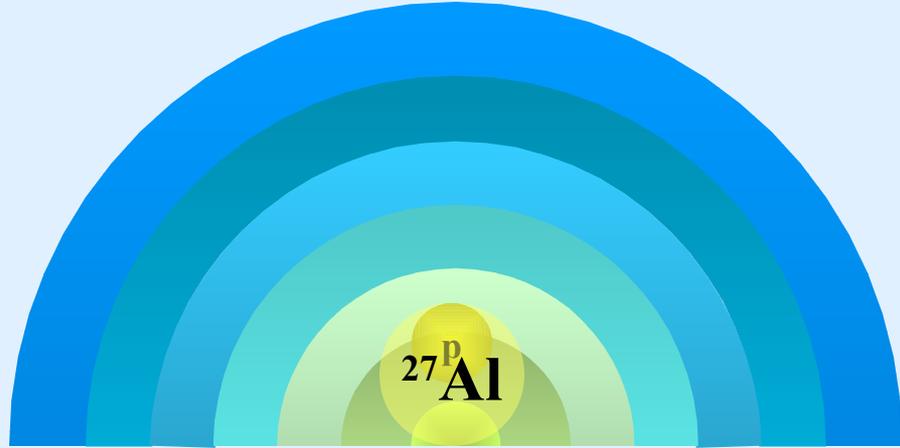
При каскадном механизме генерации нейтронов **в квазибесконечной системе** не является принципиальным с легким или тяжелым ядром вступил в неупругое взаимодействие первичный релятивистский протон.

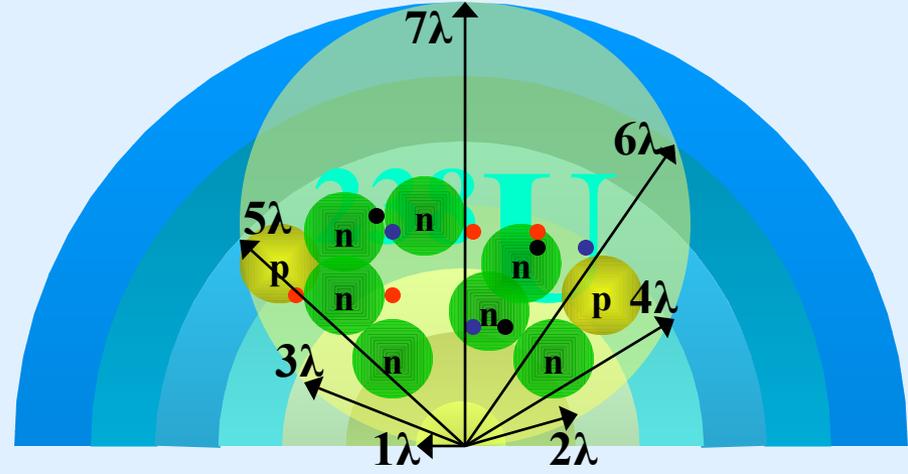
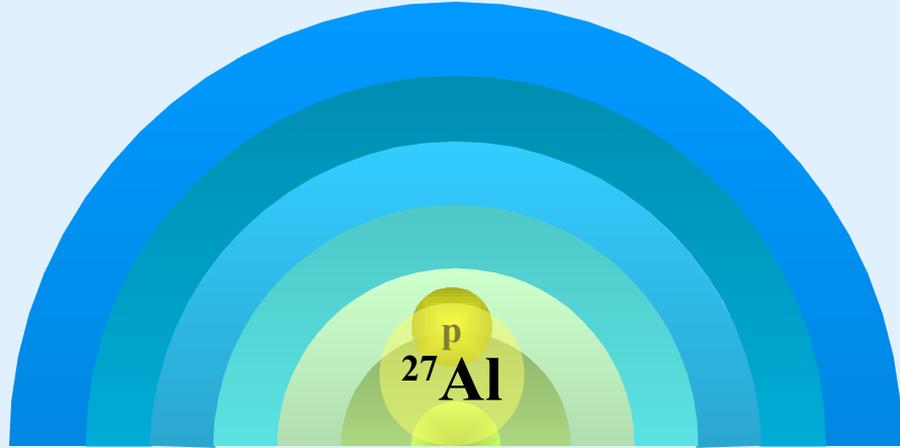
При взаимодействии релятивистского протона с легким ядром генерируется меньше нейтронов, но гораздо более жестких (высокоэнергетичных) 

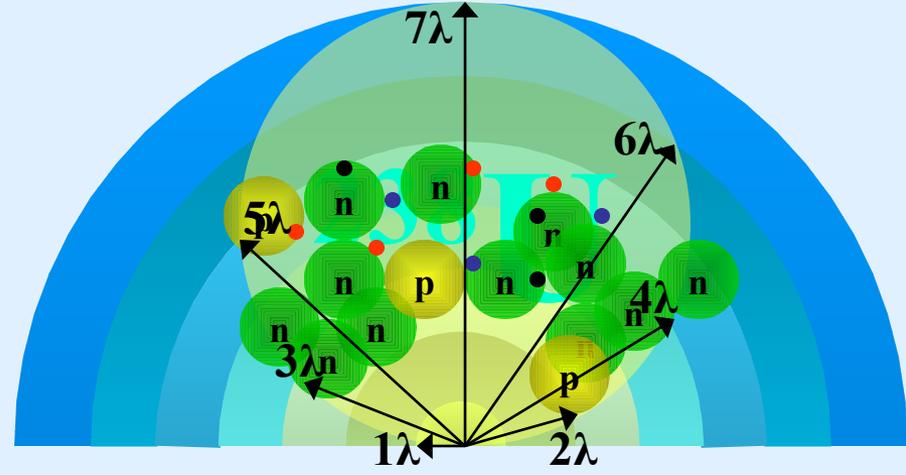
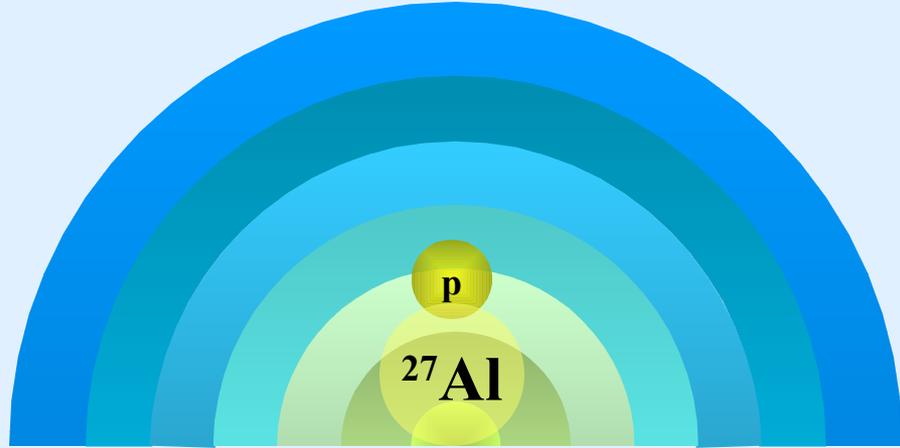


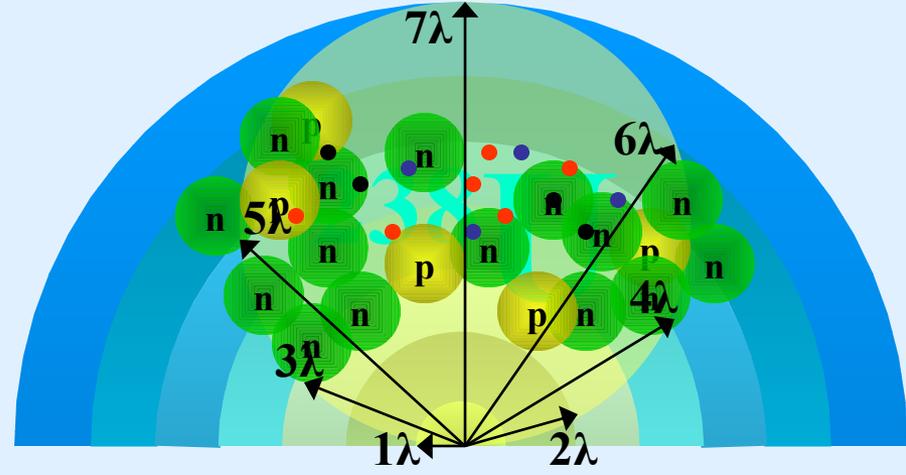
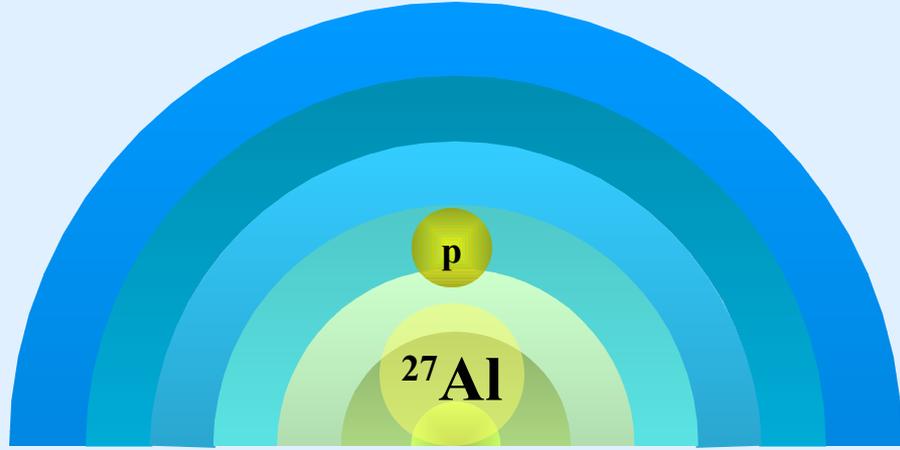


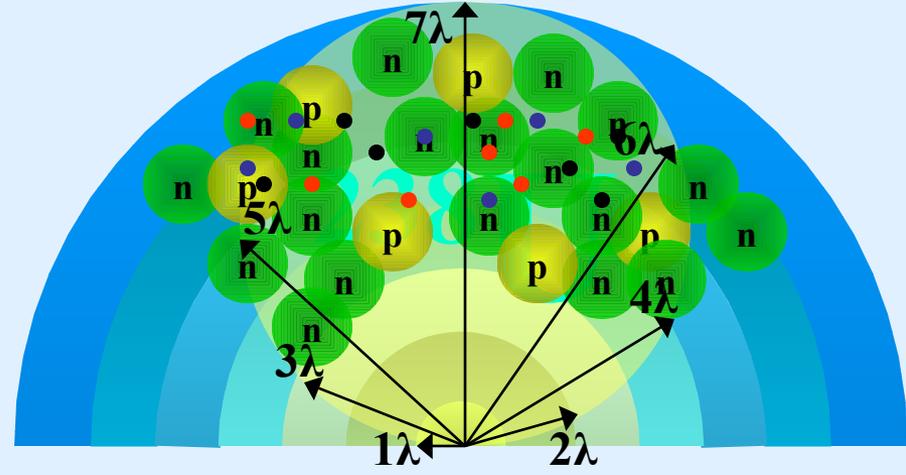
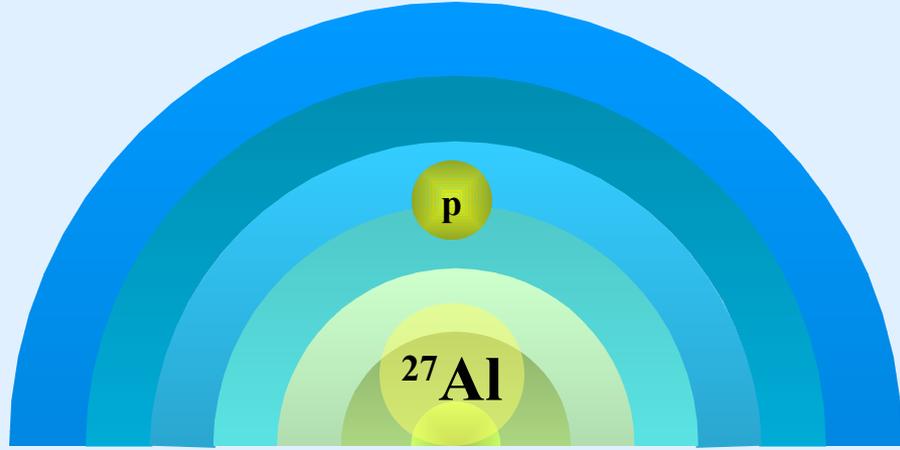


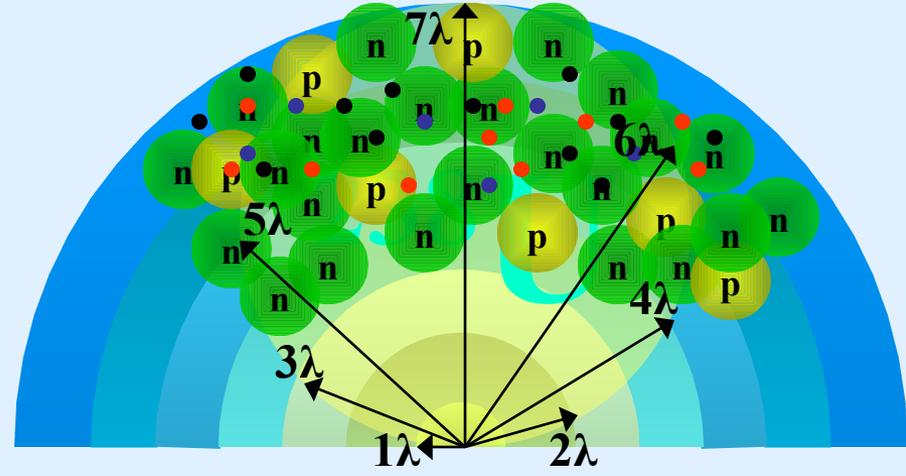
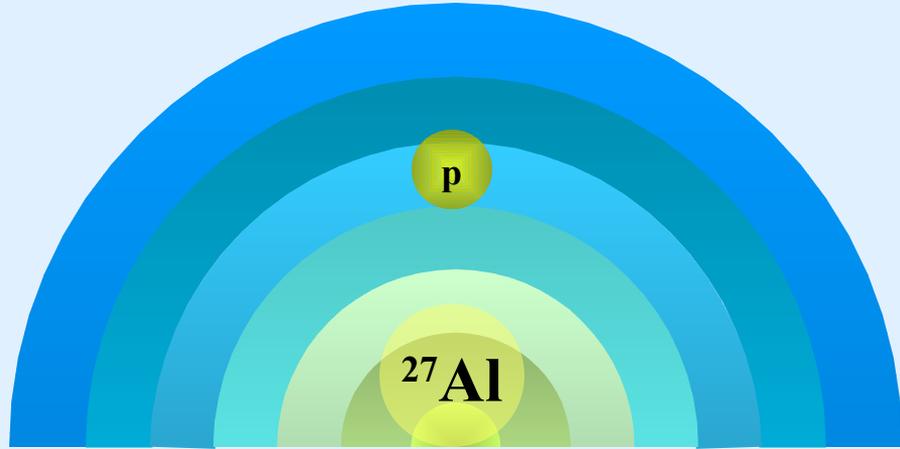


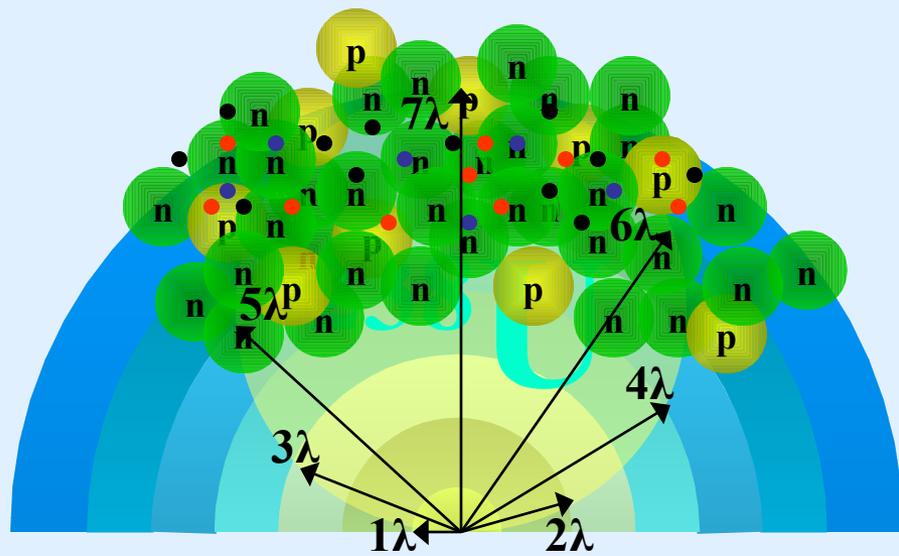
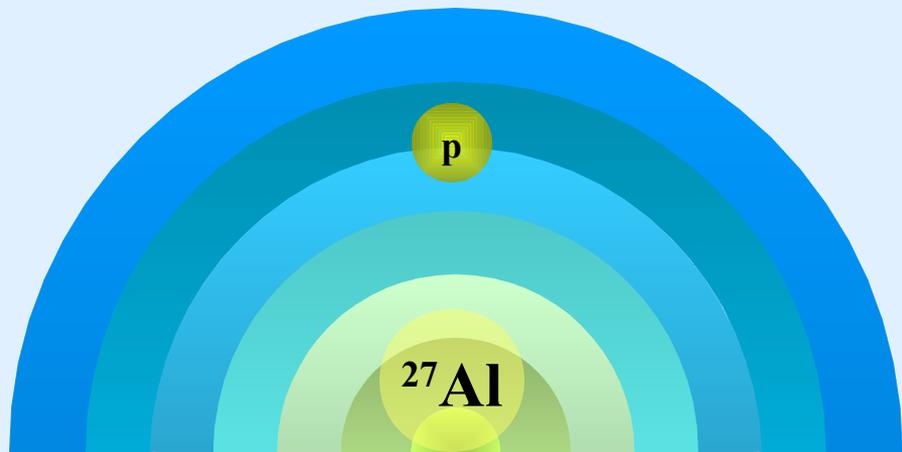


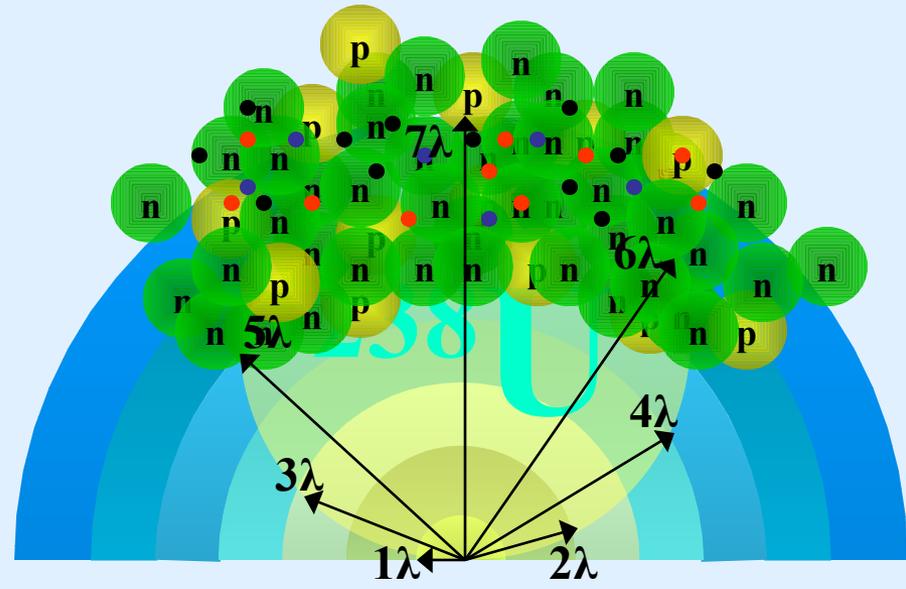
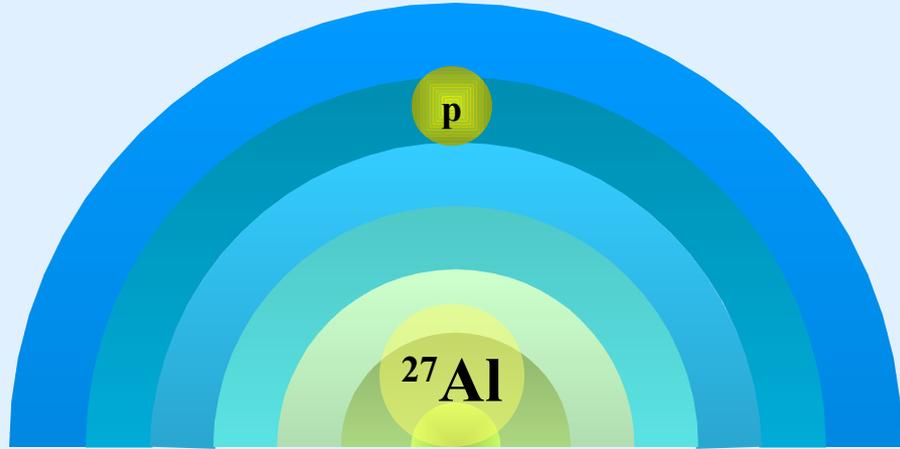


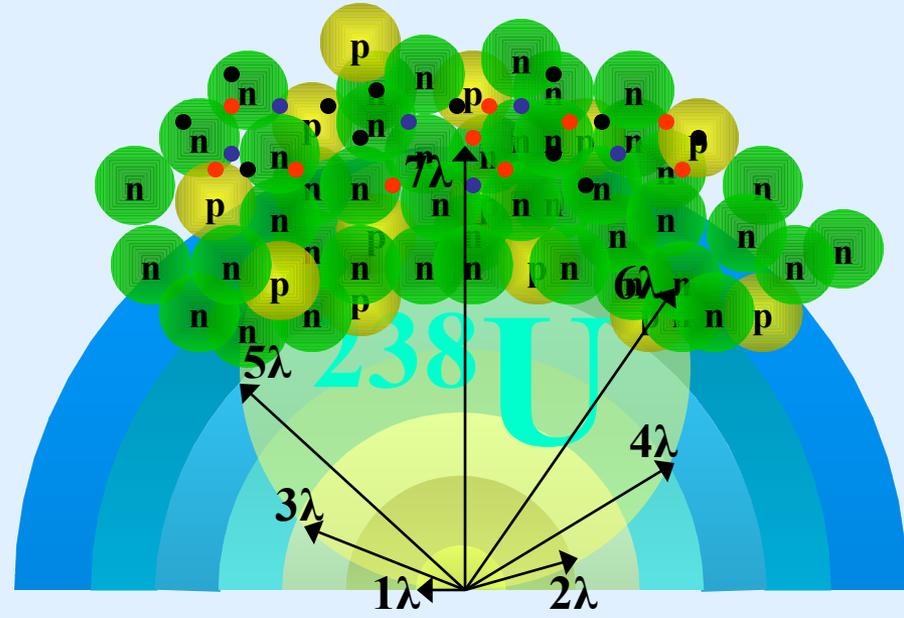
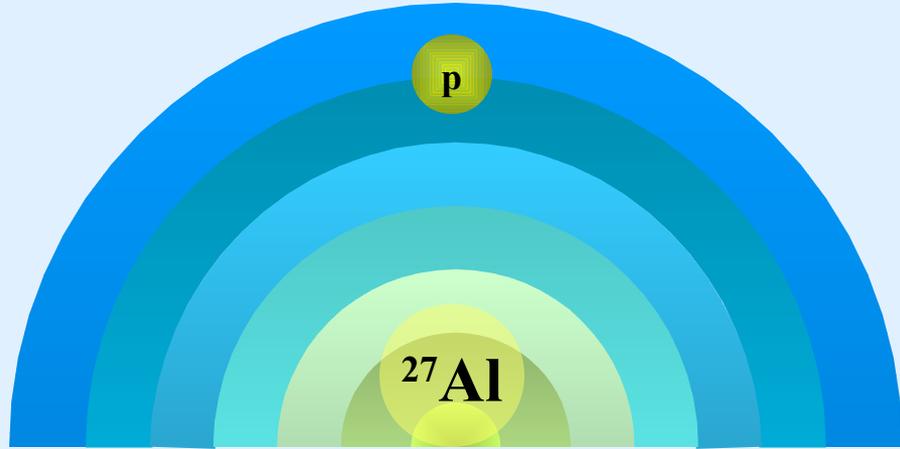


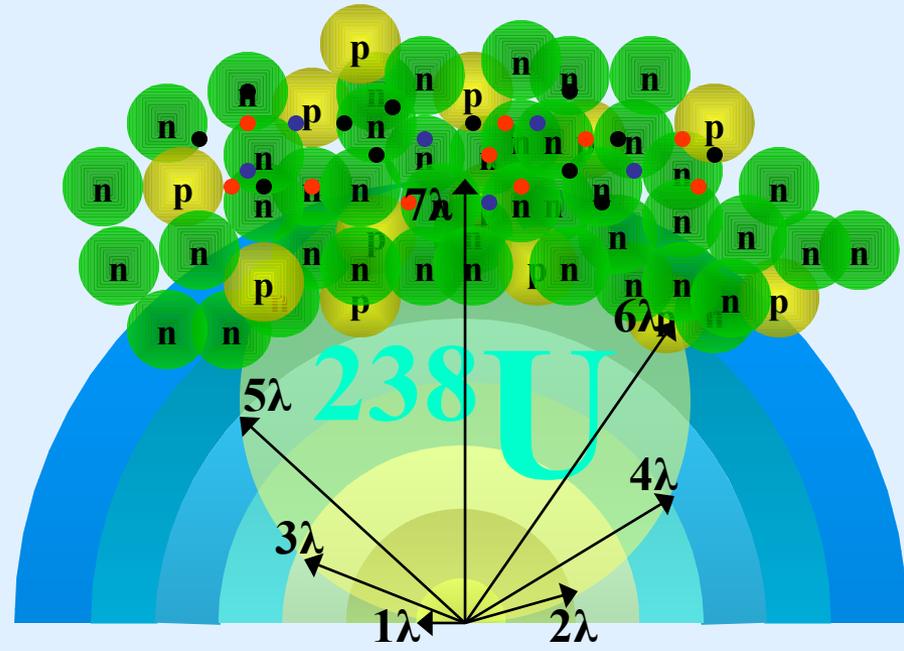
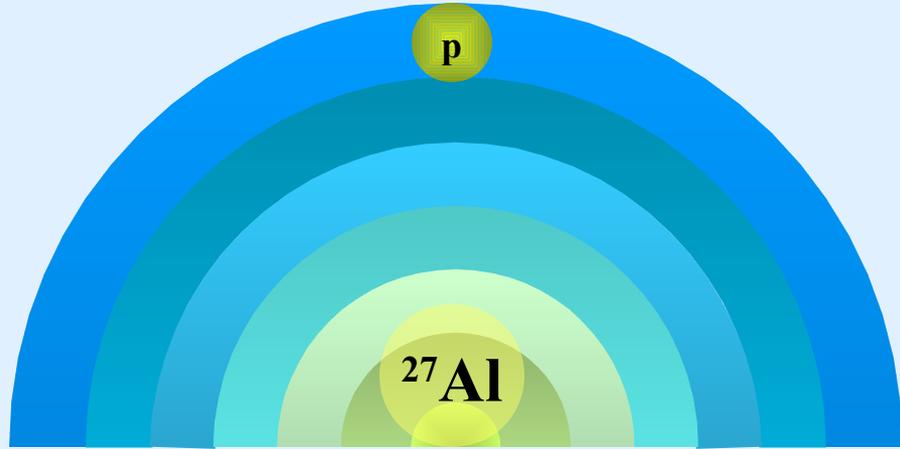


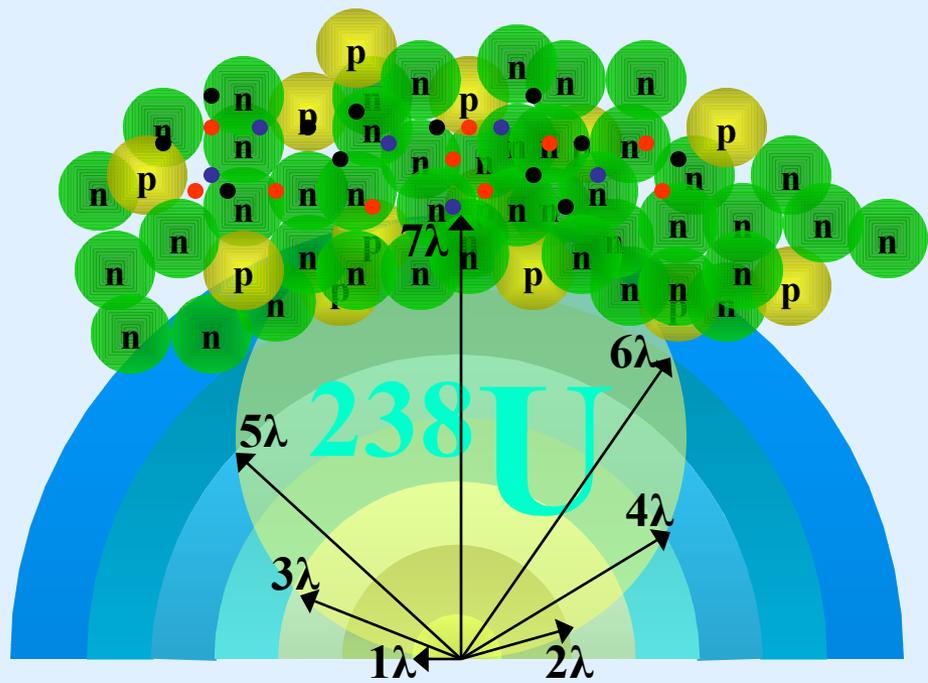
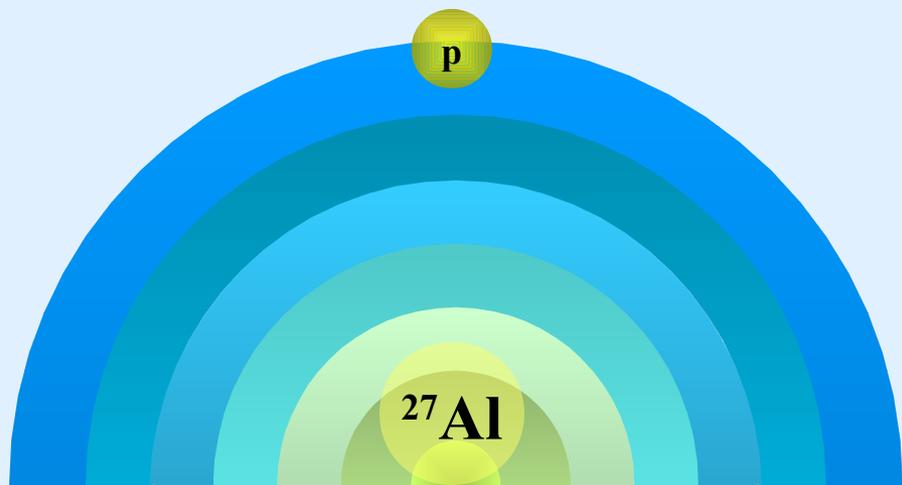


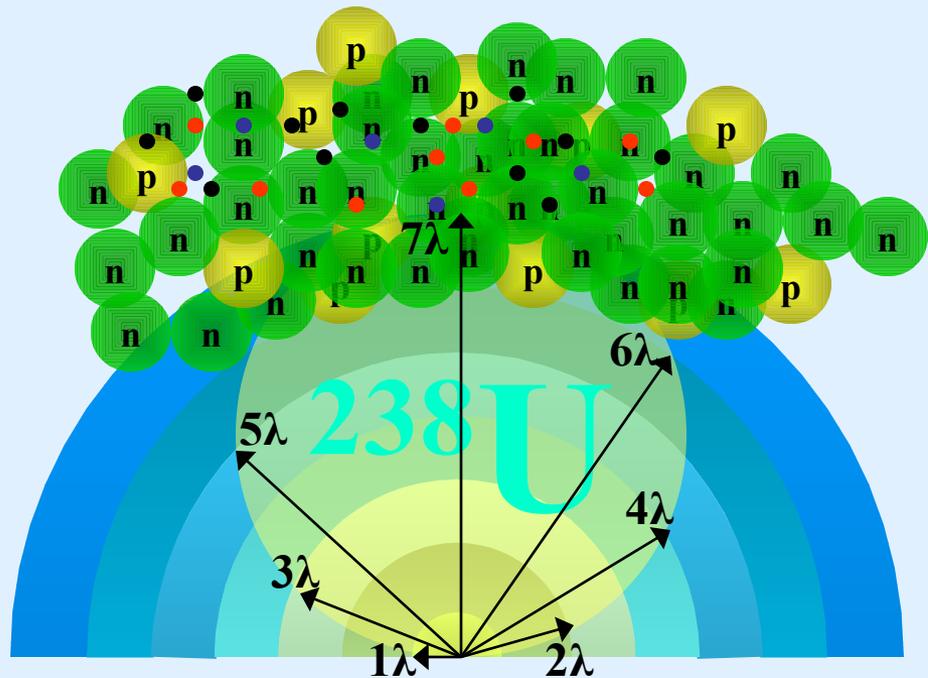
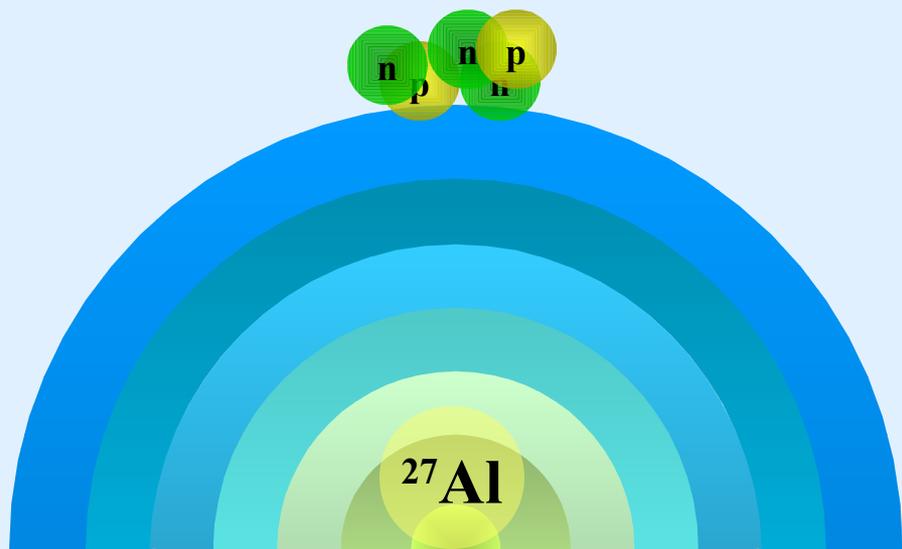




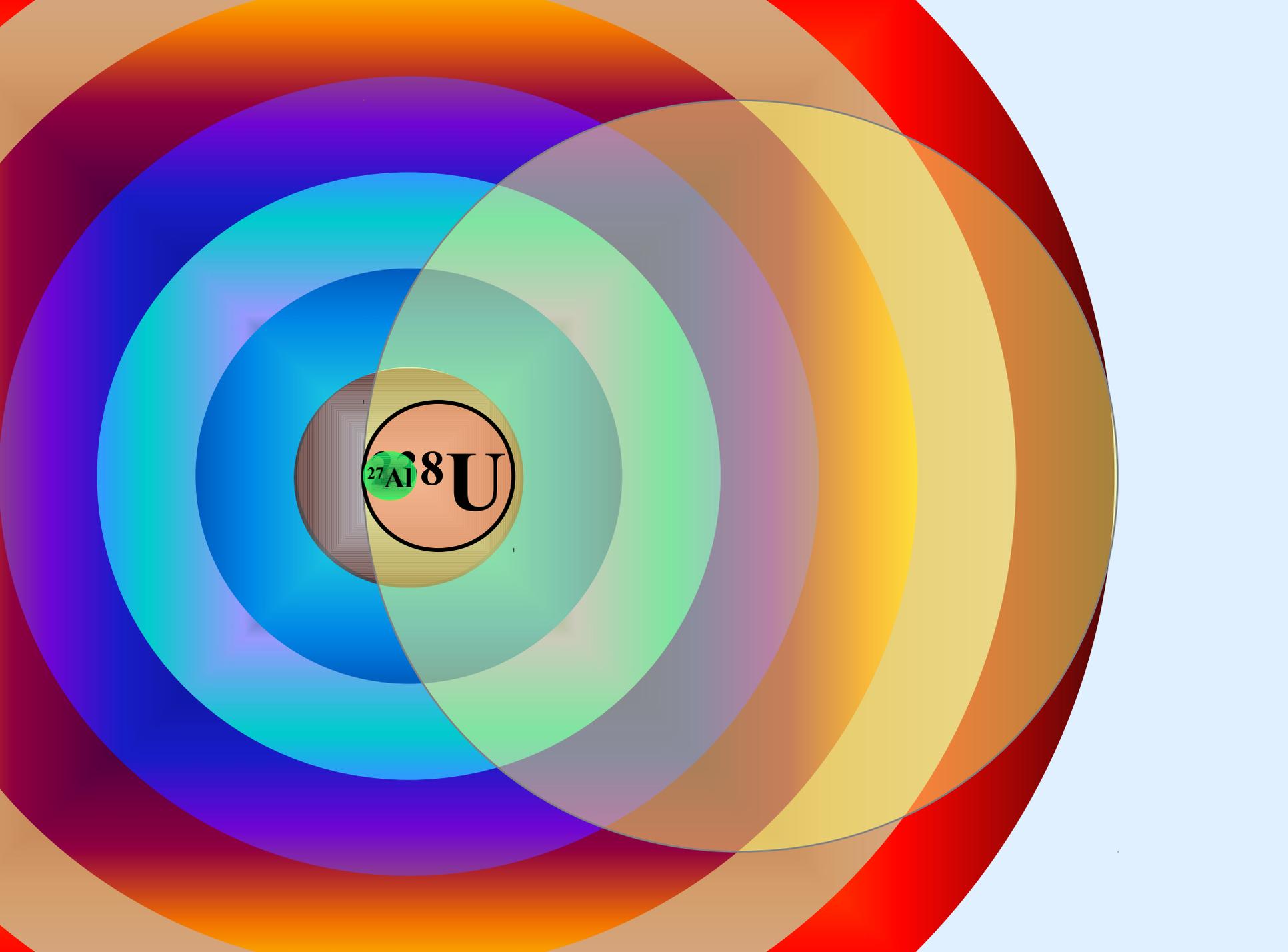




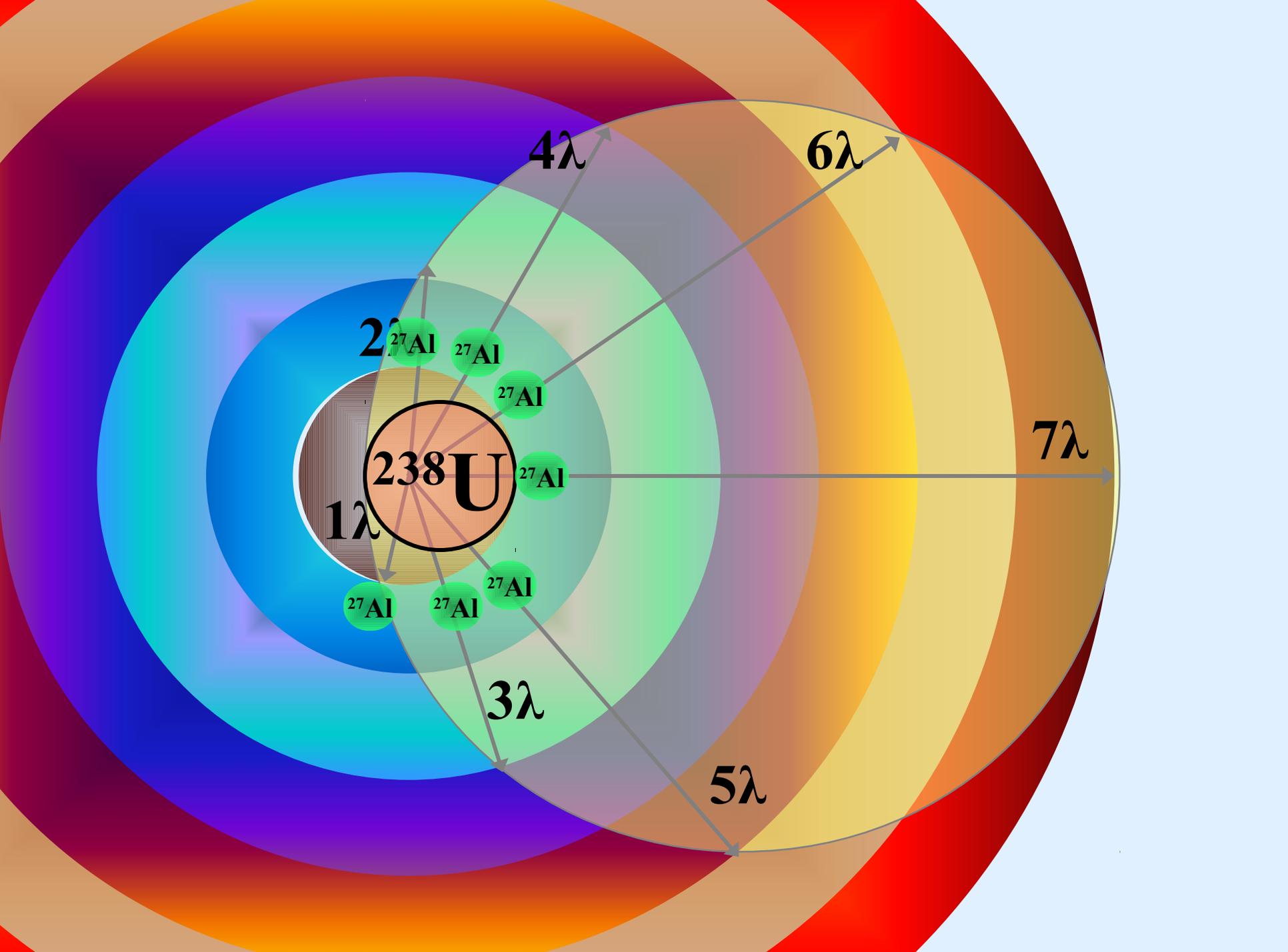


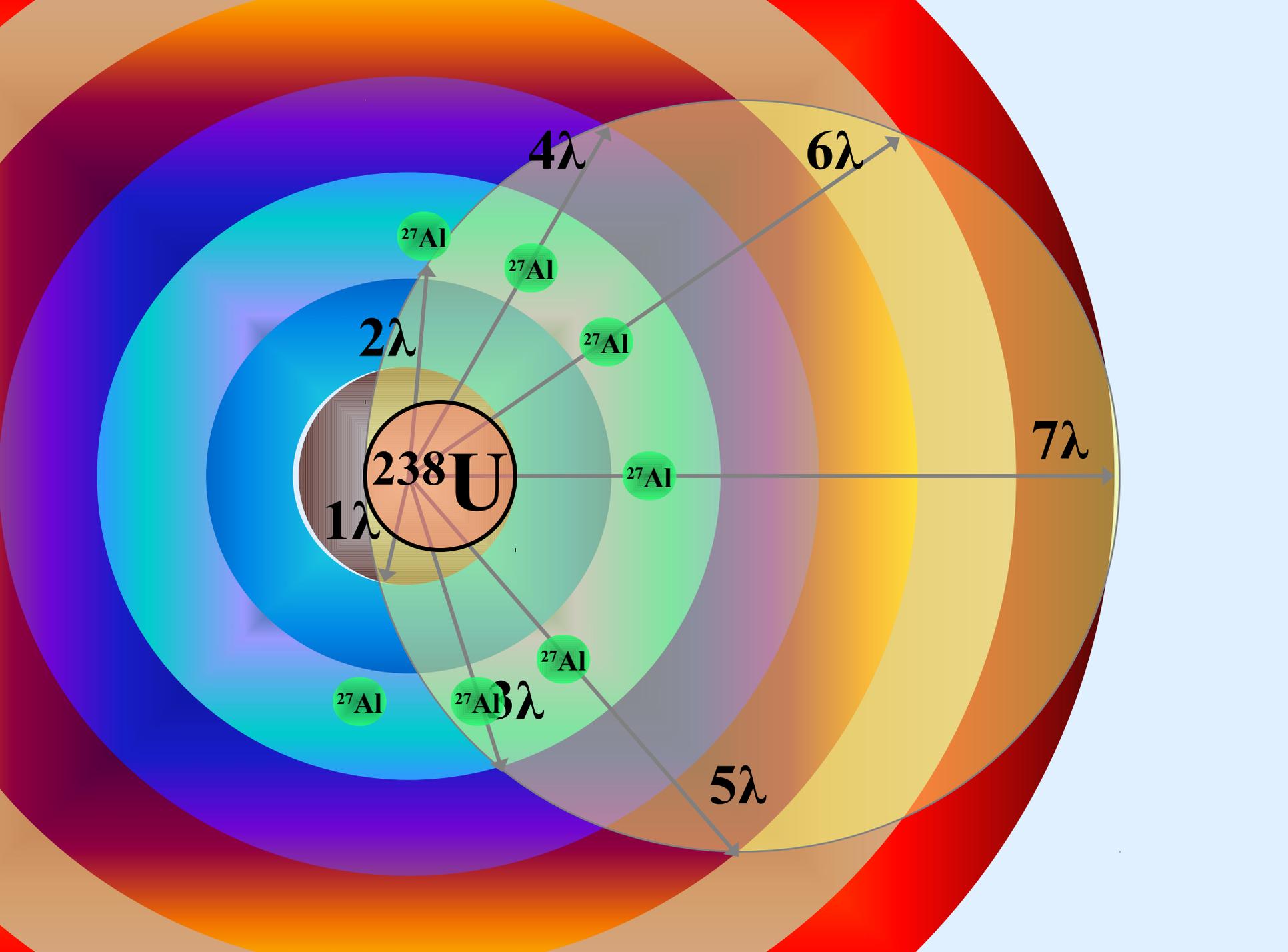


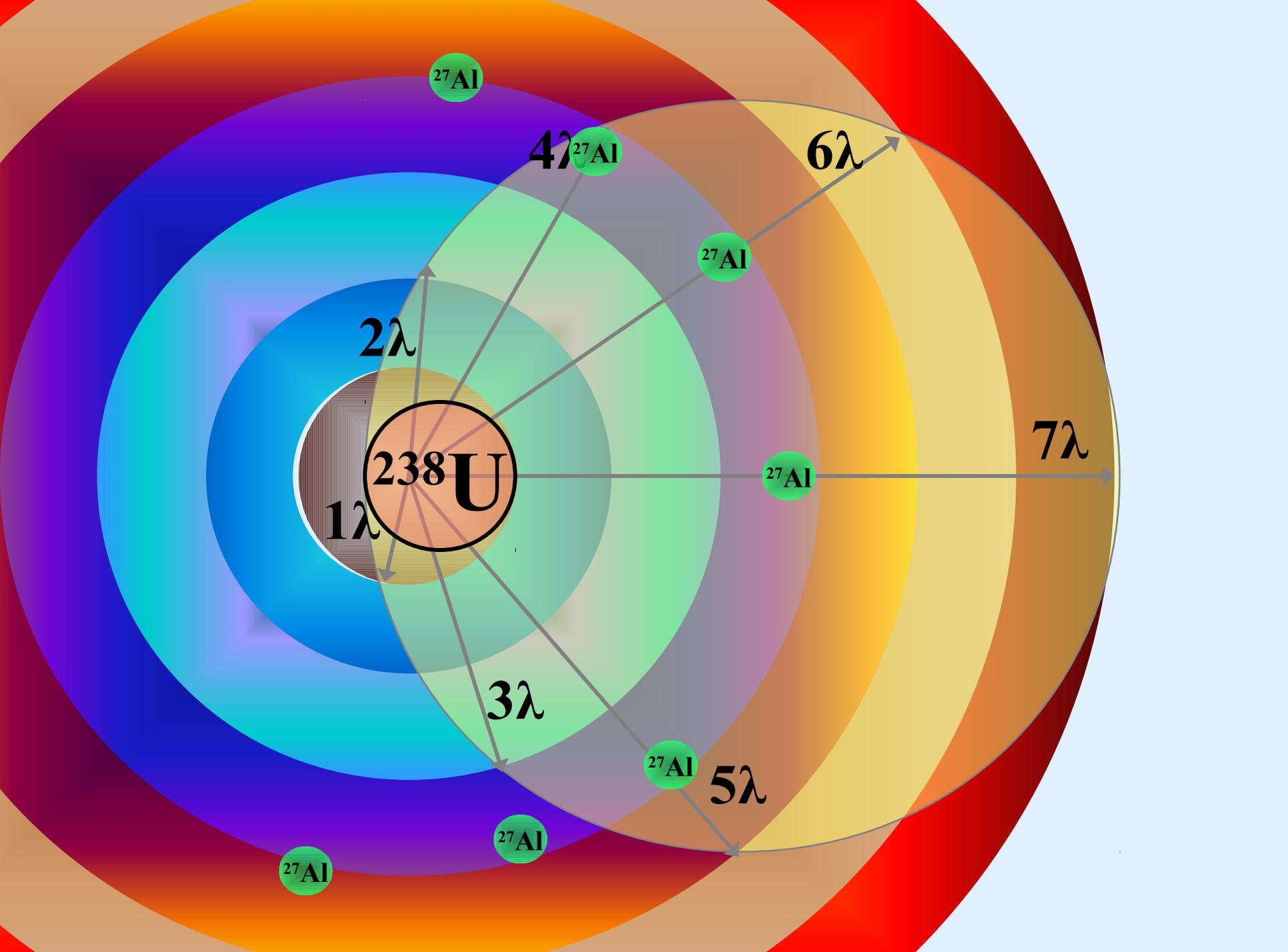
Эти нейтроны далее восстановят искомую множественность в последующих поколениях межъядерных каскадов ----->

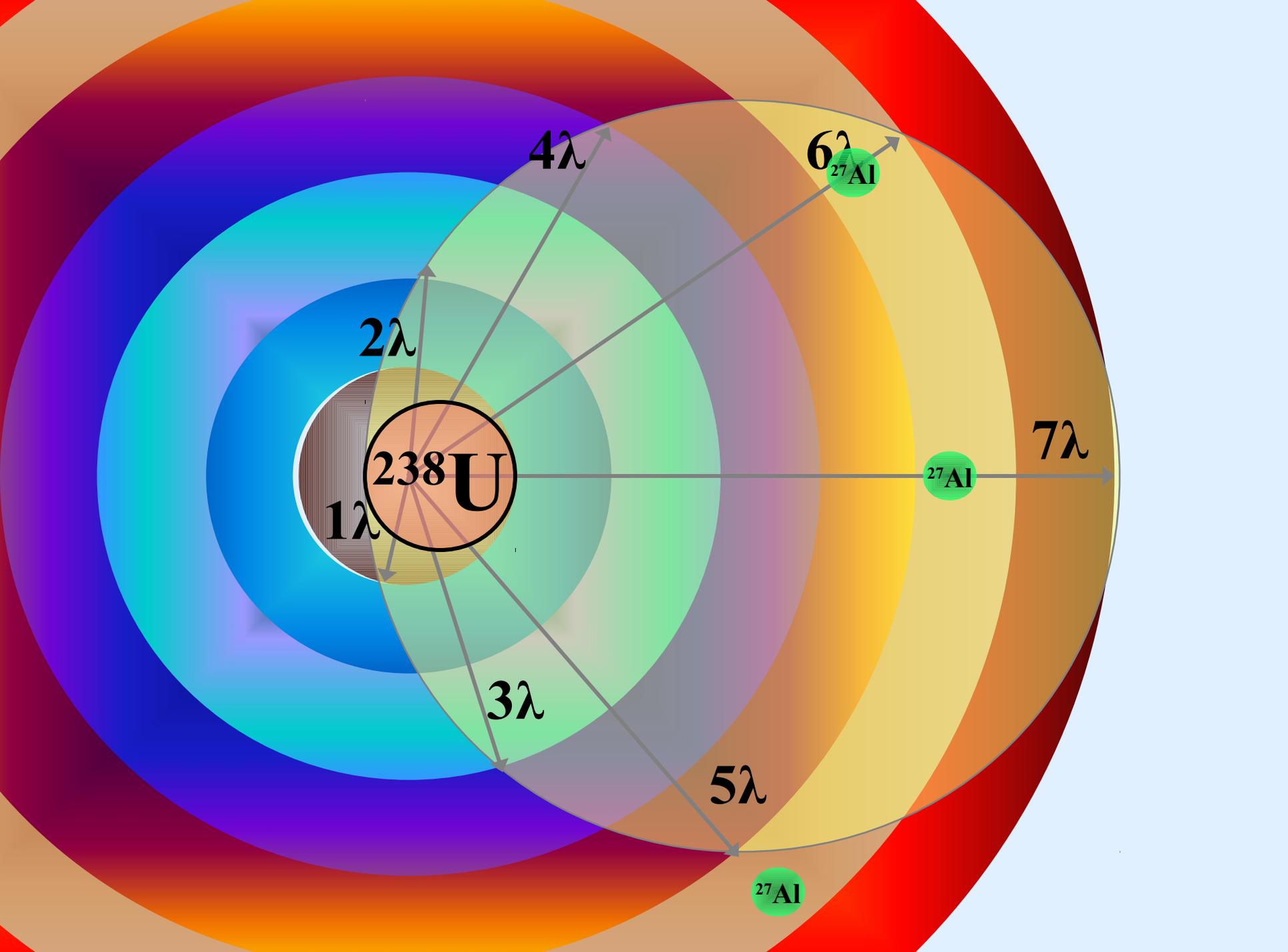


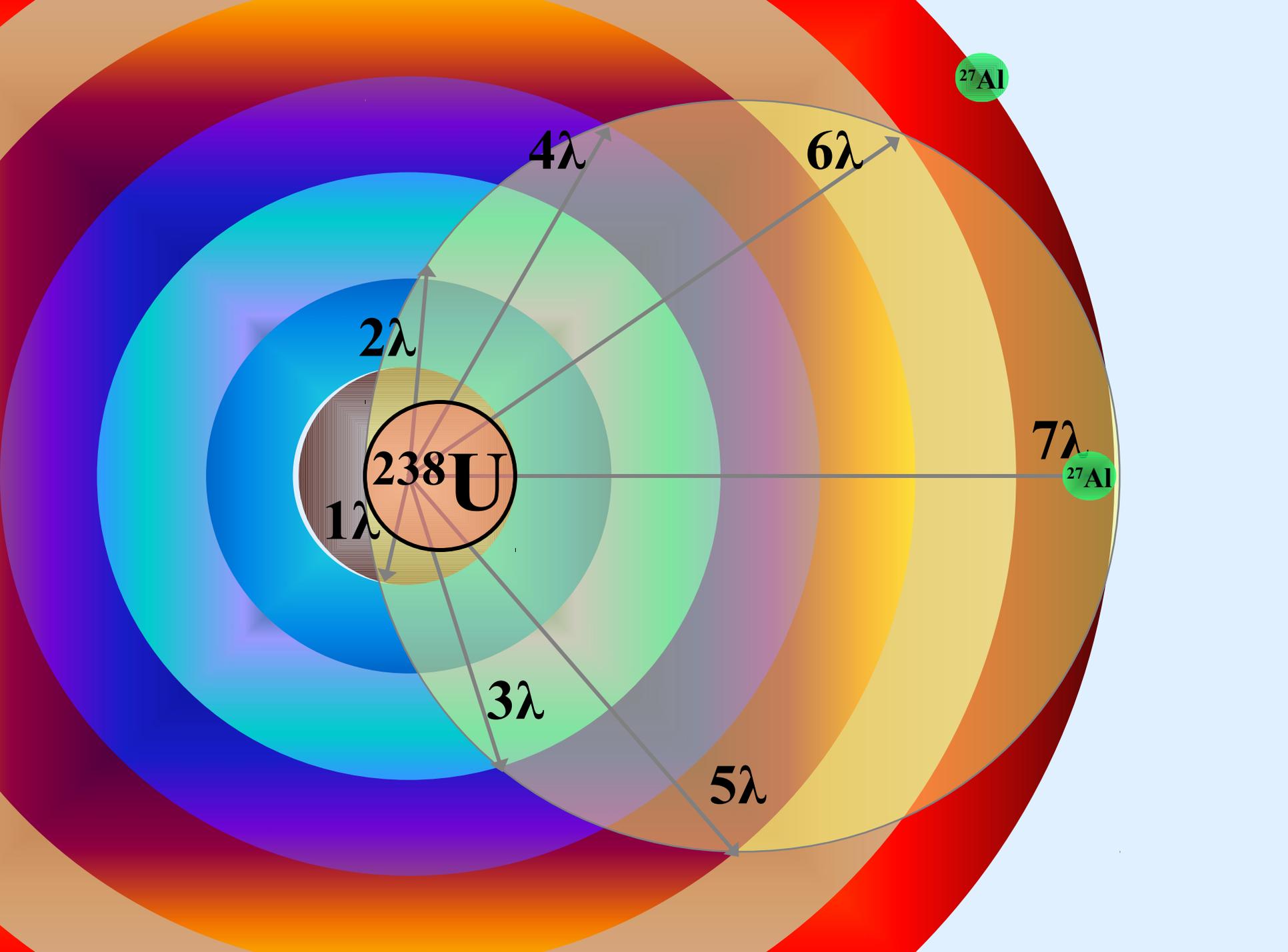
^{27}Al ^{8}U

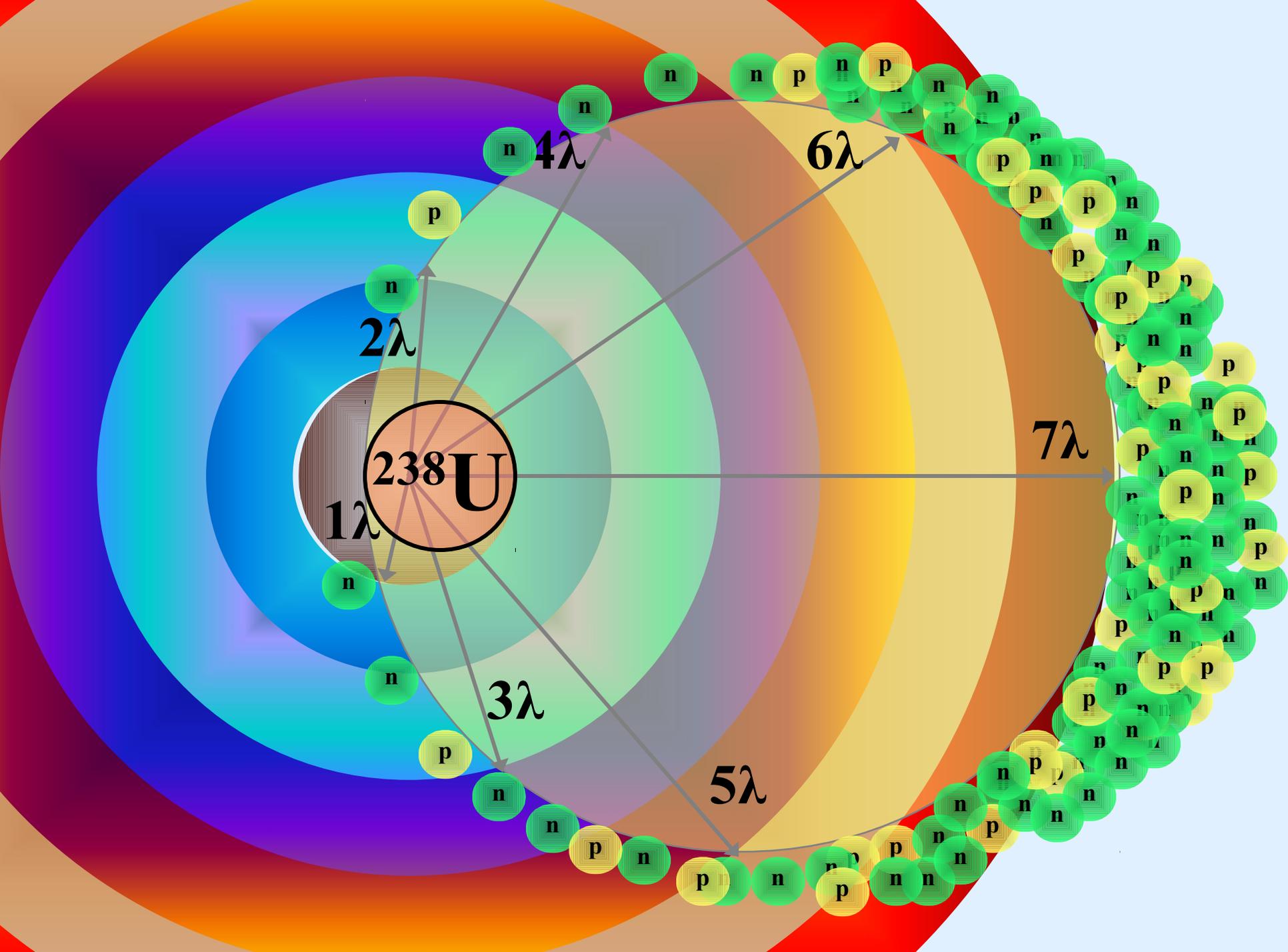








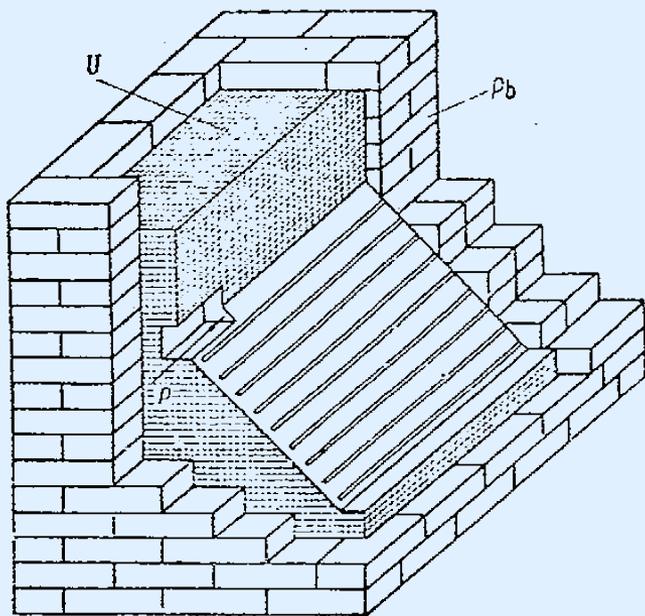




Физические предпосылки схемы ЯРТ

Результаты по наработке плутония и количеству делений, полученные в экспериментах группы Р.Г. Василькова - В.И. Гольданского - Ю.Н. Покотиловского на квазибесконечных мишенях массой $\approx 3,5$ т из обедненного и природного урана при облучении их протонами с энергией **660 МэВ (в расчете на 1 протон).**

	Выход плутония, число ядер	Число делений, η	Число делений, η_{238}	Число делений, η_{235}	Энерговыделение, МэВ	Коэффициент усиления мощности
Обедненный уран	38 \pm 4	13,7 \pm 1,2	12,2 \pm 1,1	1,5 \pm 0,1	~ 3950	$\sim 6,0$
Природный уран	46 \pm 4	18,5 \pm 1,7	14,6 \pm 1.3	3.9 \pm 0.4	~ 4900	$\sim 7,4$
Расчет	36.0 \pm 0.1	11,3 \pm 0.01	9.05 \pm 0.01	2.25 \pm 0.01		
С/Е	0.776	0,61	0.620	0.577		



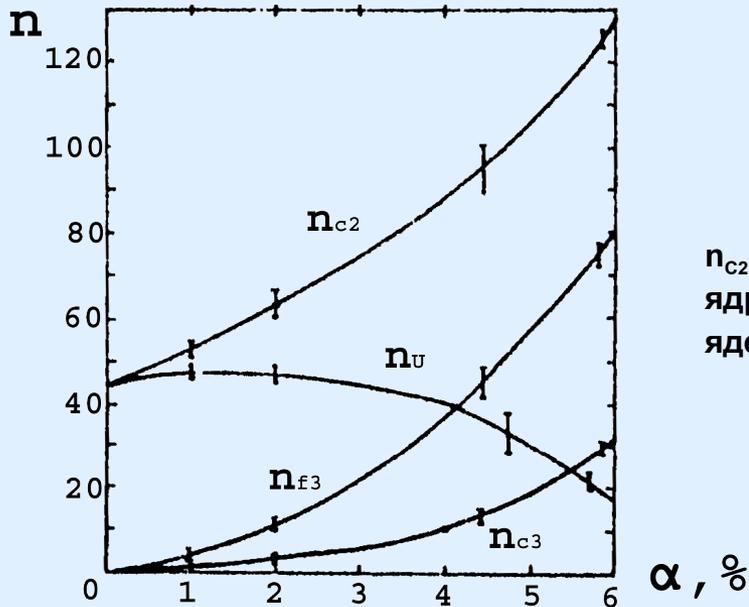
С/Е – отношение результатов расчетов по коду MCNPX к экспериментальным данным

За счет асимметричного ввода пучка результаты эквивалентны мишени массой ~ 7 т.

Средние интегральные характеристики взаимодействия пучка протонов с энергией 1 ГэВ с квазибесконечными мишенями из ^{232}Th и природного ^{238}U (в расчете на 1 первичный протон)

	^{232}Th	^{238}U
Число делений		
$\tau > 10,5 \text{ МэВ}$	$4,3 \pm 0,35$	$5,9 \pm 0,5$
$\tau \leq 10,5 \text{ МэВ}$	$1,9 \pm 0,15$	$13 \pm 1,05$
Тепловыделение (МэВ)		
Ионизационные потери	$596 \pm 47,7$	$562 \pm 45,0$
Деление ядер, $\tau > 10,5 \text{ МэВ}$	$692 \pm 55,4$	$967 \pm 77,6$
Деление ядер, $\tau \leq 10,5 \text{ МэВ}$	$301 \pm 24,1$	2161 ± 173
Суммарное	$1590 \pm 127,2$	3690 ± 295

Комплекс расчетно-теоретических работ по учету динамики наработки ^{239}Pu и ^{233}U в сильноточных системах на основе квазибесконечных делящихся мишеней из природного урана и тория соответственно, выполненных для энергии протонов 1 ГэВ группой В.С. Барашенкова в ЛИТ ОИЯИ.



Зависимость средних интегральных величин в мишени из металлического ^{232}Th со свинцовым сердечником от обогащения изотопом ^{233}U (в расчете на один первичный протон с энергией 1 ГэВ)

n_{c2} — число (n, γ) -захватов ядрами ^{232}Th , n_{c3} — число (n, γ) -захватов ядрами ^{233}U , n_U — число остающихся ядер ^{233}U , n_{f3} — число делений ядер ^{233}U . Указаны статистические погрешности расчета

Скорость наработки легкоделящихся изотопов, наибольшая при их концентрациях $\leq 1,5\%$, быстро снижается и на уровне концентрации $\sim 6\%$ достигается равновесие наработки и деления.

С учетом того, что отношения $\alpha = \sigma_v / \sigma_f$ для ^{233}U и ^{239}Pu , а также сечения радиационного захвата σ_v для ^{232}Th и ^{238}U в рассматриваемой области энергий близки, в пределах точности оценок можно считать, что паритет в квазибесконечной урановой мишени (активной зоне), — наступит также при концентрации легкоделящегося $^{239}\text{Pu} \sim 6\%$.

Для энергии 1 ГэВ увеличение коэффициента усиления мощности протонного пучка составляет порядка $6,0 \div 12$ раз при увеличении концентрации нарабатываемых легкоделящихся ядер от нуля до равновесной концентрации $\sim 6\%$.

Средние выходы нейтронов всех энергий (Υ) и нейтронов с энергиями выше 20 МэВ (Υ_{20}) на пучках протонов для протяженной свинцовой мишени ($\varnothing 20 \times 60$ см) на один падающий протон, полученные в комплексе экспериментов группы В.И. Юревича – Р.М. Яковлева, выполненных в ЛВЭ ОИЯИ, и отношение расчетной величины к экспериментальному результату С/Е.

E_p , ГэВ	Эксперимент (n/p)		MCNPX: INCL4+ABLA		MCNPX: BERTINI		Fluka 2008.3	
	Υ	Υ_{20}	Υ	Υ_{20}	Υ	Υ_{20}	Υ	Υ_{20}
0.994 C/E	24.1±2.9	2.1±0.4	23.7(2%) 0,983	1.62(2%) 0,771	24.1 1,000	1.45 0,690	24.4 1,012	1.40 0,667
2.0 C/E	44.4±5.3	4.7±0.8	46.1(2%) 1,038	3.29(3%) 0,700	49.7 1,119	3.02 0,643	48.7 1,097	3.21 0,683
2.55 C/E	63.5±7.6	5.8±1.9	50.5(1%) 0,795	3.99(1%) 0,688	62.5 0,984	3.88 0,669	60.1 0,946	4.10 0,707
3.17 C/E	71.6±8.6	6.8±1.2	57.9(1%) 0,809	4.66(1%) 0,685	76.3 1,066	4.89 0,719	72.14 1,008	5.03 0,740
3.65 C/E	80.6±9.7	8.5±1.5	62.6(1%) 0,777	5.14(1%) 0,605	86.8 1,077	5.5 0,647	80.2 0,995	5.67 0,667

$$\Upsilon_{20} / \Upsilon \sim 10\%$$

Энергетические характеристики нейтронного излучения, выходящего из ограниченной свинцовой мишени с размерами $\varnothing 20 \times 60$ см, в зависимости от энергии протонов, полученные в экспериментах группы В.И. Юревича – Р.М. Яковлева.

E_p , ГэВ	$\langle E \rangle$, МэВ	E_{kin} , МэВ	E_{kin} / E_p , %	W , МэВ	W / E_p , %
0,994	8,82	213	21,3	382	38,2
2,0	11,6	513	25,6	822	41,1
3,65	13,7	1106	30,3	1670	45,6

При энергии протонов 2 ГэВ на образование нейтронов с $E < 20$ МэВ тратится **менее 240 МэВ**, т.е. менее **30%**. Остальная часть энергии нейтронообразования - **70%** (т.е. ~ 560 МэВ) - приходится на **нейтроны высокой энергии**, **выход** которых составляет $\sim 10\%$ при размерах мишени $\varnothing 20 \times 60$ см. Оставшиеся 60% энергии пучка - это тепловыделение в мишени.

Результаты консервативных оценок ожидаемого коэффициента усиления мощности ($K_{ум}$) протонного пучка в квазибесконечной мишени из природного урана в зависимости от энергии протонов (E_p).

E_p , ГэВ	Стартовый $K_{ум}$	Равновесный $K_{ум}$
0,66	7,4	40 ÷ 90
1,0	12,0	70 ÷ 140
10,0	22,0	130 ÷ 260

Оценки возможностей ЯРТ-систем для производства энергии и утилизации ОЯТ. Технологические аспекты.

Исходные данные

1. КПД ускорительного комплекса (от розетки) – 33%.
2. КПД 2-го контура – 50 %.
3. Самодостаточный $K_{yM} \sim 6$.

Оценки возможностей ЯРТ-систем для производства энергии

Протонный ускоритель мощностью 10 МВт ($E_p = 10$ ГэВ и ток 1 мА), в соответствии с оценками таблицы, при $K_{ум} \sim 20$ обеспечит стартовую мощность ЯРТ-реактора ~ 200 МВт.

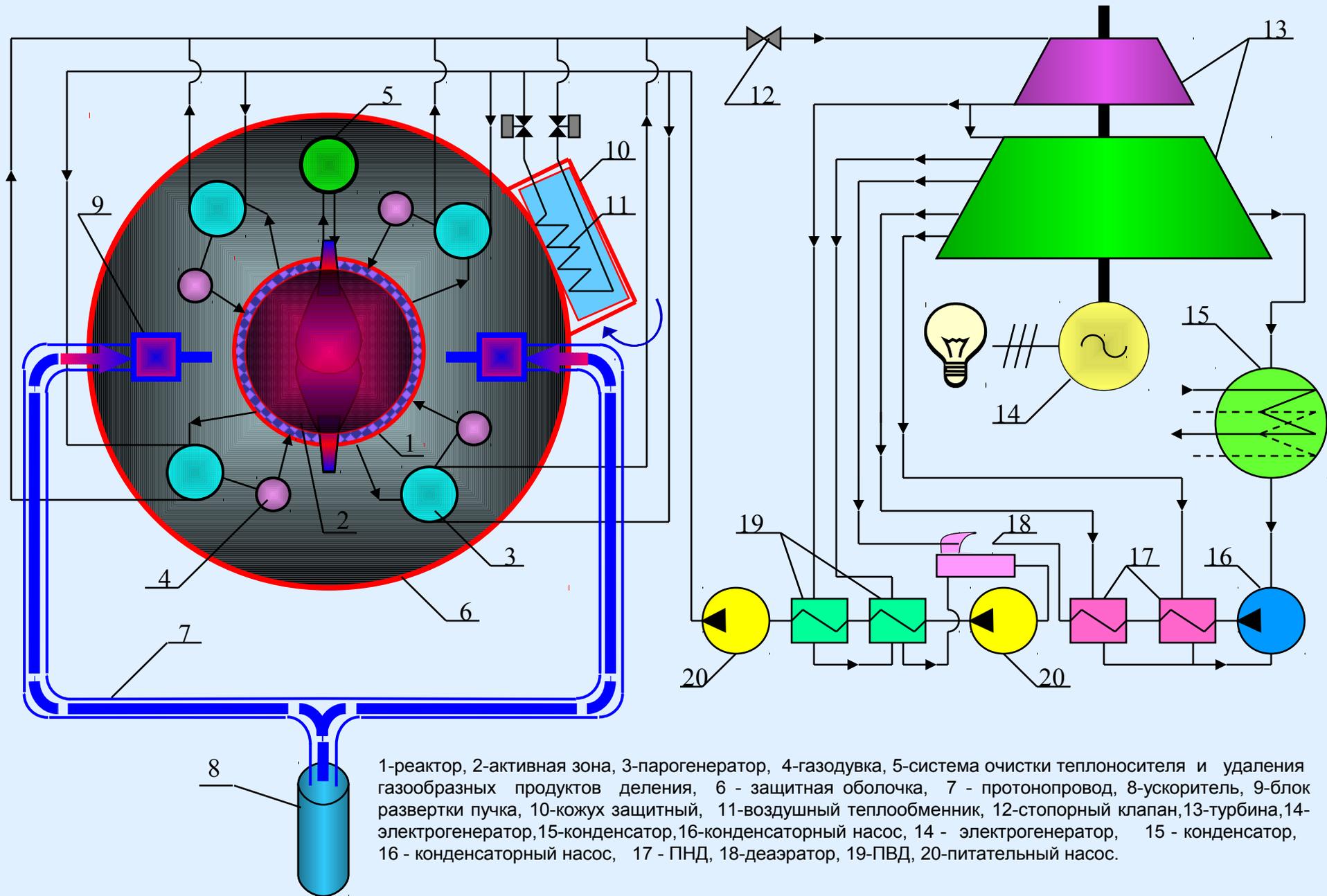
При достижении равновесной концентрации ^{239}Pu в АЗ, мощность установки может достичь значений в диапазоне 1300÷2600 МВт.

При кпд 2-го контура 50%, блок ядерной релятивистской электростанции (**ЯРЭС**) на старте сможет вырабатывать около 100 МВт электроэнергии, а при выходе на стационарный режим равновесной концентрации ^{239}Pu выработка может возрасти до 650÷1300 МВт.

Из них около 33 МВт пойдет на собственные нужды, в основном на обеспечение работы ускорителя (кпд «от розетки» $\sim 33\%$), поскольку прочие затраты энергии учтены в кпд 2-го контура.

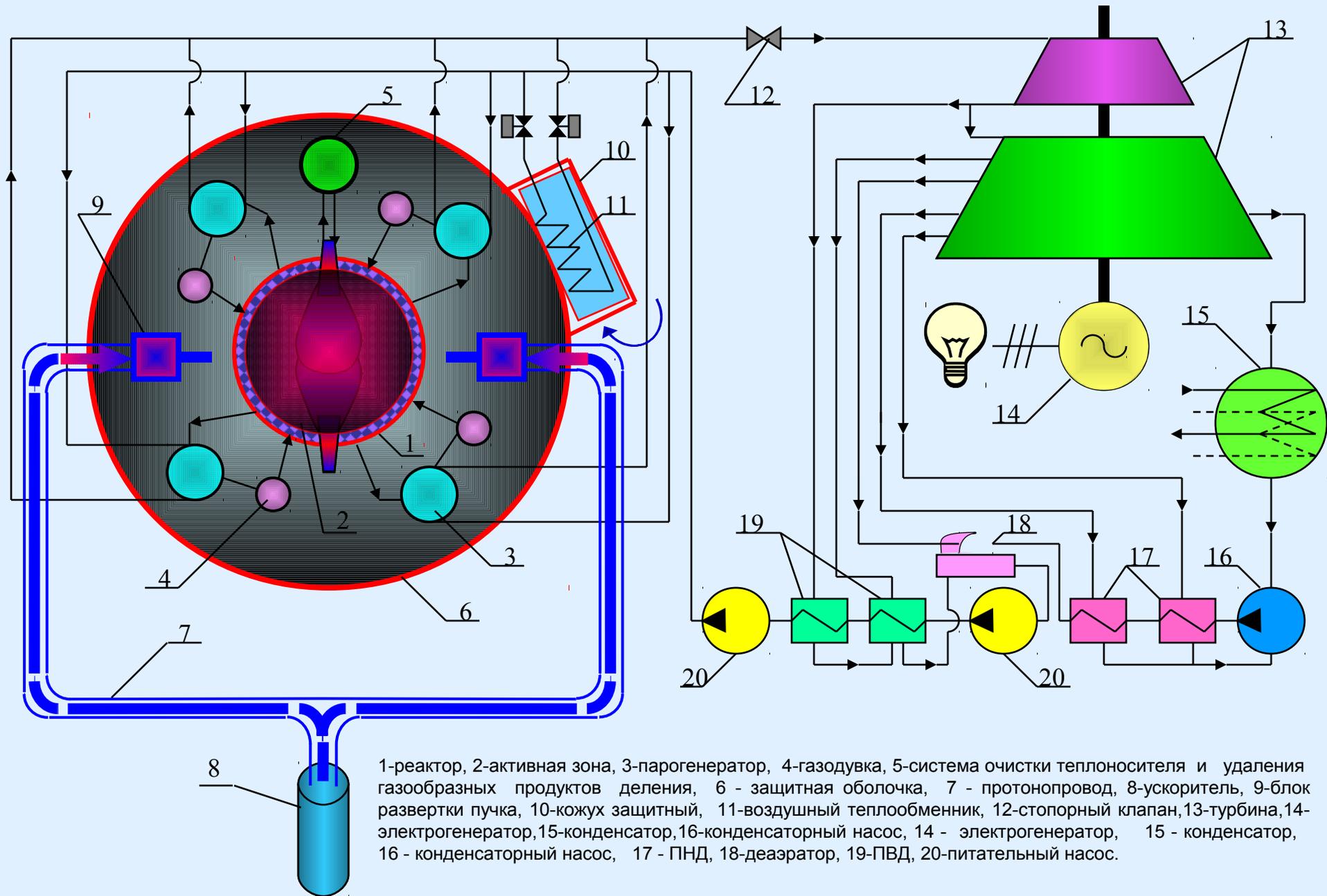
Т.е. при запуске блока ЯРЭС $\sim 33\%$ вырабатываемой электрической мощности будет уходить на собственные нужды, а при выходе на стационарный режим работы – от 4,6% до 2,3%. Сегодня блок ВВЭР-1000 тратит на собственные нужды $\sim 5\%$ вырабатываемой электроэнергии.

Принципиальная схема блока ЯРЭС



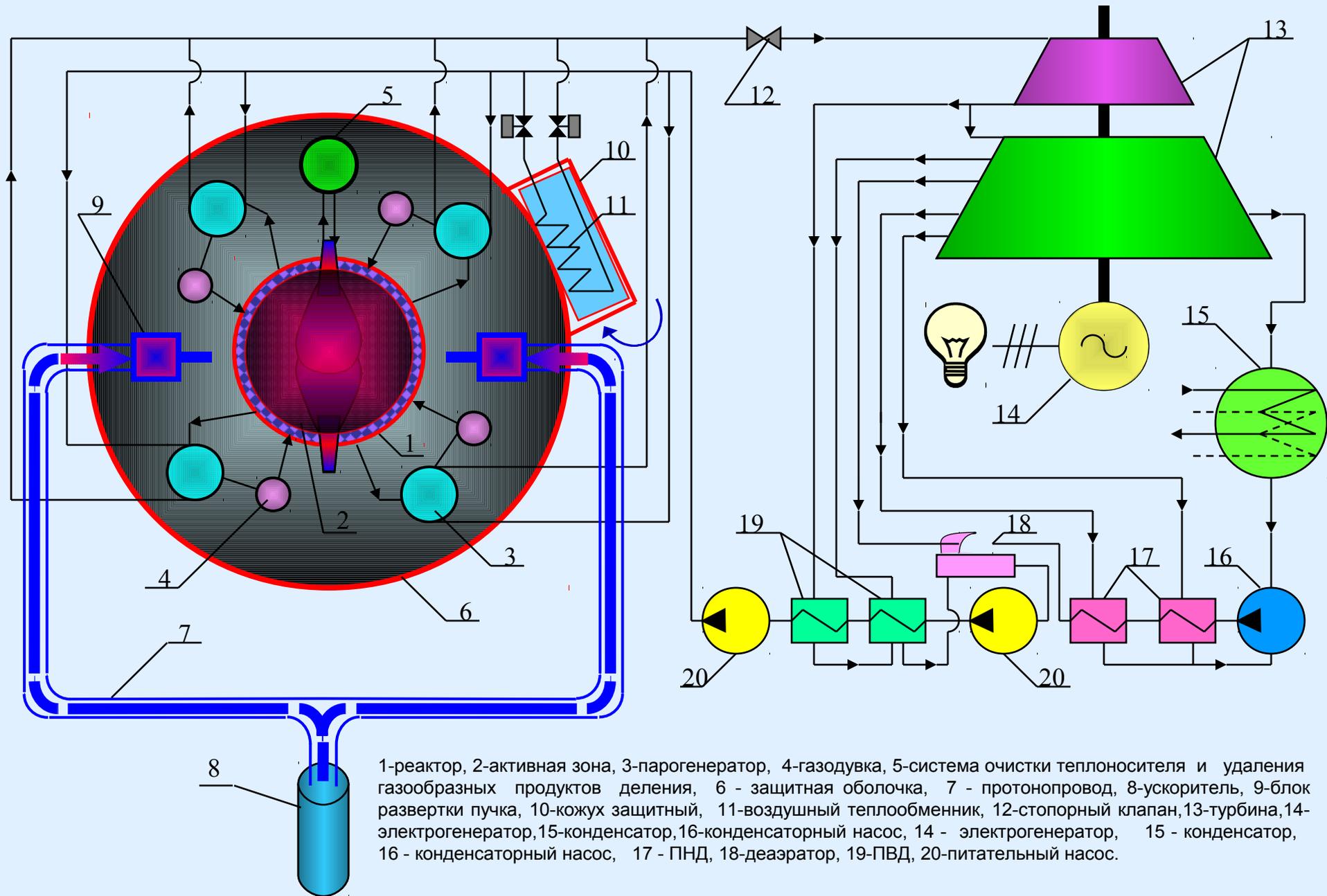
1-реактор, 2-активная зона, 3-парогенератор, 4-газодувка, 5-система очистки теплоносителя и удаления газообразных продуктов деления, 6 - защитная оболочка, 7 - протонопровод, 8-ускоритель, 9-блок развертки пучка, 10-кожух защитный, 11-воздушный теплообменник, 12-стопорный клапан,13-турбина,14-электрогенератор,15-конденсатор,16-конденсаторный насос, 14 - электрогенератор, 15 - конденсатор, 16 - конденсаторный насос, 17 - ПНД, 18-деаэратор, 19-ПВД, 20-питательный насос.

Принципиальная схема блока ЯРЭС



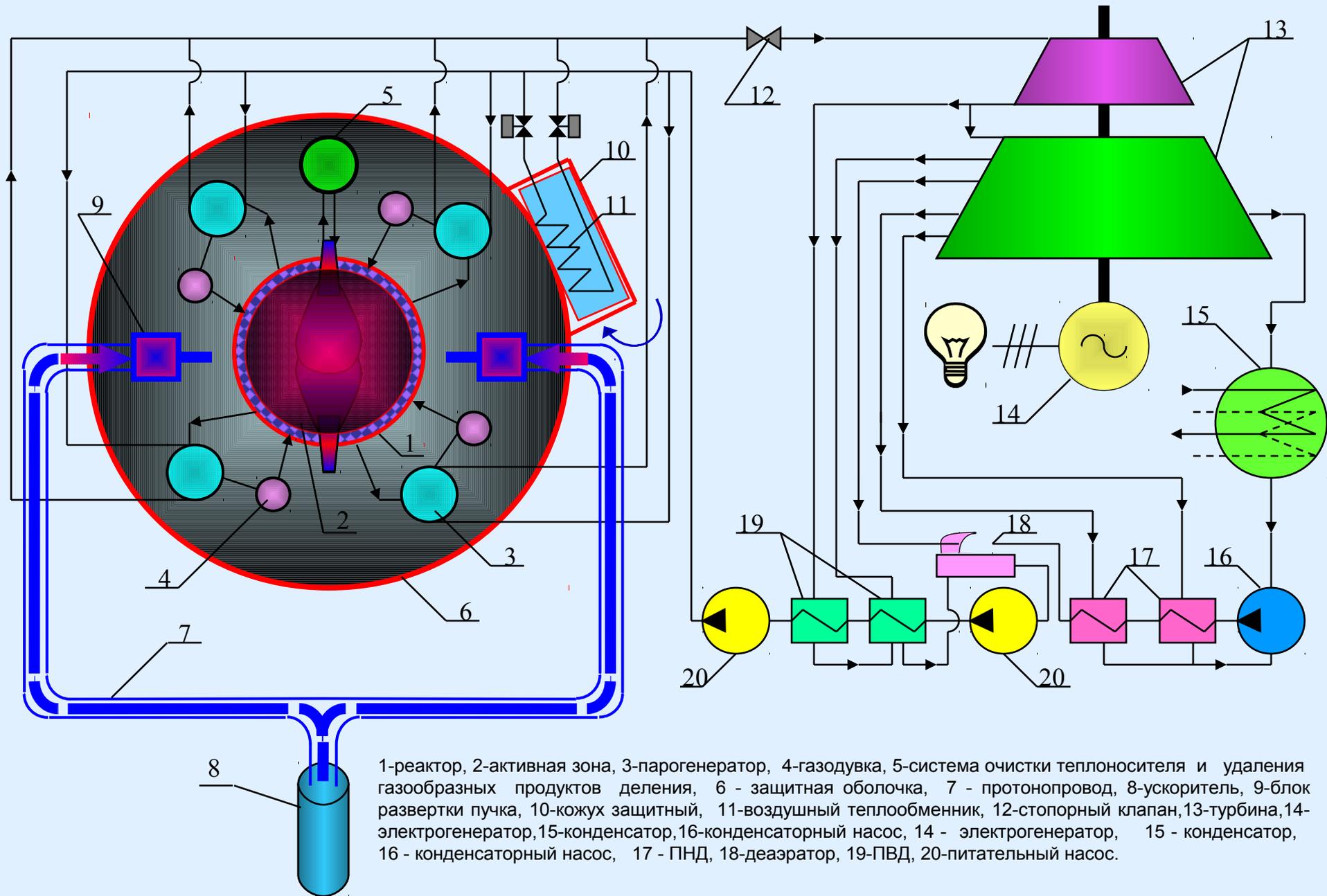
1-реактор, 2-активная зона, 3-парогенератор, 4-газодувка, 5-система очистки теплоносителя и удаления газообразных продуктов деления, 6 - защитная оболочка, 7 - протонопровод, 8-ускоритель, 9-блок развертки пучка, 10-кожух защитный, 11-воздушный теплообменник, 12-стопорный клапан,13-турбина,14-электрогенератор,15-конденсатор,16-конденсаторный насос, 14 - электрогенератор, 15 - конденсатор, 16 - конденсаторный насос, 17 - ПНД, 18-деаэратор, 19-ПВД, 20-питательный насос.

Принципиальная схема блока ЯРЭС



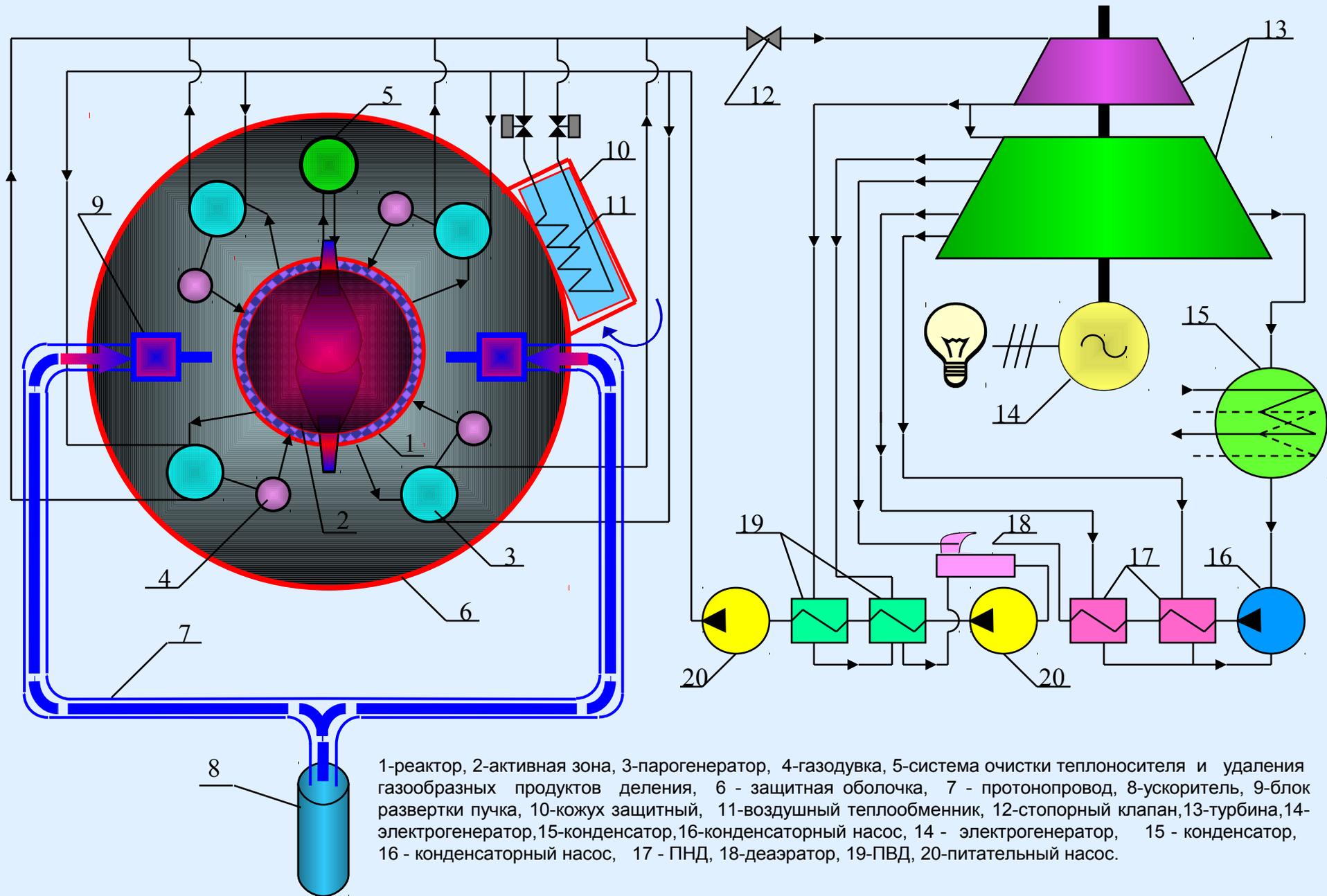
1-реактор, 2-активная зона, 3-парогенератор, 4-газодувка, 5-система очистки теплоносителя и удаления газообразных продуктов деления, 6 - защитная оболочка, 7 - протонопровод, 8-ускоритель, 9-блок развертки пучка, 10-кожух защитный, 11-воздушный теплообменник, 12-стопорный клапан,13-турбина,14-электрогенератор,15-конденсатор,16-конденсаторный насос, 14 - электрогенератор, 15 - конденсатор, 16 - конденсаторный насос, 17 - ПНД, 18-деаэратор, 19-ПВД, 20-питательный насос.

Принципиальная схема блока ЯРЭС



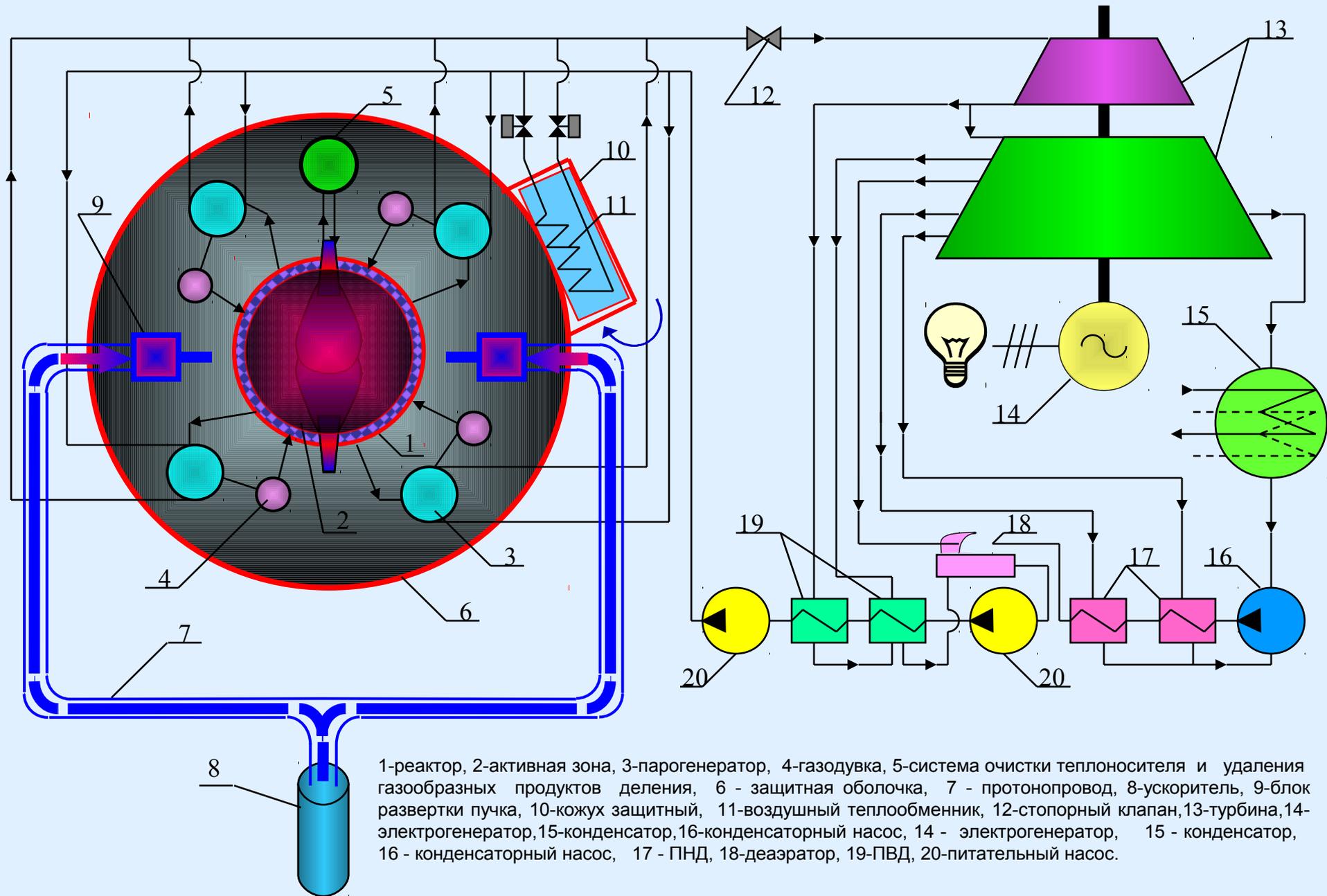
1-реактор, 2-активная зона, 3-парогенератор, 4-газодувка, 5-система очистки теплоносителя и удаления газообразных продуктов деления, 6 - защитная оболочка, 7 - протонопровод, 8-ускоритель, 9-блок развертки пучка, 10-кожух защитный, 11-воздушный теплообменник, 12-стопорный клапан,13-турбина,14-электрогенератор,15-конденсатор,16-конденсаторный насос, 14 - электрогенератор, 15 - конденсатор, 16 - конденсаторный насос, 17 - ПНД, 18-деаэратор, 19-ПВД, 20-питательный насос.

Принципиальная схема блока ЯРЭС



1-реактор, 2-активная зона, 3-парогенератор, 4-газодувка, 5-система очистки теплоносителя и удаления газообразных продуктов деления, 6 - защитная оболочка, 7 - протонопровод, 8-ускоритель, 9-блок развертки пучка, 10-кожух защитный, 11-воздушный теплообменник, 12-стопорный клапан,13-турбина,14-электрогенератор,15-конденсатор,16-конденсаторный насос, 14 - электрогенератор, 15 - конденсатор, 16 - конденсаторный насос, 17 - ПНД, 18-деаэратор, 19-ПВД, 20-питательный насос.

Принципиальная схема блока ЯРЭС



1-реактор, 2-активная зона, 3-парогенератор, 4-газодувка, 5-система очистки теплоносителя и удаления газообразных продуктов деления, 6 - защитная оболочка, 7 - протонопровод, 8-ускоритель, 9-блок развертки пучка, 10-кожух защитный, 11-воздушный теплообменник, 12-стопорный клапан,13-турбина,14-электрогенератор,15-конденсатор,16-конденсаторный насос, 14 - электрогенератор, 15 - конденсатор, 16 - конденсаторный насос, 17 - ПНД, 18-деаэратор, 19-ПВД, 20-питательный насос.

По оценкам, при загрузке в активную зону ЯРТ-реактора ~ 200 т капсул, изготовленных из отвального урана, тория **или тонкомолотых материалов ТВС** на основе микротвэльной технологии, - ЯРТ-реактор **чисто физически** сможет вырабатывать на одной такой загрузке ~ 2000-3000 МВт электричества в течение ~ 60 лет.

Жизненный цикл ЯРТ-реактора завершится режимом глубокой переработки продолжительностью ~ 1-2 года, сопровождаемым затухающим производством электроэнергии при значительном ужесточении нейтронного спектра. В результате в активной зоне останутся, в основном, короткоживущие, легкие нейтронно-дефицитные изотопы.

Разрабатываемый Проект «ЯРТ-ОЯТ» нацелен на создание демонстрационного прототипа ЯРЭС в предельно короткие сроки при минимальных затратах на основе максимального использования существующих промышленных и опытно-промышленных технологий.

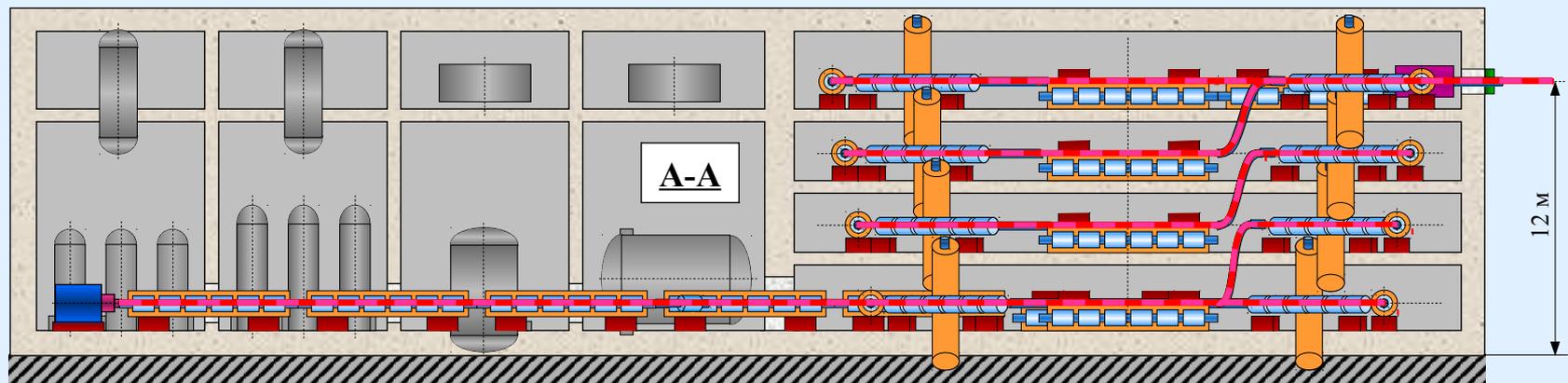
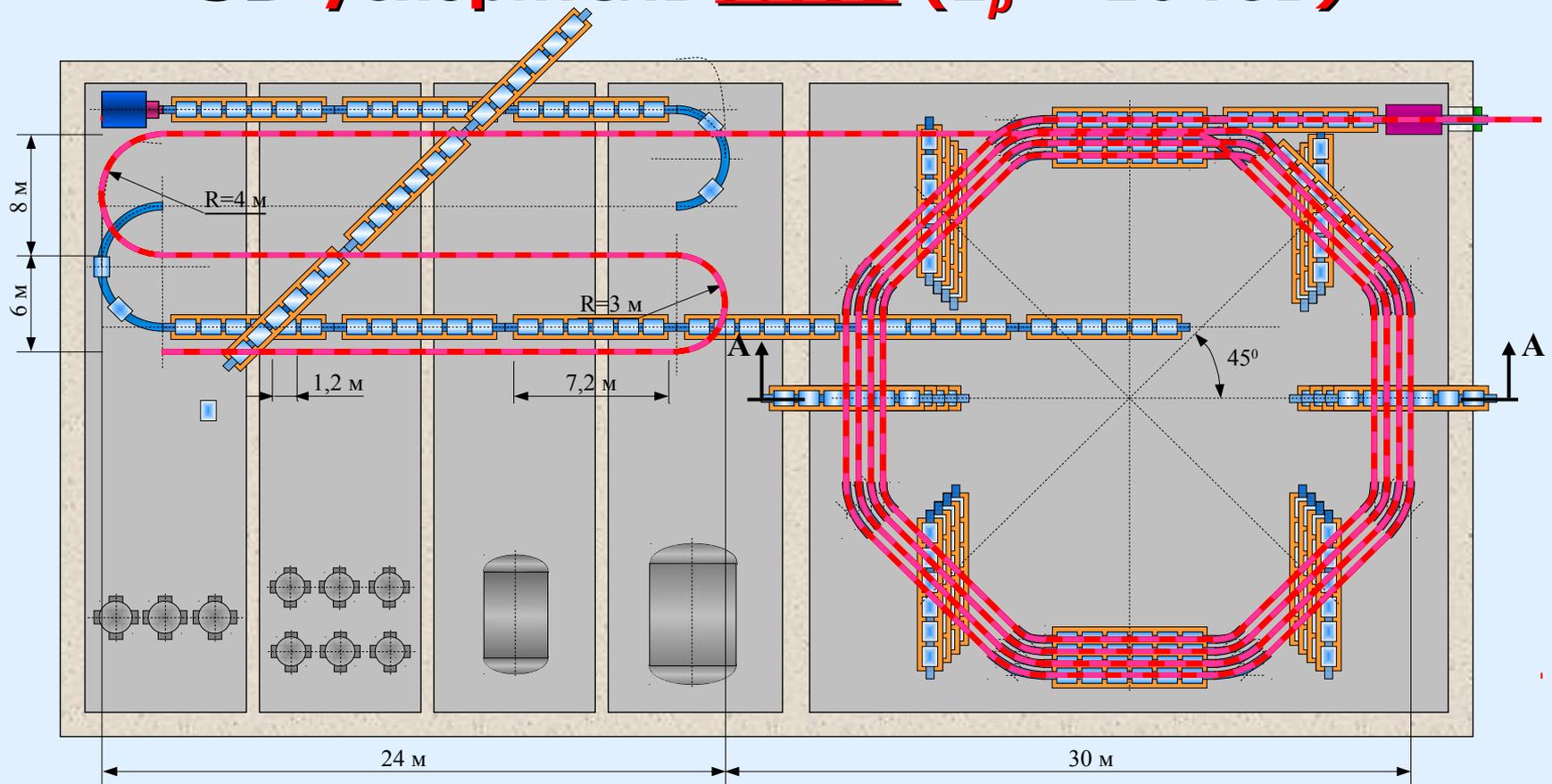
Именно поэтому в качестве топлива первого прототипа ЯРЭС предполагается использовать ОЯТ существующих АЭС и отвальный (обедненный) уран.

На первом этапе однозначное предпочтение отдано топливу на основе диоксида урана, как обеспеченного комплексом промышленно развитых и реализованных технологий.

Как показывает анализ, практически все технологии для создания полномасштабного демонстрационного прототипа ядерной релятивистской электростанции (ЯРЭС), работающего на диоксиде обедненного (отвального) урана, и/или на ОЯТ, - или уже существуют, или для их реализации имеются значительные научно-технические, технологические и опытно-конструкторские заделы.

В частности, проведенные расчеты показали, что размеры ускорителя, выполненного по уникальной российской технологии УЛОВ в 3D-компоновке на энергию 10 ГэВ для блока ЯРЭС, - составят порядка 60×30×12 м.

3D ускоритель УЛОВ ($E_p = 10$ ГэВ)



Однако объем имеющихся на сегодняшний день экспериментальных данных, уровень точности результатов расчетно-теоретических работ в этой области, а также конкретное состояние критических технологий, необходимых для практической реализации схемы ЯРТ, - недостаточны для начала проектирования и строительства демонстрационного опытно-промышленного прототипа ЯРЭС.

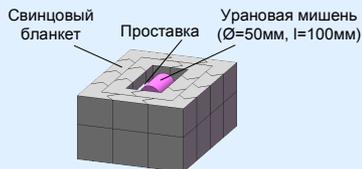
Единственный реальный путь к созданию демонстрационного прототипа ЯРЭС, экономически и экологически эффективно производящей энергию из обедненного урана и ОЯТ, - лежит через реализацию комплексной **Программы НИОКР «ЯРТ-ОЯТ»**, являющейся **фазой №1 стратегического Проекта «ЯРТ-ОЯТ»**.

Результаты первых экспериментов

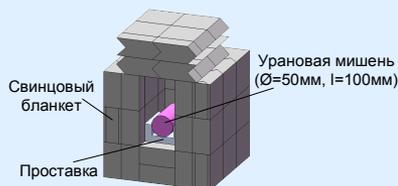
Методические эксперименты 2008г. (ПИЯФ РАН)



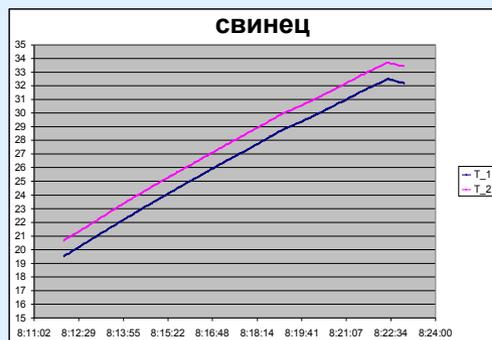
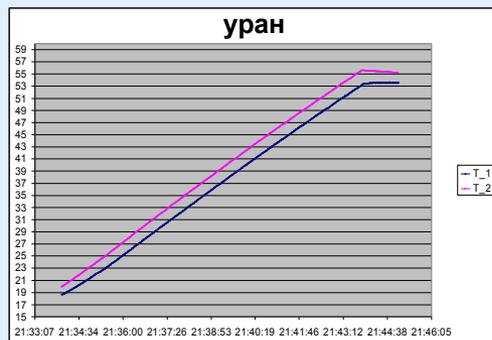
Вид сечения **A-A** мишени



Вид сечения **B-B** мишени

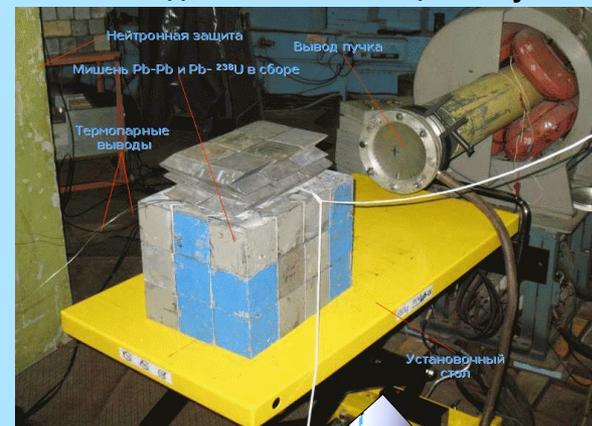


Массивная свинцовая матрица размерами 30×30(40)×40 см), содержащей цилиндрическую вставку из обедненного урана массой ~ 3.2 кг или цилиндрическую вставку из природного свинца той же ($\varnothing \sim 5 \text{ см}$, $L \approx 10 \text{ см}$) геометрии, на импульсное воздействие 1 ГэВ-ного протонного пучка синхротронного ПИЯФ РАН.

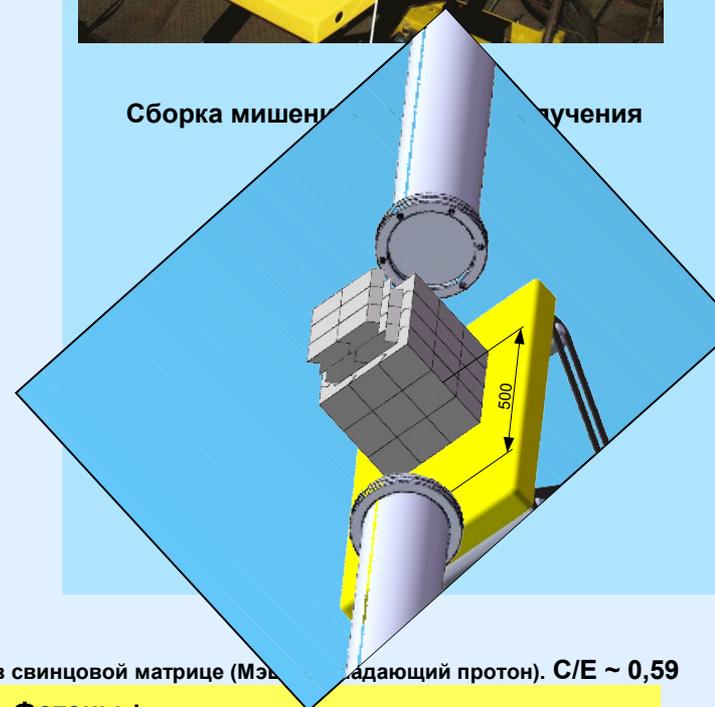


Темп роста температуры при одинаковом токе пучка в приведенных случаях различен. Нагревание свинца происходило со скоростью около 13.0 град/10 мин, а урана 35.5 град/10 мин (абсолютная погрешность термодатчика составляет 0.05°C).

Внешний вид мишени на позиции облучения



Сборка мишени на позиции облучения



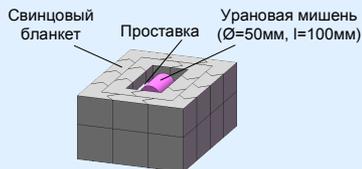
Выделение энергии в урановом и свинцовом образцах в свинцовой матрице (МэВ на падающий протон). C/E ~ 0,59

Материал	Деление, нейтроны	Фотоны + протоны	Всего расчет	Эксперимент
Обедненный уран	61.7	130.6	192.3	235.6
Свинец	0.2	74.4	74.6	70.0

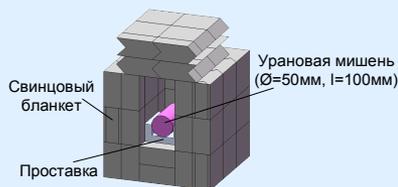
Методические эксперименты 2008г. (ПИЯФ РАН)



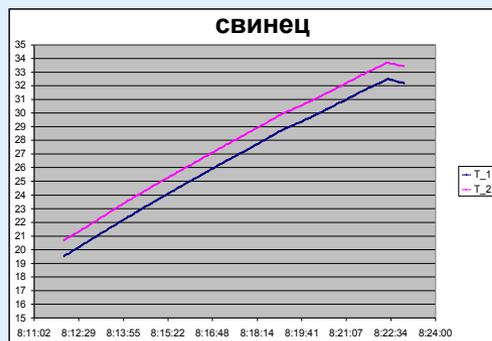
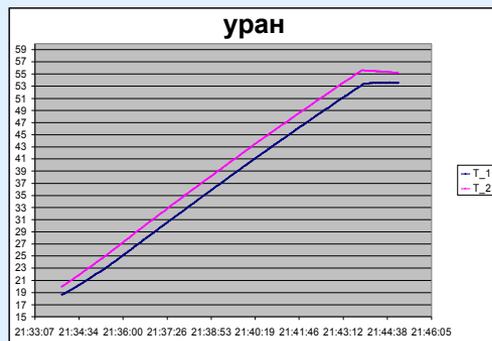
Вид сечения **A-A** мишени



Вид сечения **B-B** мишени



Массивная свинцовая матрица размерами 30×30(40)×40 см), содержащей цилиндрическую вставку из обедненного урана массой ~ 3.2 кг или цилиндрическую вставку из природного свинца той же ($\varnothing \sim 5$ см, $L \approx 10$ см) геометрии, на импульсное воздействие 1 ГэВ-ного протонного пучка синхротронного ПИЯФ РАН.

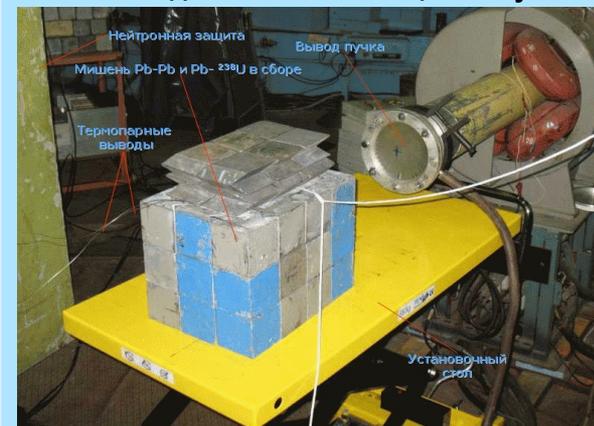


Темп роста температуры при одинаковом токе пучка в приведенных случаях различен. Нагревание свинца происходило со скоростью около 13.0 град/10 мин, а урана 35.5 град/10 мин (абсолютная погрешность термодатчика составляет 0.05°C).

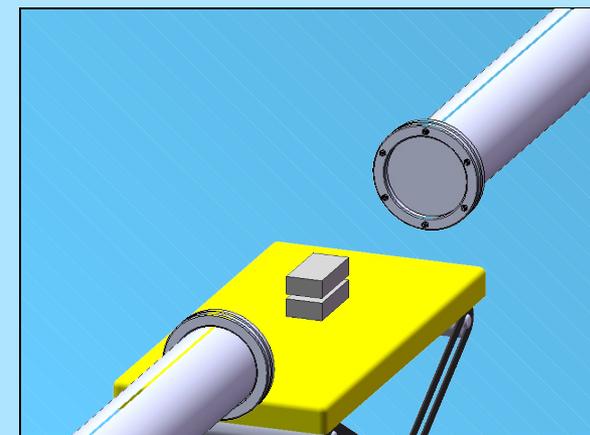
Выделение энергии в урановом и свинцовом образцах в свинцовой матрице (МэВ на 1 падающий протон). $C/E \sim 0,59$

Материал	Деление, нейтроны	Фотоны + протоны	Всего расчет	Эксперимент
Обедненный уран	61.7	130.6	192.3	235.6
Свинец	0.2	74.4	74.6	70.0

Внешний вид мишени на позиции облучения



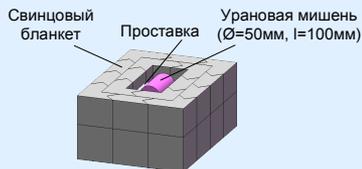
Сборка мишени на позиции облучения



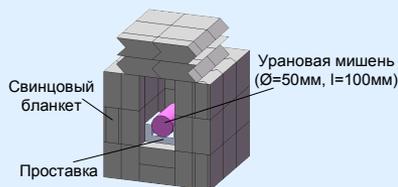
Методические эксперименты 2008г. (ПИЯФ РАН)



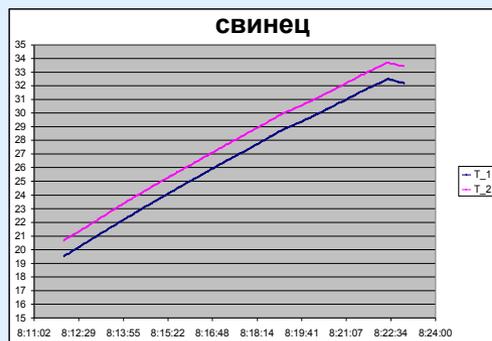
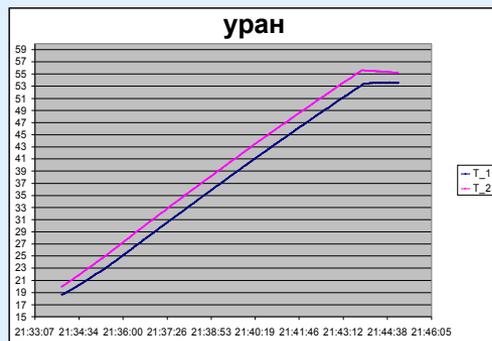
Вид сечения **A-A** мишени



Вид сечения **B-B** мишени



Массивная свинцовая матрица размерами 30×30(40)×40 см), содержащей цилиндрическую вставку из обедненного урана массой ~ 3.2 кг или цилиндрическую вставку из природного свинца той же (Ø ~ 5 см, L ≈ 10 см) геометрии, на импульсное воздействие 1 ГэВ-ного протонного пучка синхротронного ПИЯФ РАН.

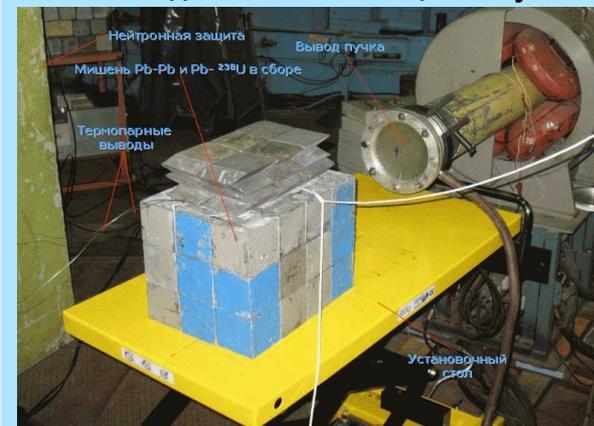


Темп роста температуры при одинаковом токе пучка в приведенных случаях различен. Нагревание свинца происходило со скоростью около 13.0 град/10 мин, а урана 35.5 град/10 мин (абсолютная погрешность термодатчика составляет 0.05°C).

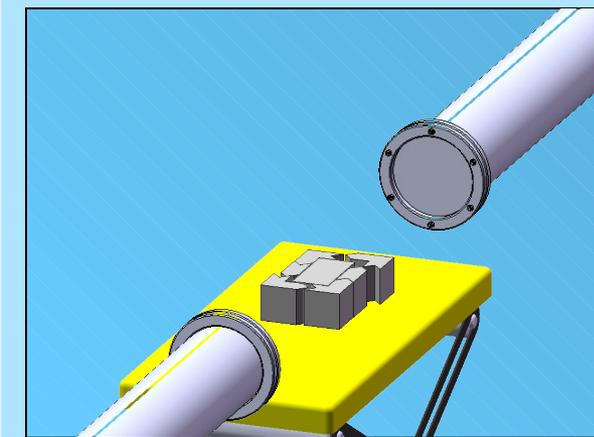
Выделение энергии в урановом и свинцовом образцах в свинцовой матрице (МэВ на 1 падающий протон). C/E ~ 0,59

Материал	Деление, нейтроны	Фотоны + протоны	Всего расчет	Эксперимент
Обедненный уран	61.7	130.6	192.3	235.6
Свинец	0.2	74.4	74.6	70.0

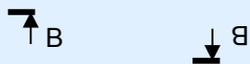
Внешний вид мишени на позиции облучения



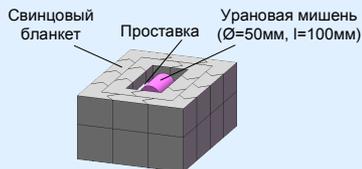
Сборка мишени на позиции облучения



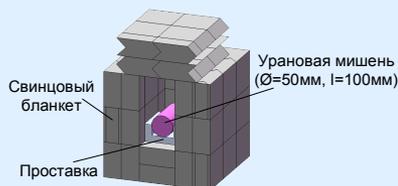
Методические эксперименты 2008г. (ПИЯФ РАН)



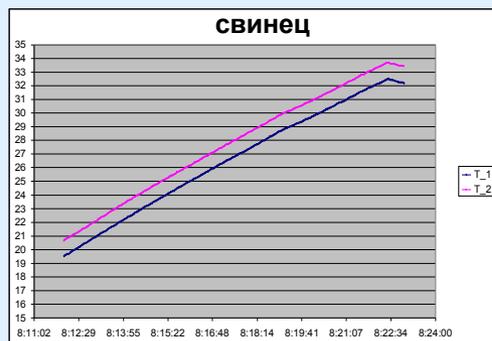
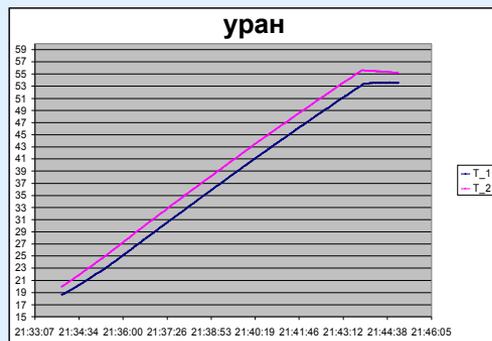
Вид сечения **A-A** мишени



Вид сечения **B-B** мишени



Массивная свинцовая матрица размерами 30×30(40)×40 см), содержащей цилиндрическую вставку из обедненного урана массой ~ 3.2 кг или цилиндрическую вставку из природного свинца той же (Ø ~ 5 см, L ≈ 10 см) геометрии, на импульсное воздействие 1 ГэВ-ного протонного пучка синхротронного ПИЯФ РАН.

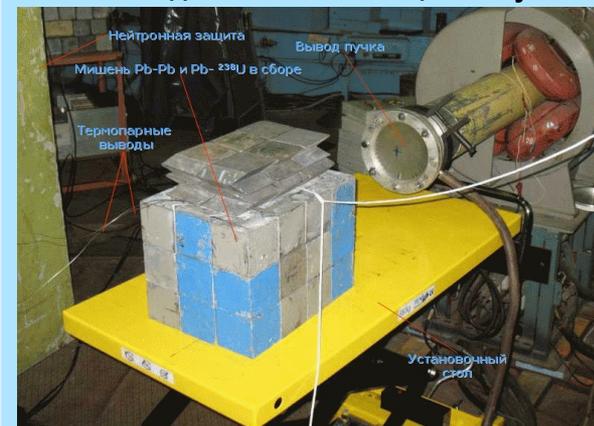


Темп роста температуры при одинаковом токе пучка в приведенных случаях различен. Нагревание свинца происходило со скоростью около 13.0 град/10 мин, а урана 35.5 град/10 мин (абсолютная погрешность термодатчика составляет 0.05°C).

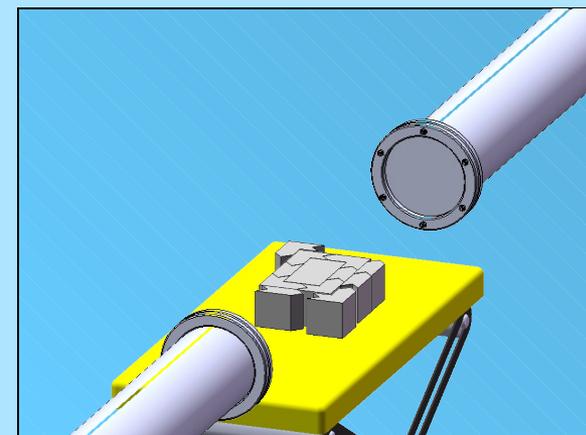
Выделение энергии в урановом и свинцовом образцах в свинцовой матрице (МэВ на 1 падающий протон). C/E ~ 0,59

Материал	Деление, нейтроны	Фотоны + протоны	Всего расчет	Эксперимент
Обедненный уран	61.7	130.6	192.3	235.6
Свинец	0.2	74.4	74.6	70.0

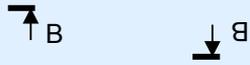
Внешний вид мишени на позиции облучения



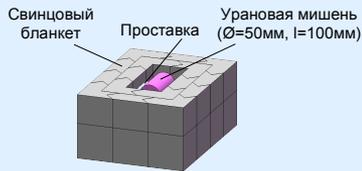
Сборка мишени на позиции облучения



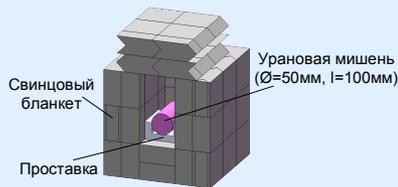
Методические эксперименты 2008г. (ПИЯФ РАН)



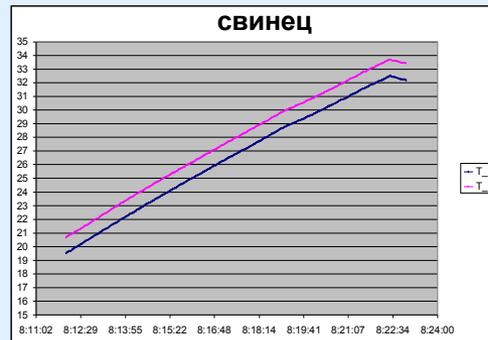
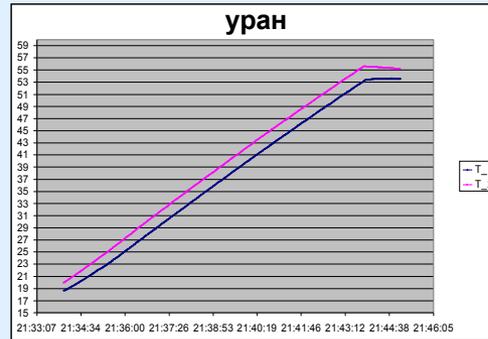
Вид сечения **A-A** мишени



Вид сечения **B-B** мишени



Массивная свинцовая матрица размерами 30×30(40)×40 см), содержащей цилиндрическую вставку из обедненного урана массой ~ 3.2 кг или цилиндрическую вставку из природного свинца той же ($\varnothing \sim 5 \text{ см}$, $L \approx 10 \text{ см}$) геометрии, на импульсное воздействие 1 ГэВ-ного протонного пучка синхротронного ПИЯФ РАН.

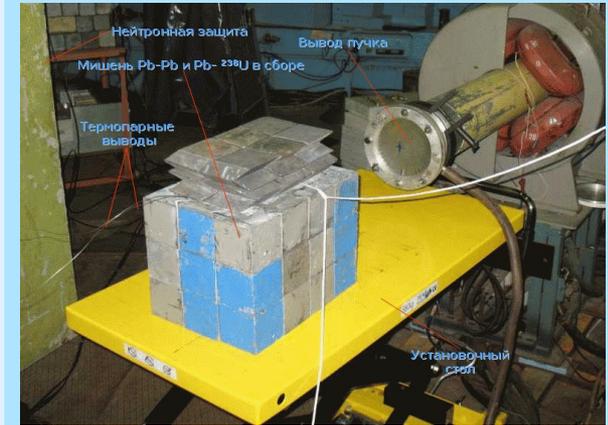


Темп роста температуры при одинаковом токе пучка в приведенных случаях различен. Нагревание свинца происходило со скоростью около 13.0 град/10 мин, а урана 35.5 град/10 мин (абсолютная погрешность термодатчика составляет 0.05°C).

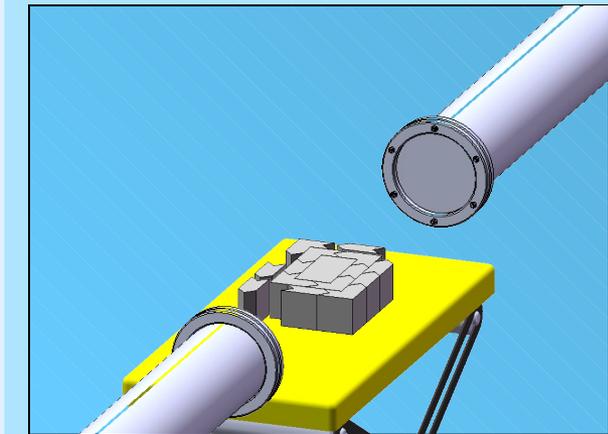
Выделение энергии в урановом и свинцовом образцах в свинцовой матрице (МэВ на 1 падающий протон). $C/E \sim 0,59$

Материал	Деление, нейтроны	Фотоны + протоны	Всего расчет	Эксперимент
Обедненный уран	61.7	130.6	192.3	235.6
Свинец	0.2	74.4	74.6	70.0

Внешний вид мишени на позиции облучения



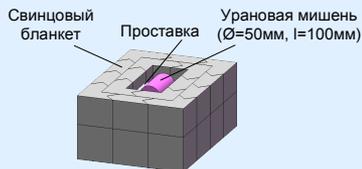
Сборка мишени на позиции облучения



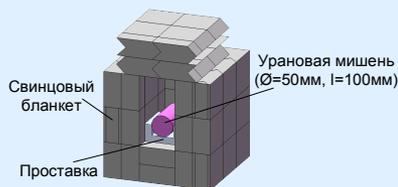
Методические эксперименты 2008г. (ПИЯФ РАН)



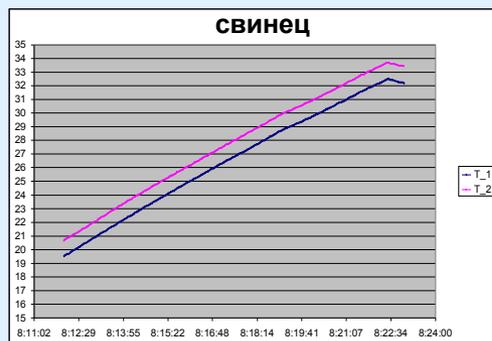
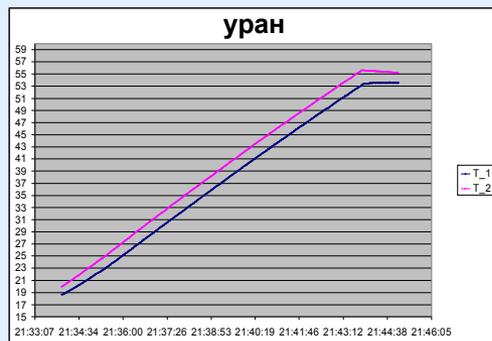
Вид сечения **A-A** мишени



Вид сечения **B-B** мишени



Массивная свинцовая матрица размерами $30 \times 30(40) \times 40$ см), содержащей цилиндрическую вставку из обедненного урана массой ~ 3.2 кг или цилиндрическую вставку из природного свинца той же ($\varnothing \sim 5$ см, $L \approx 10$ см) геометрии, на импульсное воздействие 1 ГэВ-ного протонного пучка синхротронного ПИЯФ РАН.

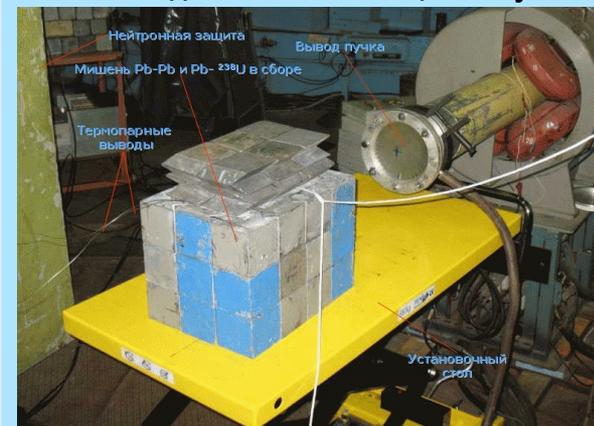


Темп роста температуры при одинаковом токе пучка в приведенных случаях различен. Нагревание свинца происходило со скоростью около 13.0 град/10 мин, а урана 35.5 град/10 мин (абсолютная погрешность термодатчика составляет 0.05°C).

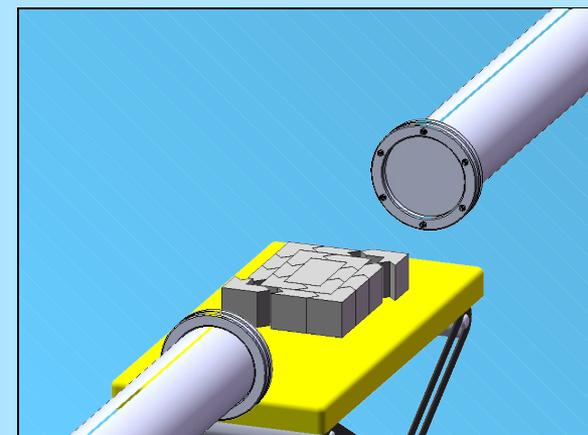
Выделение энергии в урановом и свинцовом образцах в свинцовой матрице (МэВ на 1 падающий протон). $C/E \sim 0,59$

Материал	Деление, нейтроны	Фотоны + протоны	Всего расчет	Эксперимент
Обедненный уран	61.7	130.6	192.3	235.6
Свинец	0.2	74.4	74.6	70.0

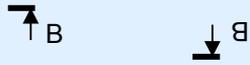
Внешний вид мишени на позиции облучения



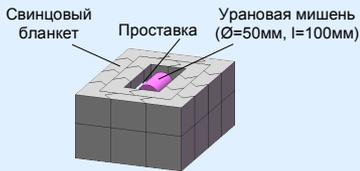
Сборка мишени на позиции облучения



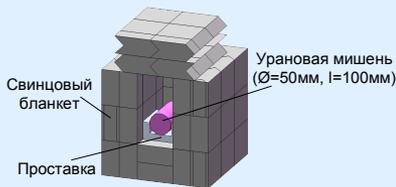
Методические эксперименты 2008г. (ПИЯФ РАН)



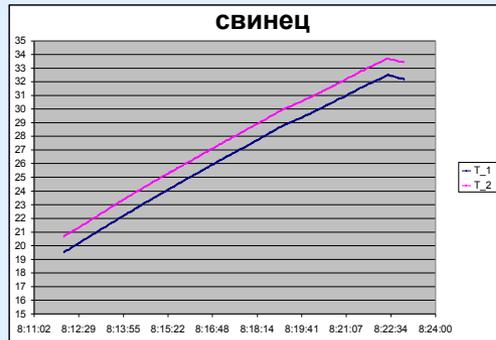
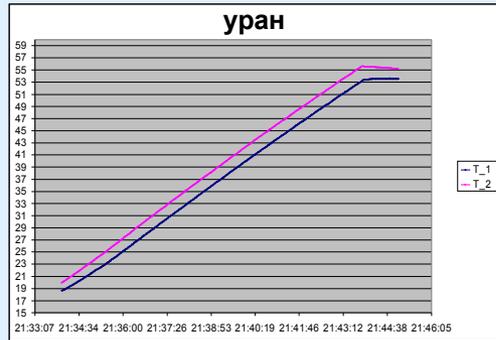
Вид сечения **A-A** мишени



Вид сечения **B-B** мишени

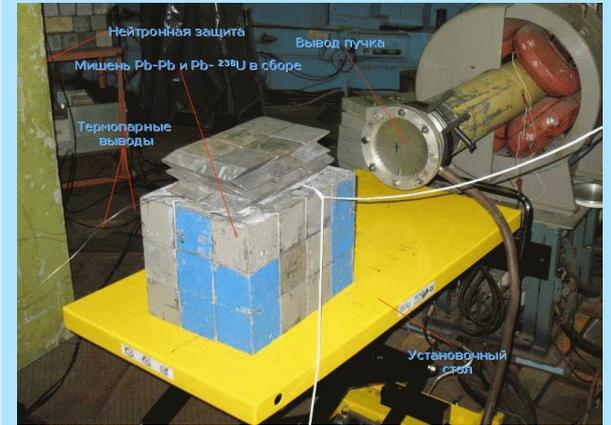


Массивная свинцовая матрица размерами 30×30(40)×40 см), содержащей цилиндрическую вставку из обедненного урана массой ~ 3.2 кг или цилиндрическую вставку из природного свинца той же ($\varnothing \sim 5 \text{ см}$, $L \approx 10 \text{ см}$) геометрии, на импульсное воздействие 1 ГэВ-ного протонного пучка синхротронного ПИЯФ РАН.

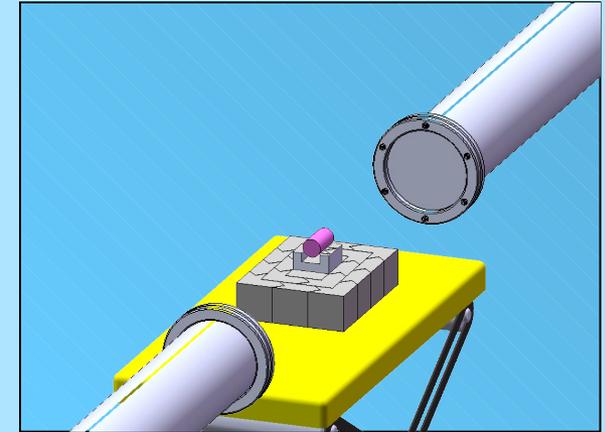


Темп роста температуры при одинаковом токе пучка в приведенных случаях различен. Нагревание свинца происходило со скоростью около 13.0 град/10 мин, а урана 35.5 град/10 мин (абсолютная погрешность термодатчика составляет 0.05°C).

Внешний вид мишени на позиции облучения



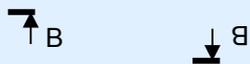
Сборка мишени на позиции облучения



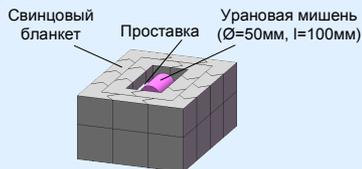
Выделение энергии в урановом и свинцовом образцах в свинцовой матрице (МэВ на 1 падающий протон). C/E ~ 0,59

Материал	Деление, нейтроны	Фотоны + протоны	Всего расчет	Эксперимент
Обедненный уран	61.7	130.6	192.3	235.6
Свинец	0.2	74.4	74.6	70.0

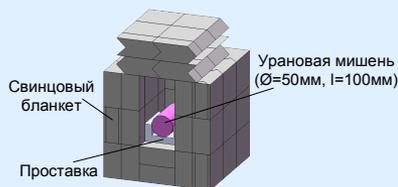
Методические эксперименты 2008г. (ПИЯФ РАН)



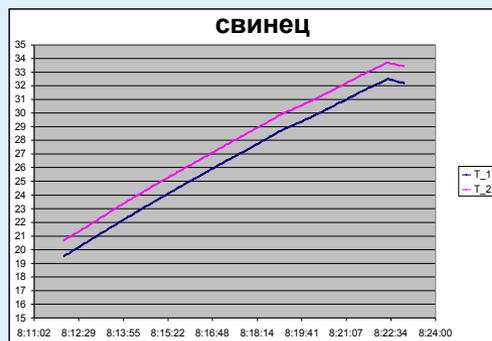
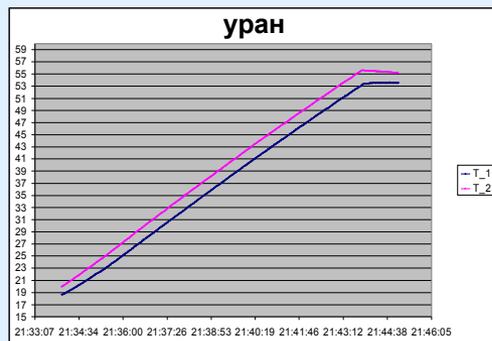
Вид сечения **A-A** мишени



Вид сечения **B-B** мишени



Массивная свинцовая матрица размерами 30×30(40)×40 см), содержащей цилиндрическую вставку из обедненного урана массой ~ 3.2 кг или цилиндрическую вставку из природного свинца той же (Ø ~ 5 см, L ≈ 10 см) геометрии, на импульсное воздействие 1 ГэВ-ного протонного пучка синхротронного ПИЯФ РАН.

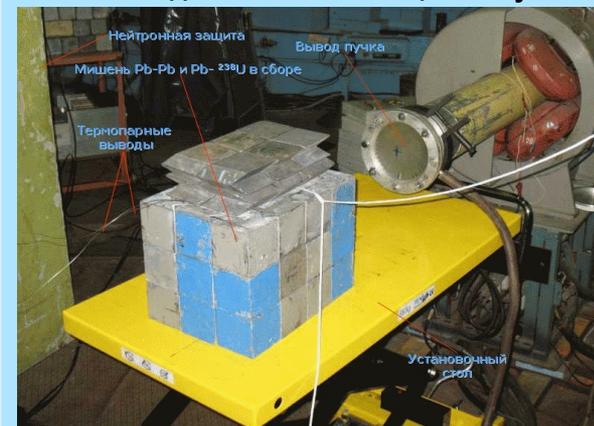


Темп роста температуры при одинаковом токе пучка в приведенных случаях различен. Нагревание свинца происходило со скоростью около 13.0 град/10 мин, а урана 35.5 град/10 мин (абсолютная погрешность термодатчика составляет 0.05°C).

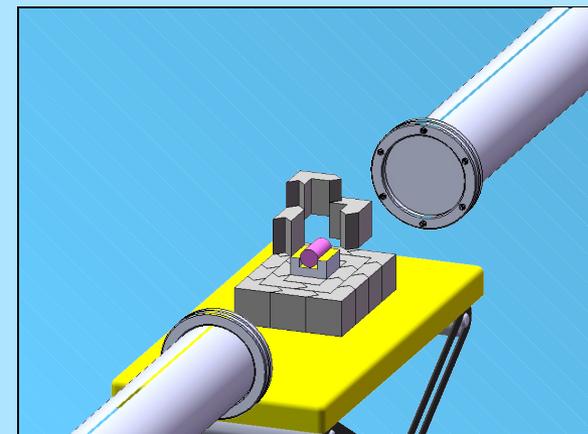
Выделение энергии в урановом и свинцовом образцах в свинцовой матрице (МэВ на 1 падающий протон). C/E ~ 0,59

Материал	Деление, нейтроны	Фотоны + протоны	Всего расчет	Эксперимент
Обедненный уран	61.7	130.6	192.3	235.6
Свинец	0.2	74.4	74.6	70.0

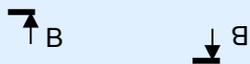
Внешний вид мишени на позиции облучения



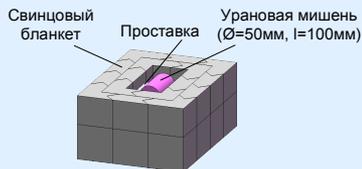
Сборка мишени на позиции облучения



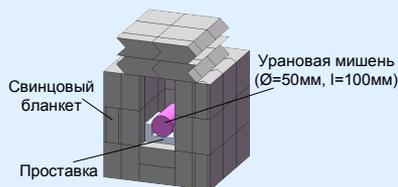
Методические эксперименты 2008г. (ПИЯФ РАН)



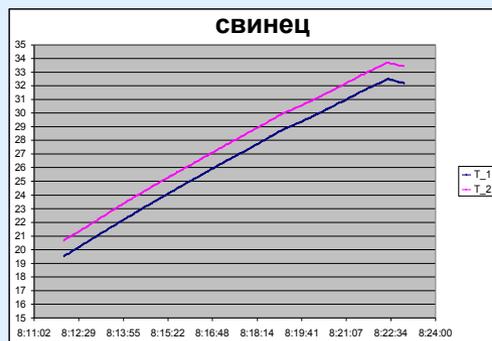
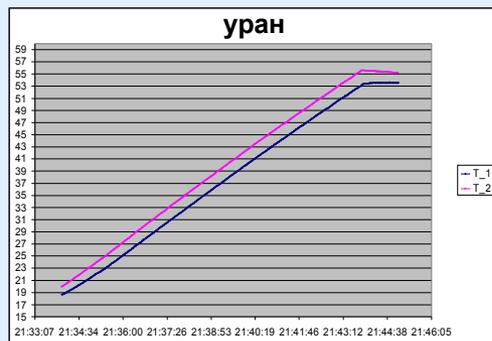
Вид сечения **A-A** мишени



Вид сечения **B-B** мишени



Массивная свинцовая матрица размерами 30×30(40)×40 см), содержащей цилиндрическую вставку из обедненного урана массой ~ 3.2 кг или цилиндрическую вставку из природного свинца той же (Ø ~ 5 см, L ≈ 10 см) геометрии, на импульсное воздействие 1 ГэВ-ного протонного пучка синхротронного ПИЯФ РАН.

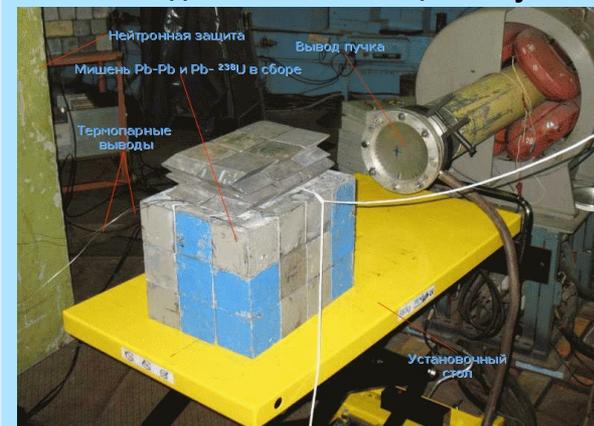


Темп роста температуры при одинаковом токе пучка в приведенных случаях различен. Нагревание свинца происходило со скоростью около 13.0 град/10 мин, а урана 35.5 град/10 мин (абсолютная погрешность термодатчика составляет 0.05°C).

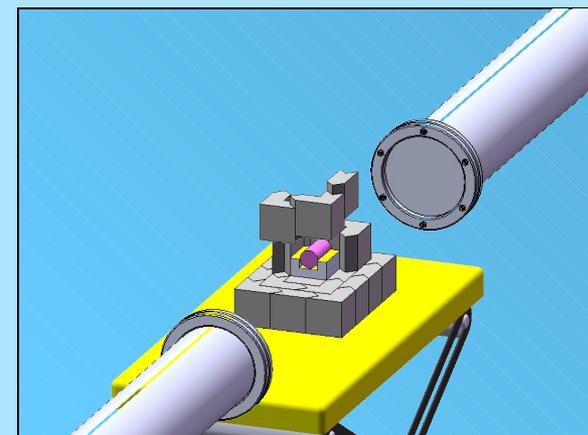
Выделение энергии в урановом и свинцовом образцах в свинцовой матрице (МэВ на 1 падающий протон). C/E ~ 0,59

Материал	Деление, нейтроны	Фотоны + протоны	Всего расчет	Эксперимент
Обедненный уран	61.7	130.6	192.3	235.6
Свинец	0.2	74.4	74.6	70.0

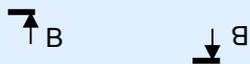
Внешний вид мишени на позиции облучения



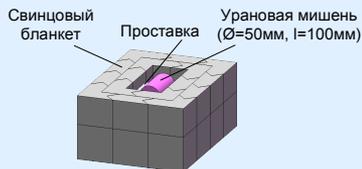
Сборка мишени на позиции облучения



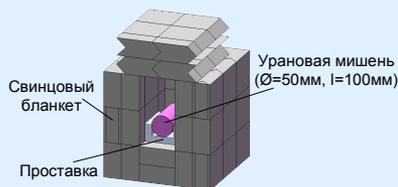
Методические эксперименты 2008г. (ПИЯФ РАН)



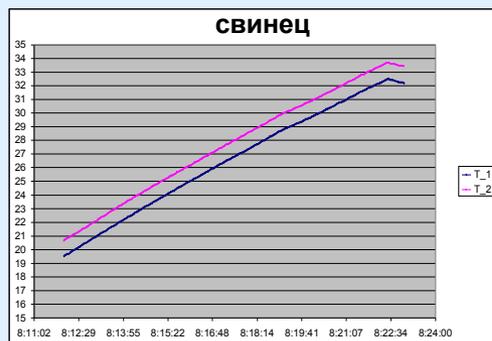
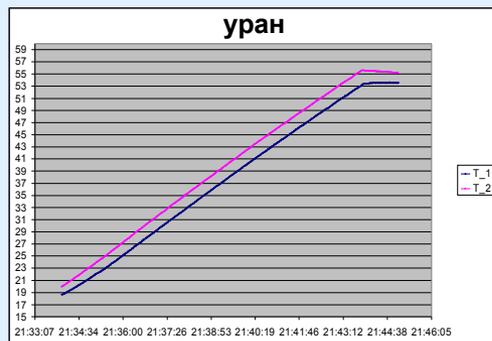
Вид сечения **A-A** мишени



Вид сечения **B-B** мишени



Массивная свинцовая матрица размерами 30×30(40)×40 см), содержащей цилиндрическую вставку из обедненного урана массой ~ 3.2 кг или цилиндрическую вставку из природного свинца той же ($\varnothing \sim 5$ см, $L \approx 10$ см) геометрии, на импульсное воздействие 1 ГэВ-ного протонного пучка синхротронного ПИЯФ РАН.

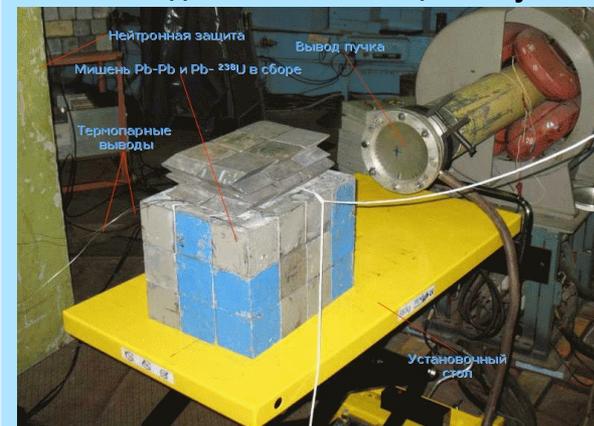


Темп роста температуры при одинаковом токе пучка в приведенных случаях различен. Нагревание свинца происходило со скоростью около 13.0 град/10 мин, а урана 35.5 град/10 мин (абсолютная погрешность термодатчика составляет 0.05°C).

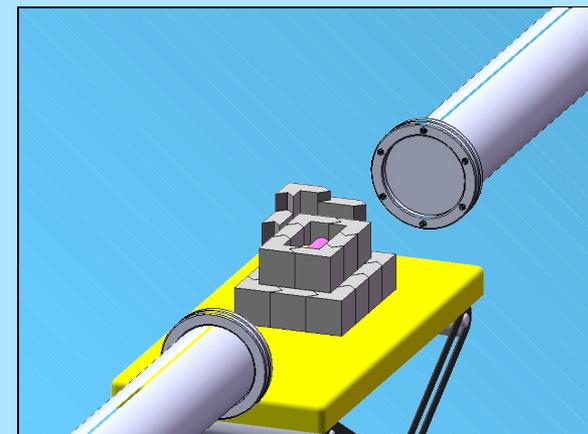
Выделение энергии в урановом и свинцовом образцах в свинцовой матрице (МэВ на 1 падающий протон). $C/E \sim 0,59$

Материал	Деление, нейтроны	Фотоны + протоны	Всего расчет	Эксперимент
Обедненный уран	61.7	130.6	192.3	235.6
Свинец	0.2	74.4	74.6	70.0

Внешний вид мишени на позиции облучения



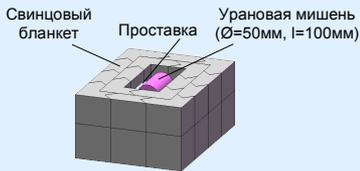
Сборка мишени на позиции облучения



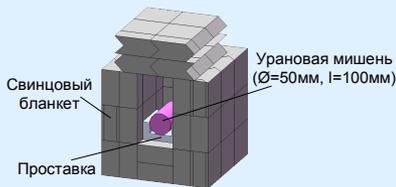
Методические эксперименты 2008г. (ПИЯФ РАН)



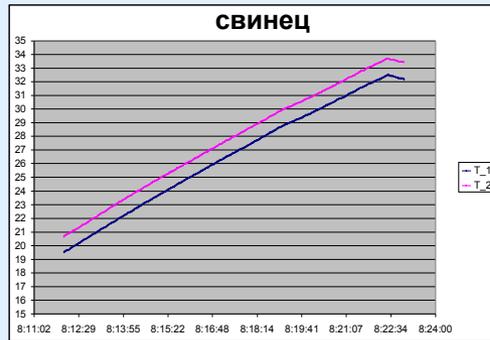
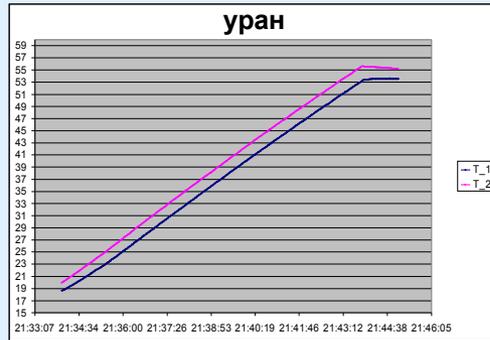
Вид сечения **A-A** мишени



Вид сечения **B-B** мишени



Массивная свинцовая матрица размерами 30×30(40)×40 см), содержащей цилиндрическую вставку из обедненного урана массой ~ 3.2 кг или цилиндрическую вставку из природного свинца той же ($\varnothing \sim 5 \text{ см}$, $L \approx 10 \text{ см}$) геометрии, на импульсное воздействие 1 ГэВ-ного протонного пучка синхротронного ПИЯФ РАН.

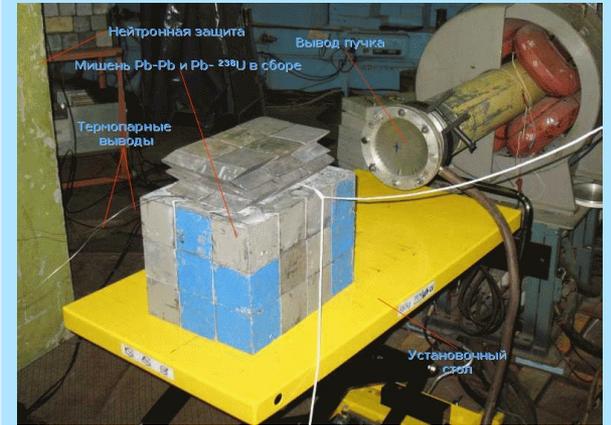


Темп роста температуры при одинаковом токе пучка в приведенных случаях различен. Нагревание свинца происходило со скоростью около 13.0 град/10 мин, а урана 35.5 град/10 мин (абсолютная погрешность термодатчика составляет 0.05°C).

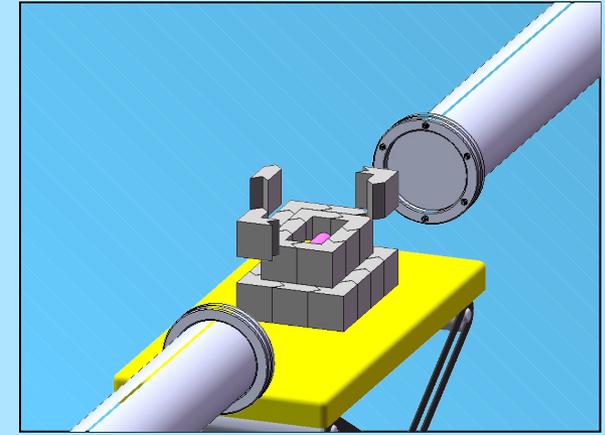
Выделение энергии в урановом и свинцовом образцах в свинцовой матрице (МэВ на 1 падающий протон). C/E ~ 0,59

Материал	Деление, нейтроны	Фотоны + протоны	Всего расчет	Эксперимент
Обедненный уран	61.7	130.6	192.3	235.6
Свинец	0.2	74.4	74.6	70.0

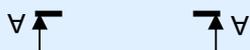
Внешний вид мишени на позиции облучения



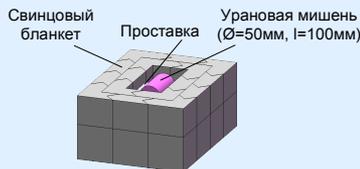
Сборка мишени на позиции облучения



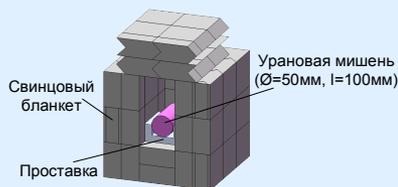
Методические эксперименты 2008г. (ПИЯФ РАН)



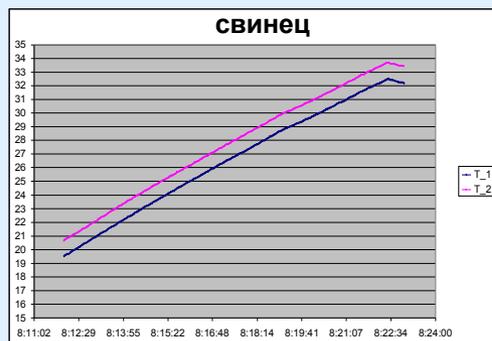
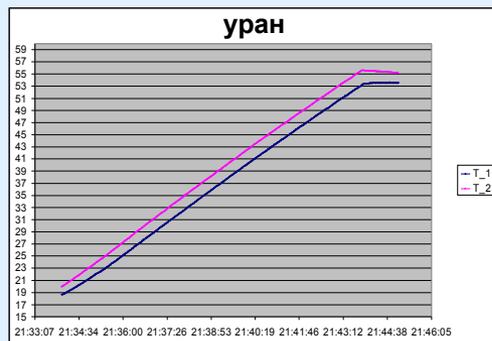
Вид сечения **A-A** мишени



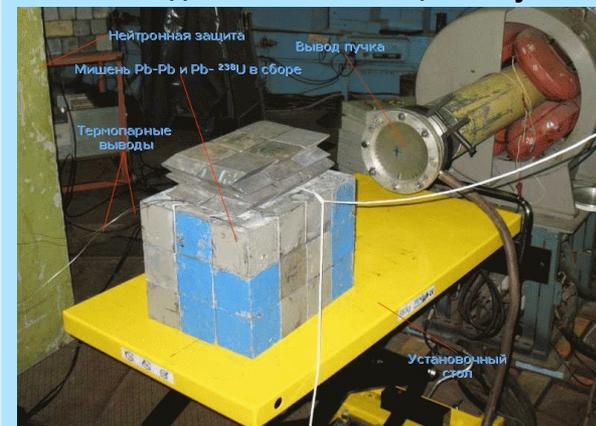
Вид сечения **B-B** мишени



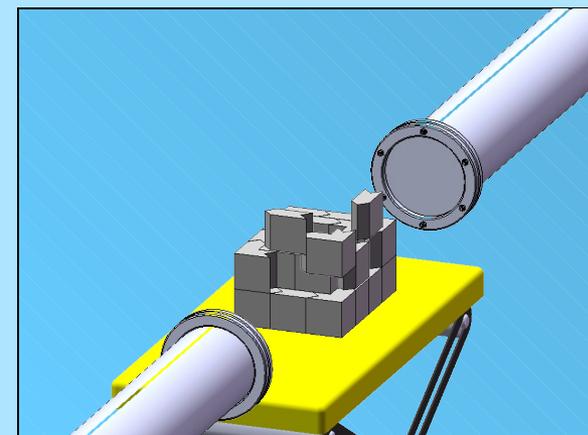
Массивная свинцовая матрица размерами 30×30(40)×40 см), содержащей цилиндрическую вставку из обедненного урана массой ~ 3.2 кг или цилиндрическую вставку из природного свинца той же ($\varnothing \sim 5 \text{ см}$, $L \approx 10 \text{ см}$) геометрии, на импульсное воздействие 1 ГэВ-ного протонного пучка синхротронного ПИЯФ РАН.



Внешний вид мишени на позиции облучения



Сборка мишени на позиции облучения



Темп роста температуры при одинаковом токе пучка в приведенных случаях различен. Нагревание свинца происходило со скоростью около 13.0 град/10 мин, а урана 35.5 град/10 мин (абсолютная погрешность термодатчика составляет 0.05°C).

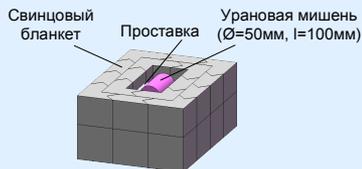
Выделение энергии в урановом и свинцовом образцах в свинцовой матрице (МэВ на 1 падающий протон). C/E ~ 0,59

Материал	Деление, нейтроны	Фотоны + протоны	Всего расчет	Эксперимент
Обедненный уран	61.7	130.6	192.3	235.6
Свинец	0.2	74.4	74.6	70.0

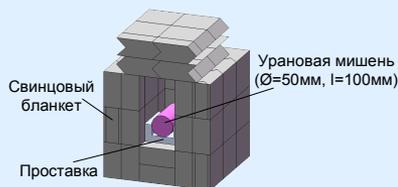
Методические эксперименты 2008г. (ПИЯФ РАН)



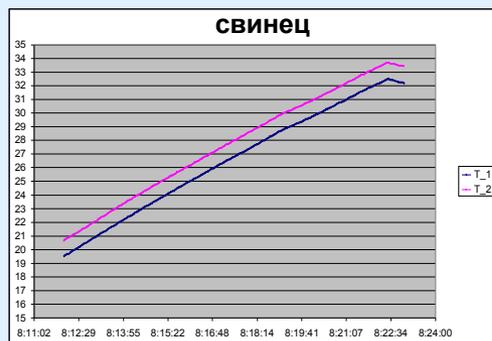
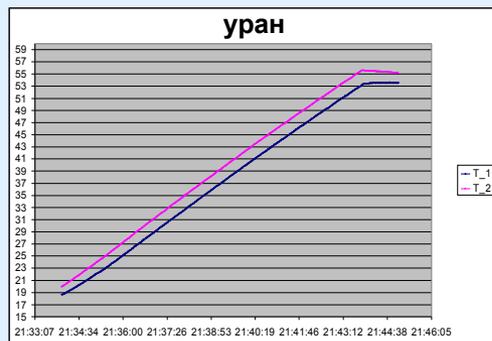
Вид сечения **A-A** мишени



Вид сечения **B-B** мишени



Массивная свинцовая матрица размерами 30×30(40)×40 см), содержащей цилиндрическую вставку из обедненного урана массой ~ 3.2 кг или цилиндрическую вставку из природного свинца той же ($\varnothing \sim 5$ см, $L \approx 10$ см) геометрии, на импульсное воздействие 1 ГэВ-ного протонного пучка синхротронного ПИЯФ РАН.

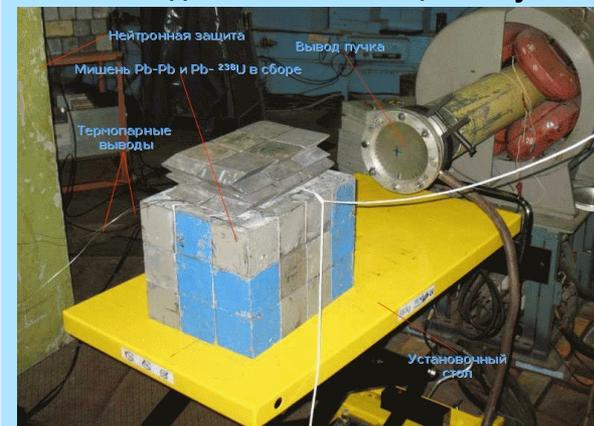


Темп роста температуры при одинаковом токе пучка в приведенных случаях различен. Нагревание свинца происходило со скоростью около 13.0 град/10 мин, а урана 35.5 град/10 мин (абсолютная погрешность термодатчика составляет 0.05°C).

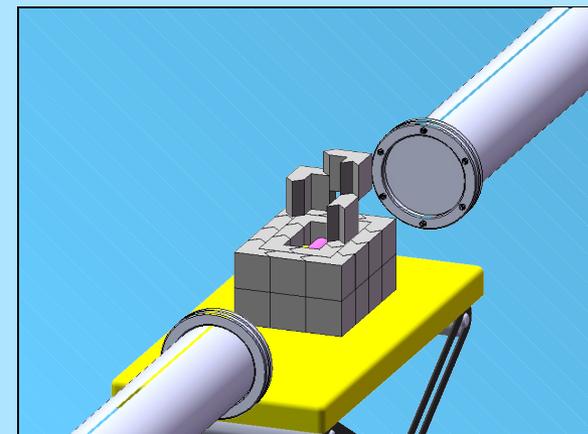
Выделение энергии в урановом и свинцовом образцах в свинцовой матрице (МэВ на 1 падающий протон). $C/E \sim 0,59$

Материал	Деление, нейтроны	Фотоны + протоны	Всего расчет	Эксперимент
Обедненный уран	61.7	130.6	192.3	235.6
Свинец	0.2	74.4	74.6	70.0

Внешний вид мишени на позиции облучения



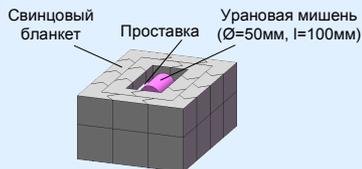
Сборка мишени на позиции облучения



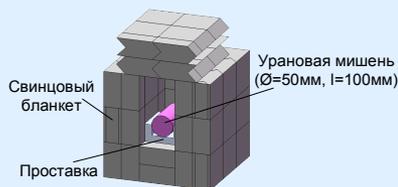
Методические эксперименты 2008г. (ПИЯФ РАН)



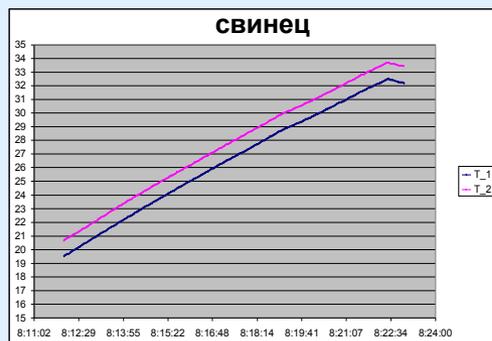
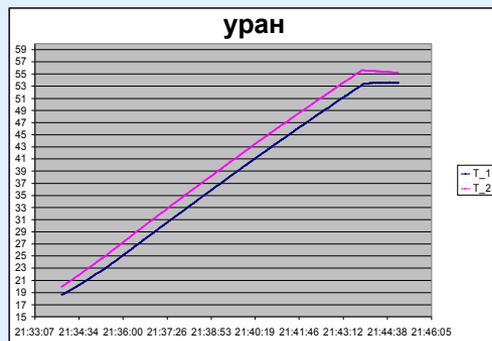
Вид сечения **A-A** мишени



Вид сечения **B-B** мишени



Массивная свинцовая матрица размерами 30×30(40)×40 см), содержащей цилиндрическую вставку из обедненного урана массой ~ 3.2 кг или цилиндрическую вставку из природного свинца той же ($\varnothing \sim 5$ см, $L \approx 10$ см) геометрии, на импульсное воздействие 1 ГэВ-ного протонного пучка синхротронного ПИЯФ РАН.

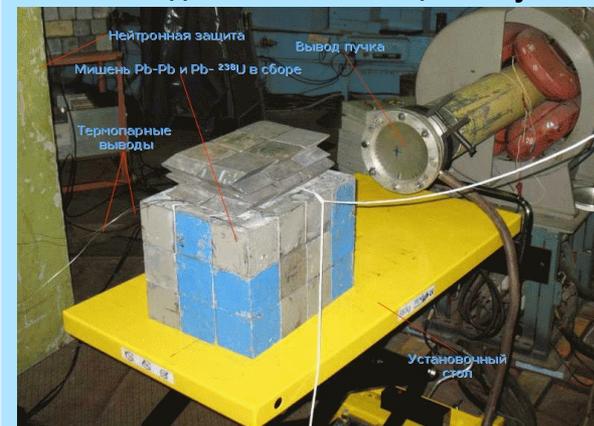


Темп роста температуры при одинаковом токе пучка в приведенных случаях различен. Нагревание свинца происходило со скоростью около 13.0 град/10 мин, а урана 35.5 град/10 мин (абсолютная погрешность термодатчика составляет 0.05°C).

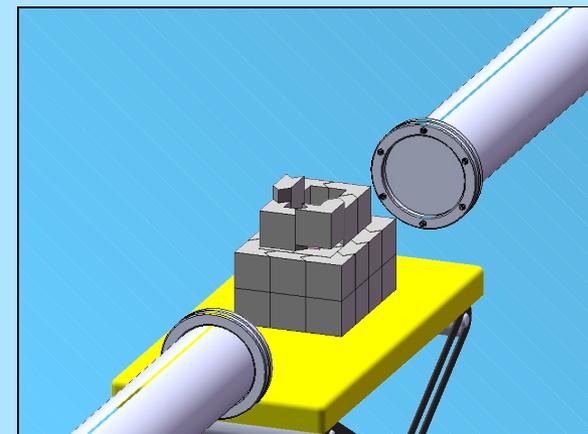
Выделение энергии в урановом и свинцовом образцах в свинцовой матрице (МэВ на 1 падающий протон). $C/E \sim 0,59$

Материал	Деление, нейтроны	Фотоны + протоны	Всего расчет	Эксперимент
Обедненный уран	61.7	130.6	192.3	235.6
Свинец	0.2	74.4	74.6	70.0

Внешний вид мишени на позиции облучения



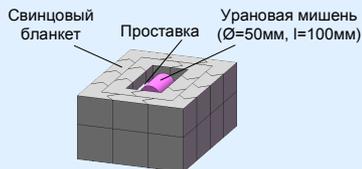
Сборка мишени на позиции облучения



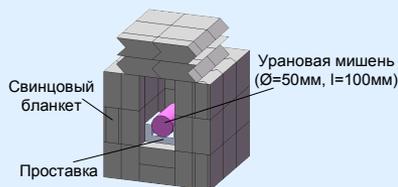
Методические эксперименты 2008г. (ПИЯФ РАН)



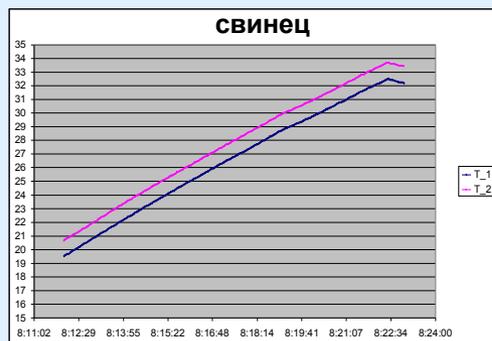
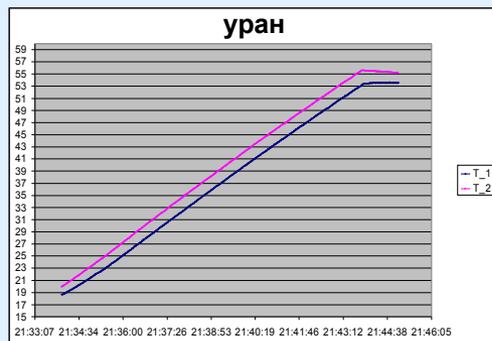
Вид сечения **A-A** мишени



Вид сечения **B-B** мишени



Массивная свинцовая матрица размерами 30×30(40)×40 см), содержащей цилиндрическую вставку из обедненного урана массой ~ 3.2 кг или цилиндрическую вставку из природного свинца той же ($\varnothing \sim 5 \text{ см}$, $L \approx 10 \text{ см}$) геометрии, на импульсное воздействие 1 ГэВ-ного протонного пучка синхротронного ПИЯФ РАН.

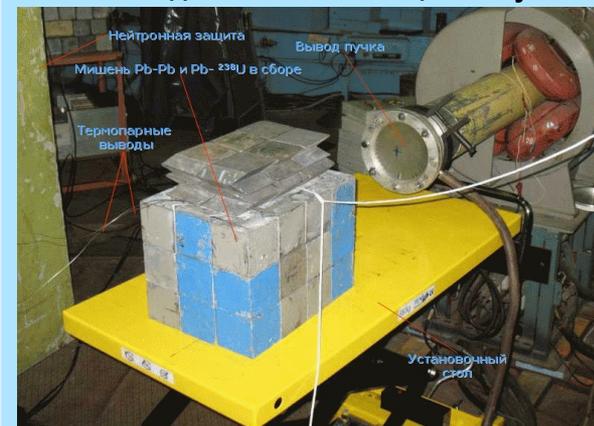


Темп роста температуры при одинаковом токе пучка в приведенных случаях различен. Нагревание свинца происходило со скоростью около 13.0 град/10 мин, а урана 35.5 град/10 мин (абсолютная погрешность термодатчика составляет 0.05°C).

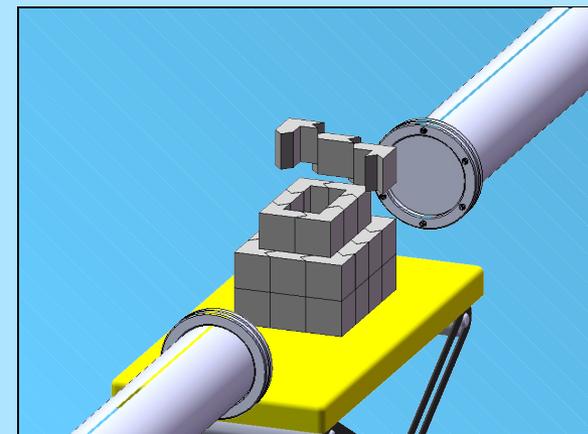
Выделение энергии в урановом и свинцовом образцах в свинцовой матрице (МэВ на 1 падающий протон). $C/E \sim 0,59$

Материал	Деление, нейтроны	Фотоны + протоны	Всего расчет	Эксперимент
Обедненный уран	61.7	130.6	192.3	235.6
Свинец	0.2	74.4	74.6	70.0

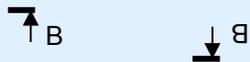
Внешний вид мишени на позиции облучения



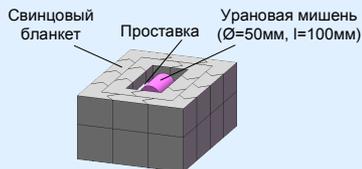
Сборка мишени на позиции облучения



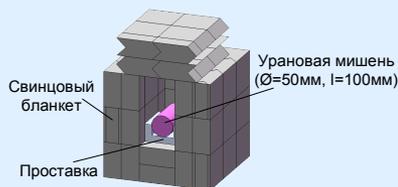
Методические эксперименты 2008г. (ПИЯФ РАН)



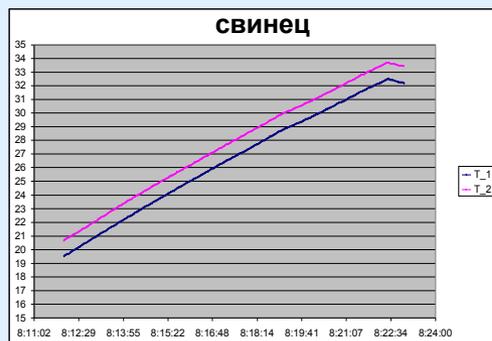
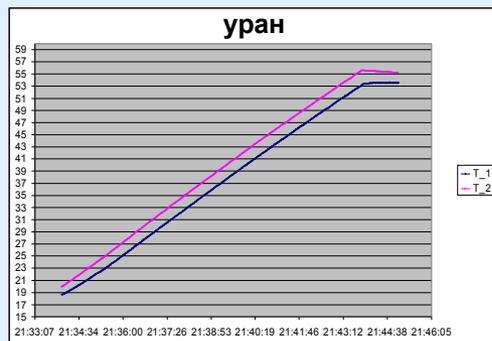
Вид сечения **A-A** мишени



Вид сечения **B-B** мишени



Массивная свинцовая матрица размерами 30×30(40)×40 см), содержащей цилиндрическую вставку из обедненного урана массой ~ 3.2 кг или цилиндрическую вставку из природного свинца той же ($\varnothing \sim 5 \text{ см}$, $L \approx 10 \text{ см}$) геометрии, на импульсное воздействие 1 ГэВ-ного протонного пучка синхротриклотрона ПИЯФ РАН.

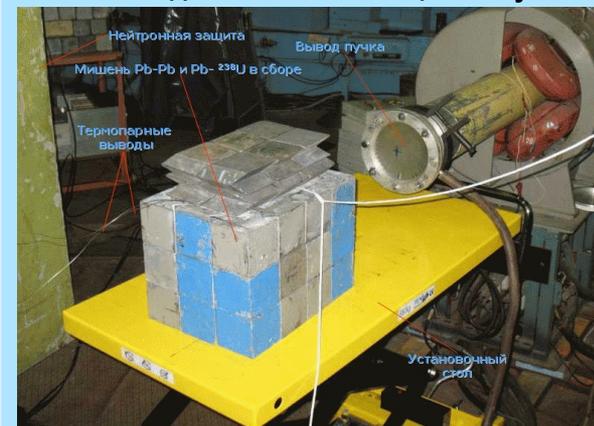


Темп роста температуры при одинаковом токе пучка в приведенных случаях различен. Нагревание свинца происходило со скоростью около 13.0 град/10 мин, а урана 35.5 град/10 мин (абсолютная погрешность термодатчика составляет 0.05°C).

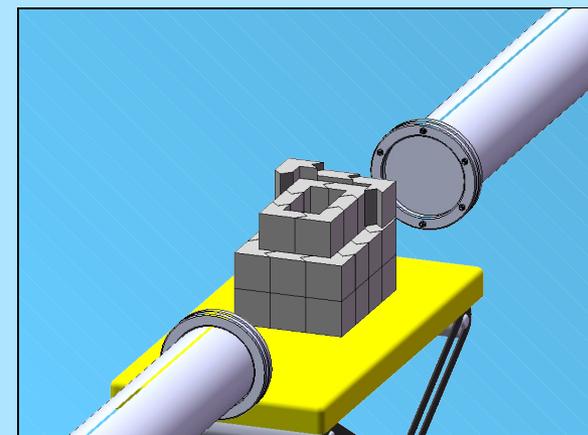
Выделение энергии в урановом и свинцовом образцах в свинцовой матрице (МэВ на 1 падающий протон). C/E ~ 0,59

Материал	Деление, нейтроны	Фотоны + протоны	Всего расчет	Эксперимент
Обедненный уран	61.7	130.6	192.3	235.6
Свинец	0.2	74.4	74.6	70.0

Внешний вид мишени на позиции облучения



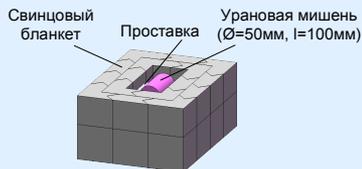
Сборка мишени на позиции облучения



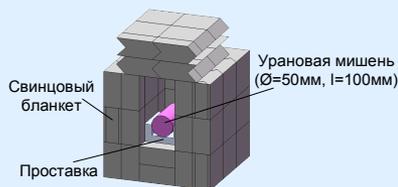
Методические эксперименты 2008г. (ПИЯФ РАН)



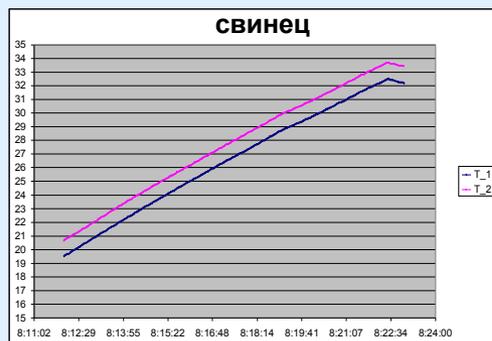
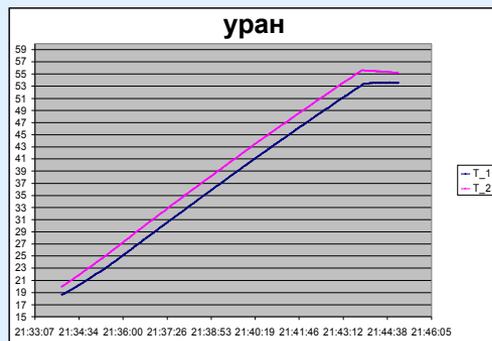
Вид сечения **A-A** мишени



Вид сечения **B-B** мишени



Массивная свинцовая матрица размерами 30×30(40)×40 см), содержащей цилиндрическую вставку из обедненного урана массой ~ 3.2 кг или цилиндрическую вставку из природного свинца той же ($\varnothing \sim 5 \text{ см}$, $L \approx 10 \text{ см}$) геометрии, на импульсное воздействие 1 ГэВ-ного протонного пучка синхротронного ПИЯФ РАН.

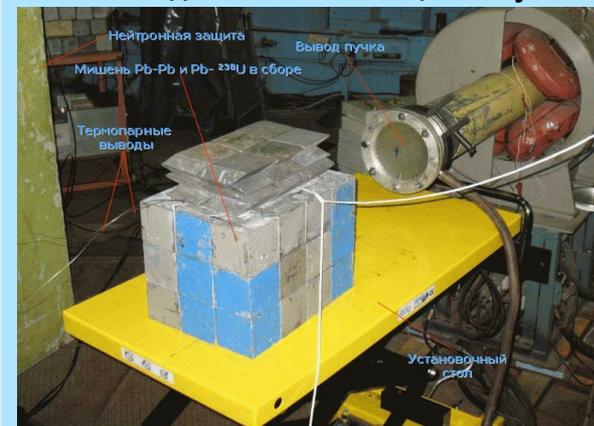


Темп роста температуры при одинаковом токе пучка в приведенных случаях различен. Нагревание свинца происходило со скоростью около 13.0 град/10 мин, а урана 35.5 град/10 мин (абсолютная погрешность термодатчика составляет 0.05°C).

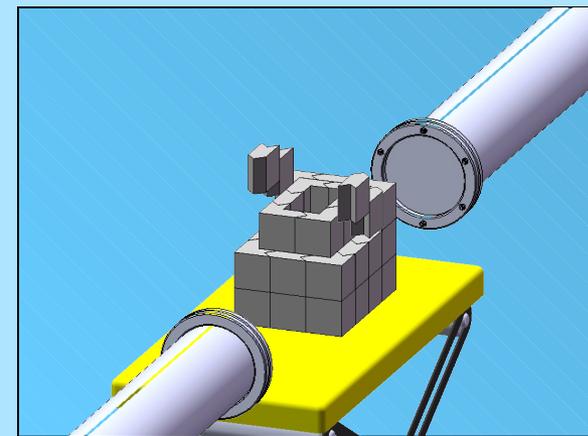
Выделение энергии в урановом и свинцовом образцах в свинцовой матрице (МэВ на 1 падающий протон). $C/E \sim 0,59$

Материал	Деление, нейтроны	Фотоны + протоны	Всего расчет	Эксперимент
Обедненный уран	61.7	130.6	192.3	235.6
Свинец	0.2	74.4	74.6	70.0

Внешний вид мишени на позиции облучения



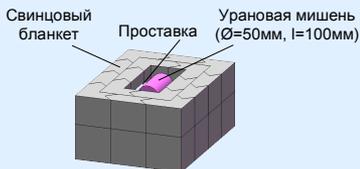
Сборка мишени на позиции облучения



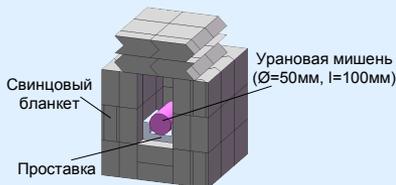
Методические эксперименты 2008г. (ПИЯФ РАН)



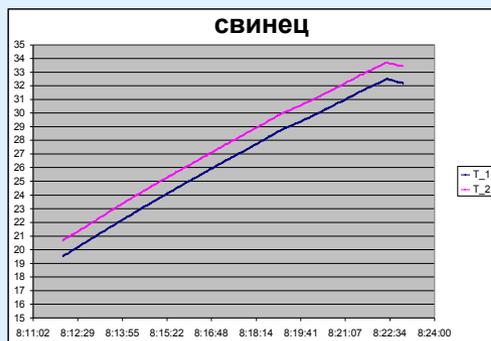
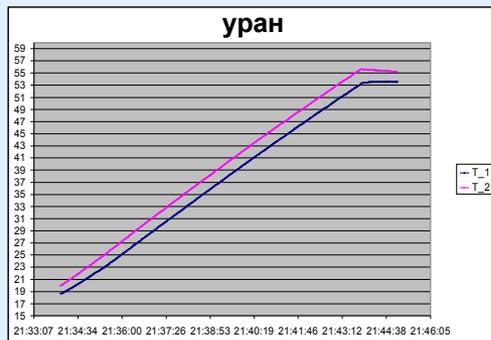
Вид сечения **A-A** мишени



Вид сечения **B-B** мишени



Массивная свинцовая матрица размерами $30 \times 30(40) \times 40$ см), содержащей цилиндрическую вставку из обедненного урана массой ~ 3.2 кг или цилиндрическую вставку из природного свинца той же ($\varnothing \sim 5$ см, $L \approx 10$ см) геометрии, на импульсное воздействие 1 ГэВ-ного протонного пучка синхротронного ПИЯФ РАН.

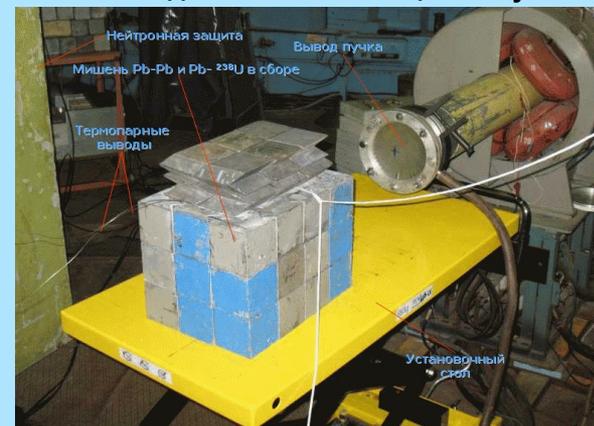


Темп роста температуры при одинаковом токе пучка в приведенных случаях различен. Нагревание свинца происходило со скоростью около 13.0 град/10 мин, а урана 35.5 град/10 мин (абсолютная погрешность термодатчика составляет 0.05°C).

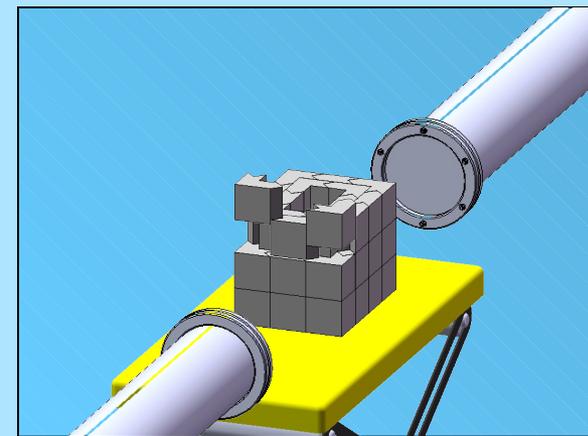
Выделение энергии в урановом и свинцовом образцах в свинцовой матрице (МэВ на 1 падающий протон). $C/E \sim 0,59$

Материал	Деление, нейтроны	Фотоны + протоны	Всего расчет	Эксперимент
Обедненный уран	61.7	130.6	192.3	235.6
Свинец	0.2	74.4	74.6	70.0

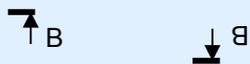
Внешний вид мишени на позиции облучения



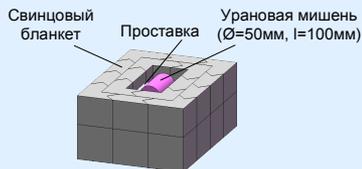
Сборка мишени на позиции облучения



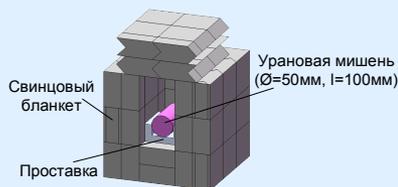
Методические эксперименты 2008г. (ПИЯФ РАН)



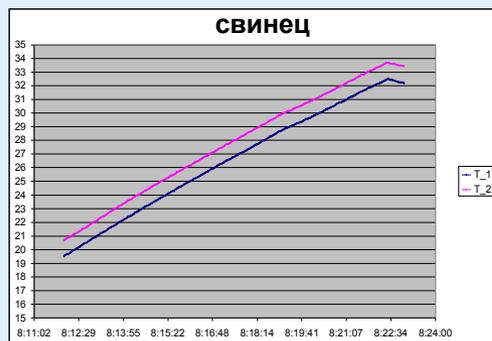
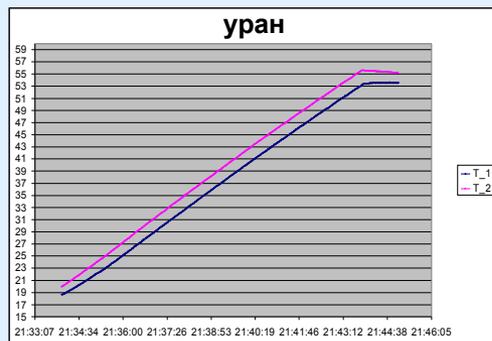
Вид сечения **A-A** мишени



Вид сечения **B-B** мишени



Массивная свинцовая матрица размерами 30×30(40)×40 см), содержащей цилиндрическую вставку из обедненного урана массой ~ 3.2 кг или цилиндрическую вставку из природного свинца той же ($\varnothing \sim 5$ см, $L \approx 10$ см) геометрии, на импульсное воздействие 1 ГэВ-ного протонного пучка синхротронного ПИЯФ РАН.

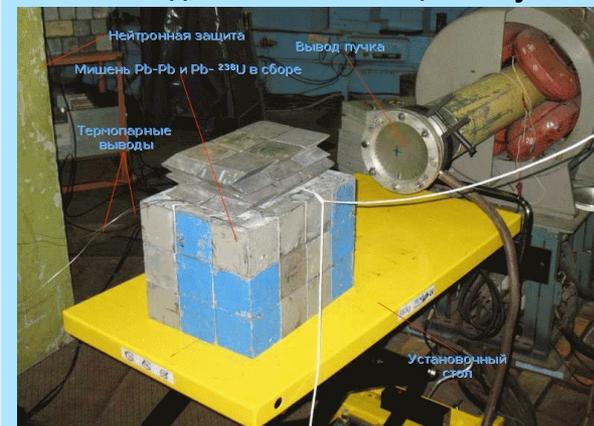


Темп роста температуры при одинаковом токе пучка в приведенных случаях различен. Нагревание свинца происходило со скоростью около 13.0 град/10 мин, а урана 35.5 град/10 мин (абсолютная погрешность термодатчика составляет 0.05°C).

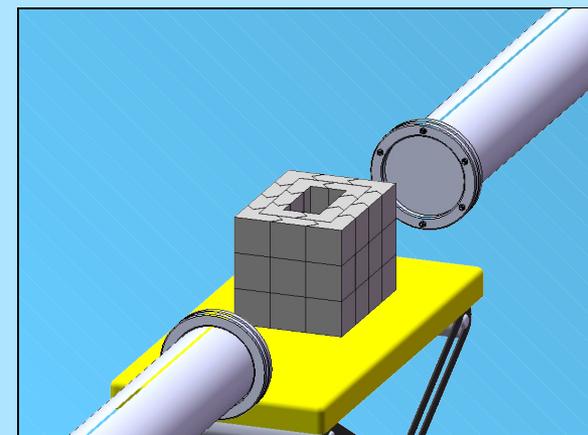
Выделение энергии в урановом и свинцовом образцах в свинцовой матрице (МэВ на 1 падающий протон). C/E ~ 0,59

Материал	Деление, нейтроны	Фотоны + протоны	Всего расчет	Эксперимент
Обедненный уран	61.7	130.6	192.3	235.6
Свинец	0.2	74.4	74.6	70.0

Внешний вид мишени на позиции облучения



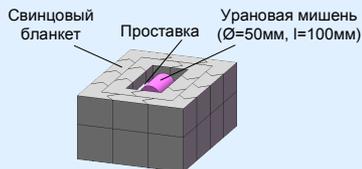
Сборка мишени на позиции облучения



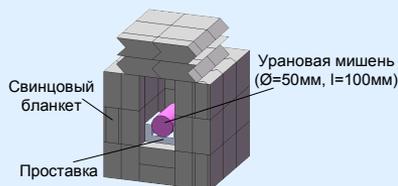
Методические эксперименты 2008г. (ПИЯФ РАН)



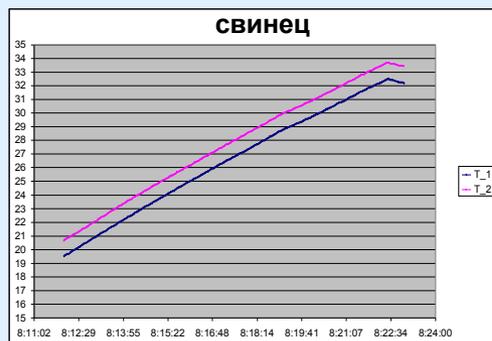
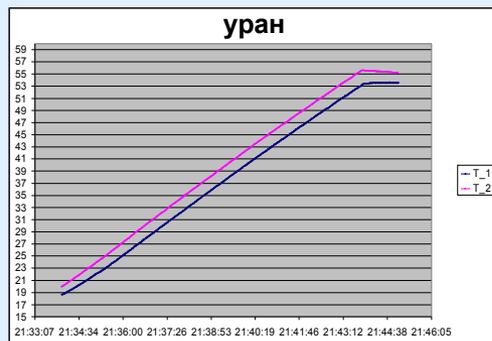
Вид сечения **A-A** мишени



Вид сечения **B-B** мишени



Массивная свинцовая матрица размерами 30×30(40)×40 см), содержащей цилиндрическую вставку из обедненного урана массой ~ 3.2 кг или цилиндрическую вставку из природного свинца той же (Ø ~ 5 см, L ≈ 10 см) геометрии, на импульсное воздействие 1 ГэВ-ного протонного пучка синхротронного ПИЯФ РАН.

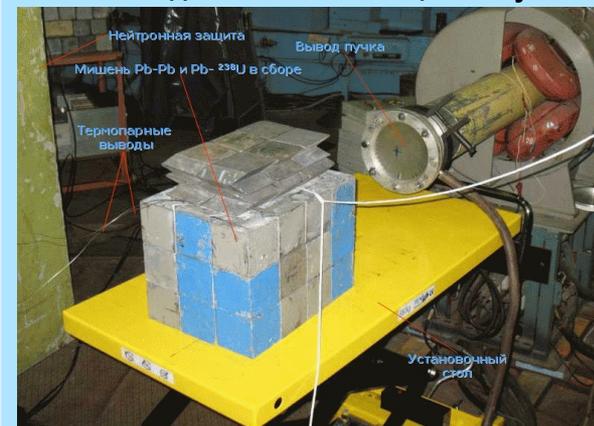


Темп роста температуры при одинаковом токе пучка в приведенных случаях различен. Нагревание свинца происходило со скоростью около 13.0 град/10 мин, а урана 35.5 град/10 мин (абсолютная погрешность термодатчика составляет 0.05°C).

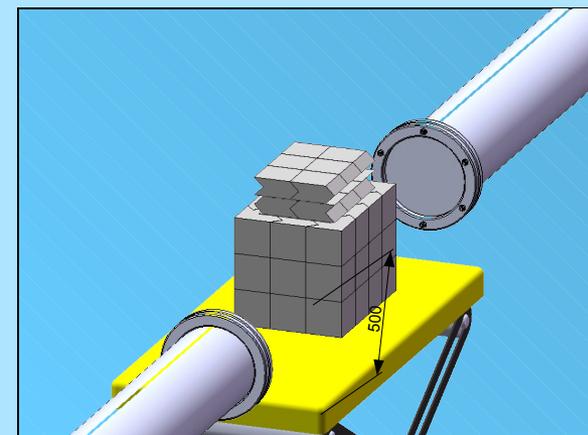
Выделение энергии в урановом и свинцовом образцах в свинцовой матрице (МэВ на 1 падающий протон). C/E ~ 0,59

Материал	Деление, нейтроны	Фотоны + протоны	Всего расчет	Эксперимент
Обедненный уран	61.7	130.6	192.3	235.6
Свинец	0.2	74.4	74.6	70.0

Внешний вид мишени на позиции облучения



Сборка мишени на позиции облучения

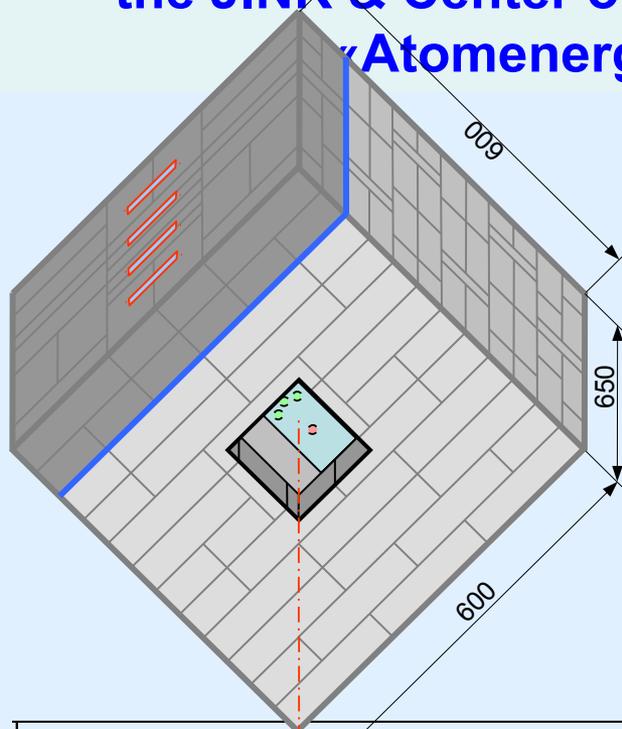


Для свинца наблюдается вполне приемлемое соответствие расчетных и полных, экспериментально полученных, интегральных характеристик, однако при этом существенно занижается роль высокоэнергетичной компоненты нейтронного излучения.

В то же время для делящихся размножающих сред существующие верифицированные программы дают значительное, до ~ 2 раз, занижение даже интегральных характеристик, как нейтронного излучения, так и энерговыделения.

Такое занижение характерно не только для расчетов процессов в достаточно больших ($\sim 3,5$ т) мишенях при относительно малых (660 МэВ) энергиях, но и для весьма малых (~ 3 кг) мишеней, при «эталонной» энергии 1 ГэВ.

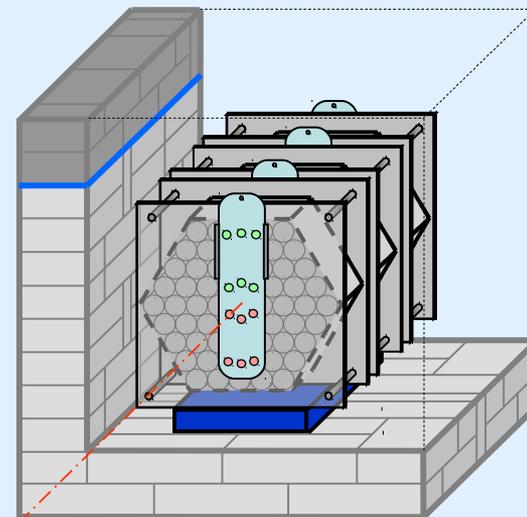
Methodological experiments conducted in 2009 on the initiative of the JINR & Center of Physical and Technical Projects «Atomenergomash» on the «Quinta»



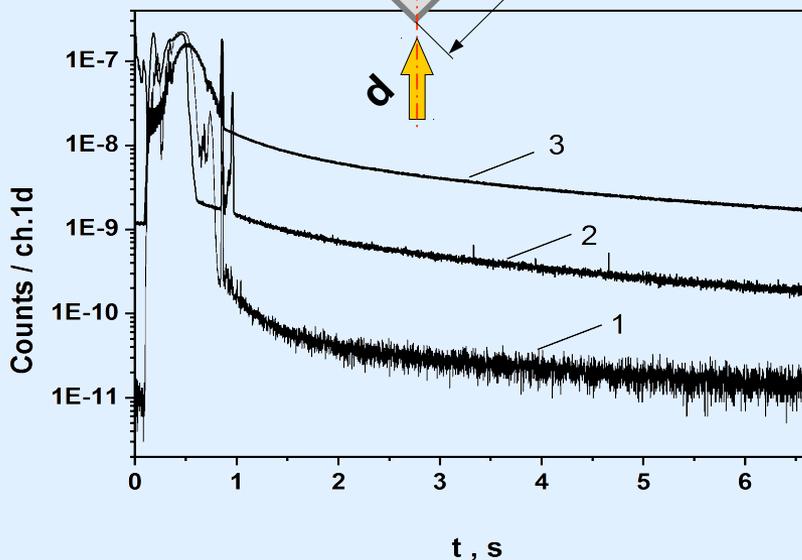
$$m_U = 315 \text{ кг}$$

$$m_{Pb} = 1780 \text{ кг}$$

$$m_{\Sigma} = 2125 \text{ кг}$$



d



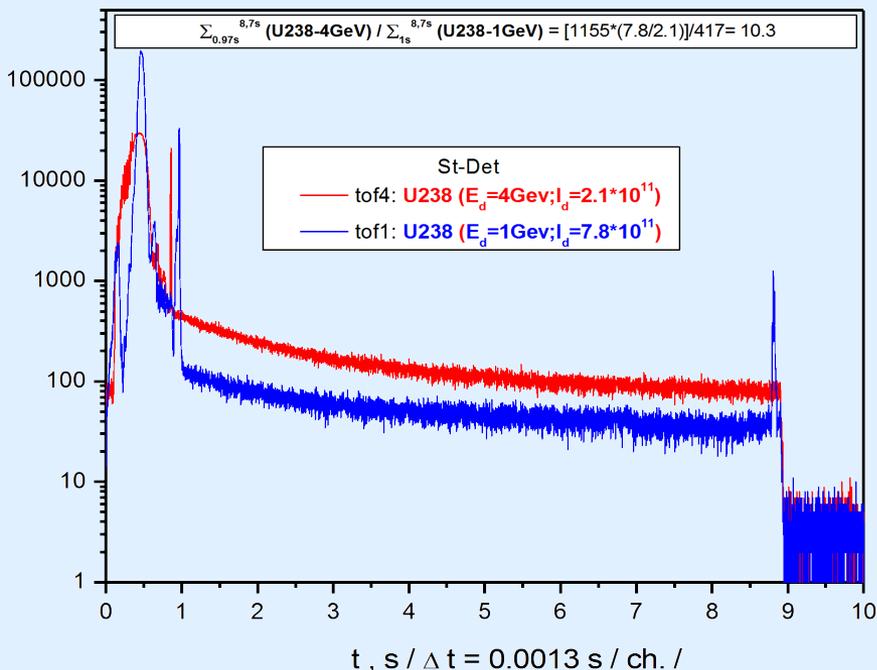
Time dependence of neutron yield from a geometrically identical target assemblies of lead and natural uranium (uranium mass of ~ 315 kg) irradiated with a deuteron energy of $E_d = 1$ and 4 GeV
 1 - (Pb + d) for $E_d = 4$ GeV;
 2 and 3 (U + d) for $E_d = 1$ and 4 GeV, accordingly.

With increasing energy of the deuteron from 1 to 4 GeV, the number of divisions and the energy release increases to $\sim 8-10$ times. In this case the gain of the beam power in natural uranium is increased ~ 2 times.

Methodological experiments conducted in 2009 on the initiative of the JINR & CPTP «Atomenergomash» on the «Quinta»

Временные спектры импульсов от ³He-детектора для сборки из урана на пучке дейтронов с энергией 1 ГэВ и 4 ГэВ.

Увеличение количества делений с ростом энергии пучка составляет $\sim 8,7 \pm 15\%$

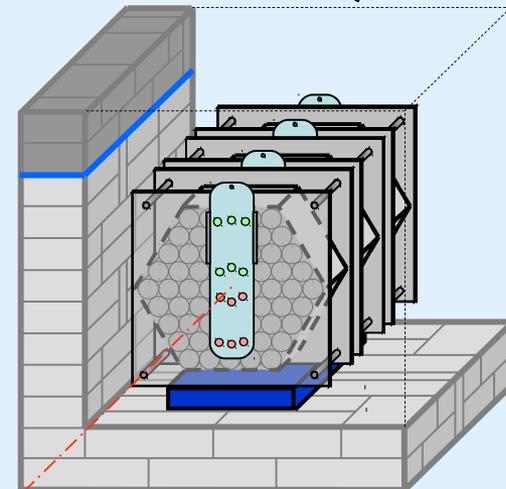
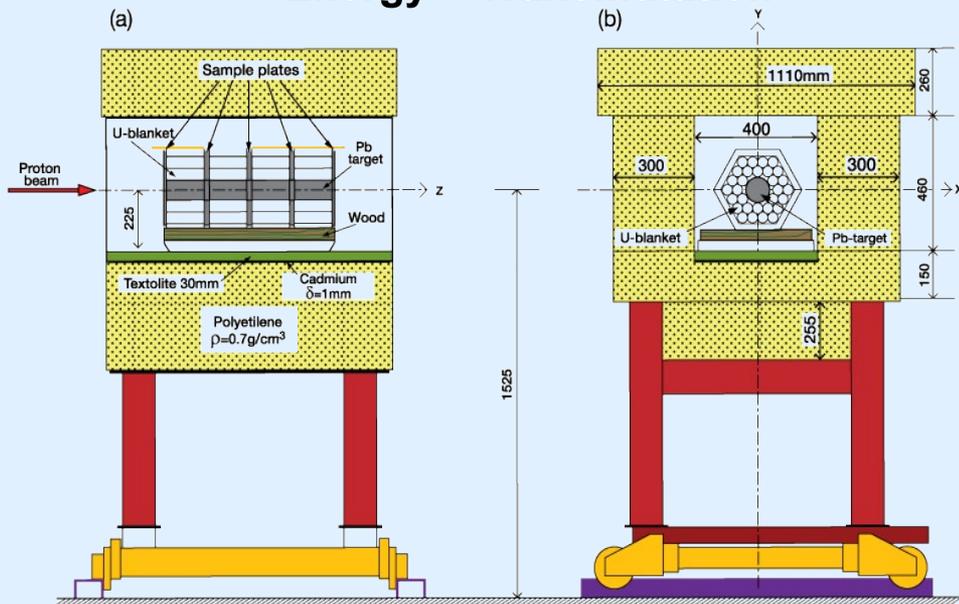


Временные спектры импульсов от St-детектора для сборки из урана на пучке дейтронов с энергией 1ГэВ и 4 ГэВ.

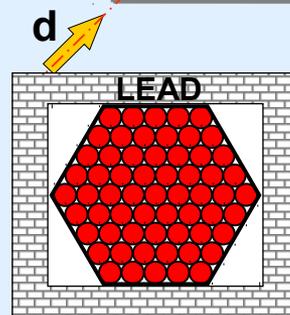
Увеличение количества делений с ростом энергии пучка составляет $\sim 10,3 \pm 15\%$

Результаты экспериментов ($E_d = 4 \text{ GeV}$)

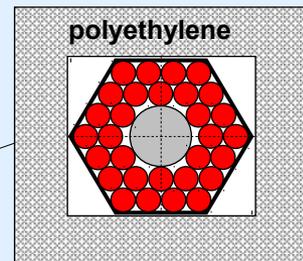
“Energy + Transmutation”



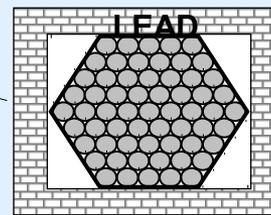
«Quinta»



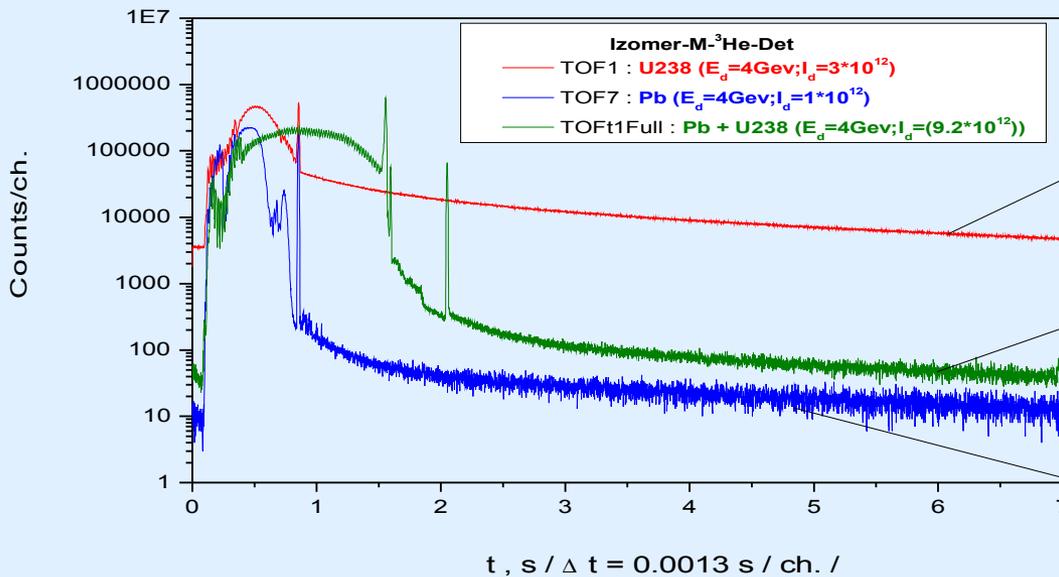
«Quinta» - Uranium



«Energy + Transmutation»



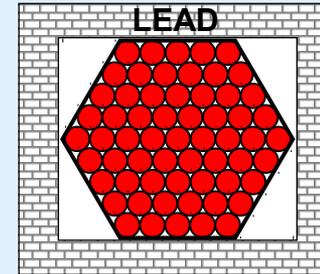
«Quinta» - Lead



Analysis of June and November 2009 results

«Quinta» - Uranium

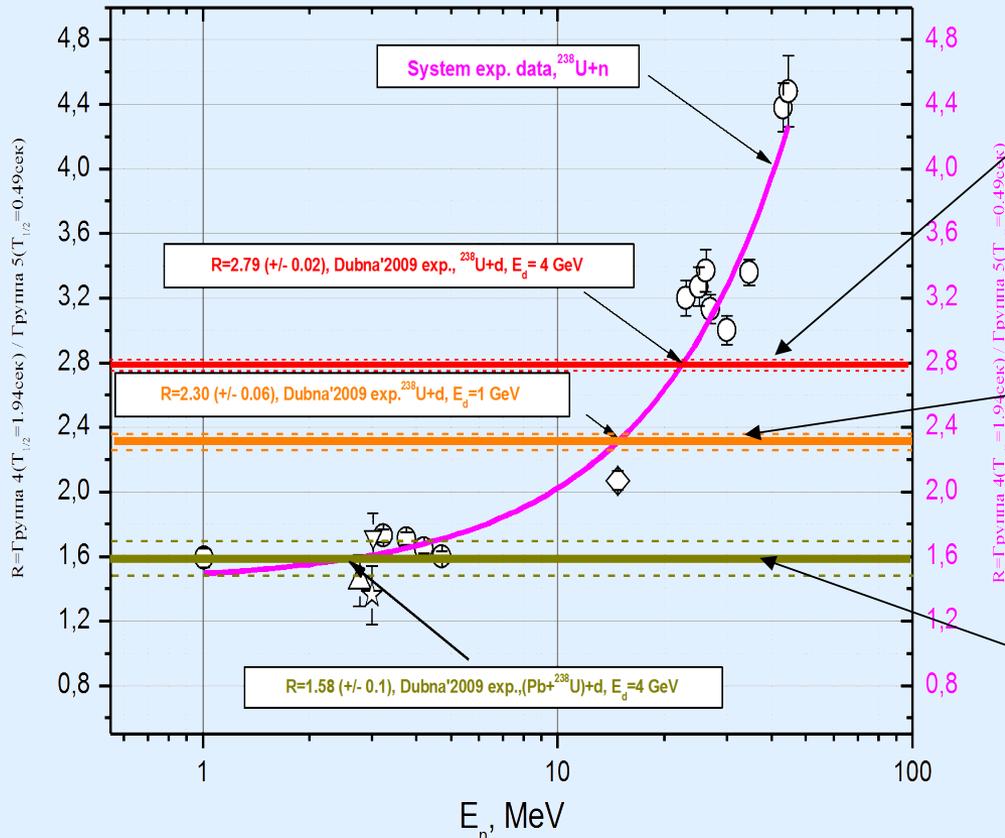
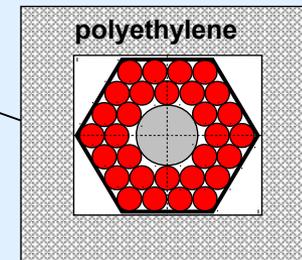
$$E_d = 4 \text{ GeV} \rightarrow E_{n,f} \sim 23 \text{ MeV}$$



$$E_d = 1 \text{ GeV} \rightarrow E_{n,f} \sim 14 \text{ MeV}$$

«Energy + Transmutation»

$$E_d = 4 \text{ GeV} \rightarrow E_{n,f} \sim 3 \text{ MeV}$$



Сравнение энергетических зависимостей отношения выходов групп ЗНД (4/5), построенных по известным данным для реакции $U(n,f)$, с полученными в наших измерениях на ^3He -детекторе отношениями выходов этих групп, выделенными из распадных кривых взаимодействия ($U + d$) при $E_d = 1$ и 4 ГэВ .

Обозначения: - \square - [1], \diamond - [2], Δ - [3], $*$ - [4], \circ - [5].

Эти результаты имели принципиальное значение для всей проблематики электроядерного метода.

1. Впервые экспериментально была поставлена под большой вопрос корректность следующих представлений, сложившихся в процессе предшествующих исследований электроядерных систем:

а) оптимум энергии первичного пучка для реализации ADS-систем лежит в области ~ 1 ГэВ;

б) с увеличением энергии выше 1 ГэВ коэффициент усиления мощности пучка (K_{yM}) или падает, в соответствии с расчетным моделированием, или, как было показано в эксперименте FEAT команды Карло Руббиа, - не растёт.

2. В случае подтверждения роста K_{yM} с ростом его энергии, возникает необходимость **выяснить фундаментальный механизм такого роста и определить его пределы**, путем проведения исследований в более широком интервале (**до 10÷12 ГэВ**) энергий падающих частиц.

**От Проекта «Энергия и Трансмутация – РАО»
к Проекту «ЯРТ – ОЯТ».**

В июне 2010 г. ПКК ОИЯИ по физике частиц утвердил Проект «Энергия и Трансмутация РАО» (Э и Т – РАО) с высшим приоритетом.

Этот проект нацелен на комплексное исследование физико-технических аспектов применения принципиально новой схемы электроядерного метода – схемы ЯРТ.

Сроки выполнения проекта: 2011-2013 г.г.

В рамках реализации Проекта создаются 2 мишенно-диагностических комплекса.

- 1. На базе модернизируемой установки «Квинта» с массой урановой мишени ~ 500 кг, которая моделирует центральную область квазибесконечной урановой мишени «Буран».**
- 2. На основе квазибесконечной урановой мишени «Буран» массой ~ 21 т, которая станет полномасштабной ядерно-физической моделью активной зоны ЯРТ-реактора.**

Квазибесконечная урановая мишень «Буран» («Buran»)

Материал мишени – обедненный уран, очехлованный стальным корпусом

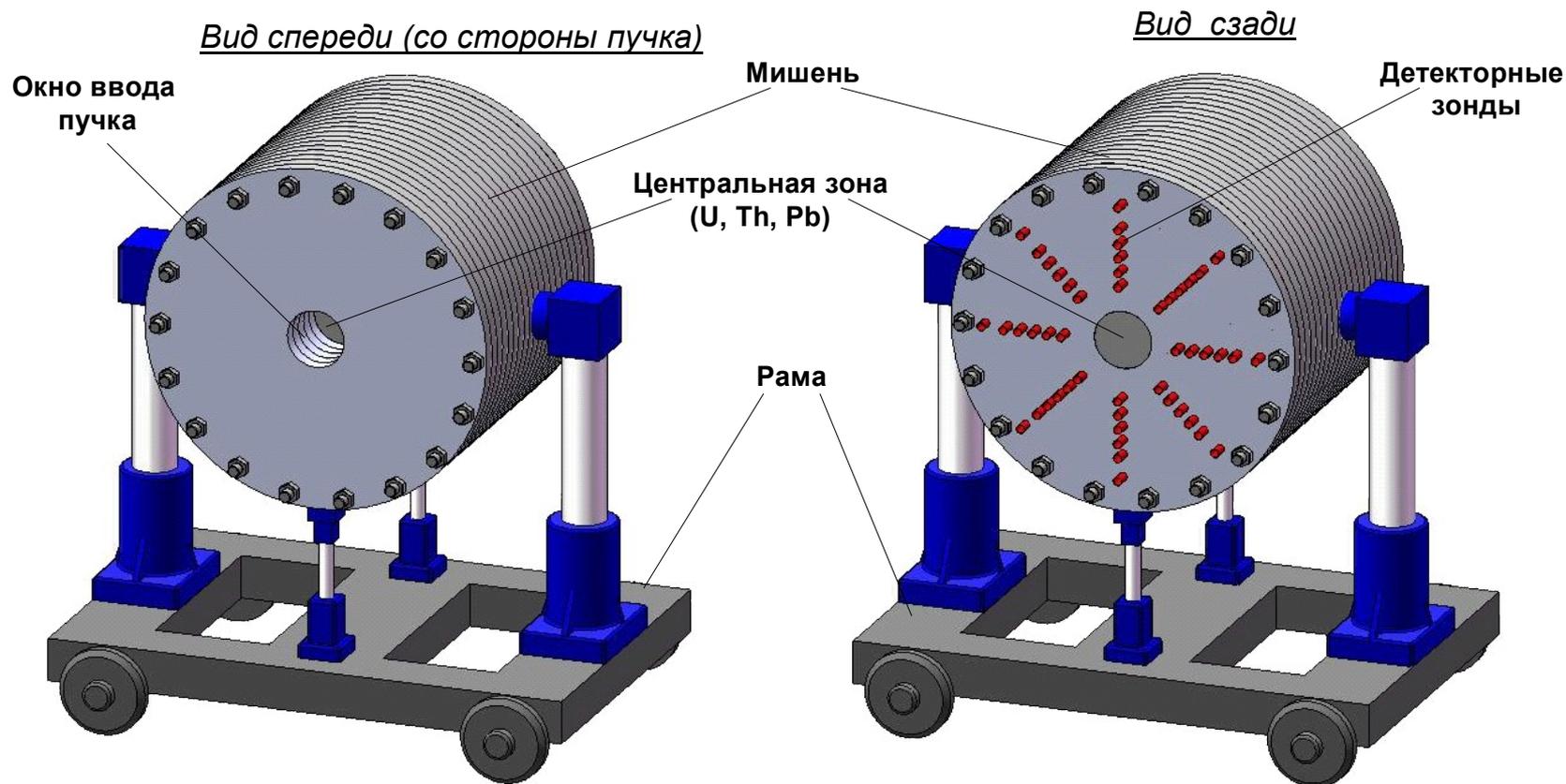
Масса урана – 21 т.

Диаметр мишени – 1,2 м.

Длина мишени – 1 м.

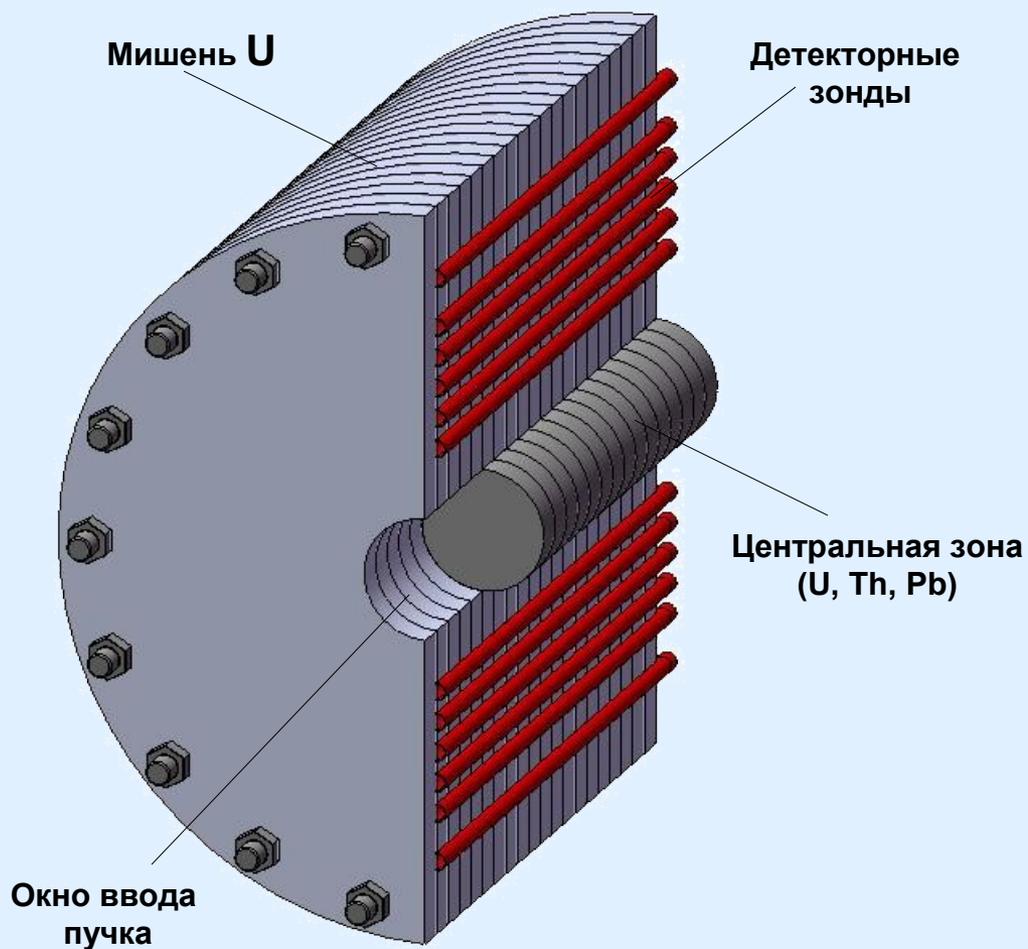
Материалы центральной зоны – U, Th, Pb.

Диаметр центральной зоны – 0,2 м.

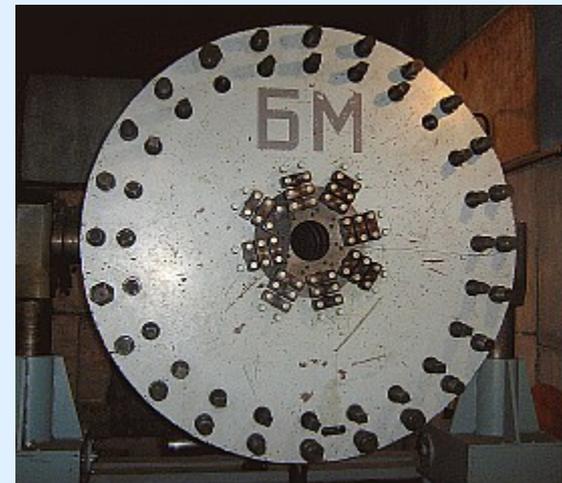


Квазибесконечная урановая мишень «Буран» («Buran»)

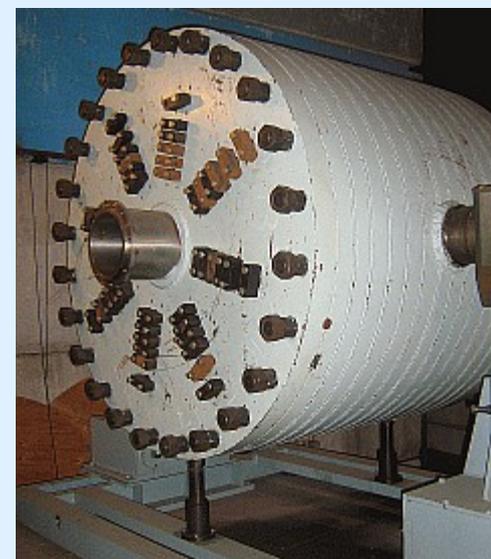
Продольное сечение мишени с установленной центральной зоной и детекторными зондами



Вид спереди (со стороны пучка)



Вид сзади



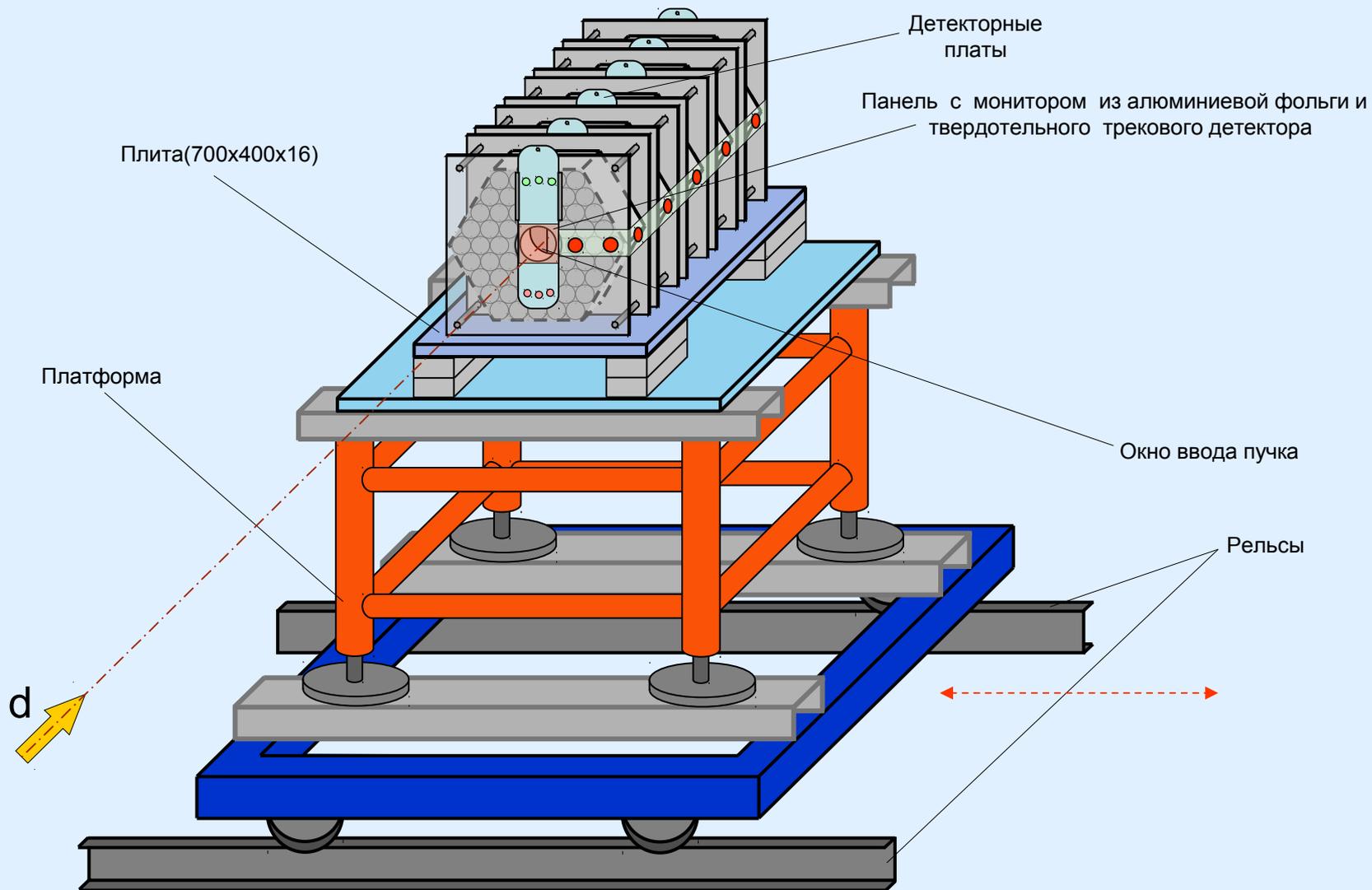
Основные задачи Проекта «Э и Т – РАО»

1. Определение оптимальной энергии и вида частиц (протоны – дейтроны).
2. Изучение процессов нейтронообразования и пространственного распределения нейтронных спектров.
3. Определение зависимости коэффициента усиления мощности пучка от энергии налетающих протонов и дейтронов.
4. Определение пространственного распределения динамики наработки и уничтожения (деления) ^{239}Pu в зависимости от его концентрации и определение, т.о., его равновесной концентрации.
5. Определение скоростей реакций переработки наиболее актуальных изотопов из состава ОЯТ.
6. Получение набора экспериментальных данных, для модификации существующих моделей и транспортных кодов.

Основные задачи экспериментов с модернизируемой установкой «Квинта»

- 1. Подтверждение и расширение результатов 2009г.**
- 2. Расширение, развитие и отработка методов и методик измерений параметров ядерно-физических процессов в интересах подготовки экспериментов на установке «Буран».**
- 3. Фундаментальные исследования в области взаимодействия релятивистских частиц с массивными мишенями в интересах модификации существующих моделей и транспортных кодов.**

Схема модернизированной установки «Квинта» на позиции облучения



● - Точки расположения ТТД и АД на поверхности мишени «КВИНТА»

General view of the experimental setup



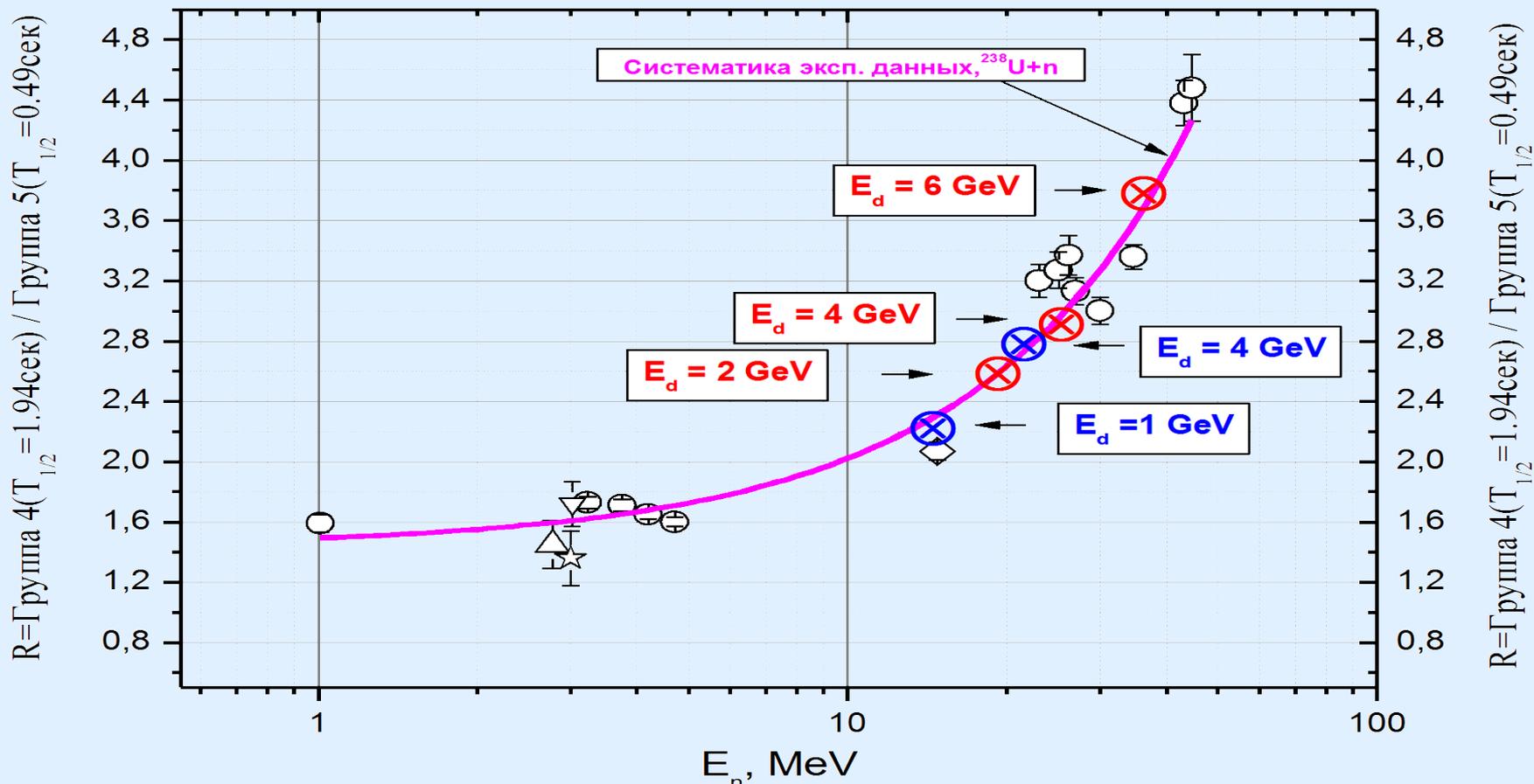
Результаты экспериментов марта 2011 г.

Энергия дейтронов	2 GeV	4 GeV	6 GeV
Общий выход ЗН на 1 дейтрон в условных единицах	$20 \pm 2,0$	$50 \pm 5,0$	$96 \pm 10,0$

Общий выход запаздывающих нейтронов на 1 дейтрон (по данным 2-х систем) показывает рост, значительно опережающий рост энергии пучка до энергии 6 ГэВ, что соответствует опережающему росту количества делений и, соответственно, энерговыделения.

(Детекторы «Изомер-М» и стильбен были направлены на середину 3-й секции).

Сравнение результатов по средней энергии нейтронов, вызывающих деление, полученных в июне 2009 г. и в марте 2011 г.



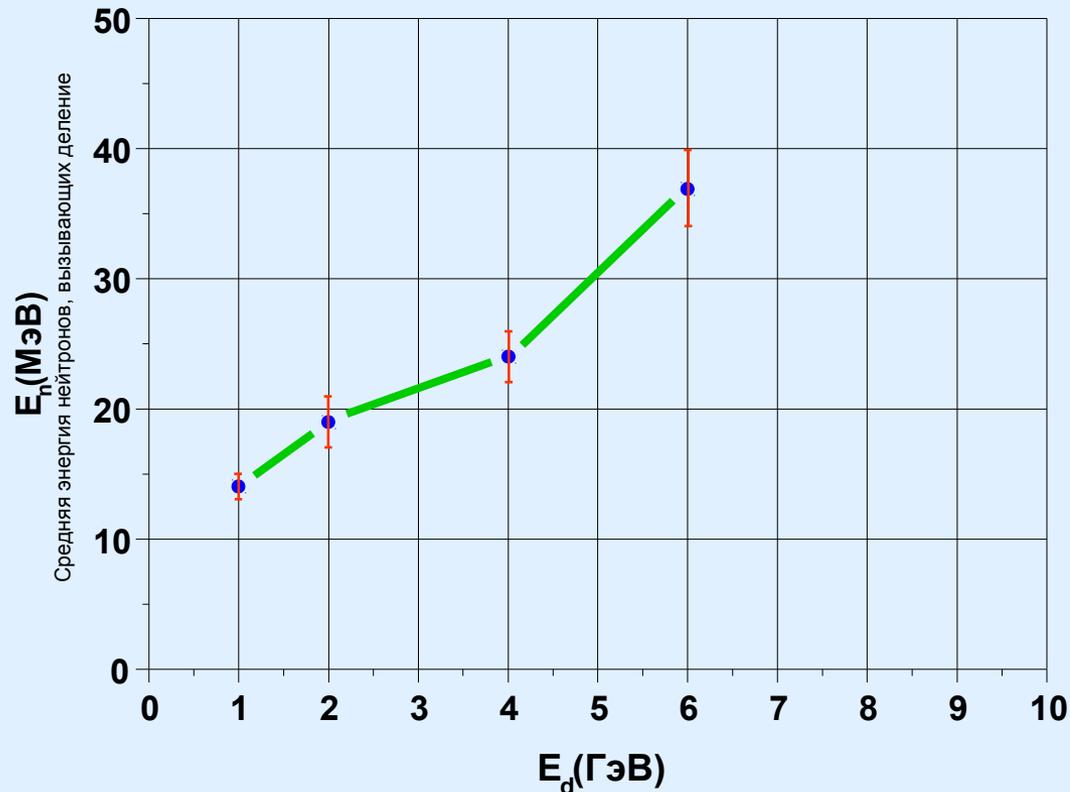
Обозначения: - □ - [1], ◇ - [2], Δ - [3], * - [4], ○ - [5]. 1. *Waldo R.W. et al.* Delayed Neutron Yields: Time Dependent Measurements and a Predictive Model // *Phys. Rev.* 1981. C23, P.1113-1127. 2. *Tomlinson L.* Delayed neutrons from fission // *Rep. AERE-R 6993.* 1972. 3. *Besant C.B. et al.* Absolute Yields and Group Constants of Delayed Neutrons in Fast Fission of ^{235}U , ^{238}U and ^{239}Pu // *J. Br. Nucl. En. Soc.* 1977. V.16. P.161-176. 4. *Rose H., Smith R.D.* Delayed Neutron Investigations with the ZEPHYR Fast Reactor, Part II— The Delayed Neutrons Arising from Fast Fission in ^{235}U , ^{233}U , ^{238}U , ^{239}Pu and ^{232}Th // *J. Nucl. Energy.* 1957. V.4. P.133-145. 5. *Isaev S.G.* Study of delayed neutrons parameters in neutron induced fission of heavy nuclei // Ph.D. thesis, IPPE, Obninsk, 2001.

При возрастании энергии пучка дейтронов от 1 до 6 ГэВ, средняя энергия нейтронов, вызывающих деление, возрастает от 14 ± 1 МэВ до 37 ± 3 МэВ

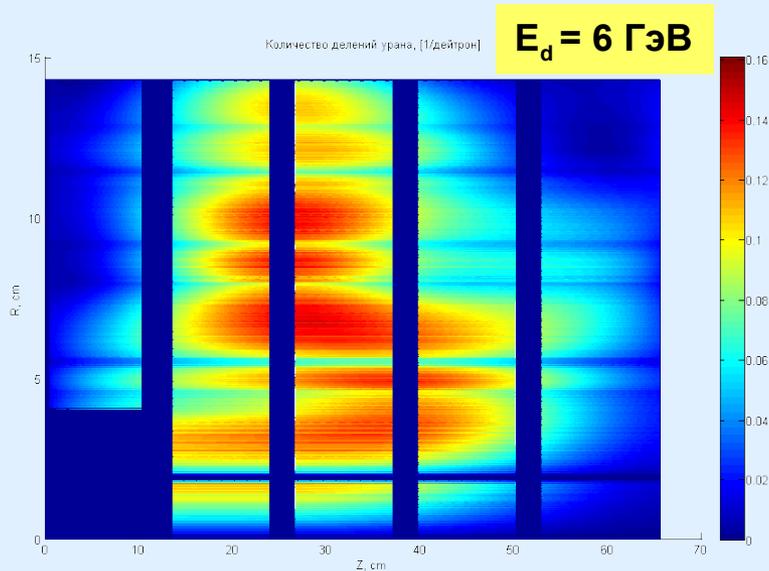
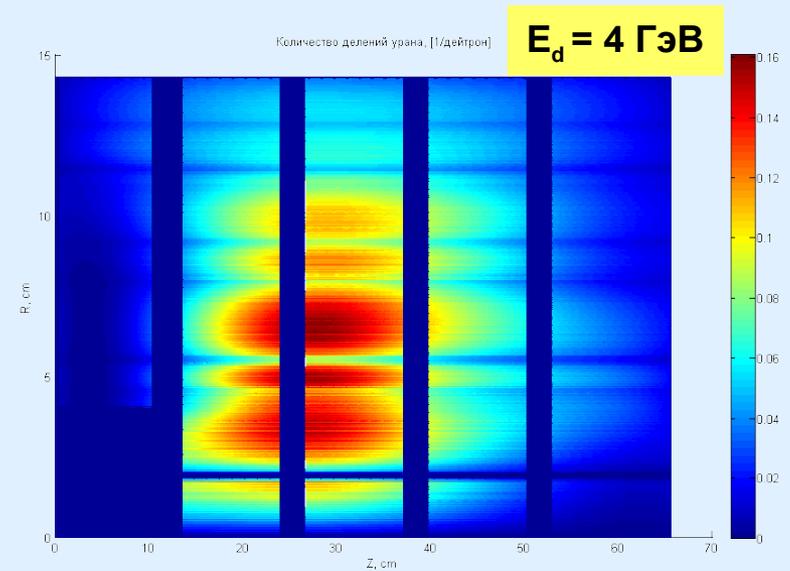
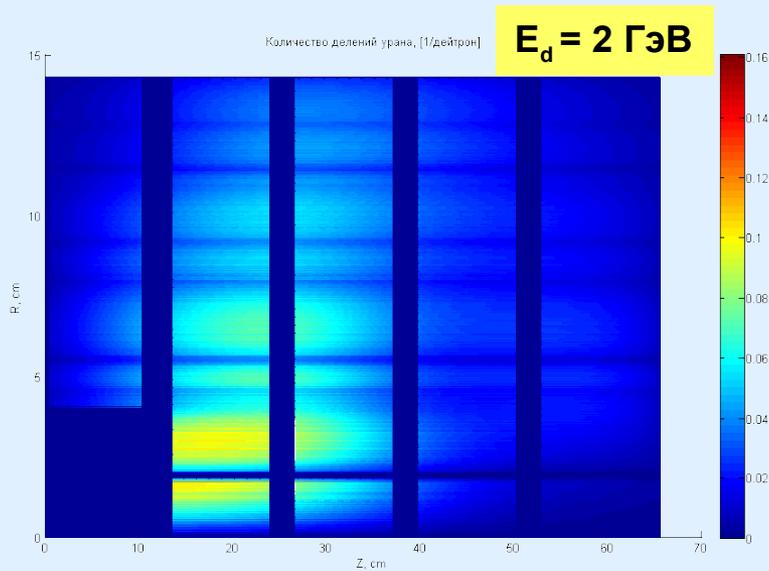
Результаты по определению средней энергии нейтронов, вызывающих деление

1. Подтверждены результаты 2009 г. на энергии 4 ГэВ.
2. Получен рост этой энергии при повышении энергии пучка до 6 ГэВ.

Зависимость средней энергии нейтронов, вызывающих деление в ограниченной (с большой утечкой нейтронов) массивной мишени из природного урана



Предварительные результаты экспериментов на установке «КВИНТА» (март 2011г.)



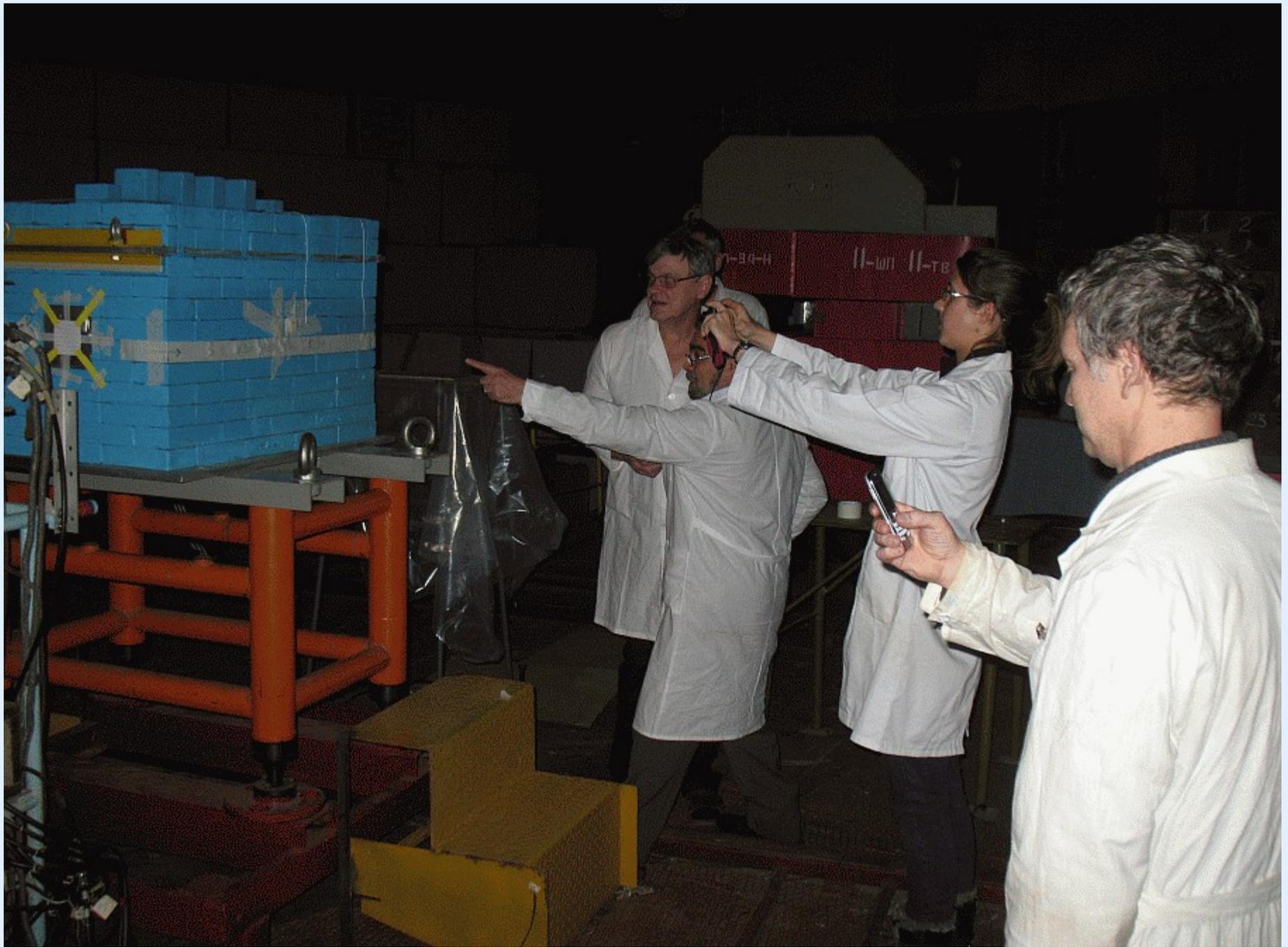
**Распределение плотности (числа делений
в 1 см^3) делений ядер урана в установке
«КВИНТА», облучаемой пучком дейтронов**

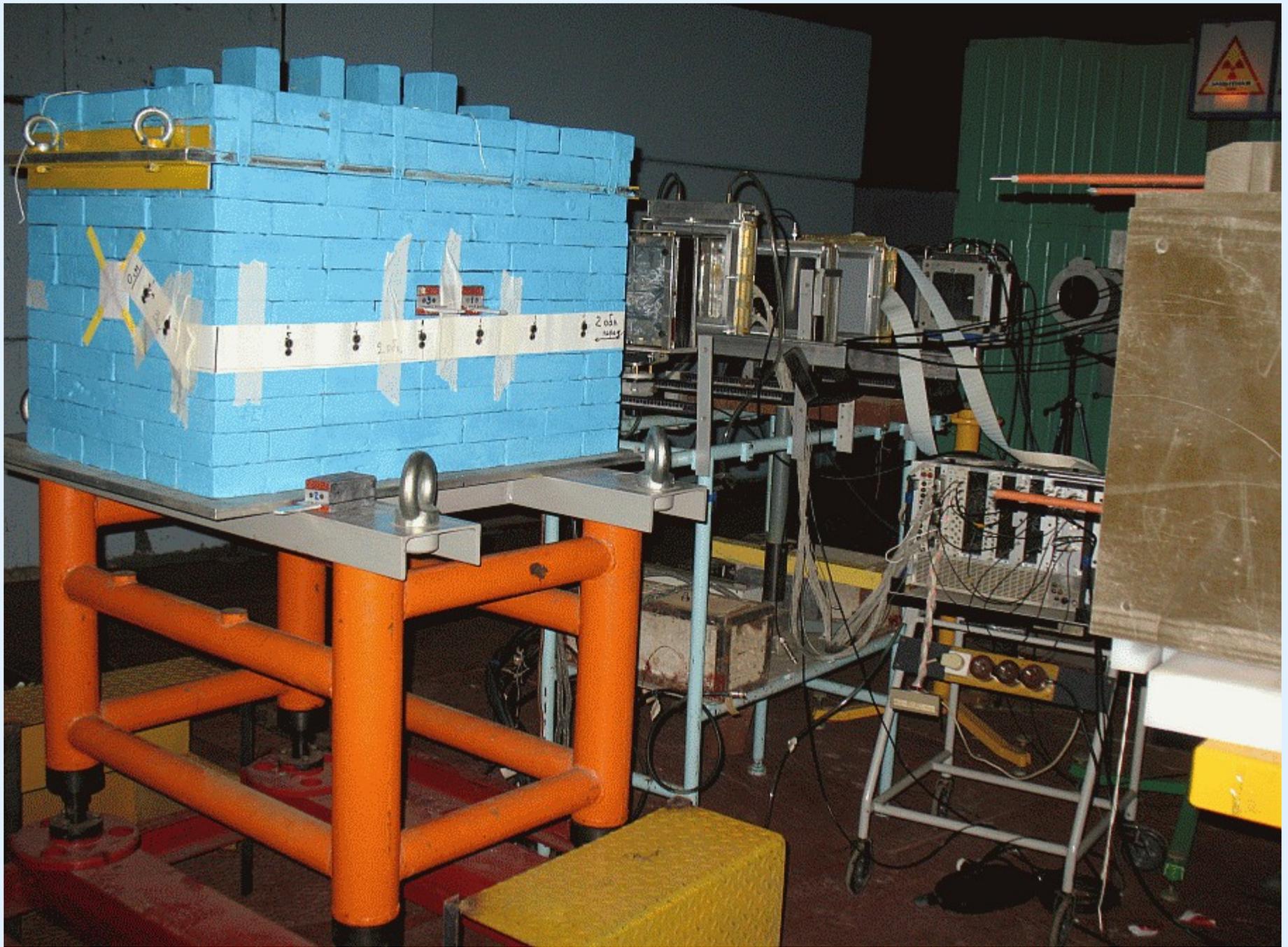
Некоторые выводы

1. Значительный рост средней энергии нейтронов, вызывающих деление в модели центральной области АЗ, с ростом энергии пучка, - указывает на **возможность использования ОЯТ без его сложной и «грязной» радиохимической переработки** - в качестве топлива ЯРТ-реактора.

2. Проект «Э и Т - РАО», по сути, является частью ядерно-физического блока Программы НИОКР «ЯРТ-ОЯТ».

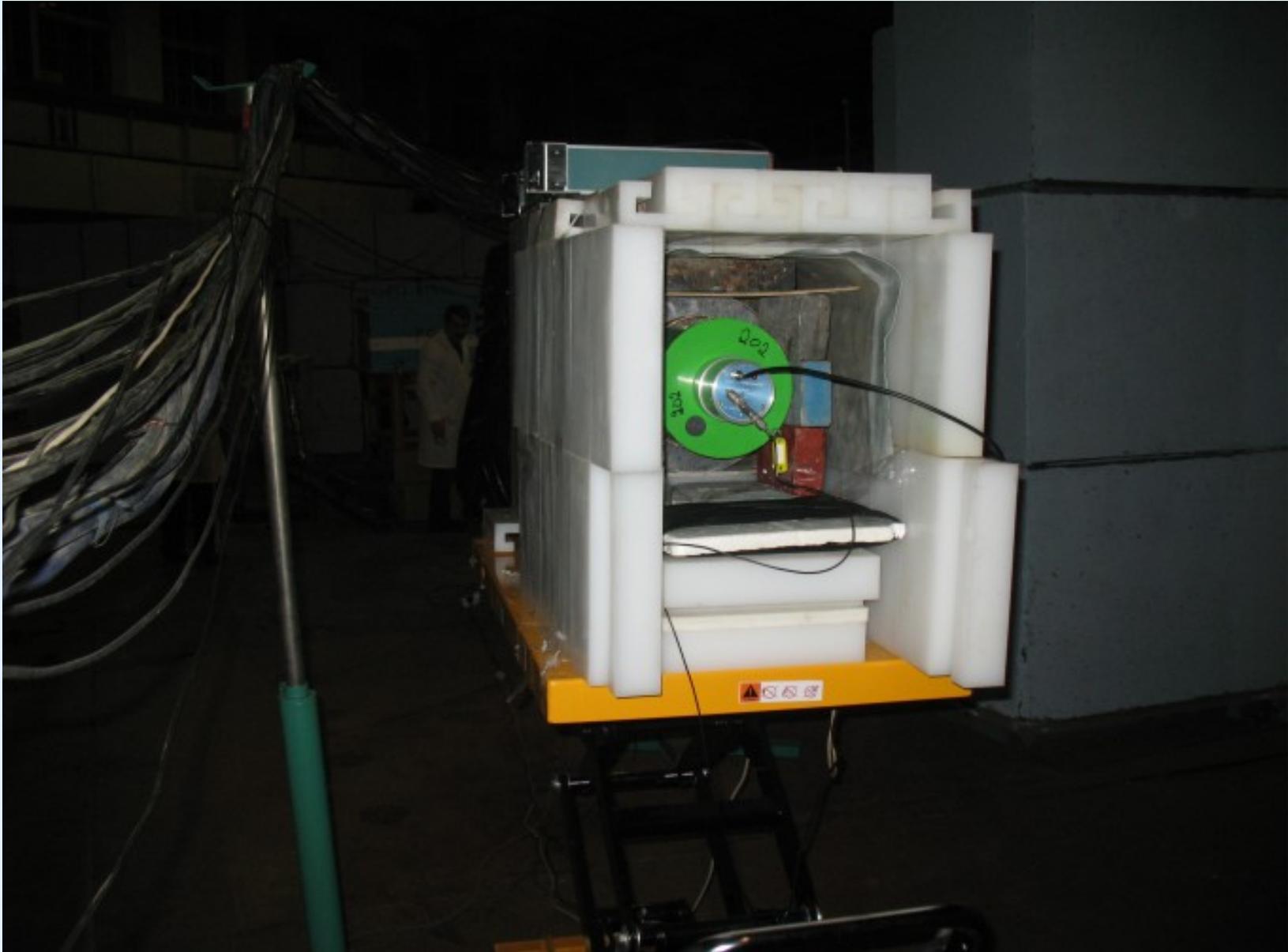
Эта программа нацелена на получение базовых исходных данных и доведение комплекса критических технологий до уровня, обеспечивающего возможность создания демонстрационного прототипа ядерной релятивистской электростанции (ЯРЭС) на основе ТЗ, разработанного в результате выполнения Программы.



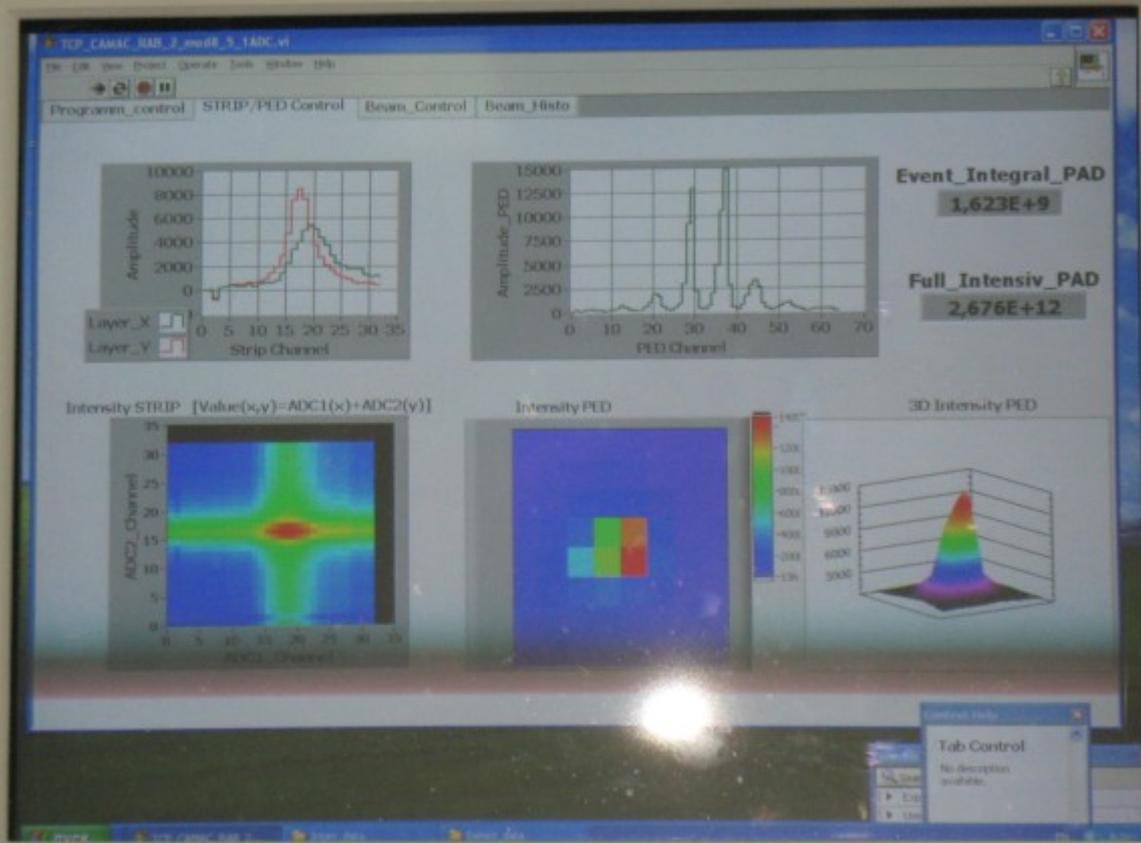












SAMSUNG

SyncMaster 1500





Программа «ЯРТ-ОЯТ»

Выполнение Программы «ЯРТ-ОЯТ» предполагается в рамках широкой международной кооперации на базе ряда Лабораторий ОИЯИ (ЛФВЭ, ЛНФ, ЛЯП, ЛИТ и др.) в составе:

ОИЯИ; Россия: ЦФТП «Атомэнергомаш», ГНЦ РФ ФЭИ, НПО «Радиевый институт», НПО «Луч», МРТИ РАН, «Атомэнергомаш» (б. ВНИИАМ), «Физтехмед», НИЯУ МИФИ, ГНЦ НИИАР, НТЦ ЯРБ, ЭЦ ИИЕТ РАН, ОКБМ, НИЦ «КИ», ГИ«ВНИПИЭТ»;

Беларусь: ОИЭиЯИ-Сосны НАН Беларуси, ИФ НАН Беларуси;

Казахстан: ИЯФ НЯЦ РК, СП «БЕЛКАМИТ»;

Украина: ННЦ ХФТИ (Украина);

и специалистами других профильных организаций **стран СНГ.**

Основные направления работ по Программе «ЯРТ-ОЯТ»

В рамках Программы «ЯРТ-ОЯТ» предполагается проведение работ по 9-ти основным направлениям.

Направления 1÷4 образуют единый ядерно-физический блок работ.

Они выполняются совместно, дополняя и используя взаимно получаемые результаты в интересах реализации конечных целей Программы «ЯРТ-ОЯТ».

Направление 1 - «Интегралы». Проведение комплекса интегральных экспериментальных работ с большими урановыми мишенями.

Направление 2 - «Константы».

Направление 3 - «Моделирование».

Направление 4 - «Материалы».

Основные направления работ по Программе «ЯРТ-ОЯТ»

Направление 5 - «Ускоритель». Создание демонстрационного образца ускорителя «УЛОВ» (BWLAP) на энергию ~ 100 МэВ.

Направление 6 - «Микротвэлы». Разработка технологии капсулирования обедненного (отвального) урана и ОЯТ, без его предварительной радиохимической переработки и разделения на элементы.

Направление «6+» - «Топливный цикл».

Направление 7 - «Теплофизика».

Направление 8 - «Безопасность и экология». Комплекс нормативно-правовых и научно-изыскательских работ по экологии, радиационной и ядерной безопасности, оценке рисков жизненного цикла ЯРЭС.

Направление 9 - «Систематика». Управление, координация, комплексный анализ и системная интеграция результатов всех направлений работ Программы в **проект ТЗ** на создание демонстрационного опытно-промышленного **прототипа ЯРЭС**.

Программа «ЯРТ-ОЯТ» является **1-й фазой** принципиально нового, «прорывного», **Проекта «ЯРТ-ОЯТ»**, в результате реализации которого Россия, Беларусь, Казахстан и Украина смогут **«обогнать, не догоняя»** - весь мир.

В отличие от Атомного проекта №1, нацеленного, в первую очередь, на военные приложения энергии атомного ядра, Атомный проект №2 нацелен на исключительно мирное использование энергии атома.

При реализации схемы ЯРТ в промышленном масштабе ядерная энергетика станет доступной всем, без исключения, странам, сняв проблему нераспространения на детерминистском уровне.

При наличии адекватного финансирования и реализации организационных принципов, соответствующих масштабу проекта, - **Программу «ЯРТ-ОЯТ»** можно реализовать за ~ **4 года**, после чего в течение ~ **8 лет** создать первый демонстрационный опытно-промышленный **прототип** блока **ЯРЭС** в рамках 2-й фазы **Проекта «ЯРТ-ОЯТ»**.

Фундаментальные аспекты Проекта

Использованы результаты, приведенные, в частности, в работах:

1. Перфилов Н.А., Ложкин О.В., Остроумов В.И. – Ядерные реакции под действием частиц высоких энергий. М., 1962.
2. Хайд Э., Перлман И., Сиборг Г. - Ядерные свойства тяжелых элементов. Вып. 5. Деление ядер. М., 1969.
3. Обухов А.И. – Деление ядер при взаимодействии с протонами и нейтронами промежуточных энергий. ЭЧАЯ, т. 32, вып. 2, 2001.

Для свинца наблюдается вполне приемлемое соответствие расчетных и полных, экспериментально полученных, интегральных характеристик, однако при этом существенно занижается роль высокоэнергетичной компоненты нейтронного излучения.

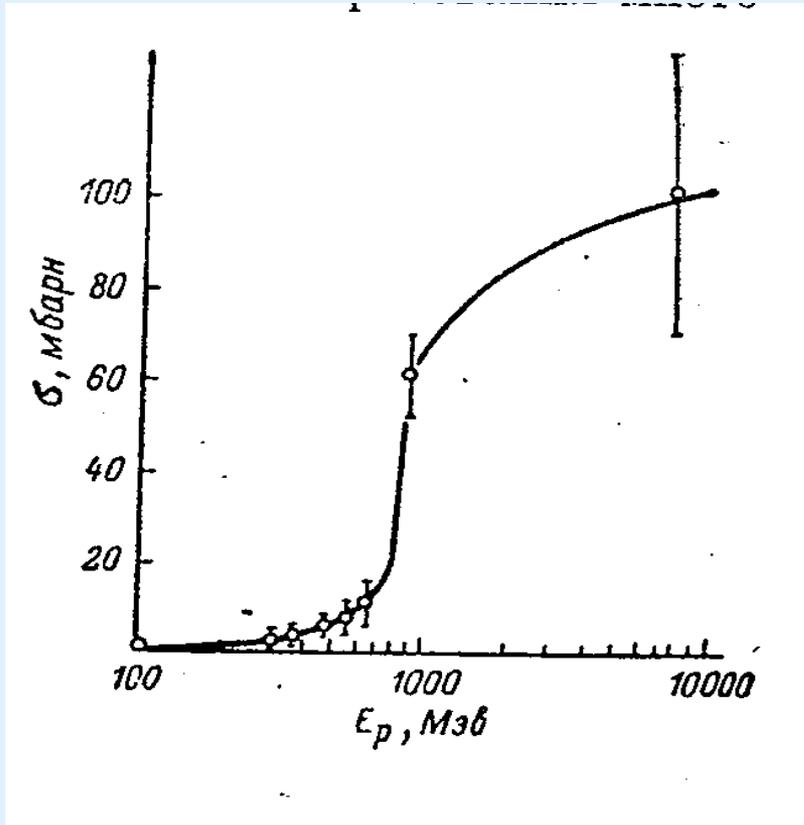
В то же время для делящихся размножающих сред существующие верифицированные программы дают значительное, до ~ 2 раз, занижение даже интегральных характеристик, как нейтронного излучения, так и энерговыделения.

Такое занижение характерно не только для расчетов процессов в достаточно больших ($\sim 3,5$ т) мишенях при относительно малых (660 МэВ) энергиях, но и для весьма малых (~ 3 кг) мишеней, при «эталонной» энергии 1 ГэВ.

Вследствие такой неполноты оптической модели и МИВ на практике пользуются различными чисто феноменологическими моделями, совершенно не связанными с фундаментальными уравнениями Шредингера. Все они основываются на интуитивных постулатах и потому содержат большое количество подгоночных параметров, физический смысл которых зависит от интерпретации той или иной модели.

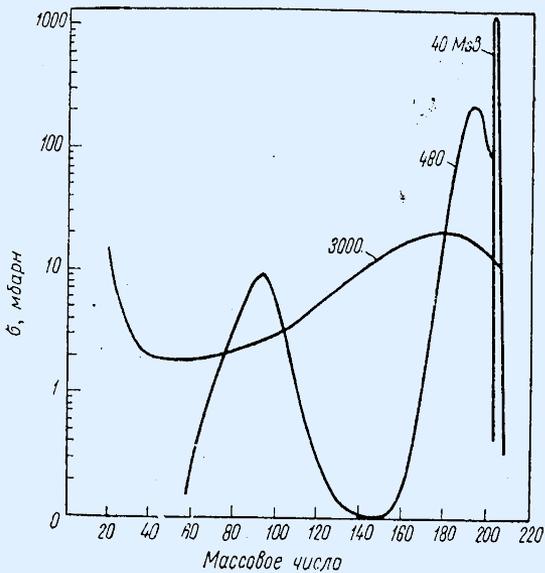
Из предыдущего обсуждения мы увидели, что главный недостаток микроскопических моделей состоит в их неприменимости (или чрезмерной сложности) для практических расчетов. Полуфеноменологические модели весьма практичны, но, к сожалению, не покрывают всего процесса реакций. Феноменологические модели также очень практичны, но в них отсутствуют фундаментальные выводы, связывающие их с микроскопическим подходом. Это плохо не только с теоретической точки зрения, но и потому, что делает невозможным определить области применимости указанных моделей и оставляет место для весьма туманно определенных (или просто свободных) параметров и для дальнейших модификаций, связанных скорее со вкусами авторов, чем с физическим смыслом. Несмотря на все это, они все же дают разумное описание экспериментальных данных. Вопрос — почему указанные модели неплохо согласуются с экспериментом — несомненно представляет интерес для теоретиков.

Полное сечение образования фрагментов

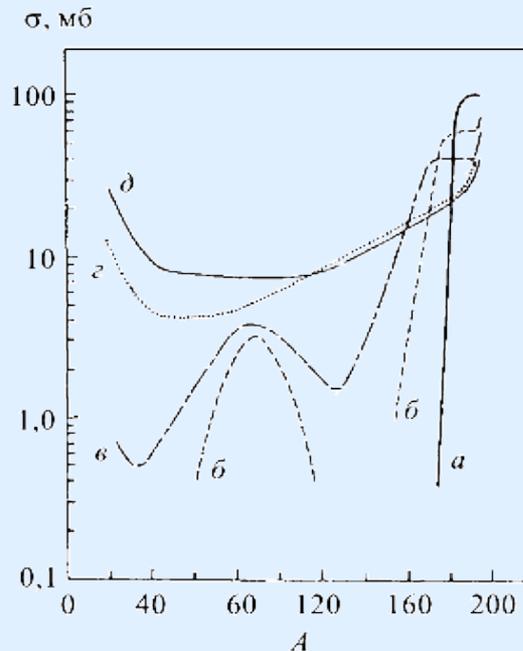


Полное сечение образования фрагментов резко возрастает в области энергий до 1 ГэВ, затем рост замедляется и практически перестаёт зависеть от энергии налетающих частиц в широком диапазоне энергий.

Характерная зависимость от энергии протона полного сечения образования фрагментов с $Z \geq 4$ при расщеплении ядер AgBr.

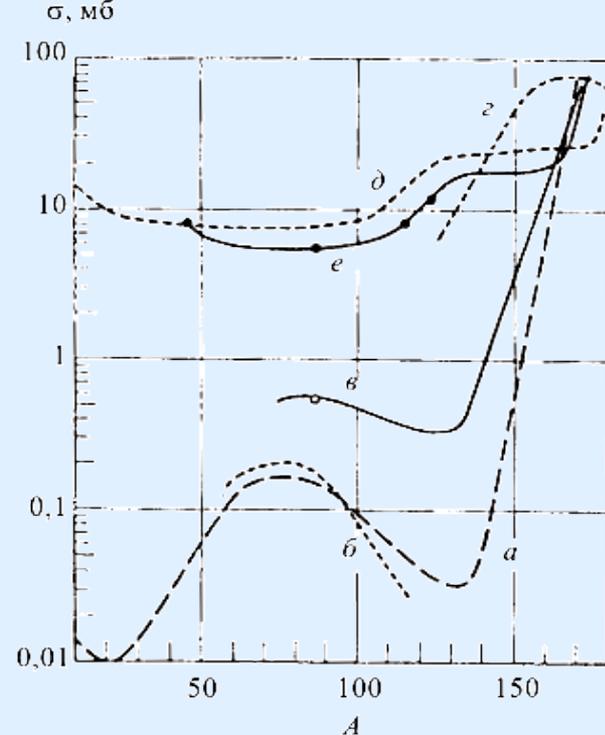


Распределение по массам ядер-продуктов при облучении протонами висмута (**40МэВ**, **480МэВ**) и свинца (**3ГэВ**)



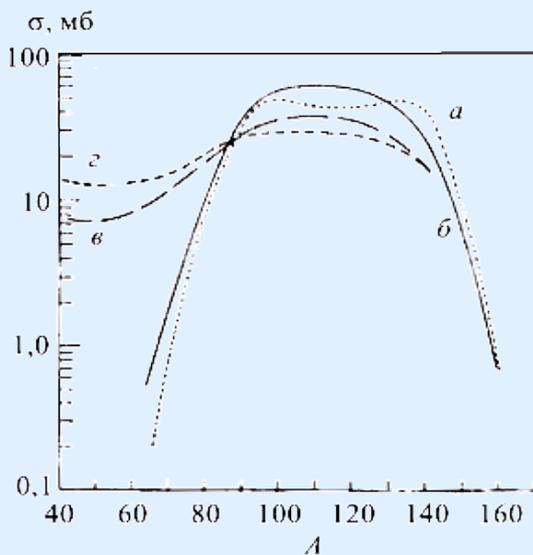
Распределение по массам ядер-продуктов при облучении протонами ^{197}Au

(**а – 0,2; б – 0,49; в – 1,0; г – 3,0; д – 11,5ГэВ**)



Распределение по массам ядер-продуктов при облучении ^{181}Ta протонами с энергиями:

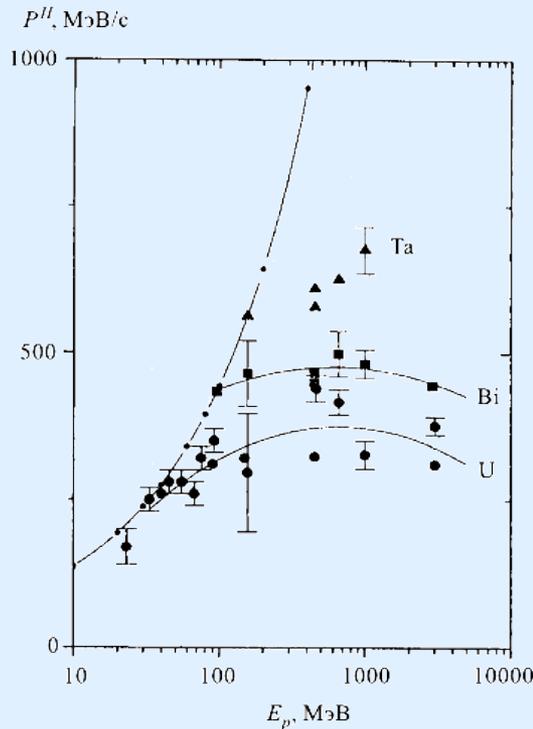
а – 0,34; б – 0,45; в – 0,58; г – 0,66; д – 5,7; е – 19,0ГэВ



Распределение по массам ядер-продуктов при облучении ^{238}U протонами с энергиями:

а – 0,1; б – 0,17; в – 2,9; г – 28ГэВ.

При энергиях протонов $E \geq 3 \text{ ГэВ}$, характеристики процесса фрагментации практически не зависят от **массы ядра и энергии налетающей частицы**. Процесс фрагментации одинаковым образом протекает и для сферически симметричных, и для сильно деформированных ядер, т.е. не зависит от формы и особенностей строения ядер. Взаимодействие происходит с ядерной материей, заключенной в объеме ядра.



Среднее значение импульса, передаваемое в переднем направлении ядрам U, Bi, Ta(W)

Экспериментальные данные указывают на то, что энергия, передаваемая ядру-мишени налетающей частицей, практически достигает своего предела при энергиях около 3 ГэВ. Другими словами, существует максимальная энергия, которую частица может передать ядру, а ядро, как целое, в состоянии «израсходовать на свои нужды».

События с выходом фрагмента той или иной массы практически равновероятны.

Понятие выделенной по энергии или иначе - **лидирующей частицы** должно быть включено в рассмотрение процессов взаимодействия быстрых нуклонов с ядрами, начиная с энергий в районе $2 \div 3 \text{ ГэВ}$.

Фрагменты испускаются непосредственно из ядра-мишени.

При исследовании фрагментации урана не обнаружено испускания фрагментов из возбужденных осколков деления.

Фрагментация делящихся ядер представляет собой отдельный процесс, не связанный с обычным процессом деления.

Выделение из распределения по массам ядер-продуктов деления при энергиях протонов выше 1 ГэВ крайне затруднено.

В некоторых работах утверждается, что среди ядер-продуктов взаимодействия урана с протонами с $E_p = 2,2 \text{ ГэВ}$ в интервале масс $90 \div 140$ все ещё присутствуют продукты обычного, как его называет Хайд, «настоящего» бинарного деления.

При энергиях же выше $2 \div 3 \text{ ГэВ}$ проявляется другой механизм деления ядер. Вклад в этот интервал масс можно описать с помощью процесса фрагментации и мультифрагментации. (Обухов).

Фрагменты представляют собой **стабильные изотопы с энергией возбуждения, недостаточной для эмиссии нейтронов**. Большинство из испускаемых фрагментов является устойчивыми по отношению к β -распаду (не более 10% - неустойчивых).

Множественность частиц

Экспериментальные исследования показали, что события с **испусканием фрагмента** в широкой области энергий налетающего протона (от 460 МэВ до 9 ГэВ) сопровождаются эмиссией заряженных частиц, среднее число которых (не считая фрагмента) **в 1,8 раза превышает среднее число частиц**, испущенных при той же энергии налетающей частицы в событиях без эмиссии фрагмента.

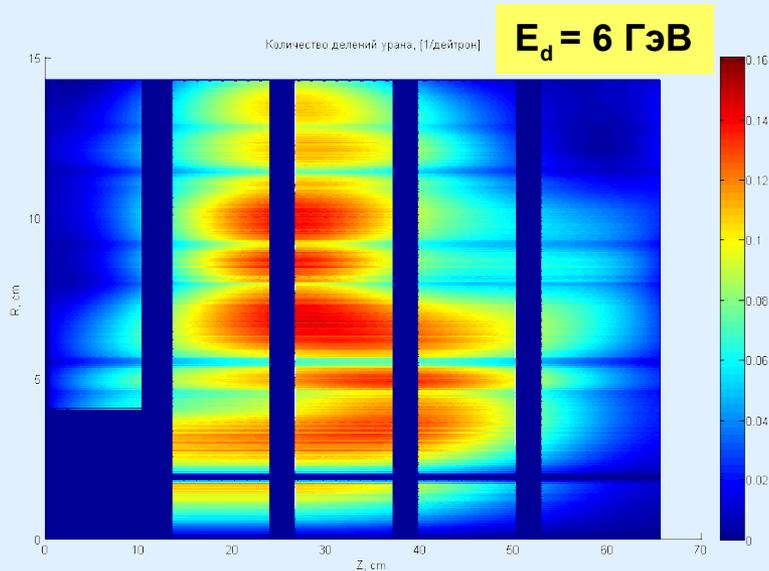
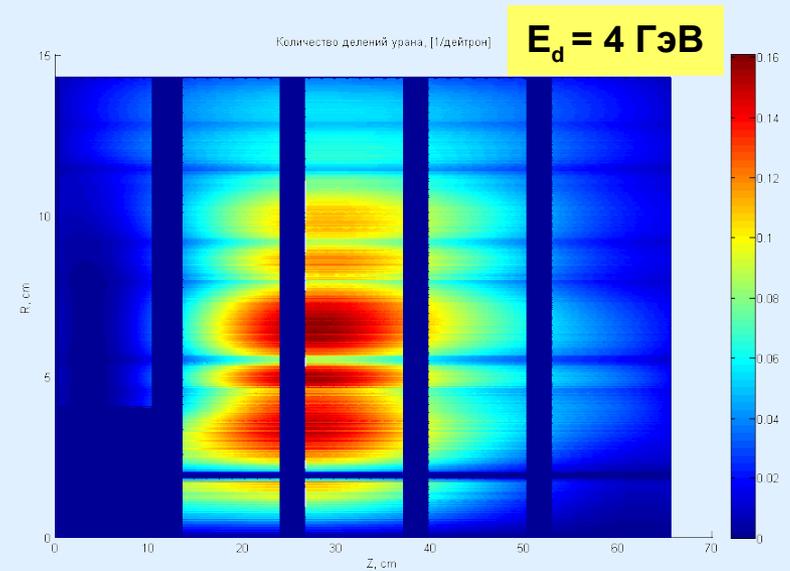
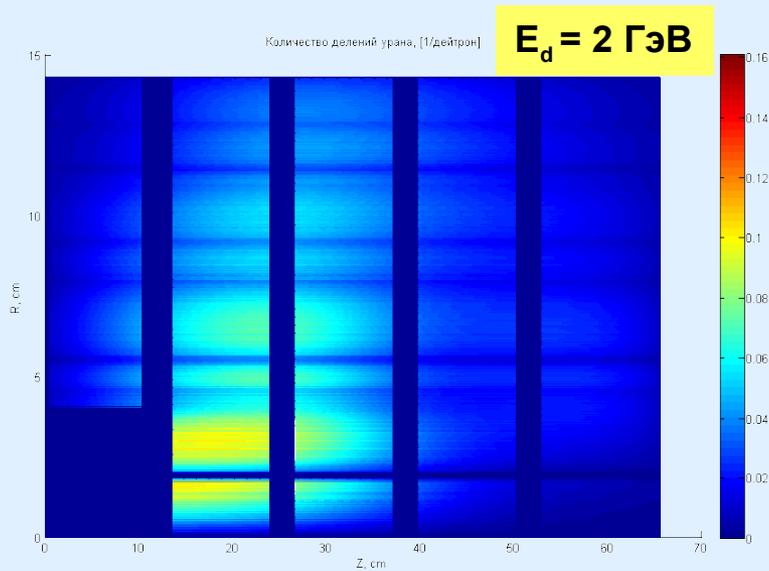
В событиях, сопровождающихся **испусканием двух и более фрагментов**, среднее число эмитированных частиц (не считая фрагментов) **более, чем в два раза** превышает среднее число частиц, испущенных без фрагментов.

Таким образом, число испущенных в акте взаимодействия ядрамишени с высокоэнергетичным протоном легких частиц существенно зависит от наличия фрагментации в данном событии.

Фрагментация соответствует бóльшей степени разрушения ядра.

Вероятность полного разрушения (на отдельные нуклоны) протонами ядер Ag, Br, Pb в событиях с фрагментацией практически не зависит от энергии протона и составляет для $E_p=6,2\text{ГэВ}$ - 2,1%, $E_p=9,6\text{ГэВ}$ - 3,1%, $E_p=70\text{ГэВ}$ - 3%.

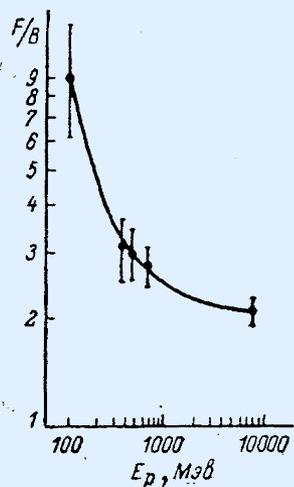
Предварительные результаты экспериментов на установке «КВИНТА» (март 2011г.)



**Распределение плотности (числа делений
в 1 см³) делений ядер урана в установке
«КВИНТА», облучаемой пучком дейтронов**

Анизотропия углового распределения фрагментов лежит в основе самого механизма образования фрагментов. **Эту характеристику, пожалуй, труднее всего понять и объяснить при теоретическом моделировании процесса.**

С ростом энергии налетающей частицы степень анизотропии уменьшается. Степень анизотропии можно охарактеризовать величиной F/V , где F – число фрагментов, испущенных в переднюю полусферу, V – число фрагментов, испущенных в заднюю полусферу относительно направления падающего протона. На рис. приведена зависимость F/V от энергии протонов для фрагментов с $Z \geq 4$.



С ростом энергии протона появляются фрагменты с изотропным распределением, однако даже при энергиях $E_p \sim 10$ ГэВ имеет место анизотропия углового распределения.

С другой стороны, степень анизотропии сильно зависит от энергии вылетающего фрагмента. Чем больше энергия фрагмента, тем больше анизотропия углового распределения.

Так при энергии фрагментов 8 МэВ/нуклон отношение F/V достигает ~ 10 при $E_p \sim 6,2$ ГэВ.

Временные характеристики взаимодействия быстрой частицы с ядром-мишенью

Для частицы.

Время пролета через ядро-мишень (для определённости ядро урана)
 $2R (^{238}\text{U}) = 13,6 \text{ фм},$

$$t = 2R (^{238}\text{U})/c \approx 4,5 \cdot 10^{-23} \text{сек}$$

Время пролета через поле нуклона, т.е. время взаимодействия с нуклоном ядра

$$t_{\text{N-взаим}} = 1,4 \text{ фм}/v \approx 5 \cdot 10^{-24} \text{с}.$$

Для ускорительных энергий от 660 МэВ до 10 ГэВ время $t_{\text{N-взаим}}$ остаётся практически постоянным, поскольку $v \approx c$.

Для ядра

Период колебаний нуклонов вокруг хаотических центров ядерной жидкости, или иначе время между столкновениями нуклонов в ядре, характеризующее временной масштаб изменения конфигурации ядерных полей в ядре.

$$t_k = \lambda_{\text{NN}} / v_N \sim 5 \cdot 10^{-24} \text{с}$$

Время распространения возмущения плотности в ядре

$$t_p = 2R (^{238}\text{U}) / u \approx 2 \cdot 10^{-22} \text{с}$$

где u – скорость звука в ядре, для урана $u = 6 \cdot 10^9 \text{ см/с}.$

Основные проблемы моделирования

При теоретическом моделировании процесса труднее всего понять и связать воедино следующие моменты:

1. Распадается холодная ядерная материя на холодные же осколки. Кинетическая энергия осколков – это кулоновская энергия расталкивания после распада.
2. Эмиссия нуклонов происходит одновременно с разлетом осколков, т.е. в результате этого распада.
3. Свойственная этому процессу анизотропия, говорит о том, что поверхности разрыва ядерной материи ориентированы по бóльшей части перпендикулярно направлению налетающей частицы.

Более тридцати лет назад появились работы, в которых рассматривались квантовые ударные волны в ядерном веществе. Квантовые ударные волны – это аналог хорошо известных бесстолкновительных волн в плазме.

Квантовая ударная волна отличается от ударной волны тем, что после её прохождения через вещество система возвращается в исходное состояние, в отличие от ударной волны, когда за фронтом состояние вещества сильно отличается от первоначального.

Квантовые ударные волны по существу описывают нелинейные явления в холодной ядерной материи.

На базе этой модели проводилось микроскопическое рассмотрение процессов, сопровождающих прохождение быстрой частицы через ядро-мишень.

Было показано, что в результате прохождения быстрой частицы в ядре происходит генерация коллективных возбуждений плотности. В случае, когда скорость частицы больше скорости нулевого звука, в ядерной материи образуется так называемый нуль-звуковой конус Маха. Максимум амплитуды нелинейной волны плотности расположен вдоль некоторой поверхности конуса, причем в ядерном веществе существуют как волны уплотнения, так и волны разрежения (солитоны уплотнения и разрежения).

Взаимодействие этих волн с поверхностью ядра или, иначе, выход этих волн на поверхность приводит к выбиванию нуклонов и вылету фрагментов.

Не очень понятно, **почему** в современных расчетах **учет фрагментации относят к испарительной стадии каскада**, в то время как **уже пятьдесят лет тому назад было убедительно показано, что фрагментация ядра не имеет никакого отношения к процессу испарения и вообще не зависит от энергии возбуждения, переданного частицей ядру.**

Отсутствие моделей, адекватно описывающих процессы взаимодействия релятивистских частиц с тяжелыми ядрами, - **является для нас серьезной прикладной проблемой.**

«... существо механизма деления ещё далеко не понято в рамках существующих теорий, хотя само явление используется уже больше 60 лет.

Чтобы практически использовать явление необязательно давать его объяснение или даже знать, что это пытаются сделать другие».

Л. Валантэн - известный французский физик-теоретик

Авторы выражают благодарность всем, кто способствовал получению экспериментальных результатов, а также принял участие в анализе полученных результатов и в обсуждениях основных положений настоящей работы.

Спасибо за внимание!