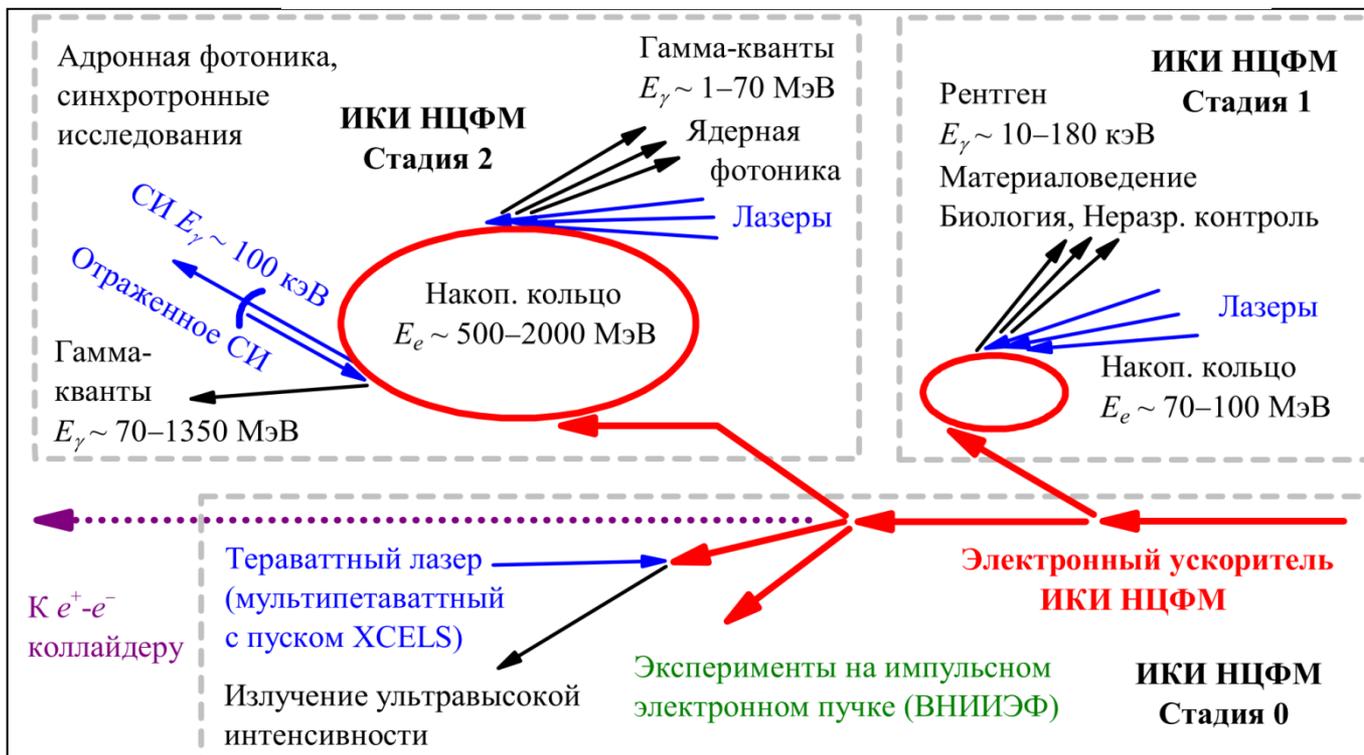


ИКИ НЦФМ. Параметры и перспективы исследований в области ядерной физики

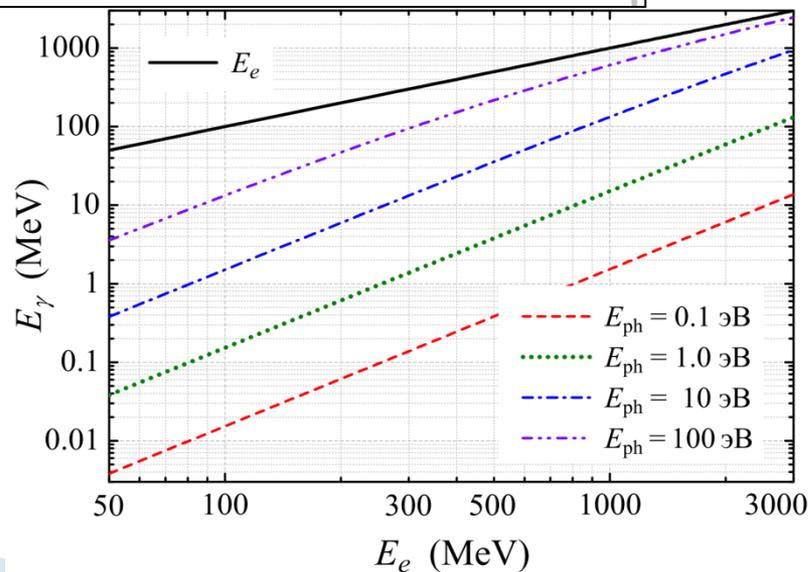
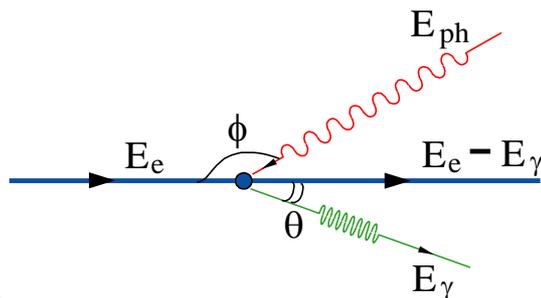
А.А. Кузнецов

27 июня 2024 г





$$E_\gamma = \frac{2\gamma^2 E_{ph}}{1 + \gamma^2 \theta^2} (1 - \cos \phi), \quad \gamma \gg 1, \quad \theta \ll 1$$



Программа исследований в области ядерной физики на пучке квазимоноэнергетических фотонов, образующихся в процессах обратного комптоновского рассеяния (ОКР) излучения мощного лазера на пучке релятивистских электронов, должна быть ориентирована на использовании преимуществ пучка фотонов нового типа по сравнению с пучками, использованными ранее (КМА, тормозных, других ИКИ) применительно к главной задаче исследований – получению точной, надежной и достоверной информации о сечениях как полных, так и парциальных фотоядерных реакций, разнообразных характеристиках образующихся в таких реакциях частиц и легких ядер.

	E_γ , MeV	ΔE_γ	I_γ , ph/sec
ELI-NP (VEGA) (Румыния, проект)	0.2-19.5	0.5%	$\sim 10^8$
NewSubaru (Япония, SPRING8, работает)	0-76	1.2-10%	$\sim 10^5$
HI γ S (США, работает)	0-100	0.8-10	$\sim 10^7$
SLEGS (Китай, работает)	0.25 – 19.5	5%	$\sim 10^{5-8}$
ИКИ НЦФМ (Россия, проект)	0-300?	0.2-0.5%	$\sim 10^7$

Основные требования и преимущества ИКИ:

1. Интенсивность, достаточная для проведения активационных экспериментов - порядка $10^7 - 10^8$ фотонов в секунду;
2. Высокая монохроматичность (среднеквадратичный относительный разброс по энергии не хуже 0.1-0.3% и малая расходимость);
3. Быстрая и плавная перестройка энергии с шагом не более 100 КэВ в диапазоне от 10 до 40 МэВ
4. Короткая длительность импульса - пикосекунды - для проведения экспериментов по времяпролетной методике на достаточно короткой базе;

Необходима разработка методов прецизионного мониторинга энергии и интенсивности пучка гамма-квантов в процессе проведения эксперимента.



Схема комплекса ИКИ

Кооперация:

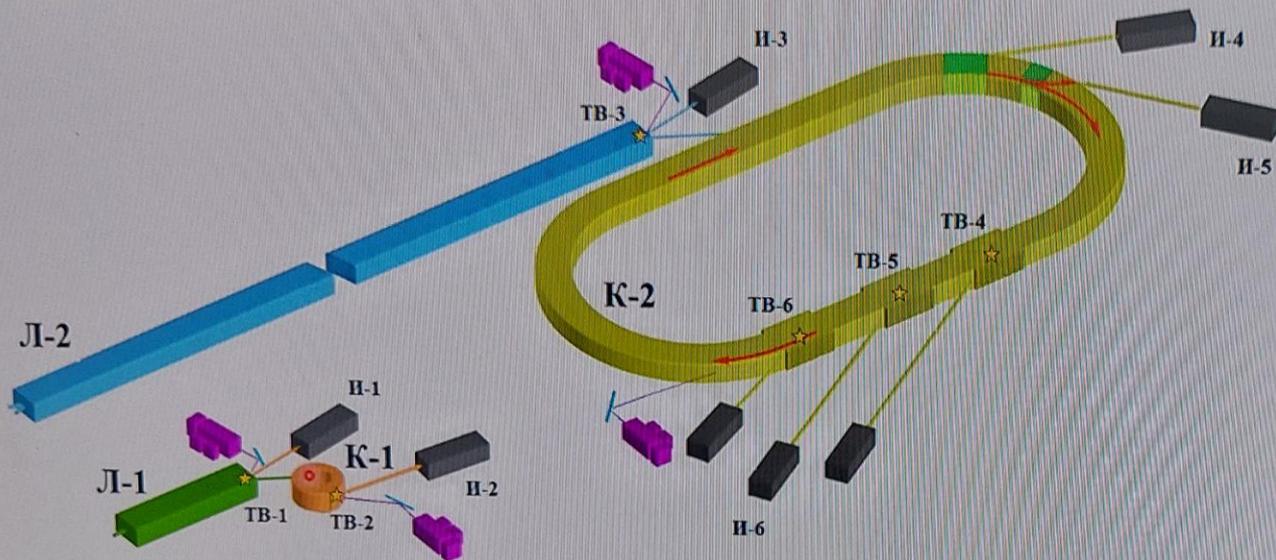
- ИЯФ СО РАН, МГУ имени М.В. Ломоносова, ИПФ РАН, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», НИЯУ «МИФИ», БФУ имени Канта, ММО ОИЯИ, АНО «НЦФМ», ИЯИ РАН, ПИЯФ НИЦ «Курчатовский институт», ФИАН, ИОФ РАН, Сколтех...



Исследовательские станции ИКИ



РФЯЦ - ВНИИЭФ
РОСАТОМ



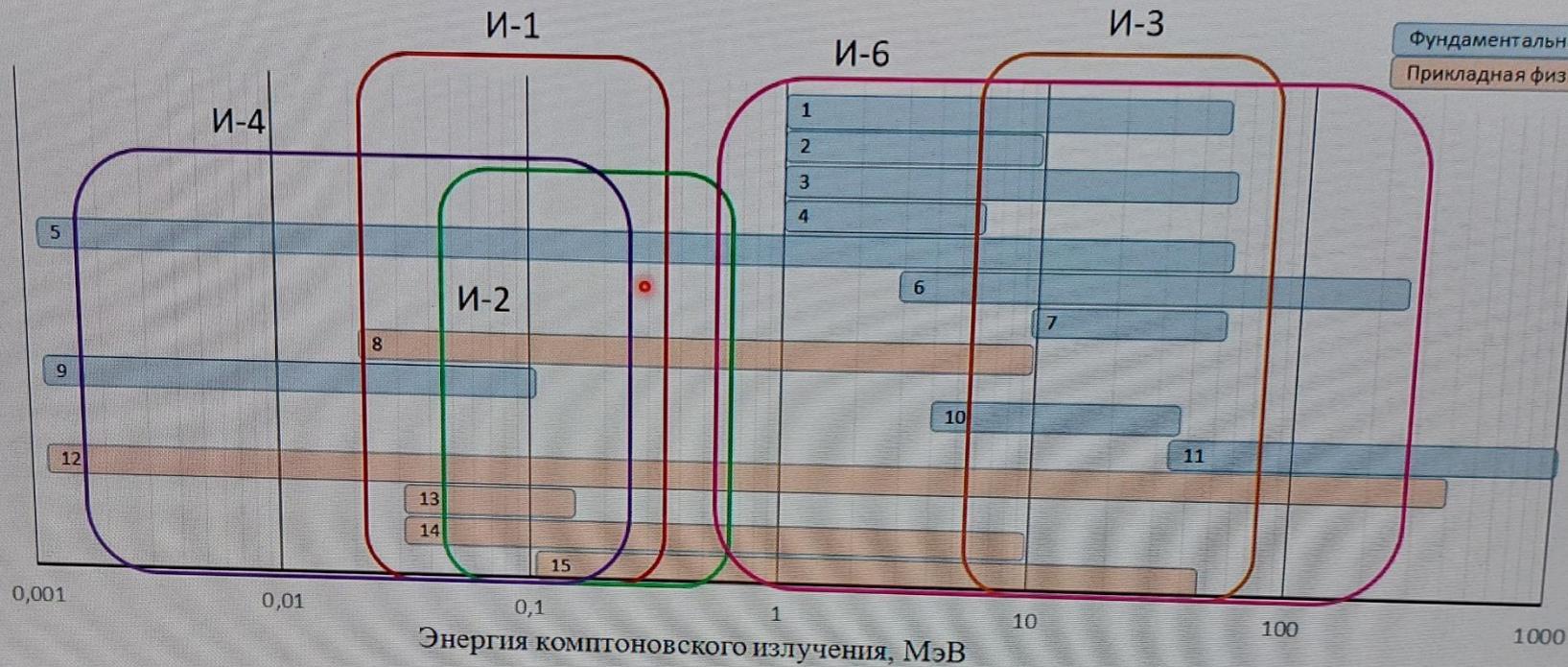
Л-1 линейный ускоритель на 120 МэВ, Л-2 линейный ускоритель на 2 ГэВ;
 К-1 накопительное кольцо на 120 МэВ, К-2 накопительное кольцо на 2 ГэВ;
 ТВ-1...ТВ-6 точки взаимодействия лазерного излучения с электронным пучком;
 И-1, И-2, И-3, И-4, И-5, И-6 исследовательские станции.

Станция	И-1	И-2	И-3	И-4	И-5	И-6
Диапазон энергии квантов, МэВ (точка взаимодействия с лазерного излучения с электронами)	0,02-0,27 (ТВ-1)	0,04-0,54 (ТВ-2)	5-70 (ТВ-3)	СИ	Вывод e^- пучка	5-70 (ТВ-4) 0,5-7 (ТВ-5) 15-220 (ТВ-6)



Фундаментальная физика

Прикладная физика



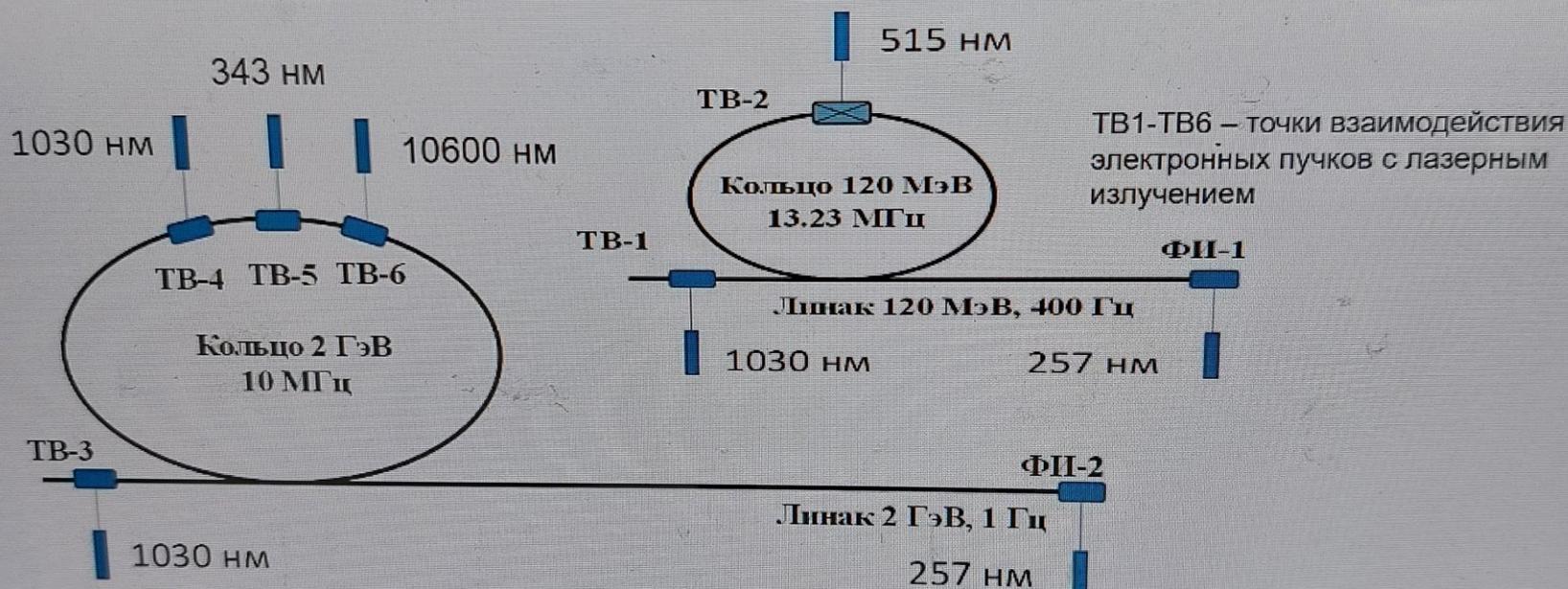
- 1. 1-40 МэВ Изучение резонансных мод возбуждения ядер (ГДР, ПДР, ГМР)
- 2. 1-10 МэВ Фотоядерные реакции, изучение дипольных переходов, экзотические моды возбуждения ядер, наработка медицинских изотопов
- 3. 1-50 МэВ Фотodelение ядер
- 4. 1-5 МэВ Роль ядерных реакций в звездном нуклеосинтезе, ядерный двойной гамма-распад, изучение медленных поляризованных нейтронов
- 5. 0-60 МэВ Дипольная поляризуемость ядра
- 6. 20-150 МэВ Фоторасщепление легчайших ядер

- 7. 10-15 МэВ Кластерное состояние ядер
- 8. 0,02-10 МэВ Ядерные изомеры
- 9. 0,00001-0,1 МэВ Ускорение и ионизация нейтральных атомов
- 10. 3-30 МэВ Нарботка и исследования радиоактивных ядер
- 11. 30-1300 МэВ Адронная физика
- 12. 0-300 МэВ Нелинейный комптон
- 13. 0,02-0,12 МэВ Исследование характеристик материалов при экстремальных воздействиях
- 14. 0,02-10 МэВ Материаловедение статических и квазистатических процессов
- 15. 0,1-15 МэВ Неразрушающий контроль (ядерная флуоресценция, томография, птихография)

Точки взаимодействия комплекса ИКИ



РФЯЦ - ВНИИЭФ
РОСАТОМ

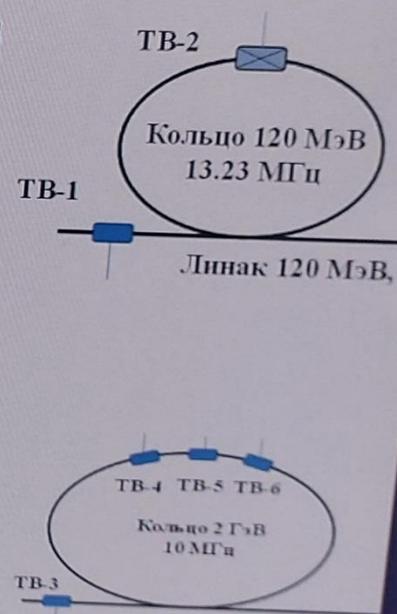
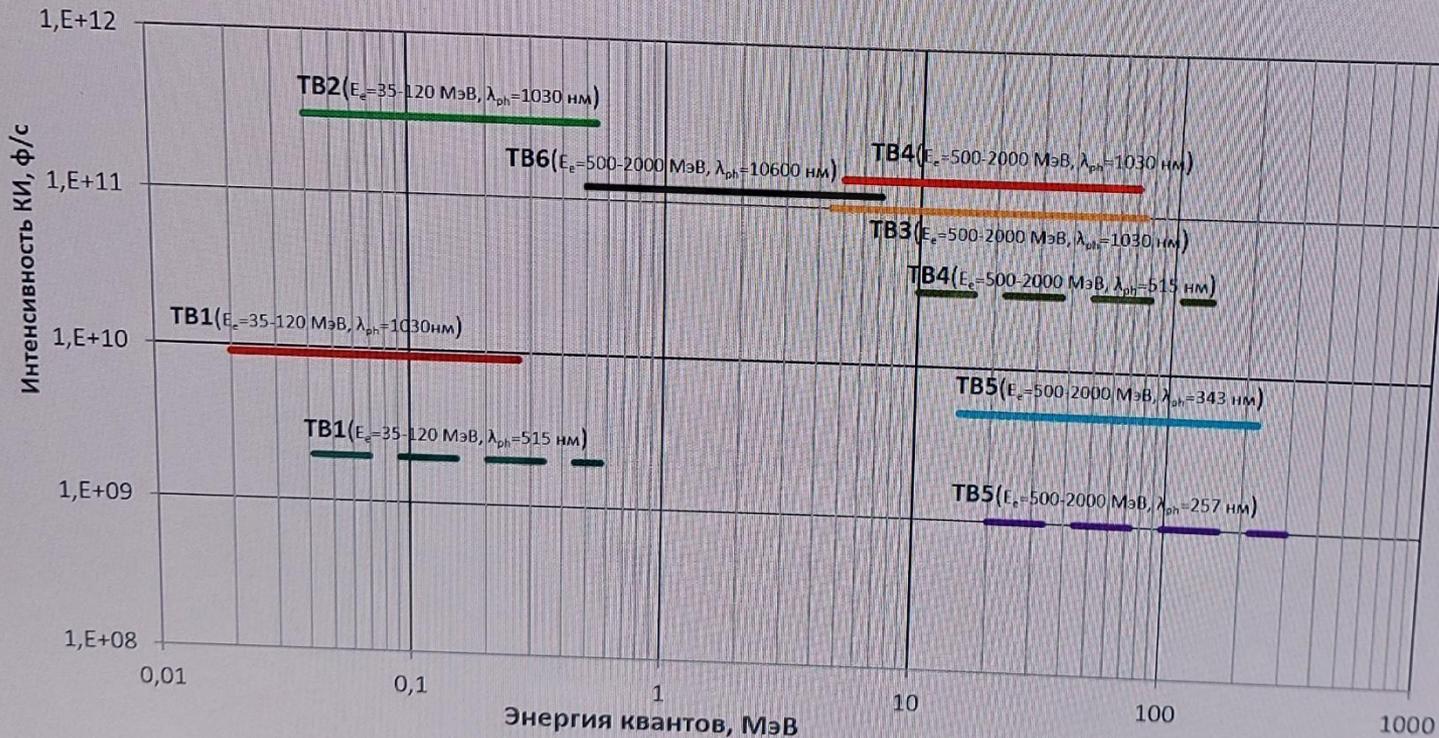


Характеристика	Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4	Точка 5	Точка 6
Диапазон энергии электронов, МэВ	35 – 120	35 – 120	500-2000	500-2000	500-2000	500-2000
Максимальная частота сгустков, Гц	400	$1,3 \cdot 10^7$	1	10^7	10^7	10^7
Длина волны лазерного излучения, нм	1030	515	1030	1030	343	10^4
Энергия импульса лазера, мДж	100	1	$2 \cdot 10^4$	0,1	0,02	-
Длительность импульса, пс	10	30	10	300	300	300
Диапазон энергии КИ, МэВ	0,02-0,27	0,04-0,54	5-70	5-70	15-220	0,5-7

Спектр излучения комплекса ИКИ



РФЯЦ - ВНИИЭФ
РОСАТОМ



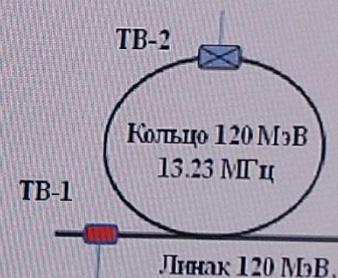
Точка взаимодействия 1



РФЯЦ - ВНИИЭФ
РОСАТОМ

Расположение – выход линейного ускорителя электронов 120 МэВ

Характеристика	Режим работы	
	основной	дополнительный
Электронный пучок		
Диапазон энергии, МэВ	35 – 120	
Разброс по энергии, %	0,25	
Нормализованный эмиттанс, мм* мрад	1	
Максимальный заряд сгустка, пКл	200	
Длительность сгустка, пс	10	
Максимальная частота сгустков, Гц	400	
Лазерное излучение		
Длина волны излучения, нм	1030	515
Энергия импульса, мДж	100	40
Длительность импульса, пс	10	
Диаметр лазерного пятна, мкм	25	
Характеристики генерируемого излучения		
Диапазон энергии квантов, МэВ	0,02-0,27	0,04-0,54
Полный поток квантов, фотон/с	$9 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^9$
Разброс энергии, %	0,5-1	



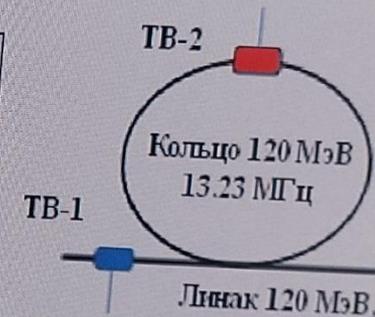
Точка взаимодействия 2

Расположение – кольцо накопителя электронов 120 МэВ



РФЯЦ - ВНИИЭФ
РОСАТОМ

Характеристика	Значение
Электронный пучок	
Диапазон энергии, МэВ	35 – 120
Разброс по энергии, %	0,25
Нормализованный эмиттанс, мм* мрад	2
Максимальный заряд сгустка, пКл	100
Длительность сгустка, пс	30
Максимальная частота сгустков, МГц	13
Лазерное излучение	
Длина волны излучения, нм	515
Энергия импульса, мДж	1
Длительность импульса, пс	30
Диаметр лазерного пятна, мкм	40
Характеристики генерируемого излучения	
Диапазон энергии квантов, МэВ	0,04-0,54
Полный поток квантов, фотон/с	$3 \cdot 10^{11}$
Разброс энергии, %	0,5-1

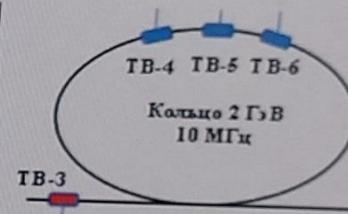


Точка взаимодействия 3

Расположение – выход линейного ускорителя электронов 2 ГэВ



РФЯЦ - ВНИИЭФ
РОСАТОМ



Характеристика	Значение
Электронный пучок	
Диапазон энергии, ГэВ	0,5-2
Разброс по энергии, %	0,6
Нормализованный эмиттанс, мм* мрад	2
Максимальный заряд сгустка, нКл	1
Длительность сгустка, пс	10
Максимальная частота сгустков, Гц	1
Лазерное излучение	
Длина волны излучения, нм	1030
Энергия импульса, Дж	20
Длительность импульса, пс	10
Диаметр лазерного пятна, мкм	20
Характеристики генерируемого излучения	
Диапазон энергии квантов, МэВ	5 - 70
Полный поток квантов, фотон/с	$1 \cdot 10^{11}$



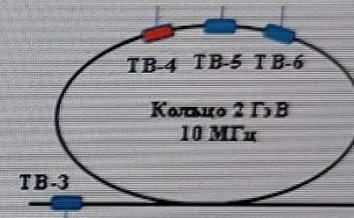
Точка взаимодействия 4



РФЯЦ - ВНИИЭФ
РОСАТОМ

Расположение – кольцо накопителя электронов 2 ГэВ

Характеристика	Режим работы	
	основной	дополнительный
Электронный пучок		
Диапазон энергии, ГэВ	0,5 - 2	
Разброс по энергии, %	0,1	
Нормализованный эмиттанс, мм* мрад	5	
Максимальный заряд сгустка, нКл	10	
Длительность сгустка, пс	300	
Частота сгустков, МГц	10	
Лазерное излучение		
Длина волны излучения, нм	1030	515
Энергия импульса, мкДж	100	40
Длительность импульса, пс	300	
Диаметр лазерного пятна, мкм	200	
Характеристики генерируемого излучения		
Диапазон энергии квантов, МэВ	5-70	10-140
Полный поток квантов, фотон/с	$1 \cdot 10^{11}$	$3 \cdot 10^{10}$
Разброс энергии, %	0,2-0,5	



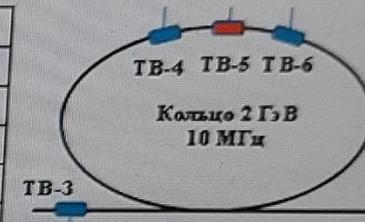
Точка взаимодействия 5



РФЯЦ - ВНИИЭФ
РОСАТОМ

Расположение – кольцо накопителя электронов 2 ГэВ

Характеристика	Режим работы	
	основной	дополнительный
Электронный пучок		
Диапазон энергии, ГэВ	0,5 - 2	
Разброс по энергии, %	0,1	
Нормализованный эмиттанс, мм* мрад	5	
Максимальный заряд сгустка, нКл	10	
Длительность сгустка, пс	300	
Частота сгустков, МГц	10	
Лазерное излучение		
Длина волны излучения, нм	343	257
Энергия импульса, мкДж	20	5
Длительность импульса, пс	300	
Диаметр лазерного пятна, мкм	200	
Характеристики генерируемого излучения		
Диапазон энергии квантов, МэВ	15-220	20-300
Полный поток квантов, фотон/с	$5 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^9$
Разброс энергии, %	0,2-0,5	



Точка взаимодействия 6



РФЯЦ - ВНИИЭФ
РОСАТОМ

Расположение – кольцо накопителя электронов 2 ГэВ

Характеристика	Значение
Электронный пучок	
Диапазон энергии, ГэВ	0,5 - 2
Разброс по энергии, %	0,1
Нормализованный эмиттанс, мм* мрад	5
Максимальный заряд сгустка, нКл	10
Длительность сгустка, пс	300
Максимальная частота сгустков, МГц	10
Лазерное излучение	
Длина волны излучения, мкм	10
Средняя мощность излучения, кВт	1
Диаметр лазерного пятна, мкм	200
Характеристики генерируемого излучения	
Диапазон энергии квантов, МэВ	0,5-7
Полный поток квантов, фотон/с	$1 \cdot 10^{11}$
Разброс энергии, %	0,2-0,5



Требующие уточнения вопросы

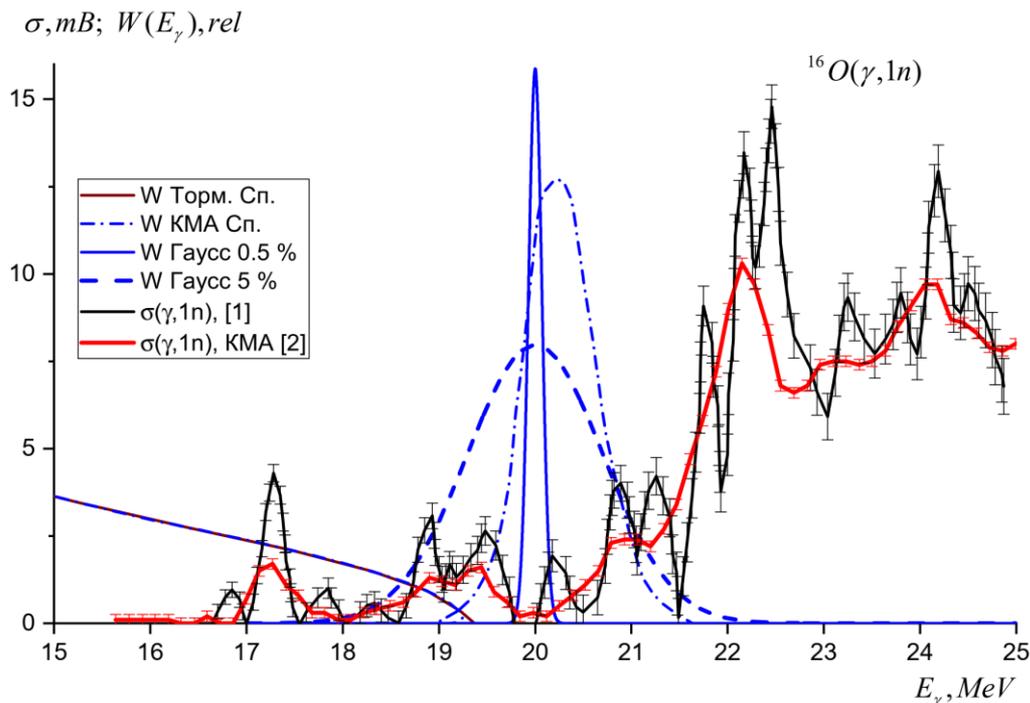


РФЯЦ - ВНИИЭФ
РОСАТОМ

- нижняя граница диапазона энергии электронов на малом накопительном кольце (реализуемы ли энергии электронов ниже 80 МэВ и какие при этом будут характеристики электронного пучка)
- характеристики лазерного резонатора (можно ли достичь более высоких значений средней мощности излучения в резонаторе)
- возможность уменьшения длительности импульсов гамма-излучения на большом накопительном кольце (для ряда методик необходимо снижение длительности импульсов гамма-излучения до десятков пкс)
- характеристики CO_2 лазера (для достижения заявленных потоков излучения необходимо либо значительное повышение мощности в непрерывном режиме, либо реализация импульсно-периодического режима)

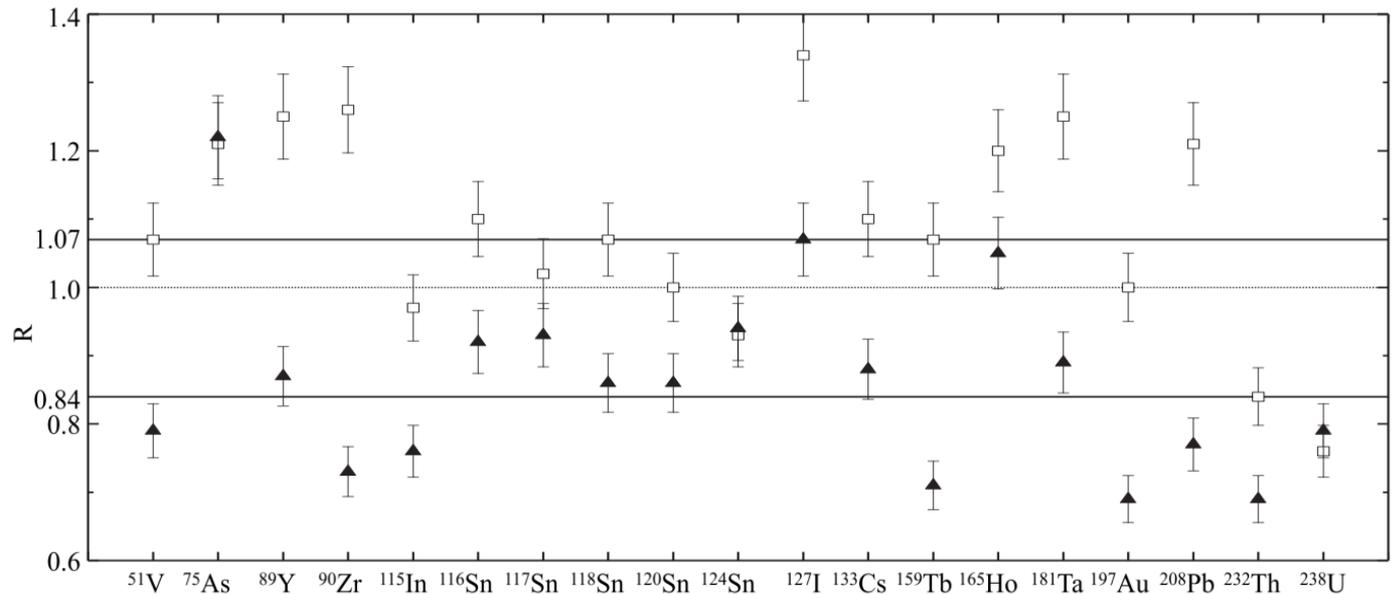
Программа возможных исследований на пучке гамма-квантов комптоновского источника, сооружение которого планируется в НЦФМ, полностью определяется характеристиками этого пучка. Создание источника гамма-квантов, параметры которого повторяют параметры действующих источников, не позволят сделать прорыв в исследовании фотоядерных реакций.

В качестве источников гамма-квантов использовались : (1) резонансные (n, γ) и (p, γ) реакции – монохроматические линии с фиксированной энергией; (2) тормозное излучение с непрерывным спектром, генерируемое пучками электронных ускорителей; (3) излучение, генерируемое при аннигиляции позитронов на лету – квазимонохроматический спектр с достаточно широким ($\sim 10\%$) аннигиляционным пиком и подложкой тормозного излучения; (4) квазимонохроматические источники на основе обратного комптоновского рассеяния лазерного излучения на электронном пучке накопителя с шириной спектра от единиц до десятков процентов.



Данные по фотоядерным реакциям, прежде всего, $(\gamma, 1n)$, $(\gamma, 2n)$, $(\gamma, 1p)$, востребованы и широко используются в разнообразных приложениях. Энергетические зависимости полных и парциальных сечений фотоядерных реакций, измеренные с высокой точностью (лучше 1\% по абсолютной величине) и высоким энергетическим разрешением (десятки кэВ) в диапазоне энергий от порогов до (30-40) МэВ, крайне важны для решения проблемы существенных расхождений между результатами разных экспериментов, дальнейшего развития моделей атомного ядра и описания механизма фотоядерных реакций, для построения и уточнения моделирования во многих задачах фундаментальных исследований: от астрофизики до проектирования экспериментальных установок, а также для прикладных целей, например, для разработки методик гамма-активационного анализа, наработки медицинских изотопов, детектирования взрывчатых веществ, радиоактивных и делящихся материалов.

$$R = \frac{\sigma_{\text{инт}}^{\text{Сакле}}}{\sigma_{\text{инт}}^{\text{Ливермор}}}$$



Полная систематика отношений R интегральных сечений парциальных реакций и полученных в Ливерморе и Сакле: квадраты — данные для реакции $(\gamma, 1n)$, треугольники — $(\gamma, 2n)$



Помимо плохого энергетического разрешения на квазимонохроматических пучках в предыдущих работах, существенное влияние оказывали используемые методы регистрации нейтронов в фотоядерных реакциях. В частности, в экспериментах на аннигиляционных гамма-квантах существуют систематические проблемы как с разделением нейтронов по множественности от многочастичных реакций, так и с энергозависимой эффективностью нейтронных детекторов, что накладывает свои ограничения при неизвестных нейтронных спектрах.

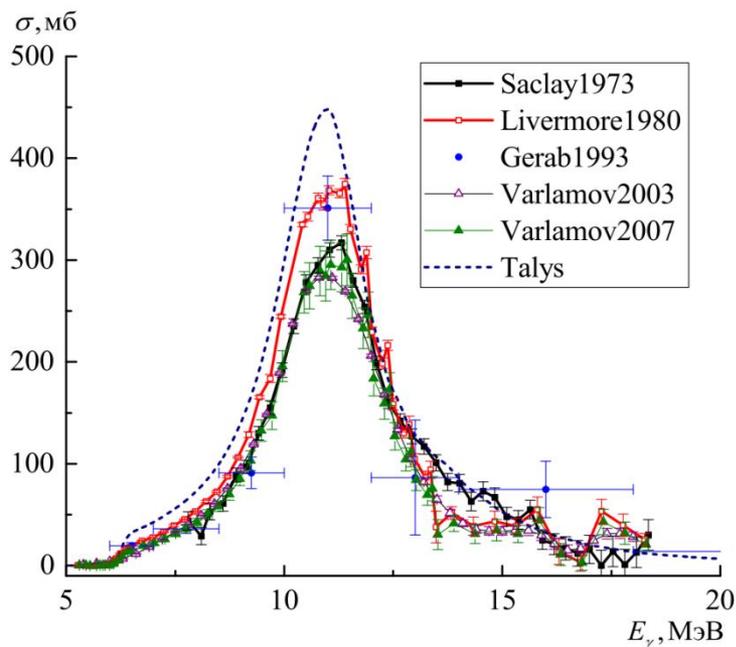


Рис. 2. Сечения реакции $^{238}\text{U}(\gamma, n)^{237}\text{U}$

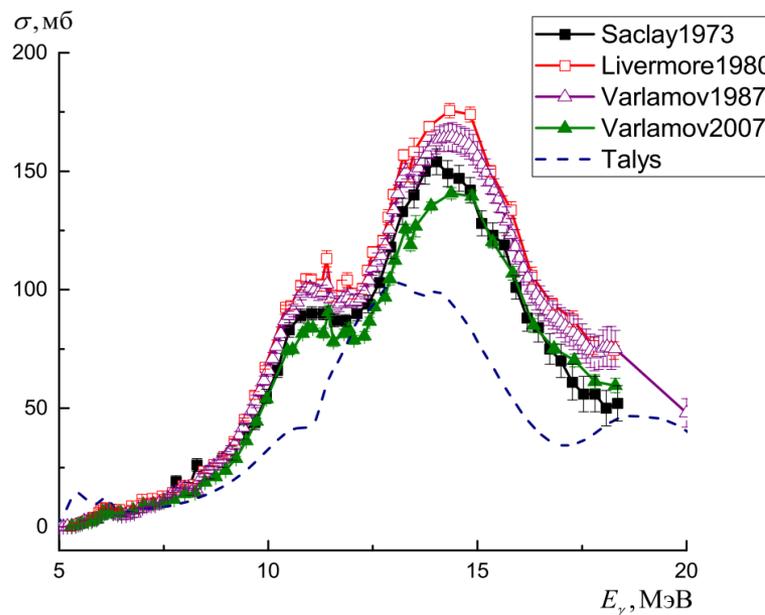


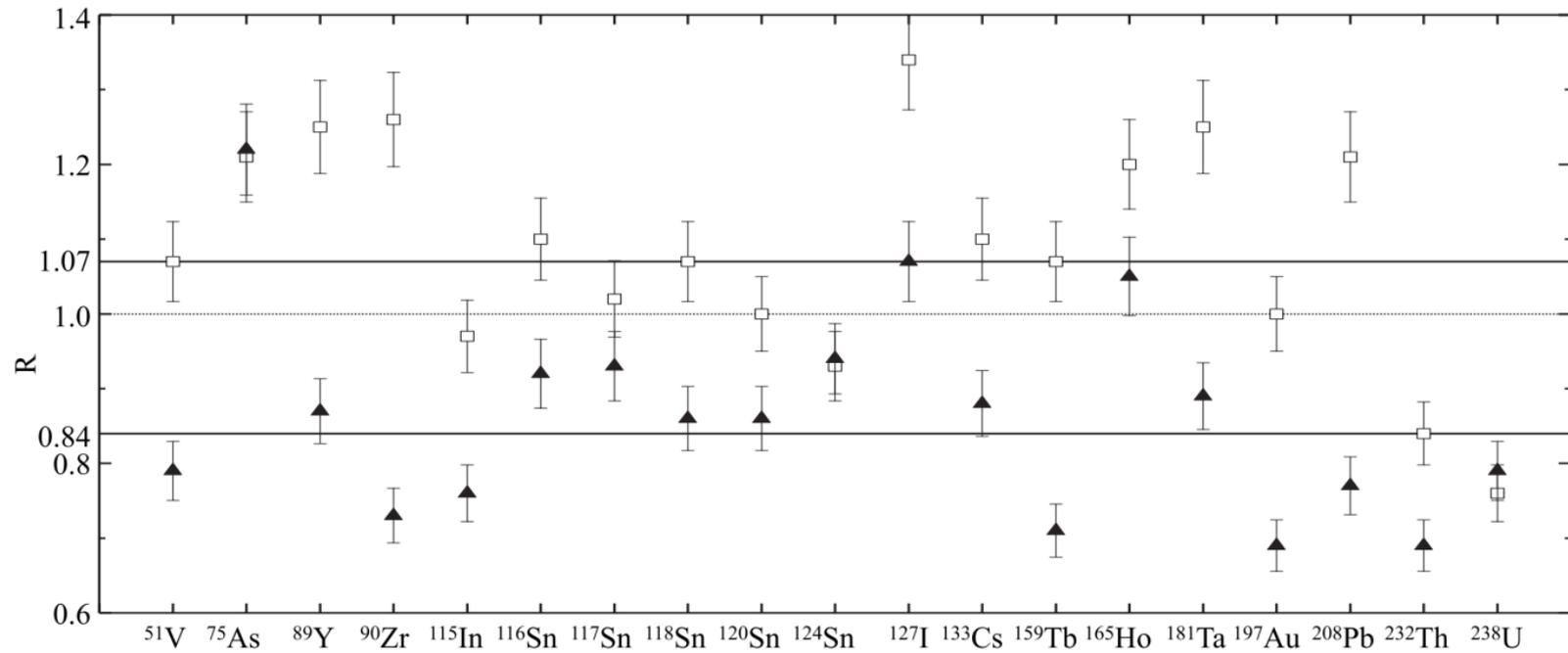
Рис. 4. Сечения реакции фотodelения $^{238}\text{U}(\gamma, F)$

Первоочередными задачами в области ядерной физики для ИКИ НЦФМ являются:

1. Получение новых непротиворечивых прецизионных данных о сечениях фотоядерных реакций и фотоделения в широкой области масс атомных ядер. Эти данные необходимы как для улучшения модельных и теоретических подходов к описанию фотоядерных реакций, так и для решения широкого круга прикладных задач, таких как: разработка систем трансмутации ядерных отходов, создания пучков радиоактивных ядер, получения экзотических ядер (высокоспиновых изомеров, сильнонейтроноизбыточных ядер, сильнодеформированных ядер), задач наработки перспективных медицинских радионуклидов;
2. Изучение фотоядерных реакций в области порога, необходимые, прежде всего, для ответа на вопрос о механизмах образования обойденных ядер в фотоядерных реакциях в процессе звездного нуклеосинтеза;
3. Исследование структурных особенностей и возбужденных состояний атомных ядер, поиск и исследование ядерных изомеров, в частности низколежащих изомерных состояний атомных ядер методом ядерной резонансной флуоресценции;
4. Изучение структурных особенностей дипольных состояний, таких как гросс-, промежуточная и тонкая структура, включая тонкую структуру пигми–дипольного резонанса, и альфа-кластерные состояния. Изучение особенностей гигантского дипольного резонанса, таких как изоспиновое, деформационное и конфигурационное расщепление



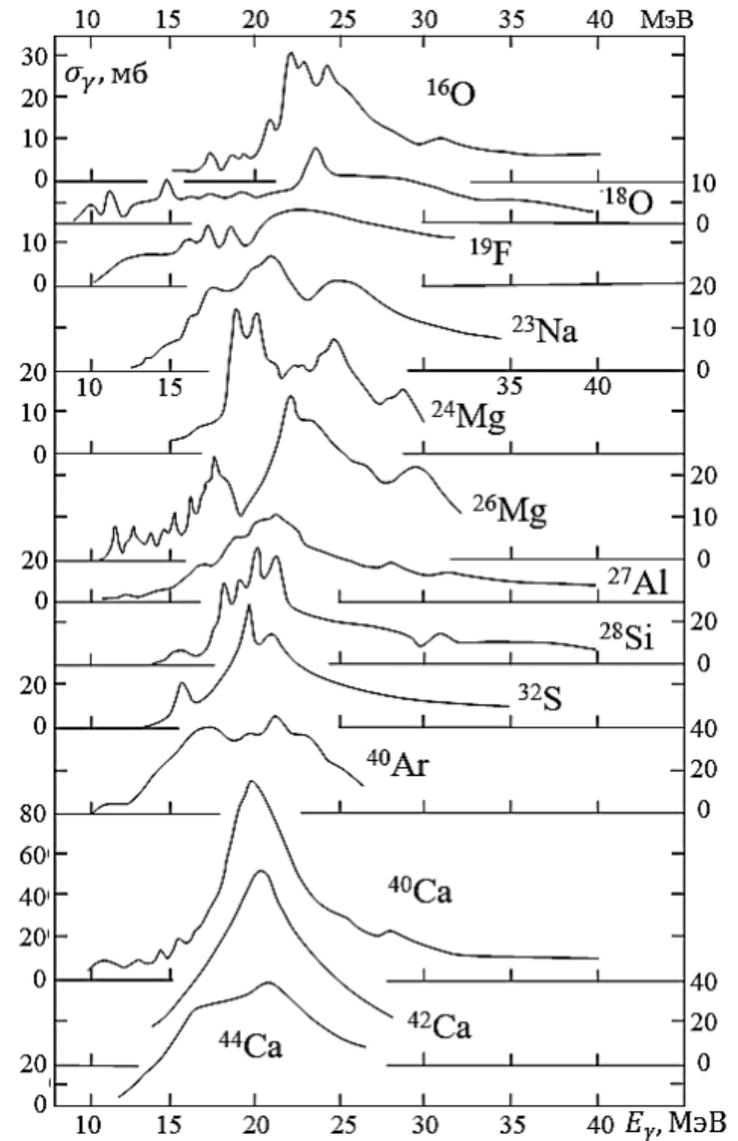
1. Получение новых непротиворечивых прецизионных данных о сечениях фотоядерных реакций и фотоделения в широкой области масс атомных ядер.



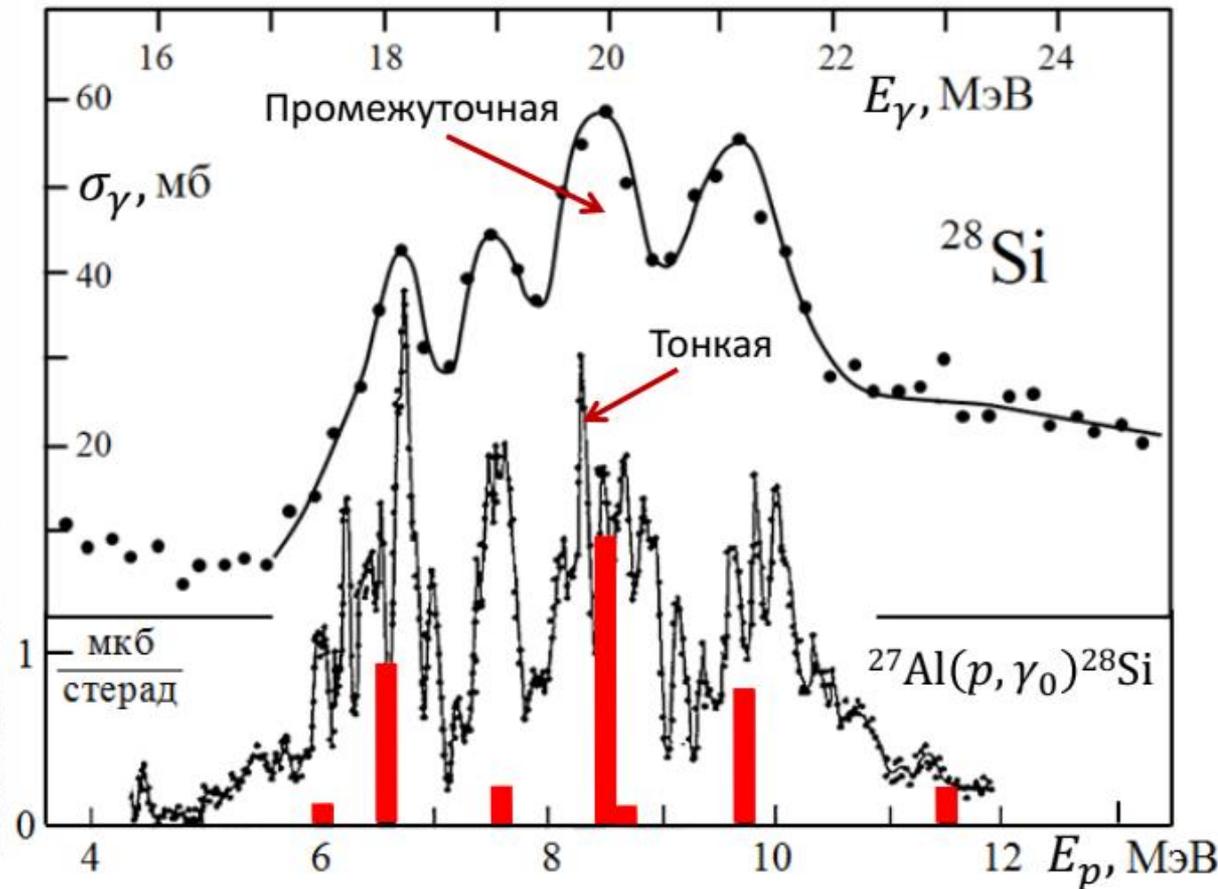
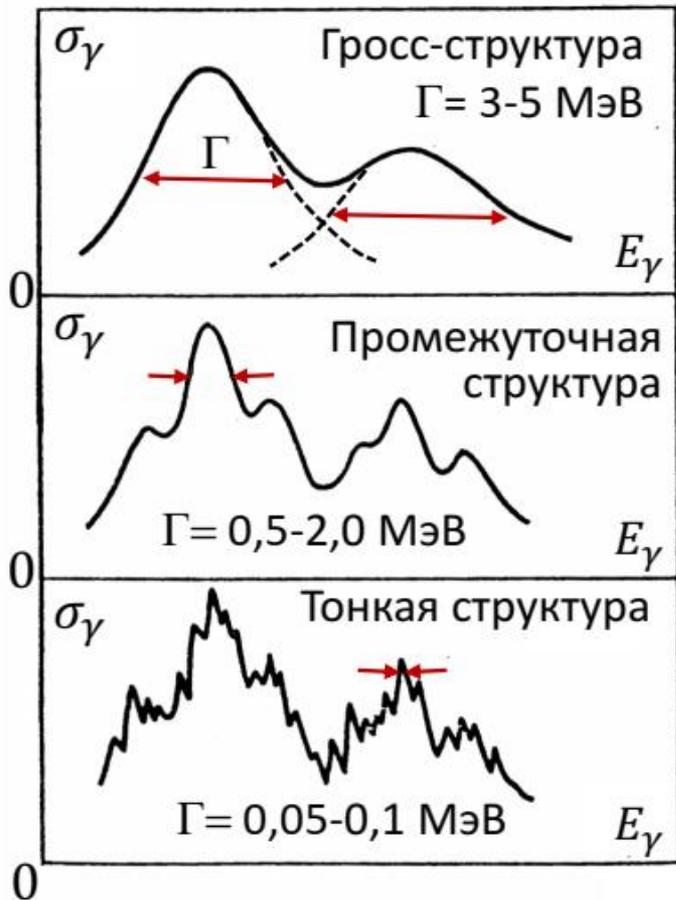
$$R = \frac{\sigma_{\text{инт}}^{\text{Сакле}}}{\sigma_{\text{инт}}^{\text{Ливермор}}}$$

Проблема структуры и ширины ГДР

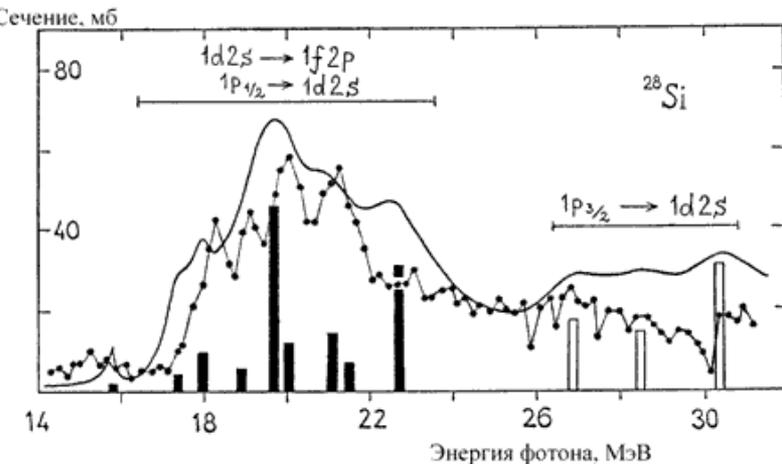
Показаны экспериментальные сечения фотопоглощения ядер $1d2s$ -оболочки (от ^{16}O до ^{44}Ca). Видно что ширина ГДР (область разброса по энергии основной доли сечения) меняется от 5 до 20 МэВ и нет никакой определённой тенденции в изменении этой величины с ростом A . Более того, изменение числа нуклонов в ядре на 1-2 может привести к кардинальному (в разы) изменению ширины сечения. Долгое время не удавалось понять, с чем связан такой большой разброс в ширине для ядер, имеющих близкие A и чем в этом плане отличаются легкие средние и тяжёлые ядра. Эта проблема тесно связана и с той структурой, которая наблюдается в фотоядерных сечениях.



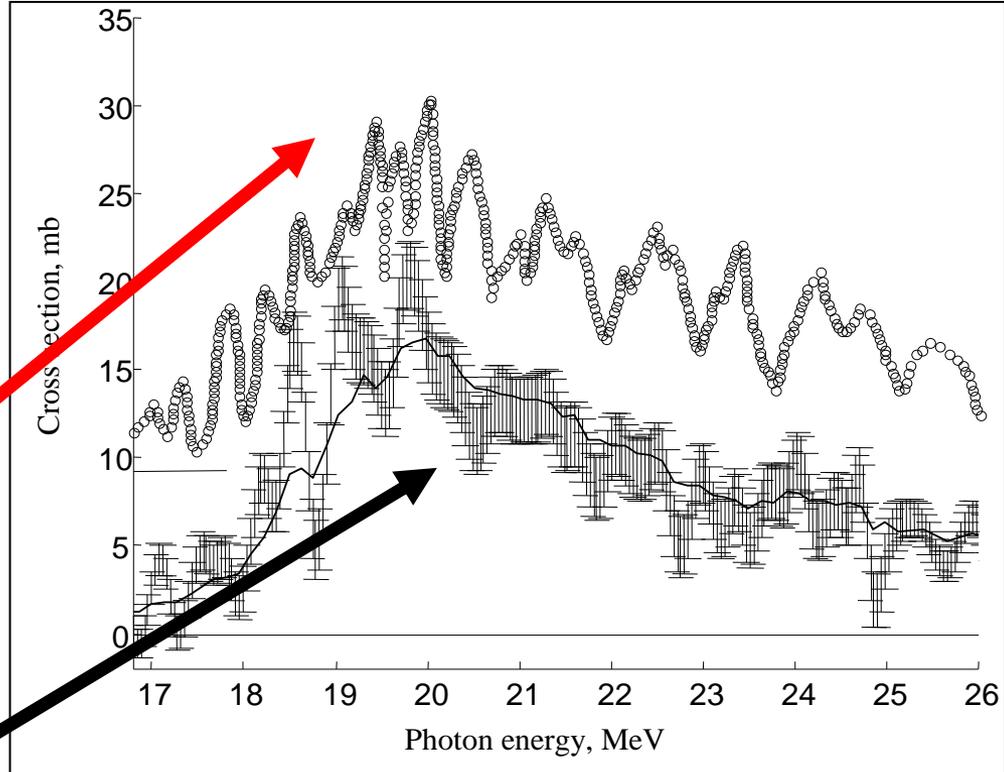
Классификация структуры сечений фотопоглощения



Проблема существования (гросс-, промежуточной и тонкой) структуры ГДР является актуальной с начала исследований фотоядерных реакций до настоящего времени. Очень хорошо выраженная структура ГДР в сечениях, полученных в экспериментах с тормозным гамма-излучением, практически отсутствует в сечениях, полученных в экспериментах с квазимоноэнергетическими фотонами. Эти расхождения прямо обусловлены принципиально разными способами получения информации о сечениях реакций.



Результат эксперимента на пучке
тормозного γ -излучения



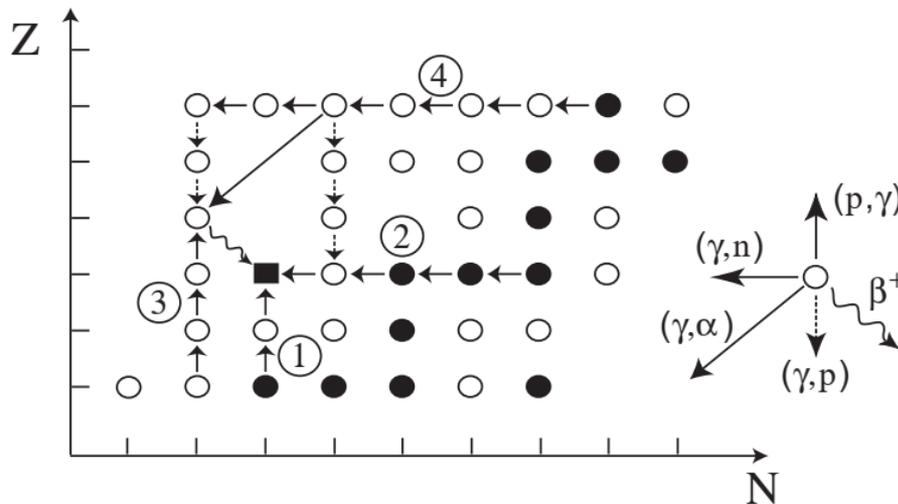
Восстановление сечения
реакции
из результата КМА-
эксперимента



Обойденные ядра.

Pd93 1.3 с EP: (7/2+,9/2+)	Pd94 9.0 с	Pd95 10 с	Pd96 122 с	Pd97 3.10 м	Pd98 17.7 м	Pd99 21.4 м	Pd100 3.63 дн	Pd101 8.47 ч	Pd102 1.02	Pd103 16.99 дн	Pd104 11.14	Pd105 22.33	Pd106 27.33	Pd107 6.86 л	Pd108 26.46	Pd109 13.7012 ч	Pd110 11.72
m		m												m		m	
Rh92 4.66 с (≥ 6+)	Rh93 11.9 с	Rh94 70.6 с EP (4+)	Rh95 5.02 м	Rh96 9.90 м	Rh97 30.7 м	Rh98 8.72 м	Rh99 16.1 дн	Rh100 20.8 ч	Rh101 3.3 л	Rh102 207 дн (1-,2-)	Rh103 100	Rh104 42.3 с	Rh105 35.36 ч	Rh106 30.07 с	Rh107 21.7 м	Rh108 16.8 с	Rh109 80 с
m		m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
Ru91 7.9 с	Ru92 3.65 м	Ru93 59.7 с	Ru94 51.8 м	Ru95 1.643 ч	Ru96 5.54	Ru97 2.9 дн	Ru98 1.87	Ru99 12.76	Ru100 12.60	Ru101 17.06	Ru102 31.55	Ru103 39.26 дн	Ru104 18.62	Ru105 4.44 ч	Ru106 371.8 дн	Ru107 3.75 м	Ru108 4.55 м
m		m	m														
Tc90 8.7 с	Tc91 3.14 м	Tc92 4.25 м	Tc93 2.75 ч	Tc94 293 м	Tc95 20.0 ч	Tc96 4.28 дн	Tc97 4.21Е6 л	Tc98 4.2Е6 л	Tc99 2.11Е6 л	Tc100 15.46 с	Tc101 14.22 м	Tc102 5.28 с	Tc103 54.2 с	Tc104 18.3 м	Tc105 7.6 м	Tc106 35.6 с	Tc107 21.2 с
m	m																
Mo89 2.11 м	Mo90 5.56 ч	Mo91 15.49 м	Mo92 14.84	Mo93 4.0Е3 л	Mo94 9.25	Mo95 15.92	Mo96 16.68	Mo97 9.55	Mo98 24.13	Mo99 85.94 ч	Mo100 9.63 7.3Е18 л ββ	Mo101 14.81 м	Mo102 11.3 м	Mo103 87.5 с	Mo104 60 с	Mo105 35.6 с	Mo106 8.73 с
m																	
Nb88 14.55 м	Nb89 2.03 ч	Nb90 14.60 ч	Nb91 6.8Е2 л	Nb92 3.47Е7 л	Nb93 100	Nb94 2.03Е4 л	Nb95 34.991 дн	Nb96 23.35 ч	Nb97 72.1 м	Nb98 2.86 с	Nb99 15.0 с	Nb100 1.5 с	Nb101 7.1 с	Nb102 1.3 с	Nb103 1.5 с	Nb104 4.9 с βn	Nb105 2.95 с βn
m																	
Zr87 1.68 ч	Zr88 83.4 дн	Zr89 78.41 ч	Zr90 51.45	Zr91 11.22	Zr92 17.15	Zr93 1.53Е6 л	Zr94 17.38	Zr95 64.032 дн	Zr96 2.80 2.0Е19 л ββ	Zr97 18.744 ч	Zr98 30.7 с	Zr99 2.1 с	Zr100 7.1 с	Zr101 2.3 с	Zr102 2.9 с	Zr103 1.3 с	Zr104 1.2 с
m																	

⁷⁴ Se	0.55
⁷⁸ Kr	0.153
⁸⁴ Sr	0.132
⁹² Mo	0.378
⁹⁴ Mo	0.236
⁹⁶ Ru	0.103
⁹⁸ Ru	0.035
¹⁰² Pd	0.0142
¹⁰⁶ Cd	0.0201
¹⁰⁸ Cd	0.0143
¹¹³ In	0.0079
¹¹² Sn	0.0372
¹¹⁴ Sn	0.0252
¹¹⁵ Sn	0.0129
¹²⁰ Te	0.0043
¹²⁴ Xe	0.00571
¹²⁶ Xe	0.00509
¹³⁰ Ba	0.00476
¹³² Ba	0.00453
¹³⁸ La	0.000409
¹³⁶ Ce	0.00216
¹³⁸ Ce	0.00284
¹⁴⁴ Sm	0.008
¹⁵² Gd	0.00066
¹⁵⁶ Dy	0.000221
¹⁵⁸ Dy	0.000378
¹⁶² Er	0.000351
¹⁶⁴ Er	0.00404
¹⁶⁸ Yb	0.000322
¹⁷⁴ Hf	0.000249
¹⁸⁰ Ta	2.48e-06
¹⁸⁰ W	0.000173
¹⁸⁴ Os	0.000122
¹⁹⁰ Pt	0.00017
¹⁹⁶ Hg	0.00048



Обойденные ядра.

$$\lambda_{(\gamma,j)}(T) = \int_0^{\infty} cn_{\gamma}(E, T)\sigma_{(\gamma,j)}(E) dE , \quad (1)$$

where c is the speed of light, and $\sigma_{(\gamma,i)}(E)$ the photodisintegration cross section at energy E .

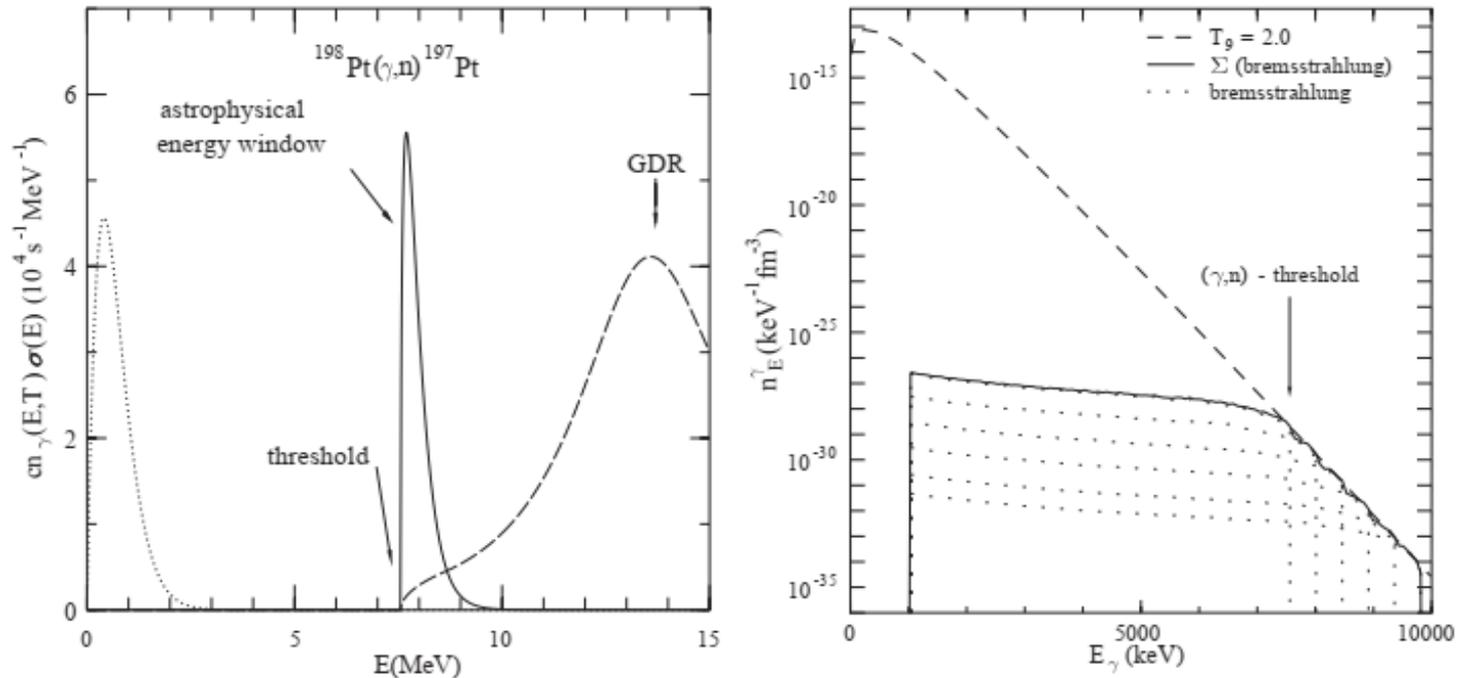


Fig. 11. Left panel: Graphical display of the integrand function of Eq. (1) for the $^{198}\text{Pt}(\gamma, n)^{197}\text{Pt}$ reaction. The Planck spectrum n_{γ} at a temperature $T = 2 \times 10^9$ K is shown, as well as the $\sigma_{(\gamma,n)}(E)$ cross section from energies slightly higher than the GDR down to threshold E_{thr} . Near this energy, the photoneutron cross section is assumed to be given by $\sigma_{(\gamma,n)}(E) = \sigma_0 \sqrt{(E - E_{\text{thr}})/E_{\text{thr}}}$, σ_0 being determined by the bremsstrahlung experiment. The energy window of astrophysical interest has typically a width of less than 1 MeV located around the effective energy $E_{\text{eff}} \approx E_{\text{thr}} + kT/2$, and is thus very close to threshold for conditions relevant to the p-process; Right panel: Approximation of the Planck spectrum at $T = 2.5 \times 10^9$ K in the approximate 5–10 MeV energy range by a superposition $\Phi = \sum_{i=1}^6 a_i(T = 2.5 \times 10^9) \Phi_{\text{brems}}(E_{0,i})$ of 6 bremsstrahlung spectra Φ_{brems} with different endpoint energies $E_{0,i}$ (from [31]).

Обойденные ядра.

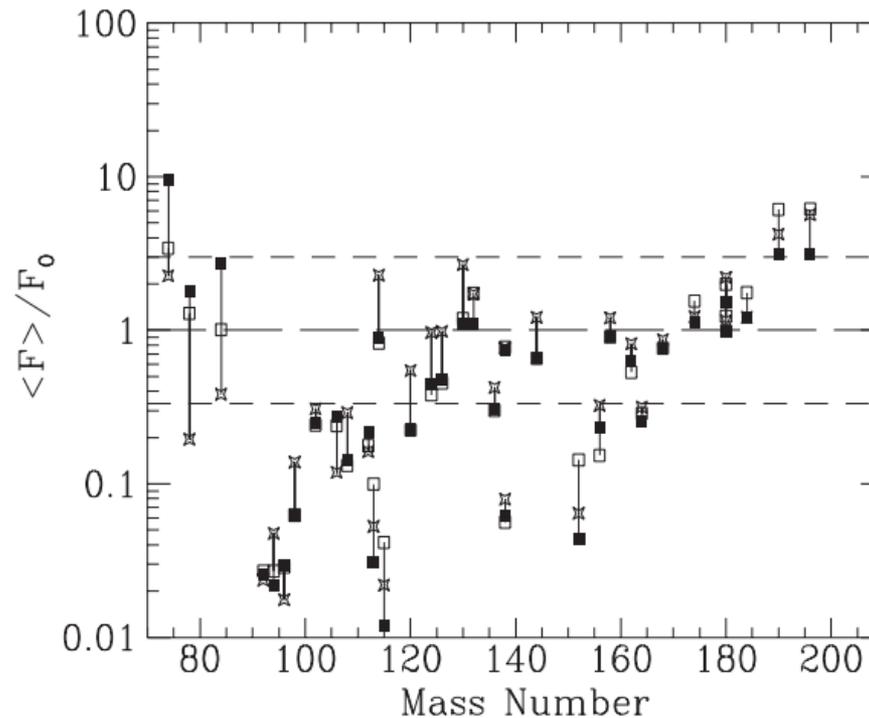


Fig. 32. Values of the normalized overproduction factor $\langle F_i \rangle(M)/F_0(M)$ calculated for three different $25 M_{\odot}$ explosion models: (a) the nominal case defined above (open squares), (b) same as (a), but with $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ rates divided by a factor of 2.5 (asterisks), and (c) same as (b), but with a final explosion kinetic energy increased by a factor of 1.5 (black squares) (from [24]).

При сечениях порядка 1 мБ, статистика составит около 10^3 нейтронов/сек. Для измерения одной точки по сечению требуются минуты.

Обойденные ядра.

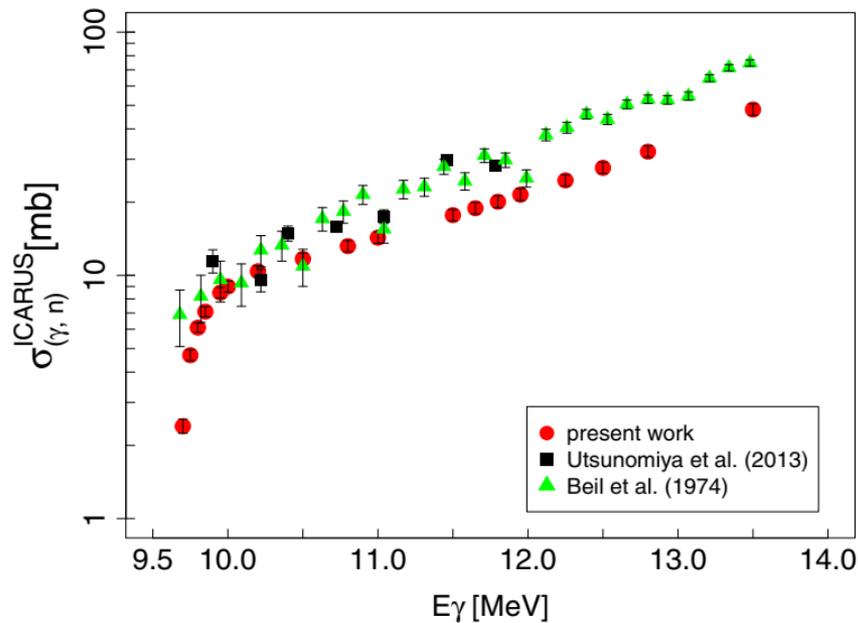


FIG. 5. ICARUS excitation function for $^{94}\text{Mo}(\gamma, n)$ of this work compared with the previous measurements [18,43].

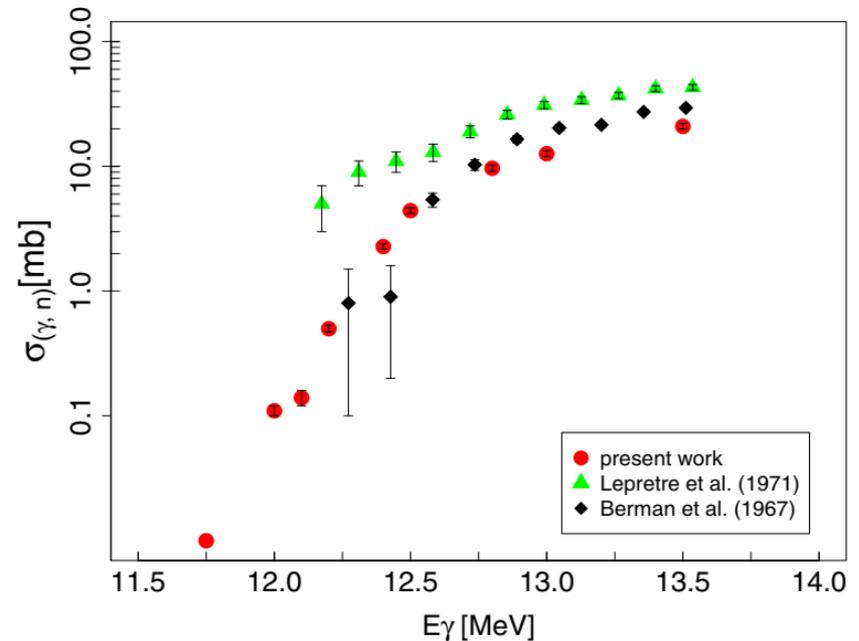


FIG. 6. Excitation function for $^{90}\text{Zr}(\gamma, n)$ of this work compared with the previous measurements [44,45].

A. Banu, E. G. Meekins, J. A. Silano, H. J. Karwowski, and S. Goriely. Photoneutron reaction cross section measurements on ^{94}Mo and ^{90}Zr relevant to the p-process nucleosynthesis. Phys. Rev. C 99, 025802 – Published 11 February 2019

Для решения поставленных задач необходимо с высокой точностью измерять спектры и угловые распределения нейтронов, протонов и гамма-квантов.

Наиболее перспективными выглядят следующие детекторные системы:

- Спектрометрическая система для измерения энергии и углового распределения гамма-квантов в результате (γ, γ') реакций на пучке гамма-квантов, состоящая как минимум из 4-х детекторов из сверхчистого германия. Эта станция необходима для решения задачи 3.
- Высокоэффективный детектор нейтронов на основе He счетчиков в замедлителе. Необходим, прежде всего, для быстрого и прецизионного измерения сечений фотонейтронных реакций (задача 1, 2, 4)
- Система для оффлайн гамма-спектрометрии на основе двух германиевых детекторов для регистрации редких событий и дополнения и мониторинга результатов измерений на высокоэффективном детекторе нейтронов в области многонуклонных реакций.
- Нейтронный времяпролетный детектор для измерения спектров и угловых распределений нейтронов в фотоядерных реакциях (задача 4).
- Детектор легких заряженных частиц для измерения спектров и угловых распределений протонов и альфа частиц в фотоядерных реакциях (задача 4).
- Система мониторинга исходного пучка гамма-квантов.



- Спектрометрическая система для измерения энергии и углового распределения гамма-квантов в результате (γ, γ') реакций на пучке гамма-квантов.

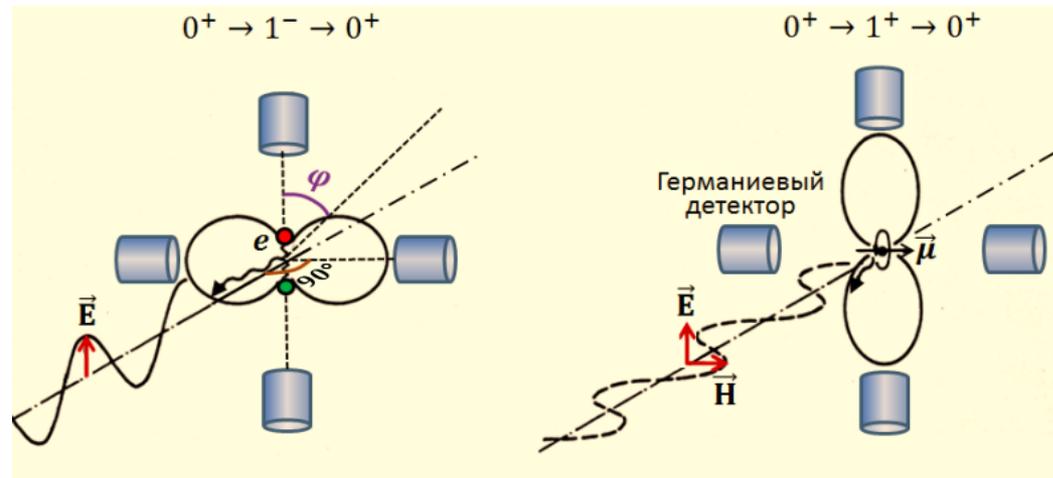
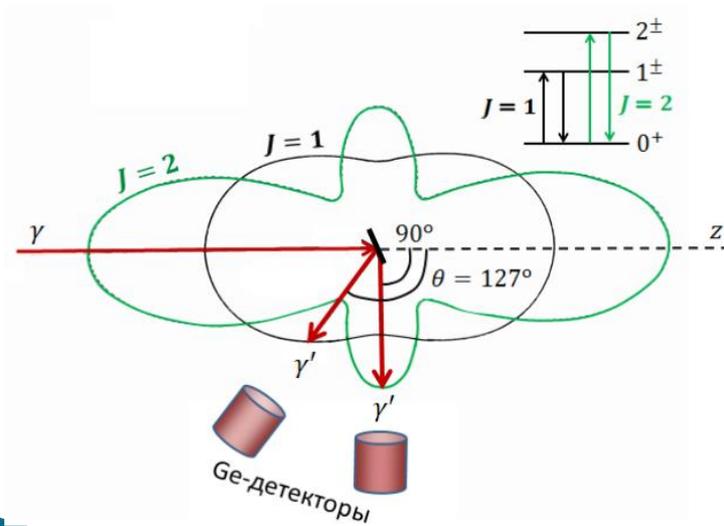
Необходима регистрация и спектрометрия гамма квантов в диапазоне несколько кэВ – 20 МэВ. Относительная эффективность не менее 50%. Количество детекторов – не менее 4-х.

Для этой задачи предлагается рассмотреть три варианта детекторов:

а) стандартный гамма-детектор на основе сверхчистого германия;

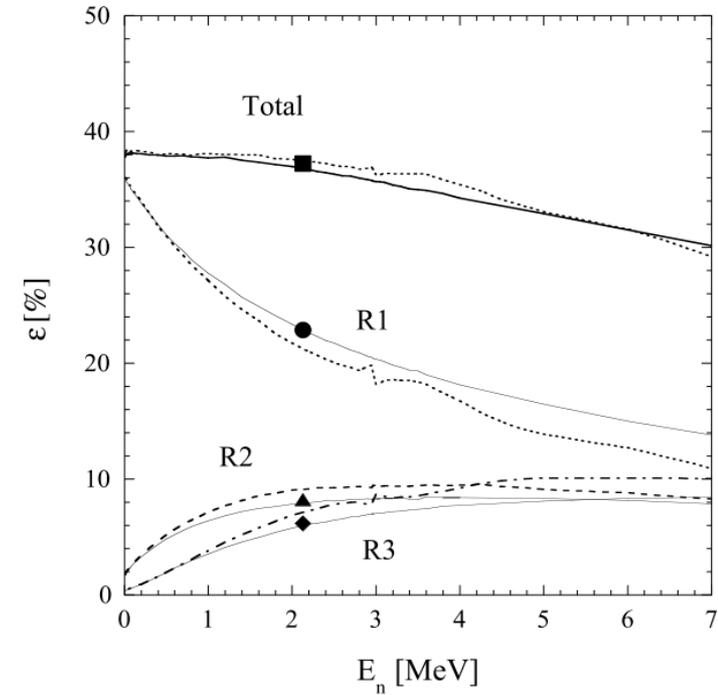
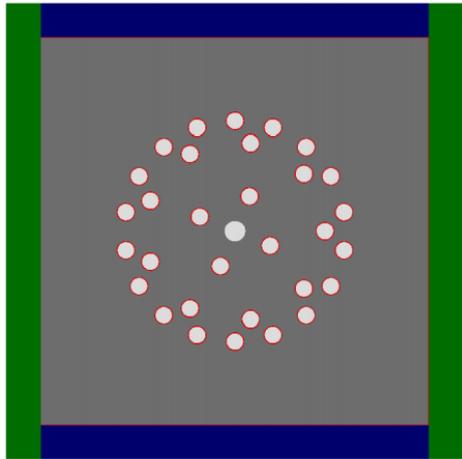
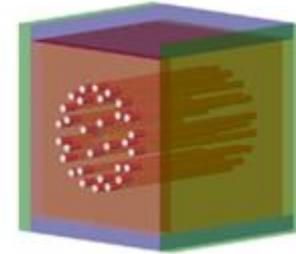
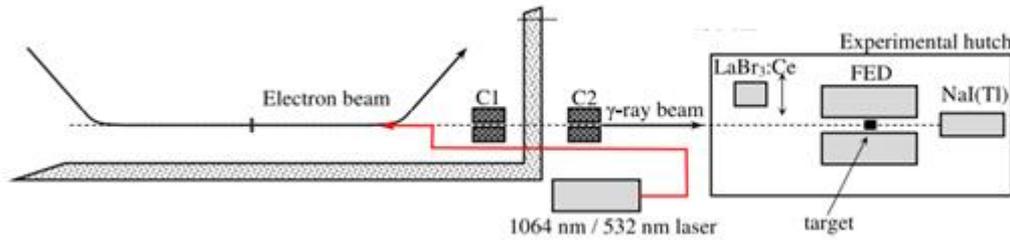
б) сцинтилляционный детектор полного поглощения на основе неорганического сцинтиллятора ВГО или вольфрамата свинца, считывание с помощью кремниевых фотоумножителей.

в) тоже что и б) однако для повышения точности будет использован секционированный кристалл, что позволит дополнительно уточнить спектр фотонов по распределению энергосвечения по глубине.



- Высокоэффективный детектор нейтронов.

Система, состоящая из 30-ти He^3 счетчиков помещенных в замедлитель. Энергия нейтронов 0.1-20 МэВ



- Высокоэффективный детектор нейтронов.

Система, состоящая из 30-ти He^3 счетчиков помещенных в замедлитель. Энергия нейтронов 0.1-20 МэВ

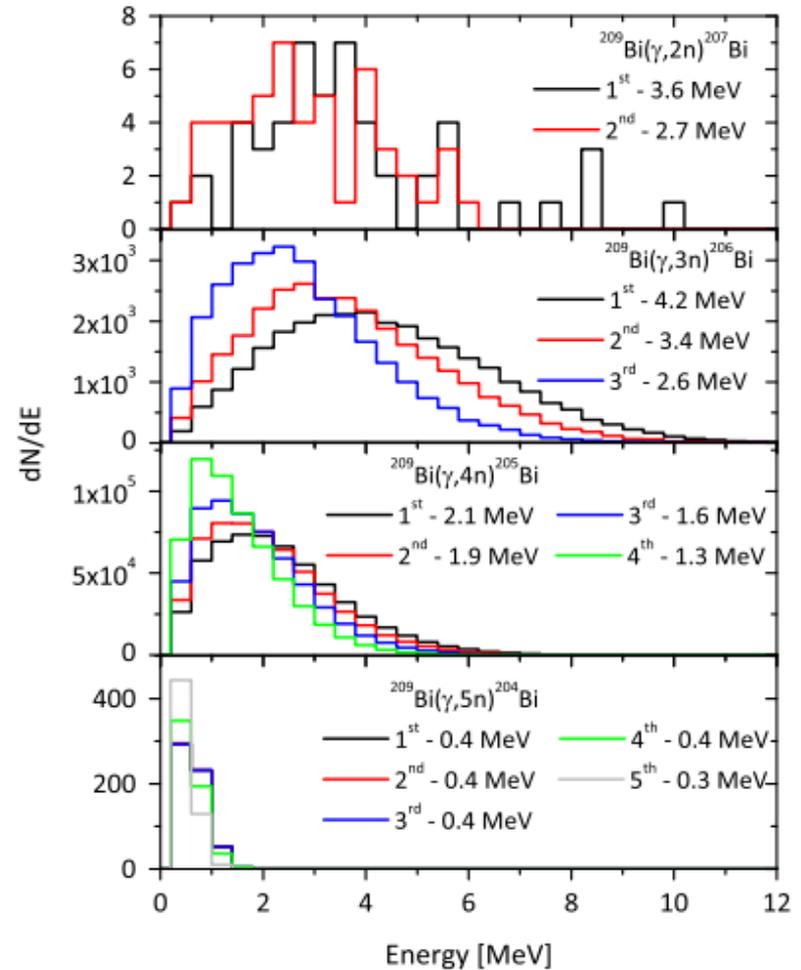
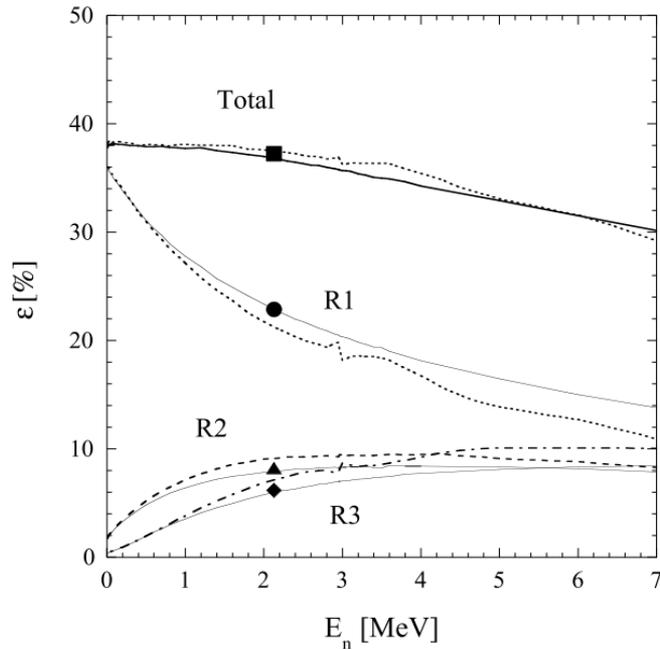


Fig. 4. (Color online) Results of the Monte Carlo statistical model calculations of neutron energy spectra in the $^{209}\text{Bi}(\gamma, xn)$ reaction at 40 MeV.

- Высокоэффективный детектор нейтронов.

Система, состоящая из 30-ти He3 счетчиков помещенных в замедлитель. Энергия нейтронов 0.1-20 МэВ

$d\sigma_n / d\varepsilon$, мб/МэВ

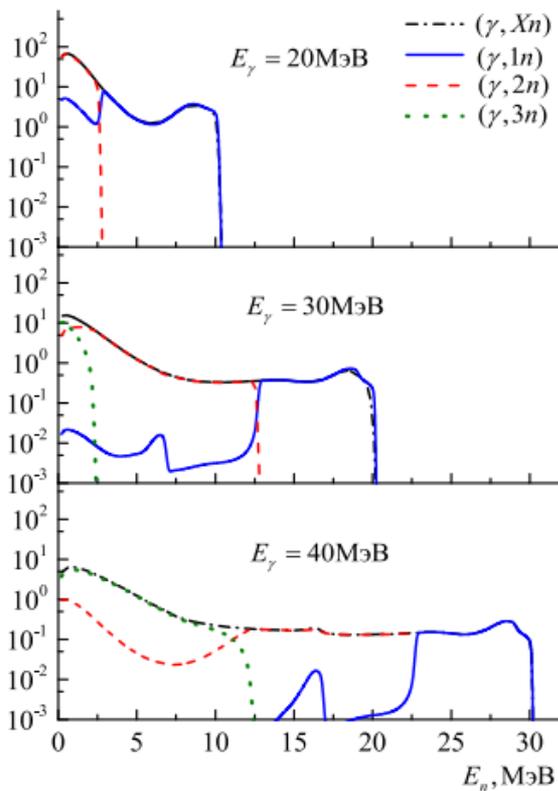


Рис. 11: Спектры нейтронов, образующихся в реакциях (γ, Xn) , $(\gamma, 1n)$, $(\gamma, 2n)$, $(\gamma, 3n)$ при энергии возбуждения ядра ^{116}Sn $E_\gamma = 20, 30, 40$ МэВ, рассчитанные в КМФР

$d\sigma_n / d\varepsilon$, мб/МэВ

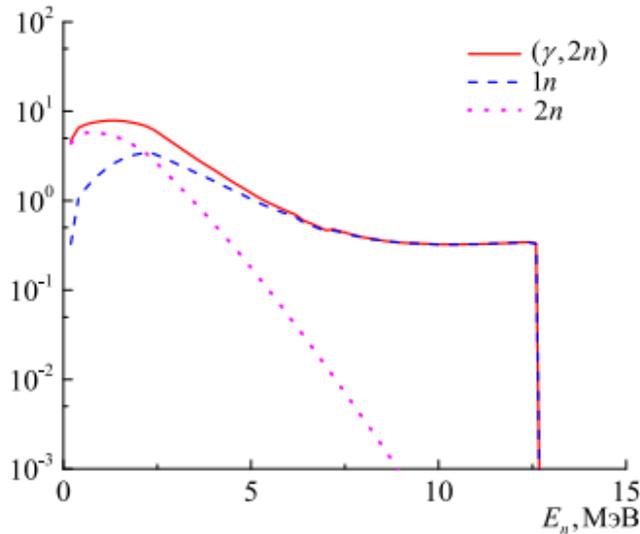


Рис. 12: Спектры первого и второго нейтронов образующихся в реакции $(\gamma, 2n)$, рассчитанные по КМФР, при энергии возбуждения ядра ^{116}Sn $E_\gamma = 30$ МэВ. Сплошной линией приведен суммарный спектр нейтронов в реакции $(\gamma, 2n)$

ε_n , МэВ

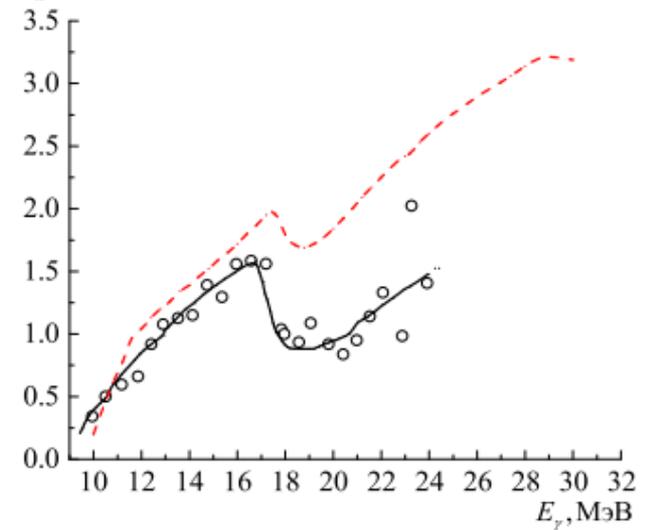
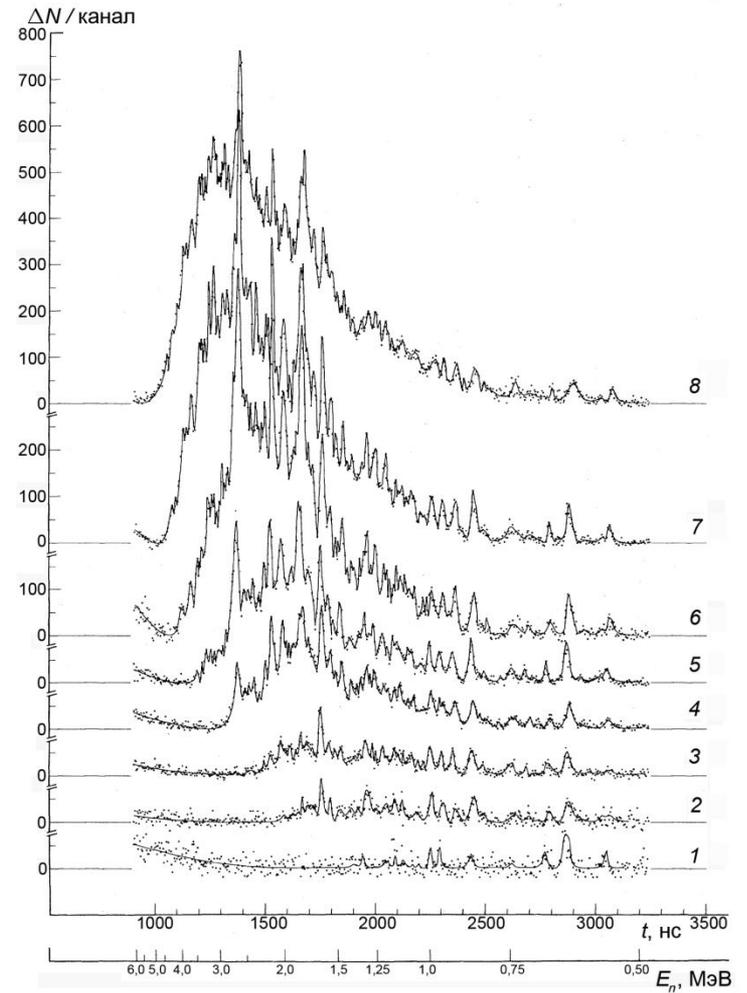


Рис. 14: Сравнение средней энергии нейтронов, определенной в эксперименте [15] на основе кольцевых отношений (точки — экспериментальные значения, сплошная кривая — аппроксимация) с результатами расчетов на основе комбинированной модели (штриховая линия)

- Спектры нейтронов

Спектры нейтронов, дающих заселение основного состояния ^{207}Pb для реакции $^{208}\text{Pb}(g, n_g)$, в зависимости от времени пролёта t и энергии нейтронов E_n (нелинейная шкала) при различных верхних границах энергий тормозных g-квантов $E_{g \text{ макс}}$: 1 – 8,8 МэВ; 2 – 9,4 МэВ; 3 – 9,9 МэВ; 4 – 10,4 МэВ; 5 – 10,9 МэВ; 6 – 11,5 МэВ; 7 – 12,0 МэВ; 8 – 12,5 МэВ.

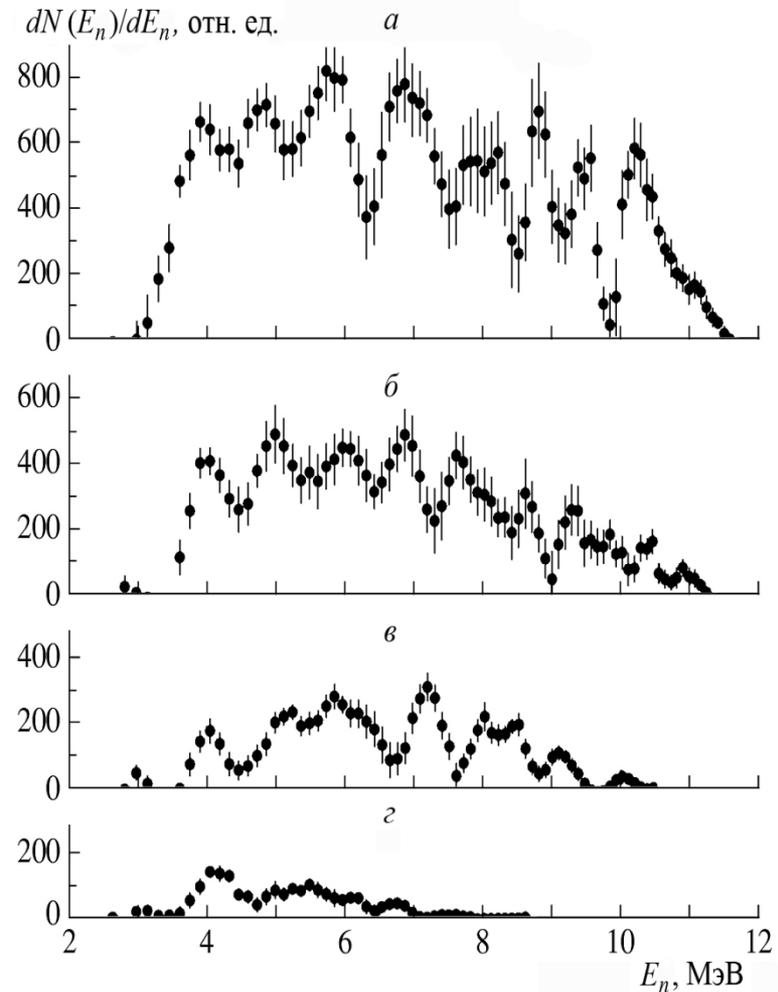
• Sherman N.K., Ferdinande H.M., Lokan K.H., and Ross C.K. // Phys. Rev. Lett. 1975. Vol. 35. P. 1215.



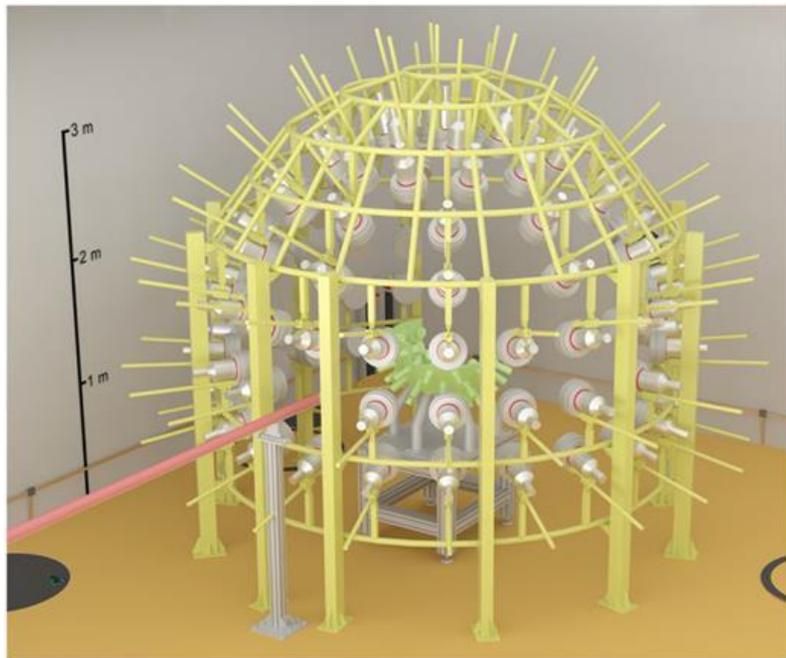
- Спектры нейтронов

Спектры нейтронов из реакции $^{51}\text{V}(\gamma, n)^{50}\text{V}$, измеренные при различных верхних границах тормозного спектра $E_{g \text{ макс}}$: *a* – 25,5 МэВ; *б* – 23,0 МэВ; *в* – 21,0 МэВ; *г* – 18,5 МэВ.

Вербицкий С.С., Лапик А.М., Ратнер Б.С. и др. // ЯФ. 2009. Т. 72. С. 420; Verbitsky S.S., Lapik A.M., Ratner B.S., et al. // Physics of Atomic Nuclei. 2009. Vol. 72. P. 387.



- Нейтронный времяпролетный детектор, планируется выполнить на основе быстрого органического сцинтиллятора типа/аналога NE111 или EJ309 (24 шт), база 1–2 м, при создании прототипа будут использоваться как ФЭУ так и кремниевые фотоумножители.



- Нейтронный времяпролетный детектор, планируется выполнить на основе быстрого органического сцинтиллятора типа/аналога NE111 или EJ309 (24 шт), база 1–2м, при создании прототипа будут использоваться как ФЭУ так и кремниевые фотоумножители.

Оценим $N_{n \text{ рег}}$ – ожидаемое число зарегистрированных быстрых нейтронов с энергией $E_n = 12$ МэВ, испускаемых из материнских ядер ^{208}Pb и приводящих к заселению основных состояний в дочерних ядрах ^{207}Pb , в одном предлагаемом детекторе от одного импульса γ -квантов обратного комптоновского рассеяния [6] при их энергии $E_\gamma \cong 20,1$ МэВ:

$$N_{n \text{ рег}} \sim N_{\gamma \text{ имп}} \cdot \left(\frac{d\sigma_g}{d\Omega} \right)_{90^\circ} \cdot \Omega \cdot \varepsilon \cdot N_A \cdot \frac{\chi_{\text{Pb}} \rho_{\text{Pb}}}{M_{\text{Pb}}} \approx 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ имп}^{-1},$$

где: $N_{\gamma \text{ имп}} \sim 10^4 \text{ имп}^{-1}$ – количество таких γ -квантов в импульсе длительностью

$$\sim 2 \cdot 10^4 \text{ с}^{-12}; \quad \left(\frac{d\sigma_g}{d\Omega} \right)_{90^\circ} \approx 5 \cdot 10^{-27} \text{ см}^2 \cdot \text{ср}^{-1}; \quad \Omega \approx 2 \cdot 10^{-3} \text{ ср}; \quad \varepsilon \sim 0,1; \quad N_A \cong$$

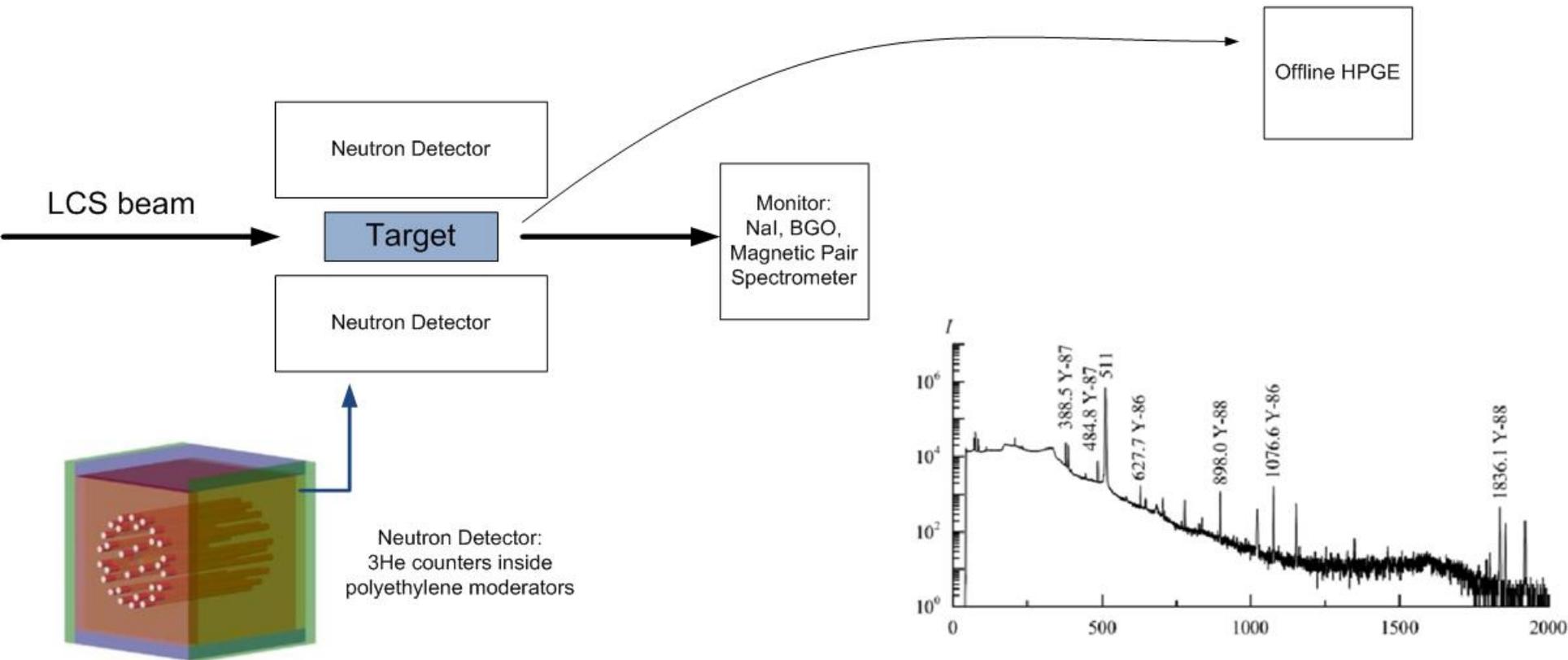
$6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ – число Авогадро; $\chi_{\text{Pb}} \sim 0,45 \text{ см}$ – толщина Pb-мишени;

$\rho_{\text{Pb}} \cong 11,35 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ – плотность Pb-мишени; $M_{\text{Pb}} \approx 11,35 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}$ – грамм-моль Pb-

мишени.



Система для оффлайн гамма-спектрометрии на основе двух германиевых детекторов для регистрации редких событий и дополнения и мониторингирования результатов измерений на высокоэффективном детекторе нейтронов в области многонуклонных реакций.



Из-за проблем, связанных с регистрацией нейтронов, прямые методы надо дополнять активационными измерениями

- Система мониторинга пучка.

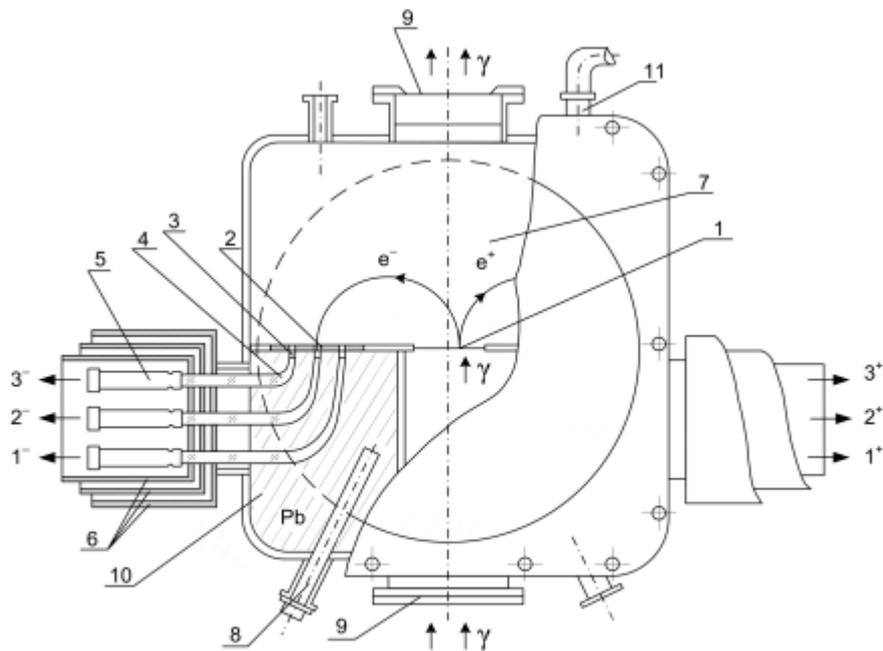


Рис. 2. Схема парного магнитного спектрометра из [16]: 1 – Au-радиатор; 2 – система Pb-щелей; 3 – сцинтилляторы; 4 – световоды; 5 – фотоэлектрические умножители ФЭУ-36; 6 – три слоя магнитной защиты; 7 – область однородного магнитного поля; 8 – катушка магнетометра (стабилизация по методу ядерного протонного резонанса); 9 – входные и выходные окна для пучка тормозных γ -лучей; 10 – Pb-защита; 11 – патрубок откачки

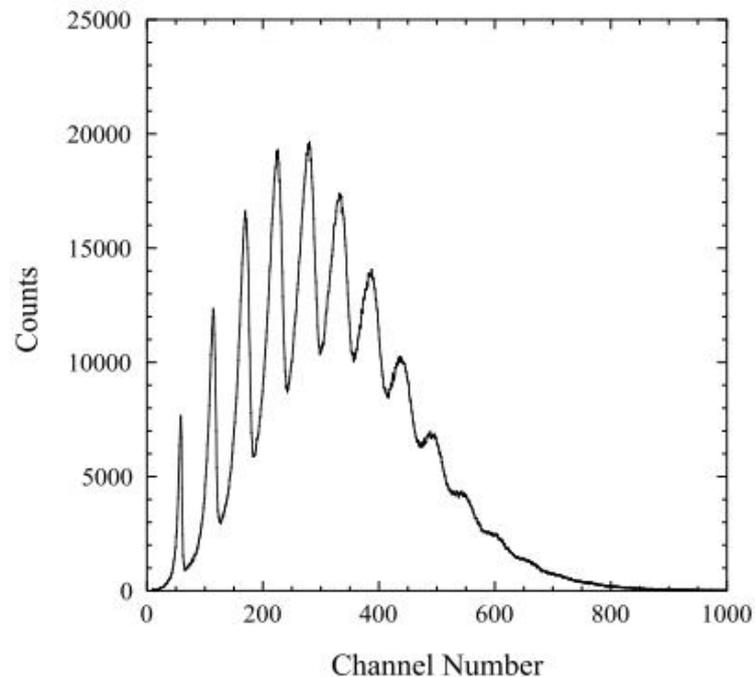


Fig. 7. Multi-photons spectrum of a 17 MeV LCS γ -ray beam measured with an $8.0'' \times 12.0''$ NaI(Tl) detector.

Для каждой задачи и детекторных станций необходимы следующие этапы:

2024 – Разработка концепции, подготовка исходных данных для моделирования, моделирование детекторных систем.

2025 – Подготовка технического предложения

2026 – Разработка и изготовления прототипов детекторов

2027 – Испытания детекторов, корректировка дизайна доработка, подготовка к изготовлению. Испытания детекторов будут проводиться на имеющихся ускорителях электронов НИИЯФ МГУ и лазерной системе ускорения электронов Физического факультета МГУ.

2028 – 2029 – Закупка необходимых материалов, изготовление детекторов, отладка и запуск.



Особенности возможных экспериментов на пучке монохроматического гамма-излучения

Планируя ядерно-физические эксперименты на монохроматическом гамма-пучке комптоновского источника, необходимо принимать во внимание следующие особенности.

1. Для методик прямого измерения необходимо разрешение по энергии не более 0.3%.
2. В проекте ИКИ количество гамма квантов в пределах полосы 0.3% составит 10^7 с⁻¹. Это позволяет проводить измерения одной точки по энергии прямыми методами в течении нескольких минут. Для измерения сечения на одном ядре прямыми методами (порядка 300 точек с учетом перестроения энергии) это займет сутки.
3. Необходимо дополнительно к прямым методам использовать методику наведенной активности для некоторого числа точек.



Особенности возможных экспериментов на пучке монохроматического гамма-излучения

4. Активационные исследования фотоядерных реакций на g - пучках от обратного комптоновского рассеяния при $E_g \lesssim 40$ МэВ имеют фундаментальную ценность для выяснения множественности образования фотонейтронов. В некоторых случаях для активационной методики требуется большая интенсивность гамма-пучка.

5. Для дальнейшего развития адекватного модельного описания возбуждения и релаксации изовекторного электрического дипольного гигантского резонанса в атомных ядрах существенно изучение распределений по энергии и углам для парциальных сечений образования быстрых нейтронов в (g, n) - реакциях. Короткая длительность импульса излучения – для линейного ускорителя – несколько пикосекунд дает возможность реализации времяпролетной методики с высоким разрешением на короткой базе.



Особенности возможных экспериментов на пучке монохроматического гамма-излучения

6. Реакции с заряженными частицами.

По сравнению с многочисленными исследованиями фотонейтронных реакций, выполненных на пучках как тормозного излучения, так и квазимонроэнергетических аннигиляционных фотонов, исследований реакций с образованием протонов, дейтронов, тритонов и альфа-частиц, проведено относительно немного.

В экспериментах на пучках тормозного излучения это обусловлено присутствием значительного фона от электронов. В экспериментах на пучках квазимоноэнергетических аннигиляционных фотонов интенсивность весьма невелика (вследствие многоэтапного процесса получения гамма-квантов от аннигиляции позитронов), что с относительно невысокой статистической точностью позволяет получать данные по фотонейтронным реакциям, в которых возможно использование толстых мишеней, и не позволяет получать данные по фотопротонным реакциям, в которых использование толстых мишеней невозможно.



Особенности возможных экспериментов на пучке монохроматического гамма-излучения

6. Реакции с заряженными частицами.

На пучках фотонов КИ возможно эффективное отделение фона электронов, поскольку пучки рассеянных электронов и рассеянных фотонов геометрически разведены. Уникальные характеристики пучка КИ позволяют организовать на новом современном уровне разнообразные исследования фотоядерных реакций с образованием заряженных частиц. Прежде всего это относится к определению сечений фотопротонных реакций для большого количества ядер, которые в настоящее время отсутствуют. Получение такой информации и ее детальное сравнение с результатами фотонейтронных исследований позволит на качественно новом уровне изучить явление изоспинового расщепления ГДР, а также уточнить сведения о таком явлении, как конфигурационное расщепление ГДР. Этому будет способствовать реализация новых возможностей по измерению энергетических и угловых распределений вылетающих протонов (как и других заряженных продуктов реакций). Данные о таких процессах позволят уточнить многие известные и изучить неизвестные пока особенности процессов фоторасщепления ядер, свойств электромагнитных взаимодействий.



Старт. ИКИ МГУ.

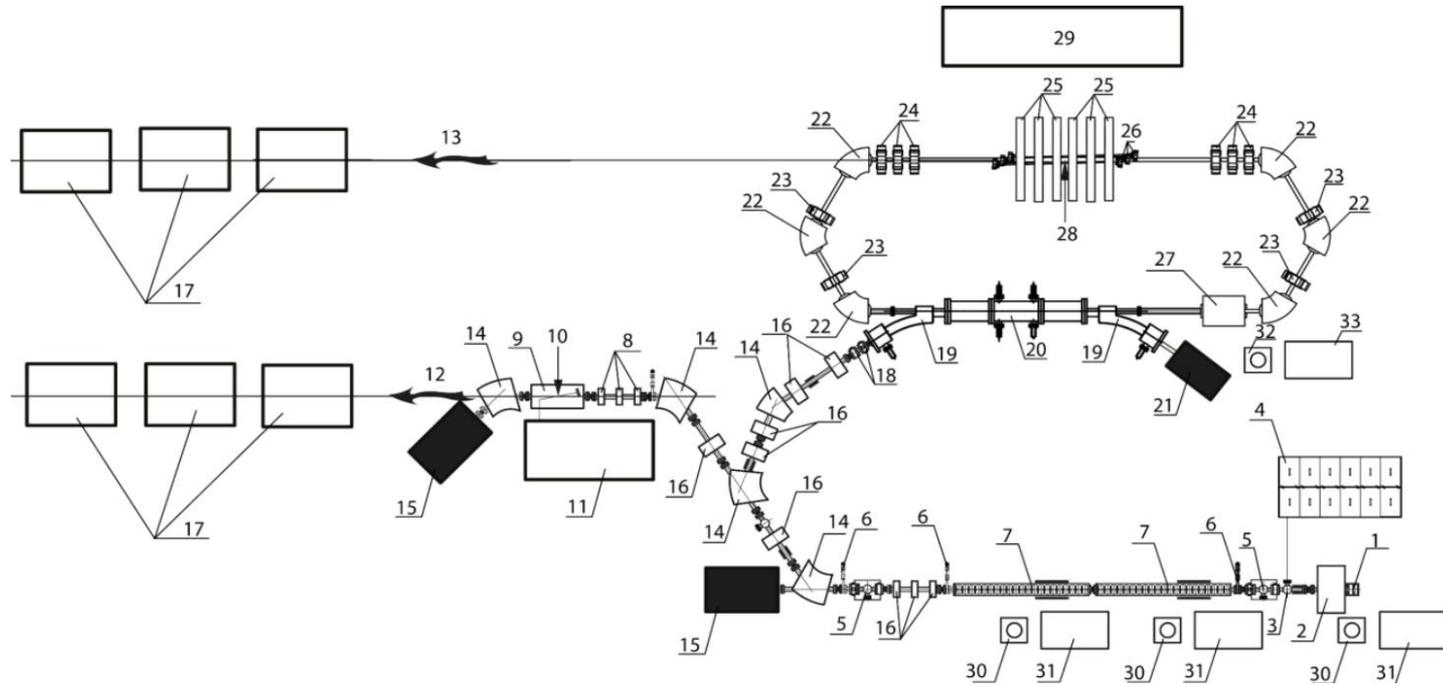


Рис. 3.5: Состав ИКИ МГУ (рентгеновский диапазон) на основе линейного ускорителя. 1 — СВЧ пушка с фотокатодом, 2 — соленоид, 3 — окно ввода лазерного излучения, 4 — лазер фотокатода, 5 — станция диагностики пучка, 6 — вакуумный затвор, 7 — ускоряющая структура, 8 — триплет квадрупольных линз, 9 — камера взаимодействия, 10 — точка взаимодействия, 11 — основной лазер, 12, 13 — рентгеновское излучение, 14 — поворотный магнит, 15 — поглотитель пучка, 16 — квадрупольная линза, 17 — рабочие станции, 30 — импульсный клистрон, 31 — модулятор.

Рис. 3.6: Состав ИКИ МГУ (рентгеновский диапазон) с линейным ускорителем и кольцом. 13 — тракт рентгеновского пучка, 18 — станция диагностики инжектируемого пучка, 19 — септум магнит, 20 — киккер, 21 — поглотитель отработанного пучка, 22 — поворотные магниты кольца, 23 — секступольные линзы кольца, 24 — триплеты квадрупольных линз кольца, 25 — триплеты точки взаимодействия, 26 — зеркала лазерного резонатора, 27 — ВЧ резонатор кольца, 28 — точка взаимодействия электронных пучков с лазерным излучением. 29 — лазерная система кольца, 32 — клистрон непрерывного действия, 33 — источник питания клистрона непрерывного действия. Остальные обозначения как на Рис. 3.5.

Экспериментальная база НИИЯФ МГУ.

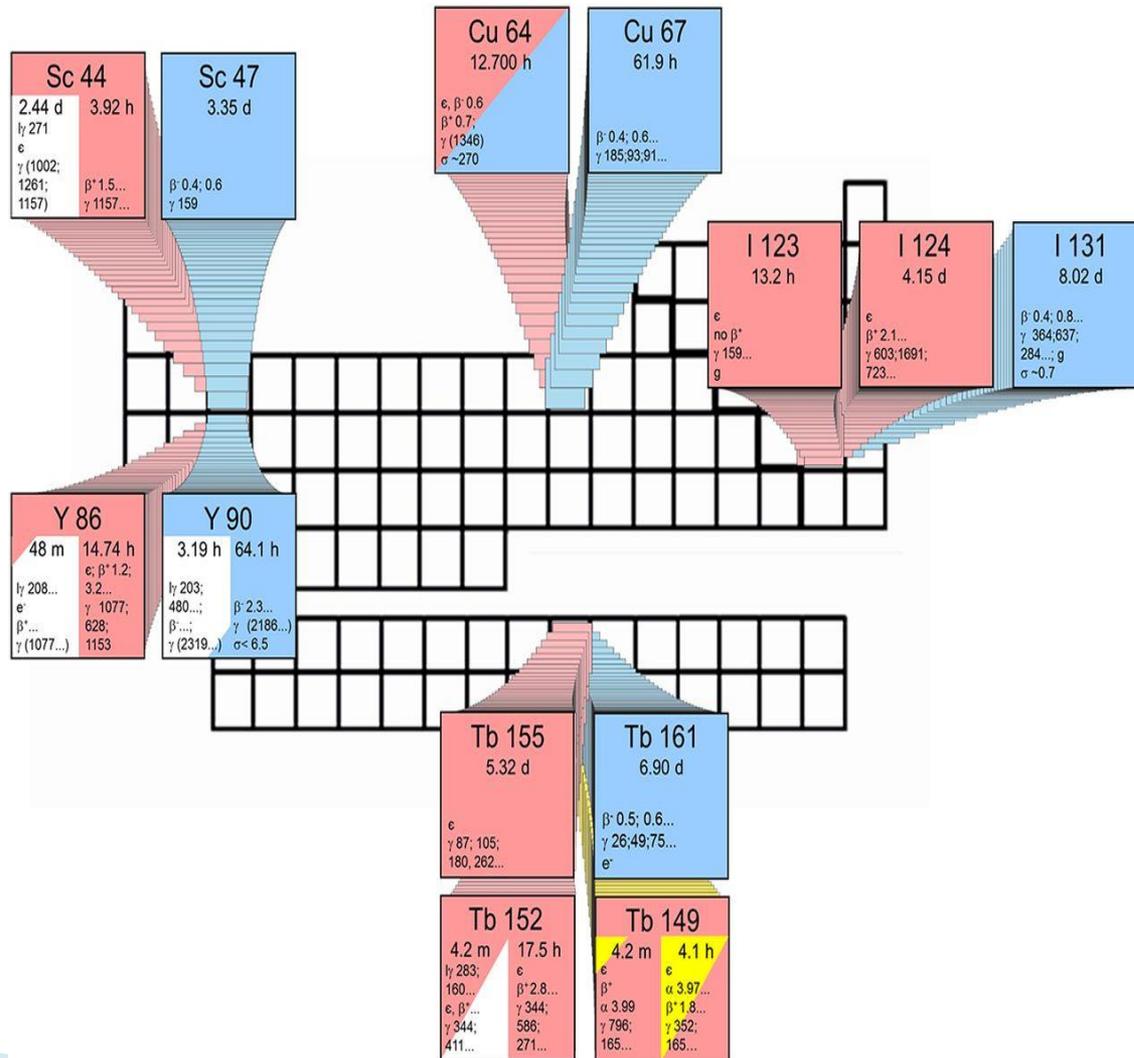
- Импульсный разрезной микротрон на энергию 55 МэВ
- Ускоритель электронов непрерывного действия
- Технологический ускоритель электронов на энергию 10 МэВ

- Система для гамма-спектрометрии облученных образцов
- Сцинтилляторы для регистрации нейтронов
- Системы регистрации заряженных частиц
- Geant4 модели детекторных систем

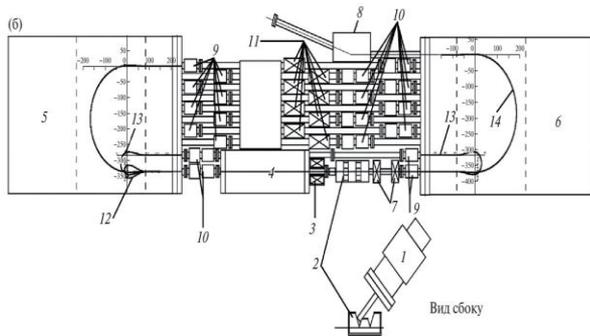
- Комбинированная модель фотоядерных реакций



Theragnostic principle: matched pairs of radionuclides for PET or SPECT imaging and for therapeutic application in nuclear medicine



^{66}Zn 27.73%	^{67}Zn 4.04%	^{68}Zn 18.45% p,2p; γ ,p d,2pn; α , α p	^{69}Zn 56.4 m	^{70}Zn 0.61%
^{65}Cu 30.85%	^{66}Cu 5.12 m	^{67}Cu 61.8 h	^{68}Cu 30.9 s	^{69}Cu 2.85 m
α ,p ^{64}Ni 0.93%	^{65}Ni 2.51 h	^{66}Ni 54.6 h	^{67}Ni 21 s	^{68}Ni 29 s



Ядерные свойства ^{67}Cu оптимальны для ядерной медицины. Низкая средняя энергия β - частиц (141 keV) позволяет использовать ^{67}Cu для радиоиммунотерапии опухолей небольшого размера (средний пробег в тканях β -частиц $^{67}\text{Cu} \approx 0.2$ мм).

Мягкое γ -излучение (184.6 keV, 48.7%) [2] позволяет визуализировать распределение радионуклида в организме и рассчитать получаемую пациентом дозу.

Период полураспада 2.58 сут. и отсутствие жесткого гамма-излучения позволяют уменьшить нежелательную дозовую нагрузку на пациента и персонал. Однако применение ^{67}Cu в медицине лимитируется трудностями, связанными с его производством. Современные производственные мощности намного меньше потенциальной потребности, которая оценена в 12 000 Ci/year

^{67}Cu - физика

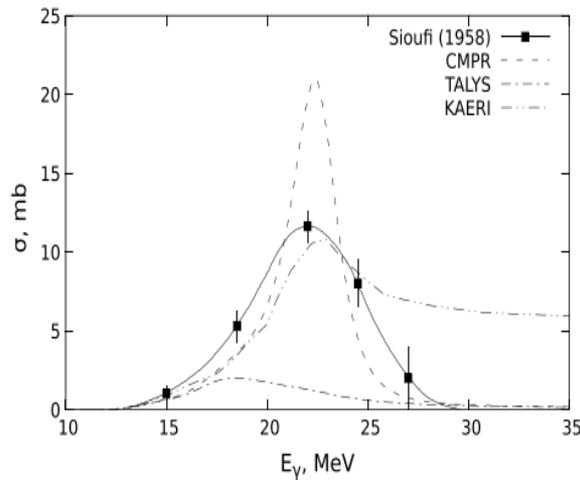
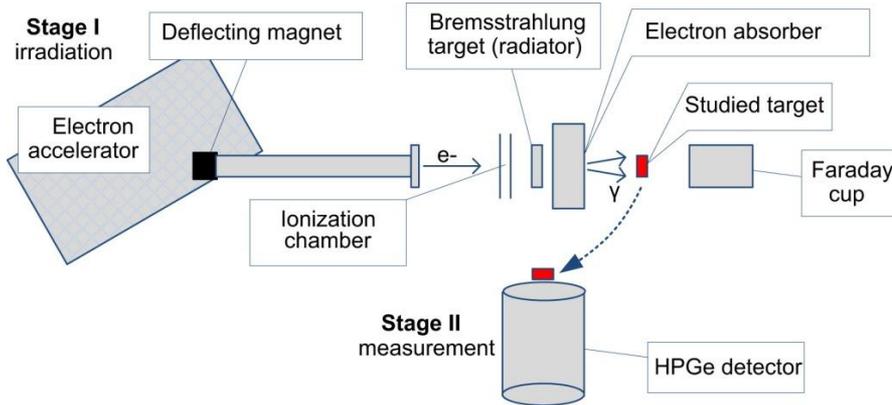


Fig. 4 Cross sections of the photonuclear reaction $^{68}\text{Zn}(\gamma, p)^{67}\text{Cu}$ measured in the work of von Sioufi [25] and theoretically calculated using different models

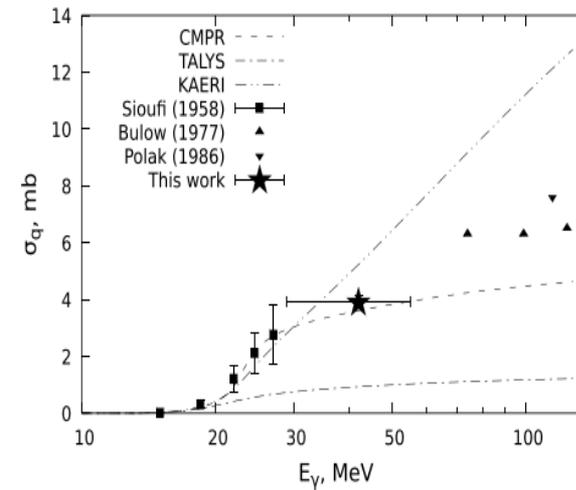


Fig. 5 Comparison of the experimental yields of the $^{68}\text{Zn}(\gamma, p)^{67}\text{Cu}$ photonuclear reaction obtained using bremsstrahlung beams and calculated on the basis of known cross sections

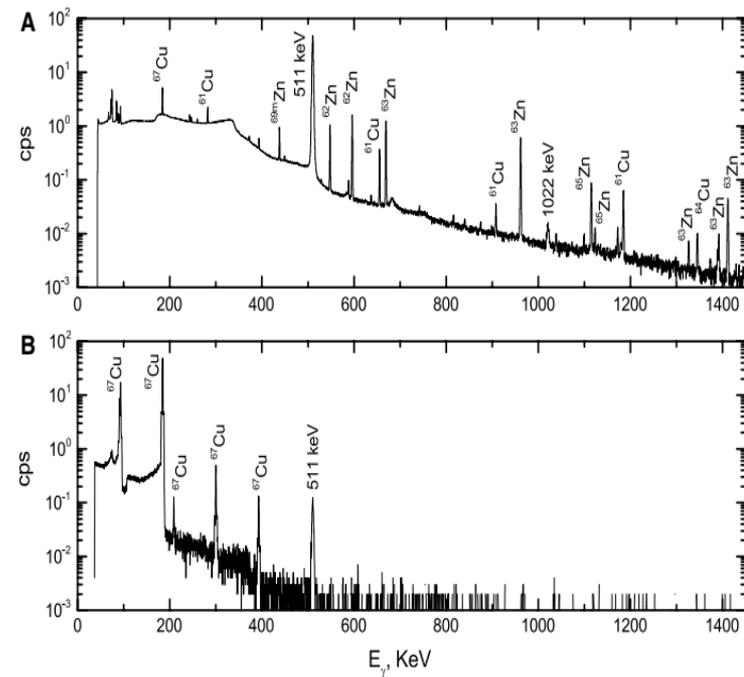
Ramiz A. Aliev, Sergey S. Belyshev, Alexander A. Kuznetsov, Leonid Z. Dzhilavyan, Vadim V. Khankin, Gleb Yu Aleshin, Andrey G. Kazakov, Anna B. Priselkova, Stepan N. Kalmykov, and Boris S. Ishkhanov. Photonuclear production and radiochemical separation of medically relevant radionuclides: ^{67}Cu . *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 321(1):125–132, 2019.

^{67}Cu - ХИМИЯ

Процедура разделения занимает ~ 2 ч и обеспечивает более 95% выхода ^{67}Cu .

Reaction	Energy, MeV	Yield	Refer
$^{68}\text{Zn}(p,2p)^{67}\text{Cu}$	128	~ 1.1 MBq/ $(\mu\text{A}\cdot\text{h}\cdot\text{g})$	Medv
$^{64}\text{Ni}(\alpha,p)^{67}\text{Cu}$	24	544 kBq/ $(\mu\text{A}\cdot\text{h})$	Skakun 2004
$^{70}\text{Zn}(p,\alpha)^{67}\text{Cu}$	18 \rightarrow 8	2.0 MBq/ $(\mu\text{A}\cdot\text{h})$	Kastleiner 1999
$^{68}\text{Zn}(\gamma,p)^{67}\text{Cu}$	60	470 kBq/ $(\mu\text{A}\cdot\text{h}\cdot\text{g})$	Yagi 1978
	55	1.2 MBq/ $(\mu\text{A}\cdot\text{h}\cdot\text{g}/\text{cm}^2)$	This work

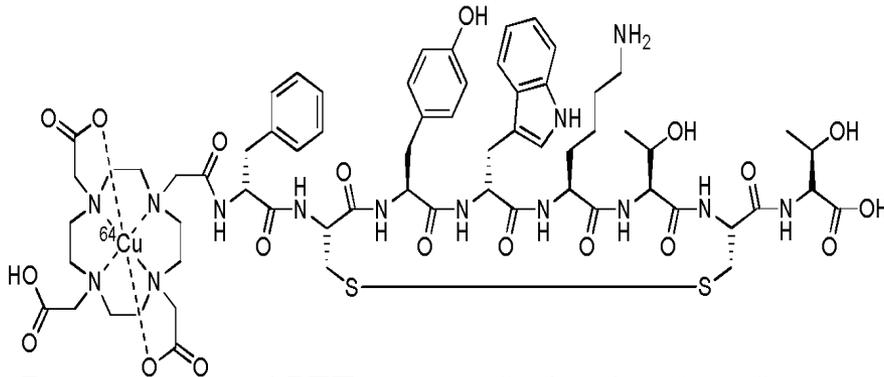
Fig. 3 Spectra of the induced activity of an irradiated zinc target, measured for 4 h **a** immediately after the end of irradiation and **b** after radiochemical separation of ^{67}Cu



Оценка
35МэВ
100мкА
24 часа
20ГБК ^{67}Cu .

Detectnet – FDA-approved ^{64}Cu Initial U.S. Approval: 2020

- Detectnet contains copper ^{64}Cu dotatate, which is a radioactive diagnostic drug for use with PET imaging. Chemically, copper ^{64}Cu dotatate is described as copper $(\text{Cu } ^{64})\text{-N-}[(4,7,10\text{-Tricarboxymethyl-1,4,7,10 tetraazacyclododec-1-yl) acetyl] \text{-Dphenylalanyl-L-cysteinyl-L-tyrosyl-D-tryptophanyl-L-lysyl-Lthreoninyl-L-cysteinyl-L-threonine-cyclic (2-7) disulfide}$. The molecular weight is 1497.2 Daltons and the following is the structural formula:

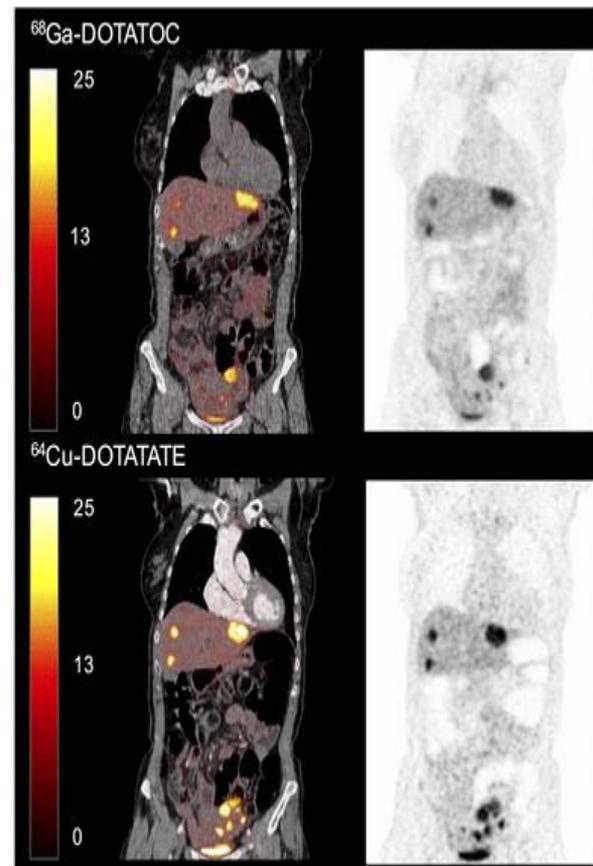


Detectnet is used PET-imaging for localization of somatostatin receptor positive neuroendocrine tumors (NETs) in adult patients

DOSAGE FORMS AND STRENGTHS:

Injection: 148 MBq (4 mCi) (37 MBq (1 mCi) per 1 mL) of copper ^{64}Cu dotatate in a single-dose vial

DetectnetTM
(copper ^{64}Cu dotatate injection)



Результаты. 2023 г.

С. С. Бельшев, В. В. Варламов, Л. З. Джилавян, А. А. Кузнецов, А. М. Лапик, А. Л. Полонский, А. В. Русаков, and В. И. Шведунов. К мониторингованию на проектируемом γ -источнике от обратного комптоновского рассеяния для фотоядерных исследований при $e\gamma \lesssim 40$ МэВ. *Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия*, 78(3):2330203, 2023.

С. С. Бельшев, В. В. Варламов, Л. З. Джилавян, А. А. Кузнецов, А. М. Лапик, А. Л. Полонский, А. В. Русаков, and В. И. Шведунов. К программе фотоядерных исследований на пучке обратных комптоновских квазимонохроматических гамма-квантов с перестраиваемой энергией $e\gamma \lesssim 40$ МэВ. *Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия*, 78(3):2330204, 2023.

С. С. Бельшев, В. В. Варламов, Л. З. Джилавян, А. А. Кузнецов, А. М. Лапик, А. Л. Полонский, А. В. Русаков, and В. И. Шведунов. К активационным исследованиям фотоядерных реакций на g -пучках от обратного комптоновского рассеяния при $e\gamma < 40$ МэВ. *Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия*, 79(1):2410201, 2024.

С. С. Бельшев, В. В. Варламов, Л. З. Джилавян, А. А. Кузнецов, А. М. Лапик, А. Л. Полонский, А. В. Русаков, and В. И. Шведунов. О РАСПРЕДЕЛЕНИЯХ НЕЙТРОНОВ ИЗ (g, n)-РЕАКЦИЙ ПО ЭНЕРГИИ И УГЛАМ НА g -ПУЧКАХ ОБРАТНОГО КОМПТОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ ПРИ $E_g \lesssim 40$ МэВ. *Известия РАН. В печати.*



Спасибо за внимание!

