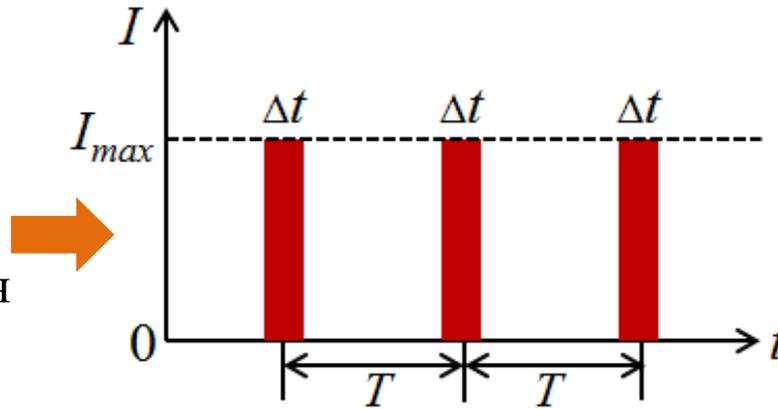


Лекция 5:

Ускорительно-детекторный комплекс
для ЯРФ-экспериментов.

Необходимость непрерывного пучка электронов (фотонов)

Временная структура тока пучка импульсного ускорителя электронов



I – ток пучка ускорителя

Δt – длительность импульса пучка

T – период следования импульсов

τ – разрешающее время детектора

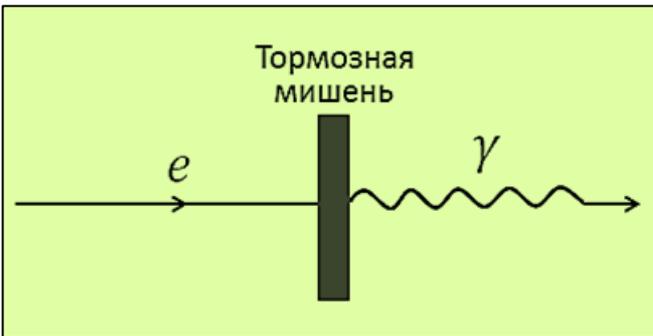
$\nu = \frac{1}{T}$ – частота следования импульсов

$\frac{\Delta t}{T} = D$ – фактор заполнения рабочего цикла (duty cycle)

n (скорость счёта детектора) $\sim I$

I_{max} – максимальный допустимый ток без перегрузки детектора

$$I_{max} \sim \frac{1}{\tau}$$



Формирование тормозного γ -излучения для ЯРФ-экспериментов

$$n_{max} \sim I_{max} \cdot \Delta t \cdot \nu \sim \frac{1}{\tau} \cdot \frac{\Delta t}{T}$$



$$n_{max} \sim \frac{D}{\tau}$$

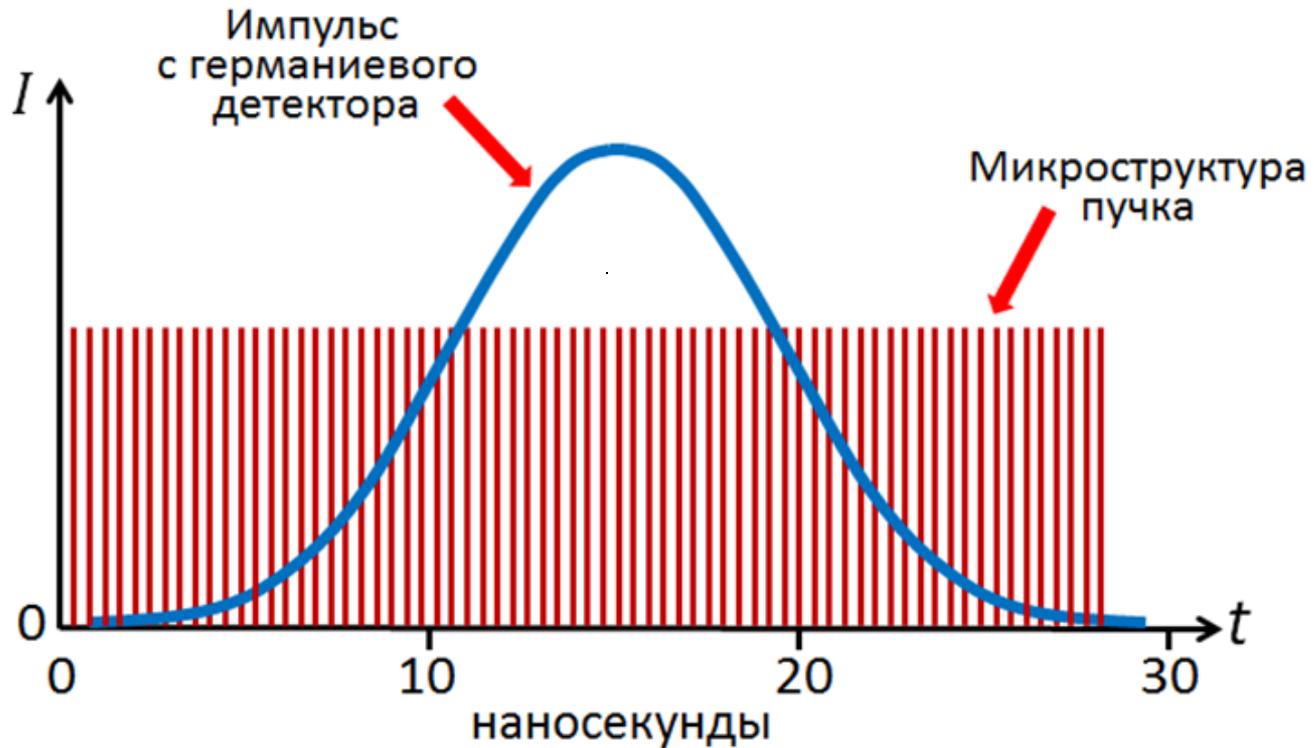
Ускорители, имеющие фактор заполнения рабочего цикла $D = 1$, называются *ускорителями непрерывного действия* (УНД).

Основные параметры импульсных ускорителей и ускорителей непрерывного действия (УНД)

Тип ускорителя	Энергия электрона, МэВ	$\Delta E/E$	D	Ток пучка, I , мкА
Бетатрон	25 – 220	10^{-3}	$10^{-3} - 5 \cdot 10^{-2}$	0,01–0,1
Синхротрон	100 – 10 000	10^{-3}	10^{-1}	0,01–1,0
Линейный ускоритель	25 – 50 000	$10^{-1} - 3 \cdot 10^{-3}$	$10^{-4} - 10^{-2}$	10–500
Микротрон	7 – 25	10^{-3}	10^{-3}	10–50
УНД	1 – 12 000	$10^{-3} - 10^{-4}$	1	10–4000

Основное преимущество УНД – величина $D = 1$. За счёт этого максимальная скорость набора статистики на УНД обычно на 2-3 порядка выше, чем на импульсных ускорителях, что даёт возможность изучать процессы с малыми сечениями, недоступные для наблюдения на импульсных ускорителях (их стандартный фактор заполнения рабочего цикла $D = 10^{-3}$). Если мы имеем спектр, полученный на УНД за 10 часов, то аналогичный спектр на импульсном ускорителе может быть получен лишь за ≈ 1 год его непрерывной работы.

Строго говоря, УНД – тоже импульсные ускорители, но у них частота следования импульсов столь высока ($\nu \approx 2500 \text{ МГц} = 2,5 \cdot 10^9 \text{ Гц}$ и $T = 1/\nu = 4 \cdot 10^{-10} \text{ сек} = 0,4 \text{ нсек}$), что эта временная микроструктура пучка не чувствуется детектором (разрешающее время германиевого детектора $\tau(\text{Ge}) \approx 10^{-8} \text{ сек} \approx 10 \text{ нсек}$) и он воспринимается детектором как непрерывный (см. рисунок)



Сравнение временной микроструктуры электронного пучка УНД с частотой $\nu \approx 2500 \text{ МГц}$ с импульсом германиевого детектора

Электронные ускорители, использованные для исследования ЯРФ

Город	Ускоритель	Фактор заполнения D , %	Энергия, МэВ	Ток пучка, мА
Штуттгарт	Dynamitron	100	4,3	4
Дармштадт	S-DALINAC	100	130	0,04
Гессен	Linac	0,12	65	0,3
Гент	Linac	2	15	2
Москва	Linac	100	6,6	1

В последней строчке этой таблицы приведены параметры УНД, созданного в ОЭПВАЯ НИИЯФ МГУ и использованного в 1993-2000 гг. для проведения ЯРФ-экспериментов. По совокупности характеристик этот ускоритель наиболее удобен для подобных экспериментов.

По фактору заполнения он превосходит гессенский и гентский, по току – дармштадский, а по энергии – штуттгартский.

За счёт использования магнитного зеркала энергия московского ускорителя могла быть поднята до 12 МэВ.

Формирование тормозного излучения для ЯРФ-экспериментов и детекторный узел

Важным преимуществом УНД по сравнению со стандартными импульсными ускорителями является малый эмиттанс (угловой или поперечный разброс) электронного пучка на конверторе и отсутствие гало – области спада интенсивности пучка вне этого эмиттанса.

Электронный пучок чётко очерчен и ограничен на конверторе пятном диаметром 2-4 мм.

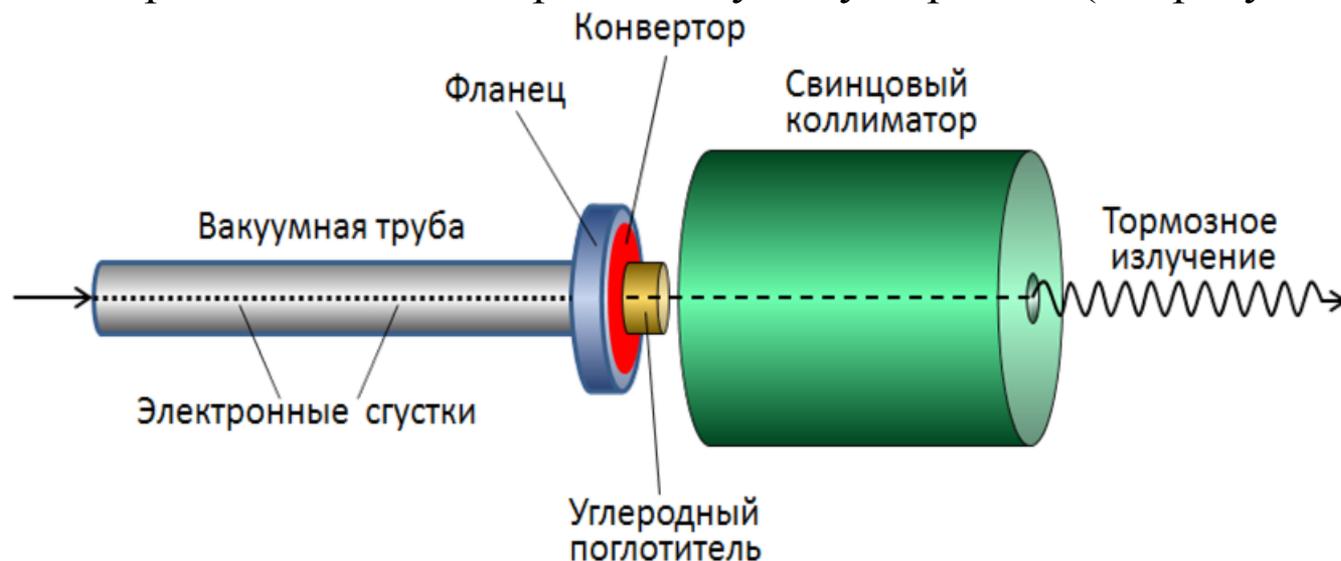
Это позволяет располагать γ -детекторы вблизи от оси пучка (на расстоянии 20-30 см от этой оси) без опасения, что «крылья» пучка заденут детектор и увеличат фон.

Близкое расположение детекторов к оси пучка увеличивает эффективность регистрации резонансно рассеянных фотонов и уменьшает время набора необходимой статистики опыта.

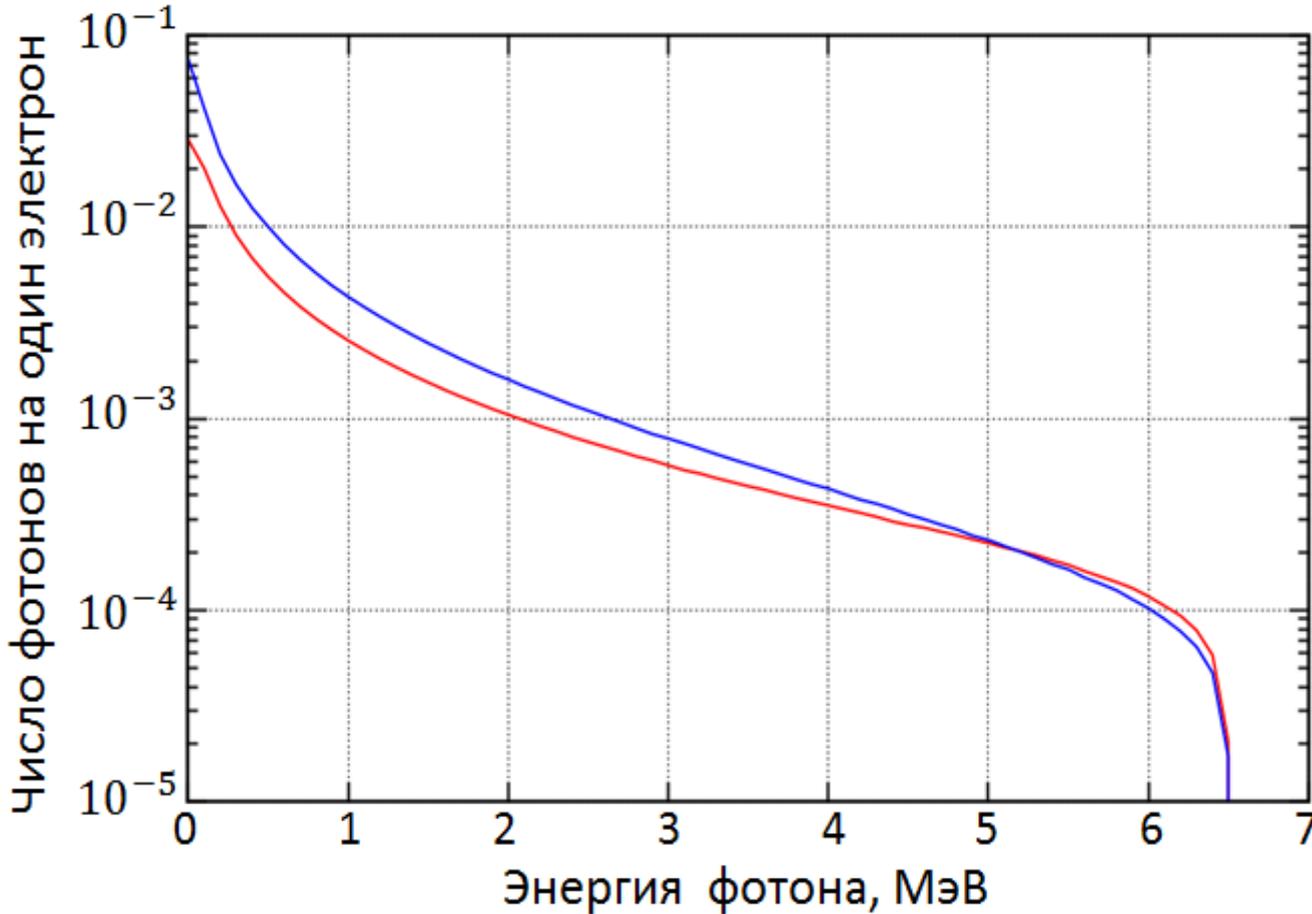
В качестве конвертора используют тугоплавкий металл с большим Z .

В установке НИИЯФ МГУ использовалась пластинка тантала ($Z = 73$) толщиной 100 мкм.

Эта пластинка крепилась на конечном фланце вакуумной трубы, по которой двигался электронный пучок ускорителя (см. рисунок).



Фланец охлаждался проточной водой, что позволяло работать с токами пучка до 50 мкА. За конвертором помещался поглотитель электронов, прошедших конвертор – цилиндр из углерода длиной 4 см, полностью поглощавший электроны. За поглотителем располагался свинцовый коллиматор толщиной 50 см со сквозным каналом круглого поперечного сечения диаметром ≈ 3 см вдоль оси тормозного пучка. Коллиматор формировал чёткие пространственные границы пучка тормозных фотонов. На рисунке показан спектр этих фотонов.



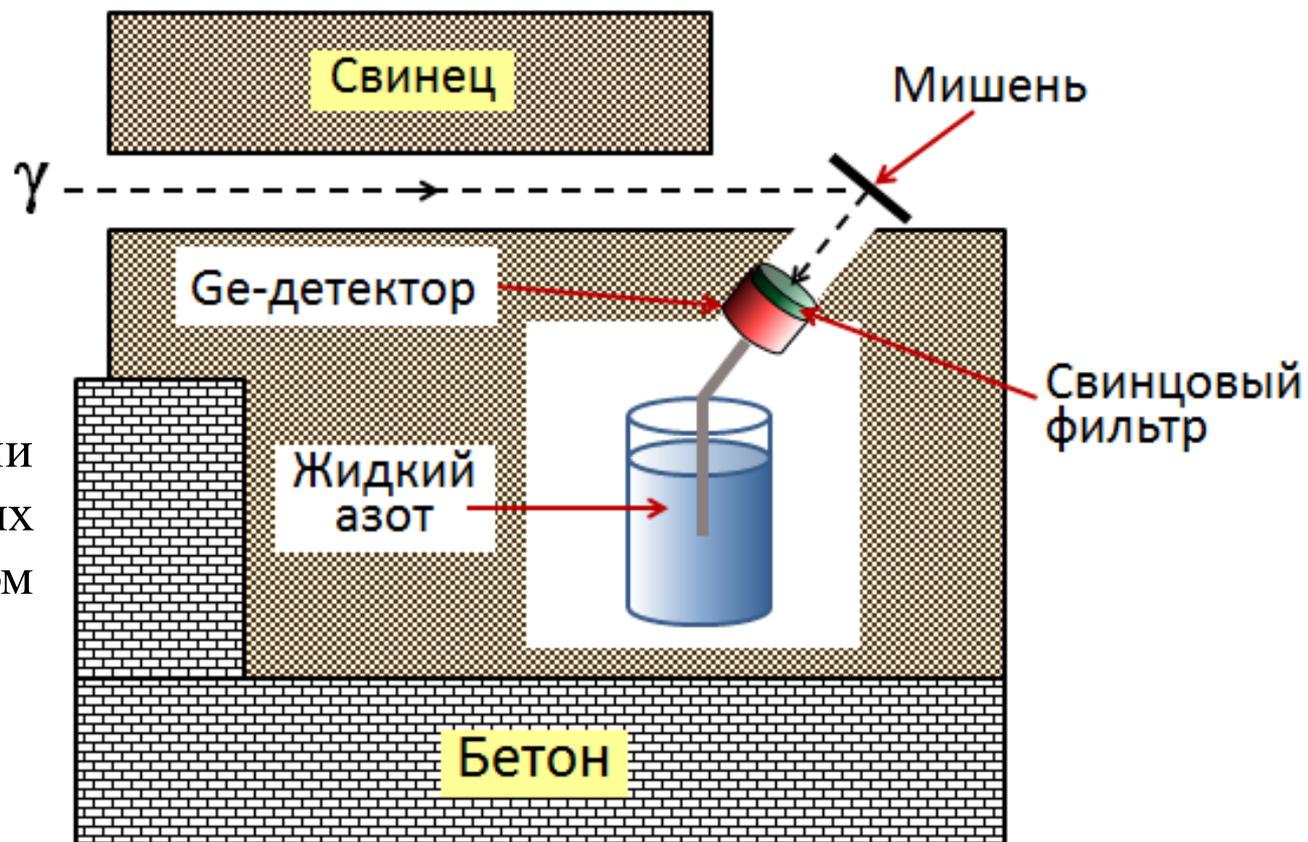
Спектр тормозных фотонов, использованных в ЯРФ-экспериментах в НИИЯФ МГУ.
Синяя линия – спектр без поглотителя,
красная – с поглотителем

Пучок тормозных фотонов после прохождения коллиматора направляется на исследуемую мишень (см. рисунок).

Резонансно рассеянные ядрами мишени фотоны регистрируются Ge-детектором, охлажденным до температуры жидкого азота.

Детектор с криостатом окружены защитой из свинца и бетона.

Размер детекторного узла с защитой примерно 1м×1м×1м.



Установка для регистрации резонансно рассеянных фотонов Ge-детектором

В качестве ускорителя электронов для ЯРФ-экспериментов в НИИЯФ МГУ использовался инжектор разрезного микротрона (Race Track Microtron – RTM) непрерывного действия с проектной энергией 175 МэВ.

Параметры этого ускорителя-инжектора приведены в нижней строке таблицы «Электронные ускорители, использованные для проведения ЯРФ-экспериментов».

Пучок электронов от этого ускорителя-инжектора после поворота на 180° и формирования тормозного γ -пучка направлялся к установке для исследования ЯРФ, изображенной на предыдущем рисунке.

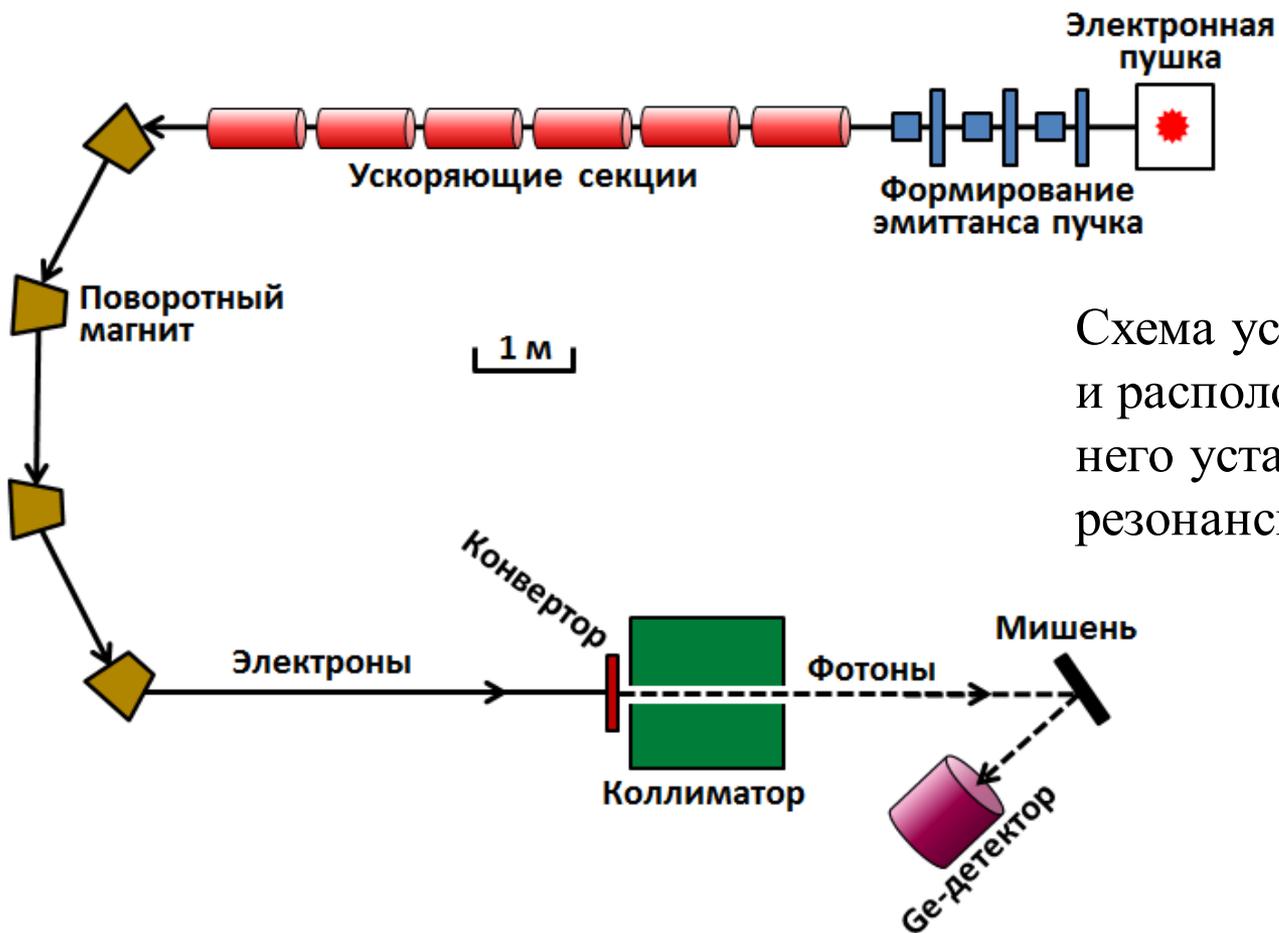
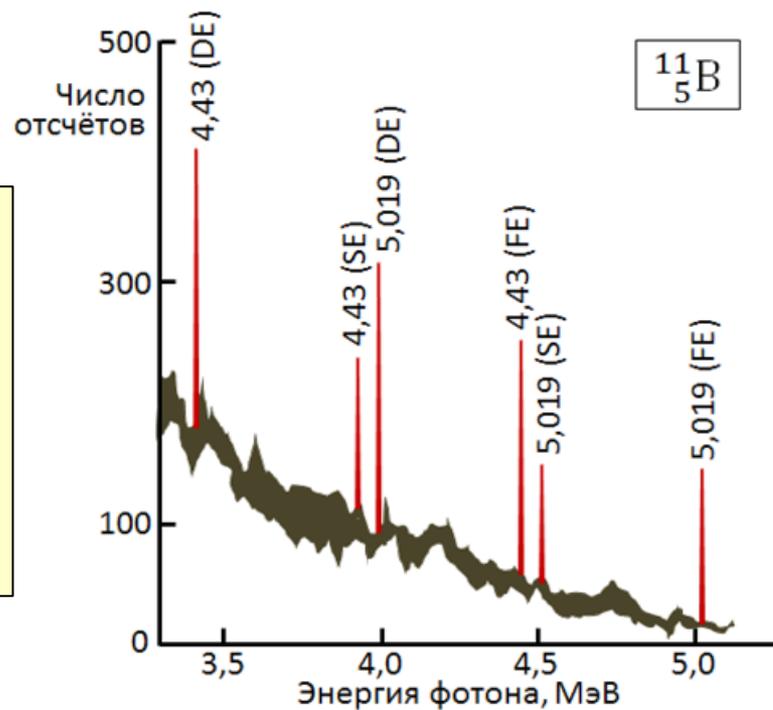


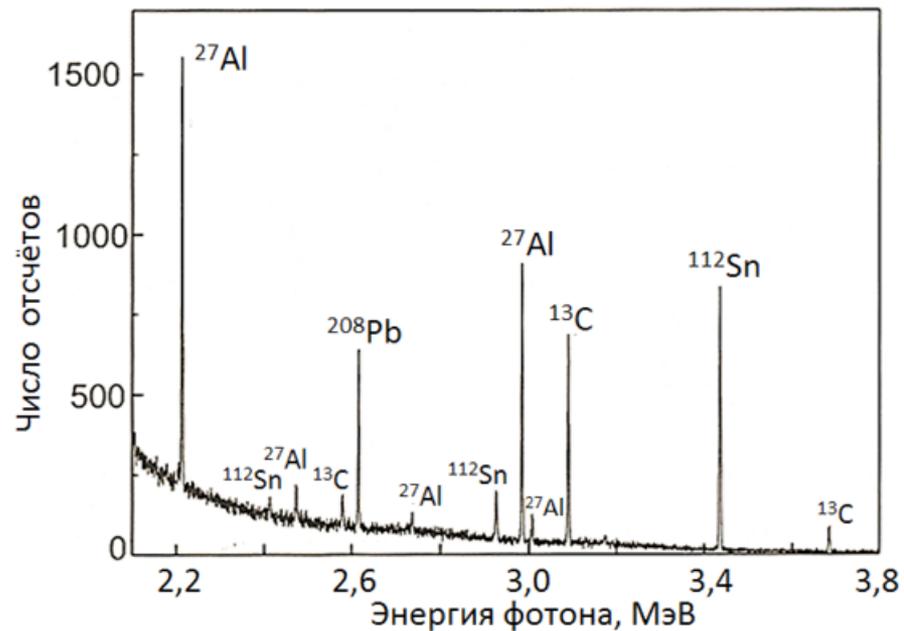
Схема ускорителя-инжектора и расположение относительно него установки для регистрации резонансно рассеянных фотонов

Спектр фотонов, полученный на ЯРФ-установке НИИЯФ МГУ от мишени $^{11}_5\text{B}$.

Использовался Ge(HP)-детектор с относительной эффективностью 10%.
Указаны энергии γ -линий в МэВ.



Один из спектров фотонов, полученный в ЯРФ-эксперименте на ускорителе Dynamitron (Штуттгарт).
Указаны ядра, являющиеся источниками соответствующих γ -линий.



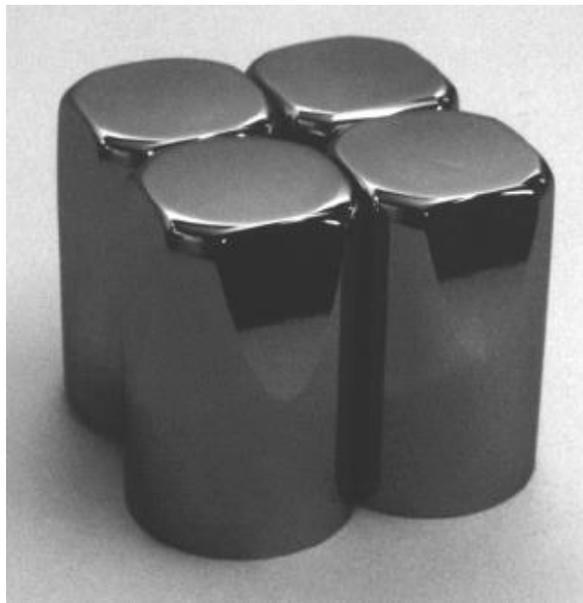
Системы из нескольких германиевых детекторов. EUROBALL. Cluster detector

Для увеличения эффективности регистрации ЯРФ-фотонов с сохранением высокого энергетического разрешения используют системы из нескольких германиевых детекторов, собранных в единый узел. Такие системы были разработаны и созданы в связи с реализацией европейского проекта **EUROBALL** и программы **Gammasphere** (USA), направленных на изучение редких и неожиданных ядерных явлений. Соответствующие установки представляют собой объединение большого числа крупных (с относительной эффективностью 60-80%) HPGe-детекторов, перекрывающих практически всё пространство вокруг исследуемой мишени. Так установка EUROBALL состоит из 239 германиевых детекторов с полной эффективностью в фотопике около 10%. Таким образом, в среднем каждый десятый фотон, вылетающий из мишени, будет зарегистрирован этой установкой. Для сравнения отметим, что эффективность EUROBALL примерно на два порядка превышает эффективность одиночного Ge-детектора. Каждый детекторный узел, входящий в состав EUROBALL, состоит из нескольких идентичных Ge-кристаллов, тесно прижатых друг к другу и размещённых в одном криостате. Сигналы от каждого кристалла суммируются, в том числе сигналы, обусловленные рассеянием между двумя или более соседними кристаллами. Использовались детекторные узлы из четырёх кристаллов (так называемый, **Clover detector**) и семи кристаллов (**Cluster detector**). В состав EUROBALL входит 26 Clover-детекторов и 15 Cluster-детекторов.

Узел из
четырёх коаксиальных
германиевых кристаллов
n-типа (**Clover detector**).
Каждый кристалл имеет
диаметр ≈ 5 см
и длину ≈ 7 см



Каждый кристалл Cluster detector
имеет внешний диаметр
 $\approx 6,5$ см, длину $\approx 7,8$ см и
относительную
эффективность $\approx 60\%$.



Узел из семи
германиевых
кристаллов
(**Cluster detector**).

Он эквивалентен
одному Ge-кристаллу
объёмом ≈ 2000 см³.

Фронтальный вид
Cluster-детектора,
состоящего из семи
германиевых кристаллов

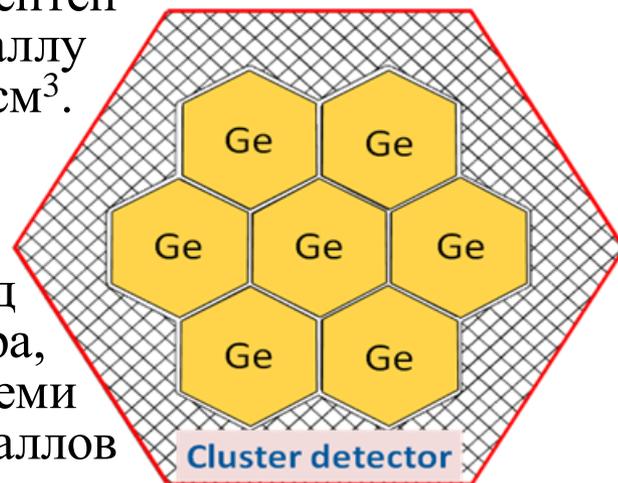
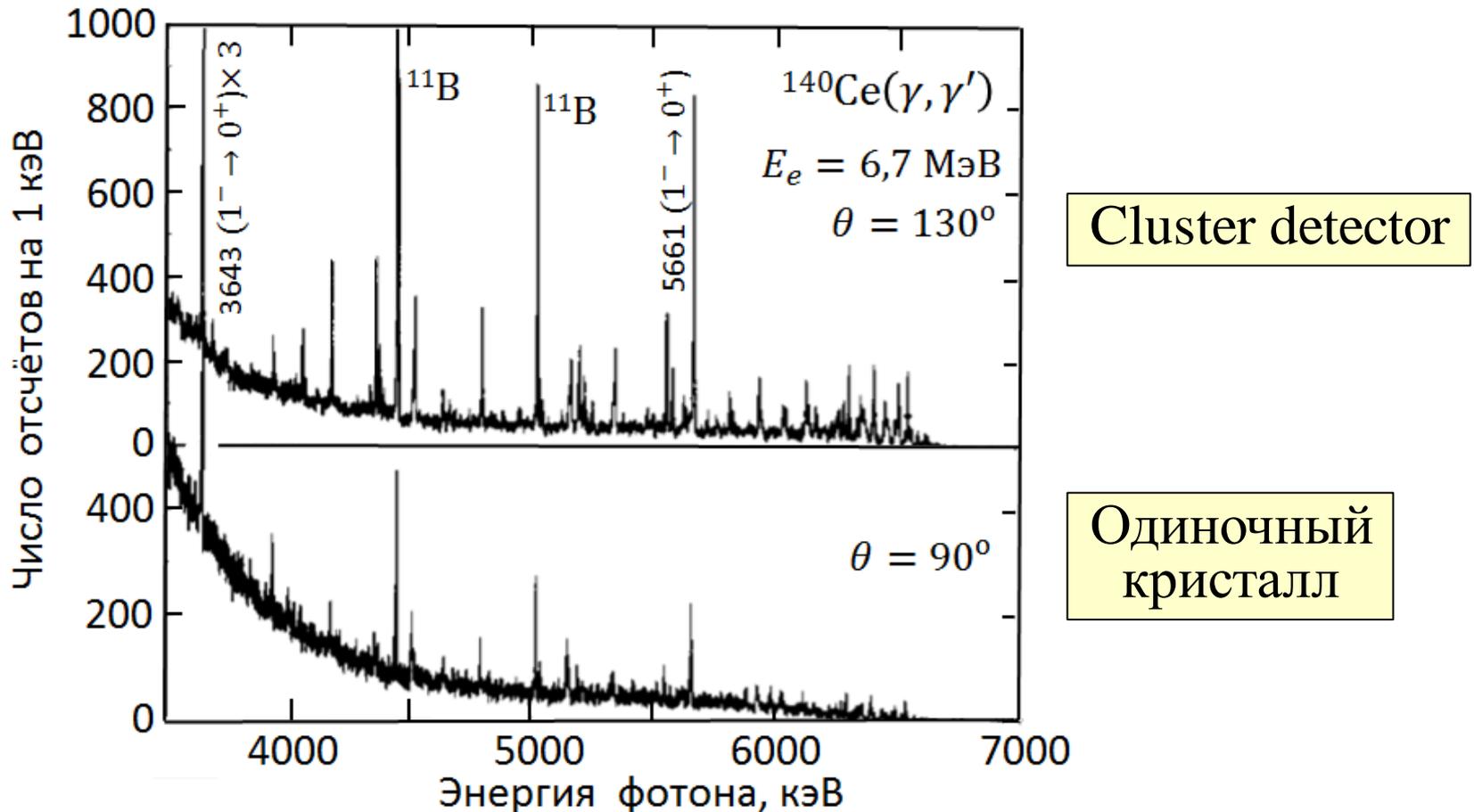


Рисунок демонстрирует возможности Cluster-детектора в сравнении с одним из семи германиевых детекторов, которые составляют Cluster-детектор.

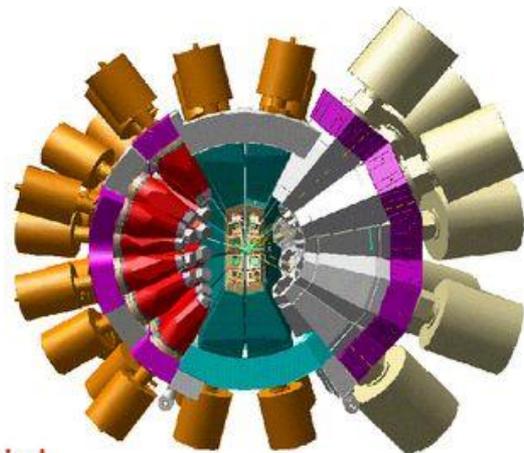
Для сравниваемых детекторов показаны спектры фотонов из реакции $^{140}\text{Ce}(\gamma, \gamma')$ в диапазоне 3-7 МэВ. Эффективность Cluster-детектора в районе 5-6 МэВ приблизительно в 6 раз выше эффективности отдельного германиевого кристалла.

Кроме того, фон при использовании Cluster-детектора заметно меньше и более пологий, особенно при энергиях ниже 4 МэВ.

Линии, принадлежащие ядру ^{11}B , используются для калибровки.

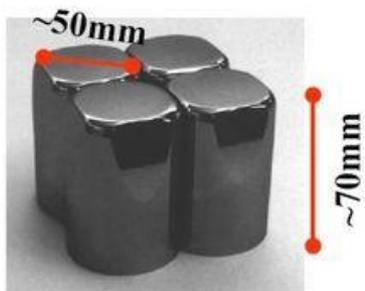


EUROBALL

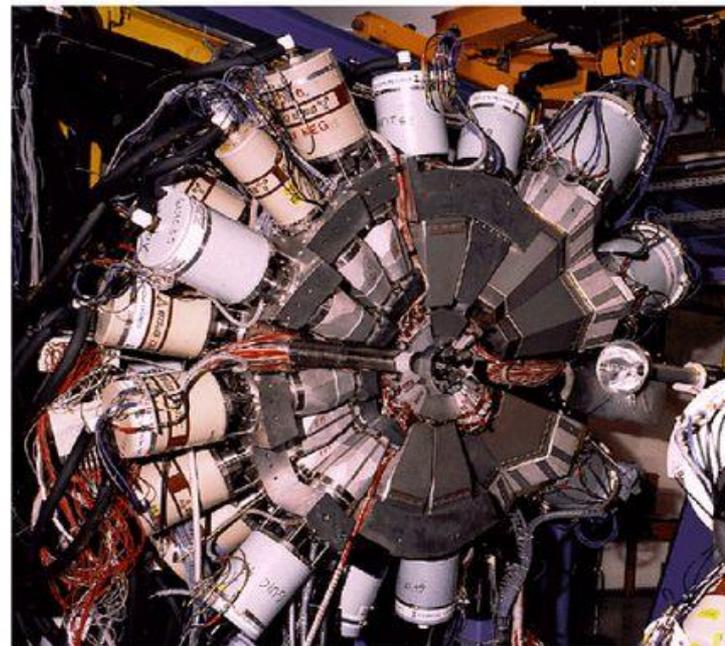
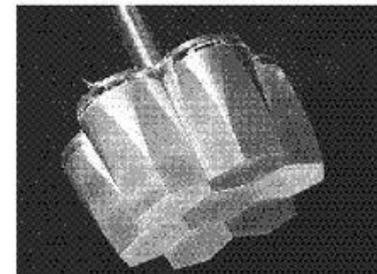


30 coaxial
detectors

26 four-fold
Clover detectors



15 seven-fold
Cluster detectors



239 германиевых детекторов

Ускоритель НИИЯФ МГУ для ЯРФ-экспериментов

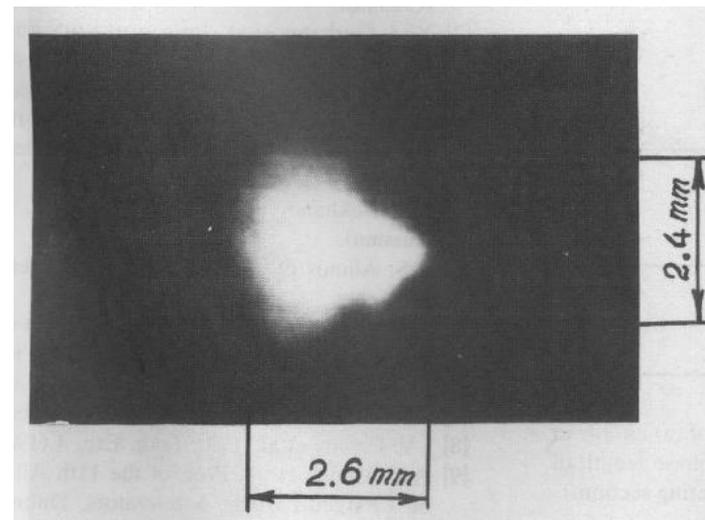
Для ЯРФ-экспериментов в НИИЯФ МГУ использовался линейный ускоритель электронов непрерывного действия с энергией 6,6 МэВ.

Его основные характеристики даны в таблице:

Максимальная энергия электронов	6,6 МэВ
Фактор заполнения рабочего цикла, D	100%
Относительный энергетический разброс	$\pm 3 \cdot 10^{-3}$
Фазовая длина электронных сгустков (банчей)	$6^\circ \pm 2^\circ$
Частота следования банчей	2450 МГц
Максимальный средний ток	1 мА
Нормализованный поперечный эмиттанс	< 5 мм·мрад

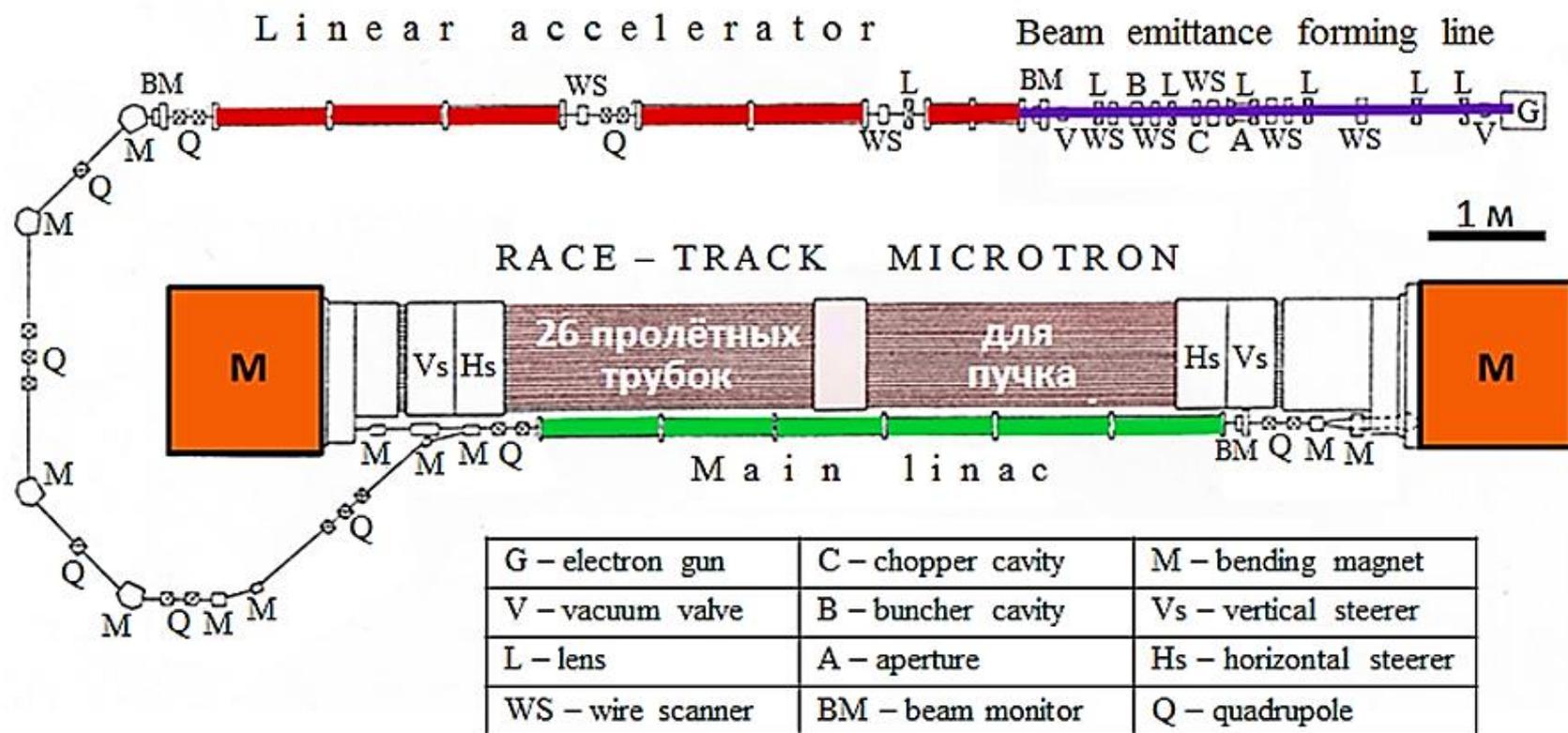
Этот ускоритель должен был исполнять роль инжектора более крупного электронного ускорителя непрерывного действия – разрезного микротрона (Moscow CW RTM) с максимальной энергией 175 МэВ.

Одним из важных для ЯРФ-экспериментов преимуществ описываемого ускорителя-инжектора являлся малый поперечный разброс электронного пучка и отсутствие гало, что позволяло располагать детектирующую установку вблизи оси пучка, увеличивая тем самым скорость набора статистики (см. фотографию электронного пучка)



Проектные параметры Moscow CW RTM

Энергия инжекции	6 МэВ
Энергия главного ускорителя (и прирост за одно прохождение)	6 МэВ
Число проходов	27
Энергия на выходе	24–175 МэВ
Фактор заполнения рабочего цикла, D	100%
Относительный энергетический разброс	10^{-3} – 10^{-4}
Поперечный эмиттанс пучка	0,05 мм·мрад
Максимальный ток пучка	100 мкА
Расстояние между двумя поворотными магнитами	10 м
Вес каждого поворотного магнита	18 т
Длина линейного ускорителя	6,24 м
Число клистронов	12+1
Частота следования банчей	2450 МГц

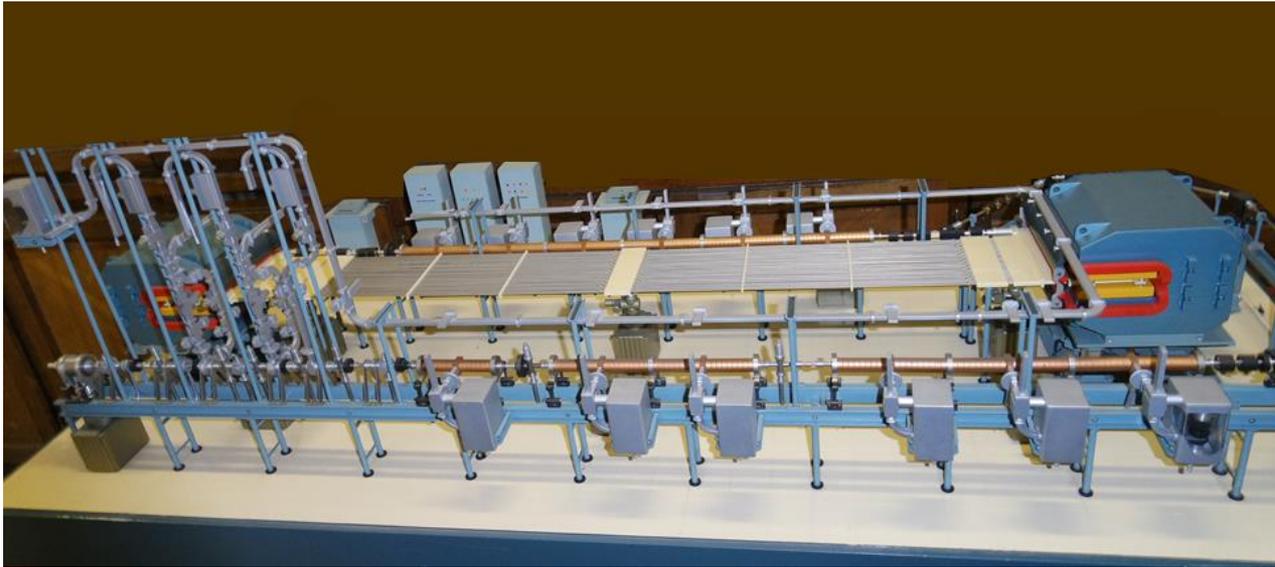


План-схема Moscow CW RTM. Красным выделен ускоритель-инжектор, зелёным – главный ускоритель, фиолетовым – линия формирования эмиттанса пучка, оранжевым – поворотные магниты.

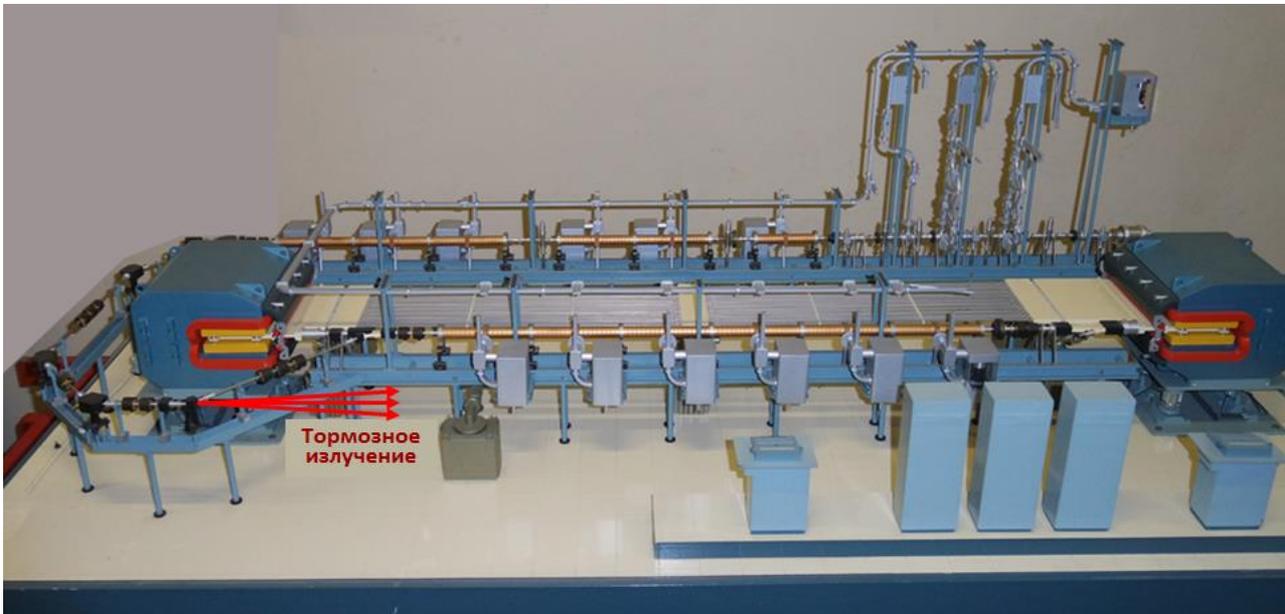
Непрерывный режим ускорения обеспечивается ускорителем-инжектором и главным ускорителем. Пройдя последовательно эти два ускорителя, электроны приобретают энергию $(6 + 6) \text{ МэВ} = 12 \text{ МэВ}$. После первого ускорения в главном ускорителе пучок отражается и проходит главный ускоритель в обратном направлении, достигая в конце его энергии 18 МэВ . Дальнейший подъём энергии осуществляется многократным возвратом пучка в главный ускоритель, что каждый раз увеличивает энергию пучка на 6 МэВ . Этот возврат пучка в главный ускоритель достигается последовательными поворотами на 180° в двух постоянных магнитах. При каждом цикле прироста энергии на 6 МэВ электронный пучок двигается между поворотными магнитами внутри своей пролётной трубки. Осуществив ещё 26 проходов через главный ускоритель, электроны достигают энергии $\approx 175 \text{ МэВ}$.

Ускоритель-инжектор, как и главный ускоритель, являются линейными ускорителями, состоящими из 6-ти одинаковых ускорительных секций каждый. Одна секция обеспечивает прирост энергии в 1 МэВ .

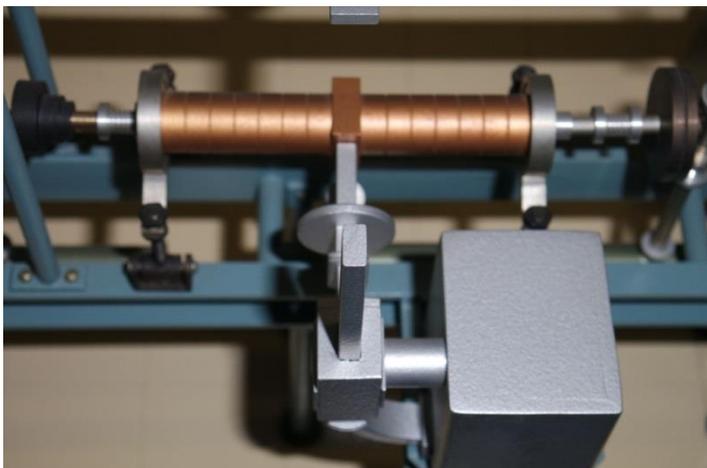
В ускоритель-инжектор электроны поступают с энергией 100 кэВ из линии формирования эмиттанса пучка, где происходит «нарезка» электронного пучка от электронной пушки на отдельные сгустки (банчи), следующие друг за другом с частотой 2450 МГц .



Moscow CW RTM
со стороны
ускорителя-инжектора



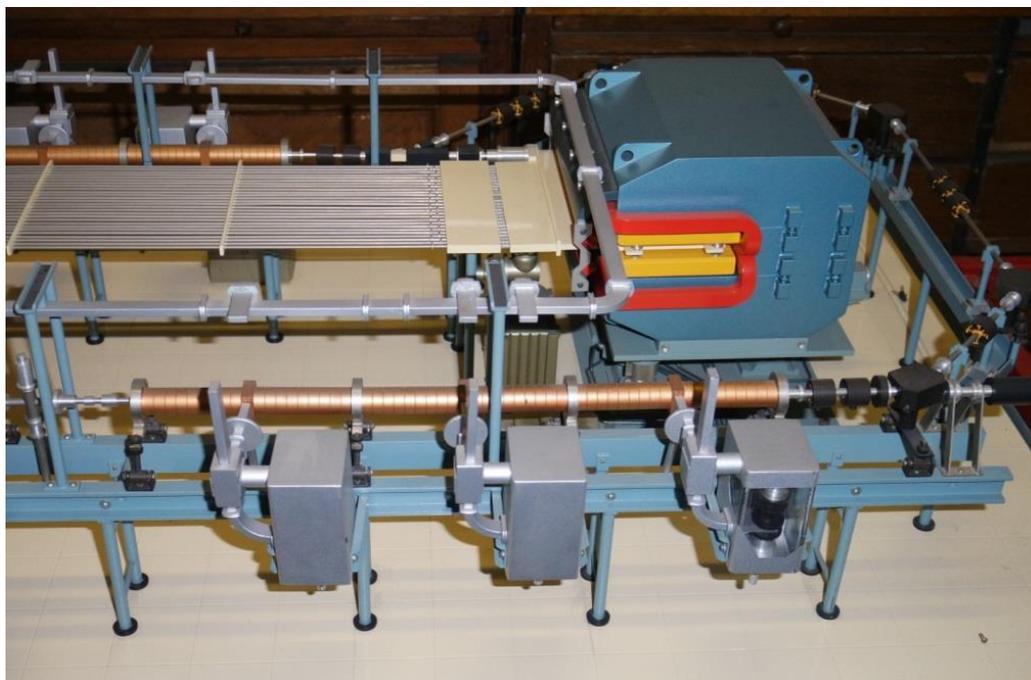
Moscow CW RTM
со стороны
главного ускорителя.
Показано место
формирования
тормозного излучения
для ЯРФ-экспериментов.



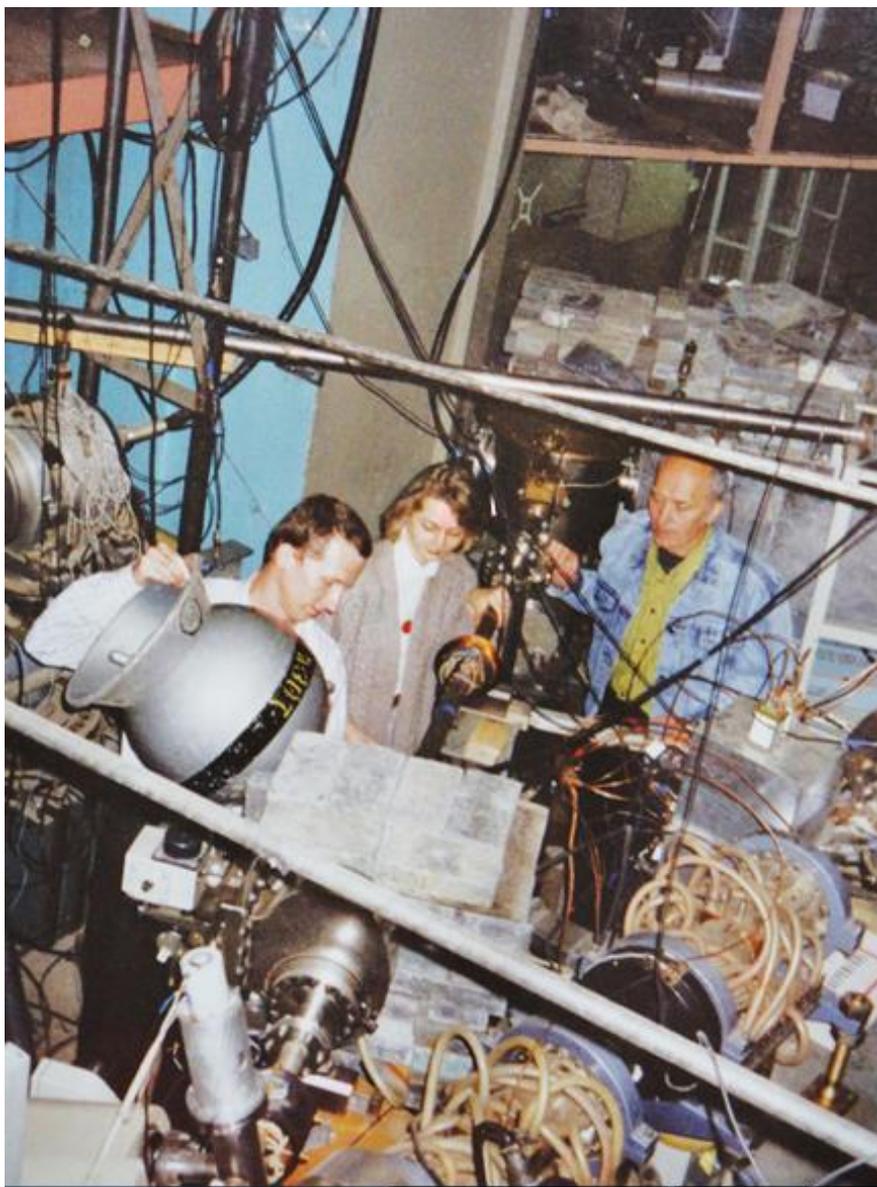
Ускорительная секция



Линия формирования эмиттанса пучка



Три последние ускорительные секции ускорителя-инжектора, участок поворота пучка от ускорителя-инжектора, поворотный магнит и пролётные трубки



Доцент Е.В. Широков,
студентка С. Бородина
и профессор И.М. Капитонов
за подготовкой ЯРФ-эксперимента
на установке
ОЭПВАЯ НИИЯФ МГУ