

Микротрон МТ-25. ЛЯР.





В Лаборатории ядерных реакций в Дубне, первый ускоритель электронов микротрон был введен в эксплуатацию 30 января 1973 года. Он был изготовлен при поддержке Г.Н.Флерова с помощью лаборатории С.П.Капицы. Он имел название микротрон МТ-17, так как максимальная энергия электронов составляла 17 МэВ. В 1980 году микротрон был модернизирован, получил название микротрон МТ-22, максимальная энергия электронов составила 22 МэВ. В 1986 году микротрон претерпел еще одну модернизацию, энергию ускоренных электронов удалось повысить до 25 МэВ, и он соответственно получил название микротрон МТ-25. Основные узлы этого ускорителя эксплуатируются по сей день.



Электроны ускоряются переменным электрическим полем постоянной частоты в однородном и постоянном магнитном поле. В вакуумной камере электроны движутся по окружностям, называемым орбитами, и имеют общую точку касания – резонатор. Источником электронов является катод, который состоит из монокристалла Лантан Бор 6 и танталовой оправке. Эмиссия электронов происходит непосредственно под действием электрического поля высокой частоты и управляется температурой катода. В качестве источника сверхвысокочастотных колебаний использованы импульсные магнетроны десяти сантиметрового диапазона. Температура катода регулируется специальным источником питания.



Микротрон МТ-25 является установкой ЛЯР. На его пучках реализуется научная программа Лаборатории по изучению фотоядерных реакций, гамма/нейтронно-активационному анализу, облучению биологических образцов, отработке методик и технологий наработки изотопов/трассеров, дефектоскопия, испытаниям на радиационную стойкость и т.д.

Основные параметры ускорителя.

Наименование	Значение
Диаметр магнита (наружный)	1520 мм.
Диаметр полюсов	900 мм.
Расстояние между полюсами	100 мм.
Вес магнита (с обмотками)	2400 кг.
Количество витков в обмотках	44 (2x22)
Ток в обмотке магнита	250 А
Мощность питания магнита	3 kW
Максимально число орбит	25
Максимальная энергия	23 MeV
Диапазон изменения энергии (выведенного пучка)	4-23 MeV
Диапазон изменения энергии (внутреннего пучка)	2-23 MeV
Импульсный ток ускоренных электронов	10 mA (при 380Hz)
Средний ток ускоренных электронов	20μA
Потребляемая мощность	20 kW
Частота ускорения	≈ 2,7 ГГц
Диапазон изменения частоты импульсов	50-400 Hz.

Основные системы и подсистемы ускорителя



Система СВЧ и формирование пучка.

В качестве источника сверхвысокочастотных колебаний в микротроне используется импульсный магнетрон МИ-456 АМ с пакетированной магнитной системой. Длина волны 10 см., фиксированная частота составляет 2794 МГц, выходная мощность, передаваемая в резонатор 3570 Вт, длительность импульса 4 микросекунды. Модулятором служит импульсный генератор «Пирит» ТИРА 2.081.019, согласованный с импульсным трансформатором ТИРА 4 720 019, который является источником питания магнетрона. Накал магнетрона осуществляется источником постоянного тока. Мощность магнетрона изменяется в зависимости от подаваемого на него импульса напряжения. Для передачи мощности в резонатор, магнетрон согласуется с резонатором волноводом. Резонатор микротрона, является одним из самых важных элементов ускорителя : В переменном электромагнитном поле резонатора происходит эмиссия электронов, их захват, ускорение и фокусировка. Он изготовлен из бескислородной меди, имеет сборную конструкцию и водяное охлаждение. На стенке резонатора в специальном отверстии расположен катод . В рабочем режиме катод разогревается примерно до 1800 градусов Цельсия и, благодаря эффекту Шоттки, происходит эмиссия электронов.

Задающий генератор



↓ 50-400 Hz

Модулятор тира «Пирит-1 PPS-11»



До 10 кВ импульсного тока

Источника питания накала магнетрона.



Магнетрон МИ-456



До 50 кВ импульсного тока

Источника питания накала катода резонатора.



Резонаторы 1го и 2го типа.



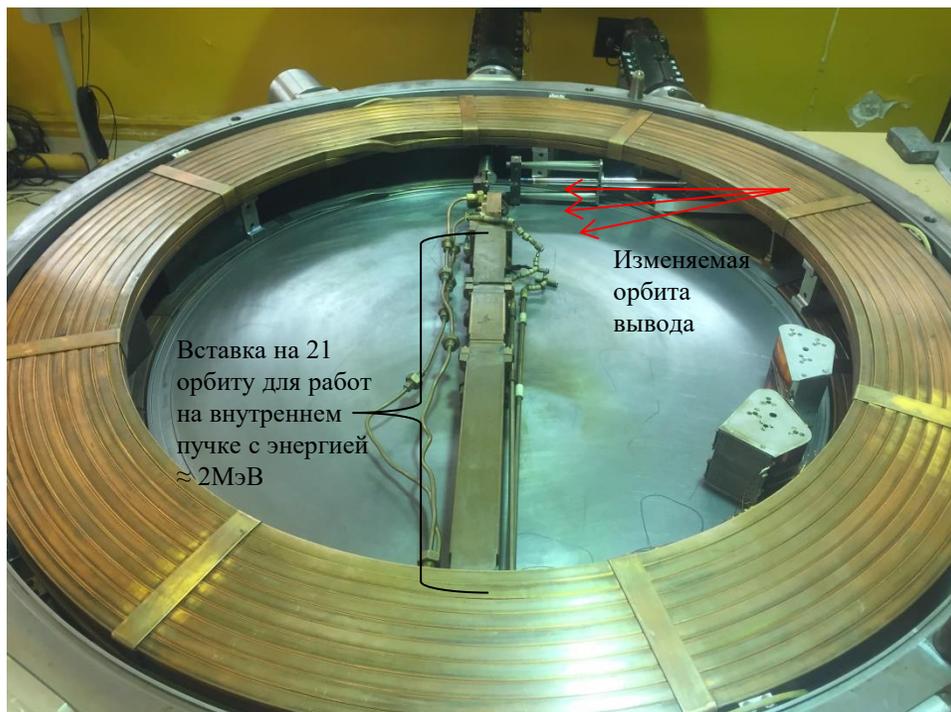
Волновод, ферритовый вентиль, фазавращатель, вакуумное окно



Система основного магнита и вывод пучка.

Магнитное поле создаётся электромагнитом. На данном ускорителе верхний и нижний полюс магнита является так же вакуумной камерой. Внутри камеры находятся две медные катушки, которые создают магнитное поле. Под действием магнитного поля, ускоренные электроны движутся по орбитам. При прохождении электрона через общую точку - резонатор, он получает прирост энергии на каждой орбите от 0,6 до 0,9 МэВ (в зависимости от типа резонатора). После того, как электрон приобрёл нужную энергию, он выводится из камеры ускорителя магнитным каналом. Изменение энергии электронов на данном микротроне происходит, путём установки волноводной вставки перед резонатором в камере ускорителя. Волноводная вставка позволяет уменьшить число орбит, что способствует уменьшению энергии электронов. Так же энергию электронов можно корректировать, изменяя значение магнитного поля и регулируя положение выводного канала.

Катушки основного магнита и подвижный выводной канал

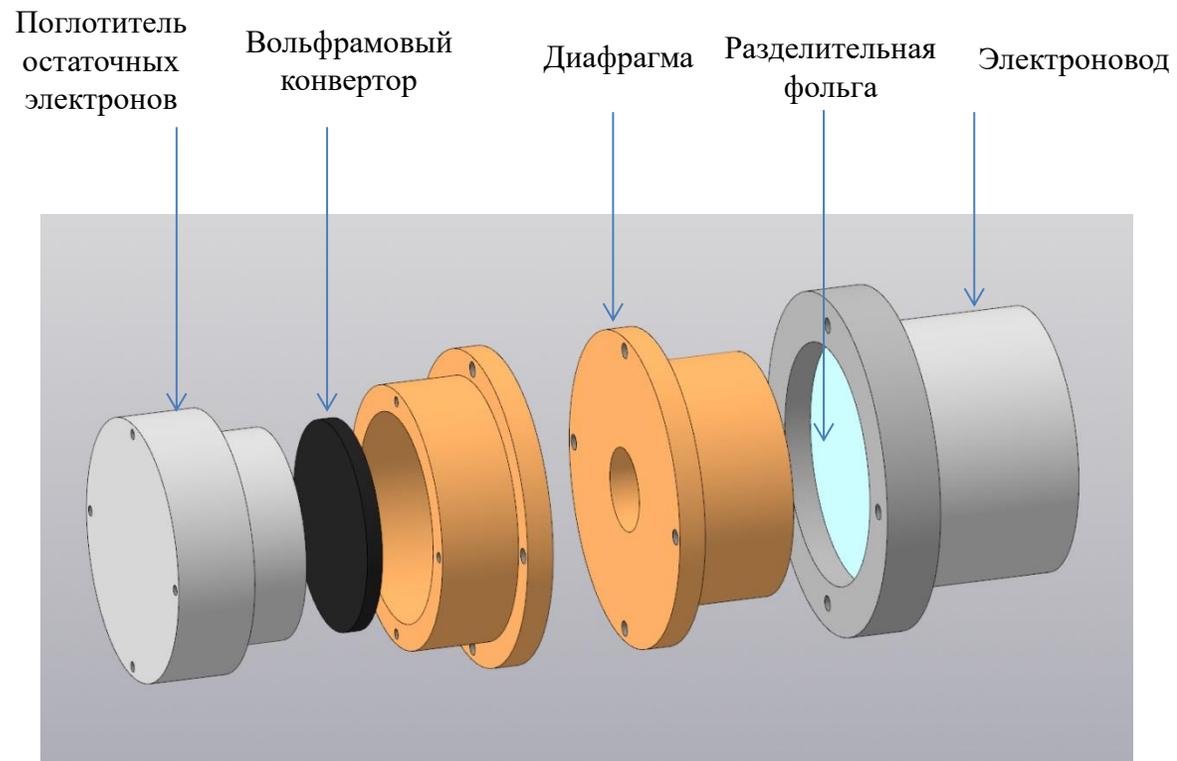


Поворотный магнит, электроновод, квадрупольные линзы, корректирующие магниты



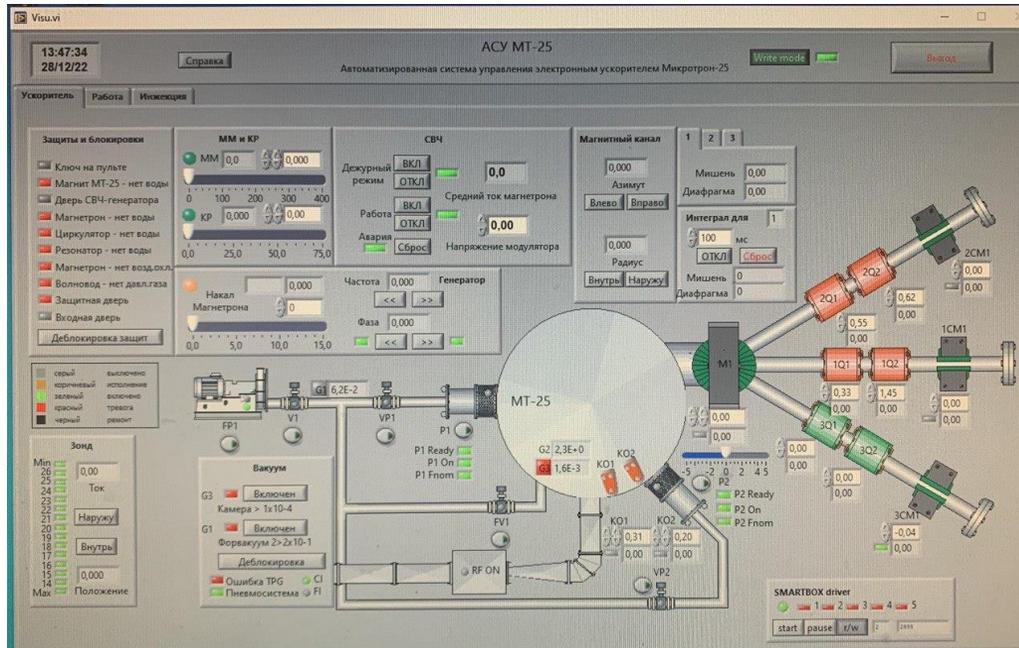
Мишенный узел

Мишенный узел имеет сборную конструкцию. Элементы мишенного узла изолированы друг от друга, для возможности контроля тока пучка.



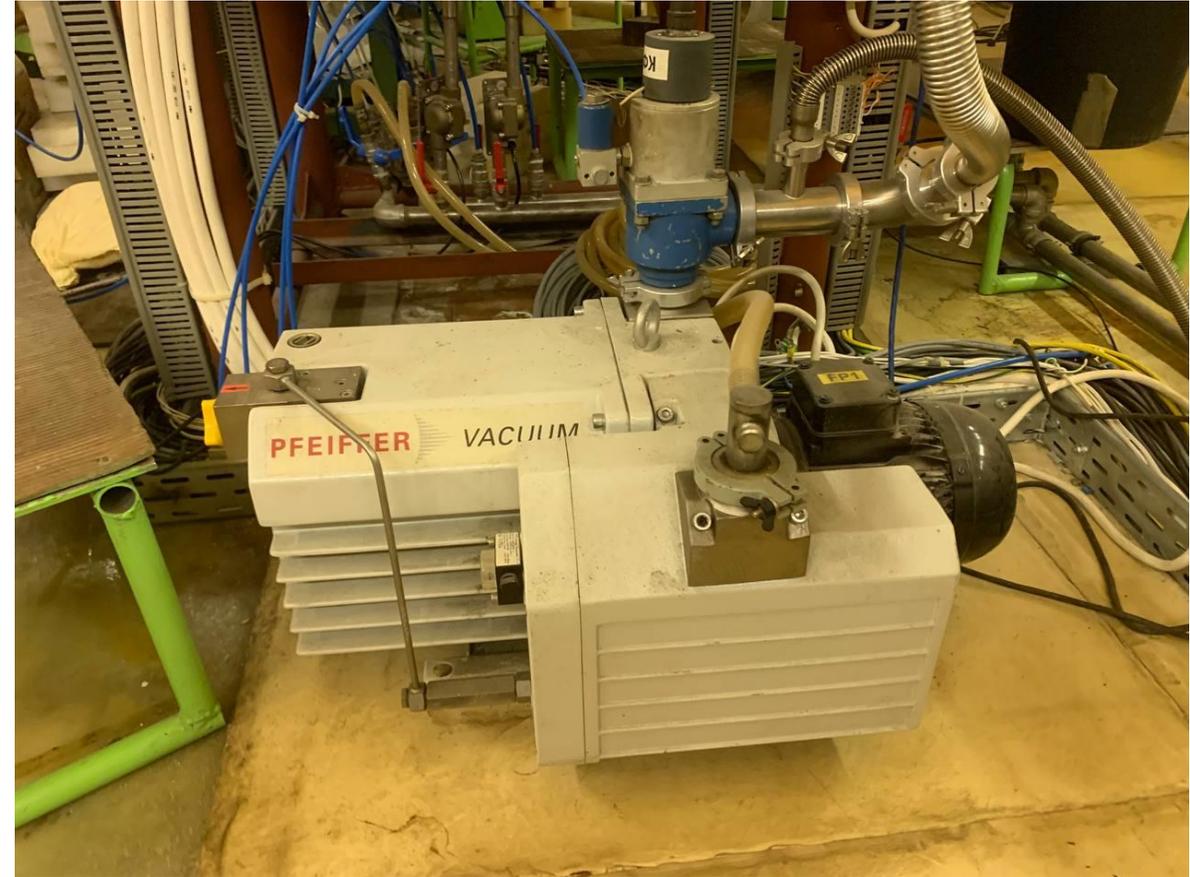
Автоматизированная система управления ускорителем.

Управление всеми элементами ускорителя осуществляется через специально разработанную в нашей лаборатории программу, написанную на LabVIEW. Коммутация всех узлов и подсистем ускорителя с управляющим компьютером осуществляется через smartbox.

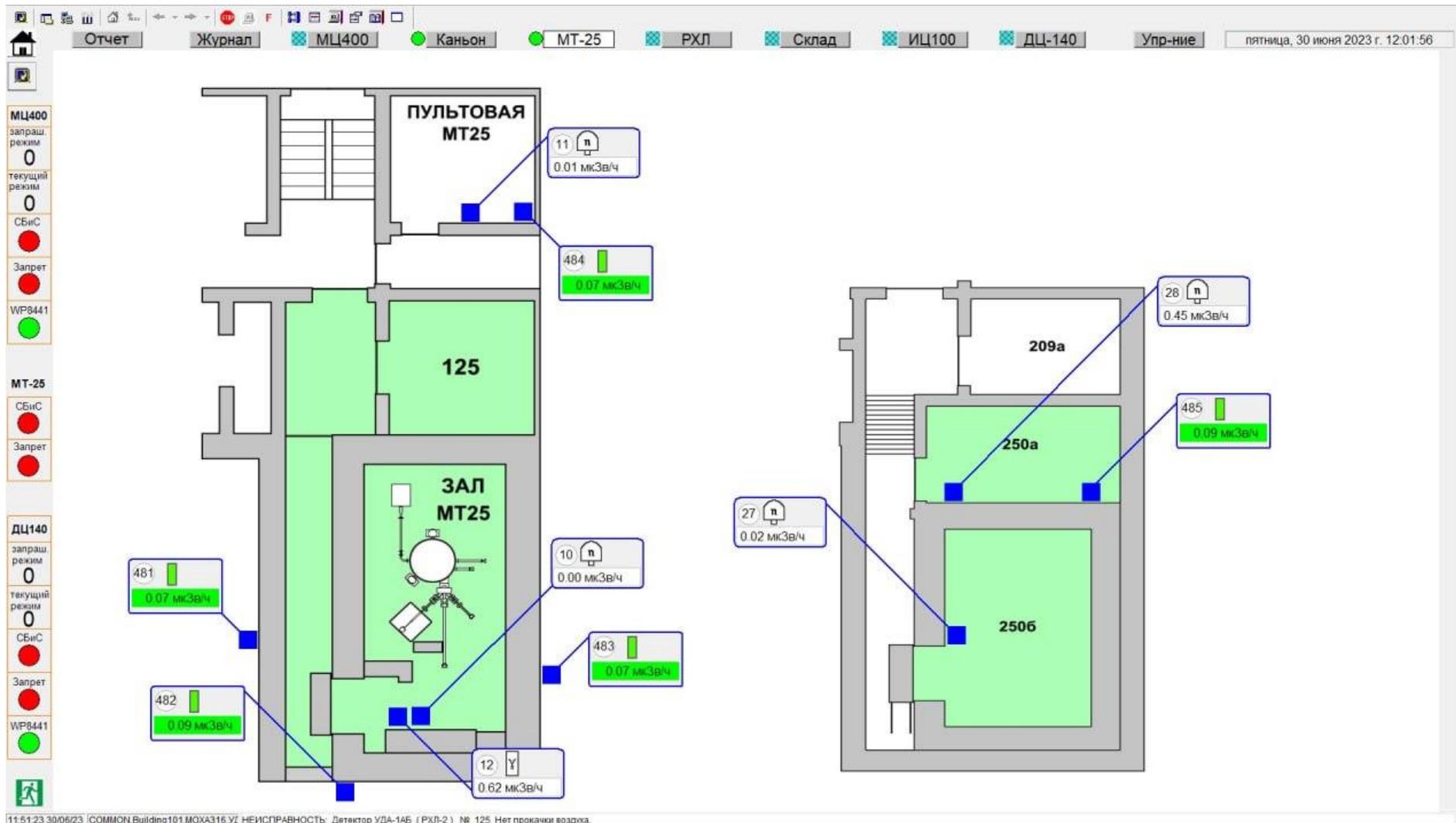


Вакуумная система

Вакуумная система представляет собой два турбомолекулярных насоса и один форвакуумный. Рабочий вакуум на этом ускорителе $2 \cdot 10^{-6}$ Торр. На данный момент имеется проект на модернизацию вакуумной системы микротрона. В проекте заложены 4 турбомолекулярных и 2 форвакуумных насоса для улучшения качества вакуума и уменьшения времени откачки ускорителя.



Автоматизированная система радиационного контроля



«Электрика» ускорителя.



Ускоритель имеет современную элементную базу.
В качестве источников питания всех систем ускорителя,
используются источники delta elektronika с возможностью
удалённого управления и мониторинга.



Облучение живых биологических образцов. Молекулярные механизмы экстремальной радиорезистентности (тихоходок) и их применения.



Облучения проводились на третьем канале МТ-25 тормозным излучением, появляющемся в результате попадания ускоренного электрона в мишень (вольфрамовый конвертор).

Образцы устанавливались в специально подготовленный штатив на расстоянии 140 мм. от мишенного узла (для большей равномерности).

$E_{e^-} = 10\text{МэВ}$.

$N \approx 300\text{ mGr/s}$. (образцы выживали)

Набранная доза варьировалась в зависимости от задачи от 100 до 1000 Gr



Измерения потока и подсчет поглощённой дозы производились ионизационной камерой «SNC600c» и программным обеспечением от производителя.

[Статья.](#)

Облучение образцов семян растений с целью оценки радиационного стресса



Энергия ускоренных электронов - 5 МэВ.
Средний ток пучка электронов на мишени - 2мкА.
Мощность дозы (по ионизационной камере) - 10-11 мГр/сек.(≈ 38 Гр/час)



Измерения потока и подсчет поглощённой дозы производились также ионизационной камерой «SNC600с» и программным обеспечением от производителя.

Облучение семян амаранта.

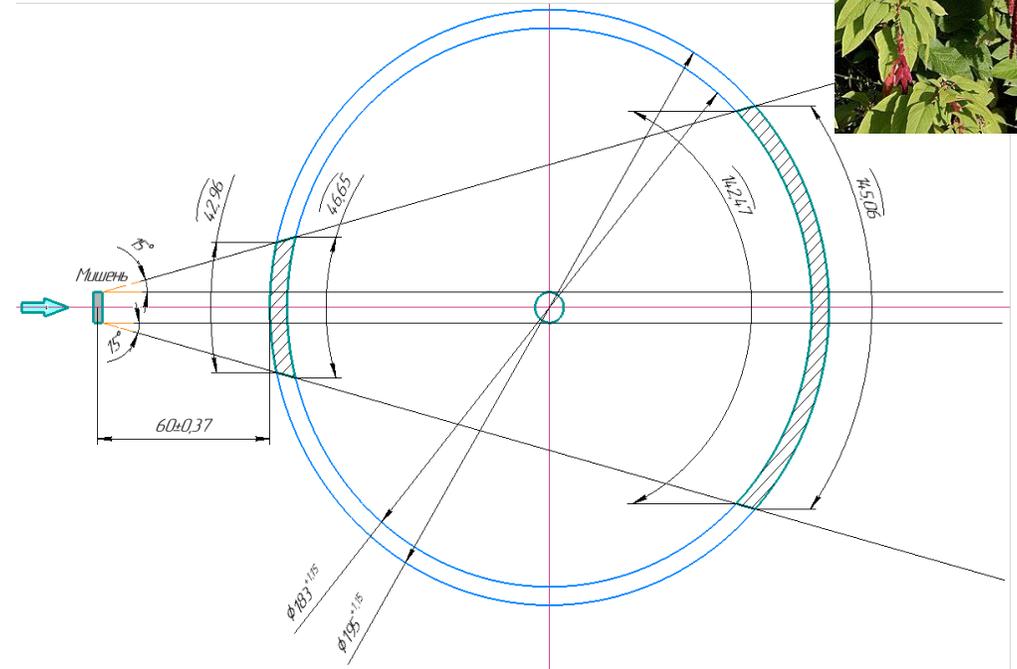


Пробное(оценочное) облучения семян амаранта тормозным излучением с энергией ускоренных электронов 5МэВ. Эксперимент проводился на третьем канале МТ-25.



Кювета с образцами установлена на вращающуюся подставку и выставлена по вертикальной и горизонтальной оси пучка.

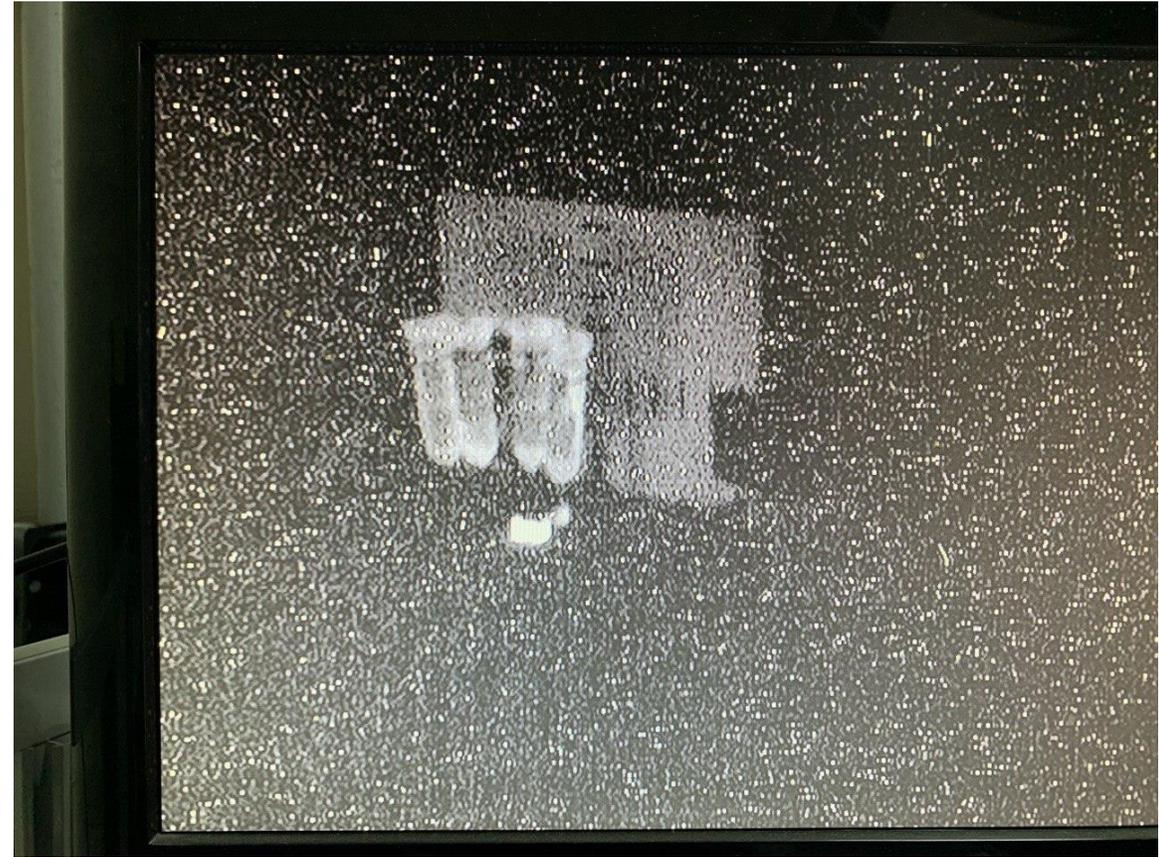
Геометрия эксперимента.



Измерения потока и подсчет поглощённой дозы производились так же ионизационной камерой «SNC600с» и программным обеспечением от производителя.

Облучение электронами образцов фосфатов для изучения их термического расширения.

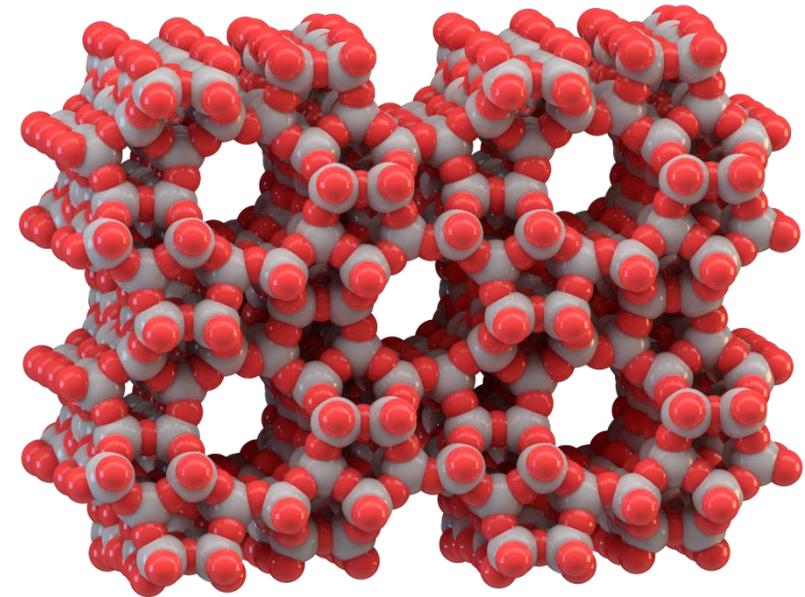
Облучение проводилось электронами с энергией $E=4.11$ МэВ. и средним током пучка $I_e=5\mu\text{A}$. Образцы облучались по времени (1 час, 2 часа и 7 часов). Расчет поглощённой дозы производился заказником.



В качестве контроля пучка, использовался пробник, установленный посередине за облучаемыми образцами. Дополнительный контроль пучка производился по люминофору

Модификация и исследование структуры и свойств цеолита ZSM-5 электронным пучком.

- Изучение свойств модифицированного электронным пучком цеолита ZSM-5.
- Изучение границ радиационной стойкости структурно-нестабилизированного ZSM-5 по отношению к электронному облучению.
- Разработка методики для равномерного по поверхности облучения порошковых образцов ZSM-5 электронами;
- Разработка, подготовка и настройка экспериментального оборудования для проведения экспериментальных работ на микротроне МТ-25;
- Проведение облучения образцов ZSM-5, первичная постэкспериментальная обработка данных;
- Исследование каталитических свойств полученных образцов.



Цеолиты — каркасные алюмосиликаты щелочных и щелочноземельных металлов, имеющие пористое внутреннее строение, кристаллическую структуру.

Схема равномерного облучения цеолита ZSM-5 электронным пучком.

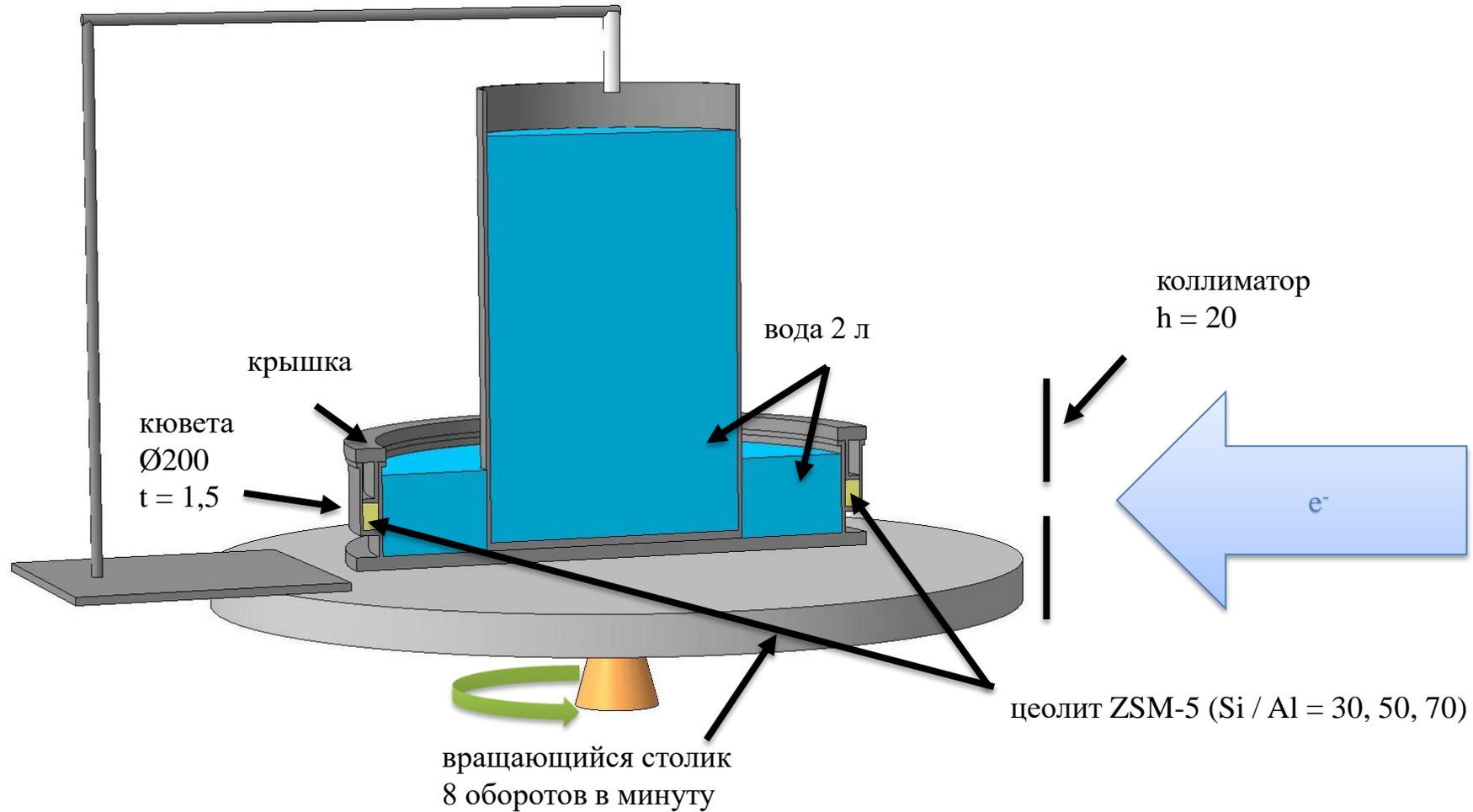


Схема калориметрического измерения флюенса





1. Измерение нагрева во время облучения;
2. Измерение охлаждения после облучения, определение мощности охлаждения dQ/dt ;
3. Измерение количества разложившейся под действием пучка воды в кювете;
4. Пост экспериментальная обработка данных.

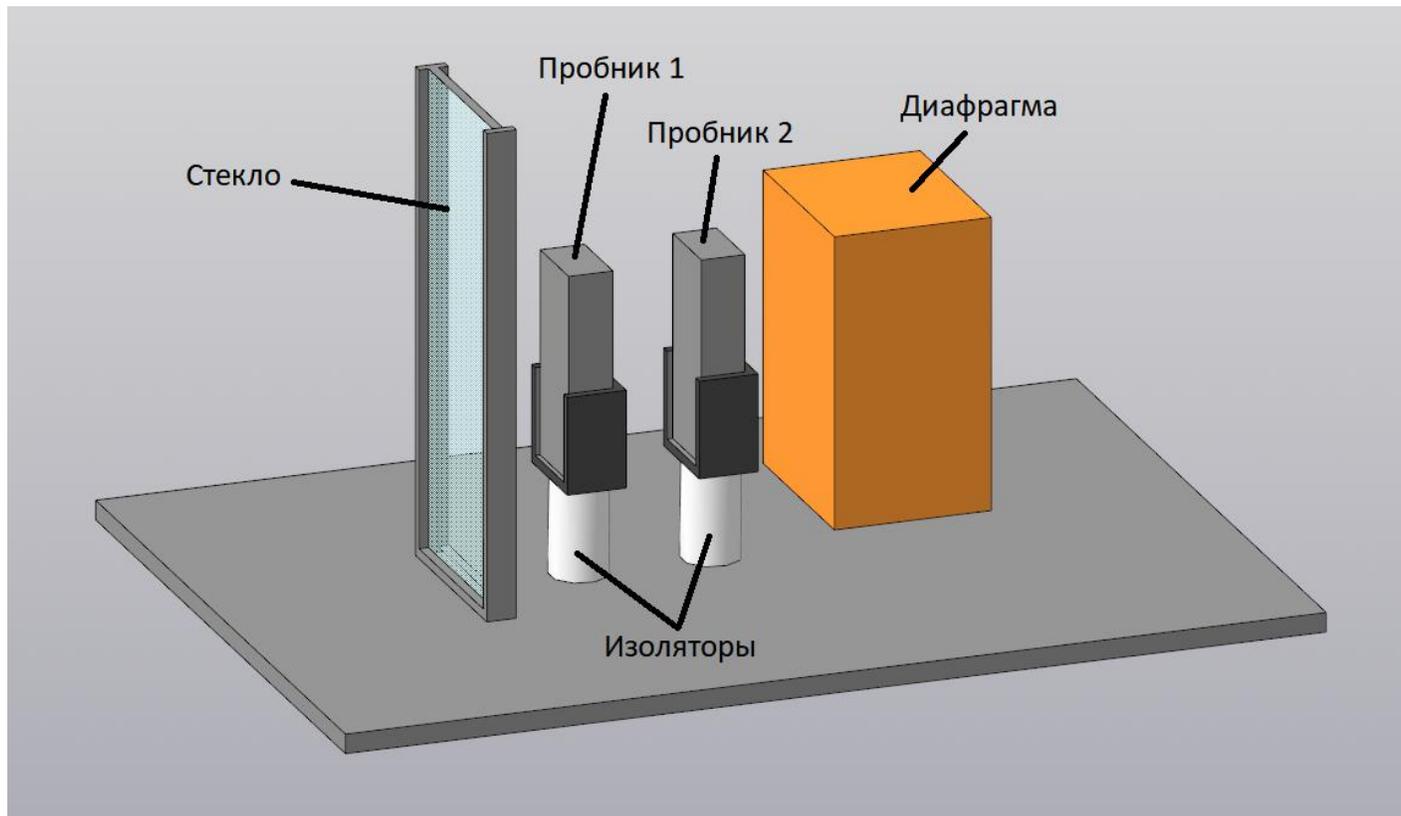
Параметры облучения:

- энергия 10 – 12 МэВ;
- ток $\sim 10 \mu\text{A}$;
- флюенс $10^{15} \div 10^{17} \text{ см}^{-2}$

Облучение образцов бетона с различными примесями электронами, с целью определения радиационной стойкости.

Образца бетона (кампаунды) облучались на Зем канале ускорителя.
Энергия ускоренных электронов составляла $\approx 12\text{МэВ}$.

Схема стенда для облучения образцов.

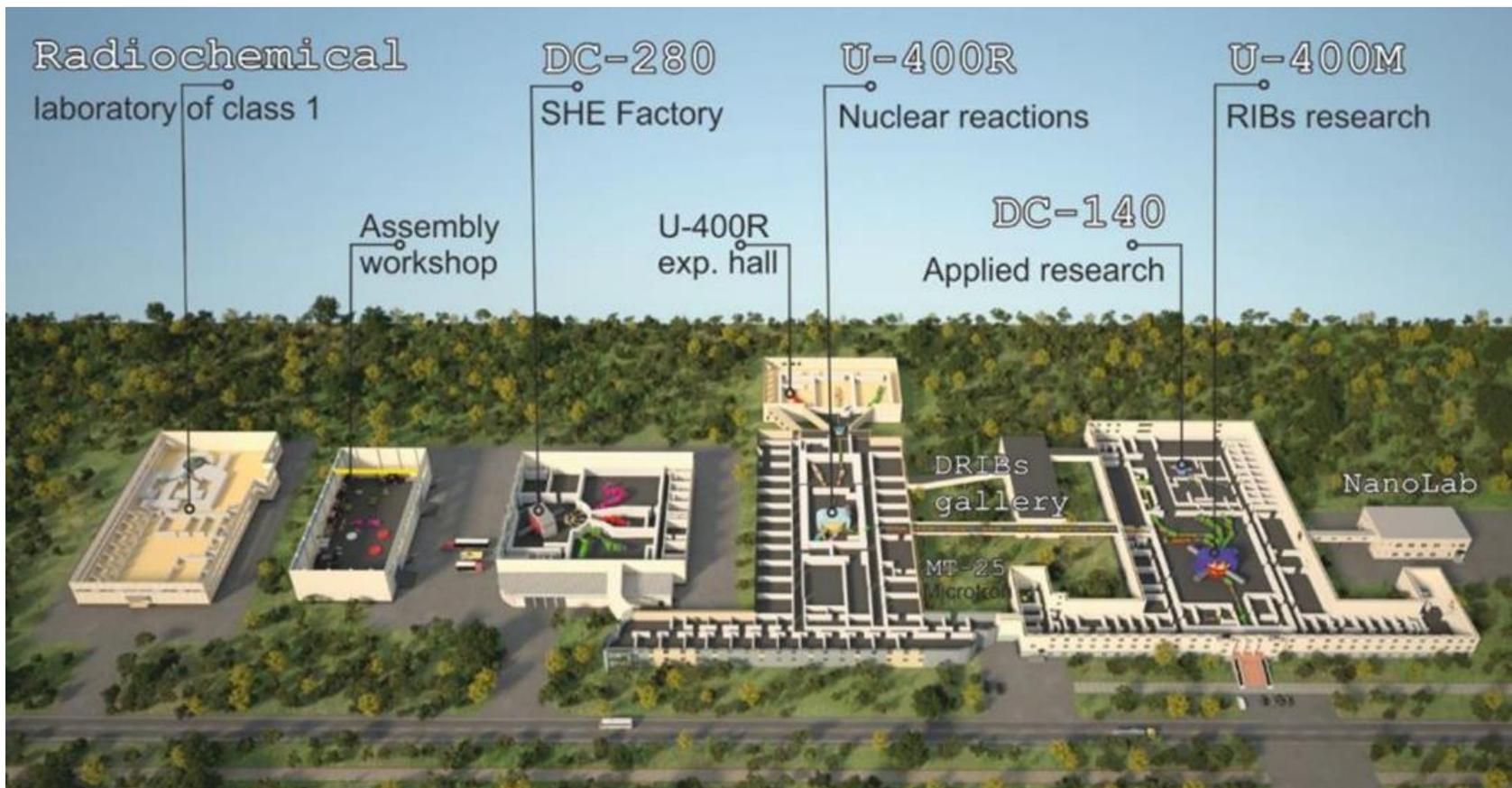


На место пробника 1 устанавливалась сначала металлическая болванка, затем облучаемый образец. Пробником 2 являлась так же металлическая болванка идентичная пробнику 1. Диафрагма - металлическая болванка размерами больше диаметра пучка.

Контроль интенсивности пучка вели по значению показаний пробника 2 и диафрагмы + с помощью камеры отслеживали положение пучка на стекле. Для равномерности облучения образца было применено сканирование пучка по вертикали.



Средний ток пучка на пробнике 1 = 10мкА.



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

П Р И К А З

26.05.2021

№ 417

г. Дубна

Об организации работ по созданию проекта инновационного исследовательского центра ОИЯИ

В связи с одобрением КПП ОИЯИ деятельности дирекции по формированию концепции Инновационного исследовательского центра ОИЯИ в области ядерных технологий (далее — Центра) и необходимостью организации работ по созданию проекта Центра в рамках утвержденного Стратегического плана долгосрочного развития ОИЯИ до 2030 года и далее

- приказ по ОИЯИ об организации работ по созданию проекта инновационного исследовательского центра в области ядерных технологий от 26.05.2021, п.1 научно-исследовательский комплекс в ЛЯР для материаловедения и НИОКР в области технологий для ядерной медицины на базе создаваемых циклических ускорителей и проектируемой РХЛ 1 класса;

Задачи проекта

- 1) Разработка новых технологических процессов получения радионуклидов для ядерной медицины в фотоядерных реакциях на промышленном ускорителе электронов и расширение спектра исследований в области технологий для ядерной медицины.
- 2) Изготовление и регенерация высокорadioактивных ускорительных мишеней, в том числе из обогащенных изотопов Pu, Am, Cm, Cf и Bk, необходимых для синтеза новых сверхтяжелых элементов на Фабрике СТЭ.
- 3) Ядерно-физические исследования фотоделения тяжелых ядер и получение радиоактивных пучков.
- 4) Исследования окружающей среды и анализ радионуклидов в природных системах используя методы ядерной физики.

Цели и задачи физических исследований:

1. Получение осколков деления для последующего ускорения;
2. Ядерная спектроскопия осколков деления;
3. Прецизионное определение масс осколков деления;
4. Лазерная спектроскопия осколков деления;
5. Изготовление и регенерация мишеней;
6. Получение радиоактивных изотопов для медицины в реакциях (γ, x);
7. Изучение реакций полимеризации, деполимеризации;
8. Изучение воздействия γ -излучения на биологические материалы.

Получение экзотических ядер ${}^6\text{He}$ в реакции ${}^7\text{Li}(\gamma; p)$

В работе [1] была изучена возможность получения экзотических ядер ${}^6\text{He}$ в реакции ${}^7\text{Li}(\gamma; p)$ с использованием тормозных гамма квантов от электронного пучка 22 МэВ микротрона МТ-25, ЛЯР ОИЯИ. Этот новый метод оказался весьма эффективным инструментом для производства ионов ${}^6\text{He}$. Максимальный выход атомов ${}^6\text{He}$ был получен при облучении мелкодисперсной соли LiF, загруженной в цилиндрический, металлический сосуд и нагретой до температуры 800°C. Выход ${}^6\text{He}$ составил $(1.7 \pm 0.2) \cdot 10^7$ ат./с на 1мкА тока электронного пучка. Использование ЭЦР ионного источника с эффективностью около 8% позволили получить пучок ионов ${}^6\text{He}$ с интенсивностью $(1.4 \pm 0.2) \cdot 10^6$ ионов/с на один 1мкА тока электронного пучка. В эксперименте было определено, что изменение выхода ${}^6\text{He}$ составляет около 20% при изменении энергии пучка электронов на 1 МэВ, что соответствует коэффициенту увеличения выхода ${}^6\text{He}$ в 3.6 раз для энергии электронов 40 МэВ.

Применение этого подхода для получения монохроматического пучка ускоренных ионов ${}^6\text{He}$ сделало бы возможным большое количество экспериментов по исследованию структуры этого ядра и механизмов ядерных реакций с его участием. Этот метод получения ядер ${}^6\text{He}$ является одним из самых оптимальных и недорогих по сравнению с другими методами с использованием ускоренных тяжелых ионов.

Production of ${}^6\text{He}$ by bremsstrahlung of electron beam. NIM B. 2014. 336, pp.74-80.

$Y_{\text{He6}} = (4,5 \pm 0,5) 10^7$ nuclei/s - в 2018 году – оптимизация производящей мишени

Some of the isotopes used in medicine produced by cyclotrons can also be obtained through photonuclear reactions. A basic idea that we could consider is to propose experiments in which the possibility of producing medical isotopes with an electron accelerator would be explored. Most of the isotopes that we would analyze are also obtained by reactions where several neutrons are ejected from the nucleus. Cross sections for these reactions are of the order of tens of millibars. By protons, the same isotopes can be produced in reactions whose cross-section is several hundred millibars, but much higher photon fluxes can be obtained, so that the yields of the reactions can be equal. If one owns an electron accelerator (40 MeV and 1 mA), the yields there would be much higher than the yields of reactions obtained using protons.

В ноябре '22 и апреле '23 гг. были проведены эксперименты по исследованию фотоядерных реакций с использованием электронных пучков ЛУЭ-75 с энергиями 40, 50, 60 МэВ.

Production of ^{117m}Sn and ^{119m}Sn by photonuclear reactions on natural antimony

March 2024 [Applied Radiation and Isotopes](#) 208(1988):111280 DOI: [10.1016/j.apradiso.2024.111280](#)

Natural antimony targets were irradiated in a 60 MeV bremsstrahlung beam and gamma spectrometric measurements were performed. The goal was to establish the yield of ^{117m}Sn , a radionuclide with great potential for application in medicine. Considering that ^{117m}Sn is predominantly produced through a photonuclear reaction in which a charged particle is emitted ($^{121}\text{Sb}(\gamma, p3n)$), the yield of this tin isotope is much lower than the yields of several antimony isotopes produced in (γ, xn) reactions. It has been estimated that photonuclear reactions on natural antimony could produce ^{117m}Sn activities needed for therapeutic applications, with accelerators having electron currents of the order of mA. For the used bremsstrahlung energy of 60 MeV, it was estimated how much ^{119m}Sn activity can be expected when exposing the antimony target.

Search for the evidence of $^{209}\text{Bi}(\gamma, p5n)^{203}\text{Pb}$ reaction in 60 MeV bremsstrahlung beams

July 2023 [The European Physical Journal A](#) 59(7) DOI: [10.1140/epja/s10050-023-01088-3](#)

Abstract

Samples made from natural bismuth were exposed in 60 MeV bremsstrahlung beam. A simple model which can determine the share of two ways of forming ^{203}Pb : by the decay of ^{203}Bi , formed in $^{209}\text{Bi}(\gamma, 6n)^{203}\text{Bi}$ reaction and by $^{209}\text{Bi}(\gamma, p5n)^{203}\text{Pb}$ reaction is described in this paper. The method employs the ratio of ^{203}Pb and ^{203}Bi nuclei numbers and activities at the end of the exposure as the input value. This ratio was estimated from gamma spectra collected after irradiation of natural Bi sample. It was found that about 5% of the ^{203}Pb activity comes from the $(\gamma, p5n)$ reaction. Obtained result is compared with TALYS based estimation.

1. ¹⁶⁵Er

Erbium-165 decays by EC without any accompanying gamma radiation, hence it is an ideal candidate for Auger electron therapy

Tm164 2.0 m 1+ *	Tm165 30.06 h 1/2+	Tm166 7.70 h 2+	Tm167 9.25 d 1/2+	Tm168 93.1 d 3(+)	Tm169 1/2+
EC	EC	EC	EC	EC,β-	100
Er163 75.0 m 5/2-	Er164 0+	Er165 10.36 h 5/2-	Er166 0+	Er167 7/2+ *	Er168 0+
EC	1.61	EC	33.6	22.95	26.8

In addition, it is an ideal isotope for production via photonuclear reactions. In the reaction ¹⁶⁹Tm(γ,n)¹⁶⁵Tm, ¹⁶⁵Tm is created, which decays into ¹⁶⁵Er, which can be separated chemically. Apart from ¹⁶⁵Tm, several other Tm isotopes are created, but they all decay into stable Er isotopes. In this way, only one active Er isotope is obtained, without significant presence of other isotopes. ¹⁶⁵Tm lives three times longer than ¹⁶⁵Er, so it can be used as a generator for several days.

1. ⁵²Mn

Manganese-52g is a positron emitter with imaging applications in the development of longer lived targeted imaging agents and dual modality PET-MRI agents

Fe50 150 ms 0+	Fe51 305 ms (5/2-)	Fe52 8.275 h 0+	Fe53 8.51 m 7/2- *	Fe54 0+	Fe55 2.73 y 3/2-	Fe56 0+
ECp	EC	EC	EC	5.8	EC	91.72
Mn49 382 ms 5/2-	Mn50 283.88 ms 0+	Mn51 46.2 m 5/2-	Mn52 5.591 d 6+	Mn53 3.74E+6 y 7/2-	Mn54 312.3 d 3+	Mn55 5/2-
EC	EC	EC	EC	EC	EC,β-	100

Several short-lived isotopes are obtained from Fe by (γ,n) photonuclear reactions. Of the obtained Mn isotopes, when waiting for ⁵¹Mn to decay, only ⁵²Mn remains, while the activity of ⁵³Mn will be very low due to its long half-life. It remains to be verified what the activity of ⁵⁴Mn would be that would be obtained in the (γ,pn) reaction.

There are several other medical isotopes that can be produced by photonuclear reactions, but it is not so simple. For example, ⁵⁵Co can be obtained from the decay of ⁵⁵Ni, but there are also a couple of Co isotopes whose production can be minimized by timing irradiation and extraction.

Ni55 212.1 ms 7/2-	Ni56 6.077 d 0+	Ni57 35.60 h 3/2-	Ni58 0+	Ni59 7.6E+4 y 3/2-	Ni60 0+
EC	EC	EC	68.077	EC	26.223
Co54 193.23 ms 0+	Co55 17.53 h 7/2-	Co56 77.27 d 4+	Co57 271.79 d 7/2-	Co58 70.82 d 2+	Co59 7/2-
EC	EC	EC	EC	EC	100

1. ⁶⁶Ga, ⁶⁷Ga and ⁶⁸Ga

There are several cyclotron produced isotopes of gallium which have applications in PET (i.e. ⁶⁶Ga and ⁶⁸Ga) and single photon imaging (i.e. ⁶⁷Ga). Of these, ⁶⁷Ga and ⁶⁸Ga are in routine clinical use. ⁶⁸Ge/⁶⁸Ga generators are currently the most common method for obtaining ⁶⁸Ga

Ge66 2.26 h 0+	Ge67 18.9 m 1/2-	Ge68 270.8 d 0+	Ge69 39.05 h 5/2-	Ge70 0+	Ge71 11.43 d 1/2- *	Ge72 0+	Ge73 9/2+ *	Ge74 0+
EC	EC	EC	EC	21.23	EC	27.66	7.73	35.94
Ga65 15.2 m 3/2-	Ga66 9.49 h 0+	Ga67 3.2612 d 3/2-	Ga68 67.629 m 1+	Ga69 3/2-	Ga70 21.14 m 1+	Ga71 3/2-	Ga72 14.10 h 3- *	Ga73 4.86 h 3/2-
EC	EC	EC	EC	60.108	EC,β-	39.892	β-	β-

All three Ga isotopes can be obtained in a package from Ge. Since their half-lives are very different, it is possible to obtain one of the Ga isotopes in greater quantities by choosing the timing. For example, ⁶⁸Ga can be obtained from ⁶⁸Ge by waiting for the short-lived ones to disappear. Due to the short half-life, short irradiation of Ge yields ⁶⁷Ge and from it ⁶⁷Ga.

1. ⁴³Sc, ⁴⁴Sc, ^{44m}Sc and ⁴⁷Sc

The isotopes 43,44g,44m,47Sc are of interest for the creation of theranostic radiopharmaceuticals using 43,44,44mSc for PET imaging and ⁴⁷Sc for therapy.

Ti43 509 ms 7/2-	Ti44 63 y 0+	Ti45 184.8 m 7/2-	Ti46 0+	Ti47 5/2-	Ti48 0+	Ti49 7/2-
EC	EC	EC	8.0	7.3	73.8	5.5
Sc42 681.3 ms 0+	Sc43 3.891 h 7/2-	Sc44 3.927 h 2+	Sc45 7/2- *	Sc46 83.79 d 4+ *	Sc47 3.3492 d 7/2-	Sc48 43.67 h 6+
EC	EC	EC	100	β-	β-	β-

⁴³Sc can be obtained from very short-living ⁴³Ti in short exposition. It can be expected that production of ⁴⁴Ti will be very low due to the long half life. Same time ⁴⁷Sc can be produced in (γ,p) reaction. However there maybe should be some advantage of mixture of ⁴³Sc and ⁴⁷Sc in theranostic procedures.

Copper isotopes ⁶⁰Cu, ⁶¹Cu, ⁶⁴Cu and ⁶⁷Cu are also used in medicine. They can be obtained from zinc in various ways, but the short half-life is a problem.

Zn60 2.38 m 0+	Zn61 89.1 s 3/2-	Zn62 9.186 h 0+	Zn63 38.47 m 3/2-	Zn64 0+	Zn65 244.26 d 5/2-	Zn66 0+	Zn67 5/2-	Zn68 0+
EC	EC	EC	EC	48.6	EC	27.9	4.1	18.8
Cu59 81.5 s 3/2-	Cu60 23.7 m 2+	Cu61 3.333 h 3/2-	Cu62 9.74 m 1+	Cu63 3/2-	Cu64 12.700 h 1+	Cu65 3/2-	Cu66 5.088 m 1+	Cu67 61.83 h 3/2-
EC	EC	EC	EC	69.17	EC,β-	30.83	β-	β-

1. ⁹⁰Nb

⁹⁰Nb has been proposed as a candidate PET isotope of moderate half- life, low positron energy and reasonably high β+ branching ratio

Mo88 8.0 m 0+	Mo89 2.04 m (9/2+) *	Mo90 5.67 h 0+	Mo91 15.49 m 9/2+ *	Mo92 0+	Mo93 4.0E+3 y 5/2+ *	Mo94 0+	Mo95 5/2+	Mo96 0+	Mo97 5/2+	Mo98 0+
EC	EC	EC	EC	14.84	EC	9.25	15.92	16.68	9.55	24.13
Nb87 2.6 m (9/2+) *	Nb88 14.5 m (8+) *	Nb89 1.9 h (9/2+) *	Nb90 14.60 h 8+	Nb91 680 y 9/2+ *	Nb92 3.47E+7 y (7+) *	Nb93 9/2+ *	Nb94 2.03E+4 y (6+) *	Nb95 34.975 d 9/2+ *	Nb96 23.35 h 6+	Nb97 72.1 m 9/2+ *
EC	EC	EC	EC	EC	EC,β-	100	β-	β-	β-	β-

All the isotopes that arise from the products (γ, xn) of the reaction are either short-lived or long-lived. Practically, it remains that ⁹⁰Nb can be easily separated. All that remains is to check how many Nb isotopes are created in the reactions (γ, pxn).

1. ¹⁰³Pd

Paladium-103 decays by EC to 103mRh (T1/2 = 56.114 m) following de-excitation through isomeric transition. Auger electrons and X rays are emitted as a result of these decay processes (EC and isomeric transition), which can be suitable for cancer therapy.

Ag102 12.9 m 5+ *	Ag103 65.7 m 7/2+ *	Ag104 69.2 d 5+ *	Ag105 4f.29 d 1/2- *	Ag106 23.96 m 1+ *	Ag107 1/2- *	Ag108 2.37 m 1+ *	Ag109 1/2- *
EC	EC	EC	EC	EC,β-	51.839	EC,β-	48.161
Pd101 8.47 h (5/2+)	Pd102 0+	Pd103 16.991 d 5/2+	Pd104 0+	Pd105 5/2+	Pd106 0+	Pd107 6.5E+6 y 5/2+ *	Pd108 0+
EC	1.02	EC	11.14	22.33	27.33	β-	26.46

At sufficiently high energies, several isotopes of silver can be obtained. But they all decay into stable isotopes of Pd, so that after some time only the activity of ¹⁰³Pd can be separated.

1. ⁸⁹Zr

Zirconium-89g (T1/2 = 74.4 h) is a longer lived positron emitting radionuclide well suited for imaging the biodistribution of radiolabelled antibodies.

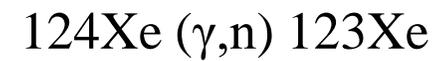
Nb88 14.5 m (8+) *	Nb89 1.9 h (9/2+) *	Nb90 14.60 h 8+ *	Nb91 680 y 9/2+ *	Nb92 3.47E+7 y (7+) *	Nb93 9/2+ *
EC	EC	EC	EC	EC,β-	100
Zr87 1.68 h (9/2+) *	Zr88 83.4 d 0+	Zr89 78.41 h 9/2+ *	Zr90 0+	Zr91 5/2+	Zr92 0+
EC	EC	EC	51.45	11.22	17.15

Of the several Nb isotopes that are created in (γ, xn) reactions, ⁸⁹Nb decays into active daughter. If ⁸⁸Nb is formed, it decays into ⁸⁸Zr, which does not emit gamma radiation and decays by electronic capture, so that it cannot burden the tissues with an additional dose, except for the one that comes from the characteristic X-ray radiation

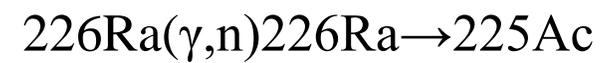
^{99m}Tc



^{123}I



^{225}Ac



123I $^{124}\text{Xe}(\gamma, n) ^{123}\text{Xe}$

123I

Препараты массовые: 123 I, 123 I-MIBG

Препараты специализированные:

Глиобластомы 123I-ИМТ, Болезнь

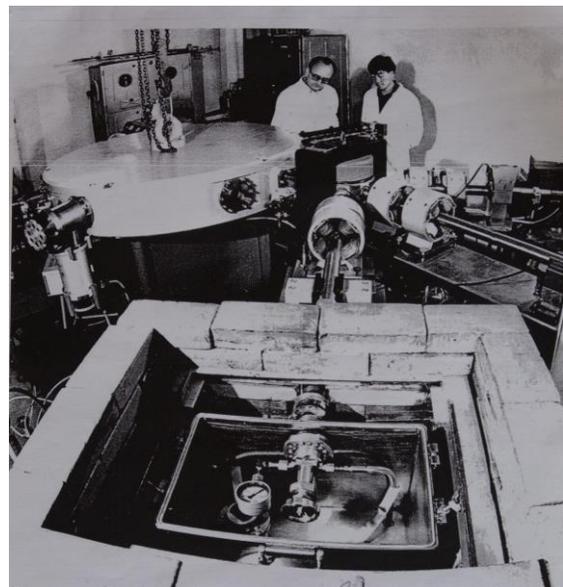
Паркинсона: 123I-FP-CIT;

Метаболические синдромы: 123 I-ВМIPP; 123I-IMP

Взрослая онкология. Приблизительное число циклов радионуклидной терапии в год ~ 20000, из них с использованием ^{131}I или ^{123}I и ^{131}I ~70%.

Центры (~циклы): Архангельск (~600), Дмитровград (>300), Казань (~500), Красноярск (~1500), Москва (РНЦРР ~2000, ЭНЦ ~500, РМАНПО ~300, ЕМС (частн.) ~1000, Медицина (частн.) ~н.д., Рогачева, РОНЦ ~н.д. (единичные, педиатрия), РОНЦ ~н.д.), Обнинск (~4000), Санкт-Петербург (РЖД, 2я КБ, 31я КБ, 1 МЕД, частн. ~1500), Тюмень (~700), Челябинск (~500), и др. Для каждого цикла ^{131}I (золотой стандарт) делается «претреатмент» цикл с ^{123}I , далее проводится цикл с ^{131}I .

В процессе лечения в течение нескольких лет пациенту проводится скintiография с ^{123}I . Кардиология, Нефрология, Детская онкология и др. Сцитинтиография или ОФЭКТ с ^{123}I или с препаратами ^{123}I , Всего скintiографии > 1 000 000 (I-?). Перспективен ПЭТ с ^{124}I или с препаратами ^{124}I .



Техническое задание

на проектирование ксеноновой мишени и газо-вакуумной системы для получения иода-123 на микротроне МТ-25

В медицинской практике широко используются препараты, содержащие радиоактивный изотоп иода-123. В ЛЯР ОИЯИ предлагается получать данный изотоп на ускорителе электронов, микротроне МТ-25 в реакции $^{124}\text{Xe}(\gamma, n) ^{123}\text{Xe} \rightarrow ^{123}\text{I}$.

Для этого необходимо спроектировать и изготовить: танталовую реакционную камеру, газо-вакуумную систему и платформу для размещения на ней газо-вакуумной системы.

1. Изучение методологических аспектов прикладных исследований в части отработки методик и технологий получения «циклотронных» изотопов на пучках электронов в фотоядерных реакциях;
2. Технологические вопросы развития ускорительной физики и техники (апробация новых методов диагностики параметров пучков **электронов/протонов** - (энергии, профиля, интенсивности) при проведении физических экспериментов; прецизионная радиационная дозиметрия в медицинских исследованиях;
3. Реализация научной программы в области изучения фотоядерных реакций, в частности, исследование сечений фотовозбуждения изомерных состояний.
4. *Планируется исследование радиационно-индуцированных эффектов в новых композитных терморегулирующих силикатных покрытиях, монокристаллических лазерных и полупроводниковых материалах, солнечных перовскитных соединениях, облученных тяжелыми ионами высоких энергий.*

Спасибо за внимание!



Пример расчёта необходимого интеграла (мкКл=мкА*сек), который «набирается» на упр. компьютере, относительно параметров облучаемого образца и требований заказчика.

№	Масса	Размер	Плотность	Доза	Интеграл
7.1	4,2	2,98/1/0,95	1,4835	10МГр	20000
7.2	4,3	2,99/0,98/0,99	1,4822		20476
7.3	4,3	2,98/0,98/0,97	1,5179		20476

Среднее время облучения образцов 7.1-7.3 составляло ≈ 90 мин на каждый с учетом настройки.

Скорость набора зависит напрямую от интенсивности пучка. Экспериментально было получено, что до 10мкА на пробнике 1 оптимально, чтобы образец не разрушался от нагрева.