

Конференция НИИЯФ МГУ по итогам 2023 года

Спектрометр для измерения параметров продуктов ядерных реакций синтеза (на примере DD-реакции)

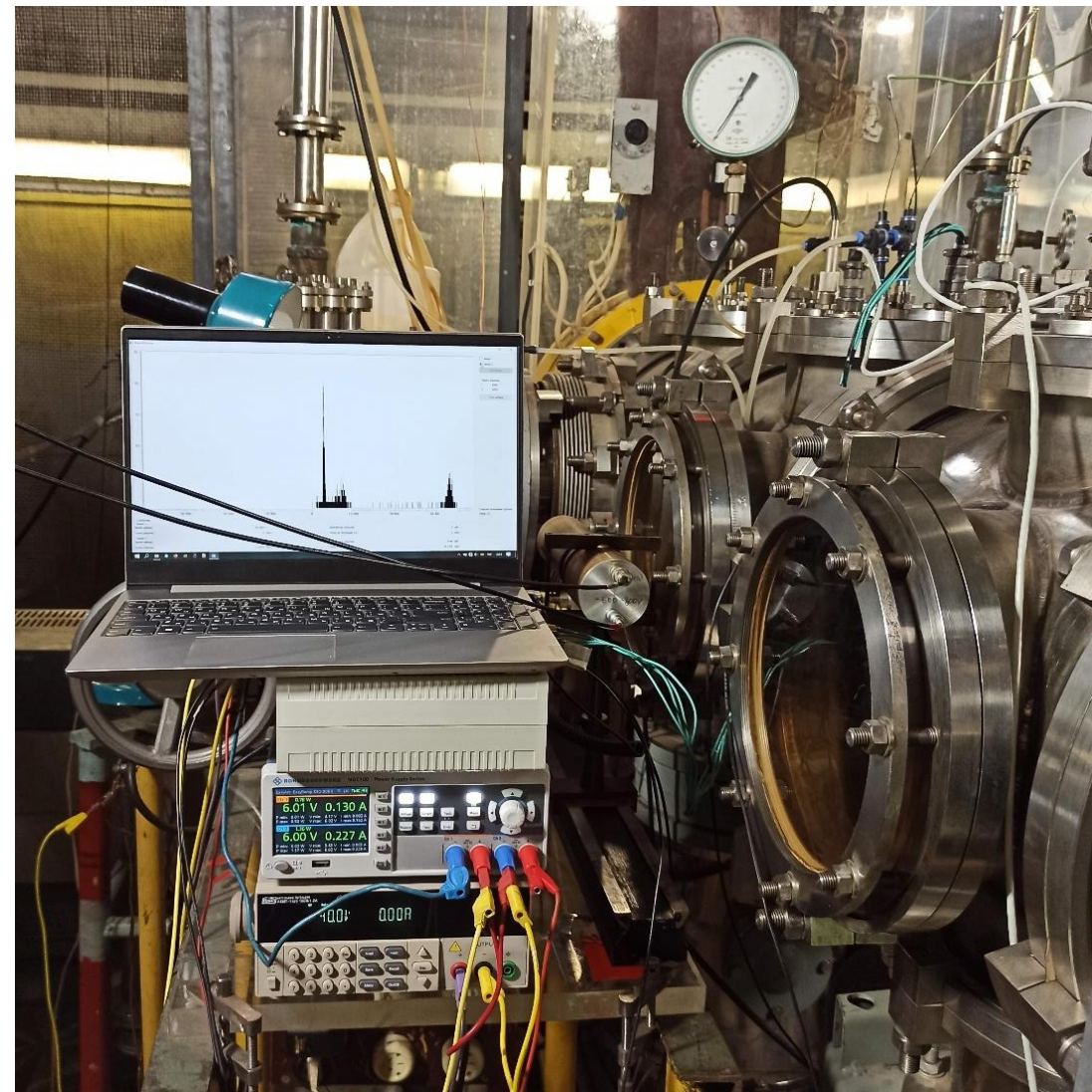
Студент 2 курса магистратуры физического факультета МГУ
Седов Георгий Евгеньевич

Научный руководитель
Карманов Дмитрий Евгеньевич



Цель работы

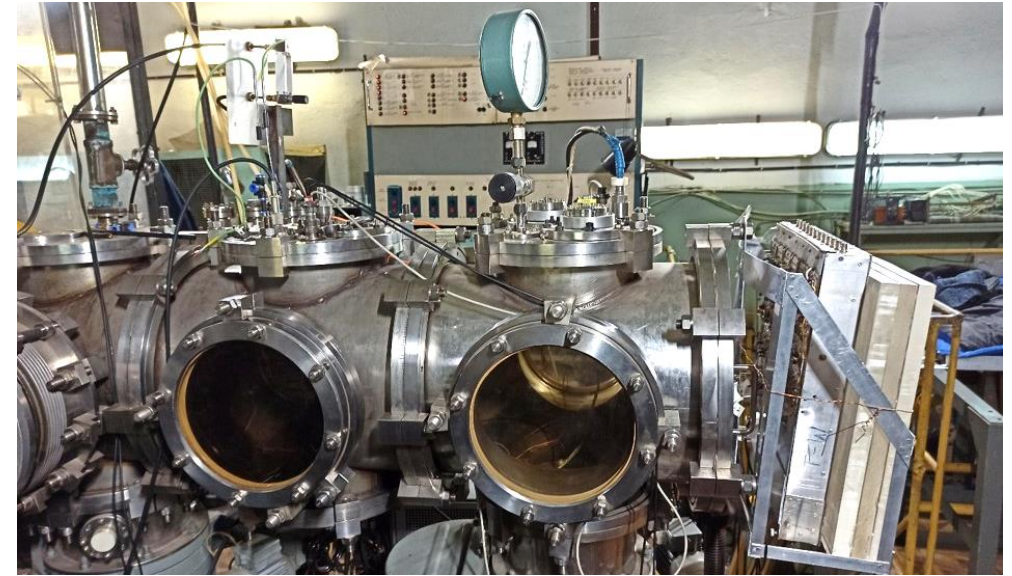
- В рамках НИР с ФИАН им. Лебедева в лаборатории детекторных систем и электроники НИИЯФ МГУ был создан комплекс научной аппаратуры для регистрации заряженных частиц (продуктов ядерных реакций синтеза)
- НИР «Доработка технологии и топологии, изготовление опытной партии кремниевых датчиков альфа-частиц с тонким входным окном» (2023 г)
- НИР «Отработка методики регистрации альфа-частиц детекторным устройством с вакуумной камерой при облучении протонами» (2022 г)



Общий вид на комплекс научной аппаратуры в процессе набора данных

Идея эксперимента

- Исследования проводятся на установке ионный ускоритель **ГЕЛИС** в ФИАН им. Лебедева
- Одним из предметов изучения на установке является **DD-реакция** идущая по каналам **$D+D \rightarrow {}^3\text{He}+n$, $D+D \rightarrow T+p$**
- Предыдущие исследования показали, что при высоких плотностях тока пучка дейтронов в гетероструктуре $\text{Ti}/\text{TiO}_3:\text{D}$, наблюдаются значительные эффекты **усиления выхода DD-реакций** по сравнению с расчетными значениями. [1]
- Также созданный комплекс научной аппаратуры может позволить исследовать ориентационные эффекты и диффузию дейтерия в твердых материалах
- Мишень облучается пучком дейтерия с энергией ~ 30 кэВ. Продукты DD-реакции регистрируются кремниевыми детекторами.
- Прибор рассчитан на регистрацию частиц с энергией от 0.1 МэВ до 10 МэВ. Максимальная скорость счёта 500 соб./с

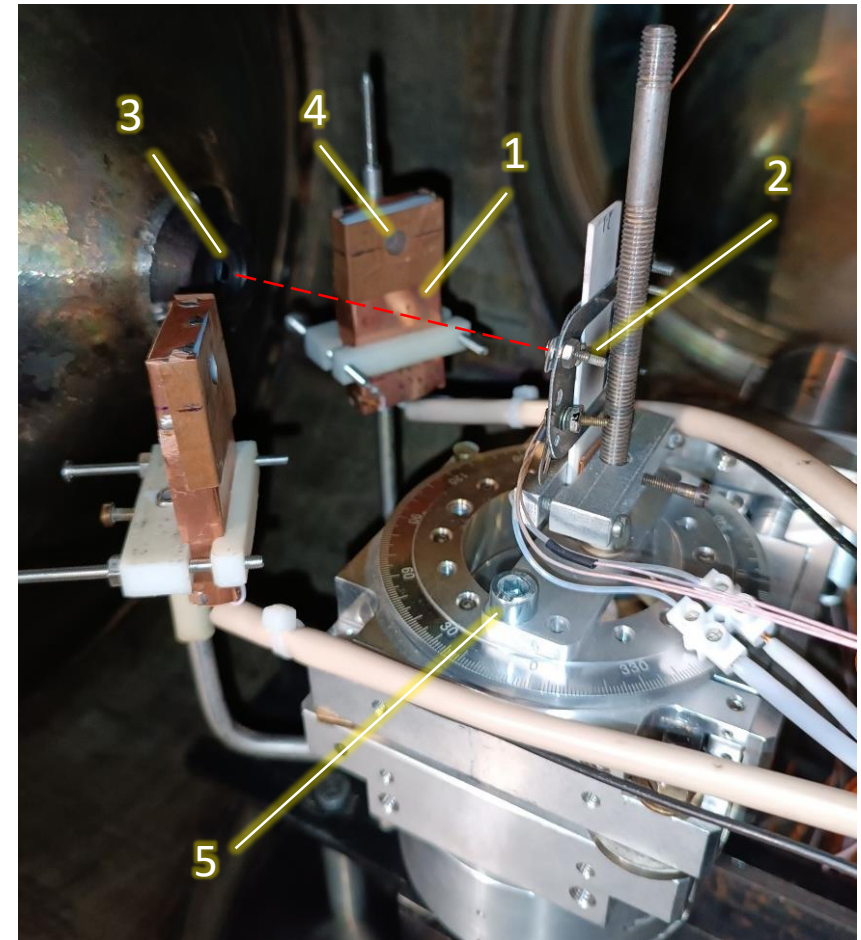
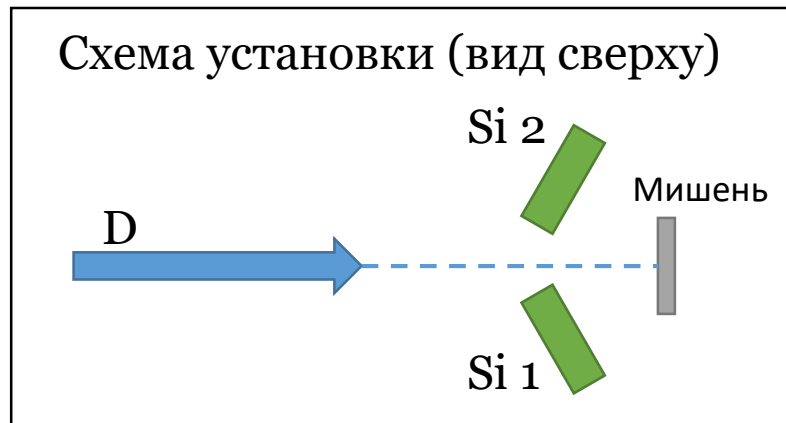


Ионный ускоритель ГЕЛИС
(ФИАН им. Лебедева)

[1] А.В. Багуля, О.Д. Далькаров, М.А. Негодаев, А.С. Русецкий, А.П. Чубенко
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫХОДОВ DD-РЕАКЦИЙ ИЗ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ
 $\text{Ti}/\text{TiO}_2:\text{Dx}$ ПРИ НИЗКИХ ЭНЕРГИЯХ НА УСТАНОВКЕ ГЕЛИС, Краткие
сообщения по физике ФИАН. 2012 г, № 12, С. 3

Экспериментальная установка ГЕЛИС

- ГЕЛИС - высокоточный ускоритель ионов
- Энергия частиц пучка до 50 кэВ,
- Плотность тока до 200 мкА/см²



Головная часть спектрометра:

1. Детекторный блок
2. Мишень
3. Выход пучка ионов
4. Коллиматор
5. Поворотное устройство

Кремниевый детектор с тонким входным окном

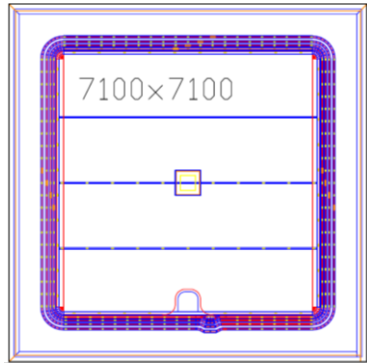


Чертёж детектора

- В 2023 г в НИИЯФ МГУ были разработаны, изготовлены и протестированы кремниевые детекторы с тонким входным окном (без технологического слоя алюминия в 1 мкм)
- Эксперимент с калибровочным источником подтвердил расчётную потерю энергии в мёртвом слое
- Энергетическое разрешение улучшилось в ~ 1.5 раза

Таблица расчетных потерь энергии для разных частиц в алюминиевом слое толщиной 1 мкм

частица	Энегропотери в 1 мкм Al
p (3 МэВ)	16 кэВ
α (4,5 МэВ)	170 кэВ
T (1 МэВ)	81 кэВ
${}^3\text{He}$ (0,8 МэВ)	330 кэВ



Детекторный блок и съёмный детектор

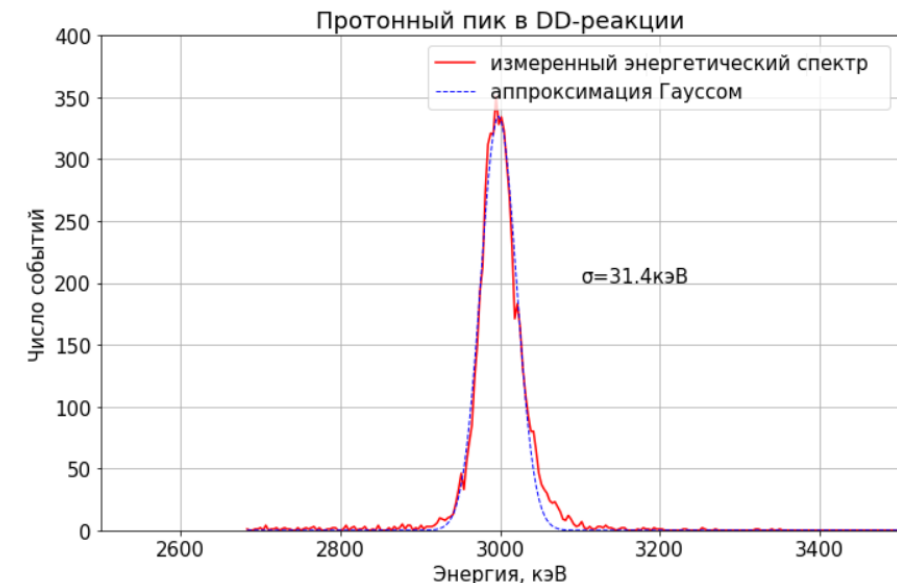
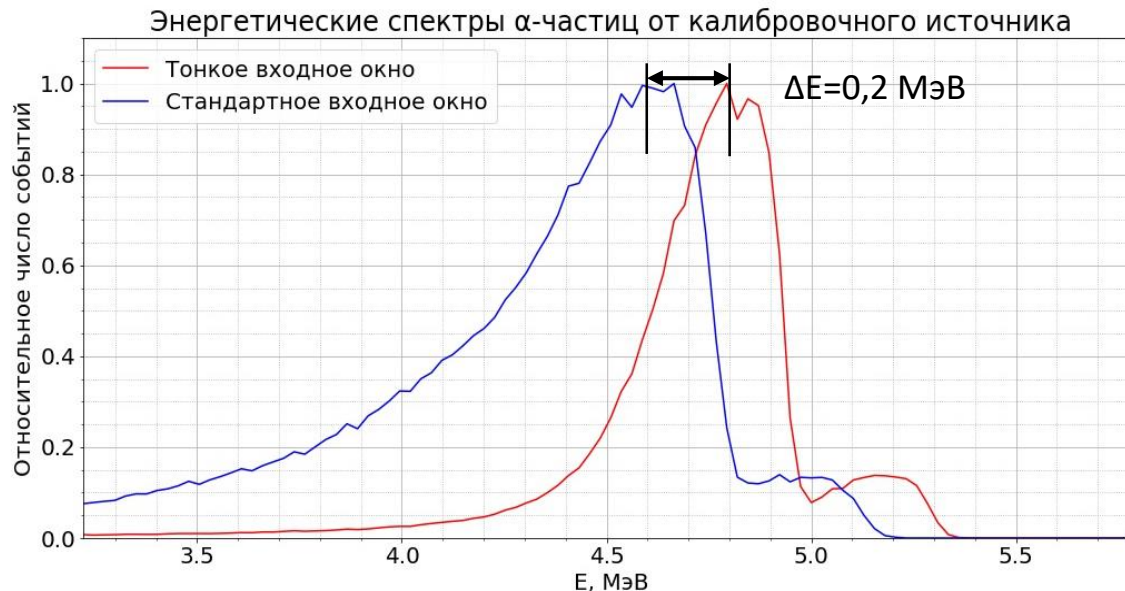
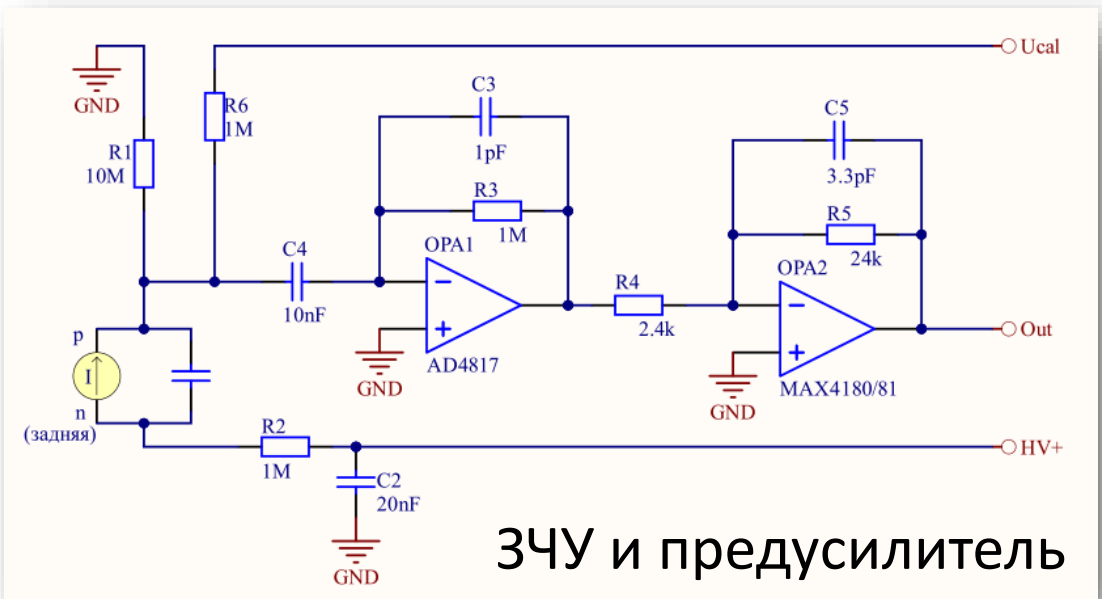


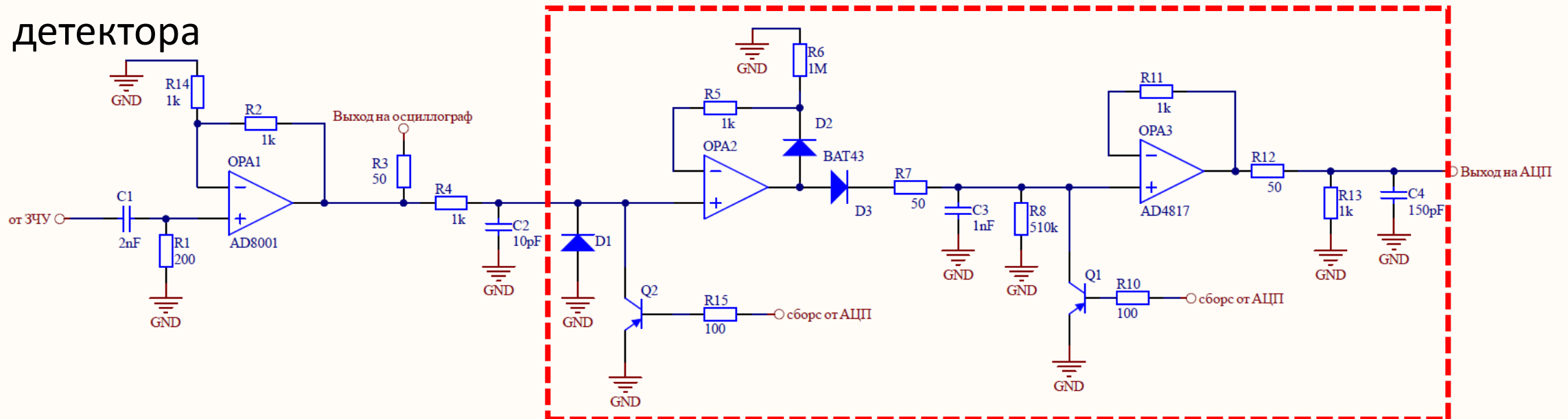
Схема ЗЧУ и АЦП с пиковым детектором

Выходной сигнал с пикового детектора идёт на цифровую часть 12-разрядного анализатора импульсов, который выполнен на development board с микроконтроллером STM32F303RET6



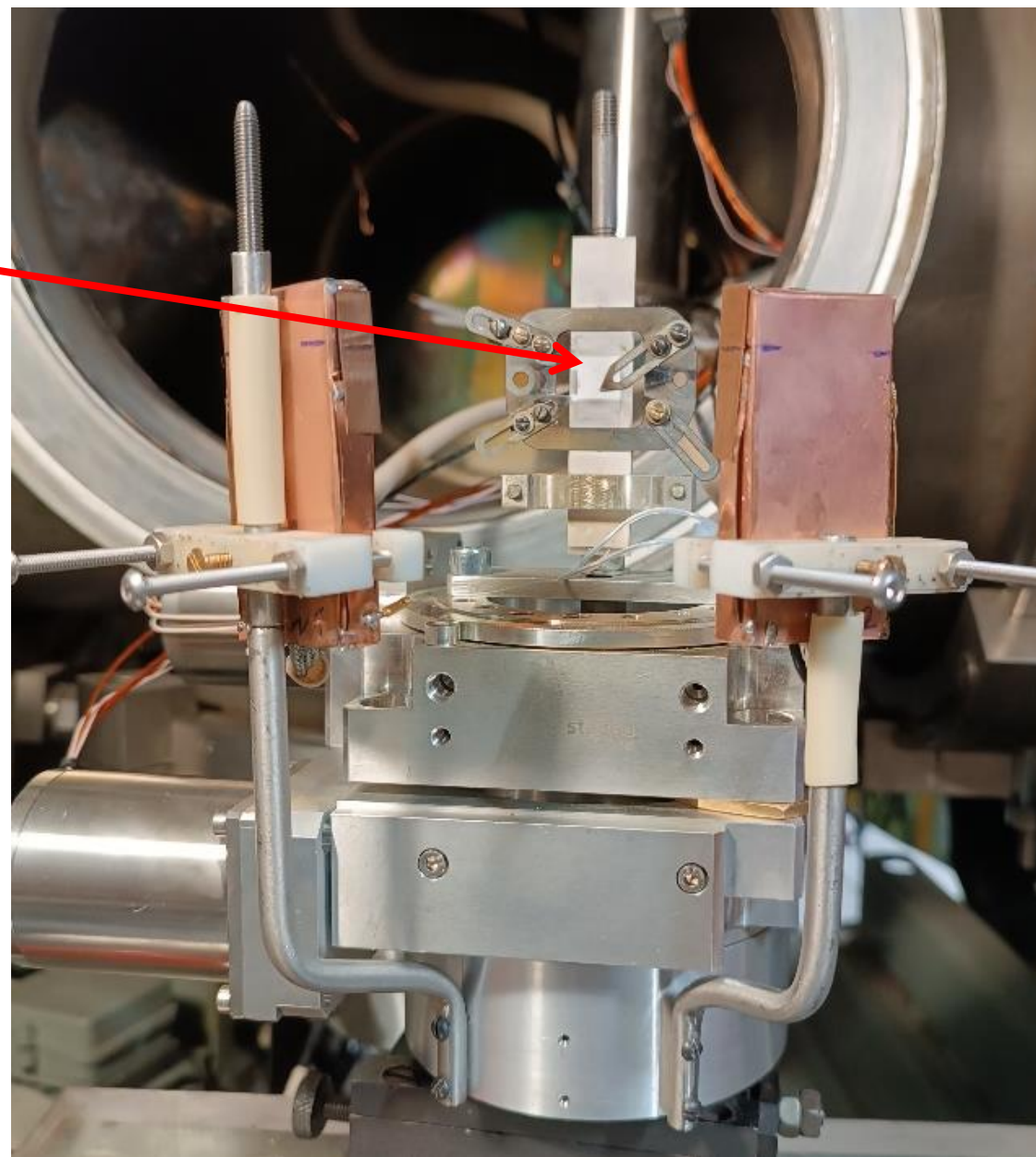
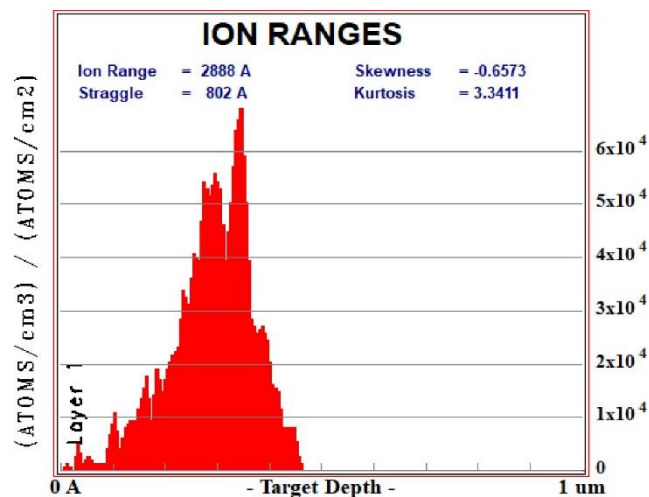
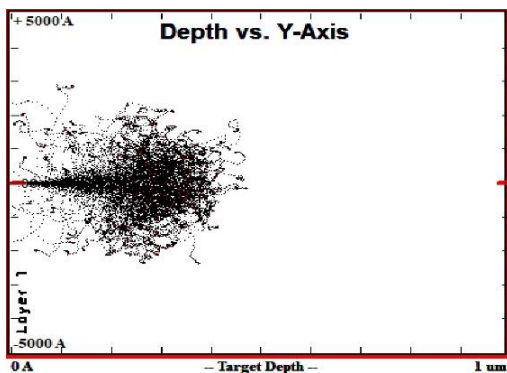
ЗЧУ и предусилитель

Схема пикового детектора

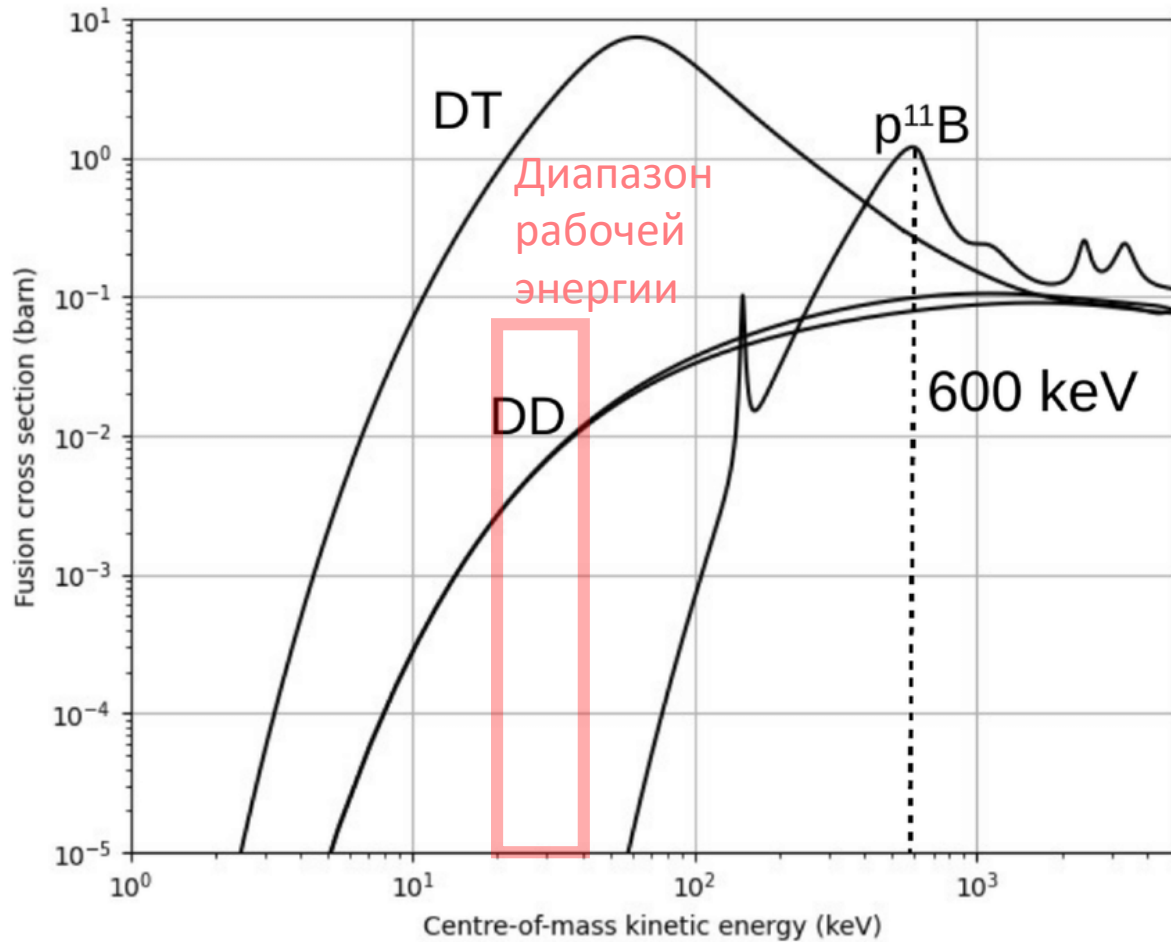


Мишень

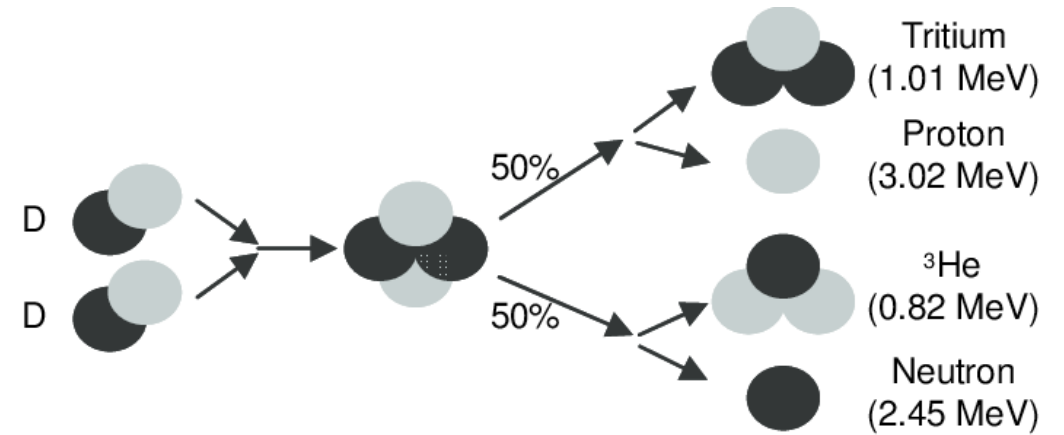
- В качестве мишени установлена титановая пластина толщиной 1 мм
- Ионы дейтерия с энергией 30 кэВ имплантируются на глубину до 0.5 мкм и далее диффундируют в объём мишени.
- Мишень установлена на поворотное устройство.
- Температура мишени контролируется



Сечение DD-реакций



Сечение DD-реакции на исследуемых энергиях:
0.003-0.01 барн

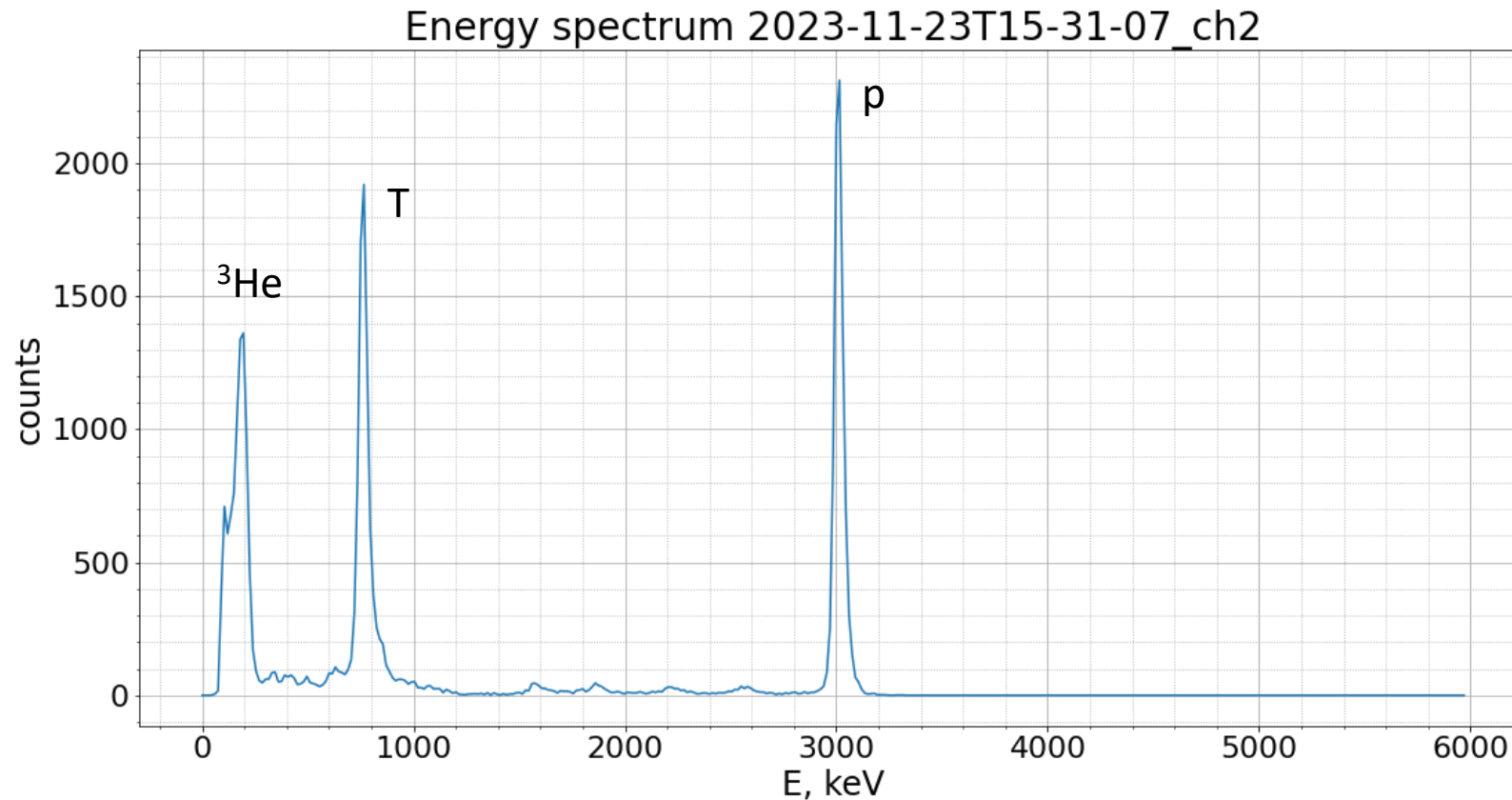


$$\sigma = \frac{N_{det}}{N_0} \frac{1}{n h G} \frac{S_{beam}}{S_{det}}$$

[2] Multiscale study of high energy attosecond pulse interaction with matter and application to proton–Boron fusion X. Ribeyre 1

Энергетический спектр продуктов DD-реакции

- Использование детектора с тонким входным окном позволило регистрировать пик ^3He

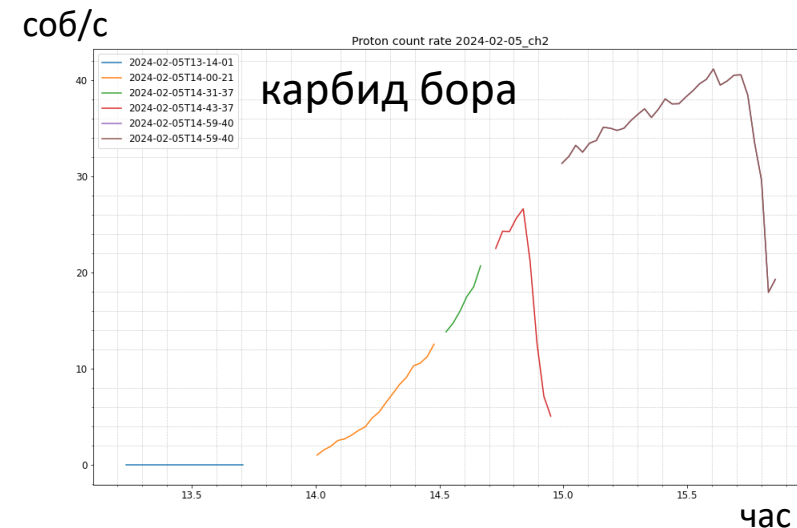
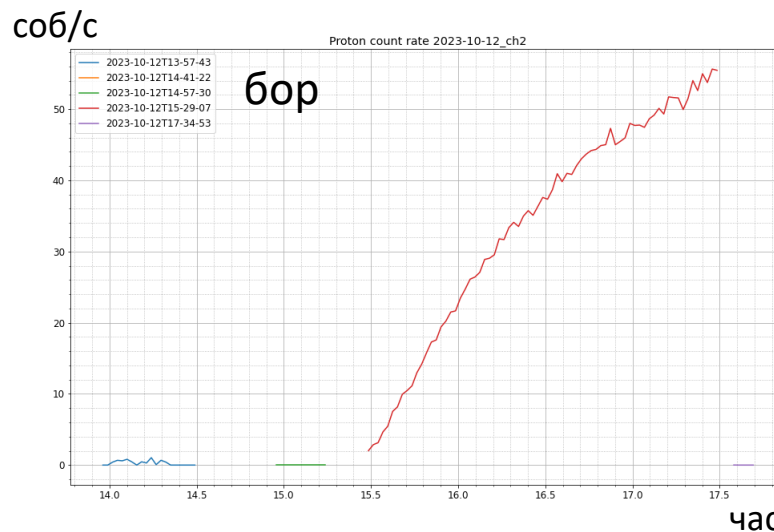
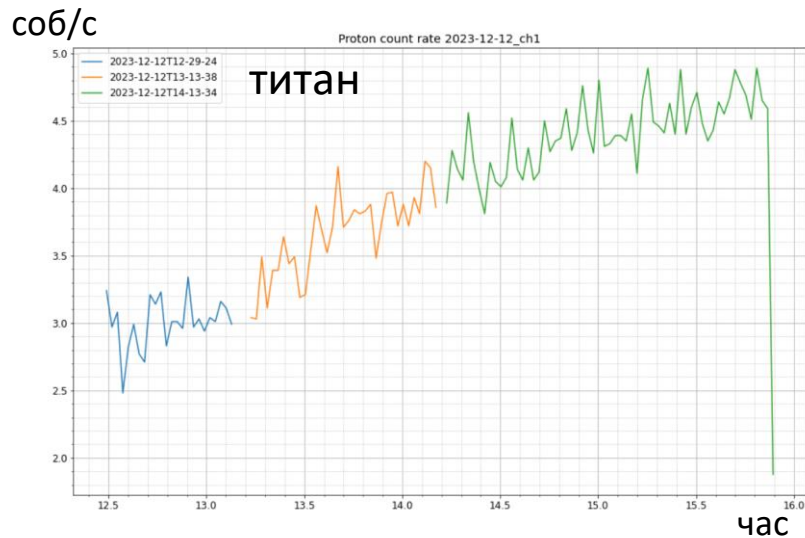


Оценка концентрации дейтерия облучаемой поверхности мишени

- Простая двухслойная модель диффузии позволяет оценить концентрации дейтерия облучаемой поверхности мишени при условии выхода на стационарный режим

$$n = \frac{N_{det}}{N_0} \frac{1}{\sigma h G} \frac{S_{beam}}{S_{det}}$$

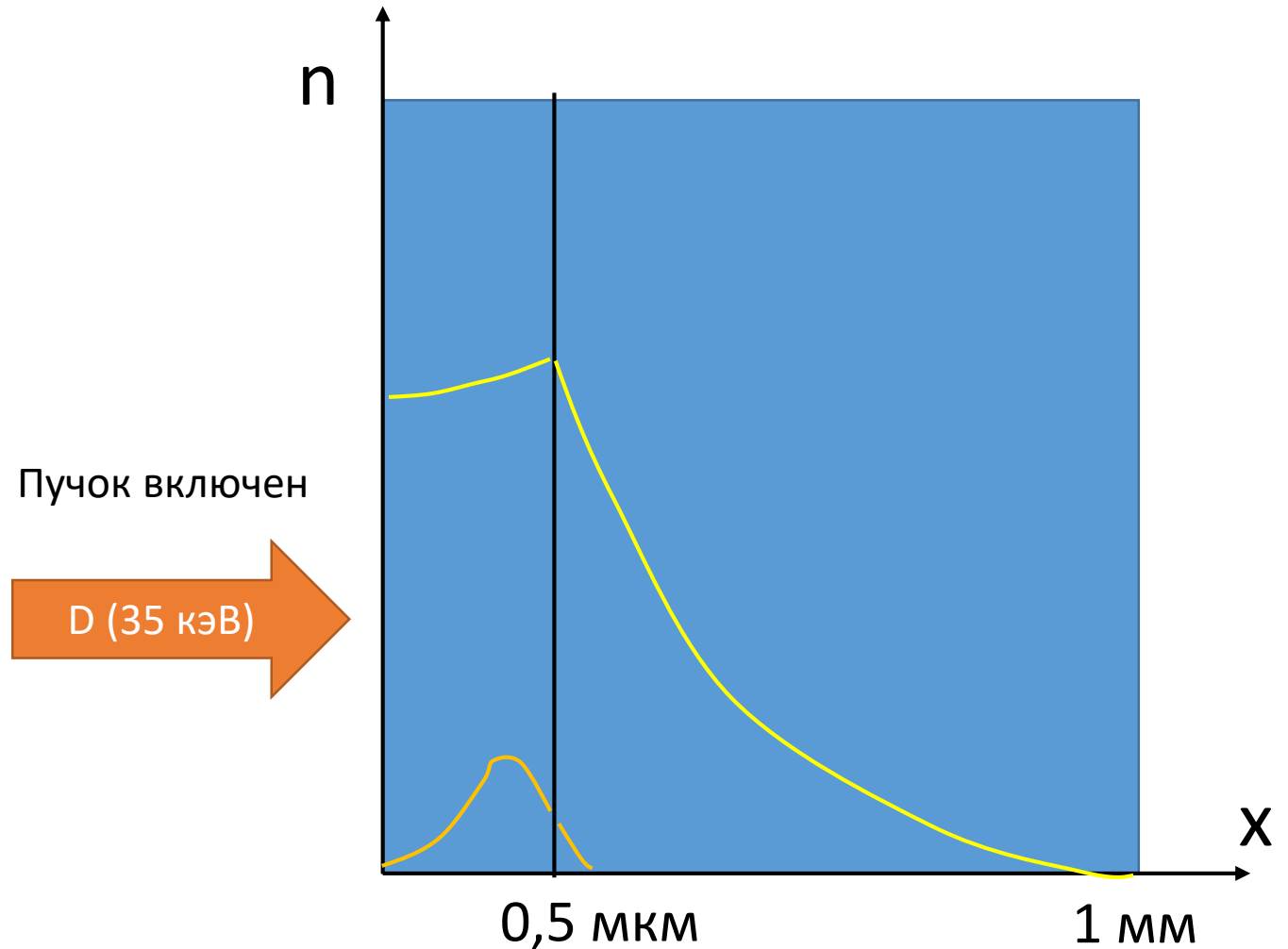
Выход протонов от времени для разных мишеней



Обсуждение модели взаимодействия пучка дейтерия с мишенью и возможных параметров

Параметры:

- Сечение DD-реакции
- Концентрация дейтерия в мишени
- Коэффициент диффузии дейтерия в мишени
- Растворимость дейтерия в мишени
- Температура мишени
- Ток пучка
- Энергия пучка



Выход реакции растёт => концентрация растёт

Публикации и доклады автора

- Статья в журнале Bulletin of the Lebedev Physics Institute
- Постер на конференции II International Scientific Conference «Innovative Technologies of Nuclear Medicine and Radiation Diagnostics and Therapy»

ISSN 1068-3356, Bulletin of the Lebedev Physics Institute, 2023, Vol. 50, No. 6, pp. 253–258. © Allerton Press, Inc., 2023.
Russian Text © The Author(s), 2023, published in *Kratkie Soobshcheniya po Fizike*, 2023, Vol. 50, No. 6, pp. 73–76.

Features of Equipment for Recording Alpha Particles as Applied to Binary Proton Technology of Radio Therapy

D. E. Karmanov^a, I. A. Kudryashov^{a,b}, A. A. Kurganov^a, S. A. Movchun^{b,*}, M. A. Negodaev^b,
A. V. Oginov^b, A. F. Popovich^{b,c}, V. A. Ryabov^b, and G. E. Sedov^{a,b,**}

^aSkobel'syn Research Institute of Nuclear Physics, Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119234 Russia

^bLebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia

^cKotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics, Fryazino Branch, Moscow oblast, 141190 Russia

*e-mail: movchunsa@lebedev.ru

**e-mail: sge444@ya.ru

Received April 13, 2023; revised May 4, 2023; accepted May 5, 2023

Abstract—A spectrometer allowing recording nuclear reaction products characteristic of boron—proton radiotherapy technologies is developed. A hardware-software system of the spectrometer allows identifying alpha particles and other light products of nuclear reactions in the energy range of 0.5 MeV—10 MeV is presented. The spectrometer was tested at the Prometheus proton accelerator of the Physico-Technical Center (PTC) LPI (Protvino) and the HELIS installation of the LPI (Moscow). The spectrometer applicability to the study of the $p + {}^{11}\text{B} \rightarrow 3\alpha$ nuclear reaction at protons energies used in proton therapy is shown.

Категория участника
«МАГИСТРЫ»



Седов Георгий Евгеньевич
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
Физический факультет

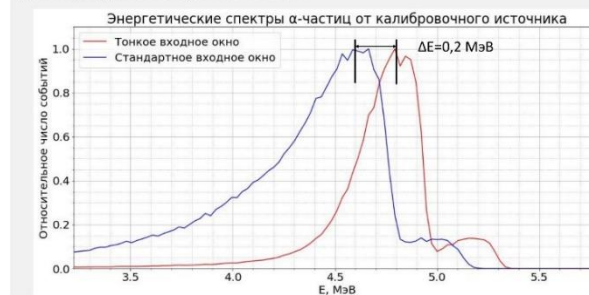
Карманов Дмитрий Евгеньевич
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова

Разработка и испытание детектора с тонким входным окном для исследования ядерных реакций на установке ГЕЛИС

Для исследования перспективных ядерных реакций используемых в радиотерапии, в частности для бор-протонной реакции ($p + {}^{11}\text{B} \rightarrow 3\alpha$), удобно применить систему регистрации α -частиц на основе полупроводниковых кремниевых датчиков. В рамках работ по созданию спектрометра для измерения энергий продуктов ядерных реакций на ионном ускорителе ГЕЛИС были разработаны детекторы с тонким входным окном без технологического слоя алюминия.

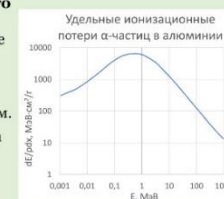
Для проверки эффективности нового детектора был изготовлен образец и проведены испытания с использованием источника α -частиц. Результаты испытаний показали, что сигнал в новом детекторе выше, чем в стандартных кремниевых детекторах с рп-переходом. Рассчитанное по полученным данным уменьшение толщины неактивной области соответствует ожидаемому значению.

Использование детекторов с тонким входным окном позволит более эффективно регистрировать альфа-частицы с минимальной регистрируемой энергией ~ 1 МэВ.

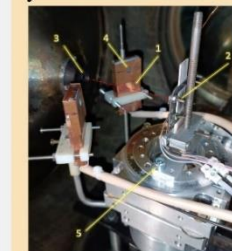


Расчёт разности толщин входного окна.

- Энергия α -частицы в основном пике 4,67 МэВ
- Удельные ионизационные потери α -частицы с энергией 4,5 МэВ в алюминии составляют ~ 175 кэВ/мкм.
- Максимум в спектрах отличается на $\sim 0,2$ МэВ.
- Таким образом, толщина входного окна отличается на 1,1 мкм

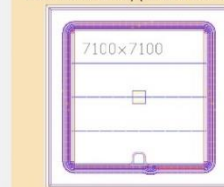


Головная часть спектрометра на установке ГЕЛИС



1. Детекторный блок
2. Мишень
3. Выход пучка ионов
4. Коллиматор
5. Поворотное устройство

Геометрия датчика с тонким входным окном



Разные цвета отвечают за различные технологические слои

- красный – легирование
- жёлтый – окна в оксиде для контакта
- синий – металлизация (Al)

При работе с таким датчиком важно использовать коллиматор, чтобы исключить специфическую зону с охранными кольцами на периферии датчика.

Спасибо за внимание!

Контакты автора

sgе444@ya.ru