



РФЯЦ-ВНИИЭФ
РОСАТОМ

Новая модель функции отклика детектора с алмазным чувствительным элементом при регистрации DT-нейтронов

LXXV Международная конференция «ЯДРО-2025. Физика атомного ядра и элементарных частиц. Ядерно-физические технологии»

Гаганов В.В., Долгополов А.В., Вершинин И.С.

Цель работы

Данные о спектре DT-нейтронов основаны исключительно на результатах расчетного моделирования

Расчётные параметры (энергия и форма пучка d^+ , распределение T в объеме мишени...) трудно контролировать

Детектор с алмазным чувствительным элементом является эффективным инструментом для измерения спектра DT-нейтронов с энергетическим разрешением менее 1%

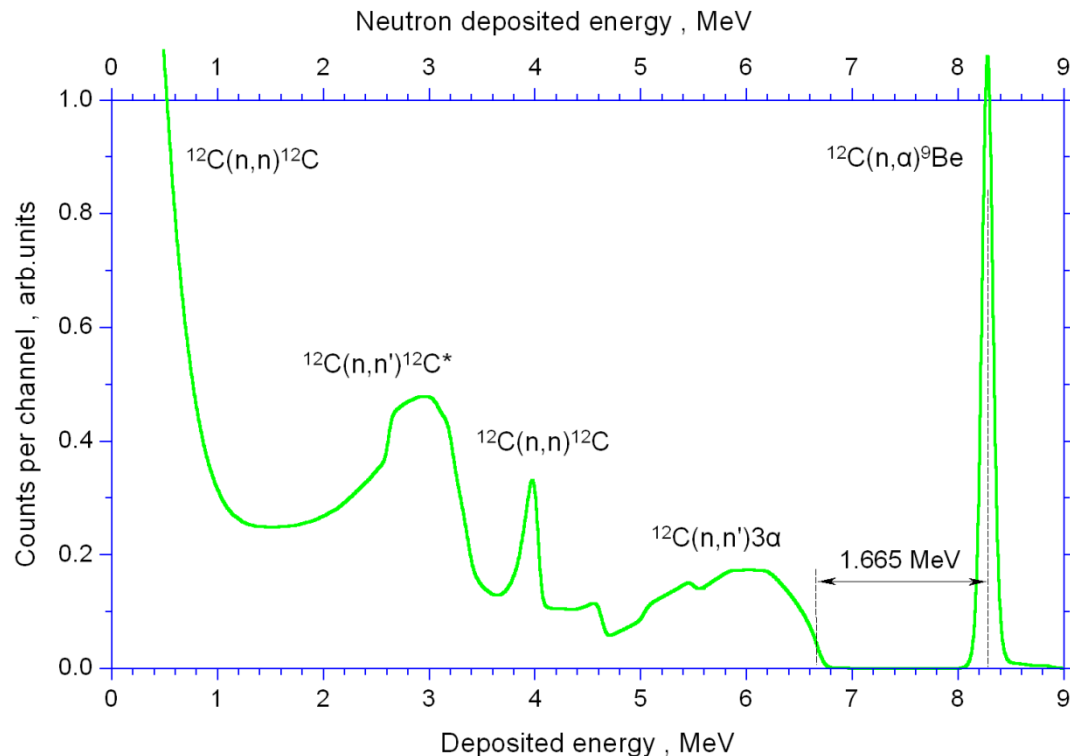
Анализ структуры функции отклика детектора с алмазным чувствительным элементом на излучение DT-нейтронов

Уточнение расчётных данных путем проведения измерений полей DT-нейтронов с использованием алмазного детектора

Структура функции отклика

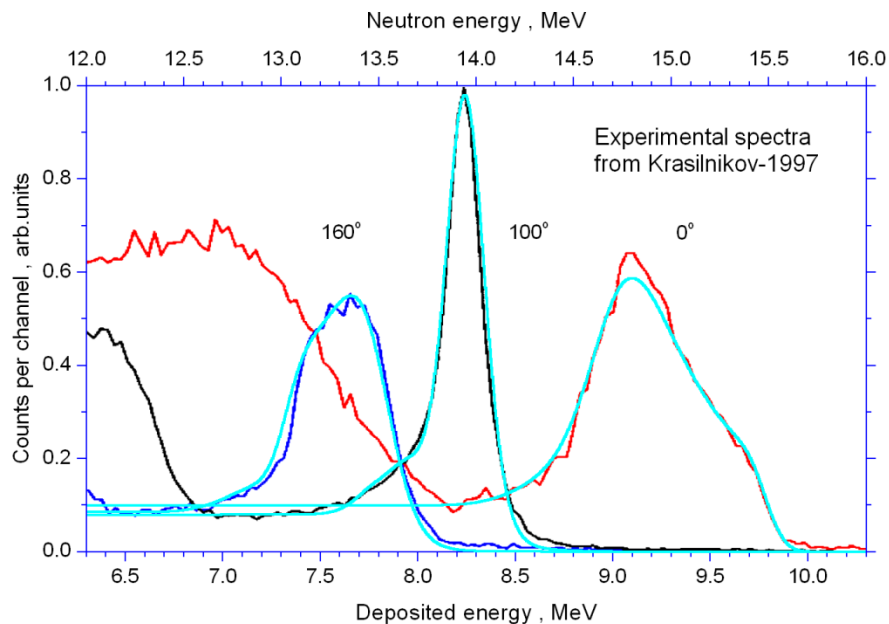
Работа детектора основана на сборе заряда, возникающего в чувствительной области детектора при торможении продуктов реакции нейтронов с ядрами углерода

Реакции:

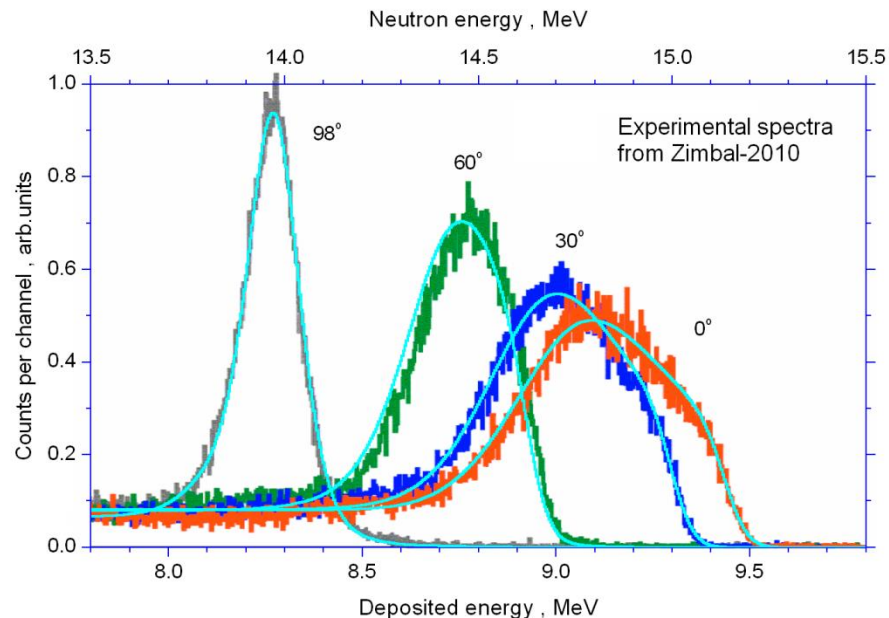


Результат моделирования распределения энергии, оставленной в алмазном детекторе при регистрации нейтронов с энергией 13.988 МэВ

Экспериментальные данные о структуре функции отклика



Результаты эксперимента с алмазным детектором на нейтронном генераторе при энергии дейтронов = 0.350 МэВ



Результаты эксперимента с алмазным детектором на нейтронном генераторе при энергии дейтронов = 0.215 МэВ

Экспериментальные данные о структуре функции отклика

Наибольший интерес представляют результаты измерений под углом, близким к 97°



Спектр DT-нейтронов, вылетающих под этим углом представляет собой симметричный пик с $fwhm = 80$ кэВ

В экспериментальных исследованиях отмечено отличие функции отклика от предсказываемого теорией обособленного пика в области энергий, соответствующих реакции $^{12}\text{C}(n,\alpha)^9\text{Be}$



В измеренных распределениях выявлено наличие практически равномерного распределения со стороны малых амплитуд импульсов – **континуума (Т)** (его появление связано с вылетом заряженных частиц за пределы чувствительной области детектора)

Оценки показывают, что более **95%** всех продуктов реакции $^{12}\text{C}(n,\alpha)^9\text{Be}$ должны вносить вклад в основной пик



Число регистрируемых в континууме событий в амплитудных распределениях не соответствует расчётным оценкам

Из анализа экспериментальных распределений было выявлено различие с расчетным моделированием на участке амплитуд импульсов, соответствующих реакции $^{12}\text{C}(n,\alpha)^9\text{Be}$



Совмещение результатов эксперимента и расчёта возможно только на основе предположения, что функция отклика помимо основного пика (**Р**) и континуума (**Т**) включает также **дополнительный элемент структуры (S)**, который, в первом приближении описывается широким гауссоподобным пиком

Новый эксперимент с алмазным детектором

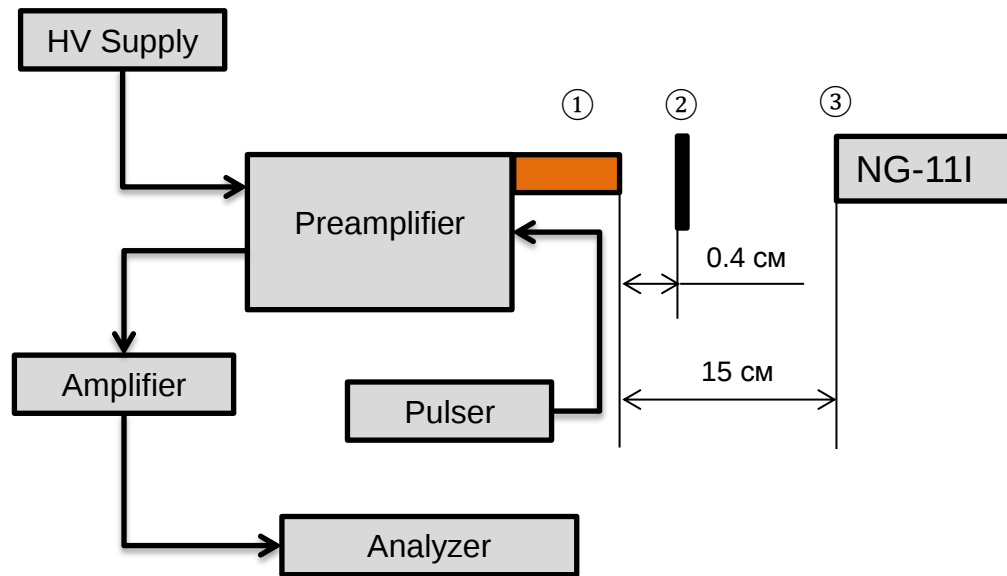
① Детектор DB-10: чувствительный элемент из искусственного CVD-алмаза в виде пластины $2 \times 2 \times 0.3$ мм

Рабочее напряжение HV = -150 В
Напряженность электрического поля в чувствительной области 0.5 В/мкм

② Перед детектором установлен эталонный источник альфа-излучения Ra^{226} :
4.784 МэВ, 5.489 МэВ, 6.002 МэВ, 7.687 МэВ

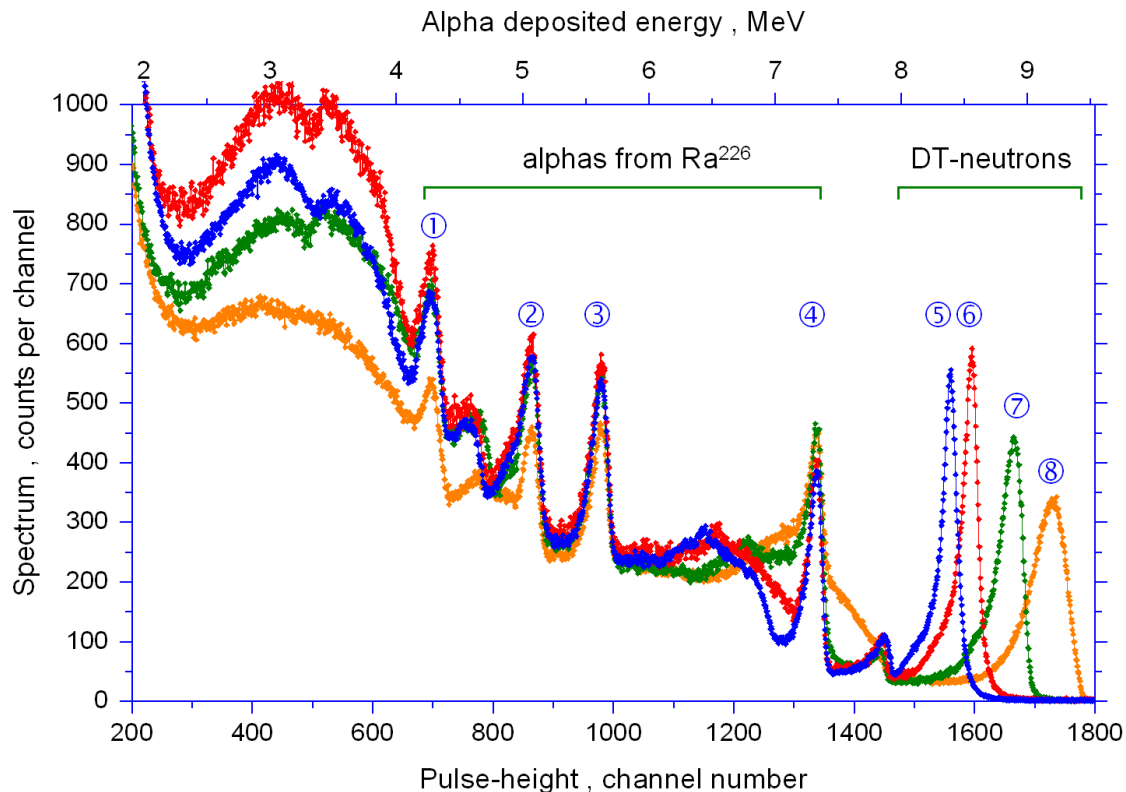
③ Источник нейтронов – генератор НГ-11И
Ускоряющее напряжение 160 кВ
Средний поток DT-нейтронов = 10^{10} н/с

Измерения проводились для следующих значений угла вылета нейтронов:
 0° , 63° , 97° , 115°



Общая схема облучения детектора с алмазным чувствительным элементом

Результаты измерений



Результаты измерений для значений углов вылета нейтронов 0°, 63°, 97° и 115°

Все распределения приведены к
единому масштабу по положению
пиков Ra²²⁶

① α-частицы 4.784 МэВ

② α-частицы 5.489 МэВ

③ α-частицы 6.002 МэВ

④ α-частицы 7.687 МэВ

⑤ DT-нейтроны, угол 115°

⑥ DT-нейтроны, угол 97°

⑦ DT-нейтроны, угол 63°

⑧ DT-нейтроны, угол 0°

Анализ полученных результатов

Определение градуировочной
характеристики спектрометра с алмазным
детектором

Градуировка по данным о положении пиков с
учетом торможения частиц в слое воздуха,
контактном слое, и защитном оксидном слое
на поверхности источника Ra^{226}

Энергия альфа-частиц (SRIM)

4.295
МэВ

5.048
МэВ

5.590
МэВ

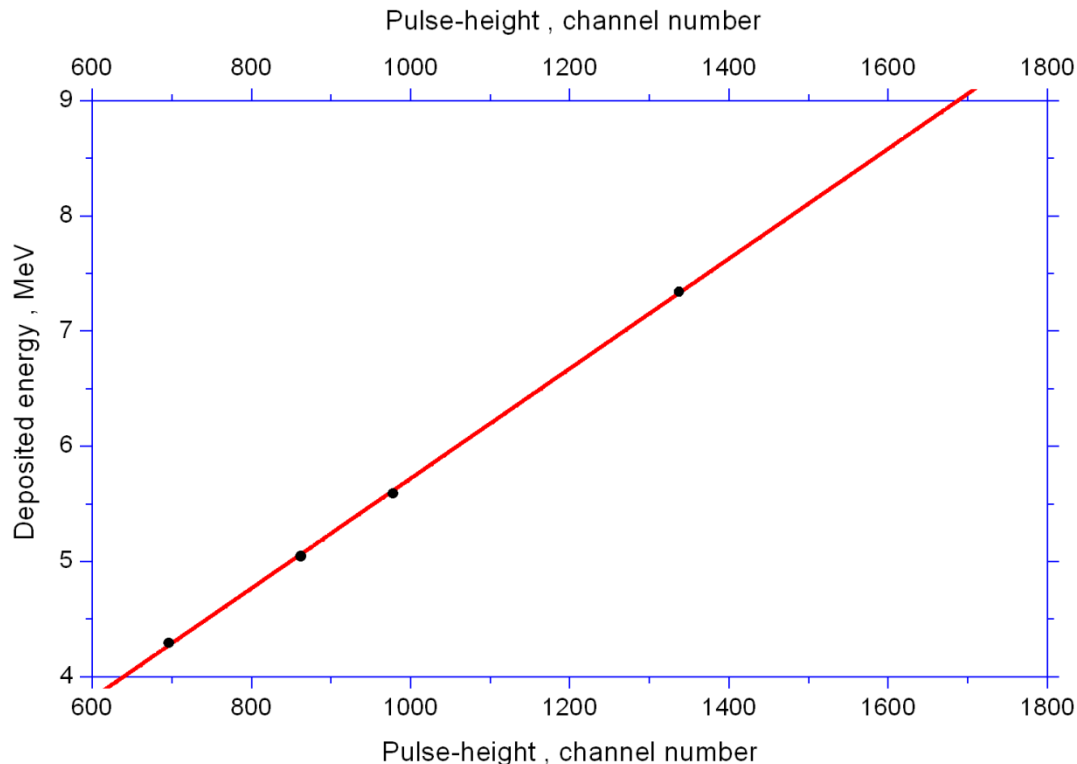
7.343
МэВ

Градуировочная характеристика (Ra^{226})

$$E_d = C \times a + b$$

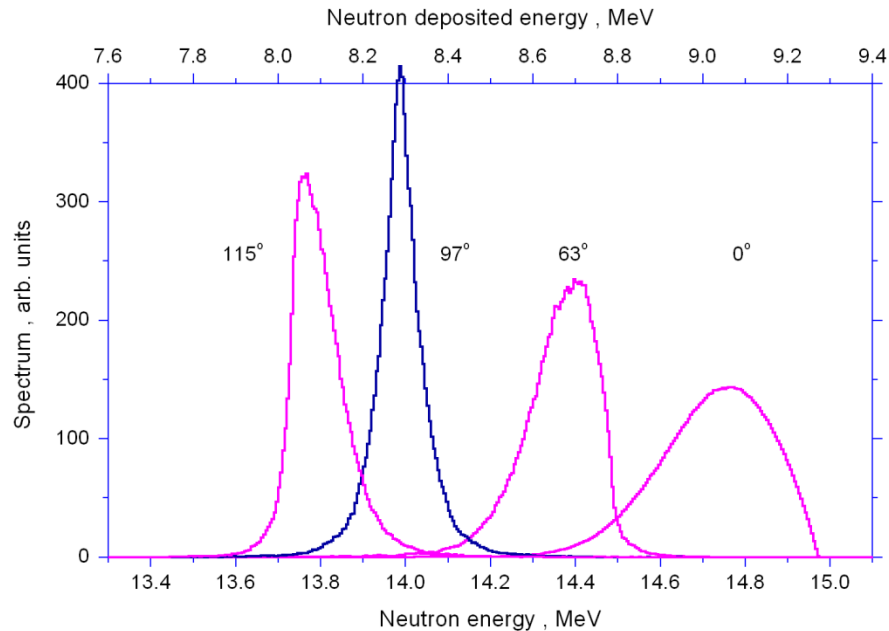
$$a = 4.77 \times 10^{-3} \text{ МэВ/канал}$$

$$b = 0.950 \text{ МэВ}$$

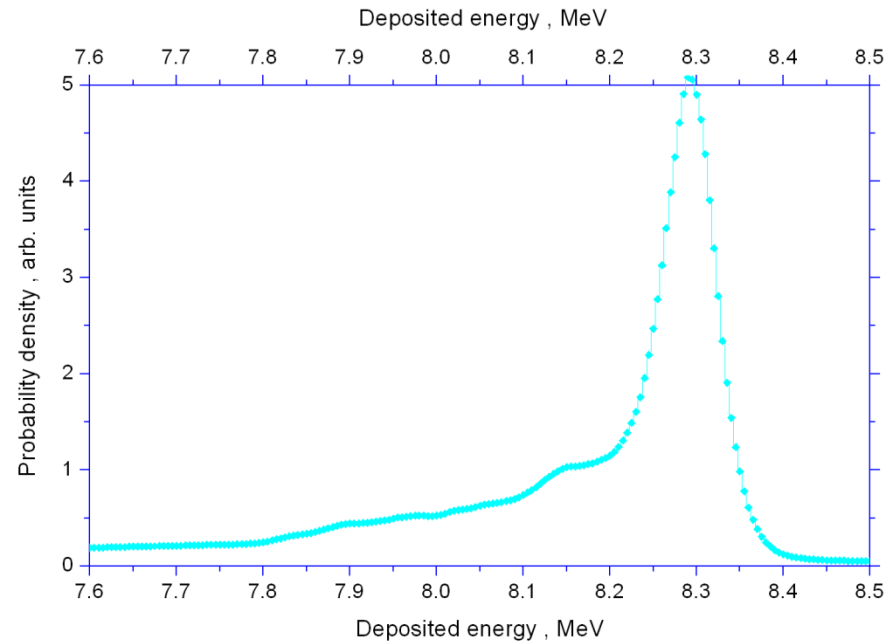


Градуировочная характеристика по положению пиков Ra^{226}

Анализ полученных результатов

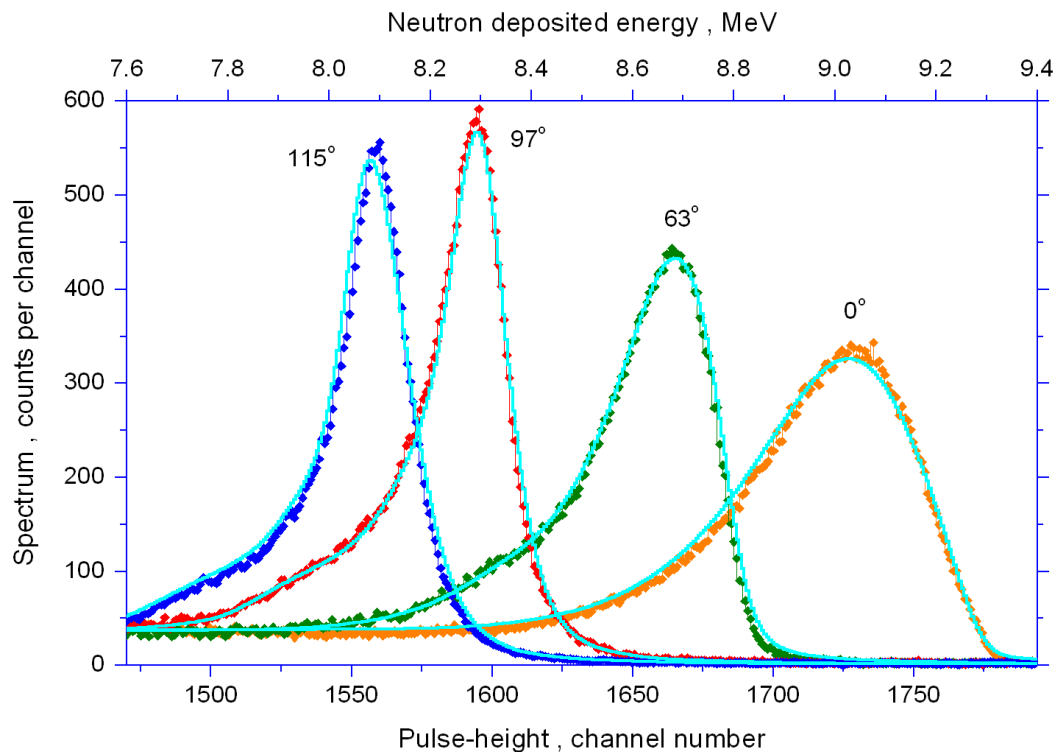


Спектры нейтронов для значений угла вылета 0°, 63°, 97° и 115°, рассчитанные с использованием программы SRIANG



Функция отклика, восстановленная из экспериментального распределения амплитуд импульсов для угла вылета 97°

Сравнение экспериментальных и расчётных распределений



По результатам сравнения наблюдается практически полное совмещение экспериментальных и расчётных распределений, что подтверждает корректность модели расчёта спектра процедуры DT-нейтронов и процедуры восстановления



Градиентовочная характеристика (DT-нейтроны)

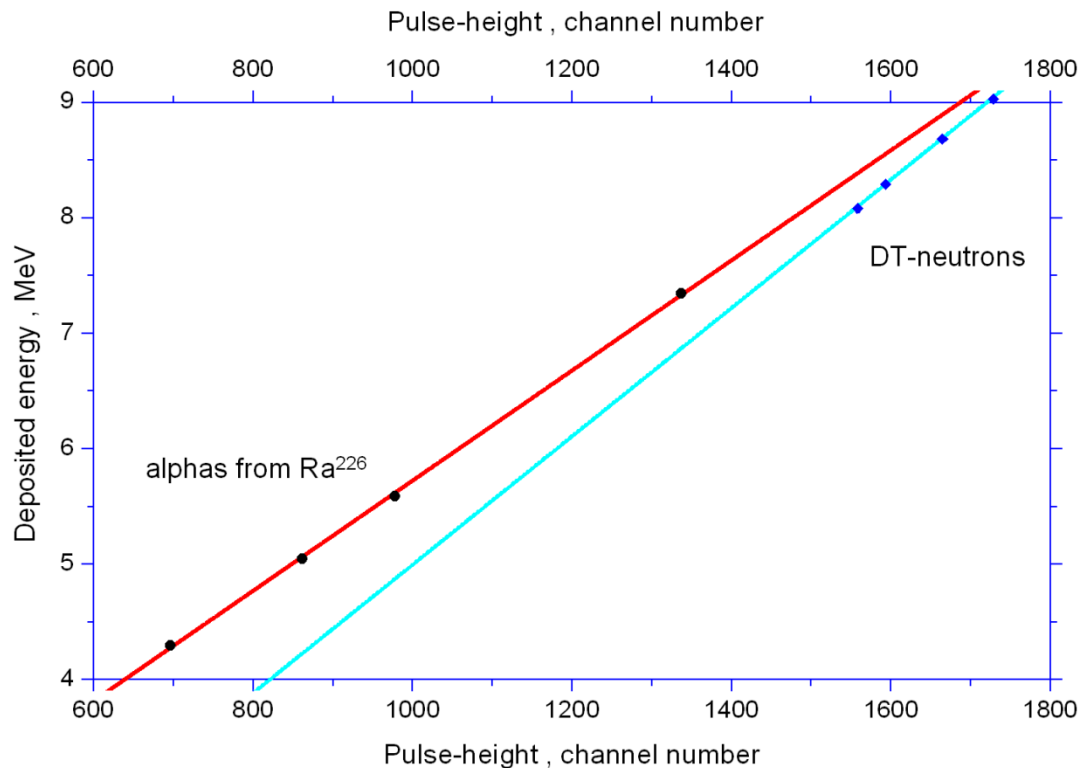
$$E_d = C \times a + b$$

$$a = 5.56 \times 10^{-3} \text{ МэВ/канал}$$

$$b = 0.567 \text{ МэВ}$$

Результат совмещения экспериментальных и расчётных распределений

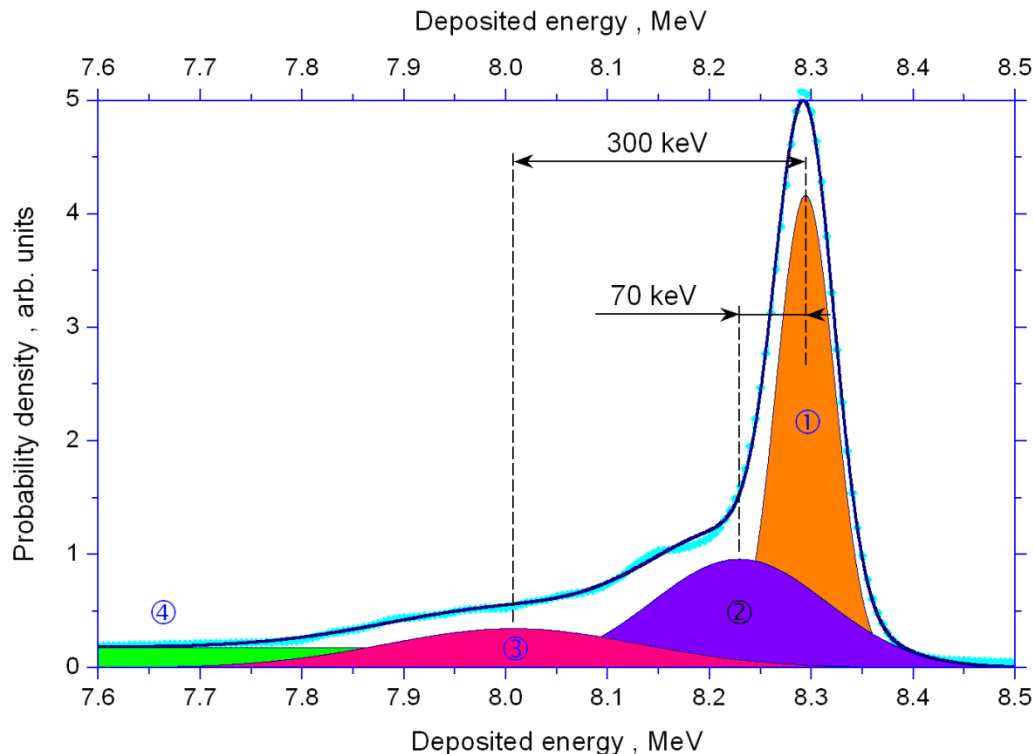
Сравнение градуировочных характеристик



Несовпадение градуировочных характеристик является свидетельством различий в процессах сбора носителей заряда, возникающих при регистрации альфа-частиц и ядер бериллия ^9Be

Градуировочные характеристики по положению пиков Ra^{226} и для различных значений угла вылета DT-нейтронов

Анализ восстановленной функции отклика



Функция отклика, восстановленная из экспериментального распределения амплитуд импульсов для угла вылета 97°

Функция отклика описывается суперпозицией гауссианов

① Основной пик
33% импульсов

② Второй пик
23% импульсов

③ Третий пик
23% импульсов

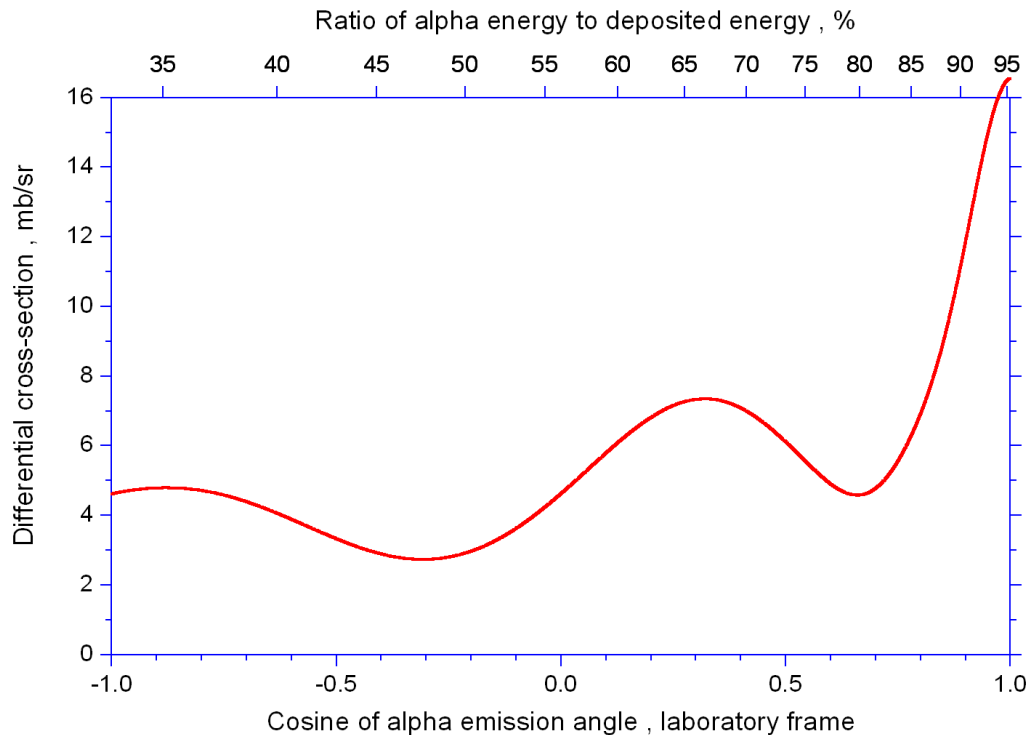
④ Континуум
32% импульсов

$\sigma = 28$ кэВ
 $fwhm = 67$ кэВ

энергетическое разрешение
0.5%

Наличие дополнительной структуры функции отклика может быть связано с угловой зависимостью сечений реакции $^{12}\text{C}(n,\alpha)^9\text{Be}$

Угловая зависимость сечения реакции $^{12}\text{C}(n,\alpha)^9\text{Be}$



Угловая зависимость сечения реакции $^{12}\text{C}(n,\alpha)^9\text{Be}$

По верхней шкале указана доля энергии реакции $^{12}\text{C}(n,\alpha)^9\text{Be}$, приходящаяся на альфа-частицу, в зависимости от угла вылета в лабораторной системе координат

α-частица вылетает в направлении, противоположном направлению движения нейтрона



67% энергии приходится на ядро бериллия ^9Be

максимальное проявление различий в сборе носителей заряда

α-частица вылетает в направлении, близком к направлению движения нейтрона



95% энергии приходится на α-частицу

минимальное проявление различий в сборе носителей заряда

Заключение

По полученным в ходе нового эксперимента данным:

Результаты анализа функции отклика

Функция отклика детектора на участке энергий, соответствующему реакции $^{12}\text{C}(n,\alpha)^9\text{Be}$ существенно отличается от модели, включающей одиночный пик и континуум

При восстановлении спектра нейтронов необходимо учитывать наличие дополнительной структуры в распределений в виде двух гауссоподобных пиков, которая может содержать не менее 35% регистрируемых импульсов

Результаты калибровочного анализа

Получены результаты, указывающие на различия в процессах сбора носителей заряда, возникающих в алмазном детекторе при регистрации альфа-частиц и ядер бериллия

Показана необходимость определения отдельной градуировочной характеристики спектрометра при регистрации DT-нейтронов

**Спасибо
за внимание**

