

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

Физический факультет

Кафедра физики элементарных частиц

Курсовая работа

Облучение ядерной эмульсии ядрами  ${}^8\text{He}$   
на сепараторе ACCULINNA

Выполнил:

Студент 212 группы

Марков Антон Александрович

Научный руководитель:

к.ф.-м.н., ст. преп. Климочкина Анна Александровна

Научный консультант:

Д.ф.-м. н. начальник сектора Лаборатории физики высоких энергий,  
руководитель проекта БЕККЕРЕЛЬ Зарубин Павел Игоревич.

Москва, 2024

На сепараторе ACCULINNA ядерная эмульсия была облучена в пучке радиоактивных ядер  ${}^8\text{He}$  с энергией 60 МэВ и обогащением около 80 %. Измерения 278 распадов ядер  ${}^8\text{He}$ , остановившихся в эмульсии, позволяет оценить возможности  $\alpha$ -спектрометрии, а также впервые наблюдать дрейф атомов  ${}^8\text{He}$ , термолитизированных в веществе.

Настоящая курсовая представляет из себя реферат по оригинальной статье [1], а также ознакомление с программой для моделирования SRIM.

## 1 Введение

При энергиях ядер около нескольких МэВ на нуклон становится возможным внедрение радиоактивных ядер в вещество детектора. В этом методе изучаются не сами внедрённые ядра, а дочерние состояния, возникающие при их распаде. При таких вводных данных стоит обратить внимание на метод детектирования медленных ядер в ядерной эмульсии. Преимущество этого метода заключается в лучшем пространственном разрешении (около 0,5 мкм), возможности наблюдать треки частиц в полном телесном угле и рекордном диапазоне чувствительности, начинающемся с релятивистских однозарядных частиц с минимальной ионизацией. Ядерная эмульсия позволяет измерить направление и длину пробега пучковых ядер и продуктов их распада, что служит основой для спектрометрии.

В качестве первого шага в применении данного подхода ядерная эмульсия была облучена в Лаборатории ядерных реакций имени Г.Н. Флерова (ЛЯР ОИЯИ) ядрами  ${}^8\text{He}$  с энергией 60 МэВ в марте 2012 года. После остановки и нейтрализации ядра  ${}^8\text{He}$  в веществе, образовавшийся атом  ${}^8\text{He}$  остается несвяз-

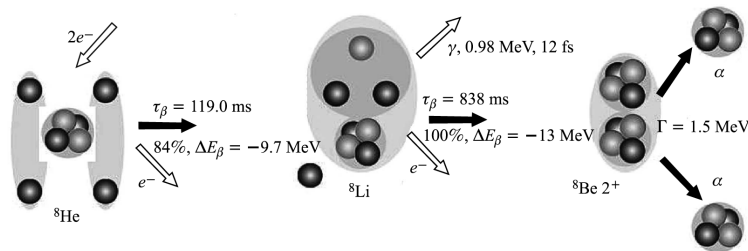


Рис. 1: Схема основного канала каскадного распада изотопа  ${}^8\text{He}$ ; светлые кружки соответствуют протонам, темные - нейтронам; кластеры выделены темным фоном

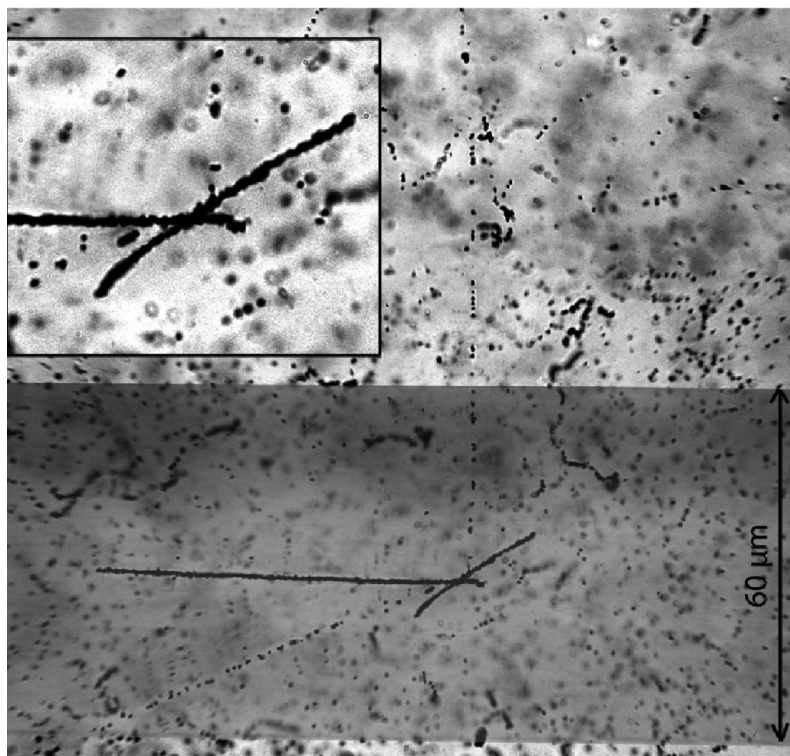


Рис. 2: Мозаичная макрофотография «молоточкового» распада ядра  ${}^8\text{He}$ , остановившегося в ядерной эмульсии (горизонтальный след). В распаде образовались пара релятивистских электронов (точечные следы) и пара  $\alpha$ -частиц (короткие противоположно направленные следы). На выставке сверху представлена увеличенная вершина распада. Для иллюстрации пространственного разрешения образ распада совмещен с макрофотографией человеческого волоса толщиной 60 мкм

-ным, в связи с тем, что является благородным газом, и в результате термализации может испытывать дрейф в среде до  $\beta$ -распада. Период полураспада ядра  ${}^8\text{He}$  составляет  $\tau_\beta = (119,0 \pm 1,5) \cdot 10^{-3}$  с. С вероятностью 84% и с  $\Delta E_\beta = 9,7$  МэВ в результате  $\beta$ -распада перейдет на уровень 0,98 МэВ ядра  ${}^8\text{Li}$ . В дальнейшем, имея период полураспада  $\tau_\beta = (838 \pm 6) \cdot 10^{-3}$  с, ядра  ${}^8\text{Li}$  со 100% и энергией  $\Delta E = 13$  МэВ испытывает  $\beta$ -распад на уровень  $2^+$  ядра  ${}^8\text{Be}$  с энергией 3,03 МэВ. И наконец имея ширину 1,5 МэВ, распадается на пару  $\alpha$ -частиц

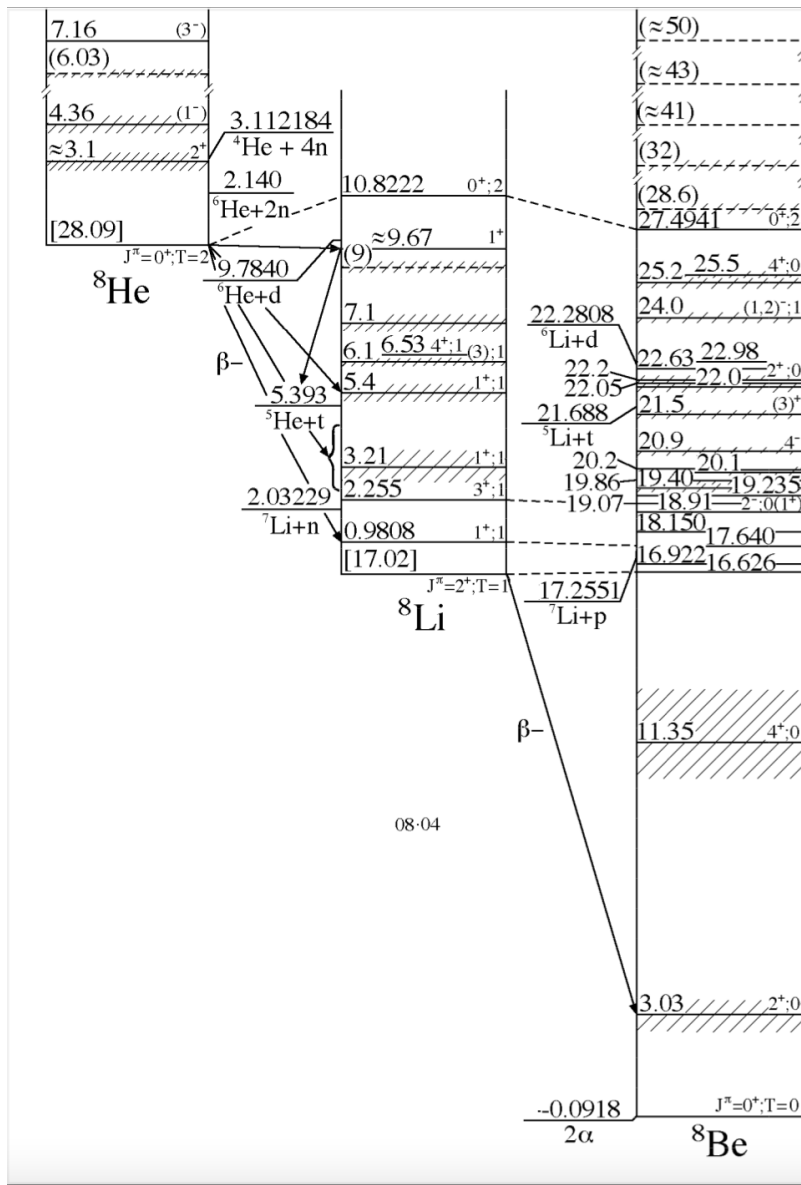


Рис. 3: Диграмма распада изотопа  ${}^8\text{He}$

## 2 Некоторые сведения об ядерной эмульсии

Фотографическая эмульсия состоит из большого числа маленьких кристаллов галоидного серебра (в основном бромистого с примесью йодистого) распределенных в желатине. Основная функция желатина состоит в том, что он образует некоторую трехмерную основу для распределенных кристаллов и препятствует их смещению. Это увеличивает точность измерений.

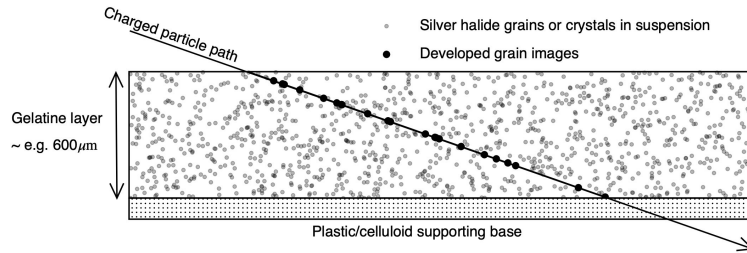


Рис. 4: Схематическое поперечное сечение ядерной эмульсии

Ядерная эмульсия является уникальным веществом, в котором после химической обработки с помощью микроскопа можно увидеть треки заряженных частиц, сформированные в результате ионизационных процессов. Поле заряженной частицы изменяет химические связи в кристаллах  $\text{AgBr}$ . После процессов проявки и фиксирования эти дефекты становятся видимыми, формируя трек.

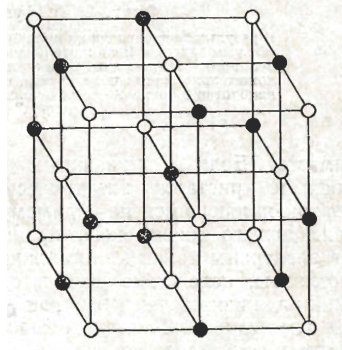


Рис. 5: Структура решетки кристалла бромистого серебра

### 3 Эксперимент

Как отмечалось ранее, облучение ядерной эмульсии ядрами  ${}^8\text{He}$  с энергией 60 МэВ проводилось в ЛЯР ОИЯИ на фрагмент-сепараторе ACCULINNA. Пучок ядер  ${}^8\text{He}$  был получен путем бомбардировки мишени из пиролитического графита толщиной  $175 \text{ мг/см}^2$  тяжелыми ионами  ${}^{18}\text{O}$  с энергией 35 МэВ/нуклон. Мишень, установленная в плоскости  $F_1$ , представляла из себя диск диаметром 20 мм и толщиной 1 мм, закрепленной между двух медных пластин, охлаждаемых водой. Первоначальный пучок выведен из циклотрона У-400М.

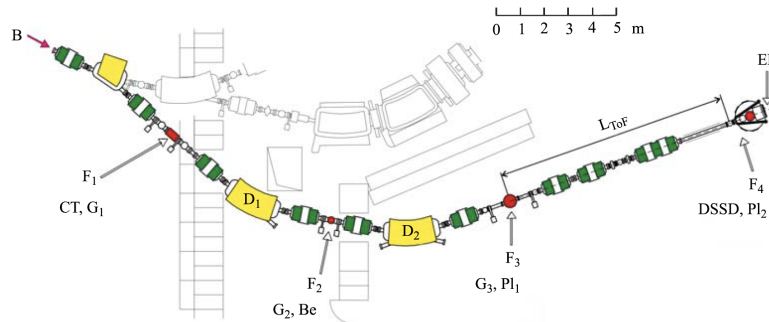


Рис. 6: Схема получения пучка  ${}^8\text{He}$  с энергией 60 МэВ на сепараторе ACCULINNA и места постановки слоев ядерной эмульсии в фокусе  $F_4$  при облучении ядрами  ${}^8\text{He}$ . В - направление первичного пучка, выведенного из ускорителя У-400М; СТ - углеродная мишень;  $F_{1,2,3,4}$  - фокальные плоскости;  $G_{1,2,3}$  - щели коллиматоров; Ве - бериллиевый клин;  $Pl_{1,2}$  - пластиковые сцинтилляционные детекторы; DSSD - стриповый кремниевый детектор;  $L_{ToF}$  - база измерения времени полета; EP - место облучения эмульсионных слоев

Настройка канала первичного пучка осуществлялась через коллиматор, диаметр которого 8 мм, до максимальной трансмиссии пучка  ${}^{18}\text{O}$ , достигавшей 90 %.

Характеристики вторичного пучка  ${}^8\text{He}$  в плоскости  $F_4$ :

1. энергия -  $(23,8 \pm 0,9)$  МэВ/нуклон.
2. интенсивность - около 50 частиц/с при интенсивности первичного пучка около.
3. обогащение ядрами  ${}^8\text{He}$  - около 80 %.

Расчетная энергия ядер  ${}^8\text{He}$  перед попаданием в эмульсионную сборку составляла около  $(59,2 \pm 4,5)$  МэВ. Пучком с такими характеристиками происходило облучение нескольких эмульсионных слоев. Период облучения каждого слоя - 10 мин. Интегральный поток - около  $4 \cdot 10^4$  ядер  ${}^8\text{He}$ .

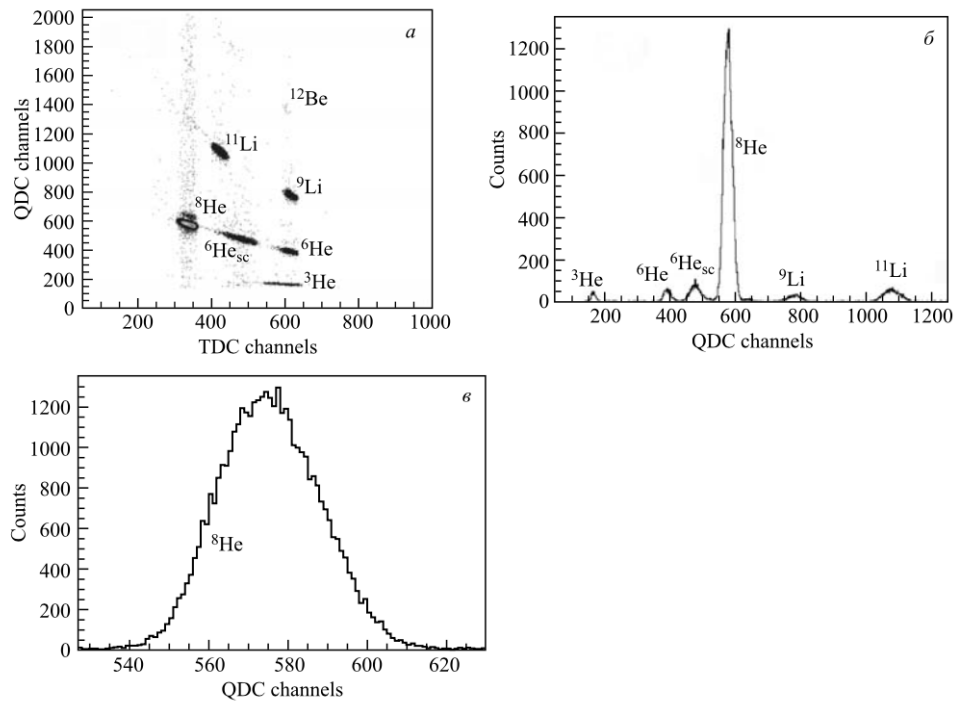


Рис. 7: Состав пучка, сформированного на сепараторе ACCULINNA при настройке на изотоп  ${}^8\text{He}$  из реакции фрагментации ядер  ${}^{18}\text{O}$  с энергией 35 МэВ/нуклон на мишени  ${}^{12}\text{C}$ : идентификация частиц при помощи кремниевого детектора и времени полета (а); спектр энергетических потерь всех частиц пучка в кремниевом детекторе толщиной 1 мм (б); энергетические потери только для ядер  ${}^8\text{He}$  (в). По отношению сумм отсчетов на рис. б и в определялось обогащение пучка ядрами  ${}^8\text{He}$

Характеристика эмульсионных слоев:

1. Размер:  $9 \times 12$  см.
2. Толщина: 107 мкм

Для выбора оптимального наблюдения остановок ядер  ${}^8\text{He}$  устанавливались как перпендикулярно пучку, так и под углом, который варьировался от  $10^\circ$  до  $20^\circ$ . Наилучшим для анализа был признан слой, который располагался под

углом  $10^\circ$  к оси пучка. Наклон пластины обеспечил увеличение слоя торможения. Кроме того облучаемые слои были обернуты в два слоя черной бумаги толщиной по 100 мкм, увеличивая эффективность торможения, особенно чувствительное при угле  $10^\circ$ .

## 4 Анализ "молоточковых" распадов

Первичный поиск  $\beta$  - распадов  ${}^8\text{He}$  при сканировании слоя на микроскопе МБИ-9 с 20-кратным увеличением объектива был ориентирован на «молоточковые» события (рис.2). Отсутствие следов в найденном событии одного из электронов распада интерпретировалось как следствие неполной эффективности наблюдения всех следов распада в эмульсионном слое. Наиболее проблематичным фоном для отбора согласно этому критерию могли бы стать распады ядер  ${}^8\text{Li}$ . Однако, согласно рис. 7, а, присутствие этого изотопа не отмечено. Такому же критерию мог бы соответствовать  $\beta$  - распад остановившихся ядер  ${}^9\text{Li}$  с образованием  ${}^8\text{Be}$  и эмиссией запаздывающего нейтрона (вероятность около 50 %). Примесь этих ядер невелика (рис. 7, а). Кроме того, для «молоточкового» распада от состояния  $2+$  ядра  ${}^8\text{Be}$  требуется заселение уровня  ${}^9\text{Be}$  не ниже 4,7 МэВ. В противном случае распад идет через основное состояние  $0+$  ядра  ${}^8\text{Be}$  и, следовательно, маловероятно наблюдаемым даже в эмульсии. Тем самым, можно было пренебречь фоном от распадов ядер  ${}^8\text{Li}$  и  ${}^9\text{Li}$ .

Многократно между местом остановки и "молоточковым" распадом наблюдался разрыв. Такой эффект может быть объяснен дрейфом термализованного атома  ${}^8\text{He}$ , который возникает в результате нейтрализации ядра  ${}^8\text{He}$ . Благодаря доминированию в пучке ядер  ${}^8\text{He}$  (около 80%) распределение «молоточковых» распадов по площади эмульсии можно представить совместно для всех найденных событий, в том числе 1413 «целых» и 1123 «разорванных»

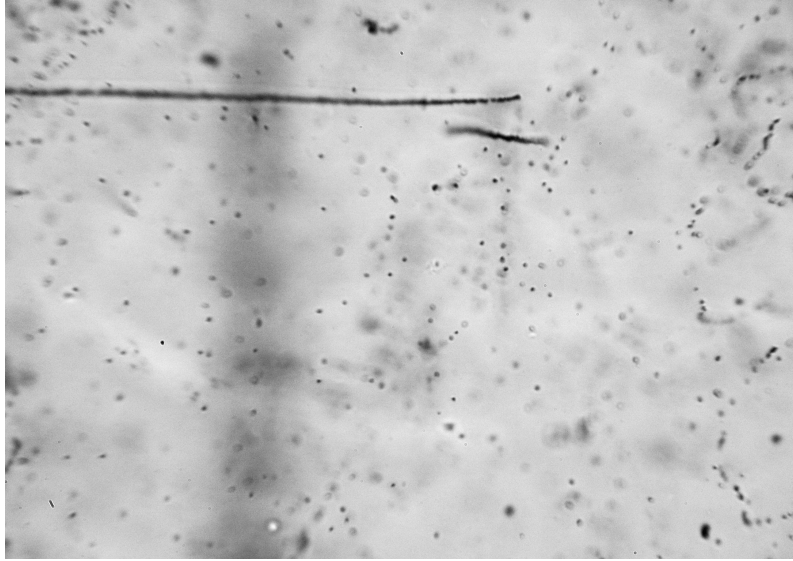


Рис. 8: Макрофотография "молотчкового - разорванного" распада

Измерения событий, в которых присутствовал хотя бы один электрон, выполнялись на микроскопе KSM с 90-кратным увеличением. Средняя длина пучковых следов для 136 "целых" событий составила  $\langle L(^8He) \rangle = (263 \pm 11)$  мкм при среднеквадратичном рассеянии (RMS) 113 мкм. В случае "разорванных" событий -  $(269 \pm 10)$  мкм при RMS 118 мкм. На основе измерения длин следов программа моделирования SRIM позволяет дать оценку кинетической энергии ядер  $^8He$ , проникших в эмульсионный слой. Их среднее значение -  $\langle E(^8He) \rangle = (29 \pm 1)$  МэВ при RMS 10 МэВ.

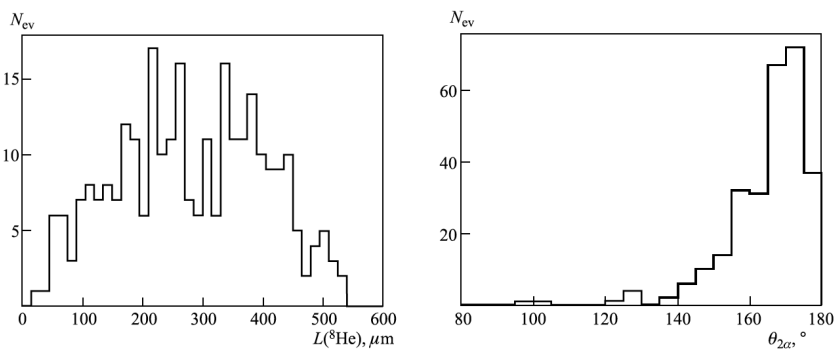


Рис. 9: Распределение следов  $^8He$  по длине пробега в эмульсии (слева); Распределение по углу  $\theta_{2\alpha}$  в паре  $\alpha$  - частиц

Существенно более низкое значение средней энергии  ${}^8\text{He}$  и ее большой разброс на входе в эмульсию по сравнению со значением, заданным фрагмент-сепаратором, объясняется торможением в упаковке.

Координаты вершин распадов и остановок распадных  $\alpha$ -частиц были определены для «молоточковых» распадов из 136 «целых» и 142 «разорванных» событий. В случае «разорванных» событий определение координаты распада делалось на основе экстраполяции следа электрона на «молоточковый» след. Таким образом, были получены углы эмиссии и пробеги  $\alpha$ -частиц.

На рис. 9 (справа) показано распределение углов разлета пар  $\alpha$ -частиц:  $\langle\theta_{2\alpha}\rangle = (169,9 \pm 0,7)^\circ$  при RMS  $(11,6 \pm 0,5)^\circ$ . Небольшой излом объясняется импульсом, уносимый парами электрон - нейтрино

Для определения связи пробегов  $\alpha$ -частиц  $L_\alpha$  из «молоточковых» распадов и значения энергии  $E_\alpha$  был проведен модельный эксперимент в программе SRIM. Энергия  ${}^4\text{He}$  выставлена от 0 до 20 МэВ. Встроенная эмульсия emulsion - liford G5 с плотностью  $3,907 \text{ г/см}^3$  имеет следующий состав:

1. Ag - 48,53 %
2. Br - 35,63 %
3. C - 7,06 %
4. O - 7,06 %
5. H - 1,43 %
6. N - 0,07 %
7. S - 0,2 %

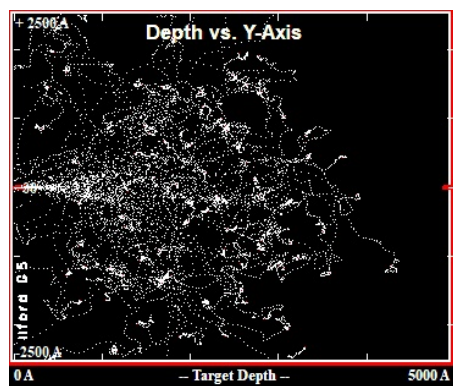


Рис. 10: Треки смоделированных ядер  ${}^4\text{He}$  в эмульсии liford G5

В результате была получена таблица со значениями пробегов с соответствующей энергией смоделированных  $\alpha$ -частиц. При последующей аппроксимации функции вида:

$$y = a * \ln(x) + b * \sqrt{x} + c * x + d$$

были получены соответствующие коэффициенты a, b, c, d.

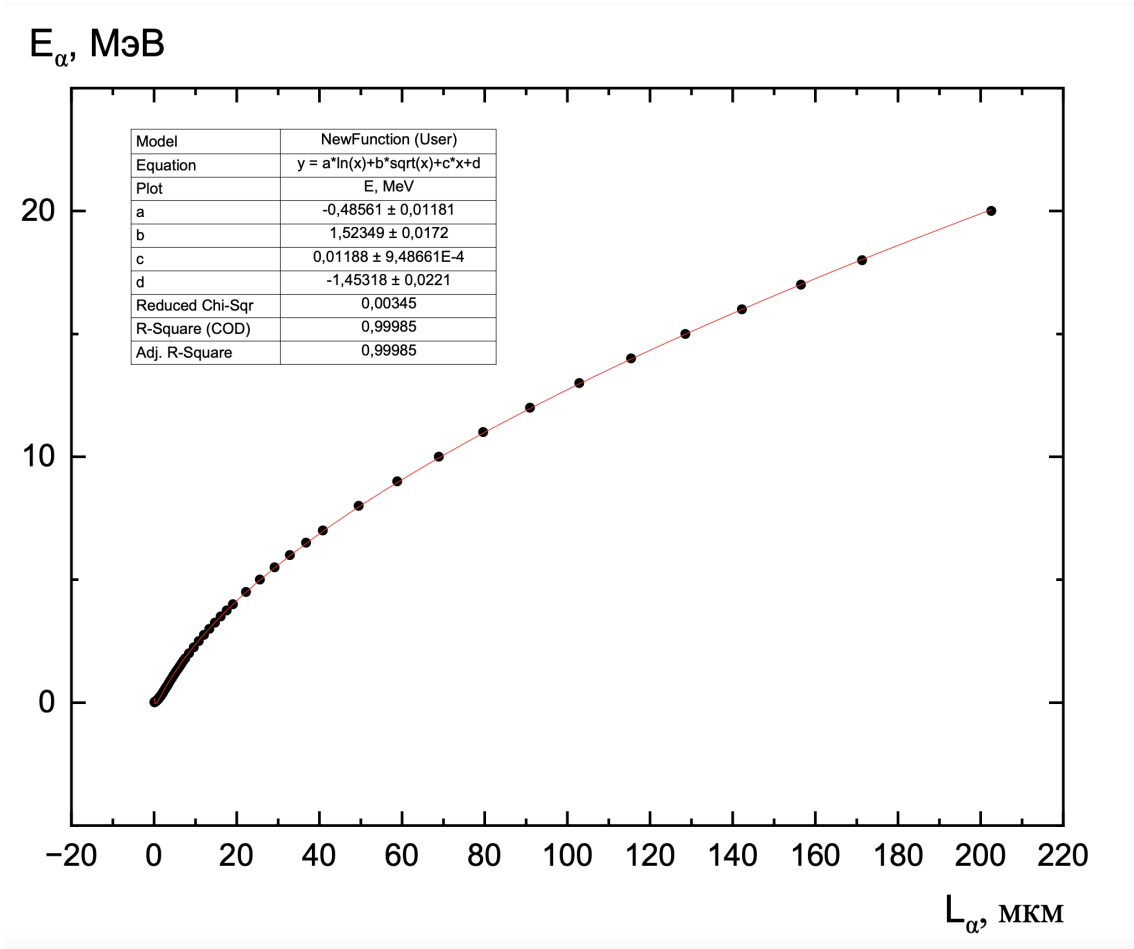


Рис. 11: Определение зависимости энергии  $\alpha$ -частиц от пробегов. На вставке сверху представлены значения коэффициентов

Среднее значение пробегов  $\alpha$ -частиц имеет величину  $(7,4 \pm 0,2)$  мкм при RMS  $(3,8 \pm 0,2)$  мкм, что соответствует среднему значению кинетической энергии  $\langle E(^4He) \rangle = (1,70 \pm 0,03)$  МэВ при RMS = 0,8 МэВ. В пробегах  $\alpha$ -частиц  $L_1$  и  $L_2$  отчетливо проявляется корреляция (рис. 12).

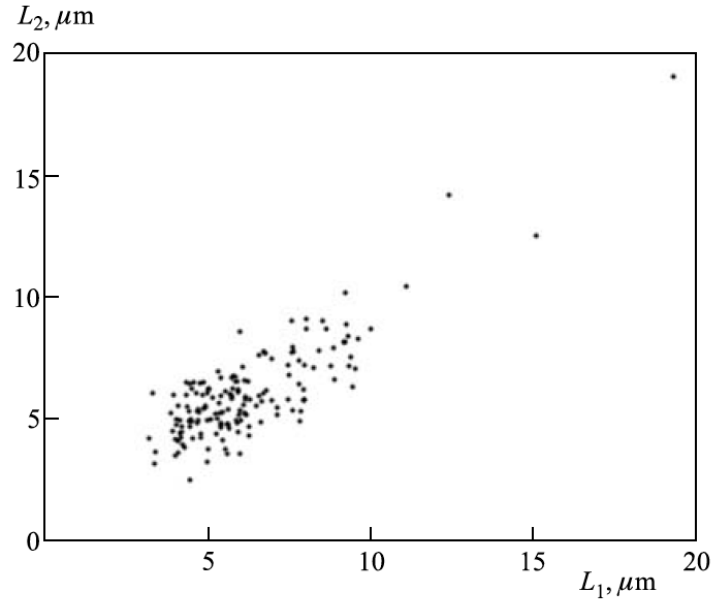


Рис. 12: Распределение пробегов  $L_1$  и  $L_2$  в парах  $\alpha$ -частиц

Знание энергии углов эмиссии  $\alpha$ -частиц позволяет получить распределение энергии  $\alpha$ -распадов  $Q_{2\alpha}$ .  $Q$  является релятивистски - инвариантной переменной, которая определяется как разница между инвариантной массой системы  $M^*$  и массой первичного ядра  $M$ .  $M^*$  определяется как:

$$M^{*2} = (\sum P_j)^2 = \sum (P_i P_j)$$

(Сумма всех произведений 4-импульс  $P_{i,k}$  фрагментов)

В основном распределение величины  $Q_{2\alpha}$  соответствует распадам ядра  ${}^8\text{Be}$  из возбужденного состояния  $2^+$ . Однако среднее значение оказалось несколько больше, чем ожидалось. Это объясняется наличием "хвоста" в области больших значений, который не описывается распределением Гаусса. Применение условий отбора для пробегов  $L_1$  и  $L_2 < 12,5$  мкм, а также  $\theta > 145^\circ$  позволяет получить значение  $\langle Q_{2\alpha} \rangle = (2,9 \pm 0,1)$  МэВ при RMS  $(0,85 \pm 0,07)$  МэВ, что соответствует состоянию  $2^+$  (рис. 3).

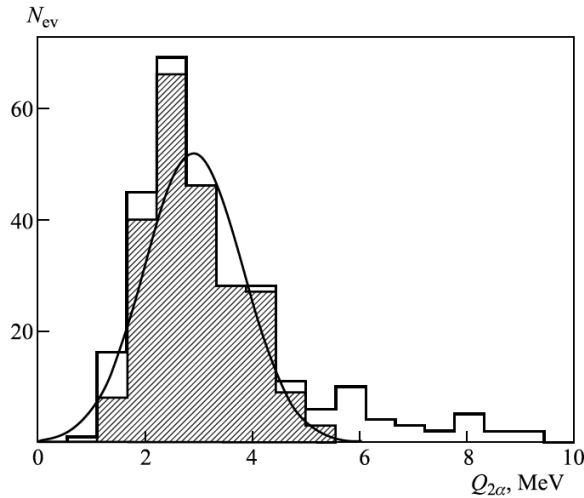


Рис. 13: Распределение по энергии  $Q_{2\alpha}$  пар  $\alpha$ -частиц; заштрихованная гистограмма отвечает условиям отбора событий:  $L_1$  и  $L_2 < 12,5$  мкм ,  $\theta > 145^\circ$

## 5 Заключение

Результатом настоящей работы является демонстрация при облучении в пучке ядер  ${}^8\text{He}$  возможностей недавно воспроизведенной ядерной эмульсии. Тестовый эксперимент позволил представить независимым образом идентификацию радиоактивных ядер  ${}^8\text{He}$  по распадам при остановке в эмульсии, оценить возможность  $\alpha$ -спектрометрии этих распадов, а также впервые наблюдать эффект дрейфа атомов  ${}^8\text{He}$ , термализованных в веществе.

Кроме того, был проведен модельный эксперимент в программе SRIM, который позволяет повторить все расчеты, проведенные в оригинальном исследовании.

Показано, что ядерная эмульсия может служить средством диагностики пучков радиоактивных изотопов.

## 6 Список литературы

1. Д.А. Артеменков, А. А. Безбах, В. Браднова, М. С. Головков, А. В. Горшков, П. И. Зарубин, И. Г. Зарубина, Г.Каминьски, Н. К. Корнегруца, С.А. Крупко, К. З. Маматкулов, Р.Р. Каттабеков, В. В. Русакова, Р. С. Слепнев, Р. Станоева, С. В. Степанцов, А. С. Фомичев, В. Чудоба Облучение

ядерной эмульсии ядрами  ${}^8\text{He}$  на сепараторе ACCULINNA

2. The BECQUEREL Project. <http://becquerel.jinr.ru/miscellanea/8He/8He.html>.
3. The ACCULINNA Project. <http://aculina.jinr.ru/>.
4. TD Slavich. [www.slavich.ru](http://www.slavich.ru).