

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ  
БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования  
«Гомельский государственный университет  
имени Франциска Скорины»

# **Анализ особенностей периферических взаимодействий легких релятивистских ядер в ядерной эмульсии**

Исполнитель

О.Н. Кашанская

Научный руководитель  
заведующий кафедрой теоретической физики,  
к.ф.-м. наук, доцент

Г.Ю. Тюменков

Научный консультант  
научный сотрудник НЭОФТИ ЛФВЭ ОИЯИ,  
к.ф.-м. наук

А.А. Зайцев

Рецензент  
профессор кафедры оптики  
д.ф.-м.н., доцент

С.А. Хахомов

Гомель 2023

**Цель работы:** сравнительный анализ данных эксперимента БЕККЕРЕЛЬ на нуклотроне ОИЯИ по релятивистской фрагментации ядер  $^{10}\text{B}$  и  $^9\text{Be}$  в ядерной эмульсии для выявления особенностей образования фрагментов ядер мишеней различной ионизирующей способности.

**Задачи диссертационной работы:**

- для  $\alpha$ -частичных каналов фрагментации исследуемых ядер представить данные эксперимента БЕККЕРЕЛЬ по сопровождающим фрагментам ядер мишени;
- на основе этих данных исследовать возможную универсальность фрагментации ядер мишени под действием периферических нуклонов в исследуемых ядрах;
- провести подобный анализ в отношении каналов диссоциации с идентифицированными распадами ядер  $^8\text{Be}$  и  $^9\text{B}$ ;
- дополнить статистику  $2\alpha$ -частичной диссоциации ядра  $^9\text{Be}$  и выполнить для них измерения углов испускания  $\alpha$ -частиц с использованием просмотровых и измерительных микроскопов МБИ-9 и KSM-1;
- представить результаты исследования в программном пакете ROOT.

**Область применения:** в периферических взаимодействиях релятивистских ядер  $^{10}\text{B}$  и  $^9\text{Be}$  в ядерной эмульсии исследуется взаимосвязь кластерных и нуклонных аспектов в структуре этих ядер. Кластерная структура легких ядер является ключевым аспектом в широком разнообразии реакций и может оказаться источником для поисков разреженных ядерных состояний. Учет кластерного характера ядерной фрагментации важен при исследованиях по радиационной медицине и геологии.

Исследование кластеризации в релятивистском подходе может дать особые преимущества, поскольку в условиях очень малых передач энергии–импульса в конечных состояниях фрагментов должна наиболее полно отражаться структура начальных состояний ядер.

**Практическая значимость работы:** современные эксперименты проводятся с релятивистскими радиоактивными ядрами с большим избытком нейтронов на магнитных спектрометрах. Они ориентированы на регистрацию фрагментов с начальным зарядом как у исследуемого ядра или близким к нему. Однако в таком подходе теряются принципиально важные каналы, содержащие фрагменты  $\text{He}$  и  $\text{H}$ , и, соответственно, распады  $^8\text{Be}$  и  $^9\text{B}$ . Возможность разрешения этой проблемы методом ядерной эмульсии мотивировала эксперимент БЕККЕРЕЛЬ на нуклотроне ОИЯИ, частью которого является и данная работа.

# Содержание работы

## Введение

1. Применение метода ядерной эмульсии в физике релятивистских ядер
2. Топология фрагментации ядер мишени
3. Фрагментация ядер мишени под действием релятивистских легких ядер

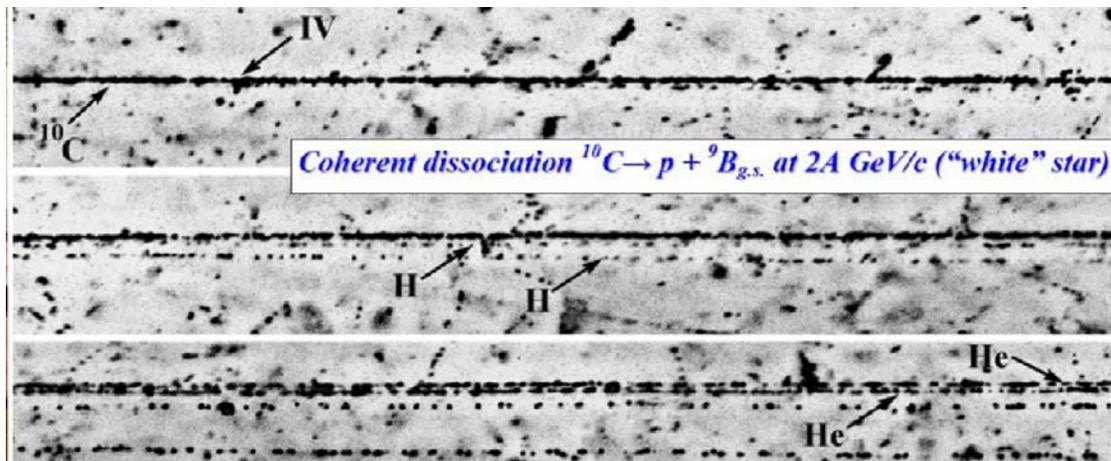
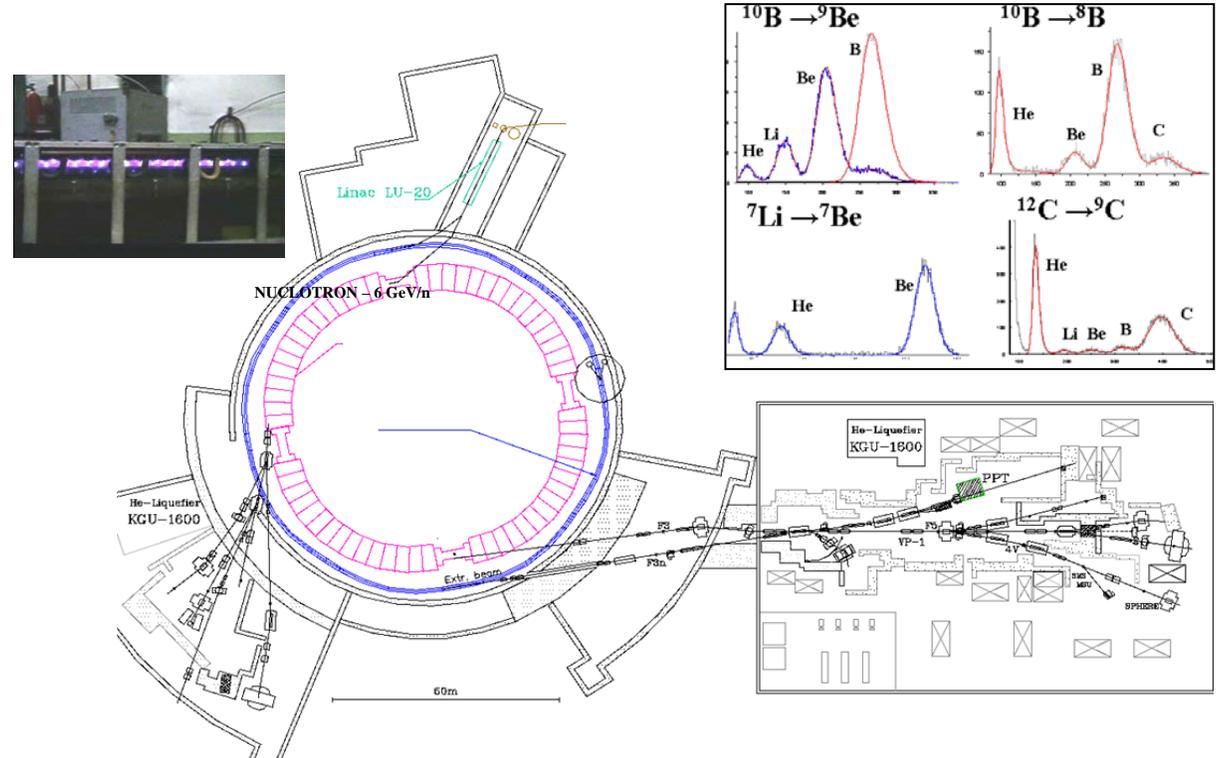
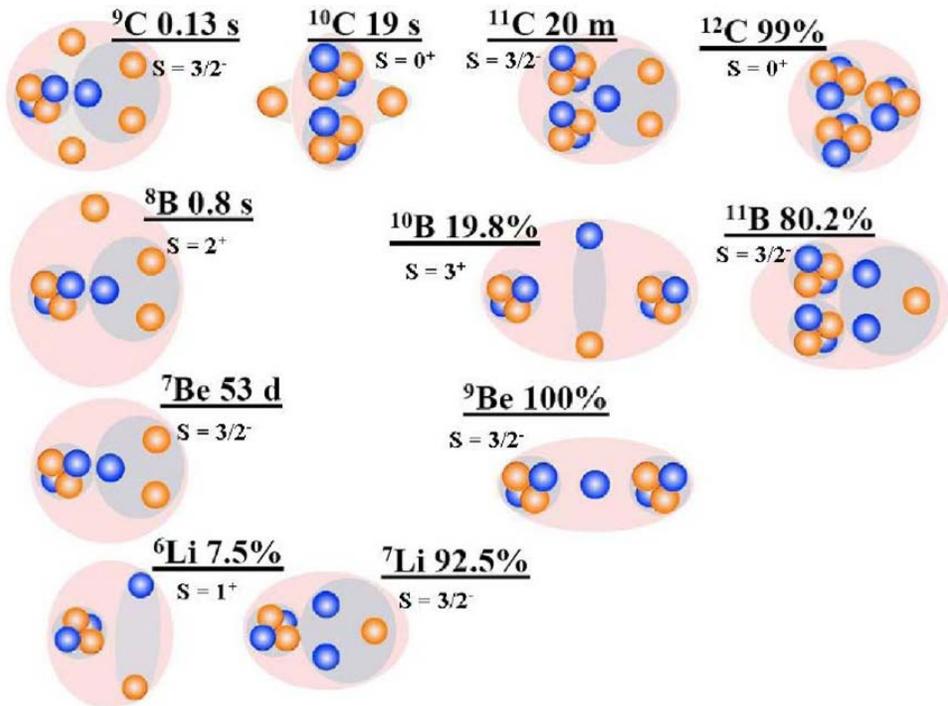
## Заключение

## Список литературы

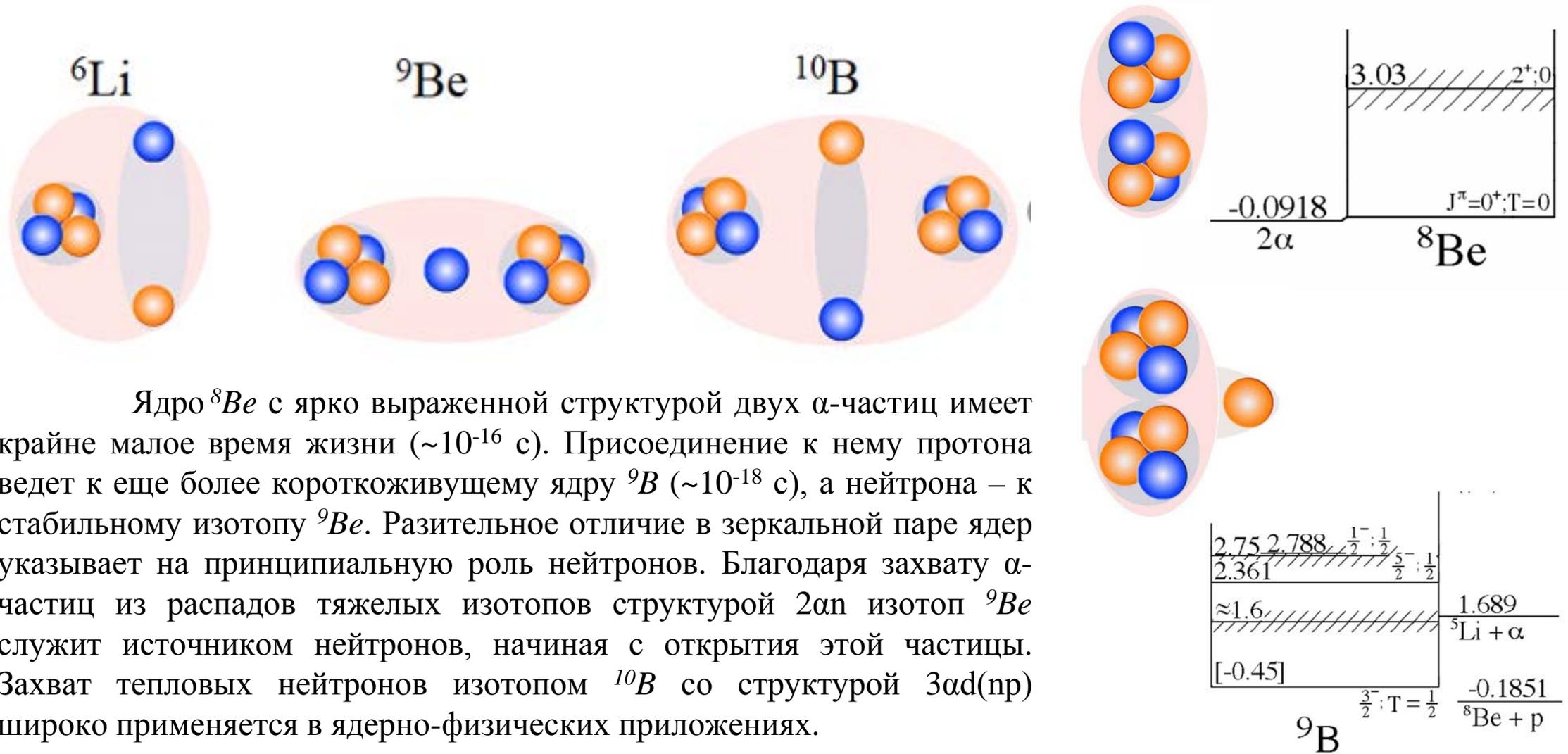
## Статьи

# ВВЕДЕНИЕ

## Проект BESQUEREL на ускорительном комплексе Nuclotron/NICA



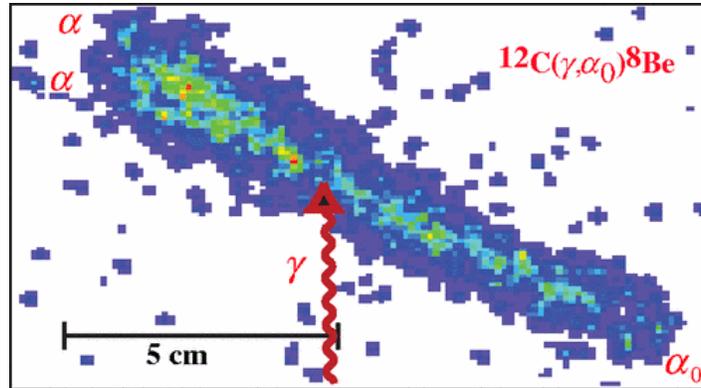
На этой основе исследуется кластерная структура легких стабильных и радиоактивных изотопов в эксперименте БЕККЕРЕЛЬ на Нуклотроне ОИЯИ. По инвариантной массе релятивистских пар и троек He и H при диссоциации изотопов  ${}^9\text{Be}$ ,  ${}^{10}\text{B}$ ,  ${}^{10}\text{C}$  и  ${}^{11}\text{C}$  идентифицируют нестабильные ядра  ${}^8\text{Be}$  и  ${}^9\text{B}$ , а при диссоциации  ${}^{12}\text{C}$  и  ${}^{16}\text{O}$  — состояние Хойла.



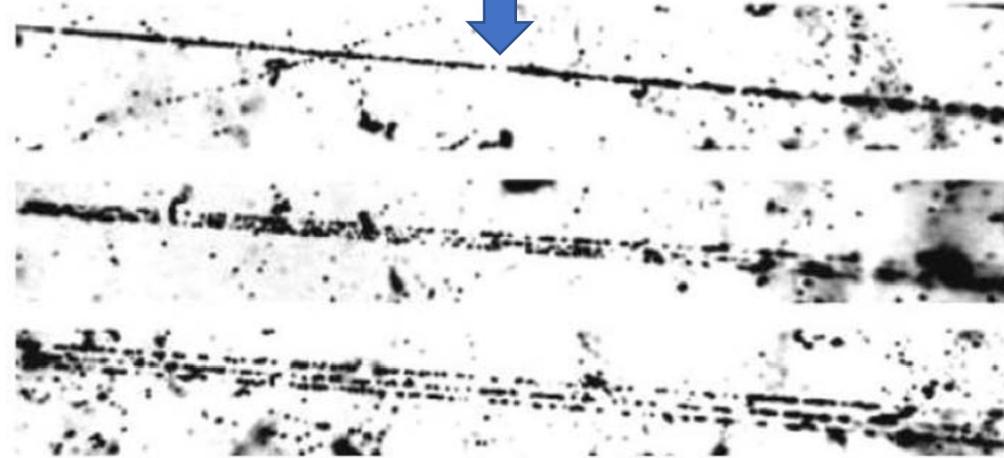
Ядро  ${}^8\text{Be}$  с ярко выраженной структурой двух  $\alpha$ -частиц имеет крайне малое время жизни ( $\sim 10^{-16}$  с). Присоединение к нему протона ведет к еще более короткоживущему ядру  ${}^9\text{B}$  ( $\sim 10^{-18}$  с), а нейтрона – к стабильному изотопу  ${}^9\text{Be}$ . Разительное отличие в зеркальной паре ядер указывает на принципиальную роль нейтронов. Благодаря захвату  $\alpha$ -частиц из распадов тяжелых изотопов структурой  $2\alpha n$  изотоп  ${}^9\text{Be}$  служит источником нейтронов, начиная с открытия этой частицы. Захват тепловых нейтронов изотопом  ${}^{10}\text{B}$  со структурой  $3\alpha d(n\text{p})$  широко применяется в ядерно-физических приложениях.

Кластерная структура легких ядер является ключевым аспектом в широком разнообразии реакций и может оказаться источником для поисков разреженных ядерных состояний. Она определяет процессы ядерной астрофизики и ядерные аспекты физики космических лучей и субнуклонных степеней свободы в ядерной материи. Учет кластерного характера ядерной фрагментации важен при исследованиях по радиационной медицине и геологии.

# Релятивистская диссоциация



Типичное изображение записанное на CCD камеру трех  $\alpha$ -частиц в реакции  $^{12}\text{C}(\gamma, \alpha_0)^8\text{Be} (\rightarrow \alpha + \alpha)$ .



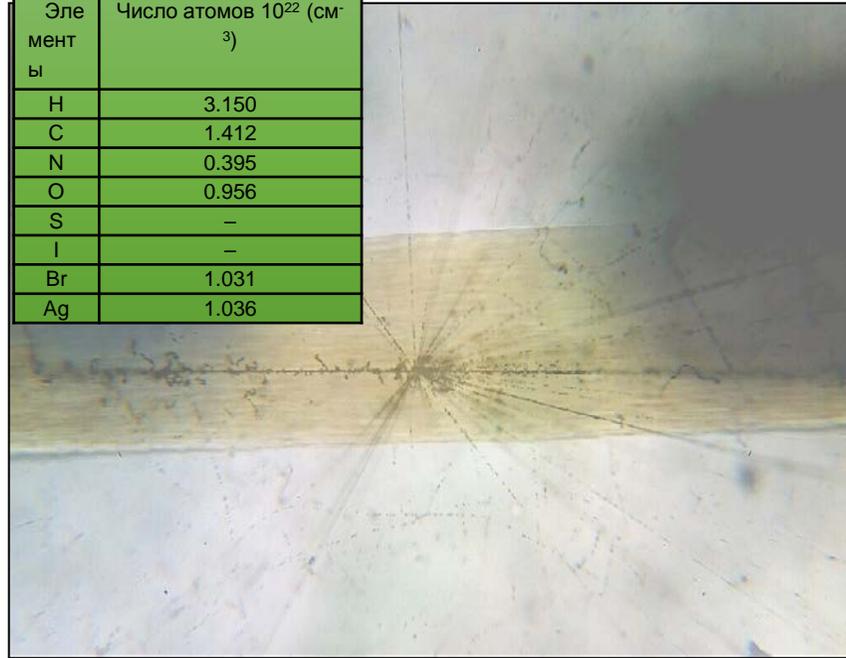
Фрагментация релятивистского ядра  $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$  с импульсом 4.5 А ГэВ/с в периферическом взаимодействии на ядре эмульсии («белая» звезда).



# 1. Методика ядерной фотоэмульсии



Элементы	Число атомов $10^{22}$ (см <sup>-3</sup> )
H	3.150
C	1.412
N	0.395
O	0.956
S	–
I	–
Br	1.031
Ag	1.036



Исследования основаны на методе ядерных трековых эмульсий, обеспечивающих непревзойденное пространственное **разрешение (0,5 мкм)** и диапазон чувствительности для измерения треков заряженных частиц, начиная с сильно ионизирующих короткопробежных ионов вплоть до однозарядных релятивистских частиц. Использование ядерной эмульсии во вновь созданных пучках ускорителей релятивистских ядер позволяет проводить анализ, который на сегодняшний день не может быть достигнут с помощью электронных методов детектирования.

# Достоинства и недостатки метода ядерной фотоэмульсии

## *Достоинства*

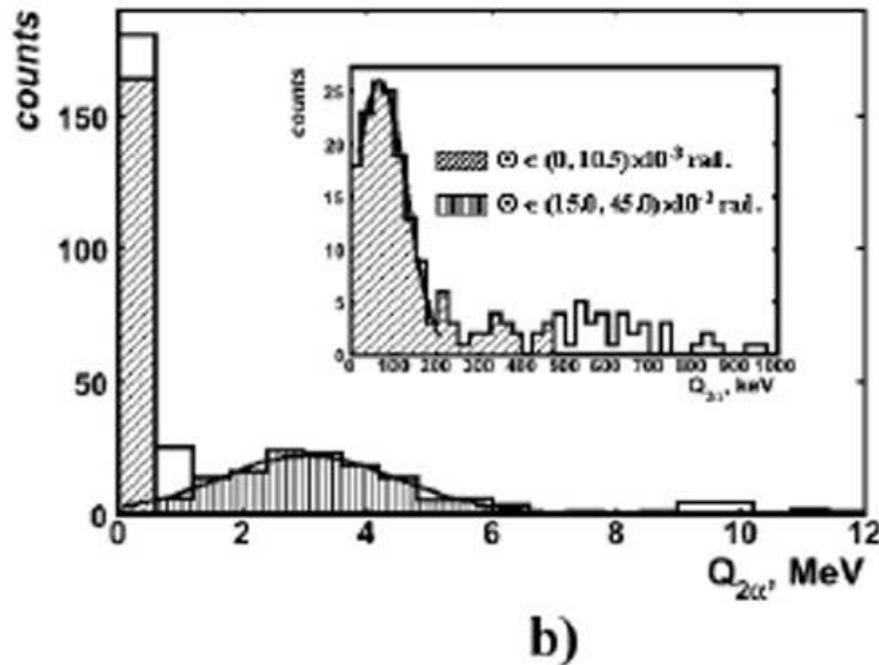
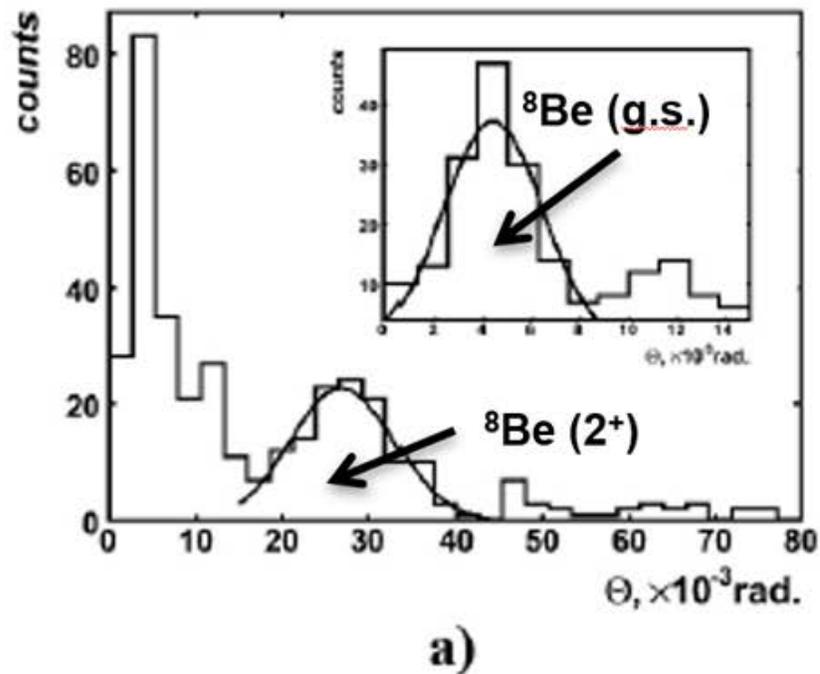
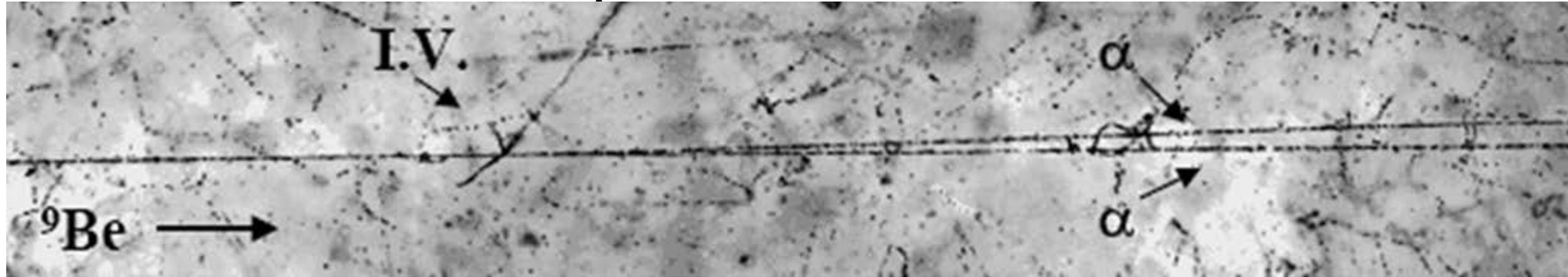
- Высокое пространственное разрешение;
- Регистрирует заряженные частицы практически любой энергии;
- Относительная дешевизна;
- Не требует больших затрат времени ускорителя;
- Навсегда фиксирует треки частиц;
- Хранит большой объём информации при небольшой площади эмульсии (в слое ядерной эмульсии площадью 125 см<sup>2</sup> около 10 ТВ информации).

## *Недостатки*

- Сложный состав вещества фотоэмульсии;
- Сложность химической обработки;
- Невысокая скорость сканирования;
- Чувствительность желатины к внешней среде.

# Топология фрагментации налетающего ядра

## Фрагментация ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\text{He}$

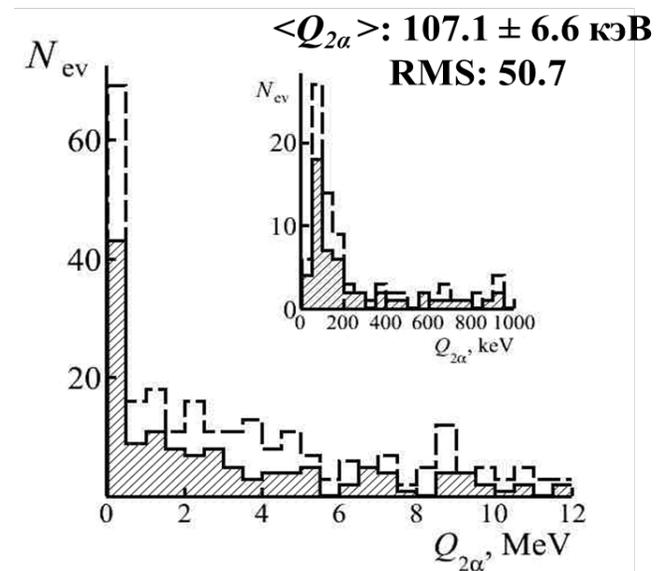
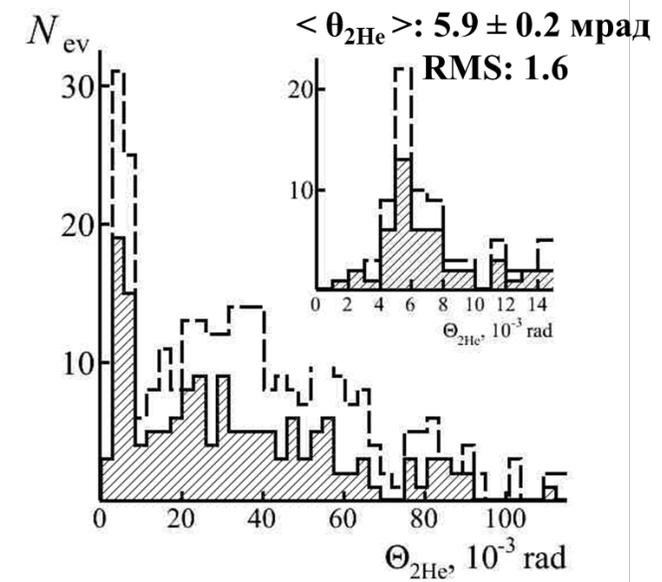
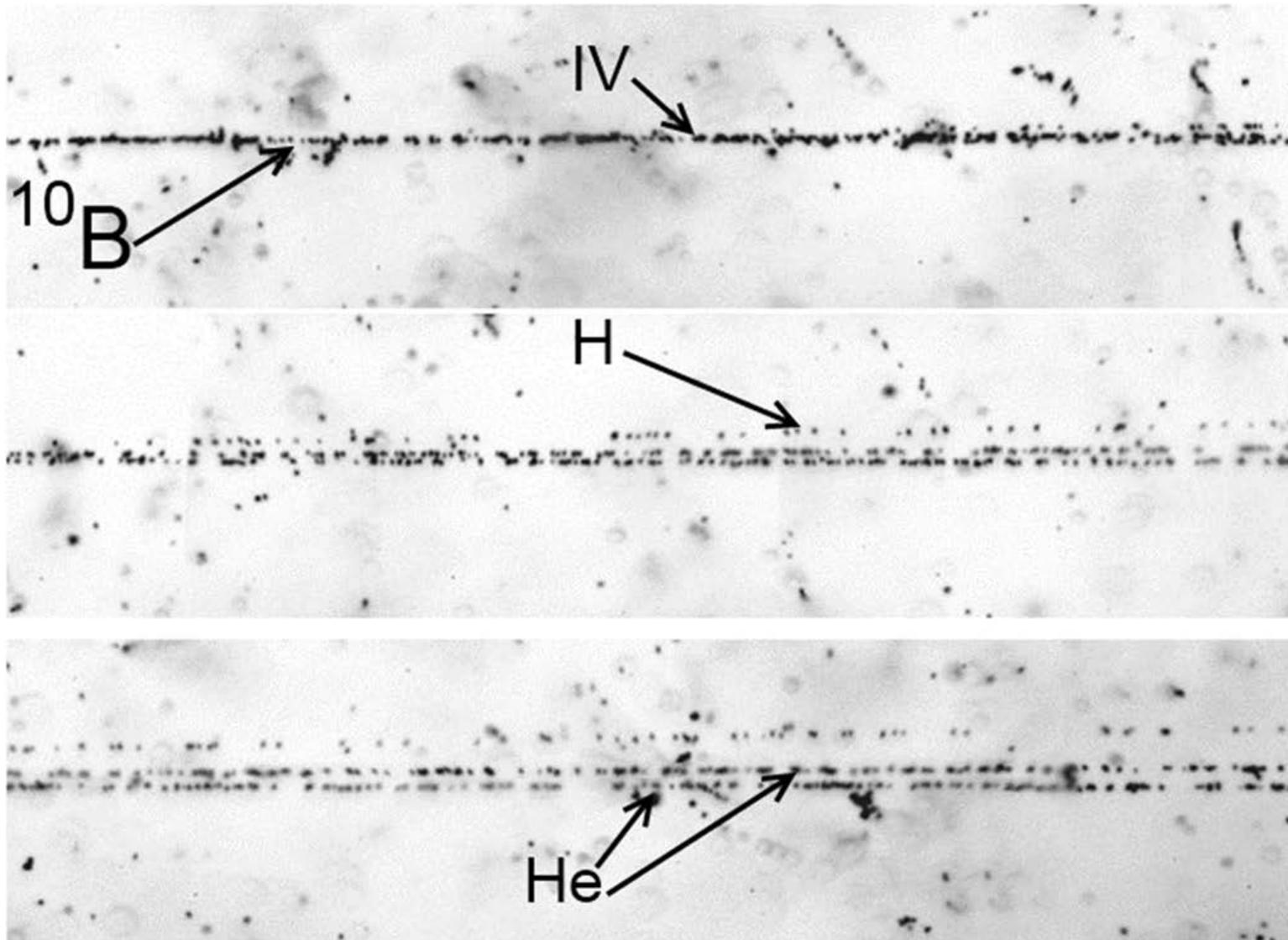


Распределения углов разлета  $\Theta$   $\alpha$  частиц в реакции фрагментации  ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha$  при энергии 1.2 ГэВ. На пересечении: диапазон  $\Theta$  от 0 до  $15 \cdot 10^{-3}$  рад. - а).

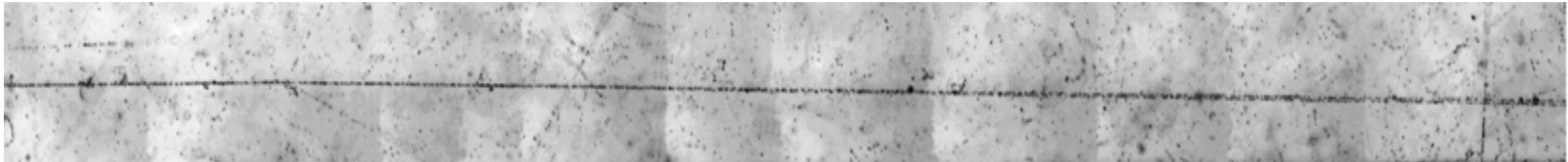
Распределение по инвариантной энергии  $Q_{2\alpha}$  пар  $\alpha$  частиц в реакции фрагментации  ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha$  при энергии 1.2 ГэВ: диапазон  $Q_{2\alpha}$  от 0 до 1 МэВ - б).

# Фрагментация ядра $^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$

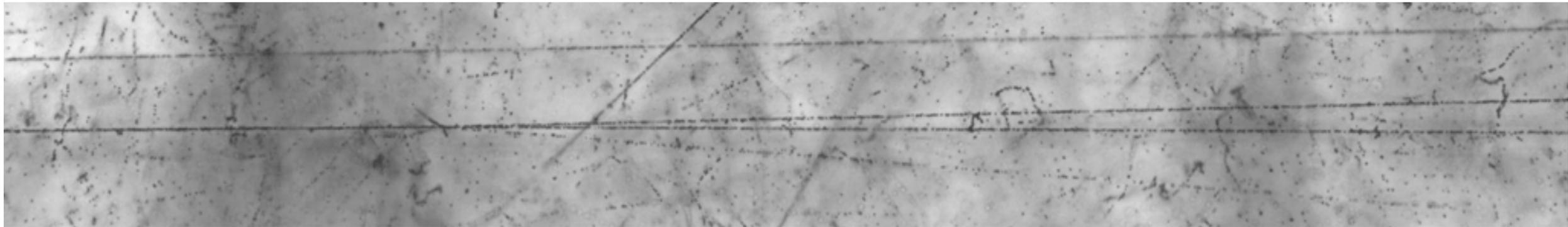
(20%)  $^8\text{Be}_{\text{g.s.}}$  in all founded events of  $^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$



# Фрагментация ядер мишени под действием релятивистских легких ядер



Диссоциация ядра  $^{10}\text{B}$  с образованием двух фрагментов ядер He и пары мезонов



Диссоциация ядра  $^9\text{Be}$  с образованием трех тяжелых фрагментов, одного протона отдачи и одного фрагмента He:  $^9\text{Be} \rightarrow 2\text{He} + s + 3b + 1g$

а) – “черные” ( $b$ -частицы) - представляют собой следы фрагментов ядра мишени с относительной ионизацией  $I/I_0 \geq 7.0$  и  $\beta < 0.23$ , где  $I_0$  - ионизация на треках релятивистских частиц с зарядом  $Z = 1$ . Однако в практическом плане,  $b$ -частицы зачастую удобно идентифицировать по величине их пробега в объеме ядерной фотоэмульсии -  $L \leq 0.3$  см;

б) – “серые” ( $g$  - частицы) - в основном это протоны, выбитые из ядра-мишени, с относительной ионизацией  $6.8 > I/I_0 \geq 1.4$  и  $\beta < 0.7$ , с остаточным пробегом  $\geq 0.3$ мм. Также к этому типу частиц относится небольшая примесь  $\pi$ -мезонов, зависящая от начальной энергии взаимодействия;

в) – “релятивистские” (ливневые или  $s$  - частицы) - к этому классу заряженных частиц относят провзаимодействовавшие протоны налетающего ядра и однозарядные ( $Z=1$ ) непровзаимодействовавшие фрагменты налетающего ядра с относительной ионизацией  $I/I_0 < 1.4$  и  $\beta > 0.7$ .

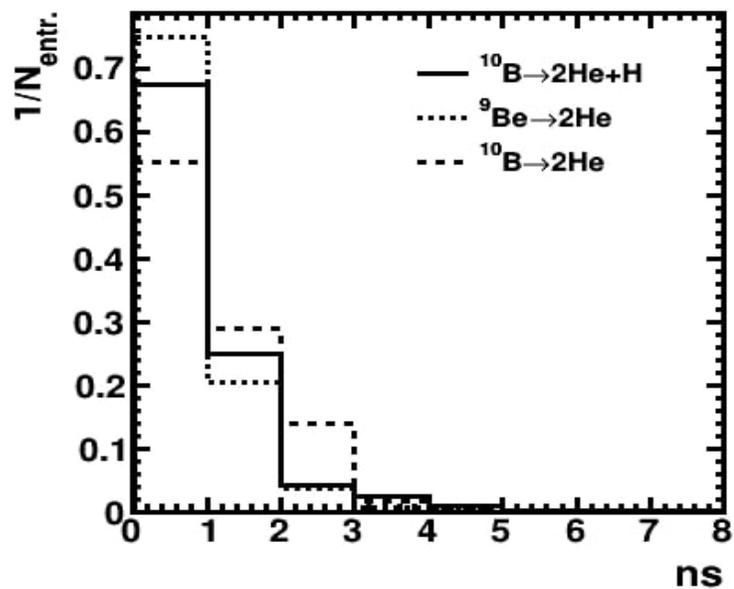
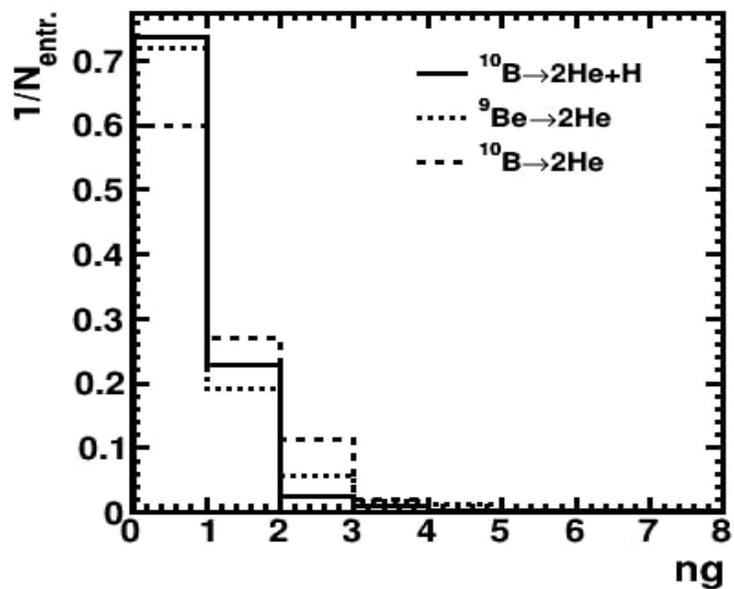
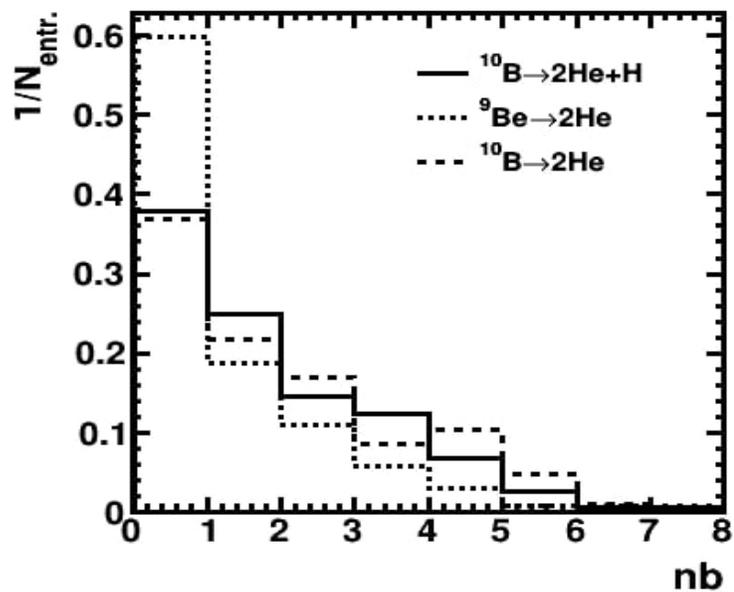
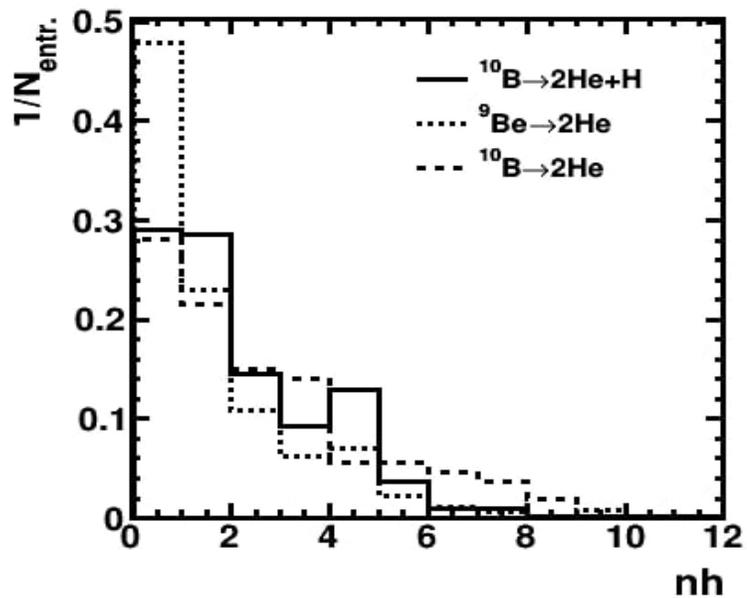
г) – “фрагменты” ( $f$  - частицы) - многозарядные фрагменты налетающего ядра с зарядом  $Z \geq 2$ . Они не входят в число  $b$ - и  $g$  - частиц которым соответствует по производимой ими ионизации. Треки релятивистских однозарядных частиц и фрагменты ядра-снаряда с  $Z=2$  легко различимы под микроскопом числом проявленных зерен на единицу длины трека, представлены на рисунке

# Матрица распределений по множественности для канала $^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He}$

Матрица распределений по множественности $n_s - n_h$ для канала $^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He}$										
$n_h$ $n_s$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	$\Sigma$
0	14	13	11	6	3	3	5	2	2	59
1	10	8	4	6	0	1	0	2	0	31
2	5	1	1	3	3	2	0	0	0	15
3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2
$\Sigma$	30	23	16	15	6	6	5	4	2	107

Матрица распределений по множественности $n_g - n_b$ для канала $^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He}$										
$n_b$ $n_g$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	$\Sigma$
0	30	15	10	5	2	1	0	0	1	64
1	8	5	7	3	4	2	0	0	0	29
2	1	3	1	1	3	2	1	0	0	12
3	0	0	0	0	2	0	0	0	0	2
$\Sigma$	39	23	18	9	11	5	1	0	1	107

Для анализа фрагментации ядер-мишеней из состава ядерной фотоэмульсии были изучены события диссоциации релятивистских ядер  $^{10}\text{B}$  и  $^9\text{Be}$ . Наибольшей статистической обеспеченностью во фрагментации ядер  $^{10}\text{B}$  являются каналы:  $^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$  - 173 события и без наблюдения трека ядра  $\text{H}$  - 107 событий. Во фрагментации ядер  $^9\text{Be}$  таким каналом является  $^9\text{Be} \rightarrow 2\text{He}$  - 475 событий. В ходе пред магистерской практики статистика событий вышеуказанных событий была дополнена 20 и 25 событиями в соответствующих каналах. Для этого использовался просмотровый микроскоп МБИ-9, с суммарным оптическим увеличением 600 крат. Сканирование образцов ядерной эмульсии проводился методом просмотра вдоль трека. Стоит отметить, что данный метод просмотра является время затратной процедурой. Однако, он позволяет вести полноценный анализ топологии фрагментации ядер без ограничений. Таким образом, окончательная статистика событий составила:  $^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$  - 193 события,  $^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He}$  - 107 событий и  $^9\text{Be} \rightarrow 2\text{He}$  - 500 событий.

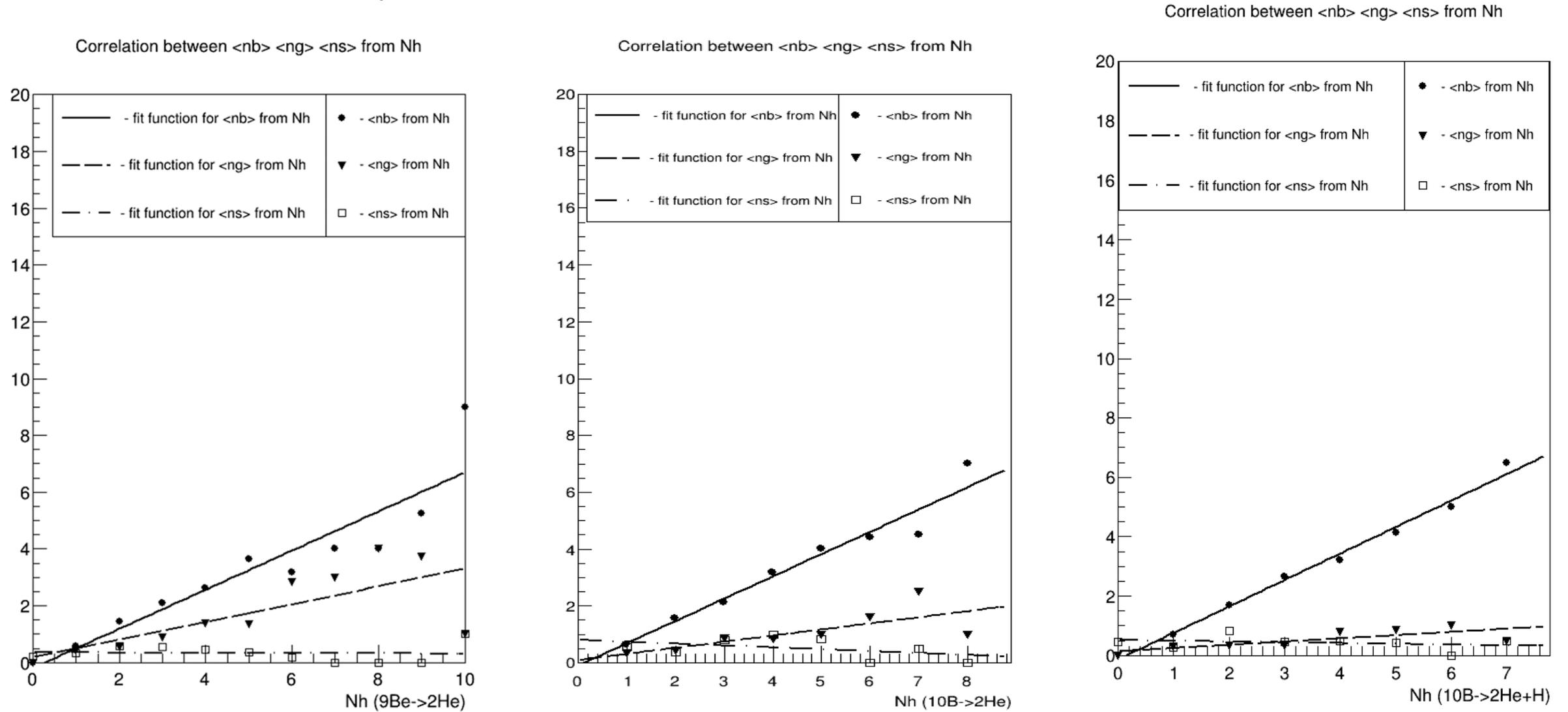


Нормированное распределение по множественности  $nh$ ,  $nb$ ,  $ng$ ,  $ns$  где  $nh \geq 0$  для каналов  $^9\text{Be} \rightarrow 2\text{He}$ ,  $^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He}$ ,  $^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$

## Средние множественности частиц для событий с $nh \geq 0$

	$\langle nh \rangle$	$\langle nb \rangle$	$\langle ng \rangle$	$\langle ns \rangle$	$N_{count}$
$^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$	$1.7 \pm 0.1$ RMS 1.6	$1.4 \pm 0.1$ RMS 1.5	$0.3 \pm 0.04$ RMS 0.6	$0.5 \pm 0.05$ RMS 0.8	193
$^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He}$	$2.1 \pm 0.2$ RMS 2.1	$1.5 \pm 0.15$ RMS 1.6	$0.6 \pm 0.07$ RMS 0.8	$0.6 \pm 0.08$ RMS 0.8	107
$^9\text{Be} \rightarrow 2\text{He}$	$1.2 \pm 0.1$ RMS 1.8	$0.8 \pm 0.05$ RMS 1.2	$0.4 \pm 0.03$ RMS 0.8	$0.3 \pm 0.03$ RMS 0.6	500

Так же были построены корреляции множественности  $\langle n_i \rangle = f(n_j)$  и их аппроксимация линейной зависимостью  $\langle n_i \rangle = a + k n_j$  от  $n_h$ ,  $n_b$ ,  $n_g$  и  $n_s$  для трех каналов фрагментации.



Корреляция между  $\langle nb \rangle$ ,  $\langle ng \rangle$ ,  $\langle ns \rangle$  от  $n_h$  ( ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\text{He}$ ,  ${}^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He}$ ,  ${}^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$ )

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная работа была выполнена в рамках исследовательской программы эксперимента Беккерель на ускорительном комплексе Нуклотрон/NICA в ОИЯИ. Основными результатами выпускной квалификационной работы являются следующее:

а) – Освоена методика ядерных фотоэмульсий. Данная методика широко применяется в исследовательских экспериментах по регистрации треков заряженных частиц в широкой области энергий и ионизации в  $4\pi$ -геометрии. К основным преимуществам методики можно отнести уникальное пространственное разрешение, отсутствие порога чувствительности и относительная простота применения. Ручная обработка фильмовой информации, требующая больших людских ресурсов и времени, является потенциальным недостатком методики. Однако развитие современных автоматизированных микроскопов и применение алгоритмов цифровой обработки изображений нивелируют данную проблему.

б) – Проведенный анализ экспериментальных данных выполнен в рамках исследовательских задач, решаемых в международной коллаборации эксперимента Беккерель в Лаборатории физики высоких энергий им. академиков В.И. Векслера и А.М. Балдина Объединенного института ядерных исследований г. Дубна, Россия.

в) – В качестве экспериментального материала были использованы образцы слоев ядерной фотоэмульсии, продольно облученных в пучках релятивистских ядер  ${}^9\text{Be}$  и  ${}^{10}\text{B}$  с кинетической энергией 1 ГэВ на нуклон. Выполнен просмотр образцов ядерной фотоэмульсии, результатом которого стало дополнение существующей статистики событий с множественным образованием вторичных фрагментов He и H налетающих ядер.

г) – Изучены корреляционные зависимости множественности  $b$ ,  $g$  и  $s$  - частиц во фрагментации ядер-мишени из состава ядерной фотоэмульсии под действием релятивистских ядер  ${}^{10}\text{B}$  и  ${}^9\text{Be}$ . Дан сравнительный анализ по средней множественности частиц в зависимости от типа ядра-мишени. Был установлен эффект насыщения в распределении по множественности  $b$ -частиц в событиях  ${}^9\text{Be}+Em$ . Для  $g$ -частиц прослеживается монотонный рост с числом  $h$ -частиц в обоих наборах данных, в отличие от  $s$ -частиц, имеющих тенденцию к уменьшению.

# Статьи

1. Artemenkov, D.A. Prospects of Searches for Unstable States in Relativistic Fragmentation of Nuclei / [D. A. Artemenkov](#), [V. Bradnova](#), [O. N. Kashanskaya](#), [N. V. Kondratieva](#), [N. K. Kornegrutsa](#), [E. Mitsova](#), [N. G. Peresadko](#), [V. V. Rusakova](#), [R. Stanoeva](#), [A. A. Zaitsev](#), [I. G. Zarubina](#) & [P. I. Zarubin](#) // *Physics of Atomic Nuclei* – 2022 – volume 85, pages 528–539.

**Спасибо за внимание!**