

# Анализ вторичных звезд, индуцированных нейтронами при множественной диссоциации ядер $^{84}\text{Kr}$

Марков Антон Александрович

409 группа, физический факультет МГУ

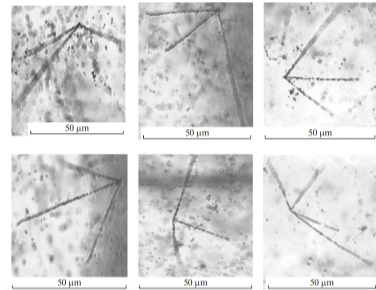
Научный руководитель: к.ф.-м.н. А. А. Климочкина

Научный консультант: к.ф.-м.н. А. А. Зайцев

Москва, 2026

## Физическая постановка задачи

- ▶ Рассматривается множественная диссоциация ядер  $^{84}\text{Kr}$  с энергией 950 МэВ на нуклон в ядерной эмульсии.
- ▶ Заряженные Н- и He-фрагменты регистрируются непосредственно, тогда как нейтроны не формируют непрерывного ионизационного следа.
- ▶ Кандидатами на нейтрон-индуцированные взаимодействия являются вторичные звезды без входящего заряженного трека, локализованные в пределах конуса фрагментации.
- ▶ Основная задача состоит в установлении связи между частотой таких звезд и нейтронной компонентой диссоциации.



Макрофотографии нейтрон-индуцированных звезд

## Физическая мотивация: $\alpha$ -бозе-конденсат

- ▶ В релятивистской диссоциации тяжелого ядра могут формироваться группы  $\alpha$ -частиц с малыми относительными импульсами.
- ▶ Такие группы используются для поиска распадов  ${}^8\text{Be} \rightarrow 2\alpha$ , состояния Хойла  $3\alpha$  и кандидатов на  $4\alpha$ -бозе-конденсатные конфигурации [1, 4].
- ▶ Кандидаты на  $\alpha$ -бозе-конденсатные состояния выделяются по малой энергии возбуждения:

$$Q_{n\alpha} = M_{n\alpha}^* - nm_{\alpha}.$$

- ▶ Нейтроны не входят в заряженную топологию события, но влияют на полноту реконструкции диссоциации и на физическую интерпретацию  $\alpha$ -кластерного канала.

### Зачем анализировать вторичные звезды

Частота нейтрон-индуцированных звезд позволяет оценить нейтральную компоненту, сопровождающую заряженные  $\alpha$ -фрагменты, и тем самым контролировать чистоту отбора кандидатов на разреженные  $n\alpha$ -состояния.

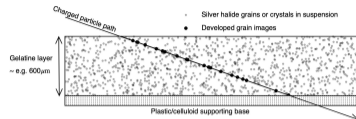
## Цель

Разработать количественную основу для интерпретации вторичных звезд без входящего следа как косвенного проявления нейтронной компоненты фрагментации  $^{84}\text{Kr}$ .

- ▶ Описать геометрию эмульсионного эксперимента и методику отбора рабочей области пластины.
- ▶ Сформулировать топологические признаки вторичных нейтрон-индуцированных звезд.
- ▶ Сопоставить данные по вторичным звездам  $^{84}\text{Kr}$  с протон-ядерными взаимодействиями.
- ▶ Выполнить Geant4-моделирование пробегов нейтронов и протонов в эмульсии.
- ▶ Оценить вероятность регистрации хотя бы одной звезды при заданной нейтронной множественности.

# Метод ядерной эмульсии

- ▶ Ядерная эмульсия обеспечивает объемную регистрацию треков заряженных частиц с микрометрическим пространственным разрешением.
- ▶ Продольная геометрия облучения увеличивает наблюдаемый путь ядра-снаряда в чувствительном слое.
- ▶ По координатам треков восстанавливаются длины пробега, углы испускания и пространственная топология фрагментационного конуса.
- ▶ Нейтронная компонента определяется косвенно по вторичным звездам без входящего заряженного следа.



Слой ядерной эмульсии

- ▶ Истинная длина трека определяется по горизонтальной и вертикальной составляющим:

$$L = \sqrt{L_{\text{hor}}^2 + h^2}.$$

- ▶ Вертикальная координата корректируется с учетом показателя преломления и усадки эмульсионного слоя.
- ▶ Угловые измерения задают кинематическую основу для анализа фрагментационного конуса.

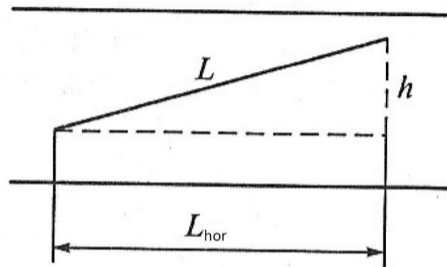
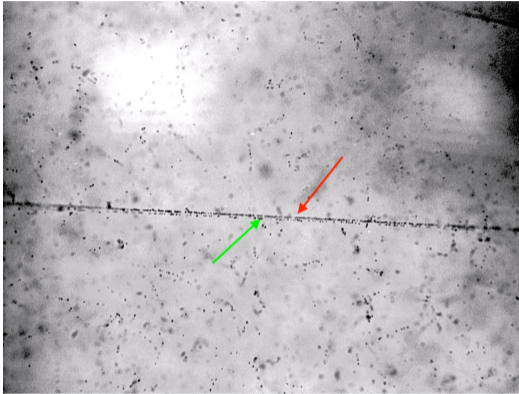
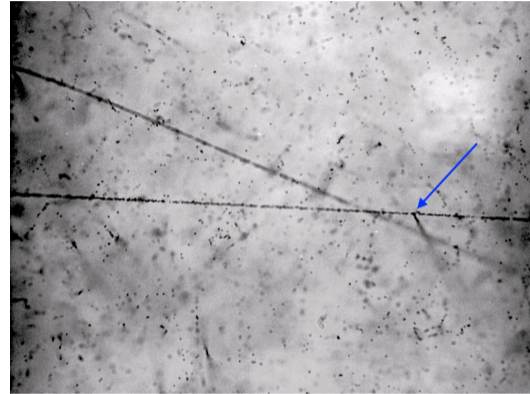


Схема восстановления длины трека в эмульсии

# Микрофотографии фрагментационного события



Фрагменты  $^{12}\text{C}$  и  $\alpha$ -частицы



Область первичной вершины взаимодействия

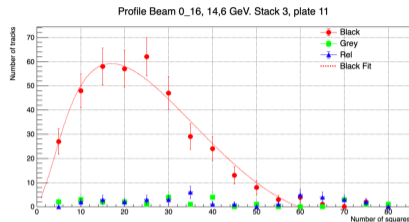
- ▶ Микрофотографии иллюстрируют типичные топологические признаки, используемые при анализе фрагментационных событий в эмульсии.

# Картирование пластины и рабочая область

- ▶ Поверхность пластины разбивалась на квадраты площадью  $1 \text{ мм}^2$ .
- ▶ Для каждого сектора оценивалась плотность следов

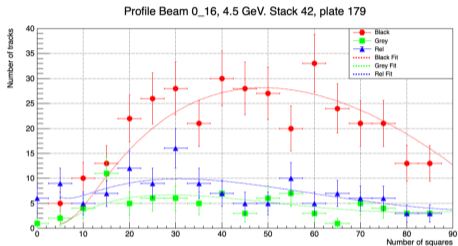
$$\rho_k = \frac{N_k}{S_k}.$$

- ▶ Профиль пучка используется для выбора области с максимальной плотностью первичных треков и минимальной фоновой загрузкой.
- ▶ Такой отбор снижает вероятность ложной идентификации вторичных звезд.

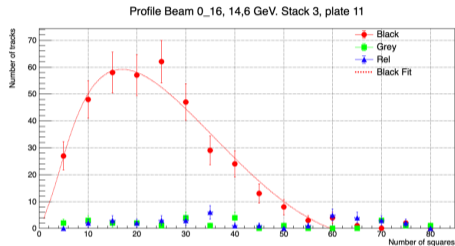


Пример распределения плотности следов

# Профиль пучка при различных условиях облучения



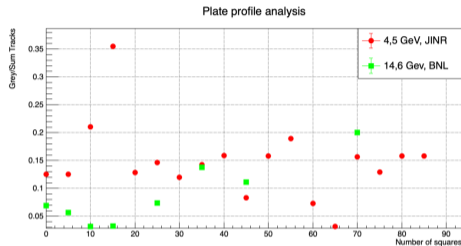
Профиль для облучения при 4.5 ГэВ/нуклон



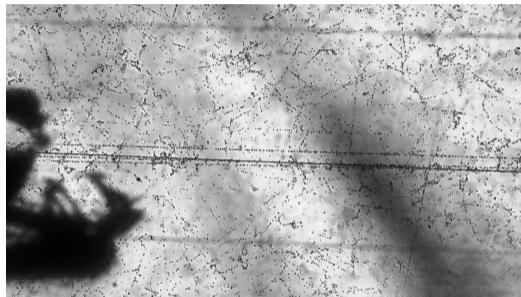
Профиль для облучения при 14.6 ГэВ/нуклон

- ▶ Сравнение профилей показывает, что пространственная концентрация пучка существенно влияет на эффективность поиска редких периферических событий.

# Фоновая загрузка и пересечения следов



Доля  $g$ -частиц по секторам пластины



Пример пересечения фоновых следов с фрагментами

- ▶ Контроль фоновой загрузки необходим для надежного отделения физических вершин от случайных пересечений и дефектов эмульсии.

## Классы следов

- ▶ *b*-частицы: медленные фрагменты ядра-мишени;
- ▶ *g*-частицы: преимущественно выбитые протоны;
- ▶ *s*-частицы: слабоионизирующие релятивистские частицы;
- ▶ *f*-фрагменты: релятивистские фрагменты ядра-снаряда.

## Конус фрагментации

$$\theta_f \approx \frac{0.2}{p_0}$$

Для 950 МэВ на нуклон:

$$\theta_f \approx 0.12 \text{ рад} \approx 6.8^\circ.$$

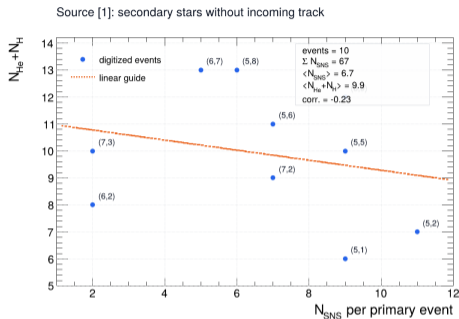
- ▶ Область поиска нейтрон-индуцированных звезд задается направлением первичного трека и характерным углом фрагментации.

# Экспериментальные данные по фрагментации $^{84}\text{Kr}$

- ▶ Для фрагментации  $^{84}\text{Kr}$  рассмотрены 10 событий, в которых в конусе обнаружены вторичные звезды без входящего следа [1].
- ▶ В области просмотра до 10 мм по  $X$  и  $\pm 0.3$  мм по  $Y$  зарегистрировано 67 таких звезд.
- ▶ Для этой выборки:

$$\langle N_{\text{SNS}} \rangle = 6.7, \quad \langle N_{\text{He}} + N_{\text{H}} \rangle = 9.9.$$

- ▶  $N_{\text{SNS}}$  интерпретируется как число зарегистрированных кандидатов, а не как полная нейтронная множественность.



# Сопоставление с протон-ядерными взаимодействиями

- ▶ Для протонов с импульсом 4.5 ГэВ/с входящий трек регистрируется непосредственно [2].

- ▶ Средние множественности:

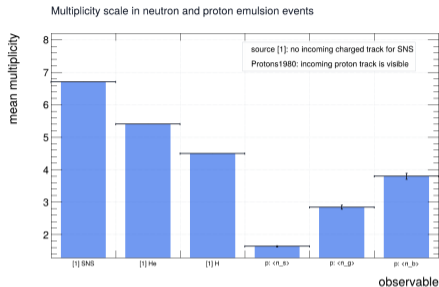
$$\langle n_s \rangle = 1.63, \quad \langle n_g \rangle = 2.84,$$

$$\langle n_b \rangle = 3.79.$$

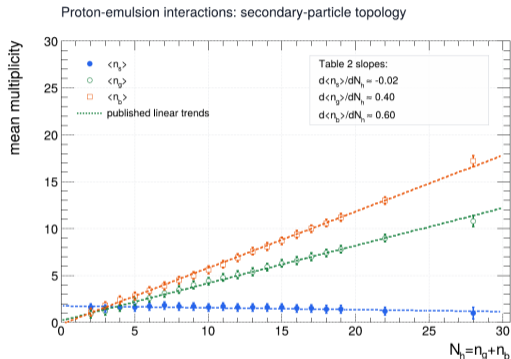
- ▶ Суммарная тяжелоионизирующая компонента:

$$\langle N_h \rangle = 6.63 \pm 0.14.$$

- ▶ Численная сходство к  $\langle N_{SNS} \rangle$  отражает сопоставимый масштаб, но не физическую эквивалентность величин.



- ▶ При росте  $N_h = n_g + n_b$  в протонных звездах возрастает вклад тяжелоионизирующих следов.
- ▶ Множественность  $s$ -частиц меняется слабо, что указывает на различие механизмов образования  $s$ -,  $g$ - и  $b$ -компонент.
- ▶ Данные используются как контрольный пример заряженного взаимодействия с наблюдаемым входящим треком.

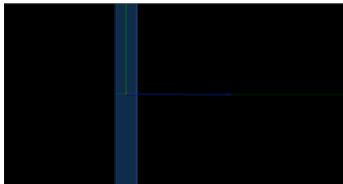


- ▶ Материал: однородная ядерная эмульсия,  $\rho = 3.84 \text{ г/см}^3$ .
- ▶ Физический список: QBBC.
- ▶ Первичные частицы: нейтроны и протоны с  $T = 950 \text{ МэВ}$ .
- ▶ Событие: первое неупругое взаимодействие первичной частицы в объеме эмульсии.
- ▶ Оценка эффективного пробега:

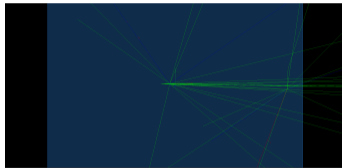
$$\lambda^{\text{MC}} = \frac{\sum_{j=1}^{N_0} L_j}{N_{\text{int}}}.$$

## Режимы

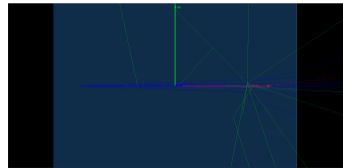
- ▶ слой 4 мм;
- ▶ конус фрагментации, путь 45 мм;
- ▶ продольный пролет 350 мм.



Нейтрон, слой 4 мм  
20 событий, 1 нейтрон

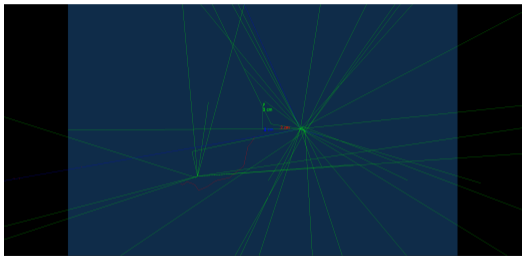


Нейтроны в конусе  
5 событий, 10 нейтронов



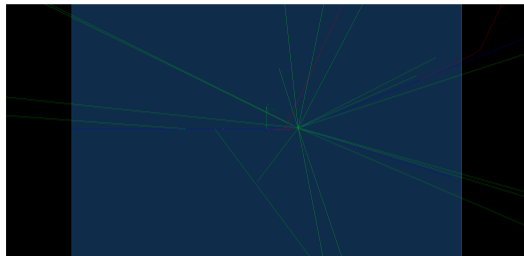
Протоны в конусе  
5 событий, 10 протонов

- ▶ Визуализация используется для контроля геометрии и направления первичных частиц; численные параметры извлекались из статистических прогонов.



Нейтрон, продольный пролет

20 событий, 1 нейтрон



Протон, продольный пролет

20 событий, 1 протон

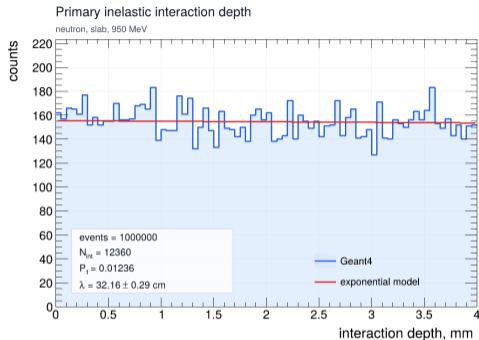
- ▶ Продольная геометрия служит предельным режимом для проверки модели на большой длине пути в эмульсионном слое.

Режим	$L$ , мм	$p_1$ , %	$\lambda$ , см
нейтрон, слой	4	$1.236 \pm 0.011$	$32.16 \pm 0.29$
протон, слой	4	$1.257 \pm 0.011$	$31.61 \pm 0.28$
нейтрон, конус фрагментации	45	$13.149 \pm 0.034$	$31.70 \pm 0.09$
протон, конус фрагментации	45	$13.214 \pm 0.034$	$31.51 \pm 0.09$
нейтрон, продольный пролет	350	$60.335 \pm 0.155$	$31.84 \pm 0.13$
протон, продольный пролет	350	$47.406 \pm 0.158$	$31.80 \pm 0.15$

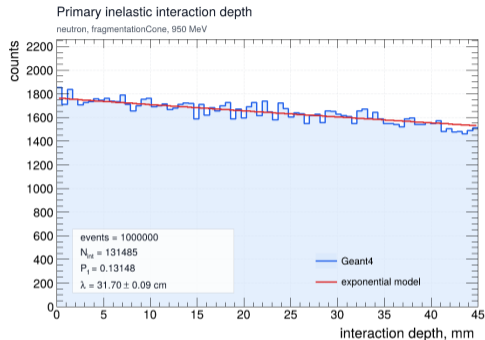
## Интерпретация

В режимах с длиной пути 4 и 45 мм эффективные пробеги протонов и нейтронов совпадают в пределах статистической точности; различие наблюдаемой топологии определяется наличием или отсутствием входящего заряженного трека.

# Распределения глубины для нейтронов



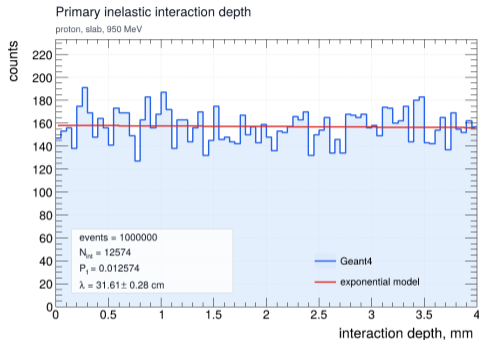
Слой 4 мм



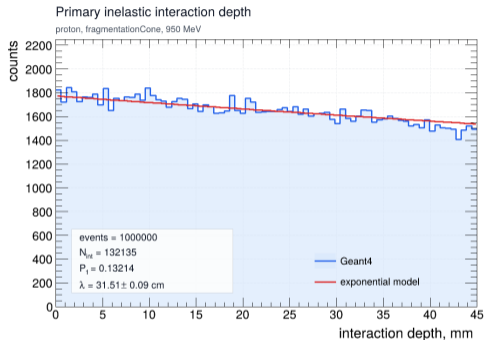
Путь 45 мм

- ▶ На интервале 4 мм распределение близко к равномерному, поскольку  $L \ll \lambda$ .
- ▶ При пути 45 мм экспоненциальный характер распределения уже существенно влияет на вероятность регистрации.

# Контрольные распределения для протонов



Слой 4 мм



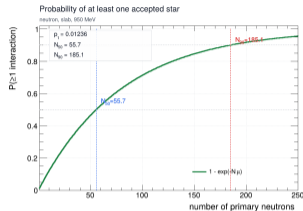
Путь 45 мм

- ▶ Протонный канал является контрольным, поскольку заряженная первичная частица оставляет наблюдаемый входящий след.

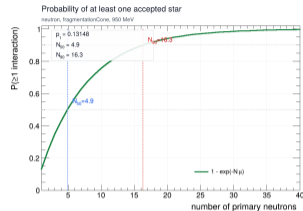
## Модель

$$P_{\geq 1}(N_n) = 1 - (1 - p_1)^{N_n}.$$

- ▶ Одиночная зарегистрированная звезда не определяет точное число нейтронов.
- ▶ Зависимость задает статистическую калибровку чувствительности метода.
- ▶ Слой 4 мм:  $N_{50} \approx 56$ ; путь 45 мм:  $N_{50} \approx 4.9$ .



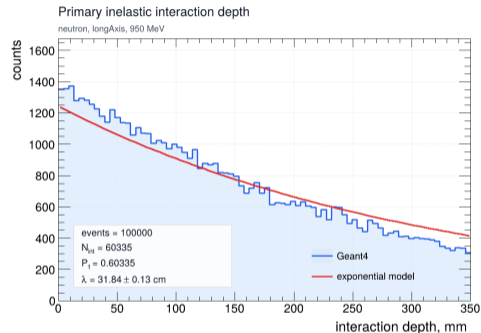
Слой 4 мм



Путь 45 мм

# Продольный контрольный расчет

- ▶ Для пролета через 350 мм эмульсии вероятность первого неупругого взаимодействия нейтрона достигает 60.3%.
- ▶ Средняя глубина зарегистрированного взаимодействия составляет около 134 мм.
- ▶ Данный режим проверяет устойчивость оценки  $\lambda$  при существенно большей длине пути.



- ▶ Наблюдаемое число вторичных звезд является сверткой трех факторов:

$$N_{\text{SNS}} \sim N_n \times p_1 \times \varepsilon_{\text{top}}.$$

- ▶ Здесь  $N_n$  — реальная нейтронная множественность,  $p_1$  — вероятность неупругого взаимодействия в просмотренном объеме,  $\varepsilon_{\text{top}}$  — эффективность топологического отбора.
- ▶ Поэтому число вторичных звезд не может быть напрямую отождествлено с числом испущенных нейтронов.
- ▶ Моделирование позволяет перейти от частоты наблюдения звезд к вероятностной оценке нейтронной компоненты.

### Методический вывод

Геометрия фрагментационного конуса делает метод чувствительным к нейтронной множественности порядка нескольких единиц, а не десятков нейтронов.

- ▶ Новая серия облучений Xe на NICA/Nuclotron расширяет анализ множественной фрагментации к более тяжелой системе [4].
- ▶ Более высокая энергия сужает конус фрагментации и улучшает условия угловых измерений.
- ▶ Совместное использование ядерной эмульсии и CR-39 позволяет контролировать профиль, интенсивность и положение пучка.
- ▶ Автоматизированная микроскопия повышает эффективность обработки событий с большим числом фрагментов и вторичных вершин.
- ▶ Методика вероятностной нормировки нейтронных звезд может быть перенесена на более богатую по топологии систему Xe.

- ▶ Сформулированы критерии отбора вторичных звезд без входящего заряженного следа как кандидатов на нейтрон-индуцированные события.
- ▶ Данные по  $^{84}\text{Kr}$  сопоставлены с протон-ядерными взаимодействиями: близость численных масштабов не означает одинаковой физической природы величин.
- ▶ Geant4-моделирование дало эффективный пробег нейтронов 950 МэВ порядка 32 см в ядерной эмульсии.
- ▶ Для одиночного нейтрона вероятность взаимодействия составляет около 1.24% в слое 4 мм и 13.15% в геометрии пути 45 мм.
- ▶ Геометрия фрагментационного конуса существенно повышает чувствительность к нейтронной компоненте множественной диссоциации.

1. Зайцев А. А. и др. Релятивистская фрагментация ядер в ядерной эмульсии и поиск  $\alpha$ -кластерных состояний. Материалы проекта BECQUEREL, ОИЯИ.
2. Банник Б. П., Вокал С., Лескин В. А. и др. Неупругие взаимодействия протонов при импульсе 4.5 ГэВ/с с ядрами фотоэмульсии. ОИЯИ, P1-13055, 1980.
3. Agostinelli S. et al. Geant4 — a simulation toolkit. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 2003; Allison J. et al., 2016.
4. Artemenkov D. A., Zaitsev A. A., Zarubin P. I. The  $^8\text{Be}$  nucleus and the Hoyle state in dissociation of relativistic nuclei. Рукопись обзора NSR-ENG, 2026.
5. Zaitsev A. A. et al. Exposure of Track Detectors in Xenon Ion Beams at the NICA Accelerator Complex. Phys. Part. Nucl., 2025.