

Амплитудный анализ мюонных и адронных спектров с тонкого сцинтилляционного счетчика на установке ГИПЕРОН-М

А.М.Горин¹, С.В.Евдокимов¹, А.А.Зайцев^{2,3}, П.И.Зарубин^{2,3},
В.И.Изучеев¹, Б.В.Полищук¹, К.А.Романишин¹, В.И.Рыкалин¹,
С.А.Садовский¹, Ю.В.Харлов¹, А.А.Шангараев¹

¹ НИЦ-Курчатовский институт ИФВЭ

²ОИЯИ

³ФИАН

Введение

Сечение реакции $\mu + {}^{12}\text{C} \rightarrow \mu' + 3\alpha$ принципиально важно для геологических оценок. Традиционно, в качестве источника гелия указывается радиоактивный распад урана, тория и их дочерних радионуклидов, а анализ на присутствие гелия служит поиску их месторождений. Вместе с тем реакция $\mu + {}^{12}\text{C} \rightarrow \mu' + 3\alpha$ может служить механизмом генерации гелия в месторождениях природного газа на километровых глубинах, куда способны проникать космические мюоны с энергией сотни ГэВ. В связи с этим измерения сечения реакции при различных энергиях мюонов представляет большой интерес.

Первоочередной интерес представляет возможность полностью детектировать короткопробежные α -частицы, рожденные в событиях ядерной фрагментации $\mu + {}^{12}\text{C} \rightarrow \mu' + 3\alpha$ релятивистскими мюонами.

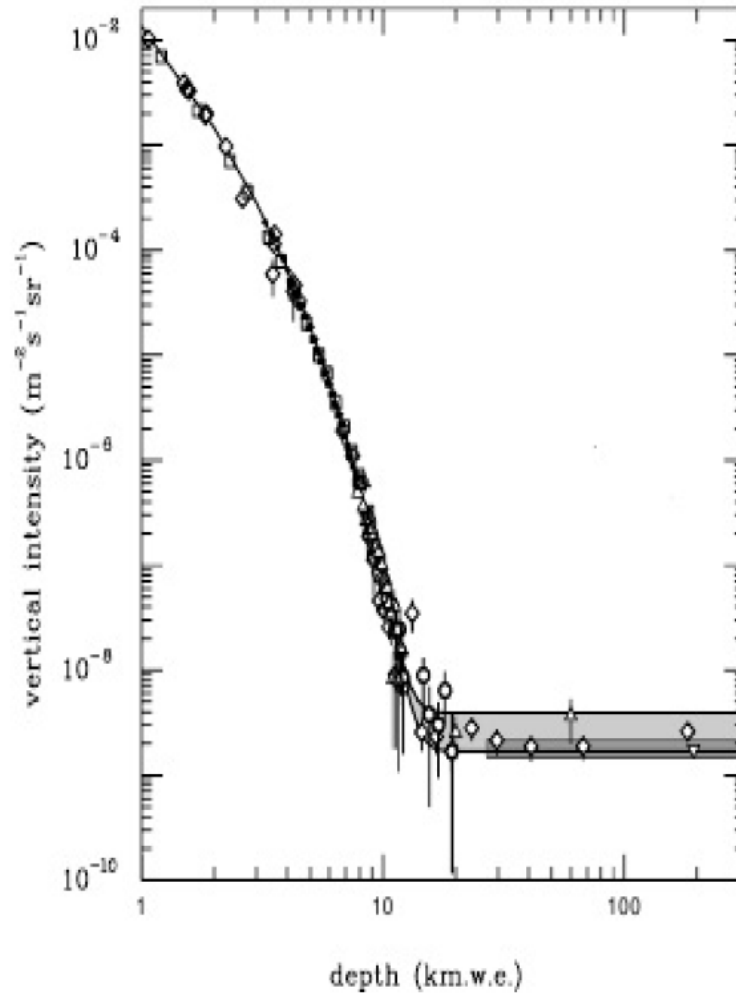
Возможный механизм образования ^4He в земной коре

Содержание ^4He (по объему):

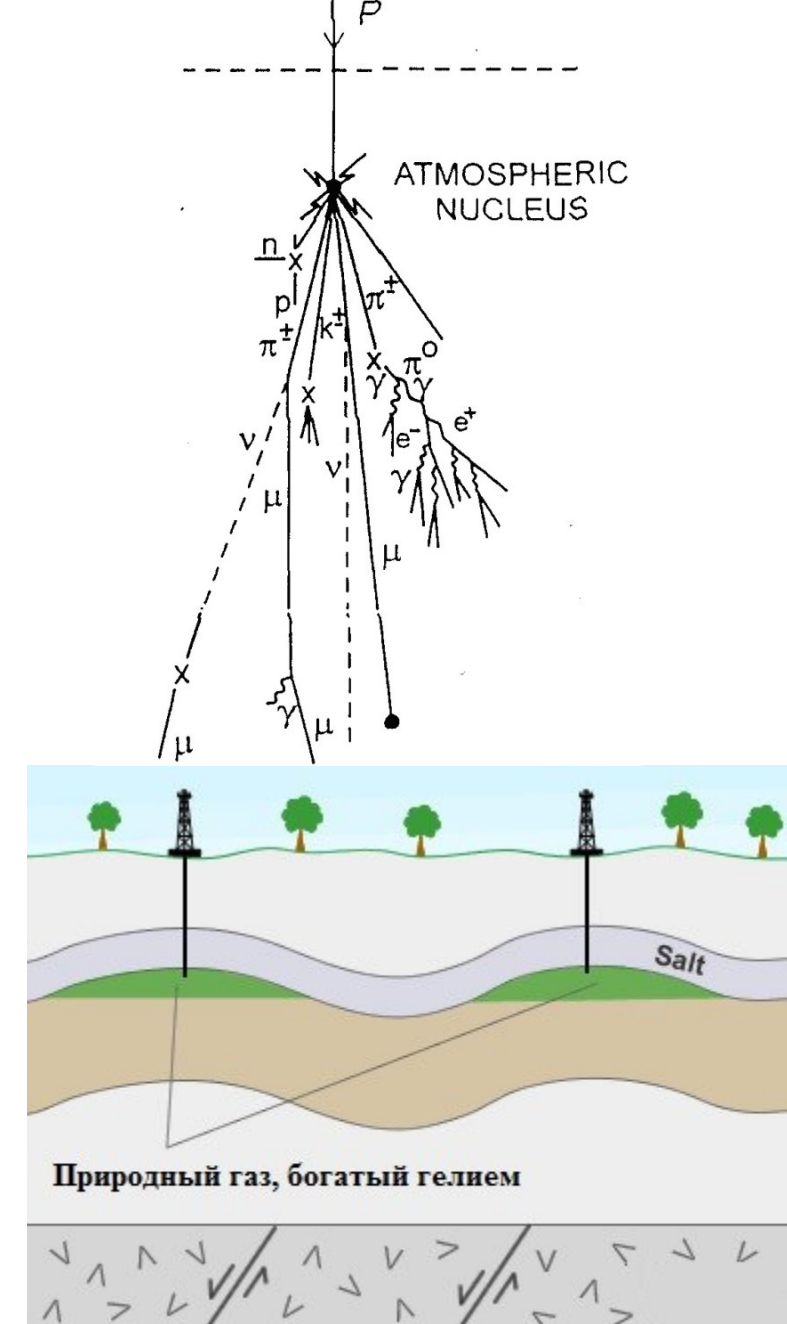
- в атмосфере – $5.27 \cdot 10^{-4} \%$
- в природном газе – (2 - 16)%

Мировой рынок гелия — 170-190 млн $\text{m}^3/\text{год}$

Стоимость гелия составляет 30-32 долл./ m^3 за газ чистотой 99,995 %



Интенсивность потока мюонов в зависимости от глубины в единицах водного эквивалента.



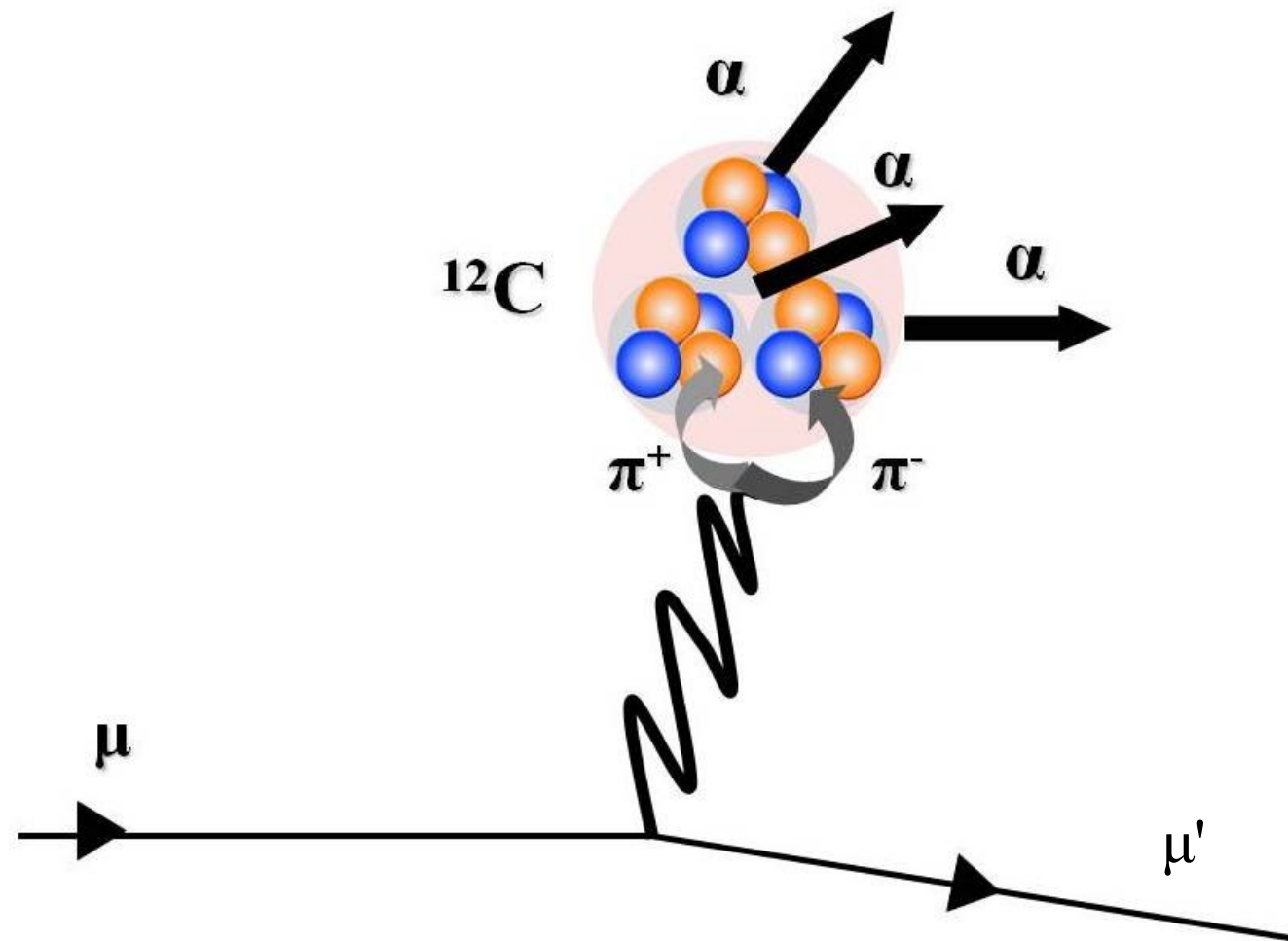


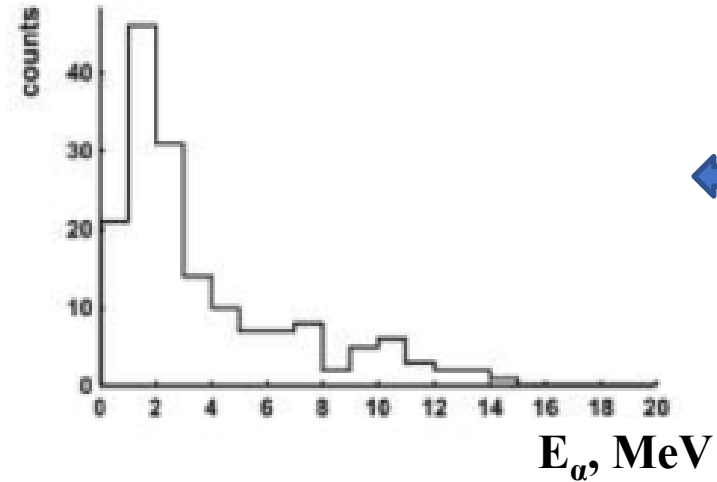
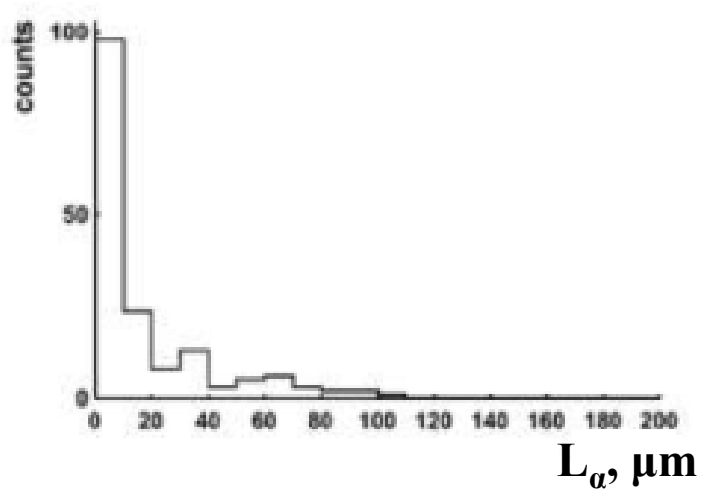
Диаграмма развала ядра ^{12}C на три α -частицы под действием релятивистского мюона (векторная доминантность)

События $\mu + {}^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha + \mu'$ в ядерной эмульсии

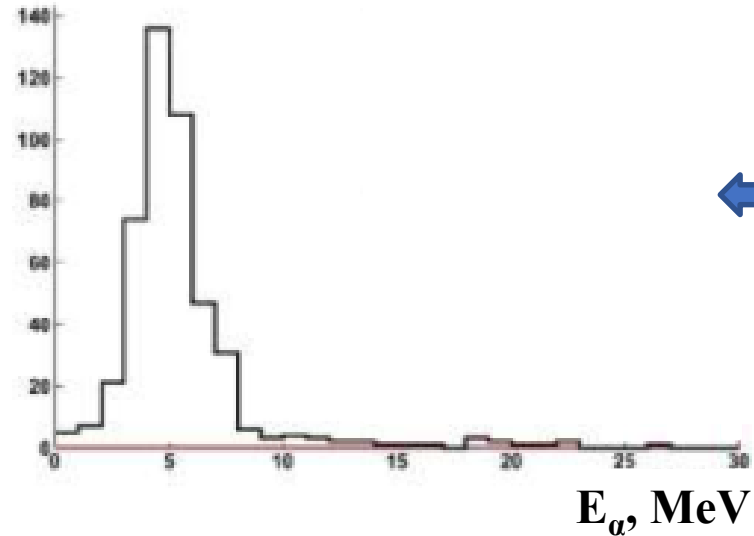
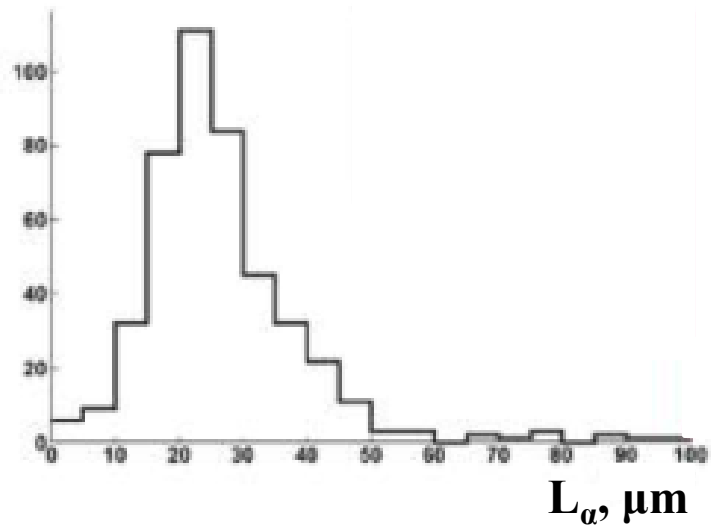
В рамках эксперимента БЕККЕРЕЛЬ (besquerel.jinr.ru) был выполнен анализ опытных образцов ядерных эмульсий (ЯЭ), облученных поперечно мюонами при энергии 160 ГэВ [1]. Разнообразие ядерных событий в ЯЭ начинается с одиночных *b* (*black*) - и *g* (*gray*) - следов протонов отдачи, за которыми следуют *b*-тройки. Наиболее вероятным источником последних является развал ${}^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ через уровни от 7.65 до 16 МэВ ниже порога отделения одиночных нуклонов. Статистика более частых 3α -звезд позволяет оценивать относительные сечения наблюдаемых с ними событий с большей множественностью следов.

Также было проведено облучение партии слоев ядерной эмульсии в мюонном факеле ИФВЭ с энергией мюонов 2.5 ГэВ.

События $\mu(160 \text{ ГэВ}) + {}^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha + \mu'$ в ядерной эмульсии

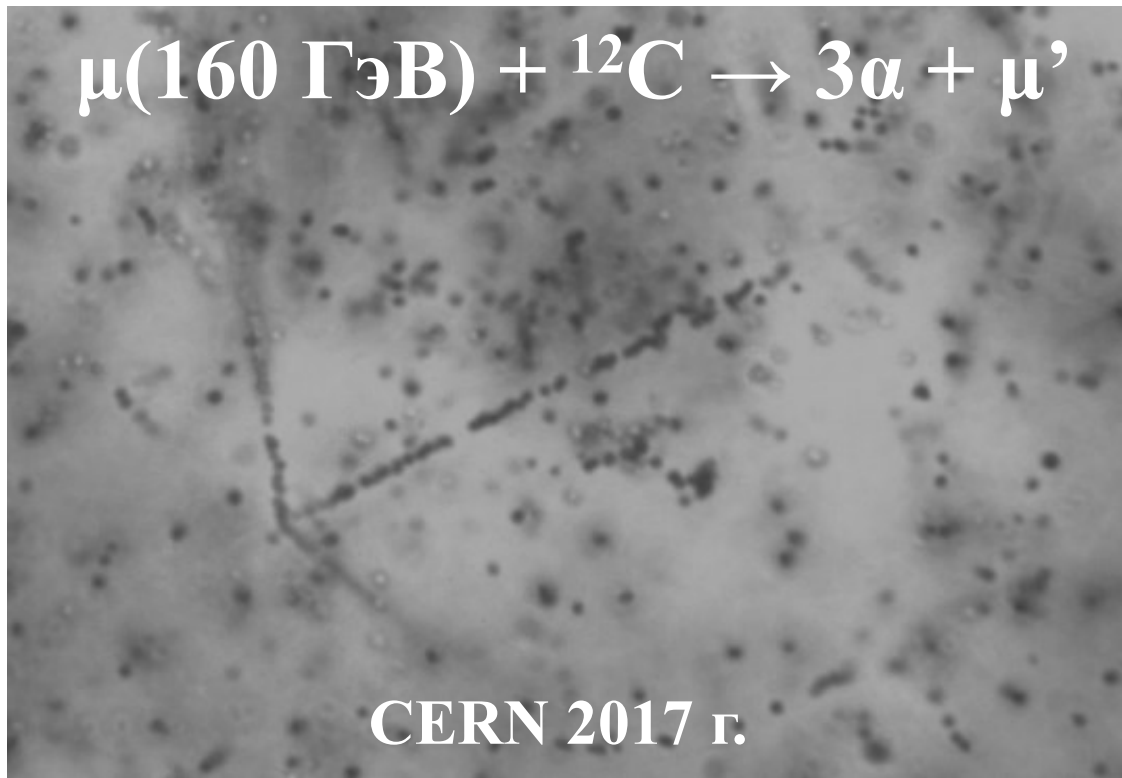
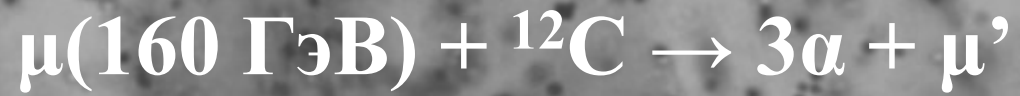


Моделирование взаимодействия мюонов с веществом эмульсии в Geant4 (пакет физических процессов CHiral Invariant Phase Space CHIPS [1]).



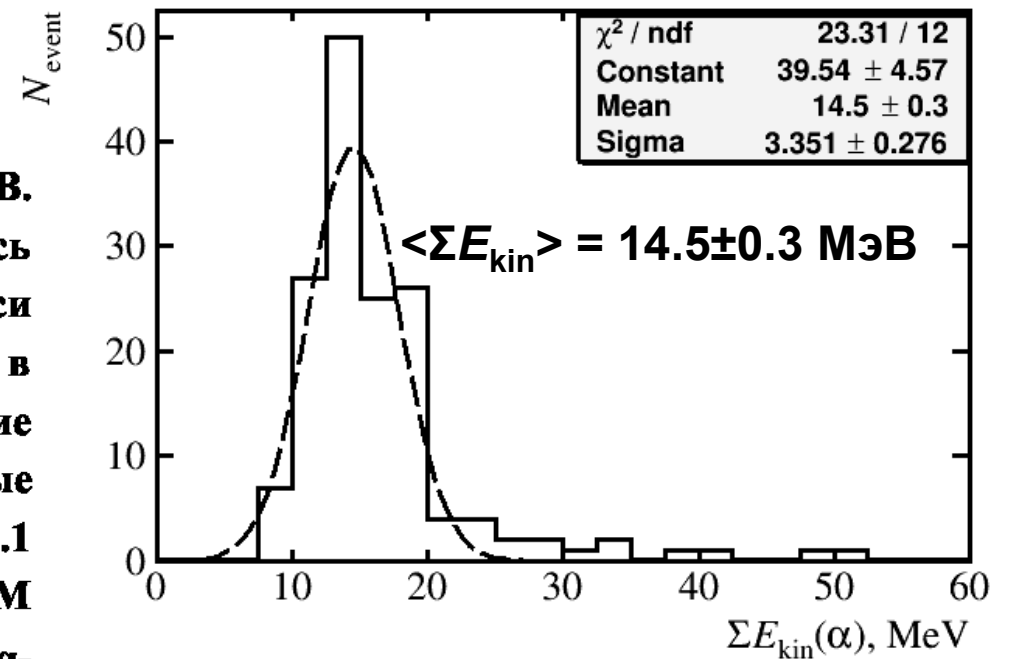
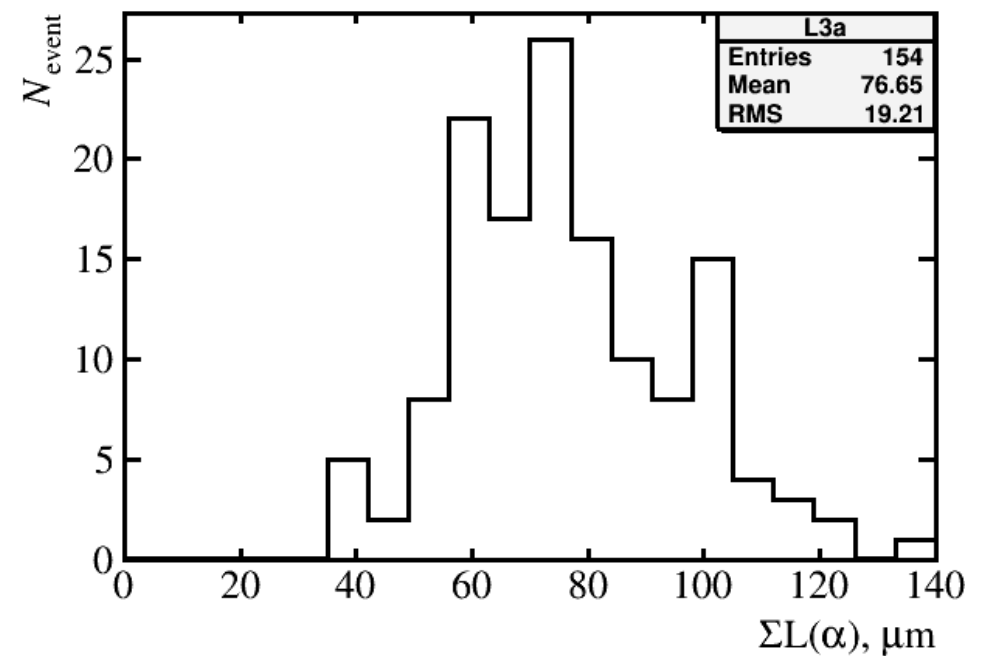
Экспериментальные данные, полученные при анализе ядерных эмульсий, облученных мюонами с энергией 160 ГэВ [2].

1. M.V. Kossov, Eur. Phys. J. A 14, 377-392 (2002).
2. D. A. Artemenkov et al., Phys. Atom. Nuclei 78, 579-585 (2015).



CERN 2017 г.

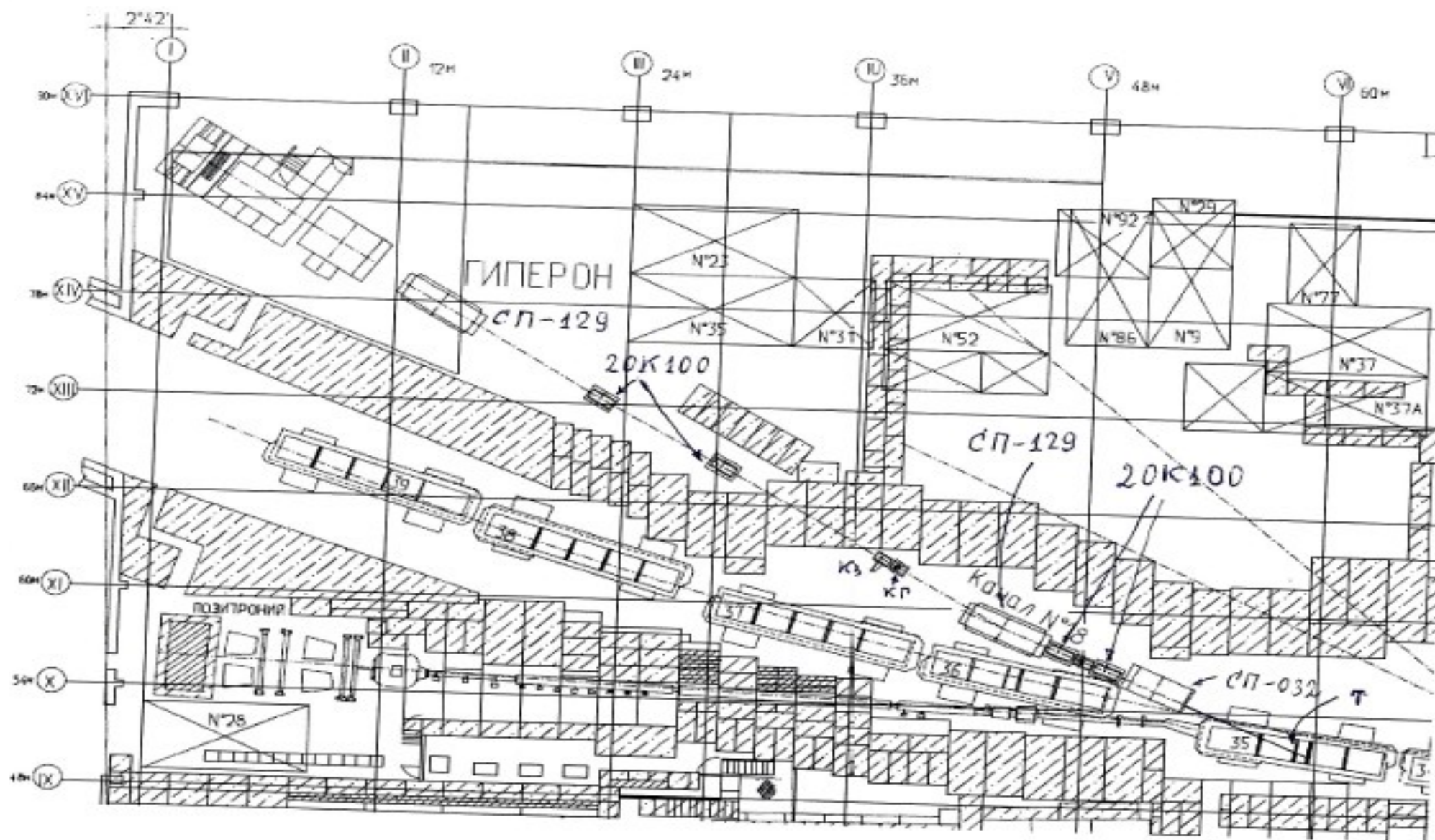
Ядерная эмульсия была облучена в CERN μ -мезонами с энергией 160 ГэВ. Образцы ЯЭ площадью 9×12 см и толщиной около 100 мкм размещались перед мишенью эксперимента COMPASS на расстоянии около 25 см от оси пучка (гало), где интенсивность достигала порядка 10^6 частиц на см^2 в цикл. При просмотре двух образцов было найдено 154 звезды, содержавшие только тройки b частиц, остановившихся в эмульсии, сопоставленные развалу ядер ${}^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$. Средняя длина пробегов α -частиц составила $L = 23.1 \pm 0.6$ мкм. Энергия α -частиц оценивалась по модели SRIM аппроксимацией $E_{\text{kin}} = -0.677\log(L) + 1.746\sqrt{L} - 1.638$. Средняя энергия 3α -частиц в событии составила 14.5 ± 0.3 МэВ.



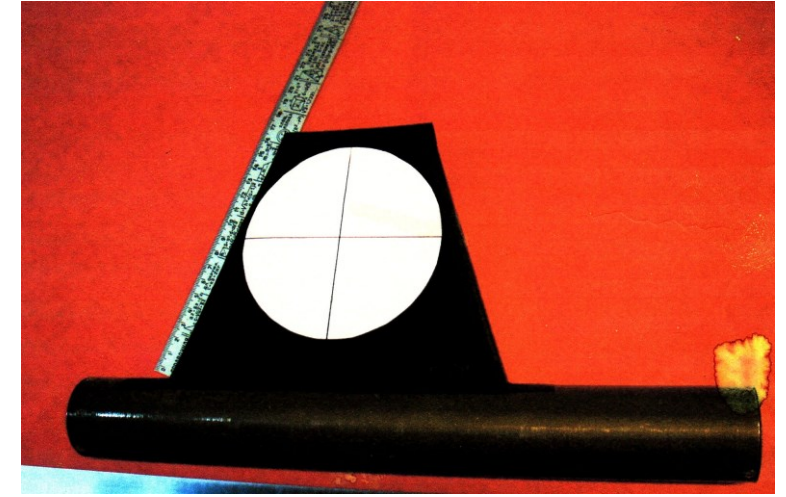
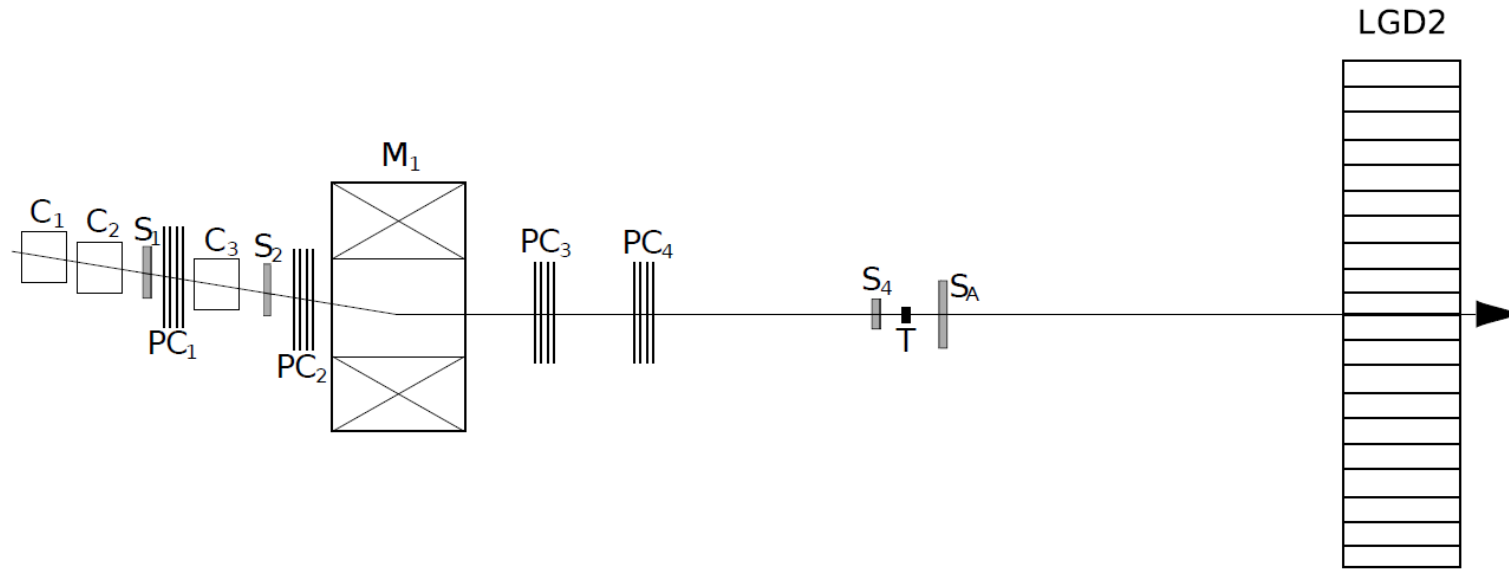
Мотивация измерений

1. Анализ слоев ЯЭ, облученных в пучках релятивистских мюонов с энергией 160 ГэВ указал на заметный вклад процессов диссоциации $\mu + {}^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha + \mu'$;
1. Определение абсолютного сечения непосредственно по потоку поперечно направленных следов релятивистских частиц в ЯЭ и наблюдаемым звездам практически нереализуемо;
1. Поэтому предложено проведение специальных измерений 3α -диссоциации ядра ${}^{12}\text{C}$ на активной тонкой углеродосодержащей мишени на установке Гиперон-М ускорительного комплекса У-70.

Установка ГИПЕРОН-М



Установка ГИПЕРОН-М

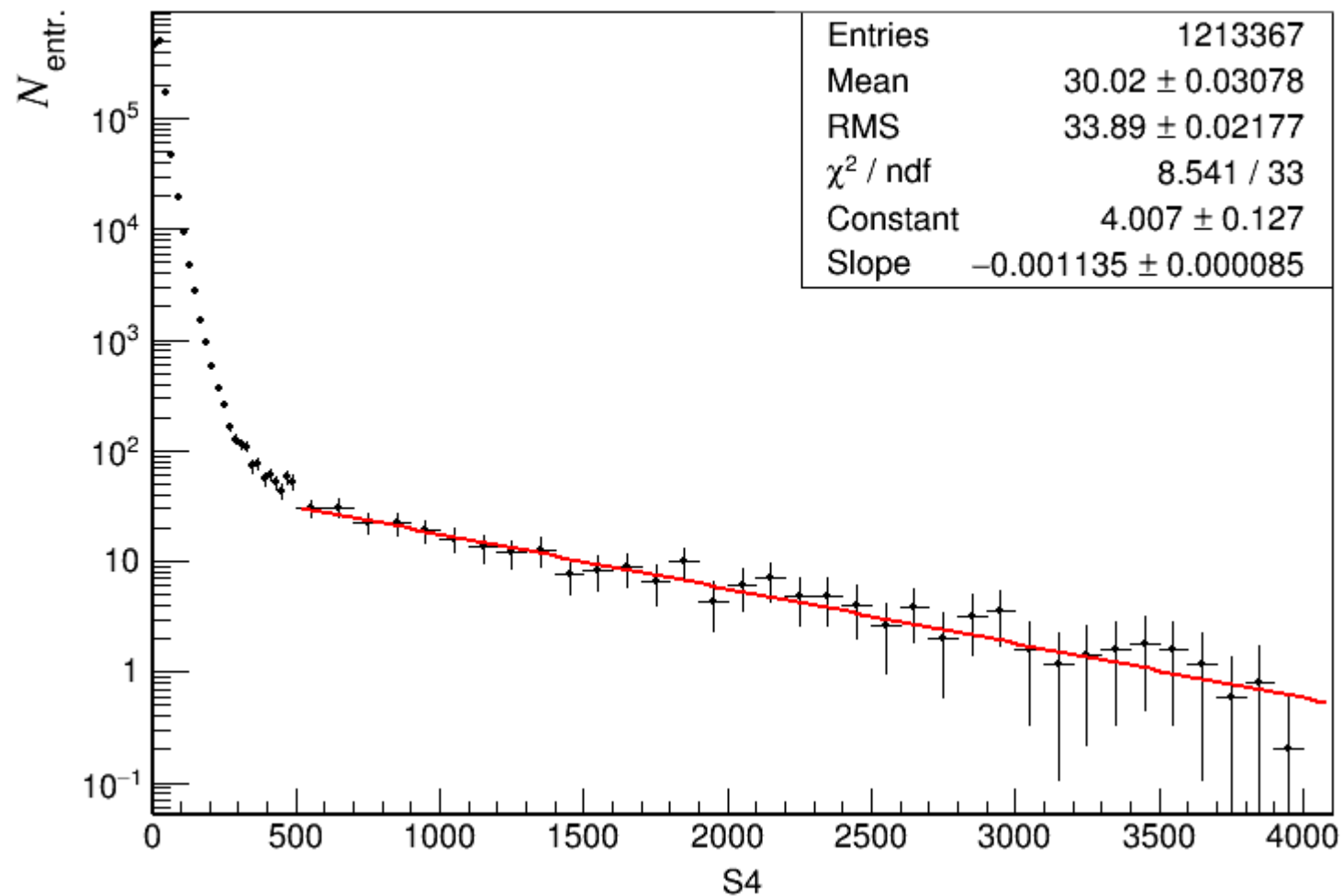


Счетчик S_4

Слева: схема экспериментальной установки ГИПЕРОН-М: S_1 ; S_2 ; S_4 - пучковые сцинтилляционные счетчики, C_{1-3} - черенковские счетчики, T - мишень, S_A - триггерный сцинтилляционный анти-счетчик, LGD2 - черенковский электромагнитный спектрометр с радиаторами из свинцового стекла; **справа:** счетчик S_4 .

Счетчик S_4 изготовлен на основе специального КС ФЭУ со щелевым фотокатодом разработки ИФВЭ и круглого сцинтиллятора (полистирол) диаметром 120 мм и толщиной 0.5 мм. Свет от прохождения частиц собирался воздушным световодом трапецевидной формы. Поверхность световода оклеена изнутри майларом с коэффициентом отражения не менее 80%. Сцинтиллятор подвешен внутри световода на трех нитках.

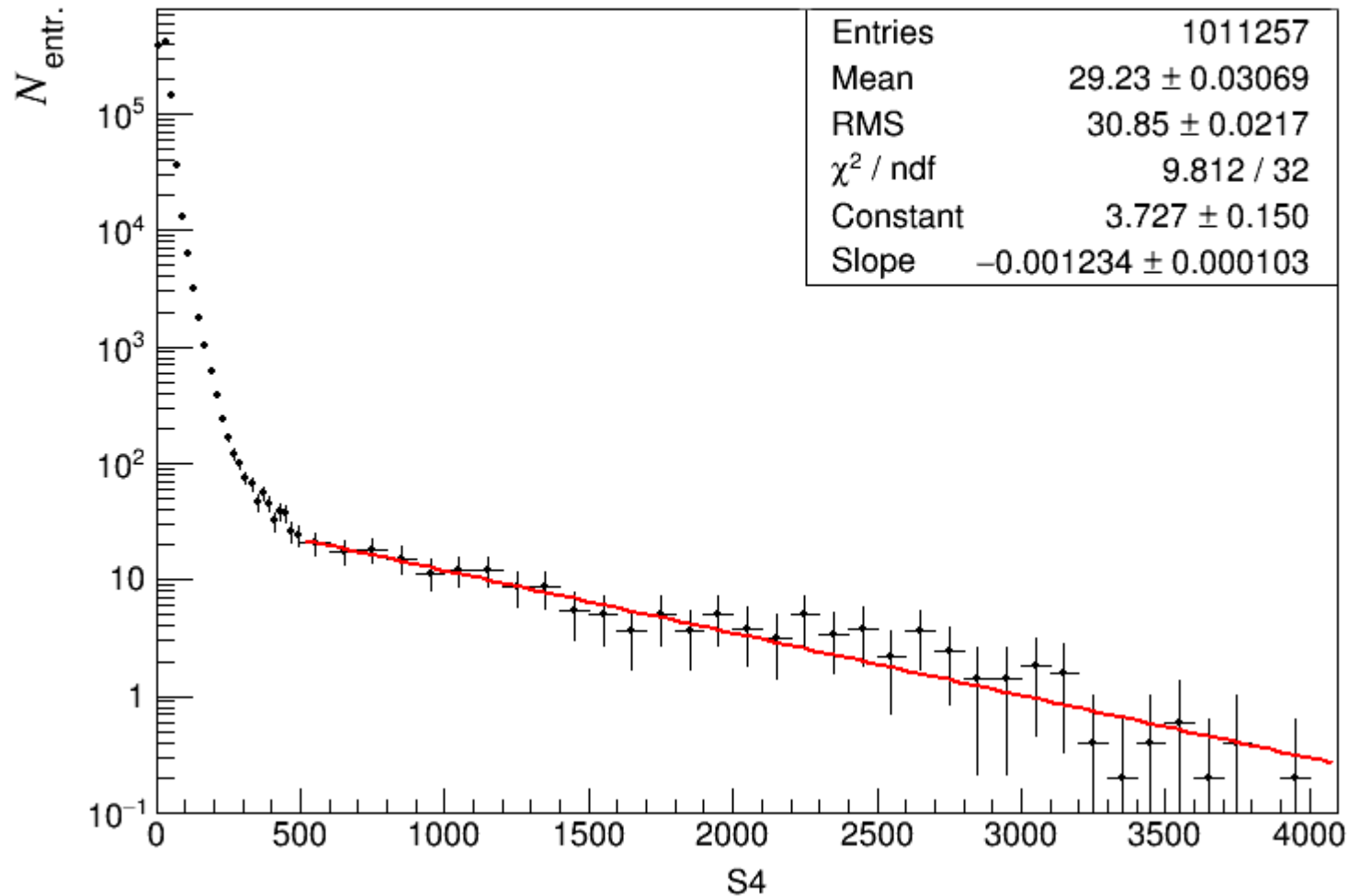
Амплитудные спектры со счетчика S4 на установке ГИПЕРОН-М



Измерения амплитудных сигналов с тонкого сцинтилляционного счетчика S4 проводились в пучке заряженных частиц с импульсом 7 ГэВ/с, в состав которого входят π^+ (67%), p (30%) и K^+ (3%), а также незначительная примесь ядер дейтерия и мюонов. На рисунке представлен спектр амплитуд ~ 1 млн. адронных событий, набранных по триггеру $trig = S1 * S2 * S3$. Красной линией показан фит спектра экспоненциальной функцией в области амплитуд [500, 4000] в отсчетах АЦП.

Спектр со счетчика S4 при прохождении пучка адронов.

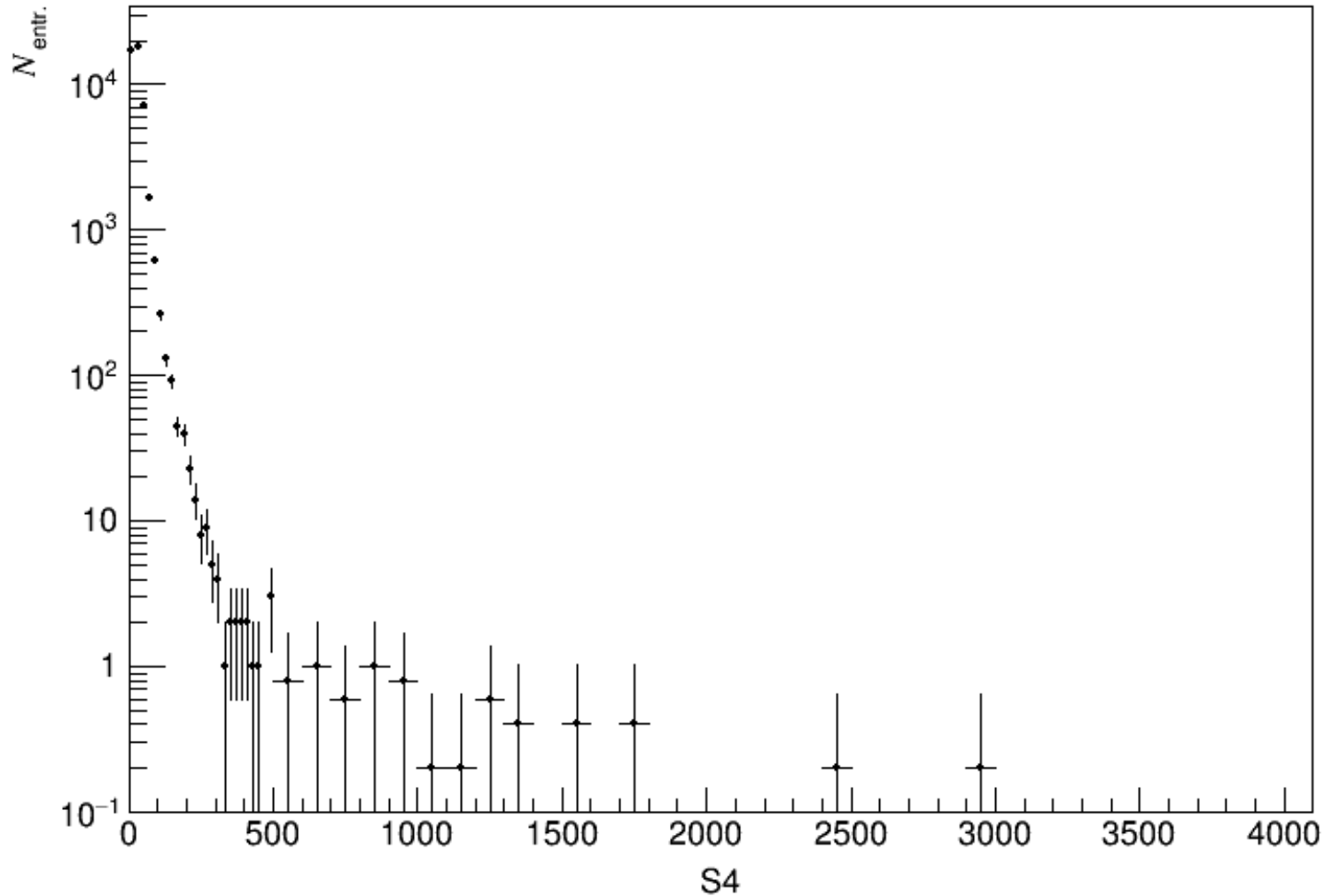
Амплитудные спектры со счетчика S4 на установке ГИЩЕРОН-М



Для набора данных со счетчика S4 с существенно уменьшенным вкладом адронной компоненты пучок был пропущен через латунный поглотитель (закрытый коллиматор) толщиной по пучку 75см ($\approx 5\lambda_n$). На рисунке представлен амплитудный спектр со счетчика S4 при прохождении такого пучка на статистике ~ 1 млн событий с тем же триггером ($trig = S1*S2*S3$). Красная линия – фит спектра экспоненциальной функцией в области амплитуд [500, 4000] как и на предыдущем рисунке.

Амплитудный спектр событий со счетчика S4, отобранных при одном перекрытом латунном поглотителе.

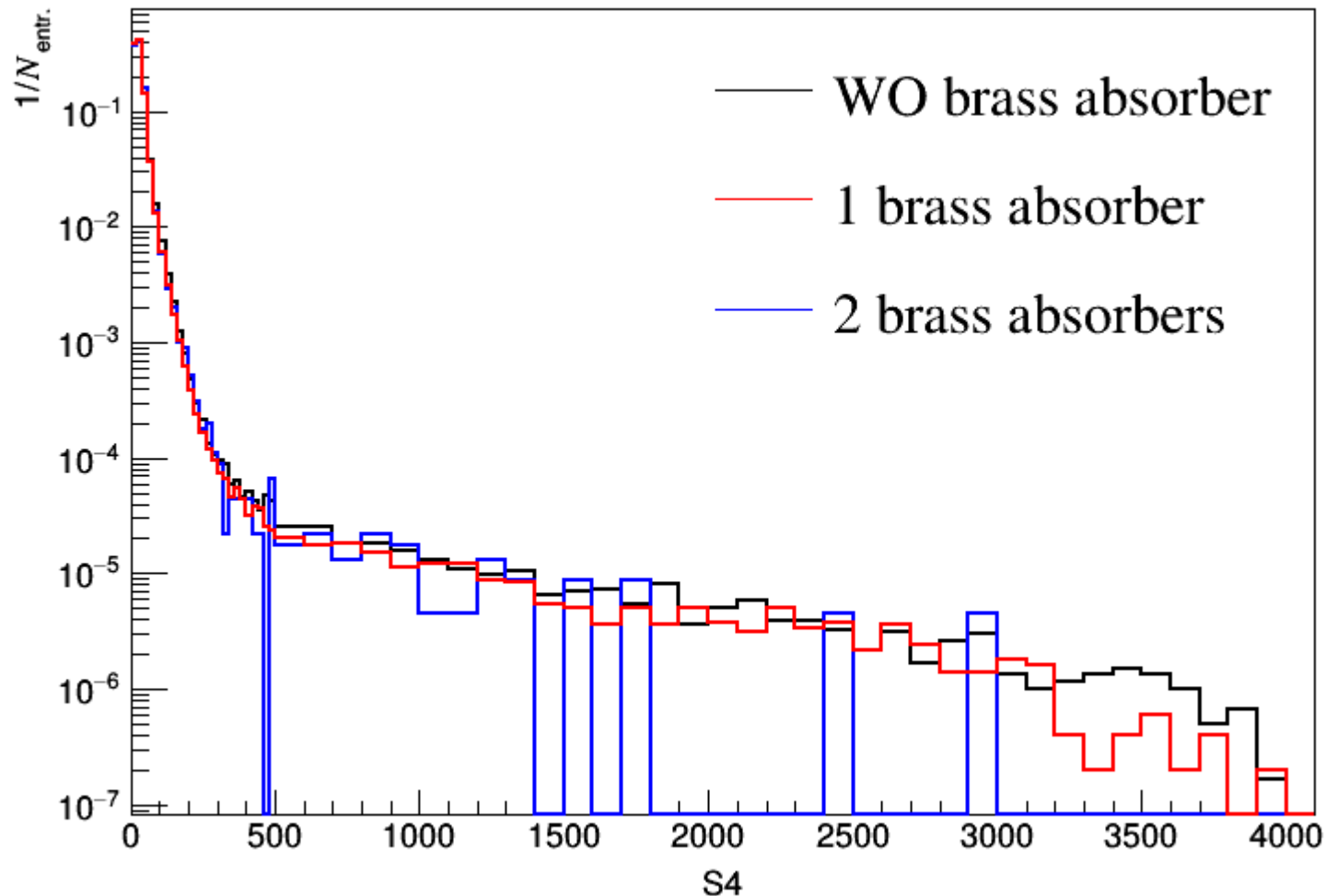
Амплитудные спектры со счетчика S4 на установке ГИЩЕРОН-М



На рисунке представлен амплитудный спектр со счетчика S4 при прохождении пучка через 2 латунных поглотителя ($\approx 10\lambda_n$) на статистике ~ 40 тыс. событий, отобранных тем же триггером. В этом случае можно утверждать практически о полном подавлении адронной компоненты пучка и преобладании в пучке мюонов.

Амплитудный спектр событий со счетчика S4, отобранных при перекрытии двух латунных поглотителей.

Амплитудные спектры со счетчика S4 на установке ГИЩЕРОН-М



На рисунке представлены нормированные спектры амплитуд при прохождении пучка через один и два латунных поглотителя, а также без поглотителей. Можно отметить, что формы амплитудных распределений хорошо согласуются в области до 2800 отсчетов АЦП. При больших значениях амплитуд наблюдается уже нерегулярность спектров.

Нормированные спектры со счетчика S4 при прохождении пучка без перекрытия, через один и два перекрытых латунных поглотителя.

Анализ облученных ядерных эмульсий в пучке адронов на установке Гиперон-М при 7 ГэВ/с

Изображение упаковок экспериментальных образцов ядерной эмульсии. На каждой упаковке указан интегральный поток частиц, прошедший через счетчик, установленный за эмульсионной упаковкой. В каждой упаковке было по 10 пластин 9 x 12 см², толщина чувствительного эмульсионного слоя которых в одной пачке 200 мкм, в двух других по 100 мкм каждая. При экспозиции плоскость сборки из пластинок была ориентирована перпендикулярно направлению пучка.



Просмотр	3α	4α	5α	<5α	Большие звезды	Всего звёзд	Число звёзд 3α на квадрат	Число всех звёзд на квадрат
Просмотрено 3760 квадратов площадью 1x1мм ²	105	33	47	21	238	973	0.02	0.26

Сканирование облученных пластинок ядерных эмульсий проводился с помощью ручного микроскопа МБИ-9 методом просмотра по полосам по всему чувствительному объему. Было проанализировано 3 пластинки с суммарным объемом 3760 мм² x 200 мкм. Было найдено 973 ядерные звезды, среди которых с образованием 5α (47), 4α (33), 3α (105).

Наблюдение $h+^{12}\text{C}\rightarrow 3\alpha$ событий в ядерной эмульсии

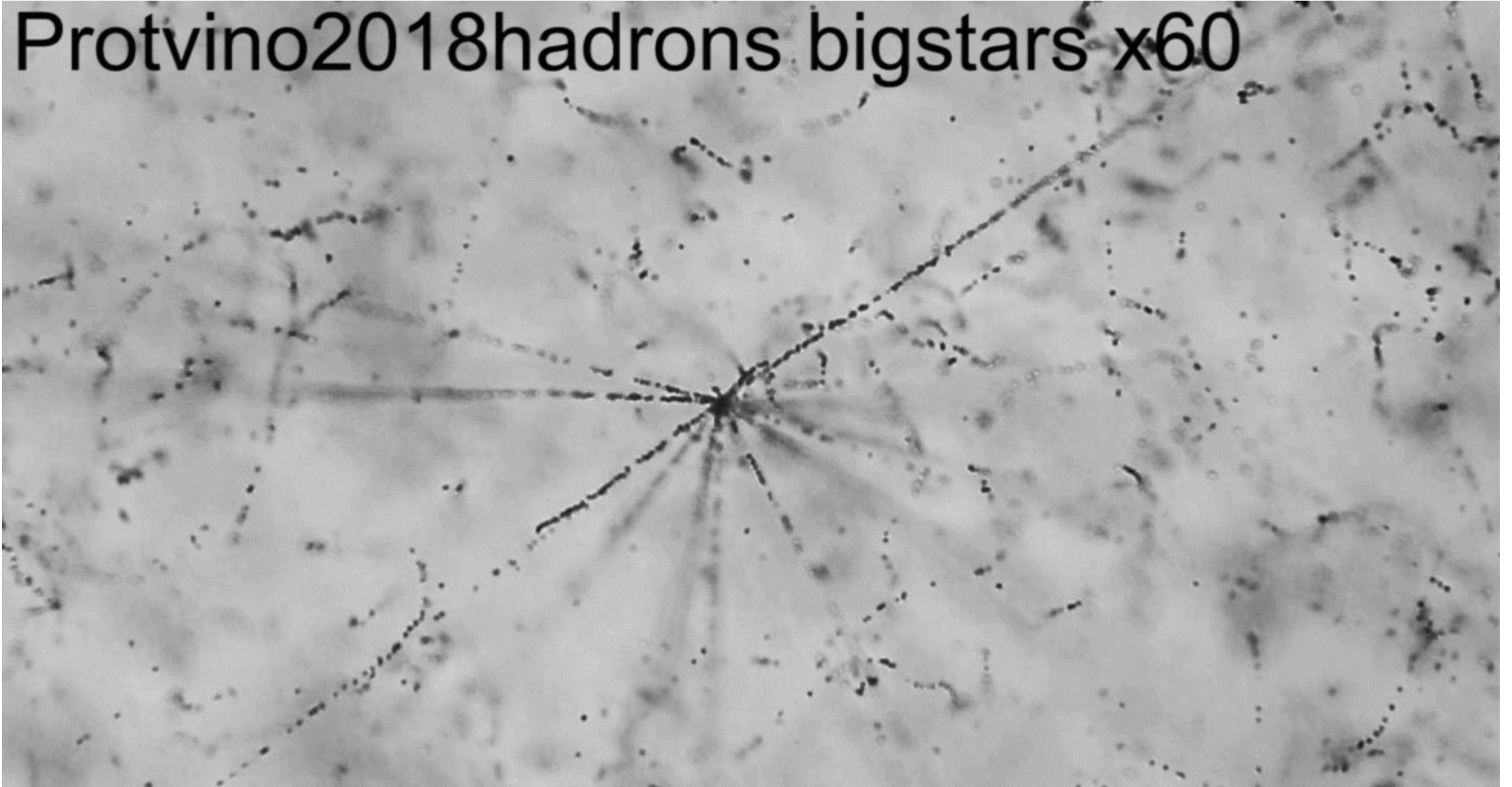


Наблюдение $h+^{12}\text{C}\rightarrow 3\alpha$ событий в ядерной эмульсии



Наблюдение $h+^{12}\text{C} \rightarrow \text{fragments}$ событий в ядерной эмульсии

Protvino2018hadrons bigstars x60



Оценка сечения 3α диссоциации ядер ^{12}C под действием адронов в ядерной эмульсии

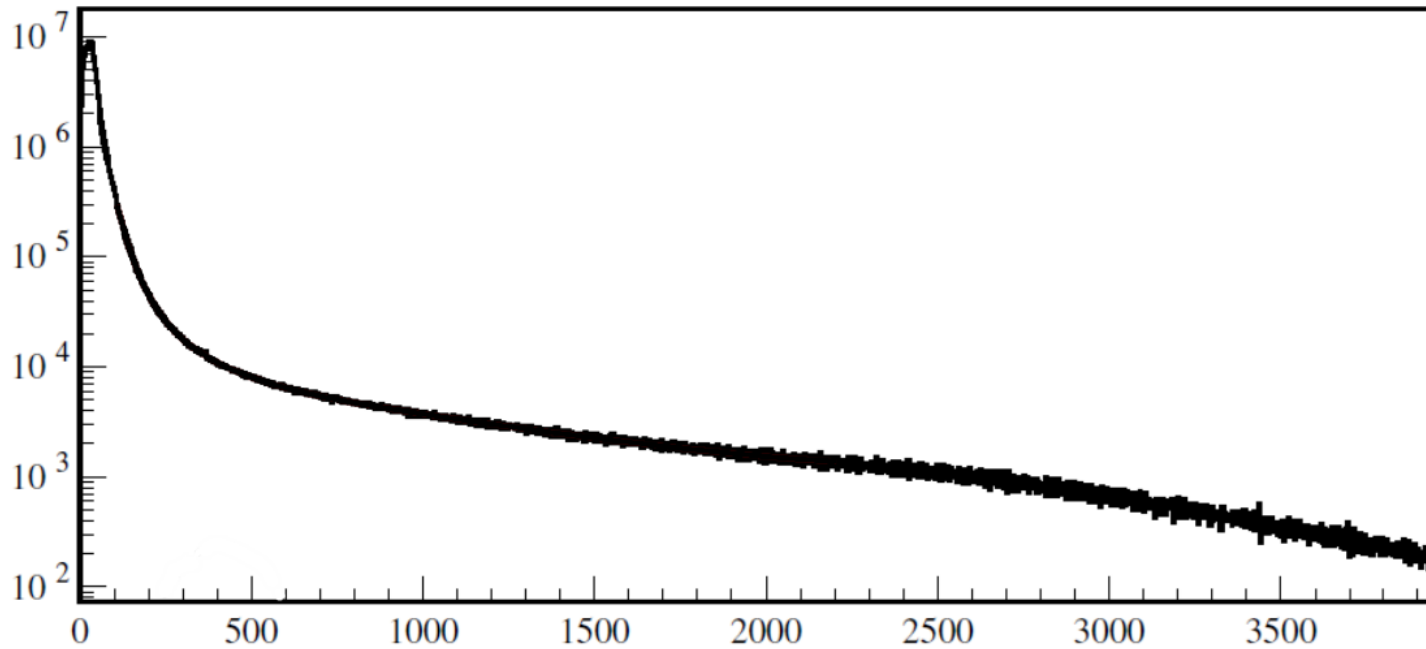
- 1. Облучение.** Облучение пластинок ядерной эмульсии проводилось на установке Гиперон-М в 2018 году. Интегральный поток заряженных частиц, прошедший через счетчик $10 \times 10 \text{ см}^2$ расположенный за пластинками ядерной эмульсии, составил 10^7 частиц.
- 2. Статистика.** В просмотренных пластинках ядерной эмульсии, размером $9 \times 12 \text{ см}^2$, было найдено **105** событий, с образованием 3 треков b частиц. Такие события интерпретировались как диссоциация ядер ^{12}C на 3 α -частицы в адронном пучке.
- 3. Концентрация углерода.** Покомпонентный состав ядерной эмульсии приведен на сайте: http://becquerel.jinr.ru/text/books/Powell_F.pdf (Таблица 3, стр. 40). В частности приведена концентрация атомов углерода при влажности 58%, равная $1.39 \cdot 10^{22}$ атомов/см³.
- 4. Просмотр.** Сканирование эмульсии велось методом просмотра по квадратам и всей толщине слоя эмульсии. Площадь квадрата составляет 1 мм^2 , а толщина эмульсионного слоя - **200 мкм**. Всего было просмотрено **3670 квадратов**.

Оценка сечения 3α диссоциации ядер ^{12}C под действием адронов в ядерной эмульсии

1. Статистика найденных событий 3α -диссоциации ядер ^{12}C : $N_{\text{соб}} = 105$ событий;
2. Объем просмотра: $S_{\text{просмотра}} = 37.6 \text{ см}^2$ при толщине эмульсии $t_{\text{эм}} = 0.02 \text{ см}$;
3. Поток частиц, прошедший через счетчик площадью $S_{\text{counter}} = 100 \text{ см}^2$ составил $j_{\text{tot}} = 10^7$ частиц, или $j_{\text{h}} = 10^5$ частиц см^{-2} ;
4. Число атомов углерода в ядерной эмульсии $N_{\text{c}} = 1.39 \cdot 10^{22}$ атомов см^{-3} .

$$\sigma = \frac{N_{\text{соб}}}{N \cdot j \cdot S_{\text{просмотра}} \cdot t_{\text{эм}}} =$$
$$\frac{105 \text{ событий}}{1.39 \cdot 10^{22} \text{ атомов} \cdot \text{см}^{-3} \cdot 10^5 \text{ частиц} \cdot \text{см}^{-2} \cdot 37.6 \text{ см}^2 \cdot 0.02 \text{ см}} =$$
$$100 \pm 10 \text{ мб}$$

Амплитудные спектры со счетчика S4 на пучке ГИПЕРОН-М на статистике $2 \cdot 10^7$ событий



Амплитудный спектр со счетчика S4 в адронном пучке, набранный во время сеанса в 2021 г.

Для оценки вклада событий 3α диссоциации ядер ^{12}C под действием адронов были проанализированы амплитудные спектры со счетчика S4 на статистике статистика 200 млн событий. Значение средней величины энерговыделения в исследуемой реакции составляет 14.5 МэВ, что соответствует амплитудам ≈ 3625 отсчетов АЦП. Однако необходимо учитывать эффект гашения сцинтилляционного света при большой плотности ионизации. Коэффициент гашения дается законом Биркса:

$$Q_i(E) = \frac{L_i(E)}{L_e(E)} = \frac{L_i(E)/E}{L_e(E)/E} \simeq \frac{dL_i/dE}{dL_e/dE} \simeq \frac{1}{kB(dE/dr)_i}$$

где kB – коэффициент Биркса для данного вещества, $(dE/dr)_i$ – тормозная способность частицы в этом веществе. Для полистирола коэффициент Биркса $kB = 9.0 \cdot 10^{-3}$ г МэВ $^{-1}$ см $^{-2}$, а тормозная способность α -частицы (5 МэВ) в полистироле $(dE/dr)_i = 8.75 \cdot 10^2$ МэВ см 2 г $^{-1}$. Таким образом коэффициент гашения амплитуд α -частиц в полистироле равен $Q_\alpha(E) = 0.127$. Ожидаемый сигнал от 3α диссоциации лежит в области амплитуд 460 ± 80 отсчетов АЦП.

Амплитудные спектры со счетчика S4 на установке ГИЩЕРОН-М

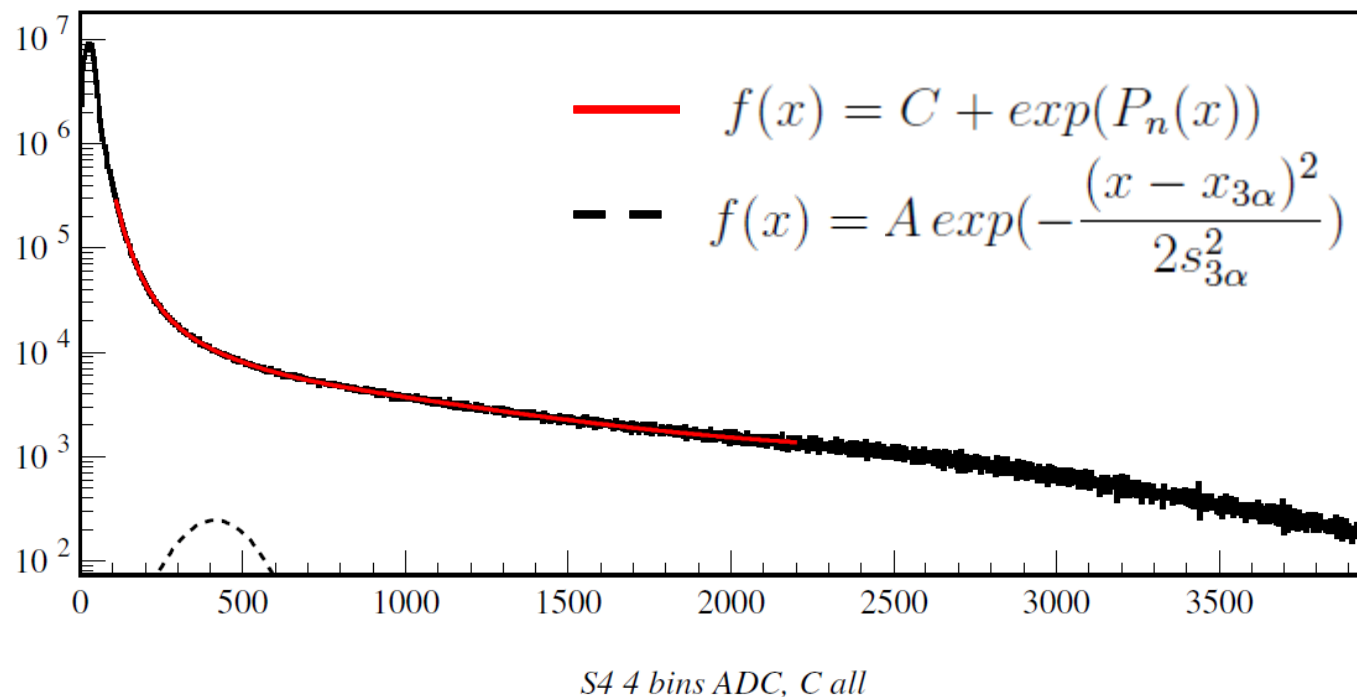
Полученный спектр амплитуд был профитирован функцией $f(x)$, включающей в себя описание ионизационные потери заряженных частиц и функцию Гаусса, с параметрами, извлеченными при анализе 3α диссоциации ядер ^{12}C в ядерных фотоэмульсиях:

$$f(x) = C + \exp(P_n(x)) + A \exp\left(-\frac{(x - x_{3\alpha})^2}{2s_{3\alpha}^2}\right),$$

где C – константа, $P_n(x) = \sum_{k=-n}^n p_k x^k$ – многочлен Лорана, A – нормировка распределения Гаусса, $x_{3\alpha}$ – среднее значение амплитуды 3α диссоциации и $s_{3\alpha}$ – среднеквадратичное отклонение относительно среднего.

Фитирование проводилось в два этапа. На первом этапе фит строился без учета 3-го члена функции $f(x)$, а варьировались константа и коэффициенты многочлена Лорана, используя метод максимума правдоподобия. Установлено, что для хорошего описания спектров достаточно ограничиться порядком многочлена Лорана $n=3$.

Амплитудные спектры со счетчика S4 на установке ГИЩЕРОН-М



На втором этапе фитирования был включен третий член функции $f(x)$ с двумя фитируемыми параметрами A и $x_{3\alpha}$. В качестве среднеквадратичного отклонения $s_{3\alpha}$ использовалась величина:

$$s_{3\alpha} = \sqrt{(\kappa x_{3\alpha})^2 + \delta^2(x_{3\alpha})},$$

где $\kappa = 0.231$ – отношение RMS к среднему значению энергии, извлеченных из анализа ядерных эмульсий, $\delta(x_{3\alpha})$ – аппаратное разрешение счетчика S4 по амплитуде.

В спектрах с уровнем достоверности от 5 до 10 ст. отклонений по параметру A определялся вклад распределений Гаусса, описывающих 3α события. На рисунке такой вклад изображен пунктирной линией.

Результаты фитирования спектров со счетчика S4 в адронном пучке

В Таблице 1 представлены параметры фитирования функцией $f(x)$ спектров адронов, пионов и протонов, где $N_{3\alpha}$ – число идентифицированных 3α -событий, $E_{3\alpha}$ – средняя энергия 3α -систем и $\sigma_{3\alpha}$ – сечение реакции. В Таблице 2 приведены физические параметры со статистическими и систематическими ошибками.

Таблица 1

	2021 г.			2022 г.		
	h^+ -пучок	π^+ -пучок	p -пучок	h^+ -пучок	π^+ -пучок	p -пучок
A	128.7 ± 16.1	92.2 ± 16.2	31.1 ± 5.4	75.1 ± 4.5	52.9 ± 17.3	14.8 ± 2.8
$x_{3\alpha}$	404.9 ± 16.9	371.6 ± 18.7	467.5 ± 26.1	445.2 ± 9.5	437.6 ± 17.3	479.2 ± 28.0
$N_{3\alpha}$, тыс.	18.1 ± 2.4	12.2 ± 2.2	5.0 ± 0.9	12.1 ± 1.2	8.4 ± 1.0	2.5 ± 0.5
$E_{3\alpha}$, МэВ	11.3 ± 1.8	10.5 ± 0.5	13.2 ± 0.7	13.3 ± 0.3	13.1 ± 0.5	14.3 ± 0.8
$\sigma_{3\alpha}$, мб	62.0 ± 8.2	61.7 ± 11.3	62.0 ± 11.3	95.5 ± 9.3	88.4 ± 10.8	97.2 ± 19.4

Таблица 2

	h^+ -пучок	π^+ -пучок	p -пучок
$E_{3\alpha}$, МэВ	$13.2 \pm 0.3_{st} \pm 0.3_{sys}$	$11.8 \pm 0.4_{st} \pm 0.3_{sys}$	$13.7 \pm 0.5_{st} \pm 0.3_{sys}$
$\sigma_{3\alpha}$, мб	$76.6 \pm 6.2_{st} \pm 4.8_{sys}$	$75.7 \pm 7.8_{st} \pm 3.4_{sys}$	$70.9 \pm 9.8_{st} \pm 2.4_{sys}$

Заключение

- Проанализирован экспериментальный материал при прохождении заряженных частиц с импульсом 7 ГэВ/с через тонкий сцинтилляционный счетчик S4 установки ГИПЕРОН-М на ускорителе У-70.
- Показано, что форма амплитудных спектров в области ионизационных потерь до 10 МэВ практически не зависит от типа проходящих заряженных частиц.
- В рамках эмульсионной методики проведено измерение энерговыделения 3α -систем в реакции $\mu + {}^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha + \mu'$, среднее значение равно 14.5 ± 0.3 МэВ.
- В рамках эмульсионной методики получено сечение реакции $h^+ + {}^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha + h^+$ при импульсе 7 ГэВ/с, равное 100 ± 10 мб.
- На статистике 200 млн заряженных частиц, прошедших через тонкий сцинтилляционный счетчик получена оценка сечения процесса 3α -диссоциации ядра ${}^{12}\text{C}$ при импульсе 7 ГэВ/с равная 74 ± 9 мб, что согласуется с сечением, полученным в рамках эмульсионной методики.
- Указанные выше сечения процесса 3α -диссоциации ядра ${}^{12}\text{C}$ в пучке заряженных частиц можно рассматривать как первую оценку процесса 3α -диссоциации ядра ${}^{12}\text{C}$ в мюонном пучке при 7 ГэВ/с.

Данная работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда No 22-12-00095,
<https://rscf.ru/project/22-12-00095/>

Благодарю за внимание!