

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

А.М.Горин<sup>1</sup>, С.В.Евдокимов<sup>1</sup>, А.А.Зайцев<sup>2,3</sup>, П.И.Зарубин<sup>2,3</sup>,  
В.И.Изучеев<sup>1</sup>, Б.В.Полищук<sup>1</sup>, К.А.Романишин<sup>1</sup>, В.И.Рыкалин<sup>1</sup>,  
С.А.Садовский<sup>1</sup>, Ю.В.Харлов<sup>1</sup>, А.А.Шангараев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> НИЦ-Курчатовский институт ИФВЭ

<sup>2</sup>ОИЯИ

<sup>3</sup>ФИАН

## 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  $\alpha$ -частицы, рожденные в событиях ядерной фрагментации  $\mu + {}^{12}\text{C} \rightarrow \mu' + 3\alpha$  релятивистскими мюонами.

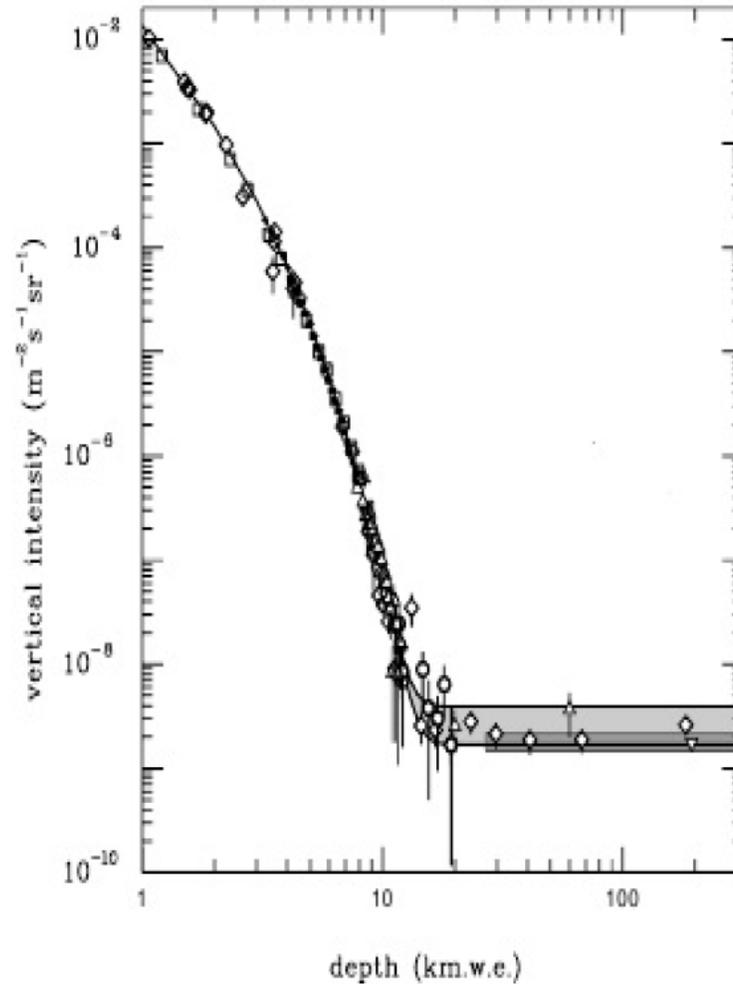
# Возможный механизм образования $^4\text{He}$ в земной коре

## Содержание $^4\text{He}$ (по объему):

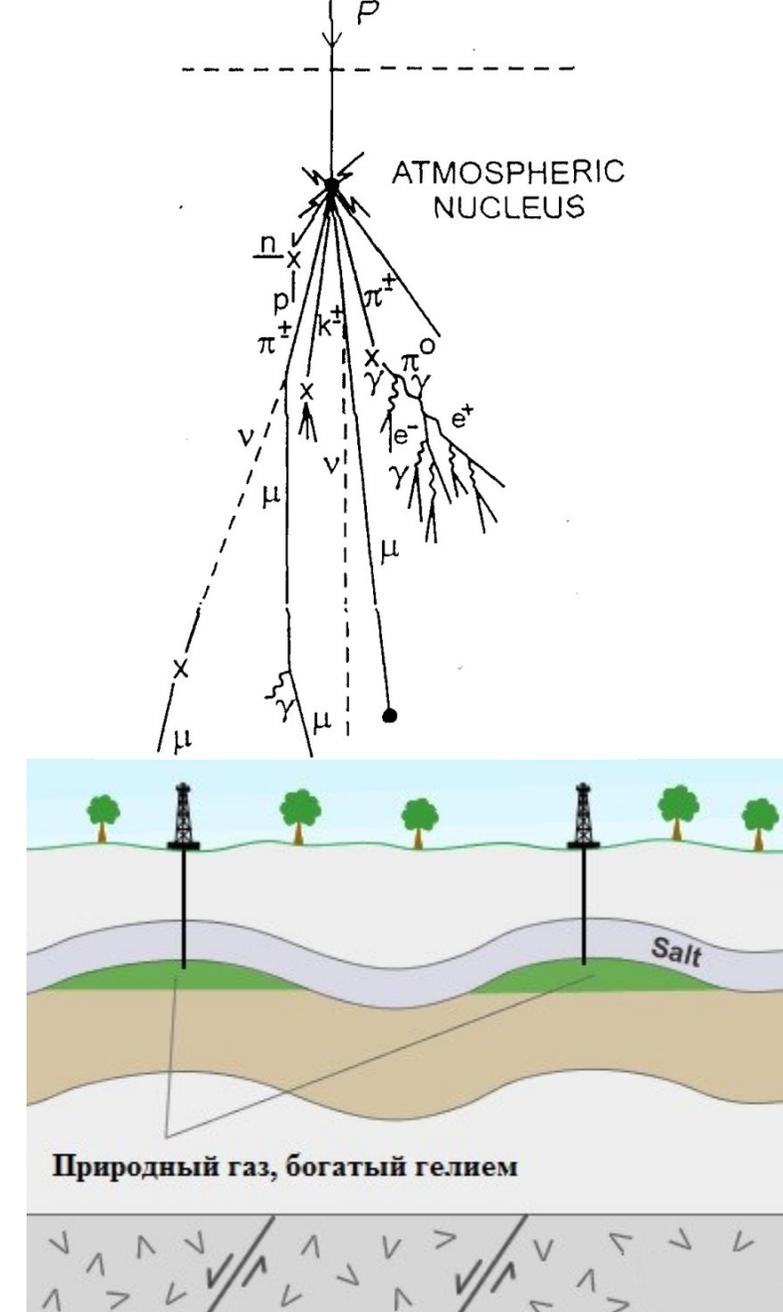
- в атмосфере –  $5.27 \cdot 10^{-4} \%$
- в природном газе – (2 - 16)%

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

Стоимость гелия составляет 30-32 долл./ $\text{m}^3$  за газ чистотой 99,995 %



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



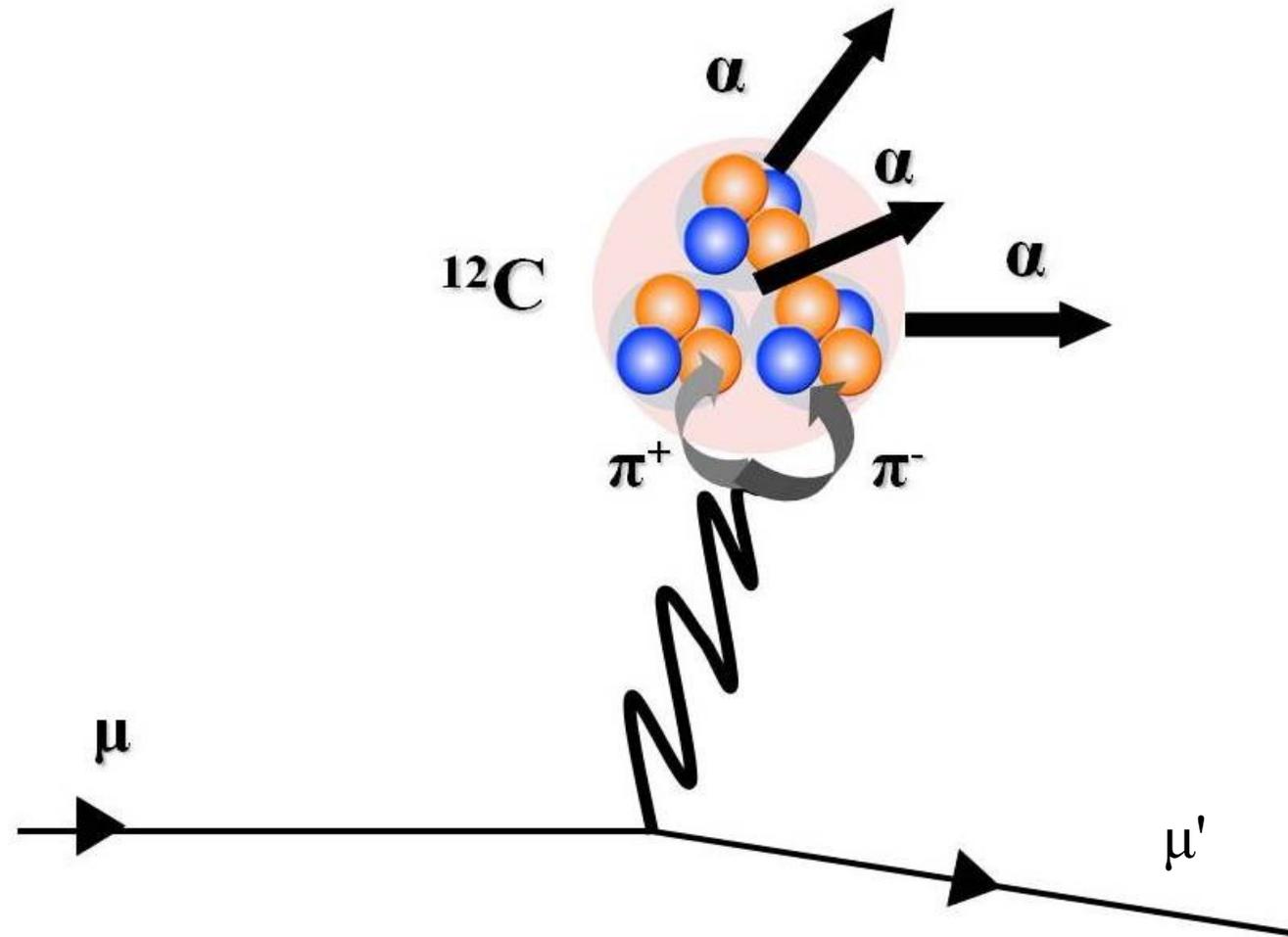


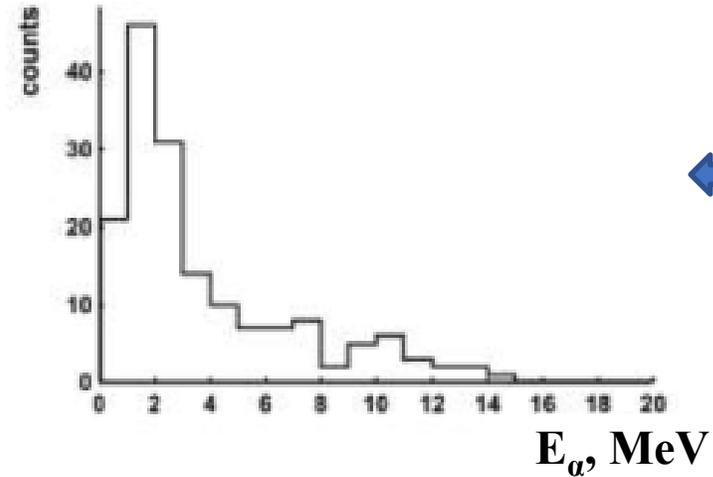
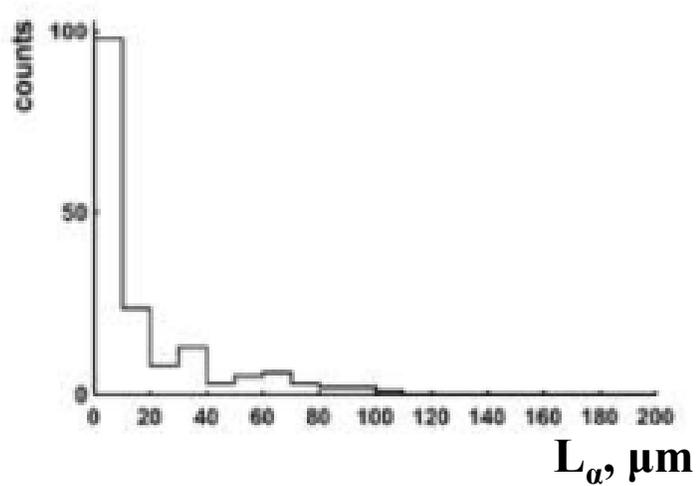
Диаграмма развала ядра  $^{12}\text{C}$  на три  $\alpha$ -частицы под действием релятивистского мюона (векторная доминантность)

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

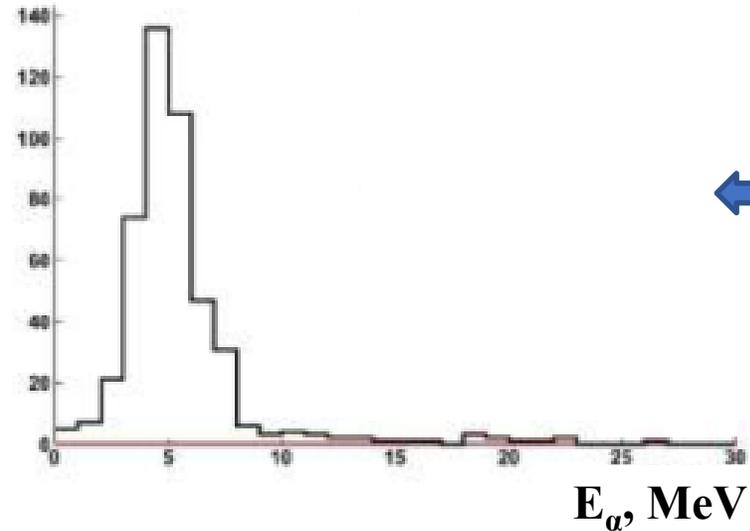
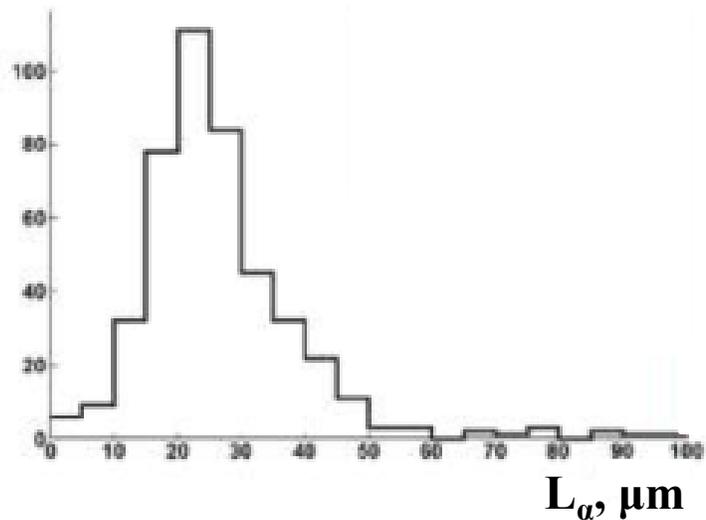
В рамках эксперимента БЕККЕРЕЛЬ ([besquerel.jinr.ru](http://besquerel.jinr.ru)) был выполнен анализ опытных образцов ядерных эмульсий (ЯЭ), облученных поперечно мюонами при энергии 160 ГэВ [1]. Разнообразие ядерных событий в ЯЭ начинается с одиночных *b* (*black*) - и *g* (*gray*) - следов протонов отдачи, 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  $3\alpha$ -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

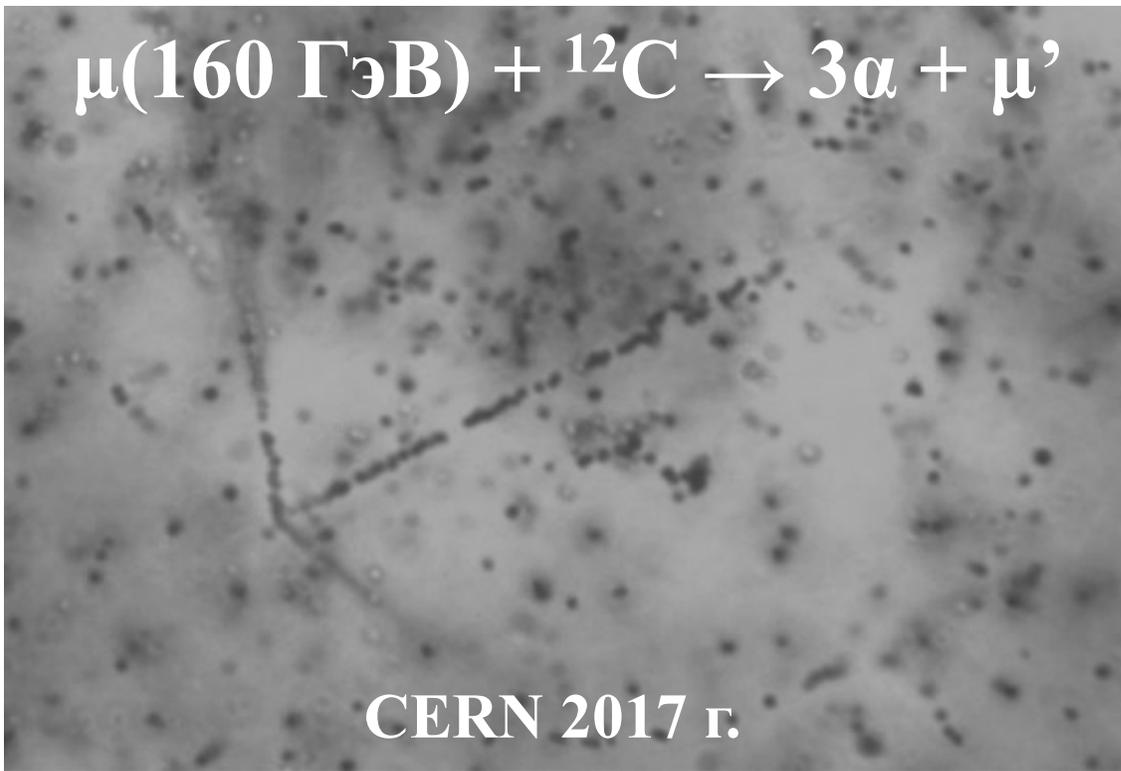


Моделирование взаимодействия мюонов с веществом эмульсии в Geant4 (пакет физических процессов CHiral Invariant Phase Space CHIPS [1]).



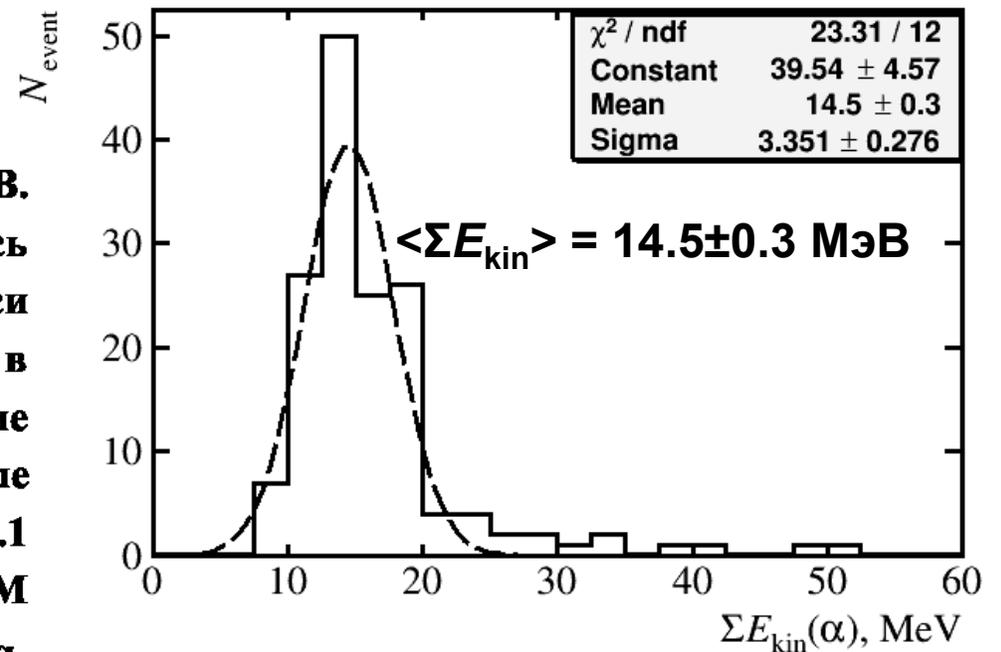
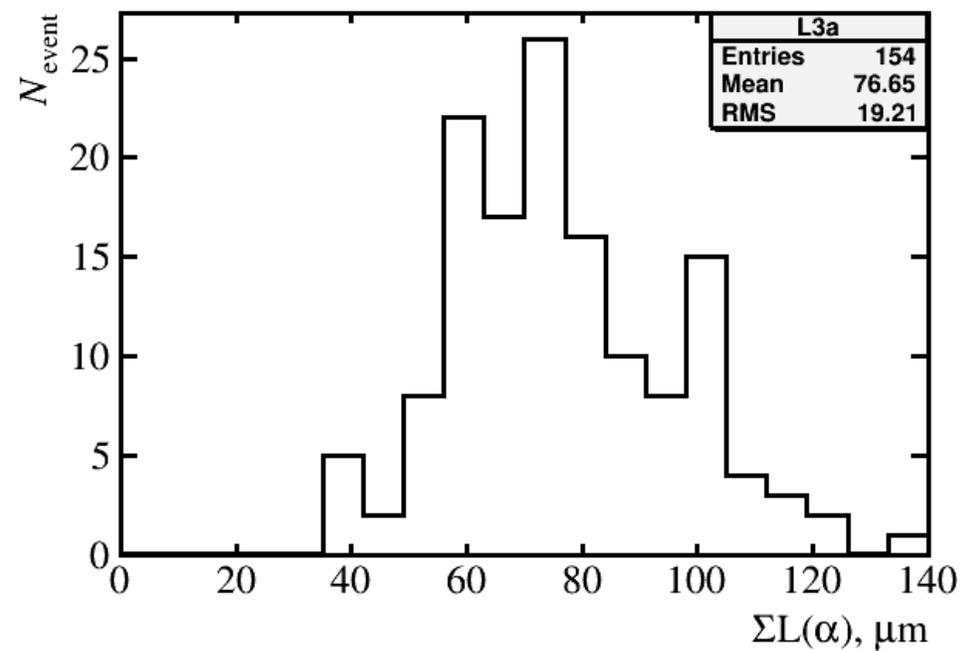
Экспериментальные данные, полученные при анализе ядерных эмульсий, облученных мюонами с энергией 160 ГэВ [2].

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.

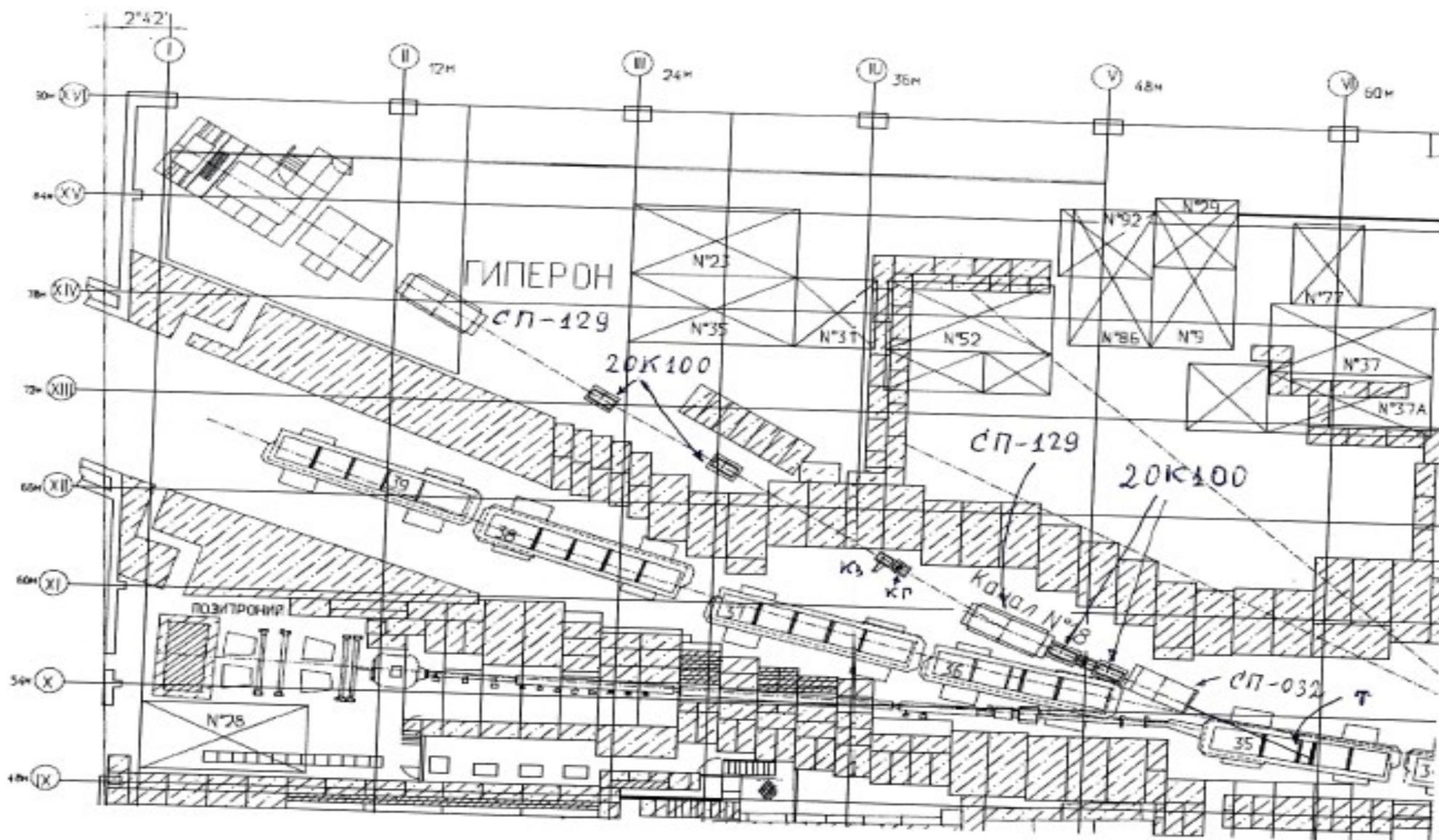
Ядерная эмульсия была облучена в CERN  $\mu$ -мезонами с энергией 160 ГэВ. Образцы ЯЭ площадью  $9 \times 12$  см и толщиной около 100 мкм размещались перед мишенью эксперимента COMPASS на расстоянии около 25 см от оси пучка (гало), где интенсивность достигала порядка  $10^6$  частиц на  $\text{см}^2$  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  $\alpha$ -частиц составила  $L = 23.1 \pm 0.6$  мкм. Энергия  $\alpha$ -частиц оценивалась по модели SRIM аппроксимацией  $E_{\text{kin}} = -0.677\log(L)+1.746\sqrt{L}-1.638$ . Средняя энергия  $3\alpha$ -частиц в событии составила  $14.5 \pm 0.3$  МэВ.



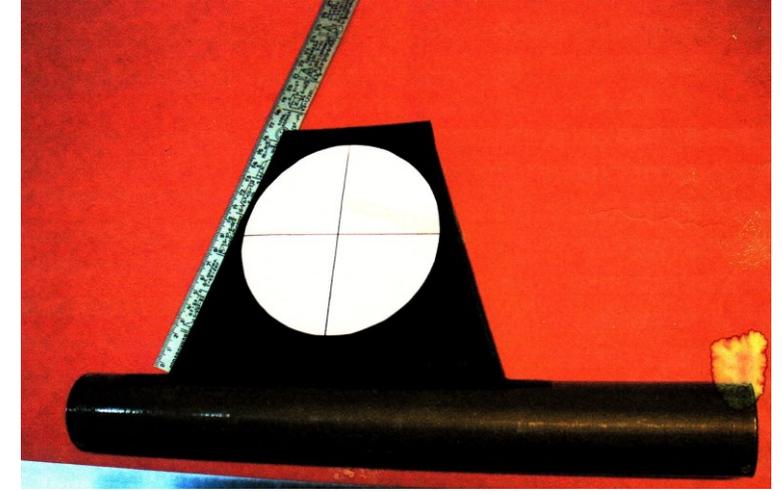
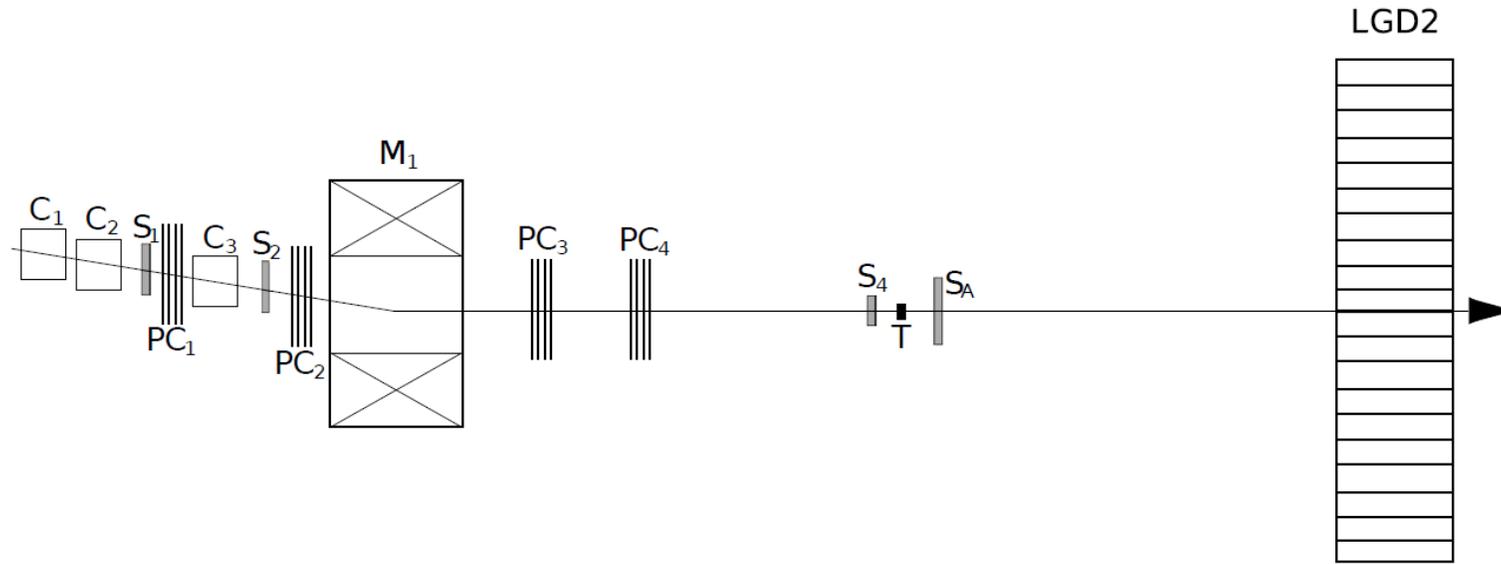
## Мотивация измерений

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  $3\alpha$ -диссоциации ядра  ${}^{12}\text{C}$  на активной тонкой углеродосодержащей мишени на установке Гиперон-М ускорительного комплекса У-70.

# Установка ГИПЕРОН-М



# Установка ГИПЕРОН-М

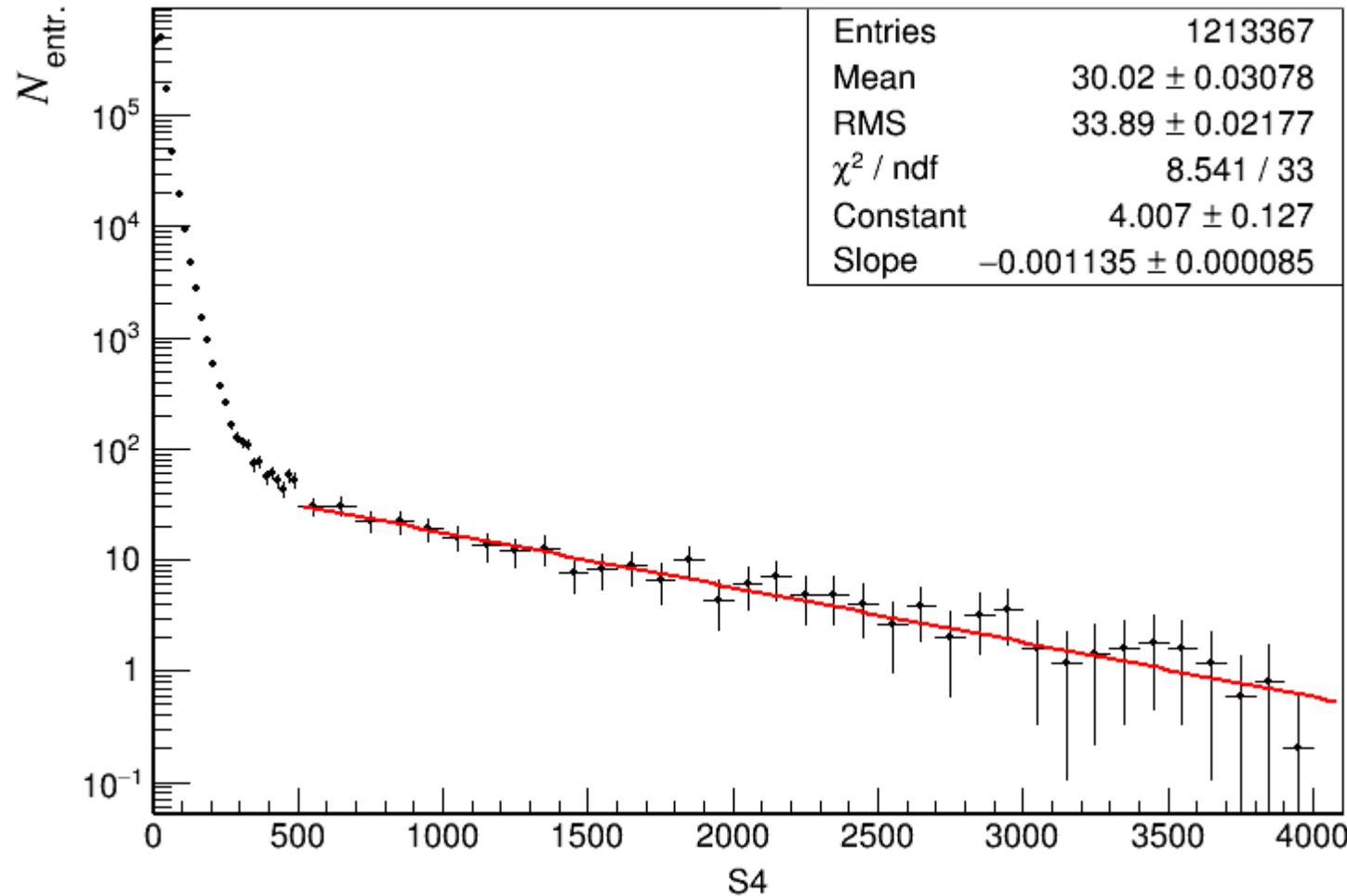


Счетчик  $S_4$

**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.

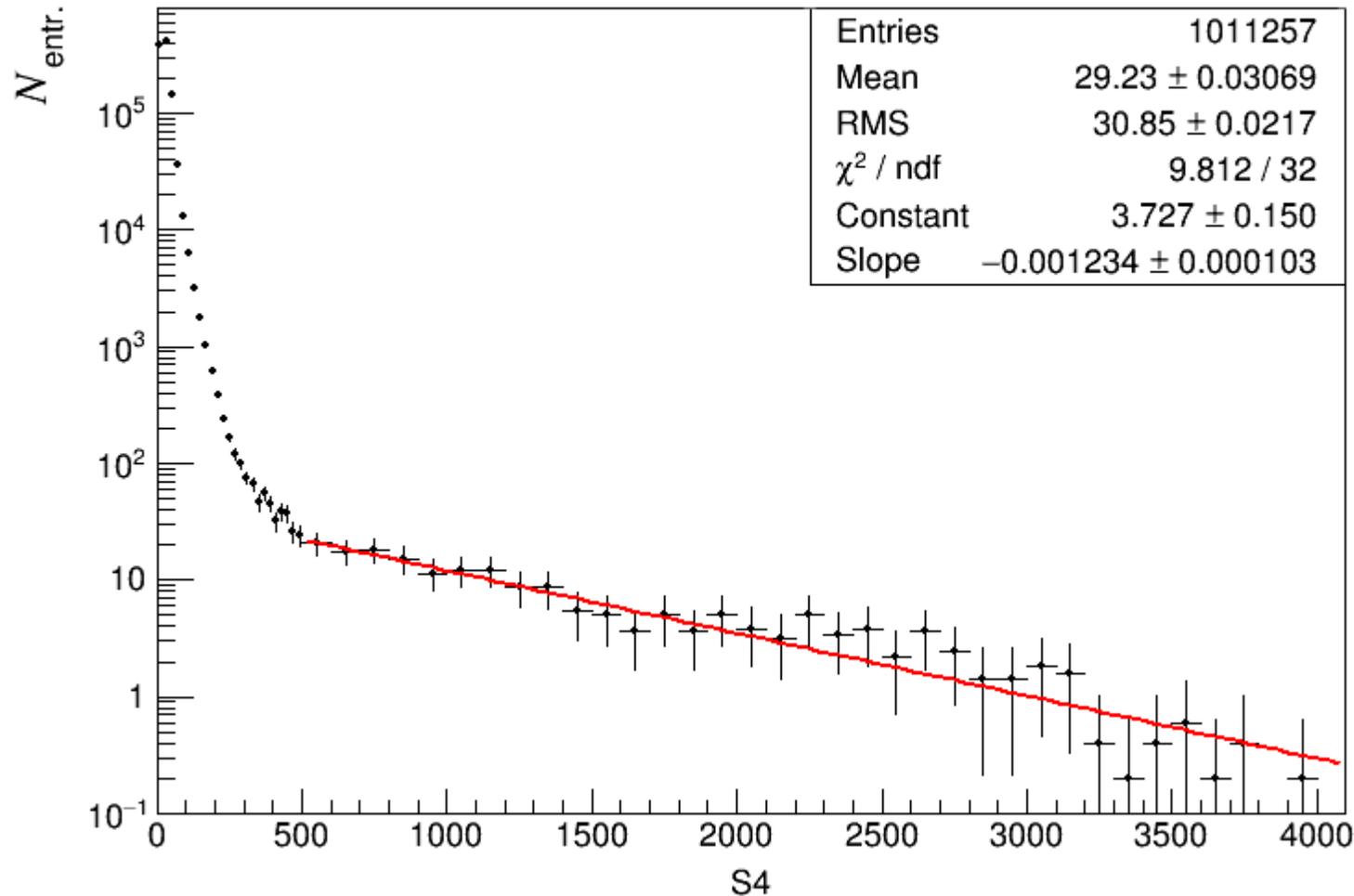
## Амплитудные спектры со счетчика S4 на установке ГИПЕРОН-М



Измерения амплитудных сигналов с тонкого сцинтилляционного счетчика S4 проводились в пучке заряженных частиц с импульсом 7 ГэВ/с, в состав которого входят  $\pi^+$ (67%),  $p$ (30%) и  $K^+$ (3%), а также незначительная примесь ядер дейтерия и мюонов. На рисунке представлен спектр амплитуд  $\sim 1$  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.

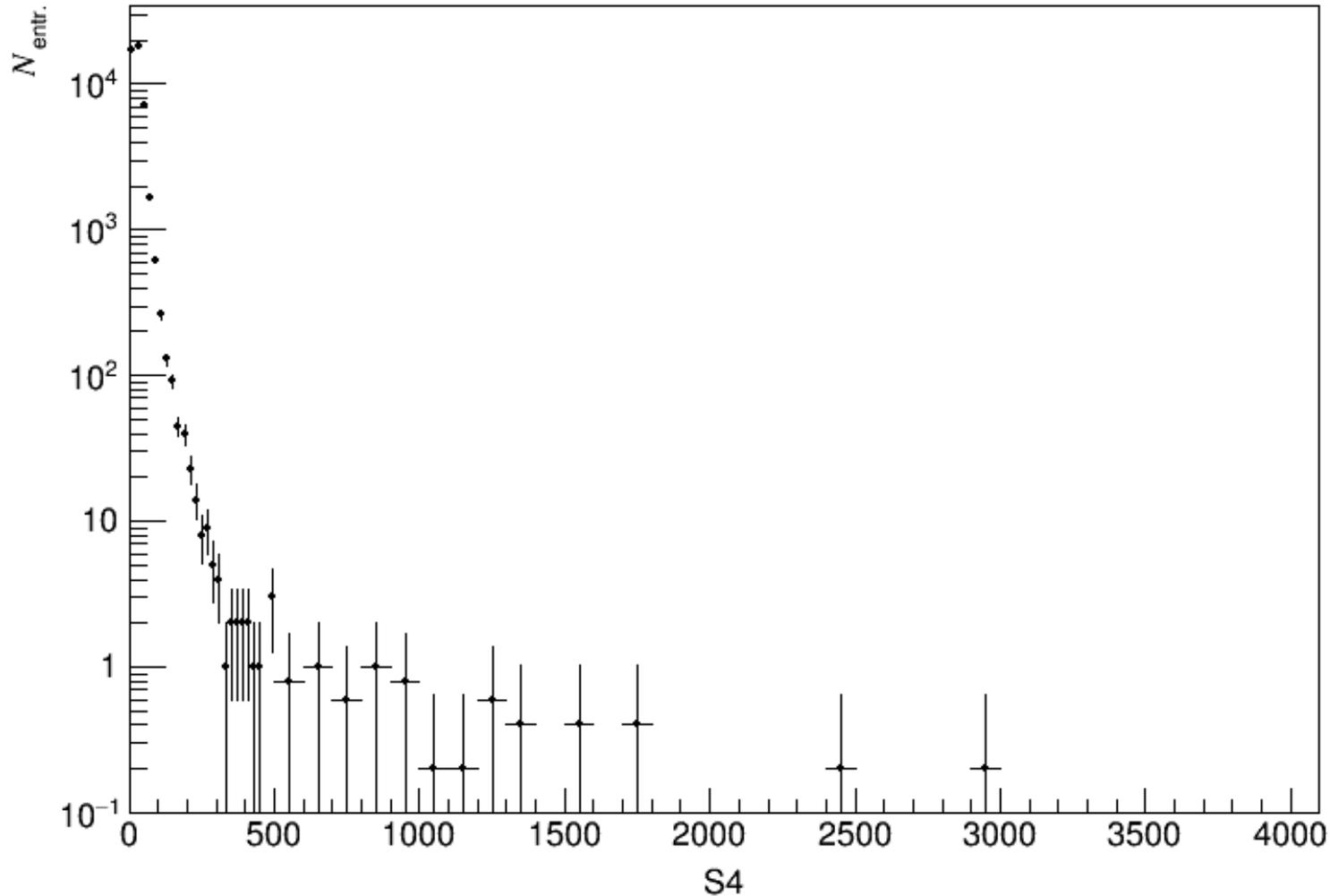
## Амплитудные спектры со счетчика S4 на установке ГИЩЕРОН-М



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  $\sim 1$  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.

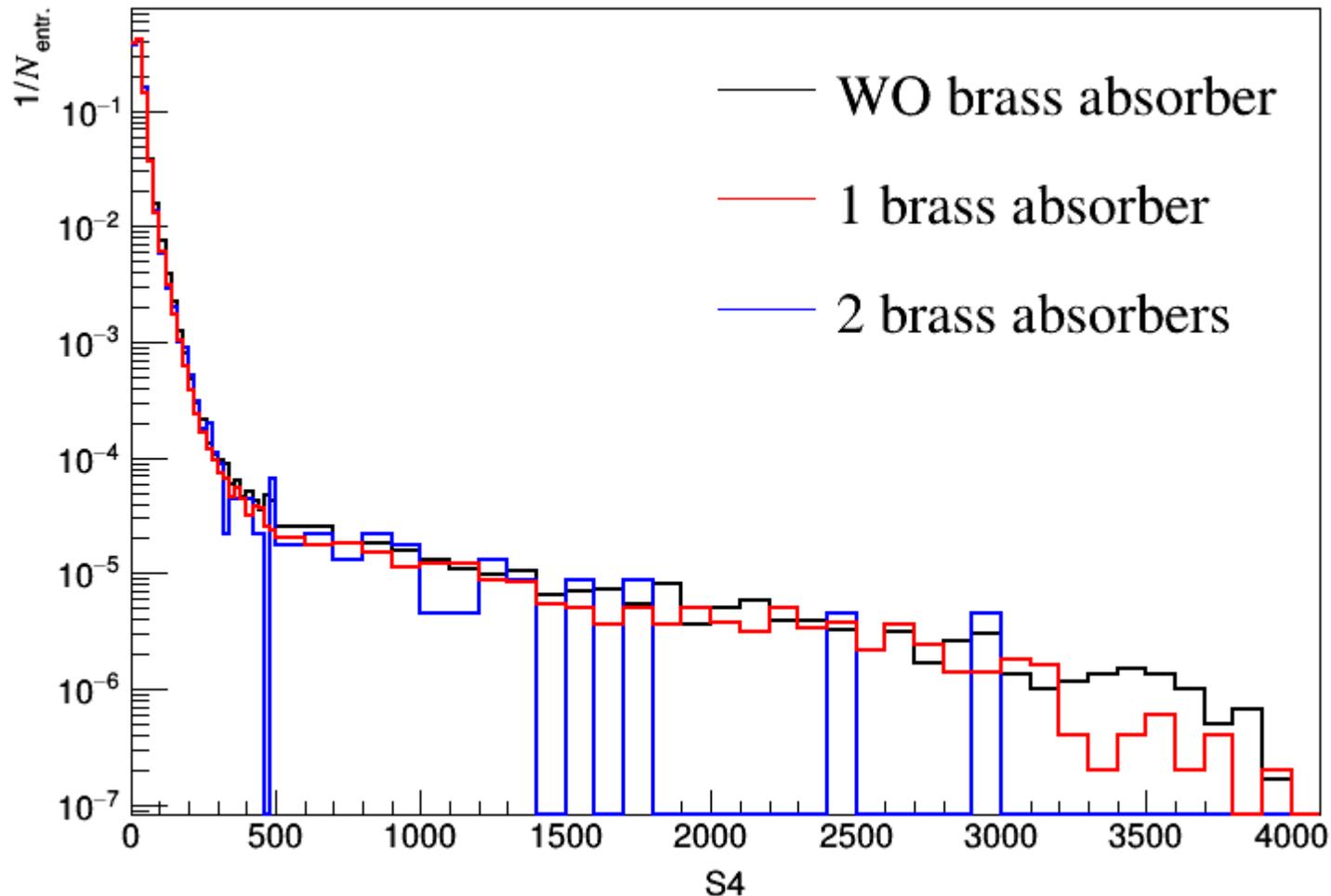
## Амплитудные спектры со счетчика S4 на установке ГИЩЕРОН-М



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

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

## 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 см<sup>2</sup>, 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 <sup>2</sup>	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 мм<sup>2</sup> 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 $3\alpha$ диссоциации ядер $^{12}\text{C}$ под действием адронов в ядерной эмульсии

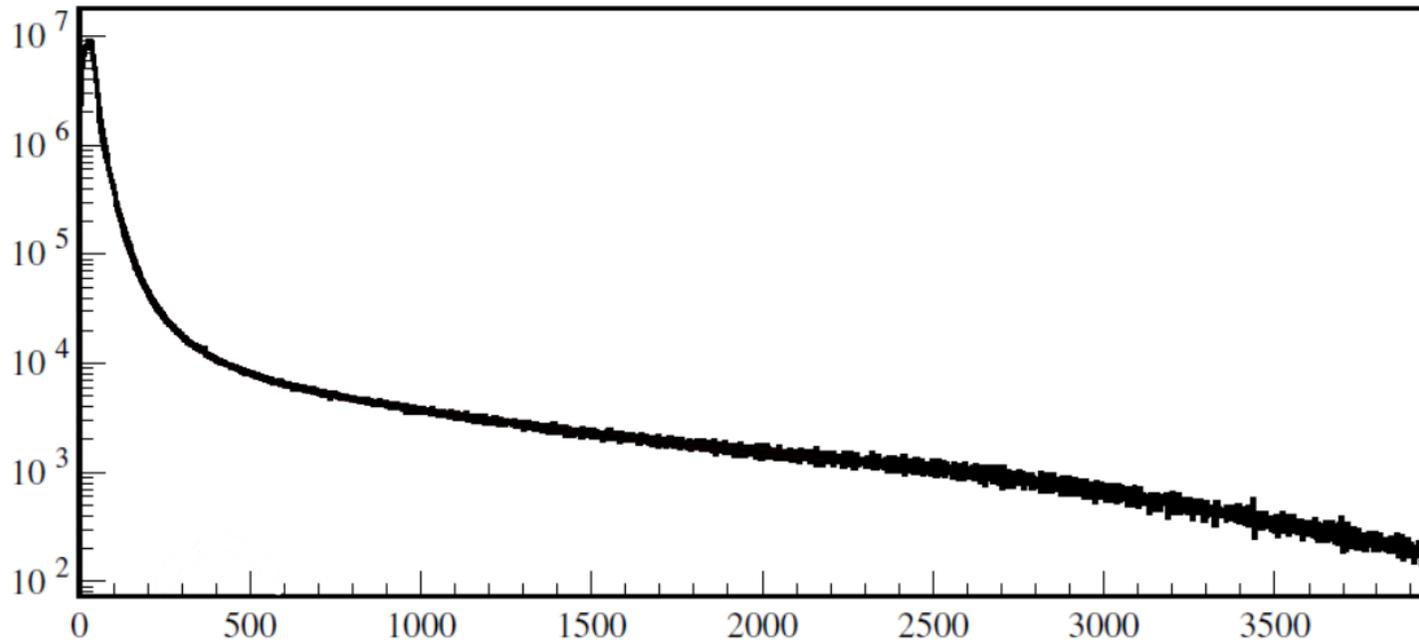
- 1. Облучение.** Облучение пластинок ядерной эмульсии проводилось на установке Гиперон-М в 2018 году. Интегральный поток заряженных частиц, прошедший через счетчик  $10 \times 10 \text{ см}^2$  расположенный за пластинками ядерной эмульсии, составил  $10^7$  частиц.
- 2. Статистика.** В просмотренных пластинках ядерной эмульсии, размером  $9 \times 12 \text{ см}^2$ , было найдено **105** событий, с образованием 3 треков  $\alpha$  частиц. Такие события интерпретировались как диссоциация ядер  $^{12}\text{C}$  на 3  $\alpha$ -частицы в адронном пучке.
- 3. Концентрация углерода.** Покомпонентный состав ядерной эмульсии приведен на сайте: [http://becquerel.jinr.ru/text/books/Powell\\_F.pdf](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/см<sup>3</sup>.
- 4. Просмотр.** Сканирование эмульсии велось методом просмотра по квадратам и всей толщине слоя эмульсии. Площадь квадрата составляет  $1 \text{ мм}^2$ , а толщина эмульсионного слоя - **200 мкм**. Всего было просмотрено **3670 квадратов**.

## Оценка сечения $3\alpha$ диссоциации ядер $^{12}\text{C}$ под действием адронов в ядерной эмульсии

1. Статистика найденных событий  $3\alpha$ -диссоциации ядер  $^{12}\text{C}$ :  $N_{\text{соб}} = 105$  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  $\text{см}^{-2}$ ;
4. Число атомов углерода в ядерной эмульсии  $N_{\text{c}} = 1.39 \cdot 10^{22}$  атомов  $\text{см}^{-3}$ .

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

# 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  $3\alpha$  диссоциации ядер  $^{12}\text{C}$  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  $\approx 3625$  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  $kB = 9.0 \cdot 10^{-3} \text{ г МэВ}^{-1} \text{ см}^{-2}$ , а тормозная способность  $\alpha$ -частицы (5 МэВ) в полистироле  $(dE/dr)_i = 8.75 \cdot 10^2 \text{ МэВ см}^2 \text{ г}^{-1}$ . Таким образом коэффициент гашения амплитуд  $\alpha$ -частиц в полистироле равен  $Q_\alpha(E) = 0.127$ . Ожидаемый сигнал от  $3\alpha$  диссоциации лежит в области амплитуд  $460 \pm 80$  отсчетов АЦП.

## Амплитудные спектры со счетчика S4 на установке ГИЩЕРОН-М

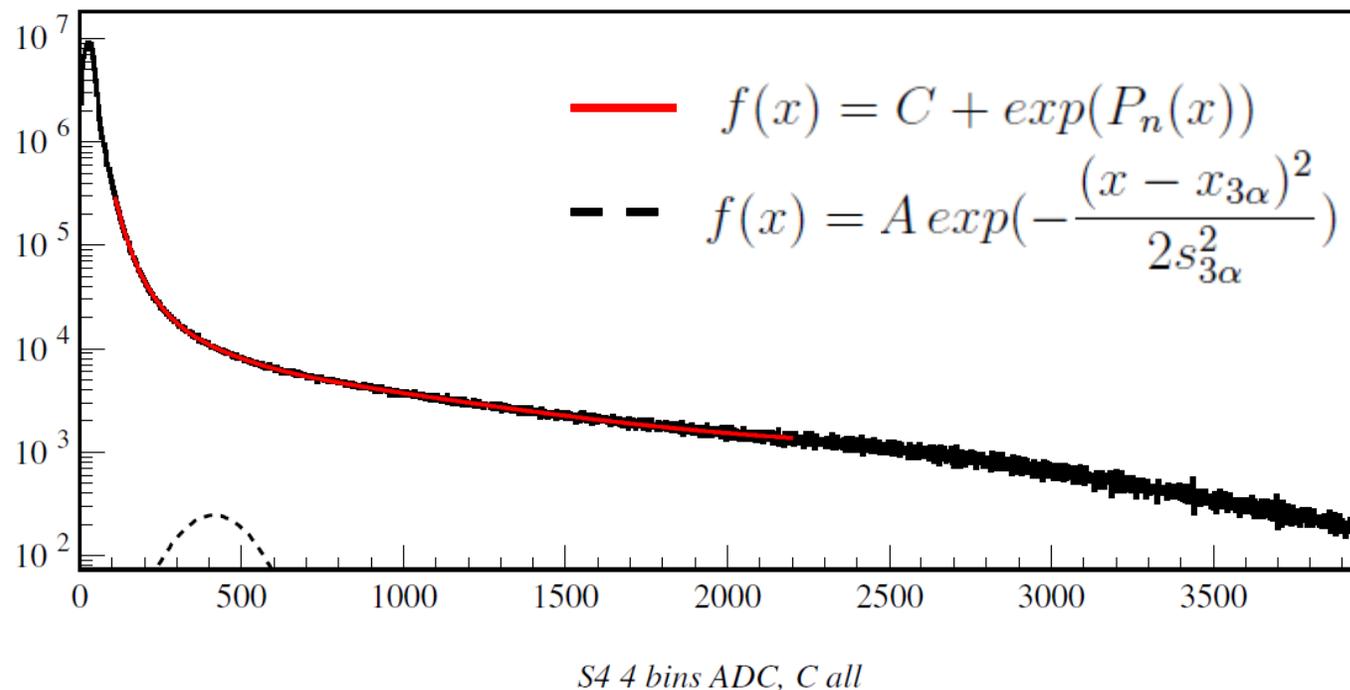
Полученный спектр амплитуд был профитирован функцией  $f(x)$ , включающей в себя описание ионизационные потери заряженных частиц и функцию Гаусса, с параметрами, извлеченными при анализе  $3\alpha$  диссоциации ядер  $^{12}\text{C}$  в ядерных фотоэмульсиях:

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

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

Таблица 2

	$h^+$ -пучок	$\pi^+$ -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  $3\alpha$ -систем в реакции  $\mu + {}^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha + \mu'$ , среднее значение равно  $14.5 \pm 0.3$  МэВ.
- В рамках эмульсионной методики получено сечение реакции  $h^+ + {}^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha + h^+$  при импульсе 7 ГэВ/с, равное  $100 \pm 10$  мб.
- На статистике 200 млн заряженных частиц, прошедших через тонкий сцинтилляционный счетчик получена оценка сечения процесса  $3\alpha$ -диссоциации ядра  ${}^{12}\text{C}$  при импульсе 7 ГэВ/с равная  $74 \pm 9$  мб, что согласуется с сечением, полученным в рамках эмульсионной методики.
- Указанные выше сечения процесса  $3\alpha$ -диссоциации ядра  ${}^{12}\text{C}$  в пучке заряженных частиц можно рассматривать как первую оценку процесса  $3\alpha$ -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!**