



НИЦ «Курчатовский институт»



## Фрагментация ядер при промежуточных энергиях на установке ФРАГМ



**М. А. Мартемьянов, В. В. Куликов**

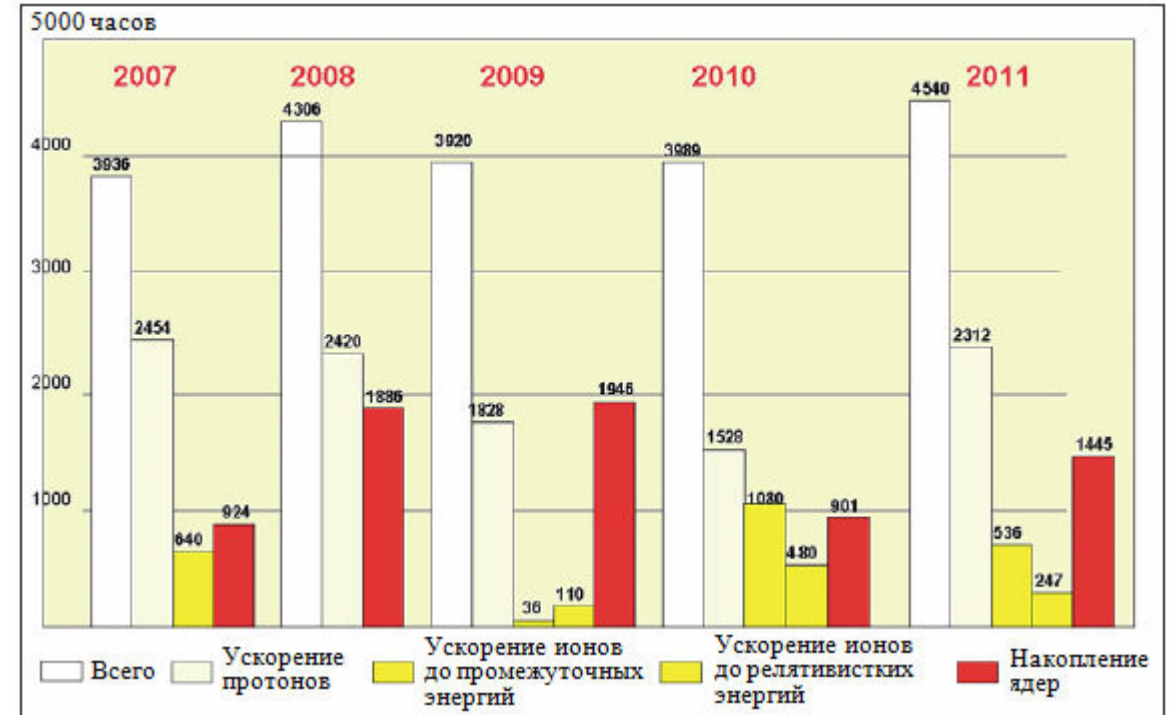
*Физика частиц при средних и высоких энергиях . Институт физики высоких энергий имени А.А. Логанова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Протвино (МО)  
2–5 июня 2026*



- Создание тяжелоионного ускорительно-накопительного комплекса ТВН открыло новые перспективы для осуществления как прикладных, так и фундаментальных исследований. Одним из экспериментов, работающим на ТВН, стал детектор ФРАГМ
- ФРАГМ был оптимизирован для измерения выходов широкого диапазона фрагментов и энергий, образованных в результате взаимодействия пучка ионов ускорителя с различными мишенями
- Среди результатов, полученных на установке ФРАГМ, следует отметить:
  - ✓ Измерение дифференциальных сечений широкого набора легких фрагментов при промежуточных энергиях, которые были включены в базу данных по ядерным реакциям EXFOR и могут служить надежным механизмом тестирования моделей ядро-ядерных взаимодействий
  - ✓ Изучение природы возникновения кумулятивного эффекта в рамках модели QGSM для протонных импульсных спектров
  - ✓ Исследование кумулятивного эффекта для пионов, протонов и легких ядер в рамках термодинамической модели при фрагментации ядер углерода
  - ✓ Поиск зарядово-обменных реакций при промежуточных энергиях,  $A$  – зависимость в квазиупругих процессах
  - ✓ Проявление кулоновских эффектов при фрагментации ядер железа



Статистические данные по эксплуатации комплекса ТВН



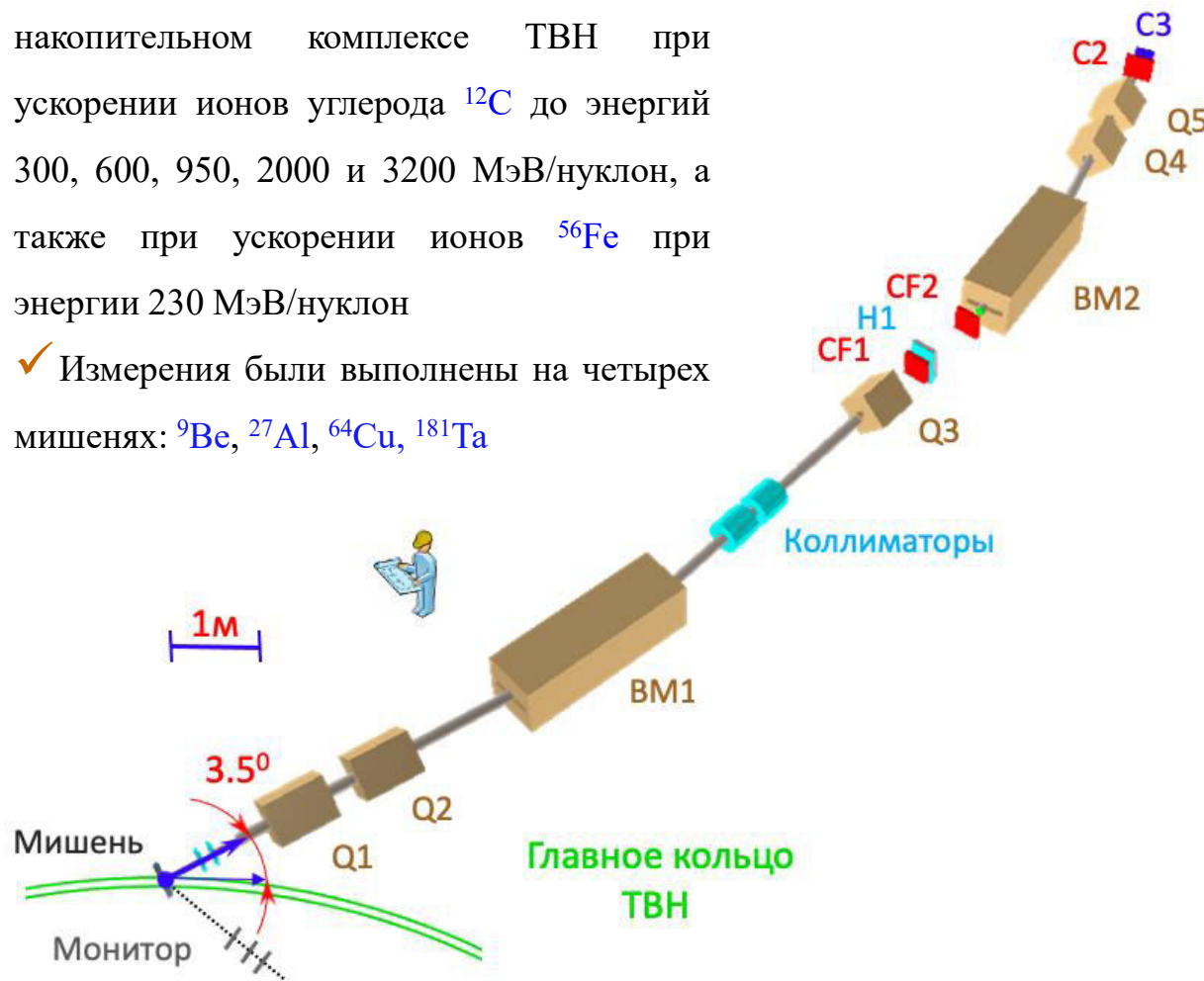
- Работы по созданию ТВН (начаты в 1997) были завершены к 2007; набор физических данных осуществлялся в течение 5 лет
- На ускорительном комплексе ТВН было осуществлено ускорение протонов и тяжелых ионов до 10 ГэВ и 4 ГэВ/нуклон соответственно при интенсивности порядка  $10^7 \div 10^{10} \text{ с}^{-1}$

- ✓ За работы по созданию ТВН группе работников ускорительно-накопительного комплекса была присуждена премия Правительства РФ в области науки и техники за 2010 год

Н. Н. Алексеев, А. А. Голубев, Б. Ю. Шарков, Научные исследования и разработки НИЦ «Курчатowski институт» – ИТЭФ, Сборник статей, Москва (2019)



- ✓ Данные набраны на ускорительно-накопительном комплексе ТВН при ускорении ионов углерода  $^{12}\text{C}$  до энергий 300, 600, 950, 2000 и 3200 МэВ/нуклон, а также при ускорении ионов  $^{56}\text{Fe}$  при энергии 230 МэВ/нуклон
- ✓ Измерения были выполнены на четырех мишенях:  $^9\text{Be}$ ,  $^{27}\text{Al}$ ,  $^{64}\text{Cu}$ ,  $^{181}\text{Ta}$



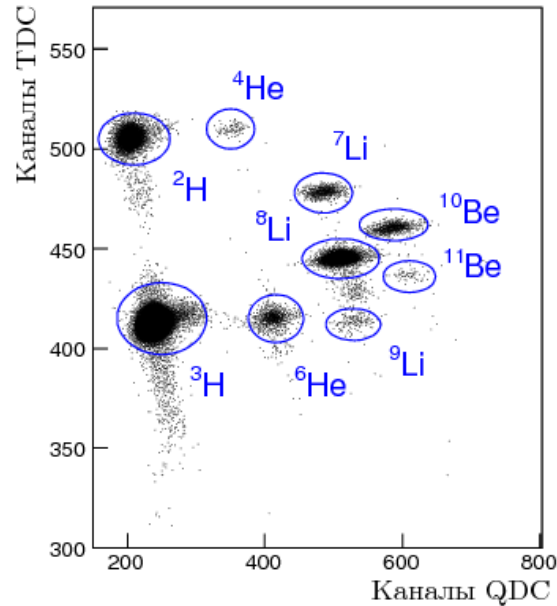
- ✓ Длина магнито-оптического канала : 42 м
- ✓ Два поворотных магнита: **BM1** (угол поворота:  $\alpha=0.259$  рад.), **BM2** ( $\alpha=0.276$  рад.)
- ✓ Пять квадруполей: **Q1**, **Q4** (вертикальная фокусировка) и **Q2**, **Q5** (горизонтальная фокусировка), **Q3** □ улучшает импульсное разрешение пучка

- Сцинтилляционные счётчики: **CF1**, **CF2**, **C2**, **C3** (измерение  $dE/dx$ , TOF)
- **CF1 – C2** задает триггер
- **H1** годоскоп из 20 вертикальных элементов (сцинтилляционные счетчики, размер  $20 \times 1 \times 1$  см)
- Система мониторинга пучка состоит из трех сцинтилляционных счетчиков и расположена под углом  $2^\circ$  по отношению к пучку

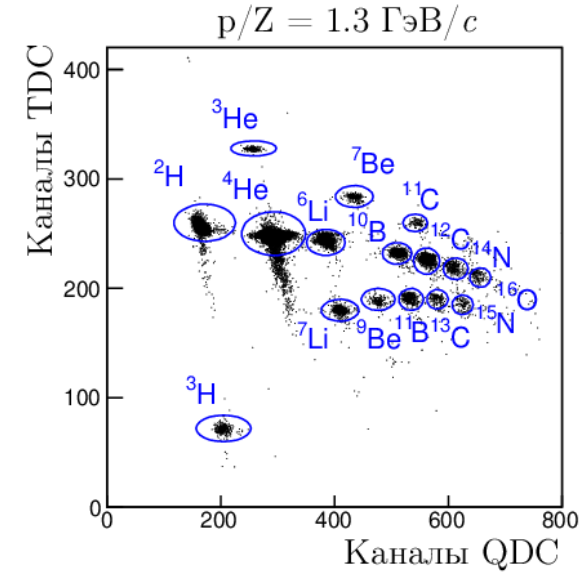
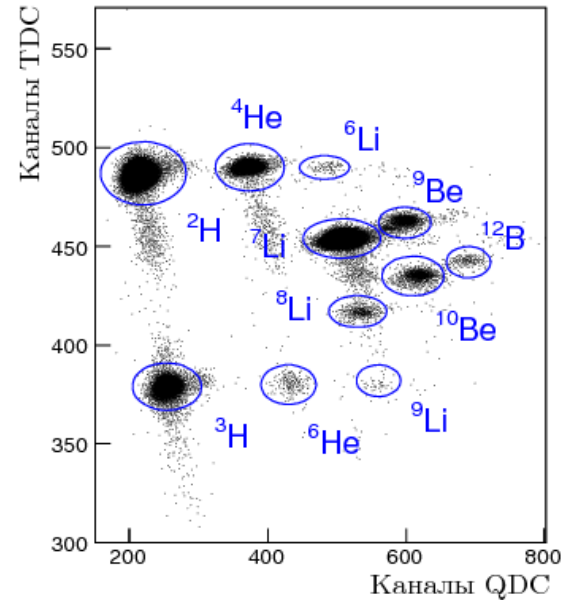


## Фрагментация $^{12}\text{C}$ при энергии 300 МэВ/нуклон

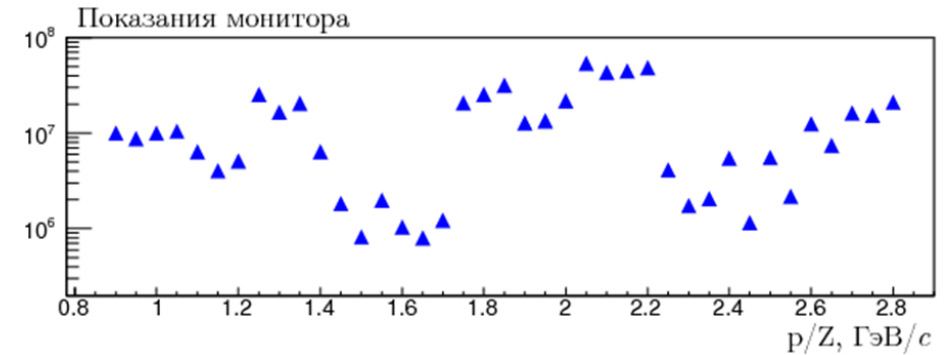
Жесткость:  $p / Z = 1.85 \text{ ГэВ}/c$



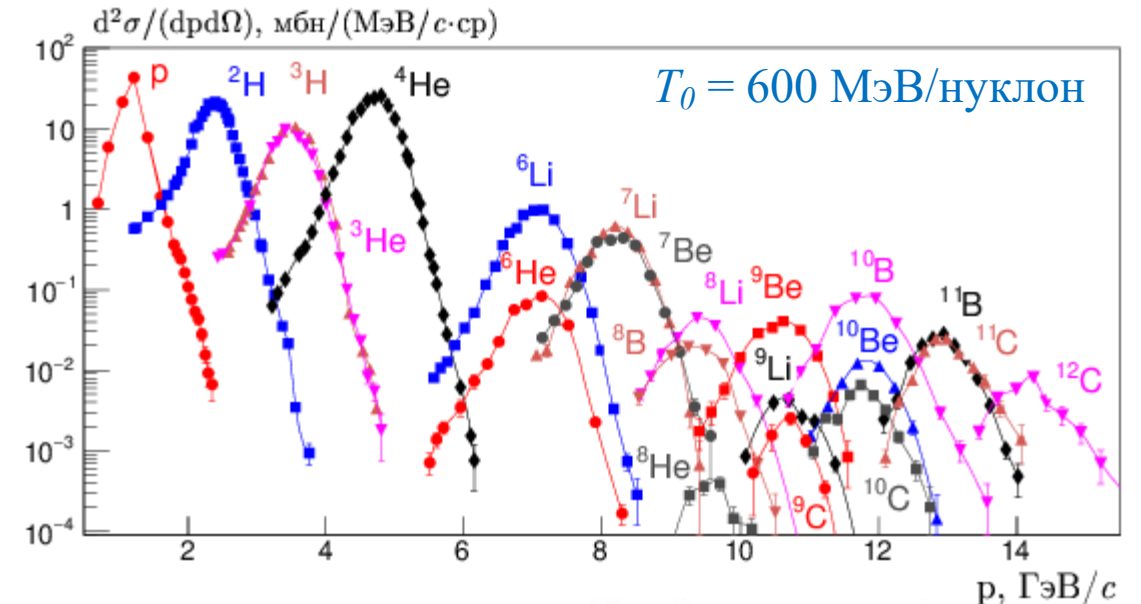
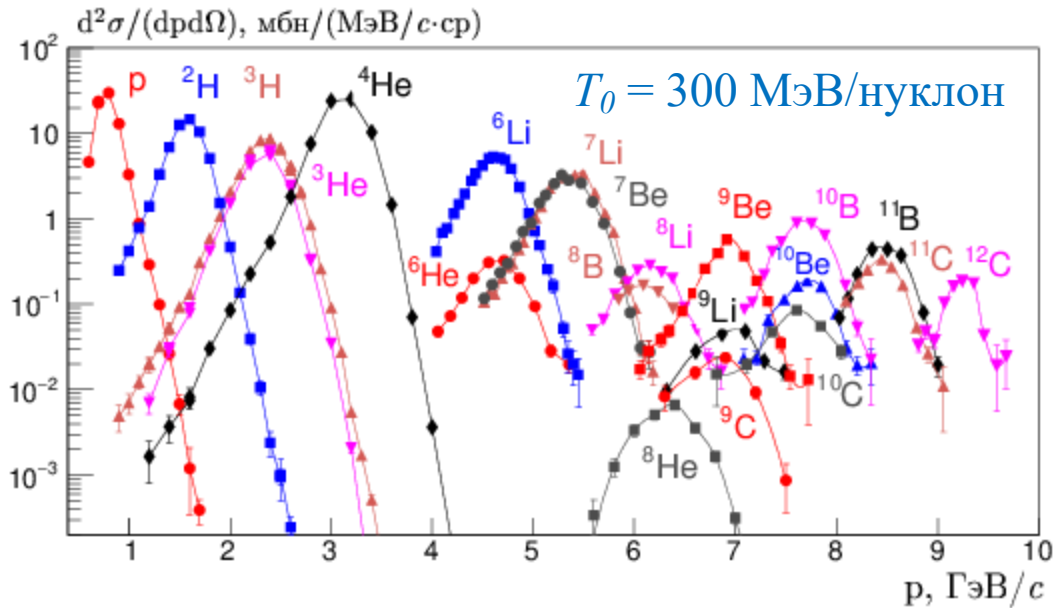
Жесткость:  $p / Z = 2.05 \text{ ГэВ}/c$



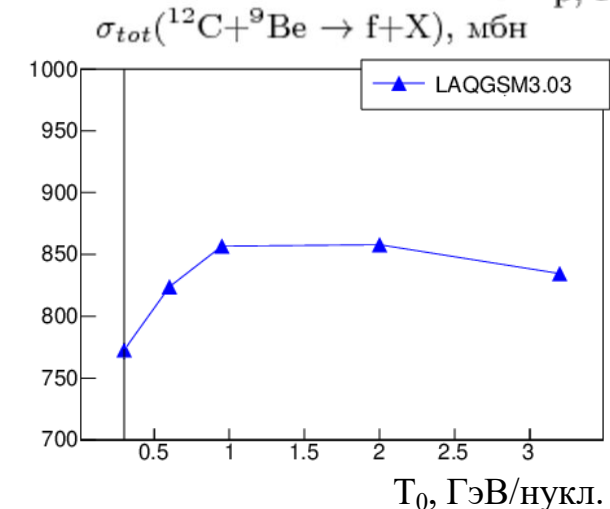
Фрагментация  $^{56}\text{Fe}$   
при энергии 230  
МэВ/нуклон  
(регистрируется до  
16-ти изотопов  
одновременно)



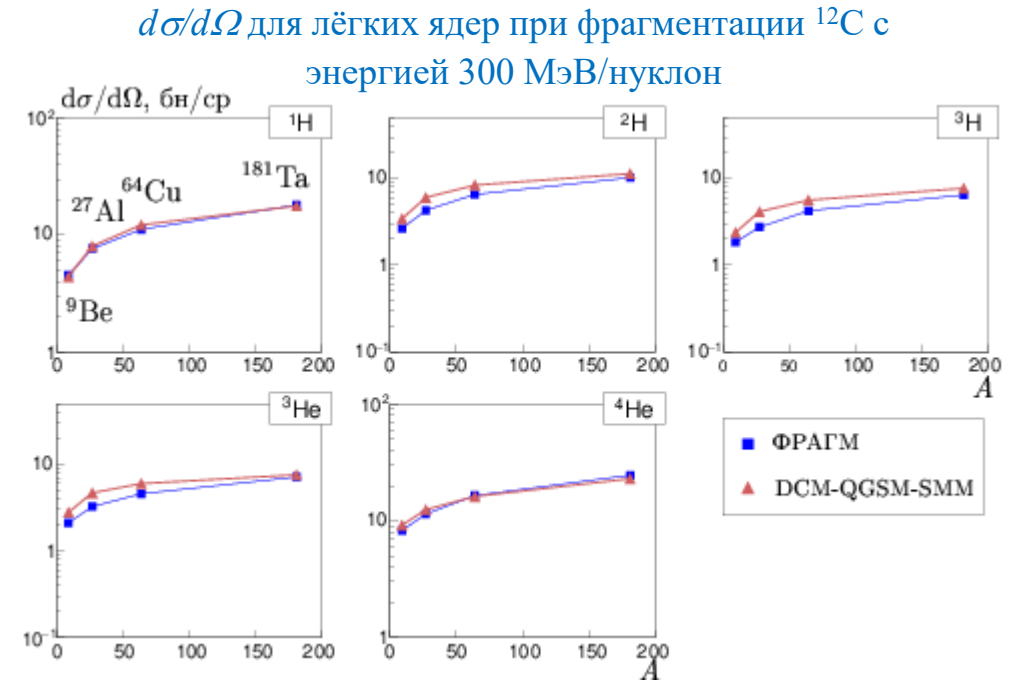
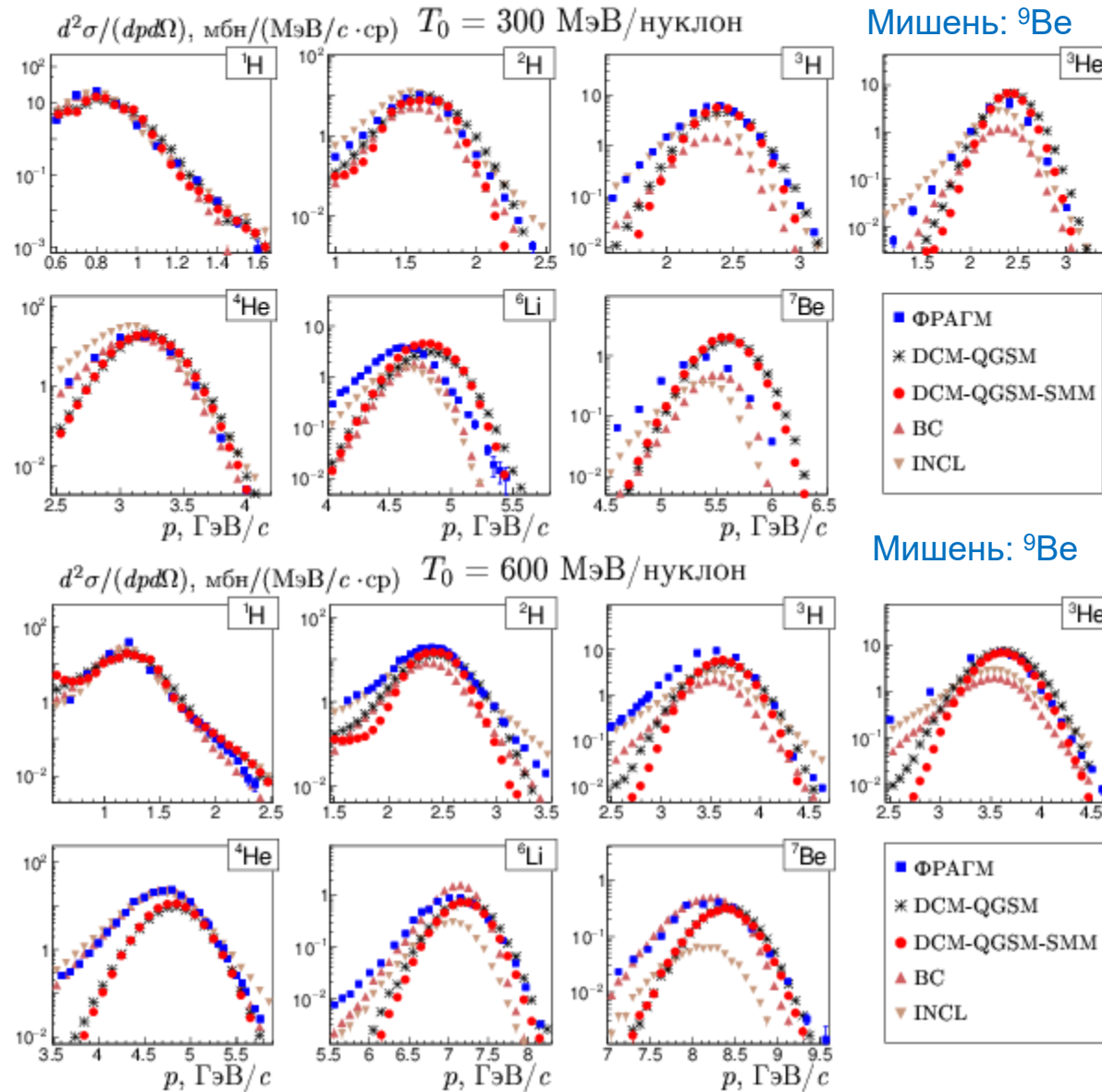
- ✓ Магнито-оптический канал настраивается на определенную жесткость, при которой набирается данная экспозиция
- ✓ Корреляционное двумерное распределение: QDC (функция  $dE/dx$  и  $Z$  фрагмента, определена по счетчику CF1) от TDC (TOF – функция атомного массового числа фрагмента, измерена между CF1 и C2). TDC канал = 0.2 нс
- ✓ Различные фрагменты могут быть легко идентифицированы при анализе такого распределения



- ✓ Сканирование магнито-оптического канала по жесткости и анализ корреляционных распределений позволяет получить полные импульсные спектры образовавшихся изотопов
- ✓ Приведены дифференциальные сечения рождения различных ядер при фрагментации  $^{12}\text{C}$  при разных энергиях на бериллиевой мишени в зависимости от импульса фрагмента
- ✓ Для получения абсолютной величины дифференциального сечения используется значение полного сечения, определенного по модели LAQGSM
- ✓ При  $T_0 = 300$  МэВ/нуклон модель дает значение  $\sigma_{tot} = 772.86$  мбн, что подтверждается другими аналогичными расчетами (L. Sihver *et al.*, Phys. Rev. C 49 (1993) 1225)

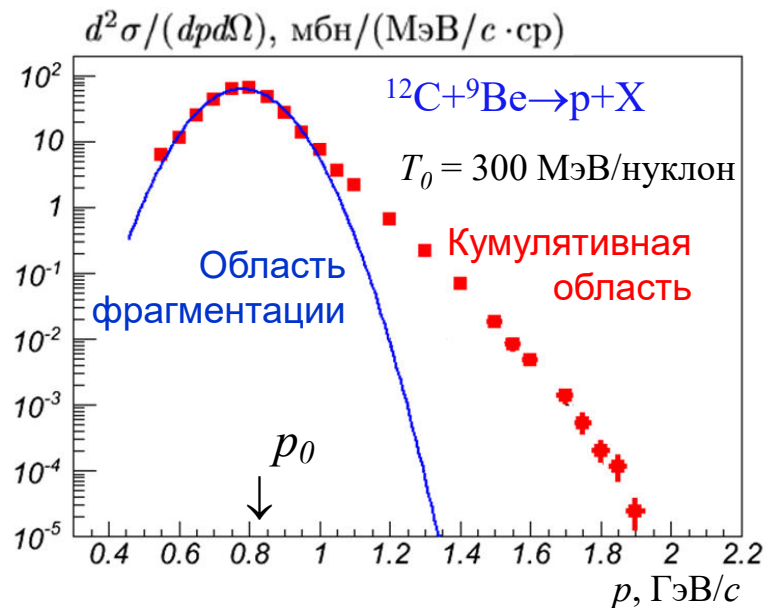


- ✓ Модель бинарного каскада (BC, G. Folger *et al.*, EPJA **21**, 407 (2004) ) :
  - Применяется, если мишень и снаряд являются легкими ионами, а также в том случае, если снаряд является более тяжелым ионом
  - Реализован новый подход внутриядерного каскада: нуклоны распределены в пространстве согласно ядерной плотности; импульсы нуклонов распределены в предположении ферми-газа
- ✓ Молекулярно – динамическая модель (QMD, T. Koi *et al.*, AIP Conf. Proc. **896**, 21 (2007) ):
  - Справедлива для легких и тяжелых ионов
  - Содержит генерацию значительного числа промежуточных резонансных состояний
- ✓ Модель внутриядерного каскада (INCL, J. Dudouet *et al.*, Phys. Rev. C **89**, 054616 (2014) ) :
  - Дает хорошее согласие по легким и стабильным ионам с экспериментальными данными с точки зрения кинематических параметров и угловых распределений
- ✓ Кварк-глюонная струнная модель (Los Alamos) (LAQGSM03.03, LA-UR-11-01887):
  - Первая стадия процесса – модель внутриядерного каскада, первоначально разработанная в ОИЯИ
- ✓ Модель DCM-QGSM-SMM (M. Baznat, A. Botvina, G. Musulmanbekov, *et al.*, Phys. Part. Nucl. Lett. **17**, 303 (2020) ):
  - Новая модель ядро-ядерных взаимодействий, развиваемая в ОИЯИ и ориентируемая на использование в рамках проекта NICA
  - Является расширением модели DCM-QGSM и базируется на модернизированной версии дубненского внутриядерного каскада DCM
  - Применима в широком диапазоне по массам и энергиям сталкивающихся ядер



A. A. Kulikovskaya *et al.*, *Phys. Part. Nucl.* **57**, 271 (2026)

- ✓ Экспериментальные данные, полученные на установке ФРАГМ, могут быть использованы для тестирования и верификации моделей ядро-ядерных взаимодействий
- ✓ С ростом массы фрагмента различия между модельными предсказаниями становятся более наглядными
- ✓ Несомненно, в этом случае важным становится оценка угловых распределений родившихся ядер, что требует наличия дополнительных экспериментальных данных



✓ В рамках QGSM кумулятивный эффект связан с существованием многокварковых кластеров в ядре. Кластеры имеют множественность  $3k$  ( $k = 1, 2, 3$ ) и соответствующие вероятности  $w_k$ . В QGSM вычисляется инвариантное сечение инвариантное сечение выхода протонов как сумму трех компонент:

$$E \frac{d^3\sigma}{d^3p} = k \times [w_1 g(x, p_\perp^2) + w_2 b_2(x, p_\perp^2) + w_3 b_3(x, p_\perp^2)]$$

$$g(x, p_\perp^2) = G \times \exp(-0.5(1-\Delta-x)^2/\sigma_x^2) \exp(-0.5 p_\perp^2/\sigma_p^2)$$

$$b_2(x, p_\perp^2) = \begin{cases} B_2 (x/2)^3 (1-x/2)^3 \exp(-\alpha_1 p_\perp^2) \\ 0, x \notin [0, 2] \end{cases}$$

$$b_3(x, p_\perp^2) = \begin{cases} B_3 (x/3)^3 (1-x/3)^6 \exp(-\alpha_2 p_\perp^2) \\ 0, x \notin [0, 3] \end{cases}$$

✓ Кумулятивный эффект это образование частиц в области кинематически запрещенной в нуклон-нуклонных взаимодействиях. Природа возникновения данного эффекта в настоящее время является предметом дискуссии. Существуют несколько приемлемых описаний: сильно возбужденные ядерные префрагменты, флуктуации ядерной плотности, короткодействующие корреляции нуклонов, многокварковые кластеры и т.д.

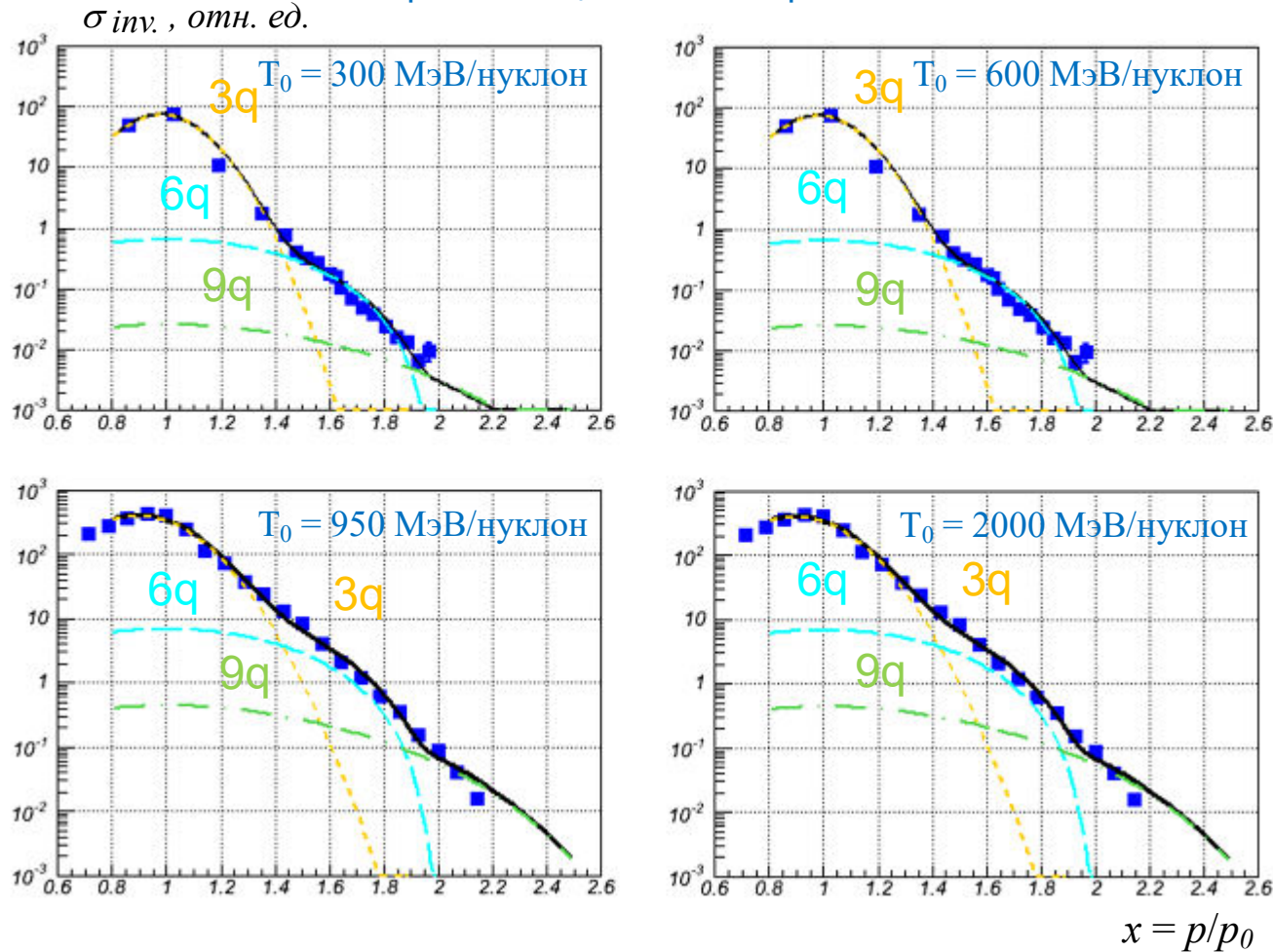
✓ Одно из описаний кумулятивного эффекта была предложена А. Ефремовым и А. Кайдаловым в рамках кварк-глюонной струнной модели (QGSM)

A. Efremov, A. Kaidalov *et al.* Phys. Atom. Nucl. 57, 874 (1994)

где  $x = p/p_0$  – кумулятивная переменная;  $g$ ,  $b_2$  и  $b_3$  – функции фрагментации (в рамках модели QGSM); параметры  $\alpha_1 = 5$  ГэВ<sup>-2</sup> и  $\alpha_2 = 3$  ГэВ<sup>-2</sup> [L. Anderson *et al.* Phys. Rev. C 28, 1224 (1983)];  $G$ ,  $B_2$ ,  $B_3$  – нормировочные константы [JETP Lett. 97 439 (2013)]. Вероятности связаны соотношением  $w_1 + w_2 + w_3 = 1$



## Фрагментация $^{12}\text{C}$ на бериллиевой мишени



В.М. Abramov *et al.*, JETP Lett. 97, 439 (2013)

$T_0$ , ГэВ/ нукл.	$p_0$ , ГэВ/ с/нукл.	$X_{\max}$	$W_2(6q)$	$W_3(9q)$
0.3	0.81	2.35	$0.054 \pm 0.010$	$0.0005 \pm 0.0001$
0.6	1.22	1.95	$0.077 \pm 0.010$	$0.004 \pm 0.002$
0.95	1.6	2.4	$0.119 \pm 0.017$	$0.002 \pm 0.001$
2.0	2.72	2.15	$0.098 \pm 0.018$	$0.006 \pm 0.001$

- $w_2$  (вероятность двух-нуклонного кластера) изменяется с 5 до 11.9 %, при этом  $w_3$  – не превышает 0.6%
- Другое измерение для  $w_2$  – 6 % (CERN)  
[V. Burov *et al.* Phys.Lett. B 28, 46 (1977) ]
- Кроме того  $w_2$  ( $w_3$ ) были измерены в эксперименте TJNAF  
[K. S. Egiyan *et al.* Phys. Rev. Lett. 96, 082501 (2006)] и составили  $(19.3 \pm 4.1) \%$  и  $(0.55 \pm 0.17) \%$  для ядра углерода

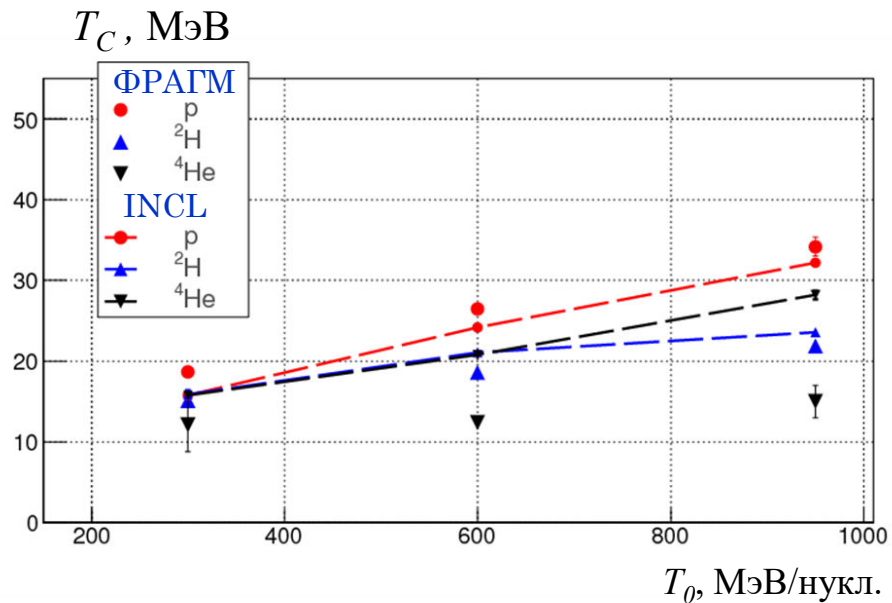
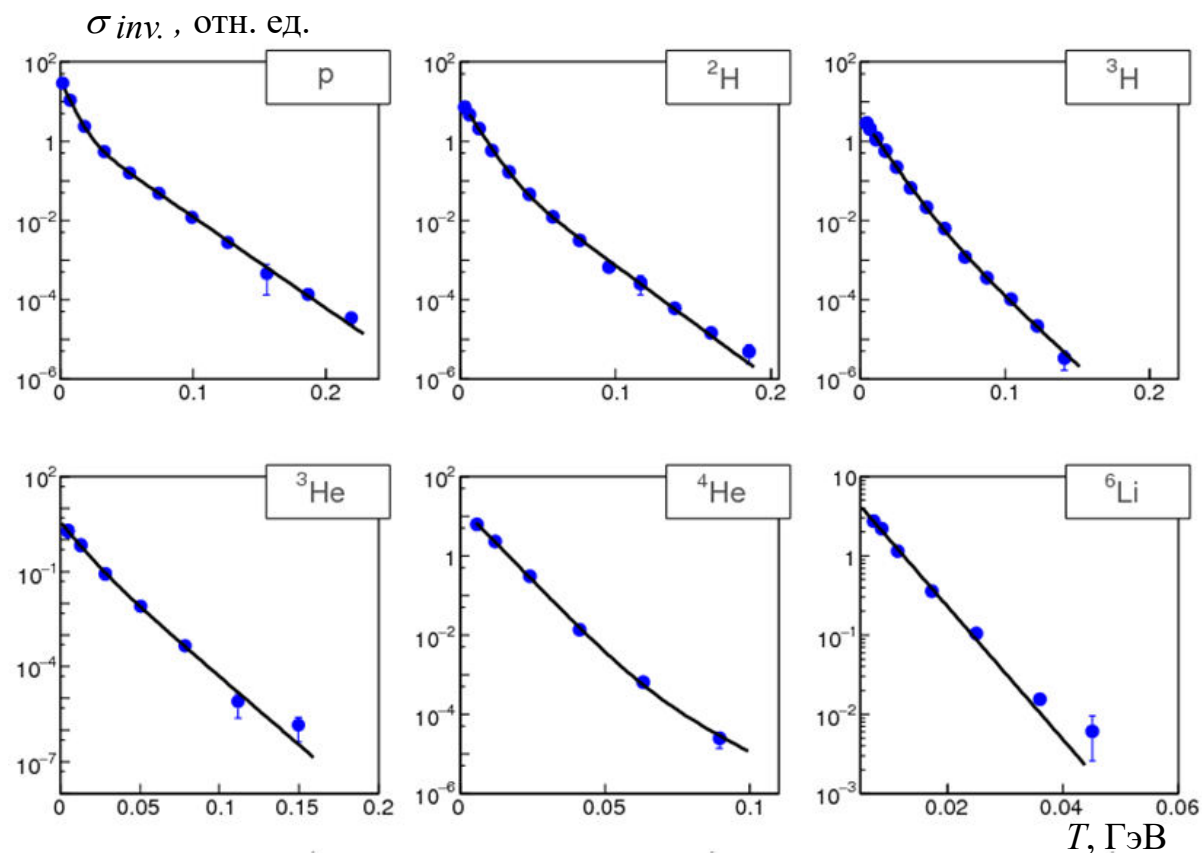


➤ В рамках термодинамической модели спектр по кинетической энергии фрагментов ( $T$ ) в системе покоя налетающего ядра может быть описан суммой двух экспонент с наклонами  $T_S$  (фрагментационный пик) и  $T_C$  (высоко-импульсный или кумулятивный) в форме:

$$Ed^3\sigma/d^3p = A_S e^{-T/T_S} + A_C e^{-T/T_C}$$

➤ Кумулятивная компонента хорошо прослеживается для легких ядер вплоть до  ${}^4\text{He}$

Фрагментация  ${}^{12}\text{C}$  с энергией 600 МэВ/нуклон



✓ Компонента  $T_C$  возрастает при увеличении кинетической энергии налетающего ядра. Модель **INCL** дает наилучшее описание кумулятивной компоненты



Фрагмент	$T_C$ (МэВ), эксперимент ФРАГМ			$T_C^*$ (МэВ)
	( $T_0 = 300$ МэВ)	( $T_0 = 600$ МэВ)	( $T_0 = 950$ МэВ)	
p	$18.7 \pm 0.4$	$26.5 \pm 0.6$	$34.3 \pm 1.2$	$25.5 \pm 1.0$
$^2\text{H}$	$15.1 \pm 0.7$	$16.8 \pm 0.4$	$21.9 \pm 1.9$	$16.0 \pm 1.0$
$^3\text{H}$	$12.5 \pm 0.9$	$16.6 \pm 0.6$	$12.4 \pm 3.3$	$15.0 \pm 1.0$
$^3\text{He}$	$10.1 \pm 0.6$	$16.8 \pm 2.2$	$25.4 \pm 12.2$	$19.0 \pm 1.0$
$^4\text{He}$	$12.1 \pm 0.3$	$12.4 \pm 0.6$	$15.0 \pm 0.2$	$14.0 \pm 1.0$

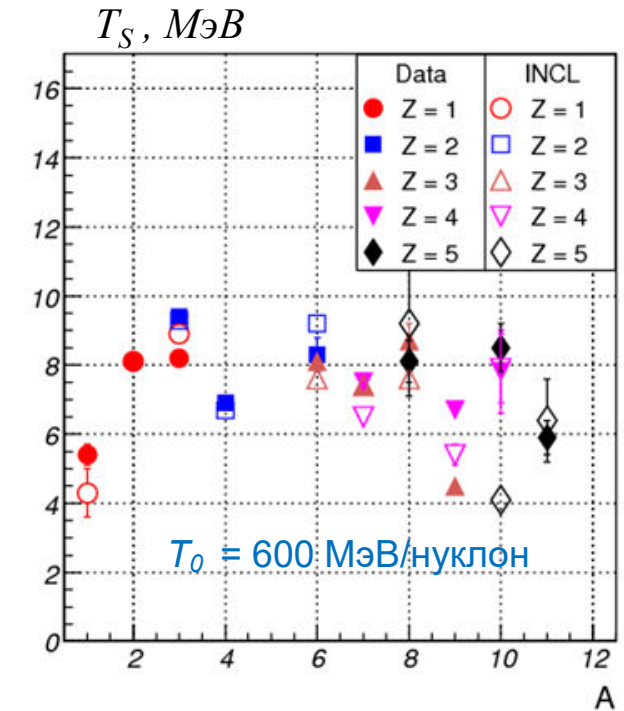
➤  $T_C^*$  [T. Odeh *et al.*, Phys. Rev. Lett. 84, 4557 (2000)] : данные по столкновениям  $^{197}\text{Au} - ^{197}\text{Au}$  с энергией 1 ГэВ/нуклон

➤  $T_C$  постепенно падает с ростом массы фрагмента

➤  $T_C$  и  $T_C^*$  находятся в удовлетворительном согласии, расхождение возможно в силу различия в угле регистрации легких ядер

➤ Данные по дифференциальным сечениям по фрагментации ядер  $^{12}\text{C}$  с энергией 600 МэВ/нуклон и широкому набору ядер от протонов до изотопов углерода размещены в базе данных **EXFOR**

V.M. Abramov *et al.*, Phys. Atom. Nucl. 79, 700 (2016); Yad.Fiz. 79, 475 (2016)

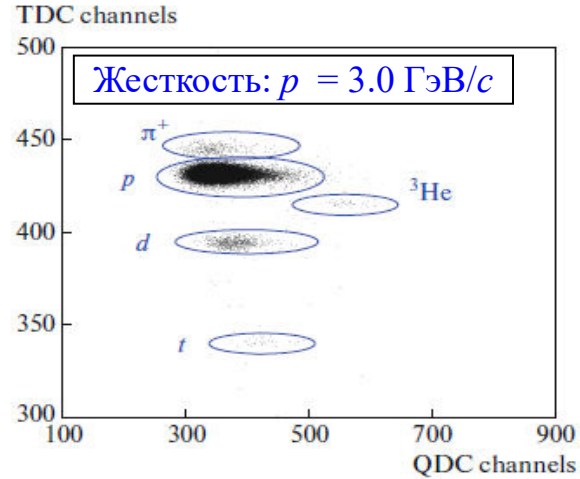


✓ Для описания импульсных спектров фрагментов с  $Z \geq 2$  можно использовать только параметр  $T_S$

✓ Модель **INCL** наиболее точно описывает ширины фрагментационных пиков для всей совокупности фрагментов

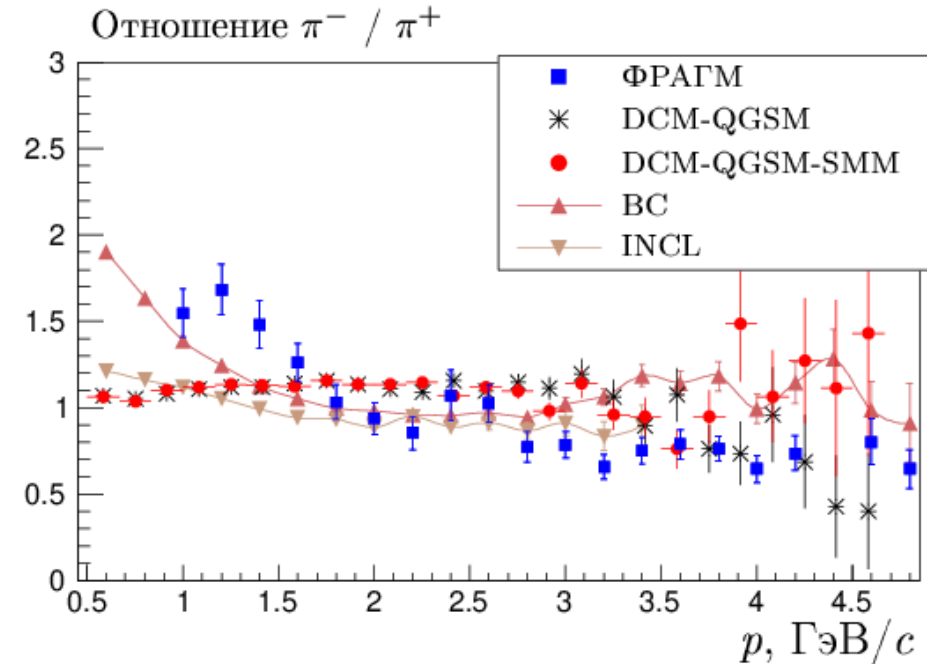
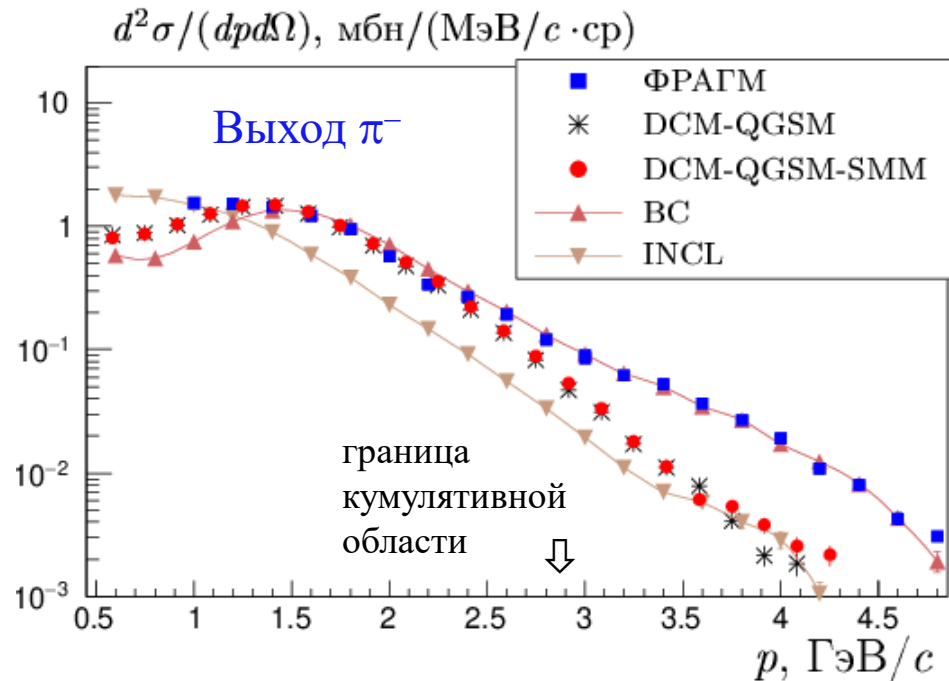


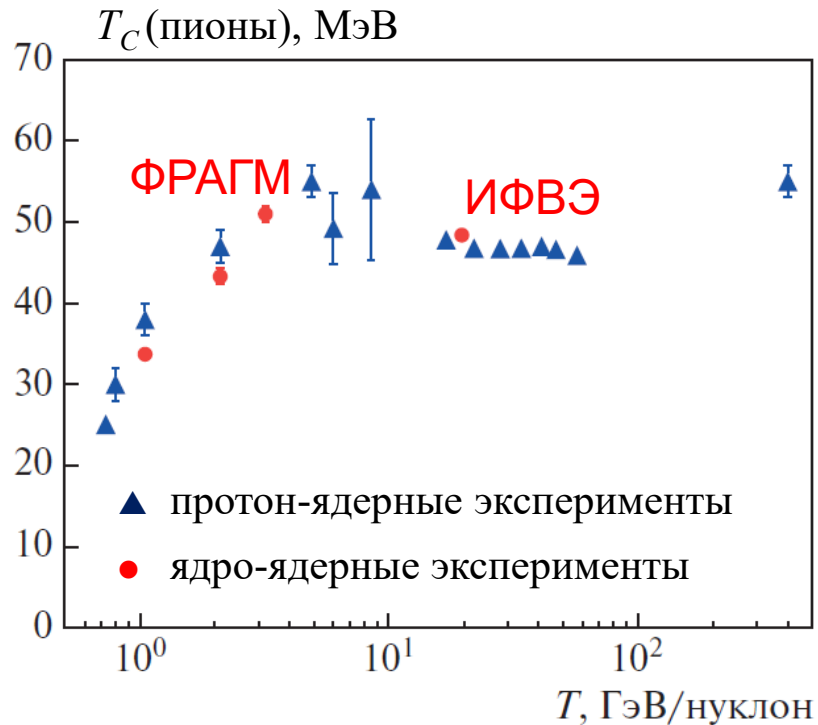
# Рождение $\pi^\pm$ при фрагментации $^{12}\text{C}$ с энергией 3.2 ГэВ/нуклон



- ✓ Установка позволяет разделять  $\pi^+$  от протонов; сигнал от  $\pi^-$  не имеет дополнительного фона
- ✓ Распределение дифференциального распределение сечения для  $\pi^-$  в зависимости от его лабораторного импульса демонстрирует фрагментационную и кумулятивные области. Экспериментальные данные хорошо согласуются с модельными расчетами в области фрагментации
- ✓ Отношение выходов  $\pi^- / \pi^+$  показывает хорошее согласие между экспериментальными и модельными данными выше 1.5 ГэВ/с; при импульсах ниже данного порога видно, что возникает влияние кулоновского поля ядра-остатка

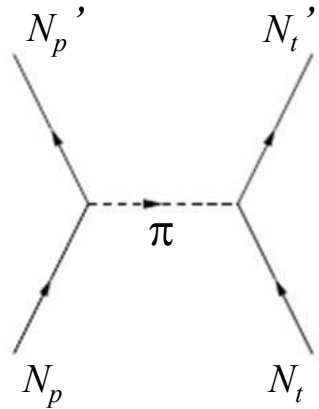
V.M. Abramov *et al.*, Phys. Atom. Nucl. **84**, 467 (2021); Yad. Fiz. **84**, 331 (2021)



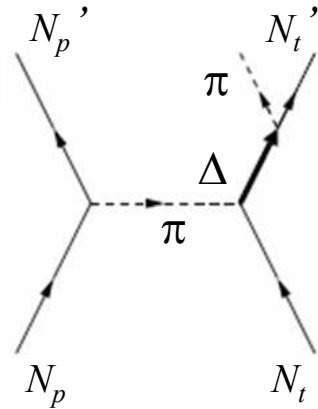


Представлены данные для протон-ядерных взаимодействий : 0.73 ГэВ , 0.8 – 4.89 ГэВ (LBL), 6.0 и 8.5 ГэВ (ОИЯИ + ИТЭФ), 15 – 65 ГэВ (ИФВЭ), 400 ГэВ (FNAL); и ядро-ядерных: 1.05 и 2.1 ГэВ/нукл. (LBL), 3.2 ГэВ/нукл. (ФРАГМ), 19.6 ГэВ/нукл. (ИФВЭ)

- ✓ Результаты эксперимента ФРАГМ при 3.2 ГэВ/нуклон дополняют существующие немногочисленные данные по изучению кумулятивных  $\pi$  – мезонов в ядро-ядерных взаимодействиях
- ✓ Измерения  $T_C$  в протон-ядерных взаимодействиях выполнены в широком диапазоне энергий протона от 700 МэВ до 400 ГэВ. Данные демонстрируют рост параметра от 25 до 55 МэВ в диапазоне энергий от 700 МэВ до нескольких ГэВ и выход на константу при больших энергиях, называемое ядерным скейлингом
- ✓ В ядро-ядерных взаимодействиях данные по  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$  и  $^{12}\text{C} + ^9\text{Be}$  показывают аналогичную зависимость от энергии
- ✓ Параметр  $T_C$  возрастает от 33 до 51 МэВ в диапазоне энергий ионов от 1 до 3.2 ГэВ/нуклон. При максимальной энергии измерение было выполнено в  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$  взаимодействиях на установке ФОДС в ИФВЭ под нулевым углом с энергией  $T_0 = 19.6$  ГэВ/нуклон ( $T_C = 48.4 \pm 0.7$  МэВ) [A.G. Afonin, M. Yu. Bogolyubsky, et al. Nucl. Phys. A **997**, 121718 (2020); Phys. At. Nucl. **83**, 228 (2020)]
- ✓ Полученные результаты свидетельствуют о том, что скейлинговый эффект проявляется также в ядро-ядерных взаимодействиях

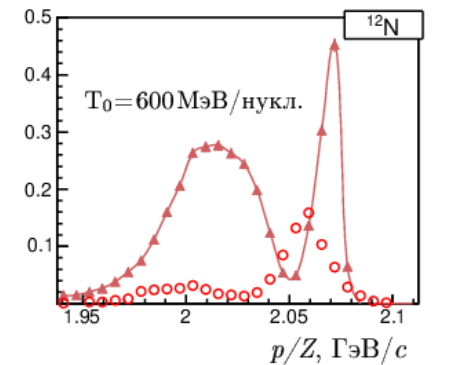
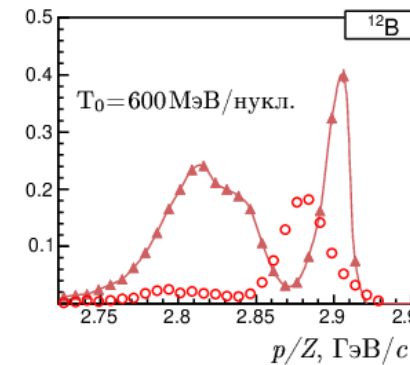
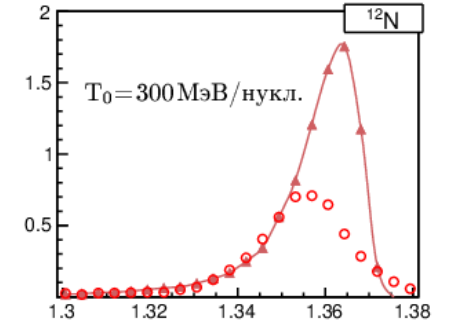
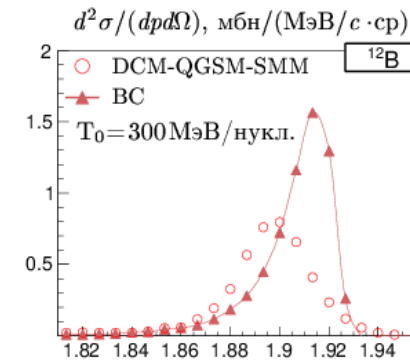


квазиупругое взаимодействие

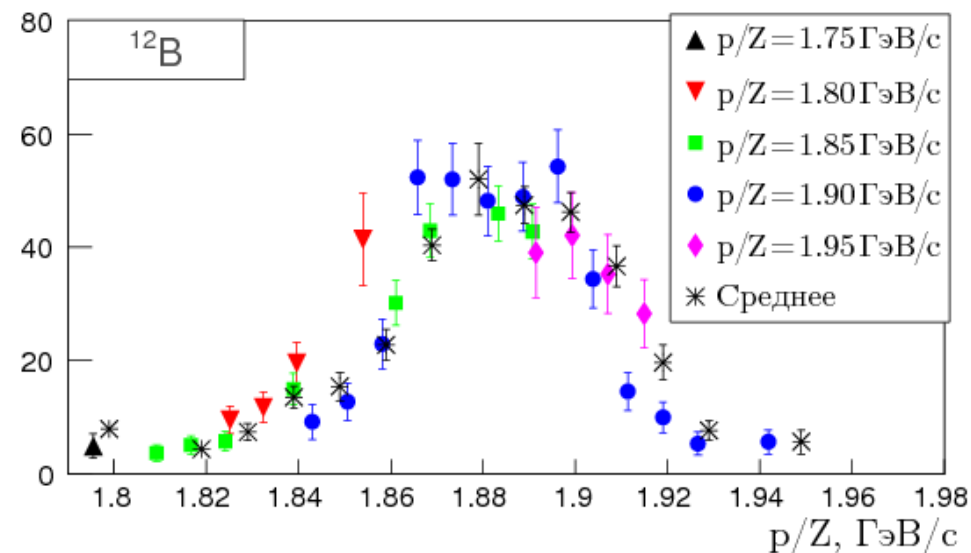
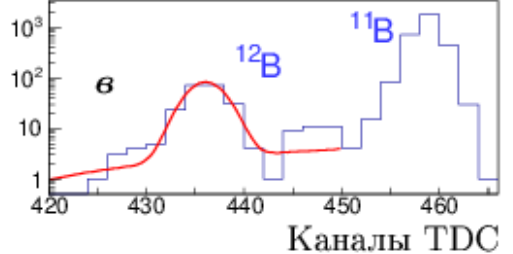
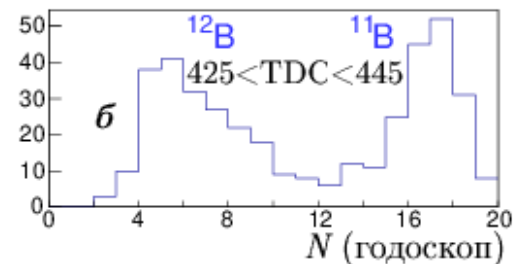
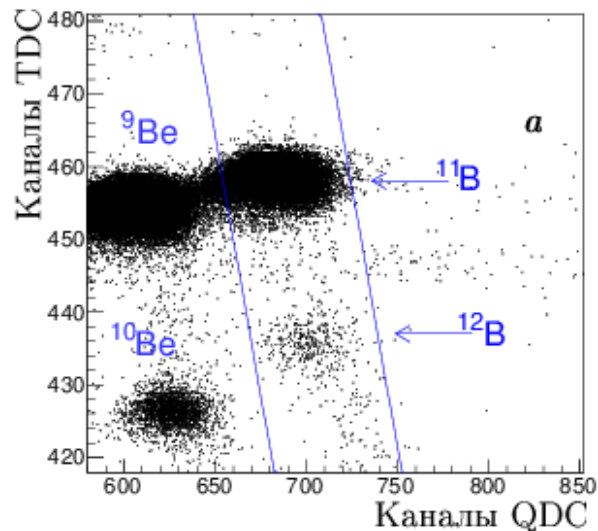


неупругое взаимодействие

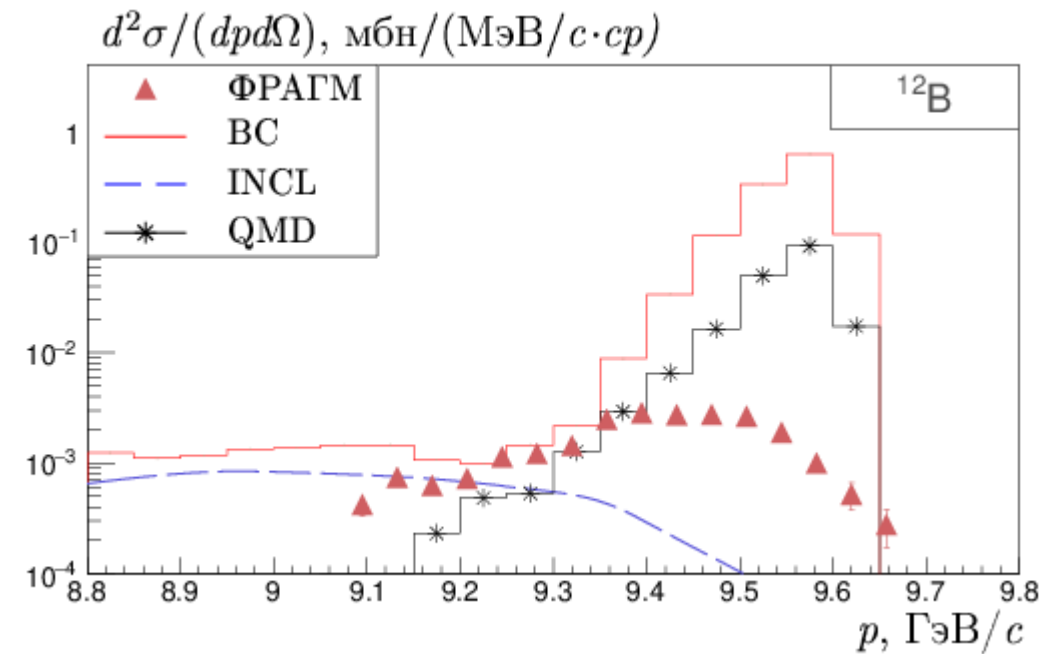
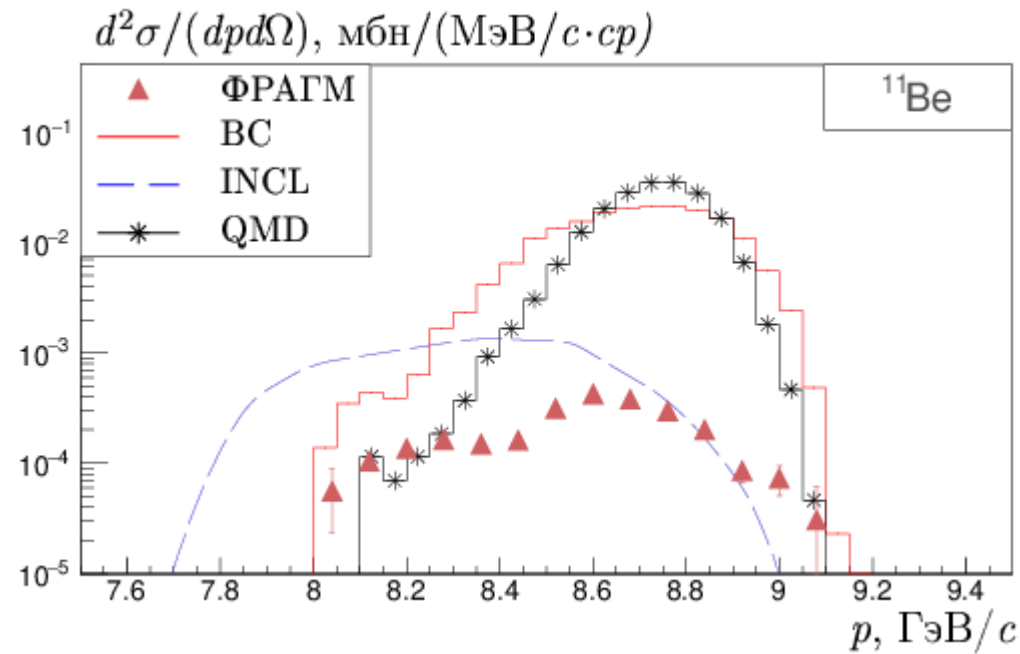
- ✓ Зарядово-обменные реакции сопровождаются изменением заряда фрагмента по отношению к налетающему ядру при сохранении числа нуклонов (при фрагментации ядер углерода – это  $^{12}\text{B}$  и  $^{12}\text{N}$ )
- ✓ При низких и промежуточных энергиях происходит квазиупругое взаимодействие нуклонов, обусловленное виртуальным обменом заряженными мезонами между ядром-снарядом и мишенью
- ✓ При более высоких энергиях могут образоваться барионные резонансы с их последующим распадом и испусканием ядерной материей заряженных мезонов
- ✓ При энергии 300 МэВ/нуклон основной вклад дает квазиупругий процесс, который может быть зарегистрирован на установке ФРАГМ



- ✓ Модели ядро-ядерных взаимодействий (**DCM-QGSM-SMM**, **BC**) описывают два механизма зарядово-обменных реакций (квазиупругий и неупругий, где возможно образование  $\Delta$  – резонанса). Теоретические предсказания имеют существенные различия

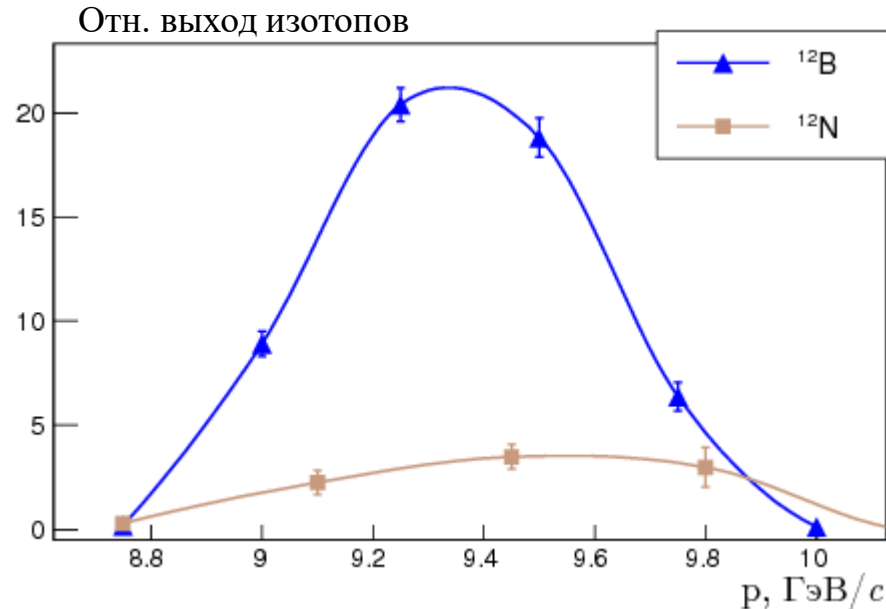
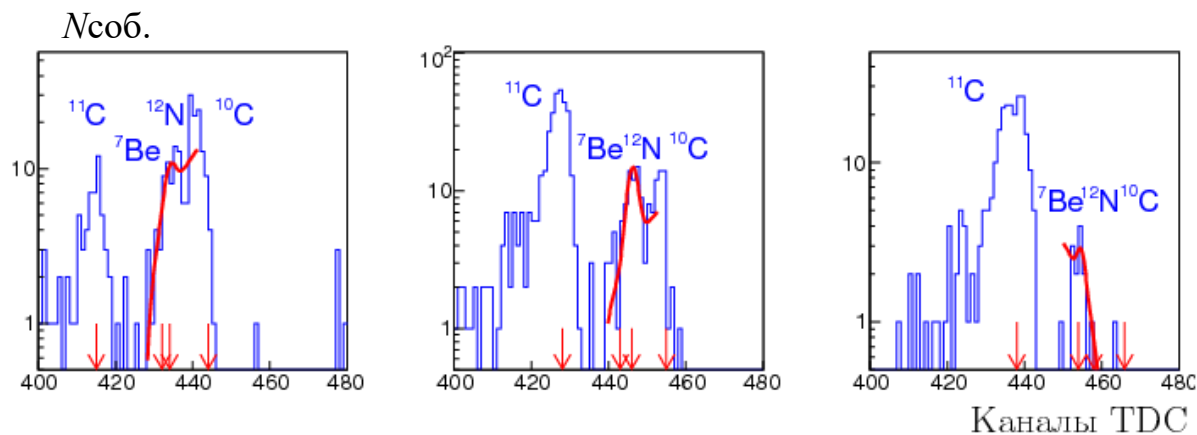
Фрагментация  $^{12}\text{C}$  при энергии 300 МэВ/нуклон

- ✓ Жесткость канала 1.8 ГэВ/с; корреляционные распределения времени пролета (TDC) и амплитуды сигнала (QDC) (слева); распределение по номеру ячейки счетчика годоскопа и по каналам TDC (справа)
- ✓ Анализ информации, поступающий с годоскопа, позволяет добиться точности измерения  $\sim 0.4\%$ ; при каждой настройке магнито-оптического канала можно получить до 10 добавочных точек по жесткости. Использование годоскопа необходимо, если импульсная ширина пиков мала
- ✓ Для суммирования  $^{12}\text{B}$  был выбран шаг по жесткости 10 МэВ

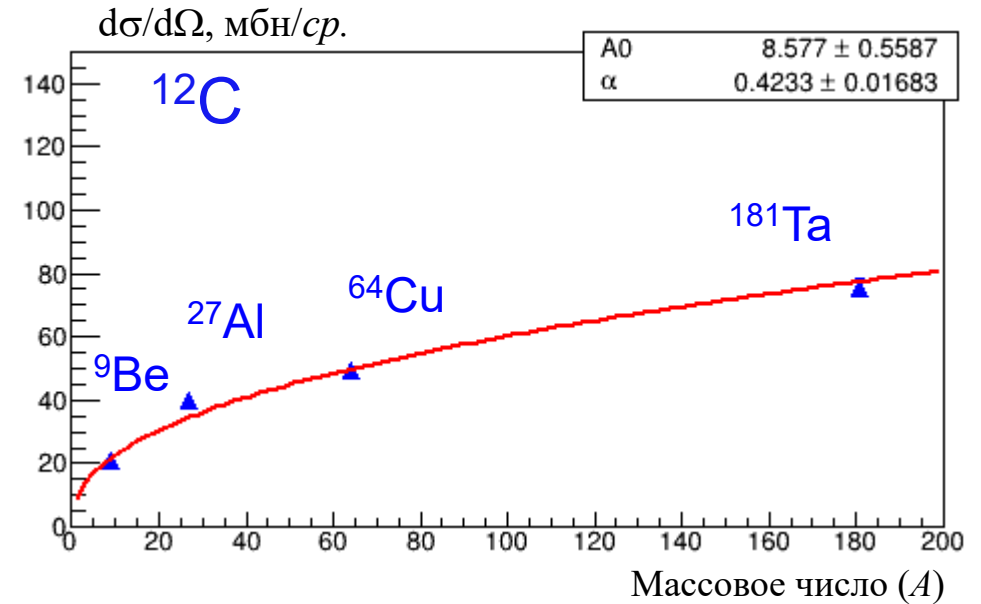
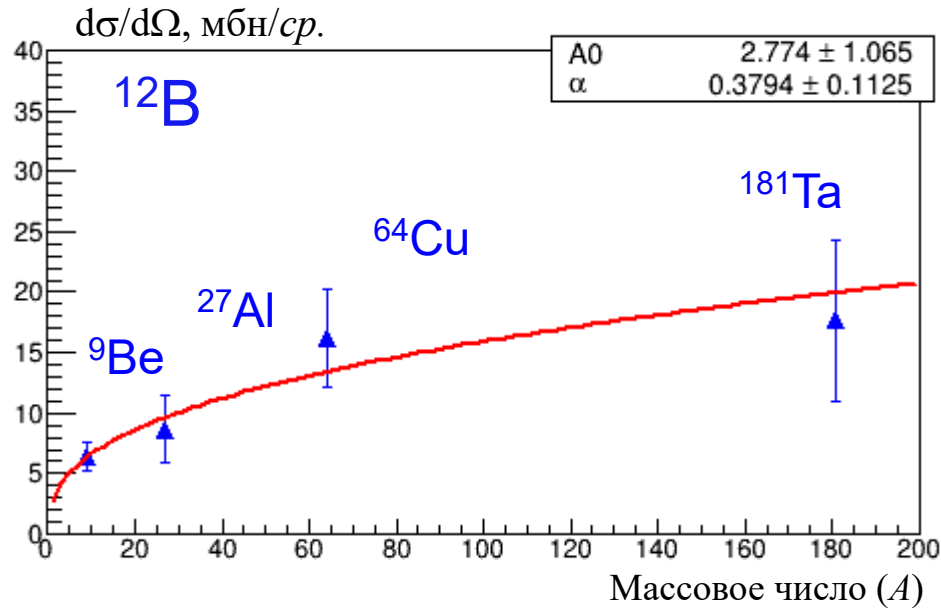


- ✓ Приведены распределения для реакций однократной перезарядки с образованием  $^{11}\text{Be}$  и  $^{12}\text{B}$
- ✓ Измеренные дифференциальные сечения и модельные расчеты отличаются друг от друга
- ✓ Экспериментальные данные близки к моделям BC и QMD по ширине и форме распределений, но расходятся с моделью по абсолютным значениям
- ✓ Данные по дифференциальным сечениям размещены в базе данных по ядерным реакциям EXFOR

A.A. Kulikovskaya *et al.*, Phys. Atom. Nucl. **85**, 466 (2022); A.A. Kulikovskaya and M.A. Martemianov, Phys. Part. Nucl. **56**, 1077 (2025)

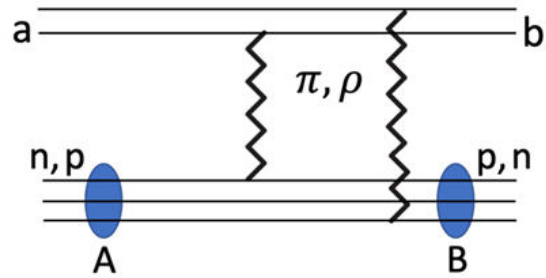


- ✓ Поиск  $^{12}\text{N}$  осуществлен в пределах по жесткости: от 1.25 до 1.45 ГэВ/с. Данных для выделения сигнала от  $^{12}\text{N}$  в основном состоянии недостаточно
- ✓ Кандидаты по  $^{12}\text{N}$  могут быть получены при анализе корреляционных распределений по переменной TDC с попыткой выделения сигнала с помощью процедуры подгонки
- Аналогичные экспериментальные данные по рождению  $^{12}\text{N}$  были получены на ускорительном комплексе Индианского университета в реакции  $^{12}\text{C}(p,n)^{12}\text{N}$  при  $T_{\text{kin}} = 135$  МэВ
- Было показано, что рождение  $^{12}\text{N}$  в основном состоянии при нашем угле регистрации подавлено по сравнению с нулевым углом. Короткоживущие возбужденные состояния  $^{12}\text{N}$  распадаются по каналу  $p + ^{11}\text{C}$
- ✓ Соотношение выходов  $^{12}\text{B}$  и кандидатов в искомый  $^{12}\text{N}$  (основное состояние) для оценки верхнего предела для регистрации  $^{12}\text{N}$  экспериментальной установкой
- ✓ В максимуме соотношение  $^{12}\text{N} / ^{12}\text{B}$  составляет 1/7 и определяет этот верхний предел



- ✓ Дифференциальные сечения выхода  $^{12}\text{C}$  и  $^{12}\text{B}$  в зависимости от атомной массы ( $A$ ) при фрагментации  $^{12}\text{C}$  на различных мишенях с энергией 300 МэВ/нуклон. Экспериментальные точки описываются степенной функцией  $A^\alpha$
- ✓ Модель пионного обмена при описании зарядово-обменной реакции ( $^{12}\text{C}, ^{12}\text{B}$ ), когда увеличение выхода  $^{12}\text{B}$ , определяется количеством нейтронов в мишени на периферии сталкивающихся ядер
- ✓ При квазиупругом рассеянии  $^{12}\text{C}$  данных можно эффект становится более выраженным, что обусловлено ростом числа нуклонов, принимающих участие в реакции

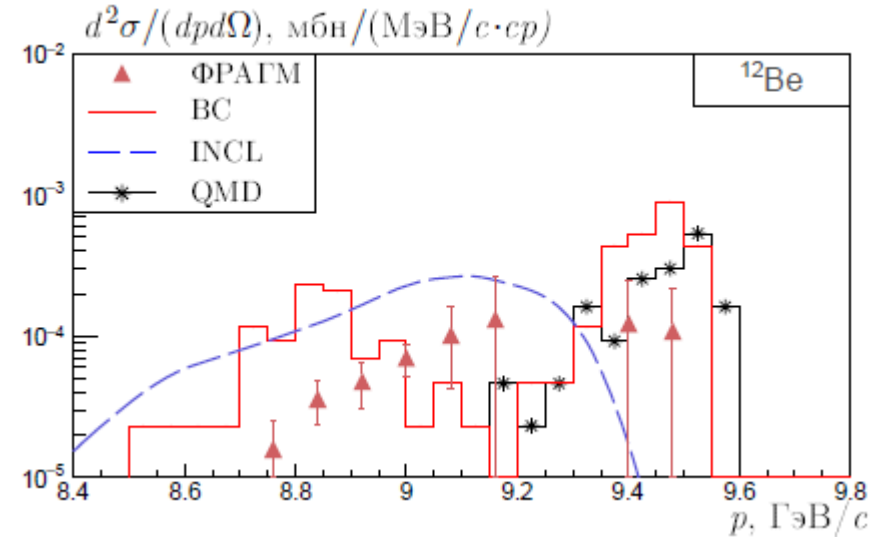
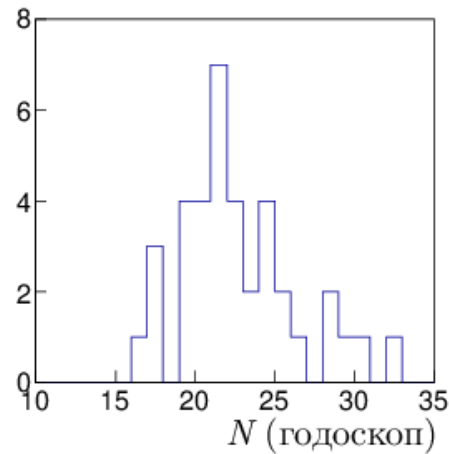
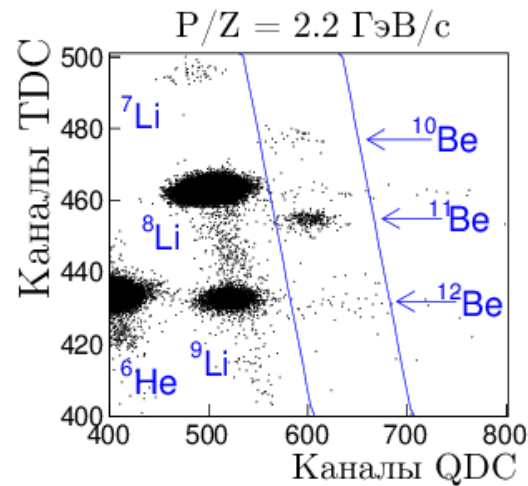
A.A. Kulikovskaya et al., *Phys.Part.Nucl.* **56**, 524 (2025)



✓ Реакции с двойной перезарядкой связывают с пионным обменом между нуклонами ядра – снаряда и мишени. При фрагментации  $^{12}\text{C}$  возможно рождение  $^{12}\text{Be}$

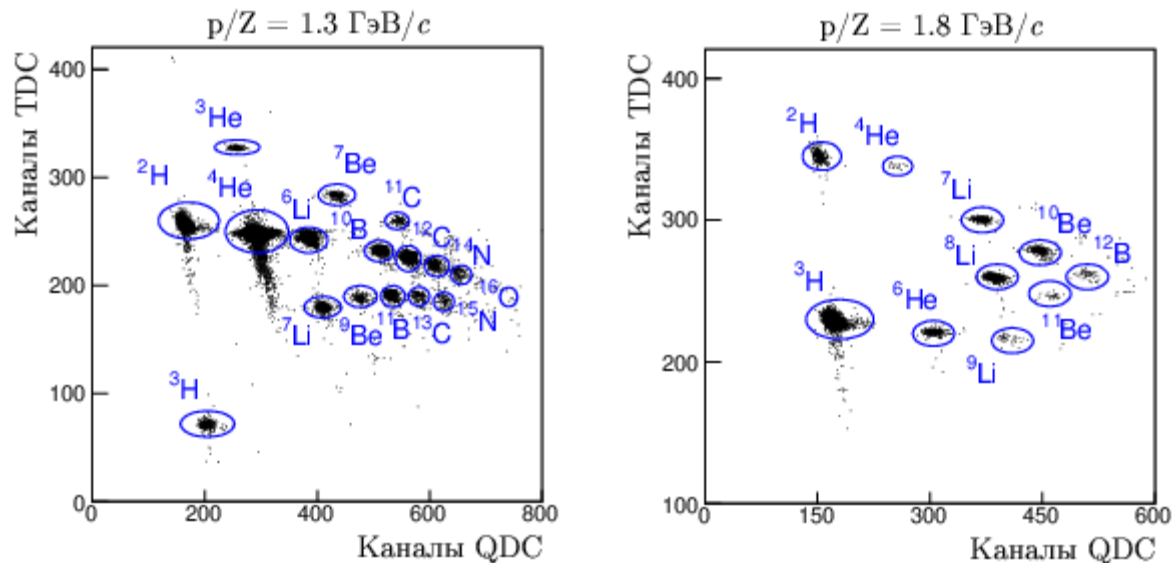
✓ При фрагментации  $^{12}\text{C}$  с энергией 300 МэВ/нуклон сечение такой реакции будет подвалено даже по отношению к реакциям, идущим с однократной перезарядкой

✓ Поиск изотопа был проведен по корреляционным зависимостям времени пролета и заряда при жесткости в пределах от 2.15 до 2.45 ГэВ/с



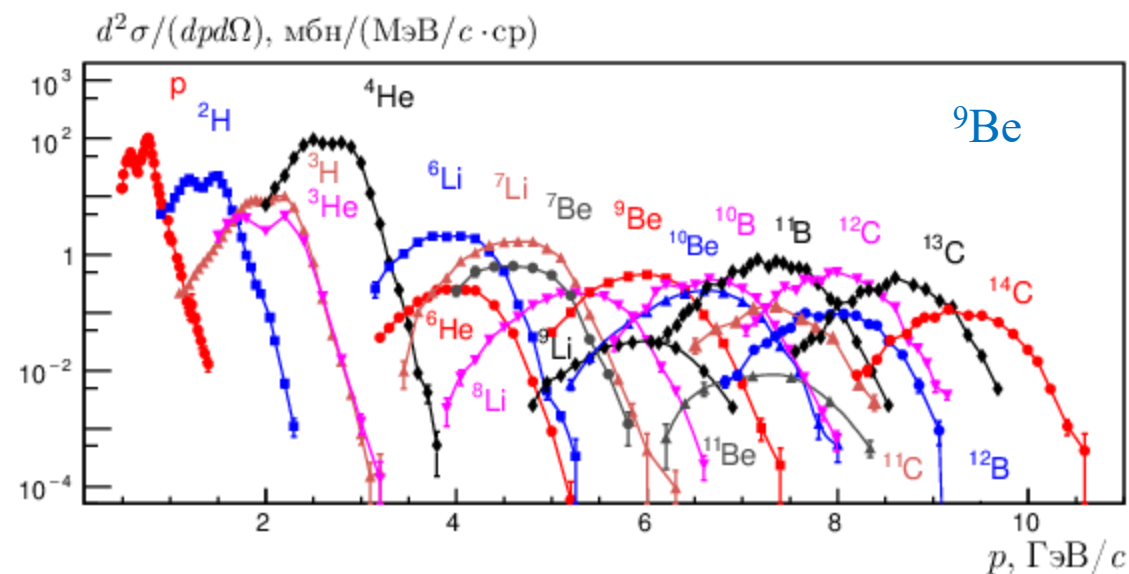
➤ Первый пик, расположенный в районе импульса  $p \sim 9.5$  ГэВ/с соответствует рождению двух виртуальных пионов. Несмотря на то, что статистическая значимость этого пика мала, экспериментальные точки согласуются с предсказаниями, полученными по моделям **BC** и **QMD**

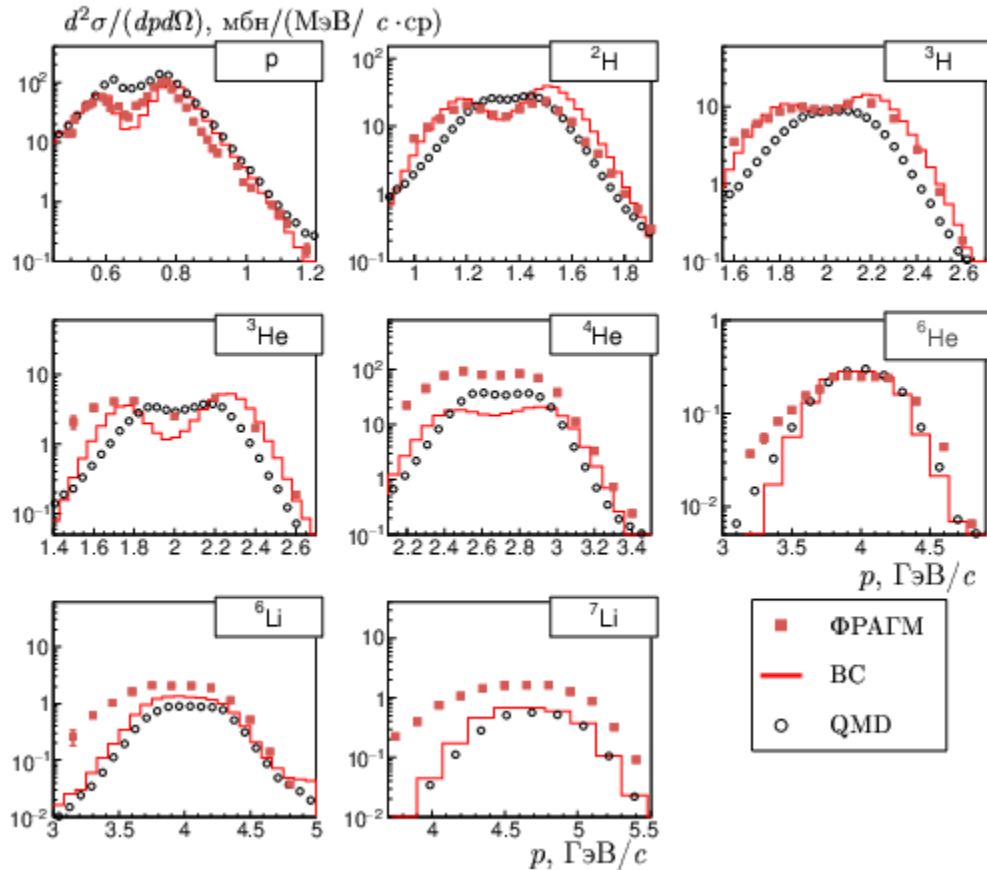
➤ Следующий, пик имеет большую статистическую значимость. Он соответствует рождению одного виртуального и одного реального пиона, что также подтверждается моделями **BC** и **INCL**



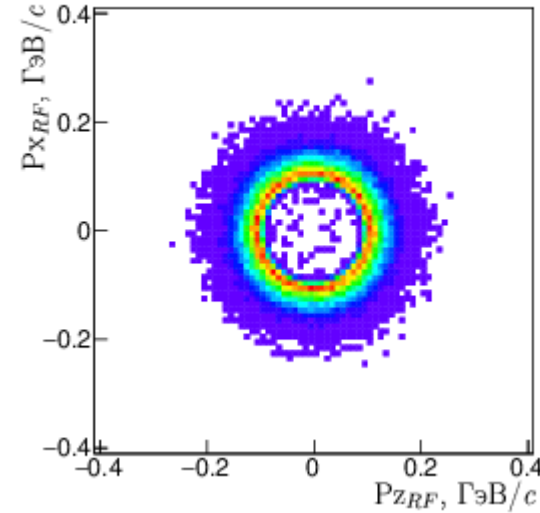
- Были получены экспериментальные данные по фрагментации ядер железа с энергией  $T_0 = 230 \text{ МэВ}/\text{нуклон}$  на трех различных мишенях:  $^9\text{Be}$ ,  $^{27}\text{Al}$ ,  $^{64}\text{Cu}$
- Набор данных проводился с помощью сканирования по жесткости канала от  $0.5$  до  $3.2 \text{ ГэВ}/c$  с шагом  $50 \text{ МэВ}/c$ .
- Анализ корреляционных распределений позволяет выделить широкий спектр конечных фрагментов (при  $p/Z = 1.3 \text{ ГэВ}/c$  – до 16-ти фрагментов)

- Характерная особенность для легких ядер: наблюдается эффект расщепления импульсных пиков вплоть до изотопов лития
- Величина данного эффекта обусловлена процессом асимметричного деления налетающего ядра-снаряда и соответствующим влиянием кулоновского поля
- Видно, что с ростом массового числа фрагмента величина расщепления пика уменьшается

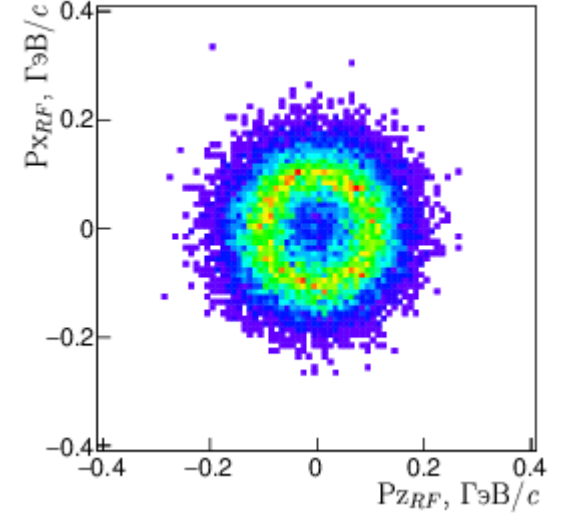




Энергия возбуждения: 2 МэВ/нукл.



Энергия возбуждения: 5 МэВ/нукл.

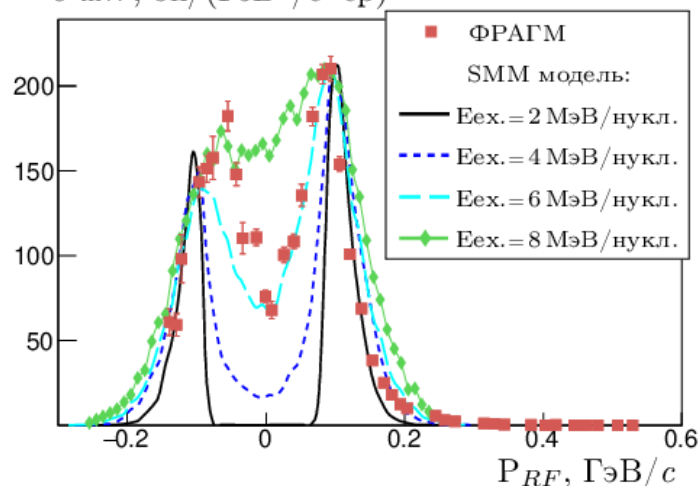


- Модельные данные отображают расщепление пика, хотя по-разному показывают величину данного эффекта
- Модели по-разному описывают процесс взаимодействия фрагмента и ядра-остатка, что влияет на величину кулоновского поля, которое искажает форму импульсного спектра

- В модели SMM (статистической мультифрагментации) в качестве входного параметра использует энергию возбуждения ядра
- Форма импульсного спектра может определять внутренне состояние возбужденного ядра-снаряда
- Наилучшее приближение с нашими данными дает значение энергии  $\sim 6$  МэВ/нуклон

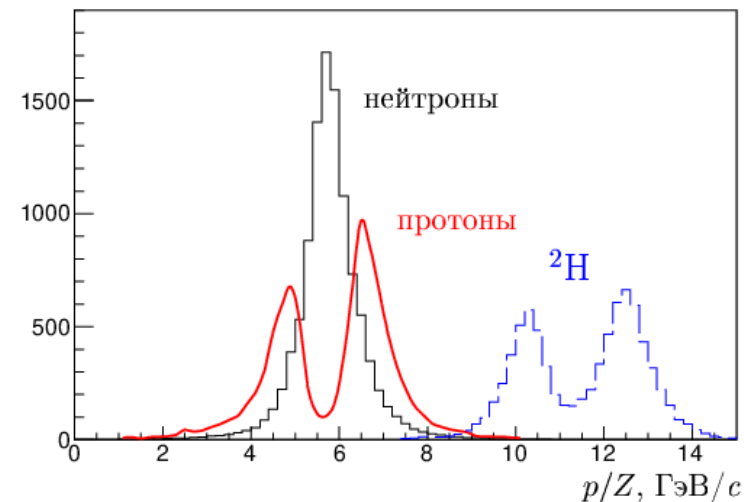
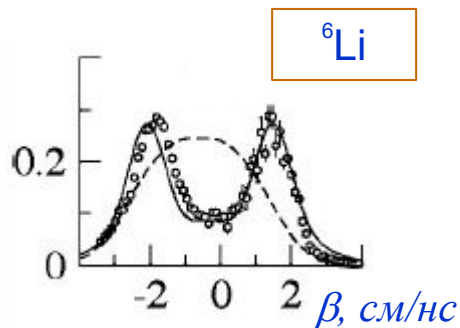
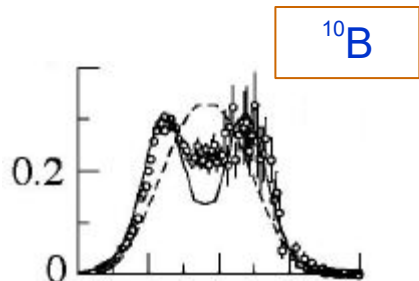
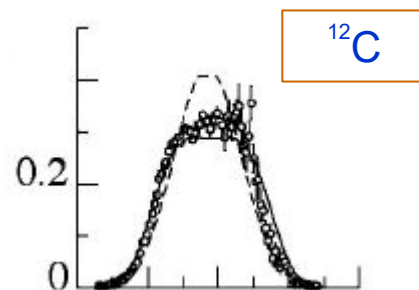


$\sigma_{inv.}$ , бн/(ГэВ<sup>2</sup>/с<sup>3</sup> ср)



V.M. Abramov *et al.* EPJ Web Conf. 204, 03008 (2019)

- ✓ Экспериментальные данные по фрагментации <sup>56</sup>Fe при энергии 1 ГэВ/нуклон на различных мишенях (водородной и титановой) были получены в эксперименте GSI-FRS на тяжело-ионном синхротроне SIS
- ✓ Зарегистрирован широкий набор фрагментов тяжелее <sup>6</sup>Li, где искажение формы спектра было наиболее заметно. Предполагается, что эффект разделения пика обусловлен процессом асимметричного деления налетающего ядра-снаряда



- ✓ Данные получены по модели LAQGSM в Au – Au взаимодействии с энергией  $\sqrt{S} = 11.5$  ГэВ/нуклон
- ✓ Эффект расщепления пиков является важным при проектировании детекторов заряженных частиц, необходимых для измерения светимости тяжелоионных коллайдеров (фрагментационный метод), например, в эксперименте NICA/MPD

P. Napolitani *et al.* Phys. Rev. C 70, 054607 (2004)



1. За период работы ускорительно-накопительного комплекса ТВН был получен уникальный материал по фрагментации ионов углерода и железа при промежуточных и высоких энергиях с помощью детектора ФРАГМ
2. Разработана методика идентификации образующихся фрагментов, основанная на анализе время-пролетной и амплитудной информации, в том числе и уточняющей координатной информации полученной с помощью годоскопической системы установки
3. Был получен значительный объем новых данных, в том числе по дифференциальным сечениям импульсных спектров фрагментов, выходам кумулятивных фрагментов, зарядово-обменные процессам, рождению заряженных пионов, кулоновским эффектам
4. Значительное внимание уделялось использованию экспериментальных данных для тестирования современных моделей ядро-ядерных взаимодействий
5. За период с 2012 по 2026 гг. опубликовано 25 статей в реферируемых журналах
6. Данные по дифференциальным сечениям выхода фрагментов от протонов до изотопов углерода, в том числе и по зарядово-обменным реакциям, размещены в базе данных по ядерным реакциям EXFOR в табулированной форме (по 6-ти статьям)
7. Защищена диссертация (Куликовская А.А., 2024 г.) на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по теме «Поиск процессов перезарядки нуклонов при фрагментации ионов углерода при энергии 300 МэВ/нуклон»
8. Премия имени И.В. Курчатова НИЦ «Курчатовский институт» за работу «Изучение кумулятивных протонов при фрагментации ионов углерода на ускорительно-накопительном комплексе ИТЭФ-ТВН»; а также лучшая работа по разделу «Фундаментальные научные исследования - эксперимент» - «Измерения выхода ядерных фрагментов при фрагментации ионов углерода в эксперименте ФРАГМ» (конкурс научно-исследовательских работ ИТЭФ – 2018)
9. Авторское свидетельство № ТР 301-16-03-2017, «Метод расчета магнитооптических каналов для установки ФРАГМ»
10. Анализ накопленных данных продолжается и в настоящее время

**Спасибо за  
внимание**