



НИЦ «Курчатовский институт»



Эффект расщепления импульсных распределений легких ядер при фрагментации ионов железа с энергией 230 МэВ/нуклон



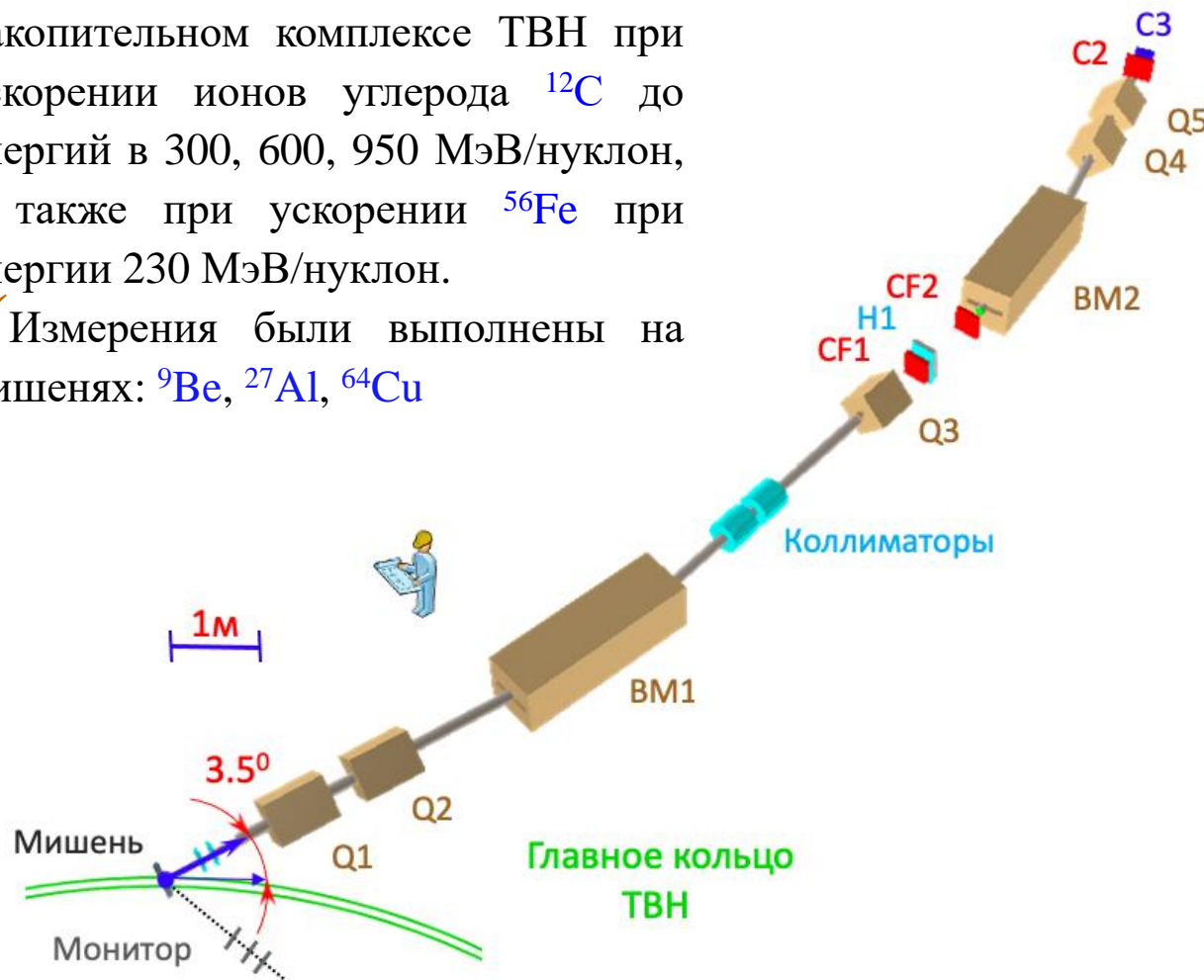
М. А. Мартемьянов, Б. М. Абрамов, С. А. Булычёв, И. А. Духовской,
А. П. Крутенкова, В. В. Куликов, А. А. Куликовская, М. А. Мацюк

*74-ая международная конференция по ядерной физике
«ЯДРО–2024: Фундаментальные вопросы и приложения»
ОИЯИ, Дубна, 1–5 июля 2024 г.*

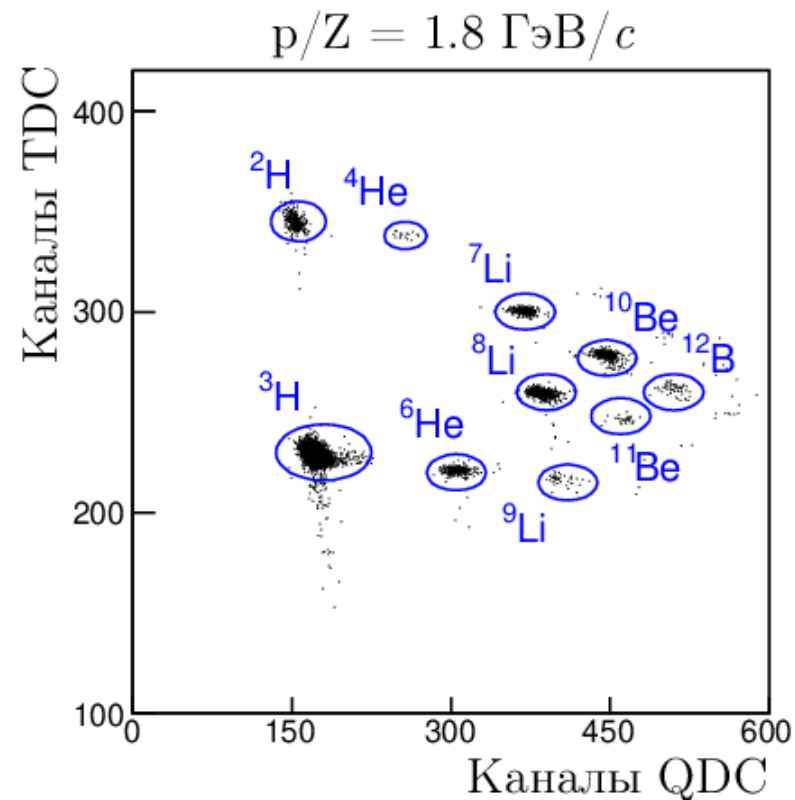
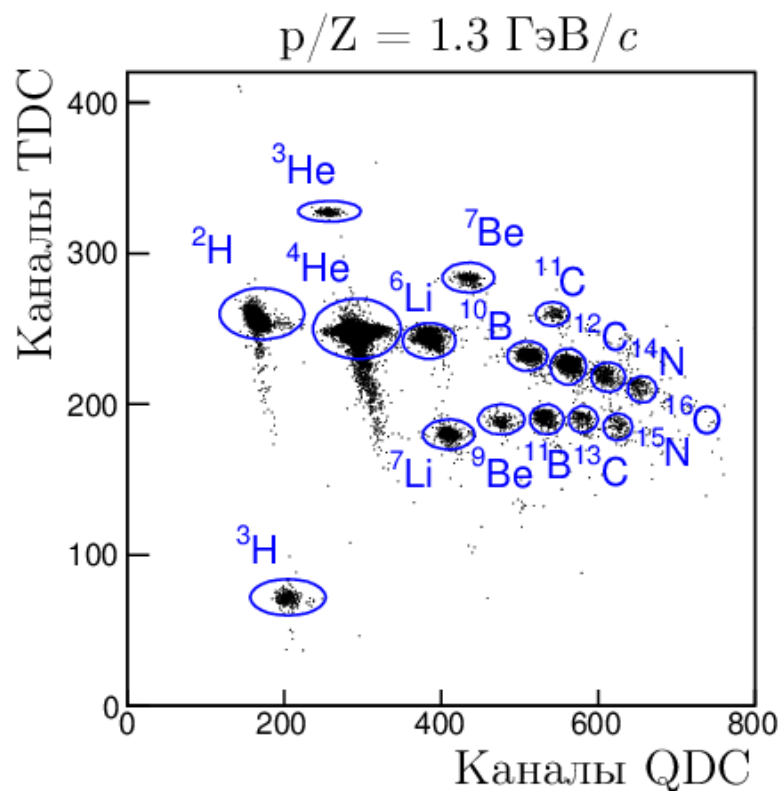


- Детектор ФРАГМ был оптимизирован для измерения выходов широкого диапазона фрагментов, образованных в результате ядро-ядерных столкновений на ускорительно-накопительном комплексе ТВН
- Экспериментальные данные были получены при фрагментации ядер железа ^{56}Fe на трех различных мишенях: ^9Be , ^{27}Al и ^{64}Cu ; регистрация образованных фрагментов происходила под углом 3.5° при энергии 230 МэВ/нуклон
- Установка ФРАГМ позволяет детектировать широкий набор как легких, так и тяжелых фрагментов, при анализе корреляционных распределений: амплитуда – время пролета. Для уточнения импульсного профиля пучка используется годоскоп, расположенный в первом фокусе магнито-оптического канала детектора
- Измерение дифференциальных сечений рождения легких фрагментов как функция импульса позволяет тестировать модели ядро-ядерных взаимодействий, в том числе и в области высоких импульсов (кумулятивной)
- Полученный профиль импульсного распределения дает возможность вычислить параметры структуры ядра, которые используются в теоретических предсказаниях различных моделей
- Данные по фрагментации ядер железа при промежуточных энергиях были получены впервые. Эффект расщепления импульсных спектров был обнаружен для легких фрагментов, приводится описание спектров на основе модели мультифрагментации и сравнение с данными, полученными в эксперименте GSI-FRS

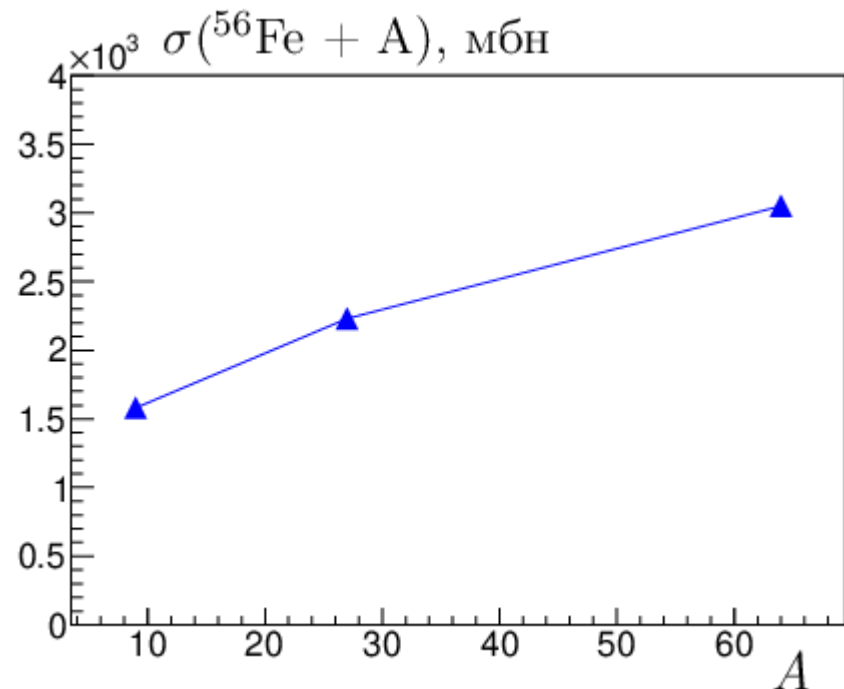
- ✓ Данные набраны на ускорительно-накопительном комплексе ТВН при ускорении ионов углерода ^{12}C до энергий в 300, 600, 950 МэВ/нуклон, а также при ускорении ^{56}Fe при энергии 230 МэВ/нуклон.
- ✓ Измерения были выполнены на мишенях: ^9Be , ^{27}Al , ^{64}Cu



- ✓ 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° по отношению к пучку

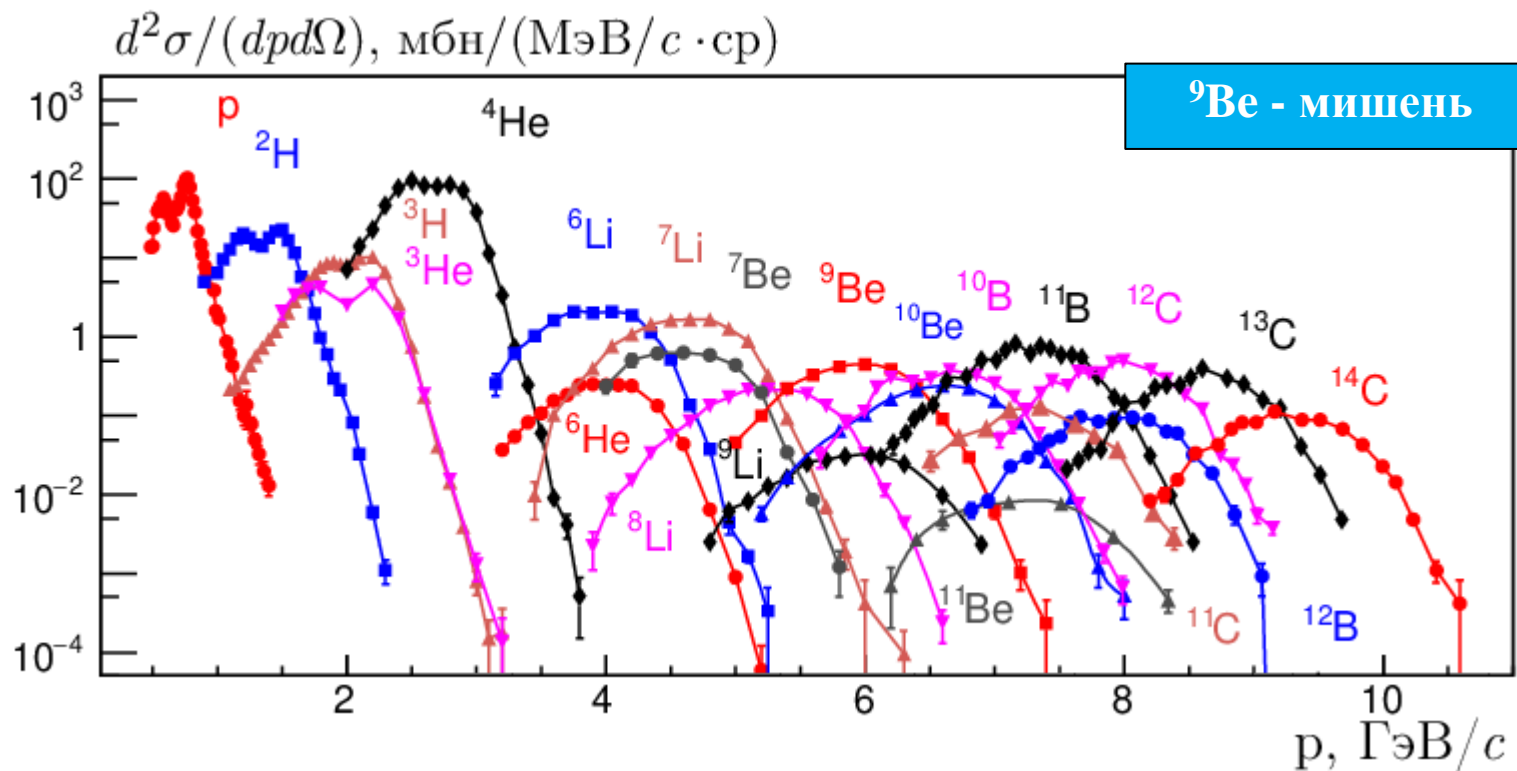


- ✓ Магнито-оптический канал настраивается на определенную жесткость, при которой набирается данная экспозиция
- ✓ Корреляционное двумерное распределение: QDC (функция dE/dx и Z фрагмента, определена по счетчику CF1) от TDC (TOF – функция атомного массового числа фрагмента, измерена между CF1 и C2).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

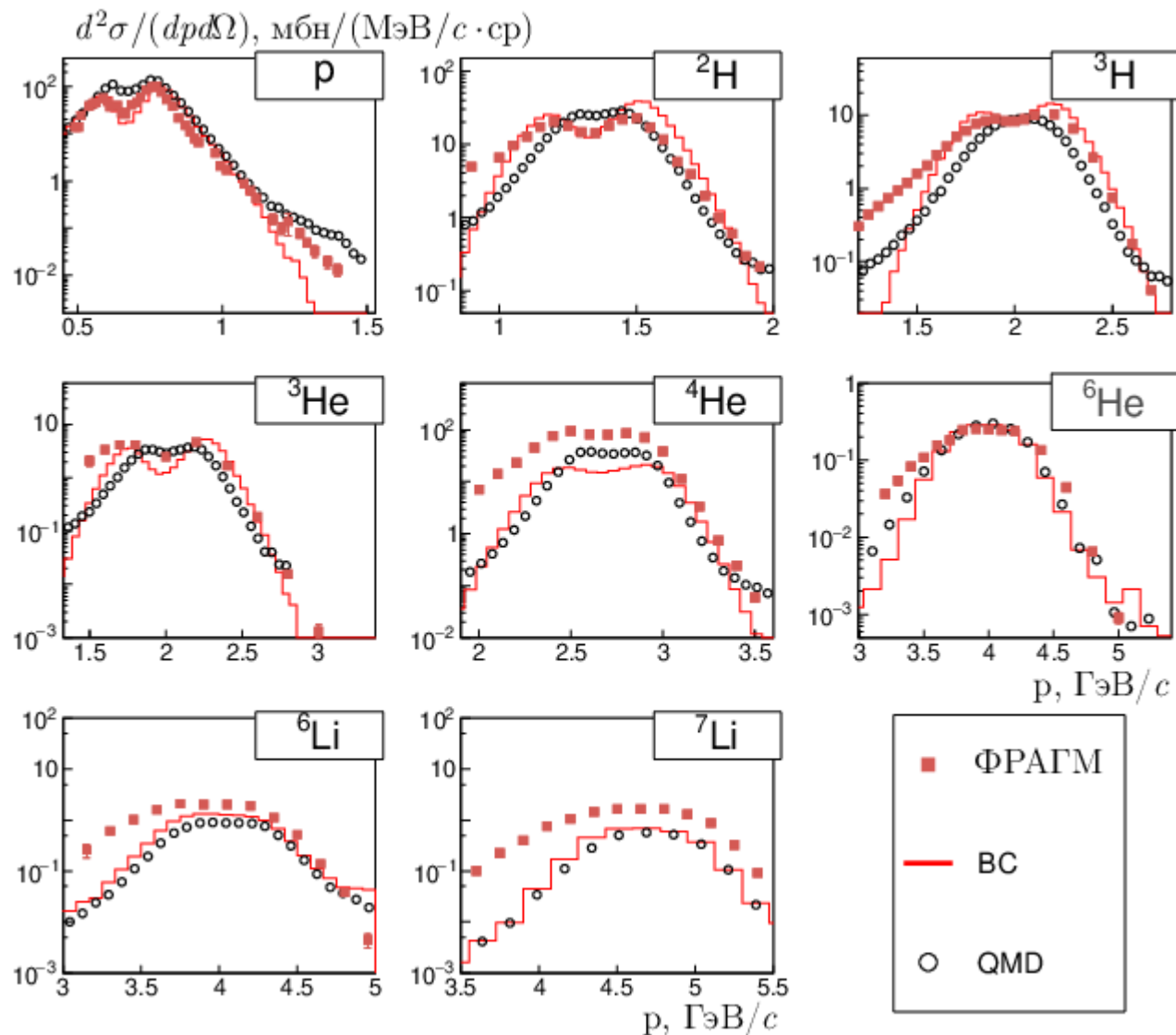


- ✓ Чтобы получить дифференциальное сечение $d^2\sigma/dpd\Omega$, необходимо знать значение полного сечения $\sigma_{\text{tot}}(^{56}\text{Fe} + A)$
- ✓ Оценка полного сечения может быть получена по формуле, которая не зависит от энергии, и применима для $T_{\text{kin}} > 100$ МэВ/нуклон [L. Sihver *et al.*, PR C49 (1993) 1225]
- ✓ Параметризация полного сечения не зависит от энергии налетающего ядра

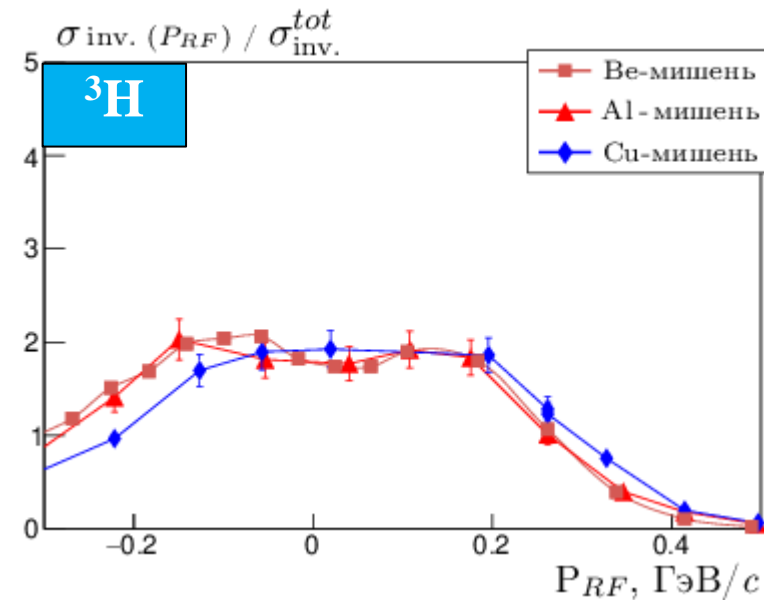
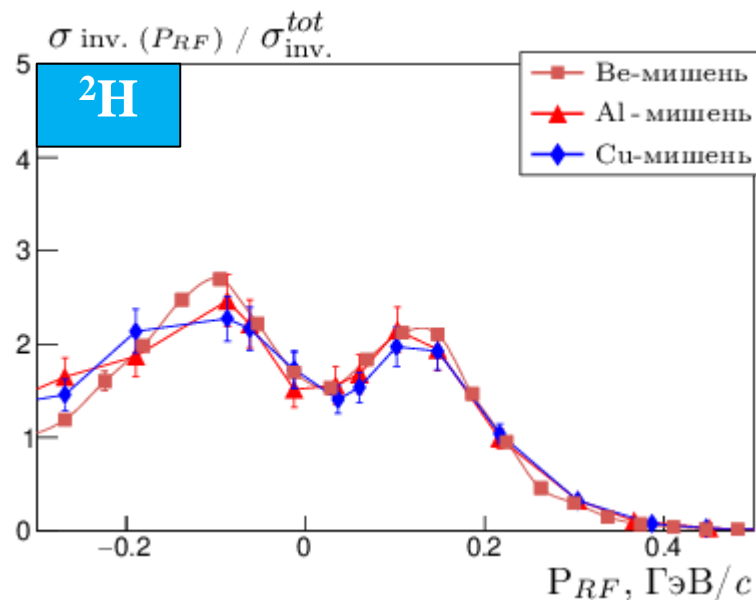
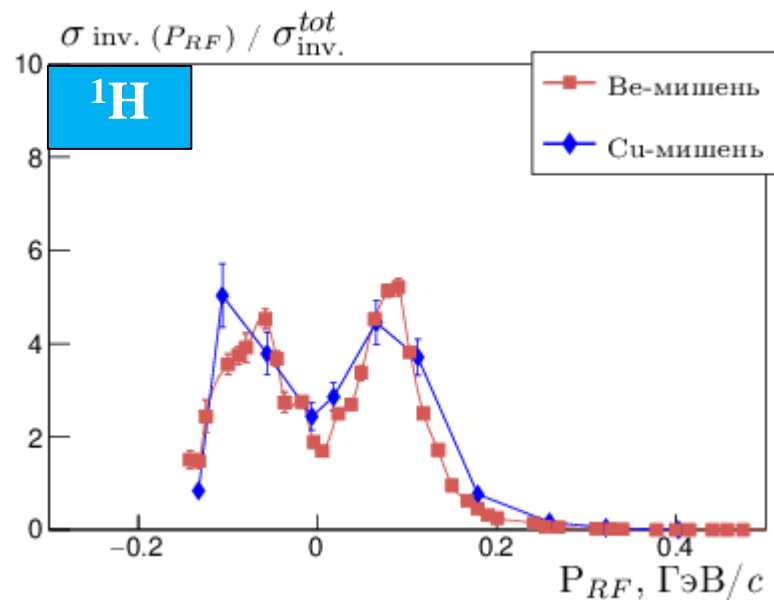
- ✓ Для модели ядро-ядерного взаимодействия LAQGSM: $\sigma_{\text{tot}} = 1547$ мб; параметризация дает сопоставимое значение $\sigma_{\text{tot}} = 1579$ мб. Разница между двумя предсказаниями находится в пределах 2 %
- ✓ Эффективность регистрации установкой ФРАГМ протонов и ионов зависит от импульса фрагмента; расчет эффективности для каждой частицы производится отдельно с помощью точного описания особенностей конструкции описания магнито-оптического канала
- ✓ Поправка на эффективность играет существенную роль при жесткости $P/Z < 3$ ГэВ/с и может существенным образом скорректировать импульсный спектр



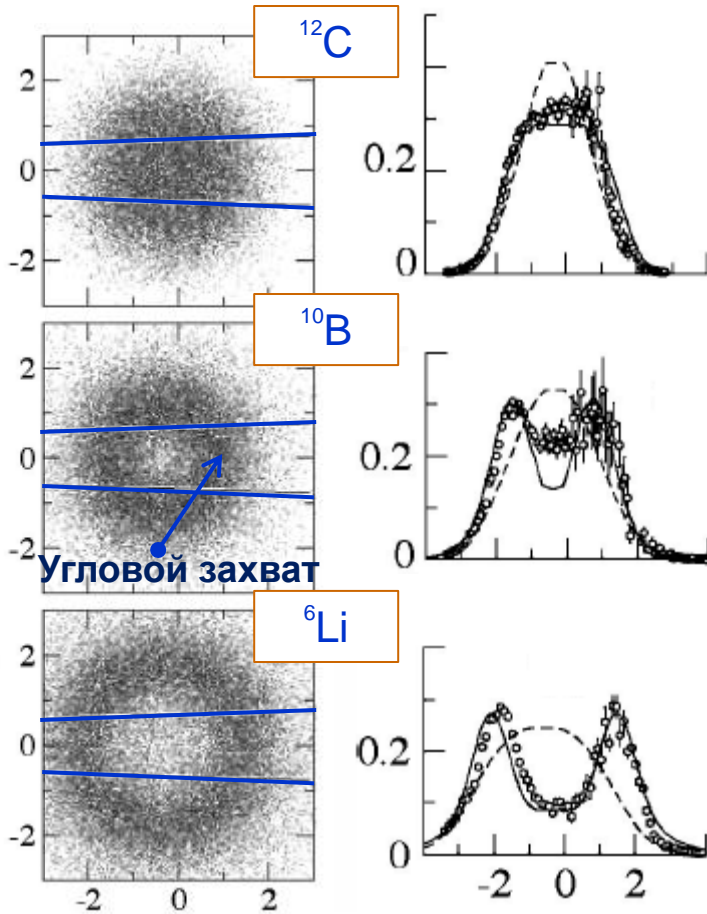
- ✓ На рисунке приведены дифференциальные сечения легких фрагментов от протонов до ${}^{14}\text{C}$
- ✓ Также на установке регистрировались другие фрагменты, вплоть до ${}^{22}\text{Ne}$
- ✓ Более тяжелые фрагменты вплоть до ${}^{56}\text{Fe}$ не регистрируются, из-за больших ионизационных потерь, растущих с увеличением заряда фрагмента.



- Эффект расщепления импульсных пиков в нашем случае проявляется на легких фрагментах, до лития
- Расщепление пика уменьшается с ростом массового числа ядра-фрагмента
- Две модели ядро-ядерных столкновений (бинарного каскада – **BC** и квантовой молекулярной динамики – **QMD**) находятся в хорошем согласии с данными эксперимента ФРАГМ
- Модельные данные отображают расщепление пика, хотя по-разному показывают величину данного эффекта
- Видно, что модель **BC** несколько лучше согласуется с нашими данными и более точно показывает эффект расщепления пиков



- ✓ Экспериментальное инвариантное сечение $\sigma_{\text{inv.}} = E/p^2 d\sigma / (d\Omega dp)$ получено для трех мишеней в зависимости от импульса в системе покоя налетающего ядра железа
- ✓ Для сравнения формы сечения производится нормировка на полное сечение. Экспериментальные данные, полученные на ${}^{27}\text{Al}$ и ${}^{64}\text{Cu}$ измерены с меньшей статистикой
- ✓ Видно, что величина и характер разделения пиков на трех мишенях (${}^9\text{Be}$, ${}^{27}\text{Al}$, ${}^{64}\text{Cu}$) демонстрируют независимость эффекта разделения пика от атомного номера мишени



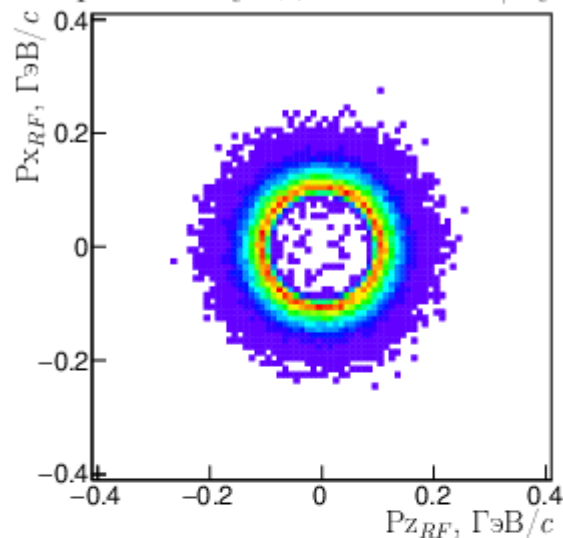
^{56}Fe на водородной мишени; быстрота в системе покоя налетающего ядра (β_{\parallel} , β_{\perp})

Быстрота в системе покоя (см / нс)

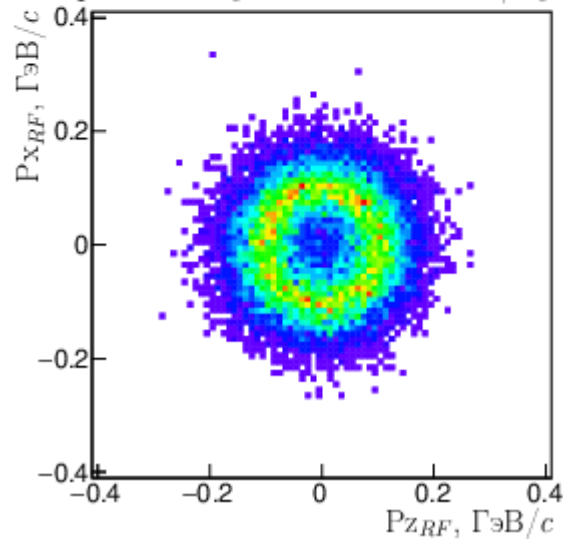
- Похожие экспериментальные данные были получены в эксперименте GSI-FRS на тяжело-ионном синхротроне SIS
- Были получены данные по фрагментации ^{56}Fe при энергии 1 ГэВ/нуклон на различных мишенях (водородной, титановой и др.)
- Детектор представлял собой магнитный спектрометр, что позволило осуществить измерения быстроты β с высокой точностью
- Зарегистрирован широкий набор фрагментов тяжелее ^6Li , где искажение формы спектра было наиболее заметно
- Предполагается, что эффект разделения пика обусловлен процессом ассиметричного деления налетающего ядра-снаряда
- Влияние кулоновских сил при фрагментации ядер не вносит существенного вклада в процесс ассиметричного деления ядра
- Основная работа : [P. Napolitani et al. Phys. Rev. C 70, 054607 \(2004\)](#)



Энергия возбуждения: 2 МэВ/нукл.

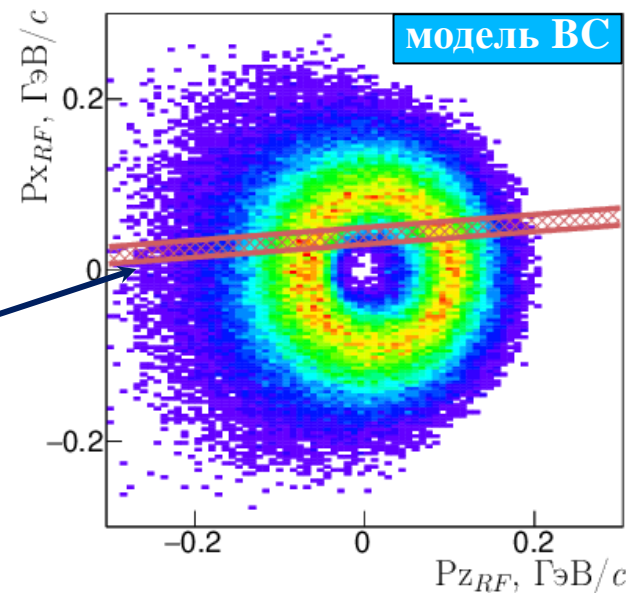


Энергия возбуждения: 5 МэВ/нукл.

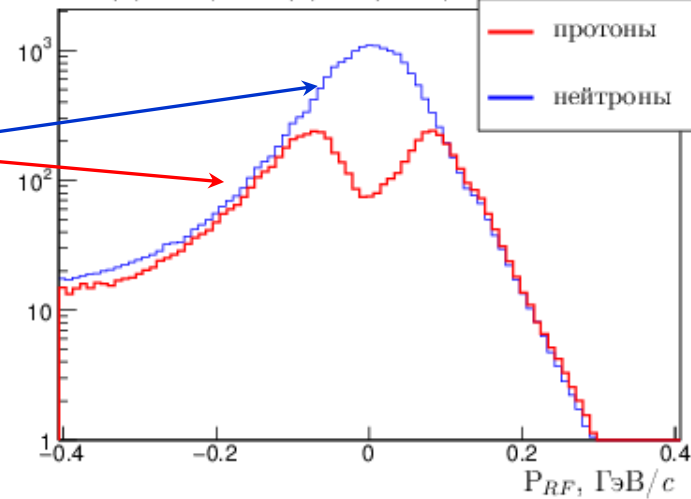


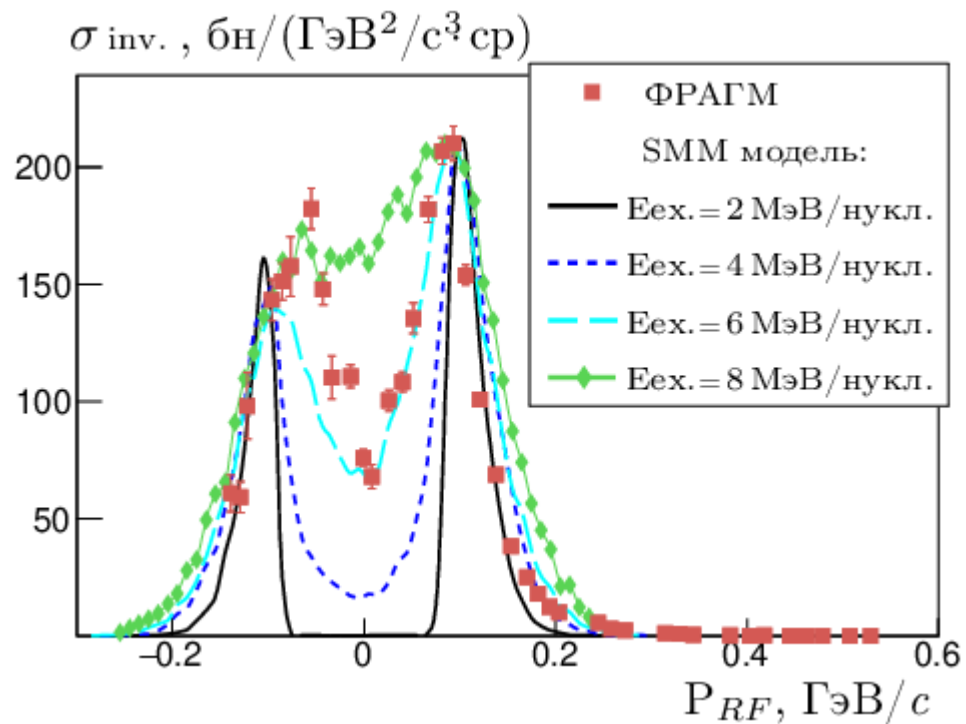
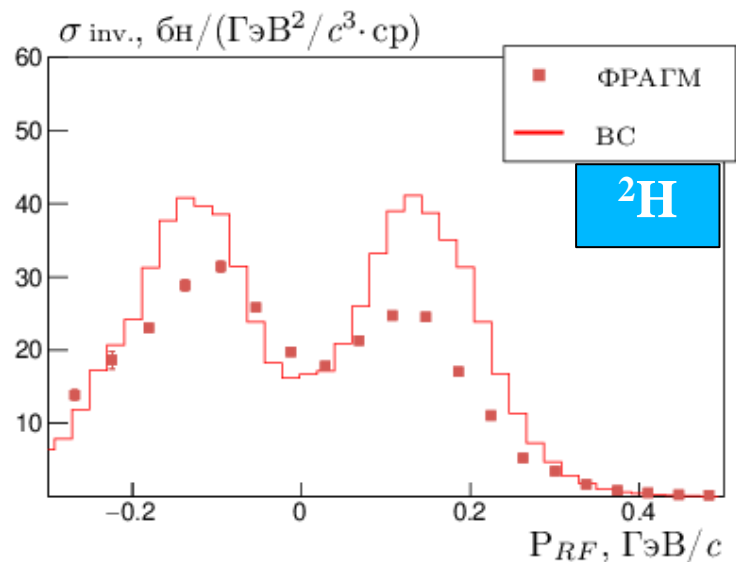
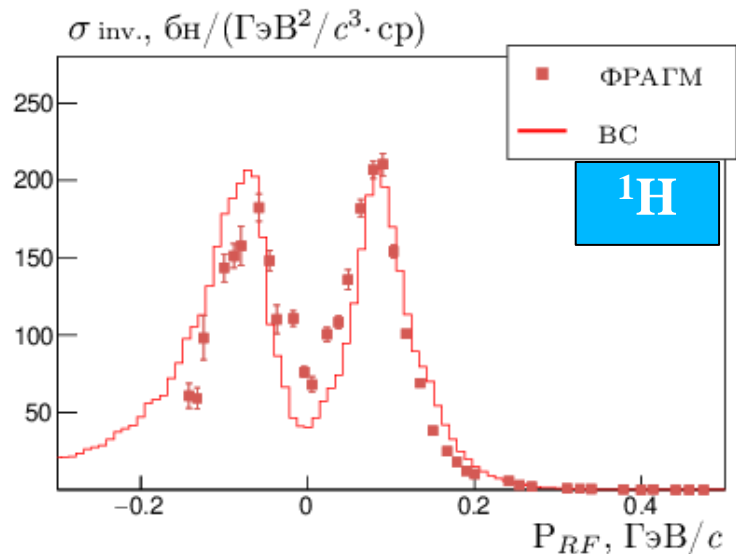
Угловой захват установки ФРАГМ

Кулоновский эффект / модель ВС

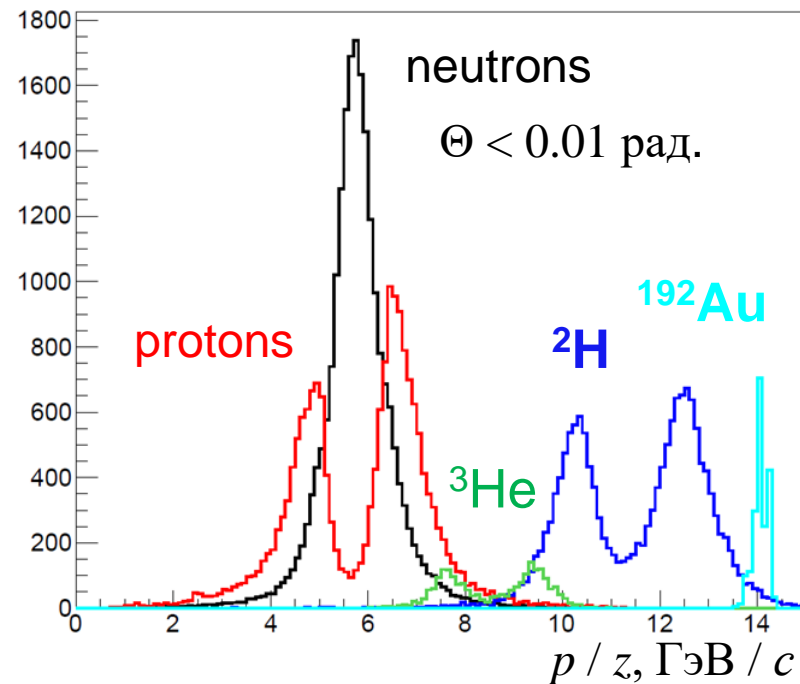
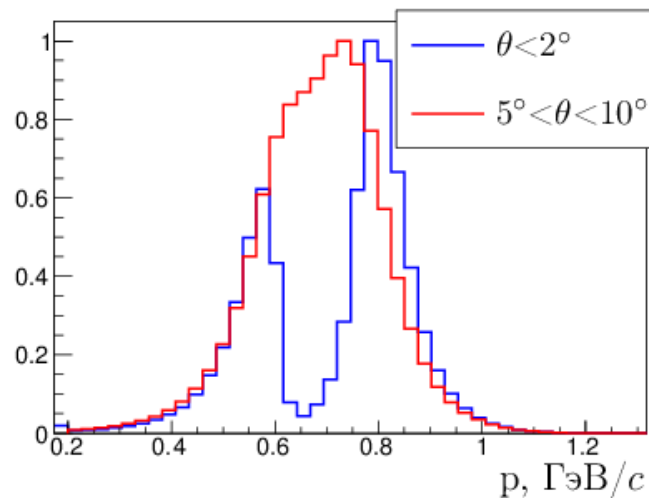
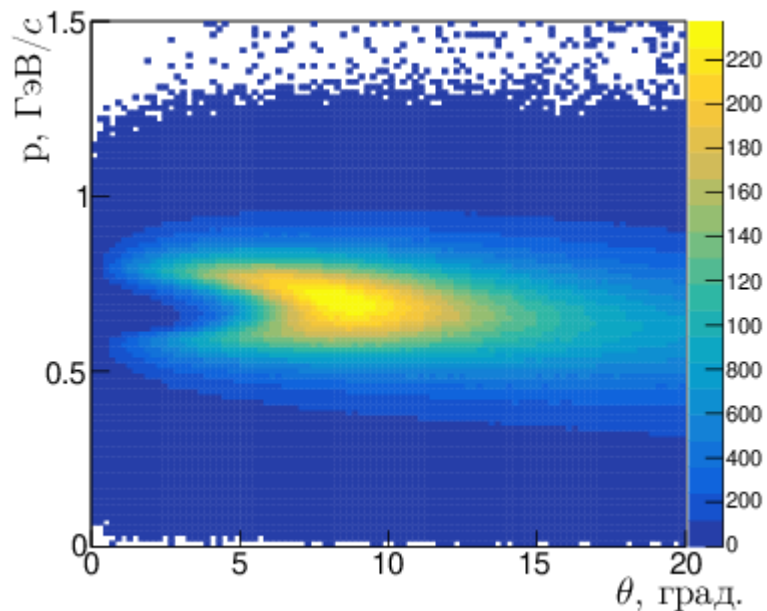


$d^2\sigma/(d\Omega dp)$, мбн/(МэВ/с·ср)





- Модель **SMM** в качестве входного параметра использует энергию возбуждения ядра ($E_{ex.}$)
- Наилучшее приближение с нашими данными дает значение энергии $E_{ex.} \sim 6$ МэВ/нуклон
- Таким образом, форма импульсного спектра может определять внутренне состояние возбужденного ядра-снаряда



- Данные вычислены в рамках модели бинарного каскада (BC) для протонов (фрагментация ^{56}Fe)
- Эффект расщепления импульсного пика доминирует при малых углах и исчезает при $\theta > 5^\circ$

- ✓ Данные получены по модели LAQGSM в Au – Au взаимодействии с энергией $\sqrt{S} = 11.5$ ГэВ / нуклон
- ✓ Видно, что импульсные пики заряженных фрагментов имеют довольно сильное расщепление
- ✓ Данный эффект является важным при проектировании детекторов заряженных частиц, необходимых для измерения светимости тяжелоионных коллайдеров (фрагментационный метод), например, в эксперименте NICA-MPD

- ✓ В работе были измерены выходы ионов в при фрагментации ядер ^{56}Fe с энергией 0.23 ГэВ / нуклон на трех различных мишенях. Данные были получены с помощью экспериментальной установки ФРАГМ на ускорительно-накопительном комплексе ТВН (ИТЭФ, Москва)
- ✓ Фрагменты от протонов до изотопов неона были выделены с помощью амплитудных и время-пролетных измерений в сцинтилляционных счетчиках, расположенных в двух фокусах магнито-оптического канала установки
- ✓ Представленные данные, показали, что в нашем случае эффект расщепления распределений импульсных пиков наблюдается на легких фрагментах с $A < 4$. Эффект максимален для протонов и спадает с ростом массы ядра
- ✓ Две модели ядро-ядрених взаимодействий (BC и QMD) отображают эффект расщепления пиков аналогичным образом. Эффект обусловлен кулоновским полем ядра-снаряда
- ✓ Модель SMM наглядно демонстрирует результат разделения пиков в зависимости от энергии возбуждения промежуточного ядра, которая является входным параметром модели. Наилучшее приближение с нашими данными дает значение энергии равное 6 МэВ / нуклон
- ✓ Впервые расщепление фрагментационных пиков было обнаружено в эксперименте GSI-FRS только на протонной мишени и не наблюдалось на тяжелых мишенях. Разделение пиков было найдено для более тяжелых фрагментов с $Z = 3-5$. По утверждениям авторов, источником такого феномена является эффект ассиметричного деления ядра
- ✓ Наше измерение на трех мишенях (^9Be , ^{27}Al , ^{64}Cu) впервые показало независимость данного эффекта от атомного номера мишени и наличие расщепления для более легких фрагментов вплоть до протонов, а согласие с модельными расчетами указывает на доминирующую роль кулоновских эффектов и не требует введения нового механизма ассиметричного деления.

**Спасибо за
внимание**