

# **Исследование релятивистской фрагментации ядер $^8\text{B}$ методом ядерной фотографической ЭМУЛЬСИИ**

**(Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна)**

**Станоева Р. Ж.**  
ОИЯИ, Дубна, Россия

# Структура диссертационной работы:

## ➤ Введение

- В.1 Периферическая фрагментация релятивистских ядер в ядерной эмульсии
- В.2 Электромагнитный механизм взаимодействия релятивистских ядер
- В.3 Постановка проблемы исследования

## ➤ Глава I. Зарядовая топология периферической диссоциации ядер ${}^8B$

- 1.1. Облучение эмульсий в пучке  ${}^8B$
- 1.2. Первичный поиск и отбор событий, определение среднего пробега, зарядовый состав пучка
- 1.3. Зарядовая топология периферической фрагментации ядра  ${}^8B$
- 1.4. Зарядовая топология «белых» звезд
- 1.5. Диссоциация с образованием фрагментов ядер мишени
- 1.6. Топология фрагментации сопровождающих ядер  ${}^{10}C$  и  ${}^7Be$

## ➤ Глава II. Угловые характеристики фрагментов ядра ${}^8B$ и особенности канала ${}^8B \rightarrow {}^7Be + p$

- 2.1. Условия угловых измерений
- 2.2. Угловые распределения релятивистских фрагментов
- 2.3. Изотопический состав релятивистских фрагментов
- 2.4. Углы испускания и поперечные импульсы фрагментов в диссоциации  ${}^7Be + p$
- 2.5. Спектры по поперечному импульсу  $P_T$  ( ${}^8B^*$ ) в событиях  ${}^7Be + p$
- 2.6. Рассеяние ядер  ${}^8B$  на тяжелых ядрах эмульсии
- 2.7. Азимутальные корреляции в системе  ${}^7Be + p$
- 2.8. Спектр парных углов и инвариантных системы  ${}^7Be + p$

## ➤ Глава III. Угловые корреляции в 3-хтельной фрагментации ядра ${}^8B$ и оценка сечения электромагнитной диссоциации

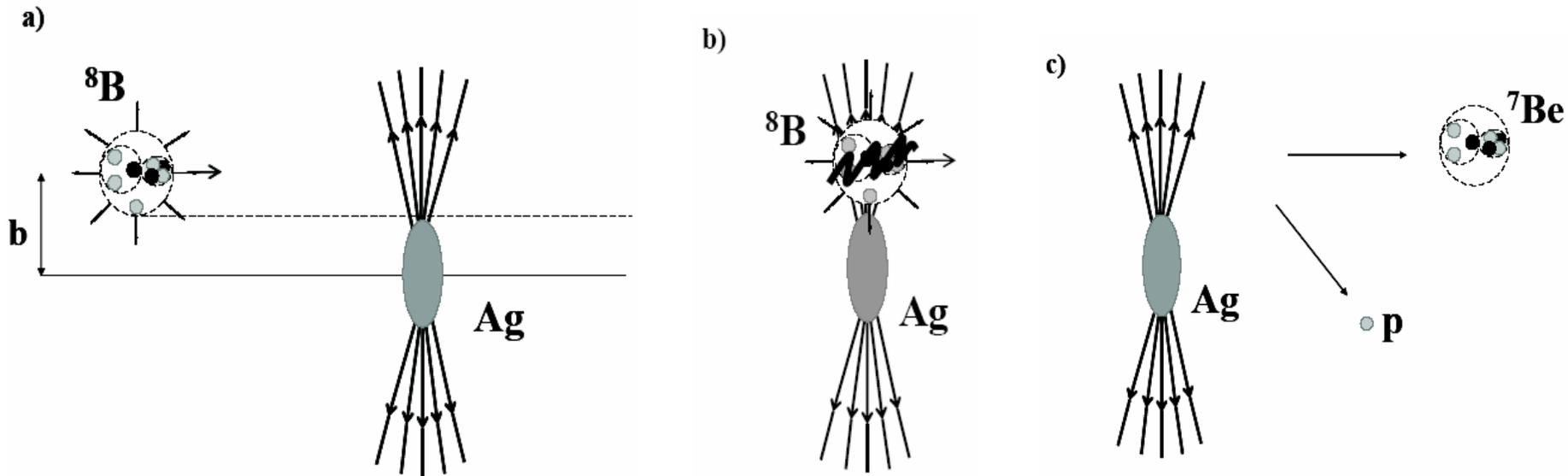
- 3.1. Угловые распределения в канале  ${}^8B \rightarrow 2He + p$
- 3.2. Определение числа событий электромагнитного типа
- 3.3. Оценки сечений электромагнитной диссоциации
- 3.4. Парные углы и инвариантные массы систем фрагментов  ${}^{10}C \rightarrow 2He + 2H$
- 3.5. Перспективы исследования легких радиоактивных ядер

## ➤ Заключение

- Приложение I (содержит микрофотографии периферических взаимодействий), Приложение II (содержит описание принятых методов поиска событий и их измерений, основные характеристики ядерной эмульсии как детектора заряженных частиц)

Схема электромагнитного процесса диссоциации релятивистского ядра  ${}^8\text{B}$  в поле тяжелого ядра:

- а) сближение ядер с прицельным параметром  $b$ ,
- б) поглощение ядром  ${}^8\text{B}$  квазиреального фотона,
- в) диссоциация на пару фрагментов  $p + {}^7\text{Be}$ .



# Зарядовая топология периферической диссоциации ядер $^8\text{B}$

✓ первичный поиск ядерных взаимодействия

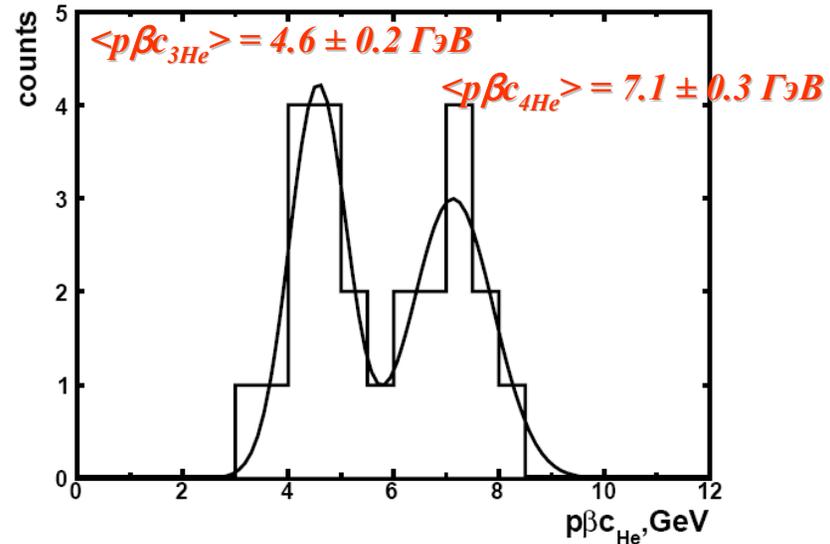
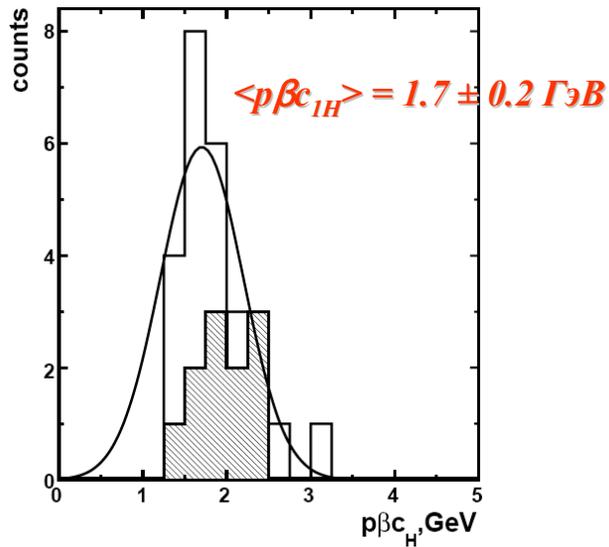
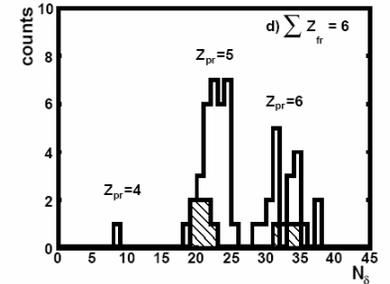
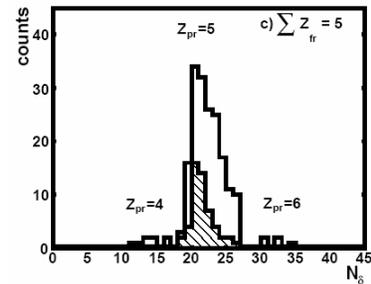
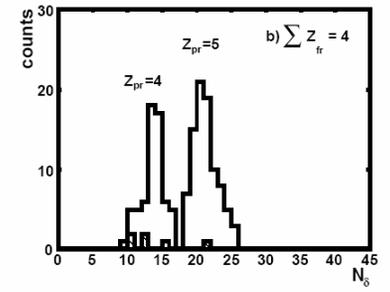
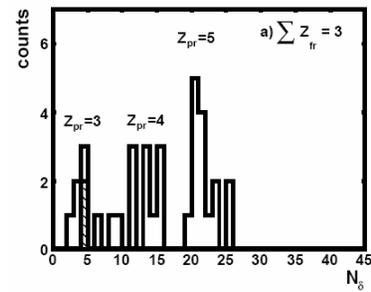
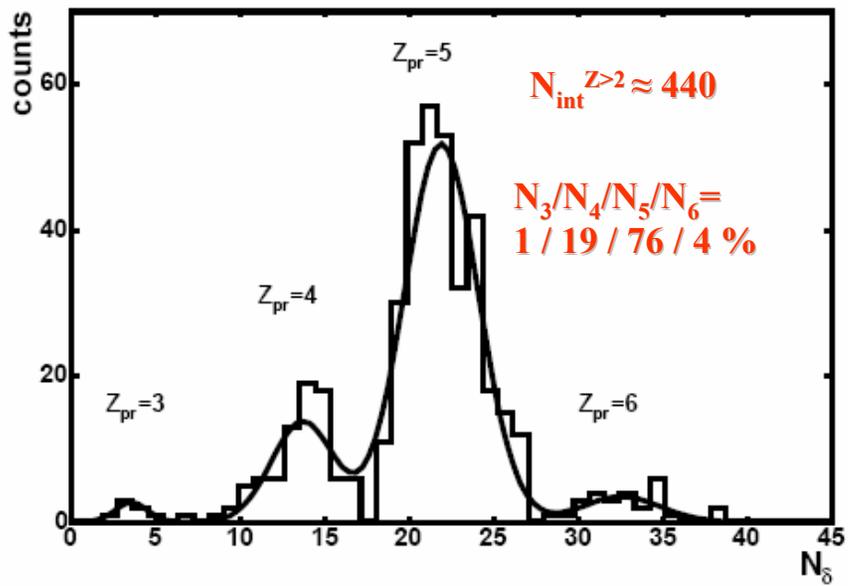
общей длине просмотренных следов  $L_{\Sigma} = 143.996 \text{ м}$

различного типа взаимодействий от ядер с зарядами  $Z_o \geq 3$  (визуальное определение),  $\approx 1070$  событий

средний пробег до взаимодействия -  $\lambda = 13.5 \pm 0.4 \text{ см}$

✓ отбор периферических взаимодействия при условии  $\Sigma Z_{fr} > 2$  и  $\theta_{fr} \leq 8^\circ$  -  $\approx 440$  событий

Определение зарядов релятивистских ядер в эмульсии с помощью методом счета  $\delta$ -электронов ( $N_{\delta}$ ) на единице длины исследуемого трека



**Совокупность данных, указывает на то, что в использованной эмульсии доминируют пучковые следы именно ядер  $^8\text{B}$ .**

# Зарядовая топология периферической фрагментации ядра ${}^8B$

| $\Sigma Z_{fr}$ | $N_z$ |   |   |   |   | $N_{ws}$ | $N_{tf}$ |
|-----------------|-------|---|---|---|---|----------|----------|
|                 | 5     | 4 | 3 | 2 | 1 |          |          |
| 5               | -     | - | - | 1 | 3 | 12       | 42       |
| 5               | -     | - | - | 2 | 1 | 14       | 44       |
| 5               | -     | - | 1 | - | 2 | -        | 5        |
| 5               | -     | - | 1 | 1 | - | -        | 2        |
| 5               | -     | 1 | - | - | 1 | 25       | 16       |
| 5               | 1     | - | - | - | - | 1        | 13       |
| 5               | -     | - | - | - | 5 | -        | 2        |

“Белые” звезды ( $n_s=0, n_g=0, n_b=0$ ):

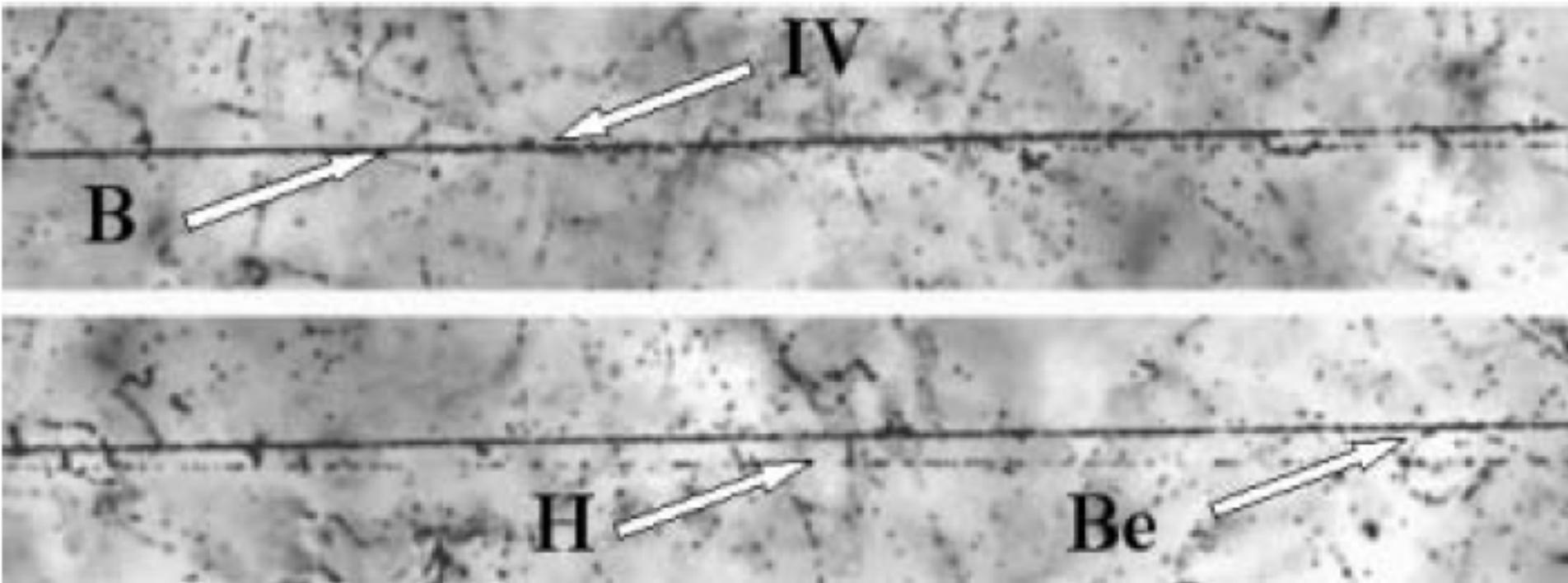
48% -  $Z=4 + Z=1$ , 23% -  $Z=2+3\cdot Z=1$  и 27% -  $2\cdot Z=2 + Z=1$ .

События с фрагментами ядра-мишени или мезонов ( $n_s + n_g + n_b \neq 0$ ):

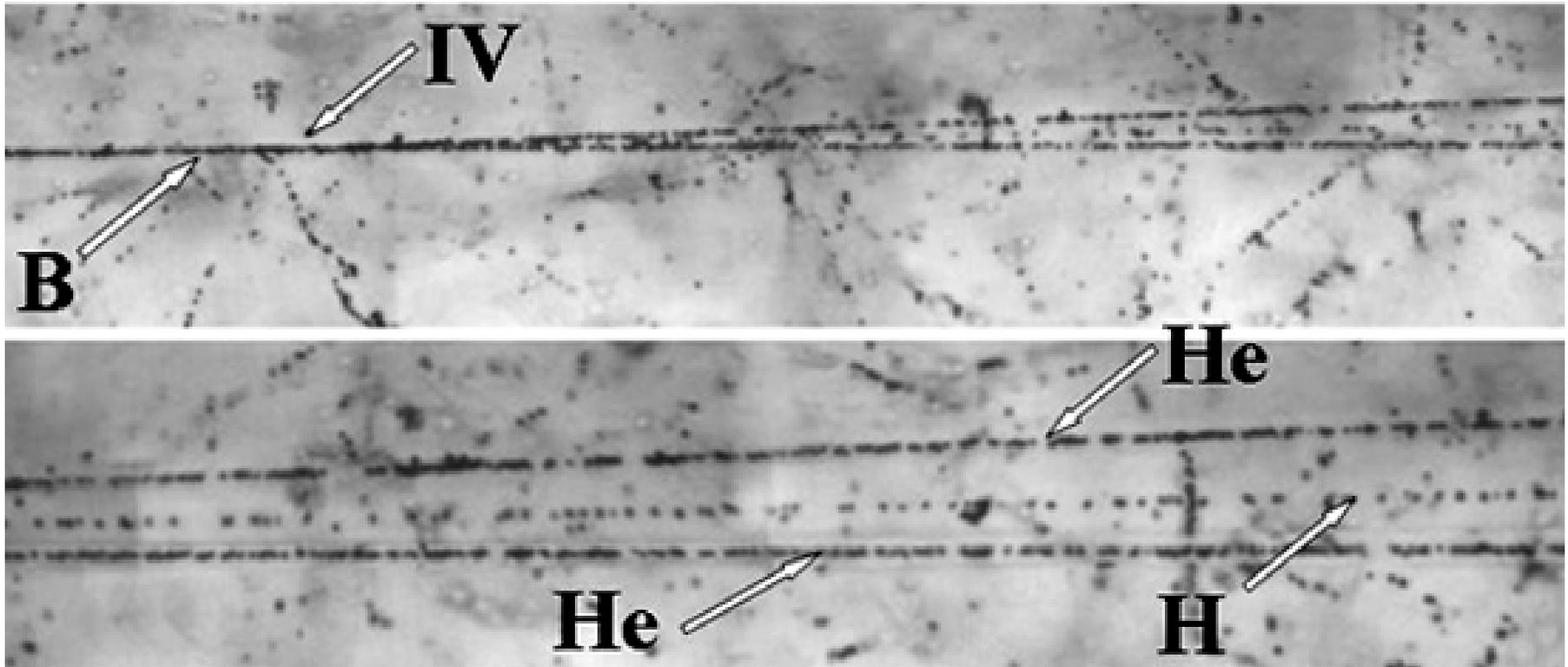
13% -  $Z=4 + Z=1$ , 34% -  $Z=2 + 3\cdot Z=1$  и 36% -  $2\cdot Z=2 + Z=1$ .

**В событиях без образования фрагментов ядер мишени и мезонов канал диссоциации  ${}^8B \rightarrow {}^7Be + p$  имеет лидирующий вклад**

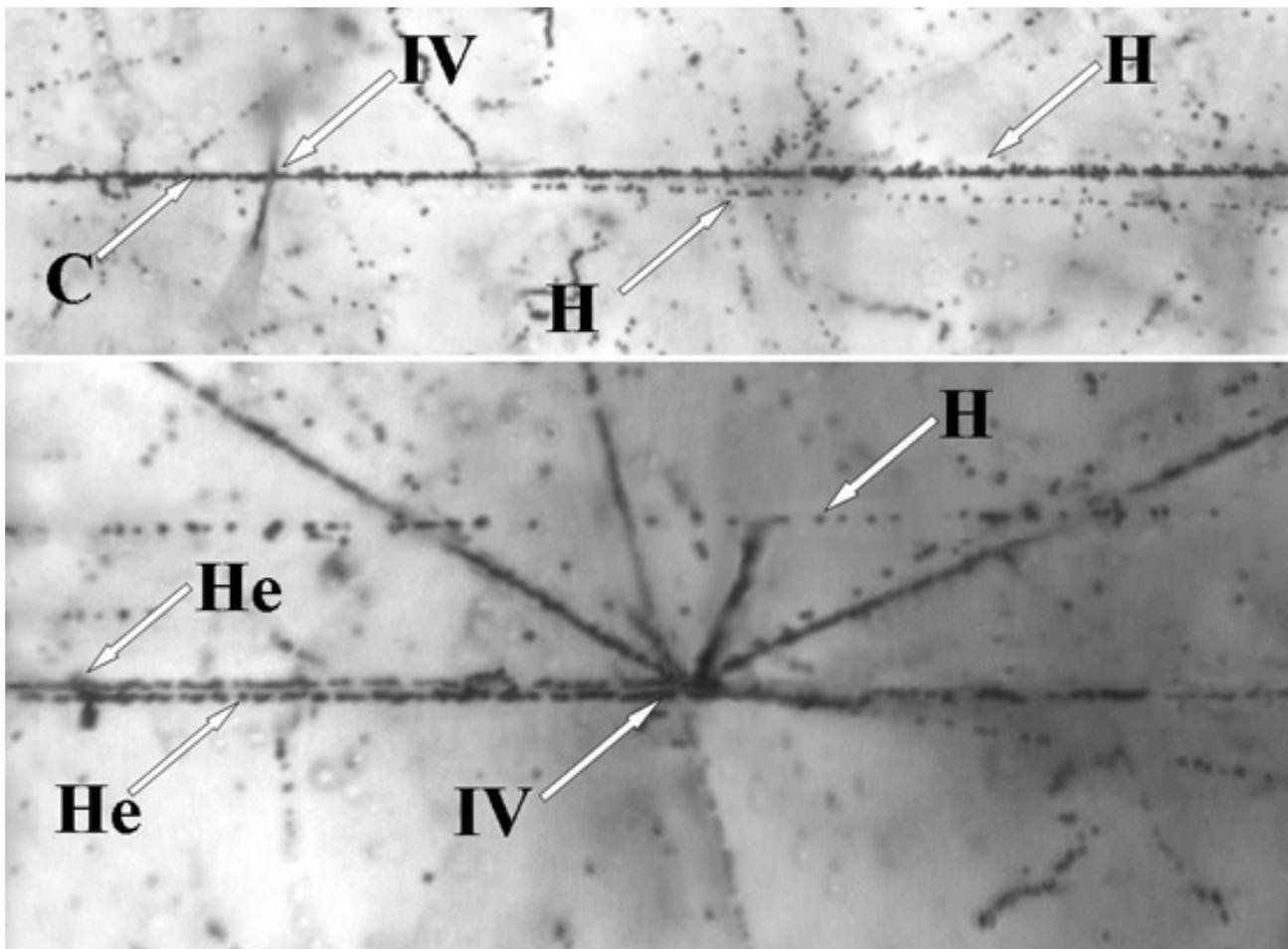
**Микрофотография событий периферической  
фрагментации  ${}^8V \rightarrow {}^7Ve + p$  (из Приложении I)**



# Микрофотография событий периферической фрагментации ${}^8\text{V} \rightarrow 2\cdot\text{He} + \text{H}$ (из Приложении I)



# Микрофотография событий периферической фрагментации $^{10}\text{C} \rightarrow 2\text{He} + 2\text{H}$ (из Приложении I)



Канал диссоциации  $^{10}\text{C} \rightarrow 2\text{He} + 2\text{H}$  преобладает в событиях без образования фрагментов ядер мишени и заряженных мезонов.

# Угловые характеристики фрагментов ядра ${}^8\text{B}$ и особенности канала ${}^8\text{B} \rightarrow {}^7\text{Be} + p$

✓ конус фрагментации -  $\sin \theta_{Fr} = P_F / P_0$ , ( $\theta_{fr} \approx 6^\circ$ )

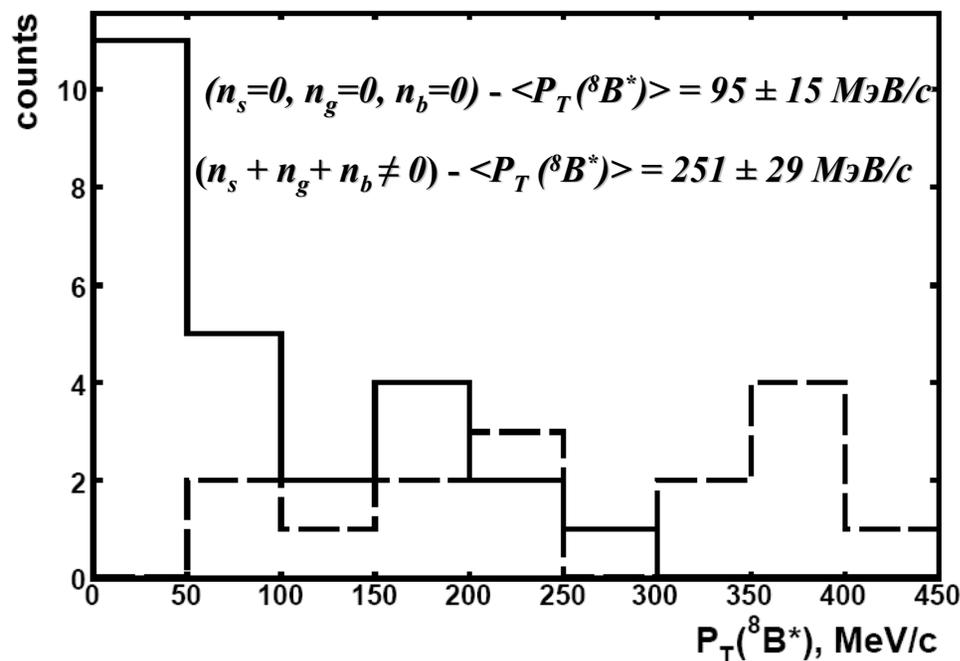
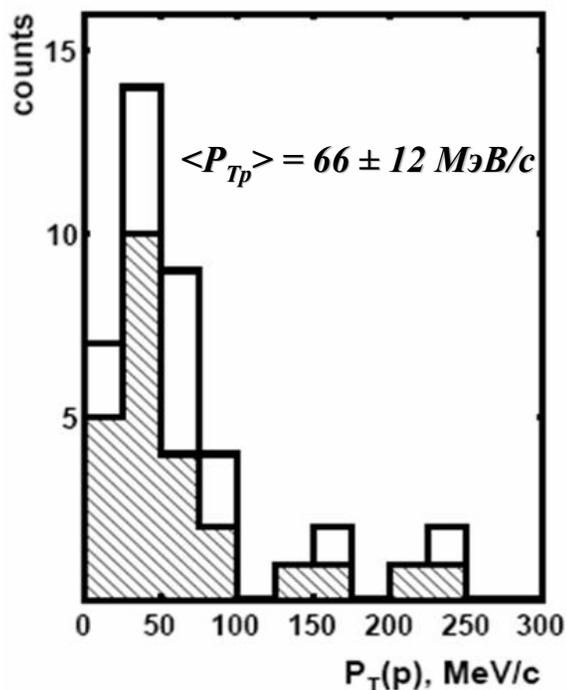
где  $P_F = 0.2 \text{ ГэВ}/c$  – Ферми-импульс,  $P_0 = 2.0 \text{ ГэВ}/c$  – импульс ядра-снаряда;

✓ выполнены угловые измерения фрагментов в примерно 240 событиях с  $Z_{pr} > 4$  и  $\Sigma Z_{fr} > 3$  –

$\theta_{fr}(Z=1) \leq 8^\circ$ ;  $\theta_{fr}(Z=2) < 6^\circ$ ;  $\theta_{fr}(Z>2) < 3^\circ$ ;

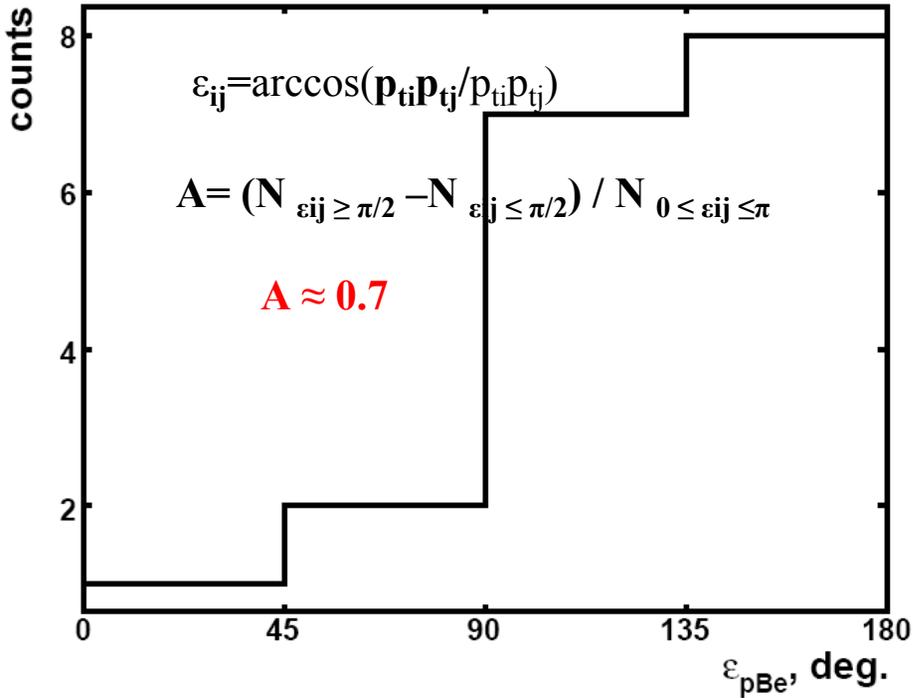
✓ точность угловых измерения  $\sim 10^{-3}$  радиана

✓ угловые измерения позволяют с большой точностью восстановить спектры поперечных импульсов фрагментов  $P_T$  согласно формуле  $P_T = A_{fr} P_0 \sin \theta$



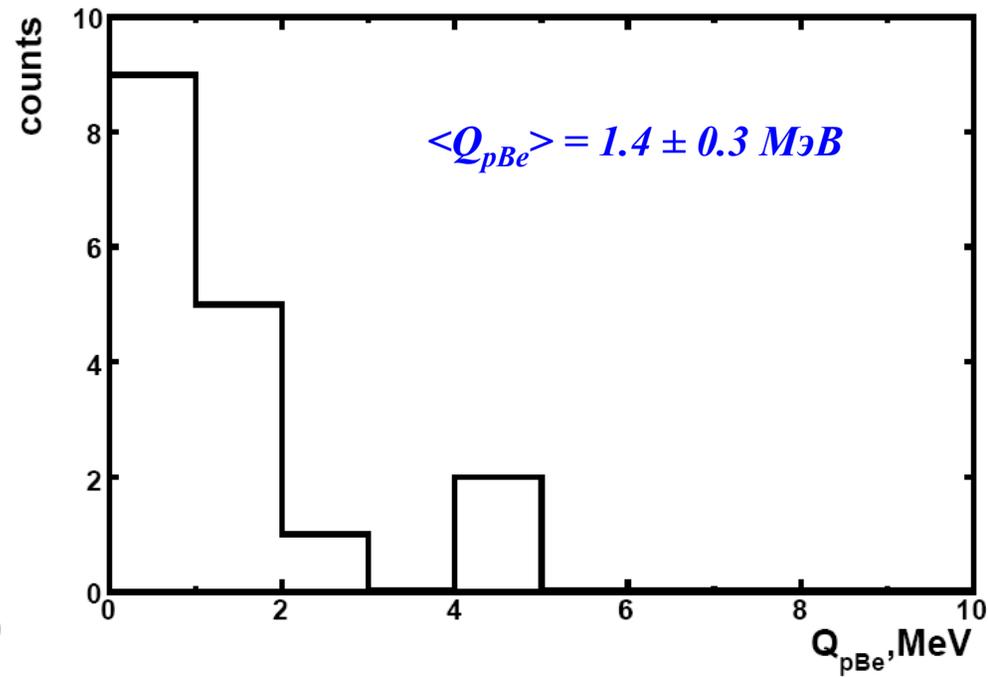
**Малые величины отражают слабую связь внешнего протона в ядре  ${}^8\text{B}$ .**

**Распределение по азимутальному  
углу  $\varepsilon_{pBe}$  между  ${}^7Be$  и  $p$   
в “белых” звездах  ${}^8B \rightarrow {}^7Be + p$  в  
событиях с  $P_T ({}^8B^*) < 150 \text{ МэВ}/c$**



Для усиления отбора событий электромагнитной природы может быть принят достаточно мягкий критерий  $\varepsilon_{pBe} > \pi/2$ .

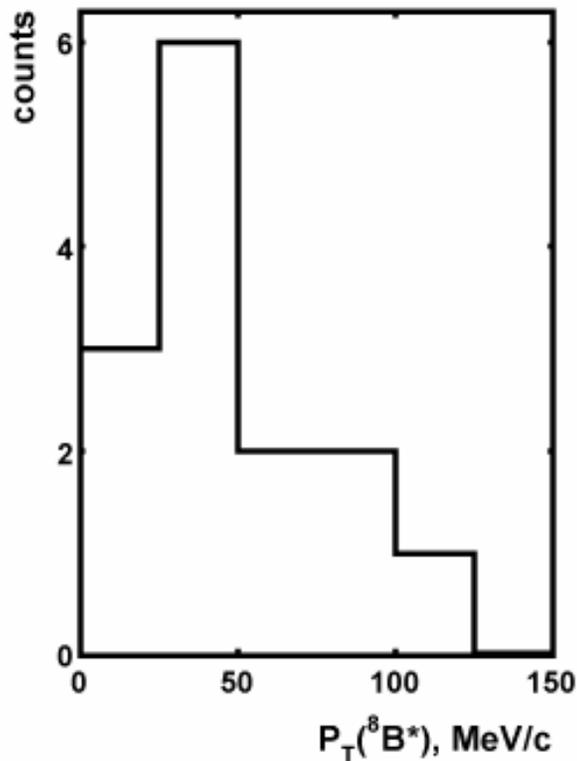
**Распределение по инвариантной  
энергии возбуждения  
для канала  ${}^8B \rightarrow {}^7Be + p$  при условии  
 $P_T ({}^8B^*) < 150 \text{ МэВ}/c$**



$Q_{pBe} < 5 \text{ МэВ}$  - условие

**Обнаружена сильная корреляция по азимутальному углу разлета фрагментов, возрастающая при уменьшении переданного поперечного импульса.**

Распределение «белых» звезд  ${}^7\text{Be} + p$  по суммарному поперечному импульсу  $P_T({}^8\text{B}^*)$ , условия отбора  $P_T({}^8\text{B}^*) < 150 \text{ МэВ/с}$ ,  $Q_{p\text{Be}} < 5 \text{ МэВ}$  и  $\varepsilon_{p\text{Be}} > \pi/2$ .



$$\langle P_T({}^8\text{B}^*) \rangle = 50 \pm 8 \text{ МэВ/с}$$

## Оценки сечений электромагнитной диссоциации

${}^7\text{Be} + p$  – 14 событий, тогда из них 9 событий можно приписать диссоциации на ядрах  $\text{Ag}$ , а 5 –  $\text{Br}$

Сечение вычисляется по формуле

$$\sigma_Z = N_{ev} / (N_Z \cdot L),$$

где  $N_{ev}$  – число событий в данном канале,

$N_Z$  – число атомов данного типа в  $\text{см}^{-3}$ , а  $L$  – полная длина следов на которых найдено  $N_{ev}$ .

$$\sigma_{\text{Ag}} = 81 \pm 21 \text{ мб}$$

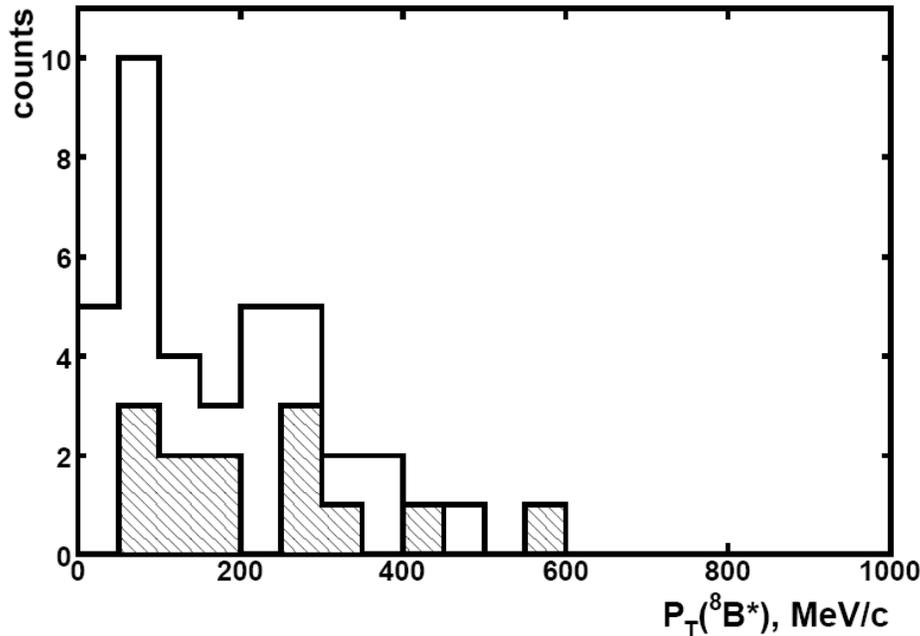
$$\sigma_{\text{Br}} = 44 \pm 12 \text{ мб},$$

Впервые получена оценка сечения электромагнитной диссоциации на ядре серебра  $\sigma_{\text{Ag}} = 81 \pm 21 \text{ мб}$ . Экстраполяция этого значения для ядра свинца указывает на согласие с теоретическими расчетами [14].

# Распределение по суммарному поперечному импульсу $P_T(^8B^*)$ событий периферической диссоциации $^8B \rightarrow ^4He + ^3He + p$

$$\langle P_T(^8B^*) \rangle = 231 \pm 41 \text{ МэВ/с} - (n_s + n_g + n_b = 0)$$

$$\langle P_T(^8B^*) \rangle = 171 \pm 19 \text{ МэВ/с} - (n_s + n_g + n_b \neq 0)$$



Соотношение фрагментов  $He$  и  $H$  при диссоциации ядра-основы  $^7Be$  в  $^8B$  проявляет сходство с диссоциацией свободного ядра  $^7Be$ .

Среднее значение поперечного импульса, переданного ядру  $^8B$ , указывает на большую передачу поперечного импульса по сравнению с каналом  $^8B \rightarrow ^7Be + p$ .

# Заключение

При проведении настоящего исследования впервые была изучена периферическая фрагментации радиоактивного релятивистского ядра  ${}^8B$  в ядерной фотографической эмульсии с полнотой наблюдения и угловым разрешением, которые можно считать уникальными. Основные выводы состоят в следующем.

1. Совокупность данных по измерению зарядов пучковых следов, зарядовой топологии периферических столкновений, угловым характеристикам, а также по идентификации релятивистских фрагментов  ${}^1H$ ,  ${}^3He$  и  ${}^4He$ , указывает на то, что в использованной эмульсии доминируют пучковые следы именно ядер  ${}^8B$ . Таким образом, получено подтверждение, что впервые задача облучения эмульсии ядрами  ${}^8B$  решена успешно на нуклотроне ОИЯИ.
2. Впервые получена систематическая картина распределения по зарядовым комбинациям фрагментов в периферических взаимодействиях ядер  ${}^8B$  в ядерной эмульсии. Главный вывод состоит в том, что в событиях без образования фрагментов ядер мишени и мезонов канал диссоциации  ${}^8B \rightarrow {}^7Be + p$  имеет лидирующий вклад.
3. Впервые получены распределения по поперечным импульсам релятивистских фрагментов  ${}^8B \rightarrow {}^7Be + p$ . Показано, что их малые величины отражают слабую связь внешнего протона в ядре  ${}^8B$ .
4. Впервые получены спектры по суммарному поперечному импульсу фрагментов  $P_T ({}^8B)$  в событиях  ${}^8B \rightarrow {}^7Be + p$ . В этих событиях обнаружена сильная корреляция по азимутальному углу разлета фрагментов, возрастающая при уменьшении переданного поперечного импульса.

5. Анализ угловых корреляций в событиях с фрагментами мишени и без них позволил обосновать отбор событий электромагнитной диссоциации  ${}^8B \rightarrow {}^7Be + p$  по суммарному поперечному импульсу фрагментов  $P_T ({}^8B^*) < 150 \text{ МэВ}/c$ , энергии возбуждения  $Q_{pBe} < 5 \text{ МэВ}$  и азимутальному углу разлета фрагментов  ${}^7Be$  и  $p$   $\varepsilon_{pBe} > \pi/2$ .
6. Для событий  ${}^7Be + p$  без образования фрагментов мишени и рожденных мезонов впервые получена оценка сечения электромагнитной диссоциации на ядре серебра  $\sigma_{Ag} = 81 \pm 21 \text{ мб}$ . Экстраполяция этого значения для ядра свинца указывает на согласие с теоретическими расчетами [14].
7. Впервые получена информация об относительной вероятности каналов диссоциации с большей множественностью –  ${}^8B \rightarrow 2He + N$  и  $He + 3N$ . Соотношение фрагментов  $He$  и  $N$  при диссоциации ядра-основы  ${}^7Be$  в  ${}^8B$  проявляет сходство с диссоциацией свободного ядра  ${}^7Be$ .
8. Впервые сделаны оценки импульсов фрагментов в канале  ${}^8B \rightarrow 2He + N$ . Среднее значение поперечного импульса, переданного ядру  ${}^8B$ , указывает на большую передачу поперечного импульса по сравнению с каналом  ${}^8B \rightarrow {}^7Be + p$ .
9. Впервые наблюдались события периферической диссоциации ядра  ${}^{10}C$ . Получено указание на то, что канал диссоциации  ${}^{10}C \rightarrow 2He + 2N$  преобладает в событиях без образования фрагментов ядер мишени и заряженных мезонов.

Результаты данной работы могут составить основу для планирования будущих экспериментов с радиоактивными релятивистскими ядрами с более высокой статистикой и детальностью идентификации фрагментов, а также более с высокой сложностью и разнообразием детекторов.

## Апробация работы.

**Основные результаты диссертации докладывались на следующих научных форумах:**

- XVII International School on Nuclear Physics, Neutron Physics and Application, Varna, Bulgaria, 24 - 30 September 2007;
- ISHEPP XVIII Relativistic nuclear physics and Quantum Chromodynamics, JINR, Dubna, September 25 - 30, 2006;
- 25th International Workshop on Nuclear Theory, Bulgaria, June 26 to July 1, 2006;
- Nuclear Physics in Astrophysics – III XXI International Nuclear Physics Divisional Conference of the European Physical Society, Dresden, Germany, 26 – 31 March 2007;
- FMNS2007 Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Blagoevgrad, Bulgaria, 6-10 June 2007;
- Регулярно представляются доклады на совещаниях сотрудничества БЕККЕРЕЛЬ в ОИЯИ, Дубна, Россия;

## Список работ опубликованных по теме диссертации

[1] Н. П. Андреева, ... Р. Станоева.... *Топология «белых» звезд в релятивистской фрагментации легких ядер* **ЯФ 68 №3 484(2005)**; перевод на англ. яз. N. P. Andreeva et al., **Phys. At. Nucl.**, **68**, 455 (2005); arXiv:nucl-ex/0605015v2

[2] N. P. Andreeva,..., R.Stanoeva,....., *Clustering in light nuclei in fragmentation above 1 A GeV* , **Eur. Phys. J. A27 s01**, **295(2006)**; arXiv: nucl-ex/0604003.

[3] Р. Станоева и др. *Периферическая фрагментация ядер  $^8\text{B}$  с энергией 1.2 A ГэВ в ядерной эмульсии*, **ЯФ 70, №7, 1255 (2007)**; перевод на англ. яз. R. Stanoeva et al., **Phys. At. Nucl.**, **70**, 1216 (2007); arXiv:nucl-ex/0605013v3.

[4] D. A. Artemenkov, T. V. Shchedrina, R. Stanoeva, and P. I. Zarubin *Clustering features of  $^9\text{Be}$ ,  $^{14}\text{N}$ ,  $^7\text{Be}$ , and  $^8\text{B}$  nuclei in relativistic fragmentation* International Symposium on Exotic Nuclei (EXON 2006), Khanty-Mansiysk, Russia, 17-24 July 2006 Published in AIP Conf. Proc. 912, 78(2007); arXiv: 0704.0384.

[5] D. A. Artemenkov,....., R. Stanoeva,..... *Особенности фрагментации  $^9\text{Be} \rightarrow 2\text{He}$  при энергии 1.2 A ГэВ*, **ЯФ 70, №7, 1222(2007)**; перевод на англ. яз. D. A. Artemenkov,..., R. Stanoeva... **Phys. At. Nucl.**, **70**, 1226 (2007); arXiv:nucl-ex/0605018v1.

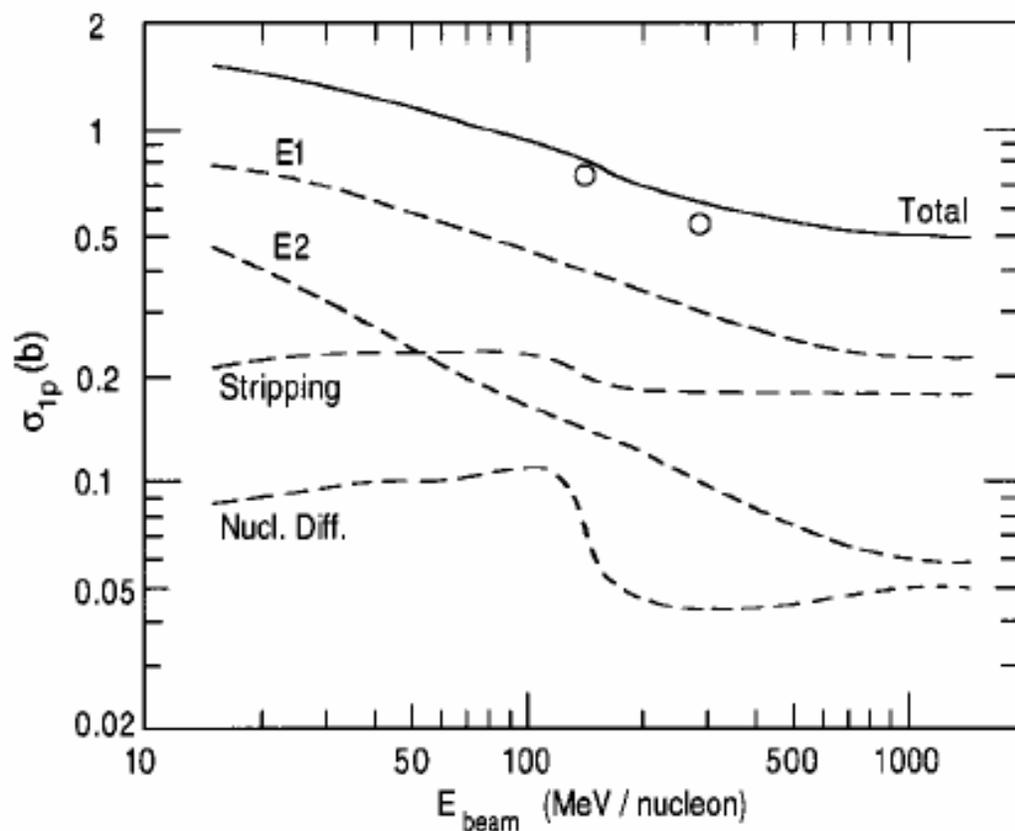


FIG. 8. One-proton removal cross section (solid curve) for  $^8\text{B}$  on a Pb target, as a function of the beam energy. The dashed curves show the contributions from stripping, nuclear induced diffraction, and the  $E1$  and  $E2$  Coulomb dissociation. The two data points are from Ref. [8].

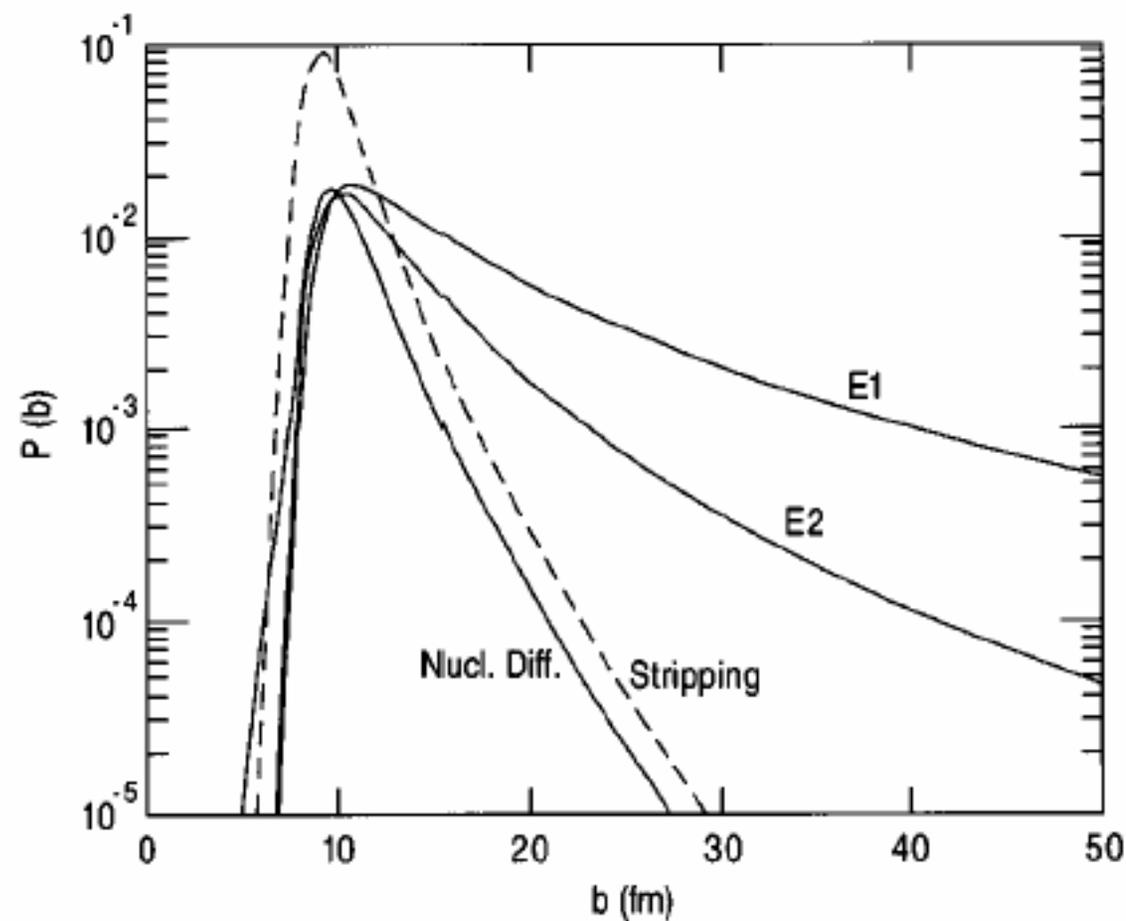


FIG. 9. Impact parameter dependence of the different components of the breakup probability for  $^8\text{B}$  on a Pb target at 285 MeV/nucleon. The dashed curve is the contribution from stripping. The solid curves show, in increasing order, the contributions from nuclear diffraction, and from the  $E2$  and  $E1$  Coulomb dissociation.