

Исследование реакции $^{11}\text{B}(p,\alpha)\alpha$

Шуклина Анна,
4 курс КФУ ФФ НГУ
Научный руководитель:
Соколова Евгения Олеговна
ИЯФ им.Г.И.Будкера СО РАН

- Цель:

- Получение новых знаний и *уточнение* имеющихся данных о протекании, сечении и угловом распределении перспективной реакции $^{11}\text{B}(p,\alpha)\alpha$ в диапазоне энергий протонов ***0,15 – 2,2 МэВ***

- Задачи:

- Облучить *толстую* борсодержащую мишень протонами
- Облучить *тонкую* борную мишени под разными углами пучком протонов 0,1 – 2,15 МэВ
- Провести анализ полученных спектров и построить зависимость сечения реакции от энергии налетающих протонов

- Рассмотрение реакции для повышения эффективности бор-протонной терапии рака
- Безнейтронная реакция для термоядерной энергетики
- Анализ структуры материалов и ядерная астрофизика

Проблема: разрозненность накопившихся данных о сечении рассеяния

Дифференциальное сечение рассеяния, мб/ср

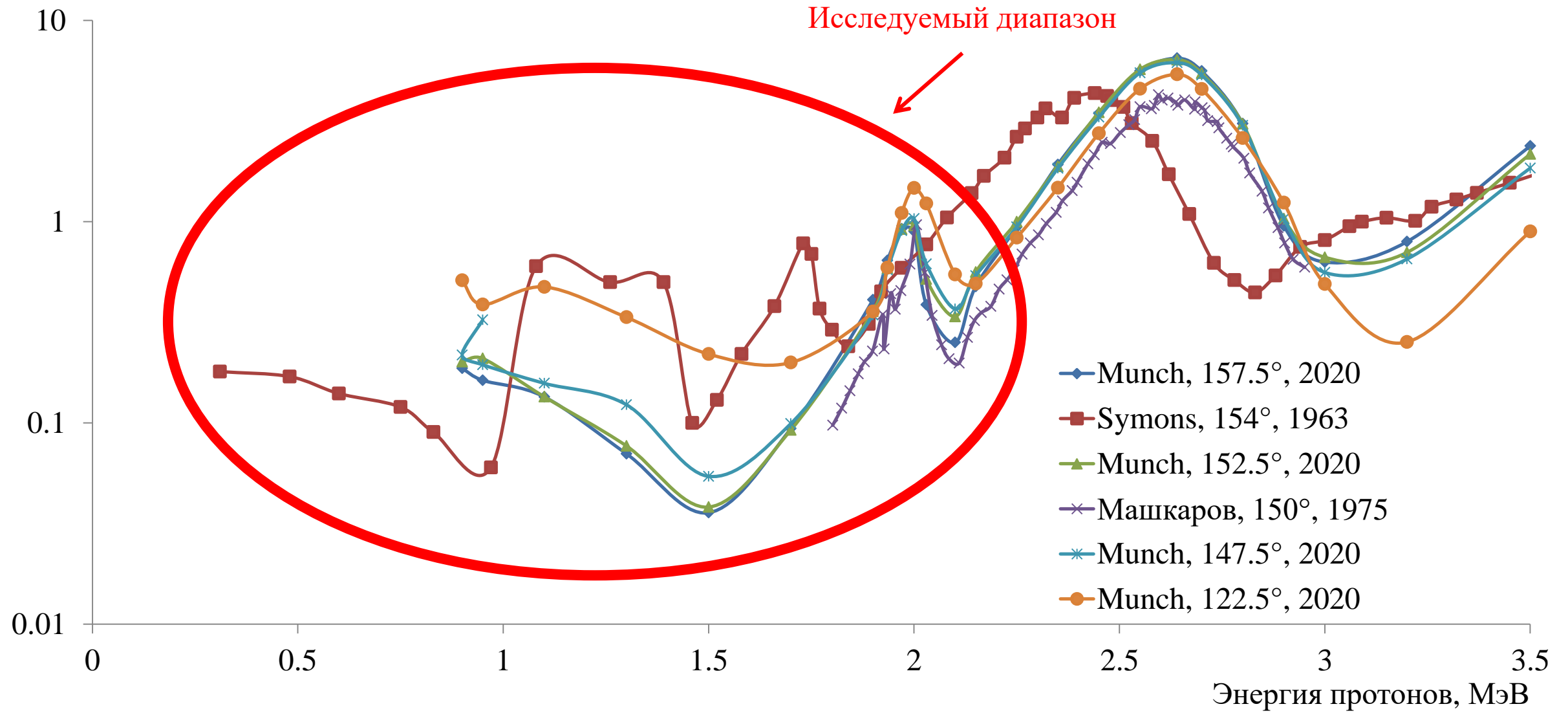


Рис.1 Данные о сечении реакции $^{11}\text{B}(p, \alpha_0)^8\text{Be}$ из базы данных ядерных реакций IBANDL

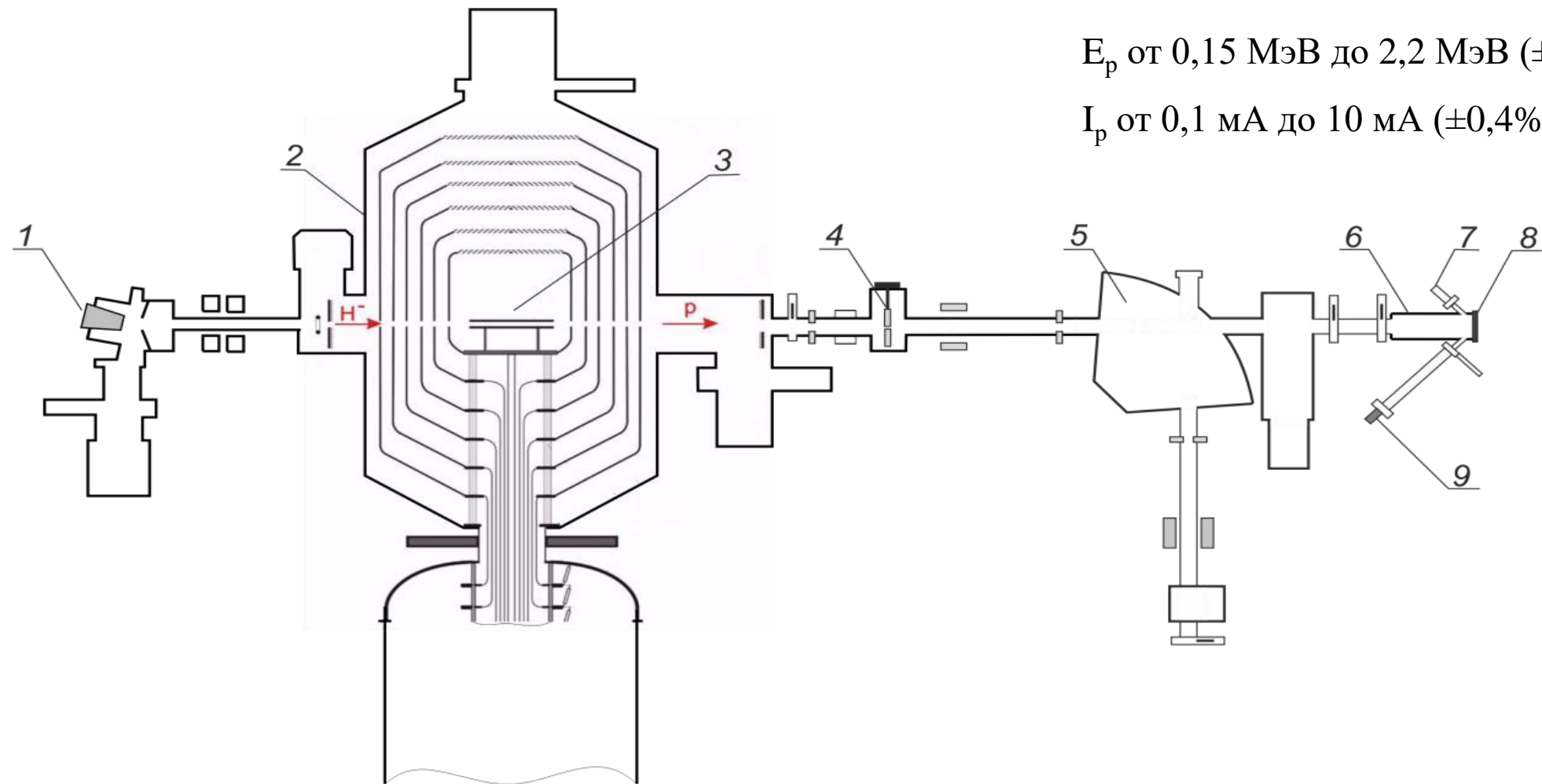


Рис. 2 Схема экспериментальной установки: 1 – источник ионов, 2 - ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией, 3 - аргоновая мишень, 4 – охлаждаемый коллиматор с апертурой 1 мм, 5 – поворотный магнит, 6 – мишенный узел, 7 – видеокамера, 8 – борсодержащая мишень, 9 - α -спектрометр

- Чувствительная площадь детектора –
 $S = 20 \text{ мм}^2$
- Энергетическое разрешение – 13 кэВ
- Емкость – 30 пФ
- Энергетический эквивалент шума – 7 кэВ
- Толщина входного окна – 0,08 мкм
- Типичный собственный фон в диапазоне 3-8
МэВ – 0,15 имп/см²ч



Рис. 3 Фото α -спектрометра

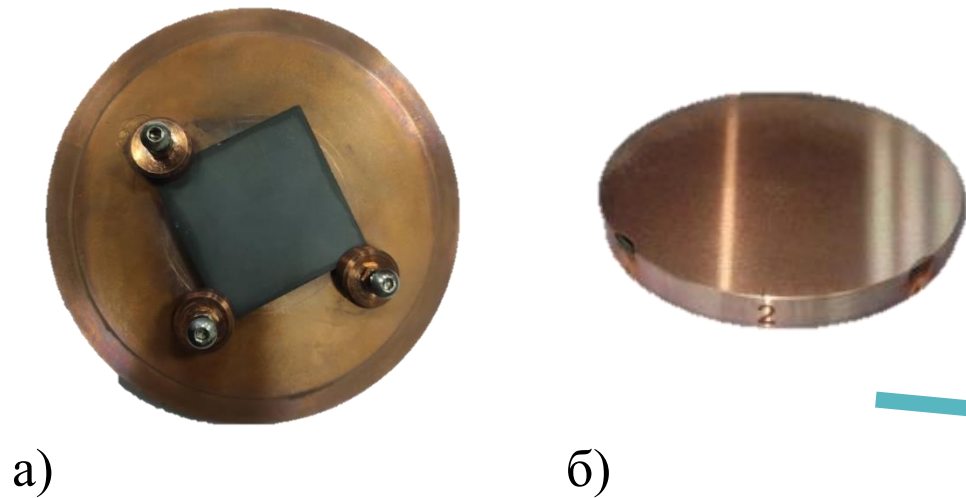


Рис.4 а) Пластина из карбида бора B_4C толщиной 4 мм на медной подложке; б) 1 мкм бора, напыленного на медную подложку

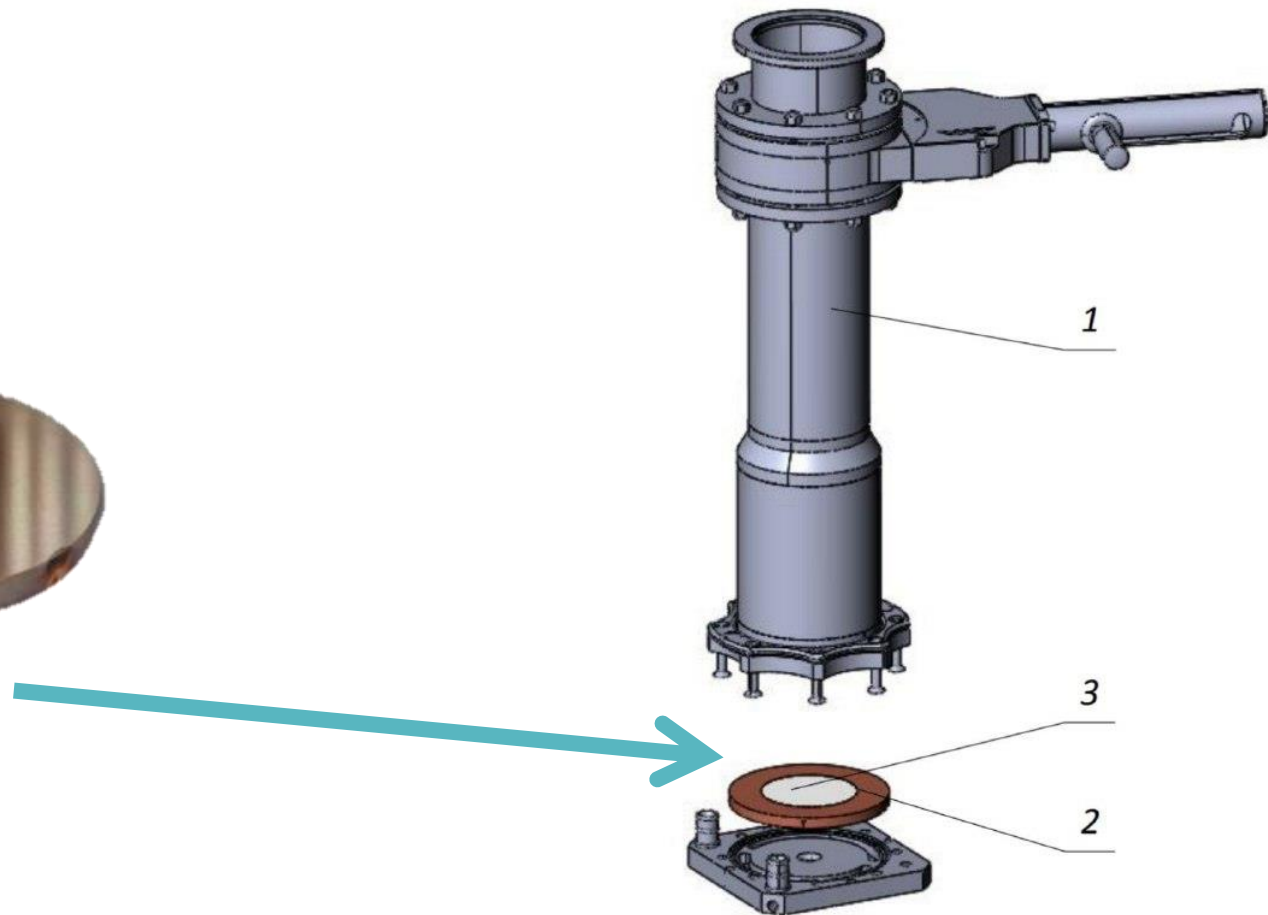


Рис.5 Устройство мишени: 1 - мишенный узел, 2 - медная подложка, 3 - борсодержащая пластина

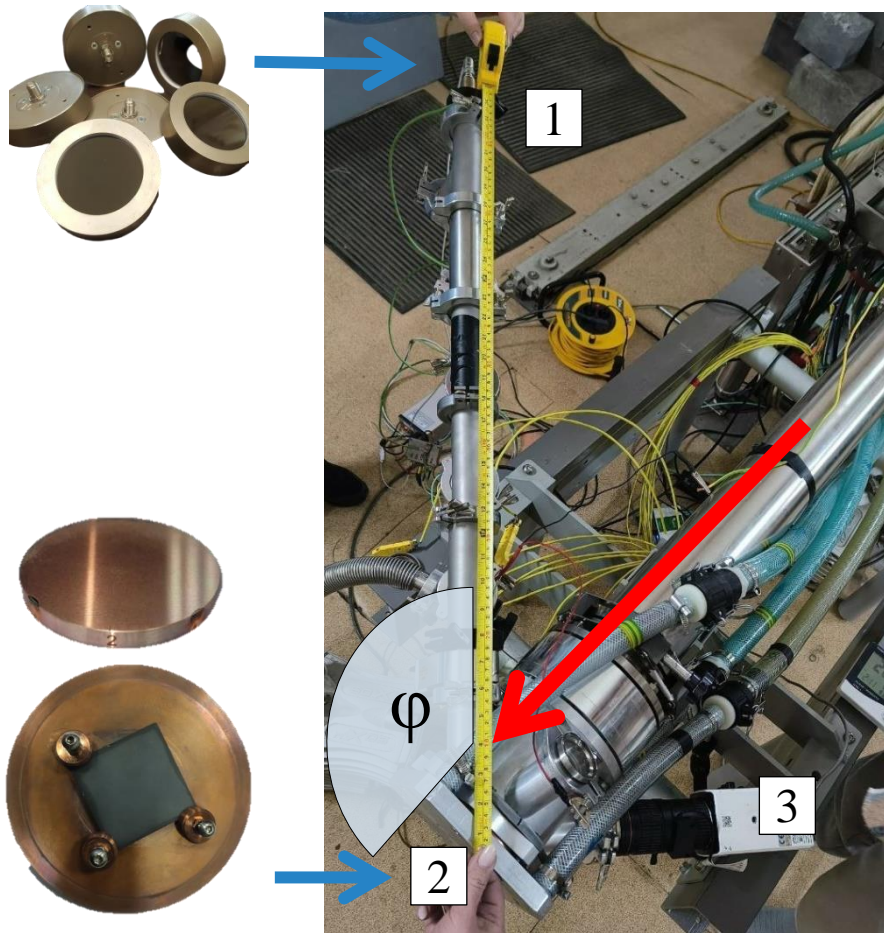
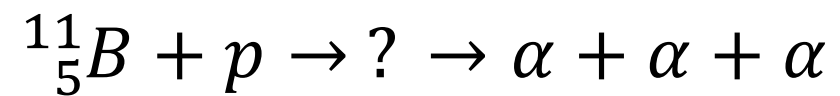
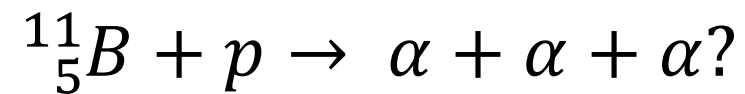
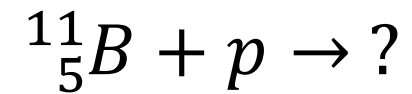
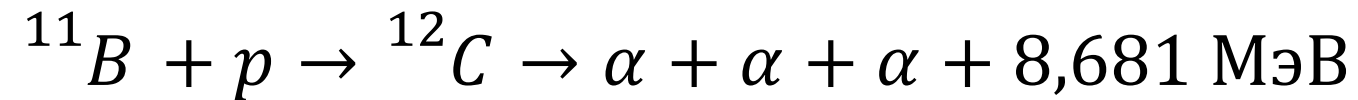


Рис. 6 Фото мишенного узла: 1 - α -спектрометр, 2 - мишень, 3 - видеокамера, красной стрелкой обозначено направление пучка протонов

Табл. 1 Параметры измерений

	Толстая мишень	Тонкая мишень	Тонкая мишень
φ	135°	135°	168°
Расстояние до мишени, мм	870	717	707
Телесный угол, ср	$2,64 \cdot 10^{-5}$	$3,89 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-5}$
Время набора статистики, мин	10	120	120
Мертвое время, менее	0,04	0,05	0,05
Ток на мишени, мкА, менее	1,5	4,6	4,6





Спектры α -частиц и обратно отраженных протонов: толстая мишень, 135°

Количество событий

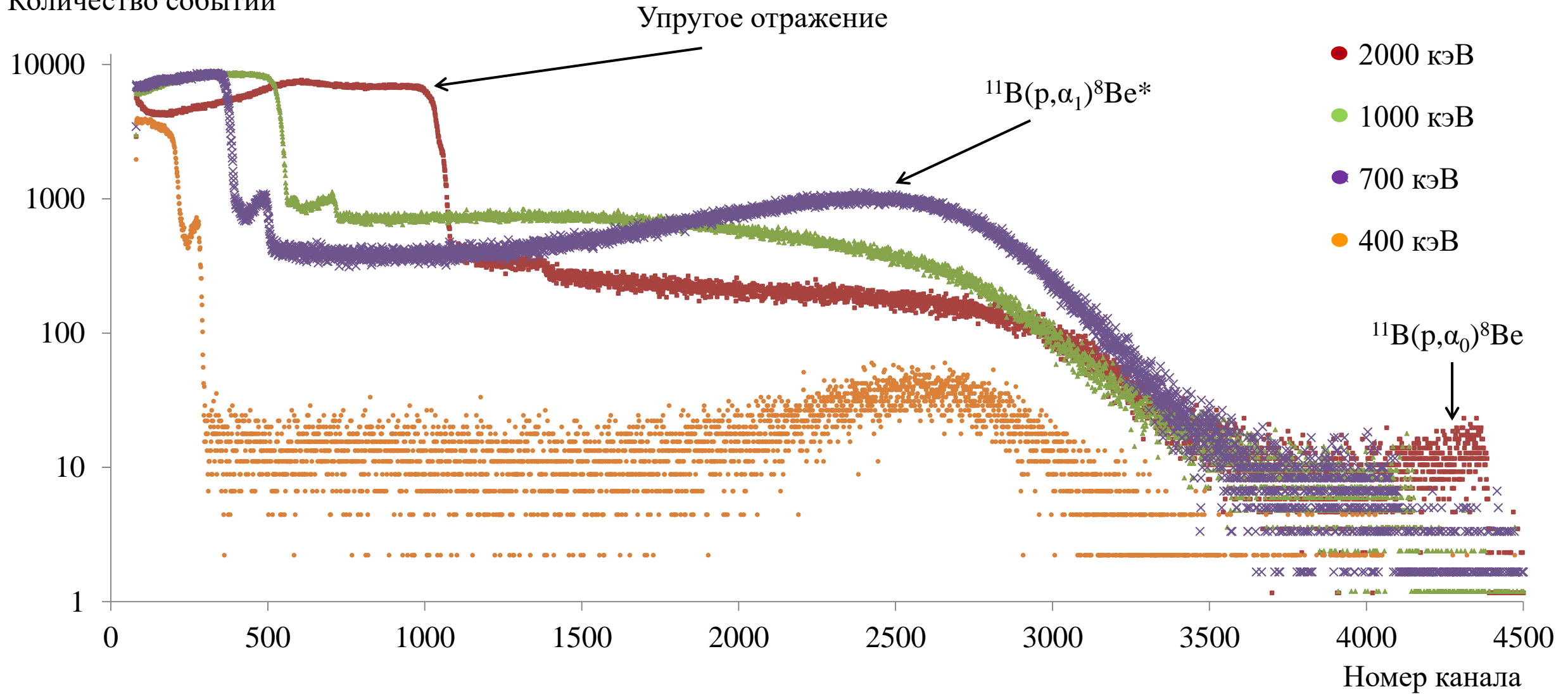


Рис.7 Спектры α -частиц и обратно отраженных протонов

Как протекает реакция:

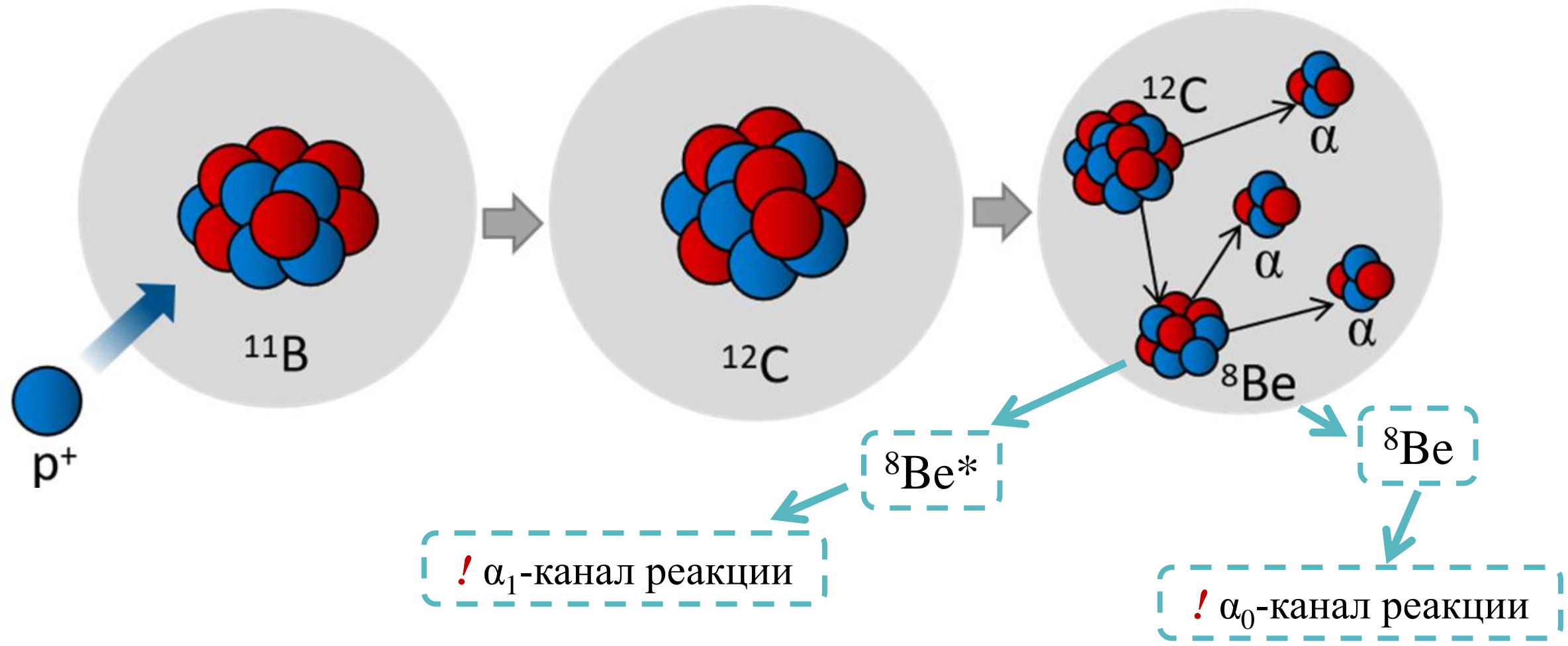


Рис.8 Схема реакции бор-протонного синтеза

Спектры α -частиц и обратно отраженных протонов

Количество событий

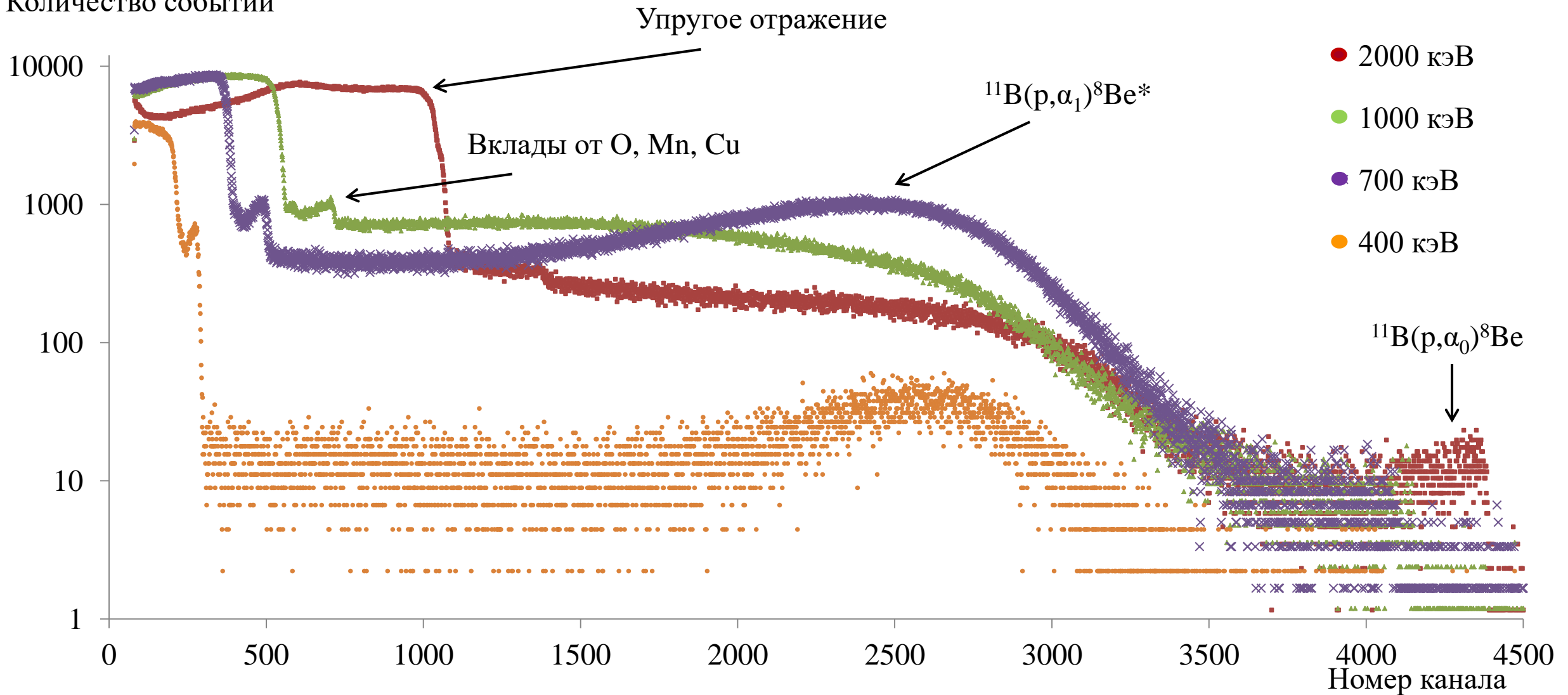


Рис.7 Спектры α -частиц и обратно отраженных протонов

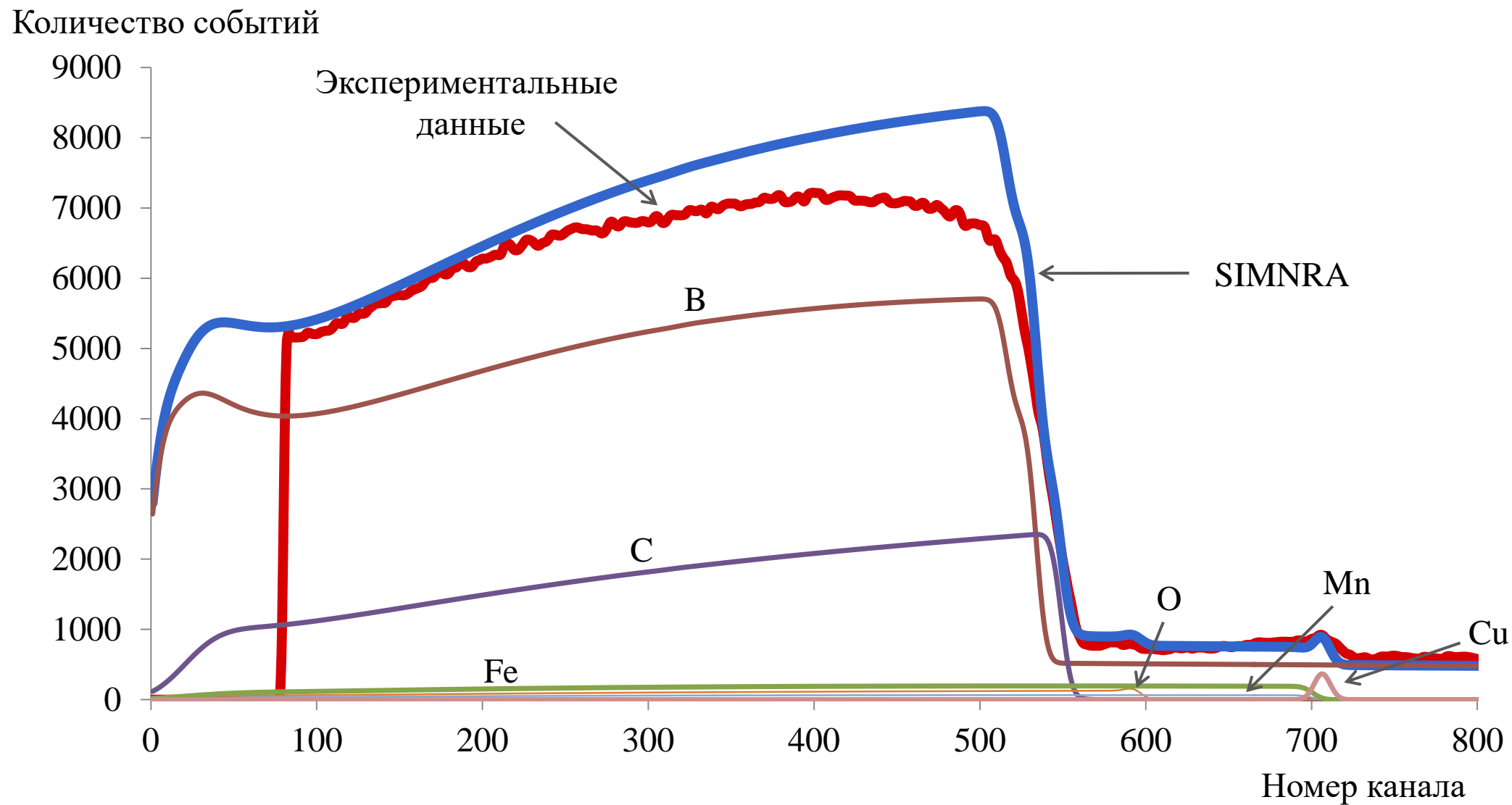


Рис.9 Результат численного моделирования и экспериментальные данные при 1000 кэВ

Количество событий

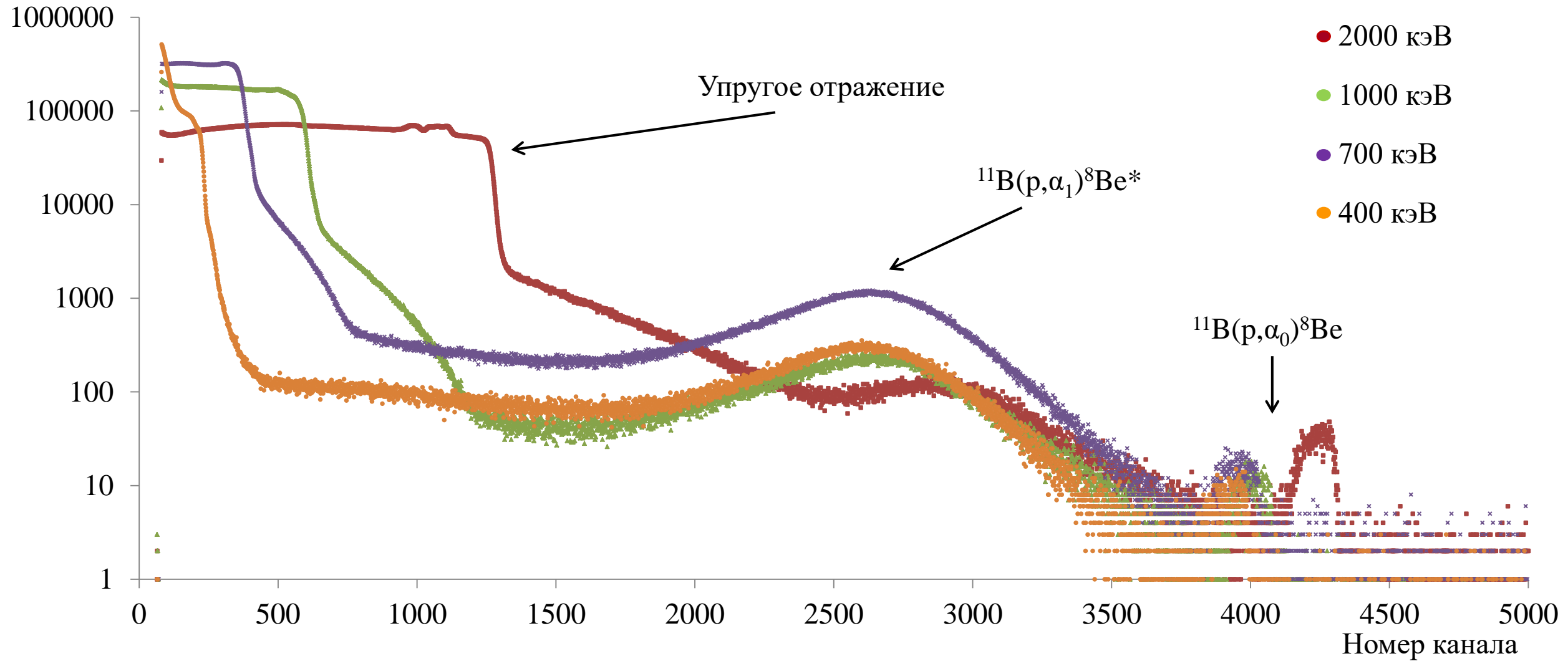


Рис.10 Спектры α -частиц и обратно отраженных протонов

Как посчитать сечение?

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{eY}{Nknl\Phi}$$

e – заряд электрона

Y – выход альфа частиц

N – количество задетектированных альфа-частиц

k – эффективность регистрации альфа-частиц
спектрометром

n – плотность частиц

l – толщина мишени

Φ – интеграл тока

θ – угол детектирования частиц

Q – энергетический выход реакции

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{c.m.} = G \cdot \frac{d\sigma}{d\Omega},$$

$$G = \frac{|1 + \beta \cos \theta|}{(1 + \beta^2 + 2 \cos \theta)^{\frac{3}{2}}}$$

$$\beta = \sqrt{\frac{m_p m_\alpha}{m_B m_{Be}} \frac{T_M}{T_M + Q}}$$

$$T_M = E_p \frac{m_{Be}}{m_p + m_{Be}}$$

Ионизационные потери и коэффициент перехода в систему центра масс

Энергия, кэВ	dE/dx , кэВ/мкм	dE , кэВ	G
150	107.4	74.106	1.0064
200	94.71	65.3499	1.0085
300	76.6	52.854	1.0127
400	64.81	44.7189	1.0168
500	56.56	39.0264	1.0208
600	50.43	34.7967	1.0248
700	45.69	31.5261	1.0288
800	41.9	28.911	1.0326
900	38.79	26.7651	1.0365
1000	36.19	24.9711	1.0403
1100	34.23	23.6187	1.044
1200	32.31	22.2939	1.0477
1300	30.63	21.1347	1.0513
1400	29.16	20.1204	1.0549
1500	27.84	19.2096	1.0584
1600	26.64	18.3816	1.0619
1700	25.56	17.6364	1.0654
1800	24.56	16.9464	1.0688
1900	23.69	16.3461	1.0721
2000	22.81	15.7389	1.0754
2100	22.07	15.2283	1.0787
2200	21.33	14.7177	1.0819

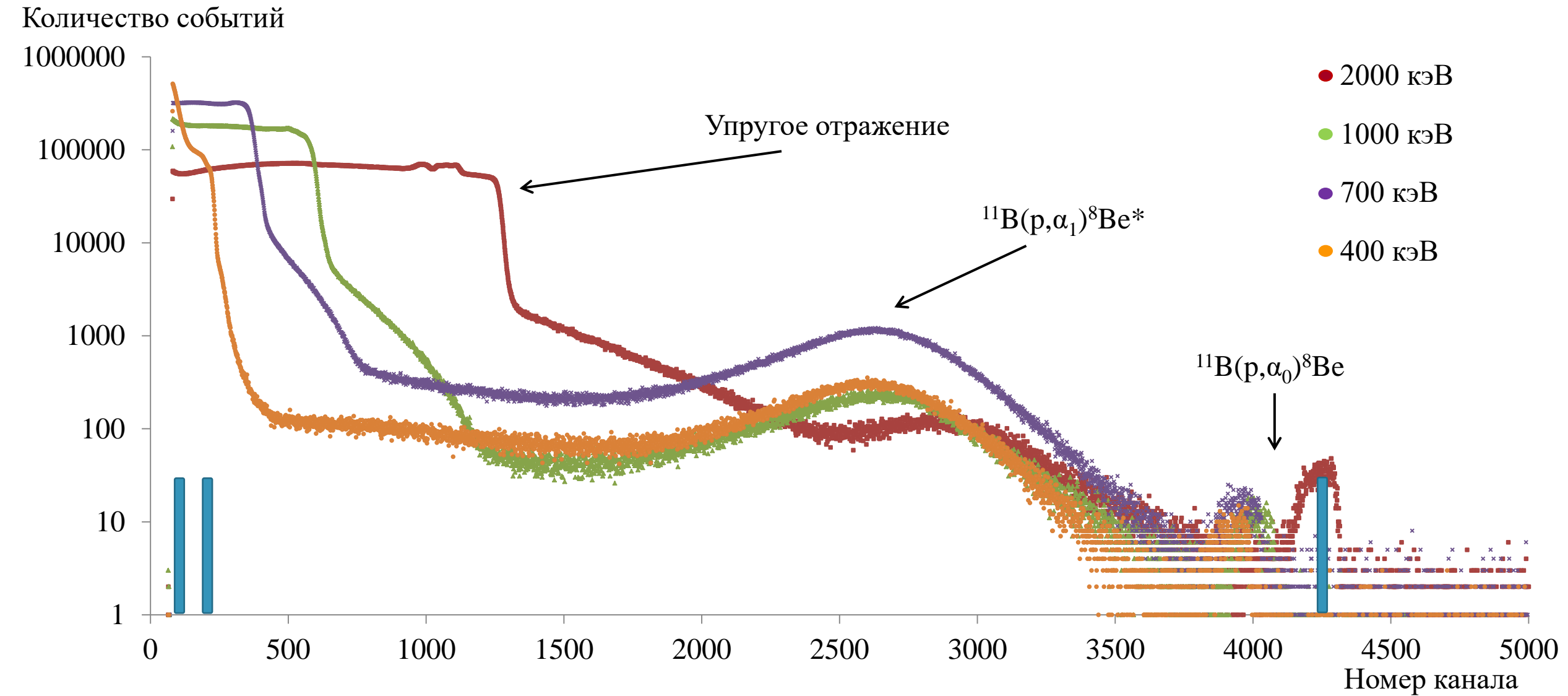


Рис.10 Спектры α -частиц и обратно отраженных протонов

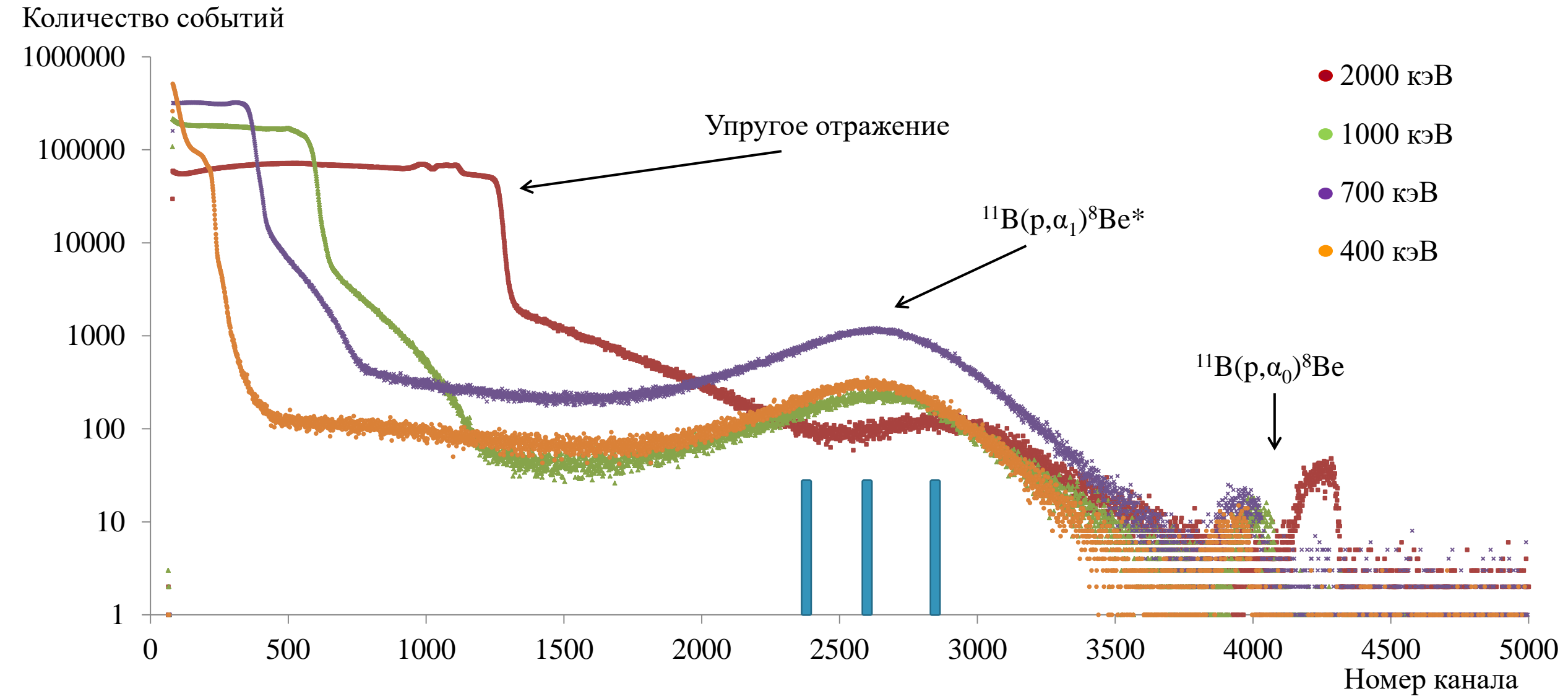


Рис.10 Спектры α -частиц и обратно отраженных протонов

Дифференциальное сечение, мб/ср

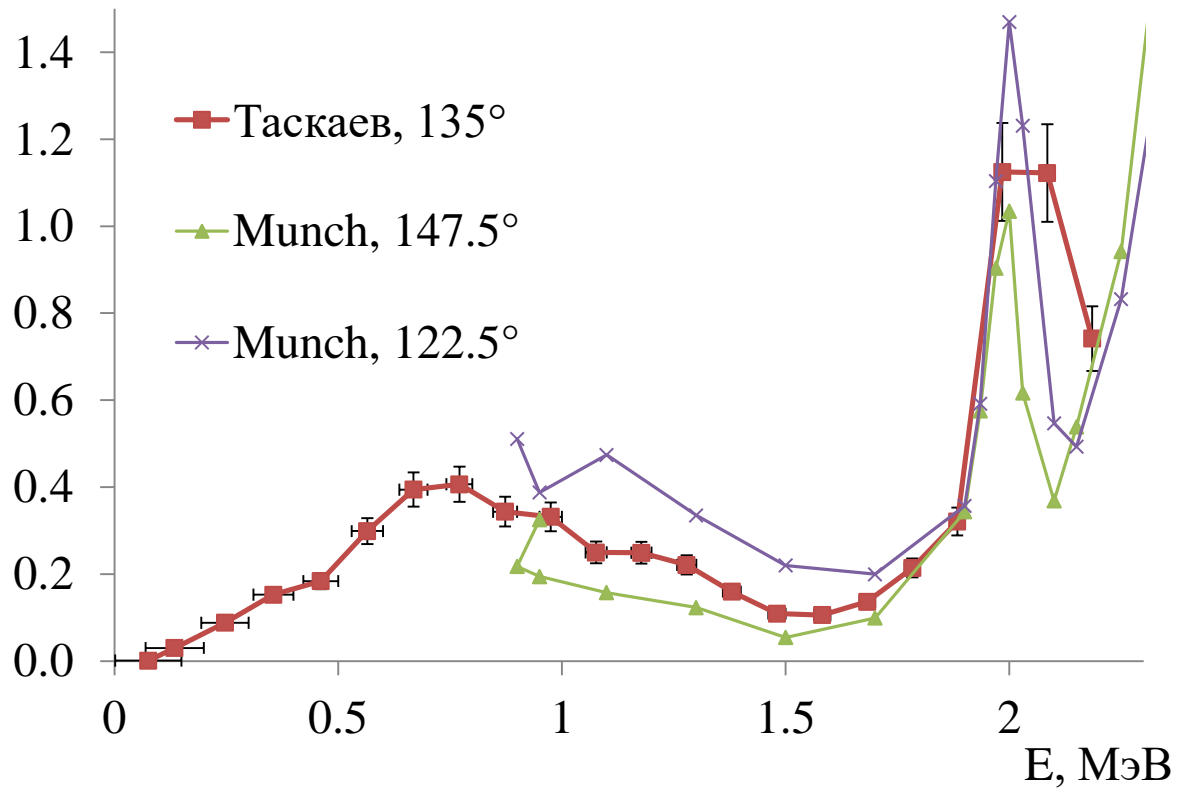


Рис.11 α_0 -канал реакции

Дифференциальное сечение, мб/ср

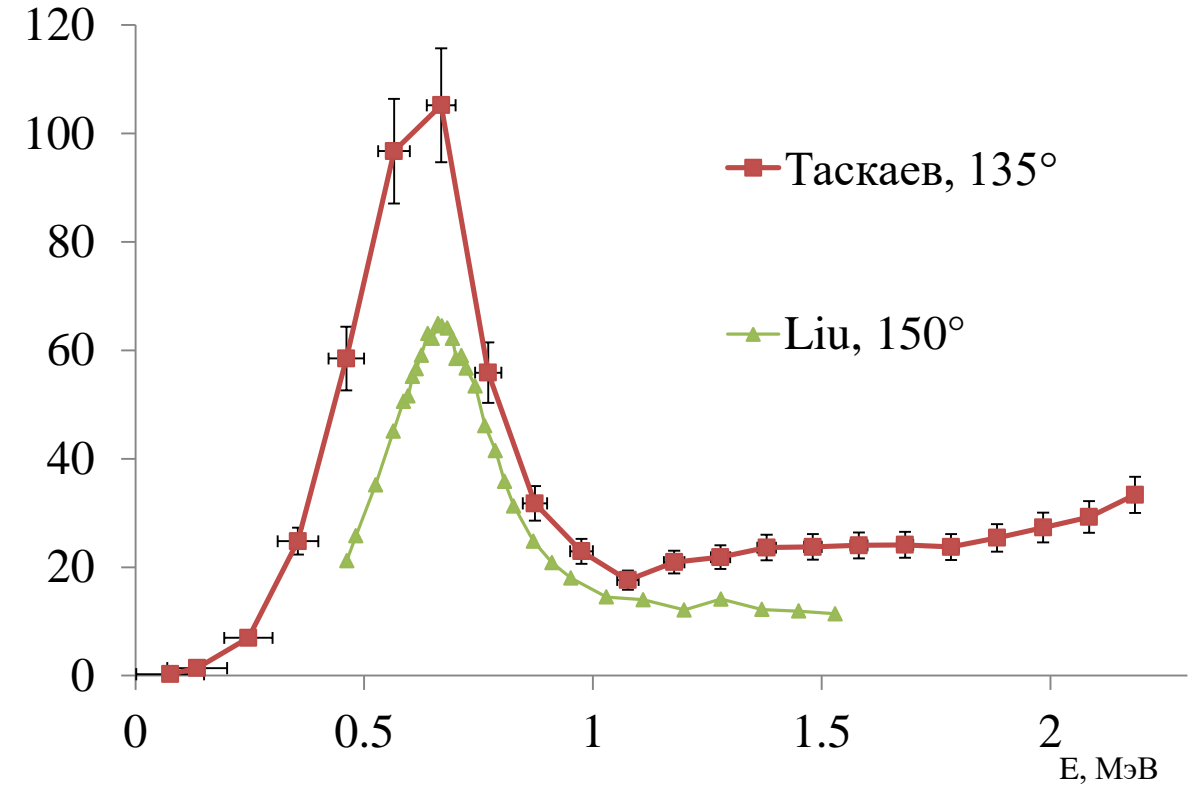


Рис.12 α_1 -канал реакции

Дифференциальное сечение, мб/ср

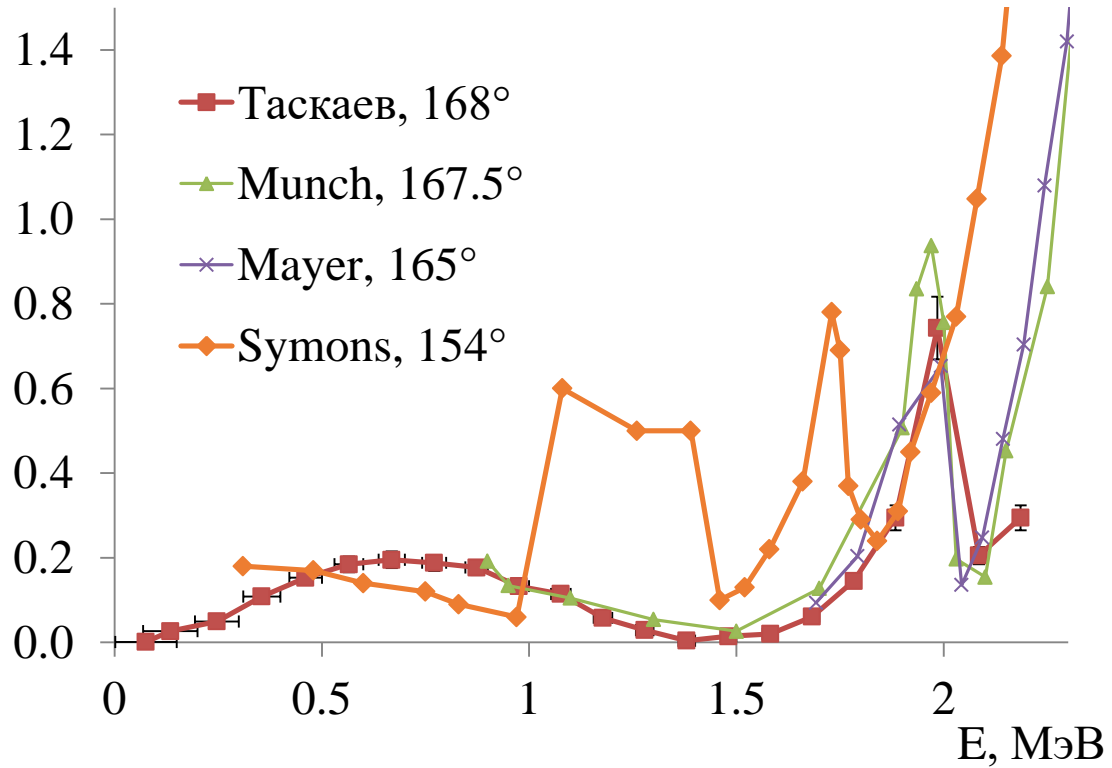


Рис.13 α_0 -канал реакции

Дифференциальное сечение, мб/ср

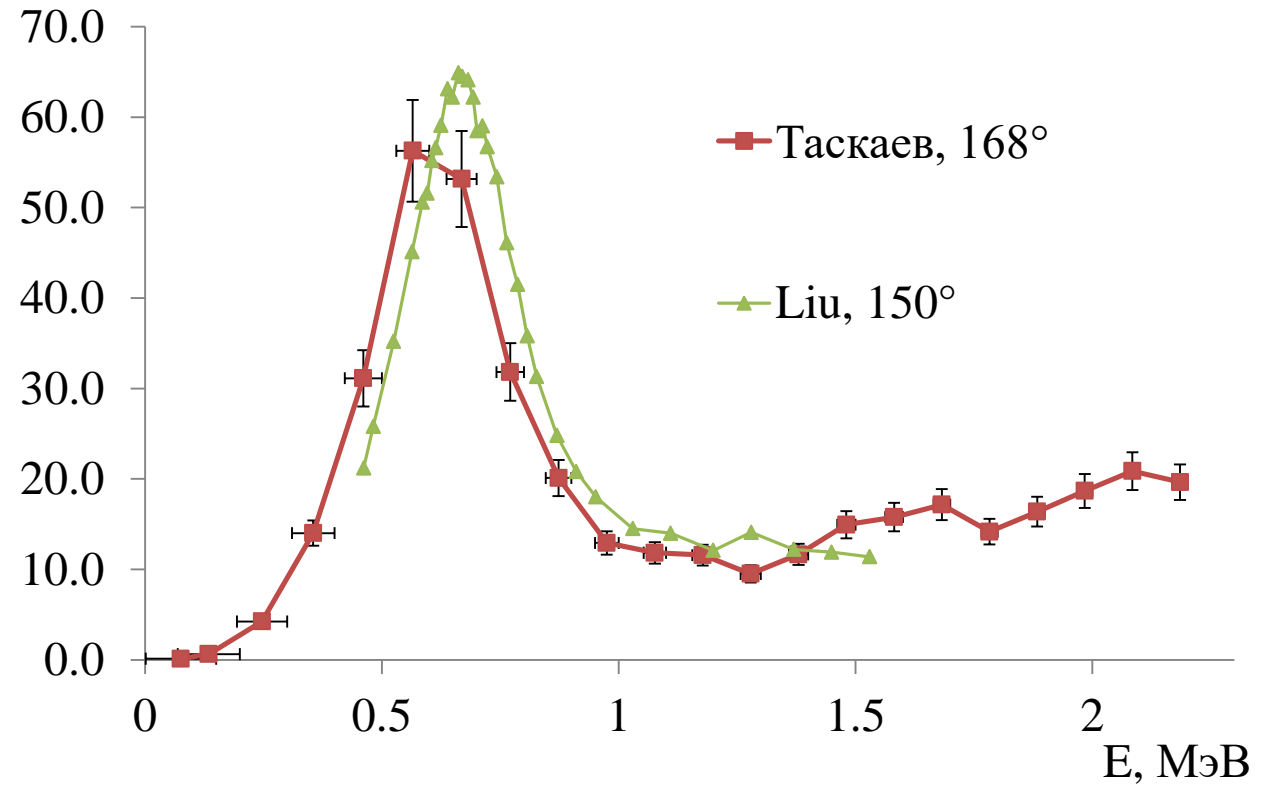
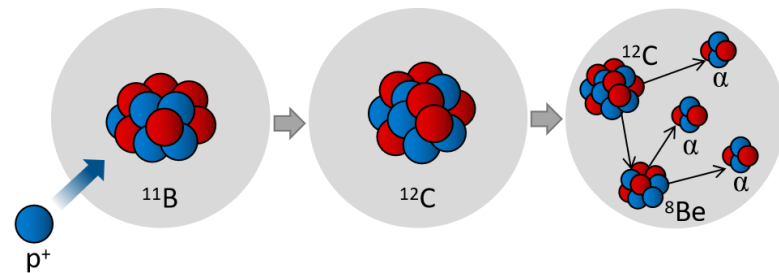


Рис.14 α_1 -канал реакции

Заключение



- ✓ Реакция $^{11}\text{B}(p, \alpha)\alpha$ имеет два канала: $^{11}\text{B}(p, \alpha_1)^8\text{Be}^*$ и $^{11}\text{B}(p, \alpha_0)^8\text{Be}$ с различными сечениями, что соотносится с современными представлениями
- ✓ Был установлен точный состав исследуемой мишени с помощью SIMNRA version 7.03
- ✓ Измерено дифференциальное сечение каждого канала под углами 135° и 168° при энергии протонов 0,15-2,2 МэВ

Исследование реакции $^{11}\text{B}(p,\alpha)\alpha$

Июль 2023

Вторая Всероссийская школа-семинар НЦФМ по Физике Высоких Энергий и Ускорительной Технике
Саров, Россия

Study of the reaction $^{11}\text{B}(p,\alpha)\alpha$ in the 0.3-2.15 MeV proton beam energy range

Сентябрь 2023

Russian Particle Accelerator Conference 2023
Новосибирск, Россия

Study of the reaction $^{11}\text{B}(p,\alpha)\alpha$ in the 0.3-2.15 MeV proton beam energy range

Ноябрь 2023

5th All-Russian School of Young Scientists on BNCT
Новосибирск, Россия

Исследование перспективной реакции $^{11}\text{B}(p,\alpha)\alpha$ для протонной терапии и других приложений

Октябрь 2023

Диплом за лучший доклад на постерной секции в категории «Бакалавры» II Международной научной конференции и V Международной молодёжной школы «Инновационные ядерно-физические методы высокотехнологичной медицины»
Москва, Россия

Исследование реакции $^{11}\text{B}(p,\alpha)\alpha$

Январь 2024

Диплом победителя Всероссийский студенческий физико-математический конкурс-школа им. И. Е. Тамма
Саров, Россия

Приложение 1. Толстая борсодержащая мишень

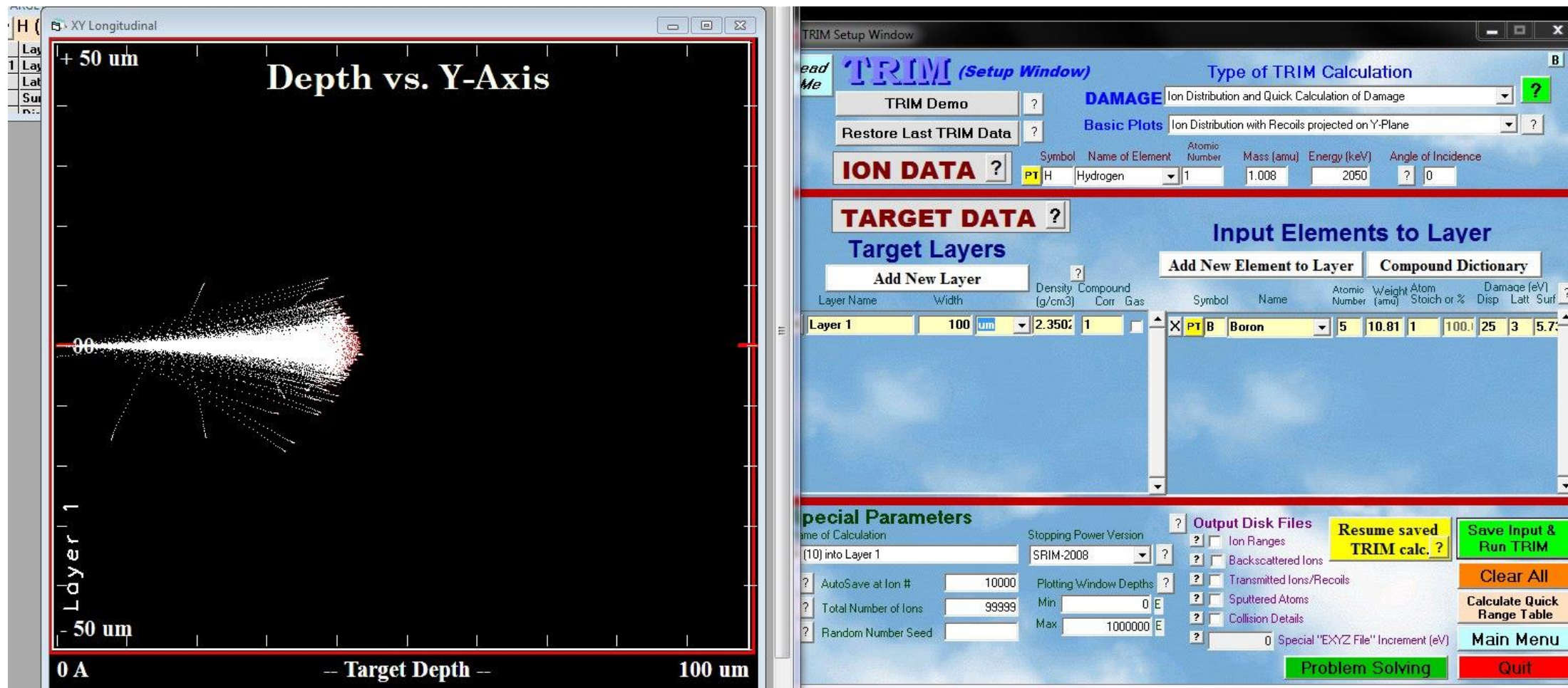


Рис.9 Результаты численного моделирования в программе SRIM-2013.00
Протоны с энергией 2050 кэВ тормозятся уже на 45 мкм

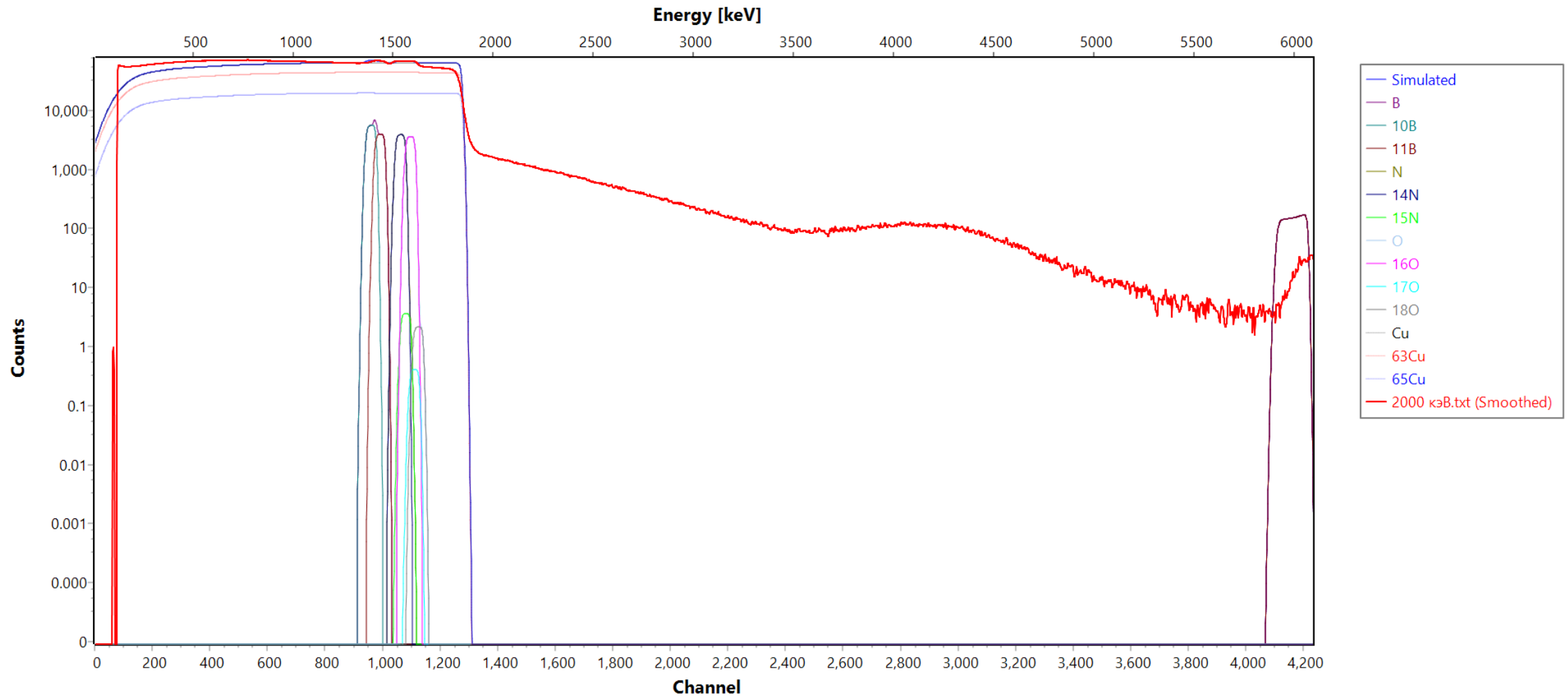
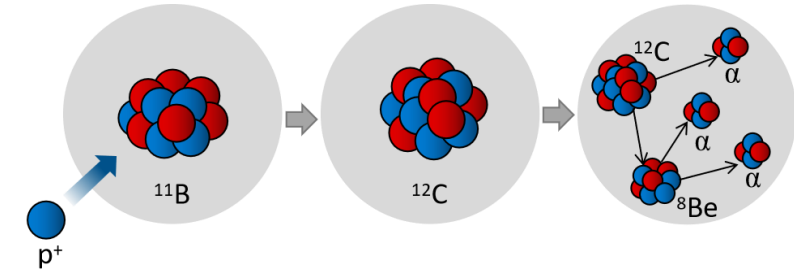
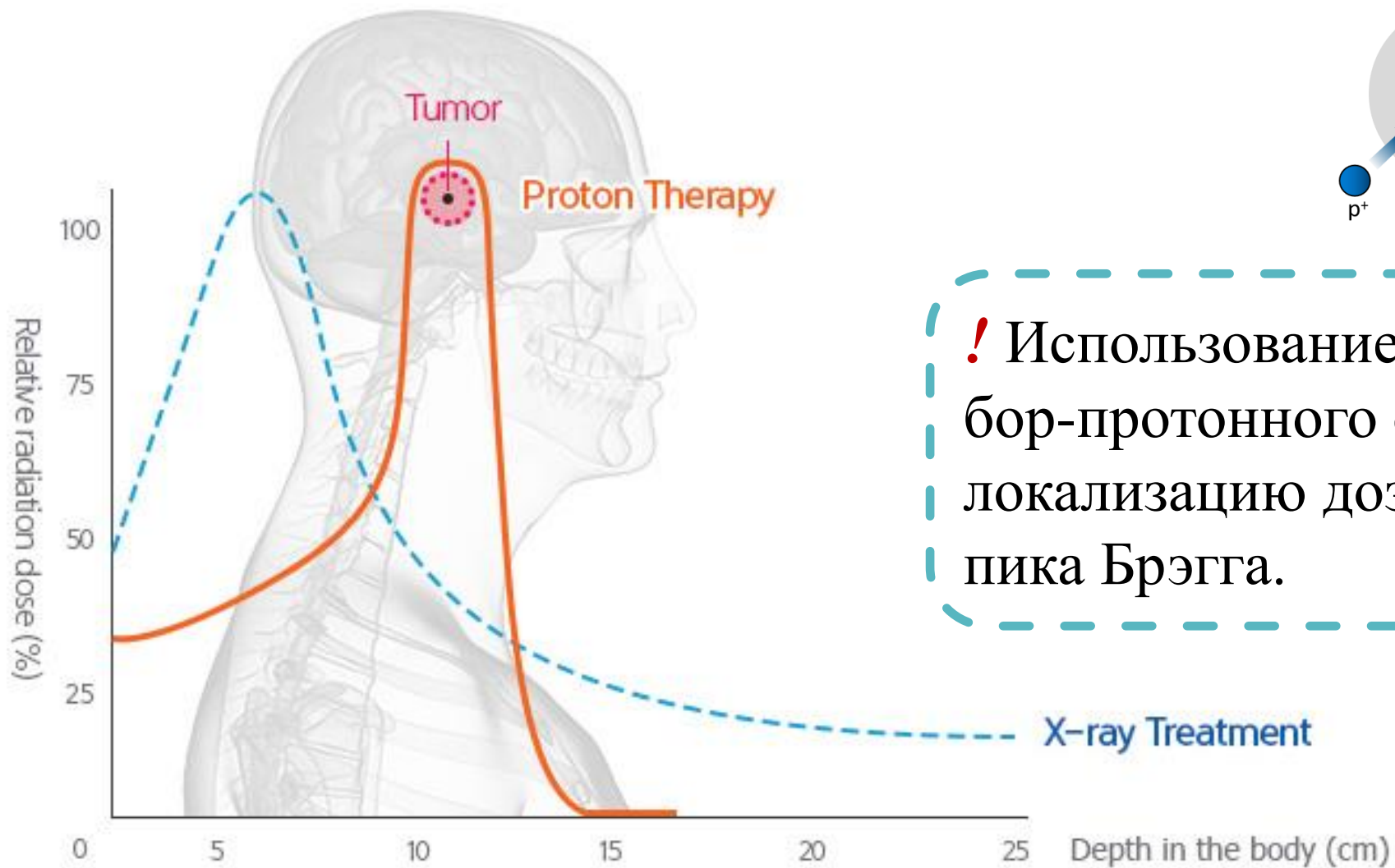
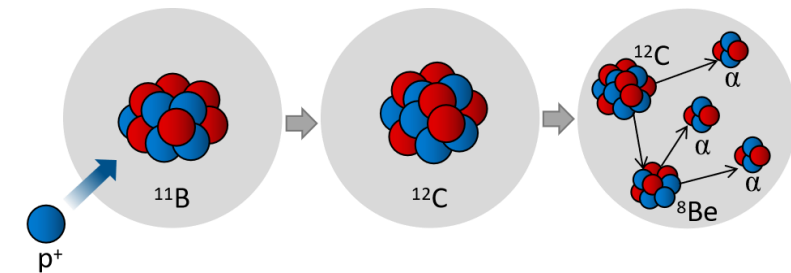
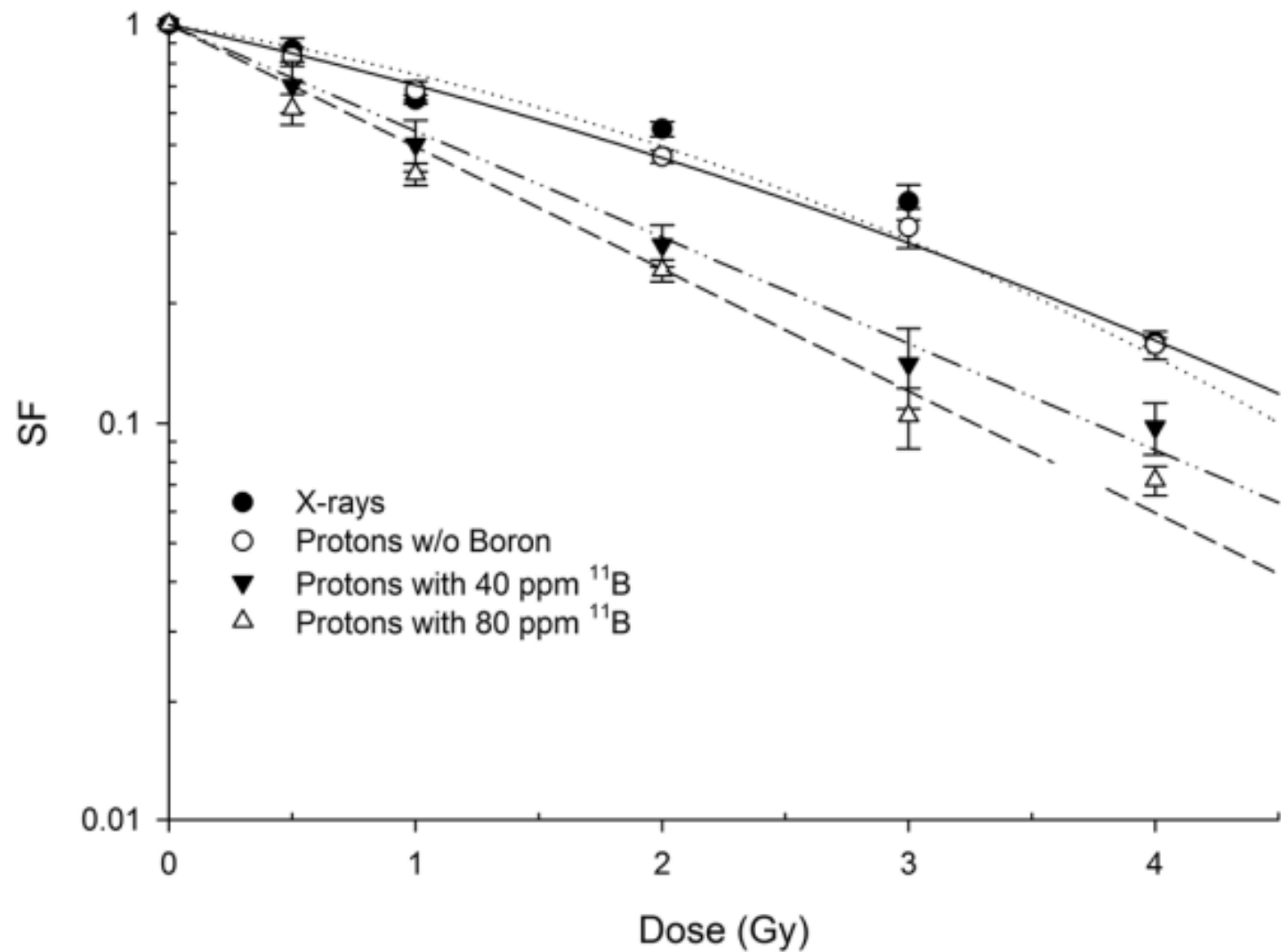


Рис.9 Результаты численного моделирования в программе SIMNRA при энергии протонов 1000 кэВ



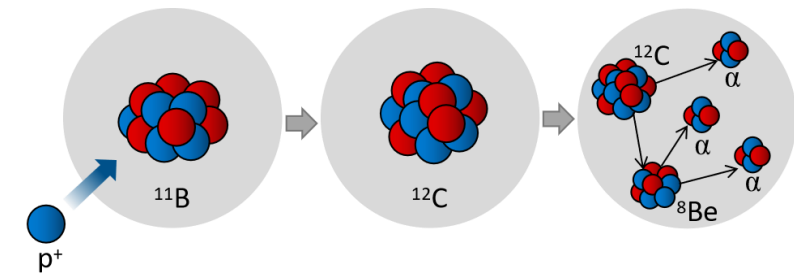
! Использование ядерной реакции бор-протонного синтеза улучшает локализацию дозы на глубине пика Брэгга.

Рис.2 Кривая глубины проникновения для протонной терапии в сравнении со стандартной лучевой терапией, пик Брэгга



Cirrone, G. et al. (2018). *First experimental proof of Proton Boron Capture Therapy (PBCT) to enhance protontherapy effectiveness. Scientific Reports, 8(1)*

Рис.3 Кривая выживаемости раковых клеток для протонной терапии с использованием бора в сравнении со стандартной лучевой терапией



○ Мировые запасы бора > 1 млрд тонн



○ Энергия от 1 гр смеси «водород+бор» ≈ энергии от сгорания 3 тонн угля



○ Обеспечение мирового потребления энергии на 1 млн лет



○ Отсутствие радиации при производстве энергии



○ «Безнейтронная» ядерная реакция



○ Альфа-частицы имеют положительный заряд – прямое производство электричества



