

Деление ядер протонами промежуточных энергий

В. Г. Вовченко

Отчет о ходе выполнения Проекта

Декабрь 2006г.

Мотивация

- Прикладные задачи: создание управляемых ускорителями реакторов (ADS), трансмутация ядерных отходов.
- Информация о свойствах высоковозбуждённых ядер.
 - Имеющиеся данные по сечениям деления ядер протонами с энергией выше 200 МэВ имеют значительный разброс (^{238}U) или отсутствуют (^{233}U , ^{239}Pu).

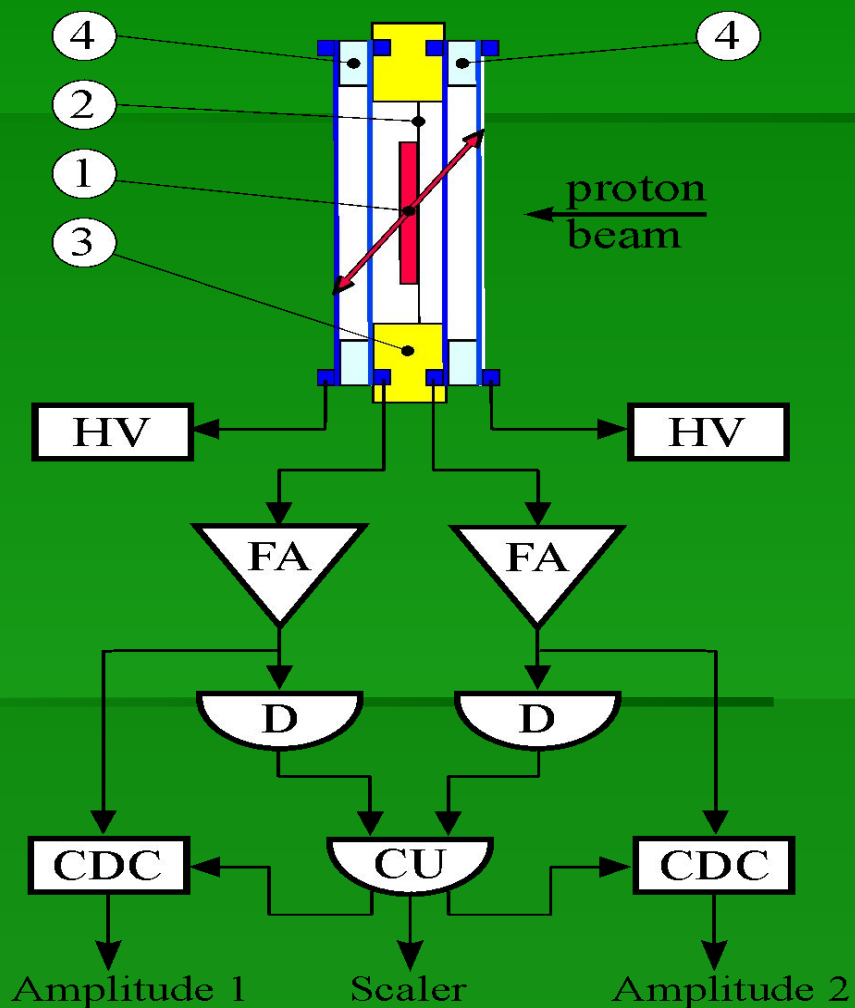
Основные задачи

- Разработка методики выделения событий деления ядер
- Создание пучков протонов переменной энергии
- Мониторирование пучков протонов в широком диапазоне интенсивности пучка
- Точное измерение толщины мишеней

Метод

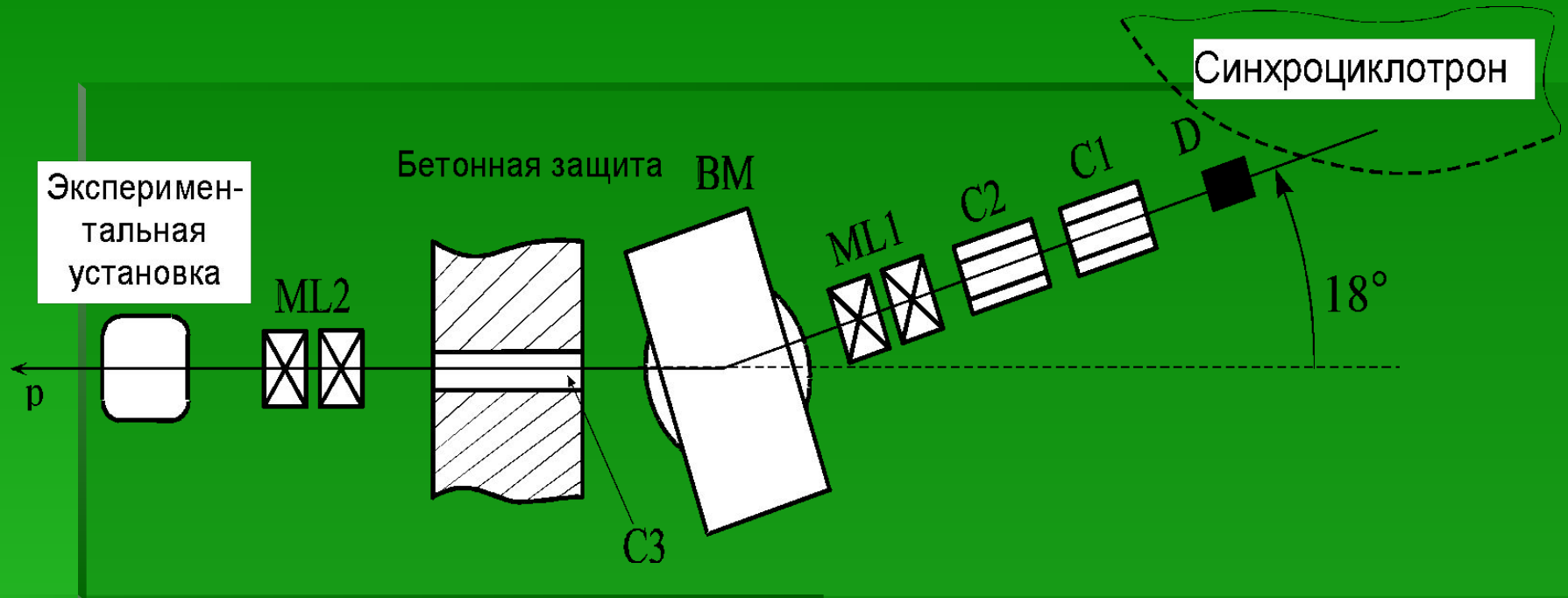
- Регистрация двух массивных осколков деления в совпадении.
- Максимально точное определение потока протонов
- Критерии отбора: 1) порог регистрации, 2) амплитудный анализ, 3) совпадения.

Схема регистрации делительных событий.



- 1. мишень;
- 2. подложка;
- 3. крепление мишени;
- 4. ППЛС;
- HV- источник высокого напряжения;
- FA- предусилитель;
- D- формирователь;
- CDC - преобразователь заряд-код;
- CU - схема совпадений.

Схема эксперимента



- D - медный поглотитель, BM - отклоняющий магнит, C1, C2 и C3 – коллиматоры, ML1, ML2 – дублеты квадрупольных линз

Характеристики протонного пучка

Интенсивность протонного пучка переменной энергии
(интенсивность пучка с $E_p=1000$ МэВ равна $3 \times 10^{12} \text{ с}^{-1}$)

E МэВ	P МэВ/с	Интенсивность пучка протонов, с^{-1}		
		1 дублет	2 дублета - А	2 дублета - Б
207	657	1.84 E7	4.02 E7	6.36 E7
301	810	4.62 E7	2.07 E8	2.49 E8
404	960	9.69 E7	2.37 E9	7.50 E8
505	1097	2.07 E8	9.03 E9	2.11 E9
612	1234	2.58 E8	3.09 E10	5.46 E9
702	1345	6.72 E8		1.41 E10
802	1466	1.00 E9		4.26 E10
899	1580	2.13 E9		1.77 E11

Протонная терапия

Цель:

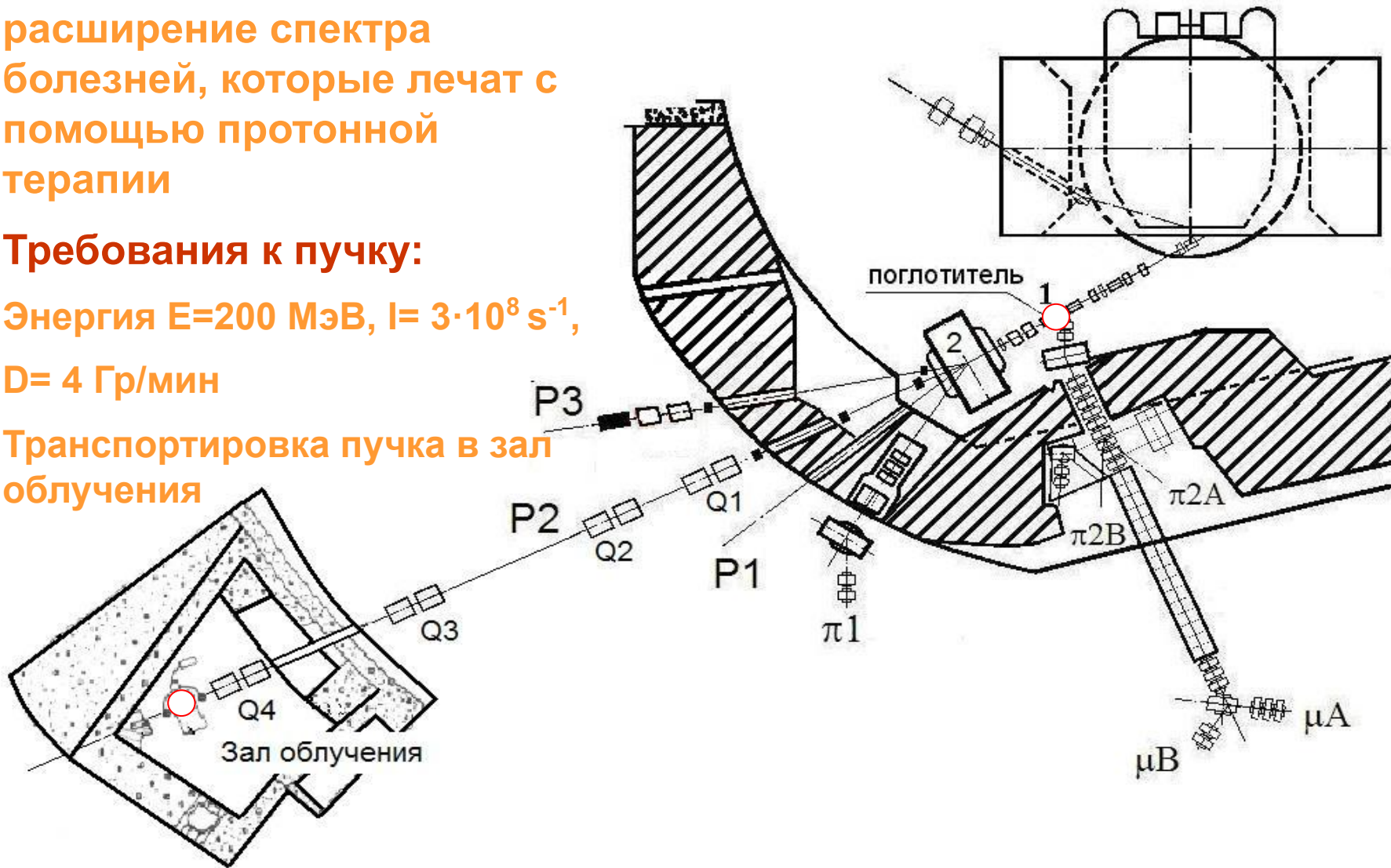
расширение спектра
болезней, которые лечат с
помощью протонной
терапии

Требования к пучку:

Энергия $E=200$ МэВ, $I= 3 \cdot 10^8$ s⁻¹,

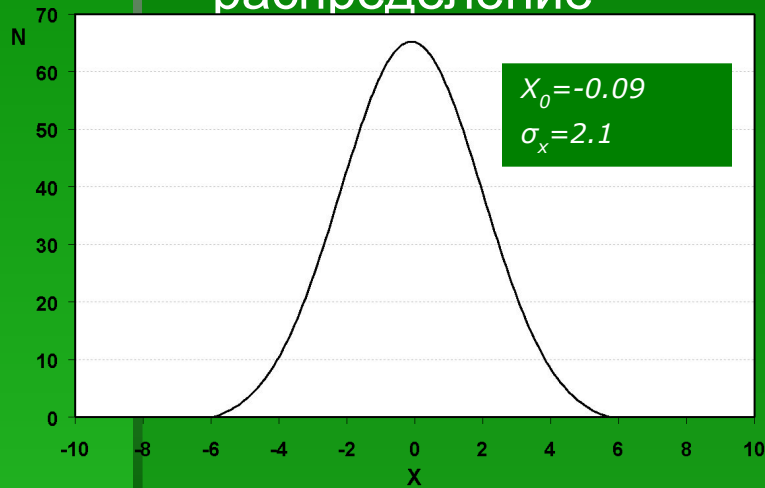
$D= 4$ Гр/мин

Транспортировка пучка в зал
облучения

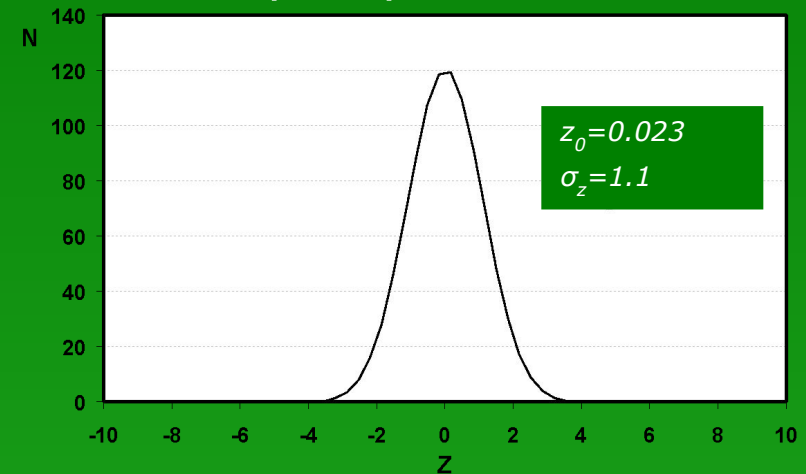


Параметры пучка **200** МэВ в зале облучения (Монте-Карло моделирование)

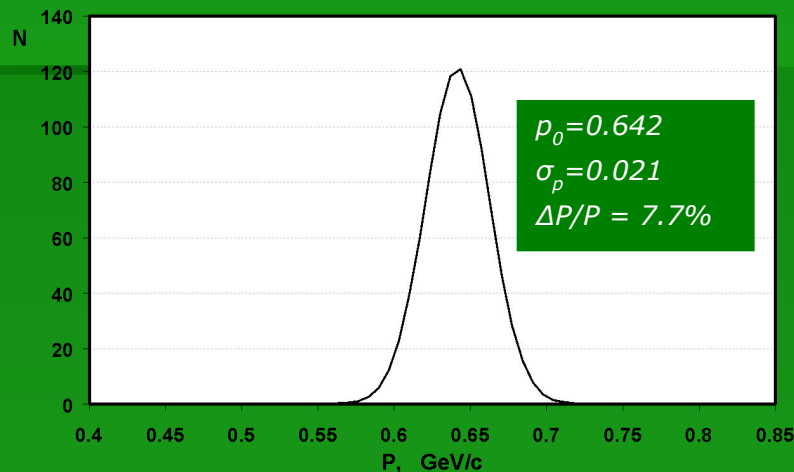
X-
распределение



Z-
распределение

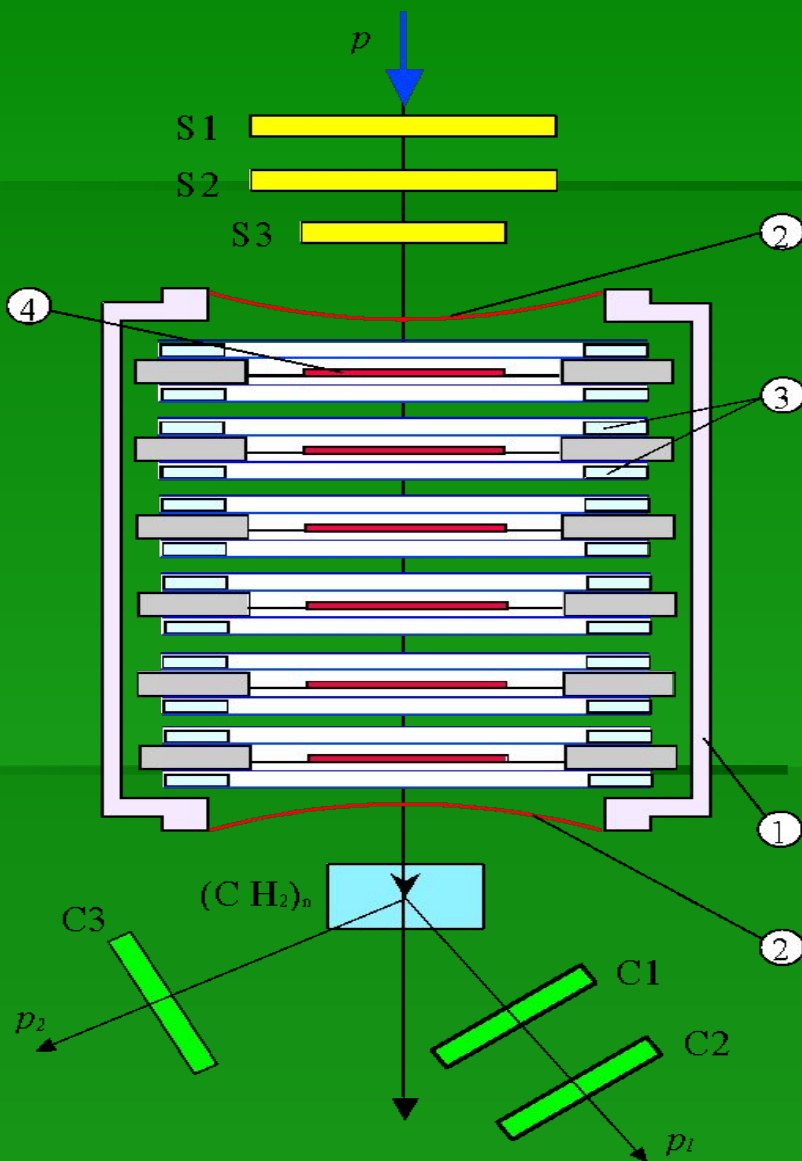


P-
распределение



$I = 8 \cdot 10^8$ p/сек
 $p_0 = 643$ Mev/c
 $\sigma/p_0 = 3.5$ %
Поглощенная доза
 $D = 12.6$ Гр/мин

Схема экспериментальной установки

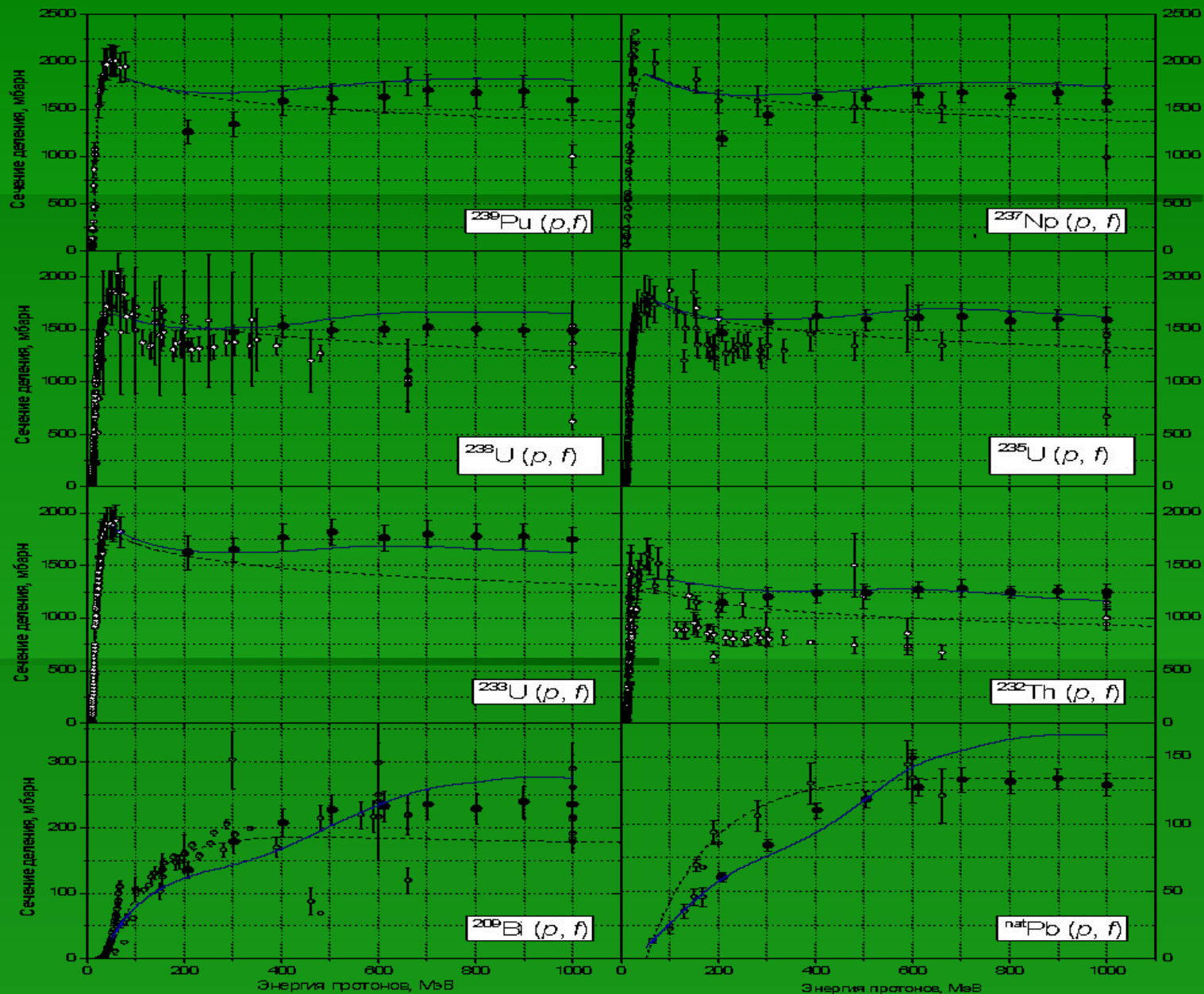


- 1 – камера, наполненная гептаном;
- 2 – входное окно;
- 3 – ППЛС;
- 4 – мишень;
- S1-S3, C1-C3 – сцинтилляционные счетчики

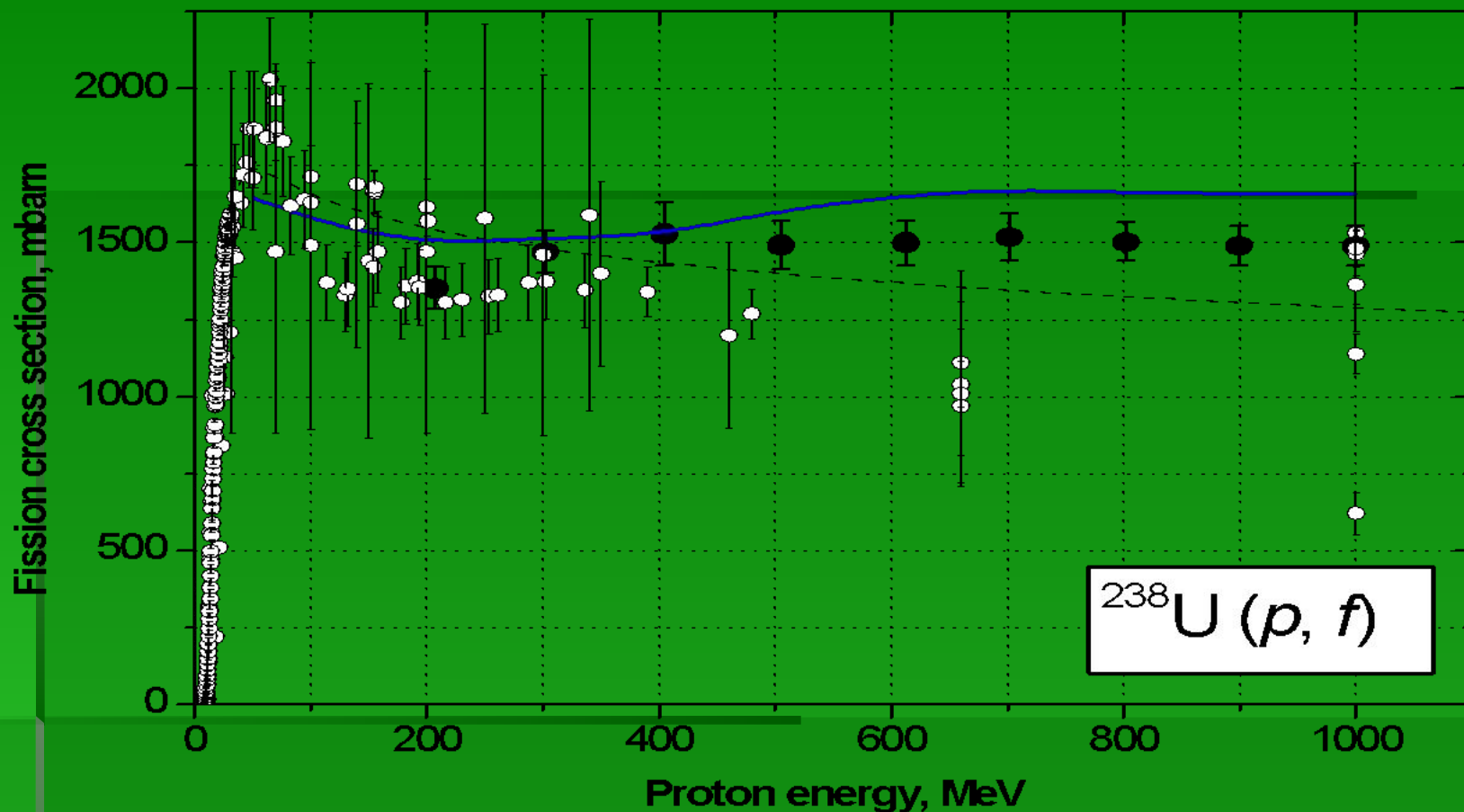
Сечения деления ядер (мб)

Энергия МэВ	^{239}Pu	^{237}Np	^{238}U	^{235}U
207	1260±126	1187± 81	1352± 68	1464±83
302	1339±134	1438± 98	1470± 68	1562±94
404	1585±158	1624± 88	1527±104	1626±138
505	1613±161	1607± 98	1491± 78	1592±102
612	1628±163	1647±100	1499± 72	1610±124
702	1700±170	1674±102	1518± 76	1620±131
802	1672±167	1629± 88	1503± 63	1571±90
899	1688±168	1673±114	1490± 63	1592±96
1000	1592±159	1568± 96	1489± 64	1591±113
Энергия МэВ	^{233}U	^{232}Th	^{209}Bi	ест Pb
207	1625±162	1144±90	136±13	60,5±3,5
302	1651±115	1200±91	178±17	84±4,5
404	1767±124	1236±91	207±21	110±6
505	1818±123	1239±61	227±23	118,5±6
612	1763±123	1268±80	233±23	127±6,5
702	1798±126	1285±81	235±23	132,5±9,5
802	1778±124	1247±54	229±23	131±8,5
899	1779±122	1252±58	239±24	133,5±7,5
1000	1745±122	1245±85	235±23	129±8,5

Энергетическая зависимость сечений деления

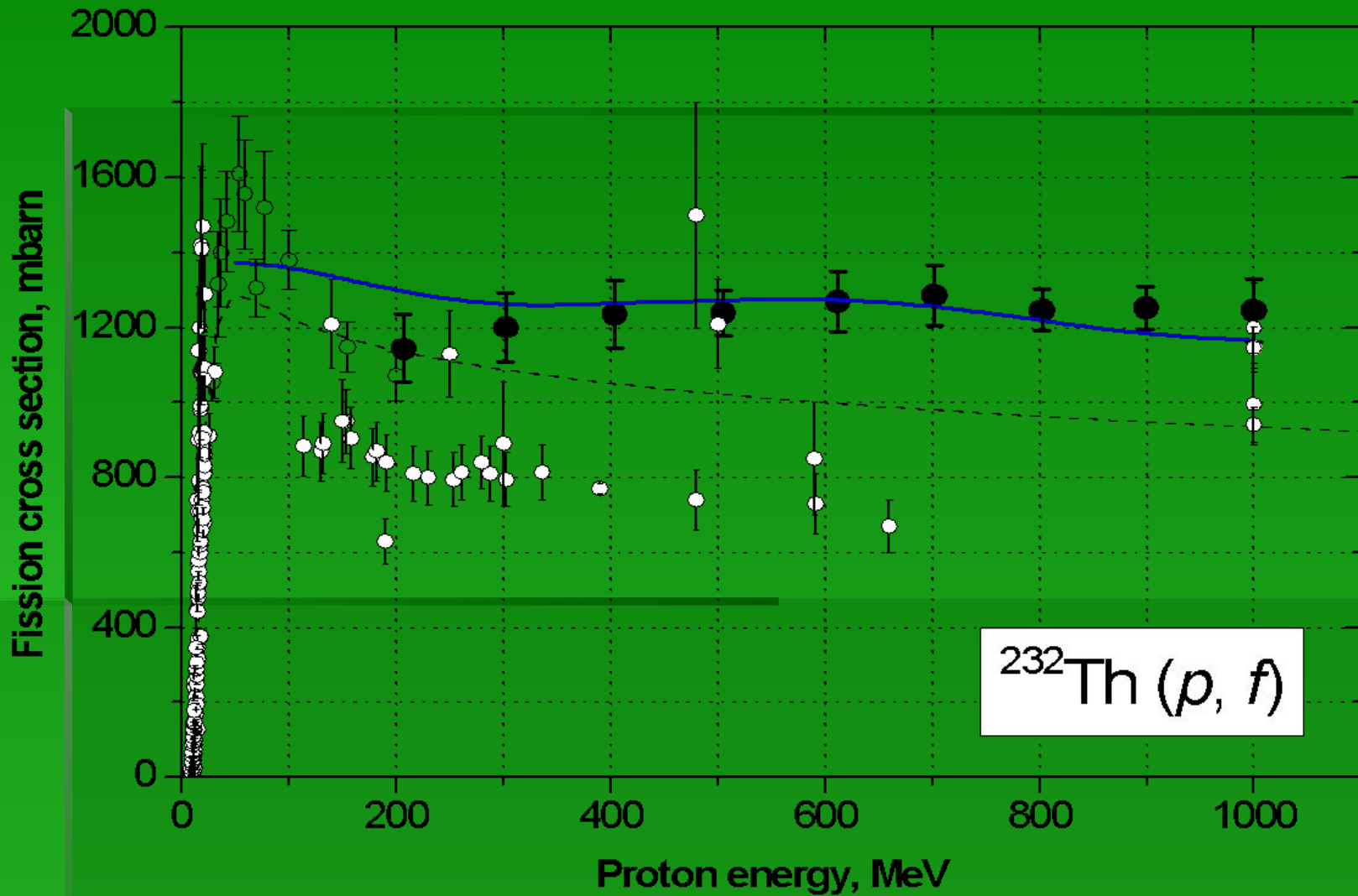


Энергетическая зависимость сечений деления ^{238}U

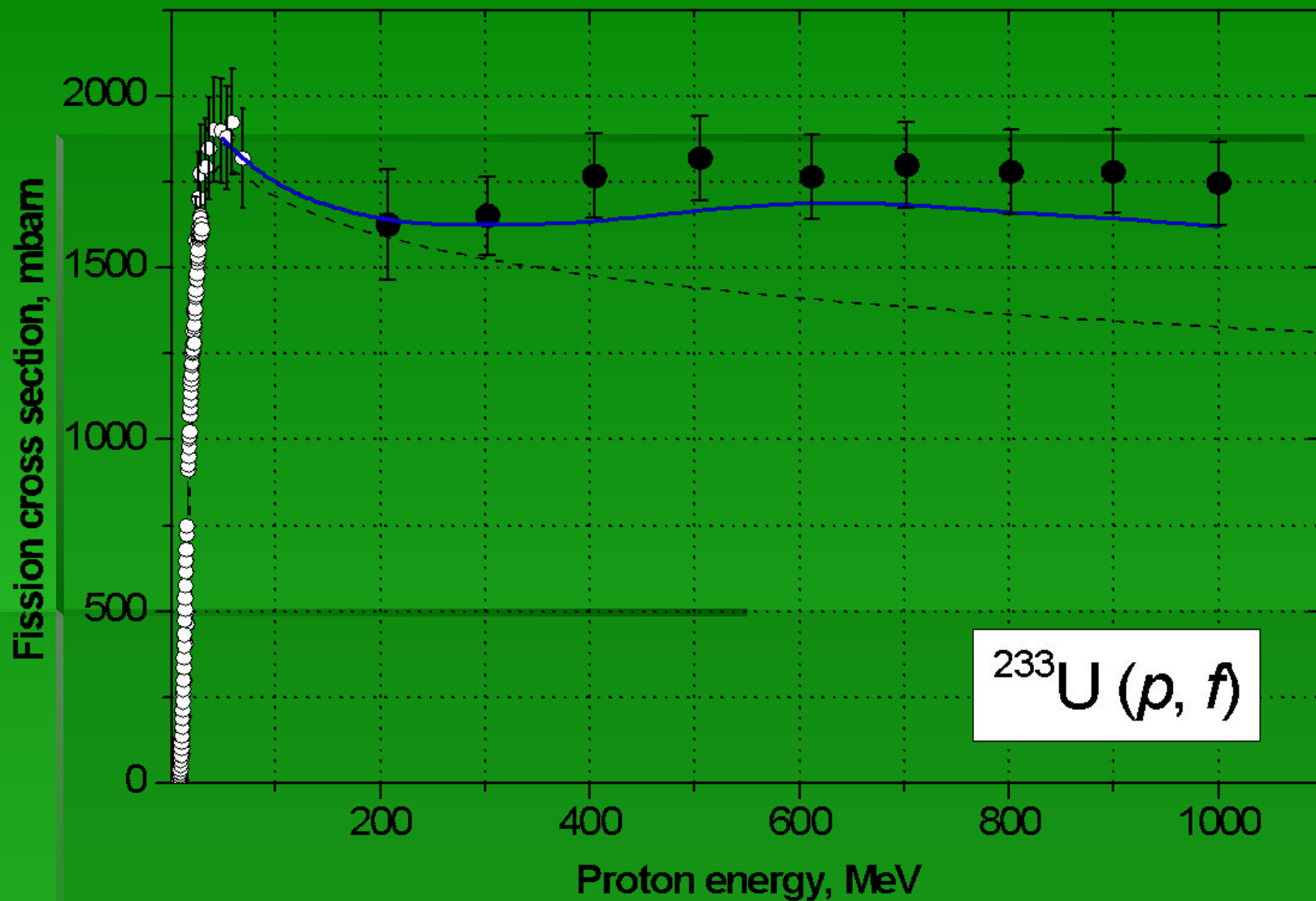


- Черные кружки - наши данные, белые кружки - данные других работ, пунктирная кривая - параметризация работы [2], сплошная кривая - результат расчета в рамках каскадно-испарительной модели

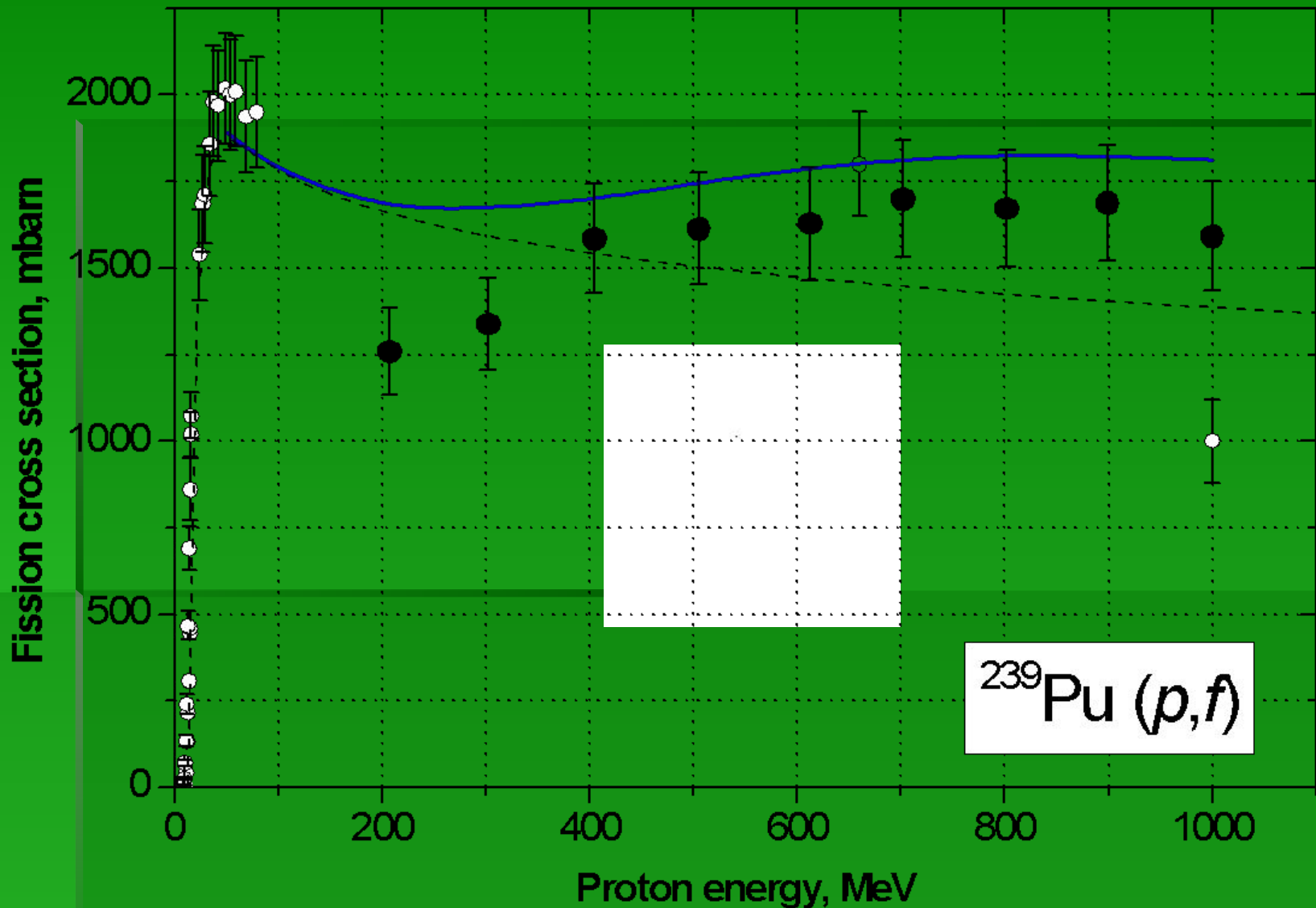
Энергетическая зависимость сечений деления ^{232}Th



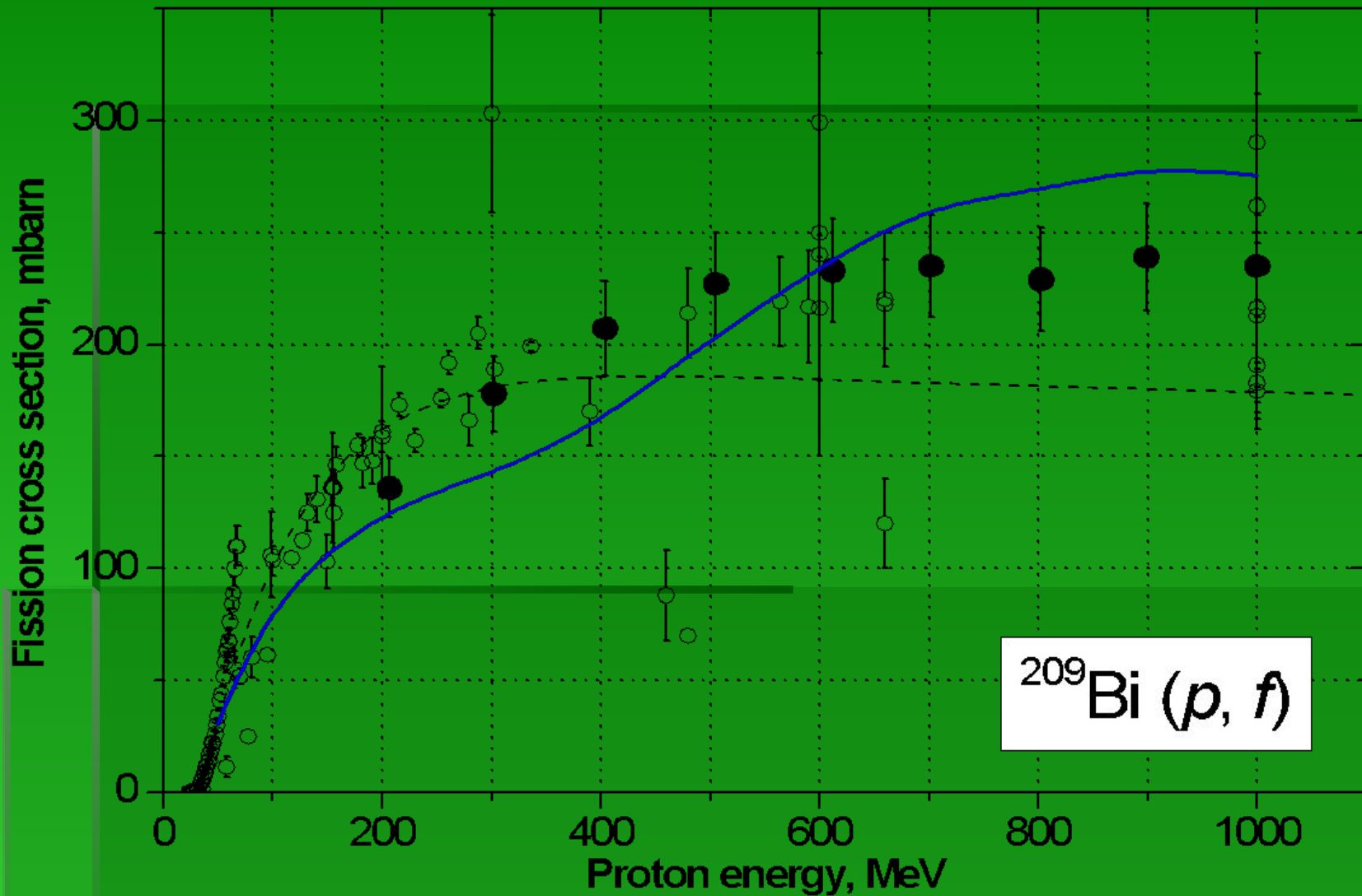
Энергетическая зависимость сечений деления ^{233}U



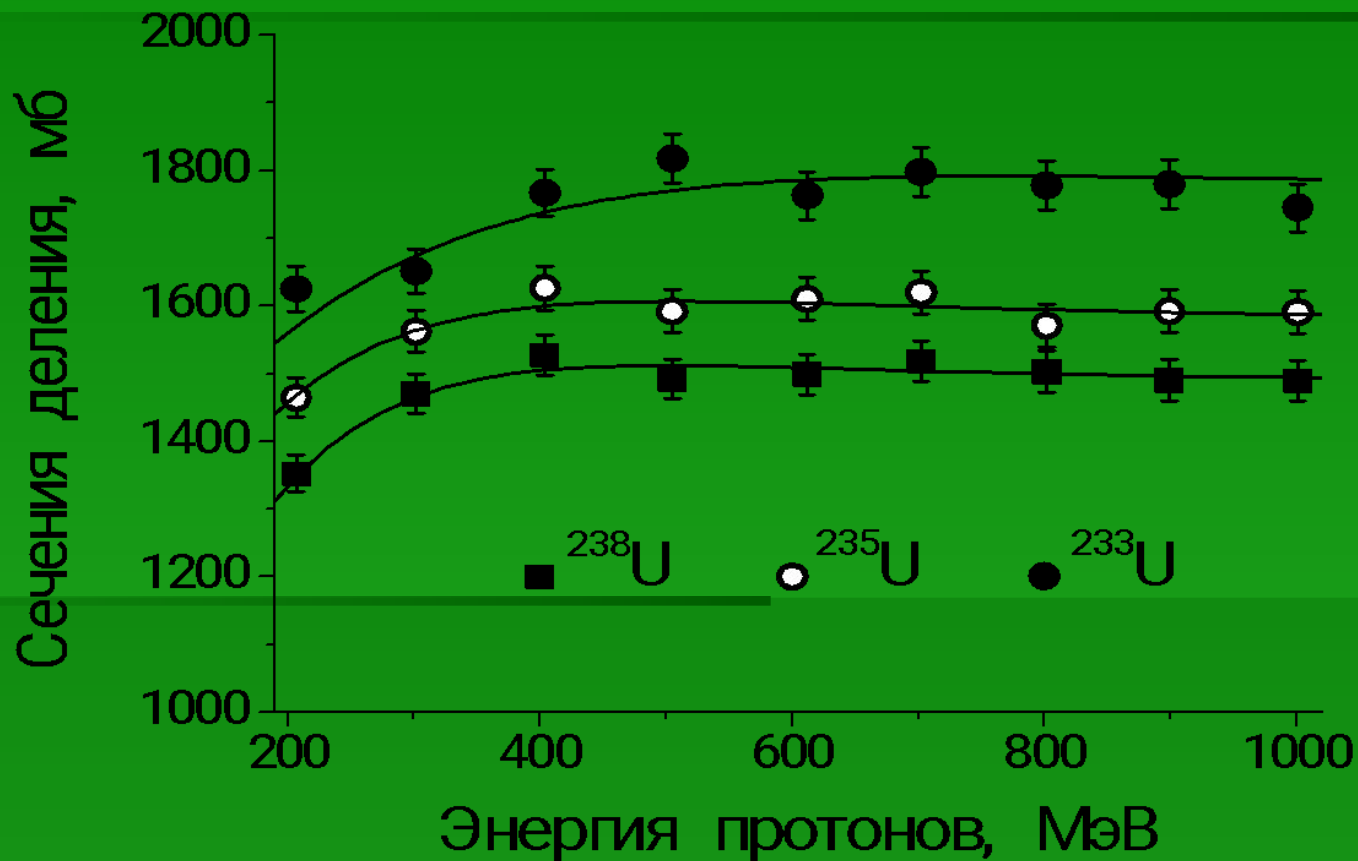
Энергетическая зависимость сечений деления ^{239}Pu



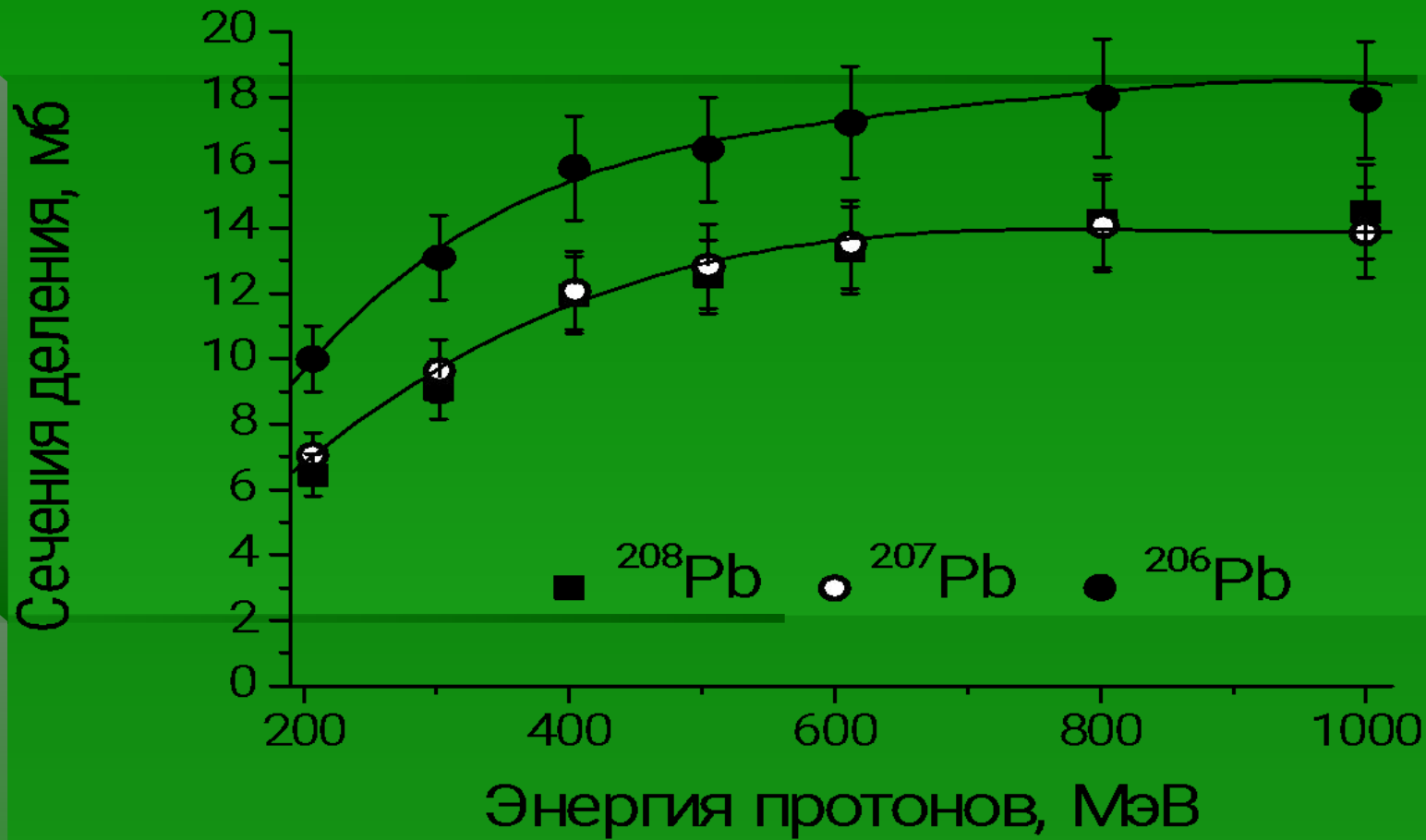
Энергетическая зависимость сечений деления ^{209}Bi



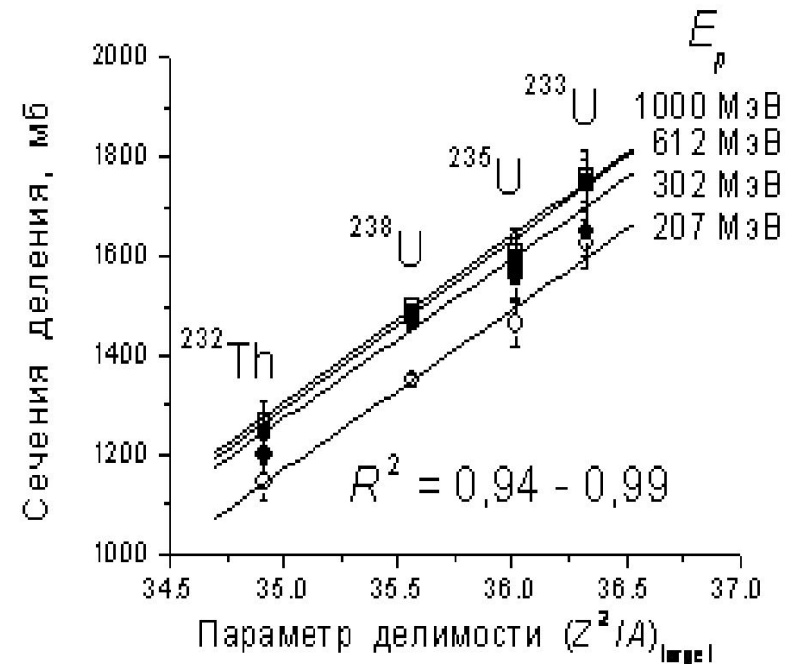
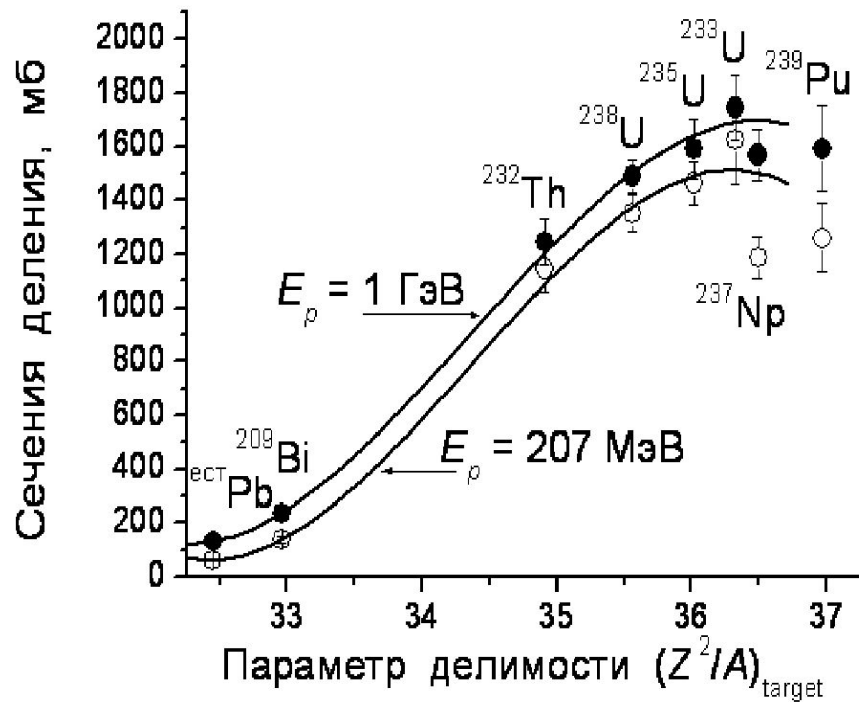
Энергетическая зависимость сечений деления изотопов урана



Энергетическая зависимость сечений деления изотопов свинца



Зависимость сечений от параметра делимости



РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОЕКТА

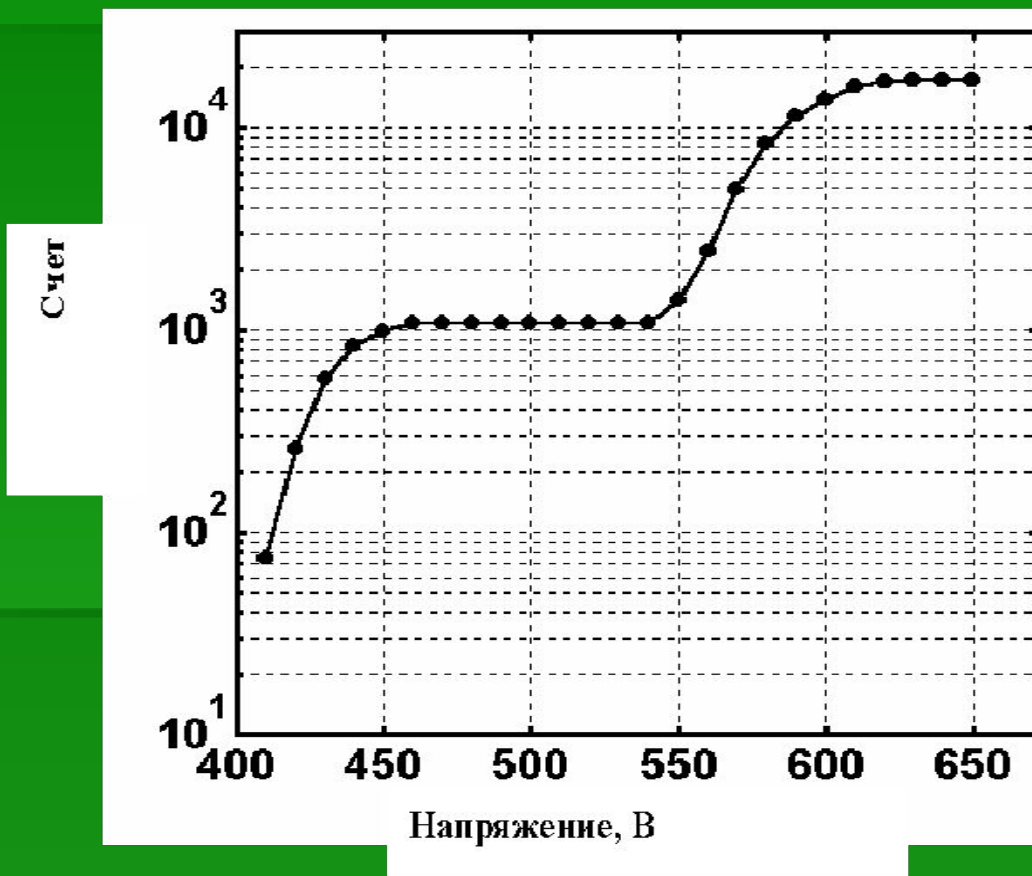
- Впервые единой методикой измерены энергетические зависимости полных сечений деления ядер: ^{239}Pu , ^{237}Np , $^{238,235,233}\text{U}$, ^{232}Th , ^{209}Bi и Свинца протонами в диапазоне энергий 200–1000 МэВ с шагом 100 МэВ.
- Расчеты, выполненные в рамках каскадно-испарительной модели с использованием единого для всех ядер набора параметров, позволяют удовлетворительно воспроизвести энергетические зависимости полных сечений деления ядер-актинидов в измеренном диапазоне энергий.
- Сечения деления для изотопов урана во всем диапазоне энергий демонстрируют рост сечений при переходе от ядра ^{238}U к более легким изотопам. Подобная зависимость характерна и для изотопов свинца.
- Полные сечения деления ядер в области насыщения (400–1000 МэВ) являются растущей функцией параметра Z^2/A мишени только до ядра ^{233}U , в то время как сечения деления ядер ^{237}Np и ^{239}Pu примерно равны сечению деления ядра ^{235}U .
- На синхроциклотроне ПИЯФ создан пучок протонов переменной энергии от 200 до 1000 МэВ, который может использоваться в целях:
 - 1) прецизионные измерения ядерных констант;
 - 2) изучение зависимости от энергии радиационных дефектов в полупроводниковых приборах и других материалах, применяемых в аэрокосмических аппаратах и ядерных технологиях;
 - 3) лечение больных методикой протонной терапии.

Участники Проекта

■ ПИЯФ РАН

- Группа нуклон – ядерных взаимодействий: В.Г. Вовченко, В.В.Поляков, Г.Е.Солякин, О.Я.Федоров, Ю.А. Честнов, А.В.Шведчиков
- Лаборатория мезоатомов: А.А.Котов, Л.А.Вайшнене, Ю. А.Гавриков, А.И.Щетковский
- Ускорительный отдел: Г.А.Рябов, Н.К.Абросимов, Е.М. Иванов
- Лаборатория радиационной физики: М.Г.Тверской

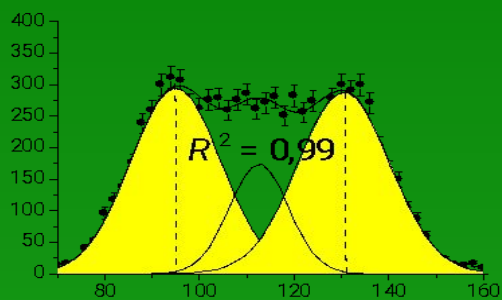
Зависимость эффективности регистрации ППЛС осколков деления и альфа-частиц от приложенного напряжения



Кластерное деление

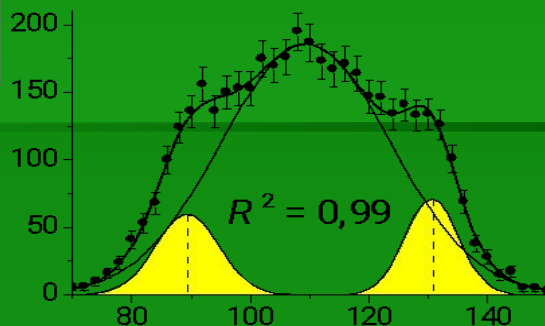
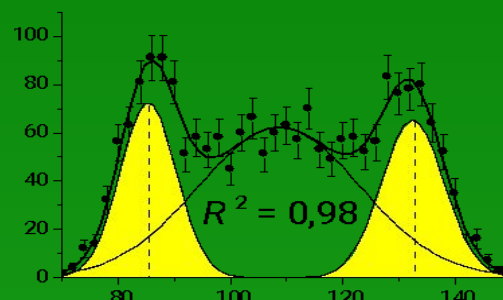
Число осколков

^{238}U

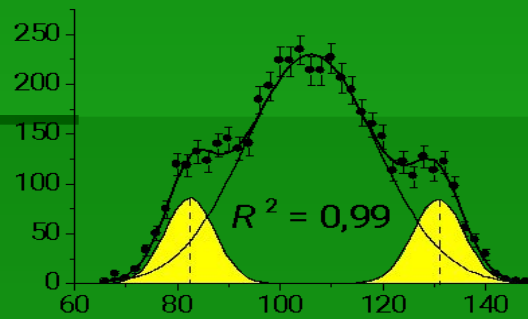


Число осколков

^{232}Th



Масса осколка, а.е.м.



Масса осколка, а.е.м.