

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНС И ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР (Ч. 2)

■ О.Я.Фёдоров

ПЛАН ИЗЛОЖЕНИЯ

1. Введение (вступление, характерные особенности бинарного деления (массовое распределение, её динамика, энергетическая зависимость сечения деления), о последовательности изложения).

2. Анализ энергетического баланса деления (метод, распределения, сравнение с экс. данными, выводы).

3. Связь анализа с особенностью объединения нуклонов в ядре.

4. Заключение.

Глава 1. Введение

Деление ядер исследуется более 70 лет. Несмотря на то, что оно нашло практическое применение как источник энергии, что этой теме посвящено большое число экспериментальных и теоретических работ, ряд характерных особенностей явления остаются не до конца понятыми: массовая асимметрия осколков, её динамика в связи с увеличением энергии возбуждения, зарядовое распределение осколков. В своём обзоре А.И.Обухов отметил: “Природа асимметричного деления актинированных ядер при низких энергиях возбуждения является одной из загадок со времён открытия деления ядер”.

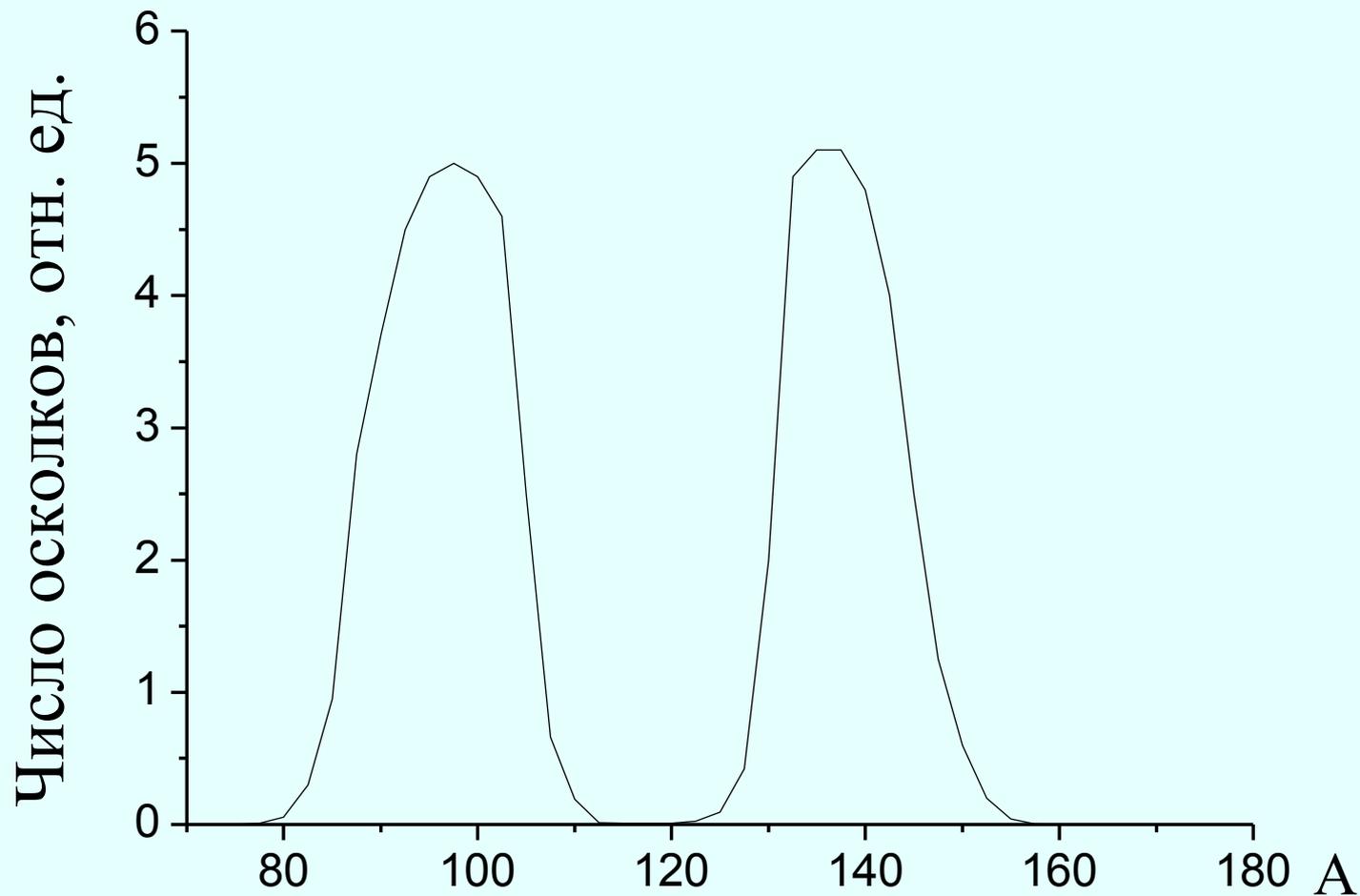
1.1

- В некотором смысле исследование деления ядер сводится к изучению нуклонного состава осколков и явлений, связанных с ним.
- Массы ядер отражают “природу” или свойства ядерных сил.
- Уместен вопрос, какой нуклонный состав осколков предпочитает “природа”.
- В предлагаемой работе ответ на вопрос следует из анализа энергетического баланса деления ядер урана в связи с экспериментальными данными по делению.

1.2. Характерные особенности сп. деления

- Уран ^{238}U .
- 1. Массовая асимметрия осколков, близка к значению $3/2$.
- 2. Массовое распределение осколков характеризуется четким провалом вблизи значений масс, равных половине массы делящегося ядра.
- 3. Энергетическая зависимость массового распределения: заполнение провала.
- 4. Плато в энерг. зависимости делимости (м.б.).

1.3. Массовое распределение осколков деления



1.4. Последовательность изложения

- В главе 2, в основном, для ядра ^{238}U описывается анализ, представляются его результаты в форме распределения числа осколков, сравниваются особенности распределений с особенностями спонтанного и вынужденного деления, делаются выводы.
- В главе 3 рассмотрена связь выполненного анализа с особенностью объединения нуклонов в ядре.
- В главе 4 даны общие выводы.

Глава 2. Анализ энергетического баланса деления

■ Баланс энергии в случае деления ядра массой $M(Z, N)$ на два осколка $M(Z_1, N_1)$ и $M(Z_2, N_2)$ со сбросом n числа нейтронов, определяется формулой:

■
$$W(Z, N, Z_1, N_1, n) = M(Z, N) - (M(Z_1, N_1) + M(Z_2, N_2) + nm_n), \quad (1)$$

■
$$Z = Z_1 + Z_2, \quad N = N_1 + N_2 + n, \quad (1a)$$

■ где W есть энергия деления (3 арг). Предполагается, что природа реализует нуклонный состав осколков деления, который удовлетворяет неравенству:

■
$$w(Z, N, Z_1, N_1, n) =$$

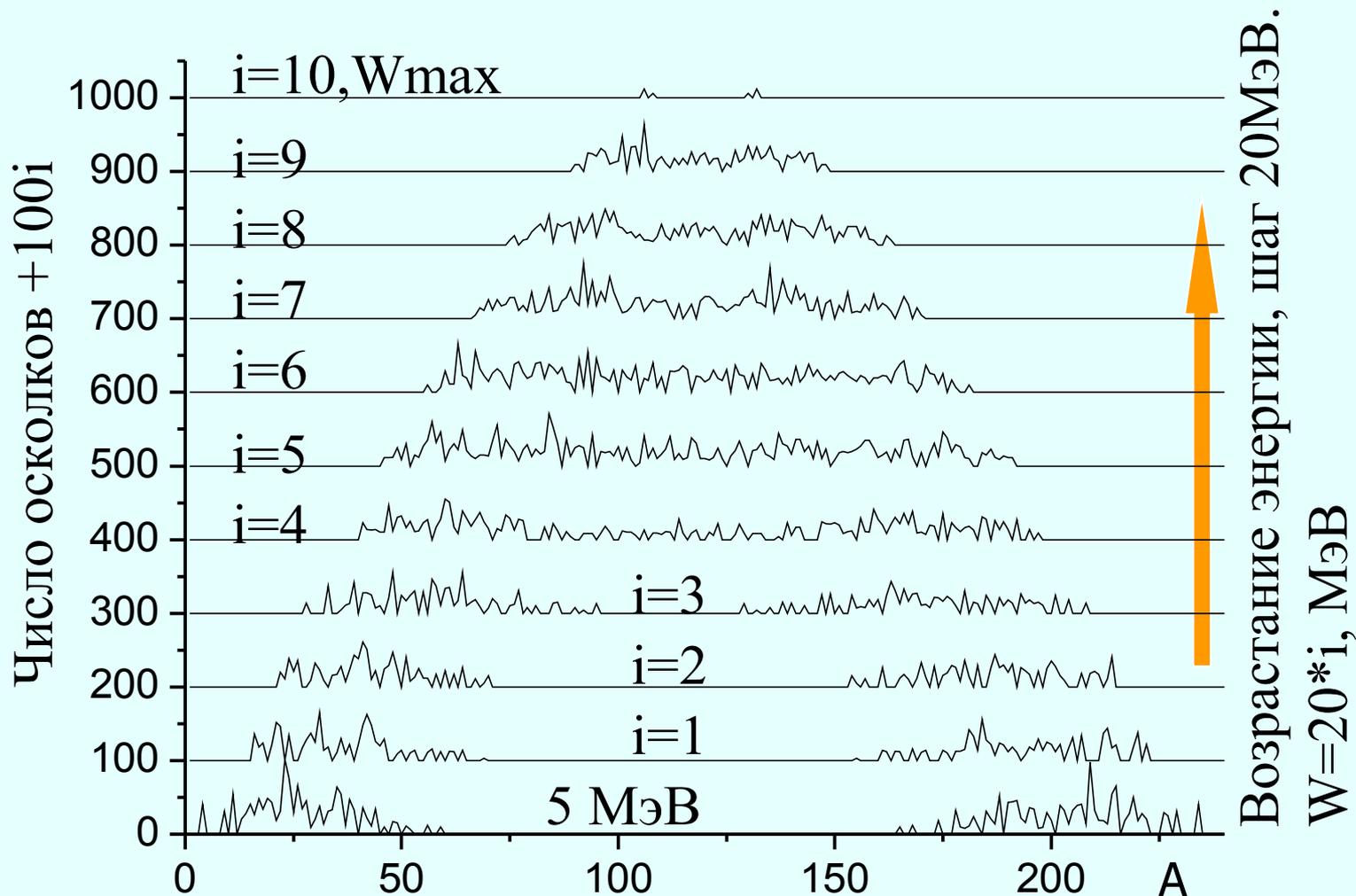
■
$$(M(Z_1, N_1) + M(Z_2, N_2) + nm_n) - M(Z, N) < 0. \quad (2)$$

2.1. Диапазоны изменения свободных параметров

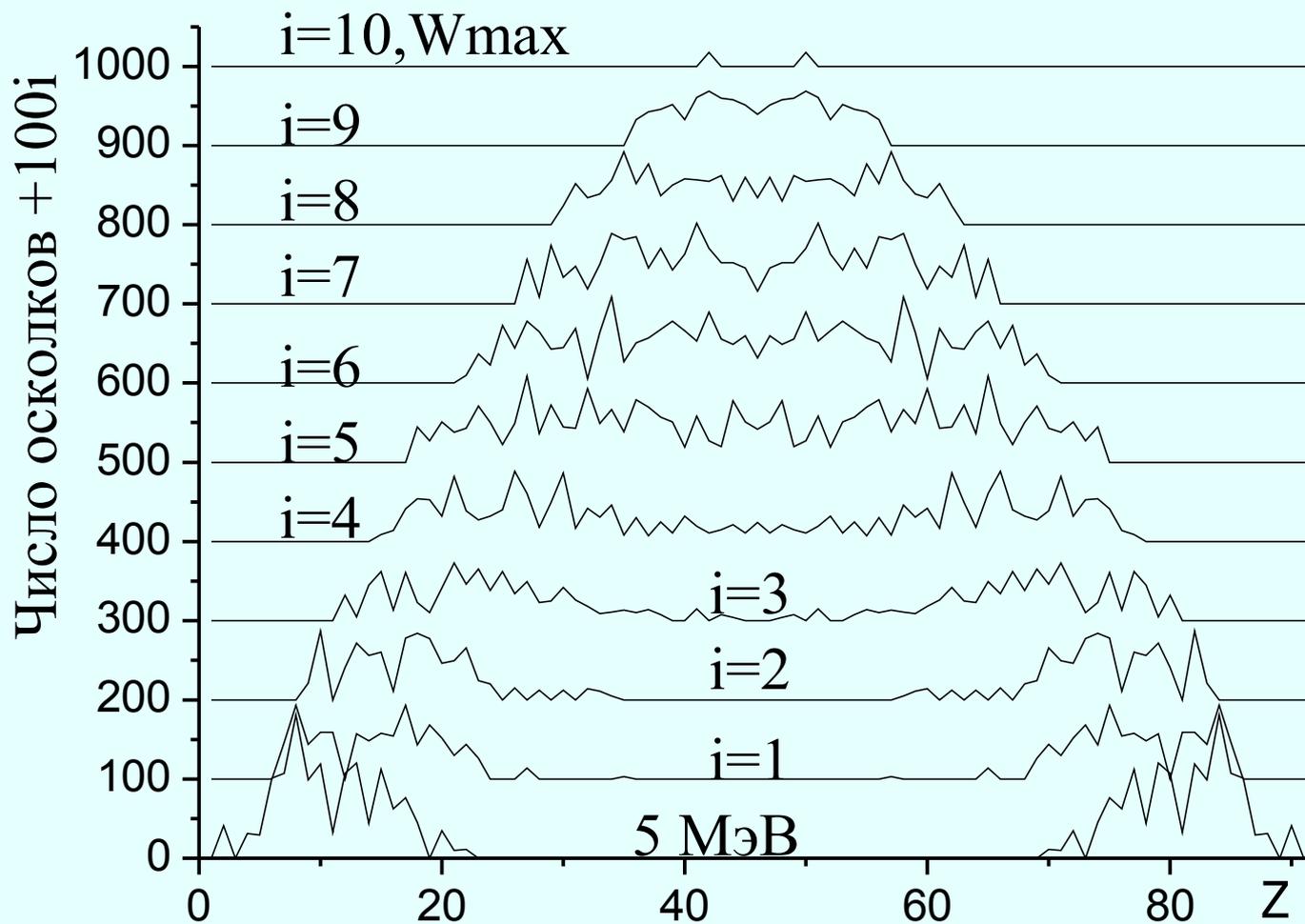
■ Разыгрывая случайным образом значения аргументов Z, N, n перебирались события, удовлетворяющие условию 2. В таблице приведены диапазоны изменения параметров. Всего около $\sim 10^5$ исходов при $\sim 2 \cdot 10^5$ розыгрышей. Ячейка: 1(A) x 2(МэВ). 8 осколков в ячейку.

Z1	N1	n	Z2	N2
2-46	$N1_{\min} - N1_{\max}$	0-15	$Z - Z1$	$N - (N1 + n)$

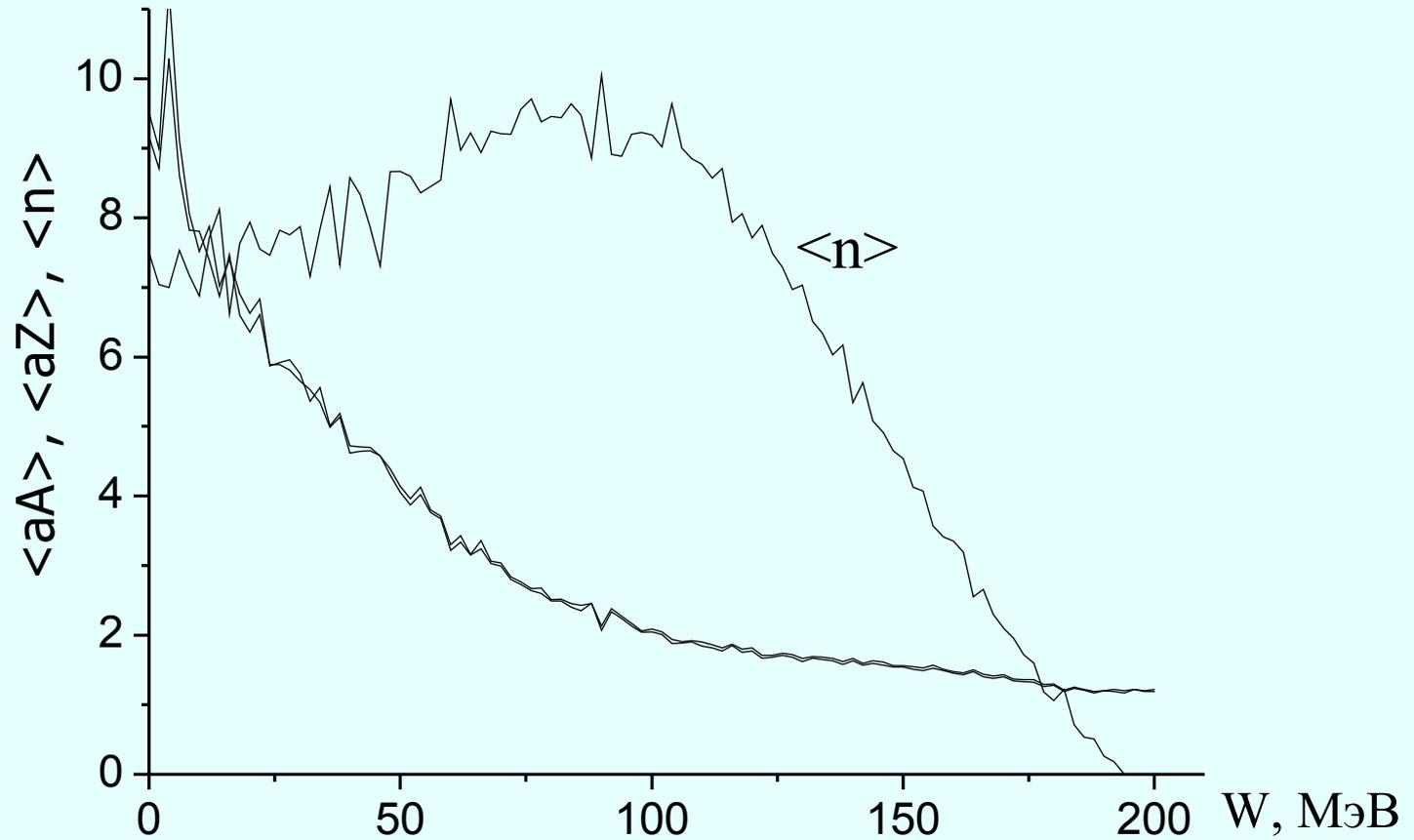
2.2. Массовое распределение осколков ^{238}U



2.3. Зарядовое распределение осколков ^{238}U



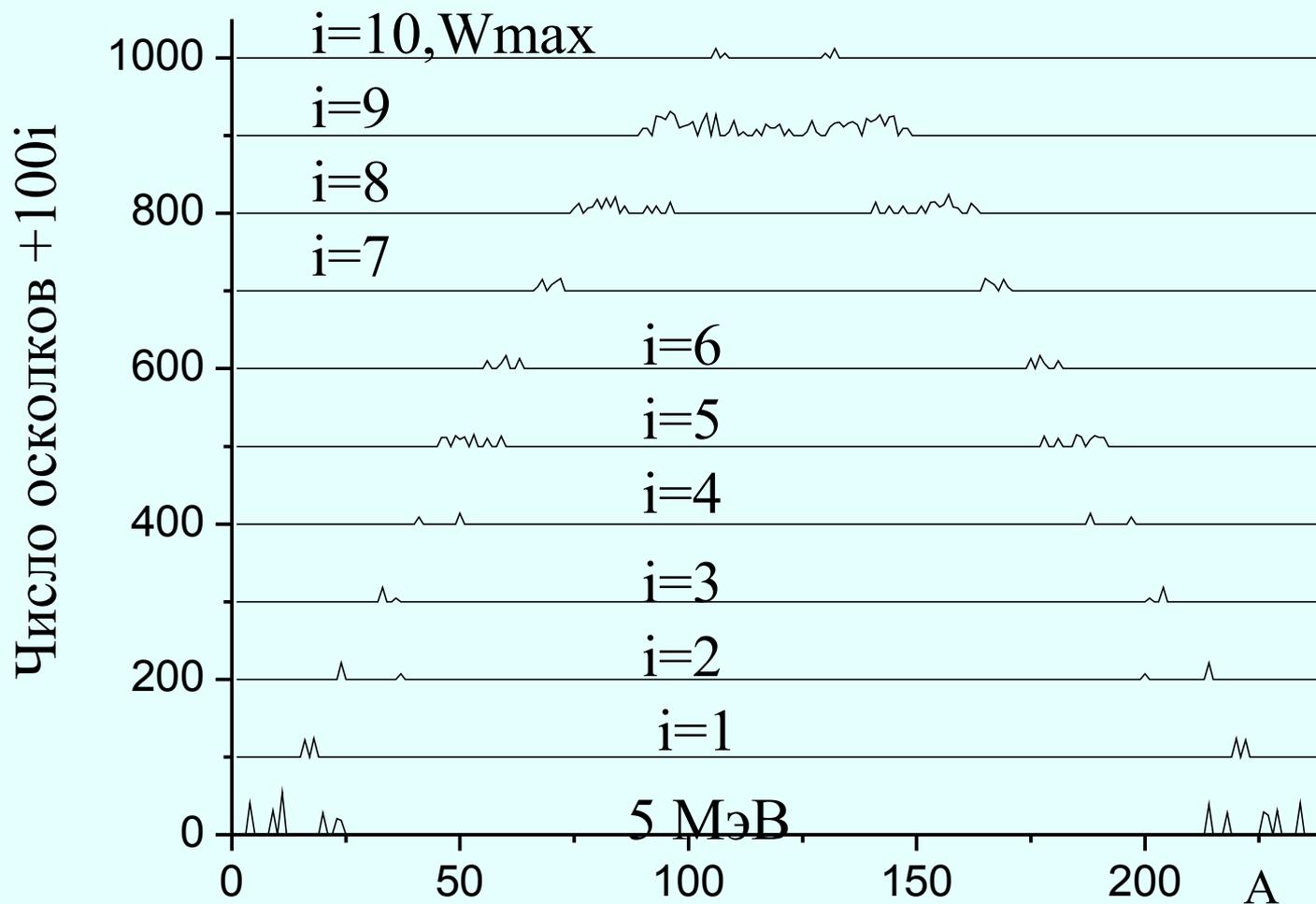
2.4. Зависимость от энергии асимметрий и числа нейтронов



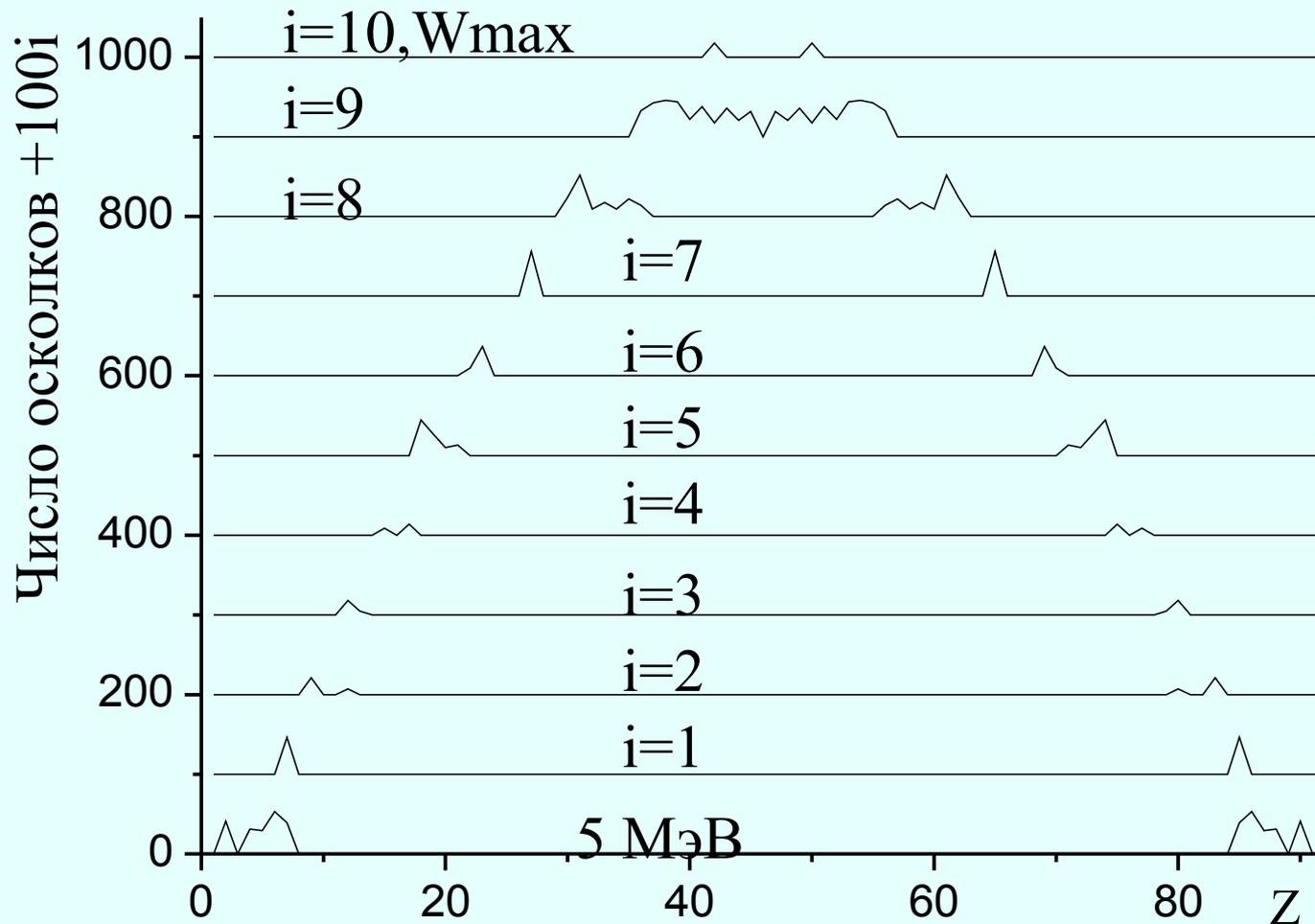
2.5. Распределения в случае спонтанного деления

- Наиболее вероятны в спонтанном делении события без их испускания нейтронов. Затем следуют события с одним нейтроном. Распределение событий с числом нейтронов $n \leq 1$ на рис. Событий заметно сократилось относительно рис., очистился интервал между группами осколков. В связи с исчезновением событий, заполняющих интервал, выросли асимметрии (кроме участка с большими энергиями), что показывает рис.

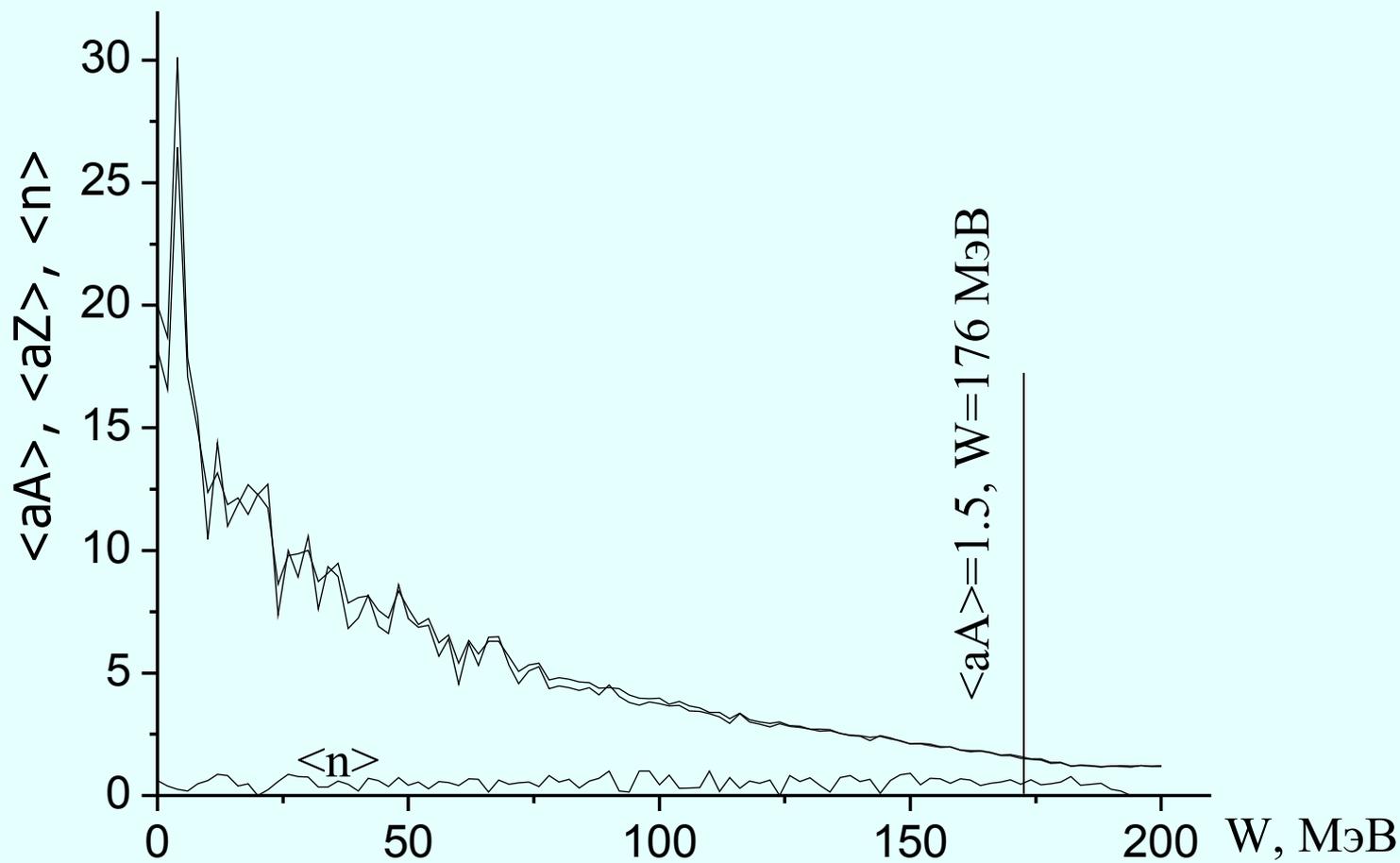
2.6. Массовое распределение осколков ^{238}U ($n=0,1$)



2.7. Зарядовое распределение осколков ^{238}U ($n=0,1$)



2.8. Зависимость от энергии асимметрий и числа нейтронов ($n=0,1$)



2.9.Замечания к рисункам

- Представлены особенности нуклонного состава осколков деления, которому “отдаёт предпочтение природа” .
- 1. Не привлекались какие-либо модели. Распределения рассчитаны на основе закона сохранения энергии с использованием известных масс ядер.
- 2. Не учтены: а)заполнение состояний, которое может зависеть от потенциальной энергии w : $p \sim \exp(-(w-w_{\min})/kT)$, б)подавление состояний по их индивидуальным характеристикам (спин,..).
- 3. В экспериментальных характеристиках продуктов деления отразятся: барьеры деления и их прозрачность, эффективности регистрации конечных продуктов.
- Поэтому следует ожидать лишь качественного соответствия между экспериментальными и рассчитанными характеристиками нуклонного состава осколков.

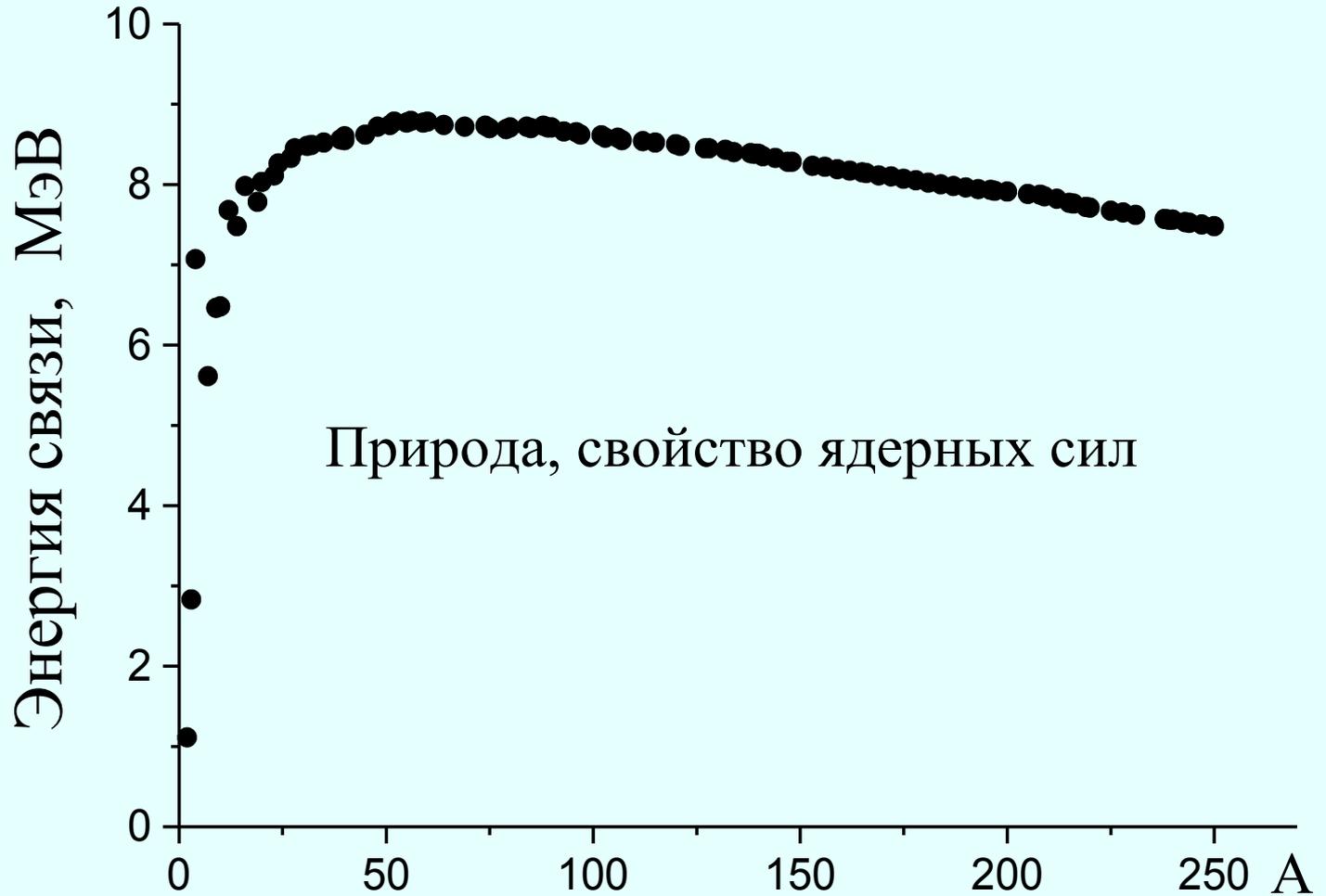
2.10. Выводы предварительные 1

- 1. Присутствует богатый спектр масс.
- 2. Есть конечная энергия деления W_{\max} .
- 3. Массовая и зарядовая асимметрии равны. При переходе к более высоким энергиям асимметрии уменьшаются. Состояния с самой высокой энергией деления имеют минимальные асимметрии 1.22 и 1.19.
- 4. Существует корреляция между средними массовой и зарядовой асимметриями и энергией деления.

2.11. Выводы предварительные 2

- Объяснение особенностей деления.
- 5. Значительная массовая асимметрия осколков спонтанного деления.
- 6. Ожидаемое уменьшение массовой асимметрии с увеличением энергии возбуждения, заполнение провала.
- 7. Ожидаемое достижение плато в энергетической зависимости делимости.

Глава 3. Объединения нуклонов в ядре.



Средняя энергия связи нуклонов в ядре.

Энергия связи

- Связь нуклонного состава ядра с его массой, формула Вайцзеккера:

- $$M(Z,N) = Zm_p + Nm_n - E_b(Z,N) , \quad (3)$$

- $$E_b(Z,N) = E_{nuc} + V_{cul},$$

- $$E_{nuc} = \alpha A + \beta A^{2/3} + \varepsilon(N-Z)^2/A + \delta D(Z,N) ,$$

- $$V_{cul} = \gamma Z(Z-1)/A^{1/3} .$$

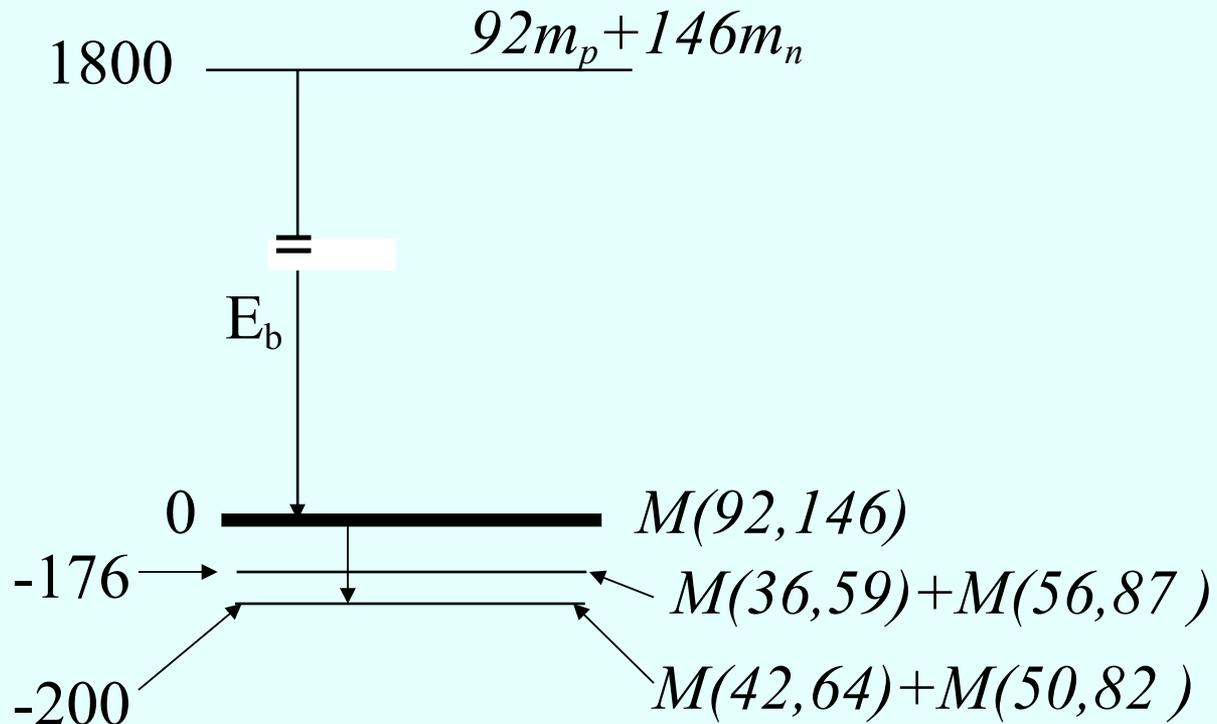
- В формуле $E_b(Z,N)$ – полная энергия связи нуклонов в ядре (Z,N) , E_{nuc} – ядерная часть энергии связи: α - “объёмное”, β – “поверхностное”, ε - и δ - , соответственно, парное и чётно-нечётное.

3.1. Фрагменты в ядре

- Для случая двух фрагментов, исходя из формулы Вайцеккера, можно записать:
- $$M(Z,N) = M(Z_1,N_1) + M(Z_2,N_2) - w(Z,N,Z_1,N_1), \quad (4)$$
- где Z и N являются суммами Z_1+Z_2 и N_1+N_2 , соответственно, а w является функцией параметров формулы 3 ($\alpha, \beta, \delta, \gamma, \epsilon$). Для тяжёлых ядер величина w может быть отрицательной...
- Тяжёлое ядро состоит из фрагментов, с той долей условности, с которой утверждается, что оно состоит из нуклонов.

3.2. Уровни масс для ^{238}U

■ С



Слева – потенциальная энергия в МэВ.

3.3. Описание ядра

Возможность ядру состоять из фрагментов как энергетически выгодного состояния, побуждает представить ядерный гамильтониан в форме:

$$H(Z, N, \dots) = H_0(Z, N, \dots) + H_f(Z, N, Z_1, N_1, n \dots),$$

где H_0 – гамильтониан (например) обобщённой модели ядра, H_f – гамильтониан, выделяющий рассмотренные выше состояния ядра, точками обозначаются индексы состояний, которые здесь не рассматриваются (спины, чётности и т.д.). Т.о. деление тяжёлых ядер есть процесс освобождения “эффективных” фрагментов, составляющих ядро. Существование таких форм ядра подтверждается следующими фактами.

3.4. Фрагменты ядра есть. Обоснование.

- 1. Свойством природы реализовывать состояния с меньшей потенциальной энергией.
- 2. Наблюдением деления ядра: α -распада, кластерного распада, деления на близкие по массам осколки.
- 3. Представленными выше вычислениями, которые: а) подтверждают связанные единой причиной процессы α -распада, кластерного распада и деления ядер, б) качественно описывают особенности деления тяжёлых ядер.
- Теория деления тяжёлых ядер, не учитывающая рассмотренную выше их

4. Заключение

- 1. Выполненный анализ энергетического баланса деления ядра урана показал, что полученный из анализа нуклонный состав осколков качественно выражает те особенности деления ядер, которые известны из эксперимента: массовую асимметрию осколков, динамику её с увеличением энергии возбуждения.
- 2. Расчёт предсказывает дополнительные особенности: близость средних массовой и зарядовой асимметрий осколков, корреляцию их с энергией деления, предпосылки к образованию плато в энергетической зависимости делимости.
- 3. Выявлена связь нуклонного состава осколков с особенностью объединения нуклонов в тяжёлых ядрах.
- Можно считать, что выполненный анализ дал дополнительную информацию о процессе деления тяжёлых ядер.

А.И.Обухов (2001):

“Природа асимметричного деления актинидных ядер при низких энергиях возбуждения является одной из загадок со времени открытия деления ядер. Хотя за это время было сделано много попыток понять природу массового распределения осколков при деления ядер качественно, ни одна из них не имела успеха в количественном предсказании.”

Литература

- 1.Э.Хайд, И.Перлман, Г.Сиборг. **Ядерные свойства тяжелых элементов.** Вып.5. Деление ядер. М. 1969.
- 2.А.А.Котов et al. **Phys. Rev. C74**, 034605, 2006.
- 3.В.Г.Вовченко, В.В.Поляков, О.Я.Фёдоров, Ю.А. Честнов. **Я.Ф. 75**, №1, с. 1-7, (2012).
- 4.Stevenson et al. **Phys. Rev.** 111, 886, 1958.
- 5.В.В.Варламов, Б.С.Ишханов, С.Ю.Комаров. **Атомные ядра.** М. 2010.