

Лекция №3

СТАТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АТОМНЫХ ЯДЕР

Статические свойства атомных ядер

Атомные ядра *условно* принято делить на *стабильные* и *радиоактивные*. Условность состоит в том что, в сущности, все ядра подвергаются радиоактивному распаду, но с различной скоростью

Стабильными называют ядра, распадающиеся достаточно медленно в условиях поставленных задач. Обычно принято считать ядра стабильными, если со времени образования видимой части Вселенной (порядка 10^{10} лет), т.е. со времени образования химических элементов, распалась ничтожная их часть.

Ядра, распадающиеся более быстро, считаются *радиоактивными*.

Статические свойства атомных ядер

Физические величины, характеризующие свойства атомных ядер, можно разделить на статические и динамические.

Статические параметры относятся к определенному, обычно невозбужденному состоянию ядра;

Динамические проявляются при возбуждениях, распадах ядер и ядерных реакциях.

Статические параметры обычно называют свойствами стабильных ядер. В действительности статические свойства присущи не только стабильным, но и радиоактивным ядрам и ядрам в возбужденном состоянии.

Статические свойства атомных ядер

Основные статические свойства ядер

Основными характеристиками стабильного ядра являются:

Массовое число -

A

Электрический заряд -

Z

Масса -

M

Энергия связи -

ΔE

Радиус -

R

Спин -

I

Магнитный момент -

μ

Квадрупольный электрический момент -

G

Изотопический спин -

T

Четность волновой функции -

P

Спектр возбужденных состояний -

E_i

Статические свойства атомных ядер

Основные статические свойства ядер

Радиоактивные ядра дополнительно характеризуются:

Типом радиоактивного превращения;

Периодом полураспада - $T_{1/2}$

Энергетическим спектром испускаемых частиц.

Полная информация о ядре включает:

Структуру и характеристики всех возможных энергетических состояний ядра;

Способы и вероятности перехода ядра из одного состояния в другое;

Сечения и характер взаимодействия ядра с другими ядрами и частицами;

Перечисленные характеристики можно приписать как основному, так и возбужденному состоянию ядра. Кроме массового числа и электрического заряда, значения для каждого состояния различны.

Статические свойства атомных ядер

Основные статические свойства ядер

Массовое число и электрический заряд:

A **Массовое число** определяется количеством нуклонов (нейтронов и протонов) в ядре.

*Общее число нуклонов в процессе ядерных реакций обычного типа (без образования античастиц) остается неизменным. Это положение носит название закона сохранения числа нуклонов. **Массовое число**, выраженное в **а.е.м.**, дает с погрешностью около $(0,1 \div 1,0)\%$ значение **массы** атомного ядра.*

Z **Заряд атомного ядра** определяется количеством протонов в ядре, которое совпадает с количеством электронов в атомных оболочках и порядковым номером в таблице Менделеева.

Статические свойства атомных ядер

Основные статические свойства ядер

Массовое число и электрический заряд:

Заряд атомного ядра определяет химические свойства всех изотопов данного элемента.

Электрический заряд занимает особое место среди других зарядов (барионный, лептонный, странный и др.), поскольку кроме сохранения суммарного заряда в ядерных процессах (закон сохранения электрического заряда), этот параметр отвечает за интенсивность электромагнитного взаимодействия. Электрический заряд является интегральной характеристикой, которая не дает представления о его пространственном распределении.

Поскольку **заряд ядра** численно равен количеству протонов в ядре, а **массовое число** – общему количеству нуклонов, то число нейтронов в ядре определяется как:

$$N = A - Z$$

Статические свойства атомных ядер

Основные статические свойства ядер

Массовое число и электрический заряд:

Ядра с одинаковым массовым числом называются - $A_1 = A_2$
изобарами

Ядра с одинаковым зарядом называются - $Z_1 = Z_2$
изотопами

Ядра с одинаковым числом нейтронов - $N_1 = N_2$
изотонами

Конкретное ядро с данными A и Z принято называть **нуклидом**.

Ядро, содержащее A нуклонов и Z протонов обозначается как (A, Z) , его масса - $M(A, Z)$, а масса соответствующего атома - $M_{am}(A, Z)$. При необходимости указывается химический символ $M_{am}(Z X^A)$.

Статические свойства атомных ядер

Основные статические свойства ядер

Основные характеристики нуклонов:

Протон 1_1p

Заряд, равен заряду электрона - $e = \begin{cases} 4,803 \cdot 10^{-10} \text{ СГСЭ} \\ 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \end{cases}$

Масса - $m_p = 1836,1m_e = \begin{cases} 1,6726 \cdot 10^{-24} \text{ г} \\ 1,007276 \text{ а.е.м.} \\ 938,28 \text{ МэВ} \end{cases}$

Спин - $s = \frac{1}{2}$

Магнитный момент - $\mu_p = +2.79\mu_y$

Статические свойства атомных ядер

Основные статические свойства ядер

Основные характеристики нуклонов:

Нейтрон 1_0n

Заряд, равен нулю

Масса - $m_n = 1838,6m_e = 1,008665 \text{ a.e.m.}$

Спин - $s = \frac{1}{2}$

Магнитный момент - $\mu_n = -1,91\mu_y$ *Заряд равен нулю!*

В свободном состоянии нейтрон является нестабильным и испытывает самопроизвольное превращение в протон с испусканием электрона и антинейтрино.

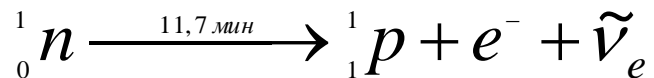
Статические свойства атомных ядер

Основные статические свойства ядер

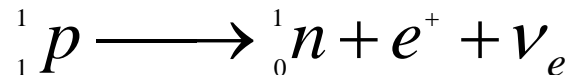
Основные характеристики нуклонов:

Разница масс протона и нейтрона составляет - $2,5m_e$

Именно поэтому нейтрону энергетически выгодно испытывать превращение в протон по схеме:



Протон – частица **стабильная**: Но! Внутри ядра за счет энергии передаваемой протону другими нуклонами возможен процесс аналогичный предыдущему:



В данном случае значение величины периода полураспада обуславливается свойствами ядра.

Статические свойства атомных ядер

Основные статические свойства ядер

Размеры атомных ядер:

Нуклоны, из которых состоит ядро, движутся по законам квантовой механики, в основе которой лежит принцип неопределенности Гейзенберга.

Поверхность ядра **«размыта»** и представление о его размерах становится неопределенным.

Стремление получить представление о точных размерах ядра наталкивается на большие трудности.

Существует две группы экспериментальных методов позволяющих **оценить** размеры ядер:

Регистрация наличия ядерного вещества;

Исследования распределения электрического заряда в ядре.

Статические свойства атомных ядер

Основные статические свойства ядер

Размеры атомных ядер:

Регистрация наличия ядерного вещества

используются явления, обусловленные ядерными силами.

Исследования распределения электрического заряда в ядре

используются явления, обусловленные электромагнитным взаимодействием.

Обе группы дают различные результаты, однако, порядок величины во всех случаях сохраняется.

Первые представления о размерах атомного ядра были получены Резерфордом на основе опытов по рассеянию альфа-частиц.

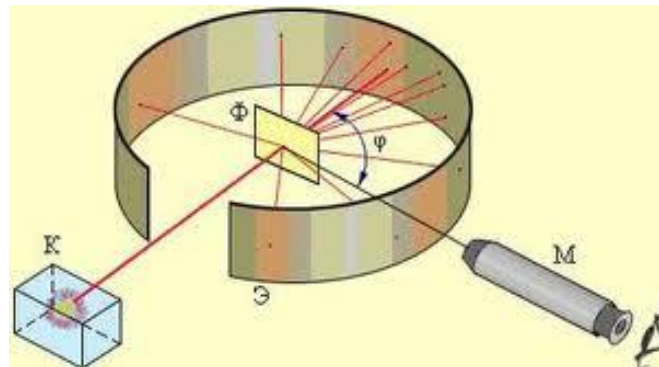
Статические свойства атомных ядер

Основные статические свойства ядер

Размеры атомных ядер:

Опыт Резерфорда

Эти опыты оказали большое влияние на развитие ядерной физики.



Пропуская узкий пучок альфа-частиц через тонкую металлическую фольгу (золотую), Резерфорд установил, что в большинстве случаев частицы рассеиваются на небольшой угол.

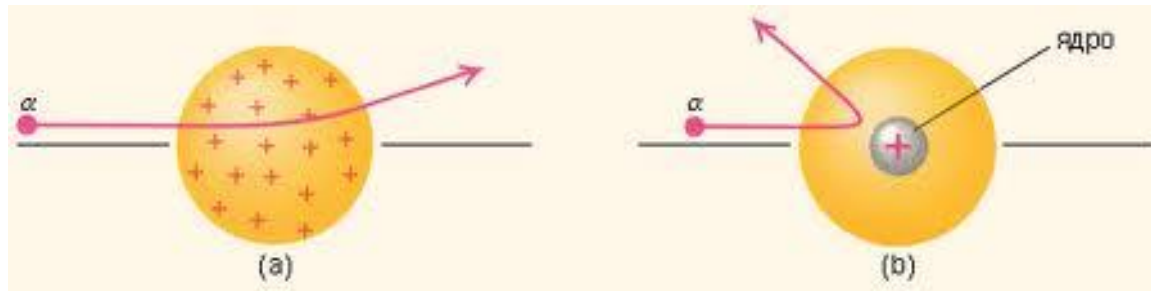
Статические свойства атомных ядер

Основные статические свойства ядер

Размеры атомных ядер:

Опыт Резерфорда

Это был ожидаемый результат, если считать, что альфа-частица отклоняется под действием кулоновских сил электронами атома, имеющими массу, много меньшую, чем масса альфа-частицы (а).



Неожиданными оказались редкие рассеяния на большие углы, иногда значительно превышающие 90° (б). Это может произойти только в том случае, если внутри атома имеются заряды, сосредоточенные в очень малом объеме и связанные с массой много большей, чем масса альфа-частицы. Такой анализ результатов позволил Резерфорду предложить ядерную модель атома.

Статические свойства атомных ядер

Основные статические свойства ядер

Размеры атомных ядер:

Опыт Резерфорда

На основании результатов опыта Резерфорда можно грубо оценить верхний предел радиуса ядра.

Согласно закону Кулона, сила отталкивания между ядром и альфа-частицей на расстоянии d равна:

$$F = \frac{2eZe}{d^2}$$

Потенциальная энергия на расстоянии d между частицами равна:

$$U = \frac{2eZe}{d}$$

Начальная кинетическая энергия альфа частицы:

$$T_{\text{кин}} = \frac{m_{\alpha} v_{\alpha}^2}{2}$$

Статические свойства атомных ядер

Основные статические свойства ядер

Размеры атомных ядер:

Опыт Резерфорда

При прямом попадании на рассеивающий центр альфа частица сможет подойти к ядру на расстояние, определяемое равенством кинетической и потенциальной энергии $U = T_{\text{кин}}$

Следовательно:
$$d = \frac{4Ze^2}{m_{\alpha}v_{\alpha}^2}$$

Результаты опыта показывают, что величина d для тяжелых ядер имеет порядок 10^{-12} см.

Площади геометрических сечений ядер $\sim \pi R^2$

для большинства ядер близки к величине 10^{-24} см². В ядерной физике для измерения площадей (сечений) принимается единица измерения 1 барн.

$$1 \text{ барн} = 10^{-24} \text{ см}^2$$

Статические свойства атомных ядер

Основные статические свойства ядер

Размеры атомных ядер:

В дальнейшем размеры атомных ядер определялись

- *по энергии альфа-частиц испускаемых радиоактивными ядрами;*
- *по рассеянию нейтронов и электронов на ядрах;*
- *по величине энергии связи;*
- *другими методами.*

Наиболее надежными считаются результаты, полученные при изучении рассеяния ядрами нейтронов и электронов. Идея метода заключается в следующем:

Если длина волны де Бройля для нейтронов, электронов или других элементарных частиц соизмерима или меньше, чем диаметр ядра, то при рассеянии этих частиц на ядрах будет наблюдаться дифракция.

Статические свойства атомных ядер

Основные статические свойства ядер

Размеры атомных ядер:

Исходной является формула $\lambda = \frac{h}{p}$

Будем считать нейтрон нерелятивистским и воспользуемся формулой: $T_{\text{кин}} = \frac{p^2}{2m}$

в комбинации с предыдущей получается $T_{\text{кин}} = \frac{h^2}{2m\lambda^2}$

Зная энергию (длину волны) нейтронов и наблюдая при этой энергии дифракцию, можно утверждать что диаметр ядра и длина волны нейтрона равны. Дифракция наблюдается для нейтронов с энергией 2 МэВ у которых длина волны равна $2 \cdot 10^{-12}$ см.

Этим методом были определены радиусы многих ядер, в том числе и радиус протона.

Статические свойства атомных ядер

Основные статические свойства ядер

Размеры атомных ядер:

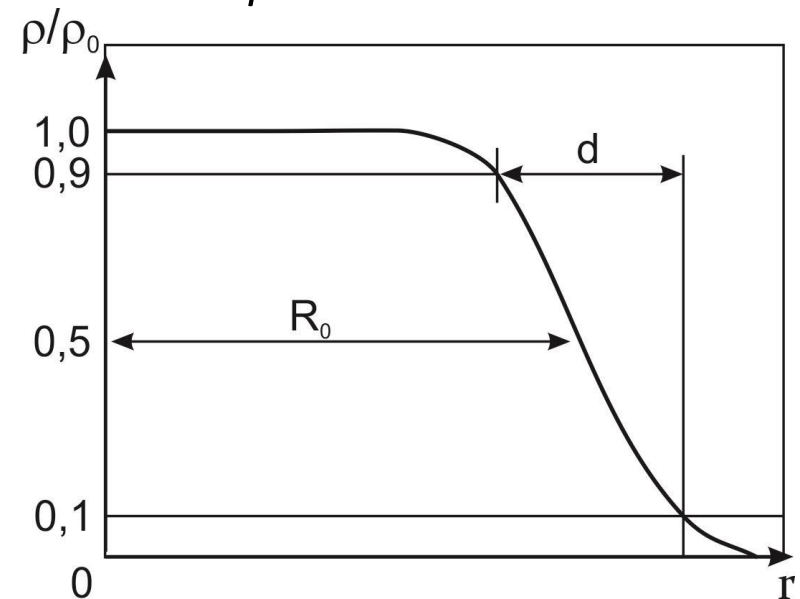
Если считать ядро сферическим, то все методы приводят к эмпирической формуле:

$$R = r_0 \cdot A^{\frac{1}{3}}$$

Постоянная r_0 определенная различными методами имеет несколько отличающиеся значения. Однако все они лежат в пределах

$$r_0 = (1,2 \div 1,5) \cdot 10^{-13} \text{ см}$$

Различия определяются физикой процессов измерения. В одном случае зондируется область сосредоточения заряда ядра, а в другом определяется величина радиуса области ядерного взаимодействия.



Распределение электрического заряда.
Модель Ферми.

Статические свойства атомных ядер

Основные статические свойства ядер

Размеры атомных ядер:

Соотношение связывающее радиус ядра и массовое число показывает что масса ядра пропорциональна его объему

$$V = \frac{4}{3} \pi r_0^3 A$$

Отсюда следует, что во всех ядрах число нуклонов в единице объема одинаково

Также одинакова должна быть и плотность всех ядер

$$n = \frac{A}{V} \approx 10^{38} \frac{\text{нуклонов}}{\text{см}^3}$$

$$\rho_{\text{яд}} = n \cdot m_n \approx 10^{14} \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$$

При такой плотности шар радиусом 200 метров обладал бы массой Земли!

Экваториальный радиус Земли – 6378,1 км;

Масса Земли $5,9742 \cdot 10^{24}$ кг.

Статические свойства атомных ядер

Основные статические свойства ядер

Размеры атомных ядер:

Величина радиусов ядер свидетельствует о том, что ядро состоит из протонов и нейтронов и не содержит электронов. Этот вывод можно сделать из сравнения размеров ядер и длины волн де Бройля для электронов. Для того, чтобы электрон имел длину волны порядка размеров ядра, он должен иметь энергию в сотни МэВ. Электроны такой энергии не могут удержаться ядром, поскольку энергия кулоновского притяжения электрона к ядру средних размеров имеет величину порядка 15 МэВ. А электрон с энергией, равной энергии кулоновского притяжения, имеет длину волны Де-Бройля, по крайней мере, на порядок больше радиуса ядра. Таким образом, волновые свойства электрона не позволяют ему находиться в малом объеме ядра.