

Конспект лекций по курсу общей физики. Часть III
“Оптика. Квантовые представления о свете.
Атомная физика и физика ядра”
Лекция № 13

9. СТРОЕНИЕ ЯДРА
9.1. Состав атомного ядра

Теперь мы должны обратить наше внимание на существенно более трудную проблему строения ядра.

Открытие Беккерелем явления радиоактивности урана (1896г) и открытие рентгеновских лучей – *вот та фундаментальная основа расширения знаний о строении вещества.*

Ядра способны испускать нейтроны, протоны и электроны, поэтому вероятно, что ядра должны содержать, по крайней мере, некоторые из этих частиц. Доказано, что *электроны находятся в ядрах не могут*. Казалось бы, сам факт испускания ядрами β – частиц, а это электроны высоких энергий, есть аргументы в пользу электронов, однако в действительности это *аргумент отсутствия* электронов в ядрах, но об этом чуть позже.

Атомному ядру, как и всякому материальному объекту, присущи определенные характерные свойства: *масса m , электрический заряд Z , энергия связи $W_{св}$* и т. д.

Ядра атомов состоят из *протонов* и *нейтронов*. Протоны и нейтроны получили общее название *нуклонов* (рис.1).

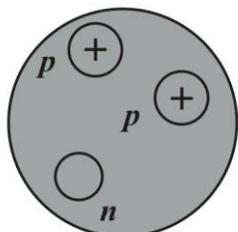


Рис.1

Протон – положительно заряженная частица, его заряд равен элементарному заряду $e = 1,602 \times 10^{-19}$ Кл, а масса $m_p = 1,6736 \times 10^{-27}$ кг = 1,008233 а.е.м. = 939,15 МэВ.

Нейтрон – нейтральная частица с массой, мало отличающейся от массы протона:

$$m_n = 1,675 \times 10^{-27} \text{ кг} = 1,0092625 \text{ а.е.м.} = 940,108 \text{ МэВ.}$$

И протон, и нейтрон обладают полуцелым спином

$$S = \frac{\hbar}{2}.$$

Так как атом в целом *электрически нейтрален*, то число положительно заряженных частиц в ядре (протонов) равно числу отрицательно заряженных частиц (электронов) Z на электронной оболочке атома. *Полное число* нуклонов в ядре называется *массовым числом A* . Следовательно, число нейтронов равно разности $A-Z$.

Атомы, ядра которых состоят из одинаково числа протонов, но из различного числа нейтронов, называются *изотопами*. Например, у водорода имеются изотопы: *протий* ${}^1\text{H}^1$ – легкий водород, *дейтерий* ${}^2\text{H}^2$ (тяжелый водород), *тритий* ${}^3\text{H}^3$ (сверхтяжелый водород). Их ядра содержат один протон, число нейтронов соответственно 0, 1 и 2. По ядерным свойствам изотопы весьма резко различаются, но химические свойства одинаковы, т. к. одинаково число электронов на электронной оболочке. Установлено, большинство химических

элементов, встречающихся в природе, представляют собой смесь изотопов. У свинца их 22, у олова – 25.

Атомы, ядра которых состоят из одинакового числа **нуклонов**, но с разным числом протонов, называются **изобарами** (${}_{40}\text{Zn}^{96}$ – ${}_{42}\text{Mo}^{96}$ – ${}_{44}\text{Ru}^{96}$).

Атомные ядра с одинаковым числом **нейтронов** называются **изотонами**.

В настоящее время известно около 2000 различных ядер, большинство из которых нестабильно.

Ядра стабильны при сравнительно малых значениях массового числа A , если они содержат одинаковое число протонов и нейтронов: ${}_{8}\text{O}^{16}$, ${}_{7}\text{N}^{14}$, ${}_{1}\text{H}^2$, ${}_{20}\text{Ca}^{40}$. Однако с ростом числа A процентное содержание нейтронов возрастает, например, у урана ${}_{92}\text{U}^{238}$ число нейтронов превышает 60% от общего числа нуклонов, ядра становятся **нестабильными**.

Свойства ядер существенно зависят от четности чисел Z и $A-Z$. Как правило, среди стабильных больше всего четно – четных. Известно, что в земной коре более распространены элементы с четными атомными номерами.

Наиболее стабильны так называемые магические ядра, у которых число протонов или число нейтронов равно одному из магических чисел: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126. **Особенно** стабильны дважды магические **ядра**, у которых магическими являются и число протонов, и число нейтронов (${}_{20}\text{Ca}^{40}$, ${}_{20}\text{Ca}^{48}$, ${}_{8}\text{O}^{16}$, ${}_{2}\text{He}^4$, ${}_{82}\text{Pb}^{202}$).

9.2. Энергия связи ядер.

Дефект массы

Эксперименты показывают, что масса ядра M меньше, чем масса составляющих его нуклонов. Уменьшение суммарной массы нуклонов, при образовании из них ядра, есть веское доказательство того, что формирование ядра сопровождается выделением энергии. По закону сохранения энергии выделенная энергия равна количеству энергии, которое надо затратить, чтобы разложить данное ядро на составные части, поэтому ее назвали **энергией связи** $W_{св}$.

Из теории относительности – энергия связи выразится следующим образом:

$$W_{св} = \Delta m \cdot c^2,$$

где c – скорость света,

$\Delta m = Zm_p + (A-Z)m_n - M_{я}$ – дефект массы.

Энергия связи может быть выражена как в атомных единицах энергии, так и в электрон-вольтах. Например, энергия связи ядра изотопа кислорода с 8 протонами и 8 нейтронами

$$\begin{aligned} W_{св} &= (8 \cdot 1,008233) + (8 \cdot 1,0092625) - 16 = 0,139964 \text{ а.е.м.} = \\ &= 130,37366 \text{ МэВ} \end{aligned}$$

(1 а.е.м. = 931,48 МэВ).

Для сравнения, энергия связи электрона в атоме водорода составляет всего лишь 13,5 эВ. Сопоставление этих цифр показывает, насколько огромна энергия связи ядер.

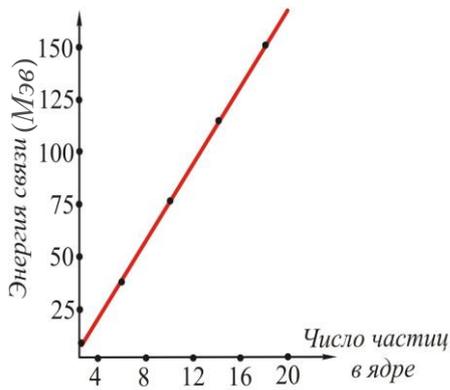


Рис.2

Как меняется энергия связи с изменением числа частиц в ядре? По виду графика (рис.2) можно заключить, что энергия связи растет линейно с увеличением числа нуклонов в ядре. Это значит, что в среднем присоединение к ядру каждого нуклона сопровождается выделением одного и того же количества энергии.

Более важной характеристикой стабильности ядер является удельная энергия связи ε :

$$\varepsilon = \frac{W_{св}}{A},$$

равная усредненной энергии связи, приходящийся на один нуклон. Зависимость удельной энергии связи от массового числа представлена на графике (рис.3).

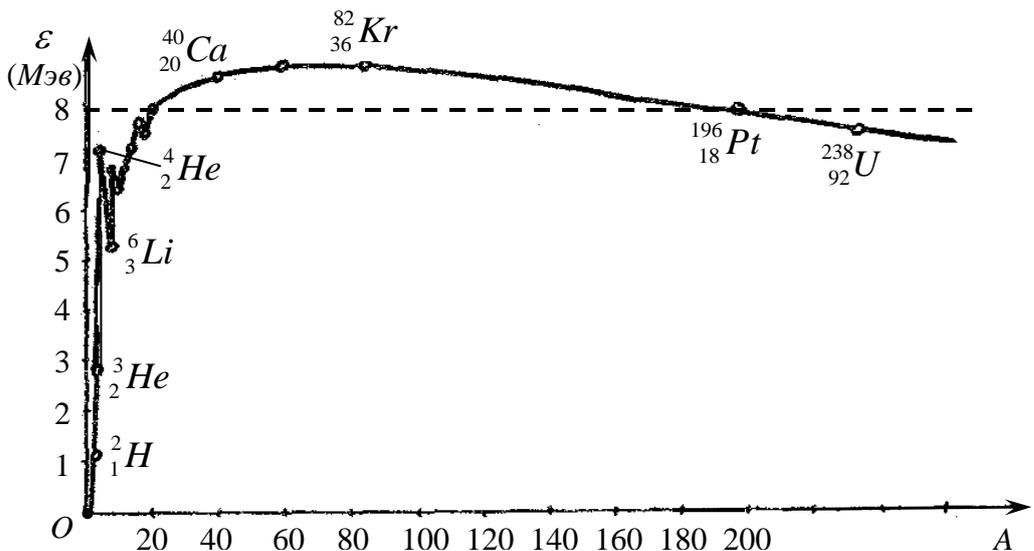


Рис.3. Зависимость удельной энергии связи ε нуклонов от массы числа A .

Очевидно:

1. ε не является одинаковой для всех ядер. Следовательно, нуклоны в различных ядрах связаны неодинаково прочно. Наиболее прочно они связаны в ядрах при $A=40-100$. Величина ε приблизительно равна 8,7 МэВ на один нуклон.
2. Характерным является наличие острых максимумов и минимумов.

Максимальное значение ε приходится на четно-четные ядра, т. е. наиболее стабильные. Минимальное значение ε у ядер, содержащих нечетное число протонов и нейтронов.

3. Для более тяжелых ядер ε уменьшается, что связано с возрастанием кулоновского отталкивания протонов, пропорционального Z^2 .

9.3. Ядерные силы

Прочная связь между нуклонами в ядре свидетельствует о наличии особых сил притяжения, называемых *ядерными силами*. Перечислим основные свойства ядерных сил и укажем, какими экспериментальными фактами они обоснованы.

1. *Ядерные силы являются короткодействующими.*

Радиус их действия $2 \cdot 10^{-15}$ м, это следует из опытов Резерфорда по рассеянию α -частиц ядрами. При меньших расстояниях переходят в силы отталкивания. При увеличении расстояния практически превращаются в нуль.

2. *Ядерные силы обнаруживают зарядовую независимость:* ядерные силы притяжения, действующие между двумя нуклонами, одинаковы по величине и характеру.

Естественно, полная сила взаимодействия между протонами, благодаря наличию кулоновского взаимодействия, отличается от силы взаимодействия между протоном и нейтроном.

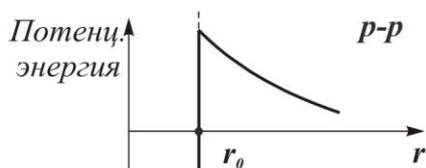


Рис.4

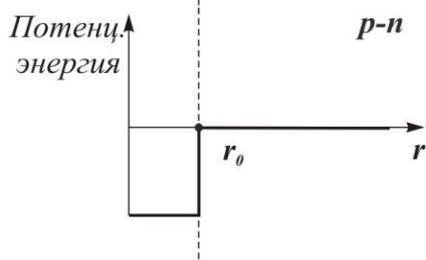


Рис.5

При сближении протонов возрастает сила их отталкивания, растет потенциальная энергия этого взаимодействия (рис.4) пока протоны не сблизятся на расстояние r_0 , на котором начинают действовать ядерные силы притяжения. Начиная с этого места, ход потенциальной энергии резко меняется, она падает столь круто, что ее падение приходится изображать отрезком почти вертикальной линии, т. к. резко изменяются с расстоянием ядерные силы. Поскольку потенциальная энергия сил притяжения отрицательна, то и суммарная энергия ядерных и кулоновских сил становится отрицательной. Представленный на графике тип зависимости называется **потенциальным барьером**. Для того, чтобы вырваться или проникнуть в ядро, протону необходимо иметь запас кинетической энергии,

превышающий высоту потенциального барьера.

Потенциальная энергия взаимодействия протон-нейтрон-иная. До расстояния r_0 между нуклонами нет сил взаимодействия, потенциальная энергия равна нулю. На расстоянии r_0 возникает ядерное взаимодействие, потенциальная функция быстро падает. Такую зависимость называют **потенциальной ямой**.

3. *Ядерные силы обладают свойством насыщения.*

Это означает, что каждый появляющийся в ядре нуклон взаимодействует лишь с ограниченным числом ближайших к нему соседей-нуклонов. Т. е. обнаруживается известное сходство с химическими силами с их особенностью – каждый атом, в зависимости от своей валентности, способен вступать в связь с ограниченным числом других атомов.

4. *Ядерные силы зависят от ориентации спинов взаимодействующих между собой нуклонов.* Поэтому ядерные силы нецентральны, направлены под углом к прямой, соединяющей нуклоны.

5. *Ядерные силы носят обменный характер.* Это квантовое свойство, благодаря которому нуклоны при столкновении передают друг другу заряды, проекции спинов и даже координаты.

6. *Ядерные силы не зависят от скоростей нуклонов,* т. е. являются нерелятивистскими.

Исследование ядерных сил является жизненно необходимым стержнем ядерной физики, потребуется громадная работа прежде чем фундаментальные процессы будут прочно обоснованы.

9.4. Ядерные модели

Существует ряд моделей ядра. Основными из них являются *капельная (коллективная)* и *оболочечная (одночастичная)* модели ядра. Любая, известная на сегодняшний день, модель не может дать полного описания ядра, каждая модель приспособлена для описания определенного круга явлений.

Капельная модель. Ядро рассматривается как капля заряженной жидкости. Из экспериментальных данных по рассеянию заряженных частиц на атомных ядрах радиус ядра оценен как

$$R_{\text{я}} = 1,4 \cdot A^{1/3} \cdot 10^{-15} \text{ м.}$$

Отсюда плотность ядерного вещества $\rho_{\text{я}}$ для всех ядер примерно одинакова и равна

$$\rho_{\text{я}} = \frac{M_{\text{я}}}{V_{\text{я}}} = \frac{A \cdot m_n}{\frac{4}{3} \pi R_{\text{я}}^3 A} \approx 1,8 \cdot 10^{17} \text{ кг/м}^3,$$
$$(\rho_{\text{стали}} = 7,87 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3).$$

Огромное значение плотности ядра означает сильное взаимодействие нуклонов внутри ядра.

Плотность вещества в ядре, независимо от числа нуклонов, и в капле жидкости (при данной температуре и давлении) приблизительно постоянна. Силы, действующие между молекулами жидкости, имеют ограниченную сферу действия, так же как и ядерные силы. При сообщении ядру дополнительной энергии она распределяется между всеми ядерными частицами, аналогично тому, как это происходит в капле жидкости. В свободном, невозбужденном состоянии жидкость принимает сферическую форму, возникает поверхностное натяжение, поверхностная энергия, теория малых поверхностных колебаний капли объясняет собственные колебания капли, при которых капля деформируется. При переходе к

капельной модели ядра собственные колебания надо проквантовать, а также объяснить деление ядер.

Оболочечная модель. В этой модели считается, что нуклоны движутся независимо друг от друга в усредненном центрально симметричном поле, поэтому имеются дискретные уровни энергии (как в атоме), заполненные нуклонами с учетом принципа Паули. Эти уровни группируются в оболочки с определенным числом нуклонов. Полностью заполненная оболочка соответствует устойчивому образованию.