

**Варламов Сергей Дмитриевич***Кандидат физ.-мат. наук,**доцент кафедры физики СУНЦ МГУ.**Член жюри Московской городской**и Всероссийской олимпиады школьников по физике.*

Кое-что о ядерном взаимодействии

Модели строения атомного ядра. Ядерные силы. Нуклонная модель ядра. Дефект массы и энергия связи. Ядерные спектры.

Состав ядер

Открытие радиоактивности А. Беккерелем, установление природы различных типов этого излучения (альфа, бета и гамма), а также эксперименты Э. Резерфорда по рассеянию альфа-частиц на тонких плёнках привели к появлению современных представлений об устройстве всех атомов. Согласно этим представлениям атом содержит ядро, в котором сосредоточена почти вся его масса (более 99,97 % для большинства сортов атомов).



Ядро имеет положительный заряд, величина которого в единицах заряда электрона (+e) равна номеру Z соответствующего химического элемента в таблице Менделеева. Масса ядра любого атома выражается в единицах атомной массы. За такую единицу принята $1/12$ часть массы атома углерода (его изотопа $^{12}_6\text{C}$).

Массы всех атомов в этих единицах близки по величине к целым числам, которые в 2 – 2,5 раза больше числа Z . Атомы в целом нейтральны, а это означает, что вблизи ядра находятся отрицательно заряженные электроны в соответствующем количестве – Z . После того, как Чедвик открыл существование нейтрона, – частицы с почти такой же массой, как и у протона, но не обладающей электрическим зарядом¹, возникла идея о том, что ядра состоят из протонов и нейтронов. Эту идею предложили Иваненко и Гейзенберг. Свободные протоны являются стабильными частицами. Свободные нейтроны нестабильны, их период полураспада примерно 900 секунд (или 15 минут). Нейтрон распадается на протон, электрон и антинейтрино.

¹ Нейтрон, не имея электрического заряда, имеет магнитный момент, поэтому взаимодействует с электромагнитными полями.



Изотопы

Атомы с ядрами, содержащими одинаковое количество протонов, но разные количества нейтронов, называются изотопами данного химического элемента. Изотопы принято символически изображать одной буквой (или двумя – как и для соответствующего химического элемента), снабжённой двумя индексами, расположенными слева от буквы. Верхний индекс показывает массовое число изотопа (а точнее суммарное число протонов и нейтронов), а нижний индекс показывает его зарядовое число. Например, существующие в природе долгоживущие изотопы урана обозначаются так: ${}_{92}^{234}\text{U}$, ${}_{92}^{235}\text{U}$, ${}_{92}^{238}\text{U}$. Периоды полураспада этих изотопов равны соответственно: 245 тысяч лет; 0,7 миллиарда лет и 4,47 миллиарда лет. Распространённость их в природе выражается в процентах от общего числа атомов урана: 0,0055%; 0,72% и 99,2745%. Есть и ещё один долгоживущий (с периодом полураспада 23 миллиона лет) изотоп ${}_{92}^{236}\text{U}$, но в природе он в обнаружимых количествах не встречается.

Кроме этих четырёх изотопов, у урана имеются изотопы с меньшими временами полураспада со всеми массовыми числами от 226 до 239. Самое короткое время жизни у изотопа ${}_{92}^{226}\text{U}$ – его период полураспада всего 0,5 секунды.

Информация в обозначении изотопов, с одной стороны, как видно, избыточная, так как зарядовое число однозначно задаёт название химического элемента и, соответственно, его буквенное обозначение, а с другой стороны, недостаточная, так как в обозначении отсутствует информация о других важных свойствах.

У самого лёгкого атома – изотопа ${}^1_1\text{H}$ атома водорода – в составе ядра находится только один протон. У всех остальных сортов атомов в составе ядра есть и протоны и нейтроны. Поскольку они составляют ядра, то их называют нуклонами (от слова *nucleus* – ядро).

Ядерное взаимодействие

Чтобы объяснить, почему молекулы и атомы образуют конденсированные тела (жидкие или твёрдые), используется представление о том, что эти частицы взаимодействуют, причём образуют друг для друга достаточно глубокие потенциальные ямы, то есть потенциальная энергия взаимодействия частиц имеет знак минус. Ямы настолько глубоки, что тепловое движение не в состоянии «выбросить» молекулы, попавшие в такие ямы, на свободу.

Взаимодействие протонов и нейтронов, из которых состоят ядра, такое, что они тоже образуют связанные состояния. Значит и для этого случая подходит идея о взаимодействии, при котором частицы для своих соседей образуют глубокие потенциальные ямы.

При объединении молекул из состояния, когда они существуют поодиночке, в конденсированное состояние выделяется энергия, которую называют теплотой конденсации.

Аналогичное явление имеет место и при взаимодействии нуклонов – объединяясь, они «сбрасывают» энергию чаще всего в виде квантов электромагнитного поля.

Ядерные силы – «короткодействующие». Расстояния R_0 , на которых они проявляются, имеют порядок 10^{-15} м. Ядерные силы, как и межмолекулярные, не обладают свойством изотропии, и зависят не только от расстояния между нуклонами, но и от взаимной ориентации спинов (от слова *spin* – вращение) нуклонов. Величины спинов протонов и нейтронов равны $1/2$ (в единицах постоянной Планка \hbar).

Релятивистские свойства нуклонов

Каждая частица, входящая в состав системы, обладает своей полной энергией, которая может быть представлена в виде суммы энергии покоя $E_{\text{покоя}} = m_i c^2$ и кинетической энер-



гии $E_{кин} = \sqrt{(P_i c)^2 + m_i^2 c^4} - m_i c^2$. Полная энергия системы частиц в этом случае складывается из полных энергий составных частей и потенциальной энергии взаимодействия этих частей:

$$E_{сист.} = \sum E_{част.} + U$$

Последнее слагаемое U (потенциальная энергия) имеет отрицательный знак.

Полная энергия системы частиц E , импульс этой системы P и её масса M связаны соотношением Эйнштейна:

$$E^2 - P^2 c^2 = (M c^2)^2.$$

Если рассматривается покоящееся ядро, то в приведённом соотношении величина импульса ядра P полагается равной нулю.

Квантовые свойства нуклонов

Нуклоны – квантовые частицы, поэтому, находясь в ограниченной области пространства (рядом друг с другом), они обязаны иметь «неопределённость» своих импульсов порядка

$P \approx \frac{h}{R_0}$. Если учесть, что примерно такой же должна быть неопределённость проекций импульсов на каждую координатную ось, то полная величина неопределённости импульса каждого нуклона может быть в $\sqrt{3}$ раз больше.

Кинетическая энергия каждого из нуклонов (в составе ядра) равна примерно:

$$E_{кин} = \sqrt{(Pc)^2 + m^2 c^4} - mc^2 \approx 1,4 \text{ ГэВ.}^2$$

Нейтроны и протоны имеют собственные механические моменты количества движения – спины. С механическими моментами связаны магнитные моменты этих частиц. Протоны и нейтроны принадлежат к числу так называемых ферми-частиц (фермионов), которые ведут себя так, что для описания их поведения Вольфганг Паули придумал так называемый «принцип запрета».

В любой системе фермионов не может быть двух частиц, обладающих совершенно одинаковыми параметрами состояния. Одним из этих параметров является проекция спина на выделенное направление. Она для протонов и нейтронов может принимать всего два значения $+1/2$ или $-1/2$ в единицах \hbar . Говорят, что на каждом разрешённом уровне или в каждом разрешённом состоянии может находиться не более двух фермионов, отличающихся только проекциями спинов.



Энергия связи и дефект масс

При образовании ядер, состоящих из нескольких нуклонов, эти нуклоны попадают в глубокие потенциальные ямы, созданные ими друг для друга.

Процесс образования «тяжёлого» ядра из «лёгких» отдельных нуклонов сопровождается «сбрасыванием» энергии в виде электромагнитного излучения или в виде других частиц. При этом масса покоя образовавшегося ядра получается меньше, чем сумма масс покоя тех

² Это соответствует его движению со скоростью, равной примерно 0,92 скорости света.



свободных частиц, из которых ядро образовалось: $\sum_i m_i > M$. Различие в массах называют «дефектом масс», который принято выражать в энергетических единицах МэВ. Энергии взаимодействия, например, протона и нейтрона в ядре дейтерия ${}^2_1\text{H}$ соответствует дефект



масс – 1,8 МэВ. Если массы протона и нейтрона почти одинаковы (m), то глубину потенциальной ямы можно найти с помощью соотношения:

$$E_D = \sum E_i + U$$

$$2\sqrt{(pc)^2 + m^2c^4} + U \approx 2mc^2 - 1,8 \text{ МэВ},$$

где $U = (-2 \times 1,4 - 0,0018) \text{ ГэВ} \approx -2,8 \text{ ГэВ}$.

Сумма потенциальной энергии взаимодействия нуклонов U и их полных энергий даёт дефект масс, равный для ядра дейтерия 1,8 МэВ $\ll 2 \text{ ГэВ}$.

Следовательно, потенциальная энергия ядерного взаимодействия протона с нейтроном равна примерно $(-2,8) \text{ ГэВ}$. Она по величине гораздо больше, чем суммарная энергия покоя обоих нуклонов (938,3 МэВ для протона и 939,6 МэВ для нейтрона).³

Механизм «сбрасывания» энергии

Рассмотрим гипотетический процесс рождения ядра дейтерия при встрече протона и нейтрона. Для приближения друг к другу на расстояние действия ядерных сил им не требуется преодолевать какого-либо потенциального барьера, так как нейтрон не имеет электрического заряда. Можно считать, что взаимное притяжение протона и нейтрона на этапе образования ядра дейтерия приводит к ускоренному движению протона, а ускоренно движущаяся заряженная частица (протон) должна излучать электромагнитные волны. Величина «сброшенной» энергии пропорциональна среднему квадрату величины ускорения и времени, в течение которого точечный заряд двигался с ускорением. В классической электродинамике, если предполагать, что точечная частица с зарядом e двигалась в течение времени t с постоянным ускорением a , то излучённая энергия находится в соответствии с выражением:

$$E = tK \frac{2e^2 a^2}{3c^3}; \quad K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}.$$

Если исходить из того, что весь дефект масс 1,8 МэВ связан с излучением протона, двигавшегося во время образования ядра дейтерия с постоянным ускорением, то можно, исходя из классической формулы для излучённой энергии, оценить расстояние, на котором во время образования ядра дейтерия на протон действовала «ядерная» сила. Она и заставляла его двигаться с этим постоянным ускорением. Легко получить⁴, что искомое расстояние должно равняться примерно $2R_0/15$ или $0,13 R_0$. Кстати, энергии 1,8 МэВ соответствует фотон с длиной волны $0,7 \times 10^{-12} \text{ м} \gg 10^{-15} \text{ м} = R_0$.

³ Совершенно иная ситуация в случае образования атомов из ядра и электронов. Энергия связи – потенциальная энергия взаимодействия электрона и ядра – во много раз меньше, чем энергия покоя электрона. Для самых глубоких уровней энергии в самых тяжёлых атомах энергия связи по порядку величины равна 10^3 эВ , а энергия покоя электрона равна 0,5 МэВ.

⁴ Предлагается читателям сделать это самостоятельно.

Почему ядерное взаимодействие называют «сильным»?

На расстоянии $R_0 = 10^{-15}$ м два протона имеют потенциальную энергию кулоновского взаимодействия порядка 1,44 МэВ, а энергия их магнитного взаимодействия гораздо меньше, чем энергия кулоновского. Этому же примерно расстоянию соответствует потенциальная энергия ядерного взаимодействия нуклонов порядка $-2,8$ ГэВ. Вот и получается, что ядерное взаимодействие на несколько порядков (почти в 2000 раз) «сильнее» электромагнитного. Поэтому ядерное взаимодействие и называют «сильным».

В ядре дейтерия спины протона и нейтрона ориентированы параллельно друг другу, а их магнитные моменты ориентированы, соответственно, антипараллельно друг другу. Магнитный момент ядра дейтерия примерно равен сумме магнитных моментов протона и нейтрона. Такому расположению магнитных моментов соответствует отрицательная потенциальная энергия их взаимодействия, однако «магнитный вклад» пренебрежимо мал в сравнении с энергией ядерного взаимодействия на расстояниях порядка 10^{-15} м. Не образуются, тем не менее, ядра дейтерия, в которых спины протона и нейтрона расположились бы антипараллельно друг другу.

Почему не существует изотоп ${}^2_2\text{He}$?

а) Согласно квантовым законам микромира, которые описывают поведение ферми-частиц, два протона не могут образовать устойчивого ядра. Связано это с таким обстоятельством: если предположить, что два протона образовали-таки ядро ${}^2_2\text{He}$, и в таком ядре их спины тоже параллельны друг другу, как в ядре дейтерия спины протона и нейтрона, то в таком случае в составе ядра ${}^2_2\text{He}$ окажутся две совершенно неразличимые частицы с полностью одинаковым набором всех характеристик. Это противоречит принципу запрета Паули для ферми-частиц, которыми являются протоны.



б) Можно рассмотреть и такое соображение: ядерное притяжение двух протонов приводит к ускоренному движению каждого из этих протонов, заряженных одинаково и имеющих одинаковые массы.

При таком движении электромагнитные волны, созданные одним протоном в отдельности, в значительной степени гасят волны, созданные другим протоном, так как ускорения частиц одинаковы по величине и противоположно направлены. То есть для двух протонов «ослаблен» механизм «сбрасывания» энергии. После такого ядерного взаимодействия протоны разлетаются друг от друга, так и не образовав связанной системы.

в) Если считать, что ядерное взаимодействие двух протонов такое же, как и для протона с нейтроном в ядре дейтерия, то добавок потенциальной кулоновской энергии приведёт к уменьшению энергии связи до 0,36 МэВ, что гораздо меньше, чем для пары нуклонов протон-нейтрон.

Рассмотрим гипотетические процессы образования более тяжёлых ядер из ядра дейтерия. Если в компанию к протону с нейтроном в ядре дейтерия попадает ещё один протон, то в этом случае ускоренно движутся хотя и одинаково заряженные, но разные по массе частицы. Их ускорения получаются разными, и механизм «сбрасывания» энергии в виде квантов света в этом случае работает! При этом получается стабильное ядро ${}^3_2\text{He}$. Если же в



компанию к протону с нейтроном в ядре дейтерия попадёт ещё один нейтрон, то при тех же ускорениях участников взаимодействия (обусловленных сильным взаимодействием) в виде электромагнитного излучения «сбрасывается» меньше энергии, так как во время образования нового ядра «излучает» только тяжёлый дейтрон, а нейтрон «не излучает». В этом случае получается ядро трития ${}^3_1\text{H}$. Масса покоя такого ядра больше, чем масса покоя изотопа гелия ${}^3_2\text{He}$, так как при его образовании «сброшено» меньше энергии. Изотоп ${}^3_1\text{H}$ является радиоактивным – он распадается, превращаясь в ${}^3_2\text{He}$, электрон и антинейтрино. Период полураспада этого изотопа равен примерно 12 годам. Кстати говоря, такие же «продукты» (электрон и антинейтрино) возникают и после распада свободного нейтрона.

Удельная энергия связи

Каждое ядро (изотоп) характеризуется величиной энергии связи (дефектом масс), приходящейся на один нуклон ядра. Эталоном для сравнения выступают нуклоны, входящие в состав ядра изотопа углерода ${}^{12}_6\text{C}$. Им сопоставляется нулевой «относительный дефект масс». Для ядер химических элементов, расположенных в начале таблицы Менделеева ($Z < 10$) и в конце таблицы ($Z > 88$) «относительный дефект масс» положителен. Для ядер элементов, находящихся в середине таблицы Менделеева по шкале масс ($10 < Z < 88$) «относительный дефект масс» отрицателен, то есть средняя глубина потенциальной ямы для каждого нуклона в таких ядрах больше, чем соответствующая глубина ямы для нуклонов в ядре ${}^{12}_6\text{C}$. Именно положительный «относительный дефект масс» и обуславливает возможность получения энергии при ядерных реакциях слияния «лёгких» ядер и при реакциях распада «тяжёлых» ядер.

Модели ядер

Для объяснения полученных экспериментально различных свойств ядер выдвинута гипотеза о так называемом «насыщении» ядерных сил, аналогичном идее о химической валентности различных атомов. Суть её в том, что каждый нуклон может взаимодействовать только с расположенными рядом с ним нуклонами (на расстояниях порядка $R_0 = 10^{-15}$ м). Максимальное количество ближайших соседей ограничено. С нуклонами, находящимися на расстоянии нескольких R_0 , взаимодействие практически отсутствует. Если нуклон находится на «границе» ядра, то число ближайших соседей у него меньше, чем у тех нуклонов, которые находятся «в глубине», то есть, окружены соседями со всех сторон. Отсюда возникла «капельная» модель ядра. Те молекулы (нуклоны в составе ядра), которые находятся на поверхности капли, характеризуются меньшей глубиной потенциальной ямы. Избыточная энергия так и называется: «поверхностная энергия».

«Капли-ядра» заряжены, и положительный заряд распределён по объёму. Роль кулоновского отталкивания протонов в ядрах растёт по мере увеличения их количества. Если Z – число протонов в ядре, а его массовое число A , то нейтронов в ядре $N = A - Z$ штук. Энергия связи ядер (дефект масс), находящихся в основном состоянии, хорошо аппроксимируется формулой Вайцзеккера:

$$E_{\text{связи}} = \alpha A - \beta A^{\frac{2}{3}} - \gamma Z^2 A^{-\frac{1}{3}} + \dots$$

Первое слагаемое соответствует максимальной энергии, которую имеют все нуклоны, будучи со всех сторон окружёнными соседями, величина α равна примерно 8 МэВ на нуклон. Второе слагаемое учитывает наличие «поверхности». Третье слагаемое учитывает вклад кулоновского взаимодействия. Три точки указывают на то, что в формуле ещё есть слагаемые, которые мы не выписали, поскольку не обсуждаем ядерное взаимодействие с достаточной



«глубиной». Приведённая формула с одинаковыми для разных ядер коэффициентами α, β, γ очень хорошо описывает энергию связи для более чем 100 различных ядер.

Точные вычисления энергии связи (на основе экспериментальных данных) для разных ядер выявляют отклонения от величин, предсказываемых на основе «капельной» модели. В частности существуют определённые наборы протонов и нуклонов, для которых энергия связи, приходящаяся на один нуклон, имеет максимальное значение. Им соответствуют так называемые «магические числа» для ядер: 2, 8, 20, 50, 82, 126.⁵ Например, для ядра изотопа кислорода ${}^{16}_8\text{O}$ с двумя магическими числами протонов (8) и нейтронов (8) «относительный дефект масс» равен примерно $-0,29$ МэВ/нуклон. А для ядер с той же массой ${}^{16}_9\text{F}$ и ${}^{16}_7\text{N}$ соответствующие величины равны $+0,67$ МэВ/нуклон и $+0,355$ МэВ/нуклон. Налицо локальный максимум удельной энергии связи для нуклонов.

Такая особенность ядерного взаимодействия послужила основой для возникновения так называемой «оболочечной» модели ядер, которая описывает устройство ядра наподобие описания устройства атомов, в которых электроны «заселяют» определённые состояния. Нуклонным состояниям соответствуют определённые пространственные и энергетические характеристики.

Ядерные спектры

Так же, как и для электронов в атомах, в ядрах для нуклонов существуют разрешённые состояния. Находясь в таком состоянии, ядро не излучает и не поглощает энергию. Этим состояниям соответствуют определённые энергии нуклонов в ядре. При этом так же, как и в атоме, система нуклонов может поглощать энергию (электромагнитную) и переходить в состояние с большей энергией – возбуждённое состояние, или переходить из возбуждённого состояния в состояние с меньшей энергией. При переходе из возбуждённого состояния в состояние с меньшей энергией, например, в основное состояние, такие ядра испускают порции электромагнитной энергии – кванты света. Каждое ядро характеризуется своим набором разрешённых уровней энергии, и, соответственно, своим спектром энергии излучения или поглощения. Чаще всего в естественных условиях возбуждённые ядра возникают в процессах распада неустойчивых (радиоактивных) ядер. Возможно получение ядер в возбуждённых состояниях и в результате облучения ядер мишени гамма-квантами, протонами, нейтронами или альфа-частицами. Например, при захвате ядром мишени нейтрона получается ядро в возбуждённом состоянии. При таком захвате ядро и нейтрон движутся с ускорениями, но поскольку масса ядра-захватчика гораздо больше массы нейтрона, в этом процессе сбрасывается очень мало электромагнитной энергии, поэтому энергия возбуждения равна примерно 8 МэВ – энергии связи нуклонов в ядре.

В спектре излучения и в спектре поглощения ядер имеется дискретный ряд энергий, что роднит ядра и атомы, только энергии квантов света, поглощаемых или испускаемых ядрами, на много порядков превышают энергии квантов света, возникающих при переходах электронов в атомах с одного разрешённого уровня на другой. Для описания этих свойств ядер и применяется «оболочечная» модель ядра. Напомним, что в таблице Менделеева, описывающей свойства различных атомов, имеются определённые закономерности, например, периодическое повторение химических и физических свойств атомов. В случае ядер также имеются такие закономерности.

⁵ Напомним, что для электронных оболочек в атомах «магическими» являются числа: 2, 8, 18, 32, 50 – они соответствуют максимальным количествам электронов, «живущих» на энергетических уровнях, соответствующих главным квантовым числам 1, 2, 3, 4, 5. Правда атомов с полностью заполненной 5-й оболочкой не существует.