

ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ И СТРОЕНИЕ ЯДРА В СВЕТЕ ГЕОМЕТРОДИНАМИЧЕСКОЙ ИДЕИ ДЖ.УИЛЕРА

В работе с точки зрения механистической интерпретации геометродинамической идеи Дж.Уилера на единой основе делается попытка объяснить природу ядерных сил как результат сложной структуры нуклонов и представить модель строения атомных ядер. Показано, что допущение о существовании замкнутых контуров, включающих в себя электрон и протонные кварки, приводит к выводу о наличии W, Z - бозонов и бозона Хиггса, масса которого рассчитывается. Вычислены значения констант связи в сильном и слабом взаимодействиях и показано, что они указывают не на силу взаимодействия, а лишь на прочность связей внутри элементов нуклонной структуры. Определены энергии связи дейтрона, тритона и альфа-частицы. Объяснена зависимость нуклон-нуклонного взаимодействия от расстояния. Предложена схема строения ядра, доказана неизбежность наличие в нем оболочек, получены выражения, позволяющие учитывать особенности структуры ядер, а также рассчитывать энергию связи ядра и их массовые числа. Результаты расчетов на уровне модели указывают на возможность ее применения для построения соответствующей теории.

1 Введение

В настоящее время отсутствует завершенная теория ядерной структуры, которая объясняла бы все свойства атомных ядер. Для описания свойств и поведения атомных ядер используются различные модели, каждая из которых базируется на тех или иных экспериментальных фактах и позволяет объяснить некоторые выделенные свойства ядра. Одной из причин тому является то, что до сих пор не установлена аналитическая зависимость для сил взаимодействия между нуклонами.

В квантовой теории взаимодействие между микрочастицами описывается как обмен специфическими квантами (фотонами, пи-мезонами, глюонами, векторными бозонами), ассоциированными с данным типом взаимодействия. Безразмерный параметр, определяющий относительную силу какого-либо взаимодействия (константа взаимодействия или константа связи α) полагается пропорциональным заряду источника взаимодействия по аналогии с зарядом электрона в электромагнитном взаимодействии:

$$\alpha_e = e^2/\hbar c = 1/137, \quad (1)$$

где e - заряд электрона (в системе CGSE).

Однако, проблема заключается в том, что как для сильного, так и для слабого взаимодействий механизм взаимодействия и, соответственно, константа связи для него сильно зависят от энергии взаимодействия (расстояния) и определяются в эксперименте.

В свете разрабатываемой модели, основанной на механистической интерпретации геометродинамической идеи Дж.Уилера [1], такое разнообразие типов и механизмов взаимодействий представляется странным и неоправданным. В отличие от квантовой теории, утверждающей, что микроявления никак не могут быть поняты с точки зрения масштабов нашего мира, механистическая интерпретация идеи Уилера прежде всего предполагает наличие единых или аналогичных природных закономерностей, которые воспроизводятся на различных масштабных уровнях материи, что, в частности, позволяет использовать макроанalogии применительно к объектам микромира.

Предлагаемая модель ядерных сил и строения ядра, как и предыдущие работы [2-5], основывается только на общих законах сохранения и балансах между основными силами (гравитационными, инерционными, электрическими и магнитными), причем в нее не вводятся какие-либо произвольные параметры и коэффициенты. Не используя сложного математического аппарата, данная работа является не физико-математической, а скорее физико-логической моделью. Тем не менее, приложение идеи Уилера к данной сфере микро-

явлений позволило прояснить причину и характер ядерных сил и дать разумную схему строения ядра, что и подтверждается примерами успешных расчетов, выполненных на основе представленной модели.

2 Исходные предпосылки

Напомним, что в данной статье, как и ранее в предыдущих работах, заряды в соответствии с идеей Уилера рассматриваются как особые точки на трехмерной поверхности, соединенные «червоточиной» или трубками тока по типу сток-исток через дополнительное измерение, образующими в целом замкнутый контур.

Наиболее близкой аналогией в масштабах нашего мира являлись бы поверхность идеальной жидкости, возникающие в ней вихревые образования и соответствующие взаимодействия между ними, формирующие как рельеф ее поверхности, так и подповерхностные структуры (вихревые нити и трубки).

В такой модели нет места для *заряда* как особой материи, и он лишь отражает меру неравновесности вакуума и пропорционален количеству его движения по контуру вихревой трубки тока, *спин*, соответственно, - моменту количества движения относительно продольной оси контура, а *магнитное взаимодействие* между проводниками аналогично силам, действующим между трубками тока.

Разумеется, в данной модели точка или линия считаются физическими объектами, обладающими определенными размерами; исходными параметрами приняты масса электрона и его классический радиус, т.е. m_e и r_e .

В такой постановке *электрическая постоянная* становится погонной плотностью вихревой трубки:

$$\varepsilon_0 = m_e/r_e = 3.233 \cdot 10^{-16} \text{ кг/м}, \quad (2)$$

величина, *обратная магнитной постоянной*, - центробежной силой

$$1/\mu_0 = c^2 \varepsilon_0 = 29.06 \text{ н}, \quad (3)$$

возникающей при вращении элемента вихревой трубки с массой m_e со скоростью света c по радиусу r_e ; она же эквивалентна силе, действующей между двумя элементарными зарядами на данном радиусе, а *заряд электрона* - импульсом трубки тока (контура), массой $m_e c_0^{2/3}$ и обладающий скоростью $c_0^{2/3} \cdot [м/с]$, энергия которого равна предельной энергии электрона $m_e c^2$:

$$e = m_e c_0^{4/3} \cos q_w \cdot [м/с] = 1,603 \cdot 10^{-19} \text{ кгм/с}, \quad (4)$$

где c_0 - безразмерная скорость света или $c/[м/с]$, q_w угол Вайнберга, равный 28.7° .

Вихревые образования в жидкости могут пребывать в двух крайних формах - вихревой воронки *на поверхности* с радиусом r_x по оси X (аналог фермиона с массой m_x) и вихревой нити или трубки тока *под поверхностью* вглубь, с окружной скоростью вращения v , радиусом r и длиной l_y по оси Y (аналог бозона с массой m_y). В реальной среде эти структуры осциллируют, переходя друг в друга (осцилляция осцилляторов). По-видимому, частицы-фермионы сохраняют бозонную часть с половинным спином, определяющую их магнитные и спиновые свойства, а при их полном переходе в бозонную форму спин восстанавливается до целого значения. Вихревая нить в свою очередь способна, скручиваясь в спираль, радиусом r_e , образовывать последующие структуры (трубки тока). Возможность взаимных переходов фермионной и бозонной форм показывает, что масса (энергия) может пребывать в двух видах и переходить из одной формы в другую.

В работе [2], исходя из условий сохранения заряда и постоянства параметров μ_0 и ε_0 , параметры вихревой нити m_y , v , r для произвольного p^+ - e^- контура определены в единицах массы электрона и долях от скорости света и радиуса электрона как:

$$m_y = (an)^2, \quad (5)$$

$$v = c_0^{1/3}/(an)^2, \quad (6)$$

$$r = c_0^{2/3}/(an)^4, \quad (7)$$

где n - квантовое число, a - обратная постоянной тонкой структуры.

Причем, имея в виду постоянство ε_0 (погонной плотности), очевидно, что относительная длина трубки тока в единицах r_e равна бозонной массе m_y в единицах m_e , т.е.

$$l_y = m_y = (an)^2. \quad (8)$$

В нашей модели частицы сами представляет собой контур последующего порядка, образующийся при пересечении поверхности X трубкой тока, и обладают собственными квантовыми числами, определяющими зону влияния этих микрочастиц. В работе [3] определено, что для протона

$$n_p = (2c_0/a^5)^{1/4} = 0.3338, \quad (9)$$

для электрона $n_e = (n_p)^{1/2} = 0.5777$, а для критического контура, когда $r \rightarrow r_e$ и $v \rightarrow c$, $n_k = c_0^{1/6}/a = 0.189$.

Далее все числовые значения массы размера и скорости приводятся в безразмерных единицах: в долях от массы электрона m_e , его радиуса r_e и скорости света c .

Важно отметить, что контур или вихревую трубку, которую вихревая нить заполняет спирально, можно рассматривать как полностью «растянутую», т.е. удлиненную кратно величине $1/r$ или, наоборот, предельно «сжатую», т.е. укороченную кратно $1/r$ и заполняющую все вихревую трубку радиусом r_e . В последнем случае ее сжатая длина $L_p = l_y r$ численно совпадает с энергией бозонной массы контура в единицах энергии-массы $m_e c^2$.

Действительно, так как $r = v^2$, то значения вышеприведенных величин в безразмерных единицах во всех случаях одинаковы

$$L_p = l_y r = m_y r = m_y v^2 = c_0^{2/3}/(an)^2. \quad (10)$$

Очевидно, что произвольная бозонная масса в единицах энергии-массы будет совпадать с собственной величиной m_y только в случае предельного возбуждения вихревой трубки, когда $r \rightarrow r_e$ и $v \rightarrow c$.

Приведем для упомянутых трех характерных контуров некоторые параметры. Подставляя в формулы (7) и (8) параметры n_e , n_p и n_c находим характерные размеры вихревых трубок: для электрона радиус вихревой нити $r = 0.0114$, длина вихревой нити $l_y = 6267$, для протона $r = 0.1024$, $l_y = 2092$, для критического контура $r = 1$, $l_y = 670$.

Что касается принятой *схемы строения нуклонов*, то в работе [3] показано, что протон имеет сложное строение при рассмотрении его на различных масштабах по мере увеличения энергии взаимодействия, т.е. как бы по мере «углубления» его вдоль оси Y , поэтому и ядерные силы для внешнего наблюдателя имеют сложный характер.

Во *внутренней области* протона существуют три критических сечения (кварки), каждое из которых пересекают по три силовые линии (заряды $+1$, $+1$, -1). Наличие *обратных циркуляционных токов*, образующие три замкнутых контура, приводит к тому, что для на-

ружного наблюдателя области пересечения силовыми линиями критических сечений внутри протона будут проецироваться на его *наружную поверхность* в виде $+2/3$, $+2/3$, $-1/3$ от полного заряда.

Вдоль оси Y расположена *бозонная вихревая трубка* протона с параметрами $m_{py} = 2092$ и $r_p = 0.1024$. Наиболее «глубоко» по оси Y расположены *кварковые вихревые трубки*, имеющие параметры, определенные в работе [3]: квантовое число $n_k = 0.480$, суммарная фермионная масса $m_{kx} = 12.9$, суммарная бозонная масса $m_{ky} = 4324$, радиус вихревой трубки $r_k = 0.024$.

Необходимо отметить, что величина параметра r_k подтверждается работами по изучению *поляризуемости* нейтрона в процессе экспериментов по измерению сечения рассеяния нейтронов на малые углы. В работе [6] приведено значение нижней границы коэффициента поляризуемости $a_p = 0.4 \cdot 10^{-42} \text{ см}^3$. Это означает, что линейный параметр неоднородности в структуре нейтрона совпадает с радиусом вихревой трубки кварка, так как $(a_p)^{1/3} = 7.37 \cdot 10^{-15} \text{ см}$ или $0.026 r_e$.

Нейтрон имеет три замкнутых контура, т.е. шесть силовых линий вместо девяти у протона и, соответственно, общая масса его кварков $12.9 \cdot 2/3 = 8.6$. Имея в виду принятое направление и возможное распределение силовых линий в нейтроне [3], можно ожидать, что в случае поляризации нейтрона он может иметь заряды во внутренней области $+1$, -1 или -1 , $+2/3$, $+1/3$, а в проекции на наружную поверхность $-2/3$, $+1/3$, $+1/3$.

В контуре, соединяющим заряженные частицы, кварки вовлекаются в циркуляцию и становятся активной частью массы нуклона. Предполагается, что в критических сечениях скорость достигает скорости света, поэтому кварки фактически являются *скрытой массой, эквивалентной дефекту масс*, отражающему энергию связей внутри нуклонов или ядер; номинальная масса-энергия одного кварка для протона составляет $0.511 \cdot 12.9/3 = 2.2 \text{ МэВ}$.

При рассмотрении замкнутого контура с противонаправленными токами из условия баланса магнитных и гравитационных сил, записанного в «безкулоновой» форме, выведен характерный размер контура как *среднегеометрическое* из двух линейных величин:

$$l_k = (l_i r_i)^{1/2} = (z_{g1} z_{g2} / z_{e1} z_{e2})^{1/2} (2\pi \gamma \epsilon_0)^{1/2} * [c], \quad (11)$$

где z_{g1} , z_{g2} , z_{e1} , z_{e2} , r_i , l_i - гравитационные массы и заряды в массах и зарядах электрона, расстояние между трубками тока и их длина.

Количество вихревых нитей, составляющих контур, отражает отличие материальной среды от вакуума, а их наибольшее значение соответствует отношению электрических сил к гравитационным силам, т.е. величине:

$$f = c^2 / (\epsilon_0 \gamma) = 4.16 \cdot 10^{42}, \quad (12)$$

где γ - гравитационная постоянная.

Контур можно рассматривать расположенным, как в области X (например, контур p^+ - e^- в атоме), так и в области Y (вихревая трубка в ядре атома). При сближении протона и электрона и деформации контура, например при его сокращении в случае e -захвата, энергия и фермионная масса контура увеличиваются, бозонная масса уменьшается, но импульс (заряд) сохраняется.

Выражение (11) для единичных зарядов, принимая $z_{g2} = 1$ и после вычисления постоянных, получает вид в единицах r_e и m_e :

$$m_k = z_{g1} = b l_k^2, \quad (13)$$

где m_k - масса протонного кварка, вовлеченного в контур циркуляции, $b = 5.86 \cdot 10^{-5}$.

Параметр l_k является составным. Для контура (вихревой трубки), направленного вдоль оси Y $r_i = r$, $l_i = l_y$, если контур направлен вдоль X, то при расчете параметры заменяются, т.е. $r_i = l_y$, $l_i = r$. Имея в виду (7), (8), (11), (13), заменяя произвольные параметры r_i и l_i на размеры короткой и длинной осей контура и вычисляя постоянные, получаем выражения, связывающие массу кварка и линейные параметры контура:

$$m_k = 26.25/r = 0.0392 l_y^{1/2}, \quad (14)$$

а также

$$r l_y^{1/2} = c_0^{1/3}. \quad (15)$$

3 О бозонных массах

Параметры контуров в областях X и Y в общем случае не совпадают, но оба включают в себя массу кварка, которая зависит от размера контура. Сравним параметры этих контуров для некоторых характерных случаев.

Рассмотрим X-контур собственно электрона при $n_e = 0.5777$. Его размер по оси X, имея в виду (8), $r_i = l_y = 6267$. Из (14) находим массу кварка $m_k = 3.10$. Что бы иметь такую же величину массы-энергии L_p Y-контур, как следует из (10), должен иметь квантовое число $n = 2.77$. Бозонная масса такого контура по (5) $m_y = 1.44 \cdot 10^5$, что близко массе W^+ -бозонов.

Рассмотрим контур собственно протона при $n_p = 0.3338$. Его размер по оси X $r_i = l_y = 2092$ и масса кварка $m_k = 1.795$. Y-контур, имеющий такую же величину массы-энергии, имеет $n = 3.645$. Бозонная масса такого контура $m_y = 2.494 \cdot 10^5$, что почти точно *соответствует массе бозона Хиггса* (125 ГэВ).

Рассмотрим критический контур при $n_k = 0.189$. Его размер по оси X $r_i = l_y = 672$ и масса кварка $m_k = 1.02$. То есть в предельном случае *масса кварка становится равной массе электрона*. Y-контур, имеющий такую же величину массы-энергии, имеет $n = 4.884$, т.е. является стандартным контуром [2]. Бозонная масса такого контура $m_y = 4.48 \cdot 10^5$, что близко суммарной массе W, Z - бозонов.

Таким образом, полученные соотношения между массами частиц, участвующими в слабом взаимодействии (кварками, бозонами, протоном и электроном) в определенной степени проясняют природу слабого взаимодействия и физический смысл его интерпретации как «обмен бозонами». Оказывается, что W, Z - бозонами и бозоном Хиггса являются вихревые трубки, имеющие величину массы-энергии равную массе-энергии кварков, включенных в контуры циркуляции, соответствующие собственным электронному, протонному или критическому контурам. Причем, в процессе слабого взаимодействия X-контур сокращается и при выполнении данного условия переориентируется в область Y, передавая импульс (заряд) протону при сохранении спина (в случае e-захвата, например), выделяясь далее в виде нейтрино [3].

Из вышеизложенного следует, что нет оснований считать бозон Хиггса особой уникальной частицей в микромире.

4 Константы связи

В работе [5] получено выражение, из которого следует, что единичный контур или вихревая трубка, имеющие *импульс, эквивалентный заряду электрона*, содержат три единичные вихревые нити. После преобразований это выражение можно представить в виде:

$$n_i^3 = \frac{m_e c_0^{2/3} r_e / ((2\pi)^{1/2} [c^2])}{2\pi \gamma m_e^2 / r_e^2} = 26.25. \quad (16)$$

Выражение представляет собой отношение сил инерции, возникающих при ускорении бозонной массы стандартного контура и действующих по направлению к периферии (ве-

величина $r_e / ((2\pi)^{1/2} * [c])$ есть скорость вращения вихревых нитей относительно продольной оси контура [3]), к силам гравитации, действующим между массами величиной m_e на расстоянии r_e . Числитель есть величина постоянная, поэтому выражение зависит только от сил гравитации, т.е. от взаимодействующих масс и расстояния между ними. Это отношение (или его модификация для произвольных m_i и r_i) может служить эквивалентом *константы связи*, т.к. указывает на прочность связей между элементами структуры протона (кварками).

4.1 Сильное взаимодействие

Пусть кварки расположены в углах правильного треугольника на расстоянии r_e . В этом случае на каждый из них действует сумма двух проекций сил, поэтому знаменатель в (16) следует скорректировать множителем $2\sin 60^\circ$. В итоге выражение (16) в относительных единицах m_e и r_e после вычисления постоянных принимает вид:

$$a_s = 15.15(r_i/m_i)^2. \quad (17)$$

Рассмотрим случай сильного взаимодействия при малых энергиях когда параметр r_i больше размера нуклона r_n . Пусть масса протонного кварка принимает минимальное значение m_e (п.3), а расстояние между кварками r_e ; подставляя $r_i=1$, $m_i=1$ в (17), получаем $a_s=15.15$, что совпадает с известной определенной при малых энергиях величиной $a_s \sim 15$.

Следует ожидать, что при $a_s=1$ существует равновесие между силами притяжения и периферийными силами инерции, что позволяет определить номинальный размер протона. Действительно, при этом условии из (17) следует $r_i = 0.257$, а размер вихревой трубки, соответственно, равен $0.257/\sin 60^\circ = 0.297$ или 0.84 фм, что совпадает с радиусом протона.

Рассмотрим случай сильного взаимодействия при $r_i < r_n$, когда энергия взаимодействующих частиц велика (около 100 ГэВ), и они сближаются на минимальное расстояние вихревой трубки протона $r_p = 0.1023$ (п.2). В этом случае расстояние между кварками, вписанными в вихревую трубку протона, составляет $r_i = r_p \sin 60^\circ = 0.0887$. Подставляя r_i и $m_i=1$ в (17), получаем $a_s = 0.119$. Это расчетное значение совпадает с экспериментальными данными. Действительно, в работе [7] установлено, что при данной энергии $a_s = 0.1176 \pm 0.0024$.

Теперь становится понятным физический смысл большого различия по величине данного типа взаимодействий. При малых энергиях взаимодействующих частиц, затрагивающих только наружную структуру нуклонов ($r_i > r_n$, малая «глубина» по Y), периферийные силы инерции превосходят силы притяжения, поэтому элементы структуры (кварки) слабо связаны между собой, могут удаляться от исходного положения и взаимодействовать с кварками близлежащих нуклонов. При больших энергиях ($r_i < r_n$, большая «глубина» по Y) взаимодействие происходит на уровнях, когда силы взаимного притяжения удерживают кварки в связанном состоянии в пределах размера нуклона, что приводит к снижению эффективности взаимодействия микрочастиц в целом.

Отметим, что в ядрах атомов кварки могут находиться в связанном состоянии также по причине их большой массы, которую они приобретают при вхождении в состав p^+ - e^- контуров.

4.2 Слабое взаимодействие

При слабом взаимодействии, например, при e^- -захвате участвует бозонная часть протона или кварковые вихревые трубки (п.3).

Примем, что масса каждой из трех кварковых трубок $m_i = m_{ky}/3 = 4324/3 = 1441$ (п.2). Подставляя m_i и $r_i=1$ в (17), находим $a_w = 0.73 \cdot 10^{-5}$. Эта величина согласуется со значением a_w , определенным через константу Ферми ($1 \cdot 10^{-5}$). При больших энергиях взаимодействия (около 100 ГэВ) константа a_w увеличивается до значения $\sim 1/40$, и в нашей модели это увеличение также может быть объяснено.

При предельном возбуждении вихревой трубки контура, на уровне кварков, когда $v \rightarrow c$ и $r \rightarrow r_e$, бозонная масса становится эквивалентной массе-энергии, но, поскольку параметры ε_0 и μ_0 являются постоянными, то пропорционально отношению r_e/r увеличивается и радиус вихревой трубки. Так как $r_e/r_k = 41.7$, то в данном случае $r_i = 41.7$, и параметр a_w увеличивается пропорционально квадрату этого отношения, т.е. $a_w = 0.73 \cdot 10^{-5} \cdot 41.7^2 = 1/78$, что согласуется с величиной a_w , определенной при высоких энергиях.

4.3 Об электроне

Применим выражение (17) к собственно электрону. Электрон содержит три вихревые нити. Полагая $r_i = r_e$ и учитывая, что бозонная масса одной электронной вихревой нити равна $m_i = (an_e)^2 / 3 = 2089$ и совпадает с бозонной массой протона, очевидно, что *константа связи для электрона в слабом взаимодействии одинакова с таковой для протона*.

Что касается сильного взаимодействия, то в данном случае $m_i = 1/3 m_e$. Подставляя в (17) $r_i = 1$ и $m_i = 1/3$, находим $a_s = 136.4 \approx a$. Исходя из огромной величины константы связи a_s , структура электрона не может находиться в связанном состоянии, в равновесном же состоянии при $a_s = 1$ размер электрона был бы очень мал при $r_i = 0.086$. Но на таком малом радиусе электрона не может разместиться его заряд согласно классическому определению, по которому потенциальная энергия электростатического поля полностью эквивалентна массе покоя электрона.

Таким образом, электрон для разрешения этого противоречия и своего существования обязан постоянно колебаться между этими состояниями (размерами). Его пульсации и обеспечивают движение среды по $p^+ - e^-$ контурам тем самым подтверждая определение заряда как импульса.

Подводя итоги главы 4 можно сказать, что *константа связи* не определяет ни природу ядерных сил, ни силу взаимодействия, а лишь *указывает на прочность связей внутри сложной структуры нуклонов*.

5 Ядро

При рассмотрении далее ядерных сил оказалось достаточным учета кулоновского взаимодействия при различных уровнях энергий (расстояниях), из чего следует вывод, что введения какие-либо особых ядерных сил не требуется, по крайней мере, в пределах данной модели.

Что касается схемы строения ядра, то в определенной степени предлагаемая схема ассоциируется с коллективной моделью (Дж. Рейнуотер, 1959, О. Бор и Б. Моттelson, 1952). Эта модель сочетает положения гидродинамической и оболочечной моделей и предполагает, что ядро состоит из внутренней устойчивой части - остова, образованного нуклонами заполненных оболочек, и внешних нуклонов, движущихся в поле, создаваемом нуклонами остова.

5.1 Ядерные силы

Существуют ли вообще особые ядерные силы?

При больших энергиях и малых расстояниях, т.е. при сближении нуклонов до их радиуса $r_n = 0.842$ фм и перекрытия их *внутренних структур*, взаимодействие между нуклонами происходит внутри их общего кваркового мешка между разноименными кварками, имеющими внутри структуры нуклона заряды $+1$ и -1 на расстоянии размера его вихревой трубки. Примем, что масса кварка минимальна и равна m_e , т.е. он идентичен электрону, тогда размер его вихревой трубки равен размеру таковой для электрона $r_k = 0.0114$ (п.2).

Запишем выражение для потенциала в единицах МэВ и долях от r_e . Глубина потенциала притяжения на минимальном расстоянии для единичных зарядов составит

$$V = - 0.511 / r_k, \quad (18)$$

что дает - 44.8 МэВ (рис.1).

При дальнейшем сближении нуклонов при еще большей энергии (большая «глубина» по Y) добавляется взаимодействие на уровне бозонных вихревых трубок нуклонов. Понятно, что однонаправленные вихревые трубки отталкиваются, причем по мере «углубления» по Y их радиус r уменьшается (здесь роль магнитных сил притяжения пренебрежимо мала). Так как масса на единицу длины уменьшается пропорционально квадрату радиуса, то местная величина электрической постоянной (погонной плотности) ϵ_0 уменьшается пропорционально отношению r/r_e . То есть отталкивающий потенциал в итоге увеличивается обратно пропорционально квадрату расстоянию, и итоговая зависимость потенциала от расстояния получает вид:

$$V = 0.511(-1/r_k + 1/r^2) \text{ МэВ}. \quad (19)$$

Вне кваркового мешка на расстоянии диаметра нуклона происходит кулоновское взаимодействие между дробными зарядами различного знака, находящимися на *внешней поверхности* протонов. Притягивающий потенциал при этом резко уменьшается, для протонов - пропорционально произведению $1/3 \cdot 2/3 = 2/9$. Таким образом, на расстоянии $2r_n = 1.684$ фм притягивающий потенциал снижается до величины $2/9 \cdot 44.8 = 9.96$ МэВ.

Еще одну опорную точку для построения зависимости $V(r)$ можно найти, если приравнять кулоновские силы отталкивания между двумя протонами на расстоянии между их центрами к остаточным силам притяжения, действующими между дробными зарядами, расположенными на внешней поверхности протонов. В таком случае справедливо:

$$e^2/(\epsilon_0 r^2) = (2/9) \cdot e^2/(\epsilon_0 (r - 2r_n)^2), \quad (20)$$

откуда получаем $r = 2r_n / (1 - \sqrt{2/9}) = 3.78r_n = 3.19$ фм, т.е. расстояние, на котором силами притяжения между нуклонами можно пренебречь.

Итоговая зависимость $V(r)$ представлена на рис.1 и в целом соответствует фактической зависимости.

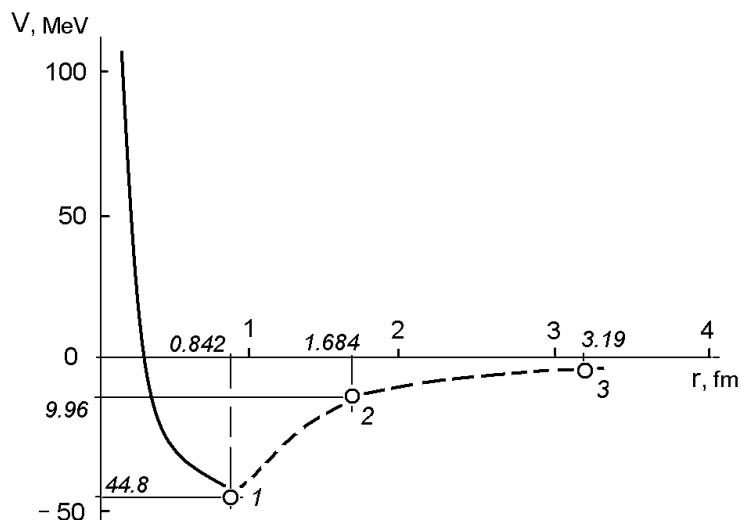


Рис. 1 Зависимость нуклон-нуклонного взаимодействия от расстояния

Таким образом, можно сделать вывод, что никаких особых ядерных сил не существует, а сложное ядерное взаимодействие объясняется силами единой природы (электрическими?), действующими между элементами сложной структуры нуклонов на различных уровнях («глубине» по оси Y), определяемых энергией взаимодействия.

5.2 Энергия связи ядер дейтерия, трития и альфа-частицы

Ядро дейтерия - дейтрон является достаточно рыхлым образованием и поэтому можно предположить, что связь двух нуклонов обусловлена кулоновскими силами между протоном, имеющими на своей *внешней* поверхности дробные заряды $+2/3$, $+2/3$, $-1/3$ и поляризованным нейтроном с зарядами на поверхности $-2/3$, $+1/3$, $+1/3$. Допустим, что нуклоны связаны собственным контуром, имеющим при $n = n_p$ параметры $l_y = 2092$ и $r = 0.1024$ (п.2). При подстановке r в (18), получаем энергию связи (потенциал) в единицах МэВ, связывающий нуклоны в дейтрон: $E_d = 0.511 \cdot (2/3 \cdot 2/3) / 0.1024 = 2.22$ МэВ, что точно соответствует фактической энергии связи дейтрона.

Может ли это быть случайным совпадением? Известно, что хорошее описание характеристик дейтрона даёт выбор межнуклонного $n - p$ потенциала в форме прямоугольной ямы глубиной $V \sim 35$ МэВ и шириной $d = 2$ фм [8]. Принимая, что d есть расстояние между центрами нуклонов, получаем, что расстояние между дробными зарядами на периферии нуклонов составляет $d - 2r_n = 0.316$ фм или $0.112 r_e$. Результат хорошо совпадает с размером вихревой трубки протона, т.е. параметром r , что подтверждает правильность расчета.

Ядро трития - тритон состоит из протона и двух присоединенных нейтронов. Среднеквадратичный зарядовый радиус тритона равен 1.63 фм, поэтому, очевидно, нуклоны находятся в соприкосновении. Допустим, что нейтроны поляризованы на заряды $+1$, -1 . Энергию связи можно определить, суммируя номинальную массу-энергию четырех кварков, участвующих в создании связей. В итоге получаем $E_d = 2.2 \cdot 4 = 8.8$ МэВ, что близко к фактической энергии связи тритона (8.48 МэВ).

Альфа-частица представляет собой сферически симметричный объект радиусом около 2 ферми и является наиболее устойчивой компактной структурой (кластером), которые могут возникать внутри атомного ядра. Если принять, что нуклоны находятся в соприкосновении друг с другом, то при симметричном расположении четырех нуклонов, имеющих радиусы $r_n = 0.842$ фм и образующих в целом замкнутую систему, действительно, радиус α -частицы составит 2.04 фм.

Вылетающая из ядра альфа-частица преодолевает потенциальный барьер и, помимо этого, имеет избыточную энергию в различных диапазонах. По-видимому, кроме массы-энергии восьми кварков, участвующих во взаимодействии, необходимо учитывать также массу-энергию двух протонных кварков, входящих в $p^+ - e^-$ контуры, которая зависит от квантового числа контура, рис.2а. Установлено, что альфа-кластеризация наиболее вероятна в поверхностной области ядра, где плотность ядерной материи уменьшается примерно до одной трети плотности в центральной части ядра [9]. Поэтому можно принять, что протоны альфа-частиц, покидающих ядро, связаны со второй электронной оболочкой (на первой всего два электрона).

Из (8), (13) и (14) следует, что масса кварков, входящих в $p^+ - e^-$ контур, пропорциональна квантовому числу:

$$m_k = b a c_0^{1/3} n = 5.377 \cdot n, \quad (22)$$

т.е. для второй оболочки их масса равна 10.75. В итоге, учитывая потенциал отталкивания двух протонов (~ 0.6 МэВ при указанном на схеме расстоянии 2.38 фм), получаем: $E_a = 0.511 \cdot (4.3 \cdot 8 + 10.75 \cdot 2) - 0.6 = 28.0$ МэВ, что хорошо соответствует фактической энергией альфа-частицы (28.2 МэВ).

Можно определить энергию связи из других соображений, суммируя энергию связанных разноименных зарядов, предполагая, что расстояние между ними равно радиусу вихревой

трубки электрона $r = 0.0114 = 0.032$ фм, рис.2б. Другие положительные заряды кварков протонов связаны с электронами атома, а остаточные отрицательные заряды нейтронов создают потенциал отталкивания. Связи образуют замкнутую систему, поэтому можно считать, что энергия связи альфа-частицы есть усредненная энергия связи одного звена, при разрушении которого распадается вся частица. Действительно, известно, что для удаления только одного нуклона из альфа-частицы необходима энергия около 20 МэВ [9].

Учитывая вышеизложенное, имея в виду принятую схему расположения зарядов, геометрию альфа-частицы и указанные размеры, можно записать итоговое выражение для энергии связей как среднюю энергию на одну связь за вычетом потенциалов отталкивания протонов как целых единиц и потенциалов отталкивания дробных зарядов нейтронов:

$$E_a = 1/4*(1*1+1/3*1+1*1+1/3*1)*0.511/r - 1*1*0.511/b - (2/3*2/3)*0.511/c, \quad (21)$$

где b и c вычислены из геометрических соображений и равны $b = 2r_n\sqrt{2} = 2.38$ фм или 0.845, $c = 2r_n(\sqrt{2}-1) = 0.697$ фм или 0.248. Подставляя значения, получаем $E_a = 28.3$ МэВ, что совпадает с фактическим значением.

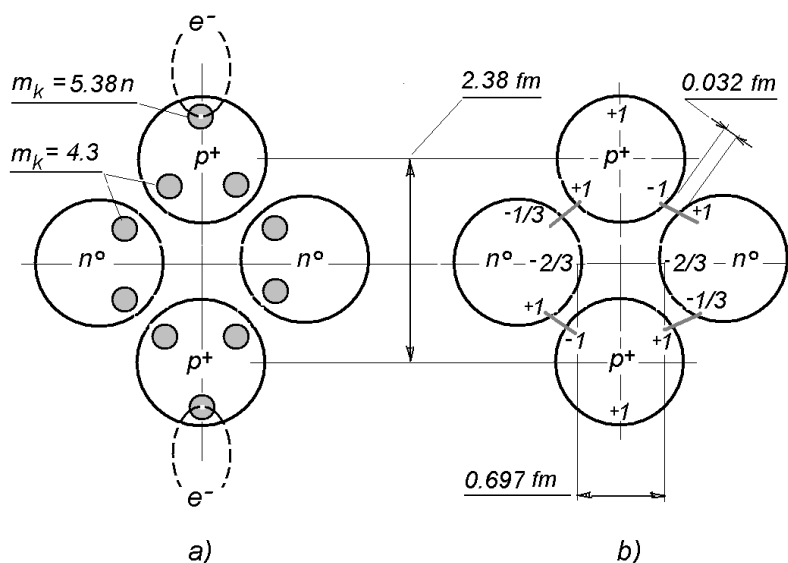


Рис. 2 Расчетная схема альфа-частицы: а - исходя из масс кварков, б - исходя из энергии связей кварков

Известно, что атомные ядра можно рассматривать как систему нуклонов и одновременно как систему большого числа кластеров различной природы, находящихся в динамическом равновесии, т.е. распадающихся, вновь образующихся и обменивающихся как нуклонами, так и энергией [10]. Чем ближе к центру ядра находятся протоны, тем большую энергию они имеют, т.к. масса-энергия протонных кварков, входящих в p^+ - e контуры, увеличивается пропорционально квантовому числу. При передаче энергии из центра и от внутренних оболочек на периферию альфа-частицы, покидающие поверхность ядра, имеют избыток энергии, равной разности энергий соответствующих уровней, т.е., имея в виду (22) и при переводе в единицы энергии, $E_a = 2.75(n_2 - n_1)$ МэВ.

Таким образом, при передаче возбуждения от третьей оболочки ко второй альфа-частица, имеющая два протона, может иметь энергию, не более $2*2.75 = 5.5$ МэВ, а при передаче от четвертой ко второй - вдвое большую, не более 11 МэВ.

Действительно, для испускаемых альфа-частиц наблюдаются два диапазона энергий, имеющих указанные верхние границы: 2 - 4 МэВ для редкоземельных элементов и 4 - 9 МэВ для трансвинцовых [11]. Немногочисленные *длиннопробежные* альфа-частицы, обладающие большей энергией, получают энергию после ряда столкновений от протонов, находящихся в центре ядра, которые связаны с пятой, шестой и седьмой оболочками; соответственно, их максимальная энергия может достигать величины $2 \cdot 2.75(7 - 2) = 27.5$ МэВ. Полученное значение точно совпадает величиной максимальной энергии альфа-частиц, определенной при изучении деления тяжелых ядер с образованием трех заряженных частиц [12]. Причем в энергетическом спектре таких частиц отсутствует какая-либо тонкая структура, это и понятно, так как энергию такие частицы получают от однородно упакованных протонов в сердцевине ядра в кварковый мешок, а не от структурных единиц в составе ядерных оболочек, обладающих определенной индивидуальностью.

Следует отметить, что разность энергии связей между соседними изотопами для ядер почти всех элементов находится в пределах от 20 МэВ (для изотопов с наименьшим количеством нейтронов) до 2 МэВ (для изотопов с наибольшим количеством нейтронов). То есть в подавляющем большинстве случаев эти разности энергий заключены в интервале от номинальной массы-энергии кластера $2.2 \cdot 8 = 17.6$ МэВ до массы-энергии одного кварка 2.2 МэВ. Это означает, что в первом случае при избытке протонов прибавление одного нейтрона приводит к образованию целого кластера (альфа-частицы), а во втором случае при избытке нейтронов - только к вовлечению в общую связанную структуру ядра еще одного кварка.

Еще одним фактом, подтверждающим, что кластеры образуются только в оболочках с первой по четвертую, является количество изотопов, обедненных нейтронами. Как правило, для большинства элементов (кроме радиоактивных) оно приближается к числу кластеров. Максимальное количество таких изотопов имеет платина ($\text{Pt}^{195} \dots \text{Pt}^{166}$), оно равно числу кластеров во всех четырех оболочках (30).

5.3 О строении ядра

В соответствии с принятой моделью плотность упаковки альфа-кластеров и в целом протонов увеличивается к центру ядра, так как расстояние между вихревыми трубками $p^+ - e^-$ контура уменьшается, а их длина увеличивается. Поэтому электроны, расположенные на более удаленных орбитах, связаны с протонами, расположенными на более глубоких уровнях ядра; таким образом, *в ядре образуются слои или оболочки*, подобные электронным.

Предположим, что расстояние между вихревыми трубками r_i не может быть менее размера альфа-частицы (4 ферми). Это условие ограничивает номер оболочки, электроны которой могут связываться с протонами, входящими в альфа-кластеры и, соответственно, оболочку ядра, глубже которой альфа-кластеры не образуются. Из (14) и (8) следует $n \leq 3.44$. Даже если принять за ограничивающий размер диаметр эквивалентной сферы, равной объему четырех нуклонов альфа-частицы ($\sim r_e$), то и тогда $n < 5$. То есть электроны пятой и последующих оболочек атома связаны с теми протонами в центре ядра, которые уже не входят в состав альфа-кластеров; четвертый слой или оболочка является последним в ядре.

Необходимо отметить, что аналогичное условие для размера нуклона определяет также наибольший возможный номер электронной оболочки атома. Действительно, предполагая $r_i \geq 2r_n$, находим $n_{\max} \leq 8.1$.

Рассмотрим ядро тяжелого атома, например ${}_{82}\text{Pb}^{207}$, где имеется заполненная четвертая электронная оболочка с 32 электронами и, соответственно, четвертый слой из 16 кластеров в ядре. Нетрудно подсчитать внешний и внутренний радиусы такого слоя, полагая, что один альфа-кластер имеет объем, эквивалентный объему четырех нуклонов, т.е. $4 \cdot (2r_n)^3 = 19.1$ фм³. Внутренний радиус равен 2.93 фм. Остальные 22 протона не входят в кластеры, находятся в центре ядра и имеют объем, эквивалентный сфере *точно такого*

же радиуса 2.93 фм. Внешний диаметр ядра в целом при суммировании толщины четырех оболочек составляет $2.93 + 4 \cdot 2r_n = 9.66$ фм, что соответствует размерам тяжелых ядер.

Таким образом, выясняется, что для элементов тяжелее свинца протоны, связанные с электронами пятой и последующих электронных оболочек, уже не полностью «вмещаются» в сердцевину ядра, ограниченную четвертой заполненной оболочкой. С увеличением числа протонов четвертая ядерная оболочка расширяется, в нее включаются дополнительные нейтроны, а радиус ядра увеличивается.

Нейтроны, не входящие в кластеры (для ${}_{82}\text{Pb}^{207}$ таких нейтронов 65), размещаются в оставшемся свободном объеме, вытесняясь во внешние оболочки. Можно предположить, что усредненное расстояние между ними не менее r_e , соответственно, усредненный объем на каждый нейтрон составляет более 22.4 фм^3 , что обеспечивает отсутствие ядерных сил притяжения между ними и их свободное перемещение. Теперь можно подсчитать количество нейтронов в свободном объеме (исключая первую оболочку, которая является переходной граничной структурой, где ядерная и зарядовая плотности резко спадают) и далее массовое число. Для свинца внешний радиус второй оболочки равен $9.66 - 2r_n = 7.98$ фм, ее объем равен 2130 фм^3 . Вычитая из этого объема объем 30 кластеров (120 нуклонов) и вычитая объем 22 нуклонов в центре ядра, получаем объем 1452 фм^3 , в котором могут разместиться 65 нейтронов. В итоге, прибавляя количество протонов (82) и нейтронов в кластерах (60), получаем точное массовое число для стабильного изотопа свинца $A = 207$.

Наибольшая плотность ядерной материи существует в центре ядра и во внутренних оболочках. Полагая, что плотность упаковки нуклонов в сердцевине ядра и примыкающей к ней оболочке одинаковы, т.е. ядерная плотность их одинакова, и исходя из вышеприведенных геометрических соображений, можно получить соотношение между количеством нуклонов в сердцевине ядра z_{cor} и их количеством в примыкающей оболочке z_{env} , которое обеспечивает данное условие однородности:

$$z_{env} = c (1 + (z_{cor}/c)^{1/3})^3 - z_{cor}, \quad (23)$$

где $c = 4\pi/3$.

Соотношение (23) для свинца соблюдается очень точно: 22 нуклонам в центре соответствует 64 нуклона в 4 оболочке (32 протона и 32 нейтрона), так что оказывается, что в сердцевине ядра нейтроны отсутствуют. Для более легких ядер сердцевиной можно считать объем внутренней оболочки, включающей протоны и нейтроны. Условие (23) приблизительно выполняется также для железа (4 нуклона в 4 оболочке, 28 нуклонов в 3 оболочке), ксенона (8 нуклонов в сердцевине, 36 нуклонов в 4 оболочке) и еще нескольких элементов. Причем, для ядер именно таких элементов наблюдаемые электрические квадрупольные моменты близки к нулю. Для большинства других элементов ситуация может быть различной, и в общем случае часть нейтронов внедряется либо в сердцевину ядра, либо в примыкающую оболочку, и такие ядра могут иметь несферическую форму.

Таким образом, для выполнения условия (23) необходимо, чтобы для металлов тяжелее железа, имеющих один-два электрона на четвертой электронной оболочке (кобальт, никель, медь, цинк), дополнительные нейтроны, находящиеся вне кластеров, пополняли внутреннюю четвертую оболочку ядра, а для металлов с $Z = 37 \dots 52$, многих лантаноидов и тяжелых металлов (до свинца) - внедрялись в сердцевину ядра. Для других, в основном неметаллов и элементов тяжелее свинца нейтроны должны пополнять оболочку, примыкающую к внутренней части ядра. На рис.3 показано положение кривой $z_{cor}(z_{env})$ по отношению к исходному количеству нуклонов для стабильных изотопов некоторых элементов.

Таким образом, зная строение электронной оболочки атома и, соответственно, количество протонов в оболочках ядра и его сердцевине, задаваясь числом нейтронов и имея в виду условие (23), можно попытаться воспроизвести строение ядра для различных атомов и их изотопов. Здесь возникает вопрос, насколько точно должно выполняться условие (23) при распределении дополнительных нейтронов?

Т.е. должно ли уравнение (23) решаться в целых числах, как это выполняется для свинца? Возможно, эта особенность определяет некоторые свойства изотопов: время жизни и др.

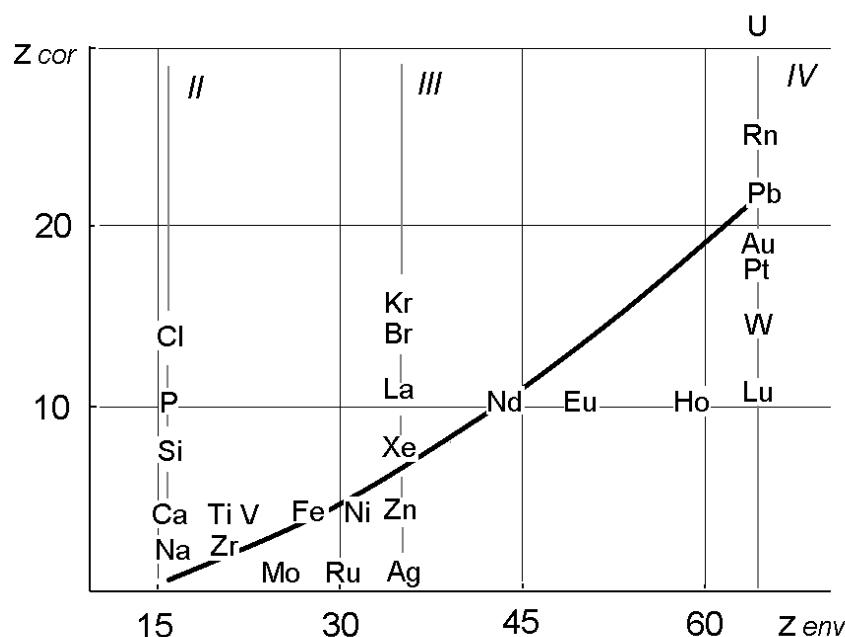


Рис. 3 Условие однородности центральной части ядра по отношению к исходному количеству нуклонов для стабильных изотопов некоторых элементов

Для заполнения внешних ядерных оболочек нейтронов, как правило, недостаточно. Поэтому для некоторых ядер их внешняя оболочка должна ужиматься, терять форму шарового слоя и принимать форму *многогранника*, в углах которого находятся альфа-кластеры. Подобное явление начинает получать подтверждение, например, в работе [13].

5.4 Энергии связи ядер и массовые числа

Общеизвестно, что энергия связи ядра E_n рассчитывается по полуэмпирической формуле Вейцеккера, основанной на капельной модели и содержит пять членов и эмпирических коэффициентов, отражающих вклад различных составляющих в общую энергию связи.

Изложенная выше модель ядра позволяет рассчитывать энергию связи, не прибегая к эмпирическим коэффициентам. Как указано в п.5.2, энергия ядра в конечном счете определяется массой-энергией нуклонных кварков. Представим эту энергию в виде суммы номинальной энергии восьми кварков во всех кластерах (рис.2а), входящих в оболочки с первой по четвертую $8 \cdot 2.2 z_{kl}$, суммарной энергии всех протонных кварков, входящих в $p^+ - e^-$ контуры циркуляции $2.75 (m_1 + 2m_2 + 3m_3 + \dots)$ и базовой энергии первой оболочки $2.75 z$. Последнюю можно ассоциировать с потенциальным барьером.

Здесь обозначено z_{kl} - число кластеров, z общее число протонов, m_i - количество электронов на i -той оболочке атома.

Итоговая сумма при замене числа кластеров числом протонов в кластерах имеет вид

$$E_n = 8.8 z_{pkl} + 2.75(m_1 + 2m_2 + 3m_3 + \dots + z), \text{ МэВ} \quad (24)$$

где z_{pkl} - количество протонов на первой - четвертой оболочках.

Выражение (23) для энергии связи не зависит от количества нейтронов, это указывает на то, что для стабильных изотопов протонам соответствует какое-то оптимальное количество нейтронов. Оказывается, что это число нейтронов можно рассчитать из соображений баланса энергии, используя уже полученные соотношения.

Принято считать, что нейтрон и протон являются различными состояниями нуклона. Это справедливо для номинальных кварковых масс нуклонов, т.к. их массы-энергии одинаковы и равны $2 \cdot 2.2 = 4.4$ МэВ. Однако, также должно быть соответствие массы-энергии нейтронных кварков массе-энергии протонных кварков, которые входят в $p^+ - e^-$ контуры циркуляции $2.75(m_1 + 2m_2 + 3m_3 + \dots)$, за вычетом базовой энергии незаполненной первой оболочки $2.75 z$ и номинальной массы-энергии протонных кварков, находящихся в центре ядра и не связанных с нейтронами $4.4(z - z_{pkl})$.

То есть должен соблюдаться баланс энергии, откуда можно найти число нейтронов N и далее массовое число $A = N + z$:

$$2.75(m_1 + 2m_2 + 3m_3 + \dots) - 2.75 z - 4.4(z - z_{pkl}) = 4.4 N, \text{ МэВ} \quad (25)$$

$$\text{тогда} \quad A = z_{pkl} + 0.625(m_1 + 2m_2 + 3m_3 + \dots - z) + (4)_{A < 140}. \quad (26)$$

Для массового числа в некоторых случаях необходима поправка, которая, как можно предположить, учитывает наличия четырех нуклонов альфа-кластера на первой оболочке, которые отщепляются при достижении ядром определенной массы. Так, для легких и средних ядер результат формулы (26) следует увеличивать на 4.

Таблица 1 Четные элементы

Элемент	${}^4\text{Be}^9$	${}^8\text{O}^{16}$	${}^{14}\text{Si}^{28}$	${}^{26}\text{Fe}^{56}$	${}^{30}\text{Zn}^{65}$	${}^{42}\text{Mo}^{96}$	${}^{62}\text{Sm}^{150}$	${}^{74}\text{W}^{184}$	${}^{92}\text{U}^{238}$
Факт, МэВ	58.2	128	237	492	567	831	1239	1473	1802
Расчет, МэВ	62.6	131	244	487	566	822	1232	1479	1806
Расчет A	9	16	28	56	65	99	151	184	236

Нечетные элементы

Элемент	${}^5\text{B}^{11}$	${}^{17}\text{Cl}^{35}$	${}^{21}\text{Sc}^{45}$	${}^{29}\text{Cu}^{64}$	${}^{39}\text{Y}^{89}$	${}^{51}\text{Sb}^{122}$	${}^{67}\text{Ho}^{165}$	${}^{83}\text{Bi}^{209}$	${}^{93}\text{Np}^{237}$
Факт, МэВ	76.4	298	388	559	775	1033	1344	1640	1795
Расчет, МэВ	79.7	303	388	544	757	1009	1344	1636	1821
Расчет A	11	35	45	63	90	123	165	208	238

Для более тяжелых ядер, с $A > 140$, поправка не нужна, что, видимо, связано с их естественным альфа-распадом. Для ядер трансурановых элементов, как показывают расчеты, следует уменьшать также и величину энергии связи на величину энергии связи альфа-частицы.

В таблице 1 приведены фактические и расчетные данные энергии связи и округленных до целых массовые числа для стабильных изотопов некоторых элементов по формулам (24) и (26). Эти выражения получены при условии, что структура ядер удовлетворяет условию (23). Имеющиеся небольшие отклонения по энергии связи в меньшую сторону для средних ядер могут быть устранены при рассмотрении их индивидуальных особенностей, например, учитывая энергию связей дополнительных нейтронов, которые пополняют сердцевину или смежную оболочку ядра.

Заключение

Представляется удивительным, что сложный характер ядерных сил и строение атомных ядер в значительной степени оказалось возможным понять без привлечения собственно квантовых понятий и сложного математического аппарата.

Получена масса бозона, эквивалентная массе бозона Хиггса, определены константы связи в различных типах взаимодействий, энергии связи дейтрона, тритона и альфа-частицы, выявлены возможные диапазоны энергий альфа-частицы, объяснена зависимость нуклон-нуклонного взаимодействия от расстояния. Опираясь только на состав электронных оболочек атома, удалось определить величины энергии связи ядер, количество нейтронов в ядре, выявить важные особенности ядер.

Очевидно, что эти результаты указывают на то, что данная модель адекватно отражает принципиальные особенности структуры атомного ядра. Полученные результаты дают основания считать, что изложенная модель может стать основой дальнейших теоретических разработок для детального описания свойств ядер и их поведения в ядерных реакциях.

Литература

1. Dewitt B.S. Quantum gravity. *Scientific American*, v.249, December 1983, 112–129.
2. Belyakov A.V. Charge of the electron, and the constants of radiation according to J.A.Wheeler's geometrodynamics model. *Progress in Physics*, 2010, v.4, 90–94.
3. Belyakov A.V. Macro-analogies and gravitation in the micro-world: further elaboration of Wheeler's model of geometrodynamics. *Progress in Physics*, 2012, v.2, 47–57.
4. Belyakov A.V. On the independent determination of the ultimate density of physical vacuum. *Progress in Physics*, 2011, v.2, 27–29.
5. Belyakov A.V. On Materiality and Dimensionality of the Space. Is There Some Unit of the Field? *Progress in Physics*, 2014, v.10, 203–206.
6. Александров Ю.А. Поляризуемость нейтрона. Возможности ее определения из нейтронных экспериментов. *Физика элементарных частиц и атомного ядра*, ОИЯИ, Дубна, 2001, т.2, вып.6.
7. Кривохижин В.Г., Котиков А.В. Структурные функции нуклонов и определение константы связи сильного взаимодействия. *Физика элементарных частиц и атомного ядра*, 2009, т.40, вып.7.
8. Ишханов Б.С., Кэбин Э.И. Физика ядра и частиц. XX век. Изд-во Московского университета, М., 2000.
9. Бережной Ю.А., Михайлюк В.П. Альфа-кластеризация в процессах рассеяния частиц и легких ядер ядрами. *Физика элементарных частиц и атомного ядра*, 2008, т.39, вып.2.
10. Кадменский С.Г. Кластеры в ядрах. Воронежский государственный университет. Опубликовано в *Соросовском образовательном журнале*, 2000, N 3.
11. Дулов Е.Н., Вагизов Ф.Г., Бикчантаев М.М., Пятаев А.В., Гайнов Р.Р. Регистрация спектров альфа-частиц, полупроводниковые детекторы. *Казанский федеральный университет. Институт физики*. Казань, 2013.

12. Перфилов Н.А., Романов Ю.Ф, Соловьева З.И. Деление тяжелых ядер с испусканием длинно-пробежных α -частиц. *Успехи физических наук*. 1960, июль, т. LXXI, вып. 3.
13. Dudek J., Curien D., Dubray N., Dobaczewski J., Pangon V., Olbratowski P., and Schunck N. Island of Rare Earth Nuclei with Tetrahedral and Octahedral Symmetries: Possible Experimental Evidence. *Phys. Rev. Lett.* 97, 072501, August 2006.