

УНИВЕРСАЛЬНЫЕ ЗАКОНЫ СТРУКТУРИРОВАННОГО ВАКУУМА: НУКЛОНЫ И ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ

Лебедев В.Н.

Лебедев Владимир Николаевич - старший преподаватель,
Донецкий государственный университет,
г. Донецк

Аннотация: публикуется продолжение двух статей из журнала «Проблемы науки» №1(82) и №2(94). На основании универсальных законов структурированного вакуума и полуклассической модели, были выполнены оценки ряда параметров нуклонов. Отмечается хорошее совпадение расчетных и экспериментальных величин, например, массы покоя протона и нейтрона вычислены с погрешностью, соответственно, 0,00039% и 0,000029%. Была рассмотрена модель атомного ядра и получено уравнение для оценки энергии связи на нуклон (аналог формулы Вайцзеккера). Особенностью предложенной автором модели является полное отсутствие в уравнениях любых эмпирических данных и коэффициентов, кроме двух констант: массы электрона и постоянной тонкой структуры. Некоторые результаты публикуются впервые.

Ключевые слова: заряды Дирака, сильное взаимодействие, радиус ядерных сил, комптоновская длина волны протона, масса ядра протона, масса оболочки протона, максимальная возможная энергия связи на нуклон.

УДК 53.01

Введение

После определения универсальных законов структурированного вакуума, записи несимметричной реакции Дирака [1] и выяснения физического смысла разностного уравнения [2], возникает задача, на первый взгляд, кажущаяся неразрешимой: - вывод уравнений для вычисления масс покоя адронов.

Первым шагом в этом направлении является вычисление массы покоя протона. Протон имеет сложную структуру, возможно состоящую из трех кварков. По существующим теориям, в его оболочке протекают процессы обмена виртуальными частицами. Протон окружен полем ядерных сил, значительно отличающимся от закона обратных квадратов и т.д. [3]. Единственным оправданием этой затее служит твердое убеждение, что в своей основе мир устроен просто, а сложности возникают при взаимодействии множества простых систем.

Целями данной работы являются: вычисление следующих параметров протона: спина, электрического заряда, энергии, заключенной в поле ядерных сил, радиуса и структуры этого поля, массы/энергии покоя протона, включая электростатическую и магнитную энергию; вычисление массы покоя нейтрона, определение причины возникновения ядерных сил и вывод уравнения для оценки энергии связи на нуклон.

Необходимо подчеркнуть, что в данной работе и в дальнейшем, не будут вычисляться параметры конкретных частиц. Расчетные величины, представленные в работе, относятся не к реально существующей частице, например протону, а к первой простой комбинации зарядов Дирака, ассоциированной с протоном. По определенным правилам, мы будем комбинировать заряды Дирака, и сравнивать параметры «синтезированных объектов» с реально существующими частицами. Фактически, мы будем строить наш мир заново, из вакуума, в меру своих ограниченных способностей, пытаясь повторить замысел Создателя.

Запись частиц и реакций будет выполняться с использованием 4 структурных форм вакуума (зарядов Дирака): A, a, B, b и базиса (вакуума): $AB = ab$. Общепринятая сегодня запись не информативна. В новой форме записи свойства частицы заданы составом и комбинацией зарядов Дирака. По зарядовой комбинации, можно сразу определить наличие античастицы, спин, электрический заряд и т.д. Кроме того, число и тип зарядов Дирака до и после реакции всегда сохраняется, - все это выводит запись реакций распада и генерации частиц на более высокий уровень.

Уравнение баланса

В работах [1,4] были определены структурные формы физического вакуума. Запись несимметричной реакции Дирака с образованием протона (антипротона) и электрона (позитрона) имеет вид:

$$AB + AB = A \rightarrow B + AB = A + B(ab); \text{Базис} = p, e; \quad (1)$$

$$AB + AB = B \rightarrow A + AB = B + A(ab); \text{Базис} = \bar{p}, \bar{e}; \quad (2)$$

где: A - структурная форма, ассоциированная с протоном, имеющая спин $S = +1/2$ и положительный электрический заряд $q = +1$; B - структурная форма, ассоциированная с антипротоном: $S = -1/2$ и $q = -1$ (в относительных единицах).

В реакции Дирака (1) предполагается, что заряд A , создающий протон, перемещается на внутреннюю орбиту $\bar{r}_p = 0,5\bar{R}_0 = 0,5$, а заряд B в электронной группе $B(ab)$ - на внешнюю орбиту равную классическому радиусу электрона: $r_e = 2R_0$, ($\bar{r}_e = 2$) [2, 5].

Проверим это утверждение и определим радиус протона. В работе [2] было получено уравнение для вычисления наблюдаемой массы покоя:

$$m_x = M_0 \cdot \left(\frac{1}{\bar{r}_x} - 1 \right), \quad (3)$$

где: M_0 – константа массы (879,9632645МэВ/c²).
Преобразуем уравнение (3) к виду:

$$m_x c^2 = M_0 c^2 \cdot \left(\frac{1}{\bar{r}_x} - 1 \right). \quad (4)$$

Из уравнения (4): внутренняя энергия массы m_x равна энергии затраченной на перемещение заряда Дирака между орбитами:

$$E = M_0 c^2 \int \frac{1}{\bar{r}_x^2} d\bar{r}_x. \quad (5)$$

Уравнение (5) позволяет, по крайней мере, формально записать уравнение баланса сил, используя следующие представления: перенос $R_0 \rightarrow r_x$ заряда массой M_0 вызывает изменение центробежных сил $F_1 - F_0$, в результате возникает центростремительная сила F_2 , восстанавливающая равновесие;

$$F_1 - F_0 - F_2 = 0. \quad (6)$$

Вначале заряд A находится на базисном радиусе R_0 , при его переносе установится некоторое новое значение r_x . Запишем уравнение (6) в явном виде:

$$\frac{M_0 c^2}{r_x} - \frac{M_0 c^2}{R_0} - \frac{hc}{(2r_x)^2} = 0, \quad (7)$$

где: α - постоянная тонкой структуры, h - постоянная Планка и c - скорость света.
После сокращений, получаем квадратное уравнение:

$$\bar{r}_x^2 - \bar{r}_x + 0,25 = 0. \quad (8)$$

Уравнение (8) имеет единственное решение: $\bar{r}_x = 0,5$. Так как $\bar{R}_0 \equiv 1$, то радиус протона будет равен половине радиуса базиса или четверти классического радиуса электрона, т.е. ~0,704...фм.

Параметры протона

Уравнение для вычисления магнитного момента электрона учитывает существование полного заряда: $Q^2 = hc + q^2$, тогда и в уравнении (7) также необходимо учесть вклад электрического заряда [2]:

$$\frac{(hc+q^2)}{R_0 r_x} - \frac{hc}{R_0^2} - \frac{(hc+q^2)}{(2r_x)^2} = 0. \quad (9)$$

После простых преобразований, получаем следующее квадратное уравнение:

$$\bar{r}_x^2 - (1 + \alpha)\bar{r}_x + 0,25(1 + \alpha) = 0. \quad (10)$$

При вычислении относительного радиуса используем отрицательный знак перед радикалом:

$$\bar{r}_x = 0,5(1 + \alpha - \sqrt{(1 + \alpha)\alpha}), \quad (11)$$

тогда масса протона без учета вклада электромагнитной компоненты будет равна [2, 6]:

$$m_p \approx M_0 \left(\frac{2}{1 + \alpha - \sqrt{(1 + \alpha)\alpha}} - 1 \right) = M_0 \varphi; \quad (12)$$

Назовем массу m_p , вычисленную по уравнению (12) и равную 939,905815...МэВ, «протонной (нуклонной) единицей массы», а коэффициент φ равный 1,068119378303, – протонным коэффициентом полного заряда.

В общем случае, при вычислении масс адронов предполагается, что полная масса состоит из трех слагаемых: массы ядра (7), массы «оболочки», обусловленной комбинированным взаимодействием (суммарное значение вычисляется по уравнению (9)), и электромагнитной массы. В свою очередь, масса/энергия электрического заряда состоит из двух компонент: энергии электростатического поля и энергии магнитного поля. Оценим их вклад в наблюдаемую массу в форме двух коэффициентов в уравнении (12).

Запишем первый коэффициент как относительную массу/энергию, затраченную на «сжатие» электростатического поля к радиусу протона:

$$k_e \sim -\frac{1}{r_p} = -2. \quad (13)$$

В работе [2] была установлена пропорциональная связь магнитных моментов с массой/энергией электрического заряда и радиусом этого заряда. Полагая, что на радиусе базиса наблюдаемая масса равна нулю, определим второй коэффициент разностным соотношением вида:

$$k_\mu \sim \pm \frac{R_0 - r_p}{R_0} = \pm(1 - \bar{r}_p) = 0,5. \quad (14)$$

Знак k_μ определяется направлением магнитного и механического моментов. Для протона знак в уравнении (14) положительный, для нейтрона и электрона – отрицательный.

Проверим корректность найденных коэффициентов. Подставим в уравнения (13,14) радиус электрона. Масса электрона на классическом радиусе будет равна: $m_x = 2m_e(1 - 0,5) = m_e$. В свободном пространстве $\bar{r}_x=1$ и наблюдаемая магнитная масса отсутствует ($k_\mu = 0, k_e = -1$).

После подстановки в (12) суммы $k_e + k_\mu = -3/2$:

$$m_p \cong 2m_e \left(\frac{2}{1 + \alpha - \sqrt{(1 + \alpha)\alpha}} - 1 \right) \left(\frac{1}{\alpha} - \frac{3}{2} \right) = M_0 \varphi \left(1 - \frac{3}{2} \alpha \right). \quad (15)$$

При следующих значениях констант: массы электрона $m_e=0,510998950 \text{ МэВ}/c^2$ и постоянной тонкой структуры $\alpha=0,00116140973289$, расчетная масса протона равна $m_p \cong 938,2684... \text{ МэВ}/c^2$. Расхождение с экспериментом $\sim 0,00039\%$.

В результате комбинированного электромагнитно-спинового взаимодействия по уравнению (9) свойства окружающего пространства изменяются: центральный заряд вызывает поляризацию базиса (вакуума) и создается структура смещенных колец, напоминающая двойной электрический слой. Уравнению (7) соответствует масса, созданная сильным взаимодействием, уравнению (9) – полная масса, включая массу, созданную комбинированным сильным и электромагнитным взаимодействиями. Предположительно, масса, аккумулированная в экранирующем слое («оболочке») протона, равна разности между нуклонной единицей массы и массой ядра, т.е. $\sim 59,94 \text{ МэВ}/c^2$.

Таблица 1. Расчетные параметры протона.

| Параметр | Величина | Примечание | Ссылка |
|---|-----------------|---|-----------|
| Спин | +1/2 | Реакция Дирака | [4] |
| Электрический заряд | +1 | Реакция Дирака | [4] |
| Зарядовая комбинация | A | Основная структурная форма вакуума | [1] |
| Парность зарядов | 1 заряд | Фермион | [1] |
| Отношение к сильному взаимодействию | участвует | $F_1 - F_0 - F_2 = 0$ | (6) |
| Масса ядра, МэВ/c ² | 879,9632645... | $2m_e/\alpha$ | [6] |
| Протонный коэффициент полного заряда, φ | 1,0681193783... | $\frac{2}{1 + \alpha - \sqrt{(1 + \alpha)\alpha}} - 1$ | (12) |
| Радиус протона по сильному взаим. фм | 0,704485081... | $r_p = 0,5R_0 = 0,25r_e$ | (8) |
| Радиус протона по полному заряду, фм | 0,65955650... | r_p/φ | (10) |
| Нуклонная единица массы, МэВ/c ² | 939,905815... | $2m_e\varphi/\alpha$ | (11) |
| Электростатическая масса, МэВ/c ² | -2,1832315231 | $-4\varphi m_e$ | (13) |
| Магнитная масса, МэВ/c ² | 0,5458078808... | φm_e | (14) |
| Наблюдаемая масса, МэВ/c ² | 938,268596... | $2m_e\varphi \cdot \left(\frac{1}{\alpha} - \frac{3}{2} \right)$ | (15), [7] |
| Масса оболочки, протона МэВ/c ² | $\sim 59,94...$ | $2m_e\varphi - \frac{2m_e}{\alpha}$ | [6] |

| | | | |
|-------------------------------|-------------------------|----------------------------|------|
| Радиус ядерных сил | $\sim 3,5\text{фм}$ | $\sim 2R_0 + R_p$ | [2] |
| Первый характерный радиус | $\sim 0,7\text{фм}$ | $r_p = 0,5R_0$ | (11) |
| Второй характерный радиус | $\sim 2,1\text{фм} (?)$ | $\sim 1,5R_0$ | (11) |
| Комптоновская длина волны, фм | 1,3191137504... | $h\alpha/(2m_e c \varphi)$ | (11) |

Нейтрон

В последнем прижизненном издании книги Д.И.Менделеева «Основы химии» была опубликована гипотеза о существовании первоэлемента «Ньютона», занимающего нулевой ряд в периодической таблице [7]. Если под первоэлементом понимать базис (вакуум), тогда такая постановка задачи имеет глубокий физический и философский смысл, но ее решение не является элементарным, и требует ясного понимания механизма формирования протон – нейтронных связей. Для решения этой задачи необходимо, как минимум; знать зарядовую структуру (комбинацию зарядов Дирака), соответствующую нейтрону, и вычислить ее основные параметры, включая массу. Решим эту задачу.

Рассмотрим гипотетическую реакцию структурирования вакуума:

$$AB + ab = A \rightleftharpoons Bb + a \uparrow. \quad (16)$$

В результате этой реакции образуется комбинация зарядов $A \rightleftharpoons Bb$ и нейтрино a (символом \rightleftharpoons обозначена двойная связь, созданная зарядом Bb). В относительных единицах спин и электрический заряд этой комбинации соответственно равны: $-1/2$ и 0 ; зарядовое сопряжение преобразует частицу в античастицу. Ассоциируем комбинацию зарядов $A \rightleftharpoons Bb$ с нейтроном. Сочетания BB и AA в природе не встречается, возможно, вследствие принципа (закона) исключения Паули.

Распад нейтрона, вследствие закона сохранения зарядов Дирака, должен происходить в два этапа с привлечением базиса и выделением нейтрино (слабое взаимодействие):

$$A \rightleftharpoons Bb = A \rightleftharpoons Bb + ab = A + B(ab) + b; \quad n \rightarrow p, e, \bar{\nu}. \quad (17)$$

Вычислим массу комбинации зарядов Дирака, ассоциированной с нейтроном. В уравнении (7) увеличим заряд в два раза, предполагая, что группа Bb из двух зарядов создает двойную связь с зарядом A , и учтем, что начальное расстояние между зарядом протона и группой Bb равно сумме радиуса протона и базиса:

$$\frac{hc}{R_0 r_x} - \frac{hc}{R_0^2} - \frac{2hc}{4(0,5r_x + r_x)^2} = \frac{hc}{R_0 r_x} - \frac{hc}{R_0^2} - \frac{2hc}{9r_x^2} = 0. \quad (18)$$

После сокращений и решения уравнения (18): $\bar{r}_N = 2/3$. Учтем также, что взаимодействуют две группы зарядов A и Bb , т.е. наблюдаемая масса будет в два раза больше, тогда:

$$m_x = 2M_0 \varphi \cdot \left(\frac{1}{\bar{r}_x} - 1 \right). \quad (19)$$

Найденному решению соответствует удивительный результат: несмотря на то, что состав зарядов Дирака и силы в комбинации нейтрона значительно отличаются от протона (нейтрон является сложной зарядовой комбинацией), расчетная масса нейтрона точно равна массе протона:

$$m_n = 2M_0 \varphi \cdot (1,5 - 1) \equiv M_0 \varphi = m_p. \quad (20)$$

Следовательно, протон и нейтрон должны быть строго идентичны по сильному взаимодействию, и отличаться только электромагнитной компонентой полной массы.

Электрический заряд комбинации нейтрона (17) равен нулю, тогда: $k_e = 0$, коэффициент $k_\mu \sim \pm \frac{R_0 - r_n}{R_0}$ имеет знак минус:

$$k_\mu \sim - \frac{R_0 - r_n}{R_0} = \frac{2}{3} - 1 = -\frac{1}{3}. \quad (21)$$

Полагая, что встречная магнитная компонента силы дополнительно не увеличивает массу, т.е. коэффициент φ перед коэффициентом k_μ отсутствует, полная масса нейтрона будет равна:

$$m_n \cong 4m_e \cdot \left(\frac{\varphi}{2\alpha} - \frac{1}{6} \right) = \frac{2m_e}{\alpha} \cdot \left(\varphi - \frac{1}{3}\alpha \right), \quad (22)$$

- расчет и эксперимент: 939,56515 МэВ/с² и 939,56542 МэВ/с², относительная погрешность меньше < 0,3ppm (<0,000029%). Это одна из немногих величин в физике, вычисленная с такой высокой точностью.

Таблица 2. Сравнение итоговых уравнений.

| Протон | Нейтрон |
|---|---|
| $m_p = \frac{2m_e\varphi}{\alpha} \cdot \left(1 - \frac{3\alpha}{2}\right)$ | $m_n = \frac{2m_e}{\alpha} \cdot \left(\varphi - \frac{\alpha}{3}\right)$ |

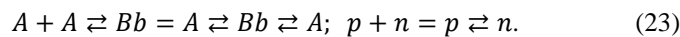
Уравнения для расчета масс нуклонов являются функцией только двух констант; массы электрона, постоянной тонкой структуры (во всех уравнениях постоянная тонкой структуры записывается без коэффициента 2π) и безразмерного протонного коэффициента полного заряда, расчетное значение равно $\varphi = 1,0681193783 \dots$. Полученные уравнения могут быть записаны и в другой комбинации констант. Несмотря на простоту, до настоящего времени эти уравнения были неизвестны.

Ядерные силы

После дешифрирования зарядовой структуры нейтрона, становится доступен следующий шаг на пути решения задачи, поставленной Д.И. Менделеевым. Появляется возможность ответить на ключевой вопрос: - *Как протоны удерживаются в ядре?*

Первые феноменологические уравнения для описания ядерных сил появились еще в середине 1950-х годов. Если рассматривать, например, уравнения Вудса-Саксона и Рейда, то можно заметить совпадение некоторых эмпирических коэффициентов с результатами расчетов, представленными в таблице 1. Например, коэффициент при радиусе взаимодействия в уравнении Рейда совпадает с расчетным значением радиуса протона $\bar{r}_p = 0,5$ (~0,704...фм), а коэффициент, характеризующий энергию связи в потенциале Вудса-Саксона равный ~50МэВ близок к расчетной энергии «оболочки» ~60МэВ [9, 10].

Вероятно, в основе процесса, удерживающего протоны в ядрах атомов, лежит следующая реакция:



В результате взаимодействия группы Bb нейтрона со свободным протоном A , возникает новая двойная связь с массой равной нуклонной единице массы. Особенностью новой структуры является наличие электрического заряда +1. Таким образом, зарядовая группа Bb связывает протоны, путем формирования электрически заряженных блоков $A \rightleftharpoons Bb \rightleftharpoons A$. Притяжение зарядов Дирака противоположного знака приводит к появлению сил, удерживающих протоны в ядрах атомов.

Увеличение числа связей нейтронов с протоном (зарядом A) приводит к увеличению числа нейтронно-подобных (нуклонных) блоков и появлению изотопов. В «оболочке» заряда A может находиться только ограниченное число базиса, зависящее от геометрии экранирующего слоя. Если использовать представление о базисных элементах, окружающих центральный заряд Дирака, то в такой «оболочке» можно расположить ~ 6 - 8 колец (сфер) AB .

Изменение энергии системы зарядов происходит в результате слияния и разделения оболочек, причем при слиянии базис AB замещается на группу нейтрона Bb . Максимальное число связанных одним протоном нейтронов будет равно числу базисных элементов в экранирующем слое и равно максимально возможному числу изотопов водорода. Известно, что атом водорода (протон) может связать максимум 6 нейтронов: дейтерий, тритий, квадий, пентий, гексий и септий, - тогда на каждый замещенный базис AB «оболочки» будет приходиться одна шестая часть от 59,94МэВ, т.е. удельная энергия будет равна $W_0 \cong 9,99$ МэВ. Так как базисные кольца взаимосвязаны, то эта энергия равномерно распределяется («растекается») по всей поверхности.

В сложных комбинациях число протонов не всегда меньше числа нейтронов. Например, зарядовой комбинации гелия-3 соответствует структура из центрального элемента Bb и 3 связанных зарядов A :



Эта комбинация имеет: спин и электрический заряд соответственно; +1/2 и +2, античастицу и наблюдаемую массу примерно равную 3 нуклонным единицам (три группы зарядов)...

Энергию связи на нуклон W_N для ядра, содержащего равное число протонов и нейтронов, можно записать в виде суммы сильной и электромагнитной компонент. В процессе заполнения базисных «вакансий», происходящее при росте числа протонов A в ядре, удельная энергия сильной компоненты будет стремиться к предельному значению 9,99МэВ:

$$W \sim W_0 \left(\frac{A}{A+1}\right)^2. \quad (25)$$

Вид этой функции представлен на рисунке 1, ряд 2.

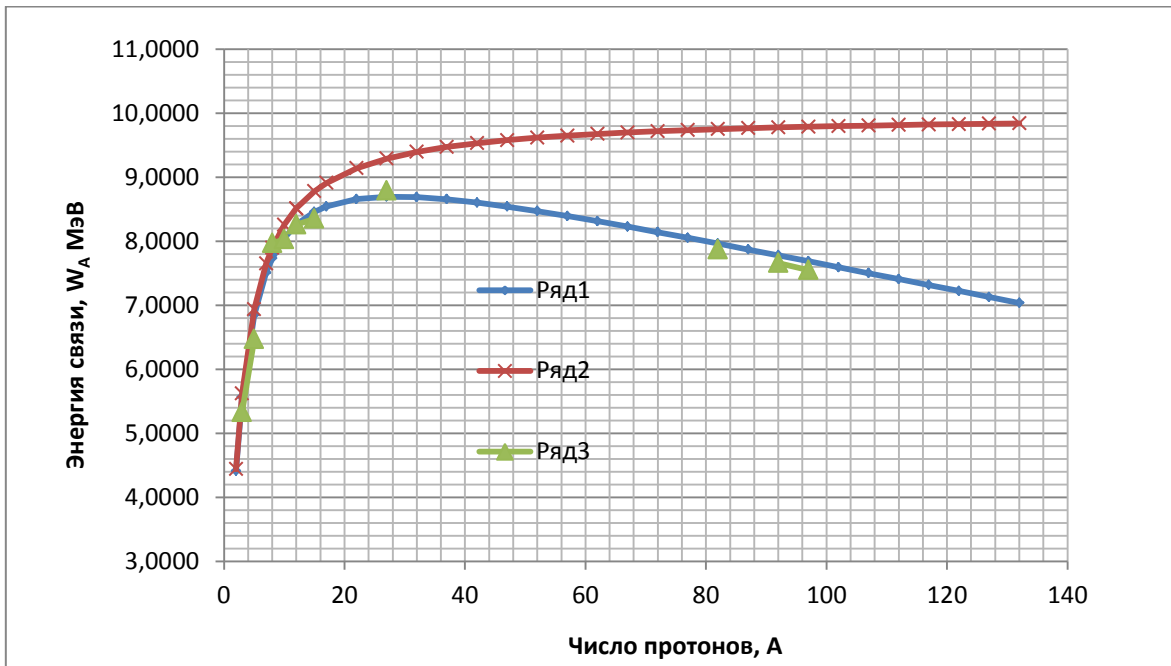


Рис. 1. Связь между числом протонов в ядре и энергией связи.

Электромагнитные силы пропорциональны числу протонов и возникают при «вытеснении» положительных электрических зарядов на поверхность. Для оценки их вклада относительно сильного взаимодействия, используем «весовой коэффициент» – постоянную тонкой структуры $\alpha = \frac{2m_e}{M_0}$. Учитывая взаимосвязь электрических зарядов с зарядами Дирака, уравнение энергии связи на протон принимает следующий вид (публикуется впервые):

$$W_A \sim W_0 \left(\frac{A}{A+1} - \alpha A \right)^2. \quad (26)$$

Вид функции для числа протонов ≥ 2 представлен на рисунке 1, ряд 1. Несколько экспериментальных значений - ряд 3.

Уравнение (26) имеет максимум энергии связи на протон W_A в диапазоне от ~ 20 до ~ 30 протонов (от 40 до 60 нуклонов) и экстремальное значение при $A = 28$ (56) равно $\sim 8,7$ МэВ. При дальнейшем увеличении числа нуклонов энергия связи начинает плавно уменьшаться до ~ 7 МэВ для трансурановых элементов.

Уравнение (26), по сравнению, например с формулой Вайцеккера [11], не содержит эмпирических коэффициентов и описывает простейшую модель атомного ядра. Отличие от экспериментального графика, вероятно, обусловлено принятыми допущениями, в том числе, использованием полуклассической модели.

Выводы

Изучение процессов слияния и разрушения ядер имеет практическое значение. Однако, даже в классическом приближении, ядра атомов представляют собой сложные для расчетов структуры, сформированные из распределенных в пространстве взаимосвязанных нейтронно-подобных блоков.

Основное значение данной работы заключается в понимании процессов, формирующих частицы. Можно ожидать, что это откроет прямой путь к теоретическому синтезу любых адронов, в том числе, таких сложных зарядовых комбинаций, как мезоны и гипероны.

Список литературы

1. Лебедев В.Н. Универсальные законы структурированного вакуума // Проблемы науки. – 2024. - №1(82).- С.5-10.
2. Лебедев В.Н. Универсальные законы структурированного вакуума – альфа материя // Проблемы науки. – 2024. - №2(94).- С.5-10.
3. A.A. Korobitsin, E.A. Kolganova. The Proton - Pion Model of Neutron and Nucleus. Joint Institute for Nuclear Research Joliot-Curie 6, Dubna, Russia. [Электронный ресурс]. Режим доступа:
4. https://www.researchgate.net/publication/374756221_The_Proton_-_Pion_Model_of_Neutron_and_Nucleus_discovered_in_2023 (дата обращения: 10.06.2024).
5. Lebedev V. STADY OF THE NON-SYMMETRIC DIRAC REACTION. Norwegian Journal of Development of the International Science. № 51-1/2020 pp. 12-15. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44403378> (дата обращения: 09.06.2024).

6. *Lebedev V.* THE SOLUTION OF PARADOX OF ELECTRON SPIN. Norwegian Journal of Development of the International Science. № 58/2021 pp. 37-41. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/reshenie-paradoksa-spina-elektrona/viewer> (дата обращения: 10.06.2024).
7. *Лебедев В.Н.* Физические основы философии идеализма / Лебедев В.Н., Прилуцкий А.С. Симферополь: изд-во Рубинчук 2019, 128с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49717097/> (дата обращения: 10.06.2024).
8. *Менделеев Д.* Основы химии, С.-Петербург, Литография П.А.Фроловой, 8 изд., 1906г.
9. Review of particle physics / M. Tanabashi, K. Hagiwara, K. Hikasa et al. // Physical Review D.- 2020.- Vol.98, N3.-P.1-1898 [030001]. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://journals.aps.org/prd/pdf/10.1103/PhysRevD.98.030001> (дата обращения: 10.06.2024).
10. *Roger D. Woods and David S. Saxon.* Diffuse Surface Optical Model for Nucleon-Nuclei Scattering (англ.) // Physical Review: journal. — 1954. — Vol. 95. — P. 577—578. — doi:10.1103/PhysRev.95.577.
11. *Рид Р.В.* "Локальные феноменологические нуклон–нуклонные потенциалы". Анналы физики. 50 (3): 411–448. 1968г.
12. Формула Вайцеккера. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://old.bigenc.ru/physics/text/1894477> (дата обращения: 10.06.2024).