

Эволюция представлений о структуре ядра: от жидкой капли к кварк–глюонным взаимодействиям в ядре

Б. С. Ишханов^{1,2*} Д. Е. Ланской^{1†}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра общей ядерной физики
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобелевца
Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Статья поступила 11.03.2019; Подписана в печать 19.03.2018)

В связи с экспериментом по изучению короткодействующих корреляций нуклонов в ядре, выполненном в лаборатории Томаса Джефферсона (США), прослеживается эволюция представлений о структуре атомного ядра, начиная с простейших — капельной и одночастичной оболочечной моделей. Показано, что изучение короткодействующих корреляций требует теоретического рассмотрения субнуклонных — кварковых и глюонных — степеней свободы в ядре.

PACS: 21.10.-k, 21.60.-n

УДК: 539.142

Ключевые слова: атомное ядро, протоны, нейтроны, кварки, короткодействующие корреляции.

ВВЕДЕНИЕ

В лаборатории Томаса Джефферсона (TJNAF, США) был выполнен эксперимент, результаты которого вносят существенный вклад в наше понимание структуры атомных ядер. Результаты эксперимента, в котором участвовала группа физиков из НИИЯФ МГУ, опубликованы в журнале Nature [1]. Используя уникальный электронный пучок от ускорителя непрерывного действия СЕБАФ, авторы эксперимента смогли наблюдать выбивание электронами из ядер не только протонов, но и нейтронов. Чтобы показать важность полученных результатов, напомним сначала известные представления о структуре ядра, разработанные много лет назад и остающиеся плодотворными до сих пор.

1. БАЗОВЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О СТРУКТУРЕ ЯДРА: КАПЕЛЬНАЯ И ОБОЛОЧЕЧНАЯ МОДЕЛИ ЯДРА

Атомное ядро как квантовая система десятков или сотен нуклонов, взаимодействующих между собой сложными силами, не описываемыми простыми потенциалами, не поддается точному расчету. Поэтому с самого начала развития ядерной теории важнейшую роль играли различные модели.

Исторически первой из них была капельная модель, в которой ядро представляется фрагментом непрерывной среды, свойства которого близки к свойствам жидкой капли. Такая модель, игнорирующая очень многие особенности ядерной динамики, тем не менее, как оказалось, хорошо отражает ряд усредненных свойств

ядер. По-видимому, наиболее полезное следствие этой модели — полученная еще в 30-е годы формула Вайцеккера для энергии связи ядра B :

$$B = a_1 A - a_2 A^{2/3} - a_3 \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_4 \frac{(Z - N)^2}{A} + a_5 \frac{(-1)^Z + (-1)^N}{A^{3/4}}.$$

Здесь A — полное число нуклонов в ядре, Z — число протонов, $N = A - Z$ — число нейтронов, a_i ($i = 1, \dots, 5$) — положительные феноменологические коэффициенты.

Первый член $a_1 A$ выражает так называемую объемную энергию, пропорциональную числу нуклонов. Если бы число нуклонов в ядре было бы на несколько порядков больше, чем в реальных ядрах, то для вычисления энергии связи системы из равного числа протонов и нейтронов в отсутствие кулоновского взаимодействия протонов достаточно было бы первого члена. Второй член $a_2 A^{2/3}$ учитывает, что значительная доля нуклонов находится вблизи поверхности ядра и имеет меньшее, чем внутренние нуклоны, количество партнеров по взаимодействию (как известно, ядерное взаимодействие является короткодействующим), что уменьшает энергию связи. Третий член $a_3 Z^2/A^{1/3}$ соответствует кулоновскому взаимодействию $Z(Z - 1)/2 \approx Z^2/2$ пар протонов, среднее расстояние между которыми пропорционально радиусу ядра, а тот, в свою очередь, пропорционален $A^{1/3}$. Четвертый и пятый член не имеют прямого обоснования в модели жидкой капли, являющейся по сути классической. Четвертый член $a_4 (Z - N)^2/A$ отражает квантовый эффект, возникающий вследствие принципа Паули: в системе с равным числом протонов и нейтронов заселены более низкие квантовые уровни, чем в системе с преобладанием протонов или нейтронов. Наконец, пятый член $a_5 [(-1)^Z + (-1)^N]/A^{3/4}$ учитывает особенность ядер-

*E-mail: bsi@depni.sinp.msu.ru

†E-mail: lanskoj@sinp.msu.ru

ных сил, приводящую к эффекту спаривания, вследствие которого четно–четные ядра имеют наибольшую энергию связи.

Хотя в последующие годы было предложено много более точных и более громоздких эмпирических формул для энергий связи ядер, формула Вайцзеккера остается популярной и присутствует во всех учебниках ядерной физики не только из-за своей простоты и наглядности. Она описывает энергии связи ядер в широкой области A и Z с неплохой точностью и сохраняет предсказательную силу для еще не открытых ядер. Отметим также, что представления капельной модели широко применяются до настоящего времени в физике деления ядер.

На рис. 1 показаны отклонения результатов расчета энергий связи по формуле Вайцзеккера от экспериментальных данных. Даже в тяжелых ядрах, энергии связи которых превышает 1500 МэВ, ошибка формулы Вайцзеккера менее 10 МэВ.

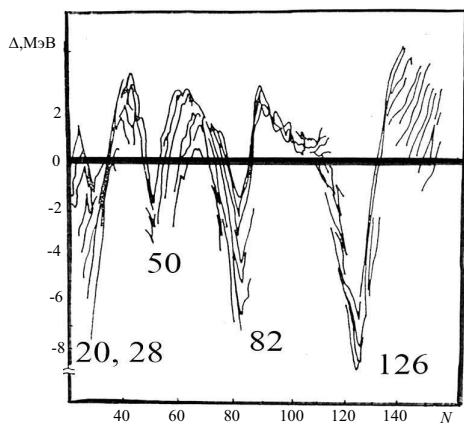


Рис. 1: Разности экспериментальных и вычисленных по формуле Вайцзеккера энергий связи ядер

В то же время область действия капельной модели очевидно ограничена. В частности, модель не описывает существования магических чисел — значений Z и N , при которых энергии связи оказываются заметно больше, чем у соседних ядер. Капельная модель, конечно, не в состоянии предсказать характеристики ядер, возникающие вследствие индивидуального поведения отдельных нуклонов — например, спины и четности ядер. Капельная модель также не позволяет описать спектры возбуждения ядер.

Рис. 2, на котором представлены спектры изотопов кальция, иллюстрирует особенности магических ядер. Видно, что возбужденные состояния дважды магических ядер ^{40}Ca и ^{48}Ca лежат значительно выше, чем в ядрах, не являющихся дважды магическими. Причина состоит в том, что возбуждение дважды магического ядра требует перехода по крайней мере одного нуклона в более высокую по энергии оболочку.

Оболочечная модель является в каком-то смысле противоположностью капельной в том отношении, что она основана на представлении об одночастичных и яв-

ляющихся в значительной степени независимыми состояниями нуклонов в ядре. Сейчас под оболочечной моделью в теории ядра часто понимается широкий класс разнообразных подходов, которые могут включать учет смешивания квантовомеханических конфигураций, деформации, спаривания и многих других эффектов. Однако в основе всех этих подходов лежит представление о нуклоне, движущемся в усредненном потенциале, обычно вида

$$V(\mathbf{r}) = V_1(\mathbf{r}) + V_2(\mathbf{r})\mathbf{l} \cdot \mathbf{s}.$$

Потенциал может выбираться феноменологически или вычисляться микроскопически, как в подходах типа метода Хартри-Фока. Потенциал, действующий на нуклон, является самосогласованным, т.е. возникает вследствие действия остальных нуклонов, которые, в свою очередь, движутся в том же потенциале.

Первый член потенциала — простейший центральный потенциал. Второй член возникает из-за спин-орбитального взаимодействия нуклонов (здесь \mathbf{l} — орбитальный момент нуклона, \mathbf{s} — его спин). Необходимость введения спин-орбитального потенциала определяется тем, что именно учет такого взаимодействия позволяет правильно описать магические числа протонов и нейтронов. Схема энергетических уровней одночастичных состояний в оболочечной модели представлена на рис. 3. Здесь хорошо видно, что заполнению 2, 8, 20, 28, 50, 82... протонных или нейтронных состояний (магические числа) соответствуют заметные «зазоры» в энергетическом спектре, что и приводит к эффекту магичности.

Не будет преувеличением сказать, что схема, представленная на рис. 3, лежит в основе наших представлений о структуре и спектрах ядер. Сфера действия оболочечной модели очень обширна. Однако с самого начала развития оболочечной модели складывалось понимание, что эта сфера широка, но ограничена.

Прежде всего, это связано с вопросом о том, насколько применимо к нуклонам в ядре понятие одночастичного движения в усредненном потенциале. В отличие от атома, где впервые возникло представление об оболочках, ядро — очень плотная система. Плотность нуклонов в центре ядра составляет $0.16\text{--}0.17 \text{ фм}^{-3}$ (т.е. один нуклон занимает объем около 6 фм^3), а радиус нуклона немного меньше 1 фм. При такой «тесноте», казалось бы, нуклоны должны часто сталкиваться друг с другом, что противоречит представлению о движении по стабильным орбитам. По ходу развития теории ядерных оболочек были даны удовлетворительные объяснения того факта, что одночастичное движение нуклонов играет тем не менее определяющую роль. Следует также отметить, что в оболочечных подходах, как правило, рассматривают лишь внешние (находящиеся на одном или нескольких верхних уровнях) нуклоны. Вопрос о том, насколько состояния нуклонов во внутренней области ядра могут рассматриваться как одночастичные, малоисследован.

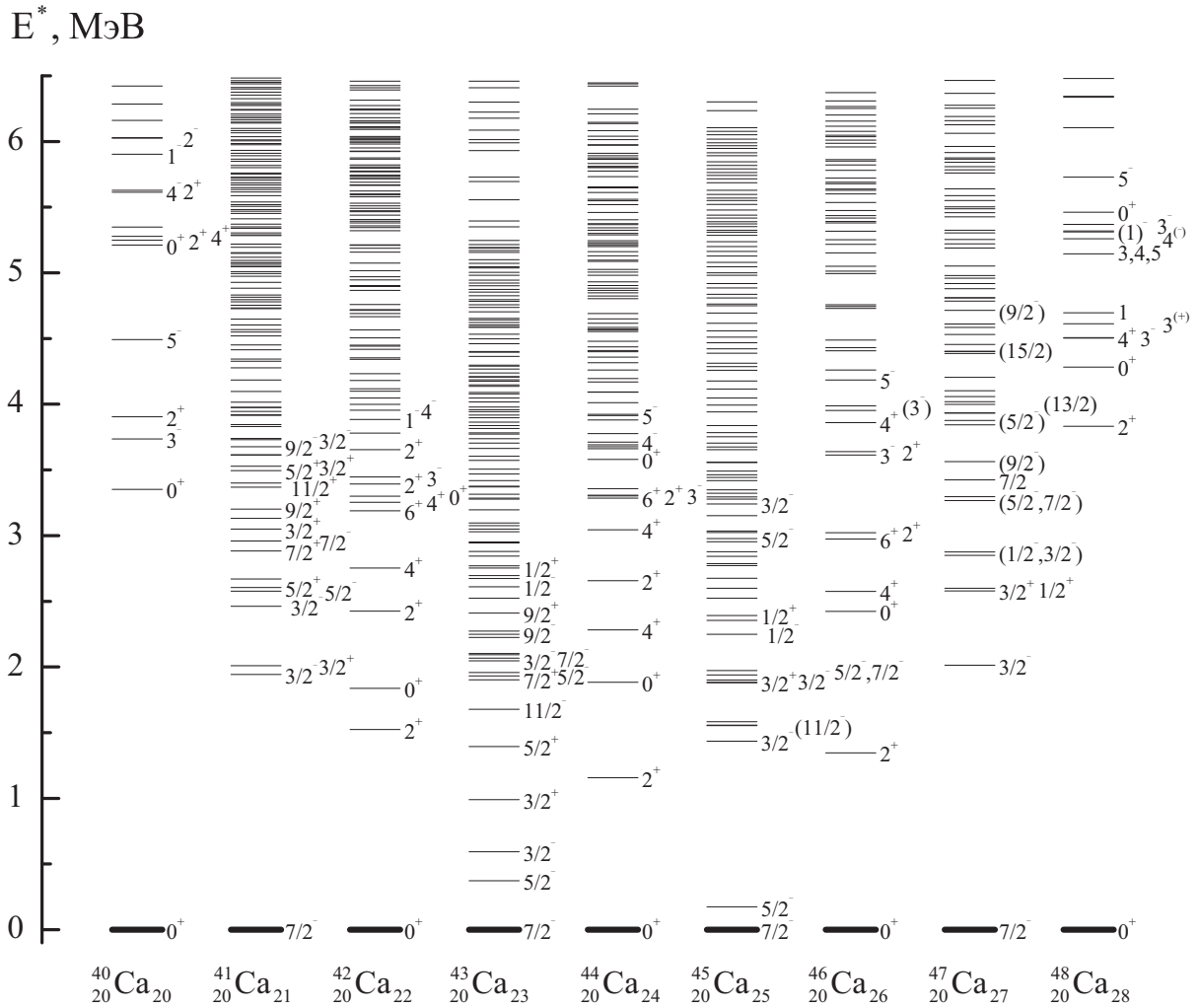


Рис. 2: Спектры низколежащих состояний изотопов кальция с $A = 40-48$

Однако наличие в ядре разного рода двухнуклонных корреляций не вызывает сомнения и может оказывать влияние на ядерные характеристики.

Примером такого влияния является спаривание нуклонов, уже упоминавшееся в связи с последним членом формулы Вайцзеккера. Как правило, два тождественных нуклона, находящиеся на одном энергетическом уровне, стремятся объединиться в пару с нулевым полным моментом. Наиболее ярким проявлением спаривания является тот факт, что все известные на сегодня четно-четные ядра имеют нулевой спин. Спаривание и его влияние на свойства ядер изучалось многими авторами, в том числе в наших работах [2].

Если нуклоны сильно сближаются, то вследствие принципа неопределенностей, а также отталкивания на малых расстояниях, они приобретают большие импульсы. Такая ситуация характерна для еще одного типа нуклон-нуклонных корреляций — короткодействующих корреляций. Фермиевский импульс нуклона в ядре составляет 250–270 МэВ. Однако вследствие ко-

роткодействующих корреляций нуклон с небольшой вероятностью может приобрести импульс, превышающий это значение. Поэтому изучение высокоимпульсной компоненты волновой функции нуклона непосредственно связано с проблемой короткодействующих корреляций, т.е. поисками отклонений от оболочечной модели. В качественной картине короткодействующие корреляции можно сопоставить со столкновениями нуклонов, о которых говорилось в связи с обоснованностью модели оболочек.

Реальная волновая функция ядра, конечно, сложнее оболочечной. Однако многие ядерные характеристики нечувствительны к таким усложнениям. Изучение высокоимпульсной компоненты нуклонов в ядре дает одну из немногих возможностей непосредственно наблюдать отклонения от оболочечной модели.

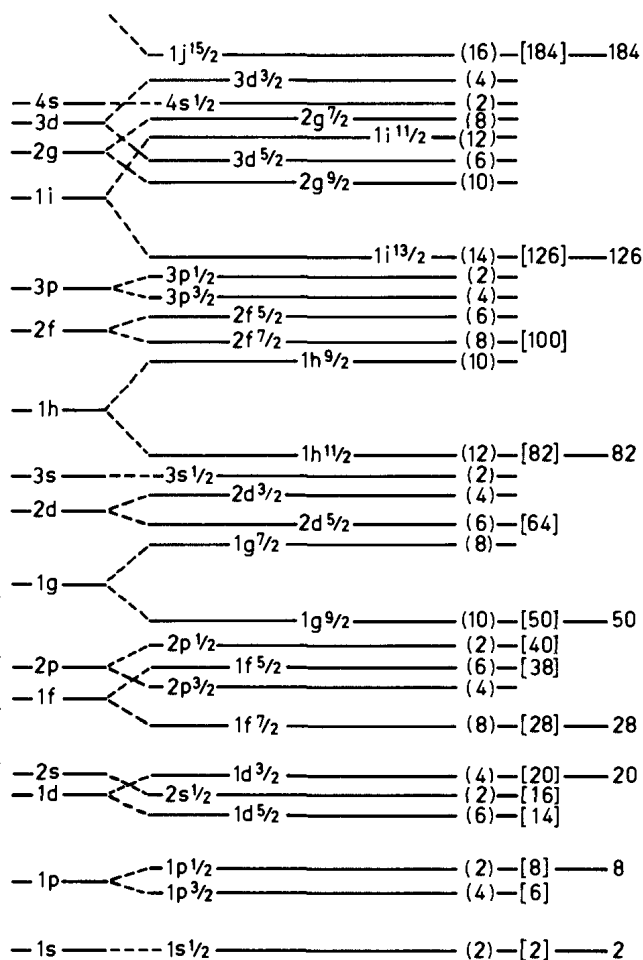


Рис. 3: Схема одночастичных состояний и числа заполнения в оболочечной модели

2. ЭКСПЕРИМЕНТ TJNAF И ЕГО ОБСУЖДЕНИЕ

В эксперименте, выполненном в TJNAF [1], наблюдалось прямое (квазиупругое) выбивание нуклонов из ядер углерода ($Z = 6$), алюминия ($Z = 13$), железа ($Z = 26$) и свинца ($Z = 82$). Отбор квазиупругих процессов (таких, когда нуклон вылетает непосредственно в результате столкновения с электроном) легко выполнить кинематически, если импульс нуклона внутри ядра мал. Если же импульс сравним с импульсом налетающего электрона, в определении импульса нуклона в ядре возникают неоднозначности. В данном эксперименте импульс (и энергия) электрона составлял 5.014 ГэВ, что позволило провести кинематический отбор событий квазиупругого выбивания даже высокоимпульсных нуклонов. В том же кинематическом анализе определялся импульс, которым нуклон обладал в ядре.

Квазиупругое выбивание нейтральных частиц — нейтронов — электронами, не участвующими в ядерном взаимодействии, — весьма маловероятный процесс. Выбивание нейтронов электронами происходит чаще при возбуждении резонансных состояний ядер

и их последующем распаде по нейтронным каналам. Такой механизм (не квазиупругий) не дает информации об импульсном распределении нейтронов. Квазиупругое выбивание возможно лишь за счет наличия у нейтрона внутренней структуры, зарядового распределения и магнитного момента. Благодаря уникальным характеристикам пучка электронов на ускорительном комплексе СЕВАФ этот редкий процесс удалось наблюдать с достаточно большой статистикой.

Главный результат работы [1] представлен на рис. 4. Здесь показаны отношения сечений квазиупругого выбивания нейтронов и протонов из четырех ядер в области низких ($k < k_F = 250$ МэВ) и высоких ($k > k_F = 250$ МэВ) импульсов, которые нуклоны имели в ядре. Сечения нормированы на соответствующие сечения рассеяния электрона на нуклоне.

Если протонов и нейтронов с данными импульсами в ядре одинаковое количество, то рассматриваемое отношение должно быть равно единице. Однако в ядрах Al, Fe и Pb нейтронов больше, чем протонов. Соответственно, отношение для низкоимпульсной компоненты, обращаясь в единицу для углерода ($Z = N = 6$), для более тяжелых ядер растет линейно с отношением N/Z .

Однако для высокоимпульсных нуклонов отношение остается равным единице независимо от N/Z . Это означает, что в ядре свинца ($Z = 82$, $N = 126$) высокоимпульсных нейтронов и протонов поровну, несмотря на то, что нейтронов в полтора раза больше, чем протонов. Данный результат выглядит парадоксально.

Можно предположить, что высокоимпульсные нуклоны возникают прежде всего во внутренней области ядра и, в терминах оболочечной модели, в низших одночастичных состояниях. Очевидно, что низшие состояния заняты равным числом протонов и нейтронов. Конечно, такое представление является слишком упрощенным, т.к. состояния протонов и нейтронов даже на одних оболочечных уровнях в средних и тяжелых ядрах заметно различаются вследствие кулоновского отталкивания протонов.

В работах, результаты которых были суммированы в обзоре [3], предполагалось, что короткодействующие корреляции возникают лишь в протон-нейтронных парах, что является результатом тензорного взаимодействия нуклонов. Тензорное взаимодействие в модели мезонного обмена на малых расстояниях между нуклонами играет относительно большую роль. Поскольку тензорное взаимодействие возможно только в триплетном по спину состоянии, а в S -состоянии относительного движения, допускающем сильное сближение частиц, триплетная конфигурация для двух тождественных нуклонов запрещена принципом Паули, то на малых расстояниях тензорное взаимодействие может связывать только pn -пары. В этом случае понятно, что короткодействующие корреляции возникают всегда для равного числа протонов и нейтронов.

Расчеты структуры ядер, выполненные с учетом короткодействующих корреляций, указывают на суще-

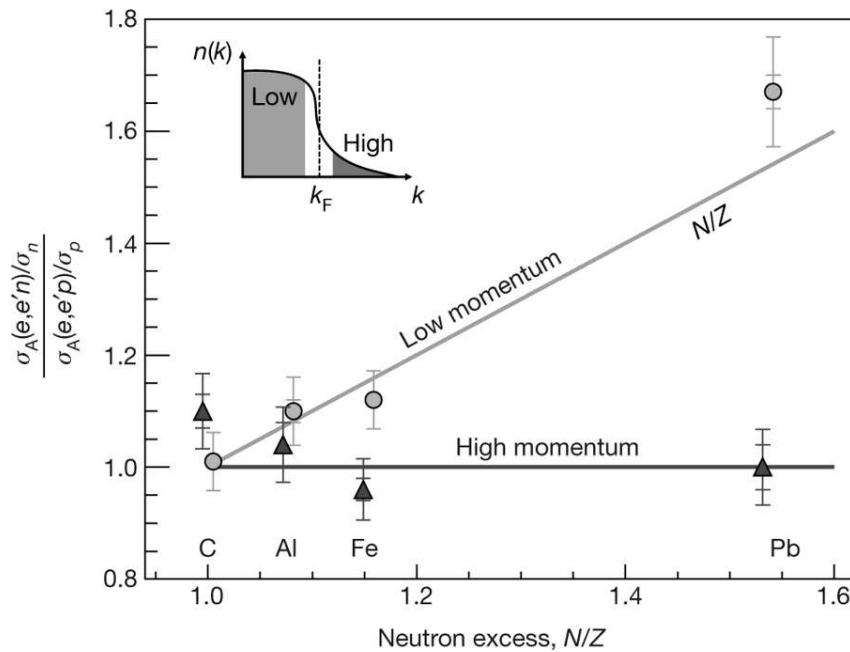


Рис. 4: Нормированные отношения выходов высоко- и низкоимпульсных (high и low, соответственно) нейтронов и протонов [1]

ственные отклонения от оболочечной картины. Так, было показано [3], что в основном состоянии ядра ⁴⁰Ca вероятность нижней оболочечной конфигурации (когда протоны и нейтроны полностью заполняют 6 низших уровней на схеме рис. 3) составляет 80%. Оставшиеся 20% приходится на состояния, в которых часть нуклонов занимает более высокие уровни. Такие поправки обычно легко учитываются в оболочечных подходах введением смешивания конфигураций. Однако, если рассматривать только нуклоны с импульсом выше 300 МэВ, вероятность основной оболочечной конфигурации составляет менее 10%, т.е. оболочечная схема полностью разрушается.

Описание короткодействующих корреляций во многих теоретических работах (например, [3, 4]) основано на традиционных моделях взаимодействия нуклонов в ядре. С одной стороны, такие подходы, вероятно, позволяют, по крайней мере качественно, объяснить полученные результаты. С другой стороны, очевидно, что их применимость также принципиально ограничена. Когда нуклоны сближаются на расстояния, меньшие их радиусов, их пространственные распределения перекрываются. При этом возникает скорее не двухнуклонная система, а шестикварковая (рис. 5), что не рассматривается в традиционных схемах. Последовательная теория короткодействующих корреляций, таким образом, требует рассмотрения внутринуклонных степеней свободы — кварков и глюонов и их взаимодействия.

Модификация нуклонов в ядре по сравнению со свободными нуклонами обсуждается со времен открытия EMC-эффекта [5], когда в экспериментах по глубоконеупругому рассеянию мюонов на ядрах было пока-

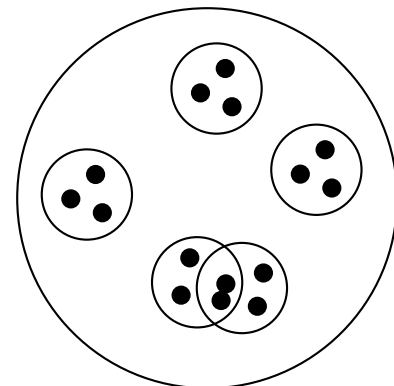


Рис. 5: Перекрывание кварковых систем нуклонов в ядре

зано, что структурные функции нуклона в ядре отличаются от структурных функций свободного нуклона. Весьма вероятно, что EMC-эффект и короткодействующие корреляции тесно связаны между собой [6]. Если это так, то данный эксперимент показывает, что в среднем модификация протонов в тяжелых ядрах должна быть сильнее, чем модификация нейтронов. Проявление кварковых степеней свободы в ядрах остается малоисследованной проблемой, однако данный эксперимент открывает перед этим направлением новые перспективы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом можно сказать, что результаты эксперимента TJNAF свидетельствуют о том, что принятые кон-

цепции в физике ядра нуждаются в развитии и уточнении. Эксперимент не указывает прямо, в каком на-

правлении должно идти развитие ядерных моделей, но бросает новый вызов теории атомного ядра.

-
- [1] *Duer M.* et al. (CLAS collaboration) // *Nature*. 2018. **560**. 617.
[2] *Имашева Л. Т.* и др. // ЭЧАЯ. 2017. **48**. 828; *Ишханов Б. С., Сидоров С. В., Третьякова Т. Ю.* // *Ученые записки физ. ф-та Моск. ун-та*. 2018. № 3. 1810201.
[3] *Ciofi degli Atti C.* // *Phys. Rep.* 2015. **590**. 1.
[4] *Sargsian M. M.* // *Phys. Rev. C*. 2014. **89**. 034305.
[5] *Aubert J. J.* et al. // *Phys. Lett. B*. 1983. **123**. 275.
[6] *Hen O., Miller G. A., Piasetzky E., Weinstein L. B.* // *Rev. Mod. Phys.* 2017. **89**. 045002.

Evolution of nuclear structure concepts: from the liquid drop to quark-gluonic interactions in nuclei

B. S. Ishkhanov^{1,2}, D. E. Lanskoj¹ ¹*Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991 Russia*
²*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*
E-mail: ^absi@depni.sinp.msu.ru, ^blanskoy@sinp.msu.ru

Evolution of nuclear structure concepts is traced from the simplest drop and single-particle shell models in view of the Thomas Jefferson Lab (USA) experiment, in which short-range correlations of nucleons in nuclei have been studied. It is argued that treatment of the short-range correlations requires theoretical consideration of subnucleonic (quark and gluonic) degrees of freedom in nuclei.

PACS: 21.10.-k, 21.60.-n

Keywords: atomic nuclei, protons, neutrons, quarks, short-range correlations.

Received 11 March 2019.

Сведения об авторах

1. Ишханов Борис Саркисович — доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой; гл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-50-95, e-mail: bsi@depni.sinp.msu.ru.
 2. Ланской Дмитрий Евгеньевич — канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент; тел.: (495) 939-56-31, e-mail: lanskoy@sinp.msu.ru.
-