

АНОМАЛОНЫ – МИФ ИЛИ РЕАЛЬНОСТЬ?

С. Д. БОГДАНОВ

Санкт-Петербургский государственный технический университет

ANOMALONS – MYTH OR REALITY?

S. D. BOGDANOV

Do nuclei expand? New experiments and ideas in nuclear physics and physics of elementary particles are given.

Расширяются ли ядра? Новые эксперименты и идеи в ядерной физике и физике элементарных частиц.

ВВЕДЕНИЕ

Слово “аномалон” обязано своему появлению опечатке. При подготовке статьи о необычных (anomalous) сечениях вторичных ядерных фрагментов автор вместо и напечатал n, что и послужило поводом для появления в научной литературе нового термина. В последние несколько лет проблема аномалонов, возникающих при взаимодействиях быстрых ядер, вызвала большой интерес как с экспериментальной (существуют ли аномалоны в действительности), так и теоретической (поиск новых форм ядерной материи) точки зрения.

Ниже будут даны основные сведения о методике поиска и наиболее интересных свойствах этих новых занимательных объектов ядерной физики.

ЯДЕРНАЯ ФОТОЭМУЛЬСИЯ

За последние десятилетия ядерные фотоэмульсии получили широкое распространение в физическом эксперименте, и на сегодня они являются одним из популярнейших средств регистрации, пригодным для получения точной информации о многих характеристиках частиц, таких, как масса, энергия, заряд, угловое и энергетическое распределение и т.д.

Напомним, что фотоэмульсия была первым регистрирующим детектором ионизирующего (то есть способного ионизировать атомы вещества) излучения. Более ста лет (1896 год) прошло с того дождливого дня, когда Анри Беккерель обнаружил, что соль урана засвечивает фотопластинку без помощи солнечных лучей. Так было сделано открытие самопроизвольного превращения атомов тяжелых веществ, сопровождающегося испусканием ионизирующего излучения. Это явление впоследствии было названо радиоактивностью.

Как известно, фотоэмульсия представляет собой слой желатина с вкрапленными в него зернами бромистого серебра AgBr. Состав эмульсии достаточно сложен: так, ядерная фотоэмульсия с плотностью 3,91 г/см³ содержит в каждом кубическом сантиметре следующее число ядер, $n_i \cdot 10^{-22}$ ядер/см³: Н 3,148; С 1,412; N 0,396; О 0,956; S 0,004; I 0,002; Br 1,031; Ag 1,036. Под действием излучения молекулы AgBr в зернах прекращают

существование и разваливаются на атомы серебра и брома. При проявлении пластинки фотоэмульсии в первую очередь начинают восстанавливаться в чистое серебро именно те зерна AgBr , в которых уже были отдельные свободные атомы серебра. На этом же свойстве основана и обычная фотография. Чем более сильному облучению подверглась фотоэмульсия, тем больше в ней окажется свободных атомов серебра и тем сильнее потемнеет она при проявлении. Таким образом, по степени почернения фотоэмульсии можно судить о поглощенной энергии излучения или, как принято говорить, дозе поглощенного излучения. Этой способностью фотоэмульсии широко пользуются экологи, работники различных служб для дозиметрического контроля и определения радиационной обстановки в местах работы и проживания людей.

Фотографический способ регистрации заряженных частиц толстыми слоями ядерной фотоэмульсии является одним из основных экспериментальных методов изучения взаимодействий элементарных частиц и ядер с ядрами. Каждая частица, проникающая в слой эмульсии, вследствие своей ионизирующей способности оставляет за собой более или менее толстый след засвеченных зерен бромистого серебра. После проявления пластины этот след виден под микроскопом как цепочка отдельных точек или как сплошная линия. Следы или треки, расходящиеся из точки, где произошла реакция, различимы под микроскопом в виде звезд. Таким образом, в ядерной фотоэмульсии можно увидеть следы частиц и изучить частицы, которые образуются в результате реакции ядер фотоэмульсии с излучением, выяснить, куда, под какими углами, с какой энергией полетели эти частицы и что произошло с ними в дальнейшем.

Изучая треки регистрируемых в фотоэмульсии частиц, можно наблюдать всю историю частиц от их возникновения до их распада, взаимодействия или остановки. При этом ядерная фотоэмульсия служит одновременно как мишенью, так и детектором излучения, а большая плотность эмульсии и возможность собирать огромные камеры из отдельных блоков фотоэмульсии позволяют получать характеристики частиц практически любой энергии.

РАЗМЕРЫ ЯДЕР, ИХ ПОПЕРЕЧНЫЕ СЕЧЕНИЯ

Обычно на вопрос, какую форму имеют ядра, отвечают достаточно просто: ядра имеют форму сферы. Плотность ядерной материи в ядре зависит только от расстояния между центром ядра и точкой наблюдения. Никаких особенностей или зависимости плотности ядерной материи в ядре от выделенного направления (угловых переменных) не наблюдается. Это наиболее

тривиальное предположение позволяет охарактеризовать размер ядра его радиусом. Тем не менее само понятие и величина радиуса ядра оказываются весьма сильно зависящими от наших представлений о ядре (применяемых физических моделей для описания ядра).

Можно представить себе ядро в виде однородного, с постоянной плотностью шара с резкой границей (как бильярдный шар), и тогда радиус ядра приобретает простой и наглядный смысл (радиус бильярдного шара). В рамках другой модели ядра необходимо предположить, что граница ядра размыта, диффузна, так же как бывает размыта граница тумана, и вероятность обнаружить нуклон на определенном расстоянии от центра ядра монотонно уменьшается при увеличении этого расстояния. В модели ядра с диффузной границей под радиусом ядра обычно понимают расстояние от центра ядра до точки, в которой плотность ядерной материи уменьшается в два раза по сравнению с плотностью в центре ядра — так называемый радиус половинной плотности. В настоящей работе мы попробуем обойтись моделью однородного ядра с резкой границей, однако форма этого ядра в некоторых случаях может отличаться от сферической.

Представим ситуацию, когда в стекло попала пуля и оставила в нем отверстие. Как летела пуля и какие у нее были размеры, мы не успели заметить, однако, измерив площадь ΔS отверстия в стекле, можно узнать площадь поперечного сечения пули. Далее, предполагая, что пуля имеет форму сферы, мы однозначно определяем ее радиус $R = (\Delta S / \pi)^{1/2}$.

Аналогично поступают и в ядерной физике. Подготовим мишень в виде тонкой пленки, имеющей площадь поперечного сечения S и толщину d . Допустим, что в каждом кубическом сантиметре этой мишени содержится n атомов. Тогда, очевидно, вся мишень содержит nSd ядер мишени (согласно планетарной модели Резерфорда, в центре каждого атома находится только одно ядро). Будем облучать мишень быстрыми ядрами-снарядами перпендикулярно к поверхности S и регистрировать число провзаимодействовавших $N_{\text{взаим}}$ и непровзаимодействовавших (прошедших через мишень без изменения своих характеристик) $N_{\text{невзаим}}$ ядер снарядов. Далее предполагается, что отношение числа провзаимодействовавших ядер снарядов к их общему числу $N_{\text{взаим}} / (N_{\text{взаим}} + N_{\text{невзаим}})$ равно отношению площади занимаемой ядрами мишени к площади мишени $\sigma nSd / S$, где $\sigma [\text{см}^2]$ — поперечное сечение отдельного ядра или так называемое сечение взаимодействия двух ядер. Таким образом, экспериментально измеряя общее число ядер снарядов, проходящих через тонкую мишень в виде пленки, и число провзаимодействовавших в мишени ядер снарядов, можно определить сечение взаимодействия двух ядер как

$$\sigma = \frac{N_{\text{взаим}}}{(N_{\text{взаим}} + N_{\text{невзаим}})nd}. \quad (1)$$

Экспериментальные результаты по сечениям взаимодействия быстрых ядер, полученные в настоящее время, весьма успешно описываются в рамках модели твердых сфер формулой

$$\sigma = \pi r_0^2 (A_{\text{снаряда}}^{1/3} + A_{\text{мишени}}^{1/3} - b_0)^2, \quad (2)$$

где элементарный радиус r_0 равен $1,4 \cdot 10^{-15}$ м, $A_{\text{снаряда}}$ и $A_{\text{мишени}}$ — массовые числа ядер снаряда и мишени (число нуклонов, содержащихся в этих ядрах), b_0 — безразмерный параметр перекрытия ($b_0 = 0,85$), учитывающий отклонения строения реальных ядер от нашей простой модели ядер в виде однородных шариков с резкой границей. Видно, что формула (2) в соответствии со здравым смыслом и методами построения физической модели абсолютно симметрично включает в себя как параметры снаряда, так и параметры ядра мишени.

Из полученных данных следует, что размеры ядер ($\sim 10^{-15}$ м) чрезвычайно малы по сравнению с размерами атомов ($\sim 10^{-10}$ м). Поэтому вероятность столкновения налетающего ядра снаряда с ядром мишени (мишень в виде тонкой одноатомной пленки) можно оценить как $P = (10^{-15}/10^{-10})^2 = 10^{-10}$. Другими словами, из прошедших через мишень 10 000 000 000 ядер снарядов в среднем провзаимодействует только один. Для того чтобы увеличить число взаимодействующих ядер снарядов, увеличим толщину мишени d . Потребуем, чтобы произведение σnd было равно единице. Тогда суммарная площадь поперечных сечений отдельных ядер мишени (без учета перекрытия ядер) будет равна площади мишени. Эта характерная толщина мишени оказывается равной средней длине свободного пробега ядра снаряда до взаимодействия в мишени, обозначаемой как λ :

$$\lambda = (\sigma n)^{-1}. \quad (3)$$

Представим себе полет пули через медленно падающие снежинки и будем в рамках полета нашей фантазии регистрировать длину пути пули между двумя последовательными столкновениями с отдельными снежинками. Очевидно, что этот путь может быть коротким или относительно длинным, главное — средняя длина пути между столкновениями будет постоянной величиной, зависящей только от концентрации n снежинок в объеме и поперечных размеров σ пули и снежинок.

Как уже отмечалось выше, каждая частица, проникающая в слой эмульсии, вследствие своей ионизирующей способности оставляет за собой более или менее толстый след засвеченных зерен бромистого серебра. Изучая треки регистрируемых в фотоэмульсии частиц, можно измерить длину пути ядер снарядов между двумя последовательными столкновениями с отдельными

ядрами фотоэмульсии и определить среднюю длину свободного пробега λ ядра снаряда до взаимодействия. Далее из формулы (3), зная концентрацию ядер, входящих в состав фотоэмульсии, легко получить и значение сечения взаимодействия двух ядер.

В заключение раздела отметим, что как сечение взаимодействия двух ядер, так и средняя длина свободного пробега ядра снаряда до взаимодействия являются физическими константами для конкретной пары взаимодействующих ядер и не могут изменяться без существенных физических причин.

КАК ОБНАРУЖИЛИ АНОМАЛЫ

По образному выражению одного экспериментатора, когда по атомному ядру бьют снарядами больших энергий, из ядра сыплются не только разнообразные частицы, но и знания об устройстве вселенной. Поэтому единственно возможным путем получения информации о свойствах ядер и ядерной материи является исследование столкновений элементарных частиц и ядер с ядрами. Практически сразу после наблюдений в фотоэмульсии, облученной в космических лучах первых ядро-ядерных взаимодействий, эти взаимодействия были отнесены к отдельному классу событий. При этом было выяснено, что одной из интереснейших особенностей реакции быстрого ядра с ядром-мишенью является появление вторичной частицы в виде быстрого тяжелого ядра, летящего практически с той же скоростью, как и первичное ядро. Эта вторичная частица была названа фрагментом налетающего ядра. Существенно, что в любых других ядерных реакциях, вызванных любыми другими ядерными частицами, фрагменты налетающего ядра отсутствуют.

Физики начали серьезное изучение этого нового объекта и были поражены весьма необычными свойствами быстрых фрагментов. Были обнаружены события, состоящие из каскадов четырех-пяти последовательных взаимодействий, вызванных одним и тем же фрагментом налетающего ядра на очень маленькой суммарной длине пробега этой вторичной частицы. Вероятности таких флуктуаций (если предположить, что фрагменты быстрых ядер, получающиеся в результате ядерной реакции, ничем не отличаются от первичных ядер до взаимодействия) составили чрезвычайно малую величину, равную 0,000 000 1.

Последовательное увеличение статистики взаимодействий фрагментов налетающего ядра с использованием пучков тяжелых ионов на ускорителях Беркли и Дубны привело ученых к неожиданному выводу. Средняя длина свободного пробега до взаимодействия фрагментов налетающего ядра оказалась действительно несколько меньше средних длин свободных пробегов

первичных ядер тех же зарядов. Так как средние длины свободных пробегов ядер и их фрагментов измерялись в одной и той же ядерной фотоэмульсии при неизменных условиях опыта, то сделанный вывод из этих экспериментальных данных был однозначен — фрагменты ядер-снарядов имеют большее поперечное сечение и занимают больший объем по сравнению с обычными “нормальными” ядрами! Действительно, из формулы (3) следует, что при постоянной концентрации ядер мишени средняя длина пробега ядер обратно пропорциональна сечению σ взаимодействующих ядер.

Дальнейшее тщательное изучение обнаруженного явления привело к новому открытию — существенные изменения в средних длинах свободного пробега и соответственно в поперечных сечениях фрагментов налетающего ядра наблюдаются только на начальных (один-два) сантиметрах пути после первого взаимодействия “нормальных” ядер. Если средняя длина свободного пробега определяется по событиям, происходящим на больших (5–10 см) расстояниях от точки первого столкновения, то она близка к длине, наблюдаемой в обычных пучках ядер.

Необычность полученных экспериментальных результатов в основном была связана с удивительным временным интервалом явления. Совершенно ясно, что ни ядерная реакция, ни распад возбужденного ядра не могут произойти за время, меньшее времени взаимодействия одного нуклона с другим. Это время оценить очень легко: так как короткодействующие ядерные силы действуют лишь на расстояниях порядка $1,5 \cdot 10^{-15}$ м, то при скорости относительного движения двух ядер, равной скорости света, эти ядра будут находиться в зоне взаимодействия около

$$(1,5 \cdot 10^{-15} \text{ м}) / (3 \cdot 10^8 \text{ м/с}) \approx 10^{-23} \text{ с},$$

то есть так называемое характерное ядерное время. Характерное время электромагнитного взаимодействия и снятия возбуждения ядер при помощи испускания гамма-квантов составляет около 10^{-16} с. Аномальное время, то есть время необычного состояния фрагментов налетающего ядра, значительно превосходит эти характерные времена. Напомним, что измерения в ядерной фотоэмульсии являются своеобразной разверткой по времени — зная расстояние, которое прошел фрагмент, и его скорость, легко определить и время его жизни. Оно составило более 10^{-10} с. Такое огромное различие по времени (более чем в 1 000 000 раз) можно объяснить только новыми состояниями ядерной материи. Рассмотрим ниже возможные объяснения.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

Основные физические идеи для объяснения аномального эффекта, то есть объяснения аномально больших

размеров фрагментов налетающего ядра (их поперечных сечений взаимодействий), связаны с ответом на простой вопрос, который, к сожалению, экспериментально еще не выяснен: все ли фрагменты ядер снарядов приобретают после первичного взаимодействия некоторую ненормальность, или сильное аномальное состояние присуще лишь какой-то весьма малой доле наблюдаемых частиц? Если ее приобретают все 100% фрагментов, то эта необычность весьма слабо выражена — сечения повышаются всего лишь в 1,05–1,08 раза. Предположение о 6%-ном вкладе аномалонов в общий состав фрагментов приводит к более существенному различию обычного и аномального состояния — сечения аномалонов возрастают в два-три раза. Таким образом, в настоящее время результаты экспериментов можно толковать двояко — или 6%-ным вкладом аномальных частиц, или тем, что большинство фрагментов приобретает слабо выраженное неестественное состояние. При этом в любом случае эти аномальные свойства пропадают за время около 10^{-10} с.

Основываясь на этих “двойных” экспериментальных результатах, теория предлагает и два возможных направления для объяснения данных опыта.

Первое (большинство фрагментов приобретает слабо выраженное аномальное состояние) — для ряда легких изотопов, рождающихся в ядро-ядерных столкновениях и не присутствующих в пучках “обычных” ядер, размеры не следуют зависимости $R = r_0 A^{1/3}$, а несколько больше. Это должно привести к завышенным поперечным сечениям (а следовательно, к уменьшению λ) во вторичных взаимодействиях с ядрами. Также возможно, что в процессе взаимодействия ядер вторичные фрагменты, приобретая дополнительную энергию и большой вращательный момент, изменяют форму, не изменяя существенно своей плотности. Действительно, допустим, что после взаимодействия ядро, занимая тот же объем, сильно вращается и приобретает форму эллипсоида вращения или гантели (так называемое квазимолекулярное состояние). При этом фрагмент в виде эллипсоида вращения из-за законов сохранения момента импульса некоторое время (10^{-10} с) летит плашмя по направлению движения. Тогда его поперечные размеры и сечение взаимодействия окажутся больше, чем у обычного ядра в виде сферы.

Второе теоретическое направление — это экзотические формы ядерной материи. В некоторых работах обсуждается возможность образования и существования изомерных состояний ядерной материи с плотностью в десять раз меньше нормальной. Такие состояния могут возникнуть у небольшого количества фрагментов в ядро-ядерных взаимодействиях в результате расширения ядра под действием ударного внешнего давления. Тогда при малых плотностях, которым соответствует радиус

ядра $R \approx 3R_0$, будет играть заметную роль особенность в уравнении состояния ядерной материи, проявляющаяся в возникновении квазидейтронных изомеров со временем жизни около 10^{-11} с. Большие размеры (за счет малой плотности) и заметное время жизни таких изомеров, если даже вероятность их возникновения среди фрагментов налетающего ядра мала, приведут к наблюдаемому уменьшению длины свободного пробега.

В других работах объяснение наблюдаемого эффекта ищут на кварковом уровне. Основная идея этих работ заключается в следующем. Согласно современным представлениям, каждый нуклон состоит из трех кварков. Кварки — это гипотетические частицы, которые существуют только внутри нуклона или других элементарных частиц. В настоящее время их обозначают буквами *u*, *d*, *s* и $\bar{c}$, образованными от начальных букв английских слов *up*, *down*, *strange* и *charm*. Протон в рамках этих представлений рассматривается как кварковая система *uud*, а нейтрон — как кварковая система *udd*. При определенных условиях дейтрон — ядро водорода, состоящее из протона и нейтрона (шести кварков, *uud + udd*), может превратиться в демона. Демон — это необычное шестикварковое состояние дейтрона, построенное как три пары кварков (трех дикварков, *ud + ud + ud*). Масса и размеры демона заметно превышают массу и размеры обычного дейтрона. Кроме того, каждый дикварк демона, чрезвычайно активный в ядерном смысле, стремится взаимодействовать с близко расположенным нуклоном (не входящим в демонический дейтрон) и тем самым поляризует окружающую ядерную материю. Расчеты показывают, что наиболее стабильной была бы трехцентровая система, состоящая из трех дикварков и трех обычных нуклонов, входящих в состав атомного ядра с массой более пяти единиц массы. Как указано в ряде работ, такие экзотические (шестикварковые) состояния ядерной материи могут возникать при столкновениях быстрых ядер. Фрагменты ядер, включающие в себя демонов, очевидно, будут иметь большие размеры, поперечные сечения взаимодействия (большой ядерный аппетит) и уменьшенную длину свободного пробега.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Завершая краткое изложение проблемы обнаружения и теоретического объяснения аномалий в поперечных размерах фрагментов быстрых ядер вскоре после их образования, отметим, что наши представления о составе, строении и возможных состояниях ядерной материи за последние 15 лет существенно изменились, наверняка будут быстро меняться и дальше. Тщательное изучение аномальных (не вписывающихся в современную картину ядерного мира) явлений, вне сомнения, приведет не только к новому знанию, но и к появлению необычных, странных на первый взгляд огромной мощности источников энергии, в десятки или сотни раз превышающей установки термоядерного синтеза или энергетические реакторы. Именно такие новые источники энергии дадут реальную основу для будущего мирного сосуществования природы и человека.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мигдал А.Б. Квантовая физика для больших и маленьких. М.: Наука, 1989. С. 114–116. (Б-чка “Квант”; Вып. 75).
2. Окунь Л.Б. $\alpha\beta\gamma\dots Z$: (Элементарное введение в физику элементарных частиц). М.: Наука, 1985. (Б-чка “Квант”; Вып. 45).
3. Зельдович Я.Б., Хлопов М.Ю. Драма идей в познании природы. М.: Наука, 1988. С. 115. (Б-чка “Квант”; Вып. 67).
4. Бердников Я.А., Богданов С.Д., Колыбасов В.М. Введение в ядерную физику. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1994.
5. Абрамов А.И. Измерение “неизмеримого”. М.: Энергоатомиздат, 1986.
6. Пенюджесевич Ю.Э. Физика экзотических ядер // Соросовский Образовательный Журнал. 1995. № 1. С. 92–98.
7. Лексин Г.А. Кварки в ядрах // Там же. 1996. № 12. С. 69–74.
8. Арбузов Б.А. Физика подкритического ядерного реактора // Там же. 1997. № 1. С. 73–78.
9. Богданов С.Д. Сверхплотная ядерная материя // Там же. 1998. № 6. С. 90–93.

Рецензент статьи Н.Б. Брандт

* * *

Сергей Дмитриевич Богданов, доктор физико-математических наук, профессор кафедры экспериментальной ядерной физики Санкт-Петербургского государственного технического университета. Область научных интересов — взаимодействие излучения с веществом, экспериментальная ядерная физика, ядро-ядерные взаимодействия. Автор более 150 публикаций.