

КЛАСТЕРНЫЙ РАСПАД – НОВОЕ ЯВЛЕНИЕ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

С. Д. КУРГАЛИН

Воронежский государственный университет

CLUSTER DECAY IS A NEW PHENOMENON OF NUCLEAR PHYSICS

S. D. KURGALIN

A new interesting phenomenon of spontaneous decay of atomic nuclei accompanied by the emission of heavy particles ^{14}C , ^{24}Ne , ^{28}Mg , ^{32}Si is considered. The peculiarities of this kind of nuclear decay are briefly described.

Рассмотрено новое интересное явление – спонтанный распад атомных ядер с выходом тяжелых частиц ^{14}C , ^{24}Ne , ^{28}Mg , ^{32}Si . Кратко освещены особенности этого вида ядерного распада.

www.issep.rssi.ru

ВВЕДЕНИЕ

Более чем за столетнюю историю развития ядерной физики накоплен колоссальный объем знаний. Атомное ядро настолько подробно изучено, что, казалось бы, уже нельзя ожидать чего-либо необычного. Специалисты, занимавшиеся исследованием атомного ядра, в последнее время с завистью следили за событиями, происходившими в физике элементарных частиц, где открывались неожиданные неординарные эффекты. На этом фоне открытие в 1984 году нового явления, которое позднее было названо кластерным распадом, представляет собой одно из ярких событий ядерной физики нашего времени.

НОВЫЙ ВИД РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА – КЛАСТЕРНЫЙ РАСПАД

В последние годы широко исследуется новый вид радиоактивного распада, заключающийся в том, что атомные ядра, которые находятся в основных (невозбужденных) состояниях, самопроизвольно (спонтанно) испускают тяжелые составные частицы, такие, как ^{14}C , ^{24}Ne , ^{28}Mg , ^{32}Si [1].

Начиная с 1984 года, когда был экспериментально обнаружен этот вид радиоактивности, растет количество работ, посвященных его теоретическому и экспериментальному исследованию. Однако уже значительно раньше встречались попытки найти в продуктах спонтанных радиоактивных распадов тяжелые частицы, превышающие по массе α -частицы (ядра гелия-4). Так, еще в 1914 году Э. Резерфорд и П. Робинсон поставили первый эксперимент в этом направлении. Они попытались получить ответ на вопрос, могут ли радиоактивные вещества испускать какие-либо составные (состоящие из нескольких нуклонов) частицы, кроме α -частиц. Ими было определено, что даже если такие частицы и испускаются, то их число не может превышать 1/10 000 части от количества вылетающих α -частиц.

В дальнейшем предположения о возможности существования нового вида радиоактивности с вылетом тяжелых составных частиц, промежуточных по массам между α -частицами и осколками деления ядер, высказывались разными авторами, однако назвать их научными предсказаниями было нельзя из-за слишком общих и неопределенных формулировок. Заслуга в открытии этого явления полностью принадлежит экспериментаторам. Теоретикам в то время не удалось достаточно точно предвидеть ни то, какие ядра окажутся способными испускать тяжелые частицы, ни то, что это будут за частицы [2]. Хотя, по-видимому, некоторые известные к тому времени теоретические работы все же привлекли внимание экспериментаторов к поиску таких экзотических распадов.

Открытие нового явления вызвало споры о том, как его назвать – в названии должна была быть кратко выражена суть явления. В настоящее время победу в этих спорах одерживает название “кластерный распад”. Слово “распад” отражает (и, как будет показано ниже, не без основания) близость этого явления к α -распаду. Появление в названии слова “кластер” носит принципиальный характер. Нуклоны, входящие в состав ядер, обладают достаточно большой кинетической энергией, и, сталкиваясь между собой во время движения внутри ядра, они на очень короткие промежутки времени могут образовывать такие группы, которые по своим характеристикам похожи на отдельно существующие ядра такой же массы. Эти группы нуклонов называют кластерами. Нуклоны кластера находятся в определенном состоянии, то есть кроме пространственной обособленности внутри ядра они могут обладать конкретными значениями энергии, импульса и т.д. Не вошедшие в состав кластера нуклоны в момент его образования также находятся в каком-то состоянии. В случае, когда кластеры определенного типа (например, α -кластеры) могут существовать в ядре достаточно долго (по ядерным меркам), такой вид кластеризации ядер называют статической кластеризацией.

При статической кластеризации нуклоны кластера обособлены пространственно и выделяются из остальных какими-либо своими характеристиками, например значениями энергии или импульса. В отличие от статической динамическая кластеризация не связана с каким-либо обособлением нуклонов. Динамическая кластеризация объясняет возможность наблюдения выхода кластеров определенного вида в некоторых ядерных реакциях.

Однако не следует упрощенно представлять себе, что кластер является достаточно стабильным образованием. Во-первых, нуклоны, составляющие кластер, в каждый момент времени не одни и те же, а разные. Бо-

лее того, неразличимость протонов или нейтронов, входящих в состав ядра, не позволяет дать ответ на вопрос, какие конкретно нуклоны образуют кластер. Во-вторых, кластеры быстро (по ядерным меркам времени) возникают и также быстро исчезают, только вероятность появления кластеров некоторых типов выше, чем других. Это дает возможность говорить, что кластеров определенного вида в ядре больше, чем других.

Рассмотрим понятие кластерного канала. Если в ядре с массовым числом A часть нуклонов в определенный момент времени образует кластер X , то оставшиеся $A - X$ нуклонов также находятся в каком-то конкретном состоянии. Если в этот момент либо группа X , либо группа $A - X$ нуклонов испытает внешнее воздействие, например электронный удар, то ядро может разделиться на две части (подсистемы), находящиеся в определенных состояниях. При этом говорят, что ядерная система перешла под действием внешнего возбуждения в двухкластерный канал. В некоторых случаях ядро может разделиться на три или большее число фрагментов, то есть перейти в мультикластерный канал. В случае кластерного распада ядерная система самопроизвольно переходит в двухкластерный канал, при этом ядро разделяется на две части: кластер, превращающийся при вылете из родительского ядра в составную частицу, и дочернее ядро (рис. 1).

В атомных ядрах энергия возбуждения ядра может быть не любой, а принимать только вполне определенные значения [3]. Они называются уровнями (состояниями) ядра. Существование некоторых уровней и их свойства можно объяснить на основе кластерной модели ядер. Эта модель (ее иногда также называют мультикластерной) исходит из существования в ядре достаточно устойчивых кластеров определенного типа.

Кластерная модель нашла достаточно широкое применение для описания уровней легких ядер. Известно [1], что низколежащие состояния легких ядер с четным числом протонов и нейтронов хорошо описываются этой моделью, что дает основание говорить, что эти состояния имеют α -кластерную структуру. Физическая причина возникновения такой структуры – хорошо известные в ядерной физике силы Майорана [4]. Существование этих сил приводит к тому, что наиболее энергетически выгодными в ядрах оказываются такие состояния, в которых нуклоны объединяются в группы, состоящие из двух протонов и двух нейтронов, с суммарным значением спина, равным нулю, и с симметричной относительно перестановок нуклонов пространственной волновой функцией [1]. Такими же свойствами (хотя и не только ими) обладает и свободная α -частица.

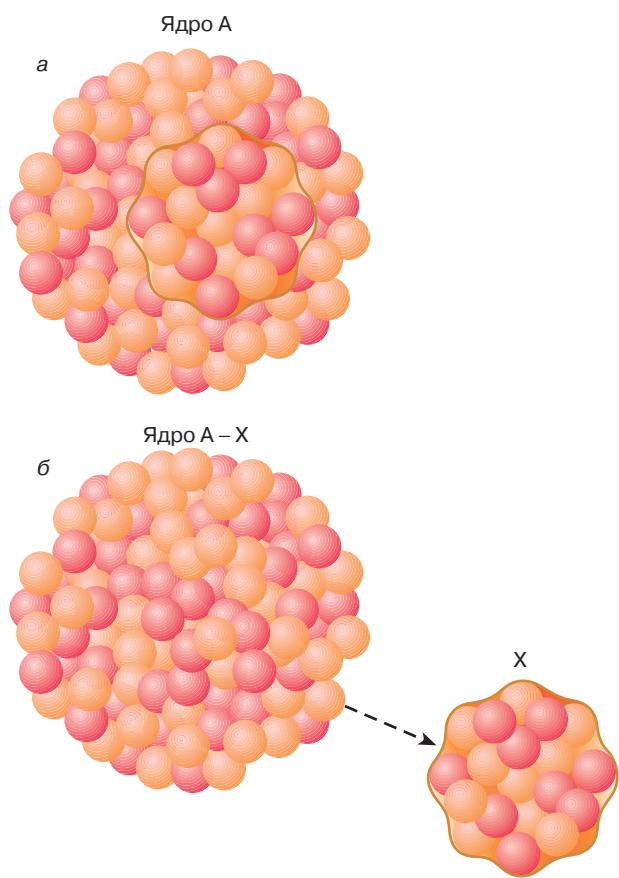


Рис. 1. Схема выхода кластера из атомного ядра: а – кластер X находится внутри ядра A; б – кластер X вылетает из ядра

КАКИЕ ФАКТОРЫ ВЛИЯЮТ НА КЛАСТЕРНЫЙ РАСПАД

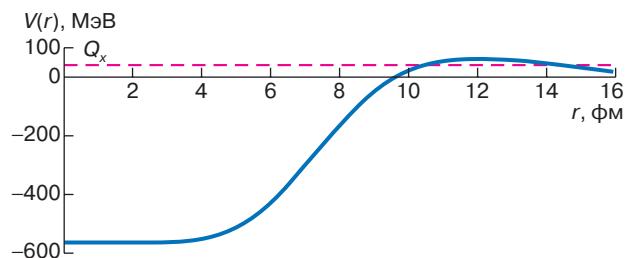
Возможность осуществления любого распада ядер в принципе определяется тем, разрешен ли он законом сохранения энергии или нет. Иными словами, важно, достаточно ли энергии Q для того, чтобы произошел распад (для спонтанных распадов $Q > 0$). Для элементов, находящихся во второй половине Периодической таблицы элементов Менделеева и имеющих среднюю энергию связи на один нуклон в ядре меньше, чем у более легких элементов, это требование удовлетворяется для большого числа различных вариантов распадов. Однако распад даже в случае выполнения этого условия не всегда может быть экспериментально обнаружен: очень часто вероятность прохождения частиц сквозь потенциальный барьер в поверхностной области ядер оказывается ничтожно малой.

Потенциальный барьер образуется вследствие того, что на положительно заряженную частицу, находя-

щуюся вблизи поверхности ядра, действуют со стороны ядра две противоположно направленные силы: ядерная сила притяжения и кулоновская сила отталкивания. Сложение соответствующих потенциалов и приводит к особой форме результирующего потенциала в виде потенциального барьера, что показано на рис. 2.

Для α -распада и спонтанного деления тяжелых ядер на осколки близкой массы вероятность прохождения частиц сквозь потенциальные барьеры оказывается такой, что обеспечивает достаточное количество вылетевших фрагментов для их экспериментального наблюдения.

Рассмотрим потенциальный барьер высоты B_x , сквозь который должна пройти частица X с энергией Q_x , чтобы осуществился распад. Особенность этого потенциального барьера ядра состоит в том, что с ростом энергии Q_x вероятность прохождения сквозь него частицы X увеличивается. Это означает, что указанную выше вероятность можно характеризовать отношением Q_x/B_x . Вычисления показывают, что значение отношения Q_x/B_x для тяжелых частиц оказывается большим, чем для α -частиц. Казалось бы, что и число вылетающих из ядер тяжелых частиц должно быть большим. Опытные данные не подтверждают такого вывода. Необходимо учесть еще один важный момент – во время распада кластер должен сформироваться из нуклонов внутри или на поверхности распадающегося ядра как единая составная частица. Расчеты [5, 6] показывают, что вероятность формирования тяжелой частицы существенно меньше вероятности формирования α -частицы – значительно более простого объекта. Этот факт имеет большее влияние на вероятность кластерного распада, чем изменение вероятности прохождения сквозь потенциальный барьер.



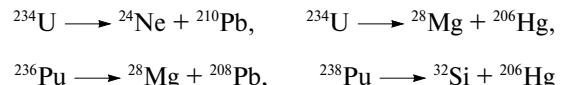
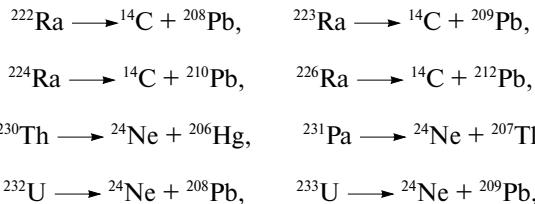
Отношение вероятности прохождения частицы X сквозь потенциальный барьер и отражения от него называют проницаемостью барьера P_X . Энергия распада, вероятность формирования кластера и проницаемость потенциального барьера – вот главные факторы, которые в совокупности определяют вероятность кластерного распада.

КЛАСТЕРНЫЙ РАСПАД – “ТАЖЕЛЬНЫЙ” α -РАСПАД ИЛИ ОСОБЫЙ ВИД ДЕЛЕНИЯ?

Первым экспериментальным подтверждением существования кластерного распада было наблюдение распада ядер ^{223}Ra с выходом ^{14}C с энергией около 30 МэВ. В качестве дочернего ядра образовывалось близкое к дважды магическому ядру ^{208}Pb ядро ^{209}Pb . Отметим, что ядра, у которых число нейтронов или протонов совпадает с одним из чисел 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, характеризуются повышенной устойчивостью и имеют существенно большую энергию связи, чем соседние ядра. Такие ядра называют магическими [3, 4]. У дважды магических ядер и число нейтронов и число протонов совпадают с приведенными выше магическими числами.

Эксперимент показал, что вероятность испускания ядер ^{14}C из ^{223}Ra примерно в 10^{10} раз меньше, чем вероятность вылета из этого ядра α -частиц. Регистрация таких редких событий на фоне большого числа одновременно вылетающих α -частиц очень сложна для экспериментаторов. При постановке этих экспериментов пришлось особым образом подбирать источники излучения, изготовить регистрирующие установки с большой разрешающей способностью. Эксперименты выполнялись на пределе возможностей аппаратуры и требовали длительного времени. Так, первые из них длились около 190 суток. И в дальнейшем при получении новых опытных данных столкнулись с неменьшими проблемами. В некоторых случаях в связи с этим устанавливались лишь верхние границы вероятностей выходов кластеров по отношению к α -частицам. Значения таких относительных вероятностей для разных кластеров и ядер равны от 10^{-10} до 10^{-17} , а их экспериментальные оценки в некоторых особенно трудных для измерений случаях приводят к еще меньшим величинам [2].

Достаточно хорошо экспериментально и теоретически изученные примеры кластерного распада



позволяют установить его основные закономерности. Приведем некоторые из них.

1. Все известные на сегодняшний день ядра, подверженные кластерному распаду, относятся к области тяжелых ядер с массовыми числами $A > 208$.

2. Зарядовые Z_f и массовые A_f числа дочерних ядер, возникающих при испускании кластеров из тяжелых ядер, лежат в узких областях: $80 \leq Z_f \leq 82$, $206 \leq A_f \leq 212$.

3. Кинетическая энергия вылетающей частицы близка к так называемому кинематическому пределу, это означает, что она забирает почти всю энергию распада. Следовательно, после осуществления распада дочернее ядро остается или в основном, или в возбужденном состоянии, но с невысокой энергией возбуждения E^* ($E^* \leq 1,5$ МэВ). Недавно экспериментально обнаружена интересная особенность кластерного распада ядра ^{223}Ra с выходом ^{14}C . Оказалось, что при его осуществлении дочернее ядро с вероятностью 16% может оказаться в основном и с вероятностью 84% в возбужденном состоянии. В этом случае говорят о заселении двух нижних уровней дочернего ядра. Схема процесса приведена на рис. 3. Такого рода особенности нередко встречаются в α -распаде и носят название тонкой структуры.

Первым шагом на пути теоретического анализа кластерного распада является поиск аналогий. Их естественно вести в направлении сравнения нового явления с известными видами радиоактивности с испусканием составных частиц – спонтанным делением и α -распадом.

Рассмотрим теоретический подход к описанию кластерного распада, основанный на его аналогии с делением ядер. В нем предполагается, что в родительском ядре происходят адиабатические, то есть медленные, колебания его поверхности по отношению к движению

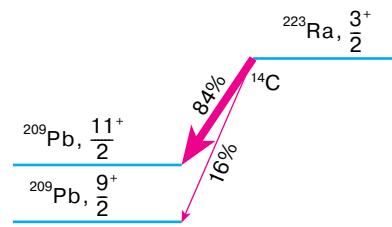


Рис. 3. Тонкая структура кластерного распада $^{223}\text{Ra} \longrightarrow ^{14}\text{C} + ^{209}\text{Pb}$. Рядом с обозначениями ядер указаны характеристики I^π (I – полный спин, π – четность) соответствующих уровней

ФИЗИКА

нуклонов в общем поле ядра. Считается, что такие колебания, если их амплитуда достаточно велика, могут привести к разделению ядра на фрагменты кластерного распада: дочернее ядро A_f и составную частицу X. Частица X проходит сквозь потенциальный барьер, существующий в поверхностной области ядра A_f , и выходит наружу.

Теоретические и практические исследования основных особенностей деления однозначно приводят к заключению о сильной перестройке ядра в этом процессе. Действительно, эксперимент показывает, что осколки деления i и j , выходящие с заметной вероятностью, имеют среднюю кинетическую энергию разлета T_{ij} , которая значительно меньше энергии кулоновского взаимодействия этих осколков B_{ij}^{Coul} в точке контакта, если считать, что они имеют равновесную форму с параметрами деформации β_i^0 и β_j^0 . Будем характеризовать деформацию фрагментов распада i и j параметрами β_i и β_j . Величина Q_{ij} энерговыхода процесса оказывается достаточной, чтобы в некотором диапазоне значений β_i и β_j , больших или равных равновесным значениям β_i^0 и β_j^0 , энергия кулоновского взаимодействия $B_{ij}^{\text{Coul}}(\beta_i, \beta_j)$ удовлетворяла условию

$$Q_{ij} \geq B_{ij}^{\text{Coul}}(\beta_i, \beta_j) + \Delta E_i^{\text{def}}(\beta_i) + \Delta E_j^{\text{def}}(\beta_j),$$

где

$$\Delta E_{i(j)}^{\text{def}}(\beta_{i(j)}) = E_{i(j)}^{\text{def}}(\beta_{i(j)}) - E_{i(j)}^{\text{def}}(\beta_{i(j)}^0),$$

причем $E_{i(j)}^{\text{def}}(\beta_{i(j)})$ – энергия деформации фрагмента $i(j)$, соответствующая параметру деформации $\beta_{i(j)}$. Следовательно, для сильно вытянутых осколков деления процесс их разлета оказывается надбарьерным или околобарьерным. В предельном случае холдного деления, когда $Q_{ij} \approx T_{ij} \approx B_{ij}^{\text{Coul}}(\beta_i^0, \beta_j^0)$, относительная вероятность такого деления мала. С теоретической точки зрения ядро имеет шанс разделиться на два деформированных (в исключительных случаях сферических) осколка, если перед разрывом оно окажется сильно вытянутым. Разрыв ядра в процессе деления происходит неадиабатически и приводит главным образом к образованию сильно возбужденных фрагментов с энергией возбуждения, большими или равными $\Delta E_{i(j)}^{\text{def}}$.

Явление α -распада кардинально отличается от деления тем, что выделяющаяся при распаде родительского ядра A на α -частицу и дочернее ядро A_f энергия Q_α всегда значительно меньше высоты кулоновского барьера $B_{\alpha A_f}^{\text{Coul}}$ (такие процессы, которые связаны с прохождением частиц сквозь потенциальные барьеры, и

энергия частиц при этом значительно меньше высоты потенциального барьера, называются глубокоподбарьерными). Дочернее ядро образуется в основном или слабовозбужденных состояниях, то есть осуществляется процесс без существенной перестройки родительского ядра.

При распаде ядер с испусканием составных частиц X ($X = {}^{14}\text{C}, {}^{24}\text{Ne}, {}^{28}\text{Mg}, {}^{32}\text{Si}$), как и при α -распаде, сохраняется соотношение $Q_X < B_{XA_f}^{\text{Coul}}$, то есть процесс оказывается глубокоподбарьерным. Эксперименты показали, что энергия вылетающих составных частиц определяется соотношением $E_X^{\text{exp}} \approx Q_X \cdot A_f / A$. Следовательно, дочерние ядра и вылетающие составные частицы оказываются практически невозбужденными, заметной перестройки родительского ядра в процессе кластерного распада не происходит и такой процесс является аналогом α -распада.

В последние годы удалось построить [2, 5–7] теорию кластерного распада на основе развития теории α -распада. Эта теория позволяет достаточно подробно исследовать это явление и сделать предсказания новых экспериментов. Однако, так как массы вылетающих составных частиц в разных вариантах кластерного распада различаются многократно, не все его детали можно понять основываясь только на аналогии с α -распадом. Это явление более сложно, многообразно, чем α -распад. Кластерный распад занимает промежуточное положение между α -распадом и делением. С серьезными основаниями следует предположить, что близкая аналогия с α -распадом для всех более тяжелых кластеров будет заменяться аналогией с делением. Более того, можно сделать вывод, что открытие кластерного распада поставило вопрос о создании единой теории распада – деления ядер.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исключительно интересное явление как с точки зрения экспериментаторов, так и теоретиков – спонтанный распад атомных ядер с испусканием тяжелых составных фрагментов будет привлекать внимание в течение еще долгого времени. В настоящее время интенсивно изучаются перспективные относительно кластерного распада ядра. Ставятся задачи развития теоретической интерпретации этого явления и прогнозирования последующих измерений. Экспериментальные исследования будут продолжаться как в направлении поиска распадов с еще более массивными вылетающими фрагментами, так и в направлении поиска новых областей ядер, подверженных этому типу распада, например ядер середины таблицы элементов Менделеева. Принципиально важно также изучение тонкой структуры

ФИЗИКА

переходов с испусканием тяжелых частиц, которая связана с возбуждением дочерних ядер. В случае распада нечетных и нечетно-нечетных ядер с вылетом четно-четных частиц можно предсказать большое разнообразие переходов на низколежащие возбужденные состояния дочерних ядер. Кроме того, следует с оптимизмом отнестись к появлению в ближайшие годы X-спектроскопии, связанной с детальным изучением характеристик ядерных уровней в кластерном распаде.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чувильский Ю.М. Кластерная радиоактивность. М.: Изд-во МГУ, 1997. 166 с.
2. Замятнин Ю.С., Михеев В.Л., Третьякова С.П. и др. Кластерная радиоактивность – достижения и перспективы: Эксперимент и теория // Физика элементар. частиц и атом. ядра. 1990. Т. 21, вып. 2. С. 537.
3. Широков Ю.М., Юдин Н.П. Ядерная физика. М.: Наука, 1972. 672 с.
4. Соловьев В.Г. Теория атомного ядра: Ядерные модели. М.: Энергоатомиздат, 1981. 296 с.
5. Кадменский С.Г., Кургалин С.Д., Фурман В.И., Чувильский Ю.М. Оптические потенциалы составных частиц и классификация распадов с испусканием тяжелых кластеров // Ядер. физика. 1990. Т. 51, вып. 1. С. 50–61.
6. Кадменский С.Г., Кургалин С.Д., Фурман В.И., Чувильский Ю.М. Полуэмпирический метод анализа относительных вероятностей спонтанной эмиссии тяжелых кластеров // Там же. 1993. Т. 56, вып. 8. С. 80.
7. Замятнин Ю.С., Кадменский С.Г., Кургалин С.Д. и др. Где искать новые примеры кластерного распада? // Там же. 1994. Т. 57, вып. 11. С. 1981–1995.

Рецензент статьи С.С. Бердоносов

* * *

Сергей Дмитриевич Кургалин, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры ядерной физики физического факультета Воронежского государственного университета. Область научных интересов – теория атомного ядра и ядерных реакций. Автор более 70 научных работ.