

## 100 лет открытия радиоактивности

Е. П. ГРИГОРЬЕВ

## История открытия

В истории человечества есть несколько веков, несколько открытий, которые самым существенным образом влияют на последующее развитие человечества. Так, в древние времена важнейшим событием было открытие колеса. В XIX в. исследование электричества было одним из главных направлений развития физической науки. В исследованиях электричества принимали участие: немецкий физик Юлиус П्लуккер, который обнаружил, что при электрическом разряде стекло трубки начинает флуоресцировать. Так, были открыты (1859 г.) и впервые описаны катодные лучи: немецкий ученый Иоганн Гитторф продолжил исследования и также наблюдал флуоресценцию и в 1869 г. описал свойства нового вида лучей; два года спустя английский физик Кромвелл Флитвуд Варли высказал предположение, что эти лучи состоят из небольших электрически заряженных частиц, испускаемых катодом. Эту идею подтвердили сначала английский физик Уильям Крукс (1879 г.), а затем Филипп Ленард (1892 г.). Решающие эксперименты были проведены английским физиком Джозефом Джоном Томсоном, который установил, что частицы, составляющие катодные лучи, несут элементарный электрический заряд примерно в 1837 раз легче атома водорода, и назвал эту частицу электроном.

Так, от исследования катодного луча физики пришли к открытию первой элементарной частицы. Дальнейшие исследования привели и к открытию нового вида электромагнитного излучения, что произвело сенсацию в мире. Это явление было обнаружено Вильгельмом Рентгеном.

Жуль Анри Пуанкаре, известный французский математик и физик, предложил проверить не излучают ли рентгеновские лучи соли урана. Стекло рентгеновской трубки флуоресцировало зеленым светом, что напоминало свечение кристаллов урана после того, как их подержали на солнце.

Проверкой этой гипотезы и занялся французский физик Антуан Анри Беккерель. В его семье исследование флуоресценции имели давние традиции. Еще его дядя Антуан Сесар Беккерель, известный ученый и член Парижской академии, проводил эксперименты в этой области. Его отец, Александр Эдмон Беккерель, также академик и даже президент Парижской академии, был автором основополагающих трудов по фосфоресценции и классифицировал это явление в зависимости от различных внешних воздействий.

Опыты Анри Беккереля были исключительно просты. Он брал фотопластинку, заворачивал ее в черную бумагу и клал на нее кристаллики урана. Выставив пластинку на некоторое время на солнце, он затем проявлял ее и с удовлетворением обнаруживал на ней силуэты кристалликов. На первый взгляд это можно было рассматривать как подтверждение гипотезы о том, что кристаллы урана, флуоресцирующие под действием солнечного света, испускают рентгеновские лучи. Однако Беккерель, будучи ученым очень высокой квалификации, решил поставить и контрольный опыт. Он положил кристаллики урана на фотопластинку, не облучая их предварительно на солнце, и установил, что, несмотря на это, они излучают, не флуоресцируя. Дальнейшие эксперименты подтвердили, что такой эффект вызывается самим ураном, содержащимся в кристаллах. Беккерель обнаружил, что «урановые лучи» ионизируют воздух и делают его электропроводным. Это позволило исследовать их с помощью электроскопа.

Таким образом, в 1896 г. Антуан Анри Беккерель открыл явление, названное естественной радиоактивностью.

Открытие естественной радиоактивности дало физикам возможность проникнуть в новый мир. В конечном счете это привело к представлениям о сложности структуры атома и к овладению атомной энергией. За открытие естественной радиоактивности Анри Беккерель получил в 1903 г. Нобелевскую премию по физике. Вместе с ним были награждены два других исследователя естественной радиоактивности — французские физики Пьер Кюри и Мария Склодовская-Кюри.

Используя тот факт, что радиоактивное излучение урана ионизирует воздух, Мария Склодовская-Кюри применила в своих исследованиях электроскоп; она поставила задачу — выяснить, не обладают ли подобными свойствами и другие вещества. В 1898 г. Склодовская-Кюри одновременно (и независимо) с немецким физиком Эрхардом Карлом Шмидтом установила, что элемент торий также радиоактивен. Наряду с этим она заметила, что некоторые соединения урана и тория имеют более сильное излучение, нежели это можно было предположить, исходя из процентного содержания в них названных элементов. Это указывало на возможность существования неизвестных радиоактивных субстанций.

Мария и Пьер Кюри провели химический анализ некоторых минералов, содержащих уран, и переработав тонны руды, в июле 1898 г. открыли новый химический элемент. Он был назван полонием — в честь Польши, родины Марии Склодовской-Кюри. В декабре того же года был открыт еще один элемент, который из-за сильного излучения получил название «радий».

Супруги Кюри по праву считаются пионерами современной атомной физики. Сам термин «радиоактивность» был предложен Марией Склодовской-Кюри. Пьер Кюри в 1901 г. обнаружил биологическое воздействие радиации, а в 1903 г. сформулировал закон уменьшения радиоактивности и ввел понятие «период полураспада». Он предложил использовать явление радиоактивности для определения абсолютного возраста земных пород. В том же году Пьер Кюри совместно с А. Лабордом обнаружил самопроизвольное выделение тепла солями радия, установив, что 1 г радия выделяет 100 кал тепла в час. Это указывало на то, что в атоме сосредоточена огромная энергия. К сожалению, Пьер Кюри погиб в 1906 г. от несчастного случая, едва достигнув 47 лет. Исследования были продолжены Марией Склодовской-Кюри, которая в 1910 г. вместе с французским химиком А. Дебьерном выделила металлический радий в чистом виде. Она определила атомный вес радия и указала его место в периодической системе элементов, за что в 1911 г. была удостоена второй Нобелевской премии — на этот раз по химии.

## Изучение радиоактивности в первые годы после ее открытия

Практически одновременно с Беккерелем исследования радиоактивности проводили во Франции супруги Мария и Пьер Кюри, в Англии и Канаде Эрнест Резерфорд.

Так, в 1899 г. Резерфорд обнаружил, что в радиоактивном излучении имеются два компонента, которые по-разному поглощаются материалами:  $\alpha$ -частицы имеют малые пробеги, а  $\beta$ -частицы поглощаются значительно слабее. В 1903 г. Резерфорд и Солди объяснили явление радиоактивности как превращение атомов одних элементов в другие. Это шло вразрез

с имевшимися тогда представлениями о неизменности элементов, но легло в основу научных представлений о феномене радиоактивности. Несколько позднее Резерфорд доказал, что  $\alpha$ -частицы представляют собой ядра атомов гелия. Созданная им в 1911 г. планетарная модель заменила прежние представления о строении атома.

Десятью годами позже Резерфорд предсказал возможность существования нейтрона, который был открыт только через 10 лет в 1932 г. Дж. Чедвиком. Представление о ядре, состоящем из протонов и нейтронов, сохраняется и по сей день. Лишь при очень высоких энергиях возбуждения ядра проявляется кварковая структура нуклона. Это выяснилось в результате работ с пучками частиц большой энергии.

Важным этапом в физике ядра было открытие в 1919 г. Резерфордом искусственного превращения элементов. Облучая азот  $\alpha$ -частицами, он наблюдал ядра водорода. В дальнейшем различные ядерные реакции стали и методом получения новых изотопов различных элементов и методом исследования структуры ядер и механизма процессов.

В 1908 г. Нобелевская премия по химии Резерфорду была присуждена за исследование распада элементов и химию радиоактивных субстанций.

В 1934 г. американскому физiku Парольду Ури была присуждена Нобелевская премия за открытие дейтерия. Тяжелая вода стала необходимым замедлителем нейтронов в последующих работах с ядерными реакторами и над атомной бомбой. Дейтерий  ${}^2\text{H}$  также стал мощным средством в химических и биохимических исследованиях, так как его сравнительно легко отличить от легкого изотопа водорода  ${}^1\text{H}$ .

Очередным этапом в изучении радиоактивности было создание в 1934 г. Федериком и Ирен Жолио-Кюри искусственных радиоактивных изотопов. Они были получены при облучении различных материалов  $\alpha$ -частицами. Продукты реакций выделялись в первых опытах химическими методами в количестве небольшого числа атомов.  $\alpha$ -частицы, излучаемые  ${}^{210}\text{Po}$ , направлялись на Al и В и создавали радиоактивные ядра  ${}^{30}\text{P}$  и  ${}^{13}\text{N}$ . За синтез «новых радиоактивных элементов» Фредерик и Ирен Жолио-Кюри получили Нобелевскую премию по химии в 1935 г. К 1937 г. число новых радиоактивных нуклидов превысило 200. Отметим, что к столетию открытия радиоактивности их число превысило 5000.

Перед самой войной в 1938 г. немецкие ученые Отто Ган и Фриц Штрассман открыли деление ядер. Открытие легло в основу военных исследований, вскоре все работы в этой области были засекречены. Курьезная ситуация сложилась с присуждением Нобелевской премии за эту работу. Премию присудили одному Гану «за открытие деления тяжелых ядер» в 1944 г. Вручена она была в неофициальной обстановке в связи с тем, что Гитлер запретил немецким ученым принимать Нобелевские премии. Коллеги Гана по работе Лиза Майтнер и Штрассман не вошли в число призеров, так как Нобелевский комитет счел Штрассмана еще слишком молодым, ему было 36 лет в 1938 г., а Майтнер была вынуждена покинуть Германию в 1938 г. Ган был известен как маститый ученый, его сочли достойным премии с учетом предыдущих научных достижений.

Еще одно открытие, спонтанное деление урана, было сделано в это же время К. А. Петряком и его учеником Г. Н. Флеровым в Ленинградском Радиовом институте.

Военные годы прервали исследования чисто научного характера. Группа Энрико Ферми в США прилагала большие усилия, чтобы опередить германских ученых в создании ядерного оружия. Коллектив Ферми включал выдающихся ученых, переехавших в Америку из ряда стран Европы, захваченных Германией. В Советском Союзе к 1944 г. также развернулись работы по созданию ядерного оружия. Советский атомный проект возглавил И. В. Курчатов.

## Изучение структуры ядра в СССР в 50—90-е годы

Детекторами ядерного излучения к 50-м годам служили фотопластинки и счетчики Гейгера-Мюллера. К этому времени было известно, что ядра при своем распаде испускают  $\alpha$ - и  $\beta$ -частицы и  $\gamma$ -лучи. При этом возбуждаются различные уровни дочерних ядер, и стояла задача найти и изучить возможно больше этих состояний в максимальном числе ядер. Радиоактивными излучателями служили или природные ядра, такие, как  ${}^{40}\text{K}$ ,  ${}^{238}\text{U}$ ,  ${}^{232}\text{Th}$ , и продукты распада тяжелых элементов, или искусственные радиоактивные нуклиды. До середины 50-х годов они производились, в основном, в реакциях с нейтронами, которые давали либо  $\text{PoBe}$ -источники, либо ядерные реакции с их очень мощными потоками нейтронов.

Наибольшую и самую точную информацию о структуре ядра получали тогда из спектров электронов внутренней конверсии. Каждый  $\gamma$ -переход между уровнями дочернего ядра сопровождается испусканием  $\gamma$ -квантов или электронов, выбитых  $\gamma$ -квантами с  $K$ - или  $L$ -оболочки атома. Эти электроны можно было хорошо разделять по энергии путем их анализа магнитным полем и регистрировать уже разделенные пучки. В то же время регистрация  $\gamma$ -квантов осуществлялась сцинтилляционными детекторами, имеющими плохое энергетическое разрешение, в 50 раз худшее, чем современные полупроводниковые  $\gamma$ -детекторы. Недостатком электронной спектроскопии была потребность в сильных и тонких источниках излучения, которые получались в ядерных реакторах.

Область физики ядра, которая изучает ядерную структуру по радиоактивному излучению, называется ядерной спектроскопией. Ее создателем в СССР по праву считается чл.-корр. АН СССР Борис Сергеевич Желепов. Его деятельность в послевоенные годы была направлена на создание парка приборов для исследования радиоактивных излучений, которая проходила в Ленинградском университете, где он создал кафедру ядерной физики, в Радиовом институте и в Институте метрологии, кроме того интенсивная работа велась в Ленинградском физико-техническом институте. Парк приборов состоял из спектрометров с улучшенной фокусировкой «кэatron» в университете и в Радиовом институте, построенных А. А. Башиловым и К. Я. Громовым соответственно. В университете А. В. Золотавин создал лучший в то время спектрометр с двойной фокусировкой на угол  $\pi\sqrt{2}$ . Имелись также различной конструкции линзовые  $\beta$ -спектрометры. Назревала проблема, какие радиоактивные излучатели исследовать на этих приборах.

К 1955-56 гг. в только что созданном Объединенном институте ядерных исследований (Дубна) начались исследования на мощном ускорителе протонов — синхроциклотроне группой физиков и химиков Радиового института.

При облучении мишени протонами с энергией 660 МэВ образуются многие изотопы десятков элементов, порядковый номер которых равен или меньше порядкового номера компунд-ядра  $z+1$ , где  $z$  — число протонов в ядре-мишени. Для химических и физических исследований требуется разделение микроскопических количеств продуктов облучения. Основная радиоактивность, получаемая при облучении танталовой мишени, относится к элементам редкоземельной группы. Тантал до сих пор используется как самый популярный элемент для облучения за счет его термостойкости.

Получив фракцию тулия, приготовив из нее источник, К. Я. Громов в Радиовом институте поместил источник в спектрометр «кэatron» и получил очень сильную линию в спектре электронов внутренней конверсии. Это было началом эпохи исследования нейтронодефицитных изотопов в нашей стране. Дефицит нейтронов в исследуемых нуклидах вызван особенностью ядерной реакции. После попадания в ядро протона с энергией 660 МэВ создается сильно возбужденное компунд-ядро, и его возбуждение снимается путем преимущественного

испускания нейтронов по сравнению с протонами, которым надо преодолеть кулоновский барьер. Так, для образования

$^{167}_{69}\text{Tm}_{98}$  из  $^{181}_{73}\text{Ta}_{108}$  необходимо, чтобы испарилось четыре протона и десять нейтронов, а сам  $^{167}\text{Tm}$  с периодом полураспада 9,25 дня имеет дефицит два нейтрона по сравнению с единственным стабильным изотопом тулия  $^{169}\text{Tm}$ .

Б. С. Джелепов сразу оценил открытие К. Я. Громова. Он организовал в Дубне облучение танталовых мишеней, их доставку из Дубны в Ленинград, разделение по элементам продуктов облучения и исследование их на всем парке имевшихся спектрометров. Лютециевая фракция шла в Институт метрологии, иттербиевая и тулиевая — в Радиевый институт, более легкие элементы — в различные лаборатории Ленинградского университета. Итогом этой деятельности было обнаружение новых радиоактивных ядер и подробное изучение структуры дочерних нуклидов, которые возникали в результате электронного захвата или позитронного распада исследованного ядра. Результаты первого этапа этой работы были подведены в докладе на Второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии в Женеве в 1959 г. Особенностью этой работы было то, что она совпала во времени с созданием модели оболочек атомного ядра и обобщенной модели. Исследования послужили проверкой теории и установлению границ ее применимости. Продолжать исследования в Ленинграде с нуклидами с периодом полураспада 5 ч и более стало невозможно и их перенесли в Объединенный институт ядерных исследований, построили специальное здание, где исследования продолжаются и по сей день. Здесь используются современные и эффективные приборы с хорошим разрешением и с большой светосилой. На протяжении более чем 30 лет с успехом работают спектрографы с однородным магнитным полем. Здесь проявилось международное сотрудничество физиков разных стран.

С учетом времени разделения и доставки источников излучения от ускорителя к измерительной аппаратуре оказалось возможным исследовать нуклиды с периодом полураспада 20—30 мин. В результате были открыты десятки новых изотопов в редкоземельной области. Исследовалась структура более удаленных ядер от дорожки стабильности, где ожидалось и были найдены новые эффекты. Этому содействовало обновление парка полупроводниковых  $\beta$ - и  $\gamma$ -спектрометров.

В середине 60-х годов произошел скачок в технике измерений  $\gamma$ -излучения. Были открыты полупроводниковые GeLi-детекторы, разрешение которых в 20 и более раз превышало разрешение прежних сцинтилляционных спектрометров. В СССР они впервые появились в Дубне в группе чешских физиков Я. Урбанца, которая работала в Лаборатории нейтронной физики. Достоинством новой аппаратуры были также ее многоканальность, что позволяло сразу измерять весь спектр, а не точку за точкой, как это было раньше. Сократилось время измерений спектра и увеличилась продуктивность исследований. В течение примерно трех лет были измерены спектры многих излучателей, новых и исследованных раньше. Пик в исследованиях по ядерной спектроскопии пришелся на 60-е годы. Это отражено и в числе публикаций. Перу Б. С. Джелепова принадлежит 75 работ, напечатанных в 1960 г., 92 работы за 1966-68 гг.

Дальнейшие исследования развивались по эволюционному пути. Усовершенствовалась техника измерений, уменьшалось время выделения и очистки излучателей. Вступил в строй масс-сепаратор, на котором впервые стали разделяться изотопы из одной фракции после ее выделения хроматографическим методом. Открывались новые нуклиды со все меньшими периодами полураспада. Наряду с увеличением числа ядер происходило продвижение в сторону повышения энергии воз-

буждения. Уточнялись энергии уровней, электрические и магнитные моменты, пути разрядки на более низкие уровни и мультипольности  $\gamma$ -переходов. Была открыта новая область  $\alpha$ -излучателей среди редкоземельных элементов и впервые обнаружена тонкая структура  $\alpha$ -спектров.

Следующим этапом ядерно-спектроскопических исследований в Дубне был проект ЯСНАПП-2 — ядерная спектроскопия на пучке протонов. Работа проводится на выведенном пучке, используются физико-химические методы разделения нуклидов, становятся доступными для излучения ядра с периодами полураспада в секундном диапазоне. Итог деятельности спектроскопистов по этому проекту был подведен на 46-м Международном совещании по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра в Москве в июне 1996 г.

Изучение структуры ядра проходило в нескольких научных центрах СССР. Были построены исследовательские ядерные реакторы в Москве, Дубне, Обнинске, в Гатчине под Ленинградом, в Киеве, Минске, Риге, Алма-Ате, Ташкенте. Созданы мощные ускорители в Дубне, Гатчине, Киеве, Алма-Ате. Помимо традиционного изучения радиоактивных нуклидов развивались новые методы. Очень информативными оказались работы на пучках нейтронов. Они велись в Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова в Москве, в ОИЯИ в Риге, Ташкенте, Обнинске.

В конце 70-х годов начались работы в Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова по исследованию спектров  $\gamma$ -квантов при неупругом рассеянии нейтронов в  $(n, n' \gamma)$ -реакции. Появились возможности выявлять возбужденные уровни ядер независимо от их природы и структуры. В эту серию работ включились физики Риги, Алма-Аты и Ленинграда, что привело к установлению почти всех уровней до 2 — 2,5 МэВ во многих стабильных ядрах таблицы Менделеева.

Оригинальная методика была применена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ. В  $(n, \gamma)$ -реакции исследуются  $\gamma\gamma$ -совпадения с суммированием импульсов. Это позволило значительно продвинуться в сторону изучения состояний с большими энергиями возбуждения, до 4 — 5 МэВ, что трудно сделать другими методами. Здесь возможно также обнаружить избирательность разрядки компаунд-ядра, возникающего при захвате теплового нейтрона.

Очень перспективная методика была создана в Киевском институте ядерных исследований АН Украины. С помощью специальных фильтров из спектра быстрых нейтронов реактора выделяются квазимонохроматические пучки нейтронов с энергией 2 кэВ, 24 кэВ, 59 кэВ. При использовании нейтронов с  $E = 2$  кэВ в компаунд-ядре возбуждается до сотни близких уровней, спин которых равен  $J_1 = j + 1/2$  и  $J_2 = j - 1/2$ , где  $j$  — спин ядра-мишени. Здесь вносимый нейтроном орбитальный момент  $l=0$ . Первичные  $E1$ -переходы, самые интенсивные в спектре, фиксируют все конечные уровни со спинами  $J_1$  и  $J_2$  с одинаковыми приведенными вероятностями и уровнями с  $J_1 + 1$  и  $J_2 - 1$  с приведенными вероятностями, в два раза меньшими. Это дает уникальную возможность выявить все уровни с определенными спинами и четностями.

Использование нейтронов с  $E = 24$  кэВ и больше связано с внесением в компаунд-ядро орбитального момента  $l=0$  или  $l=1$ . Сопоставление интенсивности первичных переходов из двух спектров с  $E_n = 2$  кэВ и  $E_n = 24$  кэВ приводит к установлению спинов и четностей конечных уровней. В лабораториях мира имеется всего несколько таких уникальных установок, как в Институте ядерных исследований в Киеве.

Большое значение для развития науки имеет работа по обобщению результатов исследований различными методами одних и тех же объектов. Создается полная картина свойств ядра. Последующее сопоставление с соседними ядрами позволяет систематизировать их особенности, сходство и раз-

личия. Эти экспериментальные данные являются основой для теоретических разработок, для создания моделей и развития теории ядра.

### Современные достижения в изучении радиоактивности

Важнейшей проблемой современной физики является установление массы покоя электронного антинейтрино  $m(\bar{\nu})$ . Старейший способ ее определения заключается в установлении формы  $\beta$ -спектра около его граничной энергии при  $\beta$ -распаде радиоактивного изотопа водорода — трития  $^3\text{H}$ . Несколько лет назад в Институте теоретической и экспериментальной физики в Москве впервые этим методом получено значение  $m(\bar{\nu}) \sim 20\text{—}30$  эВ. Это значение оказалось очень завышенным, но выход данной публикации стимулировал усилия для выполнения новых экспериментальных и методических работ, для создания специальных установок. Сейчас определен верхний предел  $m(\bar{\nu}) < 5$  эВ и предпринимаются усилия для его снижения. Выявилась тесная связь между молекулярной и ядерной физикой, когда на энергию вылетающего из ядра  $\beta$ -электрона влияет окружение этого ядра.

Пример с массой антинейтрино показывает глубокую связь различных областей науки. От  $m(\bar{\nu})$  зависит вероятность безнейтринного двойного  $\beta$ -распада, существование майораны, частицы, которая связана с этим процессом. От массы нейтрино зависят наши представления о расширении или сжатии Вселенной, так как эти мельчайшие частицы вносят существенный вклад в массу вещества нашего мира.

После упоминания об общенаучных проблемах, связанных с распадом одного из самых маленьких ядер, можно перейти к вопросам структуры более тяжелых, чем  $^3\text{H}$ , нуклидов.

Начальный период изучения радиоактивности относился к распаду природных ядер. Ядерные превращения, связанные с ядерными реакциями, скоро стали самостоятельной областью исследования. Но с развитием техники эксперимента, особенно после 60-х годов, центр тяжести переместился на изучение ядерной структуры в реакциях. Действительно, радиоактивные ядра в основном или изомерном состоянии имеют не очень большой момент количества движения, как правило, не больше  $10 \hbar$ . Их энергии распада в середине таблицы Менделеева не превышают  $5\text{—}10$  МэВ. Следовательно, в дочерних ядрах возможно изучать уровни с не очень большой энергией возбуждения и с не очень большим моментом.

Использование ядерных реакций меняет картину. Возможно в процессе взаимодействия ядер между собой возбуждение одного из них или обоих до состояний с большой энергией и с большим спином. Включены многодетекторные системы регистрации излучения, которые позволяют устанавливать последовательности уровней в ядре. Сейчас известны полосы уровней с возрастающими спинами до  $(50\text{—}60) \hbar$ . Энергия верхних членов полос превышает  $10$  МэВ. Во многих ядрах полосы несут вращательный характер. Образующиеся в реакциях ядра закручиваются в результате передачи момента партнерами по реакции. Оказалось, что кроме обычной для нижних состояний деформации ядра, где отношение радиусов большой и малой осей равно  $1,5:1$ , существуют супердеформированные состояния с отношением  $2:1$ , и недавно обнаружены гипердеформированные состояния, где отношение равно  $3:1$ . Они обычно имеют энергию возбуждения несколько МэВ и большой момент. Однако и среди низких уровней одного и того же ядра наблюдается разная деформация, и это объясняется в рамках современных модельных представлений.

С открытием новых ядер проходило продвижение к границе протонной радиоактивности. Первым обнаруженным излучателем протонов из основного состояния было ядро  $^{153}\text{Lu}$ . В нем недостает 22 нейтрона по сравнению с  $\beta$ -стабильным ядром  $^{175}\text{Lu}$ . Следом за  $^{153}\text{Lu}$  синтезировано еще несколько

протонных излучателей. Их исследование имеет целью выяснить механизм испускания одного нуклона из сложного ядра. Давно известный процесс  $\alpha$ -распада связан не только с преодолением потенциального кулоновского барьера при вылете  $\alpha$ -частицы из ядра, но и с вероятностью образования в ядре  $\alpha$ -частицы. Протоны же имеются в ядре, процесс преодоления кулоновского и центробежного барьера не маскируется другими эффектами.

Продвижение в сторону нейтронной границы нейтронной активности произошло заметным образом только для очень легких ядер. В середине и в конце таблицы известны изотопы, имеющие избыток не более  $5\text{—}10$  нейтронов по сравнению со стабильными. Это обусловлено отсутствием необходимого механизма образования ядер с большим избытком нейтронов. Следствием недостатка экспериментальных данных является невозможность проверить формулы для масс ядер, из которых и определяется граница нейтронной стабильности. Нет уверенности, что она проведена правильно. Пока нет предложений по дальнейшему существенному продвижению к этой границе.

Неожиданное открытие было сделано при изучении легкого нейтроноизбыточного ядра  $^{11}\text{Li}$ , содержащего три протона и восемь нейтронов. Радиус нейтронного облака, гало, оказался заметно выше, чем ожидалось. И здесь высокая техника эксперимента привела к этому открытию. Обычно изучалось рассеяние протонов на ядрах мишени. Невозможно создать мишень из ядер, времена жизни которых составляют микросекунды. Возможно решение обратной задачи: рассеивать радиоактивные короткоживущие ядра на водородной мишени. В нескольких лабораториях ведутся работы по созданию и ускорению радиоактивных ядер. Рассеяние  $^{11}\text{Li}$  на водороде и привело к открытию нейтронного гало.

Последнее по порядку упоминания, но не по значимости место в нашем обзоре занимает проблема открытия новых элементов. Известно, что вторая атомная бомба содержала в качестве взрывчатого вещества искусственный элемент плутоний, полученный при облучении урана нейтронами. Дальнейшее синтезирование зауроновых элементов проходило при облучении тяжелых элементов нейтронами, и в реакции слияния ядер при использовании подходящих пар партнеров. Тяжелые ионы одного элемента направлялись на мишень, а энергия должна быть достаточной для преодоления кулоновского барьера. С другой стороны, образовавшееся в результате слияния ядра-снаряда и ядра-мишени компаунд-ядро не должно обладать очень большой энергией возбуждения, иначе оно развалится на осколки, а задача состоит в охлаждении его путем испускания нейтронов и  $\gamma$ -квантов.

На протяжении многих лет шла конкуренция советских и американских физиков по созданию новых элементов. Это лаборатория Г. Н. Флерова в Дубне и Г. Сиборга в Беркли. В эту работу включались немецкие физики из Дармштадта, получившие в свое распоряжение мощный ускоритель тяжелых ионов, который имеет возможность ускорять любые ионы вплоть до урана. В итоге напряженной и кропотливой работы в конце 80-х годов были синтезированы 107-й, 108-й и 109-й элементы, а в 1995 г. появились первые публикации о 110-м и 111-м элементах. Теория предсказывает остров относительной стабильности ядер с зарядом  $Z = 114$  и с соседними  $Z$ . Результаты последних исследований дают авторам этих работ надежду достичь остров стабильности и добраться до 114-го элемента.

Прелесть исследовательской работы состоит в том, что неизвестно, какой новый сюрприз преподнесет нам природа. Так было 100 лет назад в период открытия радиоактивности, различные неожиданности встречаются и в наше время, они, безусловно, будут иметь место и в будущем.