

# 1. ИСТОРИЯ ОТКРЫТИЯ ЯВЛЕНИЯ РАДИОАКТИВНОСТИ И ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Открытие радиоактивности произошло в конце 19-го века, причем случайно. Однако оно, видимо, было неизбежно, о чем свидетельствует тот факт, что об испускании солями урана таинственного излучения еще в середине того же века независимо друг от друга сообщали французы Ньепс (1858 г.) и Сент-Виктор (1867 г.). К сожалению, их наблюдения не стали открытием и были забыты. Явление радиоактивности открыл А.Беккерель в 1896 г. Само открытие было неожиданным, но оно произошло в рамках целенаправленных работ по изучению структуры атома и свойств излучений.

В данной главе мы рассмотрим этапы развития учения о радиоактивности, и исследования, приведшие к открытию ядра, законов радиоактивного распада, ядерных процессов и свойств ионизирующих излучений.

## 1.1 Основные элементарные частицы

### Электрон

В течение тысячелетий в науке царствовала гипотеза о неделимости и «бесструктурности» атома. Отход от этих представлений начался в теории электричества. В 1749 г. Б. Франклин предположил, что электричество представляет собой своеобразную материальную субстанцию. В его работах впервые появляются термины: заряд (положительный и отрицательный), частицы электричества. Термин «электрон» как название фундаментальной неделимой единицы заряда в электрохимии предложен Дж. Дж. Стоуни в 1894 г. Открытие электрона как частицы принадлежит Дж. Дж. Томсону, который в 1897 г. установил, что отношение заряда к массе для катодных лучей не зависит от материала источника. М. Фарадей в 1833 г. для объяснения опытов по электролизу ввёл термин «ион» для носителей электричества в электролите и предположил, что ион обладает неизменным зарядом.

*Название «электрон» происходит от греческого слова ἤλεκτρον, означающего «янтарь»: ещё в древней Греции естествоиспытателями проводились эксперименты — куски янтаря трёрли шерстью, после чего те начинали притягивать к себе мелкие предметы.*

Открытие электрона — носителя отрицательного элементарного электрического заряда — и ионов свидетельствовало о сложном строении атома и возможности развала его на отдельные составляющие.

В открытии первой элементарной частицы — электрона — заметную роль сыграли катодные лучи, открытые в 1859 г. Ю.Плюккером, название дано Э. Гольдштейном, который полагал, что катодные лучи представляют собой волновой процесс в эфире. В. Крукс утверждал, что катодные лучи — потоки частичек вещества. В 1895 г. Ж. Перрен экспериментально доказал, что катодные лучи — это поток отрицательно заряженных частиц, которые движутся прямолинейно, но могут отклоняться магнитным полем. Далеко не все физики были поклонниками гипотезы атомного электричества. Так, Дж.Максвелл, создавший фундаментальную теорию электрических и магнитных явлений, категорически её отвергал.

**Катодные лучи** - электронный пучок в вакууме, порождающий магнитное поле и отклоняющийся в магнитных и электромагнитных полях.

С 1895 г. Дж. Дж. Томсон в Кавендишской лаборатории Кембриджского университета начал количественное изучение отклонения катодных лучей в электрических и магнитных полях. Работал он с трубкой Гейсслера. Томсон доказал, что все частицы, образующие катодные лучи, тождественны друг другу и входят в состав вещества. Частицы катодных лучей Томсон называл «корпускулами» или изначальными атомами. Согласно его гипотезе катодные лучи состоят из частиц, заряд которых не превышает элементарного заряда ионов  $e$ . Масса таких частиц должна быть в тысячи раз меньше массы атома. (Действительно, как оказалось, масса электрона составляет  $1/1837$  массы атома водорода). Гипотезу о существовании материи в состоянии ещё более тонкого дробления, чем атомы, Томсон изложил на заседании Королевского общества 29.04.1897. Однако идея об электроне не сразу получила признание. Так, М.Планк не поверил в гипотезу об электроне. Слово «электрон» первоначально использовалось для обозначения величины заряда «корпускулы». Только со временем электроном стали называть саму частицу. Электрический заряд электрона измерен Р. Миллиkenом в 1912 г., и лишь тогда эта первая элементарная частица получила право на существование. В 1923 г. Луи де Бройль предположил, что электрон может иметь волновые свойства. В 1925 г. Дж. Уленбек и С. Гюудсмит постулировали спин электрона. В 1927 г. К. Дэвиссон, Л. Гермер и Дж. Томсон подтвердили волновую природу электрона.

### **Фотон**

Прямое экспериментальное доказательство существования фотона было дано Р. Миллиkenом в 1912—1915 гг. в его исследованиях фотоэффекта, а также А. Комптоном в 1922 г., который обнаружил рассеяние рентгеновских лучей с изменением их частоты. Поскольку масса покоя фотона в отличие от других частиц (кроме нейтрино) равна нулю, его стали считать частицей не сразу: вначале полагали, что наличие конечной и отличной от нуля массы покоя – обязательная черта элементарной частицы. Фотон – это планковский квант света, несущий импульс. Понятие «кванты света» ввел Планк в 1901 г. для того, чтобы объяснить законы излучения абсолютно черного тела. Но тогда фотон считался не частицей, а только минимально возможной «порцией» энергии света той или иной частоты. Хотя предположение Планка о квантовании энергии света абсолютно противоречило всей классической теории, сам Планк понял это не сразу. Ученый писал, что он «... пытался как-то ввести величину  $h$  в рамки классической теории. Однако вопреки всем таким попыткам эта величина оказалась весьма строптивой». Впоследствии эта величина была названа постоянной Планка ( $h=6 \cdot 10^{-27}$  эрг·с).

Статус частиц фотоны получили в рамках теории относительности Эйнштейна, который в 1905 г. показал, что кванты должны иметь не только энергию, но и импульс, и что они являются в полном смысле частицами (при массе покоя равной нулю перемещаются они со скоростью света). Развивая идею Планка, А. Эйнштейн постулировал, что электромагнитное излучение (свет) в действительности является потоком отдельных квантов (фотонов), и на этой основе объяснил закономерности фотоэффекта.

### **Протон**

Открытие второй элементарной частицы – протона было сделано Резерфордом в 1919 г., хотя ион  $H^+$  был к этому времени давно известен.

В 1913 г. Э. Резерфорд выдвинул гипотезу, что одной из частиц, входящих в ядро атома любого химического элемента, должно быть ядро атома водорода, т.к. было уже известно, что массы атомов химических элементов превышают массу атома водорода в целое число раз. Резерфорд поставил опыт по исследованию взаимодействия  $\alpha$ -частиц с ядрами атома азота. В результате взаимодействия из ядра атома азота вылетала частица, которую в 1920 г. Резерфорд назвал протоном (от греч. *простейший, первичный*) и предположил, что это ядро атома водорода.

Резерфорд обнаружил протоны в ядерной реакции азота с гелием ( $\alpha$ -частицами):



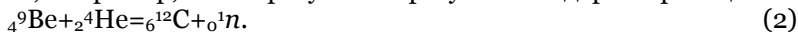
Резерфорд заключил, что «ядро атома азота распадается вследствие громадных сил, развивающихся при столкновении с быстрой  $\alpha$ -частицей, и что освобождающийся водородный атом образует составную часть ядра азота». В 1925 г. П.Блэкет получил в камере Вильсона первые фотографии следов протона, одновременно подтвердив открытие искусственного превращения элементов. В 1933 г. О.Штерн измерил магнитный момент протона. В 1955 г. О. Чемберлен, Э. Сегре, К. Виганд и Т. Ипсилантис открыли антипротон. В 1956 г. Р. Хофштадтер впервые измерил электромагнитный радиус протона.

### **Нейтрон**

В 1920 г. Резерфорд высказал предположение, что должна существовать частица массой, равной массе протона, но не имеющая электрического заряда. Однако обнаружить такую частицу Резерфорду не удалось.

В 1930 г. В.Боте и Г.Беккер проводили облучение лития и бериллия  $\alpha$ -частицами и с помощью счетчика Гейгера регистрировали возникающее при этом проникающее излучение. Поскольку на это излучение не оказывали влияния электрические и магнитные поля, и оно обладало большой проникающей способностью, авторы пришли к выводу, что испускается жесткое  $\gamma$ -излучение. В 1932 г. Фредерик и Ирен Жолио-Кюри также провели опыты с бериллием, пропуская такое проникающее излучение через парафиновый блок. Они обнаружили, что из парафина выходят протоны с высокой энергией, и заключили, что, проходя через парафин,  $\gamma$ -излучение в результате рассеяния порождает протоны.

Дж.Чедвик в 1932 г. повторил эксперимент по облучению бериллия  $\alpha$ -частицами. Он также использовал парафин и с помощью пропорционального счетчика, позволяющего определить распределение энергии между различными частицами, показал, что проникающее излучение состоит из нейтральных частиц с массой близкой к протону - нейтронов. В случае бериллия, например, они образуются в результате ядерной реакции:



При прохождении через вещество нейтроны не теряют энергию на ионизацию атомов вещества, поэтому имеют огромную проникающую способность.

Чедвик оценил массу нейтрона путем анализа энергетического баланса ядерных реакций с участием нейтрона. Свойства новой частицы были исследованы супругами Жолио-Кюри, которые показали, что она неустойчива по сравнению с протоном; для её массы они нашли значение 1,010

(при  $^{16}\text{O}=16,000$ ). Была оценена кинетическая энергия нейтронов, испускаемых источником  $\text{Po}+\text{Be}$ . Эти работы привели к открытию искусственной радиоактивности.

В 1951 г. Дж. Робсоном был измерен период полураспада нейтрона. Достаточно точное определение периода полураспада свободного нейтрона (11,7 мин) проведено в 1959 г. П.Е.Спиваком. В 2005 г. А.П. Серебров уточнил эту величину до  $T=10,14$  мин, а в 2010 К.Накамура предложил для нейтрона величину периода полураспада  $T=10,18$  мин.

### **Позитрон**

В 30-е - 50-е годы 20-го века новые частицы открывались главным образом в космических лучах. В 1932 г. в их составе А. Андерсоном была обнаружена первая античастица — позитрон ( $e^+$ ) — частица с массой электрона, но с положительным электрическим зарядом. Существование позитрона непосредственно вытекало из релятивистской теории электрона, развитой П. Дираком (1928—31 г.г.) незадолго до обнаружения позитрона.

Существование позитрона было подтверждено наблюдениями Блэккета и Оккиалини в камере Вильсона. Затем супруги Жолио-Кюри открыли, что позитроны образуются при конверсии  $\gamma$ -лучей, а также испускаются искусственными радиоактивными изотопами. Так как фотон  $\gamma$ -излучения, будучи нейтральным, образует пару: позитрон и электрон, то из принципа сохранения электрического заряда следует, что по абсолютной величине заряд позитрона равен заряду электрона.

Впервые массу позитрона измерил Ж.Тибо, который установил, что массы позитрона и электрона отличаются менее чем на 15%. Более поздние эксперименты подтвердили, что позитрон и электрон имеют равные массы. В 1938 г. Э. Штюкельберг для объяснения стабильности протона ввел понятие барионного числа.

### **Нейтрино**

Открытие нейтрино — частицы, почти не взаимодействующей с веществом, ведёт своё начало от теоретической догадки В. Паули (1930 г.), позволившей за счёт предположения о появлении такой частицы устранить трудности применения закона сохранения энергии к процессам  $\beta$ -распада радиоактивных ядер. Экспериментально существование нейтрино было подтверждено лишь в 1953 г. (Ф. Райнес и К. Коуэн, США).

В 1933 г. создана теория  $\beta$ -распада с учетом нейтрино; введено понятие нового типа взаимодействия - слабого (Э.Ферми). Теория Ферми основана на протонно-нейтронной модели ядра и опирается на понятие нейтрино и законы сохранения спина и энергии.

В 30-годы теория Ферми была обобщена на позитронный распад (Вик, 1934) и на переходы с изменением углового момента ядра (Гамов и Теллер, 1937). В 1938 г. А. Алиханов и А.Алиханян предложили для обнаружения нейтрино исследовать отдачу ядер в процессе электронного захвата (электронный захват  $\gamma\text{Be}$ ). В 1943 г. Дж. С. Аллен в процессе электронного захвата на ядре  ${}^7\text{Be}$  измерил импульс отдачи конечного ядра ( ${}^7\text{Li}$ ), подтвердив гипотезу о существовании нейтрино. В 1946 г. Б.Понтекорво предложил «хлорный метод» детектирования нейтрино.

В 1956 г. Ф. Райнес и К. Коэн зарегистрировали антинейтрино. В 1962 г. было установлено, что существуют два разных нейтрино: электронное и мюонное. В 1964 г. в распадах нейтральных К-мезонов было обнару-

жено несохранение комбинированной чётности (введённой Ли Цзун-дао и Ян Чжэнь-нином и независимо Л. Д. Ландау в 1956 г.). В 1957 г. Б. Понтекорво выдвинул идею нейтринных осцилляций. В 1962 г. Л. Ледерман показал, что электронное нейтрино отличается от мюонного. В 1998 г. получено первое свидетельство осцилляции нейтрино (при регистрации атмосферных мюонных нейтрино на установке Супер-Камиоканде, Япония).

## 1.2 Рентгеновское излучение

К открытию рентгеновского излучения привели эксперименты с трубкой Крукса, газовым разрядом и катодными лучами (В.Крукс, 1890).

Катодные лучи известны с середины 18-го века. Еще в 1748 году было замечено, что в стеклянной трубке, из которой откачан воздух, при пропускании электрической искры вспыхивают огни. Сто лет спустя аналогичное явление наблюдал Фарадей, когда подвел ток от электрической машины к стеклянной трубке с разреженным воздухом. Он отметил, что из положительного электрода (анода) исходит фиолетовое свечение, протянувшееся почти до самого катода, который также мерцал в темноте. Еще через двадцать лет Плюкер, добившийся сильного разрежения в стеклянной трубке, заметил, что светится не только катод, но и стекло, расположенное вблизи него. Еще через десять лет Гитторф вставил между катодом и фосфоресцирующим стеклом твердый предмет и заметил, что он отбрасывает тень. Из чего он сделал вывод, что невидимые лучи испускает катод.

В.Крукс, который изобрел много разных по форме катодно-лучевых трубок, высказал предположение, что катодные лучи – поток каких-то отрицательно заряженных частиц. В 1891 г. Г.Герц открыл, что катодные лучи проходят сквозь тонкие слои металла. В 1894 г. Ф.Ленард вывел пучок катодных лучей из трубки. Он сделал на ее конце отверстие и закрыл его тонкой алюминиевой фольгой, чтобы не нарушался вакуум.

Рис. 1. Рентгеновский снимок кисти руки Берты Рентген.

Немецкий ученый В.К.Рентген, занимался изучением катодных лучей, экспериментируя с трубкой Гитторфа. 8.11.1895 Рентген обнаружил свечение экрана, покрытого платиносинеродистым барием (тетрациано платинат бария,  $\text{Ba}[\text{Pt}(\text{CN})_4]$ ). Поскольку экран находился от источника излучения на значительном расстоянии (катодные лучи до него долететь не могли), а трубка была покрыта светонепроницаемым кожухом, то Рентген предположил, что свечение экрана вызвано высокоэнергетическими невидимыми лучами. Он назвал их X-лучами (в некоторых странах, в том числе – в России, они теперь называются рентгеновскими). Широкому признанию открытия Рентгена способствовало получение им изображений на фотопластинках в рентгеновских лучах.

20.01.1896 Анри Пуанкаре на заседании Парижской Академии рассказал об открытии новых лучей и высказал предположение, что рентгеновское излучение связано с флюоресценцией и, возможно, возникает всегда в люминесцирующих веществах и никакой катодной трубки для получения X-лучей не надо.

В феврале-марте 1896 года эту гипотезу проверял Анри Беккерель. Он использовал фотографическое действие через черную бумагу активированных солнечным светом кристаллов солей урана.

Замечание. Для эксперимента Беккерель выбрал из обширной коллекции отца соль, обладающую большой интенсивностью свечения под действием солнечных лучей (желто-зеленая фосфоресценция) – двойной сульфат уранила и калия ( $\text{UO}_2\text{SO}_4 \cdot \text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Выбор соли случаен – в его распоряжении были соли, обладавшие аналогичными свойствами, но не содержащие уран. Если бы Беккерель взял любую другую соль, то открытия радиоактивности, естественно, не состоялось бы. Поэтому говорят о случайности открытия радиоактивности. Однако тщательность и точность проведения всех операций, позволили Беккерелю сделать великое открытие.

На первом этапе эксперименты подтвердили гипотезу Пуанкаре, но вскоре Беккерель открыл, что урановая соль даже без воздействия солнечного света обладает свойством испускать излучение, проходящее через черную бумагу. Особенно наглядным подтверждением наличия высокопроникающего, но не являющегося рентгеновским, излучения от препарата, был эксперимент, в котором подставка, в углубления которой была насыпана соль урана, была зажата между двумя фотопластинками, завернутыми в черную бумагу. Обе пластинки дали достаточно четкие изображения (рис. 2).

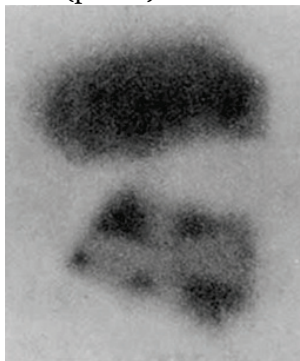


Рис. 2. Отпечаток соли урана (калийуранилсульфат), помещенной в углубления подставки, на фотопластинках, приложенным к разным сторонам подставки. Открытие А. Беккерелем явления радиоактивности (1.03.1896 г.).

Продолжая исследование, Беккерель обнаружил, что новое излучение испускают соли только урана, другие люминесцирующие или фосфоресцирующие вещества излучений не дают. В случае солей урана интенсивность излучения определяется только количеством урана в препарате и совершенно не зависит не только от температуры и агрегатного состояния, но и от того, в какие соединения входит уран. Излучение испускается не соединением, а химическим элементом – ураном. Окончательно это подтвердилось при работе с металлическим ураном, который оказался активнее его солей.

Так было открыто явление радиоактивности: свойство некоторых элементов самопроизвольно распадаться и испускать излучение без внесения энергии извне. В течение нескольких последующих лет было установлено, что мощность излучения урана не уменьшается со временем.

В 1901 году М. Кюри ввела понятие радиоактивности. В 1902 году В. Рамзай экспериментально показал, что радиоактивный процесс протекает как мономолекулярная реакция распада вещества, а Э.Резерфорд и Ф.Содди предложили первое объяснение механизма радиоактивного процесса как явления самопроизвольного распада химического элемента: атомы радиоактивных элементов претерпевают самопроизвольный распад, сопровождающийся испусканием  $\alpha$ - или  $\beta$ -частиц и образованием атома нового элемента. В 1903 г. они же сформулировали закон радиоактивных превращений и дали его математическое выражение, каноническая форма

которого  $N_t = N_0 e^{-\lambda t}$  общепринята в настоящее время. Согласно предложенной схеме, радиоактивный распад, например, радия приводит к его превращению в радон и гелий. Образование гелия было экспериментально подтверждено В.Рамзаем и Ф. Содди.

Важным обстоятельством для определенной количественной интерпретации радиоактивных явлений было введение понятия «период полураспада». В 1905 г. Э. Швейдлер доказал статистический характер радиоактивных превращений и ввёл понятие «вероятность распада». Экспериментальное обоснование этих представлений дал в 1906 г. К.Кольрауш. Так возникла трактовка радиоактивности как вероятностного процесса.

В 1934 г. супруги Жолио-Кюри открыли искусственную радиоактивность. Они получили путем ядерных превращений нестабильные изотопы легких элементов, которые обладали, в зависимости от относительно массового числа, способностью к  $\beta$ -излучению. Изотопы с относительно большим массовым числом, излучали электроны, так что их атомный заряд увеличивался на единицу, и они испытывали сдвиг вправо на одно место по периодической системе. Если же массовое число оказывалось относительно малым, то изотопы перемещались на одно место влево, излучая позитроны и уменьшая тем самым свой ядерный заряд на единицу. В результате этих ядерных реакций определенного типа образуются радиоактивные изотопы известных легких элементов, например, кислорода, углерода, азота, фтора, и других.

### 1.3 Радиоактивные элементы и изотопы

В 1898 г. М.Кюри и Г.Шмидт независимо друг от друга обнаружили активность у тория.

В 1897 г. Беккерель обратился к П.Кюри с просьбой выяснить, нет ли в излучающих веществах примесей, которые могли бы играть особенную роль. П.Кюри порекомендовал М. Склодовской-Кюри работать по этой теме. В 1896 г. супруги Кюри установили, что радиоактивность урановых минералов больше, чем радиоактивность урана, в них содержащегося. Это наблюдение привело их к предположению, что в урановых минералах содержится какой-то значительно более радиоактивный элемент, чем уран. Переработав несколько тонн урановой руды из чешского месторождения Яхимов, они получили два очень радиоактивных осадка: сернокислый барий и гидроксид висмута. В осадке гидроксида висмута в 1898 г. был обнаружен новый элемент – полоний (в чистом виде его выделить не удалось; хлорид полония оказался в 900 раз активнее урана). В 1902 из осадка сернокислого бария был выделен радий (М.Кюри, П.Кюри и Ж.Бемон).

В этих работах был указан конкретный материальный носитель радиоактивных явлений (атомы радиоактивных элементов) и реально открыт такой носитель (радий), у которого изучаемый процесс протекает с гораздо большей интенсивностью, чем у урана.

Открытие радиоактивности вызвало большой интерес ученых. К сожалению, радий купить было невозможно. Положение спас немецкий химик профессор Ф. Гизель — специалист по хинину. Он выделил активные вещества из руд урана примерно в то же время, что и супруги Кюри. Модернизовав методику К.Р. Фрезениуса, использованную в слегка модифицированном виде Кюри, Гизель перешёл от хлорида к бромиду радия и

получил довольно чистую соль радия. (В 1898 г. М.и П. Кюри имели ещё не вполне чистые образцы двух новых радиоактивных излучателей). Препарат радия он выделил раньше М.Кюри. В 1900 г. Гизель обнаружил новый радиоактивный элемент, хотя тут же выяснилось, что его уже (1899) открыл А.Дебьёрн и назвал актинием. С 1903 г. Ф.Гизель (фирма «Хининфабрик», Брауншвейг) начал поставлять в продажу по сравнительно умеренным ценам чистые соединения радия (гидрат бромида радия содержал 50% элемента). До этого приходилось работать с соединениями, содержащими самое большее 0,1% чистого радия!

В 1900 г. Э.Резерфорд обнаружил радиоактивный газ, выделяемый солями тория, и назвал его эманацией (ныне торон, Tn,  $^{220}\text{Rn}$ ), Дорн в этом же году установил, что соли радия также выделяют эманацию (радон,  $^{222}\text{Rn}$ ), а в 1903 г. Дебьёрн показал, что соли актиния выделяют актинон (An,  $^{219}\text{Rn}$ ). В 1902 г. Э.Резерфорд и Ф.Содди доказали, что торон – инертный газ. В том же году измерен коэффициент диффузии эманации радия в воздухе (П.Кюри, Ж.Данн). В 1903 г. открыт радиоторий ( $^{228}\text{Th}$ ) (О.Хан). В 1906 г. Н.Кэмбеллом и А.Вудом открыта  $\beta$ -радиоактивность калия и рубидия. Тем самым было доказано, что радиоактивность не только свойство тяжелых атомов, но может проявляться у любых элементов периодической таблицы. Протактиний обнаружен О.Ханом и Л.Мейтнер в 1907 г. В 1909 г. доказано, что различные изотопы свинца являются конечным продуктом трех естественных радиоактивных семейств (Дж. Грэй). В 1910 г. получен чистый металлический радий (М.Кюри, А.Дебьёрн). Первый международный радиевый эталон (М.Кюри, А.Дебьёрн) изготовлен в 1911 г.

В 1912 г. произошло открытие изотопов – обнаружено существование атомов неона с массой 20 и 22 (Дж. Дж. Томсон).

В 1913 г. введено понятие изотопа и продемонстрирована изотопия у радиоактивных элементов (Ф.Содди), сформулировано правило сдвига (закона смещения) при радиоактивном распаде - правило сдвига Содди – Фаянса (Ф.Содди и К.Фаянс независимо друг от друга, а так же А.С.Рассел), что позволило прийти к представлению о равенстве заряда ядра атома порядковому номеру соответствующего элемента в периодической системе. В том же году проведено разделение изотопов методом газовой диффузии (Ф. Астон). В 1914 г. проведено разделение химически неделимых радиоэлементов с помощью метода диффузии (Г.Хевеши), доказано существование стабильных изотопов свинца (Ф.Содди и др.). В 1915 г. разработан метод меченых атомов (Д.Хевеши, Ф.Панет). В 1916 г. Ф.Панет определил понятие химического элемента. В 1917 г. обнаружены изотопы высшего порядка – ядерные изомеры (Ф.Содди), а в 1918 г. доказано существование изотопов среди продуктов радиоактивного распада (Дж.Дж.Томсон).

В 1919 г. Ф. Астон построил масс-спектрограф с высокой разрешающей способностью и предложил электромагнитный метод разделения изотопов (принцип действия масс-спектрографа предложен в 1907 г. Дж. Дж. Томсон), с помощью которого обнаружены изотопы у хлора и ртути, а в 1920 г. установлены особенности изотопного обмена (Г.Хевеши). В 1918 г. предсказана возможность существования ядерной изомерии (С. Мейер), а в 1921 г. на примере  $^{234}\text{Pa}$  открыто явление изомерии атомных ядер (О.Ган). В 1923 г. Д.Хевеши применил метод меченых атомов к решению биологических проблем: исследование поглощения растениями свин-



ца из раствора. К 1925 г. явление изотопии было доказано почти для всех стабильных элементов (главным образом благодаря работам Ф.Астона). Важную роль в характеристике изотопов сыграла кривая зависимости упаковочных коэффициентов от массовых чисел (кривая Астона).

**Упаковочный коэффициент** – величина, равная отношению дефекта массы атомного ядра к массовому числу. Он характеризует значение удельной (в пересчёте на один нуклон) энергии связи нуклонов в ядре.

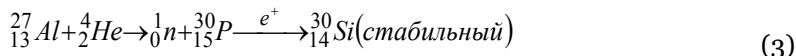
Всего к 20-м годам 20-го века было открыто 40 природных элементов и изотопов, и установлена между ними генетическая связь.

В 1911 году Ф.Содди издал книгу «Химия радиоактивных элементов», в которой подробно описал ряд последовательных радиоактивных превращений радия через радон до свинца.

Первая искусственная трансмутация элементов осуществлена в 1918 г. Бомбардируя атомы азота, находившегося в воздухе,  $\alpha$ -частицами, Э.Резерфорд впервые произвел искусственное превращение элементов: ядро азота превратилось под воздействием  $\alpha$ -частиц (ядер атома гелия) в ядро кислорода с выделением ядра водорода (см. реакцию (1)).

Важным событием явилось открытие нейтрона (Чедвиг, 1932 г.) и искусственной радиоактивности (И. и Ф.Жолио-Кюри, 1934 г.).

Первыми радиоактивными изотопами, открытыми при бомбардировке различных элементов  $\alpha$ -частицами были  $^{13}\text{N}$ ,  $^{30}\text{P}$  и  $^{27}\text{Si}$ . Бомбардируя лист алюминия  $\alpha$ -частицами полония, И. и Ф. Жолио-Кюри наблюдали с помощью счетчика Гейгера-Мюллера, что при удалении источника  $\alpha$ -частиц или при уменьшении их энергии ниже некоторого порога эмиссия нейтронов прекращается, однако эмиссия позитронов продолжается с периодом полураспада около 3 мин. Авторы предположили, что ядерная реакция протекает по схеме:



Они подтвердили свое предположение простым химическим способом: растворением облученного алюминия в соляной кислоте с последующим удалением образующегося радиоактивного продукта ( $^{30}\text{PH}_3$ ) газовым потоком. Аналогичные результаты были получены с бором, который превращался в радиоазот, и с магнием, который давал радиоалюминий.

Перед Второй мировой войной доказана возможность искусственного получения радиоактивных изотопов почти всех известных стабильных элементов. Были открыты ядерные реакции, позволившие начать получение радиоактивных изотопов и синтез новых элементов, в том числе трансурановых. В 1937 г. К.Перрье, Э.Сегре осуществили синтез первого искусственного элемента – технеция (бомбардировкой ядер молибдена дейтронами), Э.Сегре получил астат (1940 г.), М.Перей открыл франций (1939 г.), в 1940 г. Э.Макмиллан, П.Абельсон синтезировали  $^{239}\text{Np}$  ( $\beta$ -излучатель), а Г.Сиборг, Э.Макмиллан, А.Валь, Дж. Кеннеди, Э.Сегре – плутоний (в том числе  $^{239}\text{Pu}$ .) В 1930 г. открыт изотоп  $^{238}\text{U}$  (Ф.Астон), а в 1935 г. –  $^{235}\text{U}$  (А.Демпстер). В 1947 г. в продуктах деления урана был обнаружен один новый элемент – прометий.

В 1940 г. осуществлен синтез нептуния (Э.Макмиллан, П.Абельсон) и плутония (Г.Сиборг, А.Валь, Дж. Кеннеди, Э.Сегре), выделен чистый  $^{235}\text{U}$  (Дж. Даннинг, А.Нир), доказано, что  $^{235}\text{U}$  делится медленными нейтронами

(Ю.Бут, Дж. Даннинг, А.Гросс) и предсказана возможность протекания в системе с ураном и тяжелой водой цепной ядерной реакции деления (Х. Халбан, Л.Коварски). В 1944 г. предложена актинидная теория, играющая важную роль для систематики и предсказания свойств тяжелых трансураниевых элементов (Г.Сиборг). В 1946 г. осуществлен синтез 95-го и 96-го элементов – америция и кюрия (Г.Сиборг, Р.Джеймс, Л.Морган, А.Гиорсо), измерены константы деления урана (Дж. Шарф-Гольдхабер, Дж. Клайбер). В 1966 г. Л. Ледерман получил ядра антидейтерия, а в 1970 г. Ю.Прокошкин – ядра антигелия.

В 1940 – 1953 г.г. Г. Сиборг и др. синтезировали трансураниевые элементы – плутоний, нептуний, америций, кюрий, берклий, калифорний, эйнштейний, фермий.

Начиная со второй половины 20-го века и до настоящего времени синтез тяжелых элементов в мире вели и ведут три исследовательских центра: в Дубне (Россия), в Беркли (США) и в Дармштадте (Германия). Все элементы, начиная с 93-го (нептуний) и до недавно открытого 117-го, были получены именно в этих лабораториях.

В 1987 г. Международные союзы чистой и прикладной химии (IUPAC) и физики (IUPAP) создали совместную международную комиссию, которая рассмотрела вопрос о приоритете в открытии новых элементов. В 2010 эта комиссия дала наименования новым элементам: элемент 104 назван резерфордием (Rf) в честь Э.Резерфорда; элемент 105 – дубнием (Db) в честь города в России, где был открыт этот и многие другие новые элементы; элемент 106 – сиборгием (Sg) в честь американского физика и радиохимика Г. Сиборга, участвовавшего в выделении и синтезе многих новых элементов – от плутония до менделевия; элемент 107 – борием (Bh) в честь знаменитого датского физика Н. Бора; элемент 108 назван хассием (Hs) в честь земли Гессен в Германии, где находится крупнейший научно-исследовательский центр по синтезу и изучению новых элементов; элемент 109 – майтнерием (Mt) в честь австрийской исследовательницы (физика и радиохимика) Лизе Майтнер, которая вместе с О. Ганом открыла элемент протактиний и сделала много других важнейших работ, способствовавших установлению строения атома; элемент 110 – дармштадтием (Ds) в честь города Дармштадта в Германии, где открыты многие новые искусственные элементы; элемент 111 – рентгением (Rg) в честь В. Рентгена; элемент 112 – коперницием (Cn) в честь Н. Коперника. В 2004 – 2006 гг. официально был признан факт успешного синтеза элементов с номерами 113, 114 и 116, а в 2010 – элементов 117 и 118. Эти элементы названий пока не имеют.

## 1.4 Радиоактивные излучения

После того, как в руках исследователей появились мощные источники радиации, в миллионы раз более сильные, чем уран (препараты радия, полония, актиния), были начаты детальное изучение свойств радиоактивного излучения. Прежде всего, была изучена проникающая способность лучей, а также действие на излучение магнитного поля. Оказалось, что радиация неоднородна, а представляет собой смесь «лучей». Гизель первым продемонстрировал отклонение «лучей Беккереля» в магнитном поле. П. Кюри обнаружил, что при действии магнитного поля на излучение радия одни лучи отклоняются, а другие нет. Было известно, что магнитное

поле отклоняет только заряженные летящие частицы, причем положительные и отрицательные в разные стороны. По направлению отклонения убедились в том, что отклоняемые  $\beta$ -лучи заряжены отрицательно. Дальнейшие опыты показали, что между катодными и  $\beta$ -лучами нет принципиальной разницы, откуда следовало, что они представляют собой поток электронов. Отклоняющиеся лучи обладали довольно хорошей способностью проникать через различные материалы.

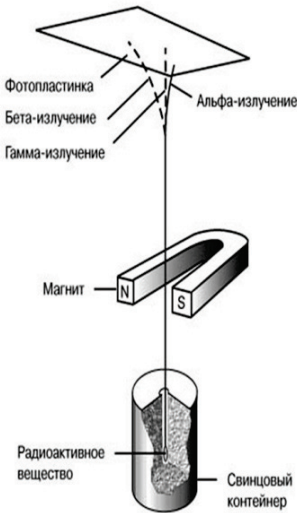


Рис. 3. Схема эксперимента, иллюстрирующего отклонение разных видов радиоактивного излучения в магнитном поле.

Вскоре обнаружилось, что излучение, не отклоняемое магнитом, тоже не однородно, а состоит из двух видов. При использовании более сильных магнитов оказалось, что  $\alpha$ -лучи тоже отклоняются, только значительно слабее, чем  $\beta$ -лучи, причем в другую сторону (Беккерель, Гизель, 1899). Отсюда следовало, что они заряжены положительно и имеют значительно большую массу (масса  $\alpha$ -частиц в 7740 раз больше массы электрона). Это излучение (оно было названо альфа-излучением) легко поглощались даже тонкой алюминиевой фольгой – так вело себя, например, излучение нового элемента полония – его излучение не проникало даже сквозь картонные стенки коробки, в которой хранился препарат. В 1900 г. П. Вийар исследовал более подробно отклонение  $\alpha$ - и  $\beta$ -лучей и обнаружил в излучении радия третий вид лучей, не отклоняющихся в самых сильных магнитных полях, это открытие вскоре подтвердил и Беккерель. Этот вид излучения, по аналогии с альфа- и бета-лучами, был назван гамма-лучами.

Гамма-лучи сходны с лучами Рентгена, т.е. они представляют собой электромагнитное излучение, но с более короткими длинами волн и соответственно с большей энергией. В 1903 г. В.Рамзай и Ф.Содди обнаружили образование гелия при  $\alpha$ -распаде (М. Кюри первая указала на корпускулярную природу  $\alpha$ -лучей). В 1909 г. доказано, что  $\alpha$ -частицы являются дважды ионизированными атомами гелия (Э.Резерфорд, Т.Ройдс), т.е. что это нуклид  ${}^4\text{He}$ , имеющий заряд +2 и массу 4 у.е.

Беккерель установил ряд свойств новых лучей, например, способность ионизировать газ, сквозь который они проходят. Гизель открыл явление окраски кристаллов под действием излучения и обнаружил новые линии в оптическом спектре радия. Практически сразу была установлена способность излучения от солей радия преобразовывать кислород в озон, вызывать потемнение стекла, а также изменять цвет кристаллов платино-синеродистого и хлористого бария. В 1902 г. Гизель обнаружил интенсивное выделение газа из водного раствора бромида радия.

Радиация радия действует и на биологические объекты. В 1900 г. Гизель и Вальхоф указали на физиологическое действие новой радиации. В 1911 г. для лекции Беккерелю понадобилось радиоактивное вещество, он взял его у супругов Кюри, и пробирку положил в жилетный карман. Про-

чтя лекцию, он вернул владельцам радиоактивный препарат, а на следующий день обнаружил на теле покраснение кожи. Беккерель рассказал об этом П. Кюри, тот поставил на себе опыт: в течение десяти часов носил привязанную к предплечью пробирку с радием. Через несколько дней у него наблюдалось покраснение, перешедшее в язву, от которой он страдал два месяца. Вскоре Л. Мату (ассистент Беккереля) сообщил, что радиоактивные излучения ускоряют прорастание семян. Затем обнаружились целительные свойства излучения: радий помогал при раке, волчанке, некоторых других болезнях кожи. Тем самым были заложены основы нового метода лечения - лучевой терапии.

В 1906 г. открыто характеристическое рентгеновское излучение (Ч. Варила), а в 1908 г. показано, что оно является фундаментальным свойством атома (Ч.Баркла, Ч.Сандлер). В 1908 году создан прибор для регистрации отдельных заряженных частиц (счетчик Г.Гейгера – В. Мюллера). В 1934 г. Вальтер Боте разработал метод совпадений.

В 1910 осуществлено первое определение энергии  $\beta$ -частиц по их отклонению в магнитном поле (О.Байер, О.Хан). В 1911 г. Резерфорд создал теорию рассеяния  $\alpha$ -частиц в веществе. В том же году было показано, что постоянные распада  $\alpha$ -излучателей связаны с длиной пробега  $\alpha$ -частиц (Зависимость между временем жизни и энергией распада радиоактивных ядер — закон Г. Гейгера - Дж. Нэттолла). В 1912 г. открыты космические лучи (В. Гейс) и изобретен прибор для наблюдения следов заряженных частиц (камера Ч. Вильсона). В 1913 г. открыт непрерывный спектр энергии  $\beta$ -излучения (Дж. Чэдвик), доказана идентичность рентгеновских спектров изотопов, окончательно подтверждено равенство порядковых номеров у изотопов данного элемента (Э. Резерфорд, Э. Андраде).

Помимо экспериментальных достижений, в начале 20-го века существенный прогресс был достигнут в сфере теоретической физики. В 1900 г. М.Планк создал теорию квантов. В 1903 г. А.Эйнштейн ввел понятие кванта света (фотона) и создал специальную теорию относительности, в которую включил формулу Пуанкаре:  $E=mc^2$ , связывающую массу ( $m$ ) с полной внутренней энергией ( $E$ ), где  $c$  – скорость света. Проверить этот закон Эйнштейн предложил путем определения количества энергии, выделяемого радиоактивными веществами. Экспериментальное доказательство существования фотона получено в 1923 г.

В 1923 г. открыты явления рассеяния коротковолнового излучения на свободном или слабо связанном электроны (эффект А. Комптона) и дана теоретическая интерпретация этого явления (А.Комптон, П.Дебай); обнаружены ядра отдачи (П. Блэккетт) – получена фотография следа протона и расщепления ядра азота  $\alpha$ -частицами. Протоны отдачи идентифицированы И. и Ф. Жолио-Кюри в 1932 г. В 1929 г. создана квантовая теория эффекта Комптона и предложено уравнение, описывающее рассеяние электронов в этом эффекте (уравнение О.Клейна – И.Нишины). В том же году О. Клейн и И. Нишина вывели формулу для рассеяния высокоэнергетичных фотонов на электронах, а Н. Мотт - формулу для кулоновского рассеяния релятивистских электронов.

В 1934 г. открыто свечение чистых прозрачных жидкостей под действием гамма-лучей (эффект С.И.Вавилова – П.А.Черенкова). Теория этого эффекта И.Е.Таммом и И.М.Франком в 1937 г. В 1944 г. предсказано син-

хротронное излучение (Д.Д. Иваненко, И.Я. Померанчук, открытое в 1946 г. Блюитом).

## 1.5 Типы распада

Как уже упоминалось, на рубеже веков было обнаружено два типа распада:  $\alpha$ -распад и  $\beta$ -распад, которые часто сопровождаются  $\gamma$ -излучением.

В 1911 г. Г. Гейгер и Дж. Нэттол установили зависимость между временем жизни и энергией  $\alpha$ -распада радиоактивных ядер (закон Гейгера – Нэттола). В 1914 г. была предсказана внутренняя конверсия (Э. Резерфорд), а в 1925 г. открыт оже-эффект (П. Оже). В 1928 г. разработана теория  $\alpha$ -распада как туннельного процесса (Дж. Гамов, Э. Кондон, Р. Герни).

В 1930 году В. Паули высказал предположение, что при  $\beta$ -распаде испускается частица, обладающая несравненно большей проникающей способностью, чем электроны. Ее не могут задержать стенки калориметра, и она уносит с собой часть энергии. Так родилось представление о нейтринно. Теория  $\beta$ -распада была создана в 1934 году Э. Ферми, который предположил, что электрон и нейтрино возникает в момент распада нуклона в ядре, и постулировал новое взаимодействие — слабое. Он ввел константу, которая играет для  $\beta$ -распада такую же роль, что заряд для электромагнитных процессов, и вычислил ее величину на основании экспериментальных данных. Теория Ферми позволила рассчитать форму  $\beta$ -спектров и связать граничную энергию распада со временем жизни радиоактивного ядра. Нейтрино в этой теории имело заряд, равный нулю, и нулевую массу. Современная теория объединенного слабого и электромагнитного взаимодействия включает модель Ферми как первое приближение.

В 1934 году открыт позитронный ( $\beta^+$ -распад) (И. и Ф. Жолио-Кюри). В том же году Х. Бете и Р. Пайерлсом предсказан обратный  $\beta$ -распад. В 1934 году выдвинута идея, что обратный  $\beta$ -распад является процессом, вызываемым свободным нейтрино (Х. Бете и Р. Бэчер). В 1935 году предсказан двойной  $\beta$ -распад и разработана его теория (М. Гепперт-Майер), в 1935 г. — захват орбитального электрона (Х. Юкава), а в 1936 г. —  $K$ -захват (Х. Юкава, С. Саката), который был открыт Л. Альваресом в 1937 г. В 1938 г. открыто конверсионное излучение ядерных изомеров (Л. Русинов, Б. Понтекорво), обнаружено испускание электронов внутренней конверсии веществами, захватывающими нейтроны (Дж. Гофман, Р. Бэчер). В 1935 г. предсказан  $L$ -захват, который экспериментально обнаружен в 1949 г. (Б. М. Понтекорво). В 1936 г. объяснено существование метастабильных состояний ядер (К. Вейцеккер).

Одним из центральных событий в истории учения о радиоактивности является открытие спонтанного и вынужденного деления урана.

Э. Ферми, подвергая уран воздействию медленных нейтронов, наблюдал слабую  $\beta$ -активность, которую он приписал образованию трансурановых ядер. О. Хан, Л. Мейтнер и Ф. Штрассман, проведя аналогичные эксперименты, подтвердили эту гипотезу и предложили несколько цепочек распада, заканчивающихся эказолотом. Ирен Кюри тоже интересовалась продуктами, получающимися в результате нейтронного облучения тория и урана. В сотрудничестве с Г. Хальбаном и П. Прейсверком она выявила образование двух новых радиоактивных ядер. Затем с П. Савичем среди про-

дуктов урана И.Кюри обнаружила новый  $\beta$ -излучатель с периодом полураспада 3,5 час, который химически отделялся от элементов, рассматриваемых как «трансурановые» и проявлял свойства лантанида. Идентифицировать его тогда не удалось (впоследствии оказалось, что это – изотоп лантана – осколок деления урана).

Для прояснения ситуации О.Хан и Ф. Штрассман продолжили свои эксперименты и обнаружили образование щелочноземельного продукта. Сначала его приняли за изотоп радия, но в конце концов его удалось отделить от радия, но не от бария. Было дано химическое доказательство того, что при нейтронном облучении урана образуется элемент с атомным номером на 36 единиц меньше урана. Так, завершением работ по облучению урана медленными нейтронами, начатых в 1934 году Э.Ферми, стало открытие О.Ханом и Ф.Штрассманом в 1938 году вынужденного деления урана под действием нейтронов.

Замечание. О возможности деления ядер в 1934 г. писала И.Ноддак, но на ее предсказание современники не обратили внимания.

Результаты, полученные О.Ханом и Ф.Штрассманом, были интерпретированы Л. Мейтнер и О. Фришем в 1939 г., как распад ядра урана на два осколка примерно равной массы. Л.Мейтнер введено понятие «деление ядра». Ф.Жолио доказал деление урана на два осколка. А.Гольштейн, А.Рогозинский и Р.Вален показали, что деление сопровождается эмиссией нейтронов. О.Фриш, Ф.Жолио-Кюри, Г.Андерсон и Дж. Даннинг подтвердили деление ядра урана на два осколка и осуществили непосредственное измерение энергии деления. В том же году Н.Бор на основе капельной модели развил качественную (капельную) теорию деления ядер, и совместно с Дж. Уиллером дал количественную интерпретацию (ввел параметр  $Z^2/A$ ) и предсказал возможность спонтанного деления урана. Эта возможность была экспериментально подтверждена К.А.Петержаком и Г.А.Флеровым.

В 1935 г. открыта ядерная изомерия у естественных (О.Хан, 1921 г.) и искусственных (И.В.Курчатов, Б.Курчатов, Л.Мысовский, Л.Русинов, 1935 г.) изотопов, а в 1936 г. объяснена причина ядерной изомерии (Г.Ван-Вургис). В 1934 г. открыта внутренняя конверсия  $\gamma$ -лучей с образованием электронно-позитронных пар (А.И.Алиханов, А.И.Алиханьян, Н.С.Козодаев). В 1939 г. В.Фарри предположил возможность безнейтринного двойного  $\beta$ -распада.

В 1947 году Г. Болдуин и Г. Клайбер наблюдали гигантский резонанс в ядерных реакциях под действием фотонов. В 1948 г. обнаружен  $\beta$ -распад нейтрона (А.Снелл и Л.Миллер), а 1949 г. установлена зависимость скорости электронного захвата от химического состояния (Э.Сегре). В 1951 г. предсказана протонная радиоактивность (Б.С.Джелепов). В 1952 г. зарегистрированы ядра отдачи, возникающие при электронном захвате в аргоне (Дж. Родебак, Дж. Аллен), доказан закон сохранения импульса при испускании нейтрино. В 1957 г. экспериментально обнаружена продольная поляризация  $\beta$ -частиц в  $\beta$ -распаде:  $\beta^+$ -частицам соответствует левый винт,  $\beta^-$ -частицам – правый.

В 1961 г. доказано существование двух типов нейтрино – электронного и мюонного (Л.Ледерман, М.Шварц, Дж. Штейнбергер), обнаружен  $\beta$ -распад положительного пиона, открыто явление испускания запаздывающих протонов (В.А. Карнаухов, Дж.Черны, 1970, З. Хофман, 1982 г.). В

1967 г. обнаружен двойной  $\beta$ -распад и двойное тормозное излучение. В 1970 г. открыта протонная радиоактивность (Дж. Черны), а в 1984 г. — кластерный распад.

Предположение о возможности эмиссии протона в радиоактивном распаде возникло еще в 1915 году в лаборатории Э. Резерфорда. В 1951 г. Б.С.Джелепов рассчитал возможность протонного распада нейтроннодефицитных ядер, а в 1958 г. В.А.Карнаухов оценил границы стабильности ядер по отношению к протонному распаду. В 1962 г. коллектив физиков (В. А. Карнаухов, Г. М. Тер-Акопьян, В. Г. Субботин и Л. А. Петров), работая на Ускорителе тяжелых ионов ОИЯИ (г. Дубна), открыл протонный распад: эмиссию запаздывающих протонов. Эта разновидность радиоактивности была обнаружена путем анализа свойств радиоактивных продуктов, получающихся при облучении никеля пучком ядер неона. Испускание запаздывающих протонов - двухступенчатый процесс. На первом этапе этого процесса протонно-избыточное ядро испытывает протонный распад. Образовавшееся дочернее ядро оказывается возбужденным и распадается, испуская протон. В 1963 г. Р.Бэртон и Р.Макферсон идентифицировали излучатель запаздывающих протонов на примере  $^{25}\text{Si}$ . В 1970 г. Дж.Черны (Беркли, США) наблюдал протонную активность – распад возбужденного (изомерного) состояния ядра  $^{53\text{m}}\text{Co}$ .

Излучатель запаздывающих протонов открыт в ОИЯИ (Дубна) при облучении никеля ускоренным пучком  $^{20}\text{Ne}$  (1962). Практически одновременно такие же излучатели были обнаружены и среди лёгких ядер. К 1991 г. было открыто более 100 излучателей, самый лёгкий из которых  $^9\text{C}$  ( $T=0,13$  с), самый тяжёлый  $^{183}\text{Hg}$  ( $T=8,8$  с). Впервые слабая протонная активность наблюдалась при облучении  $^{96}\text{Ru}$  пучком  $^{32}\text{S}$  (ОИЯИ, 1972). В 1981 г. С. Хофман (Центр исследования тяжёлых ионов, ФРГ) обнаружил протонную радиоактивность основного состояния  $^{151}\text{Lu}$  и  $^{147}\text{Tm}$ . После этого прорыва исследования в этой области стали быстро развиваться, и на сегодняшний день обнаружено более 25 изотопов, распадающихся из основного (или изомерного) состояния по этому каналу.

В 2002 г. впервые наблюдался процесс одновременного излучения двух протонов (двухпротонный распад), предсказанный в 1991 году. Он был обнаружен у изотопа  $^{45}\text{Fe}$  в экспериментах на GSI и GANIL (Кан, Франция). В 2005 г. установлено, что  $^{54}\text{Zn}$  тоже испытывает двухпротонный распад.

Если протонная активность относится к числу видов радиоактивных превращений, предсказанных теоретически, то открытие спонтанно делящихся изомеров является примером неожиданностей в истории учения о радиоактивности. Явление спонтанного деления ядер, находящихся в изомерном состоянии, было открыто в 1961 году (С.М.Пеликанов, В.А.Друин, В.А.Карнаухов) на примере изомера  $^{242}\text{Am}$ .

В 1984 г. независимые группы ученых в Англии (Х. Роуз, Г. Джонс) и России (Д.В.Александров) открыли кластерную радиоактивность некоторых тяжелых ядер, самопроизвольно испускающих кластеры — атомные ядра с атомным весом от 14 до 34. В настоящее время известно 25 ядер от  $^{114}\text{Ba}$  до  $^{241}\text{Am}$ , испускающих из основных состояний кластеры типа  $^{14}\text{C}$ ,  $^{20}\text{O}$ ,  $^{24}\text{Ne}$ ,  $^{26}\text{Ne}$ ,  $^{28}\text{Mg}$ ,  $^{30}\text{Mg}$ ,  $^{32}\text{Si}$  и  $^{34}\text{Si}$ . Энергии относительного движения вылетающего кластера и дочернего ядра меняются от 28 до 94 МэВ.

## 1.6 Строение ядра и ядерные реакции

В 1911 году произошло открытие атомного ядра и предложена планетарная модель строения атома (Э. Резерфорд). Ядерная модель возникла из экспериментов Х. Гейгера и Э. Марсдена по рассеянию  $\alpha$ -частиц различными веществами, для интерпретации которых Резерфорд вывел формулу для рассеяния заряженных частиц в кулоновском поле. Модель предполагает, что атом содержит центральное положительно заряженное ядро, в котором сосредоточена почти вся масса атома, а вокруг ядра на значительном расстоянии вращаются электроны. Эта модель послужила важной предпосылкой физического обоснования закона периодичности.

В 1913 г. Нильс Бор предложил квантовую модель атома. В 1924 г. В. Паули сформулировал принцип запрета для электронов в атоме, распространённый в дальнейшем на все тождественные частицы с полуцелым спином (принцип Паули), а С. Бозе и А.Эйнштейн использовали квантовую статистику для описания тождественных частиц с нулевым и целым спином (статистика Бозе–Эйнштейна). В 1925 г. В.Гейзенберг, М.Борн и П.Иордан разработали матричную квантовую механику, а в 1926 г. Э. Шредингер получил свое нерелятивистское волновое уравнение, сформулировал волновую квантовую механику и доказал, что матричная и волновая формулировки квантовой механики эквивалентны. В том же году Э.Ферми и П.Дирак ввели квантовую статистику для тождественных частиц с полуцелым спином (статистика Ферми-Дирака). В 1927 г. В. Гейзенберг установил принцип неопределенности, М. Борн дал вероятностную интерпретацию волновой функции. Э. Вигнер сформулировал закон сохранения пространственной четности.

В 1912 – 1913 г.г. Н.Бор, А.Ван-ден-Брук и И.Ридберг выдвинули гипотезу: заряд ядра атома численно равен порядковому номеру соответствующего элемента в периодической системе. Экспериментально это было подтверждено работами Г.Мозли в 1913-1914 гг. Был получен закон периодичности: свойства элементов суть периодические функции зарядов ядер их атомов. В 1914 г.г. Резерфорд предположил, что атомное ядро содержит протоны. В 1932 г.г. Дж. Чедвик открыл нейтрон, В. Гейзенберг и Д. Иваненко предложили протонно-нейтронную модель атомного ядра, В.Гейзенберг выдвинул гипотезу о протоне и нейтроне как двух зарядовых состояниях одной частицы – нуклона. В 1935 г. Х. Юкава разработал теорию ядерного взаимодействия и предсказал мезоны – кванты ядерного поля, а Карл фон Вайцзеккер, рассматривая ядро как каплю заряженной жидкости, вывел формулу для его энергии связи.

В 1936 г. Э. Вигнер разработал теорию поглощения нейтронов атомными ядрами. Г. Брейт и Э. Вигнер предложили дисперсионную формулу ядерных реакций (формула Брейта-Вигнера), Г. Брейт, Э. Кондон и Р.Презент выдвинули гипотезу о зарядовой независимости ядерных сил, Н. Бор и Я.Френкель создали капельную модель ядра, а Н.Бор – теорию составного (компаунд) ядра.

Заметной вехой на пути систематизации атомных ядер оказалась оболочечная модель ядра и представления о «магических числах». Здесь постулировалось периодическое появление ядер с заполненными протонными и нейтронными оболочками при  $Z$  и  $N=2, 8, 20, 50, 80$  и  $N=126$ . В. Эльзассер, применив уравнение Шредингера к описанию поведения ну-



клона в усредненном поле ядра, рассчитал последовательность заполнения ядерных уровней. Это была первая попытка количественной интерпретации ядерной периодичности, однако она не привела к удовлетворительному согласию с экспериментальными данными. В конце 40-х годов М. Гёпперт-Майер и И. Йенсен, ввели представление о спин-орбитальной связи; на основе этого представления рассчитывались истинные значения «магических» чисел: 2, 8, 20, 50, 82 для  $Z$  и  $N$  и 126 для  $N$ . В 1950 г. О. Бор и Б. Моттelson разработали коллективную модель ядра, а в 1955 г. С.Нильссон - модель деформированных атомных ядер. В 1959 г. С. Беляев и В.Соловьев создали сверхтекучую модель ядра.

В 1932 году были осуществлены первые ядерные превращения под действием нейтронов (Н.Фезер, Л.Мейтнер, У.Харкинс). В начале 30-х годов были созданы ускорители электронов и протонов, что позволило осуществить многие ядерные реакции. В 1930 г. состоялся пуск циклотрона (Э.Лоуренс, С.Ливингстон), в 1931 г. – электростатического ускорителя заряженных частиц (генератор Р.Ван де Граафа), в 1932 г. – каскадного генератора (Дж. Кокрофт – Э.Уолтон). Первое расщепление ядра частицами, ускоренными в циклотроне (Э.Лоуренс, М.Ливингстон, М.Уайт), произошло в 1932 г. В том же году удалось осуществить первую ядерную реакцию с искусственно ускоренными протонами – трансмутация ядер лития (Дж. Кокрофт и Э.Уолтон). В том же году было достигнуто первое расщепление ядра частицами, ускоренными в циклотроне (Э.Лоуренс, М.Ливингстон, М.Уайт). В 1933 г. были смонтированы мощные источники быстрых нейтронов при помощи ускорителей и открыты  $(d, n)$ - и  $(p, n)$ -реакции (Ч.Лауритсен). Одновременно был открыт ядерный фотоэффект – фоторасщепление дейтрона (Дж. Чэдвак, М.Гольдхабер) и расщепление бериллия  $\gamma$ -квантами (Л.Сцилард, Т.Чалмерс). В 1934 г. Э.Ферми облучал уран нейтронами для получения трансуранового элемента. В 1935 г. Р.Оппенгеймер и М.Филлипс рассмотрели ядерную реакцию срыва, а П.Мун, Дж. Тильман доказали резонансный характер взаимодействия медленных нейтронов с ядрами.

В 1939 г. была обоснована возможность протекания в уране цепной ядерной реакции деления (Л.Сцилард, Ю.Вигнер, Э.Ферми, Дж. Уилер, Ф.Жолио-Кюри, Я.Б.Зельдович, Ю.Б.Харитон) (Идею цепной ядерной реакции выдвинул в 1934 г. Сцилард). В 1939 г. открыто испускание вторичных нейтронов при делении (Л.Сцилард, Э.Ферми, Г.Андерсон, В.Зинн, Ф.Жолио-Кюри, Х. Халбан, Л.Коварски) и испускание запаздывающих нейтронов (Р.Робертс), представлено экспериментальное доказательство деления ядра урана на два осколка и измерены энергии деления (О.Фриш, Ф.Жолио-Кюри, Г.Андерсон, Дж. Даннинг), открыто деление  $^{232}\text{Th}$  быстрыми нейтронами (Июшио Нишина). В 1940 г. дан количественный анализ цепной реакции деления урана на медленных нейтронах и определены условия ядерного взрыва (Я.Б.Зельдович и Ю.Б.Харитон).

В 1942 г. Э. Ферми осуществил управляемую цепную реакцию деления в первом атомном реакторе.