

ИЗОТОПЫ

В 1902—1903 гг. английский исследователь новозеландского происхождения Эрнест Резерфорд вместе со своим сотрудником Фредериком Содди разработал теорию радиоактивного распада и установил закон превращения радиоактивных элементов. Эта теория связывала радиоактивные превращения с двумя известными тогда видами естественной радиоактивности — альфа- и бета-лучами, которые были открыты Резерфордом в 1899 г.

Исследуя эти лучи, английский ученый установил, что альфа-лучи состоят из ядер гелия, а бета-лучи представляют собой поток электронов. В соответствии с этим было обнаружено, что при испускании радиоактивным элементом альфа-лучей образуется новый элемент, стоящий в периодической таблице на две клетки левее, а при бета-распаде возникает элемент, стоящий на одну клетку правее исходного. Подробные исследования показали, что в ходе таких превращений природные радиоактивные элементы претерпевают серию распадов и порождают целую группу новых элементов. Работы Резерфорда в значительной степени стимулировали развитие этой новой области науки, и в 1908 г. ему была присуждена Нобелевская премия по химии. По атому поводу ученый не раз шутил, что из всех превращений, которые ему довелось наблюдать, самым удивительным и неожиданным было его собственное превращение из физика в химика.

Решение дать физику премию по химии было принято после совместного обсуждения этого вопроса Нобелевскими комитетами по физике и химии. Эксперты пришли к выводу, что работы Резерфорда чрезвычайно важны именно для химии, ибо как бы воплощают в себе осуществление старой мечты алхимиков о превращениях элементов. Это один из многих примеров в истории присуждения Нобелевских премии, когда исследования того или иного ученого оказывается невозможным вместить в рамки традиционного разделения наук.

В конце первого десятилетия нашего века при исследовании процессов радиоактивного распада были собраны интересные данные, в корне изменившие представление о химическом элементе, утвердившееся в XIX в., согласно которому считалось, что все атомы данного элемента одинаковы и неделимы. После того как обнаружилось, что атомы элемента могут распадаться, было установлено, что не все они одинаковы.

При распаде радиоактивного элемента образуется целое семейство новых элементов. Было установлено, что некоторые из этих веществ настолько сходны по своим свойствам, что не могут быть разделены химическим путем. Этот вопрос исследовал Фредерик Содди, сотрудник Резерфорда в Мак-Гиллском университете в Монреале, где и была создана теория радиоактивного распада. В 1913 г. Содди независимо от Казимежа Фаянса сформу-

лировал правило смещения при радиоактивном распаде (закон Содди—Фаянса).

Фредерик Содди показал, что атомы одного и того же элемента, имеющие одинаковый порядковый номер в таблице Менделеева (т. е. одинаковый электрический заряд ядра), могут иметь различную массу. Поскольку такие атомы обладают одинаковыми химическими свойствами и занимают одно и то же место в периодической таблице, Содди назвал их «изотопами» {от греч. *ισο* — одинаковый и *τοπε* — место). Двумя годами раньше, в 1911 г., Резерфорд предложил планетарную модель атома, согласно которой атом состоит из расположенного в центре ядра, вокруг которого по определенным орбитам обращаются электроны. Однако тогда предполагалось, что электроны, по-видимому, имеются и в самом ядре, частично нейтрализуя заряд протонов. Через 20 лет, когда был открыт нейтрон и стал известен состав атомного ядра, существование изотопов получило свое логическое и простое объяснение. Атомы одного и того же химического элемента имеют в ядре одинаковое число протонов и столько же электронов, обращающихся вокруг ядра, вследствие чего атом электрически нейтрален. Но эти атомы могут различаться по числу нейтронов в ядре, чем и объясняется различие в их атомных массах, которое тем не менее почти не сказывается на их химических свойствах. Как говорил сам Фредерик Содди, изотопы одинаковы «снаружи», но различны «внутри». За большой вклад в исследование атомов Фредерик Содди был удостоен в 1921 г. Нобелевской премии по химии.

Согласно уставу Нобелевского фонда, вручение премии может задержаться на год. Именно так произошло в 1921 г. На следующий год был объявлен новый лауреат, и Содди получил премию одновременно с другим английским физиком — Фрэнсисом Уильямом Астоном, которому в 1922 г. была присуждена Нобелевская премия по химии за разработку методов разделения изотопов; Астон сконструировал масс-спектрограф, открыл большое число стабильных изотопов и изучил их особенности.

Химическая тождественность изотопов (т. е. невозможность отличить их химическим путем) на протяжении длительного времени вносила путаницу в исследование химических элементов. Еще в 1815 г. англичанин Уильям Праут высказал оригинальную мысль, что атомы всех химических элементов построены из атомов водорода. Он заметил, что атомная масса любого элемента приблизительно кратна атомной массе водорода, которую можно принять за единицу. Однако несколько десятилетий спустя, когда точность измерений существенно возросла. Йене Якоб Берцелиус, Жан Серве Стае и другие известные химики установили, что атомные массы отнюдь не измеряются целыми числами. Например, атомная масса хлора равна 35,5, и, поскольку невозможно представить, что атом хлора состоит из 35,5 атома водорода, замечательнейшая догадка Праута была отвергнута.

Долгое время считалось, что после обширных исследований, проведенных в 60-х годах прошлого века Жаном Стасом, уже ничего нельзя добавить к имеющимся данным по атомным массам. Но в дальнейшем выяснилось, что

его методика была недостаточно совершенной. В конце прошлого века определением атомных масс занялся американский химик Теодор Уильям Ричарде, используя для этой цели значительно более чистые вещества и реактивы; эти исследования привели к переоценке численных значений атомных масс ряда элементов. За свою работу Ричарде был удостоен в 1914 г. Нобелевской премии по химии, которая, однако, была вручена ему через год. Данные Ричардса сыграли важную роль при изучении изотопов.

Открытие изотопов позволило объяснить, почему атомные массы химических элементов не выражаются целыми числами. Разумеется, в ядре не может содержаться половина протона, и нецелочисленное значение атомной массы, в сущности, показывает, что любой природный элемент представляет собой смесь изотопов с различными атомными массами. После того как удалось разделить изотопы, выяснилось, что атомная масса каждого из них действительно выражается целым числом, показывающим общее число протонов и нейтронов в ядре.

Пионером в создании методов разделения изотопов был Фрэнсис Уильям Астон. В 1913 г. он предложил для этого метод газовой диффузии. Хотя изотопы химически идентичны, они различаются по своей массе, что влияет на скорость их диффузии и некоторые другие физико-химические характеристики. Метод газовой диффузии сегодня широко используется в химической технологии для получения радиоактивных изотопов, используемых в атомной энергетике.

Более важным открытием Астона является, однако, электромагнитный метод разделения изотопов. Он основан на простой идее: отклонение ионизованных атомов (ионов) в электрическом или магнитном поле должно зависеть от их массы. В 1919 г. Астон сконструировал свой первый масс-спектрограф. В этом приборе пучок ионов, пройдя через электрическое и магнитное поля, падал на фотопленку, на которой записывался так называемый масс-спектр. Этот прибор произвел революцию в исследовании изотопов, так как их разделение отныне свелось к простой лабораторной операции. За работы в области исследования изотопов Астон получил в 1922 г. Нобелевскую премию по химии.

Благодаря исследованиям Астона ученые пришли к одному довольно интересному открытию, толчком к которому послужили не особенно точные результаты, полученные с помощью первых масс-спектрографов. В 1929 г. Джиок и Джонстон обнаружили, что кислород имеет изотопы. Это явилось большим ударом для всей химии, так как за атомную единицу массы в химии тогда была принята $1/16$ массы атома кислорода. Это заставило внести поправки в численные значения атомных и молекулярных масс, и оказалось, что атомная масса водорода оказывается различной в зависимости от того, определяется она химическим путем или методом Астона. Ученые стали подозревать, что и водород имеет изотопы.

Этим вопросом занялся молодой американский исследователь Гарольд Клейтон Юри. В начале 30-х годов он теоретически доказал, что если жидкий

водород испаряется при низкой температуре, то в оставшейся жидкости постепенно возрастает доля «тяжелого» водорода. Действительно, в дальнейших опытах, произведя испарение 4 л водорода, Юри смог получить несколько кубических сантиметров его тяжелого изотопа.

Если нейтрон добавляется к атому с большой атомной массой, то новый изотоп с химической точки зрения не отличается от первоначального. Однако если нейтрон добавляется к атому с атомной массой, равной единице, то масса атома удваивается, и эту разницу уже можно заметить химическими методами. Действительно, Гарольд Юри показал, что тяжелый водород (который он назвал дейтерием) существенно отличается по своим свойствам от обычного водорода. Продолжая свои теоретические исследования, Юри установил, что при электролизе воды в жидком остатке накапливается так называемая тяжелая вода — соединение дейтерия с кислородом. Э. Уошберн из Бюро стандартов в Вашингтоне разработал эффективные методы для получения тяжелого водорода, а известный химик Гильберт Ньютон Льюис впервые получил чистую тяжелую воду.

За открытие тяжелого водорода (дейтерия) Гарольд Клейтон Юри в 1934 г. получил Нобелевскую премию по химии. Возникла весьма пикантная ситуация, ибо как раз в то время Астон пересмотрел свои данные по масс-спектрографии водорода: оказалось, что различие результатов не столь велико, чтобы предполагать существование изотопов этого элемента. Вот интересный пример того, как ошибка в науке может стимулировать открытие.

Меченые атомы

Широкому применению изотопов в разного рода исследованиях во многом способствовало открытие, сделанное Дьёрдем (Георгом) Хевеши, одним из ассистентов Резерфорда. Он родился в 1885 г. в Будапеште, окончил Фрейбургский университет, работал в Цюрихском политехникуме, а в 1912 г. начал работать у Резерфорда в Манчестерском университете. Там и зародилась идея использования радиоактивных изотопов для того, чтобы метить химические элементы. В 1915 г. Хевеши вместе с австрийским химиком Фридрихом Адольфом Панетом подробно разработал этот вопрос.

Первоначально метод меченых атомов был применен для изучения механизма химических реакций. Используя излучение радиоактивного изотопа как индикатор, можно было установить, в какие молекулы переходит меченый атом. Впоследствии Хевеши успешно использовал радиоактивные изотопы и в физиологии — для исследования химических процессов, протекающих в живых организмах. Добавление малых количеств меченых атомов в пищу лабораторных животных или почву вблизи растений позволяло проследить путь атомов в сложных системах реакций обмена веществ организма.

Многие годы широкое внедрение меченых атомов в химические и биологические исследования сдерживалось тем, что природных радиоактивных изотопов очень мало; к тому же необходимы были такие меченые атомы, ко-

торые своим излучением не могут сильно повредить клетку, а являются био-генными элементами, т. е. в естественной форме входят в состав организмов. Перелом в этой области наступил после открытия Фредериком и Ирен Жолио-Кюри искусственной радиоактивности. Это крупное открытие было сделано в январе 1934 г. Облучая алюминиевую фольгу альфа-частицами, французские исследователи обнаружили, что после облучения мишень сама становится источником излучения. Анализ показал, что получаются новые изотопы, которые в большинстве своем радиоактивны. В следующем, 1935 г. Ирен и Фредерик Жолио-Кюри получили Нобелевскую премию по химии за открытие искусственной радиоактивности.

Возможность создания радиоактивных изотопов по желанию исследователя вдохнула новую жизнь в метод меченых атомов. Хевеши был вынужден работать с радиоактивным свинцом, являющимся продуктом естественного распада урана. После того как стало возможным получать радиоактивный углерод, азот, фосфор и т. д., меченые атомы нашли широкое применение в медицине, физиологии и, конечно же, в химии. Большая заслуга в этом принадлежала Дьёрдо Хевеши, и в 1943 г. он был удостоен Нобелевской премии по химии.

С радиоактивными изотопами связано одно из замечательных открытий нашего века: Земля имеет свои радиоактивные «часы». Все началось с простого исследования, целью которого было определить относительное содержание в живых организмах радиоактивных и обычных изотопов углерода.

В 1939 г. было обнаружено, что космические лучи, попадая в земную атмосферу, создают потоки вторичных частиц. В результате этого происходит превращение нерадиоактивного азота-15 в радиоактивный углерод-14. Указанный процесс идет непрерывно, но, несмотря на это, количество радиоактивного углерода в атмосфере минимально. В момент возникновения эти атомы, имеющие очень высокую энергию, сразу же вступают в реакцию с кислородом, образуя двуокись углерода или углекислый газ. Последний усваивается растениями и от них переходит к животным. Таким образом, в биосфере в целом поддерживается постоянная концентрация углерода-14.

Все это было установлено к 1946 г. группой исследователей, в которую входил и американский физик Уиллард Фрэнк Либби. Ученый задался вопросом: что происходит с радиоактивным углеродом после смерти организма? Поскольку обмен веществ прекращается, углерод-14 в организм более не поступает. А содержащийся в организме изотоп начинает распадаться: в соответствии с периодом полураспада углерода-14 его количество уменьшается вдвое за 5600 лет. Очевидно, по относительному содержанию углерода-14 в ископаемых останках и живых организмах можно судить о возрасте останков.

Идея очень проста, но для создания точного и удобного метода датирования потребовались большие усилия. Современный метод радиоуглеродной геохронологии (определение геологического возраста органических объектов по содержанию в них радиоуглерода-14) позволяет определять возраст объ-

ектов в пределах 200—50 000 лет. Атомы изотопа выделяются с помощью масс-спектрографа, а для анализа достаточно нескольких граммов вещества. На сегодня это один из основных методов датирования в археологии.

Попытка определения возраста древних останков с помощью углерода-14 оказалась настолько успешной, что это подтолкнуло на поиски других радиоактивных изотопов, удобных для этих целей. Сейчас в распоряжении ученых имеются радиоактивные часы для Вселенной, измеряющие периоды времени в миллионы и миллиарды лет. Создана прочная основа для датирования археологических, геологических и космических событий.

За свое замечательное открытие Уиллард Фрэнк Либби был удостоен в 1960 г. Нобелевской премии по химии. При вручении премии отмечалось, что редко открытие, сделанное в области химии, способно оказать столь широкое влияние на мышление и представления людей.

Мечта алхимиков

В 30-е годы нынешнего столетия многие ученые занимались исследованиями по искусственному превращению химических элементов. Первые успешные эксперименты такого рода были проведены Резерфордом еще в 1919 г. Он осуществил первую искусственную ядерную реакцию, превратив азот в кислород.

В начале 30-х годов Ирен и Фредерик Жолио-Кюри, используя альфа-частицы высокой энергии, получили большое число радиоактивных изотопов. Почти в то же время итальянский физик Энрико Ферми сообщил о результатах бомбардировки атомов медленными нейтронами. Попадая в ядро атома, нейтрон вызывает альфа-или бета-распад или просто присоединяется к другим нейтронам ядра. В зависимости от этого образуются различные элементы и изотопы. Ферми установил, что реакция идет более успешно при бомбардировке медленными нейтронами. Он нашел способ замедления нейтронов, пропуская их через такие богатые протонами вещества, как вода, парафин и т. д., и теоретически объяснил этот процесс.

Энрико Ферми с сотрудниками занимались получением новых, так называемых трансурановых элементов — стоящих в периодической таблице за ураном; с этой целью производилось облучение урана нейтронами. К счастью, эти попытки не принесли тогда ожидаемых результатов — в противном случае мы, возможно, имели бы атомную бомбу перед второй мировой войной. За открытие искусственной радиоактивности, обусловленной нейтронами, и другие достижения в исследовании искусственного превращения атомов Энрико Ферми получил в 1938 г. Нобелевскую премию по физике. В это же время в Берлине под руководством Отто Гана проводились решающие эксперименты по расщеплению атома урана.

К 1937 г. немецкий физик Отто Ган и его сотрудница Лизе Майтнер также занимались получением новых элементов. Вначале они считали, что эти исследования помогут продолжить периодическую таблицу, внося в нее но-

вые элементы. В 1938 г. Ган и его ассистент химик Фриц Штрасман неожиданно обнаружили среди продуктов распада, полученных при бомбардировке нейтронами урана и тория, элемент барий. Одновременно с ними во Франции Ирен Жолио-Кюри, работавшая с югославским физиком Павле Савичем, открыла среди продуктов деления ядра урана лантан — элемент, который, как и барий, расположен в середине таблицы Менделеева.

В начале 1939 г. Отто Ган высказал предположение, что под ударами нейтронов ядро урана расщепляется на два ядра. Это явилось полной неожиданностью для ученых и произвело сенсацию в научном мире.

Дальнейшие исследования показали, что в процессе расщепления урана выделяется гигантское количество энергии. Почти одновременно и независимо друг от друга Энрико Ферми, Фредерик Жолио-Кюри и Лео Сцилард установили, что при распаде урана возникают 2—3 новых нейтрона. Ферми сразу же догадался, что в этом скрывается возможность осуществления цепной самоподдерживающейся реакции деления. И всего лишь через два года он реализовал свой замысел, построив первый атомный реактор. 2 декабря 1942 г. в Чикагском университете была осуществлена первая цепная реакция деления урана. Это был день, когда человек овладел атомной энергией. Через 12 лет в Советском Союзе (в городе Обнинске) начала действовать первая в мире атомная электростанция, которая использовала тепло, полученное в атомном реакторе. 16 июня 1945 г. в пустыне штата Нью-Мексико (США) было проведено испытание первой атомной бомбы. Физики выпустили джинна из бутылки.

Расщепление атома привело к созданию оружия невиданной разрушительной силы, но оно указывало и путь к решению энергетических проблем человечества. Именно учитывая эту грандиозную перспективу. Нобелевский комитет принял решение присудить Отто Гану Нобелевскую премию по химии за 1944 г.

Все эти открытия были сделаны в ходе опытов, направленных на получение трансуранных элементов. Эксперименты Резерфорда и других пионеров в этой области проводились с естественными источниками заряженных частиц — природными радиоактивными изотопами. Лишь в 1932 г. английский физик Джон Дуглас Кокрофт и ирландский физик Эрнест Томас Синтон Уолтон сконструировали так называемый каскадный генератор для ускорения заряженных частиц. Электрическое поле напряжением 700 тыс. эВ (электронвольт) сообщало частицам энергию, достаточную для проникновения в ядра легких элементов и начала ядерных реакций. Однако, несмотря на то что каскадный генератор явился большим достижением инженерного искусства, его возможности были ограничены. Требовалась принципиально новая идея.

Такую идею выдвинул в 1929 г. Эрнест Орландо Лоуренс, работавший в Калифорнийском университете в Беркли. Он разработал конструкцию магнитного резонансного ускорителя — циклотрона, где заряженные частицы двигались по спирали между полюсами большого электромагнита, поле которого изменялось синхронно с движением частиц. Первый циклотрон, по-

строенный Лоуренсом в 1931 г., создавал разность потенциалов в 10 млн. В, что в 15 раз превышало напряжение в генераторе Уолтона и Кокрофта, тогда как напряжение, подаваемое на дуанты, составляло всего лишь несколько сотен тысяч вольт.

Почти одновременно с Лоуренсом шведский физик Густав Адольф Изинг также предложил способ ускорения заряженных частиц повторяющимися импульсами, однако при этом предполагалось, что частицы движутся по прямой. Этот замысел лег в основу конструкций линейных ускорителей.

Это один из примеров того, что большинство крупных открытий обычно делается не одним, а одновременно — и часто независимо — несколькими исследователями. Но, как мы уже говорили. Нобелевская премия индивидуальна. Возможно, было бы более правильным считать, что награждение одного ученого является символическим признанием усилий всего «невидимого коллектива» исследователей, большинство из которых остаются неизвестными широкой публике.

Циклотрон Лоуренса открыл новую эпоху в ядерной физике. Принципиально новый принцип ускорения заряженных частиц, предложенный в 1944 г. советским физиком Владимиром Иосифовичем Векслером и в 1945 г. независимо американским физиком Эдвином Маттисоном Макмилланом, позволил значительно увеличить возможности ускорителей, и на сегодня главным ограничением здесь являются финансовые затраты. Сейчас в мире построены гигантские ускорители, в которых частицы получают энергию порядка миллиардов эВ. Строительство еще более мощных ускорителей — вопрос только времени.

За свое открытие Лоуренс был удостоен в 1939 г. Нобелевской премии по физике. Кокрофт и Уолтон в 1951 г. также стали лауреатами Нобелевской премии по физике. С помощью их каскадного ускорителя были осуществлены превращения ряда атомов легких элементов.

В мае 1940 г. Эдвин Макмиллан и его молодой ассистент Филипп Абельсон на циклотроне Лоуренса бомбардировали урановую мишень нейтронами. Химический анализ мишени показал наличие неизвестного элемента. Так был получен первый трансурановый элемент. Его назвали нептунием — по названию планеты Нептун, которая находится в Солнечной системе за планетой Уран. В таблице Менделеева новый элемент был внесен под номером 93. Одновременно с ними нептуний получили также Отто Ган и Лизе Майтнер, но в слишком малых количествах, чтобы его можно было исследовать химическим путем. К концу того же года Макмиллан вместе с Гленном Теодором Сиборгом открыли еще один элемент, получивший номер 94. Следуя той же логике, ученые назвали его плутонием (планета Плутон находится за Нептуном). Исследования нового элемента показали, что он, подобно урану, под действием медленных нейтронов может порождать цепную реакцию и, следовательно, пригоден как ядерное топливо.

Занятия современной алхимией пришлось по душе Гленну Сиборгу, и он с увлечением продолжил свои исследования. Спустя некоторое время были

разработаны тончайшие методы химического анализа веществ, получаемых в ничтожно малых количествах. В 1942 г. Сиборг развил далее идею Макмиллана о том, что трансурановые элементы образуют группу, подобную так называемым редкоземельным элементам из группы лантана. Новое семейство элементов оказалось в группе актиния. Сходство между актиноидами и лантаноидами явилось еще одним блестящим подтверждением периодической таблицы химических элементов.

При участии Сиборга был синтезирован ряд трансурановых элементов. В 1951 г. он и Макмиллан стали лауреатами Нобелевской премии по химии за открытие плутония. Сиборг и после этого продолжал активно заниматься работой по синтезу трансурановых элементов. Последним элементом, в синтезе которого он принял активное участие, был элемент под номером 101 (менделевий), полученный в 1955 г.

В дальнейшем группа трансурановых элементов продолжала пополняться. Были получены элементы под номерами 102 (нобелий), 103 (лоуренсий) и 104 (курчатовий). Последнее время этот раздел радиохимии пребывает в застое. Но ученые не теряют надежды, что удастся синтезировать и другие элементы и что где-то в области элемента под номером 114 будет обнаружен «остров стабильности».

Модели ядра

В первое десятилетие нашего века физики уже довольно много знали об элементарном носителе электрического заряда — электроны. Из химических экспериментов и физических исследований каналовых лучей было известно, что наименьшим носителем положительного заряда является ион водорода. Это было установлено Винном в 1898 г. и окончательно доказано в 1914 г., когда Резерфорд открыл частицу, названную им протоном.

Из этих двух типов частиц, связанных силами электромагнитного взаимодействия, физики строили модели не только атомов, но и атомного ядра. Было установлено, что массы атомных ядер обычно превышают общую массу протонов, которые должны были бы находиться в ядре, чтобы обеспечить электрическую нейтральность атома (положительный заряд протонов должен компенсировать отрицательный заряд электронов в атоме). Ученые высказали предположение о существовании внутриядерных электронов, которые нейтрализуют часть заряда протонов. Эта схема, между прочим, была использована для объяснения бета-распада, при котором ядра «выбрасывают» электроны.

Первая модель атомного ядра была весьма искусственной, но в арсенале физики того времени просто не было ничего более подходящего. Вскоре были получены данные, которые уже не удавалось объяснить с помощью такой модели.

Нейтральные частицы требовали поиска новых сил взаимодействия. За открытие нейтрона Джеймс Чедвик был удостоен в 1935 г. Нобелевской премии по физике.

Сразу же после открытия нейтрона возник вопрос, какие силы удерживают эту частицу в ядре вместе с протоном. Предлагались модели взаимодействия, основанные на переходах нейтронов в протоны и обратно с испусканием позитронов, электронов и нейтрино. Однако выяснилось, что эта модель, в которой опять-таки все объяснялось электромагнитным взаимодействием, не соответствовала действительности. Решение проблемы оказалось иным.

Японский физик Хидэки Юкава одним из первых понял, что здесь ученые столкнулись с новым видом взаимодействия. В 1935 г. он, развивая идеи И. Е. Тамма и Д. Д. Иваненко об обменном характере ядерных сил, выдвинул гипотезу, описывающую характер взаимодействия между протонами и нейтронами в ядре. Было очевидным, что новое взаимодействие значительно сильнее электромагнитного. Его сущность определила и само его название — сильное взаимодействие.

В отличие от уже известных гравитационного и электромагнитного взаимодействий сильное взаимодействие, согласно теории Юкавы, должно возникать только на очень малых расстояниях — порядка диаметра атомного ядра. На основе квантовой теории Юкава вычислил, что квантом сильного взаимодействия должна быть частица с массой, в 200—300 раз превышающей массу электрона. Поскольку в те годы такой частицы не было известно, теория Юкавы не получила особого признания. Однако в 1937 г. Карл Дейвид Андерсон и С. Неддермейер из Калифорнийского технологического института, а также Стрийт и Стивенсон из Гарвардского университета открыли неизвестную частицу примерно в 200 раз тяжелее электрона. По своим характеристикам она весьма напоминала гипотетическую частицу Юкавы — квант сильного взаимодействия. Так как новая частица во многом, за исключением массы, была похожа на электрон, Андерсон назвал ее просто тяжелым электроном. Поскольку масса этой частицы занимала промежуточное положение между массами электрона и протона, ее назвали затем мезотроном, а потом мезоном.

Однако окончательные доказательства того, что найдена именно «частица Юкавы», отсутствовали. Война помешала этим исследованиям, и вопрос был решен лишь в 1947 г., когда группа исследователей под руководством Сесила Франка Пауэлла доказала, что существуют мезоны нескольких видов и одним из них действительно является квант сильного взаимодействия. Так теория Юкавы о существовании нового типа взаимодействия, связывающего тяжелые частицы в атомном ядре, получила свое подтверждение, и в 1949 г. Хидэки Юкава стал лауреатом Нобелевской премии по физике¹.

¹ С. Ф. Пауэлл получил Нобелевскую премию по физике в 1950 г.

Магические числа

В 1928г. американский физик-теоретик Г. А. Гамов, разрабатывая теорию альфа-распада, ввел представление о ядре как о своеобразной капле, частицы в которой тесно связаны между собой силами притяжения. В 1936 г. Нильс Бор и Джон Уилер, развивая идеи Гамова, создали капельную модель ядра. Аналогия довольно-таки наглядна. Между молекулами в капле воды силы притяжения действуют, как и ядерные силы, на очень коротких расстояниях. Если каплю воды опустить в другую жидкость такой же плотности, то она принимает сферическую форму. Это объясняется поверхностным натяжением, которое создается силами притяжения, действующими между молекулами на поверхности капли. Эти силы притяжения и придают капле форму сферы, которая имеет минимальную площадь.

В исключительно малом объеме атомного ядра находится значительное число протонов и нейтронов. Они связаны между собой сильным ядерным взаимодействием. Поверхностный слой нуклонов остается неуравновешенным, и поэтому можно говорить, что в ядре также существует своего рода поверхностное натяжение. В реальных условиях эта картина усложняется взаимным отталкиванием электрически заряженных протонов. Поскольку ядра имеют различное число протонов и нейтронов, сильное и электромагнитное взаимодействия накладываются и в конечном счете ядро приобретает неправильную форму. Некоторые ядра имеют довольно удлиненную форму, и даже такое слабое воздействие, как попадание в ядро извне еще одного нейтрона, может нарушить равновесие и привести к разделению ядра на части. Эта теория, довольно хорошо объясняющая деление атомов, была предложена Бором и Уилером в 1939 г.

Капельная модель ядра сыграла большую роль в экспериментальной физике и многие годы пользовалась большой популярностью среди ученых. Накапливались, однако, факты, которые не могли найти объяснения в рамках этой простой схемы. Уже в 1934 г. молодой немецкий физик Вальтер Эльзассер установил, что ядра, в которых число нуклонов, протонов или нейтронов равно 2, 8, 20, 50, 82 или 126, обладают особой стабильностью. Поскольку физики не находили объяснения этому явлению, эти числа были названы «магическими». Наиболее устойчивыми оказались ядра, в которых число нуклонов было «дважды магическим». К ним относятся, например, ядра гелия-4 (2 нейтрона и 2 протона), кислорода-16 (8 протонов и 8 нейтронов) и свинца-208 (82 протона и 126 нейтронов). Эти факты наряду с другими дали основание американскому физiku А. Бартлету предложить оболочечную модель ядра. Эта идея, однако, существенно опережала свое время и поэтому не нашла тогда поддержки. В 1949 г. представления физиков об атомном ядре значительно углубились, и оболочечная модель ядра, предложенная Марией Гёпперт-Майер и независимо Йоханнесом Хансом Даниелем Йенсенем, привлекла всеобщее внимание ученых.

Согласно их теории, нуклоны движутся в ядре по определенным орбитам, подобно электронам в атоме. И так же как строение электронной оболочки и ее постепенное заполнение служат основой периодической системы элементов, магические числа в сочетании с оболочечной моделью ядра привели к созданию периодической системы ядер. Магическое число показывает, какое максимальное число нуклонов может быть в следующем слое. Сначала эта теория принималась с трудом. Физики не могли допустить, что в сверхплотном ядре протоны и нейтроны движутся независимо друг от друга и сохраняют какую-то упорядоченность. Но оболочечная модель хорошо объясняла некоторые явления, в частности связанные с устойчивостью атома, и в 50-е годы получила признание большинства ученых. За создание оболочечной модели ядра Мария Гёпперт-Майер и Йоханнес Йенсен были удостоены в 1963 г. Нобелевской премии по физике.

Вместе с ними был награжден и американский физик венгерского происхождения Юджин Поль Вигнер. Его научная деятельность связана с квантовой механикой и электродинамикой, с физикой ядра и элементарных частиц. Еще в 1933 г. он доказал, что ядерные силы должны иметь небольшой радиус действия. Впоследствии он публикует и другие работы, связанные с взаимодействием между нуклонами. Вигнер участвовал в работе группы Ферми, которая в 1942 г. пустила первый американский атомный реактор. В конце 40-х и в 50-е годы он публикует важные работы по физике элементарных частиц. За большой вклад в теорию атомного ядра и элементарных частиц, особенно за применение фундаментальных принципов симметрии, Вигнеру была присуждена в 1963 г. Нобелевская премия по физике.

История науки знает много примеров того, как среди ученых периодически распространяется увлечение сначала одной теорией, а затем ее противоположностью. Обычно это заканчивается созданием некой «гибридной» теории, которая объединяет в себе положительные качества предыдущих точек зрения и знаменует новый, более высокий уровень знаний.

Так было и с представлениями об атомном ядре. На смену капельной модели Гамова, Бора и Уилера пришла оболочечная модель, которая ставила поведение протонов и нейтронов в атомном ядре в очень жесткие рамки. Но уже в 1952 г. датские физики Оге Бор, сын Нильса Бора, и Бенжамин Моттelson разработали так называемую коллективную модель ядра. Немного раньше их, в 1950 г., подобные идеи (сфероидальная модель ядра) высказал американский физик Джеймс Рейнуотер. Согласно коллективной модели, ядро действительно состоит из оболочек, которые постепенно заполняются при переходе к каждому следующему элементу периодической системы. На поверхности ядра эта упорядоченность, однако, нарушается — плотность частиц уменьшается и создаются условия для неустойчивости. Именно в этой области, около поверхности, ядра деформируются; в результате возникают своего рода волны, с которыми связаны ядерное гамма-излучение и радиоактивность.

Данные о структуре ядра были получены путем бомбардировки мишеней субатомными частицами, ускоренными до очень высоких энергий. Картина рассеяния дает представление о распределении протонов и нейтронов внутри ядра. Наряду с этим применялся также метод мезоатомов. В 1953 г. Рейнуотер решил воспользоваться тем обстоятельством, что мю-мезон (который в сущности является тяжелым электроном), попадая в атом, достигает ядра и даже проникает в него. При этом возникает рентгеновское излучение, позволяющее получить информацию о различных структурах ядра. Таким образом было, например, установлено, что ядра имеют «стратосферу» — область вблизи поверхности, в которой плотность частиц в 20 раз меньше, чем в центре.

В 1958 г. Оге Бор и Бенжамин Моттelson совместно с Дэвидом Пайнсом построили сверхтекучую модель ядра. Это значительно обогатило их теорию, приблизив ее к реальности. За большие заслуги в развитии ядерной физики О. Бор, Б. Моттelson и Дж. Рейнуотер были награждены в 1975 г. Нобелевской премией по физике.

Источник: Чолаков В. Нобелевские премии. Ученые и открытия: Пер. с болг. / Под ред. и с предисл. А.Н. Шамина. — М.: Мир, 1986. — 386с.