

- с. 875—884.
7. Горбов А. И. Флогистон.— Там же, 1902, т. 36 (№ 71), с. 138—144.
8. Горбов А. И. Химическая номенклатура.— Там же, 1903, т. 37 (№ 73), с. 205—213.
9. Горбов А. И. Этеринная теория.— Там же, 1904, т. 41 (№ 81), с. 141—142; см. также: Этилен, с. 166—170; Этил, с. 170—172.
10. Горбов А. И. Ядер теория.— Там же, 1904, т. 41 (№ 81), с. 491—492.
11. Горбов А. И. Химических типов теория.— Там же, с. 219—225.
12. Горбов А. И. Химическое строение.— Там же, с. 239—249.
13. Горбов А. И. А. М. Бутлеров и химическое строение.— В кн.: А. М. Бутлеров. 1828—1928. Л.: Изд-во АН СССР, 1929, с. 113—178.
14. Meyer E. Geschichte der Chemie. 2-te Aufl. Lpz., 1895, S. 282—283.
15. Мусабегов Ю. С. История органического синтеза в России. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 285 с.
16. Быков Г. В. История классической теории химического строения. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 311 с.
17. Кузнецов В. И. Диалектика развития химии. М.: Наука, 1973. 327 с.
18. Горбов А. И. История вопроса о конституции кислот (от конца средних веков до 1830 г.) — ЖРФХО, 1914, т. 46, вып. 4, отд. II, с. 95—149.
19. Шатенштейн А. И. Теории кислот и оснований: история и современное состояние. М.—Л.: Госхимиздат, 1949. 315 с.
20. Вальден П. И. О законе сохранения веса (массы) при химических реакциях.— ЖРФХО, 1912, т. 44, вып. 3, отд. II, с. 75—99.
21. Кипнис А. Я. Развитие химической термодинамики в России. М.—Л.: Наука, 1964, с. 121—124.
22. Горбов А. И. Правило фаз.— В кн.: Энцикл. словарь/Брокгауз и Ефрон, 1889, т. 24 (№ 48), с. 852—861.
23. Горбов А. И. Закон фаз.— Физико-математический ежегодник, 1902, т. 2, с. 174—204.
24. Горбов А. И. Химия.— В кн.: Энцикл. словарь/Брокгауз и Ефрон, 1903, т. 37 (№ 73), с. 249—266.
25. Курнаков Н. С., Пушин Н. А. О сплавах свинца с таллием и индием.— ЖРФХО, 1906, т. 38, с. 1146—1167; цит. по кн.: Курнаков Н. С. Избранные труды. М.: Изд-во АН СССР, 1961.
26. Горбов А. И. Что есть химия? — ЖРФХО, 1914, т. 46, вып. 1, отд. II, с. 1—27.
27. Курнаков Н. С. Введение в физико-химический анализ. 4-е изд. М.—Л.: Изд-во АН СССР, 1940.

Из истории изобретений и открытий

РАДИОАКТИВНОСТЬ: СВОЙСТВО И ПРОЦЕСС [К 90-летию открытия радиоактивности]

Д. Н. ТРИФОНОВ

Вряд ли кто-нибудь будет оспаривать, что наши знания о строении и свойствах материи в значительной степени — следствие открытия и многопланового изучения явления радиоактивности. В этом году исполнилось 90 лет с того момента (1 марта 1896 г.), когда Анри Беккерель наблюдал неизвестную ранее разновидность лучей, совершенно не подозревая, к сколь глубоким тайнам природы он прикоснулся. За девять десятилетий многие из этих тайн были раскрыты, объяснены и даже поставлены на службу практике, само понятие радиоактивность ныне широко известно, но загадочного здесь осталось едва ли меньше.

Уместно начать с напоминания о происхождении самого термина. В сообщении об открытии радия, сделанном М. и П. Кюри и Ж. Бемоном 26 декабря 1898 г., впервые прозвучало слово радиоактивность [1] в качестве термина «для определения нового свойства материи, проявляемого элементами ураном и торием». Слово производится от латинских *radio* (испускаю лучи) и *activis* (деятельный); таким образом, с самого начала радиоактивность была определена как способность определенных видов материи (химических элементов) испускать лучи (любопытная версия о происхождении слова радиоактивность предложена в [2]); термин радиоактивность быстро стал общепринятым.

На первых порах не было и мысли о том, что лучи могут быть потоками материальных частиц: это выяснилось не сразу. Со временем стало ясно: только так называемая γ -радиоактивность действительно носит чисто лучевой характер, а следовательно, с современной точки зрения термин отнюдь не отражает действительного содержания явления, которое оказалось гораздо глубже и шире, чем можно было полагать на заре его исследования. Традиции справедливо предостерегают от всяких посягательств на этот термин с целью введения более подходящего; однако строгий подход к делу не может не навести на размышления.

Существующие в настоящее время дефиниции понятия радиоактивность расходятся лишь в деталях. Это дает нам право по собственному разумению выбрать соответствующее определение и считать его, так сказать, эталонным. Остановимся на определении, приводимом в одном из энциклопедических изданий. Оно гласит: «радиоактивность — самопроизвольное (т. е. независящее от каких-либо внешних условий) превращение нестабильного изотопа одного химического элемента из основного и метастабильного состояния в изотоп другого элемента, сопровождающееся испусканием элементарных частиц или ядер» [3]. Подразумевается, что в качестве элементарных частиц фигурируют электрон, позитрон, протон, нейтрон, а в качестве ядер — α -частицы; это, безусловно, достаточно полно отражает суть дела, однако скрупулезный анализ позволяет зафиксировать и некоторые неточности. Так, испускание нейтрона приводит к образованию изотопа не другого элемента (т. е. с иным значением Z), но изотопа того же самого элемента. В результате спонтанного деления рождаются изотопы двух различных элементов, которые могут весьма заметно различаться по Z (в редких случаях происходит так называемое тройное деление, в результате которого образуются ядра с тремя разными значениями Z). Наконец, вместо термина изотоп

правомернее использовать термин нуклид, предложенный в 1947 г. Т. Команом [4], отвечающий виду атомов, характеризующихся определенной комбинацией протонов и нейтронов в ядрах; этот термин удачен хотя бы потому, что две разновидности атомов, различающихся по Z , не являются изотопами, отсюда выражение «радиоактивность нуклида» выглядит вполне приемлемым для его дальнейшего использования.

С учетом этих уточнений можно несколько модифицировать определение понятия радиоактивность, а именно характеризовать феномен как самопроизвольное превращение нестабильного нуклида с определенной комбинацией Z и N (N — число нейтронов) в другой (другие) нуклид с другими комбинациями Z и N , сопровождающееся испусканием (образованием) материальных частиц определенного вида (элементарных или сложных). По своему содержанию это определение не несет какой-либо принципиально новой информации. Более того, оно, как и другие дефиниции, имеет совершенно однозначную направленность: явление радиоактивности характеризуется как процесс определенного изменения материальных структур, могущий быть записанным в виде некоей ядерной реакции, уравнение которой адекватно уравнению химической мономолекулярной реакции. В этом уравнении известен исходный объект, известна вылетающая частица и, наконец, известен результирующий продукт; оно, очевидно, учитывает баланс зарядов и масс. Собственно говоря, современные определения радиоактивности по существу оказываются словесным переложением предельно конкретной формулы так называемого радиоактивного превращения нуклидов.

Подобного рода трактовка радиоактивности, если так можно выразиться, динамична; но ведь возможен и статический подход к проблеме, когда радиоактивность выступает как определенное *свойство* нуклида, т. е. как способность (потенциальная) нуклидов, строение которых соответствует определенным комбинациям Z и N , претерпевать изменения их собственной структуры. В таком случае отмеченная способность (свойство) нуклида могла бы рассматриваться как нечто первичное, тогда как реализация данного свойства представляла бы собой вторичное. Иными словами, процесс превращения нуклидов выступал бы следствием объективно существующего свойства нестабильности нуклидов с определенными сочетаниями Z и N .

Итак, среди множества нуклидов — весьма распространенных материальных образований — могут быть четко выделены подмножества, содержащие нуклиды, которые являются либо стабильными, либо нестабильными. Свойство стабильности означает, что нуклид с данным сочетанием Z и N остается неизменным в течение неопределенно долгого промежутка времени; его структура может измениться в результате внешних воздействий, вызывающих протекание искусственной ядерной реакции того или иного типа. Свойство же нестабильности выражается в том, что нуклид способен самопроизвольно претерпевать превращение в другой (другие) нуклид. Термин нестабильность при всей своей, так сказать, тривиальности представляется по существу своему более емким и содержательным для характеристики явления, известного уже девять десятков лет под именем радиоактивности (хотя, повторяем, нет необходимости в ревизии исторически сложившегося и общепринятого термина).

В настоящее время известно около 2000 нуклидов — стабильных и нестабильных, причем на долю существующих в природе приходится примерно 1/6 от этого количества. Из них стабильных — 280, тогда как нестабильных существенно меньше — немногим более 40, все остальные нестабильные нуклиды получены искусственным путем.

Большинство природных нестабильных нуклидов сгруппированы в так называемые радиоактивные семейства, родоначальниками которых являются нуклиды ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U . Выяснение структуры этих семейств и установление их связи со структурой периодической системы элементов в свое время оказалось фундаментальным достижением учения о радиоактивности. Все эти нуклиды (исключая родоначальников семейств) *вторичны* по своему происхождению, поскольку в конечном счете обязаны своим существованием именно последовательным радиоактивным распадам долгоживущих изотопов тория и урана; едва ли возможно обнаружение в составе семейств еще неизвестных нуклидов. Важный вывод, к которому привело последовательное изучение радиоактивности, состоит в том, что у всех нуклидов с $Z > 83$ отсутствует свойство стабильности: все они нестабильны — в той или иной степени (вопроса о степени нестабильности мы коснемся далее, когда перейдем к оценке явления радиоактивности как процесса). Впоследствии выяснилось, что и при значениях $Z = 43$ и 61 все нуклиды

характеризуются свойством нестабильности; странная на первый взгляд аномалия наша шла строгое теоретическое объяснение.

Подчиняются ли вообще каким-либо четким закономерностям проявления свойства стабильности (или нестабильности) нуклидами в зависимости от величины Z ? Все нечетные Z представлены в природе не более чем двумя стабильными нуклидами; 19 значениям Z отвечают единственные разновидности стабильных нуклидов. Количества же стабильных нуклидов с четными Z колеблются от 1 до 10. Образно говоря, «архипелаг стабильности» в «океане нестабильности» имеет весьма причудливые очертания. Продолжая далее эту аналогию, можно было бы заметить, что с течением времени происходит как бы «опускание» отдельных участков «суши». Примерно два десятка нуклидов, которые в первом приближении рассматриваются как стабильные, на деле в слабой степени проявляют свойство нестабильности (^{40}K , ^{87}Rb , ^{115}In , ^{138}La , ^{144}Nd , ^{176}Lu , ^{180}Ta , ^{187}Re , ^{190}Pt и ряд других). Принципиально нет теоретических оснований утверждать, что этот перечень не может оказаться значительно более широким. Подобные идеи, однако, не являются откровением современности: еще в начале столетия дискутировалась гипотеза о так называемой всеобщей радиоактивности. В согласии с ней все без исключения химические элементы (т. е. все нуклиды) неустойчивы, и только очень слабая радиоактивность большинства из них не дает возможности зафиксировать эту нестабильность экспериментально. Принять данную гипотезу означало бы, вообще говоря, встать на точку зрения, что стабильность нуклидов, если можно так выразиться, временное свойство, и в конечном счете каждый из стабильных нуклидов рано или поздно должен претерпеть радиоактивное превращение. Между прочим теоретические представления позволяют представить весьма впечатляющую ситуацию. Если проанализировать ход кривой энергии связи нуклонов в ядрах, то получается, что максимум на кривой соответствует нуклиду ^{56}Fe . Считается [5], что это ядро должно соответствовать термодинамически наиболее стабильной форме ядерной материи и при абсолютном нуле все другие нуклиды в принципе должны превращаться в желез-56. Однако скорости этих превращений неизмеримо малы, в связи с чем подобный прогноз небезынтересен лишь для оценки путей эволюции Вселенной в весьма отдаленном будущем. Для нас же, очевидно, прежде всего важны возможности экспериментального подтверждения новых «случаев» нестабильности нуклидов.

В какой мере надежно такие возможности могли бы быть предсказаны, — это отнюдь не простая проблема. Чтобы выявить ее основные контуры, нам целесообразно перейти от оценки свойства нестабильности в плане характеристики его конкретных носителей к более глубокой оценке самого свойства.

Совершим исторический экскурс, чтобы проследить ход исследований, в результате которых углублялось и расширялось представление о свойстве радиоактивности.

Сам А. Беккерель предполагал, что в наблюдавшемся им явлении реализуется свойство некоторых тел (прежде всего соединений урана) испускать лучи неизвестного ранее типа, обладающие большой проникающей способностью и рядом других примечательных качеств. Пытаясь объяснить природу излучения, ученый первоначально считал его своеобразной «невидимой фосфоресценцией» и не установил каких-либо фактов, которые свидетельствовали бы в пользу неоднородности излучения. Эта неоднородность была экспериментально доказана в 1899 г. Э. Резерфордом, который четко идентифицировал в радиоактивном излучении два компонента, названных им α - и β -лучами; спустя год П. Вийяр обнаружил третий — γ -излучение. Таким образом, подобно тому, как каждый цвет имеет набор определенных оттенков, так и первоначально «единое» свойство радиоактивности обнаружило вполне определенные разновидности, которые существенно различались по многим параметрам. Выяснение природы этих разновидностей и различий между ними привело к революционным событиям в учении о радиоактивности, а термины α -, β - и γ -радиоактивность, характеризующие отдельные разновидности свойства нестабильности, раз и навсегда вошли в понятийный аппарат этого учения.

α -Радиоактивность оказалась свойством атомов (позднее — атомных ядер) испускать дважды ионизованные атомы (ядра) гелия, а β -радиоактивность — электроны; четко была установлена электромагнитная природа γ -радиоактивности в отличие от корпускулярного характера двух других разновидностей. Материальность α - и β -частиц легла в основу теории радиоактивных превращений, в соответствии с которой

результатом проявления свойства радиоактивности оказывалось изменение химической индивидуальности радиоактивного атома, т. е. естественное превращение (трансмутация) элементов. Именно в результате этого стало очевидно, что явление радиоактивности следует рассматривать не только как свойство, но и как процесс.

Обе материальные составляющие радиоактивности были зафиксированы в первые годы изучения феномена. Обычно все нуклиды, входящие в естественные радиоактивные семейства, либо α -, либо β -радиоактивны. Однако некоторые из них обладают способностью к испусканию обеих частиц (так называемые радиоактивные вилки), причем вероятности испускания каждой из них, как правило, различаются на несколько порядков.

В первые десятилетия после открытия радиоактивности изучение свойства неустойчивости велось на сравнительно ограниченном числе природных объектов, причем каких-либо новых разновидностей свойства не удавалось обнаружить, да и вообще казалось проблематичным, могут ли существовать таковые. Положение решительно изменилось в начале 30-х годов в результате бурного развития теоретической и экспериментальной ядерной физики. В итоге это привело к двум выдающимся достижениям: массовому синтезу искусственно-неустойчивых нуклидов и открытиям новых разновидностей свойства неустойчивости.

Первыми искусственно-радиоактивными продуктами были полученные посредством ядерных реакций не существующие в природе изотопы фосфора и азота: ^{30}P и ^{13}N , что было сделано в 1934 г. И. и Ф. Жолио-Кюри. Свойство неустойчивости, присущее такого рода нуклидам, получило название искусственной радиоактивности. Строго говоря, это название выглядит именно искусственным при трактовке радиоактивности и как свойства, и как процесса. Так, например, свойство α -активности с точки зрения «механизма» своей реализации совершенно одинаково, идет ли речь о естественных или об искусственных нуклидах. Свойство радиоактивности всегда естественно, ибо оно обусловлено объективными закономерностями материального мира. Правомерно выделять совокупность (множество) искусственно полученных радиоактивных нуклидов, которая в настоящее время постоянно расширяется. Термин искусственная радиоактивность общепринят, и нет нужды заменять его другим; но ошибочно и какое-либо противопоставление искусственной радиоактивности естественной.

Почти все новые разновидности свойства неустойчивости были обнаружены у синтезированных нуклидов. Исключение составляет лишь спонтанное деление, открытое в 1940 г. Г. Н. Флеровым и К. А. Петряком у природного нуклида уран-238, причем явление это было первоначально предсказано после того, как было обнаружено вынужденное деление урана под действием медленных нейтронов. Этот третий вид природной радиоактивности наиболее кардинальное, если так можно выразиться, проявление свойства неустойчивости. Однако в природе он чрезвычайно редок и экспериментально наблюдался только у названного выше нуклида. Между тем теоретически все ядра с массовыми числами более 100 принципиально способны к спонтанному делению, но величина потенциального барьера существенно мешает разлету осколков деления до $Z > 92$. Поэтому спонтанное деление присуще главным образом изотопам трансурановых элементов и становится наиболее резко выраженной разновидностью неустойчивости у нуклидов с $Z > 101$.

В самые последние годы был зафиксирован еще один, «экзотический» вид естественной радиоактивности; его мы рассмотрим далее, а пока отметим, что этот вид относится к числу предсказанных. Советский ученый Ю. А. Шуколюков в [6, 7] пришел к следующему выводу: «Наряду с двумя конкурирующими известными процессами распада тяжелых ядер — α -распадом и спонтанным делением на два тяжелых осколка — можно предположить существование и такого типа радиоактивности, когда ядра испускают частицы, промежуточные по массе между α -частицей и тяжелым осколком: ^{21}Ne , ^{22}Ne , ^{38}Ar и ^{40}Ar и др. Скорость такого радиоактивного превращения определяется проникаемостью потенциального барьера распадающегося ядра, и по величине она должна быть меньше скорости α -распада и больше скорости спонтанного деления» [7].

Эта гипотеза получила подтверждение лишь в конце 1983 г. [8]. Английские физики Х. Роуз и Дж. Джоунс экспериментально установили явление испускания нуклидом радий-223 ядер углерода-14; при этом было показано, что на одно испускание ^{14}C приходится 10^9 вылетающих α -частиц, т. е. так называемая углеродная радиоактив-

ность оказывается весьма редким видом радиоактивного распада. В упомянутой работе предсказывалась также возможность испускания таких «фрагментов», как ^{19}O , ^{25}Mg , ^{18}O , ^{15}N , ^{15}C , ^{13}C , ^{12}C и т. д., отдельными природными изотопами тория, актиния, радия и радона. С тех пор было установлено, что испускание ^{14}C имеет место для нуклидов ^{222}Ra , ^{223}Ra и ^{224}Ra , причем в результате этих радиоактивных распадов образуются стабильные изотопы свинца, соответственно ^{208}Pb , ^{209}Pb и ^{210}Pb . По существу в реализации этих типов радиоактивных превращений можно видеть своеобразный обходной путь «скорейшего» достижения нижней границы естественных радиоактивных семейств.

В 1985 г. были обнаружены очень редкие процессы испускания ядрами урана и протактиния ядер неона, что также находится в соответствии с гипотезой, высказанной Ю. А. Шуколюковым. Пока требуют дополнительного подтверждения процессы типа $^{233}\text{U} \xrightarrow{^{24}\text{Ne}} ^{209}\text{Pb}$ и $^{233}\text{U} \xrightarrow{^{25}\text{Ne}} ^{208}\text{Pb}$, однако достаточно достоверными можно считать процессы $^{232}\text{U} \xrightarrow{^{24}\text{Ne}} ^{208}\text{Pb}$ и $^{231}\text{Pa} \xrightarrow{^{24}\text{Ne}} ^{207}\text{Tl}$, причем показано, что в данных случаях на один процесс испускания ^{24}Ne приходится соответственно 10^{10} и 10^{11} случаев испускания α -частиц.

Это открытие, вообще говоря, принадлежит к числу новых «откровений» в истории учения о радиоактивности — проникновение в область новых способов реализации свойств нестабильности нуклидов. Теоретической ядерной физике еще предстоит разобраться в природе упомянутых способов радиоактивных превращений. Такая попытка предпринята, например, в работе [9]. Во всяком случае, трактовка α -распада как предельного случая сверхасимметричного деления ядер может заслуживать внимания.

Вернемся, однако, к видам радиоактивности, открытие которых оказалось связанным с изучением синтезированных нуклидов. И. и Ф. Жолио-Кюри обнаружили позитронную радиоактивность (β^+ -нестабильность), что было продемонстрировано на примере синтезированного радиоактивного нуклида ^{30}P . Все последующие разновидности до своего экспериментального обнаружения были предсказаны: 1) орбитальный захват, или ϵ -захват (предсказан в 1937 г., открыт в 1940 г.), является своеобразным свойством нестабильности, поскольку последнее реализуется не посредством испускания материальной частицы, а, напротив, путем захвата электрона ядром с ближайшей к нему оболочки; 2) протонная радиоактивность (предсказана в 1951 г., экспериментально подтверждена в 1970 г.); 3) двупротонная радиоактивность (предсказана в 1960 г., получила подтверждение в 1982 г.); 4) двойной β -распад — одновременное испускание либо двух электронов, либо двух позитронов (предсказана в 1935 г., экспериментально этот вид нестабильности пока не зафиксирован достоверно, хотя и широко принимается во внимание в некоторых теоретических построениях, например в разработке систематик нуклидов).

Присущи ли перечисленные выше разновидности свойства нестабильности каким-либо природным нуклидам? Сразу можно исключить протонную и двупротонную активности, которые свойственны весьма ограниченному числу нуклидов с большим дефицитом нейтронов в ядрах. У единичных природных нуклидов наблюдается испускание позитронов или K -захват. Уникальным примером оказывается, например, нуклид ^{40}K , который обладает и той и другой разновидностями свойства нестабильности, да к тому же он еще и β^- -активен. Что же касается не наблюдавшегося пока двойного β -распада, то в согласии с теоретическими представлениями эта разновидность нестабильности может быть присуща довольно многим природным нуклидам в широком диапазоне значений Z .

Мы можем теперь подвести краткий итог рассмотрению радиоактивности (нестабильности) как свойства.

1. В первое время после открытия радиоактивность отнюдь не трактовалась как проявление свойства нестабильности материальными структурами (атомами), а лишь как способность некоторых веществ к испусканию лучей определенного типа. Поэтому, вообще говоря, открытие свойства нестабильности фактически произошло спустя несколько лет после пионерских работ А. Беккереля и было связано с разработкой теории радиоактивных превращений и доказательством корпускулярной природы α - и β -лучей. Конкретными носителями свойства нестабильности считались так называемые ра-

диоэлементы (изотопы естественно-радиоактивных элементов) — природные радиоактивные нуклиды, сгруппированные в три радиоактивных семейства. Уже сама констатация неустойчивости как свойства заключала в себе необходимые предпосылки для изучения ее как процесса.

2. Свойство неустойчивости как целое может быть охарактеризовано как потенциальная способность нуклида с данной комбинацией Z и N к самопроизвольному превращению в нуклид с другим сочетанием протонов и нейтронов в ядрах. Эта способность может реализовываться для разных нуклидов различными способами, называемыми видами радиоактивных превращений. Отсюда следует, что общее свойство неустойчивости расщепляется на несколько разновидностей, которые, вообще говоря, имеют признаки самостоятельных свойств. В частности, наблюдается принципиальное их различие с точки зрения типов фундаментальных взаимодействий, лежащих в основе проявления тех или иных свойств неустойчивости. Так, испускание α -частиц, протонов, спонтанное деление обязаны сильному взаимодействию. В то же время первоосновой β -превращений (объединяющих β^- , β^+ -превращения и орбитальный захват), равно как 2β -превращений является слабое взаимодействие. В той или иной степени различаются непосредственные механизмы протекания этих превращений. Строго говоря, правильнее рассматривать определенный набор свойств неустойчивости, нежели одно общее свойство.

Очевидно, что детальное выявление сущности отдельных свойств неустойчивости может быть достигнуто лишь в результате изучения явления радиоактивности как процесса.

3. Число неустойчивых нуклидов, содержащихся в природе, как говорилось выше, невелико: лишь для 11 значений Z неизвестно ни одного стабильного нуклида. Однако в плане оценки сферы простирается неустойчивости в природе наши современные знания нельзя считать сколь-либо полными. Также далеко еще не познан искусственно созданный мир неустойчивых нуклидов, ибо мы даже точно не знаем границ этого мира, в основном населенного нуклидами-«призраками», чье время жизни исчисляется долями секунд. По существу для большинства искусственных нуклидов была доказана лишь возможность их синтеза в результате той или иной ядерной реакции, но они никогда не смогут быть получены, так сказать, в материальной форме. Тем не менее определение радиоактивных характеристик синтезированных нуклидов для любых возможных значений Z необходимо, если ставить в перспективе цель отыскания закономерностей свойств неустойчивости нуклидов.

4. Процесс «расщепления» свойства неустойчивости можно продолжить и дальше, приняв во внимание энергетические факторы. Например, α -активные нуклиды могут испускать отдельные группы α -частиц, различающиеся по энергиям. Однако понятие энергии распада уже целиком относится к интерпретации явления радиоактивности как процесса.

Свойство неустойчивости есть экспериментально установленное свойство. Это обстоятельство сыграло огромную роль в становлении современной атомистики. В классической атомистике один из основополагающих принципов заключался в признании абсолютной неизменности (стабильности) атомов. Наоборот, одна из загадок новейшей атомистики заключается в неопределенности оценки распространения свойства неустойчивости среди атомных структур материи (нуклидов). Кстати говоря, вместо термина атомистика в настоящее время было бы правомочнее употреблять термин нуклидистика (ведь само понятие атом архаично, ибо означает неделимый). Но мы уже подчеркивали нецелесообразность пересмотра терминов, исторически сложившихся и общепринятых [10].

Начав изучение явления радиоактивности, А. Беккерель обратил главное внимание на исследование свойств испускаемых лучей, и уже в его экспериментах содержался зародыш познания радиоактивности как процесса. Работая с препаратами урана, Беккерель сделал вывод, что излучение не ослабевает со временем, т. е. процесс испускания лучей не изменяется во времени. Такое же наблюдение было сделано и относительно тория. С другой стороны, открытие полония и радия продемонстрировало, что интенсивность излучений этих радиоактивных элементов во много раз превосходит интенсивность урановых лучей. Эти эмпирические факты приводили к предположению, что должна существовать какая-то внутренняя причина, объясняющая различие в ин-

тенсивностях излучения радиоактивных веществ. Последующие опыты привели к выводу, что излучение может и ослабевать со временем, что отмечалось для большинства открываемых радиоэлементов. Примечательной вехой в появлении новых данных стало открытие и изучение радиоэлемента UX_1 (тория-234). При отделении его от урана последний, казалось, вообще терял способность испускать лучи. Это было ошибкой, поскольку вскоре было доказано, что UX_1 постоянно накапливается в уране, иначе говоря, в результате излучения уран превращается в некое новое материальное образование. Слово «превращение» и сыграло роль своеобразной магической палочки, чтобы изучение радиоактивности как процесса в современном понимании сделалось возможным.

Здесь хотелось бы коснуться одной детали, мимо которой почему-то проходят историки учения о радиоактивности. Чистый уран по современным меркам обладает сравнительно слабой радиоактивностью (невысокой интенсивностью испускаемых лучей). Еще вопрос, удалось ли бы Беккерелю зафиксировать явление испускания неизвестных лучей урановой солью, если бы он пользовался свежеприготовленным препаратом уран-лучей химически очищенного. Скорее всего эффект, наблюдавшийся ученым, был обусловлен более активными продуктами распада урана, накопившимися в нем за время хранения двойного сульфата уранила и калия ($K_2UO_2(SO_4)_2$), хотя и содержащимися в уране в незначительных количествах. Далее, испускание β -лучей также не связано с ураном, ибо природные изотопы урана не характеризуются этим видом нестабильности. Открытие достаточно широко распространенных в земных минералах урана и тория произошло, как известно, задолго до открытия радиоактивности.

Итак, детальное изучение лучей, испускаемых радиоактивными веществами, заложило основы исследования радиоактивности как процесса. История этого исследования рассмотрена достаточно подробно [11, 12]. Поэтому мы сконцентрируем внимание на характеристике важнейших аспектов процесса радиоактивных превращений.

Этот процесс есть процесс превращения вещества. (Здесь уместно указать на недостаточность давно используемого определения химии как науки, изучающей вещества и их превращения: ведь радиоактивные превращения веществ входят в компетенцию физики.) В химии всякий процесс может быть записан в виде уравнения (или совокупности уравнений), следовательно, правомерно говорить об уравнении радиоактивного превращения. Выше уже говорилось, что еще в начале века оно рассматривалось аналогичным уравнению мономолекулярной реакции в химии, в ходе которой испытывает превращение (разложение) данное вещество (молекулы одного вида), а результирующими продуктами являються два или более простых или сложных вещества. В ходе радиоактивного распада нуклида образуются два новых материальных объекта: испускаемая частица и нуклид с иной физической и химической индивидуальностью. Химическое разложение происходит под влиянием разнообразных внешних факторов с определенной скоростью (при заданных конкретных условиях). Оно может быть ускорено (в результате повышения температуры, давления или применения катализаторов) либо соответствующими способами замедлено. Кардинальнейшая особенность мономолекулярной реакции радиоактивного превращения заключается в том, что никакие внешние воздействия не способны изменить ее скорости. Иначе говоря, неизвестны (пока) какие-либо способы воздействия на степень нестабильности нуклида, хотя отыскать подобные способы пытались на протяжении многих лет. Существуют, правда, экспериментально найденные и теоретически объясненные факты, указывающие на очень незначительное изменение скорости орбитального захвата у некоторых нуклидов в зависимости от того, содержатся ли такие нуклиды в составе простого вещества или входят в соединения. Но очевидно, эти, бесспорно, интересные данные не изменяют общей картины, тем более, что, как уже подчеркивалось, орбитальный захват по своему механизму специфичен на фоне других разновидностей свойства нестабильности у нуклидов.

Независимость процессов радиоактивных превращений от внешних условий объясняется энергетическими факторами: энергии распадов заключены в пределах от десятых долей единицы до ~ 10 Мэв; в то же время энергетика химических процессов оперирует величинами максимум порядка десятков кэв. Понятно, что энергетический уровень различных использовавшихся воздействий на радиоактивные процессы является недостаточным. Лишь ядерные реакции, осуществляемые действием высокоэнер-

гетичных частиц или нейтронов, способны вызвать изменения в ядрах. Но едва ли правомерно усматривать в этом способ воздействия на радиоактивный распад, поскольку происходит изменение структуры бомбардируемого нуклида.

Продолжим, однако, сопоставление процесса радиоактивного превращения с характером мономолекулярной химической реакции. При соответственно подобранных условиях все молекулы данного количества вещества могут разложиться в течение весьма короткого промежутка времени, причем механизм реакции заключается в разрыве химических связей между атомами элементов, образующих молекулу. С другой стороны, в наших силах сделать так, чтобы реакция разложения практически не протекала бы. Поскольку скорость радиоактивного распада не поддается регулированию, здесь дело обстоит совершенно по-иному. Пусть мы имеем некоторое множество нестабильных нуклидов с определенной комбинацией Z и N в ядрах. Каждый из них должен реализовать присущее ему свойство нестабильности. Но если мы попытались бы предсказать, какой именно нуклид претерпит радиоактивный распад в данный момент времени, то были бы обречены на неудачу. Превращение того или иного нуклида может произойти в следующее мгновение, или через день, или через десять лет. Генеральная особенность радиоактивности как процесса состоит в том, что он является статистическим вероятностным процессом. При этом распады каждого из нуклидов протекают абсолютно независимо друг от друга; распад определенного нуклида никак не влияет на превращения соседних. Конечно, существует исчезающе малая вероятность того, что все нестабильные нуклиды с данным значением Z одновременно испытают превращение. Такая ситуация вполне подходит для фантастических произведений (так, если бы в один и тот же момент испустили α -частицы все атомы урана, содержащиеся в земной коре, то выделилась бы энергия, эквивалентная энергии взрыва двух десятков миллионов ядерных бомб средней мощности...).

Вероятность радиоактивного распада, вообще говоря, определяется двумя факторами. Во-первых, она связана с массами испускаемой частицы и образующегося нуклида, а также с энергией распада; все эти параметры используются при теоретической интерпретации механизмов превращений разного типа. Во-вторых, необходимо учитывать так называемую вероятность формирования испускаемой частицы внутри самого нестабильного ядра. Этот фактор имеет более сложную природу, и проведенные количественные расчеты не могут претендовать на высокую достоверность. Но ведь процесс этого формирования является своего рода первичным актом в общем процессе радиоактивного превращения. Пожалуй, не будет преувеличением заметить, что само свойство нестабильности представляет из себя некую функцию вероятности такой перегруппировки в структуре ядра, которая приводит к формированию в нем «фрагмента», выступающего впоследствии в качестве испускаемой частицы. Такого рода соображение, конечно, не может быть отнесено ко всем известным ныне разновидностям свойства нестабильности, но в отношении α -распада, испускания частиц, подобных ^{14}C , а также двупротонной активности оно должно приниматься во внимание.

Процесс радиоактивного превращения необратим, во всяком случае, когда речь идет о распаде природных нуклидов (о естественных ядерных реакциях). Напротив, мономолекулярная химическая реакция, достигнув состояния равновесия, становится обратимой (когда для этого имеются соответствующие условия). Однако понятие радиоактивного равновесия существует. В частности, это равновесие имеет место в природных радиоактивных семействах между генетически связанными, входящими в них нуклидами.

Процесс радиоактивного превращения нуклидов, естественно, требует определенных количественных характеристик. Одной из них, как уже отмечалось, является энергия распада, для различных нуклидов колеблющаяся в широком диапазоне значений. Кроме того, «мономолекулярная» реакция распада характеризуется и определенной скоростью, однако она трактуется несколько иначе, чем в химии. По существу это число нуклидов, распадающихся в единицу времени. Обычно для обозначения скорости радиоактивного превращения употребляют термин «активность», который фактически адекватен термину «степень нестабильности». Скорость (активность) пропорциональна числу имеющихся в наличии нуклидов. Из этого и исходили в 1903 г. Э. Резерфорд и Ф. Содди, когда они впервые применили математический аппарат для описания процесса радиоактивных превращений. Простое дифференциальное уравнение —

$dN/dt = \lambda N$ (в нем N — число нуклидов, λ — так называемая константа радиоактивного распада) является для описания явления радиоактивности столь же фундаментальным, как и уравнение Шрёдингера для квантовой механики. В нем уже заложена оценка радиоактивности как вероятностного процесса, ибо λ характеризует вероятность распада отдельного нуклида за единицу времени. Фундаментальные следствия вытекают из решения этого уравнения: уменьшение со временем числа нуклидов (среднего) и скорости их распада подчиняется экспоненциальному закону: $N = N_0 e^{-\lambda t}$ и $A = A_0 e^{-\lambda t}$ (N_0 и A_0 соответственно число нуклидов и активность в начальный момент времени $t=0$). Однако основными параметрами, которые характеризуют радиоактивные нуклиды, являются средние времена их жизни $\tau = 1/\lambda$ и периоды полураспада $T_{1/2}$; под $T_{1/2}$, как хорошо известно, подразумевается время, за которое начальное число радиоактивных нуклидов уменьшается в 2 раза.

Введение понятия о периоде полураспада (в общей форме оно было применено Э. Резерфордом в 1904 г., хотя для частного случая рассматривалось им еще в 1900 г.) сыграло огромную роль в развитии учения о радиоактивности; теоретическое и практическое значение этой константы можно сравнить с тем значением, которое сыграло в свое время в атомистике введение понятия атомного веса элемента. Период полураспада — это своеобразная ось, вокруг которой раскручиваются представления о нестабильности нуклидов. Разброс его величин чрезвычайно широк. Например, для нуклидов, входящих в радиоактивные семейства, значения $T_{1/2}$ изменяются от $1,39 \cdot 10^{10}$ лет у тория-232 до $3,03 \cdot 10^{-7}$ с у полония-212. Подавляющее большинство синтезированных нуклидов характеризуется низкими $T_{1/2}$, порядка секунд и долей секунды. Каких-либо количественных закономерностей изменения $T_{1/2}$ для нуклидов с определенными значениями Z не установлено (исключая известный закон Гейгера — Нэттола, устанавливающий зависимость между энергиями α -частиц и периодами полураспада α -активных ядер).

Синтезы новых радиоактивных нуклидов (мы не будем рассматривать так называемую гипотезу об островках относительной стабильности нуклидов в областях некоторых больших значений Z) по существу означают проникновение в те регионы «океана нестабильности», где нуклиды отличаются либо избытком, либо дефицитом нейтронов (для данного Z). В обоих случаях степень нестабильности будет возрастать, а следовательно, исследователям придется иметь дело все с более низкими значениями $T_{1/2}$. Предел возможности современной техники измерений времен жизни лежит в области $> 10^{-11}$ с. Поэтому существенную важность приобретает вопрос об установлении некоего критерия минимальной длительности радиоактивного превращения. Этот вопрос важен еще и потому, что, как оказывается, понятие нестабильности, обсуждавшееся выше, требует некоторого уточнения.

Механизм процесса, протекающего при осуществлении искусственной ядерной реакции, объясняется так. Бомбардирующая частица, сталкиваясь с ядром, сливается с ним, причем образуется составное ядро («компаунд-ядро») в возбужденном состоянии. Это возбуждение снимается либо испусканием γ -кванта [ядерные реакции (m, γ) , где m — бомбардирующая частица], либо какой-либо материальной частицы. Таким образом, всякое «компаунд-ядро» оказывается наделенным свойством нестабильности, которое, вообще говоря, реализуется тем же способом, как и у «обычных» радиоактивных нуклидов. Если это так, то рамки понятия «нестабильность нуклидов» существенно расширяются, и под иным углом зрения можно было бы оценивать некоторые исторические события. Например, открытие протонной радиоактивности следовало бы отнести ко времени работ Э. Марсдена и В. Лентсберри (1914—1915 гг.). В экспериментах этих ученых (бомбардировка воздуха α -частицами) наблюдались длиннопробежные Н-частицы (т. е. протоны), что позволило им выдвинуть гипотезу о существовании Н-радиоактивности — испускания ионов водорода радиоэлементами наряду с α -частицами. Стремление подтвердить или опровергнуть эту гипотезу и привело в 1919 г. Э. Резерфорда к осуществлению первой реакции искусственного превращения ядер: $N(\alpha, p)O$, истинный механизм которой был выяснен в 1925 г. П. Блекеттом. Протоны действительно испускались, но в качестве продукта искусственной ядерной реакции.

В соответствии с общепринятой ныне точкой зрения нестабильность «компаунд-ядра» не может рассматриваться как свойство радиоактивности. Истинно радиоактив-

ными следует считать те нуклиды, которые распадаются за время, существенно превосходящее времена жизни составных ядер, образующихся в ядерных реакциях (среднее время жизни последних оценивается величинами порядка 10^{-13} — 10^{-14} с). Однако при подобном подходе понятие нестабильности применительно к ядерным структурам материи оказывается более широким по содержанию, чем понятие радиоактивности.

Учение о радиоактивности накопило к настоящему времени огромный фактический материал, который в той или иной степени теоретически осмыслен. Однако центр тяжести исследований феномена радиоактивности ныне сместился в сторону практического применения достигнутых результатов. Но, как и в любой другой области знания, на пути дальнейшего познания радиоактивности предстоят неожиданные и существенные открытия. Двудеиное представление о явлении радиоактивности — как свойстве и как процессе — дает, на наш взгляд, необходимую методологическую основу для дальнейшего углубления и расширения его понимания.

Такое понимание неизбежно должно быть связано с еще более глубоким проникновением в тончайшие детали ядерных структур и закономерностей, обуславливающих само их существование и проявление ими различных свойств. Между тем особенность современного исторического момента состоит в том, что хотя «физики... сумели разглядеть детали самих внутриядерных частиц, перейдя на более глубокий — кварковый — уровень», изучение собственно структуры ядра «ушло с переднего фронта как бы в арьергард исследований» [9, с. 211]. Однако это не означает, что физика ядра изучалась в последние десятилетия менее интенсивно, чем раньше; достигнутые успехи достаточно впечатляющи. По словам авторов статьи [9], «по новому ставится теперь школьный вопрос: „Из чего состоят ядра?“. Кроме основной при низких энергиях нуклонной компоненты волновой функции ядра эксперименты дают информацию о других компонентах: кластерной, мезонной, изобарной, странной, очарованной и, наконец, кварковой» [9, с. 211]. Короче говоря, чисто «нуклонная» трактовка природы и механизма проявления свойства нестабильности в конечном итоге может оказаться лишь своего рода наглядным приближением к истине.

Литература

1. Curie P., Curie-Skłodowska M., Bémont G. Compt. Rend., 1898, v. 127, p. 1215—1217.
2. Погодин С. А., Либман Э. П. Как добыли советский радий. Изд. 2-е. М., 1977.
3. Гольданский В. И. Радиоактивность.— В кн.: Краткая химическая энциклопедия. Т. 4. М., 1965, с. 453.
4. Kohman T. Proposed new word, Nuclide.— Amer. J. Phys. 1947, v. 15, p. 356.
5. Фридлендер Г., Кеннеди Дж., Миллер Дж. Ядерная химия и радиохимия. М., 1967, с. 55.
6. Шуколюков Ю. А. и др. Изучение кинетики выделения изотопов аргона из уранитов в связи с проблемой происхождения ^{38}Ar .— Геохимия, 1966, № 8, с. 923—925.
7. Шуколюков Ю. А. Деление ядер урана в природе. М., 1970. 270 с.
8. Rose H., Jones G. Nature, 1984, v. 307, p. 245—247.
9. Беляев С. Т., Зелевинский В. Г. Нильс Бор и физика атомного ядра.— Успехи физ. наук, 1985, т. 147, вып. 2.
10. Трифонов Д. Н. Возникновение и развитие современной атомистики.— В кн.: Физика XX века. Развитие и перспективы. М., 1984, с. 93—135.
11. Вьяльцев А. Н., Кривомазов А. Н., Трифонов Д. Н. Правило сдвига и явление изотопии. М., 1976.
12. Трифонов Д. Н., Кривомазов А. Н., Лисневский Ю. И. Химические элементы и нуклиды. М., 1980.

К ВОПРОСУ О СОПРОТИВЛЕНИИ НОВОВВЕДЕНИЯМ В НАУКЕ: ИСТОРИЯ ВОСПРИЯТИЯ ХРОМАТОГРАФИЧЕСКОГО МЕТОДА М. С. ЦВЕТА

С. Г. КАРА-МУРЗА

Ни одно другое открытие не оказало столь огромного влияния и так не расширило горизонты исследования химика-органика, как хроматографический адсорбционный анализ Цвета.

П. Карпер

В этих словах, сказанных выдающимся химиком XX в. в 1947 г. на конгрессе ИЮПАК [1, с. 498], дана оценка метода, который не только стал одним из краеугольных камней современной методологической основы научных дисциплин, изучающих вещество, но и оказал огромное влияние на формирование современного стиля мышления естествоиспытателя. Труд М. С. Цвета представляет собой уникальный объект для изучения структуры процесса инновации в самой науке. В истории восприятия научным сообществом начала XX в. хроматографического метода Цвета отразился, как в капле воды, весь комплекс синергически взаимодействующих мотивов активного сопротивления кардинальным научным и техническим нововведениям.

Распространение нового научного метода как специфический случай научно-технического нововведения

Быстрый прогресс познавательных возможностей науки сделал актуальной проблему выявления закономерностей процесса ассимиляции научных достижений в общественной практике. Изучение инновационного процесса в самых разных сферах (материальном производстве, управлении, образовании, медицине и т. д.) стало важной междисциплинарной областью общественных наук.

Наука является важной областью продуктивной человеческой деятельности. Знание закономерностей обновления познавательных средств, процесса научно-технического нововведения в самой науке приобретает не только методологическое, но и все большее прикладное значение. Однако исследование этих закономерностей выходит, на наш взгляд, далеко за рамки интересов лишь «науки о науке». Процесс распространения новых технологий научных исследований (в частности, научных методов) может стать прекрасным объектом для исследования общих проблем технического нововведения.

Прежде всего достоинством этого объекта является существование в науке большого числа индивидуальных «производителей», осваивающих новую технологию. Это позволяет получать количественные данные, поддающиеся статистической обработке. Например, в промышленности сравнительно небольшое число предприятий в отдельной отрасли затрудняет использование методов статистики при изучении динамики распространения нововведений. Получение информации об используемой на том или ином предприятии технологии часто сопряжено со значительными трудностями. В науке же издавна существует строгая норма: подробно описывать в публикации все использованные в работе методы и приборы. Вследствие этого точная информация о движении новой технологии исследований хранится в архивах науки, доступных историку. Это позволяет поставить на прочную эмпирическую базу исторический анализ распространения конкретного нововведения в той или иной области науки, в той или иной стране [2—4].

Наконец, нововведение в самой исследовательской лаборатории является особенно «чистой» моделью, так как в ней устранено стереотипное представление о распределении «ролей» в этом процессе. Стало привычным представление, что в технологическом нововведении производство является традиционно консервативной стороной, а ученому имманентно присуща новаторская установка. В науке же «производственником», внедряющим у себя новую технологию, является сам ученый, и возникающие при этом кол-