

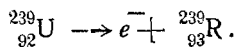
УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ИСКУССТВЕННОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР

Э. В. Шпольский, Москва

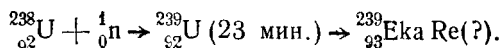
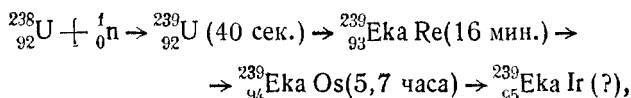
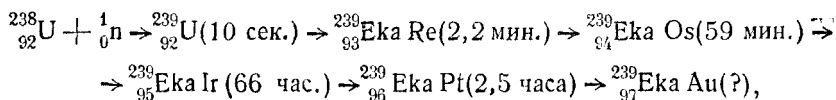
Последние месяцы 1938 г. и первые недели 1939 г. ознаменовались открытием, которое по своему значению может быть поставлено рядом с самыми важными открытиями, когда-либо сделанными в области физики. Именно, работами ряда физиков и химиков, особенно О. Гана, Л. Мейтнер и Штрассмана, было показано, что наряду с известными видами искусственных и естественных преобразований атомных ядер, при которых выбрасываются частицы с одним или двумя элементарными зарядами, существует еще один тип искусственных преобразований, сопровождающийся раздроблением тяжелого ядра приблизительно пополам и освобождением огромных количеств энергии.

Начало этим замечательным работам было положено открытием так называемых «транс-урановых элементов». В 1934 г. Ферми, Разетти и Д'Агостино¹ показали, что при обстреливании урана нейтронами возникает искусственно-радиоактивное ядро с периодом полураспада в 13 мин., которое по своим химическим свойствам аналогично элементам VII группы периодической системы — рению и марганцу. Так как возможность возникновения из урана ($Z = 92$) ядра с атомным номером 75 Re или 25 Mn в то время казалась исключенной, то было предположено, что при захвате ураном нейтрона возникает изотоп урана ${}^{239}_{92}\text{U}$, который путем β -превращения переходит в элемент с атомным номером 93:



Ядро ${}^{239}_{93}\text{R}$, ближайшим аналогом которого является рений, по установившемуся обычаю может быть названо «эка-реннием». Детальный анализ* продуктов, возникающих при бомбардировке урана нейтронами, выполненный Л. Мейтнер, Ганом и Штрассманом, показал, что в действительности получается большое количество пе-

риодов, которые Мейтнер, Ган и Штрассман интерпретировали следующим образом²:



Таким образом предполагалось, что при бомбардировке урана нейтронами возможно возникновение трех изомерных изотопов урана³, которые путем ряда β -превращений дают начало транс-урановым элементам с атомными номерами вплоть до 97.

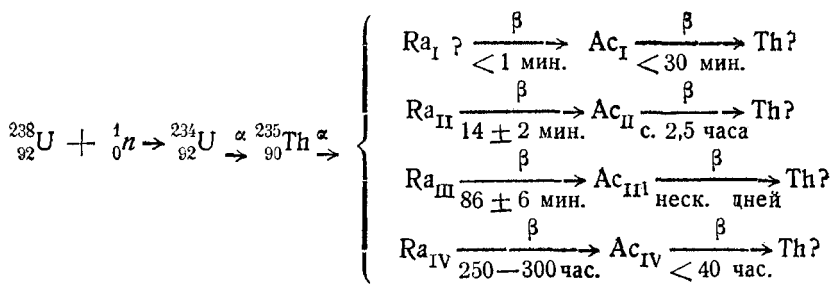
В 1937 г. Ирен Кюри и П. Савич⁴ открыли новое вещество, возникающее при облучении урана нейтронами и обладающее неизвестным до того периодом полураспада в 3,5 часа. Идентификация этого вещества оказалась, однако, затруднительной. Так как во всех известных до того типах преобразований выбрасывались частицы с одним или двумя элементарными зарядами, то обычно предполагалось, что вновь найденное вещество является либо изотопом исходного вещества, либо расположено в периодической системе где-нибудь вблизи от него. Так например, если оказывалось, что новое вещество, полученное из урана, при химических реакциях ведет себя как осмий ($Z=76$), то ему приписывался атомный номер 94, а не 76, если вещество химически реагировало как платина ($Z=78$), то ему приписывался атомный номер 96, а не 78 (см. табл. 1, на которой приведены 3 последних ряда периодической системы). Однако результаты изучения химического поведения нового вещества с периодом 3,5^h, опубликованные Кюри и Савичем в конце 1938 г., показали, что его невозможно отождествить ни с одним из близких к урану элементов. Можно было установить — и это чрезвычайно важно, что новое вещество химически ведет себя как лантан ($Z=57$), но так как оно, с другой стороны, превосходно отделяется от актиния ($Z=89$), то его

ТАБЛИЦА 1

Период	Группа I	Группа II	Группа III	Группа IV	Группа V	Группа VI	Группа VII	Группа VIII
VI	55Cs 132,81 79Au 197,2	56Ba 137,36 80Hg 200,61	57—71 Редкие земли 81Tl 204,39	72Hf 178,6 82Pb 207,21	73Ta 181,5 83Bi 209,0	74W 184,0 84Po (210,0)	75Re (188,7) 85—	76Os, 77Ir, 78Pt 190,9 193,1 195,23 87Em 223
VII	87—	88Ra 225,97	89Ac (227)	90Th 232,12	91Pa (231)	92U 238,14	93Eka-Re	94Eka Os, 95Eka Ir, 96Eka Pt

нельзя было отождествить с последним (табл. 1). В конце концов, Кюри и Савич не смогли установить химическую природу открытого ими вещества $R^{3,5}$.

Ган и Штрассман⁵ также получили это вещество и подвергли его самому детальному изучению, в результате которого они предложили гипотетическую схему сложных преобразований, возникающих при бомбардировке урана нейтронами. Согласно этой схеме при захвате нейтрона ураном $^{238}_{92}\text{U}$ возникает изотоп урана $^{239}_{92}\text{U}$, который путем двух α -превращений через торий дает четыре изомерных изотопа радия; последние же двумя последовательными β -превращениями дают четыре изомера актиния и четыре изомера тория. Всю предложенную Ганом и Штрассманом схему удобно проследить по прилагаемой табличке:



Что касается вещества, открытого Кюри и Савичем, то Ган и Штрассман предположили, что оно в действительности является смесью всех этих изотопов. Желая установить химическую природу этих веществ, Ган и Штрассман подвергли их чрезвычайно тонкому химическому изучению. Прежде всего они занялись гипотетическими четырьмя изотопами радия. Разделив свою смесь, они попытались концентрировать эти изотопы, отделив их от солей бария, путем дробной кристаллизации, — как это обычно делается при концентрации радия из солей, содержащих барий. Однако эта попытка не удалась. Контрольные же опыты с отделением таким путем от бария изотопов радия, тория X и мезотория I, показали, что эти вещества ведут себя, как и следовало ожидать, т. е. при дробной кристаллизации они отделяются от бария. Напротив, из смеси, где находились вместе с Ba мезоторий I и гипотетический Ra_{IV} , удавалось концентрировать только MsTh_I , тогда как Ra_{IV} оставался вместе с барием. Отсюда Ган и Штрассман заключили, что вещества, которые они считали изотопами радия, на самом деле обладают свойствами бария. Далее, Ган и Штрассман показали, что их гипотетический Ac_{II} в действительности не является изотопом актиния, так как при фракционировании смеси Ac_{II} с мезоторием II (изотоп актиния) и оксалатом лантана из азотной кислоты концентрируется только MsTh_{II} , тогда как Ac_{II} остается вместе с лантаном. Это, впрочем, только подтверждало результат, ранее найденный Кюри и Савичем. Отсюда можно было сделать заключение, что

вещества, принятые за актиний, являются на самом деле изотопами лантана. Вполне возможно также, что и третья группа изотопов, которую предварительно отождествляли с торием, на самом деле тождественна с церием ($Z = 58$). В окончательном результате из опытов Гана и Штрассмана можно было с полной определенностью заключить о существовании еще одного типа ядерных превращений, при которых от тяжелого ядра «отщепляется» приблизительно половина его¹⁾. Если подобное расщепление ядра на равные части происходит на самом деле, то эти «обломки» должны разлетаться в виде частиц, обладающих огромной энергией. На основании теоретических соображений Фриша и Мейтнер⁶ общее количество энергии, выделяемое в каждом элементарном акте, подсчитанное по дефекту массы и по отталкиванию, должно составлять около $2 \cdot 10^8$ eV, поэтому каждая из получающихся частиц должна нести энергию около 100 MeV ($1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$). На поиски таких частиц и было направлено внимание экспериментаторов. Доказательство их существования было получено с поразительной быстротой в различных местах Европы и Америки. Стоит привести несколько дат для того, чтобы охарактеризовать этот необычайный темп. Сообщение Гана и Штрассмана¹² было опубликовано в *Naturwissenschaften* 6 января; 16 января О. Фришем из Копенгагена было направлено в *Nature* сообщение об опытах⁷, подтверждающих «деление» ядра (опубликовано 18 февраля). 26 января в Вашингтоне открылась конференция по теоретической физике с участием Н. Бора и Э. Ферми, и на первом же заседании открытие Гана и Штрассмана подверглось оживленному обсуждению, но результаты экспериментальной работы Фриша в Америке, повидимому, не были известны. К концу конференции, 28 января, Гафстадт, Робертс и Мейер⁸ из Института Карнеги в Вашингтоне уже могли продемонстрировать Бору и Ферми появление частиц с огромной энергией в результате бомбардировки урана нейтронами. Оказалось, однако, что те же частицы совершенно независимо наблюдались в Америке еще в двух местах, именно 26 января Фаулером и Додсоном⁹ в университете имени Джона Гопкинса в Балтиморе (сообщение об этом по кабелю было послано Фаулером и Додсоном в *Nature* и опубликовано 11 февраля) и Дэннингом с сотрудниками в Колумбийском университете. В номере *Physical Review* от 15 февраля опубликовано подряд четыре сообщения разных авторов из различных лабораторий Америки, подтверждающих открытие Гана — Мейтнер — Штрассмана — Фриша. Один и тот же метод, которым пользовались все экспериментаторы, заключался в следующем. Стенки или коллектор малой ионизационной камеры, соединенной с линейным усилителем, покрывались окисью урана. Если расположить на некотором расстоянии (1—5 см) от камеры источник нейтронов (бериллий + радон в опытах Фриша), то

¹⁾ Впоследствии оказалось, что продукты этого разделения могут быть весьма разнообразными^{13—15}. Так, удалось показать, что, помимо бария и лантана, возникают стронций, иттрий, цезий, йод, а также криптон и ксенон.

10—30 раз в 1 мин. наблюдаются сильнейшие ионизационные толчки. Масса обломков ядра урана должна быть равна 100—150, эффективный заряд, по подсчету Фриша, 40—50 и энергия до 100 MeV; несмотря на эту огромную энергию, их пробег должен составлять всего несколько миллиметров воздуха, так как вследствие большой величины своего эффективного заряда эти частицы должны вызывать чрезвычайно интенсивную ионизацию (по приблизительному подсчету каждая частица должна создавать около $3 \cdot 10^6$ пар ионов). В опытах Фриша тиратрон «открывал» схему усилителя только в том случае, когда ионизационный толчок создавался по меньшей мере $5 \cdot 10^5$ пар ионов. Таким образом усилитель не реагировал на ионизацию, создаваемую α -частицами или нейтронами. Контрольные опыты показали, что в действительности толчки не наблюдаются, когда отсутствует либо уран, либо источник нейтронов. Если окружить источник нейтронов слоем парафина, то число ионизационных толчков возрастает вдвое, откуда следует, что в процессе раздробления ядра урана существенную роль играют медленные нейтроны. В опытах Робертса, Мейера и Гафстада использовались нейтроны с различной величиной максимальной скорости, получавшиеся при различных нейтронных реакциях ($\text{Li} + \text{D} \rightarrow 13,5 \text{ MeV}$, $\text{D} + \text{D} \rightarrow 2,5 \text{ MeV}$, $\text{C} + \text{D} \rightarrow 0,5 \text{ MeV}$), и медленные нейтроны отфильтровывались кадмием. Оказалось, что для нейтронов с максимальной энергией в 0,5 MeV введение кадмия уменьшало эффект на 90%, тогда как для нейтронов с максимальной энергией в 2,5 MeV и выше — только на 30%.

Опыты с торием у всех экспериментаторов дали тот же эффект, что и опыты с ураном; только медленные нейтроны не играют в случае тория никакой роли. Опыты с висмутом, свинцом, таллием, ртутью, золотом, платиной, вольфрамом, оловом и серебром дали отрицательный результат⁹.

Другой способ экспериментальной проверки разделения ядра урана, одновременно осуществленный Жолио и Мейтнер и Фришем, заключается в следующем. Ядра, получающиеся в результате разделения, обладают ненормальным избытком числа нейтронов над числом протонов. Нейтроны последовательно превращаются в протоны, вследствие чего получается цепь радиоактивных β -превращений. На самом деле продукты разделения тяжелых ядер всегда оказываются β -активными. Так как эти «обломки», кроме того, обладают большой кинетической энергией, то представляется возможным собрать их на какой-нибудь поверхности и изучить спадание их активности. Подобный опыт был осуществлен Жолио следующим способом¹⁰. Внутри латунного цилиндра, снаружи покрытого окисью урана, помещался источник нейтронов ($\text{Ra} + \text{Be}$). Латунный цилиндр в свою очередь располагался коаксиально внутри бакелитового цилиндра так, что зазор между обоими цилиндрами составлял около 3 мм. По истечении некоторого промежутка времени бакелитовый цилиндр снимался и внутрь его

⁹) В случае таллия Жолио наблюдал слабо-положительный эффект.

помещался счетчик Гейгера-Мюллера, который обнаруживал наведенную активность бакелитового цилиндра, спадающую определенным образом. Аналогичный опыт был произведен Мейтнер и Фришем.

С теоретической точки зрения раскалывание тяжелых ядер пополам на первый взгляд представляется загадочным. Действительно, обычно вылет заряженных частиц из ядра рассматривался как прохождение сквозь потенциальный барьер. Однако прохождение сквозь барьер очень тяжелой частицы или последовательное прохождение в течение короткого промежутка времени большого числа частиц есть событие в высшей степени маловероятное. Л. Мейтнер и О. Фриш, основываясь на идеях Бора, впервые указали на то, что вновь открытое явление может быть объяснено классически по аналогии с делением заряженной капли. Это объяснение было затем уточнено Бором, и существенные черты его заключаются в следующем. Так как ядро состоит из большого числа очень тесно

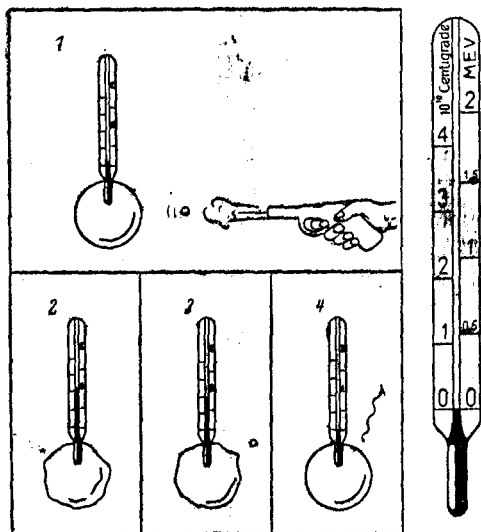


Рис. 1

расположенных частиц, связанных огромными силами, то оно может быть уподоблено твердому телу или жидкости. Распад ядра под действием налетающей частицы следует поэтому рассматривать как процесс, протекающий в две стадии, разделенные относительно значительным промежутком времени. В первой стадии частица, попадающая извне в ядро, отдает значительную часть своей энергии частицам, образующим ядро, и эта энергия распределяется между многими степенями свободы. В результате получается более сложное ядро, в котором избыток энергии распределяется между его составными частями, приходящими в оживленное движение, напоминающее тепловые движения в твердом теле или в жидкости. Это квази-термическое движение может продолжаться очень долго, — до тех пор, пока энергия возбуждения не будет отдана в виде электромагнитного излучения (испускание γ -лучей). Может, однако, случиться, что при флуктуациях энергии какая-нибудь частица, расположенная на поверхности ядра, получит избыток энергии, достаточный для того, чтобы вырваться за пределы ядра. В таком случае эта частица (нейтрон, протон или α -частица) будет выброшена из ядра, а остаток энергии возбуждения — испущен в виде γ -кванта.

Эта картина хорошо иллюстрируется наглядным рисунком Бора, который мы воспроизводим здесь для удобства читателей (рис. 1). До соударения ядро изображается в виде симметричной сферы (рис. 1,1), а температура его, измеряемая воображаемым термометром с подходящими для этого случая делениями шкалы (10^{10} градусов Цельсия или миллионы электрон-вольт), равна нулю. После того, как в ядро попадает нейтрон с энергией около 10 MeV, температура ядра поднимается приблизительно до 18 MeV (рис. 1,2), и сильнейшие термические движения сказываются в деформациях поверхности ядра. В следующей стадии с поверхности ядра вылетает частица (нейтрон) и температура несколько падает (рис. 1,3), наконец, в последней стадии (рис. 1,4) остаток энергии возбуждения излучается в виде γ -кванта, температура падает до нуля и ядро вновь принимает симметричную форму. Я. И. Френкель впервые указал на то, что такого рода выбрасывание частицы из ядра очень напоминает испарение молекулы с поверхности жидкой капли. Эта аналогия, развитая дальше В. Вейскопфом и Н. Бором, оказалась очень полезной для истолкования механизма ядерных реакций.

Для случая разделения тяжелого ядра пополам Мейтнер и Фриш указали другую классическую аналогию. Так как ядро можно уподобить жидкой капле, то квазитермические движения, возникающие при попадании в ядро нейтрона, ведут к деформациям поверхности ядра (рис. 1, 2). Эти деформации в конце концов могут привести к тому, что ядро разделится на части, подобно тому как делится капля. В случае ядра разделению способствуют огромные силы отталкивания, возникающие между одноименно заряженными его частями. Так как эффективные поперечные сечения для подобного рода процессов деления ядра для нейтронов различных скоростей того же порядка величины, что и для обычных ядерных реакций, то отсюда можно заключить, что энергия этих деформаций, ведущих к разделению ядра, — того же порядка величины, что и энергия, необходимая для выбрасывания из него одной частицы. Что для рассмотрения этой ядерной задачи можно воспользоваться чисто классическими методами, по Бору, вытекает из следующего соображения. Очевидно, что деформации, ведущие к разделению тяжелого ядра, должны быть велики по сравнению с амплитудами квантово-механических «нулевых» колебаний невозбужденного ядра, так как иначе невозможно было бы понять устойчивость тяжелых ядер в нормальном состоянии.

В заключение следует вернуться к вопросу о существовании «транс-урановых элементов». После опытов Гана и Штрассмана естественно возникло сомнение в реальности этих элементов. На самом деле, в настоящее время можно считать доказанным, что все периоды, которые приписывались элементам с атомным номером, большим 92, на самом деле принадлежат «обломкам» тяжелых ядер. Л. Мейтнер и О. Фриш произвели специальный опыт¹¹, в котором бомбардируемый слой урана располагался вблизи от поверхности воды и продукты разделения ядра урана попадали в воду, где они и подвергались дальнейшему исследованию. Оказалось,

что таким путем может быть воспроизведена кривая активности, соответствующая «транс-урановым» элементам, что и подтверждает указанный выше вывод.

ЛИТЕРАТУРА

1. Э. Ферми, Э. Амальди, О. Д'Агостино, Ф. Разетти и Э. Сегрэ, Успехи физич. наук, 14, 933, 1934.
 2. L. Meitner, O. Hahn u. F. Strassmann, Z. Physik, **106**, 249, 1937; Ann. d. Physik, **28**, 246, 1937; Ber., **69**, 905, 1936; **70**, 1374, 1937.
 3. Н. Дмитриев, Успехи физич. наук, **19**, 535, 1938; **21**, 60, 1939.
 4. Irène Curie et P. Savitsch, J. Phys. et Radium, **7**, 385, 1937; **9**, 355, 1938.
 5. O. Hahn u. F. Strassmann, Naturwiss., **27**, 11, 1939.
 6. L. Meitner a. O. Frisch, Nature, **143**, 239, 1939.
 7. O. Frisch, Nature, **143**, 276, 1939.
 8. Hafstadt, Roberts a. Meyer, Phys. Rev., 1939.
 9. Fowler a. Dodson, Phys. Rev., 1939.
 10. F. Joliot, C. R., **208**, 341, 1939; J. Physique, **10**, 159, 1939.
 11. L. Meitner a. O. Frisch, Nature, **143**, 470, 1939.
 12. O. Hahn u. F. Strassmann, Naturwiss., **27**, 89, 163, 1939.
 13. F. A. Heyn, A. H. W. Atten jun, C. I. Bakker, Nature, **143**, 616, 1939.
 14. P. Abelson, Phys. Rev., **55**, 418, 1939.
 15. N. Feather a. E. Bretscher, Nature, **143**, 516, 1939.
 16. N. Bohr, Nature, **143**, 330, 1939.
 17. Н. Бор, Успехи физич. наук, **18**, 337, 1937.
-