

Таблица 15

Запаздывающие нейтроны

Период полураспада, с	Выход, % (к общему числу вторичных нейтронов)	Кинетическая энергия запаздывающих нейтронов, МэВ
55,7	0,021	0,25
22,7	0,140	0,56
6,2	0,125	0,43
2,3	0,253	0,62
0,6	0,074	0,42
0,2	0,027	—
Средние	8,97	0,64
		0,508

нейтроны играют важную роль в ядерной энергетике — они позволяют сделать управляемыми ядерные реакции, происходящие при делении в ядерных реакторах (см. § 95, пункт 5).

12. В заключение приведем более точное примерное распределение энергии деления между различными способами ее освобождения при делении ^{235}U тепловыми нейtronами:

кинетическая энергия осколков	$166,2 \pm 1,3$ МэВ
энергия нейтронов деления	$4,8 \pm 0,4$ МэВ
энергия мгновенных γ -квантов	$8,0 \pm 0,8$ МэВ
энергия β -частиц продуктов деления	$7,0 \pm 0,3$ МэВ
энергия γ -излучения продуктов деления	$7,2 \pm 1,1$ МэВ
энергия антинейтрино продуктов деления	$9,6 \pm 0,5$ МэВ
Всего	$202,8 \pm 0,4$ МэВ

§ 94. Трансурановые элементы

1. Причину, по которой периодическая система химических элементов, встречающихся в природе в естественном состоянии, обрывается на уране ^{92}U , надо искать в происхождении химических элементов и их последующих радиоактивных превращениях. В настоящее время можно считать доказанным, что все химические элементы Солнечной системы образовались свыше 5 млрд лет назад в результате гравитационного скатия огромных масс галактического водорода, при котором сильно повысилась его температура. Чрезвычайно высокая температура и обеспечила синтез сложных ядер из более простых ядер водорода. При этом были синтезированы и многочисленные изотопы химических элементов с атомными номерами больше 92. Однако период их полураспада оказался значительно меньше времени существования Земли (около $4,5 \cdot 10^9$ лет). К настоящему времени все эти изотопы из-за радиоактивных превращений полностью распались и исчезли на Земле (см. пункт 10). Самым тяжелым из сохра-

лившихся оказался изотоп урана ^{238}U , период полураспада которого ($4,5 \cdot 10^9$ лет) того же порядка, что и возраст Земли.

2. Истинные границы периодической системы, за которыми существование более тяжелых элементов невозможно,казалось бы, должны определяться нестабильностью электронной оболочки атома. Дело в том, что самый глубокий электрон атомной оболочки не может приблизиться к центру ядра на расстояние, меньшее радиуса последнего. Такой электрон был бы сразу поглощен ядром, что привело бы к уменьшению атомного номера элемента. Расстояние самого глубокого электрона атомной оболочки до центра атомного ядра с зарядовым числом Z по теории Бора равно r_B/Z , где r_B — боровский радиус. Радиус самого ядра определяется формулой (65.1). Таким образом, для возможности существования атома, во всяком случае, необходимо выполнение условия $r_B/Z \geq r_0 A^{1/3}$, или

$$ZA^{1/3} \leq r_B/r_0 \approx 38\,000. \quad (94.1)$$

Исключение Z с помощью соотношения (64.8а) приводит к неравенству

$$\frac{A^{4/3}}{1,97 + 0,015A^{2/3}} \leq 38\,000. \quad (94.1a)$$

Решение этого неравенства сводится к решению квадратного уравнения относительно $A^{2/3}$. В результате получается $A \leq 17\,700$, следовательно, $Z \leq 1460$. Итак, совершенно невозможно существование атомов с порядковым числом $Z \geq 1460$.

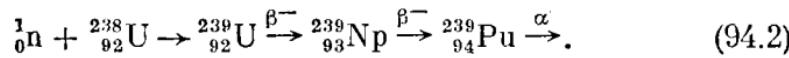
Приведенная оценка дает слишком завышенное значение для верхней границы Z . Она, в сущности, основана на безусловно верном утверждении, что атом не может существовать, если ближайший к ядру электрон находится на уровне, с которого практически мгновенно происходит электронный захват, в результате которого зарядовое число Z (равное порядковому номеру элемента) уменьшается на единицу. А такой захват (из-за туннельного эффекта) с большой вероятностью происходит не только с расстояния до центра ядра, равного его радиусу, но и с расстояний, значительно больших. Поэтому стабильность электронной оболочки атома должна нарушаться уже при Z , значительно меньших найденного выше значения. Более подробное рассмотрение показывает, что такое нарушение должно начинаться при $Z = 180 - 200$. И все же периодическая система элементов обрывается еще раньше. Ее верхняя граница связана не с неустойчивостью электронной оболочки, а определяется *неустойчивостью самого ядра*.

3. Элементы с атомными номерами больше 92, как уже указывалось, называются *трансурановыми* («заурановыми») или, короче, *трансуранами*. Все они получаются искусственно, т. е. в результате различных ядерных реакций, в которых тот или

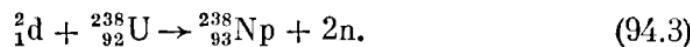
иной (тяжелый) элемент подвергается облучению или бомбардировке различными ядерными частицами. Наиболее важными из них являются нейтроны, поскольку они лишены электрического заряда и, следовательно, им не требуется преодолевать кулоновский потенциальный барьер. Но и заряженные частицы являются эффективными снарядами для получения трансурановых элементов, если только их энергия достаточно велика.

При облучении нейtronами изотопа урана ^{238}U получается промежуточное ядро ^{239}U . Обладая излишком нейтронов, оно испытывает β^- -распад и превращается в ядро трансуранового элемента с $Z = 93$. Этот элемент был назван *нептунием* (*Np*) по аналогии с Солнечной системой, в которой за планетой Уран следует планета Нептун. Претерпевая дальнейший β^- -распад, нептуний превращается в наиболее важный искусственный трансуран с $Z = 94$, названный *плутонием* (*Pu*), опять-таки по аналогии с Солнечной системой, в которой за Нептуном следует планета Плутон.

Такая схема получения трансуранов с $Z = 93$ и $Z = 94$ была абсолютно ясна Ферми уже в 1934 г., когда он начал облучать нейтронами уран. Правда, в то время Ферми не удалось наблюдать *Np* и *Pu* из-за их больших периодов полураспада (2, 3 дня для ^{239}Np и $2,4 \cdot 10^4$ лет для ^{239}Pu) и слабости радио-бериллиевого источника нейтронов, которым он тогда пользовался. В опытах Ферми в действительности наблюдались не радиоактивные излучения трансуранов, а излучения радиоактивных изотопов, получающихся при делении ядер урана (см. § 93). Только после создания ядерных реакторов, из которых исходят мощные потоки нейтронов (до 10^{15} нейтронов через 1 см^2 в 1 с), открылась возможность получать *Np* и *Pu* и притом в промышленных масштабах. Их получение можно представить следующей схемой:



Это, конечно, не единственная схема получения нептуния и плутония. Например, изотоп нептуния ^{238}Np был получен в результате облучения урана ^{238}U дейtronами с энергией 16 МэВ:

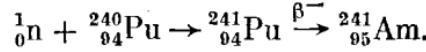
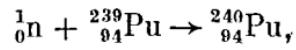


Всего в настоящее время известно не менее 12 изотопов нептуния с массовыми числами от 230 до 241. Изотоп нептуния $^{234}_{93}\text{Np}$ представляет собой тяжелый ($\rho = 19,5 \text{ г}/\text{см}^3$) металл с серебристым блеском, медленно окисляющийся на воздухе. Температура плавления нептуния 640°C .

В настоящее время известны не менее 15 изотопов плутония с массовыми числами от 232 до 246. Элемент плутоний — блестящий металл с голубоватым оттенком. Плотность его в разных

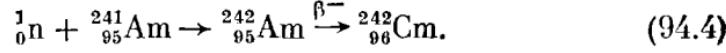
модификациях изменяется от 15,9 до 19,8 г/см³. Температура плавления плутония 640 °С. Коэффициент линейного расширения плутония отрицательный.

4. Путем облучения нейтронами плутония получается следующий трансуран с $Z = 95$. Он был получен в США и назван *америцием* (Am). Способ его получения в ядерном реакторе представляется следующей схемой:



Америций ${}_{95}^{241}\text{Am}$ представляет собой серебристый металл с плотностью 11,7 г/см³.

Облучение ${}_{94}^{241}\text{Am}$ нейтронами с последующим β^- -распадом промежуточного ядра приводит к образованию трансурана с $Z = 96$ по схеме

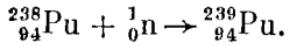
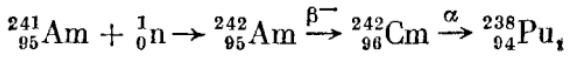
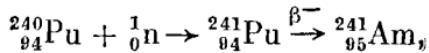
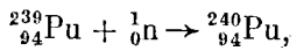


Он был назван *кюрием* (Cm) в честь Марии и Пьера Кюри. Это также серебристый металл с плотностью 7 г/см³. Он α -радиоактивен с периодом полураспада 160 дней. Его α -радиоактивность настолько велика ($10^{13} \alpha$ -частиц в 1 мин на 1 мг), что она приводит к разогреванию, разбрызгиванию и даже разложению воды в водных растворах солей кюрия, а также к свечению их в темноте.

Не вдаваясь в подробности, заметим, что 97-й и 98-й элементы также могут быть получены путем длительного облучения нейтронами плутония ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ в ядерных реакторах. Они были названы соответственно *берклием* (Bk) и *калифорнием* (Cf). Эти названия происходят от города Беркли (США) и Калифорнийского университета в Беркли, где впервые были получены рассматриваемые трансураны. Существуют различные способы получения берклия и калифорния, равно как америция и кюрия. Однако в больших количествах все эти элементы получаются только реакторным способом. В настоящее время известно 11 изотопов америция с массовыми числами от 237 до 247, 13 изотопов кюрия ($238 \leq A \leq 252$), 9 изотопов берклия ($243 \leq A \leq 251$) и 16 изотопов калифорния ($240 \leq A \leq 255$).

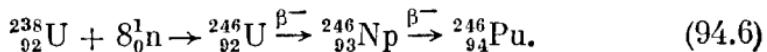
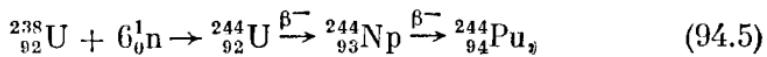
5. Реакторный способ, хотя он и является единственным способом получения трансуранов в больших количествах, все же не всегда применим. Оказалось, что следующие за калифорнием ($Z = 98$) новые элементы вблизи ядерного реактора упорно не появляются. Причина этого в том, что не все ядра одного и того же изотопа после поглощения нейтрона претерпевают β^- -распад. Большая часть ядер или испытывает деление, или распадается иным способом, не приводящим к образованию нового элемента

с большим атомным номером. Эти процессы идут тем интенсивнее, чем тяжелее атомные ядра, и, наконец, полностью вытесняют β^- -распад. Можно было бы думать, что указанные трудности имеют только технический характер и могут быть преодолены путем повышения мощности реактора. Но помимо технических трудностей есть и трудности принципиальные, когда в результате длинного ряда радиоактивных превращений опять возникает исходный элемент, подвергнутый облучению нейтронами. К этому, в частности, может привести α -распад какого-либо ядра. Примером может служить следующая цепочка превращений:

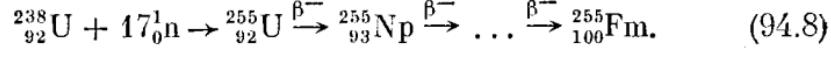
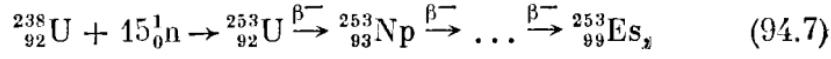


Непреодолимое препятствие для реакторного способа возникает также, когда одно из звеньев в цепочке превращений выпадает. Такое препятствие возникает, когда в этом звене время жизни ядра очень мало, а также тогда, когда ядро, входящее в звено, полностью распадается нежелательным образом, например путем спонтанного деления.

6. Указанные затруднения связаны прежде всего с тем, что при облучении нейтронами от ядерных реакторов облучаемое ядро, как правило, поглощает только один или малое число нейтронов. Если увеличить поток облучающих нейтронов во много раз, то некоторые ядра, возможно, будут поглощать сразу несколько нейтронов и окажутся в состоянии перепрыгнуть через «запрещенную» область в реакторном методе. Таким путем могут образовываться новые трансурановые элементы или новые изотопы уже известных элементов. И действительно, в 1952 г. в США произвели испытание водородной бомбы, в которой происходит сгорание дейтериево-тритиевой смеси. Реакция происходит при температуре порядка ста миллионов градусов и длится всего доли секунды. В течение такого короткого времени через урановую оболочку бомбы проходит поток нейтронов, на много порядков превышающий поток нейтронов в ядерных реакторах за то же время. В радиоактивной пыли, образовавшейся при взрыве, были обнаружены ранее неизвестные изотоны плутония ^{244}Pu и ^{246}Pu . Они образуются в результате захвата ядром ^{238}U сразу 6 или 8 нейтронов с последующим β^- -распадом, т. е.



Американские ученые запросили срочно доставить с атолла Бикини, где произошел взрыв водородной бомбы, около тонны кораллов. После весьма кропотливого труда из этих кораллов были выделены ничтожные количества 99-го и 100-го элементов. Они были названы соответственно *эйнштейнием* и *фермием* в честь Эйнштейна и Ферми. Обнаруженные изотопы эйнштейния ($^{253}_{99}\text{Es}$) и фермия ($^{255}_{100}\text{Fm}$) получаются в результате следующих процессов. При взрыве водородной бомбы некоторые ядра урана одновременно захватывают 15 или 17 нейтронов. Последующая цепь β^- -распадов и приводит к образованию новых трансуранов:



Всего в настоящее время известно 14 изотопов эйнштейния с массовыми числами от 243 до 256 и 16 изотопов фермия с массовыми числами от 242 до 258. Эйнштейний и фермий характеризуются еще меньшими периодами полураспада относительно процессов спонтанного деления и испускания α -частиц, чем предшествующие трансураны. Самый долгоживущий изотоп эйнштейния $^{254}_{99}\text{Es}$ имеет период α -распада около 480 дней, а самый долгоживущий изотоп фермия $^{257}_{100}\text{Fm}$ — только 80 дней. У изотопа фермия $^{256}_{100}\text{Fm}$ очень небольшой период полураспада относительно спонтанного деления — всего около 160 мин.

Можно было бы надеяться, что дальнейшие трансураны могут быть получены таким же способом, что и эйнштейний и фермий, если только увеличить мощность потока облучающих нейтронов. Но эти надежды не оправдались. В 60-х годах в США была произведена серия подземных ядерных взрывов. Поток нейтронов в наиболее мощном из них по своей интенсивности превосходил примерно в 10 раз соответствующий поток на атолле Бикини. Но трансураны с атомным номером выше атомного номера фермия не образовывались. Причиной этого является спонтанное деление ядер. В цепочке ядерных превращений появляется ядро, практически мгновенно испытывающее спонтанное деление и тем самым обрывающее эту цепочку.

Изложенные методы не позволяют получить ядра с $Z > 100$. Причины — недостаточная плотность нейтронных потоков, малая вероятность захвата большого числа нейтронов и (что наиболее важно) быстрый радиоактивный распад ядер с $Z > 100$.

7. Для получения трансуранов с $Z > 100$ пришлось обратиться к более старому методу, который применялся еще до открытия нейтрона. В этом методе мишень, содержащую атомные ядра одного элемента, подвергали бомбардировке атомными ядрами другого элемента. Происходило столкновение двух атомных ядер,

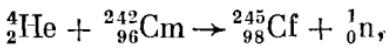
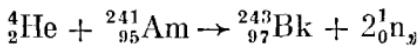
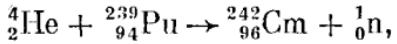
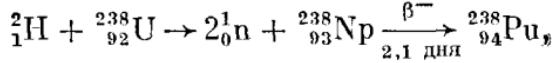
в результате чего образовывалось новое атомное ядро. Оно могло оказаться промежуточным и испытать в дальнейшем радиоактивный распад с образованием других атомных ядер. В качестве мишени брали чаще всего уран или какой-либо из ранее полученных трансуранов, а в качестве бомбардирующего ядра — более легкие атомные ядра, например α -частицы.

Недостаток метода состоит в том, что оба сталкивающихся ядра заряжены положительно, а потому они отталкиваются друг от друга. Приято говорить, что между ядрами существует *кулоновский потенциальный барьер*. Чтобы при проникновении частицы-снаряда внутрь ядра-мишени между этими частицами произошла ядерная реакция, необходимо этот барьер преодолеть. Это сделать тем легче, чем больше энергия бомбардирующей частицы.

Естественные α -частицы, испускаемые радиоактивными элементами, обладают сравнительно небольшими энергиями (не превышающими 8 МэВ). Хотя они и могут преодолевать потенциальный барьер, но это происходит только в результате маловероятного квантовомеханического эффекта — туннельного проносивания через барьер. Поэтому-то вместо α -частиц, возникающих при распаде, применяются искусственные α -частицы, т. е. ускоренные ионы гелия ^4_2He , а также ускоренные ионы других элементов.

В 1940—1950 гг. в распоряжении физиков имелись только маломощные ускорители, которые могли ускорять до небольших энергий лишь простейшие ядра водорода — протоны ^1_1H , дейтроны ^2_1H , а также ядра гелия ^4_2He (α -частицы). Для синтеза нового трансурана сначала получали в реакторе ядра самого тяжелого из известных трансуранов и из них приготавливали мишень, а затем бомбардировали ее протонами, дейtronами или α -частицами. В результате получался элемент, атомный номер которого на одну или две единицы больше, чем у ядра мишени.

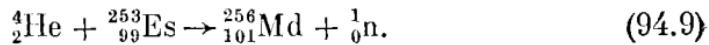
Примерами могут служить ядерные реакции



с помощью которых впервые были синтезированы изотопы элементов 94, 96, 97, 98. Они были получены в США в 1940, 1944, 1949 и 1950 гг. соответственно. Отметим, что сначала был открыт кюрий, а потом америций. Впоследствии другие изотопы тех же элементов получались другими способами, в частности путем

облучения ядер трансуранов и самого урана нейтронами. На образном языке технику эксперимента путем облучения трансуранов легкими заряженными частицами можно было бы назвать «легкой артиллерией».

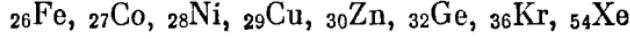
Последним элементом, синтезированным с помощью «легкой артиллерии», был 101-й элемент, названный *менделеевием* в честь великого русского химика Д. И. Менделеева. Его впервые удалось получить в Беркли (США) в 1955 г. в результате реакции



Мишенью служил невидимый глазом тонкий слой атомов изотопа эйнштейния-253 (всего около миллиарда атомов), нанесенный на тонкую (точнее человеческого волоса) золотую фольгу. На ускорителе в Беркли эта фольга облучалась α -частицами с энергией 41 МэВ. Альфа-частица, проникая в ядро эйнштейния, увеличивала его заряд на 2 единицы. В результате образовывались нейтроны и ядро 101-го элемента, которые попадали на расположенную сзади вторую золотую фольгу и осаждались на нее. Со второй фольги в первом опыте химикам удалось собрать всего 17 атомов 101-го элемента. И все же химики определили некоторые радиоактивные и химические свойства этого элемента. Работой по синтезу 101-го элемента руководил А. Гиорсо (р. 1915).

8. Все трансурановые элементы от 93-го до 101-го включительно были впервые получены в США под руководством Г. Сиборга (р. 1912) и А. Гиорсо. Для получения трансуранов с большими атомными номерами от «легкой артиллерии» требовалось перейти к «артиллерию среднего калибра», что и было сделано. В качестве снарядов для бомбардировки мишней стали использовать ускоренные ионы углерода ${}_6^C$, азота ${}_7^N$, кислорода ${}_8^O$, пеона ${}_{10}^N$, аргона ${}_{18}^A\text{Ar}$. Существенно, чтобы бомбардирующие ионы были многозарядными, так как при прочих равных условиях энергия, приобретаемая ионом в циклическом ускорителе, пропорциональна квадрату заряда иона. В середине 60-х годов лишь физики Дубны (СССР) и Беркли (США) располагали ускорителями, пригодными для ускорения ионов аргона.

В дальнейшем для бомбардировки мишней стали применять еще более массивные ионы:



и т. д. вплоть до ${}_{92}^{238}\text{U}$ включительно. Короче говоря, в строй вступила «тяжелая артиллерия». Но чем больше заряд ядра иона, тем до большей кинетической энергии должен быть ускорен ион. Действительно, чтобы ядро ускоренного иона могло слиться с ядром мишени, кинетическая энергия иона должна превышать высоту кулоповского барьера между ядрами. А последняя пропорциональна зарядам обоих сталкивающихся ядер. Например, ку-

лоновский барьер для цинка ($Z = 30$) в 15 раз выше кулоновского барьера для α -частицы ($Z = 2$). Вот почему для использования тяжелых ионов требуются ускорители на высокие энергии.

Для ускорения ионов при получении новых трансуранов в США пользовались линейными ускорителями различных типов, в том числе и перезарядными линейными ускорителями (тандемами), принцип действия которых такой же, по которому работает соответствующий тандем-генератор Ван-де-Граафа (см. § 84, пункт 2). Линейными ускорителями пользовались и ученые Дармштадта (ФРГ) и во многих других лабораториях мира. В СССР в Объединенном институте ядерных исследований (Дубна) в Лаборатории ядерных реакций, руководимой Г. Н. Флеровым, для получения новых трансуранов и изучения их свойств применялись циклотроны. Поскольку ученым Дубны при изучении трансуранов принадлежит ведущее место в мире, мы остановимся только на краткой характеристике этих циклотронов. При этом мы совершенно не будем касаться способов выделения полученного трансуранового изотопа из смеси или соединения его с другими элементами, а также способов идентификации заряда и массового числа соответствующего ему ядра, хотя эти вопросы не менее трудны и важны, чем и получение самого изотопа.

9. В 1961 г. в Дубне для ускорения тяжелых ионов был построен циклотрон У-300, который для того времени был самым мощным в мире и специально приспособлен для синтеза новых трансурановых элементов. (Число 300 означает, что диаметр полюсов магнита в циклотроне составляет 300 см, точнее, 310 см. Аналогично, символы У-200 и У-400 означают циклотроны с диаметрами полюсов магнитов 200 и 400 см соответственно.)

Энергия, приобретаемая ионом в циклотроне, пропорциональна квадрату заряда иона q , квадрату радиуса r полюсов магнита и квадрату напряженности магнитного поля H (см. задачу 2 к этому параграфу). Масса магнита в циклотроне У-300 2200 т, мощность высокочастотного генератора, питавшего циклотрона 500 кВт, напряжение между высокочастотными электродами-дугантами 260 кВ.

В 1966 г. в Дубне появился новый циклотрон У-200. Он стал одним из лучших в своем классе ускорителей (т. е. ускорителей с такими же диаметрами полюсов магнита) и оказался не превзойденным по интенсивности пучка легких ионов, а это очень важно для синтеза трансуранов. На строившихся до него циклотронах того же класса напряженность магнитного поля составляла, как правило, 14—16 кГс с вариацией амплитуды относительно этого значения около 4 кГс. На циклотроне У-200 удалось довести напряженность поля до 20 кГс, а амплитуду — до 6. В результате энергия ускоряемых частиц на циклотроне увеличилась вдвое, если учесть ее зависимость от магнитного поля, отмеченную выше. На циклотроне У-200 впервые были син-

тезированы изотопы 106-го и 107-го элементов, о чем подробнее будет сказано ниже.

С момента вступления в строй циклотрона У-200 появилась возможность дальше повышать энергию ускоряемых ионов комбинацией циклотрона У-300 с меньшим циклотроном У-200. Таким путем получался *перезарядный* или *тандем-циклотрон*, работающий по принципу, сходному с тем, по которому работает тандем-генератор Ван-де-Граафа (см. § 84, пункт 2). В тандем-циклотроне ион сначала ускорялся циклотроном У-300, затем поступал в циклотрон У-200, пройдя предварительно через угольную пленку толщиной 0,2 мкм. В пленке частично «обдирается» электронная оболочка иона, так что положительный заряд иона увеличивается. Благодаря этому появляется возможность дальнейшего ускорения иона в циклотроне У-200, хотя он и меньше циклотрона У-300. Однако этот метод не получил распространения из-за своей сложности, а главным образом потому, что интенсивность ионных пучков на выходе получалась очень малой.

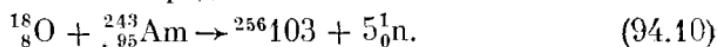
На циклотроне У-200, как уже отмечалось выше, были произведены важные исследования по синтезу трансурановых элементов. Но циклотрон У-200 главным образом был задуман как уменьшенная вдвое модель более мощного циклотрона У-400, который вступил в строй в конце декабря 1979 г. Циклотрон У-400 проектировался как специализированный ускоритель для получения ускоренных пучков ионов средней массы от неона ^{20}Ne до серебра ^{108}Ag . При его сооружении был учтен опыт строительства, эксплуатации и модернизации циклотронов У-300 и У-200, а также тандем-циклотрона. В результате У-400 оказался лучшим в мире в своем классе ускорителей. В частности, при той же массе электромагнита и том же потребляемом им токе питания, что и у ускорителя У-300, интенсивность ускоренных пучков на циклотроне У-400 возросла в сотни раз.

10. Обращаемся к вопросу о синтезе трансурановых элементов после получения 101-го элемента — менделевия. В 1956 г. к работам по синтезу 102-го элемента приступили ученые Нобелевского института физики в Стокгольме, Калифорнийского института в Беркли и Института атомной энергии в Москве.

Не прошло и года, как из Нобелевского института сообщили, что на стокгольмском циклотроне при облучении мишени из кюрия $^{244}_{96}\text{Cm}$ ионами углерода $^{13}_6\text{C}$ обнаружены атомы 102-го элемента. Авторы работы предложили называть новый элемент *нобелием* ($_{102}\text{No}$) в честь учредителя Нобелевской премии. Однако через несколько месяцев ученые в Беркли в точности воспроизвели стокгольмские опыты и не нашли активности с описанными свойствами. Но и они сообщили данные о свойствах якобы 102-го элемента, впоследствии опровергнутые. Поэтому и их работа не может претендовать на открытие 102-го элемента.

Впервые элемент 102, точнее, его изотоп ^{254}No ^{*)} был с достоверностью синтезирован в Дубне в 1963 г. путем бомбардировки $^{238}_{\text{U}}$ ионами $^{22}_{\text{Ne}}$ и правильно по порядку величины был определен период полураствора синтезированного изотопа (уточненное значение этого периода 55 с). Эта работа и может претендовать на приоритет в получении 102-го элемента. Впоследствии данные, полученные в Дубне по всем изотопам 102-го элемента, были согласованы с данными, полученными в Беркли.

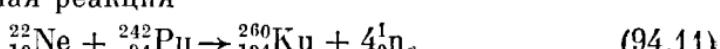
В 1961 г. из Беркли пришло сообщение о синтезе изотопа ^{257}No . Элемент с $Z = 103$ был назван *лоуренсием* в честь изобретателя циклотрона Лоуренса. Однако данные, сообщенные об изотопе ^{257}No , оказались ошибочными. Впоследствии сами авторы выразили сомнение в том, что массовое число обнаруженного ими изотопа равно 257, а не 258 или 259. В 1965 г. в Дубне с достоверностью был открыт изотоп ^{256}No путем бомбардировки америция атомами изотопа кислорода:



При этом были получены правильные данные о вновь открытом изотопе ^{256}No . Поэтому можно считать, что элемент 103 был также впервые синтезирован в Дубне в 1965 г.

Элементы 102 и 103 не получили еще общепринятых названий. Ученые социалистических стран, работающие в Объединенном институте ядерных исследований в Дубне, где впервые с достоверностью были синтезированы указанные элементы, предложили называть элемент 102 *жолиотием* (Jl) в честь Фредерика Жолио-Кюри, а элемент 103 — *резерфордием* (Rf) в честь Резерфорда. Но и эти названия до сих пор еще не получили всеобщего признания. Споры о приоритете открытия элементов 102 и 103 и их названиях продолжаются до сих пор. По этой причине мы условно и сохраняем первоначальные названия — нобелий и лоуренций.

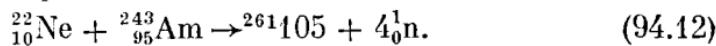
В 1964 г. в Дубне на циклотроне У-300 был синтезирован 104-й элемент (точнее, изотоп ^{260}No), названный *курчатовием* (Ku) в честь видного советского физика и организатора науки И. В. Курчатова (1903—1960). При синтезе этого элемента в качестве бомбардирующих частиц применялись ионы неона $^{22}_{\text{Ne}}$ с энергией 115 МэВ, а в качестве мишени использовался $^{242}_{\text{Pu}}$. Происходила ядерная реакция



в результате которой и получился указанный изотоп курчатовия. Всего в настоящее время открыто восемь изотопов курчатовия.

^{*)} Символ ^{254}No означает, что порядковый номер элемента равен 102, а его массовое число 254. Такая символика употребляется тогда, когда название элемента еще не установлено.

11. Во всех рассмотренных выше способах получения трансуранных элементов путем бомбардировки мишней заряженными ионами в качестве мишней брался либо уран, либо ранее полученный трансуран. Последним элементом, найденным таким путем, был элемент 105, впервые синтезированный в Дубне в 1970 г. в результате реакции



Он был назван *нильсборием* (*Ns*) в честь Нильса Бора.

В 1973 г. Ю. Ц. Оганесян в Дубне предложил вместо тяжелых радиоактивных мишеней применять обычный свинец. Это предложение основывалось на следующих соображениях. Бомбардирующее ядро должно быть ускорено до громадной кинетической энергии, достаточной для преодоления кулоновского потенциального барьера между этим ядром и ядром мишени. Пусть в результате взаимодействия этих ядер сначала образуется компаунд-ядро. Оно получается в сильно возбужденном, или, как принято говорить, в сильно «нагретом» состоянии. В дальнейшем происходит «остывание» ядра.

С точки зрения капельной модели механизм остывания аналогичен тому, который описан в предыдущем параграфе (см. пункт 11). Сильно возбужденное компаунд-ядро начинает совершать колебания. Если эти колебания становятся достаточно интенсивными, то ядро принимает форму гантеля (см. рис. 159, положение 3). Из шейки гантеля, как было выяснено в указанном параграфе, начинают интенсивно испаряться мгновенные нейтроны. За счет этого испарения и происходит остывание компаунд-ядра. При испускании нейтрона ядро может разделиться на части, но может и не разделиться. Испарение одного нейтрона без деления ядра — процесс, больше чем в 100 раз менее вероятный по сравнению с испарением, которое сопровождается делением. При испускании двух нейтронов доля ядер, не испытавших деления, уменьшается больше чем в $100^2 = 10000$ раз, при испускании трех нейтронов — больше чем в $100^3 = 1000000$ раз, и т. д.

Таким образом, чем больше нейтронов испустит компаунд-ядро при образовании нового трансуранового элемента, тем менее вероятно появление последнего.

Допустим сначала, что мишенью служит малоустойчивое, или «рыхлое», ядро. При слиянии его с ядром-снарядом лишь относительно малая часть энергии последнего тратится на дополнительное «разрыхление» образовавшегося компаунд-ядра. Основная доля энергии ядра-снаряда расходуется на дальнейшее возбуждение уже «рыхлого» компаунд-ядра. Поэтому последнее получается сильно возбужденным, или «горячим». Такая ситуация имеет место, когда мишенью служит тяжелое радиоактивное ядро. Так, при использовании ионов С, О, Ne и мишней из Ru,

См, Cf образуются сильно возбужденные ядра с энергией возбуждения 40—60 МэВ. Каждый испаряемый нейtron способен унести из ядра энергию, в среднем равную 10—12 МэВ, так что для «остывания» компаунд-ядра и образования более устойчивого трансурана из компаунд-ядра должно вылететь до 5 нейтронов. Подтверждением этого могут служить ядерные реакции (94.10), (94.11), (94.12), рассмотренные выше. Таким образом, вероятность образования трансурана будет очень малой.

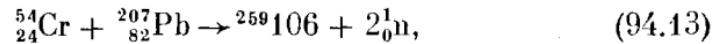
Допустим теперь, что в качестве мишени берется очень устойчивое, или «плотноупакованное», ядро. Тогда ядро-снаряд предварительно «разрывает» его, на что тратится значительная доля энергии. Лишь оставшаяся энергия ядра-снаряда идет на дальнейшее возбуждение образовавшегося компаунд-ядра. Последнее получается менее возбужденным, или «холодным».

Наиболее устойчивыми плотноупакованными ядрами являются магические и в особенности дважды магические ядра. У ядер с магическим числом протонов энергия, как функция числа N нейтронов, минимальна. Минимальна энергия и у ядер с магическим числом нейтронов, если ее рассматривать как функцию зарядового числа Z . Для дважды магических чисел энергия минимальна уже как функция обоих переменных Z и N . Ядро изотопа свинца $^{208}_{82}\text{Pb}$ ($Z = 82$, $N = 126$) дважды магическое, все остальные ядра этого элемента магические ($Z = 82$, $N \neq 126$). Магическим является и ядро висмута $^{209}_{83}\text{Bi}$. При использовании мишеней из этих ядер компаунд-ядро получается сравнительно мало возбужденным. Так, при бомбардировке плотноупакованного ядра свинца ионами аргона, титана, хрома энергия возбуждения оказывается сравнительно низкой (всего 10—15 МэВ), так что для снятия возбуждения достаточно испускания уже одного-двух нейтронов. Примерами могут служить ядерные реакции (94.13), (94.14), приводимые ниже.

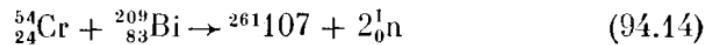
На основании изложенного можно было надеяться, что метод так называемого «холодного» или «магического» синтеза трансурановых элементов, предложенный Оганесяном, более эффективен, чем метод, в котором в качестве мишеней используются тяжелые радиоактивные элементы. Эти надежды оправдались.

12. Эффективность метода Оганесяна была испытана в Дубне прежде всего при облучении свинцовой мишени ^{82}Pb ускоренными ионами ^{22}Ti . В результате этого сразу были открыты три новых изотопа курчатовия ^{104}Ru (в зависимости от того, какие изотопы свинца и титана применялись на опыте). Несмотря на то что ускоренных ионов титана было в сотни раз меньше, чем ионов циркония в реакции (94.11), на изучение свойств каждого изотопа курчатовия потребовалось всего несколько десятков часов работы циклотрона У-300, в то время как длительность первых опытов, в которых был синтезирован элемент 104, составляла свыше 10^4 ч.

Методом Оганесяна в Дубне в 1974 г. был открыт 106-й элемент. Он получался в реакции



а в 1976 г. в реакции



был синтезирован 107-й элемент. Попутно были получены новые изотопы предшественников этих элементов по периодической системе Менделеева — от 100-го до 105-го.

Группа западно-германских экспериментаторов в Дармштадте на линейном ускорителе «Унилак» синтезировала методом Оганесяна новый изотоп 107-го элемента, воспроизвела и подтвердила многие другие результаты дубненских исследователей и получила ряд новых данных.

Предпринятые затем в Дубне и в Дармштадте попытки синтезировать 109-й элемент в реакции между висмутом ^{209}Bi и железом ^{58}Fe встретили затруднения. Выяснилось, что вероятность его образования в десятки раз меньше вероятности образования 107-го элемента. В 1982 г. в опыте западно-германских физиков, который длился двенадцать суток подряд, удалось зарегистрировать только одно событие, которое могло претендовать на распад 109-го элемента с атомной массой 266. Для дальнейшего продвижения вперед требовалось значительно повысить чувствительность опытов. В Дубне она была повышена в несколько десятков раз. Там же на рубеже 1982—1983 гг. в ходе 260-часового опыта было зафиксировано восемь событий, свидетельствовавших о рождении ядер 109-го элемента. Несмотря на столь малый эффект, можно было сделать первые общие суждения о свойствах этого элемента.

В начале 1984 г. в Дубне впервые были синтезированы два изотопа элемента 108 с массовыми числами 264 и 265. Они получались путем бомбардировки изотопов свинца $^{207}_{92}\text{Pb}$ и $^{208}_{92}\text{Pb}$ ионами железа ^{58}Fe . Изотоп с массовым числом 265 примерно в то же время был синтезирован и в Дармштадте. Весной 1984 г. в трех ядерных реакциях, проведенных на новом циклотроне У-400 (в реакциях свинца с железом и висмута с марганцем), были зарегистрированы 44 случая распада трех изотопов 108-го элемента с массовыми числами 263, 264 и 265. Все они чрезвычайно короткоживущи и распадаются не спонтанно, а испуская α -частицы. По спонтанному же делению они не менее живучи, чем 104-й и 106-й элементы,— вывод очень важный для теории и практики.

Одновременно три ядра 108-го элемента (точнее, изотопа $^{265}_{108}$) были зарегистрированы в аналогичной ядерной реакции, проведенной на ускорителе «Упилак» группой западно-герман-

ских физиков. Располагая уникальным, пока единственным в мире чрезвычайно селективным масс-спектрометром, западно-германские физики установили важнейшие характеристики изотопа ^{265}Rb : период полураспада — около 2 мс, энергия α -частиц — 10,4 МэВ.

В середине 1987 г. появилось сообщение о получении 110-го элемента периодической таблицы Менделеева. Ядро этого элемента было получено в Объединенном институте ядерных исследований в Дубне в результате бомбардировки тория и изотопов урана мощным пучком ускоренных ядер кальция и аргона. Всего было получено около 40 ядер 110-го элемента. Время жизни этих ядер оказалось порядка сотых долей секунды. Для столь тяжелых элементов такое время жизни исключительно велико. Возможно, что это является указанием на существование острова стабильности сверхтяжелых элементов. Существование такого острова стабильности современная теория предсказывает в районе элементов с атомными номерами 110—114 (см. пункт 13).

13. Трансурановые элементы испытывают все виды радиоактивного распада. Однако процессы β -распада относительно медленные; для ядер с $Z > 100$, имеющих короткие времена жизни относительно α -распада и спонтанного деления, роль β -распада невелика. С ростом Z конкуренция между спонтанным делением, α - и β -распадами проявляется все более отчетливо.

Нестабильность относительно спонтанного деления и определяет верхнюю границу периодической системы элементов. Период полураспада относительно спонтанного деления ^{238}U равен 10^{16} лет, $^{239}\text{Pu} — 10^{10}$ лет, $^{255}\text{Fm} — 20$ ч. Для ^{260}Ku он снижается до 0,1 с, а для 106-го и 107-го элементов измеряется тысячными долями секунды.

Естественно, возникает вопрос, почему физики упорно работают над получением столь короткоживущих элементов и исследованием их свойств? К тому же такие элементы получаются в ничтожных количествах, иногда составляющих всего несколько атомов. Возможно, что в чисто научном отношении это и представляет интерес, но на непосредственное практическое применение рассматриваемых элементов вряд ли можно рассчитывать. Однако такое заключение в настоящее время является поспешным.

В 1966 г. В. М. Струтинский предложил метод расчета ядерных оболочек, который не плохо воспроизводил периодические изменения свойств изученных ядер. Экстраполируя найденные таким путем закономерности на неисследованную область, можно было попытаться предсказать свойства еще не полученных трансуранов. В последующее десятилетие физиками разных стран были произведены расчеты на самых сложных вычислительных машинах. Согласно этим расчетам ядра с числом протонов 114

или числом нейтронов 184 должны быть магическими, а ядро $^{298}114$ — дважды магическим.

Гипотетические элементы с числом протонов, близким к 114, и числом нейтронов около 184 называются *сверхэлементами*, а их ядра — *сверхъядрами*. Есть основание ожидать, что сверхъядра должны характеризоваться повышенной стабильностью, проявляющейся в относительно больших временах жизни. Поэтому совокупность значений Z и A сверхэлементов называют *островом стабильности*.

Основными типами радиоактивного распада сверхъядер являются спонтанное деление и α -распад. По теории самым устойчивым по отношению к спонтанному делению должно быть дважды магическое ядро $^{298}114$. Однако время жизни по отношению к α -распаду у всех ядер сильно уменьшается с увеличением зарядового числа Z . Конкуренция между α -распадом и спонтанным делением должна по теории приводить к тому, что самым долгоживущим сверхэлементом будет изотоп $^{294}110$. Ожидается, что наиболее вероятное время жизни для него должно составлять 10^8 — 10^9 лет. Однако этот вывод основан на теории ядра, а она далеко не совершенна. Удовлетворительная теория ядра еще не создана. Не исключено, что истинное время жизни во много раз больше или меньше приведенного выше, а самым долгоживущим ядром окажется одно из ядер с зарядовым числом между 108 и 126.

Предсказываемое теорией поведение гипотетических элементов в окрестности магического ядра $^{298}114$ характеризуется резким изменением устойчивости и времени жизни даже при незначительных изменениях хотя бы одного из чисел Z или N . Так, если у самого долгоживущего ядра $^{294}110$ изменить всего на 2—3 единицы число протонов или пейтронов, то время жизни по теории уменьшится примерно в миллионы раз. Такой эффект аналогичен тому, что наблюдается у обычных элементов в окрестности предшествующего дважды магического ядра свинца $^{208}_{82}\text{Pb}$. Это ядро настолько устойчиво, что его радиоактивный распад никому еще не удавалось наблюдать. Но стоит к нему добавить всего один пейтрон, как время жизни полученного изотопа $^{209}_{82}\text{Pb}$ из-за β^- -распада снизится до 4,8 ч.

Таким образом, по теории при приближении к сверхэлементам и в их окрестности время жизни меняется нерегулярно: с возрастанием атомного номера оно то уменьшается, то снова увеличивается, достигая очень больших значений для некоторых изотопов на острове стабильности, так что они могут считаться практически стабильными. В этом отношении элементы в окрестности дважды магического ядра $^{298}114$ ведут себя аналогично элементам в окрестности предшествующего дважды магического ядра $^{208}_{82}\text{Pb}$. У таллия ($Z = 81$) и следующих за ним свинца и висмута есть

изотопы со столь большими временами жизни, что эти времена практически не удается измерить. За висмутом идут радиоактивные элементы: полоний ($Z = 84$), астат ($Z = 85$), радон ($Z = 86$)... Все изотопы элементов от полония до актиния превращаются в дочерние за очень короткие времена. Зато периоды полураствора наиболее стабильных изотопов урана и тория — элементов с большими порядковыми номерами — равны соответственно 4,5 и 14 млрд лет и сравнимы с возрастом Земли. Нептуний, плутоний, америций, кюрий менее радиоактивны, чем полоний или радий, хотя их порядковые номера значительно выше.

14. Если гипотетический остров стабильности действительно существует и если бы удалось найти способ синтезирования долгоживущих сверхэлементов в макроскопических количествах, то научно-техническое значение такого открытия было бы трудно переоценить. Поэтому попытен интерес учёных к вопросу о сверхэлементах.

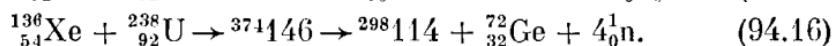
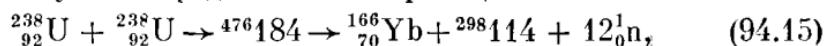
Вопрос о существовании сверхэлементов, в особенности стабильных и долгоживущих, может быть окончательно решен только экспериментально. Для этой цели можно воспользоваться уже рассмотренным нами методом синтеза трансурановых элементов путем слияния ядра-мишени с ядром-снарядом с последующим охлаждением образовавшегося компаунд-ядра в процессе испускания нейтронов. Помимо этого метода слияния есть и другой метод получения трансурановых элементов — метод деления ядер, предложенный Г. Н. Флеровым в 1965 г. В этом методе для бомбардировки урана используются ускоренные тяжелые ионы (Xe , U). Ядро-снаряд на очень короткое время (порядка 10^{-21} с) слипается с ядром-мишенью с образованием сильно перегретого гантелеобразного ядра, быстро врачающегося вокруг его центра масс (см. задачу 4 к этому параграфу). В это время нуклоны в количестве до нескольких десятков имеют возможность перейти из одной половины гантелеобразного ядра в другую. Затем под действием громадной центробежной силы гантелеобразное ядро разрывается. Образовавшиеся осколки, будучи сильно перегретыми, сами испытывают деление. В результате деления образуются сотни изотопов самых разных элементов, в том числе и тяжелых.

И действительно, уже в первом опыте в Дубне на тандем-циклотроне были обнаружены нейтрононизбыточные ядра тяжелых трансуранов, которые ранее получались при термоядерных взрывах.

В дальнейшем подобные опыты неоднократно повторялись не только в Дубне, но и в других странах, в частности в ФРГ (Дармштадт), где был использован наилучший в мире ускоритель ионов урана, причем мишенью служил также уран. Ученые ФРГ обнаружили, что ядерные «гантели» чаще всего делятся на два равных ядра урана. Более тяжелые и легкие осколки встречались реже. Чем больше различие в массах оскол-

ков, образовавшихся при делении ядерной «гантели», тем менее вероятно такое деление. Была надежда, что среди изотопов, образовавшихся при делении, появятся и изотопы сверхэлементов. Но эта надежда не оправдалась. С большим трудом удалось найти лишь ничтожные количества 102-го элемента.

15. Во многих лабораториях мира пытались найти ядерные реакции, в которых по предположению должны получаться магические ядра $^{298}114$, хотя бы и в ничтожных количествах. Примерами могут служить предполагаемые реакции



Однако практически осуществить все гипотетические реакции подобного рода пока никому не удалось. Таким образом, на вопрос о существовании острова стабильности сверхэлементов опыты пока не дают ответа.

16. Быть может, сверхэлементы или следы их существования надо искать в самой природе — на Земле или, лучше, в метеоритах? Не останавливаясь на подробностях, ограничимся только некоторыми, далеко не полными, принципиальными замечаниями по этому трудному вопросу.

Ядра урана и всякого трансуранового элемента испытывают спонтанное деление. Получающиеся осколки в момент своего образования обладают большой кинетической энергией — порядка 100 МэВ. Если деление произошло в кристаллической среде (минерале), то, двигаясь в ней, осколок до замедления производит множество разрушений — ведь атомы в решетке связаны относительно слабыми силами, для преодоления которых достаточно всего 2—3 эВ. Осколки оставляют в среде следы, или треки, в виде микроскопически узких каналов. Подвергнув минерал травлению, т. е. подействовав на него подходящей кислотой или щелочью, эти каналы можно расширить в сотни раз, так как вещество нарушенных участков кристалла гораздо легче подвергается травлению, чем непарашепленых. Расширенные треки легко увидеть в обычный оптический микроскоп (с увеличением в 100 и более раз).

Продукты деления, накапливающиеся при делении, являются изотопами элементов, лежащих в середине периодической системы. Они могут быть выделены из исследуемого минерала, например, при нагревании его до 1000 °C и выше (разумеется, для этого не требуется производить травления минерала), а затем подвергнуты анализу с помощью масс-спектрометра. По изотопному составу того или иного элемента можно однозначно судить о том, какие ядра испытали спонтанное деление, в результате которого образовались выделенные элементы. Конечно, за время, прошедшее с момента образования изотопов, часть их могла рассеяться и уйти из исследуемого образца. Однако это обстоятельство не играет роли, так как для рассматриваемого метода существует лишь *относительный* изотопный состав, а не абсолютные количества образовавшихся изотопов. А относительный изотопный состав одного и того же элемента не меняется при их расщеплении.

В изложении методе наиболее удобны изотопы ксенона, так как естественная распространенность этого элемента в земных и космических минералах очень мала — она в миллионы и миллиарды раз меньше, чем распространенность других химических элементов. Поэтому даже незначительные добавки ксенона, образующиеся при делении, легко зафиксировать на слабом фоне обычного ксенона, содержащегося, например, в атмосфере. У других элементов природный фон полностью маскирует такие добавки.

Для проблемы обнаружения следов спонтанного деления ядер сверхэлементов более подходящими являются минералы космического, а не земного происхождения. Дело в том, что на Земле такие следы не могут сохраняться столь длительное время, как это возможно в метеоритах. На Земле они исчезают под действием многочисленных разрушающих факторов. При исследовании рассматриваемой проблемы предпочтение было отдано метеоритам-ахондритам. Так называются метеориты, в состав которых входят хонды — затвердевшие капли силикатного вещества, возможно, образовавшегося еще в начальной стадии формирования Солнечной системы. Размеры хондр колеблются от долей миллиметра до сантиметров.

17. При исследовании кристаллов минералов, извлеченных из некоторых метеоритов-ахондритов, были обнаружены миллионы следов осколков деления каких-то ядер на каждом квадратном сантиметре. Однако сами ядра обнаружены не были. Естественно было предположить, что время жизни их недостаточно велико, так что за время существования Солнечной системы они полностью распались. Что же это за ядра?

При термоядерных взрывах, как уже говорилось в пункте 6, обнаружены плутоний-244 — наиболее долгоживущий элемент из всех известных трансурановых элементов (период полураспада ^{244}Pu равен $8,3 \cdot 10^7$ лет). Состояние вещества, подобное тому, какое было при термоядерном взрыве, но уже в громадных космических масштабах существовало и при возникновении Солнечной системы — в период образования химических элементов. Несомненно, что в этот период образовывался и плутоний-244, и другие трансурановые элементы, но к настоящему времени все они полностью исчезли на Земле из-за сравнительно коротких времен жизни.

Следы спонтанного деления ядер, оставленные в метеоритах-ахондритах, не могут принадлежать ядрам урана-238 или тория-232, так как в противном случае эти долгоживущие элементы сохранились бы в метеоритах до настоящего времени, как это имеет место на Земле. Можно думать, что эти следы оставлены ядрами трансуранов. Однако все известные относительно короткоживущие трансураны должны быть сразу же исключены, поскольку они распались бы еще задолго до затвердевания метеоритов. Исключение составляет только самый долгоживущий трансуран, а именно плутоний-244. Только он мог оставить рассматриваемые следы, а затем еще задолго до настоящего времени полностью исчезнуть из метеоритов. Это предположение подтвердилось экспериментально.

В метеоритах сохранились не только треки, оставленные осколками деления ядер, но и сами осколки в виде соответствующих атомов. Эти атомы частично можно было извлечь из метеоритов путем нагревания их до температуры 1000—1200 °C и масс-спектроскопически определить изотопный состав извлеченного газа. Оказалось, что в этом газе среди прочих изотопов содержатся и изотопы ксенона, представляющие для нас основной интерес. Как уже подчеркивалось, важно знать только относительное содержание изотопов ксенона, а не количество его, сохранившееся в метеорите.

С другой стороны, в потоке нейтронов, исходящем из ядерного реактора, синтезируется множество элементов, в том числе и ^{244}Pu . Несколько миллиграммов этого изотопа было помещено в кварцевую ампулу, из которой затем был выкачен воздух, после чего сама ампула была герметически запаяна. Из-за спонтанного деления ядер плутония в ампуле среди прочих продуктов образовывался и ксенон. Примерно через два года ампулу вскрыли, а образовавшийся ксенон был исследован с помощью масс-спектрометра. Хотя за это время путем деления распалась мизерная часть плутония-244, однако при высокой чувствительности современных приборов ее оказалось достаточно, чтобы исследовать изотопный состав полученного ксенона. Он оказался в точности таким же, как и в метеоритах-ахондритах. Это и доказывает, что следы деления, наблюдавшиеся в метеоритах, оставлены ядрами именно плутония-244.

18. Возникла идея, что в углистых метеоритах-хондриатах надо искать следы деления ядер гипотетических сверхэлементов. (Углистыми называют

метеориты, в состав которых входят углеродсодержащие минералы и соединения. В этих веществах в метеорите и содержатся хондры.) Их былое существование можно было бы обнаружить по изотопному составу ксенона, содержащегося в метеоритах. В основе такой идеи лежали следующие соображения. На основе квантовой механики с использованием ЭВМ было рассчитано строение электронных оболочек гипотетических сверхтяжелых атомов и тем самым определены их химические свойства. Оказалось, что наиболее устойчивые сверхэлементы должны быть химическими аналогами легколетучих элементов вроде свинца. А из всех метеоритов наиболее богаты такими элементами именно углистые метеориты.

Из углистых метеоритов-хондритов путем нагревания до 1000—1200 °C были выделены пейтрониизбыточные изотопы ^{136}Xe , ^{134}Xe , ^{132}Xe и ^{131}Xe . Казалось, что эти изотопы выделялись при делении ядер какого-то трансурана. Но все ядра известных трансуранов при делении не выделяют ксенон с таким же изотопным составом. Первоначально это считалось доказательством былого существования сверхэлемента, при делении ядер которого и получился ксенон наблюдаемого изотопного состава. Однако такое заключение вскоре было опровергнуто. Действительно, непосредственно при делении спачала получаются пейтрониизбыточные, но β^- -неустойчивые ядра (см. § 93, пункт 11). Претерпев β^- -распад, они в конце концов переходят в стабильные ядра ксенона. Эти стабильные ядра также еще должны быть пейтрониизбыточными. Нейтроподефицитные ядра ксенона при делении получиться не могут. А между тем в метеоритах они содержатся. Оказалось, что чем больше пейтрониизбыточных стабильных ядер, тем больше и нейтронодефицитных стабильных ядер. Это не согласуется с предположением, что все стабильные изотопы ксенона в метеоритах получились в результате деления. Другие контрольные опыты также подтвердили такое заключение.

Таким образом, исследование изотопного состава ксенона в метеоритах не принесло доказательства существования в настоящее время или в отдаленном прошлом сверхэлементов. Другие методы, основанные на измерении длины треков в метеоритах и на Земле, также пока не дали окончательного ответа на вопрос о существовании сверхэлементов. Для этого требуются дальнейшие исследования.

ЗАДАЧИ

1. Для качественного уяснения влияния электронного захвата на стабильность электронной оболочки атома можно предположить, что захват электронов как бы мгновенно происходит с боровской орбиты с главным квантовым числом n . Исходя из такого представления, оценить наименьшее значение числа Z , выше которого стабильность электронной оболочки атома становится невозможной, предполагая, что $n = 1, 2, 3, 4, 5$.

Решение. Такое представление эквивалентно предположению, что внутри сферы с радиусом n -й боровской орбиты электропров нет, а размер ядра (при том же заряде) как бы увеличен до размеров этой сферы. Но радиус n -й боровской орбиты пропорционален n^2 . Тем самым задача свелась к задаче, разобралной в пункте 2, если только в уравнении (94.1) r_0 заменить на $r_0 n^2$. Иначе говоря, надо оперировать с неравенством

$$\frac{A^{4/3}}{1,97 + 0,015 A^{2/3}} \leq \frac{38\,000}{n^2}. \quad (94.16)$$

Из него находим, что для стабильности электронной оболочки необходимо выполнение условий:

$$\begin{aligned} Z &\leq 1460 \quad (n = 1), & Z &\leq 370 \quad (n = 3), \\ Z &\leq 630 \quad (n = 2), & Z &\leq 250 \quad (n = 4), \\ && Z &\leq 185 \quad (n = 5). \end{aligned}$$

2. Определить в нерелятивистском приближении кинетическую энергию, приобретаемую зарядом q массой m , если радиус орбиты, по которой он вращается, равен r , а магнитное поле H однородно.

Ответ. $\mathcal{E} = q^2 R^2 H^2 / 2mc^2$.

3. Ядро ускоренного иона ^{238}U сталкивается с покоящимся ядром того же урана и на короткое время сливаются с ним в гантелеобразное вращающееся ядро. Оценить минимальную угловую скорость вращения ω полученного гантелеобразного ядра.

Решение. Момент импульса вращающегося гантелеобразного ядра определяется формулой $L^2 = l(l+1)\hbar^2$, в которой следует положить $l = 1$. Таким образом, $L = \sqrt{2}\hbar$. С другой стороны, $L = J\omega$, где J — момент инерции гантелеобразного ядра относительно его центра масс. Для оценки J заменим гантель двумя соприкасающимися ядрами урана. Момент инерции сплошного шара относительно касательной к нему равен $7/5mr^2$, а двух шаров относительно общей касательной — $14/5mr^2$. Радиус ядра урана $r = 8,7 \times 10^{-13}$ см, $m = 4 \cdot 10^{-22}$ г, $J = 8,5 \cdot 10^{-46}$ г·см². Следовательно,

$$\omega = \frac{\sqrt{2} \cdot 1,05 \cdot 10^{-27}}{8,5 \cdot 10^{-46}} = 1,7 \cdot 10^{18} \text{ с}^{-1}.$$

4. В уроловых рудах обнаружены ничтожные количества $^{239}_{94}\text{Pu}$. Такой плутоний образуется из $^{238}_{92}\text{U}$ под действием пейтронных потоков, всегда имеющихся в руде. Нейтронные потоки в свою очередь возникают и поддерживаются при спонтанном делении ядер урана или под действием космических лучей.

Оценить долю атомов $^{239}_{94}\text{Pu}$, отнесенную к числу атомов руды, предполагая, что руда состоит из чистого урана-238 и что плутоний образуется только под действием пейтронов от спонтанного деления ядер урана. Период полураспада урана-238 относительно спонтанного деления $T_{1/2}^{\text{U}} \approx \approx 10^{16}$ лет, плутония $T_{1/2}^{\text{Pu}} \approx 2,4 \cdot 10^4$ лет.

Решение. Предположим, что каждый пейтрон, возникающий при спонтанном делении ядра урана, поглощается ядром того же урана с образованием плутония. Как при всяком радиоактивном равновесии, искомая доля плутония $N_{\text{Pu}}/N_{\text{U}}$ найдется из требования, чтобы число распадающихся в единицу времени при спонтанном делении ядер урана было равно числу распадающихся за то же время ядер плутония. Это дает

$$N_{\text{Pu}}/N_{\text{U}} = T_{1/2}^{\text{U}}/T_{1/2}^{\text{Pu}} \approx 10^{-12}.$$

В действительно встречающихся рудах отношение числа атомов плутония к числу атомов руды примерно на два порядка меньше приведенного значения. Причина расхождения заключается в том, что $N_{\text{U}} < N_{\text{руды}}$, а главное в том, что большая часть пейтронов, возникающих при спонтанном делении ядер урана, поглощается ядрами других веществ руды, а также уходит паружу. Кроме того, не всякий пейтрон, поглощенный ядром урана, вызывает деление.

§ 95. Цепная реакция и ядерные реакторы

1. При делении тяжелых ядер освобождается энергия, равная в среднем около 200 МэВ на каждое делящееся ядро (см. § 93). Эта величина в сотни миллионов и миллиарды раз превосходит энергию, освобождающуюся в единичном акте химических реакций (последняя величина в лучшем случае составляет несколько