

539

X35

Г. ХЕВЕШИ и Ф. ПАНЕТ

РАДИОАКТИВНОСТЬ

П Е Р Е В О Д
А. ЛУКАШУКА

ПОД РЕДАКЦИЕЙ
В. Г. ХЛОПИНА



НАУЧНОЕ ХИМИКО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТДЕЛ В. С. Н. Х.

ЛЕНИНГРАД

1925

Депозитарий

Г. ХЕВЕШИ и Ф. ПАНЕТ

53
x35

1539
1950 г.

РАДИОАКТИВНОСТЬ

ПЕРЕВОД
А. ЛУКАШУКА

ПОД РЕДАКЦИЕЙ
В. Г. ХЛОПИНА

1394804

Проверено

Депозитарий
~~3641~~
БИБЛИОТЕКА

ИНВ. 982
ЛЕНИНГРАД

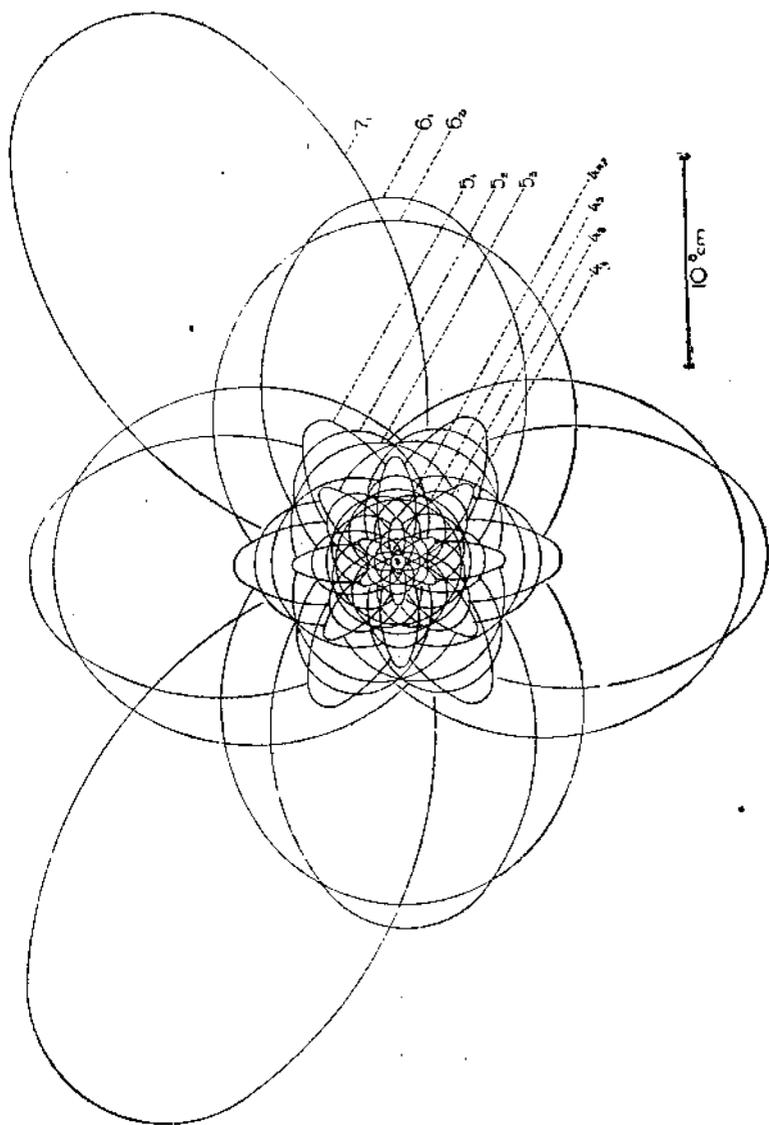
РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА

НАУЧНОЕ ХИМИКО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТДЕЛ В. С. Н. Х.
ЛЕНИНГРАД • 1925

ПРОВЕРЕНО
1956 г.

ИЗДАТЕЛЬСТВО





Атом радия (по Н. Бору).

В центре — атомное ядро, вокруг — орбиты 90 электронов; внутренняя часть внешних орбит опущена для того, чтобы сделать рисунок более наглядным. В действительности, орбиты расположены симметрично в *пространстве*, а не в одной плоскости.

ГЛАВА I.

В в е д е н и е.

I. Основные опыты.

Учение о радиоактивности ведет свое название от химического элемента радия, который был открыт в 1897 г. и на котором, главным образом, и были наблюдаемы те своеобразные явления, исследование которых и составляет содержание этого учения. Радий получается таким образом, что содержащийся в ничтожных количествах в урановых минералах барий отделяется в форме хлоридов и подвергается дробной кристаллизации. В трудно растворимых частях при этом происходит обогащение хлоридом радия, и он может быть таким образом в конце концов получен в химически чистом виде*). Соли радия (хлориды, бромиды, карбонаты, сульфаты и т. д.) и металлический радий весьма походят в химическом отношении на соответственные соединения бария и металлический барий, но радий отличается своими особыми свойствами от этого последнего и почти всех других химических элементов; мы рассмотрим наиболее важные опыты, которые показывают эту особенность радия, не вдаваясь здесь ближе в обсуждение экспериментальных трудностей, с которыми многие из них сопряжены. Мы воспользуемся для опытов запаянной стеклянной трубкой, в которой находится несколько сантиграммов хлористого радия.

1. Если стеклянную трубочку на несколько секунд положить на фотографическую пластинку и потом эту последнюю проявить, то на том месте, где лежала трубочка, обна-

*) Более подробно о способе получения см. гл. 23.

руживается сильное, кругом же постепенно ослабевающее к краям поперечные пластинки.

2. Экран с навесенным на нем платино-сиеродистым барием, находящий применение при исследовании рентгеновых лучей, также светится, если к нему приблизить трубочку с радием.

3. Заряженный электроскоп теряет свой заряд при приближении трубочки.

4. Внутри трубочки мало по малу собираются очень небольшие, но обнаруживаемые методами микрогазового анализа, количества двух различных газов: гелия и эманации.

5. Если стеклянная трубочка очень тонка, но несмотря на это все же вполне газонепроницаема, то можно наблюдать появление газа гелия также и снаружи трубки.

6. Трубочка имеет всегда несколько более высокую температуру, чем окружающая среда.

Путь для объяснения всех этих удивительных свойств дает главным образом опыт 4-ый. Вначале в трубочке были обнаружены тонким химическим анализом только два элемента: радий и хлор в форме твердого соединения $RaCl_2$, но через несколько дней или недель, как уже было упомянуто, там накапливается минимальное количество смеси газов, спектроскопическое исследование которой наряду с гелием дает возможность распознать еще присутствие ранее неизвестного элемента, который был назван эманацией. Этот элемент—по своему своеобразному спектру и неспособности вступать в химические реакции, так же как и гелий должен быть причислен к благородным газам. Из хлористого радия образовались таким образом два новых химических элемента, и так как совершенно то же самое наблюдается при бромистом радии и металлическом радии, мы должны заключить, что именно сам элемент радий превращается в два других химических элемента. Количественное исследование дает представление о способе и характере этого превращения. Если заключить 1,3138 *гр.* $RaCl_2$ (которые соответствуют 1,000 *гр.* радия элемента) в освобожденную от воздуха трубку, то можно убедиться с помощью микрогазо-

вого анализа в том, что через четыре дня образуется 0,311 *кб. мм.* эманации (при 760 *мм.* давления и при 0° C), спустя восемь дней — 0,163 *кб. мм.*, после тридцати дней — 0,607 *кб. мм.*, и что это последнее значение в дальнейшем даже спустя год, два или более лет, больше не изменяется. В случае гелия, напротив, наблюдается, если не считать первых дней, увеличение его содержания пропорционально времени, так через год образуется круглым числом 167 *кб. мм.* гелия, через два года его будет в два раза больше и т. д. *)

Это различное поведение гелия и эманации основано на различной природе обоих газов. Чтобы это исследовать, мы их разделим и будем за ними наблюдать в течение продолжительного времени. Гелий почти совершенно не меняется; его объем остается при произвольно долгом хранении постоянным. Совсем иначе ведет себя эманация; хотя она была совершенно очищена от гелия, этот последний, оказывается, через несколько дней появляется снова, в то время как эманация постоянно убывает; после четырех дней ее имеется только половина, через восемь дней — около четверти, спустя месяц лишь одна тысячная. При этом обнаруживается еще новое изумительное явление, которое для понимания процесса особенно существенно: на стенках сосуда, в котором хранилась эманация, образуется осадок свинца. Количество образующегося свинца находится в простом соотношении с исчезнувшей эманацией; вместо каждого атома последней появляется атом свинца; его количество достигает таким образом в течение первых четырех дней уже до половины максимального значения и остается через месяц уже практически постоянным **). Далее можно установить, что наполненная эманацией трубка обнаруживает все явления, описанные в опытах 1, 2, 3, 5 и 6, которые мы могли наблюдать с трубками наполненными радием.

*) Совершенно точным это отношение назвать нельзя, т. к. уже в течение одного месяца накапливается так много полония, что образующийся из него гелий становится заметным.

***) Более близко свойства появляющегося таким образом свинца, называемого RaD, будут изучены несколько позднее.

II. Гипотеза атомного распада.

Все указанные наблюдения и опыты могут быть вполне объяснены теорией, которая, кроме того, охватывает целый ряд других здесь не упомянутых родственных явлений и делает возможным правильное предсказание еще не открытых феноменов. Теория базируется на одной принципиально новой гипотезе, а именно, на допущении распада химического атома. До открытия радиоактивных элементов представлялось возможным свести все явления химии и физики на поведение атомов и их молекулярных соединений. Несмотря на многочисленные попытки никогда не удавалось осуществить превращение одного химического элемента в другой, и так как атом рассматривается, как носитель свойств элемента, то было неизбежно принять, что химический атом остается неизменным при всех обстоятельствах. И с этим не находится в противоречии то обстоятельство, что при многих процессах — при излучении света, ионизации и особенно при образовании химического соединения — определенные свойства атома исчезают и их место заступают другие; для объяснения этого достаточно сделать допущение, что сущность атома остается неизменной и что здесь имеют место только относительно ничтожные изменения, которые всегда опять могут быть сделаны обратимыми *). Тот факт, что из радия образуются новые элементы — гелий и эманация — мы должны понимать таким образом, что из атома радия образуются атомы гелия и эманации. Здесь мы, таким образом, имеем дело с распадом атома радия, и этот процесс необратим. Никогда еще не было замечено, несмотря на делавшиеся в этом направлении попытки, образование радия из гелия и эманации. Это свойство распада присуще не только радю, но, как мы говорили выше, также и эманации, которая в свою очередь превращается в другие

*) Что должно понимать под „сущностью атома“ в свете новейших теорий, будет еще обсуждаться на последующих страницах.

элементы, и еще большому числу других радиоактивных веществ, которые мы изучим дальше. Для объяснения этих случаев оказались недостаточными существовавшие воззрения химии и физики и должна была развиваться новая наука — учение о радиоактивности. Название „радиоактивный“, точно так же, как и сам термин „радий“, было выбрано потому, что главное явление, обратившее на себя внимание, заключалось в испускании особых характерных лучей (Radius = луч); несколько позднее было замечено, что эти лучи есть только явление, сопровождающее атомный распад, и поэтому теперь какое либо вещество определяется, как радиоактивное, если его атомы самопроизвольно распадаются, независимо от того, возникают ли при этом какие либо заметные лучи или нет.

Явления с 1 по 6, которые мы рассмотрели, как основные, представляют собою всегда результат действия этих лучей; природу лучей мы имеем в виду изучить в особой главе. Здесь же мы только укажем, что эти лучи служат не только качественным указанием на радиоактивность вещества, но применяются также с особым успехом для их количественных измерений. Для всякого рода лучей применимо правило, что их интенсивность прямо пропорциональна количеству имеющегося излучающего вещества. Вместо вышеуказанных, при практическом выполнении очень трудных, химических или газометрических определений количества какого либо радиоэлемента, во всех почти случаях применяется для определения его количества измерение по его лучам. Поэтому необходимо точное знание лучей и методов их измерения.

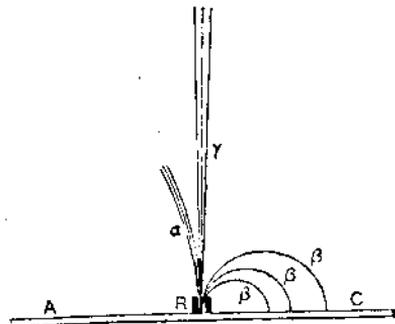
III. Лучи радиоактивных веществ.

Для понимания этой главы целесообразно вспомнить, какие разнообразные теории выдвигались для объяснения световых лучей и другого рода известных физикам лучей. В то время как Ньютон видел в световых лучах поток очень быстро движущихся материальных частиц, Гюйгенс вы-

ступил с воззрением, что здесь мы имеем дело не с поступательным движением материального субстрата, а только с состоянием волнообразного движения; согласно его теории, которая для света после продолжительного обсуждения и многочисленных опытов оказалась более удовлетворительной рабочей теорией, луч света является результатом распространения колебательного движения в эфире. Та же самая альтернатива позднее возникла и по поводу катодных и рентгеновых лучей: здесь также оба способа объяснения находили себе выдающихся приверженцев, пока окончательно в отношении катодных лучей не победила теория излучения, а в отношении рентгеновых лучей — волнообразная теория.

В случае радиоактивных веществ невозможно какое либо простое решение в том или другом смысле, так как имеются налицо оба сорта лучей: имеющие материальную природу и лучи подобные свету. Корпускулярную природу имеют, так называемые, α - и β -лучи, γ -же лучи, напротив, суть, так же как и родственные им рентгеновы лучи, не что иное, как свет очень короткой длины волны. Общее для всех этих лучей, и основание, почему они объединяются под этим именем, лежит только в том, что все они переносят энергию в пространстве прямолинейно и с большой скоростью. Как уже упоминалось, еще до открытия лучей радия были известны лучи другого рода, которым следовало приписать в противоположность свету материальную природу. Таковы катодные лучи, которые возникают в сильно разряженной трубке при высокой разности потенциалов и состоят из потока частиц отрицательного электричества, так называемых, электронов; в этих же трубках можно доказать существование частиц, движущихся в обратном направлении — против катода — так называемых, канальных лучей, которые в зависимости от того вещества, которое наполняет трубку (кислород, углекислота, ртуть и т. д.), состоят из молекул и атомов различных химических элементов и соединений, несущих положительный электрический заряд. С первыми, катодными лучами, оказываются сходны β -лучи, тогда как с последними

каваловыми лучами (также называемыми положительными электрическими лучами) обнаруживают большое сходство α -лучи. Уяснение природы лучей радия достигается путем опытов над их отклонением и поглощением; следующая диаграмма (фиг. 1) показывает схематически действие сильного магнита на пучок α -, β - и γ -лучей, выходящих из узкого отверстия в прямом направлении; магнитное силовое поле следует представить себе перпендикулярно к плоскости чертежа, при чем северный полюс находится над бумагой. α -лучи будут слабо отклоняться влево, β -лучи гораздо сильнее направо; при достаточной силе последние описывают полный круг, в то время, как γ -лучи, вообще, не испытывают на себе никакого влияния магнитного поля. По направлению отклонения можно установить знак заряда (положительный или отрицательный) по величине отклонения, сопоставляя его с подобным же исследованием отклонения в электрическом поле, — величину заряда, массу и скорость α - и β -частиц.



Фиг. 1.

Действие магнитного поля на α -, β - и γ -лучи.

Другой основной путь для исследования природы лучей заключается в изучении абсорбции лучей, т. е. их ослабления при прохождении через материю, все равно, находится ли последняя в газообразном, жидком или твердом состоянии.

В то время как γ -лучи при наложении алюминиевого листка в 5 мм. толщины испытывают только незначительное ослабление, α -лучи и почти в такой же мере β -лучи задерживаются им совершенно; тонкий листок бумаги или алюминия толщиной в 0,1 мм. недостаточен, чтобы задержать β -лучи, но он же делает совершенно недействительными α -лучи. Здесь мы имеем простое средство, наряду с магнитным и электрическим отклонением, отделить друг

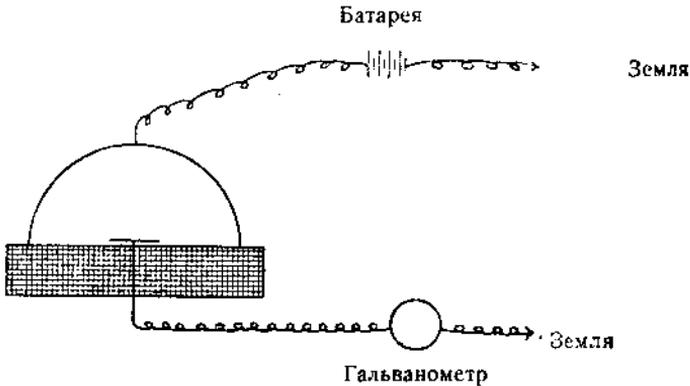
от друга различного рода лучи. Методы для измерения их силы мы изучим в следующей главе.

IV. Методы измерения лучей радия.

Естественно, что принципиально каждое из хорошо выраженных действий лучей радия могло бы быть применяемо для количественного их определения путем сравнения; так, можно было бы простейшим образом показать, что радиевые препараты в течение года существенно не изменяются, если сравнивать друг с другом те потемнения, которые были вызваны ими при действии на фотографическую пластинку в течение определенного времени (см. основной опыт 1). Особенно точных результатов по этому способу, однако, не получается. Так же мало дадо бы и тепловое действие (основной опыт 6), так как только при очень сильных препаратах оно может быть установлено точно*). Лучшим и наиболее разносторонним методом оказалось действие лучей на газы, изоляционные свойства которых, по отношению к электрическому заряду, под действием лучей радия, как известно, уменьшаются (основной опыт 3). Представим себе положительно заряженное медное полушарие, поставленное на хороший изолятор, как, напр., парафин, и со всех остальных сторон окруженное воздухом. Коль скоро мы прикоснемся к полушарию проволокой, другим концом соединенной с землей („заземленной“), заряд с шара потечет в землю. Воздух сам по себе не обладает способностью проводить электричество, но если мы приблизим к полушарию какой либо радиевый препарат, то воздух приобретет эту способность, и электричество потечет теперь через воздух подобно тому, как если бы мы соединили шар проводником; воздух благодаря лучам радия „делается проводящим“ и тем в большей степени, чем сильнее тот препарат радия, которым мы для этой цели пользовались.

*) Исключительный случай, когда тепловой эффект с успехом будет применен для измерения количества радиоактивных веществ, мы рассмотрим ниже (см. главу 24, примеч. 17, стр. 211).

Только что описанный незатейливый аппарат может уже служить, как совершенный измерительный инструмент. Чтобы измерить вызванную лучами радия проводимость только определенного, хорошо известного количества воздуха, возьмем объем его, заключенный внутри заряженного полушария. На парафиновой пластинке, на которой покоится это полушарие, имеется круглая металлическая пластинка, укрепленная с таким расчетом, чтобы она находилась по возможности точно в центре шара, от которой, как это видно



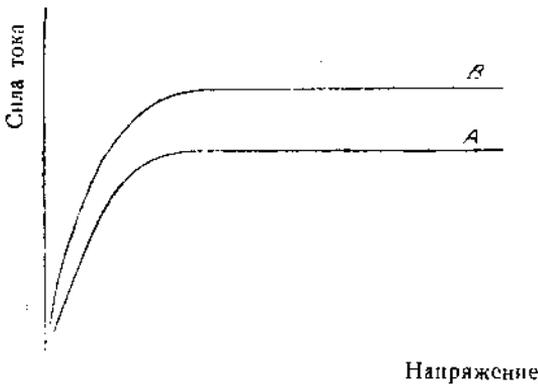
Фиг. 2.

Прибор для измерения сильных препаратов радия.

из схематической фигуры 2, через парафиновую пластинку идет к земле, проходя через гальванометр, проволока. На металлическую пластинку кладется измеряемый препарат, затем ее накрывают полушарием и последнему сообщают напряжение в 1000 — 2000 вольт. Если препарат не испускает никаких лучей, то воздух внутри полушария является изолятором, и электричество не может с него перейти на металлическую пластинку и в гальванометр; если же, вследствие испускаемых препаратом радия лучей, воздух в пространстве между шаром и пластинкой «ионизирован», электричество стекает, соответственно силе ионизации, с шара на пластинку и отсюда через гальванометр

в землю. Отсчитываемый по гальванометру ток есть мера вызываемой в воздухе ионизации и одновременно также силы препарата радия, когда приложенное напряжение достаточно велико, чтобы получить в ионизированном воздухе максимальный ток, так наз., „ток насыщения“. При недостаточном заряде имеет место сложная зависимость, которая вкратце будет пояснена ниже.

Если мы при препарате данной силы будем мало по малу повышать заряд внешнего шара, то вначале ток будет увеличиваться быстро, а затем медленно, как это поясняет



Фиг. 3.

Ток насыщения.

следующая кривая *A* (фиг. 3). Свыше известного напряжения ток становится постоянным. При более сильном препарате общий ход кривой останется таким же, достигая в этом случае, однако, более высокого постоянного значения (кривая *B*). В то время как при малом заряде сила тока зависит как от заряда, так и от препарата, при определенно высоком заряде сила тока становится функцией только силы препарата и может поэтому служить мерой этой силы („ток насыщения“). При строгом соблюдении постоянных условий опыта, само собою разумеется, возможно так же сравнивать силы препаратов, пользуясь ненасыщенными токами и по практическим основаниям при многих измерениях можно не доби-

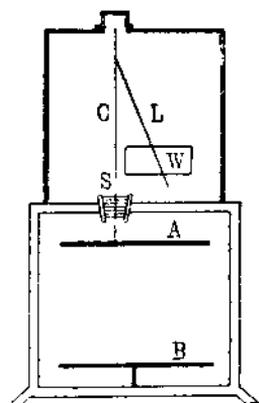
ваться полного насыщения; главным образом, при α -лучах, которые на каждом сантиметре своего пути образуют много больше ионов, чем β -лучи (см. стр. 37), часто невозможно бывает достигнуть насыщения.

Вышеуказанные гальванометрические измерения могут быть выполнены только с очень сильными препаратами, так как достигаемый в воздухе ток насыщения всегда очень слаб (см. стр. 20 примеч.); поэтому возникла необходимость применять другие чувствительные аппараты, которыми, вообще, не пользуются для измерения тока. В первую очередь здесь должен быть назван электроскоп; этот инструмент состоит, как известно, в своем простейшем виде из двух металлических листочков, которые при заряде расходятся один от другого. Чем сильнее они будут заряжены, тем больше будет их расхождение, каковое можно, пользуясь электроскопом, как измерительным инструментом, отсчитывать по шкале. Расхождение листочков остается при нормальных обстоятельствах долго постоянным и уменьшается только очень медленно („натуральное спадание“), так как воздух является изолятором, хотя и не абсолютным; если внести поблизости препарат радия, листочки начинают спадаться быстрее в зависимости от того, насколько сильна проводимость, которую препарат в воздухе вызывает; в два раза более сильный препарат вызывает, при точном соблюдении тех же самых условий опыта, в два раза большую проводимость и вдвое более быстрое спадание. Время, которое нужно, чтобы листочки при спадании прошли определенный участок (определенное число делений шкалы), обратно пропорционально силе препарата. Мерио ионизирующего действия служит здесь также получающийся ток насыщения; если шкала электроскопа вымерена в вольтах и емкость (C) всего измерительного прибора, выраженная в сантиметрах, равным образом, известна, то ток насыщения вычисляется следующим образом: в течение t секунд листочки опустились от V_1 до V_2 , „падение потенциала“ равно таким образом $V_1 - V_2$, перешедшее же количество электричества поэтому равно $C(V_1 - V_2)$. В секунду пере-

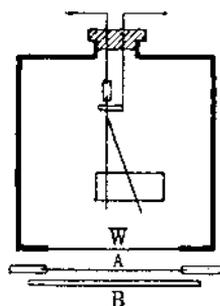
шедшее количество электричества, или электрический ток, есть, следовательно, $C \frac{V_1 - V_0}{t}$. Так как 1 вольт = $\frac{1}{300}$ эл.-статических единиц, полученное значение нужно еще разделить на 300, чтобы иметь ток насыщения в эл.-статических единицах; конечная формула выражается таким образом:

$$i_{\text{эл.-ст. ед.}} = C \frac{V_1 - V_2}{300 t}$$

Чрезвычайная простота обращения, быстрая работа с ним, а также незначительная его цена делают электроскоп наи-



Фиг. 4.
α-электроскоп.



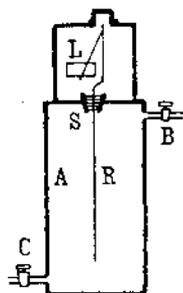
Фиг. 5.
β-электроскоп.

более употребительным измерительным аппаратом при работах по радиоактивности.

Соответственно с той целью, которой они в первую очередь служат, различают несколько типов электроскопов. Фиг. 4 показывает, так называемый, „α-электроскоп“, т.-е. электроскоп, который хотя дает возможность измерять все три сорта лучей, но для сравнительно гораздо более слабого действия β- и γ-лучей в общем слишком мало чувствителен. В нем различают ионизационную камеру, в которую вносится препарат, и которая отделяется изолятором S из ян-

таря или серы от камеры, где находятся листочки электро-скопа. Через изолятор проходит электрод *A*, который при работе заряжается до определенного потенциала, тогда как электрод *B*, так же как и с ним соединенная металличе-ская оболочка, соединяется с землей (заземляется).

В β -электро-скопе уменьшением емкости достигается повышение чувствительности ионизационной и измери-тельной камер электро-скопа; в дне его имеется вырез *W*, закрывающийся тонкой алюминиевой фольгой, которая дает возможность проходить только β -лучами, задерживая α -лучи. Стенки электро-скопа выбираются та-кими, чтобы они не пропускали также и β -лучей. Препарат кладется снизу под алю-миниевую фольгу. В таком β -электро-скопе естественно будет одновременно измеряться и нередко присутствующие γ -лучи, но их действие в процентном отношении по срав-нению с действием β -лучей настолько мало, что большей частью не принимается в ра-счет. Тот же самый электро-скоп может упо-требляться так же, как „ γ -электро-скоп“, если в нем вырез *W* вместо алюминиевой фольги закрыт металлической пластинкой толщины стенок электро-скопа.



Фиг. 6.

Эманационный электро-скоп.

Если имеют дело с определением газообразных радио-активных веществ, то в этом случае находит себе примене-ние, так называемый, „эманационный электро-скоп“, который характеризуется тем, что его ионизационная камера предст-авляет собою закрытый газонепроницаемый сосуд. Здесь воспроизводится одна из многочисленных возможных форм этого прибора (фиг. 6). Если имеются в виду не только сравнительные измерения, каковыми обычно довольствуются при определении радиоактивных веществ,—то необходимо определить абсолютные значения тока насыщения, для чего необходимо знать, как это следует из приведенных выше пояснений, емкость прибора и значение делений электро-скопа в вольтах. Более подробно о методике измерений мы

здесь говорить не будем, а ограничимся ссылкой на приведенные в предисловии специальные работы *). Следует только напомнить, что вместо металлических листочков в последнее время стали применять платинированные кварцевые нити, и, что во многих случаях предпочитается вместо вызываемого лучами радия „разряда“ измерять в определенный промежуток времени происходящий под действием лучей радия „заряд“, до того незаряженного электроскопа или электрометра. Принцип всех этих приемов остается тот же самый, а именно, все сводится к определению в каком либо газе вызванного тока насыщения. Для лучшего теоретического усвоения этих методов будет не бесполезно несколько остановиться на прохождении электричества через газы.

V. Прохождение электричества через газы.

Для пояснения воспользуемся общеизвестной картиной прохождения электрического тока через жидкости. Как это подробнее приводится в каждом учебнике химии или физики, чистая вода почти совершенно не проводит электрического тока; если же к ней прибавить какого-либо электролита, например, соляной кислоты, то вода получает способность проводить ток, и в то же время, как это можно доказать, H-атомы направляются к катоду, Cl-атомы к аноду. Из этого следует, что H-атомы заряжены положительно, а Cl-атомы отрицательно и что прохождение тока заключается, собственно, в переносе этих заряженных частиц.

Величина заряда этих частиц, которые по причине своего „странствования“ названы ионами, легко вычисляется. Согласно второму закону Фарадея необходимо всегда одно и то же количество электричества, чтобы выделить 1 грамм-эквивалент какого либо вещества, и для этого всегда нужно 96.493 кулона; этим количеством можно, например, выделить

*) О специально установленных единицах для, радиоактивных измерений (1 Кюри, 1 Махе, 1 Ив. и т. д.). См. при радии и при emanации радия в гл. 24.

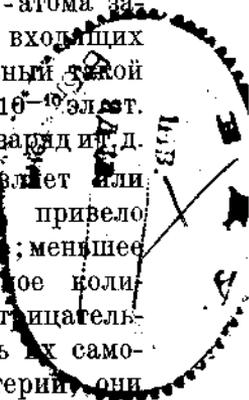
1,01 гр. водорода или $16/2 = 8$ гр. кислорода. Теперь известно, что 1,01 гр. водорода содержит $6,07 \times 10^{23}$ атомов, и каждый атом водорода несет поэтому заряд в $\frac{9649,3}{6,07 \times 10^{23}} = 1,59 \times 10^{-19}$ кулона. Такие малые количества электричества целесообразно выразить в другой системе единиц; 1 кулон $= 3 \times 10^9$ электростатических единиц; заряд, несомый одновалентным ионом, равняется таким образом $1,59 \times 10^{-19} \times 3 \cdot 10^9 = 4,77 \cdot 10^{-10}$ эл. ст. единиц. В случае двухвалентного иона при прохождении 96.493 кулона электричества выделится только $1/2$ гр. атома; эта половина грамм-атома включает в себе только половину всех атомов, входящих в состав каждого грамм-атома, и каждый отдельный такой атом несет, таким образом, двойной заряд $= 2 \times 4,77 \cdot 10^{-10}$ эл. ст. единиц. Каждый трехвалентный ион имеет тройной заряд и т. д.

То обстоятельство, что заряд атома составляет или $4,77 \cdot 10^{-10}$ эл. ст. единиц, или кратное его число привело к атомистическому представлению об электричестве; меньшее количество электричества, чем это „элементарное количество e “, никогда не наблюдалось. В случае отрицательных частиц, как известно, уже удалось доказать их самостоятельное существование, не зависимое от материи, они имеют всегда один и тот же электрический заряд, безразлично у какого бы вещества они ни образовались. Их называют электронами; мы снова с ним встретимся при β -лучах радиоактивных веществ.

Мы прибегли к этому известному представлению о проводимости электричества жидкостями, для того, чтобы облегчить себе понимание механизма прохождения электрического тока через газы; при этом наблюдаются следующего рода явления.

Заряженные тела, находящиеся в соприкосновении с газом, мало по малу теряют свой заряд; Кулон думал, что газовые молекулы при столкновении заряжаются и отдают затем свои заряды стенкам сосуда; этому, однако, противоречило наблюдение, что потеря заряда тем больше, чем больше заключающий газ сосуд. Уже из этого сле-

4207514



Погашено!

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА

довало, что разряд обуславливается частицами, которые находятся в сосуде в ограниченном числе и которые по израсходовании не могут быть возмещены; этот вывод подкрепляется опытом с газами, проводимость которых особенно возрастает или когда газы пропускаются через воду, или когда они находятся в соприкосновении с пламенем, электрической дугой, раскаленными металлами или фосфором, или когда пронизываются ультрафиолетовым светом, катодными, каналовыми, рентгеновыми лучами или, наконец, лучами радия; в этом случае повышенная проводимость исчезает со временем сама собою, но особенно быстро при прохождении через стеклянную вату, узкие металлические трубки или через электрическое поле; проводимость обуславливается, таким образом, частицами, которые можно отфильтровать и которые электрически заряжены. Так как весь газ в целом не обнаруживает никакого заряда, должно быть налицо одинаково большое число как положительно, так и отрицательно заряженных частиц. Эти частицы называют также „ионами“, а явление проводимости „ионизацией газа“. Электрическая проводимость в газах обуславливается так же, как и в растворах солей электрически заряженными частицами. Несмотря на это имеются существенные различия. Об одном мы уже говорили, а именно, о связи между напряжением и силой тока. Как известно, эта зависимость в случае электролитически проводящих жидкостей, а также и для металлических проводников, в широких пределах дается законом Ома $I = V/W$, т. - е. при постоянном сопротивлении сила тока пропорциональна напряжению. Этот закон можно пояснить таким образом, что, скажем при вдвое большем напряжении, действующая на ионы, сила также будет в два раза больше, и поэтому скорость, которую они приобретают в среде сопротивления, также удвоится, а вместе с тем и переходящее в единицу времени количество электричества, т. - е. сила тока, так же как и напряжение возрастет в два раза.

Эта пропорциональность между силой тока и напряжением может быть изображена графически прямой, проходя-

щей через точку нуля. Однако, в случае газов, ионизирующихся рентгеновыми лучами или лучами радия, эта простая зависимость, как мы видели, имеет место только на коротком участке кривой (область применения закона Ома; ср. фиг. 3), и при достаточно высоком напряжении достигается „ток насыщения“, который дальше не может быть превзойден. Особенно же замечательно здесь то, что ток насыщения тем больше, чем дальше отстоят друг от друга электродные пластинки, в то время как в случае металлических проводников и при электролитах сила тока с удалением электродов, вследствие возрастающего сопротивления, падает.

Это явление объясняется следующим образом. Как при электролизе, так и в случае газовых ионов, часть ионов, даже без приложения электрического поля, исчезает, воссоединяясь в нейтральные молекулы. В стационарном состоянии, например, имеет место динамическое равновесие между HCl -молекулами, которые диссоциирующей силой воды расщепляются в единицу времени на ионы, и ионами, которые в течение того же времени опять соединяются в незаряженные молекулы. Подобно этому существует такое же динамическое равновесие между газовыми молекулами, которые под действием рентгеновых лучей расщепляются на ионы, и газовыми ионами, воссоединяющимися в незаряженные частицы.

Если приложить электрическое поле, то положительные ионы направляются к катоду, отрицательные к аноду, и если поле достаточно сильно, движение их может стать столь быстрым, что ионы уже не будут иметь возможности путем воссоединения терять свой заряд, а будут отдавать все свои заряды электродам. Этот случай не осуществим при электролитах, с одной стороны, потому, что число ионов очень велико и, с другой стороны, по той причине, что их движение к электродам вследствие сопротивления воды может быть только медленным; таким образом даже применение сильного поля заметно не нарушит равновесие между расщеплением и воссоединением ионов.

В газах же, [подвергающихся ионизации рентгеновыми лучами или лучами радия, напротив, число ионов гораздо меньше, а их подвижность много больше *).

В этом случае повышением потенциала можно на самом деле достигнуть того, что все ионы, образующиеся в определенное время под действием ионизирующего агента, устремятся к электродам, другими словами, все ионы примут участие в переносе тока. Как скоро это будет достигнуто, дальнейшее повышение разницы потенциалов не может более вызвать никакого усиления тока, так как в единицу времени возникает только определенное число ионов. Если ионизирующее действие возрастает, тогда увеличивается также и ток, так как в этом случае имеется больше ионов; ток, таким образом, есть мера ионизирующего действия и, в известных пределах, не зависит от потенциала; если мы хотим измерить ионизирующее действие препарата вполне точно, необходимо иметь ток насыщения.

Первая часть кривой на фиг. 3, область применения закона Ома, отвечает вполне отношениям в электролитах, дальнейшая же часть (неполное насыщение и ток насыщения) в случае электролитов не может быть достигнута.

Объяснение вышеупомянутого явления, а именно, что ток насыщения усиливается, если больше раздвинуть электроды, следует также непосредственно из теории. Если ионизация происходит во всем газе равномерно, то

*) В то время как содержание ионов в сильно диссоциированном нормальном растворе электролита составляет почти 10^{20} на куб. см., содержание их в газе, даже при наиболее сильной ионизации рентгеновыми лучами или подобными им, едва достигает 10^6 на куб. см. Подвижность обыкновенного газ-иона составляет в кислороде почти 1—2 (измеренная в см. сек. на вольт см.), в водороде даже 7—8, в то время как в воде подвижность большей части электролитических ионов (Cl, K и т. д.) только $7 \cdot 10^{-4}$, и даже H-ионы имеют подвижность не более как $3 \cdot 10^{-3}$. Оба эти обстоятельства, меньшее число и большая подвижность, обуславливают достижение тока насыщения в газах. Проводимость умалется первым обстоятельством, второе же хотя и повышает её, но в столь незначительной степени, что проводимость даже в водородном газе едва достигает величины, отвечающей проводимости раствора кислоты в $1 \cdot 10^{-10}$ нормального.

тогда между электродами должно образоваться тем больше частиц в единицу времени, чем дальше пластинки отстоят друг от друга, и тем сильнее поэтому будет ток.

Кроме только что, несколько подробно, разобранный зависимости проводимости от напряжения, на которой мы остановились вследствие ее практического значения, имеется еще другое существенное различие между электролитическими и газовыми ионами. Прежде всего у последних отсутствует близкая связь заряда с химической природой. При электролизе, как известно, водород всегда несет один положительный заряд, кислород всегда два отрицательных и т. д.; газовые ионы же в водороде и кислороде несут совершенно одинаковые заряды. И в то время как в растворах большинства веществ мы находим ионизированные атомы, газовые ионы тех же самых веществ обычно состоят из ионизированных молекул. При электролизе все ионы примерно одинаковых размеров, а если даже и встречаются, благодаря гидратации, различия в их величине (а соответственно и в подвижности), то они не велики; среди газовых ионов разнообразие гораздо большее. В настоящее время можно составить себе следующее представление о процессе ионизации газов.

В результате столкновения газовой молекулы с электронами катодных или β -лучей, наконец, с электронами, вторично образовавшимися от рентгеновых лучей, γ -лучей или ультрафиолетового света, нейтральная частица отщепляет один электрон. Вследствие этого одновременно образуется положительный ион, имеющий атомные размеры. При малом давлении или при высокой температуре эти ионы остаются свободными в газе, вообще же, вследствие электростатического притяжения незаряженные частицы группируются вокруг ионов и увеличивают поэтому их массу. Вычислено из измерений диффузии, что обыкновенные газовые ионы („малые ионы“, моль-ионы“) в общем состоят из целой группы в 30 молекул. Заряд не зависит от числа соединившихся частиц; он может оставаться элементарным зарядом, но к нему могут присоединиться так же и новые заря-

женные ионы. Помимо отрицательных электронов, положительных атомо-ионов и положительных или отрицательных моль-ионов, существуют еще „большие ионы“ (называемые также „медленными ионами“), о которых необходимо упомянуть, так как с ними иногда приходится иметь дело в начале измерений, и в таком случае затрудняется достижение тока насыщения. Для газовых ионов мы должны поэтому в отличие от электролитических ионов допустить существенную разницу между положительными и отрицательными ионами; положительные всегда связаны с массой порядка величины атома, отрицательные же газовые ионы сплошь и рядом представляют собою не что иное, как электроны.

ГЛАВА II.

α -лучи.

1. Масса и заряд α -лучей.

Как было уже указано, из направления отклонения, претерпеваемого α -лучами в магнитном поле, следует, что эти лучи состоят из положительно заряженных частиц. Также и электрическое поле действует отклоняющим образом. Сопоставляя величины электрического и магнитного отклонения, мы получаем для заряженной частицы всегда очень характерную величину, именно, отношение заряда к массе частицы, e/m . Мы возьмем за единицу заряда элементарный заряд, который несет один одновалентный ион ($e = 4,77 \cdot 10^{-10}$ эл. ст. ед.), а за единицу массы — массу водородного атома ($m = 1,66 \times 10^{-24}$ гр.). Вычисляя в этих единицах e/m для α -частицы, получаем величину $1/2$, т. е. одна такая частица несет один элементарный заряд и имеет атомный вес 2, или она несет 2 элементарных заряда и обладает атомным весом 4 и т. д. Для решения этого вопроса служат как физические, так и химические методы.

Экран, покрытый, напр., сернистым цинком, вспыхивает при каждом попадании отдельной α -частицы; если сосчитать эти „сцинтилляции“ и, кроме того, определить сколько положительного электричества в тех же условиях этот α -излучающий препарат передает электрометру, — получают делением второй величины на первую заряд, несомый отдельной α -частицей; он оказывается равным 2 элементарным единицам. Отсюда массе частицы следует приписать значение равное 4, т. е. атомный вес гелия¹⁾.

Этот результат подтверждается следующим химическим опытом. Если внести эманацию радия или другое α -излу-

чающее вещество в запаянную тонкостенную ($< 1/100$ мм. толщиной) стеклянную трубку, то α -лучи будут проходить насквозь; если теперь трубку перенести в более широкий толстостенный, также запаянный и эвакуированный сосуд, то уже снаружи нельзя будет обнаружить α -частицы. Частицы должны поэтому находиться в пространстве между стенками обоих сосудов или в стенках наружного сосуда. На самом деле удается спектроскопическим способом доказать присутствие гелия в эвакуированном пространстве (ср. основной опыт 5, стр. 4). Получающееся в течение года из 1 гр. радия количество гелия составляет 167 куб. мм.

Поэтому, α -частицы суть атомы гелия, снабженные двумя положительными зарядами.

Если при радиоактивном превращении возникают α -лучи, то процесс этот идет таким образом, что каждый распадающийся атом испускает только одну α -частицу. Это важное правило было доказано многочисленными опытами, в которых число распадающихся атомов было известно, и в которых выделявшиеся α -частицы определялись указанными оптическим или электрическим методами. Один из известнейших электрических методов основан на том явлении, что в заряженной до высокого потенциала игле разряд происходит через острие каждый раз, когда α -частица ионизирует воздух вблизи иглы; число этих разрядов можно регистрировать электрометром.

Число α -частиц, испускаемых 1 граммом радия без продуктов распада в одну секунду, составляет $3,72 \times 10^{10}$, а в равновесии с 3-мя α -излучающими продуктами распада в 4 раза более. Отсюда мы можем высчитать, сколько находится атомов гелия в 167 куб. мм. гелия, выделяемых 1 граммом радия в течение одного года; очевидно $3,72 \cdot 10^{10} \times 4 \times 365 \times 86400 = 4,58 \cdot 10^{18}$ атомов гелия. Согласно числу Лоренца, полученному совершенно другим путем, в 1 куб. см. каждого газа должно заключаться $2,71 \times 10^{19}$ частиц; в 167 куб. мм. гелия следует поэтому теоретически ожидать $2,71 \cdot 10^{19} \times 0,167 = 4,53 \cdot 10^{18}$ атомов.

Это превосходное согласие является убедительным доказательством правильности атомистического представления о материи, так как только в таком случае возможен подсчет числа атомов, заполняющих определенный объем газа.

II. Абсорбция, величина пробега и скорость α -лучей.

Если поднести α -излучающий препарат, напр., какую-нибудь поверхность, покрытую полонием, поблизости к экрану с сернистым цинком, этот последний под действием лучей начнет светиться. Если же препарат мало-по-малу удалять, то свечение при удалении радиоактивного слоя от экрана на определенное расстояние, которое в этом случае составляет 3,83 см., сразу прекращается, так же, как и ионизирующее*), а равно и все прочие действия лучей.

Наличие строго определенной границы, при переходе через которую не происходит больше никакой ионизации, в высшей степени характерно для α -лучей. Определение этой „дальности пробега“ может быть произведено с большой точностью различными методами.

В таблице 1 приведены некоторые величины пробега, как они получены в воздухе при атмосферном давлении и 15°C (к каковым условиям всегда, если нет других указаний, относятся величины пробега) и в числе их наибольшая и наименьшая из известных величин пробега **) у ThC' и у U_1 .

Величина пробега обратно пропорциональна давлению газа и прямо пропорциональна абсолютной температуре; поэтому

*) Если внести препарат в α -электроскоп, у которого две конденсаторные пластинки удалены друг от друга значительно более, чем на 3,83 см., действие препарата на электроскоп не прекращается. Диффузия и перенос в электрическом поле приводят к тому, что ионы воздуха еще до их воссоединения попадают в промежуточное пространство и производят разряд электроскопа.

**) В настоящее время обнаружены α -лучи с величиной пробега 11,3 см., но такой величиной пробега обладает только $\frac{1}{10000}$ часть всех α -частиц, испускаемых препаратом ThC .

ТАБЛИЦА 1.

Величины пробега и начальные скорости α -лучей при 15°
и атмосфер. давлении.

	Величина пробега	Скорость в см/сек.
U _I . . .	2,67 см.	$1,40 \times 10^9$
Th . . .	2,90	1,44
U _{II} . . .	3,07	1,46
Jo	3,19	1,48
Ra	3,39	1,52
Po	3,93	1,59
RaEm . . .	4,12	1,61
ThA	5,68	1,80
ThC' . . .	8,62	2,06

α -лучи при высоком вакууме имеют очень большую величину пробега.

Величина пробега α -лучей в жидкостях и твердых телах соответственно с большой плотностью весьма незначительна. α -лучи препарата урана задерживаются уже слоем алюминия в 0,022 мм., лучи ThC', гораздо большей скорости, слоем в 0,065 мм. толщиной. Точные определения величины пробега в жидкостях и твердых телах произвести труднее, чем в газах; однако, и здесь получены специальными методами вполне положительные результаты. Так, напр., для величин пробега α -лучей RaC в твердых веществах получены следующие, приведенные в таблице 2-ой, значения.

Видно, что с увеличением плотности материала величина пробега падает. В воде величина пробега лучей RaC составляет 60,0 μ .

Вместо величины пробега, каждая среда, в отношении практических измерений, также вполне хорошо может характеризоваться величиной своего „воздушного эквивалента“, т. е. толщиной такого слоя воздуха, какой в такой же степени понижает величину пробега α -луча, как и рассматриваемая среда.

ТАБЛИЦА 2.

Величина пробега α -лучей RaC в различных металлах.

Li	129 μ	Zn	22,8 μ
Ca	78,8	Ag	19,2
Mg	57,8	Fe	18,7
Al	40,6	Ni	18,4
Sn	29,4	Cu	18,3
Cd	24,2	Au	14,0
Pb	24,1	Pt	12,8
Tl	23,1		

Так, например, слюда (плотность 2,87) такой толщины, при которой ее кв. сантиметр весит 1,50 mgr., имеет воздушный эквивалент в 1,0 см. (при 760 мм. и 15°) ⁵⁾.

Но определенная таким образом величина воздушного эквивалента при экстраполировании на толщину, отвечающую полной величине пробега в воздухе, не всегда дает правильные значения величины пробега α -лучей в исследуемом веществе, так как сами эквиваленты зависят от скорости лучей, и в силу этого один и тот же слой, помещенный в различных местах пути пробега лучей, в разной мере укорачивает величину их пробега в воздухе.

При исследовании поведения различных сред в отношении α -лучей часто, вместо „величины пробега“ или „воздушного эквивалента“, пользуются „способностью торможения“, т. е. величиной, показывающей, сколько атомов какого-либо „нормального“ вещества в отношении абсорбции может заменить один атом исследуемой среды. В качестве „нормального“ вещества берется большею частью воздух. Только что сказанное о воздушном эквиваленте также применимо и здесь, но понятие „способность торможения“ будет ясным вполне, если говорить о „средней способности торможения“; таким образом, например, под способностью торможения алюминия в отношении α -лучей RaC нужно разуметь величину, которая показывает, сколько

„воздушных“ атомов сможет в среднем заменить один атом алюминия на протяжении всего пути. Как будет подробнее указано ниже, торможение α -лучей при их прохождении вблизи атома (или при пронизывании атома) приводит к тому, что α -частицы отдают атому свою энергию, причем электроны последнего или переходят на орбиты с большим количеством энергии, или же совершенно отщепляются (ионизация). Способность торможения должна поэтому определяться числом электронов в атоме, равно как и частотой колебаний этих электронов на их нормальных орбитах ⁶⁾.

Принимая во внимание первую величину, следует ожидать, что способность торможения будет возрастать с увеличением числа электронов, всегда соответствующего порядковому числу элемента^{1*)}; так как, далее, с возрастанием порядкового числа всегда увеличивается и атомный вес, следует ожидать также увеличения способности торможения с возрастанием атомного веса, что и имеет место на самом деле, как показывают числа таблицы 3. Далее видно также, что отношение способности торможения (s) к корню квадратному из атомного веса (A) постоянно; еще лучшее постоянство показывает отношение способности торможения к атомному номеру (N) в степени $2/3$, в то время как отношение s/N менее постоянно. ²⁾

Способность торможения молекулы складывается аддитивно из таковых же для отдельных атомов, но это соотношение не всегда строго соблюдается. Значительные отклонения от аддитивности мы находим у наиболее легких элементов; так, например, из способности торможения молекулы H_2 мы получаем для H -атома значение $s = 0,200$; из соединений C_2H_4 , C_2H_6 , CH_4 , мы получаем для той же величины значение 0,187, а из способности торможения аммиака NH_3 — значение 0,173. Для CO_2 и CO строго имеет место закон аддитивности. В случае α -лучей различной величины пробега способность торможения, напротив, оказывается только

*) Более подробное объяснение выражения „порядковое число“ см. главным образом, гл. 16.

ТАБЛИЦА 3.

Способность торможения различных атомов в отношении α -лучей.

Вещество	Способность торможения s	$\frac{s}{\sqrt{A}}$	$\frac{s}{N^{2/3}}$
H	0,24	0,240	0,240
C	0,85	0,246	0,255
O	1,05	0,262	0,261
Al	1,495	0,287	0,271
S	1,76	0,312	0,277
Fe	2,29	0,307	0,261
Ag	3,28	0,316	0,252
Pt	4,14	0,297	0,227
Au	4,22	0,301	0,229
Pb	4,27	0,298	0,226

приблизительно постоянной; она растет с возрастанием величины пробега, в том случае, если атомный вес поглощающего вещества больше, чем средний атомный вес воздуха (14,4), и падает с возрастанием величины пробега, в обратном случае. Поглощающее действие пластинки, состоящей из слоев различного материала, на этом основании зависит от того, какой стороной она будет обращена к источнику излучения. Точное вычисление способности торможения из универсальных величин удается в тех случаях, когда скорость описывающих постоянные орбиты электронов мала по сравнению со скоростью исследуемых α -лучей. Так, напр., расчет в полном согласии с опытом дает, что атом лития обладает вдвое большей способностью торможения, чем атом водорода.

При прохождении через материю α -лучи претерпевают очень значительное уменьшение скорости, следствием чего является только что упомянутое явление, так что α -частицы скоро теряют свои характерные свойства (способность возбуждать флуоресценцию, вызывать потемнение фотографии-

ческой пластинки, способность ионизации) и таким образом, достигают конца своего „пути пробега“. Если не принимать во внимание самой последней части пути α -частицы, между скоростью и величиной пробега частицы, существует простое соотношение, заключающееся в том, что проходимое расстояние пропорционально третьей степени скорости. Так, напр., согласно этому соотношению, начальная скорость α -лучей RaA исчисляется в $1,693 \cdot 10^9$ см.-сек., в то время, как по отклонению в магнитном поле для этой величины получается $1,692 \cdot 10^9$ см.-сек. ⁸⁾ Для сравнения укажем, что каналовые лучи, обладающие скоростью $2,7 \cdot 10^8$ см.-сек, способны произвести ионизацию воздуха на расстоянии приблизительно в 1 мм.

III. Ионизирующее действие α -лучей.

Вследствие своей большой скорости α -частица в начале своего пути обладает весьма значительной кинетической энергией круглым счетом в 10^{-5} эргов, в 10^{11} раз более термической энергии атома гелия при комнатной температуре. Благодаря этой кинетической энергии α -лучи при столкновении с молекулами газа на протяжении своего пути вызывают сильную ионизацию ⁹⁾. Так, напр., одной α -частицей RaC' — в воздухе при атмосферном давлении и 0° — на протяжении ее пути в 6,94 см. образуется $2,37 \times 10^5$ пар ионов (т. е. равное число положительных и отрицательных ионов). Общее число пар ионов, образуемых любой α -частицей составляет:

$$k = k_0 R^{2/3},$$

где k_0 есть постоянная $= 6,76 \times 10^4$, а R представляет собою величину пробега. Зависимость ионизирующей способности в воздухе α -частиц, испускаемых RaC, от расстояния от исходного пункта видна из фиг. 7. В конце своего пути, как видно из чертежа, ионизация значительно возрастает с тем, чтобы затем очень круто упасть; последняя часть кривой показывает опять слабый, обусловливаемый, вероятно, рас-

сеянием изгиб (BC на фиг. 7). Так как вследствие этого по кривой нельзя точно отсчитать величину пробега, то эту часть падения кривой продолжают по прямой линии до пересечения с осью x -ов, и расстояние этой точки пересечения от нулевого пункта считают за величину пробега.

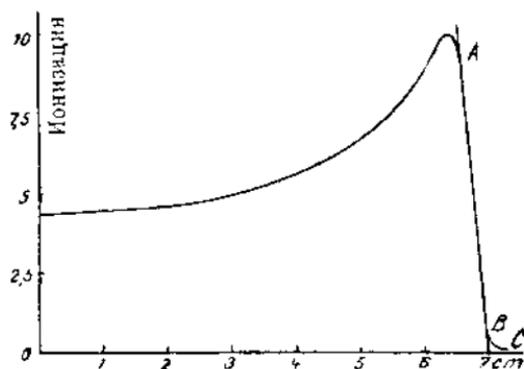
Если имеется налицо несколько α -излучающих веществ, то кривая ионизации имеет сложное строение. Фиг. 8 показывает кривую ионизации активного осадка тория. Наличие подобной кривой говорит всегда о присутствии гетерогенного излучения или,

так как каждое α -превращение сопровождается одним гомогенным излучением, о наличии различных α -излучающих продуктов.

Подобно тому, как к выяснению процесса распада может привести исследование кривых, выражающих изменение во времени активности, к той же цели приводит также и анализ кривой ионизации. Фиг. 8, напр.,

показывает, что в активном осадке тория содержится два α -излучающих радио-элемента, ThC и ThC' , один с величиной пробега в 4,80, другой 8,62 см.

Если материнское вещество находится в равновесии с большим числом продуктов распада, то общая величина ионизирующего действия, производимого продуктами распада в своей совокупности, зависит не только от числа, но и от величины пробега отдельных α -лучей. Так, отношение ионизирующего действия суммы $\text{ThX} + \text{ThEm} + \text{ThA} + \text{ThC}$ к таковому же RdTh составляет только 3,66; в то время как ионизирующее действие $\text{RaEm} + \text{RaA} + \text{RaC}$ к $\text{Ra} = 4,11$.



Расстояние от источника излучения

Фиг. 7.

Изменение ионизирующего действия α -частицы по мере удаления от источника.

Так как количества энергии, необходимые для образования одной пары ионов, различны в зависимости от природы



Фиг. 8.

Кривая ионизации при наличии двух α -излучающих веществ (ThC и ThC_1).

газа, между значениями ионизации, вызываемой α -частицей в различных газах, существуют большие различия, соответственно скорости применяемых α -лучей. Так для α -лучей полония имеют место следующие относительные значения ионизации ¹⁰).

ТАБЛИЦА 4.

Относительная ионизирующая способность α -лучей полония в различных газах.

Воздух	1
Светильный газ	0,88
Азот	0,77
Кислород	1,12
Углекислота	1,23

IV. Поперечное рассеяние α -лучей.

Если пропускать исходящие узким пучком из источника в виде точки α -лучи через тонкий металлический лист, напр., через золотой листок толщиной в $1/100$ мм., и затем заставлять падать эти лучи на подставляемый в различных направлениях световой экран, то можно заметить, что часть α -частиц оказывается отклоненной от первоначального направления на малый угол, большая часть частиц „рассеивается“ на более значительный угол и совсем малая часть

видна на световом экране отклоненной почти на 180° . Так было установлено, напр., когда был взят в качестве источника излучения RaC, что при прохождении через тонкий платиновый листок из 8000 α -частиц только одна претерпевает отклонение, переходящее за 90° .

Так называемый, „коэффициент поперечного рассеяния“, φ , т. е. наиболее вероятной угол отклонения при толщине слоя, воздушный эквивалент которого составляет 1 см., зависит от материала листка и, напр., для α -лучей RaC имеет следующие значения:

<i>Au</i>	<i>Ag</i>	<i>Cu</i>	<i>Al</i>
$\varphi = 2,1^\circ$	$1,5^\circ$	$1,1^\circ$	$0,6^\circ$

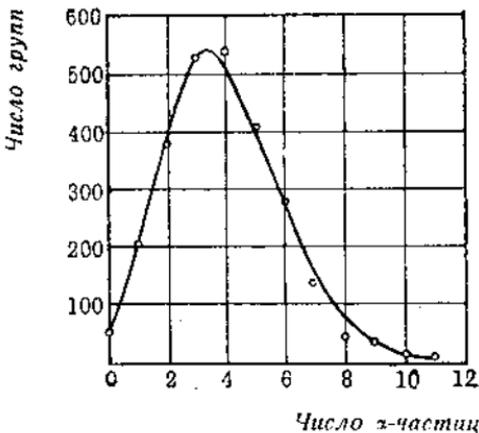
Ввиду того, что, как показывают опыты, отклонение каким-либо атомом приблизительно пропорционально весу этого атома, то явление рассеяния становится особенно заметным при прохождении лучей через тяжелые атомы, φ возрастает с уменьшением скорости α -частиц обратно пропорционально квадрату или кубу ее; от толщины слоя φ зависит таким образом, что при незначительной толщине φ возрастает прямо пропорционально с толщиной.

Рассеяние α -частиц может быть обнаружено также и фотографическим путем; для этой цели на фотографический слой наносят излучающее вещество, и в таком случае можно заметить по радиально расходящимся линиям от точек почернения (= частиц бромистого серебра, в которые попали α -частицы) внезапные отклонения, иногда под большим углом¹¹⁾. Также опыты с водяным паром (см. стр. 87) позволяют ясно обнаружить явление рассеяния. Это явление сыграло важную роль в изучении строения атома и поэтому о нем нам еще придется говорить в соответствующем месте. Здесь же необходимо только указать, что из отношения числа α -частиц, отклоненных под углом φ от первоначального направления, к числу α -частиц, падающих на равной величины участок, при отсутствии какого-либо рассеивающего слоя, может быть вычислена величина заряда ядра

рассеивающего элемента. Так, для платины, как среднее значение из различных наблюдений найдено 77,4, в то время как истинное значение отвечает 78 (см. стр. 140), для серебра 46,3 вместо 47, для меди 29,3 вместо 29¹²⁾.

V. Отклонение от среднего вероятного значения при испускании α -лучей.

Если считать число сцинтилляций, вызываемых α -частицами какого-либо постоянного однородного источника излучений на светящемся



Фиг. 9.

Колебания во времени числа испускаемых α -частиц.

экране в промежутки через каждые, напр., 15 сек., то можно заметить, что эти числа колеблются, в некоторых случаях становясь больше, в других меньше, около некоторого среднего значения, т. е. значения которое получится, если сосчитать общее число сцинтилляций, например, в течение двух часов и результат разделить на 480¹³⁾. Чем меньше интервалы времени, в течение кото-

рых производится счет, тем сильнее эти отклонения. Это явление представляет собою один из простых примеров отклонений от среднего значения, наличие которых всегда имеет место при статистическом толковании явлений природы, когда нами наблюдаемые величины суть только средние значения.

Абсцисса фиг. 9 показывает число сосчитанных α -частиц, а ордината — в скольких опытах через каждые 15 сек. было найдено это число. Результаты находятся в согласии с вы-

числениями, выполненными согласно теории вероятностей *). Совершенно так же, как это имеет место при испускании α -частиц, можно обнаружить отклонения от среднего вероятного значения и при измерении величины пробега.

*) Вероятность p , что в данный интервал времени испускается n частиц, равна, если a обозначает среднее число: $p = \frac{a^n}{n!} e^{-a}$

ГЛАВА III.

β -лучи.

I. Масса и заряд β -лучей.

Отклонение, которое претерпевают β -лучи, когда они проходят между полюсами магнита или пластинами заряженного конденсатора, весьма походит по направлению и величине на отклонение, испытываемое катодными лучами. Подобно тому, как катодные лучи, в зависимости от способа их возникновения, имеют разные скорости, при исследовании β -лучей радиоактивных веществ мы также встречаемся с лучами различной скорости, как на это указывает отклонение их в магнитном поле. Здесь, однако, мы встречаемся со скоростями такого порядка, каких никогда не достигают катодные лучи; для RaC, напр., имеем β -лучи 0,998 скорости света. Согласно теории относительности масса какого-либо тела зависит от скорости его движения. Практически эта зависимость обнаруживается в том случае, когда скорость весьма значительна, т. е. порядка скорости света *). Таким образом при β -лучах большой скорости следует ожидать значительной зависимости массы β -частицы от ее скорости, что и было доказано в полном согласии с требованием теории относительности. Соответственно различают покоящуюся и движущуюся массу β -частицы. Для первой найдено то же самое

*) Масса m при скорости V равна

$$m = m_0 \left[1 - \left(\frac{V}{c} \right)^2 \right]^{-1/2},$$

где m_0 — покоящаяся масса, c — скорость света. В то время как β -частичка, обладающая $1/10$ скорости света обнаруживает массу только на $1/20\%$ больше, чем в состоянии покоя, m для частиц в 0,998 скорости света в 15,8 раз больше m_0 .

значение, как и для покоящейся массы частиц катодных лучей, а именно, $0,898 \times 10^{-27}$ гр., что, отвечает $1/1834$ водородного атома. β -лучи состоят, поэтому, из быстро движущихся электронов.

Если β -частички попадают на положительно заряженный электромметр, то этот последний разряжается; обратно, β -излучающий препарат заряжается положительно, если его изолировать. Таким образом удается при особенно строгом соблюдении мер предосторожности зарядить препарат радия положительно до 150000 вольт (см. также „радиевые часы“ стр. 243). По величине заряда, передаваемого электромметру β -излучением известного количества радия, можно определить число испускаемых β -частиц; подобно этому, если вблизи заряженного до высокого потенциала острия проходят β -лучи, оно разряжается, вследствие вызываемой каждой отдельной β -частичкой ионизации окружающего газа; величину разряда, равную числу частиц можно при этом зарегистрировать, пользуясь измерительным прибором.

Оказывается, что подобно тому, как при α -превращении от каждого атома отделяется одна α -частица, также, напр., и при превращении RaB или RaC из каждого распадающегося атома образуется одна β -частичка; из находящегося в равновесии с 1 граммом радия количества RaB и RaC вместе образуется в 1 сек. $7,10^{10}$ β -частиц (см. стр. 24). Мы еще вернемся несколько позже к обсуждению существующих здесь соотношений, простота которых в значительной степени усложняется наличием, так наз., вторичных лучей.

II. Абсорбция и скорость β -лучей.

Большей скорости β -лучей соответствует и значительно большая способность проникновения, чем у α -лучей. Интенсивность лучей мало-по-малу при прохождении через материю падает, и толщина того слоя, которым они „вполне“ поглощаются, зависит в большой степени, кроме жесткости излучения, также и от точности нашего прибора для измерений.

Если, например, при исследовании β -излучения RaE нанести на ось абсцисс толщину поглощающего слоя алюминия, а за ординаты брать вызываемые излучением ионизации, то мы получим простую закономерную кривую. Значения ординат падают в геометрической прогрессии, в то время как значения абсцисс возрастают в арифметической*). При прохождении слоя в 0,16 мм. интенсивность излучения падает до половины, при $2 \times 0,16$ мм. — до одной четверти своей первоначальной величины. Поэтому слой алюминия, поглощающий половину излучения, для лучей RaE составляет 0,16 мм. Чем круче падает указанная кривая поглощения, тем больше поглощаются лучи, тем меньше толщина слоя, поглощающего половину излучения. Вместо последней величины рассматривают часто, так называемый, коэффициент поглощения, величину, равную:

$$\frac{0,693}{\text{толщина слоя, поглощающего } 1/2 \text{ излучения}}$$

и обычно обозначаемую буквой μ **)

Далеко не всегда кривые поглощения показывают только что описанный простой ход, дающий возможность быть выраженным математически с помощью одного только коэффициента поглощения, гораздо чаще приходится принимать при выяснении кривых наличие смеси лучей, т. е. различных коэффициентов поглощения; таковым примером является хотя бы RaB, β -лучи которого в алюминии дают коэффициенты поглощения 13, 80 и 890. Коэффициенты поглощения различных β -лучей в алюминии видны из таблицы 5.

*) Ходу этой кривой следует падение радиоактивности каждого в отдельности распадающегося радиоактивного вещества; см. кривую B на фиг. 26, стр. 92.

***) Если через I_0 обозначить интенсивность до поглощения, через I — после прохождения слоя d , то $I = I_0 e^{-\mu d}$, где μ — коэффициент поглощения. Положив $I = \frac{I_0}{2}$, μ получается $= \frac{\ln 2}{d} = \frac{0,693 \text{ см.}^{-1}}{d}$. Слой, поглощающий половину излучения, стоит в таком же отношении к коэффициенту поглощения, как полупериод распада — к постоянной распада (ср. стр. 71 и 72).

ТАБЛИЦА 5.

Коэффициенты абсорбции различных β -лучей.

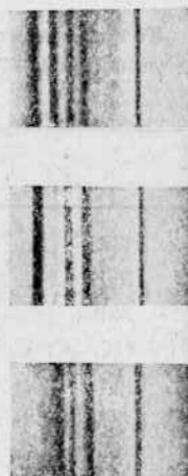
Радиоэлемент	Коэффициент абсорбции μ в алюминии
UX ₁	510
UX ₂	14
Ra	312
RaB	13; 88; 890
RaC	13; 53
RaD	5500
RaE	43

Малому коэффициенту абсорбции отвечает большая величина слоя, поглощающего половину излучения, т. е. большая способность проникания; такие лучи называются также „жесткими“ в противоположность легко абсорбируемым „мягким“ лучам.

Если мы будем исследовать абсорбцию одного и того же β -излучения в различных средах, то найдем, что коэффициент абсорбции с плотностью абсорбента возрастает, так что отношение обеих величин не строго постоянно. В таблице 6 приведены значения отношений коэффициентов абсорбции (для β -лучей UX₂) к плотности для различных твердых элементов, тогда как таблица 7 дает сравнение коэффициентов абсорбции различной жесткости β -лучей в воздухе и углекислоте.

Абсорбционная способность химического соединения составляется аддитивно из его элементарных составных частей.

Также и экспоненциальный ход кривой абсорбции еще не указывает на гомогенность



Фиг. 10.
Магнитные спектры β -излучающих веществ.

ТАБЛИЦА 6.

Отношение коэффициентов абсорбции к плотности абсорбента.

Вещество	Плотность	Коэффициент абсорбции плотность
Уголь	1,8	4,4
Сера	2,0	6,6
Бор	2,4	4,65
Алюминий	2,7	5,26
Барий	3,8	8,8
Иод	4,9	10,8
Цинк	7,3	9,46
Медь	8,9	6,8
Свинец	11,3	10,8
Золото	19,3	9,5

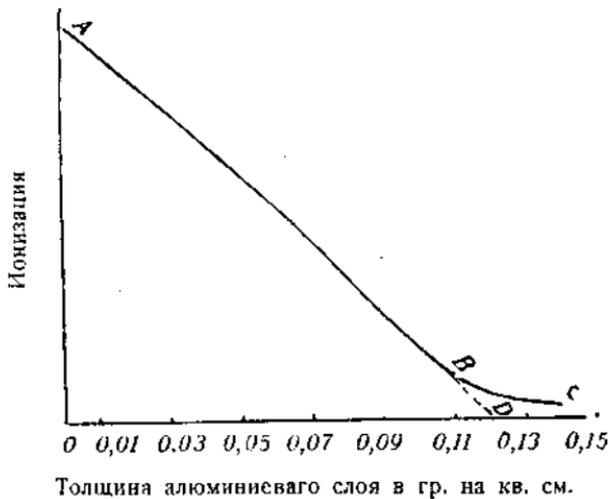
ТАБЛИЦА 7.

Коэффициенты абсорбции различных β -лучей в воздухе и в CO_2 (при 1 атм. и 22°), расположенные в порядке уменьшения жесткости β -лучей¹⁾.

Радиоэлемент	Воздух	CO_2
$\text{ThC} + \text{ThC}''$	0,0068	0,0129
RaE	0,0152	0,0297
ThB	0,090	0,142
$\text{UX}_1 + \text{UX}_2$	0,12	0,23
RaD	0,64	1,69

данного излучения; так лучи, кажущиеся однородными при изучении по этому методу, часто могут быть разложены на резко разграниченные линии, если изучать их действие на фотографическую пластинку (см. фиг. 10), заставив их предварительно пройти через щель, а затем через магнитное поле. Каждой линии в таком образом получающемся магнитном

спектре отвечает гомогенное излучение, т. е. излучение определенной скорости. Если исследовать абсорбцию одного такого β -излучения в алюминии, то получается кривая, имеющая вид, по крайней мере, вначале, почти прямой линии. Фиг. 11 показывает абсорбцию β -лучей, обладающих скоростью в 0,83 скорости света ²⁾. Чтобы получить величину, аналогичную величине пробега α -лучей, продлим линию AB . Отрезок от O до D показывает величину про-



Фиг. 11.

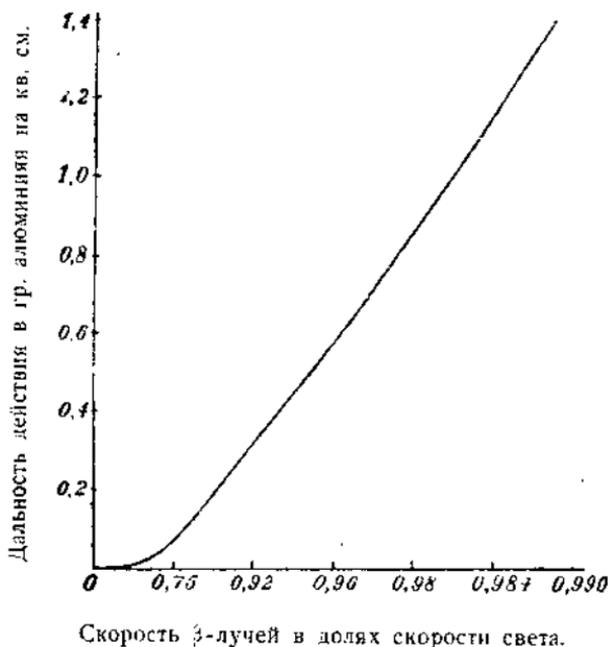
Поглощение однородного β -излучения в алюминии.

бега β -лучей, т. е. толщину слоя алюминия, которая может задержать почти все β -лучи. Приблизительная линейность этой кривой есть результат двух налагающихся друг на друга процессов, именно рассеяния и уменьшения скорости лучей ³⁾ (подробнее см. стр. 48). При замене алюминия бумагой (меньшая способность рассеяния), кривая принимает несколько вогнутый, при замене свинцом (большая способность рассеяния) — выпуклый вид.

Фиг. 12 показывает величину пробега β -лучей различной скорости в алюминии. На оси абсцисс нанесены ско-

рости — в долях скорости света, — на оси ординат величины пробега, измеренные в граммах алюминия на кв. см.*).

Исследование магнитных спектров⁴⁾ дает большое разнообразие линий, и, напр., в спектре RaC таких линий может быть установлено 48 (см. также стр. 80 и 81). β -лучи наибольшей скорости ($0,998 \times$ скорость света) были найдены в маг-



Фиг. 12.

Дальность действия различных β -лучей и в алюминии.

нитном спектре RaC, напротив же спектр ThC, например, дает возможность заключить о существовании наряду с другими также и β -лучей, скорость которых составляет только 0,29 скорости света. При прохождении через материю β -частицы претерпевают значительное уменьшение

*) При уд. весе Al в 2,7 одному грамму на кв. см. отвечает высота (величина пробега), равная 3,7 мм.

скорости, составляющее, напр., 30% при прохождении излучения в 0,95 скорости света через слой алюминия в 2 мм. Вследствие уменьшения скорости меняется также и коэффициент абсорбции во время прохождения. Толщина слоя, поглощающего половину излучения для лучей в $\frac{2}{3}$ скорости света, более чем в десять раз меньше, чем для частиц, обладающих 95-ью % скорости света. Разница квадратов энергии до и после прохождения слоя пропорциональна их толщине.

Уменьшение скорости, претерпеваемое β - и α -лучами при прохождении через материю, зависит в значительной степени от частоты характеристических колебаний электронов в атомах, подобно тому как это имеет место при рефракции и дисперсии.

III. Ионизирующее действие β -лучей.

β -частицы на протяжении их пути ионизируют газовые молекулы, если их скорость не ниже минимального значения, — которое в воздухе составляет 0,0063 скорости света, — так как способность ионизации обусловлена тем, что частицы должны обладать определенной минимальной энергией. Вместо начальной скорости β -частиц можно с успехом рассматривать их энергии, и так как энергия электрически заряженной частицы равна произведению из заряда на напряжение (eV), а заряд β -частицы всегда постоянен и, именно, равен элементарному заряду, то можно вместо энергии ввести ей соответствующую величину V — падение потенциала *); выше упомянутой минимальной скорости отвечает в этих единицах 10 вольт. Если попытаться ионизировать воздух катодными лучами, сообщая им необходимую энергию путем ускорения при достаточно сильном падении потенциала, то оказывается, что нужно падение в 11 вольт, чтобы добиться ионизации

*) Физический смысл этого падения потенциала состоит в том, что β -частица приобрела бы ту же самую кинетическую энергию, если бы, не имея начальной скорости, она прошла бы через падение потенциала, равное данной величине.

воздуха. Эту величину обозначают, как ионизационный потенциал *) воздуха; таковой же для водорода составляет 17 вольт, для гелия — 25 вольт. Вследствие большой скорости вызываемая β -лучами ионизация значительно слабее, чем производимая α -лучами. Одна β -частица со скоростью почти в 0,9 скорости света образует в воздухе при атмосферном давлении на сантиметр своего пути 55 положительных и такое же число отрицательных ионов, иначе говоря, круглым числом только $\frac{1}{200}$ количества ионов образуемых одной α -частицей. Так как одна β -частица на протяжении 1 см. своего пути в каком-либо газе при атмосферном давлении и нормальной температуре сталкивается с 8400 атомами, то отсюда можно заключить, что ионизируется едва только 1% всех встречающихся на пути атомов. Большая скорость β -лучей влияет таким образом неблагоприятно на число образующихся ионов; с уменьшением скорости число их сильно возрастает, чтобы при скоростях ниже 0,028 скорости света — когда на 1 см. образуется 7600 ионов — опять начать падать. При полной абсорбции одна β -частица дает в воздухе почти 10000 пар ионов; среднее значение числа пар ионов при нормальном давлении образующихся на протяжении 1 см. пути составляет почти 70. Потеря энергии частицы эквивалентна работе ионизации.

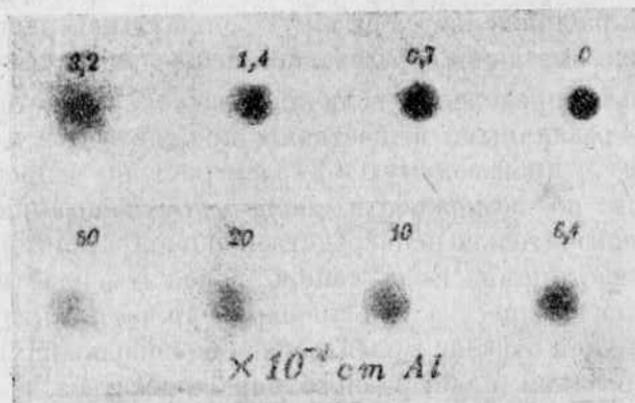
Число образующихся на каждый сантиметр пути ионов в области небольших плотностей одного и того же газа пропорционально этой плотности; для газов различной природы пропорциональность между числом ионов и плотностью сохраняется только приблизительно.

IV. Поперечное рассеяние β -лучей.

В то время как рассеяние, претерпеваемое α -лучами при прохождении через материю, становится заметным лишь

*) Напряжение ионизации можно определить так же, как такое напряжение, которое, будучи помножено на элементарный заряд, дает работу, которую необходимо затратить, чтобы удалить электрон с его постоянной орбиты внутри атома на бесконечно большое расстояние (см. стр. 74).

при точных наблюдениях и практически, например, на определение абсорбции не влияет, в случае β -лучей оно весьма значительно и пренебрегать им поэтому ни в коем случае нельзя. Так ионизация, вызываемая в электроскопе β -излучением после прохождения абсорбирующего слоя, хотя бы листка алюминия, значительно больше, когда листок находится в непосредственной близости к электроскопу, чем когда этот листок помещен непосредственно над препаратом, и этот последний, как обычно бывает, от-



Фиг. 13.

Рассеяние β -лучей при прохождении сквозь алюминиевую фольгу.

стоит от электроскопа на несколько сантиметров. В обоих случаях часть лучей при прохождении через листок алюминия рассеивается, но в то время как в первом случае в электроскоп попадают также почти полностью и рассеянные лучи, этого не происходит во втором случае ⁵⁾. Чрезвычайно сильное рассеяние, которое β -лучи испытывают уже при прохождении через совсем тонкий слой алюминия, очень наглядно показывают снимки на фиг. 13 ⁶⁾.

Эти изображения получены таким образом, что β -лучи, исходявшие из нескольких милликюри эманации радия, проходили через узкое оконце и затем падали на фотогра-

фическую пленку, покрытую черной бумагой. Если сосуд во время снимка был эвакуирован, то пучок лучей отмечается на пленке в виде резко очерченного черного пятна. Если же включить на пути лучей алюминиевый листок только $0,7 \cdot 10^{-4}$ см., то этого достаточно, как видно из фигуры, чтобы вызвать заметное рассеяние лучей, т. е. расплывчатость краев этого пятна. При листке алюминия толщиной в $50 \cdot 10^{-4}$ см. рассеяние уже настолько значительно, что пятна уже почти не видно. Хотя общая интенсивность лучей и остается приблизительно неизменной, однако, она теперь распределяется на такую большую поверхность, что почернение, вызванное образовавшимися γ -лучами — исчезает.

С целью определения величины рассеяния, которое вызывается различными веществами, прежде всего измеряют ионизацию J , производимую в β -электроскопе β -препаратом на тонком по возможности диске; эта ионизация вызывается исключительно непосредственно попадающими в электроскоп частицами. Если теперь положить пластинку из исследуемого вещества под препарат, то часть книзу испускаемых лучей (вообще в электроскоп не попадавших), вследствие рассеяния пластинкой, будет отражаться, и теперь, вызываемая в электроскопе ионизация J^1 в совокупности будет больше, чем J . Величина $100 \cdot \frac{J^1 - J}{J}$ есть, так называемое, процентное отражение; она значительно возрастает, как видно из таблицы 8, с атомным весом отражающего вещества. Числа относятся к β -лучам RaE.

Число отраженных частиц растет с увеличением толщины слоя³⁾, откуда следует, что это не есть отражение от поверхности отражающего вещества подобно отражению света, но происходит таким образом, что β -лучи при прохождении через атомы рефлектора, под действием внутри его господствующих электрических сил, к которым мы вернемся еще на стр. 71 и 72, частью настолько сильно отклоняются от своего пути, что это отклонение походит на отражение. Отраженные таким образом частицы проходят опять — теперь уже в обратном направлении — атомы рефлектора и по-

Т А Б Л И Ц А 8.

Отражение β -лучей RaE в различных веществах.

Вещество	Атомный вес	Процентное отражение
Bi	209,0	70,9
Pb	207,2	70,2
Au	197,2	67,8
Ag	107,9	57,4
Cu	63,6	44,7
S	32,1	32,1
Al	27,1	30,0
C	12,0	17,1

падают затем в электроскоп. Увеличение числа отраженных частиц прекращается при такой толщине слоя, которая достаточна, чтобы совершенно поглотить на их обратном пути отраженные β -частицы.

Для тонких слоев имеет место соотношение, по которому средний угол отклонения β -частицы при прохождении слоя толщины X пропорционален корню квадратному из X . Для самых малых слоев рассеяние меньше чем следует по закону квадратного корня. Если сравнивать рассеяние в различных элементах при слоях совсем малой толщины, то элементы с тяжелым атомным весом дают большее рассеяние, чем оно обуславливается пропорциональностью порядковому числу. Вероятнейший угол отклонения обратно пропорционален энергии лучей. Для больших скоростей эта зависимость с несомненностью еще не установлена.

Рассеянные лучи почти всегда обладают меньшей проникающей способностью, чем первоначальные лучи, так как они во время процесса рассеяния большей частью претерпевают уменьшение скорости.

Для определения „истинного“ коэффициента абсорбции необходимо знание и числовое выражение эффекта рассеяния.

V. Сравнение абсорбции и рассеяния α - и β -лучей.

В то время как скорость всех α -частиц, испускаемых каким-либо определенным веществом (напр., Ra F), при прохождении через материю уменьшается таким образом, что пучок лучей остается гомогенным, в случае прохождения через материю β -лучей, вследствие рассеяния все большее и большее число частиц отделяется, так что на дальнейшем протяжении пути ионизация производится только небольшой долей частиц, исходящих из источника излучения. Это уменьшение числа β -частиц больше, чем увеличение ионизирующего действия с уменьшением скорости (см. стр. 44), почему кривые ионизации β -лучей (кривые, абсциссы которых есть скорости, а ординаты — вызываемые ионизации), в противоположность таковым для α -лучей, (с самого начала имеют нисходящий вид. Такая кривая β -ионизации (а потому также и кривая β -абсорбции) есть результат различных факторов: уменьшения числа ионизирующих частиц, увеличения ионизирующего их действия соответственно с уменьшением их скорости и дополнительного ионизационного эффекта рассеянных β -частиц (рассеянных как действием заряда ядра, так и электронной оболочкой пронизываемого атома). Гомогенные β -лучи претерпевают, таким образом, при прохождении через материю уже в начале своего пути значительное нарушение своей однородности, и экспоненциальный ход кривой ионизации α , соответственно, и кривой абсорбции β -лучей есть только результат упомянутых различных частичных процессов.

Можно вычислить вероятность, с какой β -частицы на своем пути через абсорбирующие вещества могут избежать рассеивающего действия как зарядов ядра, так и электронной оболочки атомов, и пробиться через среду, не подвергаясь этому воздействию. Такие β -частицы имеют в этом случае такую же величину пробега, как и α -лучи (ср. стр. 41).

ГЛАВА IV.

γ -лучи.

I. Природа γ -лучей.

Третий род лучей, с которыми мы встречаемся при исследовании радиоактивных процессов, — γ -лучи¹⁾. Ни электрическое, ни магнитное поле на них не влияет, и они представляют собою — в противоположность α -и β -лучам, состоящим из прямолинейно выбрасываемых частиц — лучи той же природы, что и свет. Еще ближе стоят они к рентгеновым лучам и, также как эти последние, представляют собою особенно короткой волны ультра — ультрафиолетовый свет. Подобно разложению спектра X-лучей, удастся произвести это отчасти*) и для γ -лучей с помощью явлений интерференции их в кристаллах.

Если на какой-либо кристалл падает цилиндрический пучок рентгеновых или γ -лучей, то от частей кристалла, на которые падают эти лучи, по различным направлениям исходят отклоненные рентгеновы или γ -лучи, подобно тому, как диффракционной решеткой отклоняются световые лучи. Нагляднее всего можно себе представить образование отклоненных рентгеновых лучей, как результат отражения первоначальных лучей от усеянных атомами плоскостей пространственной решетки, которые находятся внутри кристалла. Если бы в кристалле существовала только одна такая плоскость, то тогда отражались бы все рентгеновы лучи не зависимо от их „цвета“, т. - е. длины волны. Но в кристалле имеется, всегда на рав-

*) Длина волны „жестких“ γ -лучей настолько мала, что здесь уже кристалл, как диффракционная решетка, отказывается служить.

ных друг от друга расстояниях (d), бесчисленное множество таких плоскостей и до многих из них рентгеновы лучи, которые могут быть более или менее проникающими, достигают. От всех них излучение отражается; отраженные, таким образом, лучи претерпевают интерференцию и при этом отчасти взаимно гасятся. Не гасятся лишь лучи, длина волны (λ) которых находится в следующем простом соотношении с углом падения φ — отвечающим углу между лучем и плоскостью решетки — и с расстоянием между двумя плоскостями:

$$n\lambda = 2d \sin \varphi,$$

где n есть целое число 1, 2, 3 и т. д. Это означает, что луч отражается также и под такими углами, синус которых в два, три и т. д. раза более. Интенсивность, однако, будет становиться все меньше, так же как и в оптике спектр второго, третьего и т. д. порядка последовательно слабее. Только что разобранный случай аналогичен разложению света решеткой. Так называемая, „постоянная решетки“ есть в этом случае расстояние между двумя плоскостями пространственной решетки кристалла; соответственно много меньшей длине волны рентгеновых лучей эта величина значительно меньшего порядка, чем в оптике. Так d составляет, например, в случае кристалла каменной соли только $2,80 \times 10^{-8}$ см., а в решетке Роуанда почти 10^{-4} см. Если поворачивать кристалл, в то время как на него падает узкий пучек „белого“ рентгенового света, т. е. дающего такой же непрерывный спектр как и рентгеновская трубка, то можно заметить, что при определенных величинах угла φ отражается однородный „рентгеновский цвет“. Наличие таких рентгеновских спектральных линий может быть обнаружено или фотографической пластинкой, дающей резкую линию, или электроскопом, который при определенных положениях кристалла чувствует резко увеличивающийся разряд.

Если φ и d известны, то из указанной формулы непосредственно получается λ , длина волны искомой рентгеновской или γ -линии. По указанному способу удается,

например, в γ -спектре Ra В + Ra С обнаружить свыше 20 отдельных линий, длина волны которых лежит между $0,71 \cdot 10^{-9}$ и $1,365 \cdot 10^{-8}$ см. В случае γ -лучей очень короткой длины волны кристаллографический анализ отказывается служить, так как здесь постоянная решетка для этих длин волн слишком велика. В этом случае приводит к цели другой метод, основанный на вычислении длины волны γ -лучей из энергии ими вызываемых вторичных β -лучей (см. стр. 81).

В таблице 9 сопоставлены длины волн различных колебаний эфира.

Т А Б Л И Ц А 9.

Длины волн различных лучей эфира.

Род лучей	Длины волн в см.
Электрические волны	от ∞ до $2 \cdot 10^{-1}$
неизвестные	$2 \cdot 10^{-1}$ — $3,4 \cdot 10^{-2}$
инфракрасные волны	$3,4 \cdot 10^{-2}$ — $8 \cdot 10^{-5}$
световые волны	$8 \cdot 10^{-5}$ — $4 \cdot 10^{-5}$
ультрафиолетовые волны	$4 \cdot 10^{-5}$ — $1,4 \cdot 10^{-6}$
неизвестные	$1,4 \cdot 10^{-6}$ — $1,3 \cdot 10^{-7}$
рентгеновы волны	$1,3 \cdot 10^{-7}$ — $1 \cdot 10^{-9}$
γ -волны	$1,4 \cdot 10^{-8}$ — почти $5 \cdot 10^{-11}$

Наиболее короткие до настоящего времени найденные рентгеновские волны можно получить посредством трубки Лилиенфельда или Кулиджа. Принцип их состоит в том, что в то время как в обычных рентгеновских трубках проводимость электричества обуславливается присутствием небольшого числа газовых ионов, здесь переносчиками электричества служат сами электроны, которые исходят из электрически нагреваемого с целью испускания электронов — вольфрамового катода. При напряжении разряда в 308.000 вольт в трубке Кулиджа образуются самые жесткие из известных рентгеновых лучей; их длина волны составляет менее чем 10^{-9} см., измерена спектрографически и вычислена по коэф-

коэффициенту абсорбции в свинце, равному $6,5^{-1}$ см. (см. стр. 56). Коэффициент абсорбции жестких γ -лучей RaC в свинце составляет только $0,48^{-1}$ см., и таким образом, круглым числом, в четырнадцать раз меньше.

Однако, в этой области, где, как выше указано, отказывается служить спектрографический метод измерения длин волн также и вычисление длин волн по коэффициенту абсорбции дает не многим более надежные результаты. Для длины волны наиболее жестких γ -лучей радия по этому последнему способу получается значение около $5 \cdot 10^{-11}$ (см. далее стр. 81). Чтобы вызвать рентгеновские лучи такой длины волны, необходимы напряжения порядка величины 1 миллиона вольт, каковых нашими теперешними средствами достичь не в состоянии.

II. Абсорбция γ -лучей.

Чем короче длина волны γ -лучей, тем больше их способность проникновения через материю, тем они „жестче“. Если обозначить толщину пронизанного слоя через абсциссу, а интенсивность излучения через ординату, то получается и здесь, так же, как и при β -излучении в первом приближении экспоненциальная кривая*). Только здесь коэффициент абсорбции μ большею частью много меньше, т.-е. толщина слоя поглощающего половину излучения (которая равна $\frac{0,93}{\mu}$) много больше. В то время как интенсивность наиболее проникающих β -лучей падает на половину при прохождении слоя свинца в 0,51 мм., необходима толщина свинцового слоя в 1,4 см., чтобы абсорбировать половину интенсивности наиболее жестких γ -лучей**).

С увеличением плотности абсорбирующего вещества в общем увеличивается и коэффициент абсорбции, но

*) Так же и здесь $I = I_0 e^{-\mu x}$, где I_0 = интенсивность перед прохождением через толщу слоя x ; I = интенсивность после прохождения.

**) Чтобы, например, абсорбировать α -, β -, γ -лучи активного осадка тория на половину, необходимо 0,003; 0,2 и 15,0 см. бумаги.

не совсем строго, как видно из таблицы 10-й, в которой содержатся коэффициенты абсорбции (μ) наиболее жестких лучей Ra C и $\frac{\mu}{\text{плотность}}$ для различных веществ^{а)}. Вещества расположены по убывающей плотности.

Т А Б Л И Ц А 10.

Коэффициент абсорбции γ -лучей RaC в различных веществах.

Вещество	μ	$\frac{\mu}{\text{плотность}}$
Hg	0,621	0,045
Pb	0,533	0,047
Cu	0,395	0,044
Fe	0,356	0,045
Sn	0,299	0,041
Zn	0,322	0,045
Al	0,126	0,047
S	0,091	0,046
Вода	0,055	0,055
Воздух 15° . .	$4,64 \cdot 10^{-5}$	0,0378

Как будет указано на стр. 64, из веществ, на которые падают γ -лучи исходят, так называемые, характеристические лучи вещества, которые примешиваются к прошедшим насквозь γ -лучам. Это явление и, в особенности, то обстоятельство, что характеристическое излучение находится в простой зависимости не от толщины, а от атомного номера подвергающегося действию вещества, позволяет уже предвидеть, что μ не может быть строго пропорционально плотности абсорбирующего вещества.

В таблице 11 приведены коэффициенты абсорбции γ -лучей различных радио-элементов для алюминия. Наиболее мягкие из приведенных лучей принадлежат ионию ($\mu = 1088$), наиболее жесткие — ThC ($\mu = 0,0916$). Как видно, один

и тот же радиоэлемент может испускать γ -лучи различной жесткости, как мы уже об этом говорили в случае β -лучей.

Т А Б Л И Ц А 11.

Коэффициенты абсорбции различных γ -лучей в алюминии.

Радиоэлемент	μ
RaB	230
	40
RaC	0,51
	0,40
	0,115
ThC	0,111
	0,096
	0,0916
Ra	354
	16,3
	0,27
MsTh ₂	26
	0,116
Jo	0,119
	1088
	22,7
	0,408

Для практических целей удобно различать очень мягкие, мягкие, средние, жесткие и очень жесткие γ -лучи, так как коэффициенты абсорбции распределяются неравномерно по всей области, но соединяются в определенные группы.

Для наиболее мягких лучей μ лежит между 1088 и 354, мягкие имеют μ между 230 и 120, средние между 45 и 26, жесткие между 0,51 и 0,36 и наиболее жесткие между 0,198 и 0,092.

Измерение абсорбции γ -лучей слоями различной толщины может, при известных обстоятельствах, служить также

для качественного и для количественного определения одновременно присутствующих различных радиоэлементов, как указывалось в случае α -лучей. В том случае, если препарат почему-либо не может быть вскрыт, метод этот может быть применен для решения вопроса о том, состоит ли препарат из мезотория или радия, а также, если препарат состоит из мезотория, можно приблизительно установить когда препарат был выделен. Определение это возможно благодаря тому, что проникающие γ -лучи — Ra исключительно излучаются Ra C ($0,50 \text{ см.}^{-1}$ в Pb), в препарате же мезотория имеется 2 жестких γ -излучателя: Ms Th₂ ($0,62 \text{ см.}^{-1}$ в Pb) и Th C ($0,462 \text{ см.}^{-1}$ в Pb). Но, в то время как Ms Th₂ уже спустя несколько дней после выделения препарата находится с Ms Th₁ в равновесии, излучение Th C увеличивается мало-по-малу в течение годов, соответственно с накоплением радиотория и поэтому в мезоториевых препаратах должно выступать тем сильнее жесткое излучение Th C, чем старше препарат. Присутствие особенно жесткого излучения делается заметным благодаря тому, что — беря для сравнения всегда определенное γ -излучение, например, препарата радия — толстые слои свинца при этом меньше ослабляют ионизацию, чем в случае мягкого излучения.

Следующая таблица даст сводку величин абсорбции, найденных для различного возраста препаратов мезотория; значения выражены в единицах ионизации, вызываемой препаратом радия, взятым для сравнения.

Т А Б Л И Ц А 12.

Абсорбция γ -лучей препаратов мезотория различного возраста.

Возраст в годах	0	1	2	3	4	10
0 см. свинца	0,853	1,057	1,140	1,160	1,126	0,678
1	0,719	0,975	1,092	1,135	1,117	0,691
2	0,631	0,922	1,049	1,122	1,114	0,702
4	0,494	0,848	1,030	1,117	1,126	0,730

Отсюда видно, что в свежее выделенных препаратах и, особенно, при применении толстых слоев свинца при измерениях, мезоторий уступает радью; с увеличением возраста препарата действие мезотория превышает действие радия, а в более старых препаратах мезоторий опять уступает радью. Равным образом по изменению хода абсорбции может быть качественно установлено и содержание радия в препарате. Однако, количественное определение различных веществ по этому способу наталкивается на большие трудности, заключающиеся, главным образом, в том, что почти всегда на практике приходится иметь дело со смесями радия и мезотория неизвестного возраста.

Между коэффициентом абсорбции μ и длиной волны λ существует соотношение, которое весьма хорошо выражается уравнением:

$$\mu = \text{const.} \times \lambda^{2,8},$$

с помощью которого, в случае гомогенного излучения, можно непосредственно вычислить длину волны из коэффициента абсорбции; величина константы зависит от абсорбирующего материала. Это соотношение не применимо для тех γ -лучей короткой длины волны, для которых коэффициент абсорбции возбужденного рассеянного излучения представляет собою величину того же порядка, что и первичного излучения; для определения длины волны жестких γ -лучей этим соотношением пользоваться нельзя.

III. Ионизирующее действие γ -лучей.

γ -лучи, в сущности, непосредственно не действуют ионизирующим образом, а отщепляют от встречающихся им на пути молекул электроны, которые уже, как β -лучи, затем ионизируют имеющиеся газовые молекулы.

RaC, находящийся в равновесии с 1 граммом радия, испускает γ -лучи, которые на протяжении своего пути образуют в общей сложности 11×10^{14} пар ионов. Это число почти равно тому числу ионов, которое образуется в результате действия β -лучей того же количества RaC; а так как

длина пути γ -лучей превосходит таковую же β -лучей — слой, поглощающий половину излучения для γ -лучей составляет в воздухе при нормальных условиях 150 мм., для β -лучей — 0,63 мм. — то γ -лучи на каждый сантиметр своего пути образуют соответственно гораздо меньше ионов. Как было указано на стр. 37 и 44, установлено, что каждый распадающийся атом RaC испускает одну β -частицу и что она образует на каждый сантиметр своего пути 54 пары ионов; чисто формально можно также говорить об отдельных γ -импульсах и высчитать, что одна γ -частица на единицу длины образует 1,5 пары ионов. Такое чисто формальное корпускулярное представление о γ -лучах значительно облегчает разрешение проблемы γ -лучей и часто применяется.

IV. Поперечное рассеяние γ -лучей.

Так как γ -лучи расщепляют с выделением β -частиц не только газовые молекулы, но и каждое вещество, то действие на электроскоп γ -излучения будет различным в зависимости от того, будет ли поглощающая среда, напр., свинцовая пластинка, помещена вблизи излучающего препарата или вблизи электроскопа, так как в первом случае отщепляющиеся электроны свинца (так наз., вторичные лучи) будут попадать в прибор в значительно меньшем количестве, чем в последнем⁶). Кроме того, γ -лучи выделяют электроны из различных частей электроскопа, из стенок камеры, из столика и т. д.; эти же электроны в свою очередь опять возбуждают γ -лучи. Это вредное влияние отдельных частей может быть при измерении абсорбции γ -лучей устранено тем, что источник излучения вместе с поглощающим веществом помещается в сосуд шарообразной формы. Применением электроскопов, т. е. ионизационных камер, из бумаги и других подобных легких веществ можно в значительной степени ослабить вредное действие образования вторичных лучей, как это будет показано в следующей главе, знакомство с которой необходимо для понимания явлений рассеяния γ -лучей во всей их совокупности.

ГЛАВА V.

Вторичные лучи

(Образование одних лучей под действием других).

I. Природа вторичных лучей.

Между корпускулярными лучами (β -лучами, а также в небольшой мере и α -лучами) и лучами электромагнитной природы имеется связь, заключающаяся в чередующемся образовании одних лучей под действием других. Рентгеновы лучи образуются при поглощении падающих на антикатод рентгеновой трубки катодных лучей; подобно этому же образуются и γ -лучи, когда β -частицы при прохождении своем через материю уменьшают скорость. Как рентгеновы, так и γ -лучи в свою очередь отщепляют от встречающихся на их пути атомов отрицательные электроны, так наз., вторичные β -лучи, а эти последние опять, насколько хватает их энергии, возбуждают вторичные γ -лучи и т. д.

Вторично образуемые β -и γ -лучи можно объединить под общим названием вторичных лучей, причем сюда же относятся и возбуждаемые α -частицами вторичные лучи. К этой категории лучей часто также причисляют и первичные рассеянные лучи, трудно или почти совсем не отличимые от вторичных.

Наиболее важные свойства вторичных лучей будут сейчас рассмотрены.

II. Образуемые γ -лучами вторичные β -лучи.

Начальная скорость β -излучения, образующегося под действием γ -лучей на различные вещества, в первом при-

ближении, не зависит ни от интенсивности γ -лучей, ни от природы вещества¹⁾; так, напр., для β -излучения, возбуждаемого γ -лучами, RaC , независимо от того, из какого вещества оно возникло, коэффициент абсорбции в алюминии круглым числом равен 20, чему соответствует слой, поглощающий половину излучения в 0,35 мм. От жесткости же возбуждающего γ -излучения начальная скорость вторичных β -лучей, напротив, зависит, причем, чем короче длина волны γ -луча, тем быстрее движется образуемая β -частица^{*}).

Число вторичных β -частиц пропорционально интенсивности поглощенного γ -излучения и растет с атомным весом излучающего вещества.

Вторичные лучи испускаются в различных направлениях, но преимуществу же, из веществ с малым атомным весом, в направлении, совпадающем с направлением первичных лучей. В зависимости от того, из какого участка поверхности исходят вторичные лучи, из того ли, на который падают первичные лучи, или из того, из которого они выходят, различают „вторичное излучение падения“ („Einfallsstrahlung“) или вторичное „излучение выхода“ („Austrittsstrahlung“).

Интенсивность вторичного излучения падения асимптотически возрастает с толщиной слоя вещества и достигает половины своего максимального значения, напр., в случае алюминия при толщине слоя в 0,5 мм.; интенсивность возрастает, кроме того, с атомным весом излучателя, как показывают числа табл. 13.

Из вышеприведенных чисел непосредственно следует, что, как уже указано на стр. 57, применяя для измерения γ -лучей изготовленный из бумаги электроскоп, можно в значительной степени ослабить влияние образующихся в стенках электроскопа вторичных лучей. Необходимы, однако, еще особые меры предосторожности, чтобы уменьшить вторичное β -и γ -излучение от стенок камеры, стола и т. д.

^{*}) Между максимальной энергией возбуждаемых вторичных β -лучей (eV) числом колебаний, вызывающих эти лучи γ -лучей (ν), существует зависимость $U = eV = h\nu$ (ср. стр. 60).

ТАБЛИЦА 13.

Зависимость вторичного излучения падения
от атомного веса.

Вещество	Сила излучения падения в относительных единицах
Свинец	7
Медь	4
Железо	3,7
Алюминий	2,1
Бумага	1

Интенсивность вторичного излучения выхода превосходит интенсивность вторичного излучения падения для всех до сих пор исследованных веществ, за исключением свинца; в противоположность последней она растет с увеличением толщины слоя вещества до некоторого максимума и затем опять падает.

III. Возбуждаемые электронами электромагнитные лучи *).

Чтобы вызвать образование рентгеновых лучей с длиной волны λ , катодные лучи должны обладать тем большей энергией и, соответственно, скоростью, чем меньше λ , т. е., чем больше „жесткость“ γ -лучей; чем больше начальная энергия катодных лучей, тем значительнее будет жесткость γ -лучей. Если рассматривать вместо λ -величину ей обратную, число колебаний ν , то будем иметь следующее соотношение:

$$U = eV = h\nu,$$

где U -энергия катодных лучей, V -напряжение (см. стр. 51) и константа h — „элементарный квант действия“ **).

*) Возбуждение рентгеновых лучей катодными могло быть изучено значительно более полно, чем образование γ -лучей β -частицами. Ввиду далеко идущей аналогии обоих случаев и важности этой области явлений здесь будут рассмотрены также и рентгеновы лучи.

***) Разъяснение этого понятия см. в учебниках физики.

Из этого соотношения следует, что с помощью напряжения разряда в 2500 вольт может быть получена самая короткая длина волны лишь в $4,88 \times 10^{-8}$ см., и что, напр., для получения рентгеновых лучей жесткости наиболее мягкого γ -излучения RaB ($\lambda = 1,365 \times 10^{-9}$ см.) необходимо по меньшей мере напряжение разряда в 89.000 вольт. Так как точно неизвестна длина волны наиболее жесткого γ -излучения RaC, то нельзя точно вычислить то напряжение, которое потребовалось бы, чтобы вызвать в рентгеновской трубке излучение соответствующей проникающей способности. Приблизительный подсчет дает величину около 2 миллионов вольт.

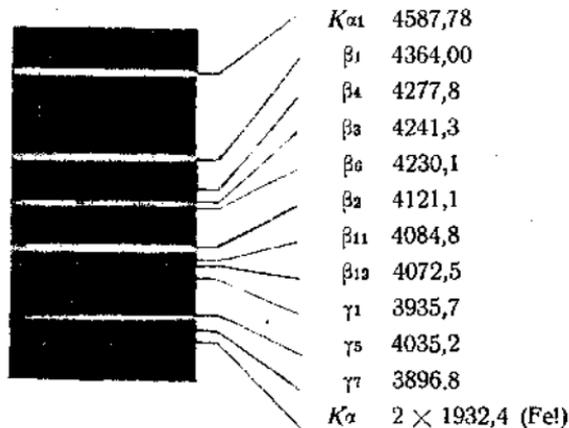
В то время как все вышеприведенные рассуждения имели в виду независимость излучения от химической природы излучающего тела, в нижеследующем мы разберем влияние природы излучателя на род испускаемого рентгенового излучения.

Если, напр., в рентгеновой трубке катодные лучи будут падать на антикатод из родия, то исследование испускаемого им рентгеновского излучения обнаруживает наряду с гетерогенным „белым“ излучением присутствие строго определенного сорта лучей, наиболее короткая длина волны которых имеет $0,534 \times 10^{-8}$ см. Возникновение этого излучения, столь же характерного для родия, как в оптике D-линия характерна для натрия*), прекращается, как требует вышеприведенная формула, коль скоро напряжение разряда упадет круглым числом ниже 23000 вольт. Следующие линии спектра родия, именно L-группы, могут быть открыты только с помощью вакуумспектрографа, так как они столь мягки, что уже слой воздуха в 20 см. их почти полностью поглощает. Фиг. 14 (на стр. 62) показывает все линии L-спектра родия, за исключением трех, и даже линию случайно содержащегося в родии в минимальных количествах железа. Рентгеноспектроскопия дает легкий и быстрый способ рас-

*) Подобно D-линии также и наиболее сильная линия родия состоит из дублета ($0,614 \cdot 10^{-8}$ и $0,619 \cdot 10^{-8}$ см.).

познавания подобных совсем незначительных примесей и загрязнений материала антикатада, в пределах $1/10—1/100$ 0/0.

Как уже указано, рентгеновы и γ -лучи образуются в том случае, когда быстро летящие электроны падают на твердые тела, теряя при этом на протяжении очень короткого расстояния свою скорость. Если сравнить состояние колебаний образующихся в рентгеновой трубке лучей с каким-либо явлением из области акустики, то оно будет больше походить на шум или взрыв, чем на музыкальный тон. Но на-

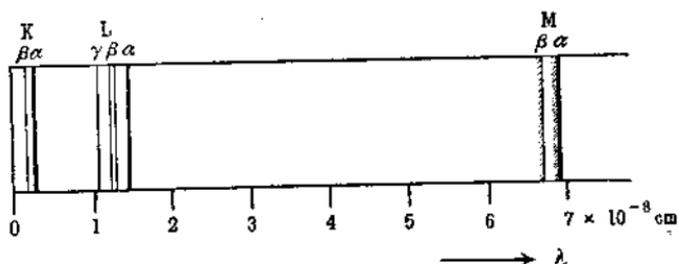


Фиг. 14.

L-спектр родия (снят с помощью кристалла гипса; λ в 10^{-11} см.
по Э. Костеру)

ряду с этим „шумообразным“ импульсом излучения при ударе какого-либо электрона образуется еще другой род рентгеновского излучения, исходящего из атомов тех тел, в которые электрон ударяется, характеристическое излучение данного рода атома или, выражаясь образно, определенный тон, благодаря резонансу данного тела. Различие обоих родов излучений в отношении распределения в спектре длин волн станет яснее всего, если считать, по аналогии с оптикой, что шумообразный импульс излучения соответствует непрерывному белому свету, а характеристическое излучение линейчатому спектру. В рентгеновском

спектре различают *K*-, *L*-, *M*-, *N*-, и *O*-серии*), при чем длины волн увеличиваются от первой серии к последней; фиг. 15 в схематическом изображении показывает относительное положение линий первых трех серий. При состоянии наших нынешних знаний *K*-серии принадлежат, по крайней мере, 10 линий, *L*-серии — 26 линий. Эти линии могут быть объединены еще в различные подгруппы; в то время как в *K*-серии различают только одну группу, в *L*-серии их находится три, а в *M*-серии — пять групп. Потенциал возбуждения вызывающих рентгеновы лучи катодных лучей для



Фиг. 15.

Длины волн *K*-, *L*- и *M*-серии.

всех линий одной и той же группы одинаков. Характеристические лучи элемента связаны простой зависимостью с его порядковым числом. Так, напр., для числа колебаний (ν) наиболее сильной линии *K*-серии имеет место следующее приближенное соотношение:

$$\sqrt{\nu} = \sqrt{\frac{3}{4} \nu_0 \cdot (N-1)},$$

где N — порядковое число для $H=1$, $He=2$, $Li=3$ и т. д., а $\nu_0 = 1,09737 \times 10^5 \text{ см.}^{-1}$, известная из оптики константа Ридберга.

*) Серия *M* встречается только у элементов с порядковым числом выше 65; *N*-серия только у элементов *Bi*, *Th* и *U*.

Для каждой линии характеристического спектра применима следующая формула с незначительным систематическим отклонением:

$$\sqrt{\nu} = A [N - B],$$

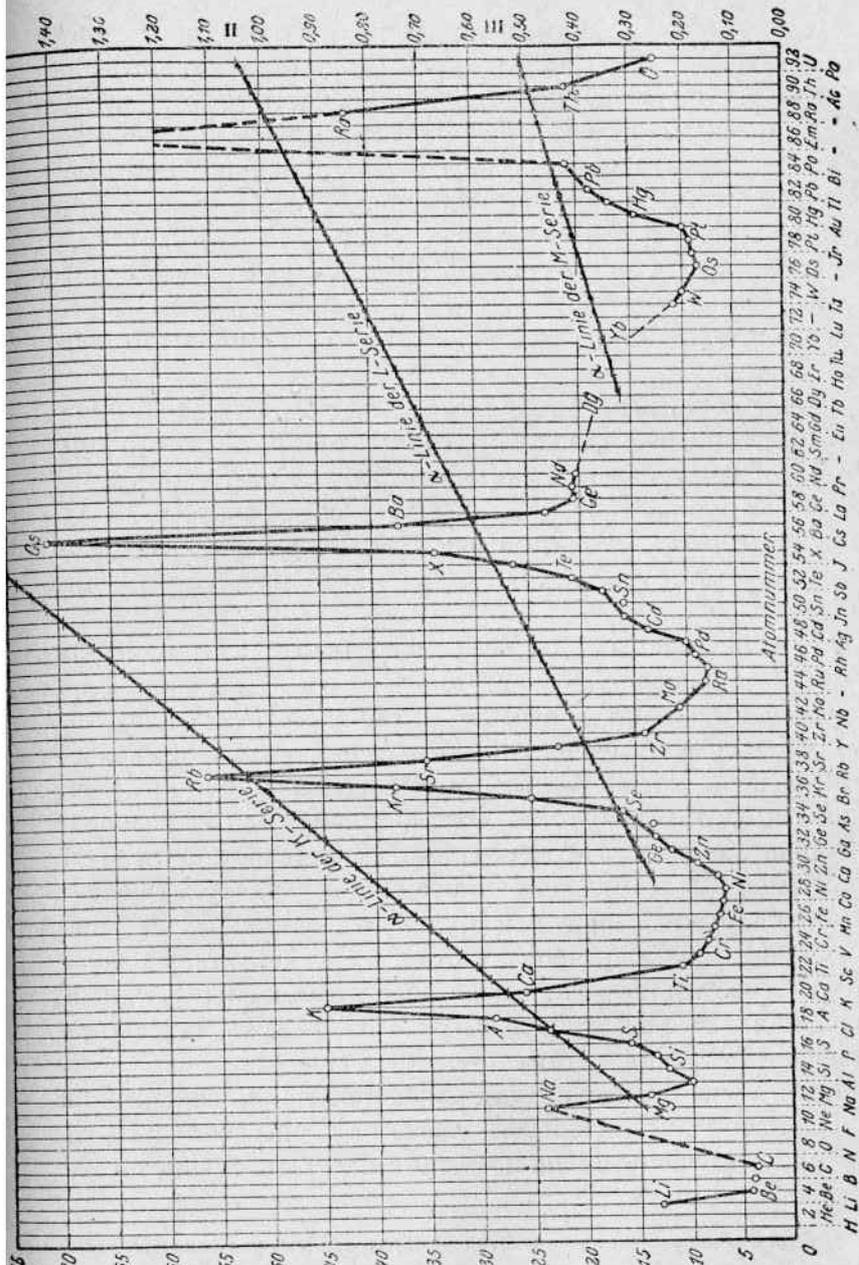
где A и B константы, N — порядковое число. Если нанести порядковые числа элементов на абсциссы, а корни квадратные из ν на ординаты, то получается почти прямая линия, как видно из фиг. 16; кривые относятся к наиболее сильным линиям K -, L - и M -серии. О важных заключениях, к которым можно прийти на основании этой закономерности, мы еще будем иметь случай говорить; здесь же необходимо только указать на то, что преимущество порядкового числа, как принципа для расположения в ряд химических элементов, над атомным весом видно уже из того, что в случае выбора в качестве абсцисс атомных весов получаются не только не прямые, но совершенно неправильные линии.

Возникновение характеристических лучей возможно также под действием рентгеновых лучей в том случае, когда число колебаний последних достигает частоты характеристических лучей (см. стр. 62). Это то самое условие, с которым в оптике согласно правила Стокса связано наступление флуоресценции; флуоресцирующее излучение может быть вызвано лишь излучением, лежащим за фиолетовой частью. Так как большая часть γ -лучей имеют высокую частоту, то они в состоянии при своем прохождении через тела вызывать характеристические лучи многих веществ, что вместе с рассеянием γ -лучей и возникновением вторичных лучей делает запутанным явление абсорбции. Что между коэффициентом абсорбции γ -лучей и плотностью абсорбирующего тела нет никакого простого соотношения, мы уже указывали на стр. 53.

IV. Вторичные лучи, образуемые α -лучами, δ -лучи.

Также и под действием α -лучей могут образоваться вторичные как β -, так и γ -лучи.

$$\sqrt{\frac{1}{\lambda}} \times 10^{-4} \text{ рентгеновских линий } K\alpha, L\alpha \text{ и } M\alpha$$



Фиг. 16. Атомные объемы и рентгеновские спектры элементов.

I — α -линия K-серии; II — α -линия L-серии; III — α -линия M-серии. Рисунок дает сопоставление свойств элементов, являющихся периодическими функциями порядкового числа (атомный объем), со свойствами линейно зависящими от последних (рентгеновский спектр).

$$\text{атомн. объем} = \frac{\text{атомн. вес}}{\text{удельн. вес.}}$$

Образующиеся таким путем β -частицы имеют большую часть очень малую начальную скорость и соответственно незначительную способность ионизации, часть же этих частиц все же достигает кинетической энергии, отвечающей свободному пробегу в 40 вольт падения потенциала, иначе говоря, круглым числом учетверенного количества энергии, требующегося для ионизации одной молекулы воздуха (см. стр. 43—44). Так называемые, „ δ -лучи“ — медленные электроны, которые дают все α -излучающие вещества — суть, по всей вероятности, тоже образуемые α -частицами вторичные β -лучи.

Это возникновение вторичных β -лучей оказывается связано с наличием газового слоя ²⁾. В то время как, напр., каждая ударяющаяся α -частица освобождает с обычной поверхности цинка три β -частицы, того же эффекта не получается для цинка, который перегонкой под высоким вакуумом освобожден от газа, и этот эффект опять имеет место при впуске воздуха.

Если α -частицы ударяют в водородные атомы, то эти последние ионизируются и, так как их масса составляет только одну четвертую часть α -частицы, достигают в результате столкновения очень больших скоростей и в несколько раз большей дальности пробега, чем вызвавшие это явление α -частицы. Так можно вызвать α -лучами Ra C в водороде „Н-лучи“, дальность пробега которых составляет почти 28 см.

С помощью наблюдений сцинтилляций (см. стр. 23) можно далее обнаружить при бомбардировке различных веществ α -лучами небольшое число частиц с еще значительно большей дальностью пробега; наблюдение таких именно Н-лучей, исходящих из ядер атомов, сыграло очень важную роль при выяснении строения атома (см. стр. 171—172).

Если α -частицы эманации радия падают на свинец, цинк и т. д., то незначительная часть их способна вызвать жесткие γ -лучи (μ в свинце = $1,8 \text{ см.}^{-1}$) *) и, кроме того —

*) Здесь обнаруживается аналогия с образованием рентгеновых лучей канальными лучами.

с таким же минимальным результатом — и характеристические лучи встречающихся на их пути атомов, при чем в случае свинца, золота и платины можно было наблюдать образование „K“- и „L“-излучения, в случае же цинка только последнее 3).

ГЛАВА VI.

Радиоактивная отдача.

Когда α -частица вылетает из атома, то последний, согласно принципу действия и противодействия, отбрасывается в противоположном направлении, подобно тому, как ружье при выстреле претерпевает отдачу.

Если масса и скорость заряда ружья соответственно m_1 и v_1 , а масса и скорость ружья m_2 и v_2 , то

$$v_2 = v_1 \frac{m_1}{m_2}.$$

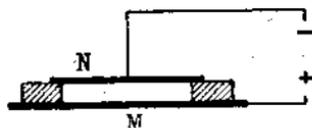
Один атом Ra A, например, испускает α -лучи скоростью в $1,69 \times 10^9$ см./сек. и превращается одновременно в атом Ra B, который вследствие отдачи будет отбрасываться со скоростью:

$$1,69 \times 10^9 \cdot \frac{4}{214} = 3,31 \times 10^7 \text{ см./сек.}$$

(атомный вес α -частицы = 4, Ra B = 214). Скорость остаточного атома Ra B значительно меньше, чем α -частицы, но она, однако, достаточна, чтобы на протяжении своего пути ионизовать воздух, действовать на фотографическую пластинку и т. д. Эта их способность, как и у α -лучей, прекращается внезапно; величина пробега получается в воздухе в 0,14 мм., в серебре в 2×10^{-5} мм. Явление рассеяния выступает здесь вследствие малой скорости отчетливее, чем при α -лучах ⁴). Из величины магнитного отклонения следует, что остаточный атом имеет атомный вес почти 214 — что очень хорошо согласуется с Ra B — и несет один электрический заряд ⁵).

Если некоторое количество Ra A находится на горизонтальной металлической пластинке, тогда те атомы, которые испускают свои α -частицы кверху, отбрасываются книзу и внедряются в пластинку; наоборот, те остаточные атомы, которые вследствие испускания α -частиц книзу отскакивают кверху, попадают в окружающий пластинку воздух. Благоприятнейший случай поэтому будет тот, когда в воздухе соберется 50% остаточных атомов ⁶).

Возможность получения отдельных радиоэлементов в чистом состоянии с помощью явления отбрасывания играет в радиоактивности очень важную роль (стр. 195). Чтобы сделать явление отбрасывания независимым от малой величины пробега остаточного атома, эти атомы собирают в электрическом поле, т.е. заряжают препарат положительно, например, до 100 вольт, и укрепляют над ним на расстоянии нескольких миллиметров пластинку столь же высоко заряженную отрицательно, к которой будут притягиваться через воздух остаточные атомы, так как



Фиг. 17.

Приспособление для улавливания атомов отдачи.

они хоть и в малой степени, но заряжены положительно (см. фиг. 17). К этому отрицательному заряду движутся остаточные атомы, вначале хотя и заряженные сами отрицательно, вследствие испускания α -частиц, благодаря тому, что при ионизации окружающих молекул воздуха они отдают много электронов и сами получают положительный заряд. Исследование отклонения остаточного атома Ra B в магнитном поле дает возможность говорить, что почти все остаточные атомы несут некоторый положительный заряд и только едва $\frac{1}{1000}$ % заряжена отрицательно ⁷).

Также и при испускании β -частицы должно происходить явление отдачи, но образуемые при этом остаточные атомы значительно труднее обнаружить, чем продукты α -отдачи ⁸). Кинетическая энергия выбрасываемой частицы здесь меньше и большею частью недостаточна, чтобы частица оторвалась

с поверхности, на которой идет распад. При применении особых мер предосторожности, как то работа под высоким вакуумом, осаждение материала на полированной поверхности и т. д., можно действительно уловить при распаде Ra В до 20% атомов отбрасываемого Ra С.

Фотографическое обнаружение атомов отдачи удается лишь тогда, когда слой желатины пластинки настолько тонок, что остаточный атом не застревает в нем, прежде чем достигнут Ag Br.

Особый род отдачи представляет собою, так называемая, „агрегатная-отдача“ („Aggregatrückstoss“). Если электролитически осадить Po на чистый металлический листок и поблизости к нему поместить второй металлический листок, то можно через короткое время обнаружить полоний на этом втором листке. Для объяснения принимается, что при электролизе полоний садится на листке не в виде отдельных атомов, но в виде агрегатов из двух и более атомов, и если один из этих атомов распадается, то при этом путем отдачи увлекается не только образующийся из распадающегося атома полония атом Ra G, но, кроме того, еще и находящиеся в этом самом агрегате нераспавшиеся атомы Po; когда поэтому α -частицы вылетают в направлении первого листочка, агрегат, состоящий из одного атома Ra G и одного или более атома Po, отбрасывается ко второй пластинке. Этим явлением объясняется то, что вблизи сильного препарата полония все предметы заражаются радиоактивностью, хотя Po не дает никакой эманации и его продукт распада не активен; это явление может наблюдаться также у тех препаратов, где полоний получен не осаждением электролитически, но собран из эманации, а, кроме того, встречается также и у других α -излучающих радиоэлементов.

ГЛАВА VII.

Строение атома и радиоактивные лучи.

Явления, наблюдаемые при прохождении лучей через материю, послужили опорными пунктами и сыграли роль путево­дителя при исследовании строения атома, и, обратно, во многих случаях теория структуры атома разъясняла образование и природу отдельных родов лучей. Мы на­мерены поэтому вкратце рассмотреть строение атома в согла­сии с современными воззрениями.

I. Строение атома.

Получившая ныне всеобщее признание модель атома представляется в таком виде, что материальная часть атома занимает не весь атом в виде шара с радиусом в 10^{-8} см., но ограничена бесконечно малым пространством в середине атома, всего около 10^{-15} см. *), образуя ядро атома, и заряжена положительно. Остальное же, а практически все, про­странство внутри атома отводится электронам, движущимся вокруг ядра. Размеры этого электронного облака опреде­ляют собою величину атома. Число электронов равно числу единиц положительного заряда, удерживаемому ядром. Вследствие этого атом кажется электрически нейтральным.

Общее число вращающихся в атоме отрицательных элек­тронов, а поэтому и число положительных зарядов ядра, равно порядковому числу (см. стр. 127) данного элемента.

*) Это значение получается из величины отклонения, претерпеваемого α -частицами, когда они достигают близости ядра (см. стр. 86). В то время, как радиус солнца лишь в 400 раз меньше радиуса земной орбиты, ядро атома, построенного подобно планетной системе, почти в 10.000 раз меньше, чем расстояние электронов от центра системы.

Так, например, в атоме водорода вращается 1 электрон, в атоме гелия—2, в атоме лития—3, в атоме меди—29, в атоме платины—78 и в уране, атоме с наибольшим порядковым числом,—92 электрона.

Если электрически нейтральный атом проионизировать и он становится положительно или отрицательно заряженным, то это происходит таким образом, что в первом случае с внешнего слоя отрывается определенное число электронов, во втором же случае к атому присоединяется из окружающей среды или из числа имеющихся свободных электронов один или несколько электронов. Ионизация или какого-либо рода химическое превращение не в состоянии, однако, произвести никакого изменения в числе зарядов ядра; эти процессы могут поэтому всегда быть сделаны обратимыми. Обратимость всех вызванных химическими процессами изменений атома означает не что иное, как давно известный закон химии, а именно, сохранение элемента. В относительно редких случаях радиоактивных процессов, ядро, а поэтому также и система окружающих его электронов, претерпевает длительное превращение. С этим превращением, которое, как указано на стр. 126, влечет за собою полное изменение химической природы атома, теснейшим образом связано испускание радиоактивных лучей.

Устойчивость указанным образом построенного атома не может быть объяснена на основании классической механики и электродинамики. Чтобы сделать понятной эту устойчивость, необходимо выдвинуть постулат, что существуют такие особые состояния движения атома, которые не сопровождаются отдачей энергии. Содержание энергии атома может измениться лишь в том случае, когда атом переходит из одного такого состояния в другое.

Чтобы дать себе отчет о процессах излучения, необходимо упомянутый постулат дополнить еще вторым, а именно, что если такой переход связан с выделением излучения, то оно всегда монохроматично, и частота колебаний испускаемого света равна излучаемому количеству энергии, деленному на, так называемую, постоянную Планка h .

Экспериментальные основания, на которые опирается вышеприведенное представление, настолько многочисленны и разнообразны, что не могут быть здесь приведены исчерпывающим образом. Мы укажем хотя бы только на следующие особенно важные явления, хорошо согласующиеся с развитым выше представлением о строении атома, а именно, на рассеяние α -лучей при прохождении через материю (стр. 32), изотопию (стр. 139), испускание и абсорбцию обыкновенного света, рентгеновых лучей и т. д., как это сказывается на спектрах элементов.

Поскольку мы желаем подойти к вопросу об образовании радиоактивных лучей, будет целесообразно выяснить несколько ближе строение атома в простейших случаях.

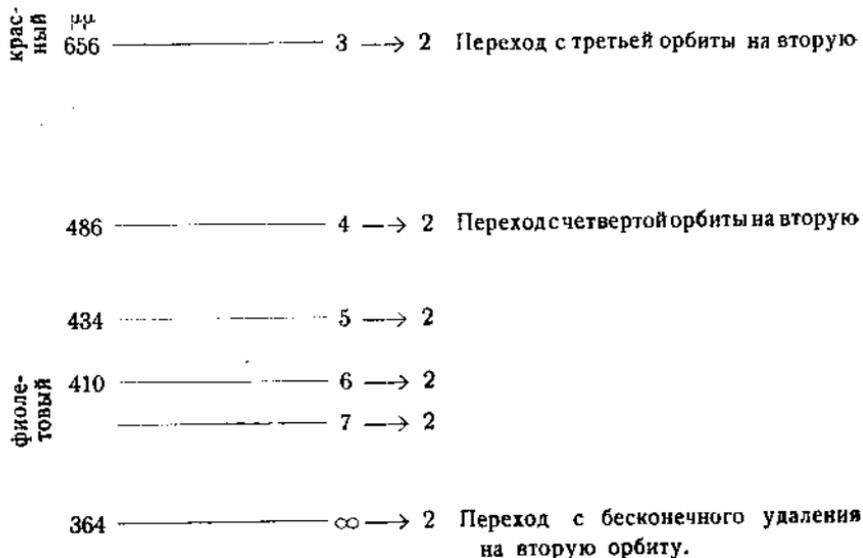
II. Строение водородного атома.

Водородный атом состоит из ядра, которое в этом случае несет только один положительный заряд, и одного электрона, который, согласно выше упомянутому первому постулату, движется всегда по определенным орбитам. Это движение подчиняется Кеплеровым законам, подобно движению планеты вокруг находящегося в фокусе солнца: таким образом описываемые электроном орбиты суть эллипсы.

Существует целый ряд таких стационарных орбит, из которых выделяется все же особенно одна вследствие того, что содержание энергии атома наименьшее, когда электрон движется по этой орбите. В этом, так называемом, „нормальном состоянии“ водородный атом может находиться очень продолжительное время, тогда как продолжительность всякого другого стационарного состояния весьма коротко.

При переходе электрона из одного стационарного состояния в другое, согласно уже упомянутому второму постулату, испускается монохроматический пучок лучей. На фиг. 18 можно видеть спектральные последствия возвращения электрона на свою нормальную орбиту с какой-либо другой, на которую он попал путем внешнего воздействия, например, бомбардировкой катодными лучами. В том случае, когда

ненормальную, с третьей орбиты на вторую и т. д.; эти линии можно видеть на фиг. 19.

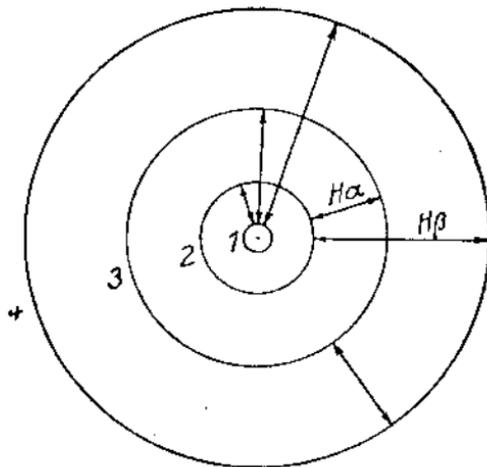


Фиг. 19.

Спектр водорода в видимой области.

Относительное расстояние отдельных стационарных орбит от центра атома представлено на фиг. 20. Диаметр первой орбиты есть диаметр атома в нормальном состоянии и равен $1,06 \times 10^{-8}$ см. Вычисление радиусов орбит определяется тремя универсальными постоянными: электрическим элементарным зарядом e , массой электрона m и Планковской постоянной h (стр. 88, 89). Тех же самых величин достаточно, чтобы высчитать работу, которая необходима для того, чтобы перевести электрон из одной стационарной орбиты на другую. Таким образом, получается, напр., что работа, которая должна быть приложена, чтобы совершенно удалить электрон из атома, выраженная в вольтах (стр. 43), составляет слишком 13,5; это есть ионизационный потенциал водородного атома.

На фиг. 20 ради простоты принято, что электрон в водородном атоме движется по круговой орбите. Более близкое исследование показывает, однако, что движение электрона, кроме стационарных круговых орбит, может также совершаться и по стационарным эллиптическим орбитам. В таком случае уже недостаточно бывает характеризовать стационарную орбиту одним числом, и для того, чтобы разобратся среди различных по величине эксцентриситетов



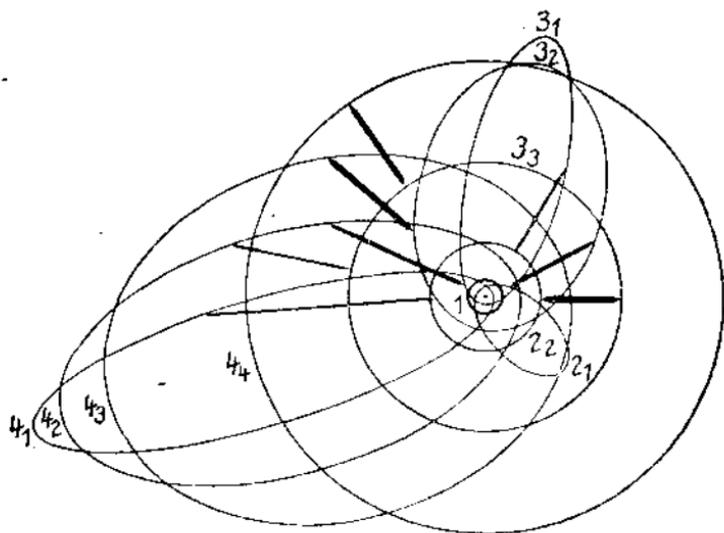
Фиг. 20.

Стационарные круговые орбиты водорода.

орбит, необходимо ввести еще второе целое число. Эти числа называются квантовыми числами орбит. Как видно из фиг. 21 у орбит с одним и тем же первым квантовым числом, большие оси имеют ту же самую длину. Малая ось меняется вместе со вторым квантовым числом таким образом, что орбита тогда имеет наибольший эксцентриситет, когда оно равно 1; орбита в том случае имеет форму круга, когда первое и второе квантовые числа одинаковы.

Закономерности, обнаруживаемые в спектре водорода, служат убедительным доказательством того, что в атоме водорода имеется лишь один электрон, т. е., что ядро водо-

рода несет только один положительный заряд. То же самое вытекает из величины абсорбции α -лучей в водороде, так же, как и из того факта, что в трубке для каналовых лучей водородные лучи никогда не встречались больше, чем с одним положительным зарядом.



Фиг. 21.

Стационарные эллиптические орбиты в атоме водорода.

III. Атомы высших порядковых чисел.

Ту же самую теорию, которая привела к выяснению строения водородного атома, можно применить и для того, чтобы получить представление о строении других атомов, опираясь одновременно на результаты, даваемые спектроскопией, рентгеновской, бомбардировкой атома электронами и химией. При этом принимается, что в случае, если в атоме имеется несколько электронов, орбита каждого электрона обозначается квантовым числом по аналогии с возможными орбитами в водородном атоме.

Рассмотрим атом гелия. Спектральная картина этого элемента приводит к заключению, что в нормальном состоя-

нии атома оба электрона движутся по одноквантовым орбитам, иначе говоря, по круговым орбитам, и что плоскости этих орбит наклонены друг к другу на 120° . Эта конфигурация особенно устойчива, что стоит в согласии и с природой гелия, как благородного газа. Очень большая химическая инертность гелиевого атома вполне соответствует также ненормально высокому потенциалу ионизации и возбуждения. Чтобы вполне выделить электрон гелиевого атома, бомбардирующие электроны должны проходить падение напряжения в 25 вольт; чтобы отделить также и второй электрон требуется 54 вольта.

Благодаря новым исследованиям в очень чистом гелии открыта возможность существования ненормального состояния, в котором атом может оставаться продолжительное время, в противоположность общему правилу кратковременности ненормальных состояний. В это „возбужденное“ состояние атомы гелия могут быть приведены бомбардировкой электронами в 20 вольт „скорости“. Возвращение из этого метастабильного состояния в нормальное может быть вызвано химическим воздействием, присутствием следов водорода и т. п. В свете приведенной теории это метастабильное состояние идентично с одним из стационарных состояний, на существование которых указывает спектр гелия. Оба электрона движутся здесь в одной и той же плоскости: внутренний по одноквантовой, внешний по двуквантовой орбите, точнее выражаясь, по орбите 2_1 (ср. аналогичную 2_1 — орбиту атома водорода на фиг. 21).

Если мы будем рассматривать элементы с большим числом электронов, то по теории нужно допустить распределение различных электронов по группам, орбиты которых обозначаются теми же квантовыми числами. Эти группы идентичны с уже упомянутыми при рассмотрении характеристических рентгеновых лучей *K*-, *L*-, *M*- и т. д. группами (стр. 63). Здесь необходимо отметить, что электроны различных групп движутся не в пространственно разделенных областях атома, но что, по крайней мере, часть, к более высшей группе принадлежащих электронов, в течение каждого пробега

пронизывает область более глубоко лежащей группы. Изменение свойств элемента с увеличением порядкового числа, как оно обнаруживается в периодической системе элементов, есть следствие постепенного образования этих группировок. Образование редкого газа есть свидетельство того, что распределение электронов в этом случае достигло особенно высокой степени завершения.

В то время, как по классической теории между частотой колебаний электрона в атоме и спектральными линиями имеется простая зависимость, по квантовой теории спектральных линий нет никакой непосредственной связи между этими обоими величинами, так как для частоты колебаний спектральных линий решающей является разница в содержании энергии атома в обоих стационарных состояниях (напр., между положением 3 и положением 2). Все же особый интерес представляет то обстоятельство, что, несмотря на это, между испускаемыми при переходах лучами и движением электрона в атоме существует полное соответствие. Это соответствие позволяет прийти к определенным заключениям относительно переходов из одной стационарной орбиты в другую и сопровождающего эти переходы излучения заключениям, которые в сущности вытекают из того, что непосредственно следует из упомянутых двух постулатов, которые приводят к только что рассмотренным воззрениям на строение атомов более высоких порядковых чисел.

IV. Образование радиоактивных лучей.

α -частицы, так же как и часть β -частиц, образуются из ядра распадающегося атома. Доказательством первого, главным образом, служит то, что α -частица есть не что иное, как атом гелия с двойным положительным зарядом, а гелий, как и все материальные составные части атома, может находиться только в ядре. Частичное хотя бы образование β -частиц из ядра доказывается тем, что коренные химические и спектральные изменения, претерпеваемые атомом вследствие испускания одной α -частицы (+ +), могут быть

вполне восстановлены (см. стр. 127) потерей двух β -частиц (—); это явление не допускает никакого другого объяснения, кроме того, что β - и α -частицы образуются из той же самой части атома, иначе говоря, из ядра его. В действительности при распаде атома только непосредственно образующиеся β -частицы выделяются из ядра; вторичные же β -лучи, возникающие при прохождении через атом первичных β -, а также α -, γ - или других лучей, образуются из окружающей ядро электронной оболочки, подобно тому, как образуются электроны, принимающие участие при ионизации или других химических процессах *).

Выбрасываемые из ядра β -частицы задерживаются при прохождении сильного электрического поля оболочки из электронов ²⁾. За счет теряемой при этом β -частицами энергии возникают электромагнитные лучи, мягкие γ -лучи. Эти же мягкие γ -лучи (напр., у изотопа свинца RaB) образуются и при ударе β -лучей о свинец; они суть не что иное, как характеристические лучи свинца, которые вызываются β -частицами, исходящими в первом случае из самой середины атома, а во втором из оболочки его. Более жесткие γ -лучи напротив образуются из самого ядра атома, подобно сопровождающим процесс распада α - и β -лучам.

Такое воззрение опирается, главным образом, на то обстоятельство, что благодаря ему возможно простое и количественное объяснение магнитного спектра β -лучей ³⁾. Согласно такому представлению спектр β -лучей может быть в общем разложен на первичную часть, принадлежащую ядру, и вторичную, обязанную своим происхождением электронной оболочке. Вторичная часть спектра получается потому, что покидающие ядро одновременно с β -частицами γ -импульсы на своем пути через оболочку атома освобождают из электронных групп β -частицы. Рассмотрим сначала предельный случай, когда магнитный спектр β -лучей особенно

*) Также исключительно из электронной оболочки образуются испускаемые радием, радиоторием и радиоактинием наряду с α -лучами β -лучи ¹⁾ (см. ниже).

прост и состоит, именно, только из первичных линий, как это мы встречаем у UХ или еще резче у ThС; здесь β -излучение не должно совсем сопровождаться, или, если и сопровождается, то в минимальных количествах, γ -излучением, что и встречается на самом деле. Перейдем теперь к другому предельному случаю, в котором β -спектр состоит исключительно из вторичных линий; в этом случае каждый распадающийся атом испускает γ -лучи и никаких первичных β -частиц, т. е. не претерпевает никакого β -превращения. Это, например, есть случай радиотория, который наряду с α -частицами испускает γ -лучи, не испытывая при этом, как это доказывается химически, β -превращения, в результате которого должен был бы образоваться изотоп протактиния.

Между энергией γ -импульсов и выбиваемых ими из электронных групп β -частиц имеется простая зависимость. Заключается она в том, что вторая величина равна первой, уменьшенной на работу, необходимую для того, чтобы вырвать электрон из данной группы. Эта работа будет различна в зависимости от того, из какой группы освобождается электрон. Рассмотрим снова очень простой спектр радиотория; здесь имеются две линии, одна отвечает 0,51 скорости света, другая 0,47 скорости света, так что разница в энергии двух линий составляет $0,2215 \cdot 10^{-7}$ эргов. Эта энергия есть, однако, не что иное, как разница работ освобождения электрона из групп M_1 - и L_1 - изотопного с радиоторием тория; работа освобождения электрона из различных групп известна из рентгеноспектроскопии (ср. стр. 63). Это суть те электронные группы, из которых γ -луч, исходящий из ядра радиотория, выбивает электроны. Благодаря этому, является возможность вычислять длины волн γ -лучей, для чего мы не имеем никаких других методов (ср. стр. 51). Первой из указанных линий β -спектра отвечает энергия в $1,298 \times 10^{-7}$ эргов, работа освобождения электрона из L_1 - группы = $0,0527 \cdot 10^{-7}$ эргов; сумма этих двух величин (= $1,3507 \cdot 10^{-7}$ эргов) составляет энергию γ -лучей. Эта же самая величина дается также суммой энергии второй линии спектра и работы освобождения электрона из M_1 - группы, т. е. $1,0765 \cdot 10^{-7} +$

$+ 0,2582 \cdot 10^{-7} = 1,3347 \times 10^{-7}$ эргов. Среднее значение двух близко совпадающих величин γ -энергий — точное определение энергии β -линией наталкивается на большие экспериментальные трудности — выраженное в длинах волн, равно $1,46 \times 10^{-9}$ см.

Если мы обратимся теперь к другому радиоэлементу, напр., ThB, спектр которого содержит как первичную, так и вторичную часть, то можно с помощью того же самого рассуждения показать, что линия в 0,630 скорости света отвечает электрону, освободившемуся из K -группы, линия 0,714 скорости света — электрону из L_2 -группы и линия 0,723 скорости света — электрону из L_1 -группы, и что вызвавшее выделение этих электронов γ -излучение обладает длиной волны в $5,2 \times 10^{-10}$ см.

Не всегда бывает достаточно, как в вышеприведенных случаях, принимать для объяснения β -спектра один только род γ -излучения; в случае RaB, напр., обнаруживается присутствие тройного рода γ -лучей. Когда α -частицы покидают ядро, то при этом также испускается γ -излучение, по большей части, однако, лишь незначительной интенсивности.

Мы хотели бы еще вкратце, в свете только что разобранный модели атома, сравнить образование характеристического рентгеновского спектра с оптическими сериальными спектрами. Согласно вышеприведенному разъяснению, в то время, как оптический спектр элемента получается вследствие того, что электрон внешней оболочки атома переходит из одного возможного положения в другое, подобное же прерывное изменение положения электронов во внутренних, т. е. лежащих поблизости к ядру, слоях вызывает образование рентгеновского спектра. Действие ядра на эти электроны настолько преобладает над действием внешних электронов, что его только и можно принимать во внимание. Этому обстоятельству необходимо приписать и то, что между характеристическим рентгеновским спектром элемента и его порядковым числом существует простое соотношение.

Напротив того, электроны во внешних, далеко отстоящих от ядра атома слоях едва подвергаются непосредственному

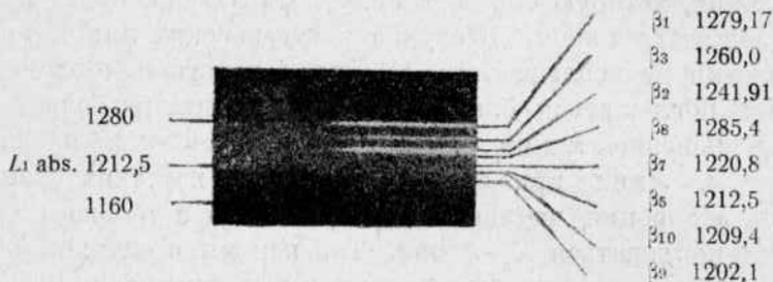
действию ядра, и в силу этого здесь простое соотношение между числом заряда ядра и оптическим спектром не находит себе места. Для оптического спектра место элемента в его группе является решающим; спектры щелочей, например, обнаруживают в значительной степени одинаковое строение, несмотря на сильно различающиеся друг от друга порядковые числа, так как периферическое расположение электронов в их атомах одинаковое.

Одно из разительнейших различий между рентгеновскими и оптическими лучами заключается в том, что в рентгеновском спектре не встречается никаких линий поглощения. Если, напр., через пары натрия проходит белый свет, то *D*-линия, которую способен испускать натрий, будет резко поглощаться паром. В случае рентгеновских линий такой аналогии не наблюдается; K_{α} -линия какого-либо элемента будет поглощаться слоем того же элемента не более, чем рентгеновские линии несколько большей или меньшей частоты. Лишь при значительно более коротких длинах волн, абсорбция начинает идти скачками и только теперь будет испускаться K_{α} -линия. Так как мы в оптике встречаемся с подобными же явлениями у флуоресцирующих веществ, которые тоже превращают свет более короткой длины волны в свет большей длины волны, то это особое рентгеновское излучение элемента называют также „флуоресцирующим излучением“.

Основываясь на выше приведенной модели атома разница становится понятной. В том случае, когда может получиться рентгеновская линия поглощения, электрон должен быть переведен с одной из наиболее внутренних орбит атома на внешне расположенную; все ближе к ядру расположенные орбиты заняты целиком электронами, и только в том случае, когда энергии приложенной длины волны достаточно для того, чтобы перевести электрон на поверхность атома, может произойти абсорбция. В отличие от оптических спектров поглощения, при которых только внешние электроны несколько перемещаются, здесь только более короткая длина волны, чем та, которая соответствует излучению элемента,

способна дать необходимую энергию. Когда описанным выше способом электрон из наиболее внутренней орбиты будет переведен на поверхность атома, тогда занять его место устремится электрон со второй, третьей и т. д. орбиты, но не с поверхности атома, и при этом появляются линии испускания K_{α} - K_{β} -, и т. д.

Необходимо указать, что на основании подобных представлений нужно ожидать, что в месте резко ограниченного участка абсорбции, при достаточно отчетливом разделении, будут появляться различные отдельные линии абсорбции соответственно тому, на какую внешнюю орбиту электрон перемещен, но так как здесь, сравнительно с работой, не-



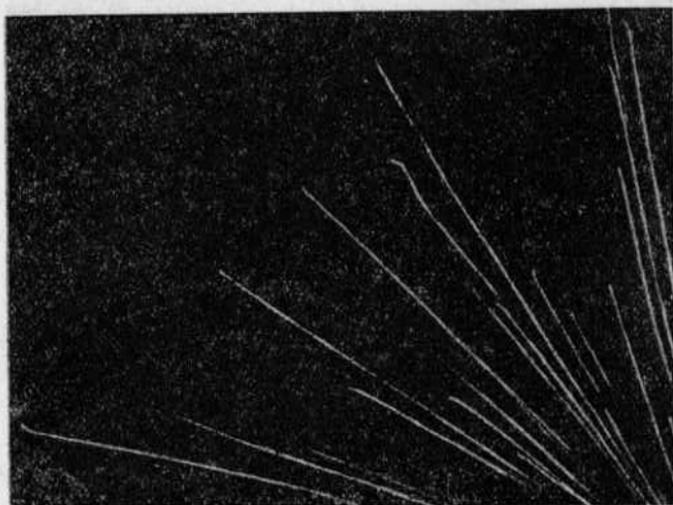
Фиг. 22.

Спектр испускания и поглощения вольфрама в области L (снято с помощью кристалла каменной соли; волны в 10^{-11} см. По Д. Костеру).

обходимой для удаления электрона от ядра, разница энергий и ей отвечающая разница в длинах волн составляет лишь ничтожную величину, то этот эффект может быть обнаружен лишь очень утонченными экспериментальными вспомогательными средствами. Фиг. 22 показывает часть как спектра абсорбции, так и спектра испускания в L -области вольфрама. На правой стороне сфотографированы линии испускания вольфрама, а на левой — гетерогенное излучение железного антикатада, на пути хода лучей которого включен тонкий слой вольфрамовой соли. Можно установить повышенную абсорбцию в вольфраме, наступающую при длине волны в $1212,5 \cdot 10^{-11}$ см. и продолжающуюся в сторону более коротких длин волн.

V. Рассеяние лучей при прохождении через атом.

Прохождение материальных частиц через атом возможно вследствие того, что, как следует из выше рассмотренной теории атома, непроницаемое ядро атома занимает лишь бесконечно малую часть объема атома, в то время как остальное пространство может быть проходимо. Пролетающие

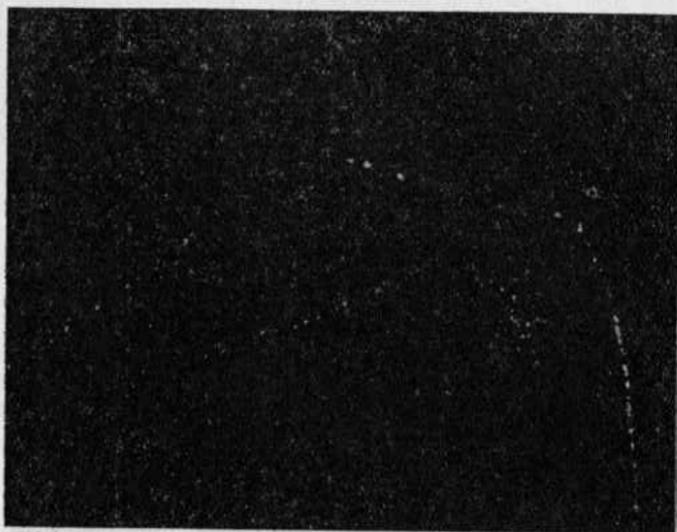


Фиг. 23.
Пути α -частиц.

частицы должны, разумеется, обладать достаточной кинетической энергией, чтобы быть в состоянии пробить атомную оболочку. Подобно чрезвычайно быстро движущимся α -частицам, пронизывать атом могут также остаточные атомы, равно как и получившие достаточное ускорение в трубке каналовых лучей материальные частицы.

Если, напр., α -частица проходит через атомы золотого листка, то она будет двигаться между поверхностью атома и атомным ядром и при этом достигать большей или меньшей близости к ядру. Принимая во внимание относительно очень большое промежуточное пространство, частица лишь в редких случаях, которые можно установить путем вычисления, попадает в непосредственную близость к ядру.

Когда имеет место такой случай, частица испытывает, в виду того, что ядро и α -частица заряжены положительно, в зависимости от расстояния, сильное отклонение от своего прямолинейного пути или, как говорилось на стр. 32, рассеяние ⁴). Исследование явлений рассеяния показало, что закон



Фиг. 24.
Пути β -частиц.

Кулона сохраняет силу на расстоянии до $5 \cdot 10^{-12}$ см. от центра в тяжелом атоме, а при столкновениях между ядрами водорода и гелия даже до $5 \cdot 10^{-13}$ см. Во всяком случае, показатель степени в формуле Кулона в тех случаях, когда он вообще отличен от 2-х, должен еще лежать между 1,97 и 2,03. Это явление рассеяния прямолинейного пучка лучей объясняется только существованием внутри атома сильного электрического поля; изучение этого явления имело громадное значение для выяснения строения атома и прежде всего для определения величины ядра и заряда ядра.

β -частицы вследствие их незначительной массы обнаруживают явления рассеяния в значительно большей степени, чем α -частицы.

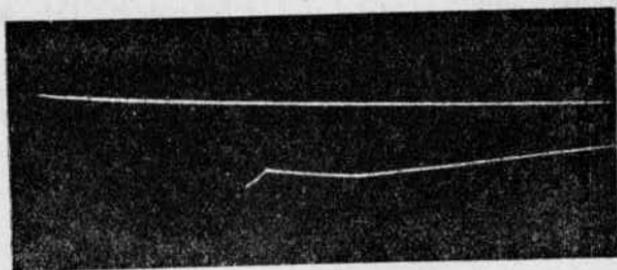
Это различие в свойствах радиоактивных лучей при прохождении их через воздух удалось фиксировать фотографическим путем. Фиг. 23—25 показывают фотографические снимки, получение которых основано на следующем принципе.

Конденсация пересыщенного пара происходит там, где имеются центры конденсации. Одним из самых действительных методов получения центров конденсации служит образование газовых ионов. Так как ионы образуются на протяжении пути радиоактивных лучей, то в случае, если такие лучи проходят через пересыщенный водяной пар, по пути их следования будет осаждаться вода, и при надлежащем освещении этот путь их следования можно сделать видимым.

Фиг. 23 показывает ход отдельных α -частиц. Они движутся почти исключительно прямолинейно, и их ионизационная способность сразу резко обрывается (дальность пробега!).

На фиг. 24, показывающей пути следования β -частиц, можно видеть, что путь легко отклоняющихся β -лучей извилистый, совершенно неправильный.

Из фиг. 23 видны также и гораздо реже встречающиеся отклонения от прямого пути α -частиц; излом, обнаруживаемый в отдельных случаях в конце их траектории, обуславливается выше рассмотренным явлением рассеяния. Фиг. 25, представляющая собою часть фиг. 23 в увеличенном масштабе, позволяет особенно отчетливо видеть траекторию с двумя изломами.



Фиг. 25.

Следующий метод, благодаря которому возможно наблюдать траектории α -лучей, состоит в том, что лучи заставляют падать под острым углом на тонкий шлиф из хорошо люми-

низирующего виллемита (см. стр. 222, 223)⁵). При этом можно видеть, пользуясь напр., лучами полония, светящийся путь α -лучей—светлые черточки—около 0,02 мм. длиной, соответствующие величине пробега α -лучей в виллемите.

VI. Дополнительные расчеты к главе о строении атома*).

Мы рассмотрим движение электрона и положительного ядра, массу которого можно принять бесконечно большой, и ограничимся простоты ради круговыми орбитами.

Сила притяжения по Кулону между ядром с зарядом Ne и электроном с зарядом e составляет $\frac{Ne^2}{a^2}$; она равна по величине, но обратна по направлению, центробежной силе $\frac{mv^2}{a}$, где m масса, v скорость электрона, a радиус орбиты электрона. Построенный подобно планетной системе атом будет устойчив, когда

$$\frac{Ne^2}{a^2} = \frac{mv^2}{a} \dots \dots \dots (1)$$

Теория сериальных спектров требует, чтобы момент импульса электрона mva в стационарных орбитах не мог принимать никаких значений, кроме кратных $\frac{h}{2\pi}$, т. е.

$$mva = \frac{hn}{2\pi} \dots \dots \dots (2)$$

где n означает целое число.

Комбинирование ур-ния (2) с ур-нием (1) позволяет вычислить радиус орбиты электрона, его скорость, а также работу (W), необходимую для того, чтобы совершенно отделить электрон от атома, удалить его на бесконечное расстояние от ядра, т. е. „низировать“ атом; отсюда также можно вычислить и частоту оборотов электрона в своей стационарной орбите (ω). Получается:

$$a = \frac{n^2 h^2}{4\pi^2 Ne^2 m} \dots \dots \dots (3)$$

$$v = \frac{2\pi e^2 N}{hn} \dots \dots \dots (4)$$

*) Эта глава включена в общее изложение таким образом, что если она будет пропущена, то понимание остальных частей от этого не пострадает.

$$W = -\frac{1}{2} m v^2 + \frac{N e^2}{a} = \frac{2\pi^2 e^4 m N^2}{h^2 n^2} \dots \dots \dots (5)$$

$$\omega = \frac{4\pi^2 m e^4 N^2}{h^3 n^3} \dots \dots \dots (6)$$

Испускание спектральных линий по смыслу разобранный теории наступает тогда, когда электрон переходит с какой-либо — как было выяснено выше — n_1 -ой орбиты на n_2 -ую, ближе к ядру лежащую, меньшей энергии орбиту. Если через ν обозначить частоту колебаний спектральной линии и через W_n количество энергии системы в положении n , то

$$h\nu = W_{n_2} - W_{n_1} \dots \dots \dots (7)$$

Для любого атома будет:

$$\nu = \nu_0 N^2 \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right) \dots \dots \dots (8)$$

где $\nu_0 = \frac{2\pi^2 e^4 m}{h^3} = 10947$ (константа Ридберга) $\times 3 \cdot 10^{10}$ и N — порядковое число элемента. Для частоты водородных линий (серия Бальмера) получается:

$$\nu = \nu_0 \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right) = (n_1 - n_2) \nu_0 \frac{n_1 + n_2}{n_1^2 n_2^2} \dots \dots \dots (9)$$

Если n_1 и n_2 велики сравнительно с их разностью, в последнем ур-нии можно положить $n_1 = n_2 = n$, и тогда для ν , принимая во внимание уравнение (5), получается:

$$\nu = (n_1 - n_2) \times \frac{2\nu_0}{n^3} = (n_1 - n_2) \omega.$$

При больших значениях n мы имеем, таким образом, количественную зависимость между частотой оборотов и частотой колебаний излучения, именно, указанное уже соотношение между последней и движением электрона в атоме при больших квантовых числах. Обертоны излучения, когда $n_2 - n_1 > 1$, имеют место лишь при эллиптическом, а не круговом движении электрона.

ГЛАВА VIII.

Приложения теории распада.

I. Основные положения.

Теория распада исходит из одного предположения, заключающегося в том, что число в каждый данный момент распадающихся атомов радиоэлемента всегда пропорционально числу имеющихся налицо атомов.

Если из числа 10^{11} атомов в какой-либо промежуток времени распадается 1000 атомов, то в то же самое время, если того же радиоэлемента имеется 10^{10} атомов, будет распадаться 100 атомов и т. д. Фактор пропорциональности, так называемая, постоянная распада (λ), совершенно не зависит от каких-либо внешних условий, как то температуры, давления и т. д., и является характерной величиной для данного процесса распада.

Редко процесс распада приводит к одному устойчивому продукту; в большинстве случаев распад атома представляет собою целый ряд последовательных превращений. Теория превращений дает возможность разобраться количественно в тех, зачастую весьма сложных, соотношениях, которые здесь встречаются, и рассчитать число атомов, имеющихся в любое время в данной ступени превращений, если только известны их постоянные распада; эта теория указывает, далее, путь, который приводит к определению постоянных распада, в тех случаях, когда они не могут быть установлены непосредственно из опыта.

Ниже мы разберем приложение теории превращений на некоторых типических случаях последовательных процессов распада.

II. Образование коротко-живущего вещества из долго-живущего материнского вещества.

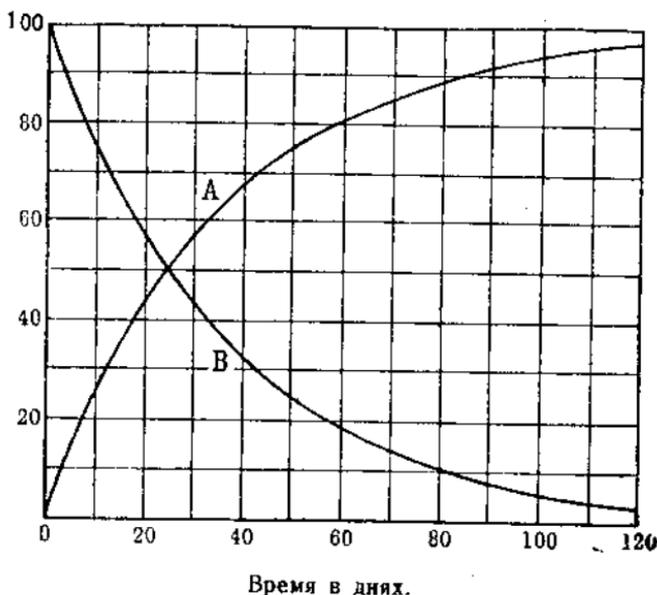
Выделение UX и падение его активности.

Если мы будем исследовать свойства азотнокислого уранила или какой-либо другой соли урана—радиоактивность есть свойство атома урана и совершенно не зависит от того, в каком соединении находится уран, — то мы найдем, что он, кроме α -излучения, дает также и β -излучение. Если мы подвергнем урановую соль кристаллизации или какому-нибудь иному химическому способу разделения, то мы найдем, что сила α -излучения препарата не меняется, β -излучение же не остается без изменения; удается даже—например, прибавлением к раствору соединения урана соли железа и последующим осаждением железа углекислым аммонием—совершенно отделить от урана β -лучи; в этом случае они будут испускаться с той же силой выпавшей солью железа. Из этого можно сделать вывод, что β -излучение производится не ураном, но отделимым от урана радиоактивным продуктом, который называется UX.

β -излучение соли железа не остается постоянным; по прошествии круглым числом 24 дней оно падает уже до половины своей первоначальной силы, в 48 дней до одной четверти, в 72 дня до $\frac{1}{8}$ и т. д.; оно падает, таким образом, согласно показательному закону *). Главная отличительная черта его состоит в том, что распад, строго говоря, вполне заканчивается лишь спустя бесконечно длинное время, но так как количество, а поэтому и излучение UX, падает уже в 10×24 дней до, круглым числом, $\frac{1}{1000}$ своей первоначальной величины, то можно для практических целей рассматривать препарат, если только он не был осо-

*) Математически такой процесс может быть представлен формулой $N_t = N_0 e^{-\lambda t}$, где N_0 — начальное число атомов, N_t — число атомов по прошествии времени t , λ — постоянная распада, e — основание натуральных логарифмов. При этом предполагается, что интенсивность измеряемого излучения всегда пропорциональна числу распадающихся атомов.

бенно сильным, уже окончательно разложившимся по прошествии этого времени (10 кратный полупериод распада)*). Указанная своеобразность показательного хода распада приводит к тому, что вместо абсолютной продолжительности жизни радиоэлемента, теоретически всегда бесконечной, и хотя конечной практически, но зависящей от силы дан-



Фиг. 26.

Нарастание (A) и распад (B) УХ.

ного препарата и чувствительности нашего измерительного инструмента—обычно рассматривают „полупериод распада“ (T), т.-е. время, в течение которого распадается половина имеющегося количества вещества.

*) Если мы в конце распада будем применять измерительные инструменты более высокой чувствительности, чем в начале, то это явление растягивается во времени; один и тот же инструмент не обладает областью измерений больше, чем 1:1000; с его помощью может быть, таким образом, обнаружен 10-кратный полупериод распада.

Кроме полупериода распада, часто приводится другая, ему пропорциональная величина, — „средняя продолжительность жизни“ (τ). Это понятие определяется здесь так же, как и в социальной статистике: возраст каждого индивидуума умножают на среднее число тех из них, которые достигли его, но не перешли, и делят сумму этих произведений на общее число индивидуумов. Не трудно показать математически, что определенная таким образом средняя продолжительность жизни τ равна $\frac{1}{\lambda}$, обратной величине постоянной распада λ , а полупериод распада $T = \frac{1}{\lambda} \ln 2 = \frac{1}{\lambda} \times 0,69$ *). В то время как постоянная распада, например, в случае UX, составляет $\lambda = 0,0290$ дней⁻¹, $\tau = 34,4$ дня, $T = 23,8$ дней. Изменение во времени активности выделенного UX, и лежащее в основании этого изменения пропорциональное уменьшение числа атомов UX показано на фиг. 26.

III. Образование UX из U.

Вернемся снова к препарату урана, от которого мы отделили UX, и который уже не испускает больше никаких

*) Полупериод распада T есть время, в течение которого N_t становится равным $\frac{N_0}{2}$; так как $N_t = N_0 \times e^{-\lambda T}$, то $\frac{N_0}{2} = N_0 \times e^{-\lambda T}$. Отсюда $T = \frac{1}{\lambda} \ln 2$. Данное выше определение средней продолжительности жизни математически выражается следующим образом:

$$T = \frac{\int_0^{\infty} t \lambda N_0 e^{-\lambda t} dt}{N_0} = \frac{1}{\lambda}$$

Так как $T = \frac{1}{\lambda}$, то среднюю продолжительность жизни можно определить, как время, в течение которого распадается все вещество при условии, что число в единицу времени распадающихся атомов остается все время постоянным и равным числу распавшихся в первый момент; тогда $\frac{N_0}{N_0 \lambda} = \frac{1}{\lambda} = T$.

β -лучей. Мало по малу, однако, он опять начинает излучать β -лучи, и в течение 24 (точнее 23,8) дней его β -излучение достигает половины той величины, какую он имел до отделения UX. В 2×24 дня оно достигает $\frac{3}{4}$ только что упомянутой величины, в 3×24 дня — $\frac{7}{8}$ той же величины и т. д. Это возрастание активности также следует экспоненциальному закону и представлено графически на кривой А фиг. 26. Совершенно подобно тому, как полное падение активности выделенного UX теоретически происходит лишь в течение бесконечно долгого времени, практически же наступает уже через 10×24 дней, и β -излучение препарата урана, освобожденного от UX, восстанавливающееся теоретически только по прошествии бесконечно длинного промежутка времени, практически достигает своей первоначальной силы уже через 10×24 дней. На фиг. 26 представлены одновременно падение β -излучения выделенного UX и возрастание β -излучения освобожденного от него уранового препарата. Из этих кривых мы видим, что сумма обоих излучений, а равно и сумма имеющихся налицо атомов UX в каждый данный момент постоянны и равны начальной величине (до отделения UX).

IV. Радиоактивное равновесие.

Теория превращений позволяет предвидеть выше разобранное явление, как это видно из следующего примера.

Пусть мы имеем 10^{15} атомов урана ($= 4 \times 10^{-7}$ гр.); так как полупериод распада U круглым числом составляет 10^{10} лет (ср. стр. 115), то отсюда следует, что, например, в каждые 5 дней, которые мы в этом случае будем рассматривать, как „единицу времени“, будет распадаться относительно чрезвычайно ничтожное число атомов, круглым числом 1000 атомов, иначе говоря, только $1/10^{12}$ часть всего количества. В ближайшие 5 дней подвергается распаду снова $1/10^{12}$ часть в данный момент имеющихся атомов ($10^{15} - 1000$); это число исчезающе мало отличается от 10^{15} , так что мы можем, даже имея в виду очень точные расчеты,

положить его равным последнему. Подобным же образом и в каждые последующие 5 дней всегда будет распадаться 1000 атомов урана. Только по прошествии многих тысяч лет имеющееся количество урана заметно уменьшится, и распадающееся в течение каждых 5 дней число атомов урана поэтому станет заметно меньше 1000; однако, такой промежуток времени, при изучении коротко живущего UХ, не приходится принимать во внимание.

В результате распада 1000 атомов перестают быть атомами урана, они становятся атомами UХ и то только на короткое время; так как средняя продолжительность жизни UХ составляет лишь 34,4 дня, то в 5 дней из 1000 атомов UХ уже распадается круглым числом $15\% = 150$; из остающихся 850 в ближайшие 5 дней подвергнется распаду снова 15% , что в данном случае, в виду того, что 850 существенно отличается от 1000, дает число значительно разнящееся от 150, а именно, 127 и т. д. Процесс распада, таким образом, в течение 5 дней оказывает весьма сильное влияние на имеющееся (а потому и на распадающееся) количество UХ. Активность здесь пропорциональна распадающемуся количеству; предыдущие рассуждения выясняют, почему активность урана практически постоянна, в то время как активность выделенного UХ уже в течение 5 дней падает круглым числом на 15% .

Рассмотрим теперь, сколько образуется UХ, когда он не отделяется от урана, а предоставлен самому себе. В то время, как каждые 5 дней возникает всегда заново 1000 атомов UХ, независимо от того, сколько их уже имеется, в тот же самый промежуток времени будет распадаться, тем больше атомов UХ, чем больше их образуется. Это обстоятельство неизбежно должно привести к такому состоянию, при котором столько же атомов UХ будет распадаться, сколько их образуется заново, так что имеющееся на лицо количество UХ перестанет далее увеличиваться. Такое состояние называют „радиоактивным равновесием“. Радиоэлемент находится со своим продуктом распада в радиоактивном равновесии, когда в единицу времени столько же

атомов дочернего вещества распадается, сколько и образуется из материнского вещества.

Чтобы сделать эти важные соотношения вполне ясными рассмотрим таблицу 14.

Т А Б Л И Ц А 14 *).

Число интервалов времени по 5 дней.	Число образующихся в интервал времени атомов UX, благодаря распаду атомов урана.	Число атомов UX, сохранившихся от предшествовавших интервалов времени.	Сумма обоих чисел.	Число распавшихся в интервал времени атомов UX.	Число в конце интервала времени остающихся атомов UX.
1	1000	—	1000	150	850
2	1000	850	1850	277	1573
3	1000	1573	2573	386	2187
4	1000	2187	3187	478	2709
5	1000	2709	3709	556	3153
6	1000	3153	4153	623	3530
7	1000	3530	4530	680	3850
8	1000	3850	4850	728	4122
9	1000	4122	5122	768	4354
10	1000	4354	5354	803	4551
.
.
.
50	1000	5667	6667	1000	5667
51	1000	5667	6667	1000	5667
52	1000	5667	6667	1000	5667
53	1000	5667	6667	1000	5667

*) Числа таблицы, строго говоря, не совсем правильны, так как в течение единицы времени в 5 дней, которая была выбрана ради наглядности, распад происходит не равномерно. Точное вычисление предполагает, что величиной единицы времени по сравнению с полупериодом распада можно пренебречь. Формулы исчисления бесконечно-малых величин оперируют с бесконечно-малыми промежутками времени, в пределах которых распад строго постоянен.

Из таблицы мы видим, что число распадающихся атомов UX во вторые 5 дней составляет почти удвоенное число распавшихся в первые 5 дней; напротив, разница между 10-м и 9-м интервалом времени уже незначительна, а через 50 интервалов времени в течение 5 дней 1000 атомов распадается и столько же их образуется; поэтому число атомов UX становится постоянным — 5667; радиоактивное равновесие достигнуто.

50 интервалов времени составляет 250 дней, иначе говоря, круглым числом, десятикратный полупериод распада UX. Мы уже видели, что этого промежутка времени, полученного умножением полупериода распада на 10, достаточно, чтобы урановый препарат, освобожденный от содержащегося в нем UX, достиг максимума β -активности и чтобы установилось радиоактивное равновесие.

Для установления количества имеющегося UX или другого коротко-живущего элемента мы довольствуемся большей частью тем, что выражаем силу препарата в условных единицах тока (например, 50 делений шкалы в минуту в определенном электроскопе). Если мы все же хотим выразить количеств коротко-живущего элемента, образующегося всегда в невесомо-малых количествах, в весовых единицах, то это можно сделать простейшим образом, с помощью радиоактивного равновесия. Согласно теории распада, распадающегося в единицу времени число атомов U равно произведению из постоянной распада (λ_1) на число имеющихся атомов (N_1), т.-е. равно $N_1 \lambda_1$; таким же образом число распадающихся атомов UX равно произведению $N_2 \lambda_2$, где N_2 — число атомов UX, а λ_2 — постоянная распада. Мы видели, что при радиоактивном равновесии числа образующихся и распадающихся атомов UX равны между собою; так как первое число равно числу распадающихся атомов U, то в состоянии равновесия должно иметь место соотношение

$$N_1 \lambda_1 = N_2 \lambda_2.$$

N_1 может быть получено взвешиванием урана, так как вес отдельного атома урана известен (в 238 раз больше веса

одного Н-атома $= 238 \times 1,66 \cdot 10^{-24} = 3,96 \cdot 10^{-22}$ гр.); λ_1 и λ_2 (стр. 93) известны, и, таким образом, получаем непосредственно искомое значение для N_2 . В 1 гр. урана, например, который по меньшей мере 8 месяцев не подвергался химической обработке, содержится:

$$N_1 = \frac{1}{3,96 \times 10^{-22}} = 2,52 \cdot 10^{21},$$

$$N_2 = 2,52 \cdot 10^{21} \times \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{2,52 \cdot 10^{21} \times 4,9 \cdot 10^{-18}}{3,4 \cdot 10^{-7}} = 3,63 \cdot 10^{10}.$$

Так как 1 атом UX весит $234 \times 1,66 \cdot 10^{-24} = 3,88 \cdot 10^{-22}$ гр., то все количество UX $= 3,63 \cdot 10^{10} \times 3,88 \cdot 10^{-22} = 1,4 \cdot 10^{-11}$ гр. *).

Обнаружение подобным образом невесома-малых количеств с помощью β -излучения возможно потому, что UX быстро разлагается и испускает относительно много β -частиц. Для обнаружения элемента радиоактивными методами важно не его абсолютное количество, а произведение из количества на постоянную его распада.

V. Материнское вещество обладает не многим большей продолжительностью жизни, чем дочернее.

Активный осадок тория.

В то время как продолжительность жизни урана столь велика, что его количество, когда он приходит в радиоактивное равновесие со своим дочерним веществом, практически остается неизменным во многих случаях, например, при образовании ThC из ThB, количество материнского вещества при этом успеваеет значительно измениться.

Последнее превращение отличается также и в других важных отношениях от превращения урана. Уран присутствует в весомах количествах и отделение его продукта распада производится обычными химическими методами;

*) Если пренебречь разницей в атомных весах обоих элементов, можно получить довольно верное значение для количества, находящегося в равновесии, подставляя вместо чисел атомов N_1 и N_2 прямо весовые количества.

каждый метод, пригодный для отделения тория от урана, может служить также и для отделения UХ (стр. 199). В случае ThВ и ThС приходится иметь дело при невесомых количествах: материнского вещества, с так называемым, активным осадком, соби́рание которого производится особыми, в химии неизвестными, методами.

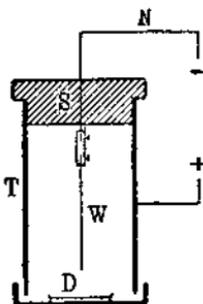
Как уже указано (стр. 4), одним из продуктов распада как радиевого, так и ториевого и актиниевого ряда является газообразное вещество — „эманация“. Эманация тория распадается с полупериодом распада в 55 секунд; при этом образуются атомы металлического ThА и атомы его продуктов распада, также металлических; образующиеся, благодаря сосуществованию этих атомов, заряженные частицы остаются долгое время в воздухе вследствие своей малости во взвешенном состоянии и только постепенно опускаются на окружающую поверхность. Эти продукты распада эманации разлагаются со значительной скоростью далее и обладают относительно сильной активностью, почему этот невидимый налет, образующийся на окружающей поверхности, и называют активным осадком*). Частицы вследствие своего образования несут положительный заряд (стр. 69); это свойство дает нам в руки средство препятствовать падению частиц в направлении силы тяжести. Нужно лишь внести в пространство, где разлагается эманация и находятся частицы, отрицательно заряженную поверхность; например, до 110 вольт заряженную платиновую проволоку, на которую тогда осаждается активный осадок. Фиг. 27 изображает приспособление для соби́рания активного осадка.

Металлическое дно и стенки сосуда соединяются с положительным полюсом, например, с полюсом осветительной проводки, платиновая проволока W, которая проходит через

*) Так как активный осадок находится на поверхности предметов, в присутствии которых разлагается эманация, в форме очень тонкого и слабого налета, он легко может быть снят, причем он „заражает“ радиоактивностью другие предметы. Прежде чем была установлена материальная природа активного осадка, эту активность, приобретенную телами, находящимися в соприкосновении с эманацией, называли „наведенной активностью“.

изолирующую пробку внутрь сосуда, с отрицательным полюсом. Если внести в сосуд препарат тория и по прошествии нескольких дней удалить платиновую проволоку („долгая экспозиция“), то оказывается, что проволока испускает α -, β - и γ -лучи и что ее активность падает с полупериодом распада в 10,6 часов, как показывает кривая *B* фигуры 28 *).

Мы можем теперь повторить опыт, произведя только „короткую экспозицию“ в несколько минут. Проволока теперь непосредственно после удаления из аппарата для экспозиции не обнаруживает никакой α -активности, но мало-по-малу эта активность появляется и увеличивается соответственно кривой *A* фиг. 28.



Фиг. 27.

Приспособление для собирания активн. осадка.

Кривая достигает по прошествии 4 часов максимума и затем падает совершенно подобно тому, как падает активность, полученная долгой экспозицией с полупериодом распада в 10,6 часов.

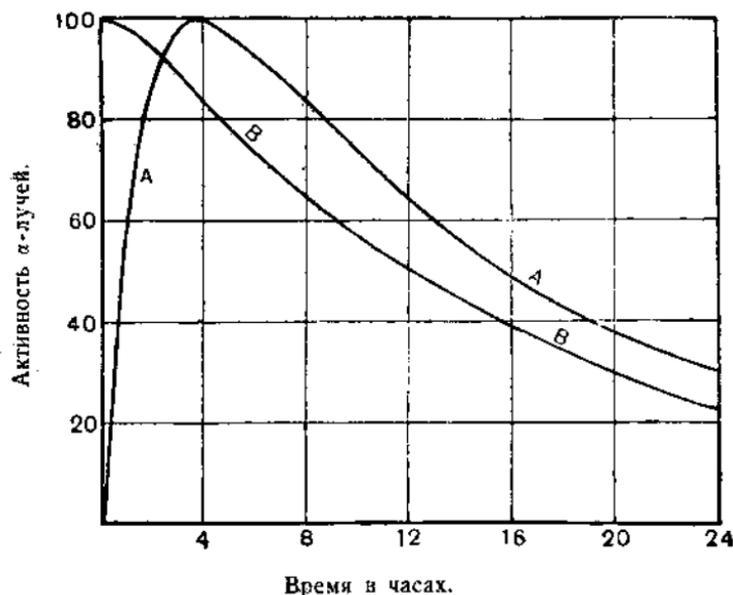
Наиболее простое объяснение этого явления заключается в том, что собирающееся при активировании на платиновой проволоке вещество, называемое ThB , само не дает никакого α -излучения; впервые оно начинает испускаться продуктом его распада ThC ; в той же самой мере, в какой мало-по-малу из ThB образуется ThC , увеличивается и α -активность проволоки. Этот процесс продолжается до тех пор, пока не будет достигнуто радиоактивное равновесие между двумя веществами; с этого момента изменение активности платиновой проволоки во времени происходит таким же образом, как и при „долгой экспозиции“.

Измерение β -активности платиновой проволоки с короткой экспозицией подкрепляет вышеприведенное заключение; эта

*) Плоское падение кривой *B* в первые часы находит себе объяснение в том, что мало-по-малу между ThC и ThB устанавливается „подвижное равновесие“ (стр. 109).

активность имела уже с самого начала, и она показывает, что ThV есть β -излучающий радиоэлемент.

Из наблюдения, что радиоактивное равновесие между ThV и ThC устанавливается на протяжении нескольких часов, следует, что полупериод распада последнего составляет около часа. Точное значение $T = 60,8$ минуты получается



Фиг. 28.

Изменение активности „активного осадка“ тория после краткой (A) и продолжительной (B) экспозиции.

вычислением из уравнения кривой или определением распада выделенного ThC. Если погрузить, например, никкелевую пластинку в солянокислый раствор активного осадка, то, таким образом, можно собрать ThC практически свободным от ThV и прямое исследование изменения активности выделенного ThC дает для T то же самое значение, как и выше указанное вычисление. „Короткая“ и „долгая“ экспозиции суть крайние случаи; если активирование будет продолжаться, например, один час, то активность будет также повышаться,

при чем начальным пунктом ее будет уже не нуль, а некоторое среднее значение между нулевой и максимальной активностью; всегда, однако, активность, спустя некоторое время после достижения состояния равновесия, убывает с полупериодом распада ThB . Долго-живущее материнское вещество передает мало-по-малу дочернему веществу свой период. Это обстоятельство становится ясным, если представить себе, что в состоянии равновесия в единицу времени столько же распадается атомов ThC , сколько и образуется; число образующихся атомов ThC равно числу распадающихся атомов ThB , и так как это последнее пропорционально общему числу имеющихся атомов ThB , то число распадающихся атомов ThC (определяющее α -активность) пропорционально общему числу атомов его материнского вещества.

Только что упомянутое явление наблюдается очень часто при радиоактивном анализе. Эманация, находящаяся в равновесии с радием, хотя она и имеет полупериод распада только в 3,81 дня, распадается с периодом радия, иначе говоря, необычайно медленно. Полоний ($T = 136$ дней) в равновесии с RaD распадается с полупериодом в 16 лет. Если полупериод распада дочернего вещества лишь немногим отличается от полупериода материнского вещества, то падение активности согласно экспоненциальному закону с полупериодом распада материнского вещества наступает спустя долгое время после максимума; например, активность RaC ($T = 19,5$ мин.) после перехода через максимум долгое время падает вместо полупериода RaB ($T = 26,8$ мин.) с полупериодом свыше 30 мин. Так как распад активного осадка радия по сравнению с активным осадком тория представляет более сложное явление еще и в некоторых других отношениях, то мы его рассмотрим особо.

VI. Коротко-живущий активный осадок радия.

Эманация тория не непосредственно переходит в ThB ; имеется промежуточный продукт между этими двумя элементами (стр. 214) — ThA , который, однако, вследствие его

крайне короткого периода ($T = 0,14$ сек.) выше нами был оставлен без внимания. Иначе обстоит дело в случае соответствующего продукта радия. RaA имеет полупериод распада в 3,05 мин., который наряду с таковым же для RaB (26,8 мин.) и RaC (19,5 мин.) уже не может быть оставлен без внимания. α -активность платиновой проволоки, например, активированной в эманации радия при долгой экспозиции около 5 часов, падает, как это изображает кривая I фиг. 29, сначала быстро, а затем все более медленно, приближаясь

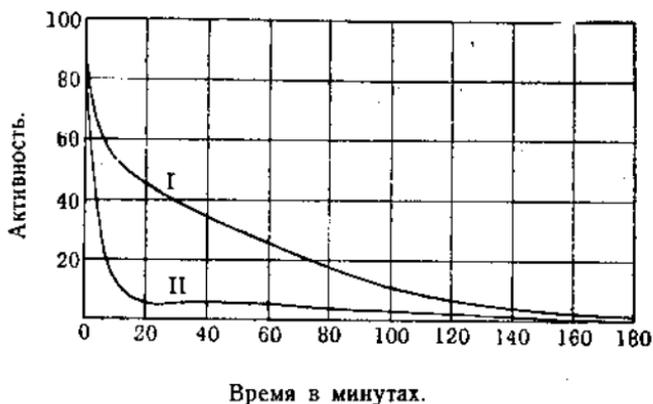


Рис. 29.

Изменение активности „активного осадка“ радия после краткой (I) и продолжительной (II) экспозиции.

к периоду RaB. При короткой экспозиции только в несколько минут активность падает, как это изображено на кривой II фиг. 29, сначала очень круто, с периодом RaA, а затем в течение некоторого промежутка почти совсем не убывает; в этой области RaA перестает уже существовать, но в той же самой мере, в какой прекращается его ионизирующее действие, увеличивается равным образом таковое же α -излучающего RaC, который постепенно образуется. Когда RaB придет в равновесие с RaC, RaA уже совершенно исчезает, и с этого момента имеют место те же соотношения, что и в ториевом ряду.

VII. Образование долго-живущего элемента из коротко-живущего. Долго-живущий активный осадок радия.

В то время как активный осадок тория приводит к образованию, по крайней мере, практически устойчивого неактивного продукта, после исчезновения активности RaA, RaB и RaC уже через несколько недель можно обнаружить новую все сильнее возрастающую активность. Из коротко-живущего RaC образуется долго-живущий RaD ($T=16$ лет), который через два следующих активных продукта (RaE — 4,85 дня и RaF — 136 дней) приводит к устойчивому RaG. Элементы RaD, RaE, RaF — последний называется также полонием — носят название „долго-живущего активного осадка“ радия*).

Тогда как RaD представляет собою β -излучающий продукт и его излучение настолько трудно обнаружить, что оно не может служить для практического определения имеющегося количества RaD, следующий за ним продукт, RaE, испускает легко обнаруживаемые β -лучи, которые могут служить для распознавания и количественного определения имеющегося количества RaD, подобно тому, как уже рассмотренным выше α -излучением ThC пользуются для определения его материнского вещества ThB.

Кроме того, α -излучение третьего члена долго-живущего активного осадка, RaF или полония, может также применяться для определения количества RaD**).

Если собрать выше описанным способом активный осадок тория, то максимум практически достижимой активности можно получить через 3 дня, в случае же коротко-живущего активного осадка радия почти через 5 часов. Напротив, мы должны были бы собирать свыше 100 лет долго-живущий

*) Причина, почему долго-живущий активный осадок радия не сразу делается заметным электроскопически или фотографически, лежит в чрезвычайной мягкости β -лучей практически неактивного RaD.

**) RaE, лежащий между RaD и RaF, может, вследствие его относительно короткого полупериода распада, при этих измерениях часто не приниматься в соображение.

активный осадок радия, чтобы добиться максимальной активности. В течение этого времени уменьшается, однако, количество радия, который в сосуде, где он помещен, выделяет эманацию и активный осадок, массу которого при предыдущих рассуждениях мы могли считать постоянной ($T = 1580$ лет); в результате этого уже через 110 лет число атомов RaD, образующихся из данного количества радия, снова начинает убывать.

Из всего вышесказанного следует, что если мы путем активирования в продолжение нескольких часов будем накапливать наиболее сильный препарат — RaC, то он после своего распада не даст никакого сильного препарата RaD (или RaF). Большие количества RaD могут быть накоплены лишь в течение долгого времени, например, на стенках закрытого сосуда, в котором разлагается большое количество эманации радия, в закупоренном препарате радия, в минералах и т. д.

Количество RaD, находящееся в равновесии с 1 граммом радия, составляет 9,4 мгр.

ГЛАВА IX.

Математическая обработка процессов распада *).

Хотя при анализе радиоактивных процессов иногда пользуются графическим методом, но обычно его производят путем вычислений. Мы намерены поэтому в этой главе вкратце изложить математическое толкование наиболее важных случаев процессов распада.

а) Распад одного вещества. Из основных положений теории распада, согласно которой число в единицу времени распадающихся атомов пропорционально числу имеющихся на лицо, непосредственно следует, что если в начале было N_0 атомов, то по прошествии времени t будет оставаться только $N_t = N_0 e^{-\lambda t}$ атомов, где $\lambda =$ постоянная распада, $e =$ основание натуральных логарифмов (стр. 91).

Пример: Пусть первоначально будет на лицо 1000 каких-нибудь единиц ThV (например, в отсчитанных делениях по шкале α -электроскопа в минуту); тогда по прошествии одного часа = 3600 секундам, так как $\lambda = 1,82 \times 10^{-5}$ сек.⁻¹, будет иметься только $1000 \cdot e^{-1,82 \cdot 10^{-5} \times 3600} = 937$ единиц.

б) Образование единичного вещества из постоянного материнского вещества. Если мы хотим вычислить нарастание активности, иначе говоря, часть всего имеющегося количества N_∞ , которая образуется по прошествии времени t , то мы должны применить формулу:

$$N_t = N_\infty (1 - e^{-\lambda t}),$$

*) К этой главе применимо то же самое примечание, что и к абзацу VI-ому VII-ой главы (стр. 88).

получающуюся непосредственно из обратного хода кривой нарастания и спадания (ср. стр. 92).

Пример: Препарат тория, например, мезоторий, в равновесии со всеми продуктами распада, включая ThA, непосредственное материнское вещество ThB, которое в этом случае можно рассматривать, как постоянное, дает максимальное, т. е. после „бесконечно“-долгой экспозиции, количество ThB в 1000 условных единиц; по прошествии односторонней экспозиции будет образовано:

$$N_t = 1000 \left(1 - e^{1,82 \cdot 10^{-5} \times 3600} \right) = 63 \text{ единицы.}$$

е) Из вещества I, которого вначале ($t=0$) имеется A атомов, последовательно образуются элементы II, III и т. д., число атомов которых мы соответственно обозначим через B, C и т. д. Спрашивается, как велико будет в определенный момент времени A, B, C и т. д.? Мы можем, например, подвергнуть короткой экспозиции в эманации радия платиновую проволоку, — экспозиции, в продолжение которой практически осаждается лишь RaA, — измерить его начальную активность (= количеству RaA) и вычислить, сколько должно образоваться из RaA по истечении времени t атомов RaB и RaC. Число атомов RaB будет:

$$B = A_0 \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} \left[e^{-\lambda_B t} - e^{-\lambda_A t} \right],$$

число атомов RaC:

$$C = A_0 \left\{ \left[\frac{\lambda_A \lambda_B}{(\lambda_B - \lambda_A)(\lambda_C - \lambda_A)} \right] e^{-\lambda_A t} + \right. \\ \left. + \left[\frac{\lambda_A \lambda_B}{(\lambda_C - \lambda_B)(\lambda_A - \lambda_B)} \right] e^{-\lambda_B t} + \right. \\ \left. + \left[\frac{\lambda_A \lambda_B}{(\lambda_A - \lambda_C)(\lambda_B - \lambda_C)} \right] e^{-\lambda_C t} \right\}$$

где $\lambda_A, \lambda_B, \lambda_C$ означают соответственные радиоактивные константы, а A_0 — первоначальное число атомов RaA.

Если, например, ко времени $t=0$ имелось 1000 атомов RaA, то по прошествии 10 минут ($t=600$ секунд) будет оставаться 103 атома RaA, и появится 756 атомов RaB и 124 атома RaC; недостающие 17 атомов будут приходиться на долю RaD.

д) В момент $t=0$ имеется радиоактивное равновесие между продуктами превращения I, II и т. д.: сколько будет иметься атомов A, B, . . . и т. д., по истечении определенного времени t ? Этот случай соответствует долгой экспозиции в эманации радия и сводится к вычислению того, сколько образуется атомов RaA, RaB и RaC через t минут после удаления платиновой проволоки.

Так как в момент $t=0$ между продуктами существует радиоактивное равновесие, то должно быть:

$$\lambda_A A_0 = \lambda_B B_0 = \lambda_C C_0 = n_0.$$

Если принять, что имелось 1000 атомов RaA ($A_0=1000$), то число атомов RaB и RaC в начале составит соответственно — 8829 и 6395.

Ко времени t число атомов распределится следующим образом:

$$A = \frac{n_0}{\lambda_A} e^{-\lambda_A t},$$

$$B = \frac{n_0}{\lambda_A - \lambda_B} \left(\frac{\lambda_A}{\lambda_B} e^{-\lambda_B t} - e^{-\lambda_A t} \right),$$

$$C = n_0 \left(a \cdot e^{-\lambda_A t} + b e^{-\lambda_B t} + c e^{-\lambda_C t} \right),$$

при чем

$$a = \frac{\lambda_B}{(\lambda_B - \lambda_A)(\lambda_C - \lambda_A)}, \quad b = \frac{\lambda_A}{(\lambda_A - \lambda_B)(\lambda_C - \lambda_B)},$$

$$c = \frac{\lambda_A \lambda_B}{\lambda_C (\lambda_A - \lambda_C)(\lambda_B - \lambda_C)},$$

по прошествии 10 минут, например, будет:

$$A = 103, B = 7543, C = 6276.$$

е) „Устойчивое“ и „неустойчивое“ радиоактивное равновесие. Находящиеся в равновесии количества RaA , RaB и RaC в предыдущем примере вычислены в предположении, что количество эманации, из которой образуется RaA , постоянно, т. е., что она сама находится в равновесии с радием. В том случае, когда это не имеет места, когда экспозиция производится в сосуде, содержащем только эманацию радия, скоростью распада эманации сравнительно со скоростью распада короткоживущего активного осадка пренебрегать уже не приходится. Правда, и здесь между четырьмя продуктами устанавливается равновесие, но соотношения количеств при этом несколько сдвигаются и, именно, в пользу последующих членов, распад которых не достаточно быстро поспевает за распадом материнского вещества, чтобы могло быть достигнуто „устойчивое“ равновесие. Это, очень часто встречающееся на практике, состояние называют „неустойчивым равновесием“. В случае эманации радия, например, при неустойчивом равновесии имеется RaA на $1/2\%$, RaB на 5% и RaC почти на 1% больше, чем при устойчивом равновесии. Эти числа вычисляются по формулам:

$$\text{для } RaA \quad \frac{\lambda_A}{\lambda_A - \lambda_{Em}},$$

$$\text{для } RaB \quad \frac{\lambda_A \lambda_B}{(\lambda_A - \lambda_{Em})(\lambda_B - \lambda_{Em})},$$

$$\text{для } RaC \quad \frac{\lambda_A \lambda_B \lambda_C}{(\lambda_A - \lambda_{Em})(\lambda_B - \lambda_{Em})(\lambda_C - \lambda_{Em})}.$$

Из формулы видно, что отношение количеств находящихся в равновесиях — неустойчивом и устойчивом — будет равно единице, когда скорость распада материнского вещества можно не принимать во внимание. Чем ближе эта по-

следняя подходит к скорости распада следующих за материнским веществом продуктов, тем большую величину приобретает это соотношение, и, напр., поправка при продуктах распада ThX (ThB, ThC и ThD) составляет уже 13 — 15%, в случае постепенного распада *ThX*, не находящегося в равновесии с долго-живущим радиоторием.

ГЛАВА X.

Ряды превращений.

Изучение радиоактивных превращений на основе теории распада приводит к тому результату, что все радиоактивные вещества — до калия и рубидия, активность которых еще мало выяснена — суть продукты одного из двух материнских веществ — урана или тория. Сводку всех последовательных превращений членов семейств урана и тория дает таблица 15 и 16.

В таблицах радиоэлемент помещен книзу от своего материнского вещества в том случае, когда он образован через α -излучение; его атомный вес всегда при этом становится меньше на четыре единицы, что показано в левой колонне. Если радиоэлемент образуется в результате β -излучения, его атомный вес практически не меняется; такие элементы помещены рядом, вправо от своего материнского вещества.

Особого объяснения требуют те случаи, где от материнского вещества ответвляются два направления, для обозначения, что это вещество переходит в два различных новых продукта. Так мы видим, что из U_{III} образуется как ионий, так и U_{IV} , и, именно, оба путем α -излучения (подробнее см. стр. 200), в то время, как из двух продуктов, которые образуются из RaC , AcC и ThC , один обязан своим происхождением α -излучению, другой — β -излучению. Такого рода разветвление носит название двойного распада. „Отношение ответвлений“ может быть очень различно: из RaC только 3 атома из 10.000 превращаются в RaC' , между тем как 9.997 атомов переходят в RaC'' , из AcC , обратно, подавляющее

Т А Б Л И Ц А 15.

Ряд урана — радия и ряд актиния.

Атомный

вес

238 Уран I

234 Уран X₁ → Уран X₂ → Уран II

230 Ионий ↓ → Уран Y → Протактиний

226 Радий ↓ Актиний ↓ → Радюактиний

222 Эманация радия ↓ Актиния X ↓

218 РаА ↓ Эманация актиния ↓

214 РаВ ↓ ↓ АсА ↓

210 РаС ↓ ↓ АсВ ↓

206 РаD ↓ ↓ АсС ↓

ТАБЛИЦА 16.

Ряд тория.

Атомный вес					
232	Торий				
	↓				
228	Мезоторий 1	→	Мезоторий 2	→	Радиоторий
					↓
224					Торий X
					↓
220					Эманация тория
					↓
216					ThA
					↓
212					ThB
					→ ThC → ThC'
					↓ ? ↓ ?
208					ThC'' → ThD

число атомов приводит к образованию C''-продукта (9.984 из 10.000), наконец, в случае ThC ни одно из превращений не является особенно преобладающим: 65% превращается в ThC' и 35% в ThC''. От UII около 3% атомов ответвляется в актиниевый ряд, остальное переходит в ряд радия.

Наличие таких незначительных ответвлений, как ответвление RaC'' или AcC' наводит на мысль, что еще и в различных других местах рядов распада может существовать еще не обнаруженный двойной распад. Так, в последнее время с помощью крайне чувствительного сцинтилляционного метода было установлено, что $\frac{1}{10000}$ часть ThC распадается, испуская α -лучи с величиной пробега в 11,3 см. (ср. стр. 25)*, и, кроме того, в ряду урана найден новый продукт ответвления, уран Z²).

*) С помощью того же метода в самое последнее время было установлено, что и при распаде RaC, около $\frac{1}{30000}$ атомов распадается, испуская α -лучи с величиной пробега 9,3 см.

ГЛАВА XI.

Определение очень длинного и очень короткого полупериода распада.

Связь между полупериодом распада и скоростью испускаемых лучей.

Полупериоды распада радиоэлементов колеблются в самых широких пределах, которые варьируют от невообразимо малых промежутков времени (для ThC' , напр., $T = 10^{-11}$ сек.) до громадных периодов (T для тория $= 2,2 \cdot 10^{10}$ лет). Установление этих величин, не поддающихся непосредственно прямому определению, достигается относительно простыми способами и может быть проделано часто различными, друг от друга независимыми путями.

Рассмотрим случай урана I. Если UI находится в равновесии со своим внучатым веществом радием, как это всегда бывает в минералах геологически достаточно древних, то (стр. 97) произведение из числа имеющихся атомов на постоянную распада UI равно произведению из соответствующих величин для радия,

$$U_I \cdot \lambda_U = Ra \cdot \lambda_{Ra},$$

или, если выражать в граммах, для чего мы должны ввести отношение атомных весов:

$$U_I \lambda_U = \frac{238}{226} \cdot Ra \lambda_{Ra}.$$

Отношение Ra и U в древних минералах различными химическими анализами установлено в $3,3 \cdot 10^{-7}$ *).

*.) Найденное для урана значение относится к UI , так как UII по весу составляет лишь 0,04%.

Так как $\lambda_{Ra} = 1,39 \cdot 10^{-11}$ сек.⁻¹, то получается:

$$\lambda_{U_I} = 4,85 \times 10^{-18} \text{ сек.}^{-1}$$

и

$$T = 4,51 \cdot 10^9 \text{ лет.}$$

Другой путь, приводящий к определению постоянной распада, заключается в подсчете числа α -частиц, испускаемых определенным количеством урана в единицу времени. Так как установлено, что каждый α -излучающий атом при своем распаде испускает только одну α -частицу (стр. 24), то число вылетающих — и подсчитываемых — α -частиц равно числу распадающихся атомов. Кроме того, постоянная распада равна отношению числа распадающихся в единицу времени атомов к общему числу имеющихся атомов радиоэлемента (стр. 90). 1 грамм урана ($= 2,55 \times 10^{21}$ атомов) испускает в секунду $2,3 \times 10^4$ α -частиц, причем необходимо принять во внимание, что только половина этого количества выделяется *UI*, другая же половина относится к *UII*. Поэтому:

$$\lambda_{U_I} = \frac{1,15 \times 10^4}{2,55 \times 10^{21}} = 4,5 \times 10^{-18} \text{ сек.}^{-1}$$

и

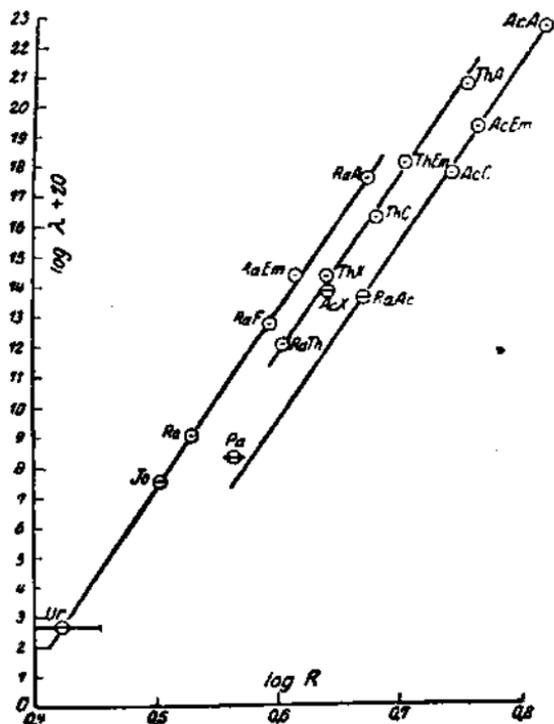
$$T = 4,77 \times 10^9 \text{ лет.}$$

Это значение хорошо согласуется с величиной, найденной по ранее указанному способу.

Определение очень короткого полупериода распада. Связь между постоянной распада и скоростью лучей.

Существует простое, эмпирически найденное соотношение между постоянной распада и величиной пробега (а, следовательно, и скоростью, см. стр. 30) α -излучающего радиоэлемента, соотношение, дающее возможность путем экстраполяции определить постоянную распада также и чрезвы-

чайно коротко-живущих элементов. Если взять, как это сделано на фиг. 30, логарифмы величин пробега за абсциссы, логарифмы постоянных распада за ординаты, то мы получаем для каждого из трех рядов превращений прямую линию. Одной и той же постоянной распада отвечает в ряду акти-



Фиг. 30.

Связь между дальностью действия и постоянной распада α -излучающих элементов.

ния большая величина пробега, чем в ряду тория, и в этом последнем большая, чем в ряду урана *).

*) Formulированное математически это соотношение выражается:

$$\log \lambda = A + B \log R_0,$$

где R_0 = величина пробега при 0° , A и B постоянны, значения которых

Из фиг. 30 получается, напр., для постоянной распада ThC' из определенной величины пробега (при 15°) в 8,67 см., величина в 10^{11} сек.⁻¹, что соответствует полупериоду распада в 10^{-11} сек.

Для полупериода распада ThA получается аналогичным вычислением значение около 0,1 сек. Прямое определение этой величины с помощью быстро вращающегося в электроскопе круга дает T для $\text{ThA} = 0,145$ сек.

Так же и в случае β -излучений: большая скорость вылетающих частиц указывает на короткую продолжительность жизни излучающего радиоэлемента; но здесь исследование количественной зависимости затрудняется из-за сложной природы β -излучения. Зависимость существует естественно лишь между постоянной распада и первичными, исходящими из ядра, β -частицами, а не вторичными, освобождающимися из электронной оболочки; но в β -спектре большую часть берут верх вторичные лучи (см. стр. 80—81), и изолирование, и выделение первичных β -лучей наталкивается на затруднения. Следующее сопоставление (табл. 17) показывает, что с уменьшением скорости частиц полупериод распада растет. 4)

Т А Б Л И Ц А 17.

Связь между скоростью и полупериодом распада β -излучателей.

	Скорость первичных β -частиц в % скорости света	Полупериод распада
RaB	80,2	26,8 минут
ThB	73,9	10,6 часов
RaD	40,2	16—20 лет

составляют в ряду урана-радия — 37,7 и + 53,9. Значение A характерно для каждого ряда распада, значение B обще для всех трех рядов 3). Это правило нарушается в случае актиния X, который, как видно из фиг. 30, имеет ненормально малую величину пробега.

ГЛАВА XII.

Химические свойства радиоэлементов. Изотопия.

Только немногие радиоактивные элементы, как, например, торий, уран, радий, могут быть получены в весомах количествах. Определение свойств этих элементов производится обычными химическими методами; радиоактивный характер не влияет на химические свойства и в течение определенного времени атом радия, например, совершенно аналогичен атомам типичных щелочно-земельных металлов. По завершении его распада мы уже имеем дело не с атомом радия, а с атомом нового элемента — с образующейся из радия эманацией — который в течение всего своего существования ведет себя совершенно так же, как атомы других благородных газов.

Значительное большинство радиоэлементов бывает доступно не только в невесомо-малых но зачастую и совсем в исчезающе-малых количествах. Определение химических свойств этих элементов возможно, если исходить из двух положений, лежащих в основании радиохимии: первое заключается в наблюдении, что свойства элементов, находящихся в крайних разведениях, в существенном одинаковы со свойствами элементов в обычных концентрациях (подробнее см. главу 14), второе состоит в утверждении принципиально совершенно новом, что один и тот же химический элемент может существовать в различных видах, причем химические реакции их, несмотря на сплошь и рядом значительную разницу в их атомных весах, одинаковы — такие виды одного и того же элемента называются изотопами —, и что многие из радиоактивных веществ представляют собою

не что иное, как радиоактивные виды давно известных химических элементов.

В то время, как некоторые радиоэлементы могут быть отделены от тех веществ, с которыми они совместно присутствуют в минералах или искусственно смешаны, и получены в чистом состоянии, другие, как оказывается, от некоторых определенных веществ совершенно неотделимы. Как было указано, радий удается выделить в чистом состоянии из урановых минералов, содержащих в большом количестве другие элементы; так же возможно выделить присутствующий в ничтожных количествах полоний как из урановой смолки, так и из смесей с другими веществами, с которыми он находится в соединении. В противоположность этому, не только нельзя отделить, например, RaD от свинца, присутствующего в урановых минералах всегда в значительно больших по весу количествах, но даже не удастся, хотя бы в самой ничтожной мере, изменить, с помощью обычных химических методов, первоначально имеющееся отношение концентраций между RaD и свинцом. Совершенно таким же образом ведут себя смеси мезотория и радия, иония и тория и т. д.

Эта, неразделимость изотопов есть явление не случайное, а лежит в самой природе изотопии, что доказывается:

1. относящимся сюда обширным экспериментальным материалом,
2. успехом размещения таких неразделимых веществ на одних и тех же местах периодической системы,
3. изучением изотопов в свете теории строения атома.

В этой главе мы намерены рассмотреть лишь

экспериментальные доказательства изотопии,

тогда как 2-ому и 3-ьему пунктам посвящены главы 13 и 16.

Если попытаться выделить, например, RaD из хлоридов свинца, полученных из урановой смолки, или хотя бы увеличить в свинце содержание RaD, то ни многочисленные кристаллизации известных соединений свинца ¹⁾, ни парциальная возгонка этих соединений или металлического свинца, ни электролиз в водном растворе или расплавлен-

ном веществе, ни адсорбция углем или другими веществами, ни диффузия, ни диализ, ни что другое не приведет к цели (ср. главу 19). Трудная разделяемость родственных радиоэлементам редких земель — явление, хорошо известное химии; однако, эту трудную разделяемость их все же ни в коем случае нельзя сравнивать с полной неразделимостью изотопов. Отношение концентраций в смеси редких земель всегда может быть изменено с помощью различных химических операций, тогда как с изотопами это не удается, если не воспользоваться совершенно специальными методами (стр. 157); в то же самое время количественное определение отдельных элементов в смесях в случае редких земель часто представляет большие трудности, с которыми совершенно не приходится сталкиваться в радиохимии. Так, например, определение содержания RaD в смеси $Pb - RaD$ с помощью электроскопа (пользуясь α -излучением его продукта распада — полония, см. стр. 104) представляет собою наиболее удобный и простой способ.

Если исходить не из находимых уже в минеральном царстве естественных смесей RaD и свинца, а искусственно смешать получающийся в совершенно чистом виде из газообразной эманации RaD с солью свинца, то и образованные таким путем смеси обнаруживают совершенно те же свойства.

В то время как RaD особенно часто применяется, вследствие его легкого обнаружения при контроле отношений концентраций смеси изотопов до и после химических операций, для исследования свойств чистого не смешанного изотопа — как, например, его спектра, абсолютной растворимости его соли, плотности, нормального потенциала и т. д., а прежде всего его атомного веса — рекомендуется пользоваться, хотя и неактивным, но в гораздо больших количествах доступным изотопом свинца, устойчивым конечным продуктом уранового ряда — RaG .

Чистый RaG добывается из урановой руды, которая геологически не содержит свинца (обычного свинца), например, из кристаллической урановой смолки из восточной Африки. Тогда как вследствие малых количеств, в которых RaD

получается из эманации, экспериментальное определение атомного веса этого изотопа свинца не выполнимо, и заключение о различии в его атомном весе, по сравнению с атомным весом обыкновенного свинца (ат. в. = 207,18) делается, главным образом, на основании формулы:

$$\begin{array}{ccccccc} \text{атомный вес Ra} & - & 4 \times & \text{атомный вес He} & = & \text{атомному весу RaD} \\ 226 & - & & 16 & = & 210 \end{array}$$

В случае RaG удается также и экспериментальное подтверждение этого различия. Для атомного веса RaG было найдено значение 206,05, тогда как вычисление дает:

$$\begin{array}{ccccccc} \text{атомный вес Ra} & - & 5 \times & \text{атомный вес He} & = & \text{атомному весу RaG} \\ 226 & - & & 20 & = & 206 \end{array}$$

Большинство урановых руд, как, напр., урановая смолка из Иохимстала содержит наряду с многочисленными другими примесями также и обыкновенный свинец; из иохимстальской урановой смолки в лучшем случае получается смесь из 36% свинца и 64% RaG с „соединительным весом“ — 206,4. ²⁾

Удельный вес металлического RaG стоит к удельному весу обыкновенного свинца в таком же отношении, как и их атомные веса, откуда следует, что атомные объемы обоих веществ одинаковы ³⁾ (см. таблицу 18).

Т А Б Л И Ц А 18.

Атомные объемы свинцов.

	Атомный вес	Удельный вес	Атомный объем
Обыкновенный свинец	207,20	11,337	18,28
Урановый свинец	206,09	11,273	18,28

Из соответственно ничтожной разницы в плотностях насыщенных растворов нитрата RaG в воде и нитрата обыкновенного свинца получается равенство их молярных растворимостей ⁴⁾ (см. таблицу 19); так же нельзя найти никакой

разницы в коэффициентах преломления их насыщенных растворов, что равным образом показывает таблица 19.

Т А Б Л И Ц А 19.

Насыщенные водные растворы различных сортов свинца.

	Молярные концентрации	Показатель преломления
Нитрат обыкновенного свинца .	1,7993	1,7815
. уранового свинца	1,7991	1,7814

Нормальный потенциал RaG в растворе $RaG(NO_3)_2$ по крайней мере в пределах $\frac{1}{10}$ милливольты равен потенциалу свинца в растворе $Pb(NO_3)_2$. Подвижность этих двух ионов с точностью до $\frac{1}{100}$ % одинакова ⁶⁾. Также и рентгеновские спектры с точностью до $\frac{1}{20}$ % длины волны найдены одинаковыми ⁶⁾, тогда как оптические спектры обнаруживают минимальные различия (стр. 146) ⁷⁾. Точки плавления одинаковы до $0,06^\circ$. ⁸⁾

Еще и другой изотоп свинца ThD, конечный продукт распада ряда тория, доступен в весовых количествах. Его атомный вес должен быть $232 - 6 \times 4 = 208$ ⁹⁾. К сожалению, подавляющее большинство торневых минералов содержит также и уран (а иногда и обыкновенный свинец), и поэтому ThD получается обычно с примесью RaG, вследствие чего его атомный вес, очевидно, будет сильно понижен; выделить очень чистый ThD удастся из практически не содержащего урана цейлонского ториянита и в таком случае его соединительный вес получается равным 207,9 ¹⁰⁾.

Из других изотопов в весовых количествах доступен еще только изотоп тория — ионий. Полученная из похимстальской урановой смолки смесь Jo—Th, с содержанием иония в 30 % дает для иония атомный вес -- 231,51, тогда как торий имеет атомный вес 232,12.

Все известные изотопы радиоактивных элементов даны в таблице 20, которая содержит также атомный вес и полу-

Радиоактивные изотопы (с атомными весами и периодами распада).

Периоды	Группа I	Группа II	Группа III	Группа IV	Группа V	Группа VI	Группа VIII	
VI	Au 197,2 устойчиво	Hg 200,6 устойчива	Tl 204,4 устойчив As ⁷⁶ 206 4,76 мин. Th ²³² 208 3,2 мин. Ba ¹³⁷ 210 1,32 мин.	Pb 207,18 устойчив BaG 206 устойчив ThD 208 устойчив AcD 206 устойчив RaD 210 16 лет ThB 212 10,6 часов AcB 210 36,1 мин. RaB 214 26,8 мин.	Bi 209,0 устойчив RaE 210 4,85 дней ThC 212 60,8 мин. RaC 214 19,5 мин. AcC 210 2,16 мин.	Po 210 136 дней RaA 218 3,05 мин. ThA 216 0,14 сек. AcA 214 0,002 сек. AcC' 210 10 ⁻³ сек. RaC' 214 10 ⁻⁷ сек. ThC' 212 10 ⁻¹¹ сек.	RaEm 222 3,810 дней ThEm 220 54,5 сек. AcEm 218 3,9 сек.	
	VII		Ra 226,0 1580 лет MsTh I 228 6,7 лет AcX 222 11,2 дня ThX 224 3,64 дня	Ac 226 20 лет MsTh 2 228 6,2 часа	Th 232,1 2,2 · 10 ¹⁰ л. Io 230 10 ⁵ лет RdTh 228 1,90 л.т. UX ₁ 234 23,8 дня RdAc 226 18,9 дня UY 230 25,5 час	Ra 230 около 10 ⁴ лет UX ₂ 234 1,15 мин. UZ 234 6,7 часов	UI 238,2 4,5 · 10 ⁹ л. UI 234 2 · 10 ⁶ лет.	

периоды распада этих веществ. Их расположение в таблице в большинстве случаев основано на химических опытах, как, например, на неотделимости их от определенных веществ (см. далее главу 14). Для коротко-живущих элементов был использован „закон сдвига“ (см. следующую главу). В каждой группе изотопы расположены по убывающим полупериодам распада, каждая из них начинается, таким образом, наиболее долго-живущим членом, по имени которого обычно называется вся группа. Так, говорят об „изотопах свинца“, „изотопах тория“ и т. д. Как видно, эта таблица, в которую ради полноты помещены еще также элементы золото и ртуть, охватывает только два последних горизонтальных ряда периодической системы (ср. таблицу 22, стр. 142, которая представляет всю периодическую систему). Об изотопах ртути и других нерадиоактивных веществ см. стр. 153.

ГЛАВА XIII.

Изотопия и периодическая система. Изменение химического характера внутри данного ряда превращений. Законы смещения или сдвига.

Открытие большого числа, около 40, радиоактивных веществ ставит перед химиком вопрос, каким образом их можно разместить в естественной таблице элементов. В основе их рациональной группировки, как дает возможность видеть таб. 20, лежит явление изотопии, т. е. химической неразделимости большинства радиоэлементов от других радиоактивных или устойчивых элементов. Если следовать этому пути и изотопы располагать в одних и тех же местах периодической системы, то оказывается, что для размещения всех радиоэлементов от урана до таллия мест в периодической системе достаточно. Вместе с тем должно быть несколько изменено и первоначальное положение, лежащее в основании периодической системы, ибо отныне атомный вес, различный у многих изотопов, не может считаться основной величиной определяющей то место, которое принадлежит данному элементу в естественной системе элементов.

Особенно же важные соотношения открываются в том случае, если рассматривать эту группировку радиоэлементов в периодической системе, как ответ на вопрос—какое влияние оказывает испускание α -или β -частиц на химический характер элемента, или другими словами, как изменяется химический характер внутри данного ряда превращений. Сравнение таблиц 15 и 16, дающих генеалогическое родство радиоэлементов и род испускаемых ими лучей, с табл. 20, показывающей их места в периодической системе, дает возможность выяснить искомую зависимость. Оказалось, что при этом имеет место следующий „закон смещения“.

При испускании α -частицы образуется элемент, стоящий в естественной системе над две группы влево от распадающегося элемента; при испускании же β -частицы образуется элемент, стоящий на одну группу вправо. При этом все химические элементы могут быть представлены одним непрерывным рядом, подобно тому, как они были представлены Лотаром Мейером на его кривой атомных объемов. Имея в виду таблицу Менделеева нельзя забывать, что отдельные периоды суть только части этого непрерывного ряда, и что, поэтому при переходе от элемента нулевой группы на две группы влево, мы попадем в шестую группу предыдущего ряда. Принимая это во внимание будет понятна таблица 21, показывающая расположение элементов ряда урана-радия (без отщепления актиниевого ряда, происхождение которого еще недостаточно ясно) в двух последних горизонтальных рядах периодической системы. Направленные влево, всегда через две группы, стрелки обозначают испускание α -частицы, направленные вправо, достигающие лишь ближайшей группы; означают β -превращение. В соответствии с уменьшением атомного веса при α -превращении, α -стрелки направлены наискось. Особое внимание следует обратить на то обстоятельство, что в случае RaC , претерпевающего „двойной распад“ (стр. 111), правило смещения имеет место как для продукта образующегося в результате α -распада, так и для β -продукта: RaC'' стоит на два места влево от RaC , RaC' — на одно место вправо. Совершенно подобным же образом можно схематически изобразить применение закона смещения к ряду актиния и тория, что, впрочем, и непосредственно видно из сравнения таблицы 15 с 20 и 16 с 20*).

Следствием закона смещения является то обстоятельство, что в одном и том же ряду превращений должен появляться

*) Нами было уже указано, что в отношении коротко-живущих радиоэлементов, только применение закона смещения и дало возможность выяснить их химический характер и вместе с тем разместить их в таблице изотопов.

изотоп, всякий раз, когда за одним γ -превращением следуют два β -превращения, как, напр., при переходе U_1 через UX и UX_2 в U_{III} , который изотопен с U_1 . Оба таким образом генетически связанные друг с другом изотопы неизбежно должны обнаруживать разницу в атомных весах в четыре единицы ($= 1 \alpha$ -частице), и из рассмотрения этих случаев становится вполне ясным, что атомный вес не может определять место элемента в периодической системе.

ТАБЛИЦА 21

Расположение элементов ряда урана-радия в периодической системе.

Атомный вес	Группа I	Группа II	Группа III	Группа IV	Группа V	Группа VI	Группа VII	Группа VIII (0)
206				U_1				
210			RaC'	RaD	RaE	RaF		
214				RaB	RaC	RaC'		
218						RaA		
222							RaE_m	
226		Ra						
230				U_0				
234				UX_1	UX_2	U_{II}		
238						U_I		

Номер места элемента в системе, или его „порядковое число“, должно зависеть от другой величины, о чем мы будем говорить в главе 16.

ГЛАВА XIV.

Химия веществ, находящихся в ничтожно малых количествах.

Из существующей между радиоэлементами генетической связи следует, что коротко-живущие радиоэлементы всегда образуются в крайне ничтожных количествах (радиоактивное равновесие см. стр. 97). Если мы имеем количество радия в 1 грамм, то из него мы можем получить относительно долго-живущего *RaD* максимум 9,4 мгр., полония 0,22 мг., а коротко-живущего *RaC'* только 10^{-14} мгр. Поэтому химия коротко-живущих радиоэлементов есть в сущности химия веществ, имеющих в крайне ничтожных количествах, и в этом заключается их особенность с точки зрения химического их поведения, а отнюдь не в радиоактивности, которая не оказывает влияние на химические свойства (см. стр. 118). Особенно характерные для каждого элемента реакции — спектральные и другие оптические — в данном случае по большей части не могут приниматься во внимание, вследствие их недостаточной чувствительности; приходится прибегать к определению растворимости элементов и их соединений, к определению электрохимических свойств и т. п., причем всегда обычные химические методы комбинируются с электрохимическими измерениями (см. стр. 18).

I. Растворимость и скорость растворения крайне малых количеств.

Насыщенный раствор коротко-живущих радиоэлементов не может быть приготовлен, вследствие незначительности

имеющихся количеств, и поэтому прямое определение растворимости невозможно. Однако, может быть определена относительная скорость растворения. Если погрузить какую-либо поверхность, напр., золотой листок, на который мы собрали активный осадок радия, только на несколько секунд в разбавленный раствор кислоты, то оказывается, что в раствор переходит большее количество атомов RaB , чем RaC , а атомов RaC больше, чем атомов RaA . Благородный характер этих веществ уменьшается, поэтому, в такой последовательности: $RaA \rightarrow RaC \rightarrow RaB$, соответственно химическим свойствам элементов $Po - Bi - Pb$.

В отдельных случаях по скорости растворения можно заключить о существовании определенных соединений данного радиоэлемента. Так, из значительно меньшей скорости растворения ThB , выделяющегося на аноде, по сравнению с выделяющимся на катоде, можно сделать заключение о существовании на аноде трудно растворимой перекиси ThB , заключение, подтверждающееся тем, что разница в скоростях растворения исчезает от прибавления к кислому раствору восстановителя.

II. Выделение малых количеств электролизом.

Электролитическое выделение металла есть явление обратное его растворению. Если подвергнуть электролизу, напр., раствор активного осадка радия, то легче всего будет выделяться RaA , труднее всего — RaB . Если вести электролиз слабым током, т. е. не переходить определенного потенциала катода, то удастся выделить наиболее трудно растворимый из присутствующих радиоэлементов в весьма чистом состоянии. Этот метод имеет особенно большое значение для получения полония, который таким способом можно выделить из растворов радиосвинцовых солей, содержащих наряду с полонием также висмут (RaE) и свинец трех видов (RaD , RaG и Pb) (подробнее см. стр. 190). Для выделения радиоэлемента вместо электролиза можно воспользоваться погружением в раствор пластинки металла, менее

благородного, чем данный радиоэлемент, аналогично тому, как осаждается медь на цинковой пластинке из раствора солей меди. Получение очень часто требующегося при радиоактивных исследованиях RaC , свободного от RaB , можно произвести, напр., проще всего погружением никелевой пластинки в кислый — не содержащий уже более быстро отмирающего RaA — раствор активного осадка.

Оба указанные способа приводят к тому, что все радиоэлементы можно расположить в ряд напряжения, в котором наиболее благородным членом будет полоний, наименее — радий.

III. Определение растворимости солей радиоэлементов с помощью метода адсорпции и метода осаждения.

Химические свойства элемента в первую очередь характеризуются растворимостью его различных соединений. Чтобы получить представление о химической природе радиоэлемента, необходимо поэтому установить отношение растворимостей их соединений. В случае коротко-живущих элементов, присутствующих только в невесомо-малых количествах, изучение их солей в чистом виде невозможно, и определение этих величин удастся лишь с помощью методов адсорпции и осаждения, подкрепленных теоретическими соображениями.

Метод адсорпции.

Если встряхивать трудно растворимую соль, напр., $BaSO_4$ с водным раствором такой соли, сульфат которой легко растворим, как, напр., с сульфатом висмута, то между находящимися на поверхности твердой соли ионами бария и ионами висмута раствора будет происходить обмен. Но силы, стремящиеся связать Bi -ионы и SO_4 -ионы с образованием твердой соли, значительно меньше, чем те, которые соединяют Ba -ионы с SO_4 , что следует из гораздо большей растворимости сульфата висмута (в разбавленных кисло-

тах)*). При столкновении Bi -ионов с адсорбентом только немногие Bi -ионы будут поэтому удерживаться SO_4 -группами, адсорпция будет незначительная. С другой стороны, если в растворе имеется соль, напр., RaCl_2 , катион которой образует с SO_4 трудно растворимое соединение, то между Ra -ионами и Ba -ионами на поверхности кристалла будет происходить очень оживленный обмен: радий будет связываться поверхностью BaSO_4 , адсорбироваться им. В общем мы можем сказать, что

катион лишь тогда адсорбируется трудно растворимой солью, когда он образует с анионом адсорбирующей соли трудно растворимое в данном растворителе соединение. Чем труднее растворимо данное соединение и адсорбент, тем сильнее адсорпция.

С помощью описанного метода можно легко доказать, что, напр., ThX и AcX (оба изотопы Ra) образуют сульфаты, очень трудно растворимые, „В“-продукты (изотопы свинца), довольно трудно растворимые, и „С“-продукты (изотопы висмута), а также и полоний—легко растворимые сульфаты. Если вести опыты в растворе едкого кали, в котором, как известно, сульфат свинца более растворим, чем сульфат висмута, то получается более слабая адсорпция В-продукта, чем С-продукта.

Метод осаждения.

К определению адсорбции данного радиоэлемента трудно растворимой солью можно придти и другим, близким к предидущему путем. К раствору радиоэлемента, напр., активного осадка тория, прибавляют растворимой соли бария и осаждают ее в виде сульфата; при этом ThV выпадает вместе с сульфатом бария, ThC же остается в растворе; отсюда следует, что первое соединение трудно растворимо (сульфат свинца) и легко растворимо второе (сульфат вис-

*) Точнее говоря, здесь дело идет не столько о величине сил, связывающих ионы в кристаллической решетке, сколько о преобладании этих сил над теми, которые связывают ионы с молекулами воды, гидратируют их.

мута). Радиоэлемент всегда выпадает с трудно растворимым осадком тем в большем количестве, чем менее растворимое соединение дает он сам с отрицательной составной частью (анионом) осадка.

Результаты опытов по адсорпции и осаждению приводят к тому заключению, что, в случае очень малых количеств, как это имеет место у радиоэлементов, существенным условием для поглощения их осадками является в первую очередь их трудная растворимость, а не изоморфизм с осаждаемым соединением, как можно было бы думать, основываясь на опытах с весомыми количествами вещества.

IV. Испарение крайне малых количеств.

Наблюдения над испарением различных составных частей активного осадка при непродолжительном нагревании до высокой температуры позволяет сделать заключение о том порядке, в каком располагаются точки кипения данных радиоэлементов и, соответственно, их соединений. Так, в воздухе при 700° ни один из „С“ — продуктов еще не испаряется, между тем как „В“ — продукты уже заметно летучи; отсюда следует более легкая испаряемость окиси ThV по сравнению с окисью ThC (окиси свинца по сравнению с окисью висмута). Этот метод может быть применен также и для частичного разделения коротко-живущих радиоэлементов.

Точное определение точек кипения веществ, находящихся в крайне малых количествах, однако, невозможно, главным образом, вследствие усиливающегося процесса возгонки. Весьма поучительным примером в этом отношении является эманация. В то время как эманация радия в количестве порядка 1 кюри = 0,6 кб. мм. имеет определенную точку кипения при -62° и точку затвердевания при -71° , эманация в количествах порядка 10^{-7} кюри уже не имеет строго определенной точки кипения; начиная в этом случае заметно сублимироваться уже при -164° , при -125° практически вообще не заметно более никакой конденсации.

V. Скорость диффузии. Определение валентности и степени дисперсности. Коллоидные растворы радиоэлементов.

Определение скорости диффузии водных ионов всех радиоэлементов, полупериод распада которых не меньше часа, может быть выполнено обычными методами; в данном случае, когда необходимы по возможности разбавленные растворы, крайне малые концентрации радиоэлементов особенно пригодны.

Совершенно подобным же образом так же легко можно определить те скорости, с какими радиоактивные ионы движутся в электрическом поле, так называемые, электролитические подвижности ионов. Отношение этой величины к скорости диффузии дает непосредственно заряд, который несет данный ион и вместе с тем его валентность. Так как подвижности большинства неорганических ионов различаются друг от друга лишь на несколько процентов, можно определить валентность, которая выражается всегда только целым числом (от 1 до 4), и непосредственно из скорости диффузии. Так, напр., из констант диффузии 0,33, 0,46 и 0,66 к. см. день⁻¹ для радиоактиния (изотоп тория), актиния (гомолог лантана) и актиния X (изотоп радия) получаются валентности 4, 3 и 2.

Опыты с диффузией показывают, кроме того, что радиоэлементы в растворе могут находиться при определенных условиях также и в коллоидальной форме. Так, полоний в нейтральном и слабо кислом растворе частью находится в коллоидальном состоянии, он медленно диффундирует, не диализирует через пергаментную перепонку и т. д. На этом свойстве может быть основан метод обогащения полония в радиосвинце: Po остается в диализаторе, кристаллический же свинец диффундирует наружу.

Также и изотопы висмута обнаруживают столь сильную тенденцию переходить в коллоидальную форму, что при фильтровании, напр., нейтрального или слабо кислого рас-

твора $\text{ThB} + \text{ThC}$, последний (изотоп внемута) в большей своей части задерживается на фильтре.

Коллоидальная природа растворов некоторых радиоэлементов находит себе особенно важное подтверждение в том обстоятельстве, что характерные для коллоидов явления изменения — знака заряда и осаждения при прибавлении ионов или других коллоидов, имеют место и в случае радиоэлементов²⁾.

Зная скорость истечения эманаций из узкого отверстия, можно определить примерно их молекулярный вес; так, напр., для эманации актиния получаются значения, лежащие между 222 и 218.

ГЛАВА XV

Применение радиоэлементов в качестве индикаторов при физических и химических исследованиях.

Как мы уже видели, изучение химического характера радиоэлементов представляет известные трудности; теперь, ориентируясь уже в их природе с достаточной ясностью, мы можем ими воспользоваться для того, чтобы обратно, с их помощью, выяснить свойства некоторых веществ в настолько малых концентрациях, что исследование их обычными способами невозможно. Те элементы, которые имеют своими изотопами радиоактивные элементы (напр., свинец и висмут) особенно пригодны для такого рода исследований, так как в этом случае мы имеем возможность, путем смешиваний в различных пропорциях устойчивого элемента с радиоактивным, охватить всю область, начиная с количеств, доступных только радиоактивному обнаружению, вплоть до количеств весомых, и исследовать свойства одного и того же химического элемента в очень широких пределах. В случае такого рода постановки проблемы, когда радиоэлемент является не объектом, а средством исследования, обычно говорят, что радиоэлементы служат в качестве „индикаторов“³⁾.

Пусть, напр., нужно определить растворимость крайне трудно растворимого хромовокислого свинца. Для этого определенное количество соли свинца смешивают с известным количеством ThВ, выраженным в условных электроскопических единицах. Вследствие неразделимости этих изотопов очевидно, что после каждой химической операции отношение ThВ к свинцу будет оставаться тем же самым. Если

высадить свинец в виде хромовокислого, отфильтровать и встряхиванием с водой получить насыщенный раствор хромовокислого свинца, то находящаяся в растворе часть — а вместе с тем и растворимость хромата свинца — может быть определена быстро и удобно электроскопически.

Обмен атомами и молекулами внутри гомогенного вещества может быть легко прослежен с помощью радиоактивных индикаторов. Простейший пример решения такой кинетической проблемы представляет собою сливание раствора $Pb(NO_3)_2$, к которому прибавлен индикатор, и эквивалентного раствора $PbCl_2$ без индикатора и выяснение, содержатся ли в выделенной путем кристаллизации пробе хлористого свинца лишь те атомы свинца, которые до смешения были связаны с хлором, или же, кроме того, и те атомы, которые первоначально были связаны в нитрате. Опыт дает, как и следовало ожидать, что атомы свинца в хлористом свинце составлены наполовину из атомов одного раствора, наполовину из другого раствора. Если же, напротив, одновременно растворить некоторое количество нитрата свинца, к которому примешан индикатор, и неактивный тетрафенилсвинец, или вместо него другое органическое соединение, в котором атом свинца при растворении не способен переходить в состояние иона, и затем, после смешения, выделить путем кристаллизации обе составных части, то никакого обмена атомами свинца между нитратом свинца и органическим соединением свинца установить нельзя ⁴⁾.

Труднее выяснить и потому важнее исследовать обмен между твердой и жидкой фазой, как то: между металлом и ионом, между солью и ее насыщенным раствором. С радиоактивными видами свинца и висмута эти процессы могут быть хорошо прослежены и на этом может быть основан, напр., метод измерения поверхности порошков, что представляет большую важность для изучения явлений абсорпции ⁵⁾. Подобным же образом, благодаря радиоактивным индикаторам, может быть изучен простейший и теоретически очень важный случай, который Максвелл определил, как „самодиффузию“, и который он неоднократно пытался мысленно решить.

Теперь этот вопрос легко решается экспериментально, необходимо лишь измерить скорость диффузии расплавленного или твердого активного свинца в неактивном, соответственно расплавленном или твердом, свинце, чтобы получить константу самодиффузии свинца. Подобным же образом можно проследить обмен ионами свинца в кристаллическом, нагретом хлористом свинце и отсюда вывести заключение о процессе диффузии и электропроводимости в кристаллах.

Большой интерес с точки зрения электрохимии представляет собою исследование потенциала осаждения иона в том случае, когда выделенного количества недостаточно, чтобы покрыть электрод сплошным слоем атомной толщины. Благодаря применению, напр., активного изотопа висмута, RaE, определение потенциала разложения висмута в этом пределе, вообще недоступном исследованию, становится возможным.

Что и другие, имеющие уже за собой большую давность, вопросы препаративной химии удачно могут быть разрешены с помощью радиоэлементов, доказываемся тем обстоятельством, что существование давно искомого газообразного водородистого висмута, также как и водородистого свинца, впервые было доказано на радиоактивном изотопе висмута, ThC, и, соответственно, радиоактивном изотопе свинца ThB⁶). Само собою разумеется, что и многие проблемы аналитической химии, особенно связанные всегда с небольшими количествами вещества, как, напр., увлечение при осаждении, промывании осадков и сосудов и т. д., находят себе сплошь и рядом изящное и простое разрешение, благодаря применению радиоэлементов в качестве индикаторов. Представляется также целесообразным применение одного радиоэлемента в качестве индикатора при изучении химико-аналитических реакций другого, менее сильно излучающего изотопного радиоэлемента; наиболее рациональные методы отделения для актиния могут быть изучены, напр., на M_sTh_2 , для отделения Ra на UX_2 ⁷). Свинец с примесью радиоактивного индикатора может, кроме того, найти применение для изучения круговорота этого элемента в организмах животных и растений.

Также и технические исследования могут извлечь пользу из радиоактивных индикаторов. Так оказалось возможным быстро и точно количественно определять различную проницаемость практически совершенно плотных прорезиненных материалов (материалы для газовых масок), применяя с этой целью воздух, смешанный со следами эманации радия.

ГЛАВА XVI

Изотопия и законы смещения в свете строения атома.

Вышеприведенная теория строения атома (см. стр. 171), оказавшая нам большие услуги в деле уяснения образования радиоактивных лучей и сериальных спектров, позволяет нам несколько глубже проникнуть в сущность уже упомянутых химических следствий атомного распада. Согласно этой теории, материальная положительно заряженная часть атома ограничена исчезающе малым пространством и находится в середине атома, тогда как все остальное пространство атома отводится вращающимся электронам *). Какое-либо α -превращение в рамках этой теории означает, так как α -частица уносит с собою два положительных заряда, уменьшение величины заряда ядра на две единицы, какое-либо β -превращение — увеличение этого заряда на единицу, так как потеря одного отрицательного заряда должна привести к перевесу положительных зарядов в ядре над отрицательными на единицу. Последовательная потеря одной α - и двух β -частиц приводит поэтому снова к тому же самому числу зарядов ядра; одному и тому же числу зарядов ядра по представлениям теории ядра атома соответствует одно и то же число и расположение электронов в электронной сфере, а следовательно, и равенство химических и спектральных

*) Радиус атома есть величина порядка 10^{-8} см., радиус электрона 10^{-13} см. и радиус положительного Н-ядра $\approx 10^{-16}$ см.; вследствие этого, ядро атома водорода, названное „протоном“, которое мы должны принимать, как тот основной элемент, из которого построены ядра более тяжелых атомов (см. стр. 172), представляет собою частицу самых малых размеров, из всех нам известных.

свойств. Сущность изотопии таким образом мы видим в равенстве числа зарядов ядра при различном числе — или по крайней мере расположении — основных элементов ядра.

То обстоятельство, что порядковое число химического элемента, как уже отмечено в главе 13 (стр. 126), после одного α -превращения уменьшается на 2, а после β -превращения увеличивается на единицу, приводит к равенству порядкового числа и числа зарядов ядра. Этому не противоречат результаты, полученные при изучении рентгеновских спектров и отклонения α -лучей; это дало возможность произвести экспериментальное определение величины заряда ядра большинства элементов, и эта величина оказалась равной номеру элемента в периодической таблице, или его порядковому числу. Формула, с помощью которой можно по частоте колебаний рентгеновских линий определить порядковое число данного элемента, была уже дана на стр. 64, об опытах по отклонению частиц была речь на стр. 32—33.

В совокупности упомянутые исследования приводят к следующим важным результатам.

I. Величина заряда ядра атома равна порядковому числу данного элемента. Это относится также и к тем трем случаям (аргон — калий, теллур — иод, кобальт — никкель), относительно которых уже с давних пор установлено противоречие порядковых чисел элементов с расположением их в ряд по их атомным весам на основании химических свойств.

II. Величины зарядов ядер (а поэтому также и порядковые числа) изотопов, как, напр., RaG и Pb, равны.

III. В промежутке между водородом (1) и ураном (92) известны носители всех 92-х величин зарядов ядра за исключением 6; недостающие имеют следующие порядковые числа:

43. Эка—марганец	75. Dvi—марганец
61. Элемент редких земель	85. Эка—иод
72. Эка—циркон *)	87. Эка—цезий.

*) Совсем недавно элемент 72 открыт в цирконовых минералах. Он получил название хафния (Hf).

Это единственные до сих пор неизвестные химические элементы. В то время, как вопрос о возможности открытия в будущем большого числа изотопов стоит открыто, ожидать нахождения новых элементов, кроме пяти вышеуказанных, нет оснований, если мы не сделаем допущения, что существуют элементы с еще большей величиной заряда ядра, чем у урана. Таким образом, вышеприведенные исследования приводят нас к важному результату, заключающемуся в том, что все поиски новых элементов в химии, к чему на основании периодической системы можно было, в сущности, притти индуктивным путем, должны быть определенно ограничены.

На основании рентгеновских спектров можно сделать заключение о порядковом числе недостающих элементов; фигура 16 (стр. 65) показывает, что закономерность прямых линий тотчас нарушится, если мы не оставим свободными на оси абсцисс 6 мест для еще неизвестных элементов и нанесем рядом значение ординат для следующих за ними элементов. Непосредственно определить химический характер, зная порядковое число элемента, нельзя, так как при этом из 4-х Менделеевских „атомных аналогов“ определяются только „соседи по ряду“, а не „соседи по группе“, которые для выяснения химических свойств элемента важнее. Но так как порядковым числом фиксируется определенное место в периодической системе, то с помощью ее можно выяснить также и химический характер недостающих элементов, и он уже дан выше, благодаря терминологии, введенной в употребление Менделеевым (Эка,—Dvi—). Таблица 22 изображает видоизмененную на основании новейших данных форму периодической системы. Что касается элемента 72, то не ясно, представляет ли он собою экациркон — или же он есть последний член группы редких земель; указание, что он был найден среди редких земель ¹⁾ нуждается еще в подкреплении, на основании же соображений атомно-теоретических ²⁾ его принадлежность к 4 группе периодической системы гораздо вероятнее *).

* В настоящее время это может считаться доказанным. (Прим. ред.)

Т А Б Л
Периодическая система

Периоды	Группа I		Группа II		Группа III		Группа IV	
	a	b	a	b	a	b	a	b
I	1 H 1,008		—		—		—	
II	3 Li 6,94		4 Be 9,1		5 B 10,7		6 C 12,00	
III	11 Na 23,00		12 Mg 24,32		13 Al 27,1		14 Si 28,3	
IV	19 K 39,10		20 Ca 40,07		21 Sc 45,10		22 Ti 48,1	
		29 Cu 63,57		30 Zn 65,37		31 Ga 69,9		32 Ge 72,5
V	37 Rb 85,5		38 Sr 87,6		39 Y 88,7		40 Zr 90,6	
		47 Ag 107,88		48 Cd 112,4		49 In 114,8		50 Sn 118,7
VI	55 Cs 132,8		56 Ba 137,4		57—71 Редкие земли ¹⁾		72 Hf	
		79 Au 197,2		80 Hg 200,6		81 Tl 204,4		82 Pb 207,2
VII	87—		88 Ra 226,0		89 Ac		90 Th 232,1	
								¹⁾ Редки
VI 57—71	57 La 139,0	58 Ce 140,25	59 Pr 140,9	60 Nd 144,3	61—	62 Sm 150,4		63 Eu 152,0

В таком случае редкие земли, как это и принято в таблице 22, состоят только из 15 членов. Элемент 61-ый, из редких земель, недавно, кажется, открыт в минерале флуосерите ²⁾.

И Ц А 22.
ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ.

Группа V		Группа VI		Группа VII		Группа VIII		
a	b	a	b	a	b	o		
—		—		—		2 He 4,00		
7 N 14,008		8 O 16,000		9 F 19,00		10 Ne 20,2		
15 P 31,04		16 S 32,07		17 Cl 35,46		18 Ar 39,2		
23 Vd 50,0		24 Cr 52,0		25 Mn 54,93		26 Fe 55,85	27 Co 58,97	28 Ni 58,68
	33 As 74,96		34 Se 79,2		35 Br 79,92	36 Kr 82,92		
41 Nb 93,5		42 Mo 96,0		43 —		44 Ru 101,7	45 Rh 102,9	41 Pd 106,7
	51 Sb 120,2		52 Te 127,5		53 J 126,92	54 Xe 130,2		
73 Ta 181,5		74 W 184,0		75 —		76 Os 190,9	77 Jr 193,1	78 Pt 195,2
	83 Bi 209,0		84 Po 210		85 —	86 Em 222		
81 Pa		92 U 238,2						
земли								
64 Gd 157,3	65 Th 159,2	66 Dy 162,5	67 Ho 163,5	68 Er 167,7		69 Tu 169,4	70 Yb 173,5	71 Lu 175,0

Перечень различных видов элементов последних двух горизонтальных рядов, начиная с таллия, дан уже в таблице 20 (стр. 123). Изотопы всех элементов приведены в таблице 25 (стр. 164).

ГЛАВА XVII

Свойства электронов и ядра атома.

Различие, существующее согласно вышеприведенной теории атома, между ядром и электронами, заставляет нас поставить вопрос о том, какие физические и химические свойства зависят от ядра и какие определяются в первую очередь электронами. Как уже указано (см. стр. 74—75) испускание спектральных линий происходит при возвращении электронов удаленных, в результате внешнего воздействия (абсорпции излучения, столкновения электронов и т. п.), из их нормального положения на их первоначальную орбиту. Так же и при химических реакциях атома принимают участие электроны именно внешних электронных групп; простейший случай представляет собою ионизация, причем, если электроны покидают атом, то получается положительно заряженный остаток, соединение же электронов с атомами приводит к образованию отрицательных ионов. Что силы тяготения в атоме по сравнению с электростатическими силами не могут играть никакой роли станет тотчас же ясным, если принять во внимание, что электростатическое притяжение между электроном и ядром в атоме водорода превышает силу тяготения в 10^{41} раз. Таким образом из теории атома непосредственно следует уже отмечавшаяся независимость химических и спектральных свойств—каковые, в виду зависимости их от числа и расположения электронов в электронной сфере, могут считаться свойствами электронов—от массы атома; отсюда же следует и чрезвычайное подобие этих свойств у изотопов.

Уже давно делались попытки составить себе определенное представление о том, каким путем происходит при

образовании ионов и вообще при химических реакциях присоединение и отдача электронов. Весьма вероятно допущение, что в случае неактивных благородных газов внешняя группа электронов обладает как раз тем числом электронов, которое необходимо для „насыщения“ группы, так что отсутствует какая-либо причина для присоединения или отдачи электронов. На основании этого допущения следует, что оба элемента, соседние благородному газу, величина заряда ядра которых отличается от него на единицу, имеют в электрически нейтральном состоянии во внешней группе в одном случае, именно, галогенов, на один электрон меньше, чем это соответствует „насыщению“, в другом случае — щелочей — в насыщенной группе имеется еще один, „пересыщенный“ электрон; отсюда непосредственно вытекает тенденция их путем присоединения или, в другом случае, отдачи электрона переходить в однозначный отрицательный или, соответственно, положительный ион. И в самом деле, в периодической системе мы находим перед благородными газами наиболее сильные электроотрицательные элементы, а за ними наиболее сильные электроположительные. Таким же образом можно мыслить себе и химическое соединение между атомом натрия и атомом фтора, обусловленным исключительно электростатическими силами, и, именно, таким образом, что каждый атом натрия отдает электрон атому фтора, оба атома получают благодаря этому расположение электронов инертного неона — напомним о непонятной до сих пор инертности ионов натрия и фтора, которые в противоположность их атомам, не разлагают, напр., воды! — и в силу приобретенных противоположных зарядов связываются электростатически.

При химических реакциях принимают участие лишь наиболее внешние электроны, при возбуждении же характеристических рентгеновых лучей, как уже указано (см. стр. 83), самые внутренние. Ядро же при всех этих явлениях ни в какой мере не затрагивается; а пока оно остается нетронутым, самая сущность элемента не меняется, так как изменения в распределении электронов всегда могут быть сде-

ланы обратимыми. В этом лежит объяснение основного положения химии, заключающегося в том, что химические элементы не могут быть ни образованы, ни разрушены. При радиоактивных же превращениях ядро меняется — вылетающие α - и β -частицы суть его составные части — и в соответствии с этим мы видим, что следствием радиоактивного процесса является превращение элемента. Средства вызвать превращение искусственно мы будем иметь тогда, когда мы сумеем добраться до ядра; подобного рода эксперименты за последнее время на самом деле дали уже положительные результаты (см. стр. 171).

Кроме радиоактивных процессов, в ядре атома сосредоточена и большая часть массы. Наряду с радиоактивными свойствами и атомный вес поэтому является свойством ядра.

Переход между свойствами ядра и электронов.

Только что установленное различие между свойствами ядра и электронов практически имеет очень большое значение, в чем мы уже убедились на примерах; однако, не всегда его можно строго провести. Так сериальные спектры мы трактовали, как свойство электронов; однако, длины волн спектральных линий должны зависеть в очень небольшой степени также и от массы ядра атома, так как, вследствие различного строения изотопных ядер (см. стр. 139—140), будет несколько различно также и исходящее от ядер электрическое поле, несмотря на равенство зарядов ядра. Можно путем особенно тонких измерений показать, что спектральная линия $405,8 \text{ м}\mu$ у уранового свинца на $0,0005 \text{ м}\mu$ больше и у ториевого свинца на $0,00022 \text{ м}\mu$ меньше, чем у обыкновенного свинца¹⁾. Разнице в атомном весе в 1% соответствует поэтому разница в длине волны круглым числом в $\frac{2}{10000}$ %.

Сильнее, чем в линейчатых спектрах, должно сказаться различие в полосатых спектрах изотопов, так как положение линий, составляющих полосы, зависит от амплитуды колебаний заряженного атома, которые должны, как зави-

сящие от момента инерции, варьировать вместе с массой изотопов. Вычисление показывает в случае соляной кислоты для полосы, лежащей в инфракрасной части спектра, что рядом с каждой линией должна находиться еще одна более слабая, сдвинутая относительно главной линии на $1,32 \mu$; и в самом деле, в полном согласии с требованием теории, предусмотренные ею спутники линий были найдены.

Указанные здесь случаи подтверждают представление о том, что на все свойства, кроме массы и радиоактивности, в первую очередь влияет лишь заряд ядра, а не его строение. И обратно, мы должны поэтому ожидать, что хотя изменение конфигурации электронов в принципе и влияет на устойчивость ядра, однако, действие это чрезвычайно ничтожно. С этим находится в полном согласии уже давно, еще в начале радиоактивных исследований, установленный факт, что радиоактивность химического соединения не отличается от радиоактивности содержащегося в этом соединении радиоэлемента. В настоящее время прямое воздействие на ядро, как мы это увидим в главе XXI, может изменить строение ядра.

ГЛАВА XVIII

Изотопия, как общее свойство материи.

Как уже было указано выше, элементы радиоактивных рядов находятся друг с другом в простой генетической зависимости, так как все они являются потомками урана или тория; область их нахождения распространяется, насколько это можно непосредственно обнаружить экспериментально, от элемента с зарядом ядра 92 (Уран) до элемента с зарядом 81 (Таллий), причем все места периодической системы заняты многочисленными изотопами. Конечными продуктами рядов распада являются разновидности свинца (RaG, ThD, AcD), которые не испускают лучей и не превращаются в излучающие продукты распада. За постоянство RaG говорит в особенности еще тот факт, что вычисленные на основании геологических дат, в предположении его устойчивости, количества RaG вполне согласуются с действительно находимыми.

Между тем, уже с давних пор имеются различные основания, делающие вероятным предположение, что все элементы, а не только радиоактивные, находятся между собою в генетической связи. К числу таких оснований относятся удивительные соотношения элементов внутри периодической системы, все время поддерживавшие мысль об единстве материи, и из них в особенности очень часто встречающаяся на протяжении всей периодической системы разница атомных весов, равная четырем, разница, в области радиоактивных элементов вполне очевидно являющаяся следствием α -излучения. Не было недостатка в попытках найти другие элементы, не считая радиоактивные элементы, расположен-

ные между ураном и таллием, которые испускали бы лучи; однако, лишь у калия и рубидия можно было это с несомненностью обнаружить, тогда как наблюдения над радиоактивностью меди, цинка и т. д. не могли дать пока твердо установленных результатов как вследствие повсюду присутствующих примесей следов радиоактивных веществ, так и вследствие проникающего излучения, присутствие которого невозможно вполне избежать. Если принять во внимание, что активность вещества тем больше, чем короче его продолжительность жизни, и что для всех элементов, присутствующих в больших количествах, мы должны принять большую продолжительность жизни (радиоактивное равновесие!), то отсутствие легко обнаруживаемых излучений может говорить лишь о чрезвычайно большой продолжительности жизни, но не об абсолютной их устойчивости *). Даже и в случае весьма редких обыкновенных элементов, мы не можем сделать с полной уверенностью обратного заключения, а именно, что они должны быть короткой продолжительности жизни, а потому и излучающими; в данном случае всегда возможно, что они потому находятся в состоянии рассеяния, что они принадлежат к ответвлению главного ряда распада и потому пропорциональность между количеством и продолжительностью жизни не имеет места; в качестве примера может служить протактиний, который, не смотря на значительную продолжительность своей жизни, присутствует в незначительном количестве по сравнению с радием, хотя и меньшей продолжительности жизни, но принадлежащим к главному ряду урана. Таким образом вопрос о медленном превращении обыкновенных элементов на основании измерений активности не может быть решен в отрицательном смысле³⁾.

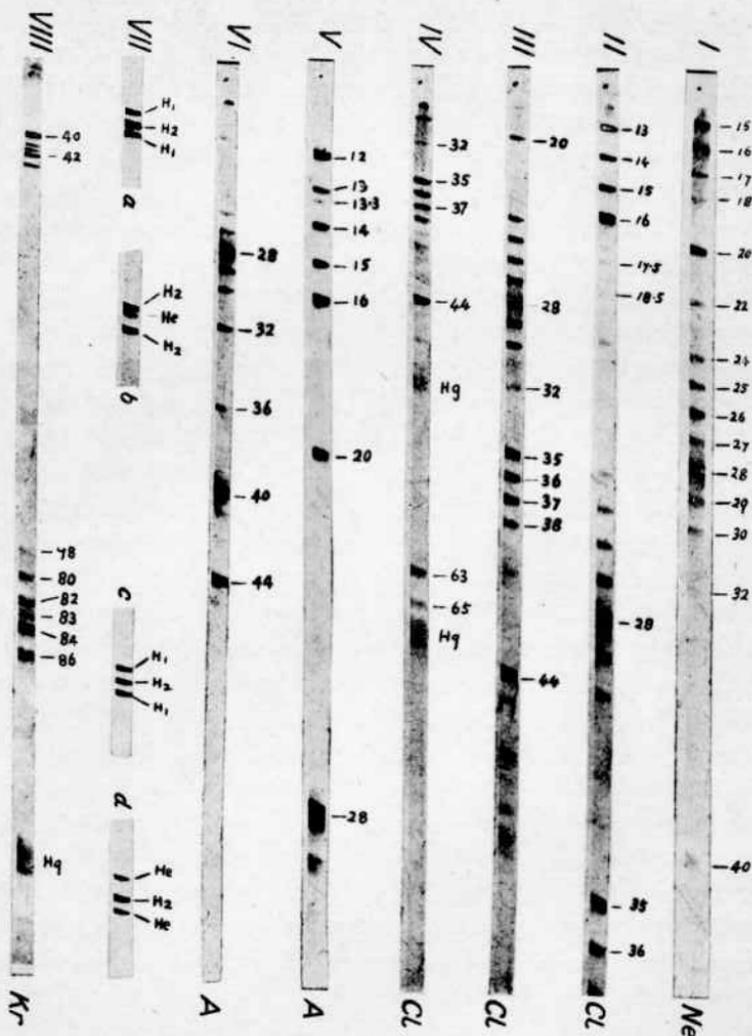
С радиоактивными превращениями теснейшим образом связано явление изотопии; таким образом, если удастся

*) Если бы даже элемент с продолжительностью жизни в несколько тысячелетий и распадался, только не с α -, а с β -излучением, то обнаружение его активности было бы весьма затруднительно, и, именно, в том случае, когда он имеет большую величину заряда ядра, так как выход электронов при этом становится затруднительным.

обнаружить также для обыкновенных элементов, что они существуют в нескольких разновидностях, то в этом можно видеть косвенный аргумент в пользу того, что законы превращений, подобные тем, которые существуют для известных уже рядов распада, простираются, или, по крайней мере, простирались на всю область химических элементов *). Для радиоактивных элементов и их конечных продуктов изотопия может быть установлена двумя путями: наблюдением, что изотопы различаются сортом их радиоактивного излучения, и — в случае разновидностей свинца и тория — установлением факта колебаний в значении их соединительных весов. Оба метода не применимы в случае обыкновенных элементов, которые, как уже указано, не проявляют себя активно, и, насколько позволяет судить достигнутая в настоящее время точность определений атомного веса, не обнаруживают каких-либо отклонений в соединительном весе. Были произведены определения атомного веса, и всегда с одним результатом, для свинца из самых разнообразных свинцовых минералов, не содержащих ни урана, ни тория, для меди, хлора и особенно ртути различных геологических эпох и стран ⁴⁾, для железа и никкеля земного и космического происхождения и т. д. Только благодаря методу спектроскопии масс, позволяющему обнаруживать массы отдельных разновидностей атома данного элемента и выделять их из смеси, удалось доказать с несомненностью и для обыкновенных элементов, что многие из них представляют собою не чистые элементы, а смеси элементов (см. стр. 159 — 160).

Способ основан на следующем принципе ⁵⁾. Исследуемый элемент помещается в сильно эвакуированную трубку, через которую пропускается электрический разряд, вследствие чего его молекулы и атомы частью приобретают один или

*) Необходимо иметь в виду, конечно, что эволюция элементов синтетическим путем, путем агрегации протонов и электронов, равным образом могла привести к изотопам; ничего определенного о способах и путях, какими образовались устойчивые в настоящее время виды атомов, мы не знаем.



Фиг. 31.

Спектры масс элементов неона, хлора, аргона, криптона, водорода и гелия.

Необходимо обратить внимание, что на спектре III и IV присутствуют частицы и атомы с весом 35 и 37, а также 36 и 38, соответственно атомам Cl_{35} и Cl_{37} , и молекулам HCl_{35} и HCl_{37} , но нет и намека на частицы с массой 35, 46 (соединительный вес хлора). В спектре V у 20 находится «линия 2-го», у 13,3 — «линия 3-го порядка», обе они, подобно линии 1-го порядка у 40, принадлежат аргону. Линия 36 в спектре VI показывает постоянное присутствие в аргоне нескольких процентов A_{36} наряду с A_{40} . Аналогично истолковываются и другие спектры.

несколько положительных зарядов, и, как „каналовые лучи“, за катодом проходят через узкое отверстие в нем и попадают в камеру для исследований; здесь сначала частицы отклоняются в электрическом поле, затем проходят через магнитное поле, причем отклоняются в противоположном направлении и, в конце концов, попадают на фотографическую пластинку. Путем соответственного подбора силы электрического и магнитного поля, надлежащих диафрагм и положения фотографической пластинки, можно достигнуть того, что все частицы, имеющие постоянное m/e , будут падать на то же самое место пластинки, даже когда их скорости в известных пределах будут колебаться. Когда частицы той же массы, т. е. той же величины m , несут двойной электрический заряд, они будут отклоняться на другое место пластинки, куда попадают также все частицы с массой $1/2 m$ и зарядом e . Применительно к способу выражения в обыкновенной спектроскопии, получающиеся таким путем спектры называют спектрами первого, второго и т. д. порядка. Какое значение, выраженное в m/e , имеют отдельные линии спектра, находится сравнением с соседними линиями известных атомов и молекул, как C , CO , CO_2 , O_2 . Чувствительность метода настолько велика, что смесь изотопов в отношении 99 : 1 различается еще, как состоящая из двух разновидностей атома.

Следующая фотограмма (фиг. 31) дает представление о точности, с какой эти спектры масс могут быть получены.

Из силы потемнения отдельных линий можно сделать выводы об относительных количествах, в каких находятся в смеси отдельные изотопы данного элемента *).

Еще более совершенные результаты получаются при употреблении другого, имеющего ограниченное применение, метода изучения спектроскопии масс, состоящего в том, что

*) Для бора, по относительному содержанию изотопов, необходимо было заключить о более низком соединительном весе, чем официально существовавший, что вскоре и было подтверждено прямым химическим путем⁶.

вместо фотографической пластинки пользуются для обнаружения отдельных видов атома его ионизационным действием ⁷⁾.

Сводку имеющихся к настоящему времени результатов по спектроскопии масс, можно видеть из таблицы 23, в которой изотопы для каждого элемента приведены в порядке, отвечающем их количественному содержанию в естественных смешанных элементах (Mischelement) и, именно, в убывающем порядке. Сомнительные изотопы отмечены знаком вопроса.

Таким образом видно, что в пределах точности метода, в среднем в пределах 1⁰/₁₀₀, все атомные веса суть целые числа (отнесенные к O = 16,00); только водород представляет собою исключение. Следует принять во внимание далее, что такой элемент, например, как бром, соединительный вес которого чрезвычайно близок к целому числу, состоит из двух изотопов разного атомного веса. Поэтому все спекуляции по поводу связи и зависимости между элементами, строящиеся на современных числовых данных для соединительных весов, до тех пор, пока не будут исследованы вышеуказанным способом все неактивные элементы, не будут иметь цены, так как эти соединительные веса представляют собою только средние числа, и поэтому им нельзя приписывать такого большого значения, как самим атомным весам, из смеси которых они получаются.

Невольно напрашивается вопрос, почему в таком химическом элементе, как, например, хлор, состоящем из двух изотопов, его составные части содержатся всегда в одном и том же отношении, так что его соединительный вес, определенный с большой степенью точности, всегда оказывается постоянным. Наиболее вероятное объяснение будет заключаться в том, что образование химических элементов, если их не рассматривать, как определенные продукты распада урана или тория, произошло еще до затвердевания земной коры, так что все изотопы в таком случае как жидкие, так и газообразные, вследствие практически полного равенства их свойств, представляли собою гомогенные смеси; из воз-

Т А Б Л И Ц А 23.

Изотопы элементов.

Порядковые числа	Элемент	Соединитель- ный вес	Веса изотопов
1	Водород . . .	1,008	1,008
2	Гелий . . .	4,00	4
3	Литий . . .	6,94	7; 6
4	Бериллий . . .	9,1	9
5	Бор	10,8	11; 10
6	Углерод . . .	12,00	12
7	Азот	14,008	14
8	Кислород . . .	16,000	16
9	Фтор	19,00	19
10	Неон	20,2	20; 22; 21?
11	Натрий	23,00	23
12	Магний	24,32	24; 25; 26
14	Кремний	28,3	28; 29; 30?
15	Фосфор	31,04	31
16	Сера	32,07	32
17	Хлор	35,46	35; 37; 39?
18	Аргон	39,9	40; 36
19	Калий	39,10	39; 41
20	Кальций	40,07	40?; 44?
26	Железо	55,85	56; 54?
28	Никкель	58,68	58; 60
30	Цинк	65,37	64?; 66?; 68?; 70?
33	Мышьяк	74,96	75
35	Бром	79,92	79; 81
36	Криптон	82,92	84; 86; 82; 83; 80; 78
37	Рубидий	85,5	85; 87
50	Олово	118,7	126; 118; 116; 124; 119; 117; 122; 121?
53	Иод	126,92	127
54	Ксенон	130,2	129; 132; 131; 134; 136; 128; 130
55	Цезий	132,8	133
80	Ртуть	200,6	197—200?; 202; 204

ных таким путем смешанных элементов (Mischelemente) с постоянным содержанием изотопов и образовалась наша твердая земля, а может быть также и другие небесные тела (ср. вышесказанное о соединительном весе метеорного железа и никкеля). Необходимо отметить что результаты прежних определений атомного веса не имеют той точности, которая была бы желательна для вполне определенного решения вопроса о постоянстве соединительного веса обычных элементов; примем, например, простоты ради, что ртуть состоит из двух изотопов с атомными весами 198 и 202, смешанных друг с другом в равных количествах; в таком случае смещение соотношений количеств в течение веков на 1% естественно не вызывало бы значительного изменения соединительного веса, каковое, вследствие разницы атомных весов всего лишь в $\frac{1}{50}$ их абсолютного значения, равнялось бы $\frac{1}{10000}$, что лежит в пределах ошибок большинства определений атомного веса*). Если также в течение геологических времен имеют место еще смещения в составе смешанных элементов порядка вышеприведенной величины, вследствие возможного, но протекающего с крайне незначительной скоростью, распада обычных элементов, то мы не можем надеяться с помощью обыкновенных методов обнаружить какие либо отклонения в соединительном весе; с этой оговоркой следует приписать и выводы об отсутствии активности у обычных элементов на основании постоянства их соединительного веса. Действительно, в частном случае со ртутью, даже при помощи наиболее точных методов определения плотности ртути, не удалось обнаружить колебаний даже в 1 : 1000000, так что для данного элемента наличие радиоактивности с различной скоростью распада его изотопов — весьма мало вероятно.

*) Если мы в каждых 100 атомах с весом в 198 заменим один атом атомом с весом в 202, то соединительный вес поднимается с $\frac{100(198+202)}{200} = 200$ до $\frac{99 \cdot 198 + 101 \cdot 202}{200} = 200,02$, что составляет $\frac{1}{10000}$.

ГЛАВА XIX

Разделение изотопов.

Изотопы обнаруживают, как уже указано, побольшей части разницу в их атомных весах, которая может достигать значительной величины; RaB, например, имеет атомн. вес 241, RaG 206, так что в данном случае разница составляет 40%. То обстоятельство, что изотопы до самого последнего времени, несмотря на все усилия, не могли быть разделены, объясняется тем, что все обычные методы разделения в химии основаны на различии свойств электронов (растворимость, давление пара и т. д.); эти же свойства у изотопов, вследствие равенства величин зарядов их ядер, вполне одинаковы. Для разделения изотопов могут найти применение лишь те методы, которые основаны на различии свойств их ядер. Число таких свойств вообще мало, и применимость их затрудняется еще тем обстоятельством, что результаты этого различия в тех условиях, при которых практически приходится вести разделение, парализуются в большей или меньшей степени посторонними влияниями и приходящими обстоятельствами.

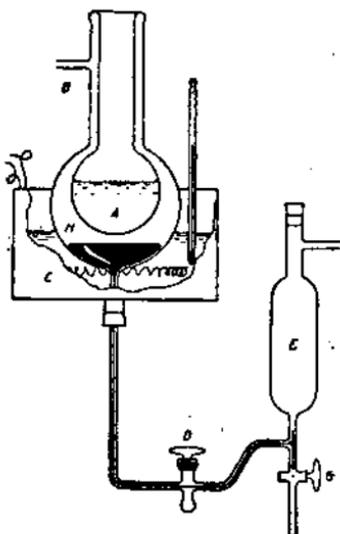
В качестве примера возьмем диффузию в жидком агрегатном состоянии. Если раствор, содержащий изотопы свинца RaD-Cl₂ и RaG-Cl₂, покрыть слоем воды, то обе соли будут диффундировать в этот слой с одинаковой скоростью, хотя более легкий ион RaG и имеет большую молекулярную скорость; в данном случае это благоприятное свойство парализуется тем, что более тяжелый ион RaD, вследствие своей большей инерции, в результате частых столкновений в течение долгого времени с молекулами жидкости дольше сохраняет свойственное ему направление движения, чем более

легкий ион RaC . В газах, где число столкновений несравнимо меньше, чем в жидкостях, такого рода неблагоприятная компенсация имеет место в значительно меньшей мере, и здесь, действительно, диффузией можно достигнуть ощутимого изменения состава изотопной смеси ⁸⁾.

Наряду с методом диффузии и, равным образом, эффузии для разделения изотопов следует указать еще следующие: использования различного распределения по плотностям в поле тяготения ⁹⁾ и различных скоростей реакции, в особенности скоростей испарения. Мы остановимся подробнее на влиянии поля тяготения.

Вблизи земной поверхности, как известно, преобладает тяжелая углекислота, в более же высоких слоях атмосферы — легкий водород; аналогично этому, по отношению к неону (ат. вес 20 и 22) в верхних слоях должно встречаться относительно больше первого неона, чем второго, что равнозначно частичному разделению двух изотопов неона. Применение барометрической формулы высоты дает, что на высоте 10 километров смешанный элемент неон не будет уже состоять, как вблизи земной поверхности, на 91% из Ne_{20} и на 9% из Ne_{22} , напротив, последний должен содержаться только в количестве круглым числом 8%. Такого изменения состава неона можно было бы ожидать только в том случае, если устанавливающееся таким путем благодаря диффузии распределение не компенсировалось бы течениями (конвекцией), условие, выполнимое — как учит опыт подъема на воздушных шарах — лишь в очень ограниченной степени. Вместо исканий в высотах атмосферы можно обратиться к глубине морей; поваренная соль, извлеченная, например, из глубины в 10 километров, должна быть богаче Cl_{37} и беднее Cl_{35} , чем находящаяся на поверхности земли, соответственно соединительному весу содержащегося в ней хлора в 35,6 вместо 35,46. И в данном случае должны сильно сказаться также движения в морской воде. — То же самое действие, как и сила тяжести, производит и центробежная сила; скорость по периферии в 1 километр в секунду соответствует разнице высот в 40 километров.

В качестве примера использования различной скорости реакций для разделения изотопов, мы рассмотрим следующий¹⁰⁾. Если пропускать ток разбавленного инертным газом хлора через серебряную трубку таким образом, что только часть молекул хлора будет достигать до стенок трубки, то, вследствие большей молекулярной скорости у более легкого изотопа хлора, до стенок будет достигать сравнительно больше легкого изотопа, чем тяжелого, и относительно больше будет образовываться AgCl_{35} , чем AgCl_{37} . Подобно тому как и в случае эффузии обогащение здесь будет происходить обратно пропорционально корню квадратному из молекулярных весов двух изотопов хлора. Вместо того, чтобы связывать химически хлор с серебром, можно его также подвергнуть замораживанию, для чего применяется вместо серебряной трубки достаточно охлажденная стеклянная трубка. Можно, кроме того, вести испарение хлора при таких условиях, что каждая, однажды испаренная молекула, будучи связана каким-либо химическим веществом или путем замораживания, не будет попадать обратно в жидкость; этот способ существенно отличается от обычной дестилляции, при которой испаряющиеся молекулы очень часто возвращаются обратно в жидкость, прежде чем они окончательно не отделяются, и при которой, поэтому разница в скоростях испарения изотопов не может сказываться на деле.



Фиг. 32.

Аппарат для частичного разделения изотопов ртути.

Фиг. 32 изображает прибор, с помощью которого удается по этому методу „идеальной дестилляции“ провести частичное разделение изотопов ртути. В колбе *H* помещается около 300 куб. см. Hg ; пространство между *H* и *A* эвакуи-

руется и колба *A* наполняется жидким воздухом. Масляная баня *C* служит для того, чтобы нагреть ртуть до 60°. Вследствие большей скорости испарения более легкого изотопа ртути с атомным весом m_1 , его испарится в $\sqrt{m_2/m_1}$ раз больше, чем более тяжелого изотопа с атомным весом m_2 , и изотопная смесь, конденсирующаяся на холодной поверхности *A*, будет содержать соответственно больше легкого изотопа, чем тяжелого. По испарении части ртути оставшаяся „тяжелая“ часть путем эвакуирования *E* и открытия кранов *D* и *G* удаляется. После этого жидкий воздух в *A* испаряют, твердый дистиллят плавится и капает со стенок *A* в сосуд *H*, а затем удаляется таким же способом, как и тяжелая часть. Путем последовательных испарений удается получить два сорта ртути, плотности которых отличаются на 1/2% их соединительного веса, иначе говоря, на 0,1.

С помощью указанного способа можно также получить два сорта хлора (около 20 гр. каждого), отличающихся на 2 единицы во втором десятичном знаке их соединительного веса. Получить эти различные сорта хлора можно путем „идеального“ испарения 7-нормального водного раствора соляной кислоты и конденсацией смеси паров воды и HCl на поверхности, охлаждаемой жидким воздухом ¹¹⁾.

Вследствие того, что выход по мере приближения к концу разделения уменьшается, ни один из указанных способов не может служить для получения вполне чистых изотопов. Чтобы этого достичь, нужно в трубке для каналовых лучей получить ионы изотопов и затем отклонением их в электрическом и магнитном поле разделить подобно тому, как это продельвается в спектрографе масс. Применение этого аналитического метода для препаративных целей наталкивается прежде всего на экспериментальные затруднения.

ГЛАВА XX

Смешанные и чистые элементы.

Соединительные веса и атомные веса.

Почти полная независимость химико-спектральных свойств от массы приводит к тому, что практически смесь изотопов можно рассматривать, как один элемент. В случае закона действия масс и т. п. концентрация данного элемента и его соединений есть просто сумма всех изотопных атомов и молекул; если будет меняться относительное соотношение количеств изотопных атомов, то это изменение останется незаметным в отношении химического действия масс, электрохимического потенциала и т. д.; в таком случае мы должны только приписать данному элементу другой соединительный вес.

Мы уже имели случай говорить о колеблющемся соединительном весе свинца (см. стр. 121); в химическом и спектроскопическом отношениях указанные сорта свинца представляют собою единственные элементы, очистка и определение „атомного веса“ которых совершенно точно может быть выполнена обычными методами. Элемент, состоящий из различных изотопов, называют „смешанным элементом“ (Mischelement) — мы уже ранее ввели это выражение — и лучше говорить о его „соединительном весе“, чем об атомном весе, так как относительные веса атомов, содержащихся, например, в хлоре, суть 35 и 37, и, таким образом, отличаются от его соединительного веса 35,46. Элемент, состоящий только из одного рода атомов, называют „чистым элементом“; ему принадлежит постоянный атомный вес, который непосред-

ственно дает вес его [атома (по отношению к кислороду, атомный вес которого принимается = 16,00).

Если говорить просто о „химическом элементе“, то остается непонятным, имеется ли в виду чистый элемент или, как в случае ртути и хлора,—смешанный элемент. Так как изотопы, из которых состоят, например, так называемые, смешанные элементы, хотя и не могут быть выделены обычными химическими методами, но, как мы уже видели в предыдущей главе, более или менее полно разделяются различными физическими способами, то уже нельзя химический элемент, как раньше, определять, как вещество, которое никаким образом не может быть разложено на более простые вещества. В качестве „практического определения“ можно рекомендовать такое ¹⁾: химический элемент есть вещество, которое никакими химическими способами не может быть разложено на более простые вещества. Только химическая неразделимость изотопов, что и важно для всех практических целей, служит причиной, почему химия так крепко держится и должна держаться за старые элементы, как простейшие кирпичики химической системы. Для практических и дидактических целей вышеприведенное определение также достаточно точно, так как все дающие результаты методы разделения изотопов типично механические постольку, поскольку они основаны всегда на разнице их масс, а не на различии их химических свойств. Если вещество вообще не вступает ни в какие химические реакции, как, например, благородные газы, то естественно, что критерий химической неразделимости к ним неприменим, и, в таком случае, необходима проверка единства заряда ядра (ср. нижеследующее определение) другими, например, спектроскопическими методами. Однако, не тот исключительный случай, который представляют собою благородные газы, а химическая неразложимость таких обычных элементов, как золото, ртуть и т. д., привела к установлению понятия химического элемента; значение его в настоящее время, так же как и во времена создания этого понятия Бойлем, заключается именно в том, что элемент

есть вещество, которое можно считать неразлагающимся при всех химических реакциях *).

Более строгое — хотя и более далекое от химического смысла определение понятия элемента — скорее „теоретическое определение“ можно дать, пользуясь представлениями, которые нам дает теория атома; совершенно строго его можно выразить так,

Химический элемент есть вещество, все атомы которого имеют одинаковый заряд ядра. Примеры: водород (заряд ядра 1), хлор (заряд ядра 17), свинец из любого минерала (заряд ядра 82), свинец из распавшейся эманации радия (заряд ядра 82).

Чистый элемент есть такой элемент, который состоит из атомов только одной разновидности. Примеры: водород (атомы веса 1,008), свинец из эманации радия (атомы радия D — β -излучающего — веса 210).

Смешанный элемент есть такой элемент, который состоит из атомов нескольких разновидностей. Примеры: хлор (атомы веса 35 и 37), свинец из чистой урановой смолки (атомы GRa веса 206, атомы актиния D веса 206, атомы RaD веса 210, последние — β -излучающие).

С той целью, чтобы укоренялось и новое понятие, согласно которому число разновидностей атомов не равно, как думал Дальтон, числу химических элементов, но существенно его превосходит, германская комиссия атомных весов выпускает ныне вместо одной таблицы две, которые мы ниже и приводим с некоторыми изменениями и дополнениями. Первая таблица содержит „химические элементы“ и их „соединительные веса“, с которыми теперешний химик при всех практических случаях может оперировать совершенно

*) Вышеприведенное определение сейчас же позволяет установить, что удающееся, например, в случае алюминия расщепление атома (см. ближайшую главу) не дает никакого основания считать, что это вещество нельзя уже больше причислять к химическим элементам, так как применявшийся для разложения способ не химический. При всех химических реакциях мы можем быть уверены, что при этом ни атомы не „расщепляются“, ни изотопы не „разделяются“; сложность элемента — может поэтому в химии не приниматься во внимание.

так же просто, как он оперировал раньше с атомными весами; вместо соединительного веса иногда употребляют также выражение „практический атомный вес“²⁾, хотя „практический атомный вес“ в случае смешанного элемента означает только, что соединительный вес этого элемента, вследствие того, что он состоит из одного и того же количества тех же изотопов, настолько постоянен, как если бы элемент состоял исключительно из чистых атомов, обладающих данным „практическим атомным весом“; вторая таблица дает наряду с соединительными весами так же и атомные веса, причем лишь эти последние дают истинные относительные веса атомов и поэтому приведены только для тех элементов, изотопы которых определены или с помощью спектроскопии масс, или путем радиоактивных наблюдений. Вместе с названиями элементов и их „символами“ приведены также в отдельности изотопы и „их обозначения“; для неактивных элементов, вследствие отсутствия у них каких-либо особенных свойств, достаточно указания их атомных весов (например, Li_6 и Li_7); в случае радиоактивных веществ, в качестве изотопов одного и того же химического элемента встречаются вещества с совершенно различными радиоактивными свойствами и, соответственно, также с совершенно различными названиями, которые, однако, будучи смешаны однажды друг с другом, никакими химическими способами не могут быть опять разделены (например, изотопами химического элемента актиния являются как актиний в тесном смысле слова, Ac , так и мезоторий 2, $MsTh_2$). Элементы и изотопы, напечатанные курсивом — радиоактивны; атомные веса, напечатанные курсивом, экспериментально не определены, а вычислены на основании генетической зависимости. Числа, напечатанные курсивом и взятые в скобки, — гипотетичны.

Во второй таблице элементы перечислены в последовательности их порядковых чисел. Чтобы легче было найти эти последние, мы в первой таблице, в которой элементы расположены в обычном алфавитном порядке по символам элементов, даем для каждого элемента его порядковое число. Изотопы каждого элемента расположены в порядке их веса,

ТАБЛИЦА 24.

Соединительные веса и порядковые числа химических элементов.

Сим-волы	Название элемента	Соединительный вес	Порядковое число	Сим-волы	Название элемента	Соединительный вес	Порядковое число
Ag	Серебро . . .	107,88	47	Mo	Молибден . . .	96,0	42
Al	Алюминий . . .	27,1	13	N	Азот . . .	14,008	7
Ar	Аргон . . .	39,9	18	Na	Натрий . . .	23,00	11
As	Мышьяк . . .	74,96	33	Nb	Ниобий . . .	93,5	41
Au	Золото . . .	197,2	79	Nd	Неодим . . .	144,3	60
B	Бор . . .	10,8	5	Ne	Неон . . .	20,2	10
Ba	Барий . . .	137,4	56	Ni	Никкель . . .	58,68	28
Be	Бериллий . . .	9,1	4	O	Кислород . . .	16,000	8
Bi	Висмут . . .	209,0	83	Os	Осмий . . .	190,9	76
Br	Бром . . .	79,92	35	P	Фосфор . . .	31,04	15
C	Углерод . . .	12,00	6	Pb	Свинец . . .	207,2	82
Ca	Кальций . . .	40,07	20	Pd	Палладий . . .	106,7	46
Cd	Кадмий . . .	112,4	48	Pr	Празеодим . . .	140,9	59
Ce	Церий . . .	140,25	58	Pt	Платина . . .	195,2	78
Cl	Хлор . . .	35,46	17	Ra	Радий . . .	226,0	88
Co	Кобальт . . .	58,97	27	Rb	Рубидий . . .	85,5	37
Cr	Хром . . .	52,0	24	Rh	Родий . . .	102,9	45
Cs	Цезий . . .	132,8	55	Ru	Рутений . . .	101,7	44
Cu	Медь . . .	63,57	29	S	Сера . . .	32,07	16
Dy	Диспрозий . . .	162,5	66	Sb	Сурьма . . .	120,2	51
Em	Эманация . . .	222	86	Sc	Скандий . . .	45,10	21
Er	Эрбий . . .	167,7	68	Se	Селен . . .	79,2	34
Eu	Европий . . .	152,0	63	Si	Кремний . . .	28,3	14
F	Фтор . . .	19,00	9	Sm	Самарий . . .	150,4	62
Fe	Железо . . .	55,85	26	Sn	Олово . . .	118,7	50
Ga	Галлий . . .	69,9	31	Sr	Стронций . . .	87,6	38
Gd	Гадолиний . . .	157,3	64	Ta	Тантал . . .	181,5	73
Ge	Германий . . .	72,5	32	Tb	Тербий . . .	159,2	65
H	Водород . . .	1,008	1	Te	Теллур . . .	127,5	52
He	Гелий . . .	4,0	2	Th	Торий . . .	232,1	90
Hg	Ртуть . . .	200,6	80	Ti	Титан . . .	48,1	22
Ho	Гольмий . . .	163,5	67	Tl	Таллий . . .	204,4	81
In	Индий . . .	114,8	49	Tu	Тулий . . .	169,4	69
Ir	Иридий . . .	193,1	77	U	Уран . . .	238,2	92
J	Иод . . .	126,92	53	V	Ванадий . . .	51,0	23
K	Калий . . .	39,10	19	W	Вольфрам . . .	184,0	74
Kr	Криптон . . .	82,92	36	X	Ксенон . . .	130,2	54
La	Лантан . . .	139,0	57	Y	Иттрий . . .	88,7	39
Li	Литий . . .	6,94	3	Yb	Иттербий . . .	173,5	70
Lu	Лютеций . . .	175,0	71	Zn	Цинк . . .	65,37	30
Mg	Магний . . .	24,32	12	Zr	Цирконий . . .	90,6	40
Mn	Марганец . . .	54,93	25				

Т А Б Л И Ц А 25.

Соединительные веса химических элементов и атомные веса их изотопов.

Порядковое число	Символ	Название элемента	Соеди- нитель- ный вес	Название изотопа	Обозначе- ние атома	Атомный вес
1	H	Водород . .	1,008	Водород	H	1,008
2	He	Гелий . . .	4,00	Гелий	He	4,0
3	Li	Литий . . .	6,94	Литий ₆		6,0
				Литий ₇		7,0
4	Be	Бериллий .	9,1	Бериллий	Be	9,0
5	B	Бор	10,8	Бор ₁₀		10,0
				Бор ₁₁	11,0	
6	C	Углерод . .	12,00	Углерод	C	12,0
7	N	Азот	14,008	Азот		N
8	O	Кислород .	16,000	Кислород	O	16,000
9	F	Фтор	19,00	Фтор		F
10	Ne	Неон	20,2	Неон ₂₀		20,0
				Неон ₂₁ ?		21 ?
				Неон ₂₂		22,0
11	Na	Натрий . . .	23,00	Натрий	Na	23
12	Mg	Магний . . .	24,32	Магний ₂₄		24
				Магний ₂₅	25	
				Магний ₂₆	26	
13	Al	Алюминий .	27,1			
14	Si	Кремний . .	28,3	Кремний ₂₈		28
				Кремний ₂₉		29
				Кремний ₃₀ ?	30 ?	
15	P	Фосфор . . .	31,04	Фосфор	P	31,0
16	S	Сера	32,07	Сера		S
17	Cl	Хлор	35,46	Хлор ₃₅		35,0
				Хлор ₃₇		37,0
				Хлор ₃₉ ?	39,0 ?	

Порядковое число	Символ	Название элемента	Соединительный вес	Название изотопов	Обозначение атома	Атомный вес
18	Ar	Аргон . .	39,9	Аргон ₃₆ Аргон ₄₀		36,0 40,0
19	K	Калий . .	39,10	Калий ₃₉ *) Калий ₄₁		39 41
20	Ca	Кальций .	40,07	Кальций ₄₀ ? Кальций ₄₄ ?		40 ? 44 ?
21	Sc	Скандий .	45,10			
22	Ti	Титан . .	48,1			
23	V	Ванадий .	51,0			
24	Cr	Хром . . .	52,0			
25	Mn	Марганец	54,93			
26	Fe	Железо . .	55,85	Железо ₅₄ ? Железо ₅₆		54 ? 56
27	Co	Кобальт . .	58,97			
28	Ni	Никкель . .	58,68	Никкель ₅₈ Никкель ₆₀		58 60
29	Cu	Медь . . .	63,57			
30	Zn	Цинк . . .	65,37	Цинк ₆₄ ? Цинк ₆₆ ? Цинк ₆₈ ? Цинк ₇₀ ?		64 ? 66 ? 68 ? 70 ?
31	Ga	Галлий . .	69,9			
32	Ge	Германий .	72,5			
33	As	Мышьяк . .	74,96			
34	Se	Селен . . .	79,2			
35	Br	Бром . . .	79,92	Бром ₇₉ Бром ₈₁		79,0 81,0
36	Kr	Криптон . .	82,92	Криптон ₇₈ Криптон ₈₀ Криптон ₈₂		78,0 80,0 82,0

*) Еще не выяснено, оба или только один изотоп калия радиоактивны. То же самое относится и к рубидию.

Продолжение.

Порядковое число	Символ	Название элемента	Сред- нтя- ный вес	Название изотопов	Обозначе- ние атома	Атомный вес
				Криптон ⁸³		83,0
				Криптон ⁸⁴		84,0
				Криптон ⁸⁶		86,0
37	Rb	Рубидий .	85,5	Рубидий ⁸⁵ *)		85,0
				Рубидий ⁸⁷		87,0
38	Sr	Стронций .	87,6			
39	Y	Иттрий .	88,7			
40	Zr	Цирконий .	90,6			
41	Nb	Ниобий .	93,5			
42	Mo	Молибден .	96,0			
43	—	—	—			
44	Ru	Рутений .	101,7			
45	Rh	Родий .	102,9			
46	Pd	Палладий .	106,7			
47	Ag	Серебро .	107,88			
48	Cd	Кадмий .	112,4			
49	In	Индий .	114,8			
50	Sn	Олово .	118,7	Олово ¹¹⁶		116
				Олово ¹¹⁷		117
				Олово ¹¹⁸		118
				Олово ¹¹⁹		119
				Олово ¹²⁰		120
				Олово ¹²¹ ?		121 ?
				Олово ¹²²		122
				Олово ¹²⁴		124
51	Sb	Сурьма . .	120,2			
52	Te	Теллур . .	127,5			
53	J	Иод	126,92	Иод	J	127

*) Ср. примечание при калии.

Порядковое число	Символ	Название элемента	Соеди- нитель- ный вес	Название изотопов	Обозначе- ние атома	Атомный вес
54	X	Ксенон . .	130,2	Ксенон ₁₂₉ Ксенон ₁₃₁ Ксенон ₁₃₂ Ксенон ₁₃₄ Ксенон ₁₃₆ Ксенон ₁₂₈ ? Ксенон ₁₃₀ ?		129 131 132 134 136 128 ? 130 ?
55	Cs	Цезий . .	132,8	Цезий	Cs	133
56	Ba	Барий . .	137,4			
57	La	Лантан . .	131,0			
58	Ce	Церий . .	140,25			
59	Pr	Празеодим.	140,9			
60	Nd	Неодим . .	144,3			
61	—	—	—			
62	Sm	Самарий	150,4			
63	Eu	Европий .	152,0			
64	Gd	Гадолиний.	157,3			
65	Tb	Тербий . .	159,2			
66	Dy	Диспрозий.	162,5			
67	Ho	Гольмий .	163,5			
68	Er	Эрбий . .	167,7			
69	Tm	Туллий . .	169,4			
70	Yb	Иттербий .	173,5			
71	Lu	Лютеций .	175,0			
72	Hf	Хафний . .	—			
73	Ta	Тантал . .	181,5			
74	W	Вольфрам .	184,0			
75	—	—	—			
76	Os	Осмий . .	190,9			
77	Ir	Иридий	193,1			

Порядочное число	Символ	Название элемента	Совми- нитель- ный вес	Название изотопов	Обозначе- ние атома	Атомный вес
78	Pt	Платина	195,2			
79	Au	Золото .	197,2			
80	Hg	Ртуть .	200,6	Ртуть ₁₉₇₋₂₀₀		197—
				(еще не разделенные)		—200
				Ртуть ₂₀₂		202
			204,4	Ртуть ₂₀₄		204
81	Tl	Таллий .		Актиний С ^α	AcC ^α	(206)
				Торий С ^α	ThC ^α	208
				Радий С ^α	RaC ^α	210
82	Pb	Свинец . .	207,2	Радий G (уранов. свинец)	RaG	206
				Актиний D		(206)
				Торий D (ториев. свинец)	ThD	208
				Радий D	RaD	210
				Актиний B	AcB	(210)
				Торий B	ThB	212
				Радий B	RaB	214
83	Bi	Висмут . .	209,0	Радий E	RaE	210
				Актиний C	AcC	(210)
				Торий C	ThC	212
				Радий C	RaC	214
84	Po	Полоний	—	Полоний (RaF)	Po (RaF)	210
				Актиний C'	AcC'	(210)
				Торий C'	ThC'	212
				Радий C'	RaC'	214
				Актиний A	AcA	(214)
				Торий A	ThA	216
				Радий A	RaA	218
85	—	—	—			

Порядковое число	Символ	Название элемента	Соединительный вес	Название изотопов	Обозначение атома	Атомный вес
86	<i>Em</i>	<i>Эманация</i>	222	<i>Эманация актиния</i> . . . <i>Эманация тория</i> . . . <i>Эманация радия</i> . . .	<i>AcEm</i> <i>ThEm</i> <i>RaEm</i>	(218) 220 222*)
87	—	—	—			
88	<i>Ra</i>	<i>Радий</i> . . .	226,0	<i>Актиний X</i> <i>Торий X</i> <i>Радий</i> <i>Мезоторий 1</i>	<i>AcX</i> <i>ThX</i> <i>Ra</i> <i>MsTh₁</i>	(222) 224 226 228
89	<i>Ac</i>	<i>Актиний</i> .		<i>Актиний</i> <i>Мезоторий 2</i>	<i>Ac</i> <i>MsTh₂</i>	(226) 228
90	<i>Th</i>	<i>Торий</i> .	232,1	<i>Радиоактиний</i> <i>Радиоторий</i> <i>Ионий</i> <i>Уран Y</i> <i>Уран X₁</i>	<i>RaAc</i> <i>RaTh</i> <i>Io</i> <i>UY</i> <i>UX₁</i>	(226) 228 230**) (230) 234
91	<i>Ra</i>	<i>Протактиний</i> .		<i>Протактиний</i> <i>Уран X₂ (бrevий)</i>	<i>Ra</i> <i>UX₂ (Br)</i>	(230) 234
92	<i>U</i>	<i>Уран</i> . . .	238,2	<i>Уран II</i> <i>Уран I</i>	<i>UII</i> <i>UI</i>	234 238

*) Эта величина была подкреплена прямым определением плотности в пределах ошибок опыта.

***) Эта величина основывается на экспериментальном определении атомного веса смеси иония-тория.

не принимая во внимание тех количественных соотношений, в которых они встречаются в естественных смешанных элементах (в этом отношении см. таблицу 23 стр. 153).

Поперечные линии во второй таблице означают концы периодов в естественной системе элементов (ср. таблицу 22 стр. 143) и приводятся для внесения ясности во всю таблицу.

ГЛАВА XXI

Искусственное разложение химических элементов.

Нам известен до сих пор один единственный установленный метод искусственного разложения ядра атома, преследующий ту же цель, которая ставилась еще алхимиками, именно превращение элементов—осуществленное, однако, до настоящего времени лишь в крайне минимальных количествах; он состоит в использовании энергии наиболее проникающих α -частиц.

Если заставить, например, α -лучи RaC проходить в атмосфере чистого азота, то можно доказать образование заряженных атомов водорода, обладающих большой скоростью. Образующееся количество водорода слишком мало, чтобы оно могло быть обнаружено химическим путем; 100.000 α -частиц освобождают в среднем один атом водорода. Что в данном случае получается именно водород доказывается, подобно тому как было установлено тождество α -частиц с атомами гелия, исследованием отклонения в электрическом и магнитном поле; таким путем для этих частиц была найдена масса=1 и заряд=1. Эти H-частицы должны образовываться из встречающихся на пути α -частиц атомов азота, так как, во-первых, случайное загрязнение применявшегося для этого азота водородом, как это было установлено специально поставленными опытами, должно было дать, вследствие редкости при таком разрежении, благоприятных столкновений между α -частицами и атомами водорода лишь значительно меньший эффект, чем тот, который наблюдается в чистом азоте, и, во-вторых, скорость H-частиц настолько велика, что необходимая для этого энергия должна

быть больше, чем та, которая может быть получена в результате простого столкновения с α -частицами. Хотя при излучении α -частиц в чистом водороде также образуются Н-лучи, но с гораздо меньшей начальной энергией; наблюдения с экраном для сцинтилляций показывают, что в этом случае величина пробега Н-частиц составляет только 29 см. при атмосферном давлении, что вполне согласуется с теоретически ожидаемой величиной, в то время как Н-лучи в азоте имеют величину пробега, достигающую до 40 см. Единственным источником происхождения Н-частиц могут быть поэтому лишь атомы азота; Н-частицы должны образовываться из ядер этих атомов, так как только там и находится материя; этим объясняется также их большая энергия, если мы себе представим, что благодаря бомбардировке α -частицами связанные в ядре силы освобождаются подобно тому, как это имеет место при радиоактивном распаде.

Явление, обнаруженное впервые у азота — именно испускание Н-лучей при бомбардировке α -частицами — дает и целый ряд других элементов, как-то — бор, фтор, натрий, фосфор и, в особенности, алюминий, у которого наблюдались Н-лучи с величиной пробега в 90 см. В данном случае также должно вылететь до 100.000 α -частиц, чтобы вызвать одну Н-частицу такой скорости. Из этого можно высчитать, что для того, чтобы получить таким путем только 1 куб. мм. водорода, необходимо подвергнуть алюминий действию излучения 1 грамма радия в продолжение 3.000 лет, откуда видно, что данный метод превращения элементов еще слишком далек от какого-либо практического значения.

В случае углерода, кислорода и серы не наблюдается никакого возникновения Н-лучей, и, несомненно, не простая случайность, что это суть элементы, атомный вес которых делится на 4. Необходимо принять, что эти элементы построены исключительно из ядер гелия и электронов, в то время как элементы, атомный вес которых на 4 не делится, в качестве составной части содержат еще и Н. Таблица 26 дает обзор вероятного строения ядра элементов, которые к настоящему времени были расщеплены α -лучами³⁾.

Т А Б Л И Ц А 26.

Ядра атомов, содержащих водород.

Э л е м е н т	Атомный вес	Число ядер гелия (масса 4)	Число ядер водорода (масса 1)
Бор	11 ; 10	2	3 ; 2
Азот	14	3	2
Фтор	19	4	3
Натрий	23	5	3
Алюминий	27	6	3
Фосфор	31	7	3

В указанных опытах применялись α -частицы RaC с величиной пробега в 7 см.; чем меньше скорость бомбардирующих α -частиц, тем меньше получается H -частиц, и пользуясь α -частицами с величиной пробега в 5 см. нельзя уже, вообще, больше наблюдать образования H -лучей. Отсюда можно заключить, что было бы мыслимо разложить ядро атома при помощи β -лучей только в том случае, если бы они могли возникать со скоростью в 6 миллионов вольт. Для сравнения напомним, что уже потенциал в 2.200 вольт достаточен, чтобы освободить электрон из самого внутреннего кольца электронов у алюминия.

Причина, почему H -лучей образуется так мало, заключается в том, что лишь очень малая часть α -частиц может достичь ядра разбиваемого атома; еще в непосредственной близости к ядру применим закон Кулона, имеющий своим следствием отталкивание α -частицы (см. стр. 86). Но из всех результатов опытов можно заключить, что те же самые частицы, когда они настолько близко достигают центра ядра другого атома, что расстояние между ними становится около 4×10^{-17} см., с этого момента уже более не отталкиваются по закону Кулона; мало того, действующие в этой области физические законы становятся как бы обратными, так что оба положительных заряда ядра атома и ядра гелия начинают друг друга притягивать. Такое допущение необходимо сделать

еще и по той причине, что только в таком случае становится понятным совместное нахождение в ядре тяжелого атома соединенных ядер гелия и водорода, и не будет какой-либо несообразностью принять, что неизвестный нам вообще закон взаимного притяжения положительных зарядов сохраняет силу также и в непосредственной близости к ядру.

Испускание Н-лучей происходит не только в направлении вылета α -частиц, но также и в обратном направлении; и это также говорит в пользу того представления, что освобождающиеся Н-частицы большей частью (почти 40%) своей энергии обязаны взрыву ядра и что α -частица при этом взрыве играет роль запала.

ГЛАВА XXII

Строение ядра атома.

Как это вытекает из радиоактивных явлений, в ядрах тяжелых атомов, которые частью являются α -излучателями, должны находиться ядра гелия. С этим находится в согласии обстоятельство, что часто разница в атомных весах и у легких элементов, и при том как общее правило, не соседних, а через один, составляет также четыре единицы, напр. (в круглых числах), $C = 12$, $O = 16$, $Ne = 20$, $Mg = 24$, $Si = 28$, $S = 32$; таким образом мы имеем основание считать гелий составной частью и этих элементов. Но так как между непосредственно следующими друг за другом элементами разница часто составляет только 1 или 3, то мы поэтому должны допустить наличие и более легкой составной части ядра атомов и в качестве таковой может быть принят во внимание из всех нам известных элементов только водород. Подтверждение этому уже давно высказывавшемуся взгляду дают упомянутые в предыдущей главе опыты над расщеплением ядра.

Кроме положительно заряженных ядер атомов водорода и гелия, ядра радиоактивных атомов, как это доказывает наличие β -лучей (см. стр. 79—80), должны содержать также определенное число электронов, так что величина заряда ядра равна алгебраической сумме имеющихся положительных и отрицательных единиц заряда. Мы с уверенностью можем сказать, что, напр., в ядре урана, соответственно 6 β -излучающим дочерним веществам UX_1 , UX_2 , RaB , RaC , RaD и RaE должно находиться, по меньшей мере, 6 электронов. Но что это число на самом деле значительно больше дает сравнение атомных весов с величиной заряда ядер:

последняя всегда должна составлять половину атомного веса, если данный тяжелый атом построен лишь из ядер гелия (масса = 4, заряд = 2). Но так как, начиная с атомного веса 40, заряд начинает отставать от этой величины, то очень вероятно, что с этого места периодической системы электроны принимают участие в строении ядра. Для тяжелых радиоэлементов число электронов доходит до 20—30. Торий, напр., имеет атомный вес 232 и порядковое число 90; в предположении, что ядро тория состоит из 58 ядер He, что соответствует 116 положительным зарядам, мы должны допустить, так как эффективный заряд ядра равен только 90, наличие электронов в ядре в числе 26⁴⁾. Если в ядре тория присутствуют не только ядра He, но также и H-ядра, подсчет для электронов ядра дает еще большее число, так как отношение заряда к массе для водорода в два раза больше, чем для гелия.

Возможно несколько ближе представить себе расположение электронов в ядре. В виду того, что очень часто в радиоактивных рядах распада за одним α -излучателем следуют два β -излучателя, или же за одним β -излучателем один α - и затем опять β -излучатель, весьма вероятно, что в ядре радиоактивного атома находятся группы, состоящие из ядра гелия и 2-х электронов, и эти группы, путем потери одной из своих составных частей, становятся неустойчивыми, так что оба другие компонента группы сейчас же вслед за этим должны также вылететь. Аналогично этому, из того факта, что в других местах рядов распада несколько α -излучателей следуют друг за другом, можно сделать заключение, что в ядре имеются также и группы из ядер гелия без электронов; из этих групп равным образом, раз они стали неустойчивыми, вылетают все их компоненты, прежде чем распад коснется другой группы ядра. Если через α' обозначить He-ядра, нейтрализованные 2-мя электронами, связанные с ними электроны через β , ядра гелия со свободным зарядом—через α , нейтрализованные ядра водорода—через H, и их нейтрализующие электроны—через e, то можно сказать, что α' -частицы и H-частицы являются причиной, почему

атомный вес тяжелого элемента больше, чем в два раза превышает порядковое число. Ядро урана, напр., (атомный вес $238 = 59 \times 4 + 2$; порядковое число 92) построено из следующих составных частей:

$$N = 46\alpha + 13(\alpha' + 2\beta) + 2H + 2e.$$

Следует упомянуть, что различие между α и α' -частицами в ядре объясняет также некоторые особенности двойного распада ⁵).

О тех силах, которые связывают в устойчивом атоме положительные частицы и электроны ядра, мы ближе ничего не знаем (см., однако, стр. 174), равно как и о тех процессах, которые приводят к радиоактивному распаду. Известные правильности получаются, если мы сравним изотопы, т. е. атомы одинаковой величины заряда ядра ⁶); оказывается, что тенденция к β -распаду тем больше и к α -распаду тем меньше, чем выше в атоме содержание электронов и чем, таким образом, больше отстает величина заряда ядра от половины атомного веса. Другими словами, склонность к β -распаду из изотопов одного и того же элемента имеют те, которые обладают более высоким атомным весом, а к α -распаду изотопы с меньшим атомным весом, напр., из β -излучающих изотопов свинца RaB (атомный вес 214) обладает более короткой продолжительностью жизни, чем RaD (атомный вес 210), из α -излучающих изотопов урана уран I (атомный вес 238) большей продолжительностью жизни, чем уран II (атомный вес 234) *).

Второе правило, которое можно высказать относительно устойчивости радиоактивного атома, заключается в уже упомянутой зависимости между величиной пробега и скоростью распада (см. стр. 115). Исходя из той энергии, с которой вылетают α -частицы, можно сделать заключение об устойчивости данного радиозлемента. Есть надежда, что с помощью таких эмпирически найденных закономерностей удастся проникнуть в механизм радиоактивного распада.

⁵) Полоний и некоторые члены ряда актиния представляют исключение.

Преобразование ядра атома при процессе распада влечет за собой значительное уменьшение содержания внутренней энергии атома. Так, содержание энергии атома $RaEm$ круглым числом на 10^{-13} cal. меньше, чем у атома Ra ; перечисленная на 1 грамм разница составляет 10^9 cal.

Согласно теории относительности, масса тела становится больше, когда его энергия увеличивается и обратно *). В то время, как имеющие место при химических процессах изменения энергии не достаточны, чтобы вызвать заметное изменение массы, вышеуказанное уменьшение энергии настолько значительно, что оно должно сказаться в заметном уменьшении массы. Так, при образовании радия из урана уменьшение веса на 12 единиц, вследствие отдачи трех α -частиц, связано с уменьшением массы на 0,02 единицы, вследствие потери энергии атомом **). Таким образом, здесь, на ряду с причиной, указанной в главе 18 (существование смешанных элементов), мы встречаемся с другой причиной, обуславливающей отклонение соединительного веса от целого числа. Приведенные на стр. 152 спектрографические исследования масс дают доказательство того, что водород также, как и гелий, есть чистый элемент. Что несмотря на это отношение атомных весов этих двух веществ не есть целое число, а $= \frac{4}{1,008}$, происходит вследствие того, что содержание энергии 4 ядер водорода (протонов) в ядре гелия значительно меньше, чем учетверенная величина энергии ядер водорода в водородных атомах. Количество энергии, образующееся при превращении 1 грамма водорода в гелий, исчисляется в $1,66 \cdot 10^{11}$ Cal. Чтобы те же калории получить сжиганием водорода, для этого необходимо сжечь 5.000 kg водорода в воду.

*) Одно из наиболее важных следствий теории относительности заключается в том, что между содержанием энергии (E) и массой (M) системы имеется простая зависимость: $M = E/c^2$, где c есть скорость света.

**) Что разница между найденным атомным весом урана и радия составляет не точно 12, а $238,18 - 226 = 12,18$, конечно, недостаточно объясняется вышеприведенной причиной. См. об этом стр. 193.

То влияние, которое оказывает на запас энергии и массу ядра способ группировки протонов и электронов, называют очень часто „упаковочным эффектом“. Атомные веса чистых элементов постольку целые числа, поскольку не принимается во внимание этот „упаковочный эффект“ 7).

Подобные представления объясняют, что He-ядра должны считаться неразложимыми составными частями атома, если они построены из 4-х H-ядер, так как разложение ядра гелия на ядра водорода требует в три раза большего количества энергии, чем то, которым обладает летящая α -частица. С этим вполне согласуются экспериментальные результаты, заключающиеся в том, что из ядер, содержащих только He и не содержащих H, никогда нельзя получить H-лучей.

ГЛАВА XXIII

Получение радиоактивных веществ.

Из всего до сих пор сказанного о химической природе радиоактивных веществ ясно, что они не образуют какой-либо группы с одинаковыми или даже только аналогичными химическими свойствами. Общим у них является лишь их физическое свойство, распад их атомов; в химическом же отношении между ними существуют большие различия — даже у генетически наиболее близко связанных между собою, как, напр., у радия и эманации радия — поэтому и способ их получения не может быть общим для всех, равно как для них нельзя дать и определенных групповых реакций, как это можно сделать для редких земель или щелочно-земельных металлов.

Помимо того, вследствие их радиоактивности, их непостоянства, здесь встречаются особенные трудности, с какими не приходится считаться ни в какой другой области химии. Неактивное вещество, освобожденное однажды от посторонних химических элементов, остается при надлежащих условиях продолжительное время чистым; для химика было бы весьма удивительным, если бы те химические элементы, которые он тщательно удалил, через несколько дней или недель появились снова. У радиоактивных же веществ это имеет место всегда, с одними скорее, с другими медленнее; если новообразование происходит уже в течение нескольких часов или минут, то образующееся за этот промежуток времени количество, само собою разумеется, не может быть весомым или видимым, и доступно обнаружению лишь благодаря его излучению. Препараты в обычном хи-

химическом смысле остаются чистыми, так как ни реагенты, ни спектроскоп не могут обнаружить примесей и только электроскоп говорит нам, что только что удаленное вещество уже опять там находится.

При получении „чистых“ радиоактивных веществ мы, поэтому, должны различать „химически чистое“ вещество и „радиоактивно чистое“. Соответственно поставленной цели методы должны быть различны, так как „химически чистый“ торий, например, может быть загрязнен некоторым количеством продуктов радиоактивного распада без ущерба для его употребления и его свойств, и, обратно, „радиоактивно чистый“ (напр., свободный от мезотория) радий может содержать для многих радиологических исследований любые количества бария. В химическом смысле чистыми мы имеем возможность получить лишь крайне незначительное число радиоактивных веществ; в видимых количествах, наряду с ураном и торием, могут быть получены только радий, эманация радия и радий D. Однако, подходить к этим веществам с точки зрения их химической чистоты приходится редко, так как ценность их заключается в их радиоактивных свойствах, мало или совсем не теряющих своей силы от примеси неактивного материала. Совершенно чистая химически, т. е. 100%-ная соль радия была получена до сих пор дважды, в Вене и Париже, для научных целей. Так же и требование о полной чистоте в радиоактивном смысле выполняется очень редко, так как „загрязнение“ собственными продуктами распада вещества при практическом употреблении только желательно, в виду того, что от этого повышается активность вещества (напр., мезоторий или радиоторий). При научных исследованиях перед радиохимиком, конечно, часто ставится эта задача; в таком случае, как это понятно из всего вышесказанного, ему необходимо знать, к какому дню и к какому часу желательно иметь „радиоактивно чистый“ препарат, так как тогда он поведет свою работу таким образом, чтобы короткоживущие, а, следовательно, и быстрообразующиеся продукты распада были удалены непосредственно перед применением препарата.

Второе затруднение, которое стоит на пути получения чистых радиоактивных веществ и которое значительно менее приятно, так как оно делает подчас невозможным их практическое применение, заключается в том, что многие из них, а ведь большинство радиоактивных веществ, вообще, неотделимо химически как друг от друга, так и от некоторых неактивных веществ (ср. главу XII), — представляют собою смеси изотопов, или естественные, или получившиеся в процессе обработки. Радий D, напр., несмотря на относительно большие количества, в которых он находится в минералах, и на то, что его химические свойства совершенно точно известны, не может быть получен в концентрированном виде — в котором он для многих применений был бы весьма ценен — так как его химические свойства точно совпадают с такими же других изотопов свинца, вместе с которыми он встречается. В настоящее время мы знаем, что изотопия есть явление, встречающееся также и у многочисленных неактивных элементов, но только проблема разделения их изотопов стоит в совершенно другом виде, а именно, в разделении химических элементов на фракции, отличающиеся только атомным весом, что представляет собою задачу, разрешение которой прежде всего важно в виду большого теоретического значения. В случае же радиоэлементов, изотопы отличаются особенно интересными и ценными свойствами, именно, свойственными им излучениями, и поэтому проблема разделения изотопов в этом случае сводится к получению данного радиоактивного вещества в „радиоактивно чистом“ виде.

Третье затруднение в изолировании радиоэлементов заключается в короткой продолжительности жизни некоторых из них. Если вещество исчезает в доли секунды, то ясно, что мы его не можем получить химическим путем (осаждением, фильтрованием и т. д.); но также и те, которые живут минуты или секунды, не могут быть большею частью химически изолированы из такой сложной смеси, каковой является большинство урановых и ториевых руд. Но это затруднение может быть обойдено, так как чем быстрее элемент разлагается, тем быстрее он и образуется из своего

материнского вещества, и общий принцип получения короткоживущих веществ состоит поэтому в том, что выделяют из данного минерала по возможности в концентрированном виде или материнское вещество, или, если оно слишком непостоянно, то один из предыдущих членов распада данного ряда; ждут образования желаемого продукта и затем уже в общем легко и быстро отделяют его химически. Таблица 27 дает сводку радиоэлементов, которые могут быть получены, благодаря их, указанным в таблице, длинным полупериодам распада T , прямо из минералов. Они расположены в таблице в порядке убывающего полупериода распада, и пять последних членов могут быть также получены, как типичские „краткоживущие“ из их материнских веществ. Особенно просто, благодаря благоприятным обстоятельствам, обстоит дело с RaD , так как выделяемый в этом случае предок, эманация радия, легко получается в совершенно чистом виде, и все промежуточные члены имеют весьма малую продолжительность жизни.

ТАБЛИЦА 27.

Долгоживущие элементы, получаемые прямо из минералов.

Торий	$T = 1,5 \cdot 10^{10}$ лет.	Актиний	$T = 20$ лет.
Уран	$5 \cdot 10^9$.	*Радий D	ок. 20 .
*Ионий	10^5 .	*Мезоторий I	6,7 .
Протактиний	10^4 .	*Радисторий	1,9 .
Радий	1700 .	Полоний	136 дней

Знаком * отмечены те элементы, которые не могут быть прямо получены в чистом виде, вследствие присутствия в минералах их изотопов с большей продолжительностью жизни.

Ниже мы намерены сообщить наиболее существенные сведения, касающиеся получения в отдельности долгоживущих и короткоживущих радиоэлементов.

А. Получение долгоживущих радиоэлементов.

Торий. — Так как весьма чистый торий в больших количествах находит себе применение в промышленности, известен целый ряд способов получения „химически чистого“ тория, на которых мы не будем останавливаться, в виду того, что описание их можно найти в учебниках химии и, особенно, в специальных сочинениях по редким землям. Здесь следует лишь отметить, что торий, получаемый обычными способами, никогда не бывает „радиоактивно чистым“, и, по меньшей мере, смешан со своим изотопом радиоторием. Существует, однако, способ освободиться и от него, и этот способ должен быть здесь приведен, так как он весьма поучителен и из него можно видеть, каким образом химик при помощи времени может произвести очистку, которой нельзя добиться прямым путем. Содержащийся в тории, после его химической очистки, радиоторий распадается в течение 20 лет до незаметных следов, но одновременно же из тория образуется мезоторий 1, из которого происходит новый радиоторий. Если позаботиться о том, чтобы путем прибавления и отделения бария время от времени производить отделения мезотория от тория, так, чтобы в течение двадцати лет не смогло собраться заметных его количеств, то по прошествии этого промежутка времени исчезнет прежний радиоторий и никакой новый не будет образован, так что можно иметь, таким образом, не только химически, но и радиоактивно чистую [соль тория. При этом предполагается, что ториевый минерал содержит только незначительное количество урана, а, следовательно, и в выделенном тории будут заключаться лишь неизмеримо малые количества долгоживущего изотопа пония.

Уран. — О получении химически чистых солей урана мы также не будем распространяться, в виду того, что необходимые указания легко найти в химической литературе. Уран, как „чистый элемент“, в противоположность торию не может быть получен никакими приемами, так как изотопный

с ураном I ($T = 5 \cdot 10^9$ лет) уран II, имеющий полупериод распада $T = 2 \cdot 10^6$ лет, не может быть от него отделен. Практически (т. е., что касается величины его соединительного веса и т. п.) уран состоит только из урана I, так как вследствие большой разницы в продолжительности жизни на 3.000 атомов урана I приходится только один атом урана II.

Радий.—Во всех урановых рудах отношение радия к урану равно $3,4 \cdot 10^{-7}$). Соответственно этому в 10.000 kg. урановой смолки содержится только 2 грамма радия; его извлечение, естественно, весьма трудно, но, благодаря счастливым обстоятельствам он не загрязнен никаким изотопом, так что уже первая работа по извлечению радия, предпринятая супругами Кюри, увенчалась полным успехом. Так как радий по своим химическим свойствам чрезвычайно близок к бария, то для его выделения применим всякий способ, который употребляется для быстрого и количественного отделения бария от остальных составных частей руды; какого либо определенного общего хода процесса дать нельзя, так как исходные материалы требуют различной обработки и в особенности этого нельзя сделать по той причине, что цена на радий недостаточно высока для того, чтобы пренебрегать остальными ценными составными частями руды, так как это не может не сказаться на экономичности данного способа. Так, ценность урана, напр., составляет одну треть ценности радия; кроме того, и ванадий, если он присутствует в руде, всегда должен из нее добываться. Тем не менее, все процессы добычи радия можно, пожалуй, расчленить на следующие главные стадии:

1. Растворение или разложение урановой руды.
2. Отделение всех нерастворимых в воде сульфатов.
3. Превращение их в растворимые соли.
4. Очистка радия и бария от посторонних составных частей.
5. Фракционированное обогащение радием бария.

Каждая из этих операций может различным образом меняться; мы не будем здесь останавливаться на разнообразных способах и вариантах, а удовольствуемся тем, что приведем

два испытанные в производстве способа, отличающиеся и по исходному материалу и по методам.

а) Иохимстальский способ.

Иохимсталь в Рудных горах представляет собою наиболее важное месторождение радиевых руд в Европе. Как при австрийском правительстве, начиная с 1910 года производство велось непрерывно по нижеприводимому способу ²⁾, так и после перехода рудника и фабрики к Чехо-Словакия методика процесса не изменилась.

Исходным материалом является урановая смолка, главная составная часть которой есть U_3O_8 с примесью большого количества других элементов, особенно PbS, SiO_2 , CaO, FeO и MgO. Размельченная руда обрабатывается смесью серной и азотной кислот в такой концентрации, что уран целиком переходит в раствор, а радий количественно остается с нерастворенными сульфатами кальция, бария и свинца. Эти последние разлагаются трехкратным кипячением с раствором соды; часть, остающаяся неизменной, так наз., „остатки“, содержит между прочим весь тантал и служит для получения из нее протактиния. Для дальнейшей очистки, перешедшая в раствор часть снова осаждается в виде сульфата и опять тем же путем, через карбонаты, превращается в хлориды. Свинец частью, как хлорид, остается нерастворенным, частью осаждается из раствора сероводородом. Последняя стадия процесса состоит во фракционированной кристаллизации смеси хлоридов радия-бария, пока не будет достигнута желаемая концентрация радия, содержание которого в кристаллах, вследствие его малой растворимости, растет после каждой кристаллизации ³⁾. Количество радия, добываемое в Иохимстале в год, составляет — вследствие трудностей, представляющихся при добыче урановой руды — только от 1 до 2-х граммов.

б) Способ Денвера.

В качестве второго примера рационального получения радия мы укажем на способ, выработанный в 1914 и 1915 гг.

в Денвере, в Северо-Американском Штате Колорадо 4). Отличие его от австрийского способа обусловлено, главным образом, тем, что исходным материалом для него служит карнотит, урано-ванадат калия, состава $K_2O \cdot 2(U_2O_3) \cdot V_2O_5 \cdot 3H_2O$, частью же тем, что при организации производства в распоряжении было гораздо больше средств.

Руда обрабатывается горячей крепкой азотной кислотой, к которой прибавлена соляная кислота, благодаря чему весь радий — даже находящийся в сульфатах, — переходит в раствор. Частичной нейтрализацией посредством $NaOH$ и прибавлением бария, радий осаждается в виде сульфата вместе с барием и свинцом — сдкантированный раствор перерабатывается на уран и ванадий, — полученные сульфаты смешиваются с древесным углем и нагреваются в графитовых тиглях в продолжение 7 часов до 800° , превращаясь таким образом в сульфиды. Сульфиды растворяют в соляной кислоте, свинец удаляется осаждением сероводородом в аммиачном растворе, барий и радий осаждают в виде карбонатов и снова растворяют в бромистоводородной кислоте. Обогащение радием бария здесь производится фракционированной кристаллизацией бромидов.

Американские карнотиты содержат в среднем 4 мгр. радия на тонну. До начала 1922 года было уже переработано 52000 тонн и, следовательно, продукция радия достигла круглым числом 200 грамм.

Мезоторий 1. Все, что говорилось о получении радия, равным образом относится и к мезоторию, так как они являются изотопами. Мезоторий находится в каждом ториевом минерале в количестве $3 \cdot 10^{-10}$ гр. на 1 гр. тория; но так как все ториевые минералы содержат также и уран, а на 1 грамм урана приходится $3,4 \cdot 10^{-7}$ грамма радия, то полученный из минералов мезоторий имеет значительные примеси, если даже, судя по излучению, примешаны и небольшие количества радия. Чтобы получить его, как „чистый элемент“, существует только один путь, а именно, ждать его постепенного образования в ториевых солях; простое осаждение свободным от углекислоты аммиаком —

с прибавлением время от времени бария, от которого он затем снова может быть отделен фракционированной кристаллизацией — достаточно для его отделения, но, само собою разумеется, этим способом, растягивая процесс на протяжении нескольких лет, можно получить только очень малый выход. Для всех практических применений содержание более долго живущего радия только увеличивает значение мезоториевого препарата.

Получение мезотория в больших количествах составляет непосредственную часть ториевого производства; при обработке монацитовых песков получается нерастворимый в серной кислоте остаток — рекомендуется прибавить соли бария, если заранее неизвестно, что данный исходный материал содержит этот элемент в достаточном количестве — и этот нерастворимый сульфат обрабатывается затем точно таким же образом, как это описано при производстве радия.

Протактиний. — При описании получения радия по химстальскому способу было указано на „остаток“, ту часть исходного материала, которая труднее всего переходит в раствор и которая, между прочим, содержит тантал и его высший аналог протактиний; подобную же фракцию получают, разлагая урановую смолку бисульфатом натрия. Обработкой плавиковой кислотой можно танталовую кислоту перевести в раствор и последующим нагреванием с серной кислотой получить снова осадок танталовой кислоты, обрабатывая который царской водкой можно извлечь железо и другие примеси. Другой способ состоит в том, что при помощи плавиковой и серной кислот тантал переводят в раствор непосредственно из руды. Всегда при этих способах протактиний остается с танталом и его тем легче получить в „радиоактивно чистом“ состоянии, что он свободен от других радиоэлементов; так как с танталом он не изотопен, а только является его гомологом, можно рассчитывать, что удастся получить весьма малые, во всех урановых рудах содержащиеся количества протактиния — лишь $6,7 \cdot 10^{-8}$ гр. на 1 гр. урана — в химически чистом виде, т. е. не содержащими тантала. Конечно, всегда необходимо,

если хотят получить количественный выход, повысить в исходном материале содержание тантала путем прибавления к нему еще некоторого произвольного количества тантала. (ср. прибавление бария при получении радия и мезотория).

Актиний.—Этот радиоэлемент есть высший гомолог лантана и может быть получен из всех урановых руд вместе с ним по всем методам, выработанным в химии для выделения редких земель⁵⁾; его обогащение относительно солей лантана наталкивается, однако, на трудности, подобные тем, которые обыкновенно встречаются при разделении редких земель, здесь же эти трудности увеличиваются еще благодаря тому, что радиологический контроль за обогащением по необходимости, требует времени, так как приходится ждать образования продуктов распада не дающего лучей актиния. Твердо установлено, что актиний является более сильным основанием, чем лантан, и поэтому осаждается аммиаком— в присутствии солей аммония—весьма неполно. Удобный способ для его получения появится тогда, когда будет получено в весомах количествах химически чистым его материнское вещество—протактиний,—от которого он, благодаря различным химическим реакциям, может быть легко отделен.

Ионий.—Так как до сего времени неизвестно ни одного уранового минерала, который был бы абсолютно лишен тория, то невозможно получить ионий, как чистый элемент; добытый; из практически не содержащей тория урановой руды, смешанный элемент состоит из 30% иония и 70% тория и дает соответственно значительно меньший соединительный вес (231,5 вместо 232,1). Так как, обратно, каждый минерал тория содержит заметные количества урана, дающего следы иония, то, хотя атомный вес получаемого тория не меняется, все же его активность всегда от примеси иония более или менее поднимается.—Для выделения солей тория-иония из минералов служат, само собою разумеется, методы, выработанные для обыкновенного тория.

Относительно радиотория уже было упомянуто, что он получается всегда вместе с торием из минералов; как чистый элемент, он может быть получен, если исходить из радио-

активно чистого мезотория, выждать образование радиотория и затем посредством NH_3 произвести простое отделение тория от бария. Так как приходится иметь дело лишь с не-весомо малыми количествами образующегося при этом радиотория, необходимо, чтобы получить видимый осадок, прибавлять какого-либо осаждаемого аммиаком вещества, например, соли железа (окисной) (см. об этом ниже, при химической обработке короткоживущих радиоэлементов).

Радий D, та составная часть радиосвинца, которая сама по себе практически лучей не дает, но которой, как материнскому веществу RaE и полония, отвечает продолжающаяся в течение десятилетий активность, никогда не может быть получен из минералов в чистом виде, так как, если в данном урановом минерале и не содержится обыкновенного свинца, то во всяком случае находится изотопный RaG, сравнительно с которым RaD в количественном отношении ступшевывается. Из эманации же радия, хотя и в минимальных количествах, радий D можно получить, как чистый элемент; так как этот способ принадлежит к тем, которые в общем приведены при описании короткоживущих радиоэлементов, о нем будет сказано ниже. Впрочем, и смешанный с обыкновенным свинцом RaD представляет для радиологов весьма ценный материал, так как он может служить для периодического получения RaE и полония.

Полоний может быть или выделен прямо из урановых минералов вместе с висмутом, или, удобнее, получен из радиосвинца. Эта смесь обыкновенного свинца с его изотопами радием G и радием D постоянно образует, как уже указано, полоний до равновесия с имеющимся радием D, и ее можно сильно обогатить кристаллизацией радиосвинца — лучше всего в виде нитрата; при этом полоний остается в маточном растворе и может быть в конце концов получен электролитически, при катодном потенциале не ниже $E_c = -0,08$ вольт, свободным от свинца и радия E (см. также при радия A)*).

*) Так как измерение потенциала в отдельности довольно хлопотливо, существует приблизительное, для практических целей вполне достаточное

В качестве материала для электродов золото рекомендуется предпочтительнее платины, потому что вследствие образования сплава с платиной полоний затем количественно не переходит в раствор.

В. Получение короткоживущих радиоэлементов.

Чем меньшей продолжительностью жизни обладают радиоэлементы, тем больше методы их получения и очистки должны отличаться от обычных химических, и тем больше в качестве контроля этих методов приходится руководствоваться измерениями активности. К тому же короткоживущие радиоэлементы встречаются в общем в конце рядов распада, после эманаций; это обстоятельство также побуждает остановиться на них, так как, мы это сейчас увидим, та легкость, с которой эманации могут быть получены в чистом состоянии, может быть использована также для получения последующих продуктов разложения эманаций, и поэтому мы здесь намерены обратиться к методам получения трех эманаций.

Эманации, как благородные газы, не связаны химически с теми солями, в которых они образуются, а только окклюдируются ими; частично эманация выделяется уже при обыкновенной комнатной температуре, при нагревании можно выгнать главную массу, а при плавлении данной соли освобождается вся эманация и, в случае, если плавление производится в соответственном аппарате, может быть уловлена. Лучше всего „аманируют“ уже при комнатной температуре гидроокиси и соли галогеноводородных кислот, тогда как сульфатами большие количества эманации удерживаются. Наиболее удобный способ для количественного определения эманации радия состоит в том, что хлористый или бромистый радий растворяют в воде, раствор оставляют стоять закрытым, пока не образуется достаточное количество эманации и затем

правило, если имеется в виду получить весьма чистый полоний — не увеличивать силу тока в $1/10$ и азотнокислом растворе выше $3 \cdot 10^{-5}$ ампера на кв. см. поверхности катода.

отсасыванием переводят весь газ в аппарат, в котором может быть произведено по методам газового анализа отделение благородных газов от примесей азота, кислорода, водорода и озона—последние три всегда образуются в результате действия лучей радия на воду (см. главу XXV). Часто бывает достаточно удалить гремучий газ, главную составную часть примесей, путем взрыва в одной из применяющихся в газовом анализе пипеток для взрыва; если хотят получить эманацию еще чище, рекомендуется, очистив ее еще с помощью едкого кали от уголекислоты и водяных паров, сконденсировать эманацию в жидком воздухе; не сгустившиеся примеси (азот, водород, благородные газы) отсасываются, а превращенная затем снова в газ эманация пропускается в тот сосуд, в котором она будет применяться.

Само собою разумеется, что такая довольно сложная очистка возможна только в случае долгоживущей эманации радия; что касается эманации тория и актиния, то их приходится получать из солей или растворов вместе с примесями больших количеств неактивного газа. Две последние эманации не могут служить источниками излучения такой же интенсивности, как эманации радия; для многих же целей и, в особенности, для получения последующих продуктов распада присутствие неактивных газов не мешает.

Первые продукты распада эманации, „короткоживущие активные осадки“,—каковым названием охватываются члены: RaA , RaB , RaC , RaC' и RaC'' , а также соответствующие продукты распада ториевого и актиниевого рядов—получаются обычно таким образом, что в сосуд, содержащий данную эманацию, подвешивают отрицательно заряженную платиновую пластинку. Результат будет тем лучше, чем больше поверхность платиновой пластинки; ее отрицательный электрический заряд следует рассматривать лишь, как благоприятствующий фактор. Названные продукты распада осаждаются на пластинке и могут быть растворены в разбавленных кислотах—большой же частью даже и в горячей воде—и затем, если в этом есть необходимость, отделены друг от друга. Очень удобно для получения ThV и ThC

пользоваться аппаратом, изображенным на фиг. 27 (стр. 100); на дне помещается в стеклянной или, еще лучше, в платиновой чашечке соль радотория или тория X.

Путем более короткой или более длинной экспозиции платиновой пластинки в эманации, можно в желаемом направлении менять относительные количества выделяющихся А-, В- и С-продуктов; таким образом легко удается при очень короткой экспозиции получить практически чистый RaA (ср. стр. 103). Обычно же необходимо дополнительное разделение на отдельные члены активного осадка. А-продукты рядов тория и актиния вследствие краткости их жизни не принимаются во внимание, а RaA отживает так скоро, что его удаление не представляет затруднения, если имеется в виду получить сумму RaB и RaC; достаточно для этого выждать около 20 минут после окончания экспозиции. О получении чистого RaA мы уже сказали, так что нам теперь следует заняться методами получения в чистом виде В- и С-продуктов.

Можно достичь уже частичного разделения простым нагреванием платиновой пластинки; при 800° , например, 75% тория В переходит в парообразное состояние, тогда как при этом улетучивается только на 20% ThC. Однако, гораздо действительнее химические и электрохимические способы разделения.

Для этого прежде всего радиоактивный налет на платиновой пластинке растворяют в разбавленной кислоте и затем уже пользуются известным способом для разделения висмута и свинца. Так, например, электролизом, при котором потенциал катода E_c равен приблизительно $-0,5$ вольт и не падает ниже этого предела (что в слабо кислом растворе отвечает плотности тока в 0,4 миллиампера на кв. см.), можно выделить чистый С-продукт, в то время, как В-продукт почти количественно остается в растворе; осаждения В-продуктов практически совершенно не происходит, если прибавить свинца, изотопа В-продуктов, в виде любой растворимой соли свинца и следить за тем, чтобы то ничтожное количество свинца, которое осаждается уже при ниже указанном для

свинца характерном катодном потенциале при данном разведении, состояло почти только из неактивного свинца. Когда все изотопы висмута, осаждение которых начинается уже при потенциале $E_c = -0,08$ вольт (чему отвечает приблизительно 0,16 миллиампера на кв. см.), удалены, то достаточно поднять напряжение до потенциала катода в $-0,5$ вольт, чтобы выделить теперь В-продукты на любом из электродов. Если хотят получить эти продукты, то, естественно, предварительного прибавления больших количеств неактивного свинца следует избегать.

Еще проще, чем электролизом, можно достигнуть выделения С-продуктов погружением белой никелевой пластинки в солянокислый раствор В- и С-продуктов. В результате процесса, по существу идентичного с электролизом, на никелевой пластинке осаждаются С-продукты, свободные от В-продуктов (ср. стр. 130).

Следует отметить, что RaE, изотоп висмута, может быть, естественно, получен теми же самыми электрохимическими методами, как и С-продукты, и что RaA, также, как и его изотоп полоний, выделяется еще легче, и, именно, уже при катодном потенциале $E_c = 0,35$ вольт; в данном случае степень чистоты RaA или Po можно поднять благодаря тому, что от прибавления висмутовой соли одновременное осаждение RaC, и, соответственно, RaE делается невозможным. Источником электрохимического получения полония и RaE служит, однако, не только радиосвинец из минералов, но также и „долгоживущий активный осадок“, образующийся при распаде эманации радия в закрытом сосуде. На стенках сосуда оседает тогда RaD, который может быть растворен в кислотах; в этом растворе постепенно накапливается RaE и RaF, и они из него, вследствие значительных концентраций, могут быть получены всеми вышеприведенными электрохимическими способами, еще удобнее и предпочтительнее, чем из растворимого только в больших количествах жидкости радиосвинца.

Электрохимические методы по отношению к тем радиоэлементам, к которым они применимы, предпочтительнее

перед всеми другими и, именно, потому, что получающиеся при этом вещества не только радиоактивны, но также и химически чисты. К сожалению, эти методы применимы лишь к тем веществам, которые являются в некоторой степени электрохимически благородными, а именно, к изотопам свинца, висмута и полония.

Другой очень изящный метод, область применения которого, однако, гораздо уже, основан на использовании радиоактивной отдачи (см. главу VI). Так, изотопы таллия—торий C'' и актиний C'' —очень удобно получают, благодаря тому, что частицы этих веществ, отбрасываемые вследствие радиоактивной отдачи от металлической пластинки, покрытой активным осадком, в воздух, собираются на противоположно поставленной отрицательно заряженной металлической пластинке. Таким же путем из RaA может быть получен радиоактивной отдачей чистый RaB ; опыт в этом случае должен быть прерван уже через несколько секунд, так как после этого осаждающийся RaB уже смешан с образующимся из него радием C .

В заключение мы должны еще остановиться на тех методах получения и разделения короткоживущих радиоэлементов, которые являются общеупотребительными, именно, на химических способах. О химическом характере всех короткоживущих радиоэлементов мы вполне осведомлены; мы знаем, что все они являются различными изотопами таллия, свинца, висмута и полония (продукты от A до G), что, далее, ThX и AcX суть изотопы радия; UX_1 , UY и $RaAc$ —изотопы тория, что $MsTh2$ химически идентичен с актинием, UX_2 идентичен с протактинием. Аналитическая химия этих веществ представляет затруднения только в том отношении, что вещества присутствуют всегда в чрезвычайно малых концентрациях; напр., концентрация ThB в 10^{-11} мол. на литр для обычных радиохимических работ считается уже довольно „крепкой“. Приемом для устранения затруднений, вызываемых чрезвычайном разбавлением, причем он всегда дает определенный результат, служит прибавление весомых количеств изотопа. Если мы захотим, напр., количественно

удалить из раствора ThB, то для этого достаточно прибавить нитрата свинца и высадить затем полностью весь свинец сероводородом; так как все атомы теперь имеющегося смешанного элемента свинца (состоящего из обыкновенного свинца и ThB) химически равнозначны, то при пропускании сероводорода, ThB должен высаживаться так же количественно, как и практически нерастворимый сульфид свинца.

Неудобство этого способа заключается в том, что производимое при этом смешение практически необратимо; данный радиоэлемент никогда уже больше не может быть получен в концентрированном виде, и к этому средству, прибавлению изотопа, следует прибегать лишь в тех случаях, когда дело идет о количественном выделении, а не просто о получении радиоэлемента. В последнем случае почти всегда следует отдать предпочтение не изотопу, а только родственному элементу, как носителю определенных свойств при реакции осаждения, аналогично тому, как при получении радия и мезотория — о чем уже говорилось — прибавляется барий, благодаря чему возможно отделение этих элементов, а, в конце концов, также и отделение от радиоэлемента прибавленного бария. В полном соответствии с этим лучше, напр., RaE при осаждении смешивать не с висмутом, а со свинцом, от которого он, напр., электрохимически может быть снова легко отделен (см. выше). UX_1 должно связывать не с торием, а с цирконом или церием и т. д.

Если мы пользуемся не изотопами, а только родственными элементами, мы не можем уже больше утверждать, что при каждом количественном осаждении данного вещества также должен осаждаться и радиоэлемент. При сульфате свинца, напр., RaE остается в растворе; сульфид же свинца, напротив, количественно его выделяет. В данном случае имеет место правило адсорбции и осаждения, о котором мы говорили выше (стр. 130 и 131): радиоэлемент адсорбируется и выпадает с теми осадками, анионы которых с данным радиоэлементом образуют в данном растворителе трудно растворимое соединение. Вместо изотопа в качестве

осадителя может применяться каждый другой элемент, который, так же как и радиоэлемент, с тем же самым анионом в данном растворе дает нерастворимый осадок. Осаждение в виде гидроокиси изотопа тория можно заменить осаждением в виде гидроокиси какой-либо соли железа, вместо сульфата изотопа свинца можно осадить в виде сульфата соль бария и т. д.

Так как это правило — если не считать отдельных еще не вполне выясненных и, вероятно, только кажущихся исключений — вполне успешно распространяется на всю большую область аналитической химии радиоэлементов, мы можем удовлетвориться здесь указанием на это правило; на основании его мы в состоянии с полной ясностью охватить уже испытанные методы разделения короткоживущих радиоэлементов и предсказать новые. Какой способ избрать в каждом отдельном случае, составляет задачу, разрешаемую аналитическим опытом химика.

ГЛАВА XXIV

Свойства отдельных радиоэлементов.

В этой главе мы рассмотрим отдельные радиоэлементы в порядке их образования из материнских веществ урана, протактиния и тория и для каждого из них приведем наиболее важные константы, которые служат для его физической и химической характеристики. Так как уже часто в предшествующих главах говорилось о специальных свойствах, то мы можем быть весьма кратки; так, напр., на методах получения мы будем останавливаться только тогда, когда систематическое изложение в главе XXIII будет нуждаться в том или другом дополнении с практической точки зрения. В заключение мы посвятим несколько слов стоящим изолировано от других и еще мало исследованным радиоактивным элементам калию и рубидию.

Значения приводимых для сокращения букв следующие:

- Z = порядковое число
- А. в. = атомный вес
- T = полупериод распада
- R = дальность пробега в воздухе, измеренная при атмосферном давлении и 15°C .
- μ = коэффициент абсорбции в алюминии, измеренный в см^{-1} .

А. Ряд урана.

Так как продолжительность жизни урана II гораздо короче, чем урана I, то смешанный элемент „уран“ содержит только 0,04% урана II и может поэтому рассматри-

1. Уран.

Уран есть смесь двух изотопов урана I и урана II.

	У р а н I	У р а н II
Z	92	92
A. в.	238,18	234
T	$5 \cdot 10^9$ лет	$2 \cdot 10^6$ лет
Излучение	α	α
R	2,67	3,07
Материнское вещество	—	UX ₂
Дочернее вещество	UX ₁	J. o

ваться с химической точки зрения, как чистый уран I. Экспериментально определенный соединительный вес составляет 238,18; возможно, что отклонение от целого числа 238 объясняется присутствием третьего, еще не открытого изотопа с более высоким, чем 238, атомным весом (см. также протактиний). При современном состоянии наших знаний уран есть элемент наивысшего порядкового числа и наивысшего соединительного веса. На его химических свойствах мы здесь останавливаться не будем, так как их можно найти в каждом учебнике химии. При радиоактивных исследованиях большей частью употребляется черная окись урана [U₃O₈] или светло-желтый уранилнитрат [UO₂(NO₃)₂·6H₂O], первая, как эталон для измерения α-лучей, второй для получения UX. О нахождении урановых руд и их переработке на радий см. стр. 185 — 187.

α-активность урана в равновесии со всеми его продуктами превращения в 4,73 раза больше, чем одного урана в отдельности.

Уран X₁ есть изотоп тория (см. таблицу 20, стр. 123); его выделение из растворов урановых солей производится поэтому осаждением или гидрата окиси железа, или циркония (см. также стр. 196). UX₂, изотоп протактиния, полу-

2. Уран X_1 и уран X_2

	У р а н X_1	У р а н X_2
Z	90 (= торий)	91 (= протактиний)
A. в.	234	234
T	23,8 дней	1,15 минут
Излучение	β	β, γ
μ	510	β T
		14,4 24
		0,70
		0,14
Материнское вещество	UI	UX ₁
Дочернее вещество	UX ₂	UII

чается или электролитически, или из растворов урана X_1 общим осаждением с окисью тантала.

3. Уран Y и уран Z.

Генезис этих обоих продуктов, находящихся в урановых солях, не вполне еще выяснен. Уран Y ($T = 25,5$ часов) есть изотоп тория, уран Z ($T = 6,7$ часов) — изотоп протактиния²⁾; оба они β -излучатели (μ^{UY} приблизительно 300, μ^{UZ} приблизительно 100); из незначительности приходящейся на них доли в общей активности следует, что они не могут находиться в главном ряду. UY по всей вероятности есть материнское вещество протактиния и вместе с тем всего активнеего ряда (ср. таблицу 15 стр. 112).

Ионий, изотоп тория, никогда еще не был получен в чистом виде; наиболее богатый ионием до сих пор препарат тория содержит 30% иония и имеет соединительный вес 231,51 (ат. в. $Jo = 230$, $Th = 232,12$).

Способы получения радия были уже рассмотрены. В продаже он встречается большею частью в форме хлорида или бромида, смешанного с соответственной солью бария; сохраняющийся в Париже интернациональный эталон радия в 21,99 мгр. и имеющийся в Венском Радиевом Институте

4. Ионий и радий.

	Ионий	Радий
Z	90 (= торий)	88
A. в.	230	226
T	10^5 лет	1580 лет
Излучение	α	α (β) (γ)
B	3,194	3,389
Материнское вещество	U II	Ионий
Дочернее вещество	Радий	Эманация радия

второй интернациональный эталон в 31,17 представляют собою совершенно чистые, т. е. не содержащие вовсе бария, хлористые соли радия, RaCl_2 . Цена радиевых препаратов зависит от содержания в них элемента радия; осенью 1921 года цена 1 mgr. радия на мировом рынке была от 125 до 135 долларов.

Так как радий, несмотря на его редкость, мог уже быть получен в количестве нескольких сот грамм — главным образом, в Америке — определение характера и свойств этого элемента обычными в химии и физике методами не представляет никаких затруднений. По спектру, растворимости солей и т. д. он оказывается высшим гомологом бария. Растворимость, напр., его сульфата меньше растворимости сульфатов всех щелочно-земельных металлов, как показывает таблица 28.

ТАБЛИЦА 28.

Растворимость сульфатов щелочно-земельных металлов.

	Растворимость при 25° в весовых процентах (1 грамм вещества в 100 гр. раствора)
CaSO_4	$2,1 \times 10^{-1}$
SrSO_4	$1,5 \times 10^{-2}$
BaSO_4	$2,3 \times 10^{-4}$
RaSO_4	$2,1 \times 10^{-6}$

Большую часть радиевые соли встречаются в количестве нескольких миллиграмм и смешаны с барием; их количественное определение удобнее всего производится измерением их радиоактивности; при этом способе, в отличие от весового, степень чистоты радиевой соли не имеет значения. В качестве препарата для сравнения должна служить соль радия известного уже содержания, которое определено или непосредственно, или посредством международного эталона. Если мерой служит сила γ -излучения, то препарат может оставаться в запаянной стеклянной трубке — обыкновенной упаковке, — что представляет преимущество этого способа *). В случае очень слабых препаратов, которые должны определяться в растворе, наиболее точным методом является определение эманации. При этом находящееся в равновесии с радием количество эманации переводят в электроскоп, уже прокалиброванный определенным количеством эманации **).

В таблице показано также слабое β -излучение радия: оно образуется не из ядра — иначе в качестве дочернего вещества должен был бы получаться изотоп актиния, — а является вторичным и происходит из оболочек K—и L, благодаря воздействию γ -лучей (ср. стр. 81.). Коэффициент абсорбции $\mu = 312 \text{ см.}^{-1}$. Собственное γ -излучение радия составляет только 1% γ -излучения радиевого препарата в равновесии с его продуктами распада. α -активность радия (без его продуктов распада) составляет 0,49 α -активности урана, который содержит всегда оба α -излучателя UI и UII.

Эманация радия есть высший гомолог благородных газов и, благодаря своей неспособности вступать в химические реакции и характеру своего спектра ⁶⁾, уже с самого начала нашла себе соответствующее место в периодической системе. Позднее были получены достаточно большие количества ее,

*) В качестве единицы для подобного рода измерений по γ -лучам предлагается: „1 Eve“ = интенсивности γ -излучения от 1 гр. радия на расстоянии 1 см. от источника излучения ⁴⁾.

***) О практике по методике измерений см. работы, указанные в предисловии.

5. Эманация радия.

Z	86
A. в.	222
T	3,810 дня ^{*)}
Излучение	α
R	4,122
Материнское вещество	радий
Дочернее вещество	Ra A

чтобы установить также и другие константы. Точка кипения лежит при -62° , точка замерзания при -71° , критическая температура при $+105^\circ$. Эманация распределяется между водной и равновеликой воздушной фазой при комнатной температуре в отношении 1 : 3; коэффициент распределения поэтому $a = 0,3$. С увеличением температуры растворимость, строго следуя закону Генри, как это видно из таблицы 29, уменьшается. Растворимость уменьшается также и с прибавлением к водной фазе солей; для 1 мол. раствора соли $a = 0,16$. Коэффициент распределения между кровью и воздухом составляет при температуре тела 0,42.

ТАБЛИЦА 29.

Распределение эманации между водой и воздухом.

Температура в градусах Цельсия	Коэффициент распределения A между водой и воздухом
0	0,510
10	0,350
20	0,255
30	0,200
40	0,160
50	0,140
60	0,127
70	0,118
80	0,112
90	0,109
100	0,107

Значительно лучше, чем вода, растворяют эманацию органические жидкости, как ацетон ($a = 6,3$), керосин ($a = 10$), гексан ($a = 17$), оливковое масло ($a = 28$) и т. д. ⁷⁾. Также и твердые тела, как каучук, парафин, платиновая чернь и, в особенности, уголь адсорбируют эманацию очень сильно. Радиевые препараты сами при известных условиях окклюдировать значительную часть образующейся эманации; выделение ее из этих плохо эмануирующих солей происходит при смачивании, тонком измельчении или при превращении в гидроксиды и галоидные соли.

С 1 граммом радия-элемента находится в равновесии 0,63 куб. мм. эманации ($= 6 \cdot 10^{-6}$ гр.); это количество называют 1 „кюри“, и в качестве единицы для измерений количества эманации пользуются, кроме того, еще одной тысячной кюри („милликюри“). Единицей для измерения концентраций эманации служит 1 „Махе“; вода источника, напр., имеет содержание эманации в 1 Махе, если количество эманации, содержащееся в 1 литре этой воды, переведенное в электроскоп, при полном использовании ее излучения, способно дать ток насыщения в $1 \cdot 10^{-3}$ эл.-стат. единиц. Единица Махе $= 3,6 \cdot 10^{-10}$ кюри на литр ^{*}). Содержание эманации в сильно радиоактивных источниках доходит до нескольких тысяч единиц Махе (ср. стр. 251). Примеры этого дает таблица 30.

ТАБЛИЦА 30.

Содержание эманации в некоторых источниках в единицах Махе.

Oberschlema	ок. 3.000	Ischia (altrömische Quelle) . . .	ок. 370
Joachimstal (Grubenwasser)	2.050	Gastein (Grabenbäcker-Quelle) . . .	155
Brambach (Wetinquelle)	2.000	Aix-les-Bains (Alaunquelle)	56
Joachimstal (Quellfassung)	600	Karlsbad (Mühlbrunnen)	32

^{*}) В новейшее время в качестве единицы для измерения концентраций эманации предлагается: „эман“ $= 10^{-10}$ кюри на литр.

6. Короткоживущий активный осадок радия.
(RaA, RaB, RaC, RaC', RaC'')

	RaA	RaB	RaC	RaC'	RaC''
Z	84 (=полоний)	82 (=свинец)	83 (=висмут)	84 (=полоний)	81 (=таллий)
A. в.	218	214	214	214	210
T	3,05 мин.	26,8 мин.	19,5 мин.	10^{-7} сек.	1,38 мин.
Излучение . . .	α	β, γ	α, β, γ	α	β
R	4,722		α	6,971	
			3,8		
μ		β γ	β γ		
		890 230	53 40		
		80 40	13 0,115		
		13 0,51			
Материнское ве- щество	RaEm	RaA	RaB	RaC	RaC
Дочернее веще- ство	RaB	RaC	99,97% RaC' 0,03% RaC''	RaD	RaD(?)

Первые пять продуктов распада газообразной эманации радия представляют собою изотопы металлов полония⁹⁾, свинца, висмута и таллия и, как твердые вещества, оседают поэтому тотчас же после их образования; так как они до некоторой степени заряжены положительно, то осаждение их предпочитают вести на отрицательно заряженных поверхностях, которыми пользуются при их получении (ср. стр. 69). Несмотря на их быстрый распад, большинство смесей было проанализировано; результирующие сложные кривые распада были уже рассмотрены выше (стр. 102, 103).

Активность поверхности, покрытой короткоживущим активным осадком радия, не падает до нуля и обнаруживается в виде весьма слабого остаточного излучения (β -лучи RaD), к которому мало-по-малу присоединяется новое β - и α -излучение (RaE и RaF) (о кривых активности (см. стр. 103). Только после распада RaF исчезает всякая

7. Долгоживущий активный осадок радия.

(RaD, RaE, RaF или полоний).

	RaD		RaE		RaF
Z	82 (= свинец)		83 (= висмут)		84 (= полоний)
A. в.	210		210		210
T	от 16 до 20 лет.		4,85 дней		136 дней
Излучение	β, γ		β, γ		α
R					3,925
μ	β	γ	β	γ	
	5,500	45	43	45	
		0,99		0,99	
Материнское вещество	RaC'		RaD		RaE
Дочернее вещество .	RaE		RaF		RaG

активность; не излучающий уже более постоянный конечный продукт ряда урана — радия, согласно закону смещения долженствующий представлять собою изотоп свинца, встречается в выкристаллизовавшихся урановых минералах в чистом виде, как „свинец с атомным весом 206“.

RaD есть также изотоп свинца и, хотя он не может быть выделен из минералов, всегда содержащих, кроме того, и другие изотопы свинца, его можно получить, как чистый элемент в видимых количествах в тех сосудах, в которых происходил распад эманации радия в количестве около 1 кури (ср. стр. 181 и 204); его электрохимические свойства в точности соответствуют свойствам обыкновенного свинца.

RaE представляет собою изотоп висмута; вследствие краткой продолжительности его жизни, возможность получения его в заметных количествах исключается.

RaF, или полоний, есть наиболее важный представитель изотопов элемента с порядковым числом 84; другие изотопы этого элемента, члены „А“ и „С“, еще менее устойчивы. Поэтому, химические свойства этого, в общем еще мало

известного элемента должны изучаться на RaF, и отчасти они уже хорошо изучены. Он является аналогом висмута и теллура, что обнаруживается всеми химико-аналитическими реакциями, его электрохимическим потенциалом — близким к потенциалу серебра — и его способностью давать газообразные соединения водорода; последние во влажном состоянии распадаются — подобно теллуристу водороду — в несколько минут ¹⁰⁾. Как уже было указано (стр. 133), полоний находится в нейтральном или слабо кислом растворе в коллоидальном состоянии.

В. Ряд актиния

1. Протактиний и актиний.

	Протактиний	А к т и н и й
Z	91	89
T	ок. 10.000 лет	ок. 20 лет
Излучение	α	β
B	3,31	
μ		неизвестно
Материнское вещество	Уран Y ?	Протактиний
Дочернее вещество	Актиний	Радиоактиний

Как видно из этой таблицы, за материнское вещество протактиния принимается уран Y главным образом благодаря хорошему согласию с законом смещения и с отношением при ответвлении актиниевого ряда (см. главу 10); прямых доказательств генетической связи найдено еще не было. Что касается материнского вещества, короткоживущего UY, то оно еще вполне не выяснено. Мы можем только сказать, что оно должно быть изотопом урана, так как ряд актиния ¹¹⁾ во всех урановых минералах встречается в постоянном процентном отношении к ряду урана — радия (3% активности); но происходит ли ответвление урана Y от урана II, как принято в таблице 15 (стр. 112), или от урана I, или, наконец, может

быть существует ¹²⁾ еще не обнаруженный уран III, от которого начинается ряд актиния, в то время как уран I и уран II на 100% переходят в ряд радия — все это вопросы, остающиеся открытыми. В силу этих причин становится невозможным расчет атомного веса, и так как ни один член ряда актиния не был еще получен в чистом виде в количестве, достаточном для экспериментального определения атомного веса, то верного пути для получения этой важной константы для всего ряда — нет (если рассматривать принятую в таблице 15 схему, как правильную, то атомный вес протактиния должен быть 230, атомный вес актиния 226 и т. д.). Все же имеется надежда, что удастся получить чистый протактиний (см. стр. 188) и тогда, определив атомный вес, одновременно выяснит вопрос о материнском веществе.

Химические свойства протактиния ¹³⁾ те же самые, какие можно ожидать от высшего гомолога тантала (см. стр. 188); его отделение от тантала довольно затруднительно. Актиний представляет собою высший гомолог лантана; получение его в чистом виде имело бы интерес, так как он является новым элементом, но это до сих пор не удавалось; при малой продолжительности жизни его, получение его в весоных количествах затруднительно.

2. Радиоактивный, Актиний X и эманация актиния.

	ВаАс	АсХ	АсЕм
Z	90 (= торий)	88 (= Ра)	86 (= Ем)
T	18,9 дней	11,2 дня	3,92 сек.
Излучение	α, β, γ	α	α
R	α	4,26	5,57
	4,61		
μ	β γ		
	175 25; 0,19		
Материнское вещество	Ас	ВаАс	АсХ
Дочернее вещество . . .	АсХ	АсЕм	АсА

Необходимо отметить, что согласно этой таблицы, вопреки общему правилу о зависимости между продолжительностью жизни и дальностью пробега (стр. 115—116), AcX дает лучи меньшей скорости, чем более долгоживущий RaAc .

О β -лучах RaAc следует сказать то же самое, что и о β -лучах Ra и RaTh , т. е. что они вторичного происхождения.

Для химического отделения RaAc от Ac и одновременно от AcX пользуются осаждением тория в слабо кислом растворе серноватистонатровой солью или перекисью водорода¹⁴). Для получения заметного осадка, перед осаждением прибавляют следы соли тория или еще лучше (ср. главу 23, стр. 196) не изотопного циркония. AcX при этом вместе с Ac остается в фильтрате, и может быть отделен от Ac многократным осаждением аммиаком; перед каждым осаждением естественно необходимо прибавлять немного железа или аналогичной соли, чтобы мог образоваться осадок, анионы которого (OH' — группы) действовали бы увлекающе на Ac (ср. правило на стр. 131). — Из твердых препаратов RaAc очень чистый AcX можно получить радиоактивной отдачей (ср. стр. 195).

AcEm также как и RaEm есть благородный газ, физические константы которого (скорость диффузии¹⁵), растворимость и т. д.), вследствие, чрезвычайно короткой продолжительности жизни¹⁶) и, соответственно, ничтожных количеств, не могли быть определены с большой точностью, но, принимая во внимание изотопию обеих эманаций, эти константы должны быть равнозначны таковым же RaEm .

Сравнение с таблицей на стр. 205 дает возможность установить большое сходство, какое обнаруживают отдельные члены активного осадка актиния в отношении последовательности и излучения, с соответственными членами короткоживущего осадка радия. Важные отличия их, если не принимать во внимание различных значений для T , R и r , заключаются, во первых, в том, что большинство атомов AcC через α -излучение распадается на AcC' , тогда как почти весь RaC через β -излучение переходит в RaC' , и, во вторых, в том обстоятельстве, что AcD представляет собою

3. Активный осадок актиния.
(AcA, AcB, AcC, AcC', AcC'')

	AcA	AcB	AcC	AcC'	AcC''
Z	84 (=полоний)	82 (= свинец)	83 (= висмут)	84 (=полоний)	81 (= таллий)
T	$2 \cdot 10^{-3}$ с.	36,1 мин.	2,16 мин.	$5 \cdot 10^{-3}$ с.	4,76 мин.
Излучение . . .	α	β, γ	α, β	α	β, γ
R	6,27		5,15	6,4	
μ		β γ взлго: 120 31 0,45			β γ 28,5 0,198
Материнское вещество	AcEm	AcA	AcB	AcC	AcC
Дочернее вещество	AcB	AcC	0,16% AcC' 99,84% AcC''	AcD (?)	AcD

уже устойчивый конечный продукт ряда, в то время как RaD, хотя и более постоянен, чем предыдущие члены, все же несмотря на это имеет характер радиоэлемента и приводит к „долгоживущему активному осадку“ радия, аналога которому в ряду актиния нет.

С. Ряд тория.

Элемент торий есть родоначальник радиоактивного ряда, вполне независимого от ряда урана-радия и ряда актиния; это вытекает из того, что участие обоих семейств в активности различных минералов колеблется в очень широких пределах: известны урановые минералы, почти совершенно не содержащие тория (и его продуктов распада) и, обратно, известны ториевые минералы с ничтожным содержанием урана, и, соответственно, также бедные ионием и радием. Главным источником для получения тория является мона-

1. Торий, Мезоторий 1 и Мезоторий 2.

	Т о р и й	Мезоторий 1	Мезоторий 2
Z	90	88 (= радий)	89 (= активий)
A. в.	232,12	228	228
T	$2,2 \cdot 10^{10}$ лет	6,7 лет	6,2 часа
Излучение	α	(β)	β , γ
R	2,72	.	
Р			β γ 40—20 26 0,116
Материнское вещество		Торий	Мезоторий 1
Дочернее вещество . .	Мезоторий 1	Мезоторий 2	Радиоторий

цитовый песок с 4—5% ThO_2 ; гораздо богаче торием некоторые редкие минералы, как, напр., встречающийся на Цейлоне, торрианит, который может содержать до 70% ThO_2 . Способы получения чистого тория, отделение которого от других редких земель далеко не просто, даются в учебниках химии; при радиоактивных исследованиях торий большей частью применяется в виде нитрата или гидроксида; первый, употребляется, напр., когда необходима для отделения от ThX растворимая соль, гидрат же окиси тория, вследствие его хорошей способности эманирования, — для собирания эманации тория.

О получении мезотория и о невозможности иметь его свободным от Ra уже говорилось выше (глава 23, стр. 187); как велико содержание Ra в продажных препаратах мезотория, можно приблизительно судить, не открывая препарата, по измерениям абсорбции γ -лучей при различной толщине абсорбирующих слоев (см. стр. 54—55); более точное значение получают путем определения количества образующейся эманации радия 17).

Мезоторий 1 не испускает легко обнаруживаемых лучей, но из того, что следующий за ним продукт мезото-

рий 2 имеет порядковое число 89, мы должны заключить, что каждый атом при переходе в мезоторий 2 теряет одну β -частицу. Его активность обуславливается исключительно излучением продукта распада, именно, мезотория 2, который, в виду своего короткого полупериода распада, практически достигает состояния равновесия уже через 3 дня. В более старых препаратах, пропорционально образованию радиотория ($T=1,9$ лет)¹⁸⁾, присоединяется еще сильно проникающее γ -излучение ThC'' . Каким образом меняется на протяжении лет общая активность „мезоториевого препарата“ показывает таблица 31, из которой видно, что максимум активности достигается почти через 4 года после получения чистого мезотория *).

ТАБЛИЦА 31.

Изменение во времени γ -активности мезотория.

Время в годах	$\text{MsTh}_1 + \text{MsTh}_2$	ThC''	Общая активность
1	1,000	0,000	1,000
2	0,881	0,489	1,370
3	0,777	0,781	1,558
4	0,685	0,935	1,620
5	0,604	1,000	1,604
6	0,531	1,007	1,538
7	0,469	0,973	1,442
8	0,413	0,921	1,334
9	0,364	0,855	1,219
10	0,321	0,786	1,107

Количество MsTh по весу всегда крайне ничтожно, так как с $3,3 \cdot 10^9$ гр. тория находится в равновесии лишь

*) Так как жесткость γ -излучения MsTh_2 и ThC'' различна, то отношение, которое будет найдено для обоих излучений, будет зависеть также от выбора толщины поглощающих слоев измерительной установки.

1 грамм MsTh_1 . Активностью 1 грамма Ra обладает $\frac{1}{240}$ грамма мезотория, т. е. такое его количество, которое находится в равновесии приблизительно с $1,4 \cdot 10^7$ гр. тория ¹⁹⁾.

2. Радиоторий, торий X и эманация тория.

	Радиоторий	Торий X	Эманация тория
Z	90 (= торий)	88 (= радий)	86 (= RaEm)
A. в.	228	224	220
T	1,90 лет	3,64 дня	54,5 секунд
Излучение	α, β	α	α
B	α	4,30	5,00
	3,87		
μ	β		
	велик		
Материнское вещество	Мезоторий 2	Радиоторий	Торий X
Дочернее вещество . .	Торий	Эманация тория	Торий A

β -лучи RaTh образуются не из ядра, но, также как и β -лучи Ra и RaAc , суть вторичного происхождения; они могут возбуждаться — непосредственно еще не обнаруженным — γ -излучением из оболочек L — и M.

О способах получения радиотория была уже речь в главе 23. Периодическое получение ThX из препарата радиотория может происходить таким образом, что RaTh вместе с железом, алюминием и т. п. осаждается аммиаком, при чем ThX остается в фильтрате (ср. выше получение изотопного AcX). Радиоторий и ThX служат, главным образом, источниками получения эманации тория и ее короткоживущих продуктов распада; для указанной цели рекомендуется держать упомянутые препараты продолжительное время во влажном состоянии, так как в таком случае они гораздо лучше отдают эманацию.

3. Активный осадок тория.
(ThA, ThB, ThC, ThC', ThC'')

	ThA	ThB	ThC	ThC'	ThC''
Z	84 (=полоний)	82 (=свинец)	83 (=висмут)	84 (=полоний)	81 (=таллий)
A. в.	216	212	212	212	208
T	0,14 сек.	10,6 часов	60,8 мин.	ок. 10^{-11} с.	3,20 мин.
Излучение . . .	α	β, γ	α, β	α	β, γ
R	5,70		α 4,80	8,60	
p		β γ 153 160 32 0,36	β 14,4		β γ 21,6 0,096
Материнское вещество	ThEm	ThA	ThB	ThC	ThC
Дочернее вещество	ThB	ThC	65% ThC' 35% ThC''	ThD	ThD

Сравнение этой таблицы с таблицами, данными для активного осадка актиния и короткоживущего активного осадка радия (стр. 210 и 205), обнаруживает в этой части большое сходство 3-х рядов распада. Для тория характерно отношение, в каком происходит разветвление C-продукта: в данном случае распадаются приблизительно одинаковые количества в направлении α - и β -излучения, тогда так у AcC почти весь распад идет в направлении α -излучения, а у RaC в направлении β -излучения. Согласно законам смещения следует ожидать, что оба ряда ответвлений приводят к одному и тому же конечному продукту, изотопу свинца, ThD, и в ториевых минералах на самом деле доказано существование изотопа свинца с атомным весом, вычисленным для ThD (ср. стр. 122) ²⁰. Но еще не решено, оба ли изотопа — образующиеся в отношении 95:65 — устойчивы, или

В виду того, что проникающая способность β -лучей рубидия, как уже указано, та же самая, что и у UX_1 , отношение активностей равных количеств урана и рубидия, если только при измерении приняты во внимание лишь β -лучи UX_1 (а не UX_2 и не α -лучи самого урана), дает ответ относительно его действительной активности. Отношение получается равным 15:1; рубидий таким образом только в 15 раз менее активен, чем равное ему по весу количество урана. Если β -лучи производятся одним из двух известных изотопов рубидия (А. в. = 85 и 87), а не примененным в небольших количествах еще неизвестным активным изотопом, то полупериод для рубидия исчисляется в $7 \cdot 10^{10}$ лет. Бесконечно тонкий слой калия круглым числом в 10 раз менее активен, чем равное ему по весу количество рубидия, так что для калия, если только изотоп с атомн. в. = 39 сам является β -излучателем, полупериод распада получается в 10 раз больше, чем для рубидия.

Испускание β -частицы должно привести, так как при этом заряд ядра увеличивается на единицу, к образованию, в случае калия, к атому с $Z=20$, т. е. изотопу кальция, в случае рубидия—к атому с $Z=38$, т. е. изотопу стронция ²³). Путем определения атомного веса кальция и стронция различных происхождений можно надеяться выяснить вопрос о существовании этих продуктов распада.

ГЛАВА XXV.

Действие лучей радия.

Действие лучей радия мы можем подразделить на:

- I. Фотографическое действие.
- II. Ионизацию.
- III. Возбуждение люминисценции.
- IV. Образование тепла.
- V. Химическое действие.
- VI. Коллоидно-химическое действие.
- VII. Физиологическое действие.
- VIII. Механическое действие.
- IX. Расщепление атома.

1. Фотографическое действие.

Уже во вступительной главе (стр. 3) было указано, что испускаемые радиоактивными веществами лучи производят на фотографическую пластинку действие, аналогичное действию обыкновенного света; в местах попадания лучей пластинка после обработки проявителем становится черной. В начале радиоактивных исследований, когда еще не были выработаны методы измерений, основанные на ионизации воздуха, для изучения новых явлений пользовались, главным образом, фотографической пластинкой, но и в настоящее время для различных опытов способ фотографической пластинки является наиболее удобным; так, напр., при опытах с рентгеновскими спектрами оказалось, что фотографирование представляет собою более простой и совершенный способ, чем вначале применявшиеся ионизационные камеры, а равным образом и отклонение возбужденных в магнитном поле „спектров“ β -лучей лучше всего регистрируется на фотографической пластинке (ср. фиг. 10, стр. 39). Фотографирование может служить также для установления точного пути α -частиц; крупинка α -излучающего радиоактивного вещества, напр., полония, помещается на фотографическую пластинку и благодаря ей удается из общего числа выхо-

дящих по всем направлениям лучей проследить те α -частицы, которые испускаются параллельно пластинке и чернят встречающиеся на их пути частицы бромистого серебра. В минералогии часто бывает необходимо определить положение в минерале радиоактивного включения; наложением на шлиф фотографической пластинки удается при достаточной продолжительности опыта определить ничтожные активные включения. Само собою разумеется, что чувствительность фотографического метода, напр., в случае слабых β -лучей радия, значительно ниже чувствительности метода электроскопических измерений.

Так как β - и γ -лучи способны проникать через твердые вещества, причем проникающая способность лучей находится в зависимости от плотности твердого тела (см. стр. 38 и 52—53), то есть основание думать, что, пользуясь лучами радия, можно получить радиограммы, подобные тем, какие дают рентгеновы лучи. Однако, для этого значительно менее пригодны β -лучи, потому что вследствие их сильного рассеяния контуры обрисовываемых предметов всегда получаются размытыми; если же заставить β -лучи отклониться — напр., в сильном магнитном поле — таким образом, что на пластинку будут падать лишь γ -лучи, то получающиеся при этом радиограммы с фотографической точки зрения будут хуже, чем от рентгеновых лучей, потому, что вследствие большей способности проникания γ -лучей контрасты между обрисовываемыми плотными и менее плотными предметами становятся не резкими.

Продолжительность экспозиции зависит, само собою разумеется, в широких пределах от силы радиоактивного вещества. На фиг. 33 изображена надпись, полученная таким образом, что 40 мгр. хлорида радия, т. е. очень сильный препарат, в стеклянной трубке медленно водили, как пишут грифелем, по фотографической пластинке, завернутой в черную бумагу. Действовали при этом почти исключительно β -лучи препарата.

Механизм действия лучей радия на бромистое серебро фотографической пластинки близок к действию света и для

его объяснения пользуются теми же теориями (теория квант, коллоидно-химическое действие и т. д.). Весьма вероятно, что γ -лучи действуют не непосредственно, а что здесь имеет место та самая своеобразная флуоресценция атомов серебра и брома, которая обуславливает такую особую чувствительность пластинок к рентгеновым лучам¹⁾.

Установлено, что почернение фотографической пластинки после проявления происходит даже при попадании только одной α -частицы на крупинку галоидного серебра, тогда как, чтобы вызвать почернение от β -ча-



Фиг. 32. Надпись, сделанная в темноте при помощи радия.

стиц, их необходимо в среднем от 6 до 8.

В местах наиболее сильного воздействия α -лучей в слое желатины образуются углубления; текучесть желатины уменьшается. При сильном действии на пластинке в соответствующих местах получается соляризация. При достаточной продолжительности и интенсивности действия почернение наблюдается уже до проявления пластинки²⁾.

II. Ионизация.

И об этом действии лучей радия мы также уже говорили (стр. 10), так как на ионизации воздуха основана вся техника радиоактивных измерений. Здесь необходимо дополнить, что аналогичным образом также и твердые и жидкие диэлектрики под влиянием лучей радия становятся проводниками. Интересен, напр., случай гексана, жидкого углеводорода формулы C_6H_{14} . При этом образуются ионы с подвижностью в 10^{-4} , отвечающей подвижности

электролитических ионов. На основании этих результатов ту незначительную проводимость, которую гексан всегда обнаруживает, можно отнести целиком или отчасти за счет действия естественного проникающего излучения (см. стр. 253). Так как число образуемых в единицу времени ионов незначительно, в данном случае, также как и при ионизации газов, имеет место явление тока насыщения (ср. сказанное в примечании на стр. 20).

Также установлено, что проводимость чистой воды увеличивается под действием излучения. Но в данном случае окончательно еще не выяснено, происходит ли при этом повышение проводимости самой воды или же оно есть результат действия лучей на стенки сосуда, благодаря чему в воду переходят следы электролита. Последнее обстоятельство при чрезвычайной чувствительности воды к малейшим примесям весьма трудно устранить.

Эффектом ионизации радиевыми лучами при случае пользуются также и при других физических измерениях. Так, с его помощью исследуются контактные потенциалы между металлами, особенно при воздушно-электрических измерениях для определения потенциала окружающего воздуха, когда вместо электродов пламени находят себе применение ионизирующие круги, активированные, например, полонием.

III. Возбуждение люминисценции.

Замечательная способность лучей радия, невидимых самих по себе, вызывать в веществах испускание видимого света, о чем уже вкратце было упомянуто на стр. 4, сказывается прежде всего в, так называемой, аутолюминисценции. Если, напр., подвергать фракционированной кристаллизации радий-содержащую соль бария, то при достижении определенной концентрации радия в барии смесь радиевой и бариевой соли начинает самопроизвольно светиться в темноте. Цвет зависит от содержания радия в барии и поэтому может служить для приблизительного определения концентрации препарата. Если 100%-ный хлорид радия расплавить

и тем совершенно обезвредить, то он начинает светить таким интенсивным синим светом, который виден даже при дневном свете. Спектрально - аналитические исследования показывают, что при этом получается полосатый спектр азота. Соответственным образом в атмосфере гелия можно получить линии гелия. Подобно этому и в крепких растворах солей радия, а также в крепких растворах препаратов полония, иония, мезотория и актиния, наблюдается то же самое явление самосвечения.

Со слабыми препаратами можно получить явление люминисценции только в том случае, если вблизи них поместить вещества, обладающие особенно большою способностью флуоресценции. Для этой цели наиболее пригодны платиносинеродистый барий ($BaPtCu_4 + 4H_2O$) и кристаллическая цинковая обманка. Первый особенно применим для обнаружения рентгеновых лучей и, соответственно, γ -лучей, вторая же для α -лучей, причем в этом случае наблюдается явление „сцинтилляций“. Каждая падающая на экран α -частица вызывает одну вспышку, и при достаточной силе α -излучающего препарата можно видеть, особенно в лупу, в высшей степени характерную картину движущегося светящегося поля, объясняемую поочередным переменным появлением светящихся точек. Продолжительность отдельной вспышки составляет только 10^{-4} секунды.

Для получения хорошо флуоресцирующей цинковой обманки необходимо следовать определенному рецепту. Выделенный из водного раствора не фосфоресцирующий аморфный порошок ZnS путем плавления переводится в кристаллическую обманку, при осаждении нужно следить, чтобы цинковая соль находилась в избытке или прибавлять посторонний тяжелый металл (напр., медь), так как кристаллическая обманка может фосфоресцировать только при наличии, так называемых, „центров“ (см. ниже).

Большое значение для научных работ хороших экранов сернистого цинка видно уже из того, что важные заключения при основных исследованиях по рассеянию α -частиц и расщеплению атомов основаны только на появлении

нескольких вспышек в неожиданных направлениях на экранах из сернистого цинка.

Практическое значение имеют те препараты сернистого цинка, к которым примешано определенное количество радиоактивного вещества, и которые поэтому обладают постоянным, от внешних источников энергии независимым, свечением; эти радиоактивные светящиеся составы отличаются от ранее применявшихся фосфоресцирующих составов тем, что не требуют никакого предварительного освещения. Ими покрываются стрелки и циферблаты часов и компасов, стрелки-указатели (напр., в театрах), приманки при ужении рыбы и т. п. В качестве α -излучающего вещества рациональнее всего употреблять радиоторий, так как сила свечения всякого сернистого цинка значительно уменьшается уже по прошествии нескольких месяцев, в виду чего применение более долго живущих радия или мезотория—радиоэлементов почти исключительно употреблявшихся ранее—совершенно нецелесообразно, в виду их гораздо более высокой цены. Для этого смешивают 1 гр. сернистого цинка с таким количеством радиотория, γ -излучение которого эквивалентно от $1/10000$ до $1/10$ mgr. радия. Хороший сернистый цинк превращает в свет свыше 1,5% энергии α -лучей, причем эта световая энергия весьма удачно распределяется почти целиком на видимый спектр—с максимумом, приходящимся на 550 μ ³).

Указанное уменьшение со временем силы свечения препаратов сернистого цинка следует по всей вероятности объяснить тем, что люминисценция происходит только в присутствующих в незначительных количествах во всех фосфоресцирующих телах „центрах“—в сернистом цинке один такой „центр“ приходится на 1000 обыкновенных молекул—и эти центры под действием лучей мало-по-малу разрушаются.

Кроме платиносинеродистого бария и цинковой обманки, под действием лучей радия фосфоресцирует еще с большей или меньшей силой целый ряд других веществ ⁴), напр., минерал виллемит (ортосиликат цинка)—зеленым светом, кун-

цит (силикат лития и алюминия)—красным светом *), алмаз флуоресцирует синим светом, и, пользуясь α -лучами, можно также наблюдать явление сцинтилляций. Кроме того, лучи радия вызывают свечение у большинства производных бензола, особенно с большим числом боковых цепей, и у производных салициловой кислоты, напр., салипирина (=салициловокислый антипирин). Под действием γ -лучей флуоресцирует также хрусталик, глазное яблоко и сетчатая оболочка глаза; в этом кроется причина ощущения света слепыми при приближении препарата радия, если только ретина и зрительный нерв у них не повреждены.

Практический и теоретический интерес представляет тот факт, что большинство флуоресцирующих веществ, если их подвергать более продолжительному действию лучей, приобретают окраску, причем одновременно уменьшается флуоресценция, наступает как бы „утомление“ вещества; при нагревании до температуры, зачастую даже только немногим выше комнатной, или при освещении (именно, ультрафиолетовым светом) вещество часто снова теряет приобретенную окраску, таким образом окрашивание можно сделать обратимым, и одновременно опять восстанавливается способность флуоресценции. Это обесцвечивание от нагревания или света большей частью сопровождается свечением и испусканием электронов (термолюминисценция и фотоэлектрический эффект), так, напр., кунцит меняет свою первоначальную розовую окраску на зеленую, плавиковый шпат при освещении перекрашивается из зеленого в синий. Что и для стекла со временем наступает явление „утомления“ в отношении его способности флуоресцировать особенно ясно видно из того, что свежие сосуды и трубки под влиянием радиоактивных растворов или газов всегда светятся гораздо сильнее, чем находившиеся в употреблении более долгое время; последние имеют всегда коричневую

*) Кунцит, а в некоторой степени и плавиковый шпат и некоторые другие кристаллы, люминисцируют особенно сильно в том случае, если их сначала подвергнуть действию γ -лучей, а затем обыкновенного света ⁵⁾.

или фиолетовую окраску и обнаруживают явление термолюминисценции (известен характерный зеленый свет рентгеновских трубок) очень отчетливо. То же самое свечение дает также фиолетовоокрашенный кварц при обесцвечивании его нагреванием *).

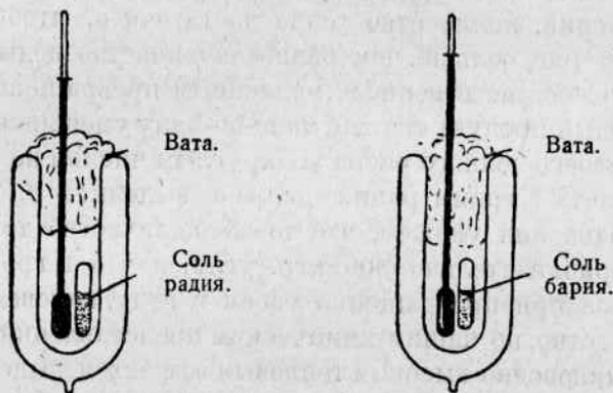
Единственное теоретическое объяснение описанных явлений возможно на основании электронной теории. Наибольшим действием в смысле сообщения веществам окраски обладают большей частью β -лучи, а также свободные электроны; впрочем, и γ -лучи всегда освобождают вторичные электроны (см. стр. 59). Как попадающие в вещество свободные электроны, так и образовавшиеся в результате действия γ -лучей, отнимают заряд у положительных металлических ионов, солеобразно построенных минералов и стекол, или переводят отдельные атомы, из которых построен кристалл, в ненормальное квантовое состояние (см. стр. 74). Эти нарушения при благоприятных обстоятельствах могут удержаться внутри кристалла на довольно продолжительное время, в противоположность нарушениям в газовой среде (нарушения в силу резонанса), каковые всегда крайне непродолжительны. Ускоряемый нагреванием обратный переход из металлического состояния или, соответственно, из ненормального ионного состояния в нормальное может быть связан с испусканием света (термолюминисценция) с одновременным обесцвечиванием, а первый процесс также и с отдачей электронов (фотоэлектрический эффект). Часто наблюдаемая одинаковость цвета окрашенной под действием лучей соли с цветом ее коллоидных жидких растворов (золи) говорит за то, что в данном случае, как, напр., при освещении поваренной соли, имеет место выделение металла. Перлы буры, напр., с литием дают коричневый цвет, с натрием—фиолетовый, с калием—синий, с рубидием — синезеленый, совершенно так

*) Термолюминисценцию строго разграничить от фосфоресценции нельзя; желто окрашенный исландский шпат фосфоресцирует, напр., красным светом уже при обыкновенной температуре.

же, как и соответствующие золи. Что окрашивание и термолюминисценция не всегда протекают параллельно, видно, между прочим, на случае фиолетово окрашенных стекол: термолюминисценция наступает уже в полной мере при 200° , цвет же теряется лишь при температуре выше 400° . Только коричневая окраска стекла исчезает уже при малых, достаточных для термолюминисценции, температурах.

IV. Образование тепла.

В дополнение к сказанному уже нами на стр. 4 можно сообщить следующие данные.



Фиг. 34.

Развитие тепла препаратом радия.

На фиг. 34 схематически изображен простой прибор, демонстрирующий постоянную отдачу тепла препаратами радия. В левом дьюаровском сосуде, снабженном термометром, находится соль радия, запаянная в стеклянную трубку, в правом точно таком же сосуде с термометром — такое же количество соли бария. Температура в левом сосуде будет все время несколько выше, чем в правом; если в сосуд поместить до $\frac{1}{2}$ грамма радиоэлемента, разница в температурах может достигнуть 5° и будет ограничена только неиз-

бежной отдачей тепла наружу. В бунзеновском ледяном калориметре движение столбика ртути, при помощи которого измеряют растаявшее в единицу времени количество льда, происходит постоянно с одинаковой скоростью.

Количество теплоты определяют большею частью таким образом, что измеряют электрическую энергию, необходимую для получения того же количества тепла, какое дает данный препарат (компенсационный метод); при постановке опыта необходимо озаботиться, чтобы все испускаемые лучи были поглощены внутри калориметра, за исключением части γ -лучей, на которые вводится поправка ⁶⁾. Этим способом найдено, что 1 гр. радия в равновесии со своими короткоживущими продуктами распада развивает в час 137 калорий, количество тепла достаточное, чтобы нагреть от 0° до 100° больше, чем равное количество воды. Эта способность, соответственно с медленным превращением радия в конечный продукт свинец, мало-по-малу уменьшается. К моменту своего полного распада (круглым числом по истечении 20.000 лет) 1 грамм радия должен выделить $3,7 \cdot 10^9$ cal. Для сравнения укажем, что то же количество тепла могут дать приблизительно 500 кгр. угля, и что 1 грамм гремучего газа при превращении своем в воду, каковая реакция, как известно, по нашим химическим представлениям, связана с необыкновенно высоким тепловым эффектом, выделяет лишь 3700 cal. таким образом только одну миллионную часть количества тепла, даваемого 1 граммом радия.

Об источниках столь больших количеств тепла, выделяемых радиоактивными веществами, можно составить себе понятие следующим образом. Зная скорость и массу испускаемых α -лучей и лучей радиоактивной отдачи и зная энергию β - и γ -лучей, можно вычислить общую энергию, которую выделяет препарат в форме лучей и которая, поглощаясь полностью, превращается в теплоту. Таким образом для количества тепла, которое происходит исключительно в результате поглощения лучей от 1 грамма радия вместе с его продуктами распада, получается значение, равное 137 cal.

час (из них 90,1% приходится на α -лучи; 1,8% на лучи

радиоактивной отдачи; 3,4% на β -лучи и 4,7% на γ -лучи). Так как экспериментально найденное количество тепла совпадает с этим, то отсюда следует сделать вывод, что развитие тепла радиоактивными веществами обязано своим происхождением исключительно энергии лучей, а не каким-либо иным внутриатомным процессам.

С помощью чувствительных приборов можно доказать, что полоний, также как и торий и уран, постоянно выделяет тепло, что и следует ожидать по теории распада. 1 грамм урана в равновесии со своими продуктами распада выделяет в час около $9 \cdot 10^{-5}$ cal.

V. Химическое действие.

Предварительное замечание: Учение о химическом действии лучей радия называют иногда „радиохимией“ в тесном смысле слова, аналогично тому, как под „фотохимией“ понимают учение о химическом действии света. Мы намерены как здесь, так и в других местах этой книги под радиохимией понимать химию радиоэлементов, т. е. учение о их химических свойствах и реакциях, так как для этой гораздо более обширной и важной области в нашем распоряжении нет другого краткого наименования.

Уже было отмечено, что между химическим действием лучей радия и тем, которое вызывает свет, имеется большое сходство. Поэтому будет целесообразно, если мы подобно тому, как мы это делали при описании ионизации газов, ссылаясь на известные свойства электролитов, и в данном случае при рассмотрении отдельных примеров, а также и теории этих явлений, будем делать указания на аналогии в области фотохимии. Прежде всего рассмотрим некоторые примеры химических изменений под действием лучей радия.

а) Химическое действие в твердых телах.

Бесцветное стекло окрашивается лучами радия, причем обыкновенное натриевое стекло становится фиолетовым,

также как и стекло, содержащее марганец; стекло же, содержащее железо или калий, становится коричневым (см. также стр. 223). Путем освещения или еще скорее, нагреванием, окрашивание делается обратимым, при чем наступают уже указанные явления люминисценции. Драгоценные камни и минералы также меняют цвет; алмаз поверхностно становится похожим на графит, синий сапфир делается желтым (искусственный сапфир не меняется), светлозеленый плавиковый шпат становится темносиним, красный кунцит зеленым, бесцветная каменная соль—синей или коричневой. Плеохроитические венчики, которые можно видеть на многих минералах, как следствие радиоактивных включений (см. стр. 249), дают то же самое окрашивание, какое можно получить искусственно, подвергая данный минерал освещению. Таким же образом многие стекла при освещении в течение долгого времени или при большой интенсивности света окрашиваются в желтый, зеленый и фиолетовый цвета.

Одно из наиболее известных химических действий света представляет собою выцветание красок. Аналогичное же действие лучей радия можно проследить, напр., на индиго или хлорофилле. Эти реакции яснее видны на растворах или на пропитанных растворами кусках ткани, чем на самих плотных красках.

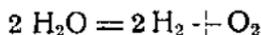
Известно разрушительное действие света на содержащую лигнин бумагу в присутствии воздуха; еще гораздо энергичнее идет разрушение всякого рода бумаги, шелка, батиста, целлулоида и т. д., если их подвергнуть действию лучей радия. Всего вероятнее здесь происходит процесс окисления в результате образующегося озона. Подобным образом парафин, вазелин и каучук становятся твердыми, а мазь для кранов разлагается с образованием CO_2 , явления, которые должны быть приняты во внимание при устройстве аппарата для радиоактивных работ.

Желтый фосфор под влиянием света переходит в красный, совершенно то же самое наблюдается и при действии лучей радия. Эффект уменьшения электрического сопротивления селена при освещении, на чем основаны многочи-

сленные технические его применения (передача изображений по телеграфу, зажигание на расстоянии и т. д.), может быть получен и с лучами радия. Иодистый азот от света магния взрывает моментально; при действии α -лучей от 3-х милликури на расстоянии в 1 см. взрыв наступает в течение 20 секунд ⁷⁾. Весьма важно, наконец, вполне аналогичное свету, восстанавливающее действие лучей радия на хлористое и бромистое серебро, что является основой их фотографического действия, и о чем уже говорилось выше (стр. 217).

б) Химическое действие в жидкостях.

Особенного внимания заслуживает разложение воды под действием лучей радия. При этом выделяются газы, состоящие из H_2 , O_2 и O_3 , и одновременно в воде образуется некоторое количество перекиси водорода. Происходящие при этом процессы можно представить в виде двух уравнений:



(часть образующихся при этом O-атомов дает с O_2 озон) и



Большинство молекул воды разлагается согласно первой реакции, образуя таким образом гремучий газ, который, однако, в результате второй реакции всегда смешан с избытком водорода. Количество образовавшихся продуктов разложения от определенного количества растворенной соли радия зависит от того, какая часть α -, β - и γ -лучей будет поглощена в воде, т. е. от размеров сосуда и, в особенности, от величины пространства для газа над жидкостью, так как в данном случае имеет значение отношение распределения эманации между жидкостью и газом (ср. стр. 203). В качестве примерного основания могут служить данные наблюдений, что 1 грамм радия в растворе в день развивает 13 куб. см. газа.

Это непрерывное образование значительных количеств гремучего газа может сказаться очень неприятным образом

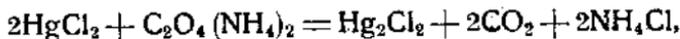
если в стеклянной трубке запаковать недостаточно высушенный препарат радия; давление развивающихся газов может разорвать трубку, а внезапное ничтожное разогревание может привести к настоящему взрыву. Поэтому неизменным условием перед запаиванием сильных препаратов является их продолжительное высушивание при t° свыше 100° .

Если для разложения воды пользоваться лишь проникающими лучами, таким, например, образом, что поместить препарат радия внутри сосуда с двойными стенками, пространство между которыми заполнено водой, то скорость разложения становится значительно меньше; ее можно повысить, если окружить сосуд снаружи слоем свинца. В таком случае из свинца будут выходить вторичные β -лучи, которые сильнее поглощаются водой, чем первичные γ -лучи и потому производят более сильное действие. Мы указываем здесь на этот опыт потому, что формально он представляет известную аналогию с, так называемой, „оптической сенсibilизацией“; так, например, фотографическая пластинка становится чувствительной к красным лучам, если к ней примешать эозин, а соединение водорода с кислородом после прибавления хлора происходит под действием тех лучей, которые поглощаются хлором, тогда как обычно видимый свет действует лишь медленно.

Обе приведенные выше реакции разложения воды могут быть вызваны также действием света и, именно, ультрафиолетового света.

Было уже отмечено, что из воды под действием лучей радия образуется в некоторой определенной части перекись водорода⁸⁾; более определенно идет обратная реакция — разложение перекиси водорода. Такое же действие производит ультрафиолетовый свет, и, притом, ртутная лампа несравненно быстрее действует, чем даже сильный препарат радия.

Из других, имеющих место в жидкостях, реакций следует указать, что щавелевая кислота в щавелевокислом ртутном актинометре разлагается также, как и от света:



(мерой интенсивности света служит выпавшее количество каломели или количество выделившейся углекислоты); и остальные описанные реакции (выделение иода из раствора иода в хлороформе, разложение жидкого NH_3 или водного раствора NH_3 , разложение NH_3 - или KJ -растворов, выделение серебра из раствора азотнокислого серебра, разложение азотной кислоты на азотистую, окись азота и кислород) качественно вполне отвечают реакциям, вызываемым действием света, но в общем протекают в несколько сот раз медленнее, чем при освещении ртутной лампой.

Наблюдение, что платиновые сосуды портятся от растворов хлористого радия объясняется выделением хлора, который переводит платину в раствор.

с) Химическое действие в газах.

Среди этих реакций наиболее бросается в глаза реакция образования озона из кислорода; вблизи каждого сильно излучающего препарата чувствуется характерный запах озона. Вследствие этого, такие металлы, как ртуть, свинец, алюминий, а также бумага, полотно и т. д. (см. выше стр. 228), находясь вблизи радиоактивных препаратов, рано или поздно окисляются. Образование озона было исследовано также количественно, о чем подробнее будет идти речь при обсуждении теории химического действия лучей (см. стр. 235).

Другие синтезы из газообразных составных частей ⁹⁾ представляют собою образование аммиака, воды и бромистого водорода из элементов; это образование ограничивается обратно идущими реакциями разложения этих соединений на элементы. Еще чаще можно наблюдать разложение CO_2 на C , CO и O и разложение CO на C и O . И здесь также имеет место равновесие, и радиоактивное излучение благоприятствует одинаково и обратному процессу. То же самое относится и к реакции: $\text{H} + \text{Cl}_2 \rightleftharpoons \text{HCl}$.

Соответствующие этим реакциям фотохимические процессы настолько известны, что мы уже здесь останавливаться на них не будем.

д) Общий характер химических реакций под влиянием лучей радия.

Выше приведенные реакции мы не расчленили на такие, которые происходят в результате действия α -, β -или γ -лучей, так как для многих из них недостает еще данных, для тех же реакций, относительно которых была изучена степень участия в них различного рода лучей, получилось, что все три сорта лучей вызывают те же самые изменения. В общем можно сказать, что α -лучи действуют наиболее энергично, если только им не препятствуют их легкая поглощаемость. Большинство газовых реакций было выполнено с эманацией, причем главное действие вероятно принадлежит α -лучам; то же самое относится и к разложению воды на гремучий газ, каковое может быть достигнуто и с чистым α -излучателем полонием, и к разложению иодистого азота. Незначительные количества вещества могут произвести окрашивание стекла на глубину лишь в несколько сотых частей миллиметра, что совершенно отвечает явлению плеохроических венчиков (см. стр. 249), причем испускаемые одновременно β - и γ -лучи не производят заметного действия.

При других реакциях главная роль принадлежит β -лучам, обладающим значительной энергией и большей проникающей способностью; в частности при выделении иода из иодоформа в бензоле α -лучи не должны совсем действовать. Воду β -лучи, в отличие от α -лучей, разлагают на перекись водорода и водород, также, как и ультрафиолетовый свет.

γ -лучи так мало поглощаются, что уже вследствие ничтожной потери энергии их действие не может быть значительным (о сенсбилизации γ -лучей см. стр. 230).

Из приведенных примеров следует, что химическое действие лучей радия, по крайней мере в их внешнем проявлении, чрезвычайно схоже с действием света как в твердых телах, так в жидкостях и газах. Многие реакции совершенно одинаковы; в особенности это относится к тем, которые называются наиболее проникающими лучами, когда радиоак-

тивный препарат, которым пользуются для опыта, запаян в стеклянной трубке. Такое сходство реакций теоретически вполне понятно, так как γ -лучи есть не что иное, как свет очень короткой длины волны. Если при реакции участвуют также и легко поглощаемые лучи, то действие будет значительно сильнее, но качественно отличаться от действия света вероятно не будет; есть реакции, на свету едва заметные, которые протекают под действием лучей радия отчетливо и быстро, как, например, сильное образование озона.

Сходство с фотохимией в особенности проявляется в том, что одна и та же реакция под влиянием лучей может идти в обоих направлениях; в то время как в отдельных случаях, например, с бромистым водородом, установлено противоположное действие различных длин волн, подобного, вполне определенного разделения для лучей радия еще не найдено. Так, эманация разлагает воду и одновременно производит соединение с образованием гремучего газа; аналогичное происходит и с аммиаком. Иногда может показаться, что в некоторых случаях действие света и лучей радия противоположны; так, окраска в минералах при освещении исчезает. Но если мы вспомним, что часто различные сорта лучей действуют в противоположных направлениях, то ничего удивительного в этом усмотреть нельзя.

Особенного внимания заслуживает то обстоятельство, что температурный коэффициент вызываемых радиевыми лучами реакций так же мал, как и в случае фотохимических реакций; при разложении перекиси водорода найдено 1,2 на 10° .

е) Теория химических реакций под действием лучей радия

После того, как было установлено сходство во внешнем проявлении реакций под действием лучей радия и фотохимических, естественно задать себе вопрос, нельзя ли допустить, что и механизм в обоих случаях один и тот же. На этот вопрос следует ответить утвердительно.

За последние годы в теоретическом толковании фотохимических процессов сделаны большие успехи. В то время как раньше все старались обосновать на принципах термодинамики, строго различая процессы, протекающие под влиянием света с притоком энергии, и процессы, при которых свет действовал лишь, как катализатор, ускоряющим образом, в настоящее время пришли к тому, что при таком представлении придется часто реакции, протекающие совершенно одинаково, рассматривать без всякого основания в разных отделах. Впервые надлежащим образом механизм этих процессов был вскрыт при помощи атомистического представления, Эйнштейновского „фотохимического закона эквивалентов“. Если абсорбированную энергию излучения разделить на значение Планковского элемента энергии для определенной длины волны, то можно получить, согласно правилу фотохимических эквивалентов, число элементарных процессов, которые принимали участие в реакции. На самом деле оказывается, например, что при освещении кислорода ультрафиолетовым светом число определенных таким образом элементарных процессов есть величина того же порядка, что и число образовавшихся молекул озона; так как, точнее говоря, молекул озона образуется в два раза больше, то можно принять, что при каждом элементарном процессе распадается одна молекула O_2 и образующиеся $2O$ соединяются с двумя следующими O_2 в $2O_3$.

Рассмотрим несколько ближе элементарный процесс, состоящий в освобождении электрона или в попадании электрона на квантовую орбиту с высшим числом, и установим соотношение между реагирующим количеством и числом участвующих в реакции электронов. Очень отчетливо эта связь получается при электрохимическом исследовании, родственном фотохимическому, которое особенно резко дает возможность увидеть и тесную связь с реакциями под действием лучей радия. Так, образование озона из кислорода было изучено и под влиянием лучей Ленара¹⁰); через алюминиевое окошко в сосуд, содержащий кислород, пропускались катодные лучи и определялось, во первых, образовавшееся количество озона.

и, во вторых, — измерением тока насыщения — общее число ионов, образовавшихся в сосуде. В то время, как число первично возникших электронов (вылетевших частиц) было в сотни и тысячи раз меньше числа образовавшихся молекул озона, между числом молекул озона и общим числом возникших в сосуде пар ионов найдено хорошее согласие. Единичный электрон может с помощью ионизации ударом (ср. стр. 43) образовать многие тысячи ионов, и эти вторично возникшие ионы и вызывают, очевидно согласно правилу фотохимических эквивалентов, равновеликое число химических элементарных процессов. То обстоятельство, что число молекул озона всегда получается несколько больше, чем число пар ионов, говорит в пользу вышеприведенного представления, что при фотохимическом правиле эквивалентов должны приниматься во внимание также и те электроны, которые еще вполне не освободились, а находятся только в возбужденном состоянии, и не принимают участия в токе насыщения.

Совершенно подобным же образом можно рассчитывать и число вступающих в реакцию электронов при освещении лучами радия. И в данном случае все дело заключается в „несамостоятельной электрической проводимости“, вызванной ионизирующим агентом, в том, что число ионов, принимающих участие в проводимости электричества, гораздо больше числа попадающих в газ первичных электронов, и первое число может быть больше второго в 10^5 раз (ср. стр. 20). Теперь из тока насыщения легко найти и общее число возникших пар ионов от препарата радия определенной силы. Так, например, можно сравнить, при образовании озона при действии на кислород эманации радия, количество молекул озона с количеством пар ионов, и найти, что требование эквивалентности в пределах ошибок опыта прекрасно подтверждается ¹¹⁾. Также и здесь получилось бы слишком малое значение для химических элементарных процессов, если бы причину их видеть не во вторично образовавшихся парах ионов, а в первичных вылетающих α -лучах, переносящих заряды.

Эта эквивалентность между числом вступающих в химическую реакцию молекул и общим числом ионов, образовавшихся в результате действия α -лучей, обнаруживается не только при получении озона, но также и при образовании воды, аммиака, и бромистого водорода из их элементов, при разложении хлористого водорода, аммиака CO и CO_2 ; кроме того, это правило применимо и к жидким системам, например, при разложении воды, жидкого бромистого водорода и кислого водного раствора иодистого калия. Оказывается, что, подобно тому, как мы это имеем в случае закона Фарадея, определенная химическая реакция связана с наличием определенного числа ионов; эти ионы, однако, в отличие от закона Фарадея не принимают участия в переносе тока; поэтому то здесь и говорится только вообще о „ионохимической эквивалентности“¹²⁾.

Так как при всяком химическом действии должна быть пройдена стадия образования атомов или ионов в состоянии возбуждения, нам становится понятным, почему использование лучистой энергии при превращении в химическую энергию как в случае света, так и лучей радия, весьма мало. Если принять, что полная ионизация есть предварительная ступень, то для образования в воздухе одной пары ионов необходимо затратить $5,5 \cdot 10^{-11}$ эргов; одна такая пара ионов может, согласно выше развитым представлениям, заставить прореагировать только одну молекулу; при таком превращении наибольший тепловой эффект — который мы рассматриваем, как меру свободной энергии — составляет $6,9 \cdot 10^{-12}$ эргов, т. е. в форму химической энергии может перейти только 12%, а так как в большинстве случаев на молекулу требуется больше, чем одна пара ионов, и так как тепловой эффект еще меньше, то использование энергии обычно еще меньше (2—3%). Вычисление получается несколько более благоприятное, если мы за предварительную стадию превращения примем не полную ионизацию, а только ионы в состоянии возбуждения. При фотохимической реакции, когда фактор использования также очень мал, можно принять, что процесс и здесь протекает таким образом, что

проходит через аномальное квантовое состояние (стр. 74) или через промежуточную ионизацию атомов.

В особенности достойно внимания то, что закон эквивалентов применим также и в том случае, когда химическая реакция протекает в направлении свободной энергии, так что и здесь лучистой энергии участвует гораздо больше, чем химической. Различия в числе требуемых ионов нет никакого даже если и совсем не происходит накопления химической энергии; большая термодинамическая разница здесь не имеет значения, и отсюда можно заключить, что и в этих случаях действие лучей нельзя принимать за каталитическое (ср. вышесказанное о несостоятельности прежнего подразделения). Опыты определенно показывают, что действие, наприм., эманации,—одного порядка, как при реакции, идущей в направлении свободной химической энергии, так и при протекающей в обратном направлении. Совершенно такие же наблюдения имеются и в области фотохимии: при разложении, напр., аммиака, ультрафиолетовым светом установлено, что, независимо от положения термодинамического равновесия, для разложения определенного количества аммиака необходима одна и та же интенсивность света. Во всех до сих пор изученных случаях химические реакции под действием света и лучей радия протекали особым путем, связанным с расходом больших количеств энергии, и каждый успех в распознавании механизма фотохимических реакций дает новые указания и о ходе химических превращений, возникающих под влиянием лучей радия.

VI. Коллоидно-химическое действие.

Здесь мы рассмотрим некоторые действия лучей радия, которые тесно связаны с коллоидно-химическими вопросами: конечно, строго разграничить то, о чем будет здесь идти речь, от того, что мы до сих пор рассматривали, нельзя. Так хорошо известно, что и фотографический процесс, о котором мы уже говорили, представляется нам, как коллоидно-химический, и явление окрашивания (см. стр. 224) есть по существу коллоидно-химическая проблема.

К коллоидно-химическим исследованиям в тесном смысле слова принадлежит изучение действия лучей радия на устойчивость коллоидных растворов. При этом обнаружались интересные результаты, заключающиеся в том, что излучение осаждает положительно заряженные коллоиды и не действует на отрицательные. Опыт был поставлен таким образом, что действие могли оказывать почти исключительно β -лучи, и так как они несут отрицательные заряды, то понятно, что они осаждают положительные коллоиды. Если, например, к коллоидному раствору гидроокиси железа прибавить раствора соли (уксуснокислого натрия) настолько, чтобы не произошло никакого изменения, то, действуя затем на этот раствор лучами радия, можно получить муть, тогда как „не освещаемая“ контрольная проба остается неизменной. В случае золя гидроокиси церия необязательна даже предварительная сенсбилизация через прибавление электролита; раствор уже в течение 24 часов при „освещении“ превращается в неподвижный студень, в то время как не подвергавшийся действию лучей не меняется в течение года.

На электроотрицательные коллоиды золота, молибденовой сини (водусодержащий окисел молибдена) и пятиокиси ванадия, которая также имеет склонность к переходу в желатинообразное состояние, как и гидроокись церия, излучение не действует. Хотя альбумин, образующий электроотрицательные коллоидные растворы, и дает хлопья, однако, по всей вероятности, в данном случае дело заключается не в одной простой потере заряда, а в более сложном изменении природы белка¹³⁾.

При определенных условиях лучи радия могут привести также и к образованию облака. Если, например, в закрытый сосуд, содержащий дистиллированную воду, ввести кусочек серы и эманацию радия, то воздушное пространство будет постоянно заполнено облаками. Так как в воде можно обнаружить следы серной кислоты, то объяснением этого явления служит то, что под действием лучей радия образуются молекулы SO_2 и SO_3 , которые служат в качестве конденсационных ядер для водяных паров; совершенно подобным

же образом можно получить „дым“, если, напр., во влажный комнатный воздух впустить пары соляной кислоты. Если в сосуд не вносить серы, то образуется облако гораздо более слабое; вероятно, в данном случае, получающаяся под влиянием эманации окись азота, дает достаточное количество конденсационных ядер, так как если заменить воздух угольной кислотой, то уже нельзя больше наблюдать никакого постоянного облака.

Если пользоваться пересыщенным водяным паром, то конденсация ионов наступает непосредственно без всякой химической реакции. Этот метод применяется для наблюдения за путями лучей радия (см. стр. 87).

В определенной связи с описанными явлениями находится наблюдение, что под влиянием β -лучей может быть повышена скорость кристаллизации переохлажденной серы. Если „осветить“ только часть капельки серы, то в освещенной части образуется гораздо больше кристаллизационных центров, чем в не подвергавшейся действию лучей.

VII. Физиологическое действие.

Уже вскоре после открытия радия было замечено, что это вещество не безопасно; если на некоторое время положить сильный препарат радия на кожу, то получаются язвы, очень напоминающие ожоги. Но в то время, как при действии жара боль тотчас же дает знать об опасности, лучи радия обладают тем коварным свойством, что они не вызывают никакого болезненного ощущения, однако — если препарат сильный — через несколько дней или недель начинается воспалительный процесс. В первое время, пока еще об этой опасности не знали, многие из радиологов получали такие ожоги на пальцах; в некоторых случаях развивалась даже на концах пораженных пальцев сильная атрофия и подобно тому, как это бывает при ожогах рентгеновыми лучами, возникала опасность дальнейшего образования кожного рака.

После того, как было установлено, что лучи радия действуют физиологически, явилась мысль о их медицинском применении; и на самом деле удалось обнаружить, наряду с поражением здоровой кожи, благотворное действие при различных болезнях кожи. Проникающие лучи часто оказывают целительное или по меньшей мере улучшающее и болеутоляющее действие также и при внутренних заболеваниях, как, напр., при раке; способность сопротивления лучам, у нормальной ткани в большинстве случаев в 4—7 раз больше, чем у больной. Хорошие результаты наблюдались, кроме того, при подагре и ревматизме, и в настоящее время имеется тенденция приписывать целительное действие некоторым природным источникам содержащейся в них эманации радия. При впрыскиваниях радиоактивных растворов наблюдалось уменьшение лейкоцитов, что делает возможным применение радия и при лечении лейкокровия.

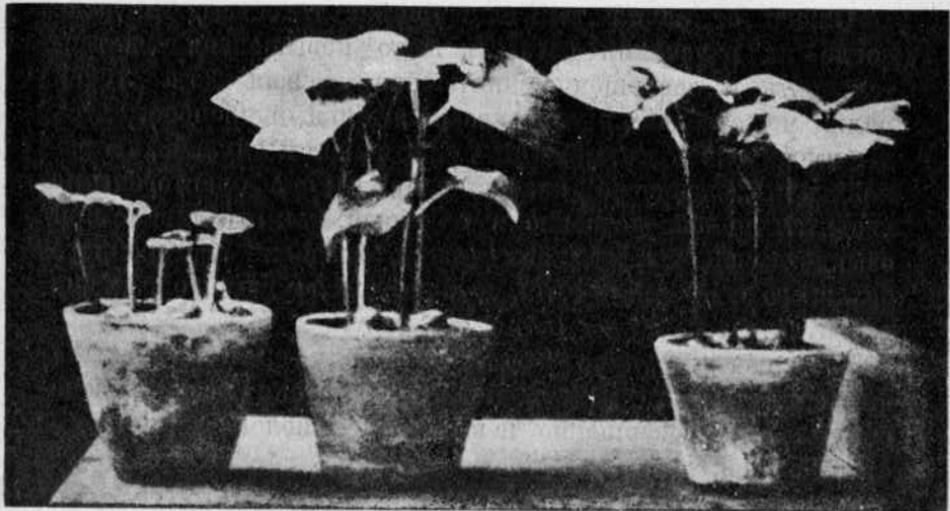
Лежащие в основании этих явлений процессы важны не только для медицинской практики — о чем более подробные сведения можно найти в обширной медицинской радиологической литературе — но представляют также большой теоретический интерес с точки зрения биологической, вследствие чего они неоднократно подвергались изучению. Из результатов этих опытов мы приведем наиболее важные.

Общее правило, называемое иногда даже „основным биологическим законом“¹⁴⁾, и заключающееся в том, что раздражение в больших дозах действует губительным образом на организм, а в малых производит благотворное влияние — напомним о смертельном действии больших количеств многих лекарственных веществ — подтверждается также и при действии лучей радия.

Молодые растения, подвергнутые действию лучей радия в небольших количествах, обнаруживают заметное усиление своего роста, под влиянием же больших доз их развитие замедляется см. фиг. 35¹⁵⁾. При достаточно сильном освещении всхождение семян совершенно прекращается, а бактерии (холеры, тифа, воспаления селезенки, стрептококки) и даже высшие организмы, как, наприм., гусеницы, погибают. Осо-

бенно чувствительны к лучам зародышевые клетки; если „освещению“ подвергнуть яйца или семенные нити, то можно наблюдать различного рода задержки в развитии. Изменения, которые не удается обнаружить на клетках даже при самых больших увеличениях, сказываются в отклонениях от нормального роста при дальнейшем развитии.

Специфическое действие радия на физиологическо-химические соединения *in vitro*, которое неоднократно утвержда-



Фиг. 35.

Действие эманации радия на ростки *Phaseolus multiflorus* (слева действие больших; в середине — незначительных количеств; справа контрольный экземпляр).

лось — еще не доказано. β -лучи напротив обладают в заметной степени гемолитической способностью, что может быть использовано для их дозировки¹⁶⁾.

Опасности ожогов пальцев, которая постоянно грозит работающим с сильными препаратами радия¹⁷⁾, можно избежать вернее всего, если воспользоваться каучуковыми наконечниками для пальцев; эти наконечники надеваются на

те пальцы, которыми берут непосредственно трубку с препаратом. Они вполне задерживают мягкие β -лучи, которыми, главным образом, и обуславливается ожог, и их следует предпочесть более твердому материалу уже по той причине, что во всяком более твердом материале могут образовываться в результате проникновения γ -лучей вторичные β -лучи. Главное же преимущество каучуковых пальцев заключается в том, что они не служат помехой и несколько не мешают работе (переливания и т. п.).

Ожоги от радия тем еще крайне тягостны, что даже после их излечения остается часто повышенная чувствительность и совершенно ничтожная свежая доза лучей радия может снова вызвать воспалительный процесс; здесь мы имеем очень интересный теоретический случай „непрямой“ или „физической анафилаксии“¹⁸⁾; анафилактогены не вводятся непосредственно в организм, как это бывает при обыкновенной анафилаксии (напр., введение постороннего белкового вещества и т. д.), но образуются в самом организме в результате действия лучей.

В заключение нужно указать, что наряду с вышеописанными физиологическими действиями лучей радия неоднократно описывались совершенно невероятные биологические действия лучей.

VIII. Механическое действие.

Механическое действие радия всегда вызывается лишь косвенным путем через посредство электрических или химических сил.

Когда, наприм., было сделано наблюдение, что стеклянные трубки, в которых запаян радий, взрывают, то это было приписано увеличенному давлению в трубках, в результате образования гремучего газа (см. 229 стр.). Объяснять это действием электрических разрядов, к каковому объяснению тоже прибегали, представляется совершенно излишним.

Прекрасным демонстрационным опытом, показывающим, как лучи радия могут вызвать, хотя и косвенно, движение,

служат, так называемые, „радиевые часы“. Они состоят из содержащей радий стеклянной трубки, подвешенной на изоляторе во второй эвакуированной стеклянной трубке и несущей на своем нижнем конце два листочка электроскопа. Так как β -лучи проходят стенки внутренней трубки, то они постоянно выносят отрицательный заряд, в то время как α -лучи с их положительными зарядами удерживаются во внутренней трубке; вследствие этого трубка заряжается все время сильнее и сильнее положительно, и листочки электроскопа все больше и больше расходятся до тех пор, пока они не коснутся стенок наружной трубки, тогда происходит разряд, листочки спадаются и весь процесс с правильностью часового механизма начинается сначала. Заряды, образующиеся на внутренней трубке, могут достигать более 100.000 вольт.

Большой теоретический интерес представляет явление, так называемого, „ионного ветра“¹⁹⁾. Если ионизировать воздух между двумя пластинками конденсатора — лучше всего α -лучами, хотя можно воспользоваться и β - и γ -лучами, — то при приближении электрического поля образуется движение воздуха, направленное из мест более сильной ионизации к местам более слабой.* Это происходит потому, что ионы увлекают вместе с собою окружающие молекулы воздуха. Даже когда ионизация равномерна и то может быть обнаружен „ионный ветер“, так как увлекающее действие у положительных ионов больше, чем у отрицательных. При определенных условиях опыта существует пропорциональность между давлением ветра и ионизирующей силой препарата; такой метод может служить для количественного определения α -излучающих веществ, которые при большой силе, обычными методами, могут быть сравнены лишь приблизительно, вследствие трудности достичь тока насыщения (см. стр. 12).

IX. Расщепление атома.

Это наиболее сильное действие лучей радия, которое не может быть вызвано никаким другим агентом, было

рассмотрено, в виду того значения, какое оно имеет для наших представлений о строении атома, уже в другом месте (стр. 171), так что здесь мы удовольствуемся лишь тем, что еще раз укажем на это теоретически самое важное применение находящегося в нашем распоряжении и заключающегося в лучах радия источника энергии.

ГЛАВА XXVI.

Радиоактивность в геологии и геофизике.

I. Определение возраста минералов.

Скорости радиоактивного распада не зависят от внешних условий, и характеризующие данный процесс распада натуральные константы могут вместе с тем служить для измерения времени; так как количество неизменившегося вещества связано со временем функциональной зависимостью, то естественно, что при помощи ее, если известна первая величина, можно вычислить вторую. Таким образом легко без часов определить промежуток времени в один час по падению активности (измеряемой в некоторых постоянных единицах) препарата ThC на 49% от первоначальной величины. Такие методы определения времени приобрели большое значение в геологии и, при том главным образом, следующие:

а) Определение содержания уранового свинца в урановых минералах.

б) Определение содержания гелия в радиоактивных минералах.

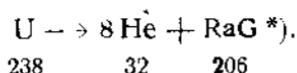
в) Определение интенсивности окраски плеохроических венчиков.

Во всех трех случаях можно без всякого затруднения по найденным значениям вычислить протекшее время.

а) Определение возраста по содержанию уранового свинца.

Как мы уже указывали (ср. таблицу 15, стр. 112) уран в течение своего последовательного превращения в стойкий

конечный продукт, изотоп свинца RaG, теряет 8 α -частиц, соответственно уравнению:



Из этого и из постоянной распада урана ($\lambda = 1,4 \cdot 10^{-10} \text{ a}^{-1}$) следует, что 1 грам U в год дает $1,4 \cdot 10^{-10} \frac{206}{238,2} = 1,21 \cdot 10^{-10}$ гр. RaG; таким образом, возраст минерала, который на каждый грам U содержит $1,21 \cdot 10^{-2}$ гр. RaG, составит 100 миллионов лет. Вообще по этому методу возраст в годах какого-либо минерала получится, если количество RaG, приходящееся на 1 гр. урана, разделить на $1,21 \cdot 10^{-10}$ или умножить на $8,2 \cdot 10^9 = 8200$ миллионов. Однако, при этом вычислении оставлено было без внимания, что количество урана в течение этого долгого времени заметно уменьшилось, и что достаточно несколько меньшего времени, чтобы из (первоначально большего) количества урана могло образоваться данное количество RaG. В первом приближении эта поправка будет введена, если для определения возраста минерала применить формулу:

$$\text{Возраст} = \frac{\text{RaG}}{U + 0,85 \text{ RaG}} \times 8200 \text{ миллионов лет,}$$

где RaG означает содержание уранового свинца, U — содержание урана в данном минерале **). Так, напр., из отношения RaG : $U = 0,093$ для руды из Морогоро в германской восточной Африке получается возраст минерала в 700 миллионов лет, а для норвежского брөггерита, в котором отно-

*) Строго говоря $U \rightarrow 8 \text{He} + 0,97 \text{ RaG} + 0,03 \text{ AcD}$, так как только 97% атомов урана распадается в направлении радия и приводит к RaG, 3% же отвечают в ряд актиния и дают конечный продукт AcD. Но это обстоятельство не имеет значения, тем более, что атомный вес AcD по всей вероятности тот же самый, что и у RaG.

**) Точная формула для искомого возраста t выражается так:

$$\frac{\text{RaG}}{U} = 0,87 \left(\lambda t + \frac{1}{2} \lambda^2 t^2 + \dots \right).$$

шение $RaG : U = 0,127$ — в 950 миллионов лет¹⁾). В то время, как руда из Морогоро не содержит обыкновенного свинца (обычного свинца), большинство урановых руд в течение геологических превращений более или менее загрязнились обыкновенным свинцом. Чтобы при анализе минерала элиминировать это содержание свинца и как бы отделить его от содержания RaG , необходимо произвести определение атомного веса данной смеси изотопов свинца ($RaG + Pb$), откуда уже можно получить как содержание Pb , так и содержание RaG в минерале. Так, напр., содержание RaG в смеси изотопов свинца, полученной из уранинита из северной Каролины, на основании определенного атомного веса смеси в 206,4, равно 70% общего числа атомов смешанного элемента^{*)}.

Устойчивый конечный продукт тория есть также изотоп свинца, и поэтому в случае, если минерал содержит и торий, необходимо принять во внимание при определении возраста равным образом и содержание ториевого свинца; однако, число практически не содержащих тория минералов урана довольно значительно.

Из минералов, возраст которых определялся по описанному методу, одним из самых молодых (320 миллионов лет) оказался уранинит, встречающийся в формации карбона. Это число дает вместе с тем и возраст самого карбона, если мы только сделаем весьма вероятное допущение, что данный уранинит первичного происхождения, т. е., что он не образовался вторично, в более позднее время. Самым старейшим минералом оказался найденный в Мозамбике циркон — его возраст 1500 миллионов лет.

Допуская (ср. стр. 214;), что образующий конечный продукт ряда тория изотоп свинца (ThD) совершенно устойчив, можно естественно, с такой же точностью, как и в случае урановых минералов, определять возраст ториевых минералов по содержанию в них свинца, причем в данном случае должна

*) $206,4 = 0,7 \times 206,05 + 0,3 \times 207,18$, где 206,05 — ат. вес RaG , 207,18 — ат. вес обыкновенного свинца.

быть введена простая поправка на примесь уранового свинца (RaG). При этом оказывается, что вычисленный по этому способу возраст многих ториевых минералов настолько мал (в некоторых случаях едва достигает 10 миллионов лет), что необходимо допустить, что они встречаются во вторичных месторождениях, и что заключение на основании их возраста о возрасте их материнской породы недопустимо. Можно установить, как эмпирическое правило, что только в том случае, когда отношение Th:U не превышает 3, минерал первичного происхождения и описанный метод для вычисления возраста геологических пород применим.

б) Определение возраста по содержанию гелия.

Атом урана, как отмечено выше, претерпевает 8 α -превращений, прежде чем он перейдет в RaG. Подавляющая часть этих α -частиц задерживается внутри минерала и остается в нем в виде окклюдированного газа гелия, который выделяется при плавлении или нагревании измельченной в порошок пробы руды и затем может быть уловлен и измерен. В одну секунду 1 грамм урана вместе со своими продуктами распада испускает $9,7 \times 10^4$ α -частиц, что отвечает ежегодной продукции гелия в $11,0 \times 10^{-8}$ куб. см.

Искомый возраст поэтому = $\frac{\text{He (в куб. см.)}}{\text{U (в гр.)}} \times 9$ миллионов лет.

Поэтому методу получаются значения, лежащие между 8×10^6 лет (руды периода олигоцена) и 700×10^6 лет (руды архаического периода). Однако, на эти числа следует смотреть лишь, как на нижнюю границу возраста данного минерала, так как улетучивание некоторой части образующегося гелия вполне возможно.

в) Определение возраста по интенсивности окраски плеохроических венчиков.

α -лучи окрашивают стекло, кварц, слюду и подобные им материалы (см. стр. 228), причем степень окраски зависит

от числа α -частиц, достигающих стекла. Сильный препарат радия производит заметное окрашивание уже в течение нескольких часов, но то же самое действие может произвести и в миллион раз более слабый препарат в миллион раз большее время. Мы таким образом можем эмпирически построить шкалу окрашиваний, вызываемых различными количествами радия в слюде в течение одного дня, и с помощью этой шкалы определять то время, в продолжение которого на слюду необходимо действовать активным веществом определенной силы, чтобы вызвать данную окраску.

Такие окрашивания встречаются в действительности, в минеральном царстве, напр., окрашенные α -лучами сорта турмалина и слюды. Из точечных радиоактивных включений таких минералов исходят радиально лучи и вызывают в пределах дальности их пробега шаровидную окраску, которая в тонком шлифе представляется в виде круга и в поляризованном свете обнаруживает свойство „плеохроизма“, откуда и название „плеохроические венчики“. Фиг. 36 изображает в сильном увеличении различные темно окрашенные кольца, которые образованы заключенными в слюде частицами урана, благодаря его собственному α -излучению и излучению его продуктов распада. Тогда как α -излучение урана, вследствие малой дальности пробега, вызывает окрашивание лишь в пределах 0,013 мм. в окружности точечного включения ²⁾, окрашивающее действие проникающего α -излучения RaC простирается до 0,033 мм.



Фиг. 36.

Плеохроический венчик.

То обстоятельство, что эти слюды подвергались действию радиоактивного излучения в продолжение чрезвычайно дол-

того времени, дает возможность обнаружить действие еще 10^{-17} гр. радия, т. е. в сто тысяч раз меньшее количество, чем это можно определить электрическим способом. Для определения возраста естественно необходимо знать, кроме интенсивности окраски также еще и количество окрашивающих радиоактивных включений; они могут быть получены путем микроскопического исследования. По этому способу возраст слюды, найденной в девонской формации, исчисляется в 400 миллионов лет. По методу уранового свинца возраст этой формации определен в хорошем согласии с геологией—в 360 миллионов лет.

При всех радиоактивных методах определения возраста имеется в виду неизменяемость скорости распада урана, сомневаться в чем в настоящее время у нас нет никаких оснований. Из всех трех описанных методов определения возраста предпочтительнее всего определение по содержанию в минерале твердого конечного продукта, и, именно, по содержанию уранового свинца в лишенных тория рудах.

II. Распространение радиоактивных веществ.

Незначительные количества тория, урана и их продуктов распада найдены в горных породах, различных водах, атмосфере и на некоторых небесных телах; для установления присутствия тория или урана служит большей частью доказательство постоянного содержания легко обнаруживаемой эманации тория и радия.

Среднее содержание урана в 1 грамме горных пород земной коры составляют 6×10^{-6} гр., а радия 2×10^{-12} гр.; последнее значение—а соответственно и вычисление отсюда значения для урана—колеблется, точнее говоря, между $0,5 \times 10^{-12}$ гр. (ультраосновные породы) и $3,1 \times 10^{-12}$ гр. (кислые породы)²⁾. Содержание тория несколько превышает содержание урана ($1,6 \times 10^{-5}$ гр.).

Количество энергии, ежегодно развиваемой вблизи земной поверхности в результате радиоактивных процессов на кв. см. почвы, составляет в среднем 1000 эргов. Оно быстро

падает в направлении более глубоких слоев; среднее значение составляет около 10 эргов ⁴).

Содержание радия в морской воде почти в тысячу раз меньше, чем в земной коре, и колеблется между $0,25 \times 10^{-15}$ и 26×10^{-15} гр. на куб. сантиметр.

Значительно бóльшую активность обнаруживают некоторые называемые „радиоактивными“ источники и термы ⁵). Их более сильная активность обусловлена эманацией радия, которую они увлекают, проходя через хорошо эманлирующие радий-содержащие породы, и в силу этого не постоянна. Одна из наиболее активных вод, рудничная вода Иохимстала, содержит на куб. см. 7×10^{-10} кюри или 2050 единиц Махе. Активность различных источников видна из таблицы 30 (стр. 204).

Так как в почве всегда содержится радий, то вместе с почвенным воздухом в наружную атмосферу непрерывно диффундирует эманация. Вследствие распада она вместе со своими потомками исчезает все больше и больше, по мере того, как мы дальше удаляемся от поверхности. В то время как содержание эманации в выходящем почвенном воздухе в среднем составляет $3,6 \times 10^{-14}$ кюри/куб. см., наиболее высокое содержание эманации в атмосферном воздухе найдено равным $\frac{1}{100}$ от указанной величины, т. е., таким образом, почти 1,3 атома на куб. см. Отсюда можно вычислить количество радия, которое питает атмосферу данным количеством эманации: оно оказывается равным 1000 клгр. Над сушей в секунду образуется в атмосферном воздухе на куб. см. около 10 пар ионов; число несколько варьирует в зависимости от материала электроскопа. Над Тихим и Атлантическим океанами найдено в секунду 3,8 пары ионов, над озером Онтарио при применении ледяного электроскопа — 2,6 пары ионов ⁶). 1 кв. см. морской поверхности отдает в секунду $1,04 \cdot 10^{-17}$ кюри эманации, тогда как с поверхности земли выделяется от 2 до $3 \cdot 10^{-17}$ кюри.

Зависимость содержания эманации в воздухе от метеорологических факторов (давление воздуха, температура и т. д.) не вполне еще выяснена.

Осадки также обнаруживают незначительную активность; дождь и снег увлекают вместе с собой не газообразную эманацию, а ее твердые, носящиеся в воздухе, продукты распада и благодаря этому становятся активными.

За нахождение радиоактивных элементов на небесных телах говорит присутствие радия в метеоритах, при чем порядок величины отвечает содержанию в ультраосновных породах. Среднее содержание радия в метеорных камнях составляет только $\frac{1}{4}$ содержания радия в граните ¹⁾. Надежного спектроскопического доказательства присутствия радия на других небесных телах еще не имеется.

III. Термические следствия распространения радиоактивных веществ.

Как мы видели, радиоактивные тела распространены во всей земной коре; так как сопровождающее распад этих веществ образование тепла весьма значительно, оно должно играть в тепловом режиме земли большую роль.

Земля через излучение постоянно отдает тепло, и так как нам известно увеличение температуры земной коры с глубиной, мы можем вычислить количество излучаемой теплоты, и отсюда количество урана, которое нужно, чтобы теплотой его распада покрыть все излучение земли. Оно не велико и составляет $2,4 \times 10^{20}$ гр. урана или 9×10^{20} гр. тория, таким образом меньше того количества урана, которое мы получаем, если, исходя из содержания урана в известных нам породах, примем, что это содержание относится ко всей массе всего земного шара. Из этой невязки следует, в полном согласии с геологическими представлениями, что содержание урана в земной коре с глубиной должно уменьшаться. Во всяком случае количество урана, а поэтому и радия, на всем земном шаре не больше, чем его содержится в слое в 16 километров толщиной, при том же самом среднем содержании радия, как и на земной поверхности, и если только часть теплоты земли радиоактивного происхождения, то она отвечает небольшой толщине.

Испускаемое солнцем тепло не может быть объяснено исключительно образованием тепла, вызываемым атомным распадом, если только мы не допустим возможности более быстрого распада на солнце урана и тория или наличия неизвестных на земле процессов распада. Если бы солнце состояло исключительно из урана, то теплотой его распада была бы покрыта лишь половина испускаемого им количества тепла.

IV. Электрические следствия распространения радиоактивных веществ.

Для электрического состояния атмосферы, которое находится в связи с другими метеорологическими факторами, имеет значение сила ионизации, т. е. число образующихся в единице объема и в единицу времени пар ионов. Это число ионизации вычисляется из проводимости воздуха, скорости, с какой движутся в электрическом поле ионы воздуха и скорости воссоединения, рекомбинации ионов. Для нормальной силы ионизации атмосферы найдено 1,5 иона на куб. см. в секунду; чтобы получить это ионное число необходимо 6×10^{-7} кюри/куб. см. эманации и продуктов ее распада *). Мы уже видели, что такое количество эманации в атмосфере всегда присутствует, а отсюда следует, что ионизация атмосферы существенно зависит от излучения находящихся в ней активных веществ *). Другие факторы влияют на ионизацию лишь в незначительной мере, как, например, найденное при подъеме на воздушных шарах в очень высоких слоях атмосферы, сильно проникающее излучение *), интенсивность которого падает по мере опускания в нижние слои. Причину его возникновения приписывают активности космической пыли.

*) В измерительном сосуде емкостью в 40 литров, наполненном угольной кислотой, зарегистрирована меньше чем 1 α -частица в час.

V. Оптические следствия атомного распада на солнце.

Северное сияние.

Тот факт, что северное сияние связано по времени с солнечными пятнами, и что оно наблюдается около магнитных полюсов земли, северного и южного, означает, что мы имеем дело с исходящими из солнца, электрически заряженными корпускулярными лучами, которые, достигая близости земли, отклоняются магнитными силовыми линиями.¹⁰⁾ Поэтому вероятно, что северное сияние радиоактивного происхождения; хотя и были обнаружены группы лучей различной скорости, все же вопрос о том, есть ли это очень большой скорости электроны или положительные лучи атомов с умеренной скоростью, остается открытым.

ГЛАВА XXVII.

Историческое развитие учения о радиоактивности.

24 февраля 1896 года Анри Беккерель сообщил Парижской Академии Наук, что соединения урана испускают лучи, которые через непроницаемые для света тела могут действовать на фотографическую пластинку. Это случайное наблюдение стало исходным пунктом развития новой научной дисциплины—учения о радиоактивности *). После открытия Беккереля в поисках тех же свойств, какие оказались у урана, были испытаны многочисленные вещества и при этом Г. С. Шмидтом и М-ше Кюри была обнаружена радиоактивность тория (1898). Систематическое исследование разнообразных уран содержащих веществ привело еще в том же году П. Кюри и его супругу к открытию в смоляной руде двух особенно сильно излучающих веществ, из которых одно приближалось по свойствам к висмуту и было названо „полонием“, тогда как второе вещество, „радий“, следовало реакциям бариевых солей. Дальнейшее изучение показало, что сконцентрировать полоний очень трудно (Марквальд), но что в радий мы имеем вещество, которое достаточно долговечно, чтобы его можно было получить в весомах количествах, и в то же самое время достаточно короткой

*) Беккерель исследовал всевозможные флуоресцирующие вещества, так как в то время предполагалась связь между флуоресценцией и рентгеновским излучением, и впервые обнаружил у флуоресцирующих солей урана новое излучение. Позднее он убедился, что все соли урана испускают лучи, и флуоресценция таким образом с новым явлением ничего общего не имела. В этом открытии — как это часто бывает в истории науки — сыграл роль „благодетельный счастливый случай“ (Лодж).

продолжительности жизни, чтобы в резкой мере обнаружить типические свойства радиоэлемента, к чему присоединяются еще многие другие благоприятные для исследования свойства, как образование газообразного, не слишком короткоживущего продукта распада и т. д. Из других наиболее важных радиоактивных веществ прежде всего был открыт Дебьерном и Гизелем актиний (1899), затем К. А. Гофманом—радиосвинец, Ганом—радиоторий (1905) и мезоторий (1907). В 1907 году Болтвуд и почти одновременно Ган и Марквальд нашли в урановых минералах ионий, и в том же году Кемпбелл мог установить радиоактивность калия и рубидия. Открыть следующий долгоживущий радиоэлемент, протактиний, посчастливилось в 1918 году Гану и Мейтнер, а также Содди и Крэнстону. Образование радиетепла наблюдалось и раньше, впервые же оно было измерено Кюри и Лабордом в 1903 году; особенно точное определение этой важной величины было произведено позднее исследованиями Швейдлера, Ст. Мейера, Гесса и Резерфорда.

Благодаря открытию радиоактивных веществ, открылась новая могущественная область явлений, но вначале неоставало удовлетворительной связи между многочисленными отдельными необъясненными наблюдениями и явлениями в других областях физико-химической науки. Впервые они получили освещение в 1903 году, благодаря теории распада, выдвинутой Резерфордом и Содди. Эта теория говорит, что испускаемое радиоактивное излучение есть следствие атомного превращения, и что по роду и интенсивности излучения можно определить количественно процесс превращения. Часто возникавшая на протяжении истории химии мысль об эволюции неорганической материи, благодаря этой теории и ее бесчисленным подтверждениям, заняла прочную позицию в нашем знании, и теория распада Резерфорда и Содди вместе с тем стала одной из самых значительных теорий в науке.

После того, как эта теория утвердилась, работа пошла по двум главным направлениям. Сначала была исследована

природа радиоактивных лучей, а затем были выяснены следствия радиоактивных превращений и изучены различные продукты превращений и свойства радиоэлементов.

Уже в 1899 году Гизелем, Ст. Мейером и Швейдлером, и Беккерелем было установлено отклонение части радиоактивных лучей в магнитном поле. Полное выяснение природы α -, β - и γ -лучей удалось несколькими годами позже Резерфорду и его сотрудникам. Для понимания сущности α -лучей доказательство, данное Рамзаем и Содди, а также Резерфордом и Ройдсом, что в данном случае мы имеем дело с заряженными атомами гелия, имело большое значение; то, что они имеют определенную дальность пробега, было замечено уже П. Кюри; изучению их абсорбции посвящены работы Брэгга, Гейгера, Марсдена, Климана, Рауша фон-Траубенберга и др. Наблюдение Эльстера и Гейтеля, и Крукса, что α -лучи способны вызывать сцинтилляции, имело большое практическое значение; Регенер, Резерфорд и Гейгер могли, благодаря этому, определить число α -частиц, испускаемых одним граммом радия, а также и заряд α -частицы.

Более близкое выяснение свойств β -лучей в первую очередь было произведено в Институтах Ленаром (Гейдельберг), Д. Д. Томсоном (Кембридж), Резерфордом (Манчестер), Ганом, Мейтнер, ф.-Байером и Гейгером (Берлин), Даничем (Париж) и Ковариком (Нью-Хэвен); свойства γ -лучей исследовались Резерфордом с его сотрудниками, Брэггом (Лидс) и в Венском Радиевом Институте (К. В. Ф. Кольраушем, Гессом, Лаусоном и др.). При изучении всех трех сортов лучей оказал большую пользу метод С. Т. Р. Вильсона, с помощью которого, благодаря конденсации водяных паров, можно проследить пути частиц.

Явление радиоактивной отдачи, открытое Ганом, а также Руссом и Маковером и, в особенности, позднее изученное Вертенштейном, дало возможность изолировать многие короткоживущие элементы. Для доказательства существования и определения продолжительности жизни эле-

ментов с очень короткой, а равно и с очень большой продолжительностью жизни имело очень большое значение найденное в 1911 году Гейгером и Нуталлом соотношение между дальностью пробега и продолжительностью жизни.

В этом же году появилась теория чрезвычайно важного значения, именно, теория атомного ядра. К ее формулировке Резерфорда привели наблюдения Гейгера над рассеянием α -лучей при прохождении их через материю; она давала удовлетворительное объяснение этому явлению, однако, объяснение стойкости и свойств такого образования на основании классических представлений теоретической физики не представлялось возможным. Это удалось сделать два года спустя Бору с помощью теории квант. Он постулировал неприменимость классической электродинамики в случае атомных процессов; согласно Бору, устойчивость атома обуславливается тем, что для движущихся вокруг ядра электронов существуют определенные, измеряемые квантами, различные состояния движения, с каковыми находятся в самой тесной связи испускание и поглощение света. Таким образом обоснованная квантовая теория атома впервые давала простое и количественное толкование спектрам поглощения и испускания — сюда относятся работы Зоммерфельда и его школы, Крамерса и др., — а также обширной области явлений столкновения между электронами и атомами, выясненными работами Франка и Гертца. Установление Бором (1918) принципа соответствия означало дальнейший шаг вперед большого значения. С этих пор стало, например, возможным понимание закономерностей, а также и исключений (редкие земли) в периодической системе элементов.

Точно также и развитие учения о рентгеновских лучах тесно связано с новым учением об атоме. За знаменитым открытием Лауэ (1911) последовали вскоре работы В. Л. и Х. Л. Брэггов по отражению рентгеновых лучей в кристаллах, а равно исследования Мозеля о характеристических рентгеновских спектрах химических элементов; на этих работах было основано фундаментальное понятие о по-

рядковом числе (1913). Но и в узком смысле слова радиоактивность во многом обязана развитию рентгеноскопии. Так, впервые вошло в обиход измерение длин волн γ -лучей, что было выполнено Эллисом и Мейтнер, после того, как благодаря рентгеноскопии сделалось возможным локализовать отдельные группы электронов оболочки атома и вычисление работы освобождения электронов; только для слабых γ -лучей Резерфорду и Андраде еще раньше посчастливилось определить частоту колебаний.

Между тем и радиохимия сделала значительные успехи; исследования Марквальда, Китмана, Болтвуда, Ауэра ф.-Вельсбаха, Мак-Коя, Стрёмхольма, Сведберга и других привели к воззрению, которое было выдвинуто уже в 1910 году Содди, а именно, что существуют такие радиоактивные вещества, впоследствии названные „изотопами“, которые, несмотря на разницу их атомных весов и радиоактивных свойств, обнаруживают одни и те же химические, электрохимические и спектроскопические свойства. На основании этого воззрения и, кроме того, базируясь на следствиях распада в рядах превращений, к тому времени выяснившихся, Рёссель и почти одновременно в совершенно законченной форме Фаянс и Содди (1913) высказали законы радиоактивного смещения. Эти законы привели между прочим к ответу на вопрос о конечных продуктах в рядах распада, и сделанные выводы были вполне подтверждены определениями атомного веса Ричардсом, Хенигшмидтом и др. Становилось все яснее, что эти понятия имеют большую важность не только для радиохимии, но также и для общей химии; в понятие химического элемента должно было быть внесено изменение и его пришлось ограничить химической неразделимостью, а относительно обыкновенных элементов пришлось считаться с возможностью, что они состоят больше, чем из одного рода атомов.

Что изотопия на самом деле есть общее свойство материи, было доказано несколькими годами позднее Астоном с помощью своего масс-спектрографа, который он успешно конструировал, положив в основание способ Дж. Дж. Том-

сона анализа с помощью каналовых лучей. Исследования Астона (1919) привели к тому, что для атомных весов были приняты целые числа и устранили аргумент против теории Прюта; эти исследования знаменуют большой прогресс в наших представлениях о строении материи. Вновь выступившая проблема разделения в естественном виде находящихся элементов на их изотопы до сих пор смогла быть, и то до известной степени, разрешена лишь в отдельных случаях. Последние годы принесли с собою, кроме того, искусственное разложение элемента, впервые удавшееся Резерфорду в 1919 году в случае азота. Выполненные им вместе с Чадвиком, Дарвином и другими сотрудниками исследования проливают свет на строение атомного ядра.

Успехи применения радиоактивности в различных областях также весьма значительны. Химическое действие лучей изучалось Линдом, Дьюэном, Вендтом, Кайланом, Пржибрамом и др. Радиоактивными индикаторами очень часто пользовались, как вспомогательным средством при химических и физических исследованиях. Что касается геологических вопросов, то в первую очередь следует назвать работы Болтвуда, Стрэтта, Жоли, Гольмса и Эллен Гледич; в области атмосферного электричества должны быть названы имена Эльстера и Гейтеля, ф.-Швейдлера, Махе, Ива, Мак-Леннана, С.Т.Р. Вильсона, Кольхёрстера, Гокеля и Гесса, который нашел в высоких слоях атмосферы особое излучение, названное им „проникающим излучением“.

УКАЗАТЕЛЬ ЛИТЕРАТУРЫ.

К главе второй.

- 1) J. E. Shrader, *Phys. Rev.* **6**, 292 (1915). R. W. Lawson and V. F. Hess, *Wien. Ber.* **127**, 104, 461, 535 и 599 (1918).
- 2) H. Geiger, *ZS. f. Phys.* **8**, 54 (1921).
- 3) E. Rutherford и A. B. Wood, *Phil. Mag.* **31**, 379 (1916).
- 4) H. Rausch v. Traubenberg, *ZS. f. Phys.* **2**, 268; **5**, 396 и 404 (1920).
- 5) R. W. Lawson, *Wien. Ber.* **127**, 943 (1918).
- 6) N. Bohr, *Phil. Mag.* **39**, 581 (1915). J. P. Rothensteiner, *Wien. Ber.* **125**, 1234 (1916). W. Makower, *Phil. Mag.* **32**, 222 (1916). A. A. Bumstead, *Phys. Rev.* **8**, 715 (1916). A. Liebert, *Dissert.* Zürich 1920.
- 7) J. L. Glasson, *Phil. Mag.* **43**, 480 (1922).
- 8) A. B. Wood, *Phil. Mag.* **30**, 702 (1915). N. Tungstall и W. Makower, *Phil. Mag.* **29**, 259 (1915). L. Flamm и R. Schumann, *Ann. d. Phys.* **50**, 655 (1916).
- 9) H. N. Mc Coy и E. C. Lennan, *Phys. Rev.* **6**, 184 (1915).
- 10) V. F. Hess и M. Hornyak, *Wien. Ber.* **129**, 661 (1920). H. Fono-vits, там же **128**, 274 (1919). R. A. Millikan, V. H. Gottschalk и M. J. Kelly, *Phys. Rev.* **15**, 157 (1920); *Nat. Acad. Sci. Proc.* **5**, 591 (1919).
- 11) H. Ikeuti, *Phil. Mag.* **32**, 129 (1916). R. R. Sahni, *Phil. Mag.* **33**, 290 (1917). D. L. Webster, *J. Amer. Chem. Soc.* **40**, 375 (1918). W. Bothe, *ZS. f. Phys.* **4**, 300; **5**, 63 (1921).
- 12) J. Chadwick, *Phil. Mag.* **40**, 734 (1920).
- 13) E. Bormann, *Wien. Ber.* **127**, 368 (1918). M. Curie, *J. de Phys.* **1**, 12 (1920). A. Muszkat и L. Wertenstein, *J. de Phys.* **2**, 119 (1921). W. Bothe, *ZS. f. Phys.* **4**, 161 и 300; **5**, 63 (1921).

К главе третьей.

- 1) A. F. Kovarik, *Phys. Rev.* **6**, 419 (1915).
- 2) R. W. Varder, *Phil. Mag.* **29**, 275 (1915).
- 3) N. Bohr, *Phil. Mag.* **30**, 581 (1915). F. Rawlinson, там же 617.
- 4) A. F. Kovarik, *Phys. Rev.* **8**, 574 (1916).

5) A. F. Kovarik, Phys. Rev. 6, 426 (1915). V. F. Hess и R. W. Lawson, Wien. Ber. 125, 1661 (1916).

6) H. Geiger и W. Bothe, ZS. f. Phys. 6, 204 (1921). W. Bothe, ZS. f. Phys. 8, 243 (1922).

К главе четвертой.

1) J. Kunz, Phys. Rev. 6, 413 (1915).

2) A. H. Compton, Phil. Mag. 41, 749 (1921). K. W. Kohlrusch, Wien. Ber. 126, 441, 683, 705 и 887 (1917); Phys. ZS. 19, 345 (1918); Jahrb. f. Radioakt. 15, 64 (1918). M. Blau, Wien. Ber. 127, 1253 (1918). O. Treitel, Diss. Heidelberg 1920. N. Ishino, Phil. Mag. 33, 119 (1917). B. Keetmann, Ann. d. Phys. 52, 709 (1917).

3) A. H. Compton, Phys. Rev. 17, 38 (1921).

4) R. Glocker, Phys. ZS. 19, 66 (1918).

5) V. F. Hess и R. W. Lawson, Wien. Ber. 125, 98 и 285 (1916).

6) J. A. Gray, J. Frankl.-Inst. 190, 633 (1920).

К главам пятой и шестой.

1) H. F. Biggs, Phil. Mag. 31, 430 (1916). L. Simons, Phil. Mag. 41, 120 (1921). H. Prelinger, Wien. Ber. 130, 279 (1921).

2) A. C. Mc Gougan, Phys. Rev. 10, 473 (1917).

3) E. P. Slater, Phil. Mag. 42, 904 (1921).

4) L. W. Mc Keehan, Phys. Rev. 10, 473 (1917).

5) H. P. Walmsley и W. Makower, Phil. Mag. 29, 258 (1915). A. B. Wood и W. Makower, Phil. Mag. 30, 811 (1915).

6) W. Makower, Phil. Mag. 32, 226 (1916). A. Gabler, Wien. Ber. 129, 1 (1920).

7) S. Ratner, Phil. Mag. 36, 397 (1918). S. J. Allen, Phys. Rev. 7, 133 (1916).

8) A. Muszkat, J. de Phys. 2, 93 (1921).

9) R. W. Lawson, Wien. Ber. 127, 1315 (1918); 128, 1131 (1919). E. Rie, там же 130, 283 (1921).

К главе седьмой.

О строении атома см.:

N. Bohr, Abhandlungen über Atombau aus den Jahren 1913 bis 1916. Vieweg, Braunschweig 1921.

N. Bohr, Drei Aufsätze über Spektren und Atombau. Vieweg, Braunschweig 1922.

A. Sommerfeld, Atombau und Spektrallinien, 3. Aufl. Vieweg, Braunschweig 1922 (там же см. литературу о рентгеновских лучах).

M. Born, *Der Aufbau der Materie*, 2. Aufl. Springer, Berlin 1922. Есть русский перевод.

W. Kossel, *Valenzkräfte und Röntgenspektren*. Springer, Berlin 1921.

1) O. Hahn и L. Meitner, *ZS. f. Phys.* **2**, 60 (1920).

2) E. Rutherford, *Phil. Mag.* **34**, 153 (1917). H. Th. Wolff, *Ann. d. Phys.* **52**, 631 (1917). F. Sanford, *Phys. Rev.* **15**, 67 (1920).

3) C. D. Ellis, *Proc. Roy. Soc.* **99**, 261 (1921). L. Meitner, *ZS. f. Phys.* **9**, 131 и 145 (1922).

4) E. Rutherford, *Phil. Mag.* **37**, 537 (1919). E. Rutherford и J. Chadwick, *Phil. Mag.* **42**, 809 (1921); там же, 923. C. G. Darwin, *Phil. Mag.* **41**, 486 (1921).

5) T. Shimizu, *Proc. Roy. Soc.* **99**, 432 (1921). S. Kinoshita, H. Ikeuti и M. A. Akiyama, *Proc. Phys. Math. Soc. Japan* **3**, 121 (1921). D. Bose, *Phys. ZS.* **17**, 338 (1916).

К главам десятой и одиннадцатой.

1) E. Rutherford, *Phil. Mag.* **41**, 570 (1921). A. B. Wood, там же 575.

2) O. Hahn, *Die Naturw.* **8**, 84 (1920); **9**, 236 (1921); *Chem. Ber.* **54**, 1131 (1921); *Z. phys. Chem.* **103**, 461 (1923).

3) H. Geiger, *ZS. f. Phys.* **8**, 45 (1922).

4) L. Meitner, *ZS. f. Phys.* **9**, 144 (1922).

К главе двенадцатой.

1) Th. W. Richards и N. F. Hall, *J. Amer. Chem. Soc.* **39**, 531 (1917). F. Soddy, там же, 1614.

2) Th. W. Richards и Ch. Wadsworth, *J. Amer. Soc.* **38**, 221, 1658 и 2613 (1916). O. Hönlischmid, *ZS. Elektrochem.* **23**, 161 (1917). A. L. Lewis, *J. phys. Chem.* **22**, 631 (1918). R. W. Richards и J. Samoshima, *J. Amer. Chem. Soc.* **42**, 928 (1920).

3) Th. W. Richards и Ch. Wadsworth, *J. Amer. Chem. Soc.* **38**, 221 и 1658 (1916). F. Soddy, *Nature* **107**, 41 (1921).

4) K. Fajans и M. Lemberg, *ZS. anorg. Chem.* **95**, 297 (1916). Th. W. Richards и W. C. Schumb, *J. Amer. Chem. Soc.* **40**, 1403 (1918).

5) G. v. Hevesy и F. Paneth, *Wien. Ber.* **124**, 381 (1915).

6) M. Siegbahn и W. Stenström, *Phys. ZS.* **18**, 547 (1917). W. Duane и T. Shimizu, *Proc. Nat. Acad. Sci.* **5**, 198 (1919). C. D. Cooksey и D. Cooksey, *Phys. Rev.* **16**, 327 (1920).

7) L. Aronberg, *Proc. Nat. Acad. Sci.* **3**, 710 (1917); *Astrophys. J.* **47**, 96 (1918). W. D. Harkins и L. Aronberg, *J. Amer. Chem. Soc.* **42**, 1328 (1920). T. R. Merton, *Proc. Roy. Soc.* **99**, 87 (1921); **100**, 84 (1921).

8) H. Lachs, M. Nadratowski и S. Wertenstein, *Warsch. Ber.* **9**, 652 (1916). Th. W. Richards, *Science* **49**, 1 (1919). M. Lemberg, *ZS. Elektroch.* **26**, 59 (1920).

9) K. Fajans, F. Richter и J. Rauchenberger, *Heidelb. Ber.* 5, 28 (1918). K. Fajans, *ZS. Elektrochem.* 24, 163 (1918). O. Höning-schmid, *ZS. Elektrochem.* 25, 91 (1919). R. W. Lawson, *Wien. Ber.* 26, 721 (1917). St. Meyer, *Wien. Ber.* 127, 1283 (1918).

10) O. Höning-schmid, *ZS. Elektrochem.* 22, 18 (1916).

К главам четырнадцатой и пятнадцатой.

1) St. Loria, *Krak. Anz.* 1917, 260.

2) H. Lachs, *Kolloid-ZS.* 21, 165 (1917). M. Wertenstein, *Warsch. Ber.* 16, 771 (1917). G. v. Hevesy, *Wien. Ber.* 127, 1787 (1918). H. Lachs и H. Herszfeld, *J. de Phys.* 2, 319 (1921). J. A. Cranston и R. A. Burnett, *J. Chem. Soc.* 119, 2036 (1921). H. Lachs и Wertenstein. *Phys. ZS.* 23, 318 (1922).

3) Применение радиоэлементов в качестве индикаторов более подробно трактуется в статье.

F. Paneth, *ZS. f. angewandte Chemie* 35, 549 (1922).

4) G. v. Hevesy и L. Zechmeister, *Chem. Ber.* 53, 410 (1920); *ZS. Elektrochem.* 26, 151 (1920).

5) F. Paneth, *ZS. Elektrochem.* 28, 113 (1922). F. Paneth и W. Vorwerk, *Z. f. phys. Chem.* 101, 445 и 480 (1922).

6) F. Paneth, *Chem. Ber.* 51, 1704 (1918). F. Paneth и E. Winter-nitz, там же, 1728. F. Paneth и O. Nörring, *Chem. Ber.* 53, 1693 (1920).

7) F. Soddy, *J. Chem. Soc.* 115, 1, 18 (1919). F. Soddy и J. A. Cranston, *Proc. Roy. Soc. A.* 94, 384 (1918).

К главе шестнадцатой.

1) A. Dauvillier, *C. R.* 174, 1347 (1922). G. Urbain, там же, 1349.

2) N. Bohr, *Drei Aufsätze über Spektren und Atombau* (Vieweg, Braun-schweig 1922), 147.

3) Assar Hadding, *ZS. anorg. Chem.* 122, 195 (1922).

К главам семнадцатой, восемнадцатой и девятнадцатой.

1) Ср. гл. 12, прим. 7.

2) E. S. Imes, *Astrophys. J.* 50, 251 (1919). F. W. Loomis, *Astrophys. J.* 52, 248 (1920). M. Kratzer, *ZS. Phys.* 3, 6 (1920).

3) G. Hoffmann, *Ann. d. Phys.* 62, 738 (1920); *ZS. f. Phys.* 7, 254 (1921).

4) J. N. Brönsted и G. v. Hevesy, *ZS. anorg. Chem.* 124, 22 (1922); Там же указана более старая литература.

5) F. W. Aston, *Phil. Mag.* 38, 709 (1919); 39, 454 и 611 (1920); 42, 436 (1921). G. P. Thompson, *Phil. Mag.* 42, 857 (1921). См. также упомянутую в предисловии книгу Астона.

6) O. Hönigschmid и L. Birkenbach, Chem.-Ztg. **46**, 884 (1922).
 7) A. J. Dempster, Phys. Rev. **11**, 316 (1918). Science, 10. Dez. 1920. Proc. Nat. Ac. Sci. **7**, 45 (1921). Phys. Rev. **17**, 427 (1921); **18**, 415 (1921); **19**, 271 (1922).

8) F. A. Lindemann, Phil. Mag. **37**, 523 (1919); **38**, 173 (1919). S. Chapman, там же, 182. W. D. Harkins, Science 19. März. 1920. Nature 22. April. 1920. J. Amer. Chem. Soc. **42**, 1328 (1920). F. Skaupy, ZS. f. Phys. **3**, 408 (1920). F. A. Lindemann, Proc. Roy. Soc. **99**, 104 (1921). J. J. Thomson, там же 98.

9) J. Jolly и J. H. Poole, Phil. Mag. **39**, 372 (1920). F. A. Lindemann и F. W. Aston, Phil. Mag. **37**, 523 (1919). J. H. Poole, Phil. Mag. **41**, 818 (1921).

10) J. N. Brönsted и G. v. Hevesy, ZS. f. Phys. Chem. **99**, 189 (1921); Nature **107**, 619 (1921).

11) J. N. Brönsted и G. v. Hevesy, Nature **107**, 619 (1921); см. W. D. Harkins, Nature **105**, 230 (1920).

К главам двадцатой, двадцать первой и двадцать второй.

1) F. Paneth, ZS. phys. Chem. **91**, 171 (1916); **92**, 677 (1917); **93**, 86 (1918). Die Naturw. **6**, 946 (1918); **8**, 94 и 839 (1920). K. Fajans, Jahrb. Radioakt. **14**, 314 (1917); **15**, 101 (1918). Die Naturw. **6**, 751 (1918). R. Wegscheider, ZS. phys. Chem. **92**, 741 (1918); **93**, 380 (1919). H. Remy, Die Naturw. **6**, 525 (1918). O. Stern и др., ZS. f. Elektrochemie **24**, 377 (1918). F. W. Aston, Journ. chem. Soc. **119**, 677 (1921).

2) Bericht der Deutschen Atomgewichtskommission, B. **54** A. 181 (1921). R. J. Meyer, Die Naturw. **10**, 911 (1922). O. Hahn, там же 934.

3) E. Rutherford, Phil. Mag. **37**, 538 (1919); Proc. Roy. Soc. **97**, 374 (1920). E. Rutherford и J. Chadwick, Phil. Mag. **42**, 809 (1921); **44**, 418 (1922). J. Chadwick, Phil. Mag. **42**, 923 (1921). C. G. Darwin, Phil. Mag. **91**, 486 (1921).

4) W. D. Harkins, J. Amer. Chem. Soc. **38**, 186 (1916); **42**, 1328 и 1956 (1920); **43**, 1038 (1921). N. F. Hall, J. Amer. Chem. Soc. **39**, 17 и 1618 (1917). A. van den Broek, Phys. ZS. **21**, 337 (1920). E. Kohlweiler, там же 311. J. W. O. Hackh, Phil. Mag. **39**, 155 (1920). J. Masson, Phil. Mag. **41**, 281 (1921). M. C. Neuburger, Nature **108**, 180 (1921).

5) L. Meitner, ZS. f. Phys. **4**, 146 (1921). Die Naturw. **9**, 423 (1921).

6) W. Kossel, Phys. ZS. **20**, 275 (1919).

7) E. Rutherford, Phil. Mag. **27**, 488 (1914). W. D. Harkins и E. D. Wilson, ZS. anorg. Chem. **95**, 1 (1916). E. Rutherford, Phil. Mag. **37**, 537 (1919); Proc. Roy. Soc. **97**, 374 (1920). W. D. Harkins, Phys. Rev. **15**, 73 (1920). W. Lenz, Die Naturw. **8**, 181 (1920); ZS. f. Electrochem. **26**, 277 (1920). E. Gehrcke, Phys. ZS. **22**, 151 (1921). Brösslera, Rev. Chim. **1**, 42 (1921).

К главе двадцать третьей.

Методы газового анализа, могущие найти применение для очистки эманации, описаны у M. W. Travers. *Experimentelle Untersuchung von Gasen* (übersetzt von T. Estreicher, Vieweg, Braunschweig 1905).

1) F. Soddy, *Phil. Mag.* **38**, 483 (1919). E. Gleditsch, *Archiv Math. og Naturw.* **36**, 18 (1919). J. H. L. Johnstone и B. B. Boltwood, *Phil. Mag.* **40**, 50 (1920). S. C. Lind и L. D. Roberts, *Chem. News* **123**, 7 (1921).

2) F. Paneth и C. Ulrich, *Handbuch der Mineralchemie* (herausgegeben von C. Doelter, Steinkopf, Dresden) III/2 306 (1922). C. Ulrich, *ZS. f. angewandte Chemie* **36**, 41, 49 и 54 (1923).

3) J. F. Underwood и C. F. Wittemore, *J. Amer. Chem. Soc.* **40**, 465 (1918). J. L. Niermann, *J. Phys. Chem.* **24**, 192 (1920).

4) См. доклад C. L. Parson's, R. B. Moore, S. C. Lind и O. C. Schaefer (*Bulletin 104, Department of the Interior, Bureau of Mines, Washington 1915*). Далее: H. Schlundt, *J. phys. Chem.* **20**, 485 (1916). S. C. Lind и R. B. Moore, *Chem. News* **123**, 7 (1921). R. Cable и H. Schlundt, *Chem. Metallurg. Ing.* **18**, 1 (1918). F. Paneth и C. Ulrich, *Handbuch der Mineralchemie III/2 306* (1922).

5) K. H. Fussler, *Phys. Rev.* **9**, 142 (1917).

К главе двадцать четвертой.

Радиоактивные постоянные, если не указано более новых источников, взяты по большей части из сводки St. Meyer в *Jahrb. d. Radioakt.* **17**, 80 (1921).

1) J. H. L. Johnstone и B. B. Boltwood, *Phil. Mag.* **40**, 50 (1920).

2) O. Hahn, *Ber. d. D. Chem. Ges.* **54**, 1131 и 146 (1921). О предположенном A. Pissard и E. Stahel, *Phys. ZS.* **23**, 1 (1922), урне V см. O. Hahn, там же, 146.

3) J. L. Niermann, *J. Phys. Chem.* **24**, 192 (1920).

4) V. F. Hess, On a simple method to avoid burn of the skin in the radium treatment of deeper seated cancers. U. S. Radium Corporation Publ. (New York 1921).

5) W. Bothe и G. Lechner, *ZS. f. Phys.* **5**, 375 (1921).

6) S. C. Lind, R. B. Moore и R. E. Nyswander, *Chem. News.* **123**, 7 (1921).

7) E. Rona, *ZS. phys. Chem.* **92**, 213 (1917).

8) W. Mohr, *Ann. d. Phys.* **51**, 546 (1916).

9) A. Muszkat и H. Heszfinkel, *J. de Phys.* **2**, 15 (1921).

10) F. Paneth, *Berichte der D. Chem. Ges.* **51**, 1704 (1918); F. Paneth и A. Johannsen, там же **55**, 2622 (1922).

11) O. Hahn и L. Meitner, *Phys. ZS.* **20**, 529 (1919); *ZS. f. Phys.* **8**, 202 (1922). St. Meyer, *Wien. Ber.* **129**, 483 (1920). G. Kirsch, там же

309. E. Ropa, Ber. d. D. Chem. Ges. 55, 294 (1922). St. Meyer и V. Hess, Wien. Ber. 128, 909 (1919).

12) A. Piccard, Arch. sc. phys. et nat. 44, 466 (1917). E. Cl. Adams. J. Amer. Chem. Soc. 42, 2205 (1920).

13) O. Hahn и L. Meitner, Phys. ZS. 19, 208 (1918); Ber. d. D. Chem. Ges. 52, 1812 (1919); 54, 69 (1921). F. Soddy и J. A. Cranston, Proc. Roy. Soc. 94, 384 (1918).

14) St. Meyer и F. Paneth, Wien. Ber. 127, 147 (1918).

15) L. W. Mc Keehan, Phys. Rev. 10, 478 (1917).

16) R. Schmid, Wien. Ber. 126, 1065 (1917).

17) О различии мезотория и радия по выделению имита тепла см. M. Curie, C. R. 172, 1022 (1921).

18) L. Meitner, Phys. ZS. 19, 257 (1918). B. Walter, Phys. ZS. 18, 584 (1917).

19) H. N. Mc Coy и L. M. Hendersohn, J. Chem. Soc. 114, 422 (1918).

20) O. Hönigschmid, ZS. f. Elektrochem. 23, 161 (1917); 25, 91 (1919). F. Soddy, Nature 98, 469 (1917); 99, 244 (1917). A. Holmes, Nature 99, 245 (1917). J. Joly, там же 284. R. W. Lawson, Wien. Ber. 126, 721 (1917). K. Fajans, ZS. Elektrochem. 24, 163 (1918); Heidelb. Ber. 1918, 3. Abh., 28. St. Meyer, Wien. Ber. 127, 1283 (1918).

21) St. Meyer, Wien. Ber. 128, 897 (1919). J. A. Cranston и R. A. Burnett, J. Chem. Soc. 119, 2036 (1921).

22) O. Hahn и M. Rothenbach, Phys. ZS. 20, 194 (1919).

23) H. Lachs, Ber. Warschauer Wiss. Ges. 8, 145 (1915).

К главе двадцать пятой.

О химических действиях лучей радия см. в особенности монографию S. C. Lind, The chemical effects of alpha-particles and electrons (Chemical Catalog Company, New York 1921). Далее обзор A. Kailan в „Radium in Biologie und Heilkunde“ (Barth, Leipzig) 2, Heft 9 (1913).

1) E. Wagner, Ann. d. Phys. 46, 879 (1915).

2) E. Mühlstein, Verh. Schweiz. Naturf. Ges. 101, 171 (1921). The Svedberg и H. Andersen, Photographic-Journ. Август 1921. K. Przibram, Wien. Ber. 130, 271 (1921).

3) G. Berndt, Radioaktive Leuchtfarben (Vieweg, Braunschweig 1920).

4) E. Bahr, Elektrotechn. ZS. 40, 229 (1919). A. Dauvillier, C. R. 171, 627 (1920).

5) K. Przibram, Wien. Ber. 130, 265 (1921).

6) H. Herszfeld и L. Wertenstein, J. de Phys. 1, 142 (1920).

7) G. H. Henderson, Nature 109, 749 (1922).

8) R. C. Sabot, Arch. Sc. phys. et nat. 42, 391 (1916). T. Ch. Choudhari, Chem. News 116, 25 (1917).

9) W. Duane und G. L. Wendt, Phys. Rev. 7, 689 (1916); 10, 116 (1917). A. Kailan, Wien. Ber. 126, 741 (1917); 128, 381 (1919). T. Ch.

Choudhari, Chem. News 116, 25 (1917). R. A. Millikan, V. H. Gottschalk и M. J. Kelly, Phys. Rev. 15, 157 (1920). E. Wourtzel, J. de Phys. 1, 77 (1920), 2, 53 (1921).

- 10) F. Krüger и M. Möller, Phys. ZS. 13, 1040 (1912).
- 11) S. C. Lind, Wien. Ber. 120 (IIa) 1709 (1911).
- 12) S. C. Lind, Trans. Amer. Electroch. Soc. 24, 339 (1913).
- 13) A. Fernau и W. Pauli, Biochem. ZS. 70, 426 (1915); см. также сводку F. Sekera, Kolloid-ZS. 27, 145 (1920).
- 14) R. Arndt, см. по этому поводу H. Schulz, Die Naturwissenschaften 4, 675 (1916).
- 15) H. Molisch, Wiener Ber. 121 (I), 833 (1912).
- 16) W. Hausmann, Wiener klin. Wochenschr. 29, 1289 (1916).
- 17) Janeway-Barringer-Failla, Radium Therapy in Cancer, New-York 1917. V. F. Hess, см. 24 гл., примечание 4.
- 18) J. Bergonié, Comptes rend. 162, 613 (1916); Ch. Richet, там же 614.
- 19) V. F. Hess, Wiener Ber. 129 (IIa), 565 (1920).

К главе двадцать шестой.

- 1) R. W. Lawson, Die Naturw. 5, 429, 452, 610 и 709 (1917). E. Gleditsch. Archiv Math. og Naturw. 36, 73 (1919).
- 2) G. Höwermann, Neues Jahrb. f. Mineralogie, XXXIV, 321 (1912).
- 3) J. Joly, Proc. Roy. Inst. 22, 116 (1919); Nature 109, 480 (1922).
- 4) W. F. Smeeth и H. E. Watson. Phil. Mag. 35, 206 (1918). J. H. J. Poole, Phil. Mag. 40, 466 (1920).
- 5) C. H. Lees, Phys. Soc. London, доклад 12. II. 1920.
- 6) A. Steichlen. Phil. Mag. 31, 401 (1916). R. R. Ramsey, Phys. Rev. 7, 284 (1916). J. R. Wright и G. W. Heise, J. Phys. Chem. 21, 525 (1917). A. Lepare, C. R. 171, 731 (1920). P. Loisel, C. R. 171, 858 (1920).
- 7) R. M. Downey, Phys. Rev. 16, 420 (1920).
- 8) T. T. Quircke и L. Finkelstein, Amer. J. Sci. 44, 237 (1917).
- 9) V. F. Hess и W. Schmidt. Phys. ZS. 19, 109 (1918).
- 10) O. H. Gish, Phys. Rev. 13, 155 (1919).
- 11) R. Seeliger, Münch. Ber. 1918, I. E. v. Schweidier, Wien. Ber. 127, 515 (1918). R. Swinne, Phys. ZS. 17, 529 (1916). L. Vegard, Ann. d. Phys. 50, 384 (1916); Jahrb. Radioakt. 14, 387 (1917); Phil. Mag. 42, 47 (1921). C. Störmer. Phil. Mag. 42, 1019 (1921).

Для более подробного изучения радиоактивности могут быть рекомендованы следующие сочинения:

E. Rutherford, Radioaktive Substanzen und ihre Strahlungen (Handbuch der Radiologie, Bd. II, herausgegeben von E. Marx, Akad. Verlagsges., Leipzig 1913).

E. Rutherford, Radioactive substances and their radiations. Cambridge 1913.
 M-me P. Curie, Traité de la radioactivité. Paris 1910 (есть русский перевод).

St. Meyer und E. v. Schweidler, Radioaktivität (Teubner, Leipzig 1916).

Сочинения меньшего объема, трактующие специальные вопросы:

S. W. Aston, Isotopes (Arnold, London 1922, есть русский перевод),

K. Fajans, Radioaktivität und die neueste Entwicklung der Lehre von den chemischen Elementen (Vieweg, 4 Auflage, Braunschweig 1922, есть русский перевод).

F. Henrich, Chemie und chemische Technologie radioaktiver Stoffe (Springer, Berlin 1918).

A. S. Russel, An Introduction to the Chemistry of Radioactive Substances (John Murray, London 1922).

F. Soddy, The chemistry of the radio-elements. Part I. Sec. Edit. 1915 и Part II. 1917. Longmans, Green and Co London (есть русский перевод первой части с первого издания).

M-me Pierre Curie. Radioactivité et phénomènes connexes. Paris. Etienne Chiren, 1923.

По методике измерений:

H. Geiger und W. Makower, Meßmethoden auf dem Gebiete der Radioaktivität (Vieweg und Sohn, Braunschweig 1920).

Кроме того по методике измерений см. главу 169 в „Lehrbuch der praktischen Physik von F. Kohlrausch (Teubner, 14 Aufl. Leipzig 1923) и главу V в „Radioaktivität“ von Meyer und Schweidler.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА ЗА 1923 и 1924 год ¹⁾.

К главе второй.

Пробег α -частиц.

1) I. Curie, Comptes Rendus T. 175, 220 — 22 (1922) и Comptes Rendus T. 176, 434 — 37 (1923). E. Ruchardt, Zeitschr. f. Phys. B. 15, 164 — 71; C. W. van der Merwe, Phil. Mag. [6] V. 45 379—81. R. W. Lawson, Nature 113, 121 — 22. I. Curie, Journ. de Phys. et le Radium [6], T. 4, 170—84 (1923).

α -частицы с ненормально большим пробегом.

2) L. Bates and J. Stanley Rogers, Nature 112, 435 — 36 (1923). L. F. Bates and J. Stanley Rogers, Nature 112, 938. (1923); L. Bates and J. Stanley Rogers, Proceed. Royal Soc. Ser. A. V. 105,

¹⁾ Примеч. ред.

97—116. D. Pettersson, Naturwissenschaften **12**, 389—90; D. Pettersson, Nature **113**, 641—42. H. Pettersson, Nature **112**, 540 (1923). G. Kirsch u. H. Pettersson, Nature **112**, 394—95. G. Kirsch u. H. Pettersson, Nature **112**, 687. E. Rutherford and J. Chadwick, Phil. Mag. [6] V. **48**, 509—26 (1924). K. Philipp, Naturwissenschaften **12**, 511. Lise Meitner u. K. Freitag, Naturwissenschaften **12**, 634—35.

Пути α -частиц.

3) E. Mühlestein, Arch. Sc. phys. et natur., Genève [5] T. **4**, 38—64. 1922. R. W. Ryan and W. D. Harkins Nature **111**, 114. D. M. Bose u. S. K. Ghosh, Nature, **111**, 463—64. P. M. S. Blackett, Proceed. Cambridg. Phil. Soc. **21**, 517—20. W. C. Mc. Quarrie, Proceed. Trans. Royal Soc. Canada [3] **17**, sekt. III, 111—18 (1923). C. T. R. Wilson, Proceed. Cambr. Phil. Soc. V. **21**, 405—9 (1923). P. Kapitza, ibid. V. **21**, 511—16. P. M. S. Blackett, Proceed. Royal Soc. London, Ser. A. V. **103**, 62—78 (1923).

Прохождение α -частиц через материю и рассеяние их.

4) G. H. Henderson, Phil. Mag. V. **44**, 680—88 (1922). K. Philipp, Zeitschr. f. Phys. Bd. **17**, 23—41. K. S. Bieler, Proceed. Royal Soc. London, Ser. A. V. **105**, 434—50. C. Jacobsen u. Johs. Olsen, Danske. Oid. Selsk. Mat. phys. Medd. **4**, № 2, 3—17 (1922). G. H. Henderson, Proceed. Royal Soc. London, Ser. A. V. **102**, 496—505 (1923). E. S. Bieler, Proceed. Cambr. Phil. Soc. V. **21**, 686—700 (1923). R. H. Fowler, ibidem. V. **21**, 521—30 и V. **21**, 531—40 (1923). Minesaburô Akiyama, Japon Journ. of Phys. **2**, 279—86 (1923). I. H. Jeans, Proceed. Royal. Soc. London Series. A. **102**, 437—53 (1923).

Ионизация, вызываемая α -лучами.

5) Hilda Fonovits-Smercker, Sitzungsber. der Wiener. Akad. d. Wissensch. Abt. 2a. Bd. **131**, 355—69. Fr. Hauer, ibidem Bd. **131**, 583—87. E. Rutherford, Proceed. Cambrid. Phil. Soc. V. **21**, 504—10 (1923). E. Rutherford Nature **112**, Supplem. p. 305—12 (1923). T. R. Wilkins, Phys. Rewiew. [2] **19**, 210—20 (1922). См. также Атомы, электроны, эфир, Рёзерфорд, Лодж, Эддингтон. Науч. Хим.-Тех. Изд. НТО. ВСНХ. Ленинград. 1924.

Число α -частиц, их счет и сцинтилляция.

6) H. Geiger, Verhand. Deutsch. Phys. Ges. [3] Bd. **5**, 12—14. H. Greinacher, Zeitschr. f. Phys. Bd. **23**, 361—78. Vict. F. Hess und Rob. W. Lawson, Zeitschr. f. Phys. Bd. **24**, 402—10 (1924). Vict. F. Hess und Rob. W. Lawson, Phil. Mag. V. **48**, 200—207; H. Geiger

und A. Werner. Zeitschr. f. Phys. Bd. 21, 187 — 203; Elisabeth Karachailowa und Pettersson, Naturwissenschaften 12, 388 и Н. Geiger Zeit. f. Phys. 27, 7 — 11 (1924); Л. В. Мысовский, Доклады Р. А. Н. Nature 113, 715 (1924), июль—сентябрь (1924).

Волновая теория α -лучей.

7) Gustav Jaumann, Sitzungsber. Akad. Wien, Abt. 2a 130, 189—216 (1921).

Энергия α -частиц и атомный номер элемента.

8) L. Myssowsky, Zeitschr. f. Phys. Bd. 18, 304—6.

К главе третьей, четвертой, пятой, шестой и седьмой.

Магнитные спектры β -лучей.

1. L. Meitner, Zeitschr. f. Phys. 11, 35 — 54 (1922); J. Chadwick and C. D. Ellis, Proceed. Cambr. Phil. Soc. 21, 274 — 80 (1922); C. D. Ellis, Zeitschr. f. Phys. 10, 303 (1922). L. Meitner, Zeitschr. f. Phys. 17, 54 — 66. Werner Pohlmeier, Zeitschr. f. Phys. 28, 216 — 30. D. Jovanovitch и J. d'Espine, Comptes Rendus. T. 178, 1811 — 13; O. Hahn und L. Meitner, Zeitschr. f. Phys. 26, 161 — 62; L. Meitner, Zeitschr. f. Phys. 19, 307 — 12 (1923). C. D. Ellis and H. W. B. Skinner, Proceed. Royal Soc. London. Ser. A. 105, 165—84 и 105, 185—196.

Первичные β -лучи.

2) J. A. Gray, Proceed. Trans. Royal Soc. Canada [3] 16, 125 — 128, Sekt. III. 1922. H. Th. Wolff. Phys. Zeitschr. 25, 348—52.

Пути β -лучей и их рассеяние.

3) W. Bothe, Phys. Zeitschr. 23, 416 (1922); J. H. Jeans, Proceed. Royal Soc. London Ser. A. 102, 437 — 53. (1923). A. V. Douglas, Proceed. Trans. Royal Soc. Canada [3] 16, 113—24. Sekt. III (1922).

Обратная диффузия β -лучей.

4) Gregor Wentzel, Ann. d. Phys. (4) 70, 561—594.

Вторичные β -лучи.

5) M. de Broglie и J. Cabrera, Annal. Soc. espaniola Tis. Quim. 20, 467—72. 1922. Jean Thibaud, Comptes Rendus 179, 165 — 67; Lewis Simons, Phil. Mag. [6] 48, 250 — 58. D. Skobelzyn, Zeitschr. f. Phys. 24, 393—99.

Остаточные атомы или лучи радиоактивной отдачи.

6) K. T. Compton, Phys. Review [2] **19**, 233—36 (1922) E. Rüdard, Ann. d. Phys. [4] **73**, 228 — 36; Minesaburō Akiyama, Japon. Journ. of Physic. **2**, 287 — 89 (1923). D. M. Bose und S. K. Ghosh, Phil. Mag. [6] **45**, 1050—54.

γ-лучи.

7) O. Hahn и L. Meitner, Zeitschr. f. Phys. **17**, 157 — 67. I. Curie et G. Fournier. Comptes Rendus **176**, p. 1301—1304. W. Bothe, Zeitschr. f. Phys. **24**, 10 — 19. Jean Thibaud, Comptes Rendus **178**, 1706 — 1709 и Comptes Rendus **179**, 165 — 167; V. F. Hess, Physik. Review [2] **19**, 73 — 79 (1922). M. de Broglie, et J. Cabrera, Comptes Rendus, **176**, 295—96.

Абсорбция γ-лучей.

8) N. Ahmad, Proc. Royal Soc. London. Ser. A. **105**, 507 — 19. N. Ahmad and E. C. Sponer, ibidem **106**, 8 — 19.

Роль γ-лучей в атомном распаде.

9) L. Meitner, Zeitschr. f. Phys. **26**, 169—77.

Число γ-импульсов, испускаемых радием.

10) Alois F. Kovarik, Physik. Review [2] **23**, 559—74.

К главе восьмой.

1) S. Rosseland, Zeitschr. f. Physik **14**, 173 — 81 и Nature **111**, 357 (1923); E. Madgwick, Proceed. Univ. Durban Phil. Soc. **6**, 136 — 47 (1921 — 1922); A. Smekal, Zeitschr. f. Phys. **25**, 265 — 78; F. H. Loring, Chem. News **128**, 113—115; Walter Kutzner, Zeitschr. f. Physik **21**, 281—98.

К главе десятой и одиннадцатой.

1) A. Piccard et E. Kessler. Arch. Sc. phys. et natur. Genève [5] **5**, 491 — 92 (1923). A. S. Russel, Nature **111**, 703 — 4; A. S. Russel, Phil. Mag. [6]. V. **46**, 642 (1923); ibidem. **47**, 145 — 47; ibidem. **48**, 365 — 78 (1924). и ibidem **48**, 293—306 (1924). E. Rutherford, Journ. Inst. Metals, **28**, 3—17 (1922).

К главе двенадцатой, семнадцатой, восемнадцатой и девятнадцатой.

1) Вышла в русском переводе книга Астова, Изотопы. Перевод В. И. Баранова. Научное Химико-Техническое Издательство. НТО. В.С. Н.Х.

Ленинград 1924 г. там же собрана новейшая литература. См. также М-ше Pierre Curie, *Isotopie et les éléments isotopes*. Paris. 1924.

К главе четырнадцатой и пятнадцатой.

Абсорбция радиоэлементов.

1) Н. Freundlich u. Marie Wreschner, *Zeitschr. f. Phys. Chem.* **106**, 366—77 (1923). James H. Breunen, *Comptes Rendus* **179**, 161—63; J. Escher—Desrivières, *ibidem* **179**, 158—160 и **178**, 1713—14, John Arn. Cranston and Robert Hutton, *Journ. Chem. Soc. London* **121**, 2843—49; (1922); *ibidem* **123**, 1318—24 (1923).

Применение радиоэлементов в качестве индикаторов.

2) В. И. Сплицин, *Жур. Русс. Физ.-Хим. Общ. Т.* **49**, 357—70. 1917. О. Hahn отчет совместно с О. Müller, *Zeitschr. f. Elektrochemie* **29**, 189—92 (1923) О. Hahn, *Naturwissenschaften* **113**, (1924). F. Paneth u. Wilh. Thimann, *Berichte*, **57**, 1215—20 (1924) и F. Paneth u. A. Radu, *ibidem* **57**, 1221—25; Панет, Радиоэлементы, как индикаторы при химическом исследовании. *Природа* № 1—6. 99. Перелож. М. А. Блох.

К главе двадцать первой.

1. Will, D. Harkins and R. W. Ryan, *Nature*. **112**, 54—55 (1923). G. Kirsch u. H. Pettersson, *Sitzungsber. Akad. Wissen. Wien*. **132** Abt. 2a, 299—307 (1923). G. Kirsch and H. Pettersson, *Naturwissenschaften* **12**, 495—500 (1924), *ibidem* **12**, 388—89 и 464; G. Kirsch and H. Pettersson, *Phil. Mag.* [6] **47**, 500—12; Will, D. Harkins and R. W. Ryan, *Journ. Amer. Chem. Soc.* **45**, 2095—2107 (1923); E. Rutherford a. J. Chadwick, *Nature*, **113**, 457.

К главе двадцать третьей.

1) H. D. d'Aquiар, *Chem. Metall. Engen.* **25**, 825—28 (1921). С. Ulrich *Zeit. f. angew. Chem.* **36** 24/1, 41—42; 27/1, 49—52; 31/1, 54—55 (1923). U. Cialdea, *Gazz. Chim. Italiana* **53**, 42—48. Witalius Chlopін, *Zeitschr. f. anorgan. u. allgem. Chemie.* **143**, 97—117 (1925). См. также монографию В. Г. Хлопин, Радий и его получение из русского сырья. Труды по изучению радия и радиоактив. руд. Росс. Акад. Наук. 1924 г. Ленинград.

К главе двадцать четвертой.

По радий и его эманации.

1) Fr. Béhounek, *Jour. de Phys. et le Radium* [6] **4**, 77—88. D. Jovanovitch et Chamié. *Comptes Rendus* **175**, 266—68 (1922). Irène Curie et

C. Chamié, Comptes Rendus, 178, 1808—10. W. Mund, Bull. Soc. Chim. Belgique. 33, 256—60. A. Becker, Zeitschr. f. Phys. 21, 304—15. P. Ludewig u. E. Lorenser, ibidem. 21, 258—63; P. Ludewig, ibidem. 20, 394—97. G. Hoffmann, ibidem 25, 177—99; E. A. Owen a. Bertha Naylor, Proceed. Phisic. Soc. London. 34, 93—97 (1921); Frank E. E. Ger-
mann, Science. 59. 340—41; V. F. Hess, Trans. Amer. Electric. Soc. 41, 287—302 (1922). U. Ciaidea, Gazz. Chim. Italiana, 53, 42—48; W. Bothe, Zeitschr. f. Phys. 16, 266—79 (1923). Ag. Becker, Zeitschr. f. anorg. u. allg. Chemie 124, 143—52 (1922). В. Г. Хлопин, Доклады Р. А. Н. 1922 г. В. Г. Хлопин, и М. А. Пасвик, Доклады Р. А. Н. А. стр. 52—54 (1923). В. Г. Хлопин, ibidem. июль—сентябрь, 101—104 (1924); Witalius Chlorin, Zeitschr. f. anorg. u. allg. Chemie, 143, 97—117 (1925) Adrien Karl u. S. Lanbard, Comptes Rendus 177, 1036—37 (1923).

Радий А.

2) Marietta Blau, Sitzungsber. Akad. d. Wissensch. Wien. Abt. 2a. 133. H. 1/2 (1924).

Радий С.

3) G. H. Henderson, Nature 114, 503 (1924).

Активный осадок.

4) G. Carrière, Bull. Soc. Chim. Belgique 32, 5—18.

Отношение Ra/U и Io/Th.

5) F. Soddy and Ada F. R. Hitchins, Phil. Mag. [6]. 47, 1148—58; Meyer H. u. C. Ulrich, Sitzungsber. Akad. d. Wissensch. Wien, Abt. 2a. 132. H. 7—8 (1923). W. P. Widdowson a. A. S. Russel, Phil. Mag. [6]. 46, 915—29.

Мезоторий второй.

6) D. Jovanovitch, Comptes Rendus 175, 307—309. 1922.

Калий, рубидий и цезий.

7) Ringer, Archives néerland. sc. exact. et natur. [3]. 7, 431—40 (1922).

Нахождение эмилия.

8) P. Loisel, Comptes Rendus 179, 533—34 (1924).

К главе двадцать пятой и двадцать шестой.

Действие на фотографическую пластинку.

1) P. M. S. Blackett, Proceed. Royal Soc. Ser. A. 102, 294—318 (1922). Rob. Wälder, Sitzungsber. Akad. Wissensch. Wien. 131 Abt. 2a 495—510 (1922).

Окраска и люминисценция под действием лучей радия.

2) J. R. Clarke, Phil. Mag. [6] 45, 735—36. K. Przibram u. Elisabeth Kara-Michailowa, Sitzungsber. Akademie Wien. Abt. 2a. 132. H. 7—8, 295—298 (1923); и ibidem. 131, 511—30 (1922). Przibram Karl u. Marie Bélar, ibidem, 132. H. 7—8, 261—77 (1923). St. Meyer. u. K. Przibram, ibidem 131 Abt. 2a, 429—35 (1922). P. Ludewig u. F. Reuther, Zeit. f. Phys. 26, 45—53 и ibidem. 18, 183—98 (1923). Karl Przibram, ibidem. 20, 196—208 (1923); C. Doelter, Zeitschr. f. Mineral., 321—24 (1923). O. Mügge, Nachr. Gesellsch. Wiss. Göttingen., 1—16 (1923). J. Joly, Nature 114, 160—64 (1924). Will. P. Headden, Amer. Journ. Science Sillim. [5] 6, 247—61 (1923) Maria Bélar, Sitzungsber. Akad. Wiss. Wien, Abt. 2a. 132, 45—54 (1923). Jessie A. Rodman, Phys. Review [2] 23, 478—87.

Химическое действие лучей.

3) Anton Kailan, Sitzungsber. Akad. Wien. Abt. 2a 130, 469—80 (1921) и ibidem 131 569—81 (1922). Anton Kailan, Monatshefte f. Chemie 42, 387—98 (1922) и ibidem 44, 35—47; N. Zelinsky, Rec. trav. chim. Pays Bas 41 613 (1922). А. Писаржевский Ж. Р. Ф. Х. О. Т. 54, 633—600 1922—23. S. C. Lind a. D. C. Bardwell, Journ. Amer. Chem. Soc. 45, 2585—92 (1923); и ibidem 46, 2003—9; D. C. Bardwell a. H. A. Doerner, ibidem, 45, 2593—99 (1923). S. C. Lind, Trans. Amer. Electr. Soc. 44, 61—69.

Действие на коллоиды.

4) A. Fernau, Kolloid Zeitschr. 34, 308—12 (1924).

Физиологическое действие.

5) K. T. A. Halbertsma, Pflügger. Arch. f. Physiol. 197, 611—23 (1923). F. Piehler u. Art. Wöber, Zentralbl. f. Bakter. u. Parasitenkunde Abt. II. 57, 319—27 (1922). J. C. Mottram W. Cramer a. A. H. Drew, British. Journ. of exp. pathol. 3, 179—81 (1922); см. также Colwel. Hector, A. and Sidney Russ, Radium x-ray and the living cell, 2 Edit. London. G. Bell & Sons (1924).

Радиоактивность атмосферы и космические процессы.

6) Мейтнер Л. Значение радиоактивности для космич. процессов. Природа. № 7—12, стр. 113 (1923). Переложение М. А. Блох; Нерманн Bongards, Phys. Zeitschr. 24, 16—19. Alb. Nodon, Comptes Rendus 176, p. 1705—7 (1923).

К вопросу об открытии радиоактивных явлений.

1) Nièpce de Saint-Victor, Comptes Rendus. 1858 г.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ.

- α -лучи 9, 23 и след.; абсорбция—25 и след., 48, величина пробега—25 и след., 30, 85, 116; воздушный эквивалент—27; заряд—23; измерение очень сильных—242; ионизация—30; история исследований—257; масса—23; образование—79; общая ионизация посредством—30; отклонение от среднего значения—34; пути—85, 87; рассеяние—32, 48; связь между величиной пробега—и постоянной распада 116; скорость—25; сравнение с β -лучами—48; счет—25; торможение—29; число α -частиц, испускаемых 1 гр. Ra—25;
- α -распад, склонность к—177.
- α -частицы см. α -лучи.
- α -электроскоп 14.
- Абсорбция см. под α -лучами, β -лучами и т. д.
- Агрегатная отдача 70.
- Адсорбция радиоэлементов 130.
- Азот, расщепление—171.
- Активный осадок, получение долгоживущего—193; получение короткоживущего—191;—радия 102 и след.; тория—98 и след.
- Актиний: открытие 256; получение 189; свойства 208.
- Актиний А: свойства 210.
- Актиний В: свойства 210.
- Актиний С: двойной распад 112; свойства 210.
- Актиний С': свойства 210.
- Актиний С'': получение 195; свойства 210.
- Актиний Х: свойства 209.
- Алюминий, разложение—172.
- Алмаз, сцинтилляции в—233.
- Анафилаксия, непрямая или физиологическая—242.
- Атмосфера, сила ионизации—253.
- Атом гелия, строение—77.
- Атом, строение—71 и след.
- Атомная модель 71.
- Атомное ядро 71; водород в—173; строение—175; электроны в—176.
- Атомные объемы химических элементов 65.
- Атомный вес, „практический“ 162; таблица—163.
- Аутолюминисценция 222.
- β -лучи 9, 36 и след.; абсорбция—37 и след., 48; абсорбция однородных—41 и след.; величина пробега—37 и след.; вторичные—58; жесткие—39; зависимость между скоростью и полупериодом распада—117; заряд—36; ионизация—43; истинный коэффициент абсорбции—48; история исследования—257; масса—36; магнитный спектр—39, 80; мягкие—39; образование—79; однородные—41; отклонение—36; отражение—47; первичные—80; пути—86; рассеяние—44 и след., 48, 85; скорость—37; скорость вторичных—64; слой,

- поглощающий половину излучения для—37; сравнение с α -лучами 48; число β -частиц—38; число вторичных β -частиц—59.
- β -распад, склонность к—177.
- β -частицы см. β -лучи.
- β -электроскоп 15.
- Благородные газы, строение 78, 145.
- Бор, отношение изотопов в—153.
- Валентность радиоэлементов 133.
- Величина пробега α -лучей 25 и след., 85; — β -лучей 41 и след.; лучей радиоактивной отдачи 68; история исследований—257 и 258; связь между—и постоянной распада 114.
- Вода, разложение—лучами радия 229.
- Водород, как основа ядер атома 171 и след.
- Водородистый висмут 137.
- Водородистый свинец 137.
- Водородный атом, строение—73; ионизационный потенциал—75.
- Воздух, содержание эманации радия в—253.
- Воздушный эквивалент 27.
- Воссоединение ионов 19.
- Виллемит 88, 222.
- С-продукты, получение—193.
- γ -лучи 9, 49 и след.; абсорбция—52 и след.; вторичные—58; длины волн—51, 54, 82; жесткие—52; ионизация посредством—56; история развития учения о—257 и след.; мягкие—54; образование—79;—препаратов радия и мезотория 55; при рода—49; разложение спектра—49; рассеяние—57.
- γ -электроскоп 15.
- Гальванометр 11.
- Гелиевые ядра в атомах высших порядковых чисел 179.
- Гелий: образование из радия 4;—из эманации 23; метастабильное состояние 77.
- Гелий в минералах 248.
- H-лучи 66, 171.
- H-частицы см. H-лучи.
- δ -лучи 64.
- Двойной распад 112;—AcC 210;—RaC 126;—ThC 210; теоретическое объяснение—177.
- Действие лучей радия 217 и след.
- Действие лучей радия на рост растений 241.
- Денвер, получение радия 186.
- Диффузия, разделение изотопов посредством—155.
- Длины волн γ -лучей 54;—лучей эфира 51.
- Дождь, активность—252.
- Долгоживущие радиоэлементы, получение 184 и след.
- Дополнительные расчеты к главе о строении атома 88.
- Еве (единица измерения) 202.
- Закон Кулона, границы применимости—86, 173.
- Закон Ома 18; область применения—18 и след.
- Заряд, электрический, α -лучей 23;— β -лучей 36;—атомов при радиоактивной отдале 69.
- Заряд ядра атома, вычисление его на основании опытов рассеяния 33; равные порядковые числа 140.
- Земная кора, содержание урана и радия в—250.
- Излучение выхода 59.
- Излучение падения 59.
- Излучение Гесса 253, 260.
- Измерение времени, радиоактивное. 245.

- Изотопия 118 и след.; история открытия—259;—и периодическая система 125;—как общее свойство материи 148;—как препятствие при получении радиоэлементов 181; теоретическое объяснение—139; экспериментальное доказательство—119.
- Изотопы, радиоэлементов 118 и след.;—не радиоактивных элементов 153, 164 и след.; разделение—155.
- Индикаторы, радиоактивные 135; применение ThВ и ThС в качестве—215.
- Ионизация газов 19.
- Ионизация посредством α -лучей 30;— β -лучей 43;— γ -лучей 56;—лучей радия 10, 219.
- Ионий: атомный вес 122; открытие 256; получение 189; свойства 201.
- Ионный ветер 243.
- Ионо-химическая эквивалентность 236.
- Ионы; движение—18; большие малые, медленные 21, 22, — в жидкостях 16;—в газах 17; воссоединение—19; концентрация — 18; теоретическое объяснение образования—144.
- Иоакмисталь, получение радия в—186.
- Искусственное разложение химических элементов 171, 243; история—260.
- Исландский шпат 223.
- Испарение крайне малых количеств 132.
- Источники, содержание в них эманации радия 204, 251.
- Калий, открытие радиоактивности—256; радиоактивные свойства—215.
- Каналовые лучи 8; ионизационная способность—30.
- Катодные лучи 8.
- Каучуковые пальцы, как защита от лучей радия 241.
- Квантовые числа электронных орбит 76.
- Коллоидно-химическое действие лучей радия 237.
- Коллоидные радиоэлементы 133.
- Комиссия по атомным весам, таблица немецкой—161.
- Конденсация водяных паров под действием лучей радия 238.
- Константа Ридберга 63, 89.
- Контактный потенциал, измерение—220.
- Короткоживущие радиоэлементы: вычисление весовых количеств—97; обнаружение—98; получение—191 и след.
- Коэффициент абсорбции β -лучей 39 и след.
- Коэффициент рассеяния 33.
- Кривая ионизации α -лучей 31 и след.
- Кристаллизация под влиянием лучей радия 238.
- Кунцит 222.
- Кюри (единица измерения) 204.
- Лучи, различные сорта—7; дальность пробега, рассеяние лучей радиоактивной отдачи—68; заряд—69 см. также под α -лучами, β -лучами и т. д.
- Люминисценция, возбуждение лучами радия 220.
- Магнитный спектр β -лучей 39, 40.
- Масса, как свойство ядра 144;— α -лучей 23;— β -лучей 36;—атомов радиоактивной отдачи 69.
- Масс-спектрокопия 160.
- Математическая обработка процессов распада 106.
- Махе (единица измерения) 204.
- Медицинское применение лучей радия 240.
- Мезоторий 1: открытие 256; получение 187; равновесие с торием 212; свойства 211.
- Мезоторий 2: открытие 256; получение 195; свойства 211.
- Метеориты, содержание радия в—252.

- блица
дей-
не —
вы-
-97;
-191
39
лед.
чей
сть
но-
69
ми
ми
у-
э-
в
- Методы измерения лучей радия 10 и след.
Механическое действие лучей радия 242.
Минералы, определение возраста—245.
Моль—ионы 21.
Морская вода, содержание радия в—251.
Наведенная активность 99.
Неустойчивое равновесие 99, 109.
Облако, образование—от лучей радия 238.
Обмен атомами 136.
Обозначение атомов изотопов 162.
Однородное β -излучение 40.
Озон, образование под действием лучей Ленара 234; с помощью лучей радия 231, 235.
Окраска подвергающихся освещению солей 223.
Определение возраста минералов 245.
Определение поверхности порошков 136.
Осаждение радиоэлементов 131.
Основной биологический закон 240.
Отклонение от среднего вероятного значения при испускании α -лучей 34.
Отношение ответвлений 111.
Отражение β -лучей 46.
Периодическая система 142; расположение радиоэлементов в—123.
Плавиновый шпат 223.
Плеохронические венчики 249.
Поле тяготения, разделение изотопов посредством—156.
Полоний см. радий F.
Полосатые спектры изотопов 146.
Полупериод распада 38, 97; определение очень короткого—115; очень длинного—114.
Получение радиоактивных и след.; трудности—
Порядковое число 71, 1;
рядковые числа 140;
Постоянная распада 38
связь между—и вели-
 α -излучателя 116.
Потенциал выделения
количеств 137.
Потенциал ионизации ге-
водорода 44;—водород
Потеря энергии при распа-
Правило адсорбции 130,
Правило осаждения 132,
Правило сдвига 125; ис-
теоретическое объясне-
Правило Стокса 64.
Препараты мезотория, из-
тивности — 212; γ -изл-
содержание радия в—2
Принцип соответствия 79,
Проводимость, максимальная
Продолжительность жизни.
Проникающее излучение ато-
Проницаемость воздуха че-
ные материалы 138.
Протактиний: открытие 256
188; свойства 207.
Протон 139.
Процессы распада, математ-
работка—106.
Пути, α -частиц 85;— β -части-
- Равновесие, радиоактивное 9
чивое—109; устойчивое—
Радий: β -излучение 202; долг-
активный осадок—104; к-
вущий осадок—102; обе-
очень малых количеств—
звание гелия, эманации
из—4 и след.; основные с-
3 и след.; открытие—251
ние—3, 185 и след.; свой-
цена—201.

- Радий А: изменение активности во времени 103; получение 192; свойства 205.
- Радий В: изменение активности во времени 103, 108; получение 192, 195; свойства 205.
- Радий С: выделение на никкеле 130; двойной распад 111; изменение активности во времени 103, 108; получение 192 и след.; свойства 205.
- Радий С': количество, находящееся в равновесии с 1 гр. радия 128; свойства 205.
- Радий С": свойства 205.
- Радий D: количество, находящееся в равновесии с 1 гр. радия 105, 128; неразделимость от свинца 119; обнаружение при помощи RaE или RaF 104; получение 190, 194; свойства 206.
- Радий E: образование из RaD 104; получение 128; свойства 206.
- Радий F (= полоний): количество, находящееся в равновесии с 1 гр. радия 128; концентрация посредством диализа 133; открытие 255; получение 190, 194;—при воздушно-электрических измерениях 220; образование из радия E 104; распад в равновесии с RaD 102; свойства 206; электролитическое осаждение—130.
- Радий G: образование из RaF 104; изотопия со свинцом 120 и след.; см. также урановый свинец.
- Радиевы лучи, действие—217 и след.; см. также под α -лучами, β -лучами и т. д.
- Радиевые препараты: взрываемость—229, 242; γ -излучение—55; определение содержания радия в—202.
- Радиевые соли, растворимость—201.
- Радиевые часы 243.
- Радиоактивная отдача 68 и след.; агрегатная отдача 70; открытие—257; получение радиоэлементов посредством—195, 209;—посредством β -лучей 69.
- Радиоактивное равновесие, см. равновесие радиоактивное.
- Радиоактивное свечение 222.
- „Радиоактивно чистые“ радиоэлементы 181.
- Радиоактивные лучи см. α -лучи, β -лучи и т. д.
- Радиоактивный, свойства—208.
- Радиосвинец 190; открытие—256.
- Радиоторий: открытие—256; получение—189; свойства—213.
- Радиохимия, история развития—259 понятие—227.
- Радиоэлементы; получение 180; распространение 250; свойства 198; таблица долгоживущих—183.
- Разложение элементов 171, 243; история—260;
- Растворимость, определение—посредством радиоактивных индикаторов 135;—малых количеств 128.
- Развитие тепла радиоактивными веществами 4, 225.
- Рассеяние α -лучей 32, 48, 85 и след.;— β -лучей 44 и след., 48, 85 и след.;— γ -лучей 57;—лучей радиоактивной отдачи 68.
- Распространение радиоэлементов 250.
- Рентгеновский спектр радия 61; вольфрама 84; K, L, M, N, O-серии 63; K, L, M-серии химических элементов 65; образование характеристического спектра 82.
- Рентгеновы лучи: возбуждение—60; наиболее жесткие—51; характеристические—62.
- Ртуть, разделение ее изотопов 157.
- Рубидий: открытие радиоактивности—256; радиоактивные свойства—215.
- Ряды превращений 111 и след.
- Ряд актиния 112.

- Ряд тория 113.
 Ряд урана—радия 112; расположение—
 в периодической системе 127.
 Ряд напряжений радиоэлементов 130.
- Самодиффузия 136.
 Световые лучи 7.
 Свойства электронов атома 144; пере-
 ход между свойствами ядра и элек-
 трона 146.
 Свойства ядра атома 144.
 Северное сияние 254.
 Сенсбилизация для проникающих лу-
 чей радия 232, 230.
 Серия Бальмера 89.
 Серийные спектры изотопов 146.
 Сила ионизации атмосферы 253.
 Символы химических элементов 162.
 Слои, поглощающие половину излуче-
 ния 38 и след.
 Смешанные элементы 159; теоретиче-
 ское определение—161.
 Соединительный вес 121.
 Соединительный вес, при смешанном
 элементе вместо атомного веса 159;
 постоянство—150, 154; таблица—
 164 и след.
 Скорость диффузии радиоэлементов 133.
 Скорость растворения малых коли-
 честв 128.
 Спектр γ -лучей 49; магнитный— β -лу-
 чей 39, 40, 80.
 Способность торможения 27.
 Снег, активность—252.
 Степень дисперсности радиоэлемен-
 тов 133,
 Сцинтилляции 23, 221.
- Теория распада β и след; применение—
 90 и след; история возникновения
 и развития—256.
 Температурный коэффициент химиче-
 ских реакций посредством лучей
 радия 233.
- Теплота земли, радиоактивное на-
 ждение—252.
 Термолуминесценция 223 и сле
 Торий: активный осадок—98 и
 открытие радиоактивности
 получение—183; свойства—2
 Торий А: как материнское ве
 тория В 102; определение п
 риода распада 117; свойства
 Торий В: изменение активнос
 времени 100; падение и нара
 активности 107; получение
 свойства 214.
 Тория В—перекись 129.
 Тория С: двойной распад 111, 214;
 нение активности во времени
 очистка 100; получение 196; Γ
 с ненормально высокой вели
 пробег 25, 113; свойства 214
 Торий С': вычисление постое
 распада 117; свойства 214.
 Торий С'': получение 195; свойств
 Торий D: соединительный вес 12'
 также торносивнец.
 Торий X:—в неустойчивом равнове
 продуктами распада 110; свойств
 Торносивнец в минералах 247.
 Ток насыщения 12, 15, 16 и след
 Трубки Кулиджа 51.
 Трубки Лилиенфельда 51.
- Увеличение при осаждении 137.
 Уменьшение массы атома при
 паде 178.
 Упаковочный эффект 179.
 Уран; открытие радиоактивности
 получение 184.
 Уран I: определение постоянной
 пада 114; свойства 199; строе
 ядра 177.
 Уран II: свойства 199.
 Уран X: образование из урана
 отделение от урана 91; паде
 активности 91.

- Уран X_1 : свойства 200.
 Уран X_2 : свойства 200.
 Уран Y : свойства 200.
 Уран Z : свойства 200.
 Урановый свинец: атомный объем 121; движение ионов 122; нормальный потенциал 122; оптический спектр 122; коэффициент преломления 122; растворимость 122; рентгеновский спектр 122; содержание в минералах 245; температура плавления 122 (см. также радий 9).
 Устойчивое равновесие 109.
 Устойчивость радиоактивного атома 177.
 Утомление при люминисценции 223.
- Физиологическое действие лучей радия 239.
 Флуоресценция и флуоресцирующее излучение 64, 83.
 Фотографическое действие лучей радия 217.
 Фотохимический закон эквивалентности 234.
 Фотохимия, действие аналогичное лучам радия 227 и след.
- Характеристические рентгеновы лучи 53.
 Хафний 140.
 Химически чистые радиоэлементы 181.
 Химические свойства радиоэлементов 118 и след.
 Химические элементы: атомные объемы 65; еще не открытые 140; изотопы 153; история развития учения о — 258; неактивность большинства — 148; порядковое число — 72, 164; практическое определение — 160; разложение — 171; рентгеновские спектры — 65; соединительные веса — 163; теоретическое определение — 161.
 Химические способы получения коротко-живущих радиоэлементов 195.
- Химическое действие лучей радия 227 и след.; в твердых телах 227; в жидкостях 229; в газах 231; теория — 233.
 Химия веществ, находящихся в ничтожно-малых количествах 128 и след.
 Хлор: разделение изотопов — 156.
- Целые числа атомных весов 153; отклонения от — 178.
- Число Лашмидта 24.
 Чистый элемент 159; теоретическое определение — 161.
- Экран платиносиеродистого бария 221.
 Экран сернистого цинка 221.
 Электрическая проводимость в жидкостях 10; — в газах 17.
 Электролитическое осаждение малых количеств 129.
 Электроны в ядре атома 175.
 Электроскопы 13 и след.
 Электростатические единицы 14.
 Элементарное количество электричества 17.
 Элементы см. химические элементы.
 Эман (единица измерения) 204.
 Эманация, образование из радия 4.
 Эманация актиния: молекулярный вес 135; получение 191; свойства 209.
 Эманация радия: в неустойчивом равновесии с продуктами распада 109; коэффициент распределения 203; получение 191; распад в равновесии с радием 102; свойства 202 и след.; точка кипения 132.
 Эманация тория: как материнское вещество активного осадка 98; получение 191; свойства 213.
 Эманационный электроскоп 15.
- Ядро атома 71 и след.; история развития учения о — 258.

ОГЛАВЛЕНИЕ.

	Стран.
Глава I. Введение	3
I. Основные опыты	3
II. Гипотеза атомного распада	6
III. Лучи радиоактивных веществ	7
IV. Методы измерения лучей радия	10
V. Прохождение электричества через газы	16
Глава II. α-лучи	23
I. Масса и заряд α -лучей	23
II. Абсорбция, величина пробега и скорость α -лучей	25
III. Ионизирующее действие α -лучей	30
IV. Поперечное рассеяние α -лучей	32
V. Отклонение от среднего вероятного значения при испускании лучей	34
Глава III. β-лучи	36
I. Масса и заряд β -лучей	36
II. Абсорбция и скорость β -лучей	37
III. Ионизирующее действие β -лучей	43
IV. Поперечное рассеяние β -лучей	44
V. Сравнение абсорбции и рассеяния α - и β -лучей	48
Глава IV. γ-лучи	49
I. Природа γ -лучей	49
II. Абсорбция γ -лучей	52
III. Ионизирующее действие γ -лучей	56
IV. Поперечное рассеяние γ -лучей	57
Глава V. Вторичные лучи	58
I. Природа вторичных лучей	58
II. Образующиеся γ -лучами вторичные β -лучи	58
III. Возбуждаемые электронами электромагнитные лучи	60
IV. Вторичные лучи, образуемые α -лучами, β -лучи	64
Глава VI. Радиоактивная отдача	68

	Стр.
Глава VII. Строение атома и радиоактивные лучи	71
I. Строение атома	71
II. Строение водородного атома	73
III. Атомы высших порядковых чисел	77
IV. Образование радиоактивных лучей	79
V. Рассеяние лучей при прохождении через атом	85
VI. Дополнительные расчеты к главе о строении атома	88
Глава VIII. Применения теории распада	90
I. Основные положения	90
II. Образование короткоживущих веществ из долгоживущего материнского вещества. Выделение UX и падение его активности	91
III. Образование UX из U	93
IV. Радиоактивное равновесие	94
V. Материнское вещество обладает не многим большей продолжительностью жизни, чем дочернее вещество. Активный осадок тория	98
VI. Короткоживущий активный осадок радия	102
VII. Образование долгоживущего элемента из короткоживущего. Долгоживущий активный осадок радия	104
Глава IX. Математическая обработка процессов распада	106
Глава X. Ряды превращений	111
Глава XI. Определение очень длинного и очень короткого полупериода распада. Связь между полупериодом распада и скоростью испускаемых лучей	114
Глава XII. Химические свойства радиоэлементов. Изотопия	118
Глава XIII. Изотопия и периодическая система. Изменение химического характера внутри данного ряда превращений. Законы смещения или сдвига	125
Глава XIV. Химия веществ, находящихся в ничтожно малых количествах	128
I. Растворимость и скорость растворения крайне малых количеств	128
II. Выделение малых количеств электролизом	129
III. Определение растворимости солей радиоэлементов с помощью метода адсорбции и метода осаждения	130
IV. Испарение крайне малых количеств	132
V. Скорость диффузии. Определение валентности и степени дисперсности. Коллоидные растворы радиоэлементов	133

Глава XV. Применение радиоэлементов в качестве индикаторов при физических и химических исследованиях	135
Глава XVI. Изотопия и законы смещения в свете строения атома	139
Глава XVII. Свойства электронов и ядра атома . . .	144
Глава XVIII. Изотопия, как общее свойство материи.	148
Глава XIX. Разделение изотопов	155
Глава XX. Смешанные и чистые элементы. Соединительные веса и атомные веса	159
Глава XXI. Искусственное разложение химических элементов	171
Глава XXII. Строение ядра атома	175
Глава XXIII. Получение радиоактивных веществ . .	180
А. Получение долгоживущих радиоэлементов	184
В. Получение короткоживущих радиоэлементов	191
Глава XXIV. Свойства отдельных радиоэлементов .	198
А. Ряд урана	198
В. Ряд актиния	207
С. Ряд тория	210
D. Калий и рубидий	215
Глава XXV. Действие лучей радия	217
I. Фотографическое действие	217
II. Ионизация	219
III. Возбуждение люминисценции	220
IV. Образование тепла	225
V. Химическое действие	227
а) химическое действие в твердых телах	227
б) химическое действие в жидкостях	229
с) химическое действие в газах	231
d) общий характер химических реакций под влиянием лучей радия	232
е) теория химических реакций под действием лучей радия	233

	Стран.
VI. Коллоидно-химическое действие	237
VII. Физиологическое действие	239
VIII. Механическое действие	242
IX. Расщепление атома	243
Глава XXVI. Радиоактивность в геологии и гео- физике	245
I. Определение возраста минералов	245
а) определение возраста по содержанию уранового свинца	245
б) определение возраста по содержанию гелия	248
в) определение возраста по интенсивности окраски плео- хронических венчиков	248
II. Распространение радиоактивных веществ	250
III. Термические следствия распространения радиоактивных веществ	252
IV. Электрические следствия распространения радиоактивных веществ	253
V. Оптические следствия атомного распада на солнце. Север- ное сияние	254
Глава XXVII. Историческое развитие учения о ра- диоактивности	255
Указатель литературы с 1916 по 1922 г.	261
Дополнительная литература за 1923 и 1924 гг.	269
Предметный указатель	276

Погашено

ВЫШЛИ ИЗ ПЕЧАТИ:

- Абегг, Р. и Саккур, О. Примеры численных задач по физической химии с решениями. Пер. с нем. М. Кучерова. 1924.
- Аничков, С. В. Действие на организм боевых отравляющих веществ. 1924.
- Аррениус, Сванте. Физико-химические закономерности химических процессов в космосе. Пер. Г. П. Горбунова под ред. М. А. Блох. 1924.
- Его же. Химия и современная жизнь. Пер. Г. П. Горбунова под ред. М. А. Блох. 1924.
- Астон, Ф. В. Изотопы. Пер. В. И. Баранова. 1924.
- Баймаков, Ю. В. Электролитическое осаждение металлов. 1925.
- Блох, М. А. Химическая промышленность. 1925.
- Валента, Э. Химия фотографических процессов. Ч. I. 1925.
- Вернадский, В. И., акад. История минералов земной коры. Вып. I. 1924.
- Вильферт и Муксель. Прессованные дрожжи. 1924.
- Воронов, А. А. Динамо-электрические машины постоянного тока. 1924.
- Гаврилов, Ф. Пробирное искусство. 1925.
- Герц, В. Очерк истории развития основных воззрений химии. Пер. Н. А. Бах под ред. и с дополнениями М. А. Блох. 1924.
- Гессе, Г. К. Переменные токи. 1924.
- Гиллебранд, В. Ф. Химия силикатов. 1925.
- Грец, Л. Эфир и теория относительности. Пер. Б. Н. Финкельштейна. 1924.
- Дюкло, Ж. Коллоиды. Пер. А. Михалевича под ред. и с предислов. В. Я. Курбатова. 1924.
- Евангулов, М. Сплавы. 1924.
- Залькинд, Ю. С. Химия органических соединений с открытой цепью. 1924.
- Его же. Ацетилен и его применение. 1925.
- Ипатьев, В. Н., акад. Химическая промышленность—база химической обороны. 1924.
- Его же. Задачи Доброхима. Изд. I и изд. II. 1924.
- Карманный спутник электротехника. Пер. М. В. Зива. 1924.
- Карнаузов, М. М. Металлургия стали. Вып. I. 1924. Вып. II. 1925.
- Катехизис смазки. Пер. И. И. Воронкова. 1924.
- Курбатов, В. Я. Что такое химическая война и химическая оборона. 1924.
- Его же. Закон Д. И. Менделеева. 1925.
- Курнаков, Н. С. Введение физико-химический анализ. 1925.
- Кюстер, Ф. В. Таблицы логарифмов для химиков. Перев. И. П. Красникова. 1924.
- Лапиров-Скобло, М. Я. Пути и достижения русской науки и техники за 1918 — 1923 гг. 1924.
- Лазарев, П. П., акад. Гельмгольца. 1925.
- Лебедев, С. В. Отравляющие вещества в военном деле. 1924.
- Леман, В. Энергия и энтропия. Пер. Г. П. Горбунова под редакцией М. А. Блох. 1924.
- Леммель, Р. Принцип относительности. Пер. под ред. проф. Я. Френкеля. 1924.
- Лейхман, Л. К. Словарик названий химических реактивов. 1924.
- Лялин, Л. М. Химическая технология органических веществ, вып. III. 1924.
- Монахов, А. Д. Как надо мочить лен. 1925.
- Мухачев, В. С. Средства химического нападения. 1924.
- Нессельштраус, Г. З. Быстрорежущая сталь. 1924.
- Никитин, Н. И. Химическая переработка древесины. 1924.
- Ногин, К. И. Смолокуренно-скипидарное производство. 1924.
- Окнов, М. Г. Производство металлов и их основные свойства. 1925.
- Омелянский, В. Л., акад. Микроорганизмы, как химические реактивы. 1924.

- Ост, Г. Химическая Технология. Вып. I. Красящие и волокнистые вещества. 1924. Вып. II. Металлургия. 1925. Вып. III. Строительные и вяжущие материалы. Стекло и керамика. 1925.
- Павлов, М. А. Metallургия чугуна. 1924.
- Порай-Кошиц, А. Е. при участии Д. Н. Грибоедова. Красочная Промышленность. Справочник хим. пром. Вып. IV. 1924.
- Радецкий, П. С. и Никитин, В. А. Логарифмическая счетная линейка. 1925.
- Радциг, А. А. Джемс Уатт. 1924.
- Резерфорд, Лодж, Эддингтон. Атомы, электроны, эфир. Пер. под ред. В. Я. Курбатова. 1924.
- Рюмплер, А. Сахарное производство. Перевод Г. И. Жукова под ред. Л. М. Лялина. 1924.
- Сальдау, П. Я. Применение удушливых газов для истребления вредителей сельского хозяйства (сусликовых и саранчевых). 1924.
- Сборник работ по чистой и прикладной химии, издан. Химич. Инстит. имени Л. Я. Карпова в Москве под ред. А. Н. Баха. № 1. 1923; № 2. 1924; № 3. 1924.
- Сборник памяти Л. А. Чугаева. Под ред. акад. В. Н. Ипатьева. 1924.
- Свен, П. В. Азбука горения. 1923.
- Слоссон, Е. Созидаящая химия. Под ред. проф. В. Н. Верховского. Вып. I. Газовая война. 1925. Вып. II. Азот и война. 1925. Вып. III. Металлы старые и новые. 1925. Вып. IV. Электрическая печь и химическая промышленность. 1925. Вып. V. Каменноугольные краски. 1925.
- Содди, Ф. Радий и его разгадка. Перев. Е. Толмачевой. 1924.
- Сообщения о научно-технических работах в Республике. Вып. XII, XIII, XIV (4-ый Съезд физиков), XV (Второй Съезд научн. деятелей по металлургии) 1924. XVI (12-ый Водопроводный и санитарно-технич. съезд), XVII, XVIII. 1925.
- Тредвелл, Ф. Таблицы качественного химического анализа. 1924. Пер. Е. Д. Воловой с предисловием М. А. Блох.
- Уинни, У. О значении работ русских химиков для мировой химии. 1924.
- Успехи Биологической Химии. Под ред. акад. В. Л. Омелянского. Вып. I. 1924; Вып. II. 1925.
- Успехи тепловой техники. Под ред. проф. А. А. Радцига. 1924.
- Успехи современного дизелестроения. Под ред. В. Ю. Гиттиса. 1924.
- Федоровский, Н. М. Опыт прикладной минералогии. 1924.
- Федотьев, П. П. Технический анализ минеральных веществ, ч. II, 1924.
- Ферсман, А. Е., акад. Химические проблемы промышленности. 1924.
- Фосфориты, как непосредственное удобрение. Труды Института по удобрениям. 1924.
- Фрейндлих, Г. Физическая химия и биология. 1925.
- Хейфец, И. Я. Патентное право. С предисловием Л. К. Мартенса. 1925.
- Хлопин, Г. В. Химическая промышленность и народное здоровье, ч. I, 1920; ч. II, 1921; ч. III, 1922; ч. IV, 1924.
- Его же. Оборона в химической войне. 1924.
- Чечотг, Г. О. Обогащение полезных ископаемых. Вып. I, 1924; вып. II, 1925.
- Чугаев, Л. А. Д. И. Менделеев. 1924.
- Шток, А. Ультроструктурная химия. Пер. под ред. Курбатова. 1924.
-

-397807-

✓

Депозит рий

1925

RLST



0000000535902

