

# **Universitäts- und Landesbibliothek Tirol**

## **Radioaktive Umwandlungen**

**Rutherford, Ernest**

**Braunschweig, 1907**

Siebentes Kapitel. Die Umwandlungsprodukte des Uraniums und Aktiniums und der Zusammenhang zwischen den Radioelementen

## Siebentes Kapitel.

# Die Umwandlungsprodukte des Uraniums und Aktiniums und der Zusammenhang zwischen den Radioelementen.

In den vorhergehenden Kapiteln sind die Umwandlungsreihen des Thoriums und Radiums ausführlich behandelt worden. Da Uranium und Aktinium, die beiden anderen aktiven Substanzen, in dem Zusammenhange dieses Buches von Interesse sind, so wird in dem folgenden eine kurze Übersicht über die Umwandlungen gegeben werden, die in ihnen vor sich gehen.

### Die Umwandlungen des Uraniums.

Uraniumpräparate senden  $\alpha$ -,  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlen aus, sichere Anzeichen dafür, daß Uranium eine Emanation abgibt, sind bisher noch nicht gefunden. In dieser Hinsicht scheint es sich vom Thorium, Radium und Aktinium zu unterscheiden. Es ist jedoch möglich, daß eine eingehende Untersuchung noch das Vorhandensein einer sehr kurzlebigen Emanation ergeben wird. Wenn das Uranium eine Emanation besäße, die nicht länger als  $\frac{1}{100}$  Sekunde beständig wäre, so würde ihre Entdeckung mit Hilfe der elektrischen Methode außerordentlich schwierig sein.

Nur ein direktes Umwandlungsprodukt des Uraniums, Uranium-X, ist bisher nachgewiesen worden. Die Abtrennung dieser Substanz ist zuerst durch Sir William Crookes<sup>1)</sup> nach zwei verschiedenen Methoden ausgeführt worden. Ammoniumkarbonat wurde zu einer Uraniumlösung zugesetzt, und das gefällte Uraniumoxyd im Überschuß des Ammoniumkarbonats wieder gelöst. Eine geringe Menge eines Niederschlages, der das Uranium-X enthielt,

<sup>1)</sup> Crookes, Proc. Roy. Soc., 66, 409 (1900).

blieb zurück. Crookes gebrauchte die photographische Methode und fand, daß das Uranium nach dieser Behandlung fast inaktiv war, während der Niederschlag, verglichen mit einem gleich großen Gewicht von Uranium, eine außerordentlich starke photographische Wirkung ausübte. Die Erklärung hierfür wurde erst später gefunden. Uranium-X sendet nur  $\beta$ -Strahlen aus, die in dem Falle des Uraniums eine viel größere photographische Wirkung ausüben, als die stark absorbierten  $\alpha$ -Strahlen. Die Entfernung des Uranium-X ändert die  $\alpha$ -Strahlenaktivität des Uraniums in keiner Beziehung, wie die Messung mit Hilfe der elektrischen Methode ergibt, raubt dem Uranium aber seine ganze  $\beta$ -Strahlenaktivität.

Die zweite von Crookes verwandte Methode besteht darin, daß das Uraniumnitrat in Äther aufgelöst wurde. Hierbei verteilt sich das Uranium ungleich zwischen dem Äther und dem vorhandenen Wasser. Die wässrige Lösung enthält das Uranium-X, während die ätherische Fraktion photographisch inaktiv ist.

Noch eine andere Trennungsmethode wurde von Becquerel<sup>1)</sup> aufgefunden. Zu einer Uranlösung wurde eine kleine Menge eines Bariumsalses hinzugesetzt, und dann das Barium mit Schwefelsäure ausgefällt. Der Bariumniederschlag reißt das Uranium-X mit, und nach einigen Wiederholungen der Fällung ist das Uranium fast völlig frei von Uranium-X. Becquerel beobachtete zuerst, daß Uranium-X nach einiger Zeit seine Aktivität verliert, während das Uranium seine verlorene Aktivität wiedergewinnt.

Die Geschwindigkeit, mit der Uranium-X seine Aktivität verliert, wurde von Rutherford und Soddy bestimmt. Die Abfallskurve ist die eines einfachen radioaktiven Produkts, sie gehorcht einem Exponentialgesetz mit einer Periode von ungefähr 22 Tagen. Die Erholungskurve der  $\beta$ -Aktivität des Uraniums und die Abfallskurve des Uranium-X sind komplementär.

Aus der Analogie mit den entsprechenden Erscheinungen beim Thorium und Radium können wir also schließen, daß Uranium das Uranium-X mit konstanter Geschwindigkeit bildet. Da die  $\alpha$ -Strahlenaktivität durch die Entfernung des Uranium-X nicht geändert wird, so ist es wahrscheinlich, daß das Uraniumatom unter Ausschleuderung einer  $\alpha$ -Partikel sich in das Atom des Uranium-X umwandelt. Dieses zerfällt seinerseits unter

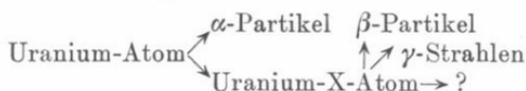
---

<sup>1)</sup> Becquerel, Compt. rend. **131**, 137 (1900); **133**, 977 (1901).

Rutherford, Radioaktive Umwandlungen.

Ausschleuderung einer  $\beta$ -Partikel. Das Produkt, das aus der Umwandlung von Uranium-X hervorgeht, ist entweder inaktiv oder so schwach aktiv, daß seine Umwandlung sich nicht mit Hilfe der elektrischen Methode verfolgen läßt.

Die Umwandlungen, die im Uranium vor sich gehen, sind in dem untenstehenden Diagramm veranschaulicht.



Es ist in dem letzten Kapitel darauf hingewiesen worden, daß Uranium-X wahrscheinlich eine oder mehrere strahlenlose Umwandlungen von langer Periode erfährt und schließlich Radium bildet.

Die  $\beta$ -Strahlenaktivität des Uraniums hat zu einigen interessanten Beobachtungen Anlaß gegeben. Meyer u. Schweidler<sup>1)</sup> machten auf einige bemerkenswerte Veränderungen aufmerksam, die die  $\beta$ -Strahlenaktivität des Uraniums während der Kristallisation erfährt. Die Aktivität ändert sich in höchst auffallender Weise so, als wenn der Kristallisationsprozeß einen direkten Einfluß auf die Umwandlungsgeschwindigkeit des Uranium-X hätte. Einige von Godlewski<sup>2)</sup> in dem Laboratorium des Verfassers ausgeführte Versuche führten später zu einer einfachen Erklärung der auffälligen Resultate von Meyer und Schweidler.

Uraniumnitrat wurde in einer kleinen Schale erwärmt und in seinem Kristallwasser geschmolzen. Die Schale wurde dann unter ein  $\beta$ -Elektroskop gestellt. Die  $\beta$ -Strahlenaktivität blieb während der Abkühlung der Lösung merklich konstant; in dem Augenblick jedoch, in dem die Kristallisation auf dem Boden der Schale begann, nahm die  $\beta$ -Strahlenaktivität schnell zu und war auch nach Beendigung der Kristallisation mehrere Male so groß wie im Anfang. Nach Erreichung eines Maximums nahm die Aktivität allmählich wieder ab und hatte nach ungefähr einer Woche den Wert wieder erreicht, den sie vor dem Schmelzen des Uraniumnitrats gehabt hatte.

Hierauf wurde ein anderer einfacher Versuch ausgeführt. Ein auf die gleiche Weise gebildeter Kristallkuchen wurde un-

<sup>1)</sup> Meyer und Schweidler, Wien. Ber. 113, Juli 1904.

<sup>2)</sup> Godlewski, Phil. Mag., Juli 1905.

mittelbar nach Beendigung der Kristallisation aus der Schale herausgenommen und umgekehrt unter das Elektroskop gelegt. Die  $\beta$ -Strahlenaktivität war viel geringer als bei der ursprünglichen Lage des Kuchens, und nahm allmählich wieder den Normalwert an. Diese Beobachtungen lassen sich folgendermaßen erklären. Uranium-X ist in Wasser löslicher als Uraniumnitrat. Wenn die Kristallisation am Boden der Schale beginnt, so wird das Uranium-X an die Oberfläche der Lösung gedrängt. Die  $\beta$ -Strahlen, die in das Elektroskop gelangen, haben im Durchschnitt eine dünnere Uraniumschicht zu passieren als zuvor. Die  $\beta$ -Strahlenaktivität wird also zunehmen, bis die Kristallisation beendet ist. Die untere Seite der Kristallplatte wird weniger als die normale Menge von Uranium-X enthalten und deshalb eine geringere  $\beta$ -Strahlenaktivität hervorrufen. Die allmähliche Abnahme der  $\beta$ -Strahlenaktivität der Oberseite und die Zunahme der der Unterseite scheint von einer Diffusion des Uranium-X herzurühren, die so lange andauert, bis das Uranium-X wieder gleichförmig in der ganzen Kristallmasse verteilt ist. Die Diffusion geht auch in einer vollkommen trockenen Kristallplatte verhältnismäßig schnell vor sich. Ein Effekt dieser Art, der sehr leicht in einer Mischung von Produkten verschiedener Löslichkeit vorkommen kann, zeigt, wie vorsichtig man sein muß, wenn man die Aktivität einer Substanz interpretiert, die gerade vorher chemischen Reaktionen ausgesetzt worden war.

Die größere Löslichkeit des Uranium-X kann leicht zu einer teilweisen Trennung des Uranium-X benutzt werden. Wenn Uraniumnitrat in einem kleinen Überschuß von Wasser aufgelöst wird, so enthält nach der Kristallisation die Mutterlauge den größten Teil des Uranium-X.

### Die Umwandlungen des Aktiniums.

Kurze Zeit nach der Entdeckung des Radiums und Poloniums fand Debierne in den Pechblenderückständen eine neue Substanz, die er Aktinium nannte. Sie wurde mit dem Thorium zusammen abgeschieden, kann von ihm jedoch nach geeigneten Methoden getrennt werden. Mehrere Jahre lang war über die radioaktiven Eigenschaften dieser Substanz sehr wenig bekannt. Inzwischen hatte Giesel unabhängig beobachtet, daß eine neue

radioaktive Substanz mit dem Lanthan und Cer ausgefällt wurde. Diese Substanz gab in großen Mengen eine sehr kurzlebige Emanation ab und Giesel nannte sie wegen dieser Eigenschaft zunächst „Emanationskörper“, ein Name, der später in „Emanium“ umgewandelt wurde. Debierne fand dann, daß Aktinium eine Emanation abgibt, die in 3,9 Sekunden ihre Aktivität zur Hälfte verliert. Spätere Arbeiten, die von verschiedenen Forschern ausgeführt wurden, haben gezeigt, daß die Emanationen und die Aktivitäten, die von Emanium und Aktinium hervorgerufen werden, die gleichen Abfallgeschwindigkeiten besitzen.

Der aktive Bestandteil, der in dem Aktinium von Debierne vorhanden ist, ist also identisch mit dem in Giesels Emanium, und wir werden daher den zuerst gebrauchten Namen Aktinium beibehalten. Aktinium ist bisher nicht in so reinem Zustande hergestellt, daß sein Atomgewicht und sein Spektrum hätten untersucht werden können.

Sehr aktive Aktiniumpräparate sind bereits von Giesel und Debierne hergestellt worden und es ist wahrscheinlich, daß Aktinium im reinen Zustande eine Aktivität von derselben Größenordnung wie das Radium besitzen wird. Die Emanation wird von den Gieselschen Präparaten sehr reichlich abgegeben und ruft auf einem in die Nähe gebrachten Zinksulfidschirm ein Aufleuchten hervor. Die Szintillationserscheinungen lassen sich beim Aktinium noch besser beobachten als beim Radium. Die ununterbrochene schnelle Bildung einer kurzlebigen Emanation läßt sich am Aktinium leicht durch ein sehr anschauliches Experiment zeigen. Eine kleine Menge von Aktinium wird in Papier eingewickelt und auf einen Zinksulfidschirm gelegt. Die von dem Aktinium selbst ausgesandten  $\alpha$ -Strahlen werden vollkommen in dem Papier absorbiert, aber die Emanation diffundiert leicht durch das Papier in die umgebende Luft und ihre  $\alpha$ -Strahlen bringen den Zinksulfidschirm zum Leuchten. Bei der Beobachtung dieses Lichtes mit einer Linse sieht man, daß es aus einer Menge leuchtender schnell wechselnder Punkte besteht. Ein Lufthauch entfernt die Emanation und die Luminiszenz verschwindet dann für einen Augenblick, kehrt aber zurück, sowie die Emanation neu gebildet ist. Das Leuchten breitet sich von dem Aktinium infolge der Diffusion der Emanation über den

Schirm aus. Der leiseste Lufthauch ruft eine deutliche Bewegung des Leuchtens hervor und verschiebt es in der Richtung des Luftstromes.

Aktinium sendet  $\alpha$ -,  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlen aus. Diese Strahlungen sind von Godlewski<sup>1)</sup> untersucht worden. Die  $\beta$ -Strahlen sind offenbar sehr homogen und besitzen ein geringeres Durchdringungsvermögen als die  $\beta$ -Strahlen anderer radioaktiver Substanzen. Hieraus geht hervor, daß die  $\beta$ -Partikeln alle mit ungefähr der gleichen Geschwindigkeit ausgeschleudert werden, und daß diese Geschwindigkeit geringer ist als die durchschnittliche Geschwindigkeit der  $\beta$ -Strahlen von anderen Substanzen.

Auch die  $\gamma$ -Strahlen haben ein geringeres Durchdringungsvermögen als die des Radiums. Es ist nicht unwahrscheinlich, daß das Fehlen sehr durchdringender  $\gamma$ -Strahlen mit dem Fehlen sehr schneller  $\beta$ -Strahlen zusammenhängt, denn es ist zu erwarten, daß die  $\beta$ -Partikel, die vom Radium beinahe mit Lichtgeschwindigkeit ausgeschleudert wird, einen heftigeren Impuls hervorrufen wird, als eine  $\beta$ -Partikel von viel geringerer Geschwindigkeit.

Die Emanation des Aktiniums wandelt sich in einen aktiven Niederschlag um, der in einem elektrischen Felde auf der Kathode konzentriert werden kann. Die Aktivität eines Niederschlages, den man nach langer Exposition erhält, verschwindet allmählich und zwar fällt sie zehn Minuten nach Beendigung der Exposition exponential mit einer Periode von 36 Minuten ab. Miss Brooks<sup>2)</sup> beobachtete, daß die Abfallskurven der induzierten Aktivität nach kurzer Exposition denselben Charakter besitzen, wie die entsprechenden Kurven der induzierten Aktivität des Thoriums. Die Aktivität nimmt anfangs zu, erreicht nach ungefähr acht Minuten ein Maximum und fällt schließlich exponential mit einer Periode von 36 Minuten ab.

Dieses Verhalten kann in derselben Weise erklärt werden, wie beim Thorium. Die Emanation wandelt sich unter Aussendung von  $\alpha$ -Strahlen in ein strahlenloses Produkt, Aktinium-A, um, welches in 36 Minuten zur Hälfte umgewandelt wird. Aktinium-A bildet Aktinium-B, welches in ungefähr zwei Minuten zur Hälfte zerfällt und  $\alpha$ -,  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlen aussendet.

---

<sup>1)</sup> Godlewski, Phil. Mag., Sept. 1905.

<sup>2)</sup> Miss Brooks, Phil. Mag., Sept. 1904.

Daß die Periode von zwei Minuten dem Aktinium-B und nicht dem Aktinium-A zugeschrieben werden muß, geht aus einem Versuch von Miss Brooks hervor. Der aktive Niederschlag wurde auf einem Platinblech gesammelt und dann in verdünnter Salzsäure aufgelöst. Durch Elektrolyse der Lösung wurde auf der Kathode eine Substanz erhalten, die  $\alpha$ -Strahlen aussandte. Diese verlor ihre Aktivität nach einem Exponentialgesetz mit einer Periode von ungefähr 1,5 Minuten. Hieraus geht hervor, daß Aktinium-B, welches  $\alpha$ -Strahlen aussendet, die kürzere Periode besitzen muß.

Die Analogie, welche somit zwischen Aktinium und Thorium besteht, trat noch deutlicher hervor, als Godlewski<sup>1)</sup> und Giesel<sup>2)</sup> unabhängig voneinander aus dem Aktinium eine sehr aktive Substanz abschieden, die Aktinium-X genannt wurde. Die Trennung wurde durch Fällung des Aktiniums mit Ammoniak in genau der gleichen Weise erreicht, wie die Trennung des Thorium-X vom Thorium. Das Aktinium-X verbleibt nach der Ausfällung des Aktiniums in dem Filtrat, zusammen mit Aktinium-A und Aktinium-B. Godlewski fand, daß Aktinium-X seine Aktivität exponential mit einer Periode von ungefähr zehn Tagen verliert. Das von Aktinium-X befreite Aktinium gewinnt mit derselben Periode seine Aktivität wieder. Die Erscheinungen, die bei der Trennung des Aktinium-X und Thorium-X von ihren Muttersubstanzen beobachtet werden, weisen einige interessante Unterschiede auf. Thorium-A und -B sind in Ammoniak nur wenig löslich und werden daher mit dem Thorium ausgefällt. Der aktive Niederschlag des Aktiniums ist jedoch leicht löslich in Ammoniak und bleibt daher in dem Filtrate mit dem Aktinium-X.

Wenn das Aktinium-X durch wiederholte Fällungen entfernt ist, so besitzt das Aktinium nur noch einen kleinen Teil seiner normalen Aktivität, während die Restaktivität beim Thorium ungefähr ein Viertel der ursprünglichen beträgt. Es ist wahrscheinlich, daß Aktinium, wenn es vollständig von Aktinium-X und seinen Produkten befreit wäre, weder  $\alpha$ - noch  $\beta$ -Strahlenaktivität besitzen würde, und also ein strahlenloses Produkt wäre. Nach den Versuchen von Hahn ist es, wie auf S. 71 bemerkt

---

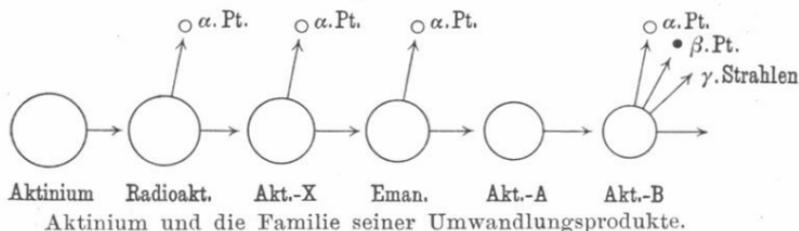
<sup>1)</sup> Godlewski, Phil. Mag, Juli 1905.

<sup>2)</sup> Giesel, Jahrbuch d. Radioaktivität 1, 358 (1904).

wurde, wahrscheinlich, daß auch Thorium, wenn es frei von Radiothorium ist, keine Strahlen aussendet<sup>1)</sup>.

Godlewski hat nachgewiesen, daß die Emanation ein direktes Produkt des Aktinium-X und nicht des Aktiniums selbst ist. In dieser Hinsicht ist das Aktinium-X dem Thorium-X sehr ähnlich. Die Umwandlungen des Aktiniums sind in Fig. 40 zusammengestellt.

Fig. 40.



Beim Vergleich der Umwandlungen des Aktiniums und Thoriums (vgl. Fig. 41) tritt die Ähnlichkeit zwischen den beiden Substanzen sehr deutlich hervor.

Die Ähnlichkeit in dem radioaktiven Verhalten der beiden Substanzen deutet darauf hin, daß Aktinium und Thorium, während sie chemisch voneinander verschieden sind, eine sehr ähnliche Atomstruktur besitzen, und daß, wenn einmal der Zerfallsprozeß begonnen hat, die Atome beider Substanzen eine gleiche Veränderung erfahren.

### Der Zusammenhang zwischen den Radioelementen.

Die drei radioaktiven Elemente, Thorium, Radium und Aktinium, bilden jedes eine Emanation, deren Leben verglichen mit

<sup>1)</sup> Hahn [Phys. Zeitschr. 7, 855 (1906)] hat in neuester Zeit ein weiteres Aktiniumprodukt abgeschieden, das er „Radioaktinium“ genannt hat. Dieses Produkt nimmt seinen Platz zwischen Aktinium und Aktinium-X ein, sendet  $\alpha$ -Strahlen aus und besitzt eine Umwandlungsperiode von 19,5 Tagen. Aktinium selbst ist strahlenlos. Godlewski hatte, ohne es zu bemerken, dieses Produkt von dem Aktinium getrennt, denn anderenfalls würde sein Aktinium infolge der Gegenwart von Radioaktinium  $\alpha$ -Strahlen ausgesandt haben. Levin [Phys. Zeitschr. 7, 513 (1906)] hat nachgewiesen, daß Aktinium-X keine  $\beta$ -Strahlen aussendet. Die  $\beta$ -Strahlen des Aktiniums rühren lediglich von dem Aktinium-B her.

dem des Elementes selbst kurz ist. Nach den bisherigen Erfahrungen besitzen diese Emanationen nicht die Fähigkeit, Verbindungen einzugehen und sind daher der Helium-Argon-Gruppe zuzurechnen. Jede Emanation bildet eine nicht flüchtige Substanz, die sich auf Gegenständen in der Umgebung der Emanation niederschlägt und in einem elektrischen Felde auf der Kathode konzentriert werden kann. Die Umwandlungen, die die aktiven Niederschläge erfahren, sind einander gleichfalls sehr ähnlich, denn der aktive Niederschlag enthält in jedem Falle ein strahlenloses Produkt, aus dem ein neues Produkt entsteht, das alle drei Strahlenarten besitzt. Das strahlenlose Produkt hat auch stets die größere Periode, oder ist mit anderen Worten beständiger, als das von ihm gebildete Strahlenprodukt.

Der Zerfall der analogen Substanzen Thorium-C, Aktinium-B und Radium-C geht mit größerer Heftigkeit vor sich, als der irgend einer anderen radioaktiven Substanz, denn nicht nur besitzt die  $\alpha$ -Partikel dieser Produkte eine sehr große Geschwindigkeit, sondern es wird zugleich mit der  $\alpha$ -Partikel eine  $\beta$ -Partikel mit großer Geschwindigkeit fortgeschleudert.

Nachdem diese heftige Explosion innerhalb des Atoms stattgefunden hat, erreicht das Atomsystem einen dauernderen Gleichgewichtszustand, denn die neu entstehenden Produkte Thorium-D und Aktinium-C haben sich bisher nach radioaktiven Methoden nicht entdecken lassen und Radium-D besitzt eine sehr geringe Umwandlungsgeschwindigkeit.

Die Ähnlichkeit in dem Verhalten der verschiedenen radioaktiven Gruppen ist zu ausgesprochen, als daß sie nur als zufällig angesehen werden könnte; sie deutet vielmehr darauf hin, daß ein Gesetz den Zerfall aller Radioelemente beherrscht. Die Umwandlungsprodukte bezeichnen die verschiedenen Phasen in der Umwandlung der Atome und stellen die Haltepunkte dar, an denen die Atome für eine gewisse Zeit bestehen können, ehe sie von neuem in mehr oder weniger beständige Formen zerfallen.

Es erhebt sich die interessante Frage, ob ein Atom nach Verlust einer  $\alpha$ -Partikel für kurze Zeit in mehr als einer stabilen Form bestehen kann. Nach der explosionsartigen Ausschleuderung einer  $\alpha$ -Partikel muß eine Neugruppierung im Inneren des Atoms stattfinden, aus der ein dauernd oder vorübergehend beständiges System hervorgehen kann. Es ist denkbar, daß mehr als ein

verhältnismäßig stabiles System sich bilden kann, und in diesem Falle müssen außer der  $\alpha$ -Partikel zwei oder mehr Zerfallsprodukte entstehen. Diese würden, obwohl sie das gleiche Atomgewicht besäßen, Unterschiede in ihrem chemischen Verhalten zeigen und es müßte möglich sein, sie voneinander zu trennen. Es wäre nicht nötig, daß die Produkte in gleicher Menge gebildet würden, sondern eines könnte in relativ größerer Menge entstehen.

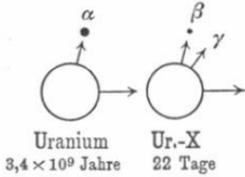
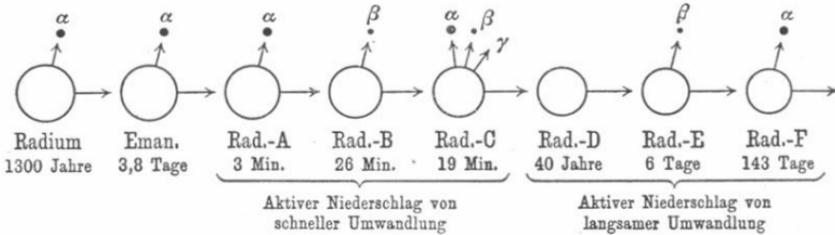
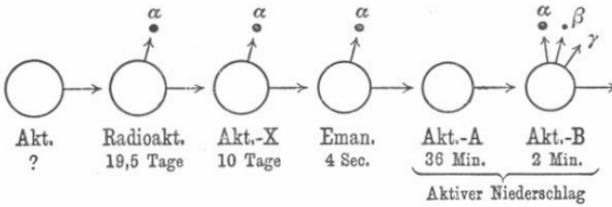
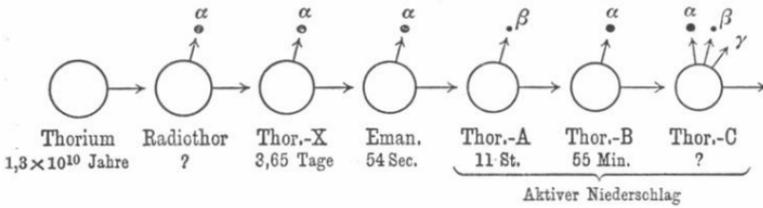


Fig. 41.



Die Radioelemente und ihre Umwandlungsprodukte.

Man kann auch noch an eine andere Möglichkeit denken. Die heftige Störung in dem Atom, die zu der Aussendung einer  $\alpha$ -Partikel Anlaß gibt, kann einen Zerfall des Hauptatoms in zwei Teile verursachen, und so, abgesehen von der  $\alpha$ -Partikel, die

Bildung zweier Atome von verschiedenem Atomgewicht hervorgerufen. Dieses könnte z. B. bei dem heftigen Zerfall von Radium-C oder Thorium-C eintreten.

Bisher ist es nicht nötig gewesen, eine dieser Theorien zur Erklärung radioaktiver Phänomene heranzuziehen. Der Zerfall liefert in jedem Falle außer der ausgesandten  $\alpha$ -Partikel nur ein Produkt. Es ist jedoch nicht unwahrscheinlich, daß eine noch eingehendere Untersuchung der Radioelemente das Vorhandensein von Produkten ergeben wird, die außerhalb der Hauptlinie des Atomabbaues liegen. Die Elektrolyse ist bereits für die Scheidung der radioaktiven Umwandlungsprodukte von Wert gewesen, die in verschwindend kleiner Menge in Lösung vorhanden sind, und die Möglichkeiten, die sie in dieser Richtung bietet, sind noch keineswegs erschöpft.

### Strahlenlose Umwandlungen.

Die meisten radioaktiven Produkte zerfallen unter Ausschleuderung einer  $\alpha$ -Partikel; einige senden außer der  $\alpha$ -Partikel noch eine  $\beta$ -Partikel und in ihrer Begleitung  $\gamma$ -Strahlen aus, während nur wenige lediglich  $\beta$ -Strahlen aussenden. Die Produkte, welche gar keine Strahlen abgeben, bilden eine besondere Klasse.

Im Radium und Aktinium bestehen je zwei strahlenlose Produkte und wahrscheinlich auch zwei\*) im Thorium. Die Methode, nach der der Nachweis solcher Produkte und die Bestimmung ihrer physikalischen und chemischen Eigenschaften ausgeführt werden kann, ist bereits in den vorausgehenden Kapiteln besprochen worden. Da ein strahlenloser Körper keine ionisierende Strahlenart aussendet, kann seine Gegenwart nur durch die Veränderung der Menge des folgenden Produktes nachgewiesen werden. Hierdurch sind wir nicht nur in der Lage, die Zerfallsperiode des strahlenlosen Produktes, sondern auch seine wichtigeren Eigenschaften zu bestimmen.

Die strahlenlosen Produkte sind offenbar in allen Beziehungen den strahlenden Produkten ähnlich, ausgenommen, daß sich bei ihnen kein Anzeichen für die Aussendung von  $\alpha$ - oder  $\beta$ -Partikeln findet. Sie sind unbeständige Substanzen, die nach

---

\*) Vgl. S. 58.

demselben Gesetz zerfallen, wie die anderen aktiven Produkte, und neue Substanzen von verschiedenen physikalischen und chemischen Eigenschaften bilden.

Die Umwandlung eines strahlenlosen Produktes kann von zwei allgemeinen Gesichtspunkten aus betrachtet werden. Man kann einmal annehmen, daß die Umwandlung nicht in einer wirklichen Fortschleuderung eines Teiles des Atomsystemes besteht, sondern in einer Umordnung der Komponenten des Atoms in ein neues zeitweilig beständiges System. Hiernach hat das strahlenlose Produkt dasselbe Atomgewicht, wie das aus ihm entstehende Produkt, unterscheidet sich von ihm jedoch so sehr in seiner chemischen Struktur, daß zwischen den Eigenschaften der beiden Substanzen ein großer Unterschied besteht. Es würde hierin eine gewisse Analogie zu dem Falle bestehen, in dem ein Element, z. B. Schwefel, in zwei verschiedenen Modifikationen vorkommt. Die Analogie ist jedoch nur oberflächlich, denn die Atome der Produkte besitzen völlig verschiedene Eigenschaften, einerlei ob in Lösung oder in festem Zustande.

Nach der anderen Hypothese wird der Umwandlung eines strahlenlosen Produktes derselbe Charakter wie der eines  $\alpha$ -Strahlenproduktes zugeschrieben und nur angenommen, daß die  $\alpha$ -Partikel nicht mit einer solchen Geschwindigkeit fortgeschleudert wird, daß sie eine merkliche Ionisation des Gases bewirken kann. Es findet ein wirklicher Masseverlust während der Umwandlung statt, aber dieser Verlust läßt sich nicht nach der elektrischen Methode feststellen. In dem Lichte einiger experimenteller Beobachtungen, die in Kapitel 10 besprochen werden, erscheint diese Erklärung nicht als unwahrscheinlich. Wenn nämlich die Geschwindigkeit der  $\alpha$ -Partikel unter 40 Proz. der Maximalgeschwindigkeit sinkt, die die schnellste  $\alpha$ -Partikel des Radiums, nämlich die von Radium-C, besitzt, so wird die photographische, Phosphoreszenz- und Ionisationswirkung der  $\alpha$ -Partikel relativ sehr klein. Die  $\alpha$ -Partikel des Radium-C wird mit einer Geschwindigkeit fortgeschleudert, die  $\frac{1}{15}$  der Lichtgeschwindigkeit beträgt. Es kann also eine  $\alpha$ -Partikel eine große Geschwindigkeit besitzen und doch eine elektrische Wirkung ausüben, die im Vergleich zu der sehr klein ist, die eine  $\alpha$ -Partikel von doppelt so großer Geschwindigkeit hervorruft. Die  $\alpha$ -Partikel des Radium-C erzeugt in einem Gase ungefähr 100 000 Ionen,

ehe sie absorbiert wird, der elektrische Effekt, den die geladene  $\alpha$ -Partikel selbst hervorruft, ist also sehr gering neben dem, der von der Ionisierung des Gases herrührt. Da auf ein strahlenloses Produkt im allgemeinen ein Produkt folgt, welches  $\alpha$ -Partikeln von großer Geschwindigkeit aussendet, so würde der starke Ionisationseffekt, der von dem letzteren herrührt, die elektrische Wirkung des strahlenlosen Produktes selbst völlig überdecken, selbst wenn es geladene Teilchen von geringer Geschwindigkeit aussenden würde.

Es ist schwer, Versuche anzugeben, die eine Entscheidung zwischen diesen beiden Hypothesen bringen könnten; es sprechen jedoch viele Gründe für die Ansicht, daß bei einer „strahlenlosen“ Umwandlung eine  $\alpha$ -Partikel von so kleiner Geschwindigkeit ausgesandt wird, daß sie auf dem gewöhnlichen Wege nicht nachgewiesen werden kann.

### Die Eigenschaften der radioaktiven Produkte.

Mit wenigen Ausnahmen sind die Umwandlungsprodukte der Radioelemente in so geringen Mengen vorhanden, daß sie niemals durch direkte Bestimmung ihres Gewichtes oder Volumens hätten entdeckt werden können. Ihre Fähigkeit, ionisierende Strahlen auszusenden, dient nicht nur dazu, ihre Umwandlungsgeschwindigkeit zu messen, sondern erlaubt auch, einige ihrer physikalischen und chemischen Eigenschaften zu bestimmen.

Die elektrische Methode ist zur qualitativen und quantitativen Analyse außerordentlich geringer Mengen von radioaktiven Substanzen verwandt worden. Das Vorhandensein von  $10^{-11}$  g eines so langsam sich umwandelnden Elementes wie Radium läßt sich leicht beobachten, während in dem Falle einer schnell zerfallenden Substanz, wie der Thoriumemanation, noch ein Hundertmillionstel dieser kleinen Menge leicht nachweisbar ist. Wie früher gezeigt wurde, ist die elektrische Methode sogar leicht imstande, das Vorhandensein einer aktiven Materie anzuzeigen, in der nur ein Atom in der Sekunde zerfällt, vorausgesetzt, daß während der Umwandlung eine  $\alpha$ -Partikel von hoher Geschwindigkeit ausgesandt wird.

Mit Hilfe des Elektroskops ist der Anwendungsbereich chemischer Trennungsmethoden außerordentlich erweitert worden.

Es hat sich gezeigt, daß die gewöhnlichen Methoden der Abscheidung von Stoffen, einerlei, ob sie auf Unterschieden der Löslichkeit oder Flüchtigkeit, oder auf der Elektrolyse beruhen, sich noch auf Substanzmengen von verschwindender Größe anwenden lassen. Für die Entdeckung kleiner Mengen von aktiver Materie übertrifft das Elektroskop hinsichtlich der Empfindlichkeit weit aus die Wage und sogar das Spektroskop.

Das Studium der Radioaktivität hat so indirekt der Chemie neue Methoden zur Untersuchung von aktiven Stoffen, die in verschwindend geringer Menge vorhanden sind, geliefert. Auf diesem neuen Arbeitsgebiete, dessen Bedeutung bisher noch nicht genügend anerkannt ist, harren noch viele Aufgaben der Erledigung.

Es ist bereits auf den radikalen Unterschied in den Eigenschaften eines Umwandlungsproduktes und seiner Muttersubstanz aufmerksam gemacht. Ein gutes Beispiel hierfür ist die Umwandlung des Radiums in die Emanation, und die der Emanation in den aktiven Niederschlag. Jede dieser Substanzen ist den anderen nach chemischem und physikalischem Charakter völlig unähnlich, und man würde ohne weiteres kaum annehmen, daß diese Substanzen direkt von dem Radiumatom abstammen.

Das Atom verliert während der meisten seiner Umwandlungsphasen eine  $\alpha$ -Partikel, deren scheinbare Masse das doppelte des Wasserstoffatoms beträgt. Diese Abnahme von ungefähr 1 Proz., die die Masse des Atoms erfährt, veranlaßt die Bildung einer völlig neuen Anordnung der Komponenten des Atoms, die sich in dem radikalen Wechsel der physikalischen und chemischen Eigenschaften ausspricht. Diese Veränderung erscheint jedoch nicht sehr überraschend, wenn wir an chemische Analogien denken. Elemente, deren Atomgewichte nicht sehr verschieden sind, haben oft völlig verschiedene Eigenschaften, und man kann daher wohl erwarten, daß mit einer Abnahme der Atommasse ein Wechsel der Eigenschaften Hand in Hand geht.

Es kann jetzt kein Zweifel mehr darüber bestehen, daß die radioaktiven Produkte aus der Umwandlung der Atome und nicht aus der der Moleküle entstehen. Jedes Umwandlungsprodukt ist ein besonderes Element, welches sich von den anderen bekannten, inaktiven nur durch seine relative Unbeständigkeit unterscheidet. Es kann z. B. kein Zweifel darüber bestehen, daß die Radium-

emanation eine neue Elementarsubstanz ist, die sich durch ihr Atomgewicht und ihr Spektrum von allen anderen Elementen unterscheidet. Wenn es möglich wäre, eines der einfachen Produkte innerhalb eines Zeitraumes chemisch zu untersuchen, der kurz ist im Vergleich mit der Umwandlungsperiode, so würde die Substanz alle Eigenschaften eines neuen Elementes aufweisen. Sie würde ein bestimmtes Atomgewicht und Spektrum besitzen und besondere physikalische und chemische Eigenschaften haben. Die Frage, ob die Umwandlungsprodukte als chemische Elemente anzusehen sind, wird dadurch beantwortet, daß es nicht möglich ist, eine Grenzlinie zwischen den verhältnismäßig stabilen Elementen wie Uranium, Thorium und Radium einerseits und ihren schnell sich umwandelnden Produkten andererseits zu ziehen. Vom Standpunkte der Radioaktivität aus unterscheiden sich die Atome dieser Substanzen lediglich durch ihre Beständigkeit. Die Atome jedes Radioelementes können eine außerordentlich verschiedene Beständigkeit besitzen, aber schließlich müssen alle diese Substanzen eine Reihe von Umwandlungen durchmachen und selbst verschwinden. Nur die inaktiven oder beständigen Produkte ihrer Umwandlung werden am Ende übrig bleiben.

Es liegt kein Anzeichen dafür vor, daß der Zerfallsprozeß, wenn er einmal begonnen hat, unter gewöhnlichen Bedingungen rückgängig gemacht werden kann. Wir können die Radiumemanation aus dem Radium erhalten, wir können jedoch nicht die Emanation wiederum in Radium verwandeln. Die Frage, ob dieser Prozeß unter Bedingungen, die möglicherweise in der Geschichte der Erde vorgelegen haben, reversibel gewesen ist, wird später im neunten Kapitel behandelt werden.

### Die Lebensdauer der Radioelemente.

Jedes einfache strahlende Produkt erfährt durch seine Umwandlung in eine andere Substanz eine Verringerung seiner Menge. Die Umwandlungsgeschwindigkeit ist der Konstante  $\lambda$  direkt proportional und der Umwandlungsperiode indirekt. Die Periode eines einfachen Produktes kann als Maß für die Beständigkeit seines Atoms angesehen werden. Man sieht sofort, daß die Beständigkeit der Produkte, deren Umwandlungs-

geschwindigkeit direkt gemessen ist, sich zwischen außerordentlich weiten Grenzen ändert. Zum Beispiel sind die Atome von Radium-F, die in 140 Tagen zur Hälfte zerfallen, mehr als drei millionenmal beständiger, als die Atome der Aktiniumemanation, die in 3,9 Sekunden zur Hälfte zerfällt. Der Stabilitätsbereich der Atome dehnt sich noch weiter aus, wenn wir die Atome der primären Elemente Uranium und Thorium einrechnen.

Die Umwandlungsperioden dieser Elemente lassen sich angenähert aus dem Vergleich ihrer  $\alpha$ -Strahlenaktivitäten ableiten. Da Uranium die Muttersubstanz des Radiums ist, so sind die relativen Mengen, die von beiden in einem alten radioaktiven Mineral vorhanden sind, ihren Umwandlungsperioden direkt proportional. Es ist nachgewiesen, daß in jedem radioaktiven Mineral  $3,8 \times 10^{-7}$  g Radium auf 1 g Uranium kommen. Da Radium sich in ungefähr 1300 Jahren zur Hälfte umwandelt, muß Uranium in  $1300 \times \frac{10^7}{3,8}$  oder ungefähr  $3,4 \times 10^9$  Jahren zur Hälfte zerfallen.

Die Umwandlungsperiode des Thoriums ist wahrscheinlich vier- oder fünfmal größer als die des Uraniums, denn seine Aktivität ist ungefähr ebenso groß wie die des Uraniums, obwohl das Thorium fünf  $\alpha$ -Strahlenprodukte und das Uranium nur eines besitzt. Zur Umwandlung eines großen Bruchteiles einer gegebenen Uraniummenge sind mindestens zehntausend Millionen Jahre erforderlich.

Die Umwandlungsperiode des Aktiniums läßt sich nicht bestimmen, ehe nicht das Aktinium in reinem Zustande dargestellt ist. Wenn seine Aktivität jedoch von derselben Größenordnung wie die des Radiums ist, so wird auch seine Periode die gleiche Größenordnung besitzen.

Es scheint kein einfacher Zusammenhang zwischen den Perioden aufeinander folgender Produkte, oder zwischen den Perioden der verschiedenen Gruppen zu bestehen. Es ist jedoch zu bemerken, daß auf eine Substanz von großer Beständigkeit im allgemeinen eine Zahl von verhältnismäßig unbeständigen Produkten folgt. Gute Beispiele hierfür bieten Thorium, Radium und Aktinium, deren Produkte in der Mehrzahl eine schnelle Umwandlung erfahren.

## Der Zusammenhang zwischen Uranium, Radium und Aktinium.

Auf den Zusammenhang, der zwischen Uranium und Radium und seinen Produkten Radioblei und Polonium besteht, ist früher hingewiesen worden; es ist von Interesse, zu untersuchen, ob eine ähnliche Beziehung zwischen Uranium und Thorium einerseits und Uranium und Aktinium andererseits besteht. Das letztere findet sich stets in Uraniummineralien und muß, da wahrscheinlich seine Lebensdauer ungefähr ebenso groß ist wie die des Radiums, in irgend einer Weise aus der Muttersubstanz Uranium entstehen. Diese Frage wurde von Dr. Boltwood und dem Verfasser untersucht.

Wenn Aktinium einen Platz in der Hauptumwandlungsreihe des Uraniums einnähme, so sollte die Aktivität eines Uraniumminerals, die von Aktinium herrührt, etwa ebenso groß sein wie diejenige, die von Radium herrührt. Da in dem Mineral zwischen Uranium und Aktinium Gleichgewicht herrschen würde, so sollte von beiden die gleiche Zahl von Atomen in der Sekunde zerfallen. Aktinium besitzt vier und Radium fünf  $\alpha$ -Strahlenprodukte, es sollte daher die Aktivität des Aktiniums und seiner Produkte nahezu gleich der der Radiumfamilie sein. Die Versuche haben jedoch ergeben, daß z. B. die Aktivität des Uraninits von Colorado fast ausschließlich von dem Uranium und dem Radium herrührt. Die Aktivität, die durch die Aktiniumgruppe hervorgerufen wird, ist sicherlich nur ein kleiner Bruchteil derjenigen, die von dem Radium und seinen Umwandlungsprodukten herrührt. Es ist wahrscheinlich, daß Aktinium aus Uranium gebildet wird, daß es aber nicht in derselben Weise wie Radium ein linearer Abkömmling des Uraniums ist. Auf die Möglichkeit, daß aus einer Umwandlung zwei verschiedene Produkte entstehen können, ist bereits früher aufmerksam gemacht worden. Wahrscheinlich wird sich ergeben, daß Aktinium von dem Uranium oder einem seiner Produkte abstammt, aber in viel geringerer Menge gebildet wird, als ein gleichzeitig entstehendes anderes Produkt. Eine derartige Beziehung würde den Zusammenhang erklären, der offenbar zwischen Uranium und Aktinium besteht, und würde zugleich dem Umstande Rechnung tragen, daß Aktinium nur in so geringer Menge vorhanden ist.

Der Zusammenhang zwischen Uranium und Thorium läßt sich noch nicht gut übersehen. Manche Mineralien enthalten Uranium und sehr wenig Thorium, aber Strutt hat gezeigt, daß von allen untersuchten Thoriummineralien jedes etwas Uranium und Radium enthält. Strutt hat die Vermutung geäußert, daß Thorium die Muttersubstanz des Uraniums ist. Hierfür spricht die Zusammensetzung des Minerals Thorianit. Dieses Mineral, das aus sehr frühen geologischen Epochen stammt und in Ceylon gefunden wird, enthält ungefähr 70 Proz. Thorium und 12 Proz. Uranium. Das Uranium könnte durch den Zerfall des Thoriums entstanden sein. Gegen diese Annahme läßt sich jedoch ein sehr gewichtiger Einwand erheben; das Atomgewicht des Thoriums, 232,5, ist geringer als das gewöhnlich dem Uranium zugeschriebene Atomgewicht von 238,5. Wenn diese Atomgewichte richtig sind, so ist es unwahrscheinlich, daß Thorium die Muttersubstanz des Uraniums ist, wenn nicht die Bildung des Uraniums und Thoriums in ganz anderer Weise vor sich geht, als die anderen radioaktiven Umwandlungen.

## Achtes Kapitel.

### Die Entstehung von Helium aus Radium und die Umwandlung der Materie.

Die Geschichte der Entdeckung des Heliums weist einige sehr interessante Züge auf. Im Jahre 1868 beobachteten Janssen und Lockyer im Spektrum der Sonnenphotosphäre eine helle, gelbe Linie, welche in den Spektren der auf der Erde vorhandenen Stoffe nicht vorkommt. Lockyer nahm an, daß sie von einem neuen Element herrührte, dem er den Namen Helium gab. Weitere Untersuchungen ergaben, daß in dem Spektrum der Photosphäre gewisse andere Spektrallinien stets die gelbe Linie begleiten und für das Helium charakteristisch sind.