

Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Radioaktive Umwandlungen

Rutherford, Ernest

Braunschweig, 1907

Sechstes Kapitel. Ursprung und Lebensdauer des Radiums

Radium-D: enthalten in neuem Radioblei; strahlenlos; Periode 40 Jahre.

Radium-E: sendet β -Strahlen aus; wird durch Wismut-, Iridium- und Palladiumsalze gefällt; Periode 6 Tage.

Radium-F: enthalten im Polonium und Radiotellurium; sendet nur α -Strahlen aus; flüchtig bei 1000° ; wird auf Wismut und Palladium niedergeschlagen; Periode 143 Tage.

Wir haben gesehen, daß ungefähr 10 mg Radium-D sich aus einer Tonne Uranium gewinnen lassen sollten. Wenige Wochen nach der Abscheidung von Radium-D sollte seine β -Strahlenaktivität ungefähr 30 mal so groß sein wie die des Radiums. Eine kleine Menge dieser Substanz würde als eine wertvolle Quelle von β -Strahlen dienen und als ein geeignetes Mittel, um Radium-F zu gewinnen, da man jederzeit einen sehr starken Niederschlag von Radium-F, durch Eintauchen einer Wismut- oder Palladiumplatte in die Lösung, erhalten könnte. Es ist zu hoffen, daß Radium-D aus den Pechblenderückständen zugleich mit dem Radium gewonnen werden wird, es würde für viele Versuche ebenso wertvoll sein wie das Radium selbst.

Sechstes Kapitel.

Ursprung und Lebensdauer des Radiums.

Da Radium dauernd α -Partikeln aussendet und ein radioaktives Gas erzeugt, so muß seine Menge fortwährend abnehmen. Radium muß daher als eine radioaktive Substanz von der Art der Emanation angesehen werden, von der es sich vom Gesichtspunkte der Radioaktivität aus nur durch seine relativ geringe Umwandlungsgeschwindigkeit unterscheidet. Eine gegebene Menge von Radium muß schließlich verschwinden, es werden nach einer Reihe von Umwandlungen nur die inaktiven Substanzen zurückbleiben, die aus dem Zerfall des Radiums entstehen.

Die Zeit, die seit der Entdeckung des Radiums verfließen ist, ist viel zu kurz, als daß sich die Zerfallsperiode des Radiums durch direkte Versuche hätte bestimmen lassen können. Auch sehr sorgfältige Messungen der Aktivität des Radiums werden keinen Anhalt hierfür bieten, da die Bildung der langsam sich umwandelnden Produkte sogar eine stetige Zunahme der Aktivität während mehrerer Jahrhunderte bedingt.

Man kann jedoch die Periode des Radiums nach mehreren unabhängigen Methoden berechnen und zwar mit Hilfe 1. der Zahl der in der Sekunde ausgesandten α -Partikeln, 2. der Wärmeentwicklung des Radiums, 3. des Volumens der entwickelten Emanation.

Methode 1: Durch Messung der Ladung, welche die von einer dünnen Radiumschicht ausgesandten Strahlen transportieren, fand der Verfasser¹⁾, daß die Gesamtzahl der α -Partikeln, die 1 g Radium im Zustande seiner Minimalaktivität aussendet, $6,2 \times 10^{10}$ beträgt; hierbei ist angenommen, daß jede α -Partikel die gewöhnliche Ionenladung von $3,4 \times 10^{10}$ elektrostatischen Einheiten besitzt. Wenn sich das Radium im Gleichgewicht mit seinen schnellen Umwandlungsprodukten befindet, so ist die Zahl der ausgesandten α -Partikeln viermal so groß.

Die einfachste Voraussetzung ist die, daß jedes Atom bei seinem Zerfall eine α -Partikel aussendet. Hiernach zerfallen von 1 g Radium $6,2 \times 10^{10}$ Atome in der Sekunde. Aus experimentellen Daten ist nun abgeleitet, daß 1 ccm eines Gases (z. B. Wasserstoff) $3,6 \times 10^{19}$ Moleküle enthält. Da das Atomgewicht des Radiums 225 beträgt, so folgt hieraus, daß 1 g Radium ungefähr $3,6 \times 10^{21}$ Atome enthält. Der Bruchteil, der hiervon in der Sekunde zerfällt, beträgt:

$$\frac{6,2 \times 10^{10}}{3,6 \times 10^{21}} = 1,72 \times 10^{11},$$

oder $5,4 \times 10^{-4}$ im Jahr.

Wie jedes andere radioaktive Produkt wird das Radium exponential abnehmen und zwar mit einem Werte von $5,4 \times 10^{-4}$ (Jahre)⁻¹ für seine radioaktive Konstante.

Hieraus folgt, daß das Radium sich in 1300 Jahren zur Hälfte umwandelt. Die durchschnittliche Lebensdauer eines

¹⁾ Rutherford, Phil. Mag., August 1905.

Radiumatoms, die durch $1/\lambda$ gemessen wird, beträgt ungefähr 1800 Jahre.

Methode 2: Die Berechnung der Lebensdauer des Radiums kann auch auf die Wärmeentwicklung des Radiums basiert werden, welche, wie wir später (Kap. 10) sehen werden, ein direktes Maß für die kinetische Energie der α -Partikeln ist. Aus Messungen der Geschwindigkeit und der Masse der α -Partikel fand der Verfasser für die durchschnittliche kinetische Energie der α -Partikel $5,9 \times 10^{-6}$ Erg. Experimentell ist bestimmt, daß 1 g Radium eine Wärmemenge von ungefähr 100 g Kal. in der Stunde entwickelt. Wenn diese von der kinetischen Energie der α -Partikeln herrührt, so beträgt die Zahl, die in der Sekunde ausgesandt werden muß, $2,0 \times 10^{11}$. Die Zahl, die vom Radium selbst herrührt, ist ein Viertel dieses Wertes. Nach der oben angewandten Berechnungsweise ergibt sich, daß das Radium in 1600 Jahren zur Hälfte umgewandelt wird; diese Zahl weicht von der nach der ersten Methode berechneten nicht sehr ab.

Methode 3: Ramsay und Soddy fanden, daß das Volumen der von 1 g Radium entwickelten Emanation wenig mehr als 1 cmm bei Atmosphärendruck und 0° beträgt. Die Zahl der in der Sekunde gebildeten Atome der Emanation ist gleich dem Produkt aus der im Gleichgewichtszustande vorhandenen Zahl und λ , wenn λ die radioaktive Konstante der Emanation ist. Wenn man die wahrscheinlich zutreffende Annahme macht, daß die Emanation ein einatomiges Gas ist, und daß jedes Radiumatom bei seinem Zerfall ein Atom der Emanation bildet, so findet man für die Zahl der in der Sekunde zerfallenden Radiumatome $7,6 \times 10^{10}$, da 1 ccm eines Gases $3,6 \times 10^{19}$ Moleküle enthält. Hieraus erhält man für die Periode des Radiums nach der oben angewandten Berechnungsweise 1050 Jahre.

Die beiden ersten Methoden machen von der Zahl der in 1 ccm Gas enthaltenen Atome Gebrauch. Die Berechnung aus dem Volumen der Emanation läßt sich jedoch auf einem anderen Wege unabhängig von der Kenntnis jener Zahl ausführen. Wenn ein Radiumatom durch Verlust einer α -Partikel sich in ein Atom der Emanation verwandelt, so muß das Atomgewicht der Emanation mindestens 200 betragen. Der aus Diffusionsversuchen abgeleitete Wert beträgt nur etwa 100, es sind jedoch auf S. 85 einige Gründe angeführt worden, die dafür sprechen, daß dieser

Wert zu niedrig ist. Nach den obigen Voraussetzungen würde 1 cmm der Emanation soviel wie 100 cmm Wasserstoff, d. h. $8,96 \times 10^{-6}$ g wiegen. Das Gewicht der in der Sekunde gebildeten Emanationsmenge ist λ mal so groß wie diese Menge, d. h. $1,9 \times 10^{-11}$ g. Das Gewicht der in einem Jahre von 1 g Radium gebildeten Emanationsmenge beträgt also 6×10^{-4} g, und ungefähr ebenso groß muß das Gewicht der in einem Jahre zerfallenden Radiummenge sein. Hieraus ergibt sich die Periode des Radiums zu ungefähr 1300 Jahren.

Mit Rücksicht auf die Unsicherheit, mit der die für diese Rechnungen verwandten Zahlen behaftet sind, befinden sich die nach diesen drei Methoden abgeleiteten Werte der Periode in guter Übereinstimmung. Für Berechnungen werden wir 1300 Jahre als den wahrscheinlichsten Wert der Periode des Radiums benutzen.

Radium zerfällt also ziemlich schnell und in wenigen Jahrtausenden würde eine gegebene Menge Radium den größten Teil ihrer Aktivität verlieren. Es läßt sich leicht berechnen, daß nach 26 000 Jahren nur noch ein Millionstel der Masse des Radiums unverändert sein würde. Wenn wir z. B. annehmen, daß die Erde ursprünglich aus reinem Radium bestanden hätte, so würde ihre Aktivität jetzt ungefähr dieselbe sein, die heutzutage eine gute Sorte von Pechblende besitzt. Die Periode des Radiums ist sehr klein im Vergleich zu dem Alter der in der Erde enthaltenen Mineralien, und wenn man nicht die sehr unwahrscheinliche Annahme macht, daß Radium an einem sehr späten Datum der Geschichte plötzlich irgendwie gebildet ist, so ist man zu der Annahme gezwungen, daß Radium dauernd neu gebildet wird. Von Rutherford und Soddy wurde frühzeitig die Vermutung ausgesprochen, daß Radium ein Zerfallsprodukt eines der in der Pechblende vorhandenen radioaktiven Elemente sei. Sowohl Uranium wie Thorium könnten die Muttersubstanz des Radiums sein. Beide haben ein größeres Atomgewicht als Radium und beide wandeln sich, verglichen mit Radium, sehr langsam um. Schon eine flüchtige Überlegung macht es wahrscheinlich, daß das Radium aus Uranium entsteht, denn Radium findet sich in den Uraniummineralien stets in gewisser Menge, während einige Thoriummineralien sehr wenig Radium enthalten.

Wir werden jetzt aus der Annahme, daß Uranium die Muttersubstanz des Radiums ist, einige Konsequenzen ziehen.

Einige tausend Jahre nach der Bildung des Uraniums sollte die Menge des Radiums einen Maximalwert erreichen. Die Geschwindigkeit, mit der das Radium aus dem Uranium entsteht, ist dann ebenso groß, wie seine Zerfallsgeschwindigkeit; die Zahl der in der Sekunde zerfallenden Radiumatome ist gleich der Zahl der in der Sekunde zerfallenden Uraniumatome. Soviele wir bisher wissen, sendet Uranium nur eine α -Partikel während seiner Umwandlung in Uranium-X aus. Uranium-X sendet nur β - und γ -Strahlen aus. Andererseits sendet Radium und vier seiner Produkte, nämlich die Emanation, Radium-A, -C und -F α -Strahlen aus. Die Zahl der von Radium und seinen Produkten ausgesandten α -Partikeln sollte also fünfmal so groß sein, wie die des Uraniums. Unter der Annahme, daß die α -Partikel des Uraniums ungefähr dieselbe Ionisation hervorruft, wie die des Radiums, sollte die Aktivität eines aktiven Minerals, das größtenteils aus Uran besteht, ungefähr sechsmal so groß sein, wie die des Uraniums selbst. Die beste Pechblende ist nun ungefähr fünfmal stärker aktiv als Uranium, so daß die Forderung der Theorie angenähert in der Praxis erfüllt ist. Solange jedoch das Verhältnis nicht genau bekannt ist, in dem die α -Partikeln des Radiums und der Radiumprodukte ein Gas ionisieren, kann die Größe der zu erwartenden Aktivitäten nicht mit Sicherheit angegeben werden.

Eine andere Folgerung aus der Theorie ist die, daß die in irgend einem radioaktiven Mineral vorhandene Menge Radium stets dem Urangehalt proportional sein sollte. Dieses muß in jedem Falle zutreffen, vorausgesetzt, daß weder Uranium noch Radium durch chemische oder physikalische Mittel aus dem Mineral entfernt sind. Die experimentelle Untersuchung dieser interessanten Frage ist von Boltwood¹⁾, Strutt²⁾ und McCoy³⁾ ausgeführt und hat Resultate von der höchsten Bedeutung geliefert.

McCoy verglich die Aktivitäten verschiedener radioaktiver Mineralien und fand, daß die Aktivität stets ihrem Urangehalt sehr nahe proportional war. Da die aktiven Mineralien jedoch etwas Aktinium und gelegentlich etwas Thorium enthalten, so deutet dieses Resultat an, daß die Aktivität von allen diesen

¹⁾ Boltwood, Nature, 25. Mai 1904; Phil. Mag., April 1905.

²⁾ Strutt, Trans. Roy. Soc. A., 1905.

³⁾ McCoy, Ber. d. d. chem. Ges., Nr. 11, S. 2641 (1904).

Substanzen zusammengenommen dem Urangehalt proportional ist. Boltwood und Strutt schlugen einen direkten Weg ein, indem sie den Gehalt radioaktiver Mineralien an Uranium und Radium bestimmten, Die Menge des Uraniums wurde durch chemische Analyse festgestellt, während der Radiumgehalt durch Messung der Emanationsmenge bestimmt wurde, die bei der Auflösung des Minerals in Freiheit gesetzt wird. Der relative Betrag der Emanation läßt sich mit großer Genauigkeit mit Hilfe der elektrischen Methode bestimmen; dieses ist die einfachste Methode, quantitativ den Radiumgehalt verschiedener Mineralien zu bestimmen.

Aus den Versuchen von Boltwood und Strutt geht hervor, daß in jedem der untersuchten Mineralien zwischen dem Radiumgehalt und dem Uraniumgehalt ein nahezu konstantes Verhältnis besteht; eine Ausnahme besteht nur in einem Falle, den wir später noch eingehender besprechen werden. Die Mineralien stammten aus verschiedenen Fundorten Europas und Amerikas, und waren sowohl nach ihrer chemischen Zusammensetzung wie nach ihrem Uraniumgehalt sehr verschieden.

Die Versuche von Dr. Boltwood von der Yale-Universität, die mit großer Sorgfalt und Genauigkeit ausgeführt sind, zeigen eine überraschende Konstanz des Verhältnisses zwischen Uranium und Radium.

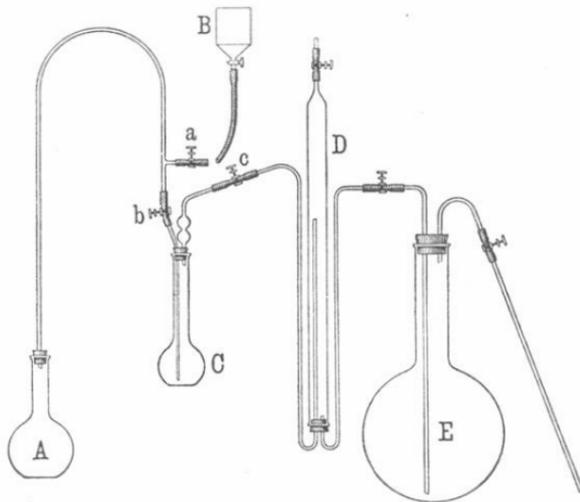
Das von Boltwood angewandte Messungsverfahren war kurz folgendes: Der Uraniumgehalt eines Minerals wurde zunächst durch chemische Analyse ermittelt. Dann wurde eine abgewogene Menge des Minerals in feingepulvertem Zustande in ein Glasgefäß *A* (Fig. 39) gebracht und eine zur Lösung hinreichende Menge Säure hinzugesetzt.

Die Säure wurde dann gekocht, bis das Mineral völlig aufgelöst war. Die hierbei entwickelte Emanation wurde über der Wassersäule in der Röhre *D* aufgefangen. Hierauf wurde die Emanation in ein evakuiertes Elektroskop von der in Fig. 6 (S. 31) dargestellten Art eingeführt und der Druck in dem Elektroskop durch Öffnen eines Hahnes auf Atmosphärendruck gebracht. Infolge der Bildung des aktiven Niederschlages erreichte die Entladungsgeschwindigkeit des Elektroskops erst ungefähr drei Stunden nach Einführung der Emanation ein Maximum. Die Geschwindigkeit des Goldblattes wurde als Maß für die vorhandene Emanationsmenge benutzt. Wenn mit der Radiumema-

nation zugleich Thorium- oder Aktiniumemanation aus dem Mineral in Freiheit gesetzt wurden, so waren sie wegen ihres schnellen Zerfalls völlig verschwunden, ehe die Radiumemanation in das Elektroskop eingeführt war.

Boltwood beobachtete, daß einige Mineralien ein beträchtliches Emanationsvermögen besaßen, d. h. daß sie auch im festen Zustande einen Teil ihrer Emanation abgaben. In diesem Falle würde die nach dem oben beschriebenen Versuchsverfahren gewonnene Emanationsmenge geringer sein als der Gleichgewichtsbetrag. Hierfür wurde eine geeignete Korrektur dadurch an-

Fig. 39.



gebracht, daß eine bekannte Menge des Minerals in einer Röhre einen Monat lang verschlossen gehalten wurde und mit demselben Elektroskop die Emanationsmenge bestimmt wurde, die sich während dieser Zeit in der Luft über dem Mineral angesammelt hatte. Die Summe beider Mengen gibt den wahren Gleichgewichtsbetrag der Emanation, der der Menge des vorhandenen Radiums entspricht.

Die Resultate Boltwoods sind in der folgenden Tabelle wiedergegeben. Die Zahlen der ersten Kolumne geben in willkürlicher Einheit die Menge der durch Lösung des Minerals erhaltenen Emanationsmenge; Kolumne II gibt den Prozentsatz der

Substanz	Vorkommen	I	II	III	IV
Uraninit	Nord-Carolina	170,0	11,3	0,7465	228
"	Colorado	155,1	5,2	0,6961	223
Gummit	Nord-Carolina	147,0	13,7	0,6538	225
Uraninit	Joachimstal	139,6	5,6	0,6174	226
Uranophan	Nord-Carolina	117,7	8,2	0,5168	228
Uraninit	Sachsen	115,6	2,7	0,5064	228
Uranophan	Nord-Carolina	113,5	22,8	0,4984	228
Thorogummit	"	72,9	16,2	0,3317	220
Carnotit	Colorado	49,7	16,3	0,2261	220
Uranothorit	Norwegen	25,2	1,3	0,1138	221
Samarskit	Nord-Carolina	23,4	0,7	0,1044	224
Orangit	Norwegen	23,1	1,1	0,1034	223
Fuxenit	"	19,9	0,5	0,0871	228
Thorit	"	16,6	6,2	0,0754	220
Fergusonit	"	12,0	0,5	0,0557	215
Aesclhynit	"	10,0	0,2	0,0452	221
Xenotim	"	1,54	26,0	0,0070	220
Monazit (Sand)	Nord-Carolina	0,88	—	0,0043	205
" (Kristall)	Norwegen	0,84	1,2	0,0041	207
" (Sand)	Brasilien	0,76	—	0,0031	245
" (Kristall)	Connecticut	0,63	—	0,0030	210

in die Luft entweichenden Emanation an; aus Kolumne III ist der Uraniumgehalt des Minerals zu ersehen und Kolumne IV enthält das Verhältnis aus der Gleichgewichtsmenge der Emanation und dem Uragehalt.

Wenn der Radiumgehalt in einem bestimmten Verhältnis zu dem Uragehalt steht, so sollten die Zahlen der Kolumne IV gleich groß sein. Abgesehen von einigen Monaziten ist die Übereinstimmung vorzüglich; die Resultate erbringen mit Rücksicht darauf, daß der Uraniumgehalt der Mineralien in so weiten Grenzen wechselt und die Mineralien aus so verschiedenen Fundorten stammen, einen direkten und zufriedenstellenden Beweis dafür, daß der Radiumgehalt von Mineralien dem Uragehalt direkt proportional ist.

Als Beweis dafür, daß dieses Verhältnis als eine physikalische Konstante aller radioaktiven Mineralien angesehen werden kann, mag folgendes angeführt werden. Boltwood beobachtete, daß einige Monazite eine beträchtliche Menge von Radium enthielten, obwohl nach voraufgehenden Analysen kein Uranium vorhanden war. Eine sorgfältige Untersuchung ergab jedoch, daß Uranium in der zu erwartenden Menge vorhanden war. Die Anwesenheit von Phosphaten hatte die Auffindung des Uraniums bei den ersten Analysen verhindert.

Die Konstanz des Verhältnisses aus dem Radium- und dem Uragehalt ist in einem interessanten Ausnahmefall nicht vorhanden. Danne fand kürzlich, daß in gewissen Ablagerungen in der Umgebung von Issy l'Évêque im Saône-et-Loire-Distrikt beträchtliche Radiummengen vorhanden waren, daß sich in ihnen jedoch keine Spur von Uranium nachweisen ließ. Das Radium findet sich in Pyromorphit (Bleiphosphat) und in bleihaltigem Ton, in dem ersteren jedoch gewöhnlich in größeren Mengen. Der Pyromorphit findet sich in Adern von Quarz und Feldspat. Die Adern waren stets feucht infolge des Vorhandenseins naher Quellen. Der Uragehalt des Pyromorphits wechselt bei den verschiedenen Proben erheblich, doch ist nach Danne im Durchschnitt ein Zentigramm Radium pro Tonne vorhanden.

Es ist wahrscheinlich, daß das Radium durch unterirdische Quellen aufgelöst ist und sich in dem Gestein abgesetzt hat. Das Vorkommen des Radiums in jener Gegend ist nicht auffallend, denn Autunitkristalle sind nur ungefähr 70 km von jener Stelle

gefunden worden. Hierdurch wird die Vermutung nahegelegt, daß Ablagerungen von großem Radiumgehalt noch an solchen Stellen entdeckt werden können, in denen die Bedingungen für die Lösung und Wiederablagerung des Radiums günstig waren.

Der Radiumgehalt von Mineralien.

Die Radiummenge, die in einem Mineral auf 1 g Uranium kommt, ist eine wohldefinierte Konstante, die sowohl praktisch wie theoretisch eine gewisse Bedeutung besitzt. Diese Konstante ist kürzlich von Rutherford und Boltwood ¹⁾ durch Vergleich der Emanationsmengen bestimmt, die ein bekanntes Gewicht von Pechblende einerseits, und eine Lösung reinen Radiumbromids von bekanntem Gehalt andererseits entwickelt. Zur Herstellung der Radiumlösung wurde eine abgewogene Menge von Radiumbromid verwandt, das aus der Braunschweiger Chininfabrik bezogen war und nach vorausgegangener kalorimetrischer Messung eine Wärmeentwicklung von mehr als 100 g Kal. in der Stunde per Gramm Radium besaß. P. Curie und Laborde fanden, daß ihre Präparate aus reinem Radiumbromid ungefähr 100 g Kal. per Stunde abgaben. Das angewandte Radiumpräparat war also nahezu rein. Durch wiederholte Verdünnung der ursprünglichen Lösung wurde eine Vergleichslösung hergestellt, die 10^{-6} g Radiumbromid im Kubikzentimeter enthielt. Wenn die Formel des Radiumbromids als RaBr_2 und für das Atomgewicht des Radiums 225 angenommen wurde, ergab sich, daß auf jedes Gramm Uranium in dem Mineral $3,8 \times 10^{-7}$ g Radium kamen.

Hieraus folgt, daß in einem Mineral jede Tonne Uranium 0,34 g Radium enthält. Da die radioaktiven Mineralien, aus denen Radium gewonnen wird, gewöhnlich ungefähr 50 Proz. Uranium enthalten, so sollten sich aus einer Tonne des Minerals ungefähr 0,17 g Radium gewinnen lassen.

Strutt erhielt einen ungefähr doppelt so großen Wert, ihm fehlten jedoch die Mittel, die Reinheit seines Radiumbromids zu untersuchen.

¹⁾ Die erste Ermittlung dieser Konstante durch Rutherford und Boltwood (Amer. Sci., Juli 1905) ergab den Wert $7,4 \times 10^{-7}$. Später fanden sie, daß dieser Wert infolge einer Ausfällung des Radiums in der Radiumlösung mit einem Fehler behaftet war.

Nimmt man an, daß die α -Partikeln des Radiums, seiner Umwandlungsprodukte und des Uraniums mit gleicher Geschwindigkeit fortgeschleudert werden, so sollte die Aktivität des Radiums und seiner schnell sich umwandelnden Produkte im Gleichgewichtszustande viermal so groß sein wie die des Urans. Setzt man die Aktivität des Radiums ungefähr drei Millionen Mal größer an, als die des Urans, so findet man für die Radiummenge, die diese Aktivität hervorbringen kann,

$$\frac{4}{3 \times 10^6} = 1,33 \times 10^{-6} \text{ g.}$$

Die beobachtete Menge von $3,8 \times 10^{-7}$ ist erheblich geringer. Die Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment wird jedoch viel besser, wenn man der experimentell beobachteten Tatsache Rechnung trägt, daß die α -Partikeln des Radiums im Durchschnitt ein größeres Durchdringungsvermögen besitzen als die des Uraniums, und infolgedessen eine größere Ionisation hervorrufen.

Die Bildung des Radiums in Uranlösungen.

Die Konstanz des Verhältnisses zwischen Radium- und Uran-gehalt in allen radioaktiven Mineralien und die Übereinstimmung zwischen den berechneten und beobachteten Mengen bilden sehr beweiskräftige Stützen der Hypothese, daß Uranium die Mutter-substanz des Radiums ist. Diese Theorie kann jedoch nicht als völlig gesichert gelten, bis experimentell nachgewiesen ist, daß Radium in Uranlösungen, die ursprünglich frei von Radium waren, allmählich sich bildet.

Die Geschwindigkeit, mit der Radium sich nach der Zerfallstheorie bilden sollte, läßt sich leicht berechnen. Auf S. 147 ist berechnet, daß von einer gegebenen Radiummenge der Bruchteil $5,4 \times 10^{-4}$ in einem Jahre zerfallen sollte. Die Radiummenge, die in Mineralien auf 1 g Uran kommt, beträgt $3,8 \times 10^{-7}$ g. Damit der Radiumgehalt eines Minerals nicht abnimmt, muß im Jahre per Gramm Uranium $5,4 \times 10^{-4} \times 3,8 \times 10^{-7} = 2 \times 10^{-10}$ g Radium neugebildet werden. Aus 1 kg Uran sollte man also im Jahre 2×10^{-7} g Radium erhalten. Die von einer solchen Menge Radium gebildete Emanation würde ein Goldblattelektroskop in wenigen Sekunden entladen, während die im Laufe eines Tages gebildete Radiummenge sich noch leicht messen lassen müßte.

Versuche über die Bildung des Radiums durch Uran wurden zuerst von Soddy¹⁾ unternommen. Zu den Versuchen diente eine Lösung von 1 kg Urannitrat. Diese wurde zuerst chemischen Reaktionen unterworfen, um die anfangs vorhandene kleine Radiummenge zu entfernen, und wurde dann in einem geschlossenen Gefäße aufbewahrt. Der Gleichgewichtsbetrag der in der Lösung gebildeten Emanation wurde dann von Zeit zu Zeit bestimmt. Vorversuche zeigten, daß die Bildungsgeschwindigkeit des Radiums sicher geringer war, als nach der Theorie zu erwarten ist, und anfangs zeigten sich nur kleine, kaum merkbare Anzeichen der Radiumbildung. Bei späteren Versuchen fand Soddy jedoch, daß im Verlauf von $1\frac{1}{2}$ Jahren der Radiumgehalt der Lösung deutlich zugenommen hatte. Die Lösung enthielt nach diesem Zeitraum ungefähr $1,6 \times 10^{-9}$ g Radium. Hiernach zerfällt von dem Uranium ein Bruchteil von ungefähr 2×10^{-12} im Jahre, gegenüber dem hundertmal größeren theoretischen Werte von 2×10^{-10} .

Whetham erhielt ein ähnliches Resultat, fand aber eine größere Bildungsgeschwindigkeit als Soddy. Andererseits fand Boltwood kein sicheres Anzeichen für die Bildung des Radiums aus Uranium, obwohl eine außerordentlich geringe Menge Radium in seinem Apparate nachweisbar war. Bei Boltwoods Versuchen wurden 100 g Urannitrat durch fraktionierte Kristallisation fast völlig von Radium befreit; in der Lösung konnte keine Spur von Radium mehr entdeckt werden, obwohl sich die Anwesenheit von $1,7 \times 10^{-11}$ g noch hätte bemerkbar machen müssen.

Nachdem die Lösung ein Jahr gestanden hatte, war noch nicht genug Emanation gebildet, um einen Effekt in dem Elektroskop hervorzurufen, welches dieselbe Empfindlichkeit wie in den ersten Versuchen besaß. Hieraus geht hervor, daß Uranium, welches in der von Boltwood angewandten Weise gereinigt ist, im Laufe eines Jahres sicherlich keine meßbare Menge Radium bildet, und daß diese Menge gewiß kleiner ist, als $\frac{1}{1000}$ des theoretisch berechneten Betrages.

Obwohl die experimentelle Untersuchung also etwas widerspruchsvolle Resultate ergeben hat, so kann es doch, meiner Ansicht nach, nicht zweifelhaft sein, daß das Uranium von Soddy

¹⁾ Soddy, Nature, 12. Mai 1904, 19. Jan. 1905; Phil. Mag., Juni 1905.

ein Anwachsen des Radiumgehaltes zeigte, obwohl nur ein Bruchteil der berechneten Menge gebildet war. Soweit wir bisher wissen, zerfällt Uranium unter Aussendung einer α -Partikel und bildet Uranium-X, das eine Periode von 22 Tagen besitzt und β - und γ -Strahlen abgibt. Weitere aktive Produkte sind nicht aufgefunden, so daß wir nicht sagen können, welche Umwandlungsstadien noch auftreten, ehe Radium gebildet wird. Wenn z. B. das Umwandlungsprodukt von Uranium-X strahlenlos ist und eine sehr große Periode besitzt, so läßt sich die geringe Geschwindigkeit, mit der Radium aus Uran gebildet wird, ohne weiteres erklären. Wenn, wie bei den Versuchen von Boltwood, das Uranium sorgfältig gereinigt ist, so kann möglicherweise das strahlenlose Produkt ganz aus dem Uran entfernt sein. Ehe sich dann das Radium in meßbarem Betrage bilden könnte, müßte das strahlenlose Zwischenprodukt in erheblicher Menge gebildet sein. Würde das Zwischenprodukt eine Periode von mehreren tausend Jahren haben, so müßte ein Zeitraum von mehreren Jahren vergehen, ehe das Vorhandensein von Radium nachgewiesen werden könnte ¹⁾.

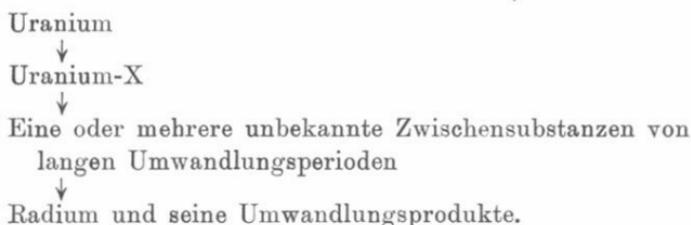
Diese Annahme des Vorhandenseins einer Übergangssubstanz würde auch den Widerspruch zwischen den Versuchen von Soddy und Boltwood erklären. Bei Soddys Versuchen wurden die anfangs vorhandenen Spuren von Radium teilweise durch Fällung von Bariumsulfat aus der Uraniumlösung entfernt. Diese Fällung kann jedoch das Zwischenprodukt unberührt gelassen haben, das sich in dem Uranium schon mehrere Jahre lang angesammelt hatte. Die unvollkommen gereinigte Lösung von Soddy war daher besser geeignet, das Anwachsen des Radiums zu zeigen, als die sorgfältig gereinigte Lösung von Boltwood.

Ich denke, daß kein begründeter Zweifel darüber bestehen kann, daß die reine Uraniumlösung schließlich eine Bildung von

¹⁾ Boltwood [Nature, 15. Nov. 1906; Phys. Zeitschr. 7, 915 (1906)] hat kürzlich gefunden, daß in Aktiniumpräparaten Radium mit annähernd der Geschwindigkeit gebildet wird, die theoretisch zu erwarten ist, wenn Radium ein Zerfallsprodukt des Aktiniums ist. Vielleicht ist Aktinium die Muttersubstanz des Radiums und entsteht selbst aus Uranium. Boltwoods Befund, daß der Aktiniumgehalt von Mineralien ihrem Urangehalt proportional ist, befindet sich mit dieser Hypothese im Einklang.

Radium zeigen wird, wenn auch mehrere Jahre verstreichen müssen, ehe die neugebildete Menge sich nachweisen läßt.

Die Umwandlungen im Uranium, die zur Bildung des Radiums führen, sind unten zusammengestellt.



Zweifellos werden die Zwischenprodukte zwischen Uranium-X und Radium schließlich einmal chemisch abgeschieden werden. Wenn wir annehmen, daß nur ein Zwischenprodukt besteht, so ist es nicht unwahrscheinlich, daß es strahlenlos sein wird. Die Anwesenheit eines solchen Produktes würde sich durch die Eigenschaft des Produktes, anfangs Radium mit konstanter Geschwindigkeit zu bilden, nachweisen lassen. Wenn beispielsweise das unbekannte Produkt völlig aus einer Menge eines radioaktiven Minerals abgeschieden wäre, die 1 kg Uran enthielt, so würde es anfangs ungefähr 2×10^{-7} g Radium im Jahre, oder $5,5 \times 10^{-10}$ g im Tage bilden. Die letztere Menge ist leicht meßbar und der Beweis für die Bildung von Radium aus dieser Substanz sollte daher nur wenige Wochen in Anspruch nehmen.

Die Beziehung, in der Radium zu Uran steht, ist einzigartig in der Chemie. Wahrscheinlich wird sich für alle radioaktiven Elemente und möglicherweise auch für einige nichtaktive Substanzen eine derartige Beziehung auffinden lassen; es ist nämlich auffallend, daß gewisse Elemente in Mineralien stets in ungefähr dem gleichen relativen Verhältnisse vorkommen, obwohl die Chemie keinen Grund für diese Gemeinschaft ersehen läßt.
