universität innsbruck
Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

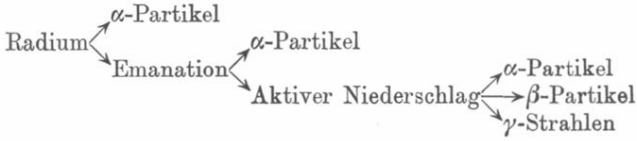
Radioaktive Umwandlungen

Rutherford, Ernest

Braunschweig, 1907

Viertes Kapitel. Die Umwandlung des aktiven Niederschlages des Radiums

urn:nbn:at:at-ubi:2-5847



Die auffallenden Unterschiede in dem chemischen und physikalischen Verhalten eines Zerfallsproduktes und seiner Muttersubstanz treten deutlich bei einem Vergleich des Radiums mit der von ihm gebildeten Emanation zutage. Radium ist ein fester Körper mit dem Atomgewicht 225, und seinem chemisthen Verhalten nach eng mit dem Baryum verwandt. Es besitzt ein wohlcharakterisiertes Spektrum, das in mancher Beziehung dem der Erdalkalien analog ist. Radium ist bei gewöhnlichen Temperaturen nicht flüchtig und besitzt, abgesehen von seiner Radioaktivität, alle Eigenschaften eines dem Baryum nahestehenden Elementes. Andererseits ist die Emanation ein chemisch träges Gas, welches sich nicht mit irgend einer anderen Substanz chemisch vereinigen läßt. Ihr Spektrum von hellen Linien gleicht seinem allgemeinen Charakter nach den Spektren der Gase der Argon-Helium-Familie. Sie wird bei — 150°C kondensiert. Abgesehen von der Radioaktivität sind also die Eigenschaften der Emanation völlig von denen der Muttersubstanz verschieden, und wenn wir nicht den Beweis hätten, daß die Emanation aus Radium entsteht, so würde nichts dafür sprechen, daß diese beiden Stoffe in irgend einer Beziehung zueinander ständen.

Viertes Kapitel.

Die Umwandlungen des aktiven Niederschlages des Radiums.

In dem vorhergehenden Kapitel ist erwähnt worden, daß alle Gegenstände, die mit der Radiumemanation in Berührung kommen, sich mit einem unsichtbaren aktiven Niederschlage bedecken, der sich in seinen physikalischen und chemischen Eigen-

schaften scharf von der Emanation unterscheidet. Diese Fähigkeit des Radiums, auf Gegenständen seiner Umgebung Aktivität zu erzeugen oder zu „induzieren“, wurde zuerst von P. Curie[1]) beobachtet, und ist in den letzten Jahren der Gegenstand zahlreicher Untersuchungen gewesen.

In diesem Kapitel werden wir die Umwandlungen besprechen, die in dem aktiven Niederschlage vor sich gehen, wir werden sehen, daß der aktive Niederschlag aus drei verschiedenen Substanzen besteht, die Radium-A, -B und -C genannt worden sind. Radium-A entsteht direkt durch die Umwandlung der Emanation, Radium-B entsteht aus Radium-A, und Radium-C aus Radium-B.

Die drei Produkte werden also durch den stufenförmigen Zerfall der Emanation gebildet. Die Analyse dieser Vorgänge ist etwas schwieriger, als in dem beim Thorium bereits behandelten Falle von zwei Umwandlungen, sie läßt sich jedoch nach derselben allgemeinen Methode ausführen.

Der aktive Niederschlag des Radiums ist in vielen Beziehungen dem aktiven Niederschlage des Thoriums ähnlich. Er ist materieller Natur und schlägt sich in Abwesenheit eines elektrischen Feldes aus dem Gase auf der Oberfläche aller Körper nieder, die sich in Berührung mit der Emanation befinden. In einem starken elektrischen Felde wird er zum größten Teil auf der negativen Elektrode konzentriert. In dieser Hinsicht verhält er sich ähnlich wie der aktive Niederschlag des Thoriums. Die aktive Substanz läßt sich von einem Platindraht teilweise mit Salzsäure ablösen und bleibt nach Verjagung der Säure zurück. Bei Verwendung der Emanation von ungefähr 10 mg Radiumbromid erhält man außerordentlich aktive Drähte. Der aktive Niederschlag ruft auf Willemit- oder Zinksulfidschirmen helle Fluoreszenz hervor. Die aktive Substanz befindet sich nur auf der Oberfläche der Gegenstände, auf denen sie niedergeschlagen ist. Wenn ein stark aktiver Draht über einen Schirm aus Willemit oder einer anderen Substanz gezogen wird, die unter dem Einfluß der Strahlen aufleuchtet, so bleibt eine hell leuchtende Spur zurück. Diese Erscheinung rührt daher, daß ein Teil des aktiven Niederschlages durch den Schirm von dem Drahte abgestreift wird. Das Leuchten

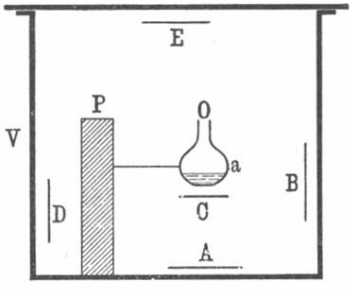
---

[1]) M. u. Mme. Curie, Compt. rend. **129**, 714 (1899).

nimmt allmählich ab und ist nach drei Stunden fast verschwunden. Daß man den aktiven Niederschlag durch Reiben entfernen kann, läßt sich auch leicht zeigen, wenn man einen aktiven Draht mit einem Stück Zeug abwischt und dieses dann in die Nähe eines Elektroskops bringt. Das Elektroskop entlädt sich fast augenblicklich, und das Tuch behält seine Aktivität im abnehmenden Maße für mehrere Stunden bei.

Im Falle einer kurzlebigen Emanation, wie der des Thoriums, ist in Abwesenheit eines elektrischen Feldes die induzierte Aktivität am größten auf Körpern, die sich nahe der emanierenden Thoriumverbindung befinden. Diese Beobachtung erklärt sich daraus, daß die Emanation zerfällt, bevor sie sich durch Diffusion weit von ihrer Quelle entfernen kann. Benutzt man andererseits in einem gleichen Gefäße Radium als Emanationsquelle, so bildet sich die induzierte Aktivität gleichmäßig auf allen Gegenständen innerhalb des Gefäßes. Das Leben der Radiumemanation ist lang, verglichen mit der Zeit, die sie gebraucht, um sich durch Diffusion in dem ganzen Gefäße zu verteilen.

Fig. 23.



Verteilung der induzierten Aktivität in einer Atmosphäre von Radiumemanation.

Gegenstände, die gegen die direkte Bestrahlung durch das Radium völlig geschützt sind, werden aktiv. Dieses geht deutlich aus einem Versuch von P. Curie hervor, der in Fig. 23 veranschaulicht ist.

Ein kleines offenes Gefäß, welches eine Radiumlösung enthielt, wurde in einen geschlossenen Behälter gestellt, in dem die Platten *A*, *B*, *C*, *D*, *E* in verschiedenen Stellungen angebracht waren. Nach einer Expositionszeit von einem Tage waren alle Platten aktiv geworden, selbst die in der Position *D*, die gegen die direkten Strahlen des Radiums durch eine Bleiplatte *P* abgeschirmt war.

Die Aktivität der Flächeneinheit ist bei verschiedenartigen Platten, die sich in derselben Stellung befinden, unabhängig von

ihrem Material; eine Glimmerplatte wird ebenso stark aktiv wie eine Metallplatte. Die Größe der induzierten Aktivität hängt in gewissem Grade von dem freien Raum in der Nachbarschaft ab. Die untere Fläche der Platte *A* würde zum Beispiel weniger aktiv sein, als die obere, da der aktive Niederschlag, der sich auf der Unterseite niederschlägt, wesentlich aus dem kleinen Gasvolumen stammt, das sich zwischen der Platte und der Wand befindet, während der Bereich, aus dem sich der aktive Niederschlag der oberen Platte absetzt, viel größer ist.

Die Emanation von mehreren Milligrammen Radiumbromid induziert auf einem Draht oder auf einer Metallplatte eine so starke Aktivität, daß der Ionisationsstrom, den sie hervorruft, leicht mit einem empfindlichen Galvanometer gemessen werden kann. Bei der Untersuchung so stark aktiver Platten ist eine hohe Spannung zur Erreichung des Sättigungsstromes erforderlich, wenn nicht die Platten des Versuchsgefäßes sehr nahe beieinander sind.

Wir wollen zunächst die Gründe anführen, welche dafür sprechen, daß der aktive Niederschlag ein Zerfallsprodukt der Emanation ist. Wenn Radiumemanation in ein zylindrisches Versuchsgefäß, wie das in Fig. 10, eingeleitet ist, so wächst die Aktivität mehrere Stunden lang an, indem sie im allgemeinen einen doppelt so großen Betrag erreicht, als sie im Moment der Einleitung der Emanation besaß. Die Zunahme ändert sich jedoch in gewissem Grade mit den Dimensionen des Versuchsgefäßes, weil das Durchdringungsvermögen der von den einzelnen Produkten ausgesandten α-Strahlen verschieden ist.

Wenn die Emanation ausgeblasen wird, so bleibt der aktive Niederschlag zurück und verliert den größten Teil seiner Aktivität in wenigen Stunden. Die Fähigkeit, einen aktiven Niederschlag zu erzeugen, fehlt dem Radium, wenn es von der Emanation befreit ist, und kommt der Emanation allein zu. Die induzierte Aktivität ist stets proportional zu der Menge der vorhandenen Emanation, einerlei wie alt die Emanation ist. Wenn man zum Beispiel Emanation für einen Monat in einem Gasometer aufspeichert und dann den noch nicht zersetzten Rest in ein Versuchsgefäß leitet, so erhält man noch immer induzierte Aktivität; und zwar ist das Verhältnis der noch vorhandenen Emanation zu der Menge des gebildeten aktiven Niederschlages das gleiche, wie bei frisch aus Radium gewonnener Emanation.

Die Konstanz dieses Verhältnisses zwischen der Menge der Emanation und der Menge des gebildeten aktiven Niederschlages ist ohne weiteres verständlich, wenn der aktive Niederschlag aus der Emanation entsteht. Wir wollen annehmen, daß ein Gegenstand eine konstante Zufuhr von Emanation erfährt; seine Aktivität erreicht nach ungefähr fünf Stunden einen konstanten Wert. Es herrscht dann ein Gleichgewichtszustand zwischen dem aktiven Niederschlag und der Emanation. Unter diesen Umständen müssen ebensoviele Atome von Radium-A in der Sekunde zerfallen, als durch die Umwandlung der Emanation neu gebildet werden. Und diese Zahl ist wiederum gleich der Anzahl der in der Sekunde zerfallenden Emanationsatome. Das gleiche gilt für Radium-B und Radium-C. Da für jedes einzelne Produkt die Anzahl der in der Sekunde zerfallenden Atome von Radium-A proportional zu der vorhandenen Gesamtzahl ist, so muß im Gleichgewichtszustande die Zahl der Atome von Radium-A proportional der Anzahl der Atome der Emanation sein. Wenn λ die radioaktive Konstante der Emanation und λ_A, λ_B, λ_C die Konstanten für Radium-A, -B und -C sind, so werden die im Gleichgewicht vorhandenen Mengen der drei Produkte N_A, N_B, N_C durch die Gleichungen gegeben:

$$\lambda_A N_A = \lambda_B N_B = \lambda_C N_C = \lambda N,$$

worin N die Gesamtzahl der vorhandenen Emanationsatome ist. Nach Erreichung des Gleichgewichtszustandes ist für die einzelnen Produkte die Anzahl der von jedem vorhandenen Atome verschieden. Für jedes Produkt ist sie proportional seiner Periode, so daß eine schnell sich umwandelnde Substanz in geringerer Menge vorhanden ist, als eine von langer Periode.

Befindet sich die Emanation in einem geschlossenen Gefäß, so nimmt ihre Menge, wie wir gesehen haben, exponential ab. Da die Perioden der Produkte des aktiven Niederschlages, verglichen mit der der Emanation, klein sind, so erreicht die Menge des aktiven Niederschlages nach wenigen Stunden praktisch den Gleichgewichtszustand und nimmt dann im gleichen Schritt mit der Emanation ab.

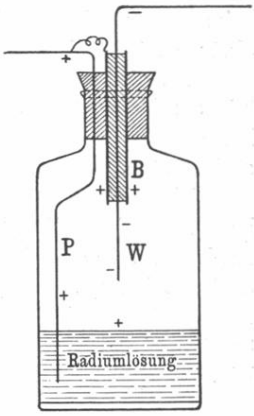
Die induzierte Aktivität wird also mit der gleichen Geschwindigkeit wie die Emanation abfallen. Diese Proportionalität ist, wie wir gesehen haben, von Curie und Danne benutzt

worden, um die Zerfallskonstante der Emanation durch Messung der β- und γ-Strahlen zu bestimmen, die aus einem geschlossenen Gefäß austreten, welches die Emanation enthält.

Die Aktivitätskurven des aktiven Niederschlages.

Wir werden jetzt im einzelnen die Veränderung betrachten, die die Aktivität des Niederschlages unter verschiedenen Bedingungen erfährt. Die experimentellen Ergebnisse erscheinen zunächst sehr verwickelt, denn die Gestalt der Aktivitätskurven ändert sich nicht nur stark mit der Expositionszeit, sondern ist auch davon abhängig, ob α-, β- oder γ-Strahlen zur Messung verwandt sind. Es ist demnach notwendig, in jedem Falle nicht nur die Expositionszeit, sondern auch die zur Messung benutzte Strahlenart anzugeben.

Fig. 24.



Anordnung zur Konzentrierung des aktiven Niederschlages auf einem kleinen negativ geladenen Drahte.

Die Zerfallskurven des aktiven Niederschlages sind unabhängig von der Natur und der Größe des aktiv gemachten Gegenstandes und von der Menge der angewandten Emanation. Wenn ein Draht aktiv gemacht werden soll, so ist die in Fig. 24 angedeutete Anordnung sehr zweckmäßig.

Eine Radiumlösung wird in ein mit Gummistopfen verschlossenes Gefäß gebracht. Die Emanation sammelt sich in dem Luftraum über der Lösung an. Der dünne Draht W, der aktiv gemacht werden soll, wird in ein enges Loch gesteckt, das in das Ende des den Stopfen zentral durchsetzenden Stabes gebohrt ist. Dieser Stab kann frei durch den Ebonitstopfen gleiten, der in der Messingröhre B befestigt ist. Ein Platindraht P durchsetzt den Gummistopfen und taucht in die Lösung ein.

Der Platindraht ist in metallischer Verbindung mit der Messingröhre. Der mittlere Stab ist mit dem negativen, der Platindraht mit dem positiven Pol einer Batterie von 300 oder

400 Volt verbunden. Bei dieser Anordnung sind die feuchten Wände des Gefäßes, die Lösung und die Röhre *B* positiv geladen, nur der Draht *W* ist negativ geladen. Der aktive Niederschlag konzentriert sich infolgedessen auf ihm, und der Draht wird in Gegenwart einer großen Menge Emanation sehr stark aktiv.

Nach Einführung des Drahtes verschließt man die Austrittsstelle des Stabes mit etwas Wachs, um das Entweichen der Emanation zu verhindern. Nachdem der Draht für die gewünschte Zeit exponiert war, wird der Stab herausgezogen und der aktive Draht abgenommen. Da der dünne Draht einen kleineren Durchmesser hat als der Stab, so berührt der Draht beim Herausnehmen die Wände nicht, so daß nichts von dem aktiven Niederschlag abgestreift wird.

Um die Änderung, die die α-Strahlenaktivität dieses Drahtes mit der Zeit erfährt, zu untersuchen, befestigt man ihn an dem Ende eines Messingstabes, der die Zentralelektrode in einem Versuchsgefäße, wie es in Fig. 10 abgebildet ist, bildet.

Wenn eine größere Oberfläche aktiv gemacht werden soll, so legt man einen Metallstreifen in eine verschließbare Glasröhre. Nach Evakuierung der Röhre leitet man die Emanation ein, der aktive Niederschlag setzt sich dann durch Diffusion auf dem Metall ab. Nach beendigter Exposition wird die Aktivität des Streifens in einem Apparate mit parallelen Platten, ähnlich dem in Fig. 9 angegebenen, gemessen.

Die Kurven der α-Strahlenaktivität.

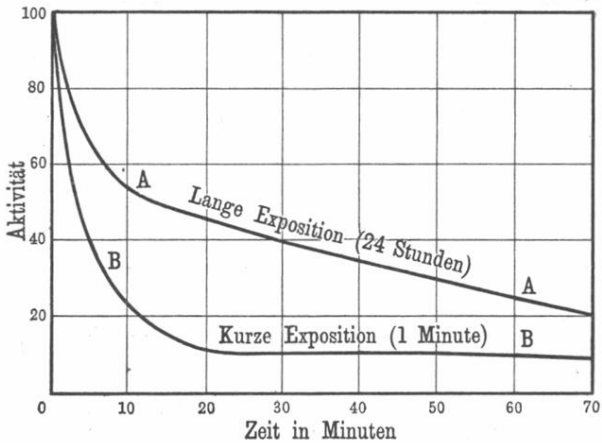
Wir wollen zunächst den Abfall der α-Strahlenaktivität eines Drahtes besprechen, der für kurze Zeit der Emanation exponiert war. Wir setzen voraus, daß die Expositionszeit — nicht mehr wie eine Minute — kurz ist, verglichen mit der Umwandlungsperiode der aktiven Substanz. Die Resultate eines Versuches sind in der Kurve *BB* der Fig. 25 wiedergegeben, bei deren Zeichnung die Maximalaktivität, die der Draht gleich nach der Entfernung aus der Emanation besaß, als 100 angesetzt ist.

Die Aktivität nimmt zunächst sehr angenähert nach einem Exponentialgesetz mit einer Periode von drei Minuten ab. Nach 20 Minuten beträgt die Aktivität weniger als ein Zehntel des Anfangswertes, sie bleibt für ungefähr 20 Minuten nahezu kon-

stant und fällt dann allmählich ab. Nach mehreren Stunden fällt die Aktivität wieder exponential mit einer Periode von etwa 28 Minuten ab.

In derselben Figur zeigt Kurve *AA* die Abfallskurve der α-Strahlenaktivität nach langer Exposition. In diesem Falle ist angenommen, daß die Expositionszeit zur Herstellung des Gleichgewichts zwischen dem aktiven Niederschlag und der Emanation ausreicht; hierzu sind ungefähr fünf Stunden erforderlich. Es findet anfänglich ein schneller Abfall mit einer Periode von drei Minuten statt. Hieran schließt sich eine allmähliche Abnahme, die

Fig. 25.



Abfall der induzierten Aktivität des Radiums nach Messungen der α-Strahlenaktivität.

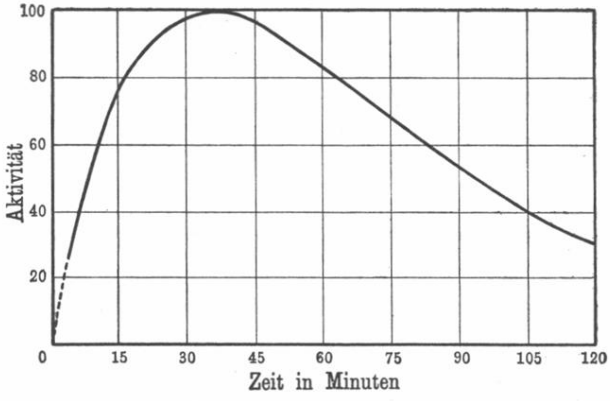
langsamer vor sich geht, als einem Exponentialgesetz entsprechen würde. Nach fünf Stunden verläuft der Abfall nahezu exponential mit einer Periode von ungefähr 28 Minuten.

Der anfängliche schnelle Abfall mit der Periode von drei Minuten rührt von dem Produkt Radium-A her. Der exponentielle Abfall am Schlusse mit der Periode von 28 Minuten deutet an, daß noch ein anderes Produkt mit einer Periode von 28 Minuten vorhanden ist. Ehe wir den mittleren Teil der beiden Kurven besprechen, wollen wir zunächst die Kurven der β- und γ-Strahlenaktivität betrachten.

Die Kurven der β-Strahlenaktivität.

Zur Bestimmung der β-Strahlenkurven wurde ein Elektroskop benutzt. Die aktive Platte oder der aktive Draht wurde unter das Elektroskop gelegt, dessen Boden mit einer Aluminiumfolie verschlossen war, die dick genug war, um alle α-Strahlen zu absorbieren. Die Entladung des Elektroskops rührt dann allein von den β- und γ-Strahlen und wesentlich von den ersteren her. Die Kurve in Fig. 26 zeigt die Veränderung der Aktivität eines Drahtes, der eine Minute lang einer großen Menge von Emanation

Fig. 26.



Änderung der β-Strahlenaktivität eines Drahtes, der für kurze Zeit der Radiumemanation exponiert worden ist.

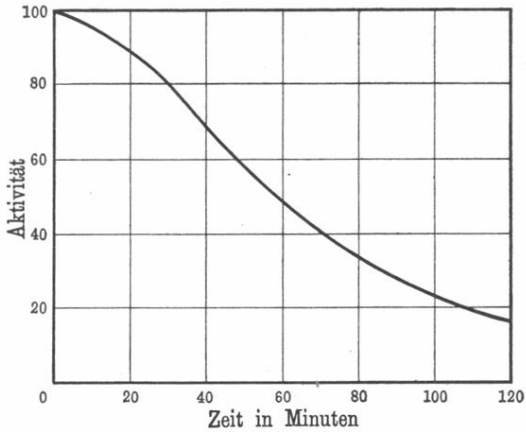
exponiert worden war. Man sieht sofort, daß der Charakter der Kurve ein ganz anderer ist, wie der der entsprechenden α-Strahlenkurve der Fig. 25. Die β-Strahlenaktivität ist anfangs klein, wächst mit der Zeit an und erreicht nach ungefähr 35 Minuten ein Maximum. Einige Stunden später fällt sie nahezu exponential mit einer Periode von 28 Minuten ab.

Die β-Strahlenkurve für lange Exposition ist in Fig. 27 wiedergegeben. Ihre Gestalt weicht erheblich von der der Kurve ab, die nach kurzer Exposition erhalten wird. Die Aktivität wächst im Anfang nicht an, sondern nimmt zunächst langsam und dann schneller ab. Schließlich fällt die Aktivität, wie in den anderen Fällen, exponential mit einer Periode von 28 Minuten ab.

Die Kurven der γ-Strahlenaktivität.

Die Kurven, die man nach kurzer oder langer Exposition durch Messung der γ-Strahlenaktivität erhält, decken sich mit denen, die sich ergeben, wenn die β- und γ-Strahlenaktivität zusammen gemessen wird. Die Messungen wurden mit Hilfe eines Elektroskops ausgeführt, in das die Strahlen erst nach Passieren einer Bleischicht von ungefähr 1 cm Dicke eintreten konnten. Diese Schicht absorbiert α- wie β-Strahlen vollständig.

Fig. 27.



Änderung der β- oder γ-Strahlenaktivität eines Drahtes, der für eine lange Zeit der Radiumemanation exponiert worden ist.

Die Übereinstimmung der β- und γ-Strahlenkurven beweist, daß die beiden Strahlenarten immer in demselben Verhältnis vorkommen. Hierdurch wird die Vorstellung bestätigt, daß die γ-Strahlen eine Art von X-Strahlen sind, die in dem Augenblick entstehen, in dem die β-Partikel von der aktiven Substanz ausgeschleudert wird. Diese Beziehung zwischen den beiden Strahlenarten hat sich in allen bisher untersuchten Fällen gefunden und deutet darauf hin, daß die γ-Strahlen in derselben Beziehung zu den β-Strahlen stehen, wie die X-Strahlen zu den Kathodenstrahlen.

Die Theorie der Umwandlungen des Radiums.

Wir werden später sehen, daß die Zerfallskurve des aktiven Niederschlages des Radiums für jede Expositionszeit, einerlei, ob die Aktivität mit Hilfe der α-, β- oder γ-Strahlen gemessen wird, in befriedigender Weise erklärt werden kann, wenn man die folgenden Annahmen macht:

1. Die Emanation wandelt sich in ein Produkt Radium-A um, welches nur α-Strahlen aussendet und eine Periode von drei Minuten hat.

2. Radium-A bildet Radium-B, welches eine Periode von 28 Minuten hat und bei seiner Umwandlung weder α-, β-, noch γ-Strahlen aussendet, also mit anderen Worten strahlenlos ist.

3. Radium-B wandelt sich in Radium-C um, welches eine Periode von 21 Minuten besitzt und bei seiner Umwandlung α-, β- und γ-Strahlen aussendet.

Wir haben es also mit drei aufeinander folgenden Umwandlungen zu tun. Da jedoch das erste Produkt Radium-A mit der Periode von drei Minuten zerfällt, so beträgt z. B. die von ihm nach 21 Minuten noch vorhandene Menge nur noch $^1/_{128}$ des Anfangsbetrages.

Wir werden deshalb der Einfachheit halber bei der Diskussion der β-Strahlenkurven die erste schnelle Umwandlung zunächst unberücksichtigt lassen und annehmen, daß die Emanation sich direkt in Radium-B umwandelt. Es hat sich sogar herausgestellt, daß die Versuche besser mit der Theorie übereinstimmen, wenn die erste Umwandlung ganz außer acht gelassen wird. Eine Erklärung für diese Eigentümlichkeit der Kurven wird später gegeben werden.

Bei der Diskussion der Aktivitätskurven des aktiven Niederschlages des Thoriums haben wir gesehen, daß die bei kurzer Exposition experimentell erhaltene Kurve sich befriedigend erklären läßt, wenn man annimmt, daß die Emanation sich in das strahlenlose Produkt Thorium-A umwandelt, welches eine Periode von 11 Stunden hat. Dieses bildet seinerseits Thorium-B, welches α-, β- und γ-Strahlen aussendet und eine Periode von ungefähr einer Stunde hat. Diese aus der Analyse der Aktivitätskurven abgeleiteten Resultate werden vollständig durch die Versuche bestätigt, bei denen Thorium-A und Thorium-B nach verschiedenen

physikalischen und chemischen Methoden voneinander getrennt worden sind.

Die Verhältnisse liegen beim Radium ganz analog, denn wenn man die erste Umwandlung mit der drei Minutenperiode außer acht läßt, so hat man zunächst ein strahlenloses Produkt Radium-B, welches Radium-C bildet, von dem α-, β- und γ-Strahlen ausgesandt werden.

Wir wollen nun die Theorie zweier aufeinander folgender Umwandlungen dieser Art behandeln.

Die Änderung der Aktivität nach kurzer Exposition.

Es seien λ_1 und λ_2 die radioaktiven Konstanten, P und Q die Anzahl der zu irgend einer Zeit vorhandenen Atome von Radium-B und Radium-C. Es wird vorausgesetzt, daß die anfänglich vorhandene aktive Substanz nur aus Radium-B besteht. Die Anzahl der Atome von B betrage n. Nach irgend einer Zeit t ist von diesen noch die Anzahl

$$P = n e^{-\lambda_1 t}$$

vorhanden. Auf Seite 53 ist gezeigt, daß die Zahl der zur Zeit t zerfallenden Atome von C gegeben ist durch die Gleichung:

$$\frac{dQ}{dt} = \lambda_1 P - \lambda_2 Q = \lambda_1 n e^{-\lambda_1 t} - \lambda_2 Q \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

Die Lösung dieser Gleichung (vgl. S. 53) ergibt:

$$Q = \frac{n \cdot \lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} (e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_1 t}).$$

Die Zahl der von P und Q zu irgend einer Zeit vorhandenen Atome ist in Fig. 28 veranschaulicht, in der die Zahl der anfänglich vorhandenen Atome von B als 100 angenommen ist. Die Exponentialkurve BB gibt den Betrag von B, der zu irgend einer Zeit noch vorhanden ist. Die Kurve CC stellt die Zahl der zu irgend welchen Zeiten vorhandenen Atome von C dar. Da die Perioden von B und C ungefähr 28 und 21 Minuten sind, so ist

$$\lambda_1 = 4{,}13 \times 10^{-4} (\text{sec})^{-1},$$
$$\lambda_2 = 5{,}38 \times 10^{-4} (\text{sec})^{-1}.$$

Die Menge von C ist anfänglich 0, wächst in ungefähr 35 Minuten zu einem Maximum, nimmt dann ab und zerfällt

schließlich exponential mit einer Periode von 28 Minuten, also nicht mit der Periode von C, sondern mit der von B. Man erkennt dieses auch leicht aus der Gleichung für Q, die sich in der Form schreiben läßt:

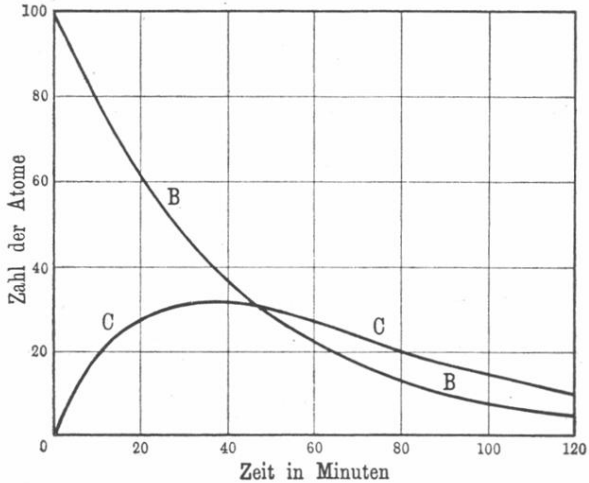
$$Q = \frac{n \cdot \lambda_1 \cdot e^{-\lambda_1 t}}{\lambda_2 - \lambda_1}(1 - e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)t}).$$

Nach sieben Stunden ist

$$e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)t} = 0{,}043$$

und kommt somit kaum noch in Betracht. Q ändert sich dann fast wie $e^{-\lambda_1 t}$, d. h. nach der Periode des strahlenlosen Produktes.

Fig. 28.



Änderung, die die Zahl der Atome von Radium-B und Radium-C theoretisch erfährt, wenn der Niederschlag anfangs nur aus Radium-B besteht.

Da nur C Strahlen aussendet, so ist der Wert von Q zu jeder Zeit proportional der Aktivität, die das Gemisch der beiden Produkte B und C besitzt.

Die Kurve CC sollte also in der Form den Kurven gleichen, die man bei kurzer Exposition mit Hilfe der β- oder γ-Strahlen erhält, und dieses ist auch innerhalb der Versuchsfehler der Fall.

Die Änderung der Aktivität bei langer Exposition.

Es sei angenommen, daß P_0 und Q_0 Atome von B und C sind, die sich nach langer Exposition miteinander im Gleichgewicht befinden. Dann ist:

$$\lambda_1 P_0 = \lambda_2 Q_0 = q,$$

wenn q die Anzahl der in der Sekunde zerfallenden Emanationsatome ist. Der Wert von P, die Anzahl der Atome von B, die zu einer Zeit t nach der Entfernung des aktiven Körpers aus der Emanation vorhanden sind, ist bestimmt durch:

$$P = P_0 e^{-\lambda_1 t} = \frac{q}{\lambda_1} e^{-\lambda_1 t}.$$

Q ist durch die Gleichung (1) gegeben. Die Lösung dieser Gleichung hat die Form:

$$Q = a e^{-\lambda_1 t} + b e^{-\lambda_2 t}.$$

Durch Einsetzung in Gleichung (1) ergibt sich:

$$a = \frac{q}{\lambda_2 - \lambda_1}.$$

Da anfangs für $t = 0$,

$$Q = Q_0 = \frac{q}{\lambda_2}, \quad a + b = \frac{q}{\lambda_2},$$

so ist

$$b = \frac{-q\lambda_1}{\lambda_2(\lambda_2 - \lambda_1)}$$

und

$$Q = \frac{q}{\lambda_2 - \lambda_1}\left(e^{-\lambda_1 t} - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} e^{-\lambda_2 t}\right). \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

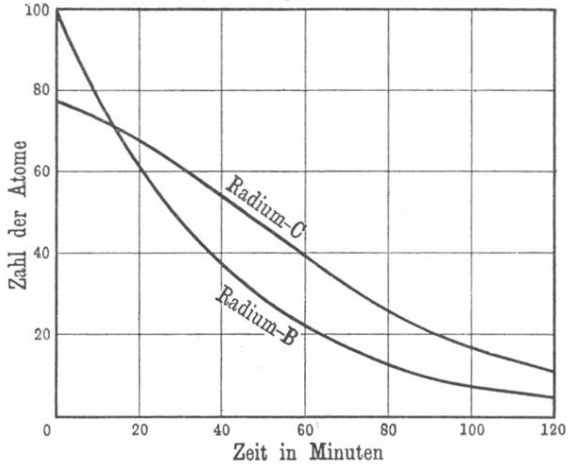
Die Veränderung, die die Menge von B nach einer langen Exposition erfährt, ist in Fig. 29 wiedergegeben, in der die Zahl der anfangs vorhandenen Atome von B als 100 angesetzt ist. Die Anzahl der anfänglich vorhandenen Atome von C beträgt

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} P_0.$$

Die Kurve CC, welche die Zahl der zu irgend einer Zeit vorhandenen Atome von C angibt, beginnt also bei der Ordinate 77 und nicht bei 100.

Da die β- oder γ-Strahlenaktivität von C zu jeder Zeit dem Werte von Q proportional ist, so sollte die Kurve, welche die Veränderung von Radium-C mit der Zeit wiedergibt, von derselben Form sein, wie die Aktivitätskurve nach langer Exposition in Fig. 27. Dieses ist der Fall, denn die theoretischen und beobachteten Kurven stimmen innerhalb der Versuchsfehler überein. Dieses geht aus der folgenden Tabelle hervor.

Fig. 29.



Änderung, die die Zahl der Atome von Radium-B und Radium-C theoretisch erfährt, wenn die aktive Substanz anfänglich aus Radium-B und Radium-C im Gleichgewicht besteht.

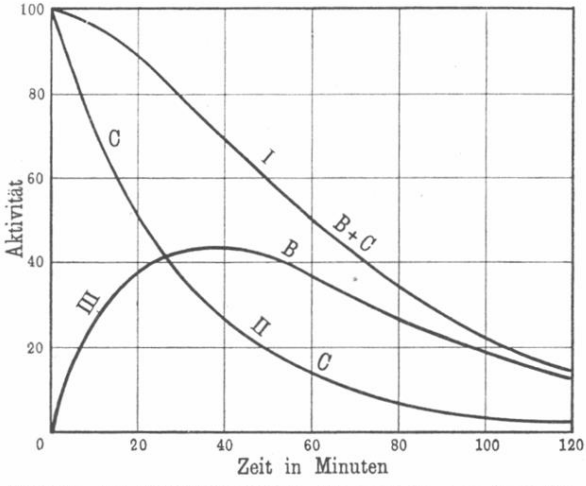
Abfall der β-Strahlenaktivität nach langer Exposition.

Zeit in Minuten nach beendeter Exposition	Beobachtete Aktivität	Berechnete Aktivität
0	100,0	100,0
10	97,0	96,8
20	88,5	89,4
30	77,5	78,6
40	67,5	69,2
50	57,0	59,9
60	48,2	49,2
80	33,5	34,2
100	22,5	22,7
120	14,5	14,9

Die Tatsache, daß die Kurve für lange Exposition (Fig. 27) durch die Umwandlung zweier aufeinander folgender Produkte zustande kommt, von denen das erste strahlenlos ist, läßt sich leicht durch graphische Analyse erweisen.

Unmittelbar nach Beendigung der Exposition sind B und C, die den aktiven Niederschlag bilden, miteinander im Gleichgewicht. Die beobachtete β-Aktivität rührt ausschließlich von C her und

Fig. 30.



Analyse der β-Strahlenkurve, die nach langer Exposition erhalten wird.

müßte exponential mit der Periode von Radium-C (21 Minuten) abfallen, wenn nicht durch den Zerfall von Radium-B neues Radium-C nachgeliefert würde. Diese Abfallskurve *CC* ist in Fig. 30 wiedergegeben. Der Unterschied zwischen den Ordinaten der beobachteten Kurve *B* und *C* und der theoretischen Kurve *CC* muß von dem Teile des Radium-C herrühren, der durch den Zerfall von B nachgeliefert wird. Die Kurve dieser Differenzen, *B* in Fig. 30, sollte ihrer Form nach identisch mit der β-Strahlenkurve sein, die man bei kurzer Exposition erhält. Denn diese Kurve repräsentiert die Aktivität, die durch die Umwandlung von B allein zustande kommt, wenn die anfangs vorhandene Substanz allein aus Radium-B besteht.

Der Vergleich der Kurve B mit der Kurve für kurze Exposition (Fig. 27) zeigt, daß die Identität in der Tat besteht. Die Aktivität steigt von Null an, erreicht nach 35 Minuten ein Maximum und fällt dann ab.

Es ist von Interesse, daß für die Abfallskurve der β-Strahlenaktivität nach langer Exposition die Gleichung aufgestellt worden ist, bevor die theoretische Erklärung gefunden war. Curie und Danne[1]) fanden, daß die Aktivität J_t zu irgend einer Zeit durch eine Gleichung von der Form

$$\frac{J_t}{J_0} = a e^{-\lambda_1 t} - (a-1) e^{-\lambda_2 t}$$

dargestellt werden kann, worin

$$\lambda_1 = 4{,}13 \times 10^{-4} (\text{sec})^{-1} \quad \text{und} \quad \lambda_2 = 5{,}38 \times 10^{-4} (\text{sec})^{-1}$$

und $a = 4{,}2$ eine numerische Konstante ist. Die Konstante λ_1 wurde aus der Beobachtung bestimmt, daß die Aktivität nach mehreren Stunden exponential mit einer Periode von 28 Minuten abfällt. Die Werte von a und λ_2 wurden so gewählt, daß die Gleichung sich der Kurve anpaßte. Diese Gleichung hat dieselbe Form wie die theoretische, bei deren Ableitung angenommen war, daß die erste Umwandlung strahlenlos mit einer Periode von 28 Minuten erfolgt, und daß bei der zweiten Umwandlung, die mit einer Periode von 21 Minuten vor sich geht, α-, β- und γ-Strahlen ausgesandt werden. Nach Gleichung (2) wird die Menge von Radium-C, die zu irgend einer Zeit vorhanden ist, gegeben durch:

$$Q = \frac{q}{\lambda_2 - \lambda_1} \left(e^{-\lambda_1 t} - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} e^{-\lambda_2 t} \right).$$

Im Anfang ist

$$Q = Q_0 = \lambda_2 q.$$

Da die Aktivität stets der vorhandenen Menge von C, d. h. dem Werte von Q proportional ist, so ist

$$\frac{J_t}{J_0} = \frac{Q}{Q_0} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} - \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_2 t}.$$

Durch Einsetzen der Werte für λ_1 und λ_2, die den Perioden von 28 und 21 Minuten entsprechen, ergibt sich

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} = 4{,}3 \quad \text{und} \quad \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} = 3{,}3.$$

---

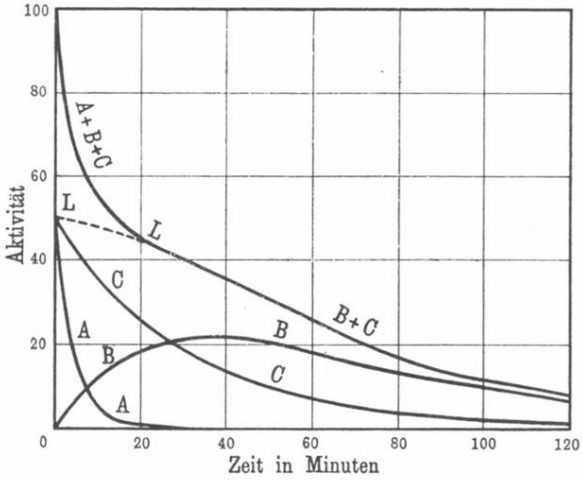
[1]) Curie und Danne, Compt. rend. **136**, 364 (1903).

Die theoretische Gleichung hat also nicht nur dieselbe Form, wie die aus der Beobachtung abgeleitete, sondern die Werte der Konstanten stimmen auch gut miteinander überein.

Analyse der α-Strahlenkurven für lange Exposition.

Wir sind nun imstande, die Kurve der α-Strahlenaktivität für lange Exposition in ihre drei Komponenten zu zerlegen. Hierbei müssen wir wieder auf das erste Produkt, Radium-A, welches

Fig. 31.



Analyse der α-Strahlenkurve, die nach langer Exposition erhalten wird.

α-Strahlen aussendet, Rücksicht nehmen. Die beobachtete α-Strahlenkurve ist in Fig. 31, Kurve $A\,B\,C$, wiedergegeben. Diese Kurve wurde mit Hilfe eines Galvanometers erhalten. Ein Stück Platinfolie wurde mehrere Tage lang in einem Glasgefäße belassen, welches eine große Menge von Emanation enthielt. Die Folie wurde dann schnell entfernt und auf die untere Platte eines Versuchsgefäßes gelegt. Nach Anlegung einer zur Herstellung der Sättigung ausreichenden Spannung wurde die Veränderung der α-Strahlenaktivität mit Hilfe eines Galvanometers von großem Widerstande gemessen. Die Größe, die der Strom in dem Augen-

blick besaß, wo die Exposition der Folie beendet war, wurde durch Rückverlängerung der Kurve bis zum Schnitt mit der vertikalen Achse erhalten.

Die Änderung der Aktivität mit der Zeit geht aus folgender Tabelle hervor:

Zeit in Minuten	Aktivität	Zeit in Minuten	Aktivität
0	100,0	30	40,4
2	80,0	40	35,6
4	69,5	50	30,4
6	62,4	60	25,4
8	57,6	80	17,4
10	52,0	100	11,6
15	48,4	120	7,6
20	45,4		

Die Aktivität, die von Radium-A herrührt, ist nach 20 Minuten fast verschwunden. Zieht man die Kurve von dem Punkte, der nach 20 Minuten erreicht ist, nach rückwärts aus, so wird die Achse im Punkte L, der ungefähr der Ordinate 50 entspricht, geschnitten. Subtrahiert man die Kurve LL von der Kurve ABC, so erhält man die Kurve AA, welche die Aktivität darstellt, die vom Radium-A herrührt. Die Kurve AA folgt einem Exponentialgesetz mit einer Periode von drei Minuten. Die Kurve LL, B und C, gleicht während ihres ganzen Verlaufes der Form nach der β-Strahlenkurve für lange Exposition (Fig. 27). Wir können hieraus schließen, daß Radium-B keine α-Strahlen aussendet; wir wissen bereits, daß es keine β-Strahlung besitzt; Radium-B muß also ein strahlenloses Produkt sein.

Die Kurve LL, B und C, kann in genau der gleichen Weise wie die entsprechende β-Strahlenkurve in ihre beiden Bestandteile zerlegt werden. Die Kurve CC stellt die Änderung dar, die die Aktivität des Radiums-C erfährt, das bei Beginn der Messungen vorhanden ist. Die Kurve BB repräsentiert die Aktivität des Teiles von Radium-C, der durch die Umwandlung von B nachgebildet wird; sie besitzt die gleiche Form, wie die β-Strahlenkurve für kurze Exposition (Fig. 26).

Wir können aus dieser Analyse schließen, daß der aktive

Niederschlag aus drei Produkten, Radium-A, -B und -C besteht, die die folgenden Eigenschaften besitzen:

Radium-A sendet nur α-Strahlen aus und wandelt sich in drei Minuten zur Hälfte um.

Radium-B ist strahlenlos und wandelt sich in 28 Minuten zur Hälfte um.

Radium-C sendet α-, β- und γ-Strahlen aus und wandelt sich in 21 Minuten zur Hälfte um.

Mehrere Stunden, nachdem der Draht aus der Emanation entfernt ist, fällt die Aktivität exponential mit einer Periode von 28 Minuten ab, einerlei, ob der Draht kurze oder lange Zeit exponiert gewesen ist und ob die Aktivität mit Hilfe der α-, β- oder γ-Strahlen gemessen wird. Die längere Periode des strahlenlosen Produktes Radium-B beherrscht den schließlichen Verlauf des Abfalls, obwohl die Aktivität selbst von dem Produkt C mit der Periode von 21 Minuten herrührt.

Entsteht Radium-B aus Radium-A?

Der Einfachheit halber ist in der obenstehenden Prüfung der Versuche an Hand der Theorie der Einfluß von Radium-A auf die folgenden Umwandlungen vernachlässigt worden. Wenn Radium-B aus Radium-A entsteht, so ist im Gleichgewicht zwischen A und B von Radium-A $^3/_{28}$ oder 0,11 der Menge von Radium-B vorhanden. Wenn Radium-A sich in Radium-B mit einer Periode von drei Minuten umwandelt, so wird der größte Teil von A nach 15 Minuten verschwunden sein, und es läßt sich berechnen, daß die Menge, die von B nach dieser Zeit vorhanden ist, um ungefähr 8 Proz. größer sein müßte, als wenn A sich nicht in B umwandelte. Dieser Unterschied müßte sich unter geeigneten Bedingungen an dem Verlauf der Abfallskurven leicht feststellen lassen. Bei einer Untersuchung dieser Frage durch den Verfasser [1]) fand sich jedoch, daß Theorie und Experiment viel besser miteinander übereinstimmten, wenn angenommen wurde, daß A und B unabhängig voneinander aus der Umwandlung der Emanation entstehen. Die Untersuchung der α-Strahlenkurve nach kurzer Exposition erlaubt keine bestimmte Entscheidung zugunsten einer der beiden Möglichkeiten.

---

[1]) Rutherford, Bakerian Lecture, Phil. Trans. A 1904, p. 169.

Der Schluß, daß A und B voneinander unabhängig sind, bedingt jedoch so wichtige theoretische Folgerungen, daß er nicht angenommen werden kann, ehe nicht durch eine eingehende Untersuchung gezeigt ist, daß die Forderungen der Theorie in der Praxis völlig erfüllt sind.

Die Theorie nimmt an, daß Radium-A sehr kurze Zeit nach seiner Entstehung auf der Elektrode niedergeschlagen wird und daß weder A noch die aus ihm entstehenden Stoffe die Elektrode verlassen; oder mit anderen Worten, daß diese Produkte bei gewöhnlichen Temperaturen nicht merklich flüchtig sind.

Es kann jedoch kein Zweifel darüber bestehen, daß unter gewöhnlichen Versuchsbedingungen merkliche Mengen von Radium-A sowohl wie von Radium-B und zuweilen auch von Radium-C in dem Gasraume gemischt mit der Emanation vorhanden sind; diese Stoffe diffundieren also keineswegs schnell zu den Elektroden. Miss Brooks[1]) hat ferner gezeigt, daß Radium-B zweifellos bei gewöhnlichen Temperaturen flüchtig ist.

Gegenwärtig sind in dem Laboratorium des Verfassers Versuche im Gange, die entscheiden sollen, ob der Umstand, daß die Versuchsbedingungen nicht mit den von der Theorie vorausgesetzten übereinstimmen, es erlaubt, den Abfallskurven unter der Annahme, daß A aus B entsteht, Rechnung zu tragen. Es ist zu hoffen, daß sich bald eine Entscheidung treffen lassen wird[2]).

Wenn Radium-A und -B unabhängig voneinander entständen, so müßte angenommen werden, daß die Emanation in zwei verschiedene Stoffe zerfällt und außerdem eine oder mehrere

---

[1]) Miss Brooks, Nature, 21. Juli 1904.

[2]) Eine Erklärung dieses Widerspruchs zwischen Theorie und Experiment scheint sich aus einigen neueren Versuchen von H. W. Schmidt (Phys. Zeitschr. 6, 897, 1905) zu ergeben. Schmidt findet, daß Radium-B nicht strahlenlos ist, sondern β-Strahlen von viel geringerem Durchdringungsvermögen als dem der β-Strahlen von C aussendet. Wie wir gesehen haben (Fig. 26), erreicht die β-Strahlenkurve nach kurzer Exposition ein Maximum 35 Minuten nach Beendigung der Exposition. Dieses trifft jedoch nur dann zu, wenn die Strahlen einen Schirm passiert haben, in dem die β-Strahlen von B völlig absorbiert werden. Bei Verwendung dünner Schirme findet man, daß das Maximum früher erreicht wird. Wenn dieser neue Faktor in Rechnung gezogen wird, so werden wahrscheinlich die experimentell bestimmten Kurven befriedigend unter der Annahme sich erklären lassen, daß die Umwandlung in der Reihenfolge A, B und C erfolgt.

α-Partikeln aussendet. Die Beobachtung, daß nach einer langen Exposition die Aktivität, die von Radium-A herrührt, nahezu gleich der von Radium-C ist, stimmt mit beiden Annahmen überein, vorausgesetzt, daß in dem Falle, daß A und B unabhängig voneinander wären, angenommen wird, daß jedes Atom der Emanation unter Aussendung einer α-Partikel in zwei verschiedene Produkte zerfällt.

In diesem Falle würden aus der Emanation zwei Familien von verschiedenen Produkten entstehen. Die Unabhängigkeit von A und B wird jedoch erst dann einwandfrei nachgewiesen sein, wenn es gelungen sein wird, aus dem Radium oder seinem aktiven Niederschlage ein Produkt abzuscheiden, welches exponential mit einer Periode von drei Minuten zerfällt und sich nicht in Radium-B oder Radium-C umwandelt*).

Einfluß hoher Temperaturen auf den aktiven Niederschlag.

In der obigen Diskussion ist unbewiesen angenommen, daß Radium-B und nicht Radium-C die Periode von 28 Minuten besitzt. Die Prüfung der Versuche an der Hand der Theorie wirft kein Licht auf diese Frage, da die Aktivitätskurven sich durch Vertauschen der Perioden von B und C nicht ändern.

Wie im Falle des Thoriums müssen andere Beweismittel herangezogen werden, um zu entscheiden, ob die Periode von 28 Minuten Radium-B oder -C zukommt. Zu diesem Zweck ist es nötig, die beiden Produkte auf irgend eine Weise voneinander zu trennen und ihre Abfallskurven getrennt zu untersuchen.

Dieses ist unter Benutzung der größeren Flüchtigkeit von Radium-B ausgeführt worden. Miss Gates[1]) beobachtete, daß der aktive Niederschlag des Radiums sich bei Weißglut verflüchtigt und sich auf kalten Gegenständen der Umgebung wieder niederschlägt.

---

*) Es ist inzwischen von H. F. Bronson (Phil. Mag., Juli 1906) und durch eine ausführliche Arbeit von H. W. Schmidt [Ann. d. Phys. **21**, 610 (1906)] einwandfrei nachgewiesen worden, daß bei Berücksichtigung der Ionisation, die die β-Strahlen von Radium-B hervorrufen, der Widerspruch zwischen Theorie und Experiment verschwindet und somit die Umwandlung der Emanation über Radium-A in Radium-B und Radium-C erfolgt.

[1]) Miss Gates, Phys. Rev., S. 300 (1903).

Curie und Danne[1]) untersuchten diese Erscheinung eingehender und erhielten einige sehr interessante Resultate. Ein aktiver Draht, der von einem kalten Metallzylinder umgeben war, wurde für kurze Zeit mit Hilfe eines elektrischen Stromes erhitzt, hierauf wurde sowohl die Aktivität des Drahtes selbst, wie auch die der Innenseite des Metallzylinders getrennt gemessen. Bei ungefähr 400° war etwas Radium-B verdampft, wie aus der Änderung der Aktivität des destillierten Teiles nachgewiesen wurde. Diese Aktivität war anfänglich gering, passierte ein Maximum und fiel dann in genau der gleichen Weise ab, wie die β-Strahlenaktivität nach kurzer Exposition (Fig. 26). Dieses beweist, daß die anfänglich auf dem Zylinder niedergeschlagene Substanz nur aus dem strahlenlosen Radium-B bestand. Bei einer Temperatur von ungefähr 600° wurde der größte Teil von B verjagt und zugleich auch ein Teil von C. Eine Anzahl von Versuchen wurde dann in ähnlicher Weise zwischen 15° und 1350° ausgeführt. Nach einer Erhitzung des Drahtes auf 630° fiel die Aktivität exponential mit einer Periode von 28 Minuten ab. Bei Steigerung der Temperatur bis zu 1100° nahm die Periode stetig bis zu 20 Minuten ab. Bei dieser Temperatur passierte sie ein Minimum und wuchs dann bei 1300° zu 25 Minuten an.

Da die Abfallskurven exponential waren, nahmen Curie und Danne an, daß Radium-B bei 630° völlig verflüchtigt war. Wenn dieses der Fall wäre, so würden die Versuche andeuten, daß die Periode von 28 Minuten dem Radium-C und die von 21 Minuten dem Radium-B zukommt. Aus den Versuchen ginge dann auch hervor, daß eine Erhitzung zwischen 630° und 1100° eine deutliche Änderung in der Umwandlungsgeschwindigkeit von Radium-C hervorruft. Dieses wäre ein sehr wichtiges Resultat gewesen, denn es war bis dahin noch kein Anzeichen dafür gefunden, daß die Temperatur irgend einen Einfluß auf die Umwandlungsgeschwindigkeit einer radioaktiven Substanz besäße. Nach den Versuchen von Curie und Danne änderte sich die Umwandlungsgeschwindigkeit von Radium-C in unerwarteter Weise, denn sie wuchs bei einer Erhitzung bis zu 1100° an und fiel bei noch höheren Temperaturen wieder nahezu auf ihren normalen Wert.

---

[1]) Curie und Danne, Compt. rend. **138**, 748 (1904).

Eine eingehende Untersuchung des Einflusses der Temperatur auf den aktiven Niederschlag wurde kürzlich von Dr. Bronson[1]) in dem Laboratorium des Verfassers ausgeführt. Die Ergebnisse dieser Versuche zeigten, daß die Erhitzung des aktiven Niederschlages keinen Einfluß auf die Umwandlungsgeschwindigkeit des aktiven Niederschlages besitzt und daß die Ergebnisse der Versuche von Curie und Danne sich erklären lassen, wenn man annimmt, daß bei den meisten ihrer Versuche der aktive Niederschlag auf dem Draht nach dem Erhitzen nicht nur aus Radium-C, sondern aus einem Gemisch von B und C bestand.

Um einwandfrei zu untersuchen, ob Erhitzung irgend welchen Einfluß auf den Zerfall des aktiven Niederschlages hat, wurde ein aktiver Kupferdraht in ein kurzes Stück eines Verbrennungsrohres gebracht, das unter vermindertem Drucke zugeschmolzen wurde. Das Rohr wurde dann in einem elektrischen Ofen auf verschiedene Temperaturen erhitzt; es hielt, wie sich fand, ungefähr 1100° aus. Die β-Strahlenaktivität wurde dann sorgfältig in einem großen Zeitraume untersucht. Zwischen 2,5 und 4 Stunden war die erhaltene Kurve angenähert exponential mit einer Periode von 28 Minuten. Nach 6 Stunden folgte die Kurve genau einem Exponentialgesetz mit einer Periode von ungefähr 26 Minuten. Innerhalb der Versuchsfehler stimmten die Kurven, die nach Erhitzung des aktiven Niederschlages bis zu 1100° erhalten wurden, mit denen bei Zimmertemperatur überein.

Bei diesem Versuche konnte nichts von den verflüchtigten Produkten entweichen, so daß wir mit Sicherheit schließen können, daß bis zu 1100° die Umwandlungsgeschwindigkeit der aktiven Produkte von der Temperatur unabhängig ist.

Bei der Wiederholung der Versuche von Curie und Danne fand Bronson den Abfall der Aktivität sehr wechselnd, nachdem der Draht auf eine konstante Temperatur erhitzt war; die erhaltenen Kurven folgten angenähert einem Exponentialgesetz mit Perioden, die zwischen 25 und 19 Minuten schwankten. Wenn zum Beispiel ein Luftstrom durch den elektrischen Ofen geblasen wurde, bevor der Draht herausgenommen war, so fiel die Aktivität exponential mit einer Periode von ungefähr 19 Minuten ab. Ebenso hatte die Periode diesen Wert, wenn ein kalter

---

[1]) Bronson, Amer. Journ. Science, Juli 1905.

Kupferdraht über dem aktiven Draht eingeführt war. Unter diesen Umständen wird es dem Radium-B erleichtert, sich von dem Drahte zu entfernen. Mehrere Kurven fügten sich genau einem Exponentialgesetz mit einer Periode von 19 Minuten. Hieraus geht hervor, daß das aktive Produkt, Radium-C, eine Periode von 19 Minuten hat und daß die Periode von 26 Minuten dem Radium-B zukommt.

In allen Fällen, in welchen die Aktivität zunächst mit einer Periode zwischen 19 und 26 Minuten abfiel, waren die Kurven anfangs nicht genau exponential. Die Periode strebte immer dem Werte von 26 Minuten zu, je mehr die Aktivität abnahm, und der Abfall erfolgte erst sehr spät nach einem Exponentialgesetz. Dieses Verhalten ist gerade dann zu erwarten, wenn die Aktivität des Drahtes nach dem Erhitzen von einem Gemisch von B und C herrührt, in dem die Menge von C anfangs überwiegt. Die Aktivität wird dann zunächst mit einer Periode abfallen, die zwischen denen von B und C liegt. Nach einiger Zeit beginnt die Menge von Radium-B zu überwiegen, weil es sich langsamer umwandelt als C, und Radium-B beherrscht die schließliche Zerfallsgeschwindigkeit, d. h. die Aktivität fällt schließlich nach einem Exponentialgesetz mit einer Periode von 26 Minuten ab.

Aus den Versuchen geht also hervor, daß, obwohl B flüchtiger ist als C, doch in manchen Fällen B nicht vollständig entfernt wird, selbst wenn der Draht weit über die Verflüchtigungstemperatur von B erhitzt wird.

Die Perioden der beiden Produkte betragen 26 und 19 Minuten, sie sind also etwas niedriger als die Perioden von 28 und 21 Minuten, die bei den vorausgehenden Berechnungen angenommen waren. Zwischen zwei und vier Stunden nach Beendigung der Exposition fällt die Aktivität unter gewöhnlichen Bedingungen angenähert exponential mit einer Periode von 28 Minuten ab, und dieses führte ursprünglich dazu, 28 Minuten als eine der Perioden anzusehen. Die Zerfallskurve ist jedoch erst sechs Stunden nach Beendigung der Exposition wirklich exponential und die Periode beträgt dann 26 Minuten.

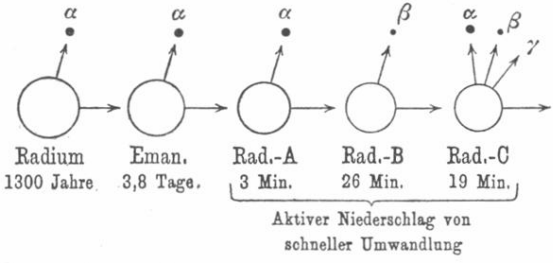
Bei der Analyse der Umwandlungen ist Radium-C die kürzere Periode zugewiesen, aber die erste Bestimmung der Perioden von B und C beibehalten worden. In dem in Betracht gezogenen Bereich unterscheiden sich die berechneten Kurven nicht sehr,

wenn man einmal 26 Minuten und 19 Minuten, das andere Mal 28 und 21 Minuten als Perioden einsetzt.

Die Beibehaltung der alten Werte läßt die ursprüngliche Beweisführung dafür, daß B strahlenlos und C α-, β- und γ-Strahlen aussendet, besser hervortreten. Eine genauere Bestimmung der verschiedenen Abfallskurven während der ersten beiden Stunden wird augenblicklich ausgeführt.

Die Umwandlungsreihe der bisher besprochenen Radiumprodukte ist in dem Diagramm der Fig. 32 wiedergegeben.

Fig. 32.



Radium und seine Familie von schnell sich umwandelnden Produkten.

Es ist bemerkenswert, daß von diesen fünf radioaktiven Substanzen nur Radium-C β- und γ-Strahlen aussendet. Die anderen besitzen, soweit sie strahlend sind, nur α-Strahlung. Die Aussendung der α-Strahlen ist jedoch von einer sekundären Strahlung begleitet, die durch das Auftreffen der α-Strahlen auf die Materie hervorgerufen wird. Die Sekundärstrahlung besteht aus Elektronen, deren Geschwindigkeit, verglichen mit denen der β-Partikeln selbst, klein ist, und die daher leicht im magnetischen Felde abgelenkt werden. Die Gegenwart solcher langsamer Elektronen ist zuerst von J. J. Thomson[1]) am Radiotellurium und von Rutherford am Radium beobachtet[2]).

Miss Slater[3]) hat kürzlich nachgewiesen, daß die Aussendung der α-Partikeln der Thorium- und Radiumemanation

---

[1]) J. J. Thomson, Proc. Camb. Phil. Soc., Nov. 14, 1904.
[2]) Rutherford, Phil. Mag., Aug. 1905.
[3]) Miss Slater, Phil. Mag., Okt. 1905.

gleichfalls unter Ausschleuderung negativ geladener Elektronen vor sich geht.

Die Aussendung dieser Elektronen ist wahrscheinlich keine eigentliche Strahlung der aktiven Substanz selbst, sondern ist zum größten Teil ein sekundärer Effekt des Auftreffens der α-Partikeln auf Materie. Aus diesem Grunde ist es nicht zweckmäßig, sie β-Strahlen zu nennen, denn dieser Name wird besser auf die primären β-Strahlen beschränkt, die von radioaktiven Substanzen beinahe mit der Geschwindigkeit des Lichtes ausgesandt werden. J. J. Thomson hat vorgeschlagen, die Elektronen von geringer Gesehwindigkeit mit dem Namen δ-Strahlen zu bezeichnen.

In dem nächsten Kapitel werden wir sehen, daß die Umwandlungen des Radiums nicht mit Radium-C enden, sondern noch drei weitere Produkte umfassen. Die zur Analyse des aktiven Niederschlages verwandten Rechnungen werden jedoch nicht in merklicher Weise durch die Anwesenheit dieser späteren Produkte beeinflußt, denn ihre Aktivität beträgt in den meisten Fällen weniger als ein Millionstel der Aktivität, die unmittelbar nach Beendigung der Exposition vorhanden ist.

Fünftes Kapitel.

Der langsam sich umwandelnde aktive Niederschlag des Radiums.

Ein Gegenstand, der der Radiumemanation exponiert gewesen ist, verliert seine Aktivität nicht vollständig. Es läßt sich stets eine kleine Restaktivität beobachten, deren Größe nicht nur von der Menge der Emanation, sondern auch von der Dauer der Exposition abhängt. Diese kleine Restaktivität ist zuerst von Mme. Curie beobachtet und ist von dem Verfasser eingehend untersucht worden.

Nach Beendigung der Exposition fällt die Aktivität zunächst nach den im letzten Kapitel besprochenen Gesetzen ab. Der