

Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Radioaktive Umwandlungen

Rutherford, Ernest

Braunschweig, 1907

Drittes Kapitel. Die Radiumemanation

Drittes Kapitel.

Die Radiumemanation.

Kurze Zeit, nachdem der Verfasser¹⁾ gezeigt hatte, daß Thoriumverbindungen beständig eine radioaktive Emanation abgeben, fand Dorn²⁾, daß das Radium eine ähnliche Eigenschaft besitzt. Feste Radiumverbindungen geben unter gewöhnlichen Umständen sehr wenig Emanation ab, sie emanieren jedoch stark, wenn sie gelöst oder erhitzt werden. Die Emanationen des Thoriums und Radiums besitzen sehr viele analoge Eigenschaften, sie lassen sich aber leicht durch die Verschiedenheit der Geschwindigkeit, mit welcher ihre Aktivität abfällt, voneinander unterscheiden. Während die Aktivität der Thoriumemanation in 54 Sekunden auf den halben Wert sinkt und praktisch im Laufe von zehn Minuten verschwindet, ist die Radiumemanation dagegen sehr beständig; sie braucht etwa vier Tage, um auf den halben Wert zu fallen und ist nach einem Monat noch nachweisbar.

In ihren physikalischen und chemischen Eigenschaften ist die Radiumemanation der des Thoriums ähnlich; wegen ihrer großen Aktivität und verhältnismäßig langsamen Umwandlung hat man sie jedoch besser als die Thoriumemanation im einzelnen untersuchen können. Es ist gelungen, sie chemisch zu isolieren, ihr Volumen zu messen, und ihr Spektrum zu untersuchen. Die Aktivität und die Wärmeentwicklung der Emanation, die im Verhältnis zu ihrem geringen Gewicht enorm sind, haben die Radiumemanation zum Gegenstande großen Interesses gemacht. Wir werden im folgenden die wichtigeren physikalischen und

¹⁾ Rutherford, Phil. Mag., Jan., Febr. 1900.

²⁾ Dorn, Naturforsch. Ges. für Halle a. S. (1900).

chemischen Eigenschaften der Radiumemanation eingehend besprechen. Das Studium dieser Substanz wird weiteres Licht auf die allgemeine Theorie der Radioaktivität werfen, die schon im vorigen Kapitel besprochen ist.

Von den Radiumsalzen kommen in der Regel die Bromide und Chloride beim Experimentieren zur Verwendung. Beide Verbindungen geben in trockener Luft sehr wenig Emanation ab. Die Emanation speichert sich in der Masse der Substanz auf und wird beim Erhitzen oder Auflösen der Verbindung frei. Die außerordentliche Aktivität der Radiumemanation wird durch folgendes einfache Experiment veranschaulicht.

Ein kleiner Kristall des Bromids oder Chlorids wird in eine kleine Waschflasche gebracht, und in wenigen Kubikzentimetern Wasser aufgelöst. Hierauf wird die Flasche sofort verschlossen. Ein langsamer Luftstrom wird dann durch die Lösung und weiterhin durch eine enge Glasröhre in das Innere eines Elektroskops geleitet. Wenn das Elektroskop anfänglich geladen war, so fallen die Goldblättchen fast in demselben Moment zusammen, in dem der Luftstrom in das Elektroskop eintritt. Später wird es unmöglich, die Goldblättchen länger als einen Augenblick zum Divergieren zu bringen.

Wird die Emanation durch einen Luftstrom wieder aus dem Elektroskop entfernt, so fallen die Goldblättchen noch immer schnell zusammen. Diese zurückgebliebene Aktivität rührt von einer aktiven Substanz her, die sich auf den Wänden des Gefäßes niedergeschlagen hat. Die Radiumemanation gleicht hierin der des Thoriums. Die induzierte Aktivität fällt jedoch rascher ab als beim Thorium, der größte Teil verschwindet in wenigen Stunden, während die Wirkung beim Thorium mehrere Tage anhält.

Messungen der Geschwindigkeit, mit welcher die Aktivität der Emanation abnimmt, sind von verschiedenen Forschern gemacht worden. Rutherford und Soddy¹⁾ bewahrten eine mit Emanation gemischte Luftmenge in einem Gasometer über Quecksilber auf; aus dem Gasometer wurden bestimmte Volumina in bestimmten Zwischenräumen entnommen und in ein Versuchsgefäß geleitet, wie es Fig. 10 darstellt. Die Aktivität, welche nach dem Eintreten der Emanation in das Gefäß beobachtet

¹⁾ Rutherford und Soddy, Phil. Mag., April 1903.

wurde, nahm infolge der Bildung des aktiven Niederschlages mehrere Stunden lang zu. Durch Messung des Sättigungsstromes gleich nach dem Eintreten der Emanation in den Versuchszylinder wurde die Menge der vorhandenen Emanation bestimmt. Auf diese Weise wurde gefunden, daß die Menge der vorhandenen Emanation nach einem Exponentialgesetz abnimmt, und in 3,77 Tagen auf den halben Wert sinkt. P. Curie¹⁾ bestimmte die Zerfallskonstante der Emanation auf eine etwas andere Weise. Ein Glasgefäß wurde mit einer großen Menge Emanation gefüllt und zugesiegelt; es wurde dann die Ionisation, die von den heraustretenden Strahlen herrührte, von Zeit zu Zeit mit einem Elektrometer in einem geeigneten Versuchsgefäß gemessen. Wir werden später sehen, daß die Emanation nur α -Strahlen aussendet, die bereits vollständig durch Glas aufgehalten werden, welches dünner als $\frac{1}{10}$ mm ist. Folglich wurden bei den Versuchen von Curie die α -Strahlen der Emanation durch die Wände der Glasröhre absorbiert. Die außen bemerkbare elektrische Wirkung rührt lediglich von den β - und γ -Strahlen her, die der aus der Emanation gebildete aktive Niederschlag aussendet. Da nach ungefähr drei Stunden der aktive Niederschlag mit der Emanation im radioaktiven Gleichgewicht ist und dann in demselben Verhältnis zerfällt wie die Muttersubstanz, so wird die Intensität der β - und γ -Strahlen in demselben Verhältnis und nach demselben Gesetz abnehmen wie die Emanation selbst. Nach dieser Methode wurde gefunden, daß die Aktivität nach einem Exponentialgesetz in 3,99 Tagen auf den halben Wert sinkt. Die Übereinstimmung der für die Zerfallsperiode nach verschiedenen Methoden erhaltenen Werte zeigt, daß die Menge des aktiven Niederschlages der Menge der vorhandenen Emanation in jedem Augenblick ihres Lebens proportional ist. Dies ist einer der Beweise dafür, daß der aktive Niederschlag ein Zerfallsprodukt der Emanation ist.

Weitere Versuche zur Bestimmung der Zerfallskonstante der Emanation sind von Bumstead und Wheeler²⁾ und Sackur³⁾ ausgeführt worden. Nach Bumstead und Wheeler sinkt die Aktivität in 3,88 Tagen auf den halben Wert, während nach

¹⁾ P. Curie, Compt. rend. 135, 857 (1902).

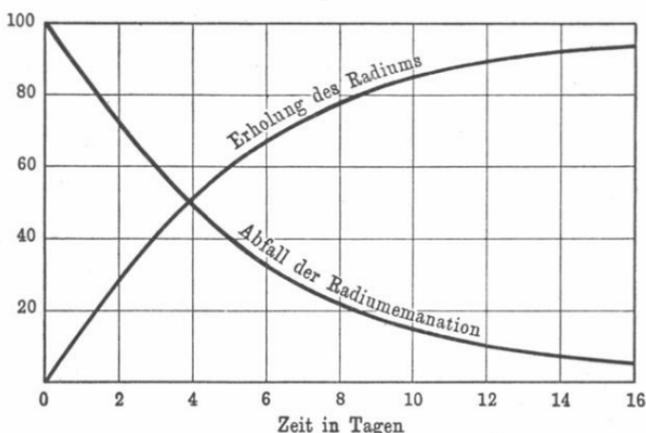
²⁾ Bumstead und Wheeler, Amer. Journ. Science, Febr. 1904.

³⁾ Sackur, Ber. d. d. chem. Ges. 38, Nr. 7, 1754 (1905).

Sackur die Periode 3,86 Tage beträgt. Wir können also annehmen, daß die Periode der Emanation ungefähr 3,8 Tage beträgt.

Radium wird fast vollständig von seiner Emanation befreit, wenn man die Lösung eines Radiumsalzes zum Kochen bringt oder Luft durch sie hindurchleitet. Der aktive Niederschlag bleibt mit dem Radium zurück, verschwindet aber nach mehreren Stunden. Wenn die Radiumlösung alsdann zur Trockene eingedampft wird, so findet man, daß die α -Strahlenaktivität ein Minimum von etwa 25 Proz. ihres Normalwertes erreicht hat.

Fig. 19.



Abfallskurve der Radiumemanation und Erholungskurve des Radiums nach Messungen der α -Strahlenaktivität; für die Erholungskurve ist das Minimum von 25 Proz. als Null angesetzt.

Wird das Radiumsalz dann in trockener Luft aufbewahrt, so bleibt die neugebildete Emanation im Radium eingeschlossen, die Aktivität des Radiums nimmt folglich zu und erreicht in einem Monat ihren Normalwert. Die Erholungskurve des Radiums, von dem Minimalwert von 25 Proz. ab gerechnet, ist in Fig. 19 wiedergegeben. Die Zerfallskurve ist zum Vergleich hinzugefügt.

Die Zerfalls- und Erholungskurven sind komplementär wie beim Thorium. Die Aktivität der Emanation fällt in etwa 3,8 Tagen auf den halben Wert, während die von dem Radium verlorene Aktivität in derselben Zeit zur Hälfte wiedergewonnen wird.

Die Aktivität der vom Radium abgegebenen Emanation wird zu jeder Zeit durch folgende Gleichung bestimmt:

$$\frac{J_t}{J_0} = e^{-\lambda t},$$

während die Gleichung der Erholungskurve vom Minimum ab die folgende ist:

$$\frac{J_t}{J_0} = 1 - e^{-\lambda t},$$

d. h. die Menge Emanation N_t , welche im Radium aufgespeichert ist, nachdem es eine Zeit t sich selbst überlassen war, ist durch die folgende Gleichung gegeben:

$$\frac{N_t}{N_0} = 1 - e^{-\lambda t},$$

worin N_0 die Maximalmenge bezeichnet. Diese Kurven sind auf die gleiche Weise zu erklären wie die entsprechenden Kurven des Thoriums. Die Emanation ist eine unbeständige Substanz, die sich in 3,8 Tagen zur Hälfte umwandelt. Sie wird mit konstanter Geschwindigkeit vom Radium gebildet, und die Aktivität der Radiumverbindungen erreicht einen konstanten Wert, wenn in einer Sekunde ebenso viel Emanation neugebildet wird, als durch Umwandlung der bereits vorhandenen Menge verschwindet. Wenn N_0 die Anzahl der Atome der Emanation im Gleichgewichtszustande und q die Zahl der in der Sekunde neugebildeten Atome ist, so ist:

$$q = \lambda N_0, \quad \lambda = \frac{q}{N_0}.$$

Der Wert von λ hat also eine bestimmte physikalische Bedeutung, er stellt die Emanationsmenge, die in der Sekunde neugebildet wird und zerfällt, als Bruchteil des Maximalbetrages dar. Nimmt man die Periode der Emanation zu 3,8 Tagen an, so ist $\lambda = 1/474\,000 \text{ sec}^{-1}$, d. h. in einer Sekunde wird $1/474\,000$ des Maximalbetrages nachgeliefert.

Dieses Resultat wird durch einen sehr einfachen Versuch von Rutherford und Soddy veranschaulicht. Eine kleine Menge im Gleichgewicht befindlichen Radiumchlorids wurde in heißem Wasser gelöst. Die freigewordene Emanation wurde durch einen Luftstrom in ein geeignetes Versuchsgefäß geblasen, in dem der

Sättigungsstrom sofort gemessen wurde. Der so gemessene Strom ist ein relatives Maß für N_0 , die Gleichgewichtsmenge der Emanation.

Durch die Radiumlösung wurde dann für einige Zeit ein Luftstrom getrieben, um die letzten Spuren der Emanation zu verjagen, und hierauf blieb die Lösung für 105 Minuten ungestört stehen. Die Emanation, die sich während dieser Zeit angesammelt hatte, wurde dann in ein ähnliches Versuchsgefäß gebracht, und der Sättigungsstrom gemessen. Dieser ist ein Maß für N_t , die Menge der neugebildeten Emanation. Für das Verhältnis $\frac{N_t}{N_0}$ wurde der Wert 0,0131 gefunden; läßt man die kleine Menge der Emanation, die in der Zwischenzeit zerfallen ist, unberücksichtigt, so ist:

$$N_t = q \times 105 \times 60$$

und

$$\frac{q}{N_0} = 1/480\,000.$$

Trägt man dem Zerfall der Emanation Rechnung, so wird

$$\frac{q}{N_0} = 1/477\,000,$$

während, wie wir gesehen haben, die Zerfallskonstante der Emanation

$$\lambda = \frac{q}{N_0} = 1/474\,000 \text{ ist.}$$

Die Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment ist also ausgezeichnet und ist ein direkter Beweis dafür, daß die Bildung der Emanation in einer festen Verbindung mit derselben Geschwindigkeit, wie in Lösung, vor sich geht. Im ersten Fall bleibt die Emanation eingeschlossen, im letzteren verteilt sie sich zwischen der Lösung und der über der Lösung befindlichen Luft.

Es ist auffallend, wie hartnäckig die Emanation von Radiumsalzen im trockenen Zustande festgehalten wird. Bei einem Versuch betrug das Emanierungsvermögen im festen Zustande weniger als ein halbes Prozent des Emanierungsvermögens in Lösung. Da ein Radiumsalz nahezu 500 000 mal so viel Emanation aufspeichert, wie in der Sekunde gebildet wird, so zeigt dieser Versuch, daß die Menge der in der Sekunde entweichenden

Emanation weniger als den hundertmillionsten Teil der in dem Salze eingeschlossenen beträgt.

Die Erholungskurve eines von der Emanation befreiten festen Radiumsalzes ändert sich, wenn viel von der Emanation entweicht. In diesem Falle wird die Maximalaktivität früher erreicht und ist viel kleiner als die normale Aktivität eines nicht emanierenden Salzes. Die Fähigkeit des Radiums, seine Emanation zurückzuhalten, ist schwer befriedigend zu erklären, wenn man nicht annimmt, daß eine schwache chemische Einwirkung des Radiums auf die Emanation stattfindet. Godlewski¹⁾ hat die Vermutung ausgesprochen, daß die Emanation sich in dem Zustande einer festen Lösung befinde. Diese Ansicht wird durch gewisse Beobachtungen Godlewskis über die Diffusionsgeschwindigkeit des Uranium-X in Uranium gestützt. Eine Besprechung seiner Beobachtungen wird in Kapitel 7 gegeben werden.

Die Kondensation der Emanation.

Nach der Entdeckung der Emanationen des Thoriums und Radiums herrschten mehrere Jahre lang sehr geteilte Anschauungen über ihre eigentliche Natur. Einige Physiker vermuteten, daß die Emanationen nicht materieller Natur seien, sondern aus Kraftzentren beständen, die mit den Molekülen des Gases, mit dem die Emanation gemischt ist, verbunden wären, und sich mit ihnen fortbewegten. Andere waren der Ansicht, daß die Emanation ein Gas sei, das in so geringen Mengen vorhanden ist, daß man es nur schwer mit dem Spektroskop oder auf direktem chemischem Wege nachweisen kann. Die Einwände, die gegen eine materielle Beschaffenheit der Emanation gemacht sind, wurden zum größten Teil durch die Entdeckung von Rutherford und Soddy²⁾ beseitigt, daß die Emanationen des Thoriums und Radiums eine charakteristische Eigenschaft der Gase besitzen, daß sie sich nämlich bei sehr tiefen Temperaturen aus dem inaktiven Gase, mit dem sie gemischt sind, kondensieren lassen. Als Resultat sorgfältiger Untersuchungen wurde gefunden, daß die Radiumemanation bei einer Temperatur von -150° C

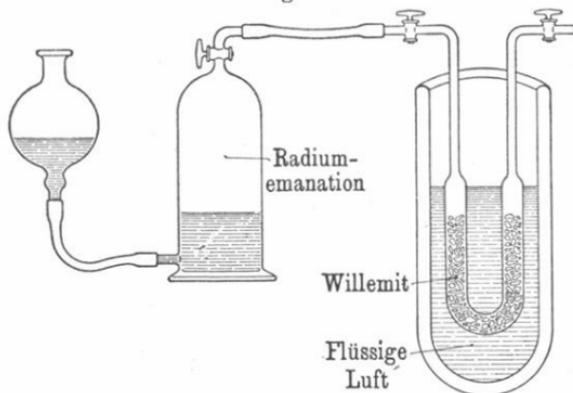
¹⁾ Godlewski: Phil. Mag., Juli 1905.

²⁾ Rutherford und Soddy, Phil. Mag., Mai 1903.

flüssig wird. Die Temperaturen der Kondensation und Verflüchtigung ließen sich genau bestimmen und wichen um nicht mehr als 1°C voneinander ab. Die Thoriumemanation fing ungefähr bei -120°C an, sich zu kondensieren; aber die Kondensation war gewöhnlich nicht eher vollständig, als bis eine Temperatur von -150°C erreicht war. Der wahrscheinliche Grund dieses interessanten Unterschiedes in dem Verhalten der beiden Emanationen wird später besprochen werden.

Wenn eine große Menge Emanation zu Gebote steht, so kann die Kondensation der Radiumemanation leicht mit bloßem Auge beobachtet werden. Das experimentelle Arrangement ist in Fig. 20 dargestellt. Die mit Luft gemischte Emanation wird in einem

Fig. 20.



Kondensation der Radiumemanation.

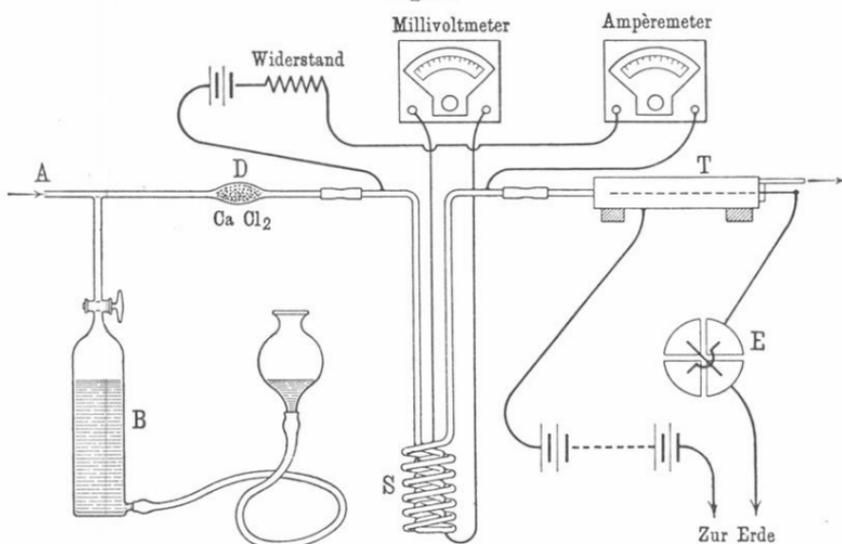
kleinen Gasometer aufgespeichert und aus diesem durch ein U-Rohr geleitet, welches in flüssige Luft eintaucht. Das U-Rohr wird mit Stücken von Willemits oder Kristallen von Baryumplatin-cyanür gefüllt, die unter dem Einfluß der Emanation zu leuchten anfangen. Wenn die mit Emanation gemischte Luft sehr langsam durch die Röhre strömt, so beginnen diejenigen Willemitskristalle, die sich direkt unter der Oberfläche der flüssigen Luft befinden, zu leuchten, und man kann das Leuchten auf einen kleinen Teil der Röhre konzentrieren. Dies zeigt, daß die Emanation sich an den Wänden der Röhre und auf der Oberfläche des Willemits abgesetzt hat und also bei der Temperatur der flüssigen Luft nicht mehr gasförmig ist. Wenn das U-Rohr nun

teilweise evakuiert und dann verschlossen wird, so bleibt die Emanation noch einige Minuten auf der Röhre und dem Willemit konzentriert, obwohl die flüssige Luft entfernt wurde. Sobald jedoch die Temperatur der Röhre auf -150° C steigt, so verflüchtigt sich die Emanation sehr schnell und verteilt sich über die ganze Röhre, so daß plötzlich die ganze Menge des Willemits zu leuchten beginnt. Die Stelle, an der die Emanation kondensiert war, bleibt noch eine Zeitlang heller als der übrige Teil der Röhre. Dies rührt daher, daß die Emanation auch im kondensierten Zustande den aktiven Niederschlag gebildet hatte. Wenn die Emanation sich verflüchtigt, so bleibt der aktive Niederschlag zurück, und seine Strahlen erzeugen das stärkere Leuchten an dieser Stelle. Nach Ablauf einer Stunde ist der Unterschied in dem Leuchten fast ganz verschwunden, und der Willemit leuchtet überall gleichmäßig stark. Das Leuchten kann durch lokales Kühlen mit flüssiger Luft auf einen beliebigen Punkt konzentriert werden. Wenn die U-Röhre mit verschiedenen Lagen phosphoreszierender Substanzen, wie Willemit, Kunzit, Zinksulfid und Baryumplatincyanür, gefüllt wird, so leuchtet jede Lage der verschiedenen Substanzen mit dem ihr eigenen Lichte. Das grünliche Leuchten des Willemits ist von dem des Baryumplatincyanürs nicht leicht zu unterscheiden, es besteht lediglich eine Verschiedenheit der Intensität. Der Kunzit glüht in einer dunkelroten Farbe, während das Zinksulfid ein gelbliches Licht aussendet. Zwischen der Wirkung der Strahlen der Emanation und derjenigen der Strahlen des aktiven Niederschlages auf diese Substanzen bestehen einige interessante Unterschiede. Abweichend von dem Verhalten der anderen Substanzen, verschwindet das Leuchten des Zinksulfids bei der Temperatur der flüssigen Luft, erscheint aber bei höherer Temperatur wieder. Unter dem Einfluß der α -Strahlen leuchten Willemit, Platincyanür und Zinksulfid hell auf, Kunzit jedoch fast gar nicht. Der letztere reagiert nur auf die von dem aktiven Niederschlag ausgesandten β - und γ -Strahlen. Infolgedessen leuchtet der Kunzit direkt nach dem Einführen der Emanation sehr wenig. Das Licht gewinnt jedoch an Intensität in dem Maße, wie der aktive Niederschlag sich aus der Emanation bildet, und erreicht etwa drei Stunden nach der Einführung der Emanation ein Maximum. Wenn Baryumplatincyanür längere Zeit der Wirkung einer großen Menge Emanation ausgesetzt wird, so

nehmen die Kristalle eine rötliche Farbe an, und ihr Leuchten wird sehr viel schwächer. Es wurde gezeigt, daß dies von einer permanenten Umwandlung herrührt, die die Kristalle unter dem Einfluß der Strahlen erfahren. Nach Auflösung der Kristalle und erneuter Kristallisation kehrt das Leuchten zurück.

Curie und Debierne zeigten schon früher, daß Glas unter Einwirkung der Strahlen der Emanation leuchtend wird. Diese Wirkung ist bei Thüringer Glas besonders deutlich, aber in der Regel ist das Leuchten schwach, verglichen mit der Luminiszenz,

Fig. 21.



Bestimmung der Kondensationstemperatur der Radiumemanation mit Hilfe der elektrischen Methode.

welche im Willemit und Zinksulfid hervorgerufen wird. Das Glas wird unter der Einwirkung der Strahlen farbig und unter dem Einfluß großer Emanationsmengen bald schwarz.

Einige Versuche von Rutherford und Soddy, die unter Benutzung der elektrischen Methode ausgeführt sind, zeigen sehr deutlich, zwischen wie engen Temperaturgrenzen die Verflüchtigung der Radiumemanation vor sich geht. Die Emanation, die in einem Gasometer aufgespeichert ist, wird in einer langen spiralförmigen Kupferröhre S kondensiert (s. Fig. 21), die in flüssige Luft ein-

taucht; ein langsamer stetiger Luftstrom passiert die Röhre und wird in ein kleines Versuchsgefäß *T* geleitet. Nachdem die Emanation kondensiert ist, wird die Kupferspirale aus der flüssigen Luft entfernt und sehr langsam erwärmt. Die Temperatur wird durch Messungen des Widerstandes der Kupferspirale bestimmt. Kurz ehe der Verflüchtigungspunkt erreicht wird, ist die in dem Versuchsgefäß beobachtete Wirkung noch sehr klein. Plötzlich tritt eine große Beschleunigung in der Bewegung der Elektrometernadel ein, und bei Verwendung einer großen Menge von Emanation wächst die Geschwindigkeit der Nadel von mehreren Teilstrichen zu mehreren hundert Teilstrichen in der Sekunde. Der Temperaturunterschied zwischen dem Punkte, bei dem praktisch keine Emanation, und demjenigen, wo sie in großen Mengen entwich, betrug in vielen Fällen nicht mehr als einen Bruchteil eines Grades.

Es ist bereits darauf hingewiesen, daß die Kondensation der Thoriumemanation keineswegs bei einer bestimmten Temperatur stattfindet, sondern sich meistens über ein Temperaturgebiet von 30° C erstreckt. Dieser auffallende Unterschied in dem Verhalten der beiden Emanationen rührt aller Wahrscheinlichkeit nach von der geringen Menge von Thoriumemanation her, die bei den Versuchen verwandt wurde. Die Thoriumemanation zerfällt mit einer etwa 6000 mal größeren Geschwindigkeit als die Radiumemanation. Wenn beide Emanationen die gleiche Anzahl von α -Partikeln ausenden, d. h. angenähert gleich große elektrische Wirkung zeigen, so muß die letztere ungefähr in 6000 mal größerer Menge vorhanden sein. Ferner war bei den meisten Versuchen mit der Radiumemanation so viel Emanation vorhanden, daß ihre elektrische Wirkung mehr als 100 mal so groß war wie der Effekt, den die kleine Menge der aus Thoriumsalzen gewonnenen Emanation hervorrief. Aus diesen Gründen war bei einigen Versuchen die Menge der Radiumemanation 10 000 mal und oft mehr als 1 000 000 mal größer als die der Thoriumemanation. Es läßt sich leicht berechnen, daß bei den unternommenen Versuchen nicht mehr als 100 Atome der Thoriumemanation in 1 cem der durch die Kupferspirale getriebenen Luft enthalten sein konnten. Unter diesen Umständen ist es weniger überraschend, daß die Thoriumemanation keine scharfe Verflüchtigungstemperatur besitzt, als daß sie sich überhaupt kondensieren läßt.

Verringerung des Luftdruckes in der Spirale oder der Ersatz des Sauerstoffes durch Wasserstoff bewirkten eine schnellere Verflüssigung. Nach den oben dargelegten Gesichtspunkten ist dieses zu erwarten, da in beiden Fällen die Geschwindigkeit vermehrt wird, mit der die Atome der Emanation durch das Gas diffundieren.

Würde sich die Thoriumemanation in größeren Mengen gewinnen lassen, so würde sie zweifellos gleichfalls verhältnismäßig scharfe Verflüchtigungs- und Verdampfungstemperaturen aufweisen. Die Tatsache, daß die Thoriumemanation bei höherer Temperatur (-120° C) sich zu verflüssigen beginnt als die Radiumemanation (-150° C), zeigt, daß die Emanationen zwei verschiedene Arten von Materie sind.

Die Aktiniumemanation läßt sich wie die beiden anderen Emanationen verflüssigen, wenn man sie eine in flüssige Luft getauchte Spirale passieren läßt, die große Geschwindigkeit ihres Zerfalls (Periode 3,9 sec) erschwert jedoch eine genaue Bestimmung ihrer Kondensationstemperatur nach der elektrischen Methode, da die Emanation den größten Teil ihrer Aktivität verlieren würde, ehe der Gasstrom auf die Temperatur der Spirale abgekühlt ist. Die Leichtigkeit, mit der sich die Radiumemanation in flüssiger Luft kondensieren läßt, ist für viele neuere Untersuchungen der Emanation von großem Werte gewesen. Man hat diese Eigenschaft benutzt, um die Emanation von beigemischtem Gasen zu befreien, sie rein darzustellen und ihr Spektrum zu bestimmen.

Die Diffusionsgeschwindigkeit der Emanation.

Führt man die Emanation in ein Ende einer auf konstanter Temperatur gehaltenen Röhre ein, so findet man sie nach einigen Stunden in der ganzen Röhre gleichmäßig verteilt. Hieraus geht hervor, daß die Emanation wie ein gewöhnliches Gas durch Luft diffundiert. Es war bisher noch nicht möglich, die Dichte der Emanation direkt zu bestimmen, da selbst die von 1 g Radiumbromid zu gewinnende Menge zu klein sein würde, als daß man ihr Gewicht genau feststellen könnte. Durch Vergleich der Diffusionsgeschwindigkeit der Emanation mit der eines anderen Gases läßt sich jedoch ihr Molekulargewicht annähernd schätzen. Es ist seit

langem bekannt, daß die Geschwindigkeit, mit der verschiedene Gase ineinander diffundieren, mit steigendem Molekulargewicht abnimmt. Wenn man daher findet, daß die Diffusionsgeschwindigkeit der Emanation in Luft zwischen den entsprechenden bekannten Werten zweier Gase A und B liegt, so ist es wahrscheinlich, daß das Molekulargewicht der Emanation zwischen denen von A und B liegt.

Kurz nach der Entdeckung der Radiumemanation bestimmten Rutherford und Miss Brooks¹⁾ den Diffusionskoeffizienten K der Emanation in Luft und fanden Werte, die zwischen 0,07 und 0,09 lagen. Ein langer Zylinder wurde durch eine bewegliche Platte in zwei Teile geteilt. Die Emanation wurde zunächst in die eine Hälfte eingeführt und gut mit der Luft durchmischt. Nach Ausgleich der Temperaturdifferenzen wurde die Platte beiseite gezogen, und die Emanation diffundierte dann allmählich in die andere Hälfte. Die Menge der Emanation, die sich zu einer bestimmten Zeit in den beiden Hälften der Röhre findet, wurde mit Hilfe der elektrischen Methode bestimmt; hieraus läßt sich der Diffusionskoeffizient berechnen. Der Diffusionskoeffizient der Kohlensäure (Molekulargewicht 44) in Luft ist seit langem zu 0,142 bestimmt. Die Emanation diffundiert also in Luft langsamer als Kohlensäure. Für Alkohol (Molekulargewicht 77) ist der Wert von K 0,077. Zieht man für die Emanation den kleineren Wert von $K = 0,07$ als den wahrscheinlicheren in Betracht, so folgt, daß das Molekulargewicht der Emanation größer als 77 ist.

Eine Anzahl verschiedener Meßmethoden ist späterhin angewandt, um das Molekulargewicht der Emanation zu bestimmen.

Bumstead und Wheeler²⁾ verglichen die Geschwindigkeiten, mit denen die Emanation und Kohlensäure durch ein poröses Gefäß diffundieren. Nach Grahams Gesetz, nach dem der Diffusionskoeffizient indirekt proportional der Quadratwurzel aus dem Molekulargewicht ist, berechneten sie das Molekulargewicht der Emanation zu ungefähr 172.

Makower³⁾ verfuhr in ähnlicher Weise, indem er die Ge-

¹⁾ Rutherford und Miss Brooks, Trans. Roy. Soc. Canada (1901), Chemical News (1902).

²⁾ Bumstead und Wheeler, Amer. Journ. Science, Febr. 1904.

³⁾ Makower, Phil. Mag., Januar 1905.

schwindigkeit, mit der die Radiumemanation durch ein poröses Gefäß diffundiert, mit den entsprechenden Geschwindigkeiten für Sauerstoff, Kohlensäure und schweflige Säure verglich, und fand schließlich, daß das Molekulargewicht der Emanation etwa 100 beträgt.

Curie und Danne¹⁾ bestimmten die Diffusionsgeschwindigkeit der Emanation in Kapillarröhren und erhielten für K 0,09 einen Wert, der etwas größer ist, als der von Miss Brooks und dem Verfasser bestimmte.

Alle Diffusionsversuche führen also zu dem Schluß, daß die Emanation ein schweres Gas ist, dessen Molekulargewicht wahrscheinlich nicht unter 100 liegt. Es ist jedoch zweifelhaft, ob die auf diesem Wege abgeleiteten Werte für das Molekulargewicht sehr zuverlässig sind, weil die Emanation in verschwindend kleiner Menge in dem Gase vorhanden ist, in welches es diffundiert, und ihr Diffusionskoeffizient mit dem von Gasen verglichen wird, die in großen Mengen vorhanden waren. Es ist möglich, daß unter diesen Umständen die Diffusionskoeffizienten nicht direkt vergleichbar sind. Ferner ist bei diesen Versuchen die Diffusion der Emanation, die die Eigenschaft eines einatomigen Gases hat, mit der von Gasen verglichen, deren Moleküle aus zwei oder mehr Atomen zusammengesetzt sind.

Wenn angenommen wird, daß die Emanation ein direktes Produkt des Radiums ist, und aus diesem durch die Abgabe von einer oder zwei α -Partikeln entsteht, so sollte ihr Molekulargewicht nicht viel kleiner als das des Radiums selbst (225) sein. Es ist zweifelhaft, ob das Molekulargewicht der Emanation mit einiger Sicherheit bestimmt werden kann, ehe genug Emanation vorhanden ist, um die Messung ihrer Dichte zu erlauben.

Der Diffusionskoeffizient der Thoriumemanation ist von dem Verfasser zu ungefähr 0,09 bestimmt. Dieses würde andeuten, daß die Thoriumemanation ein etwas geringeres Molekulargewicht als die Radiumemanation besitzt.

Die Radiumemanation gehorcht den Gasgesetzen nicht nur hinsichtlich ihrer Diffusion, sondern auch in anderen Beziehungen. Zum Beispiel verteilt sie sich in zwei untereinander in Verbindung stehenden Gefäßen nach dem Verhältnis ihrer Volumina. P. Curie

¹⁾ Curie und Danne, Compt. rend. 136, 1314 (1904).

und Danne zeigten, daß, wenn eines der Gefäße auf 10° C, das andere auf 350° C gehalten wird, die Emanation sich in demselben Verhältnis verteilt, wie ein anderes Gas unter gleichen Bedingungen.

Die Emanation besitzt so die charakteristischen Eigenschaften der Gase, nämlich sich zu kondensieren und zu diffundieren. Sie gehorcht auch bei tiefen Temperaturen dem Charleschen Gesetz, und wie wir später sehen werden, auch dem Boyle'schen.

Wir können also mit Sicherheit annehmen, daß die Emanation ein Gas von hohem Molekulargewicht ist.

Physikalische und chemische Eigenschaften der Emanation.

Eine Anzahl von Versuchen ist ausgeführt worden, um zu untersuchen, ob die Emanation bestimmte chemische Eigenschaften besitzt, die es uns erlauben könnten, sie zu irgend einem bekannten Gase in Beziehung zu setzen; bis jetzt ist jedoch noch kein Anzeichen dafür gefunden, daß die Emanation irgend eine chemische Verbindung eingehen kann. Die elektrische Methode bildet ein einfaches und zuverlässiges Mittel, um festzustellen, ob die Menge der Emanation unter verschiedenen Umständen abnimmt.

Rutherford und Soddy¹⁾ zeigten, daß die Menge der Emanation bei Kondensation durch flüssige Luft, oder wenn die Emanation ein auf Weißglut erhitztes Platinrohr passiert, nicht abnimmt. Bei einigen Versuchen wurde die Emanation über verschiedene Reagenzien geleitet, wobei sie stets mit einem Gase gemischt war, auf das die betreffenden Reagenzien nicht einwirkten.

Ramsay und Soddy²⁾ fanden die Menge der Emanation unverändert, nachdem sie mehrere Stunden lang in einer Sauerstoffatmosphäre über Alkali einen Funken durch sie hatten hindurchschlagen lassen. Der Sauerstoff wurde darauf mit Hilfe von Phosphor entfernt, ohne daß sich ein sichtbarer Rückstand fand. Hierauf wurde ein anderes Gas eingeleitet, und die Emanation

¹⁾ Rutherford und Soddy, Phil. Mag., November 1902.

²⁾ Ramsay und Soddy, Proc. Roy. Soc. 72, 204 (1903).

nach geschehener Mischung entfernt. Die Aktivität war praktisch unverändert. Ein ähnliches Resultat ergab sich, wenn die Emanation in einem Magnesiumrohr drei Stunden lang auf Rotglut erhitzt wurde. Wir können also die Emanation, da ihr jegliche Fähigkeit fehlt, Verbindungen einzugehen, den vor kurzer Zeit entdeckten Edelgasen zurechnen.

Nach der Zerfallstheorie wandelt sich die Emanation unter Aussendung einer α -Partikel um. Es ist von großer Bedeutung, festzustellen, ob ihre Umwandlungsgeschwindigkeit von der Temperatur unabhängig ist. Jeder Wechsel in der Umwandlungsgeschwindigkeit würde einen Wechsel in der Abfallsperiode herbeiführen. Diese Frage ist von P. Curie untersucht, welcher fand, daß der Abfall der Aktivität sich nicht änderte, wenn die Emanation Temperaturen zwischen -180°C und 450°C ausgesetzt war.

Hiernach kann man die Umwandlung der Emanation nicht als eine gewöhnliche chemische Dissoziation ansehen, denn keine chemische Reaktion ist über einen so weiten Bereich von der Temperatur unabhängig. Die Umwandlung der Emanation ist ferner von der Ausschleuderung eines Teiles ihrer Masse mit ungeheurer Geschwindigkeit begleitet, eine Erscheinung, die niemals bei chemischen Prozessen beobachtet ist. Dieses legt die Vermutung nahe, daß der Vorgang nicht molekularer, sondern atomistischer Natur ist, und dieser Gesichtspunkt wird durch die Beobachtung gestützt, daß eine ungeheure Energiemenge bei dem Zerfall der Emanation frei wird.

Das Volumen der Emanation.

Wir haben gesehen, daß die Emanationsmenge, die aus einer bestimmten Radiummenge gewonnen werden kann, am größten ist, wenn in der Sekunde ebensoviel Emanation neugebildet wird, wie zerfällt. Da dieser Maximalbetrag immer der vorhandenen Radiummenge proportional ist, so sollte das Volumen der Emanation, die von einem Gramm Radium im radioaktiven Gleichgewicht abgegeben wird, einen bestimmten konstanten Wert haben. Es wurde frühzeitig erkannt, daß das Volumen der aus einem Gramm Radium zu gewinnenden Emanation sehr klein, aber doch groß genug ist, um seine Bestimmung zu erlauben. Im

Jahre 1903 berechnete der Verfasser¹⁾ aus den damals zur Verfügung stehenden Daten, daß das Volumen der aus einem Gramm Radium zu gewinnenden Emanation bei 760 mm und 0° C zwischen 0,06 und 0,6 Kubikmillimetern liegen müsse.

Eine genauere Berechnung läßt sich mit Hilfe der neuerdings bestimmten Anzahl von α -Partikeln ausführen, die ein Gramm Radium in der Sekunde aussendet. Diese Zahl ist von dem Verfasser durch Messung der positiven Ladung bestimmt, die ein Körper gewinnt, auf den die α -Strahlen auftreffen. Unter der Annahme, daß jede α -Partikel eine Ladung von $3,4 \times 10^{-10}$ elektrostatischen Einheiten besitzt, wurde berechnet, daß ein Gramm Radium im Zustande der Minimalaktivität (d. h. wenn die Emanation und ihre Zerfallsprodukte entfernt sind) $6,2 \times 10^{10}$ α -Partikeln in der Sekunde abgibt. Wenn wir die wahrscheinlich zutreffende Voraussetzung machen, daß jedes Radiumatom bei seiner Umwandlung ein Atom der Emanation bildet, so muß die Zahl der in der Sekunde gebildeten Atome der Emanation gleich der Zahl der in der Sekunde ausgesandten α -Partikeln sein.

Nun ist N_0 , die Maximalzahl der Emanationsatome, die in einer im Gleichgewicht befindlichen Radiummenge vorhanden sind, gegeben durch die Beziehung $N_0 = \frac{q}{\lambda}$, worin q die Bildungsgeschwindigkeit und λ die radioaktive Konstante ist.

Demnach ist für ein Gramm Radium

$$N_0 = 6,2 \times 10^{10} \times 474\,000 = 2,94 \times 10^{16}.$$

Aus experimentellen Daten ergibt sich, daß ein Kubikzentimeter eines Gases bei Atmosphärendruck und 0° $3,6 \times 10^{19}$ Moleküle enthält. Nimmt man an, daß das Molekül der Emanation nur ein Atom enthält, so ergibt sich das Volumen der aus einem Gramm Radium gewonnenen Emanationsmenge zu

$$\frac{2,92 \times 10^{16}}{3,6 \times 10^{19}} = 0,0008 \text{ ccm oder } 0,8 \text{ mm.}$$

Wir wollen jetzt an der Hand der Disintegrationstheorie die Umwandlungen untersuchen, die in einem Volumen reiner Emanation vor sich gehen müssen. Die Emanation sendet α -Partikeln

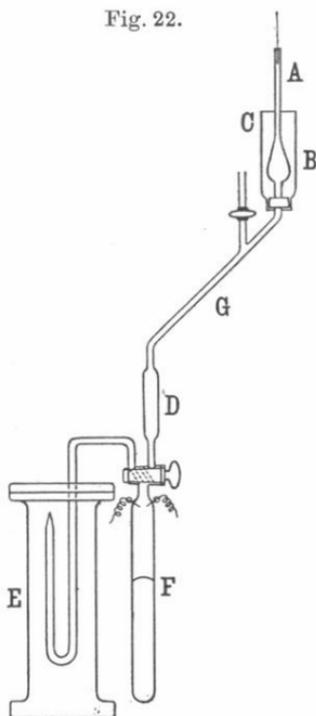
¹⁾ Rutherford, Nature, 20. August 1903; Phil. Mag., August 1905.

aus und wandelt sich in den aktiven Niederschlag um. Dieser verhält sich wie ein fester Stoff und schlägt sich auf den Wänden des Gefäßes nieder. Die Menge der Emanation fällt nach einem Exponentialgesetz in 3,8 Tagen auf den halben Wert. Wir sollten also erwarten, daß das Volumen der Emanation abnimmt und nach einem Monat sehr klein geworden ist, da in dieser Zeit die Aktivität der Emanation auf einen kleinen Bruchteil ihres Anfangswertes sinkt*). Diese theoretischen Schlüsse sind in bemerkenswerter Weise bestätigt worden.

Ramsay und Soddy¹⁾ griffen das schwierige Problem, die Emanation rein darzustellen und ihr Volumen zu messen, in folgender Weise an. Die Emanation von 60 mg in Lösung befindlichen Radiumbromids wurde acht Tage lang angesammelt und dann aus dem Gefäß *E* in die Explosionsbürette *F* geleitet (Fig. 22). Das in Lösung befindliche Radium bildet große Mengen von Wasserstoff und Sauerstoff, und mit diesen Gasen war die Emanation anfänglich gemischt. Ein kleiner Überschuß von Wasserstoff blieb nach der Explosion mit der Emanation gemischt zurück. Das

Gasgemisch wurde dann zur Entfernung von Kohlensäure für einige Zeit in Berührung mit Ätznatron belassen, das sich in dem

Fig. 22.



Apparat von Ramsay und Soddy zur Messung des Volumens der Radiumemanation.

*) Bei der Umwandlung der Emanation und des aktiven Niederschlages werden drei α -Partikeln pro Atom der Emanation ausgesandt. Wenn die α -Partikeln Heliumatome sind, so wäre eine Steigerung des Gasvolumens auf das Dreifache des Anfangswertes zu erwarten. Die α -Partikeln werden jedoch wahrscheinlich in den Gefäßwänden absorbiert und diffundieren nicht immer zurück.

¹⁾ Ramsay und Soddy, Proc. Roy. Soc. 73, 346 (1904).

oberen Teil der Bürette befand. Inzwischen war der oberere Teil des Apparates so weit als möglich evakuiert. Die Verbindung mit der Quecksilberpumpe wurde dann geschlossen, und der Wasserstoff mit der Emanation in den Apparat eingeführt, wobei das Gasgemisch zur Entfernung von Wasserdampf durch die mit Phosphorpentoxyd gefüllte Röhre *D* geleitet wurde. Die Emanation wurde in dem unteren Teile der mit flüssiger Luft umgebenen Röhre *B* kondensiert. Die Kondensierung konnte man an dem hellen Leuchten des unteren Teiles der Röhre erkennen. Das Quecksilber der Bürette wurde bis *A* gehoben, und die Röhre *AB* von neuem völlig leer gepumpt. Dann wurde die Verbindung mit der Pumpe wieder unterbrochen, die flüssige Luft entfernt und die verdampfte Emanation in die kalibrierte Röhre *A* gebracht. Hierauf wurden Beobachtungen über die Veränderung des Volumens der Emanation, während eines Zeitraumes von mehreren Wochen, gemacht. Die Resultate sind in der folgenden Tabelle enthalten:

Zeit	Volumen	Zeit	Volumen
Beginn	0,124 cmm	7. Tag	0,0050 cmm
1. Tag	0,027 "	9. "	0,0041 "
3. "	0,011 "	11. "	0,0020 "
4. "	0,0095 "	12. "	0,0011 "
6. "	0,0063 "		

Das Volumen nahm ab und nach vier Wochen blieb nur ein kleines Gasbläschen übrig, aber dieses behielt sein Leuchten bis zum letzten Augenblick bei. Während dieser Zeit färbte sich die Röhre unter dem Einfluß der Strahlen tief dunkelrot. Es wurde so schwierig, das Volumen abzulesen, und eine starke Lichtquelle war hierzu erforderlich. Ramsay und Soddy glauben, daß die schnelle Abnahme während des ersten Tages daher rühren mag, daß das Quecksilber an der Kapillarröhre klebte. Berücksichtigt man die Beobachtungen vom zweiten Tage an, so findet man, daß das Volumen der Emanation nach einem Exponentialgesetz mit einer Periode von ungefähr vier Tagen kleiner wird. Diese Abnahmegeschwindigkeit ist ungefähr die nach der Theorie zu erwartende. Ein neuer Versuch mit frischer Emanation wies

einen sehr überraschenden Unterschied auf. Das Anfangsvolumen des Gases betrug 0,0254 cmm bei Atmosphärendruck, eine Reihe von besonderen Versuchen wurde ausgeführt, um die Abhängigkeit des Volumens vom Druck zu bestimmen. Es fand sich, daß die Emanation innerhalb der Versuchsfehler dem Boyle'schen Gesetze gehorcht. Das Gasvolumen in der Kapillarröhre nahm jedoch im Gegensatz zu den Beobachtungen des ersten Versuches nicht ab, sondern wuchs an und betrug nach 23 Tagen ungefähr das Zehnfache des Anfangswertes. Zu gleicher Zeit begannen Bläschen an der Oberfläche der Quecksilbersäule zu erscheinen.

Weitere Versuche sind erforderlich, um die Widersprüche zwischen diesen beiden Experimenten aufzuklären. Wir werden später sehen, daß Helium ein Umwandlungsprodukt der Emanation ist. Bei dem ersten Versuch scheint das Helium in der Glaswand absorbiert zu sein. Dieses Verhalten kann nicht auffällig sein, denn es ist sehr wahrscheinlich, daß die α -Partikeln der radioaktiven Produkte aus Heliumatomen bestehen, die mit großer Geschwindigkeit fortgeschleudert werden. Die meisten dieser Atome würden in die Glaswände bis zu einer Tiefe von etwa 0,02 mm eindringen, und ihre Rückdiffusion in das Gas könnte von der Glassorte abhängen. Die einfachste Erklärung ist die, daß das Helium nach der Absorption durch die Glaswände bei dem zweiten Versuche zurückdiffundiert, bei dem ersten dagegen nicht.

Ramsay und Soddy folgerten aus ihren Versuchen, daß das Maximalvolumen der aus einem Gramm Radium zu gewinnenden Emanation ein wenig größer als ein Kubikmillimeter bei Atmosphärendruck und Zimmertemperatur ist.

Die berechneten und beobachteten Werte 0,8 und 1,0 cmm befinden sich so in sehr guter Übereinstimmung, was die Richtigkeit der Theorie bestätigt, auf die die Berechnungen sich gründen.

Das Spektrum der Emanation.

Nach der Isolierung der Emanation und der Bestimmung ihres Volumens versuchten Ramsay und Soddy auch ihr Spektrum zu bestimmen. Bei einigen Versuchen erschienen für einen Augenblick einige offenbar neue helle Linien, aber diese verschwanden schnell infolge der Bildung von Wasserstoff innerhalb

der Röhre. Ramsay und Collie¹⁾ setzten die Versuche fort und erhielten schließlich das Spektrum der Emanation lange genug, um schnell die Wellenlänge der deutlicheren Linien festzulegen. Das Spektrum verblaßte jedoch schnell und wurde bald völlig von dem des Wasserstoffs überdeckt. Das Spektrum war sehr hell und bestand aus einer Anzahl scharfer Linien mit völlig dunkeln Zwischenräumen. Das Spektrum zeigte in seinem allgemeinen Charakter eine auffallende Ähnlichkeit mit den Spektren der Gase der Argongruppe. Bei der Wiederholung des Versuches mit neuer Emanation wurden manche der hellen Linien wieder beobachtet und neben ihnen traten noch einige neue auf. Ramsay und Collie schließen aus ihren Versuchen, daß die Emanation zweifellos ein bestimmtes und wohlausgeprägtes Spektrum von hellen Linien hat.

Die Wärmeentwicklung der Emanation.

Ein Gramm Radium entwickelt im radioaktiven Gleichgewicht ununterbrochen eine Wärmemenge von ungefähr 100 Grammkalorien in der Stunde. Wenn das Radium durch Auflösen oder Erhitzen von der Emanation befreit wird, so sinkt seine Wärmeentwicklung auf ungefähr 25 Proz. des Gleichgewichtswertes und nimmt dann in dem Maße, wie die Emanation neugebildet wird, zu, um nach einem Monat ihren früheren Wert zu erreichen. Ein Gefäß, in welches die von dem Radium abgetrennte Emanation gebracht wird, sendet eine große Wärmemenge aus, die drei Stunden nach der Einleitung der Emanation 75 Proz. der ursprünglich von dem Radium entwickelten Wärmemenge beträgt. Die Wärmeentwicklung der Emanation nimmt in dem gleichen Maße wie die Aktivität ab, d. h. sie fällt in etwa vier Tagen auf den halben Wert. Die Kurven der Abnahme der Wärmeentwicklung der Emanation und der Zunahme der Wärmeentwicklung des Radiums sind komplementär. Die Summe der entwickelten Wärmemengen ist immer gleich der Wärmemenge, die das Radium im Gleichgewichtszustande ausstrahlt.

Die Wärme, die in dem Gefäße entsteht, welches die Emanation enthält, rührt nicht von der Emanation allein her, sondern

¹⁾ Ramsay und Collie, Proc. Roy. Soc. 73, 470 (1904).

auch von dem aus der Emanation entstehenden aktiven Niederschläge. Wir werden die Gesetze, welche die Wärmeentwicklung des Radiums und seiner Produkte beherrschen, ausführlicher im Kapitel 10 behandeln.

Wir haben gesehen, daß drei Viertel der Wärmeentwicklung des Radiums der Emanation und ihren Umwandlungsprodukten zuzuschreiben ist. Es ist schwierig, die Wärmeentwicklung der Emanation gesondert von der ihrer schnell sich umwandelnden Produkte zu bestimmen; doch rührt ohne Zweifel ungefähr ein Viertel der von dem Radium entwickelten Wärme von der Emanation her.

Somit entwickelt ein Kubikmillimeter der Emanation — der Maximalbetrag, der aus einem Gramm Radium zu gewinnen ist — eine Wärmemenge von etwa $Q = 25$ Grammkalorien per Stunde. Da die Wärmewirkung der Emanation in derselben Weise abfällt wie ihre Aktivität, so ist die gesamte, von der Emanation während ihrer Existenz abgegebene Wärmemenge gleich $\frac{Q}{\lambda}$. Der

Wert von λ ist, für die Stunde als Einheit, $\frac{1}{132}$; die gesamte von der Emanation entwickelte Wärme beträgt also 3300 Grammkalorien. Rechnet man die von den Zerfallsprodukten der Emanation herrührende Wärmemenge hinzu, so findet man, daß in der die Emanation enthaltenden Röhre 9900 Grammkalorien gebildet werden. Die gesamte, von einem Kubikzentimeter der Emanation und von ihren Umwandlungsprodukten entwickelte Wärmemenge beträgt also etwa 10 Millionen Grammkalorien.

Die Vereinigung von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser geht unter größerer Wärmeentwicklung vor sich als irgend eine andere chemische Reaktion. Bei der Explosion eines Gemisches von 1 ccm Wasserstoff und $\frac{1}{2}$ ccm Sauerstoff werden drei Grammkalorien frei. Die Umwandlung der Emanation ist also von einer nahezu vier Millionen Mal größeren Wärmeentwicklung begleitet als die Vereinigung eines gleich großen Volumens Wasserstoff mit Sauerstoff.

Wenn man annimmt, daß das Atom der Emanation eine 200 mal größere Masse hat als das Wasserstoffatom, so läßt sich leicht berechnen, daß ein Kilo der Emanation Energie im Betrage von 20000 Pferdestärken in der Stunde abgeben würde. Diese

Energieentwicklung würde exponential abfallen; im Verlauf ihres ganzen Lebens würde diese Emanationsmenge eine Energiemenge von etwa 120 000 Pferdestärkentagen entwickeln.

Diese Zahlen zeigen deutlich, welche enorme Wärmemenge bei den Umwandlungen der Emanation entwickelt wird. Diese Menge ist von einer ganz anderen Größenordnung als die, welche bei den heftigsten chemischen Reaktionen absorbiert oder entwickelt wird.

Wir werden später im Kapitel 10 sehen, daß wahrscheinlich jedes radioaktive Produkt, welches α -Strahlen aussendet, eine Wärmemenge von derselben Größenordnung wie die Emanation entwickelt. Diese Wärmeentwicklung ist in Wirklichkeit eine notwendige Begleiterscheinung der Radioaktivität, denn die Wärme ist ein Maß der kinetischen Energie der fortgeschleuderten α -Partikeln.

Diskussion der Resultate.

Wir wollen nun kurz die in diesem Kapitel behandelten Eigenschaften der Radiumemanation zusammenstellen. 1. Die Emanation ist ein schweres Gas, welches keinerlei chemische Verbindungen eingeht; sie scheint ihrem allgemeinen Verhalten nach den Edelgasen verwandt zu sein, von denen Helium und Argon am besten bekannt sind. 2. Sie diffundiert wie ein Gas von hohem Molekulargewicht und gehorcht dem Boyleschen Gesetz. 3. Sie hat ein Spektrum von hellen Linien, das denen der Edelgase ähnlich ist. 4. Sie kondensiert sich aus einem Gasgemisch bei einer Temperatur von -150°C . 5. Ungleich den gewöhnlichen Gasen ist die Emanation nicht beständig, sondern zerfällt nach einem Exponentialgesetz. Das Volumen der Emanation nimmt daher in dem Maße ihres Zerfalls ab, d. h. es fällt in 3,8 Tagen auf den halben Wert. Die Umwandlung der Emanation findet unter Aussendung von α -Partikeln statt und gibt Anlaß zur Bildung einer neuen Reihe von nichtgasförmigen Substanzen, die sich auf Gegenständen der Umgebung niederschlagen. Die Eigenschaften des aktiven Niederschlages und seine Umwandlungen werden im nächsten Kapitel behandelt werden.

Die Emanation ist Gewicht für Gewicht ungefähr 100 000 mal so stark aktiv wie ihre Muttersubstanz, das Radium. Vermöge

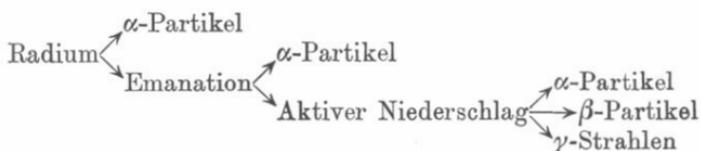
ihrer starken Aktivität leuchtet sie im Dunkeln und regt viele Substanzen zu heller Phosphoreszenz an. Ihre Strahlen färben Glas, Quarz und andere Stoffe sehr schnell und bewirken eine lebhaft entwickelte von Wasserstoff und Sauerstoff in wässrigen Lösungen. Die Umwandlung der Emanation geht mit einer außerordentlichen Wärmeentwicklung vor sich, die ungefähr eine Million Mal größer ist, als die irgend einer chemischen Reaktion.

Von der Emanation und ihren Produkten rühren drei Viertel der α -Strahlenaktivität des Radiums her. Die Emanation selbst sendet keine β - und γ -Strahlen aus, sondern diese stammen von einem ihrer Umwandlungsprodukte. Entfernt man daher die Emanation und wartet einige Stunden, bis der aktive Niederschlag, der bei dem Radium verbleibt, zerfallen ist, so findet sich das Radium fast frei von β - und γ -Strahlenaktivität.

In der Emanation und ihren Umwandlungsprodukten ist also der Hauptteil der Aktivität des Radiums konzentriert. Ein mit Emanation gefülltes Gefäß besitzt alle Eigenschaften des im Gleichgewicht befindlichen Radiums. Es sendet α -, β - und γ -Strahlen aus, entwickelt Wärme und ruft in manchen Substanzen ein Phosphoreszieren hervor. Radium selbst sendet, wenn es von der Emanation und dem aktiven Niederschlag befreit ist, nur α -Strahlen aus. Seine Aktivität und seine Wärmeentwicklung betragen dann nur ein Viertel des Gleichgewichtswertes.

Die Emanation wird von dem Radium mit gleichförmiger Geschwindigkeit gebildet und scheint ein direktes Zerfallsprodukt des Radiums zu sein. Indem wir der früher angewandten Schlußweise folgen, wollen wir annehmen, daß von den vorhandenen Radiumatomen ein kleiner Bruchteil in jeder Sekunde unter Ausschleuderung einer α -Partikel zerfällt. Aus dem Radiumatom entsteht durch die Abgabe einer α -Partikel das Atom der Emanation. Die Atome der Emanation sind viel unbeständiger als die des Radiums, sie zerfallen unter Aussendung von α -Partikeln mit solcher Geschwindigkeit, daß die Hälfte der Atome in 3,8 Tagen umgewandelt wird. Nach der Aussendung der α -Partikeln wandelt sich die Emanation in den aktiven Niederschlag um.

Die bisher behandelten Umwandlungen und die sie begleitenden Strahlenarten sind untenstehend wiedergegeben.



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 chemischen 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-