

Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Radioaktive Umwandlungen

Rutherford, Ernest

Braunschweig, 1907

Erstes Kapitel. Historische Einleitung

Radioaktive Umwandlungen.

Erstes Kapitel.

Historische Einleitung.

Das letzte Jahrzehnt war eine sehr fruchtbare Periode für die Physik; in schneller Folge haben sich Entdeckungen von weittragendster Bedeutung und höchstem Interesse aneinandergereiht. Obwohl diese Untersuchungen sich auf sehr verschiedenen Gebieten bewegten, so stehen sie doch, wie eine genauere Prüfung zeigt, in sehr engem Zusammenhange; jede Entdeckung stellte zugleich einen Ausgangspunkt dar, von dem aus die Forschung weiterschreiten konnte.

Die Entwicklung ging so schnell vor sich, daß es selbst für die, die direkt an den Untersuchungen teilnahmen, schwer war, sofort die volle Bedeutung der zutage geförderten Ergebnisse zu übersehen. In besonderem Maße war dies auf dem Gebiete der Radioaktivität der Fall, wo die beobachteten Erscheinungen so verwickelt, und die Gesetze, die sie beherrschen, so ungewöhnlich sind, daß, um sie zu verstehen, neue Vorstellungen geschaffen werden mußten.

Den Ausgangspunkt dieser Epoche der Physik bildeten Röntgens Entdeckung der X-Strahlen im Jahre 1895 und Lenards Kathodenstrahlen-Versuche. Die außergewöhnlichen Eigenschaften der X-Strahlen zogen sofort die Aufmerksamkeit der wissenschaftlichen Welt auf sich und führten zu einer Reihe von Untersuchungen, deren Gegenstand es nicht allein war, die Eigenschaften der Strahlen selbst zu prüfen, sondern auch über die eigentliche Natur der Strahlen und ihren Ursprung Aufschluß zu verschaffen.

Diese letzte Frage führte zu einer viel genaueren Untersuchung der Kathodenstrahlen in der Vakuumröhre; denn man fand, daß zwischen diesen Strahlen und der Entstehung der Röntgenstrahlen ein gewisser enger Zusammenhang bestand. Im Jahre 1897 gelang es J. J. Thomson, endgültig zu beweisen, daß die Kathodenstrahlen aus einem Strom von Partikeln bestehen, die negativ geladen sind und sich mit großer Geschwindigkeit fortbewegen. Diese Teilchen haben eine scheinbare Masse von nur etwa $\frac{1}{1800}$ der des Wasserstoffatoms und stellen somit die kleinsten bisher bekannten Körper dar. Diese Korpuskeln oder „Elektronen“, wie sie genannt werden, sind offenbar ein Bestandteil aller Materie, und man nimmt an, daß aus diesen kleinsten Teilchen die Atome zusammengesetzt sind.

Diese Elektronenhypothese ist außerordentlich fruchtbar gewesen und hat bereits in hohem Maße frühere Anschauungen über die Konstitution der Materie umgestaltet, oder vielmehr erweitert. Sie hat auf vielen Gebieten der Physik der Forschung weite Arbeitsfelder erschlossen und hat die Wissenschaft gewissermaßen mit einem Mikroskop versehen, das den Aufbau der chemischen Atome zu untersuchen erlaubt. J. J. Thomson hat die Frage der Stabilität von Atomen, die aus einer Anzahl rotierender Elektronen zusammengesetzt sind, mathematisch behandelt und gezeigt, daß diese fingierten Atommodelle in bemerkenswerter Weise einige der fundamentalen Eigenschaften der chemischen Atome aufweisen.

Der Beweis dafür, daß die Kathodenstrahlen korpuskularer Natur sind, wies sofort auf eine Erklärung des Ursprungs und der Natur der X-Strahlen hin. Stokes, J. J. Thomson und Wiechert kamen unabhängig voneinander zu der Annahme, daß die Kathodenstrahlen die X-Strahlen erzeugen. Das plötzliche Anhalten der Elektronen im Kathodenstrom verursacht eine starke elektromagnetische Störung, die von dem Auftreffpunkte mit Lichtgeschwindigkeit ausgeht. Von diesem Gesichtspunkte aus stellen die X-Strahlen eine Anzahl unzusammenhängender Impulse dar, die einander schnell, aber ohne bestimmte Ordnung folgen. Sie gleichen in gewisser Beziehung sehr kurzen Wellen ultraviolettten Lichtes, unterscheiden sich aber von diesen dadurch, daß die Impulse nicht periodisch sind. Das Durchdringungsvermögen der X-Strahlen und das Fehlen der direkten Reflexion,

der Brechung und Polarisierung, ergeben sich als Folgerungen dieser Theorie, wenn die Impulsbreite im Vergleich zu dem Atomdurchmesser klein ist. Einen einfachen, ausgezeichneten Bericht über die Natur und die Eigenschaften solcher Impulse hat J. J. Thomson¹⁾ in den Sillimanvorlesungen von 1903 gegeben.

Inzwischen war eine andere bemerkenswerte Eigenschaft der X-Strahlen eingehend untersucht worden. Der Durchgang von X-Strahlen durch ein Gas teilt diesem die Fähigkeit mit, einen elektrisierten Körper schnell zu entladen. Dieses wurde in zufriedenstellender Weise durch die Hypothese erklärt, daß die Strahlen in dem elektrisch neutralen Gase eine Anzahl positiv oder negativ geladener Teilchen oder Ionen bilden²⁾. Die Untersuchung dieser Erscheinungen geschah nach zwei verschiedenen Methoden, der elektrischen und der optischen. C. T. R. Wilson³⁾ fand, daß unter gewissen Bedingungen die Ionen, die von den X-Strahlen in dem Gase gebildet werden, Kerne für die Kondensation von Wasserdampf werden. Jedes Ion wird so das Zentrum eines sichtbaren, geladenen Wassertropfchens, das sich unter dem Einfluß eines elektrischen Feldes bewegt. Versuche dieser Art bestätigten in bemerkenswerter Weise die Fundamentalanschauungen der Ionentheorie und ließen deutlich die diskontinuierliche oder atomistische Struktur der Elektrizitätsträger erkennen.

Aus Versuchen über die Diffusion der Ionen in Gasen leitete Townsend⁴⁾ die wichtige Tatsache ab, daß die Ladung eines Gasions in allen Fällen dieselbe ist, die ein Wasserstoffatom bei der Elektrolyse des Wassers trägt. Durch eine Kombination der elektrischen mit der optischen Methode fand J. J. Thomson⁵⁾ den wirklichen Wert der von einem Ion transportierten Ladung.

Die Bestimmung dieser wichtigen physikalischen Konstanten erlaubt sofort, die Ionen zu zählen, die in jedem beliebigen Volumen eines Gases, das dem Einfluß eines Ionisators ausgesetzt worden ist, vorhanden sind. Diese Bestimmung ermöglicht

¹⁾ J. J. Thomson, Elektrizität und Materie. (Friedr. Vieweg und Sohn, Braunschweig 1904.)

²⁾ J. J. Thomson und E. Rutherford, Phil. Mag., Nov. 1896.

³⁾ C. T. R. Wilson, Phil. Trans., p. 265, 1897; p. 403, 1899; p. 289, 1900.

⁴⁾ Townsend, Phil. Trans. A, 129 (1899).

⁵⁾ J. J. Thomson, Phil. Mag., Dez. 1898; März 1903.

ferner die genaueste Berechnung der Anzahl der Moleküle, die in einem Kubikzentimeter irgend eines Gases bei 0° und 760 mm enthalten sind. Diese Zahl, die sich lediglich auf experimentelle Daten stützt, ist, wie wir sehen werden, in der Radioaktivität für die Berechnung verschiedenartiger Größen von dem größten Werte.

Die Ionentheorie der Gase wurde ferner erfolgreich angewandt, um die Leitfähigkeit von Flammen und erhitzten Dämpfen zu erklären, und um die verwickelten Erscheinungen aufzuklären, die bei der Elektrizitätsentladung durch eine Vakuumröhre beobachtet werden. Dieses fesselnde und umfangreiche Gebiet physikalischer Forschung verdankt seine erste Bearbeitung und einen großen Teil seiner Entwicklung Professor J. J. Thomson und den Schülern, die unter seiner Leitung in Cambridge im Cavendish Laboratory gearbeitet haben.

Von theoretischer Seite waren die Möglichkeiten, die eine Ionen- oder Elektronentheorie der Materie bietet, bereits lange vor ihrer experimentellen Bestätigung erkannt. Die hervorragendsten Führer auf diesem Gebiete waren Lorentz und Larmor, deren Theorien unter anderem dazu dienten, den Mechanismus der Strahlung zu erklären. Zeemans Entdeckung, daß ein magnetisches Feld die Spektrallinien verschiebt, lieferte eine wertvolle Bestätigung der allgemeinen Theorie, denn die beobachteten experimentellen Ergebnisse waren zum großen Teil durch die Lorentzsche Theorie vorausgesagt worden. Es wurde ferner nachgewiesen, daß das Ion, dessen Bewegungen zu der Aussendung von Strahlen Anlaß geben, eine Masse von etwa derselben Größe besitzt, wie die von J. J. Thomson untersuchte Korpuskel der Kathodenstrahlen. Ergebnisse dieser Art dehnten sofort die Anwendung der Ionentheorie auf die Materie im allgemeinen aus, und obwohl auf diesem Gebiete noch viel zu tun bleibt, hat sich die Elektronentheorie doch bereits als ein wertvolles Hilfsmittel für die Aufklärung der Beziehungen erwiesen, die zwischen einigen der kompliziertesten physikalischen Erscheinungen bestehen.

Die Bewegung, die durch Röntgens Entdeckung angeregt wurde, hatte unerwarteterweise noch wichtigere Folgen in einer ganz anderen Richtung. Unmittelbar nach der Entdeckung der X-Strahlen dachte man, daß die Aussendung dieser Strahlen in

irgend einer Weise mit der Phosphoreszenz zusammenhinge, die durch Kathodenstrahlen auf den Wänden einer Vakuumröhre erzeugt wird. Verschiedenen Forschern kam daher der Gedanke, daß die Substanzen, die unter dem Einfluß des Lichtes phosphoreszieren, die Eigenschaft besitzen könnten, eine Art durchdringender Strahlen, ähnlich den X-Strahlen, auszusenden. Wir wissen jetzt, daß diese Spekulation auf keinem sicheren Boden ruhte, sie lieferte jedoch den Anstoß, Substanzen nach dieser Richtung hin zu untersuchen und führte bald zu einer Entdeckung von weittragender Bedeutung.

Henri Becquerel¹⁾, ein ausgezeichnete französischer Physiker, untersuchte, diese Idee verfolgend, unter anderen Substanzen eine phosphoreszierende Uraniumverbindung, das Doppelsulfat von Uranium und Kalium, hinsichtlich ihrer Wirkung auf eine in schwarzes Papier gewickelte photographische Platte. Es wurde eine Schwärzung der Platte beobachtet, woraus hervorging, daß die Uraniumverbindung Strahlen aussendet, die imstande sind, eine Materie zu durchdringen, die für das gewöhnliche Licht undurchlässig ist. Es zeigte sich jedoch bald, daß diese Eigenschaft in keiner Weise mit der Phosphoreszenz zusammenhing, denn die Fähigkeit, auf die photographische Platte einzuwirken, fand sich bei allen Verbindungen des Uraniums und bei dem Metall selbst, auch wenn es für lange Zeit im Dunkelmzimmer aufbewahrt gewesen war.

Das Durchdringungsvermögen der vom Uranium ausgesandten Strahlen war ungefähr ebenso groß wie das der X-Strahlen. Man dachte zuerst, daß die Uraniumstrahlen sich von den X-Strahlen dadurch unterschieden, daß sie die Eigenschaft der Reflexion, Refraktion und Polarisierung besäßen; aber diese Annahme erwies sich später als unrichtig.

Becquerel beobachtete, daß die Uraniumstrahlen neben ihrer Wirkung auf die photographische Platte, wie die X-Strahlen, die Fähigkeit besitzen, einen elektrisch geladenen Körper zu entladen. Diese Eigenschaft der Strahlen wurde später im einzelnen durch den Verfasser²⁾ untersucht, welcher fand, daß dieser Entladungs-

¹⁾ Becquerel, Compt. rend. **122**, 420, 501, 559, 689, 762, 1086 (1896).

²⁾ Rutherford, Phil. Mag., Jan. 1899.

vorgang durch die Annahme erklärt werden kann, daß das Gas durch den Durchgang der Strahlen ionisiert wird. Die Ionen erwiesen sich als identisch mit den durch die X-Strahlen erzeugten, und die Ionentheorie konnte daher direkt zur Erklärung der verschiedenen durch die Uraniumstrahlen hervorgerufenen Entladungserscheinungen angewandt werden. Zu gleicher Zeit wurde nachgewiesen, daß die Uraniumstrahlen aus zwei verschiedenen Arten bestehen, die α - und β -Strahlen genannt wurden. Die ersteren werden leicht in Luft und dünnen Schichten von Metallfolie absorbiert, während die letzteren ein viel größeres Durchdringungsvermögen besitzen.

Die Intensität der Uraniumstrahlen ist konstant, wie sowohl nach der elektrischen wie photographischen Untersuchungsmethode nachgewiesen ist; jedenfalls ändert sie sich nur außerordentlich langsam, denn im Verlauf mehrerer Jahre ist keine merkliche Veränderung zu beobachten. Die photographischen und elektrischen Wirkungen des Uraniums sind, verglichen mit denen der gewöhnlichen X-Strahlen, sehr schwach. Um irgend eine deutliche Einwirkung auf der Platte hervorzurufen, ist es erforderlich, diese mindestens einen Tag lang der Strahlung eines Uraniumsalzes auszusetzen.

Unter „Radioaktivität“ versteht man jetzt allgemein die Eigenschaft gewisser Substanzen, wie Uranium, Thorium und Radium, spontan besondere Strahlenarten auszusenden, die imstande sind, auf die photographische Platte zu wirken und elektrisch geladene Körper zu entladen. Mit dem Ausdruck „Aktivität“ einer Substanz bezeichnet man die Stärke der elektrischen oder irgend einer anderen Wirkung ihrer Strahlen, verglichen mit der Wirkung einer Normalsubstanz. Uranium wird in der Regel wegen der Konstanz seiner Aktivität als Vergleichssubstanz gewählt; gewöhnlich versteht man unter der Aktivität einer Substanz das Verhältnis ihrer elektrischen Wirkung zu der eines Präparates von metallischem Uranium oder von Uraniumoxyd, welches bei gleichem Gewicht eine gleich große Fläche bedeckt. Wenn zum Beispiel gesagt wird, daß die Aktivität des Radiums zwei Millionen beträgt, so ist damit gemeint, daß der von einer bestimmten Menge Radium hervorgerufene elektrische Effekt zwei Millionen Mal so groß ist wie der einer gleichen Gewichtsmenge Uranium, die eine gleich große Fläche bedeckt.

Obwohl die Eigenschaft des Uraniums, ohne eine bemerkbare Veränderung zu erfahren, spontan Energie auszusenden, notwendigerweise als eine höchst beachtenswerte Erscheinung angesehen werden mußte, so ist doch das Maß der von dem Uranium ausgesandten Energie so gering, daß diese Erscheinung nicht dieselbe Aufmerksamkeit erfuhr, die später durch die Entdeckung des Radiums geweckt wurde. Diese Substanz besitzt die Eigenschaften des Uraniums in so hohem Grade, daß ihre Bedeutung sich nicht nur der wissenschaftlichen Welt, sondern auch dem Laien aufdrängte.

Kurz nach Becquerels Entdeckung unternahm Mme. Curie¹⁾ eine Untersuchung verschiedener Substanzen auf ihre Radioaktivität und fand, daß das Element Thorium ähnliche Eigenschaften wie Uranium besitzt, und fast ebenso stark aktiv ist. Diese Tatsache wurde unabhängig auch von Schmidt²⁾ beobachtet. Es folgte dann eine Untersuchung der in der Natur vorkommenden Mineralien, die Thorium und Uranium enthalten, und hier ergab sich ein unerwartetes Resultat. Einige dieser Mineralien zeigten sich mehrere Male so stark aktiv wie reines Uranium oder Thorium, und in allen Fällen war die Aktivität der Uraniummineralien vier- bis fünfmal größer, als nach dem Uraniumgehalt zu vermuten gewesen wäre. Mme. Curie fand, daß die Radioaktivität des Uraniums eine atomistische Eigenschaft ist, d. h., daß die beobachtete Aktivität nur von dem Betrage des vorhandenen Uraniums selbst abhängt und sich nicht ändert, wenn das Uranium chemische Verbindungen eingeht. Mit Rücksicht hierauf konnte die starke Aktivität der Uraniummineralien nur durch die Annahme erklärt werden, daß in ihnen eine noch unbekannte Substanz enthalten war, die viel stärker aktiv war, als Uranium selbst.

Im Vertrauen auf die Richtigkeit dieser Hypothese unternahm Mme. Curie den kühnen Versuch, diese unbekannte aktive Substanz chemisch aus den Uraniummineralien abzuscheiden. Durch das Entgegenkommen der österreichischen Regierung erhielt sie eine Tonne Uraniumabfälle aus dem staatlichen Bergwerk in Joachimstal in Böhmen. In der Umgegend von Joachimstal

¹⁾ Mme. Curie, Compt. rend. 126, 1101 (1898).

²⁾ G. C. Schmidt, Ann. d. Phys. 65, 141 (1898).

finden sich ausgedehnte Lager von Uraninit, gewöhnlich Pechblende genannt, die wegen des Uraniums, das sie enthalten, ausgebeutet werden. Diese Pechblende besteht hauptsächlich aus Uranium, enthält aber auch geringe Mengen einer Anzahl seltener Elemente.

Als Führer für die Trennung der aktiven Substanz benutzte Mme. Curie ein geeignetes Elektroskop, mit dem die durch die aktive Substanz hervorgerufene Ionisation gemessen wurde. Nach jeder Fällung wurde die Aktivität der Fällung und des Filtrates getrennt untersucht, und auf diesem Wege war es möglich, festzustellen, ob die aktive Substanz wesentlich gefällt oder in der Lösung geblieben war.

Die elektrische Methode diente so als ein Hilfsmittel, um qualitative und quantitative Analysen schnell auszuführen. Mme. Curie fand auf diese Weise, daß nicht eine, sondern zwei sehr stark aktive Substanzen in den Uraniumrückständen vorhanden waren. Die erste, die mit Wismut abgeschieden wurde, nannte sie zu Ehren ihres Heimatlandes Polonium ¹⁾, die zweite, die dem Baryum folgte, Radium ²⁾. Die Wahl dieses Namens entsprang einer glücklichen Eingebung, denn das Strahlungsvermögen dieser Substanz ist etwa zwei Millionen Mal so groß wie das des Uraniums. Mme. Curie schritt dann zu dem mühsamen Werk, das Radium vom Baryum zu trennen, und es gelang ihr schließlich, eine kleine Menge von wahrscheinlich reinem Radiumchlorid zu erhalten. Für das Atomgewicht des Radiums wurde die Zahl 225 gefunden. Das Spektrum des Radiums, das zuerst von Demarçay untersucht wurde, besteht aus einer Anzahl heller Linien und ist in vieler Beziehung dem der Erdalkalien analog.

Nach seinem chemischen Verhalten ist das Radium dem Baryum eng verwandt, von dem es jedoch wegen des Unterschiedes, der in der Löslichkeit der Chloride und Bromide besteht, vollständig getrennt werden kann. Mit Rücksicht auf die geringen Mengen von Radiumsalzen, die zur Verfügung stehen, und wegen ihrer Kostspieligkeit, ist bisher nicht versucht, das Radium im metallischen Zustande herzustellen. Marckwald ³⁾ hat jedoch

¹⁾ Mme. Curie, Compt. rend. 127, 175 (1898).

²⁾ M. und Mme. Curie und G. Bémont, Compt. rend. 127, 1215 (1898).

³⁾ Marckwald, Ber. d. d. chem. Ges., Nr. 1, S. 88 (1904).

eine Radiumlösung unter Verwendung einer Quecksilberkathode elektrolysiert und gefunden, daß das metallische Radium mit dem Quecksilber, in derselben Weise wie Baryum, ein Amalgam bildet. Die geringe Menge des so erhaltenen Metalls zeigte die charakteristischen Strahlungseigenschaften der Radiumverbindungen.

Es kann nicht der geringste Zweifel darüber bestehen, daß metallisches Radium radioaktiv sein wird; denn die Radioaktivität ist eine Eigenschaft der Atome und nicht der Moleküle. Außerdem besitzen Uranium und Thorium im metallischen Zustande die Aktivität, die nach der Aktivität ihrer Verbindungen zu erwarten ist.

Radium kommt nur in sehr geringen Mengen in radioaktiven Mineralien vor. Wir werden später sehen, daß in verschiedenartigen Mineralien der Radiumgehalt immer dem Uraniumgehalt proportional ist. Der Radiumbetrag per Tonne Uranium ist etwa 0,35 Gramm, oder weniger als ein Teil in einer Million Teilen des Minerals. Aus einer Tonne Joachimstaler Pechblende, die etwa 50 Proz. Uranium enthält, sollten sich ungefähr 0,17 g Radium gewinnen lassen.

Um das Radium vom Baryum, mit dem es gemischt war, zu trennen, wandte Mme. Curie die Methode der fraktionierten Kristallisation der Chloride an. Giesel¹⁾ fand, daß durch Verwendung der Bromide anstatt der Chloride die Trennung von Radium und Baryum sehr erleichtert wird. Er gibt an, daß sechs Kristallisationen fast vollständig genügen, um das Radium von dem Baryum zu trennen.

Die Entdeckung des Radiums regte lebhaft dazu an, radioaktive Mineralien auf die Anwesenheit anderer radioaktiver Substanzen zu untersuchen. Debierne²⁾ gelang es, einen neuen radioaktiven Körper aufzufinden, den er „Aktinium“ nannte. Giesel¹⁾ beobachtete unabhängig von Debierne das Vorhandensein eines neuen radioaktiven Körpers, den er „Emanationskörper“ und später „Emanium“ nannte, weil der Körper in großen Mengen eine radioaktive Emanation produziert. Neuere Arbeiten haben gezeigt, daß die von Debierne und Giesel abgeschiedenen Substanzen in bezug auf radioaktive Eigenschaften identisch sind

¹⁾ Giesel, Ber. d. d. chem. Ges., S. 3608 (1902); S. 342 (1903).

²⁾ Debierne, Compt. rend. 129, 593 (1899); 130, 206 (1900).

und dasselbe Element enthalten müssen. Hofmann und Strauss¹⁾ trennten eine aktive Substanz ab, welche mit Blei zusammen ausfiel, und die sie „Radioblei“ nannten, während Marckwald²⁾ später aus Resten von Pechblende eine außerordentlich aktive Substanz erhielt, die er „Radiotellurium“ nannte, da sie anfänglich mit Tellurium abgeschieden wurde.

Außer Radium hat man bisher keinen dieser aktiven Körper rein darstellen können. Wir werden später sehen, daß das aktive Element in dem Radiotellurium von Marckwald fast sicher mit dem identisch ist, welches in Mme. Curies Polonium enthalten ist. Wir werden auch sehen, daß die im Radioblei und Radiotellurium enthaltenen aktiven Elemente in Wirklichkeit aus dem in der Pechblende enthaltenen Radium entstanden sind, oder mit anderen Worten, daß beide Produkte der Umwandlung des Radiumatoms sind.

Die Möglichkeit, sehr aktive Radiumpräparate als Strahlenquelle zu benutzen, führte zu einer genaueren Untersuchung der Natur der intensiven Strahlen, die vom Radium ausgesandt werden. Giesel³⁾ beobachtete 1899, daß die durchdringenden Strahlen, welche als β -Strahlen bekannt sind, in einem magnetischen Felde nach derselben Richtung abgelenkt werden wie die Kathodenstrahlen, wodurch gezeigt ist, daß sie aus negativen Partikeln bestehen, welche mit großer Geschwindigkeit von der aktiven Substanz ausgeschleudert werden.

Dies wurde durch Experimente von Becquerel⁴⁾ bestätigt, welcher die Ablenkung eines Strahlenbündels in elektrischen und magnetischen Feldern untersuchte. Seine Resultate zeigten, daß die β -Partikeln dieselbe geringe Masse haben wie die Partikeln des Kathodenstromes, dessen korpuskulare Natur schon vorher durch J. J. Thomson bewiesen war. Die β -Partikel ist in der Tat identisch mit dem Elektron, welches durch die elektrische Entladung in der Vakuumröhre in Freiheit gesetzt wird.

Die β -Partikeln werden von dem Radium mit verschiedenen Geschwindigkeiten ausgeschleudert, ihre Durchschnittsgeschwindigkeit ist jedoch viel größer als die des Elektrons in der Vakuum-

¹⁾ Hofmann u. Strauss, Ber. d. d. chem. Ges., S. 3035 (1901).

²⁾ Marckwald, Ebend. S. 2662 (1903).

³⁾ Giesel, Ann. d. Phys. 69, 834 (1899).

⁴⁾ Becquerel, Compt. rend. 130, 809 (1900).

röhre und kommt in vielen Fällen nahe an die Geschwindigkeit des Lichtes heran. Diese Eigenschaft des Radiums, einen Strom von β -Partikeln verschiedener Geschwindigkeit auszusenden, wurde später von Kaufmann¹⁾ benutzt, um die Änderung der Masse der β -Partikeln mit der Geschwindigkeit zu bestimmen. J. J. Thomson hatte 1887 gezeigt, daß ein bewegter geladener Körper vermöge seiner Bewegung elektrische Masse besitzt. Die Theorie dieser Erscheinung wurde später von Heaviside, Searle, Abraham und anderen entwickelt.

Die fortbewegte Ladung wirkt wie ein elektrischer Strom, ein magnetisches Feld wird um den Körper herum erzeugt und bewegt sich mit ihm fort. Magnetische Energie wird in dem Medium, das den geladenen Körper umgibt, aufgespeichert, und der Körper selbst verhält sich infolgedessen so, als ob er eine größere Masse hätte als im ungeladenen Zustande. Diese elektrische Masse, die sich zu der mechanischen Masse addiert, sollte nach der Theorie für kleine Geschwindigkeiten konstant sein, jedoch mit Annäherung an die Lichtgeschwindigkeit rasch anwachsen.

Kaufmann fand, daß nach seinen Versuchen die scheinbare Masse des Elektrons mit der Geschwindigkeit wächst, und daß diese Zunahme sehr rasch erfolgt, wenn die Geschwindigkeit des Elektrons sich der Lichtgeschwindigkeit nähert. Aus dem Vergleich der Theorie mit dem Experiment schloß er, daß die scheinbare Masse der β -Partikel völlig elektrischen Ursprungs, und daß die Annahme eines materiellen Kernes, über den die Ladung verteilt ist, nicht notwendig sei.

Dieses war ein sehr wichtiges Resultat, denn es ermöglichte indirekt, den Ursprung der Masse zu erklären, der immer für die Wissenschaft ein großes Rätsel gewesen ist. Wenn eine fortbewegte elektrische Ladung genau die Eigenschaften der mechanischen Masse zeigt, so ist es möglich, daß allgemein die Materie elektrischen Ursprungs ist und von der Bewegung der Elektronen herrührt, aus welchen sich die Moleküle der Materie aufbauen. Ein solcher Gesichtspunkt kann jedoch augenblicklich, obwohl er wichtig und interessant ist, nur als Basis einer gerechtfertigten Spekulation betrachtet werden.

¹⁾ Kaufmann, Phys. Zeitschr. 4, 54 (1902).

Villard¹⁾ fand 1900, daß Radium außer den α - und β -Strahlen noch eine dritte Art von Strahlen von außerordentlich hohem Durchdringungsvermögen aussendet, welche man jetzt γ -Strahlen nennt. Diese Strahlen werden im magnetischen oder elektrischen Felde nicht abgelenkt und scheinen eine Art durchdringender X-Strahlen zu sein, die die Aussendung der β -Partikeln des Radiums begleiten. Das Vorhandensein dieser Strahlen wurde später auch bei dem Thorium, Uranium und Aktinium beobachtet.

In der Zwischenzeit fing man an, die Wichtigkeit der α -Strahlen deutlicher zu erkennen. Die Fähigkeit der α -Strahlen, Materie zu durchdringen, ist nicht sehr groß, sie werden bereits absorbiert, wenn sie nur wenige Zentimeter Luft oder einige Lagen von Metallfolie passieren. Andererseits ionisieren sie das Gas viel stärker als die β - und γ -Strahlen, und der größte Teil der Energie, welche die radioaktiven Körper aussenden, entfällt auf die α -Strahlen. Man dachte zuerst, daß die α -Strahlen im magnetischen Felde nicht abgelenkt würden, aber 1902 zeigte der Verfasser²⁾, daß sie in starken magnetischen und elektrischen Feldern in meßbarem Betrage abgelenkt werden. Die Richtung der Ablenkung ist entgegengesetzt derjenigen der β -Partikeln, woraus hervorgeht, daß die α -Strahlen aus positiv geladenen Teilchen bestehen.

Durch Messungen der Ablenkung der Strahlen in magnetischen und elektrischen Feldern wurde gefunden, daß die α -Partikel des Radiums mit einer Geschwindigkeit von $\frac{1}{10}$ der Lichtgeschwindigkeit ausgeschleudert wird, und daß ihre scheinbare Masse das Doppelte der eines Wasserstoffatoms beträgt. Die α -Strahlen des Radiums bestehen also aus einem Strom materieller Atome, die mit großer Geschwindigkeit ausgeschleudert werden. Wir werden später sehen, daß Grund zu der Annahme vorhanden ist, daß die α -Partikel ein Heliumatom ist. Die wesentlichen Strahlen des Radiums sind also korpuskularen Charakters und bestehen aus Strömen von positiv und negativ geladenen Partikeln.

Im Jahre 1903 entdeckten Sir William Crookes³⁾ und Elster und Geitel⁴⁾ unabhängig voneinander eine sehr inter-

¹⁾ Villard, Compt. rend. 130, 1010, 1178 (1900).

²⁾ Rutherford, Phil. Mag., Febr. 1903; Phys. Zeitschr. 4, 235 (1902).

³⁾ Crookes, Proc. Roy. Soc. 81, 405 (1903).

⁴⁾ Elster u. Geitel, Phys. Zeitschr. 15, 437 (1903).

essante Eigenschaft der α -Strahlen. Die α -Strahlen des Radiums oder anderer stark aktiver Substanzen rufen auf einem Schirm von kristallinischem Zinksulfid (Sidotblende) Phosphoreszenz hervor. Bei Prüfung des Schirmes mit einer Lupe findet man, daß der Schirm nicht gleichmäßig erhellt ist, sondern daß die Lumineszenz dadurch hervorgebracht wird, daß der Schirm an vielen Punkten für kurze Zeit hell aufleuchtet. Diese Szintillationen sind wahrscheinlich ein Resultat des Bombardements, das der Schirm durch die α -Partikeln erfährt, doch die genaue Erklärung dieser auffallenden Erscheinung steht noch aus.

Die Prozesse, die sich im Thorium abspielen, sind sehr komplizierter Natur. Der Verfasser ¹⁾ zeigte im Jahre 1900, daß Thorium nicht nur α - und β -Partikeln, sondern auch ununterbrochen ein radioaktives Gas, die Thoriumemanation, abgibt; Radium sowohl wie Aktinium zeigen eine ähnliche Eigenschaft. Die Emanationen bestehen aus radioaktiver Materie, deren Strahlungsvermögen rasch abstirbt. Die Emanationen von Thorium, Radium und Aktinium können nach der Geschwindigkeit, mit der sie ihre Aktivität verlieren, leicht voneinander unterschieden werden. Die Emanationen von Aktinium und Thorium besitzen eine kurze Lebensdauer; die erstere verliert die Hälfte ihrer Aktivität in 3,9 Sekunden. Die Radiumemanation zerfällt dagegen viel langsamer; erst nach Verlauf von etwa vier Tagen sinkt ihre Aktivität auf den halben Wert.

Um dieselbe Zeit wurde eine andere bemerkenswerte Eigenschaft des Radiums und Thoriums entdeckt. M. und Mme. Curie ²⁾ fanden, daß alle Körper, die in der Nähe von Radiumsalzen aufbewahrt werden, vorübergehend aktiv werden. Eine ähnliche Eigenschaft wurde, unabhängig, von dem Verfasser ³⁾ am Thorium beobachtet. Diese Eigenschaft des Radiums und Thoriums, auf Gegenständen, die sich in ihrer Nähe befinden, Aktivität zu „erregen“ oder zu „induzieren“, rührt direkt von den Emanationen dieser Stoffe her. Die Emanation ist eine instabile Substanz und wandelt sich in einen festen Stoff um, der sich auf allen Gegenständen in der Nachbarschaft niederschlägt.

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

²⁾ M. und Mme. Curie, Compt. rend. **129**, 714 (1899).

³⁾ Rutherford, Phil. Mag., Jan. und Febr. 1900.

Eine andere auffallende Erscheinung des Radiums wurde im Jahre 1903 von P. Curie und Laborde¹⁾ beobachtet. Ein Radiumsalz strahlt ununterbrochen eine Wärmemenge aus, die genügen würde, um in einer Stunde mehr Eis zu schmelzen, als dem Eigengewicht des Radiums entspricht. Infolge hiervon besitzt ein Radiumpräparat immer eine höhere Temperatur als die umgebende Luft. Diese schnelle Wärmeemission des Radiums ist eng mit seinen radioaktiven Eigenschaften verknüpft; sie rührt, wie wir später sehen werden, wesentlich von dem Bombardement her, das das Radium durch seine eigenen α -Partikeln erfährt.

Aus der obigen kurzen Übersicht über die wichtigeren Eigenschaften radioaktiver Substanzen geht hervor, daß die Prozesse, die sich in einer radioaktiven Substanz abspielen, sehr verwickelter Natur sind. In einem Radiumpräparat findet z. B. die Aussendung von α - und β -Partikeln und γ -Strahlen statt, ferner die Erzeugung einer großen Wärmemenge, die dauernde Produktion eines Gases und die Bildung eines aktiven Niederschlages, der zu der Bildung der „induzierten“ Aktivität Anlaß gibt.

Das Verständnis dieser verschiedenartigen Vorgänge wurde durch die Entdeckung Rutherfords und Soddys²⁾, daß aus dem Thorium eine sehr aktive Substanz durch einen einfachen chemischen Prozeß abgeschieden werden kann, wesentlich gefördert. Diese Substanz, die Thorium-X genannt wurde, verliert mit der Zeit ihre Aktivität, während das vom Thorium-X befreite Thorium spontan eine neue Menge von Thorium-X nachbildet. In einer Thoriummenge, die sich im radioaktiven Gleichgewicht befindet, gehen die beiden Prozesse der Bildung und des Zerfalls von Thorium-X gleichzeitig vor sich, und der Betrag von Thorium-X erreicht einen konstanten Wert, wenn sein Zerfall der Nachbildung aus dem Thorium das Gleichgewicht hält. Es wurde gefunden, daß die Thoriumemanation direkt aus Thorium-X entsteht und ihrerseits den aktiven Niederschlag bildet, der die induzierte Aktivität hervorruft.

Es ist bereits bemerkt worden, daß die Radioaktivität eine atomistische Eigenschaft ist und folglich von einem Prozeß her-

¹⁾ P. Curie und Laborde, *Compt. rend.* 136, 673 (1903).

²⁾ Rutherford und Soddy, *Phil. Mag.*, Sept. und Nov. 1902; *Trans. Chem. Soc.* 81, 321 u. 837 (1902).

rühren muß, der sich im Atom und nicht im Molekül abspielt. Zur Erklärung der radioaktiven Erscheinungen stellten Rutherford und Soddy die „Disintegrations- oder Zerfallstheorie“ auf. In dieser Theorie wird angenommen, daß die Atome radioaktiver Substanzen unbeständig sind, daß in jeder Sekunde ein bestimmter Bruchteil der vorhandenen Atome instabil wird und mit explosionsartiger Gewalt zerfällt, ein Vorgang, der gewöhnlich von der Ausschleuderung einer α - oder β -Partikel, oder beider zugleich begleitet wird. Der Rest des Atoms ist um eine α -Partikel leichter als das unversehrte Atom und bildet das Atom einer neuen Substanz, die von der Muttersubstanz in chemischer und physikalischer Beziehung völlig verschieden ist. Im Falle des Thoriums wird z. B. angenommen, daß das Thorium-X-Atom aus dem Thoriumatom abzüglich einer α -Partikel besteht. Thorium-X ist instabil und zerfällt mit einer bestimmten Geschwindigkeit unter Ausschleuderung einer neuen α -Partikel. Der Rest des Thorium-X-Atoms bildet das Atom der Emanation, und dieses erfährt noch eine weitere Folge von Umwandlungen.

Diese Theorie trägt in befriedigender Weise nicht nur allen Prozessen Rechnung, die sich im Thorium abspielen, sondern auch denen aller anderen radioaktiven Elemente. Im Lichte dieser Theorie gehen die radioaktiven Substanzen eine spontane Umwandlung ein, als deren Resultat neue Stoffarten auftreten, die instabil sind und eine beschränkte Lebensdauer haben. Die Aussendung von Strahlen ist eine Begleiterscheinung der Umwandlung und rührt von einer explosionsartigen Störung innerhalb des Atoms her.

Die Tatsache, daß die radioaktiven Substanzen für eine lange Zeit Energie ausstrahlen, bietet der Erklärung vom Standpunkte dieser Theorie aus keine grundsätzlichen Schwierigkeiten und steht mit dem Prinzip der Erhaltung der Energie im Einklang. Die Materie verliert bei jeder Phase der Umwandlung an Atomenergie, und die ausgestrahlte Energie stammt aus der im Innern der Atome aufgespeicherten Energie. Es wird angenommen, daß das Atom aus einer Anzahl geladener Teile besteht, die sich in oszillatorischer oder kreisförmiger Bewegung befinden. Diese Energie des Atoms ist teils kinetischer, teils potentieller Natur und rührt von der Bewegung der geladenen Teilchen und von der Konzentration der elektrischen Ladungen in dem winzigen

Volumen des Atoms her. Die Atomenergie ist für gewöhnlich latent und äußert sich nicht, weil die chemischen und physikalischen Kräfte, die zu unserer Verfügung stehen, uns nicht gestatten, den Bau des Atoms anzugreifen. Ein Teil der Energie wird jedoch bei den radioaktiven Umwandlungen in Freiheit gesetzt, bei denen das Atom selbst, unter schneller Ausschleudering eines seiner geladenen Teile, eine Zerstörung erleidet.

Diese Theorie ist von größtem Nutzen gewesen, um die verschiedenartigen Phänomene der Radioaktivität miteinander in Zusammenhang zu bringen. In manchen Fällen liefert sie sowohl eine qualitative wie auch eine quantitative Erklärung der experimentell beobachteten Tatsachen und hat der Wissenschaft wertvolle Anregung zu neuen Forschungen gegeben.

Die Disintegrationstheorie hat nicht nur bei der Untersuchung der Umwandlungsprodukte der radioaktiven Elemente gute Dienste getan, sie hat auch als Hilfsmittel für den Nachweis gedient, daß Radium aus Uranium entsteht, und daß die aktiven Bestandteile im Radioblei und Radiotellurium Umwandlungsprodukte des Radiums sind.

Die Anwendung dieser Theorie auf die komplizierten Umwandlungen des Radiums, Thoriums und Aktiniums wird den Hauptinhalt dieser Vorlesungen bilden.

Die Zerfallstheorie erfuhr eine bemerkenswerte Bestätigung durch die wichtige Entdeckung von Ramsay und Soddy ¹⁾, daß Helium von der Radiumemanation erzeugt wird. Die Versuche von Ramsay und Soddy brachten einen unzweideutigen Beweis dafür, daß im Radium in Wirklichkeit eine Umwandlung der Materie stattfindet, die neben anderen Produkten das inaktive Gas Helium liefert.

Wir werden später sehen, daß gewichtige Gründe dafür sprechen, die α -Partikel des Radiums als ein Heliumatom aufzufassen. Hiernach entsteht Helium bei der Umwandlung jedes α -Strahlen aussendenden Produktes. Dieser Schluß wird, abgesehen von anderen Bestätigungen, durch die kürzlich von Debierne gemachte Entdeckung gestützt, daß auch aus dem Aktinium Helium entsteht.

¹⁾ Ramsay und Soddy, Proc. Roy. Soc. 72, 204 (1903); 73, 341 (1904).

In dem vorstehenden Überblick haben wir die Hauptlinie verfolgt, auf der sich der Fortschritt unseres Wissens auf dem Gebiete der Radioaktivität vollzogen hat, es fand jedoch noch in einer anderen Richtung eine rasche und wichtige Fortentwicklung statt.

Elster und Geitel¹⁾ wiesen im Jahre 1901 nach, daß radioaktive Substanzen in der Atmosphäre vorhanden sind. Spätere Arbeiten zeigten, daß die Radioaktivität der Atmosphäre wesentlich durch die Anwesenheit der Radiumemanation bedingt ist, die von der Erdoberfläche in die Atmosphäre diffundiert. Elster und Geitel und andere haben eine umfassende Untersuchung der Radioaktivität des Erdbodens und der von Quell- und Brunnenwassern vorgenommen, und gezeigt, daß kleine Mengen von radioaktiver Materie überall in der Erdkruste und in der Atmosphäre vorhanden sind. Eine Anzahl von Forschern hat sich diesem neuen Untersuchungsgebiet zugewandt und bereits eine große Menge wertvoller Daten angesammelt. Während die radioaktiven Elemente die Eigenschaft der Radioaktivität in sehr deutlichem Maße zeigen, finden sich immer mehr Anzeichen dafür, daß auch gewöhnliche Materie diese Eigenschaft in geringem Maße besitzt, und daß die an ihr beobachtete Aktivität nicht von Spuren der bekannten Radioelemente herrührt. Die Entdeckung der Radioaktivität gewöhnlicher Materie ist nur durch die außerordentliche Empfindlichkeit der elektrischen Untersuchungsmethode ermöglicht worden.

Wenn man sich daran erinnert, daß die Radioaktivität des Uraniums im Jahre 1896 entdeckt wurde, so sieht man, wie schnell unsere Kenntnis dieses schwierigen Gebietes fortgeschritten ist. Eine große Menge experimenteller Tatsachen ist bereits gesammelt, und ihr wechselseitiger Zusammenhang ist durch die Aufstellung einer einfachen Theorie aufgeklärt worden. In der Geschichte der Wissenschaft ist selten oder nie ein so schneller Fortschritt zu verzeichnen gewesen, und es ist von Interesse, die Einflüsse zu untersuchen, die ihn herbeigeführt haben.

Die Entwicklung ist nicht deshalb so schnell vor sich gegangen, weil die Zahl der auf dem Gebiete Arbeitenden groß gewesen wäre; bis zu den letzten ein oder zwei Jahren haben

¹⁾ Elster und Geitel, Phys. Zeitschr. 11, 590 (1901).

verhältnismäßig wenige Forscher sich mit diesem Thema beschäftigt. Der Hauptgrund liegt in der außerordentlich günstigen Zeit, zu der das neue Feld erschlossen wurde, und in dem fördernden Einfluß, den die Bearbeitung des Gebietes durch die rasche Erweiterung unseres Wissens über den Durchgang der Elektrizität durch Gase erfahren hat.

In diesem Zusammenhange mag darauf aufmerksam gemacht werden, daß die Entdeckung der radioaktiven Eigenschaft des Uraniums auch schon vor einem Jahrhundert hätte gemacht werden können, denn dazu wäre nur erforderlich gewesen, eine Uraniumverbindung der geladenen Platte eines Goldblattelektroskops zu exponieren. Hinweise auf die Existenz des Uraniums wurden von Klaproth im Jahre 1789 gemacht, und die Fähigkeit des Uraniums, ein Elektroskop zu entladen, hätte nicht übersehen werden können, wenn es in die Nähe eines aufgeladenen Elektroskops gebracht worden wäre. Es würde nicht schwierig gewesen sein, nachzuweisen, daß das Uranium eine Art von Strahlen aussendet, die imstande sind, lichtundurchlässige Metallschichten zu passieren. Hier hätte jedoch wahrscheinlich der Fortschritt gedeutet, denn die Kenntnis von dem Zusammenhange zwischen Elektrizität und Materie war um jene Zeit viel zu gering, als daß eine vereinzelte Beobachtung dieser Art große Aufmerksamkeit auf sich hätte ziehen können.

Um den großen Einfluß anschaulich zu machen, den die rasche Entwicklung der Radioaktivität durch Entdeckungen auf dem verwandten Gebiete der Entladung der Elektrizität durch Gase erfahren hat, ist es jedoch nicht nötig, so weit zurückzugehen. Hätte die Entdeckung der radioaktiven Eigenschaften des Uraniums nur ein Jahrzehnt früher stattgefunden, so hätte die radioaktive Forschung viel langsamer und vorsichtiger geschehen müssen. Zu jener Zeit wurde die Möglichkeit, daß es Strahlen gäbe, die lichtundurchlässige Materie zu durchdringen vermöchten, nicht einmal in Betracht gezogen, und über die wahre Natur der Kathodenstrahlen konnte man nur Vermutungen hegen. Der Charakter der Strahlen von radioaktiven Substanzen hätte nur nach einer Reihe langer und mühevoller Untersuchungen erkannt werden können, denn dem Forscher würde es nicht nur an der Leitung durch Analogieschlüsse gefehlt haben, sondern er hätte auch mit Notwendigkeit die Untersuchungsmethoden unter

schwierigen Bedingungen von Grund aus entwickeln müssen. Es wäre ferner nötig gewesen, die entladende Wirkung der Strahlen im einzelnen zu untersuchen, denn auf ihr beruht die wichtigste Messungsmethode der Radioaktivität.

Wir wollen nun die Bedingungen betrachten, unter denen die Entwicklung der Radioaktivitätslehre sich in Wirklichkeit vollzogen hat. Der Mechanismus der Entladung der Elektrizität durch Gase war zuerst an solchen Gasen untersucht worden, die der Einwirkung von X-Strahlen ausgesetzt waren, und wurde durch das Studium der Elektrizitätsentladung in der Vakuumröhre weitergebildet. Die so gewonnenen Kenntnisse wurden direkt auf die Ionisation angewandt, die durch die Strahlen aktiver Substanzen hervorgerufen wird, und dienten als Grundlagen für die elektrische Untersuchungsmethode, die als ein schnelles quantitatives Hilfsmittel in der radioaktiven Analyse gebraucht wird. Nachdem gefunden war, daß die β -Strahlen des Radiums in derselben Weise wie die Kathodenstrahlen in einem magnetischen Felde abgelenkt werden, war es zum Nachweis der Identität beider Strahlenarten nur nötig, Methoden anzuwenden, die in der Wissenschaft schon seit einigen Jahren gebräuchlich waren. In ähnlicher Weise wurde das Verhalten der unablenkbaren γ -Strahlen direkt mit den bekannten Eigenschaften der X-Strahlen verglichen, während die α -Strahlen in mancher Beziehung mit den Goldsteinschen Kanalstrahlen verwandt erschienen, von denen Wien früher gezeigt hatte, daß sie im magnetischen und elektrischen Felde abgelenkt werden.

Der Einfluß der Ionentheorie auf die Entwicklung der Radioaktivität tritt noch in einer anderen Beziehung hervor. Die Kenntnis der von einem Ion transportierten Ladung ist für die Bestimmung der Größenordnung radioaktiver Prozesse von der größten Bedeutung gewesen. Dieser Wert wurde benutzt, um die Zahl der α - und β -Partikeln, die vom Radium ausgesandt werden, zu bestimmen und lieferte so Schlüsse auf die Mengen von Emanation und Helium, die aus dem Radium entstehen. Derartige Berechnungen haben es ferner erlaubt, mit einiger Sicherheit die Geschwindigkeit anzugeben, mit der sich Radium und die anderen radioaktiven Stoffe zersetzen, und im voraus den Wert mancher physikalischen und chemischen Größe zu bestimmen; sie

haben so indirekt Methoden angeregt, nach denen die verschiedenen neu entstandenen Probleme angegriffen werden konnten.

Das Zusammentreffen glücklicher Umstände in der Geschichte der Radioaktivität tritt an der Entdeckung, daß Radium Helium entwickelt, deutlich hervor. Helium hat eine dramatische Geschichte, sein Vorhandensein in der Sonne wurde im Jahre 1868 von Lockyer entdeckt, aber erst im Jahre 1898 wurde sein Vorkommen in dem Mineral Clevéit von Ramsay beobachtet. Die Prüfung der physikalischen und chemischen Eigenschaften des Heliums war kaum beendet, als Ramsay und Soddy, geleitet von der Disintegrationstheorie, eine Untersuchung der vom Radium entwickelten Gase unternahmen und entdeckten, daß Helium ein Umwandlungsprodukt des Radiums ist. Wäre Helium nicht kurze Zeit vorher in radioaktiven Mineralien gefunden, so wäre sicher diese höchst auffallende Eigenschaft des Radiums, Helium zu bilden, noch lange verborgen geblieben.

Während die Ionentheorie an der Erweiterung unserer Kenntnis der Radioaktivität einen großen Anteil gehabt hat, ist auch umgekehrt die Ionentheorie durch die Radioaktivität gefördert worden, denn die aus dem Studium der Radioaktivität gewonnenen Resultate haben in hohem Grade die Ionentheorie erweitern und sichern helfen. Die Entdeckung der Radioaktivität hat dem Experimentator eine konstante und kräftige Quelle ionisierender Strahlen als Ersatz für die variablen X-Strahlen geliefert, und dieses ist für die Gewinnung genauer Werte von großem Vorteil gewesen. Ferner sind die Resultate von Kaufmanns Versuchen über die Änderung der Masse der β -Partikel des Radiums mit ihrer Geschwindigkeit ein wichtiger Faktor in der Bestätigung und Erweiterung unserer Vorstellungen über das Elektron gewesen.

Beispiele dieser Art könnten leicht noch in großer Menge angeführt werden, die angegebenen genügen jedoch, um zu zeigen, welche enge Beziehungen zwischen diesen beiden Forschungsgebieten bestanden und noch bestehen, und welchen Einfluß das eine auf die Entwicklung des anderen ausgeübt hat.

Strahlen aktiver Stoffe.

Im folgenden wird ein kurzer Überblick über die wesentlichen Eigenschaften und die Natur der α -, β - und γ -Strahlen

aktiver Stoffe gegeben werden. Alle drei Strahlenarten besitzen gemeinsam die Eigenschaft, auf die photographische Platte zu wirken, in gewissen Substanzen Phosphoreszenz hervorzurufen und elektrisch geladene Körper zu entladen. Die Strahlen können durch die Ungleichheit ihres Durchdringungsvermögens und durch ihr verschiedenartiges Verhalten im magnetischen oder elektrischen Felde voneinander unterschieden werden. Die α -Strahlen werden durch eine Aluminiumschicht von 0,05 mm Dicke völlig absorbiert, der größere Teil der β -Strahlen durch 5 mm Aluminium, während zur Absorption der γ -Strahlen eine Aluminiumplatte von mindestens 50 cm Dicke erforderlich sein würde. Das Durchdringungsvermögen der drei Strahlenarten steht also etwa in dem Verhältnis 1 : 100 : 10 000. Es darf jedoch nicht vergessen werden, daß diese Mittelwerte sind, denn jede Strahlenart ist komplex und besteht aus Strahlen, die ungleichmäßig absorbiert werden.

Die α -Strahlen bestehen aus positiv geladenen Teilchen, die mit einer Geschwindigkeit von etwa 20 000 km per Sekunde ausgeschleudert werden. Die scheinbare Masse der α -Partikel beträgt ungefähr das Doppelte der des Wasserstoffatoms. Obwohl die magnetische Ablenkung dieser Strahlen bis jetzt nur für so aktive Substanzen wie Radium und Polonium beobachtet ist, so kann doch kaum ein Zweifel darüber bestehen, daß die α -Strahlen der anderen aktiven Substanzen von gleicher Natur sind *).

Die β -Strahlen bestehen aus negativ geladenen Teilchen, die mit großer Geschwindigkeit ausgeschleudert werden. Die scheinbare Masse der β -Partikeln beträgt etwa 1 : 1800 der des Wasserstoffatoms; abgesehen von ihrer Geschwindigkeit sind die β -Strahlen in jeder Beziehung mit den Kathodenstrahlen einer Vakuumröhre identisch.

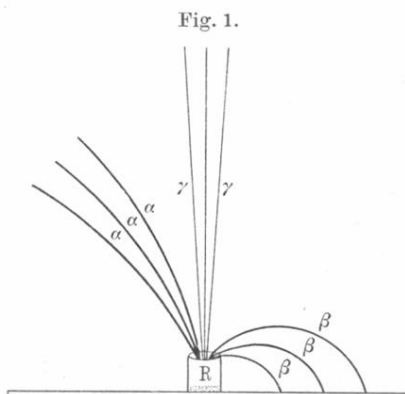
Die β -Partikeln des Radiums werden mit sehr verschiedenen Geschwindigkeiten fortgeschleudert, deren größte der Lichtgeschwindigkeit sehr nahe kommt; β -Strahlen werden ebenfalls von Uranium, Thorium und Aktinium ausgesandt.

Die γ -Strahlen werden im magnetischen oder elektrischen Felde nicht abgelenkt, sie gleichen in ihrem allgemeinen Charakter den stark durchdringenden X-Strahlen einer harten Vakuumröhre.

*) Vgl. hierzu Kap. 10.

Nach unseren jetzigen Anschauungen müssen die γ -Strahlen daher als eine Art von Ätherwellen angesehen werden, die wahrscheinlich aus Impulsen bestehen, welche durch die Ausschleuderung der β -Partikel hervorgerufen werden. Nur diejenigen aktiven Substanzen, die β -Strahlen aussenden, emittieren γ -Strahlen. γ -Strahlen werden von Uranium, Thorium, Radium und Aktinium ausgesandt, die γ -Strahlen des Uraniums und Aktiniums haben jedoch ein geringeres Durchdringungsvermögen als die des Thoriums und Radiums.

Jede dieser drei primären Strahlenarten erzeugt beim Auftreffen auf Materie sekundäre Strahlen. Im Falle der α -Strahlen besteht die sekundäre Strahlung aus negativ geladenen Teilchen (Elektronen), deren Geschwindigkeiten, verglichen mit denen der β -Strahlen, verhältnismäßig klein sind. Die von β - und γ -Strahlen erzeugten sekundären Strahlen bestehen zum Teil aus Elektronen von beträchtlicher Geschwindigkeit. Diese sekundären Strahlen erzeugen tertiäre Strahlen, und so fort.



Trennung der Radiumstrahlen unter dem Einfluß eines magnetischen Feldes.

Wenn ein starkes magnetisches Feld senkrecht zu einem Bündel von α -, β - und γ -Strahlen erzeugt wird, so werden die drei

Strahlenarten voneinander getrennt. Dieses ist in Fig. 1 veranschaulicht, in der angenommen ist, daß die magnetischen Kraftlinien die Fläche des Papierses von oben nach unten durchsetzen. Die β -Strahlen bestehen aus Teilchen, die ungleiche Geschwindigkeiten besitzen, und infolgedessen Kreise von verschiedenen großen Durchmessern beschreiben. In der Figur ist die magnetische Ablenkung der α -Strahlen im Verhältnis zu der Ablenkung der β -Strahlen stark übertrieben. Die Durchschnittswerte der Geschwindigkeit und der Energie der α - und β -Partikeln und ihrer Masse sind in Fig. 2 graphisch wiedergegeben; in der Figur

repräsentieren die Kreise die Masse, bzw. die Energie, die geraden Linien die Geschwindigkeit.

Man sieht aus dieser Zusammenstellung, daß die β -Partikel wegen ihrer relativ geringen Masse im Durchschnitt eine viel geringere kinetische Energie besitzt als die α -Partikel, obwohl diese die kleinere Geschwindigkeit hat. Dieses Resultat steht in

Fig. 2.

	Masse	Geschwindigkeit	Energie
α		—	
β	◦	————	⊙

Übereinstimmung mit der Beobachtung, daß die Ionisation und die Wärmeentwicklung, die von einer α -Partikel hervorgerufen werden, viel größer sind als bei einer β -Partikel.

Der Verfasser hat kürzlich nachgewiesen, daß ein Gramm Radium im radioaktiven Gleichgewicht etwa 7×10^{10} β -Partikeln und etwa $2,5 \times 10^{11}$ α -Partikeln per Sekunde aussendet. Es werden somit beim Radium vier α -Partikeln für jede β -Partikel ausgesandt.

Radioaktive Stoffe.

Untenstehend ist ein Verzeichnis der radioaktiven Stoffe gegeben, die bis jetzt aufgefunden sind. Die Art ihrer Strahlen und das Vorhandensein oder Fehlen einer Emanation ist gleichfalls angegeben. Unter „Periode“ ist die Zeit verstanden, in der ihre Aktivität auf den halben Wert sinkt.

Uranium: α -, β - und γ -Strahlen; keine Emanation.

Thorium: α -, β - und γ -Strahlen; Emanation, Periode 54 Sek.

Radium: α -, β - und γ -Strahlen; Emanation, Periode 3,8 Tage.

Aktinium: } α -, β - und γ -Strahlen; Emanation, Periode 3,9 Sek.

Emanium: }

Polonium:	}	nur α -Strahlen; keine Emanation.
Radiotellurium:		
Radioblei (einige Zeit nach Herstellung) α -, β - und γ -Strahlen; keine Emanation.		

Diese Substanzen behalten mit Ausnahme des Poloniums ihr Strahlungsvermögen während einer langen Zeit bei. Außer diesen Stoffen gibt es noch eine Anzahl verhältnismäßig kurzlebiger radioaktiver Produkte, die von jedem Radioelement gebildet werden. Diese Produkte sind an und für sich ebenso wichtig wie die langlebigen Substanzen und können mit gleichem Recht Elemente genannt werden. Wegen ihrer raschen Umwandlung kommen sie nur in außerordentlich geringen Mengen in der Pechblende vor und werden kaum je in solcher Menge erhalten werden, daß man sie nach gewöhnlichen chemischen Methoden untersuchen könnte. Polonium und Radiotellurium, die denselben radioaktiven Bestandteil enthalten, unterscheiden sich von den anderen oben angeführten Substanzen dadurch, daß sie nur α -Strahlen aussenden. Hinsichtlich ihrer Lebensdauer nehmen sie eine Mittelstellung zwischen den kurzlebigen Produkten, wie zum Beispiel den Emanationen, und langsam sich umwandelnden Stoffen, wie dem Radium, ein. Die Aktivität des Radiotelluriums fällt in ungefähr 140 Tagen auf den halben Wert, während die entsprechende Zeit für Radium etwa 1300 Jahre beträgt.

Mit Ausnahme des Uraniums, Thoriums und Radiums ist keine der radioaktiven Substanzen bisher rein dargestellt worden; ihre Atomgewichte und Spektren konnten infolgedessen bisher noch nicht untersucht werden. Es ist jedoch wahrscheinlich, daß Aktinium ein mindestens ebenso stark aktives Element ist wie Radium.

Wir werden später sehen, daß bei gleichem Gewicht Radiotellurium und Radioblei im reinen Zustande viel stärker aktiv sein müssen als Radium. Die Aktivität einer Substanz, die α -Strahlen aussendet, hängt von der Anzahl der in der Sekunde ausgesandten α -Partikeln ab, und diese Zahl ist, für gleiche Gewichtsmengen, der Periode der Substanz indirekt proportional. Zum Beispiel muß die Aktiniumemanation, deren Periode 3,9 Sekunden beträgt, Gewicht für Gewicht mindestens eine Milliarde Mal so aktiv sein wie Radium. Wegen ihrer enormen Aktivität und ihrer damit zusammenhängenden schnellen Umwandlung

können jedoch solche Substanzen niemals in einer für eine chemische Analyse hinreichenden Menge gewonnen werden. Nur die Stoffe von geringerer Umwandlungsgeschwindigkeit, wie Radium, Radioblei und Radiotellurium, sammeln sich in genügender Menge in Pechblende an, um chemisch dargestellt werden zu können.

Wir werden später sehen, daß die Strahlen des Uraniums, Thoriums, Radiums und Aktiniums nur zum Teil von dem primär aktiven Stoffe selbst herrühren. Die β - und γ -Strahlen rühren in allen Fällen nur von den Umwandlungsprodukten dieser Elemente her. Diese sind mit der Muttersubstanz gemischt und addieren ihre Strahlen zu denen der Muttersubstanz.

Messungsmethoden.

Drei Haupteigenschaften radioaktiver Substanzen sind der Ausführung von Messungen zugrunde gelegt worden:

1. Die Wirkung der Strahlen auf eine photographische Platte.
2. Die Erregung der Phosphoreszenz in gewissen kristallinischen Substanzen.
3. Die Ionisation, welche die Strahlen in einem Gase hervorrufen.

Von den Meßmethoden, die von diesen Eigenschaften Gebrauch machen, beschränkt sich die Phosphoreszenzmethode auf Substanzen wie Radium, Aktinium und Polonium, die eine sehr intensive Strahlung besitzen. Die α -, β - und γ -Strahlen produzieren alle ein ausgesprochenes Leuchten der Platincyaneure und des Minerals Willemit (Zinksilikat). Das Mineral Kunzit reagiert hauptsächlich auf die β - und γ -Strahlen, während Sidotblende (kristallinisches Zinksulfid) hauptsächlich auf die α -Strahlen reagiert. Außer diesen gibt es noch eine große Zahl von Substanzen, welche durch die Strahlen zu einem mehr oder weniger starken Leuchten angeregt werden. Die Eigenschaft der α -Strahlen, auf einem mit Zinksulfid bedeckten Schirm Szintillationen hervorzurufen, ist besonders interessant; es ist möglich, mit Hilfe der Szintillationsmethode noch die α -Strahlen von so schwach aktiven Substanzen, wie Uranium, Thorium und Pechblende, nachzuweisen. Man hat Zinksulfidschirme auch benutzt, um das Vorhandensein der Emanation von Radium und Aktinium sichtbar zu machen.

Die Phosphoreszenzmethode ist im allgemeinen in ihrer Anwendbarkeit sehr beschränkt und liefert nur angenähert quantitative Resultate, während sie ein sehr interessantes Mittel ist, um die Strahlen auf optischem Wege zu untersuchen.

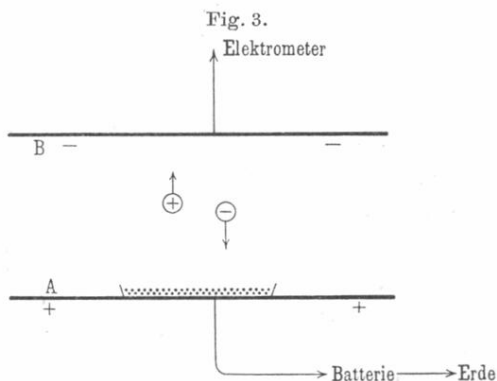
Die photographische Methode hat in den ersten Entwicklungsstadien der Radioaktivität gute Dienste geleistet, wurde aber allmählich durch die elektrische Methode ersetzt, je mehr quantitative Bestimmungen nötig wurden. Für die Untersuchung der Bahnen, die die Strahlen in magnetischen und elektrischen Feldern beschreiben, ist sie von besonderem Nutzen gewesen. Sie eignet sich jedoch nicht ohne weiteres zu quantitativen Vergleichen, und ist in ihrer Anwendbarkeit sehr beschränkt. Bei Verwendung schwach aktiver Substanzen, wie Uranium und Thorium, ist eine lange Exposition nötig, um einen guten photographischen Effekt zu erzielen. Man kann die Methode ferner nicht gebrauchen, um die schnellen Umwandlungen zu verfolgen, die sich bei vielen radioaktiven Produkten finden, und sie ist oft nicht empfindlich genug, das Vorhandensein von Strahlen nachzuweisen, die man nach der elektrischen Methode noch leicht beobachtet.

Für die Entwicklung der Radioaktivität ist die elektrische Messungsmethode von außerordentlicher Bedeutung gewesen, da sie allgemein anwendbar ist und in bezug auf Empfindlichkeit die beiden anderen Methoden bei weitem übertrifft. Sie eignet sich gut zu schnellen, quantitativen Messungen und kann für alle Strahlenarten angewendet werden, die ionisierende Eigenschaften besitzen.

Diese Methode gründet sich, wie wir gesehen haben, auf die Eigenschaft der α -, β - und γ -Strahlen, in dem Gasvolumen, durch welches sie hindurchgehen, geladene „Elektrizitätsträger“ oder Ionen zu produzieren. Angenommen, eine Schicht einer radioaktiven Substanz — z. B. Uranium — befinde sich auf der unteren der zwei isolierten, parallelen Platten *A* und *B* (Fig. 3). Das Gas zwischen den Platten wird von den Strahlen in konstantem Verhältnis ionisiert, es entsteht so in dem Luftvolumen eine Verteilung negativ und positiv geladener Ionen. Wenn kein elektrisches Feld einwirkt, so wächst die Zahl der Ionen nicht unbegrenzt an, sondern erreicht bald ein Maximum, und zwar dann, wenn die Zahl der durch die Strahlung neugebildeten Ionen genau der Zahl derjenigen gleichkommt, die durch die Wieder-

vereinigung der positiven und negativen Ionen verschwinden. Die Wiedervereinigung wird offenbar dann eintreten, wenn die positiven und negativen Ionen im Lauf ihrer Bewegung in die Sphäre gegenseitiger Anziehung kommen. Wir wollen annehmen, daß die Platte *A* konstant auf dem Potential *V* erhalten wird, und daß die Geschwindigkeit, mit welcher *B*, ursprünglich auf dem Potential Null, eine elektrische Ladung gewinnt, mit einem geeigneten Meßinstrument, zum Beispiel einem Quadrantenelektrometer, bestimmt werden kann.

Unter dem Einfluß des elektrischen Feldes bewegen sich die positiven Ionen zu der negativen Platte und die negativen Ionen zu der positiven Platte. Es entsteht also ein Strom in dem Gas,

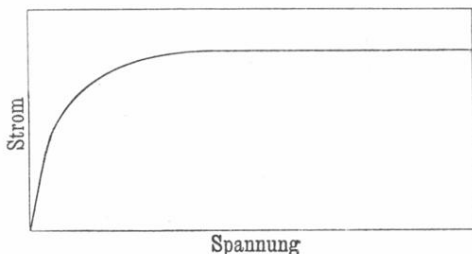


und die Platte *B* und alles, was mit ihr leitend verbunden ist, wird positiv geladen. Die Geschwindigkeit, mit der das Potential der Platte *B* steigt, ist ein Maß für den Strom, der durch das Gas fließt. Wenn *V* einen kleinen Wert hat, ist die Strömung gering, sie nimmt aber mit wachsendem *V* allmählich zu, bis ein Wert erreicht ist, bei welchem der Strom bei einem großen Zuwachs von *V* nur wenig ansteigt. Fig. 4 zeigt die Beziehung zwischen dem Strom und der angewandten Spannung. Die Form dieser Kurve findet durch die Ionentheorie eine einfache Erklärung. Die Ionen bewegen sich mit einer Geschwindigkeit, die der Stärke des elektrischen Feldes proportional ist. In einem schwachen Felde bewegen sich also die positiven und negativen Ionen langsam aneinander vorbei. Ein großer Teil der Ionen hat bei Verwendung

kleiner Spannungen Zeit, sich wieder zu vereinigen, ehe sie die Elektroden erreichen, und der in dem Gase beobachtete Strom ist dem entsprechend klein. Wenn die Spannung zunimmt, wächst die Geschwindigkeit der Ionen, und für ihre Wiedervereinigung bleibt weniger Zeit. Schließlich werden in einem starken Felde praktisch alle Ionen zu den Elektroden befördert, ehe eine merkliche Wiedervereinigung stattfinden kann. Der Maximum- oder „Sättigungsstrom“, der durch das Gas fließt, ist dann ein Maß der Ladung, welche die durch die Strahlen per Sekunde produzierten Ionen transportieren, das heißt, der Sättigungsstrom ist ein Maß der Geschwindigkeit, mit der die Ionen gebildet werden.

Der Ausdruck „Sättigung“, der mit Rücksicht auf die Ähnlichkeit der Stromspannungskurve mit der Magnetisierungskurve

Fig. 4.



Typische Kurve für den Sättigungsstrom in einem ionisierten Gase.

des Eisens angewandt ist, ist nicht sehr glücklich gewählt, hat jedoch als ein bequemes, wenn auch ungenaues, Ausdrucksmittel für eine experimentelle Tatsache allgemeine Anwendung gefunden.

Unter Einhaltung aller anderen Bedingungen wächst die Spannung, die erforderlich ist, um Sättigung hervorzurufen, mit der Intensität der Ionisierung, das heißt mit der Zunahme der Aktivität der untersuchten Substanz. Zunahme der Entfernung zwischen den beiden Platten erniedrigt den Wert des elektrischen Feldes und erhöht den Weg, den die Ionen zurücklegen müssen. Beide Umstände machen zur Erreichung der Sättigung die Anwendung einer erhöhten Spannung erforderlich.

Es ist experimentell gefunden, daß für parallele Platten, die nicht mehr als drei oder vier Zentimeter voneinander entfernt sind, 300 Volt ausreichen, um angenäherte Sättigung herbeizu-

führen, wenn man Substanzen benutzt, deren Aktivität nicht größer ist, als das Tausendfache der Aktivität des Uraniums. Bei Verwendung von stark aktiven Substanzen, wie Radium, müssen die Platten, damit überhaupt Sättigung zustande kommt, einander sehr genähert und auf hohes Potential geladen werden.

Die wesentliche Bedingung für quantitative Vergleiche nach der elektrischen Methode ist die genaue Messung des Sättigungsstromes, denn dieser ist ein Maß für die Gesamtzahl der Ionen, die per Sekunde in einem Gase erzeugt werden.

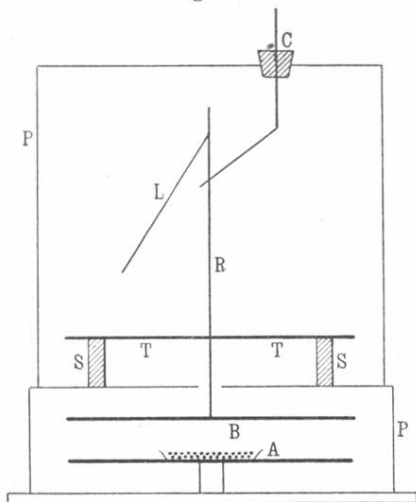
Die elektrische Methode kann gebraucht werden, um mit Zuverlässigkeit die Aktivität von Substanzen zu vergleichen, die genau dieselben Strahlen aussenden und sich nur durch die Größe ihrer Aktivität unterscheiden. Sie dient zum Beispiel dazu, genau die Geschwindigkeit zu bestimmen, mit der einfache Produkte, wie die Emanationen, ihre Aktivität verlieren.

Wenn nicht noch andere Faktoren berücksichtigt werden, kann die elektrische Methode nicht direkt zum Vergleich der Intensität verschiedenartiger Strahlen benutzt werden. Zum Beispiel können unter den in Fig. 3 angedeuteten Versuchsbedingungen die Sättigungsströme, die von den α - und β -Strahlen einer dicken Uraniumschicht erzeugt werden, nicht als Vergleichsmittel für die Intensität der beiden Strahlenarten benutzt werden. Von der Gesamtenergie der β -Strahlen wird nämlich wegen ihres großen Durchdringungsvermögens ein viel geringerer Bruchteil zwischen den Platten durch Produktion von Ionen absorbiert als von der Energie der leicht absorbierbaren α -Strahlen. Ehe derartige Messungen von Sättigungsströmen benutzt werden können, um die Energien der beiden Strahlenarten zu vergleichen, müssen das Durchdringungsvermögen und die Ionisierungsfähigkeit der Strahlenarten genau bekannt sein. Das Hauptgebiet der elektrischen Methode ist jedoch die Bestimmung der Aktivität eines Stoffes, der nur eine Art von Strahlen aussendet, und hier ist sie von großem Werte gewesen und hat Resultate von beträchtlicher Genauigkeit geliefert.

Eine Anzahl verschiedenartiger Methoden ist angewendet worden, um Ionisationsströme zu messen. Wenn eine sehr stark aktive Substanz untersucht wird, so kann ein empfindliches Galvanometer zur Messung des Sättigungsstromes verwandt werden. Mit geringen Abänderungen versehen, hat sich das Goldblatt-

elektroskop als ein zuverlässiges Meßinstrument erwiesen und hat in der Entwicklung der Radioaktivität eine hervorragende Rolle gespielt. Verschiedene Typen des Instrumentes sind benutzt worden. Eine einfache Form, die ich zum Vergleich von Aktivitäten sehr geeignet gefunden habe, ist in Fig. 5 wiedergegeben. Die aktive Substanz wird auf die untere Platte *A* gelegt, welche auf einem Schieber befestigt ist, um zur Aufnahme der aktiven Substanz leicht nach außen geschoben werden zu können. Die

Fig. 5.



Elektroskop zur Messung von α -Strahlenaktivitäten.

obere Platte *B*, die etwa 3 cm von *A* entfernt ist, ist mit einem Stabe *R* verbunden, der mittels des Querstabes *TT* fest auf zwei isolierenden Schwefelstücken ruht (*SS*). Das Aluminium- oder Goldblatt ist an dem oberen Teil von *R* befestigt. Der Draht *C* dient zur Aufladung des Goldblattsystems.

Die Bewegung des Goldblattes wird durch Glas oder Glimmerfenster mit Hilfe eines Fernrohres von geringer Vergrößerung beobachtet, in dessen Okular sich eine Mikrometerskala befindet. Die untere Platte *A* und der Kasten *PP* sind zur Erde abgeleitet.

Bei geeigneter Wahl der Länge des Goldblattes und geschickter Aufstellung des Fernrohres kann leicht erreicht werden, daß die Zeit, die das Goldblatt gebraucht, um eine gewisse Anzahl von Skalenteilen zu passieren, in einem beträchtlichen Bereiche konstant ist. Zur Ausführung eines Versuches wird die radioaktive Substanz in einer Metallschale oder einem anderen leitenden Gefäß eingeführt. Dann wird das Elektroskop aufgeladen und beobachtet, wie lange das Goldblatt braucht, um einen bestimmten Teil der Skala zu passieren. Diese Zeit muß für den natürlichen Ladungsverlust des Instrumentes korrigiert

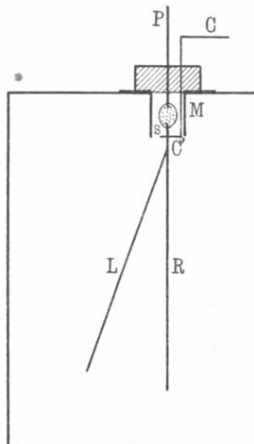
werden, der vor Einführung der aktiven Substanz bestimmt wird. Dieser natürliche Abfall kann zum Teil davon herrühren, daß die Schwefelstäbe nicht völlig isolieren, oder er kann in den meisten Fällen durch eine geringe Aktivität der Elektroskopwände verursacht werden. Alle Stoffe sind in geringem Grade aktiv, und diese Aktivität vermehrt sich häufig unter dem Einfluß radioaktiver Emanationen. Zwei- oder dreihundert Volt reichen zur Ladung des Elektroskops aus, und bei dieser Spannung erhält man Sättigung für den größten Teil des Bereiches, vorausgesetzt, daß das aktive Material das Elektroskop nicht in weniger als zwei oder drei Minuten seine Ladung verlieren läßt.

Auf diese Weise können Messungen schnell und sicher ausgeführt werden. Eine Genauigkeit von 1 Proz. läßt sich leicht erreichen, und bei einiger Sorgfalt läßt sich die Genauigkeit der Messungen noch steigern. Die großen Vorzüge dieses Instrumentes liegen darin, daß es einfach, transportabel und leicht zu bauen ist. Ein derartiges Instrument ist, wenn es durch eine konstante Strahlenquelle, wie Uranium, geeicht wird, sehr geeignet, die Änderungen in der Aktivität von Stoffen zu bestimmen, die sich sehr langsam umwandeln.

Eine Modifikation dieses Elektroskops, die zuerst von C. T. R. Wilson gebraucht wurde, erlaubt es, außerordentlich kleine Ströme zu messen. Die Konstruktion dieses Instrumentes ist aus Fig. 6 zu ersehen.

In einem reinen Gefäß aus Messing oder einem anderen Metall, von ungefähr einem Liter Inhalt, ist ein Goldblatt *L* an einem Stabe *R* befestigt, der innerhalb des Gefäßes durch eine Schwefel- oder Bernsteinperle isoliert ist. Das Goldblatt wird durch einen beweglichen Draht *C* oder durch eine magnetische Vorrichtung geladen. Nach geschehener Aufladung wird

Fig. 6.



Elektroskop
zur Vergleichung von β -
und γ -Strahlenaktivitäten,
und zur Messung sehr
schwacher Aktivitäten.

der obere Stab P mit dem Elektroskopgehäuse verbunden oder direkt zur Erde abgeleitet. In besonderen Fällen, wenn außerordentlich kleine Ströme zu messen sind, hält man den Stab P dauernd auf einem etwas höheren Potential geladen als das Elektroskopsystem. Hierdurch wird eine Entladung des Elektroskops über die Schwefelisololation verhindert.

Die Bewegung des Goldblattes wird, wie früher, mit Hilfe eines Fernrohres mit Mikrometerteilung beobachtet. Der große Vorzug dieser Konstruktion liegt darin, daß das Instrument hermetisch verschlossen werden kann. Die Entladung des Elektroskops muß daher ausschließlich von der Ionisation im Innern des Gefäßes herrühren und von äußeren elektrostatischen Störungen unabhängig sein.

Ein Instrument dieser Art ist besonders zur Messung von β - und γ -Strahlenaktivitäten geeignet. Zur Messung der ersteren entfernt man den Boden des Elektroskops und ersetzt ihn durch eine Aluminiumplatte von etwa 0,1 mm Dicke, welche die α -Strahlen vollständig, die β -Strahlen aber nur sehr wenig absorbiert. Zur Beobachtung von γ -Strahlen wird das Gefäß auf eine Bleiplatte von etwa 5 mm Dicke gesetzt, unterhalb deren sich die aktive Substanz befindet. Die β -Strahlen werden in einer Bleischicht von dieser Dicke vollkommen absorbiert, so daß die Ionisation in dem Gefäß dann ausschließlich von den durchdringenderen γ -Strahlen herrührt.

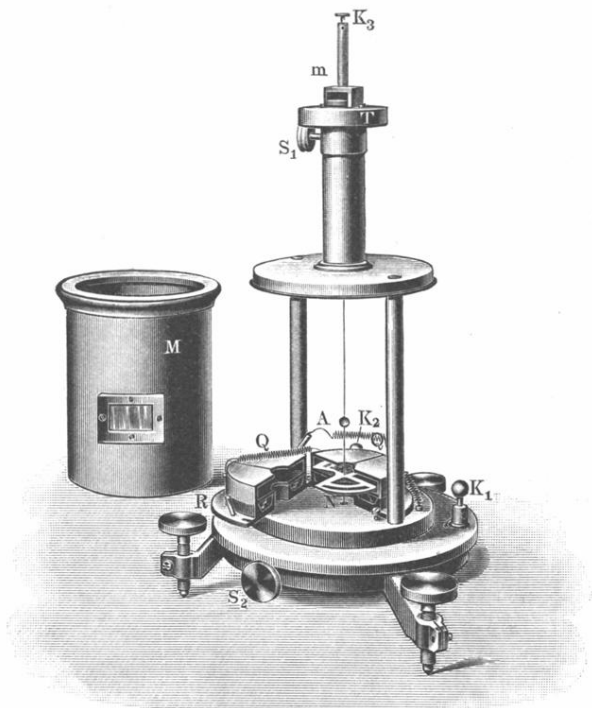
Die zweckmäßigste Meßmethode ist die Verwendung des Quadrantenelektrometers. Eine für radioaktive und andere Untersuchungen sehr geeignete und zweckmäßige Elektrometerkonstruktion ist von Dolezalek¹⁾ angegeben. Die allgemeine Konstruktion eines Dolezalek-Elektrometers ist aus Fig. 7 zu ersehen.

Die vier Quadranten ruhen auf Bernstein oder Schwefelsäulen. Eine sehr leichte Nadel, N , aus versilbertem Papier, ist an einem dünnen Quarzfaden oder Phosphorbronzeband aufgehängt. Die Nadel wird auf ein Potential von 100 bis 300 Volt geladen. Bei Verwendung eines Quarzfadens geschieht die Aufladung dadurch, daß man den Metalldraht, durch den die Nadel an dem Quarzfaden befestigt ist, leicht mit einem Draht berührt, der zu der Stromquelle führt. Oft ist es zweckmäßiger, ein

¹⁾ Dolezalek, Instrumentenkunde, S. 345 (1901).

dünnes Phosphorbronzeband zu benutzen. Die Nadel kann dann direkt mit dem einen Pol der Batterie, deren anderer Pol geerdet ist, verbunden und so auf konstantem Potential gehalten werden. Bei der Verwendung einer feinen Quarzaufhängung kann die Empfindlichkeit des Instrumentes sehr groß gemacht werden. Unter der Empfindlichkeit versteht man die Anzahl von Millimetern,

Fig. 7.



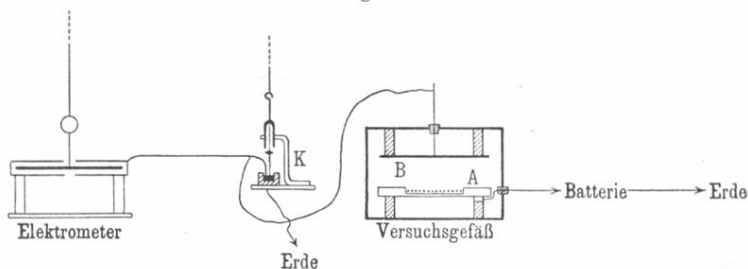
Dolezalek-Elektrometer.

die der Lichtfleck durchläuft, wenn zwischen den Quadranten eine Potentialdifferenz von einem Volt besteht. Eine Empfindlichkeit von 10 000 mm pro Volt ist nicht ungewöhnlich. Wenn jedoch nicht sehr kleine Ströme gemessen werden sollen, ist es nicht ratsam, mit einer Empfindlichkeit von mehr als 1000 mm pro Volt zu arbeiten, und oft sind 200 mm pro Volt ausreichend. Das

Quadrantenelektrometer ist wesentlich ein Instrument, um das Potential des Leiters zu messen, mit dem es verbunden ist, es wird jedoch in der Radioaktivität indirekt zur Messung von Ionisationsströmen verwandt. Die Kapazität des Elektrometers und seiner Verbindungen bleibt bei Bewegung der Nadel nahezu konstant, und die Geschwindigkeit, mit der der Lichtfleck sich über die Skala bewegt, ist daher ein Maß für die Geschwindigkeit, mit der das Potential des Elektrometersystems wächst. Diese Geschwindigkeit dient als Maß für den Ionisationsstrom zwischen den Elektroden des Versuchsgefäßes.

Die allgemeine Versuchsanordnung ist in Fig. 8 veranschaulicht. Die aktive Substanz wird auf die untere der beiden parallelen, isolierten Platten *A* und *B* gelegt. Die Platte *A* wird mit

Fig. 8.



Versuchsanordnung für Aktivitätsbestimmungen mit Hilfe des Elektrometers.

dem einen Pol einer Batterie von geeignetem Potential, die Platte *B* durch einen Schlüssel *K* mit dem einen Quadrantenpaar des Elektrometers verbunden. Wenn keine Messung gemacht wird, leitet der Schlüssel die Quadranten und ihre Verbindungen zur Erde ab. Zur Ausführung einer Messung wird die Verbindung mit der Erde ruhig, aber schnell durch eine mechanische oder elektromagnetische Einrichtung unterbrochen. Das Potential der Platte *B* und ihrer Verbindung steigt, und dieses wird durch die Bewegung des Lichtfleckes über die Skala angezeigt. Die Zeit, die der Fleck gebraucht, um über eine bestimmte Strecke der Skala zu wandern, wird gemessen, und die Anzahl der per Sekunde passierten Teilstriche bildet ein Maß für die Stärke des Stromes, der durch das Gas fließt.

Wenn die Bewegung des Lichtfleckes für genaue Beobachtung zu schnell wird, so schaltet man eine weitere Kapazität in Gestalt eines Luft- oder Glimmerkondensators an das Elektrometersystem an, wodurch die Geschwindigkeit des Ausschlages auf ein gewünschtes Maß gebracht werden kann.

Bei diesem Verfahren kann man leicht Aktivitäten von sehr verschiedener Größe messen. Die Größe der Ströme, die gemessen werden können, ist nur abhängig von der Kapazität des Kondensators und dem Potential der Batterie, welches ausreichen muß, um Sättigung in dem Versuchsgefäß herbeizuführen.

Bei der bisher beschriebenen Verwendung von Elektroskopen und Elektrometern wird die Winkelgeschwindigkeit des bewegten Systems zur Messung der Aktivität benutzt. Bei geeigneter Anordnung kann jedoch ein Elektrometer gebraucht werden, um Ströme in derselben Weise wie mit einem Galvanometer direkt abzulesen.

Wir wollen annehmen, daß das Elektrometersystem durch einen sehr hohen Widerstand, der dem Ohmschen Gesetze gehorcht, mit der Erde verbunden ist. Wenn die Erdung der Quadranten unterbrochen wird, so steigt das Potential der Platte *B* (Fig. 8), bis die nachgelieferte Elektrizitätsmenge gleich der ist, die durch den hohen Widerstand fortgeleitet wird. Da die Ablenkung der Elektrometernadel der angelegten Spannung proportional ist, so muß sich der Lichtfleck aus der Ruhelage in eine bestimmte Stellung begeben; die Ablenkung, die er so erfährt, ist proportional dem Strom im Versuchsgefäß.

Für Messungen dieser Art muß der angewandte Widerstand von der Größenordnung 10^{11} Ohm sein. Der Hauptnachteil der Methode ist der, daß es schwierig ist, geeignete Widerstände von dieser Größe zu finden, die frei von Polarisierung sind und dem Ohmschen Gesetz gehorchen. Das Prinzip dieser Methode ist von Dr. Bronson¹⁾ in dem Laboratorium des Verfassers ausgearbeitet worden.

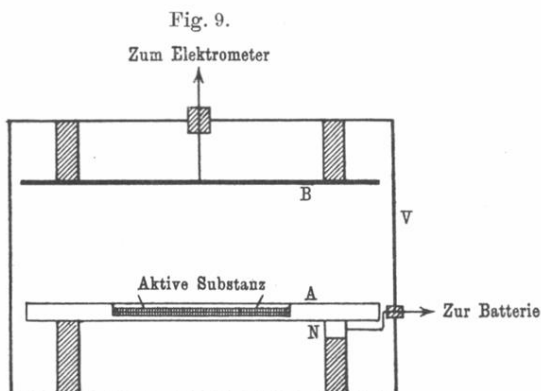
Eine derartige Anordnung ist zur genauen Verfolgung schneller Aktivitätsveränderungen besonders geeignet. Die Ablenkung ist unabhängig von der Kapazität des Elektrometers und

¹⁾ Bronson, Amer. Journ. Science, Juli 1905; Phil. Mag., Jan. 1906.

seiner Verbindungen, und die Messungen können in einem weiten Bereiche schnell und genau ausgeführt werden.

In Fig. 9 und Fig. 10 sind einige Typen von Versuchsgefäßen wiedergegeben, die zur Bestimmung von Aktivitäten mit Hilfe des Elektrometers geeignet sind.

Das aktive Material wird auf die untere der beiden parallelen Platten *A* und *B* gebracht, die sich in einem geschlossenen Gefäß befinden (Fig. 9). Die isolierte Platte *B* ist durch Ebonitstäbe an dem Gehäuse des Apparates befestigt, welches zur Erde abgeleitet ist, so daß kein direkter Elektrizitätsübergang von der Batterie zu der Platte *B* stattfinden kann.



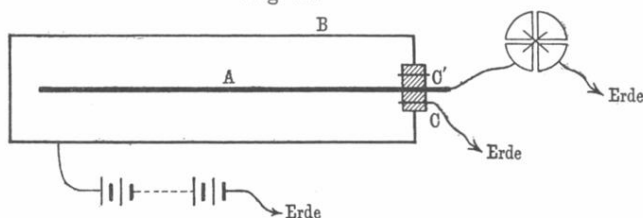
Versuchsgefäß mit parallelen Plattenelektroden.

Fig. 10 stellt ein zylindrisches Gefäß dar, das zur Untersuchung von aktiven Drähten oder Stäben dient. Die innere Elektrode *A* durchsetzt einen Ebonitstopfen. Ein direkter Elektrizitätsübergang über den Ebonit wird durch Anbringung eines Schutzringes verhindert, in Gestalt eines zur Erde abgeleiteten Metallzylinders, der den Ebonitstopfen in zwei Teile teilt. Unter diesen Umständen braucht der Ebonit nur gegen die kleine Potentialdifferenz zu isolieren, die erforderlich ist, um eine passende Ablenkung der Elektrometernadel zu bewirken. Die Anwendung des Schutzringprinzips ist in allen Fällen ratsam, um eine etwaige Elektrizitätsleitung über die Oberfläche des Isolators zu vermeiden.

Ein Apparat der in Fig. 10 dargestellten Art ist sehr geeignet, um die Abfallskurven von Aktivitäten zu bestimmen, die auf zylindrischen Elektroden induziert sind, und um den Abfall von Emanationen zu verfolgen, die in den Zylinder eingeführt sind.

Die elektrische Methode ist ein außerordentlich feines Mittel, um das Vorhandensein verschwindend kleiner Mengen von radioaktiver Materie zu entdecken. Dieses kann durch einen einfachen Versuch illustriert werden. Ein Milligramm Radiumbromid wird in 100 ccm Wasser aufgelöst. Nachdem die Lösung gut durchgemischt ist, wird ihr ein Kubikzentimeter entnommen, und zu 99 ccm Wasser hinzugesetzt. Ein Kubikzentimeter der letzten Lösung enthält demnach 10^{-7} g Radiumbromid. Wenn ein Kubikzentimeter dieser Lösung in einer Metallschale zur

Fig. 10.



Zylindrisches Versuchsgefäß mit Schutzring zur Messung der Aktivität von Drähten oder Stäben.

Trockene eingedampft wird, so reicht die Aktivität der vorhandenen geringen Radiummenge aus, um ein Elektroskop von der in Fig. 11 (S. 40) angegebenen Form mit außerordentlicher Schnelligkeit zu entladen, wenn die Metallschale nur in die Nähe der oberen Platte des Elektroskops gebracht wird. Falls die Metallschale auf die Platte selbst gesetzt wird, so vermögen die Goldblättchen ihre Ladung kaum mehr als ein paar Sekunden zu behalten.

Benutzt man ein Elektroskop, das einen kleinen natürlichen Ladungsverlust besitzt, so kann man leicht das Vorhandensein von 10^{-11} g Radium an der größeren Geschwindigkeit der Goldblättchen erkennen.

Außerordentlich kleine Ströme können mit Genauigkeit in einem Elektroskop von dem Typus der Fig. 6 gemessen werden.

Zum Beispiel hat Cooke beobachtet, daß in einem gut gereinigten Messinggefäß von etwa einem Liter Inhalt der Potentialabfall, herrührend von der natürlichen Ionisation der Luft innerhalb des Gefäßes, ungefähr 6 Volt per Stunde betrug. Die Kapazität des Goldblattsystems betrug etwa eine elektrostatische Einheit. Der Strom i ist gleich dem Produkt aus der Kapazität und dem Potentialabfall per Sekunde, das heißt:

$$i = \frac{1 \times 6}{3600 \times 300} = 5,6 \times 10^{-6} \text{ E. S.} \\ = 1,9 \times 10^{-15} \text{ Ampere.}$$

Mit besonderen Vorsichtsmaßregeln kann noch eine Entladungsgeschwindigkeit von 1/10 dieses Betrages genau gemessen werden.

Die Zahl der in dem Elektroskop erzeugten Ionen kann leicht berechnet werden. J. J. Thomson hat nachgewiesen, daß ein Ion eine Ladung von $3,4 \times 10^{-10}$ elektrostatischen Einheiten oder $1,13 \times 10^{-19}$ Coulomb transportiert. Die Anzahl der in der Sekunde gebildeten Ionen ist also

$$\frac{1,9 \times 10^{-15}}{1,13 \times 10^{-19}} = 17000.$$

Nehmen wir an, daß die Ionisation in dem ganzen Luftvolumen gleichförmig war, so entspricht dieser Zahlenwert einer Produktion von 17 Ionen per Kubikzentimeter in der Sekunde, da das Volumen der Luft in dem Gefäß einen Liter betrug.

Wir werden später sehen, daß die α -Partikel im Durchschnitt imstande ist, ungefähr 100 000 Ionen zu erzeugen, bevor sie aufhört, das Gas zu ionisieren. Durch die elektrische Methode kann also noch die Ionisation nachgewiesen werden, die von einer aktiven Substanz hervorgerufen wird, welche im Durchschnitt eine α -Partikel in der Sekunde aussendet; oder mit anderen Worten, die elektrische Methode erlaubt, eine Umwandlung der Materie zu beobachten, welche mit der Geschwindigkeit von einem Atom per Sekunde vor sich geht.

Für die Auffindung von Substanzen, die die Eigenschaft der Radioaktivität besitzen, übertrifft daher die elektrische Methode das Spektroskop an Empfindlichkeit. Wir sind imstande, das Vorhandensein eines aktiven Stoffes, wie Radium, festzustellen,

wenn er in fast unendlich kleinem Betrage in einem Gemisch mit inaktiven Substanzen vorkommt und können auch mit einiger Genauigkeit seine Menge feststellen. Diese Bestimmung ist so außerordentlich fein, daß in allen bisher untersuchten Substanzen die Gegenwart verschwindend kleiner Radiummengen sich hat nachweisen lassen.

Zweites Kapitel.

Die radioaktiven Umwandlungen des Thoriums.

In dem vorhergehenden Kapitel ist ein kurzer Überblick über die wichtigeren Eigenschaften der radioaktiven Körper und eine kurze Beschreibung der verschiedenen Meßmethoden radioaktiver Größen gegeben. In diesem und den folgenden Kapiteln werden wir die Prozesse, die in den radioaktiven Substanzen vor sich gehen, und die Theorien, welche zu ihrer Erklärung aufgestellt sind, eingehender analysieren. Obgleich im folgenden die Besprechung der Eigenschaften des Radiums, als unseres typischen Radioelementes, den größten Raum einnimmt, so sind doch die Umwandlungen des Radiums so zahlreich und verwickelt, daß es ratsam ist, vor dem Eingehen auf das schwierigere Problem ein einfacheres Beispiel zu behandeln.

Wir werden daher zuerst die Umwandlungen besprechen, welche das Thorium erfährt. Auf diese Weise können wir unsere Aufmerksamkeit auf die Hauptphänomene richten, ohne zu sehr durch Kleinigkeiten aufgehalten zu werden. Nachdem einmal die allgemeinen Prinzipien dargelegt sind, wird ihre Anwendung auf das verwickeltere Problem des Radiums keine besonderen Schwierigkeiten mehr bieten.

Diese Einteilung folgt auch der historischen Entwicklung, denn die Zerfallstheorie, welche die Basis für die Erklärung der radioaktiven Erscheinungen bilden wird, wurde an der Hand der Prozesse entwickelt, die bei der Umwandlung des Thoriums stattfinden.