

Mitteilungen.

264. W. Marckwald: Die Radioaktivität.

(Vortrag, gehalten vor der Deutschen Chemischen Gesellschaft am 2. Mai 1908.)

Hochansehnliche Versammlung! So oft glückliche Pfadfinder im Reiche unserer Wissenschaft weite und fruchtbare Gebiete neu erschlossen haben und sobald die von ihnen ausgestreute Saat reiche Früchte trägt, ist der Vorstand der Deutschen Chemischen Gesellschaft darauf bedacht, daß deren Mitgliedern die wichtigsten Ergebnisse solcher Forschungen in einem zusammenfassenden Vortrage dargelegt werden. Diese Vorträge übten einen besonderen Reiz bisher dadurch aus, daß stets diejenigen Forscher, welche an der Lösung der zu behandelnden Probleme in erster Reihe mitgewirkt hatten, auch an dieser Stelle die Berichterstattung über das Erreichte übernahmen. Daß von diesem Brauche heute abgewichen worden ist, wo es sich darum handelt, über die wunderbaren Entdeckungen, die wir unter dem Namen »Radioaktivität« zusammenfassen, rückschauend zu berichten, findet seine Erklärung wohl lediglich in dem Umstande, daß der Vorstand dieser Gesellschaft von der durch die praktischen Zwecke der Vorträge gebotenen Regel nicht abgehen wollte, an dem Gebrauch der deutschen Sprache festzuhalten. Wenn Sie sich gleichwohl in so reicher Zahl an dem heutigen Abend eingefunden haben, so ist dies ein Beweis für das außerordentliche Interesse, das Sie dem Gegenstande entgegenbringen, der uns hier beschäftigen soll.

Bevor wir auf diesen selbst eingehen, ist es notwendig, uns einige Tatsachen in Erinnerung zu rufen, die für unsere heutigen Vorstellungen von dem Wesen der elektrischen Erscheinungen grundlegende Bedeutung gewonnen haben.

I. Die Elektrizität in Gasen.

Faradays elektrolytisches Gesetz gab bereits den ersten Anstoß zu einer atomistischen Auffassung der Elektrizität. Denn es erklärte sich einfach, wenn man annahm, daß jede Valenz eines Ions mit dem gleichen elektrischen Elementarquantum verbunden sei. Dieses Quantum, gewöhnlich mit ϵ bezeichnet, ließ sich berechnen und ergab sich zu $3.2 \cdot 10^{-10}$ elektrostatischen Einheiten¹⁾. Aber erst die neueren

¹⁾ Stoney, Belfast Meet. Brit. Ass. 1874; Richarz, Wied. Ann. 52, 335 [1894].

Entdeckungen über das elektrische Verhalten der Gase haben dieser Hypothese eine festere Grundlage gegeben. Die Gase sind bekanntlich unter gewöhnlichen Umständen Nichtleiter der Elektrizität, oder wenigstens ist nicht nachgewiesen, daß sie auch ohne äußere Einwirkung ionisiert sind. Wohl aber tritt dieser Zustand ein, wenn kurzwelliges, ultraviolettes Licht, hohe Temperatur, Röntgenstrahlen oder auch andere Strahlen, von denen im Folgenden die Rede sein wird, auf Gase einwirken. Alsdann wandern in einem elektrischen Felde die Gasionen entgegengesetzten Vorzeichens in entgegengesetzter Richtung zu den Elektroden mit Geschwindigkeiten, die wesentlich von der Elektrodenspannung abhängig sind. Steigt diese an, so steigt anfänglich auch der Strom bis zu einem gewissen Grade, um dann konstant zu werden. Das Maximum der Stromintensität nennt man den »Sättigungsstrom«. Er ist ein Maß für die ionisierende Kraft der wirksamen Strahlung. Hypothetisch werden diese Verhältnisse so erklärt, daß sich beim Auftreffen der Strahlung auf Gasatome diese von einem negativen elektrischen Elementarteilchen, dem Elektron, trennen. Letzteres vereinigt sich ebenso, wie übrigens das positiv geladene Restatom mit neutralen Gasmolekülen zu größeren Molionen. Diese Annahme erklärt die verhältnismäßig geringe Diffusionsgeschwindigkeit der Gasionen¹⁾, welche zur Folge hat, daß sich in einem elektrischen Felde von geringer Spannung die Ionen nicht schnell genug zu den Elektroden bewegen, als daß sich nicht ein Teil von ihnen mit solchen von entgegengesetzter Ladung inzwischen neutralisieren könnte. Ist die Spannung hingegen hinreichend hoch, so gelangen praktisch alle Ionen zu den Elektroden, und die Stromintensität hängt lediglich von der Energiequelle ab, welche die Nachbildung neuer Ionen bewirkt.

Townsend²⁾, J. J. Thomson³⁾ und andere haben die von dem einzelnen Gasion mitgeführte elektrische Ladung experimentell bestimmt und den Wert von e für die Ionen beliebiger Gase annähernd in Übereinstimmung mit demjenigen für die Ladung des Wasserstoffions gefunden, eine Tatsache, deren Bedeutung für die Elektronenhypothese einleuchtet. Nach den neuesten Untersuchungen von Townsend⁴⁾ trifft dieser Satz nur für die negativen Gasionen zu; hingegen tragen die positiven Ionen eine doppelt so große Ladung. Danach würden die Gasatome bei der Ionisation also zwei Elektronen abgeben.

1) Riecke, Ann. d. Phys. [4] 12, 74 [1903].

2) Phil. Mag. [5] 45, 125 [1898]; Phil. Trans. 193, A, 129 [1899].

3) Phil. Mag. [5] 46, 523 [1898]; 48, 537 [1899]; [6] 5, 346 [1903].

4) Proc. Roy. Soc. London 80, A, 207 [1908].

Die elektrischen Eigenschaften der Gase erleiden eine durchgreifende Veränderung, wenn sie bei sehr großer Verdünnung hochgespannten Entladungen ausgesetzt werden, wie das in den sogenannten Hittorfschen oder Crookeschen Röhren der Fall ist. Alsdann werden von der Kathode aus mit enormer Geschwindigkeit Korpuskeln geradlinig abgeschleudert, die man als Kathodenstrahlen bezeichnet hat, bevor man erkannt hatte, daß hier eine Strahlung im eigentlichen Sinne nicht vorliegt. Diese Korpuskeln werden magnetisch und elektrostatisch abgelenkt. Aus der Richtung der Ablenkung ergibt sich, daß sie negative Ladung mit sich führen. Aus dem Grade der Ablenkung konnten Wiechert ¹⁾, J. J. Thomson ²⁾ und andere die Geschwindigkeit, sowie das Verhältnis ϵ/μ von elektrischer Ladung zu Masse berechnen. Erstere beträgt im Mittel etwa $\frac{1}{10}$ der Geschwindigkeit des Lichts; indessen hat Lenard durch das bekannte Aluminiumfensterchen schnellere und deshalb durchdringendere Strahlen von $\frac{1}{4}$ Lichtgeschwindigkeit gleichsam abfiltrieren können. Der Wert ϵ/μ ist unabhängig von der Natur des die Röhre erfüllenden Gases und auch für Strahlen von mittlerer Geschwindigkeit praktisch konstant. Er beträgt etwa $1.8 \cdot 10^7$ in elektromagnetischem Maß, während für das elektrolytische Wasserstoffion ϵ/μ annähernd 10^4 ist. Macht man nun die Annahme, die Thomson in hier nicht näher zu erörternder Weise begründet hat, daß die Ladung der Korpuskeln gleich der Atomladung von Gasen unter gewöhnlichem Druck, also auch, wie wir sahen, gleich der Ladung des Wasserstoffions ist, so berechnet sich für die Masse der Korpuskeln eine Größe, die etwa $\frac{1}{1800}$ des Wasserstoffatoms beträgt. Auch diese Masse hält Thomson übrigens nicht für reell, nimmt vielmehr an, daß die Korpuskeln der Kathodenstrahlen, das negative Elektron, lediglich deswegen eine scheinbare Masse zeigt, weil es infolge der vom umgebenden Äther ausgeübten Anziehung eine gewisse Trägheit besitzen muß. Mathematisch läßt sich ableiten, daß der Widerstand, den das Elektron vermöge dieser Trägheit einer Änderung seiner Bewegung entgegensetzen muß, so lange merklich konstant bleiben wird, als die Geschwindigkeit sich in den bei Kathodenstrahlen bisher beobachteten Grenzen hält, daß er aber wachsen muß, je mehr sich diese Geschwindigkeit der Lichtgeschwindigkeit nähert. In diesem Grenzfall würde er, also auch die scheinbare Masse des Elektrons, unendlich groß werden. Einer wichtigen Bestätigung dieser Hypothese werden wir später bei der Besprechung der Radiumstrahlung begegnen.

¹⁾ Abhdlg. d. Phys.-ökon. Ges. Königsberg 38, 1 [1897]; Wied. Ann. 69, 739 [1899].

²⁾ Phil. Mag. [5] 44, 293 [1897]; 48, 547 [1899].

Wenn man nun in dem Ionisierungsvorgang die Abtrennung eines Elektrons von dem Restatom erblickt, und wenn man dem Elektron eine scheinbare Masse zuerkennt, so wird man dazu geführt, auch das Restatom als ein Konglomerat von Elektronen aufzufassen. Auf die Brauchbarkeit dieser Hypothese zur Deutung des Zeemann-Effektes und des Mendelejew-Lothar-Meyerschen Periodengesetzes sei hier nur hingewiesen.

Neben den Kathodenstrahlen tritt in dem evakuierten Rohr noch eine zweite Strahlung auf, die von Goldstein entdeckt und mit dem Namen »Kanalstrahlen« belegt worden ist. Sie ist jenen Strahlen entgegengesetzt gerichtet und wird im magnetischen und elektrischen Felde in entgegengesetztem Sinne abgelenkt¹⁾. Hier hat man es also mit positiv geladenen Teilchen zu tun. Ihre Geschwindigkeit ist nur wenig geringer, als diejenige der Kathodenstrahlen, ihre Masse aber, die sich aus dem Wert ϵ/μ unter der Voraussetzung, daß jedes Kanalstrahlenteilchen nur eine elektrische Ladung trägt, berechnen läßt, von atomarer Größenordnung.

Eine dritte Strahlengattung hat Röntgen außerhalb der Vakuumröhre nachgewiesen. Diese nach dem Entdecker benannten Strahlen entstehen neben Wärme oder auch Licht, wenn die Kathodenstrahlen auf ein Hindernis stoßen. Man ist geneigt, sie als wellenförmige Ätherbewegungen aufzufassen, weil sie von magnetischen und elektrostatischen Kräften nicht abgelenkt werden.

II. Die Entdeckung der Uranstrahlen.

Wenn die Kathodenstrahlen die Glaswand der Vakuumröhre treffen, so zeigt diese eine lebhaft fluorescierende Erscheinung. Kurz nach der Entdeckung der Röntgenstrahlen sprach daher Poincaré die Vermutung aus, daß diese Fluorescenz die Quelle der neuen Strahlung wäre, und daß vielleicht alle fluorescierenden Stoffe solche Strahlen auszusenden vermöchten. Das veranlaßte Becquerel²⁾ im Jahre 1896, die Wirkung schön fluorescierender Uransalze, wie z. B. des Urankaliumsulfats, auf die photographische Platte zu prüfen. Dabei fand er, daß die Salze in der Tat die Platte durch lichtdichtes Papier hindurch ganz ähnlich den Röntgenstrahlen beeinflussten. Indessen zeigte sich der nämliche radiographische Effekt auch, wenn er die fluorescierenden Salze durch beliebige andere Uranverbindungen ersetzte und am stärksten beim Uranmetall selbst. Da ferner andere phosphorescierende Stoffe durch opake Schichten auf die photographische Platte nicht ein-

¹⁾ W. Wien, Verh. d. Phys. Ges. **16**, 165 [1897]; **17**, 10 [1898].

²⁾ Compt. rend. **122**, 420, 501, 559, 689, 762, 1086 [1896].

wirkten, so kam Becquerel zu dem Schluß, daß vom Uran und seinen Verbindungen eine eigenartige Strahlung ausginge.

Die Uranstrahlen teilen mit den Röntgenstrahlen auch die Eigenschaft, Gase zu ionisieren. Die Messung des Sättigungsstromes, die mit geeigneten Elektrometern leicht erfolgt, ermöglicht es, wie wir gesehen haben, das Ionisierungsvermögen solcher Strahlen quantitativ zu bestimmen. Frau S. Curie¹⁾ verglich so die Wirkung gleicher Mengen verschiedener Uranverbindungen bei gleichmäßiger Verteilung und fand sie angenähert ihrem Urangehalt proportional. Daraus zog sie den Schluß, daß die Strahlung am Uranatome haftet, ein Satz, der übrigens, wie wir sehen werden, nur mit einer gewissen Einschränkung gültig geblieben ist.

Von den übrigen, bis zum Jahre 1898 bekannten Elementen zeigte nur noch eines »Radioaktivität«, das Thorium. Dessen Strahlungsvermögen wurde fast gleichzeitig von C. G. Schmidt²⁾ und von S. Curie³⁾ entdeckt und von gleicher Größenordnung wie die Uranstrahlung befunden.

III. Radium und Polonium.

Um so auffallender war es, daß sich bei einer Untersuchung von Uranerzen, die Frau Curie vornahm, deren Aktivität unerwartet hoch erwies. So übertraf die Joachimsthaler Pechblende, die das wichtigste Ausgangsmaterial für die Uranerzgewinnung bildet, obwohl sie nur etwa 50% Uran enthält, das Metall um das Dreifache an Aktivität. Diese Beobachtung führte das Ehepaar Curie auf die Vermutung, daß in diesem Mineral noch irgend ein unbekannter Stoff enthalten sein könnte, der viel stärker radioaktiv als das Uran wäre. Das bestätigte sich, als sie die Pechblende einer gründlichen analytischen Untersuchung unterwarfen, bei der jeder abgeschiedene Bestandteil am Elektroskop geprüft wurde. Das in einer Menge von etwa 0.3% in dem Mineral enthaltene Wismut erwies sich fast 100-mal so stark radioaktiv als das Uran. Da gewöhnliches Wismut nicht aktiv ist, so mußte dem aus der Pechblende gewonnenen ein noch unbekanntes, radioaktives Element beigemischt sein, dessen Abtrennung mit zunächst sehr geringem Erfolge versucht wurde. Die Entdecker⁴⁾ gaben diesem Grundstoff den Namen Polonium.

Bei der weiteren Untersuchung der Pechblende, an der sich Bémont beteiligte, fanden P. und S. Curie⁵⁾ einen zweiten, sehr aktiven

¹⁾ Ann. chim. phys. [7] 30, 99 [1903].

²⁾ Wied. Ann. 65, 141 [1898]. ³⁾ Compt. rend. 126, 1101 [1898].

⁴⁾ Compt. rend. 127, 175 [1898]. ⁵⁾ Compt. rend. 127, 1225 [1898].

Bestandteil auf. Das in noch geringerer Menge als das Wismut abgeschiedene Barium zeigte ungefähr die gleiche Aktivität wie jenes. Hier gelang es durch fraktionierte Krystallisation des Chlorids den aktiven Bestandteil, der den Namen Radium erhielt, in den ersten Fraktionen anzureichern und so schließlich reines Radiumchlorid zu gewinnen.

Ehe indessen dieses Ziel erreicht werden konnte, war die Verarbeitung mehrerer Tonnen des Uranerzes notwendig. Dieses wird auf der Joachimsthaler Hütte mit Schwefelsäure unter Zusatz von etwas Salpetersäure aufgeschlossen. Nach dem Auslaugen des Uransulfats hinterbleibt ein Rückstand, dessen Menge etwa $\frac{1}{3}$ des angewandten Erzes ausmacht. Er besteht hauptsächlich aus Gangart, enthält daneben aber Blei-, Kupfer-, Eisen-, Wismut- und andere Salze, darunter eine sehr kleine Menge von Barium-Radiumsulfat. Zu dessen Abscheidung verfährt man so, daß man die ganze Masse zunächst mit Alkali auskocht, um den größten Teil der Sulfate zu zersetzen. Zugleich gehen Kieselsäure und Bleihydroxyd in Lösung, den Lauge-rückstand zieht man mit Salzsäure aus, die die Oxyde der Schwermetalle und Erden aufnimmt. Was ungelöst geblieben ist, wird nun zur Umwandlung des Barium-Radiumsulfats im Carbonat mit konzentrierter Sodalösung gekocht, die Lösung sorgfältig gewaschen und der Rückstand mit schwefelsäurefreier Salzsäure ausgezogen. Dabei geht das Gemisch der Barium-Radiumsalze in Lösung und wird nach den für Barium üblichen analytischen Methoden gereinigt. Man gewinnt auf diese Weise aus einer Tonne der Joachimsthaler Rückstände 3—4 kg Barium-Radiumsulfat, welche höchstens 0.4 g Radiumsalz enthalten. Eine analytische Methode, um Radium und Barium durch chemische Reagenzien zu trennen, ist bisher nicht aufgefunden worden. Die Reindarstellung des Radiums ist nur durch fraktionierte Krystallisation der Salzmischungen gelungen. Die entsprechenden Salze des Radiums und Bariums scheinen durchweg Mischkrystalle zu bilden, so daß nur ein kompliziertes Fraktionierverfahren zum Ziele führt. Am leichtesten gelingt nach Giesel¹⁾ die Trennung der Bromide.

Das Funkenspektrum des Radiums ist von Demarçay²⁾, Runge und Precht³⁾ und anderen eingehend untersucht worden. Es zeigt besonders drei sehr helle Linien im Blau und Violett. Das Flammenspektrum hat Giesel⁴⁾ beschrieben; es ist durch zwei

1) Wied. Ann. **69**, 91 [1899].

2) Compt. rend. **127**, 1218 [1898]; **129**, 116 [1899]; **131**, 258 [1900].

3) Ann. d. Phys. [4] **10**, 655 [1903]; **12**, 407 [1903].

4) Diese Berichte **35**, 3608 [1902].

rote Banden ausgezeichnet, so daß die Flamme des Bunsenbrenners durch Radiumsalze intensiv carminrot gefärbt wird.

Das Atomgewicht des Radiums hat S. Curie¹⁾ durch Ermittlung des Chlorgehalts im Chlorid bestimmt und unter Annahme der Formel RaCl_2 bei den älteren, mit etwa 0.1 g ausgeführten Versuchen $\text{Ra} = 225$, bei den neueren, zu denen 0.4 g Salz zur Verfügung standen, $\text{Ra} = 226.18$ gefunden.

Das Strahlungsvermögen der reinen Radiumsalze übertrifft dasjenige des Urans um mehr als das Millionenfache. Die überraschenden Wirkungen, die wenige Milligramme dieser Salze hervorzurufen vermögen, haben das allgemeine Interesse an der Entdeckung der radioaktiven Stoffe nicht wenig gesteigert. Die Entladung eines Elektroskops erfolgt auf große Entfernungen fast momentan. Phosphoreszierende Stoffe, wie Bariumplatincyanür, Zinkblende, Diamant, Willemit und viele andere, werden zu lebhaftem Leuchten angeregt, wie auch die Radiumsalze selbst phosphorescieren. Eine gewisse Phosphoreszenz läßt sich übrigens bei vielen anderen Stoffen nachweisen, von denen diejenige²⁾ des Stickstoffs und Heliums besonderes Interesse beansprucht.

Der photochemische Effekt der Radiumstrahlen ist noch auf eine Entfernung von zwei Metern nachweisbar. Aber auch viel kräftigere chemische Wirkungen, als diejenigen auf die photographische Platte, rufen diese Strahlen bei längerer Einwirkung hervor. Glas färbt sich je nach seiner Zusammensetzung violett oder grau. Giesel³⁾ zeigte, daß Alkalisalze die nämlichen Färbungen annehmen, die Goldstein an ihnen durch Einwirkung der Kathodenstrahlen hervorgerufen hat; so wird Kochsalz braun, Chlorkalium violett, Kaliumsulfat grün. Viele Reaktionen werden durch die Radiumstrahlen katalytisch beschleunigt, so die Bildung des Chlorwasserstoffs⁴⁾ aus den Elementen und die Zersetzung des Wasserstoffsperoxyds⁵⁾. Die Luft wird in Berührung mit Radiumbromid ozonisiert. Mit diesem Vorgang ist zugleich eine interessante Zersetzung des Salzes verbunden, welches zu Hypobromit oxydiert und unter der Einwirkung

¹⁾ Compt. rend. **135**, 161 [1902]; **145**, 422 [1907].

²⁾ Sir und Lady Huggins, Lond. R. Soc. Proc. **72**, 169, 409 [1903]; **76**, 488, **77**, 130 [1905]; Himstedt und Meyer, Physik. Ztschr. **6**, 688 [1905]; **7**, 762 [1906].

³⁾ Verh. der Deutsch. Phys. Ges., Jan. 1900.

⁴⁾ Jorissen und Ringer, diese Berichte **38**, 899 [1905]; Archive néerland. sc. exact. et nat. [2] **12**, 157 [1907].

⁵⁾ Fenton, Proc. Cambr. Phil. Soc. **12**, 424 [1904].

der Kohlensäure der Luft in Carbonat umgewandelt wird¹⁾. Aus einer wäßrigen Radiumbromidlösung entwickeln sich regelmäßig kleine Mengen von Wasserstoff und Sauerstoff, in denen aber stets mehr Wasserstoff enthalten ist, als der Zusammensetzung des Wassers entspricht²⁾. Diese Tatsache bedarf noch der Aufklärung, da sich eine nebenhergehende Oxydationsreaktion, die das Sauerstoffmanko erklären könnte, nicht hat nachweisen lassen.

Die physiologischen Wirkungen der Radiumstrahlen, die denen der Röntgenstrahlen ähneln, wurden zuerst von Walkhoff³⁾ beobachtet und bald von Giesel⁴⁾, sowie von Becquerel und P. Curie⁵⁾ bestätigt. Wenn man die Haut längere Zeit der Strahlung aussetzt, so treten Blasenbildung und selbst tief in das Bindegewebe reichende Ulcerationen auf. Diese und die von Aschkinass und Caspari⁶⁾ entdeckte baktericide Wirkung dieser Strahlen haben Anlaß zu Versuchen gegeben, sie therapeutisch zu verwerten. Bisher sind die Erfolge aber unsicher.

Die vom Radium entwickelte Energie ist zuerst von P. Curie und Laborde⁷⁾ calorimetrisch gemessen worden. Sie fanden, daß 1 g Radium in der Stunde 100 cal. entwickelt. Nach Angström⁸⁾ ist der Wert höher, nämlich zu 117 cal. anzunehmen, nach Precht⁹⁾ sogar zu 134.4 cal. Diese Wärmeentwicklung genügt, wie Giesel¹⁰⁾ gezeigt hat, um die Temperatur in einer 0.7 g Radiumbromid enthaltenden Flasche um 5° gegen die Umgebung erhöht zu halten.

Im Jahre 1902 gelang es, das Polonium¹¹⁾ vom Wismut der Pechblende zu trennen. Elektrolytische Versuche zeigten, daß das radioaktive Metall viel edler als Wismut ist, so daß die Potentialdifferenz genügt, um durch Eintauchen eines Wismutstabes in die Lösung der Chloride das Polonium abzuscheiden. Auch durch starke Reduktionsmittel, wie z. B. Zinnchlorür, wird es aus der Lösung gefällt. Der Niederschlag, dessen Gewicht etwa 0.3 pro Mille vom angewandten Wismut beträgt, besteht hauptsächlich aus Tellur. Von

¹⁾ P. und S. Curie, *Compt. rend.* **129**, 823 [1899].

²⁾ Giesel und Bodländer, diese Berichte **36**, 347 [1903]; Ramsay und Soddy, *Lond. R. Soc. Proc.* **72**, 204 [1903]; Ramsay, *Journ. Chem. Soc.* **91**, 931 [1907].

³⁾ *Photogr. Rundschau*, Okt. 1900. ⁴⁾ Diese Berichte **33**, 3569 [1900].

⁵⁾ *Compt. rend.* **132**, 1289 [1901].

⁶⁾ *Arch. der Physiol. Ges.* **86**, 603 [1901].

⁷⁾ *Compt. rend.* **136**, 673 [1903]. ⁸⁾ *Physik. Ztschr.* **6**, 685 [1905].

⁹⁾ *Ann. d. Phys.* [4] **21**, 595 [1906].

¹⁰⁾ Diese Berichte **36**, 2370 [1903].

¹¹⁾ W. Marckwald, diese Berichte **35**, 2285, 4239 [1902]; **36**, 2662 [1903]; **38**, 591 [1905].

diesem kann man das Polonium auf verschiedenen Wegen trennen. Die bequemsten sind die Fällung des Poloniums aus der salzsauren Lösung der Chloride durch überschüssiges Ammoniak als Hydroxyd oder die Fällung des Tellurs durch Hydrazin. Bei Verarbeitung von 50 kg Wismut aus 15 Tonnen Pechblende wurden so mit nahezu quantitativer Ausbeute 3 mg Substanz gewonnen, die sicherlich noch unrein waren. Diese Zahlen zeigen, daß das Wismut der Pechblende weniger Polonium enthält, als die Pechblende selbst Radium.

Daß diese Elemente überhaupt aufgefunden werden konnten, ist lediglich ihrem Strahlungsvermögen zu verdanken, und die Art ihrer Entdeckung erinnert lebhaft an die Entdeckung der seltenen Alkalimetalle durch Bunsen und Kirchhoff mittels der Spektralanalyse. Der Nachweis des Radiums mittels des Elektrometers ist millionenmal empfindlicher als der spektroskopische, obwohl das Spektrum des Elementes höchst charakteristisch ist. Die Radioaktivität des Poloniums ist der des Radiums noch tausendfach überlegen. Um von der Empfindlichkeit der elektrometrischen Methode eine Vorstellung zu gewinnen, wollen wir annehmen, daß wir die oben erwähnten 3 mg Polonium auf einem Kupferband von der Länge des Äquators elektrolytisch niedergeschlagen hätten. Alsdann würde ein Abschnitt in der Länge von 1 cm, also der 4000-millionte Teil, noch reichlich genügen, um die Radioaktivität am Elektroskop sicher nachzuweisen.

Den Weg zur Abscheidung des Poloniums hat das periodische System der Elemente gewiesen. Dieses zeigt in der sechsten Gruppe hinter dem Tellur eine Lücke für einen Grundstoff von Atomgewicht ca. 210. Daß das Polonium an diese Stelle gehöre, war die Arbeitshypothese, die seine chemischen Eigenschaften voraussehen ließ und die Mittel zur Trennung des neuen Elementes von den alten an die Hand gab.

Die folgenden Daten über die Abscheidung neuer Elemente aus großen Verdünnungen bieten einiges Interesse:

1 Tl. Caesium	wurde abgeschieden aus	6 Millionen Tln. Dürkheimer Wasser,
1 » Xenon	»	» 40 » » Luft,
1 » Radium	»	» 10 » » Pechblende,
1 » Polonium	»	» 5000 » » Pechblende.

IV. Die Strahlen der radioaktiven Stoffe.

Die von Radium und Polonium ausgesandten Strahlen sind in charakteristischer Weise unterschieden. Schon im Jahre 1899 hat Rutherford¹⁾ nachgewiesen, daß die Uranstrahlen komplexer Natur sind. Ein Teil von ihnen, die α -Strahlen, sind wenig durch-

¹⁾ Phil. Mag. [5] 47, 109 [1899].

dringend, werden durch eine Aluminiumschicht von $\frac{1}{10}$ mm Dicke völlig zurückgehalten und wirken, da sie auch von Gasen in entsprechendem Maße absorbiert werden, stark ionisierend. Der andere Teil, die β -Strahlen, besitzen etwa das hundertfache Durchdringungsvermögen und zeigen demgemäß eine verhältnismäßig geringe ionisierende Wirkung. Noch eine dritte, in sehr viel geringerem Maße auftretende Strahlenart, die γ -Strahlen, wurde später von Villard ¹⁾ nachgewiesen. Diese Strahlen sind noch etwa um das Hundertfache durchdringender als die β -Strahlen. Radium, Uran und Thorium senden alle drei Strahlenarten aus, das Polonium hingegen nur α -Strahlen, wenn wir von den neuerdings nachgewiesenen δ -Strahlen zunächst absehen.

Die Aufklärung über das Wesen dieser Strahlen gibt ihr Verhalten im magnetischen und elektrischen Felde. Giesel ²⁾ sowie St. Meyer und v. Schweidler ³⁾ haben zuerst nachgewiesen, daß die β -Strahlen vom Magneten in demselben Sinne, wie die Kathodenstrahlen abgelenkt werden. Durch Messung der magnetischen und elektrostatischen Ablenkung zeigte Becquerel ⁴⁾, daß die β -Strahlen des Radiums als Kathodenstrahlen von unter sich recht ungleicher Geschwindigkeit aufzufassen sind. Während die langsameren den im Vakuumrohr erzeugten an Geschwindigkeit etwa gleichkommen, besitzen die schnellsten und deswegen durchdringendsten beinahe Lichtgeschwindigkeit. An den letzteren hat Kaufmann ⁵⁾ das Verhältnis ϵ/μ von elektrischer Ladung zu Masse bestimmt und die aus der Thomsonschen Elektronenhypothese, wie wir oben sahen, sich ergebende Folgerung bestätigt gefunden, daß in der Tat mit wachsender Geschwindigkeit die scheinbare Masse der Elektronen wächst.

Die α -Strahlen gleichen insofern den Kanalstrahlen, als sie durch ihre magnetische und elektrostatische Ablenkbarkeit als positiv geladene Partikeln von atomarer Größenordnung charakterisiert sind. Rutherford ⁶⁾ bestimmte ihre Geschwindigkeit. Er fand diese für jeden einheitlichen radioaktiven Stoff konstant. Für verschiedene Stoffe schwankt, so weit die Untersuchungen reichen, die Geschwindigkeit zwischen $\frac{1}{20}$ und $\frac{1}{13}$ von derjenigen des Lichtes. Dagegen ist das Verhältnis ϵ/μ für alle radioaktiven Körper das gleiche. Es beträgt $5.07 \cdot 10^3$, ist also fast genau halb so groß, wie beim Wasser-

¹⁾ Compt. rend. **130**, 1010 [1900]. ²⁾ Wied. Ann. **69**, 831 [1899].

³⁾ Physik. Ztschr. **1**, 90 [1899].

⁴⁾ Compt. rend. **130**, 206, 372, 810 [1900].

⁵⁾ Nachr. k. Ges. Wiss. Gött. **1900**, Nr. 2.

⁶⁾ Physik. Ztschr. **4**, 235 [1902]. Phil. Mag. [6] **12**, 348 [1906]; **13**, 110 [1907].

stoffion. Die Partikeln müssen also, die Unteilbarkeit der elektrischen Ladung vorausgesetzt, mindestens doppelt so groß sein, als das Wasserstoffatom. Rutherford stellte die Hypothese auf, daß die α -Partikeln Heliumatome sind, welche zwei elektrische Ladungen tragen oder, anders ausgedrückt, zwei Elektronen verloren haben.

Die Ladung der α -Strahlen, die von irgend einer Strahlenquelle ausgehen, kann man elektrometrisch messen, indem man sie im Vakuum an einer Metallplatte auffängt. Da die Ladung des einzelnen α -Teilchens bekannt ist, erfährt man so die Zahl der in der Zeiteinheit ausgesandten Partikeln. Bestimmt man ferner den von ihnen in Luft erzeugten Sättigungsstrom, so findet man die Zahl der von einer Partikel erzeugten Ionenpaare¹⁾. Sie ist von der Geschwindigkeit der Strahlen abhängig und beträgt unter der Annahme, daß jede Partikel zwei Ladungen trägt, im Mittel 200000. Ganz kürzlich hat nun Regner²⁾ ein interessantes Verfahren angewandt, um die vom Polonium ausgesandten α -Partikeln direkt zu zählen. Er benutzte dazu ein von Crookes³⁾ entdecktes Phänomen. Während phosphoreszierende Substanzen im allgemeinen von α -Strahlen, wie von allen ähnlichen Strahlen, zu einem gleichmäßigen Leuchten angeregt werden, zeigt ein Schirm aus »Sidotscher Blende« ein eigenartiges Funkenspiel, namentlich, wenn man den Schirm unter der Lupe betrachtet. Crookes deutete diese Erscheinung als durch das Bombardement der α -Partikeln hervorgerufen. Regner brachte nun ein sehr schwaches Poloniumpräparat mit dem Zinkblendeschirm so unter ein Mikroskop, daß er die einzelnen Lichtblitze zählen konnte. Aus dem von demselben Präparate erzeugten Sättigungsstrom berechnete er die Zahl der ausgesandten Partikeln und fand mit ausreichender Genauigkeit übereinstimmende Werte, wenn er jeder Partikel zwei elektrische Ladungen zuerteilte.

Beim Durchdringen irgend eines Mediums wird die Geschwindigkeit der α -Strahlen vermindert, ohne daß sich das Verhältnis von Ladung zu Masse ändert, und zwar proportional der Quadratwurzel aus der Schichtdicke⁴⁾. Ist die Geschwindigkeit bis auf etwa $\frac{1}{36}$ Lichtgeschwindigkeit gesunken, so haben die Strahlen das Vermögen, Gase zu ionisieren, Phosphoreszenz zu erregen oder auf die photographische Platte zu wirken, plötzlich eingebüßt. Wir haben dann überhaupt kein Mittel mehr, sie nachzuweisen. Da nun ferner, wie wir sahen, die Geschwindigkeit der ausgesandten Strahlen für die ver-

1) Rutherford, Phil. Mag. [6] 10, 207 [1905].

2) Verh. d. Deutsch. Phys. Ges. 10, 78 [1908].

3) Chem. News 87, 241 [1903].

4) Rutherford, Phil. Mag. [6] 12, 134 [1906].

schiedenen radioaktiven Grundstoffe verschieden ist, so muß auch die Grenze der Wirksamkeit in Luft für jeden Stoff charakteristisch sein. Für Polonium beträgt der Wirksamkeitsbereich in Luft unter normalem Druck 3.86 cm¹⁾. Bragg und Kleemann²⁾ haben gezeigt, daß man vermittels dieses Kennzeichens nicht nur das einzelne radioaktive Element auf einfache Weise indentifizieren, sondern auch Gemische gleichsam analysieren kann.

Die γ -Strahlen sind noch verhältnismäßig wenig untersucht worden; sie machen nur einen kleinen Bruchteil der vom Radium ausgesandten Energie aus. Da sie magnetisch und elektrostatisch nicht abgelenkt werden, gleichen sie den Röntgenstrahlen, besonders solchen aus »harten« Röhren³⁾. Daß sie nicht homogen sind, haben McClelland⁴⁾ und Wiggers⁵⁾ nachgewiesen.

Daß die β -Strahlen des Radiums elektrische Ladung transportieren, läßt sich durch einen hübschen Versuch zeigen, dessen Anordnung von Strutt⁶⁾ erdacht worden ist. Man hängt ein Glasröhrchen mit Radiumsalz in einem evakuierten Gefäß gut isoliert auf. Die äußeren Wände des Röhrchens macht man durch Aufstreichen von Phosphorsäure leitend und befestigt an ihnen zwei Aluminiumblättchen. Durch die Wände des Röhrchens dringen die negativ geladenen β -Strahlen hindurch, während die positiv geladenen α -Teilchen zurückgehalten werden. Dadurch entsteht im Innern des Röhrchens eine positive Aufladung, die sich durch Induktion auf die äußeren Gefäßwände überträgt. Die Aluminiumblättchen werden also divergieren, bis sie die geerdeten Wände des Vakuumgefäßes berühren. Hier werden sie entladen, fallen zusammen und das Spiel wiederholt sich.

Wenn Polonium nur α -Teilchen aussendete, so müßte es sich im Vakuum negativ aufladen. J. J. Thomson⁷⁾ hat aber gezeigt, daß das Gegenteil stattfindet. Die Erklärung fand er darin, daß neben den α -Strahlen noch eine leicht absorbierbare Art von sehr langsamen β -Strahlen auftritt, die man δ -Strahlen genannt hat. Ihre Geschwindigkeit beträgt nur etwa $\frac{1}{100}$ von derjenigen des Lichtes⁸⁾. Sie können daher durch ein Magnetfeld so stark abgelenkt werden, daß sie in einer Kreisbahn zum Ausgangspunkte zurückkehren. Da die α -Strahl-

¹⁾ Levin, Physik. Ztschr. **7**, 513 [1906].

²⁾ Phil. Mag. [6] **8**, 917 [1905]; **10**, 318 [1906].

³⁾ Eve, Phil. Mag. [6] **8**, 610 [1904]. ⁴⁾ Phil. Mag. [6] **8**, 70 [1904].

⁵⁾ Ztschr. für Radioakt. **2**, 420 [1905]. ⁶⁾ Phil. Mag. [6] **6**, 588 [1903].

⁷⁾ Nature **71**, 438 [1905].

⁸⁾ Ewers, Physik. Ztschr. **7**, 148 [1906].

len nur eine geringe Ablenkung erfahren, so wird also im Magnetfelde die negative Aufladung des Poloniums erfolgen.

V. Die Desaggregationshypothese. Uran und Uran X.

Seit der Entdeckung der Radioaktivität ist die Frage auf das lebhafteste erörtert worden, wie sich die neuen Erscheinungen mit dem Gesetz von der Erhaltung der Energie in Einklang bringen lassen. Zahlreiche Hypothesen wurden aufgestellt, um zu erklären, wie das Radium scheinbar unerschöpflich seine Strahlen aussenden könne, ohne daß sich eine Energieaufnahme von außen her nachweisen ließ. Aber keine dieser Hypothesen befriedigte, noch weniger förderte eine von ihnen die Erkenntnis des Wesens der Radioaktivität. Da brachten gegen Ende des Jahres 1902 Rutherford und Soddy¹⁾ mit ihrer Hypothese vom Atomzerfall der radioaktiven Elemente in die verwirrende Fülle scheinbar widerspruchsvoller Einzelbeobachtungen Ordnung und Klarheit. Diese Hypothese hat sich inzwischen durch neue Erfahrungen, die zu sammeln sie vielfach die Anregung gegeben hatte, so glänzend bewährt, daß ihre raschen Erfolge in der Geschichte der Wissenschaften vielleicht ohne Beispiel sind. Es wird sich daher empfehlen, die Entwicklung, die die Erforschung der radioaktiven Erscheinungen in dem letzten Lustrum genommen hat, an der Hand dieser Hypothese zu erörtern, zuvor aber die wichtigsten Tatsachen zu besprechen, die zu ihrer Aufstellung führten.

Während die Abhängigkeit der Aktivität verschiedener Uranverbindungen von ihrem Urangehalt die Annahme nahe legte, die Strahlung als eine Eigenschaft des Uranatoms aufzufassen, schien eine Beobachtung von Crookes²⁾ dem zu widersprechen. Er konnte von dem Uran einen Stoff in äußerst geringer Menge absondern, welcher in stärkstem Maße auf die photographische Platte wirkte, während das abgeschiedene Uran dieses Vermögen eingebüßt hatte. Crookes nannte diesen Stoff Uran X. Zu seiner Abscheidung dienten mehrere Wege. Wenn man krystallwasserhaltiges Urannitrat in Äther löst, so erhält man neben der ätherischen Lösung des wasserfreien Nitrats eine wäßrige Schicht, welche nur wenig Salz gelöst enthält. In der wäßrigen Lösung ist neben einem kleinen Teil des Urannitrats das gesamte Uran X enthalten. Eine andere Methode zur Trennung des Urans X vom Uran besteht darin, daß man die Lösung des Uransalzes mit einem Überschuß von Ammoniumcarbonat versetzt, in welchem

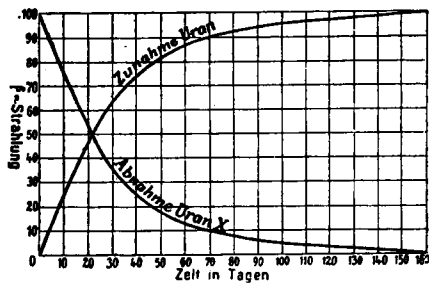
1) Phil. Mag. [6] 4, 370, 569 [1902]; 5, 576 [1903].

2) Proc. Roy. Soc. Lond. 66, 409 [1900].

sich bekanntlich der anfangs entstehende Niederschlag auflöst. Das Uran X wird dann mit den anderen Verunreinigungen des Urans, wie z. B. Eisen, ausgefällt. Ist das ursprüngliche Uransalz sehr rein, so müssen zur Erzeugung des Niederschlages kleine Mengen solcher Verunreinigungen hinzugefügt werden.

Bequerel ¹⁾ fand noch andere Mittel auf, um Uran X vom Uran zu trennen, vor allem aber zeigte er, daß das erstere seine Aktivität im Verlaufe von einigen Monaten völlig verlor, während in derselben Zeit die Aktivität des Urans wieder auf den ursprünglichen Betrag stieg. Man konnte nun das Spiel der Abtrennung des aktiven Bestandteiles beliebig wiederholen.

Diese Beobachtungen wurden in einem wichtigen Punkte von Soddy ²⁾, sowie von Rutherford und Grier ³⁾ ergänzt und berichtigt. Crookes und Becquerel hatten lediglich die photographischen Wirkungen ihrer Präparate studiert. Am Elektroskop zeigte nun das Uran auch nach Abtrennung des Uran X fast unverminderte Wirksamkeit, und es ergab sich so, daß dem Uran X nur die β - und γ -Strahlung anhaftet, dem Uran selbst aber die gesamte α -Strahlung. Rutherford und Soddy ⁴⁾ studierten ferner den zeitlichen Verlauf der Abklingung der vom Uran X ausgesandten Strahlung, welche dem Ansteigen der β - und γ -Strahlung des abgetrennten Urans völlig konform verläuft. Sie erfolgt in geometrischer Progression mit der Zeit, so daß die Anfangsaktivität in ungefähr 22 Tagen auf die Hälfte, in 44 Tagen auf ein Viertel, in 66 Tagen auf ein Achtel sinkt. Die Kurven (Fig. 1) illustrieren das Gesetz, nach welchem die Abklingung bezw. das Ansteigen der Strahlung verläuft.



Figur 1.

Bezeichnet man die ursprüngliche β -Strahlung des Uran X mit J_0 , die Aktivität nach der Zeit t (in Sekunden) mit J_t , so gilt die Gleichung

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

in welcher e die Basis der natürlichen Logarithmen und λ eine Konstante, die sogenannte »Radioaktivitätskonstante«, ist. Ihr Wert

¹⁾ Compt. rend. **133**, 977 [1901].

²⁾ Journ. Chem. Soc. **81**, 860 [1902].

³⁾ Phil. Mag. [6] **4**, 315 [1902]. ⁴⁾ Phil. Mag. [6] **5**, 422 [1903].

beträgt im vorliegenden Falle annähernd $3.6 \cdot 10^{-7}$. Für das Ansteigen der β -Strahlung des Urans gilt die komplementäre Gleichung

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

Diese Tatsachen lassen sich nun einfach deuten, wenn man annimmt, daß das Uran unter Abgabe von α -Partikeln regelmäßig Uran-X-Atome bildet, welche ihrerseits unter Aussendung von Elektronen eine weitergehende, sehr schnelle Veränderung erfahren. Welcher Art diese ist, darüber können wir vorläufig nichts Sicheres aussagen.

Wenn die Umwandlung des Urans im Vergleich zu derjenigen des Uran X so langsam erfolgt, daß sich die Menge der überhaupt vorhandenen Uranatome nicht merklich in derselben Zeit vermindert, in welcher die in einem gegebenen Augenblick vorhandene Zahl von Uran-X-Atomen sich vollständig weiter umgewandelt hat, so muß augenscheinlich das Uran, nachdem es vom Uran X getrennt worden ist, innerhalb dieser Zeit die gleiche Anzahl von Uran-X-Atomen wieder nachliefern und also sein ursprüngliches Strahlungsvermögen wieder erlangen. Es befindet sich dann mit seinem Zerfallsprodukte im radioaktiven Gleichgewicht.

Das Strahlungsvermögen eines radioaktiven Elementes ist nach dieser Hypothese der Zahl der von ihm vorhandenen Atome proportional. Bezeichnen wir die im Anfange vorhandene Atomzahl mit N_0 , die nach der Zeit t vorhandenen mit N_t , so nimmt die obige Gleichung die uns für die chemischen Reaktionen erster Ordnung geläufige Form an: $N_t = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$.

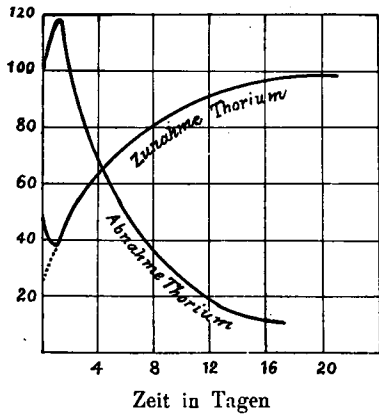
Die Radioaktivitätskonstante gibt dann den Bruchteil der in einer Sekunde sich umwandelnden Atome an, und ihr reziproker Wert $1/\lambda$ ist die durchschnittliche Lebensdauer eines Atoms des betreffenden Elementes. Für Uran X ist dieser Wert 32 Tage. Die Radioaktivitätskonstante ist unabhängig von der Temperatur in den weitesten Grenzen, die sich der Beobachtung darbieten. Sie ist vielfach das einzige sichere Kennzeichen, das wir für die schnell vergänglichen radioaktiven Stoffe, die Metabole, haben. Aber so wenig man an der Existenz des Heliums zweifelte, als man von ihm nur die Fraunhofersche Linie im Sonnenspektrum kannte, so wenig wird man an der Realität und Individualität eines durch seine Aktivitätskonstante charakterisierten Metabolons zweifeln dürfen.

Wenn die Strahlung eines radioaktiven Stoffes nicht von jedem seiner Atome gleichzeitig ausgeht, sondern nur von den in dem gegebenen Augenblick zerfallenden, so wird das Exponentialgesetz nach den Regeln der Wahrscheinlichkeitsrechnung nur dann streng erfüllt

sein, wenn die Zahl der vorhandenen Atome unendlich groß angenommen werden kann¹⁾. Anderenfalls wird die Strahlungsintensität eines Präparates Schwankungen ausgesetzt sein. Diese Folgerung aus der Hypothese haben E. Meyer und Regner²⁾ kürzlich durch Messung des von einem sehr schwachen Poloniumpräparat erzeugten Sättigungsstromes und Regner³⁾ durch Zählung der dadurch hervorgerufenen Szintillationen am Zinkblendeschirm bestätigt.

VI. Die Umwandlungsprodukte des Thoriums.

Rutherford und Soddy⁴⁾ haben schon, bevor sie die radioaktive Umwandlung des Urans studierten, ganz ähnliche Verhältnisse am Thorium beobachtet. Nur liegen diese hier etwas komplizierter, und deshalb schien es vorteilhaft, die spätere Untersuchung zuerst zu besprechen. Wird Thoriumhydroxyd in einer Säure gelöst und mit Natriumhydroxyd wieder ausgefällt, so scheidet es sich mit unverändertem Strahlungsvermögen aus. Wendet man aber als Fällungsmittel Ammoniumhydroxyd an, so beträgt nunmehr seine Aktivität nur etwa 45 % der ursprünglichen. Dampft man die Lösung ein und verjagt durch Glühen die Ammoniumsalze, so hinterbleibt ein unwägbarer Rückstand, Thorium X, der den Rest der Thoriumaktivität mit sich führt. Die Änderung der Radioaktivität erfolgt hier anfangs un stetig aus Gründen, die völlig klarge stellt sind, deren Erörterung aber erst später erfolgen kann. Die Aktivität des Thoriums nimmt am ersten Tage etwas ab, diejenige des Thorium X entsprechend zu. Dann aber erfolgt regelmäßige Zunahme der Thoriumaktivität und entsprechende Abnahme des Thorium X nach dem Exponentialgesetz, so daß nach drei Wochen ersteres ihren ursprünglichen Wert wieder erlangt hat, während letzteres gänzlich abgeklungen ist (Fig. 2). Die Lebensdauer des Thorium X ist also kleiner, als diejenige des



Figur 2.

¹⁾ v. Schweidler, Über Schwankungen der radioaktiven Umwandlung: Premier congrès international pour l'étude de la radiologie et de l'ionisation. Liège 1905.

²⁾ Verh. d. Deutsch. Phys. Ges. 10, 1 [1908].

³⁾ a. a. O.

⁴⁾ Trans. Chem. Soc. 81, 321, 837 [1902].

Uran X. Es ist in 3.64 Tagen¹⁾ zur Hälfte zerfallen. Diesen Wert nennt man seine Halbwertszeit.

Während man das Zerfallsprodukt des Uran X nicht kennt, ist dasjenige des Thorium X schon vor dessen Abtrennung vom Mutterelement entdeckt worden. Es ist die Thorium-Emanation²⁾. Wenn man über gewisse Thoriumverbindungen oder durch Thoriumsalzlösungen Luft streichen läßt, so führt diese ein radioaktives Gas mit sich, die Emanation. Ihre Wirkungen bleiben nur sehr kurze Zeit bestehen, denn die Aktivität des Gases sinkt schon in 54 Sekunden auf die Hälfte. Das Gas diffundiert langsam, hat also eine hohe Dichte, läßt sich bei der Temperatur der flüssigen Luft kondensieren und scheint inert wie die Edelgase zu sein. Das Emanationsvermögen von Thoriumlösungen ist dem Thoriumgehalt proportional, dagegen wechselt dasjenige der festen Thoriumverbindungen sehr mit der Zusammensetzung der Verbindungen, weil diese die Emanation in verschiedenem Maße okkludieren. Wird aus einer Thoriumsalzlösung das Thorium vom Thorium X getrennt, so hat es sein Emanationsvermögen völlig eingebüßt; dagegen emaniert nun das Thorium X sehr stark. Demnach ist die Emanation das Umwandlungsprodukt des Thorium X.

Auf allen Oberflächen, die mit der Emanation in Berührung kommen, schlägt sich ein radioaktiver Stoff nieder, der durch den Zerfall der Emanationsatome entsteht. Schon im Jahre 1899 hatten P. und S. Curie³⁾ beobachtet, daß alle Gegenstände, die sich in einem Radiumsalz enthaltenden Gefäße befanden, vorübergehend radioaktiv wurden. Sie nannten dieses Phänomen »induzierte Aktivität«. Rutherford⁴⁾ bemerkte das Auftreten ähnlicher Erscheinungen beim Thorium und stellte deren Zusammenhang mit der Emanation klar. Wenn man diese an einem negativ aufgeladenen Metalldraht vorüberleitet, so schlagen sich auf diesem die radioaktiven Teilchen nieder, während sie von einem positiv geladenen Draht nicht aufgesammelt werden. Das Zerfallsprodukt der Emanation muß also eine positive Ladung besitzen. Von dem Draht lassen sich die selbstverständlich unsichtbaren und unwägbaren Teilchen sowohl mechanisch abreiben, wie auch durch Mineralsäuren herunterlösen. Verdampft man die saure Lösung, so bleibt der radioaktive Bestandteil zurück. Die Aktivität klingt mit einer Halbwertszeit von etwa 11 Stunden

¹⁾ v. Lerch, Monatshefte für Chemie 26, 899 [1905].

²⁾ Owens, Phil. Mag. [5] 48, 360 [1899]; Rutherford, ibid. 49, 1 [1900]; Rutherford und Soddy, ibid. [6] 4, 569 [1902]; 5, 561 [1903].

³⁾ Compt. rend. 129, 714 [1899].

⁴⁾ a. a. O. und Phil. Mag. [6] 5, 95 [1903].

ab. In den festen Thoriumverbindungen bleibt, wie wir oben sahen, die Emanation häufig okkludiert. In ihnen muß sich demnach auch deren Zerfallsprodukt ansammeln. Dadurch erklärt es sich, daß nach der Trennung des Thoriums vom Thorium X die Aktivität des ersteren anfänglich noch abnimmt, die des letzteren aber ansteigt. Die »induzierte Thoraktivität« bleibt beim Thorium, klingt aber innerhalb eines Tages praktisch vollkommen ab; in derselben Zeit reichert sie sich in dem emanationbildenden Thorium X bis zum Maximum an.

Wenn man die Thorium-Emanation nur kurze Zeit auf eine Oberfläche wirken läßt, so steigt die dieser mitgeteilte Aktivität anfänglich mehrere Stunden bis zu einem Maximum an, um dann erst mit der normalen Zerfallsperiode abzuklingen. Dieses Verhalten beweist, daß die mitgeteilte Thoriumaktivität nicht einheitlich ist, daß sich vielmehr aus dem ersten Zerfallsprodukt der Emanation ein zweites bildet, das stärker radioaktiv ist. Rutherford bezeichnet diese Metabole als Thorium A und B. Aus dem Gesetze, nach dem die Aktivität sich ändert, konnte er mathematisch ableiten, daß der eine Stoff eine Halbierungskonstante von 11 Stunden, der andere eine solche von 55 Minuten haben muß. Pegram¹⁾ und v. Lerch²⁾ konnten Thorium A und Thorium B unvollkommen elektrolytisch trennen, weil das letztere beträchtlich edler ist als das erstere.

Miss Slater³⁾ erreichte eine ziemlich weitgehende Trennung dadurch, daß sie einen mit dem Gemenge beladenen Platindraht in einer Bleihülle erhitze. Gegen 700° begann das Thorium A vom Draht auf die Hülle über zu sublimieren, während bei 1000° fast reines Thorium B auf dem Drahte zurückblieb, das sich dann gegen 1200° völlig verflüchtigte. Neuerdings hat Hahn⁴⁾ gezeigt, daß das Thorium B nicht einheitlich ist, weil es zweierlei Arten von α -Strahlen aussendet. Er nimmt an, daß es ein Thorium C mit einer sehr schnellen Zerfallsperiode von wenigen Sekunden bildet. Das Endprodukt der radioaktiven Umwandlung des Thoriums ist nicht bekannt.

In Baden-Badener Quellsedimenten fanden Elster und Geitel⁵⁾ einen Bestandteil auf, der Thorium-Emanation abgab, ohne daß sich eine entsprechende Menge von Thorium darin auffinden ließ. Ähnliche Beobachtungen machte Blanc⁶⁾ an anderen Quellsedimenten. Fast gleichzeitig schied Hahn⁷⁾ aus Rohradium, welches Thorianit

1) Phys. Review **17**, 424 [1903].

2) a. a. O.

3) Phil. Mag. [6] **9**, 628 [1905].

4) Phys. Ztschr. **7**, 412, 456 [1906].

5) Phys. Ztschr. **6**, 67 [1905].

6) Acc. d. Lincei [5] **15**, I, 328, 349 [1906].

7) Chem. News **92**, 251 [1905].

entstammte, eine in seinen chemischen Eigenschaften dem Thorium völlig ähnliche Verunreinigung ab, die viel stärker aktiv als gewöhnliches Thorium war. Er nannte sie Radiothorium. Dieses vom Thorium durch chemische Reagenzien zu scheiden, ist bisher nicht gelungen. Nur durch Erzeugung von gewissen Niederschlägen in Thoriumlösungen, wie z. B. durch Fällung von Eisenhydroxyd oder Bariumsulfat, wird ein kleiner Bruchteil des Radiothoriums mitgerissen¹⁾. Seine Halbwertszeit bestimmte Blanc²⁾ zu 737 Tagen. Macht es schon diese kurze Lebensdauer sehr wahrscheinlich, daß das Radiothorium eine Zwischenstufe zwischen dem Thorium und dem Thorium X darstellt, so ergibt sich dies mit Sicherheit daraus, daß nach Untersuchungen von Boltwood, Dadourian, McCoy und Ross³⁾ die Radioaktivität aller Thorium-Mineralien ihrem Thoriumgehalt proportional ist.

Anders steht es nach denselben Autoren mit den Thoriumverbindungen des Handels. Diese zeigten durchweg eine geringere Aktivität, als nach dem Befunde der Mineralien sich hätte erwarten lassen. Die Erklärung für diese Tatsache hat Hahn⁴⁾ darin gefunden, daß das Thorium sich nicht unmittelbar in Radiothorium umwandelt, sondern daß noch ein Zwischenkörper, Mesothorium, anzunehmen ist, welcher bei der Abscheidung des Thoriums aus den Mineralien im Gegensatz zum Radiothorium entfernt wird. Das Mesothorium muß eine erheblich längere Lebensdauer haben, als das Radiothorium. Denn die Thoriumsalze verlieren nach ihrer Abscheidung aus den Erzen anfangs langsam an Aktivität, weil das darin enthaltene Radiothorium schneller zerfällt, als es nachgebildet wird. Nach drei Jahren etwa scheint das Minimum erreicht zu sein. Schätzungsweise dürfte die Halbwertszeit des Mesothoriums 7 Jahre betragen. Es sendet nur β -Strahlen aus, während das vom Radiothorium befreite Thorium α -Strahlung zeigt.

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die Umwandlungsprodukte des Thoriums⁵⁾.

¹⁾ Elster und Geitel, Phys. Ztschr. 7, 445 [1906]; Blanc, Acc. d. Lincei, [5] 15, II, 90 [1906].

²⁾ Acc. d. Lincei [5] 16, I, 291 [1907].

³⁾ Amer. Journ. of Science [4] 21, 409, 427, 433 [1906].

⁴⁾ Diese Berichte 40, 1462, 3304 [1907].

⁵⁾ Soeben hat Hahn (Physik. Ztschr. 9, 245 [1908]) gefunden, daß die β -Strahlung des Mesothoriums von einem kurzlebigen Zersetzungsprodukt herrührt, dessen Halbwertszeit 6.2 Stunden beträgt. Die Halbwertszeit des strahlenlosen Mesothoriums nimmt er zu 5.5 Jahren an.

Name	Halbierungs- konstante	Strahlenart
Thorium	$> 10^{10}$ Jahre	α
↓		
Mesothorium	7 Jahre?	β
↓		
Radiothorium	737 Tage	α
↓		
Thorium X	3.64 Tage	α
↓		
Emanation	54 Sekunden	α (δ)
↓		
Thorium A	10.6 Stunden	β
↓		
Thorium B	55 Minuten	α } β, γ
↓		
Thorium C	wenige Sekunden?	α }

VII. Umwandlungen und Ursprung des Radiums.

Der Entdeckung der Thoremanation folgte diejenige der Radium-Emanation¹⁾ auf dem Fuße. Alle festen Radiumverbindungen emanieren nur in äußerst geringem Maße, die Lösungen hingegen regelmäßig. Da diese Emanation eine viel längere Zerfallsperiode hat als die Thoremanation, nämlich eine Halbierungskonstante von 3.86 Tagen²⁾, so sammelt sich also in den festen Salzen eine beträchtliche Menge der Emanation an, die beim Lösen plötzlich frei wird. Auch durch Erhitzen der Salze kann sie ausgetrieben werden. Wegen ihrer verhältnismäßig langen Lebensdauer hat man ihre Eigenschaften gründlich studieren können. Ihre Diffusionsgeschwindigkeit ist vielfach³⁾ untersucht worden. Danach würde ihr Molekulargewicht weniger als 100 betragen, ein Wert, der wahrscheinlich viel zu niedrig ist. Wegen der ungeheueren Verdünnung, in der er bestimmt wurde, ist er recht unsicher. Das Gas ist inert, also wohl auch einatomig. Es läßt sich in flüssiger Luft kondensieren⁴⁾ und verflüchtigt sich bei -150° .

¹⁾ Dorn, Abh. Naturf. Ges., Halle 1900

²⁾ Sackur, diese Berichte 38, 1753 [1905].

³⁾ Rutherford und Brooks, Phil. Mag. [6] 4, 1 [1902]; Curie und Danne, Compt. rend. 136, 1314 [1903]; Makower, Phil. Mag. [6] 9, 56 [1905].

⁴⁾ Rutherford und Soddy, Phil. Mag. [6] 5, 561 [1903].

Ramsay und Collie¹⁾ haben das Spektrum untersucht und gewisse Beziehungen zu den Gasen der Argongruppe gefunden. Die Radium-Emanation sendet neben α -Strahlen auch δ -Strahlen²⁾ aus.

Die von dieser Emanation erzeugte mitgeteilte Aktivität klingt schon in wenigen Stunden fast vollständig ab. In einer längeren Zeit aufbewahrten trocknen Radiumsalze befindet sich das Radium mit der okkludierten Emanation und deren Zerfallsprodukten im radioaktiven Gleichgewicht. Löst man nun das Salz auf und verdampft die Lösung, so verjagt man die Emanation. Der Rückstand enthält zunächst noch deren Zerfallsprodukte, deren Strahlung aber schnell abklingt. Deswegen sinkt die Aktivität des Salzes anfangs, erreicht in einigen Stunden ein Minimum, das nur ein Viertel des »gereiften« Salzes beträgt, und steigt nun im Laufe eines Monats wieder auf den ursprünglichen Wert an; in derselben Zeit klingt die frei gemachte Emanation vollständig ab, deren Strahlungsvermögen in den ersten Stunden nach ihrer Abtrennung durch die Entstehung ihrer Zerfallsprodukte entsprechend ansteigt. Da es sich bei diesen Stoffen um die Entwicklung großer Energiemengen handelt, konnten Rutherford und Barnes³⁾ diese Verhältnisse calorimetrisch verfolgen. Wir sahen vorher, daß 1 g Radium in einer Stunde mehr als 100 Cal. entwickelt; $\frac{3}{4}$ dieser beträchtlichen Energiemenge sind demnach den unwägbareren Mengen seiner Zerfallsprodukte zuzuschreiben, die sich mit ihm im radioaktiven Gleichgewicht befinden.

Ramsay und seine Mitarbeiter⁴⁾ haben versucht, die Menge der vom Radium erzeugten Emanation zu messen. Die von ihnen gefundenen Werte stimmen aber unter einander und mit anderen Erfahrungen so wenig überein, daß diese Untersuchungen noch der Bestätigung bedürfen. Die aus 1 g Radium in 3.86 Tagen abgegebene Emanation würde nach den älteren Versuchen 1 cmm, nach den neueren 3.5 cmm betragen. Im letzteren Falle wurde auch eine noch unerklärte Kontraktion der Emanation auf das halbe Volumen im Verlaufe einer Stunde nach der Isolierung beobachtet.

Der Zerfall der Radium-Emanation führt zur »induzierten« Aktivität, die, ähnlich wie beim Thorium, aus einer Reihe sich aus einander entwickelnder Metabole besteht; nur daß die Reihe hier viel länger ist. Die induzierte Aktivität des Radiums klingt, wie schon erwähnt, sehr schnell ab; das gilt indessen nicht ganz streng. Es

¹⁾ Compt. rend. 138, 1388 [1904].

²⁾ Slater, Phil. Mag. [6] 10, 460 [1905].

³⁾ Phil. Mag. [6] 7, 202 [1904].

⁴⁾ Ramsay und Soddy, Proc. Roy. Soc. 73, 346 [1904]; Ramsay und Cameron, Jahrb. für Radioaktiv. 4, 253 [1907].

verbleibt schließlich ein kleiner Rest, dessen Aktivität sich nicht mehr merklich vermindert. Wir wollen diesen zunächst außer acht lassen. Wenn man einen Draht mehrstündiger Einwirkung der Radium-Emanation ausgesetzt hat, so fällt seine Aktivität nach einem Gesetz ab, das durch die Differenz zweier Exponentialfunktionen wiedergegeben wird. Hat aber die Einwirkung der Emanation nur wenige Minuten gedauert, so klingt die induzierte Aktivität anfangs mit einer Halbierungskonstante von 3 Minuten ab, um dann höchst kompliziert zu verlaufen¹⁾. Rutherford²⁾ hat diese Erscheinung auf Grund der Desaggregations-Hypothese so, erklärt, daß aus der Emanation zunächst ein Radium A genanntes Metabolon entsteht, welches mit einer Periode von 3 Minuten zerfällt. Dieses sendet α -Strahlen aus und verwandelt sich in strahlenloses Radium B, das weiter in α -, β - und γ -strahlendes Radium C übergeht. Die von ihm anfänglich unrichtig angenommenen Halbierungskonstanten von RaB und RaC bestimmte Bronson³⁾ zu 26 bzw. 19 Minuten. H. W. Schmidt⁴⁾ zeigte dann, daß dem RaB eine langsame β -Strahlung eigen ist. Endlich gelang es v. Lerch⁵⁾, RaC aus der salzsauren Lösung der induzierten Aktivität auf elektrolytischem Wege zu isolieren. RaB konnte er durch Erzeugen einer Bariumsulfatfällung aus dieser Lösung frei von RaC niederreißen. Die Strahlung des RaC bietet ein besonderes Interesse. Es ist das einzige Element der Radiumreihe, das γ -Strahlen aussendet, und seine α -Strahlung besitzt die größte Geschwindigkeit unter allen bisher bekannten radioaktiven Stoffen. Sie vermag 7 cm Luft unter normalem Druck zu durchdringen, während die α -Strahlen des Radiums selbst nur das halbe Durchdringungsvermögen besitzen.

Die induzierte Radiumaktivität verschwindet bis auf einen kleinen Rest innerhalb eines Tages. Dann aber hinterbleibt eine sehr geringe Aktivität, die zuerst von S. Curie⁶⁾ beobachtet wurde. Rutherford⁷⁾ hat auch diese »Restaktivität« eingehend studiert. Sie zeigt α - und β -Strahlung. Beide Strahlungen klingen aber nicht ab, sondern steigen im Gegenteil an, um schließlich nahezu konstant zu werden, und zwar beide nach verschiedenen Exponentialgesetzen. Rutherford deutet dies Phänomen durch die Annahme, daß RaC in

¹⁾ P. Curie und Danne, Compt. rend. **136**, 364 [1903]; **138**, 633, 748 [1904].

²⁾ Trans. Roy. Soc. Lond. **204**, A, 169 [1904].

³⁾ Amer. Journ. Science [4] **20**, 55 [1905].

⁴⁾ Physik. Ztschr. **6**, 897 [1905].

⁵⁾ Wien. Akad. Ber. **115**, IIa, 197 [1906].

⁶⁾ Ann. chim. phys. [7] **30**, 289 [1903].

⁷⁾ Phil. Mag. [6] **8**, 636 [1904]; **10**, 290 [1905].

ein nicht strahlendes Metabolon von sehr langer Lebensdauer, RaD, umgewandelt wird, welches weiter in ein β -strahlendes RaE, übergeht. Dieses endlich zerfällt unter Bildung des α -strahlenden RaF. Die Halbwertszeit von RaD ergab sich in grober Annäherung zu 40 Jahren, die des RaE zu 6 Tagen, die des RaF zu 143 Tagen.

Die Lebensdauer von RaD konnte nur indirekt aus dem Vergleich der β -Strahlungen, welche das der gleichen Emanationsmenge entstammende RaC und RaE liefern, erschlossen werden. Durch eine ähnliche Berechnung, die sich auf die von RaC und RaF ausgesandte α -Strahlung bezog, fanden St. Meyer und v. Schweidler die sehr abweichende Halbwertszeit von 25 Jahren.

Daß sich RaE in RaF umwandelt, wurde von Rutherford bewiesen. Wenn die Restaktivität nämlich auf 1000^o erhitzt wird, so verflüchtigt sich RaF und der größte Teil von RaD. Dagegen bleibt RaE, der Träger der gesamten β -Strahlung, mit dem Rest des RaD zurück. Als bald aber beginnt von neuem die Bildung des α -strahlenden RaF, und zwar infolge der kurzen Zerfallsperiode des RaE anfangs sehr schnell, später langsamer in dem Maße, als das noch vorhandene RaD sich umwandelt. Das als Glührückstand verbleibende RaE zeigt eine kleinere Halbwertszeit als sich aus dem Anstieg der β -Strahlung der Restaktivität ergibt, nämlich 4.5 Tage. Diese Tatsache hat ihre Aufklärung durch St. Meyer und v. Schweidler¹⁾ erfahren. Sie zeigten, daß RaF elektrochemisch edler ist als RaE, dieses wiederum edler als RaD. Durch Elektrolyse von sauren Lösungen der Restaktivität mit geeignet gewählten Spannungen kann man daher die einzelnen Metabole nach einander abscheiden. Dabei folgt nun auf das RaF zunächst eine β -strahlende Abscheidung mit der Halbwertszeit 4.8 Tage, dann aber ein strahlenloses Metabolon mit einer Zerfallsperiode von etwa 6 Tagen. Da das erstere aus dem letzteren entsteht, nennen die Autoren dieses RaE₁, jenes RaE₂.

Das wichtigste Ergebnis der Untersuchungen Rutherfords über die Restaktivität war die Feststellung, daß RaF mit dem Polonium identisch ist. Daß die Aktivität des Poloniums unbeständig sei, hatte schon S. Curie²⁾ erkannt. Aber die von ihr beobachtete Abnahme verlief unregelmäßig, offenbar weil ihr Präparat sehr unrein war. Nach der Abtrennung des Poloniums vermittels der oben angegebenen Verfahren ergab sich, daß es nach dem Exponentialgesetz abklingt. Die Zerfallsperiode des Poloniums ist vielfach bestimmt

¹⁾ Lieben-Festschrift 402 [1906].

²⁾ a. a. O.

worden²⁾. Die zuverlässigsten Beobachtungen lieferten Halbwertskonstanten von 139—140 Tagen. Rutherford fand für RaF, wie wir sahen, 143 Tage, St. Meyer und v. Schweidler³⁾ 138 Tage. Die Übereinstimmung ist also genügend. Die Identität wird ferner auch durch das elektrochemische Verhalten bestätigt.

RaD folgt dem Blei bei der analytischen Verarbeitung der Uranerze. Da es selbst nicht strahlt, so rührt die Aktivität des aus den Erzen gewonnenen Bleis von seinen Zerfallsprodukten her. Das »Radioblei« von K. A. Hofmann und Strauß²⁾ ist also ein Gemenge von Blei mit den Restaktivitäten. Bisher ist es nicht gelungen, RaD von Blei zu trennen. Wohl aber haben Hofmann und Wöfl³⁾ eine gewisse Anreicherung durch fraktionierte Sublimation des Chlorids und besonders durch Überführung des Bleis in die Tetraphenylverbindung erreicht.

Neben den bisher besprochenen radioaktiven Umwandlungsprodukten tritt noch ein anderes auf, dessen Entstehung das größte Interesse für sich in Anspruch nehmen darf. Es ist das Helium. Rutherford nimmt, wie wir sahen, als wahrscheinlich an, daß die α -Teilchen Heliumatome sind. Ramsay und Soddy⁴⁾ haben nun nachgewiesen, daß die Radium-Emanation in der Tat unter Bildung von Helium zerfällt. Diese Beobachtung ist wiederholentlich von anderen Forschern⁵⁾ unter mannigfachen Versuchsbedingungen bestätigt worden. Besonders verdient eine Untersuchung von Himstedt und Meyer⁶⁾ hervorgehoben zu werden, welche den Einwand, daß Helium in Radiumsalzen okkludiert sein und mit der Emanation entweichen könne, dadurch völlig widerlegten, daß sie Radiumbromid mehrfach destillierten und dann die Heliumbildung aus diesem Salz nach mehreren Wochen nachwiesen. Nimmt man hinzu, daß alle Uranerze reichlich Helium enthalten, so könnte man in diesen Tatsachen eine wichtige Bestätigung der Rutherford'schen Hypothese von der Natur der α -Partikel erblicken, wenn nicht neuere Untersuchungen in dieser

¹⁾ St. Meyer und v. Schweidler, Wien. Akad. Ber. **114**, IIa, 339, 1195 [1905]; **115**, IIa, 63 [1906]; Marckwald, Greinacher und Hermann, Jahrb. f. Radioakt. **2**, 136 [1905]; S. Curie, Phys. Ztschr. **7**, 146, 180 [1906].

²⁾ Diese Berichte **33**, 3570 [1900].

³⁾ Diese Berichte **40**, 2425 [1907]; Ann. d. Phys. [4] **15**, 621 [1904].

⁴⁾ Proc. Roy. Soc. London **72**, 204 [1903].

⁵⁾ Curie und Dewar, Compt. rend. **138**, 190 [1904]; Indrikson, Phys. Ztschr. **5**, 214 [1904]; Himstedt und Meyer, Ann. d. Phys. [4] **15**, 184 [1904]; Giesel, diese Berichte **38**, 2300 [1905]; **39**, 2244 [1906].

⁶⁾ Ann. d. Phys. [4] **17**, 1005 [1905].

Hinsicht zu Zweifeln Anlaß geben würden. Ramsay und Cameron¹⁾ haben nämlich die Zersetzung der Radium-Emanation anstatt sie, wie bei den früheren Versuchen, sich selbst zu überlassen, bei Gegenwart von Wasser und von Kupferlösung vor sich gehen lassen. Alsdann trat keine Spur von Helium, wohl aber im ersten Falle Neon, im zweiten Argon auf. Gleichzeitig entstand in der Kupferlösung Lithium, welches durch sein Spektrum erkannt wurde, und vielleicht auch Natrium. Diese höchst überraschenden Beobachtungen bedürfen indessen noch des weiteren Studiums, das von den Autoren mit großen Radiummengen bereits in Angriff genommen ist. Man sieht dem Ergebnis mit der größten Spannung entgegen.

Wenn das Radium regelmäßig in α -Partikel und Emanation zerfällt, so muß man seine Zerfallsperiode, die sich wegen ihrer langen Dauer der direkten Messung entzieht, durch Messung des einen oder des anderen seiner Zerfallsprodukte berechnen können. Nun ist, wie wir oben sahen, die quantitative Bestimmung der vom Radium gelieferten Emanationsmenge höchst unsicher. Dagegen läßt sich die von einer gegebenen Menge Radium abgegebene α -Strahlung elektrometrisch mit leidlicher Genauigkeit messen. Rutherford²⁾ fand, daß die Gesamtzahl der α -Partikel, die 1 g reines, von seinen Zerfallsprodukten befreites Radium in 1 Sekunde aussendet, unter der Voraussetzung, daß jede Partikel nur eine elektrische Ladung trägt, $6.2 \cdot 10^{10}$ beträgt. Macht man die wahrscheinlichere Annahme, daß die α -Teilchen Heliumatome mit zwei elektrischen Ladungen sind, so ist dieser Wert zu halbieren. Setzt man nun ferner voraus, daß jedes Atom beim Zerfall nur eine α -Partikel aussendet, so zerfallen also von 1 g Radium in der Zeiteinheit $3.1 \cdot 10^{10}$ Atome. Nun kann man bekanntlich die Zahl der in einem Atomgewicht in Grammen eines Elements enthaltenen Atome zu $8 \cdot 10^{23}$ annehmen. Da das Atomgewicht des Radiums 226 ist, so enthält 1 g Radium $3.6 \cdot 10^{21}$ Atome. Der Bruchteil, der hiervon in 1 Sekunde zerfällt, beträgt demnach $3.1 \cdot 10^{10} : 3.6 \cdot 10^{21} = 8.6 \cdot 10^{-12}$. Diese Zahl gibt also die Radioaktivitätskonstante des Radiums an. Aus ihr berechnet sich, daß sich das Radium in 2600 Jahren zur Hälfte umwandelt. Die Richtigkeit dieser Spekulationen könnte man durch Wägungen prüfen. Freilich würde ein Radiumsalz, trocken aufbewahrt, nur eine unwägbare Gewichtsabnahme erfahren; denn die entstehende Emanation zerfällt, ohne zu entweichen, in die unflüchtigen Metabole. Dagegen

¹⁾ Journ. Chem. Soc. **91**, 1593 [1907].

²⁾ Phil. Mag. [6] **10**, 193 [1905].

müßte ein völlig glühbeständiges Radiumsalz — und als solches käme vielleicht das Sulfat in Betracht —, wenn man es 1 Jahr lang erhitzte, $\frac{1}{4000}$ seines Gewichts verlieren.

Wenn nun die Zerfallsperiode des Radiums im Vergleich zu den Zeitmaßen, mit denen die Geologie zu rechnen gewöhnt ist, außerordentlich klein ist, so ist es klar, daß dieses Element seine Existenz in der Pechblende der sehr viel langsameren Umwandlung eines anderen radioaktiven Grundstoffs verdanken muß. Als solcher kommt nur das Uran in Betracht. Mit diesem muß sich also das Radium und seine Zerfallsprodukte in den Uranerzen im radioaktiven Gleichgewicht befinden. Diese Konsequenz der Desaggregationsprodukte haben neue Untersuchungen aufs glänzendste bestätigt. Mc Coy¹⁾ zeigte, daß die Radioaktivität aller Uranerze ihrem Urangehalt annähernd proportional, aber 5—6-mal so groß ist, als der Aktivität des in ihnen enthaltenen Urans entspricht. War schon hierdurch wahrscheinlich gemacht, daß Radium und Uran in diesen Erzen in einem konstanten Mengenverhältnis stehen, so wurde es durch Untersuchungen von Boltwood²⁾ und Strutt³⁾ exakt bewiesen. Sie bestimmten den Urangehalt der Erze gewichtsanalytisch, den Radiumgehalt aber dadurch, daß sie die beim Lösen der Erze entwickelte Emanation auffingen und deren Aktivität elektrometrisch maßen. Das Verhältnis von Uran zu Radium stimmte bei den verschiedensten Erzen sehr angenähert überein. Zu dem gleichen Ergebnis kam auch Eve⁴⁾, indem er die sehr durchdringende γ -Strahlung des Radiums C als Maß für den Radiumgehalt der Uranerze wählte. Endlich haben Rutherford und Boltwood⁵⁾ durch Vergleich des Emanationsvermögens einer Radiumlösung von bekanntem Gehalt mit demjenigen einer Pechblende das absolute Gewichtsverhältnis von Radium zu Uran in dem Erze ermittelt. Sie fanden den Wert $3.8 \cdot 10^{-7}$.

Diese Zahl gestattet nun auch, die Zerfallsperiode des Urans abzuschätzen. Denn wenn sich 1 g Uran mit $3.8 \cdot 10^{-7}$ g Radium im Gleichgewicht befindet, die Halbierungskonstante des Radiums aber 2600 Jahre beträgt, so muß Uran in $\frac{2600 \cdot 10^7}{3.8}$, also in $6.8 \cdot 10^9$ Jahren zur Hälfte zerfallen. Würde dieser Zerfall direkt zum Radium führen, so müßte er leicht nachweisbar sein. Denn, da sich 1 g Uran mit

¹⁾ Diese Berichte 37, 2641 [1904]. ²⁾ Phil. Mag. [6] 9, 599 [1905].

³⁾ Proc. Roy. Soc. London 76, 88 [1905].

⁴⁾ Amer. Journ. Science [4] 22, 4 [1906].

⁵⁾ Amer. Journ. Science [4] 22, 1 [1906].

$3.8 \cdot 10^{-7}$ Radium im Gleichgewicht befindet, die Radioaktivitätskonstante des Radiums aber $8.6 \cdot 10^{-12}$ beträgt, so würde 1 g Uran in der Sekunde $8.6 \cdot 10^{-12} \cdot 3.8 \cdot 10^{-7}$ g Radium, in einem Jahre also fast genau 10^{-10} g Radium bilden. Die von 100 g Uran in wenigen Wochen gebildete Menge müßte ausreichen, um die Radium-Emanation elektroskopisch nachzuweisen. Boltwood¹⁾ hat dahin zielende Versuche angestellt, aber auch nach einem Jahre keine Spur von Emanation gefunden, obwohl sich mit der von ihm gewählten Versuchsanordnung noch $\frac{1}{1000}$ des theoretischen Betrages hätte nachweisen lassen. Er zog daraus den Schluß, daß zwischen dem Uran X, dem kurzlebigen ersten Umwandlungsprodukt des Urans, und dem Radium mindestens noch ein Zwischenkörper von langer Lebensdauer stehen müsse.

Diese Annahme fand neuerdings eine überraschende Bestätigung. Man hätte nicht erwarten sollen, daß sich in den seit einem Jahrzehnt so eifrig durchforschten Uranerzen noch ein radioaktiver Stoff von beträchtlichem Strahlungsvermögen auffinden lassen würde, der sich der Entdeckung bisher entzogen hatte. Ein merkwürdiger Zufall hat es gefügt, daß dieser Stoff kürzlich von mehreren Autoren fast gleichzeitig aufgefunden worden ist. Die erste Veröffentlichung rührt von Boltwood²⁾ her, der ihm den Namen Ionium zuerteilt hat. Er fand ihn, ebenso wie Marckwald und Keetman³⁾, in einer größeren Zahl von Uranerzen auf. Das Ionium steht chemisch dem Thorium sehr nahe. Es sendet α - und β -Strahlen aus, von denen die ersteren durch ein besonders geringes Durchdringungsvermögen ausgezeichnet sind, denn ihr Wirkungsbereich in Luft beträgt weniger als 3 cm. Da es eine lange Lebensdauer zu haben scheint, so dürfte es in recht erheblicher Menge in der Pechblende enthalten sein. Das Mengenverhältnis zwischen ihm und Radium ist in verschiedenen Erzen merklich konstant. Hahn⁴⁾ hat das Ionium als Verunreinigung käuflicher Thorpräparate aufgefunden. Seine interessanteste Eigenschaft, die Boltwood und Hahn unabhängig von einander feststellten, ist diejenige, daß es Radium erzeugt. Das frisch abgeschiedene Präparat emaniiert nämlich nicht, wenn man von einer Spur Thorium-Emanation absieht; aber schon nach wenigen Wochen läßt sich das Auftreten von Radium-Emanation nachweisen.

¹⁾ Amer. Journ. Science [4] 20, 239 [1905].

²⁾ Amer. Journ. Science [4] 24, 370 [1907].

³⁾ Diese Berichte 41, 49 [1908].

⁴⁾ Diese Berichte 40, 4415 [1907].

Die Zerfallsperiode des Urans umfaßt viele Milliarden Jahre. Deswegen empfinden wir für die Beantwortung der Frage nach dem Ursprung dieses Elementes kaum ein größeres Bedürfnis, als für die Lösung des Rätsels der Schöpfung überhaupt. Viel näher berührt uns die Frage nach dem Endprodukt der radioaktiven Umwandlung des Urans. Denn das Polonium mit seiner kurzen Zerfallsperiode muß sich offenbar in ein beständigeres Element umwandeln. Auf Grund von immerhin recht unsicheren Voraussetzungen hat Rutherford die Vermutung ausgesprochen, daß Polonium in Helium und Blei zerfalle. Das Atomgewicht des Radiums beträgt 226. Jedes Radiumatom sendet ein α -Teilchen aus, wenn es zerfällt, und von seinen Umwandlungsprodukten senden noch vier α -Teilchen aus, nämlich außer dem Polonium die Emanation, Radium A und Radium C. Wenn die α -Partikeln Heliumatome sind, so müßte sich bei der Umwandlung jedes α -strahlenden Elementes dessen Atomgewicht um dasjenige des Heliums, also um 4, vermindern. Das Zerfallsprodukt des Poloniums sollte demgemäß ungefähr das Atomgewicht $226 - 5 \cdot 4 = 206$ besitzen, ein Wert, der dem des Bleis, 206.9, genügend nahe kommt. Das Atomgewicht des Poloniums würde hiernach etwa 211 betragen müssen, was, wie wir sahen, auch mit seiner aus rein chemischen Gründen vermuteten Stellung im periodischen System der Elemente aufs beste übereinstimmen würde. Diese Spekulationen fanden eine Stütze in Untersuchungen Boltwoods¹⁾ über den Bleigehalt von Uranmineralien. Er zeigte, daß nicht nur alle Uranmineralien Blei und Helium enthalten, sondern daß der Bleigehalt solcher Erze, für die aus geologischen Gründen gleiches Alter anzunehmen ist, zu ihrem Urangehalt in einem bestimmten Verhältnis steht, wie es die Umwandlungshypothese erfordert. Daß für Helium nicht das Gleiche gilt, ist unbedenklich, weil dieses, je nach der Natur der Erze, mehr oder minder okkludiert bleiben kann.

Aus der Zerfallsperiode des Urans und dem Bleigehalt seiner Erze kann man auf Grund dieser Hypothese offenbar auf das Alter der Erze schließen. Die von Boltwood untersuchten primären Mineralien würden danach ein Alter von 400—2200 Millionen Jahren haben. Solche Mineralien, die, wie der Gummit oder Uranophan, sekundär aus den Pechblenden durch äußere Einflüsse entstanden sind, gestatten natürlich keinen Schluß aus ihrem Bleigehalt auf ihr Alter. Immerhin sollten auch sie alle bleihaltig sein. Kürzlich haben aber Marckwald und Keetman²⁾ mitgeteilt, daß sich in 10 g Autunit sicher

¹⁾ Amer. Journ. Science [4] 23, 77 [1907].

²⁾ a. a. O.

weniger als $\frac{1}{10}$ mg Blei befindet, wenn solches überhaupt darin enthalten ist. Wenn die Rutherfordsche Hypothese zutrifft, so wäre man also genötigt anzunehmen, daß seit der Ablagerung des Autunits an seiner Fundstätte noch nicht die zur Bildung nachweisbarer Bleimengen erforderliche Zeit verstrichen wäre. Andererseits ist die Aktivität des Autunits durchaus normal, so daß sich also Uran und Radium im radioaktiven Gleichgewicht befinden.

Rutherfords Hypothese, daß Blei das Endprodukt der radioaktiven Umwandlungen sei, stützt sich auf zwei Annahmen, daß nämlich die α -Teilchen aus Helium bestehen, und daß ferner das Radium und nur 4 seiner Metabole unter α -Strahlung zerfallen. Die erstere Voraussetzung ist, wie wir sahen, nach den neuesten Beobachtungen von Ramsay und Cameron nicht mehr so wohl begründet, als dies der Fall zu sein schien, nachdem Ramsay und Soddy die Bildung des Heliums aus der Emanation nachgewiesen hatten. Dazu kommt, daß Greinacher und Kernbaum¹⁾ sich vergeblich bemühten, die Bildung dieses Gases aus Polonium experimentell festzustellen. Aber auch die zweite Voraussetzung Rutherfords, daß nur 4 Metabole des Radiums α -Teilchen aussenden, ist schon von ihm selbst in Zweifel gezogen worden. Da die α -Strahlung nur nachweisbar ist, wenn ihre Geschwindigkeit größer ist als $\frac{1}{36}$ von derjenigen des Lichtes, die Geschwindigkeit der α -Teilchen aber im Höchsthalle, beim Radium C $\frac{1}{13}$, im Mindesthalle beim Ionium weniger als $\frac{1}{20}$ Lichtgeschwindigkeit ausmacht, so kann man sich vorstellen, daß auch die sogenannten nichtstrahlenden Metabole, wie Radium D, eine langsame α -Strahlung aussenden. Diese könnte noch die Hälfte der Geschwindigkeit der Ioniumstrahlung besitzen, ohne sich durch Ionisationsvermögen oder photographische Wirkung zu verraten. Calorimetrisch müßte man sie allerdings nachweisen können, sobald Radium D in konzentrierterer Form zur Verfügung steht. Wenn man eine solche langsame Strahlung für diese Metabole annimmt, würde auch die Tatsache ihrer weiteren Umwandlung sich auf die einfachste Weise erklären.

Die Frage, ob sich Polonium in Blei umwandelt, ist übrigens der direkten, experimentellen Prüfung durchaus zugänglich. Die Poloniummenge, die sich aus einer Jahresproduktion der Joachimsthaler Werke gewinnen läßt, dürfte genügen, um diese wichtige Frage zur Entscheidung zu bringen.

In der folgenden Tabelle sind die Umwandlungsprodukte des Urans mit ihren wichtigsten Merkmalen verzeichnet.

¹⁾ Physik. Ztschr. 8, 339 [1907].

Name	Halbierungs- konstante	Strahlenart
Uran	6.8 · 10 ⁹ Jahre	α
↓		
Uran X	22 Tage	β, γ
⋮		
Ionium	?	α, β
↓		
Radium	2600 Jahre	$\alpha (\delta)$
↓		
Emanation	3.8 Tage	$\alpha (\delta)$
↓		
Radium A	3 Minuten	α
↓		
Radium B	26 Minuten	β
↓		
Radium C	19 Minuten	α, β, γ
↓		
Radium D	40(?) Jahre	—
↓		
Radium E ₁	6 Tage	—
↓		
Radium E ₂	4.8 Tage	β
↓		
Polonium	140 Tage	$\alpha (\delta)$
↓		
Blei (?)	—	—

VIII. Aktinium.

Wir haben bisher einen radioaktiven Bestandteil der Pechblende außer acht gelassen, der schon bald nach der Entdeckung des Poloniums und Radiums von Debierne¹⁾ aufgefunden worden ist. Er fand ihn bei den seltenen Erden, die in spärlicher Menge in dem Mineral enthalten sind, und nannte ihn Aktinium. Dieser Stoff ist besonders dadurch charakterisiert, daß er eine Emanation von sehr kurzer Lebensdauer aussendet. Später begegnete Giesel²⁾ dem Aktinium,

¹⁾ Compt. rend. **129**, 593 [1899]; **130**, 906 [1900]; **131**, 333 [1900]; **136**, 446, 671 [1903]; **138**, 411 [1904]; **139**, 538 [1904]; **141**, 383 [1905].

²⁾ Diese Berichte **35**, 3608 [1902]; **36**, 342 [1903]; **37**, 1696, 3963 [1904]; **38**, 775 [1905]; **40**, 3011 [1907].

als er die in Radiumbromid-Mutterlaugen angesammelten Erden untersuchte. Hier fand der Stoff sich stark angereichert vor und erhielt wegen seines hohen Emanationsvermögens, bevor seine Identität mit dem Aktinium festgestellt war, den Namen Emanium. Giesel zeigte, daß das Aktinium dem Lanthan folgt, daß man es aber auch von diesem durch fraktionierte Krystallisation des Mangandoppelnitrats teilweise trennen kann. Indessen ist die Abtrennung bisher nur in sehr unvollkommenen Maße gelungen, wie die spektralanalytische Untersuchung gezeigt hat, bei der nur Lanthanlinien gefunden wurden. Die Zerfallsperiode des Aktiniums scheint sehr groß zu sein, denn man hat bisher keine Abnahme seiner Aktivität nachweisen können.

Die Zerfallsperiode der Aktinium-Emanation ist die kürzeste, die bisher an einem radioaktiven Stoffe beobachtet wurde. Seine Halbwertszeit beträgt 3.9 Sekunden. Deshalb ist die Wirkung verhältnismäßig kleiner Mengen dieser Emanation enorm groß. Sie läßt sich bei einer Temperatur oberhalb derjenigen der flüssigen Luft ähnlich den anderen Emanationen kondensieren¹⁾ und sendet nur α -Strahlen aus. Sehr bemerkenswert ist ferner, daß sie von negativ geladenen Elektroden angezogen wird, also ähnlich den »induzierten Aktivitäten« eine positive Ladung trägt, die sie wohl wie jene dem Auftreten von δ -Strahlen verdankt. Ähnlich der Radium-Emanation zerfällt sie unter Bildung von Helium.

Die induzierte Aktinium-Aktivität klingt in etwa 36 Minuten zur Hälfte ab. Rutherford²⁾ und Brooks³⁾ zeigten, daß die Emanation bei kurzer Einwirkung einen schwach aktiven Niederschlag bildet, dessen Aktivität schnell bis zum Maximum anwächst und dann regelmäßig abfällt. Die Verhältnisse liegen also ähnlich wie beim Thorium und sind dadurch zu erklären, daß zunächst ein nicht-strahlendes Metabolon, Aktinium A, entsteht, aus welchem sich das Aktinium B bildet. Letzteres sendet α -, β - und γ -Strahlen aus. Aus dem genauen Studium⁴⁾ des Verlaufs der Aktivitätsänderung ergab sich, daß die beiden Metabole mit Halbwertszeiten von 36 Minuten und 2 Minuten zerfallen. Das Aktinium B ist elektrochemisch edler als Aktinium A und ließ sich daher von ihm aus der salzsauren Lösung des aktiven Niederschlages elektrolytisch trennen. Dadurch

¹⁾ Goldstein, Verh. der Deutsch. Phys. Ges. 5, 392 [1903].

²⁾ Transact. Lond. R. Soc. Prod. 204, A, 169 [1904].

³⁾ Phil. Mag. [6] 8, 373 [1904].

⁴⁾ Bronson, Amer. Journ. Science [4] 19, 185 [1905]; Meyer und v. Schwedler, Wien. Akad. Berichte 114, IIa, 1147 [1905].

konnte man feststellen, daß ihm die kurze Zerfallsperiode zukommt. Levin¹⁾ trennte die beiden Metabole vermöge ihrer verschiedenen Flüchtigkeit. Aktinium A verdampft schon bei 400° langsam, während Aktinium B sich erst bei 700° verflüchtigt. Meyer und v. Schweidler²⁾ glauben noch eine »Restaktivität« bei langer Einwirkung der Aktinium-Emanation beobachtet zu haben, deren Halbwertsperiode 12 Tage beträgt. Doch halten die Autoren selbst die Existenz des Aktinium C für unsicher.

Der Übergang des Aktiniums in die Emanation findet nicht direkt statt, sondern über zwei Metabole. Dasjenige, welches die Emanation erzeugt, wurde zuerst entdeckt und als Aktinium X bezeichnet. Es wird, ganz analog wie Thorium X vom Thorium, dadurch abgetrennt, daß aus der Aktiniumlösung die Base durch Ammoniak gefällt wird. Sie hat dann ihr Emanationsvermögen eingebüßt. Der geringfügige Rückstand, der nach dem Abdampfen der Lösung und Verjagen der Ammoniumsals hinterbleibt, ist stark aktiv und emanierend. Seine Wirksamkeit nimmt mit einer Halbwertsperiode von 10.2 Tagen ab, während diejenige der Ammoniakfällung in demselben Maße ansteigt³⁾.

Das vom Aktinium X befreite Aktinium ist noch α -strahlend. Wenn man aber zu seiner Lösung Thiosulfat fügt, so fällt mit dem abgeschiedenen Schwefel in unwägbarer Menge der Träger der gesamten α -Strahlung nieder, und das aus der Lösung durch Ammoniak gefällte Aktiniumhydroxyd ist nun völlig inaktiv. Hahn⁴⁾, der diese Tatsache feststellte, nannte den durch Thiosulfat abgeschiedenen Anteil Radioaktinium. Dieser Stoff besitzt unmittelbar nach der Abscheidung kein Emanationsvermögen, nimmt dieses aber im Verlaufe von mehreren Wochen bis zu einem Maximum an. Alsdann beginnt die Wirksamkeit mit einer Halbwertsperiode von 19.5 Tagen abzuklingen. In demselben Maße steigt das Strahlungsvermögen des Aktiniums wieder an. Diese Beobachtungen beweisen, daß das Aktinium selbst strahlenlos ist, in Radioaktinium zerfällt, und daß dieses weiterhin das Aktinium X bildet. Wir erhalten also folgenden Stammbaum für die Zerfallsprodukte des Aktiniums:

¹⁾ Physik. Ztschr. **7**, 812 [1906].

²⁾ Wien. Akad. Anz. **12**, 26. April 1906.

³⁾ Godlewski, Phil. Mag. [6] **10**, 35 [1905]; Levin, a. a. O.

⁴⁾ Diese Berichte **39**, 1605 [1906]; Physik. Ztschr. **7**, 855 [1906].

Name	Halbierungs- konstante	Strahlung
Aktinium	?	—
↓		
Radioaktinium	19.5 Tage	α
↓		
Aktinium X	10.2 Tage	α
↓		
Emanation	3.9 Sekunden	α
↓		
Aktinium A	36 Minuten	—
↓		
Aktinium B	2.15 Minuten	α, β, γ
↓		
Aktinium C?	12 Tage?	?

Zu der Gesamtaktivität der Pechblende trägt das Aktinium mit seinen Zerfallsprodukten nur einen kleinen Bruchteil bei. Deswegen ist auch die Frage, ob es in allen Uranerzen vorkommt, und ob es in diesem Falle stets in dem gleichen Mengenverhältnis zum Uran steht, noch offen ¹⁾. Wäre letzteres erwiesen, so müßte man einen Zusammenhang zwischen der radioaktiven Umwandlung des Urans und der Bildung des Aktiniums vermuten. Anderenfalls könnte das strahlenlose Aktinium wohl auch eine Lebensdauer besitzen, welche der Größenordnung nach derjenigen des Urans und Thoriums nahe steht, und also, wie diese beiden, gleichsam ein radioaktives Urelement darstellen.

IX. Die Radioaktivität der Atmosphäre, des Erdbodens und der Quellen.

Daß ein geladenes Elektroskop an der Luft allmählich seine Ladung verliert, ist längst bekannt. Aber erst im Jahre 1900 haben Geitel ²⁾ und Wilson ³⁾ unabhängig von einander nachgewiesen, daß diese Entladung wesentlich auf einen Ionengehalt der Luft zurückzuführen ist. Die Beobachtung, daß das Entladungsvermögen eines abgeschlossenen Luftvolumens anfänglich ansteigt, wie es in einem Radium-Emanation enthaltenden Gase infolge der Bildung induzierter

¹⁾ Eine soeben erschienene Abhandlung Boltwoods (Amer. Journ. Science [4] 25, 269 [1908]) bringt zu dieser Frage, wie bezüglich der Radioaktivität der Uranerze überhaupt, sehr interessante Beiträge, die leider nicht mehr berücksichtigt werden konnten.

²⁾ Physik. Ztschr. 2, 116 [1900].

³⁾ Proc. Cambr. Phil. Soc. 11, 32 [1900].

Aktivität der Fall sein muß, veranlaßte im folgenden Jahre Elster und Geitel¹⁾ zu dem klassischen Versuch, die Zerfallsprodukte dieser Emanation in der Atmosphäre nachzuweisen. Zu dem Zwecke spannten sie einen Draht von beträchtlicher Länge in freier Luft aus und luden ihn mehrere Stunden auf ein hohes, negatives Potential auf. Danach erwies er sich in der Tat beträchtlich aktiv. Er zeigte alle Eigenschaften der induzierten Radiumaktivität und vor allem deren charakteristische Zerfallsperiode²⁾. Wenn man einen Draht mehrere Tage der Induktion aussetzt, so findet man, nachdem die induzierte Radiumaktivität abgeklungen ist, noch einen Rest, der mit der langsameren Zerfallsperiode der induzierten Thoriumaktivität abklingt³⁾. Der Gehalt der atmosphärischen Luft an radioaktiven Bestandteilen hängt von örtlichen, wie von meteorologischen Verhältnissen ab. Als Quelle der in der Luft enthaltenen Emanationen vermuteten Elster und Geitel⁴⁾ einen Gehalt des Erdbodens an Radium und bestätigten dies zunächst durch den Nachweis, daß die Luft in Kellern, Höhlen und in den Capillaren des Erdbodens viel stärker ionisiert ist, als die atmosphärische. Aus großen Tiefen quellende Kohlensäure oder das Helium⁵⁾ der toskanischen Fumarolen führen reichliche Mengen von Radium-Emanation mit sich.

Untersuchungen des Erdbodens zeigten, daß dieser in der Tat durchgängig spurenweise und zwar dauernd radioaktiv ist. Tonböden⁶⁾ sind gegenüber dichteren Gesteinen durch eine verhältnismäßig hohe Aktivität ausgezeichnet, die von einem Gehalt an Radium herührt. Noch viel reicher an Radium sind vielfach vulkanische Ablagerungen. Ackererde von Capri zeigt etwa $\frac{1}{1000}$ der Aktivität der Pechblende, und der »Fango«, der sich aus heißen Quellen in Battaglia abgelagert, kommt ihm gleich. Aus beiden konnte Giesel⁷⁾ Radium im Gemenge mit Barium gewinnen.

Die Quellwasser führen die in den Poren des Bodens angesammelte Emanation mit sich und geben sie dem Henry-Dalton'schen Gesetze gemäß an die Luft ab⁸⁾. Noch reichlicher nimmt Erd-

¹⁾ Physik. Ztschr. **2**, 590 [1901].

²⁾ Rutherford und Allan, Phil. Mag. [6] **24**, 704 [1902].

³⁾ Bumstead, Amer. Journ. Science [4] **18**, 1 [1904].

⁴⁾ Physik. Ztschr. **3**, 574 [1902]; **4**, 522 [1903].

⁵⁾ Nasini, Anderlini und Levi, Accad. dei Lincei [5] **14**, II, 70 [1905].

⁶⁾ Elster und Geitel, Physik. Ztschr. **5**, 11, 321 [1904].

⁷⁾ Diese Berichte **38**, 132 [1904].

⁸⁾ Sella und Pochettino, Accad. dei Lincei [5] **11**, I, 527 [1902]; J. Thomson, Phil. Mag. [6] **4**, 352 [1902]; Adams, Phil. Mag. [6] **6**, 563 [1903]; Himstedt, Physik. Ztschr. **4**, 482 [1903]; **5**, 210 [1904]; Ann. d. Phys. [4] **13**, 573 [1904].

öl die Emanation auf¹⁾). Viele Quellwasser, die aus großen Tiefen kommen, sind besonders reich an Radium-Emanation. Deshalb sind viele Thermal- und andere Heilquellen sehr gründlich hinsichtlich ihres Gehaltes an radioaktiven Stoffen untersucht worden. Quellen des Deutschen Reiches wurden besonders von Himstedt, Henrich, Engler und Sieveking, H. W. Schmidt, Hinrichsen und Sahlbom untersucht, österreichische von Mache, englische von Allan und von Strutt, französische von P. Curie und Laborde, spanische von Muñoz de Castillo, italienische von Nasini, Blanc und Engler, russische von Sokolow, amerikanische von Boltwood. Die meisten dieser Quellen führen nur Radium-Emanation mit sich, einige gelöstes Radium, wenige daneben Thorium-Emanation. Für diese Quelluntersuchungen sind mehrere Apparate beschrieben worden, die eine sichere und schnelle Bestimmung der Aktivität ermöglichen. Der verbreitetste von ihnen ist das »Fontaktoskop« von Engler und Sieveking²⁾).

Wenn Thermalquellen Radium gelöst enthalten, so setzt sich dieses häufig mit dem Schlamm oder Sinter in der Nähe des Ursprungs ab. Wie der »Fango«, von dem schon oben die Rede war, so sind auch die Sedimente der Nauheimer, Kreuznacher und Baden-Badener Quellen recht reich an Radium. Daneben enthalten diese Sinter bisweilen auch, wie oben erwähnt, Radiothorium.

Obwohl sicherlich die Radioaktivität vieler Heilquellen für deren therapeutischen Wert bedeutungslos ist, so scheint doch in gewissen Fällen ihre spezifische Wirkung auf dem Emanationsgehalt zu beruhen. Ist es doch bekannt, daß die Gasteiner Thermen fast frei von gelösten Salzen sind. An Emanationsgehalt aber übertreffen sie fast alle bekannten Quellwasser. Nun hat Loewenthal³⁾ experimentell festgestellt, daß eine wäßrige Lösung von Radium-Emanation, die bei gesunden Menschen keine merkbare Störung bewirkt, bei Kranken, die an chronischem Gelenkrheumatismus leiden, alle diejenigen Erscheinungen hervorruft, die als »Bäderreaktionen« bekannt sind.

Auch im Seewasser ist Radium enthalten⁴⁾). Nach Messungen, die neuerdings Joly⁵⁾ angestellt hat, beträgt die in 1 cbm Meerwasser enthaltene Radiummenge im Mittel $1.7 \cdot 10^{-5}$ mg.

¹⁾ Himstedt, a. a. O.; Burton, Physik. Ztschr. 5, 511 [1904].

²⁾ Physik. Ztschr. 6, 700 [1905].

³⁾ Physik. Ztschr. 7, 563 [1906].

⁴⁾ Strutt, Proc. Roy. Soc. London 78, A, 151 [1906]; Eve, Phil. Mag. [6] 13, 248 [1907].

⁵⁾ Phil. Mag. [6] 15, 385 [1908].

X. Der Wärmehaushalt der Erde.

Die Erkenntnis von der allgemeinen Verbreitung des Radiums auf der Erde ist geeignet, einen Widerspruch aufzuklären, der bisher in den Ansichten der Geologen und Physiker über das Alter der Erdrinde bestand. Während erstere genötigt sind, das Alter der Erdrinde auf 1000 Millionen Jahre zu schätzen, hat Lord Kelvin aus der Erstarrungstemperatur, der geothermischen Tiefenstufe und der Wärmekapazität der Erdoberfläche einen Maximalwert von 40 Millionen Jahren berechnet. Wie wir oben sahen, kommen die von Boltwood berechneten Werte für das Alter der Uranerze den Schätzungen der Geologen nahe. Wenn diese zutreffen, so muß also auf der Erde eine fortdauernde Wärmezufuhr stattfinden, die bei den Berechnungen der Physiker unberücksichtigt geblieben ist. Eine solche Wärmequelle bildet das Radium. Rutherford¹⁾ hat berechnet, wie viel Radium in 1 cbcm Erde enthalten sein müßte, um die Temperatur der Erde konstant zu halten. Dazu wäre eine Wärmeentwicklung von $2.2 \cdot 10^{-7}$ cal. jährlich erforderlich. Da nun 1 g Radium im Jahre mehr als 876000 Cal. entwickelt, so würde ein Gehalt von $2.6 \cdot 10^{-13}$ g Radium in 1 cbcm Erde ausreichen, um deren Wärmeausstrahlung zu ersetzen. Strutt²⁾ hat nun durch zahlreiche Untersuchungen der verbreitetsten Gesteine ermittelt, daß in 1 cbcm der Erdkruste $8 \cdot 10^{-12}$ g Radium im Mittel enthalten sein dürften, also etwa 30-mal so viel als Rutherford berechnete. Nimmt man hinzu, daß die Wärmeentwicklung durch Uran, Thorium, Ionium und Aktinium außer Ansatz geblieben sind, so sieht man, daß im Erdinnern unmöglich so viele radioaktive Stoffe sich im Zerfall befinden können, als an der Rinde. Denn sonst müßte die Temperatur der Erde steigen, anstatt zu sinken. Vielleicht erklärt sich dieser Widerspruch dadurch, daß unter dem ungeheuren Druck und der hohen Temperatur des Erdinnern die radioaktiven Prozesse langsamer oder sogar in umgekehrter Richtung verlaufen³⁾.

XI. Der Energieinhalt der Atome.

Der radioaktive Zerfall der Aktinium-Emanation erfolgt $5 \cdot 10^{16}$ -mal schneller als derjenige des Urans. Es liegt daher nahe, sich vorzustellen, daß es radioaktive Elemente gibt, deren Lebensdauer die des Urans noch um das Millionenfache übertrifft. Die Strahlung solcher Stoffe würde sich dem Nachweis durch die elektrometrischen Meßmetho-

¹⁾ Die Wissenschaft, Heft 21, 213 [1907].

²⁾ Proc. Roy. Soc. 77, A 472 [1906].

³⁾ Lewin, Ztschr. für Elektrochem. 27, 390 [1907].

den entziehen. Campbell ¹⁾ und andere glaubten, an vielen Metallen, besonders am Blei, eine geringe Radioaktivität beobachtet zu haben, die allerdings hart an der Grenze des Nachweisbaren liegt. In Gemeinschaft mit Wood ²⁾ teilte er neuerdings mit, daß Kaliumsalze eine verhältnismäßig beträchtliche β -Strahlung zeigen. Indessen ist es bei der großen Verbreitung des Radiums sehr schwer, mit Sicherheit jede Spur von diesem oder seinen Zerfallsprodukten auszuschließen. Elster und Geitel ³⁾ fanden in käuflichen Bleiverbindungen stets eine geringe Aktivität. Es gelang ihnen aber, daraus Polonium abzuscheiden. Sie vermuteten daher, daß Radium D, das dem Blei ja leicht folgt, die regelmäßige Aktivität des Metalles bedinge. Diese Annahme fand sich bestätigt, als sie feststellten, daß Bleiprobe von hohem Alter, in denen ursprünglich etwa vorhandenes Radium D zerfallen sein mußte, inaktiv sind.

H. Greinacher ⁴⁾ hat die Frage geprüft, ob man calorimetrisch eine Aktivität gewöhnlicher Substanzen feststellen könne. Das Resultat war aber negativ.

Experimentell ist also keineswegs erwiesen, daß die Radioaktivität eine allgemeine Eigenschaft der Materie ist. Wohl aber wird man sich aus theoretischen Gründen der Vorstellung nicht entziehen können, daß zwischen den radioaktiven Elementen und den anderen ein prinzipieller Unterschied hinsichtlich ihres Energieinhaltes nicht angenommen werden kann. 1 g Radium, das sich mit seinen schnell zerfallenden Metaboliten im radioaktiven Gleichgewicht befindet, entwickelt, wie wir sahen, in einer Stunde ca. 120 cal. Nehmen wir die mittlere Lebensdauer des Radiumatoms zu 3700 Jahren an, so werden also bei der Umwandlung von 1 g Radium bis zum Radium D $3700 \cdot 8760 \cdot 120 \text{ cal.} = 389 \cdot 10^4 \text{ Cal.}$ frei, demnach ebensoviel, wie 500 kg Steinkohle bei der Verbrennung liefern. Die Energiemenge ist aber offenbar nur ein kleiner Bruchteil von derjenigen, die in den Restatomen latent bleibt.

Wir kennen kein Mittel, den radioaktiven Atomzerfall zu beschleunigen. Besäßen wir ein solches, so würden wir mit seiner Hilfe vermutlich imstande sein, auch andere Elemente umzuwandeln. Dabei hätten wir die Bildung von Grundstoffen mit niedrigerem Atomgewicht unter gleichzeitigem Gewinn ungeheurer Energiemengen zu erwarten. Würde die Umwandlung plötzlich erfolgen, so müßte sie

¹⁾ Phil. Mag. [6] 9, 531 [1905]; 11, 206 [1906]; Proc. Cambr. Phil. Soc. 13, 282 [1906].

²⁾ Proc. Cambr. Phil. Soc. 14, 15, 211 [1907].

³⁾ Physik. Ztschr. 7, 841 [1906]; 8, 273, 776 [1907].

⁴⁾ Ann. d. Phys. [4] 24, 79 [1907].

von den furchtbarsten Explosionswirkungen begleitet sein; wäre sie hingegen beliebig regulierbar, so würde 1 kg Pechblende sicher, vielleicht auch die gleiche Menge Blei, genügen, um einen großen Schnelldampfer über den Atlantischen Ozean zu befördern.

Es war der Traum der Alchemisten, unedle Metalle in edle umzuwandeln. Die radioaktiven Stoffe lehren uns, daß, wenn dieser Prozeß gelänge, hierbei entweder so viel Energie gewonnen würde, daß im Vergleich dazu der Wert des erzielten Edelmetalles geringfügig wäre, oder daß umgekehrt der Energieaufwand die Veredelung des Metalles praktisch wertlos machte.

Wir brauchen uns indessen nicht ins Reich der Phantasie zu begeben, um auf dem Gebiete der Radioaktivität wichtige und lohnende Aufgaben zu finden, die ihrer Lösung noch harren. Die chemische Forschung hat hier mit der physikalischen nicht gleichen Schritt gehalten. Das ist deswegen begreiflich, weil die chemische Untersuchungen einen größeren Materialaufwand erfordern und deswegen sehr kostspielig sind. Auch auf diesem Gebiete würde sich sicherlich das alte Wort des Martial bewähren:

Sint Maecenates, non deerunt, Flacce, Marones.

265. Stefan Minovici:
Beiträge zur Kenntnis des Cholesterins.

[Aus dem Laboratorium für Analytische Chemie der Bukarester Universität.]

(Eingegangen am 27. April 1908.)

Im Verlaufe meiner Studien zur Feststellung des Ursprunges des Cholesterins im tierischen Organismus — ihm käme nach meiner Ansicht die Rolle zu, die Nervensubstanz zu erhalten und zu fixieren —, habe ich beim Behandeln des Cholesterins mit Schwefel- und Salzsäure einige noch unbekannte, wohl charakterisierte Körper erhalten.

Im Folgenden möchte ich nun über diese Verbindungen berichten.

Zwenger¹⁾ hat seinerzeit die Einwirkung von Schwefelsäure auf Cholesterin studiert und dabei Kohlenwasserstoffe erhalten, die er Cholesterilene benennt. Dabei verfährt er so, daß er Cholesterin mit Schwefelsäure (1 Vol. H₂SO₄, 1/2 Vol. H₂O) bei 60—70° behandelt und dann noch soviel Schwefelsäure hinzufügt, bis das Cholesterin weich und dunkelrot geworden ist.

¹⁾ Beilsteins Handbuch, III. Aufl., II. Bd., S. 176; Ann. d. Chem. **66**, 5 und **69**, 347.