

WYDZIAŁY POLITECHNICZNE KRAKÓW

BIBLIOTEKA GŁÓWNA

L. inw. ~~369~~ 405

~~369~~

Reisteswelt

M. Centnerszwer

Das Radium und
die Radioaktivität

Zweite Auflage



B. G. Teubner · Leipzig · Berlin

Die Sammlung „Aus Natur und Geisteswelt“

nunmehr über 800 Bändchen umfassend, bietet wirkliche „Einführungen“ in die Hauptwissensgebiete für den Unterricht oder Selbstunterricht des Laien nach den heutigen methodischen Anforderungen, seit ihrem Entstehen (1898) den Gedanken dienend, auf denen die heute so mächtig entwickelte Volkshochschulbewegung beruht. Sie will jedem geistig Mündigen die Möglichkeit schaffen, sich ohne besondere Vorkenntnisse an sicherster Quelle, wie sie die Darstellung durch berufene Vertreter der Wissenschaft bietet, über jedes Gebiet der Wissenschaft, Kunst und Technik zu unterrichten. Sie will ihn dabei zugleich unmittelbar im Beruf fördern, den Gesichtskreis erweiternd, die Einsicht in die Bedingungen der Berufsarbeit vertiefend. Diesem Bedürfnis können Skizzen im Charakter von „Auszügen“ aus großen Lehrbüchern nie entsprechen, denn solche setzen eine Vertrautheit mit dem Stoffe schon voraus.

Die Sammlung bietet aber auch dem Fachmann eine rasche zuverlässige Übersicht über die sich heute von Tag zu Tag weitenden Gebiete des geistigen Lebens in weitestem Umfang und vermag so vor allem auch dem immer stärker werdenden Bedürfnis des Forschers zu dienen, sich auf den Nachbargebieten auf dem laufenden zu erhalten.

In den Dienst dieser Aufgabe haben sich darum auch in dankenswerter Weise von Anfang an die besten Namen gestellt, gern die Gelegenheit benutzend, sich an weitestehende Kreise zu wenden.

So konnte der Sammlung auch der Erfolg nicht fehlen. Mehr als die Hälfte der Bändchen liegen, bei jeder Auflage durchaus neu bearbeitet, bereits in 2. bis 8. Auflage vor, insgesamt hat die Sammlung bis jetzt eine Verbreitung von fast 5 Millionen Exemplaren gefunden.

Alles in allem sind die schmucken, gehaltvollen Bände besonders geeignet, die Freude am Buche zu wecken und daran zu gewöhnen, einen Beitrag, den man für Erfüllung körperlicher Bedürfnisse nicht anzusehen pflegt, auch für die Befriedigung geistiger anzuwenden.

Wenn eine Verteuerung der Sammlung infolge der außerordentlichen Steigerung der Herstellungskosten – sind doch die Löhne auf das Achtzehnfache, die Materialkosten auf das Fünfundzwanzig- bis Fünfunddreißigsfache (teilweise noch weit darüber) gestiegen – auch unvermeidbar gewesen ist, wie bei anderen „billigen“ Büchern, z. B. den Reclamheften, so ist der Preis doch entfernt nicht in dem gleichen Maße gestiegen wie bei anderen Bändchen „Aus Natur und Geisteswelt“.

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000295882

Leipzig, im

. Teubner

Bisher sind zur **Physik und Chemie** erschienen:

Physik: Einführung, Grundlagen und Geschichte.

Die Grundbegriffe der modernen Naturlehre. Einführung in die Physik. Von Hofrat Professor Dr. J. Ruetbach. 4. Aufl. Mit 71 Figuren. (Bd. 40.)

Experimentalphysik, Gleichgewicht und Bewegung. Von Geh. Reg.-Nat. Professor Dr. A. Vörslein. Mit 90 Abbildungen. (Bd. 371.)

Einführung in die Relativitätstheorie. Von Dr. W. Bischoff. 9., verb. Auflage. Mit 18 Figuren. (Bd. 618.)

Das Wesen der Materie. Moleküle und Atome. Von Prof. Dr. G. Mie. 4. Aufl. Mit 25 Figuren. (Bd. 58.)

Naturwissenschaften, Mathematik und Medizin im klassischen Altertum. Von Prof. Dr. Joh. E. Heiberg. 2. Aufl. Mit 2 Figuren. (Bd. 370.)

*Die Naturwissenschaften im Mittelalter und im Zeitalter des Wiedererwachens der Wissenschaften. Von Direktor Dr. J. Dannemann. (Bd. 695.)

*Die Naturwissenschaften in der Neuzeit. Von Dir. Dr. J. Dannemann. (Bd. 696.)

Große Physiker. Von Prof. Dr. J. A. Schulze. 2. Aufl. Mit 6 Bildnissen. (Bd. 324.)

Werdegang der modernen Physik. Von Oberlehrer Dr. H. Keller. Mit 19 Figuren. (Bd. 343.)

Physikalisches Wörterbuch. Von Prof. Dr. G. Verndt. (Leubners kl. Sachwörterbücher.) Bd. 5.) Geb. M. 36.—. (Preisänderung vorbehalten.)

Mechanik.

Mechanik. Von Prof. Dr. G. Hamel. 3 Bände. (Bd. 684/86.) I. Grundbegriffe der Mechanik. Mit 38 Fig. im Text. *II. Mechanik der festen Körper. *III. Mechanik der flüssigen und luftförmigen Körper.

Aufgaben aus der techn. Mechanik. Von Prof. N. Schmitt. 2 Bde. 2. Aufl. (Bd. 558/559.)

I. Statik und Festigkeitslehre. 150 Aufgaben und Lösungen. Mit zahlreichen Fig. im Text.

II. Dynamik und Hydraulik. 140 Aufgaben und Lösungen. Mit zahlr. Figuren im Text.

Statik. Von Baugewerkschuldirektor Gewerbeschulrat Reg.-Baumeister A. Schaub. 2. Aufl. Mit 12 Figuren im Text. (Bd. 828.)

Festigkeitslehre. Von Baugewerkschuldirektor Gewerbeschulrat Reg.-Baumeister A. Schaub. 2. Aufl. Mit 119 Figuren im Text. (Bd. 829.)

Optik, angewandte Optik und Strahlungserscheinungen.

Das Licht und die Farben. Einführung in die Optik. Von Professor Dr. L. Graeh. 5. Auflage. Mit zahlreichen Abbildungen. (Bd. 17.)

Sichtbare und unsichtbare Strahlen. Von Geh. Regierungs-Rat Professor Dr. A. Vörslein. 3., neubearb. Aufl. von Prof. Dr. E. Regenetz. Mit 71 Abbildungen. (Bd. 64.)

Die optischen Instrumente. (Lupe, Mikroskop, Fernrohr, photographisches Objectiv und ihnen verwandte Instrumente.) Von Prof. Dr. M. v. Kohn. 3., vermehrte u. verb. Auflage. Mit 69 Abbildungen im Text. (Bd. 88.)

Das Auge und die Brille. Von Prof. Dr. M. v. Kohn. 2. Aufl. Mit 84 Abbildungen und 1 Lichtdrucktafel. (Bd. 372.)

Das Mikroskop, seine wissenschaftlichen Grundlagen und seine Anwendung. Von Dr. A. Ehringhaus. Mit 75 Abbildungen im Text. (Bd. 676.)

Spektroskopie. Von Dr. L. Grebe. 2. Aufl. Mit 69 Figuren im Text und auf 2 Doppeltafeln. (Bd. 284.)

Die Kinetographie, ihre Grundlagen und ihre Anwendungen. Von Dr. H. Lehmann. 2. Auflage von Dr. W. Merré. Mit 68 zum Teil neuen Abbild. (Bd. 356.)

Die Photographie, ihre wissenschaftlichen Grundlagen u. ihre Anwendung. V. Dipl.-Ing. Dr. O. Prelinger. 2., verb. Aufl. Mit 64 Abbildungen. I. T. (Bd. 414.)

Die künstlerische Photographie. Ihre Entwicklung, ihre Probleme, ihre Bedeutung. Von Studentent Dr. W. Warstat. 2., verb. Aufl. Mit Bilderanhang. (Bd. 410.)

Die Röntgenstrahlen und ihre Anwendung. Von Dr. med. G. Buchh. Mit 65 Abbildungen im Text und auf 4 Tafeln. (Bd. 556.)

Wärmelehre.

Die Lehre von der Wärme. Gemeinverständlich dargestellt von Geh. Reg.-Kat Prof. Dr. A. Bönnlein. 2., durchgesehene Auflage hrsg. von Prof. Dr. A. Wigand. Mit 33 Abbildungen im Text. (Bd. 172.)

Einführung in die technische Wärmelehre (Thermodynamik). Von Geh. Bergrat Prof. A. Vater. 2. Aufl. von Dr. J. Schmidt. Mit 40 Abb. im Text. (Bd. 510.)

Praktische Thermodynamik. Aufgaben und Beispiele zur technischen Wärmelehre. Von Geh. Bergrat Prof. A. Vater. Mit 40 Abb. im Text und 3 Tafeln. (Bd. 590.)

Die Kälte, ihr Wesen, ihre Erzeugung und Verwertung. Von Dr. G. Alt. Mit 45 Abbildungen. (Bd. 311.)

Einführung in die Chemie.

Einführung in die allgemeine Chemie. Von Studentat Dr. V. Davink. 2. Aufl. Mit 24 Figuren. (Bd. 582.)

Einführung in die organische Chemie. (Natürliche und künstliche Pflanzen- und Tierstoffe.) Von Studentat Dr. V. Davink. 2. Aufl. Mit 9 Abb. im Text. (Bd. 187.)

Einführung in die anorganische Chemie. Von Studentat Dr. V. Davink. Mit 31 Abbildungen. (Bd. 598.)

Einführung in die analytische Chemie. Von Dr. J. Küssberg. 2 Bde. I. Theorie und Gang der Analyse. Mit 15 Figuren im Text. II. Die Reaktionen. Mit 4 Figuren im Text. (Bd. 524/25.)

Einführung in die Biochemie in elementarer Darstellung. Von Prof. Dr. W. Löb. 2. durchgeseh. u. verm. Aufl. v. Prof. Dr. H. Friedenthal. M. 12 Fig. i. L. (Bd. 352.)

Elektrochemie und ihre Anwendungen. Von Prof. Dr. K. Arndt. 2. Auflage. Mit 37 Abbildungen im Text. (Bd. 234.)

Das Radium und die Radioaktivität. Von Prof. Dr. M. Centnersywer. 2. Aufl. Mit 33 Figuren im Text. (Bd. 405.)

Photochemie. Von Prof. Dr. G. Kummell. 2. Aufl. Mit 23 Abbildungen im Text und auf 1 Tafel. (Bd. 227.)

Luft, Wasser, Licht und Wärme. Einführung in die Experimentalchemie. Von Geh. Reg.-Kat Prof. Dr. K. Vleschmann. 5. Aufl. Mit 92 Abbildungen. (Bd. 5.)

Das Wasser. Von Geh. Regierungsrat Dr. D. Anselmino. Mit 44 Abbild. (Bd. 291.)

*Chemisches Wörterbuch. Von Privatdozent Dr. H. Kemh. (Leubners kl. Fachwörterbüch.)

Chemische Technologie.

Die künstliche Verstellung von Naturstoffen. Von Prof. Dr. E. Käß. (Bd. 674.)

Der Luftstickstoff und seine Verwertung. Von Prof. Dr. K. Kaiser. 2. Aufl. Mit 19 Abbildungen. (Bd. 313.)

Agrilkulturchemie. Von Dr. B. Krißche. 2. verb. Aufl. Mit 21 Abbildungen. (Bd. 314.)

Die Sprengstoffe, ihre Chemie und Technologie. Von Geh. Reg.-Kat Professor Dr. K. Bieder mann. 2. Auflage. Mit 12 Figuren. (Bd. 286.)

Farben und Farbstoffe. Ihre Erzeugung u. Verwendung. Von Dr. A. Jart. Mit 31 Abb. (Bd. 483.)

Bierbrauerei. Von Dr. A. Bau. Mit 47 Abb. (Bd. 393.)

Wörterbuch der Warenkunde. Von Dr. M. Vietzsch. (Leubners kleine Fachwörterbüch. Bd. 3.) Geb. M. 36.—. (Preisänderung vorbehalten.)

Naturlehre im Hause.

Physik in Küche u. Haus. Von Studentat H. Speittamp. 2. Aufl. Mit 54 Abb. (Bd. 478.)

Chemie in Küche und Haus. Von Dr. J. Klein. 4. Aufl. (Bd. 76.)

Desinfektion, Sterilisation, Konservierung. Von Regierungs- und Medizinalrat Dr. D. Solbrig. Mit 20 Abbildungen. (Bd. 401.)

Ernährung und Nahrungsmittel. Von Geh. Kat Prof. Dr. A. Junh. 3. Aufl. Mit 6 Abbildungen und 2 Tafeln. (Bd. 19.)

Die Bakterien im Haushalt der Natur und des Menschen. Von Prof. Dr. E. Gutzeit. 2. Aufl. Mit 13 Abbildungen. (Bd. 242.)

Beleuchtungswesen. Von Ing. Dr. H. Lux. Mit 54 Abb. im Text. (Bd. 493.)

Die mit * bezeichneten und weitere Bände befinden sich in Vorb.

Aus Natur und Geisteswelt
Sammlung wissenschaftlich-gemeinverständlicher Darstellungen

405. Band

Das Radium und die Radioaktivität

Von

Dr. M. Centnerszwer

ord. Professor an der Technischen Hochschule in Riga

Zweite Auflage

Mit 33 Figuren im Text



Anton Kanyo i. R.

d. 2. 5. 24.

Fr. 10.

Verlag von B. G. Teubner in Leipzig und Berlin 1921

W. 10/1



I 301554

BIBLIOTEKA POLITECHNICZNA
KRAKÓW

I 369

Schutzformel für die Vereinigten Staaten von Amerika:
Copyright 1920 by B. G. Teubner in Leipzig

Alle Rechte, einschließlich des Übersetzungsrechts, vorbehalten

Druck von B. G. Teubner, Dresden

BPK-B-99/2014

Akc. Nr.

3749149

Vorwort.

Die zweite Auflage dieses Werkchens, welche von der ersten Auflage durch den Zeitraum des Weltkriegs getrennt ist, enthält das Wesentliche der neuen Entdeckungen auf dem Gebiete der Radiologie, insbesondere bezüglich der Stellung der Radioelemente im periodischen System. Auch sind im Text einige Korrekturen vorgenommen worden. Für freundliche kritische Bemerkungen zu meiner Arbeit bin ich insbesondere den Herren Prof. Dr. S a j a n s (München), Prof. Dr. L a z a r u s (Berlin) und Ing. R. S w i n n e zu Dank verpflichtet.

Leipzig, September 1920.

Der Verfasser.

Inhalt.

	Seite		Seite
Einleitung	5	21. Weitere Schicksale der Radiumemanation	73
I. Die Entdeckung des Radiums. Seine Eigenschaften und Wirkungen.		22. Aktiver Niederschlag des Radiums von langer Lebensdauer.	76
1. Geschichte des Radiums	6	23. Das Polonium	77
2. Die Hypothese der Frau Curie	7	24. Die Lebensdauer des Radiums	79
3. Darstellung der Radiumsalze	11	25. Das Uran	81
4. Die Leuchtwirkungen des Radiums	16	26. Der Stammbaum des Radiums	84
5. Elektrische Wirkungen	19	27. Die Familie des Aktiniums	87
6. Radioaktive Messungen	24	28. Das Thorium	89
7. Die Wärmebildung	27	29. Die Thoriumemanation	92
8. Chemische Wirkungen	28	30. Die Umwandlungen der Thoriumemanation	94
9. Physiologische Wirkungen	31	31. Systematik der Radioelemente	97
10. Die induzierte Radioaktivität	36		
11. Die Emanation des Radiums	39	IV. Anwendungen der Radiologie.	
II. Die Natur der Radiumstrahlen.		32. Vorkommen radioaktiver Stoffe	102
12. Die Strahlung des Radiums	45	33. Die Rolle des Radiums im Haushalt der Natur	105
13. Die γ -Strahlen	49	34. Das Alter der Erde	107
14. Die β -Strahlen	51	35. Das Radium in der Heilkunde	108
15. Die β -Teilchen und das Gesetz der Erhaltung der Masse	55	36. Ansichten über die Transmutation der Elemente	113
16. Der Bau der Atome	57	Literatur	117
17. Die α -Strahlen	60	Verzeichnis der Abbildungen	117
18. Die Eigenschaften der α -Teilchen	63		
19. Die Größe der Atome	65		
III. Andere radioaktive Elemente.			
20. Das Umwandlungsgesetz	71		

Einleitung.

Kein Zweifel: unsere Nachkommen werden uns um die große Zeit beneiden, in der wir leben durften! Die Gründung einer Republik im Reiche der Mitte, die wunderbaren Erfolge der Heilkunde, die Eroberung der Luft durch den Aeroplan, das alles sind Ereignisse, welche trotz ihrer scheinbaren Verschiedenheit das eine gemeinsam haben, daß sie noch vor einem Jahrzehnt von jedermann für unmöglich gehalten wurden. In der Tat läßt sich in der Geschichte der Menschheit keine Epoche finden, welche an Zahl und Bedeutung wissenschaftlicher Großtaten mit der gegenwärtigen sich messen könnte. Wer sich von diesen gewaltigen Fortschritten überzeugen will, braucht nur die Bändchen dieser Sammlung durchzublätern, um sie mit dem zu vergleichen, was die populär wissenschaftliche Literatur noch vor einem Jahrzehnt bot.

Unter den wissenschaftlichen Umwälzungen des zwanzigsten Jahrhunderts nehmen die mit dem Namen Radium verknüpften Entdeckungen unstreitig den ersten Platz ein. Es läßt sich heute kaum mehr glauben, daß man noch vor zwanzig Jahren vom Radium gar nichts wußte, und nicht nur vom Radium, sondern auch von drei Duzenden anderer Elemente, welche durch ihre gewaltigen Wirkungen sich der Beobachtung geradezu von selbst aufdrängen. Und doch können wir uns noch lebhaft der Verwunderung erinnern, welche die ersten Mitteilungen von Becquerel über das Uran im Jahre 1896 und vom Ehepaar Curie über das Polonium und das Radium im Jahre 1898 hervorgerufen haben. Seitdem ist mit einer in der Geschichte der Forschung beispiellosen Geschwindigkeit die Kenntnis dieser Erscheinungen fortgeschritten, und in einer kurzen Spanne der Zeit ist eines der größten Naturrätsel seiner Lösung entgegengeführt worden. Noch mehr: durch ein glückliches Zusammentreffen äußerer Umstände fielen die Entdeckungen der radioaktiven Erscheinungen in dieselbe Periode, in welcher die elektrischen Entladungen in Gasen besonders sorgfältig studiert wurden. Die umfassende Theorie der Elektronen, welche aus diesen Untersuchungen entsprossen ist, gab den genialen Erforschern der Radioaktivität den Schlüssel zu dieser verborgenen

Schatzkammer des Wissens. Nur dadurch ist es möglich geworden, den Zusammenhang der Erscheinungen des Radiums mit anderen Gebieten der Physik zu ergründen. War aber einmal der Schleier von diesem Naturwunder gelüftet, so verbreitete sich ein neues Licht über die ältesten und tiefsten Probleme der Naturforschung: das Problem der atomistischen Struktur der Materie, die Frage nach dem Wesen der Elektrizität, nach dem Ursprung der Masse und dem inneren Aufbau der Atome. Alle diese undurchdringlichen Welträtsel sind auf Grund der neugewonnenen Anschauungen einer exakten, mathematischen Behandlung unterworfen worden. Eine übersichtliche Darlegung dieser interessanten Entwicklung soll den Inhalt der folgenden Kapitel bilden.

I. Die Entdeckung des Radiums. Seine Eigenschaften und Wirkungen.

1. Geschichte des Radiums.

Es läßt sich nicht leugnen, daß wir unsere größten Entdeckungen dem Zufall verdanken. Auch die Auffindung des Radiums war ein Zufall. Aber es war nicht der blinde Zufall eines Glückspielers, sondern eher ein Preis, welcher dem ehrlichen Arbeiter auf dem Felde des Wissens, als Belohnung seiner Bemühungen, gebührte. Viele erinnern sich noch der Ekstase, welche im Jahre 1895 durch Röntgens Entdeckung der X-Strahlen hervorgerufen war. Das sind Strahlen eigentümlicher Art, welche in luftleeren Röhren unter dem Einfluß von Wechselströmen entstehen. Bekanntlich zeichnen sich diese Strahlen durch die Eigenschaft aus, daß sie durch undurchsichtige Gegenstände, wie Leder, Holz, Muskelgewebe, durchzudringen vermögen.

Damals untersuchte man auch verschiedene andere Lichtquellen auf ihr Vermögen, solches Licht auszusenden, welches, wie die Röntgenstrahlen, die Fähigkeit hätte, un durch sichtige Gegenstände zu durchdringen. Der namhafte französische Physiker Henri Becquerel untersuchte von diesem Standpunkte aus Salze des Urans, eines Elements, welches zur Fabrikation von Mineralfarben, „Uran glas“ und anderen Produkten eine ausgedehnte Verwendung in der Technik findet. Die Uransalze zeichnen sich durch die Fähigkeit aus, nach vorhergegangener Bestrahlung ihr eigenes Licht auszusenden: sie „fluoreszieren“. Das war schon lange bekannt und ist auch häufig genug untersucht worden. Neu war hingegen die Beobachtung, daß die vom Uran ausgesandten



Fig. 1 Frau Marie Curie-Skłodowska.

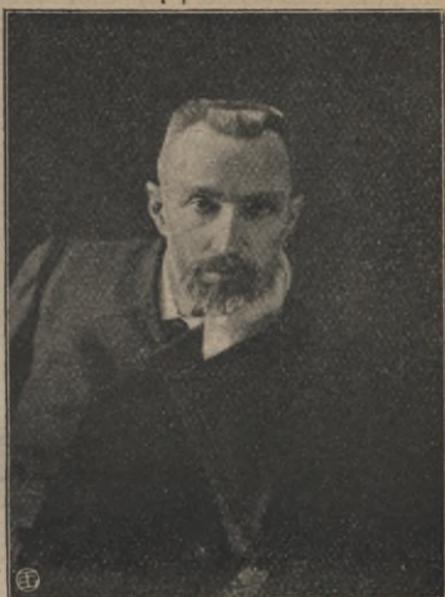


Fig. 2 Pierre Curie.

Strahlen, ähnlich wie die Röntgenstrahlen, auch undurchsichtige Gegenstände zu durchdringen vermögen. Was aber geradezu märchenhaft erschien, war die Feststellung der Tatsache, daß die Uransalze auch dann noch leuchten, wenn sie längere Zeit im Dunkeln gewesen sind, daß sie die Fähigkeit haben, andauernd auch ohne vorhergehende Belichtung ihre eigenen Strahlen auszusenden.

Das Licht ist eine Energieart. Als solche kann es weder völlig vernichtet werden noch aus nichts entstehen. Hier hatte man aber in den Uransalzen eine — dem Anscheine nach — unerschöpfliche Lichtquelle gefunden. Diese Entdeckung war nicht nur für die Praxis, sondern noch mehr für die Wissenschaft von einer so großen Tragweite, daß sie weiterer und genauerer Untersuchungen wert war. Das Verdienst, diese Untersuchungen in ausgezeichnete Weise durchgeführt zu haben, gebührt dem Ehepaar Curie.

2. Hypothese der Frau Curie.

Pierre Curie war Professor der Physik in der Sorbonne, bekannt durch seine Untersuchung der magnetischen Eigenschaften der Stoffe. Frau Curie, geb. Skłodowska, ist eine Polin. Sie studierte in Paris Chemie und arbeitete besonders unter der Leitung von Le Chatelier

8 1. Die Entdeckung des Radiums. Seine Eigenschaften und Wirkungen
über die Eigenschaften des Stahls. Der Umstand, daß in diesem berühmten Forscherpaar gerade Physik und Chemie, die beiden Wissensgebiete, denen in den letzten Jahrzehnten die größten Erfolge beschieden waren, sich vereinigten, mag auf das Wirken und die außerordentlichen Resultate dieser beiden Forscher nicht ohne Einfluß geblieben sein.

Von besonderem Interesse sind die Hypothesen, die Frau Curie ihren experimentellen Untersuchungen zugrunde legte. Sie setzte voraus, daß die geheimnisvolle Eigenschaft der Uransalze, Licht in unbeschränkter Menge auszustrahlen — eine Eigenschaft, welche in der Folge den jetzt gebräuchlichen Namen Radioaktivität erhalten hat —, von der Gegenwart eines besonderen, bisher unbekanntes Elementes herrührt. Wie bekannt, hat sich diese Annahme glänzend bestätigt. Die Bemühungen der Curies haben zunächst zwei Elemente zutage gefördert. Das eine von ihnen hat von der Entdeckerin — zu Ehren ihrer Heimat — den Namen Polonium erhalten. Leider ist es bisher noch nicht gelungen, dieses Element in größeren Mengen zu erhalten. Erfolgreicher waren die Versuche zur Auffindung des zweiten Elements, welches die Bezeichnung Radium (das „Strahlende“) erhielt. Radium besitzt alle Kennzeichen eines „wahren“ chemischen Grundstoffs und nimmt heute einen wohlberechtigten Platz in der periodischen Tabelle der Elemente von Lothar Meyer und Dmitry Mendelejew ein.¹⁾ Diesen zwei zuerst erkannten radioaktiven Elementen hat sich dann eine ganze Schar von Verwandten angeschlossen. Das alles zeigt, wie fruchtbar die Annahme der Curies gewesen ist.

Und heute fällt uns schon schwer, die Bedeutung dieser Tat richtig zu würdigen. So selbstverständlich ist es für uns heute, daß die Radioaktivität eine Eigenschaft neuer Elemente sein muß. Zu jener Zeit aber, als man von diesen Elementen noch gar nichts wußte, war die Voraussetzung, unter welcher Herr und Frau Curie an die Arbeit gingen, eine bloße Hypothese, eine Annahme, die sich bestätigen konnte, aber nicht notwendig zu bestätigen brauchte. Es gehörte also außer der Kühnheit des Gedankens noch ein fester Glaube an seine Wahrheit, um die ganz außerordentlichen Schwierigkeiten zu überwinden, welche einer Bestätigung der Hypothese im Wege lagen. Die Hauptschwierigkeit lag damals und liegt auch heute noch in der

1) Vgl. Tabelle S. 99.

ungeheueren Verdünnung, in welcher uns die Natur die radioaktive Materie in ihren Produkten geboten hat.

Bei der Lösung der kühnen Aufgabe ging Frau Curie systematisch zu Werke. Sie prüfte die verschiedensten in der Natur vorkommenden Mineralien daraufhin, ob sie — ähnlich wie Uran — die Fähigkeit besitzen, von sich aus durchdringliche Strahlen auszusenden. Der Nachweis dieser Strahlen vermöge ihrer Wirkung auf die photographische Platte war umständlich und wenig genau. Aber ein anderer Umstand erwies sich als äußerst günstig für derartige vergleichende Untersuchungen. Es erwies sich nämlich, daß die Uranstrahlen imstande sind, ein geladenes Elektroskop zu entladen. Wir werden im fünften Kapitel die elektrischen Wirkungen, welche allen radioaktiven Körpern eigen sind, genauer beschreiben und die Ursache der Entladung des Elektroskops darlegen. An dieser Stelle begnügen wir uns mit der allgemeinen Bemerkung, daß Frau Curie in ihren ersten Untersuchungen die Geschwindigkeit der Entladung eines Elektroskops als Maß der Energie dieser eigentümlichen Strahlung angesehen hat. Diese Anschauung erwies sich als richtig, und auf diese Weise ließ sich zum ersten Male die als Radioaktivität bezeichnete Eigenschaft zahlenmäßig ausdrücken. Ein Vergleich dieser Zahlen, welche für verschiedene Mineralien sorgfältig bestimmt wurden, führte sofort zu ganz überraschenden Ergebnissen.

Erstens ergab sich, daß die Strahlungsenergie uranhaltiger Mineralien stets ihrem Gehalt an Uran proportional ist. Daraus ließ sich die wichtige Folgerung ziehen, daß das Vermögen, Strahlen eigentümlicher Art auszusenden, welches Frau Curie mit dem kurzen Wort „Radioaktivität“ bezeichnet hatte, eine Eigenschaft der Atome des Urans sein muß. Denn es erwies sich als belanglos für die radioaktive Wirkung, in welcher chemischen Verbindung das Uran vorgelegen hat. War dem so, so sollte man denken, daß das Uranmetall selbst den höchsten Grad der Radioaktivität besitzen muß, weil es aus lauter radioaktiven Atomen aufgebaut ist. Um so überraschender kam daher die Erkenntnis, daß einige Mineralien vier- bis fünfmal stärker radioaktiv sind als das Element Uran in reiner Form. Das waren u. a. Chalkolit, eine natürliche Verbindung des phosphorsauren Kupfers mit phosphorsaurem Uranyl, und in besonders hohem Grade die Pechblende aus Joachimstal, natürliches Uranoxydulogen. Die Forscherin konnte sich diese sonder-



Fig. 3. Pechblende oder Uranpecherz aus Joachimstal.
Photographiert bei Tageslicht.

bare Tatsache nicht anders erklären als durch die Annahme, daß in diesen Mineralien neue, bis dahin unbekannte Elemente enthalten sein müssen, welche noch viel stärker radioaktiv sind als das elementare Uran. Sofort machte sie sich auf die Suche nach diesen neuen Grundstoffen und ließ sich durch die großen Hindernisse nicht abschrecken, welche

sich der Verwirklichung ihrer Ideen in den Weg stellten. Die größte Schwierigkeit bestand darin, daß auch die aktivsten Mineralien nur äußerst geringfügige Mengen dieser neuen Elemente enthalten.

Um eine annähernde Vorstellung von der Verdünnung der radioaktiven Materie zu erhalten, ist es gut, sich einige Zahlen zu merken. Eins der verbreitetsten Mineralien, welche zur Radiumgewinnung verwendet werden, ist die sog. Pechblende, welche in Joachimstal in Böhmen gewonnen und dortselbst zum größten Teil auf Uransalze verarbeitet wird. Fig. 3 gibt eine Photographie von diesem Mineral wieder, welche im Tageslicht aufgenommen wurde. Fig. 4 zeigt uns dasselbe Mineral, dessen Aufnahme im Dunkeln — vermittels der eigenen Strahlung der in ihm enthaltenen radioaktiven Stoffe — erhalten wurde. Nun enthalten 5 000 000 Teile dieses Erzes kaum einen Teil Radium! Es gehören also ganz besondere Mittel dazu, um diesen einen Teil unter 5 Millionen anderer zu finden und zu isolieren. Aus einer Tonne Joachimstaler Pechblende, welche ungefähr 50% Uran enthält, könnte man theoretisch kaum 0.17 g Radium gewinnen. Infolge der unvermeidlichen Verluste bei der Trennung stellt sich die wirkliche Ausbeute an Radium noch kleiner dar.

Da die Pechblende, welche zur Fabrikation der Uransalze verwendet wird, ziemlich teuer ist, so haben Herr und Frau Curie zur Darstellung von Radium nicht das Mineral selbst angewandt, sondern die

Abfälle, welche von den Fabriken der Uransalze als wertlos herausgeworfen wurden. Diese Abfälle erwiesen sich glücklicherweise als stärker radioaktiv als das ursprüngliche Erz. Trotzdem war ihre Verarbeitung zum Zweck der Reindarstellung des gesuchten neuen radioaktiven Elements sehr kompliziert und mühsam.

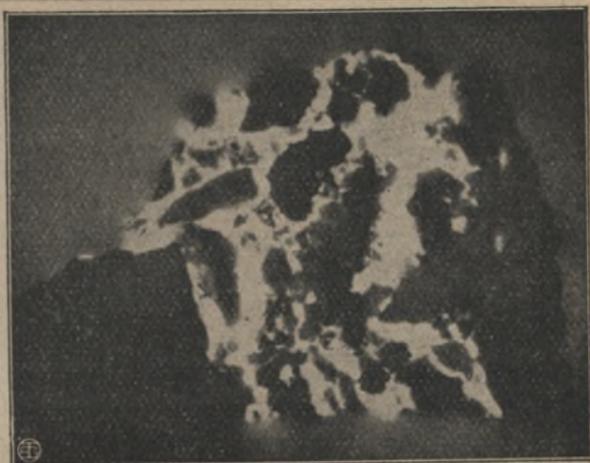


Fig. 4. Dasselbe Stück Pechblende photographiert im Dunkeln durch eigne Strahlen. (Nach Crookes.)

3. Darstellung der Radiumsalze.

Das Prinzip, von welchem sich das Forscherpaar auf der Suche nach den radioaktiven Elementen hat leiten lassen, bestand in der systematischen Trennung aller Bestandteile der Abfälle der Pechblende. Sie folgten hierbei dem üblichen Gang der chemischen Analyse. Die Pechblende besteht nur zu 75% aus UranO_2 , einer Verbindung von Uran mit Sauerstoff, der die chemische Formel U_3O_8 zukommt. Bei der fabrikmäßigen Verarbeitung dieses Minerals wird das wertvolle Uran zum größten Teil entfernt, und es bleiben Rückstände nach, welche bis zur Entdeckung des Radiums als wertlos fortgeschafft wurden. Die „Uranabfälle“ enthalten hauptsächlich unlösliche Silikate und Sulfate der Metalle Blei, Kalzium, Eisen und Aluminium. Außerdem findet man aber in ihnen fast alle bekannten Metalle. Das machte die Untersuchung besonders schwierig, weil ursprünglich alle diese Elemente nach den von der analytischen Chemie gearbeiteten Methoden voneinander getrennt werden mußten.

Um einen Fortschritt der vorgenommenen analytischen Operationen zu erkennen, haben Herr und Frau Curie ein neues analytisches Kennzeichen in ihre Untersuchung eingeführt. Sie versuchten, ob die erhaltenen Niederschläge selbst radioaktiv waren, und bestimmten den Grad ihrer Radioaktivität zahlenmäßig. Auch hier benutzten sie das Elektroskop, dessen Entladung in ebenso schneller wie sicherer Weise das Vorhandensein einer Radioaktivität verriet. Bald konnten sie sich

davon überzeugen, daß zwei von den aus dem Ausgangsmaterial ausgeschiedenen Grundstoffen viel stärker radioaktiv waren als das ursprüngliche Material selbst. Das waren Wismut und Barium. In ihnen mußten sich demnach — wenn die Voraussetzungen richtig waren — die gesuchten radioaktiven Stoffe konzentrieren. Den radioaktiven Begleiter des Wismuts nannten sie Polonium, den aktiven Begleiter des Bariums — Radium. Es verging kurze Zeit, da fand Debierne einen dritten radioaktiven Grundstoff in der Pechblende, als Begleiter des Eisens und der seltenen Erden. Dieses dritte Element erhielt die Bezeichnung Actinium.

Durch diesen Befund war der Weg der weiteren Trennung der gesuchten Substanzen vorgezeichnet. Die Aufmerksamkeit wurde zunächst auf den Begleiter des Bariums konzentriert, auf das Radium. Das Verfahren zur Isolierung dieser Substanz war äußerst mühsam. Man laugte zunächst die Abfälle der Pechblende mit kochender Sodalösung aus. Das Wertvolle war der in der Sodalösung unlösliche Rückstand. Er wurde nun weiter mit konzentrierter Salzsäure behandelt. Die erhaltene Lösung war schon ziemlich radioaktiv. Diese Lösung wurde dann mit Schwefelsäure versetzt. Es bildete sich nach diesem Zusatz ein weißer Niederschlag von Bariumsulfat. Der Niederschlag war 30 bis 60 mal stärker radioaktiv als Uranmetall. Es war klar, daß der gesuchte strahlende Grundstoff sich in dem Sulfatniederschlag konzentrierte. Daher wurde dieser Niederschlag einer weiteren Behandlung unterworfen. Er wurde wiederum mit kochender Sodalösung zersetzt und in Salzsäure gelöst. Aus der Lösung wurden zunächst die fremden Beimengungen entfernt, so daß eine reine Lösung der Chloride des Bariums und des Radiums erhalten wurde. Die beiden Salze sind aber in ihrem chemischen Verhalten einander so ähnlich, daß ihre weitere Trennung große Schwierigkeiten bot.

Das Verfahren, welches zur weiteren Abscheidung des Radiumchlorids in reiner Form angewandt wurde, bestand in mehrmaliger Kristallisation des Gemisches beider Chloride aus ihrer heiß gesättigten Lösung.¹⁾ Das Radiumchlorid ist etwas schwerer löslich als das Bariumchlorid. Läßt man eine gesättigte Lösung beider Chloride kristalli-

1) Giesel hat später gefunden, daß man durch fraktionierte Kristallisation der Bromide des Bariums und Radiums viel schneller zum Ziele kommt; denn schon nach sechs Kristallisationen erhält man ein ziemlich reines Radiumpräparat.

fieren, so erhält man Kristalle, welche fünfmal aktiver sind als die Mutterlauge. Diese Kristalle werden wiederum gelöst, und ein Teil von ihnen wiederum aus der gesättigten Lösung ausgeschieden. Diese fraktionierte oder partielle Kristallisation wird so lange fortgesetzt, bis man Präparate von konstanter Aktivität erhält. Natürlich vermindert sich hierbei fortschreitend die Gesamtmenge des Produkts, und die verschiedenen Fraktionen werden um so kleiner, je aktiver sie werden.

Zur Illustration dieses Verfahrens mögen folgende Zahlen dienen. Aus einer Tonne der Uranrückstände erhält man 10 Kilogramme des radioaktiven Bariumsulfatniederschlags. Aus dieser Menge erhielt Frau Curie schließlich ungefähr 0.1 Gramm eines Produktes, bei welchem das Spektrum des Bariums kaum mehr zu sehen war. Dieses Produkt war ungefähr eine Million mal stärker radioaktiv als Uran. Es bestand aus reinem Radiumsalz. Ich hatte Gelegenheit einer Versammlung beizuwohnen, in welcher Frau Curie in ihrer Heimatstadt über ihre ersten Arbeiten auf diesem Gebiete berichtete. Zu dem Referat hatten sich nicht allzu viele Personen zusammengefunden, denn das Interesse für diesen Gegenstand war damals noch lange nicht so verbreitet wie jetzt. Die Forscherin demonstrierte ein kleines Röhrchen, welches kaum einige Milligramme eines hochprozentigen Radiumpräparates enthielt. Es war das eines der ersten Präparate, welche von ihr dargestellt wurden. Sie sagte damals — es war vor ungefähr zwanzig Jahren —, ihr Streben wäre danach gerichtet, nur 10 Milligramme reines Radiumbromid zu erhalten, um das Atomgewicht des Radiums bestimmen zu können.

Inzwischen sind diese Wünsche von der Wirklichkeit weit überholt worden. Die Gesamtmenge der bis zum heutigen Tage isolierten Verbindungen des Radiums beträgt ungefähr 50 Gramm, und das Atomgewicht des Radiums ist heute ebenso genau bekannt wie das Atomgewicht des Barium oder des Kalziums oder anderer verbreiteter Elemente (vgl. Tabelle S. 99).

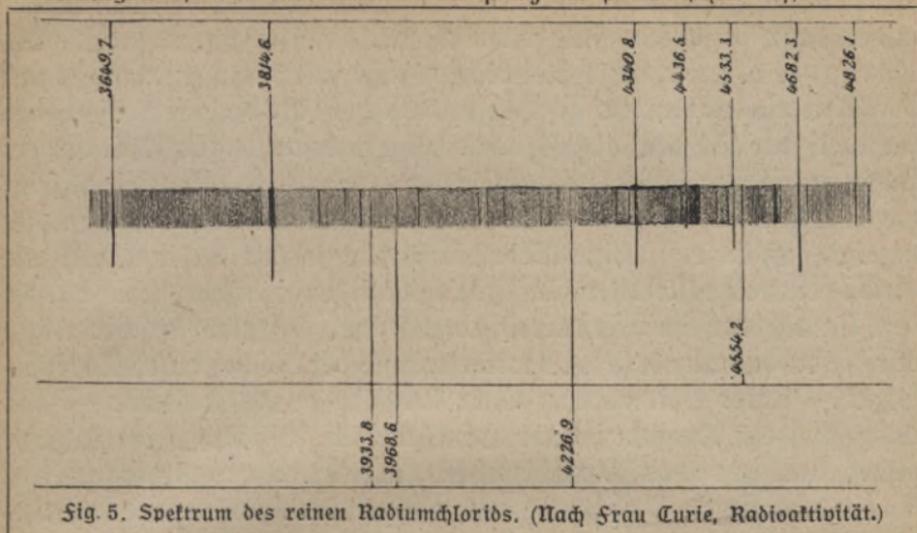
Immerhin gehört das Radium zu den teuersten Stoffen der Erde, und sein Preis ist in einem rapiden Steigen begriffen, weil die Nachfrage nach diesem eigenartigen Element und nach seinen Verbindungen rapid wächst, und zwar nicht nur von seiten der Physiker und Chemiker, sondern besonders seitens der Biologen und der Ärzte. Schon heute beträgt der Preis von einem Milligramm Radium annähernd

400 Frank, und die Sache wird dadurch nicht besser, daß die österreichische Regierung die Ausgangsmaterialien zur Radiumgewinnung mit Monopol belegt hat — sicher nicht zum Nutzen der Wissenschaft. Hierbei ist zu berücksichtigen, daß die wirklichen Herstellungskosten des Präparates nur einen geringen Bruchteil seines Preises ausmachen, seitdem diese Angelegenheit von Fabriken übernommen wurde und die Isolierung des Radiums nunmehr von letzteren im großen Maßstabe betrieben wird. Man kann leicht berechnen, daß die Gesamtmenge der bis jetzt rein dargestellten Radiumsalze, welche kaum einen Eßlöffel ausfüllen würde, heute einen Wert von etwa 5 Millionen Frank repräsentiert.

Die Bestimmung des Atomgewichts des Radiums durch Frau Curie entkleidete dieses Element aller hypothetischer Merkmale und sicherte ihm einen berechtigten Platz im periodischen System der Elemente. Diese Versuche, welche später durch die Untersuchungen von Thorpe und Hönigschmid vollauf bestätigt wurden, zeigten, daß das Atomgewicht des Radiums 226,0 beträgt. In bezug auf die Größe des Atomgewichts übertrifft somit das Radium fast alle anderen Elemente und wird selbst nur noch von zwei Elementen übertroffen, welche noch höhere Atomgewichte haben. Es sind das Thorium und Uran, welche sich gleichfalls durch Radioaktivität auszeichnen. Wir werden später sehen, daß der Zusammenhang zwischen Atomgewicht und Radioaktivität keineswegs auf einem Zufall beruht.

In bezug auf seinen chemischen Charakter weist das Radium die größte Ähnlichkeit mit einem wohlbekanntem Element auf: mit dem Barium. Es liefert, wie das Barium, mit Schwefelsäure einen unlöslichen Niederschlag von Radiumsulfat. Auch die Karbonate beider Metalle sind in Wasser unlöslich, werden dagegen leicht von verdünnter Salzsäure — unter Kohlensäureentwicklung — aufgelöst. Die Salze des Radiums sind mit den Bariumsalzen isomorph, d. h. sie geben Kristalle, welche denen der Bariumsalze ganz ähnlich sind, und kristallisieren mit den letzteren zusammen aus einer gemeinsamen Lösung. Dieser Umstand ist es auch, welcher die Trennung beider Elemente aus den Rückständen der Pechblende bedeutend erschwert.

Die Radiumsalze färben die nichtleuchtende Flamme des Bunsenbrenners schön karminrot. Das Funkenspektrum der Radiumsalze zeigt starke und scharfe Linien und einige Banden. Es gleicht im großen und ganzen den Spektren der Erdalkalimetalle (vgl. Fig. 5). Die



Spektralreaktion des Radiums ist sehr empfindlich und gestattet, in den radiumhaltigen Bariumsalzen noch die Beimengung von 0.01% Radium zu erkennen. Der Nachweis des Radiums durch die radioaktiven Eigenschaften ist jedoch bedeutend empfindlicher als die Spektralanalyse.

Alle diese Kennzeichen gestatten uns, das Radium zu derselben Familie zu rechnen, zu welcher die wohlbekannten Erdalkalimetalle gehören: Beryllium, Kalzium, Strontium und Barium. In dem periodischen System, in welchem die Elemente nach der Größe ihrer Atomgewichte geordnet sind, bilden die Erdalkalimetalle die zweite Gruppe (vgl. die Tabelle auf S. 99). Es war nun auffallend, daß gerade in dieser Gruppe ein freier Platz für ein Element vorhanden war, dessen Atomgewicht größer als 208 und kleiner als 232 sein mußte. Dieser Bedingung entsprach das Radium mit dem Atomgewicht 226 vollkommen. Es konnte somit am Ende der zweiten Vertikalreihe untergebracht werden. Radium ist das schwerste Erdalkalimetall.

Es ist nun weiter gelungen, auch das reine elementare Radium zu erhalten und diese Anschauung direkt experimentell zu bestätigen. Wir verdanken diesen wichtigen Nachweis Frau Curie und Herrn Debierne, welche das Radium durch den elektrischen Strom aus einer Lösung von Radiumchlorid abgeschieden haben. Das Radium zerlegt das Wasser, wie die anderen Erdkalimetalle; es kann also nicht direkt aus einer wässerigen Lösung abgeschieden werden. Daher

mußte man in diesem Fall einen kleinen Kunstgriff anwenden. Die Kathode, d. h. diejenige Elektrode, welche mit dem negativen Pol der Batterie verbunden ist und an welcher sich der metallische Bestandteil der Lösung abzuscheiden pflegt, bestand aus Quecksilber. Schon im Jahre 1904 hatte Marckwald — dem wir viele fundamentale Entdeckungen auf dem Gebiete der Radioaktivität verdanken — gezeigt, daß dieses flüssige Metall imstande ist, mit Radium, wie mit vielen bekannten Metallen, flüssige Legierungen zu bilden, welche unter dem Namen von Amalgamen bekannt sind. Derselbe Forscher zeigte auch schon damals, daß bei der Elektrolyse der Lösung eines Radiumsalzes — unter Verwendung einer Kathode aus Quecksilber — das ausgeschiedene Radium sich im Quecksilber auflöst und ein Amalgam bildet, welches das Wasser nicht zersetzt. So konnte von Frau Curie und Herrn Debierne aus diesem Amalgam das reine Radium erhalten werden. Das Amalgam wurde im luftleeren Raum stark erhitzt, wobei das Quecksilber fortgejagt wurde, während das Radium zurückblieb. In dieser Weise erhielt man das Element Radium als ein weißes silberglänzendes Metall, welches mit Barium und anderen Erdalkalimetallen eine große Ähnlichkeit aufweist. Wie diese, zersetzt es das Wasser, indem es sich darin auflöst. An der Luft wird das metallische Radium rasch geschwärzt, wahrscheinlich infolge einer Vereinigung mit dem Stickstoff der Luft zu einem sog. Nitrid. Es schmilzt bei 700° .

Nichts verrät uns, daß wir hier mit einem Sonderling unter den Elementen zu tun haben, — als seine radioaktiven Eigenschaften. Diese sind allerdings wunderbar genug, um ihm einen Ausnahmeplatz im System zu sichern.

4. Die Leuchtwirkungen des Radiums.

Sie sind so merkwürdig, sie widersprechen so drastisch all dem, was man bisher von chemischen Elementen wußte, daß sie seit dem Anfange der Versuche von Becquerel und Curies die Aufmerksamkeit der wissenschaftlichen Welt an sich zu fesseln vermochten. Sie beanspruchen auch heute noch das größte Interesse.

Am auffallendsten äußert sich das Radium durch seine Leuchtwirkungen. Radiumverbindungen leuchten unaufhörlich von selbst, wenn auch recht schwach. Sie besitzen aber auch die Fähigkeit, andere Stoffe zum starken Leuchten anzuregen. Sehr geeignet dazu sind einige

Mineralien: Willemit (Zinksilikat) und die Sidot-Blende (Zinksulfid). Bringt man in die Nähe eines Radiumpräparates einen echten Diamanten, so leuchtet der Stein im Dunkeln in einem lebhaften Glanze. Unehnte Brillanten besitzen diese Eigenschaft nicht und können auf diese Weise leicht von echten Steinen unterschieden werden. Sehr stark phosphoreszieren unter dem Einfluß der Radiumstrahlung einige komplexe Salze des Platins. Kristalle des Bariumplatinzyanürs und des Kalziumplatinzyanürs strahlen ein grünliches Licht aus, welches an das Leuchten der Johanniskörner erinnert. Das Lithiumplatinzyanür leuchtet mit einem rötlichen Schimmer, und das Natriumplatinzyanür sendet gelbes Licht aus. Andere Stoffe, wie z. B. Flußspat und Marmor, leuchten unter der Wirkung der Radiumstrahlen bei gewöhnlicher Temperatur nicht; erhitzt man sie aber bis zur dunklen Rotglut, so strahlen sie intensives Licht aus.

Bariumplatinzyanür ist zur Demonstration der lichterregenden Wirkung des Radiums besonders geeignet. Es ist das dasselbe Salz, welches auch zum Sichtbarmachen der durch Röntgenstrahlen erzeugten Bilder verwendet wird. In der Röntgenoskopie benutzt man zu diesem Zweck häufig lichtempfindliche Schirme aus Pappe, welche mit einer dünnen Schicht dieser Substanz überzogen ist. Bringt man in die Nähe eines solchen Schirmes ein Röhrchen mit dem Radiumpräparat, so leuchtet der Schirm an denjenigen Stellen, welche in der nächsten Nähe des Röhrchens sich befinden. Man kann sich nun mit Hilfe dieses Schirmes leicht von der Durchdringlichkeit der Radiumstrahlen überzeugen. Bringt man zwischen das Radiumröhrchen und den Schirm ein Stück Pappe oder Holz, so erscheint das Licht kaum vermindert. Man sieht das Licht auch dann nicht völlig verschwinden, wenn man die Strahlen des Radiums durch eine oder mehrere Silbermünzen, z. B. Talerstücke, passieren läßt. Allerdings erscheint dann das Licht bedeutend geschwächt. Wir werden sehen, daß es eine besondere Gattung der Radiumstrahlen ist, welche eine so hohe Durchdringlichkeit besitzt.

Eine praktische Verwendung hat die Leuchtwirkung des Radiums in den „selbstleuchtenden Radiumuhren“ gefunden, in denen sowohl die Ziffern wie auch die Zeiger mit einem Gemisch aus etwas Radiumsalz mit Zinksulfid bestrichen sind. Solche Uhren leuchten von selbst und lassen auch in der Nacht die Zeit ablesen.

Man kann das Radiumlicht, wie Giesel gezeigt hatte, auch bei ge-

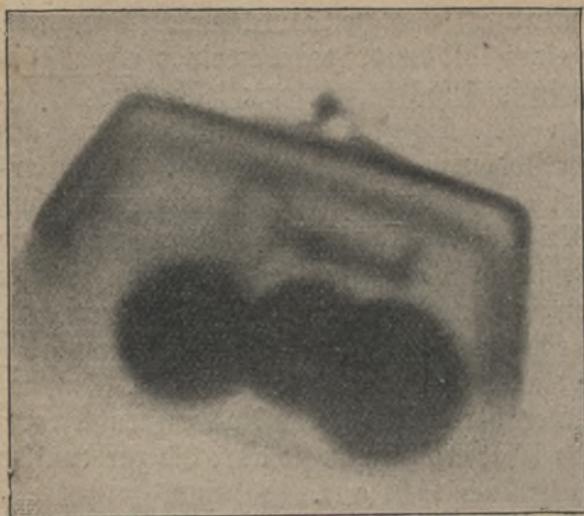


Fig. 6. Photographie eines Geldbeutels.

geschlossenem Auge sehen. Bringt man ein Radiumpräparat in die Nähe der Schläfe, während beide Augen geschlossen sind, so erhält man unmittelbar eine Lichtempfindung.

Wahrscheinlich rührt die Lichtempfindung von der Fluoreszenz der Augenflüssigkeit her. Besonderes Interesse beansprucht die Tatsache, daß das Radiumlicht in dieser Weise auch von Blinden empfunden wird, deren Netzhaut unverletzt geblieben ist.

Noch empfindlicher als unser Auge ist die photographische Platte. Man kann in Gegenwart von Radium — bei genügend langer Exposition — Gegenstände im Dunkeln photographieren. Radiumhaltige Stoffe, wie die Pechblende, photographieren sich dabei von selbst (Fig. 4 auf S. 11). Da nun die Radiumstrahlen sich durch die Fähigkeit auszeichnen, ähnlich wie die Röntgenstrahlen, undurchsichtige Gegenstände zu durchdringen, so kann man mit ihrer Hilfe auch solche Gegenstände photographieren, welche in einer undurchsichtigen Hülle enthalten sind, z. B. Geldmünzen im Geldbeutel (Fig. 6) oder Reißzeug, welches in einer Holzschachtel eingeschlossen ist (Fig. 7). Übrigens sind die „Radiogramme“, d. h. Photographien, welche beim Durchleuchten der undurchsichtigen Körper mit Hilfe von Radiumstrahlen erhalten werden, viel weniger scharf als die mittels Röntgenstrahlen erzeugten Bilder, und zwar aus zweierlei Gründen. Einerseits sind die Radiumstrahlen noch viel durchdringender als Röntgenstrahlen: ein Teil von ihnen dringt sogar durch dicke Metallplatten durch. Andererseits sind die vom Radium ausgesandten Strahlen, wie wir uns bald überzeugen werden, nicht gleichartig: sie bestehen aus mehreren Strahlengattungen von verschiedener Durchdringlichkeit. Daher ist zu empfehlen, einen Teil der Strahlung des Radiums von vornherein von der Wirkung auf die

photographische Platte auszuschalten. Wie das zu geschehen hat, werden wir bald sehen. In dieser Weise sind auch die in den Fig. 6 und 7 abgebildeten Radiogramme erhalten worden.

5. Elektrische Wirkungen.

Das empfindlichste Instrument zur Erkennung von Radium ist das Elektroskop. Seine einfachste Form ist in der

Fig. 8 dargestellt. Zwei dünne Goldblättchen hängen innerhalb eines ringförmigen Behälters an einem isolierten Metalldraht. Verbinden wir den herausragenden Knopf des Metalldrahts mit einer Elektrifiziermaschine oder berühren ihn nur mit einer mit Seidenzeug abgeriebenen Porzellanröhre, so sehen wir, daß die Goldblättchen augenblicklich auseinanderspreizen. Das rührt daher, daß die beiden Goldblättchen mit derselben (positiven oder negativen) Elektrizität geladen werden und sich deshalb — gemäß dem Grundgesetz der Elektrizitätslehre — gegenseitig abstoßen. Bringen wir jetzt in die Nähe des Elektroskops die geringste Spur Radium in einem hermetisch verschlossenen Röhrchen R, so fallen die Blättchen sofort zusammen. Die Wirkung läßt sich auch dann noch deutlich beobachten, wenn das Röhrchen mit dem Radiumpräparat in einem Futteral oder in einer Blechschachtel eingeschlossen ist. Nur fallen



Fig. 8. Nachweis der Zerstreuung elektrischer Ladungen in der Nähe des Radiums mittels des Elektroskops.

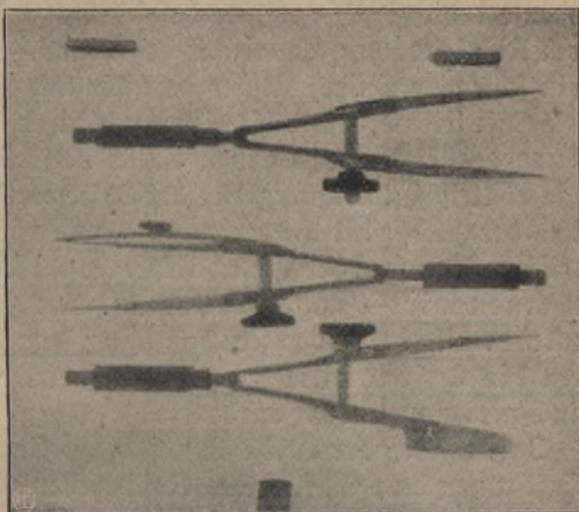


Fig. 7. Radiumaufnahme von Reifzeug, welches in einer Holzschachtel eingeschlossen war. (Nach Soddy.)

die Goldblättchen in diesem Fall bedeutend langsamer zusammenfallen. Wie sollen wir das auffallende Ergebnis dieser Experi-

mente deuten? Wir wissen, daß die Luft, wie auch alle anderen Gase, ein Nichtleiter der Elektrizität ist (oder — genauer ausgedrückt — ein schlechter Leiter). Unter dem Einfluß der Radiumstrahlung wird die Luft leitend, und dieser Umstand ist es, welcher die elektrische Ladung des Elektroskops augenblicklich verschwinden läßt. Wir schreiben die elektrische „Leitfähigkeit“ der Luft wie die Leitfähigkeit der Gase und der Flüssigkeiten überhaupt, der Gegenwart besonderer mit elektrischen Ladungen behafteter Atome zu. Solche elektrisierte Atome nennen wir — nach dem Vorgang von Faraday — Ionen. Wir pflegen also kurz zu sagen, daß unter dem Einfluß der Radiumstrahlen die Luft ionisiert wird, d. h. elektrisch neutrale Luftmoleküle in Ionen verwandelt werden.

In auffallender Weise läßt sich die Erzeugung der Ionen in der Luft unter dem Einfluß des Radiums mit Hilfe eines gewöhnlichen Induktoriums zeigen (Fig. 9). Verbindet man die Pole eines Induktionsapparates A und B mit zwei isolierten verschiebbaren Messingkugeln C oder D, so erhält man bei einem bestimmten Abstand beider Kugeln überspringende elektrische Funken. Nähert man dann den beiden Messingkugeln C ein Röhrchen mit Radiumchlorid, so hört die Funkenbildung sofort auf. Durch die Radiumstrahlung wird die Luft leitend, und die Entladung der Elektrizität findet jetzt in kontinuierlicher Weise statt. Entfernt man das Radiumpräparat, so nimmt die Entladung wieder den Charakter eines leuchtenden und knatternden Funken an.

P. Curie hat gezeigt, daß auch flüssige Nichtleiter, wie z. B. Schwefelkohlenstoff, Petroläther, Benzol u. a. unter dem Einfluß der Radiumstrahlen zu Leitern des elektrischen Stromes werden. Die interessanten Versuche von Bialobrzeski zeugen davon, daß das elektrische Leitvermögen fester Stoffe, wie z. B. des Schwefels und des Paraffins, durch Strahlen radioaktiver Stoffe gleichfalls vergrößert wird. Wahrscheinlich haben wir auch in diesen Fällen mit der Bildung von Ionen in flüssigen und festen Stoffen zu tun.

Für die Entstehung der Ionen sind mehrere Bedingungen maßgebend. In Lösungen der Salze (Elektrolyte) entstehen die Ionen durch eine Spaltung der Salz-moleküle. So wird das Chlornatrium (Kochsalz) — nach der von Svante Arrhenius begründeten Auffassung — nach der Auflösung in Wasser zum größten Teil in posi-

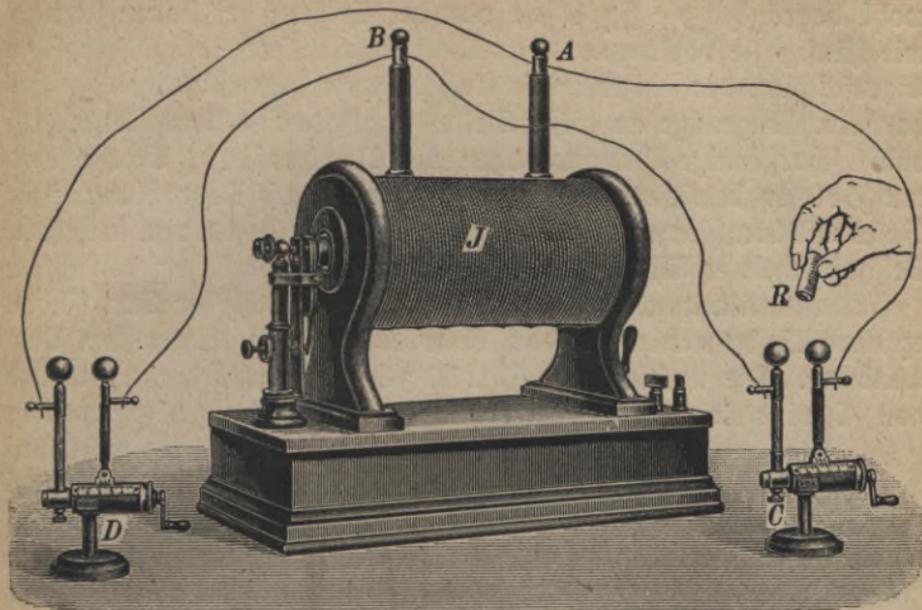


Fig. 9. Unterbrechung der Funkenentladung in der Nähe des Radiums.

tive Natriumionen und in negative Chlorionen gespalten. Man nennt diesen Vorgang: elektrolytische Dissoziation. In diesem Fall wird die zur Spaltung der Moleküle erforderliche Energie vom Lösungsmittel (Wasser) geliefert. In der Luft und in Gasen sind auch unter gewöhnlichen Bedingungen Ionen vorhanden. Aber ihre Anzahl ist nur äußerst gering. Sie kann künstlich vermehrt werden, wenn man die Luft der Wirkung von Röntgenstrahlen aussetzt. Man bemerkt, daß in der Nähe einer Röntgenröhre ein geladenes Elektroskop sehr schnell seine Ladung verliert. Das beweist uns, daß in der die Röntgenröhre umgebenden Luft Gasionen erzeugt werden.

Man kann dasselbe Resultat noch durch mancherlei andere Ursachen hervorrufen. In einem starken elektrischen Feld wird die Anzahl der Ionen in einem Gase bedeutend vermehrt. Eine negativ geladene Zinkplatte erzeugt in einem Gase Ionen, wenn sie mit ultravioletttem Licht bestrahlt wird. Glühende Körper senden im allgemeinen Ionen aus. Auch das Verhalten der Flamme liefert deutliche Beweise dafür, daß in den Flammgasen Ionen in einer großen Anzahl vorhanden sind. Alle diese Tatsachen beweisen, wie

wohl begründet die Hypothese von der Existenz der Ionen ist und wie häufig sie vorkommen. Es kann nicht unsere Absicht sein, die Eigenschaften der einzelnen Ionengattungen hier eingehend zu behandeln. Es genüge an dieser Stelle die allgemeine Bemerkung, daß durch scharfsinnige Untersuchungen von Rutherford, Townsend und Zeleny bewiesen worden ist, daß man durch Bestrahlung eines Gases mit Strahlen einer radioaktiven Substanz Ionen von derselben Beschaffenheit erhält wie durch die Einwirkung von Röntgenstrahlen.

Zur quantitativen Bestimmung der Leitfähigkeit der Luft finden exaktere Instrumente als das oben beschriebene Elektroskop Verwendung. Die nachfolgende Fig. 10 zeigt eine Anordnung, welche von Curies in ihren bahnbrechenden Untersuchungen verwendet

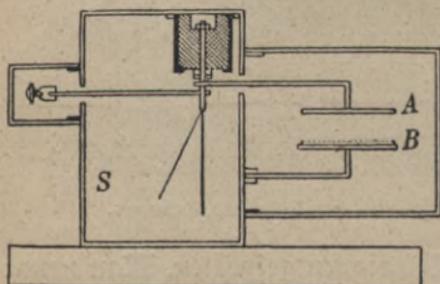


Fig. 10. Elektroskop zur Messung der Radioaktivität (Nach Curie.)

wurde. Sie besteht aus zwei Teilen: dem eigentlichen Blattelektroskop S und einer Ionisationskammer, welche zur Aufnahme des zu untersuchenden Präparats dient. Das Elektroskop S, welches im Prinzip dem zuvor beschriebenen Goldblattelektroskop ähnlich ist (Fig. 8), besteht aus einem festen vertikalen Streifen, an welchem das

leicht bewegliche Goldblatt befestigt ist. In der Ionisationskammer sehen wir zwei Metallplatten, von denen die obere Platte A mit dem Elektroskop verbunden ist, während die untere mit dem Gehäuse verbundene Platte zur Aufnahme der radioaktiven Substanz bestimmt ist. Sobald das Elektroskop geladen ist, wird das bewegliche Goldblatt aus der senkrechten Lage abgelenkt, wie es die Figur zeigt. Ist die Luft im Innern der Ionisationskammer leitend geworden, so entladet sich das Elektroskop nach und nach, und das bewegliche Blatt nähert sich dem festen Metallstreifen. Die Bewegung des Goldblattes beobachtet man mit einem schwach vergrößernden Mikroskop und kann aus der Geschwindigkeit der Entladung die Aktivität der Substanz in relativem Maße bestimmen. Als Vergleichsobjekte bei derartigen Messungen lassen sich mit Vorteil „Uranplatten“ verwenden. Man stellt sie her durch Auftragen einer bestimmten Menge des Uranoxyds auf Metallscheiben von passender Form.

Für exakte Messungen wendet man anstatt eines Elektrostops Quadrantelektrometer an, welche zuerst von Lord Kelvin in die Wissenschaft eingeführt worden sind. Fig. 11 gibt diesen Apparat in einer von Dolezalek vorgeschlagenen Konstruktion wieder. Das Elektrometer weist eine Blechdose Q auf, welche in vier Teile („Quadranten“) geteilt ist. Innerhalb dieser Dose schwebt eine am Quarzfaden aufgehängte plattenartige Nadel N. Sie ist in der Form einer 8 ausgeschnitten. Die Nadel wird mit dem positiven Pol einer Batterie verbunden und erhält ein konstantes elektrisches Potential von 100 bis 300 Volt. Der andere Pol der Batterie ist mit der Erde verbunden. Die vier Quadranten sind gut isoliert und kreuzweise miteinander verbunden. Jedes Quadrantenpaar steht außerdem in metallischer Ver-



Fig. 11. Quadrantelektrometer
(Nach Dolezalek.)

bindung mit einer Klemmschraube (K_1 und K_2 der Figur). Dann wird die eine Klemmschraube mit dem zugehörigen Quadrantenpaar zur Erde abgeleitet, die andere Klemme mit der oberen Kondensatorplatte der Ionisationskammer verbunden (vgl. Fig. 12), während die untere Platte des Kondensators mit der radioaktiven Substanz eine positive elektrische Ladung von einer konstanten Batterie enthält. Diese Ladung teilt sich durch die Luft hindurch der oberen Platte und dem Quadrantenpaar mit. Die gleichfalls positiv geladene Nadel N des Elektrometers erfährt dadurch eine Abstoßung von dem gleichnamig geladenen Quadrantenpaar und wird um einen gewissen Winkel gedreht. Die Geschwindigkeit der Drehung gibt ein Maß für die Ionisierung der Luft in der Kammer und für die Aktivität der untersuchten Substanz. Die Ablesung des Drehungswinkels geschieht durch die Beobachtung einer Skala in dem am Quarzfaden befestigten Spiegel A.

6. Radioaktive Messungen.

Für die Entwicklung der Radiologie ist die elektrische Messungsmethode von außerordentlicher Bedeutung gewesen, da sie in bezug auf die Empfindlichkeit sowohl die Phosphoreszenzwirkung wie auch die photographische Wirkung bedeutend übertrifft. Außerdem eignet sie sich zur quantitativen Bestimmung und erlaubt eine schnelle und sichere Arbeitsweise. Es ist daher von allgemeinem Interesse, auf die Grundlagen dieser Methode etwas näher einzugehen.

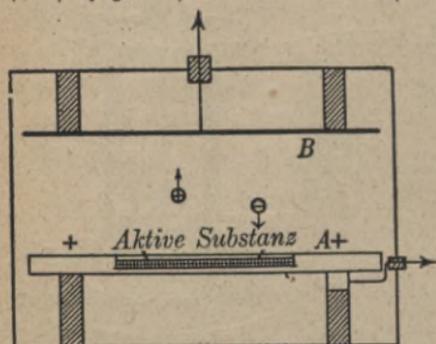


Fig. 12. Anordnung zur Messung der Aktivität radioaktiver Präparate. (Nach Rutherford.)

Fig. 12 erläutert uns schematisch die Anordnung zur Messung der Anzahl der von einer gegebenen Menge einer radioaktiven Substanz erzeugten Ionen. Die Substanz befindet sich zwischen zwei isolierten Platten A und B. Die untere Platte A ist mit dem positiven Pol einer hochgespannten

Batterie verbunden und erhält von ihr ein konstantes elektrisches Potential von einigen hundert Volt. Der negative Pol der Batterie ist zur Erde abgeleitet. Die Platte B, welche ursprünglich ungeladen ist, wird an ein Elektrometer angeschlossen. Die zwischen den beiden Platten A und B befindliche Luft wird durch die radioaktive Substanz, welche sich auf der unteren Platte befindet, leitend gemacht. Die elektrische Leitung entsteht dadurch, daß in der Luft positive und negative Gasionen gebildet werden. Die negativen Ionen werden von der positiven Platte A angezogen, die positiven Ionen wandern zu der ungeladenen Platte B. Auf diese Weise entsteht ein elektrischer Strom; wie in Flüssigkeiten, so wird auch in der Luft die elektrische Ladung durch materielle Teilchen, Ionen, transportiert. Der elektrische Strom gibt sich in unserer Anordnung dadurch kund, daß das mit der Platte B verbundene Elektrometer eine positive Ladung annimmt. Die Ladungsgeschwindigkeit des Elektrometers ist der Stromstärke und folglich auch der Anzahl der Ionen proportional und kann als deren Maß angenommen werden.

Zu weiterem Verständnis der Grundlage radioaktiver Messungen müssen wir hier an einige einfache Tatsachen aus der Elektrizitäts-

lehre erinnern. Nach dem Gesetz von Ohm ist die Stromstärke in einem geschlossenen Stromkreis proportional der elektrischen Spannung der Stromquelle (des Elementes, Akkumulators u. a.). Das Ohmsche Gesetz gilt für feste und flüssige Leiter. Für Gase gilt dieses Gesetz nicht. Von dem Verhalten der ionisierten Gase im elektrischen Felde gibt uns Fig. 13 ein anschauliches Bild. Für eine Anzahl Messungen wurden längs der Linie OX die angewandten Spannungen aufgetragen und längs der Linie OY die den angewandten Spannungen entsprechenden Stromstärken. So erhält man eine Anzahl von Punkten, deren Verbindungslinie uns die typische Kurve für den Verlauf des elektrischen Stromes in einem Gase liefert. Bei kleinen Spannungen wächst die Stromstärke entsprechend der Zunahme der Spannung, wie man aus der gezogenen Kurve unmittelbar ablesen kann. Denn die Geschwindigkeit der Gasionen wächst in diesem Intervall proportional der Spannung, wie es das Ohmsche Gesetz verlangt.

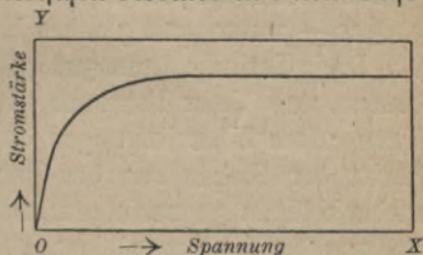


Fig. 13. Stromkurve in ionisierter Luft.

Ist aber die Spannung stark genug, so ist die Wirkung des elektrischen Feldes derart vorherrschend geworden, daß alle Ionen jetzt zu den Elektroden wandern, ohne daß welche von ihnen sich vereinigen oder durch Diffusion absorbiert werden. Eine jede Elektrode sammelt dann während einer gewissen Zeit alle Ionen von dem dem ihrigen entgegengesetzten Vorzeichen an, die während dieser Zeit entstehen. Daraus geht hervor, daß, wenn die in der Zeiteinheit erzeugte Anzahl von Ionen konstant bleibt, man nur einen Strom von nicht überschreitbarer, maximaler Stärke durch das betreffende Gasvolum hindurch senden kann, wie groß auch die Spannung sein mag. Dieser maximale Strom heißt Sättigungsstrom. Er ist erreicht, wenn alle im Gase entstehenden Ionen praktisch zum Elektrizitätstransport dienen. Dann verläuft die Stromkurve horizontal. Die Erfahrung hat gelehrt, daß man den Sättigungsstrom nur in einem Gas erreichen kann, welches durch Röntgenstrahlen oder durch Strahlen eines radioaktiven Körpers ionisiert wurde, nicht aber bei der elektrolytischen Leitung (z. B. in Flüssigkeiten). Daraus entspringt die praktische Regel, daß man zur Messung der Radioaktivität Spannungen verwenden muß, welche höher sind als die zur Erreichung der „Sät-

tigungsstromstärke" erforderliche Spannung. Je größer die Aktivität der untersuchten Substanz, um so größer ist auch die zur Sättigung notwendige Spannung. Man hat jedoch experimentell gefunden, daß man bei gewöhnlichen Messungen mit Potentialen von 300 Volt gut auskommt.

Auf Grundlage der soeben angeführten Betrachtungen sind wir imstande, aus der Geschwindigkeit der Ladung eines Elektrometers, welcher mit der Platte *B* verbunden ist, die Anzahl der in der Zeiteinheit gebildeten Ionen zu bestimmen. Die Ionisierungsfähigkeit ist für uns das Maß der Aktivität einer strahlenden Substanz.

Die elektrische Leitfähigkeit der Luft wächst um so schneller, je größer — unter sonst gleichen Umständen — die Menge des Radiums ist. Diese Tatsache kann zur quantitativen Bestimmung des Radiums dienen, und dieser Umstand ist auch von Herrn und Frau Curie in ihren ersten Untersuchungen dazu verwertet worden, um den Fortschritt der Anhäufung des Radiums in den radioaktiven Bariumniederschlägen zu verfolgen, welche als Ausgangsmaterial zur Darstellung des Radiums dienen. In derselben Weise wird auch heute noch allgemein die Gegenwart der geringsten Mengen des Radiums und anderer radioaktiver Stoffe im Boden, im Wasser verschiedener Mineralquellen, in Gasen, welche aus der Erde oder aus den Quellen entströmen — nachgewiesen und ihre Quantität zahlenmäßig bestimmt.

Als Vergleichssubstanz für radioaktive Messungen dient ein Präparat aus reinstem Radiumchlorid, welches von Frau M. Curie im Jahre 1911 eigens für diesen Zweck hergestellt wurde. Dieses „Standardpräparat“ wird in Paris aufbewahrt. Genau mit diesem Muster verglichene Präparate sind später hergestellt worden und den wichtigsten Kulturstaaten zur Aufbewahrung übergeben worden. Als internationale Einheit der Radioaktivität wird ein „Curie“ benutzt: man bezeichnet mit diesem Namen diejenige Emanationsmenge (vgl. Abschnitt 11), welche mit einem Gramm Radiumelement im Gleichgewicht steht. Nach den neuesten Messungen vermag 1 „Curie“ einen Sättigungsstrom von $2,75 \times 10^6$ elektrostatischen Einheiten (= 0,92 Milliampere) zu unterhalten.

Für Bestimmung geringer Aktivitäten, wie sie in der Luft oder in Quellen gemessen werden, benutzt man die „Mache-Einheit“ (M. E.). Man bezeichnet mit diesem Namen diejenige Emanationsmenge, welche einen Sättigungsstrom von einem Tausendstel der elek-

trostatischen Einheit zu unterhalten vermag. Daraus berechnet sich: 1 „Mache“ = $3,64 \times 10^{-10}$ „Curie“.

Die Empfindlichkeit des Elektrometers für die geringsten Spuren radioaktiver Stoffe ist erstaunlich. Es genügt zu sagen, daß wir imstande sind, mit einem guten Instrument dieser Art noch den fünfundzwanzigmillionsten Teil eines Milligrammes Radium sicher nachzuweisen. Würden wir eine Messerspitze eines Radiumsalzes unter alle Menschen der Erde verteilen, so würde doch ein jeder genug Salz bekommen, um sich von der Gegenwart des Radiums mit Hilfe eines empfindlichen Elektrometers überzeugen zu können.

Durch die Anwendung des Elektroskops ist ein neues Hilfsmittel zum Nachweis und zur Trennung der Elemente in die Chemie eingeführt worden. Wir können mit Hilfe dieser neuen Methode nicht nur solche Stoffe untersuchen und identifizieren, welche in ganz außerordentlicher Menge vorkommen, sondern auch solche, welche nur außerordentlich kurze Zeit existieren können. Wir werden sehen, daß gerade die Unbeständigkeit dieser Stoffe ihre radioaktiven Wirkungen verstärkt. Das Elektroskop ist auch dann noch imstande, das Vorhandensein solcher Stoffe mit Sicherheit anzuzeigen, wenn von ihnen nur ein Atom pro Sekunde gebildet wird. Niemals könnten wir solche geringen Stoffmengen mit einer Wage feststellen. Und auch der spektralanalytische Nachweis steht in bezug auf die Empfindlichkeit der elektroskopischen Methode bedeutend nach.

7. Die Wärmebildung.

Geradezu verblüffend wirkten auf alle die ersten Mitteilungen von Curie und Laborde über die Fähigkeit der Radiumverbindungen unaufhörlich Wärme zu erzeugen. Seitdem sind diese Mitteilungen von verschiedenen Autoren sorgfältigst geprüft worden, so daß heute in bezug auf diese Tatsache kein Zweifel mehr besteht.

Man kann sich schon mit einem Thermometer von mittlerer Güte davon überzeugen, daß ein Radiumpräparat um einige Grade wärmer ist als die Umgebung. Man verwendet dazu zwei gleiche Thermometer, welche in zwei gleich gut gegen Wärmeverlust isolierte Glasröhrchen tauchen (Fig. 14). Bringt man in das eine Röhrchen das Radiumpräparat hinein, so sieht man, daß das Thermometer steigt und ständig eine höhere Temperatur anzeigt als das andere. Also wird vom Radium unaufhörlich Wärme erzeugt.

Genaue Messungen von Pierre Curie und Laborde, welche von anderen Forschern mit größter Genauigkeit wiederholt wurden, haben gezeigt, daß wir es hier in der Tat mit solchen Quantitäten Wärme zu tun haben, welche nicht gering geschätzt werden dürfen. Durch diese Messungen wurde festgestellt, daß ein

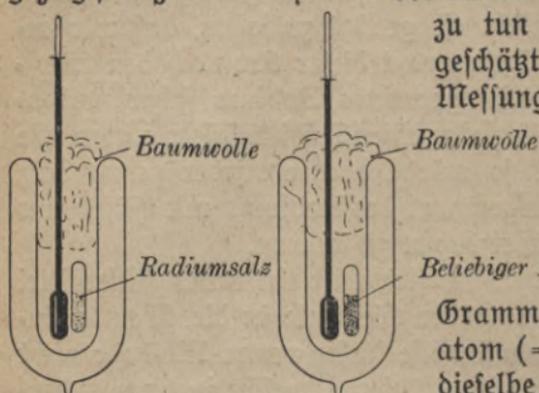


Fig. 14. Versuch von Curie und Laborde zum Nachweis der Wärmeentwicklung durch das Radium.

Gramm Radium in jeder Stunde 118 Wärme-einheiten oder Kalorien entwickelt. Das ist mehr als notwendig, um ein Gramm Eis zu schmelzen. Ein Grammatom (= 226 g) Radium würde fast dieselbe Wärmemenge in der Stunde entwickeln, welche durch Verbrennung von einem Grammatom (= 1 g) Wasserstoff erhalten wird. Das ist schon an sich ziemlich viel. Wenn man aber dazu noch bedenkt, daß diese Wärmeproduktion jahrhundertlang andauern kann, ohne daß unser Präparat hierbei seine Wirksamkeit merklich verliert, so kommt man zu unheimlichen Wärmemengen, welche die bisher bekannten Wärmequellen millionenfach übertreffen. Im Kap. 15 werden wir diese Angaben zahlenmäßig belegen. Hier ist es prinzipiell wichtig zu betonen, daß wir diese Wärmemengen ohne eine sichtbare Veränderung an unserem Präparat erhalten können.

Die von Curie und Dewar bei der Temperatur des flüssigen Wasserstoffs (-252°C) ausgeführten Messungen der Wärmeentwicklung des Radiums bieten ein besonderes Interesse. Denn sie zeigen, daß die Wärmeproduktion bei den tiefsten erreichbaren Temperaturen die gleiche ist wie bei gewöhnlicher Temperatur. Keine einzige der bekannten chemischen Reaktionen zeigt ein ähnliches Verhalten: alle kommen bei der Temperatur des flüssigen Wasserstoffs zum völligen Stillstand. Keine einzige chemische Reaktion ist imstande, solche ungeheure Wärmemengen zu produzieren.

8. Chemische Wirkungen.

Ein Glasröhrchen, in welchem ein Radiumpräparat eingeschlossen ist, nimmt mit der Zeit eine violette Färbung an. Auch diese Ver-

änderung an einem so beständigen Material, wie Glas, ist vom Radium hervorgerufen worden. Die Versuche, welche von Herrn und Frau Curie ausgeführt worden sind, zeigten, daß alle Glasarten vom Radium verändert werden. Aber die Farbe, welche sie annehmen, ist nicht immer die gleiche. Einige Glasarten werden violett gefärbt, andere braun, manche sogar gelb. Bis jetzt ist es noch nicht gelungen, mit Sicherheit nachzuweisen, welche chemische Umwandlungen im Glase diese Farbenänderung verursachen. Vielleicht rührt sie von der Oxydation des Eisens, welches in den meisten Glasarten vorkommt, her?

Sogar in viel einfacheren Fällen, in denen es sich um die Färbung der einfachsten Salze unter dem Einfluß der Radiumstrahlen handelt, sind wir über den Chemismus dieser Umwandlungen noch nicht im klaren. Man weiß, daß Kristalle von Steinsalz gelb werden, wenn sie sich in der Gesellschaft von Radiumsalzen befinden. Geschmolzener Borax wird unter denselben Bedingungen blau. Die Farben sind zum Teil beständig, d. h. sie halten sich sehr lange Zeit unverändert. In anderen Fällen sind die Farben vergänglich. Geschmolzenes Kaliumbromid wird durch die Radiumstrahlen blau gefärbt. Nach der Unterbrechung der Radiumwirkung vergeht die Farbe, besonders schnell, wenn man das Salz erhitzt.

Prof. Doelter in Wien hat den Einfluß des Radiums auf die Farben sowohl der Mineralien wie auch der Kunststoffe sehr sorgfältig untersucht und diese Wirkung mit der Einwirkung der Röntgen-, Kathoden- und ultravioletten Strahlen verglichen. Wenngleich die färbende „Ursache“ in den meisten Fällen noch nicht aufgedeckt blieb, so ließen sich doch interessante Zusammenhänge zwischen der Färbung und der Zusammensetzung der untersuchten Stoffe feststellen.

Einer Erwähnung wert sind vielleicht die Versuche, die „Radiumfärbung“ ins Praktische umzusetzen. Bekannt ist, daß man heute schon imstande ist, durch Zusammenschmelzen von reiner Tonerde mit etwas Chromoxyd künstliche Rubine herzustellen, welche den natürlichen völlig gleichen. Sie erzielen auch denselben Verkaufspreis, denn ihre physikalischen und chemischen Eigenschaften sind genau die gleichen wie bei natürlichen Steinen, und kein Sachverständiger kann die einen von den anderen unterscheiden. Diese Erfolge ermuntern zu Versuchen der künstlichen Synthese anderer Edelsteine, der Smaragde, Saphire u. a. m. Leider sind diese Versuche noch nicht ganz gelungen. Und noch heute weiß man nicht mit Bestimmtheit, welchen Bestandteilen diese

Steine ihre prachtvollen Naturfarben verdanken. Da brachten die Beobachtungen über den färbenden Einfluß des Radiums einige Experimentatoren auf den Gedanken, die Radiumfärbung zur Erzielung der gewünschten Farben der Edelsteine auszunutzen. Solche Versuche sind u. a. von Boudas ausgeführt worden, und zwar an Korunden. Er kaufte bei einem Juwelier Korunde von der billigsten Sorte zum Preise von 2 Frank für das Karat und verschloß sie auf einen Monat in einem Kästchen, in welchem sich gleichzeitig ein starkes Radiumpräparat befand. Nach Verlauf von einem Monat öffnete er das Kästchen und fand, daß sämtliche Steine ihre Farbe verändert hatten: die farblosen Korunde wurden gelb, wie der Topas, die blauen wurden smaragdgrün und die violetten nahmen die Farbe des Saphirs an. Die Färbung war so ähnlich, daß derselbe Juwelier, welcher die Steine ursprünglich für 2 Frank pro Karat verkauft hatte, jetzt für das Karat 45 Frank bot. Wenn auch bis jetzt nichts von der Anwendung dieses Verfahrens im größeren Maßstabe verlautet, so ist es immerhin nicht ausgeschlossen, daß durch weitere Versuche in dieser Richtung die Angelegenheit auch für die Industrie der Edelsteine an Interesse gewinnen wird.

Vom wissenschaftlichen Standpunkt verdienen die größte Beachtung diejenigen Umwandlungen, welche mit einer bedeutenden Energieaufnahme verknüpft sind. In diese Kategorie von Reaktionen gehören:

1. Umwandlung des Sauerstoffs in Ozon.
2. Zerlegung des Wassers in Wasserstoff und Sauerstoff.
3. Zerlegung des Kohlendioxyds in Kohlenstoff, Kohlenoxyd und Sauerstoff.
4. Zerlegung des Kohlenoxyds in Kohlenstoff und Sauerstoff.
5. Zerlegung von Ammoniak in Stickstoff und Wasserstoff und die Vereinigung von Stickstoff mit Wasserstoff zu Ammoniak.
6. Zerlegung des Chlorwasserstoffs und die umgekehrte Reaktion: Vereinigung des Chlors mit Wasserstoff zu Salzsäure.

Ozon entsteht immer, wenn sich Radiumsalze in Berührung mit Luft befinden. Öffnet man ein zugeschmolzenes Röhrchen, welches ein Radiumpräparat enthält, so bemerkt man stets einen starken Ozongeruch.

In Gegenwart von Radiumverbindungen wird Wasser mit einer nahezu konstanten Geschwindigkeit in seine Bestandteile zerlegt. Das

Radium übt in diesem Fall eine ähnliche Wirkung aus wie der elektrische Strom bei der Elektrolyse des Wassers. Aus den Versuchen von Pierre Curie, Debierne und Ramsay geht hervor, daß 1 g Radium in der Stunde annähernd 0,5 ccm Knallgas ausscheidet. Rätselhaft bleibt aber noch die Tatsache, daß in dem gebildeten Gase Sauerstoff und Wasserstoff in einem anderen Verhältnis zueinander stehen als im Wasser, und zwar ist der Wasserstoff im Überschuß. Was mit dem fehlenden Sauerstoff passiert, hat man bis jetzt noch nicht mit Sicherheit nachweisen können. Nach den neuesten Untersuchungen von Kernbaum kann man schließen, daß ein Teil des Sauerstoffs das Wasser zum Wasserstoffsuperoxyd oxydiert. Die Mehrzahl der organischen Stoffe wird unter dem Einfluß der Radiumstrahlung zerstört. Wahrscheinlich findet dabei eine Oxydation statt, welche durch das Radium beschleunigt wird. So wird der Zucker in Gegenwart von Radium stark gebräunt; Papier wird dunkel und brüchig, und einer ähnlichen Verwandlung unterliegen auch Pflanzenblätter.

9. Physiologische Wirkungen.

Es ist mit Wahrscheinlichkeit anzunehmen, daß zu derselben Gruppe der Erscheinungen auch die starken physiologischen Wirkungen des Radiums zu zählen sind. Die äußeren Wirkungen sind energisch und folgenschwer. Legen wir auf eine Stelle unserer Haut eine kleine Zelluloidkapsel mit einem Radiumpräparat, so bemerken wir schon nach einigen Stunden an derselben Stelle einen roten Fleck. Nach einigen Tagen aber entsteht eine Wunde, die nur sehr schwer verheilt. Pierre Curie ließ ein schwach aktives Radiumpräparat zehn Stunden lang auf seinen Arm wirken. Es entstand eine Wunde, deren Heilung vier Monate dauerte.

Es ist für diese Wirkung charakteristisch, daß ihre Folgen erst nach Ablauf einer bestimmten Zeit eintreten. Als Goldberg an sich selbst ein derartiges Experiment anstellte, wobei er Radiumbromid drei Stunden lang auf seinen Vorderarm wirken ließ, bemerkte er erst nach drei Tagen eine Rötung der Haut. Nach fünf Tagen bildete sich ein Geschwür, welches erst nach einigen Monaten verheilte (Fig. 15).

Auf diese zufälligen Beobachtungen folgten planmäßige Versuche, welche selbstverständlich nur an Tieren angestellt werden konnten. London experimentierte im St. Petersburger Institut für experimentelle Medizin an Fröschen, weißen Mäusen und Kaninchen. Ein Frosch



Fig. 15. Wirkung des Radiumbromids auf den Vorderarm des Menschen. (Nach London.)

befand sich in einer Flasche, deren Hals durch eine Röhre mit einem kleinen Kölbchen mit Radium kommunizierte (Fig. 16). Am Boden der Flasche war etwas Wasser vorhanden. In diesem Versuch wirkt das Radium nicht direkt, sondern durch die Luft hindurch. Die Wirkung kommt dadurch zustande, daß das Radium — wie wir im nächsten Kapitel sehen werden — ein Gas absondert, die sog. „Emanation“. Dieses Gas gelangt durch die Röhre in die Flasche und vermischt sich mit der in der Flasche vorhandenen Luft. Mit der Luft gelangt das Gas in die Atmungsorgane der Tiere, wo es resorbiert wird. Die „Emanation“ wirkt auf die Frösche sehr ungünstig, denn sie verenden nach zwei Wochen. Es ist von einigem Interesse, daß solche tote Frösche radioaktiv sind. Sie senden dieselben Strahlen aus wie Radium. Läßt man den Versuchsfrosch auf eine mit schwarzem Papier bedeckte photographische Platte einwirken, so bekommt man eine deutliche Abbildung desselben. Ähnlich fielen die Resultate der Experimente an weißen Mäusen aus. Junge Mäuse, welche einer Radiumbehandlung unterworfen wurden, zeigten schon nach drei Tagen Erscheinungen der Atemnot; dann gingen sie an Erstickung zugrunde.

Etwas widerstandsfähiger gegen Radiumbestrahlung scheinen Kaninchen zu sein. London hat zwei Männchen und ein Weibchen in einem Käfig untergebracht und auf die Mitte des Käfigdaches ein Kästchen mit 26 mg Radiumbromid gesetzt. Während der ersten zwei Wochen verhielten sich die Tiere ganz normal. Erst am 16. Versuchstag traten Wirkungen zunächst auf der Haut auf. An verschiedenen Stellen der äußeren Haut trat Rötung auf, das Haar fiel aus, und

die enthaarten Stellen fingen an sich zu entzünden. Später entstanden Geschwüre, welche die ganze Rückenseite bedeckten (Fig. 17). Gleichzeitig wurden die Tiere träge und apathisch. Sie bewegten sich nur mit Hilfe der Vorderbeine und schleppten bei der Bewegung die Hinterbeine nach. Die Fortpflanzung war in den ersten Monaten unverändert, und das Weibchen warf sogar dreimal Junge. Später wurde der Geschlechtstrieb immer schwächer und verschwand zuletzt ganz. Auffallend war es, daß das Gewicht der Versuchstiere hierbei ständig zunahm. Erst nach acht Monaten fing das Gewicht an zu fallen und verminderte sich so lange, bis die Tiere eingingen. Systematisch angestellte Versuche zeigten, daß die Bestrahlung mit Radium auf verschiedene Organe ungleich starke Wirkung ausübt. Außer der Haut werden das Nerven-



Fig. 16. Wirkung der Radiumemanation auf den Frosch. (Nach London.)

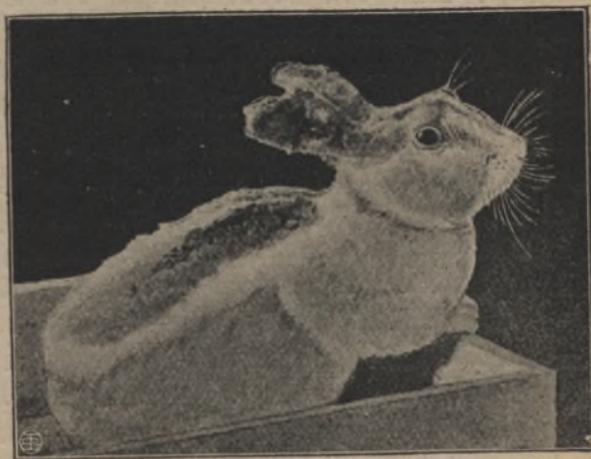


Fig. 17. Wirkung der Radiumbestrahlung auf das Kaninchen. Bildung der Geschwüre auf dem Rücken. (Nach London.)

34 I. Die Entdeckung des Radiums. Seine Eigenschaften und Wirkungen
system und die Geschlechtsorgane am meisten angegriffen.

Versuche, welche Danysz an Tieren angestellt hat, führten zu dem Ergebnis, daß Radium auf die Zentralorgane des Nervensystems, auf das Gehirn und Rückenmark, einen verheerenden Einfluß ausübt. Denn schon nach drei Stunden tritt eine Lähmung dieser Organe ein. Läßt man aber das Radium nur kurze Zeit einwirken, so bemerkt man zunächst ein Stadium gesteigerter Erregbarkeit, auf welche dann eine starke Erschöpfung folgt. Da man mit Hilfe der Radiumpräparate wohl ohne große Schwierigkeit einzelne Teile des Gehirns bestrahlen kann, so eröffnet sich hier eine Möglichkeit, über die lokale Verteilung verschiedener seelischer Funktionen im Gehirn der höheren Tiere interessante Versuche anzustellen.

Die Beeinflussung der Geschlechtsorgane durch die Radiumstrahlen steht im Einklang mit der Einwirkung der X-Strahlen auf diese Organe. Bei Meerschweinchen, welche einer mehrmaligen Bestrahlung von je 75 Minuten Dauer unterworfen waren, zeigte sich eine Verkümmernng der Hoden und ein Verschwinden der Samentierchen. Die Samensflüssigkeit der Tiere war wässerig und arm an Spermatozoiden; letztere bewegten sich nur langsam und träge. In ähnlicher Weise wirkt das Radium auf die Geschlechtsorgane der Weibchen, deren Eierstöcke bei diesen Versuchen eingehen.

Auch die Fortpflanzungselemente werden vom Radium stark beeinflusst. Nach den Beobachtungen von London und Goldberg büßen die Samentierchen des Meerschweinchens unter der Wirkung des Radiumbromids nach einigen Stunden ihre Beweglichkeit ein. Bei den Eiern äußert sich die Radiumwirkung darin, daß ihre Entwicklung in abnormer Weise vor sich geht. Besonderes Interesse beanspruchen die Experimente, welche Jan Tur an Hühnereiern angestellt hat. Dadurch, daß gewisse Teile des Embryos in ihrer Entwicklung gehemmt werden, kommt es dabei immer zur Entstehung von Mißbildungen. Andererseits fand Bohn, daß auch unbefruchtete Eier unter dem Einfluß der Radiumstrahlung zur Entwicklung gelangen können, d. h. Erscheinungen der „Parthenogenesis“ aufweisen. Ja, einige Experimentatoren wollen sogar beobachtet haben, daß das Radium die Fähigkeit besitzen soll, die Bildung von Mikroorganismen aus nicht organisierter Materie, z. B. aus steriler Gelatine hervorzurufen. Jedoch handelt es sich in diesen Fällen offenbar um Entstehung von

Niederschlägen, welche zu dieser irrthümlichen Auffassung geführt hat. Im Anschluß an die soeben erwähnten Versuche sei hier noch mitgeteilt, daß auch pflanzliche Samen durch Radium in ihrem Wachstum gehemmt werden.

Was schließlich den Einfluß des Radiums auf niedere Organismen und insbesondere auf Bakterien anbetrifft, so sind die Ergebnisse nicht ganz übereinstimmend. Aus den Versuchen von Aschkinasch und Caspari geht hervor, daß die Bazillen der Cholera, des Typhus und des Milzbrands dabei getötet werden. Unabhängig von den genannten Autoren hat auch Danysz die bakterientötende Wirkung des Radiums konstatiert. Unsicher ist der Befund bei Tuberkelbazillen. Auf einige Arten der Bakterien (Leuchtbackterien) scheint jedoch das Radium einen entgegengesetzten Einfluß auszuüben: sie vermehren sich unter Radiumwirkung noch stärker.

Fassen wir alles in diesem Abschnitt Gesagte nochmals zusammen, so sehen wir, daß Radium im allgemeinen auf Zellen und Gewebe einen zerstörenden Einfluß ausübt, wobei verschiedene Zellen einen verschieden großen Widerstand diesem Eingriff entgegensetzen können. In vielen Fällen läßt sich aber unzweideutig feststellen, daß einer zerstörenden Wirkung im Anfang eine erregende Wirkung vorangeht. Besonders deutlich tritt derartige Erregung bei der Beeinflussung der Nervenzentren zutage, und es scheint, daß dieser Tatsache ein allgemeines Prinzip zugrunde liegt.

Über die Ursache der Zerstörung sind verschiedene Ansichten ausgesprochen worden. Im allgemeinen wird angenommen, daß durch die Radiumstrahlen der Verlauf chemischer Reaktionen in der Zelle geändert wird. Insbesondere wird zur Erklärung der physiologischen Wirkung die Beobachtung herangezogen, daß unter dem Einfluß des Radiums das Lecithin, ein wesentlicher Bestandteil des Zellinhalts, gespalten wird. Andere Autoren meinen wieder, daß durch das Radium gewisse Fermente, welche im Leben der Organismen eine Rolle spielen, verstärkt werden. Bei der verwickeltesten Art der chemischen Vorgänge im Organismus dürfte die Frage nach dem Chemismus der Radiumwirkung ziemlich schwer zu lösen sein, besonders da man doch auch über die chemische Wirkung des Radiums auf anorganische Stoffe noch recht wenig weiß, wie aus den Darlegungen des vorigen Abschnitts hervorgeht.

Etwas hypotthesenfreier kann man vielleicht den Sachverhalt zu-

sammenfassen, wenn man annimmt, daß unter dem Einfluß der Radiumstrahlen in den bestrahlten Zellen Gifte gebildet werden, welche — in geringer Menge vorhanden — nur eine Erregung der Zelle hervorrufen, bei größerer Ansammlung aber ihren Tod verursachen.

10. Die induzierte Radioaktivität.

Die in den früheren Kapiteln besprochenen Untersuchungen, deren Löwenanteil von Herrn und Frau Curie ausgeführt worden ist, beweisen, daß Radium und andere radioaktive Körper unaufhörlich bedeutende Beträge von Energie an die Umgebung abgeben: sei es in Form von Strahlung, sei es in Form von Wärme, sei es in der Form der chemischen Energie, welche zur Sprengung der stärksten Verwandtschaften der Stoffe führen kann, wie das Beispiel der Zersetzung des Wassers in seine Bestandteile: den Wasserstoff und den Sauerstoff — zeigt.

Schon diese Tatsachen genügen, um Staunen hervorzurufen. Aber damit nicht genug! Das Radium ist nicht allein imstande von sich aus stets neue Mengen von Energie zu erzeugen. Es besitzt die Fähigkeit, anderen Körpern radioaktive Eigenschaften zu verleihen. Jeder Gegenstand, den wir in die Nähe des Radiums bringen, erlangt in kurzer Zeit die Eigenschaft, sich radioaktiv zu betätigen. Er sendet von sich Strahlen aus, welche, wie die Strahlen des Radiums, die Eigenschaft haben, die Luft zu ionisieren. Man kann mit einer Lösung von 10 Milligramm Radiumchlorid einen beliebigen Draht so stark aktivieren, daß er Zinksulfid und Willemit zum starken Leuchten bringt. Es ist für den Versuch belanglos, welchen Stoff wir dem Einfluß des Radiums unterziehen, denn verschiedene Metalle aktivieren sich hierbei bis zu demselben Grade wie Glas, Holz oder Papier.

Aber diese künstlich hervorgerufene oder „aufgezwungene“ Radioaktivität ist nicht beständig, wie die Aktivität des Radiums. Sie nimmt vielmehr zunächst mit der Dauer der Einwirkung des Radiums ständig zu, erreicht aber nach einiger Zeit einen Grenzwert. Wird dann der aktive Stoff dem Einfluß des Radiums entzogen, so verliert er allmählich seine Radioaktivität. Die Intensität der Strahlung nimmt zuerst rasch ab und vermindert sich in den ersten 15 Minuten ungefähr auf die Hälfte ihres Anfangswertes. Später findet die Abnahme der Aktivität immer langsamer statt: in einem Tage verschwindet die Aktivität fast vollständig.

Von einer fundamentalen Bedeutung für die weitere Entwicklung der Frage nach der Natur dieser Erscheinungen war die von P. Curie gemachte Entdeckung, daß der Abfall der „erzwungenen“ Radioaktivität sich einem einfachen Gesetz fügt. Dieses lautet, daß die Radioaktivität sich in jeder Sekunde um den gleichen Bruchteil ihrer im gegebenen Moment noch vorhandenen Menge vermindert. Dieses Gesetz erinnert schon durch seine äußere Form an jenes Grundgesetz, welches die Geschwindigkeit der einfachsten chemischen Umwandlungen regelt, wie z. B. die von Wilhelm η untersuchte Spaltung des Rohrzuckers. Denn beim Studium dieser wie auch anderer analoger chemischer Reaktionen hat sich erwiesen, daß die Menge der in der Zeiteinheit umgewandelten Substanz immer den gleichen Bruchteil der zur gegebenen Zeit noch nicht veränderten Menge der ursprünglichen Substanz ausmacht. So wird in der — als Beispiel angeführten — Spaltung des Rohrzuckers in jeder Sekunde der gleiche Bruchteil des noch im unveränderten Zustand vorhandenen Rohrzuckers gespalten. Wie wir weiter sehen werden, hat sich gezeigt, daß die Analogie des Gesetzes des Abklingens der Aktivität mit dem Grundgesetz der Geschwindigkeit der stofflichen Umwandlungen mehr als eine äußere ist.

Nehmen wir an, die Radioaktivität betrage zurzeit $t: J$ Einheiten; in einem folgenden Zeitmoment t_1 sei die Radioaktivität auf J_1 Einheiten gefallen. Die Geschwindigkeit des Abfalls der Radioaktivität wird in diesem Fall durch das Verhältnis: $\frac{J - J_1}{t_1 - t}$ gemessen. Wir können dieses Verhältnis der Kürze halber durch das Symbol $-\frac{dJ}{dt}$ ersetzen.

Das von P. Curie entdeckte höchst wichtige Grundgesetz des Radioaktivitätsabfalls besagt nun, daß die Geschwindigkeit des Abfalls der Radioaktivität in jedem Stadium der augenblicklich vorhandenen Radioaktivität proportional ist. Mathematisch wird dieses Gesetz durch die folgende Gleichung ausgedrückt:

$$-\frac{dJ}{dt} = \lambda J. \quad (1)$$

In dieser Gleichung stellt die Größe λ eine von der Zeit unabhängige, für die gegebene Substanz charakteristische konstante Größe dar. Im Zusammenhang mit der von Rutherford ausgesprochenen und wohlbegründeten Theorie nennen wir die Größe λ : Umwandlungskonstante.

Die oben angeführte Gleichung (1) gilt genau nur für kurze Zeitintervalle. Mittels einer Integration können wir der Umwandlungsgleichung eine allgemeine Form geben, welche uns gestattet, aus der anfänglichen Radioaktivität J_0 die Radioaktivität J in einem beliebigen Moment t zu berechnen. Integrieren wir die Gleichung (1), so erhalten wir folgende Beziehung:

$$J = J_0 e^{-\lambda t} \quad (2)$$

In dieser zweiten Gleichung bedeutet die Größe e die Basis der „natürlichen“ Logarithmen, während die übrigen Buchstaben ihre frühere Bedeutung behalten.

P. Curie, welcher zuerst beobachtet hatte, daß die Aktivität des Radiums allen in seiner Nachbarschaft befindlichen Gegenständen aufgezwungen werden kann, schrieb diese Erscheinung einer besonderen Eigenschaft der Materie zu. Er nannte diese Eigenschaft „induzierte Aktivität“. Rutherford nahm hingegen an, daß die Erscheinung der „induzierten Radioaktivität“ von einem besonderen Stoff herrührt, welcher in einer äußerst dünnen Schicht alle festen Körper, die sich in der unmittelbaren Nähe des Radiums befinden, bedeckt. Reiben wir einen mit „induzierter“ Radioaktivität behafteten Gegenstand mit etwas Sandpapier ab, so wird der Gegenstand inaktiv, und die „induzierte“ Aktivität geht jetzt auf das Sandpapier über. Das von Curie entdeckte Gesetz des Abfalls der Aktivität, welches wir auf S. 37 angeführt haben, spricht auch dafür, daß wir hier mit einem besonderen Stoff zu tun haben, welcher einer langsamen chemischen Umwandlung unterliegt. Man bezeichnet — nach Rutherfords Vorschlag — diesen eigentümlichen Stoff mit dem Namen radioaktiver Niederschlag.

Die von Rutherford in die Wissenschaft eingeführte Anschauung hat sich ausgezeichnet bewährt. Denn alle Eigenschaften der „induzierten Aktivität“ sprechen zugunsten ihrer stofflichen Natur, wenngleich die Menge des „radioaktiven Niederschlags“ zu gering ist, daß man sie mit der Wage feststellen könnte. Aber wir können experimentell ihre Eigenschaften studieren. Wenn wir einen Platindraht in der Nähe des Radiums halten, so aktiviert er sich. Erhitzen wir das aktivierte Platin auf Rotglut, so verliert es seine Aktivität, welche sich an kalten Stellen wieder ansammelt. Wir können daraus schließen, daß der als „radioaktiver Niederschlag“ bezeichnete Stoff in der Rotgluthitze flüchtig ist.

Tauchen wir den aktivierten Platindraht in starke Salzsäure, so geht

die „induzierte Aktivität“ von der Oberfläche des Drahtes ab; die Säure zeigt aber nach dem Verdampfen einen Rückstand, welcher aktiv ist. Daraus schließen wir, daß der radioaktive Niederschlag in starken Säuren löslich ist. Unterwirft man die durch Behandlung des aktivierten Platindrahts mit Salzsäure erhaltene Lösung der Elektrolyse, so schlägt sich der aktive Niederschlag auf die Kathode nieder. Diese Tatsache rechtfertigt den Schluß, daß der aktive Niederschlag die Eigenschaften eines Metalls aufweist.

Ein genaues Studium der Erscheinungen des Abklingens der Aktivität der radioaktiven Niederschläge hat zu der Anschauung geführt, daß wir in ihnen mit Konglomeraten mehrerer Elemente zu tun haben, welche zueinander in einer genetischen Beziehung stehen. Der 21. Abschnitt wird der Auseinandersetzung dieser Beziehungen gewidmet werden.

II. Die Emanation des Radiums.

Auch die Luft, welche mit dem Radium in Berührung gewesen ist, ist radioaktiv. Sie behält ihre Aktivität auch dann noch, wenn wir sie aus dem Gefäß, in welchem das Radiumpräparat enthalten ist, in ein anderes Gefäß überführen. Wir werden jedoch in diesem Fall wiederum bemerken, daß die Aktivität der Luft — wie wir das vorher auch bei dem „radioaktiven Niederschlag“ gesehen haben — nicht konstant bleibt, sondern stetig abnimmt. Im übrigen folgt auch der Aktivitätsabfall der radioaktiven Luft genau demselben Gesetz, welches für den „radioaktiven Niederschlag“ festgestellt worden ist. Nur ist die Dauer der Aktivität in diesem Fall viel länger. Erst nach vier Tagen geht die Hälfte der Aktivität des Gases verloren. Aber noch nach einem Monat läßt sich ein Rest der Aktivität mittels der elektrischen Methode nachweisen.

P. Curie hat die Abnahme der Aktivität der Luft zeitlich verfolgt und in diesem Fall zum erstenmal dasjenige Fundamentalgesetz verifiziert, welches wir im vorigen Abschnitt angeführt haben, und welches dazu bestimmt war, in der Theorie der Radioaktivität eine ausschlaggebende Rolle zu spielen.

Den zeitlichen Abfall der Aktivität kann man sehr schön zur Anschauung bringen, wenn man sich folgender graphischer Methode bedient. Man bezeichnet die anfängliche Aktivität mit 100 und trägt in einem Liniennetz von Tag zu Tag die beobachtete Aktivität auf den zugehörigen Vertikallinien auf, während die Zahl der Tage längs

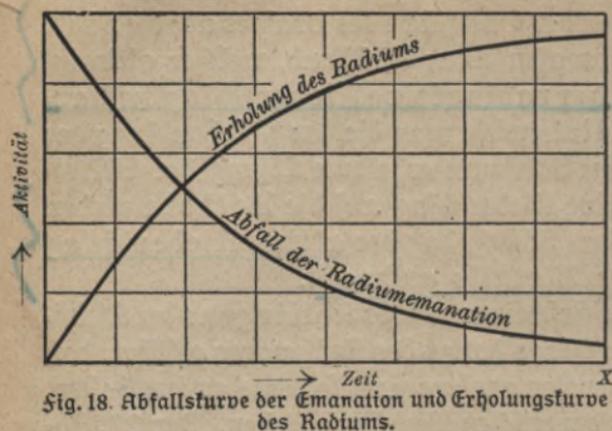


Fig. 18. Abfallskurve der Emanation und Erholungskurve des Radiums.

der horizontale bezeichnet wird. Man erhält so eine Anzahl von Punkten, welche durch eine Linie zur stetigen Kurve vereinigt werden. Man kann aus dieser Kurve ersehen, wie die Aktivität der Emanation von Tag zu Tag abnimmt (Fig. 18).

P. Curie hat weiter nachgewiesen, daß die Geschwindigkeit der Aktivitätsabnahme von der Temperatur unabhängig ist. In einem elektrischen Ofen wurde bei der Temperatur von 450° genau dieselbe Konstante erhalten wie bei der Temperatur der flüssigen Luft: bei -180° .

Die Grundlage unserer Kenntnisse von dem radioaktiven Prinzip der Luft verdanken wir Rutherford. Er ging von der Voraussetzung aus, daß die Aktivität der mit Radium in Berührung gewesenen Luft von der Anwesenheit einer unbekanntes radioaktiven Materie herrührt. Diese Materie mußte, wie die Luft selbst, gasförmig sein und wurde Emanation genannt. Das war noch lange, bevor es gelungen war, sie zu isolieren und ihre Haupteigenschaften kennen zu lernen. Aber alle Versuche, welche in der Folge an der Emanation des Radiums vorgenommen worden sind, haben diese grundlegende Annahme glänzend bestätigt, so daß heute in bezug auf ihre Richtigkeit kein Zweifel mehr herrscht.¹⁾

Die Versuche über die Entstehung des radioaktiven Niederschlags beweisen, daß zwischen der Emanation und der induzierten Aktivität eine direkte Beziehung besteht. Folgender Versuch von Curie und Debierne beansprucht besonderes Interesse. Das Radium befand sich in dem kleinen Gefäß *a* (Fig. 19), welches mit einer sehr engen Öffnung versehen war. Oberhalb, unterhalb und zu Seiten des Gefäßes befanden sich 5 Platten aus verschiedenen Stoffen: A, B, C, D, E.

1) Die Emanation des Radiums wurde zum erstenmal im Jahre 1900 von Dorn entdeckt, kurze Zeit, nachdem Rutherford eine ähnliche Materie im Thorium entdeckt hatte.

Nach eintägiger Exposition setzte sich auf allen 5 Platten der radioaktive Niederschlag ab, und alle Platten waren gleich stark radioaktiv geworden. Zwischen der Platte *D* und dem Gefäß mit dem Radiumpräparat befand sich ein dicker Bleischirm *P*. Trotzdem war am Schluß des Versuchs die Platte *D* ebenso stark aktiv wie die anderen Platten. Der Versuch beweist, daß die Erzeugung des radioaktiven Niederschlags nicht durch die Strahlen des Radiums erfolgt, weil diese durch den Bleischirm nicht durchdringen können. Man muß vielmehr die durch die Luft sich verbreitende Emanation als das erzeugende Agens betrachten. In der Tat läßt sich experimentell feststellen, daß die induzierte Aktivität nur dann auf festen Körpern entsteht, wenn dieselben mit der Emanation in Berührung sind.

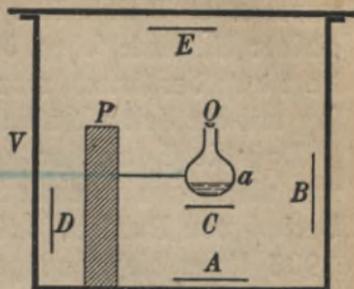


Fig. 19. Versuch von Curie und Debierne: Entstehung der induzierten Aktivität.

Feste Salze geben bei gewöhnlicher Temperatur die Emanation sehr schwer ab. Sie entwickeln reichliche Mengen davon erst, wenn sie erhitzt oder aufgelöst werden. Die Fähigkeit, mit welcher die festen Radiumverbindungen die Emanation zurückhalten, wird von Godlewski darauf zurückgeführt, daß die Emanation in diesen Verbindungen sich im Zustande der festen Lösung befindet.

Was geschieht aber weiter mit Radium, wenn es seine radioaktive Energie an andere Stoffe abgibt? In dem Maße, wie das Radium „Emanation“ und „radioaktiven Niederschlag“ erzeugt, wird es selbst in seiner Kraft geschwächt. Lösen wir das Radiumsalz im Wasser auf, um es völlig von der in seinen Poren eingeschlossenen Emanation zu befreien, so können wir feststellen, daß nach Entfernung der Emanation die Aktivität des Radiums um 75% abgenommen hat. Aber beim Stehen erholt sich das „entemanierete“ Präparat wieder, und nach Verlauf eines Monats strahlt das Radium wieder in seiner vollen ursprünglichen Kraft. Wenn wir die zeitliche Zunahme der Aktivität des Radiums in demselben Liniennetz zeichnen, in welchem wir den Aktivitätsabfall der Emanation eingetragen haben (Fig. 18), so erhalten wir eine zweite Kurve, welche einen entgegengesetzten Charakter trägt als die erste, denn sie steigt stetig. Besonders bemerkenswert ist, daß beide Kurven sich gegenseitig ergänzen, so daß die Summe der Aktivitäten der Emanation und des Radiums stets

unverändert bleibt. Wir werden bei der Besprechung anderer radioaktiver Elemente sehen, daß dieses Gesetz allgemein gilt. Und darin liegt auch der Grund, warum die Aktivität des gewöhnlichen Radiums sich mit der Zeit nicht ändert.¹⁾

Daß die Emanation ein wirklicher Stoff, und zwar ein Gas ist, und nicht etwa in einer Strahlung beruht, — ist durch einen schönen Versuch von Rutherford und Soddy bewiesen worden. Im Jahre 1903 ist es diesen ausgezeichneten Physikern gelungen, durch Ab-

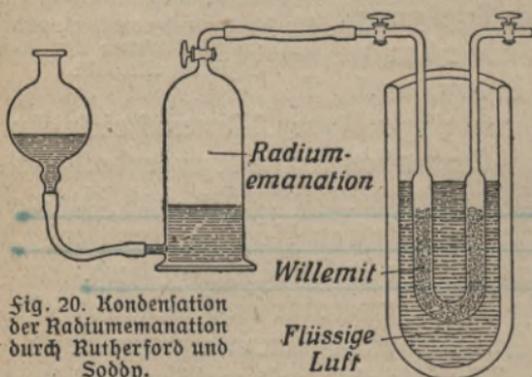


Fig. 20. Kondensation der Radiumemanation durch Rutherford und Soddy.

kühlung der Emanation auf die Temperatur der flüssigen Luft dieses Gas in eine klare durchsichtige Flüssigkeit zu verwandeln. Die Apparatur, deren sie sich bei ihren Versuchen bedienten, dürfte aus der Fig. 20 leicht zu verstehen sein. Die mit Luft vermischte Emanation wurde in einem kleinen Gasometer aufgesammelt und daraus durch ein U-rohr im langsamen Strom durchgeleitet. Das U-rohr befand sich in einem mit flüssiger Luft gefüllten doppelwandigen Zylinder. Bei der durch die flüssige Luft hervorgebrachten Kälte wurde die Emanation im U-rohr verflüssigt, während die Luft ins Freie entwich. Bringt man in die U-röhre einige Stückchen Willemitt hinein, so beginnen zunächst diejenigen Kristalle zu leuchten, welche sich unmittelbar unter der Oberfläche der flüssigen Luft befinden, weil die Emanation dort zuerst kondensiert wird.

Im reinen Zustand siedet die flüssige Emanation des Radiums bei -62° , d. h. etwa um 10° höher als die Kohlenäure. Ihre kritische Temperatur beträgt 104° . Oberhalb dieser Temperatur läßt sich die Emanation durch keinen Druck mehr kondensieren. Die flüssige Emanation ist farblos und durchsichtig. Sie zeichnet sich durch sehr hohe Dichte aus: sie ist ungefähr 5 mal schwerer als Wasser. Durch Messungen der Aktivität ist festgestellt worden, daß die Emanation 100 000 mal stärker aktiv ist wie die gleiche Menge ihrer Mutter-

1) Die mit einem Gramm Radium im Gleichgewicht befindliche Menge der Emanation bildet die Einheit der Emanation: „Curie“ (vgl. S. 26).

Substanz, des Radiums. Im Dunkeln sendet sie Licht aus und bringt auch das Glas zum lebhaften Leuchten. Man hat vermutet, daß die Emanation, als eine stark radioaktive Substanz, sich selbst ionisieren kann. Direkte Versuche haben jedoch gezeigt, daß die Emanation keine elektrische Leitfähigkeit besitzt und folglich nicht mehr Gasionen enthält als andere Gase. Bei -71° wird die flüssige Emanation fest. Auch im festen Zustand sendet sie in der Kälte ein glänzendes Licht aus, welches bei der Abkühlung die Farbe wechselt. Beim Schmelzpunkt hat das Licht eine stahlblaue Farbe. Bei der Temperatur der flüssigen Luft geht die Farbe ins Orangerot über.

Daß die Emanation ein besonderes Gas darstellt, beweist die Tatsache, daß sie ein charakteristisches Spektrum besitzt. Die elektrische Entladung durch die in einer sog. Geißlerschen Röhre eingeschlossene gasförmige Emanation ruft ein bläuliches Licht hervor, welches im Spektralapparat nicht weniger als 100 einzelne Linien erkennen läßt. Die grünen und die violetten Linien sind besonders glänzend. Nach den sorgfältigen Versuchen von Rutherford und Rønds kann heute nicht mehr bezweifelt werden, daß das Spektrum der Emanation einem individuellen Gas zugehört. Auch sonstige Eigenschaften dieser Substanz beweisen einwandfrei, daß die Emanation ein neues Element darstellt, welches von anderen Elementen sich durch nichts anderes wesentlich unterscheidet — als durch — ihre Vergänglichkeit.

Ramsay und Soddy haben bald nach der geglückten Verflüssigung der Emanation experimentell bewiesen, daß dieser merkwürdige Stoff allen Änderungen des Druckes und der Temperatur genau in derselben Weise folgt wie die anderen Gase. Beim Erwärmen dehnt er sich aus, durch Druck wird er zusammengepreßt, wobei das Produkt: $\text{Druck} \times \text{Volum}$ — entsprechend dem Gesetze von Boyle — unverändert bleibt. Er diffundiert in Luft und in andere Gase hinein in genau derselben Weise wie andere Gase. Die Emanation löst sich in Wasser auf. Die erhaltene Lösung ist radioaktiv. Bei gewöhnlicher Temperatur löst ein Liter Wasser 300 Kubikzentimeter gasförmiger Emanation von Atmosphärendruck auf. In organischen Flüssigkeiten, wie z. B. Alkohol und Toluol, ist die Radiumemanation in noch stärkerem Maße löslich. Diese Tatsachen beweisen, daß die Emanation in bezug auf ihre physikalischen Eigenschaften sich nicht wesentlich von anderen Gasen unterscheidet. Von ihren chemischen Eigenschaften läßt sich nicht viel sagen, weil alle Versuche, die Emanation mit anderen Stoffen chemisch

zu verbinden, bisher gar keinen Erfolg hatten. Weder Säuren noch Alkalien sind imstande, sie irgendwie zu verändern. Weder Sauerstoff, dieses durch die kräftigsten Verwandtschaften zu allen Elementen ausgezeichnete Gas, noch Metalle, wie Magnesium, sind fähig, sich mit der Emanation zu verbinden. Weder Kälte noch Wärme oder elektrische Entladungen wirken auf die Emanation ein. Diese Versuche führen zu dem wichtigen Schluß, daß die Emanation keine Verwandtschaft zu anderen Elementen aufweist.

So wurde einwandfrei bewiesen, daß die Emanation, welche als ein neues gasförmiges Element aufzufassen ist, allen ihren Eigenschaften nach zu derselben Gruppe der gasförmigen Elemente gezählt werden muß, zu welcher das Argon und seine Begleiter gehören, die einige Jahre zuvor von Ramsay in der Luft entdeckt worden sind. Man bezeichnet sie als Edelgase, weil sie mit keinem der bekannten Elemente Verbindungen eingehen (nach Analogie mit den Edelmetallen, welche sich nicht mit dem Sauerstoff verbinden), und bildet aus ihnen die sog. nullte Gruppe des periodischen Systems (vgl. S. 99). Zu derselben Gruppe muß auf Grund ihrer chemischen Trägheit auch die Radiumemanation gezählt werden, oder das neue Element „Niton“, wie es Ramsay getauft hat. Bestätigt wird diese Annahme dadurch, daß das Spektrum der Emanation den Spektren der Gase der Argongruppe auffallend ähnlich ist.

Da dieser eigentümliche gasförmige Stoff sich rasch umwandelt, so kann er nur in außerordentlich geringen Mengen erhalten werden. Denn aufbewahren und sammeln läßt er sich nicht. Trotzdem ist es Ramsay gelungen, mit einer Wage von außerordentlicher Empfindlichkeit die Dichte dieses Gases zu bestimmen und daraus sein Atomgewicht zu berechnen. Die Dichte der Emanation ist größer als die Dichten aller anderen elementaren Gase. Ihr Atomgewicht beträgt nach den neuesten Bestimmungen desselben Forschers 222,5. Auf Grund dieses Befundes sind wir berechtigt, dieses neue Element als letztes bekanntes Glied in der nullten Gruppe des periodischen Systems der Elemente, nämlich in der Gruppe der Edelgase unterzubringen (vgl. die periodische Tabelle der Elemente auf S. 99). Die Emanation erhält hier ihren Platz unter dem Xenon und in einer Horizontalreihe mit ihrer Muttersubstanz: dem Radium.

Trotzdem sich die Emanation durch absolute chemische Trägheit auszeichnet und mit keinem anderen Element sich chemisch verbindet, be-

sieht sie nichtsdestoweniger einen ungeheuren Vorrat an innerer Energie. Rutherford hat berechnet, daß dreiviertel der vom Radium gebildeten Wärme von der in ihm enthaltenen Emanation herrührt. Wir werden im Abschnitt 24 sehen, daß 1 g Emanation im ganzen über eine Milliarde Kalorien entwickeln kann, das ist dreimillionenmal mehr, als ein gleiches Volum Knallgas bei seiner Explosion liefert. Die Radiumemanation erweist sich als eine der gewaltigsten der in der Natur vorkommenden Energiequellen. Offenbar stehen wir hier vor einem wahren Rätsel der Natur, welches einem der bestbegründeten Naturgesetze, dem Gesetz der Erhaltung der Energie, zu trozen scheint. Woher stammen jene gewaltigen Mengen von Energie, welche ohne Anfang und ohne Ende von jedem Radiumpräparat in das Weltall hinausgeschleudert werden? Ist diese Energieverschleuderung wirklich ewig und unveränderlich oder scheint sie es nur zu sein, weil unsere Beobachtungszeit zu kurz ist, um uns zu gestatten, etwaige Abschwächung der Strahlung zu beobachten?

Die soeben erwähnten Untersuchungen der „Emanation“ und des „radioaktiven Niederschlags“ haben gezeigt, daß die radioaktiven Stoffe keineswegs so unvergänglich sind, wie man es aus dem Beispiel des Radiums zunächst schließen zu dürfen glaubte. Sie weisen zugleich darauf hin, daß die Quelle der Strahlungsenergie radioaktiver Substanzen in stofflichen Umwandlungen zu suchen ist, welche die radioaktive Materie erleidet. Die theoretischen Spekulationen sowie die experimentellen Untersuchungen, welche zur endgültigen Lösung des Rätsels der Radioaktivität führten, überragen an wissenschaftlicher Bedeutung alle Errungenschaften der letzten Zeit. Sie lassen sich mit den größten Umwälzungen auf dem Gebiet der exakten Wissenschaften in eine Reihe stellen.

II. Die Natur der Radiumstrahlen.

12. Die Strahlung des Radiums.

Ehe wir zur Beantwortung der Frage nach der Quelle der Radiumenergie übergehen, wollen wir uns hier noch etwas genauer mit der Natur und den besonderen Eigenschaften der Radiumstrahlen beschäftigen. Eine genauere Analyse hat zu dem wichtigen Schluß geführt, daß die Radiumstrahlen nicht gleichartig sind, sondern in drei Gruppen getrennt werden können, welche mit den drei Anfangs-

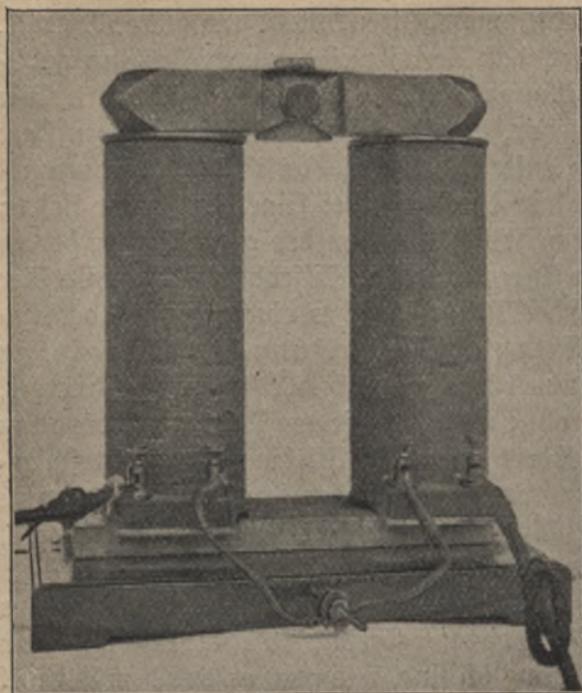


Fig. 21. Elektromagnet zum Nachweis der Ablenkung der Radiumstrahlen im magnetischen Felde.

buchstaben des griechischen Alphabets: α (Alpha), β (Beta) und γ (Gamma) bezeichnet

werden. Man spricht also kurz von α -, β - und γ -Strahlen. Diese drei Gruppen unterscheiden sich scharf voneinander, erstens in bezug auf ihre Durchdringlichkeit und zweitens in bezug auf ihr Verhalten im magnetischen Feld.

1a Eine ziemlich genaue Trennung der drei Arten der Radiumstrahlen kann man mit einem starken Elektromagnet vornehmen. Das Radiumpräparat befindet

sich in einer Bleikapfel, welche zwischen den beiden Polen des in der Figur 21 abgebildeten Elektromagnets gehalten wird. Man kann dann beobachten, daß ein Teil der Strahlen vom Magnet aus seiner Bahn abgelenkt wird, und zwar nach verschiedenen Richtungen. Denken wir uns den in der Figur 21 dargestellten Elektromagnet um 90° gegen die Ebene der Zeichnung gedreht, so daß der Nordpol vor und der Südpol hinter dem Blatt seinen Platz bekommt, so können wir uns vorstellen, daß die magnetischen Kraftlinien, welche von einem Pol zum andern laufen, in einer zur Zeichenebene senkrechten Ebene liegen. Dann tritt folgende Scheidung der Strahlen ein (Fig. 22). Die α -Strahlen werden unter einem gewissen Winkel nach links abgelenkt, die β -Strahlen krümmen sich sehr stark nach rechts, die γ -Strahlen erfahren gar keine Ablenkung.

Ähnlich verhalten sich die drei Gattungen der Radiumstrahlen im elektrostatischen Felde. Bringen wir unsere Bleikapfel mit dem Radiumpräparat so an, daß ihre Strahlen zwischen zwei elektrifizierten Metallplatten durchgehen müssen, wie es in der Figur 23 angegeben

ist, so erhalten wir folgendes Resultat. Ein Teil der Strahlen wird von der positiv geladenen Platte angezogen: das sind die β -Strahlen. Ein anderer Teil wird schwach zur negativen Platte hin abgelenkt: das sind die α -Strahlen. Die γ -Strahlen erfahren auch in diesem Versuch gar keine Ablenkung.

In bezug auf das Durchdringungsvermögen nehmen die erste Stelle die γ -Strahlen ein. Sie durchdringen eine Bleiplatte von 20 cm Durchmesser. Weniger durchdringlich sind die β -Strahlen. Sie werden durch eine Aluminiumplatte von 1 cm Durchmesser nahezu vollständig verschluckt. Die α -Strahlen werden am leichtesten absorbiert: sie werden schon von einem Aluminiumblech absorbiert, welches kaum 0,004 cm Dicke hat. Ein Blatt Papier hält sie vollständig zurück, und sogar Gase, wie z. B. Luft, verhindern ihre Ausbreitung: so können die α -Strahlen des Radiums in Luft von gewöhnlichem Druck nicht weiter als auf eine Strecke von 3,5 cm vordringen. Um die β -Strahlen vollständig zu absorbieren, brauchen wir eine Aluminiumplatte von 5 mm und zur Absorption der γ -Strahlen eine solche von 500 mm. Bezeichnen wir die Durchdringlichkeit der α -Strahlen mit 1, so erhalten wir für die Durchdringlichkeit der β -Strahlen die Zahl 100, während die Durchdring-

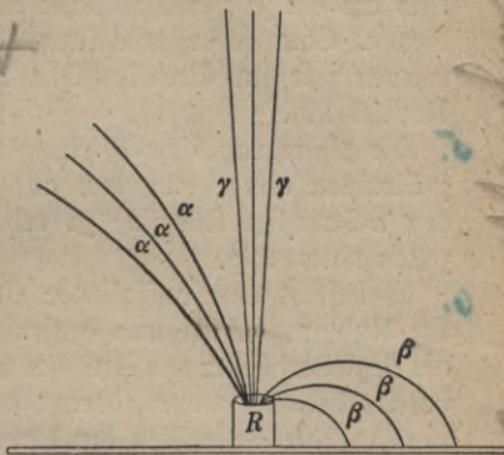


Fig. 22. Zerlegung der Radiumstrahlen im magnetischen Felde.

lichkeit der γ -Strahlen durch 10 000 ausgedrückt wird. Diese Zahlen sind nur Mittelwerte, denn jede Art der Strahlen zeigt noch individuelle Verschiedenheiten. Eine umgekehrte Reihenfolge der drei Strahlenarten werden wir bemerken, wenn wir ihre Fähigkeit Luft zu ionisieren oder Wärme zu erzeugen vergleichen. Denn in bezug auf diese Eigenschaften nehmen α -Strahlen die erste Stelle ein, dann folgen β -Strahlen und zum Schluß γ -Strahlen. Bezeichnen wir die ionisierende Kraft der γ -Strahlen mit 1, so beträgt die

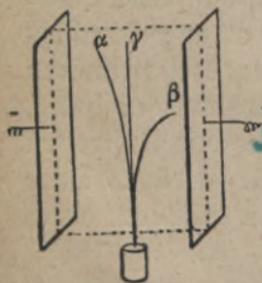


Fig. 23. Verschiedene Ablenkbarkeit der Radiumstrahlen im elektrischen Felde.

ionisierende Kraft der γ -Strahlen mit 1, so beträgt die

Jonisierungskraft der β -Strahlen 100 und diejenige der α -Strahlen 10000.

4. Von den unter dem Einfluß der Radiumstrahlen leuchtenden Stoffen sind manche nur gegen β - und γ -Strahlen empfindlich, so das Bariumplatinzinnur und Willemit. Die Zinkblende dagegen wird durch die α -Strahlen besonders leicht zum Leuchten erregt und kann darum als ein sehr empfindliches Reagens auf diese Art von Strahlen dienen. Eine interessante Anwendung dieser empfindlichen Methode werden wir im Crookes'schen Spintharistop kennen lernen (vgl. Kapitel 19).

5. Die photographische Wirkung wird hauptsächlich von den β - und γ -Strahlen ausgeübt. Um auf der photographischen Platte von den α -Strahlen Abdrücke zu erhalten, sind sehr lange Expositionszeiten notwendig.

6. Es besteht eine auffallende Analogie zwischen diesen drei Arten der Radiumstrahlen und denjenigen drei Arten von Strahlen, die als Begleiterscheinung elektrischer Entladung im luftverdünnten Raum bereits bekannt waren, derart, daß

die α -Strahlen den Kanalstrahlen,
 die β -Strahlen den Kathodenstrahlen und
 die γ -Strahlen den Röntgenstrahlen

ähnlich erscheinen.

7. Es erscheint wichtig, schon hier zu bemerken, daß die drei Arten von Strahlen nicht von allen radioaktiven Stoffen ausgesandt werden. Einige von ihnen, wie z. B. Emanation des Radiums und das Polonium, senden nur α -Strahlen aus. Andere Stoffe senden wiederum nur β - und γ -Strahlen aus. Es ließ sich aber in allen bisher untersuchten Fällen feststellen, daß alle Substanzen, welche die β -Strahlen aussenden, auch γ -Strahlen bilden (vgl. Tabelle auf Seite 101). Außer diesen drei primären Strahlenarten lassen sich in der Nähe des Radiums noch sog. sekundäre Strahlen nachweisen. Sie werden durch das Auftreffen der primären α -, β - und γ -Strahlen auf Materie erzeugt. Diese sekundären Strahlen zeichnen sich stets gegenüber den primären durch eine geringere Geschwindigkeit aus.

13. Die γ -Strahlen.

Wir gehen zur genaueren Betrachtung der einzelnen Strahlenarten über und wollen unsere Betrachtungen mit den γ -Strahlen beginnen, von denen wir weniger wissen als von den andern. Denn die γ -Strahlen zeichnen sich vorzugsweise durch negative Eigenschaften aus: Vom Magneten werden sie nicht abgelenkt. Sie werden von den dichtesten Stoffen kaum verschluckt. Sie erleiden keine Zurückwerfung an spiegelnden Flächen wie die gewöhnlichen Strahlen und werden nicht gebrochen, wenn sie aus einem Medium in ein anderes übergehen. Man beobachtet in ihnen keine Interferenz und keine Polarisation. Alle diese negativen Kennzeichen der γ -Strahlen weisen auf ihre große Ähnlichkeit mit den Röntgenstrahlen hin. Ja, man kann leicht feststellen, daß die γ -Strahlen in bezug auf ihr Durchdringungsvermögen die Röntgenstrahlen um ein bedeutendes übertreffen. Die wenig durchdringenden, weichen Strahlen entstehen in Crookes'schen Röhren, in denen eine mäßige Potentialdifferenz herrscht. Die durchdringenden harten Strahlen werden in Röhren mit sehr gutem Vakuum und bei hoher Potentialdifferenz gewonnen. Die γ -Strahlen sind noch viel „härter“, d. h. durchdringender, als die härtesten Röntgenstrahlen. Darin liegt auch der Grund, warum die Radiogramme blasser und weniger scharf herauskommen als die bekannten Aufnahmen, welche man mit Hilfe der Röntgenstrahlen auszuführen pflegt (S. 18).

Über die Natur der Röntgenstrahlen haben die bahnbrechenden Untersuchungen der letzten Jahre wichtige Resultate geliefert. Während man früher geneigt war anzunehmen, daß die Röntgen- und die γ -Strahlen aus winzigen Körperchen bestehen, die mit ungeheuren Geschwindigkeiten in den Weltraum hinausgeschleudert werden, haben die Versuche von Bragg, Barkla und von Laue in einwandfreier Weise dargetan, daß wir hier mit gewöhnlichen Lichtstrahlen von außerordentlich kurzer Wellenlänge zu tun haben.

Die kleinste Wellenlänge unter den sichtbaren Strahlen weisen die violetten Strahlen auf: ihre Wellenlänge beträgt $4 \times 10^{-5} = 0,000\ 04$ cm. Mittels ihrer photographischen Wirkung können wir im ultravioletten Teil des Spektrums Strahlen unsichtbarer Art nachweisen, deren Wellenlänge nur 1×10^{-5} cm beträgt. Die Röntgenstrahlen haben eine Wellenlänge, welche mindestens 1000 mal

kleiner ist als diejenige der ultravioletten Strahlen und welche je nach der Stärke der Strahlen verschieden ist. Man kann als erwiesen betrachten, daß das „Spektrum“ der Röntgenstrahlen in den Grenzen von 0,000 000 12 bis 0,000 000 008 cm liegt. Für die weichen Strahlen des Radiums fanden Rutherford und Andrade Wellenlängen von 0,000 000 008 bis 0,000 000 014 cm, für die harten Strahlen Wellenlängen, welche bis 0,000 000 000 7 cm herabreichen.

Für die Absorption der γ -Strahlen gilt annähernd das Exponentialgesetz:

$$J = J_0 \cdot e^{-\mu x},$$

im welchem J_0 die anfängliche Intensität der γ -Strahlung bedeutet, J die Intensität der Strahlung nach ihrem Durchgang durch Materie von der Dicke x , e die Basis der natürlichen Logarithmen und μ eine Konstante, den sog. Absorptionskoeffizienten der γ -Strahlen. Das Gesetz besagt, daß gleich dicke aufeinanderfolgende Schichten der Materie den gleichen Bruchteil der Strahlung absorbieren.

Die Absorption der γ -Strahlen hat sich in ziemlich weiten Grenzen als unabhängig von der Art der absorbierenden Materie erwiesen und als direkt proportional der Dichte der absorbierenden Substanz ρ , so daß annähernd folgende Beziehung für den Absorptionskoeffizienten μ der gegebenen Strahlungsgattung gilt:

$$\frac{\mu}{\rho} = \text{Const.}$$

Da bei allen radioaktiven Stoffen die γ -Strahlen stets in Gesellschaft der β -Strahlen auftreten, so liegt es nahe, anzunehmen, daß sie durch die β -Strahlen erzeugt werden, ähnlich wie die Röntgenstrahlen in den evakuierten Röhren durch den Anprall der Kathodenstrahlen auf die Wandungen der Röhre oder auf ein Metallblech hervorgerufen werden. In der Tat kann man beobachten, daß diejenigen β -Strahler, welche β -Strahlen von großer Anfangsgeschwindigkeit aussenden, auch eine γ -Strahlung von großer Intensität und Durchdringungsfähigkeit besitzen. Wengleich also eine derartige Annahme viel Wahrscheinlichkeit für sich hat, so ist es doch noch nicht gelungen, sie experimentell zu bestätigen. Alle Versuche, durch β -Strahlen die γ -Strahlen künstlich hervorzurufen, schlugen bisher fehl.

14. Die β -Strahlen.

Ihre charakteristische Eigenschaft beruht darin, daß sie vom Magnet nach rechts, und zwar sehr stark abgelenkt werden. Im elektrischen Feld werden sie vom positiven Pol angezogen.

Diese Tatsachen weisen darauf hin, daß die β -Strahlen sich im magnetischen und elektrischen Felde ebenso verhalten wie ein Schwarm von negativ geladenen materiellen Teilchen. Es ist bekannt, daß ein gleiches Verhalten in bezug auf diejenigen Strahlen festgestellt wurde, welche unter dem Einfluß elektrischer Entladungen in stark ausgepumpten Glasröhren entstehen. Der Entdecker dieser Strahlen, Sir William Crookes, belegte diese Strahlen mit dem Namen Kathodenstrahlen, weil sie von der Kathode, d. h. von demjenigen Platinblech, welches mit dem negativen Pol der Induktionspule verbunden ist, ausgesandt werden.

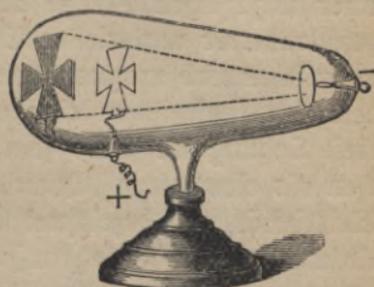


Fig. 24. Kathodenstrahlen erzeugt in einer stark ausgepumpten Röhre.

Alle Forscher, welche sich mit der Untersuchung der Kathodenstrahlen beschäftigt haben, sind zu der übereinstimmenden Überzeugung gelangt, daß diese Strahlen unmöglich als Schwingungen des Äthers aufgefaßt werden können, welche die Fortpflanzung der Lichtstrahlen verursachen. Sie müssen demnach anders gartet sein als gewöhnliches Licht.

Wir wollen uns hier daran erinnern, daß auch das Licht früher anders erklärt wurde. Der geniale Newton hatte angenommen, daß die Lichtstrahlen aus einzelnen materiellen Teilchen bestehen, welche von der Lichtquelle mit enormer Geschwindigkeit hinausgeschleudert werden. Diese Hypothese, welche man „Emissionshypothese“ nannte, unterlag im Kampfe mit der andern Annahme, welche von Huygens in die Wissenschaft eingeführt wurde. Letztere, die sog. „Undulationshypothese“ erklärt, wie bekannt, das Licht als eine Folge von wellenartig sich ausbreitenden Schwingungen des alles durchdringenden Äthers. Die Emissionshypothese von Newton wurde besiegt, weil sie die Erscheinungen der Interferenz und der Polarisation des Lichts nicht beschreiben konnte, welche im Lichte der Huygensschen Annahme völlig klar erscheinen.¹⁾

1) Der Leser sei hier auf das ausgezeichnete Werkchen von R. Börn-

Die Untersuchungen von Crookes haben aber am Ende des neunzehnten Jahrhunderts der genialen Idee des großen englischen Naturforschers ihren Ehrenplatz zurückerobert. Denn gerade in den Kathodenstrahlen haben wir mit Erscheinungen zu tun, welche den von Newton geforderten Bedingungen genau entsprechen. Alle Wirkungen der Kathodenstrahlen können — im Sinne von Crookes — als Folgen eines unaufhörlichen Bombardements aufgefaßt werden, welches von einer unzähligen Menge äußerst winziger, von der Kathode ausgeschleuderter materieller Teilchen herrührt. Exakte Messungen der elektrischen und magnetischen Eigenschaften dieser Körperchen haben bewiesen, daß ihnen eine elektrische Ladung anhaftet und daß diese Ladung negativ sein muß. Man betrachtet heute diese Teilchen als elementare „Quanta“ der Elektrizität oder als „Atome“ der Elektrizität und bezeichnet sie als „Elektronen“. Viele ausgezeichnete Untersuchungen der letzten Jahre waren darauf gerichtet, die Ladung von einem Gramm der Elektronen zu bestimmen. Man fand eine Zahl von etwas weniger als 18 Millionen elektromagnetischer Einheiten. Das ist eine enorme Zahl, welche die Ladung von einem Gramm Wasserstoff etwa 2000 mal übertrifft. Da man aber wichtige Gründe dafür besitzt, daß ein einzelnes Elektron ebensoviel Elektrizität mit sich führt wie ein einzelnes Atom Wasserstoff (oder ein Atom eines andern einwertigen Elementes), so wird man dadurch zu der Anschauung geführt, daß ein Elektron noch 2000 mal leichter sein muß als das leichteste aller bekannten Atome, das Wasserstoffatom. Wir werden sehen, daß sich diese Anschauung in allen ihren Folgerungen ausgezeichnet bestätigt hat.

Nimmt man, gemäß den neuesten Messungen, das Verhältnis von Ladung zur Masse der Elektronen gleich

$$\frac{e}{m} = 1,77 \cdot 10^7 \text{ elektromagn. Einheiten,}$$

so findet man für die Masse des einzelnen Elektrons die Zahl:

$$m = 0,876 \cdot 10^{-27} \text{ gr}$$

und für den Radius des Elektrons:

$$a = 1,83 \times 10^{-13} \text{ cm.}$$

Außer der elektrischen Ladung hat noch die Geschwindigkeit der

stein und W. Marckwald über „Sichtbare und unsichtbare Strahlen“ verwiesen, welches den 64. Band der Sammlung: „Aus Natur und Geisteswelt“ bildet.

elektrischen Teilchen im hohen Maße die Physiker beschäftigt. Es hat sich nun ergeben, daß die Geschwindigkeit der Fortpflanzung der Kathodenstrahlen nicht so konstant ist wie ihre elektrische Ladung. Sie hängt von den Versuchsbedingungen ab, namentlich von dem Verdünnungsgrad der Röhren und wechselt in den Grenzen von 20 000 Kilometer in der Sekunde bis zu 150 000. Die schnellsten Kathodenstrahlen nähern sich in ihrer Fortpflanzungsgeschwindigkeit den Lichtstrahlen, welche bekanntlich in jeder Sekunde 300 000 Kilometer zurücklegen.

Wie wir gesehen haben, sind die β -Strahlen in ihren Eigenschaften den Kathodenstrahlen ähnlich. Es war von großem Interesse, die Frage zu entscheiden, ob auch eine zahlenmäßige Übereinstimmung der Ladung und der Geschwindigkeit beider Strahlenarten vorliegt. Die ersten Messungen dieser Größen bei den β -Strahlen des Radiums sind von Becquerel ausgeführt worden. Er fand, daß die elektrische Ladung der β -Strahlen, bezogen auf die Masseneinheit, 10 000 000 elektromagnetische Einheiten beträgt. Sie ist also etwas kleiner als die Ladung der Kathodenstrahlen. Ihre Geschwindigkeit hingegen ist größer als die Geschwindigkeit der schnellsten Kathodenstrahlen: sie beträgt 160 000 Kilometer pro Sekunde. Durch die neueren Versuche von Danysz ist erwiesen, daß die β -Strahlen unter sich nicht gleichartig sind, sondern aus mehreren Strahlenbündeln bestehen, welche sich untereinander in bezug auf ihre Geschwindigkeit unterscheiden.

Sehr genaue Bestimmungen der Ladung der β -Strahlen sind von Kaufmann ausgeführt worden. Die Ergebnisse dieser Messungen sind äußerst wichtig für die Entwicklung unserer Anschauungen über den Begriff der Masse gewesen. Kaufmann hat ein schmales Bündel der β -Strahlen der gleichzeitigen Wirkung eines elektrischen und eines magnetischen Feldes ausgesetzt. Da er die Stärke sowohl des einen wie des andern kannte, so konnte gleichzeitig sowohl die spezifische Ladung wie auch die Geschwindigkeit der Strahlen bestimmt werden. Das Resultat war, daß die Ladung eines Gramms der β -Strahlen nicht konstant ist, sondern von ihrer Geschwindigkeit abhängt. Folgende Zahlen illustrieren diese Beziehung.

Abhängigkeit der Masse von der Geschwindigkeit.

Geschwindigkeit	Verhältnis $\frac{\text{Ladung}}{\text{Masse}}$
177 000 $\frac{\text{Kilometer}}{\text{Sekunde}}$	16 800 000 elektromagn. Einheiten
216 000 =	14 900 000 = =
237 000 =	13 100 000 = =
249 000 =	11 700 000 = =
258 000 =	9 750 000 = =
273 000 =	7 700 000 = =
285 000 =	6 300 000 = =

Aus diesen Zahlen geht hervor, daß die Ladung der β -Strahlen mit wachsender Geschwindigkeit abnimmt, und zwar besonders schnell, wenn sich die Geschwindigkeit der β -Strahlen der Lichtgeschwindigkeit nähert. Die langsamsten β -Strahlen kommen in ihren Geschwindigkeiten den Kathodenstrahlen sehr nahe. Die spezifische Ladung der ersteren beträgt nach der Tabelle 16,8 Millionen elektromagnetischer Einheiten. Für sehr schnelle Kathodenstrahlen fand Simon die Ladung von 18,7 Millionen pro Gramm Masse, während für die schnellsten β -Teilchen eine spezifische Ladung von nur 6,3 Millionen elektromagnetischer Einheiten resultiert. Wir sind somit berechtigt zu schließen, daß die β -Strahlen des Radiums aus freien Elektronen bestehen.

Ein namhafter englischer Forscher, Strutt, hat auf die Bildung von negativ gehaltenen Elektronen durch das Radium ein modernes Perpetuum mobile gegründet, d. h. einen Apparat, welcher sich — ohne jeglichen Arbeitsaufwand von außen — in einer ständigen Bewegung befindet. In der Fig. 25 ist dieser interessante Apparat abgebildet. Dem Prinzip nach ist es ein einfaches Goldblattelektroskop. Die Goldblättchen hängen an einem Röhrchen, welches etwas Radiumsalz enthält. Das Präparat schleudert fortwährend negativ geladene Elektronen heraus und ladet sich infolgedessen selbst positiv. Die positive Ladung des Röhrchens geht dann auf die Goldblättchen über, welche sich gegenseitig abzustößen beginnen und auseinandergehen. Sind sie bis zu einer gewissen Höhe gekommen, so berühren sie einen mit der Erde verbundenen Metalldraht, entladen sich durch die Berührung und fallen zusammen, um dann wieder von neuem auseinanderzugehen. Das Spiel der hin- und herpendelnden Goldblättchen wieder-

holt sich in regelmäßigen Zwischenräumen, z. B. je 3 Minuten. Wir haben also eine „Radiumuhr“, welche gar nicht aufgezo-gen zu werden braucht.

Die β -Strahlen pflanzen sich im Raume geradlinig fort. Sie werden — ebenso wie die γ -Strahlen — weder gebrochen noch zurückgeworfen; sie werden viel stärker absorbiert als die γ -Strahlen. Ihre Absorption folgt annähernd denselben Gesetzen wie die Absorption der γ -Strahlen. Durch die schöne Untersuchung von Borodowsky ist nachgewiesen, daß der Absorptionskoeffizient der β -Strahlen durch verschie-

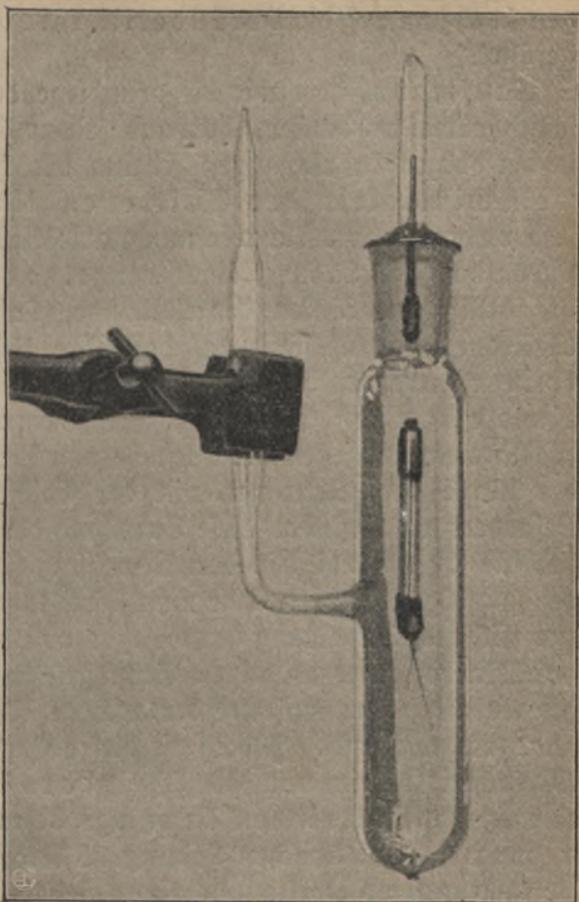


Fig. 25. Radiumuhr von Strutt.

dene Stoffe eine additive Eigenschaft ist, so daß die molekulare Absorption sich als Summe der Atomabsorptionen darstellen läßt.

15. Die β -Teilchen und das Gesetz der Erhaltung der Masse.

Die β -Teilchen werden vom Radium mit verschiedenen Geschwindigkeiten ausgeschleudert. Im Durchschnitt ist jedoch die Geschwindigkeit der β -Teilchen viel größer als die Geschwindigkeit der Elektronen in der Vakuumröhre: sie nähert sich in vielen Fällen der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichts. Diese Eigenschaft des Radiums, elektrisch geladene Teilchen verschiedener Geschwindigkeit zu entsenden, hat nun zu äußerst wichtigen Schlußfolgerun-

gen in bezug auf die Veränderlichkeit der Masse der Teilchen geführt.

Kaufmann, dem wir die grundlegenden Anschauungen auf diesem Gebiete verdanken, hat aus seinen Versuchen, deren Resultate in der obigen Tabelle angeführt sind, berechnet, daß bei wachsender Geschwindigkeit der Elektronen ihre spezifische Ladung sich vermindert. Da wir nun starke Gründe für die Annahme besitzen, daß die Ladung eines einzelnen Elektrons unveränderlich ist, so läßt das Sinken der elektrischen Ladung in einem Gramm Elektronen darauf schließen, daß ihre Anzahl in einem Gramm kleiner geworden ist, oder — mit andern Worten: daß die Masse eines einzelnen Elektrons eine Zunahme erfahren hat.

Auf diese Art setzen die Versuche von Kaufmann das Anwachsen der Masse der Elektronen mit der Geschwindigkeit außer Zweifel. Besonders rasch findet diese Zunahme der Masse dann statt, wenn sich die Geschwindigkeit der Bewegung der Elektronen der Lichtgeschwindigkeit nähert. Wie man sieht, kommt man auf diesem Wege zur völligen Verneinung des Gesetzes von der Unveränderlichkeit der Masse, jenes wichtigen Grundgesetzes, welches seit Lavoisier als einer der Grundpfeiler der exakten Wissenschaften gegolten hat und auch noch gilt. Jedoch ist dieser Gegensatz nur scheinbar. In Wirklichkeit können wir die scheinbare Masse des β -Teilchens als eine Masse elektrischen Ursprungs betrachten, als Folge der Bewegung einer elektrischen Ladung. Allerdings führt uns eine solche Betrachtung zur Vorstellung einer elektrischen Ladung an sich ohne jeden materiellen Kern, über den wir uns gewöhnlich die Ladung verteilt denken.

Wir können aber dann in unseren Betrachtungen noch einen Schritt weiter gehen: wir können versuchen, den Ursprung der Masse zu erklären, der stets eines der undurchdringlichsten Geheimnisse der Wissenschaft bildete. Wenn es möglich ist, daß eine rasch fortbewegte elektrische Ladung, wie z. B. ein β -Teilchen, genau die Eigenschaften einer mechanischen Masse zeigt, dann kann man überhaupt zu der Anschauung kommen, daß die Materie völlig elektrischen Ursprungs ist und lediglich von der Bewegung der Elektronen herrührt, aus welchen die Atome der Materie aufgebaut sind. Das Gesetz der Erhaltung der Masse wird dadurch nicht geleugnet. Es wird nur beschränkt. Dieses wichtige Grundgesetz gilt in allen Fällen, in welchen die Ma-

terie sich in Ruhe oder in nicht allzu rascher Bewegung befindet. Sowie sich aber die Geschwindigkeit der Bewegung denjenigen Größen nähert, welche in dem Gebiet der Lichtgeschwindigkeit liegen, verliert das Gesetz der Unveränderlichkeit der Masse seine Gültigkeit: die Masse wächst dann, wenn die Geschwindigkeit ihrer Fortbewegung zunimmt.

Die hier in Kürze entwickelten Gesichtspunkte dienen schon heute als Grundlage einer sehr interessanten, ja geradezu verlockenden Spekulation über den inneren Bau der Materie.

16. Der Bau der Atome.

Die radioaktiven Forschungen haben nicht nur unsere Vorstellungen über die Existenz der Atome unberührt gelassen: sie haben auch zum weiteren Ausbau der Atomtheorie wesentlich beigetragen. Auf die Berechnung der Größe der Atome und auf die daraus sich ergebenden Folgerungen können wir erst im Kapitel 19 eingehen, wenn wir mit den Eigenschaften der α -Strahlen genauer bekannt geworden sind. Hier wollen wir nur erwähnen, daß die radioaktiven Forschungen den Beweis dafür geliefert haben, daß das Atom nicht eine unteilbare Einheit ist, sondern ein aus noch kleineren Teilchen zusammengesetztes Gebilde vorstellt.

Daß das Atom eine komplizierte Struktur besitzt, geht schon aus den spektralanalytischen Untersuchungen hervor. Denn die Atome eines jeden Elementes zeigen ein sehr kompliziertes Spektrum, welches aus einer großen Anzahl von Lichtschwingungen zusammengesetzt ist. Diese Tatsachen haben schon Rarmor und Lorenz zu der Annahme veranlaßt, daß die Atome der Materie aus einer Anzahl von elektrischen Teilchen aufgebaut sind, welche sich in unaufhörlicher schwingender Bewegung befinden. Nach den bahnbrechenden Untersuchungen J. J. Thomsons über die Kathodenstrahlen konnte es keinem Zweifel mehr unterliegen, daß diese Teilchen Elektronen sind, deren scheinbare Masse nur etwa ein Tausendstel der Masse eines einzelnen Wasserstoffatoms beträgt.

Die Elektronen werden unter den verschiedensten Einflüssen von den Atomen abgespalten und mit großer Geschwindigkeit in den Raum hinausgeschleudert. Sie entstehen beim Durchgange einer elektrischen Entladung durch eine Vakuumröhre; sie werden von weißglühenden Metallen ausgesandt; sie entstehen auf Metallplatten, wenn letztere

der Wirkung des ultravioletten Lichts ausgesetzt werden. Die radioaktiven Stoffe besitzen die bemerkenswerte Eigentümlichkeit, von selbst Elektronen hinauszuschleudern, und zwar mit Geschwindigkeiten, welche viel größer sind als diejenigen, die sich in einer Vakuumröhre erreichen lassen.

Wir haben gesehen, wie Kaufmann auf Grund exakter Messungen zu dem Schluß gekommen ist, daß die Masse der Elektronen lediglich elektrischer Natur ist. Daraus läßt sich weiter folgern, daß die β -Teilchen des Radiums, wie die Elektronen überhaupt, welche die letzten Bausteine der Materie vorstellen sollen, nicht Materie im gewöhnlichen Sinne sind, sondern körperlose elektrische Ladungen, welche nur dank ihrer Bewegung die Eigenschaften gewöhnlicher Masse aufweisen. Gegenwärtig sind die Bedingungen ziemlich genau festgestellt, denen unsere Vorstellungen über die Struktur der Atome genügen müssen. Auf Grund dieser Vorstellungen lassen sich Atommodelle konstruieren, die das Verhalten der wirklichen Atome möglichst genau wiedergeben.

Nach der Hypothese von Lord Kelvin, welche von J. J. Thomson und Rutherford weiter ausgebaut worden ist, besteht das Atom aus einer großen Anzahl negativ geladener Elektronen, die sich innerhalb einer positiv geladenen Kugel mit gleichförmiger Geschwindigkeit bewegen. Ein Atom, welches aus einer großen Zahl rotierender Elektronen besteht, verliert fortwährend Energie nach außen infolge der Strahlung. Mit der Zunahme der Geschwindigkeit der Elektronen nimmt die ausgestrahlte Energiemenge rasch zu. Sinkt aber die Geschwindigkeit der Elektronen infolge der Strahlung unter einen gewissen Wert, den man als den „kritischen“ bezeichnet, so wird das Atom unbeständig und zerfällt. Ein Teil der Elektronen wird hierbei hinausgeschleudert, während der Rest sich zu einer beständigen neuen Konfiguration anordnet. Wie wir gleich sehen werden, sind die Bedingungen des Aufbaus der Atome der radioaktiven Stoffe für einen derartigen Zerfall ganz besonders günstig.

So ist bereits ein verheißungsvoller Anfang für die Bildung von Atommodellen gemacht worden. Die Bausteine der Atome — das sind die negativen Elektronen, welche die positive Elektrizität wie ein Mörtel zusammenbindet. Besonders bemerkenswert ist die Tatsache, daß es nur negative Elektronen gibt. Positiv geladene Teilchen von der Größe eines Elektrons sind bisher niemals beobachtet worden. Wohl

gibt es positiv geladene Atome oder Ionen — und wir werden im nächsten Kapitel in den α -Teilchen ein Beispiel solcher kennen lernen —, jedoch hat das leichteste von ihnen, das Wasserstoffion, eine Masse, welche die Masse des Elektrons tausendfach übertrifft. Man ist durch diese interessante Tatsache zu der Anschauung geführt worden, daß es nur eine Art von Elektrizität gibt, nämlich nur negative Elektrizität. Das ist die Elektrizität der Elektronen. Das, was wir als positive Ladung bezeichnen, wäre — im Sinne dieser Anschauung — nur ein Mangel an negativer Elektrizität, bedingt durch den Austritt einer gewissen Anzahl von Elektronen. So entsteht aus einem elektrisch neutralen Atom ein positives Ion, wenn ersteres ein oder mehrere Elektronen verliert.

Man kann einigen Denkschwierigkeiten, welche diese unitarische Auffassung der Elektrizität bietet, aus dem Wege gehen, wenn man einen Vergleich zwischen Elektrizität und Wärme zieht. Die negative Elektrizität würde dem Begriff der „Wärme“ entsprechen, während die positive Elektrizität der „Kälte“ analog wäre. Ähnlich wie wir unter Kälte einen Mangel an Wärmeenergie verstehen, bezeichnen wir als positiv geladen einen Körper, welcher negative elektrische Ladung abgegeben hat. Ähnlich wie es nur eine Art Wärme gibt, nämlich positive, so gibt es auch nur eine Art elektrischer Energie; daß wir diese Art der elektrischen Energie, welche in den Elektronen verkörpert ist, mit dem Namen „negativ“ belegt haben, ist eine Frage der Übereinkunft und hat seinen Grund in der Geschichte. Man kann aber ebensogut die Bezeichnungen umkehren, die negativen Elektronen als positiv bezeichnen, die positiven Ionen aber negativ geladen nennen.

Eine Frage bleibt allerdings bei dieser unitarischen Auffassung der Elektrizität offen: die Frage nach der Kraft, durch welche die negativ geladenen Elektronen im Atom zusammengehalten werden. Denn es ist klar, daß ohne Vorhandensein einer solchen zentripetalen Kraft die gleichnamig geladenen Teilchen mit enormen Geschwindigkeiten auseinanderfliegen müßten. Die große Wärmeentwicklung, welche bei radioaktiven Prozessen auftritt (vgl. S. 28), zeigt ganz unzweideutig, wie groß die Kräfte sind, welche die einzelnen Teile eines Atoms zusammenhalten, und welche außerordentliche Energiemengen nach außen treten, sobald diese Kräfte befreit werden. Es ist daher wichtig zu bemerken, daß die hier entwickelten Anschauungen über den Bau und

das Wesen der Elektrizität und Materie, wie verlockend sie uns auch erscheinen mögen, vorläufig nur als Grundlage einer mathematischen Spekulation betrachtet werden dürfen, welche allerdings für die Forschung äußerst nützlich gewesen ist.

17. Die α -Strahlen.

Die Eigenschaften der α -Strahlen sind noch wunderbarer als die Eigenschaften der schon besprochenen Strahlengattungen. Die α -Strahlen haben uns erst den Schlüssel zur Lösung der Rätsel des Radiums in die Hand gegeben.

Im magnetischen Felde werden die α -Strahlen nach links abgelenkt. Die Größe der Ablenkung ist viel geringer als bei den β -Strahlen, und man muß schon starke magnetische Felder anwenden, um eine merkliche Ablenkung zu beobachten. Auch die Ablenkung in elektrischen Feldern ist bedeutend schwächer als diejenige der β -Strahlen: die α -Strahlen werden hierbei von der negativen Platte angezogen (vgl. Fig. 23 S. 47). Wir schließen daraus, daß sie — im Gegensatz zu den β -Strahlen — positive Ladungen mit sich führen.

Durch quantitative Bestimmung der Größe der Ablenkung der α -Strahlen im magnetischen und elektrischen Felde von bestimmter Feldstärke läßt sich die Ladung und die Geschwindigkeit der α -Strahlen in analoger Weise wie bei den β -Strahlen feststellen. Rutherford fand dann nach diesem Verfahren, daß die Ladung der α -Strahlen viel kleiner ist als die der β -Strahlen. Die elektrische Ladung der α -Strahlen beträgt nur 5000 elektromagnetische Einheiten pro Gramm Masse (genauer: 4823 e. m. E.). Das ist nur die Hälfte derjenigen Ladung, welche ein Gramm Wasserstoffionen mit sich führt: denn letztere beträgt 9650 Einheiten.

Auch die Geschwindigkeit der Fortpflanzung ist bei den α -Strahlen bedeutend kleiner als bei den β -Strahlen. Sie ist nicht konstant, sondern bei verschiedenen radioaktiven Stoffen verschieden und schwankt zwischen 17000 und 28000 Kilometern in der Sekunde. Das ist kaum ein Zehntel der Lichtgeschwindigkeit.

Aus der Größe der Ladung der α -Strahlen hat Rutherford, dem wir hauptsächlich unsere Kenntnisse auf diesem Gebiet verdanken, den Schluß gezogen, daß diese Strahlen aus positiv geladenen Atomen einer gasförmigen Substanz bestehen müssen, oder aus elektrisch geladenen Gasionen. Durch folgende Überlegung

konnte er einige Voraussetzungen über die Natur dieser neuen Art der Materie machen.

Wir haben gesehen, daß an einem Gramm α -Strahlen eine Ladung von 5000 Einheiten haftet. Würden wir annehmen, daß ein einzelnes α -Atom dieselbe Ladung führt wie ein einzelnes Ion eines jeden einwertigen Elements (wie z. B. das Wasserstoffion), dann müßten wir schließen, daß ein α -Atom eine zweimal so große Masse besitzt wie das Wasserstoffatom. Denn ein Gramm Wasserstoffionen führt ungefähr 10000 elektromagnetische Ladungseinheiten mit sich, während auf ein Gramm α -Teilchen nur 5000 Einheiten kommen. Es müßte also, wenn unsere Annahme richtig wäre, in einem Gramm α -Teilchen nur die Hälfte der Atome vorhanden sein gegenüber einem Gramm Wasserstoff; ein jedes α -Atom wäre demnach doppelt so schwer wie ein Wasserstoffatom.

Durch genial angestellte messende Versuche hat Rutherford später bewiesen, daß jedes α -Teilchen zwei elektrische Elementarladungen mit sich führt, wie das Ion eines zweiwertigen Elements (z. B. des Bariums oder des Zinks). Daraus folgt mit Sicherheit, daß die Masse eines einzelnen α -Atoms das Vierfache der Masse eines Wasserstoffatoms beträgt. Da wir das Atomgewicht des Wasserstoffs gleich 1 setzen, so muß das Atomgewicht des von den α -Teilchen gebildeten unbekanntes Gases gleich 4 angenommen werden. Bald hat denn auch die Spektralanalyse die Antwort auf die Frage geliefert, welches Gas während der Strahlung des Radiums entsteht.

Wenn Radium unaufhörlich α -Teilchen verliert, so muß aus ihm etwas Neues entstehen. Die Atome des Radiums müssen in Atome eines andern Elementes umgewandelt werden. Hier setzte nun der kühne Gedanke von Rutherford an, welcher dort anknüpfte, wo Frau Curie stehen blieb: an der materiellen Natur der Radiumstrahlen selbst. Durch eine Reihe wichtiger Entdeckungen, welche in überraschend schneller Zeit aufeinanderfolgten, ist dieser Gedanke zu einer wissenschaftlichen Wahrheit geworden.

Im elften Kapitel haben wir erwähnt, daß, wenn man ein Radiumsalz in Wasser auflöst, aus ihm ein neues gasförmiges Element gewonnen werden kann, welches den Namen Emanation trägt. Das Gas läßt sich durch Verflüssigung von andern Stoffen befreien und kann dann in bezug auf seine Eigenschaften untersucht werden. Um das charakteristische Spektrum der Emanation zu studieren, haben

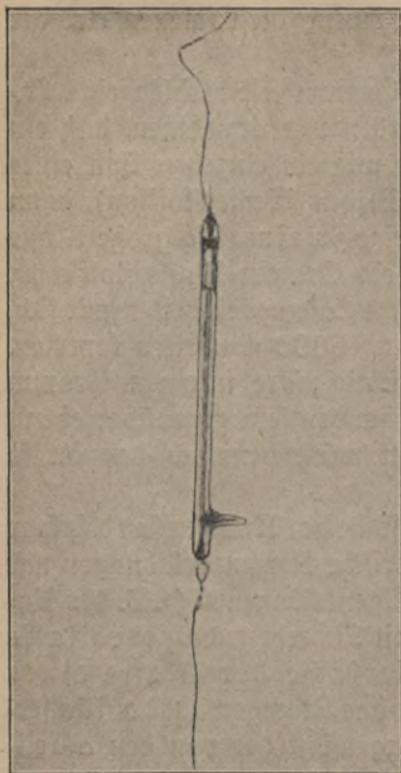


Fig. 26. Versuch von Ramsay und Soddy: Umwandlung der Emanation in Helium in der Geißlerschen Röhre.

Ramsay und Soddy im Jahre 1903 dieses Gas in eine sog. Geißlersche Röhre eingeführt und sein Spektrum beobachtet. Die Geißlersche Röhre (Fig. 26) enthält das Gas unter einem verminderten Druck. Verbindet man die beiden eingeschmolzenen Platindrähte mit den Polen einer Induktionsspirale, so erscheint in der Röhre farbiges Licht, welches bei der Beobachtung im Spektralapparat einige charakteristische Linien zeigt.

Wie alle Gase, so zeigte auch die Emanation charakteristische Linien, welche von den Spektrallinien anderer Elemente wohl zu unterscheiden waren. Nach 3 Tagen aber trat zu diesen Spektrallinien eine neue gelbe Linie hinzu: anfangs schwach, dann immer deutlicher und schärfer. Schließlich erhielt man ein vollständiges Spektrum eines andern Gases, welches schon bekannt war. Das war das Helium, ein Gas, welches — durch sein

Spektrum — erst in der Sonne entdeckt worden ist¹⁾ und fast ein halbes Jahrhundert später von demselben Ramsay in einigen irdischen Mineralien nachgewiesen wurde. Das Helium hat ein Atomgewicht, welches 4 mal größer ist als das Atomgewicht des Wasserstoffs. Es gehört zur Gruppe der Edelgase und bildet das erste Glied derselben Gruppe des periodischen Systems, deren letztes Glied die Emanation ist.

So wurde das Problem der Entstehung der Energie aus dem Radium gelöst. Gelöst nicht durch spekulative Annahmen, sondern dank der untrüglichen Hilfe des Experiments, wengleich es nicht zu verkennen ist, daß auch in diesem Fall, wie in so vielen andern, der Weg zur experimentellen Lösung der Aufgabe zuerst von der Hy-

1) Das Vorhandensein des Heliums in der Sonne ist im Jahre 1868 von Loewyer entdeckt. Ramsay hat dieses Element erst im Jahre 1898 aus dem seltenen Mineral Cleveit gewonnen.

pothese an-
gebahnt
wurde. Erst
dadurch ist
es möglich
geworden,
eine Erlä-
rung für das
Vorkommen

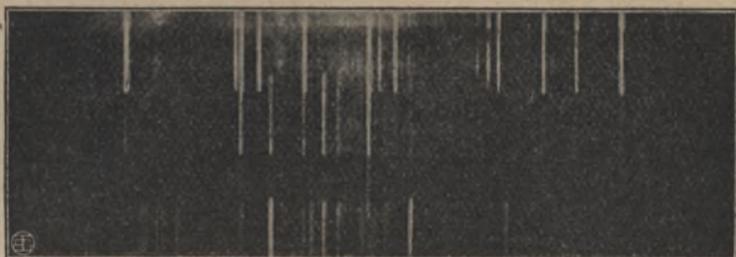


Fig. 27. Spektrum der Emanation und des Heliums. (Nach Soddy.)

des Heliums in gewissen Mineralien zu finden. Es ist heute mit Sicherheit anzunehmen, daß das Helium das Endprodukt des Zerfalls radioaktiver Elemente darstellt. Dafür spricht die Tatsache, daß dieses chemisch völlig indifferente Gas ausschließlich in denjenigen Mineralien vorkommt, welche Uran oder Thorium enthalten. Die Geschwindigkeit, mit welcher das Helium aus Uran und aus Thorium entsteht, ist bekannt. Auf diese Weise kann man aus dem Gehalt dieser Mineralien an Helium das Alter dieser Mineralien berechnen. Man erhält so Zahlen, welche einige hundert Millionen Jahre betragen und mit den aus andern Voraussetzungen abgeleiteten Daten annähernd übereinstimmen (vgl. S. 107).

Heute ist mit Sicherheit anzunehmen, daß das Gesetz der Erhaltung der Energie durch die Radioaktivität nicht umgestürzt wird. Wir können das grundlegendste aller Naturgesetze auch weiterhin für allgemeingültig betrachten. Heute können wir mit Sicherheit die scheinbar unverstiegbare Quelle der Energie des Radiums in einer stetigen, wenn auch sehr langsamen Veränderung suchen, welcher dieses Element unterworfen ist. Nach der von Rutherford begründeten Theorie beruht die chemische Umwandlung des Radiums in einem ständigen Zerfall der Atome dieses Elementes in Atome zweier neuer Elemente. Das eine von ihnen ist die gasförmige Emanation des Radiums (das „Niton“ von Ramsay). Das andere ist das schon bekannte Element Helium, dessen mit positiver Ladung und enormer Geschwindigkeit behaftete Atome die Teilchen bilden, aus denen die α -Strahlen bestehen. Wir erhalten eine neue Zerfallsgleichung, die Zerlegungsgleichung eines Elements:

$$\text{Radium} = \text{Emanation} + \text{Helium}.$$

18. Die Eigenschaften der α -Teilchen.

Die α -Strahlen spielen bei den radioaktiven Erscheinungen eine bedeutend wichtigere Rolle als die β - und die γ -Strahlen. Es ist wahr-

scheinlich, daß sich die α -Teilchen (ebenso wie die Elektronen) schon innerhalb des Atoms des Radiums in sehr schneller Bewegung befinden. Zerfällt das Atom, so behalten die α -Teilchen zunächst dieselbe Geschwindigkeit, welche sie in ihren Bahnen innerhalb des Atoms besaßen. Die bedeutende Wärmeentwicklung des Radiums erscheint im Lichte obiger Betrachtungen nicht mehr so rätselhaft wie zuvor. Sie ist eine direkte Folge der Zusammenstöße der α -Teilchen mit den Atomen des Radiums. Denn die α -Teilchen besitzen eine enorme kinetische Energie. Da sie nun durch jede Art von Materie, wie wir gleich sehen werden, sehr leicht in ihrer Bewegung gehemmt werden, so dringt der größte Teil der vom Radium ausgeschleuderten α -Teilchen gar nicht nach außen, sondern wird durch das Radium selbst aufgehalten. Die kinetische Energie dieser Teilchen wird dann in Wärme verwandelt. Da bei den Messungen der vom Radium entwickelten Wärme das Radium in ein für α -Strahlen undurchdringliches Gefäß eingeschlossen wird, so wird die gesamte von den α -Teilchen entwickelte lebendige Kraft in Wärme umgesetzt.

So kann fast die ganze Wärmeentwicklung des Radiums und anderer radioaktiver Stoffe als ein Maß für die Energie der α -Strahlen angesehen werden. Es ist denn auch durch direkte Versuche bewiesen worden, daß die β - und γ -Strahlen nicht mehr als 8 Prozent zu der Wärmebildung des Radiums beitragen, und zwar selbst dann, wenn sie von einer Bleikapfel vollständig absorbiert werden.

Wir haben gesehen, daß sich die α -Strahlen von andern Strahlengattungen hauptsächlich dadurch unterscheiden, daß sie von verschiedenen Stoffen mit Leichtigkeit absorbiert werden. Durch ein Aluminiumblättchen von 0,04 mm Dicke werden die α -Strahlen des Radiums vollständig absorbiert. Aber auch Luft und andere Gase befunden eine merkwürdige Absorptionsfähigkeit für α -Strahlen. Man kann sich durch ein einfaches Experiment davon überzeugen, daß die α -Strahlen des Radiums in der Luft nicht weiter als auf eine Strecke von 7 cm vordringen. Denkt man sich um das Radiumpräparat eine Kugel mit dem Radius von 7 cm, so wird nur in dem Bereich dieser Kugel die Luft durch α -Strahlen ionisiert, während außerhalb der Kugel die Luft in bezug auf elektrisches Leitvermögen normales Verhalten zeigt. Man nennt die Strecke, auf welche die α -Strahlen vordringen, die „Reichweite“ der α -Strahlen.

19. Die Größe der Atome.

Die α -Teilchen, welche während dieser neuartigen Umwandlung des Radiums von ihm ausgeschleudert werden, bewegen sich mit einer unfassbaren Geschwindigkeit. Man kann sich leicht vorstellen, daß bei dieser Schnelligkeit der Bewegung ein α -Teilchen im Laufe von 2 Sekunden die Reise um die Erde machen könnte. Im Laufe von 21 Stunden würde das α -Teilchen von der Erde zur Sonne gelangen, wenn es nicht unterwegs auf Hindernisse stoßen würde. In der Wirklichkeit finden sich solche Hindernisse in Gestalt anderer Gasteilchen, welche mit dem α -Teilchen zusammenprallen. Stößt ein α -Teilchen mit Teilchen der Luft zusammen, so gibt es seine Bewegungsenergie ab: es entsteht Wärme. Es unterliegt daher keinem Zweifel, daß die α -Teilchen einen bedeutend größeren Vorrat an Bewegungsenergie aufweisen müssen als die Moleküle irgendwelcher anderer Stoffe. Dank dieser Energie müssen sich die α -Teilchen auch dann den Sinnen des Beobachters aufdrängen, wenn ihre Menge ganz außerordentlich gering ist. So wurde das Radium dank dieser Eigenschaft der α -Teilchen entdeckt, obwohl dieses Element in der Natur nur in äußerst verdünnter Form vorkommt.

Um sich wenigstens eine annähernde Vorstellung von der Wirkung dieser minimalen Mengen radioaktiver Stoffe zu machen, die von keiner Wage festgestellt werden können, ist es gut, sich mit einem Apparat bekannt zu machen, welcher von Prof. Crookes konstruiert wurde und von ihm den Namen Spinthariskop erhalten hat. Die Spitze der Nadel A (Fig. 28) wird in eine sehr verdünnte Auflösung eines Radiumsalzes getaucht. Nach dem Eintrocknen bleibt an ihr eine äußerst geringe Spur Radium haften. Doch genügt diese Spur, um unbegrenzte Zeit α -Teilchen auszusenden. Zur Beobachtung der Strahlung dient das Zinksulfid, von welchem wir wissen, daß es unter dem Einfluß der Radiumstrahlen Licht ausstrahlt (vgl. S. 17). Mit diesem Stoff ist ein kleiner Papierschirm B bedeckt, welcher sich an der Rückwand des Röhrchens befindet.

Wenn wir die durch Radiumstrahlung hervorgerufene Phosphoreszenz des Zinksulfids durch die Lupe C, welche an dem Rohr verschiebbar angebracht ist, beobachten, so sehen wir ein sehr eigentümliches Bild. Wir sehen

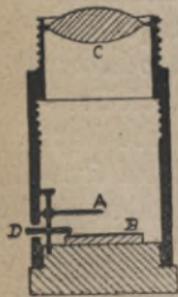


Fig. 28.
Spinthariskop
von Crookes.

kein andauerndes ruhiges Licht, sondern einzelne herumtanzende leuchtende Punkte, welche aufleuchten und erlöschen. Es sind einzelne Funken, welche denen ähnlich sind, die beim Anschlagen eines Stahlstücks auf einen scharfen Stein erhalten werden. Die ganze Erscheinung, von Crookes als Szintillation bezeichnet, macht den Eindruck funkelnder Sterne in einer klaren, ruhigen Nacht.¹⁾ Wir sehen in diesem Falle, wie ein jedes Teilchen einen besonderen Funken erzeugt, wenn es auf den Leuchtschirm fällt, und erreichen hier zum ersten Male die Möglichkeit, einzelne Atome zu sehen, oder, genauer ausgedrückt, die Wirkungen einzelner Atome zu beobachten. In dieser Weise kann man die Atome direkt zählen. Rutherford und Geiger haben diese Erscheinung sehr geschickt dazu benutzt, um zu bestimmen, wieviel α -Atome wohl eine bestimmte Menge Radium in der Sekunde bilden kann. Sie fanden, daß ein Gramm reines Radium²⁾ in jeder Sekunde nicht weniger als 34 000 000 000 α -Teilchen ausschleudert.

Um die Richtigkeit ihrer Zählung zu kontrollieren, machten sie einen Versuch, die Zahl der α -Teilchen indirekt zu bestimmen, und zwar durch

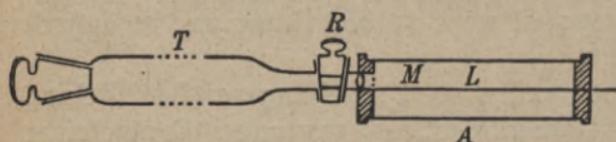


Fig. 29. Versuch von Rutherford und Geiger. Zählung der α -Teilchen vermittels ihrer elektrischen Wirkungen.

ihre elektrische Wirkung. Sie benutzten für diesen klassischen Versuch einen Trichter T, welcher mit Hahn und Stopfen R versehen

war (Fig. 29). In diesem Trichter befand sich die radioaktive Substanz, welche ihre Strahlen nach allen Richtungen ausbreitete. Ein Teil der ausgesandten α -Strahlen gelangte durch ein kleines Loch o in einen zylinderförmigen Kondensator A, in welchem ein starkes elektrisches Feld erzeugt war. Der Kondensator war mit einem empfindlichen Elektrometer verbunden. Sobald ein α -Teilchen durch das Loch o in den Kondensator eingedrungen war, machte es sich durch eine starke Ionisation der Luft bemerkbar. Die Leitfähigkeit der Luft wurde stark vergrößert, und eine Entladung trat ein, welche sich in einem Ausschlag der Nadel des Elektrometers äußerte. Dann verschwanden die

1) Die Szintillation wurde 1903 unabhängig von Sir William Crookes und von Elster und Geitel entdeckt.

2) d. h. ein von der Emanation und anderen Produkten befreites Radiumpräparat.

Ionen und die Nadel kehrte in ihre Anfangsstellung zurück. Die Öffnung o in dem Kondensator war so klein, daß bei der gewählten Versuchsanordnung nicht mehr als 4 bis 5 α -Teilchen in der Minute in den Kondensator eindringen konnten. Man hatte also die Möglichkeit, jedes von ihnen ganz genau am Ausschlag des Elektrometers zu erkennen. Auf diese Weise wurde berechnet, daß ein Gramm reines Radium in der Sekunde 36 000 000 000 α -Teilchen ausendet. Die Zahl stimmt mit der im Spinthariskop erhaltenen sehr gut überein.

Wenn wir hier noch hinzufügen, daß es keine besonders große Schwierigkeit verursacht, auch die gesamte, von allen α -Teilchen getragene Ladung mittels eines Quadrantenelektrometers zu bestimmen, so wird uns sofort klar, daß wir durch eine einfache Rechenoperation auch die elektrische Ladung eines einzelnen α -Teilchens in absolutem Maße erhalten können. In der Tat: Rutherford und Geiger haben experimentell gefunden, daß die gesamte elektrische Ladung E , welche von allen α -Teilchen transportiert wird, die von einem Gramm Radium in einer Sekunde ausgeschleudert werden,

$$E = 33,2 \text{ elektrostatische Einheiten}$$

beträgt. Um die Ladung eines einzelnen Teilchens zu berechnen, müssen wir die gesamte Ladung E in die durch Zählung gefundene Zahl Z , der von einem Gramm Radium ausgeschleuderten α -Atome teilen. Wir erhalten dann für die Ladung eines einzelnen α -Teilchens:

$$e' \text{ die Zahl: } e' = \frac{33,2}{3,6 \cdot 10^{10}} = 9,3 \cdot 10^{-10} \text{ elektrost. Einheiten.}$$

Beachten wir weiter, daß die Ladung eines Einzelions schon vorher von J. J. Thomson, Wilson u. a. auf mannigfache Weise bestimmt wurde, so werden wir fragen müssen, wie die Ladung des α -Teilchens mit der Ladung eines einwertigen Ions, z. B. des Wasserstoffions übereinstimmt. Im Mittel findet man für die Elementarladung eines Einzelions (oder Elektrons) die Zahl:

$$e = 4,65 \times 10^{-10} \text{ elektrost. Einh.}$$

Das ist fast genau die Hälfte der Ladung eines α -Teilchens. Wir schließen daraus, daß jedes α -Teilchen zwei Elementarladungen mit sich führt, d. h. ebensoviel wie ein zweiwertiges Ion des Zinks oder des Kupfers in wäßriger Lösung. Dadurch wird das Atomgewicht der α -Teilchen auf eine sichere Grundlage gestellt (vgl. S. 61).

Ein α -Teilchen ist demnach nichts anderes als ein mit zwei positiven Elementarladungen behaftetes Heliumatom. Entsprechend

dem Rutherford'schen Modell läßt sich das α -Teilchen als der positive Kern des Heliumatoms betrachten.

Zum ersten Male ist durch die radioaktiven Forschungen zu einem der merkwürdigsten Naturrätsel der Zugang eröffnet worden: zur Welt der Atome. Der innere Aufbau der Materie ist hier experimentell aufgedeckt worden. Das Ergebnis ist so wichtig, es greift so tief in die Grundfragen der Naturauffassung, daß es nicht ohne ein gewisses Mißtrauen von uns aufgenommen werden kann. Und das Mißtrauen wäre vielleicht nicht unberechtigt, wenn nicht gleichzeitig bewiesen wäre, daß die durch die Radioaktivität enthüllten Geheimnisse des innern Aufbaus der Materie sowohl qualitativ wie auch quantitativ mit allen Forderungen der Atomhypothese ganz genau übereinstimmen. Wir können nämlich, im sicheren Besitz der gewonnenen Zahlen, noch einen Schritt weiter gehen und die Frage nach der Größe der Atome aufrollen. Wir wissen, daß die Atome, jene Bausteine der Materie, ganz außerordentlich klein sein müssen. Aber doch nicht unendlich klein. Die Aufgabe: die Masse eines einzelnen Atoms zu finden, konnte noch vor einigen Jahrzehnten bei vielen ernstesten Naturforschern nur ein Kopfschütteln hervorrufen. Heute ist man im Besitze mehrerer experimenteller Methoden, welche eine exakte Antwort auf diese Frage liefern. Eine von ihnen ist auf den Eigenschaften der α -Teilchen begründet.

Und zwar gestatten uns die radioaktiven Erscheinungen auf zweierlei Weise diese Aufgabe zu lösen: rechnerisch und experimentell. Wir wollen sehen, zu welchen Endresultaten beide Wege führen.

Aus den auf S. 60 besprochenen Messungen von Rutherford geht hervor, daß die Ladung eines Gramms α -Teilchen gleich ist

$$\frac{e}{m} = 4,823 \cdot 10^3 \text{ elektromagn. Einheiten}$$

$$\text{oder } \frac{e}{m} = 1,447 \cdot 10^{14} \text{ elektrost. Einheiten.}$$

Da wir die Ladung eines α -Teilchens soeben berechnet haben, und zwar zu:

$$e' = 9,3 \cdot 10^{-10} \text{ elektrost. Einheiten,}$$

so können wir durch Division die Zahl der in einem Gramm enthaltenen α -Teilchen berechnen. Diese Zahl n_1 wird ausgedrückt durch den Bruch:

$$n_1 = \frac{1,447 \cdot 10^{14}}{9,3 \cdot 10^{-10}} = 1,55 \times 10^{23}.$$

Da ein Grammolekül („Mol“) Helium 4 Gramm wiegt, so berechnen wir für die Zahl der α -Teilchen in einem „Mol“ Helium:

$$N_1 = 4 \times 1,55 \times 10^{23} = 6,2 \times 10^{23} \text{ Atome.}$$

Experimentell ist diese Zahl folgendermaßen ermittelt worden. Dewar hat die Menge Helium gemessen, welche vom Radium geliefert wird. Er fand, daß 1 Gramm Radium in 24 Stunden 0,46 Kubikmillimeter Helium bildet. Das macht pro Sekunde 54×10^{-10} Kubikzentimeter aus. Aus den oben angeführten Zählungen von Rutherford und Geiger geht hervor, daß in derselben Zeit 36 Milliarden oder 36×10^9 Atome Radium zerfallen. Wie wir weiter unten sehen werden, bildet ein Atom Radium bei seinem spontanen Zerfall vier α -Teilchen oder vier geladene Heliumatome. Auf Grund dieser Zahlen fällt es uns nicht schwer zu berechnen, wieviel Einzelatome in einem Kubikzentimeter des Heliumgases enthalten sind. Wir erhalten die Zahl Heliumatome in einem Kubikzentimeter unter normalen Bedingungen, d. h. bei 0° und unter dem Druck einer Atmosphäre gleich:

$$n_2 = \frac{4 \times 36 \times 10^9}{54 \times 10^{-10}} = 26,7 \times 10^{18} \text{ Atome.}$$

1 Grammolekül (Mol) eines Gases nimmt unter normalen Bedingungen einen Raum von 22 400 Kubikzentimeter ein. Auf diese Weise ergeben die Versuche von Dewar die Anzahl einzelner Heliumatome, welche in einem Grammolekül (d. h. 4 g) Helium enthalten sind zu:

$$N_2 = 22\,400 \times 26,7 \times 10^{18} = 5,98 \times 10^{23} \text{ Atome.}$$

Die experimentell gefundene Zahl N_2 stimmt also mit der theoretisch berechneten N_1 ausgezeichnet überein.

Man hat aber dieselbe Zahl, welche in der Wissenschaft unter dem Namen der Loschmidtschen Zahl bekannt ist, schon früher auf Grund der verschiedensten physikalischen Eigenschaften berechnet¹⁾: aus den Abweichungen der Gase vom Gesetz von Boyle, aus der Geschwindigkeit der Diffusion der Gase, aus dem Koeffizienten der Lichtbrechung u. a. m. In letzter Zeit haben die Versuche von The Svedberg und Perrin über die Bewegung von Teilchen kolloider Stoffe, welche in Wasser suspendiert sind, eine sehr genaue Grundlage zur Berechnung der „Loschmidtschen Zahl“ geliefert. In allen derartigen Berechnungen, die auf ganz unabhängigen Voraussetzungen beruhen, hat man für

1) Eine anschauliche und verständliche Darstellung der verschiedenen Methoden zur Berechnung der Größe der Moleküle findet der Leser in ANUÖ Bd. 58: Mie, Moleküle, Atome, Weltäther.

die Anzahl der Moleküle Werte erhalten, welche von derselben Größenordnung sind. Auf Grund der neuesten Untersuchungen von Perrin ist als der wahrscheinlichste Wert der Zahl von Loschmidt die Größe $6,07 \times 10^{23}$ anzusehen. Wie ersichtlich, stimmt diese Zahl ganz gut mit denjenigen Ergebnissen überein, welche von Rutherford und Geiger, Regener und andern Forschern auf Grund der radioaktiven Erscheinungen ermittelt wurden.

In folgender Tabelle sind die erhaltenen Atomkonstanten nochmals übersichtlich zusammengestellt.

Ladung der α -Teilchen pro Gramm	$4,82 \times 10^3$ E. M. E.
Ladung der Wasserstoffionen pro Gramm	$9,65 \times 10^8$ E. M. E.
Ladung der Elektronen pro Gramm	$1,77 \times 10^7$ E. M. E.
Zahl der ausgeschleuderten α -Teilchen pro Gramm entemanirtes Radium u. Sek.	36×10^9
Gesamtladung der α -Teilchen pro Gramm entemanirtes Radium u. Sek.	$10,5 \times 10^{-10}$ E. M. E.
Ladung des einzelnen α -Teilchens	31×10^{-21} E. M. E.
Ladung eines Wasserstoffions	15×10^{-21} E. M. E.
Ladung eines Elektrons	15×10^{-21} E. M. E.
Volum der entwickelten Emanation pro Gramm Radium und Sek. bei 0° und 1 Atm.	54×10^{-10} cm ³
Anzahl der α -Teilchen in 1 Mol (= 4 g)	$6,23 \times 10^{28}$
Anzahl der Wasserstoffatome in 1 Mol (Loschmidtsche Zahl)	$6,07 \times 10^{23}$
Masse eines α -Teilchens	$6,43 \times 10^{-24}$ g
Masse eines Wasserstoffatoms	$1,62 \times 10^{-24}$ g
Masse eines Elektrons	$0,87 \times 10^{-27}$ g
Geschwindigkeit der α -Teilchen	$10 \times 10^8 - 20 \times 10^8$ $\frac{\text{cm}}{\text{Sek}}$
Geschwindigkeit der Elektronen (β -Teilchen)	$20 \times 10^8 - 300 \times 10^8$ $\frac{\text{cm}}{\text{Sek}}$
Geschwindigkeit des Lichts	300×10^8 $\frac{\text{cm}}{\text{Sek}}$
Zahl der von einem α -Teilchen erzeugten Luftionen	$150 \times 10^3 - 240 \times 10^3$
Reichweite der α -Teilchen in Luft	3–7 cm

III. Andere radioaktive Elemente.

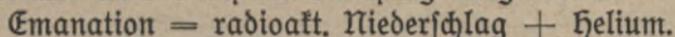
20. Das Umwandlungsgesetz.

Aus den im 17. Abschnitt mitgeteilten Tatsachen geht mit unzweifelhafter Sicherheit hervor, daß die als „Radioaktivität“ bezeichnete Energieausstrahlung des Radiums in einer chemischen Umwandlung ihren letzten Grund hat. Diese Umwandlung läßt sich als ein Zerfall des Elementes auffassen, welcher durch folgende Gleichung ausgedrückt wird:

$$\text{Radium} = \text{Emanation} + \text{Helium.}$$

Eine Schwierigkeit der von Rutherford begründeten Umwandlungstheorie scheint zunächst in der Tatsache zu liegen, daß die Aktivität des Radiums scheinbar unverändert bleibt. Jedenfalls muß das Radium sehr langsam zerfallen. So langsam, daß wir seine Zerfetzung im Laufe eines ganzen Menschenalters kaum nachweisen können.

In der Emanation haben wir hingegen ein Element kennen gelernt, dessen Aktivität im raschen Abnehmen begriffen ist (vgl. S. 39). Denn schon in vier Tagen verliert das Gas die Hälfte seiner ursprünglichen Aktivität. Hier haben wir also den direkten Beweis dafür, daß eine zeitliche Umwandlung mit der Emanation vor sich geht. Der Sinn dieser Umwandlung ist durch Versuche von Ramsay und Soddy aufgedeckt und wird durch die Gleichung ausgedrückt:



Es liegt nahe anzunehmen, daß diese Umwandlung mit der Abnahme der Aktivität Hand in Hand geht dergestalt, daß die Geschwindigkeit des Zerfalls der Emanation der Geschwindigkeit der Aktivitätsabnahme proportional ist. Dann gilt für die radioaktive Umwandlung dasselbe Gesetz, welches Curie für das Abklingen der Aktivität entdeckt hat (S. 37), und der Zerfall der Emanation unterliegt demselben Grundgesetz der chemischen Kinetik, welchem auch der Zerfall aller andern radioaktiven Stoffe gehorcht (vgl. S. 37). Die Zerfallsgeschwindigkeit ist proportional der vorhandenen Menge der Emanation. Die Zahl, welche den in der Sekunde umgewandelten Bruchteil der radioaktiven Substanz ausdrückt, nennt man ihre Umwandlungskonstante oder — kürzer — die „Konstante“ der Radioaktivität. Für die Radiumemanation beträgt die „Konstante“ $\frac{1}{500000}$. Das bedeutet, daß in jeder Sekunde $\frac{1}{500000}$ der im Augenblick vorhandenen Emanation zerfällt. Man kann daraus berechnen, daß, wenn diese Geschwindigkeit des Zerfalls unveränder-

lich bleiben würde, die Existenz der Emanation 500 000 Sekunden dauern würde. Das macht annähernd 5,8 Tage aus. Man bezeichnet diese letztere Zeit als die mittlere Lebensdauer der Emanation.

In Wirklichkeit ist der Verlauf der Umwandlung etwas komplizierter, weil die Geschwindigkeit des Zerfalls immer kleiner wird, und zwar infolge der stetigen Abnahme der Menge der zerfallenden Substanz. So hat man aus der Umwandlungskonstante berechnet, daß nach 3,85 Tagen erst die Hälfte der ursprünglich vorhandenen Menge der Emanation zerfällt. Nach abermals 3,85 Tagen wird demnach wieder die Hälfte der damals nachgebliebenen Menge umgewandelt werden, oder $\frac{1}{4}$ der ursprünglichen Menge. In der dritten Periode von 3,85 Tagen wird nur $\frac{1}{8}$ der anfänglichen Menge Emanation dem Zerfall unterliegen usw. Man ersieht, daß die Geschwindigkeit der Umwandlung — im Sinne des Umwandlungsgesetzes — ständig abnehmen muß und daß ein vollständiger Zerfall — theoretisch gesprochen — unendlich lange Zeit erfordert. Praktisch dürfte er jedoch nach Verlauf von einigen Wochen vollzogen sein.

Die Umwandlungskonstante radioaktiver Stoffe ist eine individuelle Eigenschaft, welche für die verschiedenen Elemente ebenso charakteristisch ist wie das Spektrum, Atomgewicht, Dichte und andere spezifische Eigenschaften. Da die meisten radioaktiven Elemente, von denen in den folgenden Kapiteln Ausführlicheres mitgeteilt werden wird, sehr vergänglich sind, so ist es oft unmöglich, ihre physikalischen Eigenschaften zu prüfen. Die „Umwandlungskonstante“ ist dann die einzige Größe, welche genau bestimmt werden kann und zur Charakteristik dieser ephemeren Stoffe benutzt wird.

Höchst merkwürdig ist die Unveränderlichkeit der Umwandlungskonstante. Die Geschwindigkeit, mit welcher eine bestimmte Menge eines gegebenen radioaktiven Elements zerfällt, hängt weder vom Druck noch von der Temperatur ab. Sogar verschiedene Verbindungen eines und desselben Elements sind durch eine und dieselbe Zerfallsgeschwindigkeit gekennzeichnet. Wir besitzen vorläufig kein Mittel, um diesen Zerfall zu beschleunigen oder zu verlangsamen. Das ist um so auffälliger, als die Geschwindigkeit aller chemischen Prozesse gegen Temperaturänderungen äußerst empfindlich ist und schon durch Spuren gewisser Fremdstoffe (katalytisch) beeinflusst werden kann. Der Zerfallsprozeß radioaktiver Stoffe bildet die einzige Ausnahme in dieser Beziehung. „Majestätisch wie eine einsame Sonne vollzieht jedes Element seine

Umwandlung, so daß es als eine chemische Weltenuhr dienen könnte, welche keiner Störung irgendwelcher Art ausgesetzt wäre." (Ostwald.) „Die Geschwindigkeit des Zerfalls der Radioelemente ist gleichsam eine Uhr, mit welcher wir geologische Zeit messen können.“ (Robert W. Lawson.)

21. Weitere Schicksale der Radiumemanation.

Wir haben gesehen, daß die Emanation des Radiums sehr kurzlebig ist: ihre mittlere Lebensdauer beträgt nur 5,56 Tage. Was wird aus der Emanation nach ihrem Tode?

Das eine ihrer Zerfallsprodukte haben wir schon in den α -Teilchen kennengelernt. Verlieren die α -Teilchen ihre große Geschwindigkeit, so wandeln sie sich in Heliumatome um. Das andere Zerfallsprodukt bildet den „radioaktiven Niederschlag“, welcher früher für eine besondere Eigenschaft der Materie: „induzierte“ Radioaktivität gehalten wurde. Trennt man die Emanation vom Radium und bringt sie in ein besonderes Gefäß, so bildet sich dieser Niederschlag auf den Wänden des Gefäßes. Er entsteht und vergeht. Denn der „radioaktive Niederschlag“ lebt noch viel kürzer als seine Muttersubstanz: die Emanation. Nach einer halben Stunde ist seine Menge schon auf die Hälfte gesunken. Seine mittlere Lebensdauer wurde zu 43 Minuten berechnet.

Man kann größere Mengen des „radioaktiven Niederschlags“ in dem in der Fig. 30 abgebildeten Apparat herstellen. Man bringt in die Flasche, welche eine Lösung des Radiumsalzes enthält, durch das zur Isolation dienende Rohr *B* einen Platindraht *W* und verbindet den letzteren mit dem negativen Pol einer starken elektrischen Batterie. Die beim Zerfall der Emanation entstehenden positiven α -Teilchen werden vom positiv geladenen Draht *P* angezogen, und der Niederschlag sammelt sich auf dem negativen Draht *W*.

Durch diesen Versuch wird bewiesen, daß die Atome des radioaktiven Niederschlags eine positive Ladung mit sich führen. M a k o w e r hat die spezifische Ladung dieser Atome bestimmt und fand dafür die Zahl von rund 50 elektromagnetischen Einheiten. Ihre Geschwindigkeit beträgt gegen 300 Kilometer in der Sekunde. Diese Tatsachen beweisen, daß die nach der Abspaltung eines

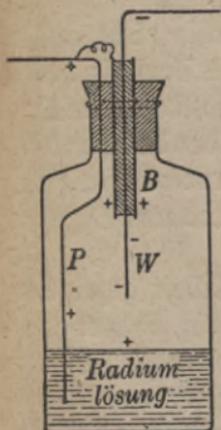


Fig. 30. Konzentrierung des „aktiven Niederschlags“ auf einem negativ geladenen Platindraht.

α -Teilchens aus der Emanation zurückgebliebenen Reste einen Rückstoß erleiden und sich insolgedessen wie kräftig bewegte, positiv geladene Ionen verhalten. Und in der Tat fand Wertenstein, daß die Partikeln des radioaktiven Niederschlags sehr dünne Metallplättchen durchdringen können.

Führt man den nach der beschriebenen Methode aktivierten Platindraht in starke Salzsäure, so löst sich der aktive Niederschlag darin auf und kann durch Abdampfen der Säure wieder zurückgehalten werden. Auf diese Weise lassen sich die Eigenschaften dieser merkwürdigen Materie ziemlich genau studieren. Es war insbesondere das Studium der zeitlichen Änderung der Aktivität, welches zu sehr interessanten Schlüssen in bezug auf den Mechanismus des Zerfalls des aktiven Niederschlags führte. Die Abnahme der Aktivität wollte nämlich anfänglich nicht dem einfachen „Exponentialgesetz“ gehorchen, welches sich für die Emanation so ausgezeichnet bewährt hat. Außerdem zeigte sich, daß der Verlauf des Aktivitätsabfalls für α -, β - und γ -Strahlen nicht derselbe ist. Auch ist er davon abhängig, welche Zeit man den aktivierten Draht der Wirkung der Emanation exponiert hatte. Eine Entwirrung dieser Verhältnisse brachte die von Rutherford festgestellte Tatsache, daß die Umwandlung des radioaktiven Niederschlags sich als Summe mehrerer nacheinanderfolgenden Umwandlungen auffassen läßt, von denen jede für sich dem allgemeinen Umwandlungsgesetz streng gehorcht.

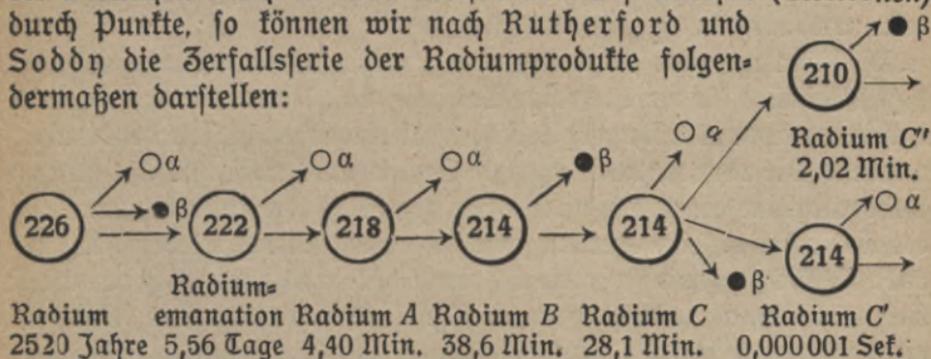
Der Zerfall des radioaktiven Niederschlags erfolgt also nicht auf einmal, sondern stufenweise. Es lassen sich drei Phasen des Zerfalls beobachten, in denen zwei Zwischenprodukte: Radium A und Radium B entstehen. Das Endprodukt dieser rasch aufeinanderfolgenden Umwandlungen nennen wir Radium C. Durch die Untersuchungen von O. Hahn und Fr. Meitner wurde bewiesen, daß auch das Radium C zusammengesetzter Natur ist.

Im Jahre 1912 hat K. Sjajans in einer schönen Arbeit gezeigt, daß das Radium C eine doppelte Umwandlung erleidet, indem es gleichzeitig zwei Zerfallsprodukte bildet. Der größte Teil von Radium C, nämlich 99,97%, bildet hierbei unter Aussendung eines β -Teilchens, d. h. eines Elektrons ein außerordentlich kurzlebiges Produkt, welches die Bezeichnung RaC' erhielt.¹⁾ Dieses Produkt hat

1) Die hier und auch im folgenden gebrauchten Bezeichnungen lehnen sich an den von Mejer und v. Schweidler im Jahre 1918 gemachten Vorschlag.

eine mittlere Lebensdauer von nur einer milliontel Sekunde und sendet bei seinem weiteren Zerfall nur α -Strahlen aus. Das zweite Zerfallsprodukt, welches mit C'' bezeichnet wird, bildet nur 0,03% des zerfallenden Radiums C. Es besitzt eine mittlere Lebensdauer von 2 Minuten und sendet β -Strahlen aus. Wir haben demnach in diesem Fall ein interessantes Beispiel einer Verzweigung in der Reihe der Zerfallsprodukte des Radiums, welche sich auch in den andern radioaktiven Zerfallsreihen wiederfinden läßt.

Alle hier aufgezählten Produkte sind von äußerst kurzer Lebensdauer, welche nach Minuten gezählt wird. Keines von ihnen kann infolgedessen in genügender Menge aufgesammelt werden, welche erlauben würde, seine Eigenschaften zu studieren. Alles, was wir von jedem dieser unbeständigen Elemente wissen, ist seine Umwandlungskonstante und allenfalls seine Flüchtigkeit und Strahlungsart. Das Radium A verflüchtigt sich bei Temperaturen 800° bis 900° , Radium B bei 600° bis 700° , Radium C bei 800° bis 1300° . Radium A sendet nur α -Strahlen aus, Radium B hingegen nur β -Strahlen. Radium C sendet alle drei Strahlengattungen aus. Quantitativ werden die verschiedensten Zerfallsstufen am besten durch ihre Umwandlungskonstanten charakterisiert (vgl. Tabelle auf S. 101). Wenn wir die Atome der radioaktiven Elemente durch Kreise bezeichnen, die α -Teilchen durch kleinere Kreise und die β -Teilchen (Elektronen) durch Punkte, so können wir nach Rutherford und Soddy die Zerfallsreihe der Radiumprodukte folgendermaßen darstellen:



Wie man sieht, werden α -Teilchen nur vom Radium, Emanation, Radium A, Radium C und Radium C' ausgesandt, wobei Produkte entstehen, deren Atomgewichte um je 4 Einheiten weniger betragen als das Atomgewicht der betreffenden Muttersubstanz. Im Gegenteil ist die Abgabe eines Elektrons von keiner Verminderung des Atomgewichts begleitet. Insgesamt senden Radium und seine schnell sich

umwandelnden Produkte vier α -Teilchen aus, was einer Verminderung des Atomgewichts um 16 Einheiten entspricht.

22. Aktiver Niederschlag des Radiums von langer Lebensdauer.

Damit ist jedoch der Zerfallprozeß noch nicht zu Ende. Frau Curie hat festgestellt, daß die Emanation ihre Aktivität im Laufe einiger Wochen nicht vollständig verliert. Ein geringer Rest der Aktivität bleibt bestehen. Sie läßt sich noch nach Jahren mit Sicherheit nachweisen.

Diese „Restaktivität“ beträgt in den meisten Fällen kaum den millionsten Teil derjenigen Aktivität, welche unmittelbar nach der Exposition vorhanden war. Daß auch diese geringe Aktivität von einem materiellen Niederschlag herrührt, ist von Rutherford experimentell nachgewiesen worden. Auch diese Restaktivität besteht aus allen drei Arten von Strahlen. Besonders auffallend war die Tatsache, daß sie mit der Zeit nicht abnimmt, sondern anscheinend ständig wächst. Besonders gilt das für die α -Strahlen. Ihre Stärke wächst mehrere Jahre lang an. Die Aktivität der β -Strahlen wächst auch, erreicht aber schon nach 50 Tagen ihren Höchstwert, um später konstant zu bleiben. Das alles läßt darauf schließen, daß die Restaktivität von einem Stoff herrührt, welcher sich äußerst langsam umwandelt.

Die Bildung dieses Produktes von geringer Umwandlungsgeschwindigkeit erklärt die merkwürdige Tatsache, daß Räume, in welchen mit Radiumpräparaten längere Zeit gearbeitet worden ist, stark radioaktiv werden. Die vom Radium erzeugte Emanation verteilt sich im ganzen Laboratorium durch Diffusion. Sie dringt in die entferntesten Teile des Gebäudes hinein. Der langsam sich umwandelnde Niederschlag bedeckt die Wände, dringt in die Schränke hinein und setzt sich auf allen Gegenständen ab, welche dadurch selbst aktiv werden. Die Aktivität, welche zuerst recht klein war, vergrößert sich im Laufe der ersten drei Jahre und kann Hunderte von Jahren anhalten. Daher empfiehlt sich beim Arbeiten mit Radium das Entweichen der Emanation nach Möglichkeit zu verhindern und alle Präparate in zugeschmolzenen Gefäßen aufzubewahren.

Auch diese langsame Umwandlung muß verschiedene Stufen nacheinander durchlaufen. Vier Phasen dieser Umwandlung sind genau

studiert. Aus Radium *C'* entsteht ein strahlenloses Produkt: das Radium *D*. In seinem chemischen Verhalten zeigt dieses Element die größte Ähnlichkeit mit dem Blei. Seine mittlere Lebensdauer beträgt 17,3 Jahre. Es ist bei Temperaturen unter 1000° flüchtig und löst sich in starken Säuren auf. Radium *D* ist das langlebigste unter allen Radiumprodukten und findet sich daher in allen natürlichen Radiummineralien (z. B. Pechblende) in geringen Mengen vor.

Aus Radium *D* entsteht weiter noch ein strahlenloses Produkt: Radium *E*, welches schon bei Rotglut flüchtig ist, β -Strahlen ausstrahlt und sich in 7 Tagen in das letzte Glied der Reihe, das Radium *F*, verwandelt. Wir erhalten auf diese Weise noch die folgende Umwandlungsreihe der Radiumabkömmlinge:



Die letzte experimentell erforschte Umwandlungsphase des Radiums, das Radium *F*, beansprucht ein besonderes Interesse.

23. Das Polonium.

Das Radium *F* sendet nur α -Strahlen aus. Seine mittlere Lebensdauer beträgt 197 Tage. In seinen chemischen Eigenschaften zeigt es die größte Ähnlichkeit mit dem Tellur und einige Ähnlichkeit mit Wismut. Bei 1000° verflüchtigt es sich. Diese Eigenschaften und insbesondere der Wert seiner Umwandlungskonstante lassen keinen Zweifel darüber übrig, daß wir hier mit einem alten Bekannten zu tun haben: mit dem Element Polonium, welches von Frau Curie zuerst entdeckt, von Prof. Marckwald ausführlich untersucht worden war. Marckwald hat zuerst auf seine Ähnlichkeit mit Tellur hingewiesen und gab auch eine höchst einfache Methode an, um das Polonium aus einem Gemisch zu isolieren. Man taucht einen Wismutstab in die Lösung, welche ein Poloniumsalz enthält. Da das Polonium edler ist als Wismut, so scheidet es sich auf dem Wismut metallisch ab. Diese sinnreiche Methode hat später eine allgemeine Anwendung zur Trennung radioaktiver Stoffe gefunden.

Auf diese Weise hat Marckwald aus 15 Tonnen der Joachims-
thaler Pechblende 3 Milligramme Polonium erhalten. Marckwalds
Leistung liefert einen lehrreichen Beweis dafür, daß es möglich ist,
eine radioaktive Substanz, welche im ganz verschwindend kleinen Be-
trage vorhanden ist, auf chemischem Wege zu konzentrieren. Wie
enorm die Aktivität dieses Präparats war, illustriert ein Versuch von
Marckwald, in welchem durch ein hundertstel Milligramm des Po-
loniumniederschlags ein Zinkfulfidschirm zu so hellem Leuchten ge-
bracht wurde, daß er in einem Auditorium von mehreren hundert
Personen gesehen werden konnte.

Daß Radium *F* tatsächlich mit Polonium identisch ist, ist von
Rutherford in exakter Weise nachgewiesen worden. Beide Pro-
dukte sondern nur eine Art der Strahlen aus, und zwar nur α -Strahlen
von übereinstimmender Geschwindigkeit. Die „Umwandlungsperiode“
oder die Zeit der halben Umwandlung des Radiums *F* beträgt 136,5
Tage, während Marckwald für das Polonium den Zeitraum von
139 Tagen gefunden hat. Da auch die physikalischen wie die chemi-
schen Eigenschaften beider Stoffe vollkommen übereinstimmen, so sind
wir berechtigt zu schließen, daß Radium *F* und Polonium ein
und derselbe Körper sind.¹⁾

Ehe sich Radium in das Polonium verwandelt, muß es vier α -
Teilchen verlieren. Der Verlust eines jeden α -Teilchens führt aber
eine Verminderung des Atomgewichts um vier Einheiten herbei, denn
ebensoviel wiegt ein Atom des Heliums. Wenn das richtig ist, so muß
das Atomgewicht des Poloniums um 16 Einheiten weniger be-
tragen als das Atomgewicht des Radiums, nämlich 210. Andererseits
geht aus Marckwalds Untersuchungen hervor, daß dieses Element
die größte Ähnlichkeit mit Tellur aufweist. Daher kommt dem Polo-
nium ein Platz in der VI. Gruppe des periodischen Systems zu: in
derselben Familie, zu welcher Schwefel, Selen und Tellur gehören.
Tatsächlich finden wir in dieser Gruppe einen freien Platz für ein
Element mit dem Atomgewicht von 208—222, und zwar gleich
hinter Wismut, welches in chemischen Eigenschaften gewisse Ähnlich-
keit mit Polonium aufweist (vgl. Tabelle S. 99).

1) Marckwald hatte zuerst das von ihm entdeckte Produkt für ein
besonderes Element gehalten und nannte es wegen seiner Ähnlichkeit mit
dem Tellur: Radiotellur. Frau Curie hat dann durch Bestimmung der
Umwandlungsperiode nachgewiesen, daß Radiotellur dasselbe Element ist
wie das von ihr zuerst entdeckte Polonium.

Was wird aber aus Polonium, wenn auch dieses radioaktive Element eines α -Teilchens beraubt wird? Allem Anschein nach muß das Umwandlungsprodukt des Poloniums ein unveränderliches Element sein, welches keine radioaktiven Eigenschaften mehr besitzt. Ist das Atomgewicht von Polonium 210, so muß dieses inaktive Element durch ein um vier Einheiten kleineres Atomgewicht gekennzeichnet sein. Sodann schließt, daß es Blei sein muß, dessen Atomgewicht 207,1 beträgt. Diese Vermutung wird durch den Umstand gestützt, daß Radium und Uran in fast allen Mineralien von Blei begleitet werden, und zwar in einer im Verhältnis zum Uran konstanten Menge.

Nun verlangt aber die Theorie für das aus Radium entstehende Blei ein Atomgewicht von 206, während das gewöhnliche Blei bekanntlich ein Atomgewicht von 207,1 besitzt. Genaue Bestimmungen des Atomgewichts von Blei, welches aus der Pechblende stammte und demnach radioaktiven Ursprungs war, sind daraufhin von Richards und Lambert ausgeführt worden und ergaben für das Atomgewicht des Radiobleis die Zahl 206,5. Im Jahre 1914 haben Höning Schmid und Horowitz für das Blei desselben Ursprungs sogar das Atomgewicht 206,05 gefunden, welches mit der Theorie völlig übereinstimmt. Wir müssen uns also vorläufig mit der Tatsache abfinden, daß es mehrere Arten des Elementes Blei gibt, welche in allen Eigenschaften vollkommen identisch in bezug auf das Atomgewicht sich um mehrere Einheiten unterscheiden. Wir werden weiter sehen, daß derartige Fälle in den radioaktiven Reihen ziemlich häufig sind.

24. Die Lebensdauer des Radiums.

In der langen Umwandlungsreihe der Zerfallprodukte des Radiums ist Radium dasjenige, welches die längste Lebensdauer besitzt. Wir haben auf S. 67 gesehen, daß Rutherford und Geiger gezählt haben, daß aus einem Gramm Radium 36 000 000 000 Atome in jeder Sekunde zerfallen. Diese an und für sich sehr große Zahl ist sehr gering im Vergleich zu der Zahl der Atome, die in einem Gramm Radium enthalten sind und die wir aus der Loschmidtschen Zahl (S. 69) leicht berechnen können. Danach enthält ein Grammatom eines beliebigen Stoffes $6,07 \times 10^{23}$ Einzelatome. Da das Atomgewicht des Radiums nach S. 14 226 beträgt, so er-

halten wir die Zahl der Einzelatome in einem Gramm Radium gleich

$$N = \frac{6,07 \times 10^{23}}{226} = 0,0269 \times 10^{23} \text{ Atome.}$$

Von dieser Gesamtzahl der Radiumatome zerfällt in der Sekunde der Bruchteil:

$$\lambda = \frac{36 \times 10^9}{0,0269 \times 10^{23}} = 1,34 \times 10^{-11}.$$

Diese Zahl, welche den Bruchteil der in jeder Sekunde zerfallenden Radiumatome ausdrückt, stellt gemäß der im Abschnitt 20 gegebenen Definition die „Umwandlungskonstante“ des Radiums dar. Würde der Zerfall mit derselben konstanten Geschwindigkeit vor sich gehen, so würde die Zeit τ , welche nötig wäre, um alle Atome des Radiums zum Zerfall zu bringen, betragen:

$$\tau = \frac{1}{1,34 \times 10^{-11}} = 78\,000\,000\,000 \text{ Sekunden} = 2500 \text{ Jahre.}$$

Auf diese Art läßt sich die mittlere Lebensdauer des Radiums zu 2500 Jahren berechnen. Die Zahl stimmt mit den Resultaten der auf andern Voraussetzungen begründeten Berechnungen gut überein.

Wir haben weiter im 7. Kapitel gesehen, daß ein Gramm Radium mit seinen Zerfallprodukten ständig Wärme entwickelt, und zwar 170 Kalorien pro Stunde. Das macht pro Jahr rund anderthalb Millionen Kalorien. Wir können jetzt leicht berechnen, wieviel Wärme ein Gramm Radium während seiner ganzen Lebensdauer erzeugen wird, d. h. ehe es völlig zerfällt. Da die mittlere Lebensdauer zu 2500 Jahren angenommen werden kann, so müssen in diesem Zeitraum von jedem Gramm Radium 3,7 Milliarden Kalorien gebildet werden. Eine enorm hohe Zahl, welche die Wärmebildung der energischsten chemischen Reaktionen millionenfach übertrifft. Denn beim Verbrennen von einem Gramm Wasserstoff erhalten wir nicht mehr als 34 000 Kalorien, beim Verbrennen von einem Gramm Kohle bloß etwa 8000 Wärmeeinheiten. Um ebensoviel Wärme zu erhalten, wieviel beim Zerfall von einem Gramm Radium erzeugt wird, müßten wir 500 Kilogramm Kohle oder 70 Kilogramm Wasserstoff verbrennen.

Die beim Zerfall der Emanation freiwerdende Wärme läßt sich gleichfalls berechnen. Wir haben gesehen, daß ein Radiumpräparat, welches von der Emanation vollständig befreit worden ist, nur ein Viertel der ursprünglichen Aktivität besitzt (vgl. S. 41). Drei Viertel der Aktivität sind mit der Emanation fortgegangen. Wir sind berech-

tigt, daraus zu schließen, daß von den 170 Kalorien, welche das ursprüngliche Radium pro Gramm und Stunde entwickelt hatte, nur ein Viertel dem reinen Radium, drei Viertel aber der Emanation und ihren Produkten zukommt. Ein Gramm Radium entwickelt etwa einen Kubikmillimeter Emanation. Dieses Kubikmillimeter Emanation könnte für sich 112 Kalorien pro Stunde entwickeln. Die Lebensdauer der Emanation beträgt 133 Stunden. Somit ist ein Kubikmillimeter Emanation imstande, im ganzen 15 000 Kalorien zu entwickeln. Auf ein Gramm (d. h. ungefähr 100 Kubikzentimeter) kommt dann eine Wärmemenge von 1,2 Milliarden Kalorien. Es läßt sich leicht berechnen, daß ein Kilo Emanation eine Arbeitsleistung von 20 000 Pferdestärken pro Stunde entwickeln könnte.

Diese Zahlen geben uns eine Vorstellung von den großen Energievorräten, welche in den Atomen der Elemente aufgespeichert sind. Erst auf Grund dieser Zahlen können wir den Grund der Beständigkeit der Meistzahl der Grundstoffe gegen die gewöhnlichen Zersetzungsmittel erkennen, welche wir zur Verfügung haben, — einer Beständigkeit, auf deren Grundlage im Laufe der Jahrhunderte das ganze heutige System der Chemie aufgebaut worden ist. Die großen Energiemengen gestatten uns auch, eine Rechenschaft darüber zu geben, warum wir mit unseren bescheidenen Energiequellen weder die Geschwindigkeit noch den Verlauf der radioaktiven Umwandlungen irgendwie beeinflussen können.

25. Das Uran.

Das Radium zerfällt außerordentlich langsam. Im Laufe eines ganzen Jahres zerfällt kaum $\frac{1}{3000}$ der vorhandenen Menge eines Radiumpräparats. Um den Zerfall der Hälfte des vorhandenen Radiums zu erleben, müßten wir 1750 Jahre warten! Das ist eine sehr lange Zeit im Vergleich mit der Lebensdauer des Menschen. Für das Leben der Erde jedoch, deren Perioden nach Millionen von Jahren zählen, ist das nur ein Augenblick. Hätte das Radium schon in der Anfangsepöche der Bildung der Erdkruste fertig vorgelegen, so wäre längst keine Spur dieses Elementes in der Erde mehr vorhanden. Das Radium kommt aber heute noch vor, und nicht nur in der Pechblende, sondern, wie die Untersuchungen der Frau Curie gezeigt haben, auch in vielen andern Mineralien, wenn auch in spärlicher Menge. Ist das der Fall, so muß dieses Element immer

von neuem entstehen und immer von neuem sterben, wie ein lebendes Wesen von einer beschränkten Lebensdauer.

Woher entsteht aber das Radium? Das ist eine Frage, welche hier von selbst auftaucht. Geologische Forschungen gaben zuerst die Antwort auf diese Frage, ehe es möglich wurde, sie experimentell zu beantworten. In allen radioaktiven Mineralien finden wir das Radium in der Gesellschaft eines andern radioaktiven Elements, welches schon lange bekannt war: des Urans. Die Analysen von Rutherford und Boltwood zeigten, daß die Menge des Urans in der Pechblende wie auch in allen andern Mineralien in einem bestimmten Verhältnis zur Menge des Radiums steht, und zwar übersteigt das Uran 3 000 000 mal die Menge des Radiums. Das führte zu der Vermutung, daß als „Urahn“ der Radiumfamilie das Element Uran anzusehen ist, an welchem zum ersten Male Radioaktivität entdeckt worden war. In der Tat haben Soddy und später Wetheram durch direkte Versuche bewiesen, daß beim radioaktiven Zerfall des Urans in nachweisbaren Mengen Radium gebildet wird.

Das Uran ist ein Metall, dessen Atomgewicht die Atomgewichte aller bekannten Elemente übertrifft (vgl. die periodische Tabelle der Elemente auf S. 99). Natürliche Uranverbindungen senden alle drei Arten von Strahlen aus. Es läßt sich jedoch — wie wir im nächsten Abschnitt sehen werden — zeigen, daß die β - und die γ -Strahlen von den Produkten seiner Umwandlung herrühren. Reines Uran sendet nur α -Strahlen aus, deren Reichweite nur 2,7 cm beträgt.

Wie das Radium, so zeichnet sich auch das Uran durch eine im Laufe der Jahre unveränderliche Radioaktivität aus, woraus wir schließen dürfen, daß die Umwandlung des Urans äußerst langsam stattfindet. Da die Aktivität des Urans eine Million mal kleiner ist als die Aktivität des Radiums, so muß offenbar das Uran noch viel längere Lebensdauer besitzen als das Radium. Aus dem konstanten Verhältnis der beiden Elemente in radioaktiven Mineralien läßt sich die mittlere Lebensdauer des Urans berechnen, und zwar auf Grund folgender Überlegung.

Experimentell wurde bewiesen, daß beim radioaktiven Zerfall des Urans Radium gebildet wird. Wäre das Radium absolut beständig, so würde sich seine Menge in den Mineralien allmählich auf Kosten des Urans vergrößern. Da jedoch auch das Radium einem weiteren Zerfall unterworfen ist, so bildet sich nach Tausenden von Jahren ein

stationärer Zustand heraus, in welchem ebensoviel Radium in einer gegebenen Zeit entsteht, wieviel in derselben Zeit zerstört wird. Dann ist die Menge des Radiums konstant. Wir pflegen dann zu sagen, daß das Uran und das Radium sich im radioaktiven Gleichgewicht befinden. Die Mengen beider Elemente, welche diesem Gleichgewichtszustand entsprechen, lassen sich durch eine einfache Rechnung ermitteln.

Zwecks Berechnung dieses Verhältnisses nehmen wir an, daß eine gegebene Menge des Minerals, in welchem das Uran und das Radium sich im radioaktiven Gleichgewicht befinden, N_1 Atome Uran enthält. Ist die Umwandlungskonstante des Urans gleich λ_1 , so wird die Anzahl der in der Sekunde zerfallenden Uranatome durch das Produkt:

$$Z_1 = \lambda_1 N_1$$

ausgedrückt. In analoger Art können wir die Zahl Z_2 der in der Sekunde zerfallenden Radiumatome ausdrücken, wenn wir die Gesamtzahl der Radiumatome gleich N_2 und die Umwandlungskonstante des Radiums gleich λ_2 setzen. Dann ist

$$Z_2 = \lambda_2 N_2.$$

Nun werden im radioaktiven Gleichgewicht ebensoviel Atome Radium in der Sekunde gebildet, wieviel im gleichen Zeitabschnitt zerfallen. Dann gilt:

$$Z_1 = Z_2 \text{ und } \lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 \text{ oder } \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{N_2}{N_1}.$$

Mit Worten ausgedrückt besagt das Gesetz des radioaktiven Gleichgewichts folgendes: „Die in Atomzahlen ausgedrückten Gleichgewichtsmengen der Elemente verhalten sich umgekehrt wie die Zerfallskonstanten, bzw. direkt wie die mittleren Lebensdauern der Elemente.“ Die letzte Gleichung gestattet uns die Lebensdauer des Urans zu berechnen. Die genauen Analysen der Pechblende von Becquerel und Jannasch ergeben für den Wert:

$$\frac{N_2}{N_1} = 3,415 \times 10^{-7}$$

Die Umwandlungskonstante des Radiums ist gleich:

$$\lambda_2 = 1,34 \times 10^{-11}.$$

Folglich ist die Umwandlungskonstante des Urans:

$$\lambda_1 = \frac{N_2}{N_1} \cdot \lambda_2 = 3,415 \times 10^{-7} \times 1,34 \times 10^{-11} \\ = 4,53 \times 10^{-18} \text{ [Sek.}^{-1}\text{]}$$

und die mittlere Lebensdauer des Urans:

$$\tau = \frac{1}{4,53 \times 10^{-18}} = 2,21 \times 10^{17} \text{ Sek.} = 7\,000\,000\,000 \text{ Jahre.}$$

Danach zerfällt im Laufe von fünf Milliarden Jahren nicht mehr als die Hälfte der ursprünglich vorhandenen Menge dieses Elements.

26. Der Stammbaum des Radiums.

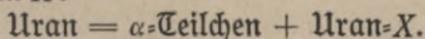
Ein genaueres Studium der radioaktiven Eigenschaften des Urans hat zu dem Resultat geführt, daß das Radium kein unmittelbares Produkt der Umwandlung des Urans sein kann. Die schönen Versuche von Crookes und von Becquerel haben uns mit einem Zwischenprodukt dieser Umwandlung bekannt gemacht, welches den Namen Uran-X erhielt.

Crookes experimentierte folgendermaßen. Er versetzte eine reine Uransalzlösung mit Ammoniumcarbonat. Dabei fällt ein Niederschlag von Uranoxyd aus. Fügt man jedoch das fällende Reagens im Überschuß zu, so löst sich der Niederschlag wieder auf. Aber eine geringe Menge dieses Niederschlags bleibt ungelöst zurück. Untersuchen wir jetzt getrennt sowohl die Lösung der Hauptmenge des Uransalzes wie den geringen Niederschlag, so finden wir, daß die Lösung keine β - und γ -Strahlen mehr aussendet; der kleine Niederschlag hingegen besitzt jetzt die gesamte β -Strahlung, welche ursprünglich dem Uran eigen war. Crookes hat daraus geschlossen, daß im Uran noch eine andere aktive Substanz in geringer Menge vorliegt, welche er Uran-X nannte.

Dann hat er die Aktivität des Uran-X längere Zeit verfolgt und auch von Zeit zu Zeit die Aktivität des zurückgebliebenen Uransalzes untersucht. Das Resultat war nicht wenig überraschend. Es zeigte sich nämlich, daß die β -Strahlung des Uran-X beständig abnahm, während das Uran wieder von neuem β -Strahlen auszusenden begann! Nach 22 Tagen hat das Uran-X die Hälfte seiner Aktivität verloren; dagegen hat das Uran die Hälfte seiner ursprünglichen β -Strahlung wiedererlangt. Nach einigen Monaten schließlich ist das Uran-X vollständig inaktiv geworden, während die Aktivität des Urans vollständig regeneriert war.

Im Verhalten des Urans und des Uran-X wiederholt sich also dasselbe Spiel, welches wir in der Veränderung der Aktivität der Emanation und des von der Emanation befreiten Radiums im Ab-

schnitt 11 (S. 41) kennengelernt haben. Und auch die Erklärung ist in beiden Fällen die gleiche. Das Element Uran, welches im reinen Zustande nur zur α -Strahlung befähigt ist, bildet hierbei ein neues Element: das Uran-X:



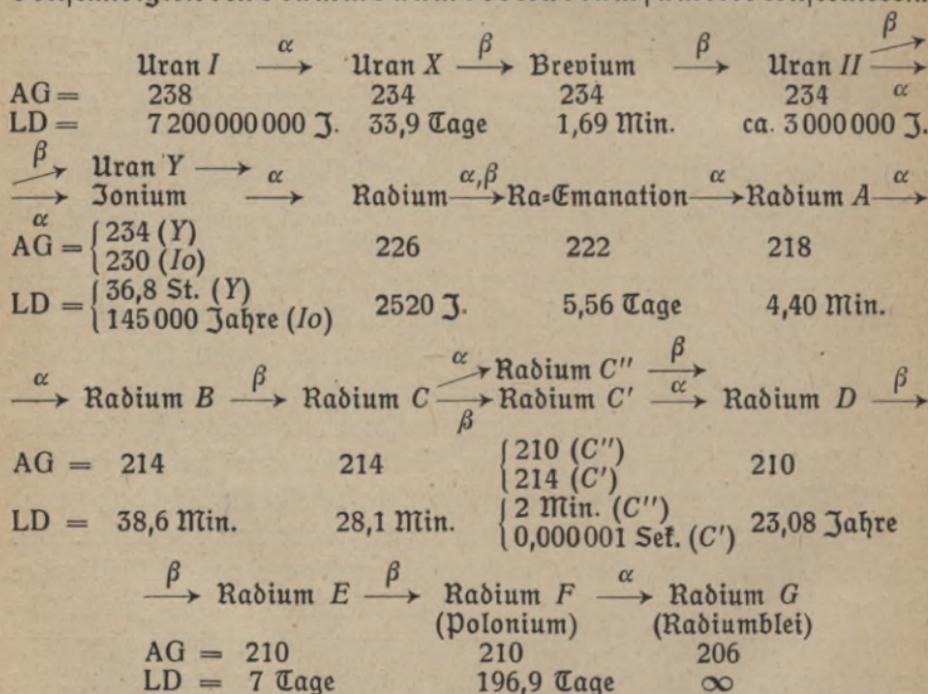
Das Uran-X schleudert negative Elektronen, d. h. β -Strahlen aus und zerfällt hierbei in eine neue, unbekannte Substanz. Die Lebensdauer des Uran-X beträgt 33,9 Tage. Außer den β -Strahlen sendet es sehr inhomogene γ -Strahlen aus.

Auf Grund einer im Abschnitt 31 zu besprechenden Regel, wonach das Produkt einer β -Umwandlung im periodischen System um eine Gruppe nach rechts rückt, haben Russell und Sajans vorausgesagt, daß als Produkt der Umwandlung von Uran-X ein neues, kurzlebiges Element auftreten muß, welches in seinen chemischen Eigenschaften dem Tantal gleicht. Und kurz darauf ist es Sajans und Göhring gelungen, dieses Produkt zu isolieren und nachzuweisen, daß es in seinen Eigenschaften mit der Voraussage völlig übereinstimmt. Dieses neue Element erhielt den Namen Brevium (kurzlebige), weil es eine Lebensdauer von nur 1,7 Minuten besitzt. Es sendet weiche β -Strahlen aus und beansprucht einen selbständigen Platz in der 12. Reihe der 5. Gruppe des periodischen Systems, wohin es auf Grund seines Atomgewichts (234) gut paßt.

Es war nun einigermaßen überraschend, als Mc-Coy und Roß und andererseits Boltwood feststellten, daß ein Atom Uran zu gleicher Zeit zwei α -Teilchen von verschiedener Reichweite sendet. Es blieb die Annahme übrig, daß das Uran ein Gemisch zweier Elemente darstellt, von denen das eine aus dem andern entsteht und welche sich daher im radioaktiven Gleichgewicht befinden. Beide Elemente sind sich in ihren physikalischen wie auch chemischen Eigenschaften so ähnlich, daß sie sich durch keine der bekannten Methoden voneinander trennen lassen. Das erste von ihnen, das Uran I, mit der Lebensdauer von 7 Milliarden Jahren ist der Stammvater der ganzen Uranreihe. Das zweite Element, das Uran II, ist sein Umwandlungsprodukt, entsteht aber nicht unmittelbar aus dem Uran I, sondern erscheint als das Produkt des Zerfalls von Brevium. Auf Grund der Regeln von Geiger und Nuttall und von Swinne ließ sich die Lebensdauer des Urans II aus der Geschwindigkeit seiner α -Strahlen annähernd berechnen: sie beträgt ungefähr 3 Millionen Jahre.

Es unterliegt weiter keinem Zweifel, daß zwischen dem Uran II und dem Radium noch mindestens ein Zwischenglied vorhanden sein muß. Ein derartiges Zwischenelement, aus welchem sich unmittelbar Radium bildet, ist von Boltwood einerseits und gleichzeitig von Marckwald und Keetmann in der Pechblende gefunden worden. Diese Muttersubstanz des Radiums erhielt den Namen Ionium. Ionium begleitet in uranhaltigen Mineralien stets ein anderes radioaktives Element, von welchem im nächsten Kapitel die Rede sein wird: das Thorium. Beide sind einander so ähnlich, daß ihre Trennung mit großen Schwierigkeiten verknüpft ist. Die Lebensdauer des Ioniums ließ sich noch nicht genau feststellen. Jedenfalls ist sie recht groß und beträgt mehr als hunderttausend Jahre. Man weiß von ihm, daß es α -Teilchen aussendet, wobei Radium entsteht.

Auf Grund der vorliegenden Daten können wir heute mit ziemlicher Vollständigkeit den Stammbaum der Radiumfamilie konstruieren.



In dieser Zusammenstellung sind in der mit AG bezeichneten Zeile die Atomgewichte und unter LD die mittleren Lebensdauern der radioaktiven Glieder der Reihe angegeben.

Wie man aus dem Stammbaum der Uran-Radiumfamilie ersieht,

tritt auch beim Uran II eine Verzweigung der Reihe ein: dieses Element hat zwei Nachkommen: außer dem von uns oben besprochenen Jonium noch das von Antonoff entdeckte Uran Y, welches sich als ein Anfangsglied einer neuen radioaktiven Familie, derjenigen des Aktiniums entpuppte.

27. Die Familie des Aktiniums.

Fast gleichzeitig mit der Entdeckung des Poloniums und Radiums durch Curies ist in der Pechblende von Debierne ein drittes radioaktives Element entdeckt worden, das Aktinium. Gleichzeitig und unabhängig von Debierne fand Giesel einen neuen radioaktiven Stoff, welchen er mit dem Namen Emanium taufte, weil dieser Stoff größere Mengen einer gasförmigen Emanation ausschied. Jedoch wurde später durch einen genaueren Vergleich festgestellt, daß Emanium und Aktinium identisch sind, worauf dann der Name Emanium fortgefallen ist.

Das Aktinium wird aus der salzsauren Lösung der Rückstände der Pechblende durch Ammoniak niedergeschlagen und fällt hier zusammen mit Eisen und den seltenen Erden aus. Das Element gehört also nach seinem chemischen Charakter zur Gruppe der seltenen Erden. Ihm kommt im periodischen Systeme ein bis dahin frei gebliebener Platz in der 12. Reihe der 3. Gruppe zu, d. h. der freie Platz unterhalb des Elements: Thallium. Sein Atomgewicht konnte bis jetzt nicht bestimmt werden: es wird von Sajans auf 226 bis 228 geschätzt. Auffallend ist seine enorme Aktivität. Schwache Präparate, welche an Aktinium verhältnismäßig arm sind, sind doch 100 000 mal stärker radioaktiv als Uran. Es scheint, daß die Aktivität des Aktiniums unveränderlich ist. Seine Umwandlungsgeschwindigkeit ist jedenfalls sehr gering und der Größe nach noch völlig unbekannt. Die schöne Erscheinung der Szintillation tritt beim Aktinium noch viel deutlicher hervor als beim Radium.

Die Kenntnis der Umwandlungsprodukte des Aktiniums verdanken wir hauptsächlich den wichtigen Untersuchungen von Godlewski. Godlewski hat nachgewiesen, daß das in der Pechblende vorhandene Aktinium seine Radioaktivität ausschließlich seinen Umwandlungsprodukten verdankt. Das Element Aktinium in reiner Form ist strahlenlos. In bezug auf seine Eigenschaften ist es noch völlig unbekannt. Sein nächstes Umwandlungsprodukt, das Radioaktinium, besitzt eine kurze Lebensdauer von nur 28,1 Tagen.

Sowohl das Radioaktinium wie sein nächster Abkömmling, Akti-

nium = X genannt, senden α -Strahlen aus und lassen als Rest eine Emanation des Aktiniums entstehen, ein der Radiumemanation ähnliches Gas, welches sich durch eine äußerst kurze Lebensdauer auszeichnet. Es lebt kaum 5,6 Sekunden. Wie die Radiumemanation zeichnet sich dieses Gas durch die Unfähigkeit aus, mit andern Elementen Verbindungen einzugehen. Es muß also derselben Gruppe der „Edelgase“ zugerechnet werden, zu welcher Helium und Argon gehören.

Die Aktiniumemanation produziert bei ihrem Zerfall Helium und liefert radioaktive Niederschläge, welche sich folgeweise ineinander umwandeln und — nach Analogie mit den aktiven Niederschlägen des Radiums — Aktinium A, Aktinium B, Aktinium C und Aktinium D genannt werden. Alle diese Produkte bilden, wie die Produkte des Radiums, eine Familie für sich. Ihre charakteristischen Eigenschaften sind in der Tabelle auf S. 101 angegeben.

Da das Aktinium in der Natur stets in der Gesellschaft des Urans vorkommt, so ist von Boltwood und Rutherford die Vermutung ausgesprochen worden, daß Aktinium von dem Uran oder einem seiner Produkte abstammt, aber in viel geringerer Menge gebildet wird als ein gleichzeitig entstehendes anderes Produkt, welches zur Bildung des Radiums führt. Durch die Entdeckung des Urans Y von Antonoff hat diese Anschauung eine kräftige Stütze erhalten. In letzter Zeit haben Hahn und Meitner ein neues radioaktives Element von langer Lebensdauer erhalten, welches als die Muttersubstanz des Aktiniums angesehen werden kann: das Protaktinium. Es ähnelt in seinen Eigenschaften dem Tantal. Seine Lebensdauer wird auf 1200 bis 180 000 Jahre geschätzt.

Nach Hahn und Meitner erhalten wir folgende Abstammungsreihe für die Elemente der Aktiniumgruppe:

	Uran I	$\xrightarrow{\alpha}$	Uran X	$\xrightarrow{\beta}$	Brevium	$\xrightarrow{\beta}$	Uran II	$\xrightarrow{\beta}$
AG =	238		234		234		234	
LD =	7 200 000 000 J.		33,9 Tage		1,69 Min		(3 000 000 J.)	
\rightarrow	Jonium	$\xrightarrow{\alpha}$	Radium					
\rightarrow	Uran Y	$\xrightarrow{\beta}$	Protaktinium	$\xrightarrow{\alpha}$	Aktinium			(α) (β)
AG =	{ 230 234		{ 226 (Ra) 234 (Pr)		(226)			
LD =	{ 145 000 Jahre 36,8 St.		{ 2520 Jahre 180 000 Jahre		43 Jahre			

$\xrightarrow{(\alpha)}$	Radioaktinium	$\xrightarrow{\alpha, \beta}$	Aktinium X	$\xrightarrow{\alpha}$	Akt. Emanation	$\xrightarrow{\alpha}$
AG =	(226)		(222)		(218)	
LD =	27,2 Tage		16,7 Tage		5,66 Sek.	
$\xrightarrow{\alpha}$	Aktinium A	$\xrightarrow{\alpha}$	Aktinium B	$\xrightarrow{\beta}$	Aktinium C	$\xrightarrow{\alpha}$ $\xrightarrow{\beta}$
AG =	(214)		(210)		(210)	
LD =	0,003 Sek.		52,1 Min.		3,12 Min.	
$\xrightarrow{\alpha}$	Aktinium C''	$\xrightarrow{\beta}$	Aktinium D (Aktiniumblei)			
$\xrightarrow{\beta}$	Aktinium C'	$\xrightarrow{\alpha}$				
AG =	{ 206 (C'')		(206)			
	{ 210 (C')					
LD =	{ 6,8 Min. (C'')		(∞)			
	{ ca. 0,007 Sek. (C')					

28. Das Thorium.

Außer den beiden schon besprochenen Familien, derjenigen des Uran-Radiums und derjenigen des Aktiniums, ist noch eine dritte Familie radioaktiver Elemente bekannt, deren Anfangsglied dem Uran in einiger Beziehung ähnlich ist und — wie das Uran — seit langer Zeit bekannt war. — Es ist das dasjenige Element, welches nächst dem Uran durch das höchste Atomgewicht ausgezeichnet ist: das Thorium.

H. C. Schmidt und Frau Curie haben zu gleicher Zeit dargetan, daß das Thorium und seine Verbindungen Strahlen aussenden, welche undurchsichtige Gegenstände durchdringen, auf die photographische Platte wirken und die Luft ionisieren. Es wurde bewiesen, daß die Strahlung des Thoriums auch im Dunkeln kontinuierlich vor sich geht, wie die Strahlung des Urans. Das Thorium sendet α -Strahlen aus. Es hat eine Lebensdauer, welche diejenige des Urans noch übertrifft. Sie beträgt 19 Milliarden Jahre!

Das erste Umwandlungsprodukt des Thoriums ist ein fester Körper: das Mesothor 1, welches keine Strahlen auszusenden scheint. Aus ihm entsteht das Mesothor 2, welches β -Strahlen aussendet. Diese beiden Umwandlungsstufen des Thoriums wurden von Hahn entdeckt. Derselbe Forscher hat gezeigt, daß die Aktivität des natürlichen Thoriums noch von einem andern bis dahin unbekanntem radioaktiven Element herrührt, welches das Thorium in allen seinen Verbindungen zu begleiten pflegt. Dieses neue Element wird als eine weitere Um-

wandlungsstufe des Mesothors betrachtet. Es erhielt den Namen Radiothorium. Seine Aktivität klingt allmählich ab in genauer Übereinstimmung mit dem allgemeinen Gesetz des Aktivitätsabfalls (vgl. S. 37); die Abnahme der Aktivität vollzieht sich aber viel schneller als beim Radium. Demgemäß beträgt die mittlere Lebensdauer des Radiothoriums 2,9 Jahre. Wie das Thorium schleudert auch das Radiothorium α -Teilchen heraus und bildet zunächst das Thor-X, ein festes radioaktives Umwandlungsprodukt, welches α - und β -Strahlen ausstrahlt.

Die Eigenschaften von Thorium-X sind zuerst von Rutherford und Soddy studiert worden, und dieses Element war das erste Beispiel, an welchem die Umwandlungstheorie geprüft werden konnte. Die Isolierung dieses Elements ist der Trennung des Uran-X vom Uran ähnlich. Eine Lösung vom Thoriumnitrat wird durch Ammoniak gefällt. Das Thorium fällt als Thoriumhydroxyd aus. Aber der erhaltene Niederschlag besitzt nur einen geringen Teil der ursprünglichen Strahlungsenergie des Thoriums. Der größte Teil der Aktivität ist in Lösung geblieben. In der Tat: läßt man die vom Niederschlag filtrierte Lösung zur Trockne verdampfen, so hinterläßt sie einen kleinen Rückstand. Dieser Rückstand ist Gewicht für Gewicht tausendmal so stark aktiv als das ursprüngliche Thoriumnitrat. Dieser Rückstand wurde Thorium-X genannt. Sehen wir zu, was weiter passiert.

Die Aktivität des gefällten Thoriumhydroxyds nimmt während des ersten Tages ein wenig ab, passiert ein Minimum und wächst dann stetig, bis sie nach einem Monat einen nahezu kon-

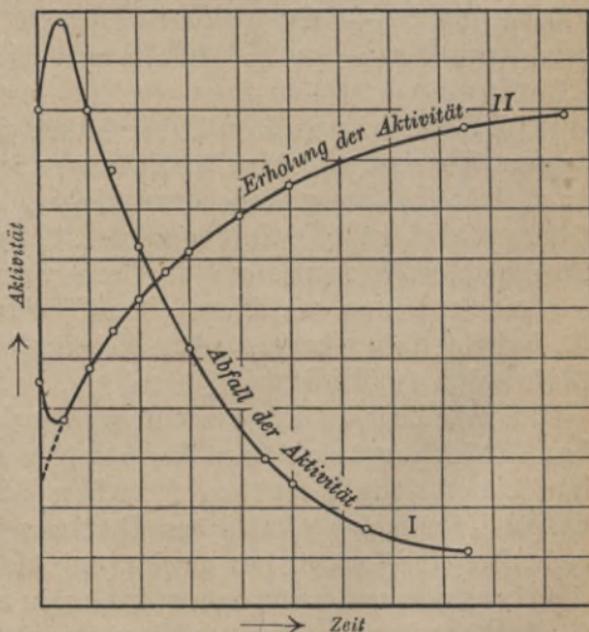


Fig 31. Abfall der Aktivität des Thoriums X und Zunahme der Aktivität des Thoriums (Nach Rutherford.)

stanten Wert erreicht. Die Kurve *II* der Fig. 31 veranschaulicht diese Ergebnisse. Die Aktivität des Thorium-*X* verhält sich ganz entgegengesetzt: während des ersten Tages steigt sie an, und später fällt sie mit einer viertägigen Periode ab. Nach einem Monat ist die zurückgebliebene Aktivität des Thorium-*X* sehr gering. Der zeitliche Ablauf der Aktivität des Thorium-*X* ist in der Kurve *I* der Fig. 31 veranschaulicht.

In den beiden Kurven der Thoriumaktivität spiegelt sich dieselbe Tatsache wider, welche wir beim „entemanieren“ Radium (S. 41) und beim Uran (S. 84) kennen lernten. Beide Kurven ergänzen sich gegenseitig. Dem Ansteigen der Aktivität des Thorium-*X* in der Kurve *I* entspricht ein Abfall der Aktivität des Thoriums in der Kurve *II*. Der spätere Abfall der Kurve *I* entspricht aber wieder einem Anstieg der Kurve *II*. In dem ganzen Bereich der Untersuchung ist die Summe der Aktivitäten des Thorium-*X* und seiner Muttersubstanz, des Thoriums, konstant. Wir werden nicht fehlgehen, wenn wir in diesem Verhalten den Ausdruck eines allgemeinen Prinzips sehen werden, das wir als das Prinzip der Erhaltung der Aktivität bezeichnen können, und welches deswegen für uns besonders wichtig ist, weil es nicht nur für das Thorium, sondern für jede radioaktive Substanz gilt. Eine Folge von diesem Prinzip ist, daß, wenn in der Muttersubstanz eine Reihe der Produkte ihrer Umwandlung vorliegt, diese Produkte im Gleichgewichtszustand in einem bestimmten Verhältnis zueinander stehen müssen. Und weil ihr Mengenverhältnis unveränderlich ist, so muß auch die Gesamtaktivität einer im radioaktiven Gleichgewicht befindlichen Substanz eine konstante Größe vorstellen.

Der Abfall der Aktivität des Thorium-*X* kann nur so gedeutet werden, daß diese Substanz ununterbrochen zerfällt, und zwar nach demselben einfachen Gesetz, welchem auch die andern einfachen radioaktiven Stoffe gehorchen. Der Anstieg der Aktivität des Thoriumhydroxyds kann dann in dem Sinne gedeutet werden, daß aus dem Thorium ununterbrochen Thorium-*X* gebildet wird. Wäre dieses Produkt beständig, so müßte seine Menge ununterbrochen zunehmen und die Aktivität des Thoriumhydroxyds müßte ständig wachsen. Da jedoch das neugebildete Thorium-*X* zum Teil wieder zerfällt, so bildet sich schließlich ein Gleichgewichtszustand heraus, in welchem genau so viel Atome Thorium-*X* in der Sekunde zerfallen, wie gleich-

zeitig gebildet werden. Tatsächlich hat man gefunden, daß man aus dem Thoriumhydroxyd, aus welchem man das Thorium-X entfernt hat, nach einem Monat (d. h. wenn das Thoriumhydroxyd seine ursprüngliche Aktivität wiedergewonnen hat) neue Mengen von Thorium-X durch Fällung mit Ammoniak erhalten kann. Man kann das Verfahren beliebig oft wiederholen, wenn man zwischen zwei Fällungen je einen Monat verstreichen läßt.

Wie das Radium und das Aktinium, so sondert auch das Thorium eine Emanation ab, welche sich allmählich in einen radioaktiven Niederschlag verwandelt. Die Aktivität dieses Niederschlags vermindert sich allmählich, und die Abfallskurve hat denselben Charakter wie die Kurve des Aktiniumniederschlags, was auf eine weitgehende Ähnlichkeit beider Elemente hindeutet.

Man hat nun weiter gefunden, daß das Thorium-X noch viel größere Mengen der Emanation entwickeln kann als das Thorium, und zwar ist die Menge der entwickelten Emanation stets proportional der Menge des vorhandenen Thorium-X. In dem Maße, wie die Aktivität des Thorium-X mit der Zeit abnimmt, vermindert sich auch die Menge der in der Zeiteinheit entwickelten Emanation. Das erlaubt uns, mit Sicherheit zu schließen, daß die Muttersubstanz der Emanation nicht das Thorium selbst, sondern das Thorium-X ist.

29. Die Thoriumemanation.

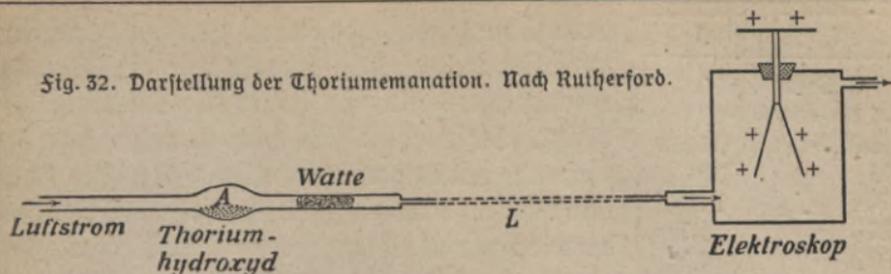
Die radioaktiven Umwandlungen des Thoriums verdienen besonderes Interesse schon aus dem Grunde, weil an der Hand dieser Umwandlungen die Zerfallstheorie von Rutherford und Soddy zuerst im Jahre 1902 entwickelt worden ist. Die Umwandlungsprozesse des Thoriums sind in der Tat einfacher als die am Radium beobachteten Erscheinungen.

Daß das Thorium eine kurzlebige Emanation aussendet, ist von uns schon im vorigen Kapitel erwähnt worden. Da Thoriumverbindungen viel zugänglicher sind als die Verbindungen des Radiums, so läßt sich die Thoriumemanation ohne große Unkosten herstellen.

Rutherford¹⁾ beschreibt folgende einfache Anordnung zur Demonstration der Haupteigenschaften dieser merkwürdigen Materie (Fig. 32).

1) E. Rutherford, Radioaktive Umwandlungen, S. 40. Braunschweig, 1907.

Fig. 32. Darstellung der Thoriumemanation. Nach Rutherford.



Die Glasröhre A wird mit Thoriumhydroxyd gefüllt, welches besonders leicht die Emanation abgibt. Die Röhre A wird durch eine enge, etwa 1 m lange Röhre L mit einem geeigneten, gut isolierten Elektroskop verbunden. Nach Aufladung des Elektroskops fallen die Goldblättchen zunächst sehr langsam zusammen, da die Thoriumverbindung die Luft innerhalb des Elektroskops nur sehr wenig ionisiert. Mit Hilfe eines Blasebalgs wird dann über das Thoriumhydroxyd Luft in einem langsamen Strom geblasen. Anfangs bleibt das Elektroskop unverändert. Sobald aber die Luft aus A in das Elektroskop hineingelangt ist, sieht man die Blättchen sehr schnell zusammenfallen. Diese Entladung des Elektroskops rührt von der ionisierenden Fähigkeit der Thoriumemanation her, welche durch den Luftstrom in das Elektroskop hineingelangt ist. Stellt man den Luftstrom ab, so nimmt die Geschwindigkeit der Entladung der Goldblättchen gleichmäßig ab und sinkt in einer Minute ungefähr auf die Hälfte ihres ursprünglichen Wertes. Nach fünf Minuten ist die Wirkung der Emanation kaum noch bemerkbar. Da die Emanation, wie auch andere einfache radioaktive Substanzen, ihre Aktivität nach dem Exponentialgesetz verliert (vgl. S. 38), so sinkt die Entladungsgeschwindigkeit in erster Minute auf die Hälfte, in der zweiten auf ein Viertel, in der dritten auf ein Achtel ihres Anfangswertes usw. Nach Verlauf von fünf Minuten beträgt sie nur noch den zweiunddreißigsten Teil des ursprünglichen Wertes. Der elektrische Nachweis ist so empfindlich, daß man zu diesem Versuch nicht mehr als einige Milligramme Thoriumhydroxyd nötig hat.

Die Emanation wird vollständig aufgehalten, wenn man die Luft, mit welcher sie gemischt ist, langsam durch eine U-förmig gebogene Röhre leitet, welche in flüssige Luft eintaucht. Hierbei wird die Emanation des Thoriums zu einer Flüssigkeit kondensiert. Aus der geringen Geschwindigkeit, mit welcher die Thoriumemanation in an-

t	J
0 Sek.	100
28 "	69
62 "	51
118 "	25
155 "	14
210 "	6,7
272 "	4,1
360 "	1,8

dere Gase hineindiffundiert, ist man berechtigt zu schließen, daß sie — ebenso wie die Radiumemanation — ein sehr hohes Molekulargewicht besitzt. Sie verhält sich auch in chemischer Beziehung vollkommen ähnlich. Rutherford und Soddy haben festgestellt, daß die Thoriumemanation von keinem chemischen Reagens angegriffen wird. Läßt man die Emanation durch eine bis auf Weißglut erhitzte Platinröhre

langsam passieren, so kann man hierbei keine Änderung der Aktivität beobachten. Da demnach auch der Thoriumemanation die Fähigkeit zur chemischen Verbindung mit andern Elementen fehlt, so muß auch sie der Familie der sog. Edelgase zugerechnet werden. Im periodischen System ist für sie noch kein Platz gefunden worden.

Das allmähliche Abklingen der Aktivität der Thoriumemanation wird durch obenstehende Zahlen illustriert, welche einer der ersten klassischen Publikationen von Rutherford über diesen Gegenstand entnommen sind. In der ersten Reihe sind die Beobachtungszeiten, in der zweiten die ermittelten Aktivitäten angeführt.

30. Die Umwandlungen der Thoriumemanation.

Rutherford hat beobachtet, daß jeder Körper, welcher der Wirkung der Emanation ausgesetzt gewesen ist, selbst radioaktiv wird. Bedeckt man jedoch die Thoriumverbindung mit einer ganz dünnen Glimmerplatte, so wird keine Aktivität nach außen abgegeben. Diese Tatsache zeigt, daß die Übertragung der Aktivität nicht durch Strahlen stattfindet, welche durch die Glimmerplatte durchdringen würden, sondern durch einen Stoff. Man kann vermittels des elektrischen Stromes diesen radioaktiven Stoff auf einer Elektrode konzentrieren. Verbindet man einen dünnen Draht *AB*, welcher in einem geschlossenen Kasten *V* (Fig. 33) der Thoriumemanation exponiert ist, mit dem negativen Pol einer starken elektrischen Batterie, so wird der Draht stark aktiv. Er kann mehrere hundertmal stärker aktiviert werden als das Thorium selbst. Die radioaktive Substanz

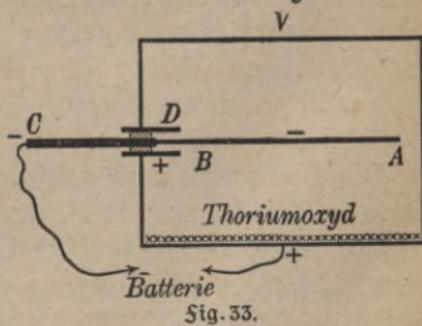


Fig. 33.

haftet nur auf der Oberfläche des Drahtes. Wir bezeichnen sie deswegen als den aktiven Niederschlag. Man kann den Niederschlag durch Reiben mit einem Stück Zeug entfernen oder auch durch starke Säuren auflösen. Läßt man dann die Säure in einer Platinschale verdampfen, so bleibt der aktive Niederschlag in der Schale zurück. Beim Erhitzen auf Rotglut verflüchtigt er sich.

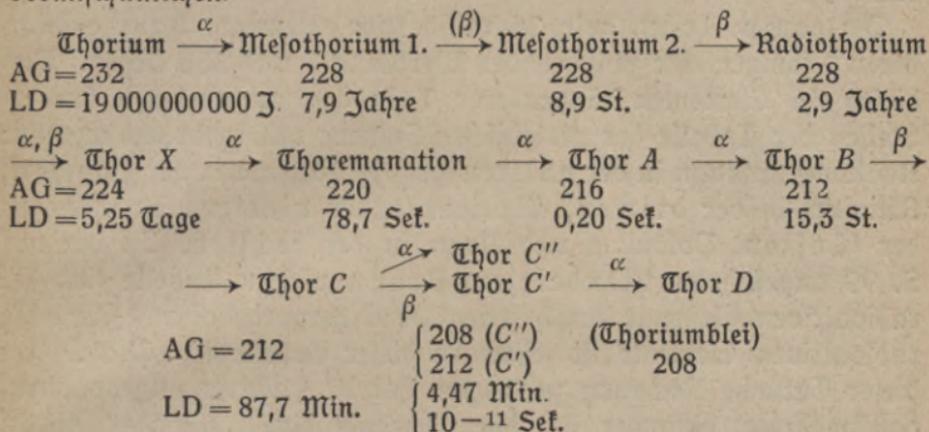
Überläßt man den radioaktiven Niederschlag sich selbst, so vermindert sich die Aktivität ständig, und zwar mit einer Periode von elf Stunden. Der Niederschlag sendet α -, β - und γ -Strahlen aus, und man erhält dieselbe Kurve für den Abfall der Aktivität, einerlei welche Strahlenart man für die Messungen verwendet. So verhält sich der aktive Niederschlag auf einem Körper, welcher mehrere Tage der Emanation ausgesetzt war.

Setzt man aber einen Körper nur wenige Minuten lang der Wirkung der Thoriumemanation aus, so erhält man ein wesentlich anderes Bild. Die Aktivität ist zuerst ganz klein, dann nimmt sie ständig zu und erreicht nach $3\frac{2}{3}$ Stunden ein Maximum. Dann nimmt sie wieder ab. Nach sechs Stunden verläuft der Abfall mit derselben Periode von elf Stunden, welche wir nach langer Expositionsdauer beobachtet haben. Zur Erklärung dieser auffallenden Erscheinung hat Rutherford die Annahme gemacht, daß der aktive Niederschlag des Thoriums aus zwei wohl unterschiedenen Substanzen besteht, welche wir als Thorium B und Thorium C bezeichnen wollen. Die Emanation wandelt sich zuerst in das Thorium A um, welches sich auf dem der Emanation exponierten Gegenstand niederschlägt. Thorium A wandelt sich aber sehr schnell in das Thorium B um. Die Umwandlung von Thorium B in Thorium C vollzieht sich ohne die Aussendung von irgendwelchen Strahlen. Ihr kommt eine Umwandlungsperiode von elf Stunden zu. Da Thorium B strahlenlos ist, so ist die Aktivität des Niederschlags am Anfang der Beobachtungszeit recht gering. In dem Maße, wie die Menge von Thorium C sich vergrößert, wächst auch die Aktivität des Niederschlags. Denn das Thorium C, welches eine einstündige Periode hat, sendet alle drei Strahlenarten aus. Nach einer gewissen Zeit wird die in der Sekunde umgewandelte Menge von C gleich der aus B neugebildeten sein. Zu diesem Zeitpunkt wird die Aktivität ein Maximum erreichen und nachher sinken, da die Menge von Thorium B dann dauernd abnehmen wird.

Man hat das Thorium *B*, welchem die Periode von elf Stunden zukommt, anfänglich für strahlenlos gehalten. Durch Lerch ist jedoch bewiesen worden, daß dieses Element bei seiner Umwandlung β -Strahlen aussendet, welche beim Durchgang durch Materie sehr leicht absorbiert werden. Das zweite Produkt, das Thorium *C* mit der einständigen Periode, sendet alle drei Strahlenarten aus. Durch eine weitere Analyse der Strahlung von Thorium *C* ist es gelungen nachzuweisen, daß das Thorium *C* eine doppelte Umwandlung erleidet in ähnlicher Weise, wie wir das schon beim Radium *C* und beim Aktinium *C* gesehen haben. Dabei wird unter Aussendung von α -Strahlen zu 35% ein β -strahlendes Produkt gebildet, das Thorium *C''*, während gleichzeitig 65% der zerfallenden Atome des Thoriums *C* sich unter Bildung von β -Strahlen in das Thorium *C'* umwandeln. Das Thorium *C'* sendet α -Strahlen aus, besitzt eine außerordentlich kurze Lebensdauer, welche auf einen hundertmilliardsten Bruchteil der Sekunde geschätzt wird, und liefert bei dieser beispiellos schnellen Umwandlung ein strahlenloses Endprodukt der Thoriumreihe, das Thorium *D*.

Aus den bisherigen Untersuchungen ergibt sich somit das Resultat, daß das Thorium im ganzen sechs Abkömmlinge liefert, welche α -Teilchen ausstrahlen. Der Verlust eines jeden α -Teilchens ruft, wie wir auf S. 61 gesehen haben, eine Gewichtsverminderung des radioaktiven Atoms um vier Einheiten hervor, welche dem Atomgewicht des Heliums entsprechen. Bei sechs α -Teilchen macht dieser Verlust 24 Einheiten aus. Das Endprodukt der Umwandlung des Thoriums müßte demnach ein Atomgewicht haben, welches um 24 Einheiten kleiner wäre als das Atomgewicht des Thoriums (232,5), d. h. 208,5. Auf Grund des von Russell und Sajans aufgestellten „Verschiebungsgesetzes“ mußte man folgern, daß das Endprodukt der Thoriumreihe, das Thor *D*, auch ein bleiähnliches Element vorstellen müsse, welches sich vom „gewöhnlichen“ Blei wie auch vom „Uranblei“ nur durch sein Atomgewicht unterscheiden ließe. Dem widersprach jedoch der geologische Befund: die uranarmen Thormineralien wiesen einen kaum nennenswerten Gehalt an Blei auf. Jedoch darf man mit Wahrscheinlichkeit annehmen, daß das „Thoriumblei“ nicht absolut unveränderlich sei, sondern im Laufe geologischer Perioden auch einer weiteren, der unmittelbaren Beobachtung unzugänglicher Umwandlung unterliegt.

Die genetische Abhängigkeit der Familie des Thoriums läßt sich nach dem heutigen Stand der Wissenschaft durch das folgende Schema veranschaulichen.



Auf diese Weise ist durch eine genaue Analyse der Veränderungen der Aktivität des Thoriums und der aus ihm erhaltenen Produkte zum ersten Male der genetische Zusammenhang der radioaktiven Stoffe in exakter Weise zum Ausdruck gebracht worden. War die Methode einmal gegeben, so lag es schon nahe, sie auf andere Gruppen radioaktiver Stoffe anzuwenden. Daß durch die späteren Versuche von Hahn zwischen das Thorium und das Thorium-X noch das Mesothorium und das Radiothorium eingeschoben wurden (vgl. S. 97), ändert prinzipiell an der Sache nichts. Im Gegenteil, es fügt nur neue Beweise für die Fruchtbarkeit der von Rutherford ausgedachten Methode hinzu, welche auch in der Radium- und Aktiniumgruppe den Zusammenhang der einzelnen Glieder vollständig aufgeklärt hat.

31. Systematik der Radioelemente.

Wir haben bisher drei Familien radioaktiver Elemente kennengelernt: die Familie des Radiums, des Aktiniums und des Thoriums. In jeder Familie finden wir eine besondere Emanation und außerdem eine kleinere oder größere Anzahl von festen radioaktiven Elementen, welche durch verschiedene Lebensdauer gekennzeichnet sind. Einige von ihnen, wie Uran und Thorium, sind so langlebig, daß wir ihre Lebensdauer überhaupt nicht bestimmen können. Wir schätzen sie auf Milliarden von Jahren. An dem Aktinium hat sich bisher überhaupt keine Veränderlichkeit nachweisen lassen. Andere Stoffe wieder leben nur

einige Sekunden, wie die Aktiniumemanation, oder gar nur Bruchteile einer Sekunde, wie das Radium C' oder Aktinium C' und Thorium C' .

Im ganzen haben wir 36 radioaktive Elemente kennengelernt, deren Atomgewichte zwischen den Werten 207 und 238 liegen. Von diesen 36 Elementen können nur 7 in den vorhandenen freien Stellen der Tabelle des periodischen Systems untergebracht werden: Radiumemanation in der nullten Gruppe, Radium in der zweiten, Aktinium in der dritten, Thorium in der vierten, Brevium in der fünften, Polonium und Uran in der sechsten. In der auf S. 99 angeführten Mendelejew-Braunerschen Tabelle sind die radioaktiven Elemente durch fetten Druck hervorgehoben. Für alle radioaktiven Elemente ist jedoch in dieser Tabelle kein Platz. Um dieser Tatsache Rechnung zu tragen, hat K. Sjajans angenommen, daß mehrere, einander ähnliche Elemente eine „Plejade“ bilden können; einer solchen Plejade kommt ein Platz im periodischen System zu. Die zu einer Plejade gehörigen Elemente zeigen nach den bisherigen Erfahrungen völlig gleiches chemisches, elektrochemisches und sogar spektroskopisches Verhalten, so daß sie sich durch die gewöhnlichen chemischen Methoden gar nicht voneinander trennen oder unterscheiden lassen. Nur ihre Atomgewichte können um mehrere Einheiten verschieden sein. Solche chemisch untrennbare Elemente bezeichnet Soddy als „isotop“. Beispiele isotoper Elemente haben wir schon in den verschiedenen Bleiarten kennengelernt, wie das gewöhnliche Blei mit dem Atomgewicht: 207,2, das Radiumblei mit dem Atomgewicht 206,0 und das Thoriumblei mit dem wahrscheinlichen Atomgewicht von 208. Auch das Radium D , welches stets das Blei in der Pechblende begleitet, ist mit diesen Bleiarten isotop.

Wenn wir aber die einzelnen Glieder der verschiedenen Familien miteinander vergleichen, so können wir bemerken, daß sich in allen drei Familien analoge Elemente wiederfinden, welche einander ebenso entsprechen wie die Glieder einer Gruppe des periodischen Systems. So finden wir eine große Ähnlichkeit in den gasförmigen Umwandlungsprodukten oder „Emanationen“ des Radiums, Aktiniums und Thoriums. Ebenso entsprechen einander die einzelnen Stufen der Umwandlung der radioaktiven Niederschläge: Radium A , Aktinium A und Thorium A , sowie Radium B , Aktinium B , Tho-

Periodisches System der Elemente n. B. Brauner.

Reihe	Gruppe 0	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3	Gruppe 4	Gruppe 5	Gruppe 6	Gruppe 7	Gruppe 8
1		1. Wasserstoff 1							
2	2. Helium 4	3. Lithium 7	4. Beryllium 9	5. Bor 11	6. Kohlenstoff 12	7. Stickstoff 14	8. Sauerstoff 16	9. Fluor 19	
3	10. Neon 20	11. Natrium 23	12. Magnesium 24	13. Aluminium 27	14. Silizium 28	15. Phosphor 31	16. Schwefel 32	17. Chlor 35,5	26. Eisen 56 27. Kobalt 59 28. Nickel (Kupfer) 59
4	18. Argon 40	19. Kalium 39	20. Kalzium 40	21. Strontium 44	22. Titan 48	23. Vanadium 51	24. Chrom 52	25. Mangan 55	
5		29. Kupfer 63	30. Zink 65	31. Gallium 70	32. Germanium 72	33. Arsen 75	34. Selen 79	35. Brom 80	
6	36. Krypton 82	37. Rubidium 85	38. Strontium 87	39. Yttrium 89	40. Zirkonium 90	41. Niobium 94	42. Molybdän 96	43. —	44. Ruthen. 102 45. Rhod. 103 46. Pallad. (Silber) 106
7		47. Silber 108	48. Kobaltium 112	49. Zinkium 114	50. Zinn 119	51. Antimon 120	52. Tellur 128	53. Jod 127	
8	54. Xenon 128	55. Caesium 133	56. Barium 137	57. Lanthan 138	58. Cer. — 72.				
9									
10									
11		79. Gold 197	80. Quecksilber 200	81. Thallium 204	82. Blei 207	83. Wismut 209	84. Polonium 210 (?)	85. —	76. Osm. 191 77. Irid. 193 78. Platin (Gold) 195 197
12	86. Emanation 222	87. —	88. Radium 226	89. Actinium (226)	90. Thorium 233	91. Rencium 234 (?)	92. Uran 239		

Atomgewichte sind in runden Zahlen angegeben. — Radioaktive Elemente sind fett gedruckt. Einis von den Elementen sind die auf Grund des Röntgenspektrums der Elemente von Moseley bestimmten „Ordnungszahlen“ angegeben, welche die positive elektrische Ladung des Atomkerns ausdrücken.

Plejaden radioaktiver Elemente nach Sajans.

Reihe	Gruppe 0	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3	Gruppe 4	Gruppe 5	Gruppe 6	Gruppe 7
11	—	—	—	Thallium 204 Affin. C'' 207 Thor. C'' 208 Radium C'' 210	Ra-Blei 206 Blei 207 Thor-Blei 208 Radium D 210 Affin. B (211) Thor B 212 Radium B 214	Wismut 209 Radium E 210 Affin. C (211) Thor C 212 Radium C 214	Polonium 210 Affin. C' 211 Thor C' 212 Radium C' 214 Affin. A (215) Thor A 216 Radium A 218	—
12	Af-Emanation (219) Th-Emanation 220 Ra-Emanation 222	—	Affinium X (225) Thor X 224 Radium 226 Mesothor. ₁ 228	Affinium (227) Mesothor. ₂ 228	Radioactin (227) Radiothor 228 Jonium 230 Thorium 232 Uran X 234	Brevium 234	Uran II 234 Uran I 238	—

Die Bezeichnung der Elemente entspricht der Nomenklatur von Meyer und v. Schweidler.

rium B. Die Ähnlichkeit in dem Verhalten verschiedener radioaktiver Gruppen kann nicht als zufällig angesehen werden. Sie scheint darauf hinzudeuten, daß der Zerfall aller Radioelemente einem allgemeinen Gesetz unterworfen ist.

In der Tat haben Russell und Fajans unabhängig voneinander eine Regel aufgestellt, welche die Verschiebung der Elemente im periodischen System bei ihrer Umwandlung zum Ausdruck bringt: diese „Verschiebungsregel“ besagt, daß bei jeder α -Umwandlung das Element eine Verschiebung in die zweitniedrigere Gruppe des periodischen Systems erfährt, während bei allen β -Umwandlungen die Verschiebung zur nächsthöheren Gruppe stattfindet. Auf Grund der Verschiebungsregel sind die auf S. 100 angeführten Plejaden von K. Fajans zusammengestellt worden.

Auf S. 101 geben wir eine Tabelle, welche von R. Swinne entworfen wurde. In jeder Vertikalreihe sehen wir die Elemente in derjenigen Reihenfolge, welche ihrer Abstammung entspricht. In den Horizontalreihen stehen die ähnlichen Elemente nebeneinander. Die leeren Stellen entsprechen vielleicht noch unbekanntem Elementen. In der Tabelle sind außerdem die Strahlenarten der betreffenden Stoffe und ihre mittlere Lebensdauer angegeben. Die Zahlen stammen hauptsächlich aus dem Werke von Frau Curie „Die Radioaktivität“ und sind durch einige neueste Angaben ergänzt.

Es steht zu erwarten, daß die schnell sich umwandelnden radioaktiven Substanzen, wie die Emanation des Aktiniums und Thoriums, im Vergleich zu ihrer Masse gewaltige Wärmemengen entwickeln müssen. So läßt sich berechnen, daß die Aktiniumemanation ungefähr 800 000 mal mehr Wärme in der Sekunde entwickeln wird als eine gleiche Menge der Radiumemanation. Freilich dauert diese Wärmeentwicklung eine viel kürzere Zeit.

IV. Anwendungen der Radiologie.

32. Vorkommen radioaktiver Stoffe in der Natur.

Durch die bahnbrechenden Untersuchungen von Elster und Geitel ist die unerwartete Entdeckung gemacht worden, daß die Radioaktivität in der Natur sehr verbreitet ist, viel verbreiteter, als man auf Grund der Seltenheit des Radiums vermuten konnte. Aus der Zerstreung der Elektrizität in der freien Luft haben die genannten Physiker ge-

schlossen, daß in der Atmosphäre stets Gasionen gebildet werden. Wo war die Quelle der Ionisierung der Luft? Durch scharfsinnige Experimente konnte diese Frage eindeutig beantwortet werden.

Schließt man frische Luft in einem geschlossenen Kasten ein, so überzeugt man sich, daß die Zahl der Ionen in der Luft zunächst wächst, nach einigen Stunden den höchsten Wert erreicht und dann sehr langsam sinkt. Darin kam eine gewisse Ähnlichkeit der freien Luft mit einigen radioaktiven Stoffen zum Vorschein, deren Aktivität sich in derselben Weise ändert (vgl. S. 40 u. 90). Durch diese überraschende Ähnlichkeit geleitet, kamen Elster und Geitel zu der Überzeugung, daß in der Luft radioaktive Stoffe vorkommen, und sie faßten den kühnen Plan: die radioaktiven Bestandteile aus der Luft zu isolieren.

Folgender Versuch wurde zu diesem Zweck angestellt. Die beiden Experimentatoren befestigten in freier Luft einen isolierten Draht, welchen sie mit dem negativen Pol einer kräftigen Elektrifiziermaschine verbunden hatten. Sie überzeugten sich, daß dieser Draht nach einigen Stunden aktiv geworden ist, d. h. er hat die Eigenschaft gewonnen, die Luft zu ionisieren. Durch Abreiben des Drahts mit einem Lederläppchen konnte man den aktiven Stoff vom Draht entfernen in ähnlicher Weise, wie das in bezug auf die „induzierte Aktivität“ nachgewiesen war. Die aktive Substanz war jetzt auf dem Läppchen konzentriert. Sie sandte Strahlen aus, welche Bariumplatincyanür zum Leuchten brachten, durch dünne Aluminiumfolie hindurch auf die photographische Platte einwirkten und überhaupt ähnliche Eigenschaften hatten wie die Radiumstrahlen.

Durch weitere Versuche von Rutherford und Allan u. a. ist nachgewiesen worden, daß die Strahlung des in freier Luft aktivierten Drahtes aus α -, β - und γ -Strahlen besteht. Die Aktivität des Drahtes war nicht konstant, sondern fiel allmählich ab. Die Kurven des Abfalls der Aktivität waren dieselben wie die Abfallkurven eines Drahtes, welcher der Radiumemanation ausgesetzt war. Dadurch war in einwandfreier Weise bewiesen worden, daß in der Luft beträchtliche Mengen der Emanation des Radiums (und auch des Thoriums) vorkommen. Man fand Radioaktivität sowohl auf dem Gipfel des Rothorns, in einer Höhe von über 2000 Meter, wie auch in der Luft tiefer Grubenschächte und unterirdischer Höhlen. Vor kurzem hat Wulf durch Messungen im Innern des bekannten

Simplontunnels nachgewiesen, daß die Luft dort besonders radioaktiv ist. Daß die atmosphärischen Niederschläge, sowohl Regen wie auch Schnee, die gleiche Eigenschaft besitzen, kann nach diesen Darlegungen nicht mehr auffallend erscheinen.

Im Durchschnitt erhalten wir in einem Kubikzentimeter Luft nicht mehr als 1 bis 2 Atome Emanation, was 10^{-16} Curieeinheiten oder 3×10^{-4} Machseeinheiten ausmacht.

Die Anzahl der von der Emanation in der Luft erzeugten Ionen unterliegt bedeutenden Schwankungen: nach Ebert beträgt sie einige Tausend im Kubikzentimeter. Es sind sowohl positive wie negative Ionen, welche sich stets in der Luft befinden. Die positiven Ionen kommen aber in überwiegender Menge vor.

Da die Emanation sehr vergänglich ist, so kann ihr Vorkommen in der Luft nur so erklärt werden, daß der Gehalt der Atmosphäre an diesem Gas unaufhörlich von der Erdoberfläche aus ergänzt wird. Diese Annahme war durch die Beobachtung gestützt, daß die Luft in Kellern, Höhlen und andern unterirdischen Räumen besonders stark radioaktiv ist. Durch direkte Versuche haben dann Elster und Geitel bewiesen, daß auch der Boden an verschiedenen Orten im größeren oder geringeren Grade radioaktiv ist. Besonders gewisse Schlammhöden sind durch diese Eigenschaft ausgezeichnet, wie z. B. der unter dem Namen „Sango“ bekannte Schlamm in Battaglia in Italien. Viele zu Heilbädern verwendeten Schlamm- und Moorsorten besitzen dieselbe Eigenschaft. Dasselbe gilt für zahlreiche Mineralquellen, deren Wasser beim Passieren radioaktiver Erdschichten aus diesen radioaktive Stoffe auslaugt und dadurch selbst radioaktiv wird. Es ist leicht verständlich, daß auch die aus solchen Mineralquellen aufsteigenden Gase gewisse Mengen Emanation enthalten und aktiv sind.

Aus diesen Beobachtungen geht hervor, daß kleine Radiummengen überall in der Erdoberfläche vorhanden sind, wenn auch in außerordentlich feiner Verteilung. In der Tat ist es schwer, eine Bodenprobe zu finden, welche nicht eine Spur Radium enthält. Aus dem Gehalt der Atmosphäre an Emanation darf man schließen, daß in der Erde eine Oberflächenschicht vorhanden ist, welche Hunderte von Tonnen Radium enthält. Diese Schicht sendet stets neue Mengen Emanation in die Atmosphäre aus, welche bei ihrer Umwandlung Radium A, Radium B und Radium C erzeugen. Da die Emanationen des Thoriums und des Aktiniums eine viel kürzere Lebensdauer

haben als die Radiumemanation, so können sie in der Luft nur in viel geringeren Mengen vorkommen.

33. Die Rolle des Radiums im Haushalt der Natur.

Die bedeutenden Wärmemengen, welche von radioaktiven Stoffen entwickelt werden, können und müssen auf das Wärmegleichgewicht sowohl unserer Erdkugel, wie auch anderer Weltkörper einen merklichen Einfluß ausüben. Bisher wurde allgemein angenommen, daß unsere Erdkugel sich einst im feuerflüssigen Zustand befand. Durch Ausstrahlung der Wärme in den Weltraum hat sich die erstarrte Erdkruste bis auf die heutige Temperatur abgekühlt und fährt auch jetzt fort, sich noch weiter abzukühlen. Aus den Gesetzen der Wärmestrahlung hat Lord Kelvin berechnet, daß unser Planet in jeder Sekunde 76 Billionen Kalorien verliert. Die Zeit, welche die Erde gebraucht hat, um sich aus dem feuerflüssigen Zustande auf die jetzige Temperatur abzukühlen, wurde auf ungefähr 40 Millionen Jahre geschätzt. Die geologischen Forschungen lassen jedoch diese Zahl als viel zu klein erscheinen. Das Alter der Erde muß danach hunderte Millionen Jahre betragen.

Durch die Entdeckung des Radiums ist man einer neuen Wärmequelle auf die Spur gekommen, welche jenen ungeheuren Verlust teilweise zu ersetzen geeignet erscheint. Und es läßt sich berechnen, daß, wenn die Materie unserer Erde in jedem Kubikmeter nur 2 zehntausendstel Milligramm Radium enthält, dieser geringe Gehalt schon genügen würde, um den Wärmeverlust der Erde vollständig zu ersetzen und ihre Temperatur auf unveränderlicher Höhe zu halten. In der Wirklichkeit enthält aber, wie die Berechnungen von Strutt zeigen, die Erdrinde zwanzigmal mehr Radium, als dem Wärmegleichgewicht entspricht. Und da in der Erdrinde außerdem noch Thoriumverbindungen in großer Menge vorhanden sind, so ist die Zahl der gebildeten Kalorien noch bedeutend größer. Daraus könnte man schließen, daß die Temperatur der Erde fortwährend zunehmen müsse, wenn . . . das Radium in der ganzen Erdkugel gleichmäßig verteilt wäre. Da eine Temperaturzunahme der Erde sehr unwahrscheinlich ist, so kann man umgekehrt schließen: daß im Erdinnern keine radioaktiven Stoffe vorhanden sein können. Die Berechnung ergibt, daß eine Verteilung der radioaktiven Stoffe in einer 16 Kilometer tiefen Kruste genügt, um das Wärmegleichgewicht der Erde zu

erhalten. Die maximale Menge des Radiums in der Erde ergibt sich auf Grund dieser Berechnung zu 100 Milliarden Kilogramm.

Man darf annehmen, daß auch in den Vorgängen, welche sich in der Sonne abspielen, radioaktive Elemente eine Rolle spielen. Zwar ist es bisher nicht gelungen, durch das Spektroskop Radium in der Sonne nachzuweisen. Es wäre immerhin möglich, daß es im innern Teil der Sonne vorhanden ist. Dafür ist das Helium, welches, wie wir gesehen haben, das ständige Umwandlungsprodukt radioaktiver Stoffe darstellt, schon lange in der Sonne spektroskopisch nachgewiesen worden, — viel früher, als es von Ramsay auf der Erde entdeckt wurde. Ist das der Fall, so können uns radioaktive Prozesse einen Schlüssel zur Auflösung des Rätsels nach der Quelle der Sonnenwärme liefern.

Die Berechnung des Wärmeverlusts, den die Sonne durch ihre Strahlung in den Weltenraum ständig erleidet, zeigt, daß ihre Temperatur in einer der Beobachtung zugänglichen Zeit merklich abnehmen müßte. Das ist jedoch nicht der Fall. Es muß also auch in der Sonne eine Wärmequelle vorhanden sein, welche diesen Verlust fortwährend deckt. Zur Erklärung dieser Tatsache wurden bisher zwei Annahmen gemacht. Nach der einen schrumpft die Sonne infolge der Abkühlung zusammen. Dabei muß Wärme gebildet werden, und zwar auf Kosten der Arbeit, welche durch die Kraft der Schwere geleistet wird. Nach der andern Annahme rührt die Sonnenwärme von der Energie der Bewegung der Meteore her, welche mit großer Geschwindigkeit gegen die Sonne anprallen. Zu diesen zwei Annahmen tritt jetzt eine dritte hinzu, nach welcher die Wärme vom Zerfall radioaktiver Stoffe stammen soll.

Es liegen zwar keine Anzeichen dafür vor, daß der Zerfallprozeß radioaktiver Elemente rückgängig gemacht werden kann. Das Radium wandelt sich in die Emanation um. Es ist aber noch niemals gelungen, die Emanation in das Radium zurückzuverwandeln. Jedoch gilt dieser Satz nur für unsere bescheidenen Hilfsmittel. Theoretische Überlegungen führen aber zu dem Schluß, daß unter gewissen Bedingungen eine Umkehrung der radioaktiven Prozesse wohl denkbar wäre.

In der Tat müssen wir auf Grund der Daten über die Wärmebildung des Radiums schließen, daß die radioaktiven Elemente stark endotherme Stoffe sind, d. h. solche, bei deren Bildung Wärme in

großer Menge aufgenommen wird. Die Energielehre liefert aber den Beweis, daß solche Stoffe bei höheren Temperaturen viel beständiger sein müssen als bei niederen. Es ist demnach nicht ausgeschlossen, daß die radioaktiven Stoffe bei der hohen Temperatur der Sonne, welche $6000-7000^{\circ}$ betragen muß, mit ihren Zerfallprodukten im Gleichgewicht sich befinden. Einer geringen Temperaturerniedrigung der Sonne würde dann sofort eine Verschiebung des Gleichgewichts entsprechen. Diese würde dann den Zerfall eines Teils der radioaktiven Stoffe zur Folge haben, welcher von der Entwicklung bedeutender Wärmemengen begleitet wäre. Jedoch ist nicht ausgeschlossen, daß bei diesen hohen Temperaturen außer diesem auch noch andere wärmebildende Prozesse vor sich gehen können, von denen wir auf der Erde mit unseren bescheidenen Mitteln uns noch keine Vorstellung machen können. Es ist auch nicht undenkbar, daß auch im Innern der Erde die Bildung radioaktiver Stoffe noch jetzt vor sich geht.

34. Das Alter der Erde.

Die unveränderliche Geschwindigkeit, mit welcher sich der radioaktive Zerfall der Elemente abspielt, gestattet uns einige wichtige Schlüsse in bezug auf das Alter unseres Planeten zu ziehen. Man erhält hierbei Zahlen, welche die Ergebnisse geologischer Berechnungen noch um das Vielfache übertreffen. Unter der Voraussetzung, daß nur drei Viertel der Wärmestrahlung der Erde radioaktiven Ursprungs wäre, berechnet Holm es die Zeit, welche seit dem Moment verstrichen ist, als die Erde aus dem feuerflüssigen in den starren Zustand überzugehen anfang, auf 1600 Millionen Jahre.

Mag uns diese Voraussetzung etwas willkürlich erscheinen, so haben wir noch drei andere Methoden, welche ziemlich übereinstimmende Resultate liefern. Aus der Zerfallgeschwindigkeit des Urans kann man berechnen, daß zur Bildung von 1 Kubikzentimeter Helium aus 1 g Uran 10 Millionen Jahre notwendig sind. Aus dem Gehalt der Uran- und Thormineralien an Helium berechnete Strutt deren Alter auf 8 bis 700 Millionen Jahre.

In Dünnschliffen mancher Mineralien kommen sehr kleine gefärbte, meistens kreisrunde Gebilde vor, die durch lange Zeit den Mineralogen ganz unverständlich waren. Jolly und Mügge zeigten 1907, daß diese sog. „pleochroitischen Höfe“ radioaktiven Ursprungs

sind: sie entstanden durch die Einwirkung eines winzigen radioaktiven Körnchens, das stets in der Mitte eines Hofes zu finden ist. Auf Grund dieser Erscheinung schätzten Rutherford und Jolij für das untere Devon das Alter auf 400 Millionen Jahre.

Beim vollständigen Zerfall des Urans entsteht als Endprodukt Blei. Es läßt sich nun aus der Umwandlungskonstante berechnen, daß zur Bildung von 1 g Blei aus einer gleichwertigen Menge Urans nicht weniger als 7,9 Milliarden Jahre notwendig sind. Kennt man den Gehalt eines Minerals an Blei und Uran und berechnet man das Mengenverhältnis der beiden letzten Elemente zueinander, $\frac{Pb}{U}$, so läßt sich das Alter des Minerals berechnen:

$$T = \frac{Pb}{U} \times 7900000000 \text{ Jahre.}$$

Auf diese Weise erhielten Holmes und Lawson:

für das Karbon: 320 Millionen Jahre,

für das Präkambrium: 1000—1300 Millionen Jahre.

Es ist bemerkenswert, daß die verschiedenen Methoden der Berechnung Werte ergeben, welche der Größenordnung nach gut übereinstimmen.

35. Das Radium in der Heilkunde.

Die energischen Wirkungen des Radiums auf die lebenden Organismen, von denen im Kapitel 9 die Rede war, konnten von der Medizin nicht unbeachtet gelassen werden. Auf die ersten zufälligen Beobachtungen folgte bald eine Reihe planmäßiger Untersuchungen, welche die Anwendbarkeit des Radiums in der Medizin zum Ziel hatten. Im Laufe einiger Jahre entstand auf diesem Gebiet eine umfangreiche Literatur, deren Berücksichtigung weit über den Rahmen dieses Werkes hinausführen würde. Es sei daher in dieser Hinsicht auf ein vor kurzer Zeit erschienenenes Buch von Prof. London verwiesen unter dem Titel: „Das Radium in der Biologie und Medizin“, welches die Fortschritte der „Radiotherapie“ in anschaulicher Weise zum Ausdruck bringt. Hier wollen wir nur kurz hervorheben, daß bisher eine äußere Behandlung mit Radium bei der Heilung einiger Hautkrankheiten günstige Erfolge erzielen läßt, so z. B. beim Hautkrebs, Lupus und in einigen ähnlichen Fällen.

Es ist anzunehmen, daß alle chemischen wirksamen Strahlen, wie die ultravioletten Strahlen der Quarzlampe, die Strahlen der Sinsen-

lampe, die Röntgenstrahlen und auch die Strahlen der Radioelemente, im Innern der Zelle ähnliche physiologische Wirkungen ausüben. Nur hat das Radium vor allen andern Lichtquellen den wichtigen Vorzug, daß in ihm in einem sehr kleinen Raum das höchste Energiequantum konzentriert ist. Daher kann es direkt in den Erkrankungs-herd, in die Blutbahn, — überhaupt in das Innere des Organismus gebracht werden, wo es in der Intensität und in der Dauer seiner Wirkung genau dosiert werden kann. Wie wir gesehen haben, bestehen die Radiumstrahlen aus drei Arten von Strahlen, von denen die α -Strahlen den größten Teil der Energie (92 %) mit sich führen. Da sie aber außerordentlich leicht absorbiert werden, so bleiben sie zum größten Teil in der Umhüllung des Präparats oder in den obersten Gewebsschichten stecken und kommen für die Bestrahlungstherapie leider gar nicht zur Geltung. Die β -Strahlen oder Elektronen haben eine viel größere Durchschlagskraft, können aber im menschlichen Gewebe doch nicht tiefer als 7—10 mm gelangen. Für die Behandlung der tieferen Stellen im Organismus kommen daher ausschließlich die γ -Strahlen in Betracht: wird der γ -Strahl von einem Zellatom absorbiert, so löst er aus demselben einen Schwarm von Elektronen heraus, oder die sog. „Sekundärstrahlen“ (S. 48). So kann man — gemäß der von Prof. Lazarus vertretenen Anschauung — das Elektron als das eigentliche Heilagens betrachten.

In geringer Menge wirkt die Radiumstrahlung auf die lebende Zelle anregend, bei stärkerer Einwirkung der Strahlen werden in der Zelle giftige Produkte gebildet, welche zuerst die Funktionen der Zelle lähmen und dann zum Tod der Zelle führen (S. 35). Die Wirkungen treten oft erst nach Tagen und Wochen ein und weisen einige Ähnlichkeit mit der Vergiftung durch Phosphor auf. Daher antworten die Gewebe auf schwache Bestrahlung mit vorübergehenden Reizerscheinungen, auf mittlere Bestrahlung mit Entzündung und fortschreitender Entartung, auf Starkbestrahlung mit nekrotischem Zerfall und Geschwürsbildung. Daher liegt der Schwerpunkt der Radiotherapie in der richtigen Dosierung.

Die günstige Wirkung der Radiumstrahlen beruht nun auf dem Unterschied in dem Verhalten der gesunden und der kranken Gewebe gegenüber den Strahlen: das normale Gewebe ist widerstandsfähiger als die Geschwulstzellen, welche wohl sich schrankenlos vermehren können, aber nicht fähig sind, sich zu regenerieren.

Die Wirkung der Bestrahlung äußert sich — bei richtiger Dosierung — darin, „daß die kranken Zellen getötet und die gesunden Elemente geschont werden, während das Bindegewebe zu entzündlichen Heilvorgängen angeregt werden soll“ (Lazarus).

Die besten Erfolge sind bisher bei der Behandlung des Krebses erzielt worden, wo die Radiotherapie die Chirurgie ganz wesentlich unterstützen kann. Es ist experimentell festgestellt worden, daß durch die Radiumbestrahlung ein völliger Schwund der Krebszellen eintritt, welche durch Bindegewebe ersetzt werden. Vorläufig hat man bei oberflächlichen Erkrankungen der Haut und der leicht zugänglichen Organe: des Rachens, der Speisehöhle u. a. sehr günstige Resultate erzielt. Einer Behandlung von tieferliegenden Neubildungen steht vorläufig die Tatsache im Wege, daß die Radiumstrahlen beim Eindringen in das Gewebe von den oberflächlichen Schichten stark absorbiert werden. Aber auch hier hat man durch Verwendung besonders harter γ -Strahlen (Dessauer) und durch Einführung der Radiumröhren in das Innere des Krankheitsherdes Heilerfolge erzielt, und zwar in einigen Fällen sogar dort, wo die Operation aussichtslos war.

Zu den bisher fast ausschließlich in der Medizin verwendeten Radiumpräparaten ist in der neueren Zeit das Mesothorium getreten, das sich durch einen etwas billigeren Preis von dem Radiumbromide auszeichnet. Freilich muß man beim Einkauf des Mesothors berücksichtigen, daß letzteres eine viel geringere Lebensdauer als das Radium besitzt. In letzter Zeit ist auch Thorium X zur Verwendung gelangt.

Die Präparate befinden sich in Schächtelchen aus Ebonit oder Zelluloid mit Glimmerfenster. Das „Radiumschächtelchen“ wird hierbei auf die kranke Stelle direkt aufgelegt. Für die innerliche Behandlung mit β -Strahlen verwendet man Radiumröhrchen mit schwachen Filtern aus Aluminium, deren mehrere in das Innere der Geschwulst eingeführt werden (Radiopunktur nach Prof. Lazarus). Für die Praxis ist die Beobachtung wichtig, daß eine Bestrahlung mit Radium nicht gleich wirkt, sondern erst nach einiger Zeit (vgl. S. 31). Daher wird empfohlen, die Bestrahlung öfters und nach längeren Pausen vorzunehmen. Die erste Applikation soll möglichst kräftig sein (50—200 mg Radium), da eine schwache Dosierung, wie oben auseinandergesetzt wurde, die pathologischen Gewebe noch mehr zum

Wuchern reizen kann. Die folgenden Bestrahlungen werden in abklingender Dosis und in längeren Intervallen wiederholt. Da die Latenzperiode 3–10 Tage dauern kann, so sind seltenere und länger andauernde Sitzungen vorteilhafter als häufige und kurzandauernde.

Als ein wertvolles Heilmittel hat sich das Radium bei der Behandlung des Lupus bewährt. Es wirkt schneller und energischer als die Lichtbehandlung nach Finzen. Dauernde Heilerfolge sind weiter beim Augentrichom erzielt worden, welches sich durch Radiumbestrahlung schmerzlos beseitigen läßt. Und schließlich wäre hier noch zu erwähnen, daß das Radium in der Schönheitspflege einige Anwendungen gefunden hat, nämlich zur Entfernung von Warzen, Narben und ähnlicher Hautveränderungen. Damit ist aber das Gebiet der eigentlichen Radiotherapie erschöpft, wenigstens für diejenigen Krankheiten, bei denen sich sichere Resultate erzielen lassen. Das sind, wie erwähnt wurde, fast ausschließlich Hauterkrankungen. Einer Anwendung des Radiums in der inneren Therapie steht vorläufig sein zerstörender Einfluß auf die inneren Organe entgegen, von welchem schon im 9. Abschnitt die Rede war.

Trotzdem hat man versucht, Radium zur Behandlung von neuralgischen Schmerzen zu verwenden, und hat hier außerordentlich günstige Resultate erzielt. Es ist denkbar, daß der entzündete Nervenast durch das Radium getötet wird und später durch einen regenerierten gesunden Nervenast ersetzt wird. Hier scheint einer vorsichtigen Erweiterung der Radiotherapie ein weites Feld offen zu sein. Die schmerzlindernde Wirkung des Radiums bei Tabetikern scheint in dieselbe Kategorie zu gehören.

Bei der Verwendung der Radiumpräparate muß der Arzt auch auf sich Rücksicht nehmen, und das um so mehr, da wir wissen, daß die Radium- und Röntgenerkrankungen einen schleichenden Charakter zu haben pflegen, und die Folgen oft erst nach Monaten aufzutreten beginnen. Darauf ist es zurückzuführen, daß die Radiologen sehr oft an Leukämie erkranken. Daher soll man mit den Radiumpräparaten möglichst wenig in Berührung treten und soll sie in dicken Bleikammern mit Nickelwänden verwahren. Denn die harten γ -Strahlen dringen noch durch 10 cm dicke Platten durch (vgl. S. 47).

Durch Tierversuche und klinische Beobachtungen hat man weiter nachgewiesen, daß die Radiumstrahlen eine Vermehrung der roten Körperchen im Blute begünstigen, und hat dieses Mittel zur Be-

handlung von Bluterkrankungen anzuwenden versucht. Jedoch sind hier die Ergebnisse keineswegs eindeutig, so daß ein endgültiges Urteil über den therapeutischen Wert des Radiums in dieser Richtung noch nicht gefällt werden kann.

Da kam ganz unerwartet die Erkenntnis, daß die Wirkung radioaktiver Stoffe von der Heilkunde schon seit uralter Zeit benutzt wurde, freilich ohne daß man wußte, um welches Prinzip es sich dabei handelt. Durch die wertvollen Untersuchungen von Elster und Geitel ist eine Reihe von Messungen der Radioaktivität des Erdbodens, der Mineralquellen und der aus dem Innern der Erde aufsteigenden Gase angebahnt worden. Und da zeigte es sich, daß die bekanntesten Heilquellen durch einen hohen Grad von Radioaktivität ausgezeichnet sind.

Wir entnehmen dem Werke von Meyer und v. Schweidler über Radioaktivität folgende Zusammenstellung der Aktivitäten der bekanntesten Heilquellen in Mache-Einheiten.

Ort	Aktivität	Ort	Aktivität
Joachimstal, Grubenwasser	2050 M. E.	Plombières, Kapuzinerquelle	94
Brambach, Sachsen, Neue Quelle	1960	Aix les Bains, Alaunquelle	96
Ischia, Altrömische Quelle	370	Sron, Tirol, Magenquelle	51 (36)
Gastein, Grabenbäckerquelle	155	Dillnößtal, Tirol, Eisenquelle	100
Gastein, Elisabethstollen	133	Disentis, Schweiz	48
Gastein, Rudolfstollen	25	Karlsbad, Mühlbrunnen	32
Baden-Baden, Büttquelle	80—125	Karlsbad, Schloßbrunnen	17
Castellamare, Acidolaquelle	23	Karlsbad, Sprudel	0,1
Griesbach, Schwarzwald, Badquelle	26	Nauheim, Karlsbrunnen	27
		Kreuznach, Inselquelle	20

Es sei hinzugefügt, daß diese Quellen kein reines Radium enthalten, sondern denjenigen Stoff, welcher vom Radium stets erzeugt wird und welcher unter dem Namen „Emanation“ bekannt ist.

Aus diesen Beobachtungen entstand eine neue Erklärung der Heilwirkung der Bäder und Trinkquellen. Sie schreibt die Wirkung der natürlichen Mineral- und Moorbäder ihrem Gehalt an radioaktiven

Stoffen zu. Da nun die radioaktiven Eigenschaften der Mineralwässer nicht beständig sind, sondern mit der Zeit abnehmen, so läßt sich daraus die empirisch schon lange festgestellte Tatsache erklären, warum alle derartige Heilmittel viel energischer an Ort und Stelle wirken als nach dem Versand nach andern Orten.

Es kann als wahrscheinlich angenommen werden, daß beim Gebrauch von Mineralbädern die radioaktiven Stoffe, welche darin enthalten sind, nicht durch die Haut in den Organismus eindringen. Man nimmt heute an, daß sie durch die Atmungsorgane dahin gelangen. Auf dieser Voraussetzung fußt die Emanotherapie, welche die natürlichen Wirkungen künstlich nachzuahmen oder zu verstärken sucht. Die „Emanation“ wird hierbei künstlich erzeugt und dem natürlichen Wasser zugeführt. Man erhält auf diese Weise konzentriertere Lösungen, welche man größtenteils zum Inhalieren verwendet. Solche Emanationen sind in letzter Zeit in bedeutenden Kurorten, in Gastein, in Wiesbaden und vielen andern entstanden. Die „Emanotherapie“ läßt schon heute günstige Erfolge bei manchen chronischen Krankheiten erzielen (z. B. bei Katarrhen der Atemwege, Gicht, Ischias, Rheumatismus), und noch mehr läßt sich von ihr für die Zukunft erwarten. Injektionen, speziell auch mit Thorium X oder mit Polonium, werden gegen Leukämie verwendet.

36. Ansichten über die Transmutation der Elemente.

Am Beispiel des Radiums ist zum erstenmal die Möglichkeit einer Umwandlung der Elemente unzweifelhaft nachgewiesen worden. Denn darüber kann kein Zweifel bestehen, daß Radium ein Element im gewöhnlichen Sinne des Wortes ist, ein Metall, wie Barium oder Magnesium. Dieses Element kann in eine gasförmige Emanation und in das gasförmige Element Helium umgewandelt werden.

Der Traum, von welchem die Alchimisten im Laufe von 12 Jahrhunderten beseelt wurden, ist in Erfüllung gegangen. Aber wie ganz anders gestaltete sich die Wirklichkeit gegenüber dem, was sich die „Goldmacher“ des Mittelalters von der Transmutation vorstellten! Vor allen Dingen war die Tatsache ganz unerwartet, daß eine Zerlegung der Elemente von selbst stattfindet, ohne irgendwelchen Eingriff seitens des Experimentators. Und — was noch mehr unerwartet kam — können wir vorläufig nur die Rolle unbeteiligter

Zuschauer bei diesem Prozeß spielen, solange wir kein Mittel haben, um den Verlauf der Elementenumwandlung beeinflussen zu können. Und ebenso unerwartet war schließlich die Erscheinung, daß die durch die radioaktiven Elemente enthüllte Umwandlung der Grundstoffe nicht nur keinen Energieaufwand unsererseits erfordert, sondern — im Gegenteil — geeignet ist, von sich aus ganz enorme Energiebeträge abzuwerfen, — Energiebeträge, mit denen sich die Ausbeute der energiereichsten bisher bekannten chemischen Prozesse gar nicht messen kann. Mit Recht bemerkt daher Soddy, daß, wenn es uns jemals gelingen sollte auch das Gold, den Traum der Alchimisten, künstlich zu erhalten, und zwar als Produkt des Zerfalls eines Elements vom höheren Atomgewicht, so würde dann der Wert der gewonnenen Materie ein geringfügiger sein im Vergleich zum Wert der Energie, welche dieser Prozeß abwerfen würde. Diese Energie, erlöst vom Zauberschlaf, in dem sie in den heutigen Elementen verbleibt, würde die erste Stelle in der Wirtschaft der Völker einnehmen. Das Gold würde nur die Rolle eines wenig geschätzten Abfallproduktes bei dieser Operation erhalten.

Weiter haben wir noch eins gelernt, daß die Geschwindigkeit, mit der sich die Umwandlung der Elemente vollzieht, wengleich dem Einfluß unserer Kräfte entrückt, von Natur aus bei verschiedenen Elementen sehr verschiedene Beträge erhalten hat. Die Dauer der Umwandlung bewegte sich ja, wie wir gesehen haben, zwischen einigen Sekunden und Milliarden von Jahren. Und da liegt die Vermutung nahe, daß auch andere Elemente, die uns noch heute als nicht aktiv erscheinen, auch einem sehr langsamen Zerfallprozeß unterworfen sein können. Ist ihre Umwandlungsgeschwindigkeit noch bedeutend geringer, als wir es beim Uran, Thorium und sogar Aktinium beobachtet haben, so kann in dieser außerordentlichen Langsamkeit der Grund dafür gesucht werden, daß wir eine Strahlung dieser Elemente bisher noch nicht feststellen konnten.

In der Tat haben die neuesten Arbeiten auf dem Gebiete der Radioaktivität für diese Ansicht einige Stützen gebracht. Campbell und Wood haben festgestellt, daß Kaliumsalze radioaktiv sind. In noch stärkerem Maß ist die Radioaktivität bei den Rubidiumsalzen von Levin und Ruer nachgewiesen worden. Wengleich die Radioaktivität der Kaliumsalze annähernd tausendmal schwächer ist als die Aktivität des Urans, so unterliegt es doch heute keinem Zweifel, daß

wir das Kalium und auch das Rubidium zur Zahl der radioaktiven Elemente zurechnen müssen. Ob auch andere Elemente als radioaktiv anzusehen sind? Ob wir die Radioaktivität als eine allgemeine Eigenschaft der Materie betrachten sollen? Vielleicht ist es mehr als ein bloßer Zufall, daß die Atomgewichte vieler Elemente sich um vier Einheiten voneinander unterscheiden oder auch um ein Vielfaches dieser Zahl? Vielleicht deutet diese Differenz auf die Abspaltung eines oder mehrerer Heliumatome bei der Bildung der leichteren Elemente aus den schwereren? Auf diese Frage läßt sich vorläufig noch keine exakte Antwort geben.

Eine Stütze für diese Ansicht haben die Untersuchungen von McCann gebracht, welcher gezeigt hat, daß die Meistzahl der Metalle Strahlen aussendet, welche sich ähnlich wie Radiumstrahlen verhalten, u. a. auch Blei, dann Zink, Eisen, Kupfer. Jedoch dürfen wir, ehe wir zu einer Verallgemeinerung dieser höchst interessanten Tatsachen schreiten, nicht vergessen, daß es noch nicht für ausgemacht gilt, ob die Aktivität den genannten Metallen, als solchen, eigen ist, oder vielleicht von Spuren beigemengter radioaktiver Stoffe herrührt, die wir nach keiner andern Methode nachweisen können. Beim Blei hat jedenfalls diese Annahme viel Wahrscheinlichkeit für sich, weil dieses Metall stets poloniumhaltig ist. Wir dürfen eben nicht vergessen, daß wir in der Radioaktivität eine Eigenschaft haben, welche bei Gegenwart außerordentlich geringer Stoffmengen deutlich hervortritt, — Stoffmengen, die wir durch keine andere Methode entdecken können. Daher ist der Forscher auf diesem Gebiete stets Irrtümern und Enttäuschungen ausgesetzt und muß in der Deutung der Ergebnisse seiner Versuche außerordentliche Vorsicht walten lassen.

Dasselbe muß auch in bezug auf die neueren Versuche, eine Transmutation anderer Elemente durch das Radium zu bewirken, gesagt werden. Das sind die aufsehenerregenden Versuche von Ramsay und Cameron über die Umwandlung des Kupfers unter dem Einfluß der Radiumemanation in Neon, Argon, Natrium und Lithium und die neueste Veröffentlichung über die Umwandlung des Thoriums in Kohlenstoff. Es ist aber vorläufig noch nicht gelungen, die Ergebnisse des genialen englischen Entdeckers zu bestätigen. Frau Curie und Frä. Gleditsch, welche die Versuche über die Transmutation des Kupfers einer Prüfung unterzogen, haben kein Lithium und kein Neon nachweisen können. Sie vermuten, daß in den Ramsayschen

Versuchen das Neon aus der Luft und Lithium aus dem Material der Glasgefäße herrühren möchte.

Aber auch das, was wir heute vom Radium mit Sicherheit wissen, genügt, um zu erkennen, daß wir hier mit Tatsachen von eminenter Wichtigkeit zu tun haben. Denn die Erscheinungen des Zerfalls der Atome radioaktiver Stoffe bilden zweifellos die merkwürdigsten Umwandlungen, welche jemals von der Chemie beobachtet wurden. Bei der Kürze der Zeit, seit welcher diese Erscheinungen studiert werden, läßt sich ihre praktische Bedeutung für die Menschheit heute noch gar nicht voraussehen.

Einer praktischen Verwendung des Radiums im Haushalt des Menschen stehen auch vorläufig noch unüberwindliche Hindernisse im Wege. Das Radium ist bisher nur in sehr verdünntem Zustand gefunden worden, und sein Preis ist zu teuer, um auch nur den Gedanken an seine Verwendung zuzulassen. Außerdem geht seine Umwandlung zu langsam vor sich, und es steht nicht in unseren Kräften, sie unserem Willen zu unterwerfen. Wenn wir jedoch auf einen Augenblick auf den Flügeln der Phantasie uns in eine Zukunft begeben, in welcher es dem Menschen vergönnt wäre auch diese eigenartigen Erscheinungen zu bezähmen, dann — müssen wir zugeben, daß diese neue Art der Energie in unseren wirtschaftlichen Verhältnissen eine Umwälzung herbeiführen müßte, gegen die die Verwendung von Dampf und Elektrizität nur ein Spielzeug sind. Denn nicht nur würde dann die Menschheit von dem drohenden Gespenst einer Erschöpfung der Kohle und anderer bisher verwendeten Energiequellen endgültig befreit werden, sondern sie könnte neue technische Aufgaben unternehmen, an welche wir jetzt noch gar nicht zu denken wagen.

Literatur.

- Curie-Skłodowska, M., Recherches sur les substances radioactives, Thèse. Paris 1903. Deutsche Übersetzung von W. Kaufmann. Braunschweig 1904.
- , Radioactivité. Paris 1910. Deutsche Übersetzung von Alex. Finkelstein. Leipzig 1911. 2 Bände.
- Rutherford, E., Radioactivity. Cambridge 1904.
- , Radioaktive Umwandlungen. Deutsche Übersetzung von M. Levin. Braunschweig 1907.
- , Die Radioaktivität. Deutsche Übersetzung von Aschkinasch. 1907.
- Soddy, Fr., Die Natur des Radiums. Deutsche Übersetzung von Prof. G. Siebert. Leipzig 1909.
- , Die Entwicklung der Materie enthüllt durch die Radioaktivität. Deutsche Übersetzung von Prof. G. Siebert. Leipzig 1904.
- Battelli, A., Occhialini, A., Chella, S., Die Radioaktivität. Aus dem Italienischen übersetzt von Klé. Leipzig 1910.
- Hammer, W., Radium and other radioactive substances. New York-London 1903.
- Hofmann, K., Die radioaktiven Stoffe nach dem neuesten Stande der wissenschaftlichen Erkenntnis. Leipzig 1904.
- Gruner, P., Kurzes Lehrbuch der Radioaktivität. Bern 1911.
- London, E. S., Das Radium in der Biologie und Medizin. Leipzig 1911.
- Sommer, E., Emanation und Emanationstherapie. München 1908.
- Doelter, C., Das Radium und die Farben. Dresden 1910.
- Lorenz, H. A., Ergebnisse und Probleme der Elektronentheorie. Berlin 1905.
- Mie, G., Moleküle und Atome. „ANuG.“, 58. Bdch. 4. Aufl. Leipzig 1919.
- Börnstein, R. u. Regener, E., Sichtbare und unsichtbare Strahlen. „ANuG.“, 64. Bdch. 3. Aufl. Leipzig 1920.
- Sajans, K., Das periodische System der Elemente, die radioaktiven Umwandlungen und die Struktur der Atome. Physikalische Zeitschrift, 16, 456—486. Leipzig 1915.
- Meyer, St. u. v. Schweidler, E., Radioaktivität. Leipzig-Berlin 1916.
- Lazarus, P., Handbuch der Radiumbiologie und Therapie. Wiesbaden 1913.

Verzeichnis der Abbildungen.

	Seite
Fig. 1. Frau Curie-Skłodowska	7
= 2. Pierre Curie	7
= 3. Pechblende aus Joachimstal, photographiert bei Tageslicht	10
= 4. Dasselbe Stück Pechblende, photographiert im Dunkeln, durch eigene Strahlen	11
= 5. Spektrum des Radiumchlorids nach Frau Curie, Radioaktivität	15

	Seite
Fig. 6. Radiographie eines Geldbeutels mit Münzen	18
= 7. Reizzeug, eingeschlossen in der Holzschachtel	19
= 8. Elektroskop zum Nachweis der Zerstreung elektrischer Ladung durch Radiumstrahlen	19
= 9. Kontinuierliche Entladung eines Induktoriums in der Nähe des Radiums	21
= 10. Elektroskop von P. Curie zur Messung der Radioaktivität	22
= 11. Quadrantelektrometer nach Dolezalef	23
= 12. Anordnung zur Messung der Aktivität radiumhaltiger Präparate	24
= 13. Stromkurve in ionisierter Luft	25
= 14. Versuch von Curie und Laborde zum Nachweis der Wärmeentwicklung durch Radium	28
= 15. Wirkung des Radiumbromids auf die Haut nach London	32
= 16. Wirkung der Emanation des Radiums auf einen Frosch. Versuch von London	33
= 17. Wirkung der Radiumbestrahlung auf Kaninchen. Bildung von Geschwüren auf dem Rücken	33
= 18. Abfall der Aktivität der Radiumemanation und allmähliche Erholung des Radiums	40
= 19. Versuch von Curie und Debierne zur Frage der Bildung der „induzierten Aktivität“	41
= 20. Kondensation der Radiumemanation durch Rutherford und Soddy	42
= 21. Elektromagnet mit einer Bleikapsel zum Nachweis der verschiedenen Ablenkungen der α -, β - und γ -Strahlen des Radiums	46
= 22. Zerlegung der Radiumstrahlen durch einen Elektromagnet	47
= 23. Ablenkung der Radiumstrahlen im elektrischen Feld	47
= 24. Erzeugung der Kathodenstrahlen in einer stark ausgepumpten Glasröhre	51
= 25. Radiumuhr n. Strutt	55
= 26. Geißlersches Rohr mit der Radiumemanation. Versuch von Ramsay und Soddy zum Nachweis der Umwandlung der Emanation in Helium	62
= 27. Das Spektrum der Emanation und des Heliums. Nach Soddy, Die Natur des Radiums	62
= 28. Das Spintharoskop von Crookes	65
= 29. Zählung der α -Teilchen mittels ihrer elektrischen Wirkung nach Rutherford und Geiger	66
= 30. Konzentrierung des „aktiven Niederschlags“ auf einem negativ geladenen Platindraht	73
= 31. Abfall der Aktivität von Thorium-X und Zunahme der Aktivität des Thoriums nach Rutherford	90
= 32. Darstellung der Thoriumemanation nach Rutherford	93
= 33. Konzentrierung des radioaktiven Niederschlags des Thoriums nach Rutherford	94

Radioaktivität. Von Dr. St. Meyer, Professor an der Universität Wien, und Prof. Dr. E. v. Schweidler, Innsbruck. Mit 87 Abbildungen. [XI u. 542 S.] gr. 8. 1916. Geh. M. 22.50, geb. M. 24.—

„Wir besitzen noch kein Buch, das uns in so mustergültiger Weise die radioaktiven Maße und Meßverfahren klarlegt. Alle, die mit radioaktiven Untersuchungen beschäftigt sind, ob Physiker, Chemiker oder Naturwissenschaftler, sie werden den Verfassern für die große Mühe dankbar sein, mit der sie sich der kritischen Sichtung und übersichtlichen Ordnung der einschlägigen Arbeiten unterzogen haben.“
(Physikal. Zeitschrift.)

Das Wesen der Materie. Von Dr. G. Mie, Prof. a. d. Univ. Halle a/S. 4. Aufl. I. Moleküle und Atome. Mit 25 Fig. [122 S.] 1919. II. Weltäther und Materie. (ANuG Bd. 58/59.) Kart. je M. 2.80, geb. je M. 3.50

Sichtbare und unsichtbare Strahlen. Von Geh. Reg.-Rat Dr. R. Börnstein, weil. Prof. a. d. Univ. Berlin. 3. neubearb. Aufl. von Prof. Dr. E. Regener. Mit 71 Abb. [130 S.] 1920. (ANuG Bd. 64.) Kart. M. 2.80, geb. M. 3.50

Die Röntgenstrahlen und ihre Anwendung. Von Dr. med. G. Bucky, Berlin. Mit 85 Abb. im Text u. auf 4 Taf. [IV u. 104 S.] 1918. (ANuG Bd. 556.) Kart. M. 2.80, geb. M. 3.50

Über Elektronen. Vortrag, gehalten auf der 77. Versammlung Deutscher Naturforscher und Ärzte in Meran. Von Geh. Hofrat Dr. W. Wien. Professor an der Universität Würzburg. 2., die Fortschritte d. Wissenschaft berücksichtigende Aufl. [39 S.] gr. 8. 1919. Geh. M. 1.40

Ionentheorie. Von Dr. P. Bräuer, Studienrat am Realgymnasium in Hannover. Mit 9 Fig. [IV u. 51 S.] 8. 1919. Kart. M. 1.80

Das Leitvermögen der Elektrolyte, insbesond. der wäßrigen Lösungen. Methoden, Resultate und chemische Anwendungen. Von F. Kohlrausch und Prof. Dr. L. Holborn, Direktor der physikal.-techn. Reichsanstalt zu Charlottenburg. 2., vermehrte Auflage. Mit in den Text gedruckten Figuren und 1 Tafel. Geh. M. 7.50, geb. M. 8.75

Lehrbuch der Physik für Mediziner, Biologen und Psychologen. Von Hofrat Dr. E. Lecher, Prof. a. d. Univ. Wien. 3. Aufl. Mit 501 Abb. [VIII u. 440 S.] gr. 8. 1919. Geh. M. 10.—, geb. M. 12.—

Grundriß der Chemie für Studierende der Medizin und Biologie. Von Dr. H. G. Kaufmann, Prof. a. d. Univ. Jena. [In Vorbereitung 1920.]

Auf sämtliche Preise Teuerungszuschläge des Verlags (ab April 1920 100%, Abänd. vorbehalten) und teilweise der Buchhandlungen

Verlag von B. G. Teubner in Leipzig und Berlin

Chemie. Unter Redakt. v. Geh. Hofrat Prof. Dr. E. v. Meyer. Allgem. Kristallographie u. Mineralogie. Unter Redaktion von Geh. Hof- und Reg-Rat Prof. Dr. Fr. Rinne. Mit 53 Abb. [VII u. 650 S.] 1913. (Die Kultur der Gegenwart. Hrsg. von Prof. P. Hinneberg. Teil III, Abt. III, 2.) Geh. M. 18.—, geb. M. 20.—, in Halbfranz M. 26.—

„Wer sich als Laie einen Einblick in die Chemie verschaffen oder als Chemiker einen raschen Überblick über benachbarte Arbeitsgebiete gewinnen will, der wird das Buch mit größtem Nutzen lesen.“ (Zeitschrift für angew. Chemie.)

Physik. Unter Redaktion von Präsident Prof. Dr. E. Warburg, Charlottenburg. (Die Kultur der Gegenwart, hrsg. von Prof. P. Hinneberg. Teil III, Abt. III, Band 1.) Mit 106 Abbildungen. [X u. 762 S.] Lex.-8. 1915. Geh. M. 22.—, geb. M. 26.—, in Halbfranz geb. M. 32.—

„Es ist nun gelungen, ein das weite Gebiet der Physik umfassendes Werk zu schaffen, das sowohl für die Physiker vom Fach als auch für die Fernerstehenden von unschätzbarem Wert ist.“ (Die Welt der Technik.)

Lehrbuch der Physik. Von Prof. E. Grimsehl, weil. Direktor der Oberrealschule a. d. Uhlenhorst in Hamburg. Zum Gebrauch beim Unterricht, bei akademischen Vorlesungen u. zum Selbststudium. 2 Bände, hrsg. v. Prof. Dr. W. Hillers in Hamburg u. Prof. Dr. H. Starke in Aachen. I. Band: Mechanik, Wärmelehre, Akustik u. Optik. 5. Aufl. Mit zahlr. Fig. im Text. [Unter der Presse 1920.]

II. Band: Magnetismus und Elektrizität. 4., verm. u. verb. Aufl. Mit 548 Fig. [VIII u. 634 S.] gr. 8. 1920. Geh. M. 22.—, geb. M. 26.—

Kleiner Leitfaden der praktischen Physik. Von Professor Dr. Fr. Kohlrausch, weil. Präsident der physikal.-techn. Reichsanstalt zu Berlin. 3. Aufl. bearb. von Dr. H. Schöll, Prof. an der Univ. Leipzig Mit 165 Abbildungen im Text. [XX u. 324 S.] gr. 8. 1919. Geb. M. 10.—

„. . . Das ausgezeichnete Buch ist ein unentbehrliches Hilfsmittel im Laboratorium und allen zu empfehlen, die sich mit der Physik beschäftigen wollen.“ (Literarische Beilage zur Pädagog. Zeitung.)

Grundriß der Physik. Für höhere Lehranstalten und Fachschulen sowie zum Selbstunterricht. Von Oberlehrer Dr. K. Hahn, Hamburg. Mit 326 Fig. [VII u. 274 S.] gr. 8. 1920. Geh. M. 8.—, geb. M. 9.60

Der Grundriß der Physik soll in „knappster Form“ und in „streng logischem Aufbau“ eine Darstellung der Experimentalphysik geben, die bis zu den „neuesten Ergebnissen der Forschung“ führt.

Experimentelle Elektrizitätslehre. Verb. mit einer Einführung in die Maxwellsche und die Elektronentheorie der Elektrizität und des Lichts. Von Dr. H. Starke, Prof. an d. Techn. Hochsch. zu Aachen. 3. Aufl. Mit zahlreichen Abb. [U. d. Presse 1920.]

„Man darf wohl sagen, daß das Werk einen hohen Grad der Vollendung erreicht hat, nicht nur dem sachlichen Inhalt nach, sondern auch als Lehrbuch.“ (Elektrotechnik u. Maschinenbau.)

Chemisches Wörterbuch. Von Dr. H. Remy, Privatdoz. a. d. Univ. Göttingen. (Teubners kleine Fachwörterbücher.) In Vorb. 1920

Physikalisches Wörterbuch. Von Prof. Dr. G. Berndt, Berlin. M. 81 Fig. i. Text. [IV u. 200 S.] 8. 1920. (Teubn. kl. Fachwörterb. Bd. 5) Geb. M. 5.— Aufsämtl. Pr. Teuerungszuschl. d. Verl. (ab April 1920 100%, Abänd. v. orb.) u. teilw. d. Buchh.

Verlag von B. G. Teubner in Leipzig und Berlin

BIBLIOTEKA POLITECHNICZNA
KRAKÓW

S. 61

Teubners kleine Fachwörterbücher

geben rasch und zuverlässig Auskunft auf jedem Spezialgebiete und lassen sich je nach den Interessen und den Mitteln des einzelnen nach und nach zu einer Enzyklopädie aller Wissenszweige erweitern.

„Mit diesen kleinen Fachwörterbüchern hat der Verlag Teubner wieder einen sehr glücklichen Griff getan. Sie ersetzen tatsächlich für ihre Sondergebiete ein Konversationslexikon und werden gewiß großen Anklang finden.“ (Die Warte.)

„Wer ist jetzt in der Lage, teure Nachschlagebücher zu kaufen? Wie viele aus den Reihen der Volkshochschulbesucher verlangen nach Handreichungen, die das Studium der Natur- und Geisteswissenschaften ermöglichen. Die Erklärungen sind sachlich zutreffend und so kurz als möglich gegeben, das Sprachliche ist gründlich erläutert, das Wesentliche berücksichtigt. Die Bücher sind eine glückliche Ergänzung der Bändchen „Aus Natur und Geisteswelt“ des gleichen Verlags. Selbstverständlich ist dem neuesten Stande der Wissenschaft Rechnung getragen.“ (Pädagog. Arbeitsgemeinschaft.)

„Diese handlichen Nachschlagebücher bieten nach Form und Inhalt Vorzügliches und werden sich, wie zu erwarten steht, in unseren Volkshochschulen schnell einbürgern.“ (Blätter für Volksbibliotheken.)

Bisher erschienen:

Philosophisches Wörterbuch. 2. Aufl. V. Studienrat Dr. P. Thormeyer. (Bd. 4.) geb. M. 36.—

Psychologisches Wörterbuch von Privatdozent Dr. Fritz Stefe. (Bd. 7.) geb. M. 32.—

Wörterbuch zur deutschen Literatur von Studienrat Dr. H. Köhl. (Bd. 14.) geb. M. 36.—

***Musikalisches Wörterbuch** von Privatdoz. Dr. J. H. Moser. (Bd. 12.)

***Wörterbuch zur Kunstgeschichte** von Dr. H. Vollmer.

Physikalisches Wörterbuch v. Prof. Dr. G. Berndt. (Bd. 5.) geb. M. 36.—

***Chemisches Wörterbuch** von Privatdozent Dr. H. Kemß. (Bd. 10.)

***Astronomisches Wörterbuch** v. Observator Dr. H. Naumann. (Bd. 11.)

Geologisch-mineralogisches Wörterbuch von Dr. E. W. Schmidt. (Bd. 6.) geb. M. 36.—

Geographisches Wörterbuch v. Prof. Dr. O. Kende. I. Allgem. Erdkunde.

(Bd. 8.) geb. M. 36.— *II. Wörterbuch d. Länder- u. Wirtschaftskunde. (13.)

Zoologisches Wörterbuch von Dir. Dr. Th. Knottnerus-Meyer.

(2.) geb. M. 32.—

Botanisches Wörterbuch von Dr. O. Herke. (Bd. 1.) geb. M. 32.—

Wörterbuch der Warenkunde von Prof. Dr. M. Pietsch. (Bd. 9.) geb. M. 36.—

Handelswörterbuch von Handelschuldir. Dr. V. Sittel u. Justizrat Dr. M. Strauß. Zugleich fünf-sprachiges Wörterbuch, zusammengestellt von V. Armhaus, verpfl. Dolmetscher. (Bd. 9.) geb. M. 36.—

* in Vorbereitung bzw. unter der Presse (1922)

Verlag von V. G. Teubner in Leipzig und Berlin

Teubners Naturwissenschaftliche Bibliothek

Serie A. Für reifere Schüler, Studierende und Naturfreunde

Alle Bände sind reich illustriert und geschmackvoll gebunden

- Große Physiker.** Von Joh. Keferstein. Mit 12 Bildnissen M. 27.—
- Physikalisches Experimentierbuch.** Von H. Rebenkoff. In 2 Teilen. I. Teil. 2. Aufl. Mit 99 Abbildungen M. 34.50. II. Teil. Mit 87 Abbildungen . M. 27.—
- Chemisches Experimentierbuch.** Von A. Scheid. In 2 Teilen. I. Teil. 4. Aufl. Mit 77 Abbildungen. M. 27.—. II. Teil. 2. Aufl. Mit 51 Abbildungen . M. 30.—
- An der Werkbank.** Von E. Scheidlen. Mit 110 Abbildungen u. 44 Tafeln. M. 40.—
- Hervorragende Leistungen der Technik.** Von A. Schreiber. Mit 56 Abb. M. 20.—
- Vom Einbaum zum Linienschiff.** Streifzüge auf dem Gebiete der Schifffahrt und des Seewesens. Von A. Kadunz. Mit 90 Abbildungen. M. 18.—
- Die Luftschiffahrt.** Von R. Nimschütz. Mit 99 Abbildungen M. 15.—
- Aus dem Luftmeer.** Von M. Sassenfeld. Mit 40 Abbildungen M. 15.—
- Himmelbeobachtung mit bloßem Auge.** Von J. Rusch. 2. Aufl. Mit 30 Figuren und 1 Sternkarte M. 30.—
- An der See.** Geogr.-geologische Betrachtungen. Von P. Dahms. Mit 61 Abb. M. 12.—
- Rüstenwanderungen.** Biologische Ausflüge. Von V. Franzy. Mit 92 Fig. M. 12.50
- Geologisches Wanderbuch.** Von K. G. Volk. 2 Teile. I. 2. Aufl. Mit 201 Abb. u. 1 Orientierungstafel. M. 54.—. II. 2. Aufl. Mit zahlr. Abb. [H. d. Pr. 22.]
- Große Geographen.** Bilder aus der Geschichte der Erdkunde. Von J. Lampe. Mit 6 Porträts, 4 Abb. u. Kartenstiche. M. 27.—
- Geographisches Wanderbuch.** Von A. Berg. 2. Aufl. Mit 218 Abb. M. 32.—
- Anleitung zu photographischen Naturaufnahmen.** Von G. E. S. Schulz. Mit 41 photographischen Aufnahmen. M. 33.—
- Vegetations schilderungen.** Von P. Sträbner. Mit 40 Abbildungen M. 11.25
- Unsere Frühlingpflanzen.** Von Fr. Höd. Mit 76 Abbildungen . . M. 18.—
- Große Biologen.** Bilder aus der Geschichte der Biologie. Von W. Maß. Mit 21 Bildnissen M. 20.—
- Biologisches Experimentierbuch.** Anleitung zum selbständigen Studium der Lebenserscheinungen für jugendliche Naturfreunde. Von C. Schäffer. Mit 100 Abbildungen M. 30.—
- Insektenbiologie.** Von Chr. Schröder. [H. d. Presse 1922.]
- Erlebte Naturgeschichte.** Von C. Schmitt. 2. Aufl. Mit 95 Abb. I. Text. Kart. M. 33.—

Serie B. Für jüngere Schüler und Naturfreunde.

- Physikalische Plaudereien f. die Jugend.** Von E. Wunder. Mit 15 Abbildungen. Kart. M. 10.—
- Chemische Plaudereien für die Jugend.** Von E. Wunder. Mit 5 Abbildungen. Kart. M. 10.—
- Mein Handwerkszeug.** Von D. Freß. Mit 12 Abbildungen . . . Kart. M. 8.—
- Vom Tierleben in den Tropen.** Von K. Guenther. Mit 7 Abb. Kart. M. 8.—
- Versuche mit lebenden Pflanzen.** Von M. Dettl. Mit 7 Abb. Kart. M. 8.—

Verlag von V. G. Teubner in Leipzig und Berlin

S-96

Preisänderung vorbehalten

Teubners Künstlersteinzeichnungen

Wohlfelle farbige Originalwerke erster deutscher Künstler fürs deutsche Haus
Die Sammlung enthält jetzt über 200 Bilder in den Größen 100×70 cm (M. 60.-), 75×55 cm (M. 50.-), 109×41 cm (M. 30.-), 60×50 cm (M. 40.-), 55×42 cm (M. 35.-), 41×30 cm (M. 25.-). Geschmackvolle Rahmung aus eigener Werkstatt.

Neu: Kleine Kunstblätter

18×24 cm je M. 8.-. Liebermann, Im Park. Brenkel, Am Wehr. Hecker, Unter der alten Kastanie und Weihnachtsabend. Treuter, Bei Mondenschein. Weber, Apfelsblüte.

Schattenbilder

R. W. Diefenbach „Per aspera ad astra“. Album, die 34 Teilb. des vollst. Wandfrieses fortlaufend wieder. (20½×25 cm) M. 80.-. Teilbilder als Wandfries (42×80 cm) je M. 30.-, (35×18 cm) je M. 10.-, auch gerahmt in versch. Ausführ. erhältlich.

„Göttliche Jugend“. 2 Mappen, mit je 20 Blatt (25½×34 cm) je M. 80.-. Einzelbilder je M. 5.-, auch gerahmt in versch. Ausführ. erhältlich.

Kindermusik. 12 Blätter (25½×34 cm) in Mappe M. 50.-, Einzelblatt M. 5.-.

Gerda Luise Schmidt (20×15 cm) je M. 4.50. Auch gerahmt in verschiedener Ausführung erhältlich. Blumenoratel. Reissenspiel. Der Besuch. Der Liebesbrief. Ein Frühlingsstrauch. Die Freunde. Der Brief an „Ihn“. Annäherungsversuch. Am Spinnet. Beim Wein. Ein Märchen. Der Geburtstag.

Teubners Künstlerpostkarten

(Ausf. Verzeichnis v. Verlag in Leipzig.) Jede Karte 60 Pf. Reihe von 12 Karten in Umschlag M. 6.-, jede Karte unter Glas mit schwarzer Einfassung und Schnur edig oder oval M. 3.80.

Die mit * bezeichneten Reihen auch in feinen ovalen Holzrahmchen (M. 9.- bzw. M. 10.50, edig M. 8.30), oder in Kettenrahmen edig oder oval (M. 5.30). Teubners Künstlersteinzeichnungen in 12 Reihen. Teubners Künstlerpostkarten nach Gemälden neuerer Meister. 1. Maccio, Maienzeit. 2. Köstlich, Sonnenbild. 3. Buttersack, Sommer im Moor. 4. Hartmann, Sommerweide. 5. Kühn jr., Im weißen Zimmer. In Umschlag M. 3.-

*Diefenbachs Schattenbilder in 7 Reihen. (Kindermusik, je M. —.60, Reihe M. 6.-). Aus dem Kinderleben, 6 Karten nach Bleistiftzeichn. von Hela Peters. 1. Der gute Bruder. 2. Der böse Bruder. 3. Wo drückt der Schuh? 4. Schmeißelhäuschen. 5. Püppchen, aufgepaßt! 6. Große Wäsche. In Umschlag M. 4.50.

*Schattenpostkarten von Gerda Luise Schmidt: 1. Reihe: Spiel und Tanz, Fest im Garten, Blumenoratel, Die kleine Schäferin, Belaulchter Dichter, Rattenfänger von Hameln. 2. Reihe: Die Freunde, Der Besuch, Im Grünen, Reissenspiel, Ein Frühlingsstrauch, Der Liebesbrief. 3. Reihe: Der Brief an „Ihn“, Annäherungsversuch, Am Spinnet, Beim Wein, Ein Märchen, Der Geburtstag. Jede Reihe in Umschlag M. 3.-.

Rudolf Schäfers Bilder nach der Heiligen Schrift

Der barmherzige Samariter (M. 50.-), Jesus der Kinderfreund (M. 40.-), Das Abendmahl (M. 50.-), Hochzeit zu Kana (M. 40.-), Weihnachten (M. 50.-), Die Bergpredigt (M. 40.-) (75×55 bzw. 60×50 cm).

Diese 6 Blätter in Format **Biblische Bilder** in Mappe M. 50.-, als 29×90 unter dem Titel **Biblische Bilder** Einzelblatt je M. 10.- (Auch als „Kirchliche Gedendblätter“ und als „Glückwunsch- u. Einladungskarten“ erhältlich.)

Karl Bauers Federzeichnungen

Führer und Helden im Weltkrieg. Einzelne Blätter (28×36 cm) M. 3.-
2 Mappen, enthaltend je 12 Blätter, je M. 12.-

Charakterköpfe zur deutschen Geschichte. Mappe, 32 Bl. (28×36 cm) M. 45.-,
12 Bl. M. 18.-, Einzelblätter M. 3.-

Aus Deutschlands großer Zeit 1913. In Mappe, 16 Bl. (28×36 cm) M. 18.-,
Einzelblätter M. 3.-

Vollständiger Katalog üb. künstl. Wandschmuck mit farb. Wiedergabe von über 200 Blättern gegen Einsend. von M. 8.50 oder gegen Nachn. (M. 10.-) v. Verlag in Leipzig, Poststr. 3, erhältlich

Verlag von B. G. Teubner in Leipzig und Berlin

Biblioteka Politechniki Krakow



I-301554

7-301554



Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000295882