



Die „**Sammlung Vieweg**“ hat sich die Aufgabe gestellt, Wissens- und Forschungsgebiete, Theorien, chemisch-technische Verfahren usw., die im Stadium der Entwicklung stehen, durch zusammenfassende Behandlung unter Beifügung der wichtigsten Literaturangaben weiteren Kreisen bekanntzumachen und ihren **augenblicklichen Entwicklungsstand zu beleuchten**. Sie will dadurch die Orientierung erleichtern und die Richtung zu zeigen suchen, welche die weitere Forschung einzuschlagen hat.

Verzeichnis der bisher erschienenen Hefte siehe 3. und 4. Umschlagseite.

Als Herausgeber der einzelnen Gebiete, auf welche sich die Sammlung Vieweg zunächst erstreckt, sind tätig, und zwar für:

Physik (theoretische und praktische, und mathematische Probleme):

Herr Professor **Dr. Karl Scheel**, Physikal.-Techn. Reichsanstalt, Charlottenburg;

Chemie (Allgemeine, Organische und Anorganische Chemie, Physikal. Chemie, Elektrochemie, Technische Chemie, Chemie in ihrer Anwendung auf Künste und Gewerbe, Photochemie, Metallurgie, Bergbau):

Herr Professor **Dr. B. Neumann**, Techn. Hochschule, Breslau;

Technik (Wasser-, Straßen- und Brückenbau, Maschinen- und Elektrotechnik, Schiffsbau, mechanische, physikalische und wirtschaftliche Probleme der Technik):

Herr Professor **Dr.-Ing. h. c. Fritz Emde**, Techn. Hochschule, Stuttgart;

Biologie (Allgemeine Biologie der Tiere und Pflanzen, Biophysik, Biochemie, Immunitätsforschung, Pharmakodynamik, Chemotherapie):

Herr Professor **Dr. phil. et med. Carl Oppenheimer**, Berlin-Grunewald.

Radioaktivität und die neueste Entwicklung der Lehre von den chemischen Elementen

Von

Dr. K. Fajans

a. o. Professor für physikalische Chemie an der Universität München

Mit 7 Abbildungen, 10 Tabellen und einem Nachtrage



Druck und Verlag von Friedr. Vieweg & Sohn in Braunschweig

1 9 1 9

ISBN 978-3-663-03977-8 ISBN 978-3-663-05423-8 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-663-05423-8
Herausgeber dieses Heftes:
Prof. Dr. Karl Scheel, Berlin.

Seiner Excellenz

Herrn Wirkl. Geh.-Rat Prof. Dr. Carl Engler

und

Herrn Prof. Dr. Georg Bredig

in dankbarer Erinnerung

an die Karlsruher Jahre

gewidmet

Vorwort.

In den letzten Jahren wurde ich öfters aufgefordert, vor Hörern sehr verschiedenen Bildungsgrades über die Ergebnisse zu berichten, die die Chemie und insbesondere die Lehre von den chemischen Elementen der radioaktiven Forschung verdankt. Das große Interesse, das diesen Fragen entgegengebracht wird, veranlaßt mich, in dem vorliegenden Bändchen einen Überblick über das genannte Thema zu geben.

Da über die ältere Entwicklung des Gebietes, die dem Studium der radioaktiven Umwandlungen der Elemente galt, zahlreiche auch populäre Schriften vorliegen, habe ich die Umwandlungstheorie verhältnismäßig kurz behandelt und das Hauptgewicht auf die neuere Lehre von den isotopen Elementen gelegt, wobei auch die wichtigsten Ergebnisse der Spektroskopie der Röntgenstrahlen und der Erforschung der Atomstruktur gestreift wurden.

Die Darstellung wurde auf einem solchen Niveau gehalten, daß sie (bis auf ganz wenige spezielleren Fragen gewidmete Abschnitte) wohl jedem Leser, dem die Grundlagen der Physik und Chemie bekannt sind, verständlich sein dürfte. Ich hoffe aber, daß das Büchlein auch physikalischen und chemischen Fachmännern willkommen sein wird, die die rasche Entwicklung des Gebietes nicht selbst an der Hand der Originalliteratur verfolgen können.

Bei der Abfassung der Kapitel III bis VI und XII konnte ich mich an meine zusammenfassende Bearbeitung in der *Physikalischen Zeitschrift* 1915: „Das periodische System der Elemente, die radioaktiven Umwandlungen und die Struktur der Atome“ nahe anlehnen und einige Stellen daraus ohne wesentliche Veränderungen übernehmen. Im übrigen unterscheidet sich aber die vorliegende Schrift von jener Bearbeitung durch Berücksichtigung der in den Kapiteln I, II, VIII, IX und XIII behandelten Fragen und durch die einem

breiteren Leserkreise angepaßte Darstellungsweise. Natürlich sind auch die seit 1915 erzielten Fortschritte berücksichtigt worden, wodurch, u. a. infolge der in allerletzter Zeit erfolgten Klärung des Verhältnisses der Erscheinung der Isotopie zum Elementbegriff, die Darstellung an Geschlossenheit gewonnen hat.

Es wäre bei dem zur Verfügung stehenden Raum nicht möglich, das Thema zu erschöpfen, doch wurde auf die wichtigsten neueren Arbeiten, falls sie nicht im Text besprochen werden konnten, wenigstens in den Literaturangaben hingewiesen.

Es gibt wohl nur wenige Probleme der Chemie, die ein so dankbares Thema für theoretische Spekulationen bieten, wie die in dieser Schrift behandelten. Wenn ich es hier vermieden habe, der Phantasie freien Lauf zu lassen, so geschah es nicht aus prinzipieller Ablehnung der sich oft aufdrängenden hypothetischen Überlegungen, sondern deshalb, weil ich glaubte, bei der durch den kleinen Umfang der Schrift notwendigen strengeren Auswahl des Stoffes den feststehenden bereits so mannigfaltigen Tatsachen den Vorzug geben zu müssen und dies um so mehr, als diese gerade auf dem behandelten Gebiete zum Teil die kühnsten Träume an Schönheit übertreffen.

Obige Zeilen lagen bereits zur zweiten Korrektur vor, als mir die neuesten Arbeiten von Sir Ernest Rutherford zugänglich wurden, deren Höhepunkt die künstliche Zerlegung des Stickstoffatoms bildet. Es war nicht mehr möglich, diese Untersuchungen in den Text hineinzuarbeiten, doch konnten sie, dank dem Entgegenkommen des Verlags, noch in einem besonderen Nachtrage Berücksichtigung finden. Da das *Philosophical Magazine* in Deutschland zurzeit noch schwer zugänglich ist, wurde die neue bahnbrechende Entdeckung verhältnismäßig ausführlich behandelt.

München, Juni-Juli 1919.

Kasimir Fajans.

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
Einleitung	1
I. Stand der Elementenlehre vor Entdeckung der Radioaktivität	2
1. Allgemeines	2
2. Das periodische System der Elemente	5
II. Die radioaktiven Umwandlungen der Elemente	8
1. Radioaktivität als Wegweiser bei der Entdeckung neuer Elemente	8
a) Entdeckung und Eigenschaften des Radiums	9
b) Radiumemanation	10
2. Umwandlungsfähigkeit eines Elementes	11
3. Die Strahlen radioaktiver Elemente als Begleiterscheinung ihrer Umwandlungen	14
4. Der langsame Zerfall des Radiums	17
5. Die Umwandlungsgeschwindigkeit als Charakteristikum der Radioelemente: aktiver Niederschlag der Radiumemanation	19
6. Die drei radioaktiven Reihen	21
III. Die Chemie der Radioelemente	30
1. Atomgewichte der Radioelemente	30
2. Chemische Eigenschaften der Radioelemente	32
3. Stellung der Radioelemente im periodischen System	35
IV. Die Verschiebungssätze und ihre Anwendungen	39
1. Allgemeines	39
2. Uran X_2	41
3. Protactinium, die Muttersubstanz des Actiniums	42
4. Andere Folgerungen	45
V. Atomgewicht und Lebensdauer der Isotopen	48
VI. Die Endprodukte der Zerfallsreihen und die isotopen Bleiarten	50
1. Theoretisches	50
2. Uranblei	53
3. Thoriumblei	55
4. Gewöhnliches Blei	57
VII. Die Eigenschaften isotoper Elemente	58
VIII. Chemisches Verhalten der Stoffe in äußersten Verdünnungen	61
IX. Radioelemente als Indikatoren	64
X. Neon und Metanon	66
XI. Die Ordnungszahlen der Elemente	69

	Seite
XII. Struktur der Atome	73
1. Allgemeine Vorstellungen	74
2. Die Kernladung	75
3. Erklärung der Verschiebungssätze und der Isotopie	76
4. Masse der Kerne	78
XIII. Revision des Begriffes des chemischen Elementes	79
1. Der Elementbegriff und die radioaktiven Umwandlungen	79
2. Der Elementbegriff und die Isotopie	81
a) Die Isotopen als dasselbe Element	81
b) Die Isotopen als verschiedene Elemente	84
XIV. Rückblick und Ausblicke	86
Nachtrag. Die künstliche Zerlegung des Stickstoffatoms	95
Literaturangaben und Anmerkungen	102
Autorenregister	107
Sachregister	109

Verzeichnis der Tabellen.

Tabelle 1. Periodisches System aus dem Jahre 1903	6
„ 2. Uran-Radiumreihe	22
„ 3. Actiniumreihe	23
„ 4. Thoriumreihe	24
„ 5. Die drei radioaktiven Reihen	27
„ 6. Die Radioelemente im periodischen System	36—37
„ 7. Uran-Radiumreihe im periodischen System	47
„ 8. Dichte und Atomvolumen verschiedener Bleiarten	59
„ 9a u. 9b. Periodisches System der Elemente	89—90
„ 10. Verzeichnis der Elemententypen und der Elemente	92—94

Verzeichnis der Figuren.

Fig. 1. Zerfall der Radiumemanation	13
„ 2. Sichtbarmachung des Weges von α -Strahlen in Luft nach C. T. R. Wilson	16
„ 3. Beziehung zwischen der Halbwertszeit der α -Strahler und der Reichweite ihrer α -Strahlen	29
„ 4. Apparat zur Erzeugung von Kanalstrahlen nach J. J. Thomson	67
„ 5. Kanalstrahlen in einem Gemisch der leichteren Edelgase der Atmosphäre nach J. J. Thomson	68
„ 6. Röntgenspektren der α -Reihe einiger Elemente nach M. Siegbahn	70
„ 7. Röntgenspektrum und Ordnungszahlen der Elemente	72

Einleitung.

Im Jahre 1896 entdeckte Henri Becquerel eine neue Eigenschaft der Materie — die Radioaktivität, indem er nachwies, daß Uransalze selbsttätig und ständig eine durchdringende Strahlung aussenden. Die hohe Bedeutung dieser Entdeckung leuchtete den Naturwissenschaftlern bald ein; eine besonders große Popularität gewann die neue Erscheinung auch in der Laienwelt, als es im Jahre 1898 dem Ehepaar Curie gelang, Radiumsalze zu isolieren, welche die Strahlungsfähigkeit in bedeutend stärkerem Maße als das Uran besitzen. Am meisten fiel es zuerst auf, daß sehr kleine Radiummengen ohne äußeres Zutun enorme Energiebeträge freimachen, deren Träger die vom Radium emittierte Strahlung ist.

Befestigt man ein Röhrchen mit Radiumsalz in der Mitte eines größeren Gefäßes mit Wasser — eines Kalorimeters —, so wird die Strahlung des Radiums zum großen Teil durch das Wasser absorbiert, und man beobachtet dabei eine Wärmeentwicklung, die für 1 g Radium in der Stunde etwa 130 g-Kalorien beträgt, d. h. eine Wärmemenge, die die Temperatur von 130 g Wasser um 1° erhöhen kann. Und diese selbsttätige Wärmeentwicklung zeigte selbst bei mehrjähriger Beobachtung keine merkliche Verminderung, so daß man ein Perpetuum mobile vor sich zu haben glaubte. Das Prinzip der Erhaltung der Energie, das seit der Mitte des vorigen Jahrhunderts das ganze naturwissenschaftliche Denken beherrscht und zu einer der Hauptgrundlagen der modernen Physik wurde, schien hier auf einen Widerspruch zu stoßen.

Wir werden bald sehen, auf welche Weise es gelungen ist, diesen scheinbaren Widerspruch aufzuklären und dadurch den radioaktiven Erscheinungen ihren revolutionären Charakter für die Physik zu nehmen. Denn trotz der vielen äußerst wertvollen Re-

sultate, die die radioaktive Forschung in das Gebäude der Physik hineingebracht hat, kann man ruhig behaupten, daß sie an dem vorher bestehenden nicht rüttelte. Dies gilt jedoch nicht für die Schwesterwissenschaft der Physik — die Chemie.

Von dieser wurden zwar die radioaktiven Erscheinungen zunächst wenig beachtet. Das darf nicht wundern, wenn man bedenkt, daß die Eigenart der Methoden, mit denen man die meistens nur in äußerst kleinen Mengen zugänglichen radioaktiven Substanzen untersuchen mußte, leicht zu der Vorstellung führen konnte, daß diese Stoffe eine Welt für sich bilden, die eine nur lose Verknüpfung mit der übrigen materiellen Welt besitzt. Erst allmählich wurden die innigen Zusammenhänge beider Welten immer klarer und klarer erkannt, und die Forschungen der letzten paar Jahre haben die Grenze fast vollständig verwischt und gleichzeitig ganz neue Gesichtspunkte in das Gebäude der Chemie hineingebracht.

Bei weitem die größte Bedeutung besitzt die Radioaktivität für die Lehre von den chemischen Elementen und deren Beziehungen zueinander. Die radioaktive Forschung hat der Elementenlehre für alle Zeiten ihren Stempel aufgedrückt. Wie weit hier die Konsequenzen der neuen Erkenntnisse reichen, ersieht man am besten aus der Tatsache, daß es im jetzigen Augenblick notwendig ist, einen der fundamentalsten Begriffe der Chemie, nämlich den des chemischen Elementes, vom Standpunkte der Errungenschaften radioaktiver Forschung auf seine Haltbarkeit zu prüfen.

I. Die Lehre von den chemischen Elementen vor Entdeckung der Radioaktivität.

1. Allgemeines.

Werfen wir zunächst einen Blick auf den Stand der Elementenlehre vor Entdeckung der Radioaktivität. Die alte, in der Mitte des 17. Jahrhunderts von Robert Boyle aufgestellte und dann von Lavoisier präzierte Definition des chemischen Elementes hatte volle Geltung behalten. Man verstand unter chemischen Elementen Stoffe, die durch kein Mittel in einfachere Bestandteile zerlegt werden konnten.

Diese Definition des Elementes ist eine rein empirische; sie besagt nicht, daß ein Element ein unzerlegbarer, sondern ein unzerlegter Stoff ist (1). Es ist deshalb wichtig, sich klar zu bleiben über die Methoden, die bis vor kurzem zu der bei den Elementen Halt machenden Zerlegung der Stoffe gedient haben.

Das allgemeinste Mittel, ein kompliziertes Gemisch in seine Bestandteile zu zerlegen, basiert auf der verschiedenen Löslichkeit der Verbindungen von Elementen. Fast jedes Element weist mehrere charakteristische Reaktionen auf, die meistens auf der Schwerlöslichkeit seiner Verbindungen beruhen und die nicht nur zur Erkennung des Elementes benutzt werden und dadurch die Grundlage der qualitativen Analyse bilden, sondern auch zu seiner Trennung von allen anderen Elementen dienen können. Es gibt aber Elemente, vor allem die zur Gruppe der sogenannten seltenen Erdmetalle gehörenden (z. B. Lanthan, Cer, Praseodym, Neodym usw.), die sich so sehr in ihren charakteristischen Reaktionen ähneln, daß ihre Trennung nur durch sehr langwierige fraktionierte Fällungen oder Kristallisationen ihrer Salze erzielt werden kann.

Ist man mit Hilfe der erwähnten Methoden von einem komplizierten Gemisch zu einheitlichen chemischen Verbindungen gelangt, so versucht man sie weiter zu zerlegen, entweder durch physikalische Hilfsmittel, wie starke Erhitzung, elektrischen Strom oder durch chemische Wechselwirkung mit anderen Stoffen. Auf diese Weise gelangt man schließlich zu einer beschränkten Zahl von Stoffen, die bei weiterer derartiger Behandlung niemals Produkte ergeben, die weniger wiegen als der Ausgangsstoff, und das sind eben unsere Elemente.

Eine besondere Beachtung verdient noch die eigenartige Gruppe der sogenannten Edelgase: Helium, Neon, Argon, Krypton, Xenon, die wegen ihres Unvermögens, mit anderen Elementen Verbindungen einzugehen, nur durch Anwendung von physikalisch-chemischen Methoden, wie fraktionierte Verflüssigung oder fraktionierte Destillation der verflüssigten Gase voneinander getrennt werden können. Schließlich sei noch erwähnt, daß die aus gewissen Gründen entstandene Frage, ob Helium ein einheitliches Element oder ein Gemisch vorstellt, dadurch im ersten Sinne ent-

schieden wurde, daß der Versuch, Helium durch fraktionierte Diffusion zu zerlegen, negativ ausfiel.

Durch alle diese Zerlegungsmethoden hatte man bis zur Zeit der Entdeckung der Radioaktivität etwa 80 chemische Elemente gefunden. Nach der üblichen Auffassung läßt sich eine bestimmte Menge eines chemischen Elementes nur in Bruchstücke spalten, die die gleichen Eigenschaften besitzen, wie der Ausgangsstoff. Diese mechanische Teilbarkeit der Elemente besitzt weiterhin nach der Atomtheorie eine Grenze, die z. B. für den Wasserstoff erreicht wird, wenn 1 g in $6,06 \times 10^{23}$ gleiche Teile¹⁾ geteilt wird, die man Wasserstoffatome nennt. Entsprechend der Zahl der bekannten Elemente nahm man die Existenz etwa 80 solcher verschiedenartigen Atome an, und aus ihnen sollte die ganze materielle Welt zusammengesetzt sein.

Die Unmöglichkeit, die Elemente zu zerlegen, bringt es mit sich, daß die einzigen Operationen, denen man das Atom eines Elementes unterwerfen kann, die Kombination mit Atomen anderer Elemente oder mit gleichartigen zu Molekeln ist; die Atome selbst bleiben aber unverändert und können immer wieder zurückgewonnen werden, so daß man den Satz von der Unzerstörbarkeit oder Erhaltung der Elemente formulieren konnte. Alle Atome eines bestimmten Elementes sind untereinander völlig gleich, sie haben vor allem gleiche Masse und gleiches Gewicht, deren relative Größe, bezogen auf das zu 16,000 festgesetzte Gewicht des Sauerstoffatoms, als das Atomgewicht (A. G.) des betreffenden Elementes bezeichnet wird.

Das Atomgewicht galt als eine besonders wichtige Eigenschaft eines Elementes. War es doch die einzige Eigenschaft, die von allen äußeren Umständen völlig unabhängig ist, eine Konstante im wahren Sinne des Wortes. Dazu kommt noch die außerordentlich große praktische Bedeutung, die dem A. G. zukommt, da es die Grundlage jeder quantitativen Analyse und chemischen Rechnung bildet.

Während das A. G. die wichtigste Eigenschaft eines Elementes ist, sobald es sich um sein Verhalten in quantitativ-chemischer Hinsicht handelt, ist für seine qualitative Erkennung neben den

1) 10^n heißt 1 mit n Nullen, z. B. 10^6 ist eine Million, 10^{-n} heißt $1/10^n$.

erwähnten charakteristischen Reaktionen das optische Spektrum als die besonders wichtige Eigenschaft anzusehen. Jedem Element kommt ein besonderes Spektrum zu, und die sonst so weitgehend ähnlichen Elemente wie die seltenen Erdmetalle oder die Edelgase, sind durch den Bau ihrer Spektren leicht zu unterscheiden.

2. Das periodische System der Elemente.

Der chemischen Zerlegungskunst gelang es also zu etwa 80 Bausteinen der Materie vorzudringen, bei welchen sie stehen bleiben mußte. Diese große Zahl macht es verständlich, weshalb man schon frühzeitig skeptisch der Ansicht gegenüberstand, daß dies die letzten ohne näheren Zusammenhang dastehenden Bausteine seien, und daß man versucht hat, wenigstens auf indirektem Wege zur Kenntnis innigerer Beziehungen zwischen den Elementen zu gelangen. Als die wichtigste Errungenschaft, zu der diese Bestrebungen im vorigen Jahrhundert geführt haben, ist das periodische System der Elemente anzusehen. Seine Aufstellung wurde durch mehrere Forscher, besonders de Chancourtois (1862) und J. Newlands (1864) angebahnt, aber erst durch Lothar Meyer und Dmitri Mendelejeff im Jahre 1869 vollendet (2). Die Tabelle 1 zeigt den Stand des periodischen Systems vor Entdeckung der Radioaktivität.

Beim Aufbau des Systems wurde zu seiner Grundlage das Atomgewicht der Elemente gewählt. Das periodische System besagt nämlich, daß, wenn man die chemischen Elemente in Reihenfolge ihrer Atomgewichte anordnet, in gewissen regelmäßigen Abständen — Perioden — Elemente mit ähnlichen chemischen und physikalischen Eigenschaften auftreten.

Wenn man z. B. beginnend mit dem Alkalimetall Lithium, das dem Edelgase Helium folgt, die Elemente der zweiten horizontalen Reihe nacheinander betrachtet, so begegnet man Stoffen, deren chemischer Charakter immer mehr von dem des Lithiums abweicht und findet in dem Halogen Fluor den vollen Gegensatz zum Alkalimetall. Der nächste Schritt führt aber wieder zu einem Edelgas (Neon), dem wiederum ein Alkalimetall (Natrium) folgt, und es sind nun alle weiteren Elemente der dritten Reihe chemisch ähnlich den über ihnen stehenden Elementen der zweiten Reihe. So ist

Tabelle I. Tabelle des periodischen Systems aus dem Jahre 1903¹⁾.

Reihen	Gruppen der Elemente																					
	0	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII													
1	—	H 1,008	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
2	He 4,00	Li 6,94	Be 9,1	B 11,0	C 12,00	N 14,01	O 16,00	F 19,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
3	Ne 20,2	Na 23,00	Mg 24,32	Al 27,1	Si 28,3	P 31,04	S 32,06	Cl 35,46	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
4	A 39,88	K 39,10	Ca 40,07	Sc 45,1	Ti 48,1	V 51,0	Cr 52,0	Mn. 54,93	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
5	—	Cu 63,57	Zn 65,37	Ga 69,9	Ge 72,5	As 74,96	Se 79,2	Br 79,92	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
6	Kr 82,92	Rb 85,45	Sr 87,63	Y 88,7	Zr 90,6	Nb 93,5	Mo 96,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
7	—	Ag 107,88	Cd 112,4	In 114,8	Sn 118,7	Sb 120,2	Te 127,5	J 126,92	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
8	Xe 130,2	Cs 132,81	Ba 137,37	La. 139,0	Ce 140,25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
10	—	—	—	Yb 173,5	—	Ta. 181,5	W 184,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
11	—	Au 197,2	Hg 200,6	Tl 204,0	Pb 207,20	Bi 208,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
12	—	—	—	—	Th 232,15	—	U 238,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	R	R ₂ O	RO	R ₂ O ₃	RO ₂	R ₂ O ₅	RO ₃	R ₂ O ₇	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
				Höchste gasförmige Wasserstoffverbindungen																		
				RH ₄	RH ₃	RH ₂	RH															

¹⁾ Aus der 7. Auflage der „Grundlagen der Chemie“ (russisch) von D. Mendelejeff, mit jetzt geltenden Atomgewichten. Die Bedeutung der Symbole der Elemente findet man in der Tabelle 10.

z. B. das Halogen Chlor weitgehend analog dem Fluor. Ähnliches, wenn auch mit gewissen Besonderheiten und Ausnahmen, wiederholt sich bis ans Ende der Tabelle.

Die ähnlichen Elemente sind in der Tabelle in vertikalen Reihen angeordnet, und sie bilden die acht Gruppen des Systems, jede eingeteilt in zwei Untergruppen.

Man unterscheidet in jeder Gruppe¹⁾ deshalb zwei Untergruppen, weil z. B. in der zweiten Gruppe, deren sämtlichen Gliedern die Zweitwertigkeit gemeinsam ist, die Elemente Be, Mg, Ca, Sr und Ba (vgl. Tab. 9) einerseits und Zn, Cd, Hg andererseits mehr Analogien zu einander aufweisen als zu den Elementen der anderen Untergruppe (3).

Der Grundgedanke des Systems läßt sich auch so ausdrücken, daß die Eigenschaften der Elemente periodische Funktionen ihrer Atomgewichte sind. — Das Atomgewicht wird danach als diejenige Eigenschaft betrachtet, von der in erster Linie die meisten übrigen abhängen. Außer dieser Errungenschaft war wohl als das wertvollste Ergebnis der Aufstellung des Systems die Möglichkeit der Vorhersagung der Zahl der noch zu entdeckenden Elemente anzusehen. Denn jedes Element mußte im System seinen Platz finden, und die Zahl der Stellen des Systems soll der Zahl der überhaupt existierenden Elemente entsprechen. Bekanntlich hat diese Idee durch die Entdeckung der Elemente Scandium, Gallium und Germanium, deren Plätze zur Zeit der Aufstellung des periodischen Systems noch frei waren, eine glänzende Bestätigung erfahren. Erhebliche Schwierigkeiten bereitete die Durchführung dieses Gedankens nur im Gebiete der seltenen Erdmetalle, worauf, wie auch auf einige andere Besonderheiten des Systems, später noch eingegangen wird.

Welche tieferen Ursachen die periodische Wiederkehr der Eigenschaften der Elemente bedingen, ist eine Frage, auf die wir auch jetzt, 50 Jahre nach Entdeckung dieser Gesetzmäßigkeit eine bündige Antwort schuldig bleiben. Wir wissen nicht genau (4), weshalb das System der Elemente ein periodisches ist. Die Erkenntnis jedoch, daß es überhaupt ein System der Elemente gibt,

¹⁾ Wie später (S. 46 und Tabelle 9) noch gezeigt wird, empfiehlt es sich, auch die in der Tabelle getrennten Gruppen 0 und VIII als Untergruppen einer gemeinsamen Gruppe zu betrachten.

war der große Gewinn der Mendelejeffschen Entdeckung. Denn sie zeigte überzeugend, daß die Elemente etwas mehr gemeinsam haben müssen, als das ihnen allen eigene widerspenstige Verhalten der Zerlegungskunst der Chemiker gegenüber. Die alte Idee einer allen Elementen zugrunde liegenden Urmaterie wurde wieder wach. Doch mußte man gleichzeitig aus dem Bestehen des natürlichen Systems folgern, daß, falls die Elemente wirklich zusammengesetzt sein sollten, die Art ihrer Zusammengesetztheit wesensgleich sein muß.

Wir brauchen hier nicht zu erörtern, welche Formen die durch das periodische System neubelebten Spekulationen über die zusammengesetzte Natur der Elemente angenommen hatten, doch sei an die erste im Jahre 1815 von dem englischen Arzt W. Prout aufgestellte Hypothese dieser Art erinnert, nach welcher der Wasserstoff die allen Elementen gemeinsame Urmaterie ist. Prout stellte sich alle schwereren Atome aus einer ganzen Zahl von Wasserstoffatomen zusammengesetzt vor und behauptete, daß in Übereinstimmung mit dieser Vorstellung die Atomgewichte aller Elemente ganze Vielfache vom A. G. des Wasserstoffes seien. Ein Blick auf die in der Tabelle 1 angegebenen Atomgewichte lehrt jedoch, daß, wenn dies auch bei einer Anzahl von Elementen sehr annähernd erfüllt ist, in vielen anderen Fällen die Abweichungen unzweideutig die Unsicherheit der Atomgewichtswerte überschreiten. Daß trotzdem die Proutsche Idee wohl nicht weit von der Wahrheit entfernt ist, ergibt sich aus den neuen Gesichtspunkten, die die radioaktive Forschung in die Lehre von den chemischen Elementen hineingebracht hat.

II. Die radioaktiven Umwandlungen der Elemente.

1. Radioaktivität als Wegweiser bei Entdeckung neuer Elemente.

Das erste wichtige Ergebnis, daß die Entdeckung der Radioaktivität für die Elementenforschung gezeitigt hat, war die Einführung einer prinzipiell neuen Methode zur Auffindung von Elementen.

Wie Becquerel zeigte, emittieren Uranpräparate durchdringende Strahlen, die die photographische Platte schwärzen, fluoreszierende

Substanzen zum Leuchten bringen und Luft zum Leiter der Elektrizität machen oder, wie man sagt, ionisieren. Die Stärke dieser ionisierenden Wirkung und damit auch die Intensität der radioaktiven Strahlung läßt sich messen, wenn man die Geschwindigkeit der Entladung eines geladenen Elektroskops oder Elektrometers bestimmt. Nun wies Marya Curie-Sklodowska mit Hilfe dieser Methode nach, daß die radioaktive Wirkung der verschiedenen Uransalze ihrem Urangehalte proportional ist, daß also die Radioaktivität dem Elemente Uran zukommt und eine Atomeigenschaft vorstellt, die unabhängig vom chemischen Bindungszustande des Uranatoms ist.

a) Entdeckung und Eigenschaften des Radiums.

Diese Erkenntnis hat bald reiche Früchte getragen. Denn nachdem Frau Curie festgestellt hatte, daß Uranminerale eine stärkere Aktivität aufweisen, als ihrem Urangehalt entspricht, folgerte sie daraus, daß in diesen Mineralien außer dem Uran mindestens noch ein anderes stark aktives Element enthalten sein muß. Herr und Frau Curie haben deshalb die Uranpechblende einer systematischen chemischen Analyse unterzogen mit dem Ziele, ein neues radioaktives Element daraus zu isolieren. Die mit Hilfe des Elektrometers ausgeführten Messungen der Intensität der Strahlung verschiedener Fraktionen dienten als Führer bei der chemischen Trennungsarbeit, und es gelang (1898) in der Tat, einen beträchtlichen Teil der Aktivität des Minerals beim Barium zu konzentrieren. Eine weitere scharfe Abtrennung des Trägers der Radioaktivität vom Barium ließ sich durch kein Reagens erzielen, und es wurde deshalb zu dem bei Besprechung der seltenen Erdmetalle bereits erwähnten Trennungsmittel gegriffen, zur fraktionierten Kristallisation der Salze. Auf diese Weise ließ sich die Radioaktivität immer weiter und weiter konzentrieren, und schließlich gelangte man zu Produkten, deren Aktivität pro Gewichtseinheit mehr als das Millionenfache der Uranaktivität betrug und weiter nicht mehr gesteigert werden konnte. Man hatte die chemisch reinen Salze eines neuen Elementes, das Radium genannt wurde, in den Händen.

Das Verhalten des neuentdeckten Stoffes entsprach in jeder Hinsicht dem eines Elementes. Man hat bei ihm ein neues charak-

teristisches Spektrum festgestellt, mit dessen Hilfe man die Gegenwart des Radiums in Mischungen mit Barium ebenso sicher, wenn auch mit kleinerer Empfindlichkeit, feststellen kann wie durch die radioaktive Methode. Später konnten Frau Curie und A. Debierne (1910) durch Elektrolyse einer Lösung von Radiumchlorid das Radiummetall herstellen, das, im besten Einklang mit dem Satze, daß die Radioaktivität eine Atomeigenschaft ist, die volle Aktivität des als Ausgangsmaterial dienenden Salzes aufwies. Auch die Einordnung in das periodische System machte keine Schwierigkeiten. Das Atomgewicht des Radiums beträgt nach O. Höngschmid 225,97, seine chemischen Eigenschaften sind denen des Bariums sehr weitgehend ähnlich, und damit steht im besten Einklang die Einordnung des Radiums an der vor seiner Entdeckung freien Stelle in der zweiten Gruppe und letzten Horizontalreihe des Systems (vgl. Tabelle 1 und 9). Das neue Element stellt somit das höchste Homologe derjenigen Untergruppe der II. Gruppe vor, zu der das Barium gehört.

Abgesehen von seinen radioaktiven Eigenschaften verhält sich somit das Radium wie jedes andere gewöhnliche Element, und es würde wohl schon vor längerer Zeit mit den gewöhnlichen chemischen Methoden entdeckt worden sein, wenn es nicht in nur so außerordentlich kleinen Konzentrationen in der Natur vorkommen würde. Betragen doch die größten Radiummengen, die in 1 g eines Uranminerals angetroffen werden, noch nicht $\frac{3}{10\,000}$ mg. Man müßte etwa 7000 kg des radiumreichsten (Joachimstaler Pechblende) von den in größeren, technisch verwertbaren Mengen vorkommenden Erzen aufarbeiten, um selbst bei verlustfreiem Arbeiten 1 g Radium zu erhalten. Dieses spärlichen Vorkommens wegen mußte die Entdeckung des Radiums den radioaktiven Methoden vorbehalten bleiben. Diese sind so empfindlich, daß es ohne Schwierigkeiten gelingt, noch etwa $\frac{1}{100\,000}$ mg Radium mit Hilfe eines Elektroskops nachzuweisen und zu erkennen (5).

b) Die Radiumemanation.

Das neue, so überaus feine analytische Hilfsmittel hat es ermöglicht, noch viele andere Elemente zu entdecken, die in noch viel kleineren Mengen als das Radium vorkommen. Wir wollen

unsere Aufmerksamkeit vor allem einem ganz besonders interessanten Element zuwenden, nämlich der von E. Dorn (1900) aufgefundenen Radiumemanation. Die Radiumemanation, auch Niton genannt, ist ein stark radioaktives Gas, das immer bei Radiumpräparaten zu finden ist und aus Radiumsalzlösungen abgepumpt werden kann, allerdings nur in äußerst geringen Quantitäten. Die größte Menge Radiumemanation, die man von 1 g Radiumelement (Wert etwa $\frac{1}{2}$ Million Mark) erhalten kann, beträgt nur $\frac{5}{1000}$ mg. Bei dem Versuch, die chemischen Eigenschaften der Emanation festzustellen, zeigte sich, daß sie ähnlich wie die Edelgase chemisch völlig träge ist, wodurch die Isolierung der Emanation in chemisch reinem Zustande wesentlich erleichtert wurde (E. Rutherford, W. Ramsay u. a.). Man konnte nun zeigen, daß sie ein neues charakteristisches Spektrum besitzt, sich verflüssigen läßt und unter Normaldruck bei -65° siedet. Mit Hilfe einer besonderen Mikrowage konnten W. Gray und Sir William Ramsay sogar das Gewicht eines gemessenen Volumens der Radiumemanation, also auch ihre Dichte ermitteln. Unter der Voraussetzung, daß die Molekel der Emanation wie die aller anderen Edelgase nur aus einem Atom besteht, ergab sich daraus das Atomgewicht der Emanation zu etwa 223, während A. Debierne nach einer eleganten Effusionsmethode den Wert 220 fand. Alle diese Eigenschaften der Emanation ließen keinen Zweifel, daß sie ein neues gasförmiges Element vorstellt, dem im periodischen System die vorher freie Stelle in der letzten Horizontalreihe und der Gruppe der Edelgase zukommt (vgl. Tabelle 1 und 9) (5).

2. Umwandlungsfähigkeit eines Elementes.

Wir haben die zwei radioaktiven Elemente Radium und Radiumemanation etwas näher besprochen, weil sie besonders geeignet sind, um als Beispiel für die Erläuterung einer der fundamentalsten Erkenntnisse, die die Chemie der Radioaktivität verdankt, herangezogen zu werden. Von E. Rutherford und F. Soddy wurde im Jahre 1902 die äußerst kühne Idee ausgesprochen, daß das Wesen der radioaktiven Erscheinungen in der Umwandlung der Elemente besteht. Ohne näher auf die sehr interessante Entwicklung einzugehen, die zu dieser Auffassung geführt

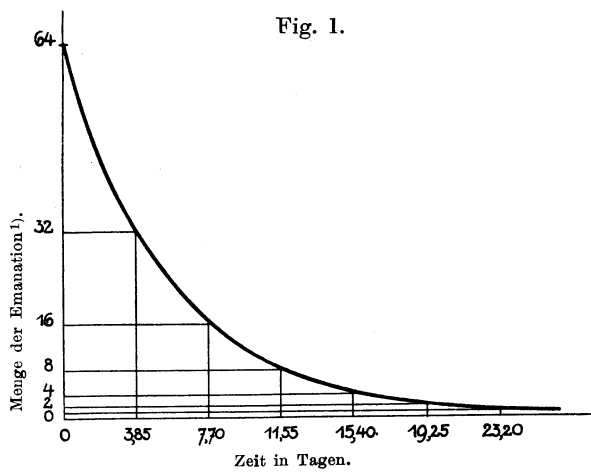
hat, wollen wir gleich den zuerst von Ramsay und Soddy im Jahre 1903 ausgeführten Versuch besprechen, der für den Chemiker den schlagendsten Beweis für die Richtigkeit dieser Idee geliefert hat.

Schließt man eine gewisse Menge Radiumemanation in ein Röhrechen ein, so läßt sich ihr Los durch Messung der von ihr ausgehenden durchdringenden Strahlung, durch Beobachtung des Volumens oder auch spektroskopisch verfolgen. Nun zeigen alle diese drei Methoden, daß die Menge der Emanation mit der Zeit allmählich abnimmt und nach einem Monat nur einen kleinen Bruchteil der ursprünglichen beträgt. Die Emanation verschwindet also, an ihrer Stelle kann man aber spektroskopisch im Röhrechen leicht die Bildung eines anderen Elementes, nämlich des Heliums nachweisen. Aus einem Element ist also ein anderes entstanden.

Das Verschwinden eines Elementes unter Bildung eines anderen steht in direktem Widerspruch mit dem vorher erwähnten Satze von der Erhaltung und Unzerstörbarkeit der Elemente, es ist deshalb klar, daß wir hier eine Tatsache vor uns haben, die die Grundvorstellungen vom Wesen der Elemente berührt. Um ihre Bedeutung ganz würdigen zu können, müssen wir diese Umwandlung eines Elementes (eine sogenannte radioaktive Umwandlung) etwas näher betrachten. Von großer Wichtigkeit ist zunächst die Frage nach dem zeitlichen Verlauf der Umwandlung. Diesen kann man sehr bequem und genau durch öftere elektroskopische Messung der Intensität der von der Emanation ausgesandten Strahlung verfolgen, denn die Intensität der von einem Radioelement emittierten Strahlung ist, wie vielfach festgestellt wurde, seiner Menge proportional. Auf diese Weise hat man gefunden, daß von einer bestimmten Emanationsmenge nach 3,85 Tagen nur die Hälfte zurückbleibt, nach weiteren 3,85 Tagen ein Viertel, dann ein Achtel usw.; jeweils nach 3,85 Tagen wird die Emanationsmenge halbiert (vgl. Fig. 1). Nach einem Monat bleibt weniger als $\frac{1}{2}$ Proz., nach 100 Tagen etwas mehr als ein hundertmillionstel der ursprünglichen Menge zurück. Man nennt das Zeitintervall von 3,85 Tagen die Halbwertszeit der Emanation. Wie man durch einfache Rechnung zeigen kann, entspricht das beschriebene Verhalten dem Gesetze, daß die Umwandlungsgeschwindigkeit, d. h. die Zahl der

pro Zeiteinheit sich umwandelnden Atome, in jedem Augenblick proportional der vorhandenen Zahl der Atome ist, d. h. es ist der in der Zeiteinheit zerfallende Bruchteil unabhängig von der absoluten Zahl der Atome (6).

Die Geschwindigkeit der Umwandlung der Emanation und, wie wir hier gleich hinzufügen können, auch die aller anderen einheitlichen Radioelemente weist einen zeitlichen Verlauf auf, den man aus der Lehre von der Geschwindigkeit chemischer Vorgänge für solche Reaktionen kennt, bei denen nur eine Molekel verändert wird, für die sogenannten monomolekularen Reaktionen. Es entsteht deshalb die Frage, ob man genötigt ist, zu der so revolutio-



Zerfall der Radiumemanation.

nären Auffassung zu greifen, daß man bei der Umwandlung der Emanation mit dem Zerfall eines Elementes zu tun hat oder ob nicht vielleicht die Emanation doch eine chemische Verbindung des Heliums sei, deren Zerfall in ihre Bestandteile wir kennen gelernt haben. Abgesehen davon, daß, wie bereits erwähnt wurde, für die Emanation alle sonstigen Kriterien eines Elementes gelten, unterscheidet sich ihre Umwandlung in mancher Hinsicht prinzipiell von einer chemischen Zersetzung. Die Geschwindigkeit einer chemischen Reaktion kann man nämlich durch

¹⁾ In willkürlichen Einheiten.

allerlei äußere Faktoren beeinflussen, so durch Änderung des Lösungsmittels, Anwendung von Kontaktsubstanzen, sogenannten Katalysatoren, und vor allem durch Änderung der Temperatur. Durch eine Temperaturerhöhung von 10^0 läßt sich nach einer bekannten Regel die Geschwindigkeit der allermeisten chemischen Reaktionen auf das Zwei- bis Dreifache steigern. Ganz anders bei den radioaktiven Prozessen: man hat im Falle der Emanation und vieler anderen Radioelemente versucht, ihre Umwandlungsgeschwindigkeit zu beeinflussen, aber selbst Temperaturveränderungen von -250^0 bis über 1000^0 waren nicht imstande auch nur den geringsten Einfluß auf die Geschwindigkeit der radioaktiven Umwandlungen oder auf die Intensität der Strahlung eines Radioelementes auszuüben. Auch die intensivsten Bestrahlungen mit Röntgen- oder Kathodenstrahlen (7 a) oder mit den Strahlen der radioaktiven Substanzen selbst sind bis jetzt erfolglos geblieben. Man steht heute den radioaktiven Umwandlungen noch völlig machtlos gegenüber, wir können sie weder hervorrufen noch die im Gang befindlichen beschleunigen oder verzögern. Dieser Umstand ist von so grundsätzlicher Natur, daß man unbedingt die radioaktiven Umwandlungen und die chemischen Prozesse als zwei völlig verschiedene Erscheinungen auseinander halten muß. Während die chemischen Reaktionen in Molekeln der Verbindungen vor sich gehen, spielen sich die radioaktiven Prozesse in den Atomen der Elemente ab (7).

3. Die Strahlung radioaktiver Elemente als Begleiterscheinung ihrer Umwandlungen.

Einen tieferen Einblick in das Wesen der radioaktiven Prozesse gewinnt man auch durch nähere Betrachtung des Zusammenhanges, der zwischen der Strahlung der Radioelemente und der soeben erwähnten Heliumbildung besteht.

Man unterscheidet drei Arten von Strahlungen der radioaktiven Substanzen, nämlich die α -, β - und γ -Strahlen. Nur bei den γ -Strahlen handelt es sich um eine Strahlung im engeren Sinne des Wortes, sie stellen nämlich, ähnlich wie die Röntgenstrahlen, eine elektromagnetische Wellenbewegung vor, die den Lichtstrahlen

an die Seite gestellt werden muß und sich von diesen nur durch eine viel kleinere Wellenlänge unterscheidet. Sie können durch ein elektrisches oder magnetisches Feld nicht abgelenkt werden und ihre Durchdringungsfähigkeit ist so groß, daß sie mehrere Zentimeter Blei zu durchqueren vermögen.

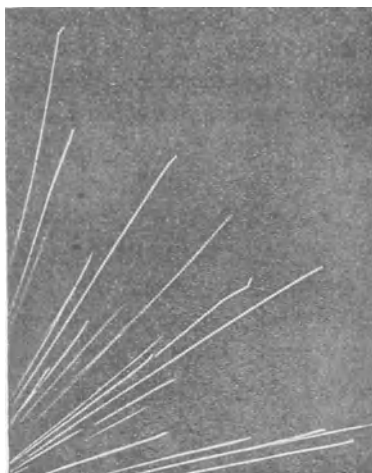
Dagegen sind die α - und β -Strahlen sehr schnell bewegte elektrisch geladene Teilchen, und zwar, wie unter anderem ihr Verhalten im magnetischen oder elektrischen Felde beweist, tragen die β -Teilchen eine negative, die α -Teilchen eine positive Ladung.

Die β -Strahlen sind nichts anderes als negative Elektronen und unterscheiden sich von den in Entladungsröhren entstehenden Kathodenstrahlen nur durch ihre größere Geschwindigkeit, die für die β -Strahlen der verschiedenen Radioelemente zwischen 100 000 und nahezu 300 000 km/sec liegt. Sonst stellen sie wie die Kathodenstrahlteilchen Atome freier negativer Elektrizität vor, mit der Einheitsladung $e = 1,59 \times 10^{-19}$ Coulomb, die die Grenze der Teilbarkeit der Elektrizität vorstellt und das elektrische Elementarquantum genannt wird. Der Größe nach dieselbe Ladung trägt ein einwertiges Atom z. B. das Wasserstoffatom oder Chloratom als Ion in Lösung, während mehrwertige Atome, z. B. Eisenatome, ein ganzes Vielfaches dieser Ladung führen. Die Masse eines Elektrons, also auch die des β -Teilchens, beträgt nur $\frac{1}{1830}$ der Masse eines Wasserstoffatoms (vgl. S. 4). Die β -Strahlen vermögen feste Substanzen bis zu einigen Millimetern Dicke zu durchdringen. Die Dicke von Aluminium, die die Intensität der β - und γ -Strahlen der verschiedenen Radioelemente auf die Hälfte herabsetzt, ist als „Halbwertsdicke“ in den Tabellen 2 bis 4 angegeben.

Von besonderem Interesse für uns ist die Natur der α -Teilchen. Ihre Geschwindigkeiten variieren bei den verschiedenen Radioelementen zwischen 15000 und 20000 km/sec. Sie sind von den drei Strahlenarten am wenigsten durchdringend. α -Strahlen einer bestimmten Geschwindigkeit vermögen nur eine scharf begrenzte Schichtdicke einer jeden Substanz zu durchdringen, hinter welcher alle Wirkungen eines parallelen Bündels von α -Strahlen vollkommen aufhören. Diese Schichtdicke, die man als Reichweite der

α -Strahlen bezeichnet, ist im allgemeinen um so kleiner, je dichter das zu durchdringende Material. In einem bestimmten Material ist die Reichweite verschieden schneller α -Teilchen proportional der dritten Potenz ihrer Geschwindigkeit (H. Geiger 1910). Die Reichweiten der bekannten α -Strahlen liegen für Luft von 15° und 760 mm zwischen 2,5 und 8,6 cm, während selbst die schnellsten α -Strahlen von 0,06 mm Aluminium vollkommen aufgehalten werden. In der Fig. 2 ist mit Hilfe einer geistreichen von C. T. R. Wilson angegebenen Methode (8) der Weg in Luft der von einem Radium-

Fig. 2.



Sichtbarmachung des Weges von α -Strahlen in Luft nach C. T. R. Wilson.

präparat ausgehenden α -Teilchen sichtbar gemacht.

Die Größe der von den α -Teilchen mitgeführten positiven Ladung konnte auf folgendem Wege ermittelt werden.

Wenn α -Strahlen auf einen Zinksulfidschirm oder Diamant fallen, bringen sie diese Substanzen vorübergehend zum Leuchten. Läßt man eine sehr schwache Strahlung wirken, und beobachtet die leuchtende Substanz unter der Lupe (J. Elster, H. Geitel, W. Crookes 1903), so sieht man zeitlich und räumlich getrennte Lichtblitze, die man Szintillationen nennt. E. Regener, Rutherford und Geiger (1908) bestimmten nun: einerseits die Zahl (n) solcher Lichtblitze, die ein bestimmtes radioaktives Präparat in der Zeiteinheit erzeugt, andererseits die positive elektrische Gesamtladung (E), die von den vom Präparat in der Zeiteinheit ausgesandten α -Strahlen getragen wird. $\frac{E}{n}$ ist dann die Ladung, die einem Lichtblitz (einem α -Teilchen) entspricht und sie ergab

sich genau zu $2e$ (vgl. S. 15). Ein α -Teilchen trägt also eine doppelt so große Ladung wie ein Wasserstoffion, d. h. die gleiche Ladung wie ein Atom eines zweiwertigen Metalles in Lösung.

Von größtem Interesse war der Nachweis, daß der materielle Träger der positiven Ladung der α -Teilchen das Heliumatom ist. Dieses von Rutherford zunächst auf indirektem Wege erschlossene Resultat konnte von ihm und T. Royds (1909) auch direkt spektroskopisch bestätigt werden. In ein Glasröhrchen mit so dünnen Wänden, daß sie zwar nicht für Heliumgas, wohl aber für die schnell bewegten α -Teilchen durchlässig waren, wurde Radiumemanation eingeführt. Nach einigen Tagen, als die Emanation zum Teil zerfallen war, konnte man in einem das dünnwandige Röhrchen umgebenden weiteren Rohr spektroskopisch Helium nachweisen, woraus direkt folgt, daß die von der Emanation ausgesandten α -Teilchen nach Verlust ihrer positiven Ladung zu Heliumatomen werden. Die Heliumbildung beim Zerfall der Radioelemente steht also im direkten Zusammenhang mit der Emission von α -Strahlen, die wiederum, wie auch die Emission von β - und γ -Strahlen eine Begleiterscheinung der Umwandlungen der Elemente ist (8).

4. Der langsame Zerfall des Radiums.

Die Radiumemanation haben wir als ein verhältnismäßig kurzlebige Element kennen gelernt, sie muß also ständig von neuem gebildet werden und da sie immer beim Radium zu finden ist, ist dieses als Muttersubstanz der Emanation anzusehen. Also auch das Radium selbst muß instabil sein und einer Umwandlung unterliegen. Man kann in der Tat leicht feststellen, daß ein von Emanation z. B. durch Auskochen seiner Lösung befreites Radiumsalz ebenso wie die Emanation α -Teilchen aussendet, d. h. Helium erzeugt, und wir kommen somit zu dem Resultat

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

Nun ist das Atomgewicht des Radiums 226,0, das des Heliums 4,0, wenn also aus einem Atom Radium je ein Atom des Heliums und der Emanation entsteht, müßte das A. G. der Emanation 226,0

— 4,0 = 222,0 sein, und in der Tat sind ja, wie früher erwähnt wurde, experimentell nach zwei verschiedenen, nur angenäherte Werte ergebenden Methoden in genügender Übereinstimmung damit die Werte 220 bzw. 223 gefunden worden.

In scheinbarem Widerspruch mit der Annahme des Zerfalls des Radiums steht die Tatsache, daß selbst nach mehrjähriger Beobachtung weder in der Menge des Radiums, noch in der Intensität seiner Strahlung eine merkliche Abnahme feststellbar war. Dies rührt jedoch daher, daß der Zerfall des Radiums nur ein sehr langsamer ist, d. h. daß das Radium eine verhältnismäßig große Lebensdauer hat. Von den Wegen, die zur Ermittlung der Halbwertszeit des Radiums und anderer langsam zerfallenden Radioelemente führen, sei hier einer erwähnt.

Mit Hilfe der Szintillationsmethode kann man die Zahl der α -Teilchen bestimmen, die von 1 g Radium in der Zeiteinheit emittiert werden. Dividieren wir diese Zahl durch die bekannte Zahl der Atome, die ein 1 g-Radium enthält, so erfahren wir, welcher Bruchteil der jeweils vorhandenen Atomzahl in der Zeiteinheit zerfällt, woraus man leicht (6) die Halbwertszeit des Radiums berechnen kann. Diese und andere Methoden ergaben für die Halbwertszeit des Radiums etwa 1700 Jahre (9).

Dieser relativ hohe Wert macht uns auch verständlich, weshalb die Wärmeproduktion des Radiums scheinbar konstant ist, eine Tatsache, die, wie anfangs erwähnt wurde, seinerzeit als Widerspruch gegen das Gesetz der Erhaltung der Energie gegolten hat. Diese Wärmeproduktion ist nämlich eine Begleiterscheinung des radioaktiven Zerfalls, sie stellt sozusagen seine Reaktionswärme vor und ist sehr annähernd gleich der kinetischen Energie der Radiumstrahlen. Sie nimmt also in Wirklichkeit in demselben Maße ab, wie die Menge des Radiums selbst, also zu langsam, als daß die Abnahme in kurzen Zeitabschnitten sich bemerkbar machen könnte. Da man aber die Zerfallsgeschwindigkeit des Radiums kennt, so kann man aus der stündlichen Wärmeentwicklung leicht berechnen, wieviel Wärme frei wird, wenn ein Grammatom (226 g) Radium praktisch vollständig in Emanation zerfällt, ein Vorgang, der viele Tausende von Jahren dauert. Das Resultat ist ein höchst interessantes, nämlich über 10^{11} (hunderttausend Milli-

onen) Grammkalorien, während die Wärmeentwicklung einer der energischsten chemischen Reaktionen, die wir kennen, nämlich der Verbrennung des Wasserstoffes zu Wasser, pro Grammolekül (18 g Wasser) nur 68000 Kalorien, also nicht einmal ein Millionstel des obigen Wertes beträgt. Die enorme Wärmeentwicklung ist neben der Unbeeinflußbarkeit der radioaktiven Vorgänge ein zweiter wesentlicher Unterschied, der diese von den chemischen Reaktionen trennt (10).

5. Die Umwandlungsgeschwindigkeit als Charakteristikum eines Radioelementes; aktiver Niederschlag der Radiumemanation.

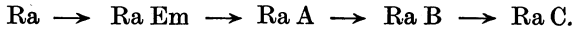
Der Umstand, daß die Radioaktivität eine Atomeigenschaft ist, und daß die radioaktiven Vorgänge durch keinen äußeren Faktor beeinflussbar sind, macht die Geschwindigkeit der Umwandlung eines Radioelementes zu einer für ihn besonders charakteristischen Eigenschaft. Nun haben Rutherford und Soddy in ihrer Theorie das Postulat aufgestellt, daß der zeitliche Ablauf der Umwandlung eines einheitlichen Radioelementes dem einfachen sogenannten logarithmischen Gesetz (6) gehorcht, das wir früher bei der Besprechung der Radiumemanation erwähnt haben: danach zerfällt von einem bestimmten Element pro Zeiteinheit stets derselbe Bruchteil der vorhandenen Zahl der Atome und es besitzt jedes Radioelement eine bestimmte charakteristische Halbwertszeit, die von seiner Menge unabhängig ist. Aus diesem Postulat ergaben sich folgende Konsequenzen. Jedesmal, wenn man eine radioaktive Strahlung mit einer vorher unbekanntem Halbwertszeit abfallen sah, mußte geschlossen werden, daß man ein neues Radioelement vor sich hatte. Die Beobachtung eines komplizierteren Zeitgesetzes wies hingegen auf das Vorhandensein von mehr als einem Element hin. Diese Leitsätze erwiesen sich als außerordentlich fruchtbar und führten zur Entdeckung einer großen Zahl neuer Elemente.

Als Beispiel sei etwas näher nur das weitere Schicksal der Radiumemanation verfolgt. Das Helium ist nämlich nicht ihr einziges Umwandlungsprodukt. Vielmehr findet man auf den

Wänden eines Emanationsröhrchens, sowie auf jedem in Emanationsatmosphäre hineingebrachten Gegenstand, z. B. einem Platindraht, einen unsichtbaren festen radioaktiven Rückstand, den sogenannten aktiven Niederschlag, dessen Aktivität nach einem ziemlich komplizierten Zeitgesetz abfällt. Die nähere Analyse ergab, daß man in ihm die Existenz von mindestens drei Radioelementen annehmen muß. Direkt aus der Emanation entsteht das Radium A (Ra A), das weiter mit der Halbwertszeit von 3 Minuten unter Aussendung von α -Strahlen zerfällt und dabei in das β - und γ -Strahlen emittierende Radium B (Ra B) umgewandelt wird. Letzteres hat eine Halbwertszeit von 26,8 Minuten und ergibt bei seiner Umwandlung das Radium C (Ra C), das eine Halbwertszeit von 19,5 Minuten aufweist und α -, β - und γ -Strahlen aussendet.

Es ist verständlich, daß es den Chemikern zunächst etwas merkwürdig zu Mute war, als Rutherford hier aus dem radioaktiven Verhalten eines unsichtbaren Beschlages die Existenz von drei neuen Elementen folgerte. Und doch war es möglich, auch mit anderen Methoden nachzuweisen, daß man einen aus mehreren Bestandteilen zusammengesetzten materiellen Beschlag vor sich hatte. Der aktive Niederschlag läßt sich von einem aus der Emanationsatmosphäre entfernten Platindraht wie ein Metall durch Säure ablösen. Taucht man nach einer halben Stunde, in welcher Zeit das kurzlebige Radium A fast vollständig zerfällt, in eine solche Lösung ein Nickelblech ein, so findet man auf dem Nickel eine Aktivität, die von α -, β - und γ -Strahlen herrührt und nach einem einfachen logarithmischen Zeitgesetz mit der konstanten Halbwertszeit 19,5 Minuten zerfällt. Man hat also das reine Ra C abgeschieden. Fügt man hingegen zu einer Lösung des aktiven Niederschlages ein Bleisalz hinzu und fällt das Blei als Sulfat aus, so bleibt das Ra C in Lösung, während man im Niederschlag zunächst hauptsächlich nur das Radium B findet, aus dem dann allmählich wieder das Ra C entsteht. Auch durch Erhitzen des festen Beschlages oder durch Elektrolyse der Lösung lassen sich die drei Produkte voneinander trennen, sie haben also nicht nur verschiedene radioaktive Eigenschaften, sondern zeigen auch Unterschiede im chemischen und physikalischen Verhalten, wie man es ja von verschiedenen Elementen zu erwarten hatte.

Wir haben also eine ganze Reihe von Radioelementen kennen gelernt, die zueinander in genetischer Beziehung stehen:



Durch ähnliche Methoden wie die bisher besprochenen hat man nun viele andere Radioelemente entdeckt und ihre genetischen Beziehungen untersucht, und heute kennt man nicht weniger als 39 Radioelemente. Ausgenommen das Kalium und Rubidium, die auch als radioaktiv erwiesen wurden, lassen sie sich alle in drei Umwandlungsreihen oder Familien einordnen. Es sind dies die Uran-Radiumreihe, die Actinium- und die Thoriumreihe (11).

6. Die drei radioaktiven Reihen¹⁾.

Die Uran-Radiumreihe beginnt mit dem bekannten Element Uran, dem Hauptbestandteil der Uranpechblende, und führt nach einigen Umwandlungen, die wir später noch näher besprechen werden, über das Element Ionium zum Radium. Das von B. Boltwood (1907) u. a. entdeckte Ionium läßt sich aus Uranmineralien mit Thorium abscheiden, es ist die direkte Muttersubstanz des Radiums, dessen allmähliche Bildung in einem Ioniumpräparat leicht beobachtet werden kann. Daß aus Uran, wenn auch nicht direkt, in der Tat Radium entsteht, konnte ebenfalls gezeigt werden (Soddy 1915).

Die genetischen Beziehungen zwischen Uran und Radium erklären es, weshalb das Radium stets in Uranmineralien vorzufinden ist. Denn wenn auch das Radium für sich allein genommen infolge seiner Umwandlung mit der Halbwertszeit von 1700 Jahren in einigen 10000 Jahren praktisch vollständig verschwinden muß, wird es in den seit Millionen von Jahren in der Erdkruste ruhenden Mineralien immer wieder aus Uran nachgebildet. Dabei stellt sich ein Gleichgewichtszustand ein, bei welchem in der Zeiteinheit ebensoviel Radium zerfällt wie entsteht. Es ist leicht durch eine einfache Rechnung zu zeigen, daß bei diesem sogenannten

¹⁾ Vgl. Tabellen 2 bis 5. In diesen wurde die im Jahre 1918 auf Vorschlag von St. Meyer und E. v. Schweidler vereinbarte (12a) Nomenklatur der Radioelemente benutzt.

Tabelle 2. Uran-Radiumreihe.

Name des Elementes	Symbol	Halbwertszeit	Strahlung	Reichweite der α -Strahlen ¹⁾ in cm	Halbwertsdicke in cm Aluminium		Chemischer Typus	Atomgewicht
					β -Strahlen	γ -Strahlen		
Uran I. . .	U _I	5 · 10 ⁹ a	α	2,50	—	—	U	<u>238,2</u>
Uran X ₁ . .	UX ₁	24 d	$\beta\gamma$	—	1,36 · 10 ⁻³	{ 2,89 · 10 ⁻² 0,99	Th	234
Uran X ₂ . .	UX ₂	1,15 m	$\beta\gamma$	—	4,81 · 10 ⁻²		4,95	Pa
Uran II . .	U _{II}	(2 · 10 ⁶ a)	α	2,90	—	—	U	234
Uran Y . .	UY	25,5 h	β	—	2,3 · 10 ⁻³	—	Th	(?)
Ionium . .	Io	10 ⁵ a	α	3,11	—	—	Th	230
Radium . .	Ra	1700 a	$\alpha\beta$	3,30	2,2 · 10 ⁻³	—	Ra	<u>225,97</u>
Radium-emanation	RaEm	3,85 d	α	4,16	—	—	Em	222
Radium A . .	RaA	3,0 m	α	4,75	—	—	Po	218
Radium B . .	RaB	26,8 m	$\beta\gamma$	—	{ 5,3 · 10 ⁻² 8,6 · 10 ⁻³ 8 · 10 ⁻⁴	{ 3,0 · 10 ⁻³ 1,73 · 10 ⁻² 1,36	Pb	214
Radium C . .	RaC	19,5 m	(α) $\beta\gamma$	(?)	{ 5,3 · 10 ⁻² 1,31 · 10 ⁻²		6,03	Bi
Radium C' . .	RaC'	(10 ⁻⁶ s)	α	6,94	—	—	(Po)	214
Radium C'' . .	RaC''	1,4 m	β	—	wie bei RaC	—	(Tl)	210
Radium D . .	RaD	16 a	$\beta\gamma$	—	1,26 · 10 ⁻⁴	{ 0,015 0,70	Pb	210
Radium E . .	RaE	5,0 d	$\beta\gamma$	—	1,61 · 10 ⁻²		wie bei RaD	Bi
Radium F . . (Polonium)	RaF(Po)	136 d	α	3,85	—	—	Po	210
Radium G . . (Radiumblei)	RaG(^{206,0} Pb)	—	—	—	—	—	Pb	<u>206,0</u>

1) Zu den Tabellen 2, 3 und 4:

Die Reichweite der α -Strahlen gilt für Luft von 15° und 760 mm.
a = Jahr, d = Tag, h = Stunde, m = Minute, s = Sekunde.

Die unterstrichenen Werte der Atomgewichte sind direkt experimentell ermittelt, die eingeklammerten der Elemente der Actiniumreihe sind hypothetisch, die übrigen auf Grund der genetischen Beziehungen berechnet.

Tabelle 3.
Actiniumreihe.

Name des Elementes	Symbol	Halbwertszeit	Strahlung	Reichweite der α -Strahlen in cm	Halbwertsdicke in Aluminium		Chemischer Typus	Atomgewicht
					β -Strahlen	γ -Strahlen		
Protoactinium	Pa	($10^4 - 10^5$ a)	α	3,49	—	—	Pa	(etwa 230)
Actinium	Ac	etwa 20 a	(β)	—	—	—	Ac	(„ 226)
Radioactinium	RdAc	19 d	$\alpha\beta\gamma$	4,2	$4 \cdot 10^{-3}$	$\left\{ \begin{array}{l} 2,8 \cdot 10^{-2} \\ 3,5 \end{array} \right.$	Th	(„ 226)
Actinium X	AcX	11,5 d	α	4,3	—	—	Ra	(„ 222)
Actiniumemanation	AcEm	3,92 s	α	5,6	—	—	Em	(„ 218)
Actinium A	AcA	0,002 s	α	6,3	—	—	(Po)	(„ 214)
Actinium B	AcB	36,1 m	$\beta\gamma$	—	sehr klein	$\left\{ \begin{array}{l} 5,77 \cdot 10^{-3} \\ 2,23 \cdot 10^{-2} \\ 1,54 \end{array} \right.$	Pb	(„ 210)
Actinium C	AcC	2,15 m	$\alpha(\beta)$	5,2	—	—	Bi	(„ 210)
Actinium C'	AcC'	(0,005 s)	α	6,4	—	—	(Po)	(„ 210)
Actinium C''	AcC''	4,71 m	$\beta\gamma$	—	$2,4 \cdot 10^{-2}$	3,5	Tl	(„ 206)
Actinium D (Actiniumblei)	AcD	—	—	—	—	—	Pb	(„ 206)

Tabelle 4. Thoriumreihe.

Name des Elementes	Symbol	Halbwertszeit	Strahlung	Reichweite der α -Strahlen in cm	Halbwertsdicke in cm		Chemischer Typus	Atomgewicht
					β -Strahlen	γ -Strahlen		
Thorium	Th	$1,5 \cdot 10^{10}$ a	α	2,72	—	—	Th	<u>232,15</u>
Mesothorium 1	MsTh ₁	6,7 a	(β)	—	—	—	Ra	228
Mesothorium 2	MsTh ₂	6,2 h	$\beta\gamma$	—	—	{ 0,027 bis 5,98	Ac	228
Radiothorium	RdTh	1,90 a	$\alpha\beta$	3,87	—	—	Th	228
Thorium X	ThX	3,64 d	α	4,30	—	—	Ra	224
Thoriumemanation	ThEm	54,5 s	α	5,00	—	—	Em	220
Thorium A	ThA	0,14 s	α	5,70	—	—	(Po)	216
Thorium B	ThB	10,6 h	$\beta\gamma$	—	—	{ $4,3 \cdot 10^{-3}$ $2,2 \cdot 10^{-2}$	Pb	212
Thorium C	ThC	60,8 m	$\alpha\beta$	4,80	—	{ $4,5 \cdot 10^{-3}$ $4,8 \cdot 10^{-2}$	Bi	212
Thorium C'	ThC'	(10^{-11} s)	α	8,60	—	—	(Po)	212
Thorium C''	ThC''	3,1 m	$\beta\gamma$	—	—	3,2 · 10 ⁻²	Tl	208
Thorium D (Thoriumblei)	ThD (²⁰⁸ Pb)	—	—	—	—	—	Pb	<u>208,0</u>

radioaktiven Gleichgewicht die Zahl der vorhandenen Atome von Uran und Radium in demselben Verhältnis zueinander stehen muß wie deren Halbwertszeiten. Es steht in bester Übereinstimmung mit dieser Forderung, daß in den verschiedensten Mineralien dieses Mengenverhältnis stets den gleichen Wert hat, nämlich $U:Ra = 3,3 \times 10^6$, woraus sich die Halbwertszeit des Urans zu $1700 \times 3,3 \times 10^6 = 5 \times 10^9$ Jahren ergibt. Man erhielt denselben Wert für die Halbwertszeit des Urans durch Bestimmung der von 1 g Uran pro Zeiteinheit ausgesandten Zahl der α -Teilchen, eine Methode, die schon beim Radium erwähnt wurde.

Die dem Radium folgenden Umwandlungsprodukte der Uran-Radiumreihe haben wir bis zum Radium C schon früher kennen gelernt. Nach einigen weiteren Umwandlungen gelangt die Reihe zum Radium F, auch Polonium genannt, das seinerzeit ein besonderes Interesse beanspruchte, weil es das erste von Frau Curie in der Pechblende entdeckte Radioelement war. Die Halbwertszeit des Radiums F beträgt 136 Tage.

Die Kurzlebigkeit der allermeisten Abkömmlinge des Radiums erklärt es, weshalb man diese Elemente nur in winzigen Mengen erhalten kann. Denn aus dem über das Mengenverhältnis $Ra:U$ in Mineralien Gesagten folgt, daß man von 1 g Radium im Gleichgewicht mit der Emanation und dem kurzlebigen aktiven Niederschlag nur etwa $\frac{3}{100000}$ mg Radium B erhalten kann. Kein Wunder, daß dieses Element nur als unsichtbarer Beschlag zum Vorschein kommt. Dank seiner radioaktiven Eigenschaften kann man aber selbst 10^{-16} g Radium B nachweisen und erkennen.

Das Polonium hinterläßt nach seiner Umwandlung keinen radioaktiv nachweisbaren Rückstand mehr, so daß man annehmen muß, daß das Umwandlungsprodukt des Radiums F — das Radium G — ein sehr beständiges Element ist. Man nennt es deshalb das Endprodukt der Uran-Radiumreihe, mit ihm werden wir uns noch eingehend zu beschäftigen haben.

Die Umwandlungen der Thoriumreihe führen zunächst vom Thorium, dem Hauptbestandteile der Gasglühstrümpfe, zu den in der Medizin gut bekannten Elementen Mesothorium, Radiothorium und Thorium X, welche letzteres seinerseits eine der Radiumemanation sehr ähnliche, aber noch viel kurzlebigere Emanation

tion liefert. Nach einer Reihe von weiteren Umwandlungen, die denen der Radiumreihe weitgehend entsprechen, bricht die Thoriumreihe ab. Auf die stabilen Produkte, zu denen sie führt, werden wir noch zurückkommen.

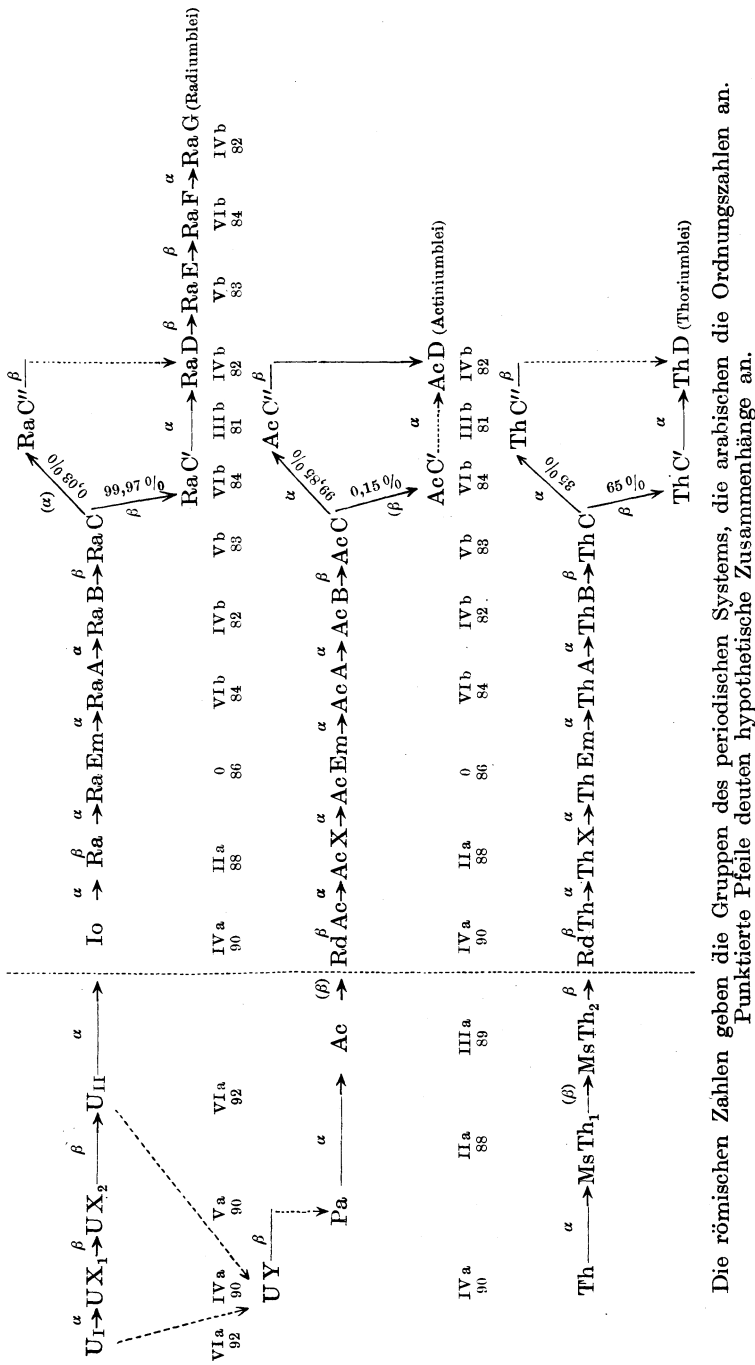
Das Actinium, dem die dritte der bekannten radioaktiven Reihen ihren Namen verdankt, konnte bis jetzt in chemisch reinem Zustande nicht erhalten werden, da es wegen seiner verhältnismäßig kleinen Lebensdauer von etwa 20 Jahren nur in winzigen Mengen vorkommt. Es wurde von A. Debierne und namentlich von F. Giesel (1899 bis 1900) aus der Pechblende mit den Elementen der seltenen Erden (Lanthan) abgeschieden und kann bis jetzt nur auf Grund seiner radioaktiven Eigenschaft charakterisiert werden. Die Umwandlungen der Actiniumreihe sind denen der anderen Reihen ganz analog.

Alle diese vielen Umwandlungen lassen sich in zwei Gruppen einteilen (Tabelle 5). Die eine Art haben wir schon kennen gelernt: sie beruht auf der Spaltung des Atoms in das nächste Atom der Reihe und ein Heliumatom, das in Form eines α -Teilchens ausgeschleudert wird. Man nennt diese Umwandlungen α -Strahlenumwandlungen oder α -Umwandlungen und die Elemente, die ihnen unterliegen, α -Strahler. Die andere Art von Umwandlungen sind die sogenannten β -Strahlenumwandlungen oder β -Umwandlungen; bei ihnen werden die β -Strahlen, d. h. negative Elektronen, abgegeben. Die Buchstaben α und β über den Pfeilen, die die Umwandlungen der betreffenden Elemente in der Tabelle 5 andeuten, zeigen die Art der Umwandlung an ¹⁾.

Bei den Umwandlungen des Actiniums und des Mesothorium 1 konnten keine Strahlen nachgewiesen werden. Es ist aber wahrscheinlich (vgl. S. 46), daß hier sehr weiche (wenig durchdringende) β -Strahlen vorliegen, die aufzufinden Schwierigkeiten bereitet. Wie auch aus Tabelle 5 zu ersehen ist, scheinen in drei Fällen, nämlich beim Radium, Radiothorium und Radioactinium, beide Arten von Strahlen emittiert zu werden. Es ist aber möglich, daß die Umwandlungen der betreffenden Elemente von komplizierterer Natur sind als die bisher besprochenen. Wir kennen nämlich einige

¹⁾ Die meisten β -Strahler emittierten außer den β - auch noch γ -Strahlen, wie aus den Tabellen 2 bis 4 hervorgeht.

Tabelle 5. Die drei radioaktiven Reihen.



Die römischen Zahlen geben die Gruppen des periodischen Systems, die arabischen die Ordnungszahlen an. Punctierte Pfeile deuten hypothetische Zusammenhänge an.

Fälle, wo ein Element zwei verschiedenen Umwandlungen unterliegt. Das sieht man vor allem beim Radium C, Actinium C und Thorium C. Ein Teil der Atome dieser Elemente unterliegt α -Strahlenumwandlungen, wobei die β -Strahler Radium C'', Actinium C'' und Thorium C'' entstehen; die übrigen Atome erleiden β -Strahlenumwandlungen, welche zu den α -Strahlern RaC', AcC und ThC' führen. Die radioaktiven Reihen weisen also bei diesen Elementen eine Verzweigung auf. Sehr interessant sind die bei diesen Verzweigungen auftretenden quantitativen Verhältnisse. Beim Thorium C erleiden 35 Proz. aller Atome die α -Umwandlung, die übrigen 65 Proz. die β -Umwandlung. Beim Radium C wandeln sich beinahe alle Atome mit Aussendung von β -Strahlen um und nur etwa 3 von 10 000 unterliegen einer α -Umwandlung. Beim Actinium C hingegen erleiden die allermeisten Atome die α -Umwandlung und nur etwa 0,15 Proz. eine β -Umwandlung.

Das von G. Antonoff gefundene Element Uran Y stellt auch ein Abzweigungsprodukt am Anfange der Uranreihe vor. Doch ist es noch unsicher, ob es aus Uran I oder Uran II gebildet wird.

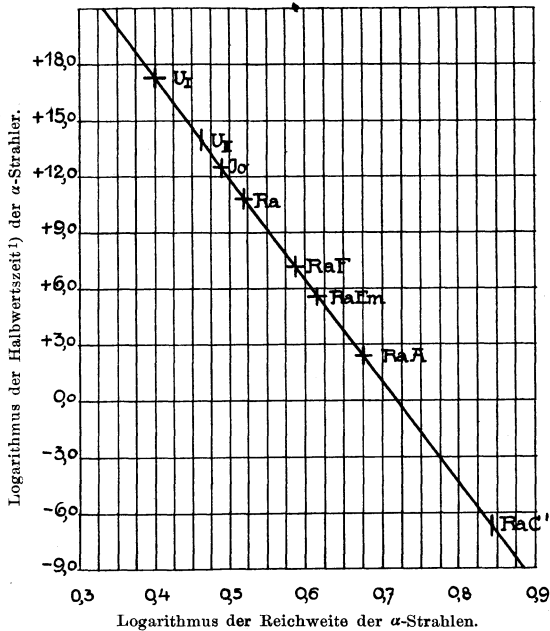
Es sei an dieser Stelle schon erwähnt, daß die Actiniumreihe ebenfalls eine Abzweigung von der Uranreihe vorstellt, worüber weiter unten noch Näheres mitgeteilt wird.

Bevor wir die Besprechung der radioaktiven Eigenschaften der Radioelemente abschließen, sei noch darauf hingewiesen, daß ihre Halbwertszeiten zwischen den so enorm voneinander entfernten Grenzen wie 10^{10} Jahre beim Thorium und 10^{-11} Sekunden beim Thorium C'' liegen. Wie man die Halbwertszeit sehr langlebiger Elemente bestimmt, wurde schon am Beispiele des Radiums und Urans erläutert, nicht minder interessant ist es zu sehen, wie man zur Ermittlung einer ganz kleinen Lebensdauer gelangt.

Durch direkte experimentelle Methoden ist es gelungen, Halbwertszeiten bis zu 0,002 Sekunden hinab zu messen. Noch weiter, allerdings nur auf indirektem Wege, gelangt man mit Hilfe einer bemerkenswerten, von H. Geiger (1911) entdeckten, quantitativen Beziehung zwischen der Halbwertszeit der Elemente und der Reichweite der von ihnen emittierten α -Strahlen. Wie man schon qualitativ aus den Tabellen 2 bis 4 ersehen kann, steigt innerhalb jeder radioaktiven Familie die Reichweite mit fallender

Lebensdauer. Trägt man, wie in Fig. 3 für die Uran-Radiumreihe geschehen ist, die Logarithmen der Reichweiten gegen die Logarithmen der Halbwertszeiten in ein Diagramm ein, so liegen die für die Glieder einer Familie erhaltenen Kreuze auf einer geraden Linie. Aus ihr kann man z. B. entnehmen, daß das Uran II, dessen α -Strahlen eine Reichweite von 2,90 cm aufweisen, die auf anderem Wege bis jetzt nicht bestimmbare Halbwertszeit von

Fig. 3.



2×10^6 Jahren besitzen muß, um der Beziehung zu entsprechen. Nun weisen die α -Strahlen der Elemente RaC', ThC', AcC' so große Reichweiten auf, daß man der Geigerschen Beziehung nur dann gerecht werden kann, wenn man annimmt, daß sie von sehr kurzlebigen Elementen mit den Halbwertszeiten von etwa 10^{-6} , 0,005 und 10^{-11} Sekunden emittiert werden. Natürlich kann von einer Isolierung so kurzlebiger Elemente keine Rede sein (12).

1) Ausgedrückt in Sekunden.

III. Chemie der Radioelemente.

Wir haben gesehen, daß es mit Hilfe radioaktiver Methoden gelungen ist, etwa 35 neue Elemente zu entdecken. Schon frühzeitig hat man sich die Frage vorgelegt, wie denn das Verhältnis dieser vielen Radioelemente zu den übrigen gewöhnlichen Elementen und namentlich zum periodischen System ist, das immer den Anspruch erhob, alle bekannten Elemente zu umfassen und für jedes neue einen eigenen Platz bereitzuhalten. Um verständlich zu machen, weshalb die Beantwortung dieser Frage zunächst große Schwierigkeiten bereitet hat, wollen wir vor allem über die Atomgewichte der Radioelemente berichten, denn auf Grund dieser Eigenschaft wurden ja gewöhnlich die Elemente in das System eingereiht.

1. Atomgewichte der Radioelemente.

Die allermeisten Radioelemente sind, wie gezeigt wurde, wegen ihrer Kurzlebigkeit nur in so außerordentlich kleinen Mengen zugänglich, daß an eine direkte Atomgewichtsbestimmung wenigstens mit den gewöhnlichen chemischen Methoden nicht zu denken ist. In den zwischen den Radioelementen bestehenden genetischen Beziehungen besitzen wir aber doch einen Weg, um ihr A. G. zu ermitteln. Bei α -Strahlenumwandlungen wird ja ein Heliumatom abgespalten, so daß zu erwarten ist, daß das Atomgewicht des Umwandlungsproduktes um das A. G. des Heliums (4,00) kleiner ist als das A. G. des sich umwandelnden Elementes. Andererseits findet bei β -Strahlenumwandlungen nur der Verlust eines Elektrons statt, dessen Masse $\frac{1}{1830}$ der des Wasserstoffatoms ist. Aber selbst diese kleine Atomgewichtsveränderung findet bei β -Umwandlungen nicht statt. Denn nach Abgabe eines negativ geladenen β -Teilchens bleibt das entstehende Atom positiv geladen zurück und wird von außen ein negatives Elektron wieder aufnehmen, um neutral zu werden. Nach β -Umwandlungen ist also das Atomgewicht des Umwandlungsproduktes gleich dem seiner direkten Muttersubstanz.

Zu berücksichtigen ist noch die Änderung der Masse, die nach dem Relativitätsprinzip wegen der Änderung des Energiegehaltes der Atome bei radioaktiven Umwandlungen zu erwarten ist. Wie R. Swinne berechnet hat, ist diese Änderung indessen so klein, daß wir sie nur bei sehr genauem Vergleich der Atomgewichte weit auseinander liegender Glieder einer radioaktiven Reihe zu berücksichtigen haben werden.

Auf obige Weise kann man nun das A. G. aller Radioelemente berechnen, die der Uran-Radium- und der Thoriumreihe an gehören, weil ja sowohl das A. G. des Urans (238,2) wie das des Thors (232,12) bekannt ist¹⁾ und auch alle Umwandlungen, die in diesen zwei Reihen vorkommen, genau studiert sind. Daß diese Methode mit beträchtlicher Annäherung richtige Resultate ergibt, folgt daraus, daß man so für das A. G. des Radiums $238,2 - 12,0 = 226,2$ bekommt, also einen Wert, der in der Tat ziemlich nahe mit dem wirklichen, dank den schönen Untersuchungen von O. Hönigschmid mit großer Genauigkeit bekannten A. G. des Radiums (225,97) übereinstimmt. Für die kleine bestehende Diskrepanz fehlt allerdings noch eine befriedigende Erklärung.

Das A. G. des Actiniums ist noch nicht sicher bekannt. Doch folgt aus später noch zu besprechenden Beziehungen, daß es in der Nähe von 226 liegen dürfte, so daß man auch die Atomgewichte aller Produkte der Actiniumreihe annähernd berechnen kann. Auf diese Weise ergibt es sich (vgl. Tabellen 2 bis 4), daß die Atomgewichte aller dieser Elemente, etwa 40 an der Zahl, zwischen den Werten 238 und 206 liegen (13). Ein Blick auf die Tabelle des periodischen Systems lehrt, daß in diesem Atomgewichtsintervall die Zahl der im System verfügbaren Plätze so klein ist, daß es nicht möglich ist, jedem der neuen Elemente eine eigene Stelle zuzuweisen. Der Versuch, Elemente, die durch β -Umwandlungen miteinander verknüpft sind und deshalb das gleiche A. G. besitzen, eine gemeinsame Stelle im System zuzuweisen, ergab auch keine Lösung des Problems.

Eine solche wurde erst gefunden, als man

¹⁾ Diese Werte sind den Bestimmungen von O. Hönigschmid entnommen.

2. Die chemischen Eigenschaften der Radioelemente

in den Vordergrund der Betrachtungen stellte. Es darf nicht wundern, wenn es erst verhältnismäßig spät gelungen ist, zu voller Klarheit über das chemische Verhalten der Radioelemente zu gelangen. Die allermeisten dieser Stoffe können ja wegen ihrer kurzen Lebensdauer nicht in wägbaren Mengen in reinem Zustande erhalten werden, so daß man sich bei der Untersuchung ihrer chemischen Eigenschaften auf das Studium ihres Verhaltens bei Reaktionen anderer in größeren Mengen beigemischter Elemente beschränken muß. Bei der Deutung der auf diesem Wege ermittelten Tatsachen stieß man jedoch auf das schwerwiegende Bedenken, ob es erlaubt ist, aus dem Verhalten der Radioelemente, das sie in winzigen Quantitäten zeigen, Rückschlüsse auf ihre chemischen Eigenschaften zu ziehen, die sie in wägbaren Mengen aufweisen würden. Diesbezügliche Zweifel schwanden erst, als man einer zuerst im Jahre 1907 von H. McCoy und W. Ross beim Radiothorium und Thorium beobachteten prinzipiell neuen Erscheinung die volle Aufmerksamkeit schenkte, nämlich der Unmöglichkeit, manche radioaktiven Elemente voneinander oder von gewöhnlichen Elementen auf chemischem Wege zu trennen.

Um die Bedeutung dieser Erscheinung würdigen zu können, muß man sich vergegenwärtigen, daß der gewöhnliche Weg zur Erkennung neuer Elemente in deren Isolierung aus Gemischen mit anderen Elementen mit Hilfe einer der eingangs erwähnten chemischen oder physikalisch-chemischen Methoden bestand. Ein außerordentlich wertvolles Mittel zur Auffindung neuer Elemente hat bekanntlich die Spektroskopie geliefert. Jedesmal, wenn man ein neues Linienspektrum beobachtete, gelang es auch durch die genannten Methoden seinen Träger als ein neues Element zu isolieren. Nun kam das neue Hilfsmittel hinzu — die Radioaktivität, und wir besprachen ja schon ausführlich die mit ihrer Hilfe entdeckten und in reinem Zustand isolierten Elemente Radium und Radiumemanation. Ebenso wurde die Aktivität des aus der Pechblende isolierten Wismuts bzw. Lanthans den neuen Elementen Polonium und Actinium zugeschrieben, und wenn es auch wegen ihres spär-

lichen Vorkommens noch nicht gelungen ist, sie in reinem Zustande zu isolieren, konnte gezeigt werden, daß sie von allen bekannten Elementen chemisch trennbar sind, und daß dem Polonium (nach W. Marckwald, 1902) die früher freie Stelle eines höheren Homologen des Tellurs, dem Actinium die eines höheren Homologen des Lanthans (vgl. Tabelle 9) zukommt. In diesen Fällen kommen also die neuen radioaktiven Eigenschaften auch chemisch neuen Individuen zu.

Es zeigte sich aber, daß dieses Verhalten durchaus nicht für alle Radioelemente zutrifft. So ist z. B. das Blei, das man aus Uranmineralien abscheidet, immer aktiv, wobei die nähere radioaktive Untersuchung bewies, daß für diese Aktivität das Radium D (mit seinen Umwandlungsprodukten Radium E und Radium F) verantwortlich ist, ein Element, dessen Halbwertszeit 16 Jahre beträgt. Man versuchte, das Ra D vom Blei der Pechblende zu trennen, aber alle Bemühungen waren erfolglos: es gibt keine Reaktion, durch die sich Ra D vom Blei unterscheiden würde, und auch die ausgedehntesten, besonders von F. Paneth und G. v. Hevesy (1913) ausgeführten Versuche, durch fraktionierte Fällung, Oxydation, Kristallisation oder Verflüchtigung eine Anreicherung von Ra D aus dem Gemisch mit Blei zu erreichen, führten zu völlig negativen Resultaten. Nach allen Operationen bleibt das Mengenverhältnis des Ra D zum Blei unverändert, die Aktivität des Ra D pro Gewichtseinheit des Bleies ließ sich selbst durch 1000 Kristallisationen (Th. W. Richards und N. F. Hall, 1917) (14) nicht merklich ändern. Diese zwei Elemente sind also mit chemischen Methoden untrennbar, und doch stellt ja natürlich das Radium D ein anderes Element als Blei vor: man kann es frei von Blei erhalten durch Zersetzung von Radiumemanation, und wir können es immer durch seine radioaktiven Eigenschaften leicht erkennen und vom Blei unterscheiden.

Ebenso verhält es sich mit dem Thorium, das aus Uranpechblende abgeschieden wird. Es ist etwa 100000 mal aktiver als das gewöhnliche Thorium; der Träger dieser Aktivität ist das vorher besprochene Ionium, die Muttersubstanz des Radiums; es gelang aber auch hier nicht, das Ionium in einem Gemisch mit Thorium anzureichern. Das von O. Hahn entdeckte technisch wichtige

Mesothorium I und Radium stellen ebenfalls zwei Elemente vor, die sich zwar leicht durch ihre radioaktiven Eigenschaften unterscheiden lassen, indessen durch chemische Methoden völlig untrennbar zu sein scheinen, wie dies W. Marckwald und besonders F. Soddy (1911) zeigten.

Solche Elemente zeigen somit einen Grad von chemischer Analogie, wie er vor der Entdeckung der Radioaktivität nicht bekannt war. Würde es gelingen, Radium D, Ionium oder Mesothorium I in genügend großen Mengen in reinem Zustande zu isolieren, so würden sie von einem Chemiker auf Grund einer qualitativen Analyse als Blei¹⁾, Thorium bzw. Radium angesehen werden. Nur den radioaktiven Methoden ist es zu verdanken, daß man überhaupt diese Elemente als neue Individuen erkannt hat.

Diese Erscheinung wiederholt sich nun bei den meisten Radioelementen und sie erklärt uns die früheren Schwierigkeiten, die die Einordnung der Radioelemente in das periodische System bereitete.

Denn das periodische System weist offenbar nur so viele Stellen auf, wie die Zahl der Elemente beträgt, die man durch chemische oder physikalisch-chemische Methoden von allen anderen Elementen trennen kann. Wir müssen deshalb solchen Elementen, die chemisch untrennbar sind, eine gemeinsame Stelle im System zuweisen.

Nun zeigte die chemische Untersuchung aller Radioelemente, die dazu nicht zu kurzlebig waren, daß sie sich in zwei Gruppen einteilen lassen: auf der einen Seite haben wir außer den schon lange bekannten Elementen Uran und Thor noch die mit Hilfe radioaktiver Methoden entdeckten Polonium, Radiumemanation, Radium, Actinium und Protactinium (vgl. S. 42), deren besondere chemische Eigenschaften beweisen, daß ihnen je eine eigene Stelle im periodischen System entspricht.

¹⁾ In der Tat konnten G. v. Hevesy und F. Paneth (14) zeigen, daß ein von ihnen nach Zerfall von Radiumemanation elektrolytisch hergestellter, eben sichtbarer Beschlag vom Superoxyd des Ra D sich elektrochemisch dem Bleisuperoxyd ganz gleich verhielt.

Zu der zweiten Gruppe gehören die übrigen Radioelemente, die entweder von einem der soeben genannten Radioelemente oder von Wismut, Blei bzw. Thallium durch die gewöhnlichen Methoden nicht getrennt werden können, das heißt in qualitativ-chemischer Hinsicht mit einem dieser Elemente völlig übereinstimmen (15).

3. Stellung der Radioelemente im periodischen System.

Es ergibt sich somit, daß trotz der großen Zahl neuer Elemente, die wir dank der Radioaktivität kennen gelernt haben, die Zahl der Elemententypen verschiedenen qualitativ-chemischen Verhaltens nicht größer ist, als es das periodische System zuläßt. Wenn man den chemisch untrennbaren Elementen einen gemeinsamen Platz im System zuweist, ergibt sich die Tabelle 6. In ihr sind die Elemente von unten nach oben nach fallenden Atomgewichten angeordnet¹⁾, wobei die ganze Tabelle den letzten zwei Horizontalreihen des Systems entspricht. Die Zugehörigkeit der allermeisten Elemente zu den betreffenden Gruppen ist experimentell sichergestellt; bei den ganz kurzlebigen Elementen wurde sie auf Grund später noch (S. 46) zu erwähnender Gesetzmäßigkeiten abgeleitet.

Wie man sieht, befinden sich z. B. an der Stelle, wo im gewöhnlichen System das Blei steht (Gruppe IVb), nicht weniger als sieben Elemente²⁾, und es weist fast jede Stelle des Systems vom Uran bis Thallium eine Gruppe von mehreren Elementen auf. Eine solche Gruppe wird nach dem Vorschlage des Verfassers Plejade genannt; die Glieder einer Plejade bezeichnet man nach F. Soddy als isotope Elemente oder Isotope. Eine Plejade umfaßt also Elemente vom gleichen chemischen Typus.

Bei den letzten Betrachtungen haben wir nur die chemischen Eigenschaften der Radioelemente berücksichtigt. Nach der üblichen Auffassung entspricht aber eine Stelle im periodischen System nicht nur einem bestimmten chemischen Typus, sondern auch einem bestimmten Atomgewicht, und es galt ja als Grundlage des

¹⁾ Der Einfachheit halber sind die Atomgewichte auf ganze Zahlen abgerundet.

²⁾ Wenn man das nicht näher bekannte Actinium D (Actiniumblei, vgl. S. 52 bis 54) nicht mitzählt.

Tabelle 6. Die Radioelemente

Atom- gewichte	0	I		II		III	
	(VIII)	a	b	a	b	a	b
197		Au					
200				Hg			
204						Tl	
206							
(206)						β AcC'' 4,7 m	
207							
208						β ThC'' 3,1 m	
210						β RaC'' 1,4 m	
(210)							
212							
214							
(214)							
216							
218							
(218)	α AcEm 3,9 s						
220	α ThEm 54 s						
222	α RaEm 3,85 d						
(222)				α AcX 11,5 d			
224		—		α ThX 3,7 d			
226				α Ra 1700 a			
(226)						β Ac 20 a	
228				(β)MsTh ₁ 6,7 a		β MsTh ₂ 6,2 h	
230							
(230)							
232							
234							
238							

a = Jahr, d = Tag, h = Stunde, m = Minute, s = Sekunde. Die staben α und β geben die Art der Umwandlung an, der die Elemente Gruppe und A. G.-Verminderung um vier Einheiten statt, bei β -Umverändert. Die eingeklammerten Atomgewichte des Pa, UY und der

im periodischen System.

IV		V		VI		VII		Atom- gewichte
a	b	a	b	a	b	a	b	
								197
								200
								204
								206
								(206)
								207
								208
								210
								(210)
								212
								214
								(214)
								216
								218
								(218)
								220
								222
								(222)
								224
								226
								(226)
								228
								230
								(230)
								232
								234
								238

Zeitangaben bedeuten die Halbwertszeiten der Elemente, die Buchunterliegen. Bei α -Umwandlung findet Verschiebung zur zweitniedrigeren wandlung Verschiebung zur nächsthöheren Gruppe, A. G. bleibt unglieder der Actiniumreihe sind hypothetisch.

periodischen Systems, daß das A. G. eindeutig die chemischen Eigenschaften eines Elementes bestimmt. Unsere Tabelle 6 lehrt nun in dieser Hinsicht etwas vollkommen Neues: sie zeigt, daß nicht nur Elemente einer Plejade, die ja vollkommen gleiches chemisches Verhalten zeigen, bis um acht Einheiten verschiedene Atomgewichte aufweisen, sondern daß auch Elemente von gleichem Atomgewicht, wie z. B. RaD, RaE und RaF, einen vollkommen verschiedenen chemischen Charakter besitzen. Die so oft diskutierte, als Ausnahme vom periodischen Gesetz geltende Tatsache, daß das als Halogen in eine höhere (siebente) Gruppe gehörende Jod ein kleineres A. G. hat als das einer niedrigeren (sechsten) Gruppe angehörende Tellur, ist in den untersten zwei Reihen des periodischen Systems zwischen Uran und Thallium eine oft wiederkehrende Erscheinung. So ist das A. G. des in die Bleiplejade gehörenden Radiums B (214) um sechs Einheiten größer als das des Wismuts (208) der fünften Gruppe.

Diese ganz neuartigen überaus wichtigen Ergebnisse machen eine gründliche Revision unserer Anschauungen über die Beziehungen zwischen dem Atomgewicht und den anderen Eigenschaften der Elemente erforderlich. Sie ändern aber nichts an der Tatsache, daß in dem nicht radioaktiven Teil des periodischen Systems von Stelle zu Stelle mit sehr wenigen Ausnahmen eine mehr oder minder regelmäßige Änderung des Atomgewichtes stattfindet. Es entsteht somit die Frage, ob den letzten zwei Reihen des Systems in dieser Hinsicht eine Ausnahmestellung zukommt. Folgende Überlegung zeigt, daß dies wohl nicht der Fall wäre, wenn uns hier, wie in den anderen Teilen des Systems, nur chemische Methoden zur Verfügung ständen. Man würde dann das A. G. der als ein unzerlegbares Element erscheinenden Plejade experimentell bestimmen und dabei einen Mittelwert erhalten, den die einzelnen Glieder der Plejade nach Maßgabe ihrer Mengen im Gemisch beeinflussen würden. Das Verhältnis dieser Mengen hängt aber in erster Linie von der Lebensdauer der betreffenden Elemente ab, und da in den meisten Plejaden eines der Glieder viel langlebiger ist oder in viel größeren Mengen vorkommt als die übrigen, kann man mit genügender Annäherung sein A. G. als das in das perio-

dische System passende ansehen. Verfährt man auf diese Weise, so bekommt man für die mittleren Atomgewichte der Plejaden Werte, welche den in der Tabelle 6 fett gedruckten Elementen gehören (vgl. auch Tabelle 2 bis 4), und man sieht, daß die Atomgewichte der Elemente¹⁾ einer Horizontalreihe der gewöhnlichen Tabelle des Systems von rechts nach links mehr oder weniger regelmäßig abnehmen²⁾, ähnlich wie in den übrigen Reihen des periodischen Systems; es verschwindet somit auf diese Weise die wirkliche Unregelmäßigkeit der Atomgewichte, die die vielen Elemente verursachen.

Es ergibt sich also, daß, wenn uns nur chemische Methoden zur Verfügung stehen würden, der von Uran bis Thallium reichende Teil des periodischen Systems sich durch nichts von dem übrigen Teil unterscheiden würde, und daß wir es nur den radioaktiven Methoden zu verdanken haben, wenn es gelungen ist, die tatsächliche, in jenem Teil herrschende große Mannigfaltigkeit der Elemente kennen zu lernen. In den radioaktiven Methoden besitzen wir also ein überaus wertvolles Mittel zur Erkennung von Elementen, und wie die Existenz der Isotopen beweist, ist dieses neue Mittel viel feiner als die qualitative chemische Analyse. Auf Grund dieser hat man z. B. auch das Uran bis vor kurzem für ein einheitliches Element gehalten, während es, wie wir gleich sehen werden, jetzt als ein Gemisch zweier isotoper Elemente Uran I und Uran II angesehen werden muß (16).

IV. Die Verschiebungssätze und ihre Anwendungen.

1. Allgemeines.

In der Tabelle 6 scheinen die Elemente zusammenhanglos dazustehen. Wir wissen aber, daß sie durch die genetischen Beziehungen verknüpft sind, die in den drei radioaktiven Reihen zur Geltung kommen, und es fragt sich, ob denn nicht ein Zusammen

¹⁾ Vielleicht mit Ausnahme des Protactiniums (Pa), vgl. S. 49.

²⁾ Vgl. auch Tabelle 9.

hang besteht zwischen der Reihenfolge der Elemente in den Umwandlungsreihen einerseits und ihrer Stellung im periodischen System andererseits. Dies ist in der Tat der Fall. Nachdem Soddy (1911) wichtige Ansätze zur Aufklärung der hier geltenden Gesetzmäßigkeiten gemacht hatte, wurden diese in ihrer vollen Allgemeinheit im Jahre 1913 vom Verfasser und bald darauf von Soddy aufgestellt (15).

Es handelt sich dabei um folgende zwei Sätze, die die beiden Arten von Umwandlungen, die wir früher kennen gelernt haben, nämlich die α -Strahlenumwandlungen und β -Strahlenumwandlungen scharf voneinander trennen.

1. Nach einer α -Umwandlung findet man das entstandene Element zur zweitniedrigeren Gruppe des periodischen Systems (zwei Gruppen nach links in einer Horizontalreihe) von seiner Muttersubstanz verschoben.

2. Nach einer β -Umwandlung findet eine Verschiebung zur nächsthöheren Gruppe (um eine Gruppe nach rechts) statt.

So sehen wir (vgl. Tabelle 5 und 6), daß die α -Umwandlung des in die Gruppe IVa gehörenden Ioniums das Glied der Gruppe IIa das Radium ergibt, von welchem eine weitere α -Umwandlung zur Emanation führt, die in der nullten Gruppe ihren Platz findet. Bei der β -Umwandlung sehen wir dagegen einen Übergang vom Radium D der Gruppe IVb zum Radium E der Gruppe Vb und von diesem zum Radium F der Gruppe VIb. Diese zwei „Verschiebungssätze“ gelten auch in der Thorium- und der Actiniumreihe ausnahmslos.

Zur Zeit der Aufstellung dieser Sätze war die chemische Natur vieler Radioelemente noch unbekannt, und die diesbezüglichen auf Grund der neuen Sätze vom Verfasser gemachten Voraussagen haben sich ausnahmslos bestätigt. Von besonderem Interesse ist es aber, daß es an der Hand der Verschiebungssätze gelungen ist, zwei neue Radioelemente zu entdecken, nämlich das Uran X₂ und das Protactinium, denen beiden die vorher freie Stelle in der fünften Gruppe und letzten Horizontalreihe des periodischen Systems zukommt.

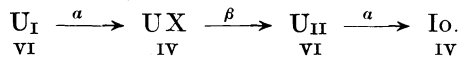
2. Uran X₂.

Vor der Aufstellung der Verschiebungssätze hat man auf Grund von rein radioaktiven Tatsachen die Umwandlungen am Anfange der Uranreihe durch folgendes Schema dargestellt:



Das Element Uran II ist bis jetzt nicht isoliert worden, seine Existenz ergibt sich aber aus dem von H. Geiger und J. M. Nuttall geführten Nachweis, daß das von den Chemikern für ein einheitliches Element gehaltene Uran zwei Arten von α -Strahlen mit verschiedener Reichweite aussendet. Daraus und auf Grund der von denselben Forschern aufgestellten S. 29 erwähnten Beziehung zwischen Lebensdauer der α -Strahler und der Reichweite der von ihnen emittierten α -Strahlen folgt, daß das Uran ein Gemisch zweier Elemente (Uran I und Uran II) von verschiedener Lebensdauer sein muß, und zwar ergibt sich aus dieser Beziehung die Halbwertszeit des Urans II zu etwa 2×10^6 Jahren (vgl. Fig. 3). Da es nicht möglich war, das Uran II vom Uran (Uran I) auf chemischem Wege zu trennen, muß man folgern, daß diese zwei Elemente isotop sind, also beide in die Gruppe VIa gehören¹⁾.

Der Versuch, auf das obige Schema die Verschiebungssätze anzuwenden, führte zu einem doppelten Widerspruch: weder die α -Umwandlung des Urans I noch die β -Umwandlung des UX wäre danach von der geforderten Verschiebung begleitet, denn auch UX und Ionium sind isotop, sie gehören beide der Thoriumplejade an. Das obige Schema wurde deshalb von Soddy, A. S. Russell u. a. folgendermaßen umgestellt:



¹⁾ Obwohl das Uran ein Gemisch von Uran I und Uran II darstellt, deren Atomgewichte um vier Einheiten differieren müssen, entspricht das experimentell bestimmte A. G. des Urans 238,2 praktisch dem Uran I. Denn die Mengen des Urans I und Urans II stehen in dem aus den Mineralien isolierten Gemisch im radioaktiven Gleichgewicht miteinander und verhalten sich deshalb zueinander wie die Halbwertszeiten der Elemente, also wie $2 \times 10^6 : 5 \times 10^9$, woraus folgt, daß Uran II nur eine Beimengung unter 1 pro Mille bildet.

Letzteres Schema war vom radioaktiven Standpunkte aus ebenso annehmbar wie das vorige. Nach diesem Schema würde aber die β -Umwandlung des UX eine Verschiebung statt um eine Gruppe eine solche um zwei Gruppen hervorrufen. Russell und der Verfasser stellten deshalb die Hypothese auf, daß das UX aus zwei Elementen besteht, welche β -Strahlen emittieren und daß also das richtige Schema lautet:



In der Tat haben Versuche, die zur Prüfung dieser Hypothese vom Verfasser mit O. Göhring unternommen wurden, zur Isolierung des unbekanntes Elementes UX_2 (Uran X_2) geführt (1913). Es erwies sich als ein kurzlebiges, β -Strahlen emittierendes Produkt mit einer Halbwertszeit von 1,15 Minuten. Die Entdeckung des UX_2 wurde dadurch wesentlich erleichtert, daß man auf Grund des letzteren Schemas seine Zusammengehörigkeit zur Gruppe Va des periodischen Systems voraussehen konnte. Es mußte also ein höheres Homologe des Tantals vorstellen. In der Tat wurde das Uran X_2 unter anderem zusammen mit Tantalsäure aus UX auf chemischem Wege abgetrennt, ähnlich wie man z. B. das Radium aus einem Gemisch mit anderen Elementen am besten mit Barium abscheiden kann.

Da das UX_2 eine vorher unbesetzte Stelle im periodischen System einnimmt, hat es einen neuen Namen erhalten, seiner Kurzlebigkeit wegen wurde es Brevium genannt (vgl. S. 45).

3. Protactinium, die Muttersubstanz des Actiniums.

Der vor kurzem erfolgten Entdeckung dieses Elementes kommt eine besondere Bedeutung zu, da sie gleichzeitig eine wesentliche Klärung der Frage der Actiniumgenese brachte.

Das Actinium ist, wie man bereits seit längerer Zeit vermutete, kein sehr langlebiges Element, seine Halbwertszeit beträgt nach den kürzlich veröffentlichten, sich über mehrere Jahre erstreckenden Messungen von O. Hahn und L. Meitner (17) nur etwa 20 Jahre. Es muß also eine langlebige Muttersubstanz besitzen und, da es stets einen Bestandteil der Uranminerale bildet, mußte man einen gene-

tischen Zusammenhang der Actiniumreihe mit der Uran-Radiumreihe annehmen. Die sich aus dieser Ansicht ergebende Forderung, daß zwischen den Aktivitäten des Urans und des Actiniums in verschiedenen Mineralien ein konstantes Verhältnis bestehen muß darf man nach B. Boltwood als erfüllt ansehen. Nun zeigte aber dieser Forscher, daß die Aktivität des Actiniums und seiner Umwandlungsprodukte in den Mineralien bedeutend kleiner ist, als zu erwarten wäre, wenn die auch sonst sehr unwahrscheinliche Annahme zutreffen würde, daß die Actiniumreihe eine direkte Fortsetzung der Uran-Radiumreihe bildet. Rutherford schloß deshalb schon im Jahre 1906, daß die Actiniumreihe eine Abzweigung von der Uran-Radiumreihe vorstellt, und zwar in der Weise, daß eines von den Gliedern letzterer Reihe einer doppelten Umwandlung unterliegt, indem sich 92 Proz. seiner Atome in das nächste Glied der Uran-Radiumreihe umwandeln, und nur die Umwandlung der übrigen 8 Proz. zur Actiniumreihe führt. Derartige doppelte Umwandlungen und Verzweigungen wurden ja später in der Tat bei den C-Gliedern, zuerst für das Ra C (Fajans 1911), direkt nachgewiesen.

Es blieb aber lange Zeit unklar, an welcher Stelle der Uran-Radiumreihe die Abzweigung der Actiniumreihe stattfindet, denn alle Versuche, eine Bildung des Actiniums aus einem der Glieder der Uranreihe nachzuweisen, blieben erfolglos. Erst die Verschiebungssätze wiesen neue Wege für die Untersuchung auch dieser Frage.

Das ganze chemische und elektrochemische Verhalten des Actiniums, das mit seltenen Erden aus der Pechblende abgeschieden wird, läßt keinen Zweifel darüber, das ihm die vorher freie Stelle in der dritten Gruppe (III a) und letzten Horizontalreihe des periodischen Systems zukommt. Faßt man also die zwei bekannten Arten von Umwandlungen, die α - und die β -Umwandlungen ins Auge, so könnte das Actinium entweder durch eine α -Umwandlung aus einem Element der Gruppe V a, d. h. aus einem Glied der Breviumplejade oder durch eine β -Umwandlung aus einem Element der Gruppe II a, d. h. einem Glied der Radiumplejade entstehen. Das einzige bekannte Element der Breviumplejade, das UX_2 , sendet aber keine α -Strahlen aus und kam auch aus dem Grunde

nicht als Muttersubstanz des Actiniums in Frage, weil es sonst leicht gelingen müßte, die direkte Bildung des Actiniums aus Uran nachzuweisen. Als Element der zweiten Gruppe kam in der Uran-Radiumreihe nur das Radium selbst in Betracht. Dieses liefert einerseits α -Strahlen, was mit der Verschiebung um zwei Gruppen bei der Bildung der Emanation im vollen Einklang steht. Andererseits findet man aber beim Radium auch β -Strahlen und diese könnten als ein Anzeichen einer zweiten Umwandlung in ein Element der dritten Gruppe aufgefaßt werden, ähnlich wie im Falle der Verzweigungen bei den C-Gliedern. Nachdem aber die zur Prüfung dieser Hypothese angestellten Versuche gezeigt haben, daß aus Radium kein Actinium entsteht, kam keines der bekannten Elemente der Uran-Radiumreihe als Muttersubstanz des Actiniums in Betracht, und es mußte nach einem neuen unbekanntem Element gesucht werden, um die Frage der Actiniumgeneseis aufzuklären (18).

Aus folgenden Gründen wurde dabei von Soddy, Hahn und Meitner u. a. angenommen, daß die vermutete Muttersubstanz des Actiniums ein Glied der fünften Gruppe vorstellt. Das von G. Antonoff 1911 entdeckte Element Uran Y (Halbwertszeit 25,5 Tage), entsteht aus dem Mischelement¹⁾ Uran, und zwar entweder aus Uran I oder aus Uran II. Nun unterliegen ja diese beiden Elemente anderen bereits bekannten Umwandlungen, und es muß somit das Uran Y als ein Abzweigungsprodukt der Uranreihe aufgefaßt werden. Das chemische Verhalten des Urans Y zeigt, daß es zur Gruppe IVa, nämlich zur Thoriumplejade gehört. Da es β -Strahlen aussendet, muß sein Umwandlungsprodukt isotop mit UX_2 sein und könnte somit mit der gesuchten Muttersubstanz des Actiniums identisch sein. Diese müßte aber ziemlich langlebig sein, weil es sonst ebenfalls in kurzer Zeit gelingen müßte, die Bildung des Actiniums aus Uran nachzuweisen.

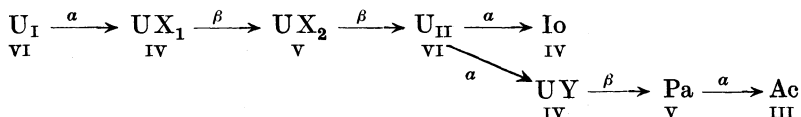
Durch diese Überlegungen geleitet, haben Otto Hahn und Lise Meitner in der Pechblende und in den Fabrikrückständen nach der Verarbeitung der Pechblende auf Uran und Radium nach einem langlebigen Element der fünften Gruppe gesucht, und es ist

¹⁾ F. Paneth hat für Gemische von Isotopen den Ausdruck „Mischelement“ vorgeschlagen.

ihnen in der Tat gelungen (17), mit Tantalsäure ein Element abzuscheiden, das α -Strahlen emittiert, und bei dessen Umwandlung die Bildung des Actiniums nachgewiesen werden konnte. Die Lebensdauer des neuen Elementes konnte bis jetzt noch nicht direkt bestimmt werden, doch ergibt sich aus der Reichweite seiner α -Strahlen auf Grund der Geigerschen Beziehung, daß die Halbwertszeit dieses, Protactinium (Pa) benannten Elementes zwischen 1200 und 180000 Jahren liegen dürfte. Diese relativ hohen Werte erlauben zu hoffen, daß es gelingen wird, das Protactinium in wägbaren Mengen in chemisch reinem Zustande zu isolieren. Dann wird sich auch das Atomgewicht dieses Elementes direkt bestimmen und daraus auch das A. G. aller Produkte der Actiniumreihe berechnen lassen.

Unabhängig von diesen ausgezeichneten Untersuchungen von Hahn und Meitner haben auch F. Soddy und J. A. Cranston (17) die Existenz des Protactiniums, das sie Ekatanal nennen, erwiesen. Sie erhitzten Pechblende im Tetrachlorkohlenstoffstrom unter Bedingungen, bei welchen Tantalsäure und Uran X₂ flüchtig sind und konnten in dem erhaltenen Sublimat die allmähliche Bildung des Actiniums nachweisen. In diesem flüchtigen Anteil der Pechblende war also die gesuchte Muttersubstanz des Actiniums enthalten.

Daß das Protactinium aus Uran Y entsteht, ist noch nicht direkt bewiesen, doch wird folgendes Schema zurzeit als das wahrscheinlichste angesehen:



Die in dem Schema gemachte Annahme, daß das Uran Y aus dem Uran II, nicht aus Uran I entsteht, wird auf S. 50 begründet.

Dem Protactinium kommt im periodischen System dieselbe Stelle zu, wie dem Uran X₂ und da es als das bei weitem langlebiger Element den Namen der Plejade bestimmt, besteht für die Bezeichnung Brevium kein Bedürfnis mehr.

4. Andere Folgerungen.

Die Verschiebungssätze ermöglichen weiterhin die chemische Natur der ganz kurzlebigen, der direkten chemischen Prüfung unzugänglichen Elemente AcA und AcC' , ThA und ThC' , sowie des RaC' und RaC'' anzugeben, denn man ersieht leicht aus den Tabellen, daß den Verschiebungssätzen nur dann Folge geleistet wird, wenn man annimmt, daß das RaC' ein Glied der Thalliumplejade (Gruppe III b) ist und die übrigen fünf Elemente zur Gruppe VI a, also zur Poloniumplejade gehören. Es führen somit die α -Umwandlungen der Emanationen aus der nullten Gruppe der letzten Horizontalreihe in die sechste der vorletzten, so daß der nullten Gruppe auch der Charakter der achten Gruppe zukommt. Dadurch rechtfertigt sich die aus anderen Gründen von manchen Autoren bereits früher empfohlene, aus der Tabelle 9 zu ersehende Vereinigung der achten und nullten Gruppe.

Weiterhin zeigt sich, daß die strahlenlosen Umwandlungen des Actiniums und Mesothoriums I auf Grund der Verschiebungssätze den Charakter von β -Umwandlungen aufweisen. Die erste führt nämlich aus der dritten Gruppe zur vierten, die zweite aus der zweiten Gruppe in die dritte. Man darf also wohl annehmen, daß diese Elemente eine sehr weiche, schwer nachweisbare β -Strahlung emittieren (18 a).

Mit Hilfe der Verschiebungssätze können wir jetzt genau die Reihenfolge beobachten, in der die Umwandlungen der Radioelemente die Gruppen des periodischen Systems durchlaufen. Es sei nur noch hinzugefügt, daß die drei radioaktiven Reihen sehr weitgehende Analogien zeigen. Vom Radiothorium, Ionium und Radioactinium ab, die eine Gruppe chemisch untrennbarer Elemente bilden, nämlich alle in die Thoriumplejade gehören, verlaufen die Umwandlungen in allen drei Reihen in identischer Weise. Diese drei Elemente unterliegen derselben Art der Umwandlung, wodurch wiederum chemisch identische Elemente entstehen, die ihrerseits gleiche Umwandlungen erleiden. Und das wiederholt sich bis an das Ende der Reihen, und zwar sind die analogen Elemente der drei Reihen nicht nur chemisch identisch und emittieren dieselbe Art der Strahlung, sondern auch die Abstufung

V. Atomgewicht und Lebensdauer der Isotopen.

Die Glieder einer solchen Plejade unterscheiden sich voneinander hauptsächlich durch ihre radioaktiven Eigenschaften, namentlich die Lebensdauer, und durch das Atomgewicht. In jeder Plejade kommen sehr verschiedene Atomgewichte vor, und in vielen Fällen sind in einer linksstehenden Plejade die Atomgewichte einiger Elemente um mehrere Einheiten größer als die mancher Elemente einer rechtsstehenden Plejade. Und doch haben wir ein mehr oder weniger regelmäßiges Abfallen der Atomgewichte von rechts nach links gefunden, als wir, um in Übereinstimmung mit den nicht-radioaktiven Elementen zu bleiben, das A. G. des langlebigsten Gliedes jeder Plejade als in das allgemeine System passende nahmen. Dieses Resultat deutete darauf hin, daß die Lebensdauer der Elemente innerhalb der Plejaden nicht regellos verteilt sein könne. Der Verfasser suchte deshalb nach Beziehungen zwischen A. G. und Lebensdauer der Isotopen, und es konnten in der Tat gewisse Regelmäßigkeiten aufgefunden werden, hinter denen ein tieferer Sinn verborgen zu sein scheint. Sie sollen hier auch aus dem Grunde angeführt werden, weil sie zurzeit die einzige Möglichkeit zur genaueren Schätzung des A. G. des Actiniums bieten.

Betrachtet man zunächst nur die Glieder der Uran-Radium- und der Thoriumreihe, deren Atomgewichte ja mit großer Annäherung bekannt sind, so zeigt sich (vgl. Tabelle 6), daß innerhalb einer Plejade die Lebensdauer (Halbwertszeit) der α -Strahler mit fallendem A. G. abnimmt, während die Lebensdauer der β -Strahler mit fallendem A. G. zunimmt. Die einzige Ausnahme bildet das Polonium (RaF), welches bei weitem das langlebigste Glied seiner nur aus α -Strahlern bestehenden Plejade vorstellt, obwohl sein A. G. am kleinsten ist.

Es entsteht sofort die Frage, welches A. G. Actinium besitzen müßte, damit die Glieder seiner Familie sich diesen Regeln unterordnen. Wie die Tabelle 6 zeigt, erhielte man die beste Übereinstimmung, wenn man dem Actinium ein A. G. zwischen 226

und 228, also ungefähr 227¹⁾) zuschreiben würde. Die Reihenfolge der Atomgewichte analoger Produkte der drei Reihen wäre dann: Uran-Radiumreihe, Thoriumreihe, Actiniumreihe, z. B. bei den drei Emanationen RaEm 222, ThEm 220, AcEm 219¹⁾). Sieht man einstweilen von der Wismutplejade ab, in der die C-Glieder sowohl α - wie β -Strahler vorstellen, so weisen von den Gliedern der Actiniumreihe nur AcX und AcB kleine Abweichungen von der Regel auf, während AcC' dieselbe auffallende Anomalie zeigt, die schon beim RaF erwähnt wurde und die, worauf R. Swinne hingewiesen hat, in der Poloniumplejade zu einem ausgeprägten Minimum der Lebensdauer beim ThC' führt.

Das Verhalten der C-Glieder muß gesondert besprochen werden. Die obigen Regeln zeigen, daß innerhalb einer Plejade im allgemeinen mit fallendem A. G. die Tendenz zur α -Umwandlung steigt, die zur β -Umwandlung dagegen fällt. Unterliegen also Isotope, wie die C-Glieder, sowohl α - wie β -Umwandlungen, so ist zu erwarten, daß mit fallendem A. G. ein immer stärkeres Überwiegen der α -Umwandlung über die β -Umwandlung zum Vorschein kommt, was bei RaC, ThC und AcC in der Tat der Fall ist: während vom ersteren nur 0,03 Proz. aller Atome α -Strahler sind, erleiden bei letzteren fast alle, nämlich 99,85 Proz., die α -Umwandlung. Das ThC mit dem Verzweungsverhältnis 35/65 steht dazwischen. In derselben Weise kann man die Tatsache deuten, daß, wenn in einer Plejade sowohl α - wie β -Strahler vorkommen, letztere ein höheres A. G. zeigen als erstere, wie man im Falle des UX₁ und MsTh₁ sieht. Der reine β -Strahler RaE bildet jedoch eine Ausnahme von diesem Verhalten.

Versucht man, das den obigen Regeln fürs Actinium am besten entsprechende A. G. 227 mit der Frage der Genesis dieses Elementes in Zusammenhang zu bringen, so ergibt sich folgendes: Es ist wahrscheinlich, daß das Protactinium durch eine β -Umwandlung aus Uran Y entsteht; je nachdem ob letzteres (durch eine α -Umwandlung) aus Uran I oder aus Uran II gebildet wird, wäre das übereinstimmende Atomgewicht des Urans Y und des Protactiniums zu 234 oder 230 anzunehmen und das des Actiniums also zu 230

¹⁾ Aus gleich zu erwähnenden Gründen wurde in der Tabelle statt 227 der eingeklammerte Wert 226 angenommen.

oder 226. Letzterer in der Tabelle 6 eingesetzter Wert entspricht zwar weniger gut den Beziehungen zwischen Lebensdauer und Atomgewicht als der Wert 227, widerspricht ihnen aber nicht. Wäre indessen das A. G. des Actiniums gleich 230, so würden die obigen Regeln fast für sämtliche Glieder der Actiniumreihe versagen. Deshalb muß es für wahrscheinlich gelten, daß entsprechend dem auf S. 45 dargestellten Schema das Uran Y, wenn es die Muttersubstanz des Protactiniums ist, sich von Uran II, nicht von Uran I ableitet. Allerdings widerspricht wiederum das in diesem Falle zu 230 sich ergebende A. G. des Urans Y den Regeln, während der Wert 234 ihnen besser entspräche. Es bedarf also entweder der Zusammenhang des Protactiniums mit Uran oder die Beziehung zwischen Lebensdauer und Atomgewicht der Isotopen noch einer näheren Klärung.

VI. Die Endprodukte der Zerfallsreihen und die isotopen Bleiarten.

1. Theoretisches.

Wie aus obigem zu ersehen ist, hat die Einführung des neuen Begriffes der Isotopie eine durchaus befriedigende chemische Systematik der Radioelemente ermöglicht. Außerdem ist dieser Begriff auch für die allgemeine Chemie von großer Tragweite, ihm liegt ja die Behauptung zugrunde, daß es Elemente gibt, die trotz verschiedener Atomgewichte (bis zu acht Einheiten) eine praktisch vollständige Übereinstimmung ihres qualitativ-chemischen Verhaltens aufweisen.

Allerdings haben die oben zugunsten der Isotopentheorie vorgebrachten Tatsachen für den Chemiker keine genügende Beweiskraft. Man darf ja nicht vergessen, daß wegen der Kurzlebigkeit der Radioelemente ihre chemischen Eigenschaften nicht in reinem Zustande, sondern nur in Gemischen mit anderen Stoffen studiert worden sind, und daß auch ihre Atomgewichte nicht direkt, sondern rechnerisch ermittelt wurden. Dieser etwas unbefriedigende Zustand dauerte aber nicht lange an, denn es ergab sich sofort eine Möglichkeit, die obige Hauptannahme der Isotopentheorie mit ge-

wöhnlichen chemischen Methoden direkt zu beweisen, als die neuen Gesichtspunkte und die Verschiebungssätze auf die Frage der Endprodukte der radioaktiven Reihen angewandt wurden.

Es ist gelungen, die radioaktiven Reihen bis zu den Elementen RaC'' und RaF , ThC' und ThC'' und AcC' und AcC'' zu verfolgen. Deren Umwandlungsprodukte konnten radioaktiv nicht mehr nachgewiesen werden, und man nahm gewöhnlich an, daß sie stabil seien. Man nannte sie deshalb Endprodukte der Reihen und vermutete, daß diese mit einem oder mehreren der gewöhnlichen Elemente identisch sind. Vor der Einreihung der Radioelemente in das periodische System ist es nur im Falle des RaG , des Umwandlungsproduktes des RaF , gelungen, die Frage nach seiner Natur mit großer Wahrscheinlichkeit zu beantworten.

Nach einer zuerst von B. Boltwood (1905) geäußerten Ansicht bildet das Blei das Endprodukt der Uran-Radium-Poloniumreihe. Diese Auffassung stützte sich hauptsächlich auf die Tatsache, daß man Blei in allen Uranmineralien findet, und zwar in Mengen, die bei Mineralien gleichen geologischen Alters proportional dem Urangehalt sind und bei verschiedenen alten Mineralien mit dem Alter steigen. Beides ist zu erwarten, wenn das Blei durch den langsamen Zerfall des Urans entsteht und im Laufe geologischer Zeiten in dem Mineral akkumuliert wird¹⁾. Auch die Betrachtung der Atomgewichte schien zunächst diese Auffassung zu stützen. Ging man von dem früher geltenden Werte für das A. G. des Urans I (238,5) oder des Radiums (226,4) aus, so erhielt man in bekannter Weise für das zu erwartende A. G. des RaG den Wert 206,5 bzw. 206,4, dem das A. G. des Bleies (207,1) von allen gewöhnlichen Elementen am nächsten stand. Die bestehende Diskrepanz dachte man auf kleine Unsicherheiten der Atomgewichte zurückführen zu können. Nun hat aber die Revision der betreffenden Atomgewichte den Unterschied nicht verkleinert, sondern wesentlich vergrößert. Aus den jetzt geltenden Werten für das A. G. des U_I (238,2) und Ra (226,0) berechnet sich das A. G. des

¹⁾ Da man die Zerfallsgeschwindigkeit des Urans kennt, läßt sich aus der Bestimmung des Mengenverhältnisses Blei/Uran im Mineral sein absolutes Alter annähernd ermitteln. Näheres vgl. die zusammenfassende Darstellung von Lawson (21).

RaG zu 206,2 bzw. 206,0, während das A. G. des Bleies nach neueren Bestimmungen 207,20 beträgt (23).

Die Einreihung der Radioelemente in das periodische System und der Begriff der Isotopie ergaben nun den Weg zur Aufklärung dieses Widerspruches und gleichzeitig auch wichtige Aufschlüsse über die Natur der übrigen „Endprodukte“. Die Anwendung der Verschiebungssätze auf die Umwandlungen der obengenannten sechs Elemente ergibt (vgl. Tabelle 5), daß ihre Umwandlungsprodukte sämtlich in die Bleiplejade gehören. Im Falle des RaG steht dieses Resultat in bezug auf das qualitativ-chemische Verhalten in bester Übereinstimmung mit der Boltwoodschen Hypothese. Weiterhin genügte es anzunehmen, daß das RaG, d. h. das in Uranmineralien vorkommende „Blei“ dem gewöhnlichen Blei zwar in chemischen Eigenschaften, nicht aber im A. G. gleicht, d. h. mit ihm nicht identisch, sondern isotop ist, um den Widerspruch der Atomgewichtsbetrachtung zu erklären.

Die beiden Umwandlungsprodukte des ThC' und ThC'' haben gleiche chemische Eigenschaften (beide sind Isotope des Bleies), und auch ihr berechnetes A. G. ist gleich, und zwar 208,1. Vom chemischen Standpunkt betrachtet, können wir sie deshalb als ein Element auffassen und Thoriumblei (oder ThD) nennen. Es muß in Thormineralien vorzufinden sein. Sollte das Thorblei nicht vollkommen stabil sein, was im Bereich der Möglichkeit liegt, so wäre es nicht ausgeschlossen, daß seine zwei Bestandteile verschiedene Lebensdauer haben.

Aus denselben Gründen wie beim Thoriumblei können wir auch die Umwandlungsprodukte des AcC' und AcC'' vom chemischen Standpunkt als ein Element betrachten, und werden es Actiniumblei (AcD) nennen. Sein zu erwartendes A. G. hängt von dem unbekanntem A. G. des Actiniums selbst ab. Wenn letzteres gleich 226 bzw. 227 ist, so ist das A. G. des Actiniumbleies zu 206 bzw. 207 anzunehmen. Da das Actinium aus Uran entsteht, muß das Actiniumblei ebenfalls in Uranmineralien sich vorfinden, und da es vom RaG chemisch untrennbar ist, wird das aus diesen Mineralien gewinnbare „Blei“ — das Uranblei — ein Gemisch von RaG und AcD vorstellen. Da aber die Actiniumreihe eine Ab-

zweigung im Verhältnis von nur 8:92 von der Haupturanreihe bildet, kann das AcD, wenn es nicht viel stabiler als RaG ist, das A. G. des Uranbleies nur wenig beeinflussen.

Obige Betrachtungen, die vom Verfasser und von Soddy in der Hauptsache schon gelegentlich ihrer ersten Arbeiten über die Einreihung der Radioelemente in das periodische System an gestellt wurden¹⁾, zeigt, daß es mehrere radioaktiv nicht nachweisbare Bleiarten geben muß, deren Atomgewichte zwischen den stark verschiedenen Werten 206,0 und 208,1 liegen, während das A. G. des gewöhnlichen Bleies 207,2 beträgt. Es eröffnete sich somit der Weg, direkt experimentell die Existenz von Bleiarten mit verschiedenen Atomgewichten festzustellen, wenn es gelang, die betreffenden Elemente voneinander getrennt zu erhalten. Die zur Prüfung dieser Überlegungen an gestellten Versuche haben nun gezeigt, daß dies in der Tat möglich ist.

2. Uranblei.

Als Ausgangsmaterial für derartige Untersuchungen sind als Idealfälle thorfreie Uranmineralien und uranfreie Thormineralien zu betrachten. Erstere sind leicht zugänglich, und es konnte deshalb die Frage des Uranbleies einer gründlichen Untersuchung unterzogen werden.

Schon die ersten auf die Anregung des Verfassers ausgeführten Bestimmungen von Th. W. Richards und M. Lambert (1914), sowie die gleichzeitig mitgeteilten Versuche von Maurice Curie und O. Hönigschmid ergaben für das A. G. sorgfältigst gereinigter Bleipräparate²⁾, die aus verschiedensten Uranmineralien stammten, Werte zwischen 206,4 und 206,9, die sämtlich niedriger lagen als das nach gleichen Methoden zu 207,2 bestimmte A. G. des gewöhnlichen Bleies.

¹⁾ Auf die Möglichkeit, daß das Radium G ein vom gewöhnlichen Blei abweichendes A. G. besitzt, hat etwas früher A. Russell privatim hingewiesen (21a).

²⁾ Im folgenden wird die Bezeichnung „Blei“, ohne nähere Angabe, ob gewöhnliches oder radioaktiv entstandenes „Blei“ gemeint ist, für in wägbaren Mengen zugängliche Glieder der Bleiplejade oder ihre Gemische benutzt.

Alle diese Resultate haben mit Sicherheit bewiesen, daß in Uranmineralien ein auf chemischem Wege vom Blei untrennbares Element sich befindet, dessen A. G. beträchtlich niedriger als das des gewöhnlichen Bleies ist. Das steht mit den Erwartungen der Theorie, wonach RaG mit dem A. G. 206,0 in diesen Mineralien sich befinden sollte, qualitativ im besten Einklang. Die Schwankungen, die Präparate verschiedenen Ursprungs zeigten, sprachen jedoch dafür, daß man es bei den meisten der untersuchten Proben nicht mit reinem radioaktiv entstandenen Uranblei zu tun hatte, sondern daß sie wohl durch gewöhnliches Blei, das von Begleitmineralien stammt, verunreinigt waren. Hönigschmid und Stefanie Horowitz untersuchten deshalb bald darauf Bleipräparate aus sehr reiner kristallisierter Pechblende (aus Morogoro in Deutsch-Ostafrika) und aus Bröggerit (Moos-Norwegen) und erhielten für das A. G. die Werte 206,05 bzw. 206,06, während Richards und Ch. Wadsworth aus kristallisiertem norwegischen Cleveit ein Blei mit dem A. G. 206,08 und aus Bröggerit ein solches mit 206,12 isolierten. Der niedrigste dieser Werte (206,05) steht in sehr naher Übereinstimmung mit dem für das RaG aus dem A. G. des Radiums sich ergebenden Wert 205,94¹⁾. Ob der etwas höhere experimentelle Wert durch das Vorhandensein des Actiniumbleies oder des gewöhnlichen Bleies bedingt ist, oder ob hier noch andere unbekanntere Umstände mitspielen, läßt sich vorerst nicht entscheiden. Soviel kann man jedoch diesem Resultat entnehmen, daß entweder das A. G. des Actiniumbleies nahe dem des RaG steht, oder daß das Actiniumblei ein instabiles Element vorstellt.

Im folgenden wird bei Besprechung der verschiedenen Bleiarten ihr A. G. über dem Symbol Pb angegeben, so daß z. B. ^{206,0}Pb mit RaG identisch ist. Das Symbol Pb wird wie bis jetzt nur für das gewöhnliche Blei = ^{207,20}Pb gebraucht werden. Ist jedoch Blei, gleichgültig von welchem A. G., gemeint, d. h. irgendwelche Elemente des Bleitypus oder ihre Gemische, so werden wir das Symbol Pb benutzen.

¹⁾ Nach Abzug vom A. G. des Radiums (225,97) für fünf Heliumatome $5 \cdot 4,00 = 20,00$ und $0,03$ für die Massenverminderung infolge Energieabgabe.

Die obenerwähnte Annahme, daß die aus weniger sorgfältig ausgesuchten Uranmineralien stammenden Bleiarten mit Atomgewichten bis zu 206,9 keine besonderen Elemente, sondern Gemische von radioaktiv entstandenem Uranblei ($^{206,0}\text{Pb}$) und von gewöhnlichem Blei ($^{207,2}\text{Pb}$) vorstellen, läßt sich folgendermaßen stützen. In verschiedenen geologisch gleich alten Uranmineralien ist das Uran zu gleichem Bruchteil in Uranblei umgewandelt, so daß das Mengenverhältnis Pb/U in solchen Mineralien gleich sein muß. Enthalten jedoch die Mineralien außer dem radioaktiv entstandenem Uranblei auch wechselnde Mengen gewöhnlichen Bleies, so muß dem Anwachsen des A. G. des aus ihnen isolierten Bleies auch eine Erhöhung des Mengenverhältnisses Pb/U parallel laufen. Daß dies in der Tat sowohl in qualitativer als auch annähernd in quantitativer Hinsicht zutrifft, hat der Verfasser für drei von derselben Fundstätte (Joachimstal) stammende Bleiprobe mit dem A. G. 206,40, 206,60 und 206,71 gezeigt, wobei als Maß des Verhältnisses Pb/U die im eindeutigen Zusammenhang damit stehende, von dem Bleiisotopen RaD herführende β -Strahlenaktivität der Bleipräparate diente. Solche Bleiarten sind also, obwohl ihre direkte Zerlegung noch nicht möglich war, als Gemische zu betrachten, und man sollte deshalb nicht von ihren Atomgewichten sprechen, da es keine besonderen Atome mit dem A. G. 206,6 gibt. Wir werden deshalb in allen Fällen, wo das mittlere Atomgewicht eines Isotopengemisches gemeint wird, den Ausdruck Verbindungsgewicht (20) (V. G.) gebrauchen (21).

3. Thoriumblei.

Die Prüfung der oben erwähnten Forderung der Verschiebungssätze, daß das radioaktiv nicht mehr nachweisbare Thorium D eine Bleiart mit dem A. G. 208 sei, stieß auf größere Schwierigkeiten, als die Aufklärung der Frage des Uranbleies. Dies rührt in erster Linie daher, daß alle bekannten Thormineralien einen gewissen Urangehalt aufweisen; deshalb stellt das im Laufe geologischer Zeiten in solchen Mineralien entstehende Blei ein Gemisch von Uranblei ($^{206,0}\text{Pb}$) und Thoriumblei ($^{208,1}\text{Pb}$) vor und muß aus diesem

Grunde ein mittleres, von dem Mischungsverhältnis abhängiges Verbindungsgewicht besitzen. Da weiterhin das Uran schneller zerfällt als das Thorium, wird sich im Mineral relativ mehr Uranblei als Thorblei ansammeln. Dabei ist zu bedenken, daß einwandfreie Anhaltspunkte für die Existenz des Thorbleies nur dann zu gewinnen sind, wenn das resultierende mittlere V. G. den Wert des A. G. des gewöhnlichen Bleies (207,2) deutlich übersteigt. Für die Untersuchung der Frage des Thorbleies war es deshalb erforderlich, Mineralien zu wählen, in denen das Mengenverhältnis Thor/Uran besonders hoch ist.

Den ersten sicheren Beweis für die Existenz des Thorbleies lieferten Atomgewichtsbestimmungen an Blei, das von Soddy aus einem Thorit von Ceylon isoliert worden ist. Die Analyse des Minerals ergab 57 Proz. Thor, 1,03 Proz. Uran und 0,4 Proz. Blei. Das Verhältnis Thor/Uran beträgt somit 55. Die von Soddy und seinen Mitarbeitern nach verschiedenen Methoden ausgeführten Bestimmungen des A. G. lieferten Zahlen, die wesentlich höher als das A. G. des gewöhnlichen Bleies lagen, der genaue, von Hönigschmid ermittelte Wert des V. G. des Bleies aus dem betreffenden Thorit beträgt 207,77.

Ein noch günstigeres Verhältnis Th/U = 67 wies ein vom Verfasser auf Blei verarbeiteter Thorit aus Norwegen auf, dessen Analyse 30,1 Proz. Thor, 0,45 Proz. Uran und 0,35 Proz. Blei ergab. Hönigschmid bestimmte das V. G. des aus diesem Thorit gewonnenen Bleies und erhielt den bis jetzt für Blei höchsten Wert 207,90. Da diese Bleiart noch eine gewisse Menge Uranblei enthalten muß, läßt sich leicht berechnen, daß das A. G. des Thoriumbleies (Th D) mindestens 207,97 beträgt, was nahe mit dem theoretischen, aus dem A. G. des Thors (232,12) für Thorium D in bekannter Weise sich ergebenden¹⁾ Wert 208,08 übereinstimmt.

Es sei noch erwähnt, daß man eine Zeitlang aus gewissen, hier nicht näher zu erläuternden Gründen das Thorium D für ein unstabiles Element gehalten hat, und daß auch jetzt noch die Frage nicht ganz entschieden ist, ob das Thorium D vollkommen

¹⁾ Nach Abzug von $6 \times 4,00$ für 6α -Teilchen und 0,04 für die Massenveränderung infolge Energieabgabe.

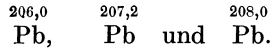
stabil ist. Die Möglichkeit, das Thoriumblei in wägbaren Mengen aus den Mineralien zu gewinnen, läßt jedoch folgern, daß, wenn das als einheitliches Element betrachtete Thorium D eine weitere Umwandlung erleiden sollte, seine Halbwertszeit nicht unter 170 Millionen Jahre liegen kann (22).

4. Gewöhnliches Blei.

Aus einem Thorianit aus Ceylon, der 68,9 Proz. Thor und 11,0 Proz. Uran enthielt, hat Hönigschmid (22) eine Bleiart isoliert, die offenbar ein Gemisch von Thorblei und Uranblei vorstellt, deren V. G. (207,2) jedoch genau mit dem A. G. des gewöhnlichen Bleies übereinstimmt. Dieses Thorianitblei verrät zurzeit noch seinen radioaktiven Ursprung, da es die Aktivität des zusammen mit ihm aus dem Mineral abgeschiedenen Bleiisotopen Radium D aufweist. In etwa 200 Jahren aber, nachdem das Ra D, dessen Halbwertszeit ja nur 16 Jahre beträgt, praktisch vollständig abgefallen sein wird, könnte man mit den heutigen qualitativen und quantitativen chemischen Methoden dieses Blei in keiner Weise von gewöhnlichem Blei unterscheiden, und man muß sich deshalb die Frage vorlegen, ob letzteres nicht etwa ein solches Gemisch von Thorblei und Uranblei vorstellt. Der wichtige Befund von G. P. Baxter und F. L. Grover (23), daß die von ihnen untersuchten sieben Proben gewöhnlichen Bleies sehr verschiedenen mineralogischen und geographischen Ursprungs innerhalb der Versuchsfehler dasselbe A. G. zeigten, würde allerdings beweisen, daß, wenn das gewöhnliche Blei ein Gemisch wäre, seine Zusammensetzung allerorts die gleiche sein müßte. Dies wäre übrigens nicht so verwunderlich, wie es auf den ersten Blick scheinen könnte: da sowohl Uran wie Thor vor der Erstarrung der Erdkruste existiert haben müssen, waren auch Uranblei und Thorblei im Schmelzfluß vorhanden, und es wäre ja nur die Annahme ihrer gleichmäßigen Vermischung notwendig, um die Konstanz des A. G. des gewöhnlichen Bleies zu erklären.

Wenn aber auch gegen die Hypothese der zusammengesetzten Natur des gewöhnlichen Bleies kein entscheidender Einwand sich vorbringen läßt, so spricht auch nichts überzeugend für sie, und

man muß deshalb zurzeit das gewöhnliche Blei als ein besonderes Element neben dem Uranblei und Thorblei betrachten. Wir hätten somit in der Bleiblejade drei in wäg-baren Mengen zugängliche Elemente:



VII. Die Eigenschaften isotoper Elemente.

Die Isolierung der isotopen Bleiarten in größeren Mengen (24) hat es zum ersten Male ermöglicht, die Eigenschaften der Isotopen direkt zu vergleichen, und, wie es ja nicht anders zu erwarten war, erwiesen sich diese Elemente in der Tat in bezug auf eine Reihe von Eigenschaften als nicht unterscheidbar, selbst bei Anwendung sehr genauer Methoden. Von größter Wichtigkeit ist vor allem der Nachweis, daß das als so charakteristisch für ein Element geltende optische Spektrum bei den Isotopen gleich ist. Nicht nur ist der allgemeine Bau des ganzen Spektrums bei verschiedenen Bleiarten identisch, sondern auch die Wellenlänge der entsprechenden Linien ist gleich. So ergab eine besondere von Th. R. Merton nach einer feinen Interferenzmethode ausgeführte Untersuchung einer Spektrallinie von der Wellenlänge $405,8 \mu\mu^1$) bei gewöhnlichem Blei und Blei aus Pechblende eine Übereinstimmung in der Wellenlänge bis auf $0,0003 \mu\mu$, d. h. bis auf $\frac{3}{4}$ Millionstel des Absolutwertes. Also nicht nur in bezug auf ihr ganzes qualitativ-analytisch-chemisches Verhalten, sondern auch spektroskopisch weisen die Isotopen keine merklichen Unterschiede auf (25a).

Auch in vielen anderen Eigenschaften haben sich die Isotopen als gleich erwiesen, das gilt z. B. für das elektrochemische Potential, für Flüchtigkeit, Schmelzpunkt (25b), magnetische Suszeptibilität, Brechungsindex der Salzlösungen, Diffusionsgeschwindigkeit in Lösungen usw. Diese Gleichheit gilt aber durchaus nicht für

¹⁾ $1 \mu\mu = \frac{1}{1000000} \text{ mm.}$

alle Eigenschaften. Da das Atomgewicht verschieden ist, müssen die Isotopen auch in denjenigen Eigenschaften, die direkt von der Masse abhängen, Unterschiede aufweisen. Dazu gehört vor allem die Dichte in festem Zustande.

Th. W. Richards und Ch. Wadsworth bestimmten für verschiedene Bleiarten einerseits das A. G., andererseits die Dichte (bei 19,94°). Dividiert man das A. G. durch die zugehörige Dichte, so erhält man das Atomvolumen, d. h. das Volumen eines Gramm-atoms.

Tabelle 8.

Atomgewicht der Bleiart	206,085	206,34	207,20
Dichte	11,273	11,288	11,337
Atomvolumen	18,281	18,280	18,276

Die Resultate sind in der obigen kleinen Tabelle angegeben, und man sieht, daß die Werte für das Atomvolumen der drei Bleiarten innerhalb der Versuchsfehler übereinstimmen, woraus man schließen kann, daß auch die Radien der einzelnen Atome der Isotopen gleich groß sind. Die Dichten der Isotopen sind aber verschieden, und zwar den Atomgewichten direkt proportional, wodurch die Dichtebestimmung zur Ermittlung der relativen Atomgewichte der Isotopen dienen kann.

Ein anderes Beispiel dieser Art bietet die Betrachtung gesättigter Lösungen der Nitrate isotoper Bleiarten. Die Gleichheit der Löslichkeit der Salze der Isotopen, die aus der Untrennbarkeit durch fraktionierte Kristallisation folgt, bedeutet, daß in gleichen Volumina der gesättigten Lösungen einander entsprechender Salze die gleiche Zahl der Moleküle enthalten sein muß, d. h. die molare Löslichkeit ist gleich. Da aber die Molekulargewichte der Nitrate zweier Bleiarten infolge der Verschiedenheit der Atomgewichte des Metalles verschieden sind, wird auch das Gewicht gleicher Volumina der gesättigten Lösungen, d. h. die Dichte der Lösungen, verschieden sein müssen. Das konnten der Verfasser und M. Lambert in der Tat zeigen. Für das Gewicht von 10 ccm der bei ^{207,20} 24,45° gesättigten Lösungen der Nitrate von Pb und ^{206,59} Pb erhielt man 14,4450 und 14,4359 g. Aus diesen Versuchen konnte ge-

folgert werden, daß die molaren Löslichkeiten dieser zwei verschiedenen Bleinitrate bis auf $\frac{7}{100}$ Promille ihres Absolutwertes übereinstimmen. Letzteres wurde von Richards (25a) mit etwas geringerer Genauigkeit auch durch direkte Analyse bestätigt: er fand für den Gehalt der bei 25,00⁰ gesättigten Lösungen der Nitrate von $\text{Pb}^{207,19}$ bzw. $\text{Pb}^{206,34}$ die innerhalb der Versuchsfehler übereinstimmenden Werte

1,7993 bzw. 1,7989 Mole¹⁾ $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$

pro 1000 g Wasser. Die in Grammen ausgedrückte Löslichkeit ist aber natürlich verschieden und beträgt für die letztgenannten Lösungen pro 1000 g Wasser

595,95 g $\text{Pb}^{207,19}(\text{NO}_3)_2$ bzw. 594,28 g $\text{Pb}^{206,34}(\text{NO}_3)_2$.

Die Bestimmung der Dichte gesättigter Lösungen bietet ebenfalls eine sehr einfache Methode zur Ermittlung relativer Atomgewichte der Isotopen.

Wir müssen also bei Isotopen zwei Gruppen von Eigenschaften unterscheiden: die einen, wie das qualitativ chemische und spektroskopische Verhalten, die molare Löslichkeit der Salze, das elektrochemische Normalpotential, das Atomvolumen und sehr wahrscheinlich noch viele andere Eigenschaften sind bis zu einem sehr hohen Grade der Annäherung für alle Glieder einer Plejade, für den ganzen Bleitypus oder Thoriumtypus gleich. Man kann sie deshalb als Plejadeneigenschaften, Typuseigenschaften oder auch als kolligative Eigenschaften der Isotopen bezeichnen. Auf der anderen Seite haben wir das Atomgewicht und dadurch das ganze Verhalten in der quantitativen Analyse, das radioaktive Verhalten, die Dichte in allen Aggregatzuständen, die in Gramm/Liter ausgedrückte Löslichkeit usw., die für jedes Glied einer Plejade und für jedes Gemisch der Isotopen, für jede Bleiart, einen anderen Wert haben. Dies sind die Arteigenschaften. Auf Grund der Arteigenschaften ist also eine feinere Differenzierung der Materie möglich, als nur auf Grund der Typuseigenschaften (25).

¹⁾ Unter einem Mol versteht man die dem Molekulargewicht gleiche Anzahl Gramme.

VIII. Chemisches Verhalten der Stoffe in äußersten Verdünnungen.

Der Nachweis, daß isotope Elemente in einer großen Reihe von Eigenschaften ein so weitgehend übereinstimmendes Verhalten zeigen, hat es ermöglicht, ein neues Forschungsgebiet von nicht geringem Reiz, nämlich die Untersuchung des physikalischen und chemischen Verhaltens der Materie in außerordentlich dünnen Schichten und höchsten Verdünnungen aufzunehmen. Zwar sind schon vor der Aufstellung der Isotopentheorie viele Erfahrungen über das Verhalten von kurzlebigen, in winzigen Mengen vorhandenen Radioelementen gesammelt worden, doch konnte man aus solchen Beobachtungen wenig Folgerungen allgemeiner Natur ziehen: da ja der chemische Charakter der betreffenden Radioelemente nicht näher bekannt war, mußte es, wie bereits auf S. 32 erwähnt wurde, unentschieden bleiben, was in ihrem Verhalten der kleinen Konzentration und was dem unbekanntem Chemismus zuzuschreiben war. Nachdem wir aber erfahren haben, daß z. B. Thorium B, das in Mengen von einem Billionstel ($1/10^{12}$) Milligramm radioaktiv noch bequem nachgewiesen werden kann, ein Glied der Bleiblejade ist, können wir aus seinem Verhalten schließen, welche Eigenschaften gewöhnliches Blei in so großen Verdünnungen zeigen würde. Da durch wird das der Untersuchung zugängliche Konzentrationsgebiet sehr erweitert.

Von den nach diesen Richtungen bereits vorliegenden Erfahrungen, die die Verdampfung der Radioelemente (26), ihre elektrochemischen Eigenschaften (27), sowie ihr Vorkommen im kolloidalen Zustand (28) und besonders die Fällung und Adsorption der Radioelemente betreffen, sei hier nur auf die letzteren Erscheinungen etwas näher eingegangen, weil deren Studium zu Resultaten geführt hat, die in mehrerer Hinsicht ein nicht geringes Interesse beanspruchen (29).

Kurz nach der Einreihung der Radioelemente in das periodische System konnten der Verfasser und P. Beer auf Grund der zahlreichen älteren und eigenen neuen Beobachtungen folgende Regel aufstellen: ein Radioelement fällt aus äußerst verdünnten

Lösungen mit den verschiedensten Niederschlägen aus, wenn diese unter Bedingungen gefällt werden, unter denen das betreffende Radioelement, wenn es in wägbaren Quantitäten zugegen wäre, ein schwer lösliches Salz bilden würde. Dann fanden der Verfasser und F. Richter bei näherer Untersuchung des Thorium B, eines Gliedes der Bleiplejade, daß es mit Wismutsulfid, Mangancarbonat oder Bariumsulfat praktisch vollständig, mit Silberjodid und Silberchlorid nur teilweise, mit Nitronnitrat jedoch fast gar nicht aus einer Lösung ausgefällt wird. Nun sind das Sulfid, Carbonat und Sulfat des Bleies schwer löslich, sein Nitrat ist ein sehr leicht lösliches Salz, während das Bleijodid und Bleichlorid eine Mittelstellung einnehmen. Es besteht also ein ausgesprochener Parallelismus zwischen der Fällbarkeit eines Radioelementes mit verschiedenen Niederschlägen einerseits und der Löslichkeit der Verbindung des Radioelementes mit den fallenden Säureresten (Anionen) andererseits.

Wie ersichtlich, berechtigt diese auf den ersten Blick fast selbstverständlich scheinende Regel, aus dem Verhalten eines Radioelementes bei Fällungsreaktionen anderer Elemente die wahre chemische Natur des ersteren zu folgern. Das wurde zwar von manchen Forschern bereits vor der Formulierung der Regel, z. B. bei der Ermittlung der chemischen Natur und der Stellung im periodischen System von Actinium und Polonium, die keine in wägbaren Mengen zugänglichen Isotope besitzen, getan, andere Autoren haben jedoch die Berechtigung solcher Schlüsse in Frage gestellt. Die Fällungsregel läßt aber keine Zweifel mehr übrig, daß diese Elemente sowie auch das Uran X_2 und Protactinium im periodischen System richtig untergebracht wurden.

So selbstverständlich die Fällungsregel scheinbar ist, so überraschend sind in Wirklichkeit die Konsequenzen, zu denen sie geführt hat. Thorium B fällt nämlich z. B. mit Wismutsulfid durchaus nicht deshalb aus, weil unter den Bedingungen der Fällung die Sättigungskonzentration des schwerlöslichen Sulfids des Th B (des Bleisulfids) etwa überschritten wäre. Denn es konnte gezeigt werden, daß eine Ausfällung eines Radioelementes erfolgen kann, selbst wenn seine Konzentration eine Billion mal kleiner ist, als zur Erreichung der Sättigung nötig ist. Auch der Isomorphismus

zwischen dem Niederschlag und dem mitgefällten radioaktiven Salz ließ sich nicht für alle Beobachtungen als genügende Erklärung heranziehen. So blieb die Annahme übrig, daß hier die Erscheinung der Adsorption der Radioelemente an der Oberfläche des ausfallenden Salzes eine Rolle spielen müsse.

Die Fällungsregel und einige eigene interessante Beobachtungen über das Kolloidwerden von Radioelementen veranlaßten deshalb F. Paneth (gemeinsam mit K. Horowitz), die Adsorption der Radioelemente durch verschiedene Stoffe zu studieren, und er gelangte in der Tat zu einer der Fällungsregel analogen Adsorptionsregel. Sie besagt, daß jene Radioelemente gut adsorbiert werden, deren Verbindung mit dem elektronegativen Bestandteil (Säurerest) des adsorbierenden festen Stoffes in dem betreffenden Lösungsmittel schwer löslich ist. So wird z. B. das Th B beim Schütteln mit Bariumsulfatpulver weitgehend aus seiner Lösung entfernt. Die Fällungsregel läßt sich somit auf die Adsorptionsregel zurückführen. Diese geht aber weiter als jene. Während nämlich die von Fajans und Beer formulierte Fällungsregel zunächst unentschieden ließ, ob der elektronegative Bestandteil, welcher mit dem Radioelement die schwerlösliche Verbindung bildet, in der Lösung oder im Niederschlag enthalten sein muß, damit Fällung erfolgen kann¹⁾, ist nach der Panethschen Adsorptionsregel in erster Linie die chemische Zusammensetzung des adsorbierenden Niederschlages und nicht die der Lösung ausschlaggebend. Die Richtigkeit dieser Auffassung konnte auch für die Fällungserscheinungen gezeigt werden: Nitronnitrat fällt kein Th B aus, auch wenn Ammonsulfat in der Lösung enthalten ist; damit Adsorption und Ausfällung erfolgt, genügt es also nicht, daß die Sulfatgruppe in der Lösung zugegen ist, sondern sie muß dazu, wie beim Bariumsulfat, im Niederschlag enthalten sein.

Die Panethsche Adsorptionsregel ist noch aus folgendem Grunde besonders bemerkenswert. Die Untersuchung der Adsorptionserscheinungen bei den in der Chemie üblichen Konzentrationen hat zu der Auffassung geführt, daß für das Eintreten der Adsorp-

¹⁾ Bei den allermeisten Fällungen trifft nämlich beides zu.

tion hauptsächlich Einflüsse der Oberflächenspannung und der elektrischen Ladung maßgebend sind. Nun zeigt es sich, daß bei den äußersten Verdünnungen der Radioelemente diese Einflüsse durch rein chemische Faktoren übertönt werden. Daß diese Beobachtungen im nahen Zusammenhang mit den neuen Vorstellungen über die Struktur der Kristalle und über die Kräfte, die an deren Oberfläche herrschen, stehen, kann hier nur erwähnt werden. Die Hoffnung ist berechtigt, daß letztere Vorstellungen durch das nähere Studium der Fällung und Adsorption der Radioelemente weitere Förderung erfahren werden.

IX. Radioelemente als Indikatoren.

Während die im vorhergehenden Abschnitt behandelten Probleme nur mit Hilfe von Radioelementen untersucht werden können, gibt es eine Anzahl von Fragen der allgemeinen Chemie, für deren Bearbeitung die Heranziehung der radioaktiven Isotopen zwar nicht unbedingt erforderlich ist, aber doch sehr wesentliche Vorteile bietet, wie aus folgenden zwei Beispielen hervorgeht.

Die Bestimmung der Löslichkeit sehr schwer löslicher Salze, wie z. B. des Bleichromats ist mit den gewöhnlichen analytischen Methoden nicht möglich und ließ sich selbst durch Ermittlung der elektrischen Leitfähigkeit der gesättigten Lösung nur schätzungsweise ausführen. Durch Anwendung der Tatsache, daß Radium D (bzw. Thorium B) vom Blei durch keine chemische Operation trennbar ist, konnten aber G. v. Hevesy, F. Paneth und Elisabeth Róna (30) folgendermaßen die Löslichkeit des Bleichromats ermitteln. Aus einer Lösung, die neben einer bekannten Gewichtsmenge von Blei eine elektroskopisch gemessene Quantität von Radium D enthielt, wurde das Isotopengemisch als Chromat ausgefällt. Den erhaltenen Niederschlag, der ein das Chromat des Ra D als Indikator enthaltendes Bleichromat vorstellte, hat man mit Wasser bis zur Erreichung der Sättigung geschüttelt und dann wurde die gesättigte Lösung, die nur kaum wägbare Spuren von Bleichromat enthielt, auf ihren Gehalt an Ra D radioaktiv unter-

sucht. Da wegen der Untrennbarkeit der Isotopen das Verhältnis der Mengen des Ra D und des Bleies in der ursprünglichen und in der an Bleichromat gesättigten Lösung das gleiche sein muß, konnte leicht der Bleigehalt der letzteren, also die Löslichkeit des Bleichromats berechnet werden. Sie ergab sich zu etwa 2×10^{-7} Mol/Liter.

Dieses Prinzip empfiehlt sich für ähnliche Probleme nicht nur deshalb, weil die absoluten radioaktiv bestimmbaren Mengen der Radioelemente so außerordentlich klein sind, sondern auch aus dem Grunde, weil die auf die Messung der Intensität der Ionisationsströme zurückführbaren radioaktiven Analysenmethoden eine außerordentlich weite Skala umfassen: so läßt sich vom Radium 1 g ebenso sicher erkennen und messen wie $\frac{1}{100000}$ Milligramm.

Dieser Umstand ermöglichte F. Paneth, auf radioaktivem Wege den Nachweis der Existenz des seit langem gesuchten Wismutwasserstoffes zu erbringen. Er sammelte den aktiven Niederschlag der Thoriumemanation auf Magnesiumblechen und löste die so erhaltene Legierung von Thorium B (Bleiart) und Thorium C (Wismutart) mit dem Magnesium in verdünnten Säuren. Paneth zeigte, daß aus diesem Reaktionsgemisch neben Wasserstoff auch ein radioaktives Gas entweicht, dessen Aktivität in einem für die Untersuchung von Emanationen bestimmten Elektroskop mit der Halbwertszeit des Thorium C (1 Stunde) abfiel. Das neue Gas konnte nur als die Wasserstoffverbindung des Th C angesehen werden, wodurch bewiesen wurde, daß ein Element des Wismuttypus sich mit Wasserstoff (wohl zu Bi H_3) verbindet. Die in Form der Wasserstoffverbindung erhaltene Menge des Th C betrug nur 1 bis 2 Tausendstel der auf dem Magnesiumblech befindlichen Th C-Menge; diese schlechte Ausbeute erklärte zum Teil die bisherigen Schwierigkeiten, den Wismutwasserstoff in wägbaren Mengen zu erhalten. Nachdem aber durch die radioaktive Methode die besten Darstellungsbedingungen und die Eigenschaften der Wasserstoffverbindung des Wismuttypus ausfindig gemacht wurden, gelang es Paneth und E. Winternitz, auch aus gewöhnlichem Wismut seine gasförmige Wasserstoffverbindung in wägbaren Mengen darzustellen (31).

X. Neon und Metaneon.

In einem der vorhergehenden Kapitel wurde erwähnt, daß das gewöhnliche Blei vielleicht ein Gemisch von Uranblei und Thorblei vorstellt. Die Tatsache, daß das gewöhnliche Blei in chemischer Hinsicht sich wie ein einheitliches Element verhält, widerspricht einer solchen Hypothese durchaus nicht, denn ein Isotopengemisch ist ja durch die üblichen chemischen Trennungsmethoden unzerlegbar. Aus demselben Grunde wäre es möglich, daß auch viele der übrigen heute als Elemente geltenden Stoffe in Wirklichkeit Gemische von Isotopen sind, und diese Annahme ist besonders verlockend, wenn man an die S. 8 erwähnten Schwierigkeiten erinnert, auf die die Durchführung der Prout'schen Hypothese stößt. Die Erscheinungen des radioaktiven Zerfalls haben ja gezeigt, daß das Helium einen Bestandteil der radioaktiven Atome bildet. Das scheint auch für leichtere Elemente zu gelten: in den zwei Reihen von Elementen Li, B, (N), F, Na, Al, P und He, (Be), C, Ne, Mg, Si, S entspricht ähnlich wie bei α -Umwandlungen, einer Verschiebung um zwei Gruppen des periodischen Systems eine Veränderung des Atomgewichtes um vier Einheiten. Aber auch der Wasserstoff beteiligt sich wohl am Aufbau anderer Atome (36). Es liegt also nahe, wieder auf die Prout'sche Hypothese zurückzugreifen und zu versuchen, die Atomgewichte aller Elemente als Summe ganzer Vielfache der A. G. des Wasserstoffes (1,008) und des Heliums (4,00) darzustellen. Bei einer Anzahl von Elementen, zu denen besonders Magnesium (A. G. 24,32) und Chlor (A. G. 35,45) gehören, scheidet jedoch eine derartige Berechnung vollkommen. Es drängt sich deshalb die Frage auf, ob die erwähnten Stoffe nicht etwa Gemische von Isotopen vorstellen, deren Atomgewichte sich durch die Formel $m \times 1,008 + n \times 4,00$ ausdrücken lassen¹⁾.

Diese Hypothese ist der experimentellen Prüfung zugänglich, denn wenn auch ein Isotopengemisch durch die gewöhnlichen chemischen und viele physikalischen Mittel unzerlegbar ist, muß

¹⁾ m und n sind ganze Zahlen.

seine Zerlegung gelingen, sobald man Trennungsmethoden anwendet, welche sich auf die Verschiedenheit der Masse der Isotopen stützen.

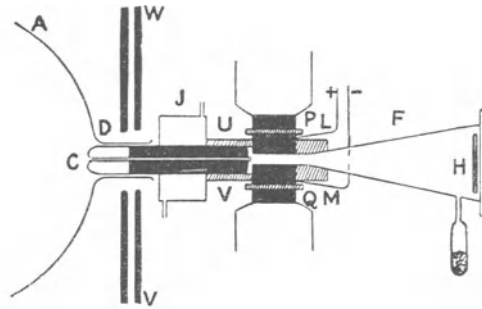
Vor allem wäre hier die Diffusion im Gaszustande zu nennen, deren Geschwindigkeit bei gegebener Temperatur bekanntlich nur vom Molekulargewicht des Gases abhängt und deshalb bei fraktionierter Durchführung zu einer teilweisen Trennung der Isotopen benutzt werden könnte. Weiterhin sei hier kurz auf die höchst interessante Methode der elektro-magnetischen Analyse der Kanalstrahlen eingegangen.

Unter Kanalstrahlen oder auch positiven Strahlen versteht man positiv geladene Gasteilchen, die in evakuierten Entladungsröhren (A in Fig. 4)

mit großen Geschwindigkeiten zur negativen Elektrode (Kathode C), also in einer der Bewegung der Kathodenstrahlen entgegengesetzten Richtung fliegen und durch einen Kanal in der Kathode hinter diese gelangen können. Wenn diese Kanalstrahlenteilchen

auf ihrem weiteren Wege ein elektrisches (L, M) und magnetisches (P, Q) Feld passieren, so erleiden sie Ablenkungen von ihrer geradlinigen Bahn, deren von dem Verhältnis der Ladung (E) zur Masse (m) dieser Teilchen und von ihrer Geschwindigkeit abhängende Größe auf einer senkrecht zur ursprünglichen Flugrichtung der Strahlen aufgestellten photographischen Platte (H) gemessen werden kann. Bei entsprechender gegenseitiger Stellung der beiden Felder bekommt man auf diese Weise auf der Platte eine Reihe von Parabeln, von denen jede Spuren von Teilchen vereinigt, die ein bestimmtes E/m und verschiedene Geschwindigkeiten besitzen. Da man, wie Sir J. J. Thomson zeigte, aus der Entfernung des Anfanges der Parabeln von der Spur der ursprünglichen Strahlenrichtung (runder Fleck in der Fig. 5) auf der Platte in vielen

Fig. 4.



Apparat zur Erzeugung von Kanalstrahlen nach J. J. Thomson.

Fällen die Ladung E (sie entspricht ganzen Vielfachen des elektrischen Elementarquantums) ermitteln kann, erlaubt diese Methode dann das m , also die Masse der im Gase enthaltenen Teilchen, zu bestimmen. Die Fig. 5 zeigt z. B. eine Platte, die von Thomson bei der Untersuchung eines Gemisches der leichteren Edelgase der Atmosphäre erhalten wurde.

Nun haben die Isotopen verschiedene Massen m , müßten also getrennte Parabeln ergeben, wodurch nicht nur ihr Nachweis,

Fig. 5.



Kanalstrahlen in einem Gemisch der leichteren Edelgase der Atmosphäre nach J. J. Thomson.

sondern prinzipiell auch eine Trennung möglich wäre.

Diese Methode scheint in einem Falle bereits ein für unser Problem wichtiges Resultat ergeben zu haben. Auf der abgebildeten Platte fand nämlich Thomson, daß neben der normalen Parabel, die Neon mit dem A. G. 20 entspricht, sich auch eine viel schwächere befindet, die einem Gas mit dem A. G. 22 zukommen muß. Für die Annahme, daß es sich dabei um ein neues Glied der Neoplejade handelt, gewann dann F. Aston eine weitere Stütze, als er versuchte, das hypothetische Element von Neon abzutrennen. Alle chemischen

Methoden und auch fraktionierte Verdampfung des Neons versagten völlig, doch konnte durch das vorher erwähnte Mittel — durch fraktionierte Diffusion — eine teilweise Trennung erreicht werden. Während die Dichte des gewöhnlichen Neons (bezogen auf Sauerstoffgas = 32,00) 20,19 beträgt, wurden äußerste Fraktionen mit Dichten 20,15 und $20,28 \pm 0,02$ erreicht. Das neue hypothetische Gas wurde Metaneon genannt. Eine Bestätigung dieser Versuche steht allerdings noch aus (32a). Sollten sie sich jedoch

als richtig erweisen, so käme ihnen eine sehr große Bedeutung zu, weil es sich dabei um den ersten Isotopiefall bei Elementen handeln würde, die in keinem näheren Zusammenhang mit radioaktiven Stoffen (32) stehen.

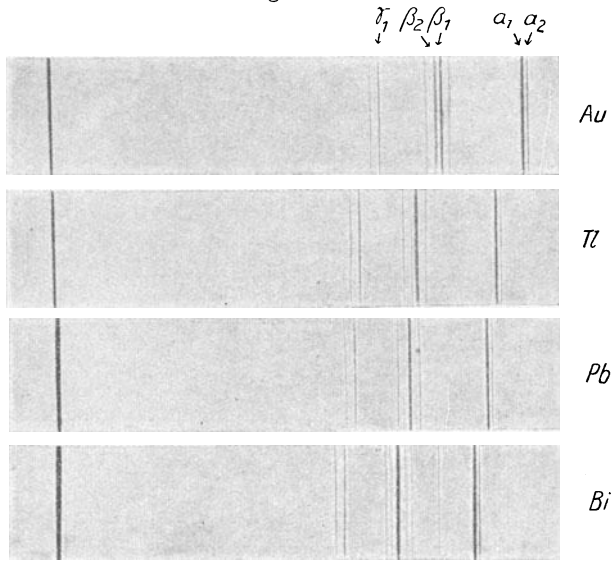
XI. Die Ordnungszahlen der Elemente.

Durch die Entdeckung der isotopen Elemente, insbesondere durch die erwähnten Atomgewichtsbestimmungen an Blei verschiedenen Ursprungs, ist mit Sicherheit gezeigt worden, daß es Elemente gibt, die bei verschiedenem Atomgewicht außerordentlich ähnliche, bis jetzt überhaupt nicht unterscheidbare chemische und spektroskopische Eigenschaften besitzen. Das Atomgewicht bestimmt also nicht, wie man seit der Aufstellung des periodischen Systems dachte, eindeutig die Eigenschaften eines Elementes und kann auch nicht als die einzige Grundlage einer Systematik der Elemente dienen. Zunächst könnte es ja scheinen, daß durch diese Schlüsse der Wert des periodischen Systems zweifelhaft gemacht wird. Die hohe Bedeutung des periodischen Systems bleibt jedoch vollkommen gewahrt, wenn man statt des Atomgewichtes eine andere Eigenschaft der Elemente, nämlich ihre Ordnungszahl, auch Grundzahl genannt, in den Vordergrund der Betrachtung stellt. Darunter versteht man die Zahl, die man erhält, wenn die Elemente in Reihenfolge ihrer Anordnung im periodischen System numeriert werden, also Wasserstoff = 1, Helium = 2 usw., bis Uran = 92 (vgl. Tabelle 9). Daß dieser Nummer eine tiefere Bedeutung zukommt, und daß man einen vom periodischen System unabhängigen Weg zu ihrer Bestimmung hat, das beweisen vor allem die grundlegenden Messungen der Wellenlänge sogenannter charakteristischer Röntgenstrahlen, die wir in erster Linie H. G. Moseley verdanken.

Im Jahre 1912 machten M. v. Laue und seine Mitarbeiter W. Friedrich und P. Knipping die so überaus wichtige Entdeckung, daß Röntgenstrahlen beim Durchgang durch Kristalle Interferenzerscheinungen zeigen. Diese Entdeckung bewies nicht

nur endgültig, daß Röntgenstrahlen eine Wellenbewegung vorstellen, sondern sie ermöglichte auch besonders dank den Arbeiten von W. H. und W. L. Bragg die genaue Bestimmung der Wellenlänge der unter verschiedenen Umständen entstehenden Röntgenstrahlen, wobei sich ergab, daß die Wellenlänge dieser Strahlen mit ihrer steigenden Durchdringungsfähigkeit (Härte) fällt.

Fig. 6.



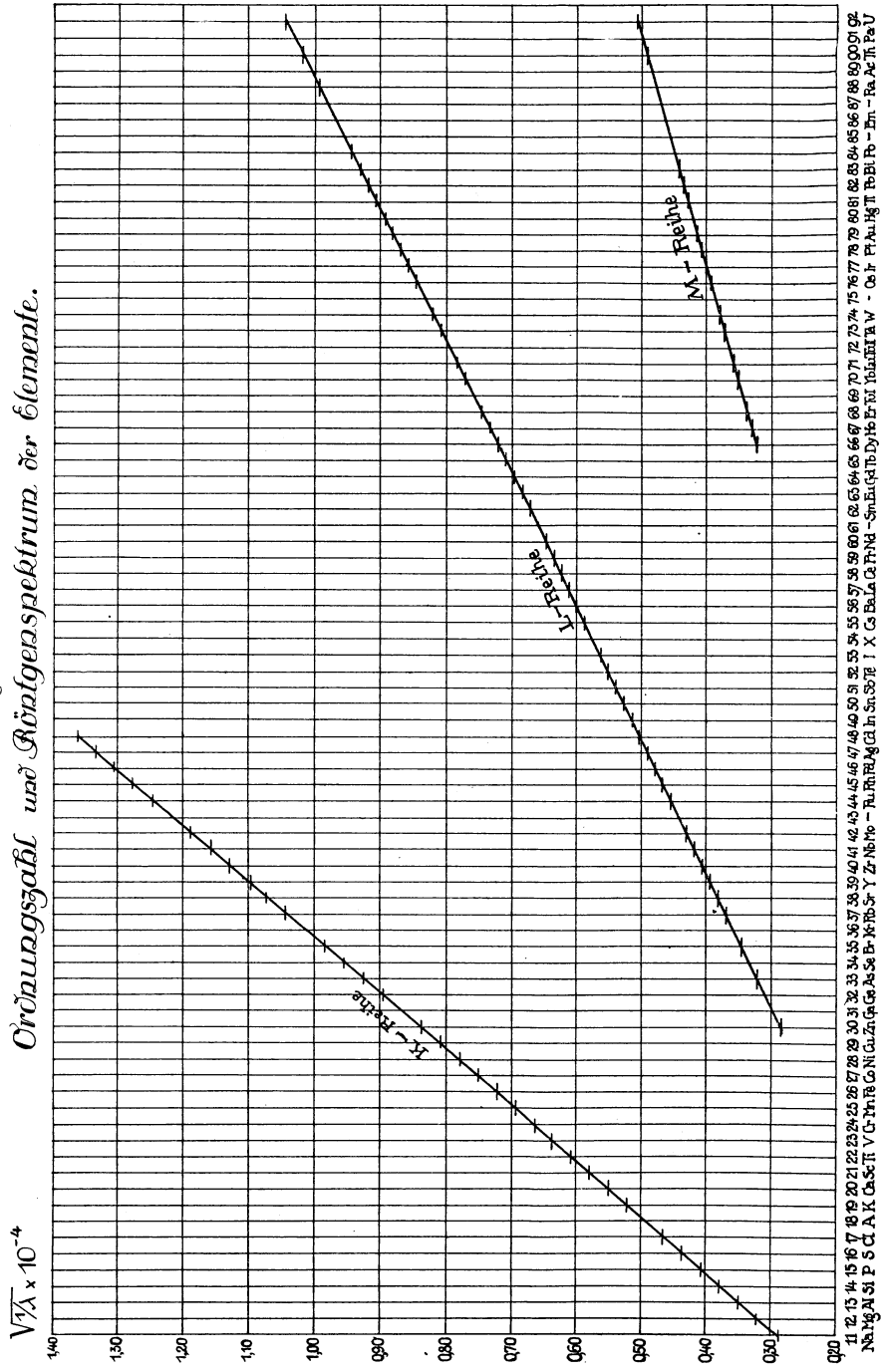
Röntgenspektren der L-Reihe einiger Elemente nach M. Siegbahn.

Aus den Untersuchungen von Ch. G. Barkla war bereits bekannt, daß jedes Element unter dem Einfluß von Röntgen- oder Kathodenstrahlen Röntgenstrahlen von einer für das Element charakteristischen Härte aussendet. Die Härte dieser Strahlen steigt im allgemeinen mit steigendem A. G. des Elementes. Bei Elementen von mittlerem A. G. konnten zwei durch ihre Härte leicht unterscheidbare charakteristische Strahlenarten gefunden werden, die härtere K-Strahlung und die weichere L-Strahlung, während bei Elementen mit niedrigem A. G. nur die K-Strahlung, bei solchen mit hohem A. G. nur die L-Strahlung der Untersuchung zugänglich waren.

Die mit Hilfe der Kristallinterferenzmethode ausgeführten Untersuchungen von Moseley, die dann von M. Siegbahn u. a. wesentlich erweitert wurden, zeigten, daß sich jede solche K- oder L-Strahlung und die von Siegbahn neuerdings bei Elementen mit besonders hohem A. G. aufgefundene noch weichere M-Strahlung in Linienspektren (vgl. Fig. 6) zerlegen läßt, die bei den verschiedensten Elementen ähnlich gebaut sind. So besteht z. B. die K-Strahlung im allgemeinen aus vier Linien, die nahe beieinander liegende Wellenlängen besitzen, die L-Strahlung aus etwa 12 Linien. Nun hängt die Wellenlänge (λ) der bei den verschiedenen Elementen einander entsprechenden Linien bzw. ihr reziproker Wert, die Schwingungszahl oder Frequenz nach einer von Moseley im Jahre 1913 entdeckten Beziehung in einer äußerst einfachen Weise mit der Ordnungszahl der Elemente zusammen. In der Fig. 7 sind die Elemente in gleichem Abstände voneinander in derselben Reihenfolge wie im periodischen System angeordnet; es ist also ihre Ordnungszahl als Abszisse gewählt, während die Ordinaten die Quadratwurzel aus der Schwingungszahl der analogen Linien vorstellen. Wie ersichtlich, liegen die erhaltenen Punkte, die sich je auf die stärkste Linie der K-, L-¹) und M-Strahlen beziehen, auf einer annähernd geraden Linie. Zum Atomgewicht zeigt jedoch die Frequenz der charakteristischen Röntgenstrahlen keine einfache Beziehung, und es ist z. B. die Frequenz beim Jod trotz seines kleineren Atomgewichtes (126,92) höher als die beim Tellur (A. G. 127,5) ganz entsprechend der anomalen Reihenfolge, die man diesen Elementen auf Grund ihrer chemischen Eigenschaften im periodischen System zuweisen muß. Dasselbe gilt vom Kobalt und Nickel. Einen weiteren Beweis dafür, daß für die Frequenz der Röntgenstrahlen nicht das A. G., sondern wie für das chemische Verhalten die Stellung im System, d. h. die Ordnungszahl maßgebend ist, ergibt sich aus folgendem. Sir Ernest Rutherford und E. da C. Andrade haben gezeigt, daß die von dem kurzlebigen Glied der Bleiblejade Radium B (A. G. = 214) emittierten γ -Strahlen dieselbe Wellenlänge aufweisen, wie die charakteristischen Röntgenstrahlen des Bleies (A. G. = 207), und nach

¹) α_1 der Fig. 6.

Fig. 7.
Ordnungszahl und Röntgenspektrum der Elemente.



11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92
 Na Mg Al Si P S Cl Ar K Ca Sc Ti V Cr Mn Fe Co Ni Cu Zn Ga Ge As Se Br Kr Rb Sr Y Zr Nb Mo C Nd Pm Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu Hf Ta W Os Ir Pt Au Hg Tl Pb Bi Po At Rn Pa U Th Pu Am Cm Bk Cf Fm Md No Lr

M. Siegbahn sind auch die Wellenlängen der Röntgenspektren von $\text{Pb}^{206,0}$ und $\text{Pb}^{207,2}$ bis auf $1/2$ pro Mille ihres Absolutwertes übereinstimmend.

Das charakteristische Röntgenspektrum ist also ähnlich wie das gewöhnliche optische Spektrum, eine Typuseigenschaft und erlaubt somit nicht, die einzelnen Glieder einer Plejade voneinander zu unterscheiden. Zur Erkennung der Ordnungszahl und des mit ihr eindeutig zusammenhängenden chemischen Typus ist aber die Röntgenspektroskopie von hervorragender Bedeutung, und wir werden im Schlußkapitel auf einige für die Lehre von den chemischen Elementen sich aus ihr ergebende wichtige Resultate noch zurückkommen. Zunächst sei aber die sich aufdrängende Frage erörtert, welchen tieferen physikalischen Sinn diese Ordnungszahl besitzt (33).

XII. Struktur der Atome.

Um diese Frage zu beantworten, müssen wir uns dem heute im Mittelpunkt des Interesses stehenden Problem der Struktur der Atome zuwenden, das in den letzten Jahren eine entscheidende Förderung erfahren hat. Es würde einer eigenen Schrift (34, 35) vom Umfange der vorliegenden bedürfen, um auch nur die wichtigsten, auf diesem Gebiete bereits erzielten Resultate darzustellen; wir müssen uns deshalb hier auf dasjenige beschränken, was für unser Thema der Beziehungen zwischen Radioaktivität und der Lehre von den chemischen Elementen erforderlich ist.

Den Ausgangspunkt für die jetzt herrschenden Ansichten über die Struktur der Atome bildet das von Sir Ernest Rutherford vorgeschlagene Atommodell, das er zuerst im Jahre 1911 zur Deutung des Verhaltens von α -Strahlen bei ihrem Durchgang durch Materie herangezogen hat. Dieses Modell wurde dann von Niels Bohr (1913) durch Verknüpfung mit der Planckschen Quantentheorie so glücklich weiter entwickelt, daß es mit einem Schlage zur Grundlage der Theorie der Spektrallinien und vieler anderen Erscheinungen wurde.

1. Allgemeine Vorstellungen.

Das Rutherford-Bohrsche Atommodell führt die Struktur der Atome auf positive und negative Elektrizität zurück. Das Atom eines jeden Elementes besteht danach aus einem positiv geladenen Zentralkern, der von Ringen negativer Elektronen umgeben ist. Im neutralen Zustande des Atoms ist die Summe der Ladungen der negativen Elektronen gleich der Ladung des Kernes. Der Kern hat sehr kleine Dimensionen (Radius von der Größenordnung 10^{-12} cm), während der Radius des äußersten Elektronenringes dem Atomradius entspricht, also von der Größenordnung 10^{-8} cm ist. Um zu erklären, weshalb die negativen Elektronen trotz der anziehenden Wirkung des positiven Kernes von diesem entfernt bleiben, muß angenommen werden, daß sie um den Kern rotieren. Ein Atom ist somit in gewisser Hinsicht mit einem kleinen Sonnensystem vergleichbar.

Die chemischen und viele physikalischen Eigenschaften hängen in erster Linie von der Anordnung der äußeren Elektronen des Atoms ab, so z. B. die Valenz eines Metalls von der Zahl derjenigen Elektronen, die leicht von dem Metallatom entfernt werden können (4). Auch das Zustandekommen des gewöhnlichen Lichtspektrums wird auf die Lagenveränderungen der äußeren Elektronen zurückgeführt.

Anders die Masse und die radioaktiven Eigenschaften. Die Masse des negativen Elektrons beträgt nur $\frac{1}{1830}$ der Masse des Wasserstoffatoms. Nun spricht eine Reihe von Erscheinungen zugunsten der Annahme, daß die Zahl der negativen Elektronen in den Atomen verschiedener Elemente von der Größenordnung ihres Atomgewichtes ist, so z. B. für das Wasserstoffatom eins beträgt. Somit muß der Hauptteil der Atommasse an die positive Elektrizität gebunden sein, d. h. auf Grund des Rutherford'schen Modells an den positiven Kern des Atoms. Die mit einer beträchtlichen Masse behafteten und eine positive Ladung tragenden α -Teilchen müssen danach bei den radioaktiven Umwandlungen aus dem Kern der radioaktiven Atome ausgeschleudert werden. Die Unbeeinflußbarkeit der radioaktiven Vorgänge im Gegensatz zu den chemischen wird vom Standpunkte dieser Vor-

stellungen verständlich, da sich die letzteren an der Oberfläche, die ersteren tief im Innern der Atome abspielen.

Man nimmt deshalb an, daß auch die negativen Elektronen bei den einer Beeinflussung ebenfalls widerstrebenden β -Umwandlungen von den Kernen der Radioelemente abgegeben werden. Die Kerne, mindestens die mancher radioaktiver Atome, müssen somit auch negative Elektronen enthalten. Die positive Ladung des Atomkerns wäre danach eine algebraische Summe der den Kern zusammensetzenden positiven und negativen Teilchen (34).

2. Die Kernladung.

Die grundlegende Frage nach der Größe der positiven Ladung von Atomkernen verschiedener Elemente wird durch die zuerst von A. van den Broek (1913) geäußerte Ansicht beantwortet, nach der die positive Kernladung ausgedrückt in elektrischen Elementarquanten gleich ist der Ordnungszahl des Elementes, die sich ja auf Grund des periodischen Systems oder noch eindeutiger aus dem im vorigen Kapitel besprochenen Moseleyschen Gesetz der Röntgenspektren ergibt.

Die Ordnungszahl 1 des Wasserstoffs bedeutet also, daß der Kern des Wasserstoffatoms nur eine positive Ladung trägt, daß also das Wasserstoffatom aus einem positiven Elementarquantum besteht, um das ein negatives Elektron rotiert. Verliert ein Wasserstoffatom dieses negative Elektron, so stellt der zurückbleibende Kern, das einfach geladene positive Wasserstoffion, die kleinste bekannte positive Ladung vor. An diese scheint die Masse des Wasserstoffatoms unzertrennlich gebunden zu sein, denn das Wasserstoffion ist das leichteste positiv geladene Teilchen, das bis jetzt beobachtet werden konnte. Dieses „positive Elektron“ hat also eine etwa 1830 mal größere Masse als das negative.

An der Richtigkeit der erwähnten Vorstellung über die Struktur des Wasserstoffatoms kann kaum gezweifelt werden, da es Bohr gelungen ist, auf Grund dieser Hypothese unter Heranziehung der Quantentheorie das Zustandekommen des Spektrums des Wasserstoffs weitgehend aufzuklären, und da P. Debye aus dem optischen

Verhalten des Wasserstoffgases genau angeben konnte, in welcher Weise sich zwei solche Bohrsche Wasserstoffatome zu dem Molekül des gasförmigen Wasserstoffs zusammenfügen.

Dem Wasserstoff folgt im periodischen System das Helium mit der Ordnungszahl 2, und es müßte somit nach der van den Broekschen Hypothese sein Atomkern eine doppelte positive Ladung besitzen, was mit der Rutherfordschen Annahme, daß der Heliumkern mit dem α -Teilchen identisch ist, in bestem Einklang steht.

Nicht nur dieser radioaktive Grund spricht für die Annahme, daß das Heliumatom aus einem zweifach positiv geladenen Kern und zwei negativen Elektronen besteht, sondern in noch höherem Grade die großen Erfolge, die Bohr und A. Sommerfeld mit Hilfe dieses Modells bei der Erklärung selbst der feinsten Details des Heliumspektrums erzielt haben.

Die Ordnungszahl, also auch die Kernladung des Lithiums, soll 3 betragen, die des Berylliums 4 usw. bis zum Uran, dessen Kernladung zu 92 angenommen wird. Für die Richtigkeit des Absolutwertes dieser Zahlen besitzen wir heute noch keine so überzeugenden Gründe wie im Falle von Wasserstoff und Helium, doch werden sie als sehr wahrscheinlich angesehen. Daß aber, entsprechend der van den Broekschen Hypothese, die Kernladung beim Fortschreiten im periodischen System in der Richtung steigender Ordnungszahl von Stelle zu Stelle jeweils um eine Einheit steigt, dafür bürgt die Moseleysche Beziehung zwischen der Ordnungszahl der Elemente und der Wellenlänge der Linien ihrer charakteristischen Röntgenspektren. Denn auf Grund der van den Broekschen Hypothese konnten Moseley und besonders Sommerfeld die für das gewöhnliche Spektrum so gut bewährte Bohrsche Theorie der Spektrallinien auch auf die Röntgenspektren ausdehnen und dabei die Moseleysche Beziehung und den Bau dieser Spektren weitgehend erklären (35).

3. Erklärung der Verschiebungssätze und der Isotopie.

Eine weitere Stütze für diese Vorstellungen bilden, wie Bohr und Soddy hervorgehoben haben, die radioaktiven Verschiebungssätze und die Existenz der isotopen Elemente. In der Tat, wenn

die Verschiebung zur nächstniedrigeren Gruppe des periodischen Systems, d. h. die Erniedrigung der Ordnungszahl um eine Einheit, die positive Kernladung um ein Elementarquantum verkleinert, so muß die Abgabe eines doppelt positiv geladenen α -Teilchens durch den Kern eines radioaktiven Atoms einen Übergang zur zweitniedrigeren Gruppe des periodischen Systems bewirken. Da andererseits der Verlust eines einfach negativ geladenen β -Teilchens die positive Gesamtladung¹⁾ des Kernes um eine Einheit erhöht, so wird bei β -Umwandlungen eine Verschiebung zur nächsthöheren Gruppe stattfinden müssen. Diese Folgerungen sind aber mit den Verschiebungssätzen identisch. Erleidet weiterhin ein Element (U_I) eine α -Umwandlung und folgen ihr dann zwei β -Umwandlungen (die des UX_1 und UX_2), so muß nach dem Obigen das nach der dritten Umwandlung entstehende Element (U_{II}) isotop mit dem ersten (U_I) sein, und die Kernladungen der beiden Elemente (U_I und U_{II}) müssen gleich sein.

Nun ist aber die Kernladung gleich der Zahl der außerhalb des Kernes befindlichen negativen Elektronen, deren Anordnung um den Kern wiederum in erster Linie von den gegenseitigen elektrostatischen Kräften abhängen wird, die Kern und Elektronen aufeinander ausüben. Deshalb müssen die meisten physikalischen und die chemischen Eigenschaften, die ja von der Anordnung dieser äußeren Elektronen abhängen, bei Elementen mit gleicher Kernladung, wie U_I und U_{II} , eine sehr weitgehende Übereinstimmung zeigen, obwohl ihre Atomgewichte wegen der Abgabe eines α -Teilchens sich um vier Einheiten unterscheiden. Dadurch ist das Wesen der Isotopie erklärt: ihr liegt die gleiche Kernladung mehrerer Elemente zugrunde. Gleichzeitig ergibt sich aus dieser Betrachtung, daß die fundamentale Eigenschaft des Atoms, von der die meisten übrigen Eigenschaften in erster Linie abhängen, nicht das Atomgewicht, sondern die Kernladung ist. Natürlich sind die Kerne der Isotopen nicht identisch: die Zusammensetzung der Kerne von U_I und U_{II} unterscheidet sich ja um ein α -Teilchen und zwei Elektronen, und der Kern vom Radium B enthält sogar zwei α -Teilchen und vier Elek-

¹⁾ Die ja nach S. 75 eine algebraische Summe der positiven und negativen Bestandteile vorstellt.

tronen mehr als der Kern seines Isotopen, des Radium G. Das erklärt ja, warum die Isotopen sich so verschieden in bezug auf ihre radioaktiven Eigenschaften, z. B. die Lebensdauer, verhalten. Die verschiedene Konstitution der Kerne wird übrigens auch für die Eigenschaften der äußeren Elektronen nicht ganz ohne Einfluß sein können, doch sind die aus diesem Grunde zu erwartenden Verschiedenheiten der chemischen und spektroskopischen Eigenschaften der Isotopen so außerordentlich klein, daß sie bisher dem experimentellen Nachweis entgehen mußten.

4. Die Masse der Kerne.

Aus den obigen Betrachtungen ergibt sich von selbst eine Präzisierung der auf Grund der radioaktiven Tatsachen so naheliegenden Annahme, daß das Helium in anderen Elementen enthalten ist: wir müssen uns nämlich vorstellen, daß nicht das ganze Heliumatom, sondern nur sein Kern einen Bestandteil der schwereren Kerne bildet. Dasselbe werden wir vom Wasserstoffatom anzunehmen haben, falls der Wasserstoff (36) sich an dem Aufbau anderer Elemente beteiligt. Und da ja, wie erwähnt wurde, auch negative Elektronen in den Kernen mancher Elemente enthalten sind, kommen wir zu dem Ergebnis, daß selbst diese so winzigen Kerne höchst komplizierte Gebilde vorstellen, in denen gewaltige elektrische Kräfte herrschen müssen. Dies gibt uns einen Fingerzeig, worin die Abweichungen von der Prout'schen Hypothese begründet sein können, falls sich die auf S. 66 erwähnte Vermutung, daß manche unserer Elemente Gemische von Isotopen vorstellen, nicht bestätigen sollte. Die Masse der Atome muß sich nach den vorgebrachten Vorstellungen auf die Masse der sie zusammensetzenden positiven und negativen Teilchen zurückführen lassen. Nun kann man die bei der Bewegung von negativen Elektronen und von positiven Wasserstoffkernen zum Vorschein kommende Masse auf Grund der Theorie elektromagnetischer Erscheinungen durch elektrische und magnetische Kräfte erklären, die von diesen kugelförmig gedachten mit Oberflächenladung versehenen Teilchen ausgehen (sogenannte elektromagnetische Masse), wenn man annimmt, daß der Radius des negativen Elektrons von der Größen-

ordnung von 10^{-13} cm und der des Wasserstoffkernes noch kleiner ist. Man könnte sich nun weiter denken, daß der die Masse 4,00 und eine doppelte positive Ladung aufweisende Heliumkern (α -Teilchen) aus vier einfach positiv geladenen Wasserstoffkernen von der Masse 1,008 und zwei negativen Elektronen zusammengesetzt sei. Da nun, wie aus gewissen Erscheinungen hervorgeht, der Radius des α -Teilchens auch nur von der Größenordnung von 10^{-13} cm ist, werden die bei der gemeinsamen Bewegung seiner dicht beieinander liegenden Bestandteile als Masse zur Geltung kommenden elektromagnetischen Wirkungen sich gegenseitig beeinflussen, und man könnte so verstehen, warum die Masse des Heliumkernes nicht genau gleich dem Vierfachen der Masse des Wasserstoffkernes ist (W. D. Harkins). Eine ähnliche elektromagnetische gegenseitige Wechselwirkung zwischen den konstituierenden Teilen schwererer Kerne könnte zur Erklärung der Abweichungen von der Prout'schen Hypothese herangezogen werden (37).

XIII. Revision des Begriffes des chemischen Elementes.

Die radioaktive Forschung hat die Lehre von den chemischen Elementen um zwei neue Erscheinungen von fundamentaler Bedeutung bereichert: einerseits wurde die Umwandlungsfähigkeit wenigstens eines Teiles der Elemente, andererseits die Existenz isotoper Elemente zutage gefördert. Man muß sich die Frage vorlegen, in welchem Verhältnis diese beiden Tatsachen zu dem alten von Boyle und Lavoisier aufgestellten Begriff des chemischen Elementes stehen.

1. Der Elementbegriff und die radioaktiven Umwandlungen.

Die radioaktiven Umwandlungen haben unzweifelhaft bewiesen, daß alle Stoffe, die im periodischen System zwischen Uran und Blei stehen und dazu noch einige Glieder der Blei- und Thalliumplejade in die einfacheren Bestandteile Helium und die stabilen Bleiarten $\text{Ra G} = \text{Pb}^{206,0}$ und $\text{Th D} = \text{Pb}^{208}$ zerfallen, also als aus diesen

Bestandteilen zusammengesetzt aufgefaßt werden können. Es wäre aber sicherlich verfehlt, wenn man diese zusammengesetzten Stoffe aus der Liste der Elemente entfernen würde und sie etwa zu chemischen Verbindungen rechnen wollte. Alles spricht dafür, daß die Elemente der letzten zwei Horizontalreihen des periodischen Systems in der Rangliste der Stoffe auf dieselbe Stufe gestellt werden müssen, wie die übrigen Glieder des periodischen Systems, so daß man kaum daran zweifeln kann, daß die übrigen Elemente ebenso wenig einfach sind, wie die zwischen Uran und Thallium stehenden. Wollte man diese Art der Zusammengesetztheit als ein genügendes Hindernis für die Auffassung eines Stoffes als Element ansehen, so dürfte man vom Standpunkte der modernen Vorstellungen über die Struktur der Atome auf die Liste der Elemente nur das negative und positive Elektron, die man zurzeit als einfach ansieht, setzen, und müßte alle Stoffe streichen. Das würde natürlich eine völlige Umgestaltung des bisherigen Elementbegriffes bedeuten. Man muß also die durch die radioaktiven Umwandlungen erwiesene zusammengesetzte Natur der Stoffe und diejenige, welche wir durch die Zerlegungskunst der Chemiker kennen gelernt haben, auseinanderhalten. Will man auf rein experimentellem Boden bleiben, so besteht das wichtigste Grenzmerkmal der beiden Zerlegungserscheinungen darin, daß wir die radioaktiven Umwandlungen bis heute noch in keiner Weise künstlich zu beeinflussen oder umzukehren verstehen, während wir die Zerlegung der Verbindungen in die Elemente und den umgekehrten Vorgang weitgehend in der Hand haben. Man kann also trotz der Existenz radioaktiver Umwandlungen den Elementbegriff in seinem bisherigen Sinne vollkommen aufrecht erhalten, und das Element weiterhin als einen Stoff definieren, der durch kein Mittel zerlegt werden konnte, wenn man im Auge behält, daß es sich um künstliche Zerlegung handelt.

Wir bleiben uns dabei vollkommen bewußt, daß die Definition in dieser Form möglicherweise nur von beschränkter Dauer sein wird, denn vielleicht gelingt es doch früher oder später die Umwandlungen der Elemente zu beherrschen, wohl eine der schönsten Hoffnungen, die es für einen Chemiker geben kann. Der Unterschied in der Art und dem Grade der Beeinflußbarkeit der zwei

Erscheinungsklassen wird aber sicherlich für alle Zeiten so groß bleiben, daß eine Schwierigkeit der Abgrenzung kaum zu befürchten ist, wenn auch aus einem qualitativen Unterschied ein quantitativer resultieren wird. Sollten sich aber die Rutherford-Bohr'schen Vorstellungen über die Struktur der Atome auch weiterhin so glänzend wie bis jetzt bewähren und auf noch breitere experimentelle Basis stellen lassen, so hätten wir übrigens auch einen neuen qualitativen Unterschied, der darin besteht, daß der Zerfall der Elemente im Atomkern vor sich geht, während der der chemischen Verbindungen nur die Oberfläche des Atoms berührt. Man kann also jedenfalls die weitere eventuell notwendige Ausgestaltung der Definition, was diese Frage anbelangt, ruhig der Zukunft überlassen.

2. Der Elementbegriff und die Isotopie.

Nun wollen wir zusehen, welche Konsequenzen sich für den Elementbegriff aus der Erscheinung der Isotopie ergeben. Es besteht hier eine eigenartige Sachlage: die Isotopen verhalten sich in bezug auf die für die Charakterisierung und Erkennung der Elemente so wichtigen Eigenschaften wie das gewöhnliche und das Röntgenspektrum als dasselbe Element, in bezug auf eine andere nicht minder wichtige Eigenschaft, nämlich das Atomgewicht, als verschiedene Elemente. So erklärt es sich, daß heute in der Anwendung des Elementbegriffes auf die Isotopen zwei verschiedene Meinungen vertreten werden: Paneth betrachtet die Isotopen nicht als verschiedene Elemente, sondern als verschiedene Arten desselben Elementes. Der Verfasser empfiehlt jedoch, die Isotopen als verschiedene Elemente anzusehen und die weitgehende Übereinstimmung, die sie in ihren meisten Eigenschaften zeigen, durch Einführung des Begriffes des chemischen Elemententypus zum Ausdruck zu bringen, also die Isotopen als verschiedene Elemente desselben chemischen Typus anzusehen.

a) Die Isotopen als dasselbe Element.

Wenn es sich auch bei diesen auseinander gehenden Meinungen schließlich nur um Unterschiede der Terminologie handelt, so werden sich die Chemiker wegen der großen Bedeutung, die der

Begriff und das Wort „Element“ für sie besitzt, früher oder später genötigt fühlen, den Gebrauch nur einer dieser zwei Auffassungen zu vereinbaren. Bei der zu treffenden Wahl wird man wohl in erster Linie bestrebt sein, den bisherigen Elementbegriff möglichst wenig zu verändern. Es sei deshalb hier nur auf die Frage eingegangen, welche von den beiden Auffassungen an dem alten Elementbegriff weniger rüttelt

Nach der Auffassung von Paneth stellen die in bezug auf die Methodik ihrer Untersuchung so gänzlich verschiedenen Stoffe, wie das kurzlebige Ra B und das gewöhnliche Blei oder die zwei Bleiarten ^{206}Pb und ^{208}Pb , dasselbe Element vor. Die radioaktiven Eigenschaften, die die Entdeckung so vieler Elemente ermöglicht haben, und das A. G. hören auf für ein Element charakteristisch zu sein, und die Frage, ob zwei durch diese Eigenschaften leicht voneinander unterscheidbaren Stoffe dasselbe oder verschiedene Elemente sind, kann nur auf Grund ihres qualitativ-chemischen oder spektroskopischen Verhaltens (oder anderer Typuseigenschaften, vgl. S. 60) entschieden werden. Da aber in diesem Verhalten nicht nur die einheitlichen Glieder einer Plejade, sondern auch ihre Gemische völlig übereinstimmen, so muß man von diesem Standpunkte aus auch ein Gemisch von Ra B und Blei oder eine durch Zusammenschmelzen von ^{206}Pb und ^{207}Pb erhaltene Legierung als Elemente betrachten, obwohl man mit voller Sicherheit weiß, Gemische vor sich zu haben. Diese Betrachtungsweise verlangt natürlich die Preisgabe der primitivsten Vorstellungen, die man an das Wort Element bis jetzt geknüpft hat.

Wir waren weiterhin gewohnt, die Zahl der Elemente mit der Zahl der durch erschöpfende Analyse zu erreichenden unterscheidbaren Bestandteile der Stoffe zu identifizieren, und darin lag ja der Hauptwert und Hauptzweck des Elementbegriffes, denn „Element“ heißt Bestandteil. Faßt man die Isotopen jedoch als dasselbe Element auf, so gilt das nicht mehr. Denn $^{206}\text{Pb Cl}_2$ und $^{208}\text{Pb Cl}_2$ bestehen nach dieser Auffassung nur aus zwei Elementen, nämlich aus Chlor und Blei, obwohl sie sich in drei unterscheidbare Bestandteile zerlegen lassen, nämlich in Chlor, ^{206}Pb und ^{208}Pb . Das

Element hört also auf, ein bestimmter Bestandteil der Stoffe zu sein, der vollkommen eindeutige Eigenschaften besitzt, sondern wird nur zum Träger von gewissen Eigenschaften (die wir Typuseigenschaften genannt haben). Wir hätten also einen vollkommen neuen Elementbegriff, der im Grunde genommen mehr Gemeinsames mit dem Elementbegriff von Aristoteles als mit dem von Boyle hätte, denn auch bei Aristoteles waren die vier Elemente Erde, Wasser, Feuer und Luft nicht als wirkliche Bestandteile anderer Stoffe, sondern nur als Träger der Eigenschaften trocken-kalt, feucht-kalt, trocken-warm und feucht-warm gedacht.

Sollte man sich zu dieser weitgehenden Umgestaltung des Elementbegriffes entschließen, so würde auch sein bisheriges Hauptkriterium, nämlich die Unzerlegbarkeit, nicht mehr gelten. Denn ein Gemisch von Isotopen läßt sich zwar nicht durch die üblichen chemischen Trennungsmethoden zerlegen, wohl aber prinzipiell durch fraktionierte Diffusion usw. Man müßte deshalb in die Elementdefinition ein neues Kriterium aufnehmen und käme z. B. zu folgender Formulierung. Ein chemisches Element ist ein Stoff, der entweder überhaupt nicht oder nur in Stoffe zerlegt werden kann, die das gleiche Röntgenspektrum geben und als dasselbe Element anzusehen sind.

Zwei als wichtige Erkenntnisse der bisherigen Elementenlehre geltende Sätze dürften allerdings aufrecht erhalten bleiben, wenn man diesen neuen Elementbegriff akzeptieren würde. Einerseits wäre, wie bis vor kurzem, die Zahl der existierenden Elemente als identisch mit der Zahl der Stellen im periodischen System anzusehen, andererseits könnte man auch weiterhin behaupten, auf Grund der qualitativ-chemischen und spektroskopischen Eigenschaften alle Elemente voneinander unterscheiden zu können. Diese beiden Sätze verlieren ihre Gültigkeit, wenn man die Isotopen als verschiedene Elemente betrachtet, denn sie gelten in diesem Falle nicht mehr für Elemente, sondern für die Elemententypen. Daraus darf man aber nicht folgern, daß der Elementbegriff eine wesentliche Umgestaltung erleidet, wenn die Isotopen als verschiedene Elemente angesehen werden. Denn der größte Fortschritt, den wir der Entdeckung der Isotopie verdanken, besteht eben darin, daß wir jetzt imstande sind, eine größere Mannigfaltigkeit der Bestandteile der Materie,

der Elemente zu erkennen, als es auf Grund der erwähnten Typuseigenschaften möglich war, oder als die Zahl der Stellen des periodischen Systems vorauszusehen erlaubte. Es ist deshalb nicht möglich, die obigen zwei Sätze in ihrem bisherigen Wortlaut aufrecht zu erhalten, ohne eine mehr oder minder willkürliche Festsetzung darüber zu machen, welche Zerlegungs- und Unterscheidungsmethoden zur Elementaranalyse zugelassen werden und welche nicht.

b) Die Isotopen als verschiedene Elemente.

Im übrigen bleibt aber der Inhalt des Elementbegriffes bei der Betrachtung der Isotopen als verschiedene Elemente gänzlich unverändert. Da diese Betrachtungsweise in den vorhergehenden Kapiteln durchweg angewandt worden ist, brauchen wir hier nicht darauf einzugehen, wie die einzelnen Fragen der Elementenlehre sich von diesem Standpunkte aus darstellen lassen. Es bleibt nur noch, eine zweckmäßige Definition des Elementbegriffes anzugeben, d. h. zu formulieren, welche Stoffe man jetzt zu den Elementen rechnen muß, wenn man diesen Standpunkt annimmt.

Dazu müssen wir zunächst an die auf S. 66 aufgeworfene Frage erinnern, ob nicht manche der gewöhnlichen Elemente, wie z. B. Chlor, Gemische von Isotopen vorstellen. Solange nicht auf solche Elemente die Trennungsmethoden der Isotopen, wie fraktionierte Diffusion oder die Kanalstrahlenanalyse angewandt worden sind, ist die Frage, ob sie durch alle uns zur Verfügung stehenden Mittel unzerlegbar sind, nicht erschöpfend beantwortet, und das gilt für die allermeisten der gewöhnlichen Elemente. Trotzdem müssen die Chemiker diese Stoffe zu den Elementen rechnen, wenn sie nicht fast die ganze Liste der Elemente streichen wollen, und zwar berechtigt sie dazu der Umstand, daß solange z. B. das Chlor nicht als Gemisch erwiesen ist, es in der Tat für uns den letzten Bestandteil, das Element aller seiner Verbindungen vorstellt. Folglich darf man jetzt nicht behaupten, daß alle Stoffe, die wir zu den Elementen rechnen, durch alle uns bekannten Mittel unzerlegbar sind, sondern nur, daß sie nicht zerlegt wurden. Gegen diese Fassung sind zwar Bedenken geäußert worden, doch zeigte eine nähere Betrachtung (1), daß es nicht nur der jetzigen neuen,

sondern auch der bisherigen Sachlage besser entspricht, wenn man die Definition des Elementes auf die Unzerlegtheit und nicht auf die Unzerlegbarkeit stützt, worauf Wilhelm Ostwald schon vor langer Zeit hingewiesen hat.

Damit ist aber die Definitionsfrage noch nicht erschöpft. Denken wir z. B. an Gemische von Isotopen, sei es von Radioelementen miteinander oder mit gewöhnlichen Elementen, wie Thorium und Radiothorium, Mesothorium und Radium, Radium D und Blei usw., oder aber an ein mit Absicht hergestelltes Gemisch von ²⁰⁶Pb und ²⁰⁷Pb, oder schließlich an ein aus einem sowohl Uran wie Thor enthaltenden Mineral isoliertes Gemisch von Uranblei und Thoriumblei (vgl. auch S. 57). Wegen der Neuheit des ganzen Problems und der großen Schwierigkeiten, die die Anwendung der Trennungsmethoden der Isotopen noch bereitet, ist bis jetzt noch keines dieser Gemische zerlegt worden; da wir aber mit Sicherheit wissen, daß sie Gemische vorstellen, also nicht als Elemente betrachtet werden dürfen, müssen wir, um dem heutigen Wissensstande gerecht zu werden, ein Element folgendermaßen definieren:

„Ein chemisches Element ist ein Stoff, der durch kein Mittel in einfachere Bestandteile zerlegt und nicht als Gemisch anderer Stoffe erkannt worden ist.“

Der auf die Erkennung als Gemisch sich beziehende Zusatz, der den einzigen Unterschied zwischen der vorgeschlagenen Definition und der bisherigen ausmacht, wird wohl nur vorübergehend notwendig sein. Denn es ist anzunehmen, daß es früher oder später gelingen wird, die erwähnten Trennungsmethoden der Isotopen auszubilden und man dann imstande sein wird, die Frage, ob in einem gegebenen Falle ein Isotopengemisch vorliegt oder nicht, durch direkte Zerlegungsversuche zu entscheiden (39). Wird einmal die Forschung so weit gelangen, so wird man zu der alten Fassung der Definition zurückkehren und den für die jetzige Übergangszeit nötigen Zusatz fortlassen können. Das zeigt am besten, daß die Abweichung der vom Verfasser vorgeschlagenen Elementdefinition von der bisherigen nur ganz geringfügig ist, und daß der alte Elementbegriff durch die Betrachtung der Isotopen als verschiedene Elemente gänzlich unverändert bleibt.

XIV. Rückblick und Ausblicke.

Nachdem wir in den vorhergehenden Kapiteln die allmähliche Entwicklung geschildert haben, die unsere Kenntnisse der chemischen Elemente in den letzten Jahren durch die Erforschung der Radioaktivität, der charakteristischen Röntgenstrahlen und der Atomstruktur erfahren haben, sei zum Schluß ein kurzer Blick auf den jetzigen Stand und die noch offenen Probleme der Lehre von den chemischen Elementen geworfen. Wir werden dabei wie bis jetzt die Isotopen als verschiedene Elemente betrachten.

Man gelangte bis jetzt bei der Zerlegung und Untersuchung aller Stoffe zu 119¹⁾ verschiedenen Bestandteilen, die weder weiter zerlegt, noch als Gemische anderer Stoffe erkannt werden konnten. Das sind die chemischen Elemente. Etwa 30 dieser Elemente unterscheiden sich von einigen anderen hauptsächlich nur im Atomgewicht oder in radioaktiven Eigenschaften, während sich im qualitativ-chemischen, elektrochemischen und spektroskopischen Verhalten kein Unterschied finden ließ. Solche Elemente gleichen chemischen Verhaltens gehören also dem gleichen chemischen Elemententypus an (isotope Elemente).

Man hat bis jetzt Elemente von 87 verschiedenen Typen festgestellt. Jedem Elemententypus entspricht auch ein bestimmtes charakteristisches Röntgenspektrum. Die Untersuchung dieser Spektren zeigte, daß wir noch nicht alle möglichen Typen kennen gelernt haben. Ordnet man nämlich die Elemente nach wachsenden Frequenzen der analogen Linien ihrer Röntgenspektren, so ergibt sich eine nahezu lineare, von Moseley aufgestellte Beziehung zwischen der so erhaltenen Ordnungszahl der Elemente (Elemente desselben Typus haben die gleiche Ordnungszahl) und der Quadratwurzel aus der Frequenz der Linien (Fig. 7). Diese Beziehung ist aber nur dann auf alle Elemente anwendbar, wenn man annimmt, daß uns von fünf Typen mit den Ordnungszahlen 43, 61, 75, 85 und 87 noch kein Repräsentant bekannt ist. Die gesamte Zahl der zwischen Wasserstoff und Uran möglichen Typen ergibt sich somit zu 92. Wie sich theoretisch zeigen läßt, ist die so bestimmte

¹⁾ Vgl. Tabelle 10.

Ordnungszahl gleich der positiven Kernladung des Atoms des betreffenden Elementes.

Die Kernladung (Ordnungszahl) steht mit anderen Eigenschaften der Elemente nicht in so einfacher Beziehung wie mit der Frequenz im Röntgenspektrum, denn die chemischen und vielen physikalischen Eigenschaften der Elemente sind nicht lineare, sondern periodische Funktionen ihrer Kernladung, was zur Aufstellung des durch die Tabelle (9) wiedergegebenen periodischen Systems der chemischen Elemente (Elemententypen) führt. Elementen von gleichem Typus kommt die gleiche Stelle (Isotope) im System zu, und die so resultierenden Elementenplejaden, die auf den Teil des Systems zwischen dem Uran- und dem Thalliumtypus beschränkt sind¹⁾, weisen zwei bis sieben Elemente auf, wie es die Tabelle 6 zeigt.

Da innerhalb einer Plejade die Atomgewichte der Isotopen bis um acht Einheiten differieren, kann man strenggenommen einer Stelle des periodischen Systems kein eindeutiges A. G. zuschreiben. Da jedoch von den meisten Typen nur ein Element bekannt ist, kann man in die Tabelle (9) sein A. G. einsetzen und in dem Gebiet der Plejaden das A. G. des verbreitetsten bzw. des langlebigen Elementes wählen. Es ergibt sich dabei das bemerkenswerte Resultat, daß die Anordnung der Elemente nach steigender Kernladung mit sehr wenigen Ausnahmen zugleich auch eine Anordnung nach steigendem A. G. ist. Doch muß man den Inhalt des periodischen Systems jetzt so formulieren, daß die Eigenschaften der Elemente periodische Funktionen der Kernladung ihrer Atome sind (nicht wie bis jetzt des Atomgewichtes).

Die Existenz von noch unbekanntem Elementen mit den Ordnungszahlen 43, 75, 85 und 87 wird von der Tabelle des periodischen Systems ebenso gefordert wie von dem Moseleyschen Gesetz über die Röntgenspektren. Jene gestattet außerdem, den chemischen Typus der fehlenden Elemente vorauszusagen: den Nummern 43 und 75 entsprechen Analoge des Mangans, Platz 85 weist auf ein unbekanntes Halogen, 87 auf ein Alkalimetall (wohl beide radioaktiv) hin.

¹⁾ Bezüglich des Neontypus vgl. S. 68.

Die durch die Moseleysche Beziehung aufgedeckte Lücke mit der Ordnungszahl 61 konnte jedoch auf Grund des periodischen Systems nicht vorausgesagt werden, da dieses in dem betreffenden Gebiet eine merkwürdige Anomalie zeigt. Die Eigenschaften der Elemente zeigen in diesem Teil des Systems nicht die in anderen Horizontalreihen von Stelle zu Stelle auftretende Abstufung, denn die ganze in der Tabelle 9 abgesonderte aperiodische Gruppe der seltenen Erdmetalle mit den Ordnungszahlen 59 bis 72 weist Elemente von sehr ähnlichem chemischen Verhalten auf (40).

Die Entdeckung wenigstens je eines Repräsentanten der noch freien Stellen des periodischen Systems würde zu den schönsten Erfolgen der weiteren Entwicklung der Elementenlehre gehören und wäre als ein Abschluß der bereits auf Jahrhunderte zurückblickenden Erforschung der Elemententypen zu betrachten. Damit wären aber, wie es noch vor kurzem scheinen konnte, unsere Kenntnisse der Welt der Elemente durchaus nicht erschöpft. Die alle 92 Typen umfassende Tabelle des periodischen Systems weist jedem Typus nur je eine Stelle zu. Wir wissen aber, daß von manchen Typen mehrere Elemente existieren, und man muß deshalb ein komplizierteres Gebäude aufrichten, um alle Elemente unterbringen zu können. So kann man die Isotopen an den zugehörigen Stellen des periodischen Systems statt in derselben Ebene senkrecht zu ihr in der Reihenfolge der Atomgewichte anordnen. Die gewöhnliche Tabelle des periodischen Systems bildet dann eine Projektion eines wirklichen räumlich gedachten Systems. Im Gebiete der Radioelemente befinden sich über und unter dieser Projektionsebene, in der nur die langlebigsten Glieder der Plejaden fixiert sind, noch weitere Stockwerke.

Es drängt sich die Frage auf, ob man auch andere Teile des Gebäudes durch solche Ober- und Unterbauten wird ergänzen müssen, d. h. ob sich auch von anderen Typen mehr als ein Element wird auffinden lassen, etwa durch Zerlegung der jetzt zu den Elementen gerechneten Stoffe in Isotope oder auf anderem Wege. Es ist noch gar nicht abzusehen welche Früchte die Verfolgung dieses Problems ergeben kann.

Weiterhin entsteht die Frage, ob die genetischen Beziehungen zwischen den Elementen auf die letzten zwei Reihen des Systems

Tabelle 9a. Das periodische System der Elemente.

Periode	Reihe	Gruppe VIII		Gruppe I		Gruppe II		Gruppe III		Gruppe IV		Gruppe V		Gruppe VI		Gruppe VII		
		0		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	
I	1	2 He 4,00		3 Li 6,94		4 Be 9,1		5 B 11,0		6 C 12,00		7 N 14,01		8 O 16,00		9 F 19,0		
	2	10 Ne 20,2		11 Na 23,00		12 Mg 24,32		13 Al 27,1		14 Si 28,3		15 P 31,04		16 S 32,06		17 Cl 35,46		
III	3	18 A 39,88		19 K 39,10		20 Ca 40,07		21 Sc 45,1		22 Ti 48,1		23 V 51,0		24 Cr 52,0		25 Mn 54,93		
	4	26 Fe 55,84	27 Co 58,97	28 Ni 58,68		29 Cu 63,57		30 Zn 65,37		31 Ga 69,9		32 Ge 72,5		33 As 74,96		34 Se 79,2		35 Br 79,92
IV	5	36 Kr 82,92		37 Rb 85,45		38 Sr 87,63		39 Y 88,7		40 Zr 90,6		41 Nb 93,5		42 Mo 96,0		43 —		
	6	44 Ra 101,7	45 Rh 102,9	46 Pd 106,7		47 Ag 107,88		48 Cd 112,4		49 In 114,8		50 Sn 118,7		51 Sb 120,2		52 Te 127,5		53 J 126,92
V	7	54 X 130,2		55 Cs 132,81		56 Ba 137,37		57 La 139,0		58 Ce 140,25		59 Pr 140,9		60 Nd 144,3		61 —	62 Sm 150,4	63 Eu 152,0
	8	64 Gd 157,3	65 Tb 159,2	66 Dy 162,5	67 Ho 163,5	68 Er 167,7	69 Tm 168,5	70 Yb 173,5	71 Lu 175,0	72 Tu II	73 Ta 181,5	74 W 184,0	75 —					
VI	9	76 Os 190,9	77 Ir 193,1	78 Pt 195,2		79 Au 197,2		80 Hg 200,6		81 Tl 204,0		82 Pb 207,20		83 Bi 208,0		84 Po (210,0)		85 —
	10	86 Em (222,0)		87 —		88 Ra 226,0		89 Ac (227)		90 Th 232,15		91 Pa (230)		92 U 238,2				

Neben den Bezeichnungen der Elemente sind die Ordnungszahlen, darunter die Atomgewichte angegeben.
 — Zwischen Uran (92) und Thallium (81) weist fast jede Stelle des Systems mehrere, meistens radioaktive Elemente auf (vgl. Tabelle 6). In die obige Tabelle wurde das Symbol und Atomgewicht nur des lang-
 lebigsten bzw. verbreitetsten Gliedes jeder Plejade eingesetzt. — Die eingeklammerten Atomgewichte von Po
 und Em sind rechnerisch ermittelt, die von Ac und Pa sind hypothetisch.

Tabelle 9b.

1 H														2 He		
I		II		III		IV		V		VI		VII		VIII		0
a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	
3 Li		4 Be		5 B		6 C		7 N		8 O		9 F		10 Ne		
11 Na		12 Mg		13 Al		14 Si		15 P		16 S		17 Cl		18 A		
19 K		20 Ca		21 Sc		22 Ti	23 V		24 Cr		25 Mn		26 Fe	27 Co	28 Ni	
29 Cu		30 Zn		31 Ga		32 Ge	33 As		34 Se		35 Br		36 Kr			
37 Rb		38 Sr		39 Y		40 Zr	41 Nb		42 Mo		43 —		44 Ru	45 Rh	46 Pd	
47 Ag		48 Cd		49 In		50 Sn	51 Sb		52 Te		53 J		54 X			
55 Cs		56 Ba		57 La		58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 —	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy		
67 Ho	68 Er	69 Tu I	70 Yb	71 Lu	72 Tu II	73 Ta	74 W	75 —	76 Os	77 Ir	78 Pt					
79 Au		80 Hg		81 Tl		82 Pb	83 Bi		84 Po		85 —		86 Em			
87 —		88 Ra		89 Ac		90 Th	91 Pa		92 U							

Obige Tabelle bringt die besondere Stellung des Wasserstoffes und Heliums, der vermeintlichen Bestandteile aller übrigen Elemente zum Ausdruck. Neben den Symbolen sind die Ordnungszahlen angegeben.

beschränkt sind, oder ob auch die übrigen Elemente Umwandlungen unterliegen, die sich nur wegen ihrer geringen Geschwindigkeit bis jetzt dem Nachweis entzogen haben? Viel zu denken gibt ja in dieser Hinsicht die Tatsache, daß die Elemente Kalium und Rubidium trotz ihrer verhältnismäßig niedrigen Atomgewichte radioaktiv sind und nach dem Verschiebungssatz mit Elementen des Calcium- bzw. Strontiumtypus in genetischer Beziehung stehen müßten, falls ihre β -Strahlung die Begleiterscheinung einer radioaktiven Umwandlung ist. Fraglich ist auch, ob die Aktivität dieser Alkalimetalle ihrer Hauptmasse zukommt oder auf Beimengungen kurzlebigerer Isotope zurückzuführen sei (40).

Für die Verfolgung des wichtigen Problems der Konstitution der Atomkerne und ihres Aufbaues aus positiven und negativen Teilchen bieten zurzeit nur die natürlichen radioaktiven Umwandlungen eine experimentelle Grundlage. Nicht nur für dieses Problem wäre es von größter Bedeutung, wenn es gelänge, die künstliche Umwandlung der Elemente ineinander zu erzwingen. Es ist vielleicht mehr als ein durch die großen Errungenschaften der letzten 20 Forschungsjahre bedingter Übermut, wenn man die Hoffnung nicht aufgibt, daß die Radiochemie in dieser Hinsicht doch noch erfolgreicher sein wird als die Alchemie.

Tabelle 10.

Verzeichnis der Elemententypen und der Elemente.

Ordnungszahl	Bezeichnung der Elementen- typen gleich der der Elemente	Symbol	Atom- gewicht	Ordnungszahl	Bezeichnung der Elementen- typen gleich der der Elemente	Symbol	Atom- gewicht
1	Wasserstoff . .	H	1,008	41	Niob	Nb	93,5
2	Helium	He	4,00	42	Molybdän . . .	Mo	96,0
3	Lithium	Li	6,94	43	—	—	—
4	Beryllium . . .	Be	9,1	44	Ruthenium . . .	Ru	101,7
5	Bor	B	11,0	45	Rhodium	Rh	102,9
6	Kohlenstoff . .	C	12,0	46	Palladium	Pd	106,7
7	Stickstoff . . .	N	14,01	47	Silber	Ag	107,88
8	Sauerstoff . . .	O	16,00	48	Cadmium	Cd	112,4
9	Fluor	F	19,0	49	Indium	In	114,8
10	Neon ¹⁾	Ne	20,2	50	Zinn	Sn	118,7
11	Natrium	Na	23,00	51	Antimon	Sb	120,2
12	Magnesium . . .	Mg	24,32	52	Tellur	Te	127,5
13	Aluminium . . .	Al	27,1	53	Jod	J	126,92
14	Silicium	Si	28,3	54	Xenon	X	130,2
15	Phosphor	P	31,04	55	Cäsium	Cs	132,81
16	Schwefel	S	32,06	56	Barium	Ba	137,37
17	Chlor	Cl	35,46	57	Lantan	La	139,0
18	Argon	A	39,88	58	Cer	Ce	140,25
19	Kalium*	K	39,10	59	Praseodym . . .	Pr	140,9
20	Calcium	Ca	40,07	60	Neodym	Nd	144,3
21	Scandium	Sc	45,1	61	—	—	—
22	Titan	Ti	48,1	62	Samarium	Sm	150,4
23	Vanadium	V	51,0	63	Europium	Eu	152,0
24	Chrom	Cr	52,0	64	Gadolinium . . .	Gd	157,3
25	Mangan	Mn	54,93	65	Terbium	Tb	159,2
26	Eisen	Fe	55,84	66	Dysprosiom . . .	Dy	162,5
27	Kobalt	Co	58,97	67	Holmium	Ho	163,5
28	Nickel	Ni	58,68	68	Erbium	Er	167,7
29	Kupfer	Cu	63,57	69	Thullium I . . .	Tu I	168,5
30	Zink	Zn	65,37	70	Ytterbium	Yb	173,5
31	Gallium	Ga	69,9	71	Lutetium	Lu	175,0
32	Germanium . . .	Ge	72,5	72	Thullium II . . .	Tu II	—
33	Arsen	As	74,96	73	Tantal	Ta	181,5
34	Selen	Se	79,2	74	Wolfram	W	184,0
35	Brom	Br	79,92	75	—	—	—
36	Krypton	Kr	89,92	76	Osmium	Os	190,9
37	Rubidium* . . .	Rb	85,45	77	Iridium	Ir	193,1
38	Strontium	Sr	87,63	78	Platin	Pt	195,2
39	Yttrium	Y	88,7	79	Gold	Au	197,2
40	Zirkonium . . .	Zr	90,6	80	Quecksilber . . .	Hg	200,6

¹⁾ Vom Neontypus scheint außer dem Element Neon (A. G. 20) noch ein zweites Element Metaneon (A. G. 22) zu existieren (vgl. S. 68).

Tabelle 10 (Fortsetzung).

Ordnungs- zahl	Elementen- typus	Symbol	Bezeichnung der Elemente	Symbol	Atom- gewicht
81	Thallium .	Tl	Thallium	Tl	<u>204,0</u>
			Actinium C''*	AcC''	(206)
			Thorium C''*	ThC''	208
			Radium C''*	RaC''	210
82	Blei	Pb	Radium G	RaG (^{206,0} Pb)	<u>206,0</u>
			Blei	Pb	<u>207,20</u>
			Thorium D (Thorblei) .	ThD (^{208,0} Pb)	<u>208,0</u>
			Radium D*	RaD	210
			Actinium B*	AcB	(210)
			Thorium B*	ThB	212
			Radium B*	RaB	214
83	Wismut .	Bi	Wismut	Bi	<u>208,0</u>
			Radium E*	RaE	210
			Actinium C*	AcC	(210)
			Thorium C*	ThC	212
			Radium C*	RaC	214
84	Polonium	Po	Polonium (Radium F)*	Po (RaF)	210
			Actinium C'*	AcC'	(210)
			Thorium C'*	ThC'	212
			Radium C'*	RaC'	214
			Actinium A*	AcA	(214)
			Thorium A*	ThA	216
Radium A*	RaA	218			
85	—	—	—	—	—

Nur die unterstrichenen Atomgewichte sind experimentell ermittelt, die übrigen aus diesen auf Grund der genetischen Zusammenhänge berechnet. Die eingeklammerten Werte sind noch hypothetisch.

* Die durch einen Stern gekennzeichneten 39 Elemente sind radioaktiv oder unbeständig.

Tabelle 10 (Fortsetzung).

Ordnungs- zahl	Elementen- typus	Symbol	Bezeichnung der Elemente	Symbol	Atom- gewicht
86	Emanation	Em	Actiniumemanation* . Thoriumemanation* . Radiumemanation* .	AcEm ThEm RaEm	(218) 220 <u>222</u>
87	—	—	—	—	—
88	Radium .	Ra	Actinium X* Thorium X* Radium* Mesothorium 1*	AcX ThX Ra MsTh ₁	(222) 224 <u>225,97</u> 228
89	Actinium.	Ac	Actinium* Mesothorium 2*	Ac MsTh ₂	(226) 228
90	Thorium .	Th	Radioactinium* Radiothorium* Ionium* Uran Y* Thorium* Uran X ₁ *	RdAc RdTh Io UY Th UX ₁	(226) 228 230 ¹⁾ (230) <u>232,15</u> 234
91	Protacti- nium .	Pa	Protactinium* Uran X ₂ *	Pa UX ₂	(230) 234
92	Uran . .	U	Uran II* Uran I*	U _{II} U _I	234 <u>238,2</u>

¹⁾ Die Bestimmung des Verbindungsgewichtes eines Ionium-Thoriumgemisches ergab den Wert 231,51 (24).

N a c h t r a g.

Die künstliche Zerlegung des Stickstoffatoms.

Der Druck des vorstehenden Textes war bereits fertiggestellt, als mich das Heft des Philosophical Magazine vom Juni 1919 erreichte, in dem einige höchst interessante Arbeiten von Sir Ernest Rutherford enthalten sind, die die Zusammenstöße von α -Teilchen mit leichten Atomen behandeln. Von den dort mitgeteilten zahlreichen Versuchen soll hier hauptsächlich nur einer Entdeckung gedacht werden, die für das Thema dieser Schrift von größter Bedeutung ist: Rutherford machte die Beobachtung, daß beim Zusammenstoß von α -Strahlen mit Stickstoffatomen aus letzteren Teilchen von kleiner Masse herausgeschleudert werden, die wohl mit Wasserstoffkernen zu identifizieren sein werden. Dies bedeutet aber die künstliche Zerlegung des Stickstoffatoms in einfachere Bestandteile. Um die Methodik dieser bahnbrechenden Versuche verständlich zu machen, müssen wir zunächst noch auf einige frühere Untersuchungen der Rutherford'schen Schule eingehen.

Wie wir bereits auf S. 73 erwähnt haben, wurde Rutherford zu seiner heute allgemein angenommenen Ansicht, daß die positive Elektrizität eines Atoms in einem im Vergleich zu den Dimensionen des ganzen Atoms sehr kleinen Kern konzentriert ist, zuerst durch das Studium des Durchganges der α -Strahlen durch Materie geführt. Und zwar waren es die scharfen Knicke¹⁾, die in Fig. 2

¹⁾ Das Auftreten dieser Knicke wurde zuerst auf anderem Wege von H. Geiger und E. Marsden (1911) im Laboratorium von Rutherford festgestellt.

(S. 16) nahe dem Ende der sonst fast geradlinigen Bahn einzelner α -Teilchen zu sehen sind, die zu der Idee der Atomkerne den Weg ebneten. Diese starken Ablenkungen erleiden die mit Geschwindigkeiten von mehreren tausend km/sec fliegenden α -Teilchen offenbar beim Zusammenstoß mit einzelnen Atomen des durchflogenen Stoffes, sei es eines Gases, wie in Fig. 2 oder einer dünnen Metallfolie, wie bei den Versuchen von Geiger und Marsden. Es müssen somit bei einem solchen Zusammenstoß enorme ablenkende Kräfte in Wirkung treten, und Rutherford nahm an, daß es sich dabei um abstoßende elektrostatische Kräfte zwischen den positiv geladenen α -Teilchen und den positiven Ladungen innerhalb der durchflogenen Atome handelt. Der Größe der nötigen elektrostatischen Kraft kann aber nur im Falle einer sehr innigen Annäherung der sich abstoßenden Ladungen Rechnung getragen werden: bekanntlich wächst ja diese Kraft gemäß dem Coulombschen Gesetz umgekehrt proportional dem Quadrat der Entfernung. Daraus ergab sich die Konsequenz, daß sowohl dem α -Teilchen (dem Kern des Heliumatoms) als auch den positiven Ladungen anderer Atome außerordentlich kleine Dimensionen zukommen müssen, und dieses Resultat führte bei näherer quantitativer Verfolgung¹⁾ zu der im Kapitel XII dargelegten Theorie des Kernatoms. Danach muß ein α -Teilchen (sein Durchmesser kann höchstens von der Größenordnung von 10^{-13} cm sein), das auf dem durch seine Reichweite begrenzten Wege viele Tausende von Atomen trifft, in diesen zwischen dem winzigen zentralen positiven Kern und den ihn umgebenden auf den Raum vom Radius 10^{-8} cm verteilten negativen Elektronen fliegen. Die allermeisten Atome werden durchquert, ohne daß sie die Richtung der α -Teilchen wesentlich beeinflussen, und nur bei einer kleinen Anzahl von Atomen kommen die α -Teilchen in unmittelbare Nähe des Kernes und erleiden die erwähnten großen Ablenkungen von ihrer geradlinigen Bahn. Die Zahl der starken Knicke ist deshalb so gering, weil die Wahrscheinlichkeit des Zusammenstoßes mit dem winzigen Kern auch nur eine sehr kleine ist.

¹⁾ Als obere Grenze für den Radius des Atomkernes des Goldes ergab sich der Wert 3×10^{-12} cm.

Nun wird bei einem derartigen innigen Zusammenstoß nicht nur das α -Teilchen eine Ablenkung von seiner Bahn erleiden, sondern es muß auch das gestoßene Atom in Bewegung gesetzt werden, und zwar wird dieses nach den Gesetzen des elastischen Stoßes eine um so größere Geschwindigkeit erlangen, je kleiner seine Masse ist. Ganz besonders groß wird deshalb diese Geschwindigkeit werden, wenn ein α -Teilchen in unmittelbare Nähe eines Wasserstoffkernes kommt, etwa beim Durchqueren von Wasserstoffgas¹). Wie C. G. Darwin berechnete, muß die Geschwindigkeit, die ein Wasserstoffkern in dem günstigsten Falle des zentralen Stoßes erlangt, 1,6mal größer sein als die Geschwindigkeit des auftreffenden, eine vierfache Masse besitzenden α -Teilchens. Es läßt sich theoretisch begründen, daß ein solches H -Teilchen bei gleicher Geschwindigkeit sehr angenähert auch die gleiche Reichweite hat wie ein α -Teilchen, und da (vgl. S. 16) die Reichweite der α -Teilchen proportional der dritten Potenz ihrer Geschwindigkeit ist, müßte ein solches durch zentralen Stoß entstandene schnelle H -Teilchen eine etwa viermal größere Reichweite als das ursprüngliche α -Teilchen besitzen.

Daß dies in der Tat zutrifft, hat E. Marsden (1914) gezeigt. Während die Reichweite von α -Teilchen, die aus einem sehr dünnwandigen Röhrchen mit Radiumemanation kamen, im Wasserstoff vom Atmosphärendruck 24 cm betrug, konnten unter diesen Bedingungen noch in einer Entfernung von über 80 cm vom Röhrchen auf einem Zinksulfidschirm Szintillationen (vgl. S. 16) beobachtet werden. Daß diese Szintillationen von sehr schnellen H -Kernen, d. h. von einfach positiv geladenen Teilchen von der Masse 1 herrühren, wurde in den eben veröffentlichten Versuchen von Rutherford durch Messung der Ablenkung dieser Teilchen im elektrischen und magnetischen Feld bewiesen.

Derartige H -Teilchen mit großer Reichweite beobachteten E. Marsden und W. C. Lantsberry (1915) auch dann, als sie

¹) Man kann diese Bewegung der gestoßenen Atome in der Abhandlung von C. T. R. Wilson, Bild 7, das eine Vergrößerung eines Teiles unserer Fig. 2 vorstellt, sehen, besonders deutlich aber für den Fall des Wasserstoffes bei D. Bose (42); leider war die Wiedergabe dieser Bilder hier nicht mehr möglich.

α -Teilchen durch eine sehr dünne Schicht einer wasserstoffhaltigen Substanz, z. B. Wachs, passieren ließen. Um ein solches schnelles H -Teilchen zu erzeugen, muß ja ein α -Teilchen ganz dicht an den Kern eines Wasserstoffatoms herankommen, und dieser erhält dabei einen so mächtigen Stoß, daß er aus dem Atomverband herausfliegt, gleichgültig, ob das Atom an seiner Oberfläche an andere chemisch gebunden war oder nicht. Wie selten übrigens derartige zentrale Zusammenstöße vorkommen, ergibt sich aus der Angabe von Rutherford, daß pro 10^5 α -Teilchen, von denen jedes auf seinem Wege durch 1 cm Wasserstoffgas mit etwa 10^4 Wasserstoffmolekülen zusammenstößt, nur ein H -Teilchen von großer Reichweite entsteht.

Von besonderem Interesse war die Beobachtung von Marsden und Lantsberry, daß man solche H -Teilchen auch unter Bedingungen erhalten kann, die keine äußere Quelle von Wasserstoff erkennen lassen: Ein mit Radium C bedecktes Nickelblech, das zwecks Vertreiben von etwa okkludiertem Wasserstoff oder Wasserdampf auf 150^0 erhitzt wurde, emittierte ebenfalls schnelle H -Teilchen. Es hatte somit den Anschein, als ob hier zum ersten Male die Abgabe von Wasserstoff neben Helium aus dem Innern radioaktiver Atome (Ra C) zur Beobachtung kam. Diesen wichtigen Befund unterzog Rutherford einer näheren Untersuchung und zeigte vor allem, daß diese „natürlichen“ H -Teilchen nicht nur vom Ra C erhalten werden können, denn auch ein Röhrchen, in das rasch vom Ra C praktisch freie Radiumemanation eingeführt wurde, emittierte unmittelbar danach solche H -Teilchen, und wenn auch deren Zahl mit der Zeit wuchs, war die Zunahme nicht entfernt so stark, wie es dem Anwachsen der Menge des aus der Emanation über Ra A und Ra B allmählich entstehenden Ra C entspräche. Es müßte also auch die Emanation selbst bzw. das Ra A H -Teilchen geben, wenn nicht, was Rutherford für möglich hält, doch vielleicht okkludierter Wasserstoff für diese Erscheinung verantwortlich zu machen ist. Über diesen wichtigen Punkt brachten also die Rutherford'schen Versuche keine eindeutige Entscheidung, sie führten aber zu einem ganz überraschenden Resultat, als der Einfluß verschiedener Gasfüllung auf die Emission der fraglichen „natürlichen“ H -Teilchen seitens eines mit Ra C bedeckten Bleches

studiert wurde¹⁾. Es wurden nämlich bei Szintillationszählung erheblich mehr Teilchen mit großer Reichweite beobachtet, wenn der Raum zwischen dem RaC und dem Zinksulfidschirm getrocknete Luft enthielt, als wenn er leer gepumpt war oder Kohlensäure bzw. Sauerstoff selbst, wenn diese mit Wasserdampf²⁾ bei 20° gesättigt waren, enthielt.

Rutherford folgerte daraus, daß es nur der Stickstoff der Luft sein konnte, der diesen verstärkten Effekt hervorruft, und in der Tat wurde bei Verwendung von chemisch-reinem Stickstoff eine um 25 Proz. größere Zahl dieser Szintillationen gefunden, als in Luft. Durch besondere Versuche konnte festgestellt werden, daß diese vermehrte Zahl von Teilchen mit großer Reichweite durch die α -Teilchen des RaC erst auf deren Wege im Gasraum erzeugt wurde. Die Durchdringungsfähigkeit der in Luft oder Stickstoff erhaltenen Teilchen war, ähnlich wie bei den in Wasserstoffgas entstehenden H -Teilchen, bis etwa viermal größer als die Durchdringungsfähigkeit der sie erzeugenden α -Strahlen. Eine so große Wucht können die α -Teilchen nur solchen Partikeln erteilen, die eine beträchtlich kleinere Masse als sie selbst besitzen, und man kann deshalb schwerlich die Schlußfolgerung umgehen, daß es Rutherford gelungen ist, aus dem Kern des Stickstoffatoms mit Hilfe von α -Strahlen leichte Teilchen herauszuschießen. Diese werden sich wohl bei näherer Untersuchung als Wasserstoffkerne erweisen: dafür spricht die Übereinstimmung dieser Teilchen mit den H -Teilchen nicht nur in bezug auf das Aussehen der von ihnen hervorgerufenen Szintillationen und in bezug auf ihre Reichweite, sondern auch ein vorläufiger Versuch ihrer Ablenkung im Magnetfeld. Rutherford hält es übrigens nicht für ausgeschlossen, daß es Teilchen von der Masse 2 seien.

¹⁾ In diesem wie auch in manchen der früheren Versuche waren vor dem in einer Entfernung von etwa 3 cm vom RaC befindlichen Zinksulfidschirm dünne Metallfolien eingeschaltet, deren Dicke so bemessen wurde, daß sie die α -Teilchen des RaC vollkommen aufhielten, die H -Teilchen aber noch leicht durchließen.

²⁾ Getrocknete Kohlensäure oder Sauerstoff verminderten infolge der Bremsung der „natürlichen“ vom RaC kommenden H -Teilchen die Zahl der im Vakuum beobachteten Szintillationen.

Auf jeden Fall ist durch diese Versuche zum erstenmal nachgewiesen worden, daß nicht nur die schweren radioaktiven Kerne, sondern auch der zu den leichtesten gehörende Stickstoffkern aus einfacheren Bestandteilen aufgebaut ist. Wirft man einen Blick auf die auf S. 66 erwähnten zwei Reihen von leichten Elementen, so fällt es sofort auf, daß die Atomgewichte der Elemente mit geraden Ordnungszahlen sich sehr annähernd durch die Formel $n \times 4,0$, die von ungerader Ordnungszahl durch $n \times 4,0 + 3$ darstellen lassen. Es drängt sich die Vermutung auf, daß die ersteren nur aus Helium aufgebaut sind (vgl. auch S. 78), und daß die Kerne der anderen neben Helium auch drei Wasserstoffkerne enthalten. Der Stickstoff fällt insofern aus der Reihe heraus, als sein A. G. $14,01 = 3 \times 4,00 + 2$ ist, so daß, falls er sich nicht als ein Gemisch von Isotopen mit A. G. 13 und 15 erweisen sollte, im Stickstoffkern neben drei Heliumkernen entweder ein Teilchen mit der Masse 2¹⁾ oder zwei Wasserstoffkerne anzunehmen wären. In letzterem Falle müßte übrigens der Stickstoffkern auch noch ein negatives Elektron enthalten, denn drei doppelt geladene Heliumkerne und zwei einfach geladene *H*-Kerne würden ihm die Kernladung 8 verleihen, statt 7, die auf Grund seiner Ordnungszahl anzunehmen ist. Aus dieser Betrachtung ergibt sich auch, weshalb weder im Sauerstoff noch in Kohlensäure *H*-Teilchen erzeugt wurden, denn das A. G. sowohl des Sauerstoffs (16,00) wie des Kohlenstoffs (12,00) lassen einen reinen Heliumaufbau vermuten.

Es ist von großem Interesse, daß die Zahl der aus den Stickstoffkernen herausgeschleuderten *H*-Teilchen etwa zwölfmal kleiner ist, als sie bei gleicher Zahl von Zusammenstößen der α -Teilchen mit unverbundenen *H*-Kernen des Wasserstoffgases erhalten wird. Daraus und aus den oben gemachten Angaben folgt, daß nur etwa 1 pro 10^{10} Zusammenstöße der α -Teilchen mit Stickstoffmolekeln zum Zerfall des Stickstoffatoms führt und daß dazu eine besondere Region dessen Kernes getroffen werden muß. Aus den Versuchen ergibt sich auch, daß der Durchmesser des Stickstoffkernes von der Größenordnung von 10^{-12} cm ist und daß bei günstigem Zusammenstoß eines α -Teilchens mit einem Wasserstoff-

¹⁾ Es könnte sich um eines der aus spektroskopischen Gründen vermuteten außerirdischen Elemente Nebulium u. a. handeln (43).

kern deren Zentren auf eine Entfernung von etwa 3×10^{-13} herankommen können.

Nachdem die vielen Bemühungen, den natürlichen Zerfall der Radioelemente zu beeinflussen, bis jetzt ohne Erfolg geblieben sind (vgl. S. 14) und auch das von mehreren Forschern festgestellte Auftreten von Helium und Neon in Entladungsröhren keine bindenden Schlußfolgerungen zuließ (44), sind die beschriebenen Versuche als die erste, wie es scheint, eindeutig nachgewiesene künstliche Zerlegung des Atoms eines chemischen Elementes zu betrachten. Die α -Teilchen, die die größten zur Verfügung stehenden Energiekonzentrationen repräsentieren, als Werkzeug und die wunderbaren H -Teilchen als analytisches Hilfsmittel haben im gleichen Maße zum Erfolg beigetragen. So ist denn die im letzten Satz (S. 91) dieser Schrift ausgesprochene Hoffnung, daß es der Radiochemie gelingen wird, den Traum der Alchemisten zu erfüllen, überraschend schnell verwirklicht worden. Es braucht nicht besonders begründet zu werden, daß die Rutherford'sche Entdeckung eine neue Phase der Entwicklung der Radiochemie einleitet, die wohl zu nicht minder wichtigen Ergebnissen führen wird, als die bisherige.

Auch der Begriff des chemischen Elementes wird noch einmal revidiert werden müssen. Aus den auf S. 80 angegebenen Gründen wird man den Stickstoff auch nach seiner Zerlegung weiterhin als Element betrachten. Nur tritt jetzt die Frage nach der Elementdefinition in ein neues Stadium, das übrigens ebenda bereits vorausgesehen worden ist. In welcher Weise sich die dort erwähnte Abgrenzung der chemisch-physikalischen Zerlegungsmethoden von den „alchemistischen“ wird durchführen lassen, ist auf Grund der einen vorliegenden Zerlegung eines Elementes noch nicht zu entscheiden. Auf jeden Fall wird sich aber eine scharfe Definition auf dem Röntgenspektrum basieren lassen, etwa in der Art: „ein chemisches Element ist ein Stoff, der ein ‚einfaches‘ Röntgenspektrum ergibt und nicht als Gemisch anderer Stoffe erkannt worden ist“. Es wird den Spektroskopikern keine Schwierigkeit bereiten, den Begriff des „einfachen“ Röntgenspektrums zu präzisieren (45).

Literaturangaben und Anmerkungen.

Größere Werke aus dem Gebiete der Radioaktivität:

M^{me} P. Curie, Radioaktivität, 2 Bde., 1911 und 1912.

E. Rutherford, Radioaktive Substanzen und ihre Strahlungen, erschienen als II. Band des von E. Marx herausgegebenen Handbuches der Radiologie, 1913.

St. Meyer und E. v. Schweidler, Radioaktivität 1916.

Speziell den Beziehungen zwischen Radioaktivität und Chemie sind gewidmet:

F. Soddy, Chemie der Radioelemente I. Teil 1912, II. Teil 1914.

K. Fajans, Zusammenfassende Bearbeitung in der Physikalischen Zeitschrift **16**, 456 bis 486 (1915).

F. Henrich, Chemie und Technologie radioaktiver Stoffe, 1918.

Im folgenden wird öfters wegen näherer Literaturangaben auf das Werk von Meyer und v. Schweidler (Abkürzung M. und Schw.) und auf die Bearbeitung von Fajans (Abkürzung K. F.) verwiesen. Nur die allerneueste einschlägige Literatur ist nahezu vollständig berücksichtigt.

I.

(1) Nähere Begründung vgl. K. Fajans, Die Naturwissenschaften **6**, 751 (1918).

(2) Eine ausführliche Schilderung der Entdeckungsgeschichte des periodischen Systems findet man in C. Schmidt, „Das periodische System der chemischen Elemente“, 1917.

(3) Näheres vgl. 2 und jedes ausführlichere Lehrbuch der anorganischen Chemie. Bei der Verteilung der Elemente der ersten zwei Perioden auf die Untergruppen kommen die chemischen Analogieverhältnisse in Tabelle 9 richtiger zum Ausdruck als in Tabelle I.

(4) Vielversprechende Aussichten auf eine Erklärung des periodischen Systems bieten die neueren Vorstellungen über die Struktur der Atome, auf die kurz im Kapitel XII eingegangen wird. Vgl. besonders W. Kossel, Ann. d. Phys. **49**, 229 (1916); Die Naturwissenschaften **7**, 339 (1919).

II.

(5) Literatur zu I a, b vgl. M. u. Schw. Kap. I und VI, 4, 5.

(6) Mathematisch wird dieses Zeitgesetz durch die Gleichung ausgedrückt

$$-\frac{\Delta N_t}{\Delta t} = \lambda N_t,$$

wo N_t die zur Zeit t vorhandene Zahl der Atome und $-\Delta N_t$ die Abnahme dieser Zahl während des kleinen Zeitintervalls Δt bedeutet. Der für ein bestimmtes Radioelement charakteristische Proportionalitätsfaktor λ gibt an, welcher Teil der vorhandenen Zahl der Atome in einer Zeiteinheit umgewandelt wird, die genügend klein gewählt wurde, um die vorhandene Zahl als praktisch konstant betrachten zu dürfen. Für längere Zeiträume nimmt dieses „logarithmische“ Gesetz die Form an $\lambda t = \frac{1}{0,4343} \lg_{10} \frac{N_0}{N_t}$, wo N_0 sich auf den Anfang, N_t auf das Ende des Zeitintervalls t bezieht, \lg_{10} den Logarithmus bei der Basis 10 bedeutet. Wählt man t gleich der Halbwertszeit (t_h), so ist

$$\lambda = \frac{1}{0,4343 t_h} \lg_{10} 2 = \frac{0,693}{t_h}.$$

Für die Radiumemanation ist $t_h = 3,85$ Tage = 5550 Minuten, also pro Minute

$$\lambda = \frac{0,693}{5550} = \frac{1,25}{10\,000} \text{ Min.}^{-1}$$

d. h. in einer Minute wird etwas mehr als $\frac{1}{100}$ Proz. der jeweils vorhandenen Menge der Emanation umgewandelt. $1/\lambda$ stellt die mittlere Lebensdauer der Atome des betreffenden Elementes vor.

(7) Literatur zu II, 2 vgl. M. u. Schw. Kap. II, 1, 3, 4.

(7a) Näheres über diesbezügliche ausgedehnte Versuche wird demnächst an anderer Stelle mitgeteilt.

(8) Literatur zu II, 3 vgl. M. u. Schw. Kap. III, IV.

(9) Auf Grund neuester ausgedehnter Untersuchungen von V. F. Hess und R. W. Lawson, Wien. Ber. 127 (IIa), 405 (1918), sendet 1 g Radiumelement (ohne Zerfallsprodukte) $3,72 \times 10^{10}$ α -Teilchen pro Sekunde aus, woraus sich seine Halbwertszeit zu 1580 Jahren ergibt.

(10) Literatur zu II, 4 vgl. M. u. Schw. Kap. II, 9 und IV, 10.

(11) Literatur zu II, 5 vgl. M. u. Schw. Kap. II, 7 und VI, 6.

(12) Literatur zu II, 6 vgl. M. u. Schw. Kap. VI, II, 10, V, 7.

III.

(13) Literatur zu III, 1 vgl. K. F. II und O. Hönigschmid, Zeitschr. f. Elektrochem. 22, 21 (1916).

(14) Literatur zu III, 2 vgl. K. F. III, ferner G. v. Hevesy und F. Paneth, Wien. Ber. 123, 1909 (1914); Th. W. Richards und N. F. Hall, Chem. News 115, 284 und 294 (1917).

(15) Näheres über die Geschichte der Erforschung chemischer Eigenschaften der Radioelemente und ihrer Beziehungen zum perio-

dischen System sowie über die Aufstellung der Verschiebungssätze vgl. K. F. III, IV, V, 1.

(16) Es sei erwähnt, daß die volle Klarheit über das Verhältnis der Radioelemente zum periodischen System im Jahre 1913 durch die fast gleichzeitig publizierten Arbeiten vom Verfasser und von F. Soddy erzielt wurde, kurz nachdem A. Russell eine ähnliche, jedoch unvollkommene Lösung vorgeschlagen hatte. Das experimentelle Material, betreffend die chemische Untrennbarkeit der Radioelemente voneinander und von gewöhnlichen Elementen ist seit der ersten Feststellung dieser Erscheinung bei Radiothorium und Thorium im Jahre 1907 durch H. Mc Coy und W. Ross zunächst nur langsam gesammelt worden und erst im Jahre 1913 hauptsächlich durch die Arbeiten von A. Fleck für alle nicht zu kurzlebigen Elemente gewonnen worden, wobei sich die erwähnte Einreihung ins periodische System vollkommen bestätigte. Der erste Versuch einer richtigen Deutung des Verhältnisses der Radioelemente zum periodischen System auf Grund der Existenz untrennbarer Elemente wurde von The Svedberg und D. Strömholm (1909) unternommen und dann von Soddy (1911) in bestimmtere Form gebracht. Vgl. auch (15).

IV.

(17) O. Hahn und L. Meitner, Phys. Zeitschr. **19**, 208 (1918); **20**, 127 (1919); F. Soddy und J. A. Cranston, Proc. Roy. Soc. London A. **94**, 384 (1918).

(18) Ältere Literatur zur Frage der Actiniumgeneseis vgl. M. u. Schw. S. 376.

(18a) Über eine sehr schwache α -Strahlung des Actiniums vgl. M. u. Schw. S. 375.

V.

(19) Literatur zu V vgl. K. F. VI und IX, 2. Über andere bemerkenswerte Regelmäßigkeiten betreffend die Lebensdauer der Radioelemente vgl. M. u. Schw. VI, 12.

VI.

(20) Wir gebrauchen also den Ausdruck „Verbindungsgewicht“ nicht in dem Gmelinschen Sinne als gleichbedeutend mit dem „Äquivalentgewicht“ (A. G. dividiert durch Wertigkeit), sondern im Sinne Ostwalds, der die Bezeichnung „Verbindungsgewicht“ statt „Atomgewicht“ benutzte. Vgl. K. Fajans, Jahrb. d. Radioakt. u. Elektron. **14**, 348 (1917); F. Paneth, Zeitschr. f. physik. Chem. **92**, 678 (1917).

(21) Literatur zu VI, 1, 2 vgl. K. F. VII, 1, 2; ferner Th. W. Richards und Ch. Wadsworth, Journ. Am. Chem. Soc. **38**, 2613 (1916); K. Fajans, Zeitschr. f. Elektrochem. **24**, 163 (1918); R. W. Lawson, Die Naturwissenschaften **5**, 429, 452 (1917).

(21a) Nach Mitteilung von F. Soddy, Chem. News **107**, 97 (1913).

(22) Näheres zu VI, 3 vgl. F. Soddy und Mitarbeiter, Journ. Chem. Soc. **105**, 1402 (1914); Nature **94**, 615 (1915); **98**, 469 (1917); **99**, 244 (1917). O. Hönigschmid, Zeitschr. f. Elektrochem. **23**, 161 (1917) und **25**, 91 (1919). K. Fajans, ebenda **24**, 163 (1918); Ber. d.

Heidelberg. Akad. 1918 (A), Abh. 3; R. W. Lawson, Wien. Ber. **126** (IIa), 721 (1917).

(23) G. P. Baxter und F. L. Grover, Journ. Am. Chem. Soc. **37**, 1027 (1915).

VII.

(24) Analog ist der Befund von O. Hönigschmid und St. Horowitz, daß ein aus Joachimstaler Pechblende stammendes stark radioaktives Gemisch von Ionium und Thorium das V. G. 231,5 aufweist, während das A. G. des Thoriums 232,12 beträgt. Das A. G. des Ioniums berechnet sich aus dem des Radiums (vgl. Tabelle 2) zu 230,0. Spektroskopisch war dieses Gemisch von Ionium und Thorium vom gewöhnlichen Thorium nicht zu unterscheiden.

(25) Literatur zu VII vgl. K. F. IX, ferner: Th. R. Merton, Proc. Roy. Soc. A. **91**, 198 (1915); Th. W. Richards und Ch. Wadsworth, Journ. Am. Chem. Soc. **38**, 221, 1658 (1916); K. Fajans und M. Lembert, Zeitschr. f. anorg. Chem. **95**, 297 (1916); G. v. Hevesy und F. Paneth, Wien. Ber. **124** (IIa), 381 (1915); H. Lachs, M. Nadratowska und L. Wertenstein, Ber. d. Warschauer wiss. Ges. **9**, 652 (1916).

(25a) Th. W. Richards erwähnt in einem Vortrage [Science **49**, 1 (1919)], daß es W. D. Harkins gelungen ist, in der Wellenlänge der Spektrallinien zweier isotopen Bleiarten einen Unterschied von 0,0001 Proz. nachzuweisen. Nähere Angaben waren nicht zu finden. Über die theoretisch zu erwartenden Unterschiede vgl. K. F. IX, 1.

(25b) Die von Th. W. Richards (25a) für Pb und Pb^{206,34} erhaltenen Schmelzpunkte 600,53^{207,19} und 600,59⁰ (abs.) zeigen keinen außerhalb der Versuchsfehler liegenden Unterschied. Dieses Resultat bestätigt die vom Verfasser (K. F. IX, 1) entwickelte Theorie der Eigenschaften der Isotopen im festen Zustande, aus der u. a. folgt, daß die chemischen Eigenschaften der Isotopen nicht als vollkommen identisch, sondern nur als weitgehend übereinstimmend zu betrachten sind.

VIII.

(26) Literatur betreffend die Verdampfungserscheinungen bei Radioelementen vgl. St. Loria, Wien. Ber. **124** (IIa), 567 u. 1077 (1915); A. B. Wood, Proc. Roy. Soc. A. **91**, 543 (1915).

(27) Über die elektrochemischen Eigenschaften der Radioelemente vgl. u. a. den zusammenfassenden Bericht von F. Paneth, Jahrb. d. Radioakt. u. Elektron. **11**, 451 (1915); K. F. Herzfeld, Phys. Zeitschr. **14**, 29 (1913); G. v. Hevesy, ebenda **16**, 52 (1915); Frau M. Wertenstein, Ber. d. Warschauer wiss. Ges. **10**, 771 (1917).

(28) Über kolloidale Lösungen der Radioelemente vgl. die Zusammenfassungen von T. Godlewski, Kolloid-Zeitschr. **14**, 229 (1914) und von F. Paneth (27) ferner H. Lachs, Ber. d. Warschauer wiss. Ges. **10**, 785 (1917).

(29) Näheres vgl. F. Paneth (27), K. Horowitz und F. Paneth, Wien. Ber. **123** (IIa), 1819 (1914); K. Fajans und F. Richter, Ber. d. deutsch. chem. Ges. **48**, 700 (1915).

IX.

(30) F. Paneth und G. v. Hevesy, Wien. Ber. **122** (IIa), 1001 (1913); G. v. Hevesy und Elisabeth Róna, Zeitschr. f. physik. Chem. **89**, 303 (1915).

(31) F. Paneth, Ber. d. deutsch. chem. Ges. **51**, 1704 (1918); Derselbe und E. Winternitz, ebenda S. 1728.

X.

(32) Näheres über die Kanalstrahlenanalyse vgl. die Monographie von J. J. Thomson, Rays of positive Electricity 1913, aus der Fig. 3 und 4 reproduziert sind; W. Wien, Kanalstrahlen in Bd. IV des von E. Marx herausgegebenen Handbuches der Radiologie, 1917. Über Metaneon vgl. F. Aston, Physik. Zeitschr. **14**, 1303 (1913).

(32a) Anm. bei der Korrektur: In einer kürzlich erschienenen Abhandlung von F. A. Lindemann und F. W. Aston (Phil. Mag. **37**, 523, 1919), in der die Möglichkeiten der Trennung der Isotopen theoretisch diskutiert sind, teilt Aston mit, daß die Existenz des Metaneons auf Grund der bisherigen Resultate seiner im Gang befindlichen Diffusionsversuche noch nicht als erwiesen zu betrachten ist.

XI.

(33) Über Röntgenstrahlenspektroskopie vgl. die zusammenfassenden Bearbeitungen von M. Siegbahn, Jahrb. d. Radioakt. u. Elektron. **13**, 296 (1916); E. Wagner, Physik. Zeitschr. **18**, 405, 432, 461, 488 (1917).

XII.

(34) Literatur zu XII, 1 vgl. K. F. VIII. Eine leichtfaßliche Darstellung vgl. L. Graetz, Die Atomtheorie in ihrer neuesten Entwicklung (1918) und Sommerfeld (35).

(35) Näheres über die Theorie der Spektren vom Standpunkte des Atommodells und der Quantentheorie vgl. E. Wagner (33) und P. Epstein, Die Naturwissenschaften **6**, 230 (1918), und besonders das im Druck befindliche Buch von A. Sommerfeld, Atombau und Spektrallinien (Verlag von Friedr. Vieweg & Sohn).

(36) Andeutungen für die Existenz von radioaktiven Umwandlungen, die von der Aussendung von Wasserstoffkernen begleitet werden, vgl. E. Marsden und W. C. Lantsberry, Phil. Mag. **30**, 240 (1915). In diesem Zusammenhange sei auch auf die α -Teilchen von sehr großer Reichweite (bis 11,3 cm) hingewiesen, die E. Rutherford und A. B. Wood, Phil. Mag. **31**, 379 (1916) beim ThC beobachtet haben, ferner auf den Wasserstoffgehalt der Mineralien der seltenen Erden, K. F. X, 6.

(37) Näheres zu XII, 4 vgl. W. D. Harkins und E. D. Wilson, Zeitschr. f. anorg. Chem. **95**, 1 (1915); W. Lenz, Bayer. Akad. 1918, S. 355.

XIII.

(38) Näheres vgl. F. Paneth, *Zeitschr. f. physik. Chem.* **91**, 171 (1916); **92**, 677 (1917); **93**, 86 (1918); *Die Naturwissenschaften* **6**, 645 (1918); K. Fajans, *Jahrb. d. Radioakt. u. Elektron.* **14**, 314 (1917); **15**, 101 (1918); *Die Naturwissenschaften* **6**, 750 (1918); R. Wegscheider, *Zeitschr. f. physik. Chem.* **92**, 741 (1918); **93**, 380 (1919).

(39) Versuche zur Trennung der Isotopen durch fraktionierte Diffusion, die im Laboratorium des Verfassers bereits im Jahre 1914 begonnen wurden, während des Krieges aber zurückgestellt werden mußten, sind jetzt wieder aufgenommen worden.

XIV.

(40) Über das Verhältnis der seltenen Erdmetalle zum periodischen System vgl. R. Vogel, *Zeitschr. f. anorg. Chem.* **102**, 177 (1917)

(41) Über die Radioaktivität des Kaliums und Rubidiums vgl. die neueste diesbezügliche Arbeit von O. Hahn und M. Rothenbach, *Physik. Zeitschr.* **20**, 194 (1919).

Zum Nachtrag.

(42) C. T. R. Wilson, *Jahrb. d. Radioakt. u. Elektron.* **10**, 34 (1913); D. Bose, *Physik. Zeitschr.* **17**, 388 (1916).

(43) Über Nebulium vgl. B. H. Bourget, Ch. Fabry und H. Buisson, *C. R.* **158**, 1017 (1914); J. W. Nicholson, ebenda, S. 1322.

(44) Eine kritische Zusammenstellung der zahlreichen bisherigen Versuche zur künstlichen Zerlegung radioaktiver und gewöhnlicher Elemente wird vom Verfasser an anderer Stelle veröffentlicht. Hier genüge der Hinweis auf die sorgfältige Arbeit von J. N. Collie, H. S. Patterson und J. Masson, *Proc. Roy. Soc. A.* **91**, 30 (1915).

(45) Näheres über *H*-Teilchen vgl. M. u. Schw. III, 11 B und 20 A; C. G. Darwin, *Phil. Mag.* **27**, 499 (1914); E. Marsden, ebenda, S. 824; Derselbe und W. C. Lantsberry, ebenda **30**, 240 (1915); E. Rutherford, ebenda **37**, 537—587 (1919).

Autorenregister.

(Die eingeklammerten Zahlen des Autoren- und Sachregisters beziehen sich auf die Nummern der Literaturangaben und Anmerkungen S. 102 ff.)

- Andrade, E. da C. 71.
Antonoff, G. 28, 44.
Aristoteles 83.
Aston, F. 68 (32, 32a).
- Barkla, Ch. G. 70.
Baxter, G. P. 57 (23).
Becquerel, H. 1, 8.
Beer, P. 61, 63.
Bohr, N. 73, 75, 76.
Boltwood, B. 21, 43, 51.
Bose, D. 97 (42).
Bourget, B. H. (43).
Boyle, R. 2, 79, 83.
Bragg, W. H. 70.
—, W. L. 70.
Broek, van den, A. 75.
Buisson, H. (43).
- Chancourtois, de 5.
Collie, J. N. (44).
Coy, Mc H. 32 (16).
Cranston, J. A. 45 (17).
Crookes, Sir William 16.
Curie, P. 1, 9.
—, Marya 1, 9, 10, 25, 102.
—, Maurice 53.
- Darwin, C. G. 97 (45).
Debiérne, A. 10, 11, 26.
Debye, P. 75.
Dorn, E. 11.
- Elster, J. 16.
Epstein, P. (35).
Fabry, Ch. (43).
Fleck (16).
Friedrich, W. 69.
- Geiger, H. 16, 28, 41, 95, 96.
Geitel, H. 16.
Giesel, F. 26.
Godlewski, T. (28).
Göhring, O. 42.
Graetz, L. (34).
Gray, W. 11.
Grover, F. L. 57 (23).
- Hahn, O. 33, 42, 44, 45 (17, 41).
Hall, N. F. 33 (14).
Harkins, W. D. 79 (25a, 37).
Henrich, F. 102.
Herzfeld, K. F. (27).
Heß, V. F. (9).
Hevesy, G. v. 33, 34, 64 (14, 25, 27).
Hönigschmid, O. 10, 31, 53, 54, 56, 57 (13, 22, 24).
Horowitz, K. 63 (29).
—, St. 54 (24).
- Knipping, P. 69.
Kossel, W. (4).
- Lachs, H. (25, 28).
Lantsberry, W. C. 97, 98 (36, 45).
Laue, M. v. 69.
Lavoisier 2, 79.
Lawson, R. W. 51 (9, 22).
Lembert, M. 53, 59 (25).
Lenz, W. (37).
Lindemann, F. A. (32a).
Loria, St. (26).
- Marekwald, W. 33, 34.
Marsden, E. 95 ff. (36, 45).
Masson, J. (44).
Meitner, Lise 42, 44, 45 (17).
Mendelejeff, D. 5.
Merton, Th. R. 58 (25).
Meyer, Lothar 5.
—, Stefan 21, 102.
Moseley, H. G. 69, 71, 86.
- Nadratowska, M. (25).
Newlands, J. 5.
Nicholson, J. W. (43).
Nuttall, J. M. 41.
- Ostwald, Wilhelm 85 (20).
- Paneth, F. 33, 34, 44, 63, 64, 65, 81, 82 (14,

- 20, 25, 27, 28, 29, 30, 31, 38).
Patterson, H. S. (44).
Prout, W. 8.
Ramsay, Sir William 11, 12.
Regener, E. 16.
Richards, Th. W. 33, 53, 54, 59, 60 (14, 21, 25a, b).
Richter, F. 62 (29).
Róna, E. 64.
Roß, W. 32 (16).
Rothenbach, M. (41).
Royds, T. 17.
Russell, A. S. 41, 42, 53 (16).
Rutherford, Sir Ernest 11, 16, 19, 20, 43, 71, 73, 95ff., 102 (36, 45).
Schmidt, C. (2).
Schweidler, E. v. 21, 102.
Siegbahn, M. 70, 71, 73 (33).
Soddy, F. 11, 12, 19, 21, 34, 35, 41, 44, 45, 53, 56, 76, 102 (16, 17, 21a, 22).
Sommerfeld, A. 76 (35).
Strömholm, D. (16).
Svedberg, The (16).
Swinne, R. 31, 43.
Thomson, Sir J. J. 67, 68 (32).
Vogel, R. (40).
Wadsworth, Ch. 54, 59 (21, 25).
Wagner, E. (33, 35).
Wegscheider, R. (38).
Wertenstein, L. (25).
—, M. (27).
Wien, W. (32).
Wilson, C. T. R. 16, 97 (42).
—, E. D. (37).
Winternitz, E. 65 (31).
Wood, A. B. (26, 36).
-

Sachregister.

- α -Strahlen 15, 16.
— und Heliumbildung 17.
 α -Strahler 26, 48.
 α -Teilchen; Zählung der 16, 18, 25.
— als Heliumkern 76.
 α -Umwandlungen 26, 40.
Actinium 26, 32, 34, 62.
—, Genesis des 42ff., 49.
Actinium D (Actiniumblei) 51, 53.
Actiniumreihe 26, 28.
Adsorptionsregel für Radioelemente 63.
Aktiver Niederschlag 20.
Analyse, chemische 4.
Arteigenschaften 60.
Atom 4.
—, Struktur des 73ff.
Atomgewicht 4.
— des Actiniums 31, 49.
— der Bleiarten 51ff.
— des Ioniums (24).
— der Radioelemente 30.
— des Radiums 10, 17, 31.
— der Radiumemanation 11, 18.
— des Thoriums 30.
— des Urans 30, 41.
— als Grundlage des periodischen Systems 7, 69.
— und Lebensdauer der Isotopen 48 ff.
Atomgewichtsregelmäßigkeiten 66.
Atomkern 74 ff.
- β -Strahlen 15.
 β -Strahler 26, 48.
 β -Umwandlungen 26, 30.
- Blei, gewöhnliches 57.
— in Uranmineralien 51 ff.
— — Thormineralien 51, 55.
Bleiarten 51ff.
Boyles Definition 2.
Brevium 42, 45.
- Diffusion 4, 67, 68 (39).
- Edelgase 3, 68.
Elektron, negatives 15.
—, positives 75.
Element, Begriff des 79ff.
—, Definition des 2, 83, 85.
Elementarquantum, elektrisches 15.
Elemente, Erhaltung der 4, 12.
—, Zahl der 7, 86.
Elemententypus 35, 60, 73, 81, 86.
Endprodukte radioaktiver Reihen 25, 50ff. (23).
Erdmetalle, seltene 3, 7, 88 (36, 40).
- Fällungsregel für Radioelemente 62.
- γ -Strahlen 14, 26.
— des Radium B 71.
- H-Teilchen 97 ff. (45).
Halbwertsdicke im Aluminium für β - und γ -Strahlen 15, 22—24.
Halbwertszeit der Radioelemente 12 (6).
— — — sehr kurzlebiger 28.
— des Radiums 18 (9).
— — Urans 25.
— — — II 29, 41.

- Helium als Bestandteil anderer Elemente 66, 79, 100.
Heliumatom, Struktur des 76.
Heliumbildung aus Radiumemanation 12, 17.
Heliumkern 76.
- Ionium 21, 33 (24).
Isotope, Bleiarten 51 ff.
— —, Röntgenspektrum der 73.
— Elemente 35.
— —, Eigenschaften der 58 ff. (25 b).
— — und Atomstruktur 77.
— —, chemische Untrennbarkeit der 33.
— —, Trennungsmethoden der 66 ff., 84.
- Kalium, Radioaktivität des 21, 91 (41).
Kanalstrahlenanalyse 67 (32).
Kernladung 75 ff.
— als Grundlage des periodischen Systems 87.
Kolloidaler Zustand der Radioelemente 63 (28).
- Lebensdauer der Radioelemente 18.
— — —, Regelmäßigkeiten der 48 (19).
— — —, mittlere (6).
Logarithmisches Umwandlungsgesetz 19 (6).
- Mesothorium 25, 26, 34.
Metaneon 68 (32)
Mischelemente 44.
Moseleys Gesetz 69, 71, 76, 86, 88.
- Neon 3, 68.
Niton 11.
Nomenklatur der Radioelemente 21.
- Ordnungszahl der Elemente 69, 86.
- Periodisches System 5 ff.
— —, Entdeckungsgeschichte des (2).
— —, achte und nullte Gruppe des 7, 46.
- Periodisches System, Zahl der Stellen im 34, 86.
— — und Atomstruktur (4).
Plejade 35.
Polonium 25, 33, 34, 62.
Protactinium 34, 45, 49.
Prouts Hypothese 8, 66, 79.
- Quantentheorie 73 (35).
- Radioaktive Analysemethoden 10, 19, 25, 61, 65.
— Umwandlungen 12 ff.
— —, strahlenlose 26, 46.
— —, Unbeeinflussbarkeit der 14, 74, 80.
— —, Zeitgesetz 13, 19 (6).
Radioaktives Gleichgewicht 25, 41.
Radioaktivität 1.
— als Atomeigenschaft 9, 10.
Radioelemente, chemische Eigenschaften der 32 ff. (15, 27).
— als Indikatoren 64.
— und periodisches System 35 (16).
Radiothorium 25, 32.
Radium 9 ff., 34.
—, Bildung aus Ionium und Uran 21.
— A, B, C 20.
— D 33, 55, 57, 64.
— G 25, 34, 52.
Radiumemanation 11, 34.
Reichweite der α -Strahlen 15.
— — — und Lebensdauer 28, 41.
Röntgenstrahlen 14.
—, charakteristische 69.
— —, Spektren der 70, 86 (33).
— — — bei Isotopen 71.
Rubidium, Radioaktivität des 21, 91 (41).
- Spektrum, optisches 4, 32.
— — der Isotopen 58 (24, 25 a).
— — und Atomstruktur 75 (35).
Szintillationen 16, 18, 97 ff.
- Thorium 25.
— B 61 ff.
— D (Thoriumblei) 52, 55.

Thorium X 25.
Thoriumemanation 25.
Thoriumreihe 24, 25.
Typuseigenschaften 60, 73.

Umwandlung der Radiumemanation
12 ff.

Umwandlungstheorie 19.

Uran, Strahlung des 1, 9.

— I und II 28, 41.

— X_1 und X_2 41.

— Y 28, 44, 49.

Uranblei 53 ff.

Uran-Radiumreihe 21.

Verbindungsgewicht 55 (20).

Verschiebungssätze 39 ff.

— und Atomstruktur 76.

Verzweigung radioaktiver Reihen 28,
43, 49.

Wärmeentwicklung, des Radiums
1, 19.

Wasserstoff als Bestandteil anderer
Elemente 66, 78, 100.

Wasserstoffatom, Struktur des 75.

Wasserstoffumwandlungen 98 (36).

Wismutwasserstoff 65.

Zerlegungsmethoden 3.

Bisher erschienene Hefte der „Sammlung Vieweg“.

- Heft 1. Dr. Robert Pohl und Dr. P. Pringsheim-Berlin: *Die lichtelektrischen Erscheinungen*. Mit 36 Abbildungen. M. 3,—.
- Heft 2. Dr. C. Freiherr von Girsewald-Berlin-Halensee: *Peroxyde und Persalze*. M. 2,40.
- Heft 3. Diplomingenieur Paul Béjeuhr-Charlottenburg: *Der Blériot-Flugapparat und seine Benutzung durch Pégoud vom Standpunkte des Ingenieurs*. Mit 26 Abbildungen. M. 2,—.
- Heft 4. Dr. Stanislaw Loria-Krakau: *Die Lichtbrechung in Gasen als physikalisches und chemisches Problem*. Mit 3 Abbildungen und 1 Tafel. M. 3,—.
- Heft 5. Professor Dr. A. Gockel-Freiburg i. d. Schweiz: *Die Radioaktivität von Boden und Quellen*. Mit 10 Abbildungen. M. 3,—.
- Heft 6. Ingenieur D. Sidersky-Paris: *Brennereitragen: Kontinuierliche Gärung der Rübensäfte. — Kontinuierliche Destillation und Rektifikation*. Mit 24 Abbildungen. M. 1,60.
- Heft 7. Hofrat Professor Dr. Ed. Donath und Dr. A. Gröger-Brünn: *Die flüssigen Brennstoffe, ihre Bedeutung und Beschaffung*. Mit 1 Abbildung. M. 2,—.
- Heft 8. Geh. Reg.-Rat Professor Dr. Max B. Weinstein-Berlin: *Kräfte und Spannungen. Das Gravitations- und Strahlenteld*. M. 2,—.
- Heft 9/10. Geh. Reg.-Rat Professor Dr. O. Lummer-Breslau: *Verflüssigung der Kohle und Herstellung der Sonnentemperatur*. Mit 50 Abbildungen. M. 5,—.
- Heft 11. Dr. E. Przybyllok: *Polhöhen-Schwankungen*. Mit 8 Abbildungen. M. 1,60.
- Heft 12. Professor Dr. Albert Oppel-Halle a. S.: *Gewebekulturen und Gewebepflege im Explantat*. Mit 32 Abbildungen. M. 3,—.
- Heft 13. Dr. Wilhelm Foerster-Berlin: *Kalenderwesen und Kalenderreform*. M. 1,60.
- Heft 14. Dr. O. Zoth-Graz: *Über die Natur der Mischfarben auf Grund der Undulationshypothese*. Mit 3 Textfiguren und 10 Kurventafeln. M. 2,80.
- Heft 15. Dr. Siegfried Valentiner-Clausthal: *Die Grundlagen der Quantentheorie in elementarer Darstellung*. Mit 8 Abbild. M. 2,60.
- Heft 16. Dr. Siegfried Valentiner-Clausthal: *Anwendung der Quantenhypothese in der kinetischen Theorie der festen Körper und der Gase. In elementarer Darstellung*. Mit 4 Abbildungen. M. 2,60.
- Heft 17. Dr. Hans Witte-Wolfenbüttel: *Raum und Zeit im Lichte der neueren Physik*. Eine allgemeinverständliche Entwicklung des raumzeitlichen Relativitätsgedankens bis zum Relativitätsprinzip der Trägheitssysteme. Mit 18 Abbild. 2. Aufl. M. 2,80.
- Heft 18. Dr. Erich Hupka-Tsingtau: *Die Interferenz der Röntgenstrahlen*. Mit 33 Abbildungen und 1 Doppeltafel in Lichtdruck. M. 2,60.
- Heft 19. Prof. Dr. Robert Kremann-Graz: *Die elektrolytische Darstellung von Legierungen aus wässrigen Lösungen*. Mit 20 Abbildungen. M. 2,40.
- Heft 20. Dr. Erik Liebreich-Berlin: *Rost und Rostschutz*. Mit 22 Abbildungen. M. 3,20.