

**Badische Landesbibliothek Karlsruhe**

**Digitale Sammlung der Badischen Landesbibliothek Karlsruhe**

**Die Atomtheorie in ihrer neuesten Entwicklung**

**Graetz, Leo**

**Stuttgart, 1918**

**urn:nbn:de:bsz:31-91571**

# Die Atomtheorie in ihrer neuesten Entwicklung

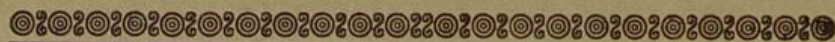
Sechs Vorträge von  
**Dr. Leo Graetz**  
Professor an der Universität München

Mit 30 Abbildungen



Stuttgart · Verlag von J. Engelhorns Nachf. · 1918

A. g. XIII.



Im gleichen Verlag ist erschienen:

# DIE ELEKTRIZITÄT UND IHRE ANWENDUNGEN

Von

DR. L. GRAETZ

Professor an der Universität München

Achtzehnte Auflage :: 87.—96. Tausend

Mit 695 Abbildungen :: In Leinen gebunden 12 Mark

Der Umstand, daß nun siebzehn starke Auflagen dieses Buches vergriffen wurden, spricht am deutlichsten für seine ungewöhnliche, von Auflage zu Auflage wachsende Gangbarkeit.

Die Wunder der Elektrizität werden mehr und mehr zum herrschenden Faktor unserer Zeit, und kein Gebildeter kann umhin, sich mit den Gesetzen dieser Naturkraft und ihrer technischen Verwendung vertraut zu machen.

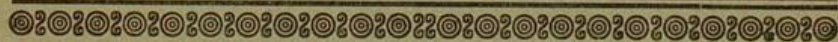
---

Die Zeitschrift für Krankenanstalten schreibt:

... Derjenige, der Zeit hat, wird sich mit Freude bei der klaren, anschaulichen Darstellung in das ganze Buch vertiefen, dem Beschäftigten ist es ein nie versagender Leitfaden bei nötiger Orientierung über eine Einzelfrage. Die Ausstattung ist trotz des erstaunlich billigen Preises sehr gut, die Abbildungen sind vorzüglich. Alles in allem kann man also den alten „Graetz“ im neuen Gewande als das beste Buch über die Elektrizität für alle Krankenhauszwecke empfehlen.

Das „Bayrische Industrie- und Gewerbeblatt München“ schreibt:

... Das Graetzsche Buch hat sich während der ganzen Zeit dieser raschen Entwicklung der Elektrizität als der weitaus beste und zuverlässigste Führer in diesem umfangreichen und schwierigen Gebiet



S/99/121-

C-37.296

DIE ATOMTHEORIE

D

# DIE ATOMTHEORIE

IN IHRER

NEUESTEN ENTWICKELUNG

SECHS VORTRÄGE

VON

DR. LEO GRAETZ

PROFESSOR AN DER UNIVERSITÄT MÜNCHEN

MIT 50 ABBILDUNGEN

STUTT GART 1918

VERLAG VON J. ENGELHORNS NACHF.

A. g. XIII.

u

M 7 E 2032



Alle Rechte vorbehalten.



Druck der Union Deutsche Verlagsgesellschaft in Stuttgart.

## Vorwort

---

Der Gegenstand dieser Vorträge, welche ich an verschiedenen Stellen, zum Teil im besetzten Gebiet, gehalten habe, hat, wie ich mich überzeugen konnte, ein allgemeines Interesse, nicht bloß bei Physikern und Chemikern, sondern bei den meisten naturwissenschaftlich gebildeten Personen gefunden. Es schien mir daher von Wert, diese Vorträge einem weiteren Kreis zugänglich zu machen, insbesondere da ich in denselben bestrebt war, den Weg ausführlich klarzulegen, auf dem die neuen umwälzenden Anschauungen über die Atome gewonnen wurden, und die Fortschritte zu erläutern, die durch sie in der Erklärung vieler Erscheinungen gewonnen wurden. Daß diese neuesten Vorstellungen noch nicht abgeschlossen sind, sondern noch mancherlei Schwierigkeiten und Dunkelheiten enthalten, die erst allmählich beseitigt werden müssen, beeinträchtigt ihren Wert nicht im mindesten und zeigt nur, daß die Wissenschaft hier in ganz unbekanntes, aber fruchtbares Neuland eingedrungen ist.

München, August 1918.

Graetz





## Inhaltsverzeichnis.

	Seite
<b>Erster Vortrag. Die Moleküle und Atome in der Chemie und der kinetischen Gastheorie</b> . . . . .	1—14
Die Atomtheorie in der Chemie und Physik. Atome und Moleküle. Ein- und mehratomige Moleküle der Elemente. Die Atomgewichte. Die Proutische Hypothese. Das periodische System der Elemente. Die kinetische Gastheorie. Die wirkliche Größe und die wirkliche Masse der Moleküle und Atome. Die Loschmidtsche und die Avogadrosche Zahl. Theorie der Wirbelatome. Der Unteilbarkeit widersprechen die Spektre der Elemente.	
<b>Zweiter Vortrag. Die Atome und Ionen bei den elektrischen Vorgängen in Flüssigkeiten und Gasen. Die Atome der Elektrizität</b> . . . . .	15—30
Die Ionen in der Elektrolyse. Das Faradaysche Gesetz. Die atomistische Struktur der Elektrizität. Die Elektronen. Elementarladung. Gasentladungen. Kathodenstrahlen. Die freien negativen Elektronen. Scheinbare Masse. Größe und Masse der negativen Elektronen. Die Kanalstrahlen. Die positive Elektrizität. Neutrale und elektrisch geladene Atome und Moleküle.	
<b>Dritter Vortrag. Der Zerfall der Atome bei den radioaktiven Stoffen. Die Kerntheorie der Atome</b> . . . . .	31—46
Das Uran, Radium, Thorium und Aktinium als radioaktive Substanzen. Die $\alpha$ - $\beta$ - $\gamma$ -Strahlen. Die $\alpha$ -Teilchen sind doppelt positiv geladene Heliumionen. Emanation. Atomzerfall. Die Heliumionen sind Bestandteile der Atome der radioaktiven Stoffe. Wilsonsche Photographieen der $\alpha$ -Strahlen. Zerstreuung der $\alpha$ -Teilchen. Rutherfordische Atomtheorie. Die positive Ladung des Kerns ist gleich der Ordnungszahl des Atoms. Die Masse ist scheinbar. Größe des Kerns. Isotope Elemente.	
<b>Vierter Vortrag. Die Spektre der Röntgenstrahlen und die Kerntheorie der Atome</b> . . . . .	47—62
Beugungserscheinungen als Beweis für die Wellennatur des Lichts. Die Beugung der Röntgenstrahlen durch Kristalle. Die Braggsche Auffassung der Beugungsbilder. Röntgenspektre. Die K- und L-Linien. Das Moseleysche Gesetz der Hochfrequenzspektre. Reihenfolge der Elemente und Lücken im periodischen System.	

Fünfter Vortrag. <b>Die Linienspektren und das Bohrsche Atommodell</b> . . .	63—78
--	-------

Die Erzeugung und das Aussehen der Linienspektren. Analogie mit Schallschwingungen nicht vorhanden. Das Balmer'sche Gesetz. Die Balmer'sche Serie im Wasserstoff. Die ultraroten Wasserstofflinien. Die Rydberg'sche Zahl. Serienlinien. Die Bohrsche Atomkonstruktion. Energiequantum und Wirkungsquantum. Das Bohrsche Atom gibt für den Wasserstoff genau die Balmer'schen Serienlinien und die Rydberg'sche Konstante. Das Heliumatom. Die komplizierteren Atome. Die Hochfrequenzspektren und das Moseley'sche Gesetz. Die Leistungen und die Schwierigkeiten des Bohrschen Atommodells.

Sechster Vortrag. <b>Spezieller Bau der Atome, Ionen und Moleküle</b> . . .	79—88
---	-------

Anhaltspunkte zur Untersuchung des Baues der Atome und Ionen. Die vier ersten Elemente, Wasserstoff, Helium, Lithium, Beryllium. Versuche über die Anordnung der Ringe bei den Elementen höherer Ordnungszahl. Die Bildung der Moleküle durch gemeinsame Ringe. Das Wasserstoffmolekül. Ein Heliummolekül kann sich nicht bilden. Es kann auch keine Verbindung des Wasserstoffs und Heliums unter gewöhnlichen Umständen eintreten. Rückblick und Ausblick.

meh  
Das  
Grö  
die  
die

ein  
Stü  
und  
Ter  
ebe  
Vol  
den  
die  
sell  
anv  
mü  
bar  
ane  
sin  
grö

fas  
Fo  
die  
Ch  
ver  
gen  
Ch  
mi  
jed  
un  
ab  
da

## Erster Vortrag.

### Die Moleküle und Atome in der Chemie und der kinetischen Gastheorie.

Die Atomtheorie in der Chemie und Physik. Atome und Moleküle. Ein- und mehratomige Moleküle der Elemente. Die Atomgewichte. Die Prout'sche Hypothese. Das periodische System der Elemente. Die kinetische Gastheorie. Die wirkliche Größe und die wirkliche Masse der Moleküle und Atome. Die Loschmidt'sche und die Avogadro'sche Zahl. Theorie der Wirbelatome. Der Unteilbarkeit widersprechen die Spektra der Elemente.

Schon hervorragende Köpfe des Altertums haben erkannt, daß es ein Irrtum ist, wenn wir annehmen, wie es der Schein verlangt, daß ein Stück Eisen, ein Stück Glas den Raum, den es einnimmt, vollständig und ohne Lücken erfülle. Die Tatsache, daß alle Körper bei tieferer Temperatur sich zusammenziehen, also einen kleineren Raum ausfüllen, ebenso wie die Tatsache, daß sie durch einen Druck auf ein kleineres Volumen zusammengepreßt werden können, beweisen schon, daß sie vorher den Raum nicht voll erfüllt haben können. Allerdings müssen die Lücken, die in den scheinbar stetigen Körpern existieren, sehr klein sein. Denn selbst bei der schärfsten mikroskopischen Vergrößerung, die wir heute anwenden können, kann man von ihnen nichts erkennen. Die Körper müssen danach aus außerordentlich kleinen, mikroskopisch nicht erkennbaren Bausteinen zusammengesetzt sein, die aber nicht lückenlos aneinandergereiht sind, sondern zwischen denen Abstände vorhanden sind, die sich z. B. durch Temperaturänderungen oder durch Druck vergrößern oder verkleinern lassen.

Diese allgemeine Überlegung wird nun bekanntlich in der umfassendsten Weise bestätigt durch die gesamten Tatsachen der chemischen Forschung. Die überaus große Anzahl von chemischen Verbindungen, die teils die Natur direkt darbietet, die anderenteils in der Retorte des Chemikers erzeugt werden, zeigen immer bestimmte einfache Gewichtsverhältnisse der in ihnen enthaltenen Stoffe. Die einfache und durchaus genügende Erklärung dieser Tatsache, welche die Grundlage der ganzen Chemie geworden ist, ist die, daß jeder einfache, elementare chemische Stoff aus kleinsten Teilchen, den A t o m e n, besteht, von denen jedes eine bestimmte Masse besitzt, so zwar, daß sämtliche Atome eines und desselben Stoffes gleichartig sind und dieselbe Masse besitzen, daß aber die Atome verschiedener Stoffe sich zunächst durch ihre Masse und dann auch durch ihre Eigenschaften voneinander unterscheiden. Da es

ungefähr 90 verschiedene chemische Elemente gibt, so gibt es auch 90 verschiedene Atome. Aus der Zusammensetzung solcher verschiedener Atome bilden sich die kleinsten Bausteine aller chemischen Verbindungen, die Moleküle derselben. Die wirkliche Masse irgend eines der 90 Atome in Gramm anzugeben sind wir zwar heute imstande und werden diese Zahlen auch später besprechen. Unter dem Atomgewicht versteht man aber nicht die wirkliche Masse eines Atoms in Grammen, sondern das Verhältnis der Masse dieses Atoms zu der Masse eines Atoms des leichtesten Stoffes, des Wasserstoffs. Die Atomgewichte sind also relative Zahlen, ohne Benennung. Ihre Bestimmung geschieht meistens auf chemischem Wege und zwar mittels der Wage. In einigen zweifelhaften Fällen hat das Gesetz der Atomwärme von Dulong und Petit, von dem wir noch zu sprechen haben werden, die Entscheidung für das richtige Atomgewicht gegeben, wo es aus rein chemischen Überlegungen nicht gefunden werden konnte.

Die chemischen Zeichen für die einzelnen Elemente, H für Wasserstoff, He für Helium, O für Sauerstoff, N für Stickstoff, Li für Lithium usw., bedeuten nicht bloß den Namen derselben, sondern zugleich ihr Atomgewicht. So bedeutet N den Namen für Stickstoff und zugleich die Zahl 14 als Atomgewicht desselben. Unter einem Grammatom einer Substanz versteht man so viel Gramm der Substanz, als das Atomgewicht angibt. Ein Grammatom Stickstoff sind also 14 g Stickstoff.

Die nicht elementaren, also alle zusammengesetzten Körper entstehen, wie gesagt, dadurch, daß ein oder mehrere Atome verschiedener Elemente in einen engen Zusammenhang treten und eine kleine Menge der Substanz bilden, die man ein Molekül nennt. Die Moleküle sind die Bausteine für die zusammengesetzten Körper. Die Moleküle können durch chemische Einwirkungen in ihre Atome zerlegt werden. Das Molekulargewicht ist stets gleich der Summe der Atomgewichte aller in einem Molekül enthaltenen Atome.

Danach scheint ein Unterschied zwischen den elementaren und den zusammengesetzten Stoffen, z. B. zwischen Chlor, das ein Element, und Chlorwasserstoff, das ein zusammengesetzter Stoff ist, darin zu bestehen, daß bei den ersteren die Atome selbst die Bausteine sind, bei den letzteren aber die Moleküle. Indes kann man beweisen, daß auch bei den letzteren Elementen es nicht die einzelnen Atome sind, welche die getrennten Bausteine der Körper bilden, sondern daß auch bei ihnen zwei (oder auch mehr) Atome in einen engeren Zusammenhang treten, also ebenfalls ein Molekül bilden, das hierbei aber nicht aus Atomen verschiedener Art, sondern aus gleichen Atomen zusammengesetzt ist. Diese Behauptung ergibt sich, wenigstens für den gasförmigen Zustand der Stoffe, aus dem Avogadro'schen Prinzip, welches einen nicht streng direkt beweisbaren, aber in seinen Folgerungen stets bestätigten Satz darstellt. Da nämlich alle Gase und Dämpfe, sowohl gasförmige Elemente wie Wasserstoff, Chlor, Schwefeldampf usw., wie auch gasförmige zusammengesetzte Stoffe, wie Chlorwasserstoff, Äthan, Kohlensäure, möge ihr Molekül noch so kompliziert zusammengesetzt sein, genau dieselben Gesetze befolgen, genau dieselbe Abhängigkeit ihres Volumens vom Druck und von der Temperatur zeigen, so müssen sie trotz der Ver-

schiedenheit ihrer Atomgewichte bzw. Molekulargewichte etwas gemeinsam haben, und dieses Gemeinsame erkannte Avogadro darin, daß er den Satz aufstellte: Alle gasförmigen Körper haben in demselben Volumen bei gleicher Temperatur und gleichem Druck die gleiche Anzahl von Molekülen. Da nun aus einem Liter Wasserstoff und einem Liter Chlorgas erfahrungsgemäß 2 Liter Chlorwasserstoffgas entstehen, in letzteren zusammen also doppelt so viel Moleküle Chlorwasserstoff, also auch doppelt so viel Atome Chlor und Wasserstoff enthalten sind, als in den beiden ersteren vorhanden wären, wenn deren Moleküle je 1 Atom enthalten würden, so folgt, daß ein Molekül Wasserstoff aus 2 Atomen Wasserstoff und ebenso ein Molekül Chlor aus 2 Atomen Chlor bestehen muß. Die zwei an sich gleichartigen Atome müssen also in einen engeren Zusammenhang getreten sein, um ein Molekül zu bilden. Warum und wodurch das geschieht, ist aber zunächst eine offene Frage.

Von den meisten elementaren Stoffen hat man beweisen können, daß ihre Moleküle nicht aus einem, sondern aus 2 Atomen bestehen. Nur von dem Quecksilberdampf war aus chemischen Gründen lange vermutet worden, daß sein Molekül bloß 1 Atom Quecksilber enthält, daß es also ein einatomiges Molekül ist. Die kinetische Theorie der Gase macht nun für ein einatomiges Gas eine bestimmte Vorhersagung. Bei den Gasen muß man nämlich zwei verschiedene spezifische Wärmen unterscheiden, die spezifische Wärme bei konstantem Druck ( $c_p$ ) und diejenige bei konstantem Volumen ( $c_v$ ). Für ein einatomiges Gas zeigt nun die kinetische Gastheorie, daß die erstere  $\frac{5}{3}$  mal so groß sein muß wie die zweite, so daß also das Verhältnis der beiden spezifischen Wärmen  $\frac{5}{3}$  sein muß. Diese Voraussage ist nun für den Quecksilberdampf durch die berühmte Messung des Verhältnisses der beiden spezifischen Wärmen von Kundt und Warburg glänzend bestätigt worden. Die Einatomigkeit des Quecksilberdampfes ist dadurch physikalisch bewiesen worden. Lange Zeit war Quecksilber der einzige bekannte Stoff, der ein bloß einatomiges Molekül enthielt. Aber als Ramsay die neuen Gase in der Atmosphäre entdeckte, die sogenannten Edelgase, das Argon, Neon, Krypton, Xenon und das Helium, erwies es sich, daß diese alle ebenfalls den Wert  $\frac{5}{3}$  für das Verhältnis der spezifischen Wärmen ergaben, daß sie also auch einatomig sind, daß also bei ihnen eine engere Verbindung zweier Atome aus irgendwelchen Gründen nicht möglich erscheint. Zugleich sind sie auch von solcher Art, daß sie sich auch nicht mit Atomen anderer Elemente verbinden, sie sind inerte, träge Elemente, ihre Atome verharren durchaus in prächtiger Einsamkeit, ebenso wie sich England früher rühmte in splendid isolation zu sein, ein Verhältnis, das es hoffentlich zu seinem Unglück aufgegeben hat, um uns zu schädigen.

Die Atome der Elemente sind, wie gesagt die letzten Bausteine aller Moleküle und danach aller Körper. Da es, wie erwähnt, rund 90 verschiedene Elemente gibt, so gibt es danach rund 90 verschiedene Bausteine, aus denen das ganze Gebäude der materiellen Körper zusammengesetzt ist.

Man hatte natürlich schon lange Zeit die Vermutung gehegt und die Frage aufgeworfen, ob nicht diese verschiedenen Atome nur Zusammensetzungen in verschiedenen Anordnungen eines einzigen, eines Grundatoms seien, und dieses konnte zunächst nur das leichteste, das Atom des Wasserstoffs, sein. Schon 1815 stellte Prout die Hypothese auf, daß alle Atome sich aus dem Wasserstoffatom ableiten. Dann aber müßten die Atomgewichte ganze Vielfache des Atomgewichts des Wasserstoffs sein, also da dieses 1 ist, ganze Zahlen sein. Um diese Frage zu entscheiden, mußten sehr genaue Bestimmungen des Atomgewichts gemacht werden. Wenn z. B. das Atomgewicht des Quecksilbers durch eine erste, schon ziemlich genaue Bestimmung sich zu 200 ergibt, so ist dieser Wert der Proutschen Hypothese günstig. Wenn aber eine genauere Messung den Wert 200,6 ergibt, so spricht dieser gegen die Proutsche Hypothese. In der Tat wird die Ganzzahligkeit nur von wenigen Atomgewichten genau erfüllt, aber bei sehr vielen beträgt die Abweichung von einer ganzen Zahl nur höchstens  $\pm 0,1$ .

Bestimmt ist also die Proutsche Hypothese im allgemeinen nicht richtig, immerhin beträgt bei 63 Elementen, bei denen das Atomgewicht genauer bestimmt ist, die Zahl der Fälle, in welchen die Atomgewichte um nicht mehr als 0,1 von einer ganzen Zahl nach oben oder unten abweichen, 27, während sie nach der bloßen Wahrscheinlichkeit nur 18—19 betragen sollte, so daß also irgend ein Korn Wahrheit sicher in der Proutschen Hypothese, wenigstens für eine ganze Anzahl von Atomen, steckt.

Andererseits aber wurde schon lange darauf aufmerksam gemacht, daß die Atome von Stoffen, die chemisch ähnliche Natur haben, eine Anzahl von annähernden Gesetzmäßigkeiten in ihren Atomgewichten zeigen, indem nämlich vielfach die aufeinander folgenden Stoffe angenähert konstante Differenzen ihres Atomgewichts aufweisen. Diese angenäherten Gesetzmäßigkeiten haben ihren allgemeinsten Ausdruck in dem periodischen System der Elemente gefunden, welches von Mendelejeff und Lothar Meyer (1869) aufgestellt wurde und welches aussagt, daß die chemischen Eigenschaften der Atome periodische Funktionen ihrer Atomgewichte sind. Für eine ganze Anzahl von chemischen Elementen ergibt sich dieses Gesetz zwanglos, da, wenn man die Elemente nach der Größe der Atomgewichte ordnet, das 9. Element wieder dieselben chemischen Eigenschaften besitzt wie das erste. Indes zeigt sich eine durchgängige Gesetzmäßigkeit auch hierbei nicht. Bei den Atomen bis zum Mangan (Atomgewicht 54,9) ist die Gesetzmäßigkeit glatt vorhanden. Dann aber kommen die drei Elemente der Eisengruppe, Eisen, Nickel, Kobalt, welche in diese Reihe durchaus nicht passen und welche sehr wenig verschiedene Atomgewichte besitzen. Dann passen die Elemente wieder einigermaßen, bis die Palladiumgruppe (Ruthenium, Rhodium, Palladium) eine neue Unstimmigkeit hervorbringt. Und dasselbe geschieht zum dritten Male durch die Platingruppe (Osmium, Iridium, Platin). Die Schwierigkeit wurde noch größer, seit eine sehr große Anzahl neuer Elemente in den seltenen Erden entdeckt wurden. Ferner aber zeigt es sich, daß die Elemente, welche zu einer Kolumne gehören, also chemisch einander ähnlich sein sollen, sich noch wieder in je zwei Gruppen teilen, die voneinander doch durch starke Unterschiede getrennt sind.

	I		II		III		IV		V		VI		VII		VIII	
0	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b		
Helium He 4,0	Lithium Li 6,94		Beryllium Be 9,1		Bor B 11,0		Kohlenstoff C 12,0		Stickstoff N 14,0		Sauerstoff O 16,0		Fluor F 19,0			
Neon Ne 20,2	Natrium Na 23,0		Magnesium Mg 24,3		Aluminium Al 27,1		Silicium Si 28,3		Phosphor P 31,0		Schwefel S 32,0		Chlor Cl 35,5			
Argon A 39,9	Kalium K 39,1		Calcium Ca 40,1		Scandium Sc 44,1		Titan Ti 48,1		Vanadin V 51,0		Chrom Cr 52,0		Mangan Mn 54,9		Eisen, Kobalt, Nickel Fe 55,8, Co 58,9, Ni 58,7	
—	Kupfer Cu 63,5		Zink Zn 65,4		Gadolinium Ga 69,9		Germanium Ge 72,5		Arsen As 74,9		Selen Se 79,2		Brom Br 79,9			
Krypton Kr 82,9	Rubidium Rb 85,4		Strontium Sr 87,6		Yttrium Y 88,7		Zirkon Zr 90,6		Niobium Nb 93,5		Molybdän Mo 96,0		—		Ruthenium, Rhodium, Ru 101,7, Rh 102,9, Palladium Pd 106,7	
—	Silber Ag 107,9		Cadmium Cd 112,4		Indium In 114,8		Zinn Sn 118,7		Antimon Sb 120,2		Tellur Te 127,5		Jod J 126,9			
Xenon X 130,2	Cäsium Cs 132,8		Barium Ba 137,3		Lanthan La 139,0		Cer Ce 140,3		—		—		—			
—	Gold Au 197,2		Quecksilber Hg 200,6		Thallium Tl 204,0		Blei Pb 207,2		Tantal Ta 181,5		Wolfram Wo 184,0		—		Osmium, Iridium, Platin Os 190,9, Ir 193,1, Pt 195,2	
—	—		Radium Ra 226,0		—		Thorium Th 232,1		—		Uran U 238,2		—			



Man muß deswegen in jeder Kolumne noch zwei Reihen als a und b unterscheiden. Infolgedessen ist es nicht ohne eine gewisse Willkür möglich, die Reihen für das periodische System aufzustellen, und in der That ist es namentlich bei den mittleren Elementen häufig fraglich, in welche Kolumnen sie eingeordnet werden sollen. Aber wir wissen heute genau, aus den später zu besprechenden Untersuchungen über die Röntgenspektren, erstens, welches die richtige Reihenfolge der Elemente ist — die nicht immer genau mit der Reihenfolge der Atomgewichte übereinstimmt — und zweitens, wo in dem System noch Lücken, noch unbekannt Elemente vorhanden sind. Man hat verschiedenfache Anordnungen für das System aufgestellt. Auf S. 5 ist eine solche gegeben, welche die neuen seltenen Erden noch nicht umfaßt und in welcher vor den schon von Mendelejeff und Lothar Meyer aufgestellten Kolumnen I bis VII noch eine Kolumne 0 eingerichtet ist, die die erst später entdeckten Edelgase enthält, und ferner eine Kolumne VIII, in welche die oben erwähnten, nicht in die Reihen passenden Elemente eingereiht sind. Diese Anordnung, welche bis vor wenigen Jahren ausreichend erschien, ist heute nicht mehr vollständig. Die Elemente der seltenen Erden fehlen in dieser Tabelle zum Teil. Sie gehören zwischen Cer und Tantal. Wasserstoff, der eine Stelle für sich einnimmt, ist nicht eingereiht. Im fünften Vortrag wird eine ausführlichere, vollständige Tabelle gegeben werden.

Daß man die einzelnen Kolumnen noch in zwei Abteilungen a und b teilen muß, um die Ähnlichkeit hervortreten zu lassen, wobei die in a oder in b enthaltenen Elemente sehr ähnlich, die Elemente beider Reihen aber weniger ähnlich sind, erkennt man aus der Betrachtung der untereinander stehenden Elemente. So sind in der Kolumne I Lithium, Natrium, Kalium, Rubidium zusammengehörige Stoffe, auch Kupfer, Silber, Gold gehören zusammen, aber die ersteren und die letzteren haben keine direkte chemische Gleichartigkeit. Und Entsprechendes findet in den anderen Kolumnen statt.

Man kann mit Bestimmtheit sagen, daß das periodische System wohl eine Andeutung, eine erste Annäherung an den wahren Zusammenhang der verschiedenen Atome gibt, daß aber eine ganze Reihe von Fragen hierbei noch im Dunkeln bleibt.

Für eine genauere Vorstellung über die Atome ist es nun vor allen Dingen wichtig, über ihre Größe und Masse, wenn möglich, bestimmte Zahlen zu erhalten. Die Atomgewichte geben ja nur die relativen Massen der einzelnen Atome, bezogen auf die des Wasserstoffs. Eine Frage von besonders hohem Interesse ist aber die, wie groß ist die wirkliche Masse eines Atoms in Grammen und, wenn wir uns die Atome kugelförmig vorstellen, wie groß ist der Radius eines Atoms? Eine direkte Messung ist natürlich unmöglich. Denn die Atome sind so klein, daß unsere leistungsfähigsten Mikroskope niemals etwas von ihnen zeigen können, und ihre Masse ist so gering, daß unsere Wagen, selbst wenn sie millionenfach empfindlicher gemacht werden könnten, als sie es sind, doch niemals diese feststellen lassen könnten.

Aber es gibt indirekte Methoden, durch welche wir genaueren Aufschluß über diese Größenverhältnisse gewinnen können. Zunächst zwar

geben uns diese Methoden nur Aufschluß über die Moleküle. Da wir ja aber wissen, daß die einzelnen Moleküle aus einer bekannten Zahl von Atomen zusammengesetzt sind, so erfahren wir daraus auch das Gewünschte über die Atome. Eine dieser indirekten Methoden beruht auf der kinetischen Theorie der Gase. Ein jeder Körper kann entweder in festem Zustand auftreten oder in flüssigem oder in gasförmigem. Man kann ohne weiteres sagen, daß die Moleküle der festen und flüssigen Körper viel dichter aneinander liegen müssen, daß sie den Raum viel enger erfüllen müssen als im gasförmigen Zustand. Denn die beobachtbare Dichtigkeit — das spezifische Gewicht — eines Körpers ist im festen und flüssigen Zustand viel größer als im gasförmigen. Da also die Moleküle im gasförmigen Zustand durchschnittlich verhältnismäßig große Abstände voneinander haben, so kann man weiter annehmen, und das tut die kinetische Gastheorie, daß die Kräfte, welche im allgemeinen zwischen den Molekülen vorhanden sind und die mit wachsender Entfernung der Moleküle an Größe abnehmen, daß diese Kräfte für die Substanzen im gasförmigen Zustand verschwindend klein sind.

Die Eigenschaften der Gase beruhen nun nach dieser Theorie darauf, daß die einzelnen Moleküle eines Gases nicht in Ruhe, sondern in lebhafter Bewegung sind. Da aber die Kräfte zwischen den Molekülen wegen des verhältnismäßig großen Abstandes verschwinden, also auf ein Molekül keine Kraft wirkt, so kann die Bewegung desselben nur eine geradlinige sein mit konstanter Geschwindigkeit. Jedes Molekül fliegt also in gerader Linie fort. Bei der großen Zahl der Moleküle, die in jedem noch so kleinen Raum vorhanden sind, muß dann das Molekül bald an ein anderes anstoßen. Bei dieser Annäherung an ein zweites Molekül werden die Molekularkräfte in Wirksamkeit treten. Ihr Einfluß kann aber so aufgefaßt werden, daß ein Molekül, wenn es ein zweites trifft, an dieses anstößt und von diesem ganz ebenso zurückgeworfen wird, wie ein Billardball, der an einen anderen anstößt. Ebenso, wenn es an die Wände des Gefäßes anstößt. So müssen wir uns also ein Gas vorstellen als bestehend aus einer ungeheuer großen Zahl von Molekülen, welche fortwährend durcheinander fliegen, dabei immer wieder an andere Moleküle anstoßen und infolgedessen die Richtung und die Größe ihrer Geschwindigkeit ändern, jedoch so, daß zwischen zwei Stößen sich jedes Molekül geradlinig mit bestimmter Geschwindigkeit bewegt. Jedes einzelne Molekül beschreibt dabei also eine Zickzackbahn, die aus lauter geraden Stücken von größerer oder geringerer Länge besteht.

Durch diese Annahme lassen sich alle Eigenschaften der Gase erklären. Zunächst entsteht der Druck, den die Gase auf die Wände des Gefäßes ausüben, durch die Stöße der Moleküle auf die Wand. Je mehr Moleküle in einem Raum sind, je größer also die Dichtigkeit des Gases ist, desto größer ist auch der Druck. Da die Dichtigkeit einer bestimmten Masse eines Gases in einem Raume dem Volumen desselben umgekehrt proportional ist, so ist dies auch mit dem Druck der Fall. Die Geschwindigkeit jedes einzelnen Moleküls wechselt fortwährend und ebenso haben alle Moleküle, die in dem gleichen Moment in einem Raume, z. B. in 1 cem enthalten sind, sehr verschiedene Geschwindigkeit. Der Mittelwert aus allen diesen gleichzeitigen Geschwindigkeiten aller Moleküle charakterisiert

nun das Verhalten des Gases, und da die Stoßkräfte, also auch der Druck des Gases, außer von der Masse der Moleküle von dieser mittleren Geschwindigkeit abhängen, so kann man aus dem beobachteten Druck diese mittlere Geschwindigkeit berechnen. Diese ergab sich für die verschiedenen Gase natürlich verschieden, die leichteren Gase haben die größere, die schwereren kleinere Geschwindigkeit. Die mittlere Geschwindigkeit ist aber unabhängig von dem Druck des Gases, dagegen wächst sie mit wachsender Temperatur, und zwar wie die Quadratwurzel aus der absoluten Temperatur. (Die absolute Temperatur ist  $= 273^{\circ} +$  der gewöhnlichen Celsius-Temperatur. Ein Gas von  $17^{\circ} \text{C}$  hat die absolute Temperatur  $290^{\circ}$ .) Die mittlere Geschwindigkeit der Moleküle ist eine sehr große, sie beträgt mehrere hundert Meter pro Sekunde. Sie ist z. B. bei  $0^{\circ} \text{C}$  für Luft  $447 \text{ m/sec.}$ , für Wasserstoff  $1692 \text{ m/sec.}$ , für Kohlensäure  $362 \text{ m/sec.}$

Trotz dieser großen Geschwindigkeit bleiben aber die Moleküle immer doch nahezu an derselben Stelle, weil sie eben sehr häufig an andere Moleküle anstoßen, zurückgeworfen werden, wieder anstoßen usw. Der Weg eines Moleküls zwischen zwei aufeinanderfolgenden Stößen ist bald größer, bald kleiner, ebenso ist er für alle Moleküle gleichzeitig ein sehr verschiedener. Aber auch hierbei kann man den Mittelwert aller dieser Wege bilden, man nennt ihn die mittlere Weglänge, und diese Größe ist maßgebend für eine Reihe weiterer Erscheinungen, die die Gase der Beobachtung bieten, nämlich für die Reibung der Gase und für die Wärmeleitung derselben. Daraus folgt umgekehrt, daß man aus der Beobachtung der Reibung oder der Wärmeleitung die mittlere Weglänge berechnen kann. Es ergeben sich, wie zu erwarten war, sehr kleine Werte für dieselbe. Sie hängen von der Dichtigkeit, also vom Druck des Gases ab; je verdünnter das Gas ist, um so größer ist natürlich die mittlere Weglänge, weil eben im Durchschnitt die Moleküle da weiter auseinanderstehen. So ergab sich z. B. bei Atmosphärendruck die mittlere Weglänge für Luft  $= 0,96 \cdot 10^{-5} \text{ cm.}$ , für Wasserstoff  $= 1,78 \cdot 10^{-5} \text{ cm.}$ , für Sauerstoff  $1,03 \cdot 10^{-5} \text{ cm.}$ , für Kohlensäure  $0,63 \cdot 10^{-5} \text{ cm.}$

Diese beiden Größen, die mittlere Geschwindigkeit und die mittlere Weglänge, anzuführen war notwendig, um die Frage zu beantworten, welche zunächst das größte Interesse besitzt, nämlich die Frage, wie groß ist denn eigentlich die Zahl der Moleküle in einem Kubikzentimeter eines Gases bei Atmosphärendruck? Man nennt diese gesuchte Zahl die Loschmidtsche Zahl, weil Loschmidt zuerst einen Weg zu ihrer Bestimmung angegeben hat. Mit dieser Frage steht in engstem Zusammenhang die andere, uns besonders interessierende, wie groß ist der Radius eines Moleküls, wenn wir uns dasselbe als kugelförmig vorstellen? Kennt man nämlich diesen Radius, so kennt man auch das Volumen je eines Moleküls, und wenn man noch die Loschmidtsche Zahl kennt, so kennt man das gesamte Volumen, welches die in  $1 \text{ cm}^3$  enthaltenen Moleküle wirklich einnehmen. Dieses Volumen aber wird angenähert dasjenige sein, welches diese Moleküle einnehmen, wenn das Gas durch Druck oder Abkühlung zu einer Flüssigkeit oder gar zu einem festen Körper geworden ist. Denn dabei kann man annehmen, daß

die Moleküle möglichst eng gepackt aneinander liegen werden. In Wirklichkeit wird die Flüssigkeit noch ein größeres Volumen haben, als dem Volumen der Summe der Moleküle entspricht. Die Dichtigkeit einer Substanz im flüssigen oder festen Zustand ist aus diesem Grunde eine außerordentlich viel größere als im gasförmigen Zustand. Z. B. hat gasförmiger Sauerstoff bei Atmosphärendruck die Dichtigkeit 0,00143, während als die größte Dichtigkeit des flüssigen Sauerstoffs = 1,249 beobachtet wurde, also ist das Verhältnis des Volumens der dicht aneinander liegenden Moleküle zu dem Volumen derselben Moleküle im Gaszustand bei Atmosphärendruck  $\frac{0,00143}{1,249} = 0,0011$ . Diese Zahl nennt

man den **Kondensationskoeffizienten**. Bedenkt man nun, daß im eng zusammengepackten Zustand der Mittelpunkt eines Moleküls um den Radius verschoben werden müßte, bis er ein zweites Molekül trifft, während im Gaszustand ein Molekül um die mittlere Weglänge verschoben werden muß, bis es ein anderes Molekül trifft, so erkennt man auch ohne genaue Rechnung, daß der Kondensationskoeffizient angenähert gleich dem Verhältnis des Radius eines Moleküls zu der mittleren Weglänge sein wird. Folglich kann man den Radius eines Moleküls aus der mittleren Weglänge und dem Kondensationskoeffizienten berechnen. So ergibt sich z. B. für Sauerstoff, für welchen der Kondensationskoeffizient = 0,0011 und die mittlere Weglänge =  $1,03 \cdot 10^{-5}$  ist, der Radius des Moleküls nach dieser Betrachtungsweise angenähert =  $0,0011 \cdot 1,03 \cdot 10^{-5} = 1,13 \cdot 10^{-8}$  cm.

Auf diese und ähnliche Weise hat man durch genauere Rechnung für die Radien der Moleküle einzelner Stoffe folgende Werte gefunden:

	Radius eines Moleküls
Wasserstoff . . . . .	$1,00 \cdot 10^{-8}$ cm
Helium . . . . .	$0,85 \cdot 10^{-8}$ „
Stickstoff . . . . .	$1,35 \cdot 10^{-8}$ „
Sauerstoff . . . . .	$1,30 \cdot 10^{-8}$ „
Argon . . . . .	$1,35 \cdot 10^{-8}$ „
Chlor . . . . .	$2,00 \cdot 10^{-8}$ „
Quecksilber . . . . .	$1,40 \cdot 10^{-8}$ „
Äther . . . . .	$3,00 \cdot 10^{-8}$ „

Natürlich geben diese Zahlen nur angenäherte Werte; denn es ist z. B. nicht anzunehmen, daß ein so kompliziertes Molekül, wie das des Äthers,  $C_4H_{10}O$ , überhaupt kugelförmig sei. Nur für die einatomigen Moleküle (Helium, Argon, Quecksilber in unserer Tabelle) läßt sich vielleicht die Kugelform annehmen und für diese geben dann die erhaltenen Zahlen zugleich die Radien der Atome. Bei den zweiatomigen Molekülen, wie denen des Wasserstoffs, Sauerstoffs, Stickstoffs, Chlors, kann man nur sagen, daß deren Atome, wenn sie kugelförmig sind, kleinere Radien haben müssen als 1,0, 1,3, 1,35,  $2,0 \cdot 10^{-8}$  cm.

Das Resultat dieser Betrachtungen der kinetischen Gastheorie gibt uns also einen Anhaltspunkt für die wirkliche Größe der Atome oder, genauer gesagt, für deren Größenordnung. Man kann annehmen, daß der Radius eines (kugelförmig gedachten) Atoms von der Größenordnung  $10^{-8}$  cm ist. Die verschiedenen Atome

haben Radien, deren Größe einige Male größer oder kleiner ist als  $10^{-8}$  cm. Die Größe  $10^{-8}$  cm ist der zehnmillionste Teil eines Millimeters.

Durch die Ermittlung der Größe der Moleküle ist es nun leicht, auch einen bestimmten Wert zu erhalten für die Zahl der Moleküle in einem Kubikzentimeter, also für die Loschmidtsche Zahl. Denn wenn man bedenkt, daß im Durchschnitt jedes Molekül um die mittlere Weglänge fortfliegt, bis es wieder ein Molekül trifft, so erkennt man, daß der zylindrische Raum, den ein Molekül bei diesem Flug durchstreicht, von der Größe ist, daß in ihm im Mittel nur 1 Molekül vorhanden ist. So groß also das Verhältnis von 1 cm zu diesem Raum ist, so groß ist auch die Zahl der Moleküle in 1 cm, so groß ist also die Loschmidtsche Zahl.

Die Rechnung ergibt, daß in einem Kubikzentimeter Gas bei Atmosphärendruck und  $0^{\circ}$  C

27,6 Trillionen

Moleküle enthalten sind. Eine Trillion ist  $10^{12}$ . Diese Loschmidtsche Zahl hat denselben Wert für alle Gase, da ja nach dem Avogadro'schen Prinzip alle Gase im Kubikzentimeter bei gleichem Druck und gleicher Temperatur dieselbe Zahl von Molekülen enthalten.

Denkt man sich diese Moleküle in dem Kubikzentimeter gleichmäßig verteilt, so kommt auf jedes Molekül ein kleiner Würfel von dem Inhalt  $\frac{1}{27,6 \cdot 10^{18}}$  cm. Die Seitenlänge dieses Würfels ist daher rund  $= \frac{1}{3 \cdot 10^6}$  cm

$= 3,3 \cdot 10^{-7}$  cm = 3—4 Milliontel Millimeter. Dies ist also die Größe des mittleren Abstandes je zweier Moleküle. Der Abstand zweier Moleküle ist also im Mittel etwa 30—40mal so groß wie der Radius eines Moleküls.

Aus der Loschmidtschen Zahl kann man noch eine weitere, wichtige Zahl berechnen, die man die Avogadro'sche Zahl nennt. Nehmen wir nämlich je 1 cm von verschiedenen Gasen, etwa Wasserstoff, Sauerstoff und Chlor, so sind die Massen dieser gleichen Volumina nicht gleich, sondern sie verhalten sich wie die Molekulargewichte, nämlich hier wie 2 : 32 : 71. Allgemein: die Volumina verschiedener Gase, deren Massen sich wie die Molekulargewichte verhalten, sind gleich. Daraus folgt, daß auch die Volumina, die ein Grammolekül eines jeden Gases (bei gleichem Druck und gleicher Temperatur) einnimmt, einander gleich sind und daher nach Avogadro auch die gleiche Anzahl von Molekülen enthalten. Diese Zahl, die Anzahl der Moleküle, welche in einem Grammolekül eines jeden Gases (beim Druck von 1 Atmosphäre und bei  $0^{\circ}$  C) enthalten ist, nennt man die Avogadro'sche Zahl. Man kann sie leicht finden, wenn man berechnet, wieviel Kubikzentimeter ein Grammolekül Wasserstoff (2 g Wasserstoff) einnimmt. Ein Gramm Luft nimmt im Normalzustand den Raum 773 cm ein. Wasserstoff ist 14,4mal leichter als Luft, also nehmen 2 Gramm Wasserstoff den Raum  $2 \times 14,4 \times 773 = 22\,260$  cm ein. Mithin enthält 1 Grammolekül Wasserstoff und ebenso ein Grammolekül jeder anderen Substanz im gasförmigen Normalzustand

$$27,6 \cdot 10^{18} \times 22\,250 = 61,4 \cdot 10^{22} \text{ Moleküle.}$$

Dies ist also die Avogadro'sche Zahl.

Aus dieser kann man nun leicht die wirkliche Masse eines Wasserstoffmoleküls und ebenso die eines jeden anderen Moleküls berechnen. Denn da  $61,4 \cdot 10^{22}$  Moleküle Wasserstoff zusammen die Masse 2 Gramm besitzen, so hat jedes Wasserstoffmolekül die Masse

$$\frac{2}{61,4 \cdot 10^{22}} = 3,25 \cdot 10^{-24} \text{ Gramm.}$$

$10^{-24}$  ist 1 dividiert durch eine Quadrillion. Ein Molekül Sauerstoff hat natürlich eine 16mal, ein Molekül Chlor eine 35,5mal so große Masse. Ein Atom Wasserstoff hat danach die Hälfte der obigen Masse, also  $1,62 \cdot 10^{-24}$  Gramm. Diese Zahl wird uns später zu einer weiteren Berechnung dienen.

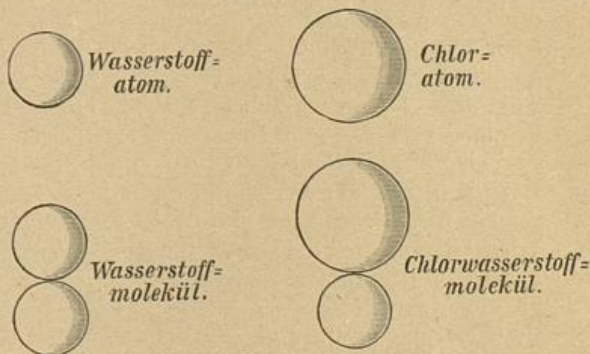
Alle diese Zahlen für die Größe und Masse der Moleküle und Atome sagen uns direkt nichts, was wir irgendwie uns vorstellen könnten. Das Verhältnis des Maßstabs, mit dem wir zu rechnen gewohnt sind, zu diesen so kleinen oder so großen Werten, ist ein zu verschiedenes. Bei Längen haben wir als Maßstab in unserer Gewohnheit 1 mm und wir können uns den zehnmillionsten Teil, den Radius eines Atoms, davon absolut nicht vorstellen. Wir können uns einen ungefähren Begriff davon machen, wenn wir unseren Maßstab (1 mm) 10millionenfach vergrößern, also auf 10 Kilometer bringen. Dann entspricht der Radius eines Atoms der Größe von 1 mm.

Noch schwieriger ist die Masse eines Atoms mit den uns gewohnten Massen zu vergleichen. Hier muß man schon die ganze Erde zu Hilfe nehmen. Die ganze Erdkugel hat eine Masse von etwa  $2 \cdot 10^{24}$  Kilogramm. Die Masse eines Wasserstoffatoms verhält sich also zu der Masse eines Gramms rund wie die Masse eines Kilogramms zu der Masse der ganzen Erdkugel.

Und von diesen Atomen, diesen winzigsten Stäubchen der Materie, zeigen die neuesten Forschungen, von denen wir in diesen Vorlesungen sprechen werden, daß sie selbst wieder ganze Welten sind, daß jedes von ihnen ein ganzes Sonnensystem darstellt.

Die einfachste Vorstellung, die man sich nach den bisher besprochenen Tatsachen von den Atomen machen kann, ist die einer sehr kleinen kugelförmigen oder anders gestalteten Masse aus dem betreffenden chemischen Stoffe. Ein Molekül würde einer Aneinanderlagerung zweier oder mehrerer Atome gleichen Stoffes oder verschiedener Stoffe entsprechen. In Fig. 1 ist nach dieser primitivsten Vorstellung in der oberen Reihe ein Wasserstoffatom und ein Chloratom dargestellt, während die untere Reihe die Darstellung eines Wasserstoffmoleküls und eines Chlorwasserstoffmoleküls

Fig. 1.



gibt. Warum hierbei zwei Wasserstoffatome immer in eine engere Verbindung zu einem Wasserstoffmolekül zusammentreten, bleibt nach dieser Vorstellung durchaus unverständlich.

Die Atome der einzelnen Stoffe werden, wie schon ihr Name sagt (a-tomos, unteilbar), als absolut unveränderliche, unteilbare Körperchen angesehen. Dabei aber kann man noch zwei verschiedene Möglichkeiten zulassen. Die eine würde sagen, daß die Atome uns zwar als unteilbare Körper erscheinen, aber nur deswegen, weil wir noch nicht imstande sind, weil wir nicht oder noch nicht die Kraft besitzen, sie zu zerteilen. Ein Goldatom als solches wäre unteilbar. Da es aber einen Raum einnimmt, können wir es uns aus noch kleineren Teilen zusammengesetzt denken, nur wären diese Teile nicht mehr Gold, sondern etwas anderes, aus dem sich eben das Gold zusammensetzt. Diese Annahme würde also die Unteilbarkeit der Atome nur als etwas Vorläufiges, Relatives ansehen, und sie berührt sich offenbar mit der oben erwähnten Prout'schen Hypothese, daß die Atome selbst aus anderen Bestandteilen zusammengesetzt sind, nur brauchen diese Bestandteile nicht gerade das Wasserstoffatom zu sein. Diese Ansicht hat sich durch die Forschungen der letzten Jahrzehnte als berechtigt erwiesen.

Es sei aber trotzdem noch die andere Annahme erwähnt, welche aussagt, daß aus irgend einem Grunde die Atome absolut unteilbare Größen sind. Dann müßte also die Unteilbarkeit in ihrer Natur begründet sein, nicht bloß in der Mangelhaftigkeit unserer Hilfsmittel. Und offenbar ist die Frage, wie das möglich ist, auch dann berechtigt und von Interesse, wenn wir selbst die Atome in kleinere Körperchen, in *Ur-atome*, zerlegen könnten. Denn dann würde immer noch die Frage bestehen bleiben, warum sind diese Uratome wirklich unteilbar? Es handelt sich also um die Frage, wie könnte die Unteilbarkeit einer gewissen Menge Materie erklärt werden? Darauf gibt eine sehr geistreiche Theorie, die von dem englischen großen Physiker Lord Kelvin schon vor 50 Jahren aufgestellt wurde, die Theorie der Wirbelatome, eine befriedigende Antwort. Es war nämlich von Helmholtz bewiesen worden, daß in einer reibungslosen Flüssigkeit Wirbelringe existieren können. Das sind ringförmige Gebilde, bei denen die Flüssigkeitsteilchen in rotierender Bewegung um die Mittellinie des Ringes begriffen sind. Aus den allgemeinen Eigenschaften einer solchen Flüssigkeit folgt aber, daß solche Wirbel nicht durch die gewöhnlichen einfachen, sogenannten konservativen Kräfte in der Natur hervorgebracht werden können, noch auch durch dieselben zerstört werden können. Vielmehr müssen solche Wirbel, wenn sie überhaupt in einer Flüssigkeit vorhanden sind, in dieser von Uranfang an existiert haben, und sie können durch konservative Kräfte nicht auseinandergerissen und zerstört werden. Wenn man mit einem noch so scharfen Messer gegen einen solchen Wirbelring stößt und ihn zu zerschneiden sucht, so gelingt das nicht. Der Wirbelring ändert seine Form, er biegt sich um das schneidende Messer herum, aber die wirbelnden Teile lassen sich nicht trennen, die wirbelnde Menge Flüssigkeit bleibt immer in ungestörtem Zusammenhang. Angenähert lassen sich die Wirbelringe und ihre Eigenschaften erkennen an den Rauchringen, welche geschickte Raucher in die Luft blasen. Angenähert nur; denn die Luft ist keine

reibungslöse Flüssigkeit, wie sie bei den Helmholtz'schen Aussagen vorausgesetzt wird. In der Tat sieht man diese Rauchringe auch, nachdem sie eine Zeit bestanden haben, sich auflösen. Das kommt aber nur daher, daß eben hier Reibungskräfte, nicht konservative Kräfte in der Flüssigkeit vorhanden sind. In einer reibungslosen Flüssigkeit dagegen bleiben die wirbelnden Teile dauernd zusammen, sie bilden immer einen geschlossenen Ring, wenn auch dessen Form sich ändert. Ein solcher Wirbelring ist also in Wirklichkeit etwas Unteilbares, ein a-tomos. Kelvin nimmt nun an, daß der Äther, den wir uns als überall vorhanden, alle Körper durchdringend, vorstellen müssen — da er der Träger der Lichtbewegung ist und das Licht in alle Körper dringt —, daß der Äther die Eigenschaften einer reibungslosen Flüssigkeit besitzt. In ihm seien nun viele solche Wirbel von Anfang an enthalten. Diese Wirbel, die unzerstörbar sind, bilden die Atome der Körper, die Atome sind Wirbelatome. Da wir sie mit unseren Kräften nicht bilden können, so kann die Anzahl der in der Welt vorhandenen Atome nicht vergrößert werden. Sie kann aber auch nicht verkleinert werden, da wir solche Wirbel nicht zerstören können. Kurz, diese Wirbel haben die wesentliche Eigenschaft der Atome, die Unzerstörbarkeit und Unteilbarkeit. Wenn nun auch, wie gesagt, die Unteilbarkeit der Atome heute nicht mehr als tatsächlich angenommen werden kann, so bleibt die Kelvin'sche Theorie doch von großem philosophischem Wert, da ja dieselbe Frage über die Möglichkeit der Unteilbarkeit nur von den Atomen auf die Uratome zurückgeschoben wird. Man könnte diese Theorie heute, da wir als die Bestandteile der Atome die positiven und negativen Elektronen erkennen werden, passend als die Wirbeltheorie der Elektronen bezeichnen.

Der Annahme nämlich, daß die Atome einfache unteilbare Körperchen seien, haben sich schon lange eine Reihe von Schwierigkeiten entgegen gestellt, welche ihrer wirklichen Einfachheit und Unteilbarkeit widersprechen. In erster Linie kommen da optische Erscheinungen in Betracht. Bekanntlich zeigen alle leuchtenden Gase und Dämpfe, wenn man ihr Licht durch einen Spalt und ein Prisma oder ein Beugungsgitter gehen läßt, sehr charakteristische Erscheinungen. Während das Sonnenlicht oder das Licht einer weißglühenden Bogenlampe, in dieser Weise untersucht, ein vollständiges Spektrum gibt, ein Farbenband, das sich von Rot bis zu Violett hinzieht und in sich alle Übergänge von Rot durch Orange, Gelb, Grün, Hellblau, Dunkelblau bis Violett zeigt, ist das bei den farbigen Gasen und Flammen anders. Bringt man ein Natriumsalz, etwa Kochsalz oder Glaubersalz, in die Flamme eines Bunsenbrenners, so wird diese Flamme schön gelb gefärbt, und wenn man dieses Licht durch einen Spalt und ein Prisma gehen läßt, so erhält man statt eines Spektrums nur eine scharfe gelbe Linie, die man bekanntlich als D-Linie bezeichnet, und die bei genügender Dispersion durch das Prisma sich als eine Doppelinie  $D_1$  und  $D_2$  zu erkennen gibt.

Da alle Natriumsalze dieselbe Linie zeigen, Chlornatrium, Natriumsulfat, Natriumnitrat usw., so rührt diese Linie nur von dem Atom des Natriums her. Ebenso zeigt eine durch Lithium rot gefärbte Flamme zwei Linien im Spektrum, eine rote und eine orangefarbene. Eine Kaliumflamme zeigt eine rote und eine violette, eine Cäsiumflamme eine Linie



in Rot, eine in Orange, eine grüne und zwei blaue Linien. Da das Licht aus Schwingungen besteht und einer jeden Farbe eine bestimmte Schwingungszahl entspricht, so folgt daraus, daß ein Atom eines Körpers unter Umständen Schwingungen von verschiedener Schwingungszahl ausführen kann. Auch die einfachen Gase kann man, wenn sie in verdünntem Zustande sind, durch Hindurchsenden eines elektrischen Stromes zum Leuchten bringen, wie das in den Geißlerschen Spektralröhren geschieht. Da zeigen sich z. B. beim Wasserstoff zunächst 5 Linien, eine rote, eine grüne, eine blaue und zwei violette. Beim Helium sind sogar 7 Linien zu sehen und das Argon, Krypton, Xenon geben sehr linienreiche Spektren. In dem Spektrum des Eisendampfs hat man über 2000 Linien gefunden. Diese optischen Schwingungen, soweit sie bisher überhaupt unter Regeln gebracht werden konnten, befolgen ganz andersartige Gesetzmäßigkeiten als die Schwingungen ausgedehnter Körper. Daraus folgt aber, daß innerhalb der Atome Schwingungen, periodische Bewegungen, sehr verschiedener Art vor sich gehen müssen, welche eben die Ursache dieser Lichtaussendung sind. Und daher ist schon aus dem Linienreichtum der Spektren der Elemente der Schluß zu ziehen, daß die Atome nicht einfache Körper sein können, sondern irgendwelche Teile enthalten müssen, daß sie also nicht wirkliche „Atome“ sein können. Schon aus diesen altbekannten Erfahrungen erkennt man also, daß in den Atomen, bei denen die Physik und Chemie sich lange als den letzten Bausteinen der Materie beruhigt hatte, noch große Probleme liegen, daß es sich eben gerade darum handelt, die Konstitution dieser scheinbar einheitlichen Körper aufzuklären.

## Zweiter Vortrag.

### Die Atome und Ionen bei den elektrischen Vorgängen in Flüssigkeiten und Gasen. Die Atome der Elektrizität.

Die Ionen in der Elektrolyse. Das Faradaysche Gesetz. Die atomistische Struktur der Elektrizität. Die Elektronen. Elementarladung. Gasentladungen. Kathodenstrahlen. Die freien negativen Elektronen. Scheinbare Masse. Größe und Masse der negativen Elektronen. Die Kanalstrahlen. Die positive Elektrizität. Neutrale und elektrisch geladene Atome und Moleküle.

Die Fortschritte in der Erkenntnis des Wesens der Atome gingen von der Elektrizitätslehre aus. Als sich um die Mitte des vorigen Jahrhunderts die neuen Erfahrungen im Gebiet der Elektrizität immer mehr häuften, als die Wärmewirkungen, die elektrolytischen Wirkungen, die magnetischen und elektrodynamischen Wirkungen der elektrischen Ströme erforscht wurden und namentlich als durch Faraday die Induktionswirkungen und durch Hertz die wellenförmige Ausbreitung derselben, die elektrischen Wellen, erkannt wurden, da wurde es immer schwieriger, sich ein widerspruchloses Bild von dem Wesen der Elektrizität zu machen. Die Verschiedenheit der Wirkungen war eine so bedeutende, daß es fast unmöglich erschien, dieselben unter einen Hut zu bringen. Eine Reihe von Wirkungen der Elektrizität war durchaus von der Art, als ob die Elektrizität ein Stoff wäre, andere aber schienen zu der Annahme zu zwingen, daß die Elektrizität auf irgend einer Bewegung des Äthers beruhe. In der Tat haben die Ansichten der Physiker darüber vielfach gewechselt, und als Hertz seine prachtvollen Entdeckungen über elektrische Wellen und Strahlen gemacht hatte, schien die Äthertheorie, die Bewegungstheorie der Elektrizität unzweifelhaft den Sieg davongetragen zu haben. Die sogenannte Maxwell'sche Theorie, die alle elektrischen Erscheinungen als Zustands- oder Bewegungserscheinungen des Äthers auffaßte, schien damals die unzweifelhafteste, vollkommenste Theorie der Elektrizität zu sein.

Sie schien es. Aber bei näherer Betrachtung blieben doch bei ihr auch eine Reihe von wichtigen Erscheinungen unerklärt, gerade solche Erscheinungen, welche hinwiederum durch die Annahme einer stofflichen Natur der Elektrizität sich sehr einfach auffassen ließen. Insbesondere waren es die Erscheinungen der Elektrolyse, die bekanntlich von Faraday erforscht und gesetzmäßig festgelegt waren, die durch die Maxwell'sche Theorie nicht erklärt werden konnten. Bei dem Durchgang eines elektrischen Stromes durch eine zusammen

gesetzte, leitende Flüssigkeit (eine Lösung von Salzen oder Säuren oder Basen in Wasser) wird diese bekanntlich zersetzt, elektrolysiert, so zwar, daß von dem gelösten Salz oder der gelösten Säure oder Base das Metall (bzw. der Wasserstoff) an dem negativen Pol, der negativen Elektrode, der Kathode, frei auftritt, der Rest des Moleküls aber an der positiven Elektrode, der Anode. Die beiden Bestandteile der Moleküle, die hierbei getrennt auftreten, nennt man bekanntlich ihre Ionen. Die Untersuchung der genauen quantitativen Erscheinungen bei der Elektrolyse führte Faraday zu dem Gesetz, daß die Menge der Ionen, die bei der Elektrolyse irgend einer Flüssigkeit an der einen oder der anderen Elektrode abgeschieden wird, proportional ist dem Produkt aus dem Äquivalentgewicht der betreffenden Substanz und der gesamten Elektrizitätsmenge, welche während der Stromdauer durch die Flüssigkeit hindurchgegangen ist:

die Masse der abgeschiedenen Ionen ist proportional:

Äquivalentgewicht des Ions  $\times$  durchgegangene Elektrizitätsmenge.

Die Äquivalentgewichte der elementaren Stoffe sind bekanntlich ihre Atomgewichte, dividiert durch ihre Wertigkeit. Wasserstoff hat das Äquivalentgewicht 1, der zweiwertige Sauerstoff das Äquivalentgewicht  $\frac{16}{2} = 8$ , der dreiwertige Stickstoff das Äquivalentgewicht  $\frac{14}{3} = 4,66$ , der vierwertige Kohlenstoff das Äquivalentgewicht  $\frac{12}{4} = 3$ .

Die gesamte Masse der abgeschiedenen Ionen, dividiert durch das Äquivalentgewicht derselben, ist aber nichts anderes als die Zahl der abgeschiedenen Äquivalente. Drückt man die ganze abgeschiedene Masse in Grammen aus, so erhält man die Zahl der abgeschiedenen Gramm-äquivalente, wobei ein Grammäquivalent eines Stoffes so viel Gramm ist, als das Äquivalentgewicht angibt. Sind z. B. bei der Elektrolyse 10 Gramm Sauerstoff abgeschieden, so sind das  $\frac{5}{4}$  Gramm-äquivalente Sauerstoff. Das Faradaysche Gesetz läßt sich daher auch so ausdrücken:

die Zahl der abgeschiedenen Äquivalente ist proportional der durchgegangenen Elektrizitätsmenge

oder umgekehrt

die durchgegangene Elektrizitätsmenge ist proportional der Zahl der abgeschiedenen Äquivalente.

Die Stromleitung in einer Flüssigkeit läßt sich so auffassen — und viele Experimente beweisen das — daß innerhalb der Flüssigkeit die Ionen beider Arten schon von vornherein in sehr großer Zahl frei vorhanden sind, jedoch so, daß in dem kleinsten Raum gleich viel positive und negative Ionen sich befinden. Werden nun in die Flüssigkeit zwei Elektroden eingetaucht und mit der Stromquelle verbunden, so wandern durch elektrostatische Anziehung die positiven Ionen in der Richtung zur Kathode, die negativen Ionen in der Richtung nach der Anode. Diejenigen positiven

oder negativen Ionen, die jedesmal der Kathode oder Anode am meisten benachbart sind, scheiden sich an ihr ab, während im Innern der Flüssigkeit immer gleichviel positive und negative Ionen bleiben. Aus diesem Vorgang erkennt man aber, daß jedes abgeschiedene Ion einen Teil der Stromleitung besorgt hat. Die Leitung durch die Flüssigkeit kommt immer durch die *Wanderung der Ionen* zustande und diese Ionen sind eben positiv oder negativ geladene Teile von Molekülen. Jedes abgeschiedene Äquivalent eines Stoffes war also vorher ein wanderndes Äquivalent und führte eine bestimmte Elektrizitätsmenge mit sich. Dann aber sagt das Faradaysche Gesetz auch aus, daß jedes Äquivalent irgend einer Substanz mit ein und derselben Elektrizitätsmenge verbunden ist, und zwar mit einer positiven, wenn es Kation, mit einer negativen, wenn es Anion ist. Jedes einwertige Atom, wie das des Wasserstoffs, Silbers, Chlors usw., ist danach mit einer ganz bestimmten Elektrizitätsmenge verbunden, jedes zweiwertige Atom, wie das des Kupfers, Zinks, Sauerstoffs, mit der doppelten, jedes drei- und vierwertige mit der drei- und vierfachen.

Es war zuerst Helmholtz, der aus diesen Tatsachen einen hochbedeutsamen Schluß zog. Die einfachste Interpretation nämlich des eben ausgesprochenen Gesetzes ist die, daß ebenso wie die Materie auch die Elektrizität atomistisch zerteilt ist. Es gibt eine gewisse kleinste Elektrizitätsmenge, welche mit jedem Atom eines einwertigen Stoffes verbunden ist. Von dieser kleinsten Elektrizitätsmenge kann ein anderer Stoff pro Atom nicht etwa das  $1\frac{1}{2}$ fache oder das  $5\frac{1}{4}$ fache enthalten, sondern nur das 2fache, 3fache usw. Die Elektrizität scheint danach also ein Stoff zu sein, der ebenfalls in kleinste, diskrete Teile, in Atome geteilt ist. Diese Atome der Elektrizität nennt man Elektronen und unterscheidet zunächst positive und negative Elektronen. Die Elektrizität verhält sich demnach wie ein besonderes chemisches Element, dessen Atome sich mit denen der anderen bekannten Elemente verbinden, nämlich zu Ionen. Und zwar ist dieser Stoff ein einwertiger. Denn jedes einwertige Element verbindet sich mit einem Elektron, jedes zweiwertige mit zweien usf., ganz so wie sich ein Chloratom mit einem Atom Wasserstoff verbindet, ein Sauerstoffatom mit zwei Atomen Wasserstoff usw.

So wurde zum ersten Male durch Helmholtz die präzierte Vorstellung in die Physik eingeführt, daß die Elektrizität selbst ein Stoff, und zwar ein atomistisch geteilter Stoff sei, also eine Vorstellung, welche der Maxwell'schen Theorie durchaus widersprach. Da aber anderseits eine große Anzahl von elektrischen Erscheinungen sich nach der Maxwell'schen Theorie durch Bewegungen des Äthers einfach und vollständig erklären ließen, so klaffte hier wiederum ein scheinbar unüberbrückbarer Abgrund zwischen den verschiedenen Erscheinungsformen der Elektrizität. Dieser Widerspruch wurde aber gelöst, die getrennten Auffassungen wurden zu einer Zusammenfassung, einer höheren Synthese gebracht, durch die von H. A. Lorentz aufgestellte Elektronentheorie der Elektrizität. Lorentz zeigte nämlich, daß alle Wirkungen der Elektrizität innerhalb der Körper sich durch die Stofftheorie, durch die Annahme von Elektronen, daß dagegen alle Wirkungen der Elek-

trizität in die Ferne, die elektrostatischen, elektromagnetischen Induktionswirkungen, sich nur durch Zuhilfenahme des Äthers erklären ließen. Und die Vereinigung dieser beiden Klassen von Erscheinungen geschah durch ihn in der Weise, daß er zeigte, daß jedes Elektron in einer engen Verknüpfung mit dem Äther steht, daß jedes ruhende und ebenso jedes bewegte Elektron in dem Äther ganz bestimmte Veränderungen hervorbringt, die sich dann eben durch den Äther fortpflanzen — und zwar mit Lichtgeschwindigkeit — und so die Fernwirkungen hervorbringen. Die nähere Ausführung dieser Elektronentheorie ist für unsere Zwecke nicht nötig. Für uns ist es dagegen von besonderer Wichtigkeit, daß wir nun außer den Atomen der chemisch bekannten Elemente noch zwei weitere Atome, die der positiven und der negativen Elektrizität, in unsere Betrachtungen einführen müssen. Zwar ist diese Annahme bisher nur aus verwickelten und ziemlich unübersichtlichen Tatsachen geschlossen und es scheinen die angenommenen Atome der Elektrizität immer nur mit Atomen der gewöhnlichen Stoffe verbunden vorzukommen. Aber wir werden bald weitere Erscheinungen besprechen, aus denen wir erkennen werden, daß diese Elektronen unter Umständen auch frei für sich, ohne Verbindung mit anderer Materie auftreten können, so daß ihre Existenz nicht mehr bloß durch eine schwierige Interpretation verwickelter Erscheinungen geschlossen werden muß.

Um diese Betrachtungen vollständig zu machen und damit auch die Grundlage für die späteren Verallgemeinerungen zu legen, müssen wir nun die aus dem Faradayschen Gesetz sich ergebenden Folgerungen nicht bloß allgemein qualitativ, sondern quantitativ nach Maß und Zahl besprechen.

Wir hatten oben den Satz ausgesprochen:

Die durchgegangene Elektrizitätsmenge ist proportional der Zahl der abgedehnten Äquivalente,  
welchen Satz wir in anderer Fassung auch so ausdrückten:

Jedes Äquivalentgewicht eines Stoffes ist mit einer bestimmten Elektrizitätsmenge verbunden.

Da die Äquivalentzahlen der Elemente zunächst relative Zahlen sind, bezogen auf das Äquivalentgewicht des Wasserstoffs gleich 1, so können wir unsere erste quantitative Frage so stellen: Wie groß ist die Elektrizitätsmenge, die mit einem Gramm-äquivalent irgend eines Stoffes verbunden ist?

Zur Beantwortung unserer Frage müssen wir zunächst festsetzen, in welchen Einheiten wir die Elektrizitätsmengen messen. In der elektrischen Praxis gilt diejenige Elektrizitätsmenge als die Einheit, welche von dem Strom 1 Ampere in jeder Sekunde durch jeden Querschnitt des Stromkreises hindurchgeschickt wird. Diese Einheit der Elektrizitätsmenge nennt man 1 Coulomb. Für manche wissenschaftlichen Rechnungen aber ist es bequemer, diejenige Elektrizitätsmenge als die Einheit zu nehmen, welche auf eine gleich große in der Entfernung 1 cm befindliche eine elektrostatische Anziehungs- oder Abstoßungskraft ausübt (je nachdem die zweite ungleichnamig oder gleichnamig ist), die gleich der Einheit

der Kraft, 1 Dyne ist. Diese letztere Einheit hat man, weil sie praktisch weniger gebraucht wird, nicht mit einem besonderen einfachen Namen bezeichnet. Man nennt sie die *elektrostatische Einheit* der Elektrizitätsmenge. Sie ist viel kleiner als 1 Coulomb, und genaue Versuche haben gelehrt, daß 1 Coulomb dreitausend Millionen ( $3 \cdot 10^9$ ) elektrostatische Einheiten enthält. Durch diese Angabe kann man also einfach von einer Elektrizitätsmenge in Coulomb übergehen zu der in elektrostatischen Einheiten ausgedrückten oder umgekehrt.

Wir wollen zunächst die Elektrizitätsmengen in Coulomb gemessen denken. Dann beantwortet sich die oben aufgestellte quantitative Frage durch folgenden Versuch, der von F. und W. Kohlrausch in Deutschland und von Lord Rayleigh und Mrs. Sidgwick in England mit der allergrößten Präzision und mit genau demselben Resultat ausgeführt wurde und der die Grundlage für die internationale Festsetzung der Stromeinheit 1 Ampere geworden ist:

Sendet man durch eine Lösung von salpetersaurem Silber die Elektrizitätsmenge 1 Coulomb hindurch, so werden an der Kathode 0,001118 g Silber abgeschieden. Das heißt nach unserer obigen Erörterung, daß 0,001118 g Silber mit 1 Coulomb verbunden sind. Folglich ist 1 Gramm-äquivalent Silber (107,88 g Silber) verbunden mit

$$\frac{107,88}{0,001118} = 96\,494 \text{ Coulomb.}$$

Dieselbe Anzahl von Coulomb ist nach dem Faradayschen Gesetz verbunden mit einem Grammäquivalent jedes anderen Stoffes, also mit 1 g Wasserstoff, mit 35,5 g Chlor, mit 8 g Sauerstoff, mit 31,78 g des zweiwertigen Kupfers, mit 9,03 g des dreiwertigen Aluminiums usw.

Daraus sieht man sofort, daß mit 1 g der verschiedenen Stoffe sehr verschiedene Elektrizitätsmengen verbunden sind, nämlich um so kleinere, je größer das Äquivalentgewicht ist. Man bezeichnet die mit 1 g eines Stoffes verbundene Elektrizitätsmenge als die *spezifische Ladung* des betreffenden Stoffes. Sie ist auch gleich dem Verhältnis der Ladung zu der Masse des betreffenden Stoffes. Aus den obigen Zahlen ergibt sich, daß die spezifische Ladung des Wasserstoffs, des Elementes mit dem kleinsten Äquivalentgewicht, gleich  $96\,494 \frac{\text{Coulomb}}{\text{Gramm}}$  ist. Dagegen die des Sauerstoffs ist  $\frac{96\,494}{8}$   
 $= 12\,062 \frac{\text{Coulomb}}{\text{Gramm}}$ , die des Chlors  $\frac{96\,494}{35,5} = 2718 \frac{\text{Coulomb}}{\text{Gramm}}$ , die des Silbers  $\frac{96\,494}{107,88} = 894,4 \frac{\text{Coulomb}}{\text{Gramm}}$  usw.

Die spezifische Ladung irgend einer Masse bei der Elektrolyse ist höchstens gleich  $96\,494 \frac{\text{Coulomb}}{\text{Gramm}}$ . Und zwar hat sie diesen Wert für den Wasser-

stoff. Für alle anderen Elemente ist sie kleiner als  $96\,494 \frac{\text{Coulomb}}{\text{Gramm}}$  und zwar um so kleiner, je größer das Äquivalentgewicht des betreffenden Elementes ist.

Aus diesem Satz werden wir später eine wichtige Folgerung ziehen. Unsere Berechnung erlaubt uns aber noch einen großen Schritt weiter zu gehen. Da jedes einwertige Ion mit einer bestimmten Ladungsmenge versehen ist, nämlich mit der Ladung eines Elektrons, so können wir nun auch die Größe dieser Ladung bestimmen. Ein Gramm-äquivalent Wasserstoff, d. h. 1 g Wasserstoff ist mit 96 494 Coulomb verbunden. Nun enthält ein Grammolekül Wasserstoff, d. h. 2 g Wasserstoff (nach S. 10)  $61,4 \cdot 10^{22}$  Moleküle (die Avogadro'sche Zahl), also 1 g Wasserstoff ebensoviel Atome bzw. Ionen. Folglich enthält jedes Ion des Wasserstoffs (und ebenso auch ein Ion jedes anderen einwertigen Stoffes) eine Ladung

$$\frac{96\,494}{61,4 \cdot 10^{22}} = 1,57 \cdot 10^{-19} \text{ Coulomb.}$$

Wir drücken diese Zahl lieber in elektrostatischen Einheiten aus, indem wir sie mit  $3 \cdot 10^9$  multiplizieren, und erhalten so

$$4,71 \cdot 10^{-10} \text{ elektrostatische Einheiten.}$$

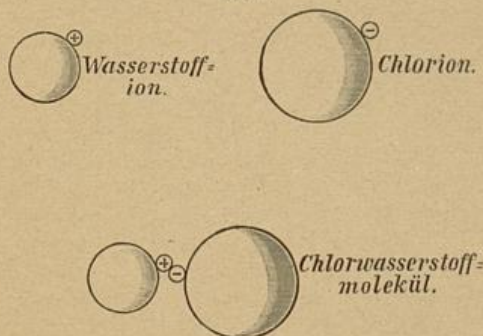
Diese Zahl nennt man die elektrische Elementarladung oder das elektrische Elementarquantum. Sie ist offenbar die Ladung eines einzigen Elektrons, also die kleinste elektrische Ladung, die überhaupt existiert. Irgend ein geladener Körper kann nur eine ganze

Anzahl von diesen Elementarquanten besitzen, aber nicht eine ganze Anzahl plus einem Bruchteil derselben. Da jedoch dieses Elementarquantum so klein ist, daß es mit unseren feinsten Meßinstrumenten nicht erkannt werden kann, so läßt sich diese Folgerung nicht direkt prüfen.

Die bildliche Vorstellung, die man sich nach dem bisherigen von einem positiven oder negativen Ion machen

kann, ist etwa durch Fig. 2 dargestellt. Die Elektronen sind durch kleine Kreise dargestellt, die mit + und - bezeichnet sind, und ein Wasserstoffion besteht aus einer Verbindung eines Wasserstoffatoms mit einem positiven Elektron, ein Chlorion ebenso aus der Verbindung eines Chloratoms mit einem negativen Ion. Die Verbindung von Chlor und Wasserstoff zu einem Chlorwasserstoffmolekül kann man sich auch in dieser Weise wie in Fig. 2 durch das Zusammentreten eines positiven und eines negativen Ions verständlich machen. Nicht aber kann man so zunächst die Ver-

Fig. 2.

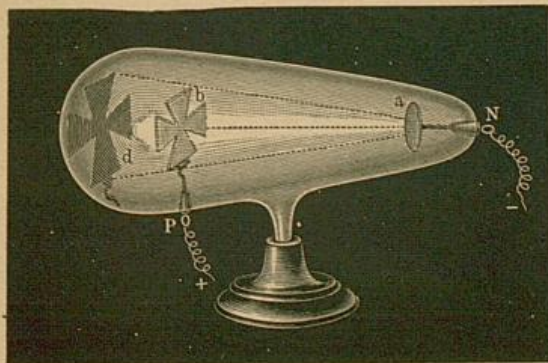


bindung zweier Wasserstoffatome zu einem Wasserstoffmolekül verstehen. Denn jedes Wasserstoffion ist bei der Elektrolyse immer nur positiv geladen.

Obwohl nun hier, bei den Erscheinungen der Elektrolyse zum ersten Male die atomistische Struktur der Elektrizität zutage trat, muß man doch zugeben, daß die Erscheinungen recht kompliziert sind und daß man nicht durchaus sicher sein kann, ob diese Erklärung, wenn sie auch verhältnismäßig einfach ist, auch wirklich stichhaltig ist und weiterer Prüfung standhält.

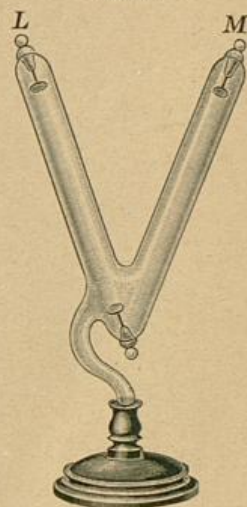
Wesentlich neue Einsichten aber und dabei eine Bestätigung und Weiterführung unserer Elektronenvorstellung gewann man durch die Beobachtung des Durchgangs der Elektrizität durch sehr verdünnte Gase. Wenn man in ein Glasgefäß zwei Metallplatten oder Metalldrähte, die Elektroden, einschmilzt und das Gas in dem Gefäß durch eine Luftpumpe auf etwa 0,01 mm Druck oder noch weiter verdünnt, so treten bekanntlich, wenn man die Elektroden mit einer Elektrizitätsquelle von hoher Spannung verbindet — einem Induktionsapparat oder einer Influenzmaschine oder einem Hochspannungsakkumulator —, in dem Gefäß sehr merkwürdige und charakteristische Erscheinungen auf, die man als Kathodenstrahlen bezeichnet. Es bleibt nämlich das Innere des Gefäßes bei dieser Verdünnung fast vollständig lichtlos, aber man erkennt, daß das Glas der Röhre grün fluoresziert, und zwar am stärksten an den Stellen, welche der negativen Elektrode, der Kathode,

Fig. 4.



gerade gegenüberliegen. Diese Fluoreszenz kommt daher, wie die folgenden Versuche lehren, daß von der Kathode aus unsichtbare Strahlen geradlinig fortgehen und da, wo sie auf ein Hindernis, wie das Glas der Röhre, treffen, besondere Wirkungen, hier Erregung von Fluoreszenz hervorbringen. Daß diese Strahlen nur geradlinig fortgehen — deswegen spricht man eben von Strahlen — und nicht um Ecken umbiegen und nur von der Kathode fortgehen, erkennt man sofort, wenn man eine V-förmige Röhre wie Fig. 3 benutzt. Macht man in dieser L zur Kathode und M zur Anode, so sieht man nur den linken Schenkel des Glases bis zur Biegung grün leuchten, den rechten nicht. Macht man umgekehrt M zur Kathode

Fig. 3.



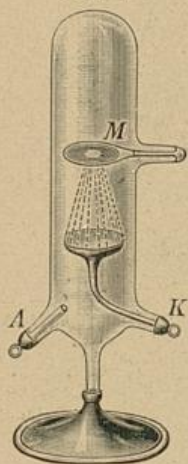
gerade gegenüberliegt. Diese Fluoreszenz kommt daher, wie die folgenden Versuche lehren, daß von der Kathode aus unsichtbare Strahlen geradlinig fortgehen und da, wo sie auf ein Hindernis, wie das Glas der Röhre, treffen, besondere Wirkungen, hier Erregung von Fluoreszenz hervorbringen. Daß diese Strahlen nur geradlinig fortgehen — deswegen spricht man eben von



und L zur Anode, so fluoresziert der rechte Schenkel. Die Kathodenstrahlen gehen eben nicht durch die Biegung des Rohres von der Kathode zur Anode, sondern nur geradlinig von der Kathode fort. Die absolute Geradlinigkeit ihrer Ausbreitung wird auch sehr scharf bewiesen durch eine Röhre wie die in Fig. 4. In dieser Röhre ist der Kathode a gegenüber ein Kreuz aus Metall im Innern befestigt. Die Kathodenstrahlen gehen von a aus geradlinig fort und erregen das Glas der Röhre, wo sie es treffen, zur grünen Fluoreszenz. Durch das Metallkreuz aber werden sie abgehalten und man sieht daher auf der grün leuchtenden Wand der Röhre bei d ein ganz scharfes Schattenbild des Kreuzes.

Nicht alle Gläser leuchten grün; Bleigläser leuchten blau, Didymgläser rot. Ebenso wie das Glas kommen eine Menge anderer Körper, namentlich Mineralien, wenn sie von Kathodenstrahlen getroffen werden, zum fluoreszierenden Leuchten.

Fig. 5.



Von der Lage der Anode ist der Gang der Kathodenstrahlen ganz unabhängig. Diese kann seitlich, vor oder hinter der Kathode angebracht sein, die Kathodenstrahlen gehen ganz geradlinig von der Kathode fort, und zwar senkrecht zu ihr. Macht man die Kathode kugelförmig, hohlspiegelartig, so treffen sich daher die Kathodenstrahlen im Mittelpunkt der Kugel, den man dann den Fokus oder Brennpunkt nennt, und gehen von ihm aus weiter auseinander.

Metallische Körper fluoreszieren nicht. Dagegen kann man an ihnen leicht zeigen, daß die Kathodenstrahlen die Körper, auf die sie treffen, erhitzen. In Fig. 5 ist in der Röhre bei K eine hohlspiegelartige Kathode eingeschmolzen, und deren Brennpunkt fällt auf ein dünnes Metallblech, M, das dort in der Röhre angebracht ist. Sobald die Kathodenstrahlen erregt werden, fängt das Metallblech in der Mitte an zu glühen. Läßt man die Kathodenstrahlen von einer hohlspiegelartigen Kathode auf das Glas der Röhre fallen, so daß der Brennpunkt am Glase liegt, so wird das Glas rasch weich und dann von dem äußeren Luftdruck durchbrochen, so daß die Röhre vernichtet wird.

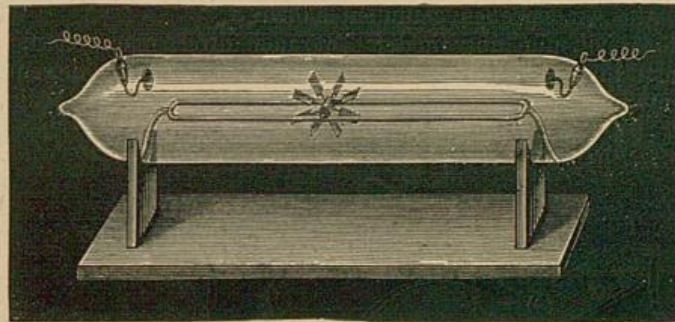
Leicht bewegliche Körper im Innern eines Rohrs werden durch die Kathodenstrahlen bewegt. In Fig. 6 ist ein leichtes Rad mit Glimmerflügeln auf zwei Glasschienen beweglich. Sobald die Kathodenstrahlen von links oder von rechts auf die Flügel fallen, dreht sich das Rad nach rechts oder links und schreitet auf den Schienen fort.

Diese Eigenschaften der Kathodenstrahlen führten schon den englischen Physiker Crookes dazu, anzunehmen, daß in einer solchen Röhre die Moleküle rasch von der Kathode fortgeschleudert werden, und daß durch den Anprall dieser Moleküle an die Wände Erhitzung erzeugt, bzw. Erschütterung der Teilchen hervorgebracht wird, die sich in dem fluoreszierenden Leuchten äußert. Crookes sprach von einem „Bombardement der Moleküle“, welches die Ursache für das Fluoreszieren und die Wärmeentwicklung sei. Durch den Stoß dieser

rasch bewegten Teile erklärt sich ebenso die Bewegung leichter Körper im Innern der Röhre.

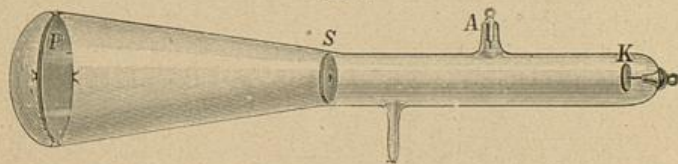
Aber was sind das für Teilchen, die in der Röhre sich rasch bewegen? Daß es nicht, wie C r o o k e s annahm, die Gasmoleküle selbst sein können, wird durch eine weitere, sehr überraschende Eigenschaft der Kathodenstrahlen bewiesen. Die Kathodenstrahlen werden nämlich von einem Magneten stark von ihrer Bahn abgelenkt. Man kann, um das zu zeigen,

Fig. 6.



sich einer Röhre von der Form Fig. 7, einer sogenannten B r a u n schen Röhre, bedienen. In dieser ist bei K die Kathode, bei A die Anode. Die Kathodenstrahlen gehen von K geradlinig fort, und um ein ganz schmales Bündel von ihnen zu erhalten, fallen sie bei S auf ein Diaphragma aus Glas oder Metall, das in der Mitte ein kleines Loch enthält. Durch dieses Loch schreiten sie hindurch und fallen auf einen Schirm P aus Kalziumwolframat, welche Substanz durch sie zum hellen, blauen Fluoreszieren gebracht wird. Man sieht also auf diesem Schirm in der Mitte einen kleinen kreisförmigen, blauen Fleck am Auffallspunkt der Kathodenstrahlen. Wenn man nun aber in die Nähe des Diaphragmas S einen Pol eines Magnetstabs bringt, z. B. den Nordpol, so sieht man, daß der

Fig. 7.



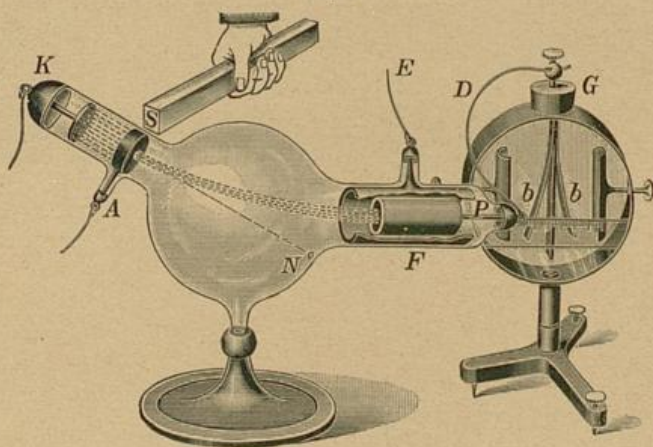
blaue Fleck sich stark verschiebt, daß also die Kathodenstrahlen von ihrer geraden Bahn abgelenkt werden. Bringt man den Nordpol oben an die Röhre, so wird der blaue Fleck nach hinten, bringt man ihn unten an, so wird er nach vorn, hält man ihn seitlich vorn an die Röhre, so wird der Fleck nach oben verschoben, und wenn man den Magnetpol seitlich hinten an die Röhre bringt, so wird der Fleck nach unten verschoben. Die Kathodenstrahlen erleiden dieselbe Ablenkung durch den Magneten, wie sie ein elektrischer Strom erfahren würde, der zur Kathode hinfließt. Übrigens findet man, daß nach der Ablenkung der Fleck nicht mehr rund,

sondern in die Länge gezogen ist, woraus folgt, daß in dem Kathodenstrahl Theile von größerer und solche von geringerer Ablenkbarkeit vorhanden sind.

Nach diesem Versuch können es nicht die Gasmoleküle sein, die in den Kathodenstrahlen fliegen; denn Gasmoleküle sind neutral und werden nicht von einem Magneten beeinflusst. Wenn die ganze Vorstellung von den bewegten Theilen richtig ist, so müßten es vielmehr elektrische, negativ geladene Theile sein, die sich in den Kathodenstrahlen bewegen, denn nur solche würden eine Ablenkung nach der Richtung erfahren, wie wir sie oben gefunden haben.

Es läßt sich nun aber in der That auch direkt nachweisen, daß die Kathodenstrahlen negative Ladung mit sich führen. Zu diesem Zwecke benützten wir die Röhre Fig. 8. In dieser ist K die Kathode, A die Anode,

Fig. 8.



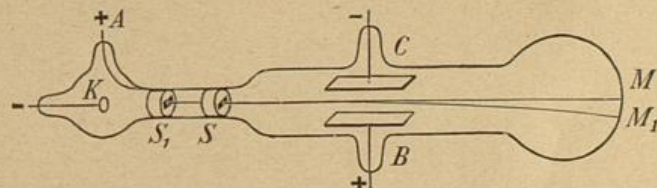
die zugleich ein Diaphragma mit einem kleinen Loch bildet, so daß die Kathodenstrahlen direkt nach der Stelle N fallen. Durch den Magnetstab S lenkt man die Kathodenstrahlen ab, so daß sie in das Ansatzrohr fallen, in welchem ein äußeres, mit der Erde durch E verbundenes Metallgefäß und ein inneres mit P verbundenes Metallgefäß sich befinden. Diese Metallgefäße nennt man einen Faradayschen Käfig. Bei P ist nun ein Goldblattelektroskop G angebracht und sobald die Kathodenstrahlen in den Käfig fallen, sieht man sofort die Blättchen des Elektroskops sich spreizen, ein Beweis, daß sie elektrisch geladen werden. Und durch Prüfung dieser Ladung (mit einem geriebenen Glasstab) erkennt man, daß sie negativ ist. Damit ist bewiesen, daß es negativ elektrisch geladene Theilchen sind, die in den Kathodenstrahlen fliegen.

Daraus erklärt sich auch folgender wichtige Versuch, der, wie wir sehen werden, eine quantitative Messung erlaubt. In Fig. 9 ist eine Röhre von der Form der Braunschen Röhre abgebildet, nur daß in dieser noch 2 Metallplatten B und C sich befinden, die zusammen einen Kondensator bilden. Man kann C mit dem negativen, B mit dem positiven

Pol (oder umgekehrt) einer Stromquelle von 100 oder 200 Volt Spannung verbinden. Die Kathodenstrahlen gehen von K aus, fallen durch die beiden Diaphragmen  $S_1$  und  $S$  und erzeugen hinten bei M auf dem Fluoreszenzschirm einen blauen Fleck, solange der Kondensator ungeladen ist. Wird dieser aber in der angegebenen Weise geladen, so verschiebt sich der Fleck nach unten hin, nach  $M_1$ , weil die negativ geladenen Teile der Kathodenstrahlen von der positiven Platte B angezogen werden. Die Kathodenstrahlen erfahren, wie man sagt, eine elektrostatische Ablenkung.

Es sind also sicher negativ geladene Teilchen, die in den Kathodenstrahlen fliegen, und die Vermutung liegt nahe, daß man es hier ebenso wie in der Elektrolyse mit Ionen zu tun hat, d. h. mit elektrisch geladenen Atomen. Wenn das der Fall ist, dann muß (nach S. 19) die spezifische Ladung dieser Teile kleiner oder höchstens gleich  $96\,494 \frac{\text{Coulomb}}{\text{Gramm}}$  sein und aus dem Wert, den die spezifische Ladung, wenn man sie bestimmen kann, wirklich besitzt, könnte man das Äquivalentgewicht des

Fig. 9.



Stoffes bestimmen, der die Ladung trägt, könnte also den Stoff selbst ermitteln.

Die Frage ist also, welches ist die spezifische Ladung der Teilchen, die in den Kathodenstrahlen fliegen, und eine weitere Frage ist, welche Geschwindigkeit besitzen diese Teilchen?

Diese beiden Fragen lassen sich aber durch quantitative Verfolgung der obigen Experimente beantworten, nämlich durch die Messung der Größe der magnetischen Ablenkung und durch die Messung der elektrostatischen Ablenkung. Bei der elektrostatischen Ablenkung verhält sich ein horizontal fliegendes Teilchen, das eine unbekannte Masse und eine unbekannte Ladung besitzt, sobald es in das von oben nach unten gerichtete elektrostatische Feld kommt, wie ein horizontal geworfener Stein, der von der Erde abgelenkt wird. Aus der Größe der Ablenkung, der Länge des Kondensators und der Größe der elektrischen Kraft, die in ihm herrscht, ergeben sich die beiden unbekannt GröÙen, spezifische Ladung und Geschwindigkeit, in der Kombination: spezifische Ladung dividiert durch das Quadrat der Geschwindigkeit.

Untersucht man anderseits die magnetische Ablenkung, so ergibt sich aus der Krümmung des Kathodenstrahles und aus der Stärke des Magnetfeldes die Kombination: spezifische Ladung dividiert durch die Geschwindigkeit selbst. Man erkennt, daß man durch diese beiden Messungen die beiden unbekannt GröÙen des Problems bestimmen

kann, nämlich 1. die Geschwindigkeit der Teilchen im Kathodenstrahl, 2. die spezifische Ladung derselben.

Was nun erstens die Geschwindigkeit der Kathodenstrahlen betrifft, so erwies sich diese immer als außerordentlich groß, etwa 100 000 Kilometer pro Sekunde, also ungefähr  $\frac{1}{3}$  Lichtgeschwindigkeit. Aber diese Geschwindigkeit zeigte sich sehr verschieden, je nachdem die Röhre stärker oder weniger stark ausgepumpt war, also auch, je nachdem sie mit höherer oder geringerer Spannung betrieben werden mußte. Bei sehr stark evakuierten Röhren war die Geschwindigkeit größer (während bei ihnen die magnetische Ablenkung kleiner war), bei weniger evakuierten Röhren war die Geschwindigkeit kleiner, aber die magnetische Ablenkung größer. Die Werte, die man so für die Geschwindigkeit in Röhren verschiedener Luftleere fand, variierten zwischen  $\frac{1}{5}$  und  $\frac{1}{3}$  Lichtgeschwindigkeit.

Im Gegensatz dazu ergab sich der Wert der spezifischen Ladung der Kathodenstrahlen bei Röhren aller Art, weniger oder stärker ausgepumpten, immer als derselbe. Und dabei zeigte sich eine große Überraschung. Während man nämlich aus den Kenntnissen der Elektrolyse erwarten mußte, daß die spezifische Ladung höchstens sich gleich 96 494 Coulomb pro Gramm ergeben könnte, zeigte es sich, daß sie hier fast 1900mal größer war. Sie ergab sich zu 180 000 000 ( $1,8 \cdot 10^8$ )

Coulomb  
Gramm

Daraus würde man zunächst schließen müssen, daß die elektrische Ladung hier verbunden ist mit dem Atom eines Stoffes, dessen Äquivalentgewicht bloß der 1900. Teil desjenigen des Wasserstoffs ist, daß also überraschenderweise in diesen Röhren sich die Existenz einer ganz neuen Materie kundgibt, die 1900mal leichter ist als die bisher leichteste Materie, der Wasserstoff.

Aber dieser seltsame Schluß hält genauerer Betrachtung gegenüber nicht stand. Es erwies sich nämlich als ganz einflußlos, ob das verdünnte Gas in der Röhre Luft oder Wasserstoff oder Helium oder Sauerstoff oder irgend ein anderes Gas ist, immer ergab sich derselbe Wert der spezifischen Ladung. Da man nun nicht annehmen kann, daß man bei allen den verschiedenen Gasen immer dieselbe Beimengung eines neuen unbekanntes Gases habe und daß dieses allein der Träger der Kathodenstrahlen sei, so ist man zu dem Schluß genötigt, daß die Kathodenstrahlen elektrische Ladungen sind, welche gar nicht an eine fremde Masse gebunden sind, sondern daß man es hier mit den freien negativen Elektronen selbst zu tun habe, daß diese Elektronen es sind, welche die Kathodenstrahlen bilden.

Danach wären die negativen Elektronen kleine Körperchen, die die elektrische Elementarladung besitzen und deren Masse bloß etwa der 1900. Teil der Masse des Wasserstoffatoms wäre. Aber sie wären materielle Körper wie der Wasserstoff.

Indes zeigt eine weitere Überlegung und zeigen weitere Erfahrungen, daß sie nicht materielle Körper wie der Wasserstoff sind. Es läßt sich nämlich beweisen, daß sie gar keine wirkliche Masse haben, sondern daß ihre Masse nur scheinbar ist.

Um diese etwas schwierige Frage zu erörtern, müssen wir untersuchen, woher wir denn eigentlich zu der Behauptung kommen, daß ein Körper *M a s s e* besitzt. Dies schließen wir aus zwei Erfahrungen. Erstens erkennen wir, daß alle Körper von der Erde angezogen werden und daher Gewicht besitzen und dieses Gewicht fühlen wir beim Aufheben der Körper. Die Masse aller unserer irdischen Körper ist also der Schwerkraft unterworfen, sie ist *s c h w e r e M a s s e*. Wenn aber die Schwerkraft nicht vorhanden wäre (wir können sie uns ja in Gedanken fortgenommen vorstellen, oder wir können uns einen Körper in die Verbindungslinie zwischen Mondmittelpunkt und Erdmittelpunkt gebracht denken, 45 700 Meilen von der Erdoberfläche entfernt, dort wirkt die Erdanziehung nicht auf ihn, weil sie durch die Mondanziehung aufgehoben wird), würden wir dann auch noch Erfahrungen haben, durch welche wir den Körpern den Besitz von Masse zuschreiben würden? Zweifellos, und zwar aus folgenden Gründen. Um einen Körper von der Ruhe aus in Bewegung zu setzen, brauchen wir eine erhebliche Kraft. Man erkennt das jedesmal, wenn z. B. ein Pferd einen Wagen anzieht. Ist der Körper einmal in Bewegung mit gleichbleibender Geschwindigkeit, so brauchen wir eine viel geringere Kraft (wenn keine Reibung vorhanden wäre, gar keine Kraft), um diese Bewegung zu erhalten. Also die Bewegung von der Ruhe aus (oder allgemeiner die Beschleunigung eines Körpers) erfordert Kraft. Umgekehrt, wenn wir einen Körper durch eine Kraft in Bewegung gehalten haben und nun die Kraft plötzlich aufhören lassen (z. B. wenn ein Motorführer bei der elektrischen Trambahn den Strom plötzlich ausschaltet), so kommt der Körper nicht sofort in Ruhe, sondern bewegt sich mit derselben Geschwindigkeit weiter, und zwar beliebig lange (wenn keine Reibung vorhanden wäre, die die Geschwindigkeit allmählich vernichtet). Diese beiden Eigenschaften jedes Körpers beruhen darauf, daß er eben Masse besitzt, und man bezeichnet sie als Wirkungen der Trägheit. Die Masse jedes Körpers ist also *tr ä g e M a s s e*. Aus der Trägheit erkennt man die Masse, die Trägheit ist für uns das Kennzeichen der Masse.

Nun können wir aber einsehen, daß ein bewegtes Elektron bloß wegen seiner Ladung auch die Erscheinungen der Trägheit zeigt, selbst wenn es gar nicht mit einer Masse verbunden ist. Eine bewegte Ladung nämlich, ein bewegtes Elektron, ist ein elektrischer Strom. Aus den von *F a r a d a y* entdeckten Erscheinungen der Induktion wissen wir aber, daß stets, wenn ein Strom zu fließen beginnt, also wenn das Elektron in Bewegung kommt, daß dann vermöge der magnetischen Kräfte, die sich durch den umgebenden Äther ausbreiten, ein *Ex t r a s t r o m* entsteht, der dem ursprünglichen Strom entgegenwirkt. Es gehört also eine Kraft dazu, um das Elektron in Bewegung zu setzen. Umgekehrt, wenn ein Strom plötzlich geöffnet wird, so entsteht aus demselben Grunde ein *Ex t r a s t r o m*, der die Bewegung fortzusetzen sucht. Das Elektron bewegt sich also weiter, auch wenn die Kraft, die es in Bewegung hielt, aufhört. Diese beiden durch den *Ex t r a s t r o m* (die Selbstinduktion) hervorgebrachten Erscheinungen bei einem Elektron entsprechen also genau der Trägheit bei einer Masse. Wir müssen sagen, ein Elektron besitzt schon wegen seiner Ladung die Eigenschaften der Trägheit, auch wenn es gar nicht

wirklich mit Masse versehen ist. Wir sagen deshalb, ein Elektron besitzt scheinbare Masse. Dieser Schein der Masse wird durch die Ladung hervorgebracht, durch die magnetischen Wirkungen einer bewegten Ladung in dem umgebenden Äther. Es läßt sich mathematisch zeigen, daß die scheinbare Masse einer Ladung um so größer ist, je kleiner das Volumen ist, welches die Ladung besitzt. Denken wir uns das Volumen nämlich kugelförmig, so sind die entstehenden magnetischen Kraftlinien um so näher an der Ladung, also um so wirksamer, je kleiner der Radius der Kugel ist. Die scheinbare Masse eines Elektrons ist, wie ausführliche Rechnung zeigt, gleich  $\frac{2}{3}$ mal dem Quadrat seiner (elektrostatisch gemessenen) Ladung, dividiert durch seinen Radius und dividiert durch das Quadrat der Lichtgeschwindigkeit — vorausgesetzt, daß die Geschwindigkeit des Elektrons nicht sehr nahe an die Lichtgeschwindigkeit herankommt.

Daraus können wir aber die Größe eines Elektrons, seinen Radius, berechnen. Die Masse eines Elektrons ist rund der 1900. Teil der Masse eines Wasserstoffatoms und da diese nach S. 11 gleich  $1,6 \cdot 10^{-24}$  ist, so ist die Masse eines Elektrons

$$= \frac{1,6}{1900} \cdot 10^{-24} = 8,4 \cdot 10^{-28} \text{ Gramm.}$$

Die Ladung eines Elektrons ist nach S. 20 gleich  $4,71 \cdot 10^{-10}$  elektrostatische Einheiten. Also ist der Radius eines Elektrons gleich

$$\frac{2}{3} \cdot \frac{21 \cdot 10^{-20}}{8,4 \cdot 10^{-28} \cdot 9 \cdot 10^{20}} = 2 \cdot 10^{-13} \text{ cm.}$$

Der Radius eines Elektrons hat die Größe  $2 \cdot 10^{-13}$  cm. Wir erinnern uns von S. 9, daß der Radius eines Atoms von der Ordnung  $10^{-8}$  cm ist. Veranschaulichen wir uns dieses Verhältnis an einem Beispiel. Der Radius der Erde beträgt rund 6350 Kilometer. Denken wir uns ein Atom Wasserstoff vergrößert, so daß es den ganzen Raum der Erde einnimmt, so hat ein Elektron bloß den Radius 127 Meter, es entspricht also etwa dem Raum einer großen Kirche, aber nicht mehr. So wie diese winzig ist im Vergleich zur ganzen Erde, so ist ein Elektron winzig im Vergleich zu einem Atom.

Daß die Masse eines Elektrons nur scheinbare Masse ist, ist zunächst nach den obigen Betrachtungen bloß möglich. Es könnte immerhin sein, daß doch auch wirkliche Masse, Materie, mit dem Elektron verbunden wäre. Aber das ist nicht der Fall, wie weitere Versuche lehren. Es ergibt sich nämlich aus der Theorie, daß die scheinbare Masse eines Elektrons nur dann den oben angeführten, konstanten Wert hat, wenn die Geschwindigkeit des Elektrons klein ist gegen die Lichtgeschwindigkeit, also etwa wie bei den Kathodenstrahlen bloß  $\frac{1}{5}$  bis  $\frac{1}{3}$  der Lichtgeschwindigkeit ist. Wenn aber die Geschwindigkeit eines Elektrons sehr viel größer wird, nahe an die Lichtgeschwindigkeit herankommt, dann muß seine scheinbare Masse auch größer werden und bei Erreichung der Lichtgeschwindigkeit würde sie sogar unendlich groß werden. Nun kennen wir, wie im nächsten Kapitel genauer auseinandergesetzt werden wird, in den  $\beta$ -Strahlen des Radiums negative Elektronen, deren Geschwindigkeit viel größer als die der Kathodenstrahlen ist, und in der Tat hat sich experimentell gezeigt, daß deren Masse immer größer wird, je mehr sich ihre Geschwindigkeit der des Lichtes nähert. Das konnte man daraus ermitteln, daß man auch bei ihnen die spezifische Ladung be-

stimmte, d. h. das Verhältnis ihrer Ladung zu ihrer Masse. Wächst die Masse, so muß die spezifische Ladung kleiner werden und immer kleiner, je mehr man sich der Lichtgeschwindigkeit nähert. Es ergaben z. B. die Versuche über die spezifische Ladung der Elektronen in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit folgendes:

Geschwindigkeit	Spezifische Ladung
$1,00 \cdot 10^{10}$ cm/sek	$1,80 \cdot 10^8$ Coulomb/Gramm
$1,50 \cdot 10^{10}$ "	$1,80 \cdot 10^8$ "
$2,36 \cdot 10^{10}$ "	$1,31 \cdot 10^8$ "
$2,48 \cdot 10^{10}$ "	$1,17 \cdot 10^8$ "
$2,59 \cdot 10^{10}$ "	$0,97 \cdot 10^8$ "
$2,72 \cdot 10^{10}$ "	$0,77 \cdot 10^8$ "
$2,83 \cdot 10^{10}$ "	$0,63 \cdot 10^7$ "

Also bei der Annäherung an die Lichtgeschwindigkeit ( $3 \cdot 10^{10}$  cm/sek) bis auf 94% derselben nahm die spezifische Ladung auf etwa den dritten Teil ab, die scheinbare Masse wuchs also auf etwa das Dreifache.

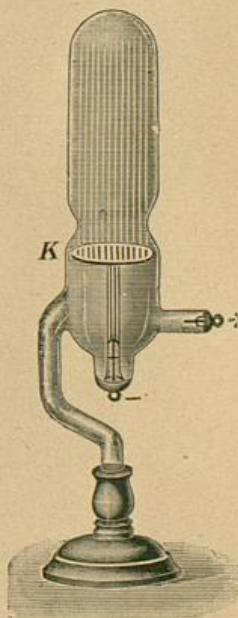
Daraus ist mit Sicherheit zu schließen, daß ein Elektron nur scheinbare Masse, keine wirkliche besitzt.

Für die negativen Elektronen ist so der Beweis ihrer Existenz geführt, und da wir bei der Elektrolyse aus einem Molekül ein positiv und ein negativ geladenes Ion erhalten, so ist also mindestens sicher, daß ein Molekül außer den materiellen Atomen noch wenigstens negative Elektronen besitzen muß.

Wie steht es nun aber mit der positiven Elektrizität, mit den positiven Elektronen? In den evakuierten Röhren treten beim Stromdurchgang unter bestimmten Umständen nicht bloß die negativen Kathodenstrahlen, sondern auch Strahlen mit positiver Ladung auf, die man als Kanalstrahlen bezeichnet. Bringt man nämlich, wie in Fig. 10, im Innern der Röhre eine Kathode mit Löchern oder Spalten, also mit Kanälen, an und in dem unteren Teil der Röhre eine Anode, so gehen die Kathodenstrahlen von K nach unten, in den Raum, in dem sich die Anode befindet, und erregen unten das Glas zu grüner Fluoreszenz. Aber man sieht dabei weiter von den Kanälen aus nach oben andere Strahlen ausgehen, die in Luft rotbraun gefärbt sind, und dieses sind die Kanalstrahlen. Daß sie positive Ladungen mit sich führen, wurde daraus erkannt, daß sie von einem Magneten und von einem elektrostatischen Feld abgelenkt werden, aber gerade nach der entgegengesetzten Richtung wie die Kathodenstrahlen.

Durch Messung der Größe der magnetischen und elektrostatischen Ablenkung konnten nun aber auch hier, wie bei den Kathodenstrahlen, die beiden wichtigen Fragen beantwortet werden: Welches ist die Geschwindigkeit der Teilchen, die in den Kanalstrahlen fliegen, und zweitens,

Fig. 10.





welches ist ihre spezifische Ladung? Die Geschwindigkeit ergab sich verschieden, aber immer viel kleiner als bei den Kathodenstrahlen. Während sie dort  $\frac{1}{5}$  bis  $\frac{1}{3}$  der Lichtgeschwindigkeit war, ist sie hier etwa  $\frac{1}{500}$  der Lichtgeschwindigkeit, also mehrere hundert Mal kleiner als bei den Kathodenstrahlen. Wichtiger war noch die Antwort auf die Frage über die Größe der spezifischen Ladung. Diese ergab sich ausnahmslos kleiner oder höchstens gleich  $96\,494 \frac{\text{Coulomb}}{\text{Gramm}}$ ,

während sie, wie oben ausgeführt, bei den Kathodenstrahlen 1900mal größer war. Daraus ist (nach S. 19) zunächst zu schließen, daß die positive Elektrizität in den Kanalstrahlen nicht frei für sich vorkommt, sondern stets nur in Verbindung mit gewöhnlichen Atomen, daß es also Ionen sind, welche die Kanalstrahlen bilden. Und weiter: während der Wert der spezifischen Ladung bei den Kathodenstrahlen sich immer als derselbe ergab, welches Gas auch in der Röhre vorhanden war, ist das bei den Kanalstrahlen ganz anders. Die Größe der spezifischen Ladung ist durchaus verschieden, je nachdem in der Röhre Luft oder Wasserstoff oder Helium oder Sauerstoff ist, auch ein Beweis dafür, daß die positive Elektrizität hier immer mit den Atomen verbunden ist.

Aber die genauere Untersuchung hat gezeigt, daß in jedem Fall, welches auch das Gas in der Röhre ist, es mehrere verschiedenartige Träger der positiven Elektrizität gibt. In Wasserstoff findet man z. B., daß es positiv geladene Atome, also  $H^+$ , aber auch positiv geladene Moleküle  $H_2^+$  gibt. Ja, es scheint auch dreifache Verbindungen von Wasserstoff zu geben, die positiv geladen sind, also Ionen von der Art  $H_3^+$ . Weiter aber hat sich gezeigt, daß es unter den Kanalstrahlen auch negativ geladene Strahlen gibt, die erst entstehen, wenn die Kanalstrahlen schon gebildet sind. So haben sich z. B. negativ geladene Wasserstoffatome  $H^-$  gezeigt. Ebenso hat man positiv und negativ geladene Sauerstoffatome  $O^+$  und  $O^-$  gefunden, ferner Kohlenstoffatome, die einfach positiv oder negativ geladen waren,  $C^+$  und  $C^-$ , und solche, die doppelt positiv geladen waren,  $C^{++}$ , ferner auch positiv oder negativ geladene Moleküle von Kohlenstoff  $C_2^+$  und  $C_2^-$ .

Was aus diesen Untersuchungen folgt, ist ein doppeltes. Erstens: freie positive Elektronen sind nicht gefunden worden, und zwar, wie wir hinzusetzen wollen, niemals, auch bei anderen Versuchsanordnungen nicht. Wir können es als das Resultat aller bisherigen Versuche hinstellen: Während die negative Elektrizität frei für sich vorkommen kann, ohne Verbindung mit Materie, ist das bei der positiven Elektrizität nicht der Fall. Die positive Elektrizität ist stets und durchgängig an die Atome der gewöhnlichen Materie gebunden.

Und zweitens ersehen wir, daß die Verbindungen von Atomen untereinander zu Molekülen und mit der Elektrizität zu Ionen vielseitiger sind, als wir zunächst glaubten. Es gibt positiv und negativ geladene Atome derselben Art, es gibt auch solche Atome mit mehrfachen positiven oder negativen Ladungen, aber es gibt auch außer den neutralen Molekülen positiv bzw. negativ geladene Moleküle mit einer oder mehreren Ladungen.

Eine umfassende Atomtheorie wird diesen vielfachen Möglichkeiten, wie sich die Atome in Wirklichkeit verhalten, Rechnung zu tragen haben.

## Dritter Vortrag.

### Der Zerfall der Atome bei den radioaktiven Stoffen. Die Kerntheorie der Atome.

Das Uran, Radium, Thorium und Aktinium als radioaktive Substanzen. Die  $\alpha$ - $\beta$ - $\gamma$ -Strahlen. Die  $\alpha$ -Teilchen sind doppelt positiv geladene Heliumionen. Emanation. Atomzerfall. Die Heliumionen sind Bestandteile der Atome der radioaktiven Stoffe. Wilsonsche Photographieen der  $\alpha$ -Strahlen. Zerstreuung der  $\alpha$ -Teilchen. Rutherford'sche Atomtheorie. Die positive Ladung des Kerns ist gleich der Ordnungszahl des Atoms. Die Masse ist scheinbar. Größe des Kerns. Isotope Elemente.

Seitdem am Beginn des Jahrhunderts erst durch Becquerel, dann durch P. Curie und Frau Curie entdeckt wurde, daß einige chemische Elemente radioaktive Eigenschaften besitzen, d. h. daß sie dauernd Strahlen besonderer Art aussenden, hat die Forschung eine große Reihe von wichtigen Eigenschaften dieser Strahlen und der Elemente, von denen diese ausgehen, gefunden, Eigenschaften, welche für die Atomtheorie von besonderer Wichtigkeit geworden sind.

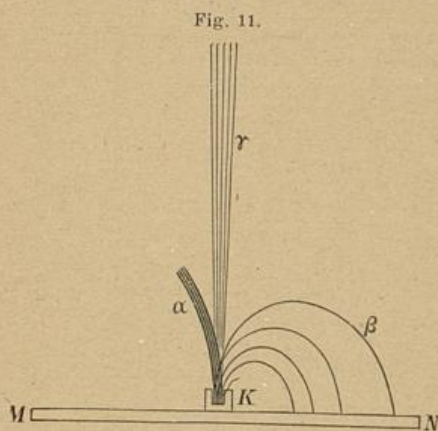
Als erste radioaktive Substanz hat Becquerel das Uran erkannt, welches im metallischen Zustand, aber auch in allen seinen Verbindungen die Eigenschaft besitzt, photographische Platten, auch wenn sie durch schwarzes Papier umhüllt sind, zu schwärzen, ferner manche Körper zur Fluoreszenz zu erregen und endlich die Luft und andere Gase leitend zu machen, zu ionisieren, so daß elektrisch geladene Körper, wenn Uran in ihre Nähe gebracht wird, ihre Ladung nicht behalten, sondern sie durch die leitend gewordene Luft zur Erde abfließen lassen. Diese Wirkungen werden durch Strahlen hervorgebracht, die von dem Uran ausgehen, das Uran ist, wie man es nennt, ein radioaktiver Stoff. Da, wie gesagt, alle chemischen Verbindungen, die Uran enthalten, ebenso wie das metallische Uran selbst diese Eigenschaften zeigen, so muß die Radioaktivität eine Eigenschaft der Atome des Urans, eine atomistische Eigenschaft sein.

Viel stärkere Wirkungen, aber von genau derselben Art, zeigt das Radium, ein Stoff, der bekanntlich von Frau Curie aus der Joachimsthaler Pechblende — die Uran enthält — durch mühsame Arbeit in kleinen Quantitäten abgeschieden wurde. Auch das Radium zeigt die Radioaktivität sowohl im metallischen Zustand, wie auch in allen seinen chemischen Verbindungen, als welche im wesentlichen Chlorradium, Bromradium und salpetersaures Radium praktisch hergestellt und gebraucht werden. Auch hier sind es also die Atome, welche radioaktiv sind. Das

Atomgewicht des Radiums wurde von Frau Curie zu 226 ermittelt. Es ist also eines der schwersten Atome. Aber das Atom des Urans ist noch schwerer, sein Atomgewicht ist 238,2.

Auch ein dritter Körper mit sehr großem Atomgewicht, das Thorium, Atomgewicht 232,15, erwies sich als radioaktiv, und endlich wurde aus der Pechblende noch ein weiterer Stoff, das Aktinium, in kleinen Quantitäten abgeschieden, das ebenfalls radioaktiv ist, dessen Atomgewicht aber noch nicht bestimmt werden konnte. Es ist jedenfalls auch sehr hoch, man schätzt es auf 227.

Die Elemente also mit den höchsten Atomgewichten zeigen die radioaktive Strahlungsausgabe. Eine genauere Untersuchung der Strahlung aller dieser Substanzen hat nun aber gezeigt, daß sie eine gemischte ist, daß in ihnen drei Strahlensorten verschiedener Art enthalten sind. Man kann diese Strahlensorten trennen durch Anwendung



eines Magneten. Wenn man nämlich, wie in Fig. 11, in K ein Quantum Radiumsalz hat, von dem die Strahlung ausgeht, und wenn man einen kräftigen Magneten mit seinem Nordpol vor diesen Behälter bringt, so werden gewisse dieser Strahlen von ihrer geraden Richtung abgelenkt, andere nicht. Unter den ablenkbaren Strahlen aber wird ein Teil stark nach rechts abgelenkt. Diese Strahlen bezeichnet man als Beta-Strahlen ( $\beta$ -Strahlen), ein anderer Teil der Strahlen wird schwach nach links abgelenkt, man bezeichnet sie als Alpha-Strah-

len ( $\alpha$ -Strahlen), und der dritte Teil der Strahlen bleibt unabgelenkt, man bezeichnet diese als Gamma-Strahlen ( $\gamma$ -Strahlen). Von den unabgelenkten Strahlen, die sich ebenso wie die Röntgenstrahlen verhalten, wollen wir erst im folgenden Kapitel ausführlicher sprechen, es sei hier nur erwähnt, daß dies diejenigen Strahlen sind, die für gewöhnlich die wirksamsten sind. Denn sie allein gehen durch dickere Schichten von festen, flüssigen und gasförmigen Substanzen hindurch und, wenn die radioaktive Substanz, wie es normal der Fall ist, in ein Gefäß eingeschlossen ist, so sind sie es allein, die durch die Wände des Gefäßes hindurchdringen und außen ihre Wirksamkeit zeigen. Die medizinische Anwendung des Radiums beruht fast ausschließlich auf den  $\gamma$ -Strahlen.

Die  $\alpha$ - und die  $\beta$ -Strahlen werden also von einem Magneten abgelenkt und sie müssen daher, nach unseren früheren Ausführungen, aus elektrisch geladenen Teilchen bestehen. Aus der Richtung der Ablenkung erkennt man, daß die  $\alpha$ -Strahlen positiv geladene Teilchen, die  $\beta$ -Strahlen negativ geladene Teilchen enthalten. Die wichtigste Frage ist auch hier, ganz ebenso wie bei den Kathodenstrahlen und den Kanalstrahlen, welcher Art sind diese Teilchen? Diese Frage aber und zugleich die Frage, welches die Geschwindigkeit dieser Teilchen ist, ließ sich hier,

genau ebenso wie bei den Kathodenstrahlen und den Kanalstrahlen, beantworten, indem man einerseits die magnetische Ablenkung und andererseits die elektrostatische Ablenkung der Strahlen quantitativ messend verfolgte. Denn aus diesen beiden Messungen konnte man sowohl die Geschwindigkeit, wie die spezifische Ladung der Teilchen bestimmen (s. o. S. 25).

Für die  $\beta$ -Strahlen ergaben diese Messungen, daß ihre spezifische Ladung ungefähr  $1,8 \cdot 10^8 \frac{\text{Coulomb}}{\text{Gramm}}$  ist, also ebenso groß ist wie bei den Kathodenstrahlen. Genau wie bei diesen müssen wir also schließen, daß es die negativen Elektronen selbst sind, welche die  $\beta$ -Strahlen bilden. Die Geschwindigkeit aber der radioaktiven  $\beta$ -Strahlen erwies sich für die verschiedenen radioaktiven Substanzen verschieden groß und zum Teil außerordentlich viel größer als die der Kathodenstrahlen. In manchen Fällen nähert sich die Geschwindigkeit bis auf wenige Prozent der Lichtgeschwindigkeit. Daß in diesem Falle die spezifische Ladung kleiner wird und daß dies ein Beweis dafür ist, daß die Masse der negativen Elektronen bloß scheinbare Masse ist, haben wir auf S. 29 schon besprochen.

Von besonderer Wichtigkeit aber war hier die Frage nach der Natur der  $\alpha$ -Strahlen mit ihren positiven Ladungen. Von der gesamten Strahlungsenergie eines radioaktiven Stoffes führen die  $\alpha$ -Strahlen fast 90% mit sich. Die größte Energieabgabe geschieht also durch sie. Andererseits aber werden die  $\alpha$ -Strahlen schon durch ganz dünne Schichten fremder Substanz absorbiert. Schon durch dünnes Papier, schon durch eine Aluminiumschicht von 0,02 mm Dicke gehen sie nicht mehr hindurch. In Luft erreichen sie Wege von einigen Zentimetern, 3—7 cm, je nach ihrer Geschwindigkeit, und hören dann plötzlich auf. Diese Strecke bezeichnet man als die Reichweite der  $\alpha$ -Strahlen. Es ist eine höchst auffallende und zunächst gar nicht zu erklärende Tatsache, daß diese  $\alpha$ -Strahlen nach Durchlaufung eines Weges von einigen Zentimetern plötzlich aufhören. Bis zu dieser Stelle ihrer Bahn zeigen sie die Fähigkeit, Gase zu ionisieren und auf photographische Platten zu wirken, noch vollkommen ungeschwächt und dann hören sie plötzlich auf. Es ist keine allmähliche Schwächung durch Absorption der Grund ihres Aufhörens, sondern es findet eben ein plötzliches Verschwinden statt.

Um die Natur der  $\alpha$ -Teilchen zu ergründen, mußte also auch ihre spezifische Ladung ermittelt werden. Durch dieselben Messungen, die diese zu bestimmen erlaubten, erhielt man auch wieder ihre Geschwindigkeit, die sich 50- bis 100mal so groß ergab wie die der Kanalstrahlen. Die direkte Messung nun für die spezifische Ladung ergab den Wert  $50\,000 \frac{\text{Coulomb}}{\text{Gramm}}$ , also von derselben Größenordnung, wie sie die Ionen bei der Elektrolyse haben. Sicher also sind die positiven Ladungen hier mit gewöhnlicher Materie verbunden, ebenso wie bei der Elektrolyse. Da die spezifische Ladung eines Atoms bei der Elektrolyse gleich 96 494, dividiert durch das Äquivalentgewicht, ist, so würde folgen, daß die unbekannte Materie das Äquivalentgewicht 2 (rund) hätte. Wir kennen aber kein Atom mit dem Äquivalentgewicht 2.

Aber es wird auch bei diesem Schluß vorausgesetzt, daß das Atom dabei bloß ein einziges Elementarquantum (s. S. 20) trägt, eine Voraussetzung, die erst geprüft werden muß und die sich tatsächlich als unrichtig erwiesen hat. Der ausgezeichnete englische Physiker Rutherford, der zur Kenntnis und Erklärung der radioaktiven Erscheinungen das meiste beigetragen hat, hat durch eine elegante Methode bewiesen, daß jedes  $\alpha$ -Teilchen 2 positive Elementarquanten trägt. Danach muß das Äquivalentgewicht des betreffenden Teilchens gleich 4 sein. Und nun kennen wir einen Stoff, das Helium, dessen Äquivalentgewicht (gleich seinem Atomgewicht) gleich 4 ist. Daraus ergab sich der wichtige Schluß, daß die  $\alpha$ -Teilchen nichts anderes sind als Heliumatome mit zwei positiven Elementarladungen. Dieser Schluß, daß die radioaktiven Substanzen außer negativen Elektronen noch doppelt positiv geladene Heliumatome aussenden, wird durch eine Reihe von Experimenten bestätigt. In abgeschlossenen Räumen, in denen vorher keine Spur von Helium, sondern nur Radium vorhanden war, zeigt sich nach einiger Zeit die Anwesenheit des Heliums deutlich durch sein ganz charakteristisches Spektrum an. Das Helium hat sich aus dem Radium entwickelt.

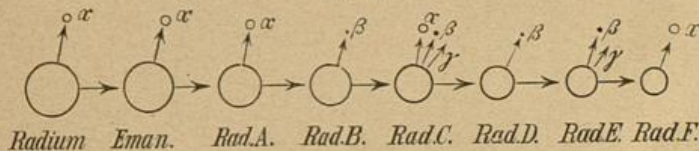
Schon bald nach der Entdeckung des Radiums wurde von Frau Curie gefunden, daß alle Körper, die in der Nähe des Radiums sich befinden, selbst radioaktiv werden, wenn auch nur vorübergehend. Ein Stück Papier, ein Stück Glas, ein Stück Holz oder Metall, das sich in der Nähe von Radium befindet, sendet selbst Strahlen aus, die die Luft leitend machen. Aber diese Eigenschaft behalten die Körper nur eine verhältnismäßig kurze Zeit, dann werden sie wieder inaktiv. Man bezeichnet ihre Aktivität als mitgeteilte Aktivität. Das Geheimnis derselben wurde durch eine Entdeckung aufgeheilt, die Rutherford zuerst bei dem Thorium machte, die sich aber dann auch beim Radium ergab. Es geht nämlich, wie er fand, von diesen Körpern eine gasförmige Substanz aus, die er Emanation nannte, und die selbst radioaktiv ist, die selbst Körper zum Fluoreszieren bringt und die Luft ionisiert. Diese Emanation aber behält auch ihre Aktivität nicht unverändert bei, sondern sie verliert sie allmählich, und zwar fällt die Radiumemanation in je 3,85 Tagen auf die Hälfte ihrer vorherigen Wirksamkeit ab, wie man durch Messung ihres Ionisierungsvermögens feststellte. Die Thoriumemanation sinkt dagegen schon in 54 Sekunden, die Emanation des Aktiniums schon in 3,9 Sekunden auf den halben Betrag. Diese Zeiten, die man die Abklingungskonstanten nennt, sind ganz charakteristisch und ergeben sich bei der Emanation radioaktiver Körper immer und unter allen Umständen als die gleichen. Sie sind unabhängig davon, ob man die Messung gleich nach Entwicklung der Emanation vornimmt oder später, ob man viel Substanz oder wenig anwendet. Die Emanation ist also danach auch ein radioaktiver Stoff, aber nicht einer wie die zuerst genannten, Radium, Thorium usw., die ihre Aktivität scheinbar dauernd beibehalten, sondern einer, der seine Aktivität allmählich verliert, ein Stoff mit vorübergehender Aktivität. Ebenso zeigt auch die mitgeteilte Aktivität eine Abklingung. Aber anders wie bei den Emanationen ergibt sich

bei dieser der Wert der Abklingungskonstante ganz verschieden, je nachdem die mitgeteilte Aktivität schon kürzere oder längere Zeit bestanden hat.

Diese auffallende Tatsache, daß es vorübergehend radioaktive Körper gibt, führte zu der Theorie, die zuerst von Rutherford aufgestellt wurde, daß die Atome der radioaktiven Körper nicht unveränderlich sind, sondern zerfallen, zu der Theorie des Atomzerfalls. In den radioaktiven Stoffen treten danach wirklich, und zwar ohne unser Zutun, die Kräfte auf, welche den inneren Zusammenhang eines Atoms lockern und das Atom in Teile zersprengen. Die Unveränderlichkeit und Unteilbarkeit der Atome ist bei ihnen durch die Tatsachen widerlegt.

Aus einem Atom des Radiums entwickelt sich durch Abgabe eines  $\alpha$ -Teilchens ein Atom eines neuen Stoffes, eben der Emanation. Dieses Atom aber zerfällt auch wieder durch Abgabe eines  $\alpha$ -Teilchens und bildet nun ein Atom desjenigen Stoffes, den man im großen und ganzen mitgeteilte Aktivität nennt. Die Unbestimmtheit von deren Abklingungskonstante kommt daher, daß diese nicht ein ein-

Fig. 12.



facher Stoff ist, sondern daß aus ihr der Reihe nach sich verschiedene Stoffe bilden, die also zum Teil nebeneinander bestehen, und zwar in verschiedenen relativen Mengen, je nach der Zeit, die seit ihrer ersten Entstehung verstrichen ist. Diese aus der Emanation der Reihe nach sich bildenden Stoffe bezeichnet man als Radium A, Radium B usw. bis Radium F. Ein Atom eines dieser Körper bildet sich aus dem vorhergehenden durch Ausstoßung von  $\alpha$ - oder von  $\beta$ -Teilchen oder von beiden, wobei zum Teil auch  $\gamma$ -Strahlen (Röntgenstrahlen) entstehen.

Die allmähliche Bildung dieser einzelnen Stoffe ist für das Radium durch Fig. 12 dargestellt, wobei auch die Art der Strahlen angegeben ist, durch die aus einem vorhergehenden Atom sich das folgende bildet. Die Stoffe: Radium A, B, C haben sehr kleine Halbwertszeiten, solche von 3; 26,7; 19,5 Minuten, sie sind also rasch verschwindende Substanzen, von denen schon nach einigen Stunden nichts mehr zu erkennen ist. Das Radium C aber geht dabei in einen Körper Radium D über, der umgekehrt eine sehr große Halbwertszeit, eine solche von 16,5 Jahren, besitzt, also ein sehr beständiger Körper ist und sich nur allmählich unter Ausgabe sehr schwer beobachtbarer  $\beta$ -Strahlen zu Radium E und F umbildet. Diese sind auch ziemlich langlebig, da sie Halbwertszeiten von 5 bzw. 136 Tagen besitzen. Das Radium F ist durchaus identisch mit dem Polonium, welches Frau Curie gleichzeitig mit dem Radium aus der Pechblende abgeschieden hat, das aber, wie man jetzt sieht, nur ein Abkömmling des Radiums ist.

In ähnlicher Weise hat sich die Entwicklung der Atome aus dem Thorium feststellen lassen, die durch folgende Reihe mit den Abklingungszeiten und den ausgesendeten Strahlen dargestellt ist.

Substanz	Abklingungszeit
Thorium . . . . .	—
↓ $\alpha$	
Mesothorium I . . . . .	6,7 Jahre
↓ $\beta$	
Mesothorium II . . . . .	6,2 Stunden
↓ $\beta, \gamma$	
Radiothorium . . . . .	1,905 Jahre
↓ $\alpha$	
Thorium X . . . . .	3,7 Tage
↓ $\alpha, \beta$	
Thoriumemanation . . . . .	53 Sekunden
↓ $\alpha$	
Thorium A . . . . .	0,14 Sekunden
↓ $\alpha$	
Thorium B . . . . .	10,6 Stunden
↓ $\beta$	
Thorium C . . . . .	55 Monate
↓ $\alpha, \beta$	
Thorium D . . . . .	3,1 Minuten
↓	
↓ $\beta, \gamma$	

Die Aktiniumreihe ist von minderer Bedeutung. Dagegen ist es von hohem Interesse, daß das Radium direkt ein Abkömmling des Urans ist. Man hat nämlich gefunden, daß das Uran durch einen Zwischenkörper Ionium, der eine außerordentlich große Halbwertszeit (von etwa 1 Million Jahre) besitzt, in das Radium übergeht, das selbst eine Halbwertszeit hat, die ungefähr 2000 Jahre beträgt.

Alle diese Substanzen, das Uran, das Radium, das Thorium, das Aktinium mit ihren Produkten, senden  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlen aus. Und bei allen sind sowohl die  $\beta$ -Strahlen dieselben, wie die  $\alpha$ -Strahlen. Alle  $\beta$ -Strahlen bei den verschiedensten Substanzen sind negative Elektronen, die sich nur dadurch voneinander unterscheiden, daß ihre Geschwindigkeiten verschieden sind. Und alle  $\alpha$ -Strahlen, bei allen Substanzen, sind doppelt positiv geladene Heliumatome, die sich nur dadurch unterscheiden, daß sie verschiedene Geschwindigkeit besitzen und verschieden lange Strecken in der Luft zurücklegen, bis sie aufhören zu ionisieren, die sich also nur durch ihre Reichweite unterscheiden.

Daraus aber folgt mit Notwendigkeit, daß die Atome dieser Stoffe, also des Urans, Radiums, Thoriums und Aktiniums und ihrer Folgesubstanzen, Heliumatome und negative Elektronen als Bestandteile besitzen müssen. Bei diesen schwersten Atomen sind also die engeren Bestandteile des Atoms durch diese Untersuchungen bekannt.

Es geht aus dem Gesagten nicht notwendig hervor, daß z. B. ein Radiumatom nur aus Heliumatomen und negativen Elektronen bestehen muß. Es könnte auch noch andere Stoffe als Bestandteile haben, z. B. Wasserstoffatome. Aber weder im positiven noch im negativen Sinn liegt hierfür irgend ein Beweis bisher vor.

Die Abschleuderung der  $\alpha$ -Teilchen aus einem Stück Radium oder aus einem Stück der anderen radioaktiven Stoffe läßt sich durch eine höchst interessante Versuchsanordnung sichtbar machen. Die verschiedenen Strahlenarten nämlich, sowohl die  $\alpha$ -, wie die  $\beta$ - (und auch die  $\gamma$ -) Strahlen machen die Luft, durch die sie hindurchgehen, elektrisch leitend, sie ionisieren, wie man sagt, die Luft. Werden nämlich Luftteilchen oder Teilchen eines anderen Gases von solchen Strahlen getroffen, so findet eine Zertrümmerung der Gasteilchen statt, es bilden sich aus einem Gasmolekül positive und negative Ionen, Gas-Ionen. Von welcher Art diese Ionen sind, interessiert uns hier nicht näher. Dieses Leitendwerden der Gase, das man messend verfolgen kann, gibt schon seit langer Zeit die Hauptmethode zur Untersuchung der radioaktiven Erscheinungen.

Diese Gas-Ionen nun haben eine besondere Eigenschaft: sie können nämlich als sogenannte Nebelkerne wirken. Wenn man nämlich in ein geschlossenes Gefäß, das Luft enthält, auf den Boden etwas Wasser bringt, so entwickeln sich Wasserdämpfe, die sich der Luft beimengen und die ebenso unsichtbar sind wie die Luft. Je nach der Temperatur, die das Gefäß besitzt, ist mehr oder weniger Wasser in Form von Wasserdampf vorhanden. Der Wasserdampf ist, wie man es nennt, gesättigt, es ist gerade so viel Wasserdampf vorhanden, als der Temperatur und dem Volumen des Gefäßes entspricht. Wenn nun aber die Temperatur des Gefäßes plötzlich verringert wird, so tritt die Sättigung schon eher ein, es gehört zu dieser niedrigeren Temperatur eine geringere Menge von Wasserdampf und folglich muß sich der überschüssige Teil des Wasserdampfes in Form von Nebel als Wassertröpfchen niederschlagen. Das sollte nun schon bei einer sehr kleinen Temperaturerniedrigung stattfinden. Aber in Wirklichkeit ist das (wegen der Oberflächenspannung) nicht der Fall, es gehört vielmehr eine ziemlich bedeutende Temperaturerniedrigung dazu, um in reiner Luft aus dem Wasserdampf Nebel entstehen zu lassen. Bedeutend erleichtert wird aber die Nebelbildung, wie man schon lange gefunden hat, wenn in der Luft Staub vorhanden ist (was gewöhnlich der Fall ist, wenn man die Luft nicht absichtlich filtriert hat). Die Staubteilchen wirken als Nebelkerne und an ihnen bilden sich leicht, auch schon bei geringer Temperaturerniedrigung, die Wassertröpfchen. Ebenso wie Staub wirken aber, wie man zufällig gefunden hat, auch die Gas-Ionen. Auch an einem Gas-Ion schlägt sich, schon bei geringer Temperaturerniedrigung, der Wasserdampf als flüssiges Wasser nieder. Um in Luft rasch eine geringe Temperaturerniedrigung hervorzubringen, setzt man bei derartigen Experimenten das Gefäß, in dem die Luft enthalten ist, plötzlich durch Öffnen eines Hahns mit einem anderen Gefäß von geringerem Druck der Luft in Verbindung. Dann findet beim plötzlichen Ausströmen, bei der plötzlichen Volumenvergrößerung eine Abkühlung der Luft statt und es bildet sich bei Anwesenheit von Staubkernen oder Gas-Ionen sofort Nebel.

Diese Eigenschaft der Gas-Ionen benutzte der englische Physiker Wilson in einer sehr schönen Versuchsanordnung, um die Bahnen, welche die  $\alpha$ -Teilchen oder die  $\beta$ -Teilchen durchlaufen, direkt sichtbar und sogar photographierbar zu machen. Hier interessieren uns nur die



Bahnen der  $\alpha$ -Teilchen. Er ließ in den Raum, der den Wasserdampf enthielt und den er die *Wolkenkammer* nannte, durch ein Stück eingebrachtes Radium die  $\alpha$ -Teilchen eintreten. Diese ionisierten die Luft der Wolkenkammer und bildeten auf ihrem Wege eine große Anzahl von Gas-Ionen. Durch plötzliche Abkühlung des Gases in der beschriebenen Weise schlägt sich an diesen Ionen der Wasserdampf nieder und man sieht also einen Nebelstreifen in der Wolkenkammer, der direkt die Bahn der  $\alpha$ -Teilchen bezeichnet. Durch plötzliche, im richtigen Moment eintretende Beleuchtung des Nebelstreifens kann man diesen sogar photographieren. Fig. 13 und 14 geben einige solche von *Wilson* aufgenom-

Fig. 13.

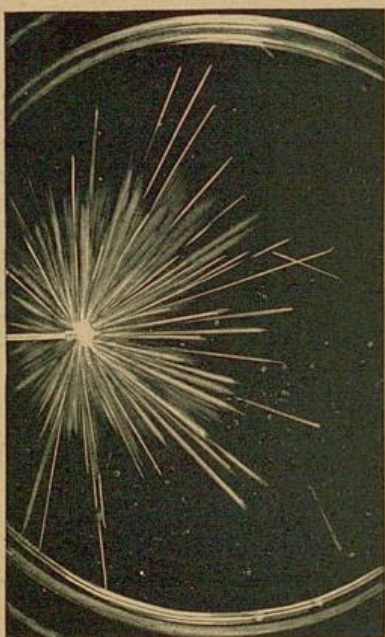


Fig. 14.



mene Photographieen der  $\alpha$ -Strahlen, die von einem Stück Radium ausgehen. Sie entsprechen durchaus dem Bilde, das man sich schon vorher aus den Experimenten über die  $\alpha$ -Strahlen gemacht hatte. Insbesondere zeigen sie, daß jeder Strahl nur eine bestimmte Reichweite besitzt, und daß er dann plötzlich aufhört. Bei näherer Betrachtung aber zeigen einige dieser  $\alpha$ -Strahlen eine besondere Eigentümlichkeit, die für unsere weiteren Ausführungen von hervorragender Wichtigkeit ist. Man sieht nämlich in Fig. 14, daß einige dieser Strahlen kurz vor ihrem Ende eine scharfe, plötzliche *Umbiegung* zeigen, daß der geradlinige Strahl an einer Stelle einen kleinen Ansatz unter einem stumpfen Winkel enthält. Nicht alle Strahlen zeigen das, sondern nur einige. In Fig. 15 sind zwei Strahlen aus Fig. 14 vergrößert dargestellt, von denen der eine die

Umbiegung zeigt, der andere nicht. Die  $\alpha$ -Teilchen stoßen bei ihrem Flug die Luftteilchen und ionisieren sie, aber dabei bleiben sie im allgemeinen auf ihrer geradlinigen Bahn. Ihre Energie ist so groß, daß sie beim Stoß an die Luftteilchen nicht von ihrer Bahn abgelenkt werden. Aber hier und da, plötzlich, erfahren einige eine starke Abbiegung und hören dann kurz darauf auf, zu existieren. Was mag die Ursache dieser merkwürdigen Erscheinung sein?

Eine andere Beobachtung, die an den  $\alpha$ -Teilchen gemacht wurde, hängt mit der eben angeführten zusammen. Wenn ein  $\alpha$ -Teilchen, also ein Heliumatom mit doppelter positiver Ladung, durch eine dünne Metallfolie hindurchgeht, so erleidet es durch diese im allgemeinen eine kleine Ablenkung von seiner Bahn, und ein dünnes Bündel von  $\alpha$ -Strahlen zeigt deswegen beim Durchgang durch eine dünne Metallfolie eine kleine Erweiterung, eine Zerstreuung. Der Grund dafür ist leicht einzusehen. Da ja die Atome der Metallfolie selbst positive und negative Ladungen enthalten, so wird das positiv geladene Heliumatom von diesen bald in dem einen Sinne, bald in dem anderen Sinne etwas abgelenkt, aber im ganzen immer nur wenig. Man hat aus den Beobachtungen der Zerstreuung berechnen können, daß die  $\alpha$ -Teilchen durch ein Goldatom im Durchschnitt nur eine Ablenkung von  $\frac{1}{200}$  Grad erfahren. Natürlich ist diese Ablenkung

je nach den Umständen, wie ein  $\alpha$ -Teilchen ein Atom trifft, bald etwas größer, bald etwas kleiner, nach den Gesetzen der Wahrscheinlichkeit, aber im Durchschnitt hat eben die Ablenkung nur die angegebene kleine Größe. Dagegen zeigte es sich nun bei diesen Beobachtungen, daß manchmal, hier und da, außerordentlich große Ablenkungen stattfanden, solche von  $90^\circ$  und darüber, Ablenkungen, die nach den Gesetzen der Wahrscheinlichkeit nie hätten beobachtet werden können, da sie nur in Millionen oder Billionen Fällen einmal hätten sich ergeben können, während sie in Wirklichkeit schon in etwa 8000 Fällen je einmal vorkamen. Diese großen Ablenkungen machen den Eindruck, als ob das  $\alpha$ -Teilchen hier und da einmal direkt von einem Atom der Metallfolie reflektiert worden wäre. Nicht bloß in Metallfolien, sondern auch in Gasen zeigte sich eine solche Zerstreuung der  $\alpha$ -Teilchen und in gewissen Fällen eben eine solche von ganz unwahrscheinlicher Größe. Man sieht, daß das genau dieselbe Erscheinung ist, wie diejenige, die bei den Wilsonschen Photographieen, Fig. 14 und 15, sich zeigt. Auch hier scheint ein  $\alpha$ -Teilchen hier und da einmal von einem Atom direkt reflektiert zu werden und zeigt dadurch die geknickte Bahn.

Beim Nachdenken über die Ursache dieser merkwürdigen Erscheinung kam Rutherford zu dem Schluß, daß diese nur in der Konstitution der Atome der zerstreuen Schicht gefunden werden könne. Die Größe dieser starken Ablenkungen hängt nämlich direkt

Fig. 15.



erdampf  
ein Stück  
erten die  
e Anzahl  
beschrie-  
eder und  
direkt die  
Moment  
er photo-  
ufgenom-



ium aus-  
on vorher  
besondere  
e besitzt,  
ung aber  
t, die für  
ist. Man  
em Ende  
ge Strahl  
inkel ent-  
g. 15 sind  
eine die

mit dem Atomgewicht der zerstreuenen Substanz zusammen. Je größer das Atomgewicht der zerstreuenen Substanz (im Quadrat) ist, um so stärker sind diese außergewöhnlichen Ablenkungen. Danach können die Ablenkungen, sowohl die gewöhnlichen kleinen, wie die seltenen großen, nur dadurch zustande kommen, daß ein  $\alpha$ -Teilchen durch ein Atom hindurchfliegt. Dann aber müssen in jedem Atom freie Lücken vorhanden sein, und die erste Folgerung daraus ist, daß der Raum, den ein Atom einnimmt, nicht vollständig mit Masse ausgefüllt sein kann.

Die merkwürdigen Erscheinungen bei den  $\alpha$ -Teilchen, nämlich ihr plötzliches Aufhören nach Durchfliegung der Reichweite, ihre gewöhnliche schwache Zerstreuung und ihre außergewöhnlich starke Ablenkung erklären sich nun, wie Rutherford zeigte, wenn man annimmt, daß jedes Atom aus einem positiv geladenen Kern von äußerst kleinem Volumen besteht und daß um diesen Kern herum in einem Abstand, der ungefähr der Größe des Atomradius entspricht, negative Elektronen vorhanden sind, so daß das ganze Atom neutral ist. Diese negativen Elektronen liegen um den Kern herum oder kreisen um ihn wie die Planeten um die Sonne. Im allgemeinen nämlich wird dann ein  $\alpha$ -Teilchen, dessen Dimensionen auch als sehr klein anzunehmen sind, irgendwo in dem Zwischenraum zwischen dem positiven Kern und den Elektronen durch das Atom durchfliegen und wird nur eine kleine Ablenkung erfahren, die aus der abstoßenden Wirkung des Kerns und der anziehenden Wirkung der Elektronen sich zusammensetzt, die aber deswegen klein bleibt, weil das  $\alpha$ -Teilchen bei seinem Flug im allgemeinen verhältnismäßig weit von dem Kern und von den Elektronen sich durch das Atom bewegt. Dagegen kann es vorkommen, daß das  $\alpha$ -Teilchen direkt auf ein negatives Elektron oder in seltenen Fällen auf den positiven Kern zufliegt. Im ersteren Fall wird es sich mit diesem vereinigen und aus einem doppelt positiv geladenen Heliumatom zu einem einfach geladenen werden, und wenn es dann noch einmal ein Elektron trifft, so wird es ein neutrales Heliumatom werden. Das wird, je nach der Geschwindigkeit des  $\alpha$ -Teilchens, bald früher, bald später eintreten. Wenn aber diese Neutralisierung seiner Ladung einmal erreicht ist, dann verliert das Heliumatom, da es nun unelektrisch geworden ist, plötzlich seine Eigenschaft, zu icnisieren, und auf diese Weise erklärt sich das plötzliche Aufhören der  $\alpha$ -Strahlen nach Durchfliegung der Reichweite.

In sehr viel selteneren Fällen — wegen der angenommenen Kleinheit des Kerns — wird es vorkommen, daß ein  $\alpha$ -Teilchen in unmittelbare Nähe des Kerns des Atoms fliegt. In diesem Fall aber wird wegen der positiven Ladungen des  $\alpha$ -Teilchens und des Kerns eine stark abstoßende Kraft auftreten und das  $\alpha$ -Teilchen wird unter einem scharfen Winkel aus seiner Bahn abgelenkt werden müssen. Auf diese Weise erklären sich also die beiden so auffallenden und zuerst so unverständlichen Erscheinungen, das plötzliche Aufhören der  $\alpha$ -Strahlen und die zuweilen auftretenden plötzlichen Umbiegungen derselben, Erscheinungen, die zunächst aller Erklärung zu spotten schienen.

Eine genaue mathematische Verfolgung dieses Vorganges, bei dem das  $\alpha$ -Teilchen durch die Ladung des Kerns abgelenkt wird, zeigt, daß

diese Ablenkung abhängen muß von der Größe der positiven Ladung des Kerns, und zwar von dem Quadrat derselben. Und indem man die Versuchsergebnisse nach dieser Theorie prüfte — wobei vollständige Übereinstimmung sich ergab — konnte man aus der beobachteten Größe der Ablenkung berechnen, wie groß die Ladung des positiven Kerns der verschiedenen Atome ist, wenn man die des Wasserstoffs gleich 1 setzt. Dabei zeigte es sich, daß bei den verschiedenen Atomen die Ladung des zentralen Kerns ungefähr die Größe des halben Atomgewichts hat, wenn man die des Wasserstoffs als Einheit nimmt. Also Helium mit dem Atomgewicht 4 zeigt eine positive Ladung des Kerns gleich 2, Kohlenstoff mit dem Atomgewicht 12 eine solche gleich 6, Sauerstoff mit dem Atomgewicht 16 eine solche gleich 8, Schwefel mit dem Atomgewicht 32 eine solche gleich 16.

Das ist zunächst ein sehr überraschendes Resultat, welches aber eine noch überraschendere Erklärung findet. Wenn man sich nämlich sämtliche Elemente nach dem periodischen System, also nach den Atomgewichten, ordnet, so ist die Stelle, welche die obengenannten Elemente einnehmen, gerade gleich der Hälfte des Atomgewichts. Es ordnen sich nämlich die ersten Elemente so:

1. Wasserstoff, 2. Helium, 3. Lithium, 4. Beryllium, 5. Bor, 6. Kohlenstoff, 7. Stickstoff, 8. Sauerstoff, 9. Fluor, 10. Neon, 11. Natrium, 12. Magnesium, 13. Aluminium, 14. Silicium, 15. Phosphor, 16. Schwefel usw.

Also die Ordnungszahl im periodischen System der Elemente ergibt sich gleich der positiven Ladung des Kerns des Atoms oder, mit anderen Worten, die Zahl der positiven Elementarladungen, welche der Kern besitzt, bestimmt seine Ordnungszahl im periodischen System, bestimmt also auch sein Atomgewicht. Denn die Reihenfolge der Elemente im periodischen System ist im allgemeinen (bis auf einige Ausnahmen) die Reihenfolge der Atomgewichte.

Daraus aber ergibt sich eine ganz neue und überraschende Betrachtungsweise. Die positive Ladung des Kernes bestimmt zugleich die Masse des Atoms. Das heißt aber nichts anderes als: die Masse des Atomes ist eine Eigenschaft, die bloß von seiner Ladung abhängt, die Masse des Atomes ist scheinbare Masse, ganz so, wie die Masse des negativen Elektrons scheinbare Masse ist.

Das ist eine Folgerung und ein Schluß von außerordentlicher Kühnheit! Sagt er doch nichts anderes aus, als daß die Masse der Körper, die wir von Jugend auf gewohnt sind als das Reellste, Tatsächlichste anzusehen, daß diese bloß ein täuschender Schein ist. Die ersten Erfahrungen, die ein Kind macht, indem es sich an einer Tischkante stößt, geben ihm den bestimmten und unauslöschlichen Eindruck der Tatsächlichkeit der Masse. Die Masse erscheint dem Kind und erscheint uns als das Deutlichste und Erste, was wir von den Körpern der Natur wissen. Und dieses Deutlichste und Erste erklären wir nun als einen Schein. Nicht daß wir die Wirkungen der Masse leugnen, wie sie das Kind an der Tischkante erfährt, oder wie sie der Soldat, der von einem Schrapnell getroffen wird, erfährt. Aber wir erklären, daß diese Wirkung nicht herrührt von einem besonderen Etwas, das wir als

Masse bezeichnen, sondern daß sie nur herrührt von den Ladungen, die der Kern des Atoms trägt, daß diese Masse also nichts ist, als eine Folge aus der Ladung, daß sie also nicht das Erste, an sich Einleuchtende, für sich Bestehende ist, sondern daß sie ein Zweites, ein aus der Ladung Folgendes, ein ohne diese Ladung nicht Bestehendes ist. Wir leugnen mit einem Wort, daß die Masse etwas Primäres, den Körpern Innewohnendes ist, wir erklären vielmehr die elektrischen Ladungen als das Primäre und die Masse nur als eine Folge aus diesen Ladungen. Wer jemals wissenschaftlich oder technisch Mechanik studiert hat, dem wird gleich zu Anfang seines Studiums die Masse der Körper als etwas aus der Erfahrung Gewonnenes hingestellt, das man nicht näher definieren kann noch will, sondern das etwas Gegebenes ist. Dieses schlechthin Gegebene leugnen wir jetzt, wir führen es zurück auf ein anderes, auf die elektrische Ladung, von der zur Zeit, als die Mechanik schon in der höchsten Blüte stand und bis zur Vollkommenheit entwickelt war, noch niemand ahnen konnte, daß sie schließlich die Ursache der Masse ist.

Wenn nun aber die Masse der Atome bloß scheinbare Masse ist, so können wir uns auch sofort einen Einblick verschaffen in die Dimension dieser positiv geladenen Kerne. Denn nach der S. 28 angeführten Formel ist

$$\text{Masse} = \frac{2}{3} \frac{\text{Quadrat der Ladung (elektrostatisch)}}{\text{Radius des Elektrons} \times \text{Quadrat der Lichtgeschwindigkeit.}}$$

Die Masse eines Wasserstoffatoms ist nach S. 11 gleich  $1,6 \cdot 10^{-24}$  g. Die Elementarladung ist nach S. 20  $4,71 \cdot 10^{-10}$  elektrostatische Einheiten. Folglich ist der

$$\text{Radius des Wasserstoffkerns} = \frac{2}{3} \cdot \frac{21 \cdot 10^{-20}}{1,6 \cdot 10^{-24} \cdot 9 \cdot 10^{20}} = 1 \cdot 10^{-16} \text{ cm.}$$

Da wir oben S. 28 gefunden hatten, daß der Radius eines Elektrons gleich  $2 \cdot 10^{-13}$  cm ist, so sehen wir, daß der positive Kern, der die ganze Masse des Wasserstoffatoms enthält, rund einen 2000mal kleineren Radius als selbst ein Elektron hat.

Denken wir uns wieder das Atom (von der Größe  $10^{-8}$  cm) so vergrößert, daß es den Raum der Erdkugel vom Radius 6350 km einnimmt, so hat der Kern des Wasserstoffatoms bloß einen Radius von 6 cm, entspricht also etwa der Größe eines Kinderballs, während ein negatives Elektron in derselben Vergrößerung dem Raum einer großen Kirche entspricht, da sein Radius 127 m beträgt.

Von derselben Größe wie der Radius eines Wasserstoffkerns ist wohl der Radius eines  $\alpha$ -Teilchens. Denn da dieses ein Heliumatom mit der doppelten Ladung ist und da die Masse des Heliumatoms 4mal so groß ist wie die des Wasserstoffatoms, so ist der Radius des Heliumkernes, also des  $\alpha$ -Teilchens, derselbe wie der des Wasserstoffkernes. Indes kann man sich davon auch eine andere Vorstellung machen, die wir später besprechen werden.

Wenn wir annehmen wollten, daß alle Atome, bis zu den schwersten, nur aus einem einzigen Kern beständen, so könnten wir ebenso die Radien aller dieser Kerne berechnen. Denn die Zahl der Ladungen der

Atome ist durch ihre Ordnungszahl im periodischen System bestimmt und ihre Masse ist durch ihr Atomgewicht gegeben. Aber da wir wenigstens von den schwersten Atomen, denen des Radiums, Thoriums, Aktiniums, Urans, bereits wissen, daß in ihnen Heliumkerne vorhanden sind, so werden wir diese und vermutungsweise die meisten anderen Atome als Konglomerate einer mehr oder minder großen Anzahl solcher Kerne ansehen müssen, von denen wir bisher allerdings nur die Heliumkerne nachweisen können, bei denen es aber möglich ist, daß sie auch andere Kerne, z. B. Wasserstoffkerne mit einfacher Ladung, enthalten könnten.

Wenn wir aber den zentralen Kern der schwereren Atome als ein Konglomerat, eine Aneinanderreihung von einfacheren Kernen ansehen müssen, so folgt noch ein weiteres daraus. Eine Anzahl positiv geladener Kerne, seien das nun Heliumkerne oder Wasserstoffkerne oder Kerne anderer Art, kann nicht ohne weiteres ein Konglomerat, eine Aneinanderreihung bilden, weil ja die verschiedenen positiven Kerne sich gegenseitig abstoßen müssen. Damit sie aneinandergereiht bleiben, ist notwendig, daß in dem Gesamtkern auch noch negative Elektronen vorhanden sind, die die Anziehung, das Aneinanderschließen der verschiedenen Einzelkerne bewirken. Wir müssen also bei den schwereren Atomen, sicher bei denen der radioaktiven Substanzen, aber vermutlich auch bei vielen anderen, den zentralen Kern aus einfacheren positiven Kernen in Verbindung mit einer mehr oder minder großen Anzahl von negativen Elektronen gebildet ansehen. Da aber durch jedes negative Elektron im Kern die gesamte positive Ladung um eine Einheit verringert wird, so müssen um so mehr positive Einzelkerne zusammentreten, um die Ordnungszahl des Elementes zu ergeben. Zum Beispiel ein Element von der Ordnungszahl 92 (Uran) würde, wenn es bloß aus Heliumkernen zusammengesetzt ist, 46 solche Kerne verlangen. Damit diese zusammenhalten, müssen noch eine Anzahl, und zwar eine gerade Anzahl negativer Elektronen dazutreten. Bei 2 negativen Elektronen brauchte man 47 Heliumkerne, bei 4 negativen Elektronen 48 Heliumkerne, usw. Aus dem Atomgewicht des Urans 238,2 und dem des Heliums 4 würde folgen, daß höchstens 59 Heliumkerne und 26 negative Elektronen im Kern des Uranatoms enthalten sein können. Man sieht, daß, um über die Konstitution der Atome Bestimmtes aussagen zu können, ebensoviele Möglichkeiten geprüft und mit den Tatsachen verglichen werden müssen, wie es in der Chemie bei den komplizierten Molekülen mit sehr vielen Atomen der Fall ist. Ein ganz neues Gebiet, die Strukturchemie der Atome, analog der Strukturchemie der Moleküle, sehen wir als eine Aufgabe der kommenden Zeit vor uns.

Was nach dieser neuen Auffassung ein Atom kennzeichnet, ein Atom von allen anderen unterscheidet, ist also der Kern, d. h. die positive Ladung, die der Kern besitzt. Ein Wasserstoffatom ist gekennzeichnet durch einen Kern mit einer Elementarladung, ein Heliumatom durch einen solchen mit zwei Elementarladungen. Um diese Kerne bewegen sich nun in Kreisen oder Ellipsen negative Elektronen herum, die aber eben nicht den Kern bilden. Ist kein solches Elektron in der Anziehung des Wasserstoffkerns, so sprechen wir nach der heutigen Ausdrucksweise von einem positiven Wasserstoffion  $H^+$ . Das ist dann eben nichts anderes als der Kern. Ist ein Elektron in seiner Anziehungssphäre, so sprechen

wir heute von einem (neutralen) Wasserstoffatom H. Ist noch ein zweites Elektron in der Anziehungssphäre, so sprechen wir von einem negativen Wasserstoffion  $H^-$ . Ebenso kann man beim Helium unterscheiden doppelt positiv geladene Heliumatome  $He^{++}$ , die nichts anderes sind als der Kern oder das  $\alpha$ -Teilchen; bei Anlegung eines oder mehrerer Elektronen werden daraus einfach positiv geladene Heliumatome  $He^+$ , dann neutrale Heliumatome He, endlich könnten negativ geladene Heliumatome  $He^-$  und  $He^{--}$  entstehen. Alle diese verschiedenen Stoffe von verschiedenem optischen und elektrischen Verhalten sind aber Helium, weil sie alle charakterisiert sind durch denselben Kern.

Man muß also bei den schwereren, zusammengesetzten Atomen unterscheiden zwischen den negativen Elektronen, die im Kern selbst sitzen, die wir als Kernelektronen bezeichnen wollen, und die den Zusammenhalt des Kernes sichern, und den negativen Elektronen, die außerhalb des Kernes um ihn herum sich bewegen, in mehr oder minder großen Abstand.

Eine Zu- oder Abnahme der letzteren ändert das Atom, den Stoff nicht. Der Stoff ist durch die positive Ladung des Kernes bestimmt. Dagegen eine Zu- oder Abnahme der Kernelektronen ändert das Atom, den Stoff, verändert ihn in einen neuen Stoff, ebenso wie eine Zu- oder Abnahme von  $\alpha$ -Teilchen in dem Kern den Stoff verändert. Verfolgen wir von diesem Gesichtspunkt aus jetzt wieder die radioaktiven Umwandlungen, so werden wir erkennen, daß wir bei den schweren Atomen, welche in dem positiven Kern noch Kernelektronen enthalten, zu einer Erweiterung unserer Begriffe genötigt sind; wir werden nämlich erkennen, daß zwei Atome, die wir nach unseren Betrachtungen als gleichartig betrachten müssen und die auch chemisch und physikalisch sich ganz gleich verhalten, daß diese doch verschiedene Atomgewichte haben können. Das widerspricht der bisherigen Auffassung des Atoms ganz direkt. Denn das Hauptmerkmal des Atoms, durch welches eine Art von Atomen von einer anderen Art unterschieden wurde, bildete eben bisher gerade das Atomgewicht.

Wenn nämlich ein Stoff mit einer bestimmten Kernladung ein  $\alpha$ -Teilchen aussendet, so vermindert sich dadurch seine Kernladung um 2 Einheiten. Wenn er aber dann ein  $\beta$ -Teilchen, d. h. ein Kernelektron, aussendet, so vermindert sich seine positive Kernladung um eine negative Einheit, d. h. seine positive Kernladung nimmt um eine Einheit zu. Und wenn er dann noch ein  $\beta$ -Teilchen aussendet, so ist seine Kernladung wieder genau dieselbe wie im Anfang, es ist also wieder dasselbe Atom, d. h. das chemisch und physikalisch gleichwertige Atom, gebildet. Und doch sind die Atomgewichte dieser beiden Stoffe, des ursprünglichen und des nach Verlust von einem  $\alpha$ -Teilchen und zwei  $\beta$ -Teilchen entstehenden, verschieden. Denn die Masse der Atome sitzt im wesentlichen in den positiven Kernladungen, also hier in den  $\alpha$ -Teilchen. Die  $\beta$ -Teilchen haben nur den 1900. Teil der Masse eines Wasserstoffatoms, tragen also nur unwesentlich zur ganzen Masse des Atoms bei. Und man sieht, der nach Ausstoßung von einem  $\alpha$ -Teilchen und zwei  $\beta$ -Teilchen gebildete Körper hat ein um 4 Einheiten kleineres Atomgewicht als der ursprüngliche. Aber

da die Kernladungen ja dieselben sind, so unterscheiden sich die beiden Körper chemisch und physikalisch nicht, sie gehören insbesondere an dieselbe Stelle des periodischen Systems. Die beiden Atome sind nicht identisch, ihre Unterschiede sind uns ja bekannt, da sie verschiedene Mengen von  $\alpha$ - und  $\beta$ -Teilchen im Kern enthalten, aber chemisch können wir sie nicht trennen.

Man nennt solche Elemente, welche die gleiche Kernladung besitzen, aber sich dabei durch die Zahl der positiven und negativen Ladungen im Kern unterscheiden, *isotope Elemente*. Sie stehen an derselben Stelle des periodischen Systems und lassen sich chemisch nicht voneinander unterscheiden, obwohl sie verschiedene Atomgewichte haben.

Solche Fälle sind bei der Untersuchung der radioaktiven Stoffe vielfach beobachtet worden und erst durch die Kerntheorie der Atome sind sie verständlich geworden.

Um das an einem Beispiel durchzuführen, gehen wir von dem gewöhnlichen Uran (Uran I) aus, das ein Atomgewicht 238,5 besitzt und dessen Kernladung, wie wir im nächsten Kapitel sehen werden, zu 92 bestimmt ist.

Die schon oben angeführte Umwandlungsreihe des Urans durch das Ionium in das Radium gibt nun folgendes, wenn wir beachten, daß das Atomgewicht eines Stoffes durch Aussendung eines  $\alpha$ -Teilchens sich um 4 Einheiten vermindert, während die Kernladung sich dabei um 2 vermindert.

Umwandlungsreihe . . . . .	Uran I $\xrightarrow{\alpha}$	Uran X $\xrightarrow{\beta}$	Brevium $\xrightarrow{\beta}$	Uran II $\xrightarrow{\alpha}$	Ionium $\xrightarrow{\alpha}$
Kernladung . . . . .	92	90	91	92	90
Atomgewicht . . . . .	238,5	234,5	234,5	234,5	230,5
Umwandlungsreihe . . . . .	Radium $\xrightarrow{\alpha}$	Radiumemanation $\xrightarrow{\alpha}$		Radium A $\xrightarrow{\alpha}$	Radium B $\xrightarrow{\beta}$
Kernladung . . . . .	88	86		84	82
Atomgewicht . . . . .	226,5	222,5		218,5	214,5
Umwandlungsreihe . . . . .	Radium C $\xrightarrow{\alpha\beta}$	Radium D $\xrightarrow{\beta}$	Radium E $\xrightarrow{\beta}$	Radium F $\xrightarrow{\alpha}$	(Rad. G ?)
Kernladung . . . . .	83	82	83	84	82
Atomgewicht . . . . .	214,5	210,5	210,5	210,5	206,5

Aus dieser Reihe erkennt man, daß die Kernzahl 84 den Elementen Radium A und Radium F (Polonium) zukommt. Dies sind also isotope Elemente. (Das Radium C ist wahrscheinlich kein einheitlicher Stoff, sondern zusammengesetzt aus  $C_1$  und  $C'$ , und Radium  $C'$  ist dann auch Isotop mit Radium A.)

Ferner kommt die Kernzahl 83 den Elementen Radium E und Radium C (vermutlich Radium  $C_1$ ) zu, es sind das also auch isotope Elemente.

Endlich besitzen die Kernzahl 82 die Elemente Radium B, Radium D und das unbekannte Endprodukt der Reihe Radium G.

Welches dieses Endprodukt ist, darüber hat man schon lange die Vermutung gehegt, daß es das Blei ist, dessen Kernladung 82 und dessen Atomgewicht 207,2 ist. Da nun das Radium B und Radium D Isotop mit dem Radium G sind, so müssen diese auch Blei sein, resp. von Blei chemisch und physikalisch mit Ausnahme des Atomgewichts nicht



zu unterscheiden sein. Und es folgt daraus, daß es Blei von verschiedenem Atomgewicht geben muß, je nach seiner Bildung, nämlich solches, welches z. B. aus Radium D besteht, und solches, welches aus Radium G besteht, deren Atomgewichte 206,5 und 210,5 sind. Diese Folgerung scheint durch neueste Versuche (von Hönigschmidt) experimentell bestätigt zu sein, bei denen man tatsächlich durch sehr genaue Messungen bei Blei verschiedener Herkunft verschiedene Atomgewichte gefunden hat. Die großen Differenzen, die theoretisch beim Atomgewicht des Bleis vorkommen könnten — zwischen 214,5 (Radium B) und 206,5 (Radium G) — können praktisch natürlich nicht vorkommen, weil das Radium B, D und G immer nur in minimalen Quantitäten vorhanden sein könnte. Wenn man noch die anderen radioaktiven Reihen hinzunimmt, so findet man, daß mit dem Blei nicht bloß Radium B, D und Radium G, sondern auch Thorium B und Aktinium B isotop sind, so daß das Atomgewicht dieser isotopen Elemente zwischen 206,5 und 214,5 liegt.

Eine vollständige Durchführung dieser Betrachtungen ist aber zurzeit noch nicht möglich, da über die aufeinanderfolgenden radioaktiven Umwandlungen in manchen Fällen die Beobachtungen noch nicht genügende Sicherheit bieten.

## Vierter Vortrag.

### Die Spektren der Röntgenstrahlen und die Kerntheorie der Atome.

Beugungserscheinungen als Beweis für die Wellennatur des Lichts. Die Beugung der Röntgenstrahlen durch Kristalle. Die Bragg'sche Auffassung der Beugungsbilder. Röntgenspektren. Die K- und L-Linien. Das Moseley'sche Gesetz der Hochfrequenzspektren. Reihenfolge der Elemente und Lücken im periodischen System.

Die Kerntheorie der Atome hat eine unerwartete, aber glänzende Bestätigung gefunden durch die neuesten Untersuchungen über Röntgenstrahlen.

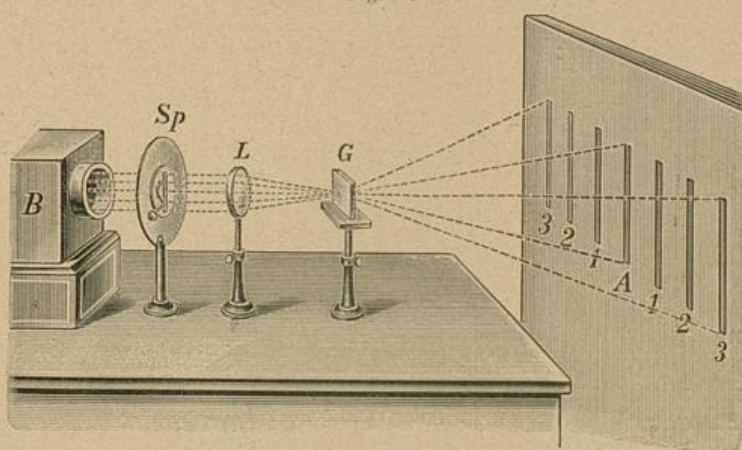
Die wissenschaftliche Erforschung der Röntgenstrahlen hat bekanntlich seit ihrer Entdeckung (1895) bis zum Jahre 1912 sehr geringe Fortschritte gemacht. Man hat schon seit ihrer ersten Entdeckung gewußt, daß es Röntgenstrahlen verschiedener Art gibt, die man im großen und ganzen als harte und weiche Röntgenstrahlen unterscheidet. Der Unterschied liegt darin, daß harte Strahlen von einem Körper, z. B. einem Stück Aluminium bestimmter Dicke, wenig absorbiert werden, während weiche Strahlen von demselben Körper stark absorbiert werden. Jede Röntgenröhre sendet sowohl harte wie weiche Strahlen in verschiedener Zusammensetzung aus, sie gibt eine inhomogene Strahlung, nicht eine Strahlung, die nur eine einzige Qualität besitzt und die man als homogene Strahlung bezeichnet. Die für den Physiker wichtigste Frage, welcher Natur die Röntgenstrahlen sind, ob sie Korpuskularstrahlen sind oder ob sie den Lichtstrahlen ähnliche Vorgänge sind, diese Frage konnte lange zu keiner direkten Entscheidung gebracht werden, obwohl allerdings die weit überwiegende Wahrscheinlichkeit für die zweite der beiden Möglichkeiten sprach. Aber wenn die Röntgenstrahlen auch manche Eigenschaften mit den Lichtstrahlen gemein zu haben schienen, so waren doch andererseits so erhebliche Verschiedenheiten zwischen beiden vorhanden, daß eine Entscheidung nicht getroffen werden konnte.

Das Licht besteht bekanntlich in einer Wellenbewegung. Es pflanzt sich durch den Raum fort mit einer Geschwindigkeit von 300 000 km pro Sekunde. Die Wellenlänge der Lichtstrahlen ist eine außerordentlich kleine, und zwar für die verschiedenen Farben eine verschiedene. Die roten Lichtstrahlen haben eine Wellenlänge von ungefähr 760 millionstel Millimeter, die violetten eine solche von ungefähr 380 millionstel Millimeter. Man drückt jetzt diese kleinen Wellenlängen zweckmäßig in einer Einheit aus, die ein zehnmillionstel Millimeter ( $10^{-8}$  cm) beträgt und die man

eine Ångström-Einheit (A.E.) nennt. So ist also die Wellenlänge der äußersten roten Strahlen etwa 7600 A.E., die der äußersten violetten etwa 3800 A.E.

Die Wellentheorie des Lichtes scheint zunächst der direkten Beobachtung zu widersprechen. Denn das Licht breitet sich, wie die einfachsten Beobachtungen zeigen, von einem leuchtenden Körper nur in Strahlen und nur geradlinig fort, und geht nicht um Hindernisse, um schattenwerfende Körper herum, während eine Wellenbewegung sich ganz anders verhält. Wenn die Wellen eines Teiches auf ein Hindernis treffen, auf einen Steinblock, der aus dem Wasser hervorragt, so sieht man von den Rändern des Blockes aus die Wellen sich hinter ihn ziehen, das Wasser hinter dem Block kommt ebenfalls in Schwingungen, die Wellen sind um ihn herumgegangen. Auch bei dem Schall, der ja eine

Fig. 16.



Wellenbewegung der Luft ist, wissen wir, daß er um Hindernisse, um Ecken herumgeht; man hört den Schall einer Schallquelle auch um Ecken herum. Bei dem Licht aber scheint das nicht der Fall zu sein. Läßt man die Lichtwellen auf einen undurchsichtigen Schirm fallen, so sieht man hinter dem Schirm nichts, es scheint das Licht nicht um die Ecken des Hindernisses herumzugehen.

Aber in Wirklichkeit scheint das nur so. Tatsächlich geht das Licht auch um Ecken herum, es wird durch Hindernisse von seiner geradlinigen Bahn abgelenkt, und gerade diese Tatsache ist der Beweis dafür, daß man das Licht trotz des gegenteiligen Anscheines als eine Wellenbewegung ansehen muß. Wegen der Kleinheit der Wellenlängen des Lichts darf man aber auch nur sehr enge, kleine Hindernisse in seinen Weg stellen, um eine merkbare Abbiegung des Lichts von seiner geraden Bahn zu erkennen. Dies geschieht in der Optik am vollkommensten durch Anwendung eines sogenannten Beugungsgitters. Ein solches wird am einfachsten so hergestellt, daß auf eine Glasplatte durch eine sehr feine Teilmaschine eine große Reihe feiner Striche in gleichen Abständen voneinander eingeritzt werden. Schon wenn 100 oder 200 Striche

pro Millimeter vorhanden sind, sieht man, daß das durchgehende Licht sehr weit von seiner geradlinigen Bahn abgelenkt wird. In Fig. 16 ist ein bekannter Versuch, wie er in der Optik ausgeführt wird, dargestellt, der diese Ablenkung, man nennt sie **Beugung des Lichts**, objektiv zeigt. Von einer Lichtquelle (Bogenlampe) B geht das Licht (das man durch ein rotes Glas, das es passieren muß, einfarbig gemacht hat) durch einen engen Spalt Sp, und von einer Linse L wird das Licht auf eine Tafel T geworfen und gibt dort ein helles, scharfes, rotes Bild A des Spaltes. Wenn man aber in den Gang der Lichtstrahlen bei G das Beugungsgitter stellt, so sieht man sofort außer dem direkten Bild des Spaltes bei A noch eine Reihe seitlicher Bilder 1, 2, 3, rechts und links vom mittleren Spaltbild. Es sind dies die abgelenkten Bilder, welche ganz direkt zeigen, daß hinter dem Gitter das Licht nicht nur geradlinig sich fortpflanzt, sondern auch nach den Seiten abgelenkt wird. Daß man dabei nur eben einzelne helle Beugungsbilder 1, 2, 3 erhält und nicht die ganze Tafel mehr oder minder hell sieht, kommt daher, daß durch die vielen Öffnungen des Gitters viele einzelne Wellenzüge zu jeder Stelle der Tafel hinein, aber wegen der Kleinheit ihrer Wellenlängen sich an den meisten Stellen durch Interferenz aufheben, und nur an einzelnen Stellen, eben den Stellen 1, 2, 3, sich gegenseitig verstärken. Die abgelenkten Bilder stehen um so weiter auseinander und um so weiter von der Mitte fort, je größer die Wellenlänge des angewendeten Lichtes ist. Wenn man daher als Lichtquelle ein gemischtfarbiges Licht anwendet, so bringt ein Beugungsgitter von selbst eine **Trennung** der verschiedenen Farben, der verschiedenen Wellenlängen hervor. Die kurzwelligen Farben geben Beugungsbilder näher am Mittelbild, die langwelligen weiter vom Mittelbild. Bei Anwendung des weißen Lichts der Sonne oder der Bogenlampe erhält man so an Stelle der einzelnen Linien 1, 2, 3 ausgedehnte **Spektre**, in denen alle Farben von Blau bis Rot sich aneinanderschließen.

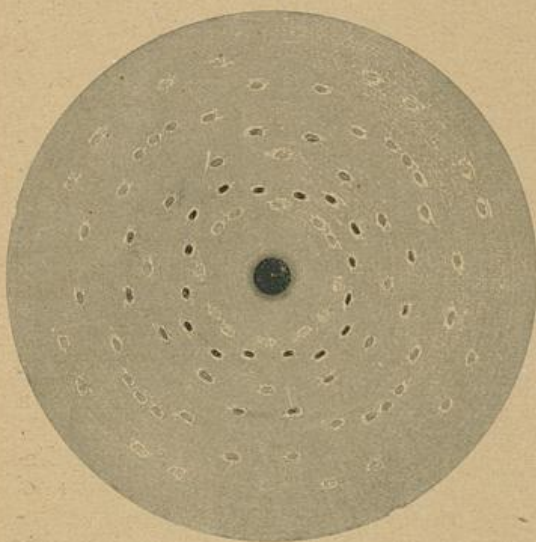
Diese Beugungserscheinungen bilden in der Optik den strengen Beweis für die Wellennatur des Lichts. Sie beweisen zu gleicher Zeit zwei für jede Wellenbewegung charakteristische Eigenschaften des Lichts, nämlich erstens die Interferenz des Lichts, d. h. die Tatsache, daß zwei Lichtwellen sich unter gewissen Umständen aufheben können, und zweitens die Abweichung von der geradlinigen Fortpflanzung, das **Um-die-Ecke-Biegen** des Lichts.

Wollte man nun die Wellennatur der Röntgenstrahlen beweisen, so war es notwendig zu zeigen, daß man durch sie auch Beugungserscheinungen erhalten kann. Aber als man selbst die feinsten Beugungsgitter anwendete, die man herstellen kann, Gitter, bei denen mehr als 1700 Striche auf den Millimeter angebracht waren, so zeigten doch die Röntgenstrahlen keine Spur von Abweichung von ihrer geradlinigen Bahn, keine Spur von Beugung. Dieses **negative Resultat** ist aber kein Beweis gegen die Wellennatur der Röntgenstrahlen, sondern es konnte daran liegen, daß die Wellenlängen der Röntgenstrahlen noch außerordentlich viel kleiner sind, als die der Lichtwellen. Die Öffnungen der Beugungsgitter müssen, damit das Gitter gut wirksam sei, so eng sein, daß sie höchstens etwa 20 bis 50 Wellenlängen umfassen, je enger sie sind, desto besser. Wenn also die Wellenlänge der Röntgenstrahlen 1000mal kleiner sein sollte, als die

des violetten Lichts, so sind die Gitteröffnungen viel zu groß, um merkliche Beugung bei ihnen hervorzubringen. Man müßte vielmehr Gitter herstellen, bei denen nicht 1000 bis 2000, sondern 1000 000 Striche auf den Millimeter kommen. Aber das ist eine Aufgabe, die mechanisch un- ausführbar ist.

Hier aber ist durch eine vortreffliche Idee von Prof. Laue ein unerwarteter und zum Ziele führender Fortschritt gemacht worden. Statt den unmöglichen Versuch zu unternehmen, Gitter von der gewünschten und notwendigen Feinheit künstlich herzustellen, kam Laue auf die Idee, daß die Natur ja selbst Gitter von dieser Feinheit uns zur Verfügung stellt. In den Kristallen nämlich ordnen sich die Moleküle der Körper gitterförmig an, es bestehen in ihnen abwechselnd Schichten,

Fig. 17.



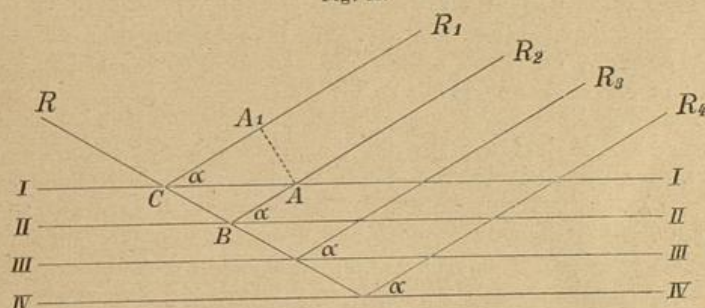
welche von Molekülen eingenommen werden, und zwischen diesen Schichten sind freie Räume, und zwar ist der Abstand dieser Schichten voneinander von der Größe  $8 \cdot 10^{-8}$  cm, also 8 A.E., mithin gerade von der Größe, wie wir sie oben für notwendig erklärt hatten, um selbst 1000mal kleinere Wellen als die des sichtbaren Lichts zu beugen. Der Versuch mit solchen Kristallen glückte nun vollkommen, es gelang tatsächlich, Beugungserscheinungen zu erhalten, wenn man ein dünnes Bündel von Röntgenstrahlen durch eine Kristallplatte

hindurchgehen ließ. Fig. 17 zeigt ein so erhaltenes Beugungsbild, bei welchem die Röntgenstrahlen durch einen Kristall aus Zinkblende hindurchgeschickt wurden und dann auf eine photographische Platte fielen. Die Mitte der Figur, der starke schwarze Fleck, zeigt den direkten Durchstoßungspunkt des angewendeten Bündels von Röntgenstrahlen, der bei nur gradliniger Fortpflanzung allein vorhanden sein müßte. Aber außer diesem zentralen Fleck sieht man noch eine große Anzahl anderer und zwar symmetrisch verteilter Flecke von geringerer oder größerer Dunkelheit. Diese Flecke entstehen durch die Beugung in dem Kristallgitter und zeigen dieselbe Symmetrie, wie sie die benutzte Kristallfläche zeigt. Der Zinkblendekristall hat nämlich in derjenigen Richtung, in der die Röntgenstrahlen durch ihn gesendet wurden, eine sogenannte vierzählige Achse. Das heißt, wenn man den Kristall um diese Achse um  $360^\circ$  herumdreht, so erhält man viermal, je bei einer Drehung um  $90^\circ$ , Lagen, die einander ganz gleichwertig sind. Und ebenso sieht man in dem Beugungsbild, daß zu jedem Fleck noch drei weitere gleiche gehören,

die um je  $90^\circ$  voneinander abstehen. Die Symmetrie des Kristalls spiegelt sich also in dem Beugungsbild wider. Dieser Umstand hat bewirkt, daß diese Interferenzen von Röntgenstrahlen bereits eine äußerst wichtige und erfolgreiche Methode der Kristallographie bilden, durch welche die nähere Konstitution, die Anordnung der Atome im Kristall, bis ins einzelne untersucht werden kann. Für die Physik aber war eine andere Folgerung aus dieser Erscheinung von besonderer Wichtigkeit; man konnte nämlich aus dieser Figur die Wellenlänge der angewendeten Röntgenstrahlen bestimmen. Es zeigt sich, daß die verschiedenen Beugungsflecke durch Wellenlängen verschiedener Größe gebildet werden, und die Berechnung ergab, daß in den angewendeten Röntgenstrahlen verschiedene Wellenlängen von 0,3 bis zu 1,5 A.E. enthalten sind. Diese Wellen sind 600- bis 3000mal kleiner als die Wellenlängen des äußersten Ultraviolett, das man bisher erzeugen und messen konnte, und das noch eine Wellenlänge von 1000 A.E. besitzt.

Das Auftreten dieser Interferenzerscheinungen beim Durchgang der Röntgenstrahlen durch Kristalle läßt sich in einer sehr bequemen und weiter-

Fig. 18.



führenden Art verstehen durch eine Betrachtungsweise, die zuerst von Bragg eingeführt wurde. In einem Kristall nämlich haben wir ein ganzes Netz von einander durchschneidenden Ebenen, von denen jede mit Atomen besetzt ist. Und zwar ist eine Reihe von parallelen Ebenen immer in bestimmter Weise mit Atomen besetzt, eine andere Reihe von parallelen Ebenen, die schief zu der ersten liegt, ist in anderer Weise mit Atomen besetzt, eine dritte Reihe von parallelen Ebenen ist wieder anders besetzt usw. Wir wollen jede solche Reihe von gleichartigen parallelen Ebenen als ein System von Netzebenen bezeichnen. Wir wollen in Fig. 18 annehmen, daß die Ebenen I, II, III, IV ein solches System von Netzebenen darstellen und daß ein paralleles Bündel von Röntgenstrahlen  $R_1, R_2, R_3, R_4$  von bestimmter Wellenlänge  $\lambda$  auf diese Netzebenen nahezu streifend, also unter einem sehr kleinen Winkel  $\alpha$  (den man den Glanzwinkel nennt) auffällt. Dann vernichten sich die Wellen durch Interferenz im allgemeinen gegenseitig. Nur wenn die Wellenlänge der Röntgenstrahlen in einer ganz bestimmten Beziehung zu dem Glanzwinkel steht, vernichten sie sich nicht, sondern verstärken sich, und zwar so, daß dann ein Bündel Röntgenstrahlen in der Richtung  $R$  den Kristall verläßt, also in solcher Richtung, als ob das Strahlen-

bündel  $R_1$  bis  $R_4$  von den Netzebenen direkt reflektiert worden wäre. Diese Verstärkung tritt dann ein, wenn der Unterschied der Wege zweier aufeinanderfolgender Strahlen (der Gangunterschied) eine ganze Wellenlänge beträgt (oder auch zwei, drei ganze Wellenlängen). Der Gangunterschied der Strahlen  $R_2$  und  $R_1$  ist aber gleich  $AB + BC - A_1C$ . Dieser Weg muß gleich einer Wellenlänge sein. (Die Beziehung, die sich daraus zwischen der Wellenlänge  $\lambda$  und dem Glanzwinkel  $\alpha$  und dem Abstand der parallelen Netzebenen  $d$  ergibt, ist einfach die, daß  $\lambda = 2d \sin \alpha$  ist). Daraus folgt nun aber weiter, daß wenn das unter dem Winkel  $\alpha$  auffallende Strahlenbündel nicht nur eine einzige Wellenlänge besitzt, also nicht homogen ist, sondern aus vielen Wellenlängen gemischt ist, daß dann in der Richtung  $R$  nur ein Strahl des Bündels herausgeht, nämlich derjenige, der gerade die bestimmte Wellenlänge  $\lambda$  besitzt. Ist eine solche Wellenlänge in dem auffallenden Bündel nicht enthalten, so wird von diesen Netzebenen unter diesem Glanzwinkel überhaupt nichts reflektiert. Ist diese Wellenlänge in dem Bündel enthalten, so wird nur der Strahl mit dieser Wellenlänge reflektiert. Das sagt aber aus, daß der Kristall aus einem Gemisch von Wellenlängen unter diesem Winkel eine bestimmte Wellenlänge absondert und diese reflektiert, daß er also aus den inhomogenen Röntgenstrahlen eine homogene, oder wie man es nennt, monochromatische Strahlung in der Richtung  $R$  hervorbringt.

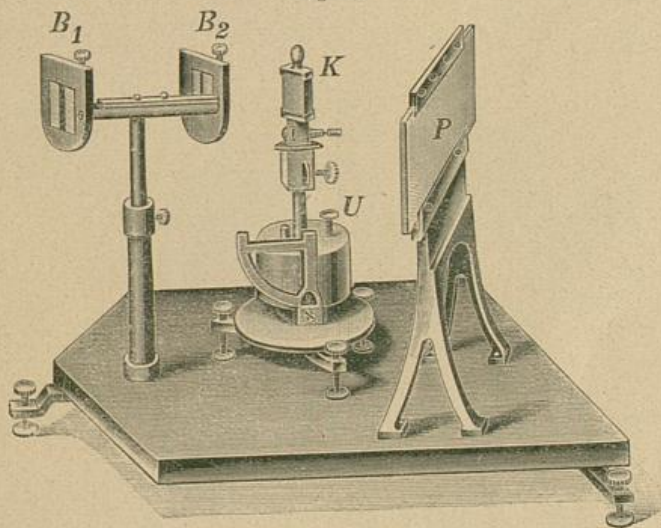
Was für den einen Glanzwinkel  $\alpha$  gilt, daß er aus den inhomogenen Röntgenstrahlen denjenigen von der Wellenlänge  $\lambda$  aussondert und ihn reflektiert, das gilt bei einem anderen Glanzwinkel  $\alpha^1$  für eine andere Wellenlänge  $\lambda^1$ . Daraus folgt aber, daß wenn ein nicht paralleles, sondern divergentes Bündel Röntgenstrahlen von verschiedenen Wellenlängen auf einen solchen Kristall auftrifft, daß dann der Kristall die einzelnen Wellenlängen nach verschiedenen Richtungen hin reflektiert, daß er also durch Reflexion einen Fächer von Strahlen bildet, von denen jeder eine ganz bestimmte Wellenlänge hat. Denn die nicht parallelen Strahlen bilden verschiedene Glanzwinkel mit den Netzebenen und unter jedem dieser Winkel wird dann ein Strahl von anderer Wellenlänge reflektiert. Der Kristall zerlegt also das auftreffende inhomogene Strahlenbündel in ein Spektrum von Röntgenstrahlen, so daß nach jeder Richtung nur ein Strahl von ganz bestimmter Wellenlänge reflektiert wird. So wie wir in der Optik durch ein Prisma das weiße auffallende Licht in ein Spektrum zerlegen, indem jede Farbe, jedes Licht von anderer Wellenlänge, unter anderem Winkel gebrochen wird und die Farben dadurch getrennt werden, so zerlegt ein Kristall eine auf ihn auffallende inhomogene Röntgenstrahlung von verschiedenen Wellenlängen in ein Röntgenspektrum, indem durch Reflexion die einzelnen Strahlen verschiedener Wellenlänge getrennt werden.

Damit haben wir aber eine Methode der Röntgenspektroskopie gewonnen, eine Methode, welche nicht bloß erlaubt, die Röntgenstrahlen verschiedener Wellenlänge zu trennen, sondern welche auch erlaubt, diese Wellenlängen direkt zu messen. Man braucht bloß bei einem bestimmten Kristall, bei dem der Abstand der Netzebenen durch kristallo-

graphische Betrachtungen bekannt ist, den Glanzwinkel für jeden Strahl zu bestimmen, um daraus die Wellenlänge zu erhalten.

Solche Messungen hat nach Bragg zuerst der ausgezeichnete junge englische Physiker Moseley ausgeführt, der als ein Opfer des Weltkrieges in Gallipoli gefallen ist. Es zeigte sich bei diesen Untersuchungen, daß, wie erwähnt, jede Röntgenröhre eine inhomogene, gemischte Strahlung aussendet. Und zwar erhält man ein Spektrum, welches alle möglichen Wellenlängen innerhalb gewisser Grenzen enthält, welches also dem Spektrum eines weißen Körpers entspricht. Außerdem aber erhält man in dem Spektrum bestimmte, sehr starke einzelne Linien, also ganz bestimmte Wellenlängen. Diese bestimmten, starken Wellenlängen hängen

Fig. 19.



ab von der Natur des Metalles, aus dem die Antikathode der Röhre besteht. Man bezeichnet sie als die charakteristische Strahlung des Metalles der Antikathode. Diese scharfen Linien der charakteristischen Strahlung sind es ganz besonders, welche bisher der Messung und Untersuchung unterworfen wurden.

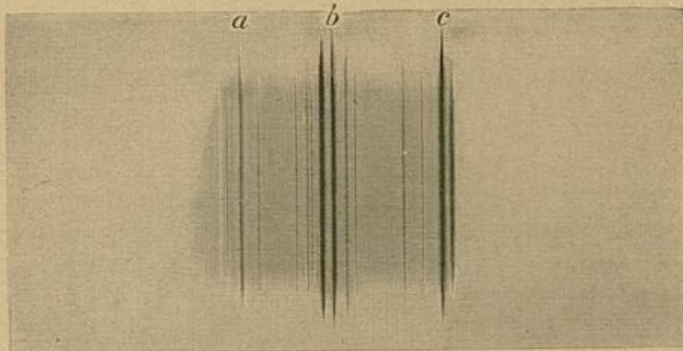
Bei der Ausführung dieser Messungen hat es sich als vorteilhaft erwiesen, den Kristall nicht fest aufzustellen, weil dabei Unregelmäßigkeiten der reflektierenden Fläche störend wirken, sondern ihn vielmehr um seine Achse langsam zu drehen, wodurch die störenden Einflüsse der Fläche sich im Mittel aufheben. Die reflektierten Strahlen fallen auf eine photographische Platte, die sich in einer Kassette befindet. Eine Anordnung des Apparates, wie sie von Siegbahn für diese Messungen ausgeführt wurde, zeigt Fig. 19. Auf einer Marmorplatte steht eine Säule, die zwei Blenden  $B_1$  und  $B_2$  aus Blei trägt, deren spaltförmige Öffnung verkleinert oder vergrößert werden kann. Durch diese Spalte dringen die Röntgenstrahlen auf die Kristallplatte  $K$ , die durch ein Uhrwerk  $U$  langsam hin und her gedreht wird, und bei welcher Vorrichtungen zum genauen



Justieren angebracht sind. Das reflektierte Spektrum fällt auf eine Kassette P, die die photographische Platte trägt. Die Spektren, die man so erhält, werden z. B. durch Fig. 20 dargestellt, bei der man auf dem allgemein verdunkelten Untergrund eine Reihe von scharfen Linien sieht, eben die charakteristischen Linien, und zwar hier von einer Platinantikathode.

Jedes Metall, als Antikathode einer Röhre genommen, zeigt solche Linien von bestimmter Wellenlänge. Die Versuche haben nun ergeben, daß die Wellenlängen dieser charakteristischen Linien um so kürzer werden, je größer das Atomgewicht des betreffenden Metalles ist. Und dabei hat es sich weiter gezeigt, daß bei den leichteren Elementen, vom Natrium bis zum Neodym, die Linien alle denselben Bau haben. Man nennt sie die K-Linien oder das K-Spektrum. Sie bestehen nämlich immer aus fünf Linien, die man als  $K\alpha_1$ ,  $K\alpha_2$ ,  $K\beta_1$ ,  $K\beta_2$  und  $K\gamma$  bezeichnet. Unter diesen

Fig. 20.



sind die Linien  $K\alpha_1$  und  $K\alpha_2$ , die nahe beieinander liegen, am stärksten. Ebenso bilden die  $\beta$ -Linien eine enge Doppellinie und bei einigen Stoffen ist auch die  $\gamma$ -Linie doppelt. Diese Linien sind bei allen genannten Stoffen vorhanden. Besteht die Kathode aus einer Legierung, z. B. Messing, so zeigen sich die Linien der beiden Bestandteile, des Kupfers und des Zinks, zusammen auf der Platte. Ja wenn die Antikathode bloß mit dem Salz eines Metalles bedeckt ist, so zeigen sich die Linien der betreffenden Bestandteile, also z. B. bei Chlorkalium die Linien des Chlors und die des Kaliums.

Bei den schwereren dieser Elemente, vom Zink an, findet man aber noch ein zweites von dem ersten getrennten Liniensystem von bedeutend größeren Wellenlängen, als sie die K-Linien haben. Man bezeichnet diese Linien als das L-Spektrum. Es besteht aus 10 bis 14 Linien, von denen wieder die stärkste als die  $L\alpha_1$ -Linie bezeichnet wird. Auch hierbei nimmt die Wellenlänge der Linien mit steigendem Atomgewicht der Elemente ab. Bei den schwersten Elementen vom Neodym an bis zum Uran ist nur die L-Reihe bisher gefunden worden, nicht die K-Reihe. Dagegen ist bei den allerschwersten Elementen, vom Gold bis zum Uran, ein noch langwelligeres Spektrum, das M-Spektrum, gefunden worden, welches aus 7 Linien besteht.

Die Wellenlänge der  $K\alpha_1$ -Linie für einige Elemente ist in der folgenden Tabelle angegeben, in welcher außerdem noch die Atomgewichte der betreffenden Elemente und die Nummer der Elemente im periodischen System, die Ordnungszahl, verzeichnet ist.

Ordnungszahl	Element	Atomgewicht	Wellenlänge von $K\alpha_1$ in $10^{-8}$ cm
11	Natrium . . . . .	23,00	11,951
15	Phosphor . . . . .	31,04	6,168
20	Calcium . . . . .	40,07	3,355
25	Mangan . . . . .	54,93	2,093
30	Zink . . . . .	65,37	1,437
35	Brom . . . . .	79,92	1,035
40	Zirkon . . . . .	90,6	0,788
45	Rhodium . . . . .	102,9	0,615
50	Zinn . . . . .	118,7	0,487
55	Cäsium . . . . .	132,81	0,398
60	Neodym . . . . .	144,3	0,330

Statt der Wellenlänge führen wir besser die Schwingungszahl ein, welche um so größer ist, je kleiner die Wellenlänge ist. Man erhält die Schwingungszahl (d. h. die Zahl der Schwingungen pro Sekunde) aus der Wellenlänge, wenn man mit der Wellenlänge in die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Ätherbewegungen, welche gleich  $3 \cdot 10^{10}$  cm/sek ist, hineindividiert. Mit wachsendem Atomgewicht werden die Wellenlängen der K-Linien immer kleiner, also werden die Schwingungszahlen der K-Schwingungen immer größer, und zwar zeigt es sich, daß die Quadratwurzeln aus den Schwingungszahlen ungefähr ebenso wachsen wie die Atomgewichte.

Moseley hat aber zuerst erkannt, daß ein sehr einfacher und glatter Zusammenhang nicht zwischen der Schwingungszahl (ihrer Quadratwurzel) und dem Atomgewicht, sondern zwischen der Schwingungszahl (ihrer Quadratwurzel) und der Ordnungszahl der Elemente besteht.

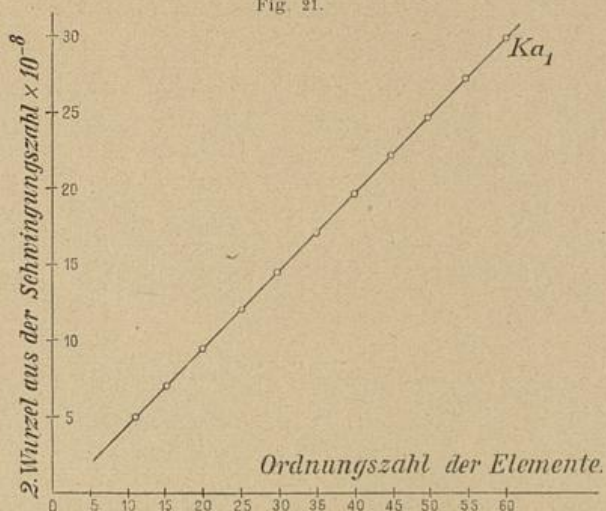
In der folgenden Tabelle sind die Schwingungszahlen  $\nu$  für die obigen Substanzen angegeben und zugleich die Quadratwurzeln aus den Schwingungszahlen.

#### $K\alpha_1$ -Strahlung.

Ordnungszahl	Element	Atomgewicht	Schwingungszahl $\nu$ von $K\alpha_1$	Quadratwurzel aus der Schwingungszahl
11	Natrium . . . . .	23,00	$0,2510 \cdot 10^{18}$	$5,010 \cdot 10^8$
15	Phosphor . . . . .	31,04	0,4863 "	6,973 "
20	Calcium . . . . .	40,07	0,9514 "	9,456 "
25	Mangan . . . . .	54,93	1,433 "	11,97 "
30	Zink . . . . .	65,37	2,088 "	14,44 "
35	Brom . . . . .	79,92	2,898 "	17,03 "
40	Zirkon . . . . .	90,6	3,808 "	19,51 "
45	Rhodium . . . . .	102,9	4,878 "	22,08 "
50	Zinn . . . . .	118,7	6,160 "	24,82 "
55	Cäsium . . . . .	132,81	7,537 "	27,45 "
60	Neodym . . . . .	144,3	9,090 "	30,15 "

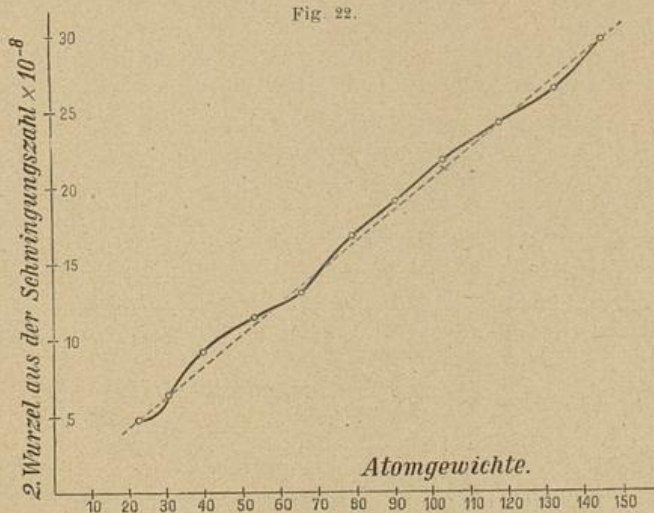
Die einfache Abhängigkeit der Schwingungszahl von der Ordnungszahl ergibt sich sofort aus Fig. 21. Trägt man nämlich in horizontaler Richtung die Ordnungszahlen ein und in vertikaler Richtung die Quadrat-

Fig. 21.



wurzeln aus den Schwingungszahlen, so liegen alle diese Punkte, die man so erhält, genau und ganz scharf auf einer geraden Linie.

Fig. 22.



Das sagt aus: Die Quadratwurzel aus den Schwingungszahlen hängt linear zusammen mit der Ordnungszahl der Elemente.

Sucht man ebenso die Beziehung zwischen der Quadratwurzel aus der Schwingungszahl und dem Atomgewicht herzustellen, so erhält man

die Kurve Fig. 22, welche zwar im allgemeinen denselben Verlauf hat, welche aber an verschiedenen Stellen deutliche Abweichungen von der geraden Linie zeigt, Abweichungen, die größer sind, als der Genauigkeit der Messungen entspricht.

Man kann das auch direkt ohne die Kurven aus den obigen Zahlen sehen. Bilden wir nämlich aus obiger Tabelle (S. 55) z. B. die Quotienten der Differenzen nach dem Schema

$$\frac{\text{Cäsium—Phosphor}}{\text{Brom—Phosphor}},$$

so geben diese für die Wurzeln aus den Schwingungszahlen

$$\frac{20,477}{10,057} = 2,036,$$

für die Ordnungszahlen

$$\frac{40}{20} = 2,000$$

und für die Atomgewichte

$$\frac{101,77}{48,88} = 2,082.$$

Die ersten Quotienten stimmen also besser überein als die letzteren. Der Unterschied ist nicht groß, aber deutlich vorhanden.

Daraus ziehen wir also den Schluß: die Quadratwurzeln aus den Schwingungszahlen der Röntgenschwingungen hängen direkt und einfach ab von der Ordnungszahl der Elemente, nicht von ihrem Atomgewicht.

Dieser Schluß gilt aber nicht bloß für die K-Strahlung, sondern auch für die weichere L-Strahlung, die bis zu den Elementen von höchstem Atomgewicht verfolgt werden konnte. In der folgenden Tabelle sind ebenso für eine Reihe von Elementen die Ordnungszahlen, Atomgewichte, Wellenlängen der Linie  $L\alpha_1$ , ihre Schwingungszahlen und die Wurzeln daraus angegeben.

#### $L\alpha_1$ -Strahlung.

Ordnungszahl	Element	Atomgewicht	Wellenlänge von $L\alpha_1$	Schwingungszahl	Quadratwurzel aus der Schwingungszahl
30	Zink . . . .	65,37	$12,346 \cdot 10^{-8}$	$0,2430 \cdot 10^{18}$	$4,930 \cdot 10^8$
35	Brom . . . .	79,92	8,391 "	0,3575 "	5,978 "
40	Zirkon . . . .	90,6	6,083 "	0,4932 "	7,023 "
45	Rhodium . . . .	102,9	4,596 "	0,6527 "	7,986 "
50	Zinn . . . . .	118,7	3,594 "	0,8346 "	9,135 "
55	Cäsium . . . .	132,81	2,891 "	1,037 "	10,19 "
60	Neodym . . . .	144,3	2,369 "	1,267 "	11,27 "
74	Wolfram . . . .	184,0	1,471 "	2,040 "	14,28 "
80	Quecksilber . . . .	200,6	1,240 "	2,420 "	15,55 "
82	Blei . . . . .	207,2	1,175 "	2,554 "	15,98 "
88	Radium . . . .	226,0	1,010 "	2,970 "	17,23 "
90	Thorium . . . .	232,15	0,957 "	3,135 "	17,71 "
92	Uran . . . . .	238,2	0,911 "	3,293 "	18,14 "

Daß auch in diesen Zahlen ein glatter, linearer Zusammenhang der Quadratwurzeln aus den Schwingungszahlen mit den Ordnungszahlen, nicht mit dem Atomgewicht besteht, können wir ebenso erkennen, wenn wir z. B. die Quotienten der Differenzen nach dem Schema bilden:

$$\frac{\text{Thorium—Zink}}{\text{Neodym—Zink.}}$$

Das gibt für die Wurzeln aus den Schwingungszahlen:

$$\frac{12,78}{6,34} = 2,016,$$

für die Ordnungszahlen

$$\frac{60}{30} = 2,000$$

und für die Atomgewichte

$$\frac{166,78}{78,93} = 2,113.$$

Die Abweichungen der ersten beiden Quotienten voneinander betragen bloß  $\frac{1}{2}$  Proz., dagegen die der ersten und dritten 5 Proz.

Das beweist wieder, und zwar hier noch schärfer, daß die Wurzeln aus den Schwingungszahlen in linearer Weise von den Ordnungszahlen abhängen.

Das in dieser Weise ausgesprochene Gesetz nennt man das Moseleysche Gesetz der Hochfrequenzspektra. Man bezeichnet nämlich die Röntgenspektren wegen ihrer sehr großen Schwingungszahlen als Hochfrequenzspektra. Das Moseleysche Gesetz sagt aus: die Quadratwurzeln der Schwingungszahlen sind lineare Funktionen der Ordnungszahlen der Elemente. Es drückt sich durch die einfache Gleichung aus, wenn  $\nu$  die Schwingungszahl,  $N$  die Ordnungszahl und  $a$  und  $c$  Konstanten bedeuten,

$$\sqrt{\nu} = c(N - a).$$

Diese Ergebnisse sind nun ein nachträglicher, aber sehr überzeugender Beweis für die Rutherford'sche Kerntheorie der Atome. Die Schwingungen der Röntgenstrahlen hängen wesentlich ab von den Ordnungszahlen der Elemente, also von den Kernen, die Schwingungszahlen wachsen in regelmäßiger Weise mit der Ladung des Kerns.

Von einer periodischen Änderung der Schwingungszahlen mit wachsender Kernzahl, wie bei dem chemischen Verhalten der Elemente, ist keine Rede. Daraus folgt, daß die in der Chemie auftretenden Periodizitäten, die im periodischen System der Elemente ihren Ausdruck gefunden haben, nicht abhängen können von der Kernladung, sondern nur von der Anordnung der äußeren Elektronen, von der wir bisher noch nicht gesprochen haben.

Aber aus diesem einfachen gesetzmäßigen Verhalten der Hochfrequenzschwingungen haben wir nun eine unwidersprechliche Methode gewonnen, erstens, um die Reihenfolge der Elemente im periodischen System, wo sie etwa zweifelhaft ist, genau festzustellen, zweitens um bestimmt zu sagen, wo etwa noch Lücken, noch unentdeckte Elemente im System

enthalten sind, und endlich, um namentlich die große Lücke, die bisher zwischen dem Cer und dem Tantal klaffte, in korrekter Weise auszufüllen.

Was erstens die Reihenfolge der Elemente betrifft, so waren schon lange einige Fälle bekannt, in denen die Anordnung nach den Atomgewichten nicht die richtige Stellung gab. Die drei Elemente Eisen, Kobalt und Nickel ordnen sich nach ihrem chemischen Verhalten in der angeführten Reihenfolge. Aber die Atomgewichte sind 55,84; 58,97; 58,68, so daß danach das Nickel vor das Kobalt gehört. Die Messung der Wellenlängen für  $K\alpha_1$  ergab für Eisen den Wert 1,928, für Kobalt 1,781, für Nickel 1,653 (A.E.), so daß unzweifelhaft die Kernladung des Nickels um 1 höher ist als die des Kobalts, die richtige Reihenfolge der Elemente im System hier also nicht die der Reihenfolge der Atomgewichte ist.

Ebenso hatte man schon lange erkannt, daß das Tellur mit dem Atomgewicht 127,5 in die sechste Kolumne des Systems (zu Schwefel, Selen) gehört, während das Jod mit dem Atomgewicht 126,92 in die siebente Kolumne (zu Chlor, Brom) gehört, also trotz niedrigeren Atomgewichts nach dem Tellur zu stehen kommt. Die Röntgenspektren geben für  $K\alpha_1$  bei Tellur 0,456, bei Jod 0,437 (A.E.) als Wellenlängen, so daß dadurch bewiesen ist, daß die richtige Reihenfolge hier auch nicht mit der Reihenfolge der Atomgewichte übereinstimmt. Ebenso steht unzweifelhaft das Argon (Atomgewicht 39,88) vor dem Kalium (Atomgewicht 39,10).

Die größte Lücke bestand im periodischen System lange zwischen dem Cer mit dem Atomgewicht 140,25 und dem Tantal mit dem Atomgewicht 181,5, eine Lücke, in welche die seltenen Erden hineinfelen, von der man aber nicht einmal wußte, mit wie vielen Elementen sie ausgefüllt werden mußte. Die Untersuchung der L-Spektren gab sofort die Antwort auf die letztere Frage. Denn das Cer entsprach nach der linearen Beziehung unzweifelhaft der Ordnungszahl 58 und das Tantal ebenso unzweifelhaft der Ordnungszahl 73, so daß zwischen diese beiden Elemente noch 14 andere gehörten. Von diesen waren das Praseodym, Neodym, Samarium, Terbium, Holmium, Erbium, Tulium, Gadolinium schon lange bekannt, andere (das Europium, Dysprosium, Lutetium, Aldebaranium) sind unterdessen gefunden worden, zwei sind noch unbekannt.

Es ist also nun durch diese Untersuchungen festgestellt, daß vom Wasserstoff bis zum Uran 92 verschiedene Elemente und nicht mehr vorhanden sind, abgesehen von den kurzlebigen Isotopen (S. 45), die an derselben Stelle wie einzelne von den bekannten langlebigen Elementen stehen. Bei der Anordnung dieser Elemente im periodischen System machen die seltenen Erden eine Schwierigkeit. Sie sind eine Klasse für sich, die sich der sonst im periodischen System zeigenden Gesetzmäßigkeit nicht einfügt. Außer zwei unbekanntem seltenen Erden Nr. 61 und 72 sind bloß vier Stoffe, 43, 75, 85 und 87, unbekannt. Die radioaktiven Stoffe 84 Polonium, 86 Emanium, 89 Aktinium, 91 Brevium sind vermutungsweise eingefügt. Danach ergibt sich das periodische System mit den 9 Kolumnen, von denen die Kolumnen 0 und 8 einfache, die übrigen zweifache Anordnungen zeigen, folgendermaßen (nach Fajans), wobei jedes Element seine Ordnungsnummer nebenangesetzt und darunter sein Atomgewicht ( $O = 16$ ) enthält.

	I		II		III		IV		V		VI		VII		VIII		
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b			
1 H 1,008	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										
—	11 Na 23,00	12 Mg 24,32	13 Al 27,1	14 Si 28,3	15 P 31,04	16 S 32,07	17 Cl 35,46										
—	19 K 39,10	20 Ca 40,07	21 Sc 44,1	22 Ti 48,1	23 V 51,0	24 Cr 52,0	25 Mn 54,93								26 Fe 55,84	27 Co 58,97	28 Ni 58,68
—	29 Cu 63,57	30 Zn 65,37	31 Ga 69,6	32 Ge 72,5	33 As 74,96	34 Se 79,2	35 Br 79,92										
—	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 —								44 Ru 101,7	45 Rh 102,9	46 Pd 106,7
—	47 Ag 107,88	48 Cd 112,40	49 In 114,8	50 Sn 118,7	51 Sb 120,2	52 Te 127,5	53 J 126,92										
—	55 Cs 132,81	56 Ba 137,37	57 La 139,0	58 Ce 140,25	59 Pr 140,6	60 Nd 144,3	61 —	62 Sm 150,4	63 Eu 152,0	64 Gd 157,3							
—				65 Tb 159,2	66 Dy 162,5	67 Ho 163,5	68 Er 167,7	69 Tu 168,5	70 Ad 173,8	71 Lu 175,0	72 —						
—						73 Ta 181,5		74 W 184,0							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 207,10	83 Bi 208,0	84 Po (210,0)											
—	87 —	88 Ra 226,4	89 Ac (227)	90 Th 232,4	91 Bv 123,4	92 U 238,5											

Nachdem so die Kerntheorie der Atome eine sehr feste Stütze in der Beobachtung der Hochfrequenzspektren gewonnen hat, werden wir mit großem Vertrauen an sie herangehen können, um ihre weiteren Folgerungen zu untersuchen.

Damit ein Atom neutral, unelektrisch sei, wie es die Atome der Körper im allgemeinen sind, muß jedes Atom ebensoviel freie negative Elektronen außerhalb des Kernes besitzen, als es positive Elementarladungen im Kern hat. Wir werden also erwarten müssen, daß ein neutrales Atom des Wasserstoffs 1 Elektron, das des Heliums 2 usw., endlich das des Urans 92 negative Elektronen im Außenraum besitzt. Es kann aber ein Atom auch weniger oder mehr von solchen negativen Elektronen an sich haben. Im ersteren Fall ist es dann ein positives Atomion mit einer oder mehreren freien positiven Elementarladungen, im letzteren Fall ein negatives Atomion mit einer oder mehreren freien negativen Ladungen. Aus der Valenzwertigkeit besitzen, daß die Atome chemisch eine gewisse Wertigkeit besitzen, daß sie ein-, zwei-, drei-, vier- oder mehrwertig sind, werden wir schließen dürfen, daß diese Elektronen im Außenraum sich noch verschieden verhalten, daß im allgemeinen die meisten von ihnen unter normalen Umständen ziemlich fest mit dem Kern zusammenhängen, daß aber einzelne von ihnen, nämlich bei einwertigen Stoffen eines, bei zweiwertigen zwei, bei dreiwertigen drei usw., leichter an den Kern gefesselt sind, so daß sie leichter von ihm getrennt oder leichter ihm zugefügt werden können. Denn mit diesen Valenzelektronen verbinden sich die Atome zu Molekülen. Da z. B. ein Kupferion positiv zweiwertig ist, so werden wir annehmen dürfen, daß es nicht die 29 negativen Elektronen enthält, die das Atom im neutralen Zustand enthalten würde, sondern nur 27, und daß die zwei fehlenden Elektronen eben seine Zweiwertigkeit bedingen. Umgekehrt wird das negative zweiwertige Sauerstoffion außer den 8 Elektronen, die das neutrale Sauerstoffatom hat, noch leicht 2 negative Elektronen in seinen Verband hineinnehmen können. Jedoch über die Art und Weise, wie die negativen Elektronen, die um den Kern herumliegen oder kreisen, im Außenraum des Kernes angeordnet sind, darüber ist zunächst eine Entscheidung aus den bisher angeführten Tatsachen nicht zu treffen, wenn auch manche dieser Tatsachen, namentlich das Moseleysche Gesetz, noch eine weitere Erklärung eben aus dieser Konstitution des Atoms erfordern.

Über die positiven Kernladungen der Atome aber kann man noch verschiedenartige Ansichten hegen. Die positive Kernladung des Wasserstoffatoms ist ein kleines Volumen (vom Radius  $10^{-16}$  cm), das eine Elementarladung enthält. Rutherford ist geneigt, diesen Wasserstoffkern als das positive Elektron anzunehmen, so daß die Kernladungen aller anderen Elemente sich aus diesen positiven Wasserstoffkernen und den nötigen negativen Elektronen zusammensetzen. Es wäre das im wesentlichen die Proutsche Hypothese (oben S. 4). Der Einwand, den wir gegen diese erhoben haben, daß danach die Atomgewichte aller Stoffe ganze Zahlen sein müßten, was sie nicht sind, erfährt hier aber zunächst eine Milderung. Denn das Atomgewicht setzt sich zusammen aus der Masse des Kernes und der Masse der negativen Elektronen, wobei übrigens alle diese Massen scheinbare sind. Wenn



nun auch die scheinbare Masse eines negativen Elektrons nur  $\frac{1}{1000}$  von der Masse eines Wasserstoffatoms ist, so erkennt man doch, daß, wenn viele solche negative Elektronen im Kern oder im Außenraum vorhanden sind, zunächst kleine Abweichungen von der Ganzzahligkeit der Atomgewichte auftreten können. Dazu aber kommt noch folgendes. Falls die negativen Elektronen im Außenraum des Kerns sich bewegen und falls ihre Geschwindigkeit unter Umständen bei dem einen oder anderen Atom, etwa eine sehr große ist, d. h. vergleichbar mit der Lichtgeschwindigkeit wird, so wird auch die scheinbare Masse derselben eine sehr große, und unter diesen Umständen könnten sogar starke Abweichungen von der Ganzzahligkeit der Atomgewichte eintreten. Also ist der Einwand, der gegen die Prout'sche Hypothese früher mit Recht gemacht wurde, hier nicht mehr durchschlagend, da man über die Zahl der negativen Elektronen im Kern und Außenraum zusammen innerhalb gewisser Grenzen frei verfügen kann.

Andererseits aber ist die Annahme, daß der Wasserstoffkern das positive Elektron selbst sei, und daß es bloß eine Art positiver Elektronen gäbe, zunächst durch nichts als durch unseren Wunsch nach Einheitlichkeit begründet. Es müßte dann also z. B. der Heliumkern mit dem Atomgewicht 4 und mit zwei positiven Ladungen zusammengesetzt sein aus vier Wasserstoffkernen und zwei negativen Elektronen. Sein Radius wäre dann nicht mehr von der Größenordnung  $10^{-16}$  cm, sondern wegen der Größe der negativen Elektronen von der Größenordnung  $10^{-13}$  cm. Aber es wäre ja auch die andere Möglichkeit vorhanden, daß ebenso wie der Wasserstoffkern ein kleines Volumen mit einer positiven Ladung ist, so der Heliumkern einfach ein kleines Volumen mit einer zweifachen positiven Ladung ist. Da die

$$\text{scheinbare Masse} = \frac{2}{3} \frac{\text{Quadrat der Ladung}}{\text{Radius der Kugel} \times 9 \cdot 10^{20}}$$

ist, so würde der Heliumkern dieselbe Größe,  $10^{-16}$  cm, haben wie der Wasserstoffkern, aber eben die doppelte Ladung tragen. Es würde eine Zusammensetzung anderer Atomkerne möglich sein, indem sie sich aus elementaren Wasserstoffkernen und elementaren Heliumkernen bilden, die, da beide eben elementar sind, sich nicht ineinander verwandeln lassen. Und ebenso könnte es noch weitere elementare Kernarten geben. Bei unserer Unkenntnis der Verhältnisse ist eine Zurückführung aller Elemente auf ein positives Elektron und ein negatives Elektron nicht sicherer und nicht einfacher, als die Zurückführung auf mehrere verschiedene positive Kerne und ein negatives Elektron. Allerdings würde dabei noch die mögliche Mannigfaltigkeit des Atombaus bedeutend wachsen. Ein Sauerstoffkern (Masse = 16, Kernladung = 8) könnte sich dann aus vier Heliumkernen ohne Wasserstoffkerne, oder aus drei Heliumkernen mit vier Wasserstoffkernen und zwei negativen Elektronen, oder aus zwei Heliumkernen mit acht Wasserstoffkernen und vier negativen Elektronen usw. bilden. Da wir aber tatsächlich bei den radioaktiven Substanzen sehen, daß der Heliumkern vielfach eine unzerstörbare Einheit bildet — auch wenn man annimmt, daß er aus Wasserstoffkernen zusammengesetzt ist — so ist diese Möglichkeit auch bei der Rutherford'schen Hypothese nicht ausgeschlossen. Diese Fragen können hier nur aufgeworfen, nicht beantwortet werden. Nur weitere Erfahrungen können hier zu einer Entscheidung verhelfen.

## Fünfter Vortrag.

### Die Linienspektren und das Bohrsche Atommodell.

Die Erzeugung und das Aussehen der Linienspektren. Analogie mit Schall-  
schwingungen nicht vorhanden. Das Balmer'sche Gesetz. Die Balmer'sche Serie  
im Wasserstoff. Die ultraroten Wasserstofflinien. Die Rydberg'sche Zahl. Serien-  
linien. Die Bohrsche Atomkonstruktion. Energiequantum und Wirkungsquantum.  
Das Bohrsche Atom gibt für den Wasserstoff genau die Balmer'schen Serienlinien  
und die Rydberg'sche Konstante. Das Heliumatom. Die komplizierteren Atome.  
Die Hochfrequenzspektren und das Moseley'sche Gesetz. Die Leistungen und die  
Schwierigkeiten des Bohrschen Atommodells.

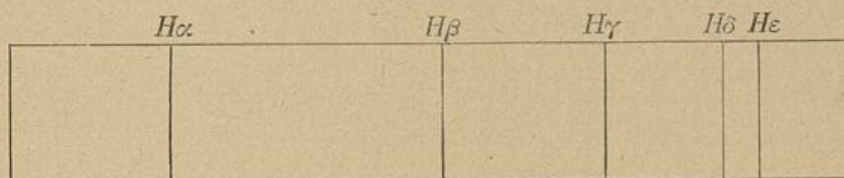
Die empfindlichste Methode, durch welche die Chemie vor der Ent-  
deckung der Radioaktivität die kleinsten Spuren von Stoffen erkennen  
konnte, und zugleich die Methode, durch welche es ihr gelang, eine ganze  
Anzahl neuer Elemente zu entdecken, ist bekanntlich die Spektral-  
analyse. Sie beruht darauf, daß man das Licht, welches glühende  
Dämpfe oder leuchtende Gase aussenden, durch einen Spalt und ein  
Prisma gehen läßt und es dadurch zu einem Spektrum ausbreitet. Dann  
erscheint nicht, wie bei einem weißglühenden festen Körper, ein aus-  
gedehntes Band, welches alle Farben von Rot bis Violett lückenlos an-  
einandergereiht enthält, nicht ein vollständiges Spektrum, sondern es  
erscheinen nur einige oder mehrere, zuweilen viele getrennte farbige  
Linien. Man erhält ein sogenanntes Linienspektrum.

Die Linien, welche dabei auftreten, sind so charakteristisch für die  
chemischen Elemente, welche in dem leuchtenden Dampf vorhanden sind,  
daß man aus dem Auftreten bestimmter Linien umgekehrt das Vorhanden-  
sein des betreffenden Elements konstatieren kann. Statt eines Prismas  
zur Erzeugung und Untersuchung des Spektrums verwendet man bei den  
genauesten Untersuchungen ein Beugungsgitter, am besten ein  
Rowland'sches Gitter, welches aus einer Fläche von Spiegelmetall be-  
steht, in welche pro Millimeter 1700 feine Striche in gleichen Abständen  
eingeritzt sind. Läßt man das Licht eines leuchtenden Dampfes oder  
eines leuchtenden Gases durch einen Spalt gehen und auf ein solches  
Gitter fallen, so erhält man im reflektierten Licht zu beiden Seiten des  
direkten Spaltbildes die Beugungsspektren, und zwar ein erstes, zweites,  
drittes Spektrum in zunehmend größerem Winkelabstand von dem direkten  
Spaltbild. Aus dem genau zu messenden Winkelabstand, welchen eine  
Linie in einem dieser Beugungsspektren von dem mittleren Spaltbild be-  
sitzt, und aus der Zahl der Gitterstriche pro Millimeter auf dem Gitter  
kann man — und das ist die Hauptmethode für diese Messungen — mit  
großer Genauigkeit die Wellenlänge der betreffenden farbigen Linie messen.  
Die Wellenlängen aller Farben sind sehr kleine Größen. Sie werden

im folgenden immer in Ångström-Einheiten (A.E.) ausgedrückt werden, welche, wie oben (S. 47) ausgeführt, gleich dem zehnmillionsten Teil eines Millimeters, also gleich  $10^{-8}$  cm, ist.

Unter den Linien, die ein leuchtendes Gas zeigt, zeichnen sich immer einzelne durch besondere Helligkeit und Schärfe aus. Diese werden gewöhnlich als die Linien des betreffenden Elementes angesehen. Aber eine genauere Untersuchung mit einem leistungsfähigen Beugungsgitter (einem Gitter mit großer Dispersion) zeigt dann noch eine sehr große Zahl anderer, schwächerer Linien, sie zeigt auch oft, daß einzelne Linien, die

Fig. 23.

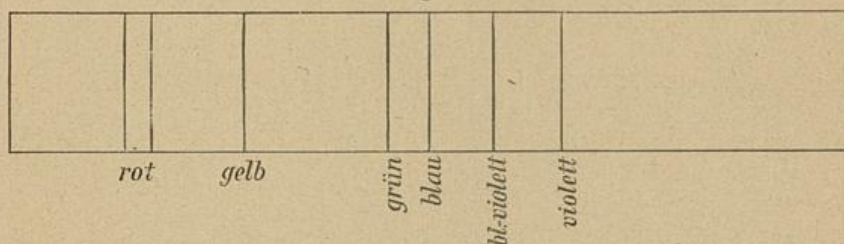


Wasserstoffspektrum.

man zuvor für einfache Linien gehalten hat, aus zwei oder mehr sehr eng beieinanderstehenden Linien bestehen. Das Aussehen des Spektrums hängt auch wesentlich ab von der Temperatur des glühenden Dampfes oder von der Art, wie die Gase durch elektrische Anregung in Geißler-Röhren zum Leuchten gebracht werden.

Das sichtbare Spektrum, das sich von Rot (mit der Grenzwellenlänge ungefähr 7600 A.E.) bis zu Violett (mit der Grenzwellenlänge ungefähr 3800 A.E.) erstreckt, hat aber bekanntlich zu beiden Seiten noch Fortsetzungen, die zwar für unser Auge direkt unerkennbar sind, die aber

Fig. 24.



Heliumspektrum.

durch physikalische Hilfsmittel ebenso genau untersucht werden können wie das sichtbare Spektrum. Die Fortsetzung jenseits des Roten nennt man das Ultrarot. Die Linien, die in diesem auftreten und die man durch ihre erwärmende Wirkung auf geeignete Apparate feststellen kann, haben also größere Wellenlänge als 7600 A.E. Man kann sie leicht bis 10 000 A.E. verfolgen, aber durch genügend feine Apparate noch außerordentlich viel weiter, sogar bis zu  $\frac{1}{3}$  mm. Den unsichtbaren Teil des Spektrums jenseits des violetten Endes, das Ultraviolett, in welchem bei den meisten Substanzen sehr viele Linien liegen, untersucht man leicht durch Photographie. Die ultravioletten Strahlen wirken nämlich noch weit

hinaus auf die photographische Platte. Auf diese Weise kann man leicht bis zu einer Wellenlänge von 1800 A.E. herunter noch Linien finden und durch geeignete Apparate sogar noch bis zu der Wellenlänge von 1000 A.E.

Als ein Beispiel für die Linienspektra ist zunächst in Fig. 23 das Spektrum der Hauptlinien des Wasserstoffs gegeben, wie man sie leicht beobachtet, wenn man eine mit Wasserstoff gefüllte Geißlersche Röhre (Spektralröhre) mit einem Spektroskop (Spalt und Prisma) beobachtet. Die fünf Linien, die der Wasserstoff so zeigt, werden bezeichnet als  $H\alpha$ ,  $H\beta$ ,  $H\gamma$ ,  $H\delta$ ,  $H\epsilon$  und sie haben folgende Wellenlängen:

	Farbe	Wellenlänge in A.E.
$H\alpha$	rot	6563
$H\beta$	grün	4861
$H\gamma$	dunkelblau	4341
$H\delta$	violett	4102
$H\epsilon$	violett	3970

Ein zweites Beispiel bildet das Spektrum der Hauptlinien des Heliums in Fig. 24. Man sieht in diesem sieben helle Linien, welche folgende Farben und Wellenlängen besitzen:

Farbe	Wellenlänge in A.E.
rot	7065
rot	6678
gelb	5876
grün	5016
blau	4923
violett	4713
violett	4471

In derselben Weise zeigen nun die verschiedensten Elemente eine mehr oder minder große Anzahl von Linien in ihrem Spektrum. Verhältnismäßig einfach sind noch die Linienspektra der Alkalien, also der Gruppe Ia des periodischen Systems, wenig komplizierter die der Erdalkalien (Gruppe IIa des periodischen Systems), aber bei den weiteren Elementen sind die Spektra außerordentlich reich an Linien.

Da die Spektra für jedes Element eine besondere Zusammensetzung haben, so hängen sie offenbar ab von den A t o m e n, und da jede Linie ja einer bestimmten Schwingungszahl entspricht, so zeigen sie an, daß innerhalb der Atome bestimmte periodische Bewegungen vor sich gehen. Schon aus dem Vorhandensein der Spektra konnte man also bereits lange schließen, und hat es auch getan, daß die Atome nicht einfach von Masse erfüllte Räume sind, sondern daß sie aus Teilen bestehen, welche periodische Bewegungen verschiedener Art ausführen können.

Wenn man sich zunächst von den bekannten Erscheinungen beim Schall als Analogie leiten lassen möchte, bei dem ja auch jeder Körper sehr verschiedene Schwingungen ausführen kann, so erkennt man doch bald, daß diese Analogie hier zu keinem Resultat führt. Wenn eine Luft-

säule in einer Pfeife zum Schwingen gebracht wird, oder wenn eine gespannte Klaviersaite oder Violinsaite schwingt, so findet man zwar auch, daß die Luftsäule, die Saite, nicht bloß eine Schwingung von einer einzigen bestimmten Schwingungszahl ausführt, sondern daß sie gleichzeitig in verschiedenfache Schwingungen von sehr verschiedenartigen Schwingungszahlen gerät. Eine solche Luftsäule oder eine solche Saite gibt nicht einen einfachen Ton, sondern sie gibt einen Klang, worunter man in der Akustik eine Kombination verschiedener einfacher Töne versteht. Wenn man aber einen solchen Klang analysiert, die Einzeltöne aufsucht, aus denen der Klang sich zusammensetzt — und man kann das nach dem Vorgang von Helmholtz leicht machen —, so findet man vielfach folgendes. Unter allen diesen Tönen hat einer die kleinste Schwingungszahl. Man nennt ihn den Grundton des Klanges. Er hat auch gewöhnlich die größte Stärke und bestimmt die musikalische Höhe des Klanges. Alle anderen Töne, die in dem Klang enthalten sind, haben nun immer Schwingungszahlen, die zu der Schwingungszahl des Grundtones in einem einfachen Verhältnis stehen. Bezeichnet man nämlich die Schwingungszahl des Grundtones als 1, so haben die anderen Töne des Klanges irgendwelche Schwingungszahlen der Reihe

2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 . . . . .

Ihre Schwingungszahlen sind also ganzahlige Vielfache der Schwingungszahl des Grundtones. Man bezeichnet diese Reihe von Tönen, die zu einem Grundton gehören, als seine Obertöne. Es können in einem Klang sämtliche Obertöne vorhanden sein — von verschiedener Stärke — oder es können bloß die geradzahligem, oder bloß die ungeradzahligem vorhanden sein, oder es können einige aus der Reihe hintereinander fehlen usf., kurz, die Kombination der Obertöne mit dem Grundton kann eine sehr verschiedene sein — darauf beruht die Verschiedenartigkeit der Klangfarbe, welche verschiedene Instrumente bei dem gleichen Grundton zeigen — aber, und darauf kommt es uns hier an, die Obertöne haben immer Schwingungszahlen, die ganze Vielfache des Grundtones sind. Daraus folgt, daß, von dem Grundton an gerechnet, in der ersten Oktave kein Oberton ist, in der zweiten Oktave sind zwei vorhanden (2, 3), in der dritten Oktave vier (4, 5, 6, 7), in der vierten acht (8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15) usf. Die Differenz der Schwingungszahlen der aufeinanderfolgenden Töne in jeder Oktave ist immer die gleiche.

Wenn das bei den Schwingungen, die zu den Linienspektra Veranlassung geben, auch der Fall wäre, so müßten die einzelnen Linien eines Beugungsspektrums alle voneinander den gleichen Abstand haben, wobei allerdings auch einige in der Reihe fehlen könnten. Aber das ist durchaus nicht der Fall, die Analogie mit den Schallschwingungen führt bei der Untersuchung der Linienspektra zu keinem Resultat.

Eine Regelmäßigkeit in der Anordnung der Linien eines Spektrums wurde zum erstenmal beim Wasserstoff entdeckt, und zwar auf rein empirischem Wege, durch einfaches Probieren. Es war ein Schweizer, Balmer, welcher hier eine äußerst merkwürdige Regelmäßigkeit erkannte.

Die oben angeführten Wellenlängen der fünf Wasserstofflinien  $H\alpha$  bis  $H\epsilon$  lassen sich nämlich durch folgende Reihe darstellen:

Bezeichnung	Wellenlänge beobachtet	Darstellung durch	Wellenlänge berechnet
H $\alpha$	6563	$3646,13 \times \frac{9}{9-4}$	6563
H $\beta$	4861	$3646,13 \times \frac{16}{16-4}$	4861
H $\gamma$	4341	$3646,13 \times \frac{25}{25-4}$	4341
H $\delta$	4102	$3646,13 \times \frac{36}{36-4}$	4102
H $\epsilon$	3970	$3646,13 \times \frac{49}{49-4}$	3970

Der Faktor, mit dem die Zahl 3646,13 multipliziert werden muß, um die beobachteten Werte zu ergeben, hat also für die aufeinanderfolgenden Linien die Größen

$$\frac{3^2}{3^2 - 2^2}, \frac{4^2}{4^2 - 2^2}, \frac{5^2}{5^2 - 2^2}, \frac{6^2}{6^2 - 2^2}, \frac{7^2}{7^2 - 2^2}.$$

Dieses merkwürdige Gesetz zeigte sich nun nicht bloß bei den fünf in sichtbarem Spektrum vorhandenen Wasserstofflinien bestätigt. Vielmehr hat man noch im Ultravioletten eine Reihe weiterer Wasserstofflinien entdeckt, zum Teil direkt in Geißleröhren, zum Teil in dem Spektrum der Protuberanzen. Und alle diese weiteren 24 Linien konnten durch dasselbe Gesetz dargestellt werden, indem der Reihe nach die Zähler die Werte 8<sup>2</sup>, 9<sup>2</sup> . . . bis 31<sup>2</sup>, die Nenner die Werte 8<sup>2</sup> - 2<sup>2</sup>, 9<sup>2</sup> - 2<sup>2</sup> usf. bis 31<sup>2</sup> - 2<sup>2</sup> erhielten. Wenn unter m eine der Zahlen von 3 bis 31 verstanden wird, so ist die Wellenlänge  $\lambda$  der zugehörigen Wasserstofflinie (in A.E.) bestimmt durch

$$\lambda = 3646,13 \cdot \frac{m^2}{m^2 - 2^2}.$$

Diese höchst überraschende Formel nennt man die *Balmer'sche Formel*. Die 29 Linien des Wasserstoffs, die durch diese Formel umfaßt werden, faßt man zusammen als eine *Serie* des Wasserstoffs.

Es ist vorteilhafter, statt der Wellenlängen dieser Linien vielmehr die Schwingungszahlen einzuführen, wobei ja das Produkt aus Wellenlänge mal Schwingungszahl gleich der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichts, also gleich  $3 \cdot 10^{10}$  cm/sec =  $3 \cdot 10^{18}$  A.E./sec ist.

Daher ist die Schwingungszahl =  $\frac{3 \cdot 10^{18}}{\text{Wellenlänge}}$  und folglich ist für die mte Linie des Wasserstoffs

$$\begin{aligned} \text{Schwingungszahl} &= \frac{3 \cdot 10^{18}}{3646,13} \left(1 - \frac{2^2}{m^2}\right), \\ &= \frac{3 \cdot 10^{18} \cdot 4}{3646,13} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2}\right), \\ &= 3,290 \cdot 10^{15} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2}\right). \end{aligned}$$

Die Schwingungszahlen aller dieser 29 Linien sind also durch dieses Gesetz dargestellt, wenn man die Zahl  $m$  der Reihe nach alle ganzen Zahlen von 3 bis 31 durchlaufen läßt.

Von großem Interesse ist, daß im Ultrarot zwei Linien des Wasserstoffs gefunden wurden, deren Schwingungszahlen sich ganz ähnlich darstellen ließen durch die Formel

$$3,290 \cdot 10^{15} \left( \frac{1}{3^2} - \frac{1}{4^2} \right) \text{ und } 3,290 \cdot 10^{15} \left( \frac{1}{3^2} - \frac{1}{5^2} \right).$$

Die entsprechenden Wellenlängen wurden beobachtet zu

$$18751 \cdot 10^{-8} \text{ und } 12818 \cdot 10^{-8}$$

und aus der obigen Formel berechnet zu

$$18752 \cdot 10^{-8} \text{ und } 12819 \cdot 10^{-8}.$$

Bei ihnen tritt also nicht die Differenz  $\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2}$  auf, sondern  $\frac{1}{3^2} - \frac{1}{m^2}$ , sie gehören nicht zu der ursprünglichen Balmer'schen Serie, aber sie bilden eine Serie mit einem ganz ähnlichen Gesetz.

Der Faktor  $3,290 \cdot 10^{15}$ , der hier zunächst nur beim Wasserstoffspektrum auftritt, hat, was zuerst von Rydberg erkannt wurde, eine allgemeine Bedeutung für alle Spektre. Man bezeichnet diesen Faktor als die Rydbergsche Konstante und drückt sie kurz durch den Buchstaben  $R$  aus.

Die ausgezeichnete Übereinstimmung der Balmer'schen Formel und der zuletzt erwähnten entsprechend gebauten mit den im Wasserstoffspektrum direkt gefundenen Linien zeigt an, daß es sich hier nicht um einen Zufall, sondern um eine wirkliche Gesetzmäßigkeit handelt. Man kann die Schwingungszahlen  $\nu$  der Wasserstofflinien (inklusive der ultraroten) darstellen durch die Formel

$$\text{Schwingungszahl} = R \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right),$$

wo  $R$  die Rydbergsche Konstante  $3,290 \cdot 10^{15}$  ist und wo für  $m$  der Reihe nach die ganzen Zahlen 3, 4, 5 usw. einzusetzen sind, während  $n$  für die gewöhnlichen Wasserstofflinien den Wert 2, für die ultraroten Wasserstofflinien den Wert 3 hat und dabei  $m$  erst von 4 an beginnt. Alle Linien, die sich für ein bestimmtes  $n$  ergeben, wenn man  $m$  die aufeinanderfolgenden ganzen Zahlen durchlaufen läßt, faßt man zusammen unter dem Begriff einer Serie und nennt sie Serienlinien.

Man hat natürlich bald versucht, das Balmer'sche Gesetz auch probeweise auf andere Spektre als das des Wasserstoffs anzuwenden. Es zeigt sich aber, daß ein so einfaches Gesetz bei ihnen nicht existiert, ein so einfaches Gesetz, in dem bloß die Quadrate der aufeinanderfolgenden ganzen Zahlen vorkommen. Wohl aber zeigte sich, daß auch in diesen Spektren eine ganze Anzahl von Linien zusammengehören, daß sie auch dadurch zusammengefaßt werden können, daß man eine Zahl  $m$

alle ganzen Zahlen durchlaufen läßt, nur daß die Zahl  $m$  nicht wie bei Balmer im Quadrat, sondern in einer anderen Kombination vorkam. Alle solche zusammengehörigen Linien eines Spektrums faßt man unter dem Begriff einer Serie zusammen, und solche Serien haben sich bei vielen anderen Spektren ergeben, und es hat sich dabei gezeigt, daß alle Linien, die zu einer und derselben Serie gehören, auch gleiches Aussehen haben. Man unterscheidet im allgemeinen mehrere verschiedene Serien in den Spektren von sehr vielen Substanzen. Die Linien einer Serie sind durchweg scharf begrenzt (und bestehen häufig aus je zwei oder drei eng nebeneinanderliegenden Linien), die einer anderen Serie sind nach dem roten Ende hin verwaschen, die einer dritten Serie sind nach dem violetten Ende hin verwaschen usw.

Es ist also eine Gesetzmäßigkeit in den Spektren des Wasserstoffs und vieler anderer Elemente aufgefunden worden, aber eine Gesetzmäßigkeit besonderer Art. Die Schwingungszahlen der verschiedenen Linien hängen von der aufeinanderfolgenden Reihe der ganzen Zahlen ab, aber sie sind nicht, wie die harmonischen Obertöne der Akustik, diesen ganzen Zahlen proportional, sondern sie enthalten diese ganzen Zahlen im Nenner, und zwar im einfachen Fall im Quadrat und sonst in noch komplizierterer Kombination. Wie soll man sich nun einen schwingenden Mechanismus, also einen Mechanismus mit periodischen Bewegungen, vorstellen, bei dem ein so merkwürdiger und absonderlicher Zusammenhang zwischen den möglichen Schwingungen vorhanden ist? Könnte man einen solchen Mechanismus ersinnen, so würde er die inneren Bewegungen eines Atoms darstellen. Viele Versuche sind in dieser Richtung von Mathematikern und Physikern gemacht worden, aber im ganzen ohne Erfolg.

Eine Ausbildung der Rutherford'schen Kerntheorie der Atome zu einer Theorie des ganzen Atoms erforderte also unbedingt, daß sie eine Darstellung gibt, durch welche Bewegungen im einfachsten Fall das Balmer'sche Gesetz und in anderen Fällen das Gesetz der Serienspektren zustande kommt. Dem dänischen Forscher Bohr ist es nun in den letzten Jahren gelungen, eine solche Ausbildung des Rutherford'schen Atoms zu ersinnen, die Bewegungen der Elektronen um den Kern in solcher Weise vorzunehmen, daß sie die eben genannten Forderungen völlig erfüllt. Diese Theorie zeigt trotz vieler Schwierigkeiten und Dunkelheiten, die sie noch in sich enthält, doch so viele unerwartete Übereinstimmung mit den Tatsachen, daß man als höchst wahrscheinlich annehmen darf, daß sie einen großen Teil Wahrheit enthält.

Um diese Theorie zu verstehen, muß aber zunächst von einer in der Physik der letzten fünfzehn Jahre aufgetretenen, noch unverstandenen Tatsache gesprochen werden. Man kann bekanntlich bei allen Vorgängen physikalischer und chemischer Natur stets das Gesetz bewahren, das zuerst von Helmholtz aufgestellt worden ist, daß bei ihnen Energie nicht geschaffen und nicht zerstört wird, sondern daß bei ihnen sich immer nur Energie aus einer Form in die andere verwandelt. Unter Energie versteht man alles, was aus Arbeit entsteht oder was in Arbeit verwandelt werden kann. Die Energie kann sehr verschiedene



Formen annehmen, sie kann kinetische Energie (lebendige Kraft), potentielle Energie, Wärmeenergie, elektrische Energie, chemische Energie, Lichtenergie sein, alles physikalische und chemische Geschehen ist immer mit einer Umwandlung der Energie aus einer Form in eine andere Form verbunden. Dabei stellen wir uns die Energie als etwas vor, das sich *s t e t i g* ändern kann, das also um die kleinsten Beträge zunehmen oder abnehmen kann. Bei allen Energieverwandlungen, mit denen wir es gewöhnlich zu tun haben, findet eine solche stetige Umwandlung der Energie statt. Wenn z. B. fließendes Wasser eine Turbine treibt und diese Turbine eine Dynamomaschine in Bewegung setzt, von welcher ein elektrischer Strom geliefert wird, der die Glühlampen eines Ortes speist, so setzt sich die kinetische Energie des Wassers um in die Arbeit, die sie an der Turbine leistet; diese Arbeit setzt sich dann in Bewegungsenergie der Turbine und Dynamomaschine um, diese verwandelt sich in die Energie elektrischer Ströme und diese endlich in Wärmeenergie und Lichtenergie. Eine noch so kleine Menge des fließenden Wassers, eine noch so kleine Arbeit, die dieses leistet, setzt sich schließlich in einen entsprechenden Betrag von Wärme- und Lichtenergie um. Wir drücken das so aus, daß wir sagen, die Energie kann sich *s t e t i g* verändern, es gibt keine sprungweise Änderung der Energie des fließenden Wassers, ebensowenig wie der Energie der elektrischen Ströme und des Lichtes.

Diese Vorstellung und Aussage aber war bloß solange richtig, als wir es mit den groben Erscheinungen zu tun hatten, die die Körper im ganzen uns zeigen. Seitdem in den letzten Jahrzehnten die Physik so weit vorgedrungen ist, daß sie das Verhalten der einzelnen Atome und Elektronen studieren konnte, zeigte es sich, daß diese Vorstellung nicht mehr richtig ist. Die Energie, welche von den einzelnen Atomen in Form von Schwingungen ausgehen wird, verhält sich nicht stetig, nicht gleichmäßig, sondern sie verändert sich *d i r e k t s p r u n g w e i s e* oder, wie man es jetzt nennt, *q u a n t e n h a f t*. Ein Atom kann einen gewissen kleinsten Betrag von Energie als schwingende, strahlende Energie ausgeben, ein *E n e r g i e q u a n t u m*, oder zwei oder drei usw. solcher Energiequanten, aber es kann nicht  $\frac{3}{4}$  oder  $1\frac{1}{2}$  oder  $2\frac{1}{4}$  Energiequanten oder überhaupt irgendeinen Zwischenbetrag zwischen 1 und 2 solcher Quanten ausgeben. Diese Einsicht hat die Physik zuerst durch die Untersuchung der Ausstrahlung eines schwarzen Körpers gewonnen, und sie hat sich dann auch in anderen Fällen als berechtigt gezeigt, wo die Schwingungen, die periodischen Bewegungen von Atomen in Frage kommen, insbesondere bei der Theorie der spezifischen Wärme. Diese Energiequanten sind aber nicht für jede Art von Schwingung gleich groß, vielmehr sind sie um so größer, je größer die Schwingungszahl ist. Das Verhältnis zwischen der Größe eines solchen Energiequantums eines schwingenden Atoms und der Schwingungszahl desselben ist eine konstante Größe, die eine ganz besonders wichtige Rolle in der Untersuchung der Atomvorgänge noch spielen wird, und die man die *P l a n c k s c h e K o n s t a n t e* oder das *W i r k u n g s q u a n t u m* nennt. Dieses Wirkungsquantum hat im absoluten Maß (cm, g, sec) den Wert  $6,5 \cdot 10^{-27}$ . Daraus ergibt sich, daß das Energiequantum für periodische Bewegungen verschiedener Art Werte besitzt, die in folgender Tabelle angegeben sind:

Art der Schwingung	Rot	Violett	Äußerstes Ultraviolett	Röntgenstrahlen
Wellenlänge . . . . .	$7600 \cdot 10^{-8}$	$3800 \cdot 10^{-8}$	$1000 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$ cm
Schwingungszahl . . . . .	$0,04 \cdot 10^{16}$	$0,08 \cdot 10^{16}$	$0,3 \cdot 10^{16}$	$300 \cdot 10^{16}$
Energiequantum . . . . .	$0,26 \cdot 10^{-11}$	$0,52 \cdot 10^{-11}$	$1,95 \cdot 10^{-11}$	$1950 \cdot 10^{-11}$ Erg.

Eine bestimmte Vorstellung, was dieses Wirkungsquantum bedeutet, oder was die spezielle Ursache ist, daß die Atome schwingende Energie nur in einzelnen Quanten ausgeben (und vielleicht auch aufnehmen), besitzen wir heute noch nicht. Das Auftreten dieser Quanten bei atomistischen Schwingungsvorgängen ist eine aus experimentellen Beobachtungen erschlossene Tatsache, mit der man stets bei solchen Vorgängen rechnen muß, aber ihre anschauliche nähere Erklärung fehlt uns noch.

In der Atomtheorie von Bohr spielen daher auch diese Energiequanten eine wichtige Rolle, diese Theorie ist ein weiterer Ausbau der Rutherford'schen Kerntheorie mit Zuhilfenahme des Wirkungsquantums. Ein Atom entspricht nach der Bohrschen Theorie einem ganzen Sonnensystem. Jedes Atom besitzt einen positiv elektrischen Kern von sehr kleinen Dimensionen, einen Kern, der soviel freie positive Elementarladungen besitzt, als die Ordnungszahl des betreffenden Elementes beträgt. Um diesen positiven Kern nun bewegen sich die negativen Elektronen in Kreisen (oder allgemeiner in Ellipsen) ganz ebenso, wie sich die Planeten um die Sonne bewegen. Die Kraft, die jedes Elektron zwingt, auf dem Kreise zu bleiben, die Zentripetalkraft, ist die einfache Coulombsche Anziehungskraft zwischen der positiven Ladung des Kerns und der negativen Ladung des Elektrons. Bei Anwesenheit noch anderer negativer Elektronen, als der gerade betrachteten, ist diese Anziehungskraft vermindert durch die Abstoßungskräfte der übrigen vorhandenen negativen Elektronen. Unter dem Einfluß dieser Anziehungskraft und einer ursprünglichen Geschwindigkeit (die das Elektron etwa durch einen Stoß von anderen Elektronen erhalten hat) bleibt das Elektron auf seinem Kreise (oder seiner Ellipse), so wie der Mond auf einem Kreise um die Erde bleibt oder die Erde auf einer Ellipse um die Sonne bleibt. Die Zentrifugalkraft des bewegten Elektrons ist immer gleich der Zentripetalkraft, die der Kern (und etwaige andere Elektronen) auf dasselbe ausübt.

Während aber die Planeten, die um die Sonne kreisen, ganz verschiedene Abstände von der Sonne haben und in ihrer Bahn ganz verschiedene Geschwindigkeiten besitzen, wobei die Abstände ganz beliebige sind und keinem Gesetz unterliegen, ist das bei den Elektronen, die um den Kern kreisen, nicht der Fall, und zwar wegen des Wirkungsquantums. Vielmehr können sie nur in ganz bestimmten Abständen, die durch ganze Zahlen charakterisiert sind, in Kreisbewegungen um den Kern begriffen sein und ihre Geschwindigkeiten müssen in diesen Bahnen ganz bestimmte sein. Eine rechnerische Durchführung zeigt, daß die Radien der möglichen Kreisbahnen (wenn wir der

Einfachheit halber von den elliptischen Bahnen absehen und nur Kreisbahnen ins Auge fassen) sich wegen des Wirkungsquantums zueinander verhalten müssen wie die Quadrate der aufeinanderfolgenden ganzen Zahlen, also wie  $1 : 4 : 9 : 16 : 25 : 36$  usw., und daß die Geschwindigkeit eines Elektrons, das sich in einer dieser Bahnen bewegt, immer kleiner wird, je weiter die Bahn vom Kern absteht, so daß sich die Geschwindigkeiten auf diesen Bahnen zueinander verhalten wie  $1 : \frac{1}{2} : \frac{1}{3} : \frac{1}{4} : \frac{1}{5} : \frac{1}{6}$  usw.

Nehmen wir den einfachsten Fall, den des Wasserstoffatoms, bei dem nur ein positiver Kern mit der Einheit der Ladung und nur ein negatives Elektron mit derselben (negativen) Ladung vorhanden ist. Wenn das Elektron sich auf einem Kreis von unbekanntem Radius mit unbekannter Geschwindigkeit bewegt, so bestehen zwischen diesen beiden unbekanntem Größen, dem Radius und der Geschwindigkeit, zwei Gleichungen. Erstens nämlich muß die Coulombsche Attraktionskraft gleich der Zentrifugalkraft sein und zweitens muß die lebendige Kraft des Elektrons gleich einem ganzzahligen Vielfachen des Wirkungsquantums (der Planckschen Konstanten) sein, dividiert durch die Zeit eines (halben) Umlaufs. Aus diesen beiden Beziehungen läßt sich sowohl der Radius der Bahn wie die Geschwindigkeit ermitteln, wenn gegeben sind die beiden Ladungen (des Kerns und des Elektrons), die Masse des Elektrons und die Plancksche Konstante. Je nach dem ganzzahligen Vielfachen des Wirkungsquantums bewegt sich ein Elektron, wie man jetzt sagt, auf einer einquantigen Bahn, oder einer zweiquantigen, dreiquantigen usw. So ergibt sich, daß der innerste Kreis, die einquantige Bahn, den Radius besitzt  $0,55 \cdot 10^{-8}$  cm, der zweite also  $2,20 \cdot 10^{-8}$  cm, der dritte  $4,25 \cdot 10^{-8}$  cm, der vierte  $8,80 \cdot 10^{-8}$  usw., Radien, deren erste Werte vergleichbar sind mit den Radien des Wasserstoffatoms ( $1 \cdot 10^{-8}$  cm nach S. 9).

Um ein Elektron von dem Kern ganz loszulösen, es also in unendlich große Entfernung von dem Kern zu bringen, muß man Arbeit aufwenden, also dem System zuführen, und zwar ist die dazu notwendige Arbeit um so größer, je näher das Elektron am Kerne ist, je kleiner also der Radius der Bahn ist. Für die verschiedenen aufeinanderfolgenden Bahnen nimmt also diese Arbeit ab wie  $\frac{1}{1^2} : \frac{1}{2^2} : \frac{1}{3^2}$  usw.

Wir stellen uns nun vor, daß wir einen Kubikzentimeter Wasserstoff haben; in diesem sind Trillionen von Kernen und Trillionen von Elektronen vorhanden. Von den Kernen und den Elektronen wollen wir annehmen, daß sie in unregelmäßiger Wärmebewegung begriffen sind. Dann wird irgendein Elektron durch einen Stoß, den es erhält, nur hier und da einmal in eine von den möglichen Bahnen in der Nähe eines Kerns kommen und wird in dieser Bahn rotieren. Durch einen anderen Stoß wird es einmal aus dieser Bahn herausgeschleudert werden und in kleineren oder größeren Abstand von dem Kern kommen und wird dann also eine Kreisbahn von kleinerem oder größerem Abstand beschreiben. Wenn es nun dabei von einer entfernteren Bahn zu einer näheren Bahn kommt, so muß es dabei Energie abgeben, und diese abgegebene Energie kann nach der Quantentheorie nur ein Energieelement sein. Diesem abgegebenen Energieelement entspricht, je nach seiner Größe, eine bestimmte Schwin-

gungszahl und diese Schwingungszahl bestimmt die Farbe des bei diesem Vorgang ausgestrahlten Lichts. Man sieht, daß wenn ein solches Elektron aus dem dritten Kreis auf den zweiten übergeht, daß dann die ausgestrahlte Schwingungszahl proportional ist

$$\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2}$$

und wenn es aus dem vierten Kreis in den zweiten gestoßen wird, so ist sie proportional

$$\frac{1}{2^2} - \frac{1}{4^2}$$

usw. Es treten also gerade diejenigen Faktoren auf, die in der Balmerischen Formel für den Wasserstoff vorkommen. Ja noch mehr, die Proportionalitätskonstante, die sich aus der Ladung des Kerns und des Elektrons, der (scheinbaren) Masse des Elektrons und der Planckschen Konstante zusammensetzt, erweist sich bei Durchführung der Rechnung genau gleich der Rydbergschen Konstante  $R$ . Wenn also ein Elektron aus dem  $m$ -ten Kreis auf den zweiten fliegt, so entsteht eine Schwingung, deren Schwingungszahl  $\nu$  gleich ist

$$\nu = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2} \right),$$

genau diejenige Schwingungszahl, die der Balmerischen Serienformel für den Wasserstoff entspricht.

Das ist offenbar eine ganz hervorragende Leistung, die dieser ganzen Vorstellung erst nachträglich die Berechtigung gibt.

Unter den Trillionen von Kernen und Elektronen, die in einem Kubikzentimeter Wasserstoff vorhanden sind, werden alle möglichen Fälle der Bewegung sehr oft vorkommen. Es werden viele tausend Male Elektronen von der dritten Bahn nach der zweiten gestoßen werden, andere Tausende werden von der vierten oder fünften Bahn nach der zweiten gestoßen werden. Das Resultat des gleichzeitigen oder aufeinanderfolgenden Zutreffens solcher Bewegungen sehen wir als die Spektrallinien, die der Wasserstoff ausstrahlt.

Man muß dabei zunächst aber fragen, warum werden diese Elektronen nur nach der zweiten Bahn geworfen, warum ist diese Bahn bevorzugt? Warum sieht man nicht auch die Spektrallinien, die entstehen, wenn ein Elektron von dem dritten oder vierten Kreis nach dem ersten geworfen wird, oder wenn es von dem vierten oder fünften Kreis nach dem dritten geworfen wird? Die Antwort darauf lautet einfach, daß natürlich solche Fälle auch ebenso oft vorkommen müssen, wie ein Übergang zur zweiten Bahn, daß aber die so entstehenden Spektrallinien nicht in das sichtbare Gebiet fallen würden, das ja nur von 7600 bis 3800 A.E. reicht.

In der Tat hat ja die Rydbergsche Konstante den Wert  $3,290 \cdot 10^{15}$ , und die Differenzen, die bei dem Übergang aus einer weiteren Bahn in die erste auftreten würden, sind

$$\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2}, \frac{1}{1^2} - \frac{1}{3^2}, \frac{1}{1^2} - \frac{1}{4^2}, \frac{1}{1^2} - \frac{1}{5^2},$$

Sie haben also die Werte

$$\frac{3}{4}, \frac{8}{9}, \frac{15}{16}, \frac{24}{25}$$

Die zu ihnen gehörigen Schwingungszahlen sind also

$$2,4675 \cdot 10^{15} \quad 2,9244 \cdot 10^{15} \quad 3,0844 \cdot 10^{15} \quad 3,1584 \cdot 10^{15}$$

Die zugehörigen Wellenlängen sind

$$1216 \text{ A.E.} \quad 1026 \text{ A.E.} \quad 973 \text{ A.E.} \quad 950 \text{ A.E.}$$

Diese Wellen fallen also in das äußerste ultraviolette Gebiet, das sehr schwer zu beobachten ist, schon deswegen, weil diese kurzwelligen Strahlen schon von der Luft sehr stark absorbiert werden. Sie sind bisher nicht beobachtet worden.

Anderseits haben die Differenzen, die beim Übergang aus einer weiteren Bahn in die dritte auftreten würden, nämlich

$$\frac{1}{3^2} - \frac{1}{4^2}, \frac{1}{3^2} - \frac{1}{5^2}, \frac{1}{3^2} - \frac{1}{6^2}, \frac{1}{3^2} - \frac{1}{7^2}$$

die Werte

$$\frac{7}{144} \quad \frac{16}{225} \quad \frac{1}{12} \quad \frac{40}{441}$$

Die zu ihnen gehörigen Schwingungszahlen sind also

$$0,1599 \cdot 10^{15} \quad 0,2339 \cdot 10^{15} \quad 0,2742 \cdot 10^{15} \quad 0,2984 \cdot 10^{15}$$

Die zugehörigen Wellenlängen sind

$$18\,752 \text{ A.E.} \quad 12\,819 \text{ A.E.} \quad 10\,941 \text{ A.E.} \quad 10\,053 \text{ A.E.}$$

Diese fallen also in das Ultrarot, sind also nur durch besondere Hilfsmittel erkennbar. Die ersten beiden Linien dieser Reihe sind, wie oben S. 68 angeführt, in der Tat beobachtet worden.

Die Differenz  $\frac{1}{4^2} - \frac{1}{5^2}$  und die entsprechenden für den Übergang bis zum vierten Kreis geben noch viel weiter im Ultrarot liegende Linien. Die erste hätte eine Wellenlänge von 40527 A.E. Im sichtbaren Spektrum liegen also bloß diejenigen Linien, die bei einem Übergang aus einem entfernteren Kreis auf den zweiten entstehen. Und solche Übergänge sind nach der Balmerschen Formel und ihren Bestätigungen sogar für den 33. Kreis noch zu beobachten. Dabei ist aber ganz allgemein zu bemerken, daß die Bewegung von Elektronen in den weiteren Abständen vom Kern, also etwa in dem 10., 15. Kreis, nur unter besonderen Bedingungen vorkommen kann. Diese Abstände sind schon so groß, daß sie bei der gewöhnlichen Dichtigkeit der Gase, wie sie in den Geißleröhren vorkommen, größer sind wie der durchschnittliche Abstand zweier Kerne. In der Tat hat der fünfzehnte Kreis nach S. 72 einen Durchmesser von  $1,6 \cdot 10^{-6}$  cm. Bei normalem Druck ist aber der mittlere Abstand zweier Moleküle nach S. 10 etwa  $3,5 \cdot 10^{-7}$  cm. Bei der Verdünnung bis auf 1–2 mm Druck, wie er in den Spektralröhren herrscht, wird der Abstand also etwa  $\sqrt[3]{760}$ mal so groß sein, d. h.  $3 \cdot 10^{-6}$  cm, mithin von derselben

Größe wie der fünfzehnte Kreis. Ein Elektron, das in größerem Abstand von einem Kern sich befindet, wird daher nicht um diesen, sondern um den benachbarten Kern seine Kreisbewegung ausführen. Daraus ist zu folgern, daß man in Geißleröhren das ultraviolette Spektrum des Wasserstoffs nur bis zur zwölften Linie der Balmerischen Serie verfolgen kann, und das ist tatsächlich der Fall. Die weiteren Linien bis Nr. 33 hat man tatsächlich nicht in Geißleröhren, sondern bloß in dem Spektrum der Himmelsnebel beobachtet, bei denen die Dichtigkeit des Gases als äußerst gering anzusehen ist, während doch zugleich infolge ihrer großen Ausdehnung die Intensität der Linien groß wird. Das entspricht genau demjenigen, was aus der Bohrschen Vorstellung zu erwarten ist.

Bei normalem Druck hat ein Wasserstoffmolekül einen Raum für sich, dessen halbe Seitenlänge  $16,5 \cdot 10^{-8}$  cm ist. In diesen Raum würden also nur die Kreise 1 bis 5, deren letzter einen Radius von  $13,7 \cdot 10^{-8}$  cm besitzt, hineingehen. Der fünfte Kreis entspricht der Wasserstofflinie  $H\gamma$ . Man muß also erwarten, daß Wasserstoff bei normalem Druck nur die Linien  $H\alpha$ ,  $H\beta$ ,  $H\gamma$  zeigt.

Um für die Größenverhältnisse, die bei dem so gestalteten Wasserstoffatom vorhanden sind, eine Anschauung zu bekommen, denken wir uns wieder das Wasserstoffatom vom Radius  $1 \cdot 10^{-8}$  cm vergrößert, bis es den Raum der ganzen Erde einnimmt, also einen Radius von 6350 km besitzt. Dann hat der Kern einen Radius von 6,5 cm, entspricht also der Größe eines Kinderballs. Das Elektron hat einen Radius von 127 m, entspricht also der Größe einer Kirche oder Kaserne. Diese Kaserne rotiert also um den Kinderball, und zwar ist der kleinste Abstand, den das Elektron von dem Kern besitzt (auf dem Kreise 1),  $0,556 \cdot 10^{-8}$  cm, entspricht also dem halben Erdradius, also einem Abstand von 3200 km. Die weiteren Kreise haben den doppelten, viereinhalbfachen Erdradius. Man sieht, daß in dem ganzen Atom nur sehr wenig Raum wirklich von (elektrischer) Materie eingenommen ist, daß der größte Teil des Atomes leer ist.

Andererseits aber erkennt man, daß ein Atom überhaupt kein bestimmtes Volumen besitzt, sondern daß sein Volumen sehr verschieden ist, je nach der Verdünnung des Gases. In den sehr dünnen Himmelsnebeln hat ein Atom einen Radius, der etwa 1000mal so groß ist, wie der Abstand des innersten Ringes. Denn noch in diesem Abstand wirkt dort der Kern auf das Elektron.

Im stabilsten Fall zirkuliert das Elektron auf dem Kreise 1, auf dem dem Kern am meisten benachbarten Kreise. In diesem Falle wäre der Radius des Atoms nur etwa die Hälfte desjenigen, der sich aus der Gastheorie berechnet.

So einfach wie das Wasserstoffatom ist natürlich kein anderes gebaut. Das nächst einfache ist das Heliumatom, dessen Kern zwei positive Ladungen besitzt und das deshalb auch zwei äußere Elektronen enthalten muß. Hier sind nun schon für die Anordnung der Elektronen mehrere Möglichkeiten vorhanden. Es könnte jedes dieser Elektronen auf einer besonderen Bahn rotieren, oder sie könnten beide auf derselben Bahn — aus Symmetriegründen im Abstand eines Halbkreises — rotieren. Wir werden diese Möglichkeiten im folgenden Kapitel besprechen und sehen, daß nur

die zweite zutreffen kann. Die Schwingungszahlen, welche sich durch die Bewegung eines dieser Elektronen aus einem äußeren Kreis in einen inneren Kreis ergeben, befolgen genau dasselbe Gesetz wie die Balmer'schen Wasserstoffschwingungen, nur daß, weil der Kern hier zwei Einheiten besitzt, nicht die ganzen Zahlen selbst im Nenner als Quadrat vorkommen, sondern ihre Hälften. Es ist auch tatsächlich eine Serie von Heliumlinien beobachtet worden, die diesem Gesetz entspricht. Zu ihr aber gehören nicht die oben S. 65 angeführten Hauptlinien des Heliums. Die Rydberg'sche Konstante tritt auch beim Helium auf. Eine vollkommene Durchführung aber aller möglichen Schwingungen, wie beim Wasserstoffatom, ist beim Heliumatom noch nicht möglich gewesen. Insbesondere ist, wie gesagt, das Auftreten der Hauptlinien im sichtbaren Spektrum noch nicht erklärt.

Für alle weiteren Spektra, namentlich die der Alkalien und der Erden, hat man nun rein empirisch auch Serien und zwar Serien verschiedener Art gefunden, die alle durch das Fortschreiten einer Größe nach ganzen Zahlen charakterisiert sind. Bei allen diesen Serien hat sich die Rydberg'sche Konstante, wenigstens in großer Annäherung, immer wieder bei der Berechnung der experimentellen Ergebnisse ergeben. Sie ist also eine fundamentale Konstante, welche bei allen Serienschwingungen auftritt. Auch nach der Bohrschen Theorie muß in vielen Fällen immer wieder die Rydberg'sche Konstante auftreten. Denn wenn auch der Kern aus vielen Einheiten zusammengesetzt ist und wenn ebensoviele Elektronen um den Kern herumfliegen, so muß doch im großen Abstand vom Kern, wo die Kräfte auf ein Elektron im wesentlichen auch von einer Elementarladung herrühren (nämlich der Ladung des Kerns, abzüglich der Ladung aller übrigen Elektronen), das Verhalten ganz dasselbe sein, wie bei der Bindung des Wasserstoffelektrons durch den Wasserstoffkern, d. h. es muß dabei auch die Rydberg'sche Konstante auftreten.

Eine genaue Durchführung der Bohrschen Atomtheorie für diese komplizierten Fälle ist aber noch in keiner Weise geschehen.

Wenn der Übergang eines Elektrons aus einem entfernteren Kreis zu einem näheren mit der Emission einer Strahlung verbunden ist, so ist umgekehrt die Absorption von Strahlung mit dem Übergang eines Elektrons von einem inneren zu einem äußeren Kreis verbunden.

Bei einer Fortführung der Theorie von den einfachsten Fällen des Wasserstoffs und des Heliums mit ein oder zwei Elektronen zu den komplizierteren Fällen, in denen eine große Anzahl von Elektronen um den Kern herum sich bewegt, ergibt sich nun als eine plausible und durch manche Erfahrungen gestützte Annahme die, daß immer eine Anzahl von Elektronen auf einem und demselben Ring um den Kern herumfliegen, und zwar in gleichen Abständen voneinander. Es kann ein einzelner Ring oder es können mehrere aufeinanderfolgende Ringe so von Elektronen besetzt sein. Nicht in allen Fällen ist die Stabilität eines solchen Systemes gesichert. Nur diejenigen Anordnungen sind möglich, bei denen das System auch stabil beharren kann.

Die Ausstrahlung kann dabei nun entweder dadurch hervorgerufen werden, daß ein ganzer äußerer Ring sich in einen inneren einschleibt, mit ihm zusammenfließt — was nur dann zu stabilen Anordnungen führt,

wenn die beiden Ringe gleiche Anzahl von Elektronen führen — oder daß ein einzelnes Elektron aus einem äußeren Ring in einen inneren springt.

Die Ermittlung aller möglichen Schwingungen, die ein solches kompliziertes Atom ausführen kann, ist natürlich eine Aufgabe von großer Schwierigkeit und bisher noch in keinem Falle gelöst. Wohl aber läßt sich leicht zeigen, daß die sehr raschen Schwingungen eines solchen Atoms (die Hochfrequenzschwingungen) das Moseleysche Gesetz (S. 58) befolgen müssen.

Bei der Bestimmung der Schwingungszahlen kommt es ja immer auf die Differenzen der Energie in dem ersten und zweiten Zustand (in dem entfernteren und dem näheren Ring) an. Die Energie eines sich bewegenden Elektrons hängt aber von dem Quadrat seiner Ladung und von dem Quadrat derjenigen Ladung ab, welche auf das sich bewegende Elektron einwirkt. Die Quadratwurzel aus der Schwingungszahl muß also proportional sein der Ladung des Elektrons (welche konstant ist) und der Ladung des einwirkenden Systems. Wenn nun bei einem komplizierten Atom um den inneren Kern, der eine  $N$ -fache Ladung besitzen möge, sich ein Ring von Elektronen befindet, so ist diejenige Ladung, welche auf ein innerhalb dieses Ringes liegendes Elektron wirkt, nicht mehr die  $N$ -fache Elementarladung, sondern kleiner, weil ja eben die anderen Elektronen des Ringes abstoßend, statt anziehend auf dasselbe wirken. Der Ring wirkt also so, als ob statt der  $N$ -fachen Ladung des Kernes nur eine verminderte, also  $(N-a)$ -fache in dem Kern vorhanden wäre, wobei die Zahl  $a$  in einfacher Weise von der Zahl der Elektronen auf dem Ring abhängt. Es ist z. B. bei zwei Elektronen im Ring  $a = 0,25$ , bei drei Elektronen  $a = 0,57735$ , bei vier Elektronen  $a = 0,9571$  usw. Daraus folgt aber, daß wenn ein Elektron von einem Ring zu einem anderen springt, die Quadratwurzel aus der Schwingungszahl proportional ist  $N-a$ , wobei  $N$  die Ordnungszahl des betreffenden Atomes im periodischen System ist, da ja die Ladung des Kernes dieser Ordnungszahl proportional ist.

In diesem Satz haben wir aber das bei allen Röntgenspektren von Moseley gefundene Gesetz abgeleitet, daß die Quadratwurzel aus der Schwingungszahl eine lineare Funktion der Ordnungszahl des betreffenden Elementes ist. Dieses merkwürdige Gesetz erklärt sich also ganz aus dem Bohrschen Atommodell.

Ja, man kann weiter, wenigstens einigermaßen, durch Vergleich der Beobachtungen über die Schwingungszahlen der  $K$ -Linien (zunächst der  $K\alpha_1$ -Linie) ermitteln, um welchen Ring es sich dabei handelt. Bohr hat auf diese Weise gefunden, daß die  $K\alpha_1$ -Linie dadurch entsteht, daß ein Elektron aus dem zweiten Ring in den ersten sich bewegt, wobei der erste Ring im stabilen Zustand aus vier Elektronen besteht. Ebenso entsteht die  $L\alpha_1$ -Linie durch Bewegung eines Elektrons aus dem dritten in den zweiten Ring. Das Auftreten der anderen Linien  $K\alpha_2$ ,  $K\beta$  usw. erklärt sich dadurch, daß die Elektronen nicht genaue Kreise, sondern auch Ellipsen beschreiben.

Diese speziellen Folgerungen sind übrigens durchaus nicht sicher. Man kann nach Debye das Auftreten der  $K\alpha_1$ -Linie auch dadurch erklären, daß im stabilen Zustand der innerste Ring bei allen Atomen (vom Natrium aufwärts) ein Ring mit drei Elektronen ist. Wenn durch



irgendeine Ursache eines von diesen drei Elektronen auf den zweiten Ring gelangt ist und dann wieder zurückfällt, so daß es die stabile Anordnung wiederherstellt, so entsteht die  $K\alpha_1$ -Linie und es entsteht entsprechend die  $K\beta_1$ -Linie, wenn dieses Elektron aus dem dritten Ring in den innersten zurückfällt. Der innerste Ring aller Atome vom Natrium an (weiter hat man die K-Linien nicht beobachtet) wäre danach im stabilen Zustand immer aus drei Elektronen gebildet.

Es ist nach dem Gesagten ganz zweifellos, daß das Bohrsche Atommodell eine Anzahl wichtiger und merkwürdiger experimenteller Tatsachen in sehr einfacher Weise umfaßt. Die Erklärung der Serienlinien, speziell die vollständige Erklärung der Balmerischen Serie beim Wasserstoff, die Ableitung der Rydbergschen Konstanten, die Ableitung des Moseleyschen Gesetzes für die Röntgenspektren sind ganz ausgezeichnete Leistungen dieser Atomtheorie. Viele experimentelle Tatsachen erwarten aber erst noch eine Erklärung nach dieser Theorie. Speziell sind es eine Reihe von Gesetzmäßigkeiten, die sich bei den Serienspektren der Alkalien und Erden ergeben haben, ferner aber die Gesetzmäßigkeiten, welche bei der Einwirkung eines Magnetfeldes (der sogenannte Zeemaneffekt) und bei der Einwirkung eines elektrischen Feldes (der sogenannte Starkeffekt) auf die Veränderung der Serienlinien gefunden wurden, die noch der genauen Erklärung durch dieses Modell harren. Anfänge zu einer solchen Erklärung sind bereits gemacht. Es darf übrigens dabei nicht verschwiegen werden, daß in den Bohrschen Annahmen eine ganze Reihe von Willkürlichkeiten enthalten sind, die nur dazu dienten, die Balmerische Serie abzuleiten. Nach unseren bisherigen elektrischen Kenntnissen kann ein Elektron im allgemeinen gar nicht dauernd im Kreise um einen Kern herum rotieren. Es gibt dabei fortwährend Energie an den Äther ab und müßte infolgedessen allmählich in den Kern fallen. Aber die Bohrsche Theorie nimmt an, daß gerade in den ausgezeichneten Bahnen keine Ausstrahlung von Energie in den Äther stattfindet. Eine Begründung hat diese Annahme, ebenso wie eine Reihe anderer, an sich nicht, sondern sie ist nur begründet durch den schönen Erfolg, die Erklärung der Serienlinien, und durch die Tatsache, die nicht zu bestreiten ist, daß im Gebiet der Atome, also in den kleinsten Abständen, unsere sonst gefundenen Gesetze der Mechanik und Elektrodynamik nicht allgemeine Gültigkeit besitzen.

## Sechster Vortrag.

### Spezieller Bau der Atome, Ionen und Moleküle.

Anhaltspunkte zur Untersuchung des Baues der Atome und Ionen. Die vier ersten Elemente, Wasserstoff, Helium, Lithium, Beryllium. Versuche über die Anordnung der Ringe bei den Elementen höherer Ordnungszahl. Die Bildung der Moleküle durch gemeinsame Ringe. Das Wasserstoffmolekül. Ein Heliummolekül kann sich nicht bilden. Es kann auch keine Verbindung des Wasserstoffs und Heliums unter gewöhnlichen Umständen eintreten. Rückblick und Ausblick.

Man hat den Chemiker manchmal mit dem Architekten verglichen, da der eine sowohl wie der andere die Gliederung und Zusammensetzung von Bauwerken zum Gegenstand seines Schaffens hat, der eine im großen, der andere im Gebiet der Atome, und da beide außer der wissenschaftlichen Grundlage auch noch die künstlerische Intuition zu ihrer Arbeit notwendig haben, um aus der Fülle von Möglichkeiten das Richtige und Wirkliche zu erkennen. Ebendieselbe künstlerische Intuition wird nötig sein, um die wirkliche Zusammensetzung der Atome aus den Kernen und den Elektronen für alle Fälle zu erforschen. Denn für die Lösung dieser Aufgabe bestehen bisher in allen den Fällen, in denen es sich um eine größere Zahl von Elektronen handelt, nur sehr wenige Anhaltspunkte. Der eine Anhaltspunkt ist der, daß die stabilen Konfigurationen einen größeren Betrag von aufzuwendender Energie gebrauchen, um zerstört zu werden, als die weniger stabilen Konfigurationen. Wenn man also den Betrag der Energie ausrechnet, der zur Auflösung einer Konfiguration notwendig ist, und diesen Betrag mit dem für eine andere Konfiguration vergleicht, so kann man sofort erkennen, welche Konfiguration wahrscheinlicher ist. Es wird diejenige sein, bei welcher der Energiebetrag ein größerer ist. Aber dieses Kriterium reicht nicht in allen Fällen aus, ja es ist sogar in vielen Fällen irreführend, weil ja auch ein relatives Maximum von Energie stabile Zustände ergeben kann, während größere Werte der aufzuwendenden Energie, wenn sie nicht maximale sind, doch zu labilen Zuständen führen können.

Ein zweiter Anhaltspunkt ist derjenige, den die Chemie an die Hand gibt, indem sie zeigt, daß die Valenz der Atome eine verschiedene ist, daß die Atome im allgemeinen 0 oder 1, oder 2, oder 3, oder 4 Valenzen besitzen. Das sagt für unsere Vorstellungen aus, daß in diesen Fällen 0, 1, 2, 3, 4 Elektronen leichter, lockerer an den Kern gebunden sein müssen als die übrigen. Mit diesen locker gebundenen Elektronen kann sich ein Atom an ein anderes anheften. Nun aber lehrt die Chemie weiter, daß die Valenz eines Atoms eine mehrfache sein kann, daß unter Umständen

die Valenz eines und desselben Atomes eine zweifache, unter anderen Umständen eine dreifache ist, ja daß auch mehr als vierfache Valenzen, fünf-, sechs-, sieben-, achtfache Valenzen vorkommen. Eine vollkommene Theorie des Paus der betreffenden Atome wird die Gründe für diese Mehrwertigkeit aus der Anordnung der Elektronen darzustellen haben.

In dieser Richtung liegen aber bisher nur erste, noch sehr unvollkommene Versuche vor. Es ist eine Aufgabe der Zukunft, hier genauere Kenntnisse zu erringen. Die Chemie der Atomzusammensetzung, die Überchemie, hat mit derselben außerordentlich großen Zahl von Möglichkeiten zu rechnen, wie die gewöhnliche Chemie, die Chemie der Molekülzusammensetzungen. So wie es dieser erst allmählich gelang, von einfacheren zu komplizierteren Molekülen fortschreitend, selbst bei sehr komplizierten Molekülen die Konstitution klarzulegen, so wird es auch bei der Frage der Konstitution der Atome nur allmählich gelingen, ihre wirkliche Anordnung festzustellen.

Was unzweifelhaft feststeht, ist nur, daß die Gesamtzahl der negativen Elektronen bei einem neutralen Atom gleich sein muß der gesamten positiven Ladung des Kernes. Aber wir wissen aus den Erfahrungen bei den Kanalstrahlen und bei der Radioaktivität, daß auch Atom-Ionen existieren können, d. h. Atome, die positiv oder negativ geladen sind, und zwar einfach oder mehrfach geladen sind. Solche Atom-Ionen müssen nun weniger oder mehr negative Elektronen im Bereich des Kernes besitzen, als die entsprechenden neutralen Atome. Sind ein, zwei, drei usw. Elektronen weniger vorhanden, als im neutralen Atom, so haben wir es mit einem Atom mit einfacher, oder doppelter, oder dreifacher . . . positiver Ladung zu tun. Sind umgekehrt 1, 2, 3 . . . Elektronen mehr an den Kern gebunden, als dem neutralen Atom entspricht, so ist ein Atom mit ein-, zwei-, drei- . . . facher negativer Ladung gebildet. Es wird dabei zu berücksichtigen sein, daß bei der Elektrolyse die Metalle und der Wasserstoff mit positiven Ladungen auftreten, daß sie elektropositiv sind, daß ihnen also leicht ein oder mehrere Elektronen fehlen können, während die elektronegativen Ionen, wie Chlor, Sauerstoff usw., mehr Elektronen besitzen, als der Ladung ihres positiven Kerns entspricht. Eine genaue Durchführung der Atomzusammensetzung wird auch dieses verschiedene Verhalten der verschiedenen Atome zu berücksichtigen haben.

Bisher sind bei den Versuchen, die man gemacht hat, die Konstitution der Atome zu ergründen, diese Gesichtspunkte noch durchaus nicht alle in Rücksicht gezogen worden.

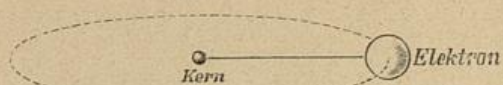
Sehr viel einfacher als bei den Atomen höherer Ordnungszahl liegen die Verhältnisse bei den vier ersten Atomen des periodischen Systems, beim Wasserstoff, Helium, Lithium und Beryllium. Bei diesen reicht man mit den angegebenen Gesichtspunkten im allgemeinen aus, um sowohl die Konstitution des neutralen Atoms wie auch die Möglichkeit der Atomionen festzulegen.

#### 1. Wasserstoff.

Der positive Kern ist bei dem neutralen Atom begleitet von einem Elektron. In der stabilsten, permanenten Lage (wenn das Elek-

tron sich auf dem innersten, einquantigen Kreis befindet) hat es einen Abstand von  $0,55 \cdot 10^{-8}$  cm von dem Kern und durchläuft diesen Kreis  $6,2 \cdot 10^{15}$ mal pro Sekunde. Diese Zahlen lassen sich berechnen, da wir oben gefunden haben (S. 72), daß zwei Gleichungen zwischen dem Radius des stabilsten Kreises und der Geschwindigkeit bestehen, Gleichungen, aus denen man diese beiden Größen berechnen kann, wenn die Ladung

Fig. 25.



### Neutrales Wasserstoffatom.

des Kerns, die Ladung und Masse eines Elektrons und die Plancksche Konstante bekannt sind. Das neutrale Wasserstoffatom hat also eine Form wie in Fig. 25<sup>1)</sup>.

Ist das Elektron von seinem Kern aus irgendeinem Grund losgerissen, so haben wir es bloß mit dem Kern zu tun, der dann ein positives Wasserstoffion ist. Dieser Kern tritt bei der Elektrolyse des Wassers (verdünnter Säuren) auf.

Es können aber auch um den Kern in etwas größerem Abstand zwei negative Elektronen rotieren. Die zur Zerstörung dieses Systemes aufzuwendende Energie ist noch etwas größer als bei dem Atom im neutralen Zustand. Man erhält so ein negativ geladenes Wasserstoffatom, wie es bei den Kanalstrahlen gefunden wurde. Der Abstand der beiden Elektronen vom Kern ist 1,33mal so groß wie beim neutralen Atom,

Fig. 26.



### Negatives Wasserstoffion.

die Zahl der Umläufe pro Sekunde aber nur 0,563 der früheren. Fig. 26 stellt dieses negative Wasserstoffion dar. Mehr als eine negative Ladung kann das Wasserstoffatom nicht annehmen, es ist auch nichts derartiges beobachtet worden.

## 2. Helium.

Der Kern mit der doppelten Elementarladung bildet das zweifach positiv geladene Helium-Ion, also das  $\alpha$ -Teilchen

<sup>1)</sup> In dieser und den folgenden Figuren sind die Radien der Kreise im richtigen Verhältnis gezeichnet. Die Elektronen sind als große Kugeln, die Kerne als Punkte angegeben, um deren gegenseitiges Größenverhältnis zu veranschaulichen. Dagegen sind die Dimensionen der Elektronenkugeln weit übertrieben gezeichnet gegenüber den Radien der Kreise.

der Radioaktivität. Um diesen Kern kann sich ein Elektron bewegen, dann haben wir es mit einem einfach positiv geladenen Heliumion zu tun. Der Abstand des Elektrons ist dabei bloß die Hälfte von dem beim Wasserstoffatom, wie Fig. 27 zeigt. Dagegen rotiert das Elektron viermal so rasch um den Kern wie dasjenige des Wasserstoffatoms.

Fig. 27.



### *Einfach positiv geladenes Heliumatom.*

Das neutrale Heliumatom besitzt zwei Elektronen, die um den Kern kreisen, und zwar in einem etwas größeren Abstand (0,571 von dem des Wasserstoffatoms) und mit etwas kleinerer Geschwindigkeit ( $\frac{3}{4}$  von der beim positiven Heliumion) (Fig. 28).

Ein Heliumkern mit drei Elektronen würde zu seinem Zerfall geringere aufzuwendende Energie erfordern als ein solcher mit zwei Elektronen, kann also nicht bestehen. Ein negativ geladenes Helium-

Fig. 28.



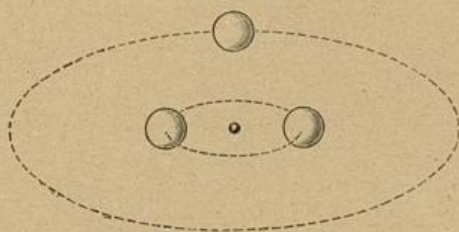
### *Neutrales Heliumatom.*

Ion gibt es nicht. Auch folgt daraus, daß ein Heliumatom keine Affinität für andere Elemente hat, daß Helium ein träges Gas ist. Bei der Untersuchung der Molekülbildung kommen wir darauf zurück.

### 3. Lithium.

Nach der Theorie kann außer dem dreifach positiv geladenen Kern noch ein Ion mit zwei oder einer positiven Ladung bestehen. Das erste

Fig. 29.



### *Lithiumatom.*

enthält ein Elektron im Abstand eines Drittels von dem des Wasserstoffatoms und mit neunmal so großer Umlaufgeschwindigkeit, das zweite enthält zwei Elektronen in einem etwas größeren Abstand und mit etwas kleinerer Umdrehungsgeschwindigkeit.

Das neutrale Lithiumatom ist vermutlich so gebildet, wie es Fig. 29 zeigt. Zwei Elektronen kreisen in einem inneren Kreis, ein drittes Elektron, schwächer gebunden, in einem äußeren Kreis. Dieses eine Elektron bedingt die Einwertigkeit des Lithiums. Die Radien des inneren und äußeren Kreises sind 0,362 und 1,182mal so groß wie beim Wasserstoff. Die Umlaufzahlen pro Sekunde sind bei den beiden inneren Elektronen 7,65mal so groß wie beim Wasserstoff, bei dem äußeren aber nur 0,71 von der des Wasserstoffelektrons.

Unter Umständen kann auch noch ein zweites Elektron in den äußeren Kreis (der dann etwas kleiner wird) treten, dann erhalten wir ein negativ geladenes Lithiumion.

#### 4. Beryllium.

Beim Beryllium mit vier Elektronen kann ein neutrales Atom so gebildet sein, daß alle vier Elektronen sich auf einem Kreise vom Radius 0,329 (der des Wasserstoffs als Einheit genommen) in gleichem Abstand bewegen, oder daß zwei Elektronen auf einem inneren Kreis vom Radius 0,262 und die beiden anderen auf einem äußeren Kreis vom Radius 0,673 sich bewegen, die ersteren mit einer 14,6mal, die letzteren mit einer 2,2mal so großen Winkelgeschwindigkeit wie das Elektron des Wasserstoffs. Die zweite dieser Möglichkeiten ist die wahrscheinlichste, weil Beryllium chemisch zweiwertig ist und die beiden äußeren, schwach gebundenen Elektronen diese Zweiwertigkeit hervorbringen können.

#### Atome mit einer größeren Zahl von Elektronen.

Der Möglichkeiten, wie die Elektronen um einen Kern von einer großen Zahl von positiven Ladungen angeordnet sind, sind so viele, daß eine Sicherheit oder selbst ein genaues Kriterium für die eine oder andere Annahme bisher nicht vorliegt. Es ist zu vermuten, daß die Elektronen in Ringen um den Kern angeordnet sind, aber über die Zahl und Besetzung der Ringe hat man keine Sicherheit. Man ist hierbei meistens auf plausible Annahmen beschränkt, die aber ebensogut Falsches wie Richtiges geben können. Einen Anhaltspunkt gibt erstens das periodische System der Elemente, welches zeigt, daß die Atome der neunten Stelle wieder Ähnlichkeit mit denen der ersten Stelle haben, daß also eine Periodizität mit der Stellenziffer 8 vorliegt, und einen zweiten Anhaltspunkt gibt die Wertigkeit der Elemente, welche in einer solchen Reihe von acht Elementen von 0 bis 4 steigt und dann wieder bis 0 fällt, wenn man in der Reihe der Atomgewichte weiter geht. Danach gab Bohr für die ersten 24 Elemente (vom Wasserstoff bis zum Chrom) eine Anordnung, die durch die folgende Tabelle angegeben ist. Die vertikalen Kolonnen zeigen die aufeinanderfolgenden Ringe um den Kern an, vom innersten angefangen. Die Zahlen in diesen Kolonnen bedeuten die Zahl der Elektronen, welche auf jedem Ring vorhanden sind. Die Gesamtzahl der Elektronen ist natürlich immer gleich der Ordnungszahl des Atoms.

Ordnungs- zahl	Name des Elements	1. Ring (innerster)	2. Ring	3. Ring	4. Ring	5. Ring
1	Wasserstoff H . . . . .	1	—	—	—	—
2	Helium He . . . . .	2	—	—	—	—
3	Lithium Li . . . . .	2	1	—	—	—
4	Beryllium Be . . . . .	2	2	—	—	—
5	Bor B. . . . .	2	3	—	—	—
6	Kohlenstoff C . . . . .	2	4	—	—	—
7	Stickstoff N . . . . .	4	3	—	—	—
8	Sauerstoff O . . . . .	4	2	2	—	—
9	Fluor F . . . . .	4	4	1	—	—
10	Neon Ne . . . . .	8	2	—	—	—
11	Natrium Na . . . . .	8	2	1	—	—
12	Magnesium Mg. . . . .	8	2	2	—	—
13	Aluminium Al. . . . .	8	2	3	—	—
14	Silicium Si . . . . .	8	2	4	—	—
15	Phosphor P. . . . .	8	4	3	—	—
16	Schwefel S . . . . .	8	4	2	2	—
17	Chlor Cl . . . . .	8	4	4	1	—
18	Argon Ar . . . . .	8	8	2	—	—
19	Kalium K . . . . .	8	8	2	1	—
20	Calcium Ca . . . . .	8	8	2	2	—
21	Scandium Sc . . . . .	8	8	2	3	—
22	Titan Ti . . . . .	8	8	2	4	—
23	Vanadin V . . . . .	8	8	4	3	—
24	Chrom Cr . . . . .	8	8	4	2	2

Wenn auch in dieser Anordnung die gewöhnliche Wertigkeit der Elemente berücksichtigt ist, so gibt sie doch keinen Anhaltspunkt für die verschiedene Wertigkeit, die viele Elemente unter Umständen zeigen. In der Reihe 10 bis 18 steigt wegen der lose gebundenen Elektronen im äußersten Ring die Wertigkeit von 0 (Neon) bis 4 (Silicium), um dann wieder bis 0 beim Argon abzunehmen. Daß aber das Chlor auch unter Umständen fünfwertig sein kann, erscheint zwar noch möglich, wenn der vorletzte Ring eben auch nur schwach gebundene Elektronen besitzt. Daß es aber auch drei- und siebenwertig sein kann, ist aus dieser Anordnung nicht zu erkennen. Ebensovienig ergibt sich aus dem Schema die Möglichkeit der Fünfwertigkeit des Phosphors und Stickstoffs, die doch eine Tatsache ist.

Wenn ferner das oben (S. 77) angeführte Resultat von Debye zuverlässig ist, daß der innerste Ring bei allen Atomen vom Natrium an aus drei Elektronen besteht, so ist die obige Anordnung damit von vornherein und im ganzen verfehlt.

Eine ganz andere Anordnung, die gerade auf diesem letzteren Resultat aufgebaut ist, gibt ebenfalls zu vielen Zweifeln Veranlassung. Sie gibt dem innersten Ring immer drei Elektronen, dem nächsten aus einem ähnlichen Grunde, sobald er sich einmal vollständig gebildet hat, immer sieben, dem dritten acht Elektronen usw., und nimmt an, daß jeder so einmal voll ausgebildete Ring bei den folgenden Elementen immer wiederkehrt, daß bei diesen bloß eine weitere Anlagerung von Elektronen in einem folgenden Ring bis zu einer Höchstzahl auftritt.

In dieser Anordnung werden z. B. dem Chlor drei Ringe mit der

Elektronenzahl (von innen nach außen) 3, 7, 7 zugeschrieben, wodurch sich zwar die Siebenwertigkeit des Chlors, nicht aber ohne weiteres seine Ein-, Drei-, Fünfwertigkeit erklärt. Der Phosphor hat drei Ringe mit den Elektronenzahlen 3, 7, 5, wodurch seine Fünfwertigkeit, aber nicht ohne weiteres seine Dreiwertigkeit erklärt wird. Denn man muß annehmen, daß alle Elektronen auf dem äußersten Ring gleich stark bzw. gleich schwach gebunden sind, so daß der Phosphor ebensogut vierwertig wie dreiwertig, zweiwertig und einwertig werden könnte.

Diese Betrachtungen also für die Atome hoher Ordnungszahl sind noch vollständig illusorisch. Genauere Untersuchungen über die Linienspektren und Röntgenspektren werden vielleicht allmählich hier die Mittel zu größerer Sicherheit gewähren.

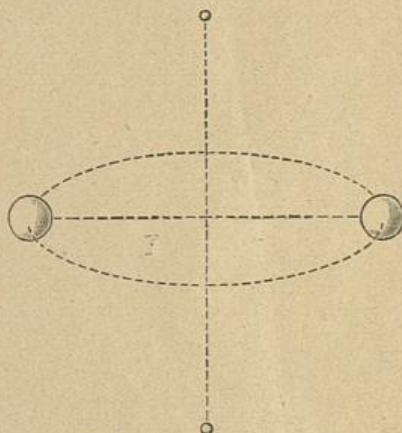
Insbesondere wird aber eine Untersuchung der Molekülbildung aus diesem Atommodell noch weitere Aufklärung bieten, eine Untersuchung, die allerdings sehr schwierig zu sein scheint und von der bisher nur die ersten Anfänge ausgearbeitet sind.

Bei Molekülen haben wir es nicht mehr mit einem zentralen Kern zu tun, sondern mit mehreren, mindestens zweien, um die die Elektronen sich bewegen. Ein neutrales Wasserstoffmolekül wird aus zwei Kernen in einem gewissen Abstand bestehen und aus zwei Elektronen. Denken wir uns die beiden Atome zunächst in großer Entfernung und nähern wir durch eine äußere Kraft den einen Kern dem anderen, so wird das Elektron, das um den einen Kern kreist, von dem anderen Kern angezogen und ebenso das Elektron des zweiten Kerns

von dem ersten, und diese Anziehung wird mit wachsender Annäherung der Kerne wachsen. Es werden sich also die Bahnen der Elektronen wegen dieser Anziehung rascher nähern, als wir die Kerne durch die äußere Kraft einander nähern. In einem gewissen Abstand der beiden Kerne werden also die Bahnen der beiden Elektronen zusammenfallen und eine einzige Bahn bilden, auf der die beiden Elektronen um die Achse, die die beiden Kerne verbindet, herumrotieren. In diesem Moment hat sich das Wasserstoffmolekül gebildet. Die Abstoßungskraft zwischen den beiden Kernen wird dann gerade aufgehoben durch die Anziehungskraft, welche die beiden Elektronen auf jeden der beiden Kerne ausüben.

Die Bindung der beiden Atome zu einem Molekül geschieht also dadurch, daß die beiden Elektronen in einem gemeinsamen Kreis um die Verbindungslinien der Kerne kreisen. Die genauere Berechnung zeigt, daß der Radius dieses Kreises etwas kleiner (0,95) als der des ersten Kreises eines Wasserstoffatoms ist, und daß der Abstand der

Fig. 30.



Wasserstoffmolekül.



beiden Kerne 1,16mal so groß ist wie der Durchmesser dieses Kreises. Fig. 30 zeigt eine Darstellung des Wasserstoffmoleküls. In absoluten Zahlen ist der Radius des Kreises  $0,52 \cdot 10^{-8}$  cm, der Abstand der beiden Kerne  $1,22 \cdot 10^{-8}$  cm. Zugleich zeigt eine genaue numerische Berechnung, daß die zur Auflösung der beiden getrennten Atome zusammen aufzuwendende Energie kleiner ist als die zur Auflösung des so gebildeten Moleküls aufzuwendende Energie, so daß also das Molekül sich von selbst aus den Atomen bildet unter Ausgabe von Energie, die als die Bildungswärme des Wasserstoffmoleküls erscheint.

Die für die Atomtheorie immer rätselhaft gewesene Tatsache, woher es kommt, daß zwei Atome Wasserstoff immer in einen engeren Verband zu einem Molekül zusammentreten und auf welcher Eigenschaft der Atome diese Bindung beruht, erfährt hier eine einfache und plausible Erklärung. Der gemeinsame Elektronenkreis bringt die Bindung der beiden Kerne hervor, die ohne diese Bindung sich gegenseitig abstoßen würden.

Danach sollte man zunächst erwarten, daß bei dem nächst einfachen Element, dem Helium, auch ein solches Zusammentreten zweier Atome zu einem Molekül stattfinden könnte, was ja bekanntlich, da Helium einatomig ist, nicht der Fall ist. Wenn wir hier ebenso verfahren, wie vorhin beim Wasserstoff, daß wir zwei Heliumatome — deren jedes um den Kern zwei Elektronen in einem Kreis besitzt — einander in der Richtung der Verbindungslinie der Kerne einander nähern, so wird folgendes eintreten.

Wegen der Anziehung der Kerne je auf die Elektronen des anderen Atoms werden die Ebenen der beiden Elektronenkreise sich rascher nähern, als die Kerne aneinandergebracht werden, und es wird in einem bestimmten Moment der Fall eintreten, daß die beiden Elektronenebenen zusammenfallen, während die Kerne noch einen bestimmten endlichen Abstand besitzen. Die vier Elektronen in demselben Kreis werden sich dann wegen ihrer gegenseitigen Abstoßung von selbst so einstellen, daß sie um je einen Viertelkreis voneinander abstehen. Das Heliummolekül scheint damit gebildet zu sein. Aber wenn man die aufzuwendende Energie zur Auflösung der beiden getrennten Heliumatome numerisch ausrechnet und ebenso die Energie zur Auflösung des so entstandenen Heliummoleküls, so findet man, daß die letztere kleiner ist als die ersteren zusammengenommen. Daher kann sich das Heliummolekül von selbst nicht bilden. Es müßte eine Zufuhr von Energie von außen dazukommen, um die Heliumatome in ein Molekül zusammentreten zu lassen. Wir können diesen Unterschied zwischen den Wasserstoffatomen und den Heliumatomen auch so ausdrücken, daß wir sagen, die beiden Wasserstoffatome ziehen einander an, während die Heliumatome einander abstoßen. Daher entsteht die Einatomigkeit des Heliumatoms. Es ist eine Aufgabe der Zukunft, für höhere Atome die Molekülbildung ebenso zu erforschen, und es wird dabei notwendig sein, nachzuweisen, daß beim Neon, Argon, Xenon, Krypton im Gegensatz zu den je benachbarten Elementen auch eine solche Einatomigkeit sich ergibt.

Auch eine Annäherung eines Wasserstoffatoms und eines Helium-

atoms kann kein Heliumwasserstoffmolekül geben. Denn erstens haben die beiden Elektronen des Heliumatoms einen viel kleineren Abstand von dem Kern, als das Elektron des Wasserstoffs von seinem Kern, es würden also die beiden Kreise nicht zusammenfließen, sondern getrennt bleiben, und außerdem wäre auch hier die zur Zerstörung des Moleküls aufzuwendende Energie kleiner als die entsprechende Energie für die Summe der beiden Atome, so daß die Bildung des Moleküls nicht von selbst, unter Abgabe von Energie stattfinden könnte.

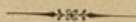
Wenn auch für die höheren Atome die Aufstellung ihrer Konstitution noch nicht im einzelnen durchgeführt werden kann, so kann man doch es als wahrscheinlich hinstellen, daß allgemein die Bildung eines Moleküls aus zwei gleichartigen oder zwei ungleichartigen Atomen dadurch zustande kommt, daß wie beim Wasserstoff ein gemeinsamer Ring sich um die beiden getrennten Atome legt, ein Ring, der die Bindung der Atome zum Molekül bewirkt. Und zwar ist anzunehmen, daß es bei allen Molekülen die äußersten Elektronen, die Elektronen des äußersten Ringes sind, welche so zusammenfließen, daß sich das Molekül bildet.

Wenn wir nun nach diesen Vorstellungen uns die verschiedenen Einwirkungen physikalischer und chemischer Kräfte auf die Atome überlegen und untersuchen, wie sich diese Einwirkungen äußern, so werden wir sagen müssen, daß die chemischen Erscheinungen im wesentlichen an den äußersten Ringen der Atome sich vollziehen. Diese äußersten Ringe verschmelzen ineinander und bringen die Bildung des chemischen Moleküls hervor.

Die Einwirkung sehr hoher Temperaturen einerseits und der elektrischen Erregung (in den Geißleröhren) andererseits wirkt auch auf die äußeren, aber auch vielfach auf die mehr nach innen gelegenen Ringe ein, indem sie diese zerstört, so daß bei ihrer Rückbildung die gewöhnlichen Spektren entstehen. Das Bombardement der Elektronen aber, welches die Röntgenstrahlen hervorbringt, beeinflußt im wesentlichen die innersten Ringe der Atome, indem es sie zerstört. Durch ihre Rückbildung entstehen die K- und L-Strahlen der Röntgenspektren. Die Atomkerne selbst endlich kommen bei der Radioaktivität in Betracht. Spontan zersetzen sich bei den schwersten Atomen die Kerne selbst und senden die  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlen aus. Die zugehörigen  $\gamma$ -Strahlen kann man nach Rutherford als die charakteristischen Röntgenstrahlen der betreffenden radioaktiven Stoffe auffassen.

So greift die Radioaktivität in das Allerinnerste des Atoms, in seinen Kern ein und bewirkt dadurch eine wirkliche Umwandlung der Atome. Denn ein bestimmtes Atom ist nach der Rutherford-Bohrschen Theorie nur gekennzeichnet durch die Ladung seines Kernes. Wieviel Elektronen um den Kern kreisen, das hängt von den Umständen ab und bringt bloß die Unterscheidung zwischen dem neutralen Atom und den positiven oder negativen Atom-Ionen hervor. Eine Veränderung des Kernes aber bildet ein neues Atom. Diese Veränderung des Atoms aber können wir bisher noch durch kein uns zur Verfügung stehendes Mittel beeinflussen. Sie geschieht von

selbst, spontan, wie bei den radioaktiven Substanzen, oder sie geschieht nicht. Erst wenn wir hier die Mittel zum Eingreifen, zum Beeinflussen haben, wenn wir diese Kernzersetzung rascher oder langsamer machen können, und wenn wir sie auf andere Atome als die bisher bekannten radioaktiven werden ausdehnen können, erst dann wird diese Über-  
chemie, die Chemie der Atome, deren wissenschaftliche Vielseitigkeit wir hier angedeutet haben, auch die ungeahntesten praktischen Erfolge zeitigen.

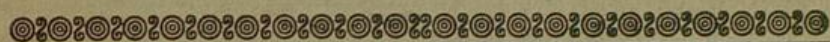


BLB Karlsruhe



52 93756 5 031

er sie geschieht  
m Beeinflussen  
gsamer machen  
her bekannten  
diese Über-  
e Vielseitigkeit  
eischen Erfolge



erwiesen, und in jeder neuen Auflage hat es sich wieder an die Spitze gestellt.

Der „Vulkan“, Frankfurt a. M., schreibt:

Das große Gebiet der Elektrizitätslehre und ihrer wichtigsten Anwendungen in einem handlichen Band ausführlich und klar beschrieben, das ist das Geheimnis des „Graetz“. Welcher Techniker oder auch nur mittelbar zur Technik Beziehungen pflegende Gebildete kennt nicht den „Graetz“? Eine Empfehlung der neuen Auflage an dieser Stelle zu geben, erübrigt sich. Dazu wird das Werk in unserm Leserkreise zu hoch bewertet. Immer auf der Höhe, Neues aufnehmend, Überlebtes fortlassend, so präsentiert sich auch die neueste Ausgabe.

Die „Mittelschule“, Halle a. S., schreibt:

... Das prächtige Buch sei wärmstens empfohlen. Insbesondere weisen wir die Physiklehrer an Mittelschulen darauf hin als auf das beste Hilfsmittel, das ihnen für das Gebiet der Elektrizität empfohlen werden kann.

---

---

In Vorbereitung befindet sich die 10. und 11. Auflage von

# KURZER ABRISS DER ELEKTRIZITÄT

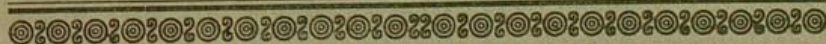
Von

**DR. L. GRAETZ**

Professor an der Universität München

Mit zahlreichen Abbildungen

In dieser neuen vermehrten Auflage (46.—55. Tausend) ist das Werk wieder auf den neuesten Stand der Wissenschaft gebracht, was von den Freunden des Buches mit Freuden begrüßt werden wird.



Druck der  
Union Deutsche Verlagsgesellschaft  
in Stuttgart