

Werk

Titel: Das Atom

Autor: Born, Max

Ort: Berlin

Jahr: 1920

PURL: https://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?34557155X_0008|log158

Kontakt/Contact

Digizeitschriften e.V.
SUB Göttingen
Platz der Göttinger Sieben 1
37073 Göttingen

✉ info@digizeitschriften.de

DIE NATURWISSENSCHAFTEN

WOCHENSCHRIFT FÜR DIE FORTSCHRITTE DER NATURWISSENSCHAFT, DER MEDIZIN UND DER TECHNIK

HERAUSGEGEBEN VON

DR. ARNOLD BERLINER UND PROF. DR. AUGUST PÜTTER

Achter Jahrgang.

19. März 1920.

Heft 12.

Das Atom¹⁾.

Von Max Born, Frankfurt a. M.

Einleitung.

Die moderne Atomistik hat ihren Ursprung in der Chemie. Die Physik hat sich nur langsam und zögernd den atomistischen Vorstellungen zugewandt, und während die Handhabung der Atome und Moleküle des Chemikers tägliche Übung wurde, gab es noch vor wenigen Jahrzehnten Physiker, die die Atomtheorie als eine oft heuristisch nützliche, im Grunde aber vermeidbare Hypothese ansahen. Heute hat sich das sehr geändert; der Physiker darf, gestützt auf die Forschungen der letzten Jahre, sich erkennen, dem Chemiker Auskunft zu geben über das Wesen des Atoms und seiner Wirkungen. Denn die physikalischen Methoden dringen tiefer in das Innere der Atome ein als die chemischen. Den Spekulationen der Chemiker über den Aufbau der Atome und die zwischen ihnen wirkenden Kräfte, besonders die Valenzkräfte, haftet ziemlich viel Willkür an, da sie sich in der Hauptsache auf die *eine* Betätigungsart der Atomkräfte, die chemische Bindung, stützen. Demgegenüber darf man behaupten, daß das Bild, das sich die heutige Physik vom Atom macht, in vielen wesentlichen Zügen willkürlich ist und ziemlich fest steht; man darf mit Sicherheit hoffen, daß die zukünftige Forschung dieses Bild ausgestalten und vertiefen, aber die heute erkannten deutlichen Umrisse unangetastet lassen wird.

Wie sieht nun aber dieses Bild aus? Zu einer Schilderung, wie es allmählich entstanden ist, gleich einem Mosaik aus unzähligen Stückchen zusammengesetzt, dazu reicht der zur Verfügung stehende Raum nicht aus; es empfiehlt sich daher, den umgekehrten Weg zu beschreiten: Wir werden berichten, wie die Physik sich heute die Atome vorstellt, und dann daraus eine große Reihe ihrer Eigenschaften ableiten, die durch Erfahrung bekannt sind.

Man könnte dieses Verfahren eine begriffliche *Synthese der Welt* nennen. Denn alles Materielle besteht aus Atomen, und der Physiker darf, frei nach *Archimedes*, sagen: Gebt mir das Atom, und ich baue Euch die Welt daraus.

1. Elektronen und Kerne.

Für die Chemie ist das Atom noch immer das Kleinste, Unteilbare, wie sein Name aus-

¹⁾ Nach einem Vortrage beim 50jährigen Stiftungsfeste der Frankfurter chemischen Gesellschaft, am 1. November 1919.

drückt. Für die Physik kann es das nicht mehr sein; sonst hätte ja die Frage nach der Konstitution des Atoms gar keinen Sinn. Auch lehrt ein Blick in das Spektroskop, worin etwa die ungezählten Linien des Eisenspektrums erscheinen, daß recht verwickelte Schwingungsvorgänge im Eisenatom vor sich gehen müssen, gegen die die modernste Musik eines *Reger* oder *Mahler* ein Kinderspiel ist.

Wenn nun aber das Atom selbst ein Gebäude ist, welches sind seine Bausteine?

Wir schildern zunächst, was die Physik darauf antwortet und geben nachträglich die Beweise für die Behauptungen soweit, als es der beschränkte Raum gestattet.

Es gibt zwei Arten von Bausteinen, die sich durch ihre elektrischen Ladungen unterscheiden. Die *negativ geladenen Teilchen* sind sämtlich gleich groß und gleich stark geladen; sie heißen *Elektronen*. Ihre Masse ist äußerst klein (etwa $1/1900$) gegen die des H-Atoms. Die *positiv geladenen Teilchen* auf einziges Urteilchen zurückzuführen, ist bisher noch nicht gelungen; wir werden später davon sprechen, wie diese Frage heute steht, vorläufig aber annehmen, daß es ebenso viele Arten solcher positiven Teilchen gibt wie chemische Elemente. Sie enthalten den Hauptanteil der tragen und schweren Masse der Atome und werden daher *Atomkerne*, kurz *Kerne* (englisch *nucleus*) genannt.

2. Aufbau des Atoms.

Ein Atom oder Ion besteht aus einem Kern und einer Anzahl z von Elektronen. Ist das Atom *neutral*, so muß die Kernladung gerade so groß sein, wie die aller Elektronen zusammen; und da diese alle einander gleich sind und alle dieselbe Ladung e haben, so muß die Kernladung ein ganzes Vielfaches von e , ze sein. Diese Zahl z heißt die *Kernladungszahl* oder auch die *Atomnummer* oder *Ordnungszahl*. Man kann nämlich alle Kerne in eine Reihe nach wachsenden z anordnen, und zwar erhält man dann genau dieselbe Reihenfolge wie die bekannte des periodischen Systems der Elemente (Fig. 1). H hat $z=1$, He $z=2$ usw. Wesentlich ist dabei, daß nicht das Atomgewicht maßgebend ist, sondern die Kernladung. Bekanntlich gibt es mehrere Fälle, wo die auf den chemischen Eigenschaften beruhende Reihenfolge des periodischen Systems nicht mit dem Anwachsen des Atomgewichtes parallel geht; so steht das leichtere Kalium (K) hinter dem Argon (A), ebenso das leichtere Nickel (Ni) hinter dem

Kobalt (Co). Wir werden nachher sehen, daß die Reihenfolge des periodischen Systems tief in der Natur des Atoms begründet ist.

Im neutralen Atom ist jeder Kern von soviel Elektronen umgeben, wie seine Nummer z angibt, also der H-Kern von 1 Elektron, der He-Kern von 2 Elektronen usw. Fehlt ein Elektron, so überwiegt die positive Kernladung und man hat ein einwertiges *positives Ion*. Ist ein Elektron mehr da, als die Zahl z beträgt, so hat

Schon Helmholtz hat zur Erklärung der bekannten Erscheinungen der Elektrolyse die Hypothese aufgestellt, daß nicht nur die Materie, sondern auch die Elektrizität atomistisch konstituiert sei. Darauf erklärt sich ja auch ohne weiteres das bekannte Faradaysche Gesetz, daß chemisch äquivalente Mengen bei der Elektrolyse immer dieselbe Elektrizitätsmenge transportieren. Die Entdeckung der Kathodenstrahlen und später der Strahlen radioaktiver Substanzen ermöglichte

	0	I a b	II a b	III a b	IV a b	V a b	VI a b	VII a b	VIII
1 H	2 He	3 Li	4 Be	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	
1,008	3,99	6,94	9,1	11,0	12,00	14,01	16,00	19,0	
—	10 Ne	11 Na	12 Mg	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	
—	20,2	23,00	24,32	27,1	28,3	31,04	32,07	35,46	
—	18 A	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe 27 Co 28 N
—	39,88	39,10	40,07	44,1	48,1	51,0	52,0	54,93	55,84 58,97 58,68
—		29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	
—		63,57	65,37	69,6	72,5	74,96	79,2	79,92	
—	36 Kr	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 —	44 Ru 45 Rh 46 Pd
—	82,92	85,45	87,63	88,7	90,6	93,5	96,0	—	101,7 102,9 106,7
—		47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 J	
—		107,88	112,40	114,8	118,7	120,2	127,5	126,92	
—	54 X	55 Cs	56 Ba	57 La	58 Ce 59 Pr 60 Nd 61 — 62 Sm 63 Eu 64 Gd				
—	130,2	132,81	137,37	139,0	140,25 140,6 144,3 — 150,4 152,0 157,3				
—					65 Th 66 Dy 67 Ho 68 Er 69 Tu 70 Ad 71 Lu 72 —				
—					159,2 162,5 163,5 167,7 168,5 173,8 175,0 —				
—						73 Ta	74 W	75 —	76 Os 77 Ir 78 Pt
—						181,5	184,0	—	190,9 193,1 195,2
—		79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 —	
—		197,2	200,6	204,0	207,10	208,0	(210,0)	—	
—	86 Em	87 —	88 Ra	89 Ac	90 Th	91 Bv	92 U		
—	(223,0)	—	226,4	(227)	232,4	123,4	238,5		

Fig. 1. Das periodische System der Elemente mit Atomnummern und Atomgewichten.

man ein *einwertiges negatives Ion*. In derselben Weise können zwei- und mehrwertige positive und negative Ionen entstehen. So ist z. B. das H^+ -Ion nichts als der nackte H-Kern, das He^{++} -Ion der nackte He-Kern, den wir so gleich in den α -Strahlen wiederfinden werden.

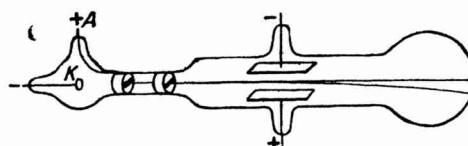


Fig. 2. Kathodenstrahlen im elektrischen Felde.

3. Die Atomistik der Elektrizität.

Ehe wir nun den Entwurf des Systems der Atome in allen Einzelheiten ausgestalten, wird es an der Zeit sein, die Behauptungen zu begründen.

den Beweis der Helmholtzschen Hypothese. Wenn man z. B. ein Kathodenstrahlbündel in ein elektrisches Feld bringt, so wird es gerade so abgelenkt, als bestände es aus einzelnen negativ geladenen, tragen Teilchen. Die Fig. 2 zeigt ein evakuiertes Glasrohr mit der Anode A und der Kathode K ; von dieser gehen die Kathodenstrahlen aus und passieren den Zwischenraum zwischen zwei geladenen Kondensatorplatten, durch die sie abgelenkt werden. Durch Kombination der elektrischen mit einer magnetischen Ablenkung kann man die Geschwindigkeit und das Verhältnis von Ladung und Masse e/m bestimmen⁽¹⁾. Dieses fand sich vielmals größer als bei der Elektrolyse, nämlich

$$\frac{e}{m} = 5,6 \cdot 10^{17} \text{ E. S. E. pro g;}$$

macht man nun die naheliegende Annahme, daß die Ladung in beiden Fällen denselben Wert hat, so folgt, daß die Masse der Kathodenstrahlteilchen

viel kleiner sein muß als die der Atome, etwa 1900-mal kleiner als die des H-Atoms. Diese leichten, negativen Teilchen sind die Elektronen.

4. Die positive Elektrizität.

Man hat auch positive Strahlen gefunden und für sie das Verhältnis e/m bestimmt; z. B. die sogen. Kanalstrahlen von *Goldstein*⁽²⁾, die aus Löchern in der Kathode in der entgegengesetzten Richtung austreten wie die Kathodenstrahlen, und die α -Strahlen der radioaktiven Substanzen. Hierbei ergab sich aber e/m von derselben Größenordnung wie bei der Elektrolyse. Überhaupt ist es niemals gelungen, die positive Elektrizität von der Materie zu isolieren. Man schließt daraus, daß die tragen, schweren Teile der Atome die positiven Elementarteilchen sind. Besonders wichtig ist der Befund, daß die α -Teilchen der radioaktiven Substanzen doppelt geladene He-Atome, also nackte He-Kerne sind⁽³⁾. *J. J. Thomson* hat in Vakuumröhren Kanalstrahlen von allen möglichen Substanzen herstellen und ihr e/m messen können.

5. Die Ladung des Elektrons.

Die Elektronen werden nun zur Erklärung zahlreicher elektrischer und optischer Erscheinungen herangezogen. So wurde gezeigt, daß die Farbenzerstreuung des Lichtes auf dem Mischwesen elastisch gebundener Elektronen in den Atomen beruht, und es konnte aus rein optischen Messungen des Brechungsindex das Verhältnis e/m in guter Übereinstimmung mit dem Kathodenstrahlwert berechnet werden⁽⁴⁾. Dasselbe gelang mit Hilfe der Erscheinung, daß die Emissionslinien leuchtender Gase in magnetischen Feldern verschoben und aufgespalten werden (*Zeeman-Effekt*)⁽⁵⁾.

Englische Physiker studierten die Leitfähigkeit der Gase und erklärten sie durch Ionisierung der Gasatome; diese Untersuchungen führten schließlich zur Auffindung einer Methode, um das elektrische Elementarquantum e in absoluten Einheiten zu messen⁽⁶⁾. Kleine Tröpfchen aus Wasser oder Öl, oder Kugelchen aus Metall von mikroskopischen oder submikroskopischen Dimensionen nehmen in ionisierten Gasen Ladungen an und wandern daher in elektrischen Feldern; sie stellen also ungeheuer empfindliche Elektroskope dar. Auf diese Weise fand *Millikan* (in Chicago), daß alle vorkommenden Ladungen der Tröpfchen ganzzahlige Vielfache des Quantums

$$e = 4,774 \cdot 10^{-10} \text{ E. S. E.}$$

sind; dieses gilt heute als die Elektronenladung. Es darf aber nicht verschwiegen werden, daß *Ehrenhaft* (in Wien), der mit wesentlich kleineren Tröpfchen hantiert, viel kleinere Ladungen gefunden haben will und die Existenz eines Elektrons in dieser Größenordnung leugnet. Dieses ist der einzige tiefe Schatten in der hellen Landschaft der Elektronentheorie; doch stehen der einen Unstimmigkeit so viele Übereinstimmun-

gen gegenüber, daß man hoffen darf, *Ehrenhaft*'s Versuche werden sich schließlich in das schöne, übersichtliche Bild einfügen lassen.

6. Die Größe der Elektronen und Kerne.

Wie groß muß man sich nun das Elektron vorstellen? Die Antwort darauf gibt ein allgemeiner Satz der Elektrodynamik, der eng mit der modernen Relativitätstheorie verknüpft ist. Unter der Masse eines Körpers versteht die Physik nicht irgend ein Maß für die Quantität der Materie, sondern dasjenige, welches durch den Trägheitswiderstand gegen Geschwindigkeitsänderungen (Beschleunigungen) geliefert wird. Die Massen zweier Körper verhalten sich wie die Geschwindigkeitsänderungen, die ein und dieselbe Kraft ihnen erteilt. Aus dieser Definition und dem Schwerpunktsatz der Mechanik folgt nun, daß die Masse nicht exakt konstant ist, sondern von dem Energieinhalt des Körpers abhängt. Diese höchst wichtige Tatsache hat *Einstein* etwa so begründet:

Man denke sich ein langes Rohr; an dem einen Ende sei ein Körper *A*, am andern ein Körper *B* von genau gleichem Material und genau gleicher Größe, also mit gleicher gewöhnlicher Masse. *A* enthalte eine gewisse Energie- menge mehr als *B* und eine Einrichtung, daß



Fig. 3.

diese als Lichtblitz in der Richtung nach *B* ausgestrahlt werden kann. Wenn das geschieht, erfährt *A* durch den Lichtdruck, dessen Existenz experimentell und theoretisch gesichert ist, einen Rückstoß; das ganze Rohr wird sich also so lange nach links bewegen, bis das Licht in *B* angelangt und dort absorbiert ist. Bei dem Auftreffen des Lichtes in *B* wirkt der Lichtdruck in der umgekehrten Richtung und mit derselben Stärke, so daß das Rohr zur Ruhe kommt, in einer gegen die Anfangslage etwas verschobenen Stellung. Jetzt mögen die beiden Körper *A* und *B* ihre Plätze wechseln; haben sie beide die gleiche gewöhnliche Masse und wäre diese mechanisch allein maßgebend, so würde bei der Vertauschung von *A* und *B* ihr Schwerpunkt in Ruhe bleiben, also das ganze Rohr keine Verschiebung erleiden. Dann wäre nachher derselbe Zustand wie zu Anfang erreicht: da, wo vorher *A* war, ist jetzt *B* mit demselben Energieüberschuss, und an Stelle von *B* ist jetzt *A* in dem Zustand, den *B* vorher hatte. Daher kann man den Prozeß wiederholen und die Energie in Strahlungsform von *B* nach *A* schicken; dabei würde das Rohr wieder eine Verrückung von derselben Größe erfahren. Durch vielfache Wiederholung des Vorganges kann der Körper

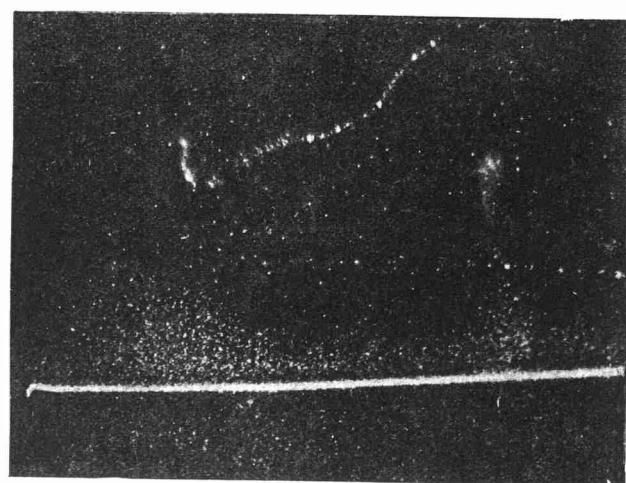
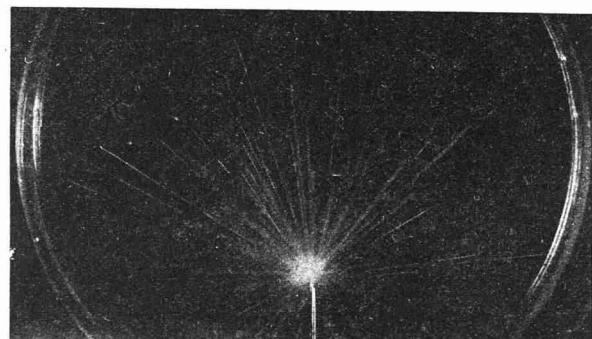
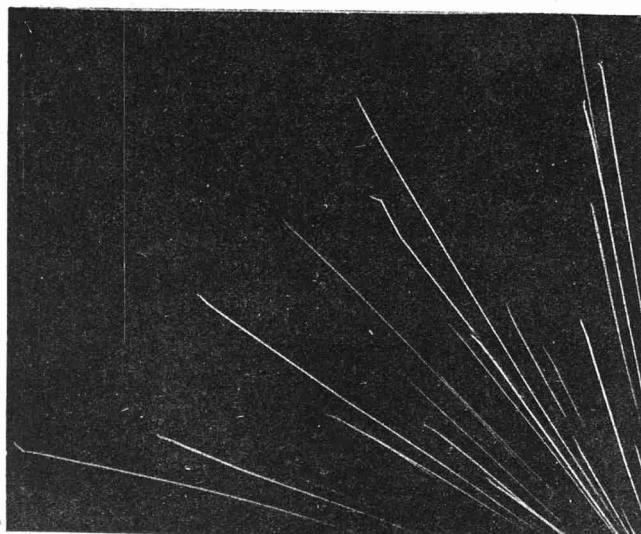


Fig. 4, 5 und 6. Bahnen von α -Strahlen.

also ohne Anwendung äußerer Kräfte aus der Ruhe in Bewegung gesetzt und beliebig weit transportiert werden. Das widerspricht den Grundsätzen der Mechanik. Man muß, um diesen Widerspruch zu lösen, annehmen, daß beim Austausch der beiden Körper A, B der mit dem Energieüberschuß versehene eine größere Masse hat, die so bestimmt ist, daß die durch den Lichtdruck erzeugte Verschiebung gerade bei dem Rücktransport wieder rückgängig gemacht wird. Diese Massenvergrößerung hängt natürlich von dem Energieüberschusse ab. Auch auf andere Weisen kann man zeigen, daß die Masse eines Körpers zunimmt, wenn sein Energieinhalt vermehrt wird. Der Gedanke liegt nicht fern, daß die ganze Masse eines Körpers von seiner Energie herrührt. Die genaue mathe-

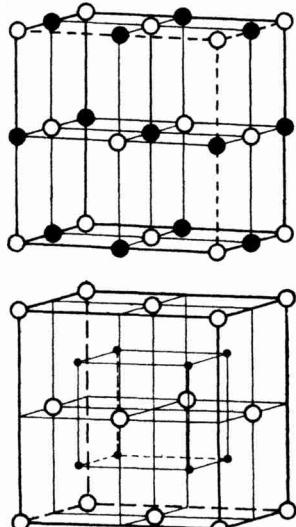


Fig. 7. Gitter des Steinsalzes (NaCl) und des Flußspats (CaF_2).

matische Analyse auf Grund des Relativitätsprinzips liefert den Satz, daß die Masse eines Körpers gleich seinem Energieinhalt dividiert durch das Quadrat der Lichtgeschwindigkeit ist (*):

$$m = \frac{E}{c^2}.$$

Ist nun das Elektron nichts als abstrakte elektrische Ladung, so ist seine Energie bis auf einen Zahlenfaktor der Größenordnung 1 gleich $\frac{e^2}{r}$, wo r der Radius des Elektrons ist; also die Masse

$$m = \frac{e^2}{c^2 r},$$

und daraus folgt

$$r = \frac{e}{m} \cdot e \cdot \frac{1}{c^2}.$$

Mit den angegebenen Werten von e/m , e und $c = 3 \cdot 10^{10}$ cm/sec findet man

$$r = \frac{5,6 \cdot 10^{17} \cdot 4,8 \cdot 10^{-10}}{9 \cdot 10^{20}} = 3 \cdot 10^{-18} \text{ cm.}$$

Nach bekannten Schätzungen sind die Atomradien von der Größenordnung 10^{-8} cm, also ist das Elektron außerordentlich klein gegen das Atom. Will man aber die Masse der Atomkerne selbst rein elektrisch deuten, so muß man bedenken, daß sie fast 2000-mal größer ist als die des Elektrons; da nun unsere Formel zeigt, daß Masse und Radius umgekehrt proportional sind, so wird der Radius des Kernes etwa 2000-mal kleiner als der des Elektrons. Dieses merkwürdige Resultat, daß die positiv geladenen, tragen Massen in außerordentlich winzigen Räumen konzentriert sind, ist nun durch Erfahrungen sehr gut bestätigt worden, wie wir sogleich sehen werden.

7. Thomsons Atommodell.

Wir kommen nämlich nun zu den Kernen und dem Aufbau der Atome aus Kernen und Elektronen. Um die scharfen Spektrallinien zu erklären, glaubte man annehmen zu müssen, daß die Elektronen in den Atomen um Gleichgewichtslagen mit scharf bestimmten Schwingungszahlen oszillieren können. Aber elektrische Ladungen, die sich nicht durchdringen, bilden keine stabilen Konfigurationen. Daher konstruierte Lord Kel-

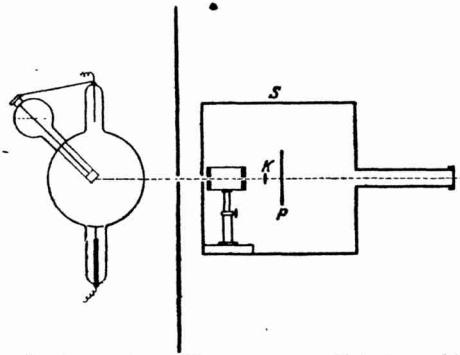


Fig. 8. Apparat zur Erzeugung von Interferenzbildern der Röntgenstrahlen nach Laue.

vin ein Atommodell, das später J. J. Thomson weitgehend ausarbeitete (*): Die positive Elektrizität bildet eine Kugel, deren Radius von der Größenordnung 10^{-8} cm ist, und in dieser schwimmen die negativen Elektronen. Diese bilden dann nach den Gesetzen der Elektrostatik regelmäßige Anordnungen, deren Eigenschaften gewisse Ähnlichkeit mit denen der Atome haben. Aber in vieler Hinsicht versagt dieses Modell, besonders hinsichtlich der Erklärung der großen Zahl von Spektrallinien und ihrer wunderbaren Gesetze, von denen wir nachher zu reden haben werden. Theoretisch ist die Kelvinsche Kugel verdächtig wegen ihrer Größe, die eine elektrische Deutung der Masse ausschließt.

8. Rutherford's Kerntheorie.

Daß nun die Atommassen tatsächlich in selbst gegen das Elektron kleinen Räumen zusammengedrängt sind, haben zuerst Rutherford und seine Schüler (10) nachgewiesen, und zwar mit Hilfe der Zerstreuung der α -Strahlen. Wir sehen hier

einige Bilder der Bahnen von α -Teilchen, die nach einer Methode von *Wilson*⁽¹¹⁾ aufgenommen sind (Fig. 4, 5, 6); die Teilchen ionisieren nämlich auf ihrer Bahn die Luft, und wenn diese mit Wasserdampf übersättigt ist, so kondensiert sich dieser um jedes Ion als Tröpfchen und macht die Bahn des α -Strahls sichtbar. Man erkennt deutlich die begrenzte Reichweite der Strahlen und sieht, daß einige am Schlusse ihres Weges plötzlich scharfe

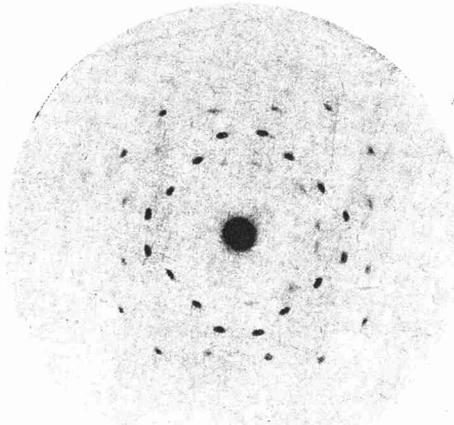


Fig. 9. Röntgenstrahlinterferenzen nach *Laue*.

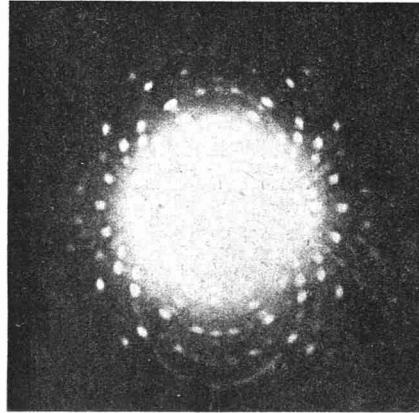
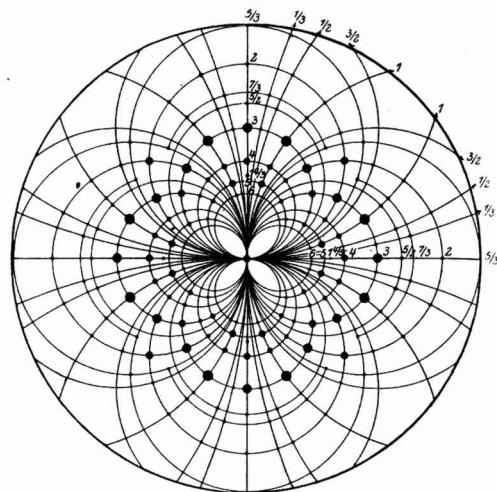


Fig. 10. Röntgenstrahlinterferenzen nach *Laue*.

Ablenkungen erfahren. Durch genaues Studium dieser Reichweite und dieser Zerstreuungen, besonders in Metallfolien, konnte *Rutherford* feststellen, daß die mit schwerer Masse behafteten Teile der Materie ungeheuer klein sein müssen, damit einerseits die α -Strahlen überhaupt so weit eindringen, wie sie es tun, und andererseits so plötzliche Ablenkungen erfahren. Er konnte auch aus seinen Messungen die Größe der Kernladung bestimmen und fand sie, gemessen in Quanten e , etwa gleich dem halben Atomgewicht:

Danach hätte also He die Nummer $z = \frac{4}{2} = 2$, C die Nummer $z = \frac{12}{2} = 6$, genau, wie auf Fig. 1 angegeben. Dieses Resultat wurde dann durch Untersuchungen über die Zerstreuung der Röntgenstrahlen gestützt⁽¹²⁾. Man kann nämlich den



9. Die Interferenz der Röntgenstrahlen.

Daß es sich aber bei der Zahl z um wirkliche Zählung der Elektronen handelt⁽¹³⁾, hat erst die Erforschung der Röntgenspektren ergeben, die durch *M.v. Laues*⁽¹⁴⁾ großartige Entdeckung der Untersuchung zugänglich wurden.

Diese Entdeckung beruht bekanntlich auf der Vorstellung, daß die Kristalle Atomgitter seien, und zwar von so kleiner Gitterkonstante, daß sie als Beugungsgitter für die kurzweligen Röntgenstrahlen verwandt werden können. Die Fig. 7 zeigt einige solche Gitter, die den Kristallen Steinsalz NaCl und Flußpat CaF_2 zugehören.

Die Fig. 8 zeigt die Lauesche Apparatur zur Erzeugung von Interferenzbildern der Röntgenstrahlen. Der aus der Röntgenröhre aus-

zu haben, und erhalten dann auf den photographischen Platten richtige „Spektren“ der Röntgenstrahlen. Die Bragg haben zuerst sichere Angaben über die Gitterstruktur einfacher Kristalle gemacht und Wellenlängen von Röntgenstrahlen genau gemessen. Der junge Physiker *Moseley*⁽¹⁶⁾, der leider im Kriege gefallen ist, hat mit Braggschen Methoden zuerst systematisch das Röntgenspektrum zahlreicher Elemente durchforscht. Von *Debye*⁽¹⁷⁾ röhrt eine Modifikation des Braggschen Verfahrens her; anstatt einen großen Kristall zu drehen, benützt er ein Pulver aus feinsten Kriställchen, dessen verschiedene Körner von selber alle möglichen Lagen gegen den Röntgenstrahl haben. Fig. 13 ist eine Originalaufnahme von einem Metallspektrum.

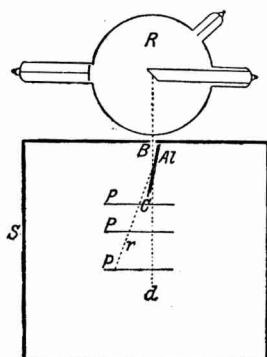


Fig. 12.
Röntgenspektrograph nach Bragg.
R Röntgenrohr, B Blende, C Kristallplatte,
Al Kristallträger, P P photographische
Platte, S Schutzkasten, d durchgehender
Strahl, r reflektierter Strahl.

tretende Strahl trifft ein Stück des Kristalls, hinter dem eine photographische Platte aufgestellt ist. Auf dieser erhält man dann außer dem Bilde des direkten Strahls zahlreiche Nebenbilder, die eine deutliche Gesetzmäßigkeit zeigen und die Symmetrieverhältnisse des Kristalls widerstreifen (Fig. 9 und 10). Aus diesen Laue-Aufnahmen kann man dann durch Messung und Rechnung Schlüsse ziehen, einerseits auf die Struktur des Kristallgitters, andererseits auf die Zusammensetzung (die „Farben“) des Röntgenlichtes. Die Fig. 11 zeigt neben der Aufnahme eine theoretische Figur, bei der die Entstehung und Bedeutung der Interferenzflecke durch eingezeichnete Kurven kenntlich gemacht ist. Wirkliche Röntgenspektroskopie haben zuerst die beiden Bragg⁽¹⁸⁾, Vater und Sohn, ausgeführt. Sie benützen die Tatsache, daß Röntgenlicht an einer natürlichen Kristallfläche reflektiert wird, aber nicht unter allen Einfallswinkeln, sondern nur unter ganz bestimmten, deren Größe von der Wellenlänge abhängt. Daher drehen sie den Kristall (Fig. 12) hin und her, um alle möglichen Einfallsinkel der Reihe nach

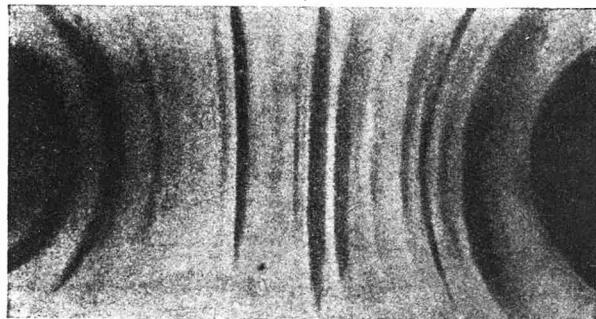


Fig. 13. Röntgenspektrum nach Debye.



Fig. 14. Die L-Reihe des Aldebaranums.

Der beste Röntgenspektroskopiker ist heute wohl der Schwede *Siegbahn*; Fig. 14 zeigt eine Aufnahme des Aldebaranumspektrums, um anschaulich zu machen, auf welcher Höhe heute die Kunst der Röntgenspektroskopie ist. Die Schönheit des Bildes steht keinem optischen Spektrum nach.

10. Die Röntgenspektren.

Was ist nun das Hauptergebnis dieser Forschungen? Es röhrt im wesentlichen schon von dem obengenannten *Moseley* her. Fig. 15 a, b zeigt das überraschende Resultat:

Alle Elemente haben wesentlich dasselbe Röntgenspektrum, nur rücken alle Linien mit wachsender Atomnummer z nach wachsenden Schwingungszahlen v oder nach abnehmenden Wellenlängen λ . Dabei ergibt sich das einfache Gesetz, daß v oder $1/\lambda$, als Funktion von z aufgetragen,

eine gerade Linie ist, oder wenigstens eine schwach gekrümmte Kurve⁽¹⁹⁾. Die Figuren 16 und 17 zeigen das für die beiden Hauptgruppen der Röntgenlinien, die *K*- und *L*-Serie; jede dieser Serien be-

bestehend; sie wächst bis zum Ne auf 8 Elektronen; dann beginnt die dritte Schale bei Na mit 1 Elektron und wächst bis A auf 8 Elektronen. Bei den großen Perioden ist der weitere Aufbau

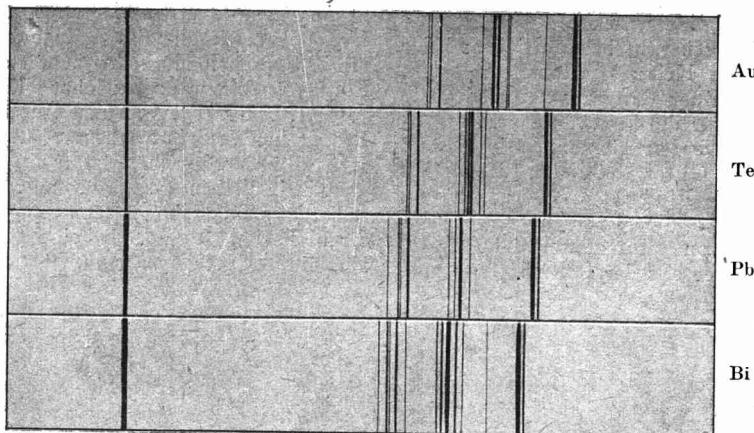


Fig. 15 a. Die *L*-Reihe einiger Elemente.

steht aus einer Anzahl von Linien, die von Element zu Element aufgetragen je eine glatte, fast *gerade* Linie ergeben. Daß es sich dabei wirklich um die Atomnummer *z*, nicht um das Atomgewicht *A* handelt, zeigt das folgende Bild, wo \sqrt{v} als Funktion von *z* eine glatte Gerade, als Funktion von *A* eine unregelmäßige Wellenlinie gibt.

Damit ist aber der fundamentale Charakter der Atomnummer *z* nachgewiesen. Man weiß nun genau, daß wirklich *A* vor *K*, *Co* vor *Ni* geht; man weiß genau, daß nur 5 Elemente im periodischen System fehlen, denn sogar die seltenen Erden folgen lückenlos dem \sqrt{v} -Gesetze. Die Entdeckung dieser fehlenden Elemente mit Hilfe der Röntgenspektren ist jetzt in greifbare Nähe gerückt.

11. Der Atombau.

Welche Folgerungen über den Atombau lassen sich nun aus diesen Tatsachen ziehen? Es ist wohl klar, daß die Röntgenstrahlen aus dem Innersten des Atoms stammen, während die chemischen, optischen, magnetischen Eigenschaften der Atome von ihren äußeren Teilen bestimmt werden. Dann lehrt die Gleichartigkeit der Röntgenspektren den Satz:

Alle Atome haben im Innern denselben Aufbau.

Verbindet man diesen Satz mit der Tatsache, daß gewisse Röntgenlinien erst von einem bestimmten Elemente an auftreten, und mit der bekannten Periodizität des chemischen und physikalischen Verhaltens, so gelangt man zu der Vorstellung von der *schalenförmigen Anordnung* der Elektronen um den Kern.

Das H-Atom hat 1 Elektron, das He-Atom 2 Elektronen; diese bilden die erste Schale (oder den ersten Ring). Mit dem Alkalimetall Li beginnt die zweite Schale, zunächst aus 1 Elektron

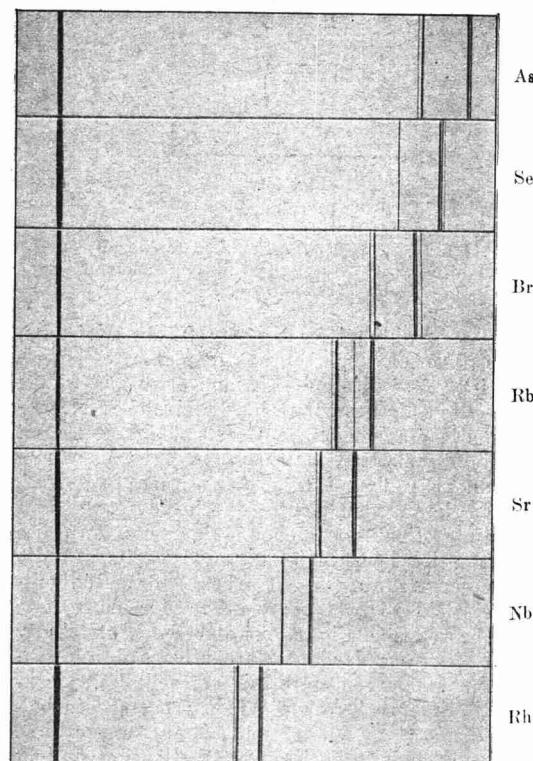


Fig. 15 b. Die *K*-Reihe einiger Elemente.

der Schalen aus chemischen Daten nicht ohne viel Willkür zu konstruieren; es sind da schon manche Hypothesen aufgestellt worden, doch wollen wir

nicht darauf eingehen. Jedenfalls liefert unser Prinzip zwei Grundtatsachen:

1. Die innersten Schalen sind für alle Atome von einer gewissen Stelle an qualitativ identisch, werden also qualitativ dieselben Röntgenstrahlen erzeugen; quantitativ aber erkennt man, daß die Elektronen mit wachsender Kernladungszahl z immer fester an den Kern gebunden werden, wodurch die Frequenz der Röntgenstrahlen immer größer wird. Die Quantentheorie der Emission, von der wir sogleich noch sprechen werden, liefert in der Tat das Gesetz, daß \sqrt{v} näherungsweise proportional z ist.

2. Die äußerste Schale hat die Periode 8 und ist für Elemente derselben Vertikalreihe identisch, entsprechend dem gleichen chemischen und optischen Verhalten. Kossel⁽²⁰⁾ hat diese Vorstellungen qualitativ weiter ausgebaut und sie mit dem Verhalten der elektrochemischen Valenzen in Übereinstimmung gebracht. Er nimmt an, daß der Konfiguration von 8 Elektronen, wie sie die äußersten Schalen der Edelgase zeigen, eine besonders hohe Stabilität zukommt. Eine Schale von 1 Elektron ist wenig stabil, das Elektron

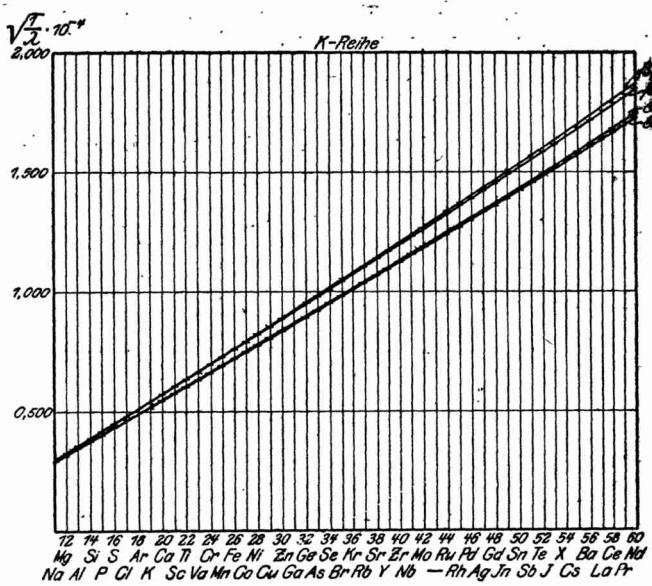


Fig. 16. Die K-Reihe.

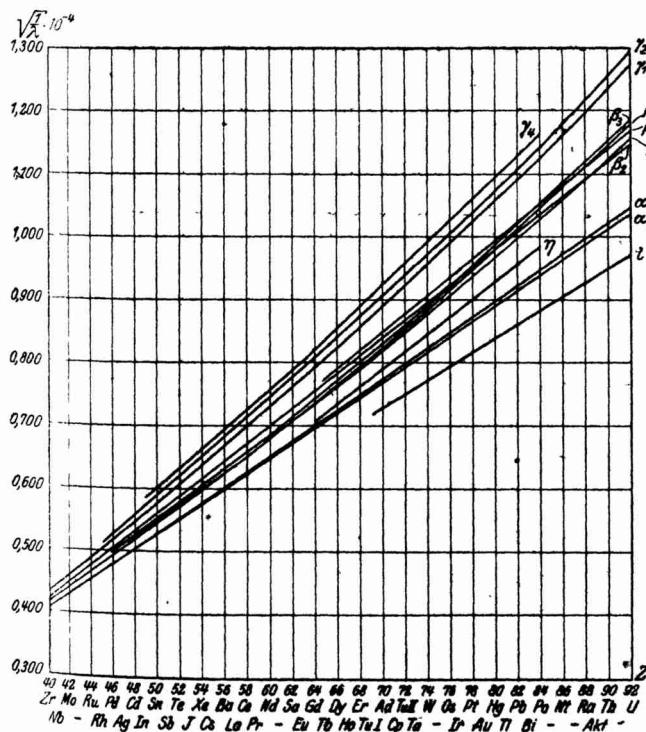


Fig. 17. Die L-Reihe.

wird leicht abgegeben; etwas fester sitzen schon 2 Elektronen usw. Eine Schale von 7 Elektronen sucht ein Elektron an sich zu ziehen und sich zur stabilen Konfiguration der 8 Elektronen zu ergänzen; eine Schale von 6 Elektronen zieht 2 Elektronen an, aber mit geringerer Stärke usw.

N. w. 1920.

Auf diese Weise wird das polare Valenzverhalten höchst anschaulich. Die Fig. 19 verdeutlicht die maximale Zahl positiver und negativer Elektronen, die ein Atom aufnehmen kann; so ist z. B. die Elektronenzahl des neutralen Na-Atoms gleich 11 (leerer Kreis auf der Diagonale des Bildes),

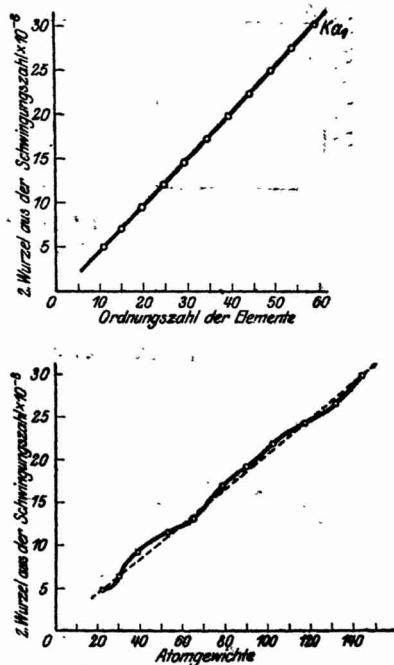


Fig. 18. Die Quadratwurzel aus der Schwingungszahl der Kα-Linie.

es kann ein Elektron verlieren und rückt dann auf die durch das Edelgas Ne gehende Horizontale $z = 10$ (voller Kreis).

12. *Chemische Folgerungen.*

Atoms diesem verloren geht und von der äußeren 7-Schale des Cl -Atoms aufgenommen wird. Dadurch entstehen ein Na^+ -Ion und ein Cl^- -Ion, beide mit einer stabilen äußeren Schale von 8 Elektronen. Diese ziehen sich nun auf Grund ihrer Ladungen an und legen sich zur $NaCl$ -Moleköl aneinander.

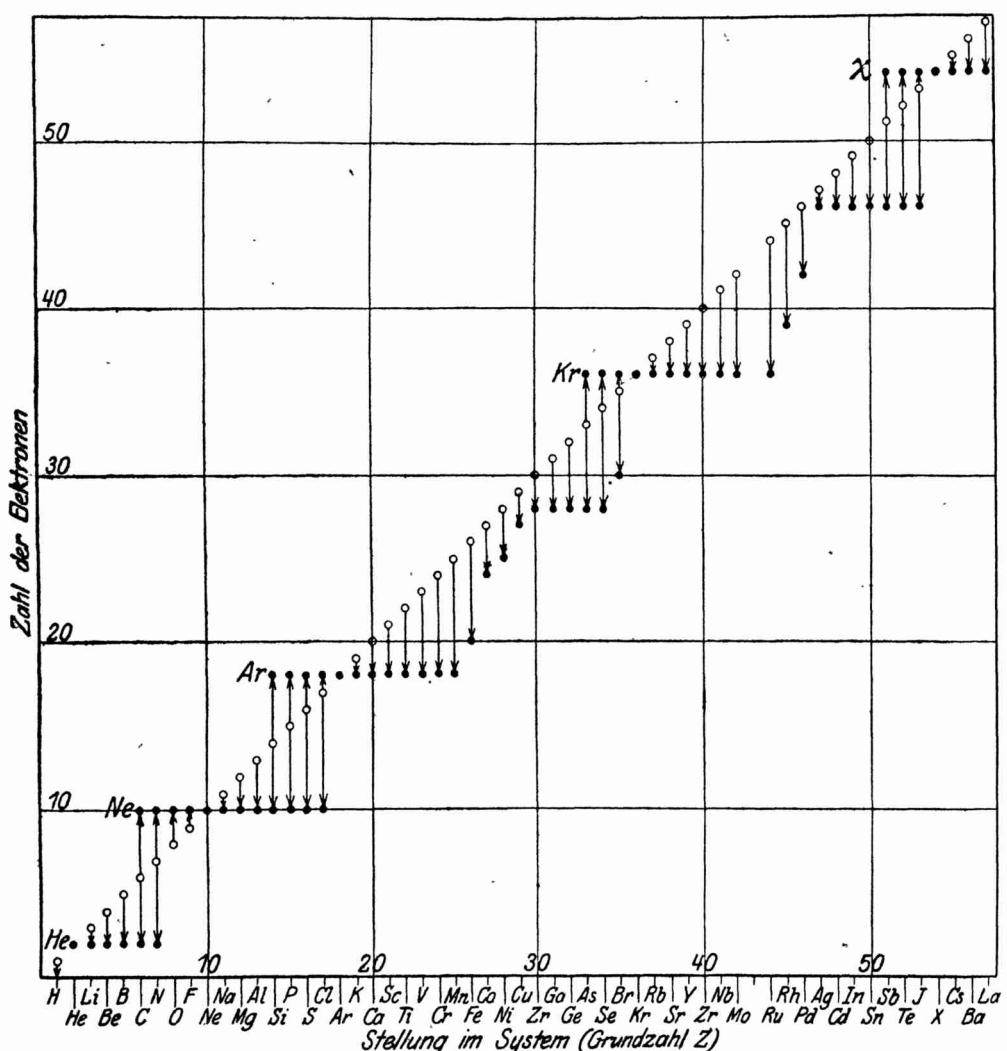


Fig. 19. Die Elektrovalenz der Atome (nach Kossel dargestellt).

Komplexverbindungen, in höchst einheitlicher Weise gedeutet. Das, was den Physiker dabei anzieht, ist, daß er mit den gewöhnlichen elektrostatischen Kräften auskommt, ohne Heranziehung besonderer Valenzen, die wie Seile oder Ketten von Atom zu Atom verlaufen. Verdeutlichen wir uns das z. B. an dem Zustandekommen der Verbindung NaCl. Der primäre Vorgang ist der, daß das lockere äußere Elektron des Na-

Diese Vorstellung haben A. Landé und ich (21) weiter verfolgt, indem wir die Gitterstruktur des NaCl-Kristalls herangezogen. Es gelingt dabei, die bei der Bildung einer Gramm-Molekel NaCl aus den Ionen frei werdende Wärme aus rein physikalischen Größen, wie Dichte und Kompressibilität, zu berechnen, und aus dem Werte dieser Bildungswärme lassen sich zahlreiche, zum Teil experimentell gut bestätigte Folgerungen

ziehen. Doch möchte ich auf diese noch im Werden befindlichen Untersuchungen hier nicht eingehen.

13. Die sichtbaren Spektren.

Die Kosselsche Vorstellung hat auch wichtige Konsequenzen auf andern Gebieten, vor allem in der Optik. Man wird annehmen müssen, daß das sichtbare Spektrum im wesentlichen von der äußersten Elektronenschale herrührt. Daraus folgt aber z. B., daß das Spektrum eines einwertigen Ions einer alkalischen Erde (3. Vertikalseihe des Systems der Elemente) qualitativ übereinstimmen muß mit dem Spektrum des entsprechenden neutralen Alkaliatoms (22); denn beide haben dieselben inneren Schalen und ein äußeres Elektron, sie unterscheiden sich nur durch eine Einheit der Kernladung. Diese wun-

derbare Gesetzmäßigkeit scheint sich durchweg zu bestätigen. So muß z. B. auch das Spektrum des He^+ -Ions mit dem des H-Atoms qualitativ identisch sein, und das führt uns nun zur genaueren Betrachtung des H-Atoms.

1. Das Elektron bewegt sich auf einer Ellipse, in deren einem Brennpunkt der Kern steht.
2. Die Quadrate der Umlaufszeiten verhalten sich wie die Kuben der großen Achsen.
3. Die vom Radius Vektor überstrichenen Flächen verhalten sich wie die verflossenen Zeiten;

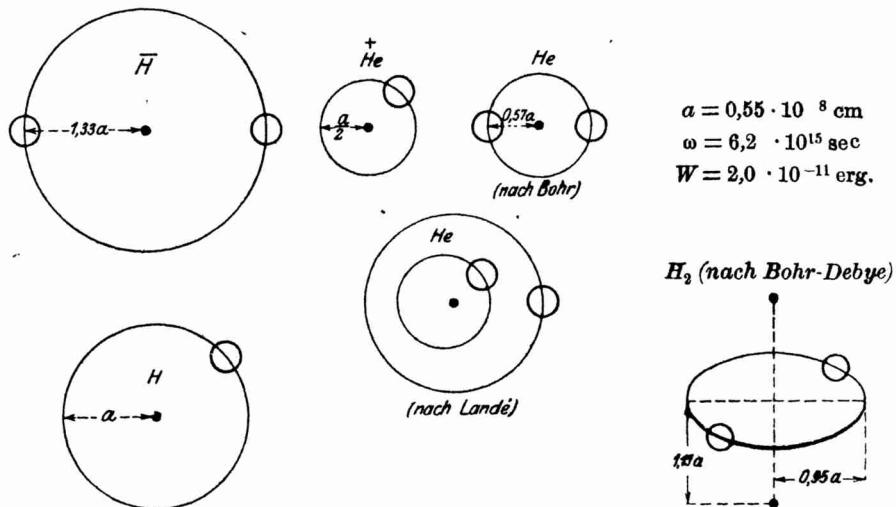


Fig. 20. Atom- und Molekell-Modelle nach N. Bohr.

derbare Gesetzmäßigkeit scheint sich durchweg zu bestätigen. So muß z. B. auch das Spektrum des He^+ -Ions mit dem des H-Atoms qualitativ identisch sein, und das führt uns nun zur genaueren Betrachtung des H-Atoms.

14. Die Quantentheorie der Atome.

Beim H-Atom besitzen wir nämlich eine eingehende Theorie und ein genaues Bild seines Ausschlags, dank der genialen Idee von Niels Bohr (23), der die Rutherford'sche Atomkerntheorie mit der Planck'schen Quantentheorie (24) verband. Die Fig. 20 zeigt solche Bohr'sche Atome. Es sind gewissermaßen kleine Sonnensysteme; der Kern ist die Sonne, die Elektronen die Planeten. Im Gegensatze zur Astronomie ist aber die Sonne nicht ungeheuer groß gegen die Planeten, sondern umgekehrt winzig klein; wohl aber ist hier wie dort die Masse des Zentralkörpers überwiegend groß. Die Anziehungskraft ist nicht die Gravitation, sondern die elektrische Attraktion, aber

dazu das Quantengesetz:

4. Das Verhältnis der bei einem Umlaufe überstrichenen Flächen zu der dazu gebrauchten Zeit ist ein ganzzahliges Vielfaches einer bestimmten Größe $\frac{4\pi m}{h}$, wo m die (bekannte) Masse des Elektrons und $h = 6,55 \cdot 10^{-27}$ erg. sec die Planck'sche Konstante ist.

Hier ist nicht der Ort, auf die Entdeckung und die Bedeutung dieser Konstanten näher einzugehen; es mag genügen, daß sie die von einem schwarzen Körper ausgestrahlte Energiemenge bestimmt. Nach den aufgezählten Bewegungsgesetzen gibt es nur eine diskrete Menge von Bahnen, eine innerste, deren Radius a , Umlaufsfrequenz ω und Energiebetrag W von der Figur abgelesen werden können, und immer weitere und weitere, die einander umschließen. Wenn nun

das Elektron von einer Bahn in eine andere überspringt, so wird dabei entweder Energie verbraucht oder abgegeben; im ersten Falle wird Licht absorbiert, im zweiten emittiert. Über das Gesetz dieser Emission und Absorption hat *Bohr* eine Hypothese aufgestellt, die der Planckschen Quantentheorie der Strahlung entlehnt ist. Bei jedem Sprunge von einer Bahn von größerer Energie zu einer von kleinerer soll eine monochromatische (einfarbige) Strahlung emittiert werden, deren Schwingungszahl mit h multipliziert gleich der Energiedifferenz W ist:

$$hv = W.$$

Auf diese Weise erhält man quantitativ exakt das Gesetz der Emission des H-Atoms, nämlich die bekannte Serie (25), die Figur 21 an zwei Sternaufnahmen (26) zeigt. Hier sieht man die Linien dieser Serie eingerahmt von je zwei Vergleichsspektren; man erkennt ohne weiteres die gesetzmäßige Aufeinanderfolge der Linien und ihre Häufung im Ultravioletten, die Seriengrenze. Die folgende Tabelle

Ähnlich steht es mit dem He^+ -Spektrum; die Hauptserie desselben hielt man früher für eine Nebenserie des Wasserstoffes wegen ihres analogen Aufbaus.

Auch über das neutrale He-Atom hat man sich bestimmte Vorstellungen gemacht; Fig. 20 zeigt das Modell von *Bohr*, wo beide Elektronen auf demselben Kreise symmetrisch umlaufen, und das Modell von *Landé* (28), wo sie verschiedene kreisähnliche Bahnen durchlaufen, deren innere von der äußeren exzentrisch zur Seite gedrängt wird. Letzteres Modell gibt das sichtbare Spektrum recht gut wieder, aber es versagt in einem Punkte, nämlich der Ionisierungsenergie. Das ist die Arbeit, die nötig ist, um dem Atom ein Elektron ganz zu entreißen, also eine Größe, die für die Kosselsche Auffassung der chemischen Bindung fundamental ist. Sie ist gewissermaßen die Energiedifferenz der im Unendlichen liegenden Quantenbahn gegen die erste und hängt daher mit der ultravioletten Grenze des Spektrums durch das Quantengesetz zusammen:

$$J = hv,$$

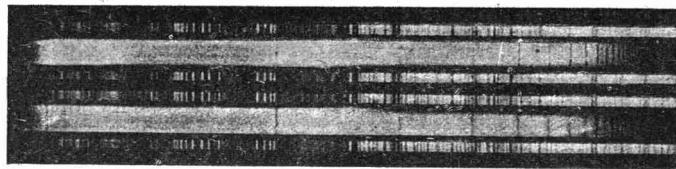


Fig. 21. Wasserstoff-Sternspektren (Balmer-Serie).

Linie	m	Berechnet	Beobachtet	Differenz
$H\alpha$	3	6564,96	6564,97	0,0
$H\beta$	4	4862,93	4862,93	0,0
$H\gamma$	5	4341,90	4342,00	+ 0,1
$H\delta$	6	4103,10	4103,11	0,0
$H\epsilon$	7	3971,40	3971,40	0,0
$H\zeta$	8	3890,30	3890,30	0,0
$H\eta$	9	3836,70	3836,80	+ 0,1
$H\theta$	10	3799,20	3799,20	0,0
$H\iota$	11	3771,90	3771,90	0,0
$H\kappa$	12	3751,40	3751,30	- 0,1
$H\lambda$	13	3735,60	3735,30	- 0,3
$H\mu$	14	3723,20	3722,80	- 0,4
$H\nu$	15	3713,20	3712,90	- 0,3

Vergleich der berechneten und beobachteten Wellenlängen der Balmer-Serie.

veranschaulicht die Genauigkeit, mit der die Wellenlängen dieser Serie durch die zuerst von *Balmer* empirisch gefundene, jetzt von *Bohr* theoretisch begründete Formel dargestellt werden. Aber noch unzählige Feinheiten des H-Spektrums, wie die zarten Trabanten der Hauptlinien (27), die Aufspaltung im elektrischen Felde (28) usw. werden durch die Bohrsche Theorie quantitativ erklärt.

wo v die Grenzfrequenz ist. Diese Abtrennungsenergie J haben *Franck* und *Hertz* (30) direkt zu messen gelehrt, indem sie die Atome mit Elektronen bombardieren und beobachten, bei welcher Geschwindigkeit die Elektronen das Atom zertrümmern und dabei ihre Energie einbüßen. Sowohl das Bohrsche wie das Landésche Modell für He lieferte Werte von J , die mit den Messungsergebnissen schwer vereinbar sind.

Die durch das Gesetz $J = hv$ statuierte Beziehung zwischen optischen und elektrischen Größen ist aber sonst überall gut bestätigt worden. Fig. 22 zeigt die Spektren der Alkalimetalle Na und K, auf der man die Grenze der Serie, deren v in dieses Gesetz eingeht, erkennen kann. Auch über die Molekelpbildung hat man sich bestimmte Vorstellungen gemacht; so hat *Bohr* ein H_2 -Modell (19) vorgeschlagen, bei dem die beiden Elektronen auf einem äquatorialen Ring zwischen den beiden Kernen kreisen (Fig. 20). *Debye* (31) hat gezeigt, daß dieses Modell den richtigen Verlauf des Brechungsexponenten vom H_2 -Gas liefert, aber die daraus berechnete Dissoziationswärme $\text{H}_2 = 2\text{H}$ ergibt sich zu klein (60 kg-Kal. gegen den gemessenen Wert von etwa 80 bis 100 kg-Kal.). Auch müßte eine solche Molekelpartikel paramagnetisch sein.

Daher hält man das Modell heute wohl nicht mehr für ganz richtig.

Auf ähnlichen Prinzipien beruhen die quantitativen Berechnungen der Röntgenspektren (32); doch sind dabei noch keine vollständigen Übereinstimmungen zwischen Rechnung und Beobachtung erzielt worden.

15. Der Aufbau der Kerne.

Zum Schluß wollen wir noch einmal auf die Frage des Aufbaus der Kerne aus kleineren Einheiten eingehen. Es liegt nahe anzunehmen, daß das H-Atom der Baustein sei, aus dem sie alle bestehen. Allerdings tritt in den α -Strahlen gerade der He-Kern als selbständiges Gebilde zu-

also nicht ganzzahlig. Neuerdings ist es nun Rutherford gelungen, vom Stickstoffatom H-Atome abzuspalten (33). Wenn man ein Gas mit α -Strahlen bombardiert, kommt es gelegentlich vor, daß ein Atom des Gases so zentral getroffen wird, daß es selbst eine große Geschwindigkeit erhält; handelt es sich besonders um Wasserstoffgas, so fliegen die H-Atome wegen ihrer 4-mal geringeren Masse mit viel größerer Geschwindigkeit weiter als die erzeugenden α -Strahlen (He-Kerne), haben also eine größere Reichweite, an der sie erkannt werden können (Fig. 23). Als nun Rutherford N₂-Gas in dieser Weise bombardierte, fand er solche sekundären Strahlen von großer Reichweite, die nichts als H-Atome sein

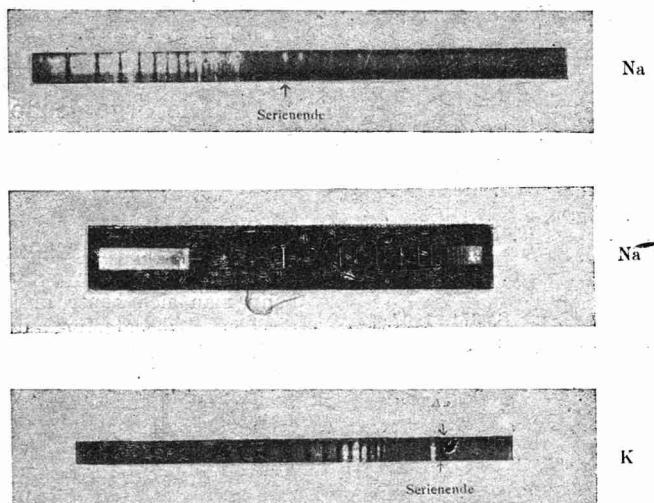


Fig. 22. Hauptserien der Alkalimetalle.
Na und K.

tage. Schwierigkeiten bietet auch die Tatsache, daß die Atomgewichte nicht genau ganzzahlig sind. Doch kennt man heute zwei Gründe hierfür, nämlich einmal die Tatsache der Isotopen, sodann den schon oben benutzten Satz der Relativitätstheorie, daß Energie Masse erzeugt. Die Isotopen hat man unter den radioaktiven Elementen kennen gelernt; es sind Elemente von genau gleicher Kernladungszahl, aber etwas verschiedenem Atomgewicht. Chemisch verhalten sie sich völlig gleich und bilden Gemische, die den Eindruck von einheitlichen Elementen machen; ein solches Gemisch wird auch dann, wenn die Atomgewichte der Bestandteile ganze Zahlen sind, ein nichtganzzahliges scheinbares Atomgewicht zeigen, nämlich einen Mittelwert der Bestandteile. Wenn mehrere Kerne (etwa He-Kerne) zu einem größeren Kerne zusammentreten, so wird dabei Energie umgesetzt, der, wie wir wissen, Masse zukommt; die Gesamtmasse des Kerns ist dann nicht einfach die Summe der Teile, sondern größer oder kleiner,

können. Das α -Teilchen muß also das N-Atom zertrümmert und ein H-Atom abgespalten haben.

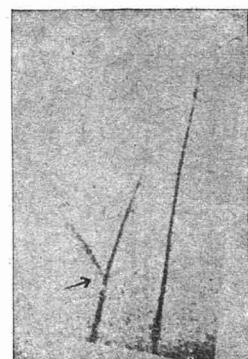


Fig. 23.
Wasserstoffstrahlen, durch
 α -Strahlen erzeugt.

Diese fundamentale Entdeckung erweckt die Hoffnung, daß dermaleinst der Aufbau der gesamten Materie aus 2 polaren Bausteinen klar zutage treten wird. Dann wird die ganze Physik und Chemie eine Aufgabe der Zahlentheorie werden: Die Theorie der Atomnummer z.

*Literatur*¹⁾.

- 1) *W. Kaufmann*, Ann. d. Phys. 19, 487, 1906.
A. H. Bucherer, Ann. d. Phys. 31, S. 513, 1909.
E. Hupka, Ann. d. Phys. 28, S. 169, 1910.
G. Neumann, Ann. d. Phys. 45, S. 529, 1914.
- 2) *E. Goldstein*, Wied. Ann. 64, S. 38, 1898. Zusammenfassende Darstellung bei *W. Wien*, Handbuch der Radiologie Bd. 4 (Leipzig 1917).
- 3) *E. Rutherford* und *T. Royds*, Phil. Mag. 17, S. 281, 1909. Allg. über radioaktive Strahlung bei *St. Meyer* u. *E. v. Schweidler*, Radioaktivität (Leipzig 1916), und *E. Rutherford*, Radioaktive Substanzen und ihre Strahlungen, Handb. d. Radiologie Bd. 2 (Leipzig 1913).
- 4) *J. J. Thomson*, The Corpuscular Theory of matter, London 1907.
W. Wien, Ann. d. Phys. 8, S. 244, 1902.
- 5) *P. Drude*, Ann. d. Phys. 14, S. 677, 936, 1904.
- 6) *P. Zeeman*, Phil. Mag. (5), 43, S. 226; 44, S. 255, 1897.
H. A. Lorentz, Wied. Ann. 63, S. 278, 1897.
- 7) *H. A. Wilson*, Phil. Mag. 5, S. 429, 1903.
R. A. Millikan, Phil. Mag. 19, S. 209, 1910; 37, S. 1, 1917. Phys. Z. 14, S. 796, 1913.
F. Ehrenhaft, Wien. Ber. 69, S. 815, 1910. Ann. d. Phys. (4) 56, S. 1, 1918.
- 8) *A. Einstein*, Ann. d. Phys. 23, S. 371, 1907.
- 9) *Lord Kelvin*, Phil. Mag. 8, S. 528, 1904; 10, S. 695, 1905.
J. J. Thomson, siehe 4).
- 10) *E. Rutherford*, Phil. Mag. 11, S. 166, 1906.
H. Geiger u. *E. Marsden*, Proc. of Roy. Soc. (A) 82, S. 495, 1909.
C. G. Darwin, Phil. Mag. 27, S. 506, 1914.
E. Rutherford, Phil. Mag. 27, S. 494, 1914.
- 11) *C. T. R. Wilson*, Jahrb. d. Rad. u. Elektr. 10, S. 34, 1913.
- 12) *J. J. Thomson*, siehe 4).
- 13) *A. van den Broek*, Atomtheorie u. Atomzerfall, Elster-Geitel-Festschrift, Braunschweig, Vieweg u. Sohn, 1915, S. 428—434.
- 14) *W. Friedrich*, *P. Knipping* u. *M. v. Laue*, München. Ber. 1912, S. 303. Zusammenfassender Bericht von *M. v. Laue*, Jahrb. d. Radioakt. u. Elektronik, 11, S. 308, 1914.
- 15) *W. H. u. W. L. Bragg*, Proc. Roy. Soc. (A) 88, S. 428, 1913. Zusammenfassender Bericht über die Kristallanalyse von *W. H. Bragg*, X-Rays and Crystal-Structure (London 1916).
- 16) *H. G. J. Moseley*, Phil. Mag. (6) 26, 1024, 1913; 27, S. 703, 1914.
- 17) *P. Debye* u. *P. Scherrer*, Phys. Z. 17, S. 277, 1916; 18, S. 291, 1917.
- 18) *M. Siegbahn*, Jahrb. d. Rad. u. Elektr. 13, S. 296, 1916. Zusammenfassender Bericht über Röntgenspektroskopie von *E. Wagner*, Phys. Z. 18, S. 495, 1917.
- 19) *A. Sommerfeld*, Ann. d. Phys. 51, S. 1, 125, 1916.
- 20) *W. Kossel*, Ann. d. Phys. 49, S. 229, 1916.
- 21) *M. Born* u. *A. Landé*, Verh. d. D. Phys. Ges. 20, S. 210, 1918; 21, S. 13, 533, 1919.

¹⁾ Während des Druckes dieses Aufsatzes erschien das wertvolle Buch von *A. Sommerfeld*, Atombau und Spektrallinien (Braunschweig 1919); es konnte leider nicht mehr benutzt werden.

- 22) *W. Kossel* u. *A. Sommerfeld*, Verh. d. D. Phys. Ges. 21, S. 240, 1919.
- 23) *N. Bohr*, Phil. Mag. 26, S. 1, 1913; 26, S. 476, 1913.
- 24) *M. Planck*, Vorlesungen über die Theorie der Wärmestrahlung, Leipzig 1913.
- 25) *J. J. Balmer*, Wied. Ann. 25, S. 80, 1885.
- 26) *J. Hartmann*, Phys. Z. 18, S. 429, 1917.
- 27) *A. Sommerfeld*, München. Ber., S. 459, 1915; Ann. d. Phys. 50, S. 125, 1916.
- 28) *P. S. Epstein*, Ann. d. Phys. 50, S. 489, 1916; Ann. d. Phys. 58, S. 553, 1919.
- 29) *A. Landé*, Phys. Z. 20, S. 228, 1919.
- 30) *J. Frank* u. *G. Hertz*, Phys. Z. 17, 409, 430, 1916; 20, S. 132, 1919.
- 31) *P. Debye*, München. Ber. 1915, S. 1.
- 32) *A. Sommerfeld*, siehe 19) und 27).
- 33) *E. Rutherford*, Phil. Mag. 37, S. 537, 1919.
K. Fajans, Naturw. 7, S. 729, 1919.
W. Lenz, Naturw. 8, S. 181, 1920.

Die organische Ernährung bei höheren grünen Pflanzen.

Von Friedrich Czapek, Prag.

Eine der wundervollsten Entdeckungen der Pflanzenphysiologie des vorigen Jahrhunderts war die sog. „Wasserkultur“ bei grünen Landpflanzen. Dank der gut ausgebildeten Methodik kann man sich heute in jedem pflanzenphysiologischen Laboratorium davon überzeugen, wie Hülsenfrüchtler, Getreidearten und andere Pflanzen, auch Holzgewächse, ohne viel Mühe in einer wässrigen Nährösung, die nichts anderes als etwa 0,2% Mineralsalze (Kali, Kalk, Magnesia, Spuren Eisen, Phosphorsäure und Schwefelsäure, mit Nitrat oder Ammoniumsalz als Stickstoffquelle) enthält und gut durchlüftet wird, freudig wachsen und vom Keimlingsstadium bis zur Blüte und Frucht zu bringen sind. Diese Ernährungsversuche zeigen schlagend, daß organische Verbindungen für grüne Pflanzen absolut entbehrlich sind und daß die Luftkohlensäure allein die gesamte organische Produktion der grünen Pflanzen ermöglicht. Mit *Pfeffer* stellt man diese Ernährungsweise als „autotrophe“ der „xenotrophen“ gegenüber, die alle Fälle in sich begießt, in denen mindestens gewisse organische Stoffe unentbehrlich sind, wie in der Ernährung der höheren und niederen Pilze. Weitere Fälle von Autotrophie kennt man nur noch von bestimmten biologischen Bakteriengruppen, sonst sind alle übrigen Organismen xenotroph.

Doch warnte bereits *Pfeffer* selbst vor der Meinung, daß den autotrophen Pflanzen eine Sonderstellung hinsichtlich ihres Stoffwechsels zu kommt. So viel wir wissen, läuft die Fähigkeit grüner Gewächse, Kohlensäure im Sonnenlicht zu assimilieren, auf eine Synthese von Zucker (Hexosen) aus Kohlendioxyd und Wasser hinaus. So wie wir nicht etwa einem Zuckeraufkanten, weil er seinen Zucker nicht einzukaufen braucht, sondern denselben aus den in eigenem Besitz be-