Zeitschrift: Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft Bern
Herausgeber: Naturforschende Gesellschaft Bern
Band: - (1918)

Artikel: Die Struktur des Atoms
Autor: Gruner, P.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-571155

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Die Struktur des Atoms.

In ihrem Streben, immer tiefer in die innersten Beziehungen der Natur einzudringen, muss die Naturforschung notwendigerweise bis zu den letzten stofflichen Bestandteilen, aus denen das ganze Weltall aufgebaut ist, gelangen.

Schon die Philosophen des Altertums suchten sich eine Vorstellung von diesen kleinsten, unteilbaren Dingen zu machen, und so finden wir den Begriff des Atoms bereits im fünften Jahrhundert vor Christus, bei Leukippos und Demokritos, später in poetischer Darstellung bei Lucretius.

Aber dieses philosophische Atom konnte erst dann für die naturwissenschaftliche Forschung fruchtbar werden, als es seiner metaphysischen Bedeutung entkleidet und einfach als kleinster, aber doch messbarer und wägbarer Naturkörper aufgefasst wurde, der mit bestimmten Eigenschaften, bezw. Kraftwirkungen ausgerüstet ist. So ist denn das Atom eigentlich erst seit ungefähr hundert Jahren durch Dalton in die Chemie eingeführt worden, während allerdings D. Bernoulli schon im Jahre 1738 die Grundgedanken der molekülaren Struktur der Gase aussprach.

I. Die Entwicklung der Atomtheorie bis zur Jahrhundertwende.

1. Die älteren chemisch-physikalischen Vorstellungen.

Noch vor wenigen Jahrzehnten war die landläufige Vorstellung des Atoms sehr einfach. Man sprach von etwa 70 chemischen Elementen, die jedes durch ein bestimmtes Atom von bestimmtem, relativem Gewicht gekennzeichnet waren; zwischen diesen Atomen machten sich bestimmte, aber ihrer Natur nach rätselhafte Kräfte, die chemischen Affinitäten, geltend; je nach der Valenz oder Wertigkeit der Atome konnten sich dieselben in mehr oder weniger grosser Zahl zu eng geschlossenen Gruppen, den Molekeln, vereinigen.

Die Chemie baute sich in wunderbarer Klarheit und Einfachheit auf der Grundlage dieser Vorstellungen auf, sie fand bald gewisse Gesetzmässigkeiten in den Eigenschaften der Atome, wodurch sie dieselben in ein sog. periodisches System einordnete, das namentlich von Mendelejeff ausgearbeitet wurde.

Auch die Physik wurde auf den verschiedenartigsten Wegen zu einer atomistischen Vorstellung der Materie geführt. Obgleich unsere sinnliche Wahrnehmung nirgends Diskontinuitäten in dem stofflichen Zusammenhang der Körper erkennen lässt, schien doch das Verständnis der Erscheinungen der Elastizität, der Kristallstruktur, der verschiedenen Aggregatszustände u. s. f. nur möglich unter der Annahme, dass in letzter Linie alle Körper aus lauter vereinzelten, über alle Maassen kleinen Teilchen bestehen, die durch keine physikalische Kraft weiter teilbar seien, und die sich durch Gravitation oder andere molekülare, anziehende und abstossende Kräfte in bestimmter Weise aneinanderheften und dadurch die unendliche Mannigfaltigkeit der Naturkörper bilden.

Besonders erfolgreich war diese Vorstellung für die Theorie der Wärmeerscheinungen. Als erkannt worden war, dass die Wärme nicht ein unwägbarer Stoff sei, der sich dem warmen Körper beimischt und dem kalten Körper entzogen wird, sondern dass sie einfach eine Form der Energie sei, da lag es nahe, sie als Bewegungsenergie der kleinsten Teile, der Molekeln bezw. Atome, aufzufassen. Durch Anwendung der Grundgesetze der Mechanik und der Regeln der Wahrscheinlichkeitsrechnung liess sich in der Tat in überraschender Weise eine ganze Anzahl interessanter Gesetzmässigkeiten, speziell bei den Gasen, in folgerichtiger Weise herleiten. Ja es zeigten sich denn auch bald Mittel und Wege, über jene unfassbar kleinen Dingerchen bestimmte Berechnungen anzustellen, so dass wir heutzutage mit ihnen als mit Körperchen von ganz bestimmten Dimensionen operieren können. (S. Abschn. VI. p. 42.)

Mit der primitiven Vorstellung der Atome als winziger, glattpolierter Kügelchen, die wie zierliche, elastische Bälle dahinsausen, aufeinandertreffen und zurückprallen, wobei ihre mittlere Bewegungsenergie direkt das Mass der absoluten Temperatur des aus ihnen aufgebauten Körpers gibt, konnte man aber auf

die Dauer nicht auskommen. Die fortschreitende chemische Forschung sowie die verschiedenartigsten Gebiete der Physik stellten immer neue Forderungen an die Struktur des Atoms, und aus jedem Problem, das durch die atomistische Auffassung des Stoffes gelöst wurde, entstand sofort wieder eine Fülle neuer, offener Fragen.

2. Ionisierung und Radioaktivität.

Die Erscheinungen der Elektrolyse, der chemischen Zersetzung durch den elektrischen Strom, brachten neues Licht in die Welt der Atome. Die von Faraday gefundenen Gesetze zeigten die auffallende Tatsache, dass der Transport der Elektrizität in den Elektrolyten unabhängig ist von der Natur desselben: Mit jedem an einer Elektrode abgeschiedenen Atom wird eine Elektrizitätsmenge abgegeben, die in keiner Weise von der chemischen Natur desselben abhängt, sondern nur mit der Zahl seiner Valenzen zunimmt, wobei jeder Valenz immer ein und dasselbe Elektrizitätsquantum zukommt, die sog. Valenzladung (S. Abschn. VI. p. 42).

Helmholtz hat wohl zuerst deutlich darauf hingewiesen, dass aus dieser Tatsache die notwendige Folgerung zu ziehen sei, dass jener elektrischen Valenzladung ein ganz selbständiges Dasein zukomme, und dass dieselbe wie eine Art besonderen elektrischen Atomes sich an die gewöhnlichen stofflichen Atome anhefte. Ja, man könnte demnach direkt von eigentlichen Ur-Atomen der Elektrizität sprechen, einem positiven und einem negativen, jedes mit einer vollkommen unveränderlichen Elementarladung versehen, nämlich mit der vorhin erwähnten Valenzladung. Die in einer Lösung auftretenden, dissoziierten Atome der gelösten Substanz, z. B. Natrium und Chlor, wären an sich elektrisch neutral; aber indem am Natrium eine positive Elementarladung sich anheftet (gleichsam eine chemische Verbindung zwischen Na und dem positiven Elektrizitätsatom bildend) wird es zum elektropositiven Natrium-Ion, während ebenso das neutrale Chlor-Atom durch die anhaftende negative Elementarladung als elektronegatives Chlor-Ion erscheint.

Diese Auffassung, die in der Elektrolyse von grosser Bedeutung war, liess sich auch bald auf die entsprechenden elektrischen

Erscheinungen in Gasen (Ionisation und Leitfähigkeit der Gase) übertragen, wodurch es möglich wurde, die elektrische Elementarladung durch neue Methoden zu bestimmen. Die hiebei gefundenen Zahlen stehen in auffallender Uebereinstimmung mit denen der Elektrolyse und bestätigen damit, dass die elektrische Elementarladung in der Tat eine universelle Grösse ist, die nicht etwa nur an bestimmte Erscheinungsformen der Materie gebunden ist.

Einen wesentlichen Schritt weiter führte das Studium der schönen Lichterscheinungen, die bei elektrischen Entladungen in stark verdünnten Gasen auftreten. Die von Crookes besonders untersuchten Kathodenstrahlen erleiden Ablenkungen im elektrischen und im magnetischen Feld, die genau messbar sind und die, verbunden mit der Tatsache, dass jene Strahlen eine negative Ladung mit sich führen, wertvolle Aufschlüsse über sie geben. Es unterliegt wohl keinem Zweifel, dass in diesen Strahlen die von der Elektrolyse postulierten Uratome der negativen Elektrizität in freiem Zustande, also gewissermassen greifbar, auftreten! Die Berechnungen führen alle übereinstimmend zum gleichen Resultat, ja sie lassen direkt die Masse und die enorme Geschwindigkeit dieser winzigen Korpuskeln berechnen. (S. Abschnitt VI, p. 42.)

Gleichzeitig mit dieser Erkenntnis von grosser Tragweite offenbarten die Entdeckungen auf dem Gebiete der Radioaktivität neue Beziehungen zwischen den Atomen und den negativen elektrischen Korpuskeln. Wir können hier nur ganz kurz einige der wichtigsten Punkte berühren. Als radioaktive Körper sind zunächst solche zu bezeichnen, die ganz von selbst eine eigentümliche durchdringende Strahlung aussenden, die im allgemeinen aus drei bestimmten Typen zusammengesetzt ist: 1. der β-Strahlung, die dem Wesen nach durchaus mit den Kathodenstrahlen identisch ist, nur dass dabei die ausgestrahlten negativen Teilchen Geschwindigkeiten bis zu 283,000 km pro Sekunde erreichen können, 2. der α-Strahlung, die offenbar aus langsamer bewegten, positiv geladenen Korpuskeln besteht, wobei die Messungen das unerwartete Resultat ergaben, dass diese Korpuskeln genau das Atomgewicht des Heliums besitzen (da in der Tat die radioaktiven Körper Helium abgeben, so

scheint es ausser Frage zu sein, dass jene α-Strahlung aus Heliumatomen besteht, die jeweilen zwei positive Elementarladungen mit sich führen), 3. der γ-Strahlung, die sich vollständig mit den Röntgenstrahlen identifizieren lässt.

Radioaktive Körper zeigen aber gleichzeitig mit ihrer Strahlung ganz bestimmte Vorgänge im Innern ihrer Atome. Die eben erwähnte Abschleuderung von Heliumatomen bedeutet nicht etwa, dass die radioaktiven Körper einfach sich zersetzende chemische Heliumverbindungen wären. Im Gegenteil ihrem ganzen physikalischen und chemischen Charakter nach bilden sie genau bestimmte chemische Elemente, sog. Isotopen, die zwar mit andern Elementen chemisch ausserordentlich ähnlich sind, aber doch ihr bestimmtes Atomgewicht haben; und auch der Vorgang der Heliumabspaltung erfolgt nicht nach den Gesetzen molekülarer Zersetzung, sondern kann nur als eigentlicher Atomzerfall aufgefasst werden: Das Atom eines radioaktiven Elementes zerfällt und zwar ganz von selbst, ohne äussere Beeinflussung, gibt seine korpuskulare Strahlung ab und bildet dann ein Atom eines neuen Elementes, das in der Regel nach kürzerer oder längerer Zeit einen erneuten Zerfallprozess durchmacht u. s. f.

3. Atome und Elektronen.

Alle diese Entdeckungen, die um die Jahrhundertwende gemacht wurden, mussten die älteren Auffassungen über das Atom von Grund aus umwandeln. Das Atom war einerseits nicht mehr der kleinste stoffliche Bestandteil, da jene negativen elektrischen Teilchen eine fast zweitausendmal kleinere Masse aufweisen, andrerseits war es auch nicht mehr der letzte, unteilbare Elementarbaustein der Materie, da es Atome gab, die von selbst eine ganze Reihe aufeinanderfolgender Umwandlungen durchmachen konnten.

Die Bedeutung des Atoms für die Physik und Chemie wurde dadurch nicht im geringsten angetastet — aber das Atom wurde hinfort selber Objekt chemischer und physikalischer Studien, es zeigte sich als eine ganze neue Welt, ein Mikrokosmos, der eine eigene, komplizierte Struktur besitzt, in deren Geheimnisse die Forschung der Neuzeit einzudringen hat.

Soviel blieb sicher, dass das Atom in irgend einer Weise aufgebaut sein muss aus dem raumerfüllenden Ding, das man materielle Masse nennt und das die Quelle der universellen Gravitationskraft bildet. Ob aber diese materielle Masse in jedem Atom ein homogenes Ganzes bildet oder ob sie nicht vielmehr in zahlreiche Einzelkerne gespalten ist, die durch starke anziehende Kräfte aneinandergehalten werden, das war hinfort eine offene Frage, die durch die Zerfallserscheinungen radioaktiver Atome wohl in letzterem Sinne beantwortet wird. Damit wird aber die alte Vorstellung von Prout, wonach es eigentlich nur ein Uratom (dasjenige des Wasserstoffs) gebe, durch dessen Zusammensetzung sich die Atome aller andern Elemente aufbauen, wieder aktuell und es bleibt nur noch zu untersuchen, welches denn diese Kerne seien, aus denen die Atome sich aufbauen; dass das Helium in Form der α-Korpuskel mit zwei positiven Elementarladungen hiebei eine wichtige Rolle spielt, ist jedenfalls auch sicher.

Aber die materielle Masse als solche reicht nicht aus, die Struktur des Atomes darzustellen, die elektrischen Elementarladungen müssen einen wesentlichen Anteil daran haben. Man hat für diese winzigen Körperchen, deren Masse, Dimension, Ladung und Geschwindigkeit trotz ihrer Kleinheit recht genau bestimmt werden konnten, auch einen passenden Namen gefunden, sie wurden nach J. Stoney's Vorschlag als Elektronen bezeichnet. Solche negative Elektronen, wie sie in den Kathodenstrahlen und β-Strahlen auftreten und die stets eine einzige, negative elektrische Elementarladung haben, müssen beim Aufbau des Atoms eine wesentliche Rolle spielen. Natürlich würde man erwarten, dass auch entsprechende positive Elektronen in jedem Atom vorkommen, aber seltsamerweise haben sich noch bei keinem Experiment derartige positive Elektronen losgelöst von den Atomkernen nachweisen lassen. Der Schluss liegt deshalb nahe, dass die Atomkerne als solche selber positive Elementarladungen besitzen, die ihrer Natur nach untrennbar mit der materiellen Masse (der Gravitationsmasse) dieser Kerne verknüpft sein muss.

So müssen wir uns denn ein einzelnes Atom als ein eigentliches Conglomerat positiv geladener Atomkerne denken, die als Ganzes die Masse des Atoms (sein Atomgewicht) darstellen;

mit denselben eng verbunden ist eine entsprechende Schar negativer Elektronen, deren Masse gegenüber derjenigen der Kerne verschwindend gering ist. Im elektrisch neutralen Atom wird die positive Kernladung gerade gleich der Summe der Elementarladungen der negativen Elektronen sein; geht ein Elektron verloren, so hat das Atom eine überschüssige positive Elementarladung, es ist zu einem positiven Atom-Ion geworden und zwar zu einem einwertigen; verliert es ein zweites Elektron, so wird es zu einem zweiwertigen positiven Ion usw. — Heftet sich umgekehrt an das ursprünglich neutrale Atom ein neues negatives Elektron an, so entsteht ein einwertiges negatives Atom-Ion, heften sich zwei Elektronen an, so entsteht ein zweiwertiges negatives Ion usw. Der ganze Vorgang der Ionisation ist daraus ohne weiteres ersichtlich, aber auch die dadurch entstehenden elektrischen Kraftwirkungen, die sich als chemische Affinität äussern, und die damit zusammenhängenden Vorgänge der Molekelbildung, der Dissoziation usw. werden grundsätzlich sofort klar.

Aber die wirkliche Struktur des Atoms ist damit noch bei weitem nicht erkannt. Wie lagern sich die einzelnen Kerne? — wieviel Elektronen stecken in einem neutralen Atom drin? — welches sind die Kräfte, die zwischen Kernen und Elektronen wirksam sind? — wie ist überhaupt die ganze Art der Bindung: ist sie starr und unbeweglich, oder elastisch und beweglich? — das alles sind Fragen, die der Beantwortung harren.

4. Optische Probleme.

Ein weiteres Eindringen in diese faszinierenden Probleme ermöglichten die Fortschritte der Optik. Seit den klassischen Versuchen H. Hertz's, ums Jahr 1888, kann als sicher gestellt gelten, dass das Licht nicht aus elastischen Schwingungen eines hypothetischen Aethers besteht, sondern Schwingungszustände elektrischer und magnetischer Kräfte darstellt, die sich als sog. elektromagnetische Wellen mit der Geschwindigkeit von 300,000 km per Sekunde im Vacuum ausbreiten. Die am Schluss (Absch. VI p. 42) angeführte Zusammenstellung gibt uns einen Ueberblick über das ganze Gebiet dieser elektromagnetischen Wellen, das sich von den äusserst kleinen Wellen der Röntgenstrahlen bis zu den riesigen Wellen der Funkentelegraphie ausdehnt.

Die Möglichkeit, die einzelnen Farben des weissen Sonnenstrahls auseinanderzuhalten, beruht auf der Tatsache der Dispersion, wonach die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Lichtwellen in einem durchsichtigen Körper für die verschiedenen Wellenlängen (bezw. Farben) verschieden ist, so dass dieselben in einem Spektrum auseinandergelegt werden. Diese Dispersion kann aber nur dadurch zu stande kommen, dass die Molekel des durchstrahlten Körpers mit den eindringenden elektromagnetischen Wellen in Wechselwirkung geraten, und dies ist natürlich nur durch Vermittlung der in den Atomen befindlichen Elektronen möglich. Die Theorie der Dispersion hängt also in engster Weise mit der Struktur des Atoms zusammen und hat gelehrt, dass jene Elektronen nicht etwa starr an die Atomkerne gebunden sind, sondern innerhalb gewisser Grenzen um ihre Gleichgewichtslage pendeln können, wie wenn sie durch elastische Kautschukbänder an dieselbe gebunden wären. Man spricht deshalb von einer quasi-elastischen Bindung der Elektronen an die Atomkerne, und die Theorie derselben hat die Gesetze der Dispersion in sehr guter Weise darzustellen erlaubt.

Ueber diese Theorie bemerken wir folgendes: Wie jedes elastisch gekoppelte System oder wie jeder akustisch wirksame Körper (z. B. eine Stimmgabel) besitzen die Atome mit ihren Elektronen bestimmte Eigenschwingungszahlen; sie werden also auf gewisse Lichtstrahlen, bezw. elektromagnetische Wellen, die mit ihnen in Resonanz stehen, ganz besonders kräftig ansprechen und diese Wellen direkt absorbieren. Demnach muss auch der durchsichtigste Körper (Glas, Steinsalz usw.) für gewisse Strahlen im Spektrum doch eine merkliche Absorption zeigen; in der Tat findet man bei all diesen „durchsichtigen“ Medien sowohl im Ultrarot wie auch im Ultraviolett Absorptionsbanden. Die Theorie lehrt aber, dass diese Absorption im ultravioletten Spektralbezirk auf Rechnung der raschen Schwingungen der kleinen Elektronen zu setzen ist, während die ultraroten Absorptionsbanden von den langsameren Eigenschwingungen der Atomkerne selbst herrühren; denn dass dieselben beim Auftreffen der elektromagnetischen Wellen auch in Schwingungen versetzt werden müssen, das ergibt sich bei einfacher Ueberlegung der Schwingungsgesetze eines dem Atom entsprechend gebauten elastischen Systems.

Mit dieser Erkenntnis wird es möglich, durch Spektralmessungen einen Einblick in den Zusammenhang der Elektronen und Atome zu erhalten; Drude, der zuerst derartige Berechnungen anstellte, fand denn auch Anhaltspunkte über die Zahl der in einer Atomgruppe vorhandenen quasi-elastisch beweglichen Elektronen: entsprechend den Vorstellungen der Chemie ergab sie sich in der Regel gleich der Zahl der Valenzen der betreffenden Elemente, von neuem bestätigend, dass die chemischen Affinitäten wesentlich durch die elektrischen Kräfte der Elektronen bedingt sind.

Im Jahre 1896 entdeckte der holländische Physiker Zeemann die nach ihm benannte Erscheinung, die der Elektronentheorie endgültig zum Durchbruch helfen sollte, wonach der Mechanismus des Leuchtens durch die Einwirkung magnetischer Kräfte beeinflusst wird. Sendet man z. B. durch eine Röhre mit verdünntem Wasserstoff elektrische Entladungen, so zeigt das Spektrum dieses leuchtenden Gases eine Anzahl charakteristischer Linien (s. p. 16). Stellt man diese leuchtende Röhre zwischen die Polschuhe eines sehr kräftigen Magneten, so erleidet dieses Linienspektrum bestimmte Veränderungen. So wird z. B. die rote Linie je nach der Richtung, in der sie relativ zu den magnetischen Kraftlinien betrachtet wird, in ein Dublett, d. h. in zwei deutlich getrennte und symmetrisch zur ursprünglichen Linie verschobene Linien, oder in ein Triplett, d. h. in drei Linien, zerlegt, und diese Linien zeigen ganz bestimmte Zustände der Polarisation.

Nach der Vorstellung, dass die in der Röhre zum Leuchten gebrachten Wasserstoffatome aus einem positiven Atomkern mit einem quasi-elastisch gebundenen negativen Elektron bestehen, wird jene Einwirkung des Magnetfeldes ohne weiteres verständlich. Im Zustande des Leuchtens werden die Elektronen dauernd in regelmässigen Schwingungen erhalten, die je nach ihrer Bindung ganz bestimmte Eigenfrequenzen aufweisen und dadurch Lichtstrahlen bestimmter Wellenlänge, entsprechend den Linien des Wasserstoffspektrums, aussenden. Sobald aber das leuchtende Wasserstoffatom in einem magnetischen Felde sich befindet, so tritt nach den bekannten Gesetzen von Biot und Savart eine Wechselwirkung zwischen der magnetischen Feldstärke und den schwingenden elektrischen Ladungen ein; die magnetische Kraft

sucht die Elektronen in schraubenförmige Bewegung um sich selbst zu versetzen und verändert dadurch ihren Schwingungszustand, damit aber auch die Wellenlänge des ausgestrahlten Lichtes. Die Theorie stimmte in ihren Hauptzügen für die einfachsten Fälle (die natürlich durch weitere Faktoren ganz erheblich kompliziert werden können) vorzüglich überein, sie zeigte, dass es in der Tat wieder die negativen Elektronen sind, die im leuchtenden Körper die Lichtstrahlen erregen, und sie ergab für ihre spezifische Ladung (Verhältnis der Elementarladung zur trägen Masse) dieselben Zahlen, die man auf allen andern Gebieten immer wieder für die negativen Elektronen findet (s. Abschn. VI p. 42).

5. Das Thomson'sche Atommodell.

So war die Physik in den Stand gesetzt, schon ein wesentlich klareres Bild über die Struktur des Atoms und der mit ihm verbundenen Elektronen zu geben. Deshalb ist es wohl verständlich, dass die Versuche, Atommodelle aufzustellen, immer zahlreicher wurden. Diese Atommodelle bedeuten erdachte physikalische Systeme, die nach bekannten mechanischen und elektromagnetischen Prinzipien funktionieren sollen, und die in ihren daraus mit Notwendigkeit sich ergebenden Eigenschaften die Atomeigenschaften repräsentieren sollen. Ein Atommodell zu finden, das restlos alle Eigenschaften der wirklichen Atome umfassen würde, wäre die höchste Leistung, die wir von der Wissenschaft in diesem Gebiete erwarten dürfen. Denn die tatsächlichen Vorgänge der uns vollständig unzugänglichen Atome werden wir nie völlig erfassen können; wir können uns von der Struktur des Atoms nur ein Bild machen, und sobald dieses Modell alle Erscheinungen des wahren Atoms widerspruchsfrei wiedergibt, so dürfen wir die Atomstruktur als erkannt bezeichnen.

Von den verschiedenartigen Atommodellen der früheren Jahrzehnte hat wohl nur dasjenige von J. J. Thomson, dessen Grundlage schon Lord Kelvin gegeben hatte, wirkliche Bedeutung erlangt. In demselben erscheint der Atomkern als eine Kugel materieller Masse von den Dimensionen des Atoms selber und mit einer gleichmässig über die ganze Masse verteilten, unveränderlichen positiven elektrischen Ladung. Ihre Wirkung nach aussen wird neutralisiert durch die dem Atom zugehörigen

negativen Elektronen (von etwa hunderttausendmal geringerem Durchmesser), die in so grosser Zahl vorhanden sind, dass die Summe ihrer negativen Elementarladungen gerade der positiven Gesamtladung des Kernes gleich wird. Das charakteristische des Thomson'schen Atommodells liegt in der Auffassung, dass die materielle Masse des Atomkernes für die punktförmigen negativen Elektronen gar kein Hindernis bedeutet, dass sie dieselbe ungestört durchsetzen können, dass sie sich überhaupt im Innern jener materiellen Masse lagern und bewegen können, als ob dort gar nichts anderes vorhanden wäre als nur die positive elektrische Ladung. Diese Auffassung hat für denjenigen, der mit der ausserordentlichen Durchdringbarkeit der β-Strahlen gut vertraut ist, gar nichts Stossendes; es erscheint ja aus solchen Beobachtungen immer klarer hervorzugehen, dass die Materie als solche gar keine Kräfte auf die Elektronen ausübt und ihnen nicht einmal den Raum wegnimmt, dass es also nur die Kräfte elektrischer Ladungen sind, die auf die Elektronen wirken können.

So wird es leicht verständlich, dass die negativen Elektronen des Atoms in bestimmten symmetrischen Figuren im Innern des positiven Kernes ihre Gleichgewichtslage finden werden. Dabei braucht dies gar nicht eine Ruhelage zu sein, sondern die Elektronen können auf einer oder auf verschiedenen, im Innern des Kernes befindlichen kreisförmigen Bahnen mit bestimmter Geschwindigkeit sich fortbewegen, ohne dass das stabile Gleichgewicht des Systems als ganzes irgendwie gestört wird.

Wir gehen auf die weitere Behandlung dieses sehr interessanten Modelles nicht ein. Sein Vorzug liegt darin, dass es die früher erwähnten, etwas unklaren quasi-elastischen Kräfte restlos auf die elektrischen Wechselwirkungen zurückführte und demnach auch alle die bisher besprochenen Eigenschaften der Atome richtig darstellte.

6. Die Balmer-Serie.

Aber die optischen Erscheinungen der Natur liefern noch eine Reihe von Gesetzmässigkeiten, die durch die bisher besprochenen Atomeigenschaften nicht erfüllt werden.

Der Basler Mathematiker J. J. Balmer hat im Jahre 1885 eine eigentümliche Beziehung in dem Spektrum des Wasserstoffes

aufgefunden. Dasselbe weist bekanntlich im sichtbaren Gebiet hauptsächlich 4 scharfe Linien auf, die wir hier mit ihren Wellenlängen (in sog. Armstrong-Einheiten, d. h. in Hundertmillionstel cm $= 10^{-8}$ cm) und den abgerundeten Schwingungszahlen pro Sekunde angeben.

Im Rot	die	C	Linie :	H_α = 6562,8	Å. E.	: c. 457	Billionen
„ Blaugrün	„	F	„ :	H_β = 4861,3	„	: c. 617	„
„ Blau	„	G	„ :	H_γ = 4340,5	„	: c. 691	„
„ Violett	„	H	„ :	H_δ = 4101,8	„	: c. 730	„

Durch eine Art mathematischer Spielerei fand Balmer, dass sich die Wellenlängen dieser vier Linien verhalten wie:

$$9/5 : 4/3 : 25/21 : 9/8, \text{ oder}$$
$$9/5 : 16/12 : 25/21 : 36/32, \text{ oder}$$
$$\frac{3^2}{3^2 - 2^2} : \frac{4^2}{4^2 - 2^2} : \frac{5^2}{5^2 - 2^2} : \frac{6^2}{6^2 - 2^2}$$

d. h. nach dem Gesetz: Wellenlänge $\lambda = k \frac{n^2}{n^2 - 2^2}$, wo k irgend ein Proportionalitätsfaktor ist, n der Reihe nach für die 4 Linien die Werte 3, 4, 5, 6 annimmt. Rechnet man diese Formel um auf die Schwingungszahlen oder Frequenzen ν, so findet man: $\nu = N \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right)$, wo n wiederum der Reihe nach gleich 3, 4, 5, 6 zu setzen ist.

Es zeigte sich bald, dass diese sog. Balmer'sche Serienformel das Grundgesetz für die so ausserordentlich komplizierte Verteilung der Spektrallinien der verschiedensten Elemente gebe; allerdings nicht in dieser einfachen, nur für den Wasserstoff geltenden Form, sondern in erweiterten Formeln, wie sie von Rydberg, Ritz u. a. aufgestellt wurden.

Die Entstehung der einzelnen Spektrallinien haben wir bereits erwähnt (p. 12); sie geben uns die Schwingungszahlen, die den verschiedenen ans Atom gebundenen Elektronen zukommen, wenn dieselben entweder durch elektrische Entladung, z. B. in Geissler'schen Röhren, oder durch die Wärmewirkung, z. B. in glühenden Dämpfen, zu regelmässigen Oszillationen um

ihre Gleichgewichtslage angeregt werden. Aber diese Auffassung lässt nirgends Raum für eine Gesetzmässigkeit, die auch nur angenähert den Balmer- Rydberg'schen Beziehungen entsprechen würde.

Die Theoretiker standen deshalb jahrzehntelang vor einer unüberwindbaren Schwierigkeit, der sich kein Atommodell anpassen wollte, bis der jugendliche schweizerische Physiker W. Ritz zum ersten Male eine Lösung fand.

7. Das Ritz'sche Atommodell.

Ritz stellte fest, dass die Balmer'sche Formel sich als notwendige Konsequenz ergibt, wenn man annehme, dass zwischen Atomkern und Elektronen bestimmte magnetische Kräfte wirken. Er ersann ein ganz neues Atommodell, in welchem der Atomkern die Rolle eines ganz kleinen, stabförmigen Elementarmagneten übernehmen sollte, wobei dann das Atom selber aus einer mehr oder weniger grossen Zahl solcher aneinandergereihter, unveränderlicher Elementarmagnete bestehen würde. Das negative Elektron, durch dessen Schwingungen die Spektrallinien des leuchtenden Atoms erzeugt werden, sollte in irgend einer Weise elastisch, gleichsam federnd mit einem solchen Elementarmagneten gekoppelt sein und demnach kreisförmige oder elliptische Schwingungen in dem magnetischen Felde desselben ausführen. Diese magnetische Einwirkung übt natürlich einen ganz bestimmten Einfluss auf die Schwingungszahl des Elektrons aus, und je nachdem das Atom ein, zwei, drei oder mehr Elementarmagnete hat, wird die Frequenz in bestimmter Weise abgeändert und zwar nach einem einfachen Gesetz, das genau den Balmer-Rydberg'schen, durchs Experiment bestätigten Formeln entspricht.

Diese glückliche Lösung durch das Ritz'sche Atommodell fand insofern noch eine Bestätigung, als durch die zahlreichen Versuche von Pierre Weiss in Zürich die grosse Rolle magnetischer Wirkungen der Atome wesentlich hervorgehoben wurde, und als durch ihn die Existenz derartiger unveränderlicher elementarer Atommagnete, der sog. Magnetonen, ausserordentlich wahrscheinlich gemacht wurde. Ueber die Natur dieser Atommagnete ist man sich allerdings noch nicht im klaren; nach der

Elektronentheorie muss es sich in irgend einer Weise um rotierende elektrische Ladungen handeln, sei es, dass die negativen Elektronen in rascher Rotation ein magnetisches Feld erzeugen, sei es, dass der positive Atomkern durch entgegengesetzt gerichtete Rotation dasselbe leiste. Die Zweifel, ob derartige reibungslos im Innern fester Körper vor sich gehende Drehbewegungen möglich seien, sind jedenfalls durch die neuesten Beobachtungen von de Haas und Einstein gehoben; die feinen Versuche derselben haben gezeigt, dass ein Körper beim Magnetisieren tatsächlich ein messbares Trägheitsmoment um die Axe der Magnetisierung erhält, so dass wirklich die letztere durch Rotationen von Körpern mit träger Masse, bezw. eben der Atome und Elektronen, erzeugt sein muss.

Aber die geniale Ritz'sche Auffassung war doch nur ein Erstlingsversuch zur atomistischen Erklärung der Balmer'schen Formel; eine allseitig befriedigende Lösung sollte auf anderm Boden gefunden werden.

II. Die Bedeutung der Quantentheorie.

Die neueren Probleme der theoretischen Physik, abgesehen von der Relativitätstheorie, haben sich namentlich nach zwei Richtungen hin entwickelt.

Vorerst gab die immer erfolgreicher werdende Erforschung der Eigenschaften der Körper bei sehr tiefen Temperaturen Resultate, die der bisherigen molekülaren Theorie der Wärme grosse Schwierigkeiten bereiten musste. Das von Nernst aufgestellte und nach ihm benannte Theorem zeigte, dass die spezifischen Wärmen, wie überhaupt die meisten thermischen Eigenschaften der Körper schon bei Annäherung an den absoluten Temperaturnullpunkt zu verschwinden beginnen. Aber gerade betreffend der spezifischen Wärme hatte die kinetische Gastheorie gelehrt, dass sie einen von der Temperatur unabhängigen, in sehr einfacher Weise zu bestimmenden Wert besitze. Sollte diese Aussage nicht mehr gelten, so war einer der Grundpfeiler der Theorie, das sog. Gesetz der Aequipartition der Energie, in Frage gestellt. Dann war es nicht mehr möglich, dass die Energie im Mittelwert sich gleichmässig auf die verschiedenen Freiheitsgrade

der Atome und Molekeln verteile, sondern es musste hier irgend eine neue, früher ungeahnte Eigenschaft der Energie verborgen sein.

Zweitens waren es auch die Gesetze der Wärmestrahlung, die an der Grundlage althergebrachter Vorstellungen rüttelten. Nach mühsamem Suchen hatte man die wichtigen Gesetze der Abhängigkeit der Wärmestrahlung von der Temperatur des strahlenden Körpers und von der Wellenlänge der ausgesandten Strahlen aufgedeckt, und den langjährigen Bemühungen Plancks war es auch gelungen, diese experimentell gefundenen Gesetze theoretisch herzuleiten.

Allein bei dieser Herleitung hatte Planck einen Kunstgriff angewendet, der wiederum dem Gesetz der Aequipartition der Energie direkt widersprach. Ueber das Wesen der Strahlenerzeugung war man sich ja völlig klar; die Molekel der erhitzten Körper mussten ganz bestimmte Schwingungszustände der in ihnen befindlichen positiven Atomkerne und negativen Elektronen erzeugen, die in ihrer ausserordentlichen Mannigfaltigkeit die gesamte, vom Körper ausgegebene Licht- und Wärmestrahlung bedingten. Jede Molekel, ja jedes Atom konnte als ein sog. elektrischer Oszillator aufgefasst werden, gleichsam eine winzige Station für Funkentelegraphie, die ihre bestimmten elektromagnetischen Wellen nach allen Richtungen ausstrahlte. Durch Anwendung der bekannten Gesetze der elektromagnetischen Wellenstrahlung in Verbindung mit den auf den Regeln der Wahrscheinlichkeitsrechnung aufgebauten Prinzipien der molekülaren Wärmetheorie hätte sich nun das richtige Strahlungsgesetz theoretisch ergeben müssen. Aber sonderbarerweise wollte das nie gelingen, bis eben Planck eine ganz neue Hypothese in diese Betrachtungen einführte. Er musste annehmen, dass die Energie, die ein einzelner molekülarer elektrischer Oszillator bei seinen Schwingungen ausstrahlte bezw. absorbierte, nicht in beliebiger Weise abgestuft werden könne, sondern gewissermassen nur ruckweise abgegeben bezw. aufgenommen werden könne. Die Energie der Strahlung eines Atoms wäre nach dieser Auffassung nicht mehr eine vollständig stetig veränderliche Grösse, sondern müsste sich immer in ganzzahligen Vielfachen einer bestimmten, allerdings äusserst kleinen Energiemenge zeigen.

Wie bei der Materie die Atome und bei der Elektrizität die Elektronen das kleinste Quantum ihrer Art darstellen, so müsste auch die Energie beim Strahlungsvorgang aus bestimmten, kleinsten Quanten, die nicht weiter teilbar sind, bestehen. Wie es verschiedene Atome mit verschiedenen Atomgewichten gibt, so fand auch Planck für die verschiedenen molekülaren Oszillatorschwingungen verschieden grosse Energiequanten und zwar direkt proportional der Schwingungszahl des betreffenden Oszillators. Die Energie, die dieser bei einer Schwingungszahl ν pro Sekunde ausstrahlte, setzt Planck gleich $n \cdot h \cdot \nu$, wobei n irgend eine positive ganze Zahl sein kann und h die ganz neue Grösse ist, die das Elementarquantum der Energie bestimmt, eine universelle Konstante von äusserster Kleinheit.

Ueber die zahlreichen Wandlungen, die diese ungewohnte Quantentheorie erfahren hat und wohl noch erfahren wird, liesse sich vieles sagen. Es genügt festzustellen, dass es heutzutage ausser Frage steht, dass bei den eigentümlichen Wirkungen, die zwischen Atomen und Elektronen bestehen, jedenfalls Gesetzmässigkeiten auftreten, die ausserhalb aller bisher bekannten Gesetze der Mechanik, der Thermodynamik und der Elektrodynamik stehen. Die Wechselwirkungen in dem Mikrokosmos der Atome weisen unbedingt auf solche neue Beziehungen hin, wie sie durch die Quantentheorie gegeben werden, die sich darin zeigen, dass gewisse Prozesse nicht stetig, sondern ruckweise verlaufen. Dabei tritt dann als grundlegende Grösse (ähnlich der Elementarladung der Elektronen) das sog. elementare Wirkungsquantum auf, eben die oben erwähnte Grösse, $h = 6{,}547 \cdot 10^{-27}$, die ihrer Dimension nach eine „Wirkung", d. h. ein Produkt aus Energie und Zeit darstellt.

Es versteht sich von selbst, dass jedes Atommodell hinfort auf diese Quantentheorie Rücksicht nehmen und irgend einen Zusammenhang mit dem Wirkungsquantum h aufweisen muss. Mit wirklichem Erfolg ist dies vom dänischen Forscher N. Bohr im Jahre 1913 durchgeführt worden, weshalb wir hinfort unsere Aufmerksamkeit nur diesem modernen Atommodell zuwenden wollen.

III. Das Bohr'sche Atommodell.

1. Das ursprüngliche Modell von Bohr.

Der Grundgedanke zum Bohr'schen Modell ist durch den bekannten englischen Radiumforscher E. Rutherford gegeben worden. In seinen Untersuchungen über die Rückwirkung der Körper auf die α-Strahlen fand er, dass das Thomson'sche Modell die beobachteten Gesetzmässigkeiten nicht richtig wiedergeben kann, indem die α-Korpuskeln beim Auftreffen und Eindringen in den relativ grossen positiven Atomkern nie eine so starke Ablenkung erfahren, als es tatsächlich der Fall ist.

Rutherford kam deshalb zum Schluss, dass der positive Kern jedes Atoms (der natürlich selber ein System einzelner dicht gedrängter Kerne vielleicht sogar einschliesslich negativer Elektronen darstellt) ausserordentlich klein sei, einen Durchmesser von jedenfalls weniger als ein Zehnbillionstel cm (10^{-13} cm) besitze, also der Grösse nach noch kleiner als die negativen Elektronen sei! Dieser winzige Kern, der aber eine sehr grosse Masse in sich konzentriert, sei dann in dem relativ grossen Abstand von einigen Tausendmillionstel mm von den negativen Elektronen umgeben, die in bestimmten Bahnen ihn umkreisen, gerade wie ein System von Planetoiden um ihre Sonne herum rotiert. Im neutralen Atom muss natürlich die Zahl dieser Elektronen, die je eine negative Elementarladung haben, genau gleich sein der überschüssigen Zahl positiver Elementarladungen, die der innere Kern aufweist. Da man aus verschiedenen Erscheinungen zum Schluss gekommen war, dass diese Elektronenzahl pro Atom ungefähr gleich dem halben Atomgewicht sei, so ergab sich, dass bei schweren Atomen die Elektronen in grosser Zahl den Atomkern umschwärmen, eine eigentliche Elektronenwolke, nach Analogie der Saturnringe, bilden. Die Aehnlichkeit dieser Systeme mit den Planetensystemen wird tatsächlich sehr gross, weil das zwischen positiver Kernladung und negativen Elektronenladungen wirkende Anziehungsgesetz, das Coulomb'sche Gesetz, genau gleichlautet wie das Newton'sche Gravitationsgesetz, nur dass in ersterem die elektrischen Ladungen die Rolle der gravitierenden Massen spielen. Die wunderschönen Berechnungen der Mechanik des Himmels lassen sich auf diese Weise unmittelbar auf die interessanten Probleme der Mechanik des Atoms übertragen.

Aber ein gewichtiges Bedenken war dieser an sich so natürlich erscheinenden Hypothese je und je in den Weg getreten: Wenn Elektronen in der eben angegebenen Weise um einen zentralen Kern rotieren, so zeigt ihre Bewegung eine nach dem Zentrum gerichtete Normalbeschleunigung. Allein nach den Prinzipien der Elektronentheorie muss jede Beschleunigung eines Elektrons mit unfehlbarer Notwendigkeit die Aussendung einer elektromagnetischen Strahlung nach sich ziehen; diese Strahlung kann ihrerseits nur auf Kosten der Energie der Elektronenbewegung stattfinden, so dass diese Energie dauernd abnehmen muss; dadurch wird aber das Elektron immer stärker gegen das Anziehungszentrum hin bewegt, es vollführt nicht die regelmässige, periodische Bahn, die ihm zugedacht war, sondern es geht auf spiraliger Kurve dem Atomkern entgegen, bis es zuletzt mit grosser Geschwindigkeit in denselben stürzt. Kurz gesagt: eine solche Elektronenbahn kann nach den Grundgesetzen der Elektronentheorie nicht stabil sein.

Der gordische Knoten, der sich durch diese Auffassung gebildet hatte, wurde von Bohr mit einem kühnen Hiebe durchschnitten. Die Quantentheorie hat uns gelehrt, dass im Mechanismus der Atome die bisher bekannten Gesetze nicht ohne weiteres gültig seien, sei es, dass wirklich neue Gesetzmässigkeiten darin auftreten, sei es, dass durch komplizierte Wechselwirkungen scheinbar ganz neue Beziehungen zu Tage treten. Sei dem, wie ihm wolle, wir sind nicht gebunden, bei Aufstellung des Atommodelles die gewöhnlichen Gesetze der Physik ausnahmslos gelten zu lassen. So durfte denn Bohr den Schnitt wagen und die erste Grundhypothese seiner neuen Atomtheorie aufstellen, wonach die negativen Elektronen um den positiven Atomkern herum rotieren mögen, ohne dass durch diese Rotation eine elektromagnetische Strahlung erzeugt werde[1]).

Doch damit war gegenüber dem Thomson'schen Atommodell nicht viel gewonnen, im Gegenteil, man musste sich nun erst recht fragen, wie denn ein solches Atom überhaupt je in den Stand gesetzt werde, Strahlung auszusenden, also zu leuchten? — Hier kommt die geniale Erfindung Bohr's zur vollen Geltung.

---

[1]) In neueren Arbeiten hat Wereide daraufhingewiesen, dass es möglich sei, dem Atomkern Eigenschaften zuzuschreiben, durch die jene Elektronenstrahlung neutralisiert wird.

In den leuchtenden Gasen und Dämpfen, z. B. in der schon mehrfach erwähnten Geissler'schen Röhre mit dem leuchtenden Wasserstoffgas, sind die Molekel und Atome nicht in gewöhnlichem Gleichgewicht. Durch die heftigen Bewegungen, die sie vollführen, sind sie teilweise dissoziiert und ionisiert, d. h. die Molekel sind zersprengt, und auch die Atome sind zeitweise in ihre Bestandteile, Atomkerne und Elektronen, zerlegt, wobei die Gesamtheit derselben in einem Zustande stetiger Ionisation und Wiederbildung begriffen ist. Die Art und Weise wie sich ein losgelöstes Elektron mit einem Atomkern wieder vereinigt, stellt sich Bohr folgendermassen vor, wobei er zunächst den einfachsten Fall des Wasserstoffatoms, das aus einem Atomkern mit einer positiven Elementarladung besteht, im Auge hat:

Sobald ein Elektron in den Anziehungsbereich eines Atomkerns kommt, wird es nach den Gesetzen der Planetenbewegung in einer Ellipse sich bewegen — man nennt sie in der erweiterten Bohr'schen Theorie kurzweg eine Keplerellipse (wegen der berühmten Kepler'schen Gesetze, denen sie unterworfen ist). Von vornherein ist eine Unzahl von Ellipsen denkbar, die ein solches Elektron beschreiben kann: grosse, kleine, lange, breite, exzentrische, kreisähnliche usf. Die zweite Grundhypothese, die Bohr einführte, besteht darin, unter all diesen möglichen Ellipsen eine ganz bestimmte Auswahl zu treffen, und zwar auf Grund der Quantentheorie. Von all den möglichen Ellipsen soll es nur eine bestimmte Art und Anzahl geben, auf denen das Elektron dauernd sich bewegen kann, die also einen stationären Zustand des Systems Atom + Elektron ergeben; jede andere Ellipsenbewegung soll nicht dauernd möglich sein, das Elektron wird stets von selbst die ihm benachbarte stationäre Ellipsenbahn einschlagen und dann auf derselben bleiben, bis irgend ein störender, äusserer Einfluss es auf eine andere stationäre Ellipse verjagt.

Für die möglichen, stationären Ellipsenbahnen stellt Bohr das quantentheoretische Gesetz auf, dass die Energie, die erforderlich ist, um das Elektron aus unendlicher Entfernung des Atomkerns in die betreffende Ellipsenbahn zu bringen, stets ein ganzzahliges Vielfaches des Produktes $\omega \cdot \frac{h}{2}$ sei, wo ω die Zahl der

Umläufe pro Sekunde und h das elementare Wirkungsquantum ist. Wenn die stationären Bahnen Kreise sind (was man in erster Annäherung ebensogut wie bei der Planetenbewegung annehmen kann), so lautet die Bedingung für die einzelnen stationären Kreisbahnen: Das Impulsmoment des Elektrons muss ein ganzzahliges Vielfaches von $\frac{h}{2\pi}$ sein.

Durch diese Gesetze erhalten wir zunächst eine ganz eigentümliche Auffassung der Struktur des Atoms, die von den bisherigen Vorstellungen stark abweicht. Das neutrale Wasserstoffatom ist ein System, das aus einem positiven Atomkern besteht, der von einem negativen Elektron elliptisch umkreist wird. Aber dabei ist eine ganze Serie von Ellipsenbahnen möglich, die sich von einer bestimmten, kleinsten, innersten Elipse bis zu ganz entfernten, sehr grossen Ellipsen erstrecken. Welches auch die Ellipse sei, auf der das Elektron sich bewegt, stets haben wir es mit einem richtigen Wasserstoffatom zu tun; nur ist die Stabilität desselben um so grösser, je kleiner die Ellipse ist, auf der das Elektron kreist. Je grösser die Ellipse ist, um so grösser ist seine Gesamtenergie, um so leichter kann aber das Elektron durch äussere Ursachen, z. B. durch Zusammenstoss mit einem andern Atomsystem, aus seiner Bahn herausgeschleudert werden. Auf der innersten, kleinsten Elipse ist die Energie am kleinsten, dort sitzt das Elektron am festesten, und so wird naturgemäss jedes Atomsystem dahin streben, sein Elektron in die stabilste, innerste Elipse hineinzuziehen, — das ist dann das „permanente" Atom, wie es nun auch bis zu tiefen Temperaturen bestehen bleibt.

Im Zustand des Leuchtens sind aber all die verschiedenartigen Elektronenbahnen vertreten, bezw. bilden sie sich immer neu und werden immer wieder zerstört. Es findet also fortwährend ein Uebergang von Elektronen aus grossen, weiten Elektronenbahnen in die kleinste, permanente Elektronenbahn. Da die letztere die geringste Energie besitzt, so wird bei diesen Bahnänderungen stets Energie frei, — und diese Energie ist es, die nach der Bohr'schen Auffassung in Form von elektromagnetischen Wellen von den leuchtenden Wasserstoffatomen ausgestrahlt wird. Der Mechanismus des Leuchtens besteht also nicht, wie

früher immer angenommen wurde, in den schwingenden oder pendelnden Bewegungen der Elektronen, sondern in dem Uebergang eines Elektrons aus einer seiner stationären Bahnen in eine andere stationäre Bahn mit geringerer Energie.

Und wiederum benützt Bohr, um die Gesetze der Strahlung mathematisch scharf zu fassen, einen quantentheoretischen Ansatz, wodurch er die dritte Grundhypothese in sein Atommodell einführt: Beim Uebergang des Elektrons aus einer stationären Bahn in eine andere wird die ganze Energiedifferenz in Form elektromagnetischer homogener Wellen von ganz scharf bestimmter Schwingungszahl ν ausgestrahlt, wobei das Produkt $h \cdot \nu$ gleich jener Energiedifferenz wird.

2. Die Erfolge des Bohr'schen Modells.

Auf den ersten Anblick erscheint dieses Bohr'sche Atommodell ausserordentlich erkünstelt, aber bei genauem Zusehen merkt man bald, dass es doch mit sehr wenigen, vom modernen quantentheoretischen Standpunkt gar nicht so seltsamen Hypothesen arbeitet; namentlich aber zeigt sich, dass sie zu höchst überraschenden Resultaten führen.

Beschränken wir uns vorläufig auf Betrachtung des Wasserstoffatoms und nehmen wir der Einfachheit halber für das Elektron lauter Kreisbahnen an, setzen wir endlich voraus, dass die Masse desselben gegenüber der Masse des Atomkerns verschwindend klein ist, bezeichnen wir die verschiedenen, möglichen stationären Bahnen durch einen laufenden ganzzahligen Index n ($n = 1, 2, 3, 4 \ldots$), sei ferner m die Masse des Elektrons, e die Elementarladung (positiv für den Atomkern, negativ für das Elektron), h das Wirkungsquantum, k die unbestimmte Energiekonstante, so ergeben die einfachen Gesetze der Planetenbewegung für die Energie der n^{ten} stationären Bahn:

$$A_n = K - \frac{1}{n^2} \cdot \frac{2\pi^2 m e^4}{h^2},$$

für ihren Durchmesser: $2a = n^2 \frac{h^2}{2\pi^2 m e^4}$, und für die Zahl der

Umläufe des Elektrons pro Sekunde:

$$\omega = \frac{1}{n^3} \cdot \frac{4\pi^2 m e^4}{h^3}$$

Wird das Elektron durch irgend welche äussern Einwirkungen gezwungen, von einer Bahn, die durch den Index n_1 gekennzeichnet sei, in eine andere Bahn mit dem Index n_2 überzugehen, so sendet es im Moment dieses Ueberganges eine Strahlung mit der Schwingungszahl ν aus, so dass

$$h \cdot \nu = A_{n_1} - A_{n_2}, \text{ also}$$

$$\nu = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^3}\left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2}\right).$$

Sei dieser Uebergang so, dass die Elektronen in den unzähligen Atomen des leuchtenden Gases aus den verschiedensten grössern Ellipsen (für welche $n_1 = 3, 4, 5, 6$ u. s. f.) immer in eine kleinste Ellipse (für welche $n_2 = 2$ sei) hingelange, so folgt daraus, dass das gesamte leuchtende Gas eine Reihe von Lichtstrahlen bestimmter Wellenlänge, also eine Serie von Spektrallinien aussendet, deren Schwingungszahlen dem einfachen Gesetz gehorchen:

$\nu = N\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right)$, wo n der Reihe nach gleich 3, 4, 5, 6 u. s. f. wird

und N eine ganz bestimmte Konstante ist: $N = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^3}$.

Aber das ist nichts anderes als das Balmer'sche Seriengesetz (p. 12), das sich hier als ganz natürliche Folgerung des Bohr'schen Atommechanismus ergibt. Die spannende Frage, die jetzt entgegentritt, betrifft die Konstante N. Bei der ausserordentlichen Schärfe der heutigen Spektralmessungen lässt sich dieselbe experimentell mit grosser Sicherheit angeben, sie hat den Zahlenwert $3{,}29 \cdot 10^{15}$ (nach der Balmer'schen Serienformel gibt sie, durch 4 geteilt, die höchste Schwingungszahl, bezw. die kleinste Wellenlänge, die im Wasserstoffspektrum auftreten kann: $\nu = \frac{N}{4}$, wenn $n = \infty$ wird). Andrerseits gibt der Bohr'sche Ausdruck einen Zusammenhang von N mit den drei Grössen m, e und h, die

auf verschiedenster Weise, ganz unabhängig von den Spektralmessungen, bestimmt worden sind; N lässt sich also berechnen, Bohr findet dafür den Wert $3{,}1 \cdot 10^{15}$, d. h. eine Zahl, die in ganz auffallender Uebereinstimmung mit den experimentellen Resultaten steht! — In dieser so unerwarteten Uebereinstimmung liegt das bestechende der Bohr'schen Auffassung, die ihr so allgemeine Anerkennung verschafft hat.

Auch nach andern Seiten geben die Bohr'schen Formeln sehr befriedigende Resultate. Berechnet man den Radius a des permanenten Atoms, d. h. der innersten Kreisbahn, so findet man $1{,}1 \cdot 10^{-8}$ cm, d. h. die Zahl, die allgemein für den Atomradius angenommen worden war. Berechnet man den zugehörigen Wert der Energie A_n (ohne Rücksicht auf die nicht in Betracht fallende Konstante K), dividiert ihn durch die Elementarladung e und rechnet ihn um in Volt, so findet man $c \cdot 13$ Volt. Nach der Definition von A_n (p. 21) gibt dies aber die elektrische Spannung an, die nötig ist, um das Elektron aus seinem Zusammenhang mit dem Atomkern, und zwar aus seiner „permanenten" Bahn heraus zu reissen; das ist aber die Grösse, die man nach besondern Methoden experimentell bestimmen kann und die man die Ionisierungsspannung des Wasserstoffatoms nennt; auch hier stimmt die Theorie gut mit den Tatsachen.

Von weitern Resultaten erwähnen wir nur folgende: Es ist als auffallend konstatiert worden, dass in den künstlich erzeugten Wasserstoffspektren die Balmerserie nur bis zum Wert $n = 12$ (also mit 10 Linien) beobachtet werden konnte, während in den Spektren gewisser Fixsterne 31 Linien (bis $n = 33$) nachweisbar sind. Bohr erklärt dies folgendermassen: für $n = 12$ wird der „Atomradius", d. h. der Radius der Elektronenbahn $a = 1{,}6 \cdot 10^{-6}$ cm, für $n = 33$ wird er $a = 1{,}2 \cdot 10^{-5}$ cm. Aber die Grösse der äussersten Elektronenbahnen hängt natürlich von der Dichte des Gases ab, da die Bahnen verschiedener Atome sich natürlich vollständig stören, wenn sie ineinandergreifen; bei den Verdünnungen, wie wir sie im Laboratorium in den Spektralröhren herstellen, kann dieser Radius nicht wohl über $1{,}6 \cdot 10^{-6}$ cm gehen, in den Sternatmosphären dagegen kann eine wesentlich stärkere Verdünnung herrschen, die Radien bis zu $1{,}2 \cdot 10^{-5}$ cm gestattet.

Interessant ist es auch, dass gewisse Sternspektra ein Linienspektrum liefern, das künstlich auch in Gemischen von Wasserstoff und Helium beobachtet wurde, und das dem Seriengesetz $\nu = 4\,N\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right)$ gehorcht. Man glaubte früher, dass es sich hier um eine besondere Art von Wasserstoffspektrum handle. Nach Bohr wird aber der Faktor N ohne weiteres vervierfacht, wenn man einen positiven Atomkern mit 2 positiven Elementarladungen annimmt, der von einem einzigen negativen Elektron umkreist wird — das kann aber nicht mehr ein Wasserstoffatom sein, sondern muss offenbar ein Heliumatom sein, das allerdings nicht neutralisiert ist, sondern noch eine überschüssige positive Ladung besitzt. Tatsächlich haben die neuesten Messungen bestätigt, dass es sich hier um Heliumspektren und nicht um Wasserstoffspektren handle.

Selbstverständlich kann die Bohr'sche Theorie nicht bei dem Wasserstoffatom, für das sie so schöne Resultate gezeitigt hat, stehen bleiben, sondern muss auch auf alle andern, wesentlich komplizierteren Atome übertragen werden. Da jedoch das Bohr'sche Atommodell von den deutschen Physikern Sommerfeld, Epstein, Schwarzschild u. a. aufgegriffen und in sinnreicher Weise erweitert und vertieft wurde, so brauchen wir uns bei den weiteren Ausführungen Bohr's nicht länger aufzuhalten.

3. Die Sommerfeld'schen Arbeiten.

A. Sommerfeld hat im Jahre 1915 eine umfangreiche Arbeit veröffentlicht, in welcher er die Grundgedanken Bohrs aufnimmt, wonach negative Elektronen um entsprechend positiv geladene Atomkerne unter der Einwirkung der elektrostatischen Anziehungskräfte kreisen und dabei gewisse, bevorzugte stationäre Bahnen beschreiben, ohne dabei einen Energieverlust durch Strahlung zu erleiden. Die Festsetzung, welche Bahnen stationär seien, geschieht bei Sommerfeld nach einem viel umfassenderen quantentheoretischen Grundsatz als bei Bohr. Indem er das Atom ganz allgemein als ein mechanisches System mit einer Anzahl Freiheitsgrade auffasst, wird sein Zustand in bekannter Weise durch eine entsprechende Anzahl allgemeiner Koordinaten q und der zugehörigen Impulse p bestimmt. Für periodische Bewegungen

lässt sich dann für jeden Freiheitsgrad die Summe all der Produkte $dp \cdot dq$ über eine Periode finden und das diesbezügliche Integral darf nach der Quantentheorie nicht einen beliebigen Wert annehmen, sondern muss gerade gleich dem elementaren Wirkungsquantum h, oder doch ein ganzzahliges Vielfaches desselben sein.

Wie dieser fundamentale Satz auf allgemeinere, nicht periodische Systeme zu übertragen sei und wie die richtigen Koordinaten zu finden seien, auf die jener Satz anwendbar ist, das sind Schwierigkeiten der Sommerfeld'schen Theorie, die er meisterhaft zu umgehen weiss, wenn er sie auch nicht endgültig lösen kann. Für uns genügt es festzustellen, dass durch diesen Satz ganz bestimmte Bahnen aus der Fülle der möglichen herausgehoben werden, so dass diese Bahnen eben die von den Elektronen befolgten, stationären Bahnen sind. Die sog. Keplerellipsen der Elektronen erfahren durch diesen Satz eine sog. Quantelung, und diese « gequantelten Keplerellipsen » sind es, die das Verhalten des Atoms charakterisieren.

Auf Grund dieser Berechnungen findet Sommerfeld für die Energie einer solchen gequantelten Ellipse im einfachen Fall des Wasserstoffatoms:

$$A_n = K - \frac{1}{(n+n')^2} \cdot \frac{2\pi^2 m e^4}{h^2},$$

also genau denselben Ausdruck wie Bohr, aber mit der wichtigen Erweiterung, dass hier zwei veränderliche ganzzahlige Grössen n und n′ anstatt einer einzigen auftreten. Der Charakter der Elektronenbahnen ist also wesentlich derselbe wie bei Bohr, sie bilden jedoch eine zweifach unendliche Schar, indem nicht nur die Axen der Ellipsen, sondern auch deren Exzentrizitäten verschieden sein können.

Es ist leicht einzusehen, dass diese Energieausdrücke unter Anwendung der dritten Grundypothese Bohrs zu den Balmer-Rydberg'schen Gesetzen führen. Auch Sommerfeld nimmt an, allerdings nicht ohne gewisse Bedenken geltend zu machen, dass die Strahlung eines Atoms dadurch zu Stande kommt, dass ein Elektron aus einer Ellipse grösserer Energie A_{n_1} in eine

solche kleinerer Energie A_{n_2} übergeht, und dass dabei die Energiedifferenz als homogene Strahlung ausgesendet wird, mit einer Gleichung

$$h\,\nu = A_{n_1} - A_{n_2}.$$

Bezeichnen also m und m′ ganze Zahlen, die für die Anfangsellipse gelten, und n und n′ ebenso die ganzen Zahlen der Endellipse, so folgt

$$\nu = N\left(\frac{1}{(n+n')^2} - \frac{1}{(m+m')^2}\right),$$

wobei N denselben Wert hat wie in Bohrs Theorie.

In diesem Ausdruck stecken wiederum je nach den Werten von $n + n'$ und $m + m'$ die verschiedenen für Wasserstoff beobachteten Spektralserien.

Diese Vervielfachung der stationären Keplerellipsen, die Sommerfeld gefunden hat, scheint anfangs gerade kein Vorteil der Theorie zu sein, da sie ja doch in Praxi auf dieselben Spektrallinien führt, die sich scheinbar aus Bohrs Theorie viel einfacher ergeben. Allein der Fortschritt der Sommerfeld'schen Auffassung tritt bei noch weiterer Vertiefung seiner Theorie sofort glänzend entgegen.

Es ist schon durch verhältnismässig ältere Versuche bekannt, dass die experimentellen Bestimmungen der trägen Masse der Elektronen aus der magnetischen Ablenkung der Kathodenstrahlen sehr seltsame Resultate lieferten: es zeigte sich, dass diese Masse nicht konstant war, sondern von der Geschwindigkeit der Elektronen im Kathodenstrahl abhing und zwar so, dass die Masse mit der Geschwindigkeit zunahm. Die damit zusammenhängenden, weitreichenden Probleme der Relativitätstheorie gehören nicht in unsere Betrachtungen, aber es geht daraus die Tatsache hervor, dass bei Berechnungen von Elektronenbewegungen, die sehr rasch erfolgen, die Aenderung ihrer Masse mit der Geschwindigkeit unbedingt zu berücksichtigen ist. Dies hat denn auch Sommerfeld getan und seine ganzen Berechnungen noch einmal mit dieser Ergänzung durchgeführt, also die sog. „relativistischen Keplerellipsen“ der Elektronen bestimmt.

Diese Bahnen sind dadurch gekennzeichnet, dass sie Ellipsen mit Perihelbewegung sind, d. h. Ellipsen, deren grosse Axe während

der Umlaufsdauer der Elektronen um den Atomkern selbst eine mehr oder weniger rasch erfolgende Rotation besitzt, so dass die wirkliche Bahn keine geschlossene Kurve mehr ist — ähnlich wie dies bei der Bahn des Merkurs um die Sonne konstatiert werden kann.

Das Resultat dieser recht komplizierten Erscheinung, angewendet auf die Gesetzmässigkeiten der Spektrallinien, ergibt, dass die nach dem Balmer-Rydberg'schen Gesetz gefundenen einzelnen Spektrallinien des Wasserstoffatoms in Wirklichkeit in ganz feine, äusserst benachbarte Einzellinien, sog. Dublett, Triplett, Quartett usw. zerfallen, so dass zu jedem Wert von ν ein oder mehrere nur ganz wenig verschiedene ν gehören. Es handelt sich dabei um äusserst minimale Veränderungen, so z. B. zerfällt nach der Theorie die rote Wasserstofflinie H α (die Fraunhofer'sche C Linie) in Wirklichkeit in 2 Linien, deren Wellenlängen 6562,849 und 6562,725 Armstrong-Einheiten betragen, also nur eine Differenz von 1,24 Tausendmillionstel cm ausmachen.

Dass die moderne Spektroskopie die Wellenlängen bis auf etwa $^1/_{1000}$ Armstrong-Einheiten, d. h. bis etwa 10^{-11} cm, zu bestimmen vermag, solche Feinstrukturen der Spektrallinien zu beobachten und sogar bis in die Details zu entwirren versteht, das gehört zu den Glanzleistungen der neueren Experimentalphysik, die sich hier in wunderbarer Synthese mit denen der theoretischen Physik vereinigen. — Wir ermessen den gewaltigen Fortschritt dieser neuen Spektralanalyse, die das innerste der Atomstruktur enthüllt, wenn wir sie vergleichen mit den Anfängen der Spektralanalyse Bunsens, die nur mühsam den allgemeinen Charakter einiger weniger Elemente aus ihrem Flammenspektrum zu ermitteln gestattete.

4. Der Starkeffekt.

Das Bohr-Sommerfeld'sche Atommodell sollte auch Klarheit verschaffen über den von J. Stark vor fünf Jahren entdeckten und nach ihm benannten elektrischen Starkeffekt. Bei seinen beharrlichen und so erfolgreichen Studien über die Kanalstrahlen und das Spektrum der in ihnen zum Leuchten gebrachten Atome, war es Stark gelungen, die Aenderungen dieses Spektrums zu verfolgen, die auftraten, wenn man jene Strahlen in ein genügend

starkes elektrisches Feld brachte. In scheinbarer Analogie mit dem Zeemanneffekt zerfallen die einfachen Spektrallinien durch die Einwirkung des elektrischen Feldes in mehrere Einzellinien; so liefert z. B. die rote $H\alpha$-Linie des Wasserstoffs bei Betrachtung senkrecht zu den elektrischen Kraftlinien ein Quintett, wobei die 2 äussersten Linien stark auftreten und Schwingungen parallel zu der elektrischen Feldstärke darstellen, während die 3 mittleren Linien Schwingungen von schwacher Intensität entsprechen, die senkrecht zu den vorigen erfolgen.

Ueber diese Erscheinungen, die mit der bisherigen Auffassung quasi-elastischer Elektronenbindungen nicht in Einklang zu bringen war, hat P. S. Epstein auf ähnlicher Grundlage wie Sommerfeld Berechnungen angestellt, die eine befriedigende Darstellung der experimentellen Resultate mit dem Bohr'schen Modell ergaben.

IV. Die Röntgenspektren.

1. Röntgenspektren und Ordnungszahl der Atome.

Die Erforschung der Röntgenstrahlen sollte das Gebiet sein, das die Probleme der Atomstruktur am hellsten beleuchtet. Seit den schönen Arbeiten von Laue's und seiner Mitarbeiter Friedrich und Knipping im Jahre 1912, welche die Interferenzerscheinungen der Röntgenstrahlen an Kristallen entdeckten, trat die physikalische Untersuchung dieser Strahlen in ein ganz neues Stadium.

Es ging daraus hervor, dass die Röntgenstrahlen zweifellos als elektromagnetische Wellen (bezw. Wellenimpulse) aufzufassen seien, die sich hauptsächlich durch ihre ausserordentlich kleine Wellenlänge auszeichnen. Diese ist im Mittel etwa tausend Mal kleiner als bei den sichtbaren Lichtstrahlen, sie ist von der Grössenordnung 10^{-8} cm, d. h. von derjenigen des Atomdurchmessers selbst (s. Abschnitt VI, p. 42). Daraus erhellt unmittelbar, dass die Röntgenstrahlen beim Eindringen in einen Körper in enge Wechselwirkung mit dem Atom geraten und deshalb in seiner Struktur stark beeinflusst werden müssen.

In der Tat, wenn Röntgenstrahlen auf die in regelmässigen Abständen angeordneten Atome des Raumgitters eines Kristalls, z. B. des Kochsalzes, auftreffen, so erregen sie in jedem einzelnen Atom gewisse Elektronenbewegungen, die ihrerseits zur Aus-

sendung entsprechender Wellen, sog. sekundärer Röntgenstrahlen führen. Diese von jedem Atom nach allen Seiten ausgehenden Strahlen lassen sich nach den Grundsätzen der Wellenlehre, insbesondere des Huygens'schen Prinzips, theoretisch verfolgen, sie zeigen auf der bestrahlten Seite des Kristalls eine scheinbare Reflexion und gelangen in Richtungen, die nur durch die Wellenlänge und den Abstand der Atome bedingt sind, zur Interferenz. Aehnlich wie die bekannten Beugungsgitter das auffallende Licht in äusserst scharfe Spektren zerlegen, so wirken die Kristallplättchen auf Röntgenstrahlen und erzeugen ein regelrechtes Röntgenspektrum.

Das in den letzten Jahren rasch sich entwickelnde Studium dieser Röntgenspektren hat gezeigt, dass neben einer stetigen Strahlung jedem Metall Strahlen von ganz bestimmter Schwingungszahl eigen sind, sei es, dass das Metall als Antikathode diese bestimmten Strahlen aussendet, sei es, dass es durch Bestrahlung zur Aussendung derselben angeregt werde, nach Art der Fluoreszenz. Stets erhält man ein Röntgenspektrum mit ganz bestimmten einzelnen Linien, die man photographieren und ausmessen kann, wie wenn es sichtbare Linienspektren wären. Wie aber in den optischen Linienspektren die einzelnen Linien sich nach Serien gruppieren lassen, die gewisse Gesetzmässigkeiten befolgen, so kann man auch bei den Röntgenspektren Serien auffinden, die man nach ihren Entdeckern: Barkla, Sadler u. a. als K-Serie, L-Serie, M-Serie u. s. f. bezeichnet, wobei die K-Serie für jedes Metall die härtesten und kurzwelligsten Strahlen enthält, während die folgenden Serien immer weichere und langwelligere Strahlen aufweisen. Einige Beispiele solcher Röntgenlinien, die man wegen ihrer grossen Schwingungszahl als Hochfrequenzspektren bezeichnet, sind in Abschnitt VI angeführt.

Von hoher Bedeutung ist es, dass die Röntgenspektra in engstem Zusammenhang mit der Natur des Atoms stehen, so dass jedes Atom auch in den mannigfachsten chemischen Verbindungen immer sein charakteristisches Röntgenspektrum liefert. Damit ist das Ziel der alten Spektralanalyse in viel weitgehenderer Weise erreicht, als es mit der optischen Spektroskopie, die nur bei wenigen Elementen erfolgreich verwertet werden konnte, der Fall war, aber es liegt noch mehr darin.

Die englischen Forscher Moseley und Darwin haben speziell die stärkste Linie der K-Serie bei den allerverschiedensten Elementen studiert und nach einem Zusammenhang ihrer Schwingungszahl ν mit der Natur des Elementes geforscht. Sonderbarerweise ergab sich kein klarer Zusammenhang mit dem Atomgewicht, das bisher als die charakteristische Grösse des Elementes galt, sondern mit einer andern Zahl, die erst jetzt in das richtige Licht gerückt wurde.

Die Anordung der chemischen Elemente nach dem sog. Mendelejeff'schen periodischen System hatte bei allen Erfolgen desselben doch noch einen etwas schwankenden Charakter, der namentlich durch das Einordnen der radioaktiven Elemente erschwert wurde. Aber die daran sich knüpfenden neueren Untersuchungen von Fajans, van den Broek u. a., sowie die Aufstellung des Begriffes der Isotopen gestatteten doch, jenem System eine grössere Festigkeit zu geben. So wurden denn die Elemente in eine bestimmte Reihenfolge eingeordnet, so dass man jedem derselben eine ganz feste Ordnungszahl Z geben konnte: $H = 1$, $He = 2$, $Si = 3$, $Be = 4$, $B = 5$, $C = 6$, $N = 7$, $O = 8$, $F = 9$, $Ne = 10$, $Na = 11$ u. s. f., wobei beiläufig diese Ordnungszahl (allerdings nur sehr angenähert) der Hälfte des Atomgewichts ungefähr gleich wird.

Diese Ordnungszahlen, die scheinbar sehr unsicher waren — wusste man ja nicht, ob nicht noch irgendwelche neue Elemente sich an gewisse Stellen einschieben würden — kamen nun bei den Untersuchungen von Moseley und Darwin zu ihrer vollen Geltung.

Sie fanden für die Schwingungszahl ν der stärksten K-Linie für die von ihnen untersuchten Elemente (im Bereich der Ordnungszahlen $Z = 11$ bis $Z = 60$) die höchst einfache Regel:

$$\nu = \frac{3}{4}\frac{N}{c}(Z-1)^2,$$

wobei N wiederum die alte, schon oft erwähnte Balmer-Rydberg'sche Konstante ist, die man neuerdings durch die Lichtgeschwindigkeit c zu dividieren pflegt (s. Abschn. VI, p. 42).

Auch für die stärkste Linie der L-Serie ergab sich eine ähnliche Formel:

$$\nu = \frac{5}{36} \frac{N}{c} (Z - 7{,}4)^2$$

Die Analogie mit den Balmer-Serien ist auffallend, ja sogar vollständig, da der Faktor der K-Serie: $\frac{3}{4} = \frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2}$ ist, und derjenige der L-Serie:

$$\frac{5}{36} = \frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2}$$

Damit war ein doppeltes Resultat gefunden:

Einerseits zeigen die Röntgenspektren ähnliche Gesetze wie die optischen Linienspektren; es ist also zu vermuten, dass der Mechanismus der Röntgenstrahlenaussendung demjenigen der Lichtstrahlung ähnlich sei, und in der Tat haben die Bohr'schen Ausführungen, die dann wiederum von Sommerfeld in erheblich verschärfter Weise erweitert wurden, dies dargetan. Diese sehr komplizierten Rechnungen lassen sich hier, auch nur andeutungsweise, nicht wiedergeben, sie sind zudem keineswegs zu einem allseitig befriedigenden definitiven Abschluss gelangt, aber sie lassen doch ersehen, dass man auch hier stationäre Elektronenbahnen annehmen muss, die relativistische gequantelte Keplerbahnen sind, bei denen Strahlungen bestimmter, sehr hoher Schwingungszahl emittiert werden, sobald ein Elektron aus der einen Bahn mit grösserer Energie in eine solche mit kleinerer Energie überspringt.

Andrerseits zeigen jene Hochfrequenzspektren den durch obige Formeln dargetanen Zusammenhang mit der Ordnungszahl Z der Atome im periodischen System, wodurch bestimmte Einblicke in die Struktur des Atoms getan werden können. Freilich ist hier die Theorie in ihren ersten noch tastenden Anfängen, die Resultate sind noch in hohem Grade hypothetisch, aber sie lassen doch folgende Hauptzüge als wahrscheinlich hervortreten.

2. Die Struktur des Atoms.

Der Atomkern ist wohl selber ein ziemlich komplexes Gebilde, namentlich bei Atomen höheren Atomgewichtes. Jedenfalls ist seine Masse massgebend für dieses Atomgewicht und danach

sind auch alle Eigenschaften der Atome, die von der Masse abhängen, lediglich durch die Natur des Kernes bestimmt; auch die radioaktiven Eigenschaften des Atoms, sofern solche bestehen, sind Erscheinungen des Atomkerns, bei denen sich α-Korpuskeln und negative Elektronen direkt aus dem Kern abspalten — woraus beiläufig zu schliessen ist, dass der Kern als solcher auch negative Elektronen in sich bergen muss. Alle mit dem Atomkern zusammenhängenden Eigenschaften zeigen einen mit seiner Masse durch das ganze periodische System hindurch zunehmenden Fortschritt, lassen also keinerlei Periodizität erkennen. Der Atomkern ist immer positiv geladen, und seine Ladung, bezw. der Überschuss seiner positiven Ladung über der negativen Ladung allfällig in ihm eingeschlossener negativer Elektronen, wächst auch von Atom zu Atom im periodischen System. Hier kommt die Ordnungszahl des Atoms zu ihrer physikalischen Bedeutung: diese Ordnungszahl gibt direkt die Anzahl der überschüssigen, positiven Elementarladungen des Atomkerns an! Im Wasserstoffatom hat der Kern eine positive Elementarladung, im Heliumatom deren zwei, im Lithiumatom drei u. s. f. bis zum Uranatom, in welchem sie 92 betragen soll.

Diese Atomkerne, deren Dimensionen auch bei dem grössten Atom, dem Uran, immer unterhalb 10^{-13} cm bleiben sollen, sind von negativen Elektronen umkreist, und zwar im neutralen Zustand von genau so vielen, als der Kern positive überschüssige Elementarladungen hat, d. h. die Zahl der umkreisenden Elektronen ist wiederum durch die Ordnungszahl Z gegeben! Das ganze Problem der Atomstruktur bezieht sich in erster Linie auf die Frage der Anordnung dieser Elektronen. Es liegt auf der Hand, dass dieselben in nahezu konzentrischen Ringen (die kreis- oder auch ellipsenförmig sein mögen) äquidistant angeordnet sein werden, wobei die Verteilung so sein muss, dass die gegenseitigen elektrostatischen Anziehungen und Abstossungen ein stabiles System erzeugen, das zudem den Anforderungen der Quantentheorie genügt. Eine vollständig exakte Behandlung dieses Stabilitätsproblems ist natürlich nur bei den allereinfachsten Modellen möglich, so dass man sich mit allgemeinen Darlegungen begnügen muss. Offenbar werden einige Elektronen, bezw. einige Ringbahnen derselben, relativ nahe am

Kern liegen, man nennt sie die inneren Elektronen, andere werden einen äussersten Ring bilden, es sind die äussern Elektronen, während der grosse übrige Haufe (wenigstens bei Atomen hoher Ordnungszahl) einen dichten mittleren Komplex von Ringen bilden wird, den wir schon früher (p. 17) mit den Saturnringen verglichen haben.

Die Elektronen des äussersten Ringes, deren Zahl wir mit Z bezeichnen wollen, stehen einerseits unter dem anziehenden Einfluss der Z positiven Elementarladungen des Atomkerns, anderseits aber auch unter dem abstossenden Einfluss der Z — z Elektronen sämtlicher übrigen Ringe. Sie sind offenbar von allen Elektronen am wenigsten fest gebunden, sie zeigen die grösste Beweglichkeit, sie wirken am stärksten nach aussen und sind am leichtesten äusseren Einflüssen zugänglich. Die verschiedenartigsten chemischen und physikalischen Eigenschaften des Atoms, abgesehen von denen, die wir dem Atomkern zugeschrieben haben, hängen also wesentlich von diesem äussersten Ring ab, so z. B. die chemischen Affinitäten und Valenzen, das Atomvolumen, die optischen Eigenschaften usw. In der Tat wird der Prozess der Lichtemission, den wir beim Wasserstoffatom besprochen haben, sich bei jedem leuchtenden Atom in ähnlicher Weise wiederholen, indem Elektronen des äussersten Ringes in verschiedenen stationären Bahnen sich bewegen können, aber dabei das Bestreben haben, in die innerste dieser Bahnen, eben die des „äussersten Ringes", zu gelangen; bei diesem Uebergang strahlen sie die verschiedenen Spektrallinien aus, und wenn sie ihre definitive Bahn erreicht haben, so hat das Atom seinen „permanenten" Charakter erhalten. Da es aus Stabilitätsgründen, nach Bohrs Angaben, nicht wohl möglich ist, dass ein einzelner Ring mehr als acht Elektronen enthalte, so ergibt sich daraus ohne weiteres die Grundlage des periodischen Systems. Sobald die im äussersten Ring auftretenden Elektronen bei den verschiedenen Atomen dieses Systems successive die Anzahl 1, 2, 3 . . . bis 8 erreicht haben, so werden sich weitere Elektronen zu einem neuen äussern Ring anordnen, der auch seinerseits von Atom zu Atom bis zur Elektronenzahl 8 anwachsen kann, um dann wieder einem neuen Ring Raum zu lassen u. s. f. Alle die Eigenschaften, von denen wir oben sagten, dass sie mit der Natur des äussersten Elektronen-

ringes zusammenhängen, werden also in der Regel je nach der achten Ordnungszahl des periodischen Systems sich wiederholen — damit ist aber der physikalische Grund der Periodizität in einfachster Weise klargelegt.

Ebenso wichtig wie das Verhalten der Elektronen des äussersten Ringes ist dasselbe für die Elektronen des innern Ringes; denn hier spielen offenbar die Gesetzmässigkeiten der Röntgenstrahlung hinein. Um dieselbe zu verstehen, denken wir uns ganz schematisch (also jedenfalls den wirklichen Verhältnissen nicht entsprechend) alle Elektronen bis auf eines in einem vom Atomkern relativ dicht gedrängten „Saturnring" angehäuft, während dieses eine Elektron im zwischenliegenden Raum seine Bahn beschreibt. Die Gesamtheit all dieser äussern Elektronen übt im Innenraum keine merkliche Kraftwirkung aus, das betrachtete „innere" Elektron bewegt sich also um den Atomkern, wie wenn es allein vorhanden wäre. Wir haben genau dieselben Erscheinungen wie beim Wasserstoffatom, mit dem Unterschied, dass die Ladung des Atomkerns Z e, die des Elektrons nur e ist. Alle Beziehungen, die wir bei Besprechung der Balmer-Serie feststellten, wiederholen sich bei diesem „wasserstoffähnlichen" Atom, wir bekommen also die Möglichkeit einer Spektralserie, bei der sich nur der Ausdruck e^4 durch $(Z-1)^2 e^4$ ersetzt, also eine dementsprechend höhere Frequenz folgt:

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

d. h. die von Moseley und Darwin für die sog. $K\alpha$-Linie gefundene Beziehung (s. p. 30 mit entsprechender Verallgemeinerung). Es lässt sich leicht überblicken, aber theoretisch kaum allgemein durchführen, dass ähnlich Ausdrücke auch dann bestehen müssen, wenn mehrere Elektronen auf dem innersten Ring kreisen, oder wenn auch mehrere derartige innere Ringe in Betracht fallen. Immer muss hier die Ordnungszahl Z direkt zur Geltung kommen und die Periodizität des Mendelejeff'schen Systems kann bei diesen innersten Prozessen nicht zum Vorschein kommen. Freilich ist für die Elektronen, die nicht mehr dem innersten Ring, sondern dem zweiten oder dritten Ring angehören, nicht mehr die Ladung Z — e des Atomkerns allein wirksam, sondern es ist die Wirkung der z weiter innen liegenden Elektronen davon abzuziehen.

Wie schon erwähnt, hat Sommerfeld in bewunderungswürdiger Weise diese komplizierten Verhältnisse zu entwirren gesucht, allein diese Berechnungen sind nur als ein erster Anfangsversuch zu betrachten. Kossel, Vegard, Debye u. a. haben in diesem Gebiete weiter gearbeitet, und wenn auch keine einheitliche Anschauung zur Zeit besteht, so können wir doch ganz allgemein folgendes Bild des Mechanismus der Röntgenstrahlenemission machen.

3. Die Emission der Röntgenstrahlen.

Um den Atomkern lagert sich der innerste Elektronenring, der nach Debye 3 Elektronen zählt, um denselben der zweitinnerste Ring, der nach Vegard 7 Elektronen zählt u. s. w.; diese Ringe mit all den nachfolgenden äussern bilden ein sehr stabiles System, sie repräsentieren das Atom in seinem permanenten Zustand. Ein solches Atom muss nun zunächst eine gewisse Energie aufnehmen, bevor es Röntgenstrahlen aussenden kann; diese Aufnahme, bezw. Absorption von Energie erfolgt gerade auf umgekehrtem Wege wie die Strahlung; es muss also irgend ein Elektron, das auf seiner Bahn eine geringe Energie hat, auf eine viel entferntere Bahn mit grösserer Energie gebracht werden, d. h. es muss irgend ein inneres Elektron möglichst weit hinausgeschleudert werden. Dazu sind verschiedene Wege offen: bei der primären Röntgenstrahlung, wie sie von der Antikathode ausgeht, ist es das Elektron des Kathodenstrahles, das mit grosser Wucht auf das Atom prallt und bewirkt, dass eines der Elektronen der innern Ringe herausgesprengt wird; bei der sekundären Röntgenstrahlung, der sog. Fluoreszenzstrahlung, ist es die primäre einfallende Strahlung, die durch ihre elektromagnetischen Kräfte ein Elektron der innern Ringe loslösen kann. Das ist der erste Akt, die Aufnahme von fremder Energie, die eine Störung des Gleichgewichtes der innersten Ringe bedingt, und der sofort vom zweiten Akt gefolgt wird: das gestörte Gleichgewicht sucht sich dadurch herzustellen, dass irgend ein Elektron eines benachbarten Ringes an die Stelle des herausgejagten eilt, wodurch eine ganz bestimmte Röntgenfrequenz emittiret; die in jenem benachbarten Ring frei gewordene Stelle wird wiederum durch ein Elektron des nächstfolgenden Ringes ergänzt,

bis zu allerletzt das ursprüngliche Elektron der Anziehung des Atoms unterliegt und irgendwo in einem äussern Ring Platz nimmt.

Nach Kossels Anschauungen, die teilweise durch Sommerfelds Berechnungen gestützt werden, erzeugt der Eintritt eines Elektrons aus dem 2. Ring in den allerinnersten die Aussendung der intensivsten Linie K_α der K-Serie, der Eintritt eines solchen aus dem 3. Ring in den innersten gibt die schwächere, aber noch höhere Frequenz aufweisende K_β-Linie, der Eintritt aus dem 4. Ring gibt die K_γ-Linie u. s. w.; dagegen erzeugen die in den zweitinnersten Ring eintretenden Elektronen die L-Serie, die in den drittinnersten Ring eintretenden die M-Serie u. s. w. Etwas abweichende, aber auf gründlichen Berechnungen beruhende Annahmen gibt Vegard; sei dem, wie ihm wolle, es erscheint ziemlich sicher, dass die verschiedenen Röntgenstrahlen entstehen durch Sprengungen der innersten Elektronenringe, die dann aus den benachbarten Ringen wieder ergänzt werden.

V. Die Molekel und die chemische Affinität.

Hat uns in den bisherigen Ausführungen das Bohr'sche Atommodell in seinen verschiedenartigen Erweiterungen ausserordentlich interessante Aufschlüsse gegeben, so fühlen wir doch ganz bestimmt, dass es lauter erste Anfangsversuche sind, die noch nach den allerverschiedensten Richtungen hin ergänzt werden müssen.

Wir können nur noch kurz, nach zwei Seiten hin, diese Erweiterungen andeuten.

1. Die Struktur der Molekel.

Die Körper der Natur sind in der Regel nicht direkt aus Atomen aufgebaut, sondern diese verbinden sich erst zu bestimmten Gruppierungen, den chemischen Molekeln, die dann ihrerseits durch eine Zusammenwirkung anziehender und abstossender Kräfte die sichtbaren Körper erzeugen. Es ist klar, dass eine Theorie der Atomstruktur notwendigerweise auch Beziehungen für die Molekülarstruktur ergeben muss. In der Tat hat Bohr auch darüber bestimmte Anschauungen geäussert, die wenigstens für die einfacheren Molekeln sehr einleuchtend sind.

So wird die Wasserstoffmolekel ohne weiteres durch Vereinigung zweier Wasserstoffatome entstehen, so dass ein neues stabiles System sich bildet, in welchem die elektrischen Anziehungs- und Abstossungskräfte mit den Zentrifugalwirkungen der rotierenden Elektronen im Gleichgewicht stehen. Die beiden positiven Atomkerne werden die Axe 2a des Systems bilden, die zwei negativen Elektronen rotieren in einer Ebene, die senkrecht zu dieser Axe durch ihre Mitte geht; sie befinden sich stets auf diametral gegenüberliegenden Punkten dieses Kreises mit Radius b. Die einfache Berechnung zeigt, dass in diesem Fall $a = \sqrt{3} \cdot b$ sein muss. Die numerischen Werte ergeben sich nach Debye:

Länge der Axe, $2a = 1{,}05 \cdot 10^{-8}$ cm.

Durchmesser des Ringes, $2b = 0{,}604 \cdot 10^{-8}$ cm.

Umlaufszahl der Elektronen $\omega = 4{,}21 \cdot 10^{16}$ per Sekunde.

Nach demselben Typus können wir uns alle Molekeln aufgebaut denken: die positiven Atomkerne ordnen sich auf einer Axe an, die negativen Elektronen bilden Ringe um diese Axe in verschiedenster Anordnung.

Wiederum sind es optische Beziehungen, und zwar die Gesetze der Brechung und der Dispersion, die erlauben, Anhaltspunkte über die Brauchbarkeit dieser Molekelmodelle zu finden. Debye hat zuerst die elektromagnetischen Gesetze der Dispersion auf den Wasserstoff angewendet unter Benützung der Bohr'schen Molekel und eine völlig befriedigende Übereinstimmung zwischen Theorie und experimentellen Messungen gefunden. Freilich zeigte sich schon bei der Molekel des nächsten Elementes, des Heliums, eine Divergenz, die auch durch die viel allgemeineren Berechnungen Sommerfelds, der noch die Sauerstoff und Stickstoffmolekel behandelte, bestätigt wurde. Die diesbezüglichen Untersuchungen sind noch völlig im Fluss, so dass es wenig Sinn hat, darauf näher einzutreten; wir stellen nur fest, dass die Bohr'sche Atomstruktur in ihren Hauptlinien ohne weiteres auch auf die Molekelstruktur übertragen werden kann, dass es aber wahrscheinlich ist, dass die Details der Struktur, vielleicht auch die Art der Anwendung der Quantentheorie noch gewisse Abänderung erfahren wird. Interessant ist es zu sehen, dass nach der neuesten Arbeit Sommerfelds der Gegensatz zwischen den klassischen Prinzipien der Mechanik und der Elektrodynamik einer-

seits und der Quantentheorie andrerseits gar nicht so unüberbrückbar ist, wie es eine Zeitlang scheinen mochte.

2. Chemische Affinität und Valenz.

Das Bohr'sche Atommodell muss seine Folgerungen auch in der Chemie, in den Gesetzmässigkeiten der Affinität und der Valenzen zeigen. Hierüber zu reden ist aber nicht Sache des Physikers, sondern des Chemikers, und wenn wir es dennoch wagen, dieses Gebiet ganz kurz zu streifen, so geschieht es im Bewusstsein unserer Unzulänglichkeit und bloss in der Absicht, der Vollständigkeit halber auch diese Fragen nicht unerwähnt zu lassen.

So allgemein anerkannt ist, dass im Atommodell die negativen Elektronen in quantentheoretisch bestimmten Ringbahnen den Atomkern umkreisen, so verschieden sind die Ansichten, sobald es sich um genauere Feststellungen der Ringanordnungen handelt. Bohr hat aus den von ihm aufgestellten Stabilitätsbedingungen gefolgert, dass kein Elektronenring mehr als 8 Elektronen enthalten könne (p. 33), und daraus ein Schema für die Elektronenringe der 24 ersten Elemente (bis und mit Cs) aufgestellt. W. Kossel hat diese Regel aufgenommen, aber aus chemischen Gründen eine gewisse Umstellung der Reihenfolge der Ringe vorgenommen. L. Vegard stützt sich auf die Untersuchungen Debyes, wonach der innerste Elektronenring stets drei Elektronen haben muss, freilich erst bei den Atomen, die zur Aussendung der K-Serie der Röntgenstrahlen veranlasst werden können (also wohl erst vom Ne oder Na an); aus weiteren Berechnungen folgert er, dass dann der nächste Ring, der Anlass zur Bildung der L-Serie gibt, aus 7 Elektronen, der folgende aus 8, der nächste aus 10 u. s. w. bestehen müsse.

Obgleich die Vegard'schen Ausführungen theoretisch besser begründet sind als die mehr schematischen Darlegungen Kossels, so wollen wir hier doch die letzteren besprechen, weil sie jedenfalls ein sehr übersichtliches Bild des Verhaltens der chemischen Affinitäten und speziell auch der wichtigen Rolle der Edelgase geben.

Bis zum Element der Ordnungszahl 25 nimmt Kossel folgende Verteilung der Elektronen an:

	1. *H*						
	1						
2. *He*	3. *Li*	4. *Be*	5. *B*	6. *C*	7. *N*	8. *O*	9. *F*
2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7
10. *Ne*	11. *Na*	12. *Mg*	13. *Al*	14. *Si*	15. *P*	16. *S*	17. *Cl*
2, 8, 0	2, 8, 1	2, 8, 2	2, 8, 3	2, 8, 4	2, 8, 5	2, 8, 6	2, 8, 7
18. *Ar*	19. *K*	20. *Ca*	21. *Sc*	22. *Ti*	23. *V*	24. *Cs*	25. *Mn*
2,8,8,0	2,8,8,1	2,8,8,2	2,8,8,3	2,8,8,4	2,8,8,5	2,8,8,6	2,8,8,7

In dieser Tabelle sind die Elemente nach dem periodischen System angeordnet, jedem Symbol ist immer die Ordnungszahl Z vorangestellt, die gleich ist der Zahl der positiven Elementarladung des Kerns; darunter sind die Elektronenringe mit den ihnen zukommenden Elektronenzahlen angegeben, und zwar links der innerste, rechts der äusserste Ring. So z. B. hat das Calcium die Ordnungszahl 20, zunächst um seinen Atomkern, der demnach 20 positive Elementarladungen besitzt, befindet sich der innerste Elektronenring mit 2 Elektronen, dann folgen nach aussen die beiden mittleren Ringe mit je 8 Elektronen und der äusserste Ring, der massgebend ist für die chemischen Eigenschaften des Atoms, hat hier 2 Elektronen.

Alle diese Atome sind in dieser Darstellung in ihrem „permanenten" Zustand und sind natürlich nach aussen elektrisch neutral. Aber das bedeutet nicht, dass sie ohne weiteres gegen elektrische Kräfte indifferent seien; im Gegenteil sie reagieren darauf in sehr bestimmter Weise und zwar so, dass sie mit mehr oder weniger Leichtigkeit entweder Elektronen des äussersten Ringes abgeben oder solche in diesen äussersten Ring aufnehmen. Dadurch wird natürlich das Atom als ganzes elektrisch geladen: positiv, wenn es Elektronen abgibt, negativ, wenn es solche aufnimmt; es geht dann eben in den Zustand eines Ions über und zeigt die bekannten Erscheinungen ionisierter Atome. Durch diese Ionisierung ist das Atom in den Stand gesetzt, mit andern in Wechselwirkung zu treten; während die ursprünglich neutralen Atome keine spezifisch chemischen Kräfte aufeinander ausüben, ist es mit den ionisierten anders; ein positives Atom-Ion wird sofort ein anderes negatives Atom-Ion anzuziehen suchen und, wenn es gelingt, werden sie sich zu einem einheitlichen Gebilde

vereinigen, sie bilden die Molekel der betreffenden chemischen Verbindung. Hatte das positive Atom-Ion nur ein Elektron verloren, so wird es sich nur mit einem negativen Atom-Ion, das ein überschüssiges Elektron hat, vereinigen, hat aber das positive Ion mehrere Elektronen verloren, so kann es natürlich entweder mehrere negative Ionen mit je einem überschüssigen Elektron oder ein negatives Ion, das entsprechend viel überschüssige Elektronen hat, an sich heften. Es zeigt sich ohne weiteres, dass diese Elektronen des äussersten Ringes die Valenz des betreffenden Atoms bestimmen.

Nur ist hier der Valenzbegriff in viel freierer Form gefasst, als dies früher der Fall war, und die verschiedenen Wertigkeiten des Atoms ergeben sich in ganz zwangloser Weise.

Der zur Beurteilung der Valenz massgebende Grundsatz ist der, dass kein Elektronenring mehr als 8 Elektronen haben kann; damit ist aber auch gesagt, dass jedes Atomgebilde gleichsam das Bestreben hat, seinen äussersten Ring auf diese Zahl von 8 Elektronen zu bringen und dass es in dem Grade leichter ionisierbar ist (demnach auch chemisch aktiver), als es von dieser Zahl entfernt ist. So tritt sofort die spezielle Rolle der Edelgase hervor: sie haben im elektrisch neutralen Zustand 8 Elektronen im äussersten Ring, sie werden also nur mit grosser Mühe eines dieser Elektronen abgeben oder eines aussen neu angliedern; darum müssen sie ihrer Natur nach chemisch indifferent sein und auch die Bildung einer Molekel aus einem positiven und einem negativen Ion tritt nicht auf.

Bei den anderen Elementen dagegen ist der äusserste Ring gleichsam „ungeschlossen“ und kann deshalb zweierlei Verhalten zeigen: entweder gibt er seine sämtlichen Elektronen leicht ab, was meist der Fall sein wird, wenn ihre Zahl gering ist, wie bei Na, Mg, K, Ca u. a. m., so dass der nächstinnerste Ring mit seinen 8 Elektronen zum äussersten „geschlossenen“ Ring wird — oder er sucht sich durch Angliederung freier Elektronen auf die Zahl 8 zu ergänzen, was meist der Fall ist, wenn deren Zahl gross ist, so bei P, S, Cl u. a. m., so dass er direkt „geschlossen“ wird.

Im erstern Fall, bei Elektronenabgabe, ladet sich das Atom positiv, das Element zeigt einen elektropositiven Charakter, und jedes abgegebene Elektron bedingt das Auftreten einer Valenz;

demnach wird ohne weiteres verständlich, dass Na und K sehr stark positiv einwertig, Mg und Ca immer noch stark positiv zweiwertig, Al und Sc positiv dreiwertig sind usw. — wobei dasselbe Verhalten sich auch bei den Elementen der 2. Reihe Li — F entsprechend zeigt. Ebenso ist dann klar, dass F und Cl eine sehr starke elektronegative Einwertigkeit besitzen, da das Bestreben, das letzte fehlende Elektron in ihren äussersten Ring aufzunehmen, sehr gross ist; O und S sind noch stark negativ zweiwertig, N und P negativ dreiwertig. Sehr deutlich tritt auch hervor, dass jedes Atom immer zwei elektrisch entgegengesetzte Wertigkeiten haben kann; so werden z. B. N und P allerdings am häufigsten ihren äussersten Fünfer-Ring durch Aufnahme dieser Elektronen schliessen, so dass diese Elemente einen negativ dreiwertigen Charakter haben, aber es wird doch auch geschehen können, dass sie ihre fünf Elektronen abgeben und dadurch sich als positiv fünfwertig erweisen — und ebenso werden sich alle Atome verhalten; speziell C und Si zeigen hierin ein symmetrisches Verhalten: es ist gleich wahrscheinlich, dass sie 4 Elektronen abgeben, wie dass sie 4 aufnehmen, ihre Vierwertigkeit bleibt unter allen Umständen erhalten.

Mit diesen kurzen Andeutungen schliessen wir unsere Betrachtungen ab.

Überblicken wir das besprochene Gebiet, so werden wir uns bewusst, welch' ausserordentliche Erfolge die Theorie der Atomstruktur in den letzten Jahren erzielt hat und wie uns durch dieselbe vollständig neue Zusammenhänge eröffnet worden sind. Freilich erfahren wir auch hier wieder, dass mit der zunehmenden Naturerkenntnis die letzten Probleme nicht gelöst, sondern einfach weiter hinaus geschoben werden.

Sollte es auch einmal gelingen, die Atomstruktur durch ein vollkommenes Modell darzustellen, so kommen wir doch über den Begriff des Modells nicht hinaus. Und je feiner das Modell wird, um so mehr treten neue Fragen in den Vordergrund. Ist das Atom als solches einmal erforscht, so wird die Frage nach der Struktur des Atomkernes und des Elektrons an die Reihe kommen — wir merken, dass das letze Ding, aus dem die Natur aufgebaut ist, uns für immer entgehen wird.

VI. Numerische Angaben.

Der Übersicht halber stellen wir die wichtigsten Zahlen der Atomtheorie hier zusammen, meistens nach den neuesten Angaben von Millikan oder von Flamm, beide aus dem Jahre 1917.

Avogadro'sche Konstante = Zahl der Atome, die sich in einem Grammatom befinden = $6{,}062.10^{23}$

Loschmidt'sche Zahl = Zahl der Molekeln eines idealen Gases, die sich bei Normaldruck und Normaltemperatur in 1 cm^3 befinden = $2{,}705.10^{19}$

Elektrische Valenzladung = 96540 Coulomb pro ein Mol.

Elektrische Elementarladung: $e = 4{,}774.10^{-10}$ elektrostatische Elektrizitätsmengeneinheiten.

Spezifische Ladung eines Elektrons: $e/m = 5{,}3058.10^{17}$ elektrostatische Einheiten.

Masse eines Wasserstoffatoms = $1{,}662.10^{-24}$ gr.

Masse eines Elektrons : $m = 0{,}9.10^{-27}$ gr.

Mittlerer Durchmesser eines Wasserstoffatoms : $2a = 1{,}1.10^{-8}$ cm.

Mittlerer Durchmesser eines Elektrons = $c.10^{-13}$ cm.

Mittlerer Durchmesser eines Atomkernes $< 10^{-13}$ cm.

Elementares Wirkungsquantum: $h = 6{,}547.10^{-27}$ (C. G. S.)

Rydberg'sche Konstante (in reziproker Wellenlänge) $N = 190737{,}11\ cm^{-1}$.

Magnetisches Moment eines Magnetons = $16{,}40.10^{-22}$.

Elektromagnetische Wellen (Spektrallinien)
nach Wellenlängen λ (in Armstrong-Einheiten $= 10^{-8}$ cm.)
und nach Schwingungszahlen ν per Sekunde.

		λ	ν
Einzelne Linien von Röntgenspektren	74 Wo: K_α - Linie	0,177	c. 17,000,000
	47 Ag: $K_{\alpha'}$ - »	0,567	Billionen
	K_α - »	0,562	
	K_β - »	0,501	
	K_γ - »	0,491	
	$L_{\alpha'}$ - »	4,155	
	L_α - »	4,146	
	L_β - »	3,928	
	L_γ - »	3,698	
	L_δ - »	3,515	
	13 Al: K_α - »	8,360	
	12 Mg: K_α - »	9,915	
	13 Na: K_α - »	11,951	
	30 Zn: L_α - »	12,346	c. 240,000 Bil.
	Unbekanntes Gebiet	—	—
	Kleinste Ultraviolette Wellen	1000	c. 3000 Bil.
	Grenze des Violett	3970	c. 756 »
	Grenze des Rot	7620	c. 394 »
	Grenze des Ultrarot	3,420,000	c. 0,88 »
	Unbekanntes Gebiet	—	—
	Kleinste elektrische Wellen	20,000,000	c. 0,15 »

VII. Alphabetisches Literaturverzeichnis.

J. J. Balmer. Wied. Ann. Phys. *25.* p. 80. 1885.
C. G. Barkla. Phil. Mag. (6S) *22.* p. 396. 1911; *23.* p. 987. 1912.
C. G. Barkla und C. A. Sadler. Phil. Mag. (6 S) *16.* p. 550. 1908.
N. Bohr. Phil. Mag. (6 S) *26.* p. 1, 476, 857. 1913; *27.* p. 506. 1914; *30.* p. 394. 1915.
A. Van den Broek. Phys. Zeitschr. *14.* p. 37. 1913.
P. Debye. Münchener Ber. p. 1. 1915.
Phys. Zeitschr. *18.* p. 276. 1917.
P. Drude. Ann. Phys. (4 F) *14.* p. 677, 936. 1904.
P. S. Epstein. Ann. Phys. (4 F) *50.* p. 489. 1916.
A. Einstein und W. I. de Haas. Verh. d. D. Phys. Ges. *17.* p. 152. 1915.
K. Fajans. Elster und Geitel Festschrift p. 623. 1915.
Phys. Zeitschr. *16.* p. 456. 1915.
Jahrb. Radioakt. Elektr. *14.* p. 314. 1917.
H. v. Helmholz. Vorträge und Reden p. 289 (1881). Braunschweig, Fr. Vieweg, 4. Aufl. 1896.
W. Kossel. Verh. d. D. Phys. Ges. *16.* p. 898, 953. 1914; *18.* p. 339. 1916. — Ann. Phys. (4 F) *49.* p. 239. 1916.
M. Laue, W. Friedrich, P. Knipping. Ann. Phys. (4 F) *41.* p. 971. 1913.
H. G. I. Moseley und C. G. Darwin. Phil. Mag. (6 S) *26.* p. 210. 1024. 1913. *27.* p. 703. 1914.
M. Planck. Vorlesungen über die Theorie der Wärmestrahlung. Leipzig, J. A. Barth, 1. Aufl. 1906.
W. Ritz. Ann. Phys. (4 F) *12.* p. 264. 1903; *25.* p. 660. 1908.
E. Rutherford. Phil. Mag. (6 S) *27.* p. 488. 1914.
A. Sommerfeld. Münchener Ber. p. 425, 459. 1915.
Ann. Phys. (4 F) *51.* p. 1, 125. 1916.
Ann. Phys. (4 F) *53.* p. 497. 1918.
J. Stoney. Dublin Trans. R. Soc. (2) *4.* p. 583. 1891.
J. Stark. Ann. Phys. (4 F) *43.* p. 965. 1914. *48.* p. 193. 1915.
J. J. Thomson. Phil. Mag. (6) *5* p. 673. 1903; *7* und *8.* 1904.
W. Thomson (Lord Kelvin) Phil. Mag. (6) 1903. 1905.
L. Vegard. Verh. d. D. Phys. Ges. *19.* p. 328, 344. 1917.
P. Weiss. Arch. Sc. phys. nat. (4 P) *31.* 1911.
Th. Wereide. Ann. Phys. (4 F) *49.* p. 975. 1916.
P. Zeemann. Zitt. Versl. Amsterdam, *5.* p. 181, 242. 1896; Phil. Mag. (5 S) *44.* p. 55, 255. 1897.