

459

Die Bedeutung der Röntgenstrahlen für die heutige Physik.

Festrede

gehalten in der öffentlichen Sitzung
der B. Akademie der Wissenschaften
zur Feier des 166. Stiftungstages

am 15. Juli 1925

von

Arnold Sommerfeld

Mitglied der mathematisch-naturwissenschaftlichen Abteilung.

München 1925.

Verlag der Bayer. Akademie der Wissenschaften
in Kommission des G. Franz'schen Verlags (J. Roth).

Die Bedeutung der Röntgenstrahlen für die heutige Physik.

Festrede

gehalten in der öffentlichen Sitzung
der B. Akademie der Wissenschaften
zur Feier des 166. Stiftungstages

am 15. Juli 1925

von

Arnold Sommerfeld

Mitglied der mathematisch-naturwissenschaftlichen Abteilung.

München 1925.

Verlag der Bayer. Akademie der Wissenschaften
in Kommission des G. Franz'schen Verlags (J. Roth).

Hochansehnliche Versammlung!

Der große Forscher, dessen durchgeistigtes, von Adolf Hildebrandt modelliertes Bildnis wir vor uns sehen, hat unserer Akademie 25 Jahre lang angehört. Seine vornehme herbe Persönlichkeit ist uns allen in Erinnerung, seine warme Menschlichkeit nur denen, die so glücklich waren, ihm freundschaftlich näher zu treten. Röntgens Leistungen sind in den Schriften unserer Akademie gewürdigt, Leistungen, die sich durchaus nicht auf die Entdeckung seiner Strahlen beschränken, sondern die gesamte Physik der Präzisionsmessungen umfassen. Heute gilt es nicht, rückschauend diese Leistungen nochmals an uns vorüberziehen zu lassen, sondern vorwärts schauend festzustellen, welchen Einfluß die Röntgensche Entdeckung auf die Physik der Gegenwart und Zukunft nimmt und nehmen wird.

Der Baustein, den Röntgen dem Hause der Physik eingefügt hat, ist zum Eckstein der Entwicklung geworden; die Provinz, die er ihrem Reiche hinzugewonnen hat, hat sich als Königreich erwiesen. Wir denken hier nicht so sehr an die medizinische Bedeutung der Röntgenstrahlen, obwohl sie weiteren Kreisen naturgemäß am nächsten liegt, an ihre wundervollen diagnostischen und therapeutischen Erfolge in Krieg und Frieden. Röntgen selbst ist, wie meine medizinischen Kollegen oft zu ihrem Leidwesen erfahren haben, diesen Anwendungen fern gestanden. Das lag in seiner zurückhaltenden Gelehrtennatur begründet. Sein Streben war allein auf die physikalische Erkenntnis gerichtet, auf die Erforschung der Natur seiner Strahlen und auf die Erforschung der Materie mit Hilfe seiner Strahlen. Auch wir wollen hier im Wesentlichen dieser Interessenrichtung folgen, werden also die technische und medizinische Anwendung der Röntgenstrahlen nur gelegentlich streifen können.

Es dauerte 10 Jahre seit Röntgens Entdeckung im Jahre 1895, bis der erste wesentliche Schritt über seine Feststellungen hinaus getan wurde. Dieser Schritt gelang dem Engländer Barkla. Barkla konnte 1905 die Gleichartigkeit von Licht und Röntgenstrahlen nachweisen, indem er durch sinnreiche Versuche die transversale Natur der Röntgenstrahlen zeigte. Das will sagen: Die elektromagnetischen Schwingungen, durch die wir uns das Licht und die Röntgenstrahlung versinnlichen, stehen senkrecht auf der Fortpflanzungsrichtung und sind unter Umständen in einer durch diese Richtung gehenden Vorzugsebene enthalten, die wir Polarisationssebene nennen. Überdies gelang es Barkla in dem Komplex von Strahlen, der aus der Röntgenröhre austritt, verschiedene Gruppen zu unterscheiden, härtere und weichere, d. h. Gruppen größerer und geringerer Durchdringungsfähigkeit. Barkla nannte diese Gruppen K- und L-Strahlung; von späteren sind noch weichere Strahlengruppen gefunden, die dann M- und N-Strahlungen genannt wurden. Dabei sei bemerkt, daß alle solche Namengebungen willkürlich und nichtssagend sind, daß sie aber, speziell im vorliegenden Falle, allgemein angenommen wurden, so daß auch wir sie im folgenden dauernd gebrauchen werden.

Den entscheidenden Schritt nach vorwärts aber bildete die Lauesche Entdeckung vom Jahre 1912, die in einem Institut unserer Akademie gemacht wurde und die wohl, trotz Rutherfords Atomzertrümmerung, trotz Astons Isotopenbestimmung und anderem, als die wichtigste Tat auf dem Gebiete der Experimentalphysik im 20. Jahrhundert bezeichnet werden darf. Wir wollen dabei nicht vergessen anzumerken, daß die Mitarbeiter Laues, die Herren Friedrich und Knipping, in der strengen Zucht der Röntgenschen Schule vorgebildet waren.

Um die Art der Laueschen Entdeckung zu kennzeichnen, möchten wir abermals an die Lehre vom Licht erinnern. Man kannte schon zu Newtons Zeiten die Zusammensetzung des Sonnenlichts aus verschiedenen Farben, man konnte diese durch das Prisma auseinanderlegen. Dies entsprach dem Vor-Laueschen Zustand unserer Kenntnis der Röntgenstrahlen, der allgemeinen Unterscheidung verschiedener

Härtegruppen K, L, . . . , welche in der Tat den verschiedenen Gruppen von Farben verglichen werden können. Aber die quantitativ messende Festlegung der verschiedenen Lichtarten fehlte. Hier war es der Münchener Optiker Fraunhofer, der Glasschleifer aus dem bayerischen Wald, welcher in den dunklen Linien des Sonnenspektrums, den sogenannten Fraunhoferschen Linien, die Marken entdeckte, an der die Messung der Wellenlängen sich zu orientieren hatte. Darüber hinaus erkannte er beim Studium der Beugungserscheinungen und der Beugungsgitter, wie die Wellenlängen des Lichts auszumessen sind durch den Vergleich mit dem Strichabstand im Beugungsgitter. Dasselbe lehrte Laue für die Wellenlänge der Röntgenstrahlen, indem er sie verglich mit den Abständen der Atome im Gitteraufbau eines Kristalls, der feinsten Struktur, die wir aus den Händen der Natur empfangen, fein genug, um auch die Zusammensetzung der Röntgenstrahlen zu analysieren.

Am vertrautesten ist uns ja das Wellenbild, welches die Wasseroberfläche darbietet. Unter Wellenlänge verstehen wir bekanntlich den Abstand aufeinander folgender Wellenberge oder Wellentäler. Wir sehen dort, daß sich Wellenzüge verschiedener Wellenlänge überlagern, wir erkennen ferner neben den großen Wellenformen in der brandenden See die kleinen Rippeln, sogenannte Capillarwellen, welche die großen Wellenformen wie mit einem feinen Muster überdecken.

Die Wellentheorie des Lichtes behauptet nun, daß sich Wellenzüge ähnlicher Art im Raume fortpflanzen, wo immer wir Licht wahrnehmen, zwar nicht Wellen bewegter Materie, sondern Wellen wechselnder elektro-magnetischer Felder, und daß diese Wellenzüge in ihrem physikalischen Verhalten und ihrem Eindruck auf das Auge allein bestimmt werden durch ihre Wellenlänge, d. h. durch den räumlichen Abstand, in dem Berg und Tal, Maximum und Minimum des elektrischen Feldes einander folgen. Rotes und blaues Licht unterscheiden sich lediglich dadurch voneinander, daß rotes Licht etwa eine doppelt so große Wellenlänge hat als blaues Licht. Die Röntgenstrahlen aber entsprechen im Wasserbilde den Rippeln; ihre Wellenlänge ist mehr

als 1000 mal kleiner als die Wellenlänge des kürzesten sichtbaren Lichtes. Während die Wellenlänge des sichtbaren Lichtes im Mittel ein 2000tel eines Millimeters beträgt, ist die Wellenlänge selbst der weichsten Röntgenstrahlen nur ein 2000000tel eines Millimeters, diejenige von harten Röntgenstrahlen noch zehnmal kleiner. Damit rückt die Wellenlänge der Röntgenstrahlen in den Bereich des Abstandes der Atome im kristallinen Gefüge der Materie und wird durch diesen Abstand meßbar.

Der ungelehrte Mensch mag bei derartigen Feststellungen etwas empfinden wie ein Bedauern über die «entgötterte Natur». Licht und Farbe sollen aus der Welt verbannt sein, an ihre Stelle soll das Grau in Grau von Längen und Zahlen treten. Wir verstehen, daß die Künstlernatur Göthes sich gegen dieses farblose physikalische Weltbild sträuben konnte. Aber wir wollen zugleich betonen, daß hier im Grund ein Mißverständnis vorliegt. Die feinen seelischen Qualitäten, die beim Anblick eines schönen Bildes oder beim Genuß der schönen Natur ausgelöst werden, sind so gewiß real, wie die physikalischen Quantitäten, die wir ihnen unterlegen, in gewissem Sinne sogar realer, da ja unsere Sinne und unsere Psyche das eigentliche und ursprüngliche Eingangstor für jede Erkenntnis der Außenwelt darstellen. Wenn wir trotzdem unser einseitig quantitatives und formales, von Maß und Zahl beherrschtes Weltbild, als das objektive, dem farbigen und tönenden Bilde unseres Sinnen- und Seelenlebens als dem subjektiven gegenüber stellen, so wollen wir damit sagen, daß wir nur auf Grund jenes quantitativen Weltbildes die Erscheinungen erklären, d. h. ordnen, verknüpfen und vorher sagen können, daß dagegen die viel reichere und verwickeltere Welt der den objektiven Reizen assoziierten Seelenvorgänge unseren physikalischen Methoden unzugänglich ist. Wir wollen aber hinzufügen, daß auch jene farblose physikalische Welt keineswegs der Schönheit und Harmonie entbehrt. Im Gegenteil: Schon Leonardo empfand die Klarheit der mathematischen Wahrheit für den Geist so wohltätig, wie den Sonnenschein für den Körper; und er konnte doch nach Lage der Dinge

erst ein dunkles Vorgefühl haben von der intellektuellen Befriedigung, die uns Neuere aus der Schönheit und Einfachheit der Naturgesetze entgegenströmt, von der geradezu ästhetisch-musikalischen Freude, die wir empfinden, wenn wir, mit jedem Tage deutlicher, die ganzzahligen Harmonien der physikalischen Grunderscheinungen erlauschen. Ich möchte wünschen, Ihnen wenigstens einen flüchtigen Eindruck dieser harmonischen Schönheit verschaffen zu können, wenn ich es unternehme, im folgenden die Ergebnisse der neueren Röntgenforschung zu schildern.

So wie sich an die Fraunhofersche Forschung die Spektralanalyse des sichtbaren Lichtes anschloß, so entwickelte sich, nur in viel schnellerem Tempo und mit viel überraschenderem Erfolge, aus der Laueschen Entdeckung die Spektroskopie des Röntgenlichtes. Es zeigte sich, daß die früher unterschiedenen Strahlengruppen, die wir durch die Buchstaben K, L, M, . . . kennzeichneten, aus Serien, d. h. gesetzmäßigen Folgen von Röntgenlinien ganz bestimmter Wellenlängen bestehen, derart, daß die Wellenlänge entsprechender Linien in der natürlichen Reihenfolge der Elemente in ganz bestimmter einfacher Weise abnimmt. Unter der natürlichen Reihenfolge der Elemente oder Grundstoffe verstehen wir bekanntlich diejenige nach steigendem Atomgewicht, wie sie in dem sogenannten periodischen System der Elemente festgelegt ist. Der Zusammenhang zwischen der Wellenlänge der Röntgenlinien und dem System der Elemente, zuerst 1913 von Moseley erkannt, ist so straff und lückenlos, daß wir die Anwesenheit eines Elements am sichersten aus der Lage seiner Emissionslinien (oder Absorptionskanten) im Röntgenspektrum nachweisen können, ja daß wir die bisher unentdeckten Elemente nach Zahl und Stellung im periodischen System aus gewissen Lücken in der Folge der Wellenlänge der Nachbarelemente ohne jede Zweideutigkeit ablesen können. Wir haben ganz kürzlich in den Zeitungen gelesen, daß zwei dieser Lücken ausgefüllt wurden, und zwar gerade durch die Methoden der Röntgenanalyse. Die beiden neu entdeckten Elemente, die zu den Stellen 43 und 75 des periodischen Systems gehören, haben die

Namen Masurium und Rhenium erhalten. Die Zahl der noch fehlenden unentdeckten Elemente beträgt nunmehr nur noch 3, die Gesamtzahl der unter irdischen Verhältnissen möglichen Elemente ist 92. Das leichteste und erste Element des Systems ist Wasserstoff, das schwerste und letzte Element Uran.

Der einheitliche Aufbau der Röntgenspektren läßt keinen Zweifel darüber bestehen, daß die Atome aller Grundstoffe aus denselben Grundeinheiten aufgebaut sind, daß die schwereren Atome sich nur darin von den leichteren Atomen unterscheiden, daß sie eine größere Zahl derselben Grundeinheiten in sich enthalten als jene. Derselbe Schluß wird auch durch andere Tatsachen nahe gelegt, z. B. durch die Erscheinungen der Radioaktivität.

Die Grundeinheiten des Atombaus sind: Das negative Elektron, das wir in den Kathodenstrahlen als isoliertes physikalisches Wesen studieren können, und das viel schwerere positive Elektron oder Proton, das den Kern des Wasserstoffatoms und die Einheit der Atomgewichte bildet. Der einheitliche Aufbau aller Atome aber vollzieht sich nach folgendem Plane: Den Mittelpunkt und Schwerpunkt jedes Atoms bildet der Kern, der seinerseits wieder zusammengesetzt ist aus Protonen und Elektronen, vergleichbar der Sonne unseres Planetensystems. Er wird umkreist von den leichten negativen Elektronen, unter sich gleichartig und gleich geladen, vergleichbar den Planeten unseres Sonnensystems. Die Zahl der Elektronen ist gleich der Atomnummer, d. h. gleich der Stellenzahl des Elements im periodischen System. Der Kern trägt eine positive Ladung, welche die negative Ladung der ihn umkreisenden Planeten gerade neutralisiert und durch ihre anziehende Wirkung auf diese den Zusammenhalt im Atomgebäude gewährleistet. Mit jedem Schritt vorwärts im System der Elemente tritt ein negatives Elektron hinzu und wächst die positive Ladung des Kerns um eine Einheit.

Das Atom Gold z. B. steht an der 79ten Stelle in der Tafel der Elemente. Es enthält daher 79 Elektronen, die in Planetenbahnen sich bewegen, und einen Kern, der 79 Ladungseinheiten trägt und

nur einen winzig kleinen Raumteil des Goldatoms einnimmt. Wie sind die 79 Elektronen um den Kern herum angeordnet? Die Antwort geben uns die Röntgenspektren. Sie zeigen, daß die Elektronen in gewisse Gruppen oder Schalen geordnet sind. Wir benennen diese Schalen von innen nach außen fortschreitend mit denselben Buchstaben K, L, M, . . . durch die wir die verschiedenen Gruppen von Röntgenstrahlen unterschieden. Die K-Schale liegt zu innerst, d. h. dem Kern am nächsten; zu ihr gehören 2 Elektronen. Dann folgt die L-Schale, welche 8 Elektronen enthält; hierauf die M-Schale mit 18, die N-Schale mit 32 Elektronen. Es bleiben dann bei Gold noch 19 Elektronen übrig, von denen 18 der nächsten Schale, die wir O-Schale nennen, zugehören, während das letzte äußerste Elektron die chemische Valenz des Goldatoms betätigt. Dabei haben wir uns die aufeinander folgenden Schalen nicht wie die Jahresringe des Baumes einander reinlich umschließend zu denken. Vielmehr durchdringen und durchsetzen sich die Bahnen der verschiedenen Schalen knäuelartig.

Die K-Strahlung des Goldatoms wird angeregt, wenn durch einen äußeren Eingriff, durch einen Kathoden- oder Lichtstrahl, ein Elektron aus seiner Bahn in der K-Schale herausgerissen wird. In den frei gewordenen Platz fällt dann ein Elektron aus einer der äußeren Schalen, der L-, M-, N-Schale, hinein. Die hierbei frei werdende Fallenergie wird in Form einer Röntgenwelle ausgestrahlt, deren Wellenlänge sich nach Bohr aus der Größe der frei gewordenen Energie bestimmt. Indem wir die Wellenlänge der Strahlung messen, können wir rückschließen auf die Energie und die Anordnung der Elektronen im Atom. Ebenso wird eine Linie der L-Strahlung angeregt, wenn durch äußeren Eingriff ein Elektron aus der L-Schale herausgehoben wird. Das Atom stellt seine ursprüngliche Konstitution wieder her, indem ein Elektron aus der M-, N- oder O-Schale in den frei gewordenen Platz der L-Schale einrückt usw. Man versteht von hier aus die Moseleysche Gesetzmäßigkeit der Röntgenspektren, d. h. ihr schrittweises Vorrücken nach kleineren Wellenlängen mit zunehmender Atomnummer des Elements. Wir brauchen uns zu dem Ende nur klar

zu machen, daß mit zunehmender Atomnummer, also zunehmender Kernladung die Kraftfelder im Innern der Atome und daher auch die verfügbaren Energien der Röntgenstrahlung schrittweise wachsen.

Die aufeinander folgenden Schalen der Elemente sind der Reihe nach den ganzen Zahlen 1, 2, 3, 4, ... zugeordnet. Die Radien der Schalen nehmen nämlich zu, die Energien der zugehörigen Elektronenbahnen ab im Verhältnis des Quadrats dieser Zahlen, also im Verhältnis 1:4:9:16. Man bemerkt zugleich, daß die Anzahl der Elektronen, die wir auf die einzelnen Schalen verteilen, je das Doppelte dieser Zahlen ist, nämlich 2 für die K-Schale, 8 für die L-Schale, 18 für die M-Schale, 32 für die N-Schale. Diese Zahlen sind zugleich die Anzahlen der Elemente, die in den sogenannten kleinen und großen Perioden des natürlichen Systems enthalten sind. Wir kommen also zu dem Ergebnis, daß die Reihe der ganzen Zahlen 1, 2, 3, 4, ... sowohl den Bau der Atome, nämlich die Größe ihrer Schalen und ihren Gehalt an Elektronen, als auch den Bau der Röntgenspektren und die Periodizitäts-Eigenschaften der chemischen Elemente bestimmen.

Hierin zeigt sich die überraschende Wendung ins Arithmetische, Ganzzahlige, die die moderne physikalische Forschung genommen hat. Diese Wendung ist durch die Quantentheorie von Max Planck vorgezeichnet und in die Probleme des Atombaus eingeführt von Niels Bohr. Die Quantentheorie bzw. die Bohrsche Theorie hat uns gelehrt, daß die physikalischen Urphänomene, die Strahlung eines einzelnen Emissionszentrums, die Bahnumläufe der Elektronen im Atom, die Umdrehungen der Molekeln nicht in stetig variierenden Portionen erfolgen, sondern in Quanten, d. h. in ganzen Vielfachen einer Grundeinheit, des sogenannten elementaren Wirkungsquantums von Planck. Für die klassische Physik, die Physik von Newton, Gauß, Helmholtz und ihren letzten Ausläufer und Höhepunkt, die Relativitätstheorie, lieferte die Rechnung mit stetig veränderlichen, fließenden Größen das adäquate mathematische Werkzeug. Dagegen arbeitet die moderne Quantenphysik mit der diskontinuierlichen Zahlenreihe, also mit einem begrifflich viel einfacheren, viel scharfkantigeren Handwerkszeug. Die

quantentheoretisch möglichen Atomzustände bilden eine abzählbare Folge. Die Prozesse, welche das Atom aus einem dieser Zustände in einen anderen überführen, haben einen sprunghaften Charakter. An die Stelle des stetigen Flusses tritt der unstetige aber wohldefinierte Quantensprung.

Hand in Hand mit dieser Wendung ins Arithmetische geht ein gewisser Hang der modernen Physik zur Pythagoräischen Zahlenmystik. Gerade die erfolgreichsten Forscher im Gebiet der theoretischen Spektralanalyse, die Balmer, Rydberg, Ritz waren ausgesprochene Zahlenmystiker. Sie legten ihren Forschungen bewußt oder unbewußt die Forderung zu Grunde, daß die Zusammenhänge der Wellenzahlen in den Spektren so harmonisch, so ästhetisch einfach sein müßten, als irgend mit den Tatsachen verträglich; und der Erfolg rechtfertigte ihren Standpunkt. Unsere von ganzen Quantenzahlen beherrschten Spektralserien sind im Grunde die sinngemäßen Verallgemeinerungen des uralten Lyradreiklages, aus dem die Pythagoräer vor 2500 Jahren die ganzzahlige Harmonie der Naturvorgänge folgerten, und unsere Quanten erinnern wirklich an die Rolle, die bei den Pythagoräern die ganzen Zahlen gespielt zu haben scheinen, nicht als Attribute, sondern als eigentliches Wesen des physikalischen Geschehens. Vielleicht kann man die ersten Anfänge der mathematischen Physik auf die Pythagoräer zurückdatieren, die um das Jahr 600 vor Christi Geburt im südlichen Italien die ganzzahligen Verhältnisse der Saitenlänge ihrer Lyra bei harmonischem Zusammenklingen feststellten, also zum ersten Male sinnlich-physikalischen Vorgängen mathematische Beziehungen zuordneten. Und wenn wir heutzutage in dem Gewirr der Linien des Eisenspektrums Übersicht und Ordnung schaffen, so lassen wir uns durchweg leiten von dem festen Glauben an die Ganzzahligkeit und Harmonie der Naturvorgänge. Wir ordnen den möglichen Atomzuständen Quantenzahlen zu und kombinieren diese miteinander nach den simpelsten arithmetischen Vorschriften, sogenannten Auswahlregeln. Es ist erstaunlich, welche Kraft diese formalen Gesetze haben und welche Fülle von Tatsachen sie umfassen. Bei gewissen optischen

Spektren treten Liniengruppen, sogenannte Multipletts, von außerordentlicher Reichhaltigkeit auf. Die innerliche Zusammengehörigkeit ihrer Linien zeigt sich in der Wiederkehr bestimmter Wellenzahldifferenzen, in ganzzahligen Verhältnissen der Intensitäten und in nahezu ganzzahligen Verhältnissen der Linienintervalle. Bei den Röntgenspektren dagegen ist alles außerordentlich durchsichtig und straff geordnet. Wir verstehen dies auf Grund der außerordentlichen Folgerichtigkeit des Schalenbaues im Innern der Atome, wo die Röntgenspektren ihren Ursprung haben, im Gegensatz zu der Mannigfaltigkeit und Unabgeschlossenheit der Elektronenanordnung an der Atomperipherie, wo die sichtbaren Spektren entstehen. Daher kommt es, daß wir heutzutage in der ganzzahligen Ordnung der Röntgenspektren, ihrer K-, L-, M-Serie weiter vorgeschritten sind als in der Ordnung der sichtbaren Spektren, die uns noch manche Rätsel aufgeben.

Auch ein Zahlenmystiker, und zwar größten Styles, war Johannes Kepler, der «lichte Mystiker», wie ihn Hermann Weyl so schön nennt. Seine Jugendschrift, das *Mysterium Cosmographicum*, zeigt ihn uns, wie er die Bahnen der Planeten mit den Platonischen Körpern zu verknüpfen sucht, und auch seine reifen unsterblichen Leistungen sind tief durchdrungen von dem pythagoräischen Geiste der «*Harmonice mundi*.» Kepler hätte die heutige Quantentheorie erleben sollen! Er hätte seine kühnsten Jugendträume verwirklicht gesehen, zwar nicht im Makrokosmos der Gestirne, sondern im Mikrokosmos der Atome. Der Schalenbau der Atome ist noch viel wunderbarer als die von Kepler ersehnte Kosmographie. Was Kepler 1619 über die Himmelsmechanik schrieb, paßt gerade so gut auf unsere heutige Atomdynamik: «Endlich habe ich ans Licht gebracht und über all mein Hoffen und Erwarten als wahr befunden, daß die ganze Natur der Harmonien in den himmlischen Bewegungen vorhanden ist, nicht zwar auf die Weise, wie ich mirs früher gedacht, sondern auf eine ganz andere durchaus vollkommene Weise.»

Übrigens ist Keplers Name und Geist im Mikrokosmos der Atome heutzutage ebenso lebendig, wie im Makrokosmos der Gestirne. Wir

sprechen heute von der Keplerbewegung im Wasserstoff-Atom, von der Keplerellipse bei den Röntgenspektren. Ja, wir handeln von der relativistischen Keplerellipse, indem wir Kepler und Einstein verknüpfen. Es ist nämlich spektroskopisch vollkommen sicher gestellt, daß bei den großen Geschwindigkeiten der Elektronen im Bahnperihel, d. h. in Kernnähe, nicht mehr die Newtonsche Mechanik der konstanten Massen, sondern die Einsteinsche Mechanik der Relativitätstheorie gilt, nach der die Masse mit der Geschwindigkeit zunehmen muß. Dies hat zur Folge, daß die Keplerellipse keine geschlossene Bahn ist, sondern daß sie eine sogenannte Periheldrehung erhält und in eine Rosettenkurve übergeht. Spektroskopisch zeigt sich dies darin, daß gewisse Linien, die nach der klassischen Theorie zusammenfallen sollten, getrennt erscheinen, also ein Dublett von Linien bilden. Die Messung des Linienabstandes in diesem Dublett bestätigt einwandfrei nicht nur die Gesetze der Quantentheorie, sondern auch die der Relativitätstheorie. Die Formel des relativistischen Dubletts, welche nebenbei bemerkt in unseren Akademieschriften vom Jahre 1916 zuerst entwickelt worden ist, bewährt sich nicht nur bei den einfachsten Atomen, bei Wasserstoff und ionisiertem Helium, sondern läßt sich in den Röntgenspektren durch die ganze Reihe der Elemente bis hin zu Uran verfolgen. Von den Röntgenspektren, wo die Verhältnisse wieder am einfachsten liegen, konnte dann die relativistische Deutung gewisser charakteristischer Dubletts wenigstens formal auch auf die sichtbaren Spektren übertragen werden.

Wenn ich hier von der Zahlenmystik ältester und neuester Zeit gesprochen habe, so hoffe ich nicht in den Verdacht zu kommen, daß ich der Mystik im gewöhnlichen Sinne, wie sie in den astrologischen, metapsychischen und spiritistischen Anwandlungen unserer Zeit hervortritt, das Wort reden wollte. Nichts liegt mir ferner. Ich sprach nur von den Naturgesetzen und dem Wege, sie zu ergründen, nicht von menschlichen Dingen. Allerdings glaube ich, daß das Quantenbild, das ich Ihnen zu zeichnen versuchte, auch für die allgemeine Theorie des menschlichen Erkenntnisvermögens belangreich ist.

Ein Konventionalismus oder Positivismus, der in den Naturgesetzen nur menschliche Verabredungen oder ökonomische Ordnungsmaßnahmen sieht, scheint mir in ein Nichts zu versinken vor der Schönheit und Sicherheit unserer neuesten physikalischen Feststellungen. Die Natur ist wirklich mathematisch gesetzmäßig, in ihrem Innersten ganzzahlig und vernünftig, die menschliche Hand und der menschliche Geist sind wirklich im Stande, durch Experiment und Rechnung, von uns unabhängige Realitäten zu erfassen. Darin liegt, wenn man will, ein Stück metaphysischen Glaubens. Ja ich bin überzeugt, daß jede Naturforschung, wenn sie nicht in einer unfruchtbaren Energetik stecken bleiben will, immer etwas — freilich nicht zu weit — über die unmittelbare Wahrnehmung hinausgehen muß. Indem wir die Beobachtungen verallgemeinern, ihre bedingte Genauigkeit zu absolut genauen Naturgesetzen verfeinern, treiben wir schon eine Art Metaphysik, die uns die Machsche Philosophie gern verbieten möchte, die aber keine wirkliche Naturforschung entbehren kann. So wie die Erkenntnistheorie Kants auf der klassischen Physik Newtons aufgebaut war, so wird eine vertiefte künftige Theorie des menschlichen Erkenntnisvermögens der Relativitätstheorie und vor allem der Quantentheorie Rechnung tragen.

Kommen wir nach diesem Ausblick ins Allgemeine wieder auf unser eigentliches Thema, die Röntgenstrahlen, zurück. Sie haben uns nicht nur den Aufbau der Atome aus aufeinander folgenden Schalen gelehrt, sondern die feinere Analyse der Röntgenspektren hat gezeigt, daß die L-, M-, N-Schalen ihrerseits noch unterteilt sind. Die 8 Elektronen, welche die L-Schale ausmachen, bewegen sich nicht in gleichartigen Bahnen, sondern zerfallen in Gruppen von $2 + 2 + 4$ teils kreisförmigen, teils elliptischen Bahnen. Die 18 Elektronen, welche die M-Schale bilden, zerlegen sich in Gruppen von $2 + 2 + 4 + 4 + 6$ Elektronen usf. Die Edelgase Ne, Ar, Kr, X, welche den Typus der chemisch inaktiven, nicht reagierenden Atome bilden, sind in ihrem Äußeren sämtlich als Achterschalen gebildet. Die einfachsten polaren Verbindungen lassen sich verstehen aus dem Bestreben der den Edelgasen folgenden oder vorangehenden Atome, sich durch Elektronen-

abgabe oder Elektronenaufnahme zu veredeln, d. h. in den Typus der Edelgase überzugehen. Die Unterteilung der Schalen in Untergruppen zeigt uns aber, daß es außer der Achterschale noch andere stabile und abgeschlossene Konfigurationen von Elektronenbahnen gibt, z. B. die Zweierschale des Heliums und die ihr im periodischen System analogen Außenkonfigurationen, etwa von Zn, Cd, Hg. Ferner gibt es abgeschlossene Vierer- und Sechser-Schalen. Alle diese Gruppen können bei der Valenzbetätigung der chemischen Grundstoffe angestrebt werden. Indem sie mehr oder minder gleichberechtigt neben die Achterschale treten, wird der häufig beobachtete Wechsel in der Valenz der Elemente in großen Zügen verständlich. Auch spektroskopisch können wir nach ganz bestimmten Zahlenkriterien beurteilen, ob ein Atom eine abgeschlossene Außenschale hat oder nicht.

Bekanntlich verdankt die Mineralogie den Röntgenstrahlen eine neue Phase ihrer Entwicklung, da sie nunmehr in der Lage ist, den Aufbau der Kristalle in Laue-Diagrammen zu durchleuchten. Zugleich zieht die Chemie hieraus Gewinn. Die Kristallanalysen liefern dem Chemiker reale stereochemische Formeln. Das bekannteste Beispiel ist die Diamantstruktur. Die Kohlenstoffatome sind hier in regelmäßigen Tetraedern angeordnet und bestätigen somit vollkommen die Grundanschauung der organischen Chemie. Von weiteren Beispielen führe ich nur an die Struktur des Carborund, die sich ganz kürzlich feststellen ließ, wobei ich bemerke, daß der Senior der deutschen Kristallographie, unser Mitglied von Groth, auf das besondere Interesse dieses Stoffes uns gleich nach der Laueschen Entdeckung hingewiesen hat. Auch hier sind die konstituierenden Atome C und Si in regelmäßigen Tetraedern angeordnet, so zwar, daß jedes C-Atom den Mittelpunkt eines Tetraeders von Si-Atomen bildet und umgekehrt. Die verschiedenen Formen des Carborund unterscheiden sich voneinander nur durch die Anordnung dieser tetraedrischen Bausteine im Gesamtgefüge des Kristalls. Auch die Struktur der komplizierten organischen Verbindungen wie Harnstoff, Naphtalin und Anthracen beginnen der Röntgenanalyse zugänglich zu werden.

Heutzutage hat jedes größere Werk der Schwerindustrie sein reichlich ausgestattetes Röntgen-Laboratorium für Zwecke der Materialprüfung. Nur durch Röntgendiagramme kann man die technisch wichtigen Umlagerungen bei der Dehnung der Kristalle, die entstehende Faserung und Rekristallisation untersuchen. Hoffen wir, daß die Hochschul-Institute nicht hinter jenen Anstalten zurückbleiben. So wie sie die Methoden der Röntgenforschung ausgebildet haben, so sind sie wegen ihrer freieren Arbeitsrichtung für deren Weiterentwicklung unentbehrlich.

In das Gebiet der medizinischen Anwendungen führt uns die Frage nach der Absorption der Röntgenstrahlen. Bekanntlich sind die medizinischen Röntgenbilder nichts anderes als Schattenrisse; ihre Deutlichkeit hängt lediglich von dem verschiedenen Durchdringungsvermögen der durchstrahlten Körperbestandteile ab. Diese wird bestimmt durch das neuerdings gesicherte Gesetz, daß die Absorption mit der vierten Potenz der Atomnummer des Absorbens geht und daß die Wirkung der verschiedenen Atome in den chemischen Verbindungen sich einfach überlagert. Also auch hier ein ganzzahliges Gesetz von höchster Allgemeinheit und Einfachheit. Dies Gesetz bringt es mit sich, daß ein Ca-Atom, Atomnummer 20, mehr als 100mal stärker absorbiert als ein C-Atom, Atomnummer 6, und macht es so verständlich, warum sich im Röntgenbilde die Knochensubstanz aus dem Untergrund der Gewebe und warum sich eine Bleikugel aus dem Untergrunde der Knochensubstanz heraushebt.

Ein letztes Beispiel führt uns wieder auf die Grundfragen der Physik zurück. Der Amerikaner A. H. Compton hat entdeckt, daß bei der Streuung der Röntgenstrahlen eine Vergrößerung der Wellenlänge um einen genau angebbaren, für alle Stoffe gleichen Betrag, stattfindet. Dies Ergebnis ist ebenso neuartig, wie schmerzlich. Man stelle sich vor: Licht, das bei der Reflexion seine Farbe verändert! Dies bedeutet einen scharfen Konflikt mit der Wellentheorie von Licht- und Röntgenstrahlung, läßt sich aber vom Boden einer erweiterten Quantentheorie wohl verstehen. Es hat den Anschein, als ob auch

in den Grundfragen der Optik und des Elektromagnetismus die uns geläufige Vorstellung von der kontinuierlichen Wellenausbreitung, die wir selbst im Vorhergehenden wiederholt unbedenklich benutzt haben, erschüttert würde und durch die Vorstellung diskontinuierlicher Quantenvorgänge zu ersetzen sei, ohne daß wir gegenwärtig zu erkennen vermögen, wie dies für den ganzen Komplex der einschlägigen Fragen widerspruchsfrei geschehen könne. Ein solcher Wechsel des Standpunktes kann im Augenblick schmerzlich empfunden werden. Aber wir sind sicher: Die neue Quantentheorie des Elektromagnetismus, zu der die Comptonsche Entdeckung möglicher Weise führen mag, wird der bisherigen klassischen Theorie in keiner Weise nachstehen an Einheitlichkeit, Einfachheit und Schönheit. Denn jeder Schritt vorwärts in der Erkenntnis der physikalischen Welt enthüllte noch stets eine vollkommenere «*Harmonice mundi*».
