

N a c h t r a g.

Die künstliche Zerlegung des Stickstoffatoms.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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