

Mitteilungen aus dem Institut für Radiumforschung
Nr. 199

Über die Atomzertrümmerung durch α -Partikeln
V. Zur Frage der Existenz von Atomtrümmern
kurzer Reichweite

Von

Gerhard Kirsch und Hans Pettersson

(Mit 1 Textfigur)

(Vorgelegt in der Sitzung am 28. April 1927)

In einer Reihe von Abhandlungen in diesen Mitteilungen haben wir und unsere Mitarbeiter über die in diesem Institut sowie in dem II. Physikalischen Institut gewonnenen Resultate unserer Untersuchungen über die Atomzertrümmerung mit α -Partikeln berichtet.¹ Zwischen unseren Ergebnissen und den von Sir Ernest Rutherford und J. Chadwick in Cambridge gefundenen² bestehen zur Zeit recht beträchtliche Widersprüche. So ergaben unsere Versuche, daß die Zertrümmerbarkeit eine allgemeinere Eigenschaft der Elemente ist als die Cambridger Forscher annehmen, welche außerdem die Zahl der Atomfragmente um vieles kleiner finden als aus unseren Messungen hervorgeht.

Da die Erfahrung gezeigt hat, daß Fortschritte auf diesem Forschungsgebiete nur mit einer verbesserten Versuchstechnik erreicht werden können, haben wir versucht, die Unstimmigkeiten den beiderseitigen Resultaten darauf zurückzuführen, daß wir Atomfragmente sehr kurzer Reichweite noch beobachten können, und zwar erstens mit Hilfe unserer »retrograden« Methode und zweitens durch Benutzung sehr lichtstarker Mikroskope, welche das Erfassen schwacher Szintillationen, die nach unserer Ansicht von den Cambridger Forschern übersehen werden, ermöglichen.

In einer kürzlich erschienenen Arbeit hat J. Chadwick zu dieser Anschauung Stellung genommen.³ Ein speziell für Szintillationszählungen konstruiertes, sehr lichtstarkes Objektiv von hoher numerischer Apertur wurde mit dem früher in Cambridge benutzten verglichen und festgestellt, daß auch mit diesem keine größere Anzahl Szintillationen beobachtet wird. Das Ergebnis der Zählungen

¹ G. Kirsch und H. Pettersson: diese Ber., IIa 132, 229; 133, 235 und 134, 491 (Mitt. Ra-Inst., Nr. 160, 167, 180). H. Pettersson: diese Ber., IIa 133, 445, Mitt. Ra-Inst., Nr. 168. G. Kirsch: diese Ber., IIa 133, 461, Mitt. Ra-Inst., Nr. 169, 1924.

² E. Rutherford und J. Chadwick, Phil. Mag. 42, 809, 1921; 44, 417, 1923.

³ J. Chadwick, Phil. Mag. (7) 2, 1056, 1926.

von mit H-Partikeln erregten Szintillationen, die mit beiden Mikroskopen durchgeführt wurden, scheint dafür zu sprechen, daß ein Übersehen schwacher Szintillationen nicht vorliegt. Eine Wiederholung der Versuche mit Beryllium, Kohle und Sauerstoff bestätigte insofern die früheren Resultate, als bei Benutzung einer starken Ra C-Strahlungsquelle in einer Richtung von 90° zur einfallenden α -Strahlung keine H-Partikeln, deren Reichweite 4 *cm* überschreitet, beobachtet wurden. Andererseits ergab sich, daß noch α -Partikeln von beträchtlich kürzerer Reichweite als das früher gefundene Minimum 4.9 *cm* auf Al-Atome zertrümmernd wirken können; die untere Grenze der Reichweite für noch wirksame α -Partikeln wird auf ungefähr 3 *cm* herabgesetzt, also immerhin eine beträchtliche Annäherung an die hier in Wien gemachten Erfahrungen.¹ Dagegen wird das Vorhandensein einer Minimalreichweite der emittierten H-Partikeln weiter aufrechterhalten, wird aber nunmehr zu 10 bis 12 *cm*, anstatt früher 13 bis 14 *cm*, angesetzt. Chadwick versucht nicht, die Widersprüche unserer Ergebnisse mit seinen eigenen zu erklären, nimmt aber an, daß die Wiener Forscher wenigstens in einigen Fällen, die Szintillationen reflektierter α -Partikeln für die von H-Partikeln aus zertrümmerten Atomen gehalten haben.

Obleich im allgemeinen die Resultate, welche mehrjährige Arbeit in Wien sowohl als in Cambridge gezeitigt hat, vollauf bestätigen, daß, wie wir früher ausgesprochen haben,² die Zertrümmerbarkeit der Elemente eine allgemeinere Eigenschaft ist als man im Jahre 1923 glaubte, so sind doch die Unterschiede in den Ergebnissen der beiden Forschungsstätten zu ernster Natur, als daß man sie durch gewöhnliche Versuchsfehler erklären könnte. Der Zweck dieser Arbeit ist, die wahrscheinlichen Ursachen dieser Widersprüche zu erläutern und somit Klarheit in die Frage der Zertrümmerbarkeit verschiedener Elemente und der Realität der zahlreichen Atomtrümmer kurzer Reichweite zu bringen.

Zählung lichtschwacher Szintillationen.

Die Szintillationen von H-Partikeln oder kurzweg die H-Szintillationen unterscheiden sich von α -Szintillationen durch ihre geringere Größe und Helligkeit, was die Erkennung der Partikeln ermöglicht. Nach photometrischen Messungen in diesem Institut ist das Verhältnis der Flächenhelligkeit für die beiden Szintillationsgattungen 1 : 3 für schnelle Partikeln.³ Nach derselben Methode ergab sich die Helligkeit der von α -Teilchen erregten Szintillationen als nahezu unabhängig von der Reichweite der Partikeln bis zu einer Restreichweite von etwa 2 *cm* herab, von wo an sich ein Abfall der Helligkeit bemerkbar macht, der zunächst allmählich einsetzt, um

¹ E. A. W. Schmidt: diese Ber., IIa, 134, 385, Mitt. Ra-Inst., Nr. 178, 1923.

² G. Kirsch und H. Pettersson, l. c.

³ E. Kara-Michailova und H. Pettersson: diese Ber., IIa 133, 163, Mitt. Ra-Inst., Nr. 164, 1924.

später rasch zuzunehmen.¹ Die Flächenhelligkeit der Szintillationen von α -Partikeln, deren Reichweite nur noch 0,3 cm beträgt, ist ungefähr gleich der schnellerer H-Teilchen. Ein ähnlicher Abfall an Helligkeit wurde auch bei H-Partikeln verminderter Reichweite festgestellt, doch wurden erst in letzter Zeit quantitative Messungen darüber durchgeführt, die später erwähnt werden sollen. Wie alle unsere vorläufigen Versuche zeigen, setzt bei H-Partikeln der Abfall der Helligkeit in größerer Entfernung vom Reichweitenende ein und die H-Szintillationen gehen schon früher als α -Szintillationen in ein Stadium über, in dem sie größtenteils unsichtbar werden.

Die Sichtbarkeit der Szintillationen und folglich auch die Sicherheit und Genauigkeit mit der sie gezählt werden können, hängt außer von der Reichweite und Art der Partikeln, die sie erregen, auch noch von anderen Faktoren ab. Die Art des verwendeten Zinksulfids, seine Verteilung auf dem Schirm, sowie die Lichtstärke des Mikroskops sind von großer Bedeutung ebenso wie die Qualität der Augen des Beobachters, sein körperliches Befinden und seine Ermüdung, verursacht durch vorhergehende Zählungen und starke Dosen durchdringender γ -Strahlung. Schließlich ist auch noch die Beleuchtung des Hintergrundes, auf welchem die Szintillationen erscheinen, von großem Einfluß auf die Ergebnisse der Zählung.

Die Bedingungen, die im allgemeinen bei den Zertrümmerungsversuchen herrschen, sind in vieler Beziehung für genaue Zählungen nicht günstig. Vor allem ist das Verhältnis der Zahl der Atomfragmente zu der der zur Zertrümmerung erforderlichen α -Partikeln außerordentlich klein. Andererseits können verlässliche Zählungen nur erhalten werden, wenn pro Minute wenigstens 20 Szintillationen auf dem Schirm erscheinen. Um dieser Bedingung zu genügen, wäre man geneigt die Versuchsanordnung so abzuändern, daß mehr Atomfragmente den Schirm treffen, und zwar entweder dadurch, daß man die Schirmfläche, d. h. das objektive Gesichtsfeld des Zählungsmikroskops vergrößert, oder indem man die Intensität der Strahlungsquelle erhöht und ihre Entfernung von bombardierter Substanz und Schirm vermindert. Die ersterwähnte Vergrößerung des objektiven Gesichtsfeldes kann nicht zu weit getrieben werden, weil sonst entweder die Helligkeit der auftreffenden Szintillationen zu stark vermindert oder aber das subjektive Gesichtsfeld zu groß wird, um tatsächlich bei der Beobachtung vollkommen ausgenutzt werden zu können. Andererseits verursacht bei Verwendung starker Strahlungsquellen im Falle zu großer Annäherung des Präparats an den Schirm dessen durchdringende γ -Strahlung, durch Zwischenschalten absorbierender Substanzen nur teilweise abgeschwächt, eine diffuse Erhellung des Schirmes, so daß sich schwache Szintillationen nur sehr schlecht darauf abheben.

¹ Kürzlich ausgeführte Versuche deuten darauf hin, daß der Verlauf der Helligkeitsabnahme in gewissem Grade von den Eigenschaften der verwendeten Szintillationssubstanz abhängig ist.

Wir haben gefunden, daß gerade diese letzterwähnte Schwierigkeit eines der größten Hindernisse für eine quantitative Untersuchung der Atomzertrümmerung bedeutet, solange nämlich mit der Szintillationsmethode gearbeitet wird und starke RaC- und ThC-Quellen verwendet werden. Wir haben es daher seit etwa zwei Jahren für richtig befunden, nur verhältnismäßig schwache Strahlungsquellen zu verwenden, und zwar etwa 5 bis 10 mg Ra-Äquivalent Anfangsintensität. Mit stärkeren Strahlungsquellen fanden wir es unmöglich, einigermaßen befriedigende Resultate zu erhalten, da durch sie ein Hintergrundleuchten erregt wird, das schwache Szintillationen unsichtbar macht und selbst mit verhältnismäßig starken Szintillationen die Zählergebnisse beeinträchtigt. Bei Verwendung von RaC als Strahlungsquelle nimmt mit der Aktivität des Präparats, die nach dem bekannten Exponentialgesetz abfällt, auch das Hintergrundleuchten ab, so daß die Helligkeit des Schirmes während jeder halben Stunde ungefähr auf die Hälfte abklingt. Dadurch werden die Beobachtungsbedingungen für die schwächsten Szintillationen im Verlaufe der Zeit verbessert, und solche, die anfangs unsichtbar waren, heben sich gegen den dunkleren Hintergrund ab, ungefähr wie Sterne, die an dem dunkler werdenden Abendhimmel auftauchen. Wir haben bei unseren Versuchen mit RaC-Strahlungsquellen die Beobachtung gemacht, daß die Zahl der gezählten Atomfragmente, bezogen auf eine konstante Aktivität der Quelle, jedesmal im Verlauf des Versuches ansteigt, und daß man gegen Ende der Zählung oft Werte erhält, die zweimal oder mehrmals größer sind als zu Beginn, wo die Strahlungsquelle noch intensiv und das Hintergrundleuchten ausgeprägter war.

Ein ähnlicher Einfluß des Hintergrundleuchtens wurde auch von den Cambridger Forschern beobachtet. In einer seiner ersten Arbeiten über H-Strahlen aus Wasserstoff gibt Rutherford an, daß die Sichtbarkeit der Szintillationen von der Helligkeit des Hintergrundes abhängt.¹ In Anbetracht der Abnahme dieser Helligkeit im Verlaufe der Zeit, empfiehlt er den Gebrauch kleiner elektrischer Lämpchen mit veränderlichem Widerstand, durch die der Schirm mit immer steigenden Lichtintensitäten bestrahlt werden kann, um die Abnahme seiner Helligkeit zu kompensieren.² In einer folgenden Arbeit werden ganz dünne Zinksulfidschirme empfohlen, um das durch die durchdringende γ -Strahlung erregte Leuchten zu vermindern.³

Seit E. A. W. Schmidt hier in Wien vor zwei Jahren gezeigt hat, daß auch die verhältnismäßig langsamen α -Strahlen von Polonium ($R = 3.9 \text{ cm}$) fähig sind, Atome zu zertrümmern⁴ — eine Tatsache,

¹ E. Rutherford, Phil. Mag. 37, 541, 1919.

² Aus demselben Grunde fanden wir es geeignet, die Öffnung des Okulars, die das Gesichtsfeld begrenzt, mit einem schwach leuchtenden Ring zu umgeben. Durch diese Vorkehrung kann der Beobachter auch bei vollkommen dunklem Hintergrund sein Auge leicht zentrisch erhalten.

Rutherford und Chadwick, Phil. Mag. 42, 810, 1921.

⁴ E. A. W. Schmidt, Mitt. Ra-Inst., Nr. 178.

damals von den Cambridger Forschern noch nicht anerkannt wurde — haben wir öfters diese Substanz für unsere Versuche benutzt. Da sie frei von durchdringender Strahlung ist, bleibt bei ihrer Verwendung der Hintergrund während der ganzen Versuchsdauer praktisch dunkel, so daß die Sichtbarkeitsbedingungen konstant und die denkbar besten sind. Versuche, bei welchen verschiedene andere Elemente mit α -Strahlen von Polonium bombardiert wurden, bestätigen im allgemeinen die Ergebnisse früherer Untersuchungen und ergaben, auf dieselbe Geschwindigkeit bezogen, eine höhere Ausbeute an Atomfragmenten als bei Bestrahlung mit RaC.

Die allgemeine Gestalt der Absorptionskurven von H-Partikeln aus zertrümmerten Atomen ist deutlich konvex gegen die Absorptionsachse; die Zahl der Partikeln steigt um so schneller an, je stärker die Absorption vermindert wird. Diese Tatsache führte uns schon in einem früheren Stadium unserer Untersuchungen zu der Annahme, daß die Ausbeute an Atomfragmenten eines bestimmten Elementes und ebenso die Zahl der Elemente, die solche Atomfragmente emittieren, steigen müsse, je weiter man die Minimalabsorption, bei welcher noch verlässliche Zählungen vorgenommen werden können, herabsetzen oder mit anderen Worten, je näher man an das explodierende Atom herankommen kann. Tatsächlich sind die Fortschritte, die sowohl hier als auch in Cambridge erzielt wurden, zu einem großen Teil den verbesserten Versuchsmethoden zuzuschreiben, mit denen es möglich wurde, ohne Störung durch primäre α -Strahlung Atomfragmente kurzer Reichweite zu beobachten. Wir wollen hier die 90°-Methode erwähnen, mit der an beiden Stellen gearbeitet wurde, sowie die retrograde Methode, bei der dieser Vorteil noch weiter ausgenutzt wird, die aber vorläufig nur in Wien für Zertrümmerungsversuche verwendet wird. Wir werden nun im folgenden einige Verbesserungen unseres Zählmikroskops beschreiben, die uns erst ermöglichten, die modifizierte Beobachtungsmethode auszunutzen, da sie unsere Zähler instand setzten, die schwachen Szintillationen der langsamen Atomfragmente, die unter den neuen Versuchsbedingungen unseren Schirm trafen, erfassen und zählen zu können.

Das Zählmikroskop.

Unser erstes Mikroskop, hier Watson I genannt, war nach dem Muster des früher von Rutherford und Chadwick¹ verwendeten gebaut, insofern als sein Objektiv ebenfalls ein Watson-Holoscop von $f = 16 \text{ mm}$ und n. a. $= 0.45$ war. Mit einem Weitfeldokular von Zeiß betrug der Flächeninhalt, der im Mikroskop erscheint, zirka 20 mm^2 , und da die lineare Vergrößerung $42 \times$ gewählt war, ist das subjektive Gesichtsfeld über 400 cm^2 . Wir fanden bald, daß das subjektive Gesichtsfeld zu groß war, um tatsächlich voll ausgenutzt zu werden, und die Szintillationen zu

¹ Rutherford und Chadwick, Phil. Mag. 42, 810, 1921.

lichtschwach waren, um sicher gezählt werden zu können. Für unser zweites Mikroskop, Watson II, benützten wir daher ein Objektiv von größerer numerischer Apertur, nämlich ein Watson Holographic von $f = 12 \text{ mm}$ und $n. a. = 0.70$. Kombiniert mit einem $5\times$ -Holosokular erhält man ein objektives Gesichtsfeld zwischen 8 und 12 mm^2 . Gewöhnlich verwendeten wir es mit einem objektiven Gesichtsfeld von 10 mm^2 und einer linearen Vergrößerung von 47 , so daß das subjektive Gesichtsfeld, das nur zirka 220 cm^2 betrug, leicht überblickt werden konnte. Die Szintillationen erscheinen bei dieser Kombination tatsächlich außerordentlich hell und die von vollkräftigen H-Partikeln erregten Szintillationen sahen nicht viel schwächer aus als α -Szintillationen im ersten Mikroskop. Andererseits ist eine gewisse Übung der Zähler erforderlich, um die Vorteile dieser Kombination, mit der die meisten entscheidenden Zählungen durchgeführt wurden, wirklich voll auszunutzen.

Später haben wir eine Kombination noch höherer Leistungsfähigkeit verwendet, die von Watson für unsere Zwecke eigens konstruiert wurde. Die numerische Apertur des Objektivs ist 0.80 (ohne Immersion), die Vergrößerung 70 fach und das objektive Gesichtsfeld entsprechend auf 3.2 mm^2 beschränkt, so daß das subjektive Gesichtsfeld 150 cm^2 beträgt. Obleich diese Kombination noch hellere Szintillationen als selbst Watson II ergibt, so haben wir doch aus praktischen Erwägungen, nämlich wegen der Größe des Mikroskops und der Schwierigkeit, die richtige Augenstellung dauernd beizubehalten, Watson II für unsere gewöhnlichen Untersuchungen vorgezogen.

Wenn wir auch gegenwärtig die anderen Mikroskope die wir ausprobiert haben, nicht erwähnen, so zeigen doch die angeführten Beispiele, daß wir die optischen Hilfsmittel konsequent so abgeändert haben, bis es uns, allerdings auf Kosten eines verkleinerten objektiven Gesichtsfeldes, gelang, auch sehr schwache Szintillationen sichtbar zu machen; gleichzeitig haben wir uns bemüht, das subjektive Gesichtsfeld nur so groß zu machen, daß es bei der Beobachtung vollkommen überblickt werden kann. Unseren Erwartungen entsprechend fanden wir, daß die Verringerung an Szintillationen, die dadurch bedingt ist, daß weniger Atomfragmente die unter Beobachtung stehende kleinere Schirmfläche treffen können, durch das Anwachsen der bei niedrigen Absorptionen auftretenden sehr langsamen Partikeln, die erst in diesem Mikroskope sichtbar werden, ausgeglichen wird.

Die Cambridger Physiker andererseits haben ihr Zählmikroskop in entgegengesetzter Richtung abgeändert. Da sie zweifellos davon überzeugt waren, daß die Zahl der Atomfragmente auch dann noch überaus spärlich bleibt, wenn die Absorption, die sie zu durchsetzen haben, verringert wird, haben sie sich bemüht, möglichst viele H-Partikeln auf ihrem Beobachtungsschirm abzufangen. Dieses Ziel erreichten sie, indem sie mit demselben Objektiv ($f = 16 \text{ mm}$ und $n. a. = 0.45$) ein noch größeres Gesichtsfeld mit Hilfe eines speziell

dafür konstruierten Okulars beobachteten. In der folgenden Tabelle sind zum Vergleiche die verschiedenen Typen von Mikroskopen, die in den verschiedenen Jahren in Cambridge und hier in Verwendung standen, angeführt.

Tabelle 1.

Zählmikroskope:					
In Cambridge verwendet			In Wien verwendet		
Jahr	n. a.	obj. Gesichtsfeld	Jahr	n. a.	obj. Gesichtsfeld
1921	0·45	8 mm ²	1923	0·45	20
1922	0·45	25	1924	0·70	10
1924	0·45	50	1925	0·80	3·2

Durch einen Vergleich dieser Daten kamen wir zu der Annahme, daß eine Erklärungsmöglichkeit für viele Widersprüche in den Wiener und Cambridger Ergebnissen darin zu suchen ist, daß die größere Lichtstärke unserer Mikroskope sowie die schwächere Präparatintensität, durch die wir ein zu helles Hintergrundsleuchten vermeiden, uns befähigt, die Szintillationen langsamer H-Partikeln zu zählen, die bei den Cambridger Untersuchungen übersehen wurden. In dieser Annahme wurden wir nicht nur durch unsere eigenen Versuche, sondern auch durch frühere Beobachtungen aus dem Cavendish Laboratorium bestärkt, wo mit Maßnahmen, die ebenfalls zu einer Erhöhung der Lichtstärke des Mikroskops führten, Resultate erhalten wurden, die den früheren, mit lichtschwächeren optischen Hilfsmitteln gefundenen, direkt widersprachen. Als Beispiel hiefür können wir die Zertrümmerung von Aluminium anführen. In seiner berühmten ersten Arbeit¹ über die Zertrümmerung von Stickstoff hat Rutherford in den Weg der zertrümmernden α -Strahlen des α -C-Präparates dünne Aluminiumfolien gebracht, um ihre Geschwindigkeit vor dem Auftreffen auf Stickstoff oder Luft, deren Atomfragmente untersucht werden sollten, zu vermindern. Bei späteren Versuchen desselben Verfassers, die in seiner Bakerian Lektüre von 1920 beschrieben werden, wurden dünne Aluminiumfolien als nicht-aktive Träger für feste Stickstoffverbindungen, deren durch α -Strahlen abgespaltene H-Partikeln beobachtet werden sollten, benutzt, so daß bei manchen Versuchen die Primärstrahlung die Aluminiumfolie durchsetzen mußte, bevor sie die Substanz erreichte. Durch Kontrollversuche² hatte sich Rutherford überzeugt, daß Aluminium, wenn es vorher zur Befreiung von Feuchtigkeit und okkludierten Gasen im Vakuum erhitzt wird, beim α -Bombardement keine bemerkbare Zahl von H-Partikeln abgibt. Andererseits wird in einer späteren

¹ Rutherford, Phil. Mag. 37, 583, 1919.

Rutherford, Bakerian Lektüre Proc. Roy. Soc. London, A 97, 386, 1920.

Arbeit, die zusammen mit Chadwick veröffentlicht wurde, und zwar der ersten, in welcher das Watson-Zählmikroskop mit der großen numerischen Apertur beschrieben wird, als Tatsache hingestellt, daß zertrümmerte Aluminiumatome H-Partikeln in größerer Anzahl und mit größerer Reichweite emittieren als selbst Stickstoffatome.

Vergleichende Prüfung verschiedener Mikroskope.

Wir hielten es für überaus wichtig, durch eine kritische Untersuchung der bei unseren Versuchen verwendeten Mikroskope zu entscheiden, ob unsere obige Erklärung richtig ist. Gelegenheit hiefür bot sich uns im Frühling 1926 durch den Besuch eines jungen amerikanischen Physikers Dr. R. L. Hasche, der auf unsere Veranlassung hin verschiedene Mikroskope auf ihre Verwendbarkeit zur Zählung schwacher Szintillationen prüfte. Da er über sehr gute Augen verfügte und keine oder nur wenig Erfahrung auf dem Gebiete der Szintillationszählungen besaß, so daß er hinsichtlich des Ausgangs der Prüfung vollkommen unvoreingenommen sein mußte, schien er zur Ausführung dieser Prüfung besonders geeignet.

Die charakteristischen Eigenschaften der von Hasche untersuchten Mikroskope sind aus der seiner Arbeit größtenteils entlehnten Tabelle 2 unter Nr. 1 bis 5 zu ersehen. Die mit Watson I bis III bezeichneten Mikroskope sind hier schon beschrieben. Nr. 4 ist eine Spezialkonstruktion, die uns von Zeiß ausgeführt wurde und die, da die Bildscharfe im ganzen Gesichtsfeld überaus befriedigend ist, außerordentlich scharfe Szintillationen und damit gute Sichtbarkeitsverhältnisse gibt, obgleich die numerische Apertur des Objektivs nicht besonders hoch ist. Das Mikroskop Nr. 5 war so zusammengestellt, daß man dasselbe große Gesichtsfeld erhielt, wie mit dem Mikroskop von Rutherford und Chadwick, das als Nr. 6 in Tabelle 2 angeführt wird. Die Vergrößerung ihres Mikroskops war uns damals noch nicht bekannt und hat sich seither als größer erwiesen als bei unserer Nachahmung Nr. 5, so daß die Resultate nicht ohne weiteres vergleichbar sind.

Tabelle 2.

Nr.	Bezeichnung	<i>f.</i>	n. a.	Vergrößerung	obj. Feld	subj. Feld	D.	G. L.
1	Watson I	16 mm	0·45	45 mal	21 mm ²	430 cm ²	5·0 mm	0·20
2	Watson II	12	0·70	47	9	200	7·5	0·49
3	Watson III	16	0·80	70	3·2	155	5·7	0·64
4	Zeiss	20	0·65	90	2·3	180	3·6	0·42
5	Watson-Reichert	16	0·45	18	44	154	(12·5)» 7·5	(0·20) 0·07
6	Rutherford-Chadwick	16	0·45	35	50	610	6·5	0·20
7	Hilger		1·06	32	105	820	(16·5)» 7·5	(1·12) 0·23

Der Zweck der Untersuchung war 1. die verschiedenen Mikroskope unter genau reproduzierbaren Bedingungen auf ihre Brauchbarkeit zur Zählung von H-Partikeln zu untersuchen und 2. zu ermitteln, inwieweit die Resultate durch Verkürzung der Reichweite und durch Erregung eines Hintergrundsleuchtens beeinträchtigt werden.

Als Quelle der H-Partikeln wurde wie gewöhnlich hier im Institut ein sehr starkes Po-Präparat mit einem Paraffindünnschnitt und einem für α -Teilchen undurchlässigen Glimmerdeckel benützt, so daß die Szintillationen auf einem praktisch vollkommen dunklen Hintergrund erschienen. Es wurden mit den Mikroskopen 1 bis 5 und demselben Schirm in kürzestem Abstand von der Strahlungsquelle die auftretenden Szintillationen gezählt und die jeweiligen Mittelwerte auf die Flächeneinheit des Schirmes, entsprechend der Größe des objektiven Gesichtsfeldes, das die einzelnen Kombinationen ergaben, bezogen. Es wurde gezählt mit und ohne Hintergrundsleuchten, hervorgerufen durch die γ -Strahlung eines Ra-Präparates und außerdem mit verschiedenen Absorptionsglimmern in dem Weg der H-Partikeln, so daß ihre Hauptmenge mit einer Reichweite zwischen einigen Zentimetern und einigen Millimetern auf den Schirm auftrafen. Aus den Ergebnissen dieser Versuche braucht hier nur folgendes hervorgehoben zu werden. Die Mikroskope 3 und 4 gaben die höchsten Zahlen von sichtbaren Szintillationen. Nicht viel weniger gab Nr. 2, besonders nach einiger Übung des Zählers, und Hasche ebenso wie unsere eigenen Zähler finden dieses Instrument wegen seiner kleinen Dimensionen am geeignetsten für praktischen Gebrauch. Die Mikroskope 1 und 5 gaben kleinere Zahlen und Hasche bezeichnet dieselben als ungeeignet für eine zuverlässige Zählung schwacher Szintillationen, indem er als Ursache dafür die zu kleine Vergrößerung bei Nr. 5 und das unbequem große subjektive Gesichtsfeld bei Nr. 1 angibt.

Die nur mit den Mikroskopen 2 und 5 ausgeführten Zählungen mit stark abgebremsten H-Teilchen ergaben noch größere Unterschiede an Leistungsfähigkeit als für schnelle H-Partikeln und ebenso trat die Verminderung an Zahl sichtbarer Szintillationen bei künstlich hervorgerufenem Schirmleuchten deutlicher hervor; bei Watson II mit 20%, bei der Watson-Reichert-Nachahmung sogar mit 40%, Verkleinerung an Zahl, verglichen mit den Zählungen ohne Hintergrundsleuchten. Die Gesamtzahl der im letzten Falle übersehenen Szintillationen im Vergleich mit der Zahl, welche ohne Hintergrundsleuchten mit Watson II sichtbar war, betrug nicht weniger als 95%.

Nun liegt die Vergrößerung des kürzlich von Rutherford und Chadwick benützten Mikroskopes (Nr. 6 unserer Tabelle II) zwischen der der Mikroskope Nr. 1 und Nr. 5. Die numerische Apertur und die Brennweite sind in allen drei Fällen gleich, während das subjektive Gesichtsfeld bei Nr. 6 bei weitem am größten ist. Man kann daher erwarten, daß das Mikroskop von Rutherford und Chadwick für eine Zählung schwacher Szintillationen wohl wegen seiner starken Vergrößerung besser, aber hinsichtlich seines zu großen

subjektiven Gesichtsfeldes schlechter geeignet ist als Nr. 5, während es, verglichen mit Nr. 1, in beiden Beziehungen schlechtere Qualitäten aufweist. Aus den Ergebnissen von Hasche gewinnt man die Überzeugung, daß das Rutherford-Chadwick'sche Mikroskop für die Zählung schwacher Szintillationen wenig geeignet ist. Besonders starkem Hintergrundsleuchten ist damit ein Übersehen schwacher Szintillationen kaum zu vermeiden.

In seiner letzten Arbeit beschreibt Chadwick ein neues Mikroskop, das von Hilger speziell für Szintillationszählungen konstruiert wurde. Die Frontlinse des Objektivs ist kugelförmig gewölbt und trägt das Zinksulfid, so daß sie gleichzeitig als Szintillationsschicht dient. Die numerische Apertur wird zu 1·06 angegeben, das objektive Gesichtsfeld ist 105 mm^2 , die Projektion dieser Fläche auf eine Ebene senkrecht zur optischen Achse beträgt 80 mm^2 . Es erscheinen diejenigen Szintillationen, die in unmittelbarer Nähe des Zentrums auftreten, als scharfe Punkte, während sie an anderen Stellen des Schirmes als dünne, astigmatische Linien abgebildet werden. Chadwick gibt nun an, daß man mit diesem Mikroskop leichter als mit dem früher verwendeten schwache Szintillationen zählen kann, daß aber kein merkbarer Anstieg in der Gesamtzahl der Szintillationen zu beobachten ist.

Eine genaue Prüfung der Eigenschaften des neuen Hilger-Mikroskopes, soweit sie aus den angegebenen Daten, die in unserer Tabelle II unter Nr. 7 aufgenommen wurden, beurteilt werden können, scheint uns zu beweisen, daß bei seiner Konstruktion, bemerkenswert sie auch in mancher Beziehung ist, in der Vergrößerung des objektiven Gesichtsfeldes und der numerischen Apertur weit gegangen wurde. Da die Vergrößerung nach einer empirischen Regel, die Chadwick in seiner Arbeit erwähnt, größer als 30fach sein muß — tatsächlich war sie 32fach — kann die abnehmend große Fläche des Schirmes nur auf Kosten des Anwachsens des subjektiven Gesichtsfeldes der Beobachtung wirklich zugänglich gemacht werden. Das subjektive Gesichtsfeld erreicht 820 cm^2 ¹, eine Kreisfläche von 32 cm Durchmesser, beobachtet aus dem gewöhnlichen Sehabstand von 25 cm, muß dauernd mit konzentrierter Aufmerksamkeit während einer Zählperiode auf schwache Szintillationen hin beobachtet werden. Nun ist dieses subjektive Gesichtsfeld praktisch doppelt so groß als das des Mikroskopes Nr. 1 unserer Tabelle II, das nach Hasche's Angabe und nach den Erfahrungen unserer Zähler für genaue Zählversuche bereits zu groß ist. Beurteilung dieser Resultate muß man zu dem Schlusse gelangen, daß bei einem so großen subjektiven Gesichtsfeld ein beträchtlicher Teil schwacher Szintillationen übersehen werden muß, besond-

¹ Dieses subjektive Gesichtsfeld wird durch Multiplikation der Projektion des objektiven Gesichtsfeldes 80 cm^2 mit dem Quadrat der linearen Vergrößerung gefunden. Falls die angegebene Vergrößerung auf die ganze gekrümmte Fläche des objektiven Gesichtsfeldes 105 mm^2 zu beziehen ist, wird das subjektive Gesichtsfeld noch größer, nämlich 1070 cm^2 .

wenn gegen einen hellen Hintergrund, wie dies bei Chadwick's Versuchen der Fall gewesen zu sein scheint, gezählt wird.

Der Eindruck, daß der Konstrukteur des neuen Mikroskopes die Grenzen, die durch rein physiologische Faktoren gesetzt sind, überschritten hat, wird bei Betrachtung einer anderen wichtigen Eigenschaft der Kombination, nämlich der Weite des aus dem Okular austretenden Strahlenbündels, noch weiter verstärkt. Damit die gesamte Lichtstärke eines Mikroskopes ausgenützt wird, ist es notwendig, daß das ganze austretende Strahlenbündel in das Auge des Beobachters gelangt und aus diesem Grunde darf sein Durchmesser den der Pupille des Auges nicht überschreiten. Wenn anderseits diese Bedingung nicht erfüllt ist, wird nur der Bruchteil, der tatsächlich in das Auge eintritt, ausgenützt und die Helligkeit des Bildes im gleichen Verhältnis vermindert.

Nun hat die Pupille des menschlichen Auges bis zu einem bestimmten Alter einen normalen Durchmesser von 3—4 *mm*. Nach einer vollkommenen Dunkeladaption, die immer einer Szintillationszählung vorausgehen muß, wird der Durchmesser etwa doppelt so groß. Nach Untersuchungen von Physiologen ist der Pupillendurchmesser eines vollkommen an die Dunkelheit adaptierten Auges etwa 7.5 *mm*¹. Es scheinen die Müdigkeitswellen, die jedem Mikroskopiker bekannt und besonders beim Zählen schwacher Szintillationen bemerkbar sind, wesentlich in einer unfreiwilligen Kontraktion der Pupille zu bestehen, wodurch der Durchmesser des Strahlenbündels auf einen kleineren Wert als den normalen beschränkt wird.

Eine praktische Folgerung dieser Tatsache ist, daß man bei Konstruktion eines lichtstarken Mikroskopes, das man bis zur äußersten Grenze ausnützen will, den Durchmesser des austretenden Strahlenbündels nicht größer als etwa $D = 7.5 \text{ mm}$ wählen darf und daß auch mit diesem Werte die Vorteile des Mikroskopes nur von geübten Zählern, die während der ganzen Dauer einer Zählperiode die Pupille des Auges gleichweit geöffnet halten können, ausgenützt wird. Wie man aus Tabelle II ersieht, in deren vorletzter Kolonne für die verschiedenen Mikroskope die Werte von D nach der Gleichung

$$D = \frac{n. a. \times 2 \times 250 \text{ mm}}{V}$$

eingetragen sind, wobei $n. a.$ die numerische Apertur des Systems, V die lineare Vergrößerung der Kombination und 250 *mm* die gewöhnliche Sehdistanz ist, wäre diese Bedingung bei allen unseren Arbeitsmikroskopen erfüllt; das Mikroskop Watson II hat gerade den höchsten erlaubten Grenzwert.

Es ist von Interesse zu bemerken, daß die Cambridger Forscher experimentell zu dem gleichen Ergebnis gekommen sind, was in

¹ Vergleiche L. L. Holladay: Journal Op. Society American and Rev. Scient., 12 Nr. 4, p. 271, April 1926.

Chadwick's Arbeit auf p. 1095 folgendermaßen ausgedrückt wird: »Die Vergrößerung des Systems darf nicht kleiner als 30fach gewählt werden, da die Erfahrung zeigt, daß bei kleinerer Vergrößerung der Zähler einen ziemlich großen Bruchteil der Szintillationen übersehen nimmt. Man nimmt in obiger Gleichung $n. a. = 0.45$ an, welches die numerische Apertur des mehrere Jahre hindurch in Cambridge für Szintillationszählungen verwendeten Mikroskopes ist und $V = 30$, den Wert, den, wie empirisch gefunden wurde, die Vergrößerung mindestens haben muß, um brauchbare Zählungen liefern, so findet man für den Durchmesser des aus dem Okular austretenden Strahlenbündels den Wert $D = 7.5 \text{ mm}$, der ebenfalls gut mit den physiologischen Tatsachen wie mit unseren Ergebnissen übereinstimmt. Man muß daher annehmen, was auch Chadwick empirische Regel besagt, daß die Cambridger Zähler zu kleine Werte gefunden haben, wenn die Bedingungen, die durch die Physiologie des Auges auferlegt sind, nicht erfüllt werden.

Betrachtet man das neue Hilger-Mikroskop, so findet man den angegebenen Daten, daß der Durchmesser des das Okular verlassenden Strahlenbündels größer als 16.5 mm ist, ein Durchmesser, den die Pupille des menschlichen Auges nie erreichen kann. Die Beurteilung der Erfahrungstatsachen, die unabhängig hier und in Cambridge gefunden wurden, ist man somit zu der Annahme gezwungen, daß die große Lichtstärke des Hilger-Mikroskopes nur zu einem Fünftel des angegebenen Wertes ausgenützt wird. Die Bruchteil ist durch das Verhältnis zwischen der die Pupille des Zählers treffenden Lichtmenge zur gesamten Lichtmenge, die das Okular verläßt, oder durch $(7.5 / 16.5)^2 = 21\%$ gegeben.

In der letzten Kolonne der Tabelle II ist in willkürlichen Einheiten die berechnete Gesamtlichtmenge einer Szintillation bei Beachtung in den verschiedenen Mikroskopen eingetragen, die, soweit die physiologischen Bedingungen erfüllt sind, dem Quadrat der numerischen Apertur der Objektive proportional ist. Für das neue Hilger-Mikroskop, Nr. 7 der Tabelle II, sind zwei Werte angegeben von denen der eine, in Klammern, den theoretischen Wert für übliche menschliche Dimensionen des beobachtenden Auges, der andere gewonnen durch Multiplikation mit dem oben angegebenen Faktor das wahrscheinliche Arbeitsmaximum bedeutet.

Wie man also sieht, ist die effektive Lichtstärke des neuen Hilger-Mikroskopes nicht viel höher als bei dem früher von Rutherford und Chadwick benützten Mikroskopen, bei welchem die oben erwähnten Bedingungen befriedigend erfüllt waren. Die von Chadwick erwähnte Tatsache, daß bei Zählungen schwacher Szintillationen in beiden Mikroskopen praktisch gleiche Resultate erhalten wurden, daher nicht weiter verwunderlich, besonders wenn man bedenkt, daß der Vorteil, den die geringe Erhöhung der Lichtstärke des neuen Mikroskopes bietet, durch die vermehrte Schwierigkeit, die das Überwachen des größeren subjektiven Gesichtsfeldes bedeutet, mehr aufgehoben wird. Sicherlich aber kann das nicht als ein Beweis

gellen, daß es unmöglich ist, mit beiden Mikroskopen ungefähr gleichviel schwache Szintillationen zu übersehen.

Ferner können wir die niedrigen Resultate Hasche's mit dem kopierten Mikroskop Nr. 5 aus derselben Ursache, die auch die Lichtstärke des Hilger-Mikroskopes beeinträchtigt, erklären, nämlich, daß auch hier, wenn auch in geringerem Grade, die durch physiologische Bedingungen gesetzte Grenze überschritten wird. Da die gesamte Lichtstärke bei Watson II, das gewöhnlich für unsere Zertrümmerungsversuche benutzt wurde, mehr als zweimal so groß wie bei dem Mikroskop von Rutherford und Chadwick und außerdem sein subjektives Gesichtsfeld kleiner ist, so steht seine Überlegenheit für Zählungen schwacher Szintillationen außer Frage.

Wie man aus diesen Überlegungen sehen kann, führt ein Anwachsen der numerischen Apertur des Objektivs nur dann zu einer Vermehrung der Lichtstärke der Kombination, wenn gleichzeitig Sorge getragen wird, daß die lineare Vergrößerung der Kombination entsprechend wächst; das kann jedoch nur durch gleichzeitige Reduktion des subjektiven Gesichtsfeldes erreicht werden, wie dies bei unseren Versuchen folgerichtig geschehen ist.

Prüfung der Zähler mit H-Szintillationen.

In einem folgenden Abschnitt seiner Arbeit beschreibt Chadwick einige Versuche, die er sowohl mit dem neuen Hilger-Mikroskop als auch mit dem früher für Szintillationen verwendeten Mikroskope durchgeführt hat. Zunächst wird eine von Geiger und Werner¹ beschriebene Methode zur Prüfung der Fähigkeit der Zähler verwendet, bei welcher die Szintillationen, die auf einem und demselben Schirm durch zwei verschiedene Mikroskope von zwei verschiedenen Zählern beobachtet und auf demselben Band der Trommel eines Chronographen registriert werden. Nimmt man an, daß N die Zahl der Szintillationen ist, die in einer bestimmten Zeit auf dem Schirm erscheinen und nennt λ_1 und λ_2 den Wirkungsfaktor der beiden Beobachter, so ist die Gesamtzahl der von jedem von ihnen registrierten Szintillationen $N_1 = \lambda_1 N$ und $N_2 = \lambda_2 N$, während die Zahl der von beiden gleichzeitig gezählten Szintillationen $C = \lambda_1 \lambda_2 N$ sein müßte. Aus diesen drei Gleichungen können die beiden Wirkungsfaktoren und die Gesamtzahl der Szintillationen berechnet werden. Zunächst wendet Chadwick wie Geiger und Werner diese Methode nur für schnelle α -Partikel an und findet für seine Zähler Wirkungsfaktoren von mehr als 90%, hierauf überträgt er dieselbe Methode auf H-Szintillationen von mit α -Partikeln einer Radonkapillare bestrahltem Paraffin und findet, daß für seine erprobten Zähler der Wirkungsfaktor nicht viel weniger als bei α -Zählungen, nämlich 80—90% beträgt, während beinahe ungeübte Zähler 60% der H-Szintillationen sehen. Aus diesen Ergebnissen könnte man leicht, wie es auch Chadwick getan hat, den Schluß ziehen, daß Beobachter,

¹ Z. f. Physik 21, 187, 1924.

die im Zählen von H-Szintillationen geübt sind, mit demselben Mikroskop und unter den gleichen Bedingungen, die, wie Chadwick selbst angibt, schlechter als bei den gewöhnlichen Zertrümmerungsversuchen waren, nur einen kleinen Bruchteil aller den Schirm tatsächlich treffenden Teilchen übersehen können.

Nun ist aber die Methode von Geiger und Werner, wie diese Verfasser ausdrücklich betonen¹, nur auf kräftige Szintillationen von konstanter Helligkeit, die von beiden Beobachtern leicht gesehen werden können, anwendbar. Bei H-Szintillationen, die so erregt wurden, wie es Chadwick beschreibt, ist diese Bedingung aber keineswegs erfüllt, denn die H-Partikeln waren notwendigerweise von heterogener Geschwindigkeit, da ihre Reichweite von einem Maximalwert, der zu 7 cm angegeben wird, bis zu 0 cm variierte. Folglich mußte auch die Helligkeit der Szintillationen verschieden sein und von einem Maximalwert, der der schnellsten Partikel entspricht, bis zu kaum sichtbaren oder sogar solchen, die unter der Sichtbarkeitsschwelle liegen, abnehmen; dabei mußten aber, wie man aus den Versuchsbedingungen erkennen kann, gerade die schwachen Szintillationen in relativ größerer Anzahl vorhanden sein. Hätte man die Möglichkeit, die beschriebene Prüfung so durchzuführen, daß man die heterogenen Szintillationen in verschiedene Helligkeitsklassen teilt und den Wirkungsfaktor für jede Klasse gesondert ermittelt, so würde sich zweifellos ergeben, daß dieser Koeffizient mit der Helligkeit von einem den schnellsten Partikeln entsprechenden Maximalwert bis nahe auf 0 für die langsamsten Partikeln abnimmt, welche fast unsichtbare Szintillationen ergeben. Überdies muß man nach allen unseren Erfahrungen erwarten, daß die partiellen Wirkungskoeffizienten für verschiedene Zähler in verschiedenem Grad gegen Null konvergieren. Andererseits aber müssen die von beiden Zählern gesehenen Szintillationen überwiegend zur hellsten Gruppe gehören, so daß es unmöglich erscheint, aus solchen Beobachtungen die Wirkungskoeffizienten oder gar die Gesamtzahl der tatsächlich vorhandenen Szintillationen zu berechnen. Es könnten z. B. theoretisch viel mehr Szintillationen, deren Hauptmenge für beide Zähler unsichtbar war, vorhanden gewesen sein als N , der aus den drei Gleichungen von Geiger und Werner berechneten Zahl entspricht.

Zweitens wird eine Serie von Versuchen beschrieben, bei welchen H-Partikeln, die nach Berechnung aus der Stoßgleichung nahe ihrem Reichweitenende waren, beobachtet wurden. In diesem Fall ließ man α -Partikeln einer Ra C-Quelle, d. h. homogener Geschwindigkeit, auf Blättchen aus festem Paraffin auffallen und beobachtete die H-Partikeln, die unter einem Winkel von 45° zur Richtung der einfallenden Strahlung nach Durchsetzen von Glimmerblättchen bekannten Bremsvermögens auf einen Schirm auffielen. Entsprechend den Versuchsbedingungen waren die zur Beobachtung

¹ l. c., p. 196.

belangenden H-Partikeln von heterogener Geschwindigkeit. Die Maximalreichweite der Mehrzahl der Partikeln war um 3 cm kleiner als die der am weitesten reichenden. Außerdem mußten noch Partikeln viel kleinerer Geschwindigkeit vorhanden sein. Chadwick gibt nun an, daß bei einer Glimmerabsorption, die so gewählt war, daß die meisten H-Partikeln Reichweiten kleiner als 1·2 cm hatten, die Zahl der Szintillationen »noch verhältnismäßig« groß war und daß bei einer Glimmerabsorption, die die am weitesten reichenden H-Partikeln auf diesen Reichweitenwert abbremsete, noch »einige« Szintillationen beobachtet wurden. Ähnliche Versuche, mit Wasserstoffgas als H-Strahlenquelle durchgeführt, schienen die Anschauung zu bestätigen, daß H-Szintillationen von einer Restreichweite kleiner als 1 cm sicher gezählt werden können. Auf den ersten Anblick scheinen wohl diese Versuche zu beweisen, daß von den Cambridger Forschern keine merkbare Anzahl von Szintillationen, nicht einmal solche von H-Partikeln nahe am Ende der Reichweite, übersehen wurden. Dieser Beweis wäre tatsächlich zwingend, wenn alle Szintillationen, die von einem Bündel von Strahlen homogener Geschwindigkeit erregt werden, bis zu einem bestimmten sehr kleinen Grenzwert der restlichen Reichweite sichtbar blieben und dann alle zu gleicher Zeit unsichtbar werden. Tatsächlich ist dies aber keineswegs der Fall; sobald die Helligkeit einer Gruppe von Szintillationen herabgesetzt wird, und zwar entweder durch Verminderung der Geschwindigkeit der die Szintillationen erregenden Partikeln oder durch Zwischenschalten lichtabsorbierender Gläser im Mikroskop, wächst die Zahl der vom Beobachter übersehenen Szintillationen an und schließlich, wenn die Mehrzahl derselben schon nahezu unsichtbar ist, können noch einige wenige gesehen und gezählt werden. Diese Tatsache ist einfach eine Folge der Physiologie des Sehens, doch wird nach Versuchen, die kürzlich hier im Institut ausgeführt wurden, der Effekt dadurch gesteigert, daß selbst die Helligkeit von Szintillationen homogener Partikeln individuelle Schwankungen zeigt, die zweifellos auf die Unterschiede in Gestalt und Orientierung der getroffenen Kristallkörner und auf die Lage des Auftreffpunktes zurückzuführen sind. Bei Szintillationen eines Bündels von α -Strahlen homogener Geschwindigkeit setzt das Verschwinden der Szintillationen, ein Vorgang, der natürlich vom »straggling«-Phänomen zu unterscheiden ist, erst einige Millimeter vom Ende der Reichweite ein. Bei H-Partikeln tritt dieser Effekt offensichtlich schon viel früher auf, besonders wenn die Sichtbarkeitsbedingungen z. B. durch Hintergrundleuchten beeinträchtigt sind.

Es ist daher die Tatsache, daß H-Partikeln von einer Reichweite kleiner als 1 cm noch gesehen werden, kein Beweis dafür, daß alle oder fast alle dieser H-Partikeln tatsächlich gesehen und gezählt werden. Es könnte nämlich die Mehrzahl der wirklich vorhandenen Partikeln kurzer Reichweite übersehen werden und die wenigen beobachteten von der Größenordnung der »natürlichen« Szintillationen sein. Wir müssen wohl annehmen, daß gerade dieser

Fall bei den im Folgenden von Chadwick beschriebenen Versuchen vorliegt. Offensichtlich steigt die Gelegenheit für ein Übersehen solcher schwacher Szintillationen, wenn das verwendete Mikroskop keine hohe Lichtstärke ergibt, wenn das subjektive Gesichtsfeld zu groß ist, um bei der Beobachtung effektiv überblickt werden zu können und wenn ein merkbare durch die γ -Strahlung von Ra C verursachtes Hintergrundleuchten vorhanden ist. Eine unserer Mitarbeiterinnen, E. Kara-Michailova, hat das allmähliche Verschwinden der H-Szintillationen bei Verminderung ihrer Helligkeit einer gesonderten Untersuchung unterzogen. Die einzige Möglichkeit, genau die Abhängigkeit der Helligkeit der H-Szintillationen von der Geschwindigkeit der sie erregenden Partikeln zu bestimmen, erreicht man durch Entwerfen eines magnetischen Geschwindigkeitsspektrums von H-Strahlen, z. B. aus Paraffin. Man kann damit, vorausgesetzt, daß die Intensität der Quelle ausreichend und die Dispersion des Spektrums nicht zu klein ist, ein Bündel hinreichend homogener H-Strahlen auf den Szintillationsschirm zu lenken. Bei einem der vorliegenden Versuche war beispielsweise die Strahlungsquelle eine äußerst dünnwandige Glaskapillare von nur $5\ \mu$ Wandstärke, mit 15 Millicuries Radon gefüllt, unter der ein Paraffindünnschnitt von $20\ \mu$ und ein Absorptionsglimmer von $7.5\ \text{cm}$ Luftäquivalent angebracht waren. Bei Verwendung eines zusammengesetzten Spaltes vom gleichen Typus, wie ihn G. Stetter für seine Versuche konstruiert hat¹, und eines nahezu homogenen Magnetfeldes von etwa 10.000 Gauß betrug die Zahl der Szintillationen auf einem rechteckigen Gesichtsfeld von $2 \times 4\ \text{mm}$ im Watson II bei einer Ablenkung von $23\ \text{mm}$ etwa 40 pro Minute, obgleich der Abstand zwischen Quelle und Schirm, der reichlich mit Metall ausgefüllt war, so groß, etwa $10\ \text{cm}$, gewählt wurde, daß nur ein sehr schwaches Hintergrundleuchten auf dem Schirm zu beobachten war. Bei manchen Versuchen wurde durch ein Ra-Präparat von $30\ \text{mg}$ Ra in kleinem Abstand vom Schirm ein merkbare Hintergrundleuchten hauptsächlich durch die harte γ -Strahlung verursacht; die andere Strahlung wurde durch Absorptionsfilter von mehreren Millimetern Metall zurückgehalten.

Die Ergebnisse von Kara-Michailova, deren Einzelheiten an einer anderen Stelle ausführlich veröffentlicht werden, zeigen, daß die Helligkeit der H-Szintillationen im Vergleich zu den Szintillationen schneller α -Teilchen, nach Untersuchungen mit einer schon beschriebenen photometrischen Anordnung, in hohem Grade von der Geschwindigkeit der Partikeln abhängig ist. Schon bei einer Verminderung der mittleren Restreichweite von 8 auf $2\ \text{cm}$ kann eine Abnahme der Helligkeit festgestellt werden und bei etwa $1\ \text{cm}$ ist ein sehr steiler Helligkeitsabfall zu bemerken. Parallel zu diesem Abfall nimmt auch die Zahl der gezählten Szintillationen ab, so daß von den H-Partikeln mit einer restlichen Reichweite von $7\ \text{mm}$ wenigstens 70% übersehen werden. Es muß bemerkt werden, daß

¹ G. Stetter: Zeitschrift für Physik, 35, 158, 1926.

diese Zählungen unter besonders günstigen Sichtbarkeitsbedingungen vorgenommen wurden, da die Lichtstärke des Mikroskopes sehr hoch und das Gesichtsfeld sehr klein, sogar kleiner als bei den gewöhnlichen Zertrümmerungsversuchen, war und daher leicht überblickt werden konnte. Außerdem war praktisch kein Hintergrundsleuchten vorhanden. Zweifellos würde man unter weniger günstigen Bedingungen noch mehr schwache Szintillationen übersehen, wofür man auch bei Erregung eines künstlichen Hintergrundsleuchtens Anzeichen fand. Obschon die Helligkeit nicht beträchtlich größer war als bei den gewöhnlichen Zertrümmerungsversuchen, so konnte doch eine deutliche Abnahme in der Zahl der beobachteten Szintillationen bemerkt werden. Wir können daher sagen, daß die Versuche Karameichailovas noch weiter unsere Annahme stützen, daß nämlich ein Übersehen von schwachen H-Szintillationen in wachsender Anzahl unvermeidlich ist, wenn die Partikeln nahe am Ende der Reichweite sind und daß dieser Effekt stärker hervortritt und um so früher, d. h. bei um so größerer Geschwindigkeit einsetzt, je ungünstiger die Sichtbarkeitsbedingungen für schwache Szintillationen sind.

Wir können uns daher den Schlußfolgerungen, die Chadwick aus den in seiner Arbeit beschriebenen Zählversuchen von H-Partikeln gewinnt, nicht anschließen, sondern sind der Ansicht, daß bei seinen Versuchsbedingungen ein Übersehen von H-Szintillationen, die durch Partikeln erregt waren, die einige Zentimeter oder gar nur einige Millimeter vom Reichweitenende entfernt waren, eintreten mußte.

Atomzertrümmerungsversuche nach der retrograden Methode.

Chadwick beschreibt ferner eine Reihe von Versuchen, bei denen ohne positiven Erfolg nach H-Partikeln gesucht wurde, die aus Beryllium, Kohlenstoff und Sauerstoffgas mit einer Reichweite größer als 4 cm austreten; die Beobachtung erfolgte unter einem Winkel von etwa 90° zur Einfallrichtung eines intensiven α -Strahlenbündels. Unter diesen Bedingungen und bei dieser Absorption muß wohl der größte Teil der langsamen H-Partikeln, die wir bei unseren Versuchen erhalten haben, abwesend sein, doch müssen noch immer so viele Partikeln vorhanden sein, daß sie, wenigstens mit unseren Versuchsbedingungen und unserer Optik, hätten gesehen werden müssen. Will man die Tatsache, daß diese Atomfragmente der Beobachtung der Cambridger Forscher entgangen sind, nicht mit den oben besprochenen Eigenschaften ihrer Zählmikroskope und mit dem Hintergrundsleuchten, das durch die Verwendung starker Ra C-Präparate (30—40 mg Ra-Äquivalent in einigen Zentimetern Abstand vom Schirm) bedingt waren, in Zusammenhang bringen, so sind wir gegenwärtig außerstande, eine befriedigende Erklärung für diese Widersprüche vorzuschlagen. Anstatt weiter über diese Frage zu diskutieren, wollen wir uns auf eine kurze Beschreibung derjenigen von uns nach der Szintillationsmethode durchgeführten Versuche beschränken, die uns überzeugt haben, daß die drei erwähnten Elemente und noch eine Reihe anderer

schwerer Elemente H-Partikeln nach rückwärts abgeben. Bevor wir jedoch dazu übergehen, ist es nötig, zu einem Irrtum in Chadwick's Arbeit, der einen vermuteten Widerspruch zwischen den hiesigen und den Cambridger Versuchen betrifft, Stellung zu nehmen.

Auf Seite 1058 seiner Arbeit spricht Chadwick gelegentlich einer Bemerkung über die Unterschiede in den Wiener und Cambridger Ergebnissen folgende Behauptung aus: »Selbst in den wenigen Fällen, in denen unsere Beobachtungen mit denen der Wiener Forscher darin übereinstimmen, daß ein Zertrümmerungseffekt vorliegt, ist die Übereinstimmung nur scheinbar und nicht reell. Als Beispiel können wir den Fall des Magnesiums und Siliziums heranziehen. Für beide Elemente finden Kirsch und Pettersson einen mehrmals größeren Zertrümmerungseffekt als wir, während die maximale Reichweite der Partikeln kleiner ist als nach unseren Messungen. Unter der Annahme, daß wir schwache Szintillationen nicht zählen können, wäre zu erwarten, daß wir eine kleinere maximale Reichweite finden als Kirsch und Pettersson.«

Nun bedeutet die Angabe einer experimentell gefundenen »Maximalreichweite« von Atomfragmenten nur die höchste Absorption im Wege der Sekundärstrahlen, bei welcher ein positiver Effekt (d. h. eine Anzahl von Szintillationen, die bei der Bestrahlung der Substanz merkbar höher ist als bei abgeschirmtem Präparat) auftritt. Entsprechend der Gestalt einer Absorptionskurve von Atomfragmenten, die bei höheren Absorptionswerten mehr oder weniger parallel zur Absorptionsachse verläuft, kann schon eine kleine Verbesserung der geometrischen Ausbeute an diesen bei hohen Absorptionen beobachteten seltenen, aber verhältnismäßig schnellen Partikeln zu einem beträchtlichen Anstieg des für die Maximalreichweite gefundenen Wertes führen. Dieses Ergebnis kann entweder durch Vergrößerung des objektiven Gesichtsfeldes des Zählmikroskopes oder durch Steigerung der Intensität des α -Bombardements herbeigeführt werden (vgl. den Anstieg in der Maximalreichweite der Atomfragmente, den Rutherford und Chadwick mit ihrem Weitfeldmikroskop im Vergleiche zu früheren Messungen gefunden haben). Die Versuchsbedingungen in Cambridge sind mit Vorsatz so gewählt, daß sie zur Beobachtung solcher seltener Partikeln geeignet sind: nämlich große beobachtete Schirmfläche, hohe Präparatintensität. Es ist daher dort möglich, die Absorptionskurven bis zu größeren Werten der Maximalreichweite zu verfolgen als hier in Wien, wo die Versuchsbedingungen für die Beobachtung der schwachen Szintillationen, die von den zahlreichen bei niedriger Absorption vorhandenen Partikeln erregt werden, besonders eingerichtet sind. Dagegen sind sie natürlich zur Auffindung der seltenen Partikeln großer Reichweite wegen der kleineren beobachteten Schirmfläche, den schwachen Strahlungsquellen und den kurzen Zählperioden weniger geeignet¹. Der von Chadwick erwähnte Widerspruch ist

¹ Wir haben gefunden, daß man bei schwachen Szintillationen die Zählperioden auf 30—20 Sekunden oder noch kürzere Zeiten beschränken muß. Die Erfahrung

also ganz im Sinne der von uns vorgeschlagenen Erklärung und ist durch die Tatsache begründet, daß wir größeres Augenmerk auf den Beginn der Absorptionskurve als auf Fixierung eines willkürlichen Endpunktes, der sogenannten maximalen Reichweite gelenkt haben.

Wie schon in der Einleitung zu dieser Arbeit erwähnt, wurde die indirekte Beobachtungsmethode für Atomfragmente, d. h. der unter 90° zur Richtung der einfallenden Strahlen emittierten Partikeln, von beiden Seiten, hier und in Cambridge, eingeführt, um die Störungen durch die Primärstrahlung zu vermeiden und so Atomfragmente kürzerer Reichweite beobachten zu können. Die Vorteile dieser Methode werden beträchtlich vermehrt, wenn man den Winkel zwischen Primär- und Sekundärstrahlung von 90° auf größere Werte erhöht; wir sind daher sehr bald dazu übergegangen, Atomfragmente, die unter einem Winkel von 150° zur Einfallsrichtung emittiert wurden, zu beobachten. Die meisten unserer Versuche seit zwei Jahren und mehr sind mit dieser retrograden Methode gewonnen.

Nach der Stoßgleichung, die von Rutherford und Darwin aufgestellt wurde, variiert die Zahl der um einen bestimmten Winkel Φ gestreuten α -Partikel wie $\sin^{-4} \frac{\Phi}{2}$, so daß die bei 150° erhaltenen

Werte drei- bis vierfach kleiner sind als die bei 90° . Nach Messungen von Geiger und Marsden¹, die von Chadwick korrigiert² wurden, sollen von tausend Millionen (10^9) schnellen α -Partikeln von Ra C [$R = 7 \text{ cm}$], die auf eine dünne Substanzfläche von 1 mm L. Ä. auffielen, folgende Zahlen gestreuter Partikeln einen Schirm von 10 mm^2 , der in 25 mm Abstand von der Substanz angebracht ist, treffen.

$$\Phi = 90^\circ \quad \text{Beryllium: } 0.63, \quad \text{Kohle: } 1.2, \quad \text{Sauerstoff: } 1.9.$$

$$\Phi = 150^\circ \quad 0.16, \quad 0.34, \quad 0.57.$$

Berücksichtigt man, daß die beobachtete Zahl der H-Partikeln unter den gleichen Ausbeutebedingungen die bei den meisten unserer Versuche erfüllt sind, zwei bis vier pro tausend Millionen α -Partikeln beträgt, so erkennt man, daß die Zahl der reflektierten α -Partikeln, die vorhanden sein müßten, wenn die Stoßgleichung als richtig angenommen wird, nur die Rolle eines Korrektionsgliedes für unsere Ergebnisse spielen könnte, aber nicht für die Gesamtzahl oder auch nur einen größeren Teil der bei 150° beobachteten Partikeln verantwortlich gemacht werden kann. Nun beweisen aber Messungen von Rutherford und Chadwick³, daß wenigstens bei Aluminium die Zahl der schnellen α -Partikeln, die um 150° gestreut werden, deutlich kleiner ist als nach der Theorie zu erwarten wäre, und daß

hat uns gelehrt, daß bei längeren Perioden bei den meisten Zählern Ermüdungswellen auftreten.

¹ H. Geiger und Marsden, Phil. Mag. 14, 604, 1913.

J. Chadwick, Phil. Mag. 40, 734, 1920.

E. Rutherford und J. Chadwick, Phil. Mag. 50, 889, 1925.

für bestimmte Werte der Reichweite der einfallenden Strahlung Beträge von bloß 30% der berechneten Zahl erreicht werden. Andererseits ergeben aber Blackett's¹ Versuche mit Stickstoff ein Überwiegen der um große Winkel gestreuten α -Teilchen dem theoretischen Werte gegenüber, so daß man in dieser Hinsicht den theoretischen Erwägungen nicht zu großen Wert beimessen darf.

Noch wichtiger aber als die Verminderung an Zahl ist die Verminderung an Reichweite für die um große Winkel gestreuten α -Partikeln, wie die folgende Daten zeigen, welche die von der Theorie geforderten Werte für die gleichen streuenden Substanzen und für die beiden betrachteten Winkel angeben. Die Reichweite der reflektierten α -Teilchen ist in Prozenten der Reichweite unmittelbar vor dem Zusammenstoß angegeben.

$$\begin{array}{l} \Phi = 90^\circ \text{ Beryllium: } 24\%_0, \text{ Kohle: } 35\%_0, \text{ Sauerstoff: } 47\%_0, \\ \Phi = 150^\circ \quad \quad \quad 7\%_0, \quad \quad 14\%_0, \quad \quad \quad \gg \quad 24\%_0. \end{array}$$

Während also die Reichweite eines Ra C- α -Partikels, das an Kohle um 90° gestreut wird, von 7 auf 2.5 cm vermindert wird, fällt die Restreichweite auf bloß 1 cm herab, wenn der Streuwinkel auf 150° erhöht wird. Weiters sind mit demselben Element die Reichweiten von Polonium- α -Partikeln von 3.9 cm Anfangsreichweite 1.4 cm nach Streuung um 90° und nur 0.55 cm bei 150° . Außerdem muß berücksichtigt werden, daß sich diese Werte auf α -Partikeln beziehen, die bloß an der Oberfläche der Substanzscheibe zurückgeworfen werden, während für Partikeln, die an Atomen gestreut werden, die in gewisser Tiefe unterhalb der Oberfläche liegen, durch Absorption in der Substanz selbst eine weitere Reichweitenverminderung eintritt. Wenn daher auch für unsere Atomzertrümmerungsversuche eine dicke Graphitschicht verwendet wurde, so ist doch nur eine verhältnismäßig sehr dünne Oberflächenschicht von weniger als 0.5 cm Luftäquivalent imstande, α -Partikeln von Polonium, welche auf die Oberfläche einfallen, zu reflektieren und selbst mit Ra C als Strahlenquelle ist das Luftäquivalent der reflektierenden Schicht kleiner als 1 cm . Andererseits können H-Partikeln aus zerfallenden Kohlenstoffatomen entsprechend ihrer Anfangsgeschwindigkeit entweichen, selbst aus Atomen, die in der maximalen Tiefe unterhalb der Oberfläche liegen, wo gerade noch Zertrümmerung stattfindet.

Die oben angegebenen Reichweiten der reflektierten α -Teilchen bestimmen die äußerste Grenze, innerhalb welcher Störungen durch solche Strahlen zu erwarten sind und die voranstehende kurze Tabelle vermittelt einen Überblick über das vermutliche Ausmaß an solchen Partikeln. In beiden Beziehungen sind die Vorteile der retrograden Methode gegenüber der 90° -Methode zu erkennen und wir bedauern sehr, daß sie bis jetzt in Cambridge für Zertrümmerungsversuche noch nicht angewendet wurde, da dann die Ergebnisse mit den unsrigen verglichen werden könnten.

¹ P. M. S. Blackett, Proc. Roy. Soc. A 107, 349, 1925.

Unsere Versuchsanordnung, die später in mancher Hinsicht von Schmidt¹ abgeändert wurde, ist schematisch in Fig. 1 wieder gegeben. *P* ist die Strahlungsquelle — ein flacher Nickelstahlring —, der an seiner oberen Fläche mit Ra B + C aktiviert ist, *S* die Substanzscheibe, die untersucht werden soll, und *C* ein dünnwandiger Messingkanal, den die Atomfragmente und die von der Substanz reflektierten α -Partikeln durchsetzen müssen, bevor sie den Schirm *Z* treffen, wo die durch sie erregten Szintillationen mit einem Zählmikroskop beobachtet werden. Die Versuche wurden entweder in einem Vakuum von einigen Millimetern Hg oder in einer Heliumatmosphäre bei Normaldruck durchgeführt. Zwischen Schirm und Quelle ist eine Unterlage aus Blei oder Gold angebracht, um die durchdringende Strahlung abzuschwächen. Unmittelbar über dem Schirm können in den Weg der Sekundärstrahlen Glimmerblätter von verschiedener, genau bekannter Absorption, die über Löchern an der Peripherie einer kreis-

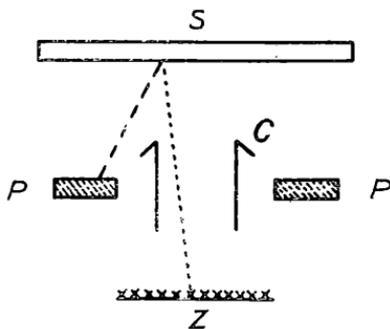


Fig. 1.

förmigen Messingscheibe und eines fächerförmigen Trägers angebracht sind, durch Drehung zweier Schiffe eingeschaltet werden. Eine flache Scherenvorrichtung kann man unmittelbar über der Quelle schließen und dadurch bei ausgeschalteter Primärstrahlung jederzeit während des Versuches auf »Verseuchung« prüfen. Hinsichtlich der verschiedenen Vorkehrungsmaßnahmen, die getroffen werden mußten, um den Apparat im Finstern zu bedienen und Substanzen und Absorptionen ohne Wissen der Zähler wechseln zu können, sei auf die Originalarbeiten hingewiesen.

Ein wichtiger Punkt für Atomzertrümmerungsversuche ist die Unterscheidung von α - und H-Partikeln. Da wiederholt von Seite der Cambridger Physiker die Vermutung ausgesprochen wurde, daß wir irrtümlich α -Partikel für H-Partikel halten, und zwar selbst in Fällen, in denen nachfolgende Versuche in Cambridge unsere Ergebnisse wenigstens qualitativ bestätigt haben, müssen wir einige Bemerkungen darüber verlieren, wie wir die beiden Arten von Partikeln unterscheiden. Zunächst benützen wir seit mehreren Jahren

¹ E. A. W. Schmidt, Diese Ber. IIa, 134, 385. Mitt., Ra-Inst. Nr. 178, 1925.

zur Diagnose unbekannter Partikeln α - und H-Strahlenquellen, die in den Apparat selbst eingebaut sind und jederzeit vor den Schirm gebracht werden können. Da die H-Strahlenquelle pro Minute eine konstante Anzahl H-Partikeln emittiert, so kann sie auch zur Prüfung der Zählfähigkeit der Beobachter während des Versuches dienen, was öfters nützlich sein kann.

Solange H- und α -Partikeln Szintillationen ganz verschiedener Helligkeit geben, ist es mit Hilfe der oben beschriebenen Maßnahmen leicht, die von der Substanz auf den Schirm fallenden α - und H-Partikeln mit einiger Sicherheit zu unterscheiden. Hingegen ist die Helligkeit der Szintillationen einer α -Partikel, deren Reichweite auf 3 mm abgefallen ist, nicht größer als die schnellerer H-Partikeln. Obgleich die Ausdehnung der Szintillationen von α -Partikeln auch noch nahe am Ende der Reichweite größer erscheint als die durch schnelle H-Partikeln erregte, so ist doch eine Entscheidung schwierig und mit ziemlicher Unsicherheit behaftet, so daß wir dieser Diagnose wenig oder gar keinen Wert beimessen. Es gibt jedoch noch ein Mittel, um eine wenigstens partielle Analyse solcher heterogener Partikeln durchzuführen, nämlich Veränderung der Absorption in Stufen von etwa 0.5 cm . Denn diejenigen α -Partikeln, die eine restliche Reichweite haben, die kleiner oder gleich 0.5 cm ist und daher Szintillationen erregen, die für H-Partikeln gehalten werden können, verschwinden bei Vermehrung der Absorption um den angegebenen Betrag, während schnelle H-Partikeln durch diese Veränderung kaum beeinträchtigt werden. Erhöht man daher nach einer Zählung die Absorption um 0.5 cm , so kann man dadurch die Zahl der α -Partikeln bestimmen, die sich bei der ersten Zählung im H-Stadium befinden.

Aber auch diese Methode hat ihre Grenzen, besonders wenn gleichzeitig viele kurzreichenden H- und α -Partikeln auftreten, wie dies bei Untersuchungen schwerer Elemente nach der retrograden Methode der Fall ist. Wir hielten es daher für sicherer, aus der Szintillationsmethode keinen Schluß auf die Zertrümmerbarkeit neuer Elemente zu ziehen, außer wenn *a*) eine beträchtliche Anzahl Szintillationen außerhalb der theoretischen Reichweite der reflektierten α -Partikeln auftrat oder *b*) innerhalb dieser Reichweite die Anzahl der auftretenden Szintillationen im Verhältnis zu den Primär- α -Strahlen weit größer war als dem nach der Rutherford-Darwin'schen Theorie errechneten Werte für die Zahl der reflektierten α -Partikeln entspricht. Denn welche Bedenken man auch gegen die exakte Gültigkeit dieser Theorie haben mag, so scheint es doch nicht wahrscheinlich, daß die restliche Reichweite der gestreuten Partikeln größer ist als dem theoretischen Werte entspricht. Was aber die Zahl der gestreuten α -Partikeln betrifft, so spricht nach den Beobachtungen in Cambridge nichts dafür, daß bei schweren Elementen der theoretische Wert zu niedrig ist.

Wir können daher sagen, daß wir jede mögliche Vorsichtsmaßregel angewendet haben, um eine Verwechslung zwischen Atom-

Fragmenten und reflektierten α -Partikeln zu vermeiden und daß wir in Fällen, wo eine solche Verwechslung theoretisch möglich schien, davon abgesehen haben, aus unseren Ergebnissen Schlüsse auf die Zertrümmerbarkeit neuer Elemente zu ziehen. Es kann daher die Beanständung Chadwicks, daß wir innerhalb der Reichweite der reflektierten α -Partikeln nach H-Partikeln gesucht haben, nicht zur Erklärung der Widersprüche herangezogen werden.

Eine Diskussion der Versuchsergebnisse nach der eben beschriebenen Methode ginge über den Rahmen dieser Arbeit hinaus. Wir müssen auf schon veröffentlichte Arbeiten, auf solche, die sich gerade im Druck befinden und auf unser Buch »Atomzertrümmerung« verweisen. Wir können nur sagen, daß mit Kohlenstoff in seiner reinsten Form und unter Bedingungen, die eine Störung durch reflektierte α -Partikeln und natürliche H-Partikeln aus Feuchtigkeitsschichten oder Wasserstoffverunreinigungen ausschlossen, mehr als 50 verschiedene Versuchsserien gemacht haben und bei allen diesen Versuchen zahlreiche H-Partikeln gesehen haben; die Untersuchung wurde zwischen den Absorptionsgrenzen von einigen Millimetern und 4–6 cm, wo H-Szintillationen meist schon nicht mehr sichtbar waren, durchgeführt. Außer unseren eigenen Zählern haben einige andere Forscher, die dieses Institut besuchten, gelegentlich an unseren Versuchen teilgenommen und ebenfalls diese schwachen Szintillationen gesehen und Zahlenangaben gemacht, die mit den unsrigen vergleichbar waren.

In letzterer Zeit ist durch Versuche von G. Stetter in seinem Massenspektroskop die Identität der Atomtrümmer aus α -bestrahltem Kohlenstoff mit Wasserstoffkernen bewiesen worden und somit das letzte Glied in der Kette unserer Beweise eingefügt worden. Wir sind also berechtigt, unser früher gebrachtes Resultat aufrecht zu halten, daß die drei Elemente Beryllium, Kohlenstoff und Sauerstoff zertrümmerbar sind ebenso wie die anderswo erwähnten Elemente höheren Atomgewichtes¹, so sehr wir auch bedauern, daß dieses Ergebnis bisher nicht in Cambridge bestätigt werden konnte.

Untersuchungen über Atomzertrümmerung nach anderen Methoden.

Aus Chadwick's Arbeit könnte man leicht den Schluß ziehen, daß man H-Partikeln einer Restreichweite bis zu wenigen Millimetern herab unabhängig von dem Vorhandensein eines Hintergrundleuchtens des Szintillationsschirmes beobachten kann. Es hätte dann den Anschein, daß die Szintillationszählungen sich für sehr genaue Untersuchungen über Atomzertrümmerung eignen und daß sie dabei quantitative Resultate von beträchtlicher Sicherheit liefern können.

¹ G. Kirsch und H. Pettersson, diese Berichte IIa, 134, 491, 1925. Atomzertrümmerung« p. 106.

Wir sind, besonders im Hinblick auf die Untersuchungen von E. A. W. Schmidt, gezwungen zu sagen, daß wir kein so günstiges Urteil über ihre Leistungen geben können. Die Szintillationsmethode hat unzweifelhaft viele Vorteile für qualitative Untersuchungen über Atomzertrümmerung und man kann aus einer genügend großen Zahl von Beobachtungen, die allerdings in mühsamer Arbeit zusammengetragen werden müssen, Meßergebnisse von einiger Genauigkeit erhalten. Doch selbst mit der besten Optik, mit ausgezeichneten und wohlgeschulten Zählern und mit einer Methode, die durch mehrjährige intensive Arbeit vervollkommenet wurde, scheint es uns unmöglich, den Grad von Genauigkeit zu erreichen, der für die meisten theoretischen Probleme erforderlich ist. Daher haben wir und unsere Mitarbeiter einen großen Teil unserer Arbeitszeit der Entwicklung anderer unabhängiger Methoden gewidmet, die weniger mühsam sind und größere Genauigkeit liefern. Voraussichtlich werden durch diese viele interessante Fragen, die sich auf diesem neuen Untersuchungsgebiet eröffnen, Beantwortung finden. Drei der bearbeiteten Methoden scheinen uns aussichtsreich und zumindest eine ist schon soweit ausgebaut, daß wir mit ihrer Hilfe Probleme in Angriff nehmen können, die mit der Szintillationsmethode unlösbar sind.

Die Nebelmethode Wilson's zur Sichtbarmachung der Bahnen von Korpuskularstrahlen, die bei Expansion eines feuchten Gases als Nebelstreifen erscheinen, eines der wundervollsten Mittel zur Erforschung der Atomwelt, das jemals erfunden wurde, hat P. M. S. Blackett² zum Studium der Atomzertrümmerung herangezogen. Es wurden α -Bahnen von Th C in Stickstoff photographiert und mit 20.000 Aufnahmen unter insgesamt 400.000 α -Bahnen 8 Spuren ausgelöster Protonen erhalten. Da Blackett seine Aufnahmen in zwei zueinander senkrechten Ebenen machte, konnte er die Dynamik des Kernzusammenstoßes studieren. Dabei konnte er eine Folgerung, die wir aus unseren in diesem Institut mittels Szintillationsmethode durchgeführten Untersuchungen³ gezogen hatten, bestätigen, nämlich daß α -Partikeln, die Zertrümmerung verursachen, am Restkern haften bleiben und so Kerne bilden, die größere Maße und höhere Kernladung besitzen, als das ursprüngliche Atom vor dem Zusammenstoß. Leider ist die schöne Methode von Blackett sehr mühsam und nicht geeignet, Atomfragmente in größerer Zahl zu beobachten; außerdem kann sie nur mit Gasen verwendet werden.

¹ Daß die Szintillationsmethode, selbst wenn sie zur Zählung von α -Partikeln verwendet wird, zu fehlerhaften Resultaten führen kann und daß durch eine massenhafte Anhäufung von Beobachtungen keine Gewähr gegen irrtümliche Schlüsse gesichert wird, dürfte am besten durch die Arbeiten der Cambridger Physiker S. J. Rogers und L. F. Bates über das Vorkommen einer beträchtlichen Anzahl von Gruppen weitreichender α -Teilchen aus Ra C, Th C, Po und Ac C (Proc. Roy. Soc. A 105 p. p., 97 und 360, 1924) veranschaulicht sein. Kontrollversuche seitens anderer Forscher haben gezeigt, daß die allermeisten dieser Gruppen nicht vorhanden sind. Vgl. D. Pettersson, diese Berichte IIa, 133, 149, 1924, ebenso wie Atomzertrümmerung, 82.

² P. M. S. Blackett, Proc. Roy. Soc. 107, 349, 1925.

³ H. Pettersson, diese Ber.: IIa, 133, 445, Mitt. Ra-Inst. 168; G. Kirsch, ibid. Nr. 169, 1924.

Einer unserer Mitarbeiter, R. Holoubek, hat die Wilson-Methode zu einer Beobachtung für Atomtrümmer umgestaltet unter Verwendung eines automatischen, von T. Shimizu konstruierten Apparates kleiner Dimensionen. Wegen Einzelheiten über diese Untersuchung müssen wir auf die demnächst erscheinende Arbeit von Holoubek verweisen, hier sei nur erwähnt, daß es ihm gelungen ist, sowohl Atomtrümmer aus mit Polonium- α -Teilchen bestrahlten festen Substanzen als auch natürliche H-Teilchen aus α -bestrahltem Paraffin in größerer Zahl sichtbar zu machen. Auch lassen sich diese Bahnsuren unter Verwendung eines besonders lichtstarken Objektivs von Zeiß photographisch aufnehmen. Nicht nur aus Aluminium, sondern auch aus Beryllium als Metall, aus Kohlenstoff in reiner Form, als weiße Diamantsplitter und aus reinem schwedischem Eisen hat Holoubek nach dieser Methode Bahnsuren der Atomtrümmer visuell und photographisch beobachten können, und zwar unter Bedingungen, die jede andere Provenienz der H-Teilchen ausschließen¹. Die Resultate dieser Messungen bilden eine kräftige Stütze für unsere früher nach der Szintillationsmethode gemachten Befunde und eröffnen außerdem Möglichkeiten für extensive und einwandfreie Untersuchungen über die Zertrümmerbarkeit der verschiedenen Elemente.

Der Nachweis einer photographischen Wirkung der H-Strahlen gelang zuerst M. Blau,² die sowohl die Gesamtwirkung bei größerer Strahlungsintensität, Schwärzung der photographischen Platte, als auch die direkten Bahnsuren einzelner H-Teilchen mit streifender Inzidenz feststellen konnte. Es handelte sich dabei zum Teil um natürliche H-Teilchen aus Paraffin, zum Teil um Atomtrümmer aus Aluminium; in beiden Fällen also um Teilchen beträchtlicher Reichweite. Mit den viel langsameren H-Teilchen aus Kohlenstoff und einigen anderen Leichtelementen ist der Nachweis viel schwieriger. Mittels einer modifizierten retrograden Methode ist es in letzter Zeit M. Blau gelungen, die photographischen Bahnsuren der unter größeren Winkeln gegen die α -Strahlung austretenden H-Teilchen zu beobachten, und zwar sowohl mit Aluminium als auch mit reinem Graphit als bestrahlte Substanz. Wiewohl es noch nicht gelungen ist, die Aufnahmen frei von störenden Nebeneffekten zu erhalten, d. h. absolut einwandfrei, so ergeben sie doch eine nicht

¹ Das Resultat mit Eisen ist von besonderem Interesse, da ja Rutherford und Chadwick bei ihren Versuchen mit schwedischem Eisen nach der 90°-Methode einen positiven Effekt gefunden hatten, der nach ihrer Meinung zweifellos auf die Anwesenheit von Stickstoff zurückzuführen war, da nach längerem Erhitzen in Vakuum eine starke Verminderung des Effektes eintrat (Proc. Phys. Soc. London, 36, 417, 1924). Der Direktor des Metallographischen Institutes in Stockholm Prof. C. Benedicks, sicherlich der erste Fachmann auf diesem Gebiet, hat uns mitgeteilt, daß der Stickstoffgehalt in schwedischem Eisen kaum 0.10% überschreitet, wodurch natürlich ein solcher Effekt nicht erklärt werden kann. In der Tat scheint hier ein ähnlicher Fall wie bei Aluminium vorzuliegen, welches Element ja nach Rutherford's ersten Arbeiten auch die Fähigkeit, H-Partikeln abzugeben, vermittelt längerem Erhitzen in Vakuum verlieren sollte, vergleiche diese Arbeit p. 201.

M. Blau, diese Ber.: IIa, 134, 427, Mitt. Ra-Inst. Nr. 179, 1925.

unwichtige Stütze für die Realität der Atomtrümmer aus Kohlenstoff. Im übrigen müssen wir auf die bald erscheinende Arbeit von M. Blau selbst hinweisen.

Schließlich sei noch erwähnt, daß in diesem Institut schon seit zwei Jahren Versuche im Gang sind, die elektrische Zählkammer für die Beobachtung einzelner Atomtrümmer auszugestalten. Während Versuche mit dem Geiger'schen Spitzenzähler wohl einen Effekt von der zu erwartenden Art und Betrag ergaben, dabei aber Störungen von Seiten anderer Strahlungsgattungen eintraten, so ist es neulich G. Ortner und G. Stetter¹ gelungen, auf einem zuerst von H. Greinacher betretenen Weg nicht nur α -Teilchen, sondern auch H-Teilchen hörbar zu machen, und zwar mit einem deutlichen Unterschied an Lautstärke zwischen den beiden Teilchengattungen. Bei ihrer Anordnung wird nur durch Röhrenverstärker allein der der Primärisation entsprechende Stromstoß bis auf Hörbarkeit verstärkt, wodurch die der Relaiswirkung der Stoßionisation entstammende Verwischung der Unterschiede zwischen den verschiedenen Strahlungsgattungen umgangen wird. Die Verwendung dieses neuen Hilfsmittels, das zunächst nur mit natürlichen H-Teilchen ausexperimentiert wurde, auf Atomtrümmer steht unmittelbar bevor.

Die Zertrümmerung von Aluminium.

Der letzte Abschnitt in Chadwick's Arbeit behandelt die Zertrümmerung von Aluminium, die nach seiner Behauptung ein typisches Beispiel für die Widersprüche in den Cambridger und Wiener Resultaten darstellt. Schmidt, der hier die Zertrümmerung von Aluminium zum Gegenstand einer sehr sorgfältigen Untersuchung gemacht hat, wird in einer gesonderten Arbeit zu dieser Kritik Stellung nehmen. Wir wollen uns daher hier nur auf die Beurteilung der sich daraus ergebenden theoretischen Folgerungen beschränken.

Chadwick legt augenscheinlich großes Gewicht auf das Vorhandensein einer Minimalreichweite der die zertrümmerten Atome verlassenden H-Partikeln. In folgender Weise bespricht er ein Argument zugunsten dieser Annahme: »Die Geschwindigkeit der H-Partikel muß mindestens dem Potentialgefälle entsprechen, das es auf seinem Wege von der den Kern umgebenden »kritischen« Oberfläche ab, wo das Potential ein Maximum hat, durchfliegt. Nach dieser Überlegung muß man annehmen, das auch die Geschwindigkeit einer α -Partikel, die gerade noch zertrümmernd wirken kann, diesem Potentialgefälle entsprechen muß, da sie sonst niemals die so definierte Kernoberfläche erreichen könnte. Chadwick findet auf diese Weise in seiner letzten Arbeit durch Interpretation seiner eigenen Resultate für den Radius des Aluminiumkerns einen Wert von $8 \times 10^{-13} \text{ cm}$, der doppelt so groß ist, wie die früher von ihm und Rutherford angenommenen von Bieler² aus Streuversuchen berechnete Zahl. Schmidt's

¹ G. Ortner und G. Stetter, Phys. Zeitschr., 28, 70, 1927.

E. S. Bieler, Proc. Roy. Society London, A 105, 434, 1924.

Ergebnisse würden zu einem wesentlich größeren Wert des Kernradius von $20 \times 10^{-13} \text{ cm}$ führen, der nach Chadwick in Widerspruch steht zu den Folgerungen, die Rutherford und er selbst aus Streuver suchen erhalten. Darnach muß nämlich das Feld, in welchem die normale Coulomb'sche Kraft herrscht, bis zu Abständen von 10 bis $12 \times 10^{-13} \text{ cm}$ bei Aluminium und $20 \times 10^{-13} \text{ cm}$ bei Silber an das Kernzentrum heranreichen.

Leider sind die Streuver suchte und die aus ihnen berechneten Daten geeignet, zu Resultaten bezüglich der Kerndimensionen zu führen, die andern Beobachtungen widersprechen. Als Beispiel können hier Rutherford und Chadwick's Streuver suchte an Uran angeführt werden, wo sich zu ihrer Überraschung zeigte, daß das normale elektrische Kraftgesetz bis $3 \times 10^{-12} \text{ cm}$ Abstand vom Kern seine Gültigkeit beibehält. Unter der Annahme, daß eine α -Partikel von Uran I ihre Geschwindigkeit nur durch das Potentialgefälle, das sie durchfliegen muß, erwirbt — eine überdies nicht sehr wahrscheinliche Annahme —, findet man, daß sie in Luft eine Reichweite von 7 cm haben müßte, was in offenkundigem Widerspruch zu dem experimentell feststehenden Wert von 2.7 cm steht. Als einen Ausweg aus diesem Zwiespalt haben Rutherford und Chadwick ein spezielles Modell für den Urankern vorgeschlagen, von dem sie annehmen, daß einige Protonen, verbunden mit einer entsprechenden Anzahl Kernelektronen, in einer äußeren Sphäre um den Hauptkern angeordnet sind. Der Hauptkern selbst soll hingegen einen Überschuß von positiven Ladungen enthalten, dessen Betrag innerhalb der durch die Streuver suchte bedingten Genauigkeit mit der Kernladung übereinstimmen müßte. Es wird dann angenommen, daß die kurzen α -Partikeln von Uran I und Uran II dieser äußern Sphäre entstammen. Allerdings scheint es nicht sehr wahrscheinlich, daß ein Prozeß, der zu einem radioaktiven Zerfall führt, in einem äußeren Bezirke des Kernes einsetzt. Indessen selbst, wenn wir, um die Argumentation vollständig zu machen, dieses Kernmodell annehmen, so drängt sich doch die Frage auf, warum nicht dieselbe Struktur, die einem Uranatom zugeschrieben wird, auch für leichtere Atomkerne, z. B. Aluminium maßgebend sein kann. Es wäre ja ebenso denkbar, daß auch bei Aluminium ein einzelnes Proton vereinigt mit einem Kernelektron außerhalb der kritischen Oberfläche, die durch Streuver suchte bestimmt ist, kreist, und daher auch von α -Partikeln kleiner Geschwindigkeit erreicht werden kann. Das aus diesem äußern Bezirk losgelöste Proton hätte dann ein vermindertes Potentialgefälle zu durchfliegen, das mit einem kleineren Wert der Minimalreichweite in befriedigende Übereinstimmung gebracht werden könnte. Es ist interessant, daß eine solche Struktur im hohen Grade an die Satellithypothese erinnert, die von Rutherford und Chadwick in einem früheren Stadium ihrer Untersuchungen als Erklärung für die Tatsache, daß nur sechs Elemente — nach dem Stand der damaligen Untersuchungen — zertrümmert werden können, vorgeschlagen wurde. Der Hauptunterschied zwischen beiden Modellen liegt darin,

daß damals nicht angenommen wurde, daß die äußeren Protonen mit Kernelektronen verbunden sind.

Kehren wir nun zu Chadwick's Arbeit zurück, so finden wir auf p. 1014 folgende Behauptung: »Eine α -Partikel von 3 cm Reichweite, die gerade noch den Aluminiumkern zertrümmern kann setzt eine H-Partikel von wenigstens 9 cm Reichweite in Freiheit. Um solche Partikel zu beobachten, braucht man die Untersuchung nicht bis in das Gebiet der gestreuten α -Partikel auszudehnen.«¹ Wenn wir uns derselben Beweisführung bedienen, können wir ebenso gut sagen, daß es nicht notwendig ist die Beobachtung einer etwaigen α -Strahlung von Uran auf Absorptionswerte kleiner als 7 cm auszudehnen, da ja Rutherford und Chadwick aus Streuversuchen den Kernradius von Uran zu $3 \times 10^{-12}\text{ cm}$ bestimmt haben, was ohne jegliche Hilshypothese einer Reichweite von 7 cm für die das Uranatom verlassende α -Partikel entspricht. Wären die α -Partikeln von Uran nicht schon lange vor Ausführung der Rutherford-Chadwick'schen Streuversuche entdeckt worden, wären diese beiden Fälle tatsächlich vergleichbar.

Auf einem Gebiete, das so wenig erforscht ist, wie die Atomzertrümmerung, scheint es nicht ratsam, die Ziele der Untersuchung durch rein theoretische Erwägungen zu beschränken. Indessen scheint uns unser Forschen nach den kürzesten beobachtbaren Atomfragmenten durch die Ergebnisse vollkommen gerechtfertigt.

Welcher Ansicht immer man auch über das normale Kraftfeld haben mag, das den ungestörten Kern umgibt, so bestehen doch schwerwiegende Gründe für die Annahme, daß es beim Kernzusammenstoß durch das elektrische Feld des herannahenden α -Teilchens merklich beeinflusst wird. Einer von uns² hat vor drei Jahren die Annahme gemacht, daß die elektrostatische Induktion der auftreffenden α -Partikel eine Neuorientierung der Ladungen im Kern bewirkt, die nicht allein eine Veränderung des äußeren Kraftfeldes, sondern sogar die Zertrümmerung selbst verursacht. Kürzlich³ wurde gezeigt, daß diese Anschauung in qualitativer Übereinstimmung mit den Streuversuchen von Bieler⁴ steht. Dieselben Überlegungen wurden unlängst in exakterer Form von Debye und Hardmeier⁵ ausgesprochen, welche die »Polarisation« eines Aluminiumkernes unter dem Einfluß des herannahenden α -Teilchens berechneten. Auf Grund derselben Annahme, daß nämlich das Coulomb'sche Gesetz bis in unmittelbare Nähe vom Kern seine Gültigkeit beibehält, konnten sie den Streueffekt dieser Polarisation berechnen und fanden ihre Ergebnisse in guter Übereinstimmung mit der früher von Ruther-

¹ Gesperrt von den Verfassern dieser Arbeit.

² H. Pettersson, Proc. Phys. London, 36, 194, 1924.

³ H. Pettersson, Arch. f. Mat. Astr. Fysik Stockholm, 19B, 1925.

⁴ Bieler, Soc. Roy. Soc., London, A 105, 434, 1924.

⁵ Debye und Hardmeier, Physik. Zeitschr. 27, 196, 1926 sowie W Hardmeier, Physik. Zeitschr. 27, 574, 1926.

tord und Chadwick für dasselbe Element erhaltenen Streukurve, für die noch keine andere Erklärung gegeben worden war.

Wenn diese Anschauung richtig ist, scheint es zwecklos, aus den Streuversuchen oder aus der vermuteten Minimalreichweite der zertrümmernden α -Partikel Schlüsse auf das Potentialgefälle zu ziehen, das eine emittierte H-Partikel zu durchfliegen hat; denn aller Wahrscheinlichkeit nach wird dieses Potentialgefälle im Stadium des Zusammenstoßes nicht gleichmäßig um das System α -Partikel + Kern verteilt sein und man kann wohl annehmen, daß es in der Richtung des entweichenden Atomfragmentes Werte annimmt, die kleiner sind als selbst den kürzesten bisher von Schmidt beobachteten Reichweiten von H-Partikeln entspricht.

Wenn wir nun, wie es Chadwick tut, den Fall des Aluminiums als typisch darstellen, so können wir unter Bezugnahme auf Schmidt's Arbeit sagen, daß die Versuchsergebnisse mit großer Wahrscheinlichkeit dafür sprechen, daß 1. die Ausbeute an H-Partikeln größer sein muß als die von Rutherford und Chadwick aus ihren Versuchen erhaltenen Werte, 2. daß nicht nur der Wert, den Chadwick früher für die minimale Reichweite der zertrümmernden α -Partikel angegeben hat, zu groß ist, sondern auch die später gefundenen stark reduzierten Werte, und 3. daß den Versuchen, die eine Minimalreichweite des abgelösten Protons von 14 *cm* oder selbst 9 bis 10 *cm* zu beweisen scheinen, durch Messungen widersprochen wird, die unabhängig voneinander nach ganz verschiedenen Methoden gewonnen wurden (Schmidt und Stetter); andererseits sind die theoretischen Argumente, die als Stütze dieser Anschauung vorgebracht werden auch nicht zwingend, so daß wir annehmen müssen, daß in allen drei Fällen die Ursache für die Diskrepanz wahrscheinlich darin liegt, daß die Cambridger Zähler die schwachen Szintillationen langsamer H-Partikeln übersehen haben. Wenn diese Erklärung aber für die Zertrümmerung von Aluminium gilt, so ist nicht einzusehen, warum sie auch nicht zur Erklärung der negativen Resultate bei den Zertrümmerungsversuchen mit anderen Elementen herangezogen werden kann.

Wir können uns der Schlußfolgerung nicht entziehen, daß die Cambridger Forscher bei Verwendung der von uns entwickelten Methodik und unter Benutzung einer ebenso lichtstarken Optik, und wenn nicht von Poloniumquellen, so doch von verhältnismäßig schwachen RaC-Präparaten (mit entsprechend herabgesetztem Schirmleuchten) dieselben Erscheinungen beobachten müßten wie wir.

Zusammenfassung.

Die von den Verfassern früher vorgeschlagene Erklärung für die Unterschiede zwischen den in Wien und in Cambridge gefundenen Resultaten bei Atomzertrümmerungsversuchen, die sich insbesondere durch die verschiedene Wahl der optischen Hilfsmittel einerseits

und durch die Art der Beobachtung bei stärkerem oder schwächerem Hintergrundleuchten andererseits weitgehend deuten lassen, wird aufrechterhalten und durch neue Versuchsergebnisse gestützt. Durch Beobachtungen nach unabhängigen Methoden werden die in Wien mittels Szintillationszählungen erhaltenen Ergebnisse bestätigt. Die von den Verfassern und ihren Mitarbeitern entdeckten zahlreichen Atomtrümmer kurzer Reichweite ebenso wie die Zertrümmerbarkeit verschiedener Elemente werden in vollem Umfange abermals erhalten.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse](#)

Jahr/Year: 1927

Band/Volume: [136_2a](#)

Autor(en)/Author(s): Kirsch Gerhard, Pettersson Hans

Artikel/Article: [Mitteilungen aus dem Institut für Radiumforschung Nr. 199. Über die Atomzertrümmerung durch \$\alpha\$ -Partikeln. V. Zur Frage der Existenz von Atomrümmern kurzer Reichweite. 195-224](#)