Über die Deutung der β -Strahlspektren radioaktiver Substanzen.

Von C. D. Ellis in Cambridge (England).

(Eingegangen am 11. Juni 1922.)

Frl. Meitner hat kürzlich in dieser Zeitschrift¹⁾ eine sehr interessante Theorie der β -Strahlspektren mitgeteilt. Ihre Ansichten scheinen sich auf den ersten Blick ziemlich mit denjenigen zu decken, die sich aus den Arbeiten von Rutherford und seinen Mitarbeitern ergeben haben und über die ich vor einiger Zeit berichtete²⁾. In Wirklichkeit unterscheidet sich die Meitnersche Theorie von der meinigen in ganz wesentlichen Punkten. In Hinsicht auf die Bedeutung, die den β -Strahlspektren für die Erforschung des Atomkernes zukommt, scheint es mir angezeigt, die beiden Theorien an Hand des experimentellen Materials kritisch zu vergleichen.

Die Meitnersche Theorie legt eine Analogie zwischen der α - und β -Strahlemission radioaktiver Substanzen nahe. Es scheint mir jedoch, daß bei genauerer Analyse der Erscheinungen diese Analogie sich nicht aufrecht erhalten läßt. Ich werde im Verlauf dieser Mitteilung versuchen, dies zu beweisen. Die Vorstellungen, zu denen ich gekommen bin, haben eine etwas allgemeinere Fassung als die Meitnerschen und lassen deshalb einen größeren Spielraum für die Entwicklung der Theorie offen.

Die gesamte β -Strahlemission wird zweckmäßig in zwei Teile zerlegt. Der erste Teil ist das sogenannte Linienspektrum, das aus einer Reihe von Gruppen homogener β -Strahlen besteht, der andere das kontinuierliche Spektrum, enthaltend β -Strahlen, deren Energien über einen weiten Bereich kontinuierlich verteilt sind. Durch meine Versuche ist, wie ich glaube, in überzeugender Weise gezeigt worden, daß sämtliche Gruppen sekundärer Art sind, und zwar bedingt durch die Umwandlung der γ -Strahlen in den verschiedenen Elektronenniveaus des Atoms. Demgegenüber glaubt Frl. Meitner bewiesen zu haben, daß einige dieser β -Linien primär aus dem Kern kommenden β -Strahlen angehören und daß nur einige dieser Linien sekundärer Art sind. Ich werde später zeigen, daß diese Ansicht nicht aufrecht zu erhalten ist. Nach meiner Auffassung hat das gesamte Linien-

¹⁾ ZS. f. Phys. 9, 131, 1922.

²⁾ Proc. Camb. Ph. Soc. 21 [2], 121, 1922; Proc. Roy. Soc. (A) 101, 1, 1922.

spektrum sekundären Ursprung. Der Zerfall des Atomkernes hat in erster Linie nur die Emission des kontinuierlichen Spektrums und der γ -Strahlen zur Folge. Beim Zerfall irgend eines Kernes werden γ -Strahlen bestimmter Frequenzen ausgesandt und ferner ein Elektron, dessen Geschwindigkeit für den Kern nicht charakteristisch ist, weil sie nur innerhalb gewisser Grenzen zu liegen braucht. Für eine ganz allgemeine Vorstellung über den β -Strahlzerfall braucht man auf den Zusammenhang zwischen diesen beiden Prozessen nicht näher einzugehen. An einer anderen Stelle habe ich jedoch die Theorie gerade in dieser Beziehung etwas präzisiert¹⁾. Ich habe dort Beweise dafür gebracht, daß die Emission der γ -Strahlen von dem Übergang zwischen diskreten, den Bau des Kernes charakterisierenden Energiestufen herrührt. Es scheint auch, daß die γ -Strahlen vor dem Kernzerfall emittiert werden. Das genauere Bild des Zerfalles ist somit folgendes: Ein Elektron im Kern soll sich infolge des vorhergehenden Kernzerfalls auf einem der höheren möglichen Energieniveaus befinden. Nach einer gewissen Zeit, die nur von Zuständen im Kern abhängt, möge es auf eine niedrigere Energiestufe fallen. Während dieses Vorganges sendet es γ -Strahlen aus. Einige dieser γ -Strahlen erleiden Absorption im Elektronensystem des Atoms d. h. in den K -, L -, M -... Niveaus, und bewirken Emission von Elektronen bestimmter Energien. Ist ν die Frequenz der γ -Strahlung, so sind $h\nu - K_{\text{abs.}}$, $h\nu - L_{\text{abs.}}$... die Energien der Elektronen, die aus den K -, L -... Niveaus ausgelöst werden, wo $K_{\text{abs.}}$, $L_{\text{abs.}}$ die auslösende Arbeit darstellen und aus Röntgenstrahl-Absorptionsversuchen bekannt sind. Diese Elektronen konstituieren das Linienspektrum. Das Elektron im Kern kann, nachdem es verschiedene Energiestufen durchlaufen hat, endlich auf ein instabiles Niveau gelangen, von dem aus es den Kern mit einer Geschwindigkeit verläßt, die als abhängig sowohl von anderen Faktoren als von den den stationären Zustand charakterisierenden betrachtet werden muß. Diesen Elektronen entspricht das kontinuierliche Spektrum. Über diese letzten Prozesse kann ohne weiteres Versuchsmaterial nichts mehr ausgesagt werden.

Diese Theorie ist fundamental verschieden von der Meitnerschen Theorie. Fr. Meitner nimmt an, daß die primäre Erscheinung des Zerfalls in der Emission eines Elektrons großer Geschwindigkeit bestehe. Es soll hier dieses Elektron, um es von anderen Elektronen im Atom zu unterscheiden, das Zerfallselektron genannt werden. Seine Energie hat immer einen bestimmten Wert E_1 . In gewissen

¹⁾ l. c.

Fällen wird das Zerfallselektron, ohne irgendwelchen Energieverlust zu erleiden, ausgenommen den Energieverlust infolge der Anziehung des Kernes, das Atom verlassen, und zwar sei seine Energie dann E_2 ; das magnetische Spektrum muß eine Linie aufweisen, die diesem Elektron entspricht. In anderen Fällen soll dieses Zerfallselektron γ -Strahlen emittieren, und zwar habe die Energie dieser Strahlung zufolge einer speziellen Annahme den Wert E_2 . Ihre Frequenz ist somit $\nu = E_2/h$. Das Zerfallselektron besitzt also gerade genügend Energie, um die Atomoberfläche zu erreichen. Die γ -Strahlen können wiederum im Atom absorbiert werden und Anlaß zur Emission sekundärer Elektronen geben. Diese Sekundärelektronen kommen, wie auch in meiner Theorie, aus den K -, L -, M -... Niveaus, haben bestimmte Geschwindigkeiten und bilden das Linienspektrum. Die gesamte β -Strahlemission soll also nur aus einer Reihe von Gruppen bestimmter Geschwindigkeiten bestehen, die Linien im magnetischen Spektrum von den Energien

$$E_2 \quad h\nu - K_{\text{abs.}} \quad h\nu - L_{\text{abs.}} \quad \dots$$

oder da $E_2 = h\nu$ angenommen wird

$$h\nu \quad h\nu - K_{\text{abs.}} \quad \dots \text{ geben.}$$

Der Energie E_2 im obigen Schema entspricht das primäre Zerfallselektron, die übrigen Energien beziehen sich auf die Sekundärelektronen.

Ein schwerwiegender Einwand gegen die hier skizzierte Meitnersche Theorie ist der, daß sie keinen Raum läßt für die Erklärung des kontinuierlichen Spektrums, dessen Existenz einwandfrei für Radium B und C von Chadwick¹⁾ gezeigt wurde, und zwar durch die Zählmethode. Vergleiche die mit der photographischen Methode zwischen $\text{Ra B} + \text{C}$ und $\text{Th C} + \text{D}$ angestellt wurden, zeigten die Anwesenheit dieses kontinuierlichen Spektrums auch im Fall von Thorium C und D. Das kontinuierliche Spektrum ist also ein wesentlicher Bestandteil des Zerfallsphänomens und muß unbedingt berücksichtigt werden.

Nach den Meitnerschen Vorstellungen kann die Zahl der in der Zeiteinheit von einer gegebenen Anzahl zerfallender Atome emittierten Elektronen und auch die entsprechende Energiemenge, welche in den emittierten β - und γ -Strahlen erscheint, berechnet werden. Die so berechneten Werte stimmen jedoch keineswegs mit den experimentell gefundenen überein²⁾. In Anbetracht der Schwierigkeit solcher Messungen soll auf die Diskrepanz zwischen Theorie und Experiment nicht zu großes Gewicht gelegt werden, um so mehr, als die hier

¹⁾ Verh. d. D. Phys. Ges. 16, 383, 1914.

²⁾ Moseley, Proc. Roy. Soc. (A) 87, 230, 1912. Danysz u. Duane, Le Radium 9, 417, 1912. Moseley u. Robinson Phil. Mag. 28, 327, 1914.

diskutierte Theorie direkt an Hand des experimentellen Materials der Linienspektren geprüft werden kann.

Ist durch die Anwesenheit von Elektronengruppen von Energien $h\nu - K_{\text{abs.}} \dots$ usw., die Existenz einer γ -Strahlung von der Frequenz ν einwandfrei festgestellt, so muß nach der Meitnerschen Theorie auch eine Primärlinie von der Energie $h\nu$ vorhanden sein. Es ist klar, daß Sekundärlinien dieser Energie in der äußeren Elektronenhülle des Atoms durch die γ -Strahlen ausgelöst werden, aber ihrer geringen Intensität wegen entziehen sie sich in den meisten Fällen der Beobachtung. Soll die Meitnersche Theorie bewiesen werden, so müssen Linien dieser Energie mit größerer Intensität auftreten als durch die Annahme eines sekundären Ursprungs zu erklären ist. Nun sind im größten Teil des Radium C- und des Thorium D-Spektrums Linien, die als Primärlinien aufgefaßt werden könnten, überhaupt nicht vorhanden. Meitner glaubte im Thorium B-Spektrum eine Primärlinie gefunden zu haben. Nach meinen Versuchen, die, wie ich glaube, mit größerer Genauigkeit ausgeführt wurden, folgt mit Sicherheit, daß diese Linie ihren Ursprung im M -Niveau hat, also eine Sekundärlinie ist. Ich habe keine Linie von der Energie $h\nu$ finden können. Im Spektrum von Radium B sind zwei Linien vorhanden, deren Energien den $h\nu$ zweier γ -Strahlen entsprechen. Nach der Meitnerschen Theorie müßten diese Elektronen aus dem Kern stammen, d. h. Zerfallselektronen sein. Diese zwei Linien könnten somit im Sekundärspektrum das durch die γ -Strahlen vom Radium B im Blei als Sekundärstrahler erzeugt wird, nicht auftreten. Der experimentelle Befund zeigt das Gegenteil. Rutherford, Robinson und Rawlinson¹⁾ konstatierten das Auftreten einer dieser Linien ($H_p = 1815$) in ihren Arbeiten über sekundär erregte β -Strahlspektren. Ich habe ihre Versuche wiederholt und neben dieser Linie auch noch die andere ($H_p = 2295$) gefunden. Auch hier also versagt die Meitnersche Theorie.

In den Teilen des β -Strahlspektrums von Radium B, Radium D und Thorium D, die von den langsameren Elektronen erzeugt werden, sind Linien zu finden, deren Energie sehr nahe mit den $h\nu$ entsprechenden γ -Strahlen übereinstimmen. Diese Energien sind eher ein wenig kleiner als die γ -Strahlenergien und haben die Größe von etwa 40000 Volt. Das Auftreten dieser Linien wird als eines der wichtigsten Argumente zugunsten der Meitnerschen Vorstellungen aufgeführt. Ich möchte dem gegenüberstellen, daß sich die Existenz dieser Linien ebenso leicht erklären läßt, wenn man annimmt, sie

¹⁾ Phil. Mag. 28, 281, 1914.

stammen sekundär aus einem äußeren Niveau. Gerade für γ -Strahlen niedrigerer Frequenz ist das Auftreten von Sekundärlinien zu erwarten, die aus den äußeren Ringen stammen. Ihre Energien würden etwas kleiner als das entsprechende $h\nu$ des γ -Strahls sein. Für höhere Frequenzen nimmt die Wahrscheinlichkeit einer Umwandlung ab und ist gering selbst für die sehr starke Strahlung des Thorium B. Diese Linien nehmen wegen der geringen Energie der γ -Strahlung eine Ausnahmestellung ein. Es scheint mir richtiger, zuerst zu versuchen, die Entstehung dieser Linien durch die Umwandlung der γ -Strahlen in der Elektronenhülle zu erklären. Ich habe diese drei in Frage kommenden Linien noch besonders untersucht und habe gezeigt, daß ihre Intensitäten von der Größenordnung sind, die von Sekundärlinien dieser Art zu erwarten ist. Dabei habe ich allerdings gefunden, daß ihre Energie näher an $h\nu$ liegt, als man erwarten würde, falls sie aus dem N -Niveau stammen sollten. Die Differenz zwischen $h\nu$ und $h\nu - N_{abs.}$ ist jedoch sehr klein (nur etwa 1 Proz.) und die Entscheidung der Herkunft dieser Elektronen deshalb nicht so einfach. Es ist möglich, daß diese Elektronen doch aus dem N -Niveau stammen und nahe Begleiter haben, die noch aus weiter entfernten Ringen kommen. Diese Linien des magnetischen Spektrums wären somit komplexer Art. Die Vermutung wird gestützt durch die Beobachtung, der zufolge sich der Schwerpunkt dieser Linien mehr und mehr nach Stellen höherer Energie verschiebt, wenn die Expositionsdauer zunimmt.

Frl. Meitners Theorie ist ein sehr interessanter Versuch, eine einfache Erklärung des β -Zerfalls zu geben. Die experimentellen Tatsachen fügen sich jedoch nicht in den Rahmen dieser Theorie ein, und es hat allen Anschein, daß sich die einfache Analogie zwischen α - und β -Zerfall nicht aufrecht erhalten läßt. Der β -Zerfall ist ein bedeutend komplizierterer Vorgang und die allgemeinen Andeutungen, die ich über denselben gemacht habe, scheinen mir zurzeit den geringsten Zwang zu erfordern.

Cambridge (England), Cavendish Laboratory.