

# Zur Interpretation der niederangeregten Zustände von $\text{Po}^{214}$ ( $\text{RaC}'$ )\*

Von C. MAYER-BÖRIGKE und G. LÜHRS

Aus dem Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg

(Z. Naturforsch. 15 a, 103—107 [1960]; eingegangen am 20. Dezember 1959)

The  $K/L$  and  $K/M$  conversion ratios of the 769 keV and 609 keV  $\gamma$ -radiations of  $\text{Po}^{214}$  have been measured with a double focusing  $\beta$ -spectrometer. For the  $K/L$  ratios we obtained the values  $3,95 \pm 0,2$  and  $3,43 \pm 0,1$ .

According to the tables of ROSE, both transitions are very pure E 2 radiations. This coincides with the conclusions of the theory of collective quadrupolvibrations. This theory—in the modified form of WILETS and JEAN—was used for the interpretation of the low-excited levels (609, 1378 and 1416 keV) of  $\text{Po}^{214}$ .

Following this model of  $\gamma$ -unstable quadrupolvibrations one obtains for the nuclear equilibrium deformation the value  $\beta_0 \approx 6,7 \cdot 10^{-2}$ .

## 1. Ziel der Arbeit

In einer vorangehenden Arbeit<sup>1</sup> wurde gezeigt, daß die ersten angeregten Niveaus von  $\text{Po}^{214}$  ( $\text{RaC}'$ ) bei 609, 1378 und 1416 keV als Kollektivzustände interpretiert werden können, die durch Quadrupolvibrationen der Kernoberfläche<sup>2–4</sup> zustande kommen. Abb. 1 gibt einen Ausschnitt aus dem Zerfallschema von  $\text{RaC}$  mit Angaben über Spin und Parität dieser Niveaus<sup>1</sup>. Nach (I) ist der  $\gamma$ -Zerfall der angeregten Zustände bei  $E_1 = 609$  keV und  $E_2 = 1378$  keV nicht verträglich mit der Annahme von Ein-Teilchen-Übergängen. Die experimentellen Daten über die  $\gamma$ -Strahlung ordnen sich aber völlig in den Rahmen der allgemeinen Gesetzmäßigkeiten ein, die von SCHARFF-GOLDHABER und WENESER<sup>4</sup> für die niederangeregten Niveaus der Kerne im Gebiet der Neutronenzahlen  $36 \leq N \leq 88$  gefunden wurden und die durch Annahme kollektiver Quadrupolschwingungen modellmäßig verstanden werden können. Nach (I) wird daher im Sinne dieses Modells das  $2^+$ -Niveau bei 609 keV als Ein-Phonon-Zustand und das  $2^+(4^+)$ -Niveau bei 1378 keV als entarteter Zwei-Phononen-Zustand aufgefaßt. Das  $0^+$ -Niveau bei 1416 keV läßt sich nach (I) ebenfalls als Zwei-Phononen-Zustand interpretieren.

Nach dem Vibrationsmodell sollte der 769-keV-Übergang zwischen den beiden ersten angeregten Niveaus aus reiner<sup>3, 5</sup> oder nahezu reiner<sup>4</sup> E2-Strah-

lung bestehen (M1-Verbot). Ziel dieser Arbeit ist es, diese Voraussage experimentell nachzuprüfen (Abschnitt 2–4). Außerdem soll das Modell für die Vibrationszustände von  $\text{Po}^{214}$  näher diskutiert werden (Abschnitt 5).

## 2. Methode

Als Methode zur Bestimmung des Strahlungscharakters der 769-keV-Strahlung diente die Messung der Konversionsverhältnisse, insbesondere die Bestimmung des  $K/L$ -Verhältnisses.

$\text{Bi}^{214}$  ( $\text{RaC}$ ) zerfällt mit einer Halbwertszeit von 19,7 min<sup>6</sup> fast ausschließlich durch  $\beta$ -Übergang in  $\text{Po}^{214}$  ( $\text{RaC}'$ ). Dabei führen etwa 80% der Zerfälle in verschiedene angeregte Niveaus des Tochterkerns und geben Anlaß zu einem linienreichen  $\gamma$ -Spektrum<sup>1</sup> und zu einem entsprechend komplizierten Konversionslinienspektrum. Die sehr zahlreichen Konversionslinien sind dem komplexen  $\beta$ -Kontinuum überlagert. Eine hochauflösende, genaue Energiebestimmung der einzelnen Konversionslinien erfolgte u. a. durch MLADJENOVIC und SLÄTIS<sup>7</sup>. Bei dieser und bei anderen ähnlichen Messungen<sup>8</sup> wurde mit photographischem Nachweis gearbeitet, so daß die photometrisch bestimmten Intensitäten der Konversionslinien recht unsicher sind. Daher ist auch der Wert für das Konversionsverhältnis der 769-keV-Strahlung, der in (I) mit als Grundlage für die Deutung des 1378-

\* Vorgetragen auf der Physikertagung in Berlin am 2. 10. 59; vgl. Phys. Verh. 10, 155 [1959].

<sup>1</sup> C. MAYER-BÖRIGKE, Z. Naturforsch. 14 a, 609 [1959]. Diese Arbeit wird im folgenden als (I) zitiert.

<sup>2</sup> K. ALDER, A. BOHR, T. HUUS, B. MOTTELSON u. A. WINTHER, Rev. Mod. Phys. 28, 432 [1956], Kap. V.

<sup>3</sup> L. WILETS u. M. JEAN, Phys. Rev. 102, 788 [1956].

<sup>4</sup> G. SCHARFF-GOLDHABER u. J. WENESER, Phys. Rev. 98, 212 [1955].

<sup>5</sup> A. BOHR, Dan. Mat. Fys. Medd. 26, No. 14 [1952].

<sup>6</sup> Vgl. z. B. J. M. HOLLANDER, I. PERLMANN u. G. T. SEABORG, Rev. Mod. Phys. 25, 409 [1953].

<sup>7</sup> M. MLADJENOVIC u. H. SLÄTIS, Ark. Fys. 8, 65 [1954].

<sup>8</sup> Ausführliche Literaturzitate sind in (I), Tab. 2, angegeben.



keV-Niveaus als Vibrationszustand diene, ebenfalls noch unsicher und bedarf einer genauen Überprüfung.

Zur präzisen Intensitätsbestimmung der dem Kontinuum überlagerten Konversionslinien ist man bei der Aufnahme des  $\beta$ -Spektrums auf eine Zählmethode angewiesen. Soweit derartige Messungen<sup>9-11</sup> vorliegen, sind die Ergebnisse jedoch, vermutlich infolge mangelnder Statistik, mit so großen Fehlern behaftet, daß ebenfalls keine eindeutige Aussage über den Strahlungscharakter des 769-keV-Übergangs möglich erscheint<sup>1</sup>.

Wir haben daher eine Neubestimmung des  $K/L$ -Verhältnisses der in Frage stehenden Strahlung mit einer Zählmethode vorgenommen und bei der Aufnahme der Meßkurven besonderen Wert auf einen möglichst kleinen statistischen Fehler der einzelnen Meßpunkte gelegt.

### 3. Versuchsanordnung und Ausführung der Versuche

Die Messungen wurden mit einem doppelfokussierenden  $\beta$ -Spektrometer<sup>12</sup> mit variablem Magnetfeld durchgeführt. Als Quellen dienten dünnwandige Glasampullen von etwa 20 mm Länge und 0,7–1 mm Durchmesser. Es gelang nach längeren Versuchen, hinreichend druckfeste Ampullen mit Wandstärken zwischen 6 und 10  $\mu$  herzustellen, diese mit etwa 10 mC Rn<sup>222</sup> zu füllen und abzuschmelzen. Außerdem wurde an einem Ende der Ampulle ein dünner Platindraht eingeschmolzen, um das Innere derselben auf Erdpotential legen zu können. Die Verwendung des relativ kurzlebigen aktiven Niederschlags der Radium-Emanation als praktisch trägerfreie Quelle kam bei unseren Untersuchungen nicht in Frage, da die große Anzahl von Meßpunkten und die erforderliche statistische Genauigkeit für jede Meßreihe vielstündige Meßdauern mit sich brachte. Die Messungen wurden mit vier Ampullen mit jeweils verschiedener Wandstärke (1,7–2,6 mg/cm<sup>2</sup>) ausgeführt, um so eventuelle Einflüsse der von den  $\beta$ -Teilchen durchsetzten Ampullenwandung erkennen zu können. Die Halbwertbreite der Konversionslinien betrug (für  $E_\beta \geq 200$  keV) je nach verwendeter Ampulle und Energiebereich 0,5–0,8%. Im Vergleich dazu beträgt die Halbwertbreite für eine trägerfreie Quelle ähnlicher Abmessungen unter gleichen Bedingungen etwa 0,3%.

Als Detektor für die  $\beta$ -Teilchen diene ein Anthrazen-kristall (25 mm Durchmesser  $\times$  10 mm), der über einen 75 cm langen Lichtleiter mit einem außerhalb des Magnetfeldes befindlichen, gut abgeschirmten Multiplier

(Dumont 6292) in optischem Kontakt stand. Die Gesamtauflösungszeit der nachfolgenden Elektronik, bestehend aus Linearverstärker, Diskriminator und Zählgerät, betrug etwa 1,5  $\mu$ sec. Bei den verwendeten Präparatstärken und der gewählten Transmission des Spektrometers lagen die Zählraten immer unter  $2 \cdot 10^4$  Impulsen/sec, meist sogar wesentlich darunter. Da die z. Tl. intensitätsschwachen Konversionslinien über einem starken  $\beta$ -Kontinuum als Untergrund liegen, mußten für eine hinreichend gute statistische Genauigkeit  $10^5$ – $10^6$  Impulse pro Meßpunkt gezählt werden. Um weitere Fehlerquellen auszuschließen, wurden die Meßzeiten mittels eines Quarz-Zeitgebers auf besser als  $10^{-4}$  eingehalten. Der Abstand der Meßpunkte betrug, je nach Meßbereich, 0,1–0,2% des jeweiligen  $BQ$ -Wertes.

Für die Auswertung der Messungen wurden der (vernachlässigbare)  $\gamma$ -Untergrund im Anthrazen-Zähler, der Energieverlust der Elektronen in der Glaswand der Ampullen (3–5 keV für  $E_\beta \geq 200$  keV) und die Zählverluste im Diskriminator experimentell ermittelt und, soweit erforderlich, als Korrektur berücksichtigt.

### 4. Ergebnisse

Als Test für die Zuverlässigkeit der theoretischen Konversionsverhältnisse nach ROSE<sup>13</sup> bei Po<sup>214</sup> wurde zunächst das  $K/L$ - und das  $K/M$ -Konversionsverhältnis der 609-keV-Strahlung möglichst genau gemessen (Abb. 3). Da es sich bei dieser Strahlung um einen E2-Übergang handelt, ist ein unmittelbarer Vergleich der theoretischen und der experimentellen Werte möglich. Wie man Tab. 1 entnimmt, ergab sich sehr gute Übereinstimmung.

In Tab. 1 sind die aus insgesamt sechs unabhängigen Messungen (vgl. z. B. Abb. 2 u. 3) mit verschiedenen Präparaten ermittelten Konversionsverhältnisse zusammengestellt. Die Auswertung erfolgte nach verschiedenen Methoden und lieferte übereinstimmende Resultate.

### 5. Diskussion

Wie man Tab. 1 entnimmt, handelt es sich beim 769-keV-Übergang, in Übereinstimmung mit den Voraussagen des Vibrationsmodells, um sehr reine E2-Strahlung.

Im folgenden soll das Niveauschema der als Vibrationszustände interpretierten Po<sup>214</sup>-Niveaus (vgl. Abb. 1) noch eingehender diskutiert werden. In (I) war schon gezeigt worden<sup>14</sup>, daß sich die experimen-

<sup>9</sup> G. D. LATYSHEV, Rev. Mod. Phys. **19**, 132 [1947].

<sup>10</sup> M. MIWA u. S. KAGEYAMA, J. Phys. Soc., Japan **5**, 416 [1950].

<sup>11</sup> K. O. NIELSEN, O. B. NIELSEN u. M. A. WAGGONER, Nucl. Phys. **2**, 476 [1957].

<sup>12</sup> H. DANIEL u. G. LÜHRS, noch unveröffentlicht.

<sup>13</sup> M. E. ROSE, Internal Conversion Coefficients, North Holland Publishing Comp., 1958.

<sup>14</sup> Die Argumentation in (I) ist durch die experimentellen Ergebnisse dieser Arbeit gesichert.

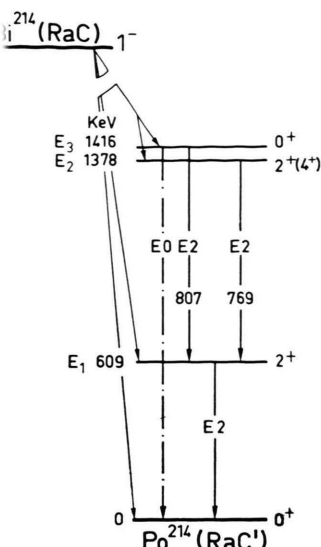
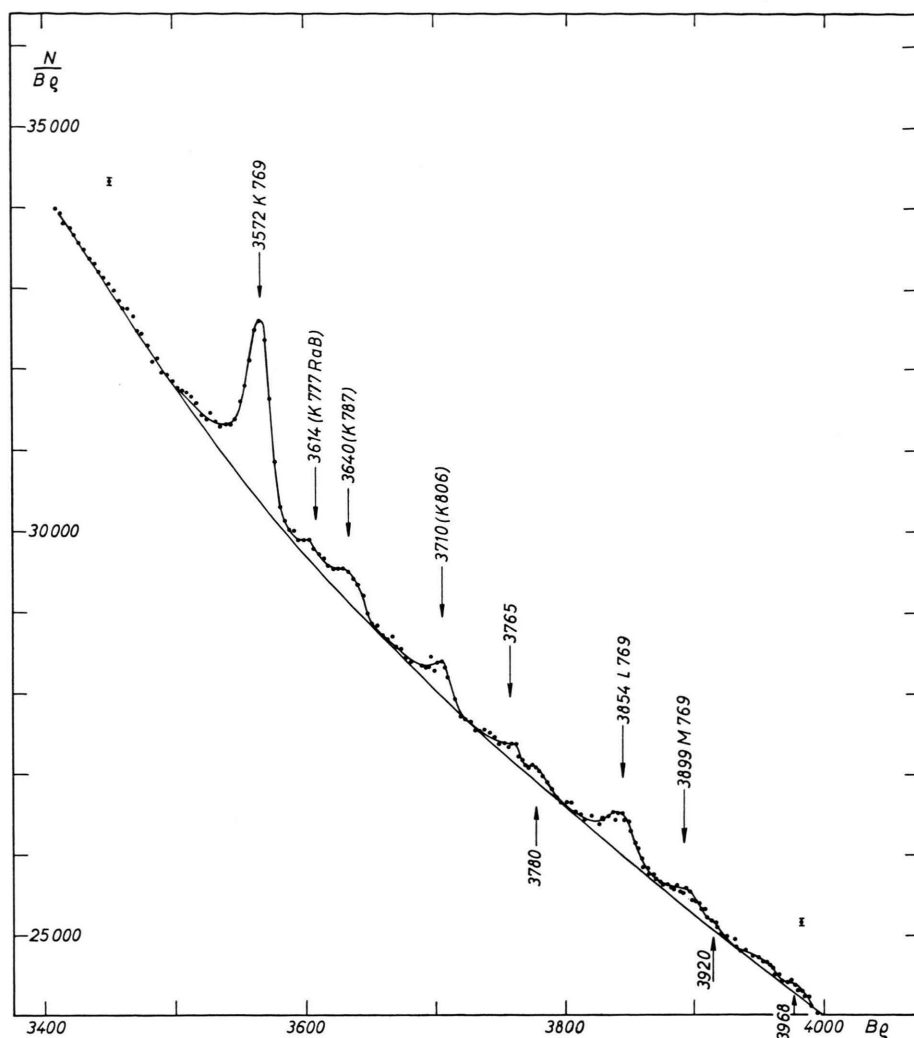


Abb. 1. Ausschnitt aus dem Zerfallsschema  $\text{Bi}^{214} - \text{Po}^{214}$  mit den als Vibrationsniveaus interpretierten Zuständen von  $\text{Po}^{214}$ .

Abb. 2. Ausschnitt aus dem  $\beta^-$ -Spektrum einer Radium-Emanationsquelle mit den Konversionslinien der 769-keV- $\gamma$ -Strahlung von  $\text{Po}^{214}$  ( $\text{RaC}'$ ). Die Pfeile oberhalb der Meßkurve markieren die Lage der von MLADJENOVIC und SLÄTIS<sup>7</sup> gefundenen Konversionslinien. Die Pfeile unterhalb der Meßkurve deuten auf bisher unbekannte schwache Strukturen hin, soweit diese in mehreren Messungen eindeutig gefunden wurden.



tell bekannten Eigenschaften der Multipolstrahlungen, die von den einzelnen Niveaus ausgehen, in den Rahmen der Voraussagen des Vibrationsmodells einfügen. In seiner einfachsten Form, bei welcher sphärische Gleichgewichtsgestalt und harmonisches Deformationspotential für den Kern angenommen werden (vgl. Anm. <sup>2</sup>), liefert das Modell eine äquidistante Niveaufolge. Das erste angeregte Niveau hat dabei Spin und Parität  $2^+$ , das zweite ist entartet und hat Spins und Paritäten  $0^+$ ,  $2^+$  und  $4^+$ . Diese Niveaufolge ist offenbar für den Fall von  $\text{Po}^{214}$  durch eine Modifikation des einfachen Modells noch so zu korrigieren, daß das Energieverhältnis  $E_2/E_1$  der beiden ersten angeregten Niveaus besser in Einklang mit dem experimentellen Werte 2.26 kommt und daß die Ent-

artung des zweiten Zustands aufgehoben wird in dem Sinne, daß das  $0^+$ -Niveau nach oben rückt, wie man es bei  $\text{RaC}'$  findet.

Da  $\text{Po}^{214}$  außerhalb der doppelt-magischen  $\text{Pb}^{208}$ -Schale sechs Außennukleonen hat, kann angenommen werden, daß der Kern nur näherungsweise Kugelgestalt hat. Es ist denkbar, daß die Außennukleonen durch ihre Kopplung an die Kernoberfläche schon Verzerrungen der Kugelgestalt bewirken, die zu einer kleinen Gleichgewichtsdeformation  $\beta_0$  noch ohne Bevorzugung einer bestimmten Ellipsoidgestalt führen. Das einfachste Vibrations-Modell, das einer solchen Gleichgewichtsdeformation Rechnung trägt, ist wohl dieses, daß man um  $\beta_0$  herum wieder harmonische Quadrupolschwingungen annimmt. Diese

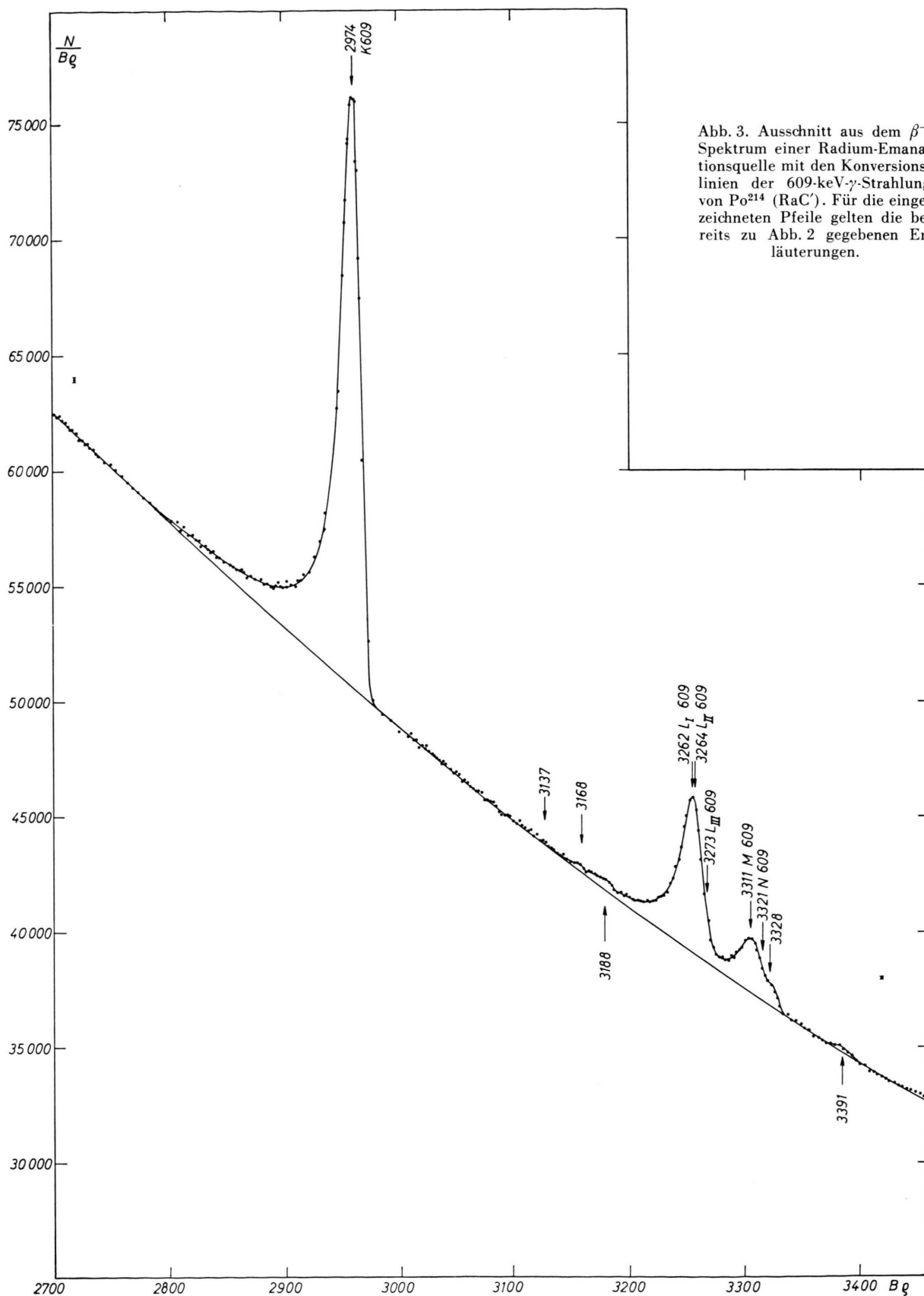


Abb. 3. Ausschnitt aus dem  $\beta^-$ -Spektrum einer Radium-Emanationsquelle mit den Konversionslinien der 609-keV- $\gamma$ -Strahlung von  $Po^{214}$  (RaC'). Für die eingezeichneten Pfeile gelten die bereits zu Abb. 2 gegebenen Erläuterungen.

$\gamma$ -Energie keV	Konversions- verhältnis experimentell	Konversions- verhältnis theoretisch M1 E2		Zu- ordnung
609	$\frac{K}{L} = 3,43 \pm 0,1$	6,02	3,44	E2
	$\frac{K}{M} = 9,2 \pm 1,0$	12,7	9,0	
769	$\frac{K}{L} = 3,95 \pm 0,2$	5,74	4,05	E2
	$\frac{K}{M} = 10,5 \pm 1,5$	12,3	10,6	

Tab. 1. Zusammenstellung der experimentellen und theoretischen Konversionsverhältnisse der 609- und 769-keV- $\gamma$ -Strahlungen von  $\text{Po}^{214}$ .

Überlegungen stehen in Einklang mit dem modifizierten Vibrationsmodell nach WILETS und JEAN<sup>3</sup>, das wir daher der weiteren Diskussion zugrunde legen wollen. Bei diesem Modell sind auch, zumindest qualitativ, die oben erwähnten Forderungen an die Korrektur der äquidistanten Niveaufolge des einfachen Modells erfüllt<sup>15</sup>. Die Autoren nehmen an, daß es sich bei den Vibrationen um  $\gamma$ -instabile, d. h. gestaltinstabile Quadrupolschwingungen der Kernoberfläche bei nicht ganz verschwindender Gleichgewichtsdeformation  $\beta_0$  handelt. Das Modell verändert die Energieabstände der einzelnen Niveaus im gewünschten Sinne ohne die charakteristischen Eigenschaften der Multipolstrahlungen, insbesondere der vom zweiten angeregten Niveau ausgehenden, zu modifizieren, so daß die Übereinstimmung mit den experimentellen Eigenschaften der  $\text{Po}^{214}$ - $\gamma$ -Strahlungen (wie beim einfachen Modell) erhalten bleibt. Das Deformationspotential hat bei WILETS und JEAN die Form  $V(\beta) = \frac{1}{2} C (\beta - \beta_0)^2$  und geht daher für  $\beta_0 = 0$  in den einfachen Fall mit sphärischer Gleichgewichtsgestalt des Kerns und äquidistanten Vibrationsniveaus über. Bei der Größe  $\beta$  handelt es sich um eine der beiden Kollektivkoordinaten (vgl. Anm. 3), die den Deformationszustand der Kernoberfläche beschreiben;  $\beta$  ist ein Maß für die Abweichung von der Kugelsymmetrie, legt jedoch nicht im einzelnen die Gestalt der Quadrupoldeformation fest. Die Konstante  $C$  ist ein Maß für die Deformierbarkeit des Kerns. WILETS und JEAN benutzen zur Kennzeich-

nung der Gleichgewichtsdeformation außerdem eine reduzierte Größe  $x_0$ , die mit  $\beta_0$  durch einen Proportionalitätsfaktor verknüpft ist:  $x_0 = (B C / \hbar^2)^{1/4} \cdot \beta_0$ ;  $B$  ist der Massenparameter der Kollektivbewegung.

Zu klären ist noch, wie genau die experimentellen Energieverhältnisse in Abb. 1 durch die Theorie reproduziert werden können. Es ist also die Frage nach einem  $x_0$ , für welches das zugehörige theoretische Energieniveauschema<sup>15</sup> mit dem experimentellen möglichst genau übereinstimmt. Gute Übereinstimmung erhält man für  $x_0 = 1,55$ . Bei diesem Wert weicht das theoretische  $E_2/E_1$ -Verhältnis noch um etwa  $-6\%$  und das  $E_3/E_2$ -Verhältnis noch um etwa  $+4\%$  vom experimentellen Wert ab.

Aus der Energie des ersten angeregten  $2^+$ -Niveaus bei 609 keV und aus der bekannten E2-Übergangswahrscheinlichkeit<sup>16</sup> der von diesem Niveau ausgehenden  $\gamma$ -Strahlung kann man im Rahmen des Modells die zu  $x_0 = 1,55$  gehörige Gleichgewichtsdeformation abschätzen. Man erhält  $\beta_0 \approx 6,7 \cdot 10^{-2}$ . Das bedeutet, daß bei  $\text{Po}^{214}$  die Abweichungen von der Kugelgestalt, die zur Erklärung des Termschemas angenommen werden, nur  $1-2\%$  des Kugeldurchmessers betragen und daher klein sind, wie man es bei den verhältnismäßig wenigen Außennukleonen erwartet. Der angegebene Wert von  $\beta_0$  ist wesentlich kleiner als die entsprechenden Werte für Kerne mit Rotationsspektren<sup>17</sup>, bei denen man eine bestimmte fixierte Gestalt annimmt. Der Wert von  $\beta_0^2 \approx 4,5 \cdot 10^{-3}$  für  $\text{Po}^{214}$  fügt sich glatt in den Verlauf der bekannten  $\beta_0^2$ -Werte ein, wenn man diese z. B. als Funktion der Neutronenzahl aufträgt<sup>18</sup>.

SCHARFF-GOLDHABER<sup>19</sup> hat gezeigt, daß man dicht unterhalb von  $Z = 86$  gg-Kerne mit Vibrationszuständen erwarten kann. Unsere Untersuchungen bestätigen dies für den Fall von  $\text{Po}^{214}$  und unterstützen damit die Vermutung, daß unterhalb des Gebiets der „Rotationskerne“ mit  $Z \geq 88$  ein Gebiet mit „Vibrationskernen“ liegt.

Wir danken Herrn Dr. J. JÄNECKE und Herrn W. EHRHARD für die bei der Abfüllung und Herstellung der dünnwandigen Emanationspräparate geleistete Hilfe.

Bei den Messungen wurden Geräte der Deutschen Forschungsgemeinschaft mitbenutzt.

<sup>15</sup> Vgl. Fig. 3 bei WILETS und JEAN<sup>3</sup>.

<sup>16</sup> Vgl. Anm. 2, Table V.6.

<sup>17</sup> Vgl. Anm. 2, Table V.2.

<sup>18</sup> Vgl. z. B. D. L. HILL, Handb. d. Physik, Bd. XXXIX, S. 223.

<sup>19</sup> G. SCHARFF-GOLDHABER, Phys. Rev. **103**, 837 [1956].