

(Mitteilung aus dem Max Planck-Institut, Berlin-Dahlem.)

Mechanische Momente von $^{171}, ^{173}\text{Yb}$, Quadrupolmoment von ^{173}Yb und Häufigkeitsverhältnis von $^{173}\text{Yb}/^{171}\text{Yb}$.

Von H. Schüler, J. Roig¹⁾ und H. Korsching²⁾ in Berlin-Dahlem.

Mit 4 Abbildungen. (Eingegangen am 23. September 1938.)

Aus der Analyse der Hyperfeinstrukturbilder der drei Yb I-Linien λ 6489, 6799, 7699 hat sich folgendes ergeben:

$$\begin{array}{l} \text{das mechanische Moment von } ^{171}\text{Yb } i = 1/2, \\ \text{von } ^{173}\text{Yb } i = 5/2, \end{array}$$

also Sprung um 2 Einheiten. — Die Terme von ^{173}Yb liegen umgekehrt. — Das Quadrupolmoment von ^{173}Yb ist $q = +3,9 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2$ (verlängerter Kern). — Dieses Quadrupolmoment ist nach ^{175}Cp von den bisher bestimmten Quadrupolmomenten das größte. Aus Tabelle 1, die alle bekannten Quadrupolmomente wiedergibt, lassen sich gewisse Gesichtspunkte über die Systematik im Kern entnehmen. — Das Häufigkeitsverhältnis der Isotope $^{173}\text{Yb}/^{171}\text{Yb}$ wird zu 1,1₄ bestimmt, im Gegensatz zu den bisher vorliegenden Schätzungen von Aston, aus denen sich der Wert 1,89 ergibt.

Meggers und Scribner³⁾ haben das Bogen- und erste Funkenspektrum von Yb untersucht; es ist ihnen gelungen, die wichtigsten Terme des Yb I festzulegen. Dadurch war prinzipiell die Möglichkeit gegeben, aus den Hyperfeinstrukturbildern eingeordneter Yb-Linien die verschiedenen Kernmomente (mechanisches, magnetisches und Quadrupolmoment) der ungeraden Yb-Isotope ^{171}Yb , ^{173}Yb zu bestimmen, vorausgesetzt, daß die Hyperfeinstrukturaufspaltungen groß genug sind und daß die Komponenten in den Strukturbildern günstig liegen, so daß man die notwendigen Bestimmungsstücke beobachten kann.

Die nachstehende Arbeit wird zeigen, daß es trotz komplizierter Hyperfeinstrukturbilder mit zahlreichen Überlagerungen von Komponenten möglich ist, soviel Größen festzulegen, daß man alle Kernmomente angeben kann. Hier soll im wesentlichen vom mechanischen Moment und vom Quadrupolmoment berichtet werden, eine weitere Mitteilung wird sich mit der Berechnung der magnetischen Momente befassen.

Wie Fig. 1 zeigt, liegen die Übergänge ($6s\ 7s$) 3S_1 nach ($6s\ 6p$) $^3P_{0,1,2}$ in einem Bereich, der für Untersuchungen mit Perot-Fabry-Etalon günstig

¹⁾ Paris, zur Zeit Berlin-Dahlem. — ²⁾ Stipendiat der Deutschen Forschungsgemeinschaft. — ³⁾ W. F. Meggers, B. F. Scribner, Journ. of Res., Bur. of Stand. **19**, 651, 1937.

ist. Aus den Strukturbildern dieser drei Linien lassen sich die Aufspaltungen des 3S_1 -, 3P_1 - und 3P_2 -Terms bestimmen. Die Untersuchungen

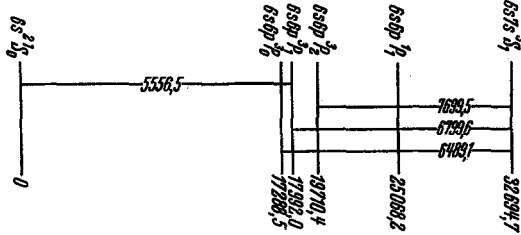


Fig. 1.

sind mit Perot-Fabry-Etalon und einem Zeisschen Dreiprismenspektrographen als Vorzerlegungsapparat durchgeführt worden. Die Lichtquelle

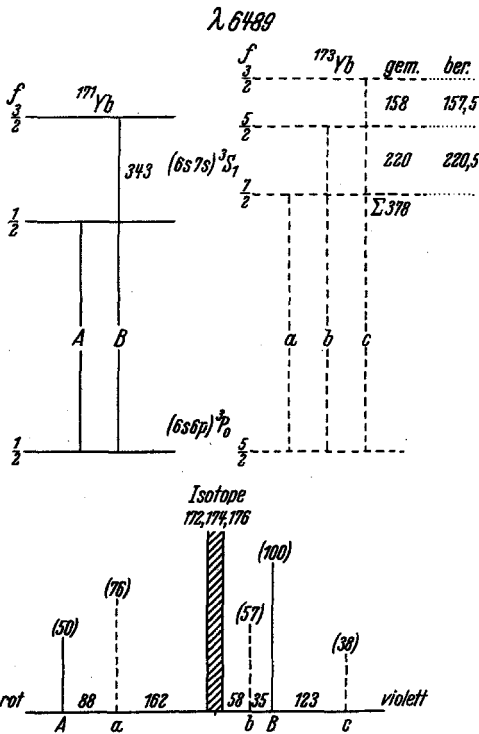


Fig. 2.

war eine mit flüssiger Luft gekühlte Hohlkathodenentladungsröhre¹⁾. Für die Untersuchung stand uns 1 g reines Ytterbiumbromat von der Auer-Gesellschaft zur Verfügung. Für die Aufnahmen benutzten wir die Plattensorten: Agfa 750 hart, Agfa 700 hart, Agfa spektral rot hart, die mit Ammoniaklösung hypersensibilisiert wurden. Die Agfa-Platten sind wegen ihres feinen Kornes für Intensitätsmessungen besonders geeignet. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in den folgenden Figuren wiedergegeben.

Fig. 2 zeigt Strukturbild und Termschema von $\lambda 6489$. Da der untere Term

¹⁾ H. Schüler, Th. Schmidt, ZS. f. Phys. 96, 485, 1935; H. Schüler, H. Gollnow, ebenda 93, 611, 1935.

den j -Wert Null hat, tritt nur die Aufspaltung des 3S_1 -Terms in Erscheinung, dadurch vereinfacht sich die Zuordnung der verschiedenen Komponenten zu den Isotopen wesentlich. Aus der Figur ist zu ersehen, wie die Zuordnung vorgenommen wurde. Alles, was sich auf ^{173}Yb bezieht, ist gestrichelt gezeichnet. Die Abstände sind in 10^{-3} cm^{-1} angegeben, die Intensität wird durch die Länge der Komponenten und die darüber geschriebene Zahl veranschaulicht. Die starke zentrale Komponente enthält nur die geraden Isotope (vor allem 172, 174, 176 mit etwa $\frac{3}{4}$ der gesamten Intensität). Aus der Tatsache, daß ^{171}Yb nur in zwei Komponenten aufspaltet, folgt für das mechanische Moment zwangsläufig der Wert:

$$\underline{^{171}\text{Yb}: i = 1/2.}$$

Für das mechanische Moment von ^{173}Yb gibt es zwei Bestimmungsmöglichkeiten.

Erstens das Verhältnis der Abstände der Hyperfeinstrukturterme; denn es kann, da die Ladungsverteilung des 3S_1 -Terms kugelsymmetrisch ist, keine Quadrupolwirkung auftreten, und es läßt sich deshalb mit Hilfe der Intervallregel der Wert für i bestimmen. Bei einer Gesamtaufspaltung von $378 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ berechnet sich nach der Intervallregel für die verschiedenen Spins der größere Teilabstand zu:

i	Nach Intervallregel	Gemessen
$\frac{3}{2}$	236,3	
$\frac{5}{2}$	220,5	220
$\frac{7}{2}$	212,6	

Wir sehen also, daß innerhalb der Meßgenauigkeit aus der Intervallregel der Wert $i = \frac{5}{2}$ folgt.

Zweitens kann man aus den Intensitäten der Komponenten den Spin bestimmen. Wir haben das Intensitätsverhältnis der beiden äußeren Komponenten (a, c) gemessen und als Mittelwert $1,9_8$ erhalten. Dieses Intensitätsverhältnis sollte für $i = \frac{3}{2}$ 3 : 1; für $i = \frac{5}{2}$ 2 : 1 und für $i = \frac{7}{2}$ 1,67 : 1 sein. Es folgt also auch aus den Intensitäten eindeutig das mechanische Moment:

$$\underline{^{173}\text{Yb}: i = 5/2.}$$

Dieser Befund zeigt, daß die mechanischen Impulsmomente zweier benachbarter ungerader Isotope eines Elementes (zumindestens bei Kernen mit ungeradem Neutron) sich auch um $2 \cdot \frac{h}{2\pi}$ unterscheiden können,

während sich bisher in allen Fällen die Regel¹⁾ bestätigt hatte, daß die Änderung Null oder höchstens $1 \cdot \frac{h}{2\pi}$ beträgt.

Bezüglich der Lage der Hyperfeinstrukturterme läßt sich folgendes sagen: Die Terme von ¹⁷¹Yb liegen regelrecht, die von ¹⁷³Yb umgekehrt.

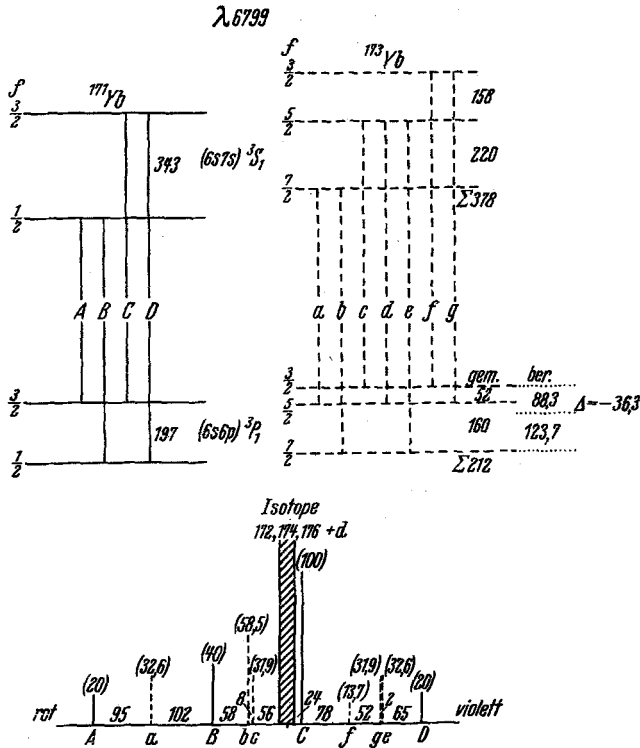


Fig. 3.

Wir beobachten damit beim Yb das gleiche wie beim Xe und Hg, wo sich auch beim Einbau von zwei Neutronen die Vorzeichen der magnetischen Momente umkehren.

Der Vergleich der Intensitäten der Komponenten a und A im Strukturbild von $\lambda 6489$ gibt noch die Möglichkeit, das Häufigkeitsverhältnis von ¹⁷³Yb zu ¹⁷¹Yb zu messen. Aus dem gemessenen Intensitätsverhältnis $a/A = 1,5_2$ erhält man für das Verhältnis ¹⁷³Yb zu ¹⁷¹Yb den Wert 1,1₄. Aus den Angaben von Aston²⁾ folgt für dieses Verhältnis $17\% / 9\% = 1,89$;

¹⁾ H. Schüler, H. Korsching, ZS. f. Phys. **102**, 373, 1936. — ²⁾ F. W. Aston, Proc. Roy. Soc. London (A) **146**, 46, 1934.

wobei bemerkt sei, daß Aston selbst seine Werte nur als rohe Schätzung bezeichnet. Wir haben für die Darstellung der Intensitäten in den Strukturbildern das Verhältnis $1,1_4$ zugrunde gelegt, indem wir außerdem die stärkste Komponente von ^{171}Yb gleich 100 setzten.

Mit den bekannten 3S_1 -Abständen läßt sich nun, siehe Fig. 3, das Strukturbild von $\lambda 6799$ ($6s\ 6p\ ^3P_1 - 6s\ 7s\ ^3S_1$) deuten und damit die Aufspaltung des 3P_1 -Terms festlegen. Aus den gemessenen Werten a bis f und a bis (g, e) ergeben sich für ^{173}Yb die Abstände der Hyperfeinstruktur-niveaus von 3P_1 . Der größere Teilabstand (160 Einheiten) muß aus dem Abstand der Komponenten a bis e bestimmt werden. Der Messung zugänglich ist aber nur a bis (g, e) . Da die Komponenten g und e gleich stark sind, so bestimmt man mit dem Wert 379 den Abstand a bis Mitte (g, e) und weil a bis g gleich der Aufspaltung des 3S_1 -Terms ist (378 Einheiten), so ist a bis e gleich 380 und damit der größere Teilabstand $380 - 220 = 160 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$. Der kleinere Teilabstand bestimmt sich aus dem Abstand a bis f und der Gesamtaufspaltung von 3S_1 zu $52 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$. Aus der Gesamtaufspaltung von 3P_1 (212) ergeben sich nach der Intervallregel die Teilabstände zu 123,7 und 88,3 Einheiten. Aus der Tatsache, daß die gemessenen und berechneten Teilabstände nicht übereinstimmen, folgt, daß ^{173}Yb ein Quadrupolmoment besitzt. Aus dem Sinn der Abweichung gemessen minus berechnet ergibt sich, im Hinblick auf eine frühere Arbeit¹⁾, ein positives Quadrupolmoment, d. h. die elektrische Ladungsverteilung des Kerns ist in Richtung der Kernspinachse verlängert.

Wenn wir die gemessenen Energien der Hyperfeinstruktur-niveaus durch die Formel

$$E = a_0 + \frac{a}{2} C + b C (C + 1)$$

darstellen, wo

$$C = f(f + 1) - i(i + 1) - j(j + 1)$$

ist, so ergeben sich aus der Lage der drei Hyperfeinstrukturterme $f = 7/2, 5/2, 3/2$ für die charakteristischen Konstanten a und b des magnetischen bzw. Quadrupolmomentes folgende Werte:

^{173}Yb	Term	b	a
	$6s\ 6p\ ^3P_1$	- 1,04	- 37,41

Mit Hilfe von b läßt sich nun das Quadrupolmoment q , wie früher gezeigt ist²⁾, errechnen.

¹⁾ H. Schüler, Th. Schmidt, ZS. f. Phys. **98**, 239, 1935. — ²⁾ H. Casimir, Verhandelingen Teyler's Tweede Genootschap XI Deel, 1936; H. Schüler, Th. Schmidt, ZS. f. Phys. **99**, 717, 1936.

Es ist:

$$q = \frac{b \cdot \lambda Z^* \cdot i (2i - 1) \cdot 14,79}{\delta \cdot (R'_1 \cdot c_1^3 - 2,83 \cdot S_1 \cdot c_1 \cdot c_2)} \cdot 10^{-24}.$$

Hierin haben die einzelnen Größen folgende Bedeutung:

Z^* : effektive Kernladungszahl für den P -Term,

$$Z^* = Z - 4 = 66;$$

i : Kernmoment, $i = 5/2$;

δ : Abstand der Grobstrukturterme 3P_0 bis 3P_2 , ergibt sich nach Anbringung der sich als notwendig erweisenden Wolfeschen Korrektur (Wechselwirkung zwischen Spin des s und Bahn des p -Elektrons);

$$\delta = 2113 \text{ cm}^{-1};$$

$c_1 = 0,4742$
 $c_2 = 0,8804$ } Konstanten der mittleren Kopplung nach Breit u. Wills¹⁾;

λ_{iZ^*} : relativistische Korrektur der Dublettaufspaltung des $6p$ -Elektrons;

$$\lambda = 1,117;$$

R'_1, S_1 : relativistische Korrekturen für die Matrixelemente $(p_{3/2} | r^{-3} | p_{3/2})$
 bzw. $(p_{3/2} | r^{-3} | p_{1/2})$;

$$R'_1 = 1,207;$$

$$S_1 = 1,38.$$

Mit diesen Zahlenwerten erhält man für das Quadrupolmoment:

$$\underline{\underline{{}^{173}\text{Yb}: q = + 4,0 \cdot 10^{-24}.$$

Einen weiteren Wert für q erhält man aus der Aufspaltung des $6s 6p {}^3P_2$ -Terms. Dieser Term kommt in der Linie $\lambda 7699$ (siehe Fig. 4) entsprechend dem Übergang ($6s 6p {}^3P_2 - 6s 7s {}^3S_1$) vor. Das Strukturbild dieser Linie ist an und für sich für die Bestimmung der Lage der Hyperfeinstrukturterme nicht sehr günstig. Denn es fallen wichtige Komponenten (e, B, g) mit den geraden Isotopen zusammen; aber es ist wenigstens möglich, drei Hyperfeinstrukturterme von 3P_2 festzulegen; nämlich $f = 9/2, 7/2, 5/2$. Man erhält sie aus den Abständen $c - f$ und $c - i$. Der Abstand $h - f$ ist nicht mehr ganz aufgelöst und daher für eine Bestimmung des Terms $f = 3/2$ nicht ausreichend. Selbst die notwendige Komponente f kann wegen der Nähe von h mit einem Fehler von zwei bis drei Einheiten behaftet sein.

Aus

$$\Delta \nu_{9/2 - 7/2} = 82$$

und

$$\Delta \nu_{7/2 - 5/2} = 95$$

¹⁾ G. Breit u. L. A. Wills, Phys. Rev. **44**, 470, 1933.

ergeben sich nun folgende Werte für a und b :

^{173}Yb	Term	b	a
	$6s\ 6p\ ^3P_2$	+ 0,28	- 24,9

Daraus lassen sich weiter die übrigen Teilabstände von 3P_2 berechnen, nämlich

$$\Delta \nu_{5/2 - 3/2} = 85,$$

$$\Delta \nu_{3/2 - 1/2} = 57$$

und man erhält als „gemessene“ Gesamtaufspaltung 319 Einheiten. Die Anwendung der Intervallregel führt nun zu den berechneten Teilabständen.

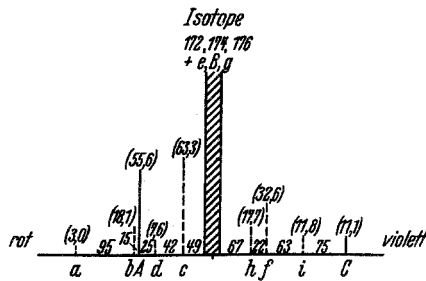
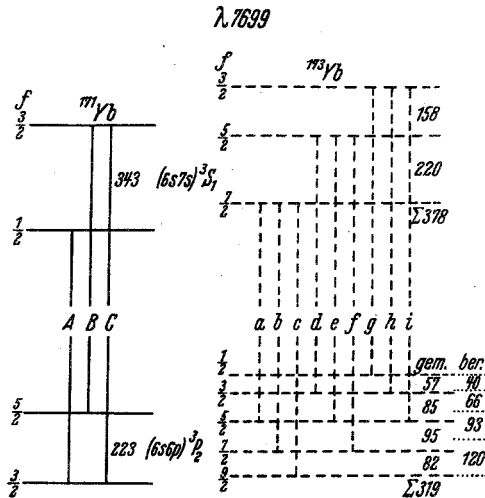


Fig. 4.

Der Vergleich gemessen minus berechnet (siehe Fig. 4) läßt auch hier einen großen Quadrupoleffekt erkennen.

In der früher zitierten Arbeit¹⁾ ist nun bereits für den 3P_2 -Term die Formel für die Berechnung von q angegeben.

$$q = \frac{b \cdot Z^* \lambda \cdot i (2i - 1) \cdot 44,87 \cdot 10^{-24}}{\delta \cdot R_1'}$$

mit $b = +0,28$ und den gleichen Zahlenwerten für Z^* , λ , i , δ , R_1' , wie sie oben schon angegeben und definiert sind, erhält man

$${}^{173}\text{Yb}: q_{3P_2} = +3,6 \cdot 10^{-24}.$$

Es ergibt sich also zwischen

$$q_{3P_1} = +4,0 \cdot 10^{-24}$$

und

$$q_{3P_2} = +3,6 \cdot 10^{-24}$$

eine recht gute Übereinstimmung. Wenn man lediglich die Meßfehler berücksichtigt, hat der Wert von q_{3P_1} ein höheres Gewicht. Wir glauben, das Quadrupolmoment von

$${}^{173}\text{Yb} \text{ mit } q = + (3,9 \pm 0,4) \cdot 10^{-24}$$

angeben zu können.

Dieser für die Größe eines Quadrupolmomentes beträchtliche Wert ist nun in verschiedener Hinsicht von Interesse. Man sieht, daß auch Kerne mit ungeradem *Neutron* große Unsymmetrien in der Ladungsverteilung aufweisen können, so daß man annehmen muß, daß die Ursache der Ladungsunsymmetrien im Kern nicht nur bedingt sein kann durch die Einwirkung der Ladung des ungeraden Teilchens auf den Kern. Vielmehr gelangt man zwangsläufig zu der Vorstellung, daß die „äußere Form“ des Atomkerns gegeben ist durch eine bestimmte Anordnung seiner Elementarteilchen oder größerer Gefüge von Elementarteilchen (z. B. α -Teilchen)²⁾.

In Tabelle 1 sind alle bisher bestimmten Quadrupolmomente zusammengestellt und gleichzeitig die dazu gehörigen mechanischen und magnetischen Kernmomente eingetragen. Wie man sieht, wurden die größten q -Werte zwischen Eu und Re gemessen (sie sind alle positiv); während sowohl die leichteren wie die nachfolgenden schwereren Atomkerne kleinere Quadrupolmomente besitzen. Unmittelbar neben dem bisher größten Wert bei ${}^{175}\text{Cp}$ ist jetzt der zweithöchste Wert bei ${}^{173}\text{Yb}$ gefunden. Diese Häufung von großen positiven q -Werten zeigt, daß beim Aufbau der Atomkerne auch über einen größeren Bereich hinweg Zusammenhänge erkennbar sind³⁾.

¹⁾ ZS. f. Phys. **99**, 717, 1936. — ²⁾ Vgl. W. Wefelmeier, ebenda **107**, 332, 1937. — ³⁾ Siehe auch H. Schüler, H. Korsching, ebenda **102**, 373, 1936.

Tabelle 1.

Kern	i	μ Kernmagnetonen	q in 10^{-24}	Literatur für q
$^{63}_{29}\text{Cu}$	$> \frac{3}{2}$	+ 2,5	- 0,1	H. Schüler, Th. Schmidt, ZS. f. Phys. 100 , 113, 1936.
$^{65}_{29}\text{Cu}$	$\frac{3}{2}$	+ 2,6	- 0,1	
$^{69}_{31}\text{Ga}$	$\frac{3}{2}$	+ 2,0	+ 1	H. Schüler, H. Korsching, ebenda 103 , 434, 1936.
$^{71}_{31}\text{Ga}$	$\frac{3}{2}$	+ 2,5	$0 \pm 0,5$	
$^{75}_{33}\text{As}$	$\frac{3}{2}$	+ 1,5	+ 0,3	H. Schüler, M. Marketu, ebenda 102 , 703, 1936.
$^{83}_{36}\text{Kr}$	$\frac{9}{2}$	- 1,0	+ 0,15	H. Korsching, ebenda 109 , 349, 1938 ¹⁾ .
$^{115}_{49}\text{In}$	$\frac{9}{2}$	+ 5,3	+ 0,8	H. Schüler, Th. Schmidt, ebenda 104 , 468, 1937. R. Bacher, D. Tomboulian, Phys. Rev. 52 , 836, 1937.
$^{131}_{54}\text{Xe}$	$\frac{3}{2}$	+ 0,7	$0 \pm 0,1$	H. Korsching, ZS. f. Phys. 109 , 349, 1938 ¹⁾ .
$^{151}_{63}\text{Eu}$	$\frac{5}{2}$	+ 3,4	$\sim + 1,2$	H. Schüler, Th. Schmidt, ebenda 94 , 457, 1935. H. Casimir, Physica 2 , 719, 1935.
$^{153}_{63}\text{Eu}$	$\frac{5}{2}$	+ 1,5	$\sim + 2,5$	
$^{173}_{70}\text{Yb}$	$\frac{5}{2}$	- 0,7	+ 3,9	H. Schüler, J. Roig, H. Korsching, ZS. f. Phys. 111 , 165, 1938.
$^{175}_{71}\text{Cp}$	$\frac{7}{2}$	$\sim + 2,6$	+ 5,9	H. Gollnow, ebenda 103 , 443, 1936.
$^{185}_{75}\text{Re}$	$\frac{5}{2}$	+ 3,3	+ 2,8	H. Schüler, H. Korsching, ebenda 105 , 168, 1937.
$^{187}_{75}\text{Re}$	$\frac{5}{2}$	+ 3,3	+ 2,6	
$^{201}_{80}\text{Hg}$	$\frac{3}{2}$	- 0,6	+ 0,5	H. Schüler, Th. Schmidt, ebenda 98 , 239, 1935.
$^{209}_{83}\text{Bi}$	$\frac{9}{2}$	+ 3,6	- 0,4	H. Schüler, Th. Schmidt, ebenda 99 , 717, 1936.

Wir danken der Auergesellschaft, Berlin, für die kostenlose Überlassung von 1 g Ytterbiumbromat und der Gesellschaft für Lindes Eismaschinen, Höllriegelskreuth, für die zur Untersuchung zur Verfügung gestellten notwendigen reinen Edelgase. Der eine von uns (H. Korsching) dankt der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Zuerteilung eines Stipendiums.

Die Untersuchung wurde mit der dankenswerten Unterstützung der I. G. Farbenindustrie, Ludwigshafen-Oppau, durchgeführt.

¹⁾ Herr Th. Schmidt hat einen der Verfasser (H. K.) freundlichst darauf aufmerksam gemacht, daß durch ein Versehen bei der Berechnung der Kopplungskonstanten die Angaben für die q -Werte von Kr und Xe sich etwas erhöhen.