

Zur Fein- und Hyperfeinstruktur von Lu I

L. H. GÖBEL

Institut für Kernphysik der Technischen Universität Berlin

(Z. Naturforsch. **26 a**, 1559—1562 [1971]; eingegangen am 24. Juli 1971)

Concerning the Fine and Hyperfine Structure of Lu I

By means of the levelcrossing method the hyperfine structure constants and the lifetime as well as the angular momentum of the term 29607.98 cm^{-1} of Lu I were determined. This term can be assigned to the $6s^2 7p^2 P_{3/2}$ -state. The signs of the interaction constants were obtained by the investigation of the line 3376.5 Å from this state into the $5d 6s^2 \text{ }^2D_{3/2}$ ground state in a Fabry-Perot interferometer. Together with the measured branching ratio from the lifetime the oscillator strengths were found. The results are:

$$\begin{aligned} J &= 3/2; \\ B/|A| &= 0.4947(4); & \tau &= 0.512(16) \cdot 10^{-8} (1.24/gJ) \text{ s}; \\ A &= 678.94(2) \text{ gJ/1.24 MHz}; & f(3376.5 \text{ Å}) &= 0.382(15); \\ B &= 335.9(3) \text{ gJ/1.24 MHz}; & f(3620.3 \text{ Å}) &= 0.15(4) \cdot 10^{-2}. \end{aligned}$$

1. Einleitung

Im Lu I-Spektrum ist der Term mit dem Termwert 29607.98 cm^{-1} und dem Code 2960 (Termwerte und Code nach KLINKENBERG¹) von Klinkenberg dem Zustand $5d 6s 6p ({}^3D) {}^2F$ mit einem Drehimpuls $J=3/2$ oder $5/2$ zugeordnet worden, während er von PINNINGTON² mit Hilfe von Zeeman-Untersuchungen als ${}^2D_{5/2}$ derselben Konfiguration interpretiert wurde.

Die Festlegung der Drehimpulsquantenzahl J durch Ermittlung der Anzahl und Intensität der Hyperfeinstruktur(Hfs)-Komponenten von Spektrallinien mit einem Fabry-Perot-Interferometer kann nur dann mit Sicherheit erfolgen, wenn die Hfs-Aufspaltung groß gegen die Doppler-Breite der emittierten Linien ist. Auf diese Weise wurde eine große Anzahl von Drehimpulsen im Lu I-Term-schema festgelegt³. Von der Doppler-Breite unabhängig und im wesentlichen durch die natürliche Lebensdauer der Zustände bestimmt ist die Hfs-Untersuchung von Spektrallinien nach Resonanzstreuung von Licht an freien Atomen.

In der vorliegenden Arbeit konnte J für den oben genannten Zustand mit Hilfe der Level-crossing-Methode aus der Zahl der Signale ermittelt werden. Darüber hinaus wurden die Hfs-Konstanten und die

Lebensdauer gemessen, sowie aus dem Verzweigungsverhältnis des Zerfalls in die beiden Grundzustände die Oszillatorenstärken berechnet. Das mit diesem J -Wert und den gemessenen Hfs-Konstanten ermittelte Doppler-Profil der anregenden Linie stimmt mit dem hinter einem Fabry-Perot-Interferometer gemessenen Linienprofil der im Experiment eingestrahlten Linie überein. Hierdurch wird gleichzeitig das Vorzeichen der Hfs-Konstanten festgelegt.

2. Hfs des Terms 2960 Lu I

In einem äußeren Magnetfeld wird die Entartung der Energieniveaus eines Atoms bezüglich des Gesamtdrehimpulses von Hülle und Kern aufgehoben. In mittleren Feldern kommt es hierbei zu Überschneidungen von Hfs-Unterniveaus, die bei Resonanzstreuung von Licht unter bestimmten Versuchsbedingungen kohärent angeregt werden können. Bei Beobachtung des Resonanzlichts in Abhängigkeit vom Magnetfeld geben solche Termüberschneidungen Anlaß zu den bekannten Level-crossing-Signalen⁴. Die Zahl der Kreuzungspunkte wird dabei bestimmt durch den kleineren der beiden Drehimpulse von Hülle und Kern. Ist der Kernspin bekannt, kann aus der Zahl der Signale in einem Level-crossing-

Sonderdruckanforderungen an Dr. L. H. GÖBEL, Institut für Kernphysik der Technischen Universität Berlin, D-1000 Berlin-37, Rondellstraße 5.

¹ P. F. A. KLINKENBERG, Physica **20**, 53 [1954].

² E. H. PINNINGTON, Canad. J. Phys. **41**, 1294 [1963].

³ H. GOLLNOW, Z. Physik **103**, 443 [1936]. — U. HORSTMANN, G. NÖLDEKE u. A. STEUDEL, Ann. Physik **12**, 14 [1963].

⁴ P. A. FRANKEN, Phys. Rev. **121**, 508 [1961].



Dieses Werk wurde im Jahr 2013 vom Verlag Zeitschrift für Naturforschung in Zusammenarbeit mit der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V. digitalisiert und unter folgender Lizenz veröffentlicht: Creative Commons Namensnennung-Keine Bearbeitung 3.0 Deutschland Lizenz.

Zum 01.01.2015 ist eine Anpassung der Lizenzbedingungen (Entfall der Creative Commons Lizenzbedingung „Keine Bearbeitung“) beabsichtigt, um eine Nachnutzung auch im Rahmen zukünftiger wissenschaftlicher Nutzungsformen zu ermöglichen.

This work has been digitalized and published in 2013 by Verlag Zeitschrift für Naturforschung in cooperation with the Max Planck Society for the Advancement of Science under a Creative Commons Attribution-NoDerivs 3.0 Germany License.

On 01.01.2015 it is planned to change the License Conditions (the removal of the Creative Commons License condition "no derivative works"). This is to allow reuse in the area of future scientific usage.

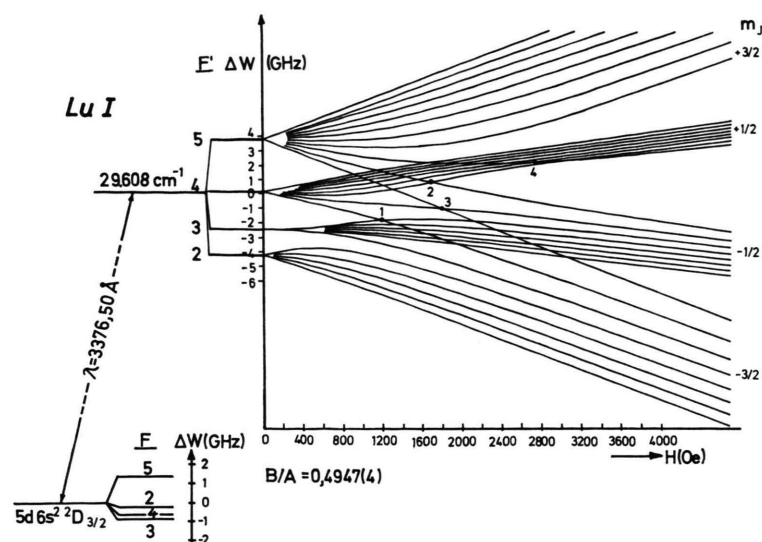


Abb. 1. Hfs des Terms $29607,98 \text{ cm}^{-1}$ von Lu I und Kreuzungspunkte der Zeeman-Unterniveaus mit $|\Delta m_F| = 2$ ($I = 7/2$). $A = 678,94(2) \text{ gJ/1,24 MHz}$.

Experiment auf den Hüllendrehimpuls J geschlossen werden⁵.

Lu¹⁷⁵ hat einen Kernspin $I = 7/2$. Für die Level-crossing-Untersuchung wurde die Linie $3376,5 \text{ Å}$ von Lu I an einem Lutetium-Atomstrahl gestreut und das Resonanzlicht in Abhängigkeit von einem äußeren Magnetfeld registriert. (Der apparative Aufbau wurde in einer früheren Arbeit beschrieben⁶.) Bei der benutzten Anordnung von Lichteinstrahlung, Magnetfeld und Beobachtung werden nur solche Terme kohärent angeregt, deren Magnetquantenzahlen sich an einem Termkreuzungspunkt um $|\Delta m| = 2$ unterscheiden (Abb. 1).

3. Details zum Experiment

Die Resonanzlinie $3376,5 \text{ Å}$ wurde in Beobachtungsrichtung mit einem Interferenzfilter (Schott & Gen.

Mainz) aus dem Resonanzlicht ausgewählt. Das Durchlaßmaximum des Filters von 45% lag bei 3390 Å , die ganze Halbwertsbreite betrug 60 Å . Die Intensität benachbarter Linien im Resonanzlicht war sehr viel kleiner, so daß die registrierten Signale mit Sicherheit nur von dem untersuchten Term herrühren konnten (weitere experimentelle Einzelheiten in Ref. ⁶).

4. Ergebnisse

a) Der Drehimpuls J für den Zustand 2960 Lu I

In Abhängigkeit vom Magnetfeld wurden für diesen Zustand nur insgesamt drei Level-crossing-Signale registriert (Abb. 2). Setzt man voraus, daß $J = 3/2$ beträgt ($I = 7/2$), so müßten entsprechend den vier Kreuzungspunkten auch vier Signale auftreten. Das vierte Crossing liegt jedoch erst bei so hohen Aufspaltungsfeldern, daß Hüllen- und Kern-

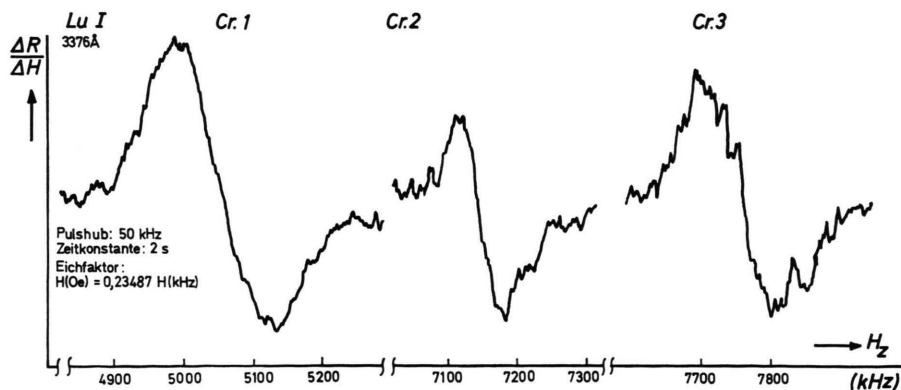


Abb. 2. Phasenempfindlich registrierte Level-crossing-Signale im Term $29607,98 \text{ cm}^{-1}$ von Lu I.

⁵ Für $|\Delta m| = 2$ z. B. beträgt die Zahl 4 bei einem Drehimpuls von $J = 3/2 \leq I$ und 13 bei einem Drehimpuls von $J = 5/2$

$\leq I$, wenn man von den viel schwächer erscheinenden Fold-over-crossings absieht.

⁶ L. H. GÖBEL, Z. Naturforsch. **25 a**, 611 [1970].

Tab. 1. Magnetfeldlage der Level-crossing-Signale im Term 29607,98 cm⁻¹ von Lu I. Für die theoretische Berechnung der Lage wurde ein $gJ=1,24$ zugrunde gelegt. Die Fehler sind statistisch. w_i =Gewicht.

Crossing Nr. i	Kreuzende Terme $ F, m_F\rangle F', m_{F'}\rangle$	Magnetfeld H_i^c [Oe]	Zahl der Kurven	Theoretische Lage $X^c [\mu_B H_z/A]$	A_i [MHz]	w_i
1	$ 4, -4\rangle 3, -2\rangle$	1188,6 (3)	66	3,4503 (1)	678,93	27
2	$ 5, -4\rangle 4, -2\rangle$	1703,4 (3)	70	3,51136 (0)	678,96	67
3	$ 5, -5\rangle 4, -3\rangle$	1822,2 (2)	80	3,7565 (1)	678,91	53

drehimpuls bereits weitgehend entkoppelt zu sein scheinen⁷. Es liegt daher nahe, diesem Term den Drehimpuls $J=3/2$ zuzuordnen.

b) Hfs-Konstanten

Aus der Abhängigkeit des Verhältnisses der Hfs-Konstanten $B/|A|$ von der Magnetfeldlage der Kreuzungspunkte für $J=3/2$ und $I=7/2$ (Abb. 3) erhält man aus der experimentell ermittelten Magnetfeldlage der Level-crossing-Signale (Tab. 1) innerhalb der Grenzen statistischer Fehler ein eindeutiges Ergebnis nur mit den Werten

$$\begin{aligned} B/|A| &= +0,4947(5); \\ A &= +678,94(2) (gJ/1,24) \text{ MHz}; \\ B &= +335,9(3) (gJ/1,24) \text{ MHz}. \end{aligned}$$

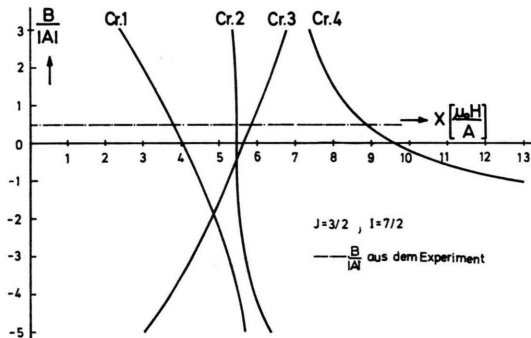


Abb. 3. Theoretische Lage der Level-crossing-Signale in Abhängigkeit vom Verhältnis der Hfs-Konstanten für $J=3/2$, $I=7/2$. Die gemessene Magnetfeldlage läßt nur das gestrichelte eingezeichnete $B/|A|$ -Verhältnis zu.

Hierbei wurde der von PINNINGTON² gemessene gJ -Faktor von 1,24 ohne Fehler zugrunde gelegt.

c) Vorzeichen der Hfs-Konstanten

Die Vorzeichen wurden mit Hilfe einer Fabry-Perot-Aufnahme der Lu I-Linie 3376 Å aus der elektrischen Entladung einer gekühlten Hohlkathode ermittelt. Unter Zugrundelegung der gemessenen Hfs-Konstanten im angeregten Zustand und der von RITTER⁸ gemessenen im Grundzustand $5d6s^2 2D_{3/2}$, sowie von $J=3/2$ im angeregten Zustand, erhält man Übereinstimmung zwischen berechnetem und gemessenem Linienprofil nur unter der Annahme $A>0$ und – wegen $B/|A|>0$ aus dem Experiment – $B>0$ (Abb. 4). Dieses Ergebnis scheint darauf hinzuweisen, daß sowohl die Annahme $J=3/2$, wie die Festsetzung der Hfs-Konstanten einschließlich deren Vorzeichen gerechtfertigt und in sich konsistent ist.

d) Lebensdauer und Oszillatorenstärken

Der phasenempfindliche Nachweis der Level-crossing-Signale durch Modulation des äußeren Magnetfeldes mit einem niederfrequenten Rechteckfeld bedingt die differenzierte Wiedergabe der resonanten Lorentz-Kurve. Die Breite dieser Kurve ist für den Fall, daß die Amplitude der Modulationsfeldstärke verschwindet, durch die natürliche Lebensdauer gegeben (Tab. 2). Die Extrapolation der Modulationsfeldstärke gegen Null (Abb. 5) ergibt als

Tab. 2. Lebensdauer aus der Breite der Level-crossing-Signale im Term 29607,98 cm⁻¹ von Lu I. Die Fehler sind statistisch.

Crossing Nr. i	Breite $H_{1/2}$ [Oe]	$\left(\frac{d\Delta E}{dH}\right)_i^*$	$gJ \tau_i$ [10 ⁻⁸ s]	w_i	$\bar{\tau}$ [10 ⁻⁸ s]
1	26,3 (0,9)	1,722	0,503 (26)	3,9	0,512 (16) $\frac{1,24}{gJ}$
2	23,5 (2,1)	1,972	0,492 (52)	1,9	
3	27,0 (1,9)	1,572	0,550 (47)	2,1	

* $gJ=1,24 \pm 0,02$ (Ref. ²).

⁷ Vgl. auch Ref. ⁶, wo für den Term 2212 mit der Zuordnung $2D_{3/2}$ ebenfalls nur drei Level-crossing-Signale gefunden wurden.

⁸ G. J. RITTER, Phys. Rev. **126**, 240 [1962]. – A. H. REDDOCH u. G. J. RITTER, Phys. Rev. **126**, 1493 [1962].

Mittelwert aus den verschiedenen Level-crossing-Signalen die Lebensdauer:

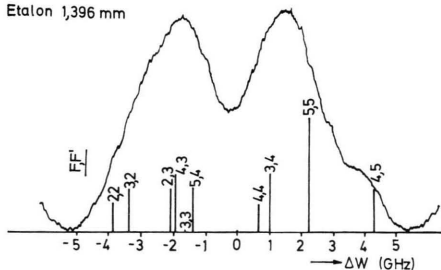
$$\tau = (0,512 \pm 0,016) \cdot 10^{-8} (1,24/g_J) \text{ s.}$$

Die Linien 3620 Å und 3376 Å vom untersuchten Zustand in die beiden Grundzustände $5d6s^2\ ^2D_{5/2}$ und $^2D_{3/2}$ haben im Resonanzlicht das Intensitätsverhältnis 0,900(1) : 0,004(1). Unter der Voraussetzung, daß der Zerfall in andere evtl. noch nicht bekannte Terme vernachlässigbar ist, erhält man die nach UNSÖLD⁹ berechneten Oszillatorenstärken:

$$f(3376,50 \text{ Å}) = 0,382(15);$$

$$f(3620,31 \text{ Å}) = 0,15(4) \cdot 10^{-2}.$$

Lu I 3376,50 Å
Etalon 1,396 mm



Lu I 1=7/2 A=679MHz B=336MHz
J=J'=3/2

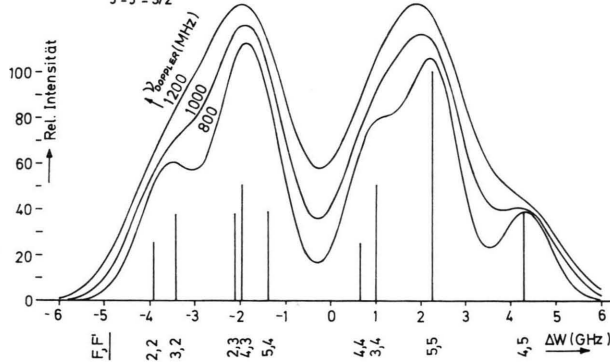


Abb. 4. Fabry-Perot-Interferenzbild der Linie $\lambda=3376,50 \text{ Å}$ vom Zustand $29607,98 \text{ cm}^{-1}$ zum Grundzustand $5d6s^2\ ^2D_{3/2}$ von Lu I. Darunter das mit den gemessenen Hfs-Konstanten berechnete Doppler-Profil der untersuchten Linie. (Etalondichte muß heißen 1,396 cm.)

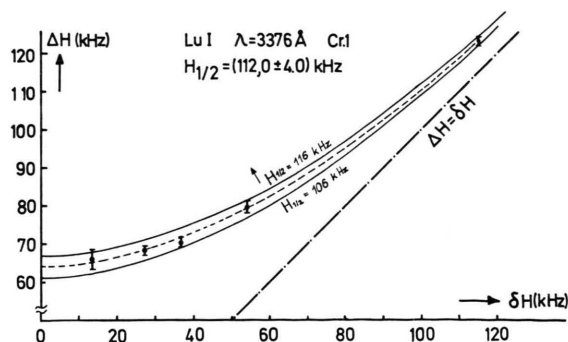


Abb. 5. Extrapolation des Feldhubes δH gegen Null zur Ermittlung der natürlichen Breite $H_{1/2}$ des angeregten Zustands $29607,98 \text{ cm}^{-1}$ aus der Signalbreite ΔH . Eichfaktor: $H [\text{Oe}] = 0,23487 H [\text{kHz}]$.

5. Diskussion der Ergebnisse

Durch Zeeman-Untersuchungen wurde für den in dieser Arbeit untersuchten Term $29607,98 \text{ cm}^{-1}$ von Lu I ein g_J -Faktor von $1,24 \pm 0,02$ ermittelt². Unter der Annahme eines Drehimpulses $J = 5/2$ wurde dieser Term einem $^2D_{5/2}$, $g(\text{LSJ}) = 1,20$, zugeordnet. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit implizieren jedoch einen Gesamtdrehimpuls $J = 3/2$. Unter allen Dublett- und Quartett-Termen kommt hierfür — bei nicht größerer Abweichung der g -Faktoren als etwa 10% von ihren LS-Werten — nur ein $^2P_{3/2}$ -Term in Betracht, $g(\text{LSJ}) = 1,33$. (Ein $^4D_{3/2}$ -Term der $5d6s6p$ -Konfiguration liegt bei sehr viel tieferen Energien.) Da an dieser Stelle des Lu I-Termschemas ein $^2P_{3/2}$ -Term der Konfiguration $6s^27p$ erwartet wird¹⁰, ist der Term $29607,98 \text{ cm}^{-1}$ wahrscheinlich der $6s^27p\ ^2P_{3/2}$ -Zustand von Lu I.

Ich danke der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Bereitstellung einiger Geräte.

⁹ A. UNSÖLD, Physik der Sternatmosphären, Springer-Verlag, Berlin 1955.

¹⁰ P. CAMUS, Thèse, Faculté des Sciences d'Orsay/Paris 1971.