

Magnetische Beeinflussung der selektiven Reflexion an Quecksilberdampf (Levelcrossing)

W. HANLE und G. STANZEL

I. Physikalisches Institut der Universität Gießen

(Z. Naturforsch. 25 a, 309–310 [1970]; eingegangen am 20. Januar 1970)

1. Einleitung: Übergang von der Resonanzfluoreszenz zur selektiven Reflexion

Bestrahlt man Quecksilberdampf von niedrigem Druck mit der Resonanzlinie 2537 Å, so beobachtet man eine allseitige Reemission. Mit zunehmendem Dampfdruck steigt die Intensität der Resonanzfluoreszenz zunächst an und sinkt infolge Stoßlöschung wieder ab. Gleichzeitig tritt eine mit wachsendem Druck an Intensität zunehmende selektive Reflexion dieser Linie an der Grenzfläche zwischen der Gefäßwand und dem Quecksilberdampf auf.

Der eine von uns hat vor 45 Jahren die magnetische Beeinflussung der Resonanzfluoreszenz des Quecksilberdampfes untersucht und die dabei beobachtete Änderung der Polarisation und der räumlichen Intensitätsverteilung als Kohärenzeffekt der Zeeman-Komponenten gedeutet, wenn die Aufspaltung kleiner ist als die durch die reziproke Abklingzeit gegebene natürliche Linienbreite¹. Solche Levelcrossing-Experimente haben eine große Bedeutung für die Atomphysik erhalten.

2. Apparatur und Messungen

Wir haben nun entsprechende Versuche bei der selektiven Reflexion an Quecksilberdampf ausgeführt. Wir berichten über einige vorläufige Ergebnisse.

Abbildung 1 zeigt die Apparatur. Als Lichtquelle diente wahlweise eine Hg-Hochdrucklampe von Osram, eine Hochfrequenzlampe oder eine Mikrowellenlampe. Eine mit Hg-Dampf gefüllte Quarz-Küvette befand sich in einem Ofen zwischen den Polkernen eines Magneten, von denen einer durchbohrt war.

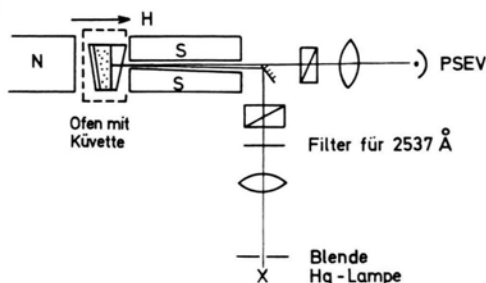


Abb. 1. Versuchsanordnung.

Das Küvettenfenster war prismatisch, so daß nur der an der Grenzschicht Quarz–Hg-Dampf reflektierte Strahl in den PSEV gelangen konnte. Reflektierter und einfallender Strahl bildeten einen Winkel von 1,5 Grad.

Der im Eintrittsfenster auftretende Faraday-Effekt wurde gesondert bestimmt.

Abbildung 2 zeigt den Verlauf der mit einem zum Polarisator gekreuzten Analysator gemessenen Lichtintensität in Abhängigkeit vom Magnetfeld bei einer Temperatur von 330 °C in der Küvette, was einem Dampfdruck des Quecksilbers von 460 Torr entspricht. Die Halbwertsbreite dieser Levelcrossing-Kurve hängt noch vom Linienprofil des eingestrahnten Lichtes ab. Bei breiterem Linienprofil wurde eine kleinere Halbwertsbreite gemessen.

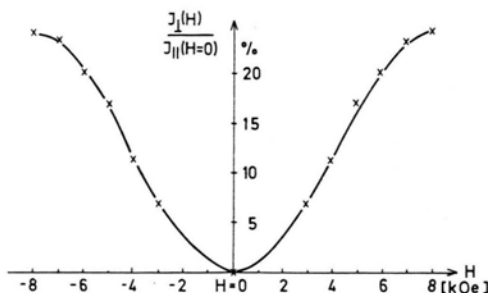


Abb. 2. Levelcrossing-Kurve, gemessen bei der selektiven Reflexion an Quecksilberdampf von 460 Torr Dampfdruck. Die Intensität I_{\perp} (Analysator \perp Polarisator) ist normiert auf $I_{\text{ges}} = I_{\parallel}$ ($H=0$, Analysator \parallel Polarisator).

Eine Drehung der Polarisationsebene und gleichzeitig Depolarisation durch das Magnetfeld waren ebenfalls festzustellen. Die Auswertung solcher Untersuchungen ist jedoch schwierig. Denn die registrierte Intensität setzt sich aus 2 Anteilen zusammen, deren Verhältnis zueinander von der eingestrahnten Linienbreite abhängt. Nur in einem beschränkten Frequenzbereich findet die Reflexion an der Grenzschicht Quarz–Hg-Dampf statt, links und rechts dieses Bereiches praktisch an der Grenzschicht Quarz–Vakuum.

3. Vergleich der Levelcrossing-Kurve bei der Resonanzfluoreszenz und bei der selektiven Reflexion

Für geradzahlige Hg-Isotope spaltet der 6^3P_1 -Zustand, von dem die Resonanzlinie ausgeht, im Magnetfeld in 3 Unterniveaus mit den magnetischen Quantenzahlen $m = +1, 0, -1$ auf. Strahlt man in Magnetfeldrichtung linear polarisiert ein, werden die Unterniveaus mit $m = \pm 1$ angeregt. Bei kleinen Magnetfeldern überlagern sich diese Aufspaltungsniveaus innerhalb ihrer mittleren Breite.

Im Bereich niedrigen Dampfdruckes, in dem Resonanzfluoreszenz auftritt, ist der Abstand der Atome groß gegenüber der Wellenlänge. Die Atome werden daher unabhängig voneinander angeregt und strahlen unabhängig voneinander aus, und es werden im Magnetfeld die magnetischen Unterniveaus in jeweils einem Atom kohärent angeregt. Man erhält für die Resonanz-

Sonderdruckanforderungen an: Prof. Dr. W. HANLE, I. Physikalisches Institut der Universität Gießen, D-6300 Gießen, Leihgesterner Weg 104–108.

¹ W. HANLE, Z. Physik 30, 93 [1924].

fluoreszenz bei gleicher Beobachtung wie in Abb. 1 infolge der kohärenten Überlagerung der σ^+ - und σ^- -Aufspaltungskomponenten eine Levelcrossing-Kurve, ähnlich wie in Abbildung 2. Jedoch besteht der prinzipielle Unterschied, daß die Halbwertsbreite nur von der mittleren Breite, dem Reziproken der natürlichen Lebensdauer des angeregten Niveaus abhängt und nicht von der Doppler-Breite Δ . Denn der Doppler-Effekt verschiebt die beiden Niveaus eines Atoms in derselben Richtung um den gleichen Betrag. Für den 6^3P_1 -Zustand von Quecksilber hat die Levelcrossing-Kurve eine Halbwertsbreite von ca. 0,5 Oe, was einer Lebensdauer von ca. $1 \cdot 10^{-7}$ sec entspricht.

Selektive Reflexion entsteht, wenn der mittlere Abstand zwischen den Atomen kleiner ist als die Wellenlänge. Dann besteht eine feste Phasenbeziehung zwischen mehreren Atomen für die Absorption und Emission. Infolge der dabei auftretenden Interferenzen kommt es zu einer kohärenten Streuung in Vorwärtsrichtung² und in Reflexionsrichtung und somit auch zu Interferenz von σ^+ - und σ^- -Strahlung verschiedener Atome. In die Halbwertsbreite der Levelcrossing-Kurve geht dann außer der Dämpfungsbreite der Niveaus auch die Dopplerbreite ein, wie im folgenden Teil die theoretische Berechnung von Series zeigt (siehe Abschnitt 4). Die Dopplerbreite beträgt bei 330 °C für die Quecksilberatome $8,8 \cdot 10^8$ sec⁻¹, was einer magnetischen Aufspaltung von 420 Oe entspricht.

Die Dämpfungsbreite Γ ist bei dem dieser Temperatur entsprechenden Dampfdruck nicht das Reziproke der natürlichen Lebensdauer, sondern durch Stoßdämpfung um mehrere Größenordnungen erhöht, $\Gamma = \Gamma_{\text{nat.}} + \Gamma_{\text{St.}}$. Nach einer Theorie von Weisskopf ist

$$\Gamma_{\text{St.}} = 9,1 \cdot 10^{-10} N \text{ (sec}^{-1}\text{)},$$

worin N die Zahl der Atome pro cm³ ist. Bei 330 °C ergibt sich $\Gamma_{\text{St.}} = 6,6 \cdot 10^9$ sec⁻¹ \cong 3,2 kOe.

Im Druckbereich bis etwa 5 Torr, in dem die selektive Reflexion noch verhältnismäßig schwach ist, ist $\Delta > \Gamma$ und damit die Breite der Levelcrossing-Kurve im wesentlichen durch die Doppler-Breite gegeben.

Im hohen Druckbereich — und damit auch bei unserem Experiment — ist die Halbwertsbreite im wesentlichen durch die Stoßdämpfung gegeben.

4. Berechnung der Levelcrossing-Kurve nach Series³

1967 erschien eine Theorie von Series über die selektive Reflexion in Levelcrossing- und Doppelresonanzexperimenten. Über eine halbklassische Betrachtung der Polarisierbarkeit eines Mediums hat Series die LC-Kurven für den Fall berechnet, daß die Doppler-Breite groß ist gegen die Dämpfungskonstante ($\Delta \gg \Gamma$).

Für geradzahlige Hg-Isotope erhält man folgende theoretische LC-Kurve:

$$I_{\perp} = I_0 (1 - \exp\{-2(\gamma H/\Delta)^2\});$$

I_{\perp} = reflektierte Intensität mit Analysator \perp Polarisator, γ = gyromagnetisches Verhältnis, H = Magnetfeldstärke.

Diese Funktion stellt eine Gauß-Kurve mit der HWB $2 \gamma H_{1/2}/\Delta = (2 \ln 2)^{1/2}$ dar.

Für den in unseren Messungen vorliegenden Fall $\Gamma \gg \Delta$ ergibt sich für geradzahlige Hg-Isotope

$$I_{\perp} = I_0 \left(1 - \frac{1}{1 + 4 \gamma^2 H^2 / \Gamma^2} \right).$$

Diese Funktion stellt eine Lorentz-Kurve mit der HWB $2 \gamma H_{1/2}/\Gamma = 1$ dar.

5. Vergleich Theorie und Experiment

Unsere bisherigen Messungen wurden in einem Druckbereich durchgeführt, wo $\Gamma \gg \Delta$. Die dabei erhaltenen LC-Kurven zeigen etwa die 3-fache HWB der theoretischen LC-Kurven. Diese Abweichung kann folgende Gründe haben. Die theoretische Berechnung der LC-Kurven gilt nur für geradzahlige Hg-Isotope und unter der Voraussetzung, daß mit einem spektralen Kontinuum eingestrahlt wird. Die Experimente wurden jedoch mit natürlichem Quecksilber und nicht genau bekanntem Linienprofil durchgeführt. Einen ebenfalls großen Einfluß kann die Ungenauigkeit in der Temperaturmessung haben.

Es ist daher beabsichtigt unter verbesserten Versuchsbedingungen mit einem geradzahligen Isotop dieselben Experimente nochmals durchzuführen und dabei auch in dem Druckbereich zu messen, in dem $\Delta \gg \Gamma$ ist.

6. Schlußbemerkung

Levelcrossing-Kurven erstrecken sich über einen Magnetfeldbereich von vielen Größenordnungen. Kürzlich wurden Levelcrossing-Experimente bei magnetischen Unterniveaus im Grundzustand ausgeführt⁴. Im Grundzustand ist die Niveaubreite nur durch die reziproke Relaxationszeit gegeben. Diese kann sehr lang und damit dann die Niveauschärfe extrem groß sein. So wurden von DUPONT-ROC, HAROCHE und COHEN-TANNOUDJI Levelcrossing-Kurven im Grundzustand von Rb 87 mit Halbwertsbreiten von der Größenordnung 10^{-6} Oe gemessen. Levelcrossing-Kurven der Lichtemission aus angeregten Zuständen haben Halbwertsbreiten der Größenordnung einige Oe. Die Halbwertsbreiten der hier beobachteten Levelcrossing-Kurven bei der selektiven Reflexion betragen mehrere 1000 Oe.

² A. CORNEY, B. P. KIBBLE u. G. W. SERIES, Proc. Roy. Soc. London A **293**, 70 [1966].

³ G. W. SERIES, Proc. Phys. Soc. London **91**, 432 [1967].

⁴ J. DUPONT-ROC, S. HAROCHE u. C. COHEN-TANNOUDJI, Phys. Let. **28** A, 638 [1969].