

EP III - Seminar

Die Lamb-Verschiebung (Kap. 4.4)

Grundlegendes Die Lamb-Verschiebung wurde zwischen 1947 und 1952 durch Willis Lamb und VORNAME Retherford experimentell entdeckt (s.u.) und erforscht. Ursprünglich war man seinerzeit davon ausgegangen, dass sich die Energieniveaus bei gleicher Hauptquantenzahl n und gleicher Gesamtdrehimpulsquantenzahl $j (=l+s)$, jedoch unterschiedlicher Nebenquantenzahl l nicht unterscheiden. Dies ist auch im untenstehenden Diagramm in der mittleren Spalte zu erkennen - die Energieniveaus der Zustände $2^2S_{1/2}$ und $2^2P_{1/2}$ sind identisch:

Aus urheberrechtlichen Gründen fehlt an dieser Stelle ein entsprechendes Bild. Selbiges ist der in der Fußnote genannten Literatur zu entnehmen. ¹

Das Experiment

Lamb und Retherford führten Experimente mit Hochfrequenz-Spektroskopie durch. In ihrem Experiment werden H_2 -Moleküle in einem geheizten Wolframofen thermisch zu H-Atomen dissoziiert. Der aus dem Ofen austretende Atomstrahl wird dann durch Elektronenbeschuss auf das Quantenniveau $2S_{1/2}$ angeregt, ein metastabiles Niveau mit Lebensdauern $> 1s$. Der Übergang $2S_{1/2} \Rightarrow 1S_{1/2}$ ist verboten. Eigentlich sollte in dem Experiment gezeigt werden, dass bei einer Resonanzfrequenz von $\nu_1 = 10GHz$ ein Übergang $2S_{1/2} \Rightarrow P_{3/2}$ unter Emission eines Photons auftritt. Dann stellten Lamb und Retherford jedoch die Resonatorfrequenz auf $\nu_2 = 1GHz$ ein und konnten ebenfalls einen Übergang beobachten. Der entdeckte Übergang ist ein Übergang $2S_{1/2} \Rightarrow 2P_{1/2}$. Dabei haben die $2P_{1/2}$ -Atome nur eine Lebenszeit von 2 ns, da sie durch Emission eines Photons mit einer Energie von etwa 10 eV in den Grundzustand ($1S_{1/2}$) übergehen. Tritt der Übergang auf, so treffen am Detektor - einem Wolframblech - weniger metastabile Atome ein. Der Versuchsaufbau sieht also insgesamt als folgt aus:

Aus urheberrechtlichen Gründen fehlt an dieser Stelle ein entsprechendes Bild. Selbiges ist der in der Fußnote genannten Literatur zu entnehmen. ²

Anschauliche Begründung

Warum nun tritt dieser Aufspaltungseffekt, der ja eigentlich nicht vorausgesagt worden war, auf? Die Begründung für diesen Effekt führt zu einem völlig neuen quantenphysikalischen Forschungsfeld, der Quantenelektrodynamik (QED). Das an das Atom gebundene Elektron wechselwirkt mit seinem eigenen Strahlungsfeld. Dies bedeutet, dass das Elektron ständig Photonen absorbiert und emittiert. Diese Photonen werden als **virtuelle Photonen** bezeichnet. Eigentlich stellt ein solches Verhalten eine Verletzung des Energiesatzes dar. Nun gilt es aber die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation zu beachten. Für betrachtete kurze Zeitintervalle wird die Energie unscharf und ist nicht mehr genau zu bestimmen bzw. zu definieren! Das bedeutet, dass ein Elektron ein Lichtquant emittieren kann und die entsprechende Energie zu besitzen, wenn das Photon schnell genug reabsorbiert wird.

Dabei bewirken die Photonen während ihrer Absorption und Emission auch einen Rückstoß, wodurch sich das Elektron nicht mehr auf einer Kreisbahn respektive einem Orbital um den Atomkern bewegt, sondern vielmehr eine Zitterbewegung δr beschreibt. Die Zitterbewegung bewirkt eine entsprechende Verschiebung im Potential des Atomkerns. Das bedeutet, dass Niveaus mit geringerem Kernabstand eine größere Energieverschiebung erfahren. Für den Mittelwert gilt $\langle \delta r \rangle = 0$. Aufgrund der Skalierung der potentiellen Energie mit $\frac{1}{r}$ gilt allerdings $\langle \frac{1}{r+\delta r} \rangle \neq \langle \frac{1}{r} \rangle$. Die Zitterbewegung kann als folgt veranschaulicht werden:

Aus urheberrechtlichen Gründen fehlt an dieser Stelle ein entsprechendes Bild. Selbiges ist der in der Fußnote genannten Literatur zu entnehmen. ³

¹Demtröder, Wolfgang - Experimentalphysik 3 (Atome, Moleküle und Festkörper), Springer, Kaiserslautern, 1996 (3. Aufl. 2005), S. 173

²Demtröder, Wolfgang - Experimentalphysik 3 (Atome, Moleküle und Festkörper), Springer, Kaiserslautern, 1996 (3. Aufl. 2005), S. 174

³Demtröder, Wolfgang - Experimentalphysik 3 (Atome, Moleküle und Festkörper), Springer, Kaiserslautern, 1996 (3. Aufl. 2005), S. 173

Anmerkungen

Im realen Experiment wird zusätzlich ein Zeeman-Effekt durch ein externes B-Feld bewirkt um den Abstand der betrachteten Atomniveaus zu vergrößern. Sonst kann es aufgrund eines als *Starkverschiebung* bezeichneten Effekts zu einer Vermischung des $2S_{1/2}$ und des $2P_{1/2}$ Zustands und infolgedessen zu einer *Entvölkerung* des ersteren Zustands kommen.

Die optische Beobachtung der Lamb-Verschiebung ist beim Wasserstoff nach herkömmlichen Methoden nicht möglich, da die Spektrallinien dazu zu stark dopplerverbreitert sind. Beim Heliumatom kann man die Lamb-Verschiebung jedoch auch optisch beobachten. Für das Wasserstoffatom ist eine spezielle dopplerfreie Spektroskopie mit Farbstofflasern erforderlich. Heute wird die Lamb-Verschiebung auch zu einer besonders genauen Bestimmung der Rydbergkonstante verwendet (vgl. Demtröder).

Probleme bereitete die Lamb-Verschiebung insbesondere in der theoretischen Physik, wo neue Renormierungstheorien erforderlich wurden. Die Betrachtung unendlicher Energien wird dadurch vermieden, dass nur der Energieunterschied zwischen gebundenen und freien Elektronen zu betrachten ist.

Auf eine formale Ableitung soll an dieser Stelle in Analogie zur Vorlesung verzichtet werden. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass eine entsprechende Darstellung in Haken, Wolf - Atom- und Quantenphysik, Kapitel 15.5 zu finden ist.