



III. Physikalisches Institut B, RWTH Aachen
Prof. Dr. Christopher Wiebusch, Dr. Philipp Soldin

Übungen zur Physik IV - SS 2024
Atome Moleküle Kerne

Übung 8

Ausgabedatum: 05.06.24

Abgabedatum: 12.06.24

Tag der Besprechung: 17.06.24

Verständnisfragen

Kapitel 6.3

1. Wie kommt es zur natürlichen Linienbreite von Spektrallinien?
2. Welche Form hat die natürliche Linienbreite?
3. Wie hängen Linienbreite, Lebensdauer der Zustände und Einsteinkoeffizienten miteinander zusammen?
4. Welche Rolle spielen Stöße bei der Linienbreite?
5. Was nennt man die Druckverbreiterung?
6. Was ist Dopplerverbreiterung und wie unterscheidet sich die Linienform?
7. Wie kann man die natürliche Linienbreite Doppler-frei in der Sättigungs-Spektroskopie messen?

Kapitel 7.1

8. Über welche beiden physikalischen Prozesse entsteht in einer Röntgenröhre Röntgenstrahlung?
9. Wie kann Röntgenstrahlung gemessen werden?
10. Was ist Bremsstrahlung und wie sieht das Spektrum aus?
11. Skizzieren Sie ein charakteristisches Röntgen-Emissionsspektrum!
12. Was sind Auger- und Konversions-Elektronen?

Kapitel 7.2

13. Was versteht man unter einer Alles-Oder-Nichts-Wechselwirkung? Was für ein Abschwächungsgesetz für die Strahlungsleistung ergibt sich daraus?
14. Beschreiben Sie mögliche Wechselwirkungsprozesse von Photonen. Welche sind für Röntgenstrahlung relevant?
15. Was sind Streu- und Absorptions- und Massenabschwächungskoeffizient?
16. Wie ist der Wirkungsquerschnitt definiert und was beschreibt er?
17. Wie hängen Abschwächungskoeffizient und Wirkungsquerschnitt zusammen?
18. Warum wurden die Größen Massenbelegung und Massenabschwächungskoeffizient eingeführt?
19. Skizzieren Sie das Aussehen eines charakteristischen Röntgen-Absorptionsspektrums!
20. Warum bilden Röntgenkanten so scharfe Strukturen im Abschwächungskoeffizienten?
21. Nach welchem Schema werden Röntgenlinien und Röntgenkanten bezeichnet?
22. Motivieren Sie das Mosley Gesetz!

Übungsaufgaben

Aufgabe 1 ★ ☆ ☆ ☆ ☆ RYDBERGZUSTÄNDE

(5 × 6 = 30 Punkte)

Rydbergatome sind Mehrelektronenatome, bei denen das äußerste Elektron in ein sehr hohes Energieniveau angeregt ist. Im Weltraum findet man Atome mit bis zu Quantenzahlen $n = 350$, im Labor erreicht man etwa $n = 100$. Im Labor stellt man solche hochangeregten Rydbergatome her, indem man z.B. einen verdünnten Lithiumdampfstrahl der Temperatur 650°C in eine Vakuumkammer einleitet und mit einem Farbstofflaser variabler Frequenz bestrahlt.

- Begründen Sie, warum hochangeregte Energie-Zustände des Elektrons in Vielelektronenatomen, die gleichen sind wie beim H-Atom.
- Das äußerste Elektron des Lithiumatoms sei im Labor durch einen Laser auf die Quantenbahn mit $n = 29$ gehoben worden. Berechnen Sie die Ionisierungsenergie dieses Rydbergatoms in eV.
- Vergleichen Sie diese Ionisierungsenergie mit der mittleren kinetischen Energie der Lithiumatome im Dampf der Temperatur 650°C . Begründen Sie, warum der Dampfstrahl sehr verdünnt sein muss, wenn man Emission von Strahlung durch Übergänge in den Grundzustand beobachten möchten.
- Welche Wellenlänge besitzt die emittierte Strahlung, die beim Übergang des Elektrons von $n = 29$ auf $n = 28$ auftritt? In welchem Spektral-Bereich elektromagnetischer Strahlung liegt diese Wellenlänge?
- Zeigen Sie, dass sich die Energiedifferenz zwei benachbarte Quantenbahnen der Quantenzahlen n und $n-1$ für $n \gg 1$ durch $\Delta E = \frac{2R}{n^3}$ approximieren lässt. Überprüfen Sie die Formel für den Balmer- α Übergang.

Aufgabe 2 ★ ★ ☆ ☆ ☆ NATÜRLICHE LINIENBREITE

(10 + 10 = 20 Punkte)

- In Positronium hat der Übergang vom 2^3P -Niveau in das 1^3S -Niveau eine Lebensdauer von 3.2 ns. Berechnen Sie die natürliche Linienbreite des Überganges.
- Betrachten Sie gasförmiges Helium. Die Niveaus 2^1S_0 und 3^1P_1 haben eine Lebensdauer von 1 ms bzw. 1.4 ns bzw. . Berechnen Sie die natürliche Linienbreite des Übergangs von 3^1P_1 auf 2^1S_0 .

Aufgabe 3 ★ ★ ★ ★ ★ DOPPLERFREIE SÄTTIGUNGSSPEKTROSKOPIE

(5 + 10 + 10 + 5 + 5 + 5 + 10 = 50 Punkte)

In der Vorlesung wurde Ihnen ein Experiment zur dopplerfreien Spektroskopie bei Rubidium gezeigt (AT-24, siehe Abbildung 1). Abb. 2 zeigt Ihnen das zu erwartende Termschema für die relevanten Rubidium Isotope. Während der Vorlesung wurden die Messdaten des Versuchs am Oszilloskop gespeichert. Ziel ist es, die Messwerte aus der Vorlesung zu analysieren und dieses Termschema zu verifizieren.

Die Daten finden Sie im JupyterHub für die Vorlesung.

In der Datei `DopplerfreieSpektroskopieRubidium.csv` finden Sie die Messung ohne Sättigungsstrahl. Zur Frequenzkalibration wurde mit CH2 (Dritte Spalte) das Signal eines Fabry-Perot-Interferometer aufgenommen. Damit wurde der Umrechnungsfaktor von 0.016 GHz/Datenzeile für Sie kalibriert. (Die Daten einer Zeile haben also eine Breite von 0.016 GHz.)

- Erstellen Sie ein Python-Skript oder Jupyter-Notebook und lesen Sie die Daten ein, rechnen Sie die Frequenz des Lasers X (erste Spalte) mit dem Umrechnungsfaktor in GHz um und stellen Sie die Daten des Oszilloskops CH1 (zweite Spalte) graphisch dar.
Hinweis: Das Einlesen von Daten wurde im Skript der Präsenzübung gezeigt.

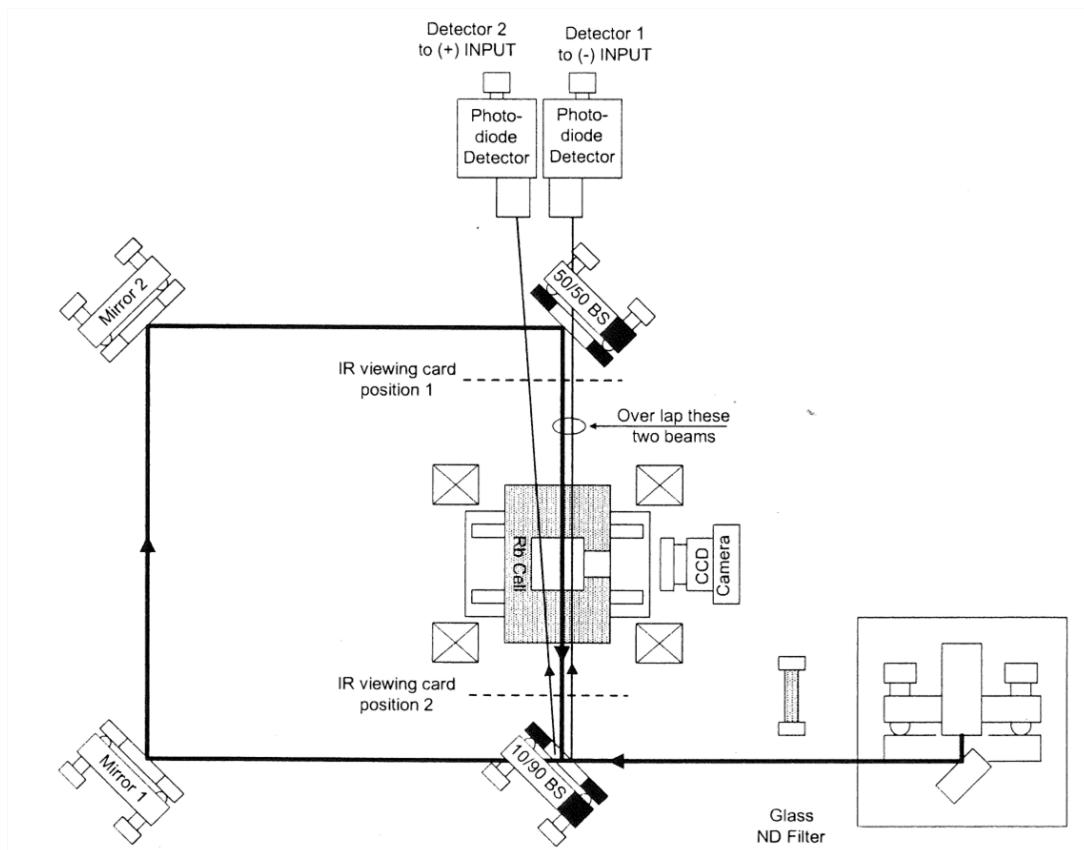


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur dopplerfreien Spektroskopie von Rubidium (AT-24).

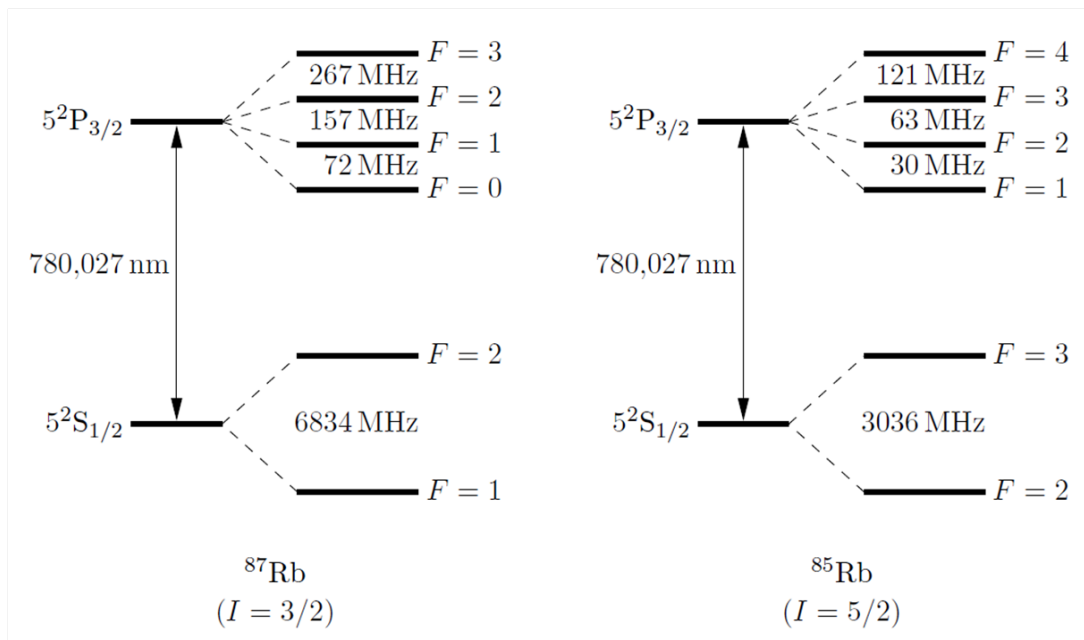


Abbildung 2: Das HFS Termschema von ^{87}Rb und ^{85}Rb .

- b) In der Abbildung, die Sie in der vorherigen Teilaufgabe erstellt haben, sehen Sie vier deutliche Minima, die einem fallenden Untergrund überlagert sind. Diese Minima korrespondieren zu überlagerten Übergängen der beiden Rubidium Isotope, die Sie auch im Termschema in Abbildung 2 entnehmen können. Argumentieren Sie mit dem Termschema, warum Sie vier Linien erwarten, und geben Sie für jedes Minimum an um welchem Übergang es sich handelt.

Hinweis: Beachten Sie, dass der Offset der X-Achse willkürlich ist. In Abbildung 2 sind die Frequenzunterschiede der Aufspaltungen gezeigt. Überlegen Sie, ob alle Übergänge der Hyperfeinstruktur im Lichte der Dopplerverbreiterung aufgelöst werden können und wenn nicht, welche als aufgelöste Übergänge sichtbar sind.

- c) Fitten Sie die Daten mit der folgenden Funktion, die die Minima mit Gauß-Funktionen und den Untergrund mit einer Geraden approximiert:

$$f(x) = p_0 + p_1 \cdot x + A_1 e^{-\left(\frac{x-\mu_1}{\sigma_1}\right)^2} + A_2 e^{-\left(\frac{x-\mu_2}{\sigma_2}\right)^2} + A_3 e^{-\left(\frac{x-\mu_3}{\sigma_3}\right)^2} + A_4 e^{-\left(\frac{x-\mu_4}{\sigma_4}\right)^2} \quad (1)$$

Geben Sie die Mittelwerte μ_i und Standardabweichungen σ_i mit $i \in \{1, 2, 3, 4\}$ an. Berechnen Sie aus den Breiten die Temperatur des Rubidiumgases.

- d) Warum können Sie in der vorherigen Aufgabe keine Lorentzkurve fitten, obwohl dies doch die Verteilung der natürlichen Linienbreite ist?
- e) Plotten Sie nun die Daten nach Anschalten des Sättigungsstrahls. Diese finden Sie in der Datei `DopplerfreieSpektroskopieHyperfineStruktur.csv`, die das gleiche Format wie im ersten Aufgabenteil hat. Hinweis: Diese Datei zeigt nur den Ausschnitt einer Linie aus dem vorherigen Messbereich. Beachten Sie, dass der Umrechnungsfaktor sich geändert hat und nun 0.0016 GHz beträgt.
- f) In der Abbildung aus dem vorherigen Aufgabenteil sehen Sie 6 Linien. Wie viele Linien würden Sie eigentlich auf Grund der Auswahlregeln sehen? Um welchen der vier vorherigen Übergänge handelt es sich? Hinweis: Die überzähligen Linien sind kombinatorischer Untergrund der entsteht, wenn der Energieunterschied von Doppler-bewegendem Gas mit einem anderen Übergang zusammenfällt.
- g) Die ganz rechte Linie ist ein realer HFS Übergang. Lesen Sie die Frequenzbreite ab und schätzen Sie die Lebensdauer des Zustandes. Hinweis: Hierbei handelt es sich um den ^{87}Rb Übergang $F = 3 \rightarrow F = 2$.

Hilfestellung:

Typische Ergebnisbilder der Aufgabenteile a) und e) sind im Folgenden gezeigt.

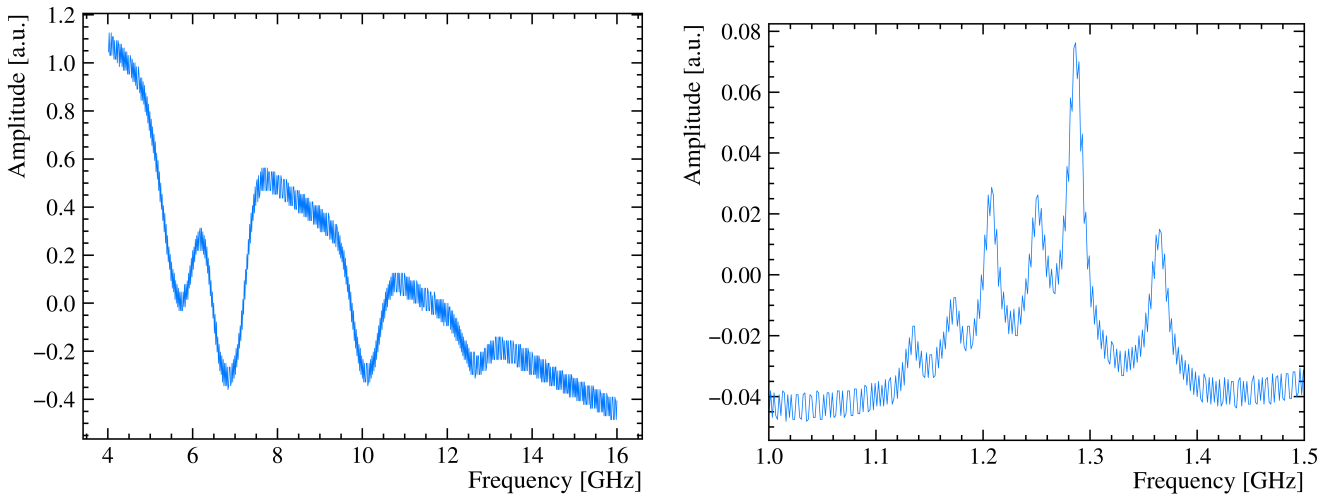


Abbildung 3: Daten zur zum dopplerfreien Spektroskopie von Rubidium (AT-24).