

**Teil 1: Observation of Atom Cooled below the Doppler Limit**Paul D. Lett *et al.*, PRL **2**, p.169 (1988)

- a) Wie funktioniert Laserkühlung von Atomen? Welche Rollen spielen spontane und stimulierte Emission bei diesem Prozess? Welche Effekte können eine vollkommene Abbremsung der Atome bis zum Stillstand verhindern?
- b) Welche Methoden werden beschrieben um die Temperatur der kalten Atome zu messen. Wie funktionieren Sie? Welche erachten Sie als am zuverlässigsten?

**Teil 2: Doppler-Limit**

Auf ein Atom, das sich mit der Geschwindigkeit  $v$  in einem Strahlungsfeld bewegt, wirkt über den Strahlungsdruck die Kraft (s.Vorlesung)

$$F(v) = \hbar k \gamma \rho_{ee} = \hbar k \frac{\gamma}{2} \frac{S_0}{1 + S_0 + [2(\delta - kv)/\gamma]^2}.$$

- a) Welche Kraft wirkt auf das Atom wenn es sich im Strahlungsfeld zweier gegenläufiger Laserstrahlen gleicher Frequenz befindet? Skizzieren sie den Verlauf der Kraft in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit.
- b) Linearisieren sie den Ausdruck für die Kraft um den Bereich der Geschwindigkeit  $v = 0$ , so dass  $F = -\beta v$ . Zeigen Sie so, dass Sie für  $kv \ll \gamma$  die Formel für den Dämpfungskoeffizienten

$$\beta = -4\hbar k^2 \frac{S_0(2\delta/\gamma)}{[1 + S_0 + (2\delta/\gamma)^2]^2}$$

aus der Vorlesung erhalten.

- c) Aus der oben stehenden Kraft ergibt sich die Kühlrate

$$\frac{dE}{dt}_{cool} = F(v)v = -\beta v^2.$$

Gleichzeitig erfährt das Atom aber auch ein Heizen

$$\frac{dE}{dt}_{heat} = \frac{1}{m} \frac{dp^2}{dt} = 2\gamma \rho_{ee} \frac{(\hbar k)^2}{m} = \gamma \frac{(\hbar k)^2}{m} \frac{S_0}{1 + S_0 + (2\delta/\gamma)^2}.$$

Zeigen Sie, dass im Gleichgewicht bei kleinen Strahlungsintensitäten ( $S_0 \ll 1$ ) die Energie des Atom

$$E_{ss} = \frac{\hbar\gamma}{8} \left( \frac{2\delta}{\gamma} + \frac{\gamma}{2\delta} \right)$$

ist.

- d) Bei welcher Verstimmung ist diese Energie minimal? Welche Formel erhalten sie so für die minimale Temperatur (Doppler Limit)?

### Teil 3: Stark Slower

a) Cäsium-Atome mit der Geschwindigkeit  $v_{x,0} = 319 \text{ m/s}$  in einem kollimierten Atomstrahl sollen durch Photonenabsorption aus einem gegenläufigen Laserstrahl mit  $\lambda = 894 \text{ nm}$  auf  $v_x = 0 \text{ m/s}$  abgebremst werden. Wie groß sind Bremsweg, Bremszeit und Bremsbeschleunigung, wenn  $1,4 \cdot 10^7$  Photonen/s absorbiert werden?

b) Da aufgrund der Doppler-Verschiebung  $\Delta\nu_{Dopp} = v_x/\lambda$  die Absorptionsfrequenz  $\nu_{abs} = \nu_{Las} - \nu_{Dopp}$  des Atoms nicht konstant ist, muss diese während des Abbremsens kontinuierlich der festen Laserfrequenz  $\nu_{Las}$  angepasst werden. Dies kann zum Beispiel mit einem ortsabhängigen elektrischen Feld  $\mathcal{E}(x)$  durch den Stark-Effekt geschehen. Nehmen Sie den quadratischen Stark-Effekt an, der zu einer Verschiebung der Absorptionsfrequenz um  $\Delta\nu_{Stark} = \frac{1}{2}\alpha|\mathcal{E}|^2$  führt. Zeigen Sie, dass für eine konstante Abbremsung ein Feldverlauf entlang der Abbremsstrecke  $L$  gemäß

$$\mathcal{E}(x) = \left( \frac{2\nu_{Las}v_{x,0}}{\alpha c} \right)^{1/2} \sqrt{1 - \sqrt{1 - x/L}} \quad (1)$$

nötig ist, wenn die Laserfrequenz  $\nu_{Las} = \nu_{abs} + v_{x,0}/\lambda$  ist. Wie groß ist  $\mathcal{E}(L)$  für die Cs D1-Linie ( $\alpha = 0,23 \text{ MHz}/(\text{kV}/\text{cm})^2$ , Laserwellenlänge  $\lambda = 894 \text{ nm}$ )?

**Abgabe und Besprechung am 24. Juni 2009**