Vorbesprechung

Einleitung

- Welchen Versuch führen wir heute durch?
- Was ist das Ziel des Versuchs? Was wollen wir in dem Versuch machen?
- Wozu benötigt man kalte Atome?

Rubidium

- Mit welchem Element arbeiten wir? Mit welchem Isotop arbeiten wir?
- Welche Wellenlänge benötigen wir ungefähr?
- Niveaustruktur ^{85}Rb, I=5/2, (n=5, S=1/2, L=0 (Grundzustand, J=1/2) und L=1 (ang. Zustand,J=1/2 bzw. 3/2), $|J-I| < F < J+I$, Natürliche Linienbreite $\Gamma = 2\pi \cdot 6\,\mathrm{MHz} = 1/\tau$ mit $\tau = 26\,\mathrm{ns}$ Lebensdauer.)

Laser und Laserstabilisierung:

- Diodenlaser mit externem Resonator (Littrow-Anordnung und Interferenzfilter);
- Laserschutz: Schutzbrille; Reflektierende Gegenstände ausziehen; Kopf nicht auf Strahlhöhe; nicht mit reflektierende Werkzeugen im Strahlengang
- Dopplerfreie Sättigungsspektroskopie;
- Offset-Lock
- PD: pin-Photodiode, Raumladungszone; Elektronenlochpaar entsteht durch absorbiertes Photon;
- PID-Regler: Regelung physikalischer Größe auf Sollwert; Proportional; Integral; Differenzialteil
- Aufbau Laserstabilisierung; Aufbau Offsetlock plus Elektronik;

Kühlen und Fangen $\leftrightarrow$ MOT

Optisches Kühlen (Spontankraft, Dopplerkühlung, Dopplerlimit)

- Spontankraft: $F = \hbar k \Gamma_{sc}$ mit $\Gamma_{sc} = \Gamma/2 \frac{s_0}{1+s_0+(2\Delta/\Gamma)^2}$ mit $\Delta = \omega_L \omega_R$; $s_0 = I/I_0$; Sättigungsintensität $I_0 = \pi hc\Gamma/(3\lambda^3)$
- Dopplerkühlung: $F_{OM} = F_{x+} + F_{x-}$ wobei $\Delta_{OM} = \Delta \mp k v_x$ Entwicklung für kleine Geschwindigkeiten: $F_{OM} = \frac{8\hbar k^2 \Delta s_0}{\Gamma(1+s_0+(2\Delta/\Gamma)^2)^2} v_x = -\beta v_x$ Dopplerlimit : $T_D = \frac{\hbar\Gamma}{2k_B} = 144\,\mathrm{uK}$
- Fangen von Atomen (Quadrupolfeld, Zeeman-Shift; Fangen) Quadrupolfeld : $B_x = B(x) = B_0 x$ Zeeman-Aufspaltung: $\Delta E = g_{F'} m_{F'} \mu_B B_x$ Verstimmung: $\Delta_{OM} = \Delta \mp k v_x \pm \frac{g_{F'} m_{F'} \mu_B B_0 x}{\hbar}$ Entwicklung für kleine Geschwindigkeiten und nahe Fallenmittelpunkt: $F_{MOT} = -\beta v_x - \kappa x$ gedämpfter harmonischer Oszillator
- Sub-Doppler-Kühlung: Lin/lin-Konfig: Sisiphus-Kühlung genannt; Energieverschiebung des Grundzustandes je nach Laserpolarisation (Bei σ^- ist $m_F = +1/2$ maximal und umgekehrt). Spontane Emission im Mittel keine Drehimpulsänderung. Recoil-Limit: $\frac{1}{2} k_B T_R = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} \leftrightarrow T_{\mathrm{recoil}} = 370\,\mathrm{nK}$.
- Sub-Doppler-Kühlung: Sigma/Sigma-Konfiguration: Stehende Welle, immer linear polarisiert; Keine Energieverschiebung; Besetzungsgleichgewicht der m_F Unterzustände hängt von Bewegungsrichtung ab; Dadurch mehr Streuung von entgegenkommenden Photonen und bremsende Wirkung.

Versuchsaufbau

- AOM und Glasfaser
- Aufbau MOT mit $\lambda/2$
- PBS sowie $\lambda/4$
- Ionen-Getter-Pumpe und Dispenser

Vorbereitungsfragen

- Welchen Vorteil bietet es, den Aufbau der MOT durch ein Glasfaserkabel von dem Aufbau der Laserstabilisierung zu trennen?
- In wiefern ist die durch den AOM verursachte Frequenzverschiebung des Laserlichtes in Bezug auf die Stabilisierung des Rückpump- und Kühllasers bzw. die in der MOT benötigte Frequenz relevant?
- Zu welchem Zweck werden die in der Laserstabilisierung und in der MOT eingezeichneten Verzögerungsplatten jeweils verwendet
- Zu welchem Zweck werden die PST verwendet und warum kommen sie immer in Kombination mit einer $\lambda/2$-Platte vor?
- Durch welche Größen/Faktoren werden die Laserfrequenzen beeinflusst? Welche dieser Faktoren sind gewollt bzw. ungewollt und wie können diese beseitigt werden?
- Welche Elemente werden zur Erzeugung einer MOT benötigt? Wo wird das Licht in die drei Strahlen aufgeteilt? Wie verlaufen die Strahlen?

1 Auswertung

Eindimensionale Betrachtung

Annahme: Gaußverteilung zu $t = 0$

$$n(r, t = 0) \propto \exp\left(\frac{-x^2}{2\sigma_x^2}\right) \tag{1}$$

Mit der eindimensionalen Geschwindigkeitsverteilung (Maxwell-Boltzmann)

$$g(v, T) = \left[\frac{m}{2\pi kT}\right]^{\frac{1}{2}} \exp\left(\frac{-mv^2}{2kT}\right) \tag{2}$$

gilt dann zum Zeitpunkt $t > 0$:

$$\begin{aligned}
n(r, t > 0) &\propto \int \mathrm{d}v \exp\left(\frac{-(x-vt)^2}{2\sigma_x^2}\right) \cdot g(v, T) && (3)\\
&\propto \int \mathrm{d}v \exp\left(\frac{-(x-vt)^2}{2\sigma_x^2}\right) \cdot \exp\left(\frac{-mv^2}{2kT}\right) && (4)\\
&= \int \mathrm{d}v \exp\left(\frac{-x^2}{2\sigma_x^2} + \frac{2xvt}{2\sigma_x^2} - \frac{v^2t^2}{2\sigma_x^2} - \frac{mv^2}{2kT}\right) && (5)\\
&= \int \mathrm{d}v \exp\Bigg(\frac{-x^2}{2\sigma_x^2} + v \underbrace{\left(\frac{xt}{\sigma_x^2}\right)}_{b} - v^2 \underbrace{\left(\frac{t^2}{2\sigma_x^2} + \frac{m}{2kT}\right)}_{a^2}\Bigg) && (6)
\end{aligned}$$

Bronstein, Wolfram o.ä. liefert:

$$\begin{aligned}
n(r, t > 0) &\propto \exp\left(\frac{-x^2}{2\sigma_x^2}\right) \cdot \exp\left(\frac{b^2}{4a^2}\right) && (7)\\
&= \exp\left(\frac{-x^2}{2\sigma_x^2}\right) \cdot \exp\left(\frac{\left(\frac{xt}{\sigma_x^2}\right)^2}{4\left(\frac{t^2}{2\sigma_x^2} + \frac{m}{2kT}\right)}\right) && (8)\\
&= \exp\left(\frac{-x^2}{2\sigma_x^2} + \frac{x^2t^2}{4\sigma_x^4\left(\frac{t^2}{2\sigma_x^2} + \frac{m}{2kT}\right)}\right) && (9)\\
&= \exp\left(\frac{-x^2}{2\sigma_x^2} + \frac{x^2t^2}{2\sigma_x^4\left(\frac{t^2}{\sigma_x^2} + \frac{m}{kT}\right)}\right) && (10)\\
&= \exp\left(\frac{-x^2 \cdot \sigma_x^2\left(\frac{t^2}{\sigma_x^2} + \frac{m}{kT}\right) + x^2t^2}{2\sigma_x^4\left(\frac{t^2}{\sigma_x^2} + \frac{m}{kT}\right)}\right) && (11)\\
&= \exp\left(\frac{-x^2t^2 - x^2\sigma_x^2\frac{m}{kT} + x^2t^2}{2\sigma_x^4\left(\frac{t^2}{\sigma_x^2} + \frac{m}{kT}\right)}\right) && (12)\\
&= \exp\left(\frac{-x^2\sigma_x^2\frac{m}{kT}}{2\sigma_x^4\left(\frac{t^2}{\sigma_x^2} + \frac{m}{kT}\right)}\right) && (13)\\
&= \exp\left(\frac{-x^2\frac{m}{kT}}{2\sigma_x^2\left(\frac{t^2}{\sigma_x^2} + \frac{m}{kT}\right)}\right) && (14)\\
&= \exp\left(\frac{-x^2\frac{m}{kT}}{2t^2 + 2\sigma_x^2\frac{m}{kT}}\right) && (15)\\
&= \exp\left(\frac{-x^2}{2\left(\frac{kT}{m}t^2 + \sigma_x^2\right)}\right) && (16)
\end{aligned}$$

Die Atomdichte entspricht also wieder einer gaußschen Verteilung, allerdings mit breiteren Varianz

$$\sigma_x^2\left(t\right) = \frac{kT}{m}t^2 + \sigma_x^2 \tag{17}$$

Alternativ kann Gleichung (4) zu

$$n(r, t > 0) \propto \int \mathrm{d}v \exp\left(\frac{-(\frac{x}{t} - v)^2}{2\frac{\sigma_x^2}{t^2}}\right) \cdot \exp\left(\frac{-v^2}{2\frac{kT}{m}}\right)$$

umgeformt werden. Hier ist die Faltung zweier Normalverteilungen f_1 und f_2 im Sinne von

$$f\left(\frac{x}{t}\right) = (f_1 * f_2)\left(\frac{x}{t}\right) = \int n_1\left(\frac{x}{t} - v\right) n_2\left(v\right) \mathrm{d}v$$

zu erkennen. Diese Faltung ergibt bekanntermaßen wieder eine Normalverteilung. Mit $\mu_1 = \mu_2 = 0$, $\sigma_1^2 = \frac{\sigma_x^2}{t^2}$ und $\sigma_2^2 = \frac{kT}{m}$ folgt dann für die Normalverteilung f:

$$\begin{aligned} \mu &= \mu_1 + \mu_2 = 0 \\ \sigma^2 &= \sigma_1^2 + \sigma_2^2 = \frac{\sigma_x^2}{t^2} + \frac{kT}{m} \end{aligned}$$

Dies liefert mit

$$\begin{aligned} n(r, t > 0) &\propto \exp\left(\frac{\left(\frac{x}{t}\right)^2}{2\sigma^2}\right) \\ &= \exp\left(\frac{x^2}{2\sigma^2 t^2}\right) \\ &= \exp\left(\frac{-x^2}{2\left(\frac{kT}{m}t^2 + \sigma_x^2\right)}\right) \end{aligned}$$

das gleiche Ergebnis (Gleichung (17)) wie obige Herleitung.