

冷原子实验中的吸收成像法

李桐

(Dated: 2021 年 6 月 29 日)

本文中主要介绍了冷原子实验中的吸收成像法。我将详细讨论了利用吸收成像信号估算冷原子数目所需的参数，并介绍了计算并推导确定冷原子团温度所需的方程。

I. 介绍

光学成像系统是几乎所有物理实验的核心。由光学系统有效地收集的光及其转换成图像可以很好地洞察发生的各种物理过程。激光冷却技术的发现和发展导致了超低温物理的快速发展，在超低温领域内观察到了玻色和爱因斯坦在20世纪就预言的物质波。不论是冷原子本身还是将超冷原子装入光晶格进行量子模拟都需要观察和检验，这些需求导致了各种光学成像技术的发展，从吸收法到荧光法。

在本报告中，我们将只讨论吸收成像。吸收成像是目前用于超冷原子的实验的最流行的成像技术。它可以提供原子空间分布的信息，原子数以及原子团的平均温度。

II. 理论

A. 冷原子团数目估算

在吸收成像中，冷原子云被与其共振的激光束照射。原子对光的吸收会投射出阴影，即共振光因为被吸收而光强减弱的暗区，然后将其成像到 CCD 相机上。被原子云吸收的光量是光密度，对激光束强度的相应变化由比尔定律给出[1]：

$$I = I_0 e^{-OD} \quad (1)$$

其中 I_0 是入射光强， I 是出射光强，如果入射光强小于饱和光强，则公式1可以利用原子密度 $n(x, y)$ 和原子吸收截面 σ 重新写作：

$$I = I_0 e^{-n(x, y)\sigma} \quad (2)$$

其中吸收截面 σ 由下式给出：

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{1 + 4 \left(\frac{\Delta}{\Gamma}\right)^2 + \frac{I_0}{I_{sat}}} \quad (3)$$

σ_0 是共振吸收截面，由下式给出：

$$\sigma_0 = \frac{\hbar\omega\Gamma}{2I_{sat}} \quad (4)$$

此处， Δ 光的失谐， Γ 是激发态的自然衰减速率， I_{sat} 是饱和光强。

通过对比公式1和2，不难得到：

$$OD = n(x, y)\sigma \quad (5)$$

实验上，我们可以通过测量激光束的入射和出射强度来测量光密度。然而，要测量实际的光密度，我们需要考虑饱和和暗电流以及杂散光的影响。考虑到所有这些因素，最终的光密度使用下式计算：

$$OD_{actual} = OD_{mod} + (1 - e^{OD_{mod}}) \frac{I_0}{I_s} \quad (6a)$$

$$OD_{mod} = \ln \frac{1 - e^{-OD_{sat}}}{e^{-OD_{meas}} - e^{-OD_{sat}}} \quad (6b)$$

$$OD_{meas} = \ln \frac{I_{light} - I_{dark}}{I_{atoms} - I_{dark}} \quad (6c)$$

上式中 I_{light} 是探测光未经过原子的强度， I_{dark} 是探测光关闭，CCD全开的背景光噪底， I_{atoms} 是探测光经过原子后的强度， OD_{sat} 是饱和光密度，实验上可以通过创建一个高密度的冷原子团，使其扩散较短时间然后拍照，这样测出来的 OD 将会出现平台，即其饱和值。之后在做吸收成像的时候，扩散时间适当加长，满足 $OD_{meas} < OD_{sat}/2$ 。 OD 出现饱和的原因主要有两点，一是探测光中有偏离共振的分量，造成可测量的 OD 值较小，二是有大量杂散光通过散射进入 CCD 窗口。现在，为了估计原子数，我们重新整理公式5，并沿 x 和 y 方向积分，得到总的原子数：

$$\begin{aligned} n &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} n(x, y) dx dy \\ &= \frac{1}{\sigma} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} OD_{actual} dx dy \end{aligned} \quad (7)$$

B. 冷原子团温度计算

测量冷原子团温度的方法可用黏团扩展法[2]，是在关闭冷却光一段时间后用吸收成像的方法来观察光学黏团图像的变化，根据吸收的强弱得到原子密度的空间分布图像，从而求得温度。光学黏团中的原子在自由扩散之前的速度分布满足麦克斯韦-玻尔兹曼分布：

$$f(v_i, t) = \left(\frac{m}{2\pi k_B T} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{mv_i^2}{2k_B T}\right) \quad (i = x, y, z) \quad (8)$$

式中， v_i 表示方向 i ($i = x, y, z$)上的速度， k_B 为玻尔兹曼常数， T 为原子团温度， t 为自由扩散时间。现在假设云中有 N 个这样的原子，将 v_i 用 $r_i - r_{0i}/t$ 代替，得：

$$f(r_i - r_{0i}, t) = \left(\frac{m}{2\pi k_B T t^2} \right)^{3/2} \exp\left[-\frac{m}{2k_B T} \left(\frac{r_i - r_{0i}}{t} \right)^2\right] \quad (9)$$

在中心处原子团的密度空间分布近似于高斯分布：

$$n_0(r_{0i}) = \left(\frac{1}{2\pi\sigma_{0i}^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{r_{0i}^2}{2\sigma_{0i}^2}\right) \quad (10)$$

式中 σ_0 表示各方向上原子团的原始大小（半径除以 $\sqrt{2}$ ，即密度降为 $1/e$ ），经过变化，得到扩散时间 t 后原子团的分布为：

$$\begin{aligned} n(r_i) &= \int f(r_i - r_{0i}, t) n_0(r_{0i}) dr_{0i} \\ &= \left(\frac{1}{2\pi\sigma_{it}^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{r_i^2}{2\sigma_{it}^2}\right) \end{aligned} \quad (11)$$

其中

$$\sigma_i^2(t) = \sigma_i^2(0) + k_B T t^2 / m \quad (12)$$

同样原子团的半径 $a_i = \sqrt{2}\sigma_i$ ，因此有：

$$a_i^2(t) = a_i^2(0) + 2k_B T t^2 / m \quad (13)$$

实验上通过两个不同的扩散时刻 t_1 和 t_2 （假设 $t_2 > t_1$ ）得到的原子团半径为 $a_i(t_1)$ 和 $a_i(t_2)$ ，由此可得到冷原子团的温度

$$T = \frac{m}{2k_B} \left[\frac{a_i^2(t_2) - a_i^2(t_1)}{t_2^2 - t_1^2} \right] \quad a_i^2(t) = a_i^2(0) + 2k_B T t^2 / m \quad (14)$$

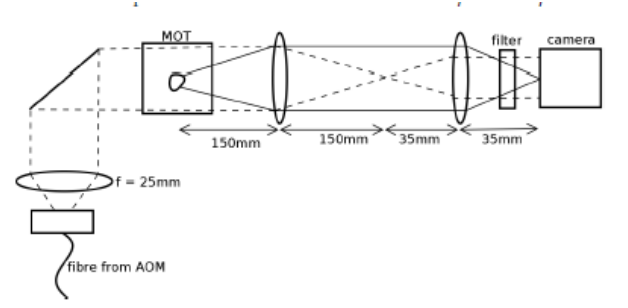


图 1. 吸收成像的实验装光路图。

III. 实验装置

图1[3]展示了一种最为简单原始的吸收成像的光路图。来自AOM的光纤出射的光束经由焦距 $f = 25\text{mm}$ 的透镜准直，扩束到足够大，可以与整个原子云重叠。在磁光阱MOT之后，光束被缩小到相机中芯片的大小。

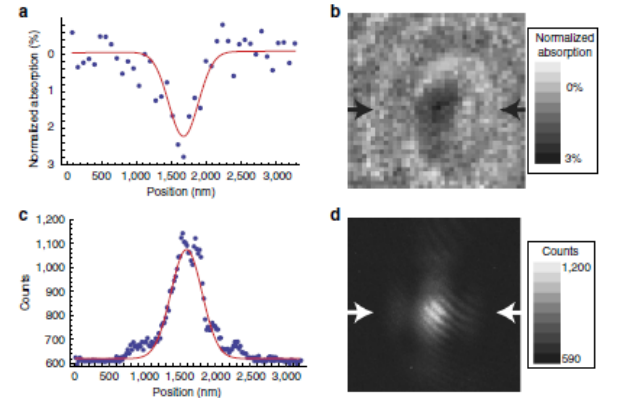


图 2. 吸收成像和荧光成像对比。

图2 [4]显示了通过吸收（图 2b）和荧光（图 2d）成像获得的单个离子的图像。两个图像中空间离子强度的轻微调制是由干涉滤光片的标准具效应引起的。

IV. CONCLUSION

本文主要调研并介绍了冷原子实验中常用的一种成像或探测手段——吸收成像法。其原理很简单，就是利用一种近共振或共振的探测光束在冷却光关闭的情况下照射冷原子样品，然后将穿过冷原子的光束照射在CCD上。该方法被广泛应用于冷原子团MOT中

的原子数目估算和温度估计，也可以在更高精度上对单原子进行高分辨率成像。

-
- [1] P. Tadas, “Developing and building an absorption imaging system for ultracold atoms,”.
- [2] 王义道, 原子的激光冷却与陷阱, 第一版 ed. (北京大学出版社) Chap. 5.2, pp. 178–179.
- [3] L. Kathrin, “Measurement of the number of atoms in a magneto-optical trap using absorption imaging,”.
- [4] E. W. Streed, A. Jechow, B. G. Norton, and D. Kielpinski, NATURE COMMUNICATIONS **3** (2012), 10.1038/ncomms1944.