

## 实验一：超冷原子量子振荡跃迁

### 1. 实验目的

高校物理教学开展实体量子实验面临诸多的困难：(1)量子物理实验一般在超净实验室中运行，对实验空间环境要求严格，如温度、湿度、空气粉尘颗粒；(2)量子物理实验采用的大型激光器等设备价格昂贵，且专项技能培训周期长；(3)大功率激光具有极强的破坏性，具有激光辐射危险性；(4)实验环境温度低于宇宙空间温度，现实不可及。

本实验通过虚拟仿真技术进行超冷原子量子振荡跃迁的实验，巩固迈克尔孙干涉仪的搭建和使用方法及注意点，探究卡诺循环制冷和激光制冷的工作原理，并探究量子振荡跃迁的原理和分析方法。

### 2. 实验原理

超冷原子量子振荡跃迁的原理主要包括迈克尔孙干涉原理、多普勒激光制冷原理和量子振荡跃迁原理三个部分。

#### 2.1. 迈克尔孙干涉原理

一束激光通过如Figure 1所示的迈克尔孙干涉仪后会产生两束全同激光，之后在空间中发生干涉，在光屏上呈现出明暗相间的同心圆环。根据光路的原理，激光的波长为

$$\lambda = \frac{2\Delta d}{N},$$

其中 $\lambda$ 为激光的波长， $\Delta d$ 为光程差， $N$ 为圆环消失/增加的圈数。

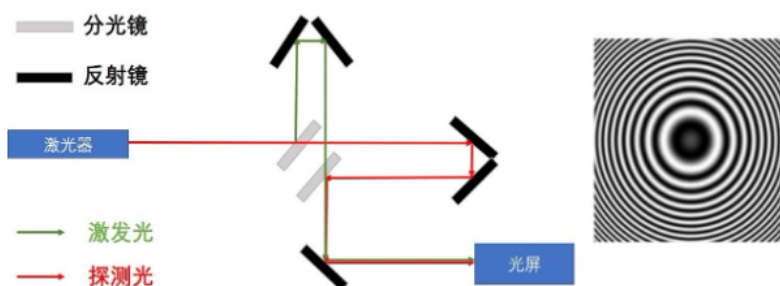


Figure 1: 迈克尔孙干涉条纹原理示意图和干涉条纹

#### 2.2. 多普勒激光制冷原理

多普勒激光制冷利用了光束的多普勒频移效应，当原子运动方向与光束同向时，原子感受到的光频率小于真实光频率；当原子运动方向与光束相反时，原子感受到的光频率大于真实光频率。若原子处在与其运动方向相反的光束中，则原子将从与原子运动方向相反的光束中吸收光子，获得与运动方向相反的净动量，且被激发至激发态。原子吸收光子后将通过自发辐射

过程回到基态，而由于自发辐射过程是各向同性的，统计平均后，辐射过程传递给原子的净动量为零。最终原子获得了与运动方向相反的动量，即原子被冷却。理论估算表明多普勒冷却的极限温度是：

$$T_{\min} = \frac{\hbar\Gamma}{2k_b},$$

其中 $k_b$ 是玻尔兹曼常数， $\hbar$ 是约化普朗克常数， $\Gamma$ 是激发态的自发辐射速率。

### 2.3. 量子振荡跃迁原理

利用激光冷却技术将宏观数量的原子俘获在基态的能级上，然后通过光子激发，将原子从基态激发到较高能量的量子态。第一组光子将原子从基态部分激发到激发态得到叠加量子态，电子在基态和激发态之间进行周期性快速迁移，周期为 $T$ 。利用第二组完全相同的激光将激发态原子退激发到初始态基态，将这两组激光之间的时间延迟 $\tau$ 稳定在Ås时间尺度上，其中激发态 $P_e$ 和基态 $P_g$ 的几率分布满足：

$$P_e = f(T, \tau) = A \cos\left(2\pi\frac{\tau}{T} + \frac{\pi}{2}\right),$$

$$P_g = 1 - f(T, \tau) = 1 - A \cos\left(2\pi\frac{\tau}{T} + \frac{\pi}{2}\right).$$

通过时间延迟技术调节 $\tau$ 可以观测多体系统中的相干动力学随时间的演化。量子振荡跃迁的实验装置如Figure 2所示。

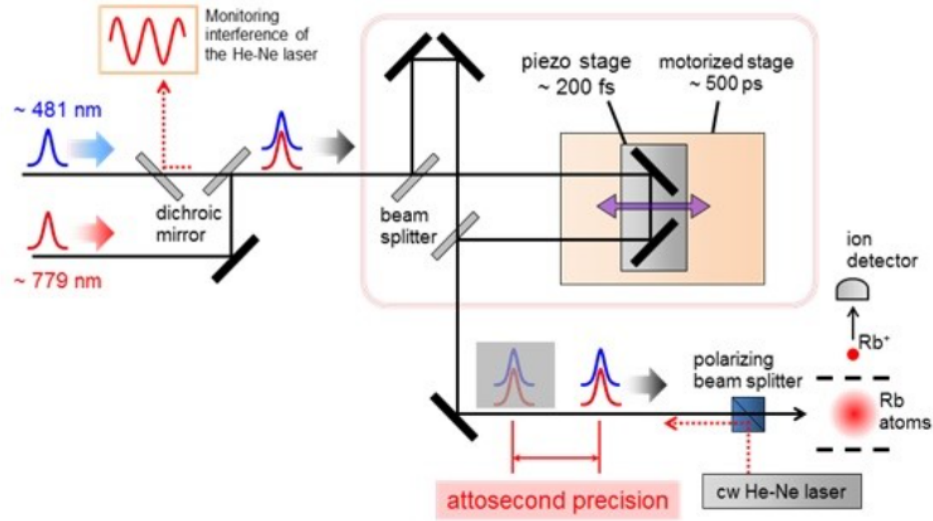


Figure 2: 量子振荡跃迁实验图

### 2.4. 实验仪器

He-Ne激光器(632.8nm)，2块分光镜，5块反射镜，外加压缩机的冷原子激发装置，示波器。

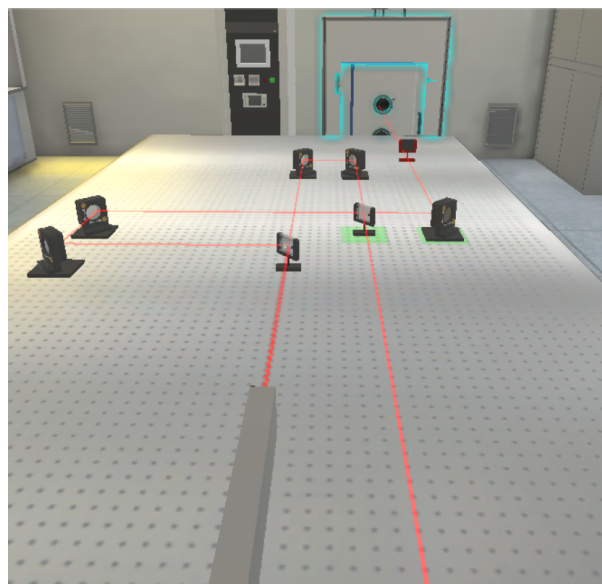
### 3. 实验步骤

#### 3.1. 实验准备

量子物理实验对实验空间环境要求严格，必须穿戴好防护服和护目镜，并在风淋除尘后再进入实验室。

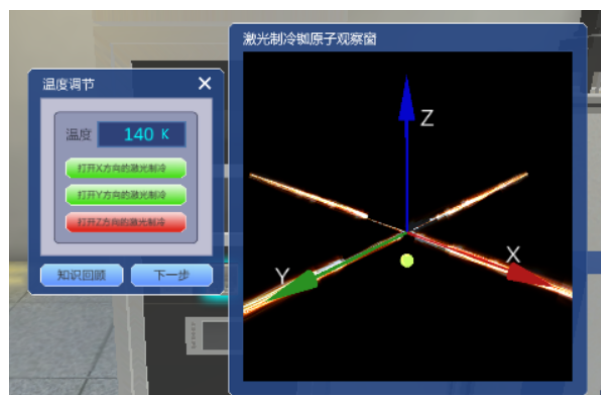
#### 3.2. 搭建迈克尔孙干涉仪

选择波长为632.8nm的He-Ne激光器作为光源，随后按图示位置按顺序放置分光镜和反射镜，仔细调节光路，直至被分光板分开的两束相干光最终都进入冷原子激发装置。此时可以测量干涉环。



#### 3.3. 制冷原子

从室温300K逐渐制冷至0.1K。首先用卡诺循环机制冷将原子温度从300K降为243K。然后用激光制冷原子，顺次打开三个方向的激光制冷，观察原子动量的变化趋势。



### 3.4. 量子振荡跃迁

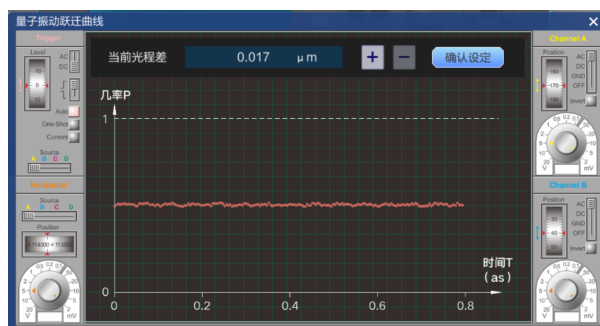
在示波器上查看量子振动跃迁的波形图。通过调整光程差来获得不同的量子跃迁信号。  
用正弦函数模型拟合量子跃迁信号。

## 4. 实验记录及结果分析

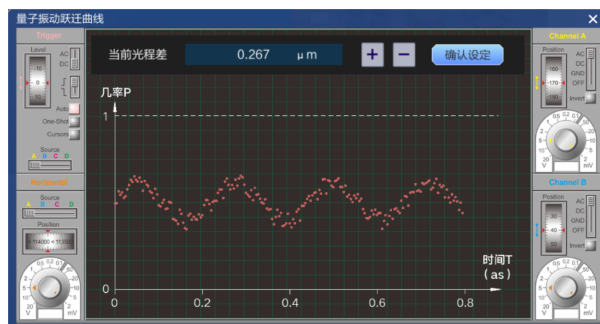
搭建完迈克尔孙干涉仪后，用卡诺制冷原理将原子温度从300K降为243K，原子的布朗运动剧烈程度明显减弱。

然后逐次打开三个方向的激光制冷，可以明显观察到，当我们打开 $n$ 方向( $n = x, y, z$ )的激光制冷时，原子在 $n$ 方向的动量就减小：起初原子在容器内整个空间随机运动；打开 $x$ 方向激光制冷，温度从243K降至140K后，原子在 $x$ 方向运动范围减小，主要在 $yz$ 方向运动；打开 $y$ 方向激光制冷,温度从140K降至50K后，原子在 $y$ 方向运动范围减小，几乎只在 $z$ 方向作一维运动；打开 $z$ 方向激光制冷,温度从20K降至0.1K后，原子在 $z$ 方向运动范围减小，被束缚在空间中某一点上。此时原子也就被俘获在了其基态上。

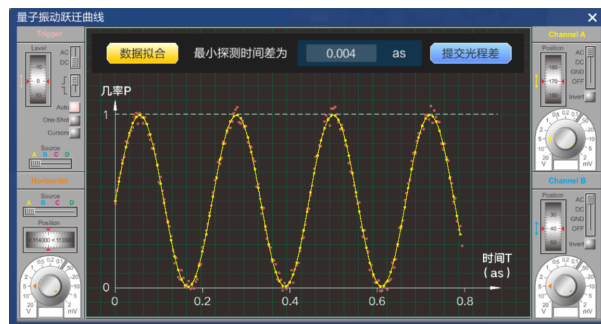
在示波器上观察量子跃迁信号时，发现不同的光程差会对应不同的信号类型。实验中光程差的可调范围为 $0.617\mu\text{m}$ 至 $0.017\mu\text{m}$ ，最小步幅为 $0.0125\mu\text{m}$ 。当光程差在 $0.617\mu\text{m}$ 到 $0.3795\mu\text{m}$ 及 $0.2545\mu\text{m}$ 到 $0.017\mu\text{m}$ 时，量子振荡曲线表现为纯噪声。



当光程差在 $0.3795\mu\text{m}$ 到 $0.2545\mu\text{m}$ 时，量子振荡曲线表现为可见的正弦波。当光程差等于 $0.317\mu\text{m}$ 时，正弦波的振幅最大，曲线的最大值约为1，最小值约为0。



用正弦函数拟合量子跃迁信号，信号周期约为 $0.22\text{\AA s}$ ，与光程差无关。



## 5. 实验结论

实验中用迈克尔孙干涉仪制备出相干光作为原子制冷和实现原子跃迁的激光光源；然后用卡诺循环机制冷及激光制冷原理将铷原子制冷到0.1K，从而捕获在基态上，为原子跃迁做准备；最后用光子激发原子使其在基态和激发态之间跃迁，读取量子跃迁信号并用正弦函数拟合，得到其周期约为0.22Ås。