

本组选做的两个实验为：“超冷原子量子振荡跃迁”和“光镊原理及应用”

超冷原子量子振荡跃迁

19307110277 于瀚清

一. 实验背景

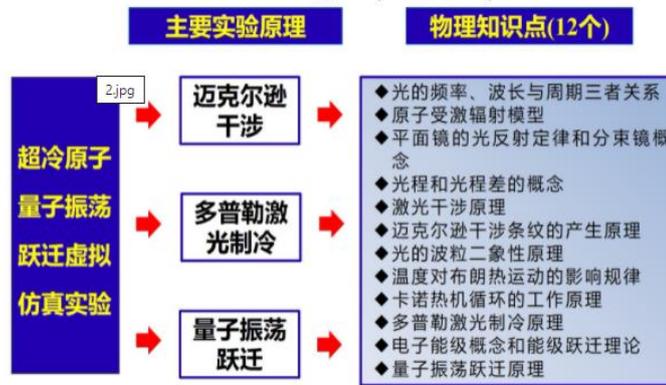
针对特定场景超冷等离子体需要满足的轨道半径很大，寿命长，相干时间长，极化率大的要求，基于原子间强相互作用的超冷里德堡原子可以实现高保真度的量子操作。超冷里德堡原子是高能物理实验室的设备，高成本、高辐射、高危险的“三高”特点使其很难由本科生直接实验操作。

本实验通过模拟超冷里德堡原子拉姆齐振荡场景，让学生通过阅读了解拉姆齐振荡的相关实验简介及基本原理说明，并采用全三维光学实验室场景展示各种实验元器件。学生可以以第一人称视角，进入实验室场景中，通过观察各种实验元器件的三维模型，学习各种元器件的基本功能和工作原理。

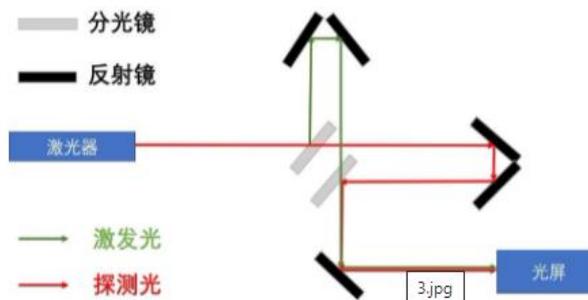
在本实验中，学生通过计算，校核，设计，确定合适的光路搭建，信号调试等，构建包含多个部件的产生拉姆齐振荡的系统，并对拉姆齐振荡结果进行分析，以确定是否以最优化的方式，最合理的结构达到特定频率的振荡。

二. 实验原理

本实验通过团队成员前言科研成果进行教学转化，完成“光路系统设计—激光制冷系统—量子振荡跃迁”全流程的梳理，从而开发此虚拟仿真实验系统。实验的原理主要包含迈克尔逊干涉原理，多普勒激光制冷原理和量子振荡跃迁原理三个部分。



迈克尔逊干涉原理：一束激光通过如下图所示的光学元件后产生两束全同激光，之后在空间中发生干涉，在光屏中呈现出明暗相间的同心圆环。



测量激光的波长用如下公式： $\lambda = \frac{2\Delta d}{N}$ ，其中 λ 为光的波长， Δd 为光程差， N 为圆环消失

/增加的圈数。

多普勒激光制冷原理：多普勒冷却利用了光束的多普勒频移，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反向时，则反之。若原子处在对射更接近原子的跃迁共振频率，因此原子将从与原子运动方向相反的光束中吸收更多光子，获得与运动方向相反的净动量。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：

$$T_{min} = \frac{\hbar\Gamma}{2k_B}$$

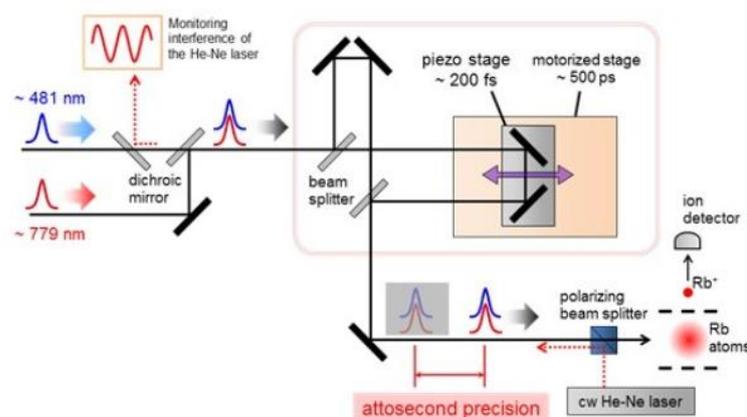
其中 k_B 是玻尔兹曼常数， \hbar 是约化普朗克常数， Γ 是激发态的自发辐射速率。

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 τ 稳定在阿秒时间尺度上，其中激发态和基态的几率满足：

$$P_e = f(T, \tau) = A \cos(2\pi\tau/T + \pi/2)$$

$$P_g = 1 - f(T, \tau) = 1 - A \cos(2\pi\tau/T + \pi/2)$$

通过时间延迟技术调节 τ 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下图所示：



三. 实验步骤

1. 实验安全准备

按照要求穿戴防护服，佩戴护目镜，风淋除尘

2. 光路系统设计

选择合适的激光源（He-Ne 激光器），制备全同光粒子，放置分光镜和反射镜，实现光相干，测量干涉环。

3. 激光制冷原子

调节原子的布朗运动，利用激光制冷技术将原子温度降至接近 0K。

4. 量子振荡跃迁

调控探测量子信号，观察原子振荡跃迁过程，拟合量子信号。

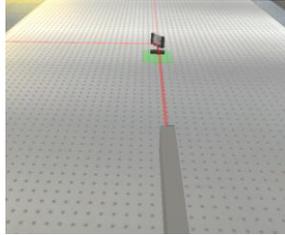
四. 实验仪器

He-Ne 激光器，单面镀有半反半透膜的分光镜 x2，反射镜 x5，光屏，外加压缩机的激光制冷装置，示波器。

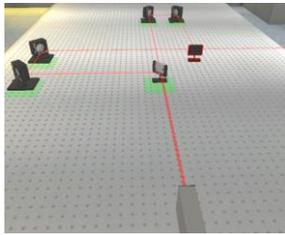
五. 实验记录与数据处理

1. 光路系统设计

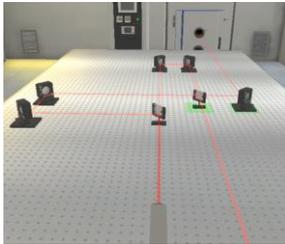
首先，在激光器的前方放置一个分光镜，角度调整为 135° ，使入射激光分为水平和垂直两束光。如图所示



然后放置反射镜角度调整为 45° 和 135° ，使两束光汇聚到同一平面上产生干涉。



最后再放置一个反射镜，把干涉后的光束投射到冷原子激发装置上，查看光学条纹干涉结果。



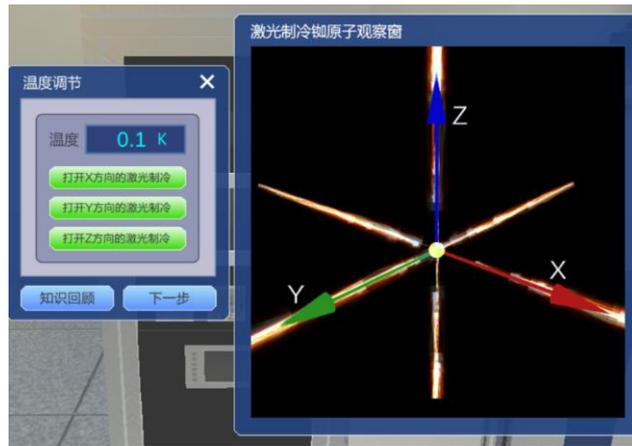
可以观测到干涉图样如图所示：



测得长出 20 个圆环时的光程差为 $12.660\mu\text{m}$ ，即两条干涉光的光程差为 $0.633\mu\text{m}$ 。

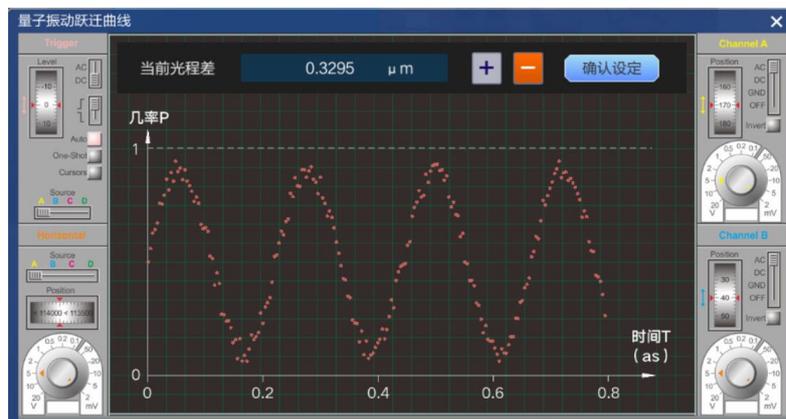
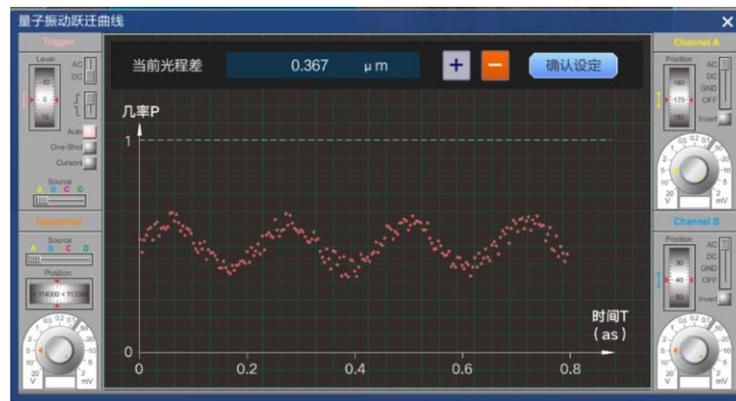
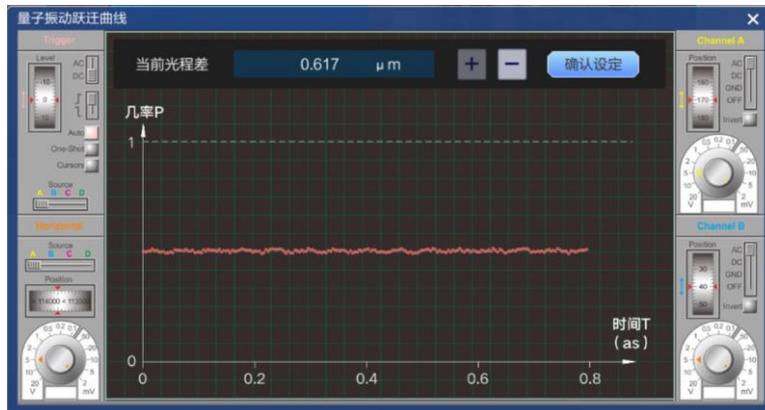
2. 激光制冷原子

完成光路搭建后，打开外加压缩机的制冷装置，降低冷原子激发装置内的温度至 243K 。之后打开激光制冷装置，按顺序打开 x ， y ， z 方向的激光制冷，使装置内的温度下降至 0.1K ，进行下一步实验。

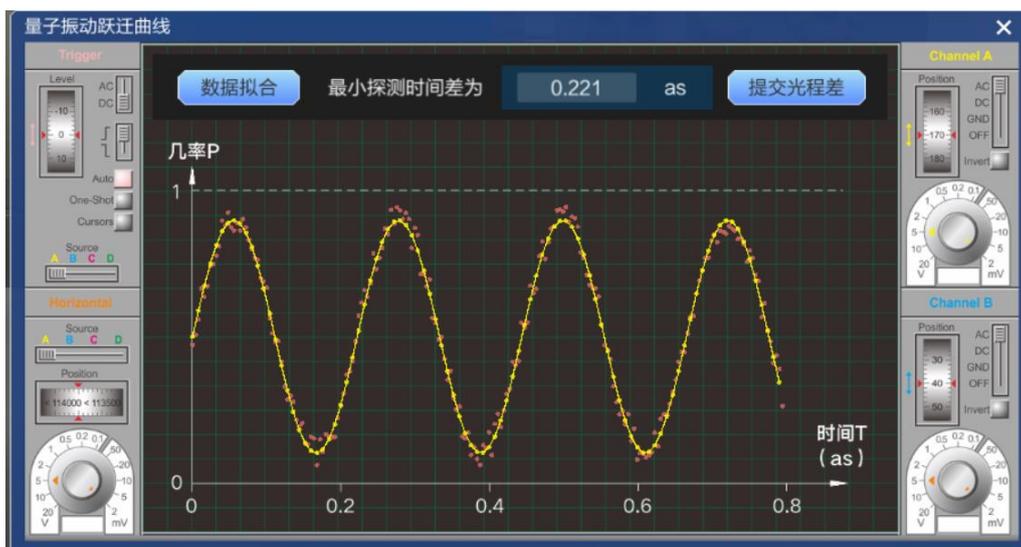


3. 量子振荡跃迁

打开示波器，调整光程差。可以看到，起初示波器的图案杂乱无章，在减小光程差之后，逐渐显示出周期性变化，当减小到 $0.3295\mu\text{m}$ 时，显示出正弦波图案。



选取 $0.3295\mu\text{m}$ 下的数据点进行正弦波拟合，如图所示，得到周期约为 0.221as 。



六. 实验结论

本实验中，我们以氦氖激光器作为光源，使用分光镜和反射镜制备出相干光作为激光光源，并使用激光制冷技术使温度降低至 0.1K ，最后用示波器读出铷原子的拉姆齐振荡周期为 0.221as 。

光镊原理及应用

19307110277 于瀚清

一. 实验目的

1. 了解激光束的基本特性
2. 掌握光镊形成的基本原理
3. 掌握构成光镊系统的多种光学仪器和器件的功能和特性
4. 掌握光镊对微观粒子的操作功能和方法
5. 明确光镊捕获力的测定方法
6. 了解光纤光镊的构建原理

二. 实验原理

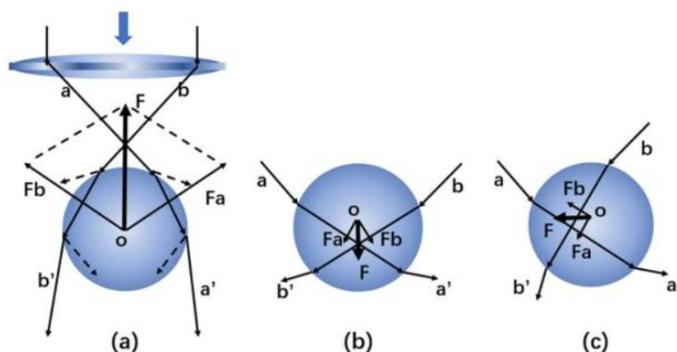
1986年，贝尔实验室的 Ashkin 教授发现将单束激光高度聚焦后可以将微粒稳定的捕获住，他将这种技术命名为光镊技术。2018年光镊技术被授予诺贝尔物理学奖。光镊可以冷却原子，实现微纳尺度粒子的微观排列和微加工，甚至还可以移动或分选新型冠状病毒细胞和生物细胞等，在生物，医学，化学，物理和微加工领域都有广泛的应用。

光学力源于光与物体相互作用时产生的动量交换，包括梯度力和辐射压力，梯度力是物体在不均匀电场中发生极化，将物体吸引到电场最强的位置。辐射压力由散射引起，光子携带动量，沿着光的传播方向推动路径上的物体。当梯度力与辐射压力平衡时，就可以实现稳定的光学捕获。光镊技术已经成为生物领域最强有力的工具之一。

在以形成光镊的光为中心的一定区域内，物体一旦落入这个区域就有自动移向光束中心的趋势，表现出光镊具有“引力”效应。光镊又酷似一个陷阱，这个陷阱有一定范围，在该范围边界处存在一个势垒，当物体的动能不足以克服势垒时，它将继续停留在陷阱内，这个

范围就叫做阱域。处于光阱中的介质小球主要受到两种力：梯度力和散射力。梯度力来自介质小球中的电偶极矩在不均匀电磁场中的受力。它正比于光强的梯度，指向光场强度的最大处，其作用效果使得粒子朝向光功率密度最大的点运动。散射力来自光在散射过程中与光子交换动量的行为，被散射的光子动量改变来自于介质对光子的作用力。散射力沿着光的传播方向，它的作用效果使粒子沿着光束的传播方向运动。

如图所示是小球在光镊中的受力分析图。



其中光线 a , b 经介质球折射后变为 a' 和 b' ，根据矢量分解，小球应该受到如图所示 F_a 和 F_b 的力。当球心 o 在焦点下方时，受力竖直向上，指向焦点 f ，当球心在焦点上方时，同理，受力竖直向下。当小球横向偏离光线焦点时的受力分析原理也相同，而当散射力大于梯度力时，则形成光阱，实现粒子捕获。

三. 实验步骤

1. 实验安全准备

了解超净间实验室的安全行为规范。

2. 传统光镊系统的搭建

学习光镊的组成部分，熟悉各个实验器材，搭建传统光镊系统。

3. 光纤光镊系统的搭建与测试

了解光纤光镊系统，截取光纤，用化学腐蚀法制备光纤探针并用显微镜观察确认是否符合要求，利用光纤探针捕获溶液中的粒子。

四. 实验仪器及其功能

980nm 激光器：捕获和操纵粒子

532nm 激光器：激发罗丹明 b 的荧光效应

三维调节架：能够在前后、左右、上下三个维度移动载物台，间接移动样品槽和槽内的微观粒子

螺纹匹配安装架：固定光线准直器或显微镜

反射组件（直角光学调整架+反射镜）：反射光线

二向色镜：反射 980nm 的激光，透射可见光

显微物镜（100x）：会聚光线（会聚 980nm 的激光用以构成光阱，会聚可见光用以观察微观粒子）

CCD 摄像机：观测样品

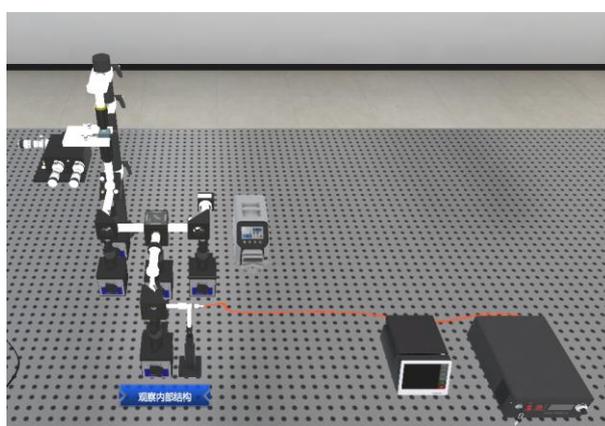
五. 实验记录

实验主要学习了如何搭建传统光镊系统和光纤光镊系统。

对于传统光镊，首先按照说明连接其线路，如下图所示

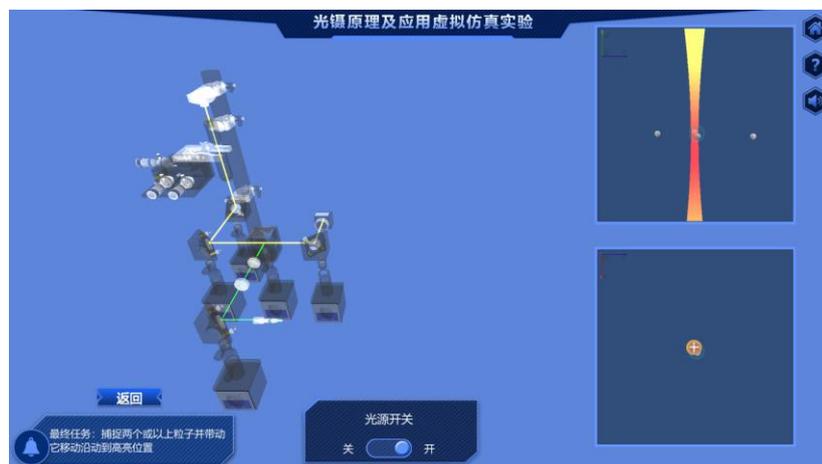


图为安装完成之前的器材



此为安装完毕的示意图

调整光源功率在 40-50mW 之内，并观察装置内部结构，如果观察到光路说明安装成功。



调整三维调节架的三个旋钮，到粒子周围，可以看到粒子被光束捕获（如果未能捕获可以考虑加大功率或微调旋钮使得粒子处于光束正中央位置）此时便可移动粒子至指定位置。

对于光纤光镊，则首先取单模光纤，用米勒钳除去 3cm 厚的涂覆层，并用带有酒精的无尘布擦拭光纤直至发出吱吱声。使用切割刀截取光纤探针。

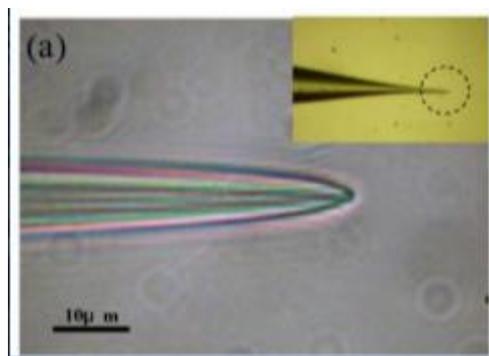


如图为切割下来的光纤示意图。

本实验中，由于光纤材质主要为二氧化硅，其化学性质稳定，但可溶于氢氟酸。故采用化学腐蚀法制备尖头光纤探针。

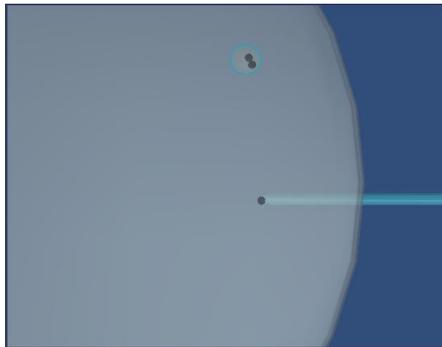
用热熔胶枪将切割好的光纤粘在塑料块上；向烧杯中加入氢氟酸，插入光纤，再向烧杯中倒入 0.5-1.0cm 厚的二甲苯覆盖氢氟酸。将烧杯放置在通风处（以防空气中氢氟酸浓度过高引发危险）30min，充分反应后取出光纤，用流水冲洗。

制备完毕后，在显微镜下观察腐蚀后的光纤，挑选合适的作为探针，如图所示：



利用焊接机连接光纤探针和激光光源尾纤。

观察时，将玻璃片放置在荧光显微镜上，并用滴管滴几滴离子溶液。调节微操控制装置，使探针插入溶液内，之后打开 980nm 激光器，调节功率为 40-50mW。



与传统光纤类似，可使用微操控制装置使光纤光镊捕获指定粒子并移动。

六. 实验结论

通过本实验以及相关资料，学习了光镊形成的基本原理，掌握了构成光镊系统的多种光学仪器和器件的功能和特性，了解了传统光镊和光纤光镊的构建原理，同时掌握了如何利用光镊实现对微观粒子的操作。