

ilab 上的两个虚拟仿真实验：1.超冷原子量子振荡跃迁，2.光镊原理及应用

超冷原子量子振荡跃迁

王越希 19307110421

一、实验目的

针对特定场景超冷等离子体需要满足轨道半径很大、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。

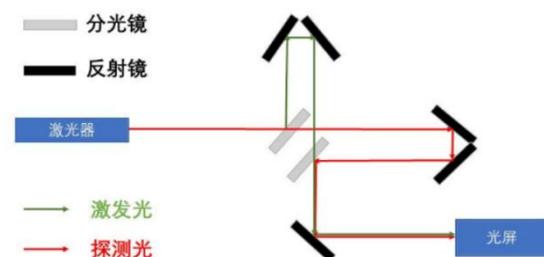
本实验模拟超冷里德堡原子拉姆齐振荡场景，学生通过阅读了解拉姆齐振荡的相关实验简介及基本原理说明，并采用全三维光学实验室场景展示各种实验元器件，可以以第一人视角，进入实验室场景中，通过观察各种实验元器件的三维模型，学习各种元器件的基本功能及工作原理。

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

1.原子的拉姆齐振荡

美国物理学家拉姆齐发明的分离振荡的电磁场方法，可用于对时间和频率的精确测。1949年拉姆齐把原子送入两个分离震荡的电磁场中，完善了研究原子结构的方法：在原子束中引起的快速能级跃迁所产生的干涉条纹能够提供原子的结构和性状的重要数据，当和微波振荡器同步时，原子的振荡也能用来极准确地测度时间的推移。这为现代铯原子钟奠定了基础，而铯钟树立了当代的时间标准。



图一：光路图

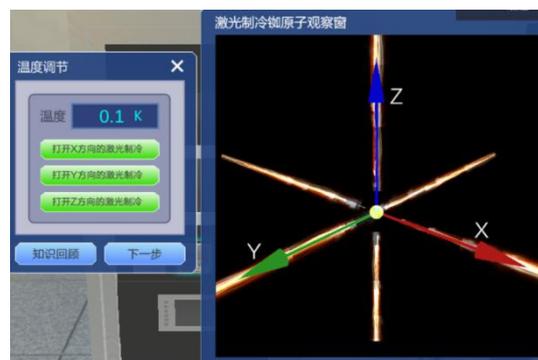
2.制备全同粒子

利用 He-Ne 激光器制备相干光，光路图如图一所示。到达光屏上的两束光来自同一光源，相位高度相关，在光屏上可以观察到明暗相间的同心圆条纹，即等倾干涉条纹。

3. 激光制冷

构成物体的原子总是在不停地做无规则运动，这种热运动越剧烈，物体温度越高；反之，温度就越低。所以，只要降低原子运动速度，就能降低物体温度。

激光制冷的原理就是利用大量的光子阻碍原子运动，使其减速，从而降低了物体温度。实验中采用三束相互垂直的激光，从各个方面对原子进行照射，使原子陷于光子海洋中，运



图二：激光制冷

动不断受到阻碍而减速。激光的这种作用被形象地称为“光学粘胶”，被“粘”住的原子可以降到几乎接近绝对零度的低温，如图二所示。

三、实验步骤

1. 实验安全准备

穿防护服，戴护目镜，风淋除尘。

2. 光路系统设计

选择合适的激光源，制备全同光粒子，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 0 开尔文。

4. 量子振荡跃迁

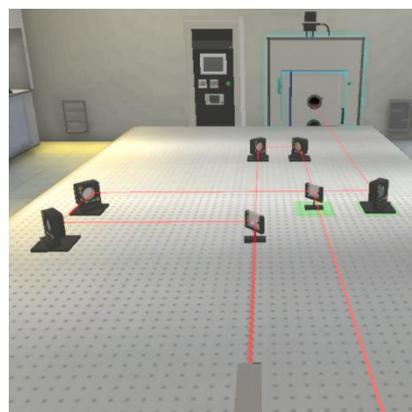
调控探测量子信号，观察原子振荡跃迁过程，拟合量子信号。

四、实验仪器

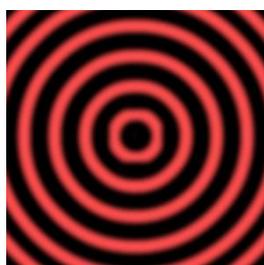
He-Ne 激光器，单面镀有半反半透膜的分光镜 x2，反射镜 x5，光屏，外加压缩机的激光制冷装置，示波器。

五、实验记录与数据处理

搭建光路时将两个分光镜角度调整至 135° ，使入射激光分成水平和垂直两束光，两束相干光会聚到最后—一个反光镜上，然后被反射入制冷装置中。实际光路图如图三所示。



图三：实际光路



放置光屏时，可以在屏上观察到干涉图样如图四所示。缩进/长出 20 个干涉环时移动的距离为 $906\mu\text{m}$ ，得到两条干涉光的光程差为 $45.3\mu\text{m}$ 。

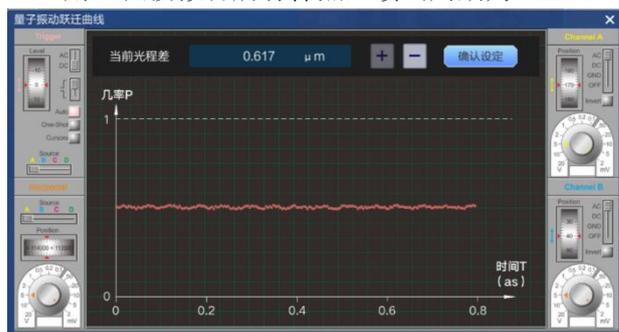
图四：干涉条纹

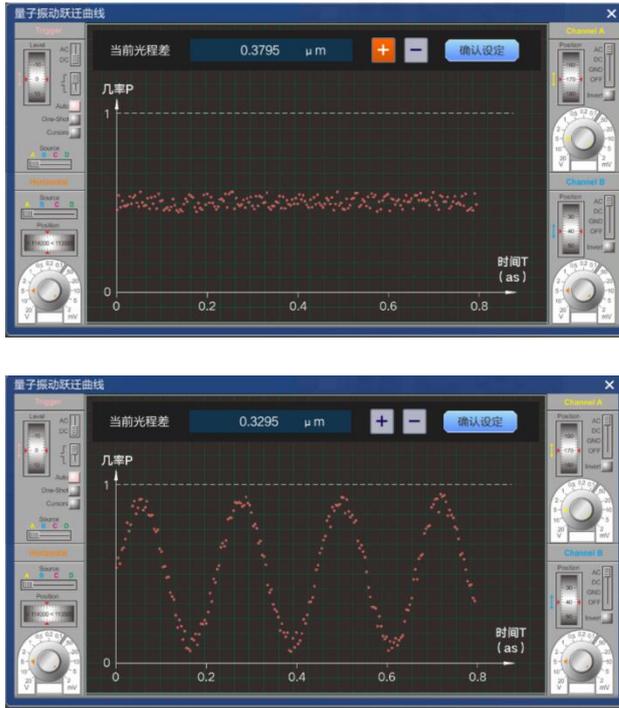
量子跃迁的能量变化是非连续的。

调控探测量子信号，减小光程差，从 $0.617\mu\text{m}$ 调到 $0.3295\mu\text{m}$ ，确保偏差范围在 20% 以下，后续能够拟合出振荡曲线。在减小光程差的过程中，示波器上的图形变化如图五所示。

可以看出，示波器上的图案最初杂乱无章，难以从噪声信号中辨认出有用信号。随着光程差不断减小，图案越来越显示出周期性变化，当减小至 $0.3295\mu\text{m}$ 时，图案大致成正弦波。

用正弦波拟合所有样点，读出周期为 0.2as 。





图五：减小光程差过程中示波器上图案的变化

六、实验结论

本实验首先用 He-Ne 激光器、分光镜和反射镜制备出相干光作为激光光源，接着用激光制冷技术将原子温度降至接近 0 开，最后用示波器读出原子的拉姆齐振荡的周期为 0.2as。

七、改进建议

这个实验重点都在前面搭建光路制造相干光部分，后面关于激光制冷和量子跃迁的讲解太少，我无法通过实验学习到有关知识，必须通过查阅资料获得。

光镊原理及应用

王越希 19307110421

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

1.光压

光同时拥有动量和能量。在生活中更常见的是对光的能量的运用，却很少涉及到光的动

量的应用问题，这主要是由于生活中常见的光（包括自然光和用于照明的光源）的力学效应很小，很难引起人们的宏观感知。如今光的力学效应在激光问世后变得广为人知，激光高亮度和高方向性的特点使其力学效应能够在显微镜下被观察到。

对于单色平面光波，设其电磁场能量密度为 u ，它以光速 c 传播，传播方向为 \hat{k} ，相应的电磁能流密度矢量为

$$\vec{S} = uc\hat{k} \quad (1)$$

动量密度为

$$\vec{g} = \frac{u}{c}\hat{k} \quad (2)$$

单位时间流过垂直光传播方向单位面积的动量为

$$\vec{G} = c\vec{g} = \frac{\vec{S}}{c} \quad (3)$$

根据光的量子理论，波矢为 \vec{k} 的单色平面波可以看成是一束光子流，其中每一个光子所携带的能量为 $\varepsilon = h\nu$ ，动量为 $\vec{p} = h\vec{k} = \frac{h}{\lambda}\hat{k}$ 。

由于光辐射对物体产生的力通常称为光的辐射压力或简称光压。

一束平行光照射到物体上，如果光束中的光子密度为 n ，其动量变化为 $n\Delta\vec{p}$ ，历经时间 t 秒，则物体得到的动量为 $-n\Delta\vec{p}$ 。由此可得光作用在物体上的力为 $\vec{F} = \frac{-n\Delta\vec{p}}{t}$ 。如果光束作用的面积为 A ，则单位面积上受到的力即为光压

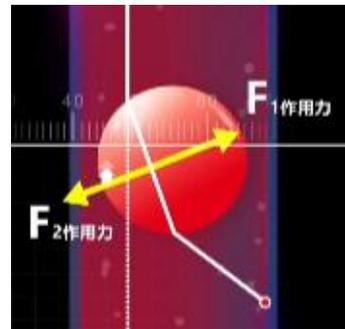
$$\vec{P} = \frac{\vec{F}}{A} = \frac{-n\Delta\vec{p}}{At} \quad (4)$$

2.光镊的捕获机理

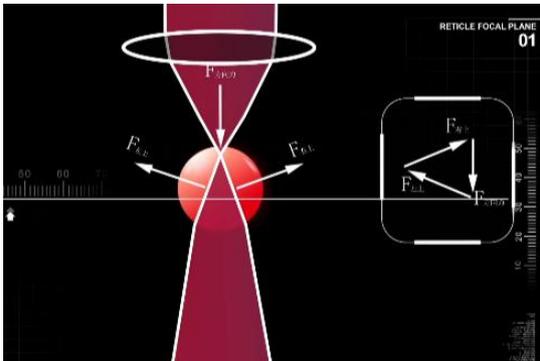
光照射到物体上时会产生光压，如果物体质量很小（病毒、细菌、原子），那么光压就可能引发物体运动。

在微粒的边界位置，两侧介质不同，光子的运动方向会发生变化，这就是光的折射。光子的运动方向向右偏移，受到来自微粒的作用力 F_1 ，因此微粒受到光子的反作用力 F_2 ，如图一所示。

微粒在激光束中，水平方向上 $\sum F_i = 0$ ，竖直方向受到的合力向下。为了让原子受力平衡，需要让激光束在微粒处强聚焦，这样光场的梯度力与光压平衡，可以实现对原子的稳定捕获，如图二所示。

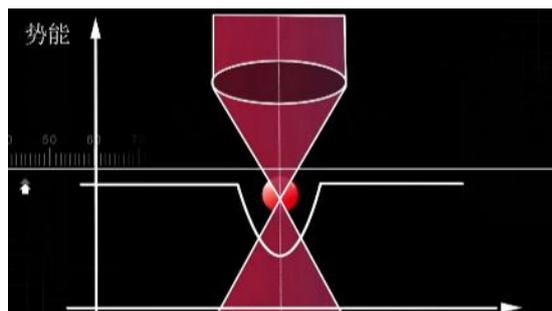


图一：光子与微粒的受力



图二：微粒在高聚焦激光束中的受力

从能量角度看，光场形成了一个势能阱将微粒牢牢束缚，如图三所示，微粒在此处能量最低。光镊的本质就是一个势阱。



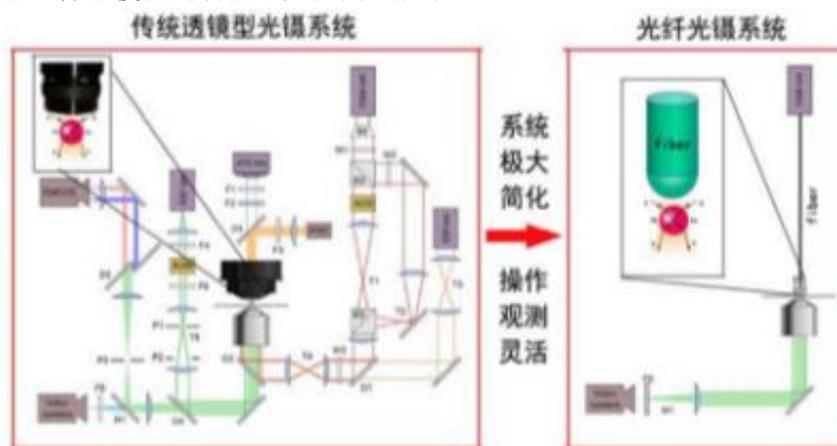
图三：高聚焦激光束形成势阱

3. 光纤光镊技术

光镊的最前端技术：光纤光镊。

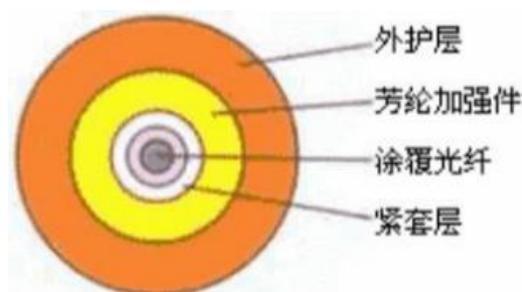
传统光镊是由激光器发射的光束经过扩束镜扩束后，由高倍显微物镜会聚形成光学势阱，进而完成对粒子的捕获操控。生物显微镜系统是传统光镊的基本构成要素，通常而言，传统光镊系统可以分成下列几个部分：激光器与空间光路、四象限探测器、样品台三维调节结构、CCD 图像采集系统、光学显微镜。图四左为最具代表性的传统光镊系统：激光器发出的激光束经扩束后产生光阱，把带有粒子的样品池放在样品台上面进行实验操作照明光源垂直照向实验台，微小颗粒被光阱捕捉的图像通过物镜与目镜被 CCD 图像采集装置接收，图像可由目镜直接观察，或过显示器显示出来。

与传统透镜型光镊技术相比，光纤光镊技术将复杂的空间光路集成在单根光纤中，以实现系统简化、操作便捷的功能，如图四右所示。



图四：传统透射型光镊向光纤光镊的转化

光纤探针的作用是将复杂的空间光路集成在单根光纤中，以实现系统简化、操作便捷的功能，其结构如图五所示。在光纤光镊系统中，其光纤探针通过光纤微加工技术得到光学微透镜，用以汇聚光纤中的传输光束。



图五：光纤探针结构图

4. 制备尖头光纤探针

现阶段主要有三种方式制备尖头光纤探针：化学腐蚀法、光纤研磨抛光法、拉锥法。

三种方式各有优劣：化学腐蚀法简单易操作，但是腐蚀光纤的氢氟酸是危险化学制剂，在操作过程中需注意危险；光纤研磨法是实验室常用的光纤微加工手段，使用光纤研磨抛光机加工锥形光纤尖，但是其加工设备相对化学腐蚀法较为昂贵；拉锥法同样存在加工设备昂贵的缺点。

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，间接移动了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。

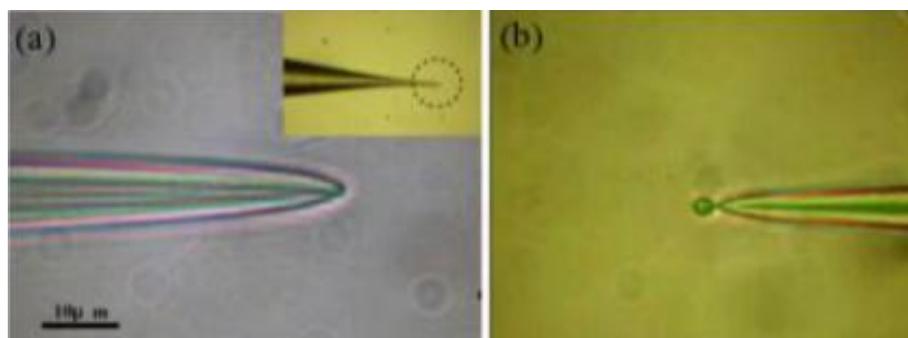
五、实验记录

重点学习了如何搭建光纤光镊系统。

取单模光纤，用米勒钳除去 3cm 厚的涂覆层；用带有酒精的无尘布擦拭光纤；用光纤切割刀截取光纤探针。

选取化学腐蚀法制备尖头光纤探针（纤材质为掺杂二氧化硅，二氧化硅是十分稳定的化学物质，但是可溶于氢氟酸，因此利用化学腐蚀法制备）：用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；取出光纤，用流水冲洗。

借助显微镜观察腐蚀后的光纤，挑选合适的作为探针。适合作为探针的光纤如图六所示。



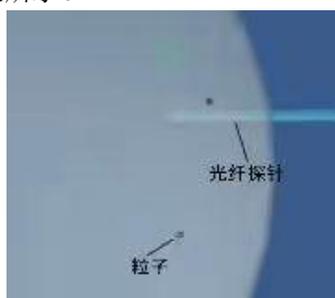
图六：合适的光纤探针示意图

连接光纤探针与激光光源尾纤。

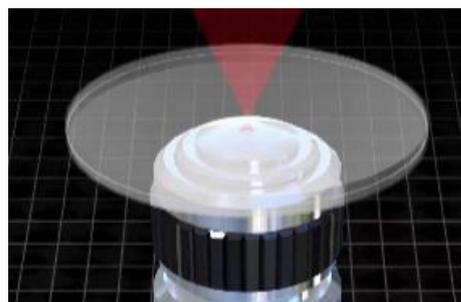
将涂有溶液的载玻片放置在倒置荧光显微镜上；调节微操控制装置，使探针插入溶液内。

打开 980nm 激光器，调节功率为 40-50mW。

调节微操作手捕捉三个粒子并放置到高亮区域，如图七所示。最终光纤光镊的实际图如图八所示。



图七：光纤探针捕捉粒子示意图



图八：光纤探针捕捉粒子实际图

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，掌握构成光镊系统的多种光学仪器和器件的功能和特性，了解光纤光镊的构建原理，掌握了如何利用光镊实现对微观粒子的操作。

七、改进建议

开头的光镊讲解视频非常好，但是无法拖动进度条反复观看，必须退出再重新打开。在搭建光镊系统的过程中需要将元件拖动到指定位置，但是这个“指定位置”的限定范围太过狭小，用鼠标操作起来十分麻烦。