

ilab-x上的两个选做实验：“拉曼光谱及宝石检测仿真实验”和“超冷原子量子振荡跃迁”

拉曼光谱及宝石检测仿真实验

19307110378 赵惊

一、实验背景

拉曼光谱是分子或凝聚态物质的散射光谱，入射光是强单色光，散射光除含有频率未变的光（这叫瑞利散射），还含有相当弱的有频率增减的光，其中带有散射体结构和状态的信息。拉曼光谱分析方法是一种用得很多的分析测试手段。首先它是一种光谱方法，光谱方法的优越性无需细说。以前用可见和近紫外光谱分析原子，用红外光谱分析分子和固体，但至今红外光谱的综合性能仍远远逊于可见和紫外光谱，而拉曼散射是在可见区，且可通过选用光源而定频段，其灵敏度足可检出四氯化碳中万分之一的杂质苯。拉曼光谱尤其有利于分析有机物，高分子，生物制品，药物等，故成为化学，农业，医药，环保及商检等行业的重要分析技术。在凝聚态物理学中，拉曼光谱也是取得结构和状态信息的重要手段。

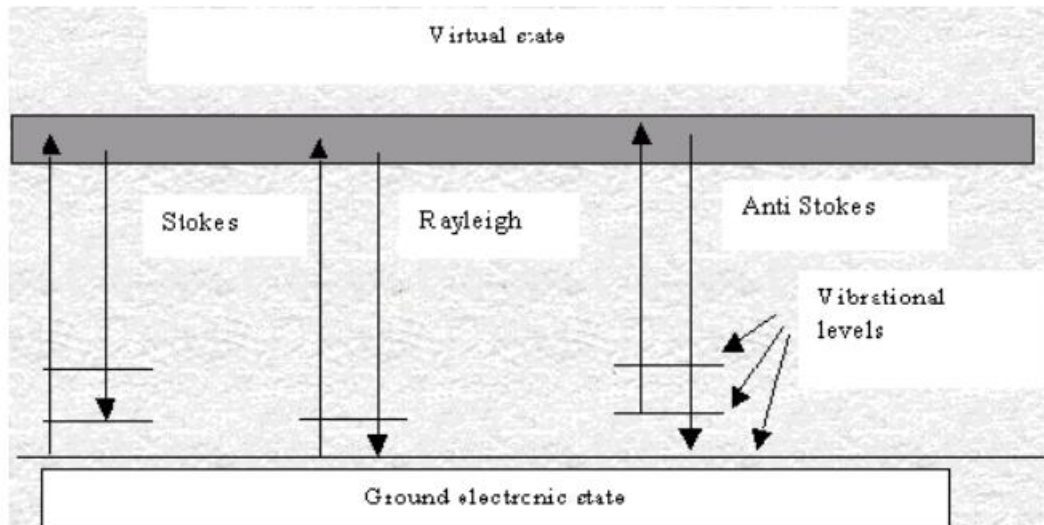
二、实验原理

1. 拉曼效应和拉曼光谱：

当光照射到物质上时会发生非弹性散射，散射光中除有与激发光波长相同的弹性成分（瑞利散射）外，还有比激发光波长长的和短的成分，后一现象统称为拉曼效应。由分子振动、固体中的光学声子等元激发与激发光相互作用产生的非弹性散射称为拉曼散射，一般把瑞利散射和拉曼散射合起来所形成的光谱称为拉曼光谱。

2. 拉曼光谱基本原理：

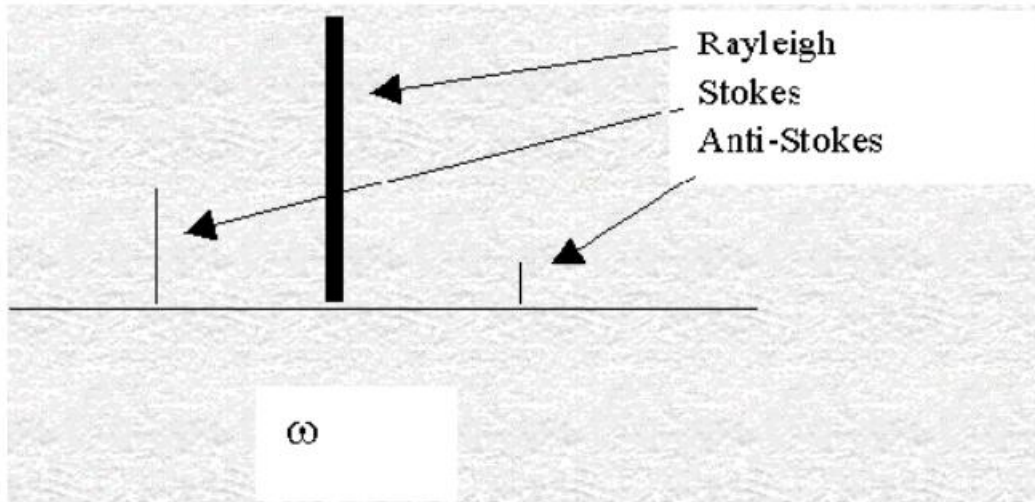
设散射物分子原来处于基电子态，振动能级如下图所示。



当受到入射光照射时，激发光与此分子的作用引起的极化可以看作为虚的吸收，表述为电子跃迁到虚态，虚能级上的电子立即跃迁到下能级而发光，即为散射光。设仍回到初始的电子态，则有如图所示的三种情况。因而散射光中既有与入射光频率相同的谱线，也有与入射光频率不同的谱线，前者称为瑞利线，后者称为拉曼线。在拉曼线中，又把频率小于入射光频率的谱线称为斯托克斯线，而把频率大于入射光频率的谱线称为反斯托克斯线。

瑞利线与拉曼线的波数差称为拉曼位移，因此拉曼位移是分子振动能级的直接量度。下图

给出的是一个拉曼光谱的示意图。

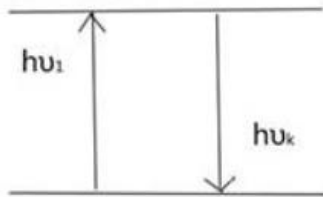


3. 拉曼效应的经典电磁解释：

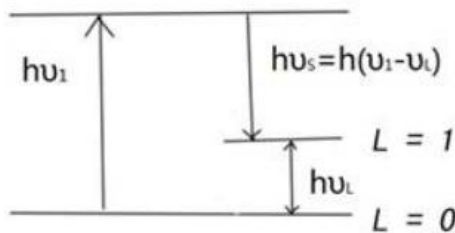
如分子，在激发光的交变场作用下发生感生极化，也就是正负电中心从相合变为相离，成为电偶极子。这感生电偶极子是随激发场而交变的，因此它也就是成了辐射体。简单的与激光同步的发射，就成为瑞利散射。然而分子本身有振动和转动，各有其特种频率。这些频率比激发光的频率低一两个数量级或更多些，于是激发光的每一周期所遇的分子振动和转动相位不同，相应的极化率也不同。

4. 当光入射到样品上时的三种情况：

(1) 光子同样品分子发生了弹性碰撞，没有能量交换，只是改变了光子的运动方向，此时散射光频率=入射光频率。

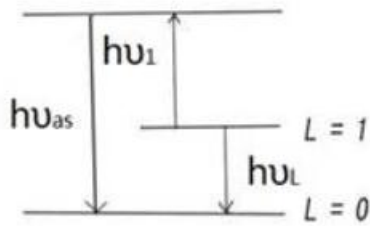


(2) 如频率为 ν_i 的入射光子被样品吸收，样品分子被激发到能量为 $h\nu_i$ 的振动能级上，同时发生频率为 $\nu_s = \nu_i - \nu_l$ 的斯托克斯散射。



(3) 如果分子出于振动能级为 L 的激发态，入射光子吸收了这一振动能级的能量就会发生频率

为 $\nu_{as} = \nu_i + \nu_l$ 的反斯托克斯散射。



5. 拉曼光谱在外观上有三个明显的特征：

(1) 对同一样品，同一拉曼线的波数差与入射光波长无关；

(2) 其次在以波数为变量的拉曼光谱图上，如果以入射光波数为中心点，则斯托克斯线和反斯托克斯线对称地分裂在入射光的两边；

(3) 斯托克斯的强度一般都大于反斯托克斯线的强度。拉曼光谱的上述特点是散射体内部结构和运动状态的反映，也是拉曼散射固有机制的体现。

6. 拉曼光谱在珠宝鉴定上的应用：

玉石等珠宝作为人们喜爱的饰品，具有很高的经济价值。然而，目前珠宝市场上鱼目混杂、真假难辨。传统鉴定方法是借助放大镜目测或采用物理方法对其硬度、密度、折射率和热导率等参数进行分析比较。从化学分析的角度来看，宝石多为矿物包裹体。如翡翠的主要化学成分是硬玉 $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$ ，红宝石为 Al_2O_3 ，海蓝宝石为 $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$ ，而珍珠为 CaCO_3 。一般来说，不同化合物具有不同的拉曼光谱图。拉曼位移的大小、强度及拉曼峰形状可确定物质的化学键和基团。经过人为处理的宝石矿物，由于混有荧光产率较高的分子，其拉曼信号中会出现较强的荧光干扰。因此，只要通过对拉曼光谱的峰位、峰强、荧光干扰等参数的分析，就可从分子级别对宝石样品进行辨别和鉴定。

三、实验内容

- (1) 分别打开激光器的电源开关和光谱仪开关。
- (2) 选择待测样品，并调节光谱仪样品支架。
- (3) 调节光谱仪外光路系统，使散射光能顺利进入单色仪。
- (4) 完成光路调节后，闭合光谱仪箱体
- (5) 进行阈值分析扫描，选择适当的阈值。
- (6) 选择合适的光谱扫描参数，扫描光谱线，并根据需要进行检峰。
- (7) 记录实验数据，根据扫描结果完成实验数据表格。

四、实验记录

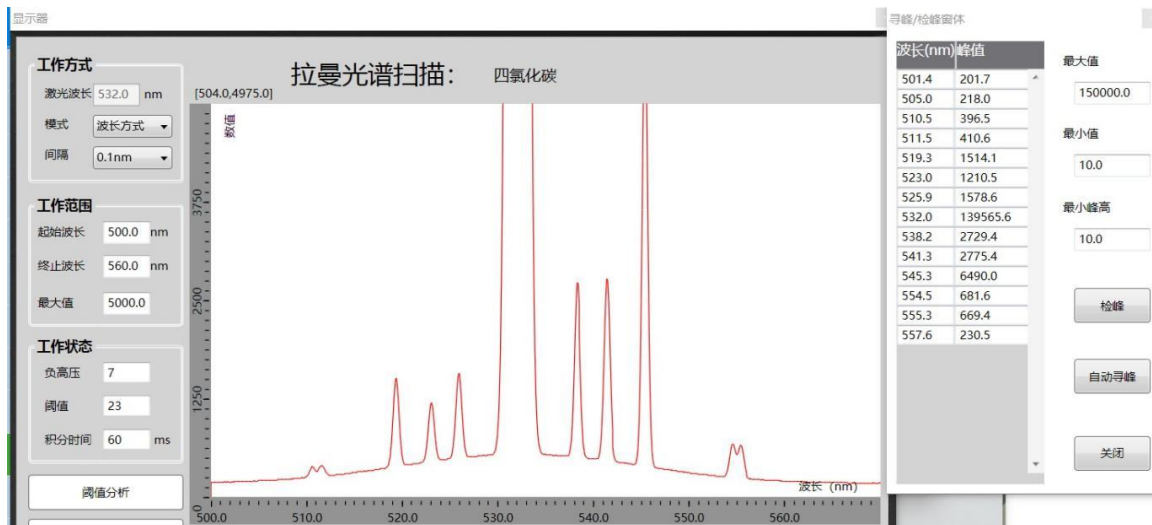
1. 获取 CCl_4 分子的拉曼光谱。

(1) 调节光路，光路如下图：



调节散光系统调节旋钮，聚光系统调节旋钮，接收光系统调节旋钮，使得透过样品后投在接收光孔上的绿色条纹状光斑对准狭缝；调节狭缝宽度调节旋钮使得狭缝尽量窄，以获得更高分辨率；

(2) 扫描光谱，得到四氯化碳的拉曼光谱，自动寻峰，得到四氯化碳的峰值数据



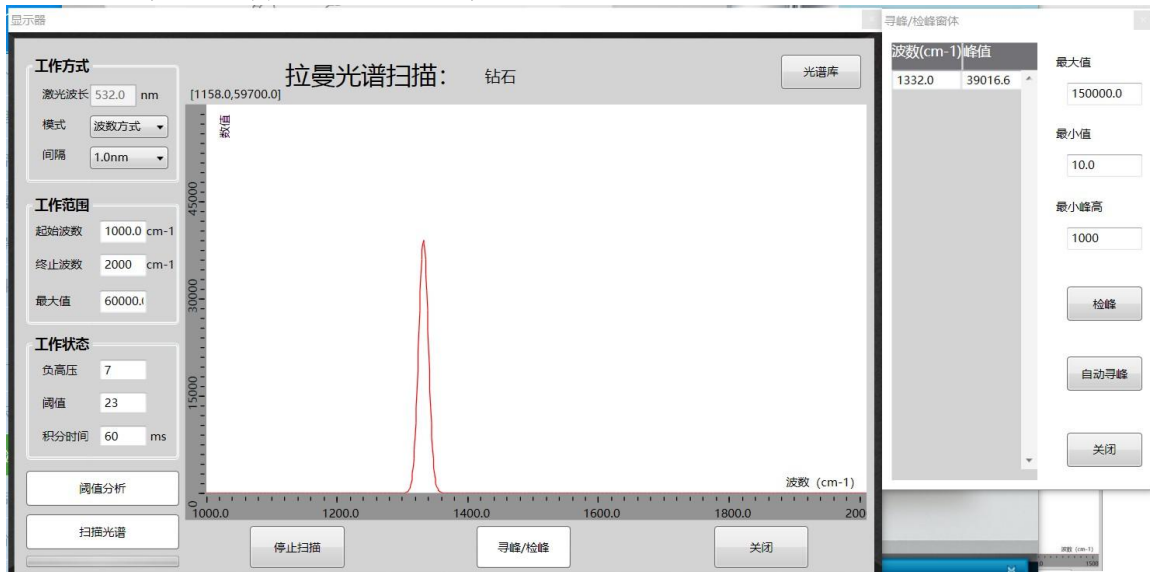
可以通过在自动寻峰时提高最小峰高来排除误检。最后可以得出上图 501.4nm，505.0nm，557.6nm 处的峰为误检。

2. 利用拉曼光谱进行宝石鉴定，测量钻石，方钠石等宝石样品的拉曼光谱。

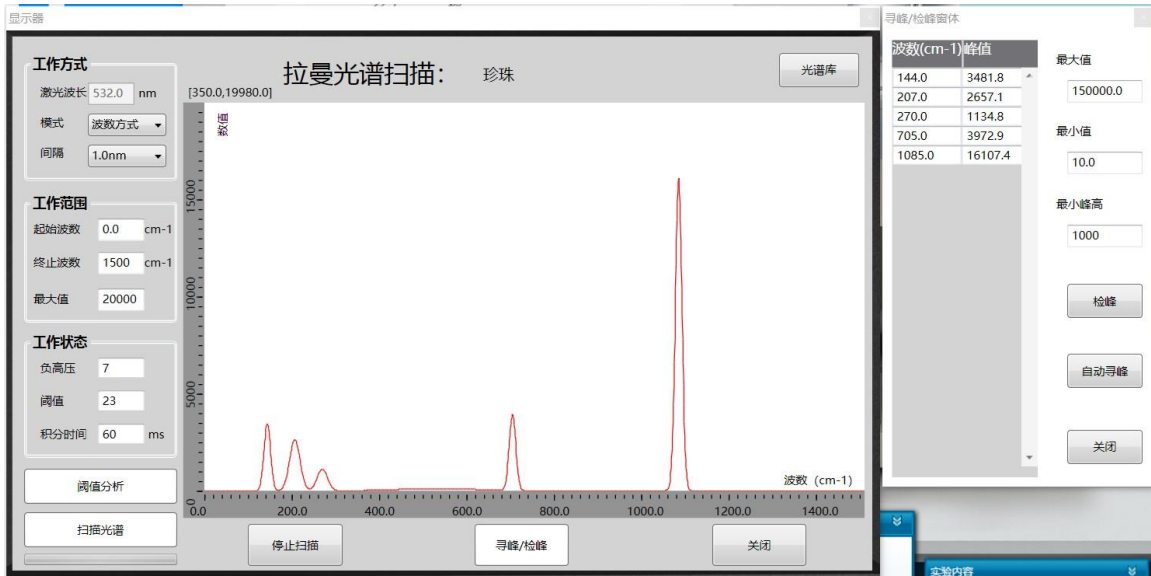
(1) 同上步步骤，调节光路如下图：



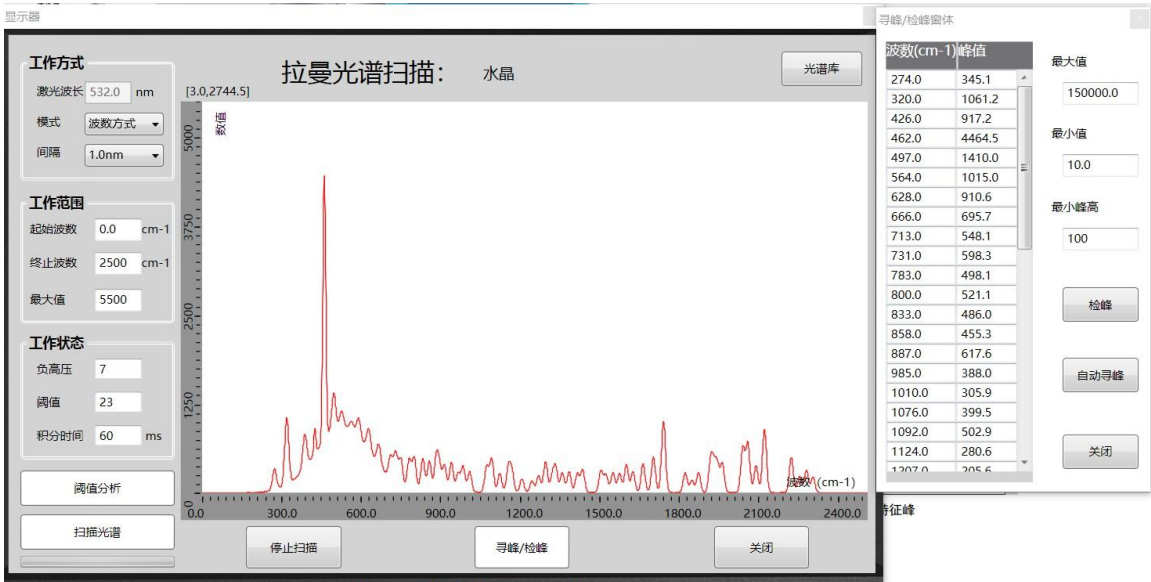
(2) 扫描光谱，得到钻石的拉曼光谱：



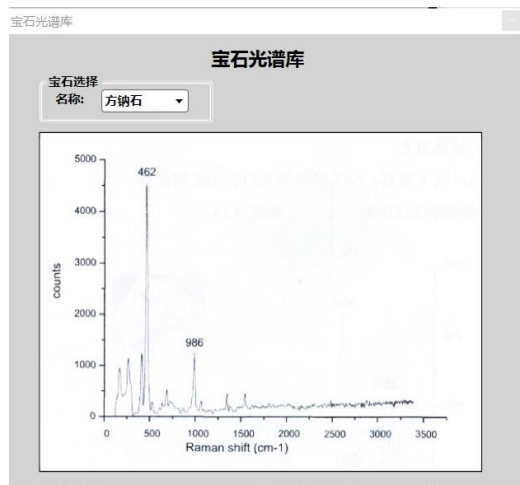
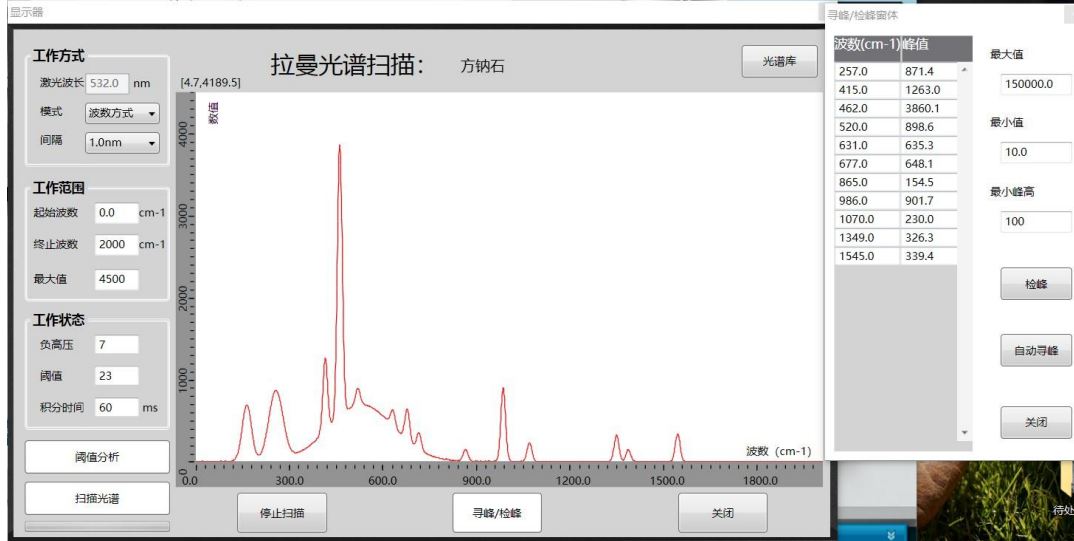
(3) 同理，得到珍珠样品的拉曼光谱：



(4) 同理，得到水晶样品的拉曼光谱：



(5) 选择一未知样品，扫描得到其拉曼光谱：



其最高峰在 462.0nm，查找宝石光谱库，对比可得知其为方钠石。

五、实验讨论

1. 对同一样品，同一拉曼线的波数差与入射光波长无关；
2. 可以看出，液体样品的谱线中央最高的峰为瑞利散射，其波长等于入射光的波长，可读出为 532.0nm。瑞利散射两侧存在一系列的较矮的峰即为拉曼散射。
3. 以入射光峰值为中心点，则斯托克斯线和反斯托克斯线对称地分裂在入射光的两边；并且右侧的拉曼谱线强度均要比左侧波长相对称的谱线高。这正好说明斯托克斯散射一般比反斯托克斯散射更强。
4. 一般把靠近瑞利散射线两侧的谱线称为小拉曼光谱；远离瑞利线的两侧出现的谱线称为大拉曼光谱。瑞利散射线的强度只有入射光强度的 10^{-3} ，拉曼光谱强度大约只有瑞利线的 10^{-3} 。小拉曼光谱与分子的转动能级有关，而大拉曼光谱与分子振动-转动能级有关。
5. 总之拉曼光谱的上述特点既是散射体内部结构和运动状态的反映，也是拉曼散射固有机制的体现。

六、实验结论

本实验：

- (1) 通过对四氯化碳溶液的散射光谱的分析，验证了拉曼散射光谱波数的对称性，强度差异，与分子结构的关系；
- (2) 扫描了钻石等样品的拉曼光谱，并通过观察特征峰的方式判断未知样品的种类。

超冷原子量子振荡跃迁

一、实验背景

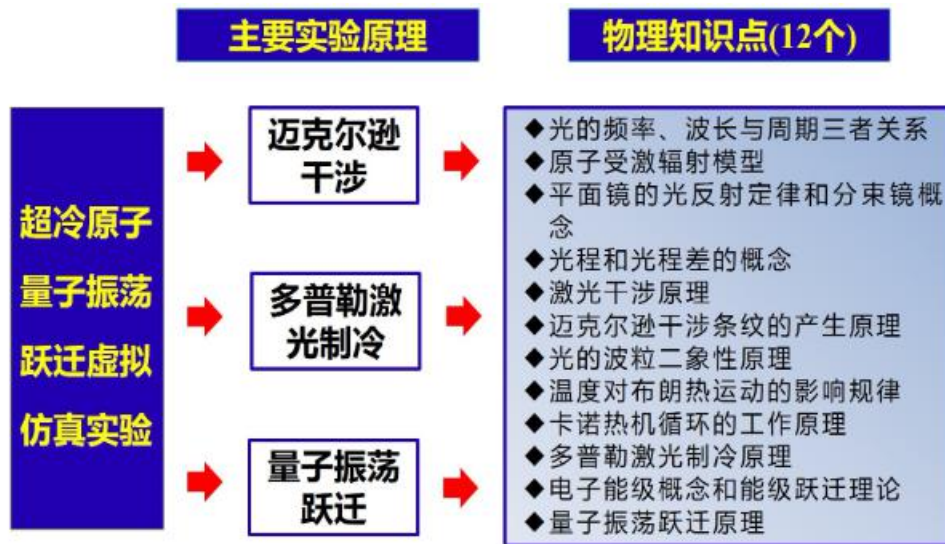
针对特定场景超冷等离子体需要满足的轨道半径很大，寿命长，相干时间长，极化率大的要求，基于原子间强相互作用的超冷里德堡原子可以实现高保真度的量子操作。超冷里德堡原子是高能物理实验室的设备，高成本、高辐射、高危险的“三高”特点使其很难由本科生直接实验操作。

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

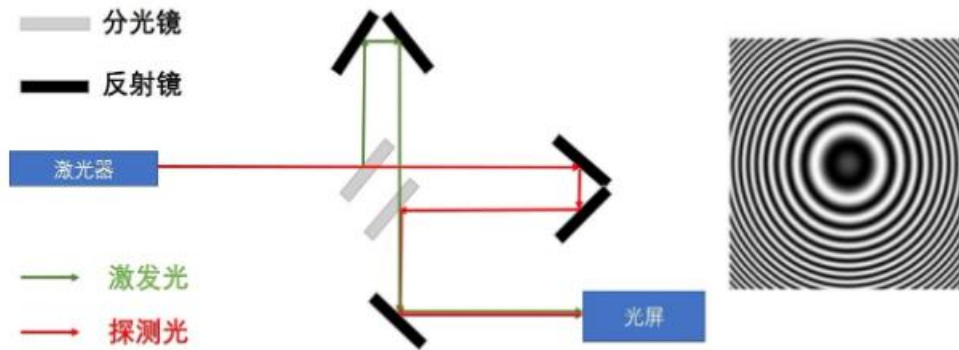
本实验通过团队成员前言科研成果进行教学转化，完成“光路系统设计—激光制冷系统—量子振荡跃迁”全流程的梳理，从而开发此虚拟仿真实验系统。实验的原理主要包含迈克尔逊干涉原理，多普勒激光制冷原理和量子振荡跃迁原理三个部分。



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：

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：

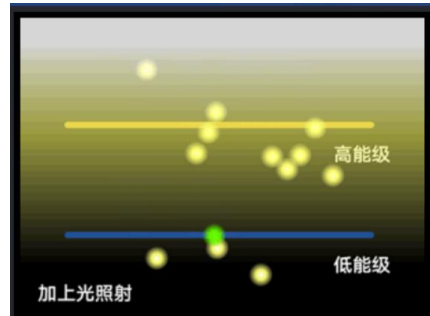
$$T_{min} = \frac{\hbar\Gamma}{2k_B}$$

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。

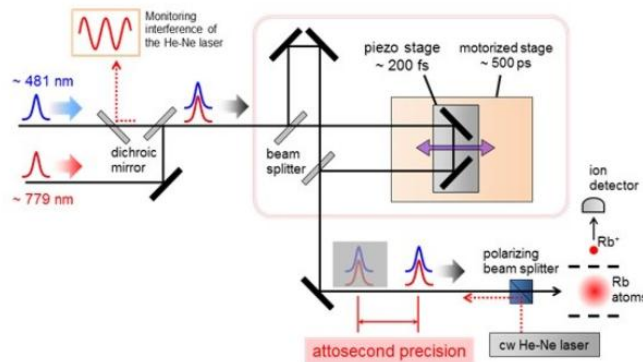
量子振荡跃迁原理：利用激光冷却技术将宏观数量的原子俘获在基态的能级上，然后通过光子激发，将原子从基态激发到较高能量的量子态。第一组光子将原子从基态部分激发到激发态得到叠加量子态，电子在基态和激发态之间进行周期性快速迁移，周期为 τ 。利用第二组完全相同的激光将激发态原子退激发到初始态基态，将这两组激光之间的时间延迟 τ 稳定在阿秒时间尺度上，其中激发态和基态的几率满足：

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

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



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、实验内容

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 0.1K。

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。

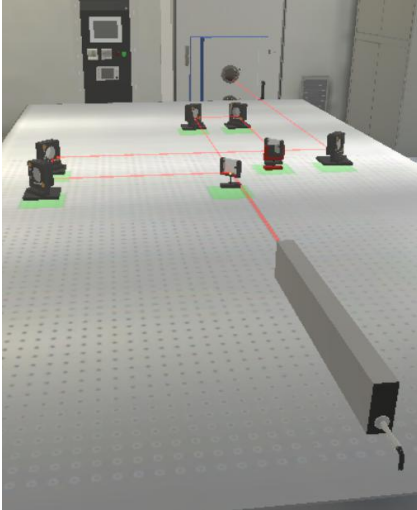
四. 实验仪器

He-Ne 激光器一个，单面镀有半反半透膜的分束镜两个，反射镜五个，光屏一个，压缩机和激光制冷装置以及示波器。

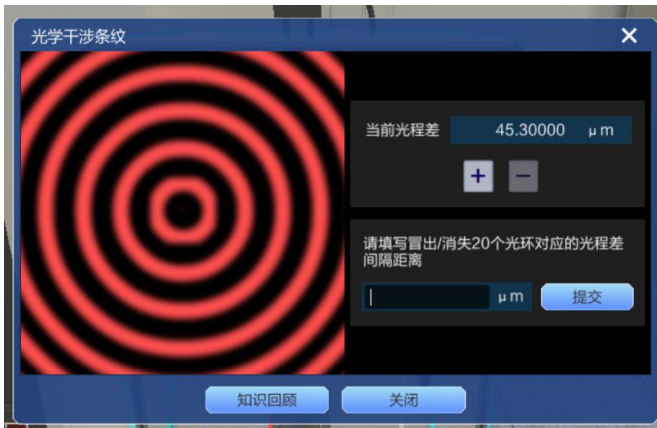
五. 实验记录

1. 调节光路

(1) 按要求搭建好光路，如下图；



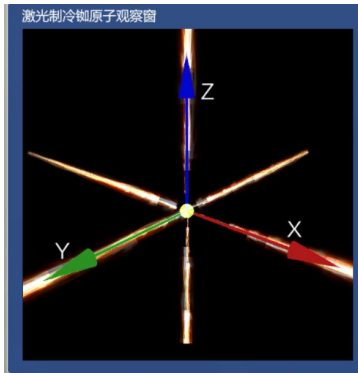
(2) 观察光学条纹干涉结果，看到环形干涉条纹：



(3) 逐渐减小光程差, 直至20个圆环从中心消失。开始读数为 $56.09265\mu\text{m}$, 结束读数为 $43.40\mu\text{m}$, 光程差为 $12.693\mu\text{m}$. 计算得到两条环之间的光程差为 $0.635\mu\text{m}$, 激光波长为 $1.2690\mu\text{m}$.

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, 使冷原子激发装置内的温度降低至 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, 发现打开 x 方向的激光制冷后, 原子在 x 方向的自由度被限制, 其余两个方向也一样; 三个方向的激光制冷都打开后, 装置内的温度下降至 0.1K , 进行下一步实验。

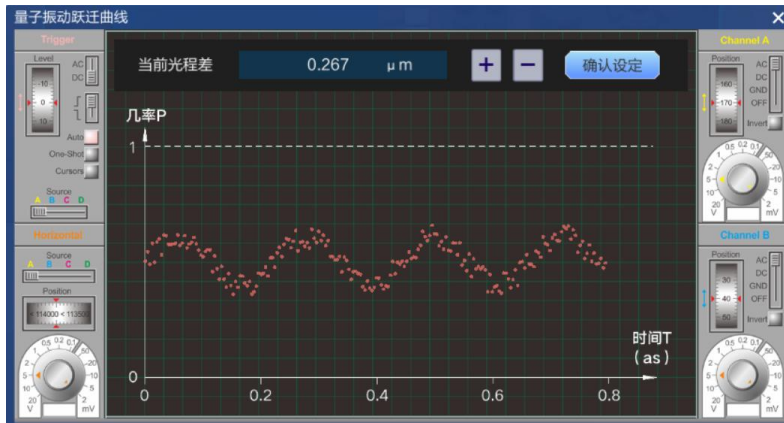


3. 量子振荡跃迁

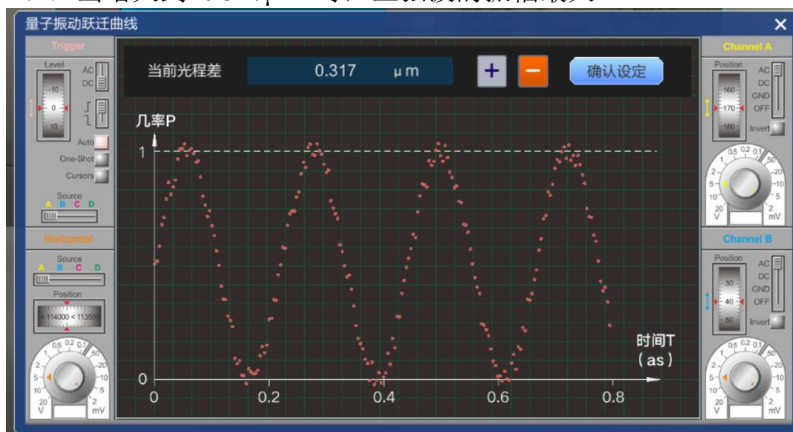
(1) 打开示波器，此时示波器的图案杂乱无章。



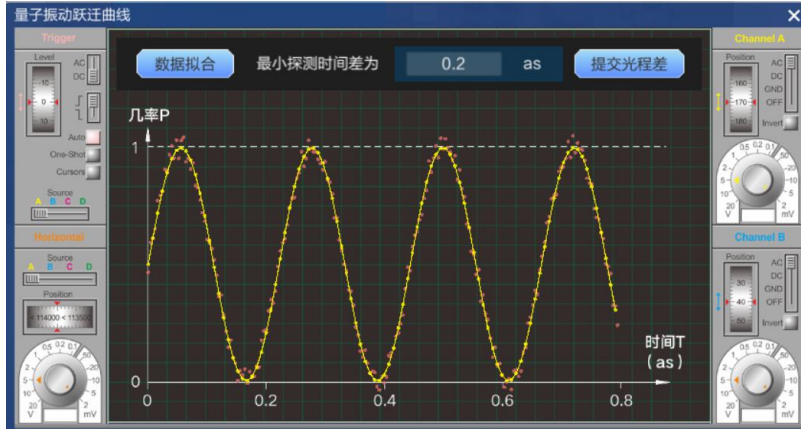
(2) 然后逐渐增加光程差，示波器上的点逐渐显示出周期性变化。



(3) 当增大到 $0.317 \mu\text{m}$ 时，正弦波的振幅最大。



(4) 选取 $0.317\mu\text{m}$ 下的数据点进行正弦波拟合, 如图所示, 选取相邻两个周期的最高点, 读取横坐标分别为 0.272as , 0.496as , 得到周期为 0.224as 。



六. 实验结论

本实验:

- (1) 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, 通过干涉图案测得激光波长为 $1.2690\mu\text{m}$;
- (2) 使用激光制冷技术使温度降低至 0.1K ;
- (2) 用示波器图像拟合得到铷原子的拉姆齐振荡周期为 0.224as 。