

# 色散实验

## 1 分离光谱与折射率测量

### 实验背景

人们对光谱的研究最早始于牛顿。1666 年，牛顿（Isaac Newton）把太阳光通过三角棱镜分解成了从红光到紫光的各种颜色的光谱。较为遗憾的是，由于牛顿提取单光源采用的是让太阳光通过了圆孔而不是通过狭缝，因此，并没有观察到分离的光谱线。一直到 1802 年，英国化学家渥拉斯顿（William Wollaston）观察到了光谱线，其后在 1814 年夫琅和费（Joseph von Fraunhofer）也独立地发现太阳中的分离光谱。

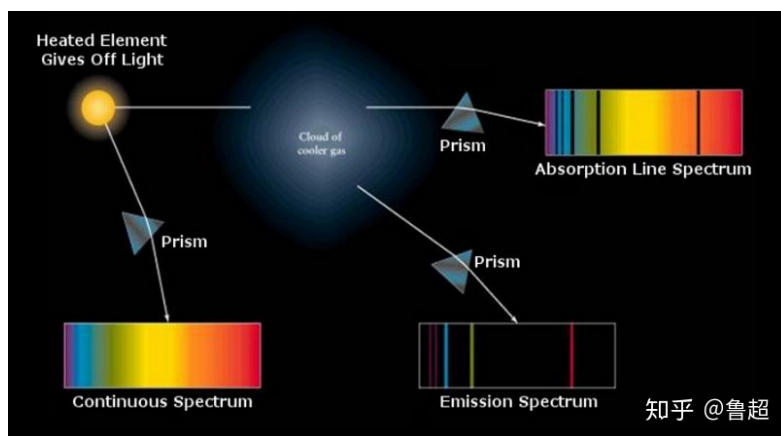
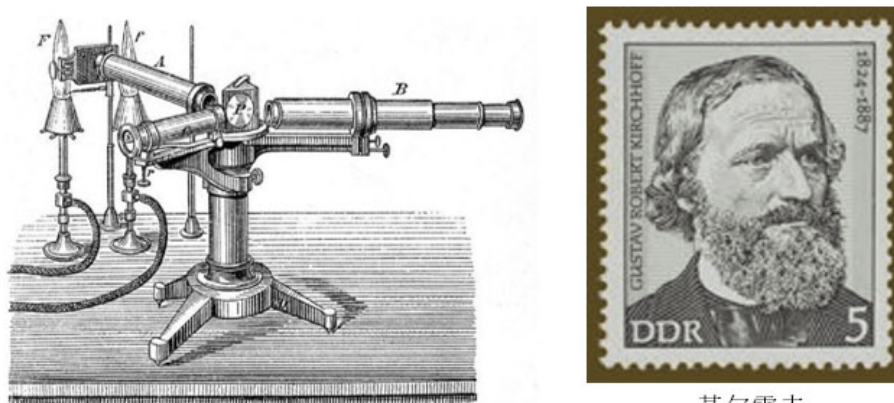


图 1-1 连续谱、吸收谱和发射谱

1859 年，德国物理学家基尔霍夫（Gustav Robert Kirchhoff）解释了太阳光谱中暗线的含义。他和德国科学家本生制成了第一台棱镜光谱仪用于光谱研究。



基尔霍夫

图 1-2 第一台棱镜光谱仪

法国数学家 A.L.柯西于 1936 年首先给出了正常色散的经验公式。柯西发现媒质的折射率与真空中入射光的波长的关系： $n(\lambda)=a+b/\lambda^2+c/\lambda^4$ ，该公式被称为柯西色散公式（Cauchy's dispersion formula）。

## 一、实验目的

- 1、了解分离光谱的实现原理；
- 2、初步掌握光学平台的使用；
- 2、用最小偏向角法测定棱镜玻璃的折射率；
- 4、了解幻日、虹和霓的形成原理；
- 5、熟悉布鲁斯特角；
- 6、利用虹和霓测定材料的折射率。

## 二、实验原理

通过碰撞或辐射等能量传递，使原子处于激发状态，原子退激发会辐射出具有特定波长的电磁波。根据波尔的原子模型理论，退激发的原子有多种跃迁能级，它们所发出的辐射就会集结成为不连续分布的亮线，这种亮线称为发射谱线。

本实验采用的光源为氦光光源，其光谱如图 1-3 所示，在可见光范围内大致具有 9 条分离谱，其中各谱线的波长（nm）也在图中进行了标注。

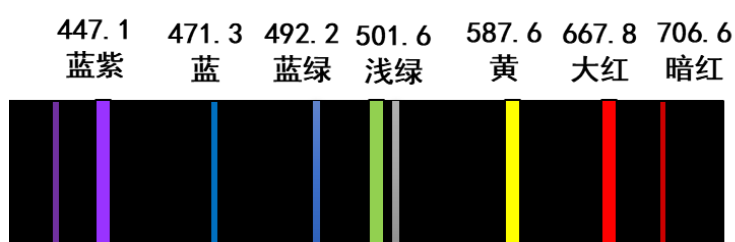


图 1-3 氦光发射光谱图

然而，人眼是无法分离出这种分离谱线，要想分离出这些谱线，需要使用分光棱镜。

本实验所用的分光棱镜为等边三棱镜如图 1-4 所示，其 5 个面中只有 2 个透光的光学表面，又称折射面，其夹角 A 称为三棱镜的顶角。光学面要避免用手触摸。三棱镜剩余均为毛玻璃面，称为三棱镜的底面。

由于不同颜色（波长）的光进入介质中，会具有不同的折射角，因而经过两次折射后，各个色光就发生的分离，实现色散现象。

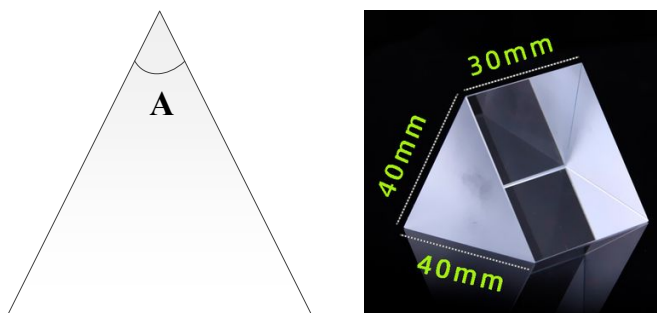


图 1-4 三棱镜示意图和实物图

假设有一束单色平行光 LD 入射到棱镜上，经过两次折射后沿 ER 方向射出，则入射光线 LD 与出射光线 ER 间的夹角  $\delta$  称为偏向角，如图 1-5 所示。

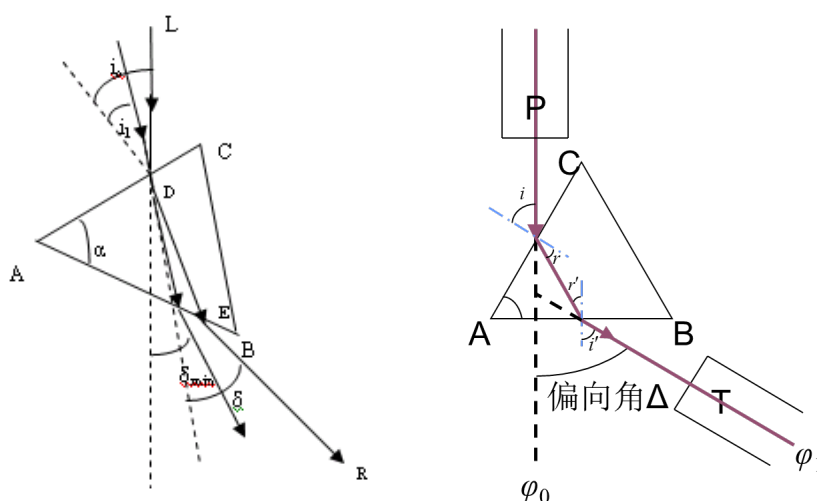


图 1-5 最小偏向角的测定

转动三棱镜，改变入射光对光学面 AC 的入射角，出射光线的方向 ER 也随之改变，即偏向角  $\delta$  发生变化。沿偏向角减小的方向继续缓慢转动三棱镜，使偏向角逐渐减小；当转到某个位置时，若再继续沿此方向转动，偏向角又将逐渐增大，此位置时偏向角达到最小值，测出最小偏向角  $\delta_{min}$ 。

可以证明，当入射角等于出射角时，偏向角达到最小。此时，棱镜材料的折射率  $n$  与顶角  $A$  及最小偏向角  $\delta$  的关系式为：

$$n = \frac{\sin \frac{A + \delta}{2}}{\sin \frac{A}{2}} \quad (1-1)$$

实验中，利用分光镜测出三棱镜的顶角  $A$  及最小偏向角  $\delta_{min}$ ，即可由上式算出棱镜材料的折射率  $n$ 。

### 三、实验仪器

氦光光源、平面镜、光学平台、三棱镜、白光手电筒、激光笔、大白板、玻璃球、亚克力棒、双面胶。



图 1-6 光学平台及各种器件

### 四、实验内容

本实验主要是搭建分离光谱装置，熟悉光学平台的使用，以及分离光学元件的搭建规则，了解几何光学光路的基本调节原则，搭建分离光谱装置，观察色散及测定三棱镜折射率。

- 1、利用平台所提供设备，搭建分离式平台光谱仪。
- 2、测定其中 2 条谱线最小偏向角（建议测黄光和绿光）。
- 3、计算 2 条谱线折射率  $n$ 。
- 4、计算出其中一条谱线折射率不确定度  $\Delta n$ ，正确决定  $n$  的有效位数；
- 5、课堂完成数据处理。

### 五、实验步骤：

光学平台器件的调节要秉承调节核心是：**平行和调焦**。这是光学设备调整里面很重要的调节原则。平行是为了光线共轴，能看见光线和物像。调焦则是为了看清楚物体。

光学调节的要点：**先粗调，后细调**。由于光学设备过于精密，轻微的调动就会偏离正常

范围，因此，**必须坚持先粗调再细调的要点**。如同找寻最优解，前提是要在收敛的范围内进行。否则，大家在调整过程中会特别费时费力，欲哭无泪。

## 1、分离光学器件的调节

### (1) 等高共轴调节。

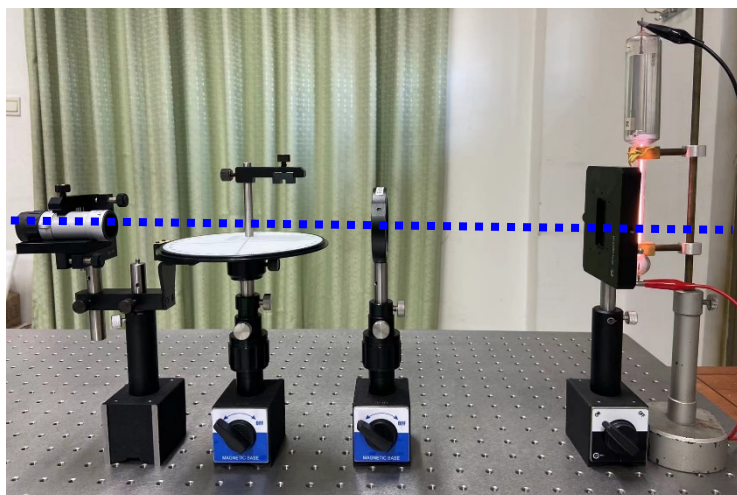


图 1-7 等高共轴调节光学器件

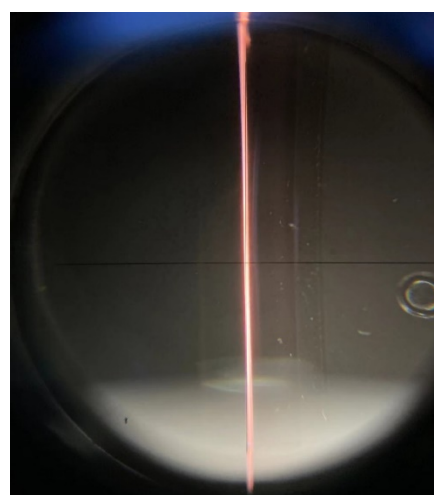


图 1-8 清晰无视差的狭缝像

将三棱镜放置于平台上，用机械夹具卡紧棱镜，防止棱镜滑落。望远镜焦距调整到无穷远，可以采取远望窗户外进行无穷远聚焦，或这目镜筒向左调整到最大。然后，将望远镜放置于转台的夹具上。初步，将所有分离光学器件放置一起，目测调整达到等高状态，如图 1-7 所示。

按照顺序：氦灯、狭缝、凸透镜、转台、望远镜，放置器件。注意，放置位置要有助于同学观察，不要摆放的离自己很远，这样观察起来需要弯腰并趴在光学平台上，会非常难受。

可借助卷尺的准直性，粗调光学器件共轴。

放置氦灯靠近狭缝，使透过狭缝的光最强。凸透镜的焦距为  $f=20\text{cm}$ ，使用卷尺测量出大致距离，确定放置透镜的初步位置。

望远镜调整至共轴状态，同时调整十字划线处于水平竖直。

### (2) 调焦，狭缝发出平行光，并观察平行光

调节狭缝宽窄和透光亮度：在望远镜中观察狭缝，调节狭缝宽窄螺钉，使狭缝不要过细。轻微移动氦光光源，使狭缝像达到最亮。

调节平行光管发出平行光：改变凸透镜距离，望远镜中观察到清晰狭缝。微偏转凸透镜、以及微左右调整透镜，使狭缝清晰，并无视差。在观察到如图 1-8 所示的狭缝像。

### (3) 寻找并测量最小偏向角



如图 1-12 所示放置三棱镜，先用肉眼在光出射的位置找到平行光管镜头的像，小幅度转动转台并在凸透镜的像中寻找氦光谱。这里可以借助激光笔，找寻出射光的大致位置。找到后，务必关闭激光笔，切勿用眼直视激光，**会亮瞎眼的！**

肉眼观察到氦光谱后，将望远镜旋转至该位置，在望远镜寻找到清晰的氦光谱。

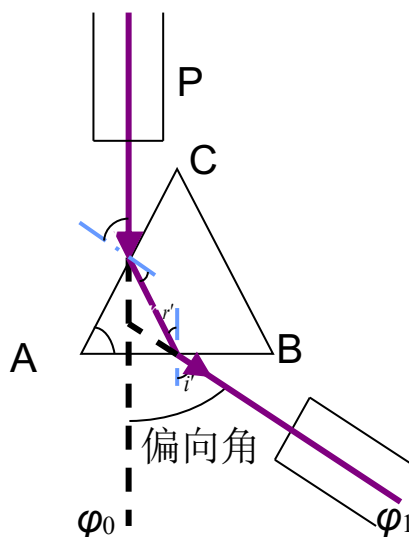


图 1-9 寻找氦光谱三棱镜摆放示意图

观察到谱线后，转动小平台，使谱线的偏向角减小。减小到一定程度时，再同方向转动小平台会使偏向角反向增大，这个临界位置就是最小偏向角位置。

锁死转台锁紧螺钉，转动望远镜使分划板上竖直线与狭缝像对准，记下该状态转盘角度值  $\varphi$ （估读一位）。更换下一个光谱再测量，得到另一个光谱的角度位置  $\varphi$ 。（每个谱线的最小偏向角不同）

取下三棱镜，转动望远镜使分划板上竖直线与狭缝像对准，记下入射方位对应的角度值  $\varphi_0$ 。

#### （4）求出最小偏向角，计算折射率及不确定度

出射光方位减去入射光方位，得到该谱线的最小偏向角。

计算得到三棱镜的折射率  $n$  并计算出其中一条谱线折射率不确定度  $\Delta n$ 。

计算数据记录和处理见图 1-10。

氢光谱 波长/nm	入射角位置 $\varphi_0$	出射角位置 $\varphi$	最小偏折角 $\delta = \varphi - \varphi_0$	$\frac{A + \delta}{2}$	折射率 $n = \frac{\sin \frac{A + \delta}{2}}{\sin \frac{A}{2}}$
蓝紫光447.1					
蓝光 471.3					
蓝绿 492.2					
浅绿 501.6					
黄 587.6					
大红 667.8					
暗红 706.6					

$$\Delta_n = \frac{1}{2} \sqrt{\left( \sin \frac{\delta}{2} / \sin^2 \frac{A}{2} \right)^2 \Delta_A^2 + \left( \cos \frac{A + \delta}{2} / \sin \frac{A}{2} \right)^2 \Delta_\delta^2} \quad A=60^\circ \quad \Delta_A = 1' \quad \Delta_\delta = 0.5^\circ$$

图 1-10 最小偏向角的测量数据表格

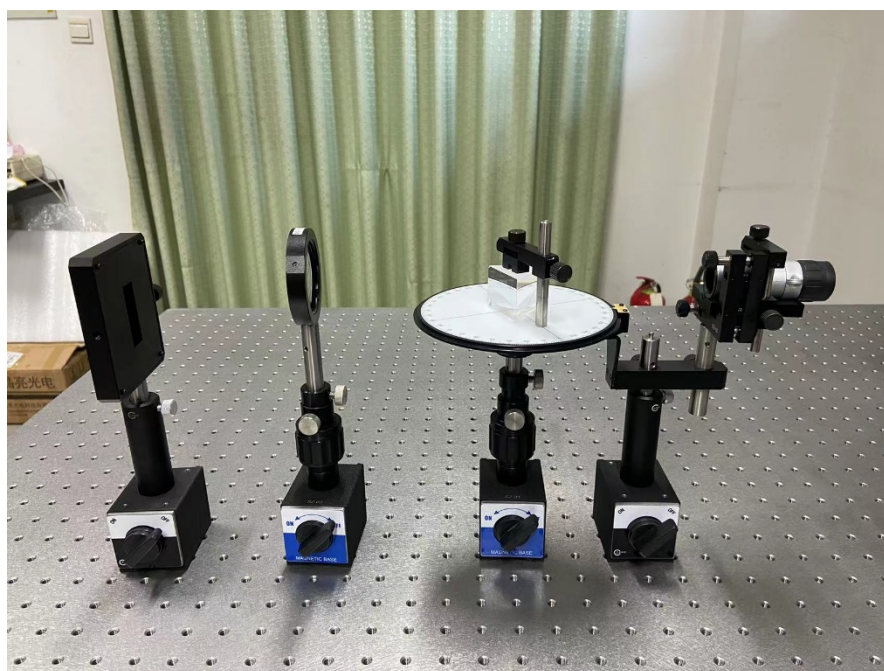


图 1-11 分离式分光计实物图

## 五、注意事项

1. 氢放电管高压（5~6kV），不要用手碰电极。
2. 光学元件（三棱镜、偏振片、望远镜）不要用手触摸光学面，不用时请放置于安全位置（例如盒子里），防止跌落摔坏。

## 2 再现双彩虹——虹和霓

幻日、虹（主虹，primary rainbow）与霓（副虹，secondary rainbow）是自然界常有的现象，雨后天晴时有发生。太阳光的各种色光在经过水滴，发生折射和反射后，会汇聚在某一特定偏折角的方位上。而不同色光由于波长有差异，这一偏折角会有不同，便产生了色散现象。太阳光在水滴内经过一次反射产生的色带叫做虹，经过二次反射产生的色带叫做霓。

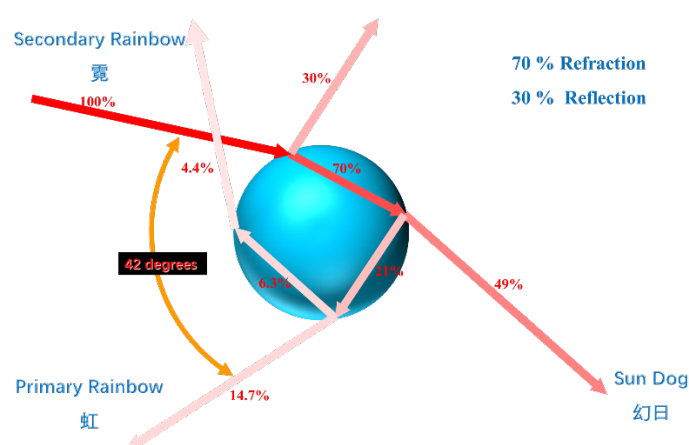


图 2-1 白光经过水滴的光学现象

### 一、实验原理

#### 1、幻日

幻日（parhelion/sundog）是一种大气光学现象，尤其特指冬季的冰晕。冰晕则是由冰晶的折射和反射形成。由于冰晶是六方体，太阳光经过透射和折射后会形成虚像或者色散。表现为位于太阳一侧或两侧的光斑。最为常见的幻日为 22°幻日，它经常同时出现在 22°日晕的两侧。冰凌幻日现象在中国东北和北美冬季较为常见。

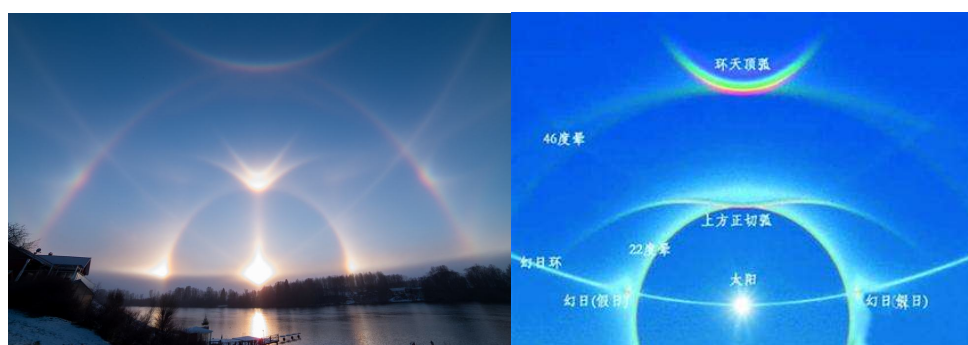


图 2-2 冰凌幻日现象



广义的幻日就是经过两次折射后的色散，类似三棱镜的色散。我们取圆柱或球体作为研究对象，取其截面来看幻日形成光路图，如图 2-3 所示。

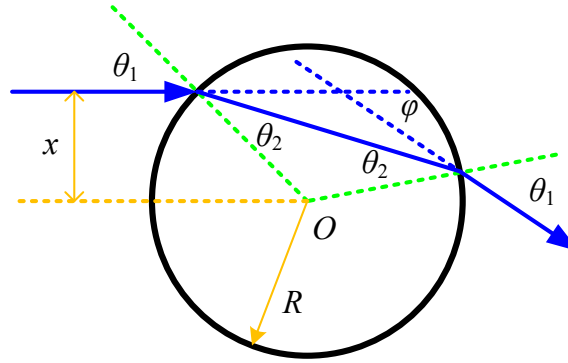


图 2-3 幻日形成原理图

设入射角为  $\theta_1$ ，出射角为  $\theta_2$ ，入射光与出射光的夹角（偏折角）为  $\varphi$ ，设介质的折射率为  $n$ 。实验室环境取空气的折射率  $n_1=1$ 。偏折角  $\varphi$

$$\varphi = 2(\theta_1 - \theta_2) \quad (2-1)$$

根据折射定律

$$\sin\theta_1 = n\sin\theta_2 \quad (2-2)$$

可得到偏折角  $\varphi$  与入射角  $\theta_1$  的关系：

$$\varphi = 2 \left[ \theta_1 - \arcsin \left( \frac{\sin\theta_1}{n} \right) \right] \quad (2-3)$$

由图 2-3 可知，如果测出入射光线所在直线到圆心的距离： $x=R\sin\theta_1$ 。只要测出偏折角  $\varphi$ 、入射光线的距离  $x$  和直径  $R$ ，就可以计算出介质的折射率  $n$ 。



图 2-4 双彩虹照片

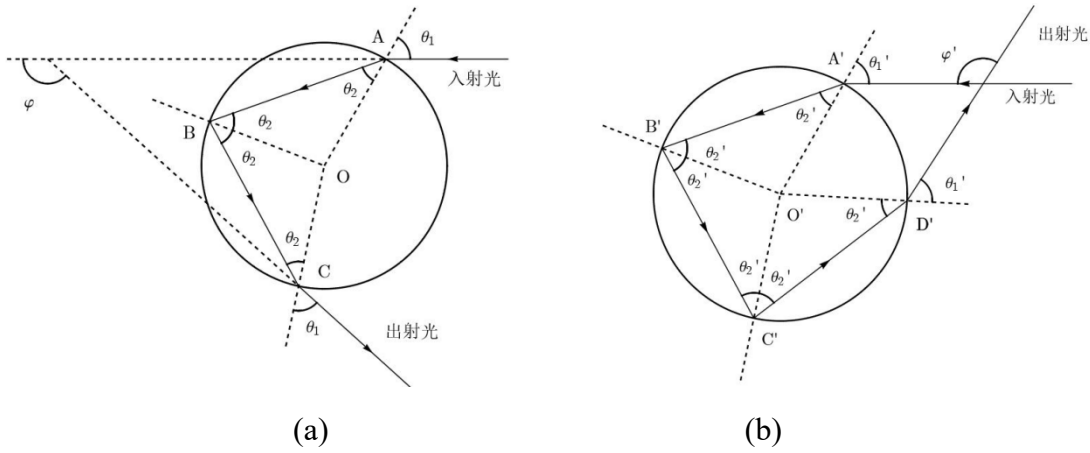


图 2-5 虹与霓产生原理图：(a) 虹 (b) 霓

## 2、虹

光线在介质经过一次反射产生的色带称之为虹（primary rainbow），如上图所示，亮度较大的彩带即为虹。图 10(a)中给出了虹产生原理。根据几何关系，光线经一次反射和两次折射后的光线偏折角  $\varphi$

$$\varphi = \pi + 2\theta_1 - 4\theta_2 \quad (2-4)$$

与幻日相似，根据折射定律，偏折角  $\varphi$  与入射角  $\theta_1$  的关系：

$$\varphi = \pi + 2\theta_1 - 4\arcsin\left(\frac{\sin\theta_1}{n}\right) \quad (2-5)$$

此函数具有极小值点，即存在一个入射角  $\theta_1$  使得  $\varphi$  存在一个极小值点处，即最小偏向角，

对应的光线最为密集，光强最强。其他区域各种颜色混合成白光，这就是为什么会形成虹的原因。

因此，形成虹时光线的偏折角，即 $\varphi_m$ ，

$$\varphi_m = \pi + 2\arcsin\left(\sqrt{\frac{4-n^2}{3}}\right) - 4\arcsin\left(\sqrt{\frac{4-n^2}{3n^2}}\right) \quad (2-6)$$

取  $n = 1.333$ ，即水的折射率，折算成角度得到  $\varphi_m = 137.92^\circ$ （偏振锐角为  $42.08^\circ$ ），与前面图 2-1 所给角度一致。

### 3、霓

白光光线在介质经过二次反射产生的色带称之为霓，如图 2-5(b)所示。利用几何关系，得到偏折角

$$\varphi = 6\theta_2 - 2\theta_1 \quad (2-7)$$

根据折射定律，可得：

$$\varphi = 6\arcsin\left(\frac{\sin\theta_1}{n}\right) - 2\theta_1 \quad (2-8)$$

霓的偏折角  $\varphi$  也存在极小值点处，即最小偏向角。因此，形成霓时光线的偏折角，即 $\varphi_m$ ，

$$\varphi_m = 6\arcsin\left(\sqrt{\frac{9-n^2}{8n^2}}\right) - 2\arcsin\left(\sqrt{\frac{9-n^2}{8}}\right) \quad (2-9)$$

取水的折射率  $n = 1.333$ ，折算成角度得到  $\varphi_m = 129.11^\circ$ 。

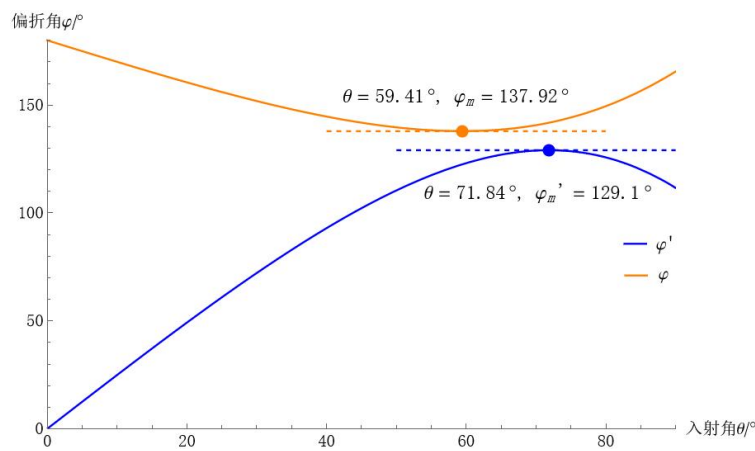


图 2-6 虹和霓偏折角与入射角的关系曲线

换言之，如果平行白光打到某个介质，通过测定虹和霓的位置就可以反推出该介质的折射率  $n$ 。某种意义上，与三棱镜测折射率有异曲同工之妙。

### 3、彩虹的偏振特性

接下来来探究虹和霓的偏振属性，图 2-7 为两张彩虹的拍摄照片，在同一时间，加有滤镜的拍摄出来的彩虹更为鲜艳多彩。显然，彩虹是有偏振属性的，接下来就是详细研究一下彩虹的偏振特性。



图 2-7 拍摄彩虹：(a) 无滤镜 (b) 加滤镜

当偏振光照射到不同介质交界面时，会发生反射和折射现象，但与此同时，其偏振属性也会发生变化。如图 2-8 所示，入射光有两种分量的偏振光构成，即 P 光和 S 光。

在这里首先定义以下概念：

- ✓ 入射面：入射光的传播方向与入射界面法向量所构成的平面；
- ✓ P 分量偏振光（P 光）：光的偏振方向平行于入射面的分量；
- ✓ S 分量偏振光（S 光）：光的偏振方向垂直于入射面的分量。

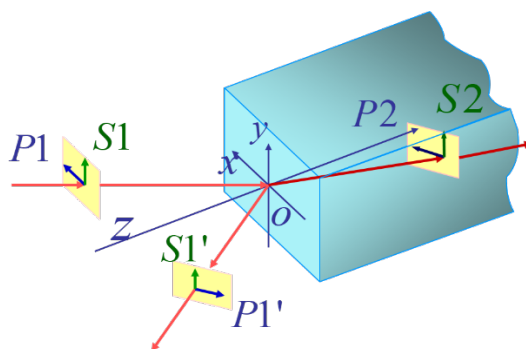


图 2-8 光在介质面上的传播光路图

光在介质界面上反射和折射时，其平行于入射面的 P 分量，与垂直于入射面的 S 分量的行为不同。

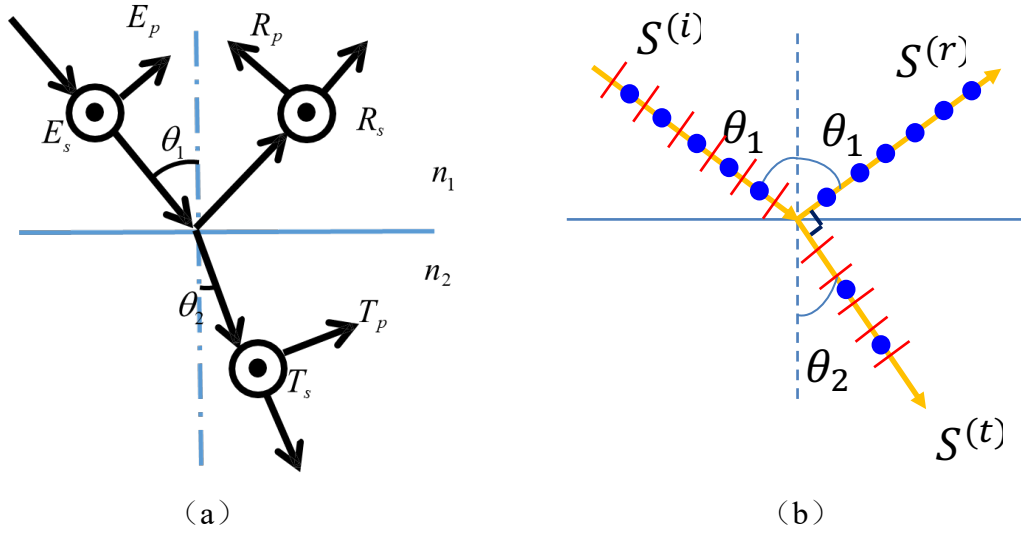


图 2-9 (a) 偏振光的反射和折射 (b) 布鲁斯特角的条件

根据电磁波传播的规律，由边界条件，分析可得入折射、反射中 P 分量和 S 分量的变化关系，此关系式即为菲涅尔公式。

S 分量的电场反射系数 $r_s$ 和透射系数 $t_s$ ：

$$\begin{aligned} r_s &= \frac{R_s}{E_s} = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} = -\frac{\sin(\theta_1 - \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \\ t_s &= \frac{T_s}{E_s} = \frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} = \frac{2 \sin \theta_2 \cos \theta_1}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \end{aligned} \quad (2-11)$$

P 分量的电场反射系数 $r_p$ 和透射系数 $t_p$ ：

$$\begin{aligned} r_p &= \frac{R_p}{E_p} = \frac{n_1 \cos \theta_2 - n_2 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_2 + n_2 \cos \theta_1} = \frac{\tan(\theta_1 - \theta_2)}{\tan(\theta_1 + \theta_2)} \\ t_p &= \frac{T_p}{E_p} = \frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_2 + n_2 \cos \theta_1} = \frac{2 \sin \theta_2 \cos \theta_1}{\sin(\theta_1 + \theta_2) \cos(\theta_1 - \theta_2)} \end{aligned} \quad (2-12)$$

由于光强 I 正比于电场  $E^2$ ，故可以得到反射光和透射光的光强关系：

$$\begin{aligned} I_{R_p} &= \left[ \frac{\tan(\theta_1 - \theta_2)}{\tan(\theta_1 + \theta_2)} \right]^2; I_{T_p} = 1 - I_{R_p} \\ I_{R_s} &= \left[ \frac{\sin(\theta_1 - \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \right]^2; I_{T_s} = 1 - I_{R_s} \end{aligned} \quad (2-12)$$

根据菲涅尔公式可知，当达到图 2-9 (b) 所示条件，即当入射角 $\theta_1$ 与折射角 $\theta_2$ 相加等于 $90^\circ$ 时， $I_{R_p} = 0$ ，故反射波没有 P 分量，只有 S 分量。



$$\theta_i = \arctan n = \theta_B \quad (2-13)$$

$\theta_B$ 为布鲁斯特角。

如果入射光只有 P 分量，而没有 S 分量，则反射光为 0。实验中可利用这一性质来确定布鲁斯特角 $\theta_B$ ，测定折射率  $n$ ，同时校正偏振片的方位。

虹的产生经过了折射、反射、折射三个过程，对自然光使用 3 次菲涅尔公式。霓的产生经过了折射、反射、反射、折射四个过程，对自然光使用 4 次菲涅尔公式。将入射角的函数转化为出射角的函数（彩虹观察的是出射角），并利用程序就可以计算出虹和霓的相对光强  $I$  与偏折角  $\delta$  之间的关系曲线。

以 折射率  $n=1.49$  玻璃棒为例，做出相对光强随偏折角的变化曲线。由图 2-10 可以看出，在偏折角  $\delta=95.0^\circ$  与  $\delta=156.4^\circ$  处出现两条光强峰，分别为霓和虹的位置。由此可见，彩虹为偏振光。因此想要拍摄漂亮对比度高的照片，加滤镜是必须的。

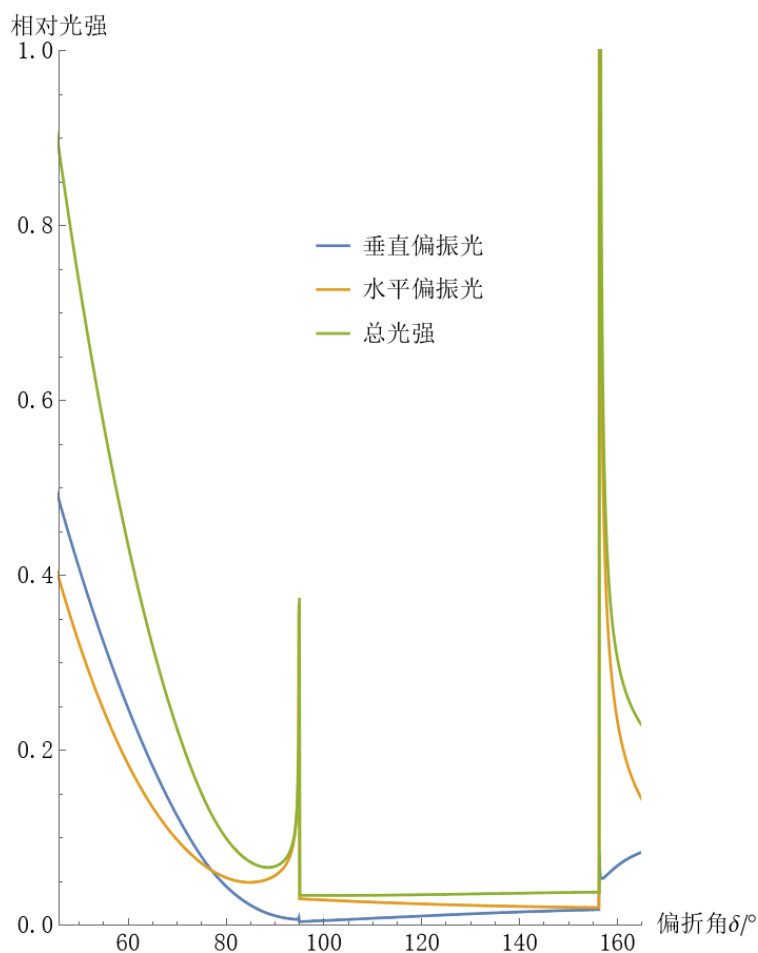


图 2-10 虹和霓相对光强随偏折角的变化曲线

## 二、实验内容

## 1、采用布鲁斯特角测定三棱镜的折射率，同时校正偏振片方位

①三棱镜放置到转台，用夹具固定好

②将半导体激光笔放置到另一夹具上，调整合适高度和角度，使玻璃反射的光与激光笔出射重合。激光笔的方向即为玻璃面的法线方向。

③偏振片放置于激光笔和转台之间

④让激光穿过偏振片，打到三棱镜光学面，同时反射光出射到大白屏

⑤转动转台，先预设入射角  $\theta_i=57^\circ$  左右，旋转偏振片到某一位置可看到白屏上的反射光点很暗，反复微调入射角  $\theta_i$  及偏振片的方位角使反射光点最暗。读取入射角，得到折射率。同时，分别调整 2 个偏振片方位校正完毕。

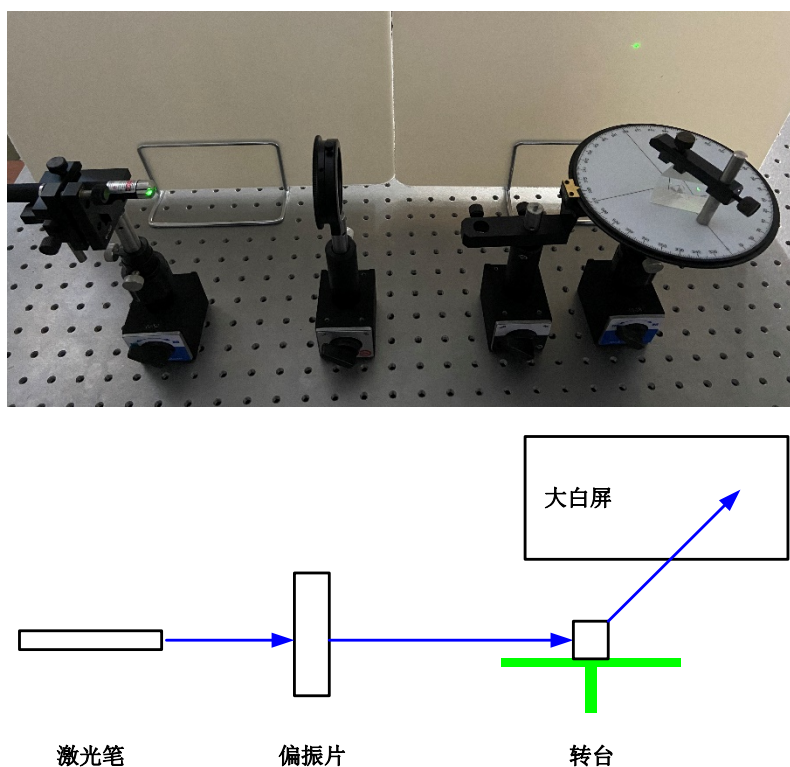


图 2-11 测定布鲁斯特角实物图和光路图

## 2、利用白光观察虹和霓并研究虹和霓的偏振属性

①观察玻璃球的虹和霓

先后分别将大玻璃球和小玻璃球放置到转台上，将手电筒放置到夹具上，调整手电筒焦距和光照强度，照射玻璃球观察虹和霓现象。

②观察虹和霓偏振状态

在布鲁斯特角实验中校正好的偏振片的角度记录下来，旋转偏振片，观察虹和霓的偏振属性，判断其偏振状态。

### 3、利用激光观察虹和霓现象

- ①实验中的亚克力棒直径为：1mm、2mm、3mm、4mm、5mm、10mm、12mm、15mm。
- ②选择合适的亚克力棒。
- ③亚克力棒放置于转台，注意用双面胶粘住底部（较粗的亚克力棒可以不用双面胶）。
- ④将激光笔放置到夹具上，照射亚克力棒观察幻日、虹和霓现象。
- ⑤测定虹和霓的出射角度，计算亚克力的折射率。

### 4、选做：测定亚克力棒的折射率

- ①用游标卡尺测出准确直径。
- ②借助实验盒所给出的器件，自行设计实验测量方法。
- ③测定幻日、虹和霓的入射角和出射角度，计算亚克力的折射率。

## 三、研究性课题

- 1、能否在实验室内复现冰棱幻日？测定相关参数？
- 2、理论上，完全模拟虹和霓，入射光应该为平行光，能否改进装置，实现平行白光和平行的激光光束？
- 3、实验中采用虹和霓的方法测定的折射率精度较低，能够改进实验方案，更为精确的测定数据，并给出测量结果不确定度的对比？