

实验 03 塞曼效应

引言

塞曼效应实验是近代物理中的一个重要实验，它证实了原子具有磁矩和空间量子化，可由实验结果确定有关原子能级的几个量子数如 M ， J 和 g 因子的值，有力地证明了电子自旋理论。

$ZM 2000B1/B2$ 型塞曼效应实验仪通过永磁铁的磁场对笔形汞灯中特定波长的光谱线产生 π 光和 σ 光分裂，并用一套高精度的线阵 CCD 采集系统（即 $ZM 2000A$ 塞曼效应微机采集处理系统）对分裂曲线进行接收，借助计算机的强大数据处理能力分析实验数据，得到实验结果。

实验目的

- 1 掌握塞曼效应理论，确定能级的量子数与朗德因子，绘出跃迁的能级图；
- 2 掌握法布里-珀罗标准具的原理及使用；
- 3 熟练掌握光路的调节；
- 4 了解线阵 CCD 器件的原理和应用。

实验原理

处于电磁场中的发光体，光谱线发生分裂的现象称为塞曼效应，其原理如下：

1 原子中的电子一方面绕核作轨道运动（用角动量 P_L 表示），一方面本身作自旋运动（用角动量 P_S 表示），将分别产生轨道磁矩 μ_L 与自旋磁矩 μ_S ，它们与角动量的关系是：

$$\mu_L = -\frac{e}{2mc} P_L, \quad \mu_S = -\frac{e}{mc} P_S$$

P_L 与 P_S 合成总角动量 P_J 并分别绕 P_J 旋进， μ_L 与 μ_S 合成总磁矩 μ ， μ 在 P_J 延长线上的分量 μ_J 才是一个定向恒量。

对于多电子原子，由于角动量之间的相互作用，有 LS 耦合与 JJ 耦合，但大多数是 LS 耦合。对于两个电子，则 L_1 、 L_2 合成 L ， S_1 、 S_2 合成 S ， L 、 S 又合成 J 。因此 μ 在 P_J 延长线上的分量 μ_J 与 P_J 的关系是：

$$\mu_j = -g \frac{e}{2mc} P_j$$

g 称为朗德因子，在 LS 耦合情形，它与 L 、 S 和 J 的关系是：

$$g = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)}$$

由于 L 、 S 和 J 只能取整数与半整数，所以得出的 g 是一个简分数。

2 在外磁场作用下，产生原子磁矩与外磁场的相互耦合，赋予的耦合能量为：

$$\Delta E = -gH \cos \sigma = Mg \mu_B H, \quad \mu_B = \frac{eh}{4\pi m}$$

μ_B 称为波尔磁子。 M 为磁量子数，是 J 在磁场方向上的量子化投影。由于 J 一定时， M 取值为 $-J, -J+1, \dots, J+1, J$ ，即取 $2J+1$ 个数值，所以在外磁场中的每一个原子能级（由 J 表征，称为精细结构能级）都分裂为 $2J+1$ 个等间距的子能级（亦称磁能级），其间距由朗德因子 g 表征。两精细能级中磁能级之间的跃迁得到塞曼效应，观察到的分裂光谱线，用波数表示为：

$$\Delta \tilde{\nu} = \frac{\Delta \nu}{C} = \frac{\Delta E_2 - \Delta E_1}{hC} = (M_2 g_2 - M_1 g_1) \frac{eh}{4\pi mc} = (M_2 g_2 - M_1 g_1) L$$

式中的 L 称为洛仑兹单位。 M 的选择定则是 $\Delta M = M_2 - M_1 = 0, \pm 1$ ，脚标 2、1 分别代表始、终能级，其中 $\Delta M = 0$ 的跃迁谱线称为 π 光线， $\Delta M = \pm 1$ 的跃迁谱线称为 σ 光线。

3 光的偏振与角动量守恒

在微观领域中，光的偏振情况是与角动量相关联的，在跃迁过程中，原子与光子组成的系统除能量守恒外，还必须满足角动量守恒。 $\Delta M = 0$ ，说明原子跃迁时在磁场方向角动量不变，因此 π 光是沿磁场方向振动的线偏振光。 $\Delta M = +1$ ，说明原子跃迁时在磁场方向角动量减少一个 $\sigma \hbar$ ，则光子获得在磁场方向的一个角动量 \hbar ，因此沿磁场指向方向观察，为反时针的左旋圆偏振光 σ^+ ，同理， $\Delta M = -1$ 可得顺时针的右旋圆偏振光 σ^- 。

当垂直于磁场方向观察时（横效应），如偏振片平行于磁场，将观察到 $\Delta M = 0$ 的 π 分支线，如偏振片垂直于磁场，将观察到 $\Delta M = \pm 1$ 的 σ 分支线。而沿磁场方向观察时，将只观察到 $\Delta M = \pm 1$ 的左右旋圆偏振的 σ 分支线。如图 1 所示。

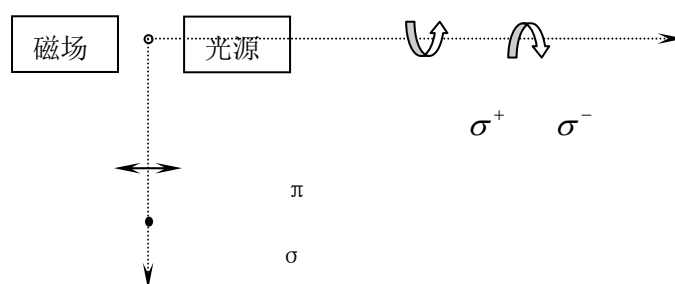


图 1

4 若原子磁矩完全由轨道磁矩所贡献，即 $S_1 = S_2 = 0$ ， $g_1 = g_2 = 1$ ，得到正常塞曼效应，波数差为

$$\Delta \tilde{\nu} = \frac{eh}{4\pi mc} H = 4.67 \times 10^{-5} H (cm^{-1})$$

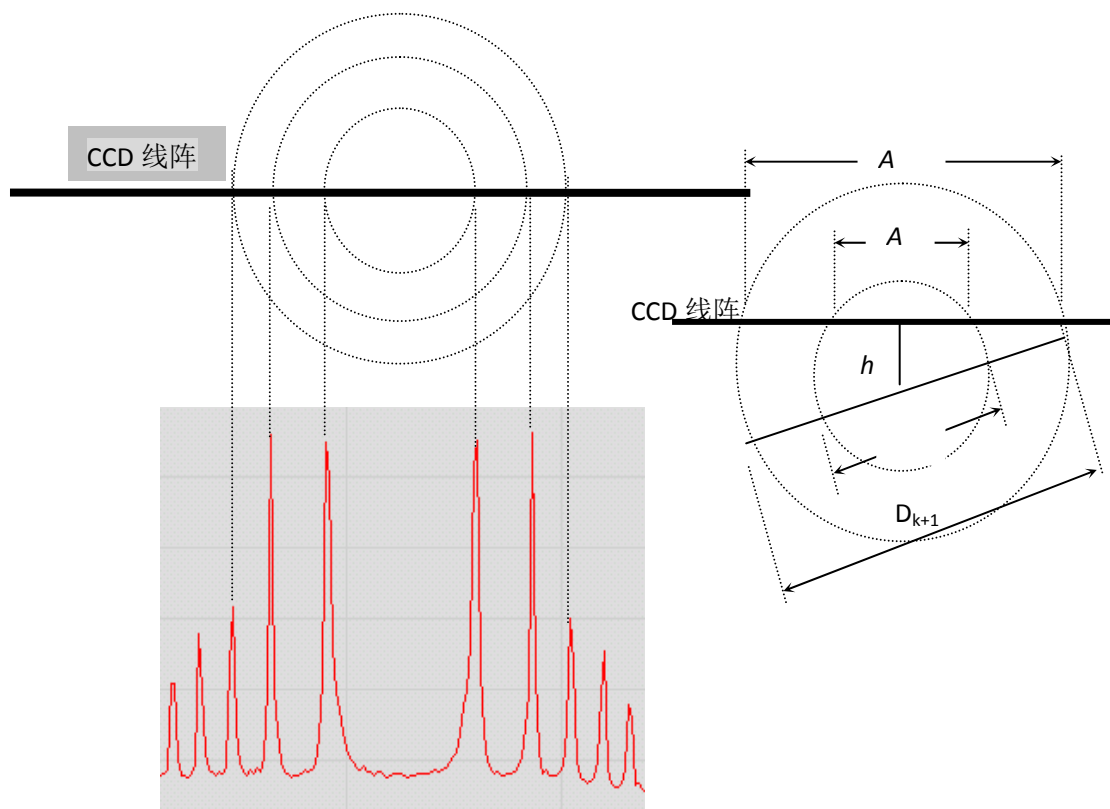
通常情况两种磁矩同时存在，即 $S_1 = S_2 \neq 0$ ， $g_1 \neq 1$ ， $g_2 \neq 1$ ，称为反常塞曼效应，波数差为：

$$\Delta \tilde{\nu} = (M_2 g_2 - M_1 g_1) \frac{eh}{4\pi mc} H$$

5 塞曼效应是中等磁场 ($H \approx 1$ 特斯拉) 对原子作用产生的效应。这样的场强不足以破坏原子的 LS 耦合, 当磁场较强 (H 为几个特斯拉) 时将产生帕邢-拜克效应。弱磁场 ($H < 0.01$ 特斯拉) 时则应考虑核自旋参与耦合。塞曼效应证实了原子具有磁矩与空间量子化。实验观测与理论分析的一致性是对磁量子数选择定则的有效性的最好的实验证明, 也是光子的角动量纵向分量有三个可能值 ($\hbar, 0, -\hbar$) 的最好证明。由塞曼效应的实验结果确定有关原子能级的量子数 M 、 J 与 g 因子值, 可判断跃迁能级哪一个是上能级和另一个是下能级, 并可计算出 L 与 S 的数值, 这些确定均与实验所用原子无关, 因而是考察原子结构的最有效的办法。

测量原理和方法

将干涉条纹投在 CCD 线阵上, 则光强分布曲线如下图所示:



由于 $(D_{k-1}^2 - D_k^2)$ 的不变性 (证明从略), 我们可用 D_k, D_{k-1}, D_k' 的值求出分裂波数值。而 D 的值就可以用光强分布曲线对应的左右两个峰的位置差求得。由于线阵是一维的, 所以圆环状的条纹很难准确地通过圆心, 因此, 现作以下推导, 证明无论 CCD 线阵位于圆环的何处, 对应的两个峰的位置差仍满足不变性的原理:

$$\because (A_k / 2)^2 = (D_k / 2)^2 - h^2,$$

$$(A_{k+1}/2)^2 = (D_{k+1}/2)^2 - h^2$$

$$\therefore A_k^2 - A_{k+1}^2 = D_k^2 - D_{k+1}^2$$

由上述推导可得，无论 *CCD* 线阵位于条纹何处，用曲线峰值位置求得的位置差都能代替直径进行计算。鉴于条纹可见度方面的考虑，我们仍建议尽量使狭缝靠近圆心，以求最佳效果。

实验内容

1 调节光路和各光学器件

2 透镜调焦：旋转成像透镜调焦，并调整 *ZM 2000A* 采集系统在光具座上的位置，使接收到的曲线幅度最大，细节最清晰（即投在线阵 *CCD* 器件上的像最清晰）；

3 测量 π 光分裂

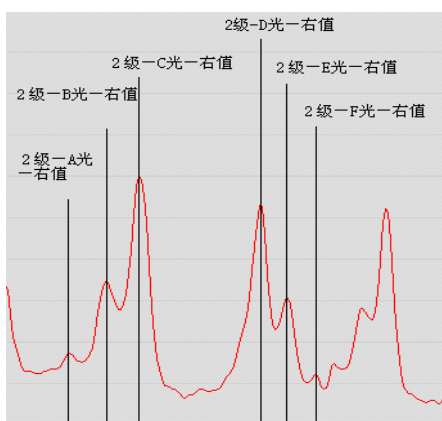
实验步骤：

- 1) 进入 *ZEEMAN*，选定采样点长度及增益值（一般取默认值），点击‘开始采集’，根据接收到的图像调整光路。正确的光路应使图像类似于上文曲线对比图例中的最上一条；
- 2) 加磁场，进行 π 光分裂，根据需要微调光路，应得到类似于上文曲线对比图例中的中间一条曲线；
- 3) 点击‘停止采集’，将得到的曲线冻结以利于稳定测量。将鼠标移到局部视窗中（或点击‘局部视窗放大’以扩大局部视窗的观察范围），用鼠标、左右键（适用于微调）或 *PageUp/PageDown* 将拾取线压在待测点上，单击鼠标左键或回车键（较单击鼠标左键稳定），在弹出的对话框里输入数据。重复此操作以完成全部的数据录入；
- 4) 点击‘参数预设’，填入各项参数；
- 5) 选择‘查看数据表格内容’里的‘ π 光直径’，在实验数据表格里检查直径数据，无误后点击‘计算’；
- 6) 选择‘查看数据表格内容’里的‘ π 光结果’，在实验数据表格里查看最后的计算结果；同时，可选择‘查看分裂圆环’里的‘ π 环’，看一看直观的图像。

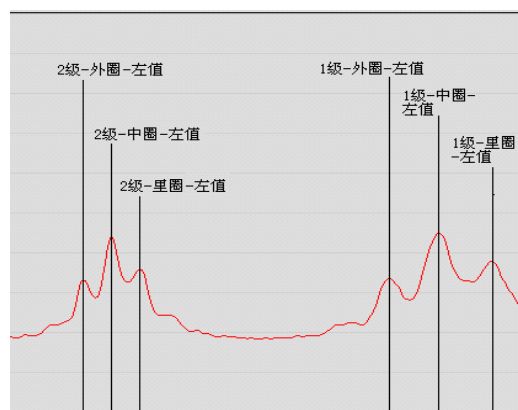
4 测量 σ 光分裂

步骤：由于 σ 光的计算过程中要用到未分裂前的直径位置数据，因此在数据录入过程中，除了要录入 σ 光的直径外，还需录入未分裂前的原直径数据。

首先得到未分裂时的曲线，将这些未分裂的直径数据录入为 π 光的中圈直径（这样处



左图演示了如何录入 σ 光的数据



右图演示了如何录入 π 光的数据

理是因为 π 光的中圈位置就是分裂前的原位置）， π 光的其余直径数据忽略不管。然后，参照测量 π 光的步骤进行 σ 光的测量。基于上述原因，可先做 π 光实验，再做同一条件下的 σ 光实验，这样可免去对未分裂曲线的处理。

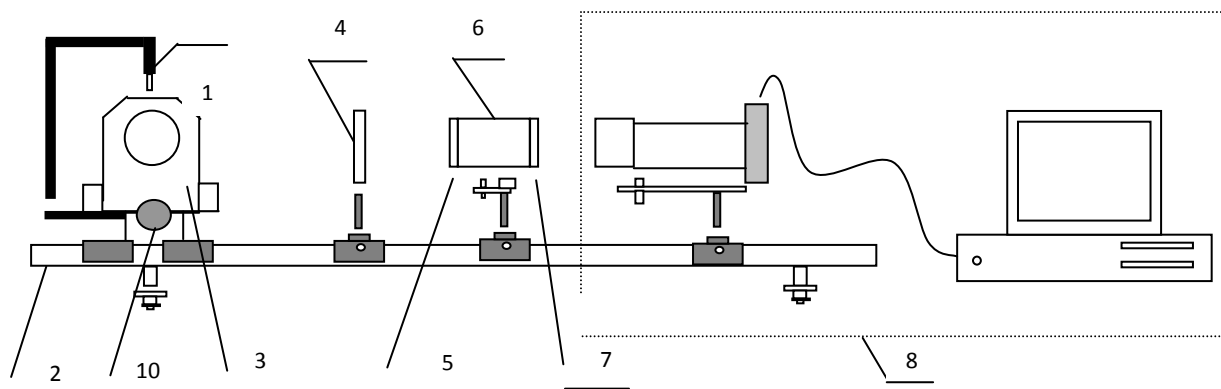
5 需注意以下几点

- 1) 各光学器件的光轴必须保持一致。调节时，第一，要使各器件的轴心等高，第二，注意各器件之间要保持平行，第三，注意对光具座的调节，不要让各器件的横向位置相互错开；
- 2) F-P 标准具的两晶片要严格调节平行；
- 3) 会聚透镜的位置要正确。
- 4) 成像透镜的位置要恰当，要缓慢地调节透镜直至采集到的曲线幅值最大、细节最清晰为止；
- 5) 如果曲线的幅度较小，可以考虑如下两种方法：一是将 CCD 采集盒的积分时间 *DIP* 作适当的调整，一是将软件的增益加大，有时也可以考虑减小 FP 标准具与 CCD 成像透镜的距离；
- 6) 如果采集到的曲线为幅度很高的一条直线，这是环境光过强所致，请减弱环境光；

6 关于实验器件，需注意以下几点

- 1) 除了 F-P 标准具的质量以外，滤色片的质量也很重要。如果得到的采样曲线有些缭乱（比如有太多的碎小波峰），请检查滤色片（主要是镀膜）是否已发花变质；
- 2) 各光学器件的质量与大小也关系到成像曲线的幅度强弱，我们应选取对光衰减较小、镜面积较大的光学器件来完成实验；
- 3) 如果使用手持式的磁场强度测量仪，请注意测量时手的抖动应尽可能小，探针的位置应尽可能与光源的位置吻合。

仪器简介



ZM2000 B1 型塞曼效应实验仪

1 笔形汞灯 2 光具座 3 永磁铁 4 聚光透镜 5 偏振片 6 固体 F-P 标准具 7 滤光片
8 虚线框内为 ZM2000A CCD 采集分析系统 9 空气隙 F-P 标准具 10 磁铁移动手轮

1 系统组成

2 技术指标

永磁铁： 磁场强度 $B = 1.2\text{T}$

F-P 标准具： 间隙 $d = 2.09\text{mm}$ (固体 F-P 标准具)

间隙 $d = 2.00\text{mm}$ (空气隙 F-P 标准具)

分辨能力 $\lambda/d_\lambda \geq 2 \times 10^5$

滤光片： 透过率 $\geq 60\%$

峰值波长 546.1nm

仪器使用方法

请按以下步骤将全套设备安装好：

1 参照上面的结构图将各个器件安装好，ZM2000A 的安装请参阅《ZM2000A CCD 塞曼效应微机采集处理系统 硬件指南/软件指南/实验指南》一书；

2 打开笔形汞灯电源，打开计算机电源，运行 ZEEMAN 软件；

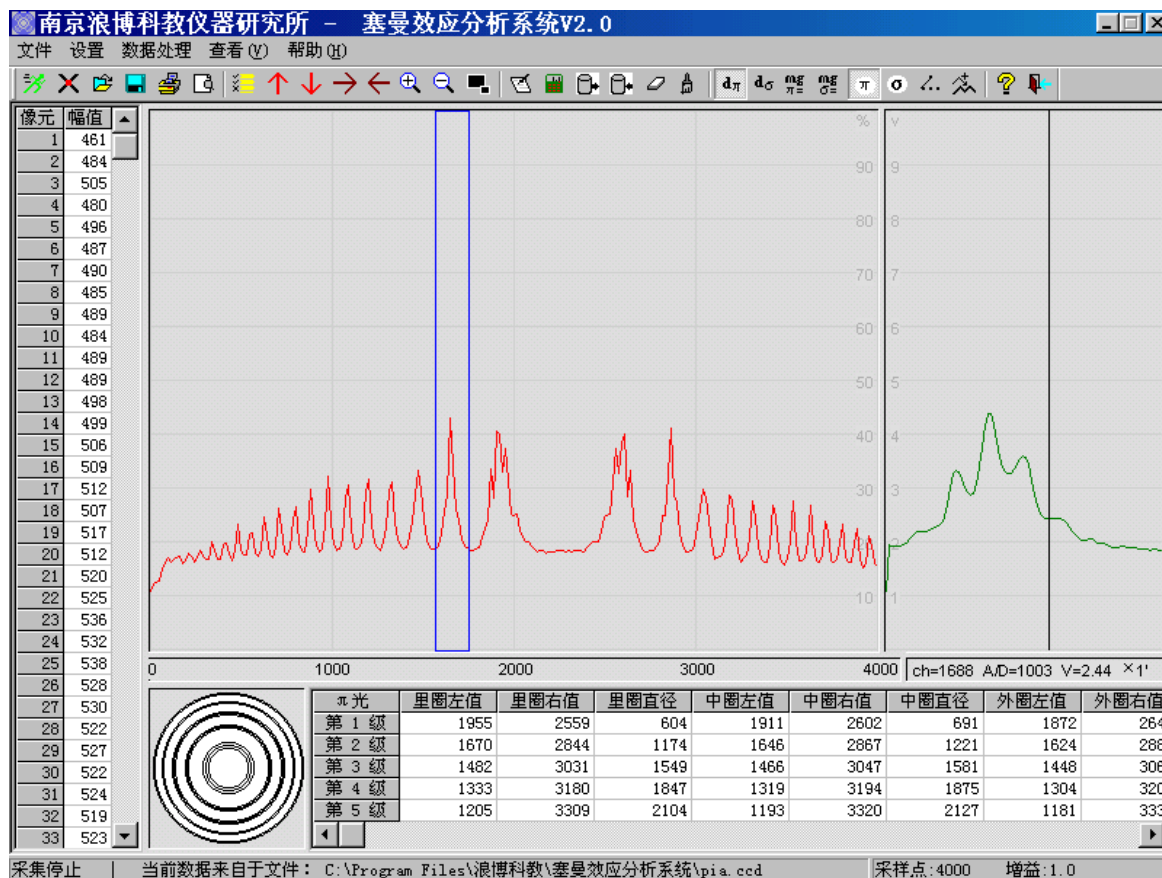
3 调节光路，使各光学器件同轴、等高，并使光线能完全进入 ZM2000A 的透镜；空气隙 F-P 标准具的调节：眼睛通过标准具观察汞灯时，仔细调节三个微调螺丝，直至眼睛移动时，同心圆环保持不动。

4 转动 ZM2000A 的镜头以调节焦距，使软件得到幅度最大，细节最清楚的曲线；

5 转动磁铁移动手轮，将汞灯置于磁场两极的中间，此时磁场强度最大，转动偏振片，分别得到 π 光和 σ 光分裂曲线；

6 参阅《ZM2000A CCD 塞曼效应微机采集处理系统 硬件指南/软件指南/实验指南》一书完成实验数据的测量。

*注：如果配有目视测量望远镜，则可先用目视测量望远镜取代 ZM 2000A 的位置，调节光路，直至用眼睛在望远镜里看到各分裂圆环后再换上 ZM 2000A 进行精确测量。



ZEEMAN 软件的外观风格如上图所示，大致可分为以下五个部分：

1) 曲线全貌区域(主视窗)，即上图中所占面积最大的红色曲线区域。ZEEMAN 会动态地将所有采样点或来自文件的数据压缩显示在这一区域内，但这也不可避免地引起了一些数据的暂时不可见。它的横坐标指示了采样点的范围，右边的纵坐标指示了信号 A/D 转换结果的幅度，100%处对应着最大值 4096。此处有一个蓝色的选择框，它所覆盖的曲线范围在局部放大区域里精确地显示。选择框的大小会动态地自行调整。要移动它，用键盘的左/右方向键、PageUp/PageDown 或将鼠标置于框内按下鼠标左键拖动即可。

2) 局部放大区域(局部视窗)，即右上部以绿色绘制曲线的区域。这一部分提供了对曲线某一段的可以精确到每一个采样点的观测。当鼠标落在这个区间时，会弹出一条拾取线，它所对应的采样点的序号、A/D 转换值、原模拟电压值、放大倍率（在下文中介绍）将显示在此部分下的横条里。左边的纵坐标指示了输入信号在 A/D 转换前的模拟电压值，最高为 10 伏。另外，出于实验需要，也可将局部视窗放大而压缩主视窗，详见下述。

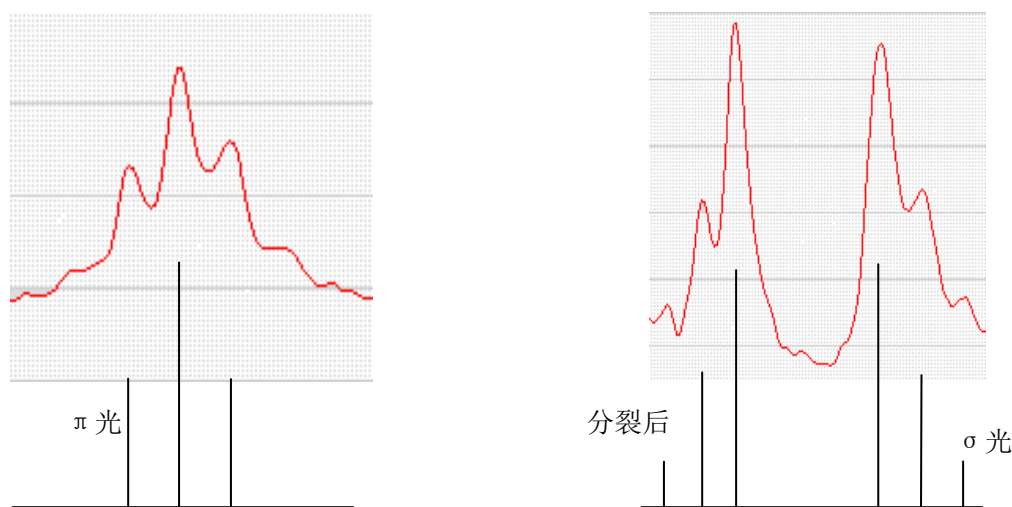
3) 图形区域(图形视窗)，即上图中绘有同心圆（赛曼分裂圆环）的区域。此处可以选择显示 π 光或 σ 光的分裂圆环。

4) A/D 转换数据表格区域，即上图中的竖置表格。其中显示了当前每个采样点的 A/D 转换结果。

5) 实验数据表格区域，即上图中的横置表格。其中可以选择性地显示四种数据： π 光

直径、 σ 光直径、 π 光结果和 σ 光结果。

软件中的曲线所代表的物理内涵如下图所示：



请注意，以上图示只表现了 *CCD* 线阵切割分裂圆环的某一级所得到的曲线的半边，请参考实验内容中图示的完整曲线。分裂曲线以光强的形式表示，曲线上每一点的分辨率为 $7\mu\text{m}$ ，这个精度是非常高的。

注意事项

使用中有下列问题需要注意：

- 1 *ZM 2000A* 的镜头筒上有一道细刻线，转动镜头与之平齐，就可大致调到焦距的位置，再略做细调即可；
- 2 偏振片的圆框上和标准具外壳上刻有划线，对齐时是观察 π 光分裂的位置，转动 90° ，即是观察 σ 光分裂的位置；
- 3 磁铁两极中间强度最大，越远离此位置，磁场强度越小，但均匀性也变差；
- 4 *ZM 2000A* 中的线阵 *CCD* 器件沿竖直方向安装，故对左右位置敏感，要仔细调节；
- 5 用 *ZM 2000A* 采集测量时，如无暗室环境，请用遮光罩连接标准具座和 *ZM 2000A* 的镜头座，否则信号会饱和，曲线一直呈现为计算机屏幕顶部的一条直线；
- 6 聚光透镜的位置对分裂曲线的影响很大，建议将聚光透镜安放在横向可调的马鞍座上；
- 7 各器件在光具座上的位置可参考以下值：
 - 1) 汞灯与聚光透镜立杆的距离一般在 180mm 左右，此值如减小，则观察到的分裂级次减少而信号较强，如增大，则相反；
 - 2) 汞灯与标准具立杆的距离一般在 390mm 左右；
 - 3) *ZM 2000A* 的镜头紧靠标准具（加遮光罩）；
- 8 汞灯通电后，亮度会逐步提高，此稳定过程约需一两分钟；
- 9 汞灯对人眼有害，实验中请勿直视汞灯；
- 10 实验中请勿将手表等易受磁场影响的物品靠近永磁铁；

11 仪器的保养请注意如下：

- 1) 实验结束后，请将各光学器件用套子罩好，以免落灰；
- 2) 各光学器件镜面不要用手触摸，如需清洁，可用洁净的脱脂棉球蘸上酒精轻轻擦拭；
- 3) 避免频繁开关笔形汞灯以提高使用寿命。