

Study on the Zeeman Effect Experimental Method Based on the Digital Zeeman Effect Experimental System

Lili Qi, Xiaoqiang Hou

College of Physical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou Henan
Email: qiliisme@126.com

Received: Mar. 11th, 2017; accepted: Mar. 26th, 2017; published: Mar. 31st, 2017

Abstract

A method of Zeeman Effect experiment is demonstrated first; this method is based on a new kind of Zeeman Effect experimental instrument and PASCO capstone software. By using this method, the intensity of magnetic field can be changed continuously; thus the phenomenon of continuous process of spectral splitting can be recorded and observed by using the video function of the PASCO capstone software. Under the module of video analysis, the diameter of interference rings can be measured, then using the function of table and calculator, and inputting the formulas of electron charge-mass ratio and experimental error by hand, the electron charge-mass ratio and experimental error can be calculated intelligently. And the condition of spectral splitting under different intensity of magnetic field was concluded. Finally, the average value of electron charge-mass ratio calculated by this method is 1.774×10^{11} C/kg, and the relative error is 0.853%, so this method is suitable to be a reference for Zeeman Effect experiment in future.

Keywords

Zeeman Effect, PASCO Capstone Software, Electron Charge-Mass Ratio

基于数字化塞曼效应实验系统的实验方法研究

戚丽丽, 侯晓强

郑州大学物理工程学院, 河南 郑州
Email: qiliisme@126.com

收稿日期: 2017年3月11日; 录用日期: 2017年3月26日; 发布日期: 2017年3月31日

摘要

本文介绍了一种新型的数字化塞曼效应实验装置和PASCO系统的PASCO Capstone数据处理软件,在二者组成的实验系统下完成了塞曼效应实验现象的观察和视频记录,测量了在不同磁场强度下的电子荷质比。利用该方法最终计算出的电子荷质比的平均值为 $1.774 \times 10^{11} \text{ C/kg}$,与电子荷质比标准值 $1.759 \times 10^{11} \text{ C/kg}$ 的相对误差为0.853%,该方法具有易共轴调节、便于实验教学以及测量精度高于传统的测量方法等优点,可作为一种塞曼效应实验方法的参考。

关键词

塞曼效应, PASCO Capstone软件, 电子荷质比

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1896年,荷兰物理学家塞曼发现,当把光源置于足够强的磁场中时,光源发出的谱线会发生分裂,分裂谱线的数量与原子能级有关,并且所发出的谱线都是偏振的。这种在外加磁场作用下,原子能级发生分裂的现象就被称为塞曼效应。塞曼效应是继法拉第磁光效应和克尔磁光效应发现之后的另一种磁光效应,它揭示了原子内部运动的量子效应,是研究原子内部结构的一种重要方法,在物理学史上具有重大意义[1] [2]。

塞曼效应实验的传统方法包括显微目镜法和拍摄底片法,在对实验现象进行观察时,两种方法都存在不便,显微目镜法容易使观察者视觉疲劳,拍摄底片法过程较繁琐,在对电子荷质比进行计算时,传统的目镜法随机误差较大,所测得的电子荷质比平均值相对误差约为1.5%左右,而拍摄底片法所测得的电子荷质比平均值相对误差约为1.1%,但拍摄底片法测量结果受感光时间影响较大[3] [4]。针对传统实验的缺陷,在对塞曼效应实验进行改进时,一般从实验装置、观测方法以及实验数据处理方法三个方面进行,随着数字化技术的发展与广泛应用,塞曼效应实验逐渐向着数字化方向发展,利用数字化技术设计的微机塞曼效应实验仪可以将塞曼效应现象搬到计算机屏幕上,从而解决了传统实验中实验现象观测困难的问题,同时,微机塞曼效应实验装置中利用各种编程软件设计的塞曼效应实验数据处理软件,可以很方便地测量干涉圆环直径和智能地计算电子荷质比,目前,利用微机塞曼效应实验仪进行实验的方法已经成为了各高校实验室塞曼效应实验的主流方法[5] [6]。然而,在实验实际操作中,光路的共轴调节是实验的一个重难点,在利用计算机软件进行干涉圆环直径测量时,在成像系统的像素和分辨率一定的情况下,光学元件共轴调节的越好,干涉圆环才会越锐细,测得的干涉圆环直径才会越准确,因此,共轴调节的好坏是影响电子荷质比计算精确度的重要因素,同时,过于智能化的实验软件不便于学生学习实验数据的详细处理步骤[7]。本文利用一种新型的塞曼效应实验装置,该实验装置在通用的光学元件的基础上进行了一定的集成化,可以减少共轴调节时的困难,同时,利用PASCO capstone软件进行数据采集和处理,使整个实验过程清晰、目的明确。

2. 塞曼效应实验原理

目前, 在高校的近代物理实验中, 通常是以观察汞灯的 546.1 nm 谱线的分裂来研究塞曼效应现象, 从而验证磁场对光源的影响, 并计算电子荷质比的, 实验中一般利用法布里 - 帕罗(F-P)标准具作为干涉元件, 它具有较高的分辨率, 工作原理是利用光在两块镀膜的平面玻璃间反复反射而形成多光束的干涉圆环。

利用塞曼效应现象测量电子荷质比的公式如式(1)

$$\frac{e}{m} = \left(\frac{2\pi c}{dB} \right) \cdot \left[\frac{1}{M_2 g_2 - M_1 g_1} \right] \cdot \left(D_{(k)}^2 - D_{(k)1}^2 \right) / \left(D_{(k-1)}^2 - D_{(k)}^2 \right) \quad (1)$$

电子荷质比的参考值为 1.759×10^{11} C/Kg, 与参考值相比, 测量误差 error(%)公式:

$$error = \left| \left(\frac{e}{m} - 1.759 \times 10^{11} \right) / 1.759 \times 10^{11} \right| * 100\%, \quad (2)$$

其中, M 是磁量子数, g 是朗德因子, d 是 F-P 标准具两平行玻璃板的间隔, e 和 m 分别是电子的电荷和质量, c 是光速, $D_{(k)}$ 是第 k 级干涉圆环直径, $D_{(k)1}$ 是第 k 级干涉圆环分裂后内部圆环直径, $D_{(k-1)}$ 是第 $k-1$ 级干涉圆环的直径。

3. 新型塞曼效应实验仪器及 PASCO Capstone 软件

3.1. 新型塞曼效应实验仪器

该新型塞曼效应实验仪为杭州博源光电科技有限公司生产的型号为 BEX-8501 的塞曼效应实验仪。其结构图如图 1 所示。

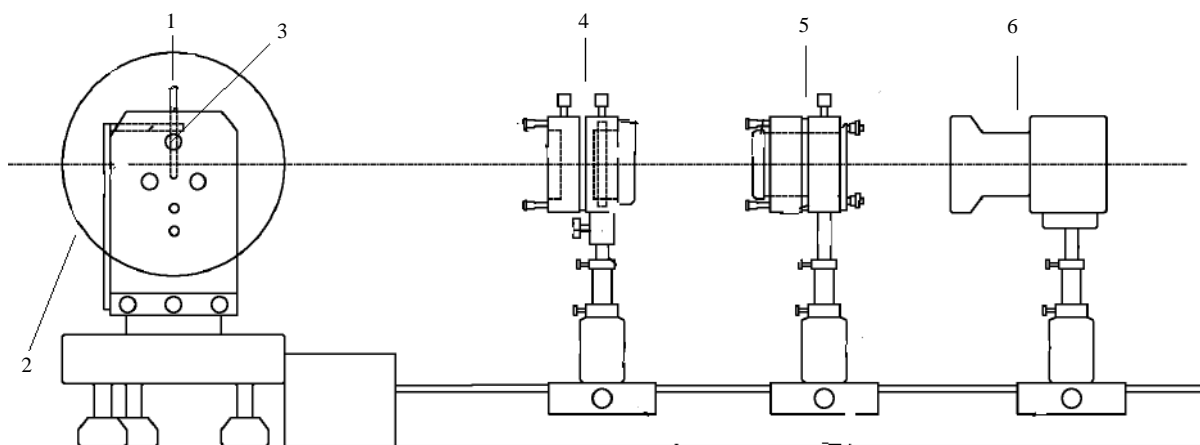
该实验仪器还包括一个可调直流恒流源, 可提供笔形汞灯电压, 以及产生连续变化的电流, 从而提供连续变化的磁场, 极大地方便了连续磁场变化下光谱分裂现象的观察, 可调电流大小与磁场强度的对应关系如图 2 所示。电磁线圈置于一个可以旋转的圆盘上, 中间打孔, 在观察纵向塞曼效应现象时, 可直接抽出铁芯, 使光源的光从孔中发出, 旋转电磁铁使磁场方向平行于光学导轨, 微调光路即可。该实验仪的光学传输部分进行了集成化改进, 其中, 准直透镜和偏振片集成在一个升降架上组成准直偏振系统, 干涉滤光片与 F-P 标准具集成在一个升降架上组成了滤光干涉系统, 并将成像透镜和相机组装在一起成为成像系统, 光学元件的集成化在一定程度上减少了实验中光学元件共轴调节时的困难, 提高了实验效率, 同时, 相对独立元件的减少, 使得光学元件在一定程度上得到了保护。成像部分使用了 200 万像素的 CMOS 工业相机, 可利用 USB 数据连接线连接至计算机, 结合计算机上的图像采集软件即可完成对图像数据的实时观察与采集。

该新型塞曼效应实验仪器相较于传统的塞曼效应实验系统具有以下优点: 1) 磁场强度可连续变化; 2) 光学元件通用且集成化; 3) 利用图像传感技术与计算机技术, 可以在较大视野范围内对实验现象进行观察, 并对实验现象实时采集[8]。

3.2. PASCO Capstone 软件

PASCO capstone 软件是 PASCO 实验平台的核心之一, 它是继 DataStudio 软件之后, PASCO 公司推出的一款全新的功能更强大的实验软件, 提供了包括影音、图片、示波器、FFT、信号发生器、表格、图表、计算器、数字表等多种功能, 极大地促进了实验教学和方便了实验数据处理[9]。在本实验中主要利用其影音、计算器和表格功能, 该软件的功能页面图如图 3 所示。

影音功能可用于录制实验操作过程, 教师在进行实验演示时, 可将标准的操作过程录制下来, 以供学生参考学习, 学生在实验时也可以将自己的操作过程录制下来, 方便教师对他们进行考核; 还可以录



1. 笔形汞灯; 2. 电磁线圈; 3. 铁芯; 4. 准直偏振系统; 5. 滤光干涉系统; 6. CMOS 工业相机

Figure 1. The structure of the new style Zeeman Effect experimental instrument

图 1. 新型塞曼效应实验仪结构图

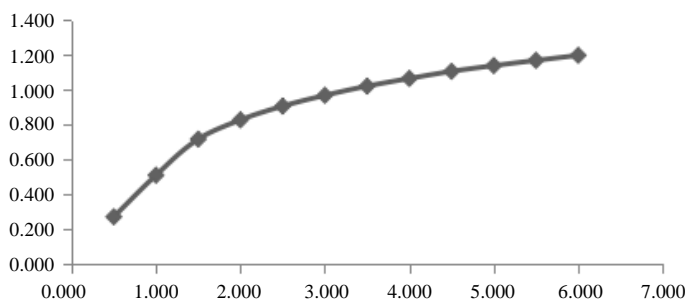
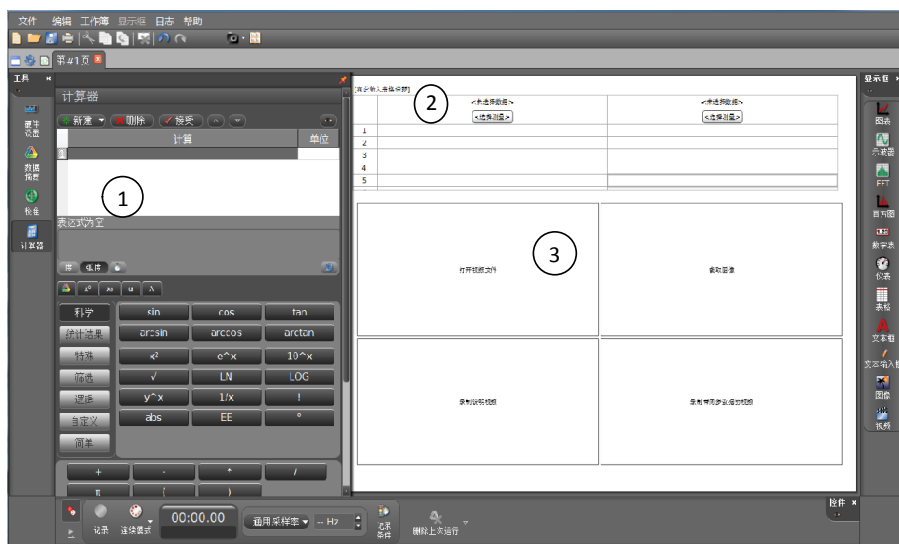


Figure 2. Magnetic field intensity VS current

图 2. 电流大小与磁场强度对应关系



① 计算器功能页面, 可以完成对实验量或者实验方程式的创作; ② 表格功能页面, 可以自定义创建多行多列表格, 选择测量量里还可以选择自定义变量, 可以进行简单的最大值、最小值、平均值统计等; ③ 视频功能页面, 可以连接外设, 进行视频录制, 视频回放观看, 或者图像截取等

Figure 3. Part function of the PASCO capstone software

图 3. PASCO capstone 软件部分功能页面

制动态实验现象和对实验现象进行数据分析, 本实验中主要利用其影音功能录制塞曼效应中光谱的分裂现象, 再对分裂的干涉圆环进行直径测量。

表格功能和计算器功能相似, 都可用于创建用户自定义量或者自定义计算方程式, 当结合图表功能使用时, 可以很方便地做出实验中各种数据量之间的关系曲线。

4. 实验过程及实验数据处理

实验过程主要包括两个方面的内容: 其一, 塞曼效应现象的观察和记录, 分别观察记录纵向塞曼效应现象和横向塞曼效应现象, 所谓横向塞曼效应就是指磁场方向垂直于光路方向时的塞曼效应, 而纵向塞曼效应是指磁场方向平行于光路时的塞曼效应; 其二, 利用横向塞曼效应现象中的光谱分裂图像进行电子荷质比计算。

4.1. 塞曼效应现象的观察与记录

将汞灯插入电磁线圈中间, 各个光学元件摆放在光学导轨的合适位置, 将 CMOS 相机与计算机通过 USB 数据线连接, 打开 PASCO Capstone 软件, 创建视频显示页面, 并点击录制带同步数据的视频选项, 并在设置中选择视频记录的帧大小。打开汞灯电源, 通过视频中的成像情况调节光学导轨上的光学元件直至干涉圆环清晰均匀地出现在视频窗口的中心位置, 点击 Capstone 软件上的记录按钮开始记录视频, 同时旋转恒流源电流调节旋钮不断增加电磁线圈的电流, 观看光谱的分裂现象, 直至能看到 $K-2$ 级的干涉条纹分裂成三条, 记录此时的电流大小, 并在电流磁场强度对应关系中找到此时的磁场大小, 保存本次操作, 并在此视频文件中标记最后的磁场强度。多次重复上述过程, 记录不同磁场强度下的光谱分裂视频。

在垂直于磁场方向观察时, 在不加磁场时, 干涉圆环图像为图 4(a)所示, 随着磁场强度的加大, 干涉圆环开始变粗, 现象为图 4(b)所示, 在进行电子荷质比的计算时, 一般利用 π 分量进行计算, 旋转准直偏振系统中的偏振片 90° , 图 4(c)是磁场强度为 1.019 T 时 π 分量的干涉圆环图。

在观察纵向塞曼效应现象时, 将电磁铁旋转 90° , 抽出铁芯, 微调光路。纵向塞曼效应现象为图 4(d)所示。

4.2. 实验数据处理

该实验的数据处理包括在视频分析模式下测量横向塞曼效应现象中 π 分量干涉圆环的直径, 计算电子荷质比和实验误差。数据处理过程如下:

1) 创建实验量、方程式, 创建表格

根据实验需要, 创建用户自定义量: 包括常量 F-P 标准具的中间间隔 d , $Mg = M_2g_2 - M_1g_1$, 磁感应强度 B , 第 k 级干涉圆环的直径 $D_{(k)}$, 第 k 级干涉圆环内部圆环直径 $D_{(k)1}$, 第 $k-1$ 级干涉圆环的直径 $D_{(k-1)}$; 然后在工具板中的计算器中编辑电子荷质比的公式(1)以及误差百分比公式(2), 其中, 误差百分比中的绝对值, 利用软件中提供的绝对值函数 $abs()$; 再创建一个表格, 所创建表格的格式如图 5 所示。

2) 视频分析模式下进行干涉圆环直径测量

打开已经录制好的塞曼效应实验视频, 进入视频分析模式, 将放大镜与测量半径工具同时使用, 测量干涉圆环直径。视频分析模式下进行干涉圆环直径测量图, 如图 6 所示。

3) 在表格内记录实验数据, 进行荷质比和误差的计算。

4.3. 实验结果分析

本方法在一种较良好的共轴调节程度下, 所测得的不同磁场强度下的电子荷质比平均值及误差百分比记录结果如表 1 所示。

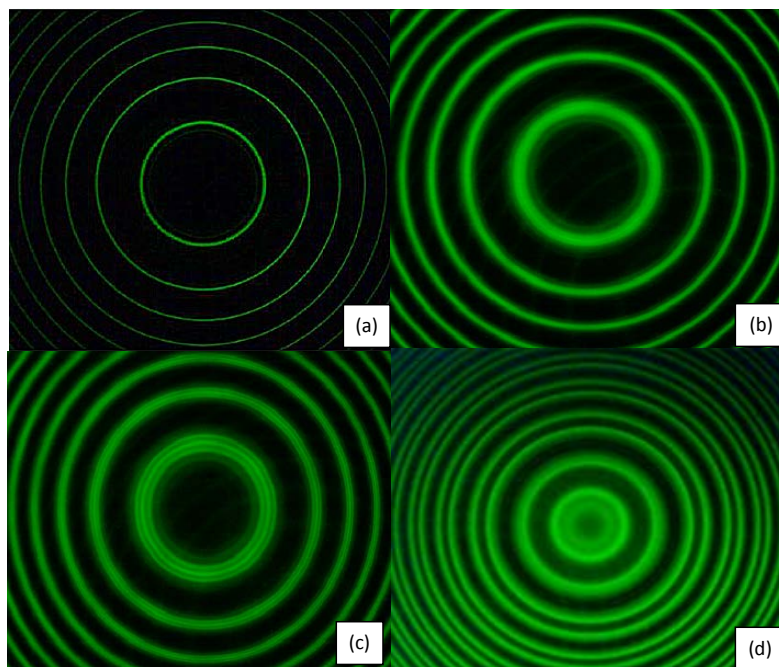


Figure 4. The images of interference rings
图 4. 干涉圆环图像

	B (T)	ΔMg	D(K) (cm)	D(K)l (cm)	D(K-1) (cm)	e/m (C/Kg)	error (%)
1							
2							
3							

Figure 5. Experimental table
图 5. 实验表格

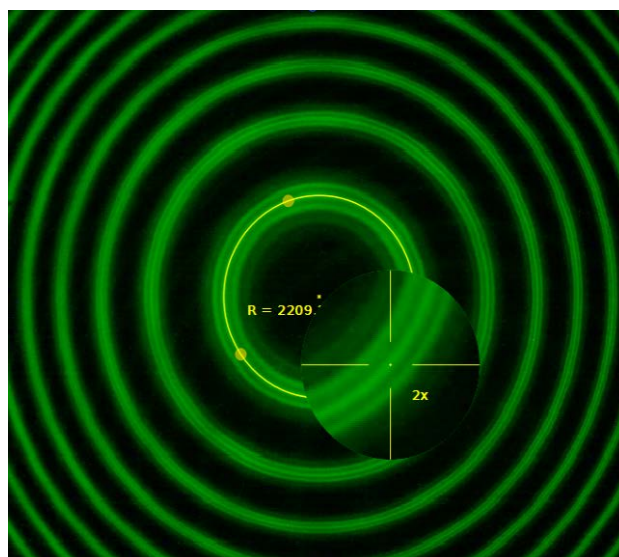


Figure 6. Measurement of the interference rings' diameter under the video analysis module
图 6. 视频分析模式下进行干涉圆环直径测量

Table 1. The average value of e/m under different magnetic intensity**表 1.** 不同磁场强度下的电子荷质比平均值

磁场强度(特斯拉) Intensity of magnetic (T)	电子荷质比平均值(库/千克) Average value of e/m (C/kg)	误差百分比(%) Error (%)
0.966T	1.800×10^{11}	2.900
1.063T	1.780×10^{11}	1.194
1.104T	1.776×10^{11}	0.966
1.137T	1.774×10^{11}	0.853
1.167T	1.741×10^{11}	1.023
1.196T	1.776×10^{11}	0.966
平均值	1.774×10^{11}	0.853

通过计算分析可以认为, 该方法测得的电子荷质比平均值为 1.774×10^{11} C/kg, 与参考值的相对误差为 0.853%, 并且, 当磁感应强度在 1.137 T 时, 所测得电子荷质比的相对误差最小。

5. 结论

根据利用此方法进行实验时, 当磁场强度为 0.966 T 时, 分裂现象已经很明显, 在进行电子荷质比测量时, 磁场强度在 0.966 T~1.2 T 范围内时, 误差较小, 并且磁感应强度在 1.137 T 时, 对电子荷质比的测量误差最小, 最终测得的电子荷质比的平均值为 1.774×10^{11} C/kg, 与参考值的相对误差为 0.853%。该方法中所利用的新型塞曼效应实验装置, 减小了共轴调节的困难, 从而减小了干涉圆环直径测量时的误差, 提高了实验效率, 方便了实验现象的观察, 利用 PASCO Capstone 软件进行实验分析和数据处理时, 需要手动输入电子荷质比、实验误差计算公式, 整个测量计算过程清晰明了, 并充分利用数字化系统智能计算的优势, 在不减少实验数据处理过程的基础上避免了繁琐的计算。

参考文献 (References)

- [1] 杨福家. 原子物理学[M]. 第 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2008: 171-189.
- [2] 唐一文, 丁晓夏. 近代物理实验教程[M]. 武汉: 华中师范大学出版社, 2015: 17-23.
- [3] 杨冰, 丁蕊, 李丽华, 等. 塞曼效应实验数据分析与处理方法改进[J]. 物理实验, 2010, 30(5): 36-38.
- [4] 王健, 邹红林, 韩姝. 采用塞曼效应仪测量电子荷质比方法研究[J]. 计量与测试技术, 2005, 32(3): 8-9.
- [5] 刘志军. 微机塞曼效应实验的改进和电子荷质比的编程测量[J]. 大学物理, 2013, 32(1): 25-29.
- [6] 舒强, 林涛, 游荣义. 基于 labVIEW 的塞曼效应实验数据处理[J]. 实验室研究与探索, 2008, 27(11): 34-37.
- [7] 朱精敏, 陈星, 周小凤. 塞曼效应实验系统评述[J]. 物理实验, 2004, 24(12): 3-6.
- [8] 隋成华, 陈晓明, 童建平, 等. 一种塞曼效应实验装置[P]. 中国专利, 202394419U, 2012.
- [9] Kraftmakher, Y. (2013) Data-Acquisition System Provides New Possibilities. *Physics Education*, **48**, 401-406.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：oe@hanspub.org