

体的部分显示,图 6(a)的立体像的前剖面正好反映了一对并列小球的剖面形态分布.图 6(b)的中间上部的小球分辨较为完整,由扫描范围可估测其直径为 100nm 左右.聚苯乙烯小球样品的显微成像是 PSTM 在聚合物观测上的具体应用.

应用本 PSTM 实验系统,还完成了一维光栅、正交光栅、HDPE 取向膜(H_1)、多种光学玻璃以及云母等多种样品的 PSTM 像,这些结果将另文发表.

- [1] R. C. Reddick and T. L. Ferrell, *Rev. Sci. Instrum.*, **61**-12(1990),3669.
 [2] 姚骏恩主编,扫描电子显微术,中国科学院,(1979),1—8.
 [3] M. 玻恩,E. 沃耳夫著,黄乐天等译,光学原理(上册),

科学出版社,(1978),61.

- [4] 于美文等,光学全息及信息处理,科学出版社,(1981),1.
 [5] 姚骏恩等,物理,**18**(1990),486.
 [6] 黄桂珍、白春礼等,物理,**18**(1990),361.
 [7] 周炳琨等,激光原理,国防工业出版社,(1987),1—19.
 [8] L. Salomon, *J. Opt. Soc. Am. A*, **18**-12(1991),2009.
 [9] T. L. Ferrell and J. P. Goundonnet, *J. Vac. Sci. Technol.*, **B9**(1991),525.
 [10] Winfried Denk and D. W. Pohl, *J. Vac. Sci. Technol.*, **B9**(1991),510.
 [11] Y. Kuk and P. J. Silverman, *Rev. Sci. Instrum.*, **60**(1989),165.
 [12] R. C. Reddick et al., *Physical Review*, **B39**(1989),767.
 [13] H. Pagnia and N. Sotnik, *Optik*, **86**-3(1990),87.

彼得·塞曼和塞曼效应

宋世榕

(武汉工学院物理教研室,武汉 430070)

一、塞曼的生平

彼得·塞曼是杰出的荷兰物理学家.他和卓越的荷兰物理学家、经典电子论的主要创立者亨德利克·安东·洛伦兹同是 1902 年诺贝尔物理学奖的获得者.

1865 年 5 月 25 日彼得·塞曼生于荷兰泽兰省斯科威岛的小村庄宗内迈尔-名路德教¹⁾教长的家里.

塞曼很早就表现出对自然科学的研究才能.

在塞曼的家乡宗内迈尔,可以清楚地看到极光.这是靠近北纬地区发生的景观,是太阳发出的高速带电粒子受地球磁场的作用而折向地磁极使高层空气中的分子或原子受到激发,从而在高纬高空中出现绚丽彩色的发光现象.

1883 年,还在本乡齐里克泽中学念书的塞曼,便对极光作了细心的观测和切实的描述.他的文章被刊登在著名的《自然》杂志上.

1883 年塞曼在中学毕业后,到德尔夫特接受古典语言教育,为期两年.他住在学校校长莱利(J. W. Lely)博士家中,这给他创造了一个研究科学的良好环境.当时学术界刮起了“麦克斯韦热”,塞曼给予高度的重视.他熟读了有关的著作,并对科学实验表现出极大的热情.在这里,他结识了著名的实验物理学家海克·卡末林-昂尼斯(Heike Kamerlingh-Onnes).昂尼斯对这名年轻人的进取精神赞叹不已.

1885 年,塞曼进入莱顿大学.他的主要导师正是昂尼斯(讲授力学)以及洛伦兹(讲授实

¹⁾ 路德教是 16 世纪欧洲宗教改革运动时期产生于德国的基督教派,由马丁·路德(1483—1546)倡导,强调“因信称义”的教义.

验物理). 塞曼于 1890 年毕业后, 成为洛伦兹的助手, 参加了一项包括由约翰·克尔(John Kerr)所发现的磁光效应在内的广泛的研究计划.

人们记得, 还在 1845 年, 法拉第就曾观察到: 平面偏振光沿着磁场方向通过磁场中的样品(如玻璃)时光的偏振面在样品中发生旋转(转角决定于样品材料、磁场大小和样品中光束的长度)的现象, 这就是磁致旋光现象或法拉第旋转效应. 1862 年 3 月, 这位坚信各种“自然力”相互联系、相互转化的大科学家, 试图用分光仪证明磁对光辐射有直接作用, 但是没有成功. 1870 年 9 月, 麦克斯韦武断地指出, 法拉第的尝试不存在成功的可能性. 到了 1876 年, 英国数学家和物理学家克尔发现了光在磁镜上反射后的振动旋转效应: 当一束光在抛光的电磁铁磁极上作简单的反射时, 所产生的偏振光束的偏振面在磁场影响下发生转动, 平面偏振光在反射后变成椭圆偏振光, 这就是所谓“克尔现象”. 1890 年, 塞曼作为洛伦兹的助手, 参与了这一课题的研讨.

塞曼在读到麦克斯韦介绍法拉第晚年企图寻找磁、光联系的文章后, 很为法拉第的精神所感动. 在塞曼的心目中, 法拉第的著作始终是新颖的、发人深思的. 他把这些著作视为活的科学, 作为给自己不断启迪和激励的源泉. 1892 年, 塞曼写出题为“关于克尔现象的测量”的科学论文, 获得了荷兰科学协会的金质奖章. 1893 年, 塞曼以“关于克尔磁光现象的测量”的论文取得哲学博士学位.

不久, 塞曼去斯特拉斯堡^①的柯耳劳施^②物理研究所, 用一个学期完成了德国理论物理学家柯恩(Emil Georg Cohn)领导下的研究工作, 研究课题是电波在液体中的传播和吸收.

1894 年塞曼返回莱顿. 从 1895 年到 1897 年他任莱顿大学编外教师. 1896 年夏塞曼根据洛伦兹的建议研究强磁场对光辐射性质的影响, 年底他们作出光谱线在磁场中分裂的重大发现. 洛伦兹和塞曼, “因研究磁对辐射现象的影响取得优异成就”而获得了诺贝尔奖金物理物理

学奖.

1897 年, 塞曼任莱顿大学讲师, 同年离开莱顿大学到阿姆斯特丹大学任讲师, 1900 年任该校特聘教授, 在那里一直工作到 1935 年.

1908 年, 塞曼接替退休和范德瓦耳斯教授任阿姆斯特丹大学物理研究所所长, 并担任一个实验室的主任(该室后来被命名为塞曼实验室), 直至 1935 年退休.

塞曼于 1921 年被选为英国皇家学会会员. 他曾获得伦福德奖章^③. 他还是法国科学院院士.

1943 年 10 月 9 日塞曼逝世于阿姆斯特丹, 终年 78 岁.

二、塞曼效应

在 19 世纪八、九十年代, 洛伦兹建立了经典电子论(此工作一直延续到 20 世纪初). 1895 年, 洛伦兹把电磁波通过实物时所呈现的各种宏观现象归结为电磁波与实物中在准弹性力作用下的带电粒子(即后来所知道的电子)相互作用的结果. 这可以解释实物中一系列的电磁现象以及实物在电磁场中运动的一些效应. 1896 年, 洛伦兹提出了原子的准弹性束缚带电粒子模型, 认为: 原子由具有质量的带电粒子组成, 带电粒子在原子内振荡产生光, 光谱线的观测频率等于带电粒子振荡的频率.

在洛伦兹的建议下, 塞曼于莱顿大学开始研究强磁场对光辐射的作用, 这是研究克尔现象的合乎逻辑的继续. 1896 年 8 月, 塞曼将一电弧光源置入含有钠蒸气的加热管, 再将它们安放在磁场为几千高斯的强电磁极之间, 然后用精密的凹面光栅加以观测. 他在垂直于磁场的方向观察到钠原子发射的黄色 D 线变宽. 10

^① 斯特拉斯堡, 位于阿尔萨斯, 1870—1871 年普法战争中割让给德国, 第一次世界大战后由法国收回.

^② 柯耳劳施(Friedrich Wilhelm Georg Kohlrausch, 1840—1910), 德国实验物理学家, 从事光学、磁学、电学和电学方面的研究并有多种成果. 1888—1894 年他任斯特拉斯堡大学教授兼斯特拉斯堡物理研究所所长.

^③ 伦福德(Count Rumford, 即 Benjamin Thompson, 1753—1814), 英国物理学家. 伦福德奖章于 1800 年设立.

月,他在沿平行于磁场的方向也观察到谱线变宽.他还发现,吸收光谱的情况与此类似.塞曼认为这一现象可以用洛伦兹的电子论予以解释,于是立即将自己发现的现象和对现象的分析告诉了洛伦兹.

洛伦兹认为,光既是由原子内振荡的带电粒子发射出来的,那么,按照经典电磁规律,外界的电磁场影响带电粒子的振荡,从而影响发射光的频率.洛伦兹一方面向塞曼介绍了计算磁场中带电粒子运动的方法,一方面还指出变宽了的D线两侧周围的光应当呈圆偏振或线偏振.因此,塞曼利用偏光镜对增宽了的D线进行观测.他发现,沿磁场方向观察时,D线的一侧消失;在垂直于磁场的方向观察时,D线的两侧消失,线宽变细.这表明展宽了的D线两侧部分确系偏振光.塞曼利用洛伦兹告知的计算方法,根据谱线的展宽,算出带电粒子的比荷(即荷质比)约为 $10^7 \text{CGSM} \cdot \text{g}^{-1}$.另外,根据圆偏振光的右旋和左旋,可以判断带电粒子电荷的正负.塞曼起先得出的是正,旋即于1896年10月末在向阿姆斯特丹科学院的报告中更正为负.

尔后塞曼使用了比钠D线更细的由镉产生的深绿谱线,加大了磁场(由几千高斯到几万高斯),提高了探测的精度,通过实验证实光谱线不是单纯地增宽,而是如洛伦兹所预言的,分裂为二条或三条分线,且各分线是偏振的.光源在强磁场中谱线分裂成二、三条偏振化分线的现象,就是“正常塞曼效应”.这是1896年底的重要科学成果.

塞曼发现,置于磁场中的光源所发射的光谱分裂后谱线的裂距(波数间距)与磁场成正比;对于某些元素的谱线,在垂直于磁场方向观察时每条谱线分裂为三条,且是线偏振(横效应);沿磁场方向观察时,则分裂为两条,且是圆偏振(纵效应).根据谱线的裂距,塞曼得到振荡带电粒子的比荷 e/m 之较精确数值为 $1.6 \times 10^7 \text{CGSM} \cdot \text{g}^{-1}$ (对钠)或 $1.2 \times 10^7 \text{CGSM} \cdot \text{g}^{-1}$ (对锌),大约为电离氢原子比荷的一千倍.这一数值,与1896—1898年考夫曼(Walther Kauf-

mann)根据阴极射线在磁场中偏转的实验所得数值 $1.865 \times 10^7 \text{CGSM} \cdot \text{g}^{-1}$ 相近,也与1897年汤姆孙根据阴极射线进入法拉第圆筒后在磁场中偏转的实验所得数值 $2 \times 10^7 \text{CGSM} \cdot \text{g}^{-1}$ 以及阴极射线先后通过静电场和磁场而受到偏转后所得数值 $0.8 \times 10^7 \text{CGSM} \cdot \text{g}^{-1}$ 在数量级上一致^D.

爱尔兰物理学家、电子论的另一名创立者拉莫尔(Joseph Larmor)在获悉1896年10月的塞曼报告后,即于次年2月指出,这个发现证实了原子是由轨道运动的带电粒子组成的假设;并称:可以断言,带电粒子比原子小得多.在看到塞曼报告的全文后,他提出了均匀磁场对在其中转动的带电粒子的作用相当于使转动坐标系环绕磁场以频率 $\nu_L = eB/4\pi mc$ 作均匀旋进的定理——拉莫尔定理(B 为磁场, ν_L 称为“拉莫尔频率”).这样,洛伦兹、拉莫尔经典电子论对正常塞曼效应的解释便是:发光体原子内的带电粒子(被视为点电荷)受到准弹性力作用而以基本频率 ν 振动,点电荷的简谐振动可分解成沿不同方向旋转的两个圆周运动,圆周运动的频率等于振动频率,也等于光谱线的观测频率.在磁场中,作圆周运动的带电粒子环绕磁场作拉莫尔旋进(此旋进具有拉莫尔频率),拉莫尔旋进叠加到带电粒子的运动上.振动频率受拉莫尔频率的调制而使观测到的频率出现 $\nu - \nu_L, \nu, \nu + \nu_L$ 三种数值.由于平行于磁场方向的振荡不受磁场影响,故原来频率的光依然出现.这里所说的拉莫尔旋进,对于解释原子能级的磁分裂、实物的抗磁性等具有重要意义.

拉莫尔还指出,根据他的定理可以得出结论:在原子内部能够运动的应是具有同种电荷(实验指明为负)的粒子,并且,如果把它的电荷看成与电解中发现的基本电荷相等的话,那么,塞曼得到的带电粒子的质量,将与汤姆孙在阴极射线偏转实验中所得数值大致相同.

至于洛伦兹,则根据丹麦理论物理学家洛

^D 电子比荷的1986年推荐值为 $1.758\ 81962(53) \times 10^{-10} \text{C} \cdot \text{Kg}^{-1}$,约等于 $1.76 \times 10^7 \text{CGSM} \cdot \text{g}^{-1}$.

伦茨(Ludwig Valentin Lorenz)于1869年利用弹性波理论和他本人于1880年利用电子论分别导出的关于介质折射率和密度关系的洛伦茨-洛伦兹公式,求得带电粒子的 e^2/m 值,再同 $e/m=10^7\text{CGSM}\cdot\text{g}^{-1}$ 的塞曼测量值相结合,便得出 m 为氢原子质量的 $1/350$,这表明带电粒子只是原子的一小部分.据此结果,得 e 与氢原子质量之比为 $3\times 10^4\text{CGSM}\cdot\text{g}^{-1}$,这与由电解实验得到的氢离子的比荷 $10^4\text{CGSM}\cdot\text{g}^{-1}$ 同数量级.洛伦兹由此断定,带电粒子的电荷与氢离子的电荷大致相同.另外,洛伦兹还根据电子论研究气体色散,他导出介质折射率与带电粒子振荡频率的关系式,于是可以得出带电粒子的比荷,他再将此比荷与塞曼实验结果相结合,并假定二种情况下带电粒子属于同类,就能得出结论.一个带电粒子的电荷与电解实验中一个氢离子的电荷同数量级,其质量大约是氢原子质量的 $1/800$ ^①.

塞曼的科学报告《论磁化对物质发光性的影响》和《论外磁场引起光谱线的二分裂和三分裂》是1896年经昂尼斯审阅、1897年经范德瓦耳斯审阅后报送阿姆斯特丹皇家科学院的,其英译文发表于《哲学杂志》(“Philosophical Magazine”),报告中记述了上述主要情况.

上面的事实说明,塞曼效应支持光的电磁理论,它对人们了解光谱的构造和实物的原子、分子结构具有重要意义.塞曼效应显示了构成原子的带电粒子之存在.效应促使人们弄清光辐射的机理,弄清电和实物的特性.效应证明,磁对光和带电粒子的影响遵从相同规律.

下面谈谈对正常塞曼效应的量子论解释概要.

众所周知,1913年,玻尔建立了氢原子的量子理论,提出电子圆轨道的量子化法则,引入主量子数,解释了氢原子和类氢离子的光谱.接着,威廉·威耳孙(William Wilson)于1915年、索末菲于1916年各自提出了椭圆轨道的量子理论,引入径量子数和角量子数;并且,威耳孙、石原纯(Ishihara Jun)于1915年、索末菲于1916年各自独立地把量子化法则推广到三个物理

自由度的情形.1916年,索末菲和德拜合作,进而提出空间量子化,并引入磁量子数用以解释塞曼所发现的光谱磁分裂,建立了正常塞曼效应的量子理论.他们分别指出,电子轨道在磁场中的空间量子化,使外磁场方向与原子的角动量方向之间取不同的夹角,因而原子得到不同的附加能量,产生原子能级的分裂,而按照一定选择定则在不同能级之间的量子跃迁便产生谱线的正常塞曼分裂.

这里顺便谈谈反常塞曼效应.

1897年12月,爱尔兰物理学家普雷斯顿(Thomas Preston)报告说,在许多实验事例中,光谱线分裂的数目并不止三条,例如锌、镉的某些光谱线可以分裂成四条分线,分线间距也不全相同.1898年法国物理学家考纽(Marie Alfred Cornu)也发现钠D线的分裂与原有理论不符: D_1, D_2 线分裂成四、六条分线,某些原子的谱线还分裂成五、六、九条分线.随后塞曼本人也发现谱线三分裂的规律有许多例外.1911年龙格(Carl David Runge)和帕邢(Friedrich Paschen)发现汞光谱中绿色明线分裂成11条分线.在大多数情形下,单一谱线的各分线的波数间距是洛伦兹单位($L=\frac{eB}{4\pi mc^2}$)的有理分数.这些情况,出现在相对来说比较弱的磁场之中.这一类原子线光谱在弱磁场中出现一系列不同的分裂谱线的现象,在以后二十七、八年的时间里一直得不到合理解释,被称为“反常塞曼效应”.

德国物理学家朗德(Alfred Landé)最先计算了反常塞曼效应中的谱项,求得1920年索末菲所引入的内量子数的数值为半整数.1923年,他单纯地从大量特殊情形的实验数据的分析中,得出了一个决定谱线分裂的复杂的半经验公式,只要知道这一公式,任何谱线的塞曼花样(包括反常塞曼效应的花样)都可以从中精确地给出.其所以需要像朗德公式那样复杂的

^① 电子-质子质量比的1986年推荐值为 $5.446\ 170\ 13(11)\times 10^{-3}$,质子-电子质量比则为 $1836.152\ 701(37)$,质子比荷的1986年推荐值为 $957\ 883\ 09(29)\text{C}\cdot\text{Kg}^{-1}$,约等于 $9.6\times 10^4\text{CGSM}\cdot\text{g}^{-1}$.

式子来描述这一类物理现象,原因在于,原子内的电子,除了“轨道”运动之外,还有另一种运动,它们合起来在磁场中有着“不寻常”的表现。这是一种什么运动呢? 1925年1月,泡利提出不相容原理,把复杂光谱归结为原子中各个电子的不同状态的表现。10月,两名在莱顿大学工作和深造的年轻学者乌仑贝克(George Eugene Uhlenbeck)和古兹米特(Samuel Abraham Goudsmit)(他们都曾在塞曼实验室工作过)基于碱金属原子能级的双重结构和反常塞曼效应等实验事实,引入了电子自旋假设。利用这一假设和量子论,可以很好地说明原子光谱的精细结构和反常塞曼效应。实际上,正常塞曼效应仅出现在自旋角动量等于零的原子中,事例较少;而反常塞曼效应的事例较多。1926年,海森伯和约尔丹(Ernst Pascual Jordan)利用量子力学原理成功地解释了塞曼效应,并从数学上导出朗德公式。量子力学还可以算出原子光谱的许多细节,包括塞曼花样的相对强度等。这样,塞曼效应的量子力学诠释便成为这一崭新理论的早期成就之一。

除了原子情况下的一次塞曼效应(分线间距正比于磁场的一次方)外,还有原子情况下的二次塞曼效应、分子中的塞曼效应、晶体中的塞曼效应、原子核塞曼效应等,它们都有各自的用途。

对塞曼效应的研究,使光谱学取得重要的理论进展。

塞曼效应是探索原子内部精细结构和各组成部分性质的有用工具。利用它可算出电子的磁矩,可算出原子的角动量从而确定原子的能级。它对泡利不相容原理的提出和电子自旋的发现均起过重大作用。它与量子力学原理完全符合,成为量子力学的重要实验证明。它为研究电子顺磁共振现象和原子核性质(核能态、核磁矩等)提供了一种有效的手段。事实上,顺磁原子共振吸收峰,可用来测定原子基态的磁矩;共振峰的精细和超精细结构,对于研究分子结构、固体和液体结构以及测量原子核角动量量子数等都有重要意义。塞曼效应还可用来测量等离

子体的磁场,并可将其与用磁探针法测得的结果相比较。在天文学中,应用它来测量太阳和其他恒星表面的磁场。

还在1897年,塞曼在那篇题为《论外磁场引起光谱线的二分裂和三分裂》的报告中就认为:可以证明,在太阳表面应有磁场存在,因此,这种磁场会改变从天体射来的光的光谱。1908年,美国天文学家黑耳(George Ellery Hale)利用他于1891年发明的太阳单色光摄影仪¹⁾所摄取的照片表明,在太阳的旋涡中,氢的、钙的以及其他元素的离子和原子发射的光谱线,确实受到磁场的影响,而磁场正是太阳黑子——太阳表面巨大的旋涡状气流——所产生的。1908年,黑耳把从太阳黑子光谱中观测到的谱线分裂与在实验室条件下的谱线磁分裂进行比较,发现太阳黑子谱线的位置、形状和结构有变化,而这恰恰起因于原子与磁场的作用,于是再次证实太阳黑子附近存在磁场;并且,他还根据太阳观测结果,证实理论上所预言的谱线偏振方向与磁场方向之间的关系。

三、塞曼的其他科学成就

1. 倒塞曼效应

1896年,塞曼观测到吸收光谱同样出现磁分裂和存在偏振性质,规律和塞曼效应相似,这乃是倒塞曼效应。1899—1900年,德国物理学家佛格特(Woldemar Voigt)研究了光的吸收和倒塞曼效应。他注意到,当强烈的白光通过均匀磁场作用下的蒸汽时,得到三条黑色(吸收)分线。此倒塞曼效应中所观测到的谱线频率间距也是 ν_L ,即 $eB/4\pi mc$ 。

佛格特从光的吸收方面考虑,并进行了定量讨论。他在描述光在吸收介质中传播的方程里,加上磁场引起的微扰项,为建立磁光现象的普遍理论提供了一个重要方法,给塞曼的研究工作以很大的帮助。

佛格特将纵向塞曼效应中谱线的磁分裂与

¹⁾ 法国天文学家德朗德尔(Henri-Alexandre Deslambres, 1853—1948)几乎同时发明类似仪器。

法拉第发现的磁致旋光效应联系起来。根据电子论观点,由于外磁场使原子或分子内的电子产生旋进,就使介质对沿顺时针和逆时针方向偏振的光产生不同的折射率,在介质中发生光的色散。而在纵向塞曼效应中,频率为 $\nu+\nu_L$ 和 $\nu-\nu_L$ 的二分线所具有的圆偏振方向相反,则介质对二分线的折射率不同,二分线在介质中的传播速度也不同,所以这种频率的光在介质中传播时产生一种相位滞后现象,此即偏振面旋转效应。因此,偏振面的磁致旋转是由于实物在磁场作用下发生光学特性的不对称变化所致。

佛格特的理论预言,在较弱磁场中,谱线三分裂中外侧的两个分线具有不同的光强,并且它们与中心线的距离也不同。塞曼在铁、锌、钒的谱线中观测到此种不对称性(很小)。

观测表明,在所有气体(包括钠蒸汽)中,偏振面的转角都很小。但意大利物理学家麦卡卢梭(D. Macaluso)和柯尔宾诺(Orso Mario Corbino)发现,在蒸汽吸收带外侧附近的那些颜色有很大的偏振面转动,达到 180° 左右,且转动在正方向上,即在励磁电流的方向上。关于吸收带内部的偏振面转动情况,佛格特预言,对十分稀薄的气体来说,在二分裂的两分线之间的区间内,偏振面的旋转应是负的,即与吸收带以外的偏振面转动方向相反,并且转角很大。塞曼用钠蒸汽作实验验证了这个理论上的发现。他指出,在蒸汽十分稀薄和磁场很强的条件下,两分线之间的偏振面旋转可达 180° 。

2. 其他

塞曼从1908年任阿姆斯特丹物理研究所所长起直至1943年逝世止,始终研究光在运动介质(包括振动介质)中的传播。1914—1915年他测量了光在快速运动的杆中的速度。他对光在水、石英及燧石中的传播进行了观测。在研究光在运动介质中的传播时,他测定了各种颜色的菲涅耳曳引系数,并证明菲涅耳曳引系数中存在洛伦兹收缩项——此关系为洛伦兹于1892年得出,后为相对论所说明。1917年,塞曼

在实验室内以精确到 10^{-7} 的高准确度证明引力质量与惯性质量相等。他对光学射线和极隧射线(低气压放电管中从阳极奔向阴极并通过阴极小孔而在阴极后面形成的离子束流)的多普勒效应作了实验室研究。他研究出测量电磁波吸收系数的方法。他与吉尔(J. de Gier)一起用汤姆孙的抛物线质谱仪发现了若干新的同位素(包括 ^{30}Ar , ^{64}Ne 等)。他根据超精细光谱研究,推导出原子核磁矩。他还对布朗运动进行了探讨。

塞曼的论著有:《关于克尔磁光现象的测量》(1893),《论磁化对物质发光性的影响》(1896),《论外磁场引起光谱线的二分裂和三分裂》(1897),《关于亚原子组元的实验研究》(1900),《磁光学研究》(1914),《对磁光学实验的审议》(1921)等。

- [1] 诺贝尔基金会编,宋玉升等译,诺贝尔奖获得者演讲集·物理学(第一卷),科学出版社,(1985),7—39.
- [2] [日]广重彻著,祁关泉等译,物理学史,上海教育出版社,(1986),307—317,343—345.
- [3] 申先甲编,物理学史教程,湖南教育出版社,(1987),337—338.
- [4] 梁宝洪编译,世界物理学家词典,湖南教育出版社,(1988).
- [5] William D. Halsey (Editorial Director), Louis Shores (Editor in Chief), Colliers Encyclopedia With Bibliography and Index, Vol. 23, (Rowell-Collier Educational Corporation, (1973),752—754.
- [6] Alan H. Smith (Executive Editor), Eric E. Akerman (Art Director), The Encyclopedia Americana, International Edition, Vol. 29, by Grolier Incorporated, (1981),756—759.
- [7] Sybil P. Parker (Editor in Chief), McGraw-Hill Encyclopedia of Science & Technology, Vol. 14, 5th Edition, McGraw Company, (1982),791—794.
- [8] [苏]B. M. 亚沃尔斯基, A. A. 杰特拉夫著,宓鼎樾等译,物理学手册,科学出版社,(1986),770.
- [9] 苟清泉编,普通物理学·原子物理学,高等教育出版社,(1982),69—75.
- [10] 褚圣麟编,原子物理学,人民教育出版社,(1979),184—191.
- [11] 杨福家著,原子物理学,高等教育出版社,(1990),123—132.
- [12] [美]F. A. Jenkins and H. E. White 著,清华大学物理系译,物理光学基础,商务印书馆,(1957),462—467.