DOI：10.19789/j.1004-9398.2025.06.012
文献引用：汪蕊，朱慧涓．检验量子力学的重要实验：福斯特的斯塔克效应实验[J]．首都师范大学学报（自然科学版），2025，46(6)：88-95.
WANG R，ZHU H J. An important experiment to test quantum mechanics：Foster’s Stark effect experiment [J]. Journal of Capital Normal University（Natural Science Edition），2025，46(6)：88-95.

检验量子力学的重要实验：福斯特的斯塔克效应实验

汪　蕊，朱慧涓*

（首都师范大学物理系，北京　100048）

摘要：在量子力学的发展史中，人们通常关注理论的进展，而较常忽略实验的作用和意义。斯塔克效应作为一种重要的量子力学现象，自发现之日起就因无法被旧量子论的原子模型所解释而引起了广泛的关注。斯塔克效应研究在旧量子论向量子力学的过渡中扮演了关键的角色。本文聚焦于加拿大物理学家福斯特在斯塔克效应研究中的贡献，详细考察了福斯特在20世纪20年代进行的斯塔克效应实验，包括实验装置的改进和技术方法的创新，并探讨了实验结果如何对量子力学的验证提供支持。同时，还分析了福斯特在斯塔克效应研究中的理论工作如何拓展了量子力学的解释力。通过实验与理论结合的探讨，本文旨在揭示福斯特的工作在量子力学确立过程中产生的重要影响，并阐明实验与理论密切联系的意义。

关键词：斯塔克效应；约翰·斯图尔特·福斯特；量子力学；实验与理论
中图分类号：O409　　**文献标志码**：A

An important experiment to test quantum mechanics: Foster’s Stark effect experiment

WANG Rui，ZHU Huijuan*

（Department of physics，Capital Normal University，Beijing　100048）

Abstract: In the development history of quantum mechanics, people usually focus on the progress of theory and often overlook the role and significance of experiments. The Stark effect, as an important quantum mechanical phenomenon, has attracted widespread attention since its discovery due to its inability to be explained by the atomic model of old quantum theory. The Stark effect has played a crucial role in the transition from old quantum theory to quantum mechanics. This article focuses on the contributions of Canadian physicist Foster in the study of the Stark effect, examining in detail Foster’s Stark effect experiments conducted in the 1920s, including improvements in the experimental setup and innovations in technical methods, and exploring how the experimental results provide support for the validation of quantum mechanics. Meanwhile, this article also analyzes how Foster’s theoretical work in the study of Stark effect has expanded the explanatory power of quantum mechanics. Through the discussion of the combination of experiment and theory, this paper aims to reveal the important influence of Forster’s work in the establishment of quantum mechanics, and clarify the significance of

收稿日期：2024-10-12
* 通信作者：jualienn@163.com

the close connection between experiment and theory.

Keywords: Stark effect; John Stuart Foster; quantum mechanics; experiment and theory

CLC: O409　　**DC**: A

0　引　言

斯塔克效应实验是量子力学发展史上具有里程碑意义的实验,其描述了原子或分子光谱线在外加电场下发生位移和分裂的现象。这一现象最初被德国物理学家约翰内斯·斯塔克于1913年发现,由于当时玻尔的量子化原子模型并未能够充分解释斯塔克效应,该模型遭受了实验上的挑战[1]。因此,能否准确解释斯塔克效应的成因成为检验量子理论是否成立的重要依据之一。进入20世纪20年代,加拿大物理学家约翰·斯图尔特·福斯特开展了一系列斯塔克效应的精确测量[2-5]。在量子力学理论提出之后,福斯特的实验结果与薛定谔计算的预测值高度一致,为新兴的量子力学提供了重要的实验证据[5]。福斯特在斯塔克效应研究上的坚持不懈也深受玻尔等人的影响[6],他在实验之余也将斯塔克效应研究扩展到了理论层面,值得一提的是他将量子力学中微扰理论从氢原子扩展到了氦原子,并且为解释原子结构提出了基于量子力学的新的计算方法[7]。可以说,福斯特的实验,以及20世纪20年代之前的一系列斯塔克效应实验共同推动了量子力学的发展,具有重要的历史意义。

福斯特所做的系列斯塔克效应实验历经了从旧量子论到量子力学的转变,反映了实验在推动量子理论发展中的关键作用。随着实验条件和技术的不断改进,斯塔克效应的测量精度得到了显著提高,而旧量子论与实验结果之间的差异愈加突显。这些不一致促使理论物理学家不断修正和发展理论模型,同时也推动了实验物理学家的技术进步。在这一过程中,实验与理论相互促进、相辅相成。

尽管福斯特在斯塔克效应实验中的贡献在量子力学史中鲜有提及,但他对这一领域的重要性不容忽视[6]。本文详细考察了福斯特关于斯塔克效应的原始论文,特别是他在1928年的实验开展过程,深入分析其在实验中的关键步骤与成功经验。此外,本文还参考了早期斯塔克效应相关的重要原始文献,包括斯塔克在1906年和1913年的实验论文[8-12]、福格特在1901年的理论研究[13],以及其他物理学家的相关实验记录[14-16]。这些历史资料为本文提供了宝贵的实验数据和理论框架,有助于揭示福斯特的工作如何在前人的基础上推动了斯塔克效应研究的深入,在实验方法和技术创新方面也为现代物理教学提供了细节参考和借鉴。

1　斯塔克效应的提出与早期实验

19世纪,人们发现了电、磁和光之间有着密切的联系。1896年,荷兰实验物理学家彼得·塞曼首次观察到磁场对钠的光谱线的影响,并发现光谱线分裂成双线或三线,这一现象后来被称为塞曼效应[17]。塞曼效应成功揭示了磁场对光谱的影响,这为物理学家提供了一个思路,既然电场和磁场在许多方面有相似的性质,那么电场是否也能引起类似的光谱效应呢?于是,电场对光谱线的影响成为了物理学家关注的新课题。1901年,德国理论物理学家沃尔德玛·福格特率先研究了电场对光谱的潜在影响。通过理论计算,福格特认为,在经典物理框架下,电场对光谱线的影响微乎其微,几乎可以忽略不计[18]。

尽管福格特否定了电场会产生影响,但哥廷根大学物理学家斯塔克还是在1906年决定对这一问题进行实验研究。他受到福格特理论的启发,认为如果选择氢或氦这类质量轻的元素,并且加大电场强度,也许能够观察到电场对光谱线的影响[18]。斯塔克的想法是正确的,即便在当时较为简陋的实验设备和有限的技术条件下,他在1913年仍成功地从电场中观测到氢的光谱线,正式确认了电场对光谱存在显著的影响,从而揭示了斯塔克效应的存在。1914—1919年,斯塔克在《物理学年鉴》上发表了10篇关于该效应的论文,详细描述了这一现象及其实验结果,为后续的研究奠定了基础。与斯塔克同时期进行的其他实验也进一步加深了人们对斯塔克效应的理解。1913年,意大利物理学家洛·苏尔多在检验正逆行射线的多普勒效应实验中,也观察到了放电管中氢谱线的分裂现象[14],为斯塔克效应提供了进一步的验证。洛·苏尔多的阴极落差电场法以及放电管也被广泛应用于后续的斯塔克效应

实验。结果表明,电场导致光谱线产生位移和分裂。在旧量子论中,光谱的形成被认为是原子内部的电子离散轨道跃迁的结果,按照这一理论计算出的光谱分裂程度与实验现象不符,使得斯塔克效应实验成为挑战经典理论的重要线索。

物理学家希望在旧量子论的框架下对斯塔克效应作出合理的解释。1916年3月,在斯塔克效应发现的第3年,阿诺德·索末菲向他的助手保罗·爱泼斯坦建议以斯塔克效应的理论解释作为其博士论文的研究方向[19]。爱泼斯坦基于玻尔-索末菲原子模型成功地解释了氢原子在弱电场中的一阶斯塔克效应,暂时捍卫了旧量子论[20]。然而,随着实验技术的进步,斯塔克效应的研究逐渐扩展到更复杂的原子系统和更高阶效应,旧量子论的局限性逐步显现。1917年,美国物理学家哈里·奈奎斯特对洛·苏尔多的方法做了改进,成功测量了氦和氖原子的光谱[15]。1918年,日本物理学家高岭俊夫和国分信雄又继续改进了洛·苏尔多的方法,使得实验设备能够承受更强的电场,从而观测到更精确的光谱线分裂,如H_γ垂直分量的中心线移动[16]。之后,高岭俊夫和国分信雄在实验中发现了氢原子和氦原子的二阶斯塔克效应,这个现象在旧量子论的框架下无法被完全解释[16]。

在量子力学理论确立以前,斯塔克效应作为电场对原子光谱线影响的一个显著例证,揭示了旧量子论的局限性。即使爱泼斯坦运用旧量子论成功地解释了一阶斯塔克效应,但他的方法里有一个明显的概念缺陷:他使用抛物线坐标得到的电子闭合椭圆轨道,与索末菲使用的极坐标得到的电子闭合椭圆轨道在几何上存在差异,具有不同的偏心率[20]。这种电子轨道模糊的问题在旧量子论中无法解决。直到埃尔温·薛定谔提出波动力学,复杂原子的斯塔克效应才能得到更好的解释,同时由于波动力学以波函数来描述电子运动,彻底解决了电子定态轨道这个横贯在旧量子论中的难题[21]。

2 福斯特的斯塔克效应实验过程及结果

福斯特对氢原子斯塔克组分强度的定量研究开始于量子力学建立之前,他在20世纪20年代多次进行斯塔克效应相关实验,力求改进实验装置,提高测量精度,并在量子力学提出之后及时验证了该理论对斯塔克效应的解释(表1)[2-4]。

2.1 1920年代早期实验装置的改进与测量精度的提高

1920年,福斯特成为耶鲁大学物理系的一名研究生,师从亨利·邦斯德教授,邦斯德建议他将斯塔克效应作为一个研究课题。然而,由于邦斯德教授在1921年1月1日突然离世[22],福斯特转而跟随利·佩吉教授继续从事氢和氦的斯塔克效应研究。1922年,福斯特在耶鲁大学完成了第1次斯塔克效应的实验,他采用传统的阴极放电管激发氢光谱,但实验受到了阴极点蚀的限制,点蚀导致放电管内杂质增加,从而影响光谱的清晰度。为了获得足够的光谱强度,他需要延长曝光时间,但这又导致了光谱线的扩展和模糊,影响了测量的精度,因此,福斯特的第1次实验并没有获得准确的结果[2]。

福斯特博士毕业后前往麦吉尔大学任教,并继续优化实验方法,提升实验精度。1924年,其通过引入旋转阴极技术成功减少了点蚀现象,从而改善了光谱的清晰度,并使得曝光时间得以缩短,提高了测量的精度。在1~38 kV/cm的电场强度范围内测量了氢和氦原子的斯塔克效应[3],获得了比早期研究更稳定且精确的光谱数据。1926年,福斯特又对氦原子中的斯塔克效应进行了进一步的观察。这次实验的目标是建立不同谱线系列的斯塔克模式,并验证实验数据与理论计算的一致性。再次提高了测量精度,获得了更为精确的结果。这一次的结果与薛定谔的波动力学在斯塔克效应上的理论值一致,初步验证了量子力学的正确性[4]。这些实

表1 福斯特的斯塔克效应实验[2-4]

实验年份	实验目的	实验改进	实验结果	实验与理论的关系
1922	耶鲁大学就读期间的博士课题	中性楔法,研究对象为氦	谱线分裂图像,斯塔克效应能量分布的变化规律	玻尔-索末菲模型无法解释实验结果
1924	解决阴极点蚀对实验的影响	旋转阴极法	电场强度为4.6~38.0 kV/cm时Hγ的平行分量	
1926	建立各种明确的斯塔克效应的谱线图案	转动电极法	氦和正氦中发现了4种斯塔克效应图案	测量结果与薛定谔提出的新理论高度吻合
1928	关注理论计算与实验测量之间的差异	3种放电管和2种测量方法	H_α、H_β、H_γ和H_δ的相对强度	

验为他的后续工作积累了宝贵的经验与数据。

2.2　1928年实验的关键改进与实验方法的独特性

1928年,福斯特与他的学生劳拉·乔克合作,再次进行了斯塔克效应的实验。本次实验的最初目的是更精确地测量此前实验中与对应原理计算出的理论值严重偏离的部分[5],也是对波动力学的再次检验。因此,在扩展工作中,福斯特特别关注此前理论计算值和实验测量值不一致的那些组成部分的相对强度。此外,在实验中对洛·苏尔多放电管的选用和改进,提高了其实验测量的精确度,这一点充分展现了其在实验物理学领域的精湛技艺和创新思维。

2.2.1　对放电管的选择与优化

在初步实验中,福斯特采用了在均匀场中选择光源的方法(图1(a))[5],并特别注意到了光谱仪狭缝处图像的均匀强度,这对于确保实验结果的准确性和可靠性至关重要。通过这些改进,福斯特成功地使用了中性楔法来直接测定光谱强度,进一步提高了实验的精确度。

然而,福斯特也意识到,传统的放电管在吸收大电流时容易过热,这限制了较弱谱线的观测时间,并且可能无法检测到叠加在斯塔克分量上的其他效应[5]。这种对实验条件的深刻理解和对潜在问题的敏锐洞察,显示了福斯特作为一名实验物理学家的严谨态度和解决问题的能力。

为了克服这些问题,福斯特选用了第2种类型的放电管(图1(b))。与第1种放电管相比,改进后的放电管使用了0.1 m厚的铝条来传导热量,有效解决了过热的问题。同时,放电管的圆柱形表面有助于在光源的窄带两端维持较弱的电场强度,从而便于使用摩尔光度计进行精确测量。这种安排不仅能够在斯塔克效应的中间谱线部分使用摩尔光度计,还在较低的电场强度下揭示了可能叠加在斯塔克分量上的次级谱线或其他谱线[5]。这一改进对于全面理解斯塔克效应的物理机制具有重要意义。

但是为了追求更大的光强,福斯特最终放弃了先前使用的放电管,转而选择了一种结构更为简单、效率更高的放电管(图1(c))。这种管的设计巧妙地利用了圆形截面放电的特性,能够在保持较大电流密度的同时,通过精细调控孔洞直径和阴极与孔洞的间距,有效降低阴极上产生的高电场,从而诱导电流在电极板上以近乎平行的方式运行[5]。这种设计不仅大幅提高了光强,也显著增强了实验的精确度和可控性。

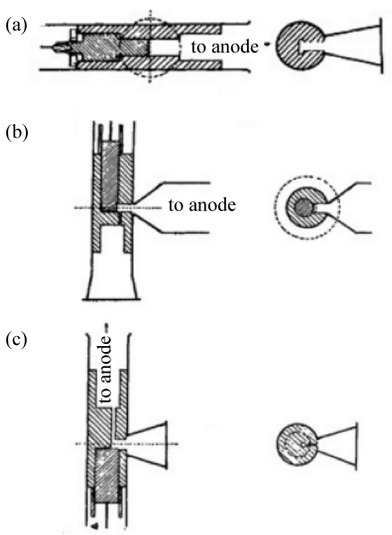


图1　苏尔多放电管[5]

(a)使用带状阴极的苏尔多放电管;(b)解决过热问题的放电管;(c)增大光强的苏尔多放电管

2.2.2　高精度测量方法的制定

在测量斯塔克效应成分相对强度的方法上,福斯特根据不同放电管的特性,提出了2种不同的测量方法。

第1种方法是通过中性玻璃楔块精确测定强度,适用于图1(a)和(b)所示的放电管。这种方法利用了楔形理论和格兰-汤普逊棱镜的光强调节功能,为实验提供了一种新的测量手段。在实验中,福斯特使用能量灯作为光源,通过浮动电池保持电流的恒定。一束平行光经过膜片的限制和棱镜的折射,最终聚焦在狭缝处的楔形上。然后,在同一底片上进行多次相同周期的曝光,曝光之间的强度以10∶1的比例递减,并用铁弧光谱来标记波长。通过在同一底片上进行不同强度的曝光,福斯特能够使用摩尔光度计记录光谱图像的变暗程度。他比较2次曝光的曲线,通过匹配等暗点来测量光谱线之间的相对强度[5]。这种创新的测量方法为后来的实验提供了宝贵的参考。

第2种方法是通过底片叠加技术来确定光谱线的相对强度。在斯塔克-苏尔多曝光完成后,福斯特在同一底片上叠加一张以能斯特发光体为光源的楔形照片。这种叠加技术是实验方法上的一次重要创新,允许人们在同一底片上直接比较不同光源下的光谱图像,从而减少因底片更换或环境变化带

来的潜在误差[5]。

为了确定这种情况下的光强度,福斯特绘制了斯塔克组分在最大场强区域的摩尔光度计曲线。在不改变仪器设置的情况下,他在同一波长区域的楔形照片上获得了第2条曲线。通过摩尔光度计的精确匹配,福斯特能够将比较组分的最大密度与楔形照片中同一波长处的密度进行比较[5]。这种比较为确定光谱线的相对强度提供了一种新的途径。楔形照片上密度变化点之间的距离对应于楔形上的一定长度,这个长度通过光度计的放大倍率以及光谱仪中透镜的焦距计算得出。通过这种方法,福斯特能够根据楔形校准确定光强度的比率。即使在曝光时间存在差异的情况下,也能够通过适当的校正来忽略这些小的误差[6]。福斯特使用了图1(c)所示的放电管,仅在光源非常有限的区域内提供恒定电场。这一方法能够更加精确地测量斯塔克效应的相对强度,并为后续斯塔克效应实验的测量提供了更为精确的方法。通过以上2种不同测量方法,福斯特得到H_α、H_β、H_γ和H_δ的相对强度,结果如表2所示(第3列括号中的数字表示在获得报告结果时采用了2种实验方法中的哪一种)。

以上的改进使得福斯特的实验精度远超此前斯塔克及其他研究者的测量,并在多条关键谱线的相对强度上给出了更加精确的数值,由表2可知,测量值与理论值的比值基本在1.00左右,说明福斯特的实验测量与薛定谔的理论计算在误差允许的范围内是一致,成功地检验了薛定谔理论的正确性。

福斯特于1929年发表了关于斯塔克效应实验

表2 氢谱线的相对强度[11]

谱线	谱线的位移和极化比较	观测到的相对强度	观察值的平均值	薛定谔计算相对强度	观察与计算的比值
H_α	$p\frac{\pm3}{\pm4}$	1.38(2)	1.38	1.37	1.01
	$p\frac{\pm3}{\pm2}$	3.32(2)	3.32	3.16	1.05
	$p\frac{\pm4}{\pm2}$	2.40(2)	2.40	2.31	1.04
	$s\frac{0}{\pm1}$	1.40(2)	1.40	1.42	0.99
H_β	$p\frac{\pm8}{\pm10}$	1.00(1) 1.02(2) 1.11(2)	1.04	1.06	0.98
	$p\frac{\pm8}{\pm6}$	4.54(2) 4.65(2)	4.59	4.74	0.97
	$p\frac{\pm10}{\pm6}$	4.45(2) 4.03(2)	4.24	4.46	0.95
	$s\frac{\pm4}{\pm6}$	1.54(2) 1.59(1)	1.56	1.56	1.00
	$s\frac{\pm4}{\pm2}$	6.06(2) 6.42(1)	6.23	6.35	0.98
	$s\frac{\pm4}{\pm2}$	4.00(2)	4.00	4.07	0.98
H_γ	$p\frac{\pm18}{\pm15}$	1.18(2)	1.18	1.14	1.03
	$p\frac{\pm5}{\pm2}$	1.03(2)	1.03	1.23	0.84
	$s\frac{\pm10}{\pm13}$	1.11(2) 1.05(2) 1.05(2)	1.07	1.06	1.01
H_δ	$p\frac{\pm28}{\pm24}$	1.72(2)	1.72	1.34	1.28
	$s\frac{\pm6}{\pm10}$	1.77(2)	1.77	2.02	0.88

注:括号中的数字表示采用了2种实验方法的某一种。

的报告《氢中斯塔克组分的相对强度》,公布了其在上述实验中获得的结果[5],这些实验结果与基于波动力学的理论计算值高度一致,清楚地表明,波动力学能够准确地解释复杂的原子行为,为量子力学理论提供了坚实的实验支持,也证实了量子力学的普适性。文章还特别指出了位移为±3和±4的平行分量的相对强度与斯塔克的原始结果存在差异[5],这一发现提示了进一步研究的潜在方向,突显了实验在推动科学发展中的关键作用。

3　福斯特的斯塔克效应研究的理论延伸

1926年,福斯特获得国际教育委员会奖学金,前往哥本哈根玻尔理论物理研究所深造。福斯特有机会与尼尔斯·玻尔和沃纳·海森堡等量子力学的领军人物直接交流,接触到了前沿的量子力学理论,尤其是海森堡的矩阵力学方法,为其理论研究提供了关键的工具[6]。在哥本哈根期间,福斯特发表了最重要的1篇理论文章——《量子力学在氦的斯塔克效应中的应用》(*Application of quantum mechanics to the Stark effect in helium*)[7]。在这篇论文中,福斯特利用量子力学理论对氦原子不同能级下的斯塔克分量的位移和强度进行了详细计算。采用了海森堡的新矩阵方法对氦中的斯塔克效应进行扰动计算,通过巧妙引入量子力学中的哈密顿量和矩阵方程,成功地从理论上预测了光谱线的位移,并将理论计算与实验观测结果进行了对比[7]。这在当时是一项极具创新性的工作,不仅展示了量子力学的预测能力,也为实验研究提供了理论依据,进一步巩固了斯塔克效应作为量子力学验证工具的重要地位。

在具体的计算过程中,福斯特还对已有的近似方法进行了改进。引入了伊戈尔·瓦勒提出的里德伯修正量,以提高氦原子某些能级差值计算的精度。这一修正在解决高精度谱线分析问题上表现出色,特别是在复杂原子系统中提供了更可靠的理论支持。此外,总结并发展了一系列数值计算技巧,例如通过矩阵方程系数的特征分析,来判断是否可以在高电场下获得更好的谱线分析[7]。详细给出了每个群中各个能级的理论计算公式,并将计算结果与实验数据进行对比。

福斯特的研究对量子力学应用于解释原子现象作出了有力补充。尽管薛定谔和海森堡的量子力学理论已能较好地解释氢原子在电场中的分裂现象,但对于更复杂的氦原子系统,其理论覆盖尚显不足。薛定谔虽全面研究了氦原子各分量的强度问题,但在某些重要细节上仍依赖于克拉默斯早先根据对应原理所作的定性估计,薛定谔在此基础上所做的定量扩展对氦原子的解释并不完善[21]。福斯特的工作弥补了这一缺失,通过详尽的理论计算和数值模拟,成功完成了量子力学对氦原子斯塔克效应的解释。这不仅验证了量子力学理论的正确性,也推动了理论模型和数值方法的改进。

福斯特的理论工作得到了玻尔和海森堡的高度认可[6]。玻尔曾赞扬道:“他(福斯特)从麦吉尔带来的漂亮的实验材料在这里的理论工作者中引起了极大的热情,并引发了许多有益的讨论”[23]。福斯特的研究为实验物理和理论物理之间的紧密互动树立了典范。通过将实验数据与理论计算相结合,福斯特证明了实验数据在推动理论创新中的不可或缺性,同时也表明理论计算可以为实验设计提供有力指导。例如,在氦的斯塔克效应研究中,福斯特利用理论模型预测了特定能级的光谱分裂特性,这些预测反过来又引导了后续实验的更精准测量。

这次经历是福斯特个人职业生涯的转折点,不仅巩固了其在实验物理方面的成就,也推动了在量子力学理论领域的研究。此外,福斯特在玻尔研究所期间的学术经历也对其后半生的研究理念和方法产生了深远影响。将玻尔和海森堡视为学术偶像,逐渐形成了简单与直观的研究风格,这种风格贯穿于其之后的研究工作中[6]。

4　福斯特的斯塔克效应研究的重要意义

福斯特的斯塔克效应实验在量子力学的发展中作出了重要贡献,这些贡献主要体现在3个方面。

(1)对旧量子论的持续检验。斯塔克效应实验是物理学史上的一个重要里程碑,更是推动了量子理论的发展。这一现象暴露了旧量子理论在解释某些物理现象时的局限性,并为量子力学的诞生提供了重要的实验证据。早期的斯塔克效应实验结果与旧量子理论存在不一致,尤其是在解释氦原子斯塔克效应时遇到了显著困难,这促使科学家寻找新的理论框架来解释这些现象。

1913年,玻尔首次提出了玻尔模型,用于描述氢原子的光谱线。1915年,弗里德里希·帕邢测量

了“玻尔的氢系和氦系”,并得到了结论:除了λ4686谱线的复杂结构外,玻尔的理论已被完全证实了。玻尔理论正确地将λ4686描述为电离氦的谱线,但未能解释仍存在的差异。同年,索末菲也讨论了氢原子斯塔克效应中的光谱线分解数,并提出了玻尔-索末菲原子模型[24]。提出了选择定则,并总结出一套经验规则,这些规则与斯塔克效应实验的一阶观测值十分符合。不过,随着斯塔克效应实验所选取的对象发生了变化,旧有理论逐渐暴露出其局限性。

福斯特在20世纪20年代完成的系列斯塔克效应实验在量子物理学的发展中占据了特殊的位置。在旧量子论面临瓶颈的时刻,其早期实验不仅多次揭示了玻尔-索末菲原子模型的缺陷,而且为量子理论的进一步发展提供了重要的启示。旧量子理论在解释复杂原子系统,尤其是氦原子的斯塔克效应时,存在明显的局限性。这引发了物理学界的广泛讨论,促使人们重新审视电子轨道概念的普适性。这种怀疑和反思是推动量子理论向更深层次发展的重要一步。面对旧理论的局限性,科学家开始寻求新的理论框架来解释复杂的原子现象。福斯特的实验激发了人们对新理论的探索,推动了量子力学的出现。

(2)对量子力学的验证。随着量子力学的提出,福斯特的斯塔克效应实验数据在检验新兴的量子力学理论中起到了重要作用。福斯特最初的实验目的是对少数严重偏离实验事实的数据进行更精确的测量。尤其值得注意的是,福斯特实验的测量结果是独立于薛定谔的理论计算,这更增加了福斯特实验检验的可靠性。在福斯特1929年的报告《氢中斯塔克组分的相对强度》中可以清晰地看到,实验测量与理论值的比值在1.00左右,这表明理论值与观测值一致,从而检验了薛定谔波动力学的正确性,进一步肯定了量子力学对斯塔克效应的解释是有效的[5]。

福斯特的实验是在1930年之前少数为量子力学提供实验证实的研究之一。虽然该实验并未揭示出量子力学预言的新颖现象,使其不能作为判决性证据,但是,这为量子力学提供了重要的观测依据,并为海森堡和薛定谔等人获得诺贝尔奖提供了有力支持[25]。

(3)为量子力学实验验证奠定技术基础。福斯特在斯塔克实验技术方面取得了显著成就,其创新方法不仅推动了光谱学的实验研究,还为量子力学的实验验证奠定了技术基础。在麦吉尔大学任教期间,他指导学生开展了针对金属斯塔克效应的深入研究,实验覆盖了铜、镍、锌、铅和锡等多种材料,记录了大量高精度的谱线数据,包括81条镍谱线、35条铜谱线以及18条锌谱线。这些精确数据为光谱学理论的完善和量子力学的进一步验证提供了首要的参考依据,并成为后续研究进行对比和验证的重要基础[26-27]。

20世纪40年代,由于参与战时雷达的研发工作,福斯特中断了斯塔克效应的相关研究。然而,其开发的实验方法因其精确性和可靠性成为了后续实验的标准参考。改进的苏尔多放电管大幅提高了实验的精确度和效率,成为研究复杂光谱效应的必要器件。通过这些技术创新,福斯特的实验方法推动了量子力学实验验证的技术发展,并进一步强化了理论与实验之间的相互作用。

5 结 语

福斯特在斯塔克效应实验中的卓越贡献,不仅表现在他在实验方法和技术创新上的开创性工作,也体现在其对实验数据进行深入理论分析的能力上。通过改进实验技术,福斯特获得了更加精确的数据,为量子力学的验证提供了至关重要的实验证据。同时他通过量子力学方法解释氦原子斯塔克效应,也拓展了理论物理在解释复杂原子现象中的应用边界。工作清楚地展示了斯塔克效应实验在旧量子论向量子力学过渡中的关键作用,对物理学家反思旧理论、寻求更普遍的理论框架起到了催化作用,也在量子力学提出之后提供了新的验证。

福斯特的实验揭示了理论与实验之间密不可分的互动关系,这种关系正如美国物理学家密立根在1924年诺贝尔物理学奖的演讲中所描述的科学进步模式:“科学用2只脚前进,即理论和实验……只有同时运用二者才能取得持续的进步——先提出理论,然后检验,或者在试验过程中发现新的关系,然后提出理论,继续推进,如此往复,无休无止”[25]。福斯特的工作正是这种科学发展方式的生动体现:通过精确的实验数据,揭示了旧理论的局限性,推动了科学界对新物理图景的探索。虽然斯塔克效应实验和同时期的塞曼效应实验并未立即

使物理学家抛弃半经典的玻尔-索末菲模型,但其显著暴露了旧理论的不足,并促使科学家意识到对理论修正的迫切性,推动了量子力学的发展。

福斯特的工作也为实验物理学的发展树立了榜样,其所做的系列斯塔克效应研究无疑是科学进步中实验与理论相辅相成的典范,展示了实验物理学在推动科学知识前沿中不可替代的作用。

参 考 文 献

[1] DUNCAN A, JANSSEN M. The trouble with orbits: the Stark effect in the old and the new quantum theory[J]. Studies in History and Philosophy of Science Part B (Studies in History and Philosophy of Modern Physics), 2014, 48: 68-83.

[2] FOSTER J S. Relative intensities of Stark effect components in the helium spectrum [J]. Physical Review, 1922, 20(3): 214-221.

[3] FOSTER J S. Observations on the Stark effect in hydrogen and helium[J]. Physical Review, 1924, 23(6): 667-686.

[4] FOSTER J S. Stark patterns observed in helium [J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1927, 114 (766): 47-66.

[5] FOSTER J S, CHALK L M. Relative intensities of Stark components in hydrogen[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1929, 123(791): 108-118.

[6] BELL R E. John Stuart Foster 1890-1964 [J]. Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society, 1966, 12: 147-161.

[7] FOSTER J S. Application of quantum mechanics to the Stark effect in helium [J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1927, 117(776): 137-163.

[8] STAEK J. Der doppler-effekt bei den kanalstrahlen und die spektra der positiven atomionen[J]. Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse, 1905, 1905: 459-471.

[9] STARK J. Beziehung des doppler-effektes bei kanalstrahlen zur planckschen strahlungstheorie [J]. Physikalische Zeitschrift, 1907, 8: 913-919.

[10] STAEK J. Beobachtungen über den effekt des elektrischen feldes auf spekrallinien I. Quereffekt [J]. Annalen der Physik, 1914, 43: 965-982.

[11] STARK J, WENDT G. Beobachtungen über den effekt des elektrischen feldes auf spekrallinien. II. Längseffekt [J]. Annalen der Physik, 1914, 43: 983-890.

[12] STARK J. Beobachtungen über den effekt des elektrischen feldes auf spekrallinien V. Feinzerlegung der Wasserstoffserie[J]. Annalen der Physik, 1915, 48: 193-209.

[13] VOIGT W. Über das elektrische analogon des Zeeman effectes[J]. Annalen der Physik, 1901, 309: 197-208.

[14] LO SURDO A. Sul fenomeno analogo a ouello di Zeeman nel campo elettrico[J]. Nuovo Cimento, 1914, 7 (1): 347-348.

[15] NYQUIST H. The Stark effect in helium and neon[J]. Physical Review, 1917, 10(3): 226-243.

[16] TAKAMINE T, KOKUBU N. Further studies on the Stark effect in helium and hydrogen[J]. Proceedings of the Tokyo Mathematico-Physical Society, 1918, 9(18): 394-404.

[17] 宋世榕.彼得·塞曼和塞曼效应[J].物理, 1993, 22 (12): 746-751.

[18] LEONE M, PAOLETTI A, ROBOTTI N. A simultaneous discovery: the case of Johannes Stark and Antonino Lo Surdo[J]. Physics in Perspective, 2004, 6 (3): 271-294.

[19] DUNCAN A, JANSSEN M. Constructing quantum mechanics: volume 1: the Scaffold: 1900-1923 [M]. New York: Oxford University Press, 2019.

[20] EPSTEIN P S. Zur theorie des Stark effektes [J]. Annalen der Physik, 1916, 355(16): 489-520.

[21] schrödinger e. quantisierung als eigenwertproblem (dritte mitteilung) [J]. Annalen der Physik, 1926, 385 (13): 437-490.

[22] THOMSON J J. Prof. H. A. Bumstead[J]. Nature, 1921, 106(2675): 734-735.

[23] THOMAS J. John Stuart Foster, McGill University, and the renascence of nuclear physics in Montreal, 1935-1950 [J]. Historical Studies in the Physical Sciences, 1984, 14(2): 357-377.

[24] 埃克特.扩展玻尔模型:索末菲早期原子理论, 1913-1916[J].科学文化评论, 2013, 10(6): 40-49.

[25] BRUSH S. Making 20th century science how theories became knowledge[M]. New York: Oxford University Press, 2015: 219-224.

[26] FEENY H F. The Stark effect in cobalt and zinc[D]. Montreal: McGill University, 1940: 10.

[27] SHUGAR D. Stark effect in copper and nickel[D]. Montreal: McGill University, 1940: 31.

(责任编辑:兰丽丽)