

吴有训与康普顿效应

郭奕玲

康普顿效应发现于1923年,是美国物理学家康普顿(A. H. Compton)经过长期研究所获得的成果.这个效应不能用经典理论解释,只能把光看成是具有能量和动量的光子,光子与自由电子作完全弹性碰撞,才能比较完满地作出解释.所以康普顿的发现具有伟大的历史意义,它肯定了光的粒子性,而波粒二象性正是量子力学的基础.

但是由于经典物理观念根深蒂固,康普顿效应一经提出,就遭到人们的怀疑和非难.有人认为实验证据不够充分,有人提出新的实验结果,作出新的解释,向康普顿的结论挑战.为了取得更全面的实验证据,康普顿所在的芝加哥大学赖尔森物理实验室开展了深入的研究,其中来自中国的研究生吴有训工作最有成效.他以高超的实验技术、严密细致的工作,为康普顿效应的确证作出了杰出贡献.

1. 康普顿的发现

康普顿是用X射线分光仪研究石墨对X射线的散射时发现这一效应的.他选用的入射线是钼 K_{α} 标识谱线(即 MoK_{α} 线).入射线经过准直后,投射到石墨晶体上,然后用可沿圆弧移动的电离室接收散射的二次X射线.散射X射线引起电离电流,再经静电计检测.这套装置经过康普顿改进,灵敏度比别人的高,因此可以得到别人难以分辨的散射曲线.康普顿的X射线散射曲线明显的有两个峰值,其中一个波长等于初始的波长,康普顿称为不变线,另一个波长变长.康普顿称为变线.实验表明,变线对不变线的偏离随散射角变化,散射角越大,偏离也越大.根据能量守恒和动量守恒对碰撞过程进行计算,所得结果跟实验完全一致.

2. 杜安尼的反对

康普顿的结论遭到另一位X射线专家杜安尼(Duane)的反对.他是哈佛大学教授.他的实验室也在进行X射线散射实验,却得不到康普顿的结果.他宣布没有检测到康普顿理论所预言的二级辐射.与此同时,他还对自己的实验结果作出理论解释.在他的散射曲线上也有一个新的峰值.但那不是康普顿预计的峰值,而是杜安尼所谓的“三次辐射”.杜安尼认为,初始射线可能会激发出光电子,光电子再冲击邻近原子,致使产生三次辐射.据他推算,三次辐射波长的变化量应与散射物的波长特性有关,与散射角无关.

对于康普顿的实验,杜安尼表示怀疑.他认为,所谓变线的峰值,可能是由于康普顿的实验装置是放在包有铅皮的木箱中,X射线打到木箱上激发了新的射线.哈佛大学之所以没有得到同样结果,是因为他那里不用箱子屏蔽.为了证明这一见解,他的实验室还专门做了实验,“证明”确有“箱子效应”.

1924年夏天,英国科学促进会在多伦多召开,杜安尼和康普顿都参加了.两人在会上展开了辩论.令人遗憾的是,杜安尼的“箱子效应”竟占了上风.会议结束时印度物理学家喇曼(C. V. Raman)甚至好心地对康普顿说:“你是辩论能手,但真理不在你这一边.”

康普顿回到芝加哥后,立即请他的学生吴有训做实验予以驳斥.他相信自己的工作是经得起考验的.

3. 吴有训的实验

吴有训是1921年赴美入芝加哥大学并随康普顿从事物理学研究的.几乎从一开始,吴有训就和康普顿一起进行X射线的散射实验.康普顿最初发表的论文只涉及一种散射物质(石墨),尽管已经获得了明确的数据,但终究还只限于某一特殊条件,难以令人信服.为了证明这一效应的普遍性,吴有训在康普顿的指导下,做了七种物质的X射线散射曲线.这七种散射物质是:锂、硼、碳、水、钠、镁、铝,都属于轻元素.他证明只要散射角相同,不同物质散射的效果都一样,变线和不变线的偏离与物质成分无关.他们在1924年联名发表论文,题为:《经轻元素散射后的钼 K_{α} 射线的波长》.他们写道:“从各种材料所得的光谱在性质上几乎完全一致.每种情况,不变线都出现在与荧光 MoK_{α} 线相同之处.而变线的峰值则在允许的实验误差范围内,出现在上述的波长变化量子公式所预计的位置上”,“从不同元素结果的一致看来,我们感到这些实验毋庸置疑地证明了散射量子理论所预言的光谱位移的真实性”.

但是,他们还不能完全排除杜安尼的“三次辐射”,因为尽管对多数曲线按杜安尼的假设计算没有找到峰值,然而对铝和钠的曲线来说,计算值正好在峰上.

于是,吴有训继续进行研究.为了检验杜安尼的“箱子效应”,他特意把X射线管和各种散射物质(岩盐、镁、铝、硅和硫等)放在铅箱中.1925年,吴有训发表题为《康普顿效应与三次X辐射》一文,他宣布:

“这些实验没有一个证明三次峰的存在。”而他发表的曲线却鲜明地显示出了康普顿理论所预言的变线和不变线，再一次证明康普顿效应的客观存在。

4. 吴有训进一步研究康普顿效应

吴有训对康普顿效应最重要的贡献在于测定了X射线散射中变线和不变线之间的强度比随散射物原子序数变化的关系，由此证实并发展了康普顿的量子散射理论。

康普顿在1923年的论文中曾对不变线的起因作出解释。他的第一个假设是：在散射过程中，分给电子的能量不足以把电子从原子释出时，就会出现不变线。光子跟这些束缚电子碰撞，实际上就是跟整个原子碰撞。因此，原子的原子序数越高，则所含的束缚电子越多，不变线的强度也就越大。

与此同时，康普顿还提出另外一种可能性，就是假设不变线可能是由于入射光子被原子核散射所致。这两个假设孰是孰非，有待实验检验。

吴有训认识到强度比的测量对研究康普顿效应有重要意义，就花了很大力量进行系统的实验研究。1925年10月写成了《康普顿效应中变线和不变线之间的能量分布》一文，此文发表在1926年的《物理评论》上。他用康普顿改进过的X射线发射管和安装有方解石大晶体的游离分光计，对五种辐射物——石蜡、木、碳(石墨)、铝和硫进行测量，作出各自的散射曲线，再用平面仪把代表谱线的曲线面积积分。由于用到很精细的准直器，研究的波长范围非常之小，他在“相当近似的程度内获得了每种光谱的相对能量”。测量结果可列表如下(数字表示变线对不变线的强度比)：

散射角	石蜡	木	碳	铝	硫
60°	2.29	1.19	1.08	0.46	—
75°	3.10	1.85	1.31	0.74	0.25
90°	4.69	2.73	1.45	0.91	0.42
105°	5.16	3.21	1.82	1.23	0.67
120°	5.49	4.57	2.26	1.45	—
135°	6.52	5.38	3.42	2.11	—
150°	6.98	6.21	4.05	2.52	—
165°	7.47	7.00	4.86	—	—

从这些数据可以看出：对于给定元素，强度比随散射角的增大而增大；对于给定角度，强度比随原子序数的增大而减少。石蜡最大，是因为它含的氢比木相对地多些。由此吴有训作了一个推论，按照这一规律，锂的强度比应该特别大，因为它是最轻的金属。

锂的X射线散射值得特别注意，并非吴有训首创。早在1924年5月康普顿就和他做过了这样的实验。他们用新鲜制备的锂样品，得到的不变线虽很微弱，但仍确实可辨。别人也做过类似的实验。杜安尼在实验中用一层石蜡油保护锂以免氧化，结果是在不变线的位置上仍有微弱的峰出现。

置上仍有微弱的峰出现。

为了验证锂散射的效果，吴有训以独特的匠心，巧妙地设计了实验方案。他把锂辐射物放在充有氩的铅室中，铅室上安有两扇云母窗，分别让原始X射线进入和散射的二次射线射出。由于铅的散射可忽略不计，而氢比锂轻，实验不会受它们影响。再让散射的二次射线经准直器后投入游离分光计进行测量。实验做得非常细致，连如何屏蔽固定云母窗的封蜡也都考虑得很周到。实验的结果是“在金属锂散射的二次X射线中康普顿效应的不变线消失不见了”。

锂散射中不变线强度为零，证明康普顿提出的第一个假设，即不变线是由于“散射过程中电子获得的能量不足以使它脱离原子所引起”，是正确的，而另一个关于光子与原子核碰撞的假设证明是不对的。这样，就把康普顿效应的理论向前推进了一大步。

在1926年6月召开的美国物理学会第140届年会上，吴有训宣读了三篇论文，都是关于康普顿效应的。这一年，他以《康普顿效应》为题通过了博士学位答辩，同年回国。

从1924年到1926年，吴有训就康普顿效应问题发表了九篇论文，他对此问题的主要贡献是：(1)用大量实验事实，证明了康普顿效应的广泛适用性；(2)从实验上推翻所谓“三次辐射”假设；(3)否定了“箱子效应”；(4)用实验手段确定了康普顿散射过程中变线与不变线之间的能量(或强度)比率及其与散射角的关系。

1926年以后，吴有训任教于清华大学物理系，积极倡导、组织和参加近代物理学的科学研究。他是我国近代物理学杰出的奠基人之一。解放后，吴有训长期担任科技、教育界的组织领导工作。他为发展我国的科学、教育事业做出了重要贡献，为国家培养了大批科学建设人材，他的学生遍布中外，其中许多已是著名的科学家。吴有训在国内外学术界享有很高的声誉，曾多次受到毛主席、周总理、朱委员长等党和国家领导人的接见和关怀。他多次率科技代表团出国访问，代表我国对外签订各项科技协定。参予接待国外特别是美国的科技代表团和科学家，为加强中外科技交流，增进中美两国人民的友谊，促使中美关系的正常化做出了积极的贡献。

康普顿非常赞赏吴有训的才干，晚年曾对杨振宁说，吴有训是他一生中最得意的学生。吴有训的工作被康普顿收进他的专著《X射线与电子》一书，其中有一张吴有训作出的用十五种物质分别测到的散射光谱曲线，这一组曲线后来也被其它许多X射线专著或教科书采用，一直作为康普顿效应最有说服力的证据。国内外科学家一致公认吴有训为康普顿效应的发现、验证和理论分析作出了重大贡献。所以国内外有些科学著作和教科书将康普顿效应称为康普顿-吴有训效应。