

康普顿效应的发现和启迪

——纪念康普顿效应发现 70 周年

邓淑琴

(北京大学分校, 北京 100083)

1993 年 4 月是美国著名物理学家 A. H. 康普顿发现康普顿效应 70 周年。康普顿效应是光量子理论的两个重要实验证据之一, 它为光和辐射的粒子性提供了确凿证据, 进一步证实了光的波粒二象性, 从而为 20 世纪初的物理学革命奠定了坚实的实验基础。康普顿效应和正确的光量子理论解释是经过许许多多科学家多年不断探索, 艰苦奋斗, 经历无数次失败才取得成功的。它既体现了科学家精湛的实验技巧, 一丝不苟的执着科学态度, 更包含了科学前辈们的创造性思维和丰富的联想, 蕴含着极丰富的方法论上的教益和启迪。今天, 我们重温这段历史, 缅怀物理学家康普顿, 挖掘其中有益的科学思想方法, 一定会受益匪浅。

一、康普顿研究 X 射线前其他科学家对 X 射线的研究

X 射线、天然放射性和电子是 19 世纪末的三大发现。这三大发现猛烈地冲击着经典物理学的基本概念, 使物理学面临着一场深刻的革命。1895 年, W. K. 伦琴发现 X 射线, 揭开了这场物理学革命的序幕, 在科学界掀起了一股研究探索新射线的热潮, 一系列新的重大发现不断诞生。1896 年, G. G. 斯托克斯和 E. 维谢尔根据 X 射线的发生方式指出它是电子的韧致辐射。同年, J. J. 汤姆孙发现了 X 射线的电离作用。1904 年, C. G. 巴克拉(Barkla)发现了 X 射线的偏振现象。1899 年, H. 哈格(Haga)和 C. H. 温德(Wind)用楔形狭缝观察 X 射线的衍射。1908 年, B. 沃尔特(Walter)和 R. W. 波尔(Pohl)重复哈格的实验。1912 年, P. P. 科赫借助光度计从沃尔特和波尔的照片中发现了衍射现象。A. 索紫末菲从理论上进行了探讨, 大致证

实了 X 射线是具有 \AA 数量级波长的波动。1912 年, W. 弗里德里希(Friedrich)和 P. 克尼平(Knipping)受 M. V. 劳厄(Loue)的启发, 用晶体光栅做 X 射线衍射实验, 确立了 X 射线的波动性, 即 X 射线与光一样是电磁波, 只不过其波长特别短。在对 X 射线的广泛研究中, X 射线通过物质的散射是一个非常重要的课题, 吸引许多科学家进行研究。1900 年, P. U. 维拉尔德(Villard)发现了 γ 射线。1904 年, A. S. 伊夫(Eve)研究 γ 射线的吸收和散射时, 发现 γ 射线散射后穿透率减弱的现象(即波长变长, 也就是康普顿效应), 由于当时人们还不了解 γ 射线的本质和波长大小, 无法解释这一现象。1910 年, C. 费罗伦斯(Florance)在做 γ 射线散射实验时, 发现随散射角加大, 吸收系数也加大(即波长变长)。1912 年, C. A. 萨德勒(Sadler)和 P. M. 梅夏姆(Mesham)在研究 X 射线散射时发现, 被轻原子散射的 X 射线比散射前变软了(即贯穿力变小, 波长变长)。第二年, 他们发现 γ 射线也有同样的现象。他们把上述现象解释为: (1) 原来的 X 射线不一样; (2) 未知的标识 X 射线的线系影响观测; (3) 电子的辐射运动引起多普勒效应。1913 年, J. A. 格雷(Gray)进一步精确测量了 γ 射线散射强度随散射角的变化, 发现单色 γ 射线散射角越大, 散射线越软, 但没有能解释这一现象。1920 年, 雷格又用 X 射线做散射实验, 观察到 X 射线散射后波长的变化, 他假定 X 射线由不同脉冲组成, 如果这些脉冲有傅里叶频谱, 就会随散射角发生波长的变化。对于单色波, 散射后不会发生波长变化。为了与经典理论取得一致, 他竟然否定了自己的实验结果。1921 年, S. J. 普林普顿(Plimpton)居然实验证实了格雷的论点, 即单色 X 射

线散射时不发生波长变化. 实际上是普林普顿忽视了在大角度散射时小角度的散射线, 致使没有观察到散射线的波长变化. 在 1895 年后的 25 年间, 虽然许多科学家致力于 X 射线散射的研究, 但其谜一直没有彻底揭开.

二、康普顿效应的发现及量子理论的建立

康普顿长期从事 X 射线的研究, 探讨 X 射线的性质, 做了大量的实验, 如 X 射线的反射、折射、偏振、衍射、散射等, 并深入进行了理论研究, 前后发表有关论文一百多篇^[1], 著作两部^[2,3], 其中尤以对 X 射线散射的研究最为著名, 他发现了著名的康普顿效应, 建立起 X 射线散射的量子理论.

康普顿早在上大学时就开始了 X 射线的研究. 当时, 他的长兄卡尔·泰勒·康普顿 (Karl Taylor Compton) 以 X 射线为题撰写硕士论文, 他经常利用课余时间参与卡尔的实验, 对探索 X 射线产生了浓厚的兴趣, 这对以后他选 X 射线作为自己的研究方向有极大的影响.

英国著名物理学家 O. W. 里查森 (Richardson) 在普林斯顿大学任物理学教授时, 曾指导康普顿的博士论文《X 射线反射强度和原子中的电子分布》, 里查森热情支持鼓励康普顿研究 X 射线, 在里查森即将返回英国时, 他将自己用的一套研究 X 射线的优质设备送给了康普顿, 对于刚刚毕业的康普顿可谓具有了得天独厚的科研实验设备. 在此期间, 卢瑟福到普林斯顿大学参观, 对年轻的康普顿研究 X 射线的实验方法和手段非常感兴趣, 给予高度评价和热情鼓励, 这对康普顿积极投身研究 X 射线具有非常重要的影响.

1919 年, 康普顿到卡文迪许实验室在卢瑟福指导下研究 γ 射线的散射 (当时没有条件做 X 射线散射实验), 发现散射 γ 射线的最软分量比入射 γ 射线的最软分量还要软, 第一次测出了 γ 射线的波长. 这为康普顿以后研究 X 射线的散射奠定了基础.

1920 年, 康普顿回到华盛顿大学, 开始研物理

究 X 射线的散射. 由于散射 X 射线的强度相对入射线很低, 测量散射后 X 射线的波长是非常困难的, 康普顿巧妙地安排实验, 尽最大努力使得测的散射 X 射线达到最高强度. 他自己设计并吹制 X 射线管, 在狭长的玻璃管内安放一个水冷式钨靶标, 靶标与石墨散射体的距离安排得相当近 (仅 2cm), 使 X 射线管上消耗掉 1.5kW 功率时, 散射体处 X 射线的强度为选用普通标准形式钨靶标库利吉 X 射线管的 125 倍. 他自己改装了 X 射线分光仪和探测用的可调象限计. 这些措施大大提高了实验的探测灵敏度, 使他清晰地观测到散射后的 X 射线包含两种不同的波长成分, 其中一种和入射 X 射线波长相同, 称为不变线, 另一种则大于入射 X 射线的波长, 称为变线. 进一步精确测量不同角度的散射 X 射线, 发现散射角增大时, 变线的波长也加大, 且变线增强, 不变线减弱. 这就是康普顿发现的康普顿效应的实验现象.

为了对实验观察到的变线波长给予合理的理论解释, 康普顿探讨了整整五年, 企图解决 γ 射线、X 射线散射和经典理论之间的矛盾. 开始他把这种矛盾解释为散射过程混杂了相当数量的某种荧光辐射. 后来他又提出大电子模型假设, 设想电子有一定大小、形状和电荷分布, 用经典电动力学计算散射的分布函数, 引入大量繁杂的计算, 他认为 X 射线波长极短情况下散射的减弱, 是由于当辐射波长和电子直径大小可以比拟时, 电子的不同部位形成的散射会发生干涉. 他给电子确定了半径的数值, 使这一假设对各种波长下的散射给出定量解释, 实验表明, 这个假设要求电子的大小随所选用 X 射线的波长而变化, 但大小随入射波长而变的电子实在让人难以接受. 他又试图用多普勒效应解释变线波长的变化, 也失败了. 正如康普顿所说^[4]: “波长的这种变化直接与汤姆孙散射理论相矛盾. 因为这个理论要求: 由初始的伦琴射线所决定的受迫振动而引起的辐射的散射电子, 它的辐射频率应当精确地等于入射线的频率. 任何关于大电子假说的理论无论如何完善也不可能是克服这种困难的途径. 由于这个缺点, 难

以使人相信根据经典电动力学就能对伦琴射线的散射给予满意的解释。”经过所有尝试的失败之后,1923年,康普顿提出了一种新的量子理论^[4]:“根据经典理论,每条伦琴射线对它所穿过的物质中的每个电子都有作用,观察到的散射与全部电子的作用有关.按量子理论的观点我们可以设想,每一个具体的伦琴量子并不是被所有电子所散射,而是和某一个固定的电子发生相互作用,消耗掉本身的全部能量.这个电子又在和入射线成一定角度的方向上进行散射.辐射量子运动方向的这种变化将导致它的冲量变化.结果散射的电子将要经受反冲,这时它的冲量等于伦琴射线冲量的变化.散射光的能量等于入射光的能量减去反冲电子的反冲动能.因为散射的光应当是整数量子,所以它的频率的变小应和能量的改变有相同的比例.因此根据量子理论我们可以预料到,被散射的伦琴射线的波长将大于入射线的波长.”即一个具有能量 $h\nu$ 、动量 $h\nu/c$ 的 X 射线光子与一个自由电子发生弹性碰撞,在碰撞过程中遵守能量和动量守恒定律,得到康普顿效应方程,导出入射波长 λ_0 , 散射波长 λ 和散射角 θ 之间的关系:

$$\lambda = \lambda_0 + \frac{2h}{mc} \sin^2 \frac{1}{2} \theta^{[4]},$$

式中 h 是普朗克常数, m 是电子质量, c 是光速. 辐射量子是单个电子在一定方向上的再发射,电子应在与入射线成锐角的方向上反冲,数学计算结果表明,变线波长的增大与入射 X 射线的波长无关,变线与不变线的波长差随散射角的增大而增大.实验结果在实验误差范围内与理论一致.

三、康普顿效应得到科学界公认的过程

康普顿的实验和理论当时在物理学界引起了强烈的反响,但是由于他的理论与经典散射理论直接冲突,而且实验证据尚不够充分完备,因此并没有立即得到国际物理学界的公认.特别是有声望的哈佛大学的 W. 杜安(Duane),他在自己的实验室中没有做出康普顿的结果,因

而极力反对将康普顿 X 射线散射的结论写入即将出版的国家科学研究委员会有关 X 射线二次辐射的报告中.1923年,杜安和 G. L. 克拉克在一篇论文中提出变线可能是一种鲜为人知的“三次辐射”,它是由 X 射线激发的光电子冲击邻近原子而产生出这种变线.1924年,在英联邦科学促进会上,杜安等人又提出一个称为“盒子”效应的新解释,他认为康普顿实验中散射仪器周围所用的防护箱改变了辐射的性质.康普顿效应面临着严峻的挑战.

康普顿和他的来自中国的研究生吴有训做了一系列重要的工作.首先,吴有训通过实验证实了康普顿效应的普遍性,他用多达 15 种样品作为散射物质,进行重复实验,结果都证明康普顿理论的正确性.其次,吴有训的实验推翻了杜安的“三次辐射”解释和“盒子”效应解释,吴有训在康普顿建议下,用五种不同散射物质进行实验都没有观察到杜安、克拉克所说的三次辐射的迹象;吴有训改造了实验仪器,采用不同材料的防护箱,甚至将散射仪器放到室外去实验,结果都没有什么差别.再次,吴有训以实验确定了康普顿散射光谱中变线与不变线之间的强度比率与散射角的关系.吴有训的工作对康普顿效应及其理论解释的确定作出了卓越的贡献.吴有训工作勤奋、严谨,被康普顿称赞为他最得意的两个学生之一.

1923年,C. T. R. 威尔孙, W. 博思(Bothe)分别用威尔孙云室观察到康普顿的量子理论所预言的反冲电子,这一事实也为康普顿效应得到物理学界的公认起了非常重要的作用.1925年,康普顿和 A. W. 西蒙(Simon)利用威尔孙云室拍摄反冲电子和散射 X 射线激发的 β 粒子,在 850 张照片中找到 38 张显示反冲电子和 β 粒子同时出现,测量结果与理论相符.对于每个反冲电子,都伴随 X 射线的散射,光子和电子构成的系统能量和动量是守恒的.

后来,杜安以科学家的真正科学态度访问了康普顿的实验室,邀请康普顿访问自己的实验室,多次反复做实验,最后终于找到了实验中的误差所在,证实了康普顿效应,并在下一次美

国物理学会年会上,他纠正了自己以前的看法,报告了他们所做的“波长改变得到了极好的测量结果。”^[5]至此,康普顿的实验和理论才得到物理学界的公认,并于1927年与威尔孙共获诺贝尔物理学奖。

四、康普顿效应在科学发展史上的重大意义

康普顿效应的发现具有重大的科学意义,不仅对X射线学而且对现代物理学的发展都有巨大意义。首先,它为普朗克的能量子理论及爱因斯坦的光量子理论的正确性提供了确凿证据。它以无可争辩的事实支持了辐射的粒子性,为微观粒子的波粒二象性提供了有力证据。正如康普顿所说^[6]：“不管怎样,散射问题与反射和干涉是如此紧密地联系在一起,对它的研究很可能给干涉现象与量子理论的关系这一难题投入一线光明。”这个设想很快就被证实了,光既不是严格意义下的波,也不是真正的粒子流,而是一种特殊的客观物质,它有时表现为波动性,有时又表现为粒子性。1924年,玻尔、H. A. 克喇末和J. C. 斯莱特(Slater)曾怀疑能量和动量守恒在微观过程中是否成立,认为它们只是统计上守恒。康普顿的实验,特别是康普顿和西蒙的工作反驳了玻尔等人的观点,直接证明了电磁辐射与物质相互作用的一个基本规律,即在微观粒子单次碰撞过程中能量和动量是守恒的。另外,康普顿的散射公式用当时还没有被普遍接受的相对论解释散射中波长的变化,这就成了狭义相对论的一个十分出色也是较早的应用。

康普顿的理论是在旧量子论的基础上建立的,成功地解释了X射线散射时波长的改变,给出了电子的康普顿波长及反冲电子的能量。但旧量子论无法给出散射X射线强度对散射角依赖关系的定量结果,无法给出散射截面的大小,无法正确给出高能状态下散射线的偏振态,因而揭示了旧量子论的不足之处,预示了需要新的理论才能解决上述问题。从这个意义上讲,康普顿的实验和理论解释对1922年到物理

1928年量子力学的发展起了推动作用。1927年,W. 海森伯把康普顿相互作用作为一个极好的例子,说明微观粒子的动量和坐标不可能同时具有确定值的不确定关系。1928年,P. A. M. 狄拉克建立起相对论量子力学。1929年,O. 克莱因和仁科芳雄(Nishina)根据狄拉克的理论,完整地描述了康普顿散射,导出克莱因-仁科公式,精确计算出散射强度对散射角的依赖关系、散射截面和高能状态下的偏振状态,理论计算结果和实验很好符合。此外,康普顿效应的逆过程——逆康普顿散射,即高能电子和光子相互作用致使低能光子获得能量的散射过程,在现代天体物理学、高能加速器物理及等离子体物理中起着非常重要的作用。康普顿效应的发现是近代物理学中的一件大事,被R. H. 斯蒂沃(Stuewer)称赞为物理学发展史中的转折点之一^[7]。

五、历史的启迪

回顾康普顿效应发现的历史及其在科学发展史上的重大意义。我们看到该成果是经过许多科学家艰辛劳动而取得的,其中既有思辨,又有实验,相互补充,相互印证;我们看到科学家科学实验的历史背景、设计思想及探索精神;看到科学实验在科学发展中的重要作用和地位。能不能牢牢抓住并准确把握实验中出现的异常现象,善于捕捉线索、追根到底,是能否作出重大发现的关键,也是科学家创造才能的标志。在康普顿效应发现的过程中,我们看到,早在1904年伊夫就已经在实验中发现了康普顿效应;后来,许多科学家如格雷、佛罗伦斯也先后在实验中发现了 γ 射线、X射线散射时的波长变化现象;但他们都没有抓住这个实验现象深究下去,也没有能作出正确的理论解释。康普顿自1913年开始研究X射线,1916年选定X射线散射的课题,一直潜心研究,不断改进和完善实验。他自己动手设计改进X射线管的结构,吹制管子,不断改进布喇格光谱仪和可调象限计,选择多种样品在各种不同条件下反复进行

实验,终于测出优于他人的结果,使实验误差小于 0.001 \AA . 如果没有丰富的经验、高超的实验技巧、执着的探索精神和严谨的科学态度,在当时的历史条件下,达到这样的实验精度是不可能的. 普林普顿由于实验上的疏忽,反而证实了格雷的错误结论. 杜安的实验室由于实验安排不当,没有探测到 X 射线散射时波长的变化.

由康普顿对康普顿效应的正确理论解释,我们可以体察到一种科学理论的建立过程. 未知世界常常表现出传统观念所意想不到的属性,广开思路,发挥丰富的有科学依据的想象力和深刻的洞察力,在纷繁、复杂的事物中把握住本质,是科学工作者的基本素质. 康普顿得出正确的理论解释,经历了多年的各种尝试,经历了所有经典理论解释的失败后,才独辟蹊径,经过严密推理,用量子理论正确地解释了实验现象. 正如爱因斯坦和英费尔德在《物理学的进化》中所说:“提出一个问题往往比解决一个问题更为重要,因为解决一个问题也许仅仅是一个数学上的或实验上的技能而已,而提出新的问题,新的可能性,从新的角度去看旧问题,却需要有创造性的想象力,而且标志着科学的真正进步.” 萨德勒和梅夏姆停留在用经典理论解释,没有进一步探究下去. 而格雷虽然早在实验上观察到 γ 射线和 X 射线散射时波长的变化,但他为与经典理论一致,竟然否定了自己的实验结果,而没有进一步探索下去,没有能冲破经典理论的束缚,也就失去了重大发现的机会.

由康普顿效应的发现和正确理论解释确立的过程中,我们可以看到科学认识的历史是不同观点不断争论的历史,通过争论才能使人们的认识从错误走向正确,从肤浅走向深刻,从片面走向全面,科学争论是科学发展必不可少的环节. 在康普顿效应得到公认的历程中,我们也看到科学前辈们的真正科学态度,杜安由于自己的实验室中没有做出康普顿效应的结果,他不盲从,一方面提出异议和各种假设,一方面在自己实验室中反复实验,并且和康普顿的实验室互相交流、讨论. 康普顿和自己的助手吴有训等反复在各种条件下做进一步的实验. 其他科学家如威尔孙、博思等也采取其他手段进行验证,最后达到了统一,康普顿效应和理论解释才得到科学界的公认. 这种真正的科学态度是值得我们永远认真学习的.

- [1] R. S. Shankland ed, Scientific Papers of A. H. Compton, Univ. of Chicago Press, (1973).
- [2] A. H. Compton, X-Rays and Electrons, New York, D. Van Nostrand Company, (1926).
- [3] A. H. Compton and S. K. Allison, X-Rays in Theory and Experiment, New York, D. Van Nostrand Company, (1935).
- [4] A. H. Compton, *Phys. Rev.*, **21**(1923),483.
- [5] A. H. Compton, *J. Phys. Am.*, **29**(1961), 817.
- [6] A. H. Compton, *Phys. Rev.*, **22**(1923),409.
- [7] R. H. Stuewer, The Compton Effect, Turning Point in Physics, Science History Publication, New York, (1975).