

多普勒和多普勒效应的起源^{*}

刘 战 存[†]

(首都师范大学物理系 北京 100037)

摘 要 介绍了奥地利物理学家多普勒的生平,回顾了多普勒对波源和观测者之间有相对运动时接收到的波频率改变的效应即多普勒效应的最初论述,以及人们早期对多普勒效应在声学、天文学及光学领域的实验验证情况.论述了多普勒效应的历史作用和纪念多普勒的现实意义.

关键词 多普勒, 生平, 多普勒效应, 多普勒原理

Doppler and the origin of his effect

LIU Zhan-Cun[†]

(Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100037, China)

Abstract A short biography of the great Austrian physicist Christian Doppler is presented. His famous paper "On the colored light of double stars and of some other stars in the sky" was the first to explain that a star's color depended on its motion. An account is given of the early experiments that demonstrated the Doppler effect in acoustics, astronomy and optics. The historical impact of this effect and the significance of commemorating Christian Doppler are discussed.

Key words Christian Doppler, biography, Doppler's effect, Doppler's principle

物理学中有很多以物理学家名字命名的效应,但是在物理学之外的领域,像多普勒效应这样被人们如此频繁地提到,如此广为人知,可能是不多见的.天文学家由它测出天体的运行速度,航天工程上由它利用雷达进行人造卫星等运动目标的监测,医学上利用超声多普勒效应进行诊断等等.在现代物理学的发展中,像多普勒原理一样保持其最初的表述不变的情况也不是很多.

2003年恰逢多普勒诞生200周年和逝世150周年,现在回顾他的生平和他对科学事业的重要贡献是很有意义的.

1 生平

克里斯琴·多普勒(Christian Doppler)1803年11月29日生于奥地利的萨尔茨堡(Salzburg),父亲是一位著名的石匠.尽管多普勒也在这门手艺上显示出了他的天赋,但由于健康状况不佳,父亲只好为他选择了另一条谋生的道路.他上了萨尔茨堡的一所中学,那里的优秀数学教师、天文学家、大地测量学

家西蒙·萨莫弗(Simon Stampfer)对多普勒的数学才能颇为赞赏,在他的支持和鼓励下,多普勒1822年进入维也纳综合技术学院(Polytechnic Institute).1825年以后,由于他发现所学课程过于片面,又回到萨尔茨堡自学,在较短的时间内学完了哲学课,并教过数学和物理.

1829年至1835年他被母校聘为数学助教,其间发表了他的第一篇关于数学和电学的论文,然而这一职位为他提供的收入很少.为了改善生活状况,他计划移居美国,于是卖掉了所有财产,到达慕尼黑以后,他获得了布拉格中等技术学校数学教授职位.1841年他成为布拉格理工学院的基础数学和应用几何学教授,尽管大学的教室狭小阴暗,在这段他最幸福的创造时期内,发表了关于多普勒效应的著名论文^[1].1847年他到位于班斯卡-什佳夫尼察(Banská Štiavnica)的矿业学院任数学、物理和力学教授,

^{*} 2002-09-13收到初稿,2002-11-25修回

[†] E-mail: lzc_phy@mail.cnlu.edu.cn

由于 1848—1849 年骚乱的影响, 他回到了维也纳, 1850 年任皇家帝国大学物理学院院长、实验物理学教授. 贫穷和困苦使多普勒早年的健康受到损害, 在布拉格工作期间已患上肺病, 1852 年离开奥地利去意大利寻找恢复健康的方法为时已晚, 1853 年 3 月 17 日在威尼斯逝世.

2 多普勒效应的提出

2.1 论文的主要结论

1842 年 5 月 25 日, 在布拉格举行的皇家波希米亚学会科学分会会议上, 他提交了一篇题为“Ueber das farbige Licht der Doppelsterne und einiger anderer Gestirne des Himmels”^[1] (论天体中双星和其他一些星体的彩色光) 的论文. 在这篇论文中, 他提出了由于波源或观察者的运动而出现观测频率与波源频率不同的现象, 后来称之为多普勒效应, 称这一原理为多普勒原理. 从论文的题目来看, 他的主要出发点是要解释双星的子星和变星的颜色和大小, 因为他相信这些参数都受到星体沿视线方向运动的影响. 他相信他的原理是布拉德雷 (Bradley J) 的星体光行差现象的普遍化. 光行差是指在同一瞬间运动中的观测者所观测到的天体的视方向同静止观察者所观测到的天体的真方向之差.

他在论文的结论部分中写道: “关于运动对光学现象的影响的认识现在可以总结为以下几点:

(1) 如果一个发光物体——无论它是自发光的还是纯粹被照亮的物体, 在沿观察者的视线方向以可与光速相比拟的速度趋近我们, 或者是向后退, 那么这一运动必然导致光的颜色和强度的变化, 即

(a) 对于趋近的情况, 光强总是增加的, 而另一方面颜色发生变化, 对于正在增加的速度, 颜色从白变到绿, 由绿变蓝, 最终变为紫色.

(b) 对于后退的情况, 光强总是减弱, 且白光变黄, 然后是橙色, 最终变红. 如果原来的光已有某种颜色, 如黄色, 则颜色的变化由此开始.

(c) 如果速度达到足够大的话, 那么在这两种情况下, 白光和彩色光将都变为完全不可见, 因为在第一种情况下, 各个波动脉动的周期变得太小; 而在第二种情况下, 它们又变到太大的值, 以致于不可能看到它们. 强度的增加与减小和颜色的变化相一致, 因此这将成功地贡献给上述更早发生的总的消失的情况.

(d) 对于一个发出白光的星体的完全消失, 即使不考虑有利的强度减弱, 有 106000km/s 的速度也就

足够了. 对于一个发出均匀的黄光或红光的星体, 分别只需有 27800km/s 和 9400km/s 的速度就可以使之完全消光.

(e) 对发白光的星体, 只需具有 183km/s 的速度, 就会出现清楚的彩色; 而达到 1040km/s 就会使彩色显著而鲜明, 尽管这时看到的光仍然包含许多白光.

(f) 如果一个运动星体的速度发生变化, 那么它的颜色和光强也会变化. 因此在一段时间内, 一个星体总会依次出现光谱中的各种颜色.

(2) 如果在另一方面一个发光物体静止不动, 而代之以观察者直接朝向或背离物体非常快速地运动, 那么所有这些频率变化将会随之发生.

(3) 如果这一‘趋近’和‘背离’不是按照上述(1)和(2)假定的那样, 沿着原来视线的方向, 而是沿着与视线成一夹角的方向, 那么除了颜色和光强的变化, 星体的方向也要变化, 这样这一星体同时会在位置上发生明显变化.^[3]

2.2 对多普勒论文的理解

多普勒用数学推导得出了他的结论, 在讨论将他的原理应用到声波中时, 他指出波源朝着我们运动的速度越快, 声调将变得越高. 多普勒将光波作为“以太”中的横向位移来处理, 他将光波与声波及大海中的水波作了类比. 他将波源和观察者的运动分别单独处理, 在这两种情况下频率都发生改变. 对运动的观察者他导出的公式为 $\nu' = (1 \pm v/c)\nu_0$, 而对于运动的波源, 改变后的频率为 $\nu'' = (1 \mp v/c)^{-1}\nu_0$. 这与我们今天所用的声波中计算多普勒效应的频率公式形式完全相同.

作为 19 世纪的奥地利物理学家, 他处于一个相对封闭的环境, 再加上受当时物理学发展水平的制约, 多普勒在他的论文中作了两个不正确的假定: 一是他假定从星体发出的辐射光谱主要处于可见光区域, 这说明他当时还不知道里特 (Ritter J W, 1776—1810) 1801 年从太阳光中发现紫外线的工作, 也不知道赫歇尔 (Herschel F W, 1738—1822) 发现红外线的工作; 而且看来多普勒当时还不了解夫琅禾费 (Fraunhofer J) 对天体光谱学的研究 (1814—1823), 不了解星体发出的光有一定的光谱组成. 二是他假定星体在空间的运动速度通常可以达到光速的几分之一, 即一般星体在空间的运动具有每秒上万千米的速度, 这比一般实际星体速度大了约 10^3 的数量级. 对于通常星体的运动速度, 最大光强度位置的微小移动不会导致明显的颜色变化. 但是对于大多数类

星体, 它们有较大的红移, 如果它们的红移是宇宙学的, 则正如多普勒预言的那样, 它们正以相当大的速度在后退。

另外, 光波作为一种电磁波, 在各向同性的媒质中都以确定的波速 c 传播, 且多普勒频移仅与两者相对运动速度有关, 而不论是源还是观测者在运动。当源和观测者运动的方向与两者之间连线垂直时, 对于电磁波仍存在多普勒频移。电磁波在媒质中传播时, 观测到的频率不受媒质运动的影响。这些相对论性多普勒效应也是多普勒当时不可能预见到的。

2.3 菲佐的解释

菲佐(Fizeau A H L, 1819—1896)1848 年在巴黎科学普及协会的一次讲演中, 抓住了多普勒原理用于星光的真正本质, 并预言了星体谱线的位移。他说:“在发光物体静止时, 每一种光占据与之具有相同波长光的位置; 根据发光体的运动方向, 所有的光将按照一种方式互相替代, 谱线不再处于与原来相同的位置, 而是都朝着红的或朝着紫的方向移位。而另一方面……颜色不会移位。人们注意到这一结果仅仅依赖于发光体的速度而与其距离无关。这样的观测将会得出最远距离星体的本来速度。”他指出多普勒效应可用于确定光谱中谱线的位置, 且光源相对于观测者的移动可以由谱线相对于其标准位置的位移测出。他特别指出这对于天文学非常有用。因而后来也有人称之为多普勒—菲佐原理(Doppler—Fizeau principle)。但由于菲佐的论文到 1870 年才发表, 未能引起人们的广泛注意。

多普勒的论文发表以后, 他提出的原理立即引起了热烈的争论, 受到一些批评和质疑, 也有不少反对意见, 于是实验验证也就具有特别重要的意义。

3 实验验证

3.1 声学上的验证

对多普勒效应最早的实验验证是在荷兰进行的。皇家气象学院院长布依斯·巴洛特(Buys Ballot, 1817—1890)对多普勒星体颜色发生变化的预言提出批评。1845 年, 他在乌得勒支铁路上进行了实验, 让机车牵引一节平板车厢, 上边坐上一队小号手奏乐, 当机车快速驶来驶去时, 由一些训练有素的音乐家用自己的耳朵判断音调的变化, 然后音乐家与号手对调位置, 重新实验。实验进行了两天, 观测到了管乐器音调的明显变化, 验证了应用于声学多普勒原理的正确性。不难想象, 当时的火车速度远不及今天快, 因而验证的效果不会特别显著。

3.2 天文学上的验证

1870 年塞奇(Secchi A, 1818—1878)提出观测太阳光球的东、西两侧以测定太阳的旋转, 他的确发现了两侧谱线在光谱位置中的差异。1871 年, 沃格耳(Vogel H C, 1841—1907)用分光镜同时展示来自太阳两侧的光谱, 定量地确定了这一结果。他的结果与由太阳黑子确定的太阳转动的速度接近。这可以视为多普勒的光学效应首次被观察所证实。在后来的几年中, 一些观测者相继用多普勒原理验证处理太阳转动速度, 其中考纽(Cornu A)以用夫琅禾费 D 线位移测的结果精确而著名, 他测得的位移与预计值的差别在 3% 以内^[3]。1891 年沃格耳由观测金星(Venus)光谱片的谱线位移和该行星的已知轨道的结果相比较, 能够由反射光的天体确定多普勒效应的正确性。后来多普勒原理很快被成功地应用到一些星体的运动上。

3.3 光学的实验室验证

第一个试图用光学方法验证多普勒原理的是俄罗斯物理学家贝勒波尔斯基(Belepolsky A A, 1854—1934)。他制作的装置包括两个很像水轮机的轮子, 每个上面装有八片尺寸为 $20 \times 105 \times 3\text{mm}$ 的反射镜。轮子转动时至少有两面镜子尽可能快地沿相反方向转动, 两轮的轴经传动装置连接, 可以使一对镜面在同一时刻保持平行。轮子是用铝做的, 直径为 250mm。用 5 个调整螺丝调整镜子, 使经过 8 对镜面的几次反射后的一束光落在一台分辨本领很强的摄谱仪上。铸铁制成的支撑底座约有 80kg, 整个装置装在 1 个非常坚固的木头桌子上。用定日镜将阳光反射到仪器前的 $10 \times 20\text{mm}$ 的狭缝上。每一个轮子与 2 台直流电动机装在同一根轴上, 共有 4 台电动机, 用 50V 的蓄电池供电, 每个电机的电流约为 1.5—2A, 它们的转速可达到 6000r/min。

两个轮子的轴线是平行的, 但稍微错开一些放置, 留出光束入射和出射的空间, 一束光经过多次反射, 光强下降很多, 摄谱仪中用了三个复合棱镜, 使波长 $\lambda = 433\text{nm}$ 的光处于最小偏向角位置。他拍摄了 430—450nm 间的光谱, 成功地使像的运动速度达到了大约 1km/s , 与拍下的不运动时同一条夫琅禾费线的位置相比较, 证明了多普勒原理是可信的^[4]。

1907 年, 加利津(Galitzin B)和威尔普(Wilip J)用一个棱镜分光镜和迈克耳孙干涉仪组合, 重复了上述实验, 以汞灯为光源, 利用其 546.1nm 和 435.8nm 的谱线, 测量了有效速度为 250m/s , 并使运动方向改变时产生的谱线移位的实验值与理论值的差

别在 10% 以内. 在同一时期, 斯塔克 (Stark J), 帕邢 (Paschen F) 等人还用电子管阴极射线进行了实验.

1914—1919 年间, 法布里 (Fabry C) 和布森 (Buisson H) 作了一些用 F—P 标准具分辨多普勒位移的实验. 他们的装置极为简单, 将一个白纸盘装在奶油分离器 (cream separator) 上, 用手转动可使转速达到 200r/s, 用汞灯照亮纸盘, 从侧面观察时, 两个边缘显示出最大的多普勒位移. 标准具的干涉级次约为 240000, 对大约 100m/s 的速度, 其移位约为 1/6 个条纹, 这样一个移位测起来相对容易些^[3]. 多普勒效应的实验室验证, 为这一原理被人们普遍接受具有重要的作用.

4 多普勒效应的意义和应用

多普勒效应的提出, 是 160 年前的事. 当时光的波动理论已经被普遍接受, 但光谱技术的发展还处于初期阶段. 因而, 多普勒提出他的效应是有相当大的风险的. 他没有足够的实验数据作基础, 没有充分的事实作依据, 更没有经过适当的手段来验证, 加上多普勒本人从来就没有进入过天文台, 提出星体运动的颜色变化, 理所当然会遭到一些批评和反对. 但多普勒具有非凡的胆识和超人的智慧, 凭借波动理论的基础, 靠着严密的数学推导, 得出了这一原理, 虽然作为这一原理两条基本假定是不正确的, 因而其表述听起来过于夸张甚至近于荒唐 (例如提到向我们靠近的星体的颜色会从白变绿变蓝变紫), 但他毕竟是第一次向人们提出了这种效应的存在, 并且正确得出了计算声学频移的公式, 因而他的这一贡献是很了不起的, 为宇宙的探索打开了一个全新的篇章. 经过相对论理论的修正, 多普勒效应成为一个重要的天文学工具.

目前, 多普勒效应已在科学研究、工程技术和医疗诊断等各方面有着十分广泛的应用. 如由于分子、原子和离子的热运动产生的多普勒效应使其发射和吸收的谱线增宽, 在天体物理中可利用谱线的多普勒增宽分析恒星大气. 今天的天文学家从多普勒原理中得到了最基本的测量方法; 绝大多数的星体运动的知识, 包括双星的特征, 银河系转动的证明等等都是由这一原理中得出的. 激光多普勒测速已成为一种重要的实用技术, 是研究流体流动的强有力的手段. 它可以用于测量某些不适于或不可能用其他

方法来测量的流体速度或湍流^[9]. 医学上的多普勒彩色血流显像系统是心脏多普勒诊断领域中的一大进展, 可在二维 (B 型) 和超声心动图基础上同时显示血流方向和相对速度, 提供心脏和大血管内血流的时间和空间信息, 给人直观的血流图像, 常简称为“彩色多普勒”或“彩超”^[7].

多普勒效应获得如此广泛的应用, 发挥了如此重要的作用, 除了应当归功于多普勒之外, 还应当感谢那些工作在多个学科交叉点上的科学家, 是他们巧妙地用移植的方法进行了创新. 吸收、引入某一领域内的理论、技术或方法来解决创新难题的方法即为移植的方法, 移植是联想、想象思维和类比法在创新活动中的具体运用. 例如, 医学中的血流图像, 看来是与多普勒效应毫不相干的, 但各学科彼此之间是有联系的, 为了解决医学中的问题, 巧妙地借助了其他有关学科的知识, 利用多普勒效应、超声技术、电子技术和医学巧妙地相结合, 解决了医学上的难题. 利用移植的方法创新, 一方面可以在解决面临的问题时, 自觉寻找技术原型; 另一方面当出现新技术时, 及时将它推广到各个可能的领域. 作为物理学工作者, 我们既要学习物理学的基本原理, 抓住这些基本原理的新应用, 更可以从这些创新中得到启发.

谨以此文献给我的恩师、曾多年从事激光多普勒测速实验研究的中国科学院力学研究所的路展民先生 (1933—2001).

参 考 文 献

- [1] Hujer K. Am. J. Phys., 1955 23(1): 51
- [2] Gillispie C C. Dictionary of Scientific Biography. Vol. 4. New York: Charles Scribner's Sons, 1981. 167—168
- [3] Heamshaw J B. Vistas Astro., 1992, 35(2): 157
- [4] Belopolsky A. Astrophys. J., 1901, 13(1): 15
- [5] Gill T P. The Doppler effect. London: Logos Press, 1965. 133—142
- [6] L E 特瑞恩著, 王仕康等译. 激光多普勒技术. 北京: 清华大学出版社, 1985. 245—278 [Drain L E ed. Wang S K et al. Trans. The Laser Doppler Technique. Beijing: Tsinghua University Press, 1985. 247—278 (in Chinese)]
- [7] 范毅明等. 医用 B 超仪与超声多普勒系统. 上海: 第二军医大学出版社, 1999. 229—236 [Fan Y M et al. Medical B Ultrasonic Instruments and Ultrasonic Doppler System. Shanghai: Second Military Medicine University Press, 1999. 229—236 (in Chinese)]