

推导纵向相对论多普勒效应的新方法

黄兴滨^①

(黑龙江大学物理科学与技术学院 哈尔滨市南岗区学府路 74 号 150080)

摘要 基于狭义相对论的洛伦兹变换和同时的相对性, 本文给出了一个推导长度收缩和纵向相对论多普勒效应的新方法。该方法可更直观理解在两个惯性系中观测一个纵向光波的波长与观测沿纵向静止于某个系中杆的长度的本质区别。

关键词 狭义相对论; 洛伦兹变换; 纵向相对论多普勒效应; 长度收缩

中图分类号: O412.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-8138(2011)03-1150-04

1 引言

众所周知, 爱因斯坦于 1905 年, 在普朗克主编的德国《物理学年鉴》上发表的著名论文“论动体的电动力学”中建立了狭义相对论。文中, 爱因斯坦智慧地把相对性原理与光速不变原理这两条假设作为基本出发点。其一是: 狭义相对性原理——物理定律在一切惯性参照系中的形式都是一样的, 不存在任何一个特殊的惯性参照系。其二是: 光速不变原理——任何光线在静止的坐标系中都是以确定的速度运动着, 不管这道光线是由静止的还是运动的物体发射出来的^[1]。

狭义相对论也可应用于多普勒效应的理论, 严格的相对论多普勒效应公式可通过平面光波的相位不变原理进行推导^[2]。但该推导理论性很强, 不易于直观理解其物理过程。因此, 经常有文献误认为^[3,4]: 纯纵向多普勒效应的固有波长与观测波长的关系和长度收缩效应等价, 并以此批评相对论。

多普勒效应通过频率反映了接收器和波源之间的运动关系, 因此可以通过观测频率与固有频率的差异研究物体间的相对运动。所以多普勒效应在科学和技术诸多领域有着广泛的应用。也许最著名的应用是星系的退行红移光谱证明了宇宙正在膨胀。因此对多普勒效应的理论和应用研究一直处于很活跃的状态^[5,6]。特别是前两年黄雍熙博士对波的相位不变性提出了质疑^[7]。理由是当观测者和在介质中的光源的相对速度超过介质中的光速时, 相对论多普勒效应理论会给出一个负频率的结果。而 Gjurchinovski A. 的解释也不尽人意^[8], 进一步的讨论、研究还是必要的。

所以本文不使用相位不变原理, 而是从洛伦兹变换公式出发, 强调了同时的相对性, 利用光速不变原理推导了长度收缩公式, 并据此方法推导了纵向多普勒效应中固有波长与观测波长的理论关系。结果表明, 这种方法对在两个相对运动的惯性系中观测同一光波的波长和同一杆的长度的物理过程更直观易懂。

2 洛伦兹变换与长度收缩

为简单, 设 K 与 K' 是两个相对作匀速直线运动的一维惯性系, 分别以 $K(x, t)$ 和 $K'(x', t')$ 表示, 两系的 x 和 x' 轴重合。静止在 K 系上观测, K' 相对 K 以速度 u 沿 x 轴的正方向运动, 二原点 O

① 联系人, 电话: (0451) 86609614(835); E-mail: huangxingbin@msn.com

作者简介: 黄兴滨(1964—), 男, 黑龙江省伊春市人, 副教授, 硕士, 主要研究方向为光电检测、核测量和狭义相对论。

收稿日期: 2010-08-12; 接受日期: 2010-09-04

与 O' 在 $t = t' = 0$ 时重合。空间的某一点、某时刻发生一个事件,如一次闪光,可以分别用两个系的坐标值 $P(x, t)$ 和 $P'(x', t')$ 来描述,两套坐标值之间的关系为: $t = \gamma(t' + ux'/c^2)$, $x = \gamma(x' + ut')$ 。即洛伦兹逆变换。其中: $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$, $\beta = u/c$, c ——真空中的光速。这里要强调的是, P 和 P' 是分别静止在 K 和 K' 系上的两个点,这两个点是相对运动的,当闪光事件发生时, P 和 P' 点都与闪光点重合,因此 P 和 P' 也互相重合。如图 1 所示,并进一步假设,在 K' 系上有长度为 L_0 的杆静止其中,杆的左端与 O' 点重合、右端与 P' 点重合,因此, K' 系中 $t' = 0$ 时,杆的两个端点坐标分别为 $O'(0, 0)$ 和 $P'(L_0, 0)$ 。

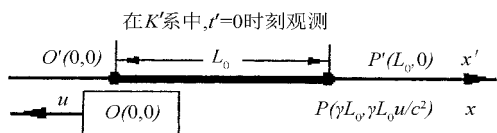


图 1 在 K' 系上 $t' = 0$ 时刻,一个长度为 L_0 的杆静止在 O' 点和 P' 点之间, O' 点和 K 系 $t = 0$ 时刻的 O 点重合, P' 点和 K 系 $t = \gamma L_0 u / c^2$ 时刻的 P 点重合。

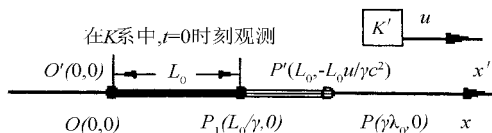


图 2 在 K 系上 $t = 0$ 时刻,观测到运动杆的左端和原点 O 重合,右端和 P_1 点重合, P_1 点和 P 点间的距离为相对运动速度 u 乘以 P' 点的运动时间 $t = \gamma L_0 u / c^2$

按照上述洛伦兹变换的两个方程可解得:在 K 系上与杆的两个端点重合的 O 点和 P 点的坐标分别为 $O(0, 0)$ 和 $P(\gamma L_0, \gamma L_0 u / c^2)$ 。其直观的物理图像是,当 K' 系的时间凝固在 $t' = 0$ 时刻,看到杆的左端点与向左以速度 u 运动的 K 系在 $t = 0$ 时刻的原点 O 重合,杆的右端点与 K 系在 $t = \gamma L_0 u / c^2$ 时刻,离原点 O 的距离为 γL_0 处的 P 点重合。这也正反映出同时的相对性,即杆的两个端点 O' 和 P' 与 K 系的 O 点和 P 点重合是两个事件,在 K' 系看,是同时发生在 $t' = 0$ 时刻的,而在 K 系看,是发生在不同的时刻, O' 点与 O 点重合发生在 $t = 0$ 时刻, P' 点与 P 点重合发生在 $t = \gamma L_0 u / c^2$ 时刻。

为导出长度收缩效应,参照经典物理对运动杆的长度测量,静止在 K 系的相同时刻观测出运动杆的长度 L_R 。根据图 1,可知在 K 系的 $t = 0$ 时刻,杆的左端点 O' 位于 O 点处,只要计算出此时的右端点 P' 的位置,则可求解出 L_R ,因此设此时 P' 点与 x 轴上的 P_1 点重合, P_1 距离 O 点的距离是 L_R ,如图 2 所示。由洛伦兹变换可知,只有当 $t = \gamma L_0 u / c^2$ 时刻, P' 点才与 P 点重合,所以物理过程是:从 $t = 0$ 到 $t = \gamma L_0 u / c^2$ 时间间隔中, P' 点从 P_1 点随 K' 系以速度 u 向右运动到 P 点,所以 P_1 和 P 点的距离为 $\gamma L_0 u^2 / c^2$ 。则有 $L_R = \gamma L_0 - \gamma L_0 u^2 / c^2 = L_0 / \gamma$ 。

这正是长度收缩效应, L_0 ——杆的固有长度; L_R ——对运动杆 L_0 在 $t = 0$ 时刻的同时观测长度。

3 纵向相对论多普勒效应公式

上述方法也可用来推导相对论纵向多普勒效应公式。把图 1 中静止在 K' 系内的杆换为单色光波的一个波长,如果光源静止在 K' 系则为固有波长,设其为 λ_0 。同样设在 K' 系中 $t' = 0$ 时刻,该波长 λ_0 的左端与 O' 点重合、坐标为 $O'(0, 0)$;右端与 P' 点重合、坐标为 $P'(\lambda_0, 0)$,见图 3。

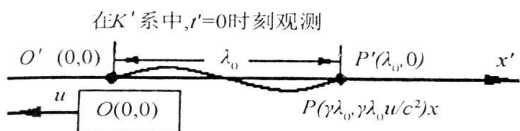


图 3 K' 系上 $t' = 0$ 时刻,一个固有波长为 λ_0 的单色光波的一个完整波长刚好位于 O' 点和 P' 点之间。

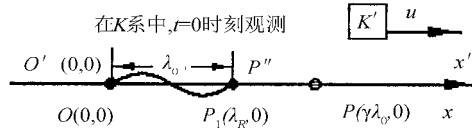


图 4 K 系上 $t = 0$ 时刻,固有波长 λ_0 的两个端点刚好与 K 系的 O 点和 P_1 点重合。 OP_1 为观测波长 λ_R 。

图 4 给出了 K 系 $t = 0$ 时刻,对固有波长 λ_0 的观测结果。设两个惯性系看到光波都是向右传播的,且 λ_0 的右端点 P'' 与 P_1 点重合, P_1 距离 O 点的距离是观测波长 λ_R 。 P'' 点与图 2 中观测静止在 K' 系中的杆的右端点的区别是:对两个系而言 P 点都是以光速 c 向右运动,而研究杆的右端点时,

在 K' 系看是静止在 P' 点, 对 K 系看是以速度 u 向右运动的。由此可以推断, 从 $t=0$ 到 $t=\gamma\lambda_0 u/c^2$ (图 1 中的 L_0 换为 λ_0) 的时间间隔中, P'' 点是从 P_1 点以光速 c 向右运动到 P 点, 所以 P_1 和 P 点的距离为 $\gamma\lambda_0 u/c$ 。由此可计算出在 K 系的观测波长为: $\lambda_K = \gamma\lambda_0 - \gamma\lambda_0 u/c = \gamma\lambda_0(1 - \beta)$ 。

这就是纯纵向多普勒效应的波长变换公式, 是观测波长 λ_K 小于固有波长 λ_0 的多普勒蓝移。虽然该公式并不可能满足长度收缩。蓝移说明光源和接收器是靠近运动。这是因为我们假设光波向右传播, 因此只能假定 λ_0 的右端为波的前端、 λ_0 的左端为波的尾端, 在 K 系接收该光波时, 接收器只能放在 P_1 点的右边, 而光源在 K' 系上, 只能位于的 λ_0 左端点 O 的左方的 K' 系上, 所以由两个惯性系的相对运动可知, 上述条件下, 必然获得观察者和光源接近的多普勒效应公式。

为得到光源远离观察者的多普勒效应公式, 我们可以假设 λ_0 向左传播, 则可推断 K 系中 $t=0$ 时刻, λ_0 的右端点一定位于 P 点的右方, 且距离 P 点 $\gamma\lambda_0 u/c$ 处, 则 $\lambda_K = \gamma\lambda_0 + \gamma\lambda_0 u/c = \gamma\lambda_0(1 + \beta)$ 。这是观测波长 λ_K 大于固有波长 λ_0 的多普勒红移。

4 结论

根据光速不变原理可以推导出洛伦兹变换。能够正确理解洛伦兹变换, 则就能够正确理解狭义相对论的精髓。洛伦兹变换的精髓在于同时的相对性。在参照系变换中, 首先选定任意一个参照系作为首选, 在首选参照系中任何事件都是同时发生的, 我们也习惯称之为静系。据此描述的任何物理过程都与我们经典的习惯相一致。而看另一个参照系则是运动的, 因此称之为动系。这时可以抓住静系中的一个主要点上的事件作为已知的切入点, 通过洛伦兹变换解出该事件在动系的空、时坐标, 然后回到动系研究其确定时刻某些点上的物理事件, 转换研究角度后, 动系则变为静系。这样处理问题简便且能直观理解物理过程的变换。

据此推导纵向多普勒效应公式的物理过程是很简洁直观的, 也可以理解纵向多普勒效应的波长变换关系与长度收缩变换关系的直观区别, 这是因为在 K 系上观测, K' 系上的杆与固有光波的波长并不等价, 杆是静止在 K' 系上的, 在 K 系观测, 杆是以速度 u 沿其 x 轴的正方向运动; 而光波不同, 无论在 K' 系上还是在 K 系上观测光波都是以光速 c 运动, 且传播方向也可以不同, 所以计算结果必然不同。因此该方法对深入学习、理解和应用狭义相对论具有一定的参考。

顺便要说明的是, 文献[3]和[4]以纵向多普勒效应的波长关系与长度收缩关系不等价来质疑狭义相对论是不对的。原因就是误以为观测一个运动的光波的波长和观测一个运动的杆都应该满足长度收缩的结果。即使相对论被证伪, 也不会错在这里。因此这是对相对论的一种误解。

参考文献

- [1] Einstein A. 爱因斯坦全集(第二卷)[M]. 范岱年, 许良英, 刘兵等译. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2002. 243—267.
- [2] 郭硕鸿. 电动力学[M]. 第2版. 北京: 高等教育出版社, 2006. 262—267.
- [3] 邓宏. 洛伦兹变换时间概念的错误[J]. 淮阴工学院学报, 2008, 17(3): 80—82.
- [4] 华棣. 运动的核弹比静止的核弹威力小——多普勒效应、红移、光行差和动体的质能当量关系[J]. 宇航学报, 2010, 31(2): 587—592.
- [5] Huang Y S, Chiue J H, Huang Y C. Relativistic Formulation for the Doppler-Broadened Line Profile[J]. *Phys. Rev. A.*, 2010, 82(1): 010102(1—4).
- [6] 崔蕴华. 关于 Doppler 效应的一种新认识[J]. 前沿科学, 2009, 3(12): 15—25.
- [7] Huang Y S. The Invariance of the Phase of Waves Among Inertial Frames is Questionable[J]. *Europ. Phys. Lett.*, 2007, 79(1): 10006(1—4).
- [8] Gjurchinovski A. Is the Phase of Plane Waves a Frame-Independent Quantity? Comment on "The Invariance of the Phase of Waves Among Inertial Frames is Questionable" by Huang Young-Sea[J]. *Europhys. Lett.*, 2008, 83(1): 10001(1—4).

New Method for Derivation of the Longitudinal Relativistic Doppler Effect

HUANG Xing-Bin

(College of Physics Science and Technology, Heilongjiang University, Harbin 150080, P. R. China)

Abstract Based on the Lorentz transformation and the relativity of simultaneity in the special theory of relativity, an method for the derivation of the longitudinal relativistic Doppler effect and length contraction is presented. According to the method, the distinction between observation of wavelength of longitudinal wave in two inertial systems and length of pole which is longitudinal static in some system, is easy to understand.

Key words Special Relativity; Lorentz Transformation; Longitudinal Relativistic Doppler Effect; Length Contraction

欢迎您投稿 “高效、保质、宽容”的中文核心期刊 《光谱实验室》

这是您的发明、发现获得“优先权”的可靠保障!

发表周期多数(50% - 75%)为 5—9 个月,

少数(20% - 45%)为 1—5 个月,极少数(0 - 7%)为 15—30 天

及时发表科技论文,是尽早实现其社会效益的前提,也是作者创造性劳动得到尊重、为在世界上取得“优先权”的可靠保障,因为发明、发现的“优先权”通常是以出版时间为准的。因此,本刊把尽快发表作者的论文,视为自己的神圣职责。

确保论文质量是论文早日发表的条件。作者发表论文总是要反映自己在工作中有所发明、有所发现和有所创造的成绩,而不是去暴露自身的“缺欠”和“毛病”,换言之,作者发表论文总是要为自己“争光”;而不是让自己“蒙羞”。因此,作者投稿之前,除了自己要反复检查外,一定要多请您周围的同事、专家挑“毛病”,把“毛病”消灭在投稿之前,再投本刊才能发表得快。如果本刊挑出毛病,再请作者修改,反复“折腾”,不仅消耗双方精力,而且必然延长发表时间。保证质量的基本要求就是论文要做到“齐、清、定”。“齐”即文字、表格、图片等齐全,并符合本刊《投稿须知》的各项要求;“清”即文字、图片打印清楚,不得有模糊不清的图片(包括上面的文字和数字);若有彩色图片及彩色曲线,请转化为清晰的黑白图片和黑色曲线,并清除图片和曲线上的背景,便于排版和复制;“定”即做到稿件内容(文字、表格、图片等)完整,无需再作增删修改。

来稿请用 Word 排版,用电子邮件发到本部电子信箱(E-mail: gpsys@263.net)。

本刊收到作者来稿后,都会在 3 日(遇公休日顺延)内发出“收稿通知”。因此,作者发送稿件后 7 日以上都没有消息,一定要及时来电查询。

一篇论文出版,常常需要反复沟通“作者→编辑部→审者→编辑部→作者”之间的联系,其中与作者的联系是最重要的一环,一旦脱节,必然中断编辑过程。因此作者来稿时,务必将联系人的正确的姓名和详细地址、办公室电话、手机号码、传真号码和电子信箱等(通讯方式要尽可能全)告诉编辑部,以便能与您及时联系。否则,由此而产生的不良后果由作者自己负责。

本刊发表论文的宗旨是交流学术,提倡“高效、保质、宽容”的精神,欢迎作者将被他刊判为“没有发表价值”的佳作再投本刊,而不是为了应付“评职称”、“拿文凭”。

《光谱实验室》编辑部