

横向多普勒效应新公式与爱因斯坦公式符合实验的精度对比

江正杰¹, 李辉²

¹ 山东工商学院人文与传播学院 山东烟台

² 烟台大学物理与电子信息学院 山东烟台

【摘要】单纯考虑光源运动速度对发射光子的频率和动量、能量的影响,在满足光速(相对于以太参考系)恒定和光子质量可变的情况下,可以通过光子动量矢量合成法则进行处理,由此得到多普勒效应公式,并在特殊情况下得到横向多普勒效应公式。从新的横向多普勒效公式的展开式可见,新公式与爱因斯坦公式都有二阶项,但是新公式的四阶项为正数,爱因斯坦公式的四阶项为负数,可见新公式的理论值要比爱因斯坦公式大一点。在此基础上,分析狭义相对论的横向多普勒效应的实验数据,发现几乎所有(五个)狭义相对论的横向多普勒效应实验的观测值都比理论值大一点,显示出可能存在系统误差。依据横向多普勒效应新公式得到的理论值都比爱因斯坦公式的理论值大一点,因此也更接近于观测值,故其理论值与观测值都符合得更好。进一步分析显示,随着光源速度更接近于光速,狭义相对论的横向多普勒效应公式的四阶效应项是沿着扩大偏差的方向;而新公式的四阶效应项是沿着缩小偏差的方向。这个事实显示,新的横向多普勒效应公式有着更为深刻的物理机制,这是狭义相对论的横向多普勒效应公式所没有的。根据后者,横向多普勒效应应有所谓“经典项”和“时间膨胀效应”贡献的区别。而根据新的横向多普勒效应公式,横向多普勒效应的本质只是动量合成机制的结果。这似乎意味着一个对狭义相对论效应的物理意义进行解释的新方法,也似乎是走出狭义相对论的一个突破口。

【关键词】光子动量合成法则;横向多普勒效应;狭义相对论修正;系统误差;四阶效应

【收稿日期】2025 年 3 月 15 日

【出刊日期】2025 年 4 月 12 日

【DOI】10.12208/j.pstr.20250010

Comparison of the experimental accuracy between the new transverse doppler effect formula and Einstein's formula

Zhengjie Jiang¹, Hui Li²

¹*School of Humanities and Communication, Shandong Technology and Business University, Yantai, Shandong*

²*School of Physics and Electronic Information, Yantai University, Yantai, Shandong*

【Abstract】By considering only how the velocity of a light source affects the frequency, momentum and energy of the emitted photons, and assuming that the speed of light (relative to the ether frame) is constant while the photon mass is variable, one can treat the problem through the vector-synthesis rule for photon momentum. This yields a Doppler-shift formula that, in the special case of observation perpendicular to the source velocity, reduces to a new transverse Doppler-effect (TDE) formula. Expanding this new formula in powers of v/c shows the same second-order term as Einstein's special-relativistic (SR) expression, but its fourth-order coefficient is positive, whereas the SR coefficient is negative; consequently the new prediction is slightly larger than the SR one. A re-analysis of the five classic TDE tests of special relativity reveals that every measured frequency shift is systematically larger than the SR prediction, suggesting the presence of a common, unaccounted-for error. Because the new formula gives values that

作者简介: 江正杰(1968-), 山东工商学院人文与传播学院副教授, 工学学士, 哲学硕士, 研究方向: 自然哲学、基础物理等; 李辉(1979-), 烟台大学物理与电子信息学院副教授, 理学博士, 研究方向: 粒子物理与场论, 引力理论与宇宙学。

are uniformly higher than the SR values, it agrees noticeably better with the observed shifts. Moreover, as the source speed approaches c the fourth-order term of the SR formula drives the predicted shift farther from the data, while the fourth-order term of the new formula pulls it closer. This behavior indicates that the new formula rests on a deeper dynamical mechanism than the SR expression. Within special relativity the TDE is ascribed to the combination of a “classical” term and a “time-dilation” contribution; in the new approach it emerges solely from momentum composition. The result suggests both a fresh physical interpretation of what are usually called relativistic effects and a possible route beyond the confines of special relativity.

【Keywords】 Photon momentum composition rule; Transverse Doppler effect; Special relativity correction; systematic error; Fourth-order effect

1 新多普勒效应公式提出的问题

我们知道, 多普勒效应 (Doppler Effect) 作为一种物理现象, 描述的是波源或观察者发生相对移动时, 观察者接收到的波的频率与波源发出的频率之间发生的变化。如果波源和观察者相互靠近, 观察者接收到的频率会变高; 如果波源和观察者相互远离, 观察者接收到的频率会变低。

关于多普勒效应, 最早发现的是声波的多普勒效应, 后来发现光波也有类似的多普勒效应。经典力学的波动理论只是给出了光的纵向多普勒效应的一阶效应 (V/c), 类似于声波。爱因斯坦利用其狭义相对论得到的洛伦兹变换推导出的纵向多普勒效应除了有一阶效应外, 还有二阶效应 ($V^2/2c^2$), 此外爱因斯坦还得到了横向多普勒效应。

相对论性多普勒效应的一般公式为:

$$\nu = \nu_0 \frac{\sqrt{1-\beta^2}}{1-\beta\cos\theta} \quad (1)$$

其中: $\beta = V/c$, V 为光源相对于观测者的速度, ν 为观测到的频率; ν_0 为光源静止时的频率; θ 为光源运动方向与观测方向的夹角。

纵向多普勒效应公式为 $\theta = 0$ 或 $\theta = 2\pi$ 时的情况:

$$\nu = \nu_0 \sqrt{\frac{c \pm V}{c \mp V}} \quad (2)$$

横向多普勒效应公式为 $\theta = \pi/2$ 的情况:

$$\nu = \nu_0 \sqrt{1-\beta^2} \quad (3)$$

(3) 式的展开式为:

$$\nu = \nu_0 \left(1 - \frac{1}{2}\beta^2 - \frac{1}{8}\beta^4 - \dots \right) \quad (4)$$

在 $\beta \ll 1$ 的情况下, (3) 式可以近似地写为:

$$\nu = \nu_0 \left(1 - \frac{1}{2}\beta^2 \right) \quad \beta \ll 1 \quad (5)$$

一般认为其中, ν_0 是经典项, 表示未受影响的原始频率; $\beta^2/2$ 是时间膨胀项, 反映了相对运动导致的时间膨胀效应。

狭义相对论中的横向多普勒效应是指当光源和观察者在垂直于光源运动方向上相对运动时, 观察者接收到的光的频率与光源发出的光的频率之间的关系。这个公式表明, 当光源和观察者在垂直于光源运动方向上相对运动时, 观察者接收到的光的频率会比光源发出的光的频率低, 且这种频率的降低与光源相对于观察者的速度有关。当 V 趋近于 c 时, ν 趋近于 0, 即观察者几乎接收不到光。当 $V = 0$ 时, $\nu = \nu_0$, 即观察者接收到的光的频率与光源静止时发出的光的频率相同。

但是笔者直接通过将动量合成法则应用于光源的运动, 引起了其所发出的光子的频率或周期的变化的情景, 同样给出了光的多普勒效应的一般公式。这个公式与爱因斯坦的光的多普勒效应的一般公式有所差别, 但是同样有纵向和横向多普勒效应, 且其也都有二阶和二阶以上的效应。

笔者避开狭义相对论, 直接利用光子的动量合成法则, 一步就得到了最一般的动量矢量表达式。笔者在 20 年前就在《道路》^[1]一书以及其后的多篇论文^[2-4]中, 用光子的动量合成法则处理因光源从静止开始运动引起其所发出的光的频率或动量变化的问题。这样也就留下一个不得不解决的问题: 笔者得到的多普勒效应公式与爱因斯坦公式, 哪一个更符合实验呢?

最近, 作者通过最新版的张元仲的专著《狭义

相对论实验基础》^[5], 找到从最早的横向多普勒效应验证实验, 到最近的实验。分析的结果显示, 笔者的多普勒效应公式, 比爱因斯坦公式更加精确地符合实验的结果。这个结果或许表明, 光的多普勒效应或许有比狭义相对论所揭示的更深刻的物理机制。

2 新多普勒效应公式的推导

让我们来看一个由光源发出的光子的动量合成的例子, 如下图 1:

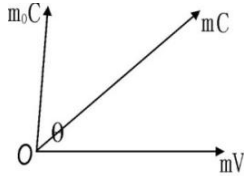


图 1

设有一个相对静止参照系 (绝对空间或其他参照系也是近似一样) 的光源 O 向一个方向发出一束相同频率 ν_0 和波长 λ_0 的光子, 其中一个光子的质量 (即所谓动质量) 为 m_0 , 速度为 $\mathbf{C}$, 则其动量矢量为 $m_0\mathbf{C}$ 。当光源相对于原来静止的光源 O 获得一个速度 $\mathbf{V}$ 时, 根据多普勒效应原理, 在光源的相同位置和方向上所发出的光子必定要改变其运动方向和频率, 同时也改变其能量及质量。设改变后的质量为 m 、频率为 ν 、波长为 λ , 速度仍为 c (依光速在真空中不变的原理), 则其动量与原光速 c 与 $\mathbf{V}$ 的夹角为 θ 。

在光源加速过程中, 光子在光源运动方向上所获得的动量, 光子质量乘以光源速度。根据动量合成规律, 有下列关系:

$$m\vec{c} = m_0\vec{c} + m\vec{V}$$

$$(mc)^2 = (m_0c)^2 + (mV)^2 + 2m_0mcV\cos\theta$$

解得:

$$m = \frac{m_0c[V\cos\theta + (c^2 - V^2\sin^2\theta)^{1/2}]}{c^2 - V^2} \quad (7)$$

于是得到改变后的光子的质量 m 与光子的初始质量 m_0 及 θ 和 V 的关系式。当 $\theta = \pi/2$ 时, 得:

$$m = \frac{m_0c\sqrt{c^2 - V^2}}{c^2 - V^2} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} \quad (8)$$

这与相对论所得到的质量增加效应公式形式上完全一样。

我们可以将式 (6) 中的 θ 化为与式 (1) 中的 θ 含义相同的角, 设为 α , 如下图 2 所示:

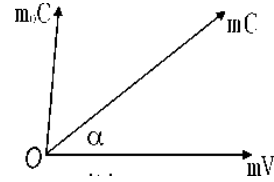


图 2

则有

$$m\vec{c} - m\vec{V} = m_0\vec{c} \quad (9)$$

即:

$$m^2c^2 + m^2V^2 - 2m^2cV\cos\alpha = m_0^2c^2 \quad (10)$$

求得:

$$m = \frac{m_0c}{(c^2 + V^2 - 2cV\cos\alpha)^{1/2}}$$

考虑到 $mc^2 = h\nu$, 用 $m = h\nu/c^2$ 代入, 得:

$$\frac{h\nu}{c^2} = \frac{\frac{hv_0}{c}}{(c^2 + V^2 - 2cV\cos\alpha)^{1/2}}$$

$$\nu = \frac{v_0c}{(1 - 2V\cos\alpha/c + V^2/c^2)^{1/2}} \quad (11)$$

当 $\alpha = \pi/2$ 时, 得:

$$\nu = \frac{v_0}{(1 + V^2/c^2)^{1/2}} \quad (12)$$

将 (12) 式展开, 得:

$$\nu \approx v_0(1 - \frac{1}{2}\beta^2 + \frac{3}{8}\beta^4 - \frac{5}{16}\beta^6 \dots) \quad \beta \ll 1 \quad (13)$$

将 (13) 式与 (4) 式对比, 可知两者皆有相同的二阶效应, 但 (4) 式的四阶项比 (13) 式略小。

式 (12) 与式 (3) 究竟哪一个更为精确, 需要通过计算对比新公式与狭义相对论的横向多普勒效应公式在符合实验的时候偏差大小才能看出来。但是, 从直观来看也可以知道, 是笔者提出的新公式更加接近于实验的观测值。因为由本文下节可知, 所有的实测值都是负值, 且所有的爱因斯坦公式的预测值都偏在实测值的一边, 即比实测值小一些 (即绝对值要比实测值大一些)。而 (13) 式的四阶项为正数 ($+3\beta^4/8$), (4) 式的四阶项为负数 ($-\beta^4/8$), 即 (13) 式的四阶项减去 (4) 式的四阶项为 $+\beta^4/2$ 。

由此可以判断, 所有的横向多普勒效应实验数据都表明, 新公式的预测值都更接近于实测值。具体精确多少要具体计算。

3 新公式与爱因斯坦公式的预测值对比计算方法

笔者得到多普勒效应新公式(11)与(12)之后, 并没有立刻做关于新公式与爱因斯坦公式的预测值对比计算这一项工作, 但是一直相信新公式更为精确, 因为它是基于更为简单的物理原理的引入。而爱因斯坦公式(4)是借助于洛伦兹变换得到的, 其单纯取决于相对运动的物理内涵并不清晰且富有争议。不久之前受到李辉博士的提醒, 开始借助于张元仲的专著《狭义相对论实验基础》并结合 DeepSeek 来做这个工作。

我们找到了所能找到的横向多普勒效应验证实验的数据, 逐一检查每个实验数据, 对比这两个公式的预测值哪一个更精确符合实测值。由于两个公式都有相同系数的二阶效应项, 故要精确加以对比, 就至少还需要算出四阶项。例如, 对于 Kündig 实验

以爱因斯坦公式计算的预测值:

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = -\frac{1}{2} \times 0.01^2 + \frac{1}{8} \times 0.01^4 - \frac{1}{16} \times 0.01^6 \dots = -5.0 \times 10^{-5} - 1.25 \times 10^{-9} - 6.25 \times 10^{-14} = -5.00012500625 \times 10^{-5}$$

以新公式计算的预测值:

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = -\frac{1}{2} \times 0.01^2 + \frac{3}{8} \times 0.01^4 - \frac{5}{16} \times 0.01^6 \dots = 4.9996750325 \times 10^{-5}$$

计算偏差百分比的公式为:

$$\text{偏差百分比} = \frac{|\text{预测值} - \text{实测值}| \times 100\%}{\text{实测值}}$$

$$\text{新公式偏差百分比} = \frac{|-0.000049996750325 - (-0.000048)|}{0.000048} \times 100\% = 4.15989651\%$$

$$\text{爱因斯坦公式偏差} = \frac{|-0.0000500012500625 - (-0.000048)|}{0.000048} \times 100\% = 4.169270959\%$$

4 新的横向多普勒效应公式和爱因斯坦公式符合于实验数据的精度比较

通过参考以上计算方式我们可以知道, 根据新的横向多普勒效应公式计算得到的二阶加四阶频移的理论值, 肯定比根据爱因斯坦的横向多普勒效应的公式得到的二阶加四阶频移的理论预测值要大一些, 因为前者的四阶效应是正数, 后者的四阶效应是负数。但是根据以上计算可以看出, 两者只是差别一个很小的值, 对于每一个实验, 如果我们如果

(1963) 中的铁-57 核转速 $v=0.01c$, 需要分别计算爱因斯坦公式和新公式的四阶项, 并确保符号和系数正确。

爱因斯坦公式(公式3)的六阶展开式为:

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = -\frac{1}{2}\beta^2 + \frac{1}{8}\beta^4 - \frac{1}{16}\beta^6 \dots$$

新公式(公式12)的六阶展开式为:

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = -\frac{1}{2}\beta^2 + \frac{3}{8}\beta^4 - \frac{5}{16}\beta^6 \dots$$

接下来, 我们要求偏差分析精确到小数点后尽可能多的位数, 以体现微小差异。需要确保所有计算步骤都保持高精度, 避免四舍五入或截断误差影响最终结果。针对每个实验, 按照以下步骤, 计算预测值和偏差百分比:

以 Kündig 实验(1963)为例, 参数 $v=0.01c$, 实测值: -4.8×10^{-5} 。

一一将其计算出来, 加以对比, 意义不大, 因此我们只是采取一个对比法, 将新公式的理论值与爱因斯坦公式的理论值加以对比, 然后再与实验观测值对比, 只要显示哪一个值更接近实验观测值, 就胜出。由于笔者的外语文献能力有限, 故将更精确的计算工作留给更加专业的人士进行。笔者只是在张元仲的专著《狭义相对论实验基础》的基础上, 加以简单的对比。由于四阶效应实在是一个很小的值, 只要显示新横向多普勒效应公式更加接近于观测值, 就

可以证明其精确度至少不输于爱因斯坦公式。如果实验进一步显示爱因斯坦公式存在系统的误差, 新公式的优势就更加明显。

笔者完全根据张元仲的专著提供的文献线索, 找到原文, 并结合 AI 的翻译和分析结果, 了解实验的基本情况, 核实实验结果的数据, 然后重点是对比理论值与实验观测值哪一个值更大, 如果显示观测值略大, 即可以判断, 新公式更加精确地符合实验观测值。

张元仲的专著中有一个列表 9.4, 列出了全部时间膨胀实验的结论数据。由于横向多普勒效应实验属于时间膨胀实验, 故张元仲的专著将横向多普勒效应实验数据也列入其中。张元仲用一个小节(《横向二阶多普勒频移》)专门谈到了横向多普勒效应实验的验证实验^[6], 但是具体的实验数据不详, 笔者就根据其提供的参考文献寻找原文。

综合起来说, 属于横向多普勒效应实验论文共有 5 篇, 其余还有与横向多普勒效应相关, 但没有横向多普勒效应的实验论文, 笔者就将其忽略不计。

4.1 第一篇论文^[7]: 作者是 Hay, Schiffer, Cranshaw, Egelstaff (英国哈维尔原子能研究所), 于 1960 年发表在《Physical Review Letters》上, 论文标题为:

《Measurement of the Red Shift in an Accelerated System Using the Mössbauer Effect in Fe⁵⁷》(《使用 Fe⁵⁷ 的穆斯堡尔效应在加速系统中测量红移》)。

就这个实验的直接目的而言是验证等效原理的一个推论: 在加速参考系中, 光子频率应发生红移(即时间膨胀效应), 其大小应与等效引力场中的引力红移相同。这是首次在实验室加速系统中验证引力红移类效应的实验之一, 为后来的引力红移、引力时间膨胀实验奠定了基础。

其实验方法: 利用 Fe⁵⁷ 的 14.4 keV γ 射线和 Mössbauer 效应测量频率变化。将 Co⁵⁷ 源镀在铁圆柱表面, 外围是一个 Lucite 圆筒, 内贴富集 Fe⁵⁷ 的铁箔作为吸收体。

整个装置安装在中子斩波器驱动单元上, 最高转速 500 转/秒。通过测量透射 γ 射线计数率随转速的变化, 推断频率偏移。吸收体线速度 $7 \times 10^{-7}c$ 。

理论预测: 在旋转系统中, 由于向心加速度等效为引力场, γ 射线应发生红移, 其相对频率偏移为:

$$\Delta\nu/\nu = -v^2/2c^2 = (R_1^2 - R_2^2) \omega^2 / 2c^2 = -2.44 \times 10^{-20} (\omega)^2$$

实验观测: 在 500 rev/s 转速下, 计数率变化与理论曲线吻合。共振线全宽为 0.38 mm/s(速度单位)。

实验数据与理论曲线在误差范围内一致(统计误差已标出)。

结论: 实验首次在加速系统中观测到光子频率红移。结果与狭义相对论的时间膨胀/等效原理预测一致。验证了: 加速度系统等效于引力场, 光子在其中会发生可测量的频率偏移。这个频率偏移完全符合横向多普勒效应的条件。

关于这个实验结果中观测值比理论值大还是小? 这个实验论文没有给出“观测值系统性地偏大或偏小”的结论。论文中只给出了实验点与理论曲线的对比图(见本文图 3), 并说明:

“The curve calculated from these parameters is also shown in Fig.2... the observed effect is in able agreement with expectations.”(根据这些参数计算出的曲线也显示在图 2 中观测到的效应与理论预期非常吻合。)

文中没有列出具体的数值偏差或“观测值-理论值”的差值表, 也没有说观测值系统性地偏大或偏小。从图 3 上看, 实验点在理论曲线两侧随机分布, 在统计误差范围内没有系统偏移。因此, 在这个实验中, 观测值与理论值一致, 没有系统性地偏大或偏小。在实验误差范围内, 两者吻合良好, 故作者认为实验验证了理论预测。

但是, 笔者发现, 从观测值与理论预测值的对比图(见本文图 3)可以看出, 共有 6 对对比值, 其中三个观测值落在理论值的曲线之中, 且距离曲线的距离都一样, 其中两个观测值落在理论值的曲线上方, 一个观测值落在理论值的曲线下方。因此就平均值来看, 观测值还是落在理论值曲线的上方, 即观测值还是比理论值略大一点点。

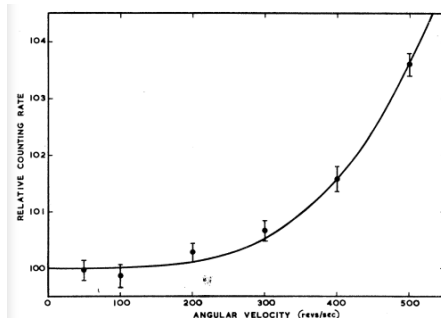


FIG. 2. Comparison of the calculated curve with experimental points. The statistical errors of each point are indicated. The curve was calculated from the parameters given in the text.

图 3 论文《使用 Fe⁵⁷ 的穆斯堡尔效应在加速系统中测量红移》中的实验数据图

而根据新横向多普勒效应公式计算的理论值结果是, 计算值比根据爱因斯坦的横向多普勒效应公式的理论值大一点点, 这个大的值由四阶 ($+ \beta^4/2$) 及四阶以上的效应提供, 是一个很小的值, 因此也可以认为新公式更精确符合这个实验的观测值。

4.2 第二篇论文^[8]: 作者为 Walter Kündig, 标题为《Measurement of the Transverse Doppler Effect in an Accelerated System》(《在加速系统中横向多普勒效应的测量》) 发表于 The Physical Review (《物理评论》) 1963 年 3 月 15 日, 第 129 卷第 6 期。

这个实验利用超离心机转子, 测量了在旋转系统中 Fe⁵⁷ 的 14.4 keV 穆斯堡尔吸收线的移动, 作为角速度 ω 的函数。Fe⁵⁷ 吸收体被放置在距离转子轴 9.3cm 的半径处, Co⁵⁷ 源安装在一个压电陶瓷换能器上, 位于转子中心。通过施加三角波电压, 使射线源相对于吸收体移动, 从而在不同角速度下观测整个共振线。射线源飞行速度 $10^{-7}c$ --- $10^{-6}c$ 。实验测得的横向多普勒频移与相对论理论的预测在 1.1% 的实验误差范围内一致。文中还讨论了可能的系统误差来源。

理论预测 (相对论横向多普勒效应):

$$(E_A - E_S) / E_S = R_A^2 \omega^2 / 2c^2$$

实验拟合结果 (最终公式): $(E_A - E_S) / E_S = -(1.0068 \pm 0.011) R_A^2 \omega^2 / 2c^2$

其中误差包括统计误差 (0.77%) 和系统误差 (0.28%)。

即观测值比理论值大约 0.68%, 但此偏差在实验误差范围内, 因此该文认为与相对论预测一致。这是当时对横向多普勒效应最精确的实验验证, 精度达 1.1%。该实验观测值与理论值的对比结果如下表 1。

表 1 Kündig 实验的观测值与理论值对比数据表

项目	数值
理论系数	1.0000 (定义值)
实验系数	1.0068 $\pm$ 0.011
偏差方向	观测值略大 (+0.68%)
偏差是否显著	否 (在 $\pm 1.1\%$ 误差范围内)

但是, 根据新横向多普勒效应公式计算得到的理论预测值比爱因斯坦的理论预测值大一点点, 这个大的值由四阶 ($+ \beta^4/2$) 及四阶以上的效应提供,

是一个很小的值, 因此根据表 1 的结果可以认为新公式更精确符合 Kündig 实验的实验观测值。

4.3 第三篇论文^[9]: 作者为 Champeney, Isaak, Khan, 于 1963 年发表在《Nature》(Nature, Vol. 198, p. 1186 (1963)) 上, 标题为《Measurement of Relativistic Time Dilatation using the Mössbauer Effect》(《利用穆斯堡尔效应测量相对论时间膨胀 (横向多普勒效应)》) 的实验。

实验目的: 通过穆斯堡尔效应测量横向多普勒效应 (即相对论时间膨胀), 验证狭义相对论的预测: 在旋转系统中, 位于不同径向位置的时钟 (原子核) 由于速度不同, 会表现出相对频率偏移。

实验装置与方法:

源: 使用钴-57 (Co⁵⁷) 扩散在铁-56 箔中, 安装在旋转系统上, 发出 14.4keV γ 射线。

吸收体: 富集铁-57 (81%) 不锈钢箔, 固定在转子一端。测量横向多普勒效应导致的共振吸收变化。

转子系统: 空心管状转子, 长约 8cm, 绕中心轴旋转。射线源固定在转子中心, 吸收体位于一端。转子转速可达数千转/秒。

探测器: 两个计数器分别测量通过共振吸收体和非共振吸收体的 γ 射线强度。通过对比旋转时与线性移动时的穆斯堡尔谱, 提取频率偏移。

对比实验: 使用线性驱动装置缓慢移动吸收体, 模拟一阶多普勒效应, 用于校准和对比。

利用穆斯堡尔效应极高的频率分辨率, 测量由于相对速度引起的 γ 射线频率偏移。

改文在计算中引入参数 K 表示实验值与理论值的比值, 定义参数 K 表示实验值与理论值的比值: $\Delta v/v = K v^2 / 2c^2$,

其中 v 是吸收体相对于射线源的线速度。吸收体线速度 $10^{-7}c$ -- $10^{-6}c$ 。

实验结果测得: $K = 1.03 \pm 0.03$

结论: 观测值比理论值 ($K=1$) 大约 3%, 但在误差范围内, 与相对论预测一致。

这是当时对横向多普勒效应最精确的实验验证之一。此实验设计巧妙, 利用旋转系统模拟加速度场, 验证了时间膨胀效应, 即横向多普勒效应。为后续更高精度的相对论实验奠定了基础。此实验结果理论预测值与实验拟合值对比汇总如下表 2:

表 2 实验结果理论预测值与实验拟合值对比

项目	数值
理论预测值	$K=1.00$ (定义值)
实验拟合值	$K=1.03\pm0.03$
偏差方向	观测值偏大 (+3%)
是否在误差范围内	是 ($\pm 3\%$ 误差)

结论: 本次实验测得 $K=1.03\pm0.03$, 即观测值比理论值大约 3%, 但该偏差在误差范围内, 与相对论预测一致。

但是根据新横向多普勒效应公式计算得到的理论预测值比爱因斯坦的理论预测值大一点点, 这个大的值由四阶 ($+\beta^4/2$) 及四阶以上的效应提供, 是一个很小的值, 因此可以认为新公式更精确符合本次实验的实验观测值。

4.4 第四篇实验论文^[10]: 作者为伯明翰大学物理系的 D. C. Champeney, G. R. Isaak, A. M. Khan, 论文标题《A time dilatation experiment based on the Mössbauer effect》(《基于穆斯堡尔效应的时间膨胀实验》(1965))。

该文核心思想是: 将 ^{57}Co 源与 ^{57}Fe 吸收体分别固定于高速转子的中心与顶端(或反之), 利用 14.4keV γ 射线的穆斯堡尔共振测量转子转速 ω 引起的横向多普勒频移(即相对论时间膨胀)。通过对比不同转速下的透射计数率, 并与线性一阶多普勒校准曲线拟合, 提取二阶频移系数 K 。

该文描述了一系列实验, 通过在高速旋转的转子顶端测量时间膨胀效应(即横向多普勒效应), 并与相对论理论的预期进行比较。实验中, 穆斯堡尔源和吸收体分别安装在转子的中心和顶端(或反之), 通过测量 γ 射线透射率随转速的变化来推导时间膨胀。文章介绍了一种使用具有适当固有频移的源-吸收体组合, 使实验具有“零实验”特征的方法。 ^{57}Co 和 ^{57}Fe 的线速度 10^6c

实验结果为: 时间膨胀比理论预期大 $2.1\% \pm 1.9\%$ 。实验结果汇总如下表:

表 3 实验观测值与理论预测值的对比表

量	数值
理论预期(相对论)	$K = 1.0000$ (定义值)
实验综合拟合结果	$K = 1.021 \pm 0.019$

偏差方向与大小: 实验观测值比理论值大 2.1%; 不确定度: $\pm 1.9\%$ (1σ); 偏差在 1σ 范围内, 与理论一致。

实验测得的时间膨胀系数 K 比相对论预言值高 2.1%, 差异完全落在 $\pm 1.9\%$ 的误差带内, 因此结果支持相对论预言。

但是根据新横向多普勒效应公式计算得到的理论预测值比爱因斯坦的理论预测值大一点点, 这个大的值由四阶 ($+\beta^4/2$) 及四阶以上的效应提供, 是一个很小的值, 因此可以认为新公式更精确符合本次实验的实验观测值。

4.5 第 5 篇实验论文^[11]: 作者为 J.J. Snyder 和 J.L. Hall, 作者单位: Joint Institute for Laboratory Astrophysics (JILA), NBS 与 University of Colorado (联合实验室天体物理研究所(JILA), 美国国家标准局(NBS)与科罗拉多大学)。标题为《A NEW MEASUREMENT OF THE RELATIVISTIC DOPPLER SHIFT》(1975) (《相对论性多普勒频移的新测量》)。发表于 1975 年法国 Megeve 召开的第二届激光光谱学国际会议论文集, 其中包含一篇关于横向多普勒效应(transverse Doppler effect)的实验研究论文: 该实验利用激光饱和吸收技术(saturated absorption spectroscopy)测量了高速 Ne 原子束中横向多普勒效应引起的频率偏移。

在该论文中, 作者报告了使用激光饱和吸收技术对高速原子束中的横向多普勒效应进行的高精度测量。此前的光学测量虽然使用了类似的原子束速度, 但受限于普通多普勒展宽, 精度仅为百分之几。穆斯堡尔实验通过使用极高光谱分辨率获得了类似精度, 但受限于机械转子所能达到的低速。介子实验虽然具有理想的 v/c 值, 但在飞行时间和衰变时间测量上难以达到极高精度。

本次实验基于如下观察: 在饱和光谱中观测到的粒子不受一阶多普勒频移和展宽的影响, 然而横向效应仍然存在。它源于相对论性时间膨胀: 在实验室参考系中观测到运动参考系中事件发生的时间间隔被拉长。一个合适的“时钟”可由运动原子中两个量子态之间的跃迁提供。由于相对论性时间膨胀效应, 我们发现, 为了激发运动原子, 所需施加的频率在实验室参考系中将相对于原子的本征频率发生红移。

实验原理：实验中使用一束能量高达 50 keV 的亚稳态氖原子(Ne)束，其速度高达约 1.2×10^6 m/s。通过激光饱和吸收技术，我们观测了 588nm 的跃迁，并利用其荧光信号识别出具有零一阶多普勒频移的原子。

由于相对论性时间膨胀效应，原子“时钟”的频率在实验室参考系中将发生红移。对于 50 keV 的氖原子，这一频移约为 1368MHz。

实验设置要点：使用 50 keV 的 Ne^+ 离子束，通过电荷交换形成中性亚稳态 Ne 原子束；原子速度约为 $v \approx 1.2 \times 10^6$ m/s，即 $\beta = v/c \approx 4.1 \times 10^{-3}$ ；利用频率稳定的染料激光器（输出功率约 100 mW，波长 588 nm）激发 Ne 原子；通过饱和吸收共振测量原子跃迁频率；激光束与原子束垂直交叉，形成驻波；使用高精度度法布里-珀罗腔作为频率参考；通过扫描加速电压使原子跃迁频率与激光频率匹配；使用光电倍增管检测 660 nm 的荧光信号；实验测量了相对论性时间膨胀导致的频率偏移，即横向多普勒效应。

结果与对比：实验测量了相对论性多普勒频移引起的频率偏移；理论值：-4.27GHz；实验观测值：-4.26 ± 0.05GHz；相对误差：< 0.3%。

结论：本实验首次以激光光谱技术高精度地验证了横向多普勒效应，观测结果与狭义相对论的理论预测高度一致，为相对论提供了强有力的实验支持。这一成果也标志着激光光谱学在基础物理研究中的巨大潜力。

运动原子对激光的饱和吸收（横向多普勒效应）根据论文中的实验结果，观测值与理论预测值非常接近，但略微偏大（即观测到的频率偏移比相对论预测值稍大）。不过，这个偏差在实验误差范围内，因此并不构成对相对论的偏离，而是验证了横向多普勒效应的正确性。

爱因斯坦公式的理论预测值与实验观测值对比

爱因斯坦横向多普勒效应理论值：横向多普勒效应引起的频率偏移为：

$$\Delta \nu_{\text{theory}} = -\nu_0 \cdot \beta^2/2$$

其中： ν_0 为静止原子跃迁频率（ $\approx 5.087 \times 10^{14}$ Hz，对应 588nm）；

$$\beta = v/c \approx 4.1 \times 10^{-3};$$

代入得：

$$\Delta \nu_{\text{theory}} \approx -5.087 \times 10^{14} \times 21 \times (4.1 \times 10^{-3})^2 \approx -4.27 \times 10^9 \text{ Hz} = -4.27 \text{ GHz}$$

实验测得的频率偏移为：

$$\Delta \nu_{\text{obs}} = -4.26 \pm 0.05 \text{ GHz}$$

表 4 理论预测值 vs 实验观测值对比总结

项目	数值 (GHz)	相对误差
理论值	-4.27	—
实验观测值	-4.26 ± 0.05	<0.3%

结论：观测值与理论值的相对偏差：< 1%。在拟合结果中，系统误差主导因素为：激光束与原子束的非理想垂直角误差 $\alpha = (2.5 \pm 1.0) \mu\text{rad}$ 。该误差项在频率拟合公式中引入了一个小量修正，使得实验观测值略大于爱因斯坦公式的理论预测值。该实验首次以激光光谱学方法高精度验证了横向多普勒效应，观测值与理论值吻合至 < 0.3%，为狭义相对论提供了强有力的实验支持。在 0.5% 的精度以内观测值与相对论多普勒效应公式预言值符合。

但是根据新横向多普勒效应公式，计算得到的理论预测值比爱因斯坦的理论预测值大一点点，这个大的值由四阶（ $+\beta^4/2$ ）及四阶以上的效应提供，是一个很小的值，因此可以认为新公式更精确符合本次实验的实验观测值。

4.6 还有一些实验论文也涉及横向多普勒效应 [12-18]，不过这些实验都没有产生横向多普勒效应，属于从反面验证了产生横向多普勒效应的条件。

此外，关于横向多普勒效应的验证实验还有一些，因为涉及与纵向多普勒效应和引力红移效应的混合，计算起来比较困难，故暂时略去，并不影响从本文得出的结论。

5 从以上数据及其分析结果可以得出的关键结论

5.1 横向多普勒效应新公式具有优势

依据新得到的横向多普勒效应公式，其理论预测值与实测值都符合得更好一些，理论预测值均更接近于实测值，偏差都比爱因斯坦公式减少一个四阶效应值。在低速（ $v < 0.01c$ ）条件下，根据计算其中最大的偏差减小值为 0.01%。最小的偏差减小值出现在最小光源速度的实验中，也可以判断是大于 0 的某个值，但是由于超出最小误差的可计算范围，故没有给出具体数据。

5.2 狭义相对论的横向多普勒效应公式可能存在系统误差

笔者通过对于横向多普勒效应实验数据的全面检视,发现只有一篇(第二篇)实验论文对系统误差进行了估算,存在系统误差(0.28%),即观测值比理论值大约 0.68%,但此偏差在实验误差范围内,因此与相对论预测一致。笔者发现所有狭义相对论横向多普勒效应公式的理论预测值都比实测值偏小,且都偏向同一边,且偏差率有小也有大,从全部 5 个实验来看,显示出过去的横向多普勒效应可能存在系统误差。由此似乎显示需要新的解释理论和公式来消除这种偏差。

5.3 两个横向多普勒效应公式的偏差差别是由四阶区别引起的

虽然以上计算表明横向多普勒效应新公式与实验值的偏差比爱因斯坦公式最多只减少 0.01% (当 $v=0.01c$ 时),但是这微小的减小量都是四阶效应的体现。新公式(13)式的四阶项为正数($+3\beta^4/8$),

(4)式的四阶项为负数($-\beta^4/8$),即(13)式的四阶项减去(4)式的四阶项为 $+\beta^4/2$ 。因此狭义相对论的横向多普勒效应公式的四阶项的值是朝着扩大偏差的方向,而新公式的四阶项的值是朝着缩小偏差的方向。由此可以判断,所有已知的横向多普勒效应实验数据都表明,新公式的理论预测值都更接近于实测值。

5.4 预期未来横向多普勒效应的偏差规律

以上两个公式的偏差对比显示出一个规律,就是随着光源的速度增大,两个公式的理论预期值与实测值的偏差也将拉大,新公式偏差较小的优势也将越来越显著。我们有必要在更高光源速度的情况下重做这个实验的理由就在于已有实验显示出的以上规律。假定在中高速($V > 0.01c$)下进行实验,两个公式的差别会扩大。

如当 $V = 0.5c$ 时,新公式与爱因斯坦公式的 $\Delta\nu/\nu$ 值分别为: -0.118034 和 -0.154734,两个值的差别达到 23.718%,这样的差距就明显了。又如当 $V = 0.9c$ 时,新公式与爱因斯坦公式的 $\Delta\nu/\nu$ 值分别为: -0.345362 和 -1.294157,两个值差别达到 73.314%。这样的差距就更明显了,完全可以给出两个公式哪一个更加正确的最终判据。

5.5 未来横向多普勒效应实验可能的改进方向

笔者通过文献搜索显示,目前尚未发现公开的狭义相对论横向多普勒效应实验用的光源速度超过了 $0.03c$ 。这是因为这类实验在实验室条件下实现纯横向运动且速度超过 $0.01c$ (约 $3 \times 10^6 \text{ m/s}$) 极具挑战性,主要受限于以下因素: (1) 机械稳定性: 高速旋转或振动装置的精密控制难度大。(2) 测量的灵敏度: 频移量级随速度平方增长,但超高精度探测仍面临噪声干扰。(3) 实验设计的复杂性: 需严格排除纵向速度分量的干扰。未来可能的实验改进方向包括: (1) 基于粒子加速器的实验: 设计环形加速器中的横向运动分量,结合高精度光谱技术,分离横向多普勒效应。其潜在速度范围: 接近光速 ($0.1c-0.99c$),但需解决同步辐射干扰问题。(2) 激光驱动微纳结构: 利用超强激光脉冲驱动微米级反射镜或纳米颗粒,实现瞬时高速横向运动。其潜在速度范围: $0.01c-0.1c$,依赖激光能量和材料特性。(3) 冷原子喷泉实验: 通过激光冷却和磁光阱技术,将原子团加速至更高横向速度 ($0.01c$ 以上),结合原子干涉仪测量频移。其挑战在于: 维持原子团高速运动时的相干性。

5.6 新的横向多普勒效应公式可能有着更为深刻的物理机制

根据狭义相对论的横向多普勒效应公式,横向多普勒效应有所谓“经典项”和“时间膨胀效应”贡献的区别。而根据新横向多普勒效应公式,横向多普勒效应的本质只是动量合成机制的结果,不能进行“经典项”和“时间膨胀效应”的区分。

5.7 所有的狭义相对论效应都与光子的动量合成机制相关

新公式不仅显示横向多普勒效应的本质只是光子的动量合成机制的结果,而且还显示狭义相对论的其他效应也与光子的动量合成机制相关。这似乎意味着一个对狭义相对论效应的物理意义进行解释的新方法,也似乎是走出狭义相对论的一个突破口。

5.8 横向多普勒效应新公式的意义与缪子反常磁矩实验的对比

新公式对于横向多普勒效应实验的偏差计算结果显示,虽然其与狭义相对论只有很小的差别,最大偏差只有 0.01%,但是其与更低光源速度下的实验红移偏差一起显示出的趋向是: 在更高光源速度的情况下,横向多普勒效应实验一定会更为清楚地

判定两套公式的优劣, 进而显示发生横向多普勒效应的真正原理是光子的动量合成法则。因此这两套公式的差别是不可忽视的, 其意义堪比最近由美国费米国家加速器实验室的国际合作组进行的缪子反常磁矩实验。其对缪子反常磁矩进行的最新测量结果显示, 其值为: $g-2 = 0.00233184110$ (中心值) ± 0.00000000043 (统计误差) ± 0.00000000019 (系统误差)。即这个实验数据与偏差为: 理论值为 2.00233183620 (基于标准模型的计算, 不确定度在第十位); 实验值为 2.00233184122 (费米实验室等国际合作组通过精密测量获得, 不确定度在第十位); 差异: 实验值与理论值的偏差达到 4.2 个标准方差 (统计学上随机误差的概率仅为约 4 万分之一), 接近粒子物理中“发现”的阈值 (5 个标准方差)。该结果的测量精度达到了千万分之二, 与基于标准模型的理论值存在 4.2 个标准方差的偏差, 为新物理的存在提供了有力证据。论文的作者包括来自 7 个国家 34 个机构的近 200 名科研工作者, 其中上海交通大学的李亮教授和许金祥副教授等也参与了实验, 并在反常进动频率测量、磁场校准和束流动力学修正等方面做出了突出贡献。论文详细介绍了实验装置、数据采集、分析方法以及结果的统计和系统误差评估等内容^[19]。

6 新横向多普勒效应公式揭示的物理机制与狭义相对论公式存在差别

值得注意的是, 狭义相对论的横向多普勒效应公式和时间膨胀公式是一样的。横向多普勒效应是指当光源与观察者之间的运动方向垂直于视线方向时, 观察到的频率变化, 这被认为就是由时间膨胀效应引起的。因此, 狭义相对论横向多普勒效应公式直接反映了时间膨胀效应, 或者说, 横向多普勒效应本质上就是时间膨胀的体现。验证横向多普勒效应的实验, 事实上也通常是通过测量光源运动垂直于视线时的频率偏移来间接验证时间膨胀。而在爱因斯坦那里所谓的时间膨胀效应是依赖于洛伦兹变换得到的, 通常我们都将洛伦兹变换理解为是由纯粹相对运动引起的时空变换效应, 因此对于多普勒效应的物理解释, 自然是认为多普勒效应只取决于观察者与光源之间的相对运动速度的变化, 而不能区分究竟是光源在运动引起的, 还是观察者在运动引起的。

但是笔者得到横向多普勒效应新公式的推导是建立在存在绝对空间的实在性 (真空以太) 的假定基础上进行的, 因此认为以上两种情况是完全可以区分的。在观察者运动状态不变的情况下, 多普勒效应就是光源运动发出的光子的频率事实上发生了改变, 其物理机制显然在于动量合成法则。如果光源运动状态事实上没有改变, 则多普勒效应也可能发生在观测仪器与接收到的光子之间的相互作用状态 (即相对运动状态) 的改变, 这样的改变也会引起光子动量事实上发生改变。这两种情况都符合光子的动量合成法则。而狭义相对论的横向多普勒效应公式的洛伦兹变换推导方式之所以在一定程度上也符合实验, 是因为其在一定程度上也符合动量合成法则所反映的物理机制, 但是由于洛伦兹变换与动量合成法则并不完全等效, 故有必要区分两者在物理机制上的不同。

笔者还将以上工作推广到对于纵向多普勒效应实验的对比, 得出类似的结论。最后, 笔者还将构成多普勒效应物理机制的光子动量合成法则或原理与光速相对于绝对坐标系的不变性发展为一个新的坐标系变换关系。AI 将这个变换的前提归结为一个“核心假设”: 光子动量合成法则的优先性, 即时空变换的物理本质源于光子动量的矢量合成, 而非传统洛伦兹变换的时空几何框架。在这个新的时空框架下也可以解释纵向多普勒效应效应的二阶效应。有关这个问题将另文论述。

参考文献

- [1] 江正杰著. 道路——道的证明与唯道主义的自然哲学和科学[M]. 北京: 人民日报出版社. 2005.8:287-304.
- [2] 江正杰. 动量合成原理适用于光源发射光子的情况探讨——狭义相对论效应物理机制的量子论解释[J]. 广西物理 2022 年第 4 期.
- [3] 江正杰. 狭义相对论公式的绝对论推导[J]. 格物. 2005.4.
- [4] Zheng-jie Jiang. Deriving the formulas of special relativity with absolutism[J]. Matter Regularity. 2005.3.
- [5] 张元仲著. 狭义相对论实验基础[M]. 北京: 科学出版社. 2023.9 第二版.
- [6] 张元仲著. 狭义相对论实验基础[M]. 北京: 科学出版社. 2023.9 第二版: 182-192.

- [7] Hay H J, Schiffer JP, Cranshaw T E, et al. Measurement of the red shift in an accelerated system using the Mössbauer effect in Fe⁵⁷. Physical review letters, 1960, 4:165.
- [8] Kundig W. Measurement of the transverse Doppler effect in an accelerated system. Physical review, 1963, 129: 2371.
- [9] Champeney D C, Isaak GR, Khan A M. Measurement of relativistic time dilatation using the Mossbauer effect. Nature, 1963, 198: 1186.
- [10] Champeney D C, Isaak G R, Khan A M. A time dilatation experiment based on the Mössbauer effect. Proceeding of the physical society, 1965, 85: 583.
- [11] Snyder J J, Hall J L. Laser spectroscopy. Proceedings of the second international conference, Megeve, France, 1975, 43: 8–17.
- [12] Champeney D C, Moon PB. Absence of Doppler shift for gamma ray source and detector on same circular orbit. Proceedings of the physical society, 1961, 77: 350.
- [13] Champeney D C, Isaak GR, Khan A M. An 'aether drift' experiment based on the Mössbauer effect. Physics letters, 1963, 7: 241.
- [14] Turnerand K C, Hill H A. New experimental limit on velocity-dependent interactions of clocks and distant matter. Physical review, 1964, 134: B252.
- [15] Muirhead H. The special theory of relativity. London: Mcetilillau, 1973.
- [16] D.C. Champeney & P.B. Moon: Absence of Doppler Shift for Gamma Ray Source and Detector on Same Circular Orbit. Proceedings of the Physical Society (1961)
- [17] D.C. Champeney, G.R. Isaak & A.M. Khan. An 'Aether Drift' Experiment Based on the Mössbauer Effect. Physics Letters. (1963)
- [18] K.C. Turner & H.A. Hill: New Experimental Limit on Velocity-Dependent Interactions of Clocks and Distant Matter. Physical Review (1964)
- [19] Muong-2 Collaboration, "Measurement of the Positive Muon Anomalous Magnetic Moment to 0.46 ppm Precision"[J]. Phys. Rev. Lett. 126, 141801 (2021). arXiv: 2104. 03281.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS