

1851 年的“斐索实验”证明了什么？证伪了什么？*

李春生^{1)†}

——对 M. H. Fizeau 1851 年的《关于光以太的假设以及一项实验，这项实验似乎表明物体运动会改变光在其内部传播的速度 (*Sur les hypothèses relatives à l'éther lumineux, et sur une expérience qui paraît démontrer que le mouvement des corps change la vitesse avec laquelle la lumière se propage dans leur intérieur*)》实验报告的分析与反思。

摘 要

本文对法国物理学家阿尔芒·斐索 (Armand Hippolyte Louis Fizeau) 1851 年的流水拖曳实验 (斐索实验) 的进行了另一个角度的分析，发现之前没有被引起足够重视的实验细节。斐索实验证明了光速会与运动的介质的运动速度叠加和递减——光速可变，证明了经典物理学速度相加定理，证伪了光速不变假说。科学需要实验证明，但是，对同一个实验却存在完全相反的结论，并且发展成不同的理论体系，我们依据什么来判断哪一种解释 (或理论) 正确？希望这些疑问能够引起一些反思。

关键词：以太、光速、光速不变、光速可变、速度相加定理、伽利略变换

摘自 H. 斐索的论文《关于光以太的假设以及一项实验，这项实验似乎表明物体运动会改变光在其内部传播的速度》，《法兰西科学院报告 (*Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*)》，第 33 卷，1851 年，第 349-355 页。

原始资料链接：

<https://www.academie-sciences.fr>

(可参考附录 B 中的中文翻译)

† 通讯作者：elephantintheroom202ls@gmail.com

1 3 种以太假说

空间是什么？由什么构成？光是什么？如何传播？物质由什么构成？质量从哪里来？为什么物质具有与生俱来的引力？引力如何传递？宇宙的基本作用力通过什么介质来传递？空间的性质不仅决定了物质的性质，也决定了宇宙的运作原理。从亚里士多德、笛卡尔、

惠更斯到麦克斯韦，人们猜想以太充满了空间，光是以太的横振动。但是，以太是什么？具有什么性质？人们却提出了不同的猜想。到 19 世纪时，形成了 3 种不同的以太假说：

(1) “以太漂移假说” (*The Ether Drift Hypothesis*)。1804 年，英国物理学家托马斯·杨将布拉德利对粒子光的解释改编为波状光

在一种名为光以太的介质中传播的解释。他的推理与布拉德利的相同，但他要求这种介质在太阳参考系中是静止的，并且必须不受影响地穿过地球，否则介质（以及光）将随地球一起移动，不会观察到任何像差。^[1]他认为：通过研究恒星的光行现象，我倾向于相信光以太可以毫无阻力地、几乎没有阻力地弥漫于一切物质实体之中，就像风穿过树林一样自由。^[2]按照“以太漂移假说”因为地球存在自转和公转，地球相对绝对静止的以太空间的存在绝对运动，因此在地球表面会产生所谓的“以太风”。1887年的迈克尔逊—莫雷实验是为了验证“以太漂移假说”和解释光行差现象而设计的实验（在另一篇文章里详细分析）。

(2) “以太部分曳引假说” (*The Drag Hypothesis of the Aether*)。1818年，法国物理学家 (Augustin Fresnel) 假设物质内部的“光以太”由两部分组成：一部分是自由以太，存在于空隙中（例如亚原子粒子之间），密度较低；另一部分是与亚原子粒子绑定的以太（包括粒子本身），密度较高。自由以太不受原子（电子壳层）运动的影响，只有电子壳层（绑定以太）在自由以太中运动。即部分光以太是自由的，而另一部分则附着于物体分子，只有附着物体分子上的这部分以太被物体拖曳随物体一起运动。^[3]

相关实验的验证：光的拖拽是指光进入运动介质时路径的改变。1886年，迈克尔逊在《介质运动对光速的影响 (*Influence of Motion of the Medium on the Velocity of Light*)》写道：

“关于光通过介质的运动对光速的影响，唯一有意义的工作是斐索的

实验。他宣布了一个引人注目的结果：光所经历的速度增量不等于介质的速度，而是该速度的分数 x ，该分数取决于介质的折射率。菲涅尔先前从理论上获得了这个结果，但最令人满意的证明是艾森洛尔”。^[4]

根据菲涅尔的波动理论，首先，以太应该处于静止状态，除了在透明介质内部，其次，它应该以小于介质速度的速度移动，其比率为：

$$\frac{n^2 - 1}{n^2} \quad (1)$$

其中 n 为折射率。这两个假设对像差给出了完整而令人满意的解释。第二个假设，尽管看似不可能，但必须被视为已得到充分证明，首先，著名的斐索实验已经证明了这一点，其次，我们自己的工作也充分证实了这一点。^[5]当时的人们普遍认为1851年的斐索实验证明了菲涅尔的“部分以太曳引假说”。

(3) “以太完全曳引假说” (*The Complete Drag Hypothesis of the Aether*)。1845年，英国物理学家乔治·斯托克斯认为，把以太分成不动（以太漂移假说）和可动（以太部分曳引假说）的两部分不如假设物体能够完全拖曳一部分以太，在物体表面附近的以太有一个速度逐渐减慢的区域，物体（星体）曳引周围的这部分以太一起运动，而距离物体（星体）更远空间中的以太则完全静止。即在地球表面，以太与地球具有相同的速度，即地球完全曳引这部分以太。只有在离开地球表面某一高度的地方，才可以认为以太是静止的。^{[6]pp. 17}按照“以太完全曳引假说”，物体表面的以太和地球的大气层类似，在接

近物体（星体）的部分以太与物体一起运动，与物体之间没有相对运动。

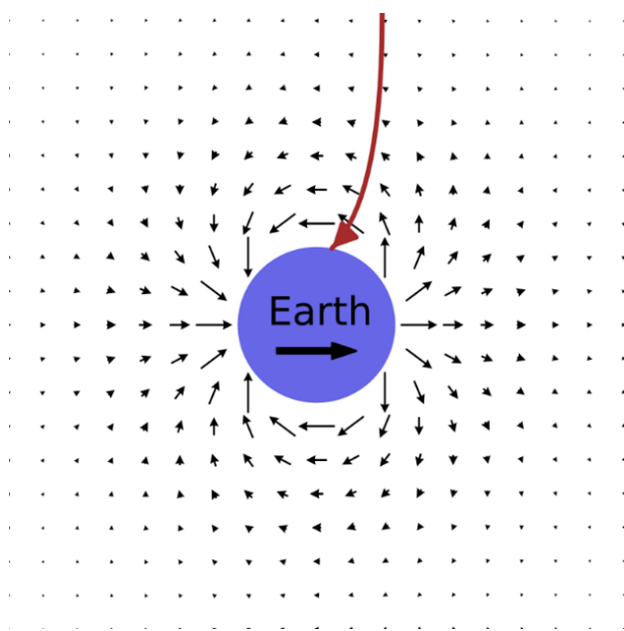


图 1 斯托克斯以太拖拽理论的概念图。在太阳静止参考系中，地球通过以太向右移动，从而产生局部电流。来自垂直方向的一束光线（红色）因以太流动而被拖拽和倾斜。来源：维基百科

Fig. 1 Conceptual illustration of Stokes' aether drag theory. In the rest frame of the Sun the Earth moves to the right through the aether, in which it induces a local current. A ray of light (in red) coming from the vertical becomes dragged and tilted due to the flow of aether. Source: Wikipedia

相关实验验证：迈克尔逊在 1897 年进行了验证“以太完全曳引假说”的实验。论文是 1897 年在美国科学杂志，第 4 辑，第 3 卷，第 18 期刊登的《地球与以太的相对运动》（*The relative Motion of the Earth and the Ether*），作者艾伯特·A·迈克尔逊（Albert A. Michelson）。^[7] 迈克尔逊写道：

“为了解释光行差现象，菲涅尔假设光以太处于静止状态，地球通过这种介质运动，但运动的任何部分都不会被感知。根据这一理论，已经证明。应该能够检测到两个垂直方

向上光速的差异。由于没有观察到这种差异，因此似乎可以推断菲涅尔的假设是错误的。

另一种理论是斯托克斯理论，其中如果地球和以太的相对速度具有势能，则光行差可以得到解释。然而，这一要求与刚才引用的实验结果不一致，该实验表明在地球表面相对运动为零。

为了检测出与水平差异相对应的相对运动，我们进行了以下实验”（pp.475-478）

实验的结论是：无论如何，我们不得不得出非同寻常的结论，而选择就在这三者之间：——地球穿过以太（或者更确切地说，让以太穿过其整个质量）而没有受到明显的影响。

所有物体的长度都会因其在以太中的运动而改变（均匀地改变?）。

地球在运动时会拖曳以太，即使距离其表面数千公里。

迈克尔逊没有给出确切的结论，不同的人存在不同的理解。因为未知的原因，这个实验及论文并不著名。

需要注意的是，3 种以太假说是对以太性质的不同解释和猜想，事实上，所有的理论都是对同一个客观世界不同的解释和描述。目前面临的问题是，以太被证明了吗？以太被证伪了吗？斐索实验证明了什么？证伪了什么？通过回顾 170 年前的斐索实验，希望能够从这个实验的细节中发现真相的新线索。

2 斐索实验

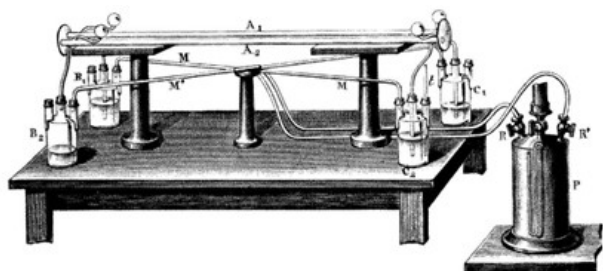


图 2 斐索实验中使用的仪器示意图。来源：维基百科
Fig. 2 Instruments used in Fizeau's experiment.
Source: Wikipedia

1851 年，斐索为了验证菲涅尔的“部分以太曳引假说”而设计了一个流水实验(见图 2)，测量光在流动水中的相对速度。) [3] 他发现实验结果与菲涅尔 (*Augustin-Jean Fresnel*) 的预测相符。 [8] 后续的实验证实了斐索的测量结果。 [4]

斐索实验是托马斯·杨双缝干涉实验的一种变体，只是在双缝干涉实验的两条狭缝的后面增加了一套水流方向相反的水管，检验运动的水流的速度是否会使两束光产生的干涉条纹发生变化，以检验水中的以太是否会被部分拖曳。

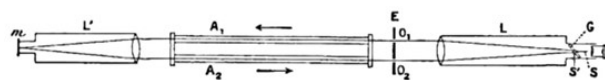


图 3 斐索实验的示意图，从光源 S' 放出的光线在被分光镜 G 反射后，经透镜 L 准直为两束平行光。这两束光线在通过狭缝 O_1 和 O_2 后进入管道 A_1 和 A_2 。两个管道分别按照箭头所指的方向通入水流。在透镜 L' 焦点处放置的平面镜 m 是为了确保两束光中有一束总是顺着水流方向传播，而另一束则逆着水流传播。在通过水管后，两束光线会在 S 处会聚形成干涉条纹。干涉条纹可以用来分析水管中的光速。 [3, 9]

Fig. 3 The schematic diagram of Fizeau's experiment: light emitted from the source S' is reflected by the beam splitter G and then collimated into two parallel beams by the lens L . These two beams pass through slits O_1 and O_2 before entering the tubes A_1 and A_2 . Water flows through the tubes in the directions indicated by the arrows. A plane mirror m , placed at the focal point of the lens L' , ensures that one of the beams always travels with the water flow, while the other travels against it. After passing through the tubes, the two beams converge at S , forming interference fringes. These interference fringes can be used to analyze the speed of light in the water. [3, 9]

斐索在《法兰西科学院报告》里写道：

“为了解释波动理论体系中的光行差现象，人们提出了许多理论。从菲涅尔最初的假设，到多普勒、斯托克斯、查利斯以及其他研究者的贡献，这些理论均进行了重要扩展。在这些假设中，有些较为可信，但没有一种被完全证实。事实上，在缺乏关于发光以太的性质及其与有重量物质的关系的某些概念的情况下，有必要做出假设，并且在所提出的假设中，有或多或少的可能性，但没有一个可以被证实。这些假设可以归纳为以下三类，涉及到如何理解存在于透明物体内部的光以太状态：光以太附着并固定于物体的

分子上，因此完全随物体的运动而移动；以太是自由的，独立于物体的运动，不受其影响；第三种假设结合了前两者：部分以太是自由的，而另一部分则附着于物体分子，只有附着部分参与物体运动。第三种假设是由菲涅尔提出的，目的是同时解释光行差现象和阿拉戈著名实验的结果。阿拉戈通过实验证明，地球的运动对星光在棱镜中折射的影响可以忽略不计。我们可以针对每种假设，讨论物体运动对光速的可能影响：假设以太完全随物体运动：如果以太完全随物体运动，光速将在物体运动方向上增加一个等于物体速度的量；假设以太完全自由：如果以太完全自由，光速不会受到物体运动的任何影响；假设部分以太随物体运动：如果仅一部分以太随物体运动，则光速会有所增加，但仅为物体速度的一部分，而非全部。”^[3]

光的拖曳（曳引）是指光进入移动介质时路径的改变。按照菲涅尔的“部分以太曳引假说”，当水流的方向与光的传播方向相同时，光速在以太被水“拖曳”时增大，而在以太“克服”水阻力时减小，总光速是光与水的相对速度与水速的和，即光速和与水的运动速度叠加——光速变快。当水流的方向与光的传播方向相反时，逆着水流传播的光会比顺着水流传播的光速度慢——光速变慢。观察者看到的两束光重新会聚形成的干涉条纹取决于两束光的光程差。它可以用来确定光速与水速之间的函数关系。^[10]

按照托马斯·杨的双缝干涉实验，只有在两束光的波长、频率和相位（注：波的波峰、波谷之间的某点的标度，波峰和波谷完全重叠则认为是相位相同）完全相同时才会产生干涉条纹，如果两束光的波长和频率相同但相位不同时，不会产生干涉条纹。在斐索实验中，斐索首先在水流静止时使两束光产生干涉条纹，当水流以相反方向运动时，观测干涉条纹是否发生变化，来确定两束光的相位是否因为水流速度的影响而发生改变。如果干涉条纹发生变化，说明运动的水流的速度改变了光速，改变了两束光的光程差，造成两束光的相位不再相同，使干涉条纹发生变化。如果光速会与运动的水流的速度叠加和递减，则证明水中的以太被曳引；如果运动的水流没有改变干涉条纹，或干涉条纹没有发生任何改变，说明光速不会与运动的水流的速度叠加和递减，则证明水中的以太没有被曳引。

实验的观测结果：

“现在观察到的情况如下：当水开始运动时，条纹会移动，并且根据水是朝一个方向还是另一个方向移动，条纹会向右或向左发生改变。当水被推到位于观察者右侧的管子中的前面，并流向位于观察者左侧的管子中的观察者时，条纹向右移动。当每个管中的水流方向与刚刚定义的方向相反时，条纹会向左移动。当水速为每秒 2 米时，位移已经非常明显；当速度增加至 4 至 7 米时，位移清晰可测。…假设以太完全自由且独立于物体的运动，则位移应该为 0。在以太将与物体分子结合

以共享它们的运动的假设中，计算给出了双位移的值 0.92。观察得出的数字只有一半低，即 0.46。根据菲涅耳的部分以太曳引假说，理论计算的位移值为 0.40，与实验观察值非常接近。如果能够在水速计算中引入一项由于缺乏足够精确数据而被忽略的修正值，那么两者之间的差异可能会更小。” [3]

斐索实验结果表明，两束以相反方向运动的水流的确改变了干涉条纹，证明了光进入移动介质后路径发生了改变，产生了拖曳效应。光的路径被改变，意味着光速会与运动的介质的速度产生了叠加或递减。当时的人们普遍认为斐索实验证明了菲涅尔的“部分以太曳引假说”。

因为那个时代实验技术的局限，斐索实验并不完美。美国实验物理学家阿尔伯特·迈克尔逊与爱德华·莫雷认为斐索的原始实验存在以下问题：

1. 仪器变形会导致干涉条纹失真；
2. 由于加压水流持续时间很短，观察时间非常有限；
3. 层流效应导致只有水流最中心部分的流速符合要求，这会导致条纹模糊；
4. 斐索测定的水速也存在不确定度。 [4]

原始的斐索实验的确存在这些问题，但是，斐索实验的确探测到了拖拽效应，只是该效应却比预期弱很多。因此，人们不断改进实验，希望获得更精确的实验结果，以消除对实验结论的争议。

3 重复实验

1868 年，马丁·赫克 (Martin Hoek) 进行了类似的实验，间接验证了菲涅耳系数。 [11]

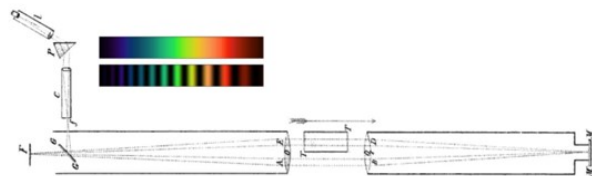


图 4 赫克的实验中使用的仪器示意图。来源：维基百科
Fig. 4 Schematic diagram of the instruments used in Hoek's experiment. Source: Wikipedia

赫克的实验装置与斐索实验类似，其中一条干涉臂充入的是静水，另一条则是空气。在静止以太中的观察者看来，地球是运动的，也就是说上述装置中的水也是运动的。因为赫克的实验中的水没有运动，因此，不太符合菲涅尔的“部分以太曳引假说”的条件，无法验证菲涅耳系数，不过，这个实验比较适合用于检验“以太漂移假说”。

1886 年，迈克尔逊和莫雷重复了斐索实验，并在美国科学杂志上发表论文《介质运动对光速的影响 (*Influence of Motion of the Medium on the Velocity of Light*)》。 [4] 他们重新设计了实验仪器，增大了管径并使用了一个可以提供三分钟稳定水流的大水池。他所设计的同光路干涉仪 (Common Path Interferometer) 可以自动补偿光路长度。结构上说，光路与萨尼亚克干涉仪 (Sagnac Interferometer) 中的相同。每条光路上都会产生偶数次反射。 [12]

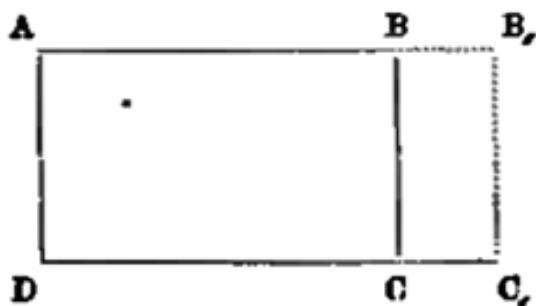


图 5 光速与流水速度的叠加示意图。

Fig. 5 Diagram of the superposition of the speed of light and the flow velocity of water.

迈克尔逊写道：

“以速度 θ 相对于以太在方向 AB 上运动。假设外部以太的密度为 1，而棱柱内部以太的密度为 $1 + \Delta$ 。在时间 dt 内，棱柱将前进一段距离 $\theta dt = BB'$ 。在此时间开始时，位于体积 BC 内的以太量（若棱柱底面的面积为 S ）为： $S\theta dt$ 。在此时间结束时，体积 BC 内的以太量将变为： $S\theta dt(1 + \Delta)$ 。因此，在这段时间内，进入该体积的以太量等于： $S\theta dt\Delta$ 。”

这种仪器对一阶效应的稳定性非常高，并且对于其中任何组件的移位都不敏感。即使在 h 处放一个玻璃盘或者在光路中放入一个点燃的火柴也不会使条纹中心发生偏移。迈克尔逊与莫雷利用这种仪器确认了斐索的结果。^[4]

1886 年，迈克尔逊和莫雷重复了斐索实验。

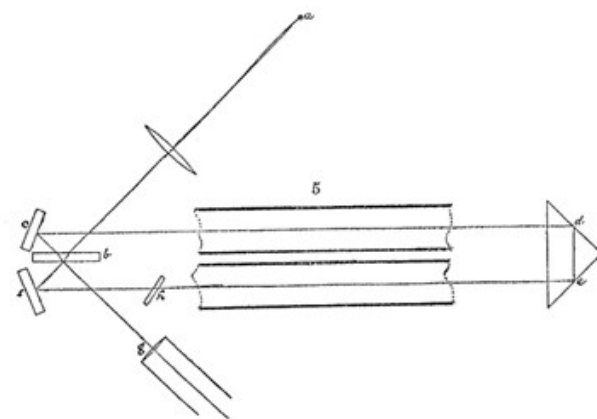


图 6 1886 年，迈克尔逊和莫雷改进的斐索实验的折射仪平面图。来源：维基百科

Fig. 6 A plan view of the refractometer used in Michelson and Morley's improved Fizeau experiment in 1886. Source: Wikipedia

迈克尔逊的结论是：

“这项工作的结果是，斐索宣布的结果基本上是正确的；并且光以太完全不受它所渗透的物质运动的影响。”^[3]

迈克尔逊和莫雷重复的斐索实验证明了运动的介质（水）的确会改变光速——证明了光速会与水的运动速度叠加或递减。

1910 年，弗朗茨·哈雷斯（Franz Hares）重复了斐索实验。哈雷斯使用了可以旋转的仪器来确认菲涅尔拖曳系数。不过，他发现数据存在“系统性的偏差”。后来他发现这是由萨尼亚克效应（Sagnac Effect）造成的。^[13]

1915 年，荷兰物理学家彼得·塞曼也重复了斐索实验。他将迈克尔逊的仪器的规模进一步扩大，并将其仪器直接与阿姆斯特丹的主供水管道相连。塞曼还对波长在 4358 \AA （紫）到 6870 \AA （红）范围内的单色光也进行了测量，以验证洛伦兹修改后的系数。^[14, 15]

虽然这些相关实验都证明了菲涅尔的

“部分以太曳引假说”——运动的水流的确改变了干涉条纹，但是，人们对“部分以太曳引假说”仍然存有疑滞。斐索的实验报告中写道：

“这种解释使得速度变化的假设变得更有可能，并且在流水中进行的实验在我看来完全适合确定地解决这个问题。在我看来，这个实验的成功导致了菲涅尔假设的采用，或者至少是他发现的通过物体运动的影响来表达光速变化的定律的采用；因为虽然这个定律被发现是正确的，这是一个非常有力的证据，支持这个假设，而它只是一个其中结果，也许菲涅尔的概念会显得如此非凡，而且在某些方面，如此难以承认，以至于我们在采用它作为事物现实的表达之前，还需要几何学家进行进一步的证明和彻底的检查。”

需要注意的是，虽然斐索不得不承认自己的实验有利于菲涅尔的“部分以太曳引假说”，但是，他也认为“尽管这个定律只是其中一个结果”，即同时代还有“以太漂移假说”和“以太完全曳引假说”。斐索也承认“动体”——运动的介质的速度对光速的影响，至于运动的介质的速度对光速的影响是因为物体曳引了以太一起运动还是以太本身就是构成物体的一部分，斐索没有找到这个问题的答案。

同样，人们在重复斐索实验时也发现不同的光源得到的实验结果并不相同。费尔特曼 1870 年提出对于不同波长的光，对应的拖曳系数并不相同，因为不同色光的折射率不

同。马斯卡尔则在 1872 年测定双折射介质中偏振光的情况时也得到了类似结果。换言之，以太要同时有两种不同的拖曳系数。^[16]

虽然人们在重复斐索实验时发现不同的光源得到的实验结果并不相同（例如不同波长和频率的光对应着不相同的拖曳系数），但是，重要的是，斐索实验发现运动的水流的确可以改变干涉条纹，这意味着光进入移动介质后路径的确产生了拖曳效应，光的路径被改变，意味着光速与运动的介质的速度产生了叠加或递减。

4 经典物理学的速度相加原理是否成立？

当时的人们做斐索实验是为了验证菲涅尔的“部分以太曳引假说”，但是没有意识到光进入移动介质后路径产生拖曳效应——光速会与运动的介质的速度叠加或递减现象意味着光速可变。当爱因斯坦提出基于光速不变假设的狭义相对论时，人们才意识到光速不变假设与斐索实验揭示的光速可变的事实不相符。面对人们依据斐索实验提出的质疑，爱因斯坦在他的《狭义与广义相对论浅说》中进行了辩解：

在《狭义与广义相对论浅说 (*Relativity: The Special and the General Theory*)》，第 6 节《经典力学中所用的速度相加原理》里爱因斯坦写道：

假设我们的旧相识，火车车厢在铁轨上以速度 v 恒定行驶，并假设有一个人在车厢里沿车厢行驶的方向以速度 ω 从车厢一头走到另一头。那么在这个过程中，对于路基而言，这个人向前走的有多快呢？换句话说，这个人前进的速度 W 有多快呢？

唯一可能的解释似乎可以根据下列考虑而得：如果这个人站住不动一秒钟，在这一秒钟里他就相对于路基前进了一段距离 ν ，在数值上与车厢的速度相等。但是，由于他在车厢中向前运动，在这一秒钟里他相对于车厢向前走了一段距离 ω ，也就是相当于路基又多走了一段距离 ω ，这段距离在数值上等于这个人在车厢里走动的速度。

这样，在所考虑的一秒钟里他总共相对于路基走了距离 $W = \nu + \omega$ ，我们以后将会看到，表述经典力学的速度相加定理的这一结果，是不能加以支持的；换句话说，我们刚才写下的定律实际上是不成立的，但目前我们暂时假定这个定理是正确的。[6]pp. 15

如果火车的速度是 100 公里/小时，以火车车厢为参照系测量人的速度是 5 公里/小时，按照经典力学的速度相加定理——伽利略变换 $W = \nu + \omega$ ，此时，以路基为参照系，路基上的观察者测量火车上的人的（与火车同向时）速度应该是 $100 + 5 = 105$ 公里/小时。

如果人的速度不会与火车的速度叠加（同向）或递减（逆向），那么，以路基为参照系，路基上的观察者测量火车上沿车厢行驶的方向行走的人的速度仍然是以火车车厢为参照系测量的 5 公里/小时，逆车厢行驶的方向行走的人的速度仍然是以火车车厢为参照系测量的 5 公里/小时。与火车同向或逆向时人的速度都是 5 公里/小时，即火车车厢的速度不会改变人的行走速度，这个结论也可以称为“人速不变”。

我们需要回答一个问题：常识是什么？

在第 13 节，《速度相加定理——斐索实验》里，爱因斯坦写道：“在第 6 节（经典物

理学中所用的速度相加定理）里，我们推导出同相速度相加定理，其所取形式也可以由经典力学的假设推出，这个定理也可以很容易理由伽利略变换（第 11 节）推演出来，我们引进相对于坐标系 k' 按照下列方程运动的一个质点来代替车厢里走动的人。”

$$x' = \omega t' \quad (2)$$

借助于伽利略变换的第一和第四方程，我们可以用 x 和 t 来表示 x' 和 t' ，我们得到其间的关系式：

$$x = (v + w)t \quad (3)$$

这个方程所表示的正是该点相对于坐标系 K 的运动定律（人相对于路基的运动定律）。我们用符号 W 表示这个速度，像在第 6 节一样，我们得到：

$$W = v + w \quad (4)$$

但是我们同样也可以根据相对论来进行探讨。在方程 (2) 中，我们必须引用洛伦兹变换的第一和第四方程借以用 x 和 t 来表示 x' 和 t' 。这样我们得到的方程就不是方程 (4)，而是：

$$W = \frac{v + w}{1 + \frac{vw}{c^2}} \quad (5)$$

这个方程对应于以相对论为依据的另一个同向速度相加定理。[6]pp. 30

需要注意的是，光速不变意味着光速在任何运动速度的介质中光速保持恒定不变，意味着以任何参照系为参照测量的光速都完全相同。如果光速不会与运动的介质的速度

相加或递减，则证明光速不变，可以证伪同向速度相加定理；如果光速会与运动的介质的速度相加或相减，则结论是光速可变，这可以证明同向速度相加定理。相对论的同向速度相加定理和经典物理学的同向速度相加定理都是同向速度相加定理！都意味着光速会与运动的介质的速度相加或相减。争论的焦点不是为了验证哪一个理论的同向速度相加定理更精确！而是光速不变还是光速可变。

爱因斯坦继续写道：

“现在引起的问题是这两个定理哪一个更好地与经验相符合。关于这个问题，我们可以从杰出的物理学家斐索在半个多世纪以前所做的一个极为重要的实验得到启发。这个实验在后来曾由一些最优秀的实验物理学家重新做过，因此这个实验结果是无可置疑的。这个实验涉及下述问题。光以特定速度 ω 在静止的液体中传播，现在如果上述液体以速度 ν 在管内 T 内流动，那么光在管内沿箭头（图 4）所指方向的传播速度有多快呢？”

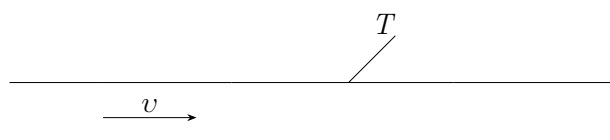


图 7 爱因斯坦的光在运动的液体中的速度的配图： T 是水管， ν 是水流，测量以水为参照系和以水管壁为参照系测量的光速是否相同。来源：《狭义与广义相对论浅说》第 31 页

Einstein's illustration of the speed of light in a moving liquid: T represents the water pipe, and ν represents the water flow. The experiment measures whether the speed of light is the same when referenced to the water or to the wall of the pipe. Source: *Relativity: The Special and the General Theory*, p. 31.

按照相对性原理，我们当然必须认为光相对于液体总是以同一速度 ω 传播的，不论此液体相对于其他物体是否运动与否（请注意爱因斯坦的结论！本文作者注），因此，光对于液体的速度和液体相对于管的速度皆为已知，我们需要求出光相对于管的速度。

显然我们又遇到了第六节《经典力学中所用的速度相加定理》所论述的问题。管相当于铁路路基或坐标 K ，液体相当于车厢或坐标 K' ，而光则相当于沿着车厢走动的人或本节所引进的运动质点。

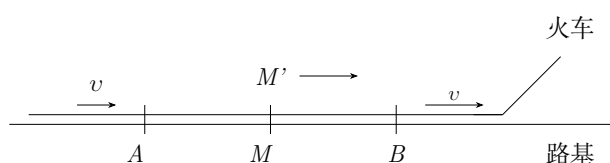


图 8 爱因斯坦著名的火车与路基的思想实验的配图，来自于《狭义与广义相对论浅说》第 21 页

Illustration of Einstein's famous thought experiment involving the train and the embankment, from *Relativity: The Special and the General Theory*, p. 21.

如果我们用 W 表示光相对于管的速度，那么 W 就应该按照方程 (3) 或方程 (5)。

“计算，视伽利略变换符合实际还是洛伦兹变换符合实际而定。实验做出的决定是支持由相对论推出的方程 (5)，而且其符合的程度的确是很精确的。” [6]pp. 31

如果以水管壁为参照系，光在管内沿箭头 (图 4) 所指方向的传播速度仍然是静水中的光速 $W = \nu$ 或 $W = \frac{c}{n}$ ，即光速不变，那么，将证明相对论的洛伦兹变换正确。如果以水管壁为参照系，测量的光速是光速与水流的速度的叠加或递减，则证明光速可变，将证明经典物理学的伽利略变换正确。

《狭义与广义相对论浅说》的编辑者对方程 (5) 的注解是：斐索发现 $W = \omega + v(1 - \frac{1}{n^2})$ ，其中 $n = \frac{c}{\omega}$ 是液体折射率。另一方面由于 $\frac{v\omega}{c^2}$ 与 1 相比相当小，我们可以首先用 $W = (\omega + v)(1 - \frac{v\omega}{c^2})$ 代替方程 (5)，因而按照同一级的近似程度可以再用 $W = \omega + v(1 - \frac{1}{n^2})$ 代替方程 (5)，而此式是与斐索的实验结果相符合的。[6]pp. 31 需要注意的是，斐索实验的结论是运动的介质改变了光速——光速与水流的速度的叠加或递减，证明了菲涅尔的“部分以太曳引假说”。爱因斯坦的解释是：

“这个方程 (5) 对应于以相对论为依据的另一个同向速度相加定理。” [6]pp. 30

以水管壁为参照系，运动水流中的光速是大于静止水中的光速还是等于静止水中的光速？爱因斯坦的结论是：

“按照相对性原理，我们当然必须认为光相对于液体总是以同一速度 ω

传播的，不论此液体相对于其他物体是否运动与否。” [6]pp. 31

相对论建立在光速不变的基础上，如果光速在任何情况下都不变，那么公式只能是 $W = \nu$ 或 $W = \frac{c}{n}$ 。无论方程怎样变换形式，只要结果不是等于 $W = \nu$ 或 $W = \frac{c}{n}$ ，就证明光速会与运动的介质的速度叠加或递减，即证明光速可变。斐索实验证明，以水管壁为参照系测量水中的光速并不是静止水流中的光速 $W = \frac{c}{n}$ ，而是光速与水流的速度的叠加——光速会与运动的介质的速度叠加或递减——光速可变。

需要注意的是，方程 (3) 和方程 (5) 的计算结果都大于静止水中的光速（注：光在不同的介质中光速不同），即爱因斯坦给出的两个选项题都证明了光速会与运动的介质的速度相加或相减（为什么爱因斯坦给出的方程不是 $W = \nu$ 或 $W = \frac{c}{n}$ 呢？）。因此，相对论的同向速度相加定理证明的是光速可变而不是光速不变。用相对论的同向速度相加定理来替换用伽利略变换的同向速度相加定理和用白天鹅来证明天鹅是黑色的逻辑类似，是偷换概念的一种形式——颠倒黑白。

因为时代的局限性，当时的斐索实验的结论是运动的介质改变了光速，证明了菲涅尔的“部分以太曳引假说”。当爱因斯坦提出在光速不变——光在任何情况下，光速相对于任何运动的参照系都是一个常数时，争论的焦点就变成了不同的参照系测量的光速是否恒定。

斐索实验证明，以水管壁为参照系测量水中的光速并不是静止水流中的光速 $W = \frac{c}{n}$ ，而是光速与水流的速度的叠加——光速会与运动的介质的速度叠加或递减——光速可

变，即方程 $W = v + \omega$ 。

重要的是，斐索实验证明以水为参照系和以水管壁为参照系所测量的光速不同——不同的参照系所测量的光速不同，这与爱因斯坦的光速不变假说完全相反，证明了经典物理学的速度相加定理。

经典物理学的速度相加定理是伽利略变换的基础，斐索实验的结论将决定伽利略变换和洛伦兹变换哪一个正确。事实证明，数学无法独立做出判断哪一种解释正确，数学需要依靠逻辑来得出结论。数学只是科学的一种工具，是科学的仆人而不是主人。数学不能代表科学。

5 伽利略的思想实验

伽利略变换依据什么原理为基础？我们需要了解伽利略构建伽利略变换的逻辑基础。

为了否定亚里士多德—托勒密的时空观，1632年，伽利略在《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》著作中借萨尔维阿蒂之口表达了他的观点：

“把你和一些朋友关在一条大船甲板下的主舱里，再让你带几只苍蝇、蝴蝶和其他小飞虫。然后，挂上一只大水瓶，让水一滴、一滴地滴到下面的宽口罐里。大船停止不动时，你留神观察，小虫都以等速向舱内各方向飞行，鱼向着各个方向随便游动，水滴滴进下面的罐子里。

你把任何东西扔给你的朋友时只要距离相等，向着一个方向不比另一方向用更多的力，你双脚起跳，向哪个方向，跳过的距离都相等……在

使船以任何速度前进，只要运动是匀速的，也不会忽左忽右的摆动。你将会发现，上述的现象丝毫没有变化，你也无法从其中任何一个现象来确定船是运动还是停着不动。即使船运动得相当快，在跳跃时，你将和以前一样，在船底甲板跳过相同的距离，你跳向船尾也不会比跳向船头来的远，虽然你跳到空中时，脚下的船底板向你跳的相反方向移动，你把什么东西扔向你的同伴时，不论他是在船头还是船尾，只要你自己站在对面，你也并不需要用更多的力。水滴将像先前一样，滴在下面的罐子里，一滴也不会滴向船尾，虽然水滴在空中时，船已经行驶出了很远的距离……如果点香冒烟，则将看到烟像一朵云一样向上升起，不会向任何一边移动。所有这些一致的现象，其原因在于船的运动是船上一切事物所共有的，也是空气所共有的，这正是为什么我说你，应该在甲板下面的缘故；因为如果这个实验在露天（船甲板上）进行，就不会跟上船的运动，那样上述某些现象就会发现或多或少的显著差别。毫无疑问，烟会随同空气本身一样远远地落在后面。至于苍蝇、蝴蝶，如果它们脱离船的运动有一段客观的距离，由于空气的阻力，就不能跟上船的运动。” [17] pp. 130-131

在伽利略思想实验中匀速运动的船舱里，苍蝇、蝴蝶和其他小飞虫（以下简称蝴蝶和小飞虫）可以自由的飞翔，水滴可以垂

直落下。同样，在匀速运动的火车车厢、飞机的机舱里，蝴蝶和小飞虫同样可以自由的飞翔，水滴可以垂直落下，我们甚至可以像在地面上一样打乒乓球，而不用考虑火车和飞机是否处于高速的运动状态。伽利略的结论是，如果没有参照系为参照，我们无法感知自己处于直线匀速的运动状态。

如果我们把伽利略思想实验里的大船的船舱甲板拆除，我们将会发现蝴蝶和小飞虫都会被与船速相等的风吹走。原因很简单，封闭的船舱空间里的空气与船舱外部的空气相互隔绝，船舱内部的空气与船舱外部的空气存在相对运动。船舱内部的空气相对船舱静止，构成船舱内部的空间与船同步运动，也可以说，船曳引了船舱内部的空间作同步运动。蝴蝶和小飞虫能够在船舱内部的空间里自由飞翔，说明船舱内部的空间和船舱外部的空间是两个相互独立的空间，是两个独立的参照系。蝴蝶和小飞虫以这个相对静止的绝对空间为参照系作绝对运动，而不是以船舱外部空间为参照系来确定运动速度。

但是，当船舱甲板被拆除，船舱内部的空间和船舱外部的空间合二为一，船舱内部的空间和船舱外部的空间不再是两个相互独立的参照系，而是合并成为一个参照系，这艘船就失去了与它同步运动的内部空间，因此只具有一个质点的性质。此时，蝴蝶和小飞虫只能以船舱外部的空间为绝对参照系，与船舱产生了相对运动。换句话说，蝴蝶和小飞虫会被与船速相等的风吹走。如果恢复船舱的甲板，那么，船舱内部的空间又会成为一个相对静止的绝对空间，并且与船舱同步运动，蝴蝶和小飞虫又将以船舱内部的绝对空间为绝对参照系作绝对运动。蝴蝶和小飞

虫是否可以在船舱里自由的飞翔，取决于船舱内部的空间是否与船舱外面的空间相互隔绝，取决于船舱是否是一个相对静止的绝对空间。

6 能否用实验来验证是否存在绝对空间？

科学需要实验证明，伽利略的思想实验不是一个真实的实验，不能作为证明存在绝对空间的证据。是否有真实的实验证明绝对空间是否存在呢？能否证明地球表面也是一种绝对空间呢？

6.1 如何用实验来验证是否存在绝对空间？

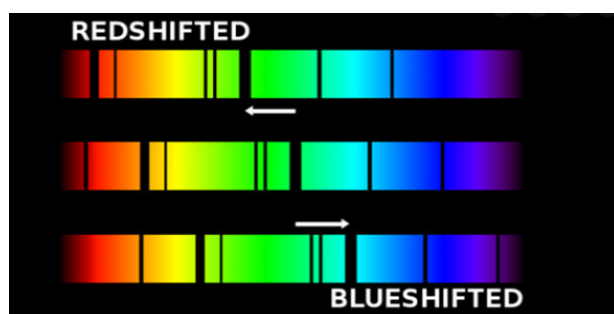


图 9 光的多普勒效应。摘自凤凰网

Fig. 9 The Doppler Effect of Light. Excerpted from Phoenix News

根据多普勒效应，运动的光源会产生多普勒效应。但是，所有运动的光源都会产生多普勒效应吗？

实验：在封闭的火车车厢的内部和外部分别设置一个光源进行光学多普勒实验，每一个光源分别向火车前进方向和相反方向发射光波。在火车高速运动时，会发现车厢外部的光源会产生多普勒效应——与火车前进方向相同的光会产生“蓝移”现象，与火车前进相反方向的光会产生“红移”现象；而火车车厢内部的光源则不会产生任何多普勒效

应。原理非常简单，车厢的内部空间与车厢同步运动而没有相对运动，即光源与车厢的内部空间同步运动而没有相对运动，因此不会产生多普勒效应；而车厢外部的光源只具有一个质点的属性，车厢外部的光源与车厢外部的空间介质存在绝对运动，因此会产生多普勒效应。同样原理，可以在高速飞行的飞机和宇宙飞船的内部设置光源进行光学多普勒效应实验。因为飞机和宇宙飞船的内部空间是完全封闭的空间与飞机和宇宙飞船同步运动，是相对静止的绝对空间，光源与飞机和宇宙飞船内部的空间没有绝对运动，因此，飞机和宇宙飞船的内部的光源发出的光不会产生多普勒效应。这是一个常识，只是被人忽略而已。

结论：严格上讲这并不是是一种实验，而是常识。并不是所有运动的光源都会产生多普勒效应，只有光源与空间介质发生绝对运动时才会产生多普勒效应。在火车、飞机和宇宙飞船内部封闭的（空气）空间进行的多普勒实验中没有产生多普勒效应，证明火车、飞机和宇宙飞船内部封闭的空间都是绝对空间，证明所有封闭的空间无论是否处于运动状态都是绝对空间。

6.2 如何用实验证明地球表面是一种绝对空间？

因为自转和公转，地球处于运动的状态。但是，地球表面的空间没有包围空间的物质容器，地球表面的空间是否也是一种封闭的绝对空间呢？

实验：在地球赤道附近的地面设置一个光源进行光学多普勒实验，分别向东方向和向西方向发射光波。如果发生多普勒效应，则

证明地球与空间介质存在绝对运动（称为“以太风”或“暗物质风”并不重要）。但是，如果向东发射的光波没有产生“蓝移”现象，向西发射的光波没有产生“红移”现象，即没有产生多普勒效应，说明光源与空间介质没有发生绝对运动。问题是，地球表面的空间并没有包围空间的物质容器，为什么地球表面的空间与地球没有产生绝对运动呢？同样，这是一个常识，只是被人忽略而已。

众所周知，大气层由空气分子构成，空气分子是物质，是物质就具有与生俱来的引力，会吸引别的物质和被别的物质的引力吸引。根据牛顿引力定律，空气分子被地球引力吸引在地球周围形成一个遵守牛顿引力定律的大气层，越接近地球表面空气密度越大。大气层接近地球表面的部分被地球完全曳引而与地球同步运动，这部分被地球完全曳引的大气层与地球表面相对静止，是一种绝对空间。虽然地球存在自转和公转，但是，鸟儿、蝴蝶、小飞虫和飞机可以在大气层里的这部分空间自由的飞翔，而不会担心被抛出地球。同样，在这个绝对空间里，因为光源与地球表面的空间介质没有绝对运动，所以不会产生多普勒效应。之前在地球表面进行的多普勒实验之所以产生多普勒效应，是因为人为使光源加速，使光源与空间介质产生了绝对运动，当然会产生多普勒效应。

结论：即使不考虑斯托克斯的“以太完全曳引假说”，不考虑以太的因素，在地球表面进行的多普勒实验也可以证明地球表面附近的大气层是一个相对静止的绝对空间。还有，根据牛顿引力定律，空气分子被地球引力吸引在地球周围形成一个遵守牛顿引力定律的大气层，越接近地球表面空气密度越大，光

在穿过不同密度的大气时会产生折射而形成透镜现象，即形成大气透镜现象的原因是引力——引力吸引物质，因为物质的密度不同而产生折射而形成透镜现象，换句话说，引力会产生透镜现象。

6.3 如何用实验证明水也是一种绝对空间？

伽利略的思想实验的船舱里还有一个装满水的鱼缸，里面有几只自由游动的小鱼，无论船的甲板是否打开，鱼缸里的鱼都可以自由游动。问题是，鱼缸没有用于封闭的盖子，为什么鱼缸里的鱼可以自由的运动而不受船的运动影响？鱼缸里的水是独立的参照系吗？如何验证鱼缸里的水是否是绝对参照系？

斐索实验证明，以水管壁为参照系测量的光速和以水为参照系测量的光速不同，以水管壁为参照系测量流水中的光速是光速与水流速度的叠加。即在运动的空间介质内部，以运动的介质（加速介质）为参照系，光速的确没有改变，仍然不会超过这种空间介质里的最大速度。但是，以另一个参照系为参照系，光的光速会与运动的介质速度叠加和递减——光速可变；实验证明水管里的水是一个独立的参照系，是一种绝对空间。

如果水管外面存在运动的水（例如水管外面的河水或海水），水管里的水和水管外面的水是不同的、独立的参照系，是不同的绝对空间。鱼缸里的水与船舱外面的水相互隔绝，鱼缸里的水与鱼缸同步运动，不受船舱外面的水流的影响，鱼缸里的水与船舱外面的水存在绝对运动。重点是，鱼缸里的鱼以鱼缸里的水为绝对参照系来计算速度，而不是以船舱外面的水为参照系来计算速度。同样，鱼缸里的水与船舱内的空间也相互隔绝。

因此，鱼缸里的水、船舱内的空间和船舱外的水是三个相互独立的绝对空间，是三个相互独立的绝对参照系，它们之间存在绝对运动。

综上所述，实验证明被地球引力完全曳引的那部分大气层、船舱、飞机和宇宙飞船的内部空间一样都是绝对空间和绝对参照系。证明任何与其他空间相互隔绝的封闭的空间都是绝对空间，这些绝对空间都是独立的绝对参照系（水、玻璃、冰和水晶都是封闭的空间，事实上，真空也是绝对空间和绝对参照系其中的一种）。

7 事实

人类构建物理理论的目的是什么？是自洽的解释客观现象和自洽的描述客观世界的运作原理？还是构建一个不容置疑的正确的理论？伽利略相对论和爱因斯坦的狭义/广义相对论哪一个能够自洽的解释客观现象和自洽的描述客观世界的运作原理呢？人们会使用哪一种理论来解释和描述地球上的运动现象？例如：

在现实中，人们会使用哪一种理论来解释和描述地球上的运动现象？例如：

1. 如果火车的速度是 100 公里/小时，一个人在火车上以 5 公里/小时的速度行走，那么，对路基上的观察者来说，火车上的这个人的速度是每小时 $100+5=105$ 公里还是每小时 5 公里？
2. 如果一艘船以 30 公里/小时的速度在一条流速 4 公里/小时的河流里顺流航行，船的甲板上有一人以 5 公里/小时的速度向着船的前进方向的相反方向行走。此时，对岸上的观察者来说，船上

的这个人的速度是 $30+4-5=29$ 公里/小时? 还是 5 公里/小时?

3. 如果一架以 900 公里/小时速度飞行的飞机的机舱里有一只蝴蝶以 5 公里/小时的速度向着飞机前进方向飞行, 此时, 对地面上的观察者来说, 飞机上的这只蝴蝶的速度是 $900+5=905$ 公里? 还是 5 公里/小时?
4. 一只鸟以 20 公里/小时速度在西向风速 10 公里/小时的风中向北飞行, 一条鱼以 7 公里/小时的速度在一条以 5 公里/小时的速度向西流动的河流里向南游动, 这只鸟和这条鱼的相对速度是多少?

火车、人、船、飞机、蝴蝶、河流和风之间的叠加和递减的速度都由伽利略变换计算得出, 计算火车、人、船、飞机、蝴蝶、河流和风的速率都需要一个绝对参照系! 列出伽利略变换的计算结果只是为了方便理解速度的不同, 如果认为洛伦兹变换正确, 必须使用洛伦兹变换来计算运动速度, 那么, 原始的问题应该是:

1. 对路基上的观察者来说, 运动的火车和在火车上行走的人的速度各是多少?
2. 对岸上的观察者来说, 航行的船和在船上行走的人的速度各是多少?
3. 对地面上的观察者来说, 飞行中的飞机和飞机机舱内的一只蝴蝶的速度各是多少?
4. 一只在西风中向北飞行的鸟和一条在向西流动的河流里向南游动的鱼的相对速度是多少?

以上几个的例子只是简单的运动现象, 真实世界的运动现象要复杂的多, 火车、人、

船、飞机、蝴蝶、河流和风都存在相对运动。例如, 如果以船外的水、空气或海岸为参照系来测量蝴蝶和小飞虫的速度, 需要将这艘船的运动速度纳入计算; 如果这艘船在一条流动的河里运动, 那么, 还需要将河流的流动速度纳入计算, 即蝴蝶和小飞虫的速度需要与水流的速度叠加或递减; 如果另一艘运动的船的内部也有一个封闭的船舱, 封闭的船舱里也有蝴蝶和小飞虫飞翔, 那么, 这两艘船上的蝴蝶和小飞虫之间的相对运动速度需要将两艘船的运动速度和河流的运动速度纳入计算 (这里暂时不考虑运动方向的复杂计算)。地球上有无数的船只、汽车、火车、飞机等拥有封闭空间的事物在运动, 它们有不同的方向、不同的速度, 它们的内部空间里有无数的蝴蝶和小飞虫以不同的速度运动, 计算这些蝴蝶和小飞虫的速度仍然必须以它们各自的绝对空间为参照系来确认运动速度, 并且必须将它们身处的绝对空间的运动速度纳入计算。如果不承认绝对空间、不承认绝对运动, 那么, 将无法计算任何运动事物的速度。因此, 计算物体的运动速度需要将绝对参照系的运动速度纳入计算, 也需要将绝对空间与绝对空间之间的相对运动纳入计算。物体的运动速度与绝对空间的运动速度相加定理是伽利略变换的理论基础, 这是经典力学的基础伽利略相对论和伽利略变换的特点 (因为篇幅限制, 这里不展开讨论伽利略相对论和狭义/广义相对论的区别, 不讨论伽利略变换和洛伦兹变换的差异)。

事实是最好的证明。在现实中, 人们是使用经典物理学的伽利略变换来计算? 还是使用爱因斯坦的洛伦兹变换来计算?

答案是, 到目前为止, 人类对地球上

及宇宙中所有的运动现象全部使用经典力学的基础伽利略相对论的伽利略变换来描述，没有之一。事实是最好的证据。（相关问题的讨论代表了目前主流的观点。）
参考阅读（相关问题的讨论）：(a), (b), (c)

8 经典物理学只能描述低速的运动吗？

目前流行一种观点，认为狭义/广义相对论是描述高速运动现象的理论，低速运动现象由经典物理学来描述。这种观点存在以下问题：

1. 伽利略变换和洛伦兹变换不是速度的区别，伽利略变换以绝对空间为绝对参照系。洛伦兹变换没有绝对空间和绝对参照系，不计算运动介质和运动的参照系的速度。如果使用经典物理学描述运动现象，意味着使用的是伽利略变换的速度相加定理，要考虑绝对参照系的运动速度；如果使用相对论，则意味着光速不变——光速不会与运动的介质的速度相加或递减，使用洛伦兹变换来计算，没有绝对参照系，不计算运动的介质——绝对参照系的速度。例如，只能计算一条河里的两艘船的相对运动，无法计算河流的速度，也无法计算两艘船的船舱里蝴蝶和小飞虫的相对速度。
2. 人们对于所谓的高速是什么速度的理解各不相同。假设所谓的高速是指光速，那么，这与爱因斯坦的判断不符，爱因斯坦的结论是将任何有质量的物质加速到光速需要无穷大的能量，任何有质量的物质以光速运动时质量无穷大。假设所谓的高速是光速 90%，那么，如果把一

个有质量的物质加速到光速的 91%，那么在物体的加速过程中，在光速的 90% 以下时使用伽利略变换——经典物理学的速度相加定理来描述，计算绝对参照系的速度。当速度达到光速的 90% 时换成洛伦兹变换来描述，即不再将所有运动介质的速度纳入计算。在具体的应用中，将消除运动的空气、水、汽车、火车、飞机的速度，不考虑绝对空间和绝对参照系的概念。对同一事物的运动现象使用两个观点完全相反的定理来描述！这种观点明显违反了逻辑一致性原则。

3. 经典力学的伽利略变换没有速度限制，甚至允许超光速现象，因此，不存在伽利略变换无法描述高速运动现象的问题。
4. 斐索实验是描述光的运动现象的实验，实验使用的是光，而光正是高速的运动现象，即斐索实验描述的正是高速运动的现象。而斐索实验的结论是光速会与运动的介质的速度相加或递减，证明了经典物理学的速度相加定理。

事实是，到目前为止，无论是低速和高速，人类描述地球上的所有运动现象全部使用经典物理学的伽利略变换，没有之一，没有人能够使用相对论的洛伦兹变换描述地球上的任何运动现象，这是事实，而事实是最好的证据和证明。
参考阅读（相关问题的讨论）：(d), (e)

9 反思

现代科学需要实验证明，但是，同一个实验却存在完全相反的结论，并且这些不同的解释发展成了不同的理论解释体系，因此，如何正确解释一个实验的结果将决定物理学

的发展方向。斐索实验证明了什么？证伪了什么？将决定空间是什么？决定光是什么？如何描述运动？如何解释物质？如何描述基本作用力的关键实验。

9.1 斐索实验能否证明“部分以太曳引假说”

虽然斐索实验证明光速会与运动的介质的速度叠加和递减，这个实验结果有利于菲涅尔的“部分以太曳引假说”，但是，“部分以太曳引假说”本身却存在一些问题——没有解释物质以什么原理曳引周围的以太一起运动？是万有引力吗？以太具有质量吗？以太是否作为构成物体的一部分而随物质一起运动？如果以太构成了物质本身，那么，“部分以太曳引假说”就是错误的假设。证明了一个存在疑问的假说，那么，说明这种证明也是可疑的。既然“部分以太曳引假说”的假设是模糊的，并且只是 3 种以太假说的其中一种，因此，我们不能因此得出结论：斐索实验证明了以太的存在。同样的道理，迈克尔逊—莫雷实验只是证伪了 3 种以太假说其中的一种“以太漂移假说”，但是，无法证伪菲涅尔的“部分以太曳引假说”和斯托克斯的“以太完全曳引假说”，因此不能得出结论：迈克尔逊—莫雷实验证伪了以太。事实上，只要还有一种以太假说没有被证伪，就不能得出结论以太的假设是错误的。

9.2 斐索实验证明了光速不变还是证伪了光速不变？

斐索实验从干涉条纹被改变的现象推导出运动的介质改变了光的传播速度和传播方向，造成光波的相位被改变，导致干涉条纹发生改变，证明光速会与运动的介质的速度

叠加或递减，证明光速可以被改变——光速可变。

有些人会提出反驳：光速不变原理 (*The Principle of the Constancy of the Speed of Light*) 指的是无论在何种惯性参照系中观察，光在真空中的传播速度相对于该观测者都是同一个常数，不随光源和观测者所在参考系的相对运动而改变。光速不变原理是基于真空环境的假设，指在真空中光速不变，而斐索实验是在非真空的环境中（水中）进行的实验，因此，斐索实验不能证伪光速不变原理。

这个反驳存在严重的逻辑矛盾，因此，回答这个问题而无需数学证明而只需要逻辑思辨：

1. 斐索实验的确是在非真空的环境中进行的实验，的确不能作为证伪“真空中光速不变”的证据。但是，为什么这个在非真空环境里进行的实验却被认为证明了狭义相对论的光速不变原理？还有，被认为证明了光速不变原理的迈克尔逊—莫雷实验也是在非真空环境中进行的实验，因此，迈克尔逊—莫雷实验同样也不能作为证明光速不变原理的实验证据。
2. 真空中光速不变原理不仅指光在任何参照系中光速不变，而是不随光源和观测者所在参考系的相对运动而改变。如果任何运动的参照系都不会改变光速，那么不同速度的参照系中测量的光速变化必然是 0。但是，斐索实验和后续的相关实验测量的结果都不是 0。而只要测量结果不是 0，就意味着光速会与介质的运动速度叠加或递减，意味着光速会被改变——光速可变。

3. 有什么实验可以证明“真空中光速不变”？到目前为止，没有任何人在真空环境中进行过以验证光速不变原理为目的的实验——在真空环境中检测不同运动速度的参照系所测量的光速是否相同。光速不变原理既没有被证明也没有被证伪，是否符合波普尔的“不可证伪性”的判断标准呢？
参考阅读（相关问题的讨论）：(f), (g)

4. “真空中光速不变”建立在真空的基础上，狭义相对论以“真空中光速不变”为理论基础，问题是，建立在真空基础上的狭义相对论是否适用于非真空的环境呢？换句话说，在地球这个非真空的环境中狭义相对论是否适用呢？如果宇宙中充满了“暗物质”，那么，存在狭义相对论适用的环境吗？

斐索实验的结果非常清晰，测量结果不是 0 意味着光速可变。为什么人们对斐索实验测量结果不是 0 的事实视而不见呢？为什么一个证伪了光速不变的实验被当作证明光速不变的证据呢？能否以一个白天鹅作为证据证明所有的天鹅都是黑色的吗？

9.3 光速不变原理是一种客观现象吗？

光速不变原理无法自洽解释地球上的任何客观现象，也没有任何客观现象证明光速不变，恰恰相反，光在不同的介质中光速不同是一个基本的科学常识，没有证据证明所谓的光速不变原理是一种客观现象。牛顿认为：“凡不是来源于现象，不论它是形而上学的或物理学的，不论它是关于隐秘的质的或是关于力学性质……都应称之为假说。”
[18]pp. 349 科学必须以事实为依据，科学的

起点和终点都必须都是事实，科学结论需要证据来证明，所有的证据和结论都必须有经得起质疑，所有经不起质疑和检验的理论本质上都只是一种假说。既然光速不变原理不是一种客观现象，也没有被实验证明，那么，光速不变原理应该称之为定理吗？

科学不在于寻求绝对无误的真理，而是在客观事实的基础上，以科学方法不断尝试揭露和确认客观世界的运作法则和原理。重要的是，科学必须实事求是，不能回避事实。科学精神是：理性、怀疑、批判和实验证明，质疑会将真相和谬误都暴露在阳光下。在赞美一个理论多么精妙之前，应该先了解这个理论的逻辑基础是否经得起质疑，是否有实验证据证明。如果质疑被认为是离经叛道，那么，既谈不上理性，也谈不上科学。如果一个假说或一个理论不容置疑，那么，科学就会失去纠错机制，科学的发展方向就会偏离正确的轨道。因此，只有秉承科学精神，才能避免落入“证实性偏见”的思维陷阱（注：“证实性偏见”（*Confirmation Bias*）是指个人在主观上支持某种观点的时候，往往倾向于寻找那些能够支持自己原来的观点的信息，而忽视那些对己不利或矛盾的信息，甚至扭曲不利于自己观点的事实以支持自己想法的现象）。科学精神不能保证我们能够找到全部的真相，但是，至少能够保证我们在探索的过程中不会误入歧途。

哲学总是在自我批判和自我否定中发展的，整部人类哲学史充满着哲学家们互相批判、互相推翻、互相取代的斗争。科学发展史同样如此，人们对自然的认识并非一成不变，从古希腊诸子百家到哥白尼、伽利略、笛卡尔、牛顿、胡克、惠更斯、麦克斯韦、普朗克、

爱因斯坦、玻尔、费曼等等，探索者们的观点虽有继承和发展，但也有批判和否定，科学同样是在自我批判和自我否定中发展。先贤们几千年积攒下来的思想成果滋养了我们的智慧，他们点亮了一个又一个灯塔，指引

着人类的发展方向。没有人的观点全部正确，也没有人的观点一无是处。有些观点后来被事实证明是一个个错误，那也是他们在错误的地方树立起了一个个指引正确航道的航标灯。

争论一个问题而没有解决它，比解决一个问题而没有争论它要好！

——约瑟夫·朱伯特（1754年-1824年）

What did the 1851 “Fizeau Experiment” prove? What did it disprove? *

Chunsheng Li^{1)†}

—An analysis and reflection on M. H. Fizeau’ s 1851 experimental report, “On the hypotheses concerning the luminous ether, and on an experiment that seems to demonstrate that the motion of bodies changes the speed at which light propagates within them” (original title: *Sur les hypothèses relatives à l’éther lumineux, et sur une expérience qui paraît démontrer que le mouvement des corps change la vitesse avec laquelle la lumière se propage dans leur intérieur*).

Abstract

This paper provides an alternative perspective on the 1851 flowing water dragging experiment (Fizeau Experiment) conducted by the French physicist Armand Hippolyte Louis Fizeau, uncovering experimental details that have not received sufficient attention previously. The Fizeau Experiment demonstrated that the speed of light is influenced by the motion of the medium, either adding to or subtracting from it—showing that the speed of light is variable. It confirmed the classical physics principle of velocity addition while disproving the hypothesis of the invariance of the speed of light. Science relies on experimental evidence, yet the same experiment can lead to completely opposite conclusions and give rise to different theoretical frameworks. On what basis do we determine which interpretation (or theory) is correct? It is hoped that these questions will prompt some reflection.

Keywords: Ether, speed of light, invariance of the speed of light, variable speed of light, velocity addition theorem, Galilean transformation.

References: Excerpted from H. Fizeau’ s paper, ” On the Hypotheses Relating to the Luminous Ether and an Experiment That Seems to Show That the Motion of Bodies Changes the Speed with Which Light Propagates Within Them” , *Comptes Rendus de l’ Acad’emie des Sciences*, Vol. 33, 1851, pp. 349–355.

Original source link: <https://www.academie-sciences.fr>

(Refer to [Appendix B](#) for the Chinese translation.)

附录 A

参考阅读（相关问题的讨论）

- a. 广义相对论能否用于计算河中鱼、陆地上奔跑的马和风中飞行的鸟之间的相对速度？ (*Can General Relativity Be Used to Calculate the Relative Speeds Between a Fish in a River, a Running Horse on Land, and a Bird in the Wind?*) Quora, 2019. Available at: <https://qr.ae/p2B705>.
- b. 在一条直线轨道上，两列火车以相同的方向和速度行驶，但有一列火车以相反的方向行驶。能否利用狭义相对论计算出这三列火车的速度和独立时间？ (*On a straight track, two trains are moving in the same direction and at the same speed, but one train is moving in the opposite direction. Can special relativity be used to calculate the speeds and independent times of these three trains?*) Available at: <https://qr.ae/pszfD3>.
- c. 如果经典力学只是狭义广义相对论在低速情况下的近似，那么狭义和广义相对论可以应用于什么速度？ (*If classical mechanics is just an approximation of special general relativity at low speeds, then to what speeds can special and general relativity be applied?*) Available at: <https://qr.ae/p2aKmn>
- d. 广义相对论中的时空曲率能否用来解释海市蜃楼、彩虹、幻日等自然现象？为什么人们普遍选择经典光学解释？ (*Can the curvature of space-time in general relativity be used to explain natural phenomena such as mirages, rainbows, and parheliads? Why do people generally choose the classical optical explanation?*) Available at: <https://qr.ae/p2H7qM>; <https://qr.ae/psCmWY>.
- e. 广义相对论能描述苹果从树上掉下来吗？ (*Can general relativity describe an apple falling from a tree?*) Available at: <https://qr.ae/p2BRhV>; <https://qr.ae/p2BRGH>.
- f. “真空中光速不变”如何证明？“真空中光速不变”如何被证伪？ (*How is the "constancy of the speed of light in a vacuum" proven? How could the "constancy of the speed of light in a vacuum" be disproven?*) Available at: <https://qr.ae/p2q4mW>; <https://qr.ae/p2q4qt>.
- g. 1851 年阿尔芒·斐索的实验（斐索实验）推翻了什么误解？它证明了什么？ (*Armand Fizeau's experiment in 1851 (Fizeau Experiment) disproved what misconception? What did it prove?*) Available at: <https://qr.ae/p2VJHx>.

附录 B

斐索原始论文翻译

(注：本文为 ChatGPT 所翻译，仅供参考。原始法语论文：<https://www.academie-sciences.fr>)

法国科学院成员：Hippolyte Fizeau 关于以太的假设以及一项实验，这项实验似乎表明物体运动会改变光在其内部传播的速度 (*Sur les hypothèses relatives à l'éther lumineux, et sur une expérience qui paraît démontrer que le mouvement des corps change la vitesse avec laquelle la lumière se propage dans leur intérieur*) 摘自 H. Fizeau 的论文，《法国科学院报告》 (*Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*), 第 33 卷, 1851 年, 第 349-355 页

(349)

.....

物理学：

关于以太假设及一项实验，这项实验似乎表明物体的运动会改变光在其内部传播的速度

作者：H. FIZEAU (作者摘录)

(评审员：MM. Arago, Pouillet, Babinet)

“已经提出了几种理论来解释波动理论中的像差现象。最早由菲涅耳 (*Fresnel*) 提出，最近多普勒 (*Doppler*)、斯托克斯 (*Stokes*)、查利斯 (*Challis*) 及其他几位学者也发表了关于这一主题的重要著作。然而，似乎没有一种理论完全得到物理学家的普遍认可。”

“事实上，由于缺乏关于发光以太 (*éther lumineux*) 的性质及其与可重物质关系的确切概念，研究者不得不提出假设。这些假设中有些或多或少是合理的，但没有一个能够被认为是被完全证明的。”

“这些假设可以归结为三个主要假设，它们涉及透明物体内部存在的以太的状态：

以太附着于并固定在物体的分子上，因此它完全共享施加于物体的运动；以太是自由的、独立的，并且不会被物体运动拖动；第三种假设结合了前两者：部分以太是自由的，而另一部分固定在物体分子上，仅共享物体的运动。”

(350)

“最后一种假设归功于菲涅耳 (*Fresnel*)，提出这一假设是为了同时解释像差现象以及阿拉戈先生 (*Arago*) 著名实验的结果。通过该实验，阿拉戈先生证明了地球的运动对星光通过棱镜 (*prisme*) 时的折射没有影响。”

“我们可以进一步探讨，当假设物体处于运动状态时，对于每种假设，光速在物体中的数值应该是多少。光速的数值可以根据运动的事实而发生改变。”

“如果假设以太完全随物体移动，那么当光束的方向与物体的运动方向一致时，光速会增加等于物体速度的量。”

“如果假设以太是自由的，那么光速将不会受到任何改变。”

“最后，如果只有部分以太被拖拽，那么光速会有所增加，但仅为物体速度的一部分，而非全部。这一结论虽然不像前两种情况那样直观，但菲涅耳已证明，这一结果可以通过非常合理的机械分析加以支持。”

“尽管光速与我们能够赋予物体的速度相比非常巨大，但今天我们拥有极其精密的观测手段，因此通过直接实验验证物体运动对光速的影响已被认为是可能的。”

(351)

“阿拉戈先生 (Arago) 提出了一种基于干涉现象的方法, 这种方法适用于揭示物体折射率中最细微的变化。阿拉戈与菲涅耳的观察表明, 干空气 (*air sec*) 与湿空气 (*air humide*) 之间的折射率差异充分证明了这一方法的极高灵敏度。”

“采用相同的原理, 我将阿拉戈先生的双管装置与我之前用于测定绝对光速的组合设备连接起来, 从而能够直接研究空气和水两种介质中物体运动对穿过其的光的影响。”

“我将尝试在不借助图示的情况下, 说明光在实验中的传播路径。”

“从柱面透镜 (*lentille cylindrique*) 的焦点开始, 太阳光几乎立即通过非常靠近焦点的侧面开口进入第一架望远镜。一块透明玻璃的平面与望远镜轴线成 45 度角, 通过反射将光引导至物镜的方向。”

“从物镜射出后, 光线变得彼此平行, 并遇到一个双缝装置 (*fente double*), 每个缝口对应一个管子的入口。一束非常狭窄的光线可以穿透每个管子, 并贯穿其整个长度 (1.487 米)。”

“两束始终平行的光束到达第二架望远镜的物镜, 在那里被折射, 并由于折射作用汇聚于焦点。在焦点处, 光束遇到一块与望远镜轴线垂直的反射镜 (*miroir*), 发生反射后返回物镜; 然而, 通过反射的作用, 光束路径发生了交换: 原本经过右侧路径的光束反射后移到了左侧, 而原本经过左侧路径的光束则移到了右侧。”

“光束再次穿过物镜后变得平行, 然后第二次进入管子。然而, 由于路径的交换, 出发时通过某一个管子的光束, 在返回时通过了另一个管子。”

“在完成第二次穿越管子后, 这两束光再次通过双缝装置, 回到第一架望远镜, 并穿过透明玻璃, 在焦点处形成干涉现象。在焦点处, 两束光的相互作用产生了干涉条纹 (*franges d' interférence*), 这些条纹通过带有分划的目镜进行观察。”

“为了能够测量干涉条纹宽度的细微变化, 条纹需要足够宽。我发现, 通过在其中一个缝口前放置一块倾斜的厚玻璃, 可以利用折射效应使两个缝口在视觉上变得更近, 从而增加条纹的宽度, 同时保持光线的强度。”

“这种双路径设计的主要目的是延长光在运动介质中传播的路径长度, 同时完全抵消两个管道之间可能存在的温度或压力差所引起的影响。这些差异可能导致干涉条纹的位置发生变化, 与由运动引起的位移混淆, 从而使观测结果不准确。”

(352)

“事实上, 很容易看出, 在这种设置中, 位于某一光束路径上的所有点也会出现在另一光束路径上。因此, 路径上任何点的密度变化都会对两束光产生相同的影响, 因此不会影响干涉条纹的位置。”

“为了验证这一补偿机制的有效性, 我在一个缝口前放置了一块厚玻璃, 或仅在一个管道中注入水而另一个管道中保持空气。无论是上述哪种测试方法, 都没有观察到干涉条纹的位置发生任何变化。”

“然而, 当水流动时, 情况发生了变化, 两束光受到相反的影响。”

“如果我们假设右侧的管道中水向观察者方向流动, 那么从右侧来的光束将沿着水流方向穿过管道, 而从左侧来的光束则逆着水流方向穿过管道。”

“通过让两个管道中的水同时流动, 且流动方向相反, 我们可以观察到两种效应会叠加。如果反转两个管道中的水流方向, 那么效应会再次叠加。”

“这些水流是通过非常简单的方式产生的: 每个管子通过两个位于管子两端附近的分支与两个玻璃容器相连, 通过压缩空气交替施加压力。在这种压力作用下, 水从一个容器流向另一个容器, 穿过两端由玻

璃封闭的管道。管子的内径为 0.3 厘米，长度为 1.487 米，材质为玻璃。”

“水流的压力可以超过两个大气压。流速通过单位时间内流过的水量除以管子的截面积计算得出。为了避免可能由于水压和水流冲击而产生的意外运动影响结果，实验设备进行了特别设计。两个管道和用于制造水流的容器由独立支架支撑，与其他设备部分（尤其是望远镜）完全分离。因此，只有管道可能会发生一些偶然的运动，但理论和实验均表明，管道自身的移动或弯曲对干涉条纹的位置没有影响。”

(353)

“以下是我们在实验中观察到的现象：

当水流动时，干涉条纹会发生位移，并且根据水流方向的不同，条纹的位移方向会向左或向右移动。当水在右侧管道中向观察者流动，同时在左侧管道中远离观察者流动时，条纹会向右侧偏移。当水流方向相反时，条纹会向左侧偏移。”“当水流速度达到每秒 2 米时，条纹的位移已经很明显；当水速达到每秒 4 到 7 米时，位移可以精确测量。”

“观察到这一现象后，我试图尽可能精确地确定其数值。在水从静止开始流动时发生的位移称为‘简单位移’，而当水流方向完全反转时发生的位移称为‘双位移’。”

“根据从 19 次观测中得出的平均值，简单位移的值为 0.23，而双位移的值为 0.46，以干涉条纹的宽度为单位。当时的水速为每秒 7.069 米。”

(354)

“随后，我将这一实验结果与基于光以太假设的各种理论计算进行了比较：

如果假设光以太是完全自由的，不受物体运动的影响，则理论位移应为零；如果假设光以太完全被物体分子拖拽，并随其运动，则理论计算的双位移值为 0.92；根据菲涅耳假设（*Fresnel*），即部分光以太被物体拖拽，则理论计算的双位移值为 0.60。这一数值与实验中观察到的 0.46 非常接近。”“理论值与实验值之间的小差异可能是由于实验中水流速度计算中未能充分考虑的修正因素。这些修正与水流在管道内速度分布的不均匀性有关。通过合理估算这些修正值，可以看到，它们的效应是略微增加理论计算的位移值，使其更接近于实验值。”

“在此前的一次类似实验中，我曾用流动的空气替代水进行实验，但观察到空气流动并不会引起干涉条纹的明显位移。在实验条件下，空气流速为每秒 25 米。如果假设光以太被完全拖拽，则理论计算的双位移应为 0.82；而根据菲涅耳假设，双位移的值仅为 0.000465，这一值几乎不可察觉。因此，空气实验中条纹的静止现象完全符合菲涅耳理论的预测。”

(355)

“这一负结果促使我在不同光以太假设的框架内尝试解释它，同时兼顾光行差现象与阿拉戈先生（*Arago*）实验的结果。最终，我得出结论，必须接受菲涅耳假设，即物体的运动会引起光速的变化。这种速度变化的大小因介质的折射能力而异：在折射能力较高的介质中，这种变化显著；而在低折射介质（如空气）中，这种变化则极其微弱。”

“因此，当光穿过运动的空气时，干涉条纹不会移动；但相反地，当实验在水中进行时，由于水的折射率远高于空气，条纹的移动应当十分明显。”

“一项由巴比奈先生（*Babinet*）进行的实验在《科学院报告》（*Comptes Rendus de l' Académie des Sciences*）第 IX 卷中被提及。这一实验似乎与根据菲涅耳定律推导出的速度变化假设相矛盾。然而，仔细研究实验条件后，我注意到一种补偿效应的存在，这种效应可能掩盖了运动所带来的影响。这种补偿效应

与光在实验中经历的反射有关：实际上，可以证明，当两束光之间存在一定的光程差时，镜面运动的反射会改变这种差值。”

“通过分别计算巴比奈实验中的两种效应，发现它们的数值几乎相等，但符号相反。”

“这一解释进一步验证了光速变化假设的合理性。在我看来，在运动水中进行的实验非常适合明确地解决这一问题。”

“这一实验的成功似乎要求我们采纳菲涅耳的假设，或者至少承认他提出的定律的正确性，即物体运动会导致光速的变化。尽管这一定律的真实性为菲涅耳假设提供了非常强的支持，但由于这一假设在某些方面显得非常非凡且难以接受，或许在完全接受它为现实表达之前，仍需要几何学家的进一步验证和更深入的分析。”

.....

参考文献

- [1] Whittaker E, 1910. *A History of the Theories of Aether and Electricity* .
- [2] Schaffner K F, 1972. *Nineteenth-century aether theories* .
- [3] Fizeau H, *Comptes Rendus* **33**(1851) pp. 349–355. .
- [4] Michelson A A, Morley E W, *American Journal of Science* **31**(1886) pp. 377–386. .
- [5] Michelson A A, Morley E, *American Journal of Science* **34**(1887) 203 pp. 333–345. .
- [6] 爱因斯坦, 2006. 狭义与广义相对论浅析 (北京: 北京大学出版社). .
- [7] Michelson A A, *American Journal of Science* **3**(1897) 18 pp. 475–478. .
- [8] Falkner E, 2018. *Fizeau Experiment*. The General Science Journal.
- [9] Fizeau H, *Ann. Chim. Phys.* **57**(1859) pp. 385–404. .
- [10] Wood R W, 1905. *Physical Optics* (New York: The Macmillan Company). .
- [11] Hoek M, *Verslagen en Mededeelingen* **2**(1868) pp. 189–194. .
- [12] Hariharan P, 2007. *Basics of Interferometry* (Elsevier), .
- [13] Anderson R, Bilger H R, Stedman G E, *American Journal of Physics* **62**(1994) pp. 975–985. .
- [14] Zeeman P, *Proc. Kon. Acad. Van Weten.* **17**(1914) pp. 445–451. .
- [15] Zeeman P, *Proc. Kon. Acad. Van Weten.* **18**(1915) pp. 398–408. .
- [16] Stachel J, 2005. In A J Kox, J Eisenstaedt (Eds.) *The Universe of General Relativity* (Boston: Birkhäuser). pp. 1–13. Accessed October 30, 2024.
- [17] 伽利略, 2006. 关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话 (北京大学出版社). .
- [18] 牛顿, 2006. 自然哲学之数学原理 (北京: 北京大学出版社). .