

## 狭义相对论的一种复空间表述及其物理诠释

雷勋杰

广东药科大学广州复星禅诚医院 广东广州

**【摘要】**因同时的相对性依赖“观察者”的缘故，狭义相对论的客观实在性曾屡遭质疑。为此，本文提出一种基于复数表述的物质绝对运动模型，详细介绍了复平面几何的时空运动框架，并将其应用于狭义相对论中的时间膨胀与长度收缩效应的几何化表达。在该框架中，引入“空间运动”与“时间运动”的形式分解，采用复数结构对粒子运动进行统一描述，则相对论效应可被重释为物质绝对运动的几何投影。需要强调的是，该模型并不试图替代现有的量子场论或相对论理论体系，而是作为一种可能的解释性工具，用于探索时空结构的几何表达方式。通过与闵可夫斯基时空的对比，本文讨论了复数表示在理解相对论效应方面的潜在直观性与局限性。

**【关键词】**狭义相对论；绝对运动；时间位移；同时性；复平面

**【收稿日期】**2026 年 4 月 15 日 **【出刊日期】**2026 年 5 月 16 日 **【DOI】**10.12208/j.sdr.20260044

### A complex space formulation of special relativity and its physical interpretation

Xunjie Lei

Guangdong Pharmaceutical University Guangzhou Fosun Chancheng Hospital, Guangzhou, Guangdong

**【Abstract】** Due to the dependence of simultaneity on the “observer,” the objective reality of special relativity has been repeatedly questioned. To address this, to this end, this paper proposes a material absolute motion model based on complex representation, detailing the spatiotemporal motion framework of complex plane geometry and applying it to the geometric expression of time dilation and length contraction effects in special relativity. Within this framework, a formal decomposition of “spatial motion” and “temporal motion” is introduced, employing complex structure to unify the description of particle motion, thereby reinterpreting relativistic effects as the geometric projection of material absolute motion. It should be emphasized that this model does not attempt to replace existing systems of quantum field theory or relativity theory, but rather serves as a possible explanatory tool for exploring geometric expressions of spatiotemporal structures. By comparing with Minkowski spacetime, this paper discusses the potential intuitiveness and limitations of complex number representations in understanding relativistic effects.

**【Keywords】** Special relativity; Absolute motion; Time displacement; Simultaneity; Complex plane

爱因斯坦（Albert Einstein）的狭义相对论，是借助狭义相对性原理、光速不变原理以及同时的相对性假定推导而来的<sup>[1,2]</sup>。由于同时性的相对性取决于“观察者”<sup>[3-5]</sup>，使得狭义相对论看似更像一种观测效应理论。虽然相对论效应早已被实验所证实，但其对“观察者”的依赖在哲学上引发了关于“实在性”的持久争论。以爱因斯坦本人的实在论立场为参照，他相信物理理论应揭示不依赖于观察的“世

界本身”。然而，操作主义者如布里奇曼（P.W. Bridgman）认为，相对论中的“时间”“长度”概念必须还原为具体的测量操作（时钟、光信号）——离开观察者，这些量无意义<sup>[6]</sup>。哲学家普特南（Hilary Putnam）曾指出，相对论似乎暗示“没有绝对的全局事实”，只有不同参照系下的相对事实<sup>[7]</sup>。而关系性实在论者罗韦利（Carlo Rovelli）等人主张：相对论教给我们的是，物理系统的属性只存在于与其他

系统（包括观察者）的相互作用中。“世界本身”如果没有观察者视角，就是空洞的形而上学<sup>[8]</sup>。反之，批判者如吉伯恩(Paul Gyer)、厄尔曼(John Earman)等认为，相对论的数学结构（如闵可夫斯基时空）完全独立于任何观察者，后者只是理论中一种特殊的坐标系选择<sup>[9]</sup>。

本文引入一种绝对主义取向的思辨模型，将物质运动视为实空间运动与虚空间运动的合成，通过复平面几何变换，重新诠释了洛伦兹(Lorentz)长度收缩、时间膨胀、质速关联和质能联系。在复时空中，复平面几何变换规则与狭义相对论的时空变换规则是相通的，而复数与虚数在描述周期性、旋转和时间箭头方面的天然契合性，则为理解“同时性”及时间本质提供了一种非观测者依赖的可能路径。

## 1 物质的绝对运动

### 1.1 一种绝对主义取向的思辨模型：复时空中的物质运动

物理学乃是探究物质结构、相互作用以及运动规律的科学。古希腊自然哲学里的原子论（例如德谟克利特所提出的原子论等），或许称得上是最早具备物理学含义的物质运动理论了。毕竟，原子论不像古代其他自然哲学理论那样，将物质世界归结为某些特定的物质形态，像水、火、土、气之类，而是将其归结为不可分割的“原子”这种普遍的物质形态。德谟克利特(Demokritos)认为，万物的本原是原子和虚空，原子是不可再分的物质微粒；虚空是原子运动的场所；运动是原子的固有属性；原子在虚空中永恒运动着，集合时形成物体，分离时则物体消灭；实物由于其组成原子的不同而表现出差别性和多样性。

现代物理学中有关物质结构和运动的理论，实质上可以被看作是古典原子论的一种改良版本。依据现代粒子物理学标准模型，原子是由质子、中子和电子组成的，而质子和中子则由更为基本的夸克组成，虚空乃是量子场能量的基态。微观粒子的运动源于粒子之间的相互作用，包括电磁、引力、强力以及弱力这四种基本相互作用，而传递这四种相互作用力的粒子分别是光子、引力子、胶子和中间玻色子。其中，夸克和轻子似乎是难以继续分割的“基底粒子”<sup>[10]</sup>，迄今没有任何实验证据显示这些粒子还有内部结构，虽然还不能确认它们就是物质结构的最后层次，但很有可能是相当基本的层次<sup>[11,12]</sup>。这

些基底粒子在量子场中的激发与相互作用构成了物质世界的全部现象。

这里将不可再分的粒子定义为基底粒子而非基本粒子，原因在于历史上曾将原子以及后来的质子、中子等归为不可再分的“基本粒子”，而后续研究证明这些归类均存在谬误。实际上，即便存在不可再分的基本粒子，亦可将其视作一定量物质在特定时空汇聚所形成的物质单元。假设夸克和轻子为不可再分的基底粒子，这仅表明夸克或轻子内部不存在更小的亚粒子结构，然而它们有可能是由某种“非粒子物质”聚集而成的物质单元，例如“场”或者“波”。实验观测显示，正负电子相遇可湮灭为2个或3个光子，同时，1个能量足够大的光子也能够转化为正负电子对。这一现象揭示了粒子与场或波之间存在着深层次的等价关系，表明基底粒子或许并非实体化的“点”，而是场（波）在特定条件下的凝聚形式。

光子是电磁波，电磁波本质上是一种“物质波”，即无需传播介质而依靠自身电磁振荡而传播的波<sup>[13]</sup>。在此，不妨将构成光子或电磁波的物质称为“电磁波样物质”，所谓电磁波实则为电磁波样物质的可观测表象。基于正负电子与光子相互转化的实验结果可以推测，构成电子的物质与构成光子的物质可能相同或具有相通性，即可以假定电子和光子均由“电磁波样物质”构成。进一步而言，可将电子视为电磁波样物质的束缚态，也就是一定量的电磁波样物质耦合形成局域的、不弥散的电磁波包或物质波包，波包的大小等同于电子的大小，波包的运动体现出电子的性质。可将光子视作电磁波样物质的发散态，呈现为在欧氏空间中以光速传播的电磁波。正电子可被看作是电磁波样物质耦合形式与电子相反的物质波包。当正负电子相遇时，电磁波样物质由束缚态转变为发散态，表现为正负电子湮灭为光子。

通常而言，稳定的束缚态标志着非线性作用和孤波解<sup>[14]</sup>。电子波包属于稳定的束缚态，其内部必然存在非线性作用，故而电子波包可被视作一定量电磁波样物质通过非线性耦合所形成的孤波波包。实际上，任何粒子的正反粒子相遇皆可湮灭为电磁辐射，基于此，可以假定所有基底粒子均为电磁波样物质耦合而成的某种局域的、不弥散的电磁波包或物质波包，波包的尺度即为粒子的尺度，波包的

运动展现出粒子的特性。

上述粒子波包模型与波动力学创始人薛定谔 (E.Schrödinger) 最初构想的粒子波包模型<sup>[15,16]</sup>存在一定相似性。其差异在于, 薛定谔所设想的是平面波包, 而平面波包是不稳定的, 最终会因色散而解体。此处所设想的物质波包具备孤波的特性, 由于波包内部的非线性作用和色散效应相互抵消, 故而粒子波包是稳定的, 稳定的粒子波包应是孤波波包或孤子。

依据粒子波包模型, 基底粒子并非简单的无内部结构的刚性粒子, 而是由一定量电磁波样物质耦合而成的具有确定大小的物质波包。电磁波样物质在波包内部的运动表现为物质空间分布的波动, 即所谓物质波, 而波包在欧氏空间的运动则表现为粒子的空间位置的移动。物质波包的内部空间为粒子内禀空间, 它是局域的、弯曲的闭合空间, 具有黎曼 (Riemann) 空间的性质。构成粒子的电磁波样物质同时在粒子内禀空间和欧氏空间运动, 故而具有两种运动形式: 其一是以“波包”(粒子)的形式在欧氏空间运动, 表现为粒子的欧氏空间位置的迁移, 这种运动形式可定义为粒子的空间运动; 其二是以“波”的形式在粒子内禀空间运动, 表现为物质的空间分布的周期性波动, 这种运动形式可定义为粒子的时间运动。粒子的时间运动亦可视为物质波元 (即连续分布的电磁波样物质) 在粒子内禀空间的位置迁移, 时间运动的速度系指物质波元在粒子内禀空间的位移速率。粒子的空间运动的速度系指粒子波包在欧氏空间的位移速率。由此可知, 粒子的运动是一种复合运动, 包含粒子的空间运动和时间运动两个分运动, 同时具有空间运动速度和时间运动速度两个分速度。

可运用复域分析方法对粒子的这种复合运动进行刻画。粒子的空间运动速度为欧氏空间的速度矢量, 可将其视作实矢量, 用  $v$  表示; 粒子的时间运动速度是粒子内禀空间的速度矢量, 可将其视为虚矢量, 用  $iu$  表示; 空间运动速度和时间运动速度的合速度用  $w$  表示, 可写成复数形式:

$$w = v + iu \quad (1)$$

$w$  是复空间或复时空的速度矢量, 即复矢量。此处的复空间 (复时空) 具备明确的物理意义, 指的是粒子内禀空间和欧氏空间的复合空间。其中, 欧

氏空间是我们熟悉的三维空间, 它是广域的开放的平直空间, 可通过欧几里德几何学进行描述; 粒子内禀空间是局域的闭合的弯曲空间, 具有黎曼空间的特性, 需运用非欧几何 (黎曼几何) 加以描述。依据上式, 欧氏空间为实空间, 粒子内禀空间为虚空间, 构成粒子的电磁波样物质于实空间和虚空间的复合空间中运动。

如果电磁波只是电磁波样物质可被观测的表现形式, 那么, 可基于电磁波的特性来推测电磁波样物质的性质, 至少以下是较为明确的: 其一, 电磁波属于物质波, 且为横波, 由此推测, 电磁波样物质是以波的形式存在的物质, 且属于横波物质; 其二, 电磁波在真空中的传播速度为常数  $c$ , 据此推测, 电磁波样物质是以恒定速度  $c$  运动的物质; 其三, 电磁波依靠自身电磁振荡实现传播, 由此推测, 电磁波样物质具有自发的电磁运动, 能够产生变化的电场与变化的磁场, 进而推动其以恒定速度  $c$  运动。因此, 物质波与电磁波等价。粒子的物质波是构成该粒子的电磁波样物质本身的一种自发电磁运动, 对应于电磁波样物质在复空间分布的波动。

构成基底粒子的电磁波样物质总是以恒速度  $c$  运动着的, 这样的观点并不新鲜, 爱因斯坦就曾提出过类似见解, 他认为一切物质总是以一个固定的速度——光速  $c$ , 在时空里运动<sup>[17]</sup>。鉴于光速  $c$  具有极限性与绝对性, 此处将  $c$  定义为物质运动的绝对速度, 而把物质以绝对速度  $c$  运动定义为物质的绝对运动。电磁波样物质是以绝对速度  $c$  运动的物质, 它的运动即为绝对运动。由 (1) 式可知, 构成粒子的电磁波样物质于欧氏空间和粒子内禀空间分别以空间运动速度  $v$  和时间运动速度  $u$  运动, 这两个速度的合速度为复数  $w$ 。依据物质绝对运动的定义, 合速度  $w$  的模应恒等于绝对速度  $c$ , 即:

$$|w| = \sqrt{v^2 + u^2} \equiv c \quad (2)$$

于是有:

$$c^2 = v^2 + u^2 \quad (3)$$

当粒子以空间运动速度  $v$  在欧氏空间运动时, 粒子的时间运动速度为:

$$u = c \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (4)$$

上式表明, 当  $v \rightarrow 0$  时,  $u \rightarrow c$ , 如果粒子在欧氏空间保持静止 ( $v=0$ ), 则粒子的时间运动速度等于绝对速度 ( $u=c$ ); 当  $v \rightarrow c$  时,  $u \rightarrow 0$ , 如果粒子在欧氏空间以绝对速度运动 ( $v=c$ ), 则粒子的时间运动速度为零 ( $u=0$ )。空间运动速度、时间运动速度和绝对速度的关系可以用图 1 表示:

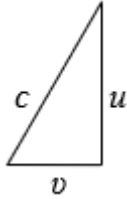


图 1 物质运动速度三角形

以上设想的物质运动模型, 可称为物质绝对运动模型。在该模型中, 所有基底粒子都是由电磁波样物质构成的物质波包, 且所有电磁波样物质均在欧氏空间和粒子内禀空间的复合空间中运动, 因而具有空间运动速度和时间运动速度两个分速度, 二者的合速度的模恒等于绝对速度  $c$ 。依据此模型, 构成粒子的电磁波样物质在复时空的运动速度是不变的且绝对的, 与参考系的选择无关, 而电磁波样物质分别在欧氏空间和粒子内禀空间的运动速度是可变的和相对的, 与参考系的选择有关。同一粒子相对不同运动状态的参考系, 可具有不同的空间运动速度和时间运动速度, 但其合速度的模保持不变。

假定标准模型中的全部粒子皆为基底粒子, 那么存在 62 种基底粒子, 包括 36 种夸克、12 种轻子、1 种传递电磁相互作用的光子、3 种传递弱相互作用的中间玻色子、8 种传递强相互作用的胶子、1 种传递引力相互作用的引力子、1 种生成粒子质量的希格斯玻色子。依据这些基底粒子的绝对运动特性, 可将其划分为两类: 一类是时间运动速度为零 (即  $u=0, v=c$ ) 的传递相互作用的媒介粒子, 如光子、引力子、胶子等; 另一类是时间运动速度大于零 (即  $0 < u \leq c, 0 \leq v < c$ ) 的实物粒子, 如轻子、夸克等。质子、中子、原子等都是由各种基底粒子耦合而成的复合粒子。实物粒子是一定量电磁波样物质通过非线性耦合形成的束缚型物质波包, 由于内部存在非线性作用, 所以实物粒子可称为非线性粒子。媒介粒子是一定量电磁波样物质构成的发散型物质波包, 其内部不存在非线性作用, 所以媒介粒子可称为线性粒子。复合粒子通常是由两个以上非线性粒

子耦合而成的, 因此复合粒子均为非线性粒子。非线性粒子因其内部结构的复杂性和相互作用的非线性特征, 表现出质量、电荷等可观测属性。而线性粒子由于缺乏内部束缚机制, 始终以光速传播, 不具有静止质量。两类粒子在时空中的运动行为差异, 源于其物质波包的构造方式不同。

物质绝对运动模型与爱因斯坦晚年的研究有所契合。爱因斯坦曾设想: “既然依据我们今天的见解, 物质的基本粒子按其本质来说, 不过是电磁场的凝聚, 而决非别的什么, 那末我们今天的世界图像, 就得承认有两种在概念上彼此完全独立的 (尽管在因果关系上是相互联系的) 实在, 即引力场和电磁场, 或者——人们还可以把它们叫做——空间和物质” [18]。他还指出: “我们离开拥有一种合理的并符合事实的关于光和物质的理论还远得很呢! 我觉得只有大胆的思辨而不是经验的堆积才能使们进步。”然而, 他后半生思辨努力的结果却毫无斩获。“怎么可能把光化归为运动的物质元素呢? 这曾经拼命地尝试过, 但未获成功, 最后终于放弃了这一企图”。爱因斯坦在晚年还表示: “整整五十年有意识的思考还没有使我更接近于光量子是什么的答案。当然, 今天每一个不老实的人以为他知道了答案, 但他是在欺骗自己” [19]。物质绝对运动模型基本延续了爱因斯坦的研究思路, 不同之处在于, 该模型并非单纯思辨的产物, 而是与实验 (正负电子和光子的相互转化) 相契合的物理构想。

## 1.2 粒子的空间运动和时间运动

可以用时间  $t$  乘 (1) 式, 得:

$$wt = vt + i ut \quad (5)$$

由此可定义三个位移:

$$s_v = vt, \quad s_u = ut, \quad s_w = wt \quad (6)$$

$s_v$  是粒子波包在欧氏空间的位移;  $s_u$  是电磁波样物质 (或物质波元) 在粒子内禀空间的位移;  $s_w$  是电磁波样物质在复时空的位移。则 (5) 式可写成:

$$s_w = s_v + i s_u \quad (7)$$

空间运动速度  $v$  是欧氏空间的速度矢量, 可由笛卡尔坐标的各分量表示为:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (8)$$

粒子的欧氏空间位移  $s_v$  可表示为:

$$s_v = vt = \sqrt{(v_x t)^2 + (v_y t)^2 + (v_z t)^2} \quad (9)$$

如果选择粒子的初始位置作为笛卡儿坐标的坐标原点，则可用粒子的空间坐标  $(x, y, z)$  表示粒子的欧氏空间位移的各分量，即：

$$s_v = \sqrt{(v_x t)^2 + (v_y t)^2 + (v_z t)^2} = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (10)$$

粒子的空间运动系指粒子波包在欧氏空间的位置移动， $s_v$  能够被定义为粒子的空间位移；粒子的时间运动系指构成粒子的电磁波样物质的空间分布的周期性波动， $s_u$  可被定义为粒子的时间位移。由于任

$$|s_w| = \sqrt{s_v^2 + s_u^2} = \sqrt{(vt)^2 + (ut)^2} = ct \quad (11)$$

则有：

$$c^2 t^2 = (vt)^2 + (ut)^2 = (v_x t)^2 + (v_y t)^2 + (v_z t)^2 + (ut)^2 = x^2 + y^2 + z^2 + u^2 t^2 \quad (12)$$

上式可改写成：

$$u^2 t^2 = c^2 t^2 - x^2 - y^2 - z^2 \quad (13)$$

等号左边为时间位移的平方，即：

$$s_u^2 = c^2 t^2 - x^2 - y^2 - z^2 \quad (14)$$

去掉时间位移的下标：

$$s^2 = c^2 t^2 - x^2 - y^2 - z^2 \quad (15)$$

上式与所谓闵可夫斯基 (Minkowski) 空间或闵可夫斯基世界具有完全相同的数学形式。在闵可夫斯基空间， $s$  称为时空间隔或间隔，是洛伦兹变换下的不变量。比较 (14) 式和 (15) 式可知，所谓时空间隔  $s$  实际上就是时间位移  $s_u$ ，由此推测，时间位移  $s_u$  可能是坐标变换下的不变量。

那么，该如何理解时间位移的不变性呢？可以假设粒子  $A$  在坐标系  $K$  中保持静止，另一坐标系  $K'$  相对坐标系  $K$  以速度  $V$  运动，那么，粒子  $A$  在坐标系  $K$  的空间运动速度和时间运动速度分别为  $v=0$  和  $u=c$ ，而粒子  $A$  在坐标系  $K'$  的空间运动速度和时间运动速度分别为  $v'=V$  和  $u'=c(1-V^2/c^2)^{1/2}$ 。粒子  $A$  的时间运动指的是粒子  $A$  的物质波在粒子内禀空间的周期性波动，时间位移指的是物质波元在粒子内禀空间的位置移动，所谓时间位移不变性，是指粒子  $A$  的物质波在坐标系  $K$  产生一次波动所对应的的时间位移 ( $s_u$ ) 与在坐标系  $K'$  产生一次波动

何周期性过程都能充当时间的原始标准，比如，作为时间基准的原子钟，就是通过让微波在谐振腔内的固定距离间往返传播形成振荡来实现计时的<sup>[20]</sup>。粒子内禀空间好比一个谐振腔，物质波在其内部循环传播就像一个粒子钟，所以，粒子内禀空间中的物质运动具备时间的特性，物质波元在粒子内禀空间的位移能够被看作粒子的“时间位移”。这样一来，(7) 式中三个位移的物理意义就十分清晰了： $s_v$  属于空间位移，表示空间距离； $s_u$  属于时间位移，表示时间距离； $s_w$  属于时空位移，表示时空距离。 $s_w$  的模：

所对应的的时间位移 ( $s'_u$ ) 相等，即：

$$s_u = s'_u \text{ 或 } uT = u'T' \quad (16)$$

$T$  和  $T'$  分别代表粒子  $A$  的物质波在坐标系  $K$  和  $K'$  的波动周期。鉴于粒子的时间运动本质上是指粒子内禀空间的物质运动，而粒子自旋实为粒子内部物质运动的一种表现形式，因此可以认为，粒子自旋是粒子时间运动的一种具体表现形式。可将粒子自旋诠释为构成粒子的电磁波样物质在粒子内禀空间循环往复的流动，物质波的一次波动等同于电磁波样物质在粒子内禀空间流动一周，其对应的的时间位移即为电磁波样物质运行一周所产生的位移。根据上式，构成粒子  $A$  的电磁波样物质在粒子内禀空间运行一周（或物质波的一个波动周期）所产生的位移在坐标系  $K$  和  $K'$  是相等的，也就是说，粒子  $A$  自旋一周所对应的的时间位移在所有参考系中

均相等。由上述公式可推得：

$$T' = \frac{uT}{u'} = \frac{T}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (17)$$

这意味着若要维持时间位移恒定，粒子  $A$  的物质波于  $K'$  坐标系中的波动周期  $T'$  需延长。此周期延长现象恰为时间膨胀效应的具体体现。

由 (14) 和 (15) 式可知，时空间隔  $s$  和时间位移  $s_u$  是等效的。在闵可夫斯基空间里，时空间隔  $s$  的物理意义并不明确，因为闵氏几何仅作为一种数学技巧被引入狭义相对论。通过将相对论问题进行几何化处理，简化了狭义相对论的数学表达，但闵氏几何对于理解相对论效应的物理机制所提供的助益非常有限。然而，在物质的绝对运动模型中，时间位移  $s_u$  具有明确的物理意义。若  $s_u$  在坐标变换下保持不变，那么其作为物理量的普适性便得以确立，从而为进一步揭示狭义相对论效应的物理起源创造了条件。

根据 (6) 式第二式，可以把时间  $t$  定义为：

$$t = \frac{s_u}{u} \quad (18)$$

此处的  $t$  表示时间运动速度为  $u$  的粒子的时间。式中  $u$  作为粒子时间  $t$  的度量标准，可称作时间度标，或简称时标。 $s_u$  为坐标变换下的不变量。若粒子于坐标系中处于静止状态 ( $v=0$ )，则静止粒子的时标  $u=c$ ，静止粒子的时间：

$$t = \frac{s_u}{c} \quad (19)$$

可将  $u=c$  定义为绝对时标，以绝对时标  $c$  进行标度的粒子时间可称作粒子的绝对时间，亦称为固有时或原时，用  $\tau$  表示：

$$\tau = \frac{s_u}{c} \quad (20)$$

时标  $u < c$  可界定为相对时标，以相对时标  $u$  进行标度的粒子时间可称作粒子的相对时间，亦称为坐标时。假定粒子相对静止参考系以速度  $v$  做匀速直线运动，依据 (4) 式可知，该运动粒子相对静止参考系的时标：

$$u = c\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

代入 (18) 式，得到运动粒子相对静止参考系的坐标时：

$$t = \frac{s_u}{c\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{\tau}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (21)$$

坐标时  $t$  大于原时  $\tau$ ，与狭义相对论关于时间膨胀的结论相契合。

由 (6) 式第二式和 (21) 式可得：

$$s_u = ut = ct\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = c\tau \quad (22)$$

亦即：

$$ut = c\tau \quad (23)$$

时间位移  $s_u$  等于绝对时标  $c$  和绝对时间  $\tau$  的乘积，这表明  $s_u$  为不变量，与参考系的选择无关。同一粒子相对不同运动状态的参考系可以有不同的时标 ( $u$ ) 和坐标时 ( $t$ )，但粒子的时间位移  $s_u (=ut = c\tau)$  保持不变。基于此，我们可以重新理解“同时性”：所谓同时性，即时间位移的不变性，是指粒子在不同运动状态的参考系里时间位移相等。这种对同时性的解读有别于爱因斯坦提出的“同时的相对性”，它给予了同时性以绝对性的含义。

以往的物理学仅聚焦于物质的空间运动，对物质的时间运动鲜有探讨。通常，粒子的空间运动会借助空间位移  $s_v$ 、空间运动速度  $v$  和时间  $t$  这三个物理量予以描述。同样，粒子的时间运动能够利用时间位移  $s_u$ 、时间运动速度  $u$  和粒子时间  $t$  这三个物理量来刻画。值得注意的是，时间  $t$  和粒子时间  $t$  是两个不同的时间概念。时间  $t$  是人为设定并引入的参量，可称其为标度时间，它和粒子自身的运动毫无关联，是人们依据可观测的周期性运动制定的时间标准，1 秒被规定为 1 个平均太阳日的  $1/86400$ ，或者等同于铯 133 原子基态两个超精细能级间跃迁对应辐射周期的  $9192631770$  倍。而粒子时间  $t$  与粒子自身运动相关联，它是粒子时间位移与时间运动速度的比值（即  $t=s_u/u$ ），标度时间  $t$  的引入既为空间运动速度  $v$  的测量创造了条件，又为粒子时间  $t$  设定了参照标准。实际上，标度时

间  $t$  可被看作是对静止粒子的时间  $t_0$  或原时  $\tau$  的模拟 (即  $t=t_0=\tau$ )，于是，粒子时间与标度时间的关系便是坐标时与原时的关系。在描写粒子的时间运动的三个参量中，时间位移  $s_u$  和时间运动速度  $u$  是客观实在量，而粒子时间  $t$  是派生的量。衡量粒子的时间运动应该采用客观实在量，正如衡量粒子的空间运动需采用空间位移  $s_o$  一样，粒子的时间运动应该用时间位移  $s_u$  的大小来衡量。由于  $s_u$  在坐标变换下为不变量，所以采用  $s_u$  度量粒子的时间运动就会发现，同时性是绝对的，时间的流逝极有可能是均匀的。以往总是用时间  $t$  或粒子时间  $t$  来表征时间，许多疑难和佯谬可能由此而产生。

上述见解超越了传统时间观念的束缚，将时间位移作为基本物理量加以确立，使时间不再仅是事件排序的参量，而成为可度量的运动属性。不同参考系中观测到的时间差异仅源于标度时间的相对性，而时间位移本身恒定不变。这表明，时间并非如相对论所强调的那样本质上是相对的，而是通过

引入粒子时间与标度时间的区分，在时间位移不变性的基础上，实现了绝对性与相对性的统一。时间运动的本质因此更清晰地显现——它是一种内禀的、不受观测影响的物理过程。

## 2 绝对运动的四维时空

### 2.1 绝对运动的四维时空的复平面表示

物质绝对运动的时空关系呈现为复域的时空关系。如图 2 所示，实轴表征三维空间运动及其空间位移  $S_o$  (只画出  $x$  轴)，虚轴表征一维时间运动及其时间位移  $is_u (=iut)$ ，由此构成的四维时空  $(x, y, z, iut)$  为复时空或称复空间，可定义为绝对运动的四维时空。其与闵可夫斯基的四维时空  $(x, y, z, ct)$  [21-23] 有所不同，闵可夫斯基的四维时空的时轴用  $ct$  标示，而  $ct$  实则为时空位移  $s_w$  的模。故而， $(x, y, z, iut)$  是复时空， $(x, y, z, ct)$  是所谓伪欧时空，它们的时间轴都不是简单的时间  $t$ ，而是速度和时间  $t$  的乘积 ( $iut$  和  $ct$ )，从而确保时间轴与空间轴的量纲保持一致。

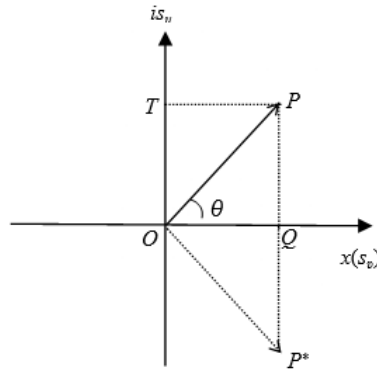


图 2 绝对运动的四维时空

绝对运动的四维时空可以用一个复平面来表示。如图 2 所示，任意时空点  $P$  可用复平面上的一个复数表示为：

$$Z_p = x + is_u = OQ + iT \quad (24)$$

复数  $Z_p$  的实部  $OQ$  是  $P$  点距  $O$  点的空间距离  $S_o$ ，虚部  $iOT$  是  $P$  点距  $O$  点的时间距离  $is_u$ 。  $Z_p$  也可以表示为复平面上的一个矢量：

$$Z_p = \vec{OP} = OP e^{i\theta} \quad (25)$$

$OP = |\vec{OP}| = |Z_p|$  是  $P$  点距  $O$  点的时空距离， $\theta$  为  $Z_p$  的辐角。

假设一粒子  $P$  从坐标原点  $O$  以速度  $v_p$  沿  $x$  轴

正方向运动，经时间  $t_p$  到达  $P$  点，那么复数  $Z_p$  可写成：

$$Z_p = v_p t_p + iu_p t_p = s_o + is_u \quad (26)$$

$t_p$  是粒子  $P$  的时间，能依据(18)式定义成  $t_p = s_o / u_p$ 。复数  $Z_p$  的实部体现的是粒子  $P$  的空间运动状态，虚部则体现粒子  $P$  的时间运动状态。时空点  $P$  可记为  $P(v_p t_p, iu_p t_p)$  或  $P(s_o, is_u)$ ，其中  $s_o = OQ = v_p t_p$  表示粒子  $P$  的空间位移； $is_u = OT = iu_p t_p$  表示粒子  $P$  的时间位移； $|Z_p| = OP = ct_p$  表示粒子  $P$  的时空位移。如此一来，时空点  $P$  或复数  $Z_p$  所表征的实际上是一个粒子以空间运动速度  $v$  和时间运动速度  $u$  从复坐标原点  $O$  到时空点  $P$  的运动过程，或者说，

复平面上任意时空点对应于一个特定粒子的绝对运动状态。可以把这种与特定时空点对应的粒子称为时空点粒子，例如，时空点  $P$  对应于时空点粒子  $P$ ，它可由复数  $Z_P$  来描写。复平面可看作所有时空点粒子的集合，每一个时空点都对应着一个时空点粒子，并可表示为一个复数，该复数的实部表示时空点粒子距原点  $O$  的空间位移，虚部表示时空点粒子距原点  $O$  的时间位移。在图 2 中，矢量  $\vec{OP}$  是时空点粒子  $P$  的时空位移矢量，简称时空位矢。如果时空点粒子  $P$  在欧氏空间保持静止（即  $v_P=0, u_P=c$ ），则有  $s_v=v_P t_P=0, s_u=u_P t_P=ct_P=|Z_P|, \theta=\pi/2$ ，即静止粒子的时间位移和时空位移相等，静止粒子的时空位矢与虚轴  $is_u$  重合。因此，复坐标的虚轴可视为静止粒子的时间位移轴，虚轴上的时空点粒子皆为静止粒子。如果时空点粒子  $P$  以光速运动（即  $v_P=c, u_P=0$ ），则  $is_u=iu_P t_P=0, s_v=v_P t_P=ct_P=|Z_P|, \theta=0$ ，这表明光子的时空位矢与实轴  $x$  重合，所以复坐标的实轴是光子的空间位移轴，实轴上的时空点粒子都是光子，可称作光轴。

由此可见，复平面不仅统一描述了粒子的空间运动与时间运动，而且通过幅角  $\theta$  的连续变化反映了粒子从静止到光速运动的全过程。当粒子的空间运动速度由 0 增至  $c$  时，其时空位矢从虚轴逐渐转向实轴，幅角  $\theta$  由  $\pi/2$  减至 0，体现出空间位移与时间位移之间的动态平衡。这一几何图像为理解物质的绝对运动及其相对性原理提供了直观的复数框架。在此框架下，任意粒子的运动状态均可通过复平面中的射线  $OP$ （即时空位矢  $\vec{OP}$ ）唯一确定。

以光轴为界，在复平面的上半部分（第一、二象限），时空点粒子的时间位移呈现为正虚数，可将其视作物质粒子的时间位移；而在复平面的下半部分（第三、四象限），时空点粒子的时间位移表

现为负虚数，可将其视为反物质粒子的时间位移。换言之，复平面第一、二象限的时空点粒子属于物质粒子，复平面第三、四象限的时空点粒子则属于反物质粒子。复数  $Z_P$  的共轭复数为：

$$Z_P^* = v_P t_P - iu_P t_P = s_v - is_u \quad (27)$$

$Z_P^*$  描写反物质粒子  $P^*$  的绝对运动。 $P$  和  $P^*$  是两个共轭对称的时空点粒子（见图 2），二者互为反粒子。比较上式和 (26) 式可知，正、反物质粒子的差别仅体现为复数虚部的符号相反，这表明正、反粒子在时间运动方向上相反，亦可理解为构成正、反粒子的电磁波样物质的空间构型相反。此结论与费曼对反粒子的描述相契合，在费曼图上，正、反粒子的时间箭头方向相反。因此，复平面上的共轭对称性体现了正、反粒子在时间演化方向上的对立关系以及它们在时空结构上的镜像关系，进而可能与  $CPT$  对称性存在某种对应关系。

2.2 几何诠释：等时线、等速线与时空投影

可于复平面上绘制直线  $d, l, m$  和圆  $q$ 。如图 3 所示，圆  $q$  是以  $O$  点为圆心、以任意长度为半径的圆，圆周上所有时空点粒子与  $O$  点的时空距离相等，因此  $q$  可称作等时空位移线。直线  $d$  与实轴  $x$  平行，该直线上所有时空点粒子与  $O$  点的时间距离相等，所以直线  $d$  可称为等时间位移线。直线  $l$  与虚轴  $is_u$  平行，该直线上所有时空点粒子与  $O$  点的空间距离相等，故而  $l$  可称为等空间位移线。直线  $m$  是从  $O$  点引出的一条直线，处于该直线上的时空点粒子的空间运动速度  $v$  相等，时间运动速度  $u$  相等，所以  $m$  可称为等速线。鉴于位于同一等速线上的时空点粒子的幅角  $\theta$  相等，因此等速线也可称为等辐角线。接下来分别对复平面上的等时间位移线、等空间位移线、等时空位移线和等辐角线展开考察。

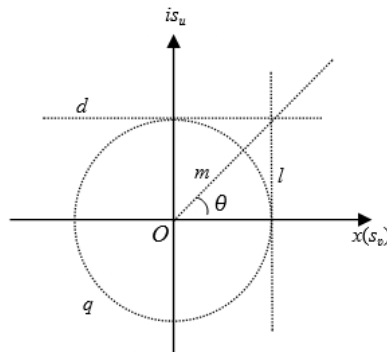


图 3 复平面上的几何图形

如图 4 所示,  $A$ 、 $B$ 、 $C$  是等时间位移线  $d$  上的三个时空点粒子, 粒子  $A$  的空间运动速度  $v_A=0$ , 粒子  $B$  的空间运动速度为  $v_B$ , 粒子  $C$  的空间运动速度为  $v_C$ 。  $\vec{OA}$ 、 $\vec{OB}$ 、 $\vec{OC}$  分别是粒子  $A$ 、 $B$ 、 $C$  的时空位矢。根据 (4) 式, 三个粒子的时间运动速度 (即时标) 分别为:

$$u_A = c \quad (28)$$

$$u_B = c \sqrt{1 - \frac{v_B^2}{c^2}} \quad (29)$$

$$u_C = c \sqrt{1 - \frac{v_C^2}{c^2}} \quad (30)$$

三个时空点粒子的时间位移相等, 均为  $OA$ 。按照粒子时间的定义式 (18) 式, 三个粒子的时间分别为:

$$t_A = \frac{OA}{u_A} = \frac{OA}{c} \quad (31)$$

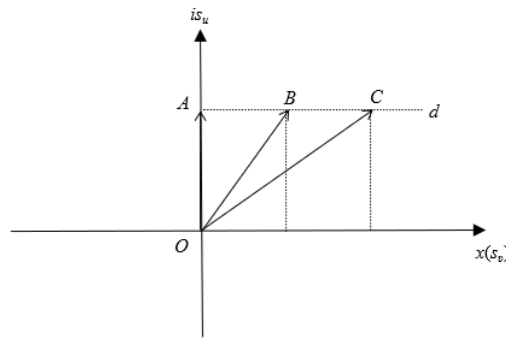


图 4 等时间位移线

$$t_B = \frac{OA}{u_B} = \frac{OA}{c \sqrt{1 - \frac{v_B^2}{c^2}}} = \frac{t_A}{\sqrt{1 - \frac{v_B^2}{c^2}}} \quad (32)$$

$$t_C = \frac{OA}{u_C} = \frac{OA}{c \sqrt{1 - \frac{v_C^2}{c^2}}} = \frac{t_A}{\sqrt{1 - \frac{v_C^2}{c^2}}} \quad (33)$$

粒子  $A$  的时标为绝对时标  $c$ , 故粒子  $A$  的时间  $t_A$  可视为原时或绝对时间。上式表明, 如果以静止粒子  $A$  为参考系, 那么运动粒子  $B$ 、 $C$  的时间比静止粒子  $A$  的时间延长。比较 (32) 和 (33) 式, 可得到粒子  $B$  和粒子  $C$  的时间关系:

$$t_C = \frac{t_B \sqrt{1 - \frac{v_B^2}{c^2}}}{\sqrt{1 - \frac{v_C^2}{c^2}}} \quad (34)$$

$$t_B = \frac{t_C \sqrt{1 - \frac{v_C^2}{c^2}}}{\sqrt{1 - \frac{v_B^2}{c^2}}} \quad (35)$$

三个粒子的时间位移相等，即：

$$u_A t_A = u_B t_B = u_C t_C = ct_A \quad (36)$$

时空点粒子  $A$ 、 $B$ 、 $C$  的空间位移分别为  $0$ 、 $v_B t_B$  和  $v_C t_C$ 。那么，时空点  $A$ 、 $B$ 、 $C$  可分别用复数表示为：

$$Z_A = 0 + iu_A t_A = iu_A t_A = ict_A \quad (37)$$

$$Z_B = v_B t_B + iu_B t_B = v_B t_B + ict_A \quad (38)$$

$$Z_C = v_C t_C + iu_C t_C = v_C t_C + ict_A \quad (39)$$

上面三个复数的虚部（时间位移）相等，实部（空间位移）不相等。三个复数的模分别为：

$$|Z_A| = ct_A, \quad |Z_B| = ct_B, \quad |Z_C| = ct_C \quad (40)$$

表明三个时空点粒子的绝对运动需要用各自的粒子时间（ $t_A$ 、 $t_B$ 、 $t_C$ ）来描写。在同一条等时间位移线  $d$  上，任意时空点  $P_i$  可表示为一个复数  $Z_i (v_i t_i, iu_i t_i)$ ，这些复数的虚部相等，实部不相等，复平面可视为无数条相互平行的等时间位移线铺排而成的平面。在这样的复平面中，“同时性”系指粒子的时间位移相等，但粒子的坐标时间  $t_i$  不相等。

下面考察等时空位移线的情形。如图 5 所示，此图是在图 4 的基础上，以  $OA$  为半径绘制等时空位移线  $q$ ，该线与  $OA$ 、 $OB$  和  $OC$  分别相交于  $A$ 、 $B_q$  和  $C_q$  点，此时，时空点粒子  $A$ 、 $B_q$ 、 $C_q$  的时空位移相等，即：

$$OA = OB_q = OC_q = ct_A \quad (41)$$

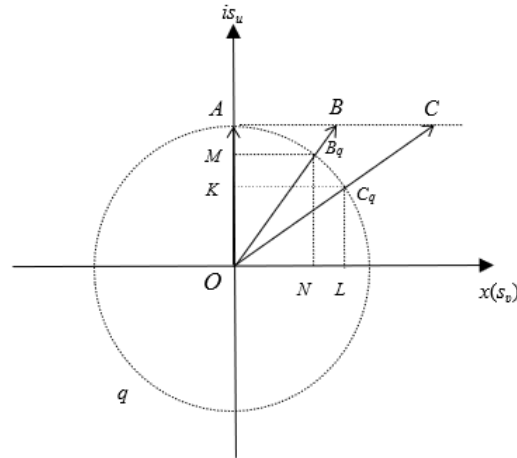


图 5 等时空位移线

由于时空点粒子  $B$  和  $B_q$  或  $C$  和  $C_q$  位于同一条等速线上，所以时空点粒子  $B_q$  的空间运动速度  $v_{B_q} = v_B$ ，时空点粒子  $C_q$  的空间运动速度  $v_{C_q} = v_C$ ，而粒子  $B_q$  和粒子  $C_q$  的时间分别为  $t_{B_q}$  和  $t_{C_q}$ 。由此得到时空点粒子  $B_q$  的空间位移  $MB_q = v_B t_{B_q}$ ，时间位移  $NB_q = u_B t_{B_q}$ ；时空点粒子  $C_q$  的空间位移  $KC_q = v_C t_{C_q}$ ，时间位移  $LC_q = u_C t_{C_q}$ 。时空点  $B_q$  和  $C_q$  可用复数表示为：

$$Z_{B_q} = v_B t_{B_q} + iu_B t_{B_q} \quad (42)$$

$$Z_{C_q} = v_C t_{C_q} + iu_C t_{C_q} \quad (43)$$

两个复数的模分别为：

$$|Z_{B_q}| = OB_q = ct_{B_q} = ct_A \quad (44)$$

$$|Z_{Cq}| = OC_q = ct_{Cq} = ct_A \tag{45}$$

于是有：

$$t_{Bq} = t_{Cq} = t_A \tag{46}$$

则复数  $Z_{Bq}$  和  $Z_{Cq}$  可改写成：

$$Z_{Bq} = v_B t_A + iu_B t_A \tag{47}$$

$$Z_{Cq} = v_C t_A + iu_C t_A \tag{48}$$

由此可知，在等时空位移线上，三个时空点粒子  $A$ 、 $B_q$ 、 $C_q$  的绝对运动能够统一采用时间  $t_A$  予以描述；换言之，等时空位移线上所有时空点粒子的坐标时间相等，故而等时空位移线也可称为等时线。等时线  $q$  上任意时空点  $P_i$  可表示为一个复数  $Z_i(v_i t_A, iu_i t_A)$ ，且所有这些复数的模 ( $ct_A$ ) 均相等。复平面可视为由无数个不同半径的同心圆（即等时空位移线）铺排而成的平面。显然，在这样的复平面中，“同时性”是指粒子的坐标时间  $t_i$  相等，然而粒子的时间位移并不相等。

等空间位移线为与虚轴平行的直线，即如图 3 所示的直线  $l$ 。直线  $l$  上所有时空点粒子的空间位移相等，然而其空间运动速度、时间运动速度和粒子时间各不相同，粒子的时间位移和时空位移也不相同。

等辐角线（或等速线）是从复坐标原点引出的直线，即如图 3 所示的直线  $m$ 。直线  $m$  上所有时空点粒子的空间运动速度和时间运动速度相等，然而粒子的空间位移、时间位移和粒子时间并不相等。

在图 5 所示的复坐标系中，粒子  $A$  是所谓“静止”粒子，此处的“静止”指的是粒子在坐标系中的空间运动速度为零，时间运动速度为绝对速度  $c$ ，即粒子  $A$  是沿虚轴以绝对速度  $c$  运动的粒子，其时间位移等于时空位移。虚轴上的时空点粒子是静止粒子，而静止粒子的时标为绝对时标  $c$ ，故静止粒子的时间为绝对时间  $\tau$ （即原时或固有时）。可以把虚轴上的时空点粒子的时间设定为复坐标系的固有时间，所有运动粒子的坐标时间都是参照固有时间而确定的相对时间。等时空位移线  $q$  上的所有时空点粒子的空间位移和时间位移可以用坐标系固有时间来描写，而等时间位移线  $d$  上的所有时空点粒子的空间位移和时间位移必须用不同的粒子的坐标时间来描写。通常情况下，我们把人为设定和引进的标度时间  $t$  视为静止粒子的时间  $\tau$ ，那么所有时空点粒子的坐标时间均可看作是以标度时间  $t$  为参照的相对时间。

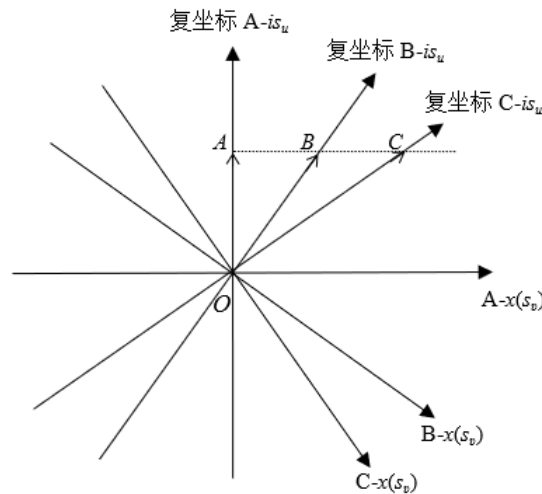


图 6 复坐标架的转动

前文所探讨的是以静止粒子  $A$  为参考系的复坐标系，实际上，我们亦可选取运动粒子作为参考系来构建复坐标系。如图 6 所示，可使时间位移轴  $is_u$  与运动粒子  $B$  的时空位矢  $OB$  相重合，构建一个以运动粒子

$B$  为参考系的复坐标系  $B$ ，其空间位移轴  $s_b$  始终与时间位移轴  $is_u$  垂直正交。同样，也能够将虚轴与运动粒子  $C$  的时空位矢  $OC$  相重合，构建一个以运动粒子  $C$  为参考系的复坐标系  $C$ 。此类以运动粒子为参考系的复坐标系，本质上只是复坐标架的转动。

上述分析显示，绝对运动的四维时空能够借助一条时间位移轴与一条空间位移轴所描绘的复平面来呈现。复平面上的每一个时空点，均可表示为一个复数，此复数对应着一个粒子自坐标原点至该时空点的时间位移与空间位移，该对应粒子可称作时空点粒子。

以实轴  $x$  为界，复平面可划分为两部分。 $x$  轴上方的时空点粒子均为物质粒子， $x$  轴下方的时空点粒子均为反物质粒子，实轴上的时空点粒子为光子。在等时间位移线上，时空点粒子的时间位移相等；在等空间位移线上，时空点粒子的空间位移相等；在等时空位移线上，时空点粒子的时空位移相等；在等辐角线上，时空点粒子的运动速度（包含空间运动速度与时间运动速度）相等。对于复平面上的任意时空点  $P_i$ ，仅有一条等时间位移线、一条等空间位移线、一条等时空位移线以及一条等速线与  $P_i$  相交。因此，复平面可被视作由这些线条连续铺排所构成的平面，如图 7 所示。图中所绘制的是静止坐标系  $A$  的复平面，若变换至运动坐标系  $B$  或  $C$ ，则复平面  $A$  上所有线条的形状将会改变，即复平面会发生形变。

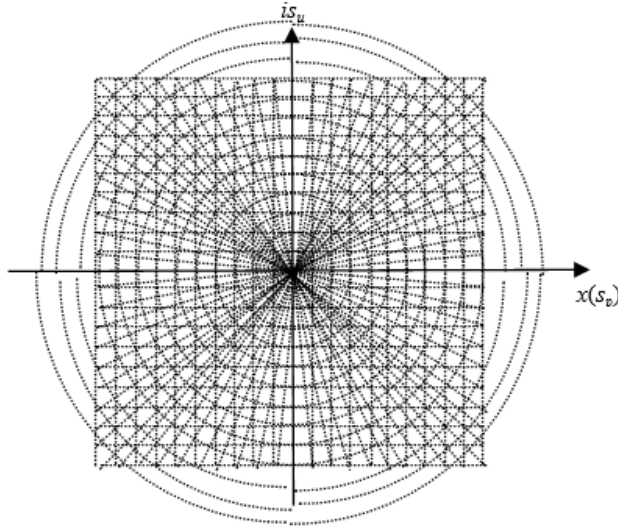


图 7 复平面

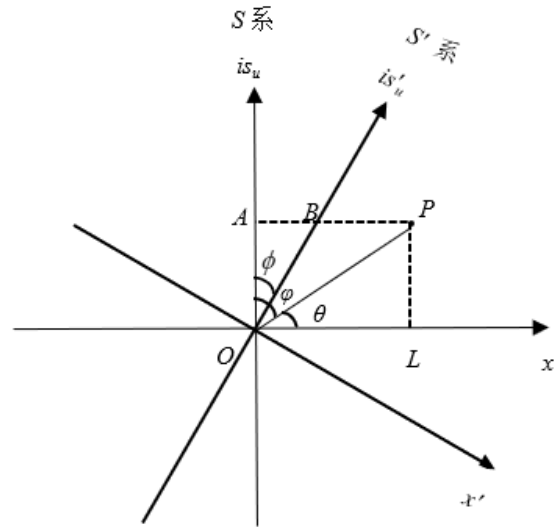


图 8 复平面的转动

### 3 绝对运动的时空坐标变换

#### 3.1 任意时空点的时空坐标变换

如图 8 所示，假定存在两个复坐标系  $S(x, is_u)$  和  $S'(x', is'_u)$ ，其中  $S$  系处于静止状态， $S'$  系沿  $x$  轴正方向以速度  $V$  相对  $S$  系运动，这相当于  $S'$  系的坐标轴沿顺时针方向的转动，转角  $\phi$  与速度  $V$  成正比。由  $S$  坐标系所构成的复平面称为  $S$  复平面，由  $S'$  坐标系所构成的复平面称为  $S'$  复平面。两个坐标系的时间  $t$  和  $t'$  可由相应坐标系中沿虚轴运动的粒子的时间表示。具体而言，沿虚轴  $is_u$  运动的粒子的空间运动速度  $v=0$ ，时间运动速度  $u=c$ ；沿虚轴  $is'_u$  运动的粒子的空间运动速度  $v=V$ ，时间运动速度  $u=c(1-V^2/c^2)^{1/2}$ 。 $P$  为  $S$  复平面上的一个时空点，该时空点对应于一个粒子以空间运动速度  $v$  和时间运动速度  $u(=c(1-v^2/c^2)^{1/2})$  从坐标原点  $O$  到时空点  $P$  的运动过程。因此，时空点  $P$  可由时空点粒子  $P$ （以下简称粒子  $P$ ）来表征。时空点粒子  $P$  的时空位矢  $\vec{OP}$  与虚轴  $is_u$  的夹角为  $\phi$ ， $\vec{OP}$  与实轴  $x$  的夹角为  $\theta$ ，且有  $\phi+\theta=\pi/2$ 。

由  $P$  点向虚轴  $is_u$  引垂线  $AP$ ，该垂线是  $S$  复平面上的等时间位移线，垂线  $AP$  与虚轴  $is'_u$  相交于  $B$  点，故时空点  $A, B, P$  位于同一条等时间位移线上。这三个时空点粒子的空间运动速度分别为  $v_A=0, v_B=V, v_P=v$ ，时间运动速度分别为  $u_A=c, u_B=c(1-V^2/c^2)^{1/2}, u_P=c(1-v^2/c^2)^{1/2}$ ，则时空点  $A, B, P$  可用复数表示为：

$$Z_A = v_A t_A + i u_A t_A = 0 + i c t_A \tag{49}$$

$$Z_B = v_B t_B + i u_B t_B = V t_B + i c t_B \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}} \quad (50)$$

$$Z_P = v_P t_P + u_P t_P = v t_P + i c t_P \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (51)$$

复数  $Z_P$  的辐角为  $\theta$ 。参照 (31) ~ (35) 式，可列出以下关系式：

$$t_B = \frac{t_A}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \quad (52)$$

$$t_P = \frac{t_A}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{t_B \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (53)$$

因：

$$OA = PL = ct_P \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = ct_B \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}} = ct_A$$

$$OB = ct_B, OP = ct_P, OL = AP = vt_P, AB = Vt_B$$

故有：

$$\sin \varphi = \frac{AP}{OP} = \frac{v}{c}, \cos \varphi = \frac{OA}{OP} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (54)$$

$$\sin \phi = \frac{AB}{OB} = \frac{V}{c}, \cos \phi = \frac{OA}{OB} = \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}} \quad (55)$$

$$\sin \theta = \frac{PL}{OP} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}, \cos \theta = \frac{OL}{OP} = \frac{v}{c} \quad (56)$$

当前，将  $S$  复平面的时空点  $P$  变换至  $S'$  复平面。如图 9a 所示，时空点  $A$ 、 $B$ 、 $P$  位于  $S$  复平面的同一条等时间位移线上，复坐标架  $S'$  的转动角为  $\phi$ ，时空矢  $\vec{OP}$  与虚轴  $is_u$  的夹角为  $\varphi$ ， $\vec{OP}$  的辐角为  $\theta$ （图中  $\varphi$  和  $\theta$  未标出，可参考图 8）。以  $OP$  为半径绘制等时空位移线  $q$ （图中虚线大圆），该线与虚轴  $is_u$  相交于  $C$  点，再以  $C$  为切点作一切线，此切线与虚轴  $is'_u$  相交于  $D$  点。其中， $A$  和  $C$  为虚轴  $is_u$  上的时空点， $B$  和  $D$  为虚轴  $is'_u$  上的时空点。依据“同时性”的定义，“同时性”指的是时间位移相等，那么时空点粒子  $A$  和  $B$  具有“同时性”，时空点粒子  $C$  和  $D$  同样具有“同时性”，然而它们的粒子时间并不相等。时空点粒子  $A$  和  $B$  的粒子时间  $t_A$  和  $t_B$  满足 (52) 式，同理，时空点粒子  $C$  和  $D$  的粒子时间  $t_C$  和  $t_D$  也满足相同的关系，即：

$$t_D = \frac{t_C}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \quad (57)$$

时空点粒子  $P$  可用 (51) 式列出的复数  $Z_P$  来表示，该复数的模：

$$|Z_P| = OP = ct_P = OC = ct_C \quad (58)$$

由于时空点粒子  $C$  和时空点粒子  $P$  位于同一条等时空位移线（等时线）上，故有：

$$t_C = t_P \quad (59)$$

且有:

$$t_D = \frac{t_P}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \quad (60)$$

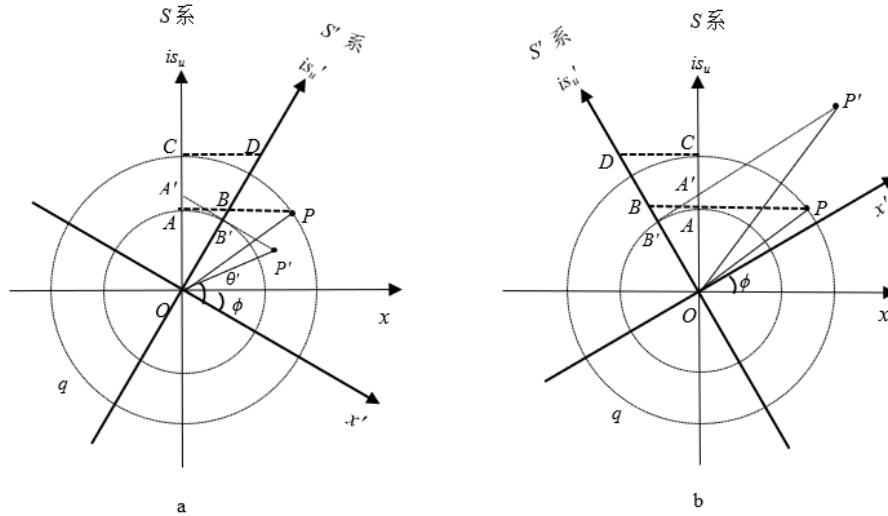


图9 任意时空点的时空坐标变换

根据 (53) 式, 可得:

$$t_A = t_P \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}, \quad t_B = t_D \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (61)$$

可将 (51) 式写成:

$$Z_P = vt_P + ict_P \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = PA + iOA \quad (62)$$

其中:

$$PA = vt_P \quad (63)$$

$$OA = ct_P \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (64)$$

当坐标从  $S$  系变换至  $S'$  系时,  $S$  复平面的时空点粒子  $P$  变换为  $S'$  复平面的时空点粒子  $P'$ , 变换前后的时间位移保持不变, 这就是同时的绝对性的含义。如图 9a 所示, 以  $OA$  为半径作一圆 (虚线小圆), 该圆与虚轴  $is'_u$  相交于  $B'$ ; 再以  $B'$  为切点引一切线, 该切线与虚轴  $is_u$  相交于  $A'$ , 时空点粒子  $A'$  和  $B'$  在  $S'$  系的时间位移为  $OB'$ , 显然存在:

$$OB' = OA = ct_P \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (65)$$

即  $S'$  系的时空点粒子  $A'$ 、 $B'$  的时间位移与  $S$  系的时空点粒子  $A$ 、 $B$ 、 $P$  的时间位移相等。  $S$  系中的时空点  $A$  变换至  $S'$  系对应的为  $A'$ , 而时空点  $B$  变换到  $S'$  系对应的是  $B'$ 。如此一来,  $S$  系中的时空点  $P$  变换至  $S'$  系所对

应的时空点  $P'$ , 应与  $A'$ 、 $B'$  处在同一条等时间位移线上, 换言之,  $P'$  必然处于切线  $A'B'$  的延长线之上。若设时空点粒子  $P$  在  $S'$  系的空间运动速度为  $v'$ , 粒子时间为  $t'_P$ , 则时空点  $P'$  可用复数表示为:

$$Z'_P = v't'_P + iu't'_P = B'P' + iOB' \quad (66)$$

图中  $\theta'$  为复数  $Z'_P$  的辐角。已知时空点粒子  $P$  在  $S$  坐标系的空间位移为  $AP=vt_P$ , 而时空点粒子  $P$  在  $S'$  坐标系的空间位移应为:

$$B'P' = (v-V)t_D = \frac{(v-V)t_P}{\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}} = v't'_P \quad (67)$$

$(v-V)$  是粒子  $P$  相对  $S'$  系的空间运动速度,  $t_D$  是  $t_P$  (亦即  $t_C$ ) 在  $S'$  系对应的时间。以上确定了时空点  $P'$  的空间坐标  $B'P'$  和时间坐标  $OB'$ 。复数  $Z'_P$  的模等于时空点粒子  $P'$  的时空位移:

$$|Z'_P| = OP' = ct'_P \quad (68)$$

应有:

$$OP'^2 = B'P'^2 + OB'^2 \quad (69)$$

将 (65)、(67) 和 (68) 式代入上式, 可得:

$$c^2 t'^2_P = (v-V)^2 t_D^2 + c^2 t_P^2 \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} = \frac{(v-V)^2 t_P^2}{\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}} + c^2 t_P^2 \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} \quad (70)$$

由此可解出  $t'_P$ , 即:

$$t'_P = \frac{\sqrt{\frac{(v-V)^2 t_P^2}{c^2 \sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}} + t_P^2 \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \frac{t_P - \frac{vV}{c^2} t_P}{\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}} \quad (71)$$

其中  $vt_P=x$ , 代入可得:

$$t'_P = \frac{t_P - \frac{Vx}{c^2}}{\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}} \quad (72)$$

这就是洛伦兹变换的时间变换式, 亦即时空点粒子  $P$  的时间变换式。

将 (72) 式代入 (67) 式, 可以解出  $v'$ :

$$v' = \frac{v-V}{1-\frac{vV}{c^2}} \quad (73)$$

这就是相对论速度合成公式, 亦即时空点粒子  $P$  的速度变换式。

由  $v't'_P=x'$ ,  $vt_P=x$ , 可将 (67) 式改写成:

$$x' = \frac{x - Vt_P}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \quad (74)$$

这就是洛伦兹变换的空间坐标变换式，即时空点粒子  $P$  的空间坐标变换式。

根据 (54)、(55) 和 (56) 式，可将时空点粒子  $P$  的空间坐标变换式、时间变换式和速度变换式改写成以下形式：

$$x' = \frac{vt_P - Vt_P}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} = \frac{\frac{v}{c} - \frac{V}{c}}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \cdot ct_P = \frac{\sin \varphi - \sin \phi}{\cos \phi} \cdot ct_P \quad (75)$$

$$t'_P = \frac{1 - \frac{vV}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \cdot t_P = \frac{1 - \sin \varphi \sin \phi}{\cos \phi} \cdot t_P \quad (76)$$

$$v' = \frac{\frac{v}{c} - \frac{V}{c}}{1 - \frac{vV}{c^2}} \cdot c = \frac{\sin \varphi - \sin \phi}{1 - \sin \varphi \sin \phi} \cdot c \quad (77)$$

由于时空点粒子  $P$  和  $P'$  的时间位移不变，故有：

$$s'_u = s_u = ct_P \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = ct_P \cos \varphi \quad (78)$$

将  $\varphi$  替换为辐角  $\theta$ ，则 (75) ~ (78) 式可写成：

$$x' = \frac{\cos \theta - \sin \phi}{\cos \phi} \cdot \rho \quad (79)$$

$$s'_u = \rho \sin \theta \quad (80)$$

$$t'_P = \frac{1 - \cos \theta \sin \phi}{\cos \phi} \cdot t_P \quad (81)$$

$$v' = \frac{\cos \theta - \sin \phi}{1 - \cos \theta \sin \phi} \cdot c \quad (82)$$

其中：

$$\rho = |Z_P| = ct_P \quad (83)$$

$\rho$  是复数  $Z_P$  的模，亦即时空点粒子  $P$  的时空位移。以上就是绝对运动的时空变换关系。

时空点  $P'$  用复数的三角函数式可表示为：

$$Z'_P = \rho' (\cos \theta' + i \sin \theta') \quad (84)$$

$\theta'$  为复数  $Z'_P$  的辐角。复数  $Z'_P$  的模：

$$\rho' = |Z'_P| = ct'_P = ct_P \frac{1 - \cos \theta \sin \phi}{\cos \phi} = \frac{1 - \cos \theta \sin \phi}{\cos \phi} \rho \quad (85)$$

根据 (79) 和 (80) 式, 可以把 (84) 式写成:

$$Z'_P = x' + is'_u = \rho \left( \frac{\cos \theta - \sin \phi}{\cos \phi} + i \sin \theta \right) \quad (86)$$

(86) 式和 (84) 式的实部和虚部分别相等, 由此可以解出:

$$\cos \theta' = \frac{\cos \theta - \sin \phi}{1 - \cos \theta \sin \phi} \quad (87)$$

$$\sin \theta' = \frac{\sin \theta \cos \phi}{1 - \cos \theta \sin \phi} \quad (88)$$

$$\tan \theta' = \frac{\sin \theta \cos \phi}{\cos \theta - \sin \phi} \quad (89)$$

辐角  $\theta'$  可定义为:

$$\theta' = \arctan \left( \frac{\sin \theta \cos \phi}{\cos \theta - \sin \phi} \right) \quad (90)$$

或写成:

$$\theta' = \arctan \left( \frac{\sqrt{1 - v^2/c^2} \sqrt{1 - V^2/c^2}}{v/c - V/c} \right) = \arctan \left( \frac{\alpha \alpha'}{\beta - \beta'} \right) \quad (91)$$

其中:

$$\alpha = \sqrt{1 - v^2/c^2}, \alpha' = \sqrt{1 - V^2/c^2}$$

$$\beta = \frac{v}{c}, \beta' = \frac{V}{c}$$

这是时空点的辐角变换公式。

假定在复坐标系中,  $S'$  系沿  $x$  轴负方向以速度  $V$  相对于  $S$  系做相对运动, 此情形等同于  $S'$  系的坐标轴沿逆时针方向转动  $\phi$ , 其它条件保持不变, 如图 9b 所示。可运用上述相同方法, 推导得出时空点粒子  $P$  的空间坐标 (即空间位移)、时间坐标 (即时间位移)、粒子时间以及速度等从  $S$  系到  $S'$  系的变换关系。各变换式的形式保持不变, 仅需将速度  $V$  替换为  $-V$ 。

$$x' = \frac{x + Vt}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} = \frac{\cos \theta + \sin \phi}{\cos \phi} \cdot \rho \quad (92)$$

$$s'_u = ct_P \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}} = \rho \sin \theta \quad (93)$$

$$t'_P = \frac{t_P + \frac{Vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} = \frac{1 + \cos \theta \sin \phi}{\cos \phi} \cdot t_P \quad (94)$$

$$v' = \frac{v+V}{1+\frac{vV}{c^2}} = \frac{\cos\theta + \sin\phi}{1 + \cos\theta \sin\phi} \cdot c \quad (95)$$

辐角  $\theta'$  的三角函数及辐角变换公式为:

$$\cos\theta' = \frac{\cos\theta + \sin\phi}{1 + \cos\theta \sin\phi} \quad (96)$$

$$\sin\theta' = \frac{\sin\theta \cos\phi}{1 + \cos\theta \sin\phi} \quad (97)$$

$$\tan\theta' = \frac{\sin\theta \cos\phi}{\cos\theta + \sin\phi} \quad (98)$$

$$\theta' = \arctan\left(\frac{\sin\theta \cos\phi}{\cos\theta + \sin\phi}\right) = \arctan\left(\frac{\alpha\alpha'}{\beta + \beta'}\right) \quad (99)$$

### 3.2 等速线和等时间位移线的时空坐标变换

等速线上各时空点的时空位矢的辐角  $\theta$  相同。当复坐标架的转动角  $\phi$  为定值时，绝对运动的时空变换式 (79) ~ (82) 式中的各变换系数是确定的。如图 10 所示， $m$  是  $S$  系的一条等速线，等速线  $m$  上所有时空点的时空位矢辐角相等（等于  $m$  与  $x$  轴的夹角  $\theta$ ）。 $m$  上所有时空点可用一个集合  $\{P_i\}_m$  来表示，将时空点集  $\{P_i\}_m$  依据绝对运动的时空变换式变换至  $S'$  系，可记为：

$$\{P_i\}_m \rightarrow \{P'_i\}_{m'} \quad (100)$$

时空点集  $\{P'_i\}_{m'}$  组成了  $S'$  系的等速线  $m'$ 。等速线  $m$  上的每一个时空点  $P_i$  在等速线  $m'$  上都有一个对应时空点  $P'_i$ ，时空点  $P'_i$  的辐角为  $m'$  与  $x'$  轴的夹角  $\theta'$ 。 $S$  系的等速线  $m$  变换为  $S'$  系的等速线  $m'$  后，长度也会发生改变， $m'$  相较  $m$  会变短或变长（见图 10a、b）。

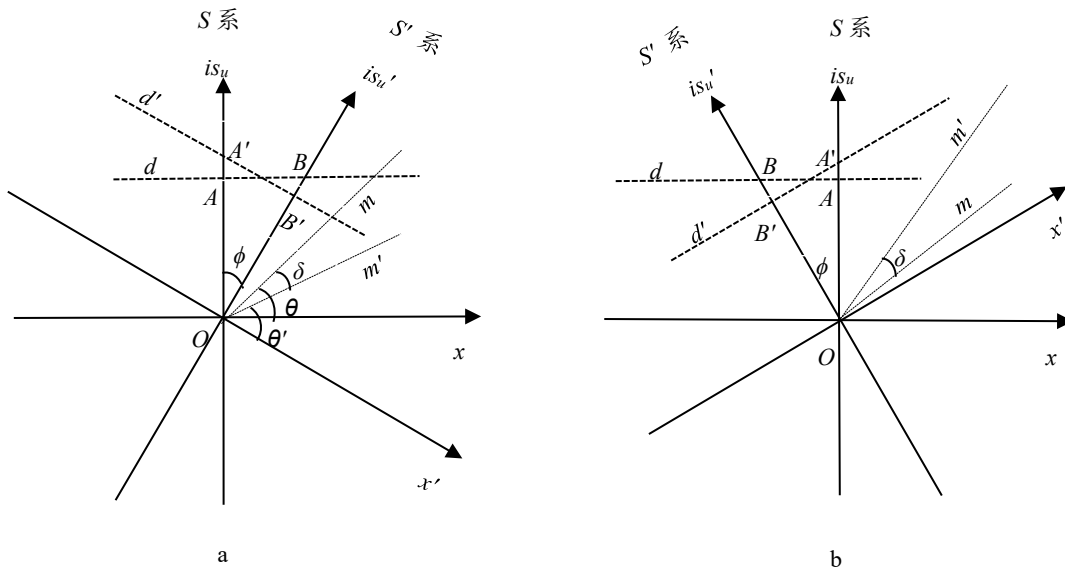


图 10 等速线和等时间位移线的时空坐标变换

等速线  $m$  和  $m'$  之间的夹角为  $\delta$ ，由图 10a 可以看出：

$$\delta = \theta + \phi - \theta' \quad (101)$$

故有：

$$\tan \delta = \tan(\theta + \phi - \theta') = \frac{\tan(\theta + \phi) - \tan \theta'}{1 + \tan(\theta + \phi)\tan \theta'} \quad (102)$$

把 (89) 式带入上式，可得：

$$\begin{aligned} \tan \delta &= \frac{(\tan \phi + \tan \theta)(\cos \theta - \sin \phi) - \sin \theta \cos \phi(1 - \tan \theta \tan \phi)}{(1 - \tan \theta \tan \phi)(\cos \theta - \sin \phi) + \sin \theta \cos \phi(\tan \phi + \tan \theta)} \\ &= \frac{\sin \phi(1 - \sin \theta)(\cos \phi - \sin \phi \cos \theta) - \cos \theta(1 - \cos \phi)(\sin \theta - \sin \phi \cos \theta)}{1 + \cos \theta(1 - \cos \phi)(\cos \theta \cos \phi - \sin \theta \sin \phi) - \sin \phi(\sin \phi - \sin \phi \cos \theta + \cos \phi \cos \theta)} \\ &= \frac{\beta'(1 - \alpha)(\alpha' - \beta\beta') - \beta(1 - \alpha')(\alpha - \beta\beta')}{1 + \beta(1 - \alpha')(\alpha'\beta - \alpha\beta') - \beta'(\beta' - \beta\beta' + \alpha'\beta)} \end{aligned} \quad (103)$$

$$\delta = \arctan\left(\frac{\beta'(1 - \alpha)(\alpha' - \beta\beta') - \beta(1 - \alpha')(\alpha - \beta\beta')}{1 + \beta(1 - \alpha')(\alpha'\beta - \alpha\beta') - \beta'(\beta' - \beta\beta' + \alpha'\beta)}\right) \quad (104)$$

在图 10b 中，等速线  $m$  和  $m'$  的夹角：

$$\delta = \theta' + \phi - \theta \quad (105)$$

则有：

$$\tan \delta = \frac{\tan(\phi - \theta) + \tan \theta'}{1 - \tan(\phi - \theta)\tan \theta'} \quad (106)$$

把 (98) 式带入上式，得：

$$\begin{aligned} \tan \delta &= \frac{(\tan \phi - \tan \theta)(\cos \theta + \sin \phi) + \sin \theta \cos \phi(1 + \tan \theta \tan \phi)}{(1 + \tan \theta \tan \phi)(\cos \theta + \sin \phi) - \sin \theta \cos \phi(\tan \phi - \tan \theta)} \\ &= \frac{\cos \theta(1 - \cos \phi)(\sin \theta + \sin \phi \cos \theta) + \sin \phi(1 - \sin \theta)(\cos \phi + \sin \phi \cos \theta)}{1 + \cos \theta(1 - \cos \phi)(\cos \theta \cos \phi + \sin \theta \sin \phi) - \sin \phi(\sin \phi - \sin \phi \cos \theta - \cos \phi \cos \theta)} \\ &= \frac{\beta(1 - \alpha')(\alpha + \beta\beta') + \beta'(1 - \alpha)(\alpha' + \beta\beta')}{1 + \beta(1 - \alpha')(\alpha'\beta + \alpha\beta') - \beta'(\beta' - \beta\beta' - \alpha'\beta)} \end{aligned} \quad (107)$$

$$\delta = \arctan\left(\frac{\beta(1 - \alpha')(\alpha + \beta\beta') + \beta'(1 - \alpha)(\alpha' + \beta\beta')}{1 + \beta(1 - \alpha')(\alpha'\beta + \alpha\beta') - \beta'(\beta' - \beta\beta' - \alpha'\beta)}\right) \quad (108)$$

当将  $S$  系的时空点变换到  $S'$  系时，时空位矢的辐角会发生变化（呈现逆时针或顺时针转动）， $\delta$  为时空位矢的转动角度，其与复坐标架转动角  $\phi$  和辐角  $\theta$  存在关联。从图 10 能够得知， $\delta$  的数值等于坐标架转动角减去辐角之差的绝对值，即：

$$\delta = \phi - |\theta - \theta'| \quad (109)$$

由此可知：

$$\delta \leq \phi \quad (110)$$

即时空位矢的转动角  $\delta$  小于或等于复坐标架的转动角  $\phi$ ，可见时空位矢的转动和复坐标架的转动是不同步的。复坐标架的转动意味着整个复平面的转动，可导致复空间的几何性质发生改变。因此，在绝对运动的四维时空变换过程中，时空位矢的转动角与复坐标架转动角并非呈现线性关系，而是表现为非线性关系。这与欧式空间中笛卡尔坐标的转动变换有所不同，在欧式空间中，坐标架的转动角与位矢转动角通常呈线性关系。这是因为欧氏空间属于线性空间，而复空间则为非线性空间。

等时间位移线的时空变换如图 10a、b 所示， $d$  是  $S$  系的一条等时间位移线，它与虚轴  $is_u$  和  $is'_u$  分别相交于  $A$  点和  $B$  点， $d$  上所有时空点可用时空点集  $\{P_i\}_d$  表示。将  $\{P_i\}_d$  按照绝对运动的时空变换规则变换至  $S'$  系，即：

$$\{P_i\}_d \rightarrow \{P'_i\}_{d'} \tag{111}$$

对应的时空点集  $\{P'_i\}_{d'}$  组成了  $S'$  系的等时间位移线  $d'$ ，它与虚轴  $is_u$  和  $is'_u$  分别相交于  $A'$  点和  $B'$  点。 $d$  上任意时空点  $P_i$  在  $d'$  上都有一个对应时空点  $P'_i$ ， $A'$  是时空点  $A$  在  $d'$  上对应的时空点， $B'$  是时空点  $B$  在  $d'$  上对应的时空点，且有  $OA=OB'$ 。两条等时间位移线  $d$  和  $d'$  的夹角等于复坐标架的转动角  $\phi$ 。

### 3.3 等时空位移线的时空坐标变换

等时空位移线是以复坐标原点为圆心、以任意长度为半径所构成的圆。如图 11a 所示， $q$  是  $S$  系中的一条等时空位移线，其与虚轴  $is_u$  和  $is'_u$  分别相交于  $A$  点和  $B$  点。将  $q$  上的所有时空点  $\{P_i\}_q$  依据绝对运动的时空变换规则变换至  $S'$  系，即：

$$\{P_i\}_q \rightarrow \{P'_i\}_{q'} \tag{112}$$

对应时空点集  $\{P'_i\}_{q'}$  在  $S'$  系构成的是一个椭圆  $q'$ 。等时空位移线  $q$  上任意时空点  $P_i$  在椭圆  $q'$  上都有一个对应时空点  $P'_i$ ，时空点  $A$  和  $B$  是椭圆  $q'$  与虚轴  $is_u$  和  $is'_u$  的交点，同时也是时空点  $A$  和  $B$  在  $q'$  上对应的时空点，其中  $A'$  点和  $B$  点位于等时间位移线  $d'$  上。 $d'$  与椭圆  $q'$  相切于  $A'$  点， $d'$  与等时空位移线  $q$  相切于  $B$  点。从  $A'$  点向  $x'$  轴作垂线  $A'D$ ，则  $D$  点即为椭圆中点。坐标原点  $O$  是椭圆  $q'$  的一个焦点，椭圆的长轴在  $x'$  轴上， $C$  是椭圆长轴上的一个顶点， $A'$  是椭圆短轴上的一个顶点， $CD$  为半长轴， $A'D$  为半短轴。

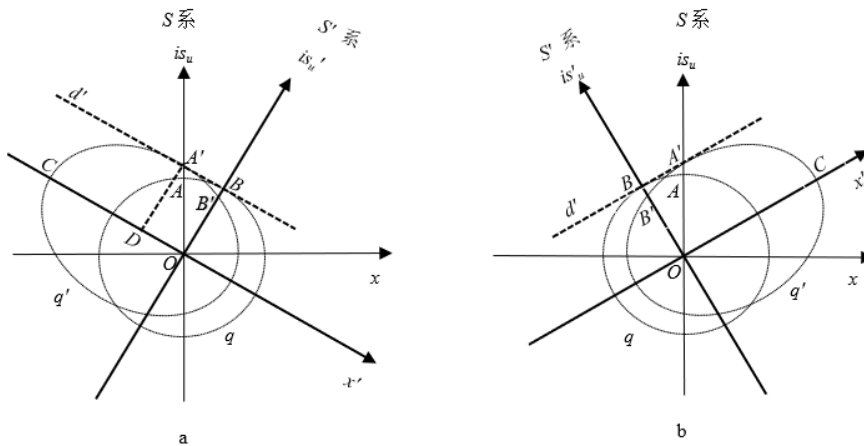


图 11 等时空位移线的时空坐标变换

在图 11 中，时空点  $A$  的时间为  $t_A$ ，与之对应的时空点  $A'$  的时间为  $t'_A$ ，应有：

$$t'_A = \frac{t_A}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \tag{113}$$

由图 11a 可知：

$$\begin{aligned} \angle OA'D &= \angle BOA' = \phi \\ A'D &= OB = OA = ct_A \\ OD = BA' &= Vt'_A = \frac{Vt_A}{\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}} \end{aligned}$$

椭圆  $q'$  的半短轴  $A'D$  等于等时空位移线  $q$  的半径。根据椭圆的性质，应有：

$$CD^2 = A'D^2 + OD^2 \tag{114}$$

于是可得：

$$CD = \sqrt{A'D^2 + OD^2} = \frac{ct_A}{\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}} = \frac{A'D}{\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}} \tag{115}$$

上式可写成：

$$CD = \frac{A'D}{\cos \phi} \tag{116}$$

这是椭圆  $q'$  的半长轴和半短轴的关系式。而椭圆  $q'$  的压缩系数为：

$$\mu = \frac{A'D}{CD} = \cos \phi \tag{117}$$

由此可见，椭圆  $q'$  的压缩系数  $\mu$  随转动角  $\phi$ （或速度  $V$ ）的变化而变化，当  $\phi \rightarrow \pi/2$ （或  $V \rightarrow c$ ）时， $\mu \rightarrow 0$ ，椭圆  $q'$  的长轴趋于无限大，将沿  $x'$  轴的负方向无限延伸，此时椭圆的形状逐渐扁平，直至趋近于一条沿  $x'$  轴负向的直线段，反映出相对论效应下长度收缩和时间膨胀的极限情况。

图 11b 显示的是复坐标架沿逆时针方向转动时的情形， $S$  系的等时空位移线  $q$  变换至  $S'$  系时成为椭圆  $q'$ 。与前面类似，椭圆  $q'$  的短轴等于圆  $q$  的半径，压缩系数  $\mu$  随  $\phi$ （或  $V$ ）的变化而变化，当  $\phi \rightarrow \pi/2$ （或  $V \rightarrow c$ ）时， $\mu \rightarrow 0$ ，椭圆  $q'$  的长轴趋于无限大，将沿  $x'$  轴的正方向无限延伸。

### 3.4 等空间位移线的时空坐标变换

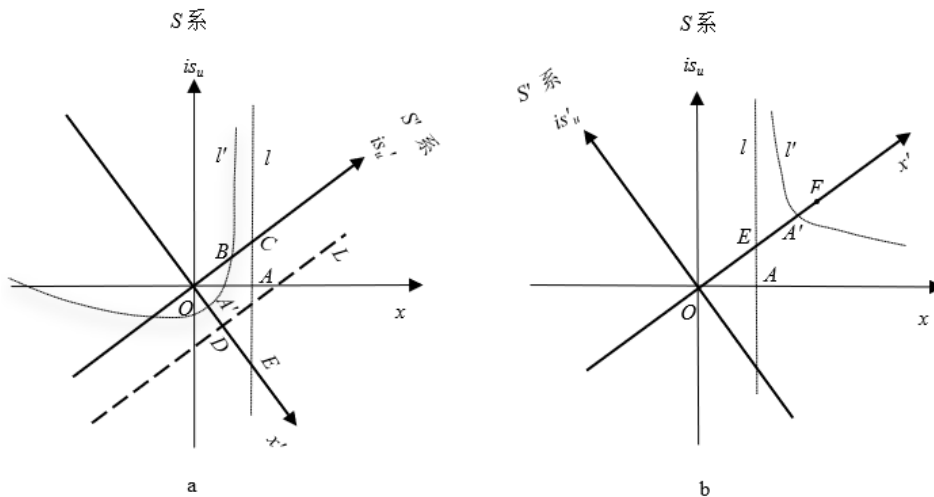


图 12 等空间位移线的时空坐标变换

等空间位移线上的所有时空点距虚轴的垂直距离相等。如图 12 所示， $l$  是  $S$  系的一条等空间位移线，它与  $x$  轴相交于  $A$  点，与  $x'$  轴相交于  $E$  点。把  $l$  上所有时空点  $\{P_i\}_l$  依据绝对运动的时空变换规则变换至  $S'$  系，即：

$$\{P_i\}_l \rightarrow \{P'_i\}_{l'} \quad (118)$$

对应时空点集  $\{P'_i\}_{l'}$  在  $S'$  系是一个抛物线  $l'$ ，等空间位移线  $l$  上任意时空点  $P_i$  在  $l'$  上都有一个对应时空点  $P'_i$ ，抛物线  $l'$  与  $x'$  轴的交点  $A'$  是时空点  $A$  在  $S'$  复平面上对应的时空点。如图 12a 所示，复坐标架沿顺时针方向转动时，抛物线  $l'$  的主轴在  $x'$  轴上，坐标原点  $O$  是抛物线  $l'$  的焦点， $A'$  是顶点， $L$  是准线。根据抛物线的性质， $l'$  上任意一点到焦点  $O$  的距离与到准线  $L$  的距离相等，且有  $OB=OD=DE$ ， $OA'=OB/2$ 。如果复坐标架沿逆时针方向转动，则如图 12b 所示，抛物线  $l'$  的焦点不在坐标原点，而是在  $x'$  轴上的  $F$  点，且满足  $OE=EF$ 。

3.5 数学形式的一致性：与主流表述的对应关系

绝对运动的四维时空变换指的是时空点于  $S$  复平面与  $S'$  复平面之间时空坐标的变换，其实质为两个复平面的转动变换。这种变换亦可表述为一个复平面上的莫比乌斯变换。所谓莫比乌斯变换，即从黎曼球面到其自身的一一对应的共形变换，包括平移变换、旋转变换、相似变换和倒数变换等形式<sup>[24]</sup>。可将图 9 改用图 13 表示。从图 13 能够看出， $S$  复平面上的  $P$  点经变换操作后，变换至  $S'$  复平面上的  $P'$  点，也就是将复数  $Z_P$  变换为复数  $Z_{P'}$ ，复数  $Z_{P'}$  的模和辐角都将发生改变，这相当于莫比乌斯的旋转变换和相似变换的复合变换，可表示为：

$$Z_{P'} = kZ_P e^{i\delta} \quad (119)$$

或写成：

$$Z_{P'} = k|Z_P| e^{i(\theta \pm \delta)} \quad (120)$$

$k$  是莫比乌斯相似变换系数， $\theta$  为复数  $Z_P$  的辐角， $\delta$  是莫比乌斯旋转变换的旋转角度， $\delta$  可由 (104) 和 (108) 式确定。当  $k=1$  时，变换退化为纯旋转变换，此时仅改变复数的辐角而不改变其模长。

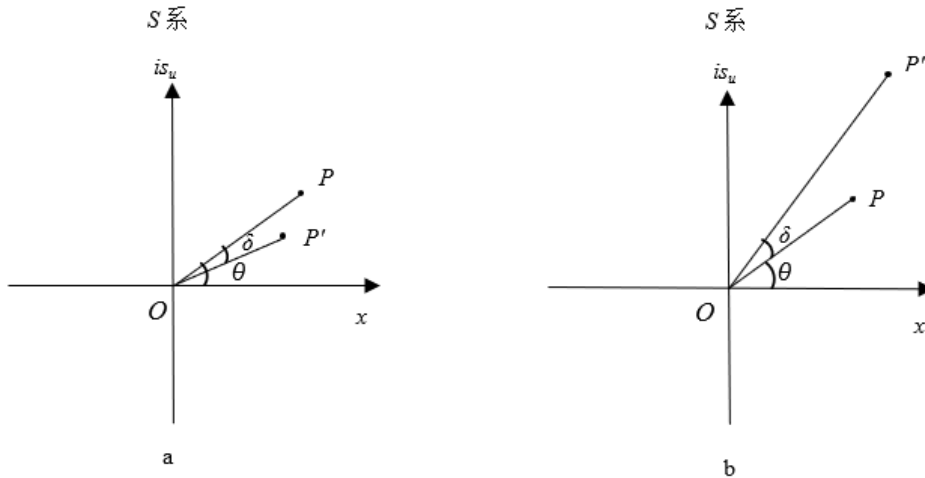


图 13 复平面的莫比乌斯变换

由 (120) 式，复数  $Z_{P'}$  的模可表示为：

$$|Z_{P'}| = k|Z_P| \quad (121)$$

或写成：

$$\rho' = k \cdot \rho \quad (122)$$

根据物质绝对运动的四维时空模型，复数  $Z_P$  和  $Z_{P'}$  的模分别为：

$$|Z_P| = \rho = ct_P, \quad |Z_{P'}| = \rho' = ct'_P \quad (123)$$

代入 (121) 式可得：

$$t'_P = kt_P \quad (124)$$

由洛伦兹时间变换方程：

$$t'_P = \frac{1 \pm \frac{Vv}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \cdot t_P$$

可得：

$$k = \frac{1 \pm \frac{Vv}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \quad (125)$$

莫比乌斯相似变换系数  $k$  等于洛伦兹时间变换系数。这一等价关系揭示了莫比乌斯变换与狭义相对论时空结构之间的深刻联系，表明在四维时空背景下，复平面上的相似变换其实已经内在地蕴含了洛伦兹协变性。

#### 4 绝对运动的动力学

##### 4.1 运动粒子的质量-速度关系

用粒子的质量  $m$  乘 (1) 式可得：

$$mw = mV + imu \quad (126)$$

这里的质量  $m$  代表组成粒子的电磁波样物质的量。由上式可以定义三个动量

$$P_v = mV, \quad P_u = mu, \quad P_w = mw \quad (127)$$

$P_v$  为粒子的空间运动量，简称空间动量，亦即通常所说的动量； $P_u$  为粒子的时间运动量，简称时间动量； $P_w$  为粒子的时空运动量，简称时空动量。由此可将 (126) 式写成

$$P_w = P_v + iP_u \quad (128)$$

$P_w$  的模为：

$$|P_w| = P = \sqrt{P_v^2 + P_u^2} = \sqrt{m^2V^2 + m^2u^2} = mc \quad (129)$$

$P$  可称为粒子的总动量。

依据量子场论的理念，粒子间的相互作用是通过交换媒介粒子而实现的，接下来我们来探究粒子于力场（电磁场、引力场）里的运动状况。已知电磁场的媒介粒子是光子，引力场的媒介粒子是引力子，这些媒介粒子皆以光速传播，即媒介粒子的空间运动速度  $v=c$ ，时间运动速度  $u=0$ 。按照物质绝对运动的粒子波包模型，像光子、引力子这类媒介粒子都是由一定量电磁波样物质构成的发散型物质波包。假定构成媒介粒子的电磁波样物质的运动质量为  $m_\gamma$ ，那么媒介粒子的空间动量、时间动量以及时空动量分别为

$$P_{v\gamma} = m_\gamma v = m_\gamma c, \quad P_{u\gamma} = m_\gamma u = 0, \quad P_{w\gamma} = m_\gamma c + i0 = m_\gamma c \quad (130)$$

$P_{v\gamma}$ 、 $P_{u\gamma}$  和  $P_{w\gamma}$  分别表示媒介粒子的空间动量、时间动量和时空动量。上式表明，传递相互作用力的媒介粒子只有空间运动量，没有时间运动量。

设粒子  $A$  在初始时刻保持静止（即  $v=0$ ,  $u=c$ ），粒子  $A$  的静止质量为  $m_0$ ，则粒子  $A$  静止时的空间动量、时间动量和时空动量分别为

$$P_{v0} = m_0 v = 0, \quad P_{u0} = m_0 u = m_0 c, \quad P_{w0} = 0 + i m_0 c = i m_0 c \quad (131)$$

$P_{v0}$ 、 $P_{u0}$  和  $P_{w0}$  分别表示粒子  $A$  静止时的空间动量、时间动量和时空动量。上式表明，静止粒子只有时间运动量，而空间运动量为零。在力场中，粒子  $A$  俘获（吸收）媒介粒子并获得媒介粒子的空间动量  $P_{v\gamma}$  后被加速，其加速度的方向与  $P_{v\gamma}$  的方向一致。

设初始静止的粒子  $A$  在俘获一个媒介粒子后，被加速到以速度  $v$  运动的状态，依据动量守恒定律，粒子  $A$  被加速后的时空动量  $P_w$  应等于粒子  $A$  静止时的时空动量  $P_{w0}$  与被俘获媒介粒子的时空动量  $P_{w\gamma}$  之和，即：

$$P_w = P_{w\gamma} + P_{w0} = (P_{v\gamma} + P_{v0}) + i(P_{u\gamma} + P_{u0}) = m_\gamma c + i m_0 c \quad (132)$$

另外，根据（128）式，粒子  $A$  被加速后的时空动量也可表示为：

$$P_w = P_v + i P_u = m v + i m u \quad (133)$$

$m$  是粒子  $A$  被加速后的质量，即粒子  $A$  的运动质量。比较（132）式和（133）式，两式的实部和虚部分别相等，即：

$$m v = m_\gamma c \quad (134)$$

$$m u = m_0 c \quad (135)$$

则有：

$$\frac{m_\gamma}{m} = \frac{v}{c} \quad (136)$$

$$\frac{m_0}{m} = \frac{u}{c} \quad (137)$$

把（4）式代入（137）式，可得：

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (138)$$

这便是相对论质量-速度关系式，粒子的运动质量随粒子的运动速度的增大而增大。

将（134）式和（135）式相加，可得：

$$m_0 + m_\gamma = \frac{v+u}{c} \cdot m \quad (139)$$

由物质绝对运动的速度三角形（参见图 1）可知：

$$\frac{v+u}{c} \geq 1 \quad (140)$$

于是有：

$$m \leq m_0 + m_\gamma \quad (141)$$

亦即：

$$m_\gamma \geq m - m_0 = \Delta m \quad (142)$$

$\Delta m$  是粒子  $A$  在加速过程中的质量增量。上式表明，处于静止状态的粒子  $A$  在吸收一个媒介粒子后获得加速，此时粒子  $A$  的运动质量  $m$  小于粒子  $A$  的静止质量  $m_0$  与被吸收媒介粒子的质量  $m_\gamma$  之和。换言之，粒子  $A$  加速后的质量增量  $\Delta m$  小于被吸收的媒介粒子的质量  $m_\gamma$ ，这表明媒介粒子在被吸收后出现了质量亏损。那么，这是否意味着质量守恒定律不再成立呢？答案是否定的。这种“质量亏损”现象可能与粒子波包的内部结构形式存在关联。依据物质绝对运动的粒子波包模型，实物粒子  $A$  属于具有静止质量的非线性物质波包，而媒介粒子则是仅具有运动质量的线性物质波包。粒子  $A$  吸收一个媒介粒子的过程，本质上是一个线性物质波包和一个非线性物质波包相互耦合的过程。在此过程中，质量守恒并非呈现线性守恒，而是表现为非线性守恒。在非线性守恒机制下，部分质量转化为维持新波包结构的结合能，体现为系统内禀能量的重新分布，媒介粒子的“质量亏损”恰好对应于粒子  $A$  的内部结构畸变所需的能量，其总质能仍严格守恒。

假设粒子  $A$  由静止状态被加速到以速度  $v$  运动的状态共俘获了  $n$  个媒介粒子，且被俘获的媒介粒子的空间动量的方向相同，那么加速后的粒子  $A$  的空间动量为：

$$P_v = P_{v0} + \sum_{i=1}^n P_{v\gamma i} = \sum_{i=1}^n P_{v\gamma i} = \sum_{i=1}^n m_{\gamma i} c = m v \quad (143)$$

粒子  $A$  的时间动量为：

$$P_u = P_{u0} + \sum_{i=1}^n P_{u\gamma i} = P_{u0} = m_0 c = m u \quad (144)$$

粒子  $A$  的时空动量为：

$$P_w = P_v + iP_u = \sum_{i=1}^n m_{\gamma i} c + im_0 c = m v + i m u \quad (145)$$

上式显示，粒子  $A$  的全部空间动量都来自于被俘获的媒介粒子的空间动量。并且，在粒子  $A$  被加速时，仅空间动量发生变化，时间动量维持不变。能够把（4）式与（138）式代入到（127）式的第二个式子，得到：

$$P_u = m u = m_0 c \quad (146)$$

表明粒子的时间动量  $P_u$  为常量，与粒子的运动状态无关。

#### 4.2 运动粒子的质量-能量关系

用粒子  $A$  的质量  $m$  乘（3）式可得：

$$m c^2 = m v^2 + m u^2 \quad (147)$$

根据爱因斯坦质能关系式（ $E=mc^2$ ），上式等号左边为粒子  $A$  的能量  $E$ ，则上式可写成：

$$E = m v^2 + m u^2 \quad (148)$$

把（4）式和（138）式代入上式，得：

$$\begin{aligned}
 E &= m\upsilon^2 + mc^2 \sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}} = \frac{m_0 \upsilon^2}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}} + m_0 c^2 \sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}} \\
 &= \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}}
 \end{aligned} \tag{149}$$

这便是相对论质能关系式。

用  $m^2 c^2$  乘 (3) 式, 可得:

$$\begin{aligned}
 m^2 c^4 &= m^2 \upsilon^2 c^2 + m^2 u^2 c^2 \\
 &= m^2 \upsilon^2 c^2 + m^2 c^4 \sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}^2 \\
 &= m^2 \upsilon^2 c^2 + m_0^2 c^4
 \end{aligned} \tag{150}$$

上式可写成:

$$E^2 = P_v^2 c^2 + m_0^2 c^4 \tag{151}$$

这便是相对论的能量动量关系式。根据 (146) 式, 上式还可写成:

$$E^2 = P_v^2 c^2 + P_u^2 c^2 \tag{152}$$

则有:

$$E = c \sqrt{P_v^2 + P_u^2} = Pc \tag{153}$$

由此可得:

$$P = \frac{E}{c} = \frac{mc^2}{c} = mc \tag{154}$$

与 (129) 式相吻合。

## 5 讨论: 对时间哲学与实在论的意义

1) 狭义相对论效应并非观察者效应, 而是物质运动本身的属性

面对“相对论是否消解了客观实在”的质疑, 许多物理学家和哲学家持否定态度。例如, 科学哲学家霍华德·斯坦 (Howard Stein) 就明确为物理实在辩护, 反对相对论必然导致“块宇宙”宿命论的观点, 他通过定义一种洛伦兹不变的“生成”关系, 论证了即使在相对论框架下, 未来的“开放性”依然可以得到自洽的哲学解释, 而非纯粹的测量假象<sup>[25]</sup>。迈克尔·弗里德曼 (Michael Friedman) 则从理论结

构入手, 批评了实证主义将相对论效应仅视为“测量约定”的观点, 认为尺缩、钟慢等效应是四维时空几何在不同惯性系下的客观投影, 是时空本身具有的非欧几何结构的必然体现, 是时空结构作用于物质过程的真实结果<sup>[26]</sup>。本研究进一步验证了上述观点。在复时空中, 物质运动是时间运动与空间运动的统一, 亦是绝对运动和相对运动的统一, 而“同时性”的判定可以存在两种途径: 其一为比较粒子于不同参考系中的粒子时间  $t$ , 其二为比较粒子于不同参考系中的时间位移  $s_u$ 。其中  $t$  是坐标变换下的可变量,  $s_u$  是坐标变换下的不变量, 由此可以得到两种

截然不同的结论：“同时性是相对的”和“同时性是绝对的”。爱因斯坦正是凭借同时的相对性概念创立了狭义相对论，本文则依托同时的绝对性概念重新诠释了狭义相对论。这种诠释无需借助于“观察者”，亦无需赋予“人”任何特殊地位，仅仅通过物质在复空间中的绝对运动，也能产生相对论效应。这表明尺缩、钟慢等效应可能是时空本征性质的体现，而非观测视角的结果，或者说相对论效应是物质绝对运动本身所具有的属性。与纯粹作为数学技巧被引入的闵可夫斯基几何不同，本文所阐释的复平面几何模型与物质的绝对运动紧密相关，通过复平面中的洛伦兹变换，可观测量在不同参考系间的转换得以进行几何化表达，进一步揭示了相对论效应与物质运动本质的内在联系。这种基于绝对运动的诠释路径，不仅与实验事实相符，更消除了传统解释中对观察者意识的依赖，使相对论回归物理学客观性的基本准则。

2) 物质世界可能是以复数的形式存在和运动的  
根据物质绝对运动模型，物质的绝对运动需采用复数进行描述，其中，复数的实数部分描写物质的空间运动，复数的虚数部分描写物质的时间运动，如此便赋予了复数和虚数以真实的物理内涵。这似乎表明，自然界本身是以复数的形式存在和运动的，虚数并非虚幻，而具有客观实在性。从几何层面上看，虚数的本质是旋转，是螺旋，是循环往复，这与时间的特性（延续性、周期性和不可逆性）相契合，故而虚数适宜用于描述物质时间运动的数量关系，实数则用于描述物质空间运动的数量关系。狭义相对论除可运用闵可夫斯基几何进行描述外，还能够采用复平面几何加以描述。复平面中的实轴与虚轴分别对应空间维度与时间维度，洛伦兹变换可视为复平面上的旋转与伸缩组合，其数学形式更为简洁直观。这种几何化描述不仅保留了物理规律的协变性，还揭示了时间与空间在物质运动中的内在耦合机制。由此，诸如钟慢尺缩等相对论效应不再是抽象的坐标变换结果，而是物质运动投影到复空间的具体表现。除此之外，量子力学的发展也印证了复数和虚数的客观实在性。自从薛定谔将复数和虚数引入到他的方程之后，现代物理学就再也离不开这个有效的数学工具。量子力学必须用复数描写，它通过虚数单位  $i$  捕捉了量子叠加中的相位信息，保证了时间演化的概率守恒，并且得到了严格的实验

证实。特别是近期潘建伟团队的工作<sup>[27]</sup>，他们以极高的实验精度证明，复数并非观察者为了描述测量结果而引入的临时约定，而是构成量子世界“本体”的一部分，这就进一步印证了物质世界以复数形态存在与演化的客观实在性。

### 3) 关于时间的本质

时间的本质究竟为何？这是人类与生俱来的困惑。千百年来产生了各种各样的时间观，归纳起来可分为两派：一派试图从人的内在精神意识中寻找时间的本性，认为时间是主观的和非理性的，其代表人物有奥古斯丁(Augustinus)、康德(I.Kant)、胡塞尔(E.Husserl)、柏格森(H.Bergson)等；另一派则试图从外在的物质运动本身来探索时间的本质，认为时间是客观的和理性的，其代表人物有亚里斯多德(Aristoteles)、牛顿(I.Newton)、爱因斯坦等。近代科学诞生以来，物理学的时间观大致经历了从牛顿的绝对时间观向爱因斯坦的相对论时间观的演变。本研究以时间位移不变性为基础，论证了同时的相对性和绝对性的统一，从而调和了牛顿的“绝对时间”和爱因斯坦的“相对时间”的对立。根据物质绝对运动模型，时间不是抽象的，而是有物理内涵的。作为物质存在和运动的形式，“时间”实则为虚空间，即局域、弯曲、闭合的粒子内禀空间，它与广域、平直、开放的欧氏空间（即实空间）并无本质上的区别。虚空间的物质运动即为时间运动，它是一种内禀的、不受观测影响的物理过程。粒子内禀空间的物质运动（时间运动）具体表现为粒子自旋，也就是构成粒子的电磁波样物质在粒子内禀空间周而复始的流动。由于所有电磁波样物质均以绝对速度  $c$  运动，这意味着“万物皆流，万物皆变”，不可能存在片刻的静止。任何粒子在任意时刻的时空位置都是全新的和不断变化的，并且粒子无法重复经过同一个时空位置，就像古希腊哲学家赫拉克利特(Herakleitos)所言“人不能两次踏进同一条河流”，将其表述为“粒子不能两次经过同一个时空位置”同样成立。粒子自旋的每一次旋转都是全新的和独一无二的，因为每一次旋转都是在全新的时空位置上发生的，这一次旋转不同于上一次旋转，下一次旋转也不同于这一次旋转，由此可以把上一次旋转定义为“过去”，把这一次旋转定义为“现在”，而把下一次旋转定义为“未来”。如此一来，粒子自旋便具备了时间的特性，即延续性、周期性

和不可逆性。时间运动永远指向“未来”，不可能回到“过去”，或者说时间的流逝只能从现在“流向”未来，不可能从现在“流回”过去。而且，粒子自旋的每一次旋转并非孤立、无端发生的，而是在“过去”无数次旋转的基础上发生的，“现在”不过是“过去”的历史的积累，所有的“过去”成为“现在”得以涌现的原因，单向的时间箭头正是这种因果关系的反映。由此可见，时间的单向性并非源于热力学统计规律，而是根植于物质在复空间中不可重复的绝对运动本身。这种基于复空间动态演化的时序结构，将过去、现在与未来统一于粒子自旋的非定域过程之中，使时间成为可被物理刻画的实在形态。这与现象学或过程哲学将“时间作为过程”的设定是一致的。例如，胡塞尔通过“滞留-原印象-前摄”的内时间结构揭示了时间不是孤立“现在点”的串联，而是如河流般持续的综合过程<sup>[28]</sup>。过程哲学创始人怀特海（A. N. Whitehead）则彻底拒绝了实体性的“瞬时现在”，他提出“现实实有”作为世界的终极单元，但每个现实实有本身就是发生与过程，时间不是空架子上流逝的量，而是事态摄入与生成的内在维度<sup>[29]</sup>。

#### 4) 物质运动的动力来源于物质本身

根据物质绝对运动模型，电磁波样物质是一切物质结构的始原要素，在此基础上，爱因斯坦的质能关系式  $E=mc^2$  就很好理解了。式中  $m$  是粒子所包含的电磁波样物质的量， $c$  为电磁波样物质的运动速度， $E$  是粒子的能量。质能关系式所表达的内涵为：一个粒子的能量等于该粒子所含电磁波样物质的量与电磁波样物质的运动速度的平方之积。粒子的总能量包括粒子的动能和静能，粒子的总动量包括粒子的空间运动量和时间运动量。静止粒子 ( $v=0, u=c$ ) 只有时间运动量，其空间运动量为零；光子等媒介粒子 ( $v=c, u=0$ ) 只有空间运动量，其时间运动量为零。粒子运动状态的改变是通过吸收或辐射媒介粒子达成的，运动粒子的动量和动能均源自媒介粒子的动量和能量。粒子自旋亦是其内在电磁运动的必然结果，这种运动不依赖外部作用，而是源于自身存在的本质属性。鉴于电磁波样物质具备自发的电磁运动，并具有速度  $c$ 、质量  $m$ 、能量  $E(=mc^2)$ 、动量  $P(=mc)$  等固有属性，故而，物质世界不需要第一推动力，既无需求助于上帝，也无需在物质之外寻找动力来源，物质本身就是一切运动的动力之源。

本研究的局限性：本研究在数学上与狭义相对论是等效的，其意义在于提供了一种不同的、具有特定哲学意涵的诠释。本文提出的物质绝对运动的复平面几何模型仍属于形式化表述，其物理含义尚需进一步澄清。目前该模型尚未与实验观测建立直接对应关系，也未纳入标准模型框架中的规范对称性与量子效应，因此，其适用范围仍局限于经典相对论层面的几何解释。

#### 参考文献

- [1] 爱因斯坦,论动体的电动力学.爱因斯坦文集[M],北京,商务印书馆,1977.83-115.
- [2] 路甬祥,百年物理学的启示.世界物理年在中国[M],北京,中国科学技术出版社,2006.31.
- [3] 吴翔等,文明之源——物理学[M],上海,上海科学技术出版社,2010.1.
- [4] 杨振宁,爱因斯坦:机遇与眼光.世界物理年在中国[C],北京,中国科学技术出版社,2006.11.
- [5] L.斯莫林著,李泳译,物理学的困惑[M],长沙,湖南科学技术出版社,2008.9.
- [6] P. W. Bridgman, A Sophisticate's Primer of Relativity, Mineola[M], NY: Dover Publications, 2002.172.
- [7] 吴玉平,任晓明,合理的可接受性:对真理概念的一种分析——普特南真理观试析[J],河南社会科学, 2007 (3): 29.
- [8] Carlo Rovelli 著,量子物理如何改变世界[M],杭州,浙江科学技术出版社,2023.5.
- [9] John Earman, World Enough and Space-Time: Absolute versus Relational Theories of Space and Time[M], Cambridge, Massachusetts, The MIT Press, 1989.12.
- [10] 冯霞,物理科学概论[M],合肥,安徽人民出版社,2007.128.
- [11] 黄祖洽,现代物理学前沿选讲[M],北京,科学出版社,2007.12.
- [12] 张三慧,大学物理学.力学[M],北京,清华大学出版社,1999.9.
- [13] 吴强,光学[M],北京,科学出版社,2006.5.
- [14] 李正道,粒子物理和场论[M],上海,上海科学技术出版社,2006.104.

- [15] 薛定谔,薛定谔演讲录[M],北京,北京大学出版社, 2007. 29.189.
- [16] P.Robertson 著,杨福家等译,玻尔研究所的早年岁月[M],北京,科学出版社,1985.113.
- [17] B.格林著,李泳译,宇宙的琴弦[M],长沙,湖南科学技术出版社,2007.7-50.
- [18] 爱因斯坦,爱因斯坦文集(第一卷)[M],北京,商务印书馆,1994:128-129.
- [19] 爱因斯坦,爱因斯坦文集(第三卷)[M],北京,商务印书馆,1978:492.
- [20] W.G.V.罗瑟著,岳曾元等译,相对论导论[M],北京,科学出版社,1980.2.
- [21] 刘辽,费保俊,张允中,狭义相对论[M],北京,科学出版社, 2008.7.
- [22] 李复,广义相对论和宇宙学的物理基础[M],北京,气象出版社,2000.33.
- [23] R·P·费曼著,周国荣译,费曼讲物理-相对论[M],长沙,湖南科学技术出版社,2007.7.
- [24] 李忠,复数的故事[M],北京,科学出版社,2011.54.
- [25] H.Stein,On Relativity Theory and Openness of the Future[J], Philosophy of Science, Vol. 58, No. 2, 1991, pp. 147-167.
- [26] M.Friedman, Foundations of Space-Time Theories: Relativistic Physics and Philosophy of Science[M], Princeton University Press, 1983.10.
- [27] Chen Mingcheng et al,Ruling Out Real-Valued Standard Formalism of Quantum Theory[J],Physical Review Letters, Vol. 128, No. 4, 040403.
- [28] E. Husser 著,倪梁康译,内时间意识现象学[M],北京,商务印书馆,2009.
- [29] A. N.Whitehead 著,李步楼译,过程与实在[M],北京,商务印书馆,2011.

**版权声明:** ©2026 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。

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



**OPEN ACCESS**