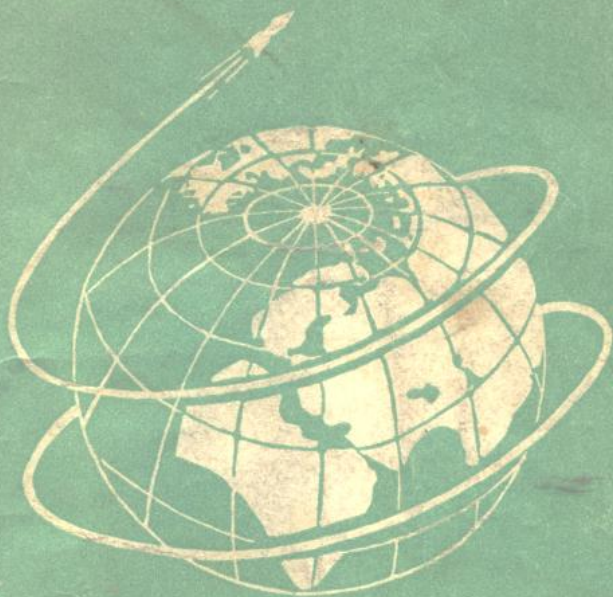




# 相对论

〔苏联〕Л. С. 古列维奇著

科学普及出版社

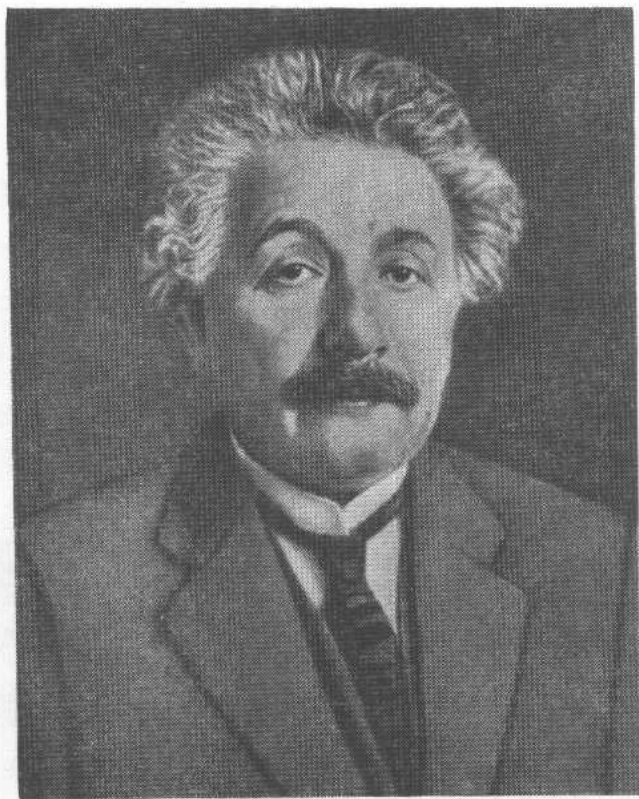
# 相 对 論

[苏联] Л. Д. 古列維奇

吳 金 生 譯

科 学 普 出 版 社

1958年·北京



*A. Einstein*

1468577

# 目次

|                     |    |
|---------------------|----|
| 空間、時間和运动概念的演化 ..... | 1  |
| 古典力学中运动的相对性 .....   | 2  |
| 运动的相对性和电磁場 .....    | 5  |
| 相对論的基本概念 .....      | 10 |
| 相对論的一些最簡單的結論 .....  | 13 |
| 長度的相对性 .....        | 13 |
| 時間間隔的相对性 .....      | 17 |
| 在時間中旅行 .....        | 18 |
| 星际航行 .....          | 22 |
| 区間 .....            | 22 |
| 軌迹的相对性 .....        | 23 |
| 速度的加法 .....         | 25 |
| 都卜勒效应 .....         | 26 |
| 相对論在物理学中的某些应用 ..... | 28 |
| 慣性質量 .....          | 28 |
| 能量 .....            | 31 |
| 質量亏损 .....          | 34 |
| 能量，質量和重量之間的联系 ..... | 36 |

## 空間、時間和运动概念的演化

### 古典力学中运动的相对性

在近代物理的原理中有着确定的空間、時間和运动的概念。这些概念并不是立即以现有的形式出現的，而是發展了几千年的結果。远在古代的科学中就产生了一些不同的空間理論。亞里斯多德認為世界是一个不太大的球；它的半徑不超过几十万公里，而地球就处在这个球的中心。亞里斯多德認為地球周圍的空間是不均匀的，并認為和地球相距不一样远的各点，按其本身的特性是各不相同的。它們之中的每一个点都能加以确定，而与那里是否有什么样的物体存在無關。物体从一点到另一点的位移，就代表了物体的绝对运动。

几百年以后，哥白尼剥夺了地球作为世界中心位置的資格，而使它变为太陽的一顆不太大的衛星。布魯諾在科学中引进了这样的概念，認為太陽并不是宇宙的中心，而仅仅代表着無數的世界当中的一个。从此在科学中就确立了这样的概念，認為空間是無际的并且是均匀的，此外还認為空間的点只能用它和处在空間中的物体的关系来加以确定。尽管在目前广义相对論又重新改变了这些概念，它們是不正确的，然而它們在科学史上却起过重大的作用。

在这些有关于空間的新概念的基础上，伽里略建立了物体运动的实验規律，并且提出了运动的相对性原理。这个原理的内容是：人們处在等速直綫运动的系統內(例如，在輪船中)，

如果不直接观察它相对于周围系统的位移，就不能决定系统本身的速度，而只能研究在这系统内(輪船内)的物体的运动。

这个結論可以从下面这个基本事实得出，处在等速直綫运动系統內的物体，其运动規律并不依赖于系統的运动速度。

簡短地說，物体或物体系統的等速直綫运动仅能够根据其他物体或其他物体系統的关系，例如二者之間距离的变化查觉出。

因此，由于物理学長期發展的结果，利用实验方法就可以了解到这样一个事实：物体的运动(至少是等速直綫运动)不是物体本身从真空的空間中一固定点到另一固定点的过渡，而是相对于其他物体的位移，这个位移在經驗上是通过該物体和其他物体之間距离的变化查觉出的。这就証明了要在經驗上發現运动，只有通过距离的变化才有可能。这个关于运动的概念与亞里斯多德的物理学比較起来，意味着一个重大的进步，然而，正像我們現在所看到的，再深入一步他就会碰到某些困难而且甚至会在事实的压力下讓步。

現在的古典物理是从牛頓开始的。大家都知道牛頓建立了运动的普遍規律，这个規律的簡化形式可以这样表述：在物体的运动中，任何一种加速度都是由力的作用产生的。

然而，事实并不像这个規律是那么簡單。在地球上就存在着一系列并不是任何力所产生的加速度：

1. 佛科摆是这样悬挂着，使得摆的摆动平面能够圍繞鉛直綫發生扭轉。摆受到两种加速度：在振动中由于重力引起的加速度，以及另外的一种加速度。由于第二种加速度的存在，摆动平面在一晝夜內將轉过  $360^\circ$  角<sup>①</sup>。第二种加速度并不是由任何力所产生的，而仅仅是地球轉动的結果。它的产生是由于

① 在地球兩極才恰好轉过  $360^\circ$  角，在其他地点偏轉都要小些——譯者

擺企圖按着慣性保持不變的擺動平面的緣故。

2. 在北半球行駛的火車更快地磨損右側的鐵軌<sup>①</sup>，在北半球流着的河流對右岸的沖刷也更厲害<sup>①</sup>，這都是和所謂葛利奧里加速度有關的，後者同樣是由于地球的轉動所引起的，而不是某種什麼外力所引起的。

由于地球上這種加速度存在，就使得我們能夠斷定地球圍繞着自己軸的轉動，即使我們對於天穹表面的轉動一無所知時，譬如說，如果真的和金星一樣，地球永遠被不透明的雲幕所籠罩時。

類似的一些事實牛頓也是了解的，正是他從這樣一些事實中作出了十分重要而富有遠見的結論。如果不觀察天體的運行而僅限於觀察地面的現象就能確定地球的轉動，那麼意味着這個轉動就是地球本身的状态，而不是它相對於其物體的关系。然而轉動是加速運動的一種特殊情形，這就意味着任何一種加速運動都是物體本身的状态，是和其他物體無關的。事實上，我們上面提到過的和伽理略相對性原理有關的那隻輪船突然急劇地改變自己的速度時，那麼我們就立刻會發現這種在輪船周圍看不到有任何物體的加速度。因此，物體的加速運動是物體的本征運動状态，而不是相對於其他物體的。在這種意義上我們能夠說物體的加速運動是絕對運動。牛頓引進了在其中發生着絕對運動的絕對空間的概念，這空間正好像是全部物體的住所，它的性質不依賴於這些物體的分布和運動。這些特性是永遠保持不變的，而且是由歐幾里得幾何的規律所決定的。

與此相類似，牛頓引進了絕對時間的概念，它的特性完全不依賴於在其中流動着的物質過程。這個時間對於整個世界都是一樣的，於是在世界中所有的現象都能夠作為一系列一個接

① 都是指南北向的運動情況下——譯者

一个的事件排起队来。这种牛頓的时空概念構成了力学和全部物理学的基础。

德国物理学家馬赫發現了牛頓在有关于加速运动絕對性底結論中的錯誤。这个錯誤归根結的在于地球不是在真空的空的中轉动，而是在充滿了物質的空間中轉动。地球是一个称为銀河系的巨大星系之中的小質点。至于銀河系，它也是由無數銀河系的集合組成的更为巨大的星系的一部分。所有这些巨大的世界集团都对轉动着的地球起着作用，因而我們沒有理由預先假定在这些世界集团不存在时，佛科摆的轉动和葛利奧里加速度仍然存在。由此可見，地球的轉动完全不是它“本身”的运动，而是相对于世界集团的运动。同样精確地，在任何加速运动中所觀察到的現象都可以这样來說明，这个运动是相对于世界集团而發生的。可以設想，相对于世界集团的运动的概念，按其实質來說是和相对于真空的空間的运动沒有差別的：前者是相对的，而后者是絕對的。然而实际上并不如此，要知道，世界集团本身在宇宙的各个不同部分能够各不相同地运动着，因此相对于世界集团的运动和絕對运动在意义上是絕不相等的。因此在以后談到世界集团时，我們的意思是指那样一些制約着在一定宇宙範圍內的物体的行为的世界集团。

从他自己对牛頓的批評出發，馬赫做出了不正确的結論，它在科学的进一步發展中被拋棄了，而我們現在所感觉兴趣的仅仅是他的这种觀念，那就是物体加速运动的特征絕不和运动相对性的概念相冲突。

为了要使牛頓的普遍运动規律具有上面所指出的形式而又不过于簡單化，那么我們應該如何来表叙它呢？要回答這個問題，我們將首先从慣性原理着手。通常慣性原理可以这样来表叙：孤立的物体，也就是和其他所有物体远离因而不受它們影



响的物体，是作等速直线运动的。

然而在这样的状况下这种断言是不正确的。例如，这个物体相对于太阳作等速直线运动着，那么它就不能同时相对于按近似圆的轨道绕太阳旋转的地球作等速直线运动。

事实上惯性定律应该这样表述：孤立的物体彼此相对作等速直线运动。在特殊的情形下，它们彼此的相对速度可以等于零。在这种情况下我们说，这些物体形成一个惯性系统。各个惯性系彼此之间相对以等速直线运动着，或者换句话说，以惯性运动着。现在我们能够用下列形式正确地表述运动规律：相对于惯性系（或者像通常所说，在惯性系内）的物体的加速度可以用作用在该物体上面的力来确定。

在地球上存在着与这规律的偏差表明：地球并不是惯性系。相对于（在给定的宇宙范围内的）世界集团而言，等速直线运动着的系统是惯性系。转动着的物体不是惯性系，并且在这种系统中上面所提到的规律是不正确的。地球绕太阳周年运动，在很大的精确度上几乎是惯性的，而且不会引导到与牛顿运动定律有显著的违背。

### 运动的相对性和电磁场

19世纪以后出现了有关于电磁场的概念，运动的相对性问题就需要另外加以研究。这个概念在19世纪末渐渐发展成为物理学的中心概念之一。电磁波的存在被确定了，并且了解到光是电磁波的特殊情形，也就是电磁场的特殊情形（电动力学的）。电磁场理论引导到这样一个基本结论：任何电磁场（其中也包括光）在空间中以确定（大约等于每秒300,000公里）的速度传播着。这个结论当电磁波的源是不动时，是完全肯定的；但是在电磁波的源有运动存在时，却引起了一系列新的问题。

存在着十分令人信服的証明表明：电磁場的傳播速度并不依赖于电磁場源的运动速度的。

这些証明之一是由所謂双星給出的，双星之間以相互吸引力联系着，而且彼此相繞作旋轉。观察表明，这个轉动是按引力定律进行的。很容易看出：假設从双星發出的光其傳播速度和双星运动有关，这是不可能的。实际上，在这种情况下，每一时刻在不同方向上运动着而且具有不同速度的兩顆星，發射出的光波也就同样用不同的速度傳播到地球上來。

譬如，設在某一时刻星  $A$  趋近地球，而星  $B$  远离地球，并且在这时刻兩顆星离地球有相同的距离。那时候由星  $A$  發出的光与从星  $B$  發出的光比較起来將用另一种（例如，較大的）速度傳播到地球上。由于双星离开地球有巨大的距离，它們的光到达地球所經過的时间間隔是用年和千年来测量的，因此即使在傳播速度上有着不很显著的差別 都会使得由星  $A$  發出的光到达地球要比从星  $B$  發出的光早很多。星  $A$  和  $B$  同时的位置，我們是不同时收到的。这就产生了完全畸变了的双星运动圖像，它和在相互引力影响下的运动沒有任何共同的地方。而实际上，正像我們上面所說的，双星的运动表明他們相互圍繞着的轉动完全符合引力定律。由此推出，从双星所發出的光，其傳播速度实际上并不依赖于星体本身的运动速度。

光速与光源运动的無关性表明，光与一般的电磁波永远用同一速度  $c$  傳播着。試問：相对什么而言，电磁場用这样的不变速度傳播着？也許可以假定，是相对于世界集团而言的。如果确实是这样，那么我們就有可能来决定我們所未知的地球相对于世界集团的速度。实际上，如果某一光源的光在地球运动的方向或在其相反的方向用速度  $c$  傳播，而地球以速度  $v$  运动，那么光相对于地球而言，以速度

傳播着(圖 1 甲)。

$$c' = c \pm v.$$

如果光底傳播方向垂直于地球運動的速度方向，那麼光相對地球而言其速度等於(圖 1 乙)。

$$c'' = \sqrt{c^2 + v^2}.$$

比較了相對於地球在各種相互垂直的方向上的光的速度，我們也許就能夠決定地球相對於世界集團的速度。邁克爾遜所製成的儀器，使我們可以進行這樣的比較。

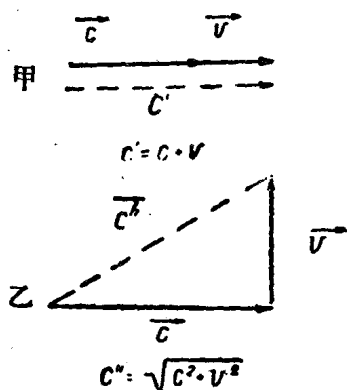


圖 1 光傳播的示意圖

鍍銀的鏡子  $A$  以後，一部分穿過一直到達鏡子  $B$ ，而另一部分被反射到鏡子  $C$ 。從鏡子  $B$  和  $C$  反射回來的光綫(它們在圖上用虛綫  $B'A'$  和  $C''A''$  表示出來)到達半透明鏡子  $A$ ，而且再一次一部分透過它，一部分被反射。結果一條光綫走过的路程是

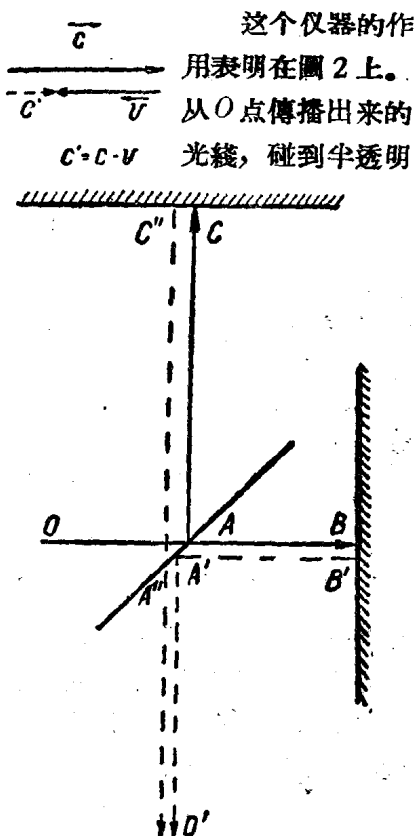


圖 2 邁克爾遜儀器作用的示意圖

$OABA'O'$ ，而另外一条光綫所走过的路程是  $OACA''O'$ （实际上点  $A'$  以点  $A''$  是和点  $A$  重合的），此后它們就落到接收器  $O'$  上。在路程  $AO'$  上，这两条光綫相遇，从两条光綫分开的地点出發，它們走过了不同的距离而且同时正像我們現在所見到的是用不同的速度走过的。因此它們有着不同的位相，也就是說，它們之中的电磁振动在不同的时刻到达極大值和極小值（圖 3）。

在光的波动理論中証明了，当这样一些具有不同位相的光綫落到屏上时，屏上就出現了干涉現象，也就是一系列等

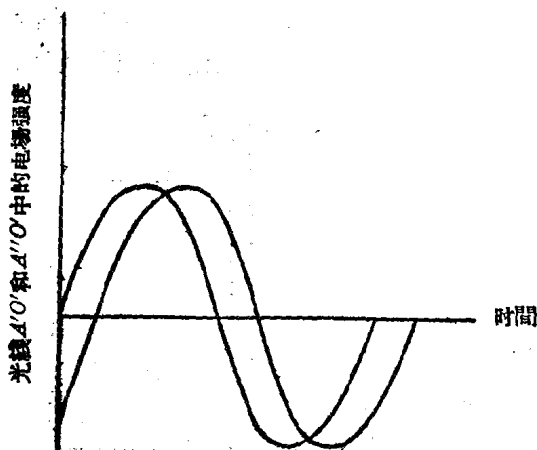


圖 5 在極大值和極小值时刻的电磁振动

距离明暗相間的帶，在这些帶上两条光綫分別互相加强或减弱。讓儀器的臂  $AB$  沿着地球前进运动的方向置放着，因此光綫  $AB$  用速度  $c \pm v$  傳播着，而光綫  $AC$  的速度是  $\sqrt{c^2 + v^2}$ ，因此这两条光綫在点  $O'$  产生一組干

涉条紋。現在我們把仪器轉过  $90^\circ$ ，这样使得臂  $AC$  平行于地球的速度，而臂  $AB$  則垂直于它。那时两条光綫的速度就互換了，其后果就改变了它們的位相差。这就应当引起干涉条紋的位移。知道了这个位移，就能够决定地球的运动速度。

在各种条件下多次进行过的实验給出了否定的結果：沒有任何的光帶的位移出現！这就表明两条光綫在实际上是用同样

速度傳播的。這樣一來，我們就得到了出乎意料的結論：相對於地球的光速在各個方向上是相同的而且等於 $C$ 。這個結果也許可以解釋這樣一個推測：地球相對於世界集團是靜止的。但是這個解釋意味着回到了地球為中心的概念並且是不能為近代科學觀點所接受的。

正確的解釋是由愛因斯坦提出的，可以歸結如下：不僅相對於地球，並且相對於任何一個慣性系統，光及一般電磁場是用同一個速度 $C$ 傳播的。這個解釋是一個假設，因為邁克爾孫實驗直到現在還僅僅只是在地球上進行過而還不能在其他天體上進行。但是從這個假設，我們可以推出許多組成了相對論內容的結論，而所有到現在為止能夠和實驗比較的結論都顯示出是正確的。因此，現在對這一點是無可置疑的，就是一旦我們能夠在其他星體上進行邁克爾孫實驗時，它將引導到和地球上同樣的結論。

從愛因斯坦的假設推出，在慣性系內電磁場的傳播規律是和系統的运动無關的，這一點和力學規律完全相同，因而處在這種系統中並且不考察系統本身相對於其他物體的位移時，不僅用力學實驗而且用電磁實驗都不能夠決定系統的速度。這是伽利略相對性原理的推廣。

在未敘述相對論之前，我們先講邁克爾孫實驗的另一種說法，它是邁克爾孫同時代人所喜歡採用的。

在相對論產生之前，人們推測光和一般電磁場是代表着某種物質（連續充滿着空間的宇宙以太）的运动狀態。電磁波就是以太底某些狀態的這種波狀的傳播。以太並不被在其中運動着的物體所帶動，因而它相對於世界集團是靜止的。但是在此種情況下，地球相對於以太的运动同時也就是地球相對於世界集團的运动。因此邁克爾孫實驗在愛因斯坦的解釋下，不可避免

地要引导出下面的結論：总而言之，無論是什么样的以太都是不存在的。因此，电磁場不是以太的运动状态。

这样一来，电磁場丧失了实物的載負者。然而因为在电磁場的物質性上是不存在着什么疑問的，因此物理学就引导到作为物質独特形式的电磁場的概念，它正和实物一样是真实的。

現在由于量子理論以及有关于基本粒子的实验数据累积的結果，产生了更为普遍的有关于在自然界中存在着物質的多样性的概念，在特殊的情形下，它的形式可以是实物，也可以是电磁場。

### 相对論的基本概念

于是，下列的原理構成了相对論的基础：力学現象和电磁現象在所有的慣性系中是相同的。特别是，电磁場在任何慣性系内在各个方向上是以等于  $C$  的同一种速度傳播的。

乍看起来，也許觉得这个原理立刻可以导出一个矛盾。我們可以想像，在火車用速度  $C$  通过車站的时刻，在車站上發生光的閃耀以及所产生的光波用速度  $C$  沿着鐵路傳播。試問，例如在時間  $\Delta t = 10^{-8}$  秒，以后，光的信号从發生閃耀的地方算起傳播了多少距离。

在这里我們有兩個慣性系：火車系統和車站系統，并且按照基本原理，光在兩系統中是以同一速度  $C$  傳播的。因此經過  $\Delta t$  時間之后，光的信号在兩個系統中傳播到离开閃光地点距离为  $c\Delta t$  的地方。但是因为火車在这段时间之后位移了  $v\Delta t$ ，那末，在确定了信号在兩個系統中傳播到的一点以后，我們就得出下面的結論：

1) 在車站系統中光从閃光發生的地点出發傳播了  $c\Delta t$  的距离。

2) 在火車系統中信號從同一地點出發傳播的距離為  $(c+v)\Delta t$  (圖 4)。但是因為信號從一確定地點出發並且到達另一確定地點，所以這個結論是荒謬的。

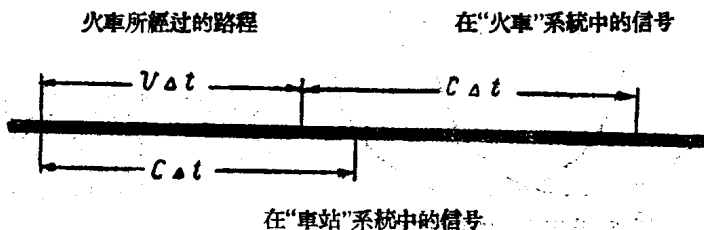


圖 4 具有兩個慣性系(火車系統和車站系統)的例子的圖解

這樣一來，我們就導出了矛盾。愛因斯坦在一個大膽的觀念下解決了這個矛盾，這個觀念認為，在兩個系統中的秒和公里是不同的秒和不同的公里，也就是說，在同樣的兩個物質點之間的距離以及同樣兩件事件之間的時間間隔，在不同的系統中是不同的。正像通常所說的，從一個系統過渡到另外一個系統時空間的距離和時間的間隔不是不變量，而是在這種過渡中按照一定的規律變換着。

現在我們來研究第二個例子，假定在某一時刻從地球上等速直綫地飛出一架宇宙飛機到空間中去，我們將用點  $A$  代表地球，以點  $B$  代表飛機。在飛機從地球上飛出的時刻，地球上發生了光的閃耀，並且所產生的光波向各方向以同一速度  $C$  傳播着。在地球的系統內，波的表面，也就是波同時所到達的各點，是一些具有中心點  $A$  的同心球。在同一時候，在飛機的系統中波的表面是一些中心在點  $B$  的球。兩組球彼此相截，因為他們具有不同的中心  $A$  和  $B$  (圖 5)。這個結論顯然是荒謬的，因為同時到達一個球上所有各點，不能同時到達與它相截的球上各點。波應該較早地到達處在第一個球內各點，而對於球外

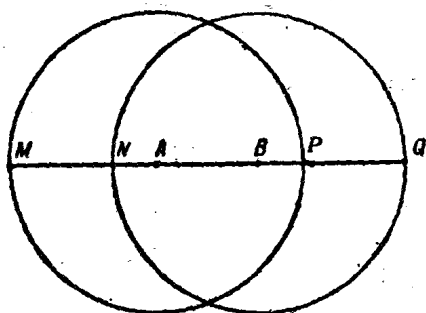


圖 5 宇宙飞机例子的圖解

在系統A中波首先到达N, 然后同时到达M和P, 最后到达Q; 在系統B中波首先到达P, 然后同时到达N和Q, 最后到达M。

的点則应較迟到达。对这个矛盾, 爱因斯坦从另一个大胆的观念上找到了解答, 这另一个观念認為: 在一个系統中(例如在地球系統中)是同时的事件, 在其他的系統中(在飞机的系統中)是不同时的, 或者換句話說, 同时是相对的。

这样一来, 相对論的基本原理只是在这种情况下沒有矛盾, 如果空間和時間間隔(同样还有許多其他的物理量)从一个系統过渡到另一个系統时是按照一定的規律变换的話。这个規律首先是由劳倫茲所創立(在近似的形式下), 而更加一般的和精确的形式是由爱因斯坦和邦加萊建立的。

空間和時間間隔的变换規律称为罗倫茲变换。如果系統A以速度 $v$ 运动, 那么与此速度相垂直的綫段長度从一系統到另一系統的过渡中并不变化。平行于速度 $v$ 的綫段長度 $l$ 以及時間間隔是按照勞倫茲公式:

$$l' = \frac{l - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (1)$$

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}l}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (2)$$

过渡到相应的量 $l'$ 和 $t'$ 。



勞倫茲變換構成了全部相對論的基礎，我們立刻看出，在這些表面上看來很簡單的方程中總結着全部不平常的概念和現象。在所有為數眾多的結論中我們只能講到很少的一些，然而就是這一些已經足夠使讀者感覺到在這樣一些數學方程的後面可以包含着新而微妙的物理觀念的世界，這些觀念是不屬於我們通常概念的範圍的。

## 相對論的一些最簡單的結論

### 長度的相對性

在系統  $A$  中物體是靜止的，我們用  $l_0$  表示在系統  $A$  內物體的長度，也就是物體的端點  $A$ 、 $B$  之間的距離。這個長度通常稱為靜止長度。它等於點  $a$  和  $b$  的同時位置之間的距離。假設系統  $A'$  用速度  $v$  沿着直線  $ab$  相對於系統  $A$  運動。為了要決定在新系統中的長度  $l'$ ，就應當測量點  $a$  與  $b$  在新系統中同時被決定的位置之間的距離，也就是在  $t' = 0$  的條件下所決定的位置之間的距離。但是那時，按照方程 (2)，在系統  $A$  中點  $a$  和  $b$  的位置是非同時決定的，並且在這兩個決定之間的時間間隔

$$t = \frac{v}{c^2} l.$$

然而，如果物體端點底位置是非同時決定的，那麼它的長度很自然就不一樣了。將所得到的  $t$  值代入方程 (1)，並且令  $l = l_0$ ，我們就有：

$$l' = \frac{l_0 \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$