

狭义相对论的时空观 - 四维时空问题

李学生 (Li Xuesheng)

山东大学副教授, 理论物理教师, 中国管理科学院学术委员会特约研究员, 北京相对论研究联谊会会员, 中国民主同盟盟员 (作者为中国科学院高能物理所研究员)

xiandaiwulixue@21cn.com, 1922538071@qq.com

Abstract: 维数是刻画几何图形拓扑性质(拓扑是译音, 原意是形势分析, 形是指一个图形本身性质, 势是指一个图形与其子图形相对的性质)的一种数, 物体占有的空间, 只与空间这一元(素)有关, 物体占有的空间可以用几何图形来描述. 通俗地说, 它是确定整个图形中各点的位置所需要的坐标(或参数)的个数. 直线上的点由一个坐标确定, 故直线的维数为 1. 平面上的点由两个坐标确定, 故平面的维数为 2. 同理日常所指的空间, 空间中的点由三个坐标确定, 故空间的维数为 3, 物体占有的空间, 是有限的三维空间. 当整个图形为一点时, 点的维数假设为 0. 在 19 世纪前, 几何学仅从事三维或低于三维图形的研究.

[李学生 (Li Xuesheng). 狭义相对论的时空观 - 四维时空问题. *Academ Arena* 2017;9(16s): 125-138]. (ISSN 1553-992X). <http://www.sciencepub.net/academia>. 2. doi:[10.7537/marsaaj0916s1702](https://doi.org/10.7537/marsaaj0916s1702).

Keywords: 物理学; 力学; 因果; 分析; 数学; 方法

1. “维数”问题, 物理学与四维时空

维数是刻画几何图形拓扑性质(拓扑是译音, 原意是形势分析, 形是指一个图形本身性质, 势是指一个图形与其子图形相对的性质)的一种数, 物体占有的空间, 只与空间这一元(素)有关, 物体占有的空间可以用几何图形来描述. 通俗地说, 它是确定整个图形中各点的位置所需要的坐标(或参数)的个数.

直线上的点由一个坐标确定, 故直线的维数为 1. 平面上的点由两个坐标确定, 故平面的维数为 2. 同理日常所指的空间, 空间中的点由三个坐标确定, 故空间的维数为 3, 物体占有的空间, 是有限的三维空间. 当整个图形为一点时, 点的维数假设为 0. 在 19 世纪前, 几何学仅从事三维或低于三维图形的研究.

19 世纪以来, 更高维空间的概念开始被接受. 例如, 日常的三维空间中点的坐标是 (x, y, z) , 再加上时间坐标 t , 就得到点 (x, y, z, t) , 它们组成的空间就是最简单的四维空间. 【7】随着宇宙中客观时间的流逝, 物体在坐标系中的位置, 不断的发生变化, 即物体中各个质点的坐标不断的发生变化, 只考虑物体的空间属性, 物体就看成几何体.

Engles 认为, 从宇宙总体上来看, 物质运动是一个永远循环的过程, 在这个循环过程中, 物质的任何一个属性都不会丢失. 宇宙的每一循环过程都按照物质固有的规律运行, 是物质属性的有秩序的展现过程, 循环过程中的物质运动规律是永恒不变的. 世界的某些特征永远保持不变. 自然定律在空间的每一个方向上以及在任何时刻都相同, 这分别等价于在任何物理过程中的总旋量子——角动量——守恒和总能量守恒. 这两个量与电磁质量的总体绝对守恒, 它们作为守恒量已与整个物理学的上层建筑深深捆绑在一起了. 因此“无限时间内宇宙的永远重复的连续更替, 不过是无限空间内无数宇宙并存的逻辑的补充【3】”, 即时间内的宇宙是空间内的宇宙的纵向展开. 所以, “物质在它的一切变化中永远是同一的, 它的任何一个属性都永远不会丧失. 因此, 它虽然在某个时候以铁的必然性毁灭自己在地球上的最美的花朵——思维着的精神, 而在另外的某个时候一定又以同样的铁的必然性把它重新产生出来. 【3】”物质的每一个循环过程都是其前一循环过程的重复, 各个循环过程所包含的信息展现的程序也是相同的, 时间是空间的变化, 时间经常是用事物变化的方式来定义的. Einstein 指出: “相对论和时间与空间的理论有密切的关系”, 在相对论的所有推理过程中, 都离不开时间和空间的性质. Einstein 的相对论不仅标志着人类科学思维的一大进步, 而且是我们今后相当一个时期科学发展的新的起点, 是值得我们进一步思考下去的通向新的辉煌的通道. 因为这里讨论的本质上是关于时间和空间的理论, 这几乎是一切科学的基础.

在刚体中, 刚体的空间是由距离不变的质点组成, 在几何体中, 几何体的空间是由距离不变的几何点组成, 在坐标系中, 坐标系的空间是由坐标不变的几何点组成, 刚体占有的空间、几何体占有的空间是有限空间, 有边有界, 坐标系定位确定的空间是无限空间, 坐标系的几何点之间的距离不变, 这些几何点与坐标原点、坐标轴的各点的距离不变, 坐标系的几何点相对这坐标系始终静止, 坐标不变, 坐标系的空间始终相对自己的坐标系静止, 坐标系的空间是参考物及坐标系定位确立的空间, 参考物是人为选定的, 坐标系是人为依据参考物建立的几何图形, 坐标系是用坐标描述, 质点、假设的其它几何点在这坐标系中位置, 也是用于

数字化描述物体、物质，假设的刚体、几何体，相对位置的主观意识工具，坐标系只能画在纸上，存在在人的主观意识中，客观上并不存在，坐标系可以建立无数个，描述的是同一个客观存在的宇宙空间，坐标系的空是主观意识定位确立的空间，在不同的时刻，各个坐标系的相对位置是不同的，在同一时刻，对同一点的位置描述，在不同的坐标系中，这点的坐标是不同的，这就涉及各个坐标系之间的坐标变换。

Einstein 的老师闵可夫斯基在 1908 年德国自然科学家学会的第八十次年会上的报告中宣称的那样：“我们现在讲述的空间和时间的观点，是在实验物理学基础上发展起来的，这就是理论之所以有力的原因，它的意义是革命性的。从此以后，时间和空间退化为虚幻的影子，只有两者结合才能保持独立的存在。”

在经典力学体系下，空间是三维的，时间是事件发生的顺序，也可以将空间的三维与时间一维在数学上组合到一起过程四维的时空系统，这个系统应当是广泛的，时间就是时间维的坐标刻度，同时就是指某些事件具有相同的时间刻度。

根据物理学必须具有普适性，按宇(时)宙(空)中各点同一性和等价性的普遍观点，时空必须具有不变的确定均匀度量性。因此它是由可直接度量的实3-维空间 (x^1, x^2, x^3) 和不可直接度量的虚(原理二)1-维时间 $x^0=ict$ 构成的具有均匀性，各向同性的4-维欧几里德度规空间： $M^4(g_{\mu\nu} = \{1, 1, 1, 1\}, \mu, \nu = 0, 1, 2, 3.)$ ： $x^0=ict, x^1=x, x^2=y, x^3=z, c$ 是真空中光速。对于物理学，在宇宙任意点建立的参考系(坐标系) M^4 都是互相等价的，平权的；在宇宙任意点上建立的 M^4 中，一切物理定律都有相同的形式。原理(一)给出在宇宙中任一点的 M^4 中，物理定律都具有相同的形式。由此物理定律对宇宙四维时空具有普适性。在这里看到，表示时间维度的坐标还具有独特的形式：虚数单位 i 表示时间的不可直接观测性(原理二)， c 表示时间在以光速流逝。由于它在宇宙中任一点都有这个特性，就称它为普适时间维度，常用符号 $0ictx\tau$ 表示。由天文时和原子时的同步表明， τ 在 M^4 中是唯一确定的。时间的这个特性在各种文化中都受到了关注。“时光飞逝”，“时间一去不复返”，“逝者如斯夫，不舍昼夜”(中华)，“未来珊珊来迟，现在象箭一样飞逝，过去永远静止不动”(德意志)，“时间对于谁都是奔跑着走的”(英格兰)，……

闵可夫斯基把相对论写成四维时空的形式，从而把时空看成一个整体。

如果令 $x_0 = ct, x_1 = x, x_2 = y, x_3 = z$ ，洛伦兹变换可写为：

$$\begin{pmatrix} x_0' \\ x_1' \\ x_2' \\ x_3' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma & -\beta\gamma & 0 & 0 \\ -\beta\gamma & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\text{式中 } \beta = v/c, \gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2} \quad (2)$$

相对论中联系不同惯性系的坐标变换式洛伦兹变换，在相对论中，矢量被定义为在洛伦兹变换下与坐标一样变的量，即如(1)那样变的量。

二阶张量被定义为在洛伦兹变换下按以下规律变化的量：

$$T' = aTa^{-1} \quad (3)$$

所有的力学量和电学量都可以写成张量，所有的力学规律(除万有引力外)和电磁学规律都可以写成张量方程。所以，除去万有引力定律外，力学规律和电磁学规律都满足洛伦兹变换和相对性原理，都符合相对论。

值得注意的是能量和动量一起可以构成四维动量：

$$P = \begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{pmatrix} \quad (4)$$

四维闵可夫斯基时空的一个点，用 (t, x, y, z) 四个坐标表示称为一个事件。三维空间的一个点，由于时间的不断发展，在四维时空中都会描绘出一根线。

图1中A、B、C三条世界线，A描述三维空间中的一个不动点，B描述一个匀速直线运动的点，C描述一个变速运动的点。 ds 为世界线上两点之间的“距离”。由于不可能画出时空的四个维度，所以没有画出

z 轴坐标描述的那一维空间.

在四维时空中, 闵可夫斯基注意到了时间与空间的差异, 考虑了光和质点的速度表达式, 把四维时空两点之间的“距离”表示为:

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2 \quad (5)$$

ds 通常称为两点的间隔. 由于两点总可以用世界线相连, 所以 ds 又可以看成世界线的线元. $ds^2 = 0$ 有

$$v^2 \equiv \frac{dx^2 + dy^2 + dz^2}{dt^2} = c^2 \quad (6)$$

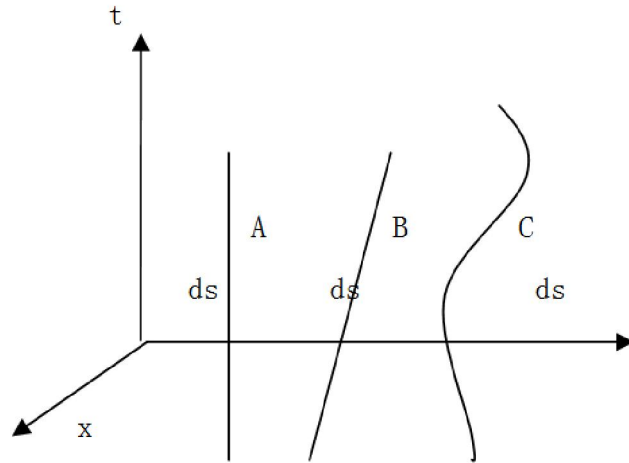


图 1 四维时空中的世界线

表明从点 1 到点 2 的运动速度正好是光速, 这段间隔正好描述光信号的运动, 称类空间隔.

不难看出:

$$ds^2 > 0 \Leftrightarrow v^2 > c^2 \quad \text{类空间隔}$$

$$ds^2 = 0 \Leftrightarrow v^2 = c^2 \quad \text{类光间隔}$$

$$ds^2 < 0 \Leftrightarrow v^2 < c^2 \quad \text{类时间隔}$$

时空中任取一点 p, 与 p 的间隔类光的点组成如图 2 所示的锥面, 成为 p 点的光锥.

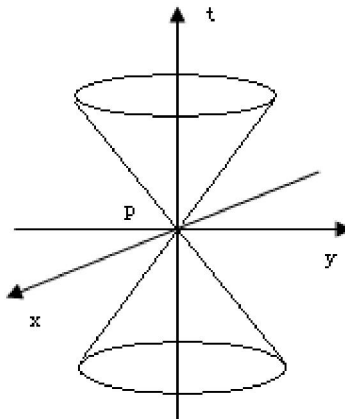


图 2 光锥图

光锥内部的点与 p 点的时间间隔都是类时的，与 p 点以亚光速信号联系。上半光锥内部点处在 p 点的未来，而下半光锥内部的点处在 p 点的过去。上半光锥上的点也处在 p 点的未来，从 p 点发出的光信号可以到达它们，下半光锥类似。

光锥外部的点与 p 点类空，只有超光速信号才能到达，或从它们到达 p。而相对论认为，光速是信号传递的最大速度，所以光锥外部的点与 p 点没有因果关系。

我们考察在 S 系中静止的一个质点。由于它在 S 系中不动，从空间看，是一个点， $dx=dy=dz=0$ ，(5) 约化

$$-\frac{ds^2}{c^2} = dt^2 \quad (7)$$

$$d\tau = i \frac{ds}{c} \quad (8)$$

由此我们定义

四维时空是构成真实世界的最低维度，我们的世界恰好是四维，至于高维真实空间，至少现在我们还无法感知。有一个例子，一把尺子在三维空间里（不含时间）转动，其长度不变，但旋转它时，它的各坐标值均发生了变化，且坐标之间是有联系的。四维时空的意义就是时间是第四维坐标，它与空间坐标是有联系的，也就是说时空是统一的，不可分割的整体，它们是一种“此消彼长”的关系。在四维时空里，质量（或能量）实际是四维动量的第四维分量，动量是描述物质运动的量，因此质量与运动状态有关就是理所当然的了。在四维时空里，动量和能量实现了统一，称为能量动量四矢。另外在四维时空里还定义了四维速度，四维加速度，四维力，电磁场方程组的四维形式等。值得一提的是，电磁场方程组的四维形式更加完美，完全统一了电和磁，电场和磁场用一个统一的电磁场张量来描述。四维时空的物理定律比三维定律要完美的多，这说明我们的世界的确是四维的。

爱因斯坦在论述“空间—时间”（《文集》第一卷）时写道：

“相对论引起了空间和时间的科学概念的根本改变，用明可夫斯基的名言来说——“从今以后，空间本身和时间本身都已成为阴影，只有两者的结合才保持独立的存在”。这种结合叫做“时间—空间”，是目前这个条目的主题。因为这两个概念相当难懂，多数读者最好也许先读一下《相对论》那个条目，以便对这主题有一比较初步的了解”。

他在论述“闵可夫斯基四维空间”（《浅说》）时写道：

“一个人如果不是数学家，当他听到“四维”的事物时，会激发一种象想起神怪事物时所产生的感觉而惊异起来。可是，我们所居住世界是一个四维空时连续区这句话却是再平凡不过的说法”。

“闵可夫斯基简称为“世界”的物理现象的世界，就空一时观而言，自然是四维的。因为物理现象的世界是由各个事件组成的，而每一事件又是由四个数来描述的，这四个数就是三个空间坐标 x, y, z 和一个时间坐标——时间量值 t。具有这个意义的“世界”也是一个连续区，……”

在相对论中，用四维方式来考察这个“世界”是很自然的，因为按照相对论时间已经失去了它的独立性。这已由洛伦兹变换的第四方程表明。

还有，按照这个方程，甚至在两事件相对于 K 的时间差 Δt 等于零的时候，该两事件相对于 K' 的时间差 $\Delta t'$ 一般也不等于零。

两事件相对于 K 的纯粹“空间距离”成为该两事件相对于 K' 的“时间距离”。

但是，对于相对论的公式推导具有重要作用的闵可夫斯基的发现并不在此。而是在他所认识到的这样的一个事实，即相对论的四维空时连续区在其最主要的形式性质方面与欧几里得几何空间的三维连续区有着明显的关系。

但是，为了使这个关系所应有的重要地位得以表现出来，我们必须引用一个与通常的时间坐标 t 成正比的虚量 $i \times ct$ 来代替这个通常的时间坐标 t。

在这种情况下，满足（狭义）相对论要求的自然界定律取这样的数学形式，其中时间坐标的作用与三个空间坐标的作用完全一样。在形式上，这四个坐标就与欧几里得几何学中的三个空间坐标完全相当。甚至不

是数学家也必然会清楚地看到，由于补充了此种纯粹形式上的知识，使相对论能为人们明了的程度增进不少”。

他在论述“相对论和空间问题”（《文集》第一卷）时写道：

“关于空间问题，狭义相对论的立场是怎样的呢？首先我们必须反对这样的见解，认为实在的四维是由这理论第一次引进来的。

事实上，即使在古典物理学里，事件也已经是由四个数字来定位的，其中三个是空间坐标，一个是时间坐标；因此，全部物理“事件”被认为是镶嵌在四维连续流形里的”。

“四维结构（明可夫斯基空间）被认为是物质和场的载体。惯性空间同它们有关的时间一道，是仅有的由线性洛伦兹变换结合起来的特许的四维坐标系。既然在这种四维结构里不再存在任何客观上代表“现在”的截面，发生和变化这两个概括固然不是完全搁置起来，但却是更加复杂化了。

因此，看来比较自然的是认为物理实在是一种四维的存在，而不是迄今所认为的是一种三维存在的演化”。

他还在“论科学”（《文集》第一卷）文章中写道：

“在数学上，人能想象第四维，可是在物理上，人不能看到和直觉地想象第四维。对于他来说，第四维只是在数学上存在着。他的理智不能理解第四维”。

在狭义相对论中，长度和时间间隔也变成相对量，运动的尺相对于静止的尺变短，运动的钟相对于静止的钟变慢，光速在狭义相对论中是绝对量，相对于任何惯性参照系光速都是 c 。经典力学和狭义相对论都认为一个惯性参照系可以适用于整个宇宙，或至少一个大的范围。相对于某一个惯性参照系，宇宙中任何范围内的物体运动都遵从惯性定律。实际上，空间化的时间可以与空间一起处理。在时间空间化最为明确显著的近代物理学中，space-time 完全是作为一体的。在 Newton 运动方程中，时间 t 如取负值，方程依然可以成立，表明 Newton 力学是时间可反演的；在 Einstein 狭义相对论中，时间的空间化进一步被形式化、完备化，时间、空间成为 space-time。：“相对论是一种原理的理论。”与“构造理论”不同，原理理论“应用分析而不是综合的方法。其出发点和基础不是假设的要素，而是经验上观察到的现象的一般性质、一般原理；从这些性质和原理导出这样一些数学公式，使其用于每一自身出现之处。”“原理理论的优点，是它们逻辑上的完善，和它们基础的稳固”。在给定参照系后，参照系自己看来的“时间流速”是固定不变的，改变的是从这个参照系看来的别的物体的内秉时间流速，也就是从你看来的别人自己的时间流逝速度。某个物体的“时间流速”就是这个物体的本征长度在时间方向上的投影，也是一种影子，时空中的物体就是时空坐标系中的一个单位向量箭头，那么很显然，这个单位向量角度不同的话，向量在时间轴上的投影长度也就是不同的了。狭义相对论的本质就是如此简单。由于时空的特殊性，在空间中上述的投影是角度越大影子长度越短，在时空中，这个角度越大，投影的长度却是越长。闵科夫斯基几何与欧几里德几何的本质区别是两个微分几何流形的号差不同，度量不一样（闵科夫斯基流形也叫做赝欧几里德流形，就是除了号差不同，别的都一样）。

因果关系是绝时的，不可颠倒的。狭义相对论通过绝对“间隔”把四维时空划分为两大区域，即“类时间隔”和“类空间隔”。在“类时间隔”区域，事件之间存在着联系，理论证明因果关系是绝时的，不会导致不可知论；在“类空间隔”区域事件之间没有联系，即不存在因果关系，理论分析证明，同时性是相对的。这便出现了甲乙两事件（无联系的两事件）发生的先后次序因观察者所在的参照系的不同而不同。显然，“类空间隔”区域的的同时性并不与因果关系相矛盾。

参考文献：

- 【1】林为民编译《图说相对论》，内蒙古人民出版社 2003 年 3 月版 218 页。
- 【2】吴忠超译《果壳中的宇宙》湖南科学技术出版社 2002 年 8 月版 54 页。
- 【3】Engels 著。《自然辩证法》第 23-24 页人民出版社 1971 年版。

2、狭义相对论中的绝对问题

爱因斯坦认为：“相对论是一种原理的理论。”与“构造理论”不同。原理理论“应用分析而不是综合的方法。其出发点和基础不是假设的要素。而是经验上观察到的现象的一般性质、一般原理；从这些性质和原理导出这样一些数学公式，使其用于每一自身出现之处。”“原理理论的优点。是它们逻辑上的完善。

和它们基础的稳固”。虽然所有的物理学都认为地面上的观测者和行驶中的火车上的观测者所测得的同一运动物体的运动速度，动量和动能数值是不同的，但是在经典物理学中人们相信理解一个物象系统可以基于一个统一的时间标准和统一的各种尺度标准。而在相对性理论中，（除了光速的测量是绝对的，与观测者是否在运动无关）包括空间与时间的测量都是相对于观测者的。但是，不仅实验事实推断起来与经典物理

相矛盾，而且只有考虑了时间与空间的相对性以后，才能使依据物象来完美构造的物理定律对于所有的观测者来说是不变的，即物理定律的绝对性。的确，如果像时间和长度的经典概念所要求的那样，放弃 Maxwell 电磁场方程的确定形式，那么留给我们的将是一个任意而又复杂的方法系统。比较起来，相对性理论那个方法才是确定的和简单的。所以，相对性理论应当称作绝对论。这个理论的主要点不在于测量数值的相对效应，而在于把物理定律的相对性移去了，反倒强调了物理定律的绝对性，即所谓事物运动规律不依赖于观察者的立场。

根据相对论认为存在所谓的“静止质量”。理由是，根据洛伦茨变换，在四维空间中的不变量是一系列的。比如，四维时间不变量——就是人们所说的“静止时间”，四维空间不变量——就是人们所说的“静止空间”，四维质量不变量——就是人们所说的“静止质量”，四维动量不变量——就是人们所说的“静止动量”，四维能量不变量——就是人们所说的“静止能量”，四维温度不变量——就是人们所说的“静止温度”，四维作用力不变量——就是人们所说的“静止作用力”，四维功率不变量——就是人们所说的“静止功率”，四维电荷密度不变量——就是人们所说的“静止电荷密度”，四维电流密度不变量——就是人们所说的“静止电力密度”，四维标电势不变量——就是人们所说的“静止标电势”，四维磁矢势不变量——就是人们所说的“静止磁矢势”。四维质量不变量正是电磁质量满足 Lorentz transformation 的直接结果之一。电磁场空间是线性空间，满足 Lorentz transformation 是很自然的。而引力场是非线性空间，不满足 Lorentz transformation 也是很正常的。但我们将引力场在局域内微线性化，就可以找微线性化变换群，二次积分后就可以得到非线性变换群。Einstein 没有找到这个微线性化变换群——所以始终没有能够创立出真正意义上的“广义相对论”来。他是一个失败者，但更是一个领航者——因为他第一个最早指出了创立出真正意义上的“广义相对论”正确的方向。Lorentz transformation 的前提条件是“间隔平方相等”（参见朗道和栗弗席兹合著的《场论》一书）在 20 世纪头二、三十年里，正如后来的 P. A. M. Dirac 所说，“一旦看到了一些用非相对论形式表示的物理学，人们就能把它修改成适合狭义相对论的。这很像是一种游戏。一有机会我就沉溺于此。有时候这个结果使我感到十分有趣，可能为它写出一篇微不足道的论文。”【1】1907 年，Planck 给出了热力学的变分原理，导出了热力学的 Lorentz 变换关系。在 Planck 的理论中，通过逻辑推理和思辨，并照顾到统计力学中的 Boltzmann 熵公式，指出熵必然是 Lorentz 标量。研究相对运动系统内，物质运动变化规律的时空理论，就是相对论，在相对运动系统中，测量同一事件的时间和空间之间的关系，就是相对论的时空变换。

参考文献：

【1】沈惠川，“狄拉克”，载《世界数学家思想方法》（解恩泽，徐本顺主编），山东教育出版社，1993：pp1357-1401。

3、相对论与对称性原理的关系初探

马赫和迪昂的约定论思想肯定对爱因斯坦或多或少有所启示，但是爱因斯坦的约定论思想主要源于彭加勒，因为彭加勒是约定论的创造者和集大成者，而爱因斯坦在奥林比亚科学院时期就认真研读了彭加勒的《科学与假设》，并与同伴们进行了热烈的讨论。可以说，爱因斯坦对彭加勒的约定论的内涵和精神实质是心领神会的。这就是：数学公理和物理学的基本假设或基本原理既非先验判断，亦非经验事实，它们原来都是约定；约定是我们精神自由活动的产品，但是自由并非任意之谓，它要受实验事实的引导和避免一切矛盾的限制；约定是我们强加于科学的，并未强加于自然界，而且并非整个科学都是约定的，约定只是出于方便，无所谓真假；约定具有巨大的方法论功能，在从未加工的事实过渡到科学事实、从科学事实过渡到定律，尤其是从定律上升到原理时，约定都是不可或缺的。爱因斯坦的基础约定论思想虽然没有彭加勒的约定论那么多的内涵，但是却牢牢地把握了彭加勒约定论的精髓，并对其做了更为明确、更为严密、更为深入的阐释和发展。第一，他表明，从永恒的观点看，彭加勒的约定论是正确的，必须把康德的“先验的”冲淡为“约定的”。第二，他把科学理论分为两大类，即构造性理论和原理理论，约定在后一种理论的逻辑基础和内部结构的建设中扮演关键性的角色（这也是我们称爱因斯坦的约定论为“基础约定论”的原因）。第三，作为原理理论逻辑基础的基本概念和基本原理是自由选择的约定，是“人类精神的自由创造”和“人类理智的自由发明”。第四，形象地把这种自由比喻为猜字谜的自由，明确指出理论筛选的双标尺标准。第五，严格区分了作为纯粹命题集的非解释系统和与感觉经验和实在相联系解释系统，指出真理概念适合与后者。第六，创造性地提出了约定论和理性论的方法论——探索性的演绎法和逻辑简单性原则。另外，爱因斯坦的客观性、可知性、和谐性、统一性、简单性、因果性、协变性等科学信念，实际上属于最深层次的约定，因为无论经验还是理性，都无法证实、证伪或反驳它们。

Einstein 在建立理论体系之前，先追求数学上的完美性。对于数学上不完美的理论，则将其拒之门外，

Einstein 建立的理论属于对称性理论。在一个给定的参照系中的自然规律和一切实验结果都与整个系统的平动无关,更精确地说法是:存在着无穷多的互相作匀速直线相对的运动三维等效欧几里得参照系,在这些参照系中,一切物理现象都是以等同的方式发生的。所以我们说, Einstein 方法可以称为相对自由或受对称性限制的方法。具体地说,即以实验和事实为依据,仅在对称性方案之中,选择最佳方案。在经典物理学中,理论的建立程序为:实验→方程→对称性,而爱因斯坦在狭义相对论的建立中倒转了这个程序:对称性→方程→实验,在广义相对论中,爱因斯坦把这个倒转过来的程序又应用于引力场方程的建立。另外,当把对称性的概念引入物理学中时,便可以把运动的相对性作为一种对称性来看待。在科学中“一种对称性的发现比一种特定现象的发现意义重大得多。像旋转不变性和洛伦兹不变性这样的时空对称性,统治着整个物理学。”在创立狭义相对论时,爱因斯坦利用了洛伦兹(Hendrik Antoon Lorentz, 1853—1928)变换的不变性,而在创立广义相对论时,他把变换不变性提升为物理学的普遍原理,并从引力质量与惯性质量等同这一经验事实出发,把某种变换不变性作为表示空间结构四维性和对称张量的引力方程的前提。

A. Einstein 提出相对性原理和真空光速不变原理两个公设,在这两个公设的基础上以用数学方法证明了 Lorentz transformation 并赋予其更广泛的涵义,又进一步推导出在物体运动接近光速时长度收缩、时间膨胀、物体的质量增大等一系列崭新的结论,提出了时空相对性理论。首先由于 Lorentz transformation 实际上出现在相对论之前,而 Lorentz 本人认为由该变换推出的“尺缩”是真实的,有一个关于动杆佯谬实际上就是针对这个意义上的 Lorentz transformation 的。而 Einstein 自己推导的 Lorentz transformation,只是与 Lorentz 本人的变换具有相同的形式,而没有继承其意义,按照 Einstein 的意思,“尺缩”不是真实发生的。

当这篇论文发表后,人们并不知道伟大的相对论已经与它同时诞生, Einstein 自己也只是为了解决动体的电动力学问题而发表了这篇论文,并没把它命名为“相对论”。此后的 6 年时间里, Einstein 一直把他这篇论文中关于时间、空间相对性的论述简称为“相对性原理”(Relativitätstheorie),并未当做一种“理论”(theory)来提升。1911 年 1 月 16 日, Einstein 在瑞士苏黎世自然科学会上作了一个题为“相对论”(Die Relativitätstheorie)的报告,发表在《苏黎世自然研究会季刊》56 卷第 1~14 页上,这才正式完整地提出了“相对论”这一全新的理论,并把《论动体的电动力学》一文作为“相对论”的开山之作,故 1905 年也被追认成了“相对论”的诞生年。传统的惯性系是建立在一无所有的绝对的空间假设之上。这样一个惯性系是虚拟的,他不对应任何具体的物理实在。Einstein 的相对论并没有改变传统惯性系的本质。相对论改变的是人们的空间观念和时间观念。相对论在处理传统的惯性系理论与现代物理学实验之间的矛盾的做法是:保留传统惯性系的基本观点和看法,通过改变空间和时间的定义以调和两者之间的矛盾。Einstein 推广了相对性原理,提出狭义相对论的相对性原理,即不但要求在不同惯性参照系中力学规律具有同样形式,而且其他物理规律也应如此。在狭义相对论中,不同惯性系的空间和时间之间遵从洛伦兹变换。根据这种变换,同时性不再是绝对的,相对于某一参照系为同时发生的两个事件,相对于另一参照系可能并不同时发生。

在 1905 年的相对论论文中, Einstein 从麦克斯韦电动力学应用到运动物体上就要引起并非现象所固有的不对称入手,把相对性原理从力学推广到电动力学,不仅达到了逻辑的简单性,而且也使力学和电动力学两个理论体系之间达到了统一、和谐。在构造狭义相对论时, Einstein 主要用的还是定性概念形式的抽象对称法。此后,尤其是在闵可夫斯基的工作之后,他已逐渐从定量数学形式的协变对称法看待问题了。这就是要求普遍的自然定律对于洛伦兹变换是协变的。这是他能达到广义相对论的关键之所在。

杨振宁说:“狭义相对论不仅仅是一个划时代的革命,它也有某些 Einstein 最初并未自觉意识到的深远影响,那就是对称性原理的应用。Einstein 在 1905 年发表狭义相对论的论文时,他并没有充分意识到自己所提出的是一个对称理论。所以在 1905 年的时候, Einstein 的思想距离对称性支配相互作用还是很远的。然而在两、三年后,伟大的数学家闵可夫斯基指出 Einstein 所做的研究,在更深层的角度来看是对称性原理的应用。Einstein 一开始不喜欢这种说法,实际上,他认为闵可夫斯基的这种复杂想法是多余的东西,于是他想:好吧,那又会怎样呢?不过,他很快就改变了想法。他不仅认识到狭义相对论的理论框架十分对称这个事实,而且还开始表示应该对对称性观念进行推广。我们怎么知道这点的呢?他在创造广义相对论的时候并没有这样说,但是在他老年的时候,在他所写的自传中,他明确地谈到自己如何根据狭义相对论发展了广义相对论。其中他提到,在 1905 年提出狭义相对论三年之后,他感到狭义相对论中的对称性受到了限制,应该对对称性的应用加以扩充,这一思想同物理学上称为等效原理的思想结合起来,导致 Einstein 完成了广义相对论。”“对称性是 20 世纪物理学中一个最重要的课题,而且很明显地将在 21 世纪物理学中发挥主导作用。……对称性是 20 世纪物理学的重要旋律之一,而且这一旋律将在 21 世纪很好地继续下去。这个观点现在已为所有的理论物理学家和数学家普遍接受。广义相对论是 Einstein 异常美丽的创造,它有着深远的影响。尤其是

最近在天体物理学中出现了一些谜团，一些惊人的发现，这些发现理解起来非常困难。很明显，这些东西与人们对广义相对论的发展、评估和修改是紧密结合在一起的。宇宙学本身就是由 Einstein 所创建的学科，在完成广义相对论几年之后，他写了一篇论文，那篇论文被认为是当代宇宙学的开端。”

据霍耳顿研究，在爱因斯坦的狭义相对论论文中，既有大胆的假设和虚构的成分(这是理性论思想的体现)，也有明显的经验论和操作论的成分。而且，马赫的思维方式对爱因斯坦的影响也十分明显，它显著地表现在两个相互关联的方面。第一，爱因斯坦在他的论文开始就坚持，只有对各种概念，尤其是对时间和空间概念的意义进行认识论的分析，才能理解物理学的基本问题。第二，爱因斯坦认为各种感觉，也就是各种“事件”所提供的东西等同于实在，而不是把实在放在感觉经验之外或感觉经验之后的位置上。论文一开头，对测量和对空间、时间概念的工具论的(因而也就是感觉论的或经验论的)观点就极其明显。关于同时性的定义，更是操作式的定义，这直接启发 P. W. 布里奇曼于 20 年代创立了操作论哲学。爱因斯坦引入的“事件”一词，在论文中屡屡出现，这个概念与马赫的“要素”概念几乎是完全吻合的。在爱因斯坦看来，就像一个事件的时间只有通过感觉经验(也就是用置于同一地点的时钟作原则上允许的测量)和我们的意识联系起来才有意义一样，一个事件的地点或空间坐标也只有通过作原则上允许的测量(就是把米尺在同一时间放在该处)进入我们的感觉经验时才有意义。这种工具论的或操作论的定义，体现了马赫关于物理学中的任何陈述都必须表述可观测量之间的关系的要求(这是实证论的要求)。这种强烈的经验论色彩，使爱因斯坦论文中的其他哲学内容相形之下黯然失色。难怪那些自命为马赫哲学继承者的人，即新实证论的维也纳学派，热情地接受了爱因斯坦的著作。它为这个学派早期的成长，在哲学上提供了极大的帮助。

尽管怀疑的经验论在爱因斯坦早期的哲学思想中是相当明显的，而且在他的科学探索中也发挥了相当大的作用，但这毕竟不是他的哲学思想的完整画面。否则，就很难解释狭义相对论的创立和他早期的其他科学贡献。事实上，在爱因斯坦早期哲学思想中，也有理性论、实在论和约定论的成分。怀疑的经验论是破旧的锐利武器，理性论的实在论是立新的坚实基础，经验约定论是构筑理论框架的有力工具。它们各司其职、各显其能、珠联璧合、相得益彰，引导爱因斯坦谱写出“思想领域中最高的音乐神韵”。

4、狭义相对论与以太

相对论的建立来源于经典物理内部力学图景和电磁图景的冲突：在本体论上表现为粒子纲领与场论纲领的冲突，在方法论上体现为在惯性系变换中，麦克斯韦方程与伽利略相对性原理不协调。这种冲突集中体现在对所谓“以太”的理解上。洛伦兹电子理论保持了物理学基础中实物和以太的二元论，将以太视为类似于绝对空间的参照系，麦克斯韦方程只对常驻“以太”参照系才成立。如果确实如此，那么在相对“以太”参照系运动的实验参照系(比方说：地球)，光沿不同方向就应以不同的速度传播。为了测出地球相对以太参照系的运动，实验精度必须达到很高的量级。到 19 世纪 80 年代，迈克尔孙和莫雷所作的实验第一次达到了这个精度，但得到的结果仍然是否定的，即地球相对以太不运动。此后其他的一些实验亦得到同样的结果，于是以太进一步失去了作为绝对参照系的性质。这一结果使得相对性原理得到普遍承认，并被推广到整个物理学领域。可是，所有的检验“以太风”的实验都无一例外地否定了上述推断，其中最有名的是迈克尔孙—莫雷实验，证明了相对于任何惯性系，光沿不同方向以相同的速度传播，这显然是对以太假说的沉重打击。这是导致经典物理发生严重危机的经验问题，它与黑体辐射问题一起，被开尔文称为是“悬浮在热和光动力理论天空的十九世纪的乌云”。我国著名相对论物理学家胡宁(中科院理论物理研究所研究员、北京大学教授，中科院院士)在一篇纪念 Einstein 诞辰一百周年的文章中写到：“迈克尔孙设计了测量地面在以太中的运动速度的实验，实验结果发现这个速度完全测不到，后来洛伦兹和斐兹杰惹根据以太论说明了为什么测量不出地面相对以太的速度。原因很简单：当仪器相对以太运动时，由于电磁作用的改变，沿着运动方向上的长度收缩了，长度的缩短恰好使得仪器相对于以太得速度不可能在干涉仪上显示出来。如果一个人真正理解了以太模型下的电磁规律，他就不会建议用迈克尔孙干涉仪来测量地面相对于以太的速度。总之，在迈克尔逊实验结果和以太模型之间没有出现任何矛盾。”胡宁在《狭义相对论实验基础》一书的序言中也指出：“初次学习狭义相对论的人，往往误认为迈克尔逊实验或“真空光速不变性”是狭义相对论的实验基础。但是，在相对论出现以前，斐兹杰惹和索末菲已经在以太论的基础上对迈克尔逊实验的结果给出了解释。因此，迈克尔逊实验的零结果既可以用以太论来解释，也可以用相对论来解释，也就是说，它既不否定真空光速不变，也不肯定真空光速不变。所以，企图用迈克尔逊类型的实验来进一步更准确地验证真空光速不变将是没有意义的。(摘自张元仲《狭义相对论实验基础》北京：科学出版社，1979)

洛伦兹为了在承认光速与参照系无关的条件下，拯救以太假设，便抛弃了空间间隔和时间间隔与参照系无关的绝对观念。在他看来，常驻以太参照系是基本参照系，在这个参照系中，时间是均匀流逝的，空间是均匀的，各向同性的。任何实际参照系都相对于这个基本参照系运动着。它们具有下列性质：空间沿该参照

系运动方向收缩，时钟速率变慢，具体变化公式就是引入收缩假设和地方时间概念： $l=l_0(1-v^2/c^2)^{1/2}$ ， $T=T_0/(1-v^2/c^2)^{1/2}$ ，式中 c 为光速， v 为运动参照系的速度； l_0 和 l 为沿实用参照系运动方向放置的尺分别在以太参照系和实用参照系中所测得的长度； T_0 与 T 为这两个参照系中分别测得的某两个事件之间的时间间隔。根据上面两式，可以导出任一事件在这两个参照系中的时空坐标之间的变换公式——洛伦兹变换。这个结论与光速同参照系无关的实验结果相一致。如果要求质点力学定律相对于洛伦兹变换也不变，则牛顿动力学方程就非加以修改不可，这就是后来 Einstein 从一个全新的观念出发完成的工作。洛伦兹以太论可以解释所有可观察的实验事实，这一点 Einstein 也是一直承认和肯定的。Einstein 在《狭义与广义相对论浅说》一书中写道：“对于所有这些事实和实验的结果，除了迈克尔逊——莫雷实验以外，洛伦兹根据下述假定都作出了解释。这个假定就是以太不参与与有重物体的运动，以太各个部分相互之间完全没有相对运动。这样以太看来好像就体现一个绝对静止的空间。但是洛伦兹的研究工作还取得了更多的成就。洛伦兹证明了，迈克尔逊——莫雷实验所取得的结果至少与以太处于静止状态的学说并不矛盾。”（摘自 Einstein《狭义与广义相对论浅说》上海科学技术出版社[M]，1964. 114）。但是，在洛伦兹理论中，以太除了荷载电磁振动之外，不再有任何其他的运动和变化，这样它几乎已退化为某种抽象的标志。除了作为电磁波的荷载物和绝对参照系，它已失去了所有其他具体生动的物理性质，这就又为它的衰落创造了条件。

菲兹杰惹几乎与洛伦兹一起从迈克尔逊——莫雷实验中提出了收缩假说，彭加勒则从同一个实验中得出相对性原理：我们没有任何方法区分静止还是匀速运动。新的相对性原理从根本上取消以太风，以及发现地球相对于以太的绝对速度的可能性。彭加勒在 1898 年《时间的测量》一文中，首先提出了光速在真空中不变的假设，认为这个公设从来也不能直接用经验来验证，它在利用光信号来定时的过程中具有约定的性质。到 1905 年，彭加勒详细讨论了利用光信号使异地时钟同步的问题，认为时间概念应该用测量来定义。这位相对论的先驱者，还预言了与以上两个原理协调一致的新力学的世界图像：光速成为不可逾越的极限速率；惯性随速度增加；原来的力学作为一级近似包容在新力学中，等等。彭加勒在物理学危机面前，致力于建立与洛伦兹电子论一致的理论。在对相对论的贡献上，提出普遍原理的是彭加勒，提供数学表达式的却是洛伦兹。但彭加勒与洛伦兹一样承认存在以太和以太参照系，认为与洛伦兹理论一致的以太假说将对相对性原理与真空光速不变原理给出进一步的解释。

洛伦兹等人拯救“以太”的方案生动地告诉人们，一个行将崩溃的原理或假说，可以怎样通过引入保护性的补充假说而保存下来。事实上，迄今为止，它还没有被任何实验证伪。然而，洛伦兹的方案中却包含着“真实”的长度，时间间隔与速度这样一些基本物理量，可是，这些基本力学量却是不可测量的。这就使人们怀疑洛伦兹以太论的真正价值。

二十世纪初，Einstein 面对所有一切探测“以太风”的实验都失败的事实，认为“引入光以太”本来就是“多余的”，这样空间就又回到了一无所有的“空虚”状态。可是这样的认定在当时就不能自圆其说。面对空间能够传播电磁波的事实，Einstein 又认为空间“具有一种发送电磁波的性能”，是“物理空间”；以太论的消失始于 Einstein 的相对论于 1905 年发表之后。“相对论假设一经引入，把以太看作实物的概念就要从物理理论中排除出去。”“当光的电磁理论取代了光的固体弹性理论以后，以太这一机械的概念实际上已变成多余的障碍物了。”在 Einstein 看来，以太假设完全是多余的，人们只要从两条对物理过程与定律进行限制的限定性原理出发，就可以实现力学与电磁学概念体系的统一，这就是：（1）真空光速不变原理；（2）物理学定律与惯性系的选择无关。第一条原理跟洛伦兹的出发点是一样的，第二条原理就是狭义相对性原理，它取代了洛伦兹的以太假设。Einstein 摒弃这一假设，不只是由于以太的不可观测性，主要是由于他早年的物理经验，培植了他的一种直觉观念，即电磁学定律独立于具体的惯性系。当他年仅十六岁时，就思考过这样的问题：如果一个观察者，以光速追逐一列光，他会看到何种情况呢？对这个问题的回答，似乎是：这列光看起来就像是空间固定振荡的电磁场。但是，不论从实验观察，还是从麦克斯韦理论，似乎都不会得出这一结论。对这一悖论的长期斟酌，最后，Einstein 确信：一束光，在追逐的观察者看来和相对于地球静止的观察者看来是一样的。于是，在他看来，狭义相对性原理毋庸置疑。现在的问题是：在牛顿时空框架里，真空光速不变性与狭义相对性原理是互不相容的。然而，如果把任意两个惯性系之间坐标变换由伽利略变换形式，换成洛伦兹变换形式；同时，对牛顿力学进行改造，使得改造后的动力学定律相对于洛伦兹变换保持不变。那么，这两条原理就相容了。这样，狭义相对性原理就可以表述为：一切物理学定律相对于洛伦兹变换保持不变。爱因斯坦曾经讲过：“在我看来，洛伦兹关于静态以太的基本假定是不能完全令人信服的，因为它所得出的对于迈克尔逊-莫雷实验的解释，我觉得是不自然的。”

狭义相对论不同于洛伦兹——彭加勒理论的关键是：

（1）承认“同时性”，“长度”，“时间间隔”等的操作性质，并且考虑到物理信号传播的有限性，在此基础

上使“同时性”等概念相对化。同时性的相对化是指：在一个惯性系中处于不同空间位置同时发生的两个事件，在另一个惯性系看来是不同时发生的两个事件。这是对常识和经典物理的同时性观念的彻底革命，在 Einstein 以前没有一位科学家和哲学家认识到同时性的相对性，尽管在神话和传说中已经有天上人间时间流逝不同的推测，在洛伦兹和彭加勒的理论中也出现了不同参照系时间流逝不同的科学论断。Einstein 理论中尺度和时间单位在不同惯性系中的变化，不再涉及有关物质结构和以太运动关系的特殊假说，而被视为洛伦兹坐标变换的内在要求；力学和电动力学是平权一致的，不存在何者优先的问题；以太被视为无用的假说，即使引入到理论中，也不过是与物质运动分布有关的时空度规的另一种说法，代表真空不是虚空而已，不能赋予它类似质点运动的机械或电磁属性。

(2) 引入闵可夫斯基四维时空的新表述，将时间处理为与三个空间坐标垂直的第四维，四维时空间隔定义为 $ds^2=c^2dt^2-dx^2-dy^2-dz^2$ ，这是在各惯性系中不变的量；还出现了其他与四维时空间隔有关的相对论不变量，空间与时间，动量与能量，电场与磁场等形成了有机的统一体，并且推导出物体总能量 E 与质量 m 的关系式 $E=mc^2$ 。这代表着相对论引入了新的自然秩序理想，闵氏时空表述是狭义相对论中类似欧几里德几何的先验自然几何和数学理想，是狭义相对论中最基本的图像推理模型。当然，在彭加勒和 Einstein 看来，闵氏时空的先验结构不是真正先验的，而是与真空光速不变原理有关的操作约定的结果。

Einstein 反对把相对论教条化为某种封闭的体系，认为相对论不过是某种启发性原理，它本身不过是关于固体，时钟和光信号的陈述。人们接受了电磁场本身就是物质存在的一种形式的概念，而场可以在真空中以波的形式传播。量子力学的建立更加强了这种观点，因为人们发现，物质的原子以及组成它们的电子、质子和中子等粒子的运动也具有波的性质。波动性已成为物质运动的基本属性的一个方面，那种仅仅把波动理解为某种媒介物质的力学振动的狭隘观点已完全被冲破。

5、狭义相对论的时空变换效应

我们经验所能及的唯一空间，是用尺度上二刻度间的距离所规定的长度标准来测量的，唯一时间是用天文现象所规定的时钟来测量的。如果我们的标准也发生了菲茨杰拉德收缩这样的变化，这种变化是我们觉察不到的，因为我们和这些标准一道前进，也发生相同变化，但是，以不同方式运动的观察者却是可以觉察到这种变化的。所以时间与空间，不是绝对的，而只是与观察者相对的。这样，可知由于时间与空间的性质，相对于任何观察者，光总是以所测得的相同的速度进行。长度、质量与时间并非绝对的量。它们真正的物理数值，就是由测量所表示的。它们对双方不一样这一事实说明，它们的意义只能相对于某一观测者而规定。绝对长度、绝对空间、绝对时间或甚至时间流动的观念都是形而上学的概念，远远超过观测或实验所表示或证明的。相对论摆脱了绝对时间。这些充分表现了狭义相对论引起了时空观发生重大的变革。狭义相对论揭示了时间和空间的内在联系，并且告诉人们对时空的测量是依赖于参考系的选择的。

中科院朱重远研究员的观点，狭义相对论在理论上很难找到突破口。用美国 UAH 研究员张先生的话：“如果狭义相对论在数学上、理论上有问题，那狭义相对论当时就不会被世界物理界公认，当时 Einstein 还是个小人物”。倪光炯说过，“不同时的”光学畸变，抵消了必须“同时”观测的洛伦兹收缩，有绝对的收缩，这才是相对论。

(1) 从静系到另一个相对于它做匀速移动的坐标系的坐标和时间的变换理论：

“尺缩钟慢”是一种几何效应，物体本身是怎样就是怎样的。相对论说的主要是不同坐标系中测量物理量的变换规则。牛顿认为惯性系之间的“变换是相等的”，这只是一个假设。实验证明很多物理量在不同坐标系中，测量结果是不同的。设在“静止的”空间中有两个坐标系，每一个都是由三条从一点发出并且互相垂直的刚性物质直线所组成。设想这两个坐标系的 X 轴是叠合在一起的，而它们的 Y 轴和 Z 轴则各自互相平行着②（注：②本文中用大写的拉丁字母 XYZ 和希腊字母 Ξ HZ 分别表示这两个坐标系 (K 系和 k 系) 的轴，而用相应的小写拉丁字母 x, y, z 和小写的希腊字母 ξ, η, ζ 分别表示它们的坐标值——译者注。）设每一系都备有一根刚性量杆和若干只钟，而且这两根量杆和两坐标系的所有的钟彼此都是完全相同的。

现在对其中一个坐标系 (k) 的原点，在朝着另一个静止的坐标系 (K) 的 x 增加方向上给一个 (恒定) 速度 v，设想这个速度也传给了坐标轴、有关的量杆，以及那些钟。因此，对于静系 K 的每一时间 t，都有动系轴的一定位置同它相对应，由于对称的缘故，我们有权假定 k 的运动可以是这样的：在时间 t (这个“t”始终是表示静系的时间)，动系的轴是同静系的轴相平行的。

我们现在设想空间不仅是从静系 K 用静止的量杆来量度，而且也可从动系 k 用一根同它一道运动的量杆来量，由此分别得到坐标又 x, y, z 和 ξ, η, ζ 。再借助于放在静系中的静止的钟，用 §1 中所讲的光信号方法，来测定一切安置有钟的各个点的静系时间 t；同样，对于一切安置有同动系相对静止的

钟的点，它们的动系时间 τ 也是用 §1 中所讲的两点间的光信号方法来测定，而在这些点上都放着后一种（对动系静止）的钟。

对于完全地确定静系中一个事件的位置和时间的每一组值 x, y, z, t ，对应有一组值 ξ, η, ζ, τ ，它们确定了那一事件对于坐标系 k 的关系，现在要解决的问题是求出联系这些量的方程组。

首先，这些方程显然应当都是线性的，因为我们认为空间和时间是具有均匀性的。

如果我们置 $x' = x - vt$ ，那么显然，对于一个在 k 系中静止的点，就必定有一组同时间无关的值 x', y, z 。我们先把 τ 定义为 x', y, z 和 t 的函数。为此目的，我们必须用方程来表明 τ 不是别的，而只不过是 k 系中已经依照 §1 中所规定的规则同步化了的静止钟的全部数据。

从 k 系的原点在时间 τ_0 发射一道光线，沿着 X 轴射向 x' ，在 τ_1 时从那里反射回坐标系的原点，而

在 τ_2 时到达；由此必定有下列关系：
$$\frac{\tau_0 + \tau_2}{2} = \tau_1$$
 或者，当我们引进函数 τ 的自变数，并且应用在静系中的真空光速不变的原理：

$$\frac{1}{2} \left(\tau(0, 0, 0, t) + \tau \left[0, 0, 0, \left(t + \frac{x'}{V-v} + \frac{x'}{V+v} \right) \right] \right) = \tau \left(x', 0, 0, t + \frac{x'}{V-v} \right)$$

如果我们选取 x' 为无限小，那么，

$$\frac{1}{2} \left(\frac{1}{V-v} + \frac{1}{V+v} \right) \frac{\partial \tau}{\partial t} = \frac{\partial \tau}{\partial x'} + \frac{1}{V-v} \frac{\partial \tau}{\partial t}$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial x'} + \frac{v}{V^2 - v^2} \frac{\partial \tau}{\partial t} = 0$$

或者：

应当指出，我们可以不选坐标原点，而选任何别的点作为光线的出发点，因此刚才所得到的方程对于 x', y, z 的一切数值都该是有效的。

做类似的考察——用在 H 轴和 Z 轴上——并且注意到，从静系看来，光沿着这些轴传播的速度始终是 $\sqrt{V^2 - v^2}$ ，这就得到：

$$\frac{\partial \tau}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \tau}{\partial z} = 0$$

$$\tau = a \left(t - \frac{v}{V^2 - v^2} x' \right)$$

由于 τ 是线性函数，从这些方程得到：，此处 a 暂时还是一个未知函数 $\Phi(v)$ ，并且为了简便起见，假定在 k 的原点，当 $\tau = 0$ 时， $t = 0$ 。

借助于这一结果，就不难确定 ξ, η, ζ 这些量，用方程来表示的话，光（像真空光速不变原理和相对性原理所共同要求的）在动系中量度起来也是以速度 V 在传播的。对于在时间 $\tau = 0$ 向 ξ 增加的方向

发射出去的一道光线，其方程是：
$$\xi = V \tau, \text{ 或者: } \xi = aV \left(t - \frac{vx'}{V^2 - v^2} \right)$$

但在静系中量度，这道光线以速度 $(V-v)$ 相对于 k 的原点运动着，因此得到：
$$\frac{x'}{V-v} = t$$

$$\xi = \frac{aV^2 x'}{V^2 - v^2}$$

如果我们以 t 的这个值代入关于 ξ 的方程中，我们就得到：

$$\eta = V \tau = aV \left(t - \frac{vx'}{V^2 - v^2} \right), \text{ 此}$$

用类似的办法，考查沿着另外两根轴走的光线，我们就求得：

$$\text{处: } \frac{y}{\sqrt{V^2 - v^2}} = t, \quad x' = 0, \quad \eta = a \frac{V}{\sqrt{V^2 - v^2}} y, \quad \text{和} \quad \zeta = a \frac{V}{\sqrt{V^2 - v^2}} z,$$

$$\text{因此: } \tau = \Phi(v) \beta \left(t - \frac{vx}{V^2} \right), \quad \xi = \Phi(v) \beta (x - vt),$$

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}}, \quad \eta = \Phi(v) y, \quad \zeta = \Phi(v) z, \quad \text{此处:}$$

而 Φ 暂时仍是 v 的一个未知函数. 如果对于动系的初始位置和 τ 的零点不作任何假定, 那么这些方程的右边都有一个附加常数.

我们现在应当证明, 任何光线在动系量度起来都是以速度 V 传播的, 就像我们所假定的在静系中的情况那样. 因为我们还未曾证明真空光速不变原理同相对性原理是相容的.

在 $t = \tau = 0$ 时, 这两坐标系共有个原点, 设从这原点发射出一个球面波, 在 K 系里以速度 V 传播着. 如果 (x, y, z) 是这个波刚到达的一点, 那么 $x^2 + y^2 + z^2 = V^2 t^2$, 借助我们的变换方程来变换这个方程, 经过简单的演算后, 我们得到: $\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2 = V^2 \tau^2$, 由此, 在动系中看来, 所考查的这个波仍然是一个具有传播速度 V 的球面波. 这表明我们的两条基本原理是彼此相容的.

在已推演得的变换方程中, 还留下一个 v 的未知函数 Φ , 这是我们现在所要确定的.

为此目的, 我们引进第三个坐标系 K' , 它相对于 k 系做这样一种平行于 Ξ 轴的运动, 使它的坐标原点在 Ξ 轴上以速度 $-v$ 运动着. 设在 $t = 0$ 时, 所有这三个坐标原点都重合在一起, 而当 $t = z = y = z = 0$ 时, 设 K' 系的时间 t' 为零. 我们把在 K' 系量得的坐标叫做 x', y', z' , 通过两次运用我们的变换方程, 我们就得到:

$$t' = \Phi(-v) \beta(-v) \left(\tau + \frac{v\xi}{V^2} \right) = \Phi(v) \Phi(-v) t,$$

$$x' = \Phi(-v) \beta(-v) (\xi + v\tau) = \Phi(v) \Phi(-v) x, \\ y' = \Phi(-v) \eta = \Phi(v) \Phi(-v) y, \quad z' = \Phi(-v) \zeta = \Phi(v) \Phi(-v) z,$$

由于 x', y', z' 之间的关系中不含有时间 t , 所以 K 同 K' 这两个坐标系是相对静止的, 而且, 从 K 到 K' 的变换显然也必定是恒等变换. 因此: $\Phi(v) \Phi(-v) = 1$.

我们现在来探究 $\Phi(v)$ 的意义. 我们注意 k 系中 H 轴上在 $\xi = 0, \eta = 0, \zeta = 0$ 和 $\xi = 0, \eta = L, \zeta = 0$ 之间的这一段. 这一段的 H 轴, 是一根对于 K 系以速度 v 作垂直于它自己的轴运动着的杆. 它的

两端在 K 中的坐标是: $x_1 = vt, \quad y_1 = \frac{L}{\Phi(v)}, \quad z_1 = 1$ 和 $x_2 = vt, \quad y_2 = 0, \quad z_2 = 0$. 因此, 在 K 中所量得的这样的长度是 $L/\{\Phi(v)\}$; 这就给出了函数 Φ 的意义. 由于对称的缘故, 一根相对于自己的轴作垂直运动的杆, 在静系中量得的它的长度, 显然必定只同运动的速度有关, 而同运动的方向和指向无关. 因此, 如果 v 同 $-v$ 对调, 在静系中量得的动杆的长度应当不变. 由此推得:

$$\frac{L}{\Phi(v)} = \frac{L}{\Phi(-v)}, \quad \text{或者: } \Phi(v) = \Phi(-v),$$

从这个关系和前面得出的另一关系, 就必

$$\tau = \beta \left(t - \frac{vx}{V^2} \right), \quad \xi = \beta (x - vt),$$

然得到 $\Phi(v) = 1$, 因此, 已经得到的变换方程就变为:

$$\eta = y, \quad \zeta = z, \\ \beta = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}}$$

此处

(2) 关于运动刚体和运动时钟所得方程的物理意义

我们观察一个半径为 R 的刚性球① (注: ①即在静止时看来是球形的物体.), 它相对于动系 k 是静止的, 它的中心在 k 坐标原点上. 这个球以速度 v 相对于 K 系运动着, 它的球面的方程是: $\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2 = R^2$.

$$\frac{x^2}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{V}\right)^2}} + y^2 + z^2 = R^2$$

用 x, y, z 来表示, 在 $t=0$ 时, 这个球面的方程是:

一个在静止状态量起来的刚体, 在运动状态——从静系看来——则具有旋转椭球的形状了, 这个椭球的轴是

$$R \sqrt{1-\frac{v^2}{V^2}}, R, R。$$

这样看来, 球 (因而也可以是无论什么形状的刚体) 的 Y 方向和 Z 方向的长度不因运动而改变, 而

X 方向的长度则好像以 $1: \sqrt{1-\frac{v^2}{V^2}}$ 的比率缩短了, v 愈大, 缩短得就愈厉害. 对于 $v=V$, 一切运动着的物体——从“静”系看来——都缩成扁平的了. 对于大于光速的速度, 我们的讨论就变得毫无意义了; 此外, 在以后的讨论中, 我们会发现, 光速在我们的物理理论中扮演着无限大速度的角色.

很显然, 从匀速运动着的坐标系看来, 同样的结果也适用于静止在“静”系中的物体.

进一步, 我们设想有若干只钟, 当它们同静系相对静止时, 它们能够指示时间 t ; 而当它们同动系相对静止时, 就能够指示时间 τ , 现在我们把其中一只钟放到 k 的坐标原点上, 并且校准它, 使它指示时间 τ . 从静系看来, 这只钟走得快慢怎样呢?

在同这只钟的位置有关的量 x, t 和 τ 之间, 显然下列方程

$$\tau = \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{V}\right)^2}} \left(t - \frac{vx}{V^2} \right) \quad \text{和} \quad x=vt \quad \text{成立,}$$

因此, $\tau = t \sqrt{1-\left(\frac{v}{V}\right)^2} = t - t \left(1 - \sqrt{1-\left(\frac{v}{V}\right)^2} \right)$, 由此得知, 这只钟所指示的时间 (在静

系中看来) 每秒钟要慢 $1 - \sqrt{1-\left(\frac{v}{V}\right)^2}$ 秒, 或者一略去第 4 级和更高级的 (小) 量——要慢 $\frac{1}{2} \left(\frac{v}{V}\right)^2$ 秒.

从这里产生了如下的奇特后果. 如果在 K 系的 A 点和 B 点上各有一只 在静系看来是同步运行的静止的钟, 并且使 A 处的钟以速度 v 沿着 AB 连线向 B 运动, 那么当它到达 B 时, 这两只钟不再是同步

的了, 从 A 向 B 运动的钟要比另一只留在 B 处的钟落后 $\frac{1}{2} t \left(\frac{v}{V}\right)^2$ 秒 [不计第 4 级和更高级的 (小) 量], t 是这只钟从 A 到 B 所花费的时间.

我们立即可见, 当钟从 A 到 B 是沿着一条任意的折线运动时, 上面这结果仍然成立, 甚至当 A 和 B 这两点重合在一起时, 也还是如此.

如果我们假定, 对于折线证明的结果, 对于连续曲线也是有效的, 那么我们就得到这样的命题: 如果 A 处有两只同步的钟, 其中一只以恒定速度沿一条闭合曲线运动, 经历了 t 秒后回到 A , 那么, 比起那只在 A

处始终未动的钟来, 这只钟在它到达 A 时, 要慢 $\frac{1}{2} t \left(\frac{v}{V}\right)^2$ 秒. 由此, 我们可以断定: 在赤道上的摆轮钟, 比起放在两极的另一只在性能上完全一样的钟来, 在别的条件都相同的情况下, 它要走得慢些, 不过所差的量非常之小.

附录:

新华网消息: 据阿根廷《21 世纪趋势》周刊网站 5 月 8 日报道, 霍金确定了可以进行时空旅行的方式. 英国著名物理学家斯蒂芬·霍金日前在英国《每日邮报》上发表文章称, 时光之旅在理论上是可行的, 人类可以打开回到过去的大门和通向未来的捷径.

霍金在文章中提出了三种理论上可行的时空旅行方式。

为了实现时光旅行，霍金首先建议人们接纳时间作为第四维的观念。他举了一个非常简单的例子：当人们驾驶汽车时，向前直行和向后倒车是第一维，向左或向右转弯是第二维，在山路上爬坡和下坡是第三维，那么时间就是第四维。我们怎样才能找到在第四维前行或后退的路径呢？

方法一：虫洞

在科幻电影中，奇形怪状的时间机器借助巨大的能量打开一条穿越时光的隧道，时光旅行者勇敢地走进隧道，去无法确定的时间和地点进行冒险……霍金表示，现实的操作可能并非如此，但这种想法其实并不疯狂。对于物理学家来说，时光隧道也许就是虫洞。霍金说，虫洞就在我们周围，只是小到肉眼无法看见。宇宙万物都会出现小孔或裂缝，这种基本规律同样适用于时间。时间也有细微的裂缝和空隙，比分子、原子还要小的空隙被称作“量子泡沫”，而虫洞就存在于“量子泡沫”中。

有朝一日，人类也许能够捕获某一个虫洞，将它放大到足以使人类甚至宇宙飞船从中穿过。

但霍金警告说，不要利用时间机器回到过去，因为这将导致违反基本的因果论。

方法二：黑洞

霍金在文章中说，时间就像是一条河流，在不同的地段会有不同的流速，而这正是实现通往未来之旅的关键。根据爱因斯坦的理论，时间在有些地方会过得更慢，而在另一些地方会过得更快。当飞船在太空中加速时，对飞船的宇航员来说，时间的流逝速度会有所放慢。

比整个银河系还要重的超大黑洞可以更为明显地降低时间流逝的速度。霍金说，这种超大黑洞就像是一部天然的时间机器。如果一艘宇宙飞船进入超大黑洞，并按照地球指挥中心的要求完成了 16 分钟绕轨道一周的飞行，而对于宇航员来说，时间只过去了 8 分钟。如果他们在超大黑洞内执行 5 年任务，返回地球时会发现已过去了 10 年。

这种时光旅行方式的问题在于，接近超大黑洞的危险太大。

方法三：以接近光速的速度飞行

霍金指出，另一种方法是设法达到比避免被黑洞吸入所需速度更快的速度。如果能够建造出速度接近光速的宇宙飞船，那么宇宙飞船必然会因为不能违反光速最快的法则，而致使舱内的时间放慢。宇航员以这种方式飞行一个星期，地球上的时间就过去了 100 年，从而实现通往未来之旅。

5/6/2017