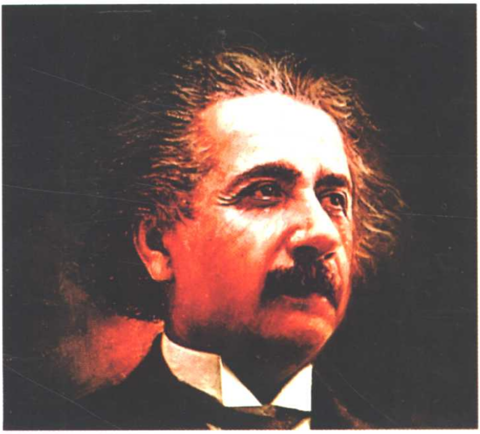
普林斯顿科学文库 1

Princeton Science Library

相对论的意义

阿尔伯特·爱因斯坦 著

郝建纲 刘道军 译 李新洲 审校



上海科技教育出版社

相对论的意义

阿尔伯特·爱因斯坦　著
郝建纲　刘道军　译
李新洲　审校

上海科技教育出版社

The Meaning of Relativity

by

Albert Einstein

Princeton Science Library edition, 1988

责任编辑　匡志强　装帧设计　汤世梁

相对论的意义
阿尔伯特·爱因斯坦　著
郝建纲　刘道军　译
李新洲　审校
上海科技教育出版社出版发行
（上海冠生园路 393 号　邮政编码 200235）
各地新华书店经销　上海长阳印刷厂印刷
开本 787 × 960　1/32　印张 5　字数 100 000
2001 年 12 月第 1 版　2001 年 12 月第 1 次印刷
印数 1 - 5 000
ISBN 7 - 5428 - 2765 - 0/N·447
图字 09 - 2000 - 302 号
定价:9.50 元

普林斯顿科学文库

1

图书在版编目(CIP)数据

相对论的意义/(美)爱因斯坦(Einstein, A.)著;郝建纲,刘道军译.
—上海:上海科技教育出版社,2001.12
(普林斯顿科学文库)
书名原文:The Meaning of Relativity
ISBN 7-5428-2765-0

Ⅰ.相…
Ⅱ.①爱…②郝…③刘…
Ⅲ.相对论
Ⅳ.O412.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 084900 号

原出版者说明

1921 年,爱因斯坦在关于广义相对论的详尽论文发表 5 年之后及他永久离开欧洲加入高等研究院(Institute for Advanced Study)12 年之前,访问了普林斯顿大学,在那里做了当年的斯塔福德·利特尔讲演。这四次讲演,构成了对他那时尚有争议的相对论的概述。普林斯顿大学出版社以《相对论的意义》为题汇集了这些讲演,这是第一本由一家美国出版社出版的爱因斯坦著作。在该出版社出版的后续版本中,爱因斯坦添加了详述该理论的新材料。附录"非对称场的相对论性理论"的修订版本,是爱因斯坦最后一篇科学论文,添加于他逝世后的 1956 年版本中。

版本说明

本书第一版于1922年由梅休因公司(Methuen and Company)在英国、并由普林斯顿大学出版社(Princeton University Press)在美国出版,包括爱因斯坦先生1921年5月在普林斯顿大学所做的斯塔福德·利特尔讲演(Stafford Little Lectures)的原文。在第二版中,爱因斯坦先生添加了一个附录,讨论自1921年以来相对论的一些进展。在第三版中,爱因斯坦又添加一个附录(附录二)论述其"引力理论的推广"。在第五版中,这已被完全修订了。

第五版说明

在现在这个版本里，我全面修订了原来的附录“引力理论的推广”，并将标题更新为“非对称场的相对论性理论”。因为我已成功地简化了场方程的推导及其形式，其中部分工作是与我的助手考夫曼(B. Kaufman)合作完成的。这样整个理论在不改变其内容的情况下就变得更为明晰了。

爱因斯坦

1954年12月

目　　录

相对论前物理学中的空间与时间

相对论(theory of relativity)和空间与时间的理论(theory of space and time)是紧密相连的。因此,我将首先对我们的空间与时间观念起源进行一番简要的探讨。尽管我知道在这么做时,会引入一个引起争议的话题。一切科学,不论是自然科学抑或心理学,其目的都在于使我们的经验互相协调并将它们纳入一个逻辑体系。然而,我们习以为常的空间与时间观念又是如何与我们经验的特征相联系的呢?

个体的经验是以事件序列的形式呈现在我们面前的。在这个序列里我们记忆中的各个事件看来是依照“早”和“迟”的标准排列的,而对于这个标准则不能再做进一步的分析了。因此,对于个体来说,就存在着一个“我”的时间(I-time),或曰“主观时间”(subjective time),这个时间本身是不可测度的。我们确实可以把每个事件与一个数字联系起来,依照这样一种方式,即较迟的事件与较早的事件相比对应于较大的数,然而这种联系的本质却可以是十分随意的。将一个时钟所指出的事件顺序和既定事件序列的顺序相比较,我就能用这个时钟来定义这种联系。我们将时钟理解成提供了一连串可以计数

的事件的东西,它还有其他一些性质,我们将在以后再讨论。

借助于语言,不同的个体能在一定的程度上比较各自的经验。通过比较,人们就会发现不同个体的某些感觉(sense perceptions)是彼此一致的,而对于另一些感觉,却无法建立起这样的一致性。我们习惯于把对不同个体而言是共同的因而多少是非个体特有的感觉当作真实的感觉。自然科学,尤其是其中最基本的物理学,就是研究这样的感觉。物理客体的概念,特别是刚体的概念,便是这样一类感觉的一种相对恒定的复合。在同样的意义上,一个时钟也是一个物体,或者说是一个体系,它有一个附加的性质:它所计数的一连串事件是由全可视为相等的元素构成的。

我们的概念与概念体系之所以能得到承认,其惟一理由在于它们代表的是我们经验的复合。除此之外,它们并无其他的理性依据。我坚信,哲学家曾对科学思想的进步起过有害的影响,在于他们把某些基本概念从经验论(empiricism)的领域里(在那儿它们是受人们驾驭的)取出来,提升到先验论(the *a priori*)的难以捉摸的高处。因为即使观念世界看起来并不能借助逻辑的方法从我们的经验中演绎出来,但就一定的意义而言,它还是人类意识(human mind)的产物,没有人类的意识便无科学可言。不过,这个观念世界很难独立于我们经验的性质之外,正如衣服依赖于人体的形状一样。这对于我们的时间与空间概念尤为正确。迫于事实,物理学家只好使时间与空间概念从先验论的奥林帕斯山降落到人间的土地上来,以整理这些概念并使之适用于实际情况。

现在,我们来讨论对于空间的概念和判断。在这里,密切注意经验和我们的概念之间的关系仍然是非常重要的。在我看来,庞加莱(Poincaré)在其著作《科学与假设》(La Science et l'Hypothese)的叙述中,已经清楚地认识了这一道理。在我们所能感觉到的所有刚体变化中间,那些可以被我们身体的主动运动抵消的变化是以简单性(simplicity)为其标志的;庞加莱称之为位置变化。通过简单的位置变化,能使两个物体相接触。在几何学中有基本意义的全等定理,就与支配这类位置变化的定律有关。下面的讨论对于空间概念来说是很重要的。将物体 $B, C, \cdots$ 附加到物体 A 上去可以形成新的物体,我们说我们延伸了物体 A。我们可以这样延伸物体 A,使其与任意其他物体 X 相接触。物体 A 的所有延伸的集合,我们可以定义为"物体 A 的空间"。于是,一切物体都在"(随意选定的)物体 A 的空间"里的说法是正确的。在这种意义下,我们不能抽象地谈论空间,而只能谈论"属于物体 A 的空间"。在日常生活中,当我们要判定物体的相对位置时,地壳扮演了一个如此重要的角色,它导致了一个抽象的空间概念,而这当然是无法论证的。为了使我们自己免于这项致命的错误,我们将只提到"参考物体"或"参考空间"(space of reference)。我们将会看到,只是由于广义相对论才使得这些概念的精确化成为必要。

我不打算详细地讨论参考空间的某些性质,正是这些性质导致我们认为点是空间的基本元素,并将空间设想为一个连续统(continuum)。我也不打算进一步分析一些表明连续点列或曰线的概念为合理的空间性质。如果假定了这些概念以

及它们和大量的坚实经验之间的关系,就很容易说出我们所指的空间三维性(three-dimensionality)是什么:每一个点都可以用这样一种方式与3个数 x_1, x_2, x_3(坐标)相联系,即这种相互联系是惟一的,而且当这个点描绘一个连续的点列(一条线)时,它们就作连续变化。

在相对论前物理学(pre-relativity physics)里,假设理想刚体位形的定律是符合于欧几里得几何学(Euclidean geometry)的。它的意义可以表述如下:标记在刚体上的两点构成一个间隔。可以采取多种方式使得这个间隔与我们的参考系相对静止。如果现在能用坐标 x_1, x_2, x_3 表示这个空间里的点,使得该间隔两端的坐标差 $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3$,对于该间隔所取的每个方向都有相同的平方和:

$$s^2 = \Delta x_1^2 + \Delta x_2^2 + \Delta x_3^2, \tag{1}$$

则称这样的参考空间为欧几里得空间,这样的坐标为笛卡儿坐标*。对于一个无穷小间隔,我们事实上取这个假设的极限情况就可以了。还有一些不那么特殊的假设包含在这个假设里,鉴于这些假设具有根本的意义,我们也必须给予重视。首先,假设了我们可以任意移动理想刚体。其次,假设了理想刚体对于取向所表现的行为与物体的材料及其位置的改变无关,换言之,只要能使两个间隔重合一次,则随时随地都能使它们重合。上述两个假设对于几何学(特别是物理测量)都至关重要,它们都是自然而然地由经验得来的;在广义相对论

* 这个关系必须对于任意选择的原点和间隔方向(比值 $\Delta x_1 : \Delta x_2 : \Delta x_3$)都能成立。

里，必须假定这两个假设只有对于那些与天文尺度相比无限小的物体与参考空间才是有效的。

我们将量 s 称为间隔的长度。为了能惟一确定这个量，需要任意确定一个具体的间隔长度；例如，令它等于1（单位长度），那么所有其他间隔长度就可以确定了。如果我们使 x_ν 线性地依赖于参量λ，即

$$x_\nu = a_\nu + \lambda b_\nu,$$

那么我们就得到了一条线，该线具有欧几里得几何中直线应具有的一切性质。特别地，这明显意味着把间隔 s 沿着一条直线放置n 次，就能获得长度为 $n\cdot s$ 的间隔。所以，长度所指的就是用单位量杆沿直线测量的结果。下面将会看到，和直线一样，长度与坐标系无关。

现在，我们已有了这样一条思路，它在狭义相对论与广义相对论中处于相类似的地位。我们会问：除了已经使用过的笛卡儿坐标外，还有与之等价的其他坐标吗？间隔具有与坐标选择无关的物理意义；由此，在参考空间中的任一点取相等的间隔，所有的间隔端点的轨迹为一球面，可知这个球面也同样具备与坐标选择无关的物理意义。如果 x_ν 和 x_ν'（ν 从1到3）都是参考空间的笛卡儿坐标，则球面在两个坐标系中将表示为方程

$$\sum \Delta x_\nu^2 = 常数. \tag{2}$$

$$\sum \Delta x_\nu'^2 = 常数. \tag{2a}$$

必须怎样用 x_ν 表示x_ν'才能使(2)式和(2a)式彼此等价呢？如果认为 x_ν'可以表示成x_ν 的函数，那么根据泰勒定理(Taylor's theorem),对于很小的 Δx_ν,可以写出

$$\Delta x_\nu{}' = \sum_\alpha \frac{\partial x_\nu{}'}{\partial x_\alpha}\Delta x_\alpha + \frac{1}{2}\sum_{\alpha\beta} \frac{\partial^2 x_\nu{}'}{\partial x_\alpha \partial x_\beta}\Delta x_\alpha \Delta x_\beta \cdots$$

如果将(2a)式代入上式并与(1)式相比较,便会看出 $x_\nu{}'$ 必须是 x_ν 的线性函数。因此,如果令

$$x_\nu{}' = a_\nu + \sum_\alpha b_{\nu\alpha} x_\alpha \tag{3}$$

或

$$\Delta x_\nu{}' = \sum_\alpha b_{\nu\alpha}\Delta x_\alpha\ , \tag{3a}$$

那么(2)式和(2a)式的等效性就可以表述成

$$\sum \Delta x_\nu{}'^2 = \lambda \sum \Delta x_\nu^2 \quad (\lambda \text{ 与 } \Delta x_\nu \text{ 无关}). \tag{2b}$$

所以 λ 必须是一个常数。如果取 $\lambda = 1$,则由(2b)、(3a)两式可导出条件

$$\sum_\nu b_{\nu\alpha} b_{\nu\beta} = \delta_{\alpha\beta}\ , \tag{4}$$

其中按照 $\alpha = \beta$ 或 $\alpha \neq \beta$,有 $\delta_{\alpha\beta} = 1$ 或 $\delta_{\alpha\beta} = 0$。条件(4)称为正交条件,而变换(3)和(4)称为线性正交变换。如果要求 $s^2 = \sum \Delta x_\nu^2$ 在所有坐标系里都等于长度的平方,并且总以同一单位标尺去量度,则 λ 必须等于1。所以,线性正交变换是我们能用来从参考空间中的一个笛卡儿坐标系变换到另一个的惟一变换方式。我们看到,在运用这种变换时,直线方程仍化为直线方程。将(3a)式两边同时乘以 $b_{\nu\beta}$并对所有的 ν 求和,便可以反过来导出

$$\sum b_{\nu\beta}\Delta x_\nu{}' = \sum_{\nu\alpha} b_{\nu\alpha} b_{\nu\beta}\Delta x_\alpha = \sum_\alpha \delta_{\alpha\beta}\Delta x_\alpha = \Delta x_\beta. \tag{5}$$

系数 b 同样也决定了 Δx_ν 的逆代换。在几何上,$b_{\nu\alpha}$ 是 $x_\nu{}'$ 轴

与 x_ν 轴间夹角的余弦。

综上所述,我们可以认为在欧几里得几何学中(对于一个给定的参考空间)存在一种优先坐标系,即笛卡儿坐标系,它们之间可以通过线性正交变换来彼此变换。参考空间中两点间用量杆测得的距离 s,在这种坐标系中就可以特别简单的形式表达。整个几何学都可以建立在这个距离概念的基础上。在当前的论述中,几何学是与实物(刚体)相联系的,它的定理就是对这些实物的行为所作的陈述,而这些陈述又可以被证实或证伪。

通常人们习惯于离开那些概念与经验之间的任何联系来研究几何学。把那些纯逻辑的并且与在原则上不完备的经验论无关的东西分离出来,是有益的。这样能使纯数学家满意。如果能从公理中正确地(即无逻辑错误地)推导出定理来,他就心满意足了。至于欧几里得几何学究竟是否真确之类的问题,他并不关心。但是,对于我们的目的来说,必须将几何学的基本概念与自然对象联系起来;没有这样的联系,几何学对于物理学家毫无用处可言。物理学家所关心的是几何学定理究竟是否真确之类的问题。从这个观点上讲,欧几里得几何学肯定了某些东西,这些东西不仅仅是根据定义并通过逻辑推导而得出的结论。我们将会在下面的简单考察中看到这一点。

在空间中的 n 个点之间,有 $\frac{n(n-1)}{2}$ 个距离 $s_{\mu\nu}$,它们与 $3n$ 个坐标之间有下述关系:

$$s_{\mu\nu}^2=(x_{1(\mu)}-x_{1(\nu)})^2+(x_{2(\mu)}-x_{2(\nu)})^2+\cdots.$$

可以从这$\frac{n(n-1)}{2}$个方程里消去$3n$个坐标，由这样的消去法，至少会得到$\frac{n(n-1)}{2}-3n$个有关$s_{\mu\nu}$的方程*。因为$s_{\mu\nu}$是可测量的量，而根据定义，它们之间是彼此无关的，所以$s_{\mu\nu}$之间的上述关系并不必是先验的。

从前面的讨论中，容易看出变换(3)式、(4)式决定了从一个笛卡儿坐标系到另一个的变换关系，因此它们在欧几里得几何学里具有根本的意义。在笛卡儿坐标系中，两点间的可测量距离s是用方程

$$s^2=\sum\Delta x_\nu^2$$

表示的，这个性质表示着笛卡儿坐标系的特征。

如果$K_{(x_\nu)}$和$K'_{(x_\nu)}$是两个笛卡儿坐标系，则有

$$\sum\Delta x_\nu^2=\sum\Delta x_\nu'^2.$$

考虑到线性正交变换方程，上式中的左边恒等于右边，而右边和左边的区别只在于x_ν换成了x_ν'。这可表述为$\sum\Delta x_\nu^2$在线性正交变换下是不变量。在欧几里得几何学中，显然所有这样的量，而且也只有这样的量才具有客观意义。因为这样的量与笛卡儿坐标系的选择无关，并且能够用线性正交变换下的不变量来表示。这就是不变量理论(theory of invariants)，它涉及那些支配着不变量形式的定律，对于解析几何学十分重要的理由。

---

* 事实上有$\frac{n(n-1)}{2}-3n+6$个方程。