

# 从相对性原理来看规范场

刘 耀 阳

敬爱的读者,当看到这个题目时,你也许会觉得纳闷:伽利略相对性原理、爱因斯坦相对性原理,和规范场如电磁场、杨—密尔场,是风马牛不相及的东西,怎么会扯在一起呢?下面我来回答这个问题,我要说两者不仅有关系,而且关系非常密切,弄清楚了相对性原理,规范场就一点不难理解。

## 由伽利略相对性原理到引力场

看过伽利略传电影的人,都知道他是一位伟大的物理学家,也都会为他那种为捍卫真理而斗争的大无畏精神所感动。他不怕神权,坚持一切经过实验检验的才能称为真理。伽利略对物理学有许多重要贡献,但最重要的是关于自由落体的研究。在这项研究中他

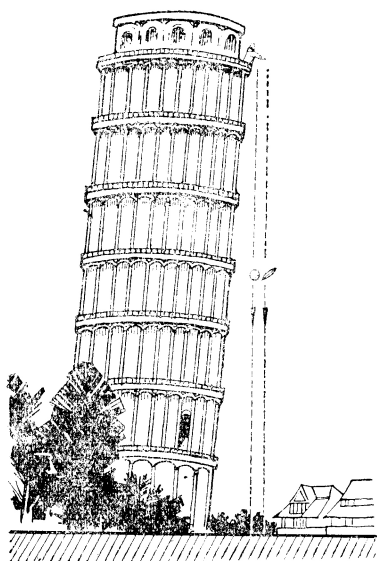


图 1

所形成的思想对后来相对论的发展以及近年来规范场理论的发展有着重大的影响,所以我们就从自由落体说起。伽利略时代流行着一种看法,认为重的物体从高处掉下来时比较轻的物体来得快。伽利略不相信,他到比萨斜塔上作了实验,最后证实大的物体和小的物体在塔上如同时离手,就同时落地(图1)。他就是这样用事实驱斥那种错误的看法,根据这个实验,伽利略提出一个假说:真空中一切自由落体的运动规律都是相同的。粗粗一看,肯定会觉得这个假说平淡无魅力,无非是我们日常观察到的现象的简单综合。但下面将看到,这是一个非常重要的假定,对以后广义相对论的发展有决定性的意义。伽利略还注意到另一个尽人皆知的事实,在一个等速运动木船上的密封房间里作自由落体实验和在地面上作自由落体实验,所观察到的现象一模一样

(图2)。伽利略把这件事又概括为:在任何作等速直线运动的系统中观察自由落体运动,其情况都是相同

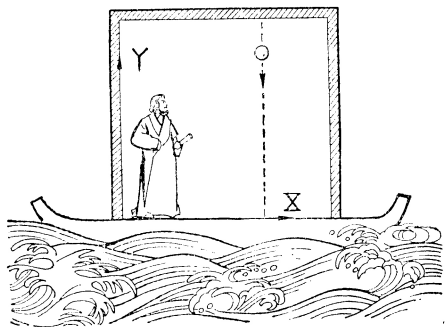


图 2

的。这就叫做伽利略相对性原理。若把两面墙壁之间的夹线以及墙和地板的夹线看作笛卡儿坐标轴,自由落体运动就可通过落体的坐标随时间的改变作精确的数学描述。设想密封的房间也可以放在火车上或飞机上,火车或飞机作等速直线运动,便得到许许多多笛卡儿坐标系。在这许许多多坐标系中观察到的自由落体的运动情况都是相同的。物理学家把固定在木船、火车、飞机上的坐标系也叫做参考系,当它们之间作相对等速直线运动时,又特别叫惯性参考系。伽利略相对性原理告诉我们,在各惯性系观察自由落体运动,情况是完全相同的,在这种意义上就说各惯性系是平等的或等价的。不存在一个比另一个优越的问题。因此,就不可能通过自由落体实验来确定一个惯性参考系相对于另一个惯性参考系的运动速度。

要特别注意,伽利略相对性原理只是说不能通过自由落体实验来确定惯性参考系的相对运动速度,至于问到能否通过别的手段来确定惯性参考系的运动速度,伽利略则认为是可能的。例如光线和地球(惯性参考系)运动方向一致时的速度与光线和地球运动方向相反时的速度是不同的。按伽利略理论,后者的速度减前者的速度应等于地球速度的两倍,对这两个速度分别进行测量就能定下地球(惯性参考系)的运动速度。上世纪末,一些物理学家运用已经掌握的测量光速的技术,对这两个速度进行了精确的测量。实验结果大出人们的预料,证实在很高很高的准确度内两个速度相等。在这个事实面前,许多物理学家都不知如何是好,只有爱因斯坦意识到这个实验的重大意义。他认为那种拘泥于伽利略相对性原理,而去寻找各种

“理论”把这个实验“解释掉”的思想是不可取的，应当首先把这个实验事实接受下来，然后去修改和推广伽利略相对性原理。爱因斯坦把修改后的相对性原理表述为：各惯性参考系不仅对力学（自由落体），而且对电磁学（光是电磁波），进而对所有物理规律都是平等的。这就是大家熟悉的狭义相对论的相对性原理。它是伽利略相对性原理的修改和推广，表现在各惯性系对电磁学和对一切物理规律都是平等的。经爱因斯坦这么一推广，影响就大了：第一个结论是如果各惯性系中光速都相同，那就要修改古典力学时间与空间不相干的观念，代之以时间与空间是相互关联的；第二个结论是质量、能量间有  $E = mc^2$  的关系，这个关系为后来的原子核物理的研究所证实。

读者仔细想一想，上面关于惯性参考系的论述实际上是很含糊的。第一，不论是伽利略相对性原理或是爱因斯坦相对性原理，都暗暗假定至少存在一个特殊惯性参考系，以它为基准，凡是和它作相对等速运动的系统，也都属于惯性参考系，试问这个惯性参考系是否存在，并且如果存在的话，它在什么地方呢？伽利略相对性原理和爱因斯坦相对性原理均回答不了这个问题。第二，伽利略的第一个假定是，在各惯性系所看到的自由落体的运动规律和该物体是一个钢球或是一个羽毛没有关系，乍一看这好象是相对性原理的必然结果，其实不然。逻辑上说，相对性原理只能告诉我们，在各惯性系观察到钢球的自由落体运动规律是一样的，在各惯性系观察到羽毛的自由落体运动规律是一样的，并不要求在惯性系统中钢球和羽毛的运动规律也是一样的。

爱因斯坦仔细研究了这两个问题，发现这两个问题实际上是一个问题。我们可以设想一个人乘升降机（电梯，图3），他所能看到的只是升降机的墙壁、天花板和地板，外界则什么都看不见。此人特别有兴趣在升降机内作自由落体实验。当升降机静止或等速运动时，发现和地面上作的实验没有不同，即钢球和羽毛的下降情况一模一样。按照伽利略第一个假定，他得出结论有引力，因为他坚信引力具有这种特点，什么特点呢？就是物体的运动状态与物体由什么东西组成的无关。现在让升降机以等加

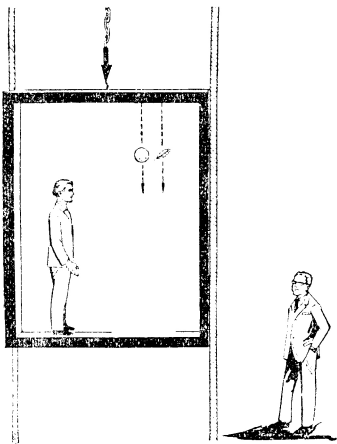


图 3

速度升高，他再次重复钢球和羽毛的实验，发现两者的运动情况又是相同的，按照他的逻辑又得出了存在引力的结论，只是引力的强度增加了。再让升降机作变加速运动，他还是看到钢球和羽毛的运动状况相同，按照他的逻辑，他又得出结论，引力随时间改变。设想还有一位站在地面上的自由落体运动的爱好者，并假定他能清楚地看到升降机内发生的一切事情。当升降机内的人作自由落体实验时，他自己也对升降机内的落体作了加速度的测量。就引力来说，他持有和升降机内的人相同的观点。但他用的参考系是地球，测到的加速度和升降机怎么运动没有关系，所以在他看来引力始终没有变。于是两个人产生了尖锐的分歧，一个坚持说引力改变了，一个坚持说引力没有改变。那么究竟谁是正确的呢？爱因斯坦认为，我们应当老老实实地承认两个人关于引力的各自的结论都是正确的，因为都是客观上实际观察到的，而这个承认意味着要对狭义相对论的相对性原理和牛顿引力理论作出重大的修改，为什么这样说呢？因为如果要承认他们的结论都是正确的，就要承认他们既可以用地面作参考系，也可以用正在作加速运动的升降机作参考系去描述自由落体运动。然而加速参考系在狭义相对论中是不允许使用的，所以狭义相对性原理应代之以广义相对性原理：一切参考系（包括相对作任意加速运动的参考系）都是平等的。那么，这两个人的分歧怎样解决呢？爱因斯坦认为只要假定引力加速度的大小同所用的参考系有关就行了。不仅如此，按照爱因斯坦的观点，连伽利略的第一个假设也能得到解释：设想如果引力加速度只与参考系有关，当然自由落体运动的加速度就和物体由什么东西做成的没有关系了。在这里，承认一切参考系平等，得承认有的参考系是有引力的，并不是惯性系。否则，如果只承认一切参考系平等而没有引力，那么，为解决分歧就只有一条退路——回到狭义相对论的相对性原理和牛顿引力理论，同时告诉升降机内的那个人，他的结论是错误的，因为那个参考系不是惯性系。当然，无论如何那个人是不会服气的，因为他研究引力的出发点和地面上的人没有丝毫差别。更重要的还在于采用了这条退路后，对我们认识引力的性质没有任何帮助，而且伽利略的第一个假定仍旧是个谜。我想大家都会同意，应当接受爱因斯坦的观点。

爱因斯坦的理论还可以这样来表述，就是在各种参考系中把惯性系突出出来，既没有实验根据，逻辑上也说不通。换句话说，我们应当认为一切参考系都是平等的，而承认一切参考系平等，必须伴随着承认一种力场，这个力场正好具有在该系统中自由落体实验所具有的特征。这个力场可以很自然地解释为客观上的引力场，所以广义相对论又叫引力理论。当然，最终判断究竟是惯性系具有独特性的观点正确，还是爱因斯坦的狭义相对论的观点正确，不是靠上面的推理，而是

靠实验。一阶近似下,爱因斯坦理论可以导出牛顿引力理论,高阶近似下可以得到对牛顿理论的修正,这些修正已被光线弯曲、水星进动和光谱线红移等实验证实,所以广义相对论现已普遍被承认。由于历史上的原因,人们把假定一切参考系平等之后所必然出现的力场叫规范场,引力场就是一种规范场。

### 从电磁场到杨-密尔场

上面已经直观地说明了作为规范场的引力场和参考系选择之间的关系,有了这个基础,我们便可以来研究电磁场。历史上物理学家首先认识的规范场不是引力场而是电磁场,可是电磁场与参考系的关系又是量子力学发现之后才开始搞清楚的。

学了量子力学后知道,微观客体有粒子和波动两重性,粒子性是说它和质点一样,有一定的质量和动量,波动性是说它象水波那样连续分布于一个区域,波动性可比作水波,譬如向平静的湖面上抛一块石头,顿时激起一阵阵微波缓缓地向着四面散开。这个波动可用简单的三角函数  $\cos(kx - \omega t)$  描述。从所抛石头的位置向任一方向作一条

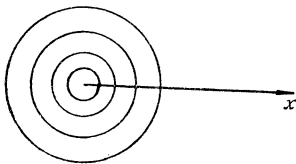


图 4

直线,  $x$  是直线上任一点到原点的距离,  $t$  是时间,  $\omega$  叫圆频率,  $\omega/k$  是波传播速度(图4)。粒子性和波动性的统一在于  $k = p/\hbar$ ,  $\omega = E/\hbar$ , 其中  $p$  是粒子的动量,  $E$  是粒子的能量,  $\hbar$  是普朗克常数, 这样两方面都能照顾到。量子力学叫

$$\cos(kx - \omega t) = \cos [(px - Et)/\hbar]$$

为波函数。以  $\pi$  介子为例, 实验测得它质量为 140 兆电子伏/ $c^2$ , 考虑到相对论  $E = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$  ( $c$  是光速), 一旦动量给定, 就可求出相应的能量, 自由  $\pi$  介子的波函数便定了下来。

更确切地说, 量子力学的粒子波函数应该用下式来表述:

$$\psi = e^{i(\frac{p}{\hbar}x - \frac{E}{\hbar}t)} = \cos [(px - Et)/\hbar] + i \sin [(px - Et)/\hbar]$$

可见, 波函数值有两部分, 一部分是实数值, 一部分是虚数值。  $\psi$  的实数值部分是

$$\psi_\xi = \cos [(px - Et)/\hbar]$$

$\psi$  的虚数值部分是  $\psi_\eta = \sin [(px - Et)/\hbar]$ 。可用

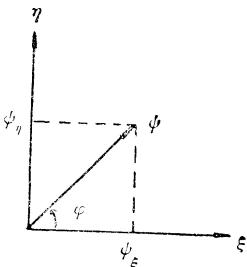


图 5

图5来表示  $\psi$  和  $\psi_\xi$ ,  $\psi_\eta$ 。图5的平面就叫做波函数复值的平面。

为了表明  $\psi$  对上述复平面和对普通空间的依赖关系, 需要在普通空间  $X-T$  平面的每一个  $x, t$  点上再引入一个复平面 ( $\xi-\eta$  坐标系) 如图6。图上看到, 在  $x_1 t_1, x_2 t_2, x_3 t_3, \dots$  各点, 各有一个  $\xi-\eta$  坐标系。取横轴  $\xi_1 \parallel \xi_2 \parallel \xi_3, \dots$  ( $\parallel$  是平行符号); 纵轴  $\eta_1 \parallel \eta_2 \parallel \eta_3, \dots$ , 则各点的相角为  $\varphi_1 = (px_1 - Et_1)/\hbar, \varphi_2 = (px_2 - Et_2)/\hbar, \varphi_3 = (px_3 - Et_3)/\hbar, \dots$ 。这就是量子力学的粒子波函数随  $x, t$  的不同而在复平面上变动的几何图象。

正如水波在一望无际的湖面上传播那样, 粒子波平稳地按一定方向传播到遥远遥远的地方。

现在设想湖中有一个露出水面的礁石, 水波遇到了它, 传播方向就要改变, 这种现象叫做衍射。对带电

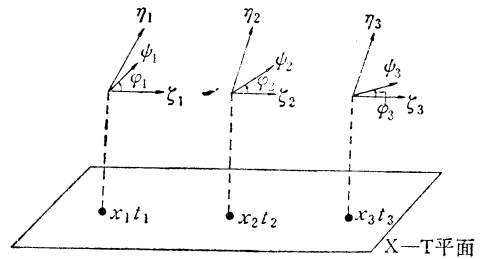


图 6

粒子的传播来说, 电磁场好比礁石。当一束自由传播的带电粒子遇到了电磁场, 粒子波就产生衍射, 复平面上的相角不再是  $\varphi = (px - Et)/\hbar$  的简单形式, 而代之以  $\varphi = (px/\hbar - Et/\hbar + \delta)$ 。一般说  $\delta$  是  $x, t$  的函数, 其具体形式和电磁场的电磁势有关。

下面我们把这种情况和引力场情况作一个类比; 把  $\xi_1 - \eta_1, \xi_2 - \eta_2, \xi_3 - \eta_3, \dots$  比作地面参考系, 当处于该参考系的人观察到波函数在复平面上的相角偏离自由波的相角时, 他得出结论说, 存在电磁场。另一个人采用  $\xi'_1 - \eta'_1, \xi'_2 - \eta'_2, \xi'_3 - \eta'_3, \dots$  参考系, 这些参考系相对于上述参考系来说, 相当于在不同的时空点作不同的旋转(加速)。也就是说, 旋转角度的大小既和  $x$  有关也和  $t$  有关。我们可以把这些参考系和升降机相比。在此人看来, 波函数的相角也偏离了自由波的相角, 于是同样得出存在电磁场的结论。但后者的偏离和前者的偏离不相同, 因而他们看到的电磁场的电磁势也不同, 分歧便产生了。为此, 或者认为不能采用旋转参考系; 或者承认电磁场的电磁势和所选取的参考系有关, 二者必居其一。采用第一种观点, 对认识电磁场的本质没有任何帮助, 因为这就相当于回到承认惯性系才能作为参考系, 不承认所有的参考系一律平等。接受第二种观点就是承认各个  $\xi-\eta$  参考系都是平等的, 我们可以称之为波函数复平面空间的广义相对性原理。这样一来, 情况便大不相同, 这时必然要求一个电磁势的场, 否则就无法解释采用旋转

参考系的人所观察到的相角和自由波的偏离，反之，如果假定了电磁势的场存在，则观察到的相角偏离就可以认为是电磁势的场引起的效应，各参考系相角的差别则归之为电磁势的场与参考系有关。实验上，电磁场的存在是早知的事实，所以这一番讨论说明波函数复平面空间的广义相对性原理是成立的。正因为电磁场是波函数复平面空间广义相对性原理所要求的，所以电磁场是一种规范场。

经过广义相对性原理引入的规范场，有非常吸引人的特点，一是自然，所谓自然是指用的假定最少，二是普适性，适用范围更广。具体说引力的普适性表现在，引力作用下任何物体都获得相同的加速度，而且两个物体间的引力正比于他们的质量，比例系数就是人所共知的万有引力常数，电磁场和带电粒子作用的普适性表现在，不论是 $\pi$ 介子、电子或是质子，电荷绝对值是相同的，而且所有已知粒子的电荷都是质子电荷的整数倍。

我们不会忘记物理学是一门实验科学，无论逻辑上或理论上多么合理，最终要由实验来检验。电磁力和引力直到目前还是人们在实验上了解得最清楚的两力，这两种力和参考系之间竟存在着这种关系，作为一个经验是十分可贵的。随着社会的发展，人类关于自然界的认识由分子、原子进入了原子核和基本粒子内部，发现了许许多多原子核和基本粒子。原子核是结合得很紧很紧的，那么，是什么力把它们束缚在一起呢？这就是所谓核力问题。1954年杨振宁和密尔斯试图从根本上解决核力问题，他们基于引力和电磁力的经验，提出一个核力的新理论。基本思想是这样的：他们认为实验上看到的三种 $\pi$ 介子 $\pi^+$ 、 $\pi^-$ 、 $\pi^0$ ，实际上是同一种 $\pi$ 介子的三种不同表现。这样便需要把二维的波函数复平面空间扩充为三维的。三维空间有三个坐标轴 $\xi$ 、 $\eta$ 、 $\zeta$ ，波函数是这个空间的矢量，物理学上叫这个空间为同位空间。波函数在同位空间的运动可比作一个小球在一个球面上运动。若同时考虑波函数在普通空间的运动，其几何图象如图7，对各时空点 $(x_1, t_1)$ 、 $(x_2, t_2)$ 、 $(x_3, t_3)$ ...有一个相应的同位空间参考系 $(\xi_1, \eta_1, \zeta_1)$ 、 $(\xi_2, \eta_2, \zeta_2)$ 、 $(\xi_3, \eta_3, \zeta_3)$ ...。在作图7时假定了 $\xi_1 \parallel \xi_2 \parallel \xi_3$ ...， $\eta_1 \parallel \eta_2 \parallel \eta_3$ ...， $\zeta_1 \parallel \zeta_2 \parallel \zeta_3$ ...，波函数 $\psi$ 在不同时空点对于 $\xi\eta\zeta$ 轴的投影可以不同。然后，把广义相对

性原理推广到同位空间，认为一切同位空间参考系都是平等的，就是说各时空点上的参考系可以绕原点作任意旋转。要真正实现这个平等必须引入新的力场，人们叫做杨-密尔斯场。波函数复平面空间是二维的，在二维空间里，描述一个参考系对另一个参考系的旋转只需要一个旋转角；而同位空间是三维的，描述一个参考系对另一个参考系的旋转需要三个旋转角，所以杨-密尔斯场比电磁场复杂，电磁场只有四个分量，即三个矢量势和一个标量势，杨-密尔斯场则有十二个分量，即九个矢量势和三个标量势，其中一些势场还带电。但尽管形式上复杂了，导出场的精神则是完全相同的，因此也就没有特别神秘之处。

为了确定核力是不是就是杨-密尔斯场产生的，自然也应当把理论结果同实验进行比较，遗憾的是实验上一直没有找到与杨-密尔斯场对应的粒子，即找不到无静止质量的带电粒子。同时理论本身还存在一系列困难，所以杨-密尔斯场提出后将近十年的时间几乎无人问津。六十年代以后，有实验迹象表明杨-密尔斯理论可能有道理，激起人们认真对待，所遇到的困难也得到克服，这时才悟出杨-密尔斯场内容极其丰富，并成为当前高能物理研究方向之一。

由于问题的复杂性，为敲死杨-密尔斯场存在或是不存在，物理学还要走一段相当长的路程。就目前已获得的初步结果来说，核力的规范场理论可能是导致最终解决核力问题的正确方向。

引力场、电磁场、杨-密尔斯场这三个具体例子，使我们看清楚规范场和参考系之间的密切关系。所谓规范场理论实质上是提供一个引入物质之间相互作用的原则，任何人都可以根据这条原则引入规范场，其步骤是：给定一个空间，在该空间引入参考系，假定一切参考系都是平等的，这时必然出现场，这个场叫做规范场。因此，理论上规范场数目可以有无穷多，物理学家的任务在于确定那些是客观上存在的，那些是不存在的。人类的认识正是这样无止境地向前推进，对伽利略相对性原理认识的深化引导到现代规范理论的出现。同样我们坚信即使到了今天，关于相对性原理的认识还没有到达它的尽头。（插图设计：蒋德舜）

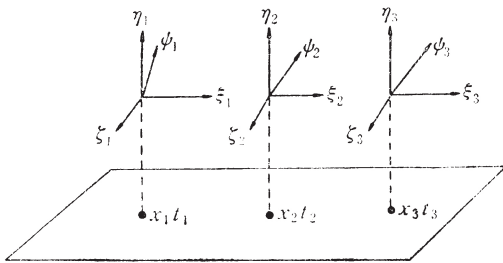


图 7