

# 走向统一的自然力

## 爱因斯坦：试图统一电磁力和引力

### 未能如愿（IV）

厉光烈 赵洪明

#### （3）相对时空观

狭义相对论是关于时间、空间、物体运动及其相互关系的理论；广义相对论是关于时空性质与物质分布及运动相互关系的理论，因此，它们都是与时空观密切相关的物理理论。这里，时空是时间和空间的总称。通常，时间用来描述事件的顺序；空间用来描述物体的位形；时空用来描述事物之间的一种次序。人类对时空的认识经历了经典力学时空观、狭义相对论时空观和广义相对论时空观等三个主要阶段。经典力学时空观认为，时间独立于空间而存在，不管物体是静止的还是运动的，空间始终不变，时间始终均匀流逝，因此，它又被称为绝对时空观；狭义相对论的时

空观认为，时间和空间不可分离，组成四维时空，运动的尺相对于静止的尺长度会变短、运动的钟相对于静止的钟走得会变慢；广义相对论的时空观认为，时间和空间除了与物体的运动状态有关外，还与物质的分布有关，物质的存在会使周围时空发生弯曲。狭义和广义的时空观又被统称为相对时空观，认为时空与物质及其运动不可分离。

#### 空间与时间

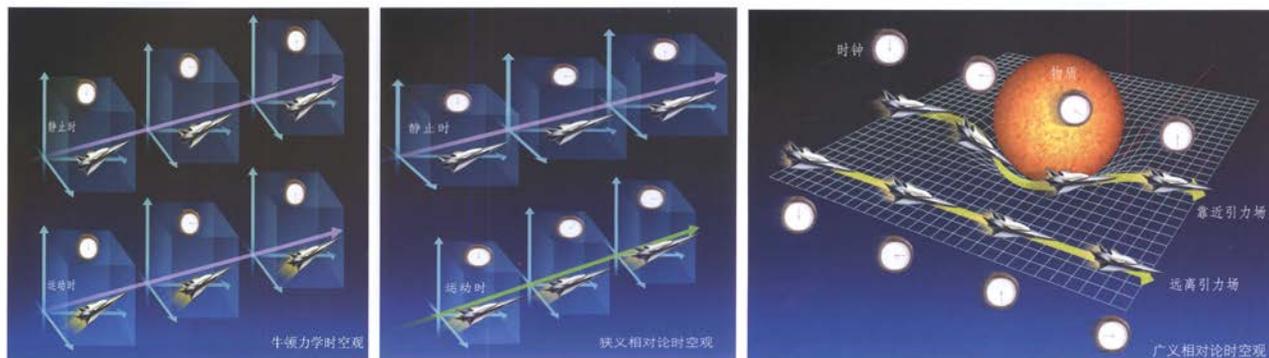
空间的概念来自观察者能感受到周围物体具有长、宽、高三个方向上的广延性，也来自观察者无论在哪里都能感受到周围物体可在相对观察者的前后、左右、上下方向上连续移动，而且当没有外力（例如引力）的情况下，这种移动甚至

没有一个特别优越的方向。由此可见，空间是均匀、各向同性的三维连续体。

时间的概念来自观察者所经历的事件都按“早”和“迟”排成一个序列。为了具体描述这些事件的“早”和“迟”，就用一个称为“时间”的单调变化的数列来指定事件发生的先后顺序，使得较早发生的事件对应一个较小的数，而较晚发生的事件对应一个较大的数。在日常生活中，这种指定的顺序是绝对的，也就是说，两个事件中哪个发生早一些或晚一些，与谁（哪个观测者）看到这两个事件无关。

#### 绝对时空观

绝对时空观认为，空间和时间的存在及其运动无关，存在



牛顿力学时空观、狭义和广义相对论时空观的图示

着绝对空间和绝对时间。牛顿在其名著：《自然哲学的数学原理》中写道“绝对空间，就其本性来说，不受外界事物的影响，始终保持着相似和不变”，“绝对的、纯粹的和数学的时间，就其本性来说，自行均匀流逝，而与任何外界事物无关”。物质就是在这不变的空间和均匀流逝的时间中运动。也就是说，绝对时空就是与物体及其运动无关的、时间和空间分离的“3+1”维（三维空间和一维时间）平直时空，服从欧几里得几何学。

物体的运动性质和规律与采用怎样的空间和时间来度量有着密切的关系。只有以绝对空间作为度量运动的参考系，或者以相对于绝对空间作匀速直线运动的物体为参考物体，惯性定律才成立，即不受外力作用的物体，总保持静止或者匀速运动状态。这类参考系统称为惯性参考系。任何两个不同惯性参考系的空间坐标与时间坐标之间满足伽利略变换。在这种变换下，位置和速度是相对的，即对于不同参考系其数值不同；长度和时间间隔是绝对的，即相对于不同参考系其数值不变；同时性是绝对的，即相对于某个惯性参考系同时发生的两个事件，相对于其他惯性参考系也必定是同时的。另外，牛顿力学规律在伽利略变换下保持形式不变，即在不同的惯性参考系中具有相同的形式，这就是伽利略相对性原理。如果存在绝对空间，则物体相对于这个绝对空间的运动就应该是可以测量的，就应该存在绝对速度。然而，伽利略相对性原理不允许在物

体运动定律中包含绝对速度，亦即绝对速度在原则上是无法测定的。这样，就出现了自相矛盾，而且，绝对空间和绝对时间的存在也缺乏实验证据。

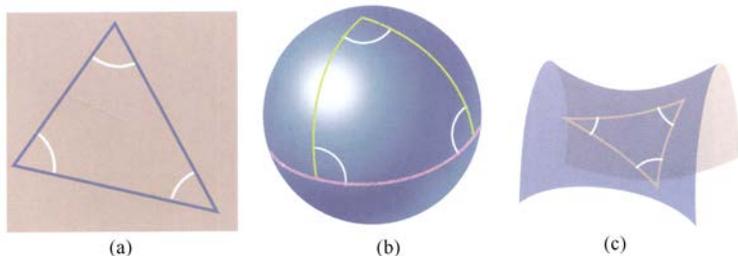
#### 四维时空观

为了克服上述矛盾，爱因斯坦提出相对时空观代替绝对时空观，他在狭义相对论中将伽利略相对性原理作了推广，要求在不同的惯性参考系中，不仅牛顿力学规律，而且其他一切物理规律都具有相同的形式。在狭义相对论中，由于这一推广，加上引入光速不变原理，不同惯性参考系的空间坐标与时间坐标之间遵从洛伦兹变换，空间和时间不再是绝对的，而是相对的，它们都依赖于物体的运动状态；空间和时间不再是相互独立的，而是相互关联地形成四维时空。根据这种变换，同时性也不是绝对的，而是相对的，即相对于某个惯性参考系同时发生的两个事件，相对于另一个惯性参考系可能并不同时发生；空间距离和时间间隔也不再是绝对的，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。但是，尽管在不同的惯性参考系中观

测到的两个事件之间的时间间隔可以不同，但因果关系不会颠倒。另外，光速也是绝对量，即相对于任何惯性参考系光速都是一样的。四维时空是平直的，服从欧几里得几何学，它依赖于物体的运动状态，但不依赖于物体存在与否。

#### 弯曲时空观

经典力学与狭义相对论都认为，一个惯性参考系可适用于整个宇宙，相对于某个惯性参考系，宇宙任何范围中的物体运动都遵从惯性定律。如果考虑到物体的万有引力，那么，一个惯性参考系只能适用于一个局部的范围，而不可能适用于整个宇宙。如果对于一个局部范围中的物体来说，某一个参考系是惯性的，那么，对其他范围中的物体运动而言，它一般就不再是惯性的。为了描写大范围中的运动，对不同局部范围要用不同的惯性参考系。物体之间引力的作用，就在于决定各个局部惯性参考系之间的联系。物体的引力与非惯性参考系中的惯性力相似，引力的作用在于使时空弯曲，弯曲时空由非欧几何描述，各个不同局部范围惯性参考系之间的关系可通过时空曲率来规



欧几里得几何与非欧几何（黎曼几何和双曲几何）的比较  
（在欧几里得几何学中，三角形三个内角之和等于  $180^\circ$ ，如图（a）；在黎曼几何学中，三角形三个内角之和大于  $180^\circ$ ，如图（b）；而在双曲几何学中，三角形三个内角之和小于  $180^\circ$ ，如图（c））

定。这样，通过引入弯曲时空就可将引力和惯性力同时纳入相对性原理。爱因斯坦突破了惯性参考系的局限，提出广义相对性原理：客观的、真实的物理规律在任何参考系中都具有相同的形式。在广义相对论中，时间和空间不仅依赖于物质的运动状态，而且依赖于物质的分布，正是物质的存在使四维时空本身发生弯曲，而所谓引力实际上就是时空弯曲的表现。

### 3. 未完成的统一场论

从库仑定律和安培定律与牛顿万有引力定律一样都服从“平方反比率”，到麦克斯韦电磁场方程和爱因斯坦引力场方程都具有协变形式，这种数学形式上的类同使爱因斯坦确信：定能找到适当的几何方法进一步推广广义相对论，使其既能描述电磁场又能描述引力场，甚至可以涵盖量子论，解释电子和质子的存在及其性质，导出  $e$ 、 $c$  和  $h$  等基本物理常数，也就是说，寻求建立一个统一场的理论。但是，经历了一次又一次挫折，花费了后半生 30 多年的时间，爱因斯坦至死未能如愿。

#### 爱因斯坦获诺贝尔奖

爱因斯坦在 1895 年撰写了第一篇有关“以太”的论文并提出“追光”的思想实验之后，经过十年酝酿，创建了狭义相对论；又过十年，再创广义相对论。其间，他还成功地解释了布朗运动和光电效应，并将广义相对论应用于宇宙学。爱因斯坦在这 20 多年里的创造性工作，

极大地改变和丰富了物理学。1922 年 11 月 9 日，瑞典科学院在斯德哥尔摩宣布：爱因斯坦因“对理论物理的贡献，特别是发现了光电效应定律”荣获诺贝尔物理学奖。

瑞典科学院早就意识到爱因斯坦应该获奖，但是他们不清楚应该从哪方面给爱因斯坦授奖。按照设奖人诺贝尔（A. B. Nobel, 1833 ~ 1896）的要求，一个原理或理论不是一项“发现”。早在 1910 年，奥斯特瓦尔德就根据爱因斯坦在相对论方面所取得的杰出成就提名他获诺贝尔奖，就因诺贝尔的上述要求，物理学评奖委员会建议将他的提议暂时放在一边，等到相对论获得实验验证后再加以考虑。1912 年以后，爱因斯坦曾被更多的人多次提名获奖，提奖的内容不仅包括狭义相对论，还有布朗运动和光电效应；1917 年以后，更有与广义相对论和水星近日点进动有关的成就，但是仍然有人反对。

直到 1919 年，爱丁顿等的日全食观测验证了广义相对论的预言，爱因斯坦成为家喻户晓的新闻人物，加上评委会成员、乌普沙拉的物理学教授卡尔·威廉建议根据光电效应的理论工作推荐爱因斯坦，才使爱因斯坦终于荣获了推迟颁发的 1921 年度诺贝尔物理学奖。

按照常规，诺奖得主的演讲应该围绕他获奖的题目，但是，评委会主席阿瑞尼阿斯告诉爱因斯坦：

“如果你能讲一下相对论，人们一定会更为感激。”1923 年 7 月 11 日，在哥特堡，爱因斯坦给包括国王在内的两千多名观众作《相对论基本思想和问题》的演讲。爱因斯坦曾想讲一讲他正在思考的关于引力和电磁力的统一场理论，但是感到：这个问题过于复杂，很难通俗地讲清楚，因此，只是对技术大学的少数专家讲述了他的想法：“一个寻求统一理论的人绝不会满足于存在两个性质上完全独立的场。”



1923 年 7 月 11 日，爱因斯坦在瑞士哥特堡作诺奖报告

### 又一个十多年的酝酿

爱因斯坦，究竟何时开始考虑统一场论，文献上没有明确的记载，只是知道：1909年，他在那年1月发表的论文《辐射问题的现状》结尾中说：“寻找一个在我看来可以适合于构造电的基本量子数和光量子的方程组，未获成功”；1913年，他在苏黎世时曾经思考过“引力效应是否与电磁感应相似”，那时，可能他并不知道，早在半个多世纪之前，法拉第就研究过电力和重力的统一性，希望从实验上找到它们在物理本质上的类同。广义相对论的论文发表后，就在爱因斯坦忙于完善和发展广义相对论，特别是将其应用于宇宙学的时候，黎曼几何在广义相对论中的成功应用，引起了一些数学家对发展黎曼几何来建立统一场论的兴趣：1915年11月13日，德国著名数学家希尔伯特(D. Hilbert, 1862 ~ 1943)在给爱因斯坦的信中谈到：“在数学上，电磁方程(普适的麦克斯韦方程组)可以看作是引力方程的延伸，也就是说，引力和电磁没有实质上的差别”，两天后，爱因斯坦回信给他：“我对你的研究极有兴趣，因为我在心里也一直想为引力和电磁之间的空隙搭一座桥，你在来信中的暗示给我带来了极大的期望。”有迹象表明：1916年初，爱因斯坦在写《广义相对论基础》时，已经开始统一场论的研究，只是未向外界透露任何信息。在1917 ~ 1919年间，一些年轻数学家曾设法将电磁场也和时空的黎曼几何特性联系起来，以便建立电磁场和引力场的

统一理论。1917年11月11日，鲁道夫·弗尔斯特化名“巴赫”给爱因斯坦写信谈了自己引入反对称度规和协变6矢量建立统一场论的想法，爱因斯坦于16日回信告诉他：自己也在忙这件事，只是结果令人失望。但是，爱因斯坦对希尔伯特高足、著名数学家外尔(H. Weyl, 1885 ~ 1955)的工作相当重视。

外尔是一位数学天才，继赫森伯格(G. Hesseberg, 1874 ~ 1925)、利维-薛维塔(T. Levi-Civita, 1873 ~ 1941)和肖顿(J.A. Schouten, 1883 ~ 1971)之后，通过引入平行移动和协变导数并将其普遍化，发展了黎曼几何，创建了“仿射联络”数学，并写出了《空间时间物质》一书。1918年春天，躺在病床上的爱因斯坦在阅读了该书的校样后，热情称赞道：“这本

书像一篇精美的交响乐章，……其中的基本观念十分了不起”。后来，外尔将与该书同时完成的有关统一场论的文章《引力与电力》寄给爱因斯坦，请他转交普鲁士科学院，在《普鲁士科学院会议报告，物理-数学部分》(以下简称《年报》)上发表。在这篇文章里，外尔从推广“联络”入手，设法将电磁场和四维时空的黎曼几何特性联系起来，进而建立了电磁场与引力场的统一理论。所谓“联络”，就是由度规张量 $g_{\mu\nu}$ 及其一阶偏微商构成的 $\Gamma_{\mu\nu}^{\lambda}$ ：

$$\Gamma_{\mu\nu}^{\lambda} = \frac{1}{2} g^{\lambda\sigma} \left( \frac{\partial g_{\sigma\mu}}{\partial x^{\nu}} + \frac{\partial g_{\sigma\nu}}{\partial x^{\mu}} + \frac{\partial g_{\mu\nu}}{\partial x^{\sigma}} \right) \quad (1)$$

注意：从现在开始，上下指标(在黎曼几何学中，指标放在上面或下面分别表示张量是协变的或逆变的)相同意味着对其求和(在上式



希尔伯特和爱因斯坦

中即对  $\sigma$  求和), 称为“缩并”。在爱因斯坦引力场方程中出现的里奇张量  $R_{\mu\nu}$  就是由联络  $\Gamma_{\mu\nu}^\lambda$  定义的曲率张量:

$$R_{\mu\nu\rho}^\lambda = \frac{\partial \Gamma_{\mu\nu}^\lambda}{\partial x^\rho} - \frac{\partial \Gamma_{\mu\rho}^\lambda}{\partial x^\nu} + \Gamma_{\mu\nu}^\alpha \Gamma_{\alpha\rho}^\lambda - \Gamma_{\mu\rho}^\alpha \Gamma_{\alpha\nu}^\lambda \quad (2)$$

缩并而得:  $R_{\mu\nu} = R_{\mu\lambda\nu}^\lambda$ 。外尔的工作就是通过引入规范变换在联络  $\Gamma_{\mu\nu}^\lambda$  中附加一线性项将其加以推广, 进而设法通过推广得到的广义联络将分别用度规场和矢量场描述的引力场和电磁场统一起来。同年3月, 爱因斯坦看到他的文章后, 写信表示祝贺: “现在, 你实际上已经得出我没能产生的结果, 用  $g_{\mu\nu}$  解释了麦克斯韦方程。”但是, 没有过多久, 爱因斯坦就发现, 在外尔的文章中, 有一个明显的错误: 理论给出的氢原子光谱与其过去的历史有关, 与“所有氢原子都具有同样光谱”这一实验事实相抵触。4周后, 爱因斯坦的表扬变成了善意的讽刺: “你的文章很精彩, 是纯粹思维的巨大成就, 只是与物理现实不符。”外尔回信说: “这使我很困扰, 因为经验告诉我: 应该相信你的直觉。”尽管如此, 爱因斯坦还是支持外尔发表这篇文章。那时, 正值欧战期间, 稿源稀缺, 虽然有些科学院院士反对, 文章还是在《年报》上发表了, 只是在文章的结尾处爱因斯坦加上了他的批评意见。顺便指出: 因日全食观测验证光线在引力场中偏转而名声大振的爱丁顿, 出于对爱因斯坦物理直觉的尊重, 曾运用数学技巧修改、发展了外尔理论。他的工作

主要是在里奇张量  $R_{\mu\nu}$  中引入反对称项, 以便修改后的外尔理论能够满足爱因斯坦的客观标准。

另外, 受到外尔文章的鼓舞, 德国数学家卡鲁扎 (T. Kaluza, 1885 ~ 1954) 于1919年首先想到把四维时空扩展为五维流形来使电磁场和引力场达到统一。他引进不变线元:  $ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$  ( $\mu, \nu = 1, 2, \dots, 5$ ), 并让度规张量  $g_{\mu\nu}$  满足两个约束条件: 一是  $g_{\mu\nu}$  只取决于时空坐标  $x^k$  ( $k=1, 2, 3, 4$ ), 即  $\frac{\partial g_{\mu\nu}}{\partial x^5} = 0$ ; 另一是  $g_{55}=1$ , 即他要处理的只是五维柱体世界。他还假设  $g_{k5}$  或  $g_{5k}$  ( $k=1, 2, 3, 4$ ) 与电磁势成正比, 这样便写出了在数学形式上与爱因斯坦引力场方程完全类似的五维场方程:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \kappa T_{\mu\nu} \quad (3)$$

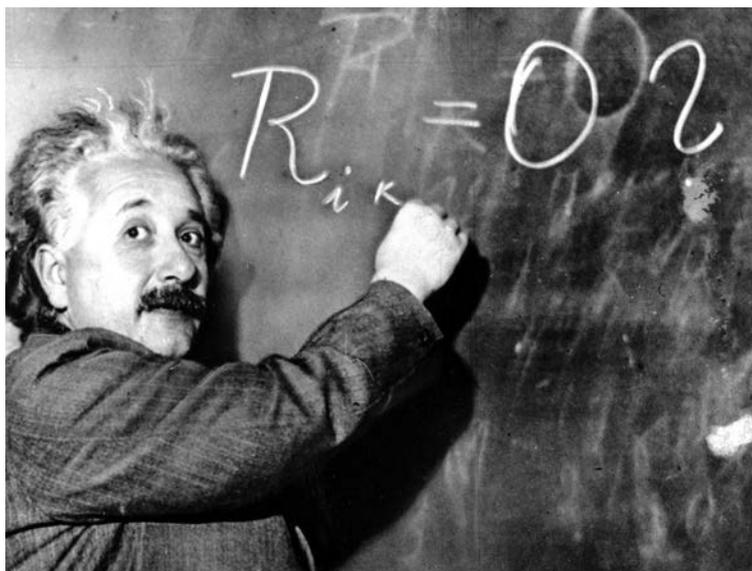
式中里奇张量  $R_{\mu\nu}$  是联络  $\Gamma_{\mu\nu}^\lambda$  及其一阶偏微商函数; 曲率标量  $R$  是度规张量  $g_{\mu\nu}$  与里奇张量  $R^{\mu\nu}$  缩并的结果:  $R = g_{\mu\nu} R^{\mu\nu}$ ; 在只考虑具

有质量  $m$  和电荷  $e$  的点粒子源的情况下,  $T^{\mu\nu} = m \frac{dx^\mu}{ds} \frac{dx^\nu}{ds}$ , 其中

$m \frac{dx^\mu}{ds}$  是描述“动量-能量-电荷”

的5矢量;  $\frac{dx^5}{ds}$  与  $\frac{e}{m}$  成正比。卡

鲁扎证明: 当  $\mu, \nu=k=1, 2, 3, 4$  时, (3)式就是爱因斯坦引力场方程;  $\mu, \nu=k, 5$  或  $5, k$  时, 给出麦克斯韦方程组;  $\mu, \nu=5, 5$  时, 简化为与电荷守恒有关的恒等式。另外, 五维柱体世界的短程线就是一个带电点粒子在一个引力-电磁组合场中的运动轨迹。同年4月, 爱因斯坦写信给卡鲁扎: “通过五维柱体世界来实现统一场理论的思想是我未曾想到的, 粗略一看, 我非常喜欢你的思想”, 几星期后, 又写信给他: “你的理论在形式上的统一是令人惊叹的”。1921年, 爱因斯坦将不知何故推迟发表的卡鲁扎的第一篇论文寄给了普鲁士科学院。有一段时间, 他甚至认为卡鲁扎的想法比其他任何方法都要现实, 但



爱因斯坦: 重要的是要不断提问, 决不要丧失好奇心

是很快就发现：采用这种方法，在理论上得出的仍然是“外来之物”；这个五维流形虽然在数学上是优美的，但从物理上讲，却没有任何意义。后来，爱因斯坦与格罗默（J. Grommer, 1879 ~ 1933）合写了一篇文章，证明了“卡鲁扎理论不存在无奇点的中心对称解”，而爱因斯坦一直希望在他试图建立的统一场论中能够得到可以用来表示粒子的没有奇点的解。

1922年夏天，爱因斯坦批判地回顾了这段时间在统一场论方面的所有尝试，他写道：“为了取得真正进展，我认为一个人必须从自然界中找到一个普适的原理。”为此，他曾想说服因发现空间量子化而出名的盖拉赫（W. Gerlach, 1889 ~ 1979）通过在水流和瀑布上作实验来检验运动物体能否产生磁场，只是因为盖拉赫不愿让这个想法干扰自己的学术研究而未能实现。显见，直到此刻，爱因斯坦仍寄希望于从物理上获得解决问题的灵感，尚未把数学看作是寻找统一

场论过程中的“唯一路标”。

### 屡遭挫败的不倦探索

#### ① 外尔 - 爱丁顿理论相关工作

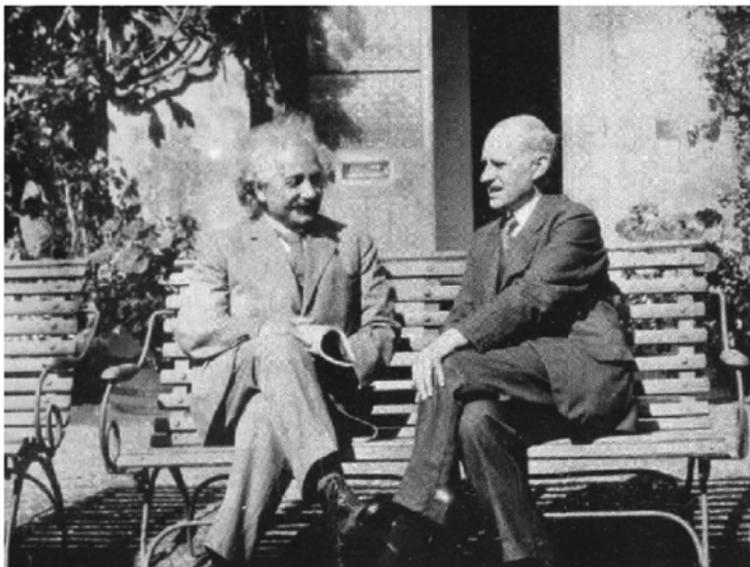
1923年2月2 ~ 14日，在从日本访问回来的旅途中，爱因斯坦在轮船上完成了《关于广义相对论》一文。船靠岸后，他立即将文章寄往柏林，2月15日，普朗克替他把文章交给了普鲁士科学院。对这篇“把外尔理论的爱丁顿形式和哈密顿原理结合起来”的文章，爱因斯坦相当重视，高兴地认为：“这篇文章所述的理论没有武断，符合我们目前所知道的引力和电力知识，非常完美地统一了这两种场。”回到柏林后，他亲自在科学院介绍了他的观点，又写了两篇相关的文章。实际上，他当时已经意识到：他的新思想在物理上不会带来任何有意义的结果，他曾向外尔报告说：“整个数学方法是完美的，但是自然界使我们走了很多冤枉路。”“概括地说，对于整个问题，我只能采取听任的态度。”接着又说：“面对自然的冷酷微笑，我们必须坚持

这个思想，毕竟，它的美妙使我们产生更大的动力。”正是在这一年，爱因斯坦的思维方式发生了很大的转变，逐渐由“从自然界中寻找真理”转向“把数学思维当作是认识的根源”。

1925年夏天，他正式宣布：“1923年的理论并不是这个问题的真正答案，经过两年的不断探索，现在我相信自己发现了真正答案。”这个“真正答案”就在他的另一篇关于统一场论的文章里，这篇题为《引力和电力的统一场理论》的文章仍以仿射联络为基础，只是现在的基本张量包括对称和反对称两部分：对称部分描述引力场；反对称部分描述电磁场。爱因斯坦在给挚友贝索（M. A. Besso, 1873 ~ 1955）写信说：“这篇文章有极大可能性与事实相符……至少在客观上我认为它是正确的。”仅仅8周后，这种乐观便消失了，他告诉埃伦费斯特（P. Ehrenfest, 1880 ~ 1933）：“现在，我又开始怀疑我的这项工作了。”两天后



外尔



1930年，爱因斯坦与爱丁顿在一起



埃伦费斯特

又说：“我去年暑期的工作完全是错的。”

之所以如此，是因为他发现上述理论存在一个难以解决的问题。1925年秋天，爱因斯坦在一篇短文《电子与广义相对论》中提出了这个问题：任何相对论场论，在空间反射和时间反演变换下，都应该保持不变，具体到上述的统一场理论，这将导致以下结论：对应于任何一个与带正电荷的基本粒子有关的场，总会存在一个具有同样静态质量、带负电荷的基本粒子的场。用现在的话说，就是



爱因斯坦和贝索

对应于任何一个质量为  $m$ ，电荷为  $e$  的基本粒子，一定存在一个质量为  $m$ ，电荷为  $-e$  的“反粒子”。而在当时，物理学家只知道两种基本粒子，即带负电荷的电子和带正电荷的质子。后者的质量大约是前者的 2000 倍，显然，不能把电子看作是质子的“反粒子”。爱因斯坦再一次陷入他的统一场论与物理现实矛盾的困惑之中，他没有想到数年之后这个问题却让一位年轻物理学家一举成名：1930年，英国物理学家狄拉克（P. A. M. Dirac，1902 ~ 1984）创建了相对论量子



迈尔

力学，预言了电子的“反粒子”——正电子的存在。两年后，美国物理学家安德森（C. D. Anderson，1905 ~ 1991）从宇宙射线中发现了正电子，证实了狄拉克的理论预言。

1928年，爱因斯坦开始写纯粹数学的文章，连续在《年报》上发表了两篇论文。在这两篇文章中，他引入了“远平行性”的概念<sup>①</sup>，并试图证明：如果四维连续区不仅具有黎曼度规而且还具有“远平行性”，那么便可以得到引力和电力的统一理论。1929年初，他在《年



卡鲁扎



克莱因



格罗默

报》上又发表了题为《关于统一场论》的6页文章，并于1月11日向报界发表了一个简短的声明：“这项工作的目的是要用统一的观念写出引力定律和电磁场方程”。1929年2月3日，《纽约泰晤士报》在星期天专栏通篇登载了爱因斯坦相对论的早期发展，并在结束语里提到了“远平行性”。但是，外尔和爱丁顿都对其持批评态度，泡利则要爱因斯坦回答：水星近日点进动、光线在引力场中偏转和能量-动量守恒定律在新的理论中变成了什么？后来，爱因斯坦在给迈尔(W. Mayer, 1887~1948)的信中说：“几乎所有的同事都尖酸刻薄地反对这一理论”。1931年，他在给《科学》杂志的信中承认“这是一个错误的方向”，最终放弃了这一理论。随后，他写信给泡利说：“终究你是对的，你这个淘气包。”

#### ②卡鲁扎-克莱因理论相关工作

1926年4月，瑞典物理学家克莱因(O. Klein, 1894~1977)发表文章对卡鲁扎理论作了改进<sup>②</sup>。原先，卡鲁扎只在弱场和低速近似下证明了他的结果，克莱因进一步证明不用加上“弱场和低速”这两个约束条件，而且相信对与电荷有关的第五维可以量子化，从而完善了卡鲁扎的五维统一理论，因此现在人们将其称为卡鲁扎-克莱因理论。同年8月23日，爱因斯坦在给埃伦费斯特的信中提到，格罗默已经注意到克莱因的文章，10天后，他又说：“克莱因的文章给我留下了美好的印象，只是我总感到卡鲁扎的原理太不自然。”1927

年2月，爱因斯坦发表了两篇关于五维理论的简短通讯。然后，他在给洛伦兹的信中写道：“看来统一引力定律和麦克斯韦方程的理论可以通过五维理论以完全令人满意的形式得到”。那么，在给埃伦费斯特的信中，爱因斯坦提到的“太不自然”又指的是什么呢？在他和迈尔于1931年发表的文章中，我们找到了答案：原来，他认为，卡鲁扎理论不应把物理连续推广到五维上去。同年，在《科学》上发表的文章中，他进一步指出：“用五维流形代替四维连续，然后，为了说明连续的第五维并不出现，又人为地将其冻结起来，显然是不正常的。我们通过引入一个完全新颖的数学概念已经成功地运用公式表达出形式上近似于卡鲁扎理论而又不出现上述异议的一种理论。”但是，爱因斯坦-迈尔方程不能从变分原理推导出来。不知是否因为这个原因，还是其他原因，1932年以后，在爱因斯坦的工作中，就再未见到这个理论的踪影。

1938~1941年间，爱因斯

坦在老朋友、长期合作者埃伦费斯特故世后，先与贝克曼(P. Bergmann, 1915~2002)，后与巴格曼(V. Bargmann, 1908~1989)合作，对五维理论作了最后一次尝试，试图用其解释量子现象，特别是海森伯(W. K. Heisenberg, 1901~1976)的测不准关系，但是未能成功，于是便永远地放弃了五维方法。

20多年来，爱因斯坦几乎每五年试验一次五维方法，中间和随后，便用四维联络来实现他的目的。先是一种方法，然后再试探另一种方法，一次又一次的挫折，总是不停地用“真正答案”取消以前的声明，直到他的晚年。虽然在1945年和1954年又曾取得过一些进展，但是没有突破性的，都只停留在数学形式的改进上，并没有得到有物理意义的结果，甚至很少发表论文。

#### 未能如愿的原因何在

临终前，爱因斯坦还让人把统一场论的最后计算结果拿到病床边，可见，直到生命的最后一刻，爱因斯坦仍在想着他的统一场



贝克曼



巴格曼

论，……但终究未能如愿。那么，究竟是什么使这位旷世天才未能实现自己的伟大梦想呢？我们认为，主要原因有二：

一是，进入中年以后，爱因斯坦的物理直觉完全埋没于他所欣赏的数学思维的美妙之中，再也没有像以往那样设计出可供实验和观测检验的、闪现智慧火花的思想实验。

无论是狭义相对论还是广义相对论的创建，都是先有物理概念上的突破，后有数学方法上的创新，虽然黎曼几何学在广义相对论中的成功应用，确实让爱因斯坦看到了数学的微妙之处，但是，一有机会，爱因斯坦还是要提醒数学家：

“除非与事实相结合，否则他们的抽象艺术只是纯粹思维，而不是物理学。”在1919～1922年间，无论是在给外尔的信和明信片上，还是在对外尔和卡鲁扎等工作的评价中，爱因斯坦都一再强调物理的重要性，仍然不太重视纯粹的数学思维。

但是，不知是因为已经发表的有关统一场论的工作总是脱离物理现实，还是媒体过分渲染这些数学方法的神妙之处，1923年，爱因斯坦的思维方式发生了很大的转变：以前数学只是他研究物理的工具，现在却变成了认识的根源。就在那年的诺奖报告中，爱因斯坦首次指出：“在寻找统一场论的过程中，数学是唯一的路标”，“非常不幸，我们不能像推导引力理论那样完全以‘引力质量与惯性质量相等’这一经验事实为基础，必须以数学的简洁性作为判断标准，这难

免有些武断。”1928年以后，他更转入了纯粹数学的探索。1933年，在英国牛津大学斯宾塞讲座中，他进一步将数学提到了创造性原理的高度，他说：“在某种意义上，纯粹思维是可以理解现实的”，并认为“数学标准是真理的唯一可靠来源”。几年后，他把思想上这种转变概括成一句话：“引力问题把我变成一位虔诚的唯理主义者，变成在数学简单性中寻找可靠根源的人。”费曼则说他“后期不再从具体的物理图像思考问题，成了一个专门摆弄方程的人。”

年轻时，爱因斯坦清楚地知道：物理学是一门实验科学，物理学的研究应该摸着自然现象或实验数据的“石头”过“河”。但是，一次又一次的挫折，终于使他不再凭自己的物理直觉从“自然界中寻找原理”，反而坚信“能用纯粹数学的构造来发现概念以及把这些概念联系起来的定律”。爱因斯坦晚年一直带着这种信念寻求统一场论，终究一无所成。

二是，爱因斯坦晚年完全沉迷于经典的统一场论之中，始终不愿接受量子力学的统计解释，致使他的研究偏离了物理学发展的主流方向。

爱因斯坦创建统一场论的伟大梦想，实际上，是要建立一个可以解释“所有事情”的终极理论。20世纪初，爱因斯坦刚刚考虑这个问题的时候，物理学家只知道有电力和引力，只知道存在两个既有质量又带电荷的基本粒子——电子和质子，甚至发现原子核并将最轻

原子核——氢核命名为质子的卢瑟福（E. Rutherford, 1871～1937）也曾认为“原子核虽小，但它本身却是由强大的电力紧密地结合在一起的带正负电的物体”，他还曾推测“核结合能是一种电磁效应”；爱因斯坦也曾指出：“有些迹象表明组成原子基本结构的基本粒子是由引力结合在一起的”。因此，爱因斯坦当时认为，只要找到统一电磁场和引力场的理论，就一定能解释电子和质子的存在和性质，是很自然的。

但是，在爱因斯坦寻求统一场论的漫长过程中，从20世纪30年代开始，特别是在查德威克（J. Chadwick, 1891～1974）发现中子和泡利（W. Pauli, 1900～1958）提出中微子假说以后，物理学家逐渐认识到：将组成原子核的中子和质子结合在一起的力要比电力和引力强得多，而在原子核 $\beta$ 衰变过程中将中子衰变成质子、电子和中微子的力虽比引力要强得多但比电力要弱，也就是说，除了电力和引力，自然界还存在强核力和弱核力现在我们称其为强力和弱力，而且，描述强力和弱力的理论都是量子场论。虽然爱因斯坦曾提出光量子假说，成功地解释了光电效应，为量子力学的建立奠定了基础，但是，他始终不愿接受德布罗意（L. de Broglie, 1892～1987）关于微观粒子的“波粒两象性”，并与丹麦物理学家玻尔（N. Bohr, 1885～1962）就“量子力学的统计解释”争论不休，致使他一直不能融入20世纪物理学



玻尔与爱因斯坦在一起



爱因斯坦与泡利

研究的主流之中，始终坚持他的统一场论所追求的只是引力场与电磁场的统一，而未能与时俱进地修改、扩充自己的奋斗目标。

现在我们知道：引力场是时空度规场；电磁场是量子规范场，从物理上讲，两者是有所不同的，例如，电磁场源为电荷，可正可负，电磁力既包括吸引力又包括排斥力，而引力场源为物质，呈中性，只有引力、没有斥力。因此，不可能在四维时空中，仅仅凭借几何方法的改进，就能实现引力场与电磁场的统一，很可能要引入多维空间，例如，对于电磁场，还要引入同位旋空间；如果进一步考虑强力场和弱力场以及与之有关的基本粒子场，还要引入自旋空间以及轻子数、重子数等自由度。因此，要建立涵盖所有这些场的统一理论，就必须要用包含自旋、同位旋等在内的多维空间的规范场理论。虽然外尔理论提到了规范变换<sup>②</sup>；在卡鲁扎理论中也引入了第五维，但是

他们的理论都是经典的，不是量子的，而作为描述强力和弱力理论基础的杨-米尔斯规范场理论是杨振宁（C.N.Yang, 1922~）和米尔斯（R.L.Mills, 1927~1999）于1954年才提出的，那时，爱因斯坦已经躺在病床上，显然未能注意这个当时尚有争议后来却很成功的理论。

爱因斯坦一生的最后30年完全沉迷于寻求描述宏观（引力和电磁）现象的经典统一场论，并期望能够用它为量子力学提供合理的理论基础，他的保守与固执致使许多年轻有为的物理学家离他而去或不屑与他合作，就连早期甚为关心他的工作并及时给予批判的、被人们戏称为“上帝的鞭子”的泡利后来也不再搭理他。因此，晚年的他只能与少数几个青年数学家合作，而这些人又未必能够确切领会他的物理想法。历史上，常有物理学家对数学发展做出重要贡献，例如牛顿发现微积分、狄拉克发现 $\delta$ 函数等，

但是，很少有纯粹数学家创建重要的物理理论。

当然，创造力衰退、老年人的固执，乃至孤独，也是史学家和传记作者经常提及的原因。确实，有一段时间，爱因斯坦不得不承认：

“在年轻时，大部分的智力结果都已耗尽了。”但是，这并不妨碍他仍然执着地寻求他的统一场论。说到固执，它本来就是爱因斯坦的最强个性之一。正是这一个性，成就了他创建相对论，可能也是这一个性，导致他未能完成统一场论，真可谓“成也固执，败也固执”。不过，爱因斯坦成名之后，过多的社会活动，使他用来思考科学问题的时间越来越少，也影响他发挥创造性完成自己的心愿。

至到现在，仍有许多人，包括大学教师、中学教师、乃至业余物理爱好者，还在采用类似爱因斯坦的方法或比其更为简单的数学方法试图统一电磁力与引力。我们写这个系列讲座，就是希望他们看后，或者放弃这一努力，或者融入主流之中，改换一个思路，去寻求强力、弱力和电磁力与引力的统一。

（中国科学院高能物理研究所 100049）

① 远平行性，简单地说，就是外尔“平行移动”的一种推广，要说得更清楚一些，那就不是几句话能办到的了，应当指出的是，这个概念是由法国数学家嘉当（E.Cartan, 1869~1951）先提出来的。

② 在应当指出，在同一年，曼德尔（H.Mandel）也独立地改进了五维统一理论。

③ 在本系列讲座后面几讲中，我们将介绍什么是规范变换，以及描述强力和弱力的规范场理论。