

规范场和爱因斯坦*

李华钟[†]

(中山大学冼为坚堂高等学术研究中心 广州 510275)

摘要 文章讨论的主题是现代非亚贝尔规范场的理论思想. 文章说明了这个理论思想是承传、推广和拓展了爱因斯坦的物理思想、目标和原则. 规范场理论把爱因斯坦后半生努力奋斗而未能达到的目标提到现实, 更加迫近和部分地圆了爱因斯坦的梦想

关键词 爱因斯坦 杨振宁 相对论 规范场

Gauge field theory and Einstein

LI Hua-Zhong[†]

(Advanced Research Center, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China)

Abstract We discuss the relationship between the principle of non-Abelian gauge field theory and the physical ideas of Einstein. We demonstrate that gauge field theory is in fact a continuation of Einstein's physical thought and is also an important development of the principle of relativity. Furthermore, the successes of gauge theory have brought closer Einstein's goal of achieving the unification of interaction and geometrization in physics.

Keywords Einstein, C. N. Yang, relativity, gauge field.

1 爱因斯坦和规范场

本文讨论一个迄今未为物理学界广泛注意的物理思想承传问题:规范场和爱因斯坦(本文内有关规范场的概念、名词和定义的初步引介,请参阅文献[1]). 杨振宁在他的演讲^[2,3]多次讲到爱因斯坦对20世纪物理学的影响. 我们这里会更直接更集中聚焦到规范场. 阐明它承传、推进和发展了爱因斯坦的物理思想和信念.

爱因斯坦在物理学的重要贡献都在20世纪20年代前完成. 狭义相对论(1905), 光电效应光的量子说(1905), 布朗运动统计物理理论(1905), 广义相对论(1916), 原子受激自发辐射理论(1916), 理想气体的玻色凝聚(1925). 爱因斯坦1955年4月逝世. 现代的规范场理论(非亚贝尔规范场)在1954年10月发表, 是由杨振宁和 Mills 所提出. 爱因斯坦与杨振宁他们都在 Princeton 高等研究院工作过, 他

们的会见见诸记载的一次是1952年爱因斯坦在他的办公室约见杨振宁和李政道, 谈的是杨和李政道合作关于相变临界现象统计物理一篇论文. 另一次是1954年秋天在研究院附近散步路上碰上杨振宁替爱因斯坦和杨光诺(杨振宁的儿子, 当时是三四岁)拍了一张照片, 杨和爱氏却没有合照, 他们没有谈论物理. 杨振宁回忆唯一的一次讨论也因为爱氏的英语带很重的德语音, 也没有完全听懂. 因此, 可以设想爱因斯坦不知现代规范场. 爱因斯坦在20世纪20年代完成了他的伟大贡献, 后来的30余年致力于统一场的研究而没有什么成就. 事实上, 正是他没有注意到的现代规范场理论把他后半生努力的物理目标提到现实, 也正是现代规范场理论把爱因斯坦的物理理论原则思想大大地推进和发展. 这些原则思想就是:对称性支配物理世界, 物理世界最终几何化, 物质基本相互作用的统一性. 这些是爱因斯坦

* 2005-03-18 收到初稿, 2005-04-05 修回

[†] Email: puaarc@zsu.edu.cn

在 20 世纪上半叶穷后半生之力而无所获,却在 20 世纪下半叶在现代非亚贝尔规范场理论框架上得到逐步实现,从微粒子到宇宙尺度现出精彩纷呈,奇景迭出的宏大绘景.在现代规范场理论的基础上已经衍生了 4 个诺贝尔物理奖.所以说现代规范场理论正是承传、推进和发展了爱因斯坦的物理思想,更迫近成就了爱因斯坦未竟的理念.

2 “对称性决定相互作用”(Symmetry dictates interaction)

相对论的最重要的一个革命性的概念是“同时性”的相对性.“同时”并不是绝对的,它依赖于观察者的运动状态.四维“时空”间隔才是绝对的,不依赖于观察者(惯性参考系),这个革命性的概念,引入四维时空的对称性,即 $(ds)^2$ 对一切惯性参考系不变,物理定律对四维时空的洛伦兹变换不变.事实上“相对性原理”的陈述,在伽利略时已经清楚地陈说出来^[4];“相对论”这个专用名词,始自庞加莱(Poincare);四维时空变换的公式则是洛伦兹导出,爱因斯坦点出了时空观念的物理意义,完成了四维时空相对性原理,一切物理定律、法则、运动方程都是“相对论不变”的¹⁾,即都要满足四维时空的对称性.电磁运动定律就是满足四维时空相对论不变,但是人们要注意,反过来四维时空对称性,并不完全决定运动方程.例如标量场的 Klein-Gordon 方程,同矢量场的 Maxwell 方程一样满足相对论对称性的要求,但他们是不同的物理场.换言之,爱因斯坦的相对论要求是一个物理世界运动的必要条件,但不是充分条件.从今天的观点来看,爱因斯坦时代相对论的对称性只成功了一半.

我们现在知道,现代规范场理论把相对论的时空对称、外对称推广到物质的内对称.在定域内对称不变性的原则下,完全确定了物质相互作用,既是必要的也是充分的²⁾.因此可以说,现代规范场理论的根本原则“定域内对称决定相互作用”完成了爱因斯坦相对论不变性所未能包括的另一半.非亚贝尔规范场充分显示对称性的威力是“对称性决定相互作用”的范例,它确立了对称性原则.杨-米尔斯场的出现完成了爱因斯坦寻求的相互作用初始原理的目的.

3 定域内对称和因果性

在时空连续域(continuum)的真空状态,即系统

基态,时空两点(或两个局部区)之间有没有关联?如果是“裸真空”,那我们一般假定它们之间没有关联.如果是“物理真空”,则真空中存在“虚”过程,量子起伏便会引起时空两处的关联,两处如不存在关联,则在此二处的事件不存在因果关系.两事件的“同时”,也就是两事件之间没有因果关系,在时空两点发生的事件互相独立.如果两点事件存在因果关系,则从 A 点到 B 点的联系通过信息传播,根据相对论这一传播速度有限,不可以大于光速 c .这些观念成为相对论时空观念的基础观念,爱因斯坦及其后的物理都在四维时空对称的架构内.

现代规范场把对称的观念推广到内对称空间,如同位旋空间^[1],我们现先在经典的理论范畴内,真空中时空两点间不存在因果关系时,在 B 点定义的同位旋态 $|n\rangle$ 和 $|p\rangle$ 和 A 点作出的定义无关.这些同位旋态几何地取为同位旋空间中的矢量不同取向,这就意味着在 A 和 B 点两处同位旋空间的标架取向各自独立,这就是说,在不同时空点上,标架取向各自独立自由,即定域内对称空间转动独立.如果有相互作用存在,AB 两处间有联系, A 处信息传到 B,这样存在 AB 间的因果关系,相对论要求有限传递速度,AB 两处的相对影响不可以是瞬时的,超距的.这传递信息需要有媒介联络 AB 之间,这个使者就是规范场,又称为补偿场(compensating field).这个场的出现和存在,使 A 处和 B 处同位旋的改变相互抵消,保持了 A 处和 B 处各自同位旋守恒,即独立的定域同位旋空间不变性.那就是说,同位旋定域不变性召唤了规范场登场.规范场的出现保证了相互作用的定域不变性.

因此可以说:规范场理论把相对论的时空对称拓展到内对称空间的对称性,相对论因果关系引起了规范场的必要存在.定域内对称不变性和相对论因果关系规定相互作用场需要包含规范场.这就使规范场理论成为物质相互作用的普遍基石.

4 物理学基本原理的几何化

爱因斯坦在创立了广义相对论时,就认定了对于狭义相对论的四维时空线性变换的不变性必需推广到非线性变换,即从平直四维时空推广到弯曲的黎曼空间,物理的定律对于四维连续域中的坐标变

1)或者仔细一点:“不变或协变”

2)当然,这里还隐含了一个物理上的简单性(simplicity)原则,例如同不含高次微商或全微分等.

换不变的要求,应该推广到非线性变换,物理定律对这种非线性变换也是不变的.在广义相对论中,引力就是这种非线性的效应,引力是空间几何性质的体现,引力存在的空间是非线性的有曲率的黎曼空间.在广义相对论之后,爱因斯坦执着地要把电磁和引力统一到单一个度规空间,成为一个统一的空间几何结构,可是穷后半生三十余的努力并不成功,未能获得有意义的进展.

在1954年杨-米尔斯的非亚贝尔规范理论提出后两年即1956年,日本人R. Utiyama就试图把引力纳入非亚贝尔规范场理论,以后人们渐渐相信引力场是可以纳入规范场的理论框架之中.1975年杨振宁、吴大峻发现非亚贝尔规范场的数学基础是一种称为纤维丛的数学结构.规范场是建立在以李群为基础的纤维丛上的“联络”(connection),爱因斯坦的时代还未出现纤维的这种数学和几何结构,它是在20世纪40年后由陈省身发明的.至此可见,当时空相对性原理推广到内对称空间,由此引入的规范场是建立在纤维丛这种几何结构上,规范场虽然仍然在四维平直时空存在,但是它不是时空线性变换所要求,而是在内对称空间非线性所要求,这种非线性就是纤维丛几何结构所提供的.从相对论的对称性线性空间走到爱因斯坦寻求的非线性.这样现代规范场理论使物理学更加逼近爱因斯坦把物理学几何化的梦想的实现,当然尚远未完成爱氏的目标,但实在是跨越了一大步.

5 物质相互作用的统一

爱因斯坦执着研究“统一场论”,他当时已知的是电磁场和引力场.这两者的统一成为爱因斯坦的主要目标.现在我们知道物质的基本相互作用是四种,除了引力和电磁力之外还有弱作用和强作用.20世纪60年代末,在非亚贝尔规范场的理论框架里已经成功地实现了弱力和电磁力的统一,20世纪70年代,人们相信强相互作用也可以纳入弱电作用的框架之中,成为弱电磁和强作用的统一.建立了被许多实验支持的标准模型,虽然尚未完满达到最后完成,毕竟这是已为实验证明或已接近完成的统一理论.它的基础就是非亚贝尔规范场理论,纤维丛这种几何结构的非线性空间就是统一的相互作用活动的舞台.近20年,人们正在热烈议论怎样把引力场也统

一进来.现在已非当年爱因斯坦作的孤军奋战,也不是海森伯当年企图一举完成统一场论,可是却处处碰壁.现时寻求统一的理论成为理论物理和实验物理探索的主流之一.正是非亚贝尔规范场驱动了这一切,部分地完成爱因斯坦的梦.近二十年来的弦理论也正在这个方向上探索.

从以上论述的4个方面事例可以看出:规范场理论从建立的原则开始到后来达到发现的几何结构,反映出爱因斯坦在狭义相对论到广义相对论发展过程的思想在内对称空间的推广.这一推广显示了20世纪上半叶爱因斯坦的物理思想承传到20世纪下半叶的物理基础理论深化成为现实的进展.现今可以设想上述4个方面的思想将会继续影响21世纪的物理学,这些影响还会通过非亚贝尔规范场理论在物理学的渗透,将会在微观粒子物理学、宇宙学、宏观凝聚态物理等方面发挥威力!

当杨振宁父子在1954年秋天路上碰到爱因斯坦时,杨-米尔斯论文已经完成,但杨没有提起这篇论文.50年后,杨振宁在德国纪念爱因斯坦诞生125周年大会演讲^[2],回忆同爱因斯坦碰面的情景时说:“今天我很自然会问,如果那时我和他讨论了我们的这篇文章的主要思想,他会有什么反应?他曾对相互作用的初始原理着迷多年,也许对非亚贝尔规范场理论会有兴趣”^[2].现在当我们追踪规范场理论成功贡献的思想轨迹,我们看到20世纪上半叶和下半叶两个历史阶段理论物理思想竟是先后一以贯之,两个时代的两位伟大的物理学家主流思想承接起来构成20世纪物理理论强音主旋律之一.

参 考 文 献

- [1] 李华钟. 物理, 2001, 30(11):668; 2002, 31(4):249; 2003, 32(3):192; 2004, 33(2):137; 2004, 22(12):861; [Li H Z. Wulx Physics) 2001, 30(11):668, 2002, 31(4):249, 2003, 32(3):192, 2004, 33(2):137, 2004, 22(12):861 (in Chinese)]李华钟. 物理学进展, 2004, 24(4):458 [Li H Z. Progress in Physics, 2004, 24(4):458 (in Chinese)]
- [2] 杨振宁. 科学中国, 2004年改版号(1月号), 80 [Yang C N. Science and Technology in China, 2004(1):80 (in Chinese)]
- [3] 杨振宁. 杨振宁演讲集. 宁平治等主编. 天津:南开大学出版社, 1989. 264, 355, 366, 384 [Yang C N. collection of public lectures by Yang C N. (eds. P. G. Ning et al.)]
- [4] Zichichi A. Physics World, March 2000, 17