

专题导读

1947年的谢尔特岛(Shelter Island)会议催生了量子场论。在这个会议上,兰姆(Willis Lamb)报告了著名的兰姆位移——实验发现氢原子 $2S_{1/2}$ 与 $2P_{1/2}$ 轨道之间存在 4.372×10^{-6} eV的能量差,而不是狄拉克理论预言的严格简并态;拉比(Isidor Rabi)则报告了电子磁矩的测量结果,发现朗德 g 因子的值为2.0011597,而非狄拉克理论预言的精确为2。飓风起于青萍之末,这两个看似微小的差别却揭示了一个重要的事实:以狄拉克方程为代表的单粒子相对论量子力学仅是近似理论,无法准确描述电子与光子的相互作用。很快,贝特、费曼、施温格、戴森、朝永振一郎等理论物理学家基于量子电动力学框架,成功计算出了与实验吻合的理论值。这一系列突破震撼了当时的物理学界,也标志着量子场论的真正开端。

从谢尔特岛会议至今已经过去了将近八十年。量子场论的发展历程可谓波澜壮阔,但辉煌的成就与深刻的困惑始终如影随形。1970年代,在量子场论框架下建立的粒子物理标准模型经受住了无数实验验证,堪称现代物理学最成功的理论之一。然而这绝不意味着我们对量子场论的理解已然完备。当前量子场论的主要计算工具是微扰方法,该方法虽在弱耦合条件下能够给出精确结果,但存在很大的局限性。首先,其适用范围仅限于弱耦合区域,对有限耦合及强耦合情形束手无策,而许多关键的物理现象如夸克禁闭等恰恰发生在强耦合区;其次,在微扰方法中,物理量是耦合常数的一个级数,但很多时候此类级数是发散的。在实际应用中,固然可以暂时忽略这个问题,只取前几项作为近似,但一个不收敛的级数在物理上应该如何诠释,依然是一个无法回避的基本问题;最后,场论中许多重要的非微扰效应,如瞬子解(instanton)等,无法简单通过微扰理论进行研究。

相较于弱耦合区域,我们对非微扰量子场论的理解仍相当有限。对于一般相互作用量子场论,除了用格点方法进行数值模拟外,尚缺乏普适的非微扰解析方法。因此,研究场论的非微扰方法是一个重要而困难的问题。在过去二十多年里,量子场论的非微扰方法研究取得了一系列新的突破。这些理论突破主要源自于对某些具有特殊对称性的场论的深入研究,这些对称性包括共形对称性(conformal symmetry)、超对称(supersymmetry)以及可积性(integrability)等。根据对称性原理,理论的对对称性越高,其本质结构往往越简单。通过巧妙地利用理论的对对称性,理论物理学家发展出与微扰展开截然不同的非微扰解析方法来求解这些理论。这些方法包括自举方法(bootstrap approach)、超对称局域化方法(supersymmetric localization)以及可积性方法(integrability approach)等。此外,一种利用复现理论从渐近级数中提取非微扰效应的方法在量子场论的研究中也发挥着日益重要的作用。通过这些方法,人们得到了许多重要物理量的解析表达式,从而获得这些物理量从弱耦合到强耦合的完整物理图像。同时,这些理论方法本身具有深刻的物理思想和精妙的数学结构,对基础数学研究也产生了深远影响。

本专题旨在向读者介绍量子场论非微扰方法的新进展,包括4篇文章,内容分别为:(1)量子场论的可积性方法;(2)自举思想在共形场论中的应用;(3)超对称局域化方法;(4)量子物理中的复现理论。需要指出的是,本专刊介绍的四类方法仅是量子场论非微扰方法的一部分,且偏重于解析手段。限于篇幅,其他非微扰方法,尤其是数值方法,例如格点场论方法、哈密顿量截断方法、数值自举方法等无法在此一一介绍。我们希望通过这些文章给读者传达这样一种印象:量子场论并不是一座已经竣工的完美建筑物,而更像是一片生机盎然的原始森林,尽管人们已经探索了其中的一些区域,但更多未知的奥秘仍隐藏在迷雾深处,有待研究者们继续开拓。

(东南大学 江云峰 供稿)

DOI:10.7693/wl20250601 CSTR:32040.14.wl20250601