

非阿贝尔规范场的重整化理论*

——1999 年诺贝尔物理学奖介绍

张肇西

(中国科学院理论物理研究所 北京 100080)

摘要 因 30 年前解决了非阿贝尔规范场重整化的理论问题,特霍夫特和威特曼两位教授获得了 1999 年诺贝尔物理学奖.解决非阿贝尔规范场重整化的理论问题需要独特的技巧,而且非常有用.他们关于非阿贝尔规范场重整化所取得的成就,现已被广泛用于粒子物理的理论精确计算中,并且通过实验和计算结果精确地比较,已证实了它的正确性.

关键词 非阿贝尔规范场,重整化理论,诺贝尔物理学奖

RENORMALIZATION THEORY FOR NON- ABELIAN GAUGE FIELD THEORIES —— On the 1999 Nobel Prize for Physics

CHANG Chao Hsi

(Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract The 1999 Nobel Prize for physics was won by G. t' Hooft and M. J. G. Veltman for solving the renormalization of non - Abelian gauge fields about 30 years ago. This renormalization theory is quite tricky and very useful. It has been widely applied to various precise calculations in particle physics and proven to be correct by accurate experimental data.

Key words non - Abelian gauge field theories, renormalization theory, Nobel Prize for physics

诺贝尔奖金评选委员会在 1999 年 10 月 12 日的新闻发布会上,正式宣布了 1999 年度诺贝尔物理学奖授予特霍夫特(Gerardus t' Hooft)教授和威特曼(Martinus J. G. Veltman)教授两人,他们获奖的原因是鉴于他们在非阿贝尔规范场的重整化方面的贡献,把“粒子物理理论置于更坚实的数学基础上”,“清晰地揭示了物理学中的电弱相互作用的量子结构”。

诺贝尔奖金评选委员会曾在 1965 年把物理学奖授予费曼(Richard P. Feynman)、施温格(Julian S. Schwinger)和朝永振一郎(Sinitiro Tomonaga)三位教授.当时是基于他们对量子电动力学(QED)的重整化理论的贡献,他们把量子电动力学的计算“程序化”,使“纯粹量子电动力学的观察量”的计算能达到物理学的最高精度;使人们能逐级地计算这些观察量的量子“修正”效应.因此,事实上他们揭示

了电磁相互作用的量子结构.

量子电动力学只是电磁作用的理论.电磁相互作用的阿贝尔规范相互作用本性早已由经典电动力学解决,即电磁作用的量子(光子)自己之间没有“自作用”,是“阿贝尔”的.相互作用的阿贝尔性,使得费曼、施温格和朝永所解决的量子电动力学的重整化理论与非阿贝尔的情形比较,相对地“简单”一些.

由杨振宁和米尔斯两位教授于 50 年代建立非阿贝尔规范场理论以来,人们逐步认识到非阿贝尔规范场理论在量子化和重整化上的特有困难,同时也越来越认识到它的重要性.对非阿贝尔规范场理论的重要性的认识直至今日还在加深着.

非阿贝尔规范场的量子化的问题迟至 60 年代后期才得到解决.用路径积分的方法可以把任意的

* 1999 - 11 - 01 收到初稿,1999 - 11 - 18 修回

非阿贝尔规范场在确定“规范”下,做到正确地量子化.与此同时,1968至1969年,粒子物理取得了重要进展:电磁作用与弱作用的“统一”,即由格拉肖(Sheldon Lee Glashow)教授、萨拉姆(Abdus Salam)教授和温伯格(Steven Weinberg)教授建立的电弱统一标准模型(获1979年度诺贝尔物理学奖),认为电弱作用最初是 $SU_L(2) \times U(1)$ 的非阿贝尔规范场作用,之后通过希格斯(Higgs)机制自发破缺,达到我们在通常情况(“低能”情况)下观察到的、破缺了的电磁作用和弱作用及由它们引起的各种现象.在建立电弱统一模型理论时,选择非阿贝尔规范场描述电弱相互作用,而且采取自发破缺的方法让所涉及的弱作用规范场量子“获得”质量,其中一个重要考虑是有阿贝尔规范场即电磁场作用(QED)的重整化理论的经验,猜想这样电弱非阿贝尔规范场作用理论能够做到有QED那样“美好”的可重整化性和“量子结构”.

事实上,首先真正完成了非阿贝尔规范场理论的重整化证明,把上述猜想得以证实的,正是特霍夫特和威特曼两人在60年代末70年代初的工作.他们成功地证明非阿贝尔规范场的重整化,其中的关键是做到整个重整化过程中保持“规范不变性”.他们提倡用时间、空间维数的“解析延拓”方法完成重整化中需要的“正规化手续”,从而克服了重整化中难于保持规范不变性的这个困难(其他正规化方法,都会破坏理论的“非阿贝尔规范不变性”,而且这一规范不变性一旦破坏之后,就很难恢复).他们两人的非阿贝尔规范场重整化证明,同时也是展示非阿贝尔规范场重整化的具体方法和步骤.电弱统一标准模型是非阿贝尔规范场的模型理论.它是数学上“允许”的非阿贝尔规范场的一个重要的物理应用的例子.他们的成功,使得电弱统一标准模型及其他非阿贝尔规范场理论,也能如QED那样进行逐级的量子“修正”效应的计算,使理论计算能达到极高的精度.

在特霍夫特和威特曼的工作之后的近30年的今天,电弱统一标准模型已经得到了实验的精确检验.特别是自1989年以来,日内瓦的欧洲核子中心(CERN)的电子-正电子对撞机(LEP)上的实验,

达到极高的精度(小于1%).若采用LEP等实验精确测量数据,通过特霍夫特和威特曼的重整化办法,进行量子“修正”的计算,能十分精确地预言出顶(top)夸克的质量.不久前(1995年)在美国的费米实验室的质子-反质子对撞机(Tevatron)上,确实发现了一种夸克,其质量恰好在预言的误差范围内,电荷也正确,因此,这一新发现的夸克已经被人们广泛接受它是“期待”已久的顶夸克.不仅如此,通过量子“修正”的计算亦能估计出电弱统一标准模型尚未发现的希格斯粒子的质量.世界上的各大实验室也都正在参考这一预言的数值,寻找这一尚未发现的粒子.这是两个非常典型的电弱统一模型和重整化成功的实例.假如没有特霍夫特和威特曼的重整化的成功,人们无法正确地去“重整化”,也无法进行量子“修正”计算,在这种情况下,若要做出上述的预言是不可想象的.特霍夫特和威特曼两位教授完成的非阿贝尔规范场的重整化证明已经写入教科书,已经成为量子场论教科书中的重要内容.

诺贝尔奖金评选委员会在1999年10月12日新闻发布会的背景介绍中,还强调了威特曼发展计算机符号运算程序“Schoonship”的贡献.利用这符号运算程序,可用计算机化简代数表达式.在电弱理论的重整化计算中,不可避免地需要进行大量的简化代数表达式的工作.假如没有计算机和相应的软件程序,许多量子“修正”相应的计算,若不是不可能,便是需要成倍或几十倍、几百倍长的时间才能完成.利用这符号运算程序,在计算机上化简代数表达式是很有实际意义的.尽管现在已经有许多软件程序有可以与“Schoonship”类似的或更强的功能,但是,威特曼在这方面的的工作毕竟是先驱性的.并且,在这一发展程序过程中,“Schoonship”保持了相当长时间的领先优势.

总之,特霍夫特和威特曼在60年代末、70年代初的关于非阿贝尔规范场重整化的工作,确实把粒子物理的标准模型理论,即电弱统一标准模型理论及另一重要的非阿贝尔规范场理论——量子色动力学(QCD),置于更坚实的数学基础上,把实验的检验推进到高度精确的程度.因此,他们的这一贡献获得诺贝尔奖完全是受之无愧的!