

塞伯格-威滕理论

——4 维空间量子场论研究的新飞跃

徐 湛

(清华大学物理系)

从 1994 年初开始,由塞伯格(N. Seiberg)、威滕(E. Witten)和他们的合作者所完成的一系列工作震动了理论物理界和数学界. 从物理的角度说,这些工作涉及如何精确地研究 4 维空间量子场论的非微扰行为(例如禁闭、手征对称性破缺、真空凝聚等),也就是如何解析地处理强耦合的相互作用. 从数学的角度说,它们涉及如何简单地算出光滑 4 维流形的拓扑特征. 以上这些问题在物理学和数学中都是极为重要的,但是 20 多年来都一直困扰着物理学家和数学家,现在,人们终于看到了解决这些问题的曙光.

塞伯格-威滕理论的主要研究对象是 4 维空间中的超对称非阿贝尔规范场论(包括 $N=1, 2$ 和 4),它的主要内容包括以下几个方面.

塞伯格首先注意到超对称理论对其中的耦合常数是全纯的,这就强烈地限制了理论随耦合常数的变化. 基于这种性质,人们一旦研究了理论的弱耦合区域(在这里微扰论是可以应用的),那么有许多结果就可以推广到强耦合情形. 他还利用这个性质研究了 $N=1$ 的规范模型的真空态(基态),证明了其真空是简并但不等价的,即不同的真空将产生不同的激发谱. 随后,塞伯格和威滕一起研究了 $N=2$ 的情形,特别是仔细研究了 $SU(2)$ 规范模型. 以后又有人研究了更广泛的模型.

所有这些模型有一个共同的特征,就是能够自然地产生磁单极,也就是基本场的集体激发(孤子). 这种磁单极不同于托霍夫特和波利科夫在 70 年代提出的那种质量很重的磁单极. 在这里,磁单极的质量随真空态而改变,在

某些真空态下会变成无质量的,因而可以产生磁单极的真空凝聚. 这种情形非常象超导体中带电的库珀对的凝聚. 在那里,这种凝聚使得超导体完全排除磁场(梅思纳效应),类似地,在这里,带磁的粒子的凝聚使得真空完全排除电场. 如果这里所说的“电”和“磁”就是 QCD 中的“色电”和“色磁”,那么这种效应正是“夸克禁闭”. 他们也通过磁单极凝聚发现了手征对称性的破缺. 关于磁单极凝聚导致夸克禁闭的思想在 70 年代也由托霍夫特和其他人提出过,但他们无法进行实际的计算. 现在塞伯格-威滕理论把它具体地实现了,从而证明了这种想法是正确的. 这无疑是对禁闭现象的更深的理解.

由于有了磁单极,理论也就有了一种非常重要的“对偶性”——电和磁的对偶性. 在一定的意义上说,这种对偶性是塞伯格-威滕理论的核心,而且它还不只涉及电与磁. 比如,对于 $N=2$ 的 $SU(2)$ 超对称规范模型这个具体的情况,他们证明了: 这个模型对于电荷 \leftrightarrow 磁荷,粒子 \leftrightarrow 单极子(或者说基本场 \leftrightarrow 集体激发)同时 $g\leftrightarrow 1/g$ 的互相交换是对偶的,也就是说,从一个方面的计算结果可以推断出另一个方面的计算结果. 这样一来,物理学家所面临的一个艰巨任务——处理“电”的粒子在强耦合下(而且是非阿贝尔的)相互作用,可以化为处理它的对偶情形:“磁”的粒子在弱耦合下(而且是阿贝尔的)相互作用,而后者是微扰论可以应用的,是容易得多的事情. 类似的对偶性在这个理论研究过的许多其他模型中也存在,而且事实上是理论的主要应用所在. 无疑地,这种“电-磁、粒子-孤子、强耦合-弱耦合”的对偶性质如果存在于真实的物理世界,那么它将成为

中国物理学会高能物理分会第四届 第二次在京常务理事会会议纪要

中国物理学会高能物理分会第四届第二次在京常务理事会于1995年12月8日在物理研究所举行。戴元本理事长、郑志鹏副理事长、霍安祥副理事长、黄涛秘书长、赵志咏秘书长和邝宇平、汤拒非、李满园、汪雪瑛、张肇西常务理事出席了这次会议，分会副秘书长沈建平、秘书王玉伯、陈鸣远也出席了会议。

会议由戴元本先生主持。由郑志鹏先生通报了95'国际轻子-光子会议和中美高能物理年会会谈情况，并介绍了国际高能物理学界对中国正在进行的“ τ -粲工厂可行性研究”大力支持的情况；由黄涛先生汇报学会各单位申请推荐参加1996年华沙第28届国际高能物理人

员名单的情况，会议对此作了讨论，并请他尽早与国际高能物理会议组织委员会联系、推荐。

在会上，郑志鹏先生提出：由于他已担任IUPAP CII委员会国际成员中国代表将满六年，按照该组织规定需要换届推选。会议经过一再讨论，同意郑志鹏先生意见，并一致推选戴元本先生为下届IUPAP CII委员会国际成员中国代表的候选人。

会议最后由沈建平先生作了：“中国物理学会高能物理分会1995年工作总结”，并提出了1996年学术活动的安排计划。会议对此作了详细讨论并提出了修改意见。

(卞吉 秦宝 编)

物理学的主要基本特征。

在塞伯格-威滕理论的数学意义方面，首先要谈一谈计算4维光滑流形拓扑特征的唐纳森理论。人们早已知道，与任何其他维数的流形不同，4维流形是解析结构最为丰富(理论上说有无穷多种)的流形。所以，如何完全地计算出一个给定4维流形的拓扑特征，就成为人们关注的问题。1982年，S. 唐纳森提出了一个办法：用自对偶的非阿贝尔杨-米尔斯方程来研究4维流形的拓扑不变量(后来即被称为唐纳森不变量)，开辟了这方面的研究的新途径，并逐渐成为4维流形拓扑学的基础。但可惜的是，唐纳森理论的计算量极为庞大。塞伯格-威滕理论提出以后，唐纳森不变量的计算就化为数出“单极子方程”(即单极子与光子相互作用的方程)经典解的个数的问题，从而把这个计算成千倍地简化了。利用这种方法，人们已经轻易地证明了一些以前只是猜测的定理，而且新

的定理还在不断地涌现。

总而言之，把塞伯格-威滕理论称为4维空间量子场论研究的一次新飞跃是不过分的，它的意义还将在今后不断地被揭示出来。但是说到它与实在物理世界的联系，比如能否回答在粒子的“标准模型”中人们关心的夸克禁闭、电弱对称性破缺、质量产生等问题，还存在着一定的障碍，这主要是由于它是一种超对称的理论，而现在的标准模型是非超对称的，而且实验到目前为止也还没有发现自然界中存在着超对称性。这个缝隙如何填补？谁向谁靠拢？仍然众说纷纭。这个问题只有靠理论的更深入的研究和实验的证据来回答了。

