

对称性自发破缺和希格斯机制

张会 鲍淑清

(北京应用物理与计算数学研究所 北京 100088)



众所周知,本世纪最辉煌的科学成就之一是弱电统一理论,然而历史上这一理论的重大突破有赖于对对称性自发破缺的研究,特别是希格斯机制的建立.

(一)

对称性自发破缺早在固体物理中就被发现,其中最明显的例子是铁磁体现象.1928年,德国的海森堡建立了铁磁体理论.在铁磁材料中,各个点阵上的原子自旋间的相互作用是短程的(主要取决于最相邻的原子),并且具有转动不变性.然而人们发现,当温度降到一定数值(T_C)时,处于系统基态的所有原子的自旋将有序地排列起来,这样整个系统就具有了磁性,并具有一定的方向(NS极),而且不再具有旋转不变性.但此时相互作用自旋系统的拉格朗日密度仍具有旋转不变性,因此铁磁体的物理态(基态)破坏了描述铁磁体的拉格朗日密度的对称性.这就是铁磁体现象中展示的对称性自发破缺.

超导体中的迈斯纳效应,同样存在着对称性自发破缺的现象.人们正是在超导研究的启发下,将对称性自发破缺从固体物理中移植到粒子物理中.然而这种移植并不是一帆风顺的.

芝加哥大学的南部(Y. Nambu)是最早进行这种尝试的人之一.南部于1921年生于日本东京,他于1942年和1952年在日本东京大学分别获物理学士和博士学位,然后移居美国.早在日本期间,他就从事量子场论及其对固体物理和粒子物理中多体现象的应用的研究.他在美国的早期工作主要是粒子物理方面的,但他仍保持着对固体物理的兴趣,特别是对超导现象的兴趣.50年代后期,正值超导研究的激动人心的时期,特别是建立了BCS理论,南部和他在芝加哥的同事也加入了这一方面的

研究.南部在1960年就洞察到,量子场论中的真空态与相互作用多体系统的基态是相类似的,并用超导的数学方法来处理粒子的自能问题.由于他在固体和高能物理两个领域均具有较高的造诣,这促使他与当时在芝加哥大学做博士后的意大利访问学者乔纳-拉西诺(G. Jona-Lusina)一起尝试将他的如上直觉从固体物理移植到粒子物理.南部后来在回忆他是如何注意对称破缺时说:“这是较偶然的,恰好那天依利诺斯大学的毕业研究生施里弗(Schrieffer)应邀来芝加哥作关于还未发表的BCS理论的报告.我一直对超导感兴趣,……在听过报告后我感到很不安,因为作者在他们的理论中忽视了规范不变性,而他们的这个理论是试图解释迈斯纳效应的”.

最后南部终于理解了BCS理论中的对称破缺.他一方面根据波戈留波夫的准粒子方程和狄拉克方程的相似,另一方面根据诱导哥德斯通流和 π 介子对核子轴矢流的贡献的相似,将手征对称性破缺、有质量的核子和无质量的 π 介子逻辑地连结起来.这就导致了他与拉西诺于1961年在《Physics Review》上发表了“基于与超导相类似的基本粒子的动力学模型”(题目完全相同)的两篇论文.值得注意的是,该工作不仅激发粒子物理学家将固体物理作为启发粒子物理的重要来源,而且更重要的是,一个新的概念被引入到量子场论中,即对称性自发破缺,也就是一个场理论的拉氏量具有的某种对称性却被体系的基态所破坏.与此同时,波戈留波夫学派的瓦克斯(V. G. Vaks)和拉肯(A. I. Larkin)也建立了相似的模型.

南部深深注意到对称性破缺可以作为一个普遍现象,并试图在凝聚态物理中收集实例,以完成一篇更普遍的论文.但哥德斯通的论文先

出现了。

(二)

60年代早期,对称性自发破缺这一课题引起了粒子物理学家的极大兴趣。英国剑桥大学的哥德斯通是研究场论的,也同样对BCS理论深感兴趣。BCS理论刚提出不久,由于人们认为它不满足规范不变性而受到一些人的攻击。到1960年,人们发现超导性是电磁理论中规范对称性自发破缺的一个例子。这促使人们开始考虑对称性破缺是否也适合其他研究领域。哥德斯通便是其中之一。他注意到在基本粒子中,最明显的非对称性就是粒子具有不同的质量。他对电子和 μ 子(二者除质量不同外,其余性质均相同)很感兴趣,并希望用对称破缺来说明二者的不同。事实上1960年夏天他就开始构造这样的模型。在他的模型中,为了实现对称性破缺,他假设在整个空间中存在一种特殊的场,它破坏对称性成立的条件。而且外部空间的真空并不空,其中充满了这种对称性破缺的场。但是他发现这种破缺对称性的场的存在将导致无质量、零自旋粒子(现称Goldstone粒子)的存在。这是很不理想的,因为这种新假设的粒子是短程的、强作用的,而它的零质量又将导致长程作用。

这年的夏天,哥德斯通在欧洲核子研究中心(CERN),与在相邻办公室工作的格拉肖(S. L. Glashow)进一步讨论了他的理论,但并没有解决他的问题,也未看出此理论有什么用处(包括对格拉肖的弱电统一理论)。当哥德斯通告诉格拉肖,他对于这个新假设的粒子的意义感到非常迷惑的时候,格拉肖瞪大眼睛说道,“噢,加把劲!无论如何也要发表它”。这样,哥德斯通勉强地发表了他的论文。1961年夏,哥德斯通在美国威斯康星州麦迪逊城的一次会议上报告了他的理论。这个理论深深吸引了参加会议的萨拉姆(A. Salam)和温伯格(S. Weinberg),并使他们非常激动和吃惊。此时,萨拉姆刚刚证明了格拉肖的第一个弱电统一理论。由于W质量是手加的而不可重整,他已经在思考对称性自发破缺可能解决这个问题。凭直觉他认

为,真实的非对称的世界可能由一个完全对称的理论来描述,因此他希望构造一个像量子电动力学的规范不变理论以描述非对称的真实世界,且该世界中的矢量玻色子具有质量。不过他想到的是电子,而不是W或Z,但他已预感他已经找到了线索。同样,温伯格也深深地被哥德斯通定理所吸引,他刚刚看过南部的文章,但未真正理解。温伯格后来回忆道:“我认为,在麦迪逊城与哥德斯通在一起时,我第一次开始认真对待这类事件(指对称破缺)。”“我深深迷恋于对称破缺,很明显,过去寻找对称性的传统已经太过时了,它好像已经走入绝境”。哥德斯通关于对称性的思考方式深深地打动了,温伯格认为:“很显然,自然界不会再留下许多对称性等待我们去发现。关于对称破缺,最奇妙的事情是,可能仍然存在许多深层次的隐藏对称性。并不是对称破缺本身令我激动,强烈吸引我的是,仍有对称性等待着我们去发现”。

可见萨拉姆和温伯格均已开始考虑对称性破缺,并对这个问题深感兴趣。但是哥德斯通的结论很令他们失望,因为对称性破缺导致了不存在的粒子,这样萨拉姆不能用它去拯救他的弱电统一理论,而温伯格也无法去发现更多的对称性。因此他们都不相信哥德斯通的结论。经过一些讨论,他们认为该理论一定有错误,一定不存在哥德斯通粒子。1961年秋,温伯格来到英国的帝国学院与萨拉姆一起继续寻找哥德斯通定理的缺陷。有趣的是,他们不但没有找到任何缺陷,反而至少用三种不同的方式证明了哥德斯通本人未证明的哥德斯通定理的正确性,即对称性自发破缺一定伴随出现零质量、零自旋的粒子。他们将此证明写成了论文,不过又怀疑他们所讨论的也许不是哥德斯通所谈论的。于是他们打电报给当时在麻省理工学院工作的哥德斯通,问他是否可以合作,哥德斯通表示同意。就这样,1962年他们三人合作发表了证明哥德斯通定理的论文“破缺对称性”。

(三)

60年代初期,如何避免Goldstone粒子乃是场论研究的一个问题,美国、英国和比利时的

一些理论物理学家都进行了尝试。第一个发现漏洞的是美国哈佛大学的许温格(J. Schwinger)。他在1962年的论文“规范不变性和质量”中指出,定域对称性破缺和整体对称性破缺可能是两个不同的事情。但是许温格的论文很少有人去读,甚至更少有人能理解它。在这极少数人之中,当时在贝尔实验室的凝聚态物理学家安德逊(P. Anderson)却试图去理解它。安德逊曾在哈佛大学听过许温格的课,他曾于1958年就讨论过超导体中的对称性自发破缺问题。在1963年4月1日的论文(“等离子体激元、规范不变性和质量”)中,安德逊遵循许温格的论文,并采纳了其主线,对哥德斯通定理的例外进行了讨论。他指出,超导是对称性破缺的例子,然而并不出现零质量粒子,因此哥德斯通定理有例外。他认为如果电磁理论能够摆脱哥德斯通定理,那么其他定域规范理论也可以如此;并且在规范不变理论中,杨-米尔斯玻色子与Goldstone玻色子相互缠结起来,最终产生质量。因此,安德逊得出结论,哥德斯通质量困难不是严重的,可以通过杨-米尔斯质量问题来消除。现在看来,安德逊的如上建议是多么有先见!这正是当今所说的希格斯机制!更令人吃惊的是,虽然他的论文发表在国际著名的《Physics Review》上,却未引起人们的普遍注意,原因是他是一位凝聚态物理学家。

在少数读过安德逊论文的人中,哈佛大学的吉尔伯特(W. Gilbert),宾夕法尼亚大学的克莱因(A. Klein)和本杰明·李(Benjamin Lee)分别持有不同的意见。克莱因和李支持安德逊的观点,而吉尔伯特则认为超导和相对论量子场论是完全不同的领域。这种争论促使比利时的布劳特(R. Brout)和恩格拉特(F. Englert)以及英格兰的希格斯(P. Higgs)分别进行了大量独立的研究(另外,哥德斯通早些时候也做过该方面的研究)。他们均发现,从某一角度说,所有关于对称性破缺的讨论均是正确的;在所有相对论性的理论中,只要对称性破缺就会产生Goldstone粒子,只有基于定域规范对称性的杨-米尔斯理论例

外,最受人们接受的理论是希格斯1964年发表的论文“破缺对称性,零质量粒子和规范场”(《Physics Letter》)和“破缺对称性与规范玻色子质量”(《Physics Review Letter》)以及1966年的论文“没有无质量玻色子的自发对称性破缺”(《Physics Review》)。希格斯于1947年在英国的帝国学院开始了他作为物理学家的训练,并于1954年在该学院获理论物理博士。他的博士论文是关于量子力学对分子物理的应用。但是离开帝国学院后,遵循他早期的爱好,他转而从事理论高能物理。1960年他成为爱丁堡大学的讲师。他在高能物理方面的早期工作涉及许多专题,其中包括量子场论、粒子对称和对引力的研究。南部关于超导和对称性自发破缺的工作,以及后来关于Goldstone定理的争论,使他取得了决定性的创造,即希格斯机制。希格斯在他的论文中指出,当规范场和基本标量场相互作用时,若有对称自发破缺存在,那么Goldstone玻色子和规范粒子以特殊的机制结合起来,使规范粒子成为质量不为零的粒子,而相应的Goldstone玻色子自由度将变成矢量玻色子的纵向自由度,这就消除了零质量Goldstone玻色子。这就是现在所说的希格斯机制。值得指出的是,希格斯模型不过是将哥德斯通模型与电磁相互作用结合起来,即把整体的U(1)哥德斯通模型推广到定域U(1)规范模型,这样便出现了奇迹。可见,定域对称性显示了它的重大作用。1967年,英国帝国学院的凯伯(T. Kibble)将此模型推广到了非阿贝尔规范理论中。这样希格斯机制解决了杨-米尔斯理论中存在的零质量问题,这就为现代规范理论的复兴准备了条件。

然而历史上,希格斯机制的出现并未引起人们的重视。布劳特和恩格拉特的论文,由于太专于凝聚态物理,几乎没有人去注意。布劳特曾打电话给萨拉姆,试图解释Goldstone定理的例外情况,而且他还在他的固体物理教科书《相变》中作了讨论。他知道,有质量的矢量玻色子将破坏弱作用的重整性,他与恩格拉特一起开始考虑是否对称破缺是问题的答案。他

们很确信这点,但却无法证明.不过他们还是在1966年发表了这一建议.另外,有趣的是,希格斯在发表那些现在看来十分重要的论文时,甚至遇到了麻烦.他的第一篇文章证明了如何避免 Goldstone 粒子,发表在《Physics Letter》上.第二篇论文,给出了一个非常简单的例子,但竟被《Physics Letter》杂志退回,理由是 与粒子物理无关.

希格斯机制的提出并没有立刻显示其重要作用,原因是人们对对称性自发破缺的兴趣集中在对强相互作用的 SU(3) 对称破缺上.这是由于 60 年代前期,粒子物理的主要热潮是对强子的认识.另外,希格斯机制仅在一小部分物理学家中引起注意.希格斯机制在强作用研究中并未取得有意义的结果,而使其取得重大突破的则是弱电统一规范理论.

(四)

弱电统一最早由哈佛大学的许温格于 1957 年开始考虑.他将电磁作用与弱作用看成是同一现象的两个方面,但他的理论不是 V-A 型的,且不包含弱中性流.稍后,他的学生格拉肖用规范理论来研究弱电统一理论,并于 1959 年首次发表了有关论文.1961 年格拉肖发表了题为“弱作用的部分对称性”一文,即 SU(2) × U(1) 模型,其思想与后来的模型在定性上是一致的.另外,在英国工作的萨拉姆和瓦德(J. C. Ward)自 50 年代后期也在做弱电统一的研究.不过,这些早期的弱电统一模型的特点是传递弱电作用的中间玻色子质量均是人为放入的,且理论均是不可重整的.

60 年代末温伯格和萨拉姆将希格斯机制应用到弱电统一模型中,使弱中间玻色子获得了质量,从而使弱电统一规范理论取得了实质性进展.温伯格是场论方面的重要人物,他曾对对称性自发破缺作出过重大贡献.在做完对称性破缺的工作后,他与其他物理学家一起从事了手征对称性的研究.1956 年李政道和杨振宁已发现弱作用破缺手征对称性.由于手征对称性被弱作用所破坏,与这个破缺对称性相

应的无质量粒子是 π 介子.或者说,由于手征对称性是近似的,所以 π 介子近似地为一个 Goldstone 玻色子,具有很小的质量.由于这个原因,希格斯机制开始并未引起温伯格的重视.而且,他试图利用无限个低能 π 介子的结合效应去发展一个强作用理论,但并未成功.

温伯格又沿着另一条途径进行尝试.他构造了一个模型,其中的中间传播子是介子三重态,一个介子为 Goldstone 玻色子,另外两个通过对称破缺获得质量.但温伯格对此模型并不满意.后来,1967 年秋天,他突然意识到他一直将一个正确的思想应用到了错误的问题上.他用于构造强作用的整个数学工具,正是用来解决弱作用和中间矢量玻色子问题所需要的.而且通过人为手加质量的杨-米尔斯理论是不可重整的,而通过对称性自发破缺获得质量的规范理论则可能正好是可重整的.这样温伯格发表了论文“一个轻子模型”.在此论文中,他利用希格斯机制使规范粒子获得质量,克服了过去手加的困难.

与此同时,1967 年早期,萨拉姆在英国的帝国学院向他的同事凯伯学习如何避免 Goldstone 玻色子的技术,与凯伯曾详细讨论过希格斯机制.萨拉姆早在 1959 年就同瓦德一起发表过弱电统一理论的论文,并在 1961 年的续篇中提出过一个强、弱、电磁作用的规范理论.他们合作的最重要的一篇论文则是 1964 年关于弱电规范模型的论文“电磁作用和弱作用”.萨拉姆也是对称性自发破缺研究中的重要人物,他早在 1962 年就已经讨论过规范理论通过对称性自发破缺来产生质量的可能性.他将希格斯机制应用到他和瓦德合作的 1964 年的 SU(2) × U(1) 模型中,利用希格斯机制提供规范粒子质量重新构造了弱电统一规范模型,并于 1968 年 5 月在瑞典举行的第八届诺贝尔会议上报告了他的成果“弱作用和电磁作用”.因此,到 60 年代后期,人们已确立了弱电统一规范模型(GWS 模型).

1971 年,荷兰年轻的特胡夫证明了关于对称性自发破缺的规范理论是可重整的,亦即

物理学在技术科学发展进程中的作用

贾 堤

(天津城建学院基础学科部)

物理学是研究物质运动的最一般规律及其基本结构的科学,是自然科学中最基本的学科之一。物理学研究范围很广,包括从基本粒子到整个宇宙,力、声、热、电、光等各种现象。作为一门科学,除了通过物化的过程对人类的物质生活产生巨大的影响之外,还应看到,它是人类文化的一个重要组成部分。物理学建立的新的概念和方法以及为物理学研究所发展起来的各种特殊条件和测量手段大大深化了人们对自然界的认识,对科学、技术乃至科学思维的发展起了极其重要的作用。特别是自牛顿时代以来,物理学一直在自然科学中占主导地位,它以其对客观世界的结构及运动规律朴实而顽强的探求,成为自然科学中一个有重要影响的组成部分,并且对技术科学的发展产生了巨大的影响。本文拟从技术科学的发展过程中论述物理学在它们创建及发展过程中的作用机制。

证明了 GWS 模型是可重整的。随后经本杰明·李等人的工作,人们普遍接受了通过希格斯机制来使规范粒子获得质量的规范理论是可重整的观念。至此,由于希格斯机制的建立,人们不再认为规范理论只是个数学珍品,而认识到它是具有深远意义的场论,特别是引起了人们对弱电统一规范理论的重视。另外,1970 年格拉肖等将弱电统一规范模型推广到同时包含夸克的体系。至此,弱电统一理论已成为自治的理论。1973 年中性流的发现及其他实验都证实了弱电统一模型。1983 年,人们又相继发现了弱中间矢量玻色子 W^{\pm} 、 Z^0 ,进一步证实了 GWS 理论的预言。

对称性自发破缺思想在大统一理论和超对称大统一理论中得到了进一步的应用和深化,人们还进一步研究了超对称性真空自发破缺以

技术科学定义为一种知识、工具和技巧的组合物,是从科学和实践经验中派生出来的,并且应用于产品、工艺、系统和服务的开发、设计、生产和使用。这个定义其中有一个要点:技术是从科学理论和经验中派生出来的。这就是说,理论与实践是技术的必要条件。

一种完整的技术科学的形成,通常以一定的科学理论作为自己的基础,选择一定的技术路线并确定具体的实施方案。物理学对技术科学的作用渗透在这项技术科学创造到完善的发展过程之中,其关系如图 1:

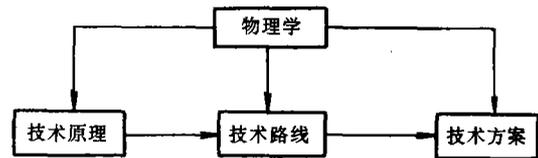


图 1

及高维空间的真空对称性自发破缺的概念等。另外,在现代宇宙学中,为了研究宇宙的早期演化,也广泛采用和深化了真空对称性自发破缺的思想。可见,希格斯机制在现代物理学中占有十分重要的地位。然而值得指出的是,理论上预言的希格斯粒子至今尚未在实验上观察到。目前世界各国许多实验都在寻找希格斯粒子的存在,但希格斯粒子至今仍未露面。另外,希格斯机制的本质尚未被认识清楚。例如,希格斯场是作为基本标量场引入理论的,但从理论上讲,找不出任何理由说明为什么基本标量场应当存在。然而,我们确信,随着现代物理学的发展,人们对希格斯粒子和希格斯机制的本质必定会有进一步的认识,从而更加深刻地明了对称性自发破缺的意义。

(题图 张树梓)