

从对称性破缺到希格斯机制

卢昌海

五、对称性自发破缺

在质量的电磁起源破灭后,质量起源问题沉寂了很长一段时间。但物理学本身的前进步伐并未因此而稍有停顿。物理学家手头有大量的观测数据需要分析解释,同时理论体系本身也有大量的问题亟待解决。这些是现代物理学的发展动力,远比解决像质量起源之类的本原问题更重要。但是现代物理学在研究那些细节问题中逐渐积累起来的智慧与洞见,却常常会为更深入地探求本原问题提供新的思路。这正是现代物理学的卓越之处,也是它没有像那些只注重于深奥的本原问题,却对细节不屑一顾的其他尝试那样流于肤浅的重要原因。

物理学再次回到质量起源问题是在 20 世纪 60 年代。

20 世纪 60 年代初,物理学家在对基本粒子的研究中已经发现了许多对称性。对称性在物理学中一直有着重要的地位,不仅由于其优美的形式与物理学家们对自然规律的美学追求十分吻合,更重要的是因为它不仅中看,而且中用,有一种穿透复杂性的力量。即使在对称性动力学行为还没有透彻理解的情况下,对称性也往往具有令人瞩目的预言能力。这最后一点在 20 世纪五六十年代的粒子物理研究中具有极大的吸引力,因为当时人们对基本粒子相互作用的动力学机制知之甚少,而且对在很大程度上为研究基本粒子相互作用而发展起来的量子场论产生了很深的怀疑。在这种情况下,许多物理学家对对称性寄予了厚望,希望通过它们来窥视大自然在这一层次上的奥秘。

但不幸的是,当时所发现的许多对称性却被证明只在近似情况下成立,比如同位旋对称性与宇称对称性。如何理解这种近似对称性呢?当时有一种猜测,认为近似对称性是(严格)对称性自发破缺的产物。

所谓对称性自发破缺,指的是这样一种情形:即一个物理体系的拉氏量具有某种对称性,而基态却不具有该对称性。换句话说,体系的基态破缺了运动方程所具有的对称性。这种对称性自发破缺的概

念最早出现在凝聚态物理中,20 世纪 60 年代被南部阳一郎等引入量子场论。在量子场论中,体系的基态是真空态,因此对称性自发破缺表现为体系拉氏量所具有的对称性被真空态所破缺。

有的读者可能会问:一个物理体系的真空态是由拉氏量所确定的,为什么会不具有拉氏量所具有的对称性呢?这其中的奥秘在于许多物理体系具有简并的真空态,如果我们把所有这些简并的真空态视为一个集合,它的确与拉氏量具有同样的对称性。但物理体系的实际真空态只是该集合中的一个态,这个态往往不具有整个集合所具有的对称性,这就造成了对称性的破缺,也就是我们所说的对称性自发破缺。

学过量子力学的读者可能会进一步问:如果一个量子体系的基态是简并的,那么体系的物理基态难道不应该是这些简并态的某种量子叠加吗?这种量子叠加(如我们在量子力学中所见到的)往往会破除原有的基态简并性,并且使真正的基态具有与原先简并基态的集合相同的对称性。在这种情况下,对称性自发破缺岂不是不存在了?对于有限体系来说这是完全正确的,除非有什么原因(比如对称性)禁止简并基态间的相互耦合。但在量子场论中通常假定体系的空间体积趋于无穷,这时不同真空态之间的相互耦合趋于零,严格的对称性自发破缺只发生在这种情形下。

但是把近似对称性归因于对称性自发破缺的想法在 1961 年曾遭到致命打击。那一年由戈德斯通提出并在稍后与萨拉姆及温伯格一起证明了这样一个命题(被称为戈德斯通定理):每一个自发破缺的整体连续对称性都必然伴随一个无质量标量粒子(被称为戈德斯通粒子或南部-戈德斯通粒子)。

为什么会有这样的结果呢?我们来简单地证明一下:假定拉氏量中的势函数为 $V(\varphi_a)$ ($a = 1, \dots, N$),其中 φ_a 为标量场(可以是基本的,也可以是复合的)。显然这一体系的真空态满足 $\partial V / \partial \varphi_a = 0$,而标量粒子的质量(平方)由 $\partial^2 V / \partial \varphi_a \partial \varphi_b$ 在真空态上

的本征值给出。现在考虑对真空态 φ_a 作一个无穷小连续对称变换 $\varphi_a \rightarrow \varphi_a + \varepsilon \Delta_a(\varphi)$ (其中 ε 为无穷小参数)。由于 $V(\varphi_a)$ 在这一变换下不变, 因此有: $\Delta_a(\varphi)(\partial V/\partial \varphi_a) = 0$ 。将这一表达式对 φ_b 作一次导数, 并注意到真空所满足的条件, 可得: $\Delta_a(\varphi) \partial^2 V/\partial \varphi_a \partial \varphi_b = 0$ 。由上式可以看到, 每一个 $\Delta_a(\varphi) \neq 0$ 的连续对称变换都对应于 $\partial^2 V/\partial \varphi_a \partial \varphi_b$ 的一个本征值为零的本征态, 从而也就对应于一个无质量标量粒子。而 $\Delta_a(\varphi) \neq 0$ 的连续对称变换所对应的正是那些不能使真空态不变(从而被真空态所破缺, 即自发破缺)的连续对称性。这就证明了每一个自发破缺的整体连续对称性都必然伴随一个无质量标量粒子(即戈德斯通粒子), 这正是戈德斯通定理。

戈德斯通定理也可以从几何上来理解。 $V = V(\varphi_a)$ ($a = 1, \dots, N$) 可以看成是一个 N 维曲面, 真空态对应于该曲面的一个极小值点, 而该点处每一个独立的平坦方向(即二阶导数为零的方向)对应于一个无质量标量粒子。另一方面, 每一个这种独立的平坦方向对应于一个可以使真空态移到邻近点的连续对称变换。这种连续对称变换所表示的正是被真空态所破缺的对称性。这就表明无质量标量粒子与这种自发破缺的对称性一一对应。

由于自发破缺的整体连续对称性的数目等于这些对称性的生成元数目, 因此戈德斯通定理表明戈德斯通粒子的数目等于自发破缺的整体连续对称性的生成元数目。举个例子来说, $SU(2)$ 对称性具有 3 个生成元, 若完全破缺, 就会产生 3 个戈德斯通粒子; 若破缺为 $U(1)$, 则只产生 2 个戈德斯通粒子(因为有一个生成元未破缺)。进一步的分析还表明, 戈德斯通粒子与那些自发破缺的整体连续对称性所对应的荷具有相同的宇称及内禀量子数。

严格地讲, 上面的证明只是在所谓经典层次上的证明, 没有考虑量子修正。那么考虑了量子修正后, 戈德斯通定理是否还成立呢? 答案是肯定的, 而且证明也基本一样, 只需用包含量子修正的所谓量子有效势 V_{eff} 取代经典拉氏量中的势函数 V 即可。

由戈德斯通等人证明的这一结果为什么会把近似对称性归因于对称性自发破缺的想法造成致命打击呢? 原因很简单, 那就是近似对称性中有一些正是整体连续对称性(比如同位旋对称性), 如果它们果真来源于对称性自发破缺的话, 那就应该存在相应的无质量标量粒子。但我们从未在实验上观测

到任何这样的粒子。因此对称性自发破缺的想法在粒子物理学中由于牵涉到无质量粒子而陷入困境。

六、从希格斯机制到电弱统一理论

无独有偶, 粒子物理学中产生于五六十年代的另一个高明想法也受到无质量粒子的困扰, 那便是 1954 年由杨振宁和米尔斯提出, 现在被称为杨-米尔斯理论的定域非阿贝尔规范理论。这种理论是对量子电动力学所具有的定域 $U(1)$ 规范对称性的推广, 最初是想用来描述同位旋对称性。但它立刻就遇到很大的困难, 那便是这种理论所具有的定域规范不变性会无可避免地导致无质量的矢量粒子(被称为规范粒子, 类似于量子电动力学中的光子), 而在现实中, 除光子外, 我们从未在实验上观测到任何这样的无质量矢量粒子。

就这样, 杨-米尔斯理论与对称性自发破缺这两个出色的想法先后搁浅了, 追根溯源, 都是无质量粒子惹的祸。但如果我们仔细研究一下这对难兄难弟的病根, 就会发现两者竟然像是互为解药! 对称性自发破缺的问题出在哪里呢? 出在整体连续对称性上; 而杨-米尔斯理论的问题又出在哪里呢? 出在定域规范对称性(那是一种特殊的定域连续对称性)上。如果我们把这两者放在一起, 让对称性自发破缺干掉那些产生无质量矢量粒子的定域规范对称性, 杨-米尔斯理论不就可以摆脱困境了吗? 更妙的是, 由于杨-米尔斯理论中的对称性不是整体而是定域的, 戈德斯通定理将不适用于这种对称性的自发破缺, 这样一来说不定那些可恶的戈德斯通粒子也会消失, 那岂不是两全其美? 世界上会有这么好的事吗? 还真的有的。

最早明确指出这一点的是美国凝聚态物理学家安德生。对于安德生来说, 戈德斯通定理显然不可能普遍成立, 因为当时就已经知道超导体是一个连续对称性——定域 $U(1)$ 对称性——自发破缺的体系, 但在这一破缺过程中并没有产生无质量的戈德斯通粒子。安德生意识到 $U(1)$ 对称性的定域特点是使戈德斯通定理失效的关键。由于并非只有定域 $U(1)$ 对称性具有定域特点, 事实上所有杨-米尔斯理论也都具有这一特点。因此安德生在 1963 年猜测道: “戈德斯通的零质量困难并不是一个严重的困难, 因为我们很可能可以用一个相应的杨-米尔斯零质量问题来消去它”。安德生的想法得到一些物理学家的认同, 但也有人认为这种凝聚态物理的类

比不能应用到相对论量子场论中。这一怀疑很快就被推翻了。1964年,英国物理学家希格斯、比利时物理学家英格勒特与布罗特等几乎同时证实了安德生的想法。这便是描述规范对称性自发破缺的著名的希格斯机制。

用技术性的语言来说,希格斯机制中对应于戈德斯通粒子的那些自由度可以被定域规范变换所消去(必须注意的是:“定域”二字在这里至关重要,整体的连续变换是不具有这种能力的)。从规范理论的角度讲,这相当于选取了一种被称为么正规规范的特殊规范。这种特殊规范的选取造成定域规范对称性的破缺,从而使原本受定域规范对称性所限必须无质量的规范粒子可以获得质量。人们有时把这种机制形象地描述为:规范粒子通过“吃掉”戈德斯通粒子而获得质量。

不过希格斯等人的漂亮工作并没有立即引起轰动。希格斯就这一工作所写的两篇短文的第二篇甚至一度遭到退稿,理由是“与物理世界没有明显关系”。这一退稿理由使希格斯深感不快,但也促使他更深入地考虑了理论可能带来的实验结果,并对论文进行了补充。希格斯后来认为,他因遭到退稿而偶然添加的那些内容是人们将希格斯粒子及希格斯机制与他的名字联系在一起的主要原因。

做了这么多的背景介绍,现在让我们回到主题(质量起源)上来。希格斯机制不仅一举“救活”了粒子物理学中对称性自发破缺与杨-米尔斯理论这两个极为出色的想法,而且在救助过程中为我们提供了一种产生质量的新方法,即通过规范对称性的自发破缺,从不带质量项的拉氏量中产生出质量来。我们在上面已经提到规范粒子可以由此获得质量。不过规范粒子在宇宙可见物质的质量中所占的比例极小,我们更关心的是在可见物质质量中占主要比例的那些粒子——费米子。那么费米子的情况如何呢?在后来建立起来的粒子物理标准模型中,费米子也是通过规范对称性的自发破缺,或者更确切地说,通过电弱统一理论中的规范对称性自发破缺获得质量的,这其中希格斯机制起到了重要作用。具体地讲,在标准模型中费米场与标量场(也称为希格斯场)之间存在所谓的汤川耦合— $\lambda\bar{\psi}_L\phi_R\varphi-h.c.$ (其中 λ 为耦合常数, ψ_L 与 ψ_R 为费米场质量本征

态的左右手征部分, $h.c.$ 代表厄密共轭)。在标准模型的希格斯机制中,真空态具有非零的 φ 值,因此将这一耦合项相对于真空展开后就会出现费米子质量项— $m\bar{\psi}\psi$ 。

因此,在标准模型中,所有基本粒子的质量都来源于电弱统一理论中的规范对称性自发破缺。这是标准模型对质量起源问题的直接回答。

遗憾的是,这一回答却是一个不尽人意的回答。为什么这么说呢?因为这一回答与其说是在回答问题,不如说是在转嫁问题,它只是把我们想要理解的基本粒子的质量值转嫁给了希格斯场的真空期待值、规范耦合常数以及汤川耦合常数。这其中希格斯场的真空期待值及规范耦合常数与基本粒子(主要是费米子)的种类无关,可以算是普适的,因此将质量向这些参数约化不失为是一种有效的概念约化。但汤川耦合常数则不然,它对于每一种费米子都有一个独立的数值。由于这些参数的存在,标准模型的拉氏量虽然不显含质量参数,但它所包含的与质量直接有关的自由参数数目却一点也不比原先需要解释的质量参数数目来得少(事实上还略多一点)。用这种方式来解释质量的起源,就像霍金在《时间简史》中引述的一位老妇人的理论。那位老妇人宣称世界是平面的,由一只大乌龟托着。当被问到那只大乌龟本身站在哪里时,老妇人冷静地回答说:站在另一只大乌龟的背上。

因此希格斯机制及包含希格斯机制的电弱统一理论,虽然从许多唯象的方面来衡量是非常成功的,它们所体现的把质量与真空的对称性破缺性质联系在一起的思路也极为深刻。但它们作为与对称性破缺有关的特殊机制或模型,本身却没能实现对质量概念的真正约化,从而不能被认为是对质量起源问题令人满意的回答。

作者简介

卢昌海,1971年出生于浙江杭州,1994年毕业于上海复旦大学物理系,后赴纽约哥伦比亚大学从事理论物理学习研究,2000年获物理学博士学位。现旅居纽约。个人主页:<http://www.changhai.org/>。

