

走向统一的自然力

强力、弱力和电磁力的大统一 (IV)

厉光烈¹ 阮建红²

(1 中国科学院高能物理研究所 100049; 2 华东师范大学 200062)

2. 相位·杨-米尔斯场·弱电统一理论

(1) 相位

在纪念中国科学院成立 50 周年所举行的学术报告会上, 杨振宁教授作了题为《量子化、对称和相位因子——20 世纪物理学的主旋律》的学术报告; 2002 年, 在巴黎国际理论物理讨论会上, 他又作了类似题目: *Thematic Melodies of Twentieth Century Theoretical Physics: Quantization, Symmetry and Phase Factor* 的报告, 一再强调“量子化、对称和相位因子是 20 世纪物理学的主旋律”。量子化和对称在 20 世纪物理学中的主导作用和支配地位, 在本系列讲座的前几讲中, 已有介绍; 这节, 我们将介绍杨-米尔斯规范场理论及其发展, 而相位因子是规范不变的体现, 杨振宁在上述报告中也曾说过: 规范场这个命名不甚恰当, 如果重新命名, 应该称为“相位场”, 因此, 得从相位谈起。

何谓“相位因子”

相位, 又称位相、周相等, 与振幅同为描述振动和波的主要物理量: 振幅描述振动的幅度; 相位描述波动的形态。在量子力学中, 波函数 $\psi(x, t) = Ae^{i\alpha(t)}$ 是描述微观粒子运动状态的基本物理量, 其中 A 是它的模 $|\psi(x, t)|$, 其平方表示在某一瞬时 t , 在 x 与 $x+\Delta x$ 区间内测量到该粒子的几率密度, 它是与实验数据相联系的最重要的物理量; 而 $e^{i\alpha(t)}$ 就是杨振宁前面报告中提到的相位因子。

在“量子力学”一节中, 我们曾经谈到, 是海森伯首先注意到: 描述粒子波动性质的物理量不仅有振幅还应考虑相位, 他用振幅和频率组成的二维数组去

进行计算时发现乘法交换律不再成立, 进而发现了正则对易关系, 并与玻恩和约丹一起于 1925 年创建了矩阵力学; 狄拉克在 1970 年 4 月的一次演讲中也谈到了相位的作用: “如果有人问, 量子力学的主要特征是什么? 现在我倾向于说, 量子力学的主要特征并不是不对易代数, 而是几率振幅的存在, 后者是全部原子过程的基础。几率振幅的模的平方是我们能够观测的某种量, 即实验者所测量的几率。但除此以外还有相位, 它是模为 1 的数, 它的变化不影响模的平方。这个相位是极其重要的, 因为它是所有干涉现象的根源, 而它的物理意义是隐含难解的。所以, 可以说: 海森伯和薛定谔的真正天才在于, 他们发现了包含相位这个物理量的几率振幅的存在。相位这个物理量巧妙地隐藏在大自然之中, 正由于它隐藏得如此巧妙, 人们才没能更早建立量子力学。”

狄拉克所说的隐藏在大自然之中的相位或相位因子, 因其与规范场的关系, 成为了杨振宁上述报告中的“20 世纪物理学的主旋律”, 而谈到相位因子与规范场的关系, 就不能不提外尔早年的贡献。

外尔早年提出的规范变换

外尔在 1955 年去世前 6 个月将他 1918 年有关规范理论的文章收入他的论文全集时所写的跋中谈到: “我的理论最强的证据似乎是这样的: 就像(时空)坐标(平移)不变性保持能动量守恒那样, 规范不变性保持了电荷守恒。”

那么, 什么是外尔所说的“规范不变性”呢?

众所周知, 在曲面上的矢量沿闭合曲线作平行移动时, 矢量方向会有改变。1918 年, 外尔提出的问题是: 既然沿闭合曲线平行移动能导致矢量方向的改变, 那么, 可否设想矢量长度也会改变呢? 他认为, 如果



福克

伦敦

假定沿曲线每一点时空标度有所改变的话，那么平移也会导致矢量长度有相应的改变。于是，他引入时空度规 $g_{\mu\nu}$ 的定域改变（即在时空中逐点变化）来表征标度变换：

$$g_{\mu\nu} \rightarrow g'_{\mu\nu} = e^{\lambda(x)} g_{\mu\nu},$$

并称其为“规范变换”，进而要求电磁力和引力相互作用在此变换下保持不变，即具有“规范不变性”，以便实现爱因斯坦梦寐以求的、当时仅知的两种基本相互作用：电磁力和引力的统一。但是，他的这一观念受到了许多大物理学家包括他所崇敬的爱因斯坦的反对，故而不得不放弃。

福克和伦敦的改进

1927年，福克（V. Fock, 1898 ~ 1974）注意到，在量子电动力学中，描述带电粒子在电磁场中的运动应将自由粒子的动量算符 $\hat{P}_\mu = -i\hbar \frac{\partial}{\partial x^\mu}$ 代之以 $-i\hbar \left[\frac{\partial}{\partial x^\mu} - i(e/\hbar c) A_\mu \right]$ 。随后，伦敦（F. London, 1900 ~ 1954）指出：福克的工作与外尔 1918 年的工作有相似之处，只是福克用复相位变换代替了外尔的实际标度变换；受福克和伦敦工作的启发，外尔认识到：量子力学中波函数的相位是一个新的局域变量。1929 年，他在德国《物理杂志》上发表的一篇文章中将 1918 年提出的规范变换改写为 $\psi \rightarrow \psi' = \psi e^{ie\lambda(x)/\hbar c}$ ，即“相位因子”变换。正因为此，杨振宁才说，应将“规范变换”正名为“相位变换”。

在外尔的上述规范变换中，若 $\lambda(x)$ 在任何时空点都一样，即为常量，那么它就是现在所说的第一类规范变换，是最简单的、与时空作用无关的相位变换，故又称为整体规范变换，相应于这种规范变换不变性，

存在着电荷守恒定律；若 $\lambda(x)$ 随时空坐标逐点变化，即与时空作用有关，它就被称为第二类规范变换，或定域规范变换。用群论的语言来说，这类变换对应于一维么正变换群，常用 $U(1)$ 表示。顺便指出：由于相位因子 $e^{ie\lambda(x)/\hbar c}$ 是普通函数，服从乘法交换律，故 $U(1)$ 对称性又被称为阿贝尔对称性， $U(1)$ 群又被称为阿贝尔群。所以，外尔在上述文章中将物理系统在这种变换下保持不变的特性称为 $U(1)$ 对称性，他还发现：若将整体规范变换推广为定域规范变换，物理系统仍然具有规范不变性，或者说，电荷守恒定律仍然成立，那么就必须引入 $U(1)$ 规范场——电磁场，也就是说，这种规范不变性（即电荷守恒）决定了全部电磁相互作用。顺便指出，描述电磁力的量子电动力学就是 $U(1)$ 规范场理论，这是因为量子电动力学在描述电磁

场的 $A_\mu(A, \varphi)$ 作规范变换
$$\begin{aligned} \mathbf{A}(x) &\rightarrow \mathbf{A}(x) + \nabla\lambda(x) \\ \varphi(x) &\rightarrow e^{ie\lambda(x)/\hbar c} \varphi(x) \end{aligned} : \text{时}$$
 保持不变，具有 $U(1)$ 规范不变性。从此，对于相互作用，一直处于被动地位的对称性，开始处于主动的、“支配”的地位。

1954 年，杨振宁和米尔斯^①将外尔 1929 年改进的规范变换推广应用于同位旋守恒，创建了杨-米尔斯场。

(2) 杨-米尔斯场

杨振宁——华人的骄傲

杨振宁，美籍华裔理论物理学家，1922 年 9 月 22 日出生于中国安徽省合肥市。1942 年，毕业于西南联合大学物理系，学士论文指导老师是吴大猷教授，吴先生让他看的第一篇论文讨论的是分子光谱学和群论的关系，使他初次接触到群论和对称性^②；同年秋天，他考进该校属下的清华大学研究院，在王竹溪教授指导下研究统计物理学，杨振宁曾经说过：他一生中三分之二的工作与对称性有关，他的群论知识启蒙于父亲、数学家杨武之；另外三分之一的工



杨振宁

作则与统计物理学有关。1945年，杨振宁赴美，进入芝加哥大学做研究生，深受费米的熏陶，在导师、氢弹之父泰勒（E. Teller, 1908 ~ 2003）的指导下于1948年完成了博士论文，获得了博士学位。杨先生曾经不止一次说过：“那时，我是芝加哥大学物理系非常有名的研究生”，“同学们都很佩服我的理论知识，常常要我帮他们做理论习题，可是，大家一致笑我在实验室里笨手笨脚：‘Where there is Bang, there is Yang(哪里有爆炸，那里就有杨)’！”正是费米让他先跟泰勒从事理论物理研究，造就他成为了一代伟大的理论物理学家。

杨振宁对理论物理的贡献范围很广，包括粒子物理、统计力学和凝聚态物理等领域。其中，最杰出的贡献是：1954年，他与米尔斯共同提出杨-米尔斯规范场理论，开辟了非阿贝尔规范场的新的研究领域，为现代规范场论（包括弱电统一理论、量子色动力学、强弱电大统一理论和引力场的规范理论等）奠定了基础；1956年，他与李政道合作，揭示了 θ - τ 之谜，发现了弱作用下宇称不守恒，并于第二年荣获了诺贝尔物理学奖，这是诺贝尔奖历史上从发现到获奖时间最短的一次。因对物理学发展做出的杰出贡献，杨振宁曾获得许多奖项或奖章，除1957年诺贝尔物理学奖和美国总统里根授予他的1986年国家科学奖章外，还有：拉姆福德奖（1980）；富兰克林奖章（1993）；鲍尔奖（1994）；爱因斯坦奖章（1995）；博格留波夫奖（1996）；昂萨格奖（1999）；费萨尔国王国际奖（2001）等。

杨振宁对祖国有一颗赤子之心，是美籍华裔学者中访问新中国的第一人。他于1971年首次访华回美后，对促进中美建交、中美科技和教育交流以及两国人民的相互了解，都做出了重要的贡献。改革开放后不久，本文作者（厉光烈），与中国原子能科学研究院李祝霞、北京大学戴远东和杨威生通过教育部考试成为公派前往杨振宁所在的纽约州立大学石溪分校物理系的第一批访问学者。记得，一天傍晚，杨先生带本文作者去附近一家中国餐馆吃饭，餐馆老板亲自出面招待。他先给杨先生倒了一杯酒，对他说：“这是我敬你的，不收费，因为你是我们华人的骄傲。”杨先生也曾说

过：“我一生最重要的贡献是帮助改变了中国人自己觉得不如人的心理作用。”

杨-米尔斯场的创立

1985年，杨振宁在外尔100周年诞辰纪念会上的演讲：《外尔对物理学的贡献》中谈到：“外尔的理论已经成为规范理论中一组美妙的旋律。当我在做研究生，正在通过研读泡利的文章来学习场论时，外尔的想法对我有极大的吸引力。当时我做了一系列不成功的努力，试图把规范理论从电磁学推广出去，这种努力最终导致我和米尔斯在1954年合作发展了非阿贝尔规范理论。”接着，他直接引用了他与米尔斯1954年合作撰写的那篇短文：“同位旋守恒与推广的规范不变性”开头的一段话：“与电荷守恒相类似，同位旋守恒表明了存在着一个基本的不变性定律，在前一种情形里，电荷是电磁场的源，其中的一个重要概念就是规范不变性，它与下列三点紧密相联：（1）电磁场的运动方程，（2）流密度的存在，（3）在带电（粒子）场和电磁场之间可能有的相互作用。我们试图将这个规范不变的概念推广应用到位旋守恒上去，结果表明，有可能实现一个十分自然的推广。”

在上述引文中，杨振宁所指的是泡利在1933年《物理手册》中的文章和1941年发表在《现代物理评论》上的文章。正是这些文章，让杨明白：外尔规范理论揭示了一个非常重要的物理思想——“电荷守恒决定了全部电磁作用”，以及“只要系统具有 $U(1)$ 群的规范对称性，就必然要求系统的粒子之间存在电磁作用”和“所有规范作用必须通过规范量子来传递”。外尔的这些观念对杨振宁“有极大的吸引力”，促使他产生了一个大胆而诱人的想法：把外尔从电荷守恒中发现和提出的规范不变性，推广应用到同位旋守恒中去。关于同位旋，前面已有介绍，这里需要补充的是，不仅核力的电荷无关性（即除去电磁相互作用， n - p 和 p - p 相互作用完全相同）反映了在核子-核子相互作用中 n - p 和 p - p 系统的总同位旋守恒，而且反应过程： $n+p \rightarrow \pi^0+d$ 和 $p+p \rightarrow \pi^++d$ 的微分截面相同也反映了在 π -核相互作用中 n - p 和 p - p 系统的总同位旋守恒，也就是说，同位旋守恒在强相互作用过程中普遍存在。正是这些实验上的发现，促使杨振

宁类比于用 A_μ 描述的、保持电荷守恒的电磁场方程，试图导出用 B_μ 描述的、保持同位旋守恒的规范场方程。但是，开始的努力并不成功：头几步运算很顺利，待到要作推广时，总是导出一个冗长的、丑陋的公式，使得他不得不把这个想法暂时搁置下来。

1952年12月中旬，杨振宁收到布鲁克海文国家实验室高能同步稳相加速器部主任柯林斯(G. B. Collins)的一封信，邀请他去作一年的访问学者。1953年夏天，杨振宁携全家来到了布鲁克海文。那时，国家实验室不断有新粒子发现，杨也参与了其中的一些实验。正是这些实验唤起了潜伏在杨振宁心中多年的思索，激励他追寻那个梦寐以求的目标。杨振宁曾说：“随着越来越多介子被发现，以及对各种相互作用进行更深入的研究，我感到迫切需要一种在写出各类相互作用时大家都应遵循的原则。因此，在布鲁克海文我再一次回到把规范不变性推广出去的念头上来。”这次，他是和同办公室的米尔斯一起进行讨论，他们决定：先在电磁场强 $F_{\mu\nu}$ 上尝试加一个二项式，如果不行再加三项式等。没有想到，加上一个简单的二项式之后：

$$F_{\mu\nu} = \frac{\partial B_\nu}{\partial x_\mu} - \frac{\partial B_\mu}{\partial x_\nu} + i\varepsilon[B_\mu, B_\nu]$$

便没有再出现以前遇到的越来越复杂的项，反而“越算越简单”，很快找到了使 $F_{\mu\nu}$ 保持不变的规范变换，“我们知道我们挖到了宝贝!!!”于是，他们顺利写出了《同位旋守恒和一个推广的规范不变性》和《同位旋守恒和同位规范不变性》两篇文章，分别发表在《物理学评论》1954年95和96两卷上。派斯在他的《基本粒子物理学史》一书中评价杨-米尔斯规范场理论的重要价值时说：“杨振宁和米尔斯的两篇杰出文章奠定了现代规范理论的基础”。

在上述论文中，杨振宁和米尔斯指出，如果要求粒子所具有的同位旋对称性，即 $SU(2)$ 对称性，也称为定域对称性，那么就必须引入相应的规范场，即杨-米尔斯场。由于他们引入的二项式： $i\varepsilon[B_\mu, B_\nu] = i\varepsilon(B_\mu B_\nu - B_\nu B_\mu)$ 正好就是量子力学中的正则对易关系，它的存在表明， B_μ 不同于电磁场的 A_μ ，在乘法运算中不可对易，故得用矩阵来表示。因此，

场强 $F_{\mu\nu}$ 也应是矩阵函数，使其保持不变的规范变换也应是矩阵函数，不服从乘法交换律，与其对应的应是非阿贝尔群，故杨振宁和米尔斯的规范场理论是非阿贝尔规范理论。正如杨振宁和米尔斯在他们的论文中所指出的：他们的理论“很容易推广为其他类型的非阿贝尔规范理论”，故通常将非阿贝尔规范场统称为杨-米尔斯场。它是继麦克斯韦的电磁场和爱因斯坦的引力场之后提出的一种新的规范场。

应当指出：杨-米尔斯场与电磁场不一样：电磁场本身不带电荷，只能和带电粒子相互作用，并不存在自作用；而杨-米尔斯场本身带有同位旋，除了和费米子相互作用以外，还存在自作用。另外，电磁场只有一个传递相互作用的规范量子，即光子；而杨-米尔斯场有三个规范量子，其中一个带正电，一个带负电，还有一个不带电。费米子场通过交换这些规范量子引起新的相互作用，这是在爱因斯坦利用广义协变原理（也是一种定域对称性原理）得到引力作用之后，理论物理学家又一次纯粹利用对称性原理给出具体的相互作用规律，用杨振宁的话说，就是“对称性支配相互作用”。

但是，杨-米尔斯场和电磁场一样，不能有静止质量，或者说，杨-米尔斯场的三个规范量子 and 光子一样没有静止质量，这使杨-米尔斯场的实际应用受到了很大的影响。在20世纪50年代，杨振宁和米尔斯规范理论几乎没有引起太多的注意，爱因斯坦和外尔大概在去世之前也都不知道他们的工作。直到20世纪六七十年代，自发对称破缺和希格斯机制的提出导致温伯格、格拉肖和萨拉姆建立弱电统一理论以后，属于它的时代才真正到来——荣获1979、1999和2004年三次诺贝尔物理学奖的工作都以杨-米尔斯场为其理论基础，使得杨-米尔斯规范场理论最终成为强力、弱力和电磁力大统一的理论基础。

不可积相位因子与场的积分形式

杨振宁对规范场理论的另一项重大贡献是于1974年借助狄拉克1931年引入的依赖路径的复相位因子（即不可积相位因子）写出了杨-米尔斯场的积分形式，还和吴大峻于1975年从规范场的整体变换方面了解到规范场的几何本质，即将纤维丛上的联络、抽

象的拓扑学与物理实在的场相结合，对现代几何学的发展做出了重要的贡献。鉴于本刊的大多数读者对拓扑学中的纤维丛理论等高深数学未必熟悉，限于篇幅，这里就不作详细介绍。

1993年，声誉卓著的美利坚哲学学会在将该学会颁发的最高荣誉——富兰克林奖章授予杨振宁时，执行官说：“杨振宁教授是自爱因斯坦和狄拉克之后20世纪物理学出类拔萃的设计师”，并指出：杨振宁和米尔斯合作所取得的成就是“物理学中最重要的事件”，是“对物理学影响深远和奠基性的贡献”；1994年，美国费城富兰克林研究所将鲍尔奖金颁发给杨振宁的文告中说：“杨振宁是第一位获此奖金的理论物理学家。他的研究作为宇宙中基本作用力和自然规律提供了解释。”“作为20世纪阐明亚原子粒子相互作用的大师之一，他在过去40年里重新塑造了物理并发展了现代几何。杨-米尔斯规范场理论已经与牛顿、麦克斯韦和爱因斯坦的工作并列，而且必然对未来几代人产生可与这些学者相比拟的影响。”

(3) 弱电统一理论

记不得是在什么场合，曾听杨先生谈起：1954年初，他应奥本海默（J. R. Oppenheimer, 1904 ~ 1967）邀请回到普林斯顿做短暂访问，并就他和米尔斯的工作做了一次专题报告。当时，泡利也在普林斯顿访问。报告开始不久，他刚在黑板上写下场方程，泡利就问：“场的质量多大？”他说：“我们不知道”，然后继续报告。但是，泡利仍不依不饶地再次提出同样的问题，他回答：“这是一个十分复杂的问题，虽然我们对它进行了研究，但是没有得到明确的结论。”泡利固执地反驳道：“这不是一个充分的辩解。”当时，他有些惊慌，犹豫一会儿，便坐了下来，场面很尴尬。会议主持奥本海默转圜说：“我们应当让他继续”……泡利的问题所指的是：既然电磁场是没有静止质量的，你们的规范场也不应当有质量，而要解释与核有关的短程力，规范场必须有质量。后来，这个“质量问题”一直困扰着杨振宁，虽然他与李政道发现了弱作用过程中的宇称不守恒对揭示弱作用本质做出了重大贡献，但是，最终还是让温伯格和萨拉姆在杨-米尔斯规范场和格拉肖 $SU(2) \times U(1)$

规范场的基础上引入希格斯机制建立了弱电统一理论。

格拉肖的 $SU(2) \times U(1)$ 规范场理论

我们曾在本系列讲座第四讲：“弱力和电磁力的统一”中提到：在揭示弱力物理本质的过程中，费米凭其物理直觉最先指出：弱力和电磁力一样，是矢量相互作用。后来，经过许多科学家近30年的实验和理论研究，终于确立了费米V-A普适弱相互作用，证明了弱力确实与电磁力十分类似，是矢量相互作用。1958年，费曼和盖尔曼根据费米V-A普适弱相互作用进一步提出了守恒矢量流理论和同位旋三重态矢量流假说，为弱力和电磁力的统一奠定了基础。

在杨振宁和米尔斯提出 $SU(2)$ 规范场之后，施温格根据费米的想法尝试在杨-米尔斯场的基础上实现弱力和电磁力的统一。1957年，在《物理年鉴》上发表的一篇题为：《基本相互作用理论》的论文中，他假设：弱力和电磁力一样，也是由某种规范场来传递的，这种传递弱力的规范量子就是中间玻色子W，但是W的质量要求很大，否则在处理低能弱衰变时所得结果就要和费米 β 衰变理论相矛盾。后来，施温格的理论被格拉肖、萨拉姆和沃德（J. C. Ward, 1924 ~ 2000）作了进一步的发展。

通常认为，在弱电统一的道路上，取得实际进展的第一篇论文是格拉肖于1961年发表在欧洲《原子核物理》上的，题目为《弱作用的局部对称性》。在这篇论文中，格拉肖考虑到弱作用中宇称不守恒，即左右不对称，以及手征对称性^①要求静止质量为0的中微子是左旋的，纯轻子弱作用只能发生在左旋轻子之间，将海森伯用来描述中子和质子对称的同位旋加以推广，引入弱同位旋和弱超荷分别描述轻子双重态 (ν_L, l_L) 和单态 (l_R) ，这里 ν_L 是左旋的中微子； l_L 和 l_R 分别是左旋的轻子和右旋的轻子，并将描述双重态的 $SU(2)$ 群和描述单态的 $U(1)$ 群结合成 $SU(2) \times U(1)$ 群来描述轻子的对称性。于是，要求理论在定域 $SU(2) \times U(1)$ 变换下保持不变，就必须引入四个规范场，其中三个组成弱同位旋矢量 \mathbf{W}_μ ，另一个是弱同位旋标量 B_μ 。 \mathbf{W}_μ 在同位旋空间中的头两个分量 W_μ^1 和 W_μ^2 是带电的，可以看作是产生荷电弱流的中间玻色子；第三分量 W_μ^3 和 B_μ 是中性的，除了光子

还有一个是产生中性弱流的中间玻色子。这样，格拉肖便预言了原先没人知道的纯轻子弱中性流的存在。显见，按照格拉肖的上述方案， $SU(2)\times U(1)$ 规范场确实可以统一地描述弱作用和电磁作用，但是，类似于杨-米尔斯场和电磁场，这个场的四个规范粒子都与光子一样不具有质量，也就是说，困扰杨振宁的“质量问题”仍然没有得到解决，因此，格拉肖的方案仍然只是一种形式理论。1964年，在意大利国际理论物理中心工作的萨拉姆和沃德在不知道格拉肖工作的情况下，也提出了与格拉肖基本相同的弱电统一方案。

对称性自发破缺与希格斯机制

对称性自发破缺，指的是物理系统的连续对称性虽然不存在明显的破缺，但其基态不具有这种对称性，从而自发破坏了系统的对称性。1960年，美籍日裔理论物理学家南部阳一郎（Y. Nambu, 1921~）首先将原先存在于铁磁现象中的对称性自发破缺^④引入到粒子物理中，用来说明：如果一个系统具有连续对称性，那么，由于真空在此对称性下并非不变而产生自发破缺时，就必然会出现哥德斯通定理^⑤所预言的质量为零的玻色子，即哥德斯通玻色子。但是，实验上一直没有发现哥德斯通玻色子，这对于严格的哥德斯通定理来说，显然是一个疑难的问题。在希格斯机制提出之后，这个问题才得到了解决。

希格斯机制是在规范场对称性自发破缺的情况下使其获得静止质量并消除掉哥德斯通玻色子的一种方法。它是由三组科学家：（1）比利时人布鲁特（R. Brout, 1928~2011）和恩格勒特（F. Englert, 1932~）；（2）英国人希格斯（P. Higgs, 1929~）；（3）美国人古拉尔尼克（G. Guralnik, 1936~2014）和哈根（C. Hagen, 1937~），以及英国人基伯（T. Kibble,



布鲁特



古拉尔尼克



哈根

基伯

1932~）于1964年分别独立提出的，只是因为希格斯的数学表述更易于理解，后人将其称为希格斯机制。

1964年，希格斯在超导理论的启示下，提出了一种利用对称性自发破缺使中间玻色子获得质量，而不破坏基本相互作用的规范不变性的方法。具体地讲，规范场是无静止质量的矢量场，这个场只有两个横向极化的自由度，而有静止质量的矢量场可以有纵向极化，因而有三个自由度。当发生对称性自发破缺时，规范场获得静止质量，而这就意味着它增加了一个自由度。希格斯发现：这个增加的自由度可以由哥德斯通玻色子提供。于是，通过对称性自发破缺，使规范场获得了静止质量，消除了无静止质量的哥德斯通玻色子，代之以产生了一个质量不为零的标量粒子。这样的过程，就被称为希格斯机制；产生的标量粒子，就被称为希格斯粒子。

对称性自发破缺和希格斯机制的提出，解决了困扰杨振宁多年、同样使格拉肖头痛的“质量问题”，促进了杨-米尔斯规范场理论的实际应用。

温伯格-萨拉姆模型

1967年，美国哈佛大学的温伯格教授将希格斯机制应用于格拉肖 $SU(2)\times U(1)$ 规范场理论，建立了弱电统一理论，并定量地预言了中间玻色子 W^+ 和 Z^0 的质量。差不多同时，萨拉姆也将希格斯机制应用于他自己和沃德的理论，得出了与温伯格一致的结果。这两项工作，后来被统称为弱电统一理论的温伯格-萨拉姆模型。

为了叙述的方便，我们以温伯格的工作为例，来介绍温伯格-萨拉姆模型。采用希格斯机制，让格拉肖 $SU(2)\times U(1)$ 规范场的对称性自发破缺，使得该场

的4个规范粒子中的带电的 W_μ^1 和 W_μ^2 变成现在所说的中间玻色子 W^+ 和 W^- ；不带电的 W_μ^3 和 B_μ 则重新组合成电中性的中间玻色子 Z_μ （即 Z^0 ）和光子 A_μ （即 γ ）：

$$\begin{pmatrix} A_\mu \\ Z_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_w & -\sin\theta_w \\ \sin\theta_w & \cos\theta_w \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_\mu \\ W_\mu^3 \end{pmatrix}$$

其中混合角 θ_w 称为温伯格角。适当选取温伯格角 θ_w 的数值，便可使中间矢量玻色子 W^\pm 和 Z^0 获得质量，而光子仍保持无质量。这样，便能同时得到破坏宇称守恒的弱作用和仍然保持宇称守恒的电磁作用。至于对称性自发破缺时本应出现的哥德斯通玻色子，则通过希格斯机制被“吃掉”了，另外产生了一个有质量的标量粒子，即希格斯粒子^⑥。

1970年，格拉肖等提出了粲夸克的概念，使温伯格-萨拉姆理论不仅适用于纯轻子弱作用而且可以适用于有强子参与的弱作用。1971~1972年间，荷兰的一位很年青的研究生特霍夫特（t Hooft, 1946~）和他的老师韦尔特曼（M. Veltman, 1931~）证明了对称性自发破缺并不破坏非阿贝尔规范场理论的可重整性，更加精确地预言了中间玻色子 W^\pm 和 Z^0 的质量。顺便指出，特霍夫特和韦尔特曼荣获了1999年度的诺贝尔物理学奖。

1973年，在欧洲核子研究中心的 Gargamelle 实验合作组哈塞尔特（F. J. Hasert）等利用庞大的重液泡室和能量为28 GeV的加速器所产生的中微子束流找到了弱中性流反应： $e + \nu_\mu \rightarrow e + \nu_\mu$ 的第一个事例，间接地证明了 Z^0 的存在，从而验证了温伯格-萨拉姆理论的预言；1978年，在美国斯坦福直线加速器中心



特霍夫特

韦尔特曼

工作的由泰勒领导的实验组作了一个纵向极化电子在氦核上散射的实验，得到了与弱电统一理论预言相符合的实验结果，再次确认了弱电统一理论；1979年，美国费米国家实验室莫玮-王祝翔小组实验发现的弱中性流事例多达四十余起，对温伯格-萨拉姆理论做出了更为严格的检验，这些实验发现最终导致温伯格、格拉肖和萨拉姆荣获了1979年度诺贝尔物理学奖^⑦。

1983年初，在欧洲核子研究中心，由鲁比亚领导的 UA1 实验组在质子-反质子对撞机（SPS）上观察到5个 W^\pm 事例，确定 $M_{W^\pm} = (81.70 \pm 6.44) \text{ GeV}$ ；另一个由德勒拉领导的 UA2 实验组观察到4个 W^\pm 事例，确定 $M_{W^\pm} = (83.05 \pm 7.05) \text{ GeV}$ 。4个月后，UA1组找到了 Z^0 的第一个事例，又过2个月，在欧洲核子研究中心一共找到了5个 Z^0 事例，确定 $M_{Z^0} \cong 100 \text{ GeV}$ 。实验发现的中间玻色子 W^\pm 和 Z^0 的质量与弱电统一理论预言值符合得很好。1年后，鲁比亚和领导建成反质子储存环的范德梅尔共同荣获了1984年度诺贝尔物理学奖。

综上所述，规范变换原先是外尔试图统一电磁力和引力而引入的，但未能如愿；杨振宁和米尔斯将外尔提出的时空坐标的定域规范变换推广为同位旋空间的定域规范变换，或者说，将阿贝尔群（ $U(1)$ 群）推广为非阿贝尔群（ $SU(2)$ 群），建立了杨-米尔斯规范场理论；格拉肖在杨-米尔斯场的基础上引入 $SU(2) \times U(1)$ 规范场来统一描述弱力和电磁力，但仍然没有解决“质量问题”；温伯格和萨拉姆，引入希格斯机制，解决了“质量问题”，建立了弱电统一理论，即 $SU(2) \times U(1)$ 规范场理论。差不多同时，盖尔曼等提出夸克模型，格罗斯、波利策和维尔切克创建量子色动力学，即 $SU(3)$ 规范场理论。这些都说明了，主宰微观世界的强力、弱力和电磁力都可用规范场来描述。因此，它们的大统一自然也可以通过规范场来实现。下一讲，我们将介绍夸克模型与量子色动力学、粒子物理标准模型和强力、弱力和电磁力的大统一。

^① 罗伯特·米尔斯（R. L. Mills, 1927~1999）当时是哥伦比亚大学克劳尔（N. Kroll, 1922~2004）教授的博士研究生，后成为俄亥俄州立大学的教授。

她用物理的情趣，引我们科苑揽胜； 她用知识的力量，助我们奋起攀登！

欢迎投稿，欢迎订阅

《现代物理知识》杂志隶属于中国物理学会，由中国科学院高能物理研究所主办，是我国物理学领域的中、高级科普性期刊。

为进一步提高《现代物理知识》的学术水平，欢迎物理学界的各位专家、学者以及研究生为本刊撰写更多优秀的科普文章。投稿时请将稿件的 Word 文档发送至本刊电子信箱 mp@mail.ihep.ac.cn，并将联系人姓名、详细地址、邮政编码，以及电话、电子信箱等联系方式附于文章末尾。

所投稿件一经本刊录用，作者须将该篇论文各种介质、媒体的版权转让给编辑部所有，并签署《现代物理知识》版权转让协议书（全部作者签名），如不接受此协议，请在投稿时予以声明。来稿一经发表，将一次性酌情付酬，以后不再支付其他报酬。

《现代物理知识》设有物理知识、物理前沿、科技经纬、教学参考、中学园地、科学源流、科学随笔和科苑快讯等栏目，并于 2009 年增加了彩色中

心插页。

2015 年《现代物理知识》每期定价 10 元，全年 6 期 60 元，欢迎新老读者订阅。

邮局订阅 邮发代号：2-824。

编辑部订阅 汇款到：北京市玉泉路 19 号乙高能物理所《现代物理知识》编辑部；邮编：100049。

需要过去杂志的读者，请按下列价格汇款到编辑部。1992 年合订本，18 元；1993 年合订本，18 元；1994 年合订本，22 元；1994 年增刊，8 元；1994 年附加增刊合订本，36 元；1995 年合订本，22 元；1996 年合订本，26 元；1996 年增刊，15 元；1997 年合订本，30 元；2000 年附加增刊合订本，38 元；2000 年增刊，10 元；2001 年合订本，48 元；2002 年合订本，48 元；2003 年合订本，48 元；2004 年合订本，48 元；2006 年仅剩 4、5、6 期，每期 7 元；2007 ~ 2011 年单行本每期 8 元；合订本每本 50 元；2012 ~ 2014 年单行本每期 9 元，合订本每本 60 元。

② 群论是研究群的数学理论，群是元素间存在二元运算（例如交换律一般不成立的乘法）并满足封闭性、结合性、存在单位元和逆元等四条公理的对象集合，例如，矢量在空间绕坐标原点的转动，使一个矢量变换为另一个矢量，这些变换的集合就构成了空间转动群；又如，本文中出现的以 $SU(2)$ 标记的么正变换群就是在某种抽象空间（例如自旋或同位旋空间）中的转动变换群。

群论在物理学中的作用是与对称性密切相关的，例如，时空平移不变性和空间转动不变性分别给出动量守恒定律和角动量守恒定律等。

③ 手征对称性，指的是在手征变换 $\psi \rightarrow \frac{1}{2}(1 + \gamma_5)\psi$ 下保持不变。在本系列讲座第四讲中，我们曾经指出：苏达香和马谢克首先引入手征变换并要求四费米子弱相互作用在手征变换下保持不变，从而在理论上确认了费米 V-A 普适弱相互作用。手征对称性要求质量为 0 的费米子必须是左旋的，例如中微子就是左旋粒子。

所谓左旋或右旋，指的是它们的自旋的指向或者与运动方向相同——左旋；或者与运动方向相反——右旋。对于质量不为 0 的费米子，例如电子，只有在磁场中使其自旋极化才能变成左旋或右旋的粒子，一般情况下，它是左旋粒子和右旋粒子的组态混合，或

者说，它既包含左旋态 (I_L) 又包含右旋态 (I_R)。

④ 铁磁系统本来是空间各向同性的，但在临界温度下系统基态却稳定地处在自旋有一定取向的状态中，从而破坏了空间的各向同性。

⑤ 1961 年，英国理论物理学家哥德斯通 (J. Goldstone, 1933 ~) 提出一个有关对称性自发破缺的普遍定理：如果物理系统所具有的连续对称性被真空态破坏，则必然会出现静止质量和自旋均为 0 的玻色子，即哥德斯通玻色子。具体地说，真空态是能量和动量均为 0 的状态，它不是只有一个，而是简并着的无穷多个；当发生对称性自发破缺时，不同的真空态能够被区分开来，这是因为它们里面包含着不同数目的静止质量、能量和自旋均为 0 但具有真空量子数的量子。鉴于南部阳一郎对自发对称破缺先已做出了重要贡献，有人也将其称为南部 - 哥德斯通定理。

⑥ 关于希格斯粒子的寻找和实验发现，我们将在下一讲谈到粒子物理标准模型时再作详细介绍。

⑦ 关于弱中性流和中间玻色子 W^+ 和 Z^0 的实验发现以及随后颁发的两次诺贝尔物理学奖，在本系列讲座第四讲中已经作过详细介绍，这里就不赘述。