

# 对称性和对称性破缺

——兼释 2008 年诺贝尔物理学奖成就

黄 涛

对称性存在于自然界许多客观物体的几何形状之中，例如物体和镜中的像物体有镜像对称性，一个球形物体对它的轴有转动对称性，对称性也存在于周围物体和各种建筑图案等等。对称性在物理上决定了微观世界中基本粒子特性和它们之间的相互作用规律存在各种对称性质。例如在不同时间不同地点做同样一个物理实验其结果是相同的，不会因为在中国和美国做出不同物理规律的结果。这意味着对一个物理系统，时空坐标原点的选取和坐标轴方向的选取都不影响客观的物理规律，或者说时间-空间是均匀对称和各向同性的。又如相应于宏观物体的镜向对称性有微观粒子的空间坐标反射对称性，还有时间坐标反演对称性，正、反粒子间电荷共轭对称性，空间转动对称性，时间-空间的均匀对称或各向同性等。这些对称性反映了物质状态和相互作用运动规律在相应的对称性变换下的性质。对称性变换有些是分立的，如空间反射、时间反演等，有些对称性变换是连续的，如空间转动、时间-空间各向同性等。数学上将那些满足一定结合律和具有恒等变换、逆变换的对称性变换集合称为对称群。对称群理论在物理上的应用对认识物质状态和相互作用运动规律起了很重要的作用。

物理系统在某一对称性变换下不变是和物理量的守恒律紧密相关的。例如时间-空间的各向同性意味着物理系统在时间-空间平移变换和转动变换下是不变的，这相应于能量-动量守恒律和角动量守恒律，其守恒量是能量、动量、角动量。与空间坐标反射对称性相关的是宇称守恒律，其守恒量是宇称(以  $P$  标记)。在微观物理研究领域，每个粒子都存在着一个反粒子，例如电子的反粒子是正电子，质子的反粒子是反质子。粒子与反粒子的质量相同但守恒量子数相反，两者相遇会发生剧烈的湮灭反应生成能量量子。与正、反粒子对称性相关的是电荷共轭守恒量(以  $C$  标记)。与时间反演对称性相关的守恒量是时间反演宇称(以  $T$  标记)。由物理学普遍原理知微观世界遵从空间反射、时间反演、电荷共

轭三者联合变换下是不变的，即所谓的  $CPT$  定理。有些守恒律在研究物质运动规律中是必须遵从的法则，如能量-动量守恒。有些守恒律在某种特定相互作用下会被破坏。

1956 年，李政道、杨振宁首先提出宇称(左右)对称性在弱相互作用下是破缺的，即宇称不守恒规律。这就打破了人们在历史上一贯认为的运动中对称性守恒是基本规律的传统观念。1964 年克隆宁(James Cronin)和费希(Val Fitch)等从  $K$  介子系统实验中又发现宇称和电荷共轭联合( $CP$ )也是破缺的[如果自然界中( $CPT$ )是守恒的，那么  $CP$  不守恒就意味着时间反演( $T$ )不守恒]。人们逐渐认识到物质状态和相互作用运动规律对称性质和对称性破缺是自然界中的基本规律。

2008 年 10 月 7 日瑞典皇家科学院诺贝尔奖委员会宣布将 2008 年度诺贝尔物理学奖授予美国科学家南部阳一郎和两位日本科学家小林诚、益川敏英。南部阳一郎(Yoichiro Nambu)因为发现亚原子物理的对称性自发破缺机制而获奖，日本科学家小林诚(Makoto Kobayashi)、益川敏英(Toshihide Maskawa)因发现对称性破缺的来源并预言了自然界至少存在三代夸克获此殊荣。南部阳一郎将获得一半的奖金。小林诚、益川敏英将分享另一半奖金。

这两个互相关联的成就的重要意义在于它是建立粒子物理标准模型的基本原理并经过了几十年的实验验证，还有助于认识早期宇宙和宇宙演化规律。



南部阳一郎  
(1921 年生)

小林诚  
(1944 年生)

益川敏英  
(1940 年生)

## 一、小林和益川理论提出 CP 对称性破缺起源和预言第三代夸克存在

大家知道，物质结构的研究已从早先的原子层次深入到夸克和轻子这一新层次。20 世纪 60 年代初从加速器实验中发现了 100 多种基本粒子，于是产生了高能物理学(或粒子物理学)。这些基本粒子可以分为两类：一类是参与强相互作用的粒子，如质子、中子、 $\pi$ 介子、奇异粒子和一系列的共振态粒子等，统称为强子(hadron)；另一类是不参与强相互作用，只参与电磁、弱相互作用的粒子，如电子、 $\mu$ 子和中微子等，统称为轻子(lepton)。高能物理实验又进一步揭示上百种强子并不“基本”，是有内部结构的。质子、中子、 $\pi$ 介子等强子是由更小的夸克(quark)组成的，夸克被看成是物质结构的新层次，并提出了夸克模型理论。这些强子是由三种更基本的夸克(上夸克 u、下夸克 d 和奇异夸克 s)组成的。20 世纪 60 年代大量的实验证实了这三种夸克的存在。1974 年，丁肇中和里克特发现了第四种夸克——粲夸克 c，1977 年发现了底夸克 b，1995 年发现了顶夸克 t。因此，这 6 种夸克就是构成所有数百种强子的“基本”单元。对于这不同的 6 种夸克，引入量子数“味”来描述。同时轻子的发现也达到了 6 种(电子 e、电子型中微子  $\nu_e$ 、 $\mu$ 子、 $\mu$ 型中微子  $\nu_\mu$ 、 $\tau$ 轻子、 $\tau$ 型中微子  $\nu_\tau$ )。因此具有不同味的夸克和轻子就是目前阶段我们所认识的物质结构的新层次，人们称上夸克 u、下夸克 d 为第一代夸克，粲夸克 c、奇异夸克 s 为第二代夸克，顶夸克 t、底夸克 b 为第三代夸克，

$$\begin{array}{ccc} \text{第一代} & \text{第二代} & \text{第三代} \\ \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, & \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}, & \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix} \end{array}$$

相应地轻子也有三代，

$$\begin{array}{ccc} \text{第一代} & \text{第二代} & \text{第三代} \\ \begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}, & \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}, & \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix} \end{array}$$

形成夸克——轻子对称性。

夸克、轻子通过电磁相互作用、弱相互作用、强相互作用和引力等四种相互作用运动规律就构成了自然界万物奥妙无穷、千变万化的物理现象。传递电磁相互作用的媒介子是光子( $\gamma$ )，传递弱相互作用的是荷电中间玻色子( $W^+$ ,  $W^-$ )和中性中间玻色子，传递强相互作用的是八种胶子(g)。(见右表)

早在底夸克 b 发现之前五年(当时只发现了前三种夸克 u、d、s)，1973 年小林和益川(Kobayashi-Maskawa)在日本学术刊物“理论物理进展”(Progress of Theoretical Physics)发文指出如果自然界中还存在(至少)第三代夸克(顶夸克 t 和底夸克 b)，微观粒子系统中的 CP 破坏现象就可以得到解释。从而预言了底夸克 b 和顶夸克 t 的存在，并为 1977 年和 1995 年实验所证实。他们还认识到 B 介子(包含 b 夸克的介子)有可能是研究 CP 对称性破坏的最理想的场所。20 世纪 90 年代末美国和日本花巨资建造了 B 介子工厂就是为了寻找在 B 介子中 CP 不守恒现象。此后几年两个 B 介子工厂的实验(美国的 BaBar 和日本的 Belle)证实了他们提出的 CKM 矩阵(KM 是 Kobayashi-Maskawa 的缩写，C 是意大利科学家 Nicola Cabibbo 的代称)。迄今为止 CP 破坏现象是在 K 介子和 B 介子中发现的，人们也可以问，除了夸克系统外，在轻子系统是否也存在 CP 不守恒的现象？

相互作用力类型	传递相互作用的媒介子
电磁相互作用	光子
弱相互作用	中间玻色子， $W^+$ , $W^-$ , Z
强相互作用	胶子

## 二、南部提出自发对称性破缺理论在建立粒子物理标准模型中起了关键作用

1967 年，温伯格(Weinberg)和萨拉姆(Salam)提出了电磁相互作用和弱相互作用统一理论，并预言了弱中性流的存在以及传递弱相互作用的中间玻色子的质量，Glashow(格拉肖)，Weinberg 和 Salam 获 1979 年诺贝尔物理奖。弱、电统一理论的成功，其意义可以与麦克斯韦电学和磁学统一理论的验证相比拟。弱电统一理论与 1973 年提出的描述夸克之间强相互作用的量子色动力学理论合在一起，统称为高能物理(或粒子物理)中的标准模型理论。20 世纪 70 年代到 20 世纪末，大量的高能物理实验证实了粒子物理中标准模型理论的成功，这一理论已经受到了实验检验并正在继续发展。标准模型理论是近半世纪以来探索物质结构研究的结晶，是本世纪探索微观世界规律的极重要的成就。可以相信，标准模型理论的发展必将导致深层次动力学规律的发现和建立。

弱、电统一模型理论成功的一个关键点是引入真空对称性自发破缺机制。在弱电统一理论模型中，

现代物理知识

电磁相互作用和弱相互作用分别通过光子和中间玻色子等媒介子传递，它们可以用一种统一的量子规范场（杨-米尔斯场）来描述，规范场与夸克和轻子的相互作用遵从规范不变的内部对称性（非阿贝尔规范群）。然而精确的规范群不变性要求光子和中间玻色子是无质量的，这一点仅对传递电磁相互作用的光子是正确的。引入真空对称性自发破缺机制使得中间玻色子获得质量，并预言了质量值的大小。CERN 科学家卢比亚（carlo Rubbia）和范德梅尔（Simon Van Der Meer）在 1983 年 1 月和 6 月发现了带电的和中性的中间玻色子，实验上测到的中间玻色子的质量与理论预言惊人地一致，此项成果证实了弱、电统一理论的成功，从而获得了 1984 年诺贝尔物理学奖。

对称性自发破缺机制最早是 1960 年南部阳一郎将铁磁系统和超导体中对称性破缺引入到微观粒子系统提出的。量子场论是描述微观粒子系统的基本理论体系，量子场系统的能量最低状态就是真空态，这个基态的能量、动量为零。粒子是真空激发的量子，所以粒子的性质必然与真空的本质密切相关。真空的性质和各种粒子的运动规律，由量子场论体系中基本原理给出的相互作用形式确定。因此，自然界的真空不是一无所有的虚无，而是充满物质场相互作用的最低能量态，它可以有真空零点振荡、真空涨落（各种虚粒子的产生、湮灭和转化）和真空凝聚（如集体激发态的相干凝聚）等。真空性质的复杂性及其物理后果都充分表明了真空不空，它对物理学发展产生了深刻的影响。南部的对称性自发破缺理论就是基于对真空物质性的认识提出的。

前面提到的弱相互作用宇称不守恒这种对称性破缺明显地包含在相互作用中，人们称为对称性明显破缺。上夸克  $u$ 、下夸克  $d$  和奇异夸克  $s$  由于它们的质量不同也明显地破缺  $SU(3)$  味对称性。对称性破缺还有另一种形式就是自发破缺。1960 年南部首先认识到在某种相互作用形式下真空态可能不是唯一的，存在多个最低能量态，物理上称为简并真空态，此时可能发生真空对称性自发破缺，即物理真空只选取了多个简并真空的一个态。这时真空的对称性小于相互作用的对称性。举个例子讲，一枝铅笔立在一个圆盘的中央，它对所有方向都是相同的或者说是对称的，然而不稳定立着的铅笔一定会倒下，倒下后仅一个方向被选定，不再具有这种对

称性，或者说对称性存在于铅笔倒下之前（图 1）。

再举个例子：一桌酒席开宴前每个座位前筷子、酒杯、毛巾整齐摆放在客人面前，从哪个角度看都是对称的，一旦一位客人拿起面前的筷子或毛巾，其他客人只有一种方式拿起自己面前的筷子或毛巾，对称性破缺。物理上铁磁体和超导体系统就是这种情况。例如铁磁体在居里点以下显示出的铁磁性，它的磁矩指向特定方向。铁磁系统可以用自旋点阵模型来描述，其相互作用形式是各向同性的，即具有转动不变对称性，但最低能态(真空)不止一个，可以指向不同方向。在居里点以下由于某种原因选定了所有自旋都排列在同一方向就不是各向同性，破坏了转动不变对称性，这时系统发生了对称性自发破缺。按照南部-戈德斯通(Nambu-Goldstone)定理，当连续对称性产生自发破缺时，系统中一定会出现零质量的戈德斯通粒子。戈德斯通粒子的数目取决于相互作用对称性的大小( $G$ )和物理真空保留对称性大小( $H$ )之差(确切地说戈德斯通粒子的数目为  $n_G - n_H$ ，其中  $n_G$  和  $n_H$  分别是群  $G$  和群  $H$  的生成元数目)。弱电统一理论中弱相互作用和电磁相互作用具有共同的非阿贝尔规范群对称性，规范场介子的质量为零。当选取了某一特定物理真空后，对称性产生自发破缺，系统中出现的零质量戈德斯通粒子变成了规范介子的纵向自由度，使原来没有质量的中间玻色子获得了很重的静止质量，使统一的电弱相互作用分解为性质截然不同的电磁相互作用和弱相互作用两部分。这就是希格斯(Higgs)机制，从而精确地预言了前面提到的中间玻色子质量，还保持了理论的规范不变性和可重整性。



图 1

弱电统一理论在精确预言了中间玻色子质量的同时，也预言了一种中性标量粒子，称为希格斯粒子的存在，但理论上无法预言它的质量。自弱、电统一模型提出以后，人们一直在寻找它，从几个 MeV 一直找到几十个 GeV 都没有发现它，每一台新加速器建成以后都企图发现它，然而就是找不到，在目前加速器能量极限下只能给出希格斯粒子的下

限是 114GeV。这就成为近 20 年来粒子物理中的一个令人不解的谜—希格斯粒子在哪里？如果希格斯粒子不存在，那么对称性破缺的机制是什么？在西欧中心正在建造的大型强子对撞机(LHC)，以几十亿美元、历时 10 多年的投资，其物理目标之一就是回答对称性破缺的本质这一疑难。

在标准模型中，不仅中间玻色子的质量是通过对称性破缺获得的，而且夸克和轻子的质量也是通过引入希格斯机制破缺对称性给出的。然而轻子和夸克的质量谱从电子伏特 (eV) 一直到 180GeV，可以相差 11 个数量级，即使同一层次的夸克也从几 MeV 到 180GeV，相差上万倍，其质量的起源困扰着高能物理学家们。这样宽广的质量谱很可能反映了有更深层次的结构。

### 三、对称性和对称性破缺是宇宙演化的基本规律

对称性自发破缺和 CP 对称性破缺还具有更深远的科学意义，它提供了解释宇宙起源和今日宇宙存在的可能性。大约 140 亿年前我们的宇宙从大爆炸开始，宇宙大爆炸理论预言了早期宇宙很可能处于高度对称状态，经过冷却和相变才变成今日之世界，这就相应于一系列的对称性自发破缺过程。大爆炸开始是在普朗克能量尺度，温度在  $10^{19}$  GeV(时间相当于  $10^{-44}$  秒)，这时宇宙中引力、强、弱、电四种相互作用是统一的。然后冷却能量尺度降至  $10^{15}$  GeV(时间相当于  $10^{-35}$  秒)、 $10^{14}$  GeV(时间相当于  $10^{-33}$  秒)，强、弱、电三种相互作用仍是统一的，有可能是粒子物理中超对称大统一理论所描述，夸克、胶子处于等离子体状态。当温度降至  $10^2$  GeV 时，真空选取一特定方向弱电对称性自发破缺成为两种差别很大的相互作用。温度继续下降到 1GeV(时间相当于  $10^{-6}$  秒)，夸克在强相互作用下形成强子，由量子色动力学描述。当温度下降到 0.1GeV(时间相当于  $10^2$  秒)，轻原子核形成，由核合成理论描述。这就是宇宙最初三分钟形成物质世界的图像。而后是中性质子的形成(温度降到 1eV，时间相当于  $10^{12}$  秒)，星系形成直至当今的万千世界。

早期宇宙处于高度对称状态，粒子数和反粒子数相等，遵从电荷共轭对称性，反粒子存在将会由反质子、反中子和正电子构成的反物质存在于宇宙中。粒子与反粒子两者相遇会发生剧烈的湮灭反应生成能量辐射，因而就不会有今日之宇宙。然而人们至今在浩瀚的宇宙空间还没有找到反物质，自然

界万物都是正物质构成的。物理学家通常用  $\eta = (n_B - n_{\bar{B}})/n_\gamma$  来定义物质与反物质不对称的度量(其中  $n_B$  和  $n_{\bar{B}}$  分别为重子和反重子的数密度,  $n_\gamma$  为光子的数密度, 大约为  $400/\text{cm}^3$ )。直观上,  $\eta$  不为零标志着物质和反物质不对称性。近年的微波背景辐射的研究对  $\eta$  的精确确定为  $\eta = (6.1_{-0.2}^{+0.3}) \times 10^{-10}$ 。宇宙学研究表明, 宇宙在早期经历了一个暴涨阶段, 物质在暴涨后的再加热过程 (Reheating) 中产生, 随着宇宙的冷却, 湮灭反应不再可逆, 所有的反重子全部湮灭, 超出的百亿分之一的重子被残留下来, 湮灭生成的大量辐射冷却后成为宇宙微波背景, 残留重子在暗物质和引力塌缩的作用下凝聚为星系和恒星。所以物质与反物质的不对称也必然是宇宙演化的结果。1967 年萨哈洛夫 (Sakharov) 提出宇宙中要想得到物质和反物质不对称性有三个必要条件:

(1) 基本理论必须具有破坏重子数的过程(重子数 B 不守恒); (2) 导致重子数破坏的相互作用也必须破坏 C 和 CP 对称性; (3) 为了动力学确立这种不对称性, 重子数破坏过程必须破坏宇宙中热平衡。虽然粒子物理标准模型理论能够提供前两个必要条件, 例如大统一理论中存在有重子数不守恒过程; 弱电统一理论存在着一种重子数破坏的解。小林和益川机制给出的 CP 破坏的起源。但定量计算表明, 标准模型给出的正反物质不对称  $\eta$  远远小于  $10^{-10}$ 。其主要原因是小林和益川 (CKM) 机制给出的 CP 破坏量不够大。因此寻找新的 CP 破坏机制是粒子物理学和宇宙学的重要课题。正、反物质不对称疑难的研究促进了对超出标准模型新物理的探讨。现已提出的有大统一机制、弱电相变机制、超对称伴随子凝聚衰变生成机制、拓扑缺陷生成机制, 以及由轻子数非对称转化为重子数非对称的机制等。近年来, 由于中微子振荡实验结果肯定中微子有质量, 这样轻子数本来就可能不守恒, 由轻子数非对称转化为重子数非对称, 提供了一种可能比较自然发生的机制。但最终答案有待进一步探讨。因此, 粒子物理学对物质结构的探索, 从低能量加速器到高能加速器以及理论上自己追求不同能量标度的大统一理论, 正是与宇宙演化过程相一致的, 粒子物理与宇宙学相互交叉发展必将揭示自然界中对称性和对称性破缺的本质仍是探求微观物质结构和宇宙起源的基本难题。

(中国科学院高能物理所 100049)