

破缺的对称性

——简评 2008 年诺贝尔物理学奖

苏 刚[†]

(中国科学院研究生院 北京 100049)



The Nobel Prize in Physics 2008

"for the discovery of the mechanism of the spontaneous broken symmetry in subatomic physics"

"for the discovery of the origin of the broken symmetry which predicts the existence of at least three families of quarks in nature"



Photo: SCANPIX

Yoichiro Nambu

1/2 of the prize

USA

Enrico Fermi Institute,
University of Chicago
Chicago, IL, USA

b. 1921



Photo: Kyodo/Reuters

Makoto Kobayashi

1/4 of the prize

Japan

High Energy Accelerator
Research Organization
(KEK)
Tsukuba, Japan

b. 1944



Photo: Kyoto University

Toshihide Maskawa

1/4 of the prize

Japan

Yukawa Institute for
Theoretical Physics
(YITP), Kyoto University
Kyoto, Japan

b. 1940

2008 年 10 月 7 日北京时间下午 5 点 45 分,瑞典皇家科学院在斯德哥尔摩宣布,将本年度的诺贝尔物理学奖的一半授予美国芝加哥大学的南部阳一郎(Yoichiro Nambu),以表彰他发现了亚原子物理中对称性自发破缺的机制,奖项的另一半由日本高能加速器研究机构(KEK)的小林诚(Makoto Kobayashi)和京都大学的益川敏英(Toshihide Maskawa)分享,以表彰他们发现了对称性破缺的起源,并由此预言了自然界中至少有 3 个夸克家族存在。

人类对对称性的兴趣可以追溯到远古时期。从古希腊文明到现在的日常生活,从美丽的雪花、达·芬奇的油画、各种漂亮的装饰图案、植物的花、叶,到令人惊叹的建筑物如鸟巢、水立方等,人们无时无刻不在感受着对称性带来的美感。对称性是指如果一个操作或变换使系统从一个状态变到另一个与之等

价的状态,或者说系统的状态在此操作或变换下不变,我们就说该系统具有对称性。例如,一个呈现六角图案的雪花,当旋转 60° 时,人们看到的形状与旋转前是完全一样的,我们就说该图案具有 6 重旋转对称性;对正常的人体来说,则具有明显的镜面反射对称性等。对称性描述的数学语言是 19 世纪由数学家建立起来的群论(group theory)。在 20 世纪,群论作为一个有力工具在物理学研究中得到了重要而广泛的应用,并由此导致了許多重大的科学发现和物理理论的建立,如狭义相对论、质子、中子、正电子和其他一些基本粒子的发现、标准模型、弱作用中的宇称不守恒等,这些成果均获得了诺贝尔物理学奖。

现在知道,物理学中的对称性意味着守恒律的出现。当系统由于某种原因失去了原有的对称性后,一定会进入到另一个与以前完全不同的状态,这就是对称性破缺的概念。例如,当体重差不多的两个小孩在玩跷跷板时,两个小孩分坐两端,在静止状态下,跷跷板保持水平状态,达到平衡;当一个小孩离开后,跷跷板失去平衡,有小孩的一端着地,另一端则必然上翘,使原来的水平状态被打破,原有的对称性就发生了破缺。又比如,水是各向同性流动的液体,水分子在水中沿各个方向运动皆可,但当温度下降到零度以下时,水结成了冰,水分子在冰中按一定的择优方向排列,形成了冰的几何结构,对称性降低,不再保持原来水中各向同性的对称性,即发生了对称性破缺。

对称性破缺是贯穿凝聚态物理始终的一个重要的基本概念。在凝聚态物理学中,对称性的破缺就意味着有序相的出现。例如,水结成冰后,水分子在冰中的分布比在水中更有序。另一个典型的例子是铁磁性材料,人们有时俗称为吸铁石或磁石,在这类材

2008-10-08 收到

† Email: gsu@gucas.ac.cn

料中,由于磁性原子之间的交换作用,使之具有自发磁矩,对外呈现出磁性,称为磁有序;但当温度升高到一个临界温度(称之为居里温度)以上时,磁性原子的磁矩在热运动的作用下呈现出混乱的排布,导致铁磁性材料失去磁性,这个状态称为顺磁性。在没有磁场时,其磁矩排布是一种无序状态。在顺磁状态下,磁矩分布杂乱无章,具有较高的对称性,在居里温度以下时,磁矩朝某一个方向择优分布,出现磁有序,对称性随之降低,原有的对称性发生破缺,出现了有序相,对外显示出磁性。这种对称性的缺失无需外来的激励,称为对称性自发破缺(spontaneously symmetry breaking),因此,铁磁有序相的出现必然伴随着对称性的自发破缺。

凝聚态物理中另一类重要的材料是超导体,即在某一临界温度以下,这类材料处于超导态,会失去电阻,呈现零电阻特性,同时对磁场具有排斥作用。超导材料表现出的性质称为超导电性。超导材料在电力传输、低温制冷、磁悬浮运输、高能粒子加速器、储能、精密测量、微波器件、逻辑元件等领域具有广阔的应用前景。目前铜氧化物高温超导体的临界温度已达到 160K 左右,并已经在很多领域得到了大量的实际应用。超导态也是一个对称性自发破缺的态。1957 年,美国 3 位物理学家 John Bardeen, Leon Cooper 和 Robert Schrieffer 对超导电性的起源给出了令人信服的解释,现在被称之为 BCS 超导电性理论,并于 1972 年获得诺贝尔物理学奖。该理论指出,两个具有相反动量和相反自旋的电子通过与晶格振动相互作用可以结成电子对,称为 Cooper 对,超导电性来源于这些电子对在动量空间中的凝聚,超导态是 Cooper 对的凝聚态。由于 Cooper 对破坏了原来电子-声子系统满足的 $U(1)$ 规范对称性,因此,超导态是一个 $U(1)$ 规范对称性自发破缺的态,在其激发谱中有一个能隙。BCS 理论在基本粒子物理、核物理、宇宙学等学科中有重要的应用。

BCS 理论出现以后,Nambu 想要去理解超导态中的规范对称性是如何破缺的,探讨其中是否还蕴藏更深层次的道理。结果他花了大约两年的时间,利用量子场论的框架,推导出了 BCS 理论的结论。通过考虑对顶角的辐射修正,他发现超导态中的规范不变性仍然存在,表征规范不变性的 Ward 恒等式可以建立,只是以非线性的方式来实现。这样,超导态中的所有计算都可以在规范不变下进行,从而发现了在场论表述下的对称性自发破缺。Nambu 在对 BCS 理论的处理中,发现存在着一个具有零能量和

动量的态,称为无质量的声子,当把库仑场考虑进去以后,这些无质量的声子就变成了有质量的等离激元。

1960 年,Nambu 提出在基本粒子的量子场论中也存在着对称性自发破缺,通过引入某种未知场的真空期望值,与超导态相类比,建立了强相互作用理论。在假定手征对称性具有很小的明显破缺时,发现 π 介子有一个小的质量,比其他尺度小得多,并推导出了表征轴矢量、 π 介子衰变常数以及 π 介子与核子间耦合的 GT 关系,计算出了 π 介子与核子间的散射截面,发现与实验符合。 π 介子是一个复合粒子,当对称性没有明显的破缺时,该复合粒子就变成了无质量的。J. Goldstone 利用标量场做了类似的计算,得到了真空期望值,发现能谱中也有一个无质量的粒子,现在被称作 Nambu - Goldstone 玻色子。在基本粒子理论中,手征对称性是整体对称的,而整体对称性的破缺会导致出现无质量的粒子;在超导电性理论中,对称性是规范不变的,这会导致有质量的态出现。1964 年,F. Englert,R. Brout,以及 P. W. Higgs 分别提出了相对论规范理论,他们发现自发破缺的规范对称性没有产生一个无质量的粒子,而是给出了一个有质量的标量态,现在被称为 Higgs 玻色子,它是迄今为止在实验上尚未观测到的唯一的标准模型粒子。2008 年 9 月 10 日,在欧洲核子中心开始运行的大型强子对撞机(LHC),有希望提供实验证据证实 Higgs 粒子存在与否(LHC 运行 9 天后,由于连接加速器中两个磁体间的电路出现问题,导致机械故障,引起液氦泄露,现在正在抢修,预计 2009 年能重新运行)。随后,Nambu 及其合作者提出了强相互作用的基本理论应该是基于 $SU(3)$ 规范群的非阿贝尔规范理论。非阿贝尔规范理论是由杨振宁和 Robert Mills 于 1954 年首先提出的,现在被称为 Yang - Mills 理论,已经成为人们统一自然界电磁、弱、强和引力四种相互作用中前三种作用的数学基础。2000 年,美国 Clay 数学研究所悬赏 100 万美元奖金征集四维时空中量子 Yang - Mills 方程的解,时值今日该问题尚未破解。Gerhard 't Hooft 和 Martinus Veltman 证明了即使规范对称性自发破缺,非阿贝尔规范理论也是可重整化的。杨振宁和 Nambu 等人的工作引发了一系列有关非阿贝尔规范理论的后续的重大发现,如电弱理论、渐进自由、量子色动力学、夸克混合等。

今年诺贝尔物理学奖的另一半授予了日本的科学家 Kobayashi 和 Maskawa。1972 年,当时这两个年

轻的日本学者,根据 Glashow - Salam - Weinberg 的电弱理论模型,研究了电荷宇称(CP)破坏问题.他们想去扩展上述模型,希望得到包含真实复耦合常数的一项.首先研究了具有两夸克家族的模型,发现得不出一个复耦合常数.随后,他们研究了具有SU(2)量子数的三夸克家族模型,发现通过么正变换可以得到一个具有自由相因子的耦合常数,该相因子不能被吸收进其他项.通过矩阵分解,Kobayashi 和 Maskawa 写下了一个含相因子矩阵元的矩阵,现在称为 Cabibbo - Kobayashi - Maskawa 矩阵,被广泛用于讨论夸克混合.该相角不能被变换掉,它的出现就成为三夸克家族理论中包含 CP 破坏的证据.当时,人们只知道 3 个夸克(u, d, s),而 Kobayashi - Maskawa(KM)的理论中包含有 6 个夸克,论文发表后未引起人们的注意.随着一些基本粒子如 J/ψ、重轻子等的发现,人们开始关注 KM 理论,第 4 个夸克(c-夸克)由 Glashow 等人引进,随后第 5 个夸克(b-夸克)在 1977 年被实验发现,第 6 个夸克(t-夸克)在 1994 年被发现.长寿命 b-夸克的发现提供了新的可能性去测试 CP 破坏,人们因此在斯坦福大学和日本的 KEK 建立了“B-工厂”,所有的测量结果和实验数据都显示出与 KM 三十多年前的理论预言惊人的一致,表明在我们能够测量的能量范围内,自然界的基本组成来自于 3 个家族的 6 种夸

克,同时考虑了 CP 对称性破坏可用于区分物质与反物质.需要提及的是,KM 理论也通过了物理学家建立的所有理论上的验证.

KM 理论之所以重要,除了上面讲述的之外,可能对探索宇宙的起源提供了深刻的启示.一种看法认为,在 137 亿年前发生的大爆炸导致了宇宙的诞生,其根源可能来自于迄今尚不能确定的某种对称性破缺.因为按照一般理论,在大爆炸之初,应该产生同等数量的物质和反物质,他们相遇会彼此湮灭,但实际情况并不是这样,而是产生了我们今天所在的世界.其原因有可能是在产生每 100 亿个物质和反物质粒子的同时,有一个额外物质粒子的偏离,正是这样的微小偏离导致的对称性破缺,才使得我们今天的宇宙得以存活.上述设想是否正确,现在尚未有明确的答案,或许刚刚运行的欧洲大型强子对撞机以后会提供部分答案.

对称性自发破缺的重要性除了在上述领域体现出来之外,还是其他领域如宇宙学、化学、生命科学等领域的普遍现象.今年的诺贝尔物理学奖授予了 3 位理论物理学家,他们建立的理论基本而深刻,对人们认识由基本粒子组成的微观世界的结构及其运动规律以及宇宙的起源起到了重要的推动作用,影响深远.

· 封面故事 ·

固态阴极射线发光中的初电子来源的扩展实验

2000 年,美国的《科学》杂志将有机电子学取得的进展列为 2000 年十大科技成果之一,这些成果中包括人类基因组草图、克隆技术等重大发现.同一年诺贝尔化学奖授予了黑格尔、麦克迪米亚德、白川英树等人,奖励他们在有机电子学、有机/聚合物研究方面取得的重大突破.有机材料的生长条件对分子的排布方式有很大影响,它直接涉及有机光电子器件中载流子的传输及器件的性能,提高有机材料的稳定性,不断探索新的器件结构和薄膜制备技术将是有机电子学面临的长期课题.徐叙瑛课题组研究了过热电子激发下有机材料发光的性能,得到了有机材料的激子发光和扩展态发光,将其命名为固态阴极射线发光.为了扩大初电子来源及提高固态阴极射线发光的性能,他们利用场调制分子取向和倾斜式生长的方法制备出了有机、无机纳米棒状结构的纳米薄膜.左上图是利用热蒸发技术在硅片上制备的有机小分子并五苯的原子力显微镜图.经过分析认为并五苯分子是以长轴垂直衬底的方式生长的,形成了许多类金字塔结构的晶粒.右下图是高真空光场调制的方法制备的有机小分子八羟基喹啉铝的原子力显微镜图,从图中可以看到制备的薄膜出现了直径大约是 100nm 的纳米棒.

(北京交通大学光电子技术研究所 张福俊)