



# 科学思维与对称性理论的发现

大贯義郎

在日常生活中，人们可以看到很多“对称性”的例子，例如：建筑物和人工设计的图案，自然界中的矿物晶体、花的形状以及某些特定的生物体的形态等。当然，如果仔细看起来，它们并不见得满足严格意义上的对称性。理想的“对称性”可以作如下定义：如果某个系统具有对称性，那么在对描述这个系统的标架进行变换时，该系统的描述方式不变。例如，对于具有左右对称的系统来说，如果改变左和右的定义，即把左看成右，把右看成左，该系统的描述方式不变。对于绕着某一轴的旋转具有对称性的系统来说，即不管所定义的旋转角的0度为何方向，该系统的描述方式也不变。

改变上述标架，就有种种所谓变换。如果标架变换时仍保持某种对称性，则称为在该种变换下不变，或具有不变性。通常所说的对称性，比较多的是指几何空间配置上的对称性。此外，还有其他形式的对称性。常见的有，相对论中的洛仑兹不变性，量子力学中的全同粒子不可识别性。全同粒子不可识别性是指在任意个数全同粒子中，将粒子的参数作任意交换，其哈密顿量的形式不变。前者是体现在时空性质上面，而后者是和把同种粒子用量子化的单一场描述并和理论原理的构造直接相关的严格的对称性。我把这种对称性称之为一级对称性。

与此相反，几种复杂条件重叠在一起，会产生近似的对称性，即二级对称性。自然界中，雪的结晶就属于这种类型。仔细观察雪的晶体，会发现其结晶的完整性有欠缺。实际上，从几何学的意义来说，不存在真正的六边形或者完全的球型。但在微观的基本粒子世界，可以有非常抽象的、严密而且是奇妙的对称性的存在。在定义对称性时，用了变换这个词。这些变换的集合在数学上称之为群。 $g$ 变换和 $f$ 变换的积 $h = gf$ ，是表示在进行 $g$ 变换后，再进行 $f$ 变换的结果。 $f$ 的逆元是 $f$ 的逆变换，群的单位元即是恒等变换。在谈到上述支配基本粒子世界的对称性时，其群的数学表示为类似 $SU_c(3) \times SU(2) \times U(1)$ 这样的形式。而且，经过近十年来的研究证明，这些对称性的模型是非常严格的，不会有一丝一毫的偏差。但是其背景至今还不太清楚。不管怎样，它们是解释微观世界的重要手段之一。总而言之，对称性是基本粒子理论中不可缺少的最基本的概念之一。然而，和对称性问

题相关联，基本粒子理论和群论的结合是30年前才开始的。

下面我要讲的，并不是在基本粒子理论中，关于对称性的最新话题。当然，在我国基本粒子理论领域研究中，不断地在产生着对称性理论的新枝芽。我只是作为置身其中的一员，叙述我个人的回忆。在这里不可能讲得很仔细。首先，按照时间顺序，从对称性理论的发展史说起。

## 坂田模型

50年代，人们从宇宙射线中，捕获了一群奇异的基本粒子。这一现象，展开了基本粒子理论光辉的一页。

在这之前，所谓基本粒子，有构成原子核的质子和中子，在原子核内作为这些粒子间力的媒介的 $\pi$ 介子，再早一些已经知道的电子和光子，战后不久发现的 $\mu$ 介子，以及那时还没有直接观察到，但后来被确认的中微子。一般来讲，用质量、自旋和带电与否，即带正电还是带负电，以及相互作用的强弱来规定基本粒子的特征。

例如，上述基本粒子中，质子(p)、中子(n)和介子( $\pi$ )是属强相互作用(其强度为电磁相互作用的100倍)。其中，质子和中子的自旋为1/2，遵从费米统计，两者质量几乎相等，彼此很相似，因而被称之为核子(N)。其区别只是质子带正电荷，而中子不带电荷。

在基本粒子量理论中，用场来表达相应的基本粒子。核子场 $N(x)$ ，用质子场 $p(x)$ 和中子场 $n(x)$ 两个分量来表示，即：

$$N(x) = \begin{pmatrix} p(x) \\ n(x) \end{pmatrix} \quad (1)$$

此外，有三种 $\pi$ 介子，即带正电、负电和中性的 $\pi$ 介子(写作 $\pi^+$ 、 $\pi^0$ 和 $\pi^-$ )，其自旋为零，它们的质量相同，约为核子的1/7。和这三种 $\pi$ 介子对应的介子场 $\pi(x)$ 的三个分量表达为

$$\pi(x) = \begin{pmatrix} \pi^+(x) \\ \pi^0(x) \\ \pi^-(x) \end{pmatrix} \quad (2)$$

在由核子和介子组成的强相互作用的系统里，存

在一个称之为电荷无关性的近似的对称性。这里的时空概念是假想的三维空间（称之为电荷空间或同位旋空间）。在这样的空间中，作旋转变换，即把(1)看作同位旋的旋量，把(2)看作和三维矢量相当的三个分量进行变换时，拉格朗日函数不变。这就是所谓电荷无关性的内容。作为一级近似，假定质子和中子质量相等，三种介子的质量也相等。在核子的电荷空间里“角动量”为1/2。在 $\pi$ 介子的空间里“角动量”为1。在电荷空间粒子固有的“角动量”称之为同位旋。电荷空间的矢量有三个分量  $T_i (i = 1, 2, 3)$ ，如将第三个分量对角化，根据核子和 $\pi$ 介子的定义，表示同位旋的算符为

$$T_3 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}, \quad T_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

(核子)                      ( $\pi$  介子)

从(3)式出发，并以质子的电荷为1时，便可以推出各种粒子的电荷算符 $Q$ 。如将(3)式用到(1)或(2)的右方，不难证明下面这个算符是正确的，

$$Q = T_3 + \frac{N_B}{2}. \quad (4)$$

这里， $N_B$ 是重子数，对核子来说取值为1（反核子为-1），对 $\pi$ 介子来说取值为0。基本粒子反应过程中，重子数的总和守恒。

以上，即是新粒子被发现以前所了解到的强相互作用粒子的特征。

电荷无关性用的是三维转动群，记作 $SO(3)$ （在别的说法中，有其同构群 $SU(2)$ ，即由一个两行两列的行列式构成的群）。当然，在讨论同位旋时，没必要大张其鼓地去用群论，实际上只要把它和角动量和自旋相比拟就可以了。

50年代初，发现粒子的产生和湮灭现象。由此发现了一批新型式的粒子，也就是在文章开头提到的新粒子的出现。当时，很多人尝试去解释这些现象，但其中有不少是错误的。终于，在1954年得出了“中野、西岛、盖尔曼定则”。根据这个定则，所有的新粒子具有强相互作用性质。它们象核子和 $\pi$ 介子一样，具有固有的同位旋和重子数，并满足电荷无关性。但是，对于每一种粒子，还必须增加一个叫做奇异量子数的量 $S$ ，才能完全确定这些新粒子。因此，(4)式中强相互作用粒子的电荷算符 $Q$ ，可以推广为

$$Q = T_3 + \frac{1}{2} (N_B + S). \quad (5)$$

同样地，在基本粒子反应过程中重子数守恒。在强相互作用和电磁相互作用下，奇异量子数也守恒；而在弱相互作用下，反应前后有 $\pm 1$ 的变化。

以上是中野、西岛和盖尔曼定则的内容。与此相对应，在表一中列出了当时所知道的强相互作用的粒

子（以下称之为强子）。粒子质量的单位是百万电子伏特。用这种单位系，电子的质量是0.51百万电子伏特。粒子和反粒子的 $N_B, T_3, S$ 和 $Q$ 值的负号相反，而同位旋的大小和质量相等。在中野、西岛和盖尔曼定则发现后的第二年，名古屋大学的坂田昌一博士对该定则作了非常重要的说明，即现在称之为“坂田模型”。记录有当时博士构想的笔记本，现保存在名古屋大学物理学教室的坂田纪念史料室内。但是，上面并没有记载作笔记时的正确日期，我想大概是在1955年的9月或是10月吧，其内容为一切强相互作用的粒子，可以考虑为质子(p)、中子(n)和( $\Lambda$ )粒子与其反粒子 $\bar{p}, \bar{n}$ 和 $\bar{\Lambda}$ 的适当结合的复合状态。

总之，所谓基本粒子并不“基本”，上述三种粒子是组成强子的基础。表一展示了坂田模型中强子的复合情形。表中的 $\Lambda$ 粒子的同位旋为0，因而在电荷空间不受转动的影响。强相互作用的电荷无关性和质子、中子一致。再则当 $N_p = (\text{质子数}) - (\text{反质子数})$ ， $N_n = (\text{中子数}) - (\text{反中子数})$ ， $N_\Lambda = (\Lambda \text{粒子数}) - (\text{反}\Lambda \text{粒子数})$ 时，立即可以从坂田模型的基本粒子定义那里得到：

$$T_3 = (N_p - N_n)/2, \quad N_B = N_p + N_n + N_\Lambda, \quad S = -N_\Lambda \quad (6)$$

把它代入(5)式的右边，可得到 $Q = N_p$ ，因而只有质子带有电荷。所以，(5)是坂田模型必然结果。由此，坂田模型完美地说明了中岛、西岛和盖尔曼原则。但是基本粒子如何形成复合状态的动力学问题的解释，却并不那么简单。这是留给以后要解决的重要的课题。坂田模型在1955年的物理学会和随后的研究会上发表，英文论文在第二年(1956年)被刊载。

### 三维么正群

50年代到60年代，对于作为基本粒子理论描述的基础的定域量子场论的信赖，正处在一个低下的时期。从作为规范理论基础的定域量子场论处于全盛的现状看，这是不可思议的，但这是事实。需要说明的是这种倾向并不限于我国。当然名古屋大学是最突出的地方之一。然而，当时认为量子理论的适用范围，充其量不过到 $10^{-14}$ 厘米程度。在更小的微观领域里，人们强烈地期望存在另一种理论。不在这里细谈其理由，我想，这和当时提倡的坂田模型的时代背景不是没有关系的，当时总感到新的理论就要到来。再则，和现在不同，当时在我国的基本粒子理论界中，有一种不尊重数学的强烈的气氛。当时，在我国的基本粒子学术界，有那么一些成就可以在国际上自豪。因此，他们认为与其说这些成就是和现代数学高度相关联的，还不如说多数是因为有了好的物理思想而得到的。因为在那个时代在基本粒子理论领域里，并不欢迎数学色彩很浓的议论。

话说回来，自从坂田模型发表以后，我国学术界环

绕着这一模型,写出了各种各样的论文。其中广岛大学的小川修三(现名古屋大学名誉教授)的论文,暗示了丰富而珍贵的内容。小川认为,在坂田模型中要扩大电荷无关性,如果在把  $p(x) \leftrightarrow \Lambda(x)$  和  $n(x) \leftrightarrow \Lambda(x)$  形成的场相互交换下,哈密顿保持不变的话,(当然,此时忽略了核子和  $\Lambda$  粒子的质量差)则有存在同位旋为 0 的介子的可能性。

在上述内容的论文发表的前一年,即 1958 年秋天,我在京都大学基础物理研究所的会议上开始接触这个问题。我从小川那里拿来论文的复印件,连夜通读。我注意到,如果将满足上述对称性的哈密顿量适当改写,便可归结为很简单的形式。由此可以推测,存在一种出乎预料的漂亮的对称性,假定  $x_1(x) = p(x)$ ,  $x_2(x) = n(x)$ ,  $x_3(x) = \Lambda(x)$ , 并且用满足  $u^*u = 1$  任意的三行三列的行列式,作变换

$$x_j(x) \rightarrow \sum_{i=1,2,3} u_{ij} x_i(x) \quad (7)$$

时,哈密顿量不变。这些  $u$  的总体组成群。尽管对动力学的细节还不太清楚,利用了这一概念,系统的一部分特性可以用严格的方式导出。我从京都回来后,把这意见转告了小川。小川当时并没有同意这种说法,而且立即写来了信,详细说明了他的意见。当时,不仅长途电话话费很贵,而且接通电话也很费时间,所以写信只是作为远距离的通讯唯一手段。在那个时期的通信中,我还保存给小川的三封信。从信中可以知道当时研究的状况。发信的日期是 1958 年 11 月 29 日,和同年的 12 月 3 日和 6 日。从字面上可以推测,在此以前已经通了一、二封信了,但信已经遗失了。

关于这三封信的内容在别的地方已作详细的介绍。因其内容比较专业,这里不打算深谈,只说一下信中内容的要点。(a) 小川所假定的对称性和在变换(7)构成的群下哈密顿量的不变性是等效的,(我自己将此群起名为“三维么正群”,后来偶然地知道在数学上也给它正名了),(b) 假定满足严格的对称性,那么一定存在和  $\pi$  介子质量相同,同位旋为 0 的介子(称之为  $\pi^0$ ),(c) 需要构筑一般理论,把任意个数的  $u$  和其复数共轭行列式  $u^*$  的直积分解为三维么正群的不可约表示,(d) 建立以三维么正群的量子场论为基础理论形式等等。

现在回过头来看,在一周中写的三封信中,即在根据坂田模型所作的种种探索,也可以说是在黑暗中摸索中,不知不觉地可以感到已形成一种东西。从某种意义上讲,这些信是非常重要的。然而,当时我的群论知识非常薄弱,只对转动群和洛伦兹群有若干认识,至于对三维么正群及其表现理论却一无所知。要知道,和现在不同,当时书架上几乎没有这方面的专门著作,和我接触搞物理学的人,对此也一无所知。姑且不说当时我们和现代的数学的距离很远,和我讨论

的人也是没有这方面的参考书,我们只是凭空讨论问题。

万事起头难,在还未预见今后会有如此快速发展时,我们就见缝插针地开始作准备工作。特别遵循(c)中的物理目的,去建立一般理论,并着手探讨具体的例子和建立必要的符号系统,如果这种一般理论完成了,就可以将坂田模型中的所有复合状态加以分类了,这对于理论总体可行性的预测是必要的。

第二年,即 1959 年 6 月,在接到小川的来信后,我就带着当时的结果直奔广岛。其目的,一方面是就物理问题进一步讨论,另一方面是去请教当时广岛大学理论物理研究所的池田峰夫(后来他成了京都大学部应用数学系的教授,已病故),谋求在数学方面有所进展。

我们三人的合作研究是就那时开始的。

不久,论文就完成了。在论文中有先前提到的,论述同位旋为 0 的介子  $\pi^0$  (在二年后的 1960 年,在实验上确认其存在,并命名为  $\eta$  介子)、核子和介子散射的共振状态的三维么正群  $U(3)$  的不可约表示。进一步建立了适于这一理论的数学构造的一般理论。第二年,涉及该工作的论文被刊载了。特别在第二篇论文中,数学出身的池田起了很大作用。

#### 结束语

由此可见,在基本粒子的理论方面我国在国际上比较早地起步了。可是这种探索在国内并没有广泛开展起来。从整体来看,其原因可能是由于人们对基本粒子的看法不同,支持坂田模型的人也不多,再加上对用这样麻烦的(当时的想法)数学,很多人有满腹的疑问,或者说大家还没有看到在外国有这类研究工作,也就是前面说过的当时那种不尊重数学的特殊情况造成的结果。不久,由于受到国际上群论热的影响,我国也渐渐流行起对称性的讨论。当然,这种发展需要有一个时间过程。

想想看,从中野、西岛和盖尔曼定则开始,经过坂田模型和小川的论文,进一步到对称性  $U(3)$  的发现。这一潮流,都是得到了国内议论推动。从那时起,30年来,经过种种迂回曲折,对称性理论有了想象不到的发展。上述的研究成果也是其中理论发展关键之一吧。在本文初说到的,和超微观世界的本质的直接相关的严格的对称性  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$  存在,并和规范作用相结合,形成了至今被称之为基本粒子的标准模型,但是为什么这种对称性能成立,至今还不清楚,也许是今后要解释的课题吧。

#### 编后记:

此篇原载《パリティ》1991 年第 10 期,现因作者大贺善郎要求、经戴元本、黄涛先生审阅,特在本刊发表。译者沈电洪先生受本刊主编吴水清之托,十分流畅地翻译了此篇文章,特表谢意。

粒子(反粒子)*	质量(MeV)	$N_B$	同位旋	$T_3$	$S$	电荷(Q)	坂田模型中粒子(及其反粒子)的组成
$p(\bar{p})$	938.3	1		1/2	0	1	$p(\bar{p})$
$n(\bar{n})$	939.6	1	1/2	-1/2	0	0	$n(\bar{n})$
$\Delta(\bar{\Delta})$	1115.6	1	0	0	-1	0	$\Delta(\bar{\Delta})$
$\Sigma^+(\bar{\Sigma}^+)$	1189.4	1		1	-1	1	$p\bar{\Delta}\bar{n}(\bar{p}\bar{\Delta}n)$
$\Sigma_0(\bar{\Sigma}^0)$	1192.4	1	1	0	-1	0	$[p\bar{\Delta}\bar{p} - n\bar{\Delta}\bar{n}]/\sqrt{2}([p\bar{\Delta}p$
$\Sigma^-(\bar{\Sigma}^-)$	1197.3	1		-1	-1	-1	$- \bar{n}\bar{\Delta}n]/\sqrt{2})$ $n\bar{\Delta}\bar{p}(\bar{n}\bar{\Delta}p)$
$\Xi^0(\bar{\Xi}^0)$	1314.9	1		1/2	-2	0	$\bar{p}\bar{\Delta}\Delta(\bar{p}\bar{\Delta}\bar{\Delta})$
$\Xi^-(\bar{\Xi}^-)$	1321.3	1	1/2	-1/2	-2	-1	$\bar{n}\bar{\Delta}\Delta(\bar{n}\bar{\Delta}\bar{\Delta})$
$\pi^+$	139.6	0		1	0	1	$p\bar{n}$
$\pi^0$	134.0	0	1	0	0	0	$[p\bar{p} - n\bar{n}]/\sqrt{2}$
$\pi^-$	$\pi^+$ 的反粒子	0		-1	0	-1	$n\bar{p}$
$K^+(K^-)$	493.7	0		1/2	1	1	$p\bar{\Delta}(\bar{p}\Delta)$
$K^0(\bar{K}^0)$	497.7	0	1/2	-1/2	1	0	$n\bar{\Delta}(\bar{n}\Delta)$
$\eta$	548.8	0	0	0	0	0	$[p\bar{p} - n\bar{n} - 2\bar{\Delta}\bar{\Delta}]/\sqrt{6}$

\* 指强子。表中的  $\eta$  是根据对称性理论预测的。早先命名为  $\pi^0$ ，上述表中的其它粒子最迟到 1961 年，都被实验验证了。

参考文献:

1) 大贯羲郎: “量子物理的展望”(下), 江沢、恒藤编, 429. 岩波书店(1978).

2) 大贯羲郎: 粒子理论研究, 86, 503(1991)这是一本以

专家为对象的通俗读物, 不久将出版。

3) 关于坂田模型提出的前后情形, 可参考如: 小川修三, 大贯羲郎: 科学, 40, 450(1970).

(沈电洪 译)

## • 英语角 • 93 年第二期英语角答案

(1) The result of the experiment was unreliable, he could not draw a Conclusion.

其错误是仅用逗号连接两个独立分句, 称为 Comma splice. 为目前英语写作中常见的错误, 修改的方式之一是在逗号后加并列连接词 “so”, 也可作其它修改。例如:

(a) 由于上述两句的关系密切(因果关系)可将逗号改为分号, 使之成为并列复合句。

The result of the experiment was unreliable; he could not draw a conclusion.

(b) 改为从属句

Because the result of the experiment was unreliable, he could not draw a conclusion.

(c) 将逗号改为句号, 使之成为两简单句。还有其它修改方式, 在此不赘述了。

(2) One can not see air, however, it does exist.

也是常见的错误, 为另一种 Comma splice. 此处的 however 看起来像连接词并起连接词的作用。但它决不是连接词而是连接副词, 故在其前不能用逗号而须用分号。还有其它修改方式:

(a) however 前用句号, 使之成为二独立句子

(b) 改为从属句。

Although one can not see air, it does exist.

(3) Young men like blue jeans they wear them all the time.

此句为 fused Sentence, 即两分句间甚么也没有。修改的方式有三种:

(a) 改为两简单句。

Young men like blue jeans. They wear them all the time.

(b) 两分句间用分号。

Young men like blue jeans; they wear them all the time.

(c) 在两分句间加 “, and”。

Young men like blue jeans, and they wear them all the time.

## 93 年第三期英语角题目

修改下列句子的错误

(1) When the target changes course radar detects the Change.

(2) To love one must first understand. 及 To understand these phenomena you must know some of the properties of alloy.

(3) Diving distance by time we get speed.

(4) By decreasing the value of resistance we can increase the Current.