

基本粒子物理学中的 对称性原理

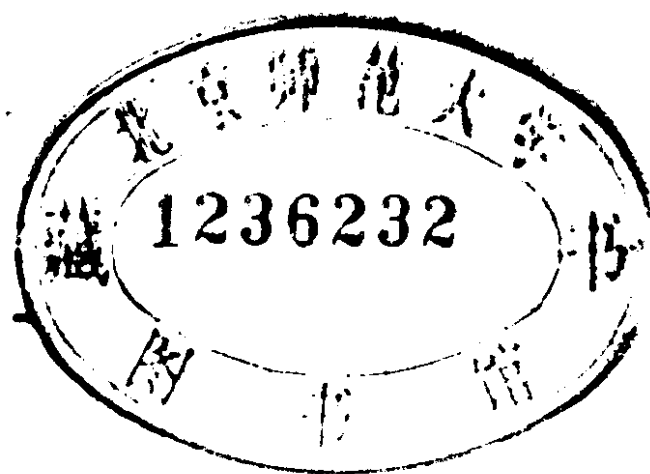
作者 W. N. 吉布森 著 译者 丁 里 译

丁 里 译

高等教育出版社

基本粒子物理学中的 对称性原理

〔英〕 W. M. 吉布森 著
B. R. 波拉德
丁 里 译



高等教育出版社

内 容 简 介

本书根据英国剑桥大学出版社 (Cambridge University Press) 出版的 W. M. 吉布森和 B. R. 波拉德著《基本粒子物理学中的对称性原理》(*Symmetry principles in elementary particle physics*) 一书的 1976 年版译出。

原书是两位著者在布里斯托尔大学的研究生讲义的基础上编写而成的。它是以对称性原理和由此而得出的守恒定律为线索, 阐述基本粒子的某些性质及其相互作用规律的理论。为使全书不致过分抽象, 著者注意尽量避免使用与本课题相距太远的数学工具; 同时著者还注意到本书的篇幅和特色, 不去介绍冗繁的实验方法。本书内容包括十一章: 基本粒子简介、量子力学和不变性原理、角动量、洛伦兹不变性、宇称、时间反演、电荷无关性及同位旋和奇异性、电荷共轭、介子的强子衰变、 $SU(3)$ 、夸克模型。

本书可作为高等学校有关选修课的参考书, 也可供从事粒子物理的理论和实验工作的研究生、教师及有关科技人员参考。

基本粒子物理学中的对称性原理

〔英〕 W. M. 吉布森 著
B. R. 波拉德

丁 里 译

高等教育出版社出版
新华书店北京发行所发行
河北省香河县印刷厂印装

开本 850×1168 1/32 印张 14.25 字数 341,000

1982 年 12 月第 1 版 1984 年 7 月第 1 次印刷

印数 00,001—5,200

书号 13010·0834 定价 2.15 元

译 者 序

对称性原理的存在是与人们的日常经验完全符合的。

对称性原是一个几何学上的概念,实质上就是某种不变性。譬如,我们说某个图形具有对称性,这就意味着该图形绕某一轴旋转某一角度后图形保持不变。

在物理学中,对称性具有更为深刻的物理意义,它指的是物理规律在某种变换下的不变性。物理规律在匀速的坐标系变换下的不变性,即伽利略变换下的不变性,早为人们所认识,并且它是牛顿力学的基石之一。对称性原理的结果曾被物理学家大量引用,并且得出了许多重要结果。另一方面,一般来说,一个对称性原理(或者不变性原理)产生一个守恒律;反过来,发现了一种对称性,就必然可以找到与之相联系的一个守恒律。严格成立的对称性对应着严格的守恒律;近似的对称性对应着近似的不严格的守恒律。除了存在着空间平移、时间平移、空间转动这类连续的对称性外,还存在着例如空间反演、时间反演之类的分立对称性,量子力学诞生后,连续对称性和分立对称性之间的差别不复存在。

相对论和量子力学问世以来,物理学中的对称性原理大有发展,人们不能不深感对称性原理的巨大力量。基本粒子物理学(即粒子物理学)的研究离不开对称性质的研究,目前在高能物理方面所取得的进展大都借助于对称性原理。从对称性原理可以找到基本粒子的内部属性、相互间的联系和所遵循的物理规律以及基本粒子相互作用的性质。

基本粒子物理学近 20 年,特别是近 10 年来的发展,成果卓著。相应地,论述这一领域的著作,种类繁多。鉴于对称性原理在

基本粒子物理学研究中占有重要地位，因而都是作为重要内容写入各种著作之中。但是，象本书那样，全面地、系统地专论存在于基本粒子物理学中的对称性原理及其相互关系的为数不多。可以说本书是论述有关对称性原理的一本比较有特色的书。

众所周知，基本粒子物理学中的对称性是借助于数学上群论中的一个分支——对称群来描述的。但是，本书在叙述时极力避免明显地采用正规的群论工具，而又注意保持其物理的严谨性。这样，就使读者不致陷入太抽象的研究之中，从而对阐述的原理和概念容易接受和理解。

本书除了阐述对称性原理的基本理论外，还阐述了基本原理对一些特殊事例的应用，这对初学者是有益的。

对基本粒子物理学研究中经常出现的基本原理的阐述准确、不抽象而又简明扼要，内容上取材精炼、深入浅出和易懂也是本书的特点。

如前所述，由于基本粒子物理学的迅速发展，原书出版后，已有一些有意义的新课题引起了广泛的注意和探讨。例如，标准的弱电统一理论（即格拉肖-温伯格-萨拉姆 $SU(2) \times U(1)$ 模型），大统一规范理论（即强作用、弱作用和电磁作用满足的一种高级的规范对称性）。对于这些课题，读者如有兴趣，可以参阅有关的书刊。

我们相信，把本书介绍给从事或正要从事基本粒子物理学研究的读者，以及在物理学其他领域内工作的广大读者，是极为有益的。

在翻译过程中，对原书中存在的一些明显的不妥之处和排印错误，已予订正。

由于译者学识简陋，水平低浅，译文中一定有错误和不妥之处，恳切地期望从事基本粒子物理学研究的学者以及广大读者批评指正。

序 言

基本粒子及其相互作用的研究，已经揭示出存在于基本粒子之间的对称性和相互关系，这些正是当今研究的课题。在本书中，试图把这些对称性原理和伴随它们的守恒定律当作一组相互联系的物理原理来加以叙述，并且用最简单的适当的数学来阐明它们。本书避免数学上离题太远，从而避免引进极为抽象的研究方式，因此我们特地不明显地采用正规的群论工具。同样地，我们也避而不谈用以得到所引结果的各色各样的实验方法。

于是，本书的深度打算满足从事粒子物理工作的研究生的需要，他们想要的是在其学科文献中常常被引述的那些原理的准确的、然而又不太抽象的解释。同时，我们也希望许多这样的读者，往后借助于更高深的文献进一步深造。

本书大量地引用了我们两人在布里斯托尔大学研究院讲演的材料，我们感谢这些研究生班对我们自己理解和解释的能力所作的贡献。

我们也要感谢许多同事和朋友，这些年来由于通过同他们的讨论，得以把许多疑难的专题弄清楚了。同时还要感谢阿尔玛·道斯小姐、玛格丽特·詹姆斯小姐、安娜·洛夫小姐和南希·索普先生，他们为我们打印了手稿。同样，我们也应当感谢 J. W. 阿尔科克博士，他协助我们一起通读了校样。最后，对剑桥大学出版社编辑部的全体人员，在整个出版过程中的协助表示感谢。

W. M. 吉布森

B. R. 波拉德

1974年8月于布里斯托尔

目 录

译者序	1
序言	1

第一章 基本粒子简介

1.1 概述	1
1.2 粒子	1
1.3 相互作用的类型	4
1.4 守恒定律	6

第二章 量子力学和不变性原理

2.1 量子力学原理	8
2.1.1 态和可观察量	8
2.1.2 两个可观察量的同时测量	11
2.1.3 系统随时间的变化和 $\mathcal{S}$ -矩阵	13
2.1.4 相对论性量子力学	18
2.2 量子力学中的不变性原理和守恒量	19
2.2.1 坐标变换和态矢量变换	19
2.2.2 对称变换	23
2.2.3 无穷小变换和运动常数	27
2.3 平移不变性	30
2.3.1 平移与动量	30
2.3.2 动量守恒	33

第三章 角 动 量

3.1 初等量子力学中的角动量	36
3.1.1 角动量算符及其对易关系	36
3.1.2 球谐函数的性质	39

3.1.3 自旋角动量	40
3.1.4 总角动量	42
3.2 角动量算符的矩阵元	42
3.2.1 角动量的本征值	43
3.2.2 角动量算符的矩阵元	46
3.3 转动不变性	49
3.3.1 有限转动算符	49
3.3.2 转动不变性和角动量守恒	53
3.4 有限转动的表示	55
3.4.1 有限转动的矩阵元	55
3.4.2 群论和转动	62
3.4.3 $d_{m'm}^l(\beta)$ 函数的性质	66
3.5 角动量的矢量相加	67
3.5.1 克莱布施-戈丹系数	67
3.5.2 计算克莱布施-戈丹系数的方法	69
3.5.3 一个例子 $j_a = \frac{1}{2}, j_b = 1$	71
3.5.4 $j_a = j_b = \frac{1}{2}$ 或为 1	74

第四章 洛伦兹不变性

4.1 洛伦兹变换和四维矢量代数	76
4.1.1 洛伦兹变换方程	76
4.1.2 洛伦兹群	79
4.1.3 四维矢量	80
4.2 相对论运动学	81
4.3 量子力学中的洛伦兹不变性: 无自旋粒子	83
4.4 带自旋的粒子	92
4.5 无质量的粒子	97
4.6 二粒子螺旋性态按角动量本征态的展开	99
4.6.1 二粒子态	100
4.6.2 按角动量本征态的展开	102
4.6.3 态的归一化	104

4.7	二粒子散射的分波分析	106
4.8	π 介子-核子散射	108
4.9	二粒子衰变	116
4.9.1	一般理论	116
4.9.2	阿代耳分析	121
4.10	螺旋性态洛伦兹变换性质的进一步讨论	124
4.10.1	维格纳转动	124
4.10.2	一种特殊情形下的维格纳转动	127
4.10.3	$\mathcal{S}$ -矩阵元的变换	131

第五章 宇 称

5.1	宇称算符的基本理论	134
5.1.1	波函数的宇称	134
5.1.2	宇称算符的形式理论	135
5.1.3	算符的变换	137
5.1.4	对称变换的定义评述	139
5.1.5	在反应中的宇称守恒	140
5.2	原子物理学和原子核物理学中的宇称	142
5.2.1	宇称守恒的某些结果	142
5.2.2	宇称守恒在原子物理学中的实验验证	144
5.2.3	宇称守恒在原子核物理学中的验证	145
5.3	基本粒子物理学中的宇称	149
5.4	空间反演和螺旋性描述	152
5.4.1	单粒子和二粒子态的宇称变换	153
5.4.2	关于反应和衰变的宇称守恒的一些结果	159
5.4.3	宇称和无质量粒子	163
5.5	内禀宇称的确定	166
5.5.1	一般评述	166
5.5.2	中性 π 介子和光子的宇称	166
5.5.3	荷电 π 介子的宇称	167
5.5.4	奇异粒子的内禀宇称	168

5.5.5 以极化靶来确定奇异粒子宇称的实验	170
5.5.6 衰变 $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma$ 和 $\Sigma\Lambda$ 的相对宇称	174
5.5.7 Ξ 的宇称	177
5.5.8 Ω^- 的宇称	178
5.6 弱相互作用中宇称守恒的破坏	178
5.6.1 $\tau-\theta$ 之谜	178
5.6.2 吴健雄实验	179
5.6.3 π 介子衰变和 μ 子衰变	181
5.6.4 超子衰变的唯象理论	186
5.7 宇称守恒的检验	192
5.7.1 强相互作用	192
5.7.2 总结	195

第六章 时间反演

6.1 经典力学中的时间反演	196
6.2 非相对论量子力学中的时间反演	199
6.2.1 无自旋粒子	199
6.2.2 自旋 $\frac{1}{2}$ 的粒子	201
6.2.3 时间反演算符形式上的性质	202
6.2.4 在散射过程和反应中的时间反演不变性	206
6.2.5 在第一级过程中的时间反演	210
6.3 时间反演和螺旋性描述	212
6.3.1 单粒子和二粒子态的时间反演变换	212
6.3.2 关于反应的时间反演不变性的结果	217
6.3.3 时间反演不变性和无质量粒子	219
6.4 时间反演不变性的结果	220
6.4.1 截面的倒易定理	220
6.4.2 终态定理	221
6.4.3 静态电偶极矩	225
6.5 强相互作用中时间反演不变性的检验	228
6.5.1 细致平衡检验	228

6.5.2 极化不对称等式	230
6.6 电磁相互作用中时间反演不变性的检验	233
6.7 弱相互作用中时间反演不变性的检验	235

第七章 电荷无关性、同位旋和奇异性

7.1 强相互作用中电荷无关性的证据	238
7.2 同位旋的概念	240
7.3 同位旋守恒	245
7.4 对奇异粒子的应用	248
7.5 π 介子-核子散射	250
7.6 同位旋不变性群—— $SU(2)$	253

第八章 电荷共轭

8.1 电荷共轭对称性	257
8.1.1 算符 C	257
8.1.2 C 的本征态	257
8.1.3 电子偶素	258
8.2 电荷共轭不变性的检验	259
8.2.1 强相互作用中的 C	259
8.2.2 电磁相互作用中的 C	261
8.2.3 弱相互作用中的 C	262
8.3 CP 不变性	263
8.3.1 算符 CP	263
8.3.2 中性 K 介子的衰变	263
8.3.3 中性 K 介子束的演变过程	264
8.4 CPT 不变性	266
8.4.1 CPT 不变性对质量和寿命的影响	269
8.4.2 CPT 不变性和磁偶极矩	273
8.5 CP 不变性的破坏	274
8.5.1 衰变方式	276
8.5.2 CPT 不变性和 T 不变性	279

8.5.3 CPT 和 T 的不变性在 K^0 衰变中的检验	280
--	-----

第九章 介子的强子衰变

9.1 G 宇称	282
9.2 广义泡利原理	285
9.3 正常 C 和反常 C	286
9.4 终态	288
9.5 真实介子	288

第十章 $SU(3)$

10.1 更高级的对称性的概念	290
10.2 保守的 $SU(3)$	295
10.3 $SU(3)$ 超多重态	301
10.3.1 权和权点阵	301
10.3.2 一个超多重态的最高权	304
10.3.3 多重性和态的标记	308
10.3.4 低维的超多重态	310
10.4 粒子和共振态对 $SU(3)$ 超多重态的配置	317
10.5 破缺对称性: 质量公式和粒子混合	320
10.5.1 盖尔曼的对称性破缺假设	320
10.5.2 U 旋	322
10.5.3 质量公式	324
10.5.4 质量混合	328
10.6 十重态衰变	330
10.7 $SU(3)$ 的克莱布施-戈丹系数	335
10.7.1 克莱布施-戈丹级数	335
10.7.2 克莱布施-戈丹系数	338
10.7.3 应用	341
10.8 $SU(3)$ 中的电磁效应	343
10.8.1 重子的磁矩	343
10.8.2 其它的电磁过程	346

10.8.3 包括了电磁效应的质量公式	347
---------------------------	-----

第十一章 夸克模型

11.1 夸克	349
11.2 介子的夸克模型	352
11.3 重子的夸克模型	356
11.3.1 三夸克态的分类	356
11.3.2 三夸克态的物理学	361
11.4 把自旋引入夸克模型: $SU(6)$	363
11.4.1 $SU(6)$ 变换	365
11.4.2 $SU(6)$ 中的介子态	366
11.4.3 $SU(6)$ 中的重子态	369
11.4.4 $SU(6)$ 中的重子波函数	371
11.4.5 重子的激发态	374
11.4.6 夸克统计法	376
11.5 重子的磁矩	378
11.6 自由夸克	381
11.7 进一步的发展	382

附录 A 截面和 $\mathcal{T}$ -矩阵元

A.1 截面的定义	383
A.2 相对论性跃迁几率	385
A.3 互通量	386
A.4 截面	387
A.5 衰变率	389

附录 B 极化的密度矩阵描述

B.1 密度矩阵的定义	391
B.2 自旋 1/2 的密度矩阵	394
B.3 推广	398
B.4 密度矩阵和散射	399

附录 C 同位旋和 $SU(3)$ 的相位约定

C. 1 同位旋和电荷共轭的相位约定	402
C. 2 G 宇称	407
C. 3 $SU(3)$ 中的相位约定	409

附录 D 8×8 的克莱布施-戈丹系数

参考文献	416
索引	426

第一章 基本粒子简介

1.1 概 述

本书所要探讨的一般领域有时称为“基本粒子物理学”，有时则称为“高能物理学”，近来也有给予另外的名称——“亚原子核物理学”。这些名称差不多是同义的，只是它们分别强调：对组成物质的基本单元的探索；探索物质内部结构需要高能；以及探索把我们引向比原子核更深层次的粒子的事实。

在这方面已有许多教科书介绍了基本粒子以及它们的性质，而且从这些性质的规律性中引出逐步地被揭示出来的基本相互作用理论。不过，我们并不把粒子本身作为我们的主题，而是把对称性原理和支配粒子性质的守恒定律作为主题。我们对这些定律和原理的认识，当然是从真实粒子的实验研究中逐渐产生的。因而，当我们研究整个对称性原理和守恒定律的基本数学框架时，这个事实势必会经常地把我们带回到观测事实的基础上来。

1.2 粒 子

我们可以按照基本粒子的质量大小作出一种纯粹经验性的分类：质量具有质子质量数量级的粒子为重子，质量很小或静止质量等于零的粒子为轻子，质量介于两者之间的粒子为介子。

但是，我们不久就会明白，能够使我们得到一个更为本质的分类方案的不是基本粒子的质量，而是其它的一些性质。首先我们考虑自旋和统计法的问题：服从费密-狄喇克统计法的半整数自旋的粒子和服从玻色-爱因斯坦统计法的自旋为零或整数的粒子，它们

之间存在着重要的区别。前者称为费密子，它只能与相应的反粒子成对产生，因此一种确定种类的费密子的总数目是守恒的(见节 1.4)。至今还无法解释的一个观测事实是：一切费密子具有非零的重子数或轻子数，同时由于费密子的反粒子具有相反数值的重子数或轻子数，故费密子与它们的反粒子是可区分的。另一方面，玻色子能以仅间接地受到其它守恒定律制约的数目产生。例如，高能中子-质子散射，就可以伴随有一个、二个、三个或更多个 π 介子产生。重子和轻子是费密子，而一切参予强相互作用的介子则是玻色子。原来根据 μ 子的质量，把它归入介子类，现在则根据它的自旋是 $1/2$ 和(参见后面)它的弱相互作用性质，把它归入轻子类。

象上面提到过的那样，按照粒子的相互作用的性质，可以作出一种更有成效的粒子分类法。这就使得我们把重子和介子一起归并为强子，即参予强相互作用的粒子(见节 1.3)；而轻子，除了质量轻以外，则以它们参予弱相互作用而与强子区别开来。

根据上述原则，我们把已知的真实粒子列于表 1.1~1.3 中，

表 1.1 重子和反粒子

	I_3	I	J	P	S	Y	B
$N \begin{Bmatrix} p & +\frac{1}{2} \\ n & -\frac{1}{2} \end{Bmatrix}$		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	+	0	+1	+1
Λ^0	0	0	$\frac{1}{2}$	+	-1	0	+1
$\Sigma \begin{Bmatrix} \Sigma^+ & +1 \\ \Sigma^0 & 0 \\ \Sigma^- & -1 \end{Bmatrix}$		1	$\frac{1}{2}$	+	-1	0	+1
$\Xi \begin{Bmatrix} \Xi^0 & +\frac{1}{2} \\ \Xi^- & -\frac{1}{2} \end{Bmatrix}$		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	+	-2	-1	+1

(续表)

	I_3	I	J	P	S	T	B
$\bar{N} \left\{ \begin{array}{l} \bar{p} \quad -\frac{1}{2} \\ \bar{n} \quad +\frac{1}{2} \end{array} \right\}$		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	-	0	-1	-1
$\bar{\Lambda}^0 \quad 0$	0	0	$\frac{1}{2}$	-	+1	0	-1
$\bar{\Sigma} \left\{ \begin{array}{l} \bar{\Sigma}^+ \quad +1 \\ \bar{\Sigma}^0 \quad 0 \\ \bar{\Sigma}^- \quad -1 \end{array} \right\}$		1	$\frac{1}{2}$	-	+1	0	-1
$\bar{\Xi} \left\{ \begin{array}{l} \bar{\Xi}^+ \quad +\frac{1}{2} \\ \bar{\Xi}^0 \quad -\frac{1}{2} \end{array} \right\}$		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	-	$+\frac{1}{2}$	+1	-1

表 1.2 介子($B=0$)

	I_3	I	G	J	P	C_n	$S=Y$
$\left. \begin{array}{l} \pi^+ \quad +1 \\ \pi^0 \quad 0 \\ \pi^- \quad -1 \end{array} \right\}$		1	-	0	-	+	0
$\left. \begin{array}{l} K^+ \quad +\frac{1}{2} \\ K^0 \quad -\frac{1}{2} \end{array} \right\}$		$\frac{1}{2}$		0	-		1
$\left. \begin{array}{l} \bar{K}^0 \quad +\frac{1}{2} \\ K^- \quad -\frac{1}{2} \end{array} \right\}$		$\frac{1}{2}$		0	-		-1
$\eta \quad 0$	0	0	+	0	-	+	0
$\left. \begin{array}{l} \rho^+ \quad +1 \\ \rho^0 \quad 0 \\ \rho^- \quad -1 \end{array} \right\}$		1	+	1	-	-	0
$\omega \quad 0$	0	0	-	1	-	-	0
$\phi \quad 0$	0	0	-	1	-	-	0