



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

中 外 物 理 学 精 品 书 系

前 沿 系 列 · 2 1

CP 不守恒

杜东生 编著

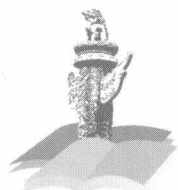


北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

013037204

0572.2

07



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

中外物理学精品书系

前沿系列 · 21

CP 不守恒

杜东生 编著



北京大学出版社



北航

C1645065

0572.2
07

图书在版编目(CIP)数据

CP 不守恒/杜东生编著. —北京:北京大学出版社, 2013. 5

(中外物理学精品书系·前沿系列)

ISBN 978-7-301-22372-7

I. ①CP… II. ①杜… III. ①粒子物理学—对称变换—研究 IV. ①O572.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 070613 号

书 名: CP 不守恒

著作责任者: 杜东生 编著

责任编辑: 刘 啸

标准书号: ISBN 978-7-301-22372-7/O·0921

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn>

新浪微博: @北京大学出版社

电子信箱: zpup@pup.pku.edu.cn

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62752038

出版部 62754962

印 刷 者: 北京中科印刷有限公司

经 销 者: 新华书店

730 毫米×980 毫米 16 开本 10.75 印张 205 千字

2013 年 5 月第 1 版 2013 年 5 月第 1 次印刷

定 价: 29.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话:010-62752024 电子信箱: fd@pup.pku.edu.cn

“中外物理学精品书系”

编 委 会

主 任：王恩哥

副主任：夏建白

编 委：（按姓氏笔画排序，标*号者为执行编委）

王力军	王孝群	王 牧	王鼎盛	石 兢
田光善	冯世平	邢定钰	朱邦芬	朱 星
向 涛	刘 川*	许宁生	许京军	张 酣*
张富春	陈志坚*	林海青	欧阳钟灿	周月梅*
郑春开*	赵光达	聂玉昕	徐仁新*	郭 卫*
资 剑	龚旗煌	崔 田	阎守胜	谢心澄
解士杰	解思深	潘建伟		

秘 书：陈小红

序 言

物理学是研究物质、能量以及它们之间相互作用的科学。她不仅是化学、生命、材料、信息、能源和环境等相关学科的基础,同时还是许多新兴学科和交叉学科的前沿。在科技发展日新月异和国际竞争日趋激烈的今天,物理学不仅囿于基础科学和技术应用研究的范畴,而且在社会发展与人类进步的历史进程中发挥着越来越关键的作用。

我们欣喜地看到,改革开放三十多年来,随着中国政治、经济、教育、文化等领域各项事业的持续稳定发展,我国物理学取得了跨越式的进步,做出了很多为世界瞩目的研究成果。今日的中国物理正在经历一个历史上少有的黄金时代。

在我国物理学科快速发展的背景下,近年来物理学相关书籍也呈现百花齐放的良好态势,在知识传承、学术交流、人才培养等方面发挥着无可替代的作用。从另一方面看,尽管国内各出版社相继推出了一些质量很高的物理教材和图书,但系统总结物理学各门类知识和发展,深入浅出地介绍其与现代科学技术之间的渊源,并针对不同层次的读者提供有价值的教材和研究参考,仍是我国科学传播与出版界面临的一个极富挑战性的课题。

为有力推动我国物理学研究、加快相关学科的建设与发展,特别是展现近年来中国物理学家的研究水平和成果,北京大学出版社在国家出版基金的支持下推出了“中外物理学精品书系”,试图对以上难题进行大胆的尝试和探索。该书系编委会集结了数十位来自内地和香港顶尖高校及科研院所的知名专家学者。他们都是目前该领域十分活跃的专家,确保了整套丛书的权威性和前瞻性。

这套书系内容丰富,涵盖面广,可读性强,其中既有对我国传统物理学发展的梳理和总结,也有对正在蓬勃发展的物理学前沿的全面展示;既引进和介绍了世界物理学研究的发展动态,也面向国际主流领域传播中国物理的优秀专著。可以说,“中外物理学精品书系”力图完整呈现近现代世界和中国物理

科学发展的全貌,是一部目前国内为数不多的兼具学术价值和阅读乐趣的经典物理丛书。

“中外物理学精品书系”另一个突出特点是,在把西方物理的精华要义“请进来”的同时,也将我国近现代物理的优秀成果“送出去”。物理学科在世界范围内的重要性不言而喻,引进和翻译世界物理的经典著作和前沿动态,可以满足当前国内物理教学和科研工作的迫切需求。另一方面,改革开放几十年来,我国的物理学研究取得了长足发展,一大批具有较高学术价值的著作相继问世。这套丛书首次将一些中国物理学者的优秀论著以英文版的形式直接推向国际相关研究的主流领域,使世界对中国物理学的过去和现状有更多的深入了解,不仅充分展示出中国物理学研究和积累的“硬实力”,也向世界主动传播我国科技文化领域不断创新的“软实力”,对全面提升中国科学、教育和文化领域的国际形象起到重要的促进作用。

值得一提的是,“中外物理学精品书系”还对中国近现代物理学科的经典著作进行了全面收录。20世纪以来,中国物理界诞生了很多经典作品,但当时大都分散出版,如今很多代表性的作品已经淹没在浩瀚的图书海洋中,读者们对这些论著也都是“只闻其声,未见其真”。该书系的编者们在这方面下了很大工夫,对中国物理学科不同时期、不同分支的经典著作进行了系统的整理和收录。这项工作具有非常重要的学术意义和社会价值,不仅可以很好地保护和传承我国物理学的经典文献,充分发挥其应有的传世育人的作用,更能使广大物理学人和青年学子切身体会我国物理学研究的发展脉络和优良传统,真正领悟到老一辈科学家严谨求实、追求卓越、博大精深的治学之美。

温家宝总理在2006年中国科学技术大会上指出,“加强基础研究是提升国家创新能力、积累智力资本的重要途径,是我国跻身世界科技强国的必要条件”。中国的发展在于创新,而基础研究正是一切创新的根本和源泉。我相信,这套“中外物理学精品书系”的出版,不仅可以使所有热爱和研究物理学的人们从中获取思维的启迪、智力的挑战和阅读的乐趣,也将进一步推动其他相关基础科学更好更快地发展,为我国今后的科技创新和社会进步做出应有的贡献。

“中外物理学精品书系”编委会 主任
中国科学院院士,北京大学教授

王恩哥

2010年5月于燕园

内 容 简 介

本书首先系统介绍了分立变换的物理思想和相应的数学描述.在此基础上,本书详细讨论了标准模型下的 CP 破坏机制,回顾了实验上首次在中性 K 介子衰变中发现 CP 不守恒的历史,并给出了中性 K 介子到两 π 衰变的 CP 破坏的理论描述.此后,本书重点讨论了 $B^0-\bar{B}^0$ 混合的实验结果和理论描述,建造 B 工厂的必要性, B 介子弱衰变中 CP 破坏的理论计算方法和实验测量,以及么正三角形实验测量的最新结果等.在讨论了 $D^0-\bar{D}^0$ 混合的实验结果之后,本书深入讨论了粲粒子系统 CP 破坏及其实验检验的困难所在.此外,本书还详细讨论了中微子振荡和中微子系统中 CP 破坏的实验观测,其中包括中微子振荡的实验证据、理论描述,狄拉克中微子和马约拉纳中微子的区别,以及中微子振荡实验中观测 CP 破坏的可能性等内容.最后,本书还介绍了超出标准模型的新的 CP 破坏机制.

本书努力结合最新的实验成果和理论前沿,目的是使初学者能够与国际最新发展接轨.本书适合粒子物理、场论等方向的研究人员参考,同时也可用作该领域研究生的指导书.

前 言

本书是对作者在 2000 年北京大学暑期讲习班上的系统讲演加以扩充整理写成的. 当时讲演的对象是全国各高校及科研单位的在校研究生、青年教师和青年研究人员, 目的是把年轻人带入 CP 不守恒的研究领域的前沿.

十多年来, 这一领域已发生了很大变化, 理论和实验研究都有了很大的发展. 虽然本书的目标与讲习班的目标一致, 但仍须补充不少新内容和新的实验结果. 随着时间的推移和新成果的不断涌现, 前沿课题也会更改, 但基本的东西不会变. 作者衷心希望本书能成为引领后来者入门的书.

作者写本书的指导思想是简洁易懂又不失深入和贴近前沿. 本书力求避免冗长的推导, 希望把读者尽快地带到科学研究的第一线. 如果真能达此目的, 作者就十分欣慰了.

在本书写作过程中, 作者曾多次与邢志忠教授、吕才典教授和李海波教授做过深入的讨论. 吕才典教授对本书内容提出过不少好的修改意见, 使本书内容更适合高年级研究生阅读. 这里特向以上三位教授表示衷心的感谢. 作者还感谢孙俊峰、刘纯、邢志忠、朱国怀、杨德山、杨茂志、杨亚东、李竞武、张大新、郭立波、魏正涛、戴又善等各位教授的合作. 在重味物理与 CP 不守恒领域的研究工作中, 我们一起度过了许多令人激动的日日夜夜. 正是这些合作研究, 使作者对本书所涉及的领域有了更深入的理解.

当前对标准模型乃至非标准模型的理论研究和实验检验都在紧锣密鼓地进行. LHC 上发现了质量为 125 GeV 左右的标量粒子, 很可能是 Higgs 粒子. 对 B 介子衰变和粲粒子衰变及 CP 破坏的研究也正在开展, 不久会有新结果问世. 超级 B 工厂 (super B factory) 正在兴起, BEPC II 上的粲粒子实验也正在加紧取数. 因此, 本书的实验结果随时可能更新. 希望读者在读本书时能密切关注实验和理论的新发展.

由于时间有限和作者水平的原因, 书中定有不少缺点和不足, 甚至还可能有错误之处, 望读者给予指正, 本人不胜感激.

杜东生

2013 年 1 月

于中国科学院高能物理研究所

目 录

第一章 物理学中的对称性	1
参考文献	3
第二章 分立变换 P, C, T, CP 及 CPT	5
§ 2.1 空间反射 P	5
§ 2.2 电荷共轭变换 C	7
§ 2.3 时间反演变换 T	10
§ 2.4 乘积变换 CP, CPT 和 CPT 定理	16
参考文献	17
第三章 标准模型及其 CP 破坏机制	18
§ 3.1 Cabibbo 理论和 GIM 机制	18
§ 3.2 Kobayashi-Maskawa 模型	20
§ 3.3 弱电统一理论的标准模型	21
§ 3.4 标准模型的 CP 破坏机制	25
§ 3.5 CKM 矩阵的参数化及其在位相变换下的不变量	27
§ 3.6 么正三角形	28
参考文献	30
第四章 中性粒子系统 CP 破坏的量子力学描述	31
§ 4.1 有效哈密顿量和薛定谔方程	31
§ 4.2 CPT, CP, T 变换对有效哈密顿量的限制	32
§ 4.3 有效哈密顿量的质量本征态	38
§ 4.4 CPT 不变时的情形	40
§ 4.5 CP 破坏	42
参考文献	47
第五章 中性 K 介子系统的 CP 破坏	48
§ 5.1 τ - θ 疑难	48
§ 5.2 K^0 - $\bar{K}^0$ 混合(振荡)	48
§ 5.3 K_S 再产生	52
§ 5.4 CP 破坏的发现	53

§ 5.5	半轻子衰变中的 CP 破坏	54
§ 5.6	$K \rightarrow 2\pi$ 衰变中的 CP 破坏的唯象描述	54
§ 5.7	η_{+-}, η_{00} 的实验测量	61
§ 5.8	$K \rightarrow 3\pi$ 衰变中的 CP 破坏	63
§ 5.9	T 破坏的直接实验检验	65
	参考文献	67
第六章	B 介子系统中的 CP 破坏	68
§ 6.1	B 介子的发现	68
§ 6.2	B 介子的标定(tagging)及其基本物理参数	69
§ 6.3	$B_d^0 - \bar{B}_d^0$ 混合及 $\Delta m, \Delta \Gamma$ 的计算	70
§ 6.4	B 介子工厂	77
§ 6.5	B 介子三类 CP 破坏过程举例	78
§ 6.6	B 介子弱衰变的有效哈密顿量	88
§ 6.7	B 介子弱衰变振幅的计算	89
§ 6.8	幺正三角形的测量	93
§ 6.9	B 物理的未来发展	105
	参考文献	106
第七章	粲粒子系统的 CP 破坏	109
§ 7.1	$D^0 - \bar{D}^0$ 混合的理论预言	109
§ 7.2	$D^0 - \bar{D}^0$ 混合的实验测量	111
§ 7.3	在粲粒子衰变中寻找 CP 破坏	123
§ 7.4	粲粒子衰变中的直接 CP 破坏	124
	参考文献	126
第八章	中微子振荡和中微子系统的 CP 破坏	127
§ 8.1	中微子振荡(混合)的实验证据	128
§ 8.2	中微子振荡的理论描述	134
§ 8.3	中微子的狄拉克质量和马约拉纳质量	141
§ 8.4	中微子混合矩阵的参数化形式	144
§ 8.5	中微子振荡和 CP 破坏	145
	参考文献	148
第九章	非标准模型及新的 CP 破坏机制	150
§ 9.1	左右对称模型	150
§ 9.2	超对称模型	153
	参考文献	157
	名词索引	158

第一章 物理学中的对称性

对称性在物理学的研究中起着重要作用,是人类了解和研究自然规律的强有力的工具.今天我们知道,有些对称性是严格的,但有些对称性只在一定的条件下成立,我们称这类对称性为破缺对称(broken symmetry).对称性的分类有不同的方法,其中一种是把对称性分为四类^[1]:

(1) 置换对称性.

如全同粒子交换对称,导致玻色-爱因斯坦(Bose-Einstein)统计;全同粒子交换反对称,导致费米-狄拉克(Fermi-Dirac)统计.

(2) 连续时空对称性.

如空间转动对称性,即空间的各向同性,导致角动量守恒;时间、空间的平移不变性,即时空的均匀性,导致能量动量守恒.

(3) 分立对称性.

如空间左右对称,即空间反射 $P(\mathbf{x} \rightarrow -\mathbf{x})$ 对称性,导致宇称守恒;时间反演 $T(t \rightarrow -t)$ 对称性,导致过去未来的对称;电荷共轭 C 不变性,即正、反粒子变换的不变性;乘积对称 CP, CPT 也属此类.

(4) 么正对称性.

如 $U(1)$ 整体规范对称性(global gauge symmetry),即理论在整体 $U(1)$ 群变换 $e^{i\hat{O}\theta}$ 下不变,也就是当场量 $\phi_i(x) \rightarrow \phi'_i(x) = e^{i\hat{O}\theta} \phi_i(x)$ 时的不变性,导致某个量子数守恒.其中 θ 与时空坐标无关.例如,电荷守恒、重子数守恒、轻子数守恒都属于这一类.还有整体 $SU(2)$ (即同位旋),整体 $SU(3)$ 等对称性,如夸克模型的 $SU(3)$ 味对称性等.

在整体规范对称性之外,还有定域规范对称性(local gauge symmetry).此时,上述对称性的群参数 θ 与时空坐标有关.如:

$$U(1), \quad e^{i\hat{O}\theta(x)},$$

$$SU(2), \quad e^{i\frac{1}{2}\tau_i\theta_i(x)}, \quad \tau_i (i=1,2,3) \text{ 为泡利(Pauli)矩阵},$$

$$U(3), \quad e^{i\frac{1}{2}\lambda_i\theta_i(x)}, \quad \lambda_i (i=1, \dots, 8) \text{ 为盖尔曼(Gell-Mann)矩阵},$$

$$\vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots$$

还有另一种分类方法,把各种对称性分为两类:

(1) 时空对称性.

① 连续时空对称性:空间转动不变性,时间和空间平移不变性.

② 分立时空对称性:空间反射(左右)对称性,时间反演对称性.

(2) 内禀对称性.

这是指物理系统内部的对称性. 其中包括:

① 分立对称性:置换对称性,电荷共轭对称性.

② 连续对称性:整体规范对称性,包括 $U(1)$, $SU(2)$, $SU(3)$ 等;定域规范对称性,包括 $U(1)$ 及 $SU(N)$ 等.

例如,量子电动力学(QED)满足 $U(1)$ 定域规范对称性,该对称保证了光子质量为零. 量子色动力学(QCD)具有 $SU(3)$ 非阿贝尔定域规范对称性,保证了胶子质量为零.

整体规范对称和定域规范对称之所以归入连续对称,是因为它们的群元素的参数 θ 和 $\theta(x)$ 都是可以连续变化的.

现在来讨论对称性的破缺问题.

自然界的许多对称性是严格的. 如空间转动对称性(角动量守恒),时空的平移不变性(能量、动量守恒),强相互作用 $SU(3)$ 定域规范对称性,电荷守恒对应的 $U(1)$ 整体规范对称性和 QED 对应的 $U(1)$ 定域规范对称性都是严格的,至今未发现任何破坏的迹象. 但有些对称性不是严格保持的,在某些条件下会被破坏. 对称性破缺的发现使我们物质世界的多样性和自然界的奥妙有了更深刻的认识. 因此在某种意义上说,对称性的破缺有时更重要.

1957 年,根据李政道和杨振宁的建议^[2],吴健雄实验组在实验中首次发现了弱相互作用中宇称不守恒(左、右不对称,即空间反射 P 不守恒)^[3]. 这推翻了科学家们多年来一直认为宇称守恒的观念,使人们能正确地建立弱相互作用的理论,从而对弱相互作用的性质有了更深入的理解和掌握.

由于弱作用诱导的 β 衰变只能产生左手中微子和右手反中微子,这破坏了正反粒子变换的不变性,即破坏了电荷共轭变换 C 的不变性,所以在弱相互作用中, P 和 C 单独守恒都被破坏了. 但 CP 联合变换在 β 衰变中仍然保持守恒. 直到 1964 年,在实验中观察到了 $K_L^0 \rightarrow 2\pi$ 衰变时人们才发现, CP 在某些弱作用过程中也不守恒^[4].

1998 年,坐落在日内瓦的欧洲核子研究中心(CERN)在质子-反质子储存环内观察到了直接的时间反演不变性的破坏^[5]. 而几乎同时,美国费米实验室(Fermilab)也在测量 $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- e^+ e^-$ 角关联实验中看到了时间反演不变性的直接破坏^[6].

物理学家多年坚信的 CPT 不变性是否也会遭到破坏呢? 如果是,人类对自然规律的认识将会有重大修改. 我们习惯使用的,也被无数实验证实是正确的定域场论也将要被修改. 随之而来的是,非定域相互作用的理论研究不得不回到议事

日程上来, 目前意大利的 ϕ 介子工厂的最重要的实验之一就是检验 CPT 不变性是否被破坏.

须指出, 目前在 K 介子和 B 介子系统中观测到的 CP 破坏现象完全可以在标准模型框架内得到解释. 但目前已观测到的 CP 破坏的强度对于产生宇宙中的重子-反重子不对称来说还是太小了. 在当今宇宙中, 我们只观测到了物质(重子), 还没有发现反物质(由反重子组成), 只在宇宙线中看到少量反质子, 以及在实验中可以用人工方法(如加速器加速的质子等粒子轰击靶)产生少量反重子.

早期宇宙中, 产生重子-反重子不对称性的萨哈罗夫(Sakharov)三条件是^[7]:

(1) 重子数不守恒. 否则就不会产生宇宙初始态和现在状态重子数的不同.

(2) CP 不守恒. 对一个重子数改变过程 $N \rightarrow f$, 它的 CP 共轭过程为 $\bar{N} \rightarrow \bar{f}$. 要想重子数不对称 $N \neq \bar{N}$ 能永远保持, 则上述两过程的几率必须不同. 这要求 CP 不守恒.

(3) 只要 CPT 不变性保持, 重子数改变过程 $N \rightarrow f$, $\bar{N} \rightarrow \bar{f}$ 和 CP 不守恒必须在非平衡态进行. 否则, 宇宙初始就处于平衡态, 状态与时间无关, T 不变, 则 CPT 不变意味着 CP 不变, 破坏了条件(2). 这是不允许的.

既然标准模型框架下产生的 CP 破坏强度不能满足早期宇宙产生重子-反重子不对称的要求, 可能就得寻找超出标准模型的新的 CP 破坏机制. 当然, 如果 CPT 不变性遭到破坏, 或者我们找到了比萨哈罗夫更好的理论来产生重子-反重子不对称性而不需要大强度的 CP 破坏, 则另当别论.

在 QCD 理论中我们已经知道, 三角反常的存在使得 QCD 拉氏量中多出一项,

$$\mathcal{L}_\theta(x) = \frac{\theta}{8\pi} \alpha_s \text{Tr} G_{\mu\nu}^a(x) \tilde{G}_a^{\mu\nu}(x),$$

这里 $G_{\mu\nu}^a(x)$ 是胶子的场强张量 ($a=1, 2, \dots, 8$). $\mathcal{L}_\theta(x)$ 的存在导致中子的电偶极矩 $d_n \neq 0$, 非零 d_n 的存在将破坏 P 和 T 不变性. 若 CPT 不变(这点在很高精度上是成立的), 则 T 破坏意味着 CP 也破坏了. 目前实验给定的 d_n 的上限为 $|d_n| < 1.1 \times 10^{-25} \text{ e} \cdot \text{cm}$, 这将导致 $|\bar{\theta}| < 2 \times 10^{-10}$. 这里 $\bar{\theta}$ 是重整化后的 θ . $|\bar{\theta}|$ 为什么这么小? 这就是所谓的“强 CP 问题”. Peccei 和 Quinn 引入一个 $U(1)$ 对称性来解决这个问题, 但这将导致一个轻的赝标介子——axion 的存在. 这个 axion 介子的质量比电子的质量还小很多. 迄今为止, 所有寻找 axion 的实验都没有成功.

在以下的章节中, 我们将重点讨论分立对称, 特别是讨论与 CP 对称性及其破坏相关的各种问题.

参考文献

[1] 李政道. 场论与粒子物理学. 北京: 科学出版社, 1980.

- [2] Lee T D, Yang C N. Phys. Rev. , 1956, 104: 254.
- [3] Wu C S, Ambler E, Hayward R W, et al. Phys. Rev. , 1957, 105: 1413. Garwin R L, Lederman L M, Weinrich M. Phys. Rev. , 1957, 105: 1415. Telegdi V L, Friedman A M. Phys. Rev. , 1957, 105: 1618.
- [4] Christenson J H, Cronin J W, Fitch V L, et al. Phys. Rev. Lett. , 1964, 13: 138.
- [5] Angelopoulos A, et al. (CPLEAR Collaboration). Phys. Lett. B, 1998, 444: 43.
- [6] Cox B (for KTeV Collaboration). Talk given at the International Workshop on CP Violation in K, Tokyo, Japan. 18-19 Dec. 1998.
- [7] Sakharov A D. JEPT Lett. , 1967, 5: 24.

第二章 分立变换 P, C, T, CP 及 CPT

本章讨论分立变换的性质及部分应用. 对于场论中分立变换的许多公式, 因篇幅所限, 我们并不详细证明, 而只是引用文献中的结果. 读者如有需要, 可参阅相应的教科书和专著, 如本章的参考文献[1-3].

§ 2.1 空间反射 P

空间反射 P 是将空间坐标 x 变为 $-x$ 的变换, 又称宇称变换或左右变换. 实际上 P 是将左手坐标系变成右手坐标系, 或将物体变为它的镜子里的像的一种变换. 日常生活中人的左手和右手长得相当对称, 许多动物的肢体也是左右对称的. 当然如果细看, 左右手还有些轻微的不对称. 左右脚的大小也有轻微的不对称. 这个轻微的不对称是由生活环境造成的偶然不对称. 因此科学家们推测, 微观世界的自然规律应当是左右对称的, 而宇称是守恒的, 或是 P 变换不变的. 宇称守恒多年来一直被当作一个物理规律的选择定则来研究各种电磁相互作用、强相互作用和弱相互作用物理过程. 直到 1956 年, 宇称在弱相互作用过程中也守恒才受到了李政道和杨振宁的质疑^[4].

事情起源于 1947 年宇宙线实验发现的 τ - θ 疑难^[5]. 实验上发现, 两个粒子 θ^+ 和 τ^+ 质量相同, 但却衰变到两个宇称不同的末态:

$$\begin{aligned}\theta^+ &\rightarrow \pi^+ \pi^0 \text{ (宇称为正),} \\ \tau^+ &\rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \text{ (宇称为负).}\end{aligned}$$

如果假定弱衰变中宇称不守恒, 则可认为 θ^+ , τ^+ 是同一个粒子 K^+ . 而宇称守恒在弱相互作用过程中从来没有被实验证实过. 吴健雄等人利用超低温下极化的 ^{60}Co 原子核的 β 衰变证实了宇称在弱衰变中不守恒^[6]. 李政道和杨振宁因此而获得了诺贝尔物理学奖. 宇称不守恒的发现使我们对弱相互作用有了更深刻的认识, 引导科学家提出了正确的弱相互作用理论——V-A 理论(详见第三章).

在量子力学中, 薛定谔方程(Schrödinger equation)为

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi(\mathbf{x}, t)\rangle = H |\psi(\mathbf{x}, t)\rangle. \quad (2.1)$$

其中, 哈密顿量 H 为(假定只依赖于 $|\mathbf{x}|$)

$$H = \frac{|\mathbf{p}|^2}{2m} + V(|\mathbf{x}|). \quad (2.2)$$

假定空间反射变换 P 是一个么正变换, 即 $P^\dagger = P^{-1}$, 且与哈密顿量 H 对易,

$$[P, H] = 0, \quad (2.3)$$

则薛定谔方程(2.1)在空间反射下不变,

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} P |\psi(\mathbf{x}, t)\rangle = PH |\psi(\mathbf{x}, t)\rangle = HP |\psi(\mathbf{x}, t)\rangle, \quad (2.4)$$

空间反射后的态 $P |\psi(\mathbf{x}, t)\rangle$ 满足同样的方程.

另外, 对易关系

$$[x_i, p_j] = i\hbar \delta_{ij} \quad (2.5)$$

也是空间反射不变的, 只要满足

$$\begin{aligned} P\mathbf{x}P^{-1} &= -\mathbf{x}, \\ P\mathbf{p}P^{-1} &= -\mathbf{p}. \end{aligned} \quad (2.6)$$

态 $P |\psi(\mathbf{x}, t)\rangle$ 可取为 $|\psi(-\mathbf{x}, t)\rangle$, 即

$$P |\psi(\mathbf{x}, t)\rangle = |\psi(-\mathbf{x}, t)\rangle. \quad (2.7)$$

(2.7)式右端前面可有一任意位相 $e^{i\phi}$.

由以上的论述可见, 这个量子系统在空间反射下不变, 即运动方程和对易关系都是不变的.

在量子场论中, 假定在空间反射下粒子场按如下的方式变换:

$$\begin{aligned} \text{标量场,} \quad & \phi(\mathbf{x}, t) \rightarrow P\phi(\mathbf{x}, t)P^{-1} = \phi(-\mathbf{x}, t); \\ \text{赝标量场,} \quad & \varphi(\mathbf{x}, t) \rightarrow P\varphi(\mathbf{x}, t)P^{-1} = -\varphi(-\mathbf{x}, t); \\ \text{旋量场,} \quad & \psi(\mathbf{x}, t) \rightarrow P\psi(\mathbf{x}, t)P^{-1} = \gamma^0 \psi(-\mathbf{x}, t), \\ & \bar{\psi}(\mathbf{x}, t) \rightarrow P\bar{\psi}(\mathbf{x}, t)P^{-1} = \bar{\psi}(-\mathbf{x}, t)\gamma^0; \\ \text{矢量场,} \quad & V_\mu(\mathbf{x}, t) \rightarrow PV_\mu(\mathbf{x}, t)P^{-1} = V^\mu(-\mathbf{x}, t); \\ \text{轴矢量场,} \quad & A_\mu(\mathbf{x}, t) \rightarrow PA_\mu(\mathbf{x}, t)P^{-1} = -A^\mu(-\mathbf{x}, t). \end{aligned} \quad (2.8)$$

这里 P 为希尔伯特(Hilbert)空间的算符, 可用场的产生湮没算符表示, 具体形式可参阅李政道和 Bjorken-Drell 的书[1]和[3]. 上下指标的升降用 Bjorken-Drell 度规, γ 矩阵也采用该书的表示.

由(2.8)式可给出如下的双线型在 P 变换下的性质, 其中, $\psi, \bar{\psi}$ 中的时空坐标 $(\mathbf{x}, t) \rightarrow (-\mathbf{x}, t)$.

$$\begin{aligned}
\text{坐标,} & \quad (\mathbf{x}, t) \rightarrow (-\mathbf{x}, t); \\
\text{标量,} & \quad \bar{\psi}_1 \psi_2 \rightarrow \bar{\psi}_1 \psi_2; \\
\text{赝标量,} & \quad \bar{\psi}_1 \gamma_5 \psi_2 \rightarrow -\bar{\psi}_1 \gamma_5 \psi_2; \\
\text{矢量,} & \quad \bar{\psi}_1 \gamma_\mu \psi_2 \rightarrow \bar{\psi}_1 \gamma^\mu \psi_2; \\
\text{轴矢量,} & \quad \bar{\psi}_1 \gamma_\mu \gamma_5 \psi_2 \rightarrow -\bar{\psi}_1 \gamma^\mu \gamma_5 \psi_2; \\
\text{张量,} & \quad \bar{\psi}_1 \sigma_{\mu\nu} \psi_2 \rightarrow \bar{\psi}_1 \sigma^{\mu\nu} \psi_2.
\end{aligned} \tag{2.9}$$

利用(2.8), (2.9)式容易证明, 量子电动力学(QED)拉氏量及作用量在 P 变换下不变, 场算子的对易关系也满足 P 变换下的不变性. 如果不考虑反常项

$$\frac{\theta}{8\pi} \alpha_s \text{Tr} G_{\mu\nu}^a(x) \tilde{G}_a^{\mu\nu}(x),$$

则 QCD 拉氏量和作用量也满足 P 变换的不变性. 详细证明也可参阅文献[1], [3].

§ 2.2 电荷共轭变换 C

电荷共轭变换又称正反粒子共轭变换. 这个变换本质上属于相对论量子场论的范畴, 因为非相对论量子力学中没有反粒子的概念.

考虑弱衰变 $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e$ 和 $\pi^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e$. 图 2.1 给出了这两个过程在 $\pi^\pm$ 质心系的示意图.

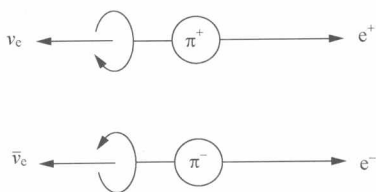


图 2.1 $\pi^\pm \rightarrow e^\pm \nu_e (\bar{\nu}_e)$

我们知道这两个过程宇称是不守恒的(见文献[6]中 R. L. Garwin et al. 的实验). 电荷共轭 C 也不守恒, 原因是将 $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e$ 做电荷共轭变换时应当给出左旋的 $\bar{\nu}_e$ (C 不改变自旋), 但实际上 $\bar{\nu}_e$ 只有右旋态. 但如果在做 C 变换时同时也作 P 变换(左手 $\leftrightarrow$ 右手), 则 CP 似乎可以守恒. 当然, 在 $K_L \rightarrow 2\pi$ 时 CP 不守恒^[7].

在量子场论中, 假定场算符满足如下的电荷共轭变换关系: