

电荷 - 宇称(CP)对称性破坏和夸克 - 轻子味物理 ——写在 CP 破坏发现和夸克理论提出 40 周年之际*

吴 岳 良[†]

(中国科学院理论物理研究所 北京 100080)

摘 要 简要地介绍了与电荷 - 宇称(CP)对称性破坏和夸克 - 轻子味物理有关的一些重要进展. 从 1964 年发现 CP 破坏和提出夸克理论至今, 这个领域就一直成为粒子物理研究的前沿领域, 已研究和发展了整整 40 年, 取得了许多辉煌的成就. 在这篇文章中, 着重评述了目前仍然热门的几个主要的研究方向: 直接 CP 破坏的理论研究和实验验证, CP 破坏机制和新的 CP 破坏源, 中微子物理和新的味物理, 夸克味物理和有效量子场理论, 标准模型中味物理参数的预言和超对称大统一理论. 同时对我国有关研究组在这些前沿方向做出的重要贡献作了重点简述. 可以看出, 在 CP 破坏和味物理这个重要前沿领域, 仍然存在着许多未解之谜, 使得粒子物理在 21 世纪既面临着巨大的挑战, 又有着不断发展的机遇.

关键词 对称性, CP 破坏, 夸克, 味物理, 中微子, 超对称, 大统一, 量子场论

CP symmetry violation and quark-lepton flavor physics ——at the 40's anniversary on discovery of CP violation and quark theory

WU Yue-Liang[†]

(Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract Important progress concerning charge-parity (CP) symmetry violation and quark-lepton flavor physics is briefly reviewed. Since the discovery of CP violation and the establishment of the quark theory in 1964 this field has been at the frontier of particle physics and numerous outstanding achievements have been accomplished. Here we describe various research topics of current significance, including the theoretical study and experimental detect of direct CP violation, new sources and mechanism of CP violation, neutrino physics and new flavor physics, quark-flavor physics and effective field theories, determination of basic parameters in the standard model, and supersymmetric unification models. Several important contributions from research groups in China are mentioned. It is seen that there are still many outstanding unsolved mysteries, and great challenges and opportunities lie ahead.

Key words symmetry, CP violation, quark, flavor physics, neutrinos, supersymmetry, grand unification, quantum field theory

1 引言

今年(2004 年)既是 CP 破坏发现 40 周年, 也是夸克理论提出 40 周年. 1964 年, Cronin 和 Fitch 由

于他们发现了 K - 介子弱衰变中的 CP 破坏^[1], 而荣获 1980 年的诺贝尔物理学奖. 同年, Gell - Mann

* 2004 - 10 - 18 收到初稿, 2004 - 11 - 03 修回

[†] E-mail: ylwu@itp.ac.cn

和 Zweig 首次提出了夸克作为物质的基本组元^[2], 为此, Gell - Mann 获得了 1969 年的诺贝尔物理学奖. 早在 1956 年, 李政道和杨振宁先生因首先发现弱作用中宇称 (P) 对称性破坏^[3], 而获得 1957 年诺贝尔物理学奖. 由夸克和轻子作为物质的基本组元以及基于宇称不守恒的所谓 (V - A) 理论, Glashow、Weinberg 和 Salam 建立了电弱统一模型^[4], 并荣获了 1979 年的诺贝尔物理学奖. 1972 年, 't Hooft 和 Veltman 发展了量子场论维数正规化方法, 证明了电弱统一模型和量子规范理论是可重整的理论^[5], 从而获得了 1999 年的诺贝尔物理学奖. 1973 年, Gross、Wilczek 和 Politzer 发现了夸克之间强相互作用规范理论的渐近自由行为^[6], 而荣获今年 (2004 年) 的诺贝尔物理学奖. 在 CP 破坏发现和夸克理论提出 40 周年之际, 受《物理》杂志之邀, 我们在这里简要地介绍和评述与电荷 - 宇称对称性破坏和夸克 - 轻子味物理有关的一些进展.

研究表明, 构成自然界的基本组元有夸克和轻子, 即到目前为止, 夸克和轻子被认为是物质世界 (包括人类自身) 的最小构成元素. 质子和中子由最轻的所谓上夸克和下夸克两种夸克组成. 电子和中微子是最轻的轻子. 由夸克和轻子作为物质的基本组元而建立的粒子物理标准模型取得了极大成功, 堪称 20 世纪物理学最重大的成就之一. 到目前为止, 共发现了 6 种夸克和 6 种轻子. 这些不同的基本组元通常用“味” (flavor) 这个量子数来描述. 不同的夸克和轻子称为不同的“味”量子. 每一种“味”夸克又区分为具有相同质量和电荷而不同“色” (color) 量子数的三种夸克, 这样实际上有 18 种不同量子数的夸克. 另外 6 种“味”夸克和 6 种“味”轻子按它们的同位旋和质量被分为三代, 每一代有同位旋为正和负的 2 种“味”夸克和 2 种轻子组成. 目前的研究表明, 由这些基本粒子组成的物质世界中, 存在四种基本相互作用力, 即: 支配行星运动和天体演化的万有引力, 构成原子的电磁相互作用力 (由量子电动力学 QED 来描述), 引起原子核衰变的弱相互作用力 (由量子味动力学 QFD 来描述) 和形成核子的强相互作用力 (由量子色动力学 QCD 来描述). 后三种相互作用力由规范量子场论来描述, 即所谓的粒子物理标准模型. 粒子物理标准模型虽然已取得了很大的成功, 尤其规范相互作用部分得到了越来越精确实验的验证, 但粒子物理学家相信标准模型不可能是一个最基本的理论. 因模型中关于对称破缺和夸克禁闭的基本问题仍然是一个悬而未

决的谜, 并且涉及到 18 个未知参数, 它们的起源也仍然不清楚. 模型中关于电荷共轭 - 宇称 (CP) 破坏的起源和机制也仍不清楚. 并且标准模型中的 CP 破坏不足以解释宇宙中观察到的物质 - 反物质不对称. 为此检验标准模型中的 CP 破坏, 理解 CP 破坏的起源和机制以及寻找 CP 破坏的新的源成为粒子物理最重要的研究方向之一. 中微子有质量的实验进一步表明了存在着与味物理有关的新物理, 因粒子物理标准模型是在中微子质量为零的假定下建立起来的.

为此, 以下的两个重要问题一直成为粒子物理研究的前沿领域: CP 破坏和味物理以及对称破缺机制, QCD 低能动力学和夸克禁闭机制.

粒子物理许多丰富的现象和重大突破都直接与“味”物理有关. 如: 从核辐射衰变到最近观察到的中微子振荡, 从时空基本对称性 (P, C, T, CP) 的破坏和基本粒子质量的起源到宇宙中物质 - 反物质不对称的起源, 等等. 这里我们列举大家熟知的几个例子:

- (1) 轻味夸克的 SU(3) 对称性和介子八重态 (获诺贝尔奖)
- (2) 宇称反演对称性破坏, $\pi - \theta$ 之谜 (味道改变的 K - 介子衰变, 获诺贝尔奖)
- (3) 电荷 - 宇称 (CP) 联合反演破坏 (味道改变的 K - 介子衰变, 获诺贝尔奖)
- (4) V - A 理论的确立 (味改变的 β - 衰变)
- (5) 中性流的发现和电弱统一模型 (获诺贝尔奖)
- (6) 粲夸克的发现 (获诺贝尔奖)
- (7) τ - 轻子的发现 (获诺贝尔奖)
- (8) 中微子的发现 (获诺贝尔奖)

可以预见, 新的现象和新的突破也期望通过研究与味物理有关的理论和实验来发现.

另一方面, 夸克被“囚禁”起来形成强子, 实验上无法观察到自由夸克的存在. 定性地说, 这可由 QCD 在 高能时的渐近自由行为来推论, 但对夸克禁闭的机制仍不清楚. 在能量标度远大于 QCD 特征能标 $\Lambda_{\text{QCD}} \sim 300 \text{ MeV}$ 时, QCD 可很好地用微扰理论来处理. 但当能量标度接近 QCD 特征能标 Λ_{QCD} 时, 微扰论处理不再成立, 需发展非微扰理论方法来处理. 如发展有效场理论来描述 QCD 的低能动力学性质.

对于与强子有关的味物理, 上面的第一个问题和第二个问题总是相互联系着的. 如“味”对称性 (包括重夸克近似“自旋 - 味”对称性和轻夸克近

似手征味对称性) 对非微扰理论的建立以及对强子性质和结构的理解起着重要的作用. 为此, 要精确检验粒子物理标准模型, 探讨新物理效应, 必须能更精确地计算所涉及到的基本理论参数, 发展能很好地处理 QCD 强相互作用非微扰效应的方法. 下面我们着重分析在 CP 破坏和夸克 - 轻子味物理方面的几个重要进展, 尤其是北京组在这方面取得的一些重要研究成果.

2 直接 CP 破坏的理论研究和实验验证

因空间反演(宇称 P)和电荷共轭 - 宇称(CP)对称性涉及到空间和物质的基本对称性以及人们对时空和物质的认识, 它一直是粒子物理学家探索自然界规律的前沿领域. 在 Cronin 和 Fitch 发现了 K - 介子弱衰变中的 CP 破坏后不久, 粒子物理学家很快就研究清楚了, Cronin 和 Fitch 所发现的 CP 破坏是由中性 K^0 介子和它的反粒子之间的混合所引起的, 通常被称为间接 CP 破坏(用 ε 描述), 而这样的 CP 破坏既可以由弱相互作用(weak interaction)引起, 也可由新的超弱相互作用(super weak interaction)引起^[7]. 为了区分这两种基本相互作用, 必须测量由衰变振幅引起的直接 CP 破坏, 通常用比值 ε'/ε 来描述, 因在超弱相互作用的模型中, $\varepsilon'/\varepsilon = 0$, 而在弱相互作用模型中 $\varepsilon'/\varepsilon \neq 0$.

由于测量和计算这个比值 ε'/ε 不仅对研究直接 CP 破坏有着重要意义, 而且它对探索自然界新的作用力和理论, 以及 CP 破坏的起源起着关键性的作用. 因此, 自从 1964 年后, 实验和理论物理学家就开始致力于对直接 CP 破坏进行研究. 国际上投入了大量人力和物力, 建立了几个 K - 介子工厂(包括现在的欧洲日内瓦核子中心的 NA48 组, 美国费米国家实验室的 KTeV 组, 意大利国家实验室的 ϕ - 工厂). 理论上, 这要求精确地预言在标准模型中 CP 破坏源^[8]引起的直接 CP 破坏的大小. 这样, 一方面可给实验物理学家进行实验设计时提供必要的依据和有用的参考, 另一方面, 只有通过实验与理论比较, 才能检验 CP 破坏的机制和理解 CP 破坏的起源.

然而直到去年, 实验和理论才对直接 CP 破坏 ε'/ε 给出了一个明确的一致结论. 2001 年, 理论上已对直接 CP 破坏给出了一个更精确的预言^[9]

$$\varepsilon'/\varepsilon = (20 \pm 4 \pm 5) \times 10^{-4}, \text{ (北京组)},$$
 这个结果被国际同行专家引用为“北京组”的工

作^[10-12]. 此研究工作同时解开了 $\Delta I = 1/2$ 同位旋选择规则这个曾经困扰了粒子物理学家近半个世纪的不解之谜^[13]. 2002 和 2003 年, 欧洲日内瓦 NA48 组^[11]和美国费米国家实验室 KTeV 组^[12]分别报道了他们最终的实验结果:

$$\begin{aligned} \varepsilon'/\varepsilon &= (14.7 \pm 2.2) \times 10^{-4} \text{ (NA48 组)}, \\ \varepsilon'/\varepsilon &= (20.7 \pm 2.8) \times 10^{-4} \text{ (KTeV 组)}. \end{aligned}$$

人们自然要问, 理论和实验为什么要经过这么长时间才对直接 CP 破坏的研究取得突破进展. 实验上要求精度很高, 因 ε' 是一个很小的量 ($\varepsilon' \sim 3 \times 10^{-6}$). 随着实验精度的提高, 要求理论预言的精确度也有相应的提高. 2000 年以前, 所有理论计算所遇到的关键的难题主要有三个:

难题之一: 量子色动力学的微扰和非微扰计算之间的匹配问题. 因如果这个问题不解决, 理论预言的结果将依赖于一个任意能量标度.

难题之二: 奇异夸克质量的不确定性, 它可导致直接 CP 破坏 ε'/ε 的结果在数值上达 2 倍以上的不确定性.

难题之三: 任何理论如果要对直接 CP 破坏 ε'/ε 给出可信和自洽的理论预言, 它必须同时能解释所谓的 $\Delta I = 1/2$ 同位旋选择规则.

这是因为直接 CP 破坏参数与 $\Delta I = 1/2$ 规则涉及到同样的强子矩阵元, 因此要对直接 CP 破坏给出一个自洽的预言, 所用的理论方法必须同时能解释 $\Delta I = 1/2$ 规则. 这成为了困扰粒子物理学家近半个世纪的一个不解之谜. 这里同位旋选择规则是指: 在 $K \rightarrow \pi\pi$ 的衰变中, 同位旋为 0 的衰变振幅 A_0 必须远大于同位旋为 2 的衰变振幅 A_2 . 因实验发现 $A_0/A_2 = 22.5$, 它比用简单的因子化方法估算的结果约大 16, 因子化理论得到的比值为 $A_0/A_2 \approx 1.4$. 即使考虑了量子色动力学的微扰修正后, 这个比值最多增大 2.7 倍, 与实验相比较, 仍然小 6 倍左右. 这必须归结到非微扰的贡献.

通过深入研究, 北京研究组取得的主要重要进展包括^[9]:

重要进展之一: 引进了一种新的函数切断正规化方法, 从而解决了微扰与非微扰之间匹配的难题, 并得到了两个重要的匹配条件.

重要进展之二: 进一步论证了一组手征代数关系, 它们不仅在树图而且在量子圈图修正下仍然成立.

重要进展之三: 采用所得到的两个匹配条件和手征代数关系, 对直接 CP 破坏 ε'/ε 的大小得到了

更精确的预言. 其预言的数值不仅与能标和正规化方案无关, 而且也不再依赖于奇异夸克的质量, 由此消除了理论预言中所有可能的大的不确定性.

重要进展之四: 解释了 $\Delta I = 1/2$ 同位旋选择规则这个曾经困扰了粒子物理学家近半个世纪的不解之谜.

基于国际粒子物理界对直接 CP 破坏 ε'/ε 和相关味物理问题的兴趣和重视, 2001 年, 由中国科学院理论物理研究所发起举办了首届“味物理国际会议”. 邀请了世界上十多个国家和地区的 50 多位来自海外的著名理论和实验物理学家. 大会还特别邀请到欧洲日内瓦核子研究中心和美国费米国家实验室的两个实验组 NA48 和 KTeV 的专家. 尤其是在 1964 年提出“超弱相互作用”理论的美籍华裔物理学家 Wolfenstein 教授也欣然参加了会议. Wolfenstein 教授不但在大会上对 CP 破坏的研究做了回顾性的报告, 而且在会议结束后回答记者的采访时, 他非常坦率地说: “此次会议最大的收获, 是证明了我 36 年前所提出的纯‘超弱相互作用’理论是不正确的.” 这次国际会议的成功举办开创了我国味物理和 CP 破坏的先河, 现已发展成为国际系列会议, 每两年举行一次.

早在 1984 年, 周光召院士在中国科学院理论物理研究所担任所长期间, 就注意到在我国粒子物理理论方面, 研究直接 CP 破坏 ε'/ε 的重要性. 当时实验和理论对 ε'/ε 的研究已近二十年, 在实验达到的精度范围内 (百分之一至千分之几之间), 仍然不能确定直接 CP 破坏的大小. 在周光召先生的带领下, 研究组开始了对这个重要前沿问题的研究, 并且把研究直接 CP 破坏 ε'/ε 与国际上当时正在寻找的自然界中的第六种基本组元, 即顶夸克, 联系起来. 很快地, 他们就发现, 如果直接 CP 破坏 ε'/ε 小于千分之几, 顶夸克质量 m_t 必须大于中间玻色子质量, 即 $m_t > m_w \approx 80 \text{ GeV}$, 并很自然地可允许达到 200 GeV . 而当时, 在没有找到顶夸克之前, 顶夸克的质量 m_t 被普遍认为较小, $m_t < 40 \text{ GeV}$, 即远小于中间玻色子质量 $m_w \approx 80 \text{ GeV}$, 大部分理论都仅考虑 $m_t < m_w$ 的情况 (包括标准模型创立者、诺贝尔物理学奖获得者格拉肖 (Glashow) 也认为 $m_t < 40 \text{ GeV}$). 并且日本在 20 世纪 80 年代初, 还专门建立了仅在 40 GeV 能量区的高能加速器, 试图寻找顶夸克. 尤其在当时还出现了一个小插曲, 即在欧洲日内瓦核子研究中心, 发现中间玻色子的实验组报道, 并声称发现了顶夸克, 其顶夸克质量约在 $m_t \sim 40 \text{ GeV}$. 当

得知这个消息, 研究组通过深入分析认为, 若顶夸克质量真的被确认为 $m_t \sim 40 \text{ GeV}$, 那么要解释直接 CP 破坏 ε'/ε , 必须引进第四代夸克^[14]. 10 年后, 直到 1994 年, 美国费米国家实验室才最终发现了顶夸克, 其质量约为 $m_t \approx 180 \text{ GeV}$.

实际上, 在 1989 年时, 美国费米国家实验室已第一次把顶夸克质量极限值改变过来, 即 $m_t > m_w$. 这时国际上开始重新认真地讨论 $m_t > m_w$ 时的有效哈密顿量. 结果发现重顶夸克在电弱企鹅图中的贡献表现出非退耦效应. 并通过重整化群效应, 对直接 CP 破坏有重要贡献, 且此贡献与胶子企鹅图中的贡献反号, 它们可引起对直接 CP 破坏的一种抵消作用^[15]. 不久, 1991 年, 又发现了量子手征圈图给出的非微扰量子色动力学的贡献有非常重要的效应, 并对直接 CP 破坏 ε'/ε 有很大的增强作用. 并预言了有较大的直接 CP 破坏 ε'/ε , 其大小可在当时实验精度范围内观察到^[16]. 这一新的研究进展, 被邀请在 1992 年第 26 届国际高能物理大会上报告^[17], 并引起了实验物理学家极大的关注. 因当时国际上其他几个理论组的预言都倾向于小的 CP 破坏值 ε'/ε , 无法在当时实验精度范围内观察到^[18]. 不久后, 1993 年, 欧洲日内瓦核子研究中心和美国费米国家实验室的两个实验组 NA31 和 E731 分别报道和发表了他们的实验结果. 欧洲日内瓦核子研究中心的 NA31 实验组, 在千分之一的精度范围内, 观测到了直接 CP 破坏的证据^[19]. 但这个证据未能完全得到美国费米国家实验室 E731 实验组的证实^[20].

为了在实验上更精确确定直接 CP 破坏 ε'/ε 的大小, 并判断哪一个理论的预言是正确的. 1993 年后, 欧洲和美国的两个实验组, 又投入了大量的人力和物力, 重新改进和设计新的实验, 使得实验精度能提高到万分之一左右. 这样, 又经过近十年的努力, 欧洲日内瓦 NA48 组^[11] 和美国费米国家实验室 KTeV 组^[12] 最终证实了 K-介子衰变中直接 CP 破坏的存在, 并与理论预言相一致^[9].

3 CP 破坏机制和新的 CP 破坏源

虽然标准模型中的 CP 破坏源可解释观察到的 CP 破坏, 但标准模型中的 CP 破坏是人为地放进去的, 它们的起源和机制仍不清楚. CP 破坏和对称破缺一直是粒子物理标准模型中两个悬而未决的谜. 早在 1973 年, 李政道先生就提出了 CP 对称性自发破缺的想法^[21]. 直到 1994 年, CP 对称性自发破缺

的自洽模型才在双黑格斯二重态模型 (S2HDM) 中被首次完整地建立起来, 此模型不仅给出了标准模型中 CP 破坏机制的起源, 还发现了一类新的 CP 破坏源^[22]。

随着实验精度的提高, 很多模型被排除, 如粒子物理标准模型创立者, 诺贝尔物理学奖获得者温伯格 (Weinberg) 早期提出的 CP 自发对称破缺的 3 个黑格斯二重态模型受到了实验严格的限制, 似乎已不能给出与所有实验自洽的预言。通过对 S2HDM 这个模型作深入的研究, 并对所有可能的唯象进行系统的分析, 并与现有的各种实验进行比较, 取得了一系列重要的进展^[23], 如: S2HDM 模型仍然与现有的所有实验相一致, 并且还可导致许多新的物理效应。有的可在美国和日本的两个 B - 工厂实验上进行检验, S2HDM 模型中新的 CP 破坏源和相互作用可很好地用来解释由美国布鲁克海文 (Brookhaven) 国家实验室最近所观测到的 μ 子反常磁矩与标准模型中的偏差; S2HDM 模型中的味改变轻子过程如 $\mu \rightarrow e\gamma$, $\pi \rightarrow \mu\gamma$, 可接近现有实验精度范围。

人们也许会问, 双黑格斯二重态 CP 自发对称破缺模型 (S2HDM) 为什么直到近年才被完整地建立起来并得到粒子物理学家的重视。实际上, 双黑格斯二重态模型作为标准模型的一个最简单的推广, 一直受到粒子物理学家的关注。为了避免味改变的中性流, 人们通常引进分立对称性来实现, 如标准模型创立者、诺贝尔物理学奖获得者格拉肖和温伯格提出的所谓自然味守恒 (NFC) 假设。在这个假设下, 温伯格证明了要得到 CP 自发对称破缺的规范模型至少需要三个黑格斯二重态, 因双黑格斯二重态在 NFC 假设下不会产生自发的 CP 对称破缺。温伯格的三个黑格斯二重态模型成为了一个很有吸引力的 CP 自发破缺的规范理论^[24]。但随着越来越多精确实验结果的报道, 如 K - 介子中的间接和直接 CP 破坏, 中性 B - 介子混合和辐射衰变, 中子和电子的电偶极矩, 温伯格的模型受到严格的限制, 似乎不能给定与所有实验自洽的预言。为此温伯格等提出放弃 NFC 的假设, 考虑近似的味对称性, 并研究了双黑格斯二重态模型。但在这些研究中, 又人为地对 Yukawa 耦合参数附加了一些不必要的条件, 使得模型的行为类似超弱作用来压低味改变中性流以至 CP 破坏的效应也变得很小^[25]。与此相反, 文献 [22] 在近似味对称的假设下详细分析了最普遍的双黑格斯二重态模型。除了把自发 CP 对称破缺作为引进双黑格斯二重态的动机外, 不再

人为地附加任何条件和限制。结果发现自发 CP 对称破缺的双黑格斯二重态模型不仅可诱导标准模型中 KM 机制的 CP 位相, 还发现了一类 CP 破坏的新的源, 并且所有 CP 破坏源可以分为四类。其中一类是中性流改变的具有超弱相互作用的行为。还有一类是由标量和赝标量黑格斯粒子之间的混合引起的。并对这个模型所有可能的唯象作了系统的分析, 在与现有实验自洽的情况下, 可导致一系列新的效应^[23-26]。

与 CP 破坏的起源和机制有关的新物理模型还有不少, 较为引起关注的模型有: 左右对称模型、超对称模型、大统一模型等^[27]。

最近美国 SLAC 和日本 KEK 在两个 B - 介子工厂中, 发现了 B - 介子衰变中直接 CP 破坏的证据^[28], 为进一步检验标准模型中的 CP 破坏和探测新物理有着重要的意义^[29]。

4 中微子物理和新的味物理

中微子有质量暗示了与味物理有关的新物理的存在^[30-31]。粒子物理学家一直在试图扩展粒子物理标准模型, 建立更基本的理论来解释已探测到的中微子振荡以及有关的物理新现象。一类较有兴趣的理论是通过对称性和统一角度考虑而建立的模型, 如具有轻子和夸克家族对称性的超对称大统一模型。而味对称性规范理论作为量子味动力学 (QFD) 可看作是标准模型中量子电动力学 (QED) 和量子色动力学 (QCD) 的一个直接扩展。最简单的味对称性规范群, 如 $SO(3)$ 味规范作用模型^[32]。SO(3) 对称性自发破缺后可自然地得到了第二和第三代中微子之间的最大混合, 很好地解释大气中微子失踪之谜。结合双 β 衰变和天体宇宙学的限制, 可得到解释太阳中微子失踪之谜的大角度 MSW 解。另外, 此类模型还可自然导致味改变的轻子过程。当味规范粒子的质量在 100 TeV 附近时, 味改变的轻子过程可接近现有实验精度范围。

虽然中微子物理研究取得了重要进展, 尤其在 中微子振荡的实验探测和中微子物质效应的研究方面。但人们对中微子性质的了解仍然很有限, 如: 中微子是 Dirac 粒子还是 Majorana 粒子? 中微子质量的绝对值有多大? 中微子质量是不是几乎简并的? 为什么中微子质量变得比带电轻子和夸克小得多? (约为电子质量的百万分之一, 为最重的顶夸克质量的十万亿分之一), 与中微子有关的 CP 破坏如

何?中微子轻子数不守恒与物质-反物质不对称的联系怎样?中微子对宇宙大尺度的演化以及天体物理中的奇特现象(超新星爆发等)起着怎样的作用等基本问题到目前为止仍然不清楚^[33].这需要理论和实验进行深入研究,如:日本建立了 Super-K、K2K、KAMLAND 中微子实验,加拿大建立了 SNO 中微子实验进行研究,目前国际上还在筹建长基线中微子振荡实验和建议建造中微子工厂,如:美国在筹建 MINOS 长基线中微子振荡实验以及 Mini-BooNE 等短基线中微子振荡实验等.

5 夸克味物理和有效量子场理论

对于 3 个轻夸克(u, d, s)的味物理动力学已进行了长期的研究,国际上许多实验也已作了大量分析,并将进一步提高实验精密密度做深入研究.而对重味物理,即 3 个重夸克(c, b, t)的研究,由于过去受实验精度的限制,真正的进展才刚刚开始.这个领域也是目前粒子物理的热门课题.同时,重味物理对新物理更敏感.当重味物理的探测精度提高到可与轻味物理相匹配时,重味夸克物理对研究 CP 破坏机制,精确地确定粒子物理标准模型中重要的基本物理量,理解量子色动力学(QCD)的微扰和非微扰相互作用性质,弄清强子结构以及探讨新物理起着非常重要的作用.国际上正在运行的两个 B-介子工厂,已得到了很多有价值的结果,近两年还将提供大量数据.

量子色动力学的渐近自由行为^[6]使得人们可很好地计算 QCD 的微扰修正.但强子作为夸克的束缚态,它将涉及到 QCD 低能动力学和夸克禁闭.微扰论处理不再成立,需发展非微扰处理方法.通常是发展有效量子场理论来描述 QCD 的低能动力学性质.对于重味夸克系统,人们发现在重夸克极限($m_Q \rightarrow \infty$)下有新的味道——自旋对称性,这使得重强子之间相互跃迁所涉及到的十多个形状因子仅用一个普适的函数来表示^[34].最近,重夸克有效场论的物理基础得到了进一步论证,即从基本的 QCD 理论出发,建立和发展重夸克系统的完整有效场理论^[35],它可作为 QCD 的一种大分量理论^[36].采用重夸克有效场论,可通过研究 B-介子的单举和遍举过程,计算相应的跃迁矩阵和形状因子,对标准模型中夸克混合矩阵元的 2 个重要的基本参数 $|V_{cb}|$ 和 $|V_{ub}|$ 给出更精确的定量预言^[37];可得到重介子衰变常数与质量之间近似度很好的标度定律^[38];还

可很好地解释长期悬而未决的底夸克强子衰变寿命之谜,更好地理解夸克-强子对偶性^[39].

计算重夸克介子衰变的跃迁矩阵和形状因子,通常采用的几种处理方法包括:夸克模型计算^[40],改进的 QCD 因子化方法^[41],微扰 QCD 方法(pQCD)^[42],Bethe-Salpeter 求解方法^[43],光锥 QCD 求和规则^[44]以及最近发展的软共线有效场理论(SCET)方法^[45]等.对于重夸克偶素系统,较为常用的一种处理方法是而非相对论 QCD(NRQCD)^[46].但这些方法计算的结果还不能完全对现有实验数据给出满意的解释,有待进一步发展.有关最近的进展可查阅我国 B-物理高级研讨班总结报告^[47]以及其中所引的参考文献.

对于轻味夸克系统,人们发现在轻夸克极限($m_q \rightarrow 0$)下有 SU(3)手征味对称性.实际上在量子色动力学建立之前,粒子物理学家就应用味对称性研究强子的性质,包括采用流代数 and PCAC 理论^[48]等方法.后来发展了手征微扰理论^[49-53],它被广泛应用到轻味夸克系统来研究 QCD 的低能动力学.最近,一种新的量子场论的圈正规化方法被找到^[54],它克服了维数正规化等现有正规化方法遇到的一些难题,包含了现有正规化方法的优点,可同时应用到规范量子场论和有效量子场论以及手征量子场论和超对称理论等,导出正确的能隙方程,研究动力学自发对称破缺和真空能量,理解夸克禁闭和质量标度等粒子物理中的一些重大前沿问题.如:从量子色动力学出发,基于强子作为夸克的束缚态,导出了低能 QCD 的动力学自发对称破缺机制,并通过考虑非微扰 QCD 的瞬子效应,得到了标量和赝标介子质量谱等近 30 个与实验相自洽的预言^[55],其中标量介子可被看作是复合的 Higgs 粒子.这为发展手征动力学有效场论奠定了基础.

正在运行的两个 B-介子工厂(BarBar, Belle),两个 τ -c 实验(BEPC 和 CLEOc),两个 K-介子实验(NA48, KTeV)和 Φ -介子工厂,以及对撞机上的一些其他实验装置(BTeV 和 LHCb)将进一步研究“味”物理和有关的新物理.

6 标准模型中味物理参数的预言和超对称大统一理论

一方面,标准模型取得了极大的成功,它是我们研究新物理的基础和出发点.另一方面,标准模型不

可能是一个最基本的理论. 它涉及到 18 个未知参数的起源, 尤其是 Higgs 粒子的存在及它的质量还没有得到实验的证实. 为了减少标准模型中的参数, 一个重要的研究方向是超对称大统一理论^[56-58].

建立参数更少的超对称大统一模型是理论物理学家的一个愿望^[59]. 到目前为止, 文献 [60] 成功地构造了一类参数最少的具有味对称性的超对称大统一模型, 用不到 6 个参数就可给出标准模型中 18 个参数的预言, 且预言的结果与实验值相当符合. 虽然这个模型仅是一个唯象模型, 模型需要引进 3 个特殊的大统一群破缺方向和一些超重的费米子和标量粒子来构造, 但所得的夸克和轻子的质量与混合角之间的十多个关系式很可能具有一定的普适性. 这对引导人们构造更基本的统一理论具有重要的学术意义, 值得作进一步的研究. 美国费米国家实验室 TEVATRON 和正在筹建的 LHC 实验以及正在研讨的高能量的线性正负电子对撞机将进一步探测超对称粒子. 理论上, 超对称破缺机制和破缺的能量标度仍然是一个难题.

7 结束语

总之, 研究 CP 对称性破坏和夸克 - 轻子味物理动力学一直是粒子物理研究的重要前沿领域. 其中面临的一个最大挑战是: 日常世界完全由第一代夸克和轻子所组成, 这一代本身似乎就已是个完整的理论, 为什么要有并且只有三代夸克和轻子“味”粒子? 在粒子物理标准模型中 CP 对称性破坏至少要求有三代夸克, 但为什么只有三代夸克仍然不能回答.

这里我们仅仅给了一个非常简要的关于 CP 对称性破坏和夸克 - 轻子味物理的回顾和展望. 更重要的目的是为了启发和激励我国更年轻的科学家来揭开在这个前沿领域所面临的未解之谜.

今年正好也是我国第一颗原子弹爆炸成功 40 周年, 其中为第一颗原子弹爆炸成功做出重要贡献的许多科学家曾是著名的粒子物理学家, 他们为了我国的国防事业和祖国的强盛, 放弃了研究粒子物理的黄金时代和已经取得的国际公认的成果以及个人名誉. 为此, 让我们在纪念这特殊的 40 周年之际, 发扬“两弹一星”精神, 在 21 世纪为粒子物理学和科学的发展做出真正具有开创性的成果, 在科学史上留下更多中国科学家的贡献, 为诺贝尔物理学奖在我国的土地上诞生而共同努力.

参 考 文 献

- [1] Christenson J H, Cronin J W, Fitch V L, Turlay R. *Phys. Rev. Lett.*, 1964, 13 : 138
- [2] Gell-Mann M. *Phys. Lett.*, 1964, 8 : 214 ; Zweig G. CERN preprint TH401, 1964
- [3] Lee T D, Yang C N. *Phys. Rev.*, 1956, 104 : 254
- [4] Glashow S. *Nucl. Phys.*, 1961, 22 : 579 ; Weinberg S. *Phys. Rev. Lett.*, 1967, 19 : 1264 ; Salam A. In : *Elementary Particles*. Ed. Svartholm N. Stockholm : Almqvist Wiksells, 1968. 367
- [5] 't Hooft G, Veltman M. *Nucl. Phys.*, 1972, B50 : 318
- [6] Gross D J, Wilczek F. *Phys. Rev. Lett.*, 1973, 30 : 1343 ; Polizer H D. *Phys. Rev. Lett.*, 1973, 30 : 1346
- [7] Wolfenstein L. *Phys. Rev. Lett.*, 1964, 13 : 562
- [8] Kobayash M, Maskawa K. *Prog. Theor.*, 1972, 49 : 282
- [9] Wu Y L. *Phys. Rev.*, 2001, D64 : 016001 ; Wu Y L. Consistent prediction for direct CP violation and $\Delta I = 1/2$ rule. In : *Flavor physics*. Ed. Wu Y L. World Scientific Pub. Co., 2002. 217-236
- [10] Bertolini S. *Frascati Phys. Ser.*, 2002, 28 : 275
- [11] Batley J R *et al.* *Phys. Lett.*, 2002, B544 : 97
- [12] Alavi-Harati A *et al.* *Phys. Rev.*, 2003, D67 : 012005
- [13] Gell-Mann M, Pais A. *Proc. Glasgow Conf.*, 1955, 342
- [14] Chou K C, Wu Y L, Xie Y B. *Chin. Phys. Lett.*, 1984, 1 : 47
- [15] Paschos E A, Wu Y L. *Mod. Phys. Lett.*, 1991, A6 : 93 ; Wu Y L. Invited talk at the 25th Int. Conf. on High Energy Physics. Ed. Phua K K, Yamaguchi Y. ICHEP90 Proceedings. World Scientific Pub. Co., 1230
- [16] Wu Y L. *Intern. J. of Mod. Phys.*, 1992, A7 : 2863 ; Heinrich J, Paschos E A, Schwarz J -M, Wu Y L. *Phys. Lett.*, 1992, B279 : 140
- [17] Wu Y L. Recent Theoretical Development on Direct CP Violation ϵ'/ϵ . In : ICHEP92 Proceedings. Ed. Sanford J R. Dallas, 1992. 506
- [18] Buras A, Jamin M, Lautenbacher M E. *Nucl. Phys.*, 1993, B408 : 209
- [19] NA31 Collab., Barr G D *et al.* *Phys. Lett.*, 1993, B137 : 233
- [20] E731 Collab., Gibbons L K *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1999, 70 : 22
- [21] Lee T D. *Phys. Rev.*, 1973, D8 : 1226 ; *Phys. Rep.*, 1974, 9 : 143
- [22] Wu Y L, Wolfenstein L. *Phys. Rev. Lett.*, 1994, 73 : 1762
- [23] Wolfenstein L, Wu Y L. *Phys. Rev. Lett.*, 1994, 73 : 2809 ; Wu Y L. *Chin. Phys. Lett.*, 1999, 16 : 339 ; Wu Y L. Invited talk at Int. Europhys. Conf. on “ High-Energy Physics (EPS - HEP 99)”. In : Ed. Huitu K *et al.* Proceedings. IOP Publishing Ltd., 2000. 570 ; Wu Y L, Zhou Y F. *Phys. Rev.*, 2000, D61 : 096001 ; Wu Y L, Zhou Y F. *Phys. Rev.*, 2001, D64 : 115018 ; Wu Y L, Zhou Y F. *Frontiers of Physics at Millennium*. In : Ed. Wu Y L, Hsu J P. World Scientific Pub. Co., 2001. 185
- [24] Weinberg S. *Phys. Rev. Lett.*, 1976, 37 : 657
- [25] Hall L J, Weinberg S. *Phys.*, 1993, D48 : 979
- [26] Wu Y L. A Model of CP Violation. Carnegie-Mellon Univ. Report. 1994. 78, hep - ph/9404241 ; Wu Y L. Invited talk at 5th Conference on the Intersections of Particle and Nuclear Physics. In : Ed. Seestrom S J. Proceedings. New York : AIP, 1995. 38, hep - ph/9406306
- [27] Nir Y. CP violation in and beyond the standard model. Lectures given at 27th SLAC Summer Institute on Particle Physics. hep - ph/9911321

- [28] <http://www.slac.stanford.edu/xorg/hfag/rare>
- [29] Wu Y L , Zhou Y F. hep - ph/0409221 , 2004
- [30] Gonzalez-Garcia M , Nir Y. Rev. Mod. Phys. , 2003 , 75 : 345
- [31] Mohapatra R N. ICTP lectures on theoretical aspects of neutrino masses and mixings. Invited talk at SUSY02 , Beyond the Desert 02 , hep - ph/0211252
- [32] Wu Y L. Phys. Rev. , 1999 , D60 : 073010 ; Wu Y L. Eur. Phys. J. , 1999 , C10 : 491 ; Wu Y L. Nucl. Phys. Proc. Suppl. , 2000 , 85 : 193
- [33] Smirnov A Y. Neutrino Physics : Open Theoretical Questions. Invited talk at " Lepton Photon 2003 ". Int. J. Mod. Phys. , 2004 , A19 : 1180
- [34] Isgur N , Wise M B. Phys. Lett. , 1989 , B232 : 113 ; Phys. Lett. , 1990 , B237 : 527
- [35] Wu Y L. Mod. Phys. Lett. , 1993 , A8 : 819
- [36] Wu Y L *et al.* Mod. Phys. Lett. , 2003 , A18 : 1303
- [37] Wang W Y , Wu Y L. Phys. Lett. , 2001 , B515 : 57 ; Wang W Y , Wu Y L , Yan Y A. Int. J. Mod. Phys. , 2000 , A15 : 1817
- [38] Wang W Y , Wu Y L. Int. J. Mod. Phys. , 2001 , A16 : 377
- [39] Wu Y L , Yan Y A. Int. J. Mod. Phys. , 2001 , A16 : 285
- [40] Bauer M , Stech B , Wirbel M Z. Phys. C , 1985 , 29 : 637 ; Bauer M , Stech B , Wirbel M Z. Phys. C , 1987 , 34 : 103
- [41] Beneke M , Buchalla G , Neubert M *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1999 , 83 : 1914 ; Beneke M , Neubert M. Nucl. Phys. B , 2003 , 675 : 333 ;
- [42] Keum Y Y , Li H N , Sanda A I. Phys. Lett. , 2001 , B504 : 6 ; Phys. Rev. D , 2001 , 63 : 054008 ; Lu C D , Ukai K , Yang M Z. Phys. Rev. , 2001 , D63 : 074009
- [43] Dai Y B , Huang C S , Jin H Y. Z. Phys. C , 1993 , 60 : 527
- [44] Ball P , Braun V M. Phys. Rev. D , 1997 , 55 : 5561
- [45] Bauer C W *et al.* Phys. Rev. D , 2001 , 63 : 114020
- [46] Bodwin G T , Braaten E , Lepage G P. Phys. Rev. D , 1995 , 51 : 1125
- [47] Chang C H *et al.* hep - ph/0410272 , 2004
- [48] Gell-Mann M , Levy M. Nuovo Cimento , 1960 , 16 : 705 ; Chou K C. Soviet Physics JETP , 1961 , 12 : 492
- [49] Weinberg S. Physica , 1979 , 96A : 327
- [50] Gasser J , Leutwyler H. Ann. Phys. (NY) , 1984 , 158 : 142 ; Nucl. Phys. , 1985 , B250 : 1985
- [51] Bardeen W A , Buras A J , Gerard J -M. Nucl. Phys. , 1987 , B293 : 787 ; Phys. Lett. , 1987 , B192 : 138 ; Phys. Lett. , 1988 , B211 : 343
- [52] Ecker G , Gasser J , Leutwyler H *et al.* Phys. Lett. , 1989 , B223 : 425
- [53] Meissner U G. Phys. Rept. , 1988 , 161 : 213
- [54] Wu Y L. Int. J. Mod. Phys. , 2003 , A18 : 5363 ; Wu Y L. Mod. Phys. Lett. , 2004 , A19 : 2191
- [55] Dai Y B , Wu Y L. Eur. Phys. J. C , 2004 , (DOI) 10.1140/epjc/s2004-01-001-3 ; hep - ph/0304075
- [56] Dimopoulos S , Raby S , Wilczek F. Phys. Rev. D , 1981 , 24 : 1681
- [57] Langacker P , Luo M X. Phys. Rev. D , 1991 , 44 : 817
- [58] Raby S. Rep. Prog. Phys. , 2004 , 67 : 755
- [59] Altarelli G , Ferruccio F. hep - ph/0405048 , 2004
- [60] Chou K C , Wu Y L. Phys. Rev. D , 1996 , 53 : 3492 ; Nucl. Phys. Proc. Suppl. , 1997 , 52A : 159 ; Chou K C , Wu Y L. The frontiers of physics at millennium. Ed. Wu Y L , Hsu J P. World Scientific Pub. Co. , 2001. 374—417 ; Chou K C , Wu Y L. Science Sinica , 1996 , A39 : 65

· 信息服务 ·



Rensselaer

美国伦斯勒理工学院招生信息

Troy , New York , U. S. A.

December , 2004

JOIN OUR GRADUATE SCHOOL IN PHYSICS

Ph. D. in Department of Physics , Applied Physics , and Astronomy

Areas of research : Terahertz Imaging and spectroscopy , Terascale Electronics and photonics , Nano-Particles Physics , Bio-physics , Origins of Life , Astronomy , Elementary Particles Physics. Teaching , research assistantships , and fellowships are available.

Application : <http://www.rpi.edu/dept/grad-services/>

Information : <http://www.rpi.edu/dept/phys/>

E-mail : gradphysics@rpi.edu