

超对称大统一理论及低能唯象物理*

吴 岳 良

(中国科学院理论物理研究所 北京 100080)

摘要 简要地说明为什么有必要扩展粒子物理标准模型. 作为最有兴趣的一类扩展, 将主要讨论超对称大统一理论及其低能唯象物理.

关键词 超对称 大统一 CP破坏 中微子振荡

粒子物理学家经过二十多年的努力, 表明了粒子物理标准模型是一个描述电弱和强相互作用较为成功的模型. 到目前为止, 还没有发现与标准模型有明显不符的实验现象. 但粒子物理学家普遍认为, 标准模型不可能是最基本的理论. 首先标准模型所预言的一个关键的粒子——Higgs 粒子至今尚未发现, 它涉及到标准模型对称性破缺机制及粒子质量的产生. 其次标准模型中的 CP 破坏尚不足以解释宇宙中物质-反物质的不对称. 再次标准模型中只有左手中微子, 故中微子是没有质量的, 而天体物理和宇宙学中的许多现象暗示有质量的中微子将帮助人们理解所观察到的一些疑难, 如太阳中微子和大气中微子失踪之谜, 宇宙中的热暗物质. 最后, 也是最为重要的原因, 标准模型中含有 18 个自由参数, 它们的起因全不清楚, 只能由实验来确定. 这大概是几点重要的因素导致粒子物理学家探讨标准模型以外的新物理, 并通过扩展标准模型逐渐建立更基本的理论. 最小标准模型是由对称性为 $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ 的规范相互作用来描述, 含有三代夸克和轻子. 故标准模型的推广主要沿下面的两个方向.

一是仅仅物质内容的扩充, 保持原有的对称性不变. 最简单的有两个黑格斯二重态模型; 四代夸克和轻子模型, 其中第四代中微子质量较重; 有质量中微子模型. 这类模型虽然比较直接和简单, 但它们可导致较丰富和有趣的唯象结果, 如 CP 破坏的起源及机制, 稀有衰变过程, 中微子振荡等. 这类模型尽管不能给出定量的预言, 但确能暗示人们从哪里去寻找新物理.

二是同时扩展对称性和物质内容. 较为有兴趣的两类扩展有:

i) 超对称理论——费米子与玻色子之间的基本对称性^[1-4]. 超对称最有吸引力之处在于它将物质的两种已知形式(费米子和玻色子)统一起来理解, 并且超势中的耦合参数不从圈图获得任何有限的或无限的修正.

1998-06-08收稿

* 国家杰出青年科研基金项目资助(19625514)

ii) 大统一理论——夸克和轻子之间的基本对称性^[2]. 大统一最有吸引力的性质是将物质的两种不同类型(夸克和轻子)统一起来理解, 并且把三种不同的基本相互作用力(强、电和弱)用一个规范耦合常数来描述. 很遗憾的是最小大统一模型 $SU(5)$ 由于它预言的质子衰变寿命与实验不符而被排除. 但这使得 $SO(10)$ 模型变得更有兴趣. 通过引进一个中间的能量标度 ($\sim 10^{12} \text{GeV}$), 可以得到一个自洽的模型, 并且 $SO(10)$ 大统一模型自然导致有质量的中微子.

沿着以上两个方向, 首先人们考虑最小超对称标准模型 (MSSM). 这个模型可以解决所谓 Higgs 质量的稳定性问题, 并预言了较轻 Higgs 的存在. 若自然界真的选择了超对称, 那么将会有更丰富和有趣的物理现象有待人们去研究. 仅仅粒子谱就比已知的粒子多一倍. 而在最小超对称标准模型中, 超对称粒子质量谱也是未知的, 因超对称的破缺是通过所谓软破缺而人为地加入的. 这样就导致以下几个问题. 仅要求标准模型的规范对称性, 软破缺项将有重子数和轻子数破坏的相互作用存在. 但目前质子寿命的实验限制要求耦合常数小于 10^{-13} . 这样小的耦合常数显然不是自然的. 另外, 若允许这些项存在, 最轻的超对称粒子将不能作为冷暗物质的候选者. 除此以外, 最小超对称模型将会导致较大的所谓味道改变的中性流 (FCNC), 除非夸克的超对称伴随子质量平方之差与质量平方的比值为千分之一, 否则与现有实验矛盾. 这样小的比值若没有某种对称性限制, 也是一个不自然的小量. 还有一个不自然的小量是超对称部分的 CP 破坏位相必须小于百分之一到千分之一, 否则它将导致较大的中子电偶极矩.

这些问题的解决很大程度上取决于人们对超对称破缺机制的理解. 一个较为已知的超对称破缺机制是超引力诱导的超对称破缺. 在这个破缺机制下, 超对称破缺势只依赖于一个普适的参数(在普朗克能量标度). 但在电弱破缺标度, 由于重整化群效应, 超对称软破缺势将变成较一般的形式, 其耦合参数取决于模型中的 Yukawa 耦合常数. 为了抑制 FCNC, 要求第一代和第二代夸克所对应的超对称伴随子的质量矩阵元相同. 另外, 这个超对称破缺机制可以自然地提供一个电弱对称破缺机制. 这是由于顶夸克与标量粒子的耦合较强, 超对称破缺后的重整化群效应较大, 以至在电弱破缺的能量标度下, 可以改变超势中超势质量项的符号. 另一个最近较为感兴趣的超对称破缺机制是所谓规范诱导的超对称破缺机制. 它是用熟知的规范力作为超对称破缺的传递者. 已知粒子的超对称伴随子的质量通过圈图贡献给出. 如规范粒子的伴随子质量可来自于单圈图的贡献, 而夸克和轻子的伴随子的质量由双圈图的贡献给出.

通过以上的分析, 现在讨论为什么考虑超对称大统一理论. 人们知道, 大统一理论一个较为普遍的问题是所谓规范等级问题, 而超对称理论正好可以解决这个问题. 超对称理论(如最小超对称标准模型)中的一个问题是参数的大量增加, 而大统一的想法自然地可以帮助减少参数. 如超对称 $SU(5)$ 大统一理论, 除了三个规范耦合常数自然地统一为一个规范耦合常数, 还自动给出底夸克和 τ 轻子的 Yukawa 耦合常数的统一. 另外, 若超对称破缺是由超引力诱导而产生, 它仅依赖于 5 个参数 ($A, B, m_{3/2}, \mu, m_\lambda$). 最小超对称 $SU(5)$ 模型所预言的质子衰变寿命可以大于现在实验的下限, 但它要求带色的 Higgs 的质量大于大统一能量标度. 另外超对称 $SU(5)$ 不能自动给出 R 宇称守恒. 再就是超对称 $SU(5)$ 不能自然解释宇宙中观察到的物质-反物质不对称性. 这些不足之处, 在超对称

$SO(10)$ 大统一理论中可以得到解决. 另外超对称 $SO(10)$ 大统一理论可以对夸克和轻子的质量及混合角给出更有预言性的结果. 并可以对天体物理和宇宙学中有关中微子和暗物质之谜给出定量解释. 对宇宙中物质-反物质不对称也能给出定量解释.

下面给出一个具体例子, 那是一个到目前为止, 预言量较多的超对称大统一模型, 即超对称 $SO(10) \times \Delta(48) \times U(1)$ 模型^[5-7]. 其中 $\Delta(48)$ 是 $SU(3)$ 的一个分立子群, 由 5 个三重态和 3 个单态组成. 这样, 标准模型中的所有粒子包括新加的右手中微子都可统一为 $SO(10) \times \Delta(48) \times U(1)$ 的一个不可约表示. 发现在这个模型中存在两种类型的解, 它们分别对应于 $\tan\beta = O(1)$ 和 $\tan\beta = O(50)$. 这里 $\tan\beta = V_2/V_1$. V_2 和 V_1 分别是两个 Higgs 二重态的真空平均值. 假定在普朗克能量标度, 超势只依赖于一个普适的耦合常数. 另外, 假定对称破缺是由三个必要的能量标度 $V_{10}(SO(10) \rightarrow SU(5))$, $V_5(SU(5) \rightarrow SU(3) \times SU(2) \times U(1))$ 和 $V = \sqrt{V_1^2 + V_2^2}(SU(3) \times SU(2) \times U(1) \rightarrow SU(3) \times U(1))$ 来描述. 结果发现, 标准模型中的所有夸克和带电轻子以及新加的中微子的质量和混合角, 可以通过四个必要的参数来确定. 夸克和轻子之间的质量差和混合主要由对称群的 Clebsch 因子引起的. 这些 Clebsch 因子依赖于对称破缺的方向. 利用较为精确测定的三个带电轻子的质量和底夸克的质量来确定模型中的四个参数, 得到二十多个预言量, 见表 1:

表1 超对称 $SO(10) \times \Delta(48) \times U(1)$ 大统一模型中的预言量及已有的实验数据

参 量	预 言 值	数 据	参 量	预 言 值
M_t / GeV	179	175 ± 6	$J_{\text{CP}} = A^2 \lambda^6 \eta$	2.62×10^{-5}
$m_c(m_c) / \text{GeV}$	1.21	1.27 ± 0.05	α	86.28°
$m_u(1\text{GeV}) / \text{MeV}$	4.11	4.75 ± 1.65	β	22.11°
$m_s(1\text{GeV}) / \text{MeV}$	156.5	165 ± 65	γ	71.61°
$m_d(1\text{GeV}) / \text{MeV}$	6.26	8.5 ± 3.0	m_{ν_e} / eV	2.4515
$ V_{\text{us}} = \lambda$	0.22	0.221 ± 0.003	m_{ν_μ} / eV	2.4485
$\frac{ V_{\text{ub}} }{ V_{\text{cb}} }$	0.083	0.08 ± 0.03	m_{ν_τ} / eV	1.27×10^{-3}
$\frac{ V_{\text{td}} }{ V_{\text{ts}} }$	0.209	0.24 ± 0.11	m_{ν_s} / eV	2.8×10^{-3}
$ V_{\text{cb}} = A\lambda^2$	0.0389	0.039 ± 0.005	$ V_{\nu_e e} $	-0.049
λ_1^G	1.20	—	$ V_{\nu_\mu e} $	0.000
$\tan\beta = V_2 / V_1$	2.12	—	$ V_{\nu_\tau e} $	-0.049
ϵ_G	0.2987	—	$ V_{\nu_e \tau} $	-0.707
ϵ_p	0.0101	—	$ V_{\nu_\mu \tau} $	0.038
B_K	0.96	0.82 ± 0.10	M_{N_1} / GeV	~ 361
$f_B \sqrt{B} / \text{MeV}$	212	200 ± 70	M_{N_2} / GeV	1.77×10^6
$\text{Re}(\epsilon' / \epsilon) / 10^{-3}$	1.4 ± 1.0	1.5 ± 0.8	M_{N_3} / GeV	361

由上面的预言结果, 注意到, 其预言结果与实验较符合, 特别对中微子的预言, 可以较好地解释一些实验之谜, 如:

- (1) μ 中微子和 τ 中微子之间的长波振荡可以用来解释大气中微子的亏损之谜.
- (2) μ 中微子和 τ 中微子的质量有可能作为宇宙中热暗物质.
- (3) 电子中微子和 μ 中微子的短波振荡用来解释 LSND 实验组最近观察到一些结果.
- (4) 模型中允许无中微子的双电子衰变.
- (5) 太阳中微子失踪之谜可由电子中微子与无弱相互作用中微子间的振荡来解释.

这些现象可由不久将来更精确的实验来检验,并启发我们建立更基本的理论.最后,值得指出的是:一方面由于标准模型得到了越来越精确的实验的验证,尤其最近又找到了顶夸克,使得粒子物理学这门学科越来越成熟,而另一方面,粒子物理学又面临着新的挑战.关于这方面的探讨,我国理论物理学家朱洪元先生曾撰写了一篇非常精彩的评述文章^[8]刊登在《现代物理知识》上.这里我想简洁地把它归结为两个基本问题:

- (1) 自然界的基本对称性以及对称破缺机制是什么?

如 CP 破坏的起源,粒子质量的起源,物质-反物质不对称的起源.

- (2) 物质和真空的基本结构是什么?

如夸克为什么是禁闭的?物质的基本组元是量子场还是弦或其它.

事实上,这些基本问题一直贯穿于人类文明的发展,并成为推动人类文明的主要动力之一.相信这也将成为下一个世纪粒子物理学家继续探讨的基本问题.

参 考 文 献

- 1 Bagger J, Wess J. *Supersymmetry and Supergravity*, Princeton University Press. 1993
- 2 Mohapatra R N. *Unification and Supersymmetry*. Springer-Verlag, 2nd edition. 1991
- 3 Haber H, Kane G. *Phys. Rept.*, 1984, **76**:117
- 4 Mohapatra R N, Rasin A. *Supersymmetry-96: Theoretical Perspectives and Experimental Outlook*, North Holland, 1997
- 5 Chou K C, Wu Y L. *Phys. Rev.*, 1996, **D53**:R3492
- 6 Chou K C, Wu Y L. *Nucl. Phys. Proc. Suppl.*, 1997, **52A**:159;AS-ITP-97-21, hep-ph/9708201
- 7 Chou K C, Wu Y L. *Science in China*, 1996, Series **A39**:65; *Science in China (in Chinese)*, 1996, **26**:44 (周光召, 吴岳良. 中国科学, 1996, **26**:44)
- 8 Zhu H Y. *Knowledge of Modern Physics (in Chinese)*, 1991, **3**(4):3 (朱洪元. 高能物理学发展的回顾和展望, 现代物理知识, 1991, **3**(4):3)

Supersymmetric Grand Unification Theories and Low Energy Physics Phenomena*

Wu Yueliang

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

Abstract In this talk, I briefly show why it is necessary to go beyond the standard model (SM). As one of the most interesting extensions of the SM, I mainly discuss supersymmetric grand unification theories and their low energy physics phenomena.

Key words supersymmetry, grand unification, CP violation, neutrino oscillations

Received 8 June 1998

* Supported by Outstanding Young Scientist Research Found of China (19625514)