

TeV 能区物理*

邝宇平 何红建

(清华大学高能物理研究中心 北京 100084)

摘要 文章简要介绍研究 TeV 能区物理的意义、重要性和当前国际上的发展形势,以及清华大学粒子物理理论组为发展 TeV 能区物理研究所做的工作和取得的成果.

关键词 电弱对称破缺机制,超出标准模型的新物,TeV 能量对撞机

Physics at TeV energy scale

KUANG Yu-Ping HE Hong-Jian

(Center for High Energy Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract We explain the role and importance of studying the Physics at TeV Energy Scale in particle physics, and concisely review the recent development in this field. We also briefly summarize the efforts made by the members of Tsinghua Particle Theory Group for developing the study in this field, and their related scientific works.

Keywords electroweak symmetry breaking mechanism, new physics beyond the standard model, TeV energy colliders

探索自然界最深层物质结构的粒子物理学正处在一个面临革命性突破的关键时期.描述粒子基本相互作用的标准模型已经受到大量精确实验的支持,但其关键部分——电弱对称破缺机制还是未解之谜.在电弱理论中,电弱对称性的破缺要由一个非 0 的真空期望值 v 来实现,而且一切粒子的质量也都由此真空期望值 v 引起.现在 v 的物理内容和形成的动力学机制仍是未知数.对 v 的探索涉及对一切粒子质量起源的了解,这是物理学中一个最为基本和深刻的问题.揭示质量的起源和物理真空的本质将对整个物理学的发展产生意义深远的影响.

在标准模型中,引入一个基本标量场 ϕ (称为 Higgs 场)并假设它一定的自作用来造成 $v \neq 0$ ^[1]. 这样的理论不能预言 Higgs 玻色子的质量.多年来人们一直在实验所能达到的能量寻找 Higgs 玻色子,至今尚未找到.不仅如此,理论研究表明这个理论的 ϕ 场的相互作用是不自洽的.当用于高能区时出现平庸性^[2]和不自然性^[3]的矛盾.因此它高能区必须被一个更深刻、自恰的新理论所取代.现有标准模型只是这个新物理理论出现的能标 Λ 以下的低能有效理论.所以探索电弱破缺机制将导致发现新物理规律而突破现有标准模型.这种探索是当代国际粒子物理学界最关注的前沿课题.从自然性考虑,新物理能标 Λ 应为 TeV 量级.不仅如此,任何自恰量子场论中几率守恒要求 S 矩阵元必须满足么正性,

从 W 弱规范玻色子散射的么正条件能够推断在 1.2 TeV 以下必须存在已发现的粒子之外的新粒子^[4],所以研究 TeV 能标的物理必将有新发现.

目前国际粒子物理界正在积极设计、建造 TeV 能量对撞机,从实验上直接研究探索 TeV 能区物理.正在 CERN 建造的大型强子对撞机(LHC)是质心能量为 14 TeV 的质子-质子对撞机,官方公布的总造价为 77 亿美元,中国已正式加入 LHC 国际合作. LHC 即将在明年(2007 年)投入运行,获取数据,它是当今世界上最强大的发现最深物质层次新物理的实验装置.为了能对发现的新物理进行精确测量并系统确定其背后的崭新物理定律,粒子物理学家正在研制 TeV 能量正负电子直线对撞机——国际直线对撞机(ILC).这些对撞机预期将首次揭示电弱破缺机制并定量确定突破标准模型的新物理.为了使我国在探索最深层物质结构这一重大基础研究领域处在国际前列,在我国大力开展这方面的理论研究和数据分析研究是非常必要的.进行这种微观深层次的探索研究要靠理论与实验的紧密配合,这已成为当代粒子物理前沿研究的一个本质特征.目前清华大学正在为促进我国在 LHC 国际合作中的自主研究而努力工作,并积极促进中国加入 ILC 国际合作.

* 国家自然科学基金(批准号:90403017)资助项目

2006-04-11 收到

近年来国际粒子物理界已经提出一些没有平庸性和不自然性困难且能与现有实验一致的可能的新物理模型. 例如, 最小超对称模型(含一个质量小于 135 GeV 的基本 Higgs 玻色子)^[5]、technicolor 类型的模型(没有轻 Higgs 玻色子)^[6]、topcolor/topseesaw 模型(有重的复合 Higgs 玻色子)^[7]、基于额外维数的 Higgsless 电弱模型(含自旋为 1 的新规范场的电弱模型)^[8-10]、little Higgs 模型(含有一个轻的复合 Higgs 玻色子, 质量为 100—200 GeV 左右)^[11]. 这些模型的 Λ 都在 TeV 量级.

目前国内外作得最多的研究是从上述的各具体模型出发来研究这些模型在 TeV 对撞机上的可观测信号, 以便从实验上检验这些模型. 这方面的研究仍有大量的工作需要进行.

但若只是在 LHC 和 ILC 上研究上述具体模型的信号会受各具体模型参数的局限, 而目前并不知道描述自然界的真实理论是什么. 为了确保探测到自然界的新物理规律, 发展一种不依赖于具体模型描述新物理效应的普遍办法是非常行之有效的. 我们知道, 质量在 Λ 以上的任何新物理中的重粒子可以通过中间虚过程影响现有粒子的相互作用形式和强度, 所以可以首先研究对现有粒子的有效相互作用的普遍描述, 并分析如何通过 TeV 对撞机上的实验来测量这些有效相互作用的强度, 从而探测到新物理的效应. 这是一种相对普适的分析和探测手段.

由于自然界可能存在轻 Higgs 玻色子, 也可能不存在轻 Higgs 玻色子. 所以这样的研究需要分别考虑有轻 Higgs 和无轻 Higgs 的两种情况.

(1) 有轻 Higgs 的情况

倘若自然界存在轻的 Higgs 玻色子, LHC 一定能发现它. 一旦发现一个它的候选者, 最重要的任务就是判断它是标准模型的 Higgs 还是新物理的 Higgs. 这可以从测量 Higgs 的有效相互作用强度来判断. 考虑 Higgs 与电弱规范场的系统, 若有新物理贡献, 则可产生如下偏离标准模型的有效相互作用^[12]

$$L_{\text{eff}}^{\text{H}} = \sum_{V=W, Z, \gamma} \sum_{i=1}^2 g_{WV}^{(i)} O_{HV}^{(i)}(H, V),$$

其中 $g_{WV}^{(i)}$ 是反常耦合常数, $O_{HV}^{(i)}$ 是量纲为 6 的算符. 标准模型 $g_{WV}^{(i)} = 0$.

最小超对称模型(MSSM)^[5]也是一个有效理论, 它的电弱破缺部分含有一个轻 Higgs (h^0) 和另

外 4 个非标准 Higgs 粒子 (A^0, H^0, H^\pm). 这样上述有效拉氏量可扩展为

$$L_{\text{eff}}^{\text{H}} = \sum_{V=W, Z, \gamma} \sum_i g_{WV}^{(i)} O_{HV}^{(i)}(h^0, A^0, H^0, H^\pm, V).$$

(2) 无轻 Higgs 的情况

若自然界不存在轻 Higgs 玻色子, 则 S 矩阵元么正性要求在 1.2 TeV 以下必存在其他新粒子^[4]. 如果新粒子的衰变宽度很宽以至于实验很难观察到其共振峰, 则实验只能测量现有粒子的相互作用性质. 此时可通过测量电弱规范场 W, Z 的反常耦合来探测新物理效应. 此时反常有效相互作用可表为^[13]

$$L_{\text{eff}} = \sum_{i=1}^{15} l_i O_i(W, Z, \pi),$$

其中系数 l_i 是反常耦合强度. 标准模型 $l_i = 0$. 近年来发现了一大类新的普遍 Higgsless (HL) 模型, 它们都含有自旋为 1 的新规范粒子家族 (W', Z', \dots)^[8-10], 其衰变宽度较窄, 因而实验可以通过其共振峰直接发现和测量它们. 在这种情况下, 上述有效拉氏量可扩展为

$$L_{\text{eff}}^{\text{HL}} = \sum_i l_i O_i(W, Z, \pi, W', Z', \dots).$$

若在 TeV 对撞机上相关实验过程中测量出各 $g_{WV}^{(i)}$ 或 l_i 的反常值, 则表明已经从实验上发现了新物理效应. 下一步的任务是甄别这些新效应背后起支配作用的新物理模型, 其理论预言必须与 $g_{WV}^{(i)}$ 或 l_i 的测量值一致, 进而确认正确的新物理理论.

清华大学高能物理研究中心的粒子理论组十多年来一直在此领域最前沿展开研究. 除了研究标准模型^[14]和已提出的各种新物理模型^[15]在 TeV 能量对撞机上的检验外, 20 世纪 90 年代对无轻 Higgs 情况如何探测电弱规范场的反常耦合常数 l_i 的问题进行了系统研究. 首先给出了作为这种探测的理论基础的等价定理的严格证明和正确表述^[16]. 继而又根据所得结果, 进一步对在 LHC 和 ILC 上探测 l_i 的各种可能反应过程的灵敏度作了全面的分析, 指出了实验应采用的灵敏过程^[17]. 近年来又致力于研究有轻 Higgs 情况的反常耦合 $g_{WV}^{(i)}$ 的探测问题, 提出在 LHC 上通过 WW 散射和在高能光子对撞机上通过 $\gamma\gamma \rightarrow ZZ$ 和 $\gamma\gamma \rightarrow WWWW$ 来测量 $g_{WV}^{(i)}$ 的新办法, 是目前探测灵敏度最高的办法^[18]. 此外还发展了新的非微扰方法准备在实验测得 $g_{WV}^{(i)}$ 或 l_i 后由可能的含强作用的相关动力学新物理模型来计算 $g_{WV}^{(i)}$ 或 l_i 以判断哪类模型是真正反映自然界的^[19]. 最近又根据高能散射 S 矩阵么正性(几率守恒)的普遍判据, 对所

有夸克、轻子和中微子的质量产生标度上限首次进行定量分析、研究,由此发现所有质量产生的标度和伴随新粒子的质量都不超过 170 TeV 能量标度,这为计划将来新对撞机的能量和探索所有费米子质量产生机制提供了普适的定量依据和指导^[20]。最近还对基于额外维数的 Higgsless 电弱模型做了实质性的发展,揭示和表述了更为普遍的 Higgsless 电弱破缺机制和模型,并研究其在 TeV 对撞机上的唯象预言^[10]。这些工作受到了国际同行的公认和重视,论文被大量引用。我们的研究成果中有的已被国际上有关实验室采纳作为设计新实验的依据,有的已成为我国参加 LHC 合作的实验研究课题。

在 LHC 即将开始获取数据的前夕,为了进一步推动我国在这个重要领域中的研究以使我们在此领域中处在国际前列,2005 年 8 月我们发起并组织了全国的 TeV 物理工作组,目前已有来自国内 12 个单位的四十多位粒子物理学家参加了这个工作组。2005 年 12 月召开了工作组全体会议,各单位交流了各自的研究计划,讨论了今后工作组如何开展工作和加强合作等问题。会议选出 6 位年轻教授作为召集人,组织工作组的学术活动。工作组成员正在积极大力推动我国 TeV 能区物理的研究。

总之,粒子物理正面临新的重大突破。TeV 能标对撞机 LHC 和 ILC 上的实验必将发现自然界的电弱破缺机制和超标准模型新物理,从而揭示一切粒子质量的起源和物理真空的本质,实现整个物理学发展史上一场意义深远的划时代革命。世界各国已经充分认识到,今后 20 年内粒子物理将进入一个举世瞩目的黄金时代和新纪元。LHC 和 ILC 的建造也将引发加速器、计算机和信息技术及其产业化的伟大革命。我国参加这样的国际重大合作是千载难逢的机会。应积极组织力量加强有关的理论和实验研究,力争作出重要贡献。

参 考 文 献

- [1] Weinberg S. *Phys. Rev. Lett.*, 1967, 19 :1264
- [2] Dashen R, Neuberger H. *Phys. Rev. Lett.*, 1983, 50 :897 ; Kuti J, Lin L, Shen Y. *Phys. Rev. Lett.*, 1988, 61 :678 ; Luscher M, Weisz P. *Nucl. Phys.*, 1989, B 318 :705
- [3] Susskind L. *Phys. Rev. D*, 1979, 20 :2619 ; tHooft G. In : *Recent Development in Gauge Theories*. Ed. tHooft G *et al.* New York : Plenum, 1979
- [4] Dicus D A, Mathur V S. *Phys. Rev. D*, 1973, 7 :3111 ; Lee B W, Quigg C, Thacker H B. *Phys. Rev. D*, 1977, 16 :1519
- [5] Haber H E. *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)*, 2001, 101 :217
- [6] Hill C T. *Phys. Lett. B*, 1995, 345 :483 ; Lane K, Eichten E. *Phys. Lett. B*, 1995, 352 :382
- [7] Dobrescu B A, Hill C T. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, 81 :2634 ; Chivukula R S, Dobrescu B A, Georgi H *et al.* *Phys. Rev. D*, 1999, 59 :075003 ; He H J, Hill C T, Tait T. *Phys. Rev. D*, 2002, 65 :055006
- [8] Chivukula R S, Dicus D A, He H J. *Phys. Lett. B*, 2002, 525 :175 ; Chivukula R S, He H J. *Phys. Lett. B*, 2002, 532 :121 ; Chivukula R S, Dicus D A, He H - J *et al.* *Phys. Lett. B*, 2003, 562 :109
- [9] Csaki C, Grojean C, Pilo L *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2004, 92 :101802 ; Csaki C, Grojean C, Hubisz J *et al.* *Phys. Rev. D*, 2004, 70 :151012 ; Csaki C, Grojean C, Murayama H *et al.* *Phys. Rev. D*, 2004, 69 :055006
- [10] He H J. *Int. J. Mod. Phys. A*, 2005, 20 :3362 ; Chivukula R S, Simmons E H, He H - J *et al.* *Phys. Rev. D*, 2005, 71 :035007 ; *Phys. Rev. D*, 2005, 71 :115001 ; *Phys. Rev. D*, 2005, 71 :115001 ; *Phys. Rev. D*, 2005, 72 :095013 ; *Phys. Rev. D*, 2005, 72 :075012 ; *Phys. Rev. D*, 2005, 72 :015008 ; *Phys. Lett. B*, 2004, 603 :210 ; *Phys. Rev. D*, 2004, 70 :075008
- [11] Arkani - Hamed N, Cohen A G, Georgi H. *Phys. Lett. B*, 2001, 513 :232 ; Arkani - Hamed N, Cohen A G, Katz E *et al.* *JHEP*, 2002, 0207 :034 ; Arkani - Hamed N, Cohen A G, Katz E *et al.* *JHEP*, 2002, 0208 :021 ; Chang S, He H - J. *Phys. Lett. B*, 2004, 586 :95 ; Katz E, Lee J, Nelson A E *et al.* *JHEP*, 2005, 10 :088
- [12] Gonzalez - Garcia M C. *Int. J. Mod. Phys. A*, 1999, 14 :3121
- [13] Appelquist T, Bernard C. *Phys. Rev. D*, 1980, 22 :200 ; Longhitano A C. *Nucl. Phys. B*, 1981, 188 :118 ; Appelquist T, Wu G H. *Phys. Rev. D*, 1993, 48 :3235 ; *Phys. Rev. D*, 1995, 51 :240
- [14] Zhou H Y, Kuang Y P. *Phys. Rev. D*, 1993, 47 :R3680
- [15] Accomando E *et al.* *Phys. Rept.*, 1998, 299 :1 ; Balazs C, Diaz - Criz L L, He H J *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1998, 80 :4641 ; *Phys. Rev. D*, 1999, 59 :055016 ; He H J, Yuan C P. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, 83 :28 ; Balazs C, He H J, Yuan C P. *Phys. Rev. D*, 1999, 60 :114001 ; He H J, Tait T, Yuan C P. *Phys. Rev. D*, 2000, 62 :R011702 ; Yue C X, Kuang Y P, Wang X L *et al.* *Phys. Rev. D*, 2000, 62 :055005 ; Diaz - Cruz J L, He H J, Yuan C P. *Phys. Lett. B*, 2002, 530 :179 ; He H J, Hill C T, Tait T. *Phys. Rev. D*, 2002, 65 :055006 ; He H J, Kanenura S, Yuan C - P. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, 89 :101803 ; *Phys. Rev. D*, 2003, 68 :075010 ; Bisset M, Moortgat F, Moretti S. *Eur. Phys. J. C*, 2003, 30 :419 ; Zhang B, Gao Y, Kuang Y P. *Phys. Rev. D*, 2004, 70 :115012 ; Bisset M *et al.* *Eur. Phys. J. C*, 2006, 45 :477
- [16] He H J, Kuang Y P, Li X. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, 69 :2619 ; *Phys. Rev. D*, 1994, 49 :4842 ; *Phys. Lett. B*, 1994, 329 :278 ; He H J, Kuang Y P, Yuan C P. *Phys. Rev. D*, 1995, 51 :6463 ; He H J, Kilgore W B. *Phys. Rev. D*, 1997, 55 :1515
- [17] He H J, Kuang Y P, Yuan C P. *Phys. Lett. B*, 1996, 382 :149 ; *Phys. Rev. D*, 1997, 55 :3038 ; Han T, He H J, Yuan C P. *Phys. Lett. B*, 1998, 422 :294 ; Boos E, He H - J, Kilian W *et al.* *Phys. Rev. D*, 1998, 57 :1553 ; *Phys. Rev. D*, 2000, 61 :077901
- [18] He H J, Kuang Y P, Yuan C P *et al.* *Phys. Lett. B*, 2003, 554 :64 ; Zhang B, Kuang Y P, He H J *et al.* *Phys. Rev. D*, 2003, 67 :114024 ; Han T, Kuang Y P, Zhang B. *Phys. Rev. D*, 2006, 73 :055010
- [19] Wang Q, Kuang Y P, Wang X L *et al.* *Phys. Rev. D*, 2000, 61 :054001 ; Yang H, Wang Q, Kuang Y P *et al.* *Phys. Rev. D*, 2002, 66 :014019
- [20] He H J, Dicus D A. *Int. J. Mod. Phys. A*, 2005, 20 :3082 ; Dicus D A, He H J. *Phys. Rev. D*, 2005, 71 :093009 ; *Phys. Rev. Lett.*, 2005, 94 :221802