

TeV 能区物理的进展

邝宇平

(清华大学物理系 北京 100084)

摘要 综述近年各种 TeV 能量对撞机的计划和建造情况, TeV 能区物理的理论研究进展和 TeV 能区物理的发展前景.

关键词 TeV 能区物理 高能对撞机 电弱对称破缺机制 顶夸克 超对称

1 引言

近年 LEP 和 SLC 上的精确电弱测量实验已可检验标准模型 (SM) 到一圈图修正的水平. 实验支持可重整的 $SU(2) \times U(1)$ 规范理论作为描述电弱相互作用的正确理论, 或者说支持电弱对称性自发地破缺. 但现有的实验对探测电弱破缺机制还不够灵敏, 有待在将来的 TeV 能量对撞机上进行的实验来进一步探清¹⁾. 研究电弱对称破缺机制涉及对一切物质质量起源的了解, 因而是物理学的一个很根本且影响深远的课题. 由于标准模型的简单 Higgs 理论存在平庸性、不自然性等理论问题, 人们相信这研究很可能导致新物理的发现. 这正是人们有兴趣投资建造 TeV 能量对撞机的原因. 最近 TeV 能区的对撞机及有关物理问题的研究都在很快进行. 下面简要总结一下这方面的进展情况.

2 TeV 能量对撞机的进展

目前已有的和正在计划建造的 TeV 能量对撞机及其进展情况如下:

2.1 Tevatron RunII 和 RunIII ($\bar{p}p$ 对撞机)

为了更有效地研究顶夸克物理和寻找轻 Higgs 玻色子, 美国的 Fermilab 的 Tevatron 正在升级. 在 2000 年以前将完成 RunII 其性能提高到

能量: 2TeV, 年积分亮度: 2fb^{-1} .

同时 CDF 和 D0 组的探测器性能也都将提高. 此后还计划 (尚未批准) 在 2006 年以前进入

1998-05-04收稿

1) 虽然有的对 LEP 及 SLC 实验的分析认为现有实验倾向于支持较轻的 Higgs, 但慎重的分析指出确定 Higgs 质量的误差实际很大, 结论尚不明确^[1].

RunIII(TeV33)将年积分亮度再提高到 30fb^{-1} .

2.2 LHC(pp 对撞机)

CERN 的 LHC 将在 2005 年完成, 并会很快达到预期指标

能量: 14TeV , 年积分亮度: 100fb^{-1} .

这将是下世纪初探测电弱对称破缺机制和寻找新物理的主要对撞机之一. LHC 同时也是个顶夸克工厂, 它每年可产生 8×10^6 个顶夸克事例.

2.3 e^+e^- 直线对撞机 LC

现在美国、德国、日本都在加紧研究 TeV 能量的 e^+e^- 直线对撞机以与 LHC 互相补充来探测电弱对称破缺机制和新物理. 在此对撞机上加激光背散射装置还可做成 $\gamma\text{-}\gamma$ 对撞机和 $e\text{-}\gamma$ 对撞机.

美国在研究使用常规腔的 e^+e^- 直线对撞机 NLC, 设计指标为^[2]

能量: 0.5TeV , 年积分亮度: 50fb^{-1} ;

能量: 1.0TeV , 年积分亮度: 100fb^{-1} ;

能量: 1.5TeV , 年积分亮度: 100fb^{-1} .

德国的 DESY 正在研究设计使用超导腔的 e^+e^- 直线对撞机 TESLA, 指标为^[3]

能量: 0.5TeV , 年积分亮度: $\approx 500\text{fb}^{-1}$;

能量: 0.8TeV , 年积分亮度: 500fb^{-1} ;

能量: 1.6TeV , 年积分亮度: $\geq 500\text{fb}^{-1}$.

1997 年单腔加速能力已达 25MeV/m , 9 个腔联用的加速腔组的加速能力也已达 24MeV/m (制造能量为 0.5TeV 的对撞机要求的指标是 21MeV/m). DESY 已与临近地方政府签了坑道用地合约, 并计划于 2000 年完成总预算方案, 交德国政府批准^[3].

最近日本计划在亚太地区建造一个使用常规腔的 e^+e^- 直线对撞机 JLC(ACFA Joint Linear Collider). 指标与上述能量为 0.5TeV 的对撞机相近, 准备将能量从 0.16TeV 连续调到 0.5TeV 作实验(以后还可能逐步加到 1.5TeV). 亚洲未来加速器委员会(Asian Committee for Future Accelerators (ACFA))最近成立了一个包括我国代表在内的国际研究组 Study Group for Linear Collider Physics. 这个组正在积极开展活动.

与 LHC 相比, e^+e^- 直线对撞机有背景小、易作精确测量的优点. 对探索电弱对称破缺机制和新物理来说, 这两类对撞机上涉及的物理过程不同, 因而可互相补充. LHC 和 LC 将是下世纪初探索电弱对称破缺机制和新物理的主要实验装置.

2.4 $\mu^+\mu^-$ 对撞机

最近人们在积极研究 TeV 能量的 $\mu^+\mu^-$ 对撞机^[4], 它将是 Higgs 工厂. 一旦 Higgs 玻色子被发现, 它将可用来测量 Higgs 玻色子的各种衰变, 从而研究 Higgs 玻色子的相互作用性质, 判断它是否是 SM 的 Higgs 玻色子. 若没有轻的 Higgs 玻色子, 它也可用来探测其它新物理. 计划的 $\mu^+\mu^-$ 对撞机分为两步

FMC: 能量: 0.5TeV ,

年积分亮度: 20fb^{-1} ;

NMC 能量: 4TeV,

年积分亮度: 1000fb^{-1} .

2.5 e^-e^- 对撞机

最近人们建议在做 LC 的基础上建造 e^-e^- 直线对撞机. 它的好处是探测超对称粒子特别有利^[5]. 同时 e^-e^- 对撞也可在探测强耦合电弱破缺机制方面作为 LHC 和 LC 的进一步补充^[6].

3 电弱对称破缺机制的探测

3.1 Higgs 玻色子的寻找

最近 LEP2 在 189GeV 上的

$$e^+e^- \rightarrow Z^* \rightarrow ZH \quad (1)$$

实验已给出 Higgs 玻色子的质量下限为 $m_H > 94.1\text{GeV}$ ^[7]. LEP2 可继续寻找到 94.6GeV 左右的能量.

在 Tevatron 的 RunIII 可以通过

$$\bar{p}p \rightarrow HWX \rightarrow b\bar{b}l\nu X, \bar{p}p \rightarrow HZX \rightarrow b\bar{b}l^+l^-(\nu\bar{\nu})X \quad (2)$$

的联合产生过程来寻找 $m_H < 125\text{GeV}$ 范围的 Higgs 玻色子 (RunII 的寻找能量范围与 LEP2 大致相当). 若能找到 Higgs 玻色子, TeV33 可将其质量定准到 $\pm (1-3)\%$ 的水平, 并可将 g_{WWH}^2/g_{ZZH}^2 定准到 $\pm 15\%$ 的水平^[8].

在 LHC 上寻找 Higgs 玻色子分成两个范围. (i) 若 $m_H > 140\text{GeV}$, 下面反应可很清楚地探测 Higgs 玻色子的共振峰

$$pp \rightarrow HX \rightarrow ZZ(Z^*)X \rightarrow l^+l^-l^+l^-X \text{ (or } l^+l^-\nu\bar{\nu}X). \quad (3)$$

通过此道可探测 $m_H < 800\text{GeV}$ 的 Higgs 玻色子. 若 $m_H > 800\text{GeV}$, 则它的衰变宽度太宽, 无法探测到共振峰. (ii) 对中等质量的 Higgs 玻色子, $M_Z < m_H < 140\text{GeV}$, 上面的过程分支比太小, 难以探测. 此时只能通过 $H \rightarrow \gamma\gamma$ 衰变道由联合产生过程

$$pp \rightarrow WHX \rightarrow l\nu\gamma\gamma X, pp \rightarrow t\bar{t}HX \rightarrow l\nu\gamma\gamma X \quad (4)$$

来探测. 这些过程的信号和背景的详细计算见文献 [9].

在 LC 上寻找 Higgs 玻色子更有利, 除与 LEP2 上相同的过程 (1) 外, 还可有 WW 及 ZZ 合成过程

$$e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}W^+W^- \rightarrow \nu\bar{\nu}H, e^+e^- \rightarrow e^+e^-ZZ \rightarrow e^+e^-H. \quad (5)$$

由于在 LC 上强子背景较小, 可通过 $H \rightarrow b\bar{b}$ 道来测, 各种探测办法见文献 [10].

在 $\mu^+\mu^-$ 对撞机上可在 s 道直接产生 Higgs 玻色子

$$\mu^+\mu^- \rightarrow H \rightarrow b(t)\bar{b}(\bar{t}). \quad (6)$$

因而不但可寻找 Higgs 玻色子, 而且容易测量 Higgs 玻色子的衰变从而测量它的相互作用以判断它是什么样的 Higgs 玻色子 (详见文献 [11]).

3.2 强耦合电弱破缺机制的探测

若 Higgs 玻色子的质量高于 800GeV, 则它的宽度已宽到不能用上述办法来探测. 此

外,克服基本 Higgs 标量场的平庸性和不自然行的有吸引力的想法之一是设想造成电弱对称破缺的是由某种新的强相互作用形成的复合场(例如 technicolor(TC)、topcolor-assisted TC(TC2)等理论). 对上述情况,尤其是在 1TeV 以下找不到与电弱破缺机制有关的新共振的情况,则需要从 Goldstone 玻色子 ϕ^a ($a = \pm, 0$)的相互作用来探测电弱破缺机制. 根据 Higgs 机制,这非物理的 ϕ^a 自由度经规范变换转换为吃掉它的弱规范玻色子纵分量 V_L^a (W_L^\pm, Z_L^0)的自由度. 因而可通过测量 V_L^a 的反应来探测电弱破缺机制. V_L^a 反应振幅与 ϕ^a 反应振幅间的定量关系由等价定理给出^[12],等价定理还提供判断探测灵敏度的判据^[12]. 对 LHC、LC 等对撞机上各过程灵敏度的系统分析由文献 [13] 给出. 理论研究指出,在 LHC、LC 等对撞机上的各过程对探测电弱破缺机制是互相补充的. 详细情况见文献 [13].

3.3 通过顶夸克产生探测电弱破缺机制

由于顶夸克的质量 $m_t = 175\text{GeV}$ 已接近于破缺电弱对称性的真空期望值 $v = 246\text{GeV}$, 顶夸克的 Yukawa 耦合常数接近于 1. 故通过顶夸克的在各高能对撞机上的产生来探测电弱对称破缺机制是个有效的途径. 通过顶夸克与规范玻色子纵分量的耦合来探测的综述见文献 [14]. 此外在 TC 及 TC2 理论中含有几百 GeV 重的赝 Goldstone 玻色子 (PGB), 它们与顶夸克有强的耦合, 故通过顶夸克的产生容易检验这类理论. 理论研究表明测量 LHC 上 $t\bar{t}$ 的产生截面可探测 TC 及 TC2 模型; 在 LC 上测量 $\gamma\gamma \rightarrow t\bar{t}$ 的截面可区分不同的 TC、TC2 模型和小 $\tan\beta$ 的最小超对称标准模型 (MSSM)^[15].

4 顶夸克物理

除通过顶夸克的产生探测电弱破缺机制外, 利用在 Tevatron 和 LHC 上大量顶夸克的产额还可对顶夸克的性质进行较准确的测量, 这是精确检验 SM 所需要的.

首先在 Tevatron RunII 上就可将顶夸克质量确定到 $\delta m_t \approx 2-3\text{GeV}$ 的程度, 将 $t\bar{t}$ 产生截面从现在的 $\delta\sigma_{t\bar{t}} \approx \pm 30\%$ 改进到 $\pm (5-10)\%$ 的程度. 在 RunIII 和 LHC 上可进一步将 δm_t 缩小到 $1-2\text{GeV}$ ^[8].

现在 CDF 组的数据已给出 $B_b \equiv \frac{\Gamma(t \rightarrow bW)}{\Gamma(t \rightarrow qW)} = 0.99 \pm 0.29$. 假定只有三代费米子, 则可得

$|V_{tb}| > 0.76$ (95%CL). RunII 可将 δB_b 改进到 $\pm 10\%$, LHC 可到 $\pm 1\%$. 不依赖于三代假定的 $|V_{tb}|$ 直接测量可由单顶夸克产生过程 $q\bar{q} \rightarrow W^* \rightarrow t\bar{b}$ 及 $gW \rightarrow t\bar{b}$ 来进行^[8]. 在 Tevatron RunII 上可确定到 $|V_{tb}| > 0.9$, RunIII 可到 $|V_{tb}| > 0.97$ (在 LHC 上此实验较难作, 因 gg 初态变为主要)^[16]. 在 LC 上可通过测量 Γ_t 和 $B(t \rightarrow bW)$ 来得到 $\Gamma(t \rightarrow bW)$ 从而确定 $|V_{tb}|$. 用 500GeV 的 LC 可作到 $\delta\Gamma_t \approx 5\%$, $\delta B(t \rightarrow bW) \approx 2.5\%$ ^[16].

测量 $B(t \rightarrow bW)$ 还可探测新物理, 因若有与顶夸克耦合的轻子顶夸克的新粒子 (例如 MSSM 中的 H^+ , TC 和 TC2 中的 PGB 等) 则 $B(t \rightarrow bW)$ 会偏离 SM 值. 在 TeV33 和 LHC 上

可通过测量 B_b 和 $\frac{B(t \rightarrow qW)}{B(t \rightarrow (\text{non} - W + X))}$ 来得到 $B(t \rightarrow bW)$ ^[16].

在 SM 的 V - A 相互作用中顶夸克的衰变 $t \rightarrow W^+ + b$ 中 W^+ 的纵向极化成分为 $f_0 = (m_t^2/M_W^2)/(1 + m_t^2/M_W^2)$. 由于顶夸克很重, 此公式给出 $f_0 \approx 70\%$. f_0 可通过 W 的轻子角分布来测量. 若发现与 70% 有明显偏离, 则意味着存在 V - A 型以外的新相互作用(新物理). 在 Tevatron 的 RunII 上可将 f_0 测量准到 $\delta f_0 = \pm 30\%$; 在 LHC 上可准到 $\delta f_0 = \pm 1\%$.

5 超对称粒子的寻找

超对称是保留基本 Higgs 场而克服其不自然性、缓解其平庸性的最简单的新物理方案. 在大部分参量范围这理论都可用微扰论处理, 目前非常被注意. 最终判断超对称是否正确要看在实验上是否找到超对称粒子. 由于此类模型含自由参量非常多(例如最普遍的 MSSM 含 124 个参量), 实验上寻找超对称粒子的任务比较艰巨. 现在一般是考虑特殊超对称破缺机制下的最小超对称模型 MSSM.

对 R 宇称守恒的超对称模型来说, 各超对称粒子只能最后衰变为最轻的超对称粒子, 在实验上表现为探测不到的遗失横能量, 这需通过各种过程综合分析.

例如在 LHC 上可通过以下末态来寻找相应的超对称粒子:

$$\begin{aligned} l^\pm + \text{jets} + \cancel{E}: & \tilde{g}\tilde{g}, \tilde{q}\tilde{q}; \\ l^\pm l^\pm + \text{jets} + \cancel{E}: & \tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g}\tilde{q}, \tilde{q}\tilde{q}; \\ l^\pm l^\pm l^\pm + \cancel{E}: & \tilde{\chi}_1^0 \tilde{\chi}_1^\pm; \\ l^\pm l^\pm + \cancel{E}: & \tilde{\mu}. \end{aligned} \quad (7)$$

在 LC 上可通过

$$\begin{aligned} e^+ e^- \rightarrow \tilde{\chi}_i^+ \tilde{\chi}_j^-, \quad i, j = 1, 2, \\ e^+ e^- \rightarrow \tilde{\chi}_i^0 \tilde{\chi}_j^0, \quad i, j = 1, 2, 3, 4 \end{aligned} \quad (8)$$

来寻找带电微子 $\tilde{\chi}^+$ 和中性微子 $\tilde{\chi}^0$. 在一定参量范围, 最轻的中性微子 $\tilde{\chi}_1^0$ 可衰变成 $\tilde{\chi}_1^0 \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \gamma\gamma\tilde{G}\tilde{G} \rightarrow \gamma\gamma\cancel{E}$. 测量精度可达 $\delta m_{\tilde{\chi}_1^\pm} \approx 100\text{MeV}$, $\delta m_{\tilde{\chi}_1^0} \approx 600\text{MeV}$. 还可通过

$$\begin{aligned} e^+ e^- \rightarrow \tilde{l}_L^+ \tilde{l}_L^-, \tilde{l}_R^+ \tilde{l}_R^-, \text{ etc.}, \\ e^+ e^- \rightarrow \tilde{t}_1 \tilde{t}_1, \tilde{t}_2 \tilde{t}_2, \text{ etc.} \end{aligned} \quad (9)$$

来寻找轻子的超对称粒子. 对 $\tilde{\mu}$ 的质量可确定到 $\delta m_{\tilde{\mu}} \approx 1.8\text{GeV}$.

LHC 和 LC 可互相补充地有效寻找各种超对称粒子到 2TeV 的范围^[17].

最近又发现在 $e^- e^-$ 对撞机上 $e^- e^- \rightarrow \tilde{e}^- \tilde{e}^-$ 的截面比 LC 上的相应截面大一个量级^[5], 故甚有利.

R 宇称不守恒模型的探测尚待认真研究.

反过来看, 自然性要求超对称粒子的质量不高于 1TeV 的量级^[17], 故若在 LHC 和 LC 上找不到它们, 则这类模型的意义将大大降低. 此外, MSSM 中最轻的 Higgs 玻色子 h 的质量上限为 $m_h < 130\text{GeV}$ ^[17]. 在 LHC 上可通过 (3) 的联合产生过程寻找 h, 在 LC 上能更好地寻找 h^[10]. 若找不到这么轻的 h, 则现在考虑的 MSSM 将被否定^[17].

6 结论

TeV 能区物理是粒子物理向前发展的前沿, 其中包含丰富的重要物理内容. 近年人们在理论和实验方面都作了大量研究, 取得很快的进展. 现在形势非常好. 下世纪初的 TeV 能量对撞机(LHC、LC 等)建成后, 必将形成 TeV 能区物理研究的高潮. 电弱对称破缺机制的探清和新物理的发现将不是遥远的事.

参 考 文 献

- 1 Chanowitz M S. LBNL-40877, hep-ph/9710308; Eiler J, Langacker P. UPR-791-T, hep-ph/9801422
- 2 Kuhlman S et al. The NLC Accelerator Design Group and The NLC Physics Working Group, SLAC Report. 1996, **485**
- 3 Wiik B H. Summary Talk at the TESLA Workshop. 1997; Zerwas P M. Summary Talk at DESY Workshop on Linear Colliders. 1996
- 4 Gallardo J C et al. The $\mu^+\mu^-$ -Collider Collaboration. Fermilab-Conf.-96/092
- 5 Peskin M E. SLAC-PUB-7759, hep-ph/9803279; Feng J L. LBNL-41254, hep-ph/9803319
- 6 Han T He H J, Yuan C P. Phys. Lett., 1998, **B422**:294; Murayama H. LBNL-41645, hep-ph/9804216
- 7 Ruhlmann-Kleider V. LEPC 12/11/98
- 8 Quigg C. Fermilab-AB-CONF-98/059-T, hep-ph/9802320; Liss T M. Proc. Intern. Europhysics Conf. on High Energy Physics (HEP95). Brussels, Belgium, July 27-Aug. 2, 1995, 190-193
- 9 CMS Technical Proposal, CERN/LHCC/94-38 (1994); ATLAS Technical Proposal, CERN/LHCC/94-43 (1994); Zhou H Y, Kuang Y P. Phys. Rev., 1993, **D47**: R3680; 1996, **D53**:4095
- 10 Sachwitz M, Schreiber H J, Sichanin S. DESY 97-123E, hep-ph / 9706338; Liao Y, Repko W W. TUIMP-TH-97/89 MSUHEP-70912, hep-ph/9711202; Zhu S H, Li C S, Gao C S. hep-ph/9710424; Li C S, Zhu S H. PKU-TH-98-02, hep-ph/9801390
- 11 Gunion J F. UCD-97-4, In: Proc. Workshop on The Higgs Puzzle-What Can We Learn From LEP2, LHC, NLC and FMC, Dec. 8-13, Ringberg Castle, Germany (World Scientific), 142-151
- 12 He H J, Kuang Y P, Li X. Phys. Rev. Lett., 1992, **69**:2619; Phys. Rev., 1994, **D49**:4842; Phys. Lett., 1994, **B329**:278; He H J, Kuang Y P, Yuan C P. Phys. Rev., 1995, **D51**:6463
- 13 He H J, Kuang Y P, Yuan C P. Phys. Lett., 1996, **B382**:149; Phys. Rev., 1997, **D55**:3038; In: Physics at TeV Energy Scale, CCAST-WL Workshop Series: 1996, **72**:119-234
- 14 Larios F, Malkawi E, Yuan C P. In: Physics at TeV Energy Scale, CCAST-WL Workshop Series: 1996, **72**:49-118
- 15 Eichten E, Lane K. Phys. Lett., 1994, **B327**:129; Yue C X, Zhou H Y, Kuang Y P et al. Phys. Rev., 1997, **D55**:5541; Zhou H Y, Kuang Y P, Yue C X et al. Phys. Rev., 1998, **D57**:4205
- 16 Frey R et al. hep-ph/9704243
- 17 Kunszt Z. ETH-TH/97-27, hep-ph/9710210; Accomando E et al. DESY-97-100, hep-ph/0705442; Haber H E. SCIPP 97-27, hep-ph/9709450; Roy D P. TIFR/TH/98-08, hep-ph/9803421; Heinemeyer S, Hollik W, Weglein G. KA-TP-2-1998, hep-ph/9803277

Recent Developments of Physics at TeV Energy Scale

Kuang Yuping

(Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract The situation of future TeV energy colliders and recent developments of theoretical studies of physics at TeV energy scale are briefly reviewed.

Key words physics at TeV energy scale, high energy colliders, electroweak symmetry breaking mechanism, top quark, supersymmetry