

Scrutinizing Electro-weak Physics for New Physics

Dissertation for Ph.D

by

Junjie Cao

Directed by

Prof. Jinmin Yang

Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of
Science, P.O.Box 2735, Beijing 100080, P.R. China

January , 2005

摘 要¹

在过去的几十年里，实验和理论的惊人吻合表明标准模型在描述电弱物理方面是成功的，但是标准模型自身的缺陷揭示着新物理的存在。通常来讲，新物理会以各种方式影响电弱物理量，讨论新物理在电弱物理量中的效应来寻找新物理存在的可能迹象是本文的主要目的。

我们首先讨论超对称模型在电弱物理中的残留效应。这类效应的特征是在一定的条件下，即使当超粒子很重时，超对称对电弱物理可观测量的影响仍旧能够很大；并且随着超粒子的变重，这种影响要么相应地变大，要么趋于不为零的常数。在这个方面，我们做了如下工作：

- 在最小超对称模型轻 sbottom 轻 gluino 方案下研究超对称模型对 Z 共振峰处物理可观测量的影响。这个方案曾被认为能够成功地解决 Tevatron 上 Bottom 夸克对过量产生问题，并且不会对其他电弱物理量产生较大影响。我们在该方案下研究超对称对 Z 共振峰处物理量的影响，发现其将随其他超粒子的变重而变大。欲使 R_b 实验和理论的偏离小于 $2.6\sigma(3\sigma)$ ，该方案中另一个 Sbottom 质量必须轻于 $150\text{GeV}(180\text{GeV})$ 。考虑到当前 LEP II 的实验结果不倾向存在这么一个 sbottom，我们的工作可以基本排除最小超对称模型中轻 sbottom 轻 gluino 方案。
- 研究强子对撞机上 Higgs-Bottom 夸克联合产生过程 $pp(\bar{p}) \rightarrow bh(h$ 为最轻 CP 偶的 Higgs 粒子)。这个过程对测量 $hb\bar{b}$ 耦合强度以及寻找 Higgs 粒子都有重要意义。我们的研究表明在最小超对称模型中，该过程的树图截面可以是对应标准模型过程截面的几十倍；我们的研究还表明即使当所有超粒子都很重的情况下，超对称 QCD 对该过程的修正仍旧能够很大，并且修正的幅度可以与超粒子的质量无关。举例来说，当 $\tan\beta = 50$ ， $M_A = 200\text{GeV}$ (A 为 CP-odd 的 Higgs 粒子) 时，不依赖超粒子的质量，上述修正可达 70%。
- 在具有 See-saw 机制的 Split SUSY 中研究中微子和标中微子部分对最轻 Higgs 粒子质量的修正。我们发现当提高重的标中微子和重的中微子质量标度时，该修正会相应地变大，并且修正的幅度对两者的质量劈裂非常敏感。数值上讲，如果固定上述标度为 10^{14}GeV (通常 See-saw 模型采用的标度)，当两粒子质量兼并时，该修正为 0；而当劈裂等于 20% 时，在一些参数空间该修正可降低 Higgs 粒子质量达 40GeV 。如果进一步提高重中微子质量标度，这个修正幅度将更大。这个发现对在 Split SUSY 中研究 Higgs 粒子的性质具有重要意义。

¹关于本论文更详细的综合论述可见第二、三章的结论。

由于超对称理论的这种残留效应，对它的研究要么能够提供丰富的超对称信息，要么能够对超对称理论加以限制。特别的，当超粒子很重而不能在对撞机上直接产生的情况下，研究超对称残留效应是探索超对称的唯一途径。在本论文中，我们对上述三个电弱过程中大的量子修正予以本质上的解释。

其次我们讨论不同新物理模型对 Top 夸克性质，尤其是对 Top 夸克味改变中性流，的影响。在这个领域我们做了如下工作：

- 详细研究了最小超对称模型对 Top 夸克的主要衰变模式 $t \rightarrow bW_{\pm,0}$ ($\pm, 0$ 代表 W 的不同极化态) 的修正。这一过程在早期 W.Hollik(国际辐射修正领域权威人士之一) 组的研究中被认为对超对称很敏感。而我们研究结果表明无论超对称 QCD 修正，还是超对称电弱修正，对该过程宽度和各种形状因子的影响都很小 (小于 1%)，并且这两种修正倾向于相互抵消。因此，与 W. Hollik 结论截然相反，我们认为 $t \rightarrow bW$ 过程对超对称模型并不敏感。
- 在探讨探测 TC2 模型的工作中，我们指出 LHC 上 Top-Charmed 联合产生过程是探测 TC2 模型的理想过程，并且首次提出一个重要的 Top-Charmed 联合产生途径²。通过对该过程做了具体的蒙特卡罗模拟，我们比较现实地给出 LHC 对 TC2 模型参数的探测范围，即对新粒子质量的探测能力可达 1TeV，对 Top-Charmed 味改变参数的探测能达 2×10^{-2} 。
- 在多种模型中对不同的 Top 夸克味改变中性流过程予以研究，并且讨论它们的可观测性问题。这些味改变中性流过程包括 Top 夸克的稀有衰变过程以及不同对撞机上 Top 夸克的奇异产生过程。我们发现，尽管与 Top 夸克的非稀有过程相比，新物理对 Top 夸克味改变中性流过程的预言较小，但是由于其背景小，信号特别，它们能够作为新物理存在的灵敏探针，甚至在一些模型中能够提供丰富的新物理信息；LHC 是一个较为理想的探测 Top 夸克味改变中性流的场所。

考虑到实验上 Top 夸克的探测技术日臻成熟以及作为 Top 夸克工厂的 LHC 即将运行，我们的研究对通过 Top 夸克寻找新物理具有一定的理论指导作用。

关键词: 新物理, 超对称, 残留效应, Top 夸克, 味改变中性流

²我们的这项研究被国外专家称为“一个重要的新发现”

博士期间所做工作

- 1 、 Can MSSM with light sbottom and light gluino survive Z-peak constraints ?
Junjie Cao, Zhaohua Xiong, Jin Min Yang
Phys. Rev. Lett. 88 (2002) 111802
- 2 、 Lightest Higgs Boson Mass in Split Supersymmetry with the Seesaw Mechanism
Junjie Cao, Jin Min Yang
Phys. Rev. D71 (2005) 111701 (Rapid Communication)
- 3 、 Probing Topcolor-Assisted Technicolor from Top-Charm Associated Production at LHC
Junjie Cao, Zhaohua Xiong, Jin Min Yang
Phys. Rev. D67 (2003) 071701 (Rapid Communication)
- 4 、 SUSY-Induced Top Quark FCNC Processes at Linear Colliders
Junjie Cao, Zhaohua Xiong, Jin Min Yang
Nucl. Phys. B651 (2003) 87-105
- 5 、 Supersymmetric effects in top quark decay into polarized W-boson
Junjie Cao, Robert J. Oakes, Fei Wang, Jin Min Yang
Phys. Rev. D68 (2003) 054019
- 6 、 Higgs-boson production associated with a bottom quark at hadron colliders with SUSY-QCD corrections
Junjie Cao, Guangping Gao, Robert J. Oakes, Jin Min Yang
Phys. Rev. D68 (2003) 075012
- 7 、 Probing Topcolor-Assisted Technicolor from Like-sign Top Pair Production at LHC
Junjie Cao, Guoli Liu, Jin Min Yang
Phys. Rev. D70 (2004) 114035
- 8 、 Lepton flavor violating Z-decays in supersymmetric see-saw model
Junjie Cao, Zhaohua Xiong, Jin Min Yang
Eur. Phys. J. C32 (2004) 245-252
- 9 、 Probing New Physics from Top-charm Associated Productions at Linear Colliders
Junjie Cao, Guoli Liu, Jin Min Yang
Eur. Phys. J. C41 (2005) 381-391
- 10 、 圈图函数中的红外发散
Lingde Wan, Junjie Cao
高能物理核物理 27 卷第五期 (2003).

致 谢

弹指一挥间，三年博士生活行将结束。当我又一次站在人生十字路口，忆往昔峥嵘岁月，看今朝灿烂前程，真是感慨万千……。

年少时候的我也曾有自己的理想，但是现实的无奈只能让它们一个个无果而终；我也曾渴望能够卓而不凡，标新立异，但是屡次的失败使我学会逆来顺受，随波逐流。曾经以为一生就这样平平淡淡地老去，蓦然回首间，却发现人生又逢第二春。人生际遇的变迁，固然有其偶然性，但是环境的潜移默化以及智者的引导才是根本的原因。

我应该感谢理论所，因为它所倡导的“唯实，求真，协力，创新”为每一个年轻人都提供了宽广的自我发展空间。在这种氛围下，崇尚科学、开拓创新已成为一种传统。我应该感谢理论所，因为这里人才荟萃，学术气氛浓厚，是人与人之间交流探讨的平台。我应该感谢理论所，因为这里学风端正，空气清新，是潜心学习研究的理想之处。

我应该感谢我的导师杨金民研究员。他对物理敏锐的洞察力，严谨的治学态度让我折服；他谦虚谨慎，温和待人使我们成为朋友；他谆谆教导，循循善诱，将知识毫无保留的传授是育人的楷模。正是他的悉心指导使我能够逐渐熟悉自己的研究领域，正确地认识自己，重新树立自信。

我应该感谢熊兆华博士。在短暂的不到一年的合作时间里，他讨论问题时畅所欲言，做工作时争先恐后，面对困难时百折不挠的精神，都给我留下深刻的影响。

我应该感谢鲁公儒教授，张新民研究员，是他们将我带入科学的殿堂。

我应该感谢戴元本研究员，邝宇平教授，赵光达教授，张肇西研究员、李小源研究员、黄朝商研究员、李重生教授、吴岳良研究员、陈裕启研究员、高原宁教授、王青教授、邢志忠研究员、吕才典研究员、刘纯研究员等许多老师。他们精彩的授课和丰富多彩的报告使我受益匪浅。

我应该感谢赵国顺教授、纪焕亭教授、梁仁通教授、刘自信教授、鞠国兴教授、王学雷教授和郭立波教授，是他们的精心培育使我在本科期间打下较好的基础。

我应该感谢欧阳钟灿研究员、郭玲老师、潘雷老师、杨竞波老师以及理论物理所的有关工作人员对我学习和工作上的帮助与支持。

我应该感谢张现周教授、张豪峰教授以及万陵德教授。他们对我家庭的关怀为我的发展提供了强大的保障。

我应该感谢吴兴刚博士、周宇峰博士、周勇博士、吴小红博士、陈剑锋博士等（恕不能一一列举他们的名字）。与他们在学业上的讨论和愉快的相处，使生活增色不少。

最后，我更应该感谢我的妻子为我作出的牺牲。没有她的长期支持和奉献，我也不可能会有今天。

在今后的生活工作中，不管是顺境，还是逆境，希望我都能够以平常心对待，努力做到“得意时淡然，失意时坦然”。

兹附歌曲一首，用以励志人生

顺 流 逆 流

词曲：蔡国权

不知道在那天边可会有尽头
只知道逝去光阴不会再回头
每一串泪水伴每一个梦想
不知不觉全溜走
不经意地在这圈中转到这年头
只感到在这圈中经过顺逆流
每颗冷酷眼光
到每声友善笑声
默然一一尝透
几多艰苦当天我默默接受
几多辛酸也未放手
故意挑剔今天我不在乎
只跟心中意愿去走
不相信未作牺牲就实现可以拥有
只相信始靠双手找到我要求
每一串汗水
换每一个成就
从来得失我睇透
心里从不会强求