

博士学位论文

顶夸克稀有过程中的新物理效应

柳国丽

导师 杨金民研究员

中国科学院理论物理研究所

二零零六年 一月

New Physics Effects in Top Rare Processes

Dissertation for Ph.D

Guo-Li Liu

Directed by Prof. Jin-Min Yang

Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences,

P.O.Box 2735, Beijing 100080, China

Jan, 2006

摘 要

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一些不足使人们相信新物理的存在。通常来讲，新物理会以各种方式影响物理量，讨论新物理在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。

顶夸克是已知的唯一的质量处于电弱尺度上的基本费米子，因此对顶夸克的研究为探索电弱对称破缺提供了一个良好的手段。巨大的顶夸克质量为研究其他大质量粒子的存在提供了条件。精确的测量顶夸克质量可以帮助限制标准模型中 Higgs 玻色子的质量。而且，在顶夸克的产生和衰变过程中极有可能探测到新物理信号。

LHC 的能量很高，是一个很大的顶夸克工厂，可以获得大量的统计事例，因此很多与顶夸克相关的研究可以在这里展开。很多物理学家将目光转向了对 LHC 的研究。

而线性对撞机因其背景干净而备受人们青睐。除了 e^+e^- ，TESLA 线性对撞机工作组提出设计的光子对撞机以它独特的优势引起了人们的重视：它将使我们对一些新物理如 Higgs 玻色子、超对称以及额外维下的量子引力等有更深入的理解，并且它在一些特定条件下可以达到最有效地探测新物理的目的。

我们的工作主要是在 LHC 强子对撞机和未来的线性对撞机上围绕顶夸克在新物理模型中的性质展开。具体地说，

- 我们在新物理理论框架中研究了顶夸克和粲夸克在线性对撞机 e^+e^- ， $e^-\gamma$ 和 $\gamma\gamma$ 上的联合产生。由于 GIM 机制压低，这种顶夸克与粲夸克的味改变过程在标准模型 (SM) 中是非常小的。而新物理如双 Higgs 二重态模型、最小超对称模型以及 topcolor-assisted technicolor (TC2) 模型都预言了比较大的味改变耦合，从而使得通过这些新物理模型中的顶粲夸克联合产生来探测新物理。结果显示，TC2 理论预言的产生几率远远大于其他模型，并且在一种理论中 $\gamma\gamma \rightarrow t\bar{c}$ 具有最大的碰撞截面，在大多数空间中可达到 10 fb。从

我们的探测分析及几率计算可以得出结论，TC2 理论的预言在大多数参数空间能够探测到而其他理论就几乎不能达到可观测水平。

- 由于 TC2 理论预言了非常大的树图味改变耦合，这有可能产生很大的同号顶夸克对过程。基于这种想法，我们在在此理论框架下研究了 $pp \rightarrow tt + X$ 和 $pp \rightarrow tt\bar{c} + X$ 过程，发现在大多数参数空间中它们的截面可以达到几十个 fb，而它在强子对撞机的背景很低，所以应该能够被 LHC 观测到。而在标准模型及其他新物理模型中这种过程截面是非常小的，远没有达到 LHC 的探测范围。因此研究这种过程在 LHC 上的产生可以很好地探测 TC2 理论的性质。
- 在 LHC 强子对撞机上，我们在超对称理论框架下研究了单顶夸克产生过程 $pp \rightarrow t$ 、 $tV(V = g, \gamma)$ 、 th 、 tj 以及顶夸克稀有衰变过程 $t \rightarrow ch$ 、 $c\gamma$ 和 cZ 。我们详尽地讨论了这些过程的产生和背景截面以及衰变过程的分支比，结果发现，在大多数参数取值下 $pp \rightarrow th$ 和 $t \rightarrow ch$ 应该能够被未来的对撞机探测到； $c\gamma \rightarrow t$ 过程则强烈依赖于不同参数取值，有可能在一定情形可以观察到；在参数优化的情况下， $pp \rightarrow tj$ 和 $t \rightarrow c\gamma$ 过程才能达到探测器的边缘，因此很难在未来的强子对撞机上探测到；而 $c\gamma \rightarrow tV$ 和 $t \rightarrow cV$ 则几乎完全位于 LHC 的探测范围之外。

这些顶夸克稀有过程在新物理中的效应非常显著，很有可能在未来的对撞机上探测到。考虑到实验上顶夸克的探测技术日臻成熟以及作为顶夸克工厂的 LHC 即将运行，我们的研究对通过顶夸克寻找新物理具有一定的理论指导作用。

关键词：顶夸克；新物理；味改变中性流；TC2，超对称

Abstract

In the past decades, the remarkable agreement of experiment with theory testifies the correctness of the Standard Model (SM) in describing the electroweak physics. However, the theoretical defects of the SM itself suggest the existence of new physics. In general, new physics may significantly affect electroweak observables. Studying such effects to probe new physics is the main goal of this thesis.

In this thesis, we investigate new physics influence on top quark properties in the framework of different models, with special attention on top quark flavor changing neutral current (FCNC) interactions. Our work includes:

- The top-charm associated productions via e^+e^- , $e^-\gamma$ and $\gamma\gamma$ collisions at linear colliders, which are extremely suppressed in the Standard Model (SM), could be significantly enhanced in some extensions of the SM. We calculate the full contribution of the topcolor-assisted technicolor (TC2) to these productions and then compare the results with the existing predictions of the SM, the general two-Higgs-doublet model and the Minimal Supersymmetric Model. We find that the TC2 model predicts much larger production rates than other models and the largest-rate channel is $\gamma\gamma \rightarrow t\bar{c}$, which exceeds 10 fb for a large part of the parameter space. From the analysis of the observability of such productions at the future linear colliders, we find that the predictions of the TC2 model can reach the observable level for a large part of the parameter space while the predictions of other models are hardly accessible.
- TC2 theory predicts tree-level flavor-changing neutral-current (FCNC) top quark Yukawa couplings with top-pions. Such FCNC interactions will induce like-sign top quark pair productions at CERN Large Hadron Collider (LHC). While these rare productions $pp \rightarrow tt + X$ and $pp \rightarrow t\bar{t} + X$ are far below

the observable level in the Standard Model and other popular new physics models such as the Minimal Supersymmetric Model, we find that in a sound part of parameter space the TC2 model can enhance the production cross sections to several tens of fb and thus may be observable at the LHC due to rather low backgrounds. Searching for these productions at the LHC will serve as an excellent probe for the TC2 model.

- We also study the all the FCNC single top production $pp \rightarrow t, tV(V = g, \gamma), th, tj$ and the top rare decay $t \rightarrow ch, cg, c\gamma, cZ$ in the context of the supersymmetry models. With discussion of the background, our results show that in most of parameter space, $pp \rightarrow th$ and $t \rightarrow ch$ can reach the detectable level at LHC; while $cg \rightarrow t$ process depends strongly on the parameters; The processes $pp \rightarrow tj$ and $t \rightarrow cg$ just lie in the threshold of the LHC discovery potential in the optimum parameter spaces. But it is difficult to detect the $cg \rightarrow tV$ and $t \rightarrow cV$ even with favorable values of the parameters.

With the experimental advancement in top quark tagging and the upcoming of LHC which can serve as a top factory, our discussion is important in seeking for new physics via top quark.

Keywords: top quark; new physics; flavor changing neutral coupling; TC2; SUSY

致 谢

又一次站在人生的十字路口，回首望去，脑海里涌出更多的是诚挚的谢意。

感谢我的导师杨金民研究员。杨老师工作上非常认真，一点的小瑕疵都不会放过；生活上性格温和，发扬民主，对待学生和藹可亲，学生都愿意和他亲近；在培养学生方面，他放开手脚，让学生大胆去做，充分发掘他们的聪明才智与积极主动性；同时又不急功近利，耐心地希望学生在工作时要全力投入，以期能达到尽善尽美。他身上的高尚品质对我的影响将使我终身受益。

感谢曹俊杰师兄。在我三年的博士生活中，有两年多的时间和他在一起工作，他对我无私的帮助，他刻苦的学习态度，他的自信与认真负责的工作精神都给了我积极的影响。在具体工作中，几乎是他一步步指导带领我不断前进。可以说，在我博士期间所做的工作中，也有很多他的努力与辛劳。

感谢辽宁师范大学的岳崇兴教授将我领入了粒子物理的大门。感谢河南师范大学的鲁公儒、万陵德教授对我生活上的关心。感谢原子能院的张焕桥院士对我们的帮助。

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、马建平研究员、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、朱守华教授等许多老师，他们精彩的授课和丰富多彩的报告使我受益匪浅。

感谢欧阳钟灿研究员、郭玲老师、杨竞波老师、潘雷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。

感谢王飞，王雯宇和徐富强，我会永记同门的情谊，也感谢他们在我论文写作中对我的帮助；感谢郭媛媛、李丽、庄辞、程领梅、殷复荣、杨丽萍、郑丽、熊爱民、封晓勇、卢先聪、赵继泽、昌峻等研究生给我三年枯燥的求学生涯注入色彩与青春活力；感谢乒乓球小组的熊爱民、王琦，李新强、胡峰、杨丽萍、邵振等各位成员给我的生活增色；感谢杨岚斐、钟鸣、陆汉涛等同学对我学业上热情帮助；感谢英语角小组的各位成员如胡惊雷、林宏伟、赵海军以及蒋睿等各位同学使我在欢娱的过程中得到锻炼与提高。

最后，深深感谢我的父母家人，没有他们的默许与支持，我就不可能在求学的道路走得这么远，留给他们的却只是默默的思念；感谢我的爱人周平，感谢他无论在任何时候都给

我的一如既往的鼓励支持和关爱，感谢他让我在人事浮沉中感觉到的不变的温度。