

# 未来正负电子对撞机中轻子超对称伴子寻找的 预研

程华杰, 李 恺

海军工程大学基础部, 湖北 武汉

收稿日期: 2024年6月23日; 录用日期: 2024年7月23日; 发布日期: 2024年7月31日

## 摘 要

本文研究了在未来正负电子对撞机实验条件下, 寻找轻子超对称伴子的物理分析预研。利用计算机产生的基于最小超对称模型和R宇称守恒假设的信号过程样本以及标准模型物理过程样本, 并结合国际主流在研的正负电子对撞机的实验参数进行全模拟。结果表明, 在考虑5%系统不确定性的前提下, 正负电子对撞机可大幅提高现有实验对所研究超对称粒子的发现及排除限, 验证了正负电子对撞机在寻找新物理方面的探测能力与前景, 也为国际上正在筹备中的各类大型正负电子对撞机提供了重要的物理分析预研和参考。

## 关键词

轻子超对称伴子, 正负电子对撞机, 蒙特卡罗模拟

# Pre-Study on the Search for Sleptons in Future Electron-Positron Colliders

Huajie Cheng, Kai Li

Department of Fundamental Courses, Naval University of Engineering, Wuhan Hubei

Received: Jun. 23<sup>rd</sup>, 2024; accepted: Jul. 23<sup>rd</sup>, 2024; published: Jul. 31<sup>st</sup>, 2024

## Abstract

This paper presents the pre-study of the physical analysis of the search for sleptons under the experimental conditions of future electron-positron colliders. Full simulations are performed by using computer-generated signal process samples based on the minimal supersymmetric standard model and the assumption of R-parity conservation, as well as standard model physics process samples, and combining them with the experimental parameters of mainstream international proposed electron-positron colliders. The results show that considering a 5% systematic uncertainty, the elec-

tron-positron colliders can significantly improve the existing experimental limits for the discovery and exclusion of the studied supersymmetric particles. This validates the electron-positron colliders' capability and prospects in detecting new physics and provides important physical pre-study and reference for various large-scale electron-positron colliders that are being prepared internationally.

## Keywords

Slepton, Electron-Positron Collider, Monte Carlo Simulation

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

标准模型是用于描述物理学中基本粒子和基本相互作用的一门非常成功的理论, 但仍有不少如暗物质的解释等标准模型无法解释的问题, 因此寻找并验证新的超出标准模型的理论是近年来基础物理学最重要的目标之一。在众多新理论中, 能够完美兼容标准模型的超对称理论[1]-[3]被普遍认为是最热门的候选者之一。在最小超对称模型(MSSM)中, 每个标准模型的粒子都有一个与它自旋相差 1/2 的超对称伴子。在 R 宇称[4]守恒的条件下, 最轻的超对称粒子(LSP, 即  $\tilde{\chi}_1^0$  粒子)是拥有很大质量并具有极大的稳定性的中性粒子, 该属性使其成为暗物质极好的候选者[5]。遗憾的是, 过去以及现有的大型粒子对撞实验, 包括大型正负电子对撞机(LEP)、大型强子对撞机(LHC)等, 均未能发现超对称粒子的踪迹, 仅给出了 95% 置信度下的质量参数排除区间[6]-[8]。

基于 MSSM 理论和 R 宇称守恒假设, 在正负电子高速对撞时, 超对称粒子将成对产生, 并最终衰变到标准模型粒子以及一对稳定的 LSP。与强子对撞机相比, 正负电子对撞机的质心能量较低, 但其拥有极高的信噪比和精确对撞初态等优点[9]。本文利用计算机模拟的正负电子对撞机中产生的末态含轻子的事例寻找轻子超对称伴子(slepton)信号, 为国际上正在筹备中的各类大型正负电子对撞机提供此类物理分析的预研和参考。

## 2. 信号与本底相空间分析

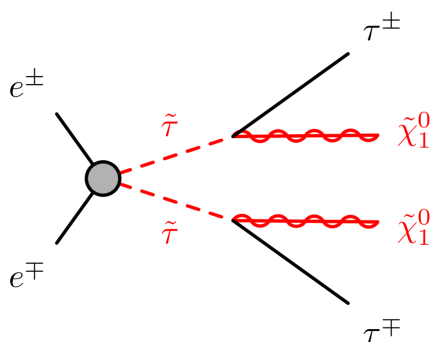
### 2.1. 对撞机物理环境分析与软件框架

在 2012 年希格斯粒子被发现后, 世界上多个国家先后提出了建设新的正负电子对撞机的设想, 包括日本国际直接对撞机(ILC) [10]、欧洲的未来正负电子对撞机 ee (FCC-ee) [11]以及我国高能物理研究所提出的环形正负电子对撞机(CEPC) [12]。这些对撞机的主要运行区间都在 240 GeV 附近, 即作为 ZH (Z 玻色子 + 希格斯粒子)工厂, 进行希格斯粒子的精确测量。同时, 作为高能量的正负电子对撞机, 也为电弱能标的新物理寻找提供了极佳的条件。目前, ILC 合作组和 CEPC 合作组均已完成了包括探测器模拟、主要物理过程全模拟等工作, 实现了非常高的单粒子的重建与鉴别效率, 具备开展物理分析所需要的基本条件。因此, 在进行物理分析预研工作时, 可选取其中一个对撞机实验的主要对撞参数及相应的探测器性能参数进行蒙特卡罗(MC)模拟。本研究所采用的是 CEPC 实验参数, 基于概念设计报告, 模拟对撞质心能量 240 GeV、积分亮度  $5050 \text{ fb}^{-1}$ , 并使用 CEPC 基准探测器[13]。该基准探测器是一组面向粒

子流的探测器, 它由一个低质量材料径迹系统、一个高粒度量能器系统和一个大半径螺线管组成, 螺线管可产生 3 T 稳定磁场, 位于电磁量能器(ECAL)和强子量能器(HCAL)的外侧。物理过程和粒子的模拟及重建使用 CEPC 软件框架, 利用基于 MadGraph + Pythia8 的 Whizard [14]软件进行信号和本底过程的样本模拟, 基于 MokkaPlus [15]进行粒子与探测器物质相互作用全模拟, 其中径迹重建使用 Clupatra [16]算法, 基于粒子流的重建与鉴别使用 Arbor 算法[6]。

## 2.2. 信号与本底样本模拟

正负电子对撞机的质心能量较低, 如 CEPC 将主要在 240 GeV 的质心能量下运行, 因此其主要可能产生的超对称粒子为电弱反应产生的超对称电弱规范子以及 slepton。三代 slepton 中, 以陶轻子超伴子(stau)质量最轻, 因此在本研究中以 stau 粒子作为信号样本。基于 MSSM 理论和 R 宇称守恒假设, 将信号样本参数化为 stau 和 LSP 质量的函数, 其中 stau 质量参数以现有排除限为下限, LSP 质量则以 stau 质量为参数上限, 且假设标量 tau 的混合矩阵是对角的, 即忽略左右手混合 tau 的产生模式。同时, 除 LSP 之外的所有超对称电弱规范子的质量都设定为 2.5 TeV, 远高于对撞质心能量, 帮 stau 粒子 100%衰变到标准模型陶轻子, 其他所有衰变通道都是禁闭的。信号过程的产生如图 1 所示。



**Figure 1.** Schematic diagram of the production and decay of the signal particle pair  
**图 1.** 信号粒子对的产生及衰变示意图

**Table 1.** Generation cross-sections of the signals and dominant background process

**表 1.** 信号和主要本底过程的产生截面

物理过程	截面/fb
$m_{\text{stau}} = 80 \text{ GeV}$	419.6
$m_{\text{stau}} = 90 \text{ GeV}$	293.0
$m_{\text{stau}} = 100 \text{ GeV}$	171.1
$m_{\text{stau}} = 110 \text{ GeV}$	64.6
$m_{\text{stau}} = 115 \text{ GeV}$	23.6
$m_{\text{stau}} = 119 \text{ GeV}$	2.2
$\tau\tau$	4374.94
$ZZ\text{or}WW > \nu\nu\tau\tau$	205.84
$\nu Z (Z > \tau\tau)$	14.57
$ZZ > \nu\nu\tau\tau$	9.20
$\nu\nu H (H > \tau\tau)$	3.07

物理分析中涉及的与信号过程相似的其他物理过程(即本底过程), 依据末态中来自部分子的费米子数量进行分类。在 240 GeV 的质心能量下, 来自标准模型的本底主要来自 2 费米子和 4 费米子本底。前者包含两夸克过程(qq)、巴巴散射(ee)、两轻子过程( $\mu\mu$  和  $\tau\tau$ ), 后者包含双玻色子过程(ZZ、WW)、单玻色子过程(单 W、单 Z)和干涉过程, 其中干涉过程的产生是由于末态费米子组合允许多个中间态及其干涉同时存在, 记为 ZZorWW 和 ZorW 过程。表 1 总结了信号和主要本底过程在 240 GeV 的质心能量下的产生截面。

### 3. 事例选择

基于 MC 模拟样本, 本文拟采用 cut-and-count 方法进行物理分析, 其关键在于找到有效区分信号过程与本底过程的选择条件。信号过程在探测器中的主要特征是事例末态包括两个带相反电荷的陶轻子和由于 LSP 及中微子逃逸后产生的大量的缺失能量。得益于正负电子对撞实验非常高的单粒子重建与鉴别效率, 末态特征不同的其他物理过程可通过粒子数、末态粒子电荷关系等方式较高效地过滤, 因此在物理分析中需要重点考虑与处理的是事例末态具有相似特征的标准模型物理过程, 包括 ZZorWW  $>$   $\nu\tau\tau$  过程、 $\nu Z$  ( $Z >$   $\tau\tau$ )过程以及  $\nu\nu H$  ( $H >$   $\tau\tau$ )过程。这些物理过程的产生截面高于 stau 质量较高时的信号过程, 因此还需要通过更多的筛选条件将其分离。

信号区的事例选择是基于信号衰变的拓扑结构, 即从一对背靠背的 stau 衰变而来的两个带相反电荷的陶轻子, 以及来自将从探测器中逃逸的 LSP 的非常大的缺失质量。因此, 事例末态中两个陶轻子的不变质量、反冲质量和角分布信息, 对于从海量的本底过程事例中分离出信号事例是非常有效的。

由于陶轻子复杂的衰变模式, 无论是在强子对撞机实验, 还是在正负电子对撞机实验中, 其重建都是一个难点, 不仅需要使用大量计算资源, 重建效率通常较低, 强子对撞机实验中甚至只有 40~70% [17]。在研究末态粒子的角分布时, 本文分析使用事例中能量最高的一组带相反电荷的径迹用于替代陶轻子, 在不改变信号与本底过程末态事例在探测器中的特征的前提下, 大大降低了计算资源的使用及物理分析的复杂度。图 2 为对应的不同物理过程中, 分别使用两个陶轻子(左)、两个陶轻子中能量最高的径迹(中)以及整个事例中能量最高的两个带相反电荷的径迹(右)作为研究对象, 得到的空间角分布  $\Delta R$ , 其中信号过程使用的是 stau 质量 110 GeV、LSP 质量 10 GeV 的参数组合。显然, 除了  $\Delta R$  接近 0 处, 即其中一个陶轻子能量较低导致选择出来的两条能量最高的径迹都来自于同一个粒子的情况, 在此方法得到的两条带电径迹较好地还原了信号和本底过程中两陶轻子的空间分布。从图 2 中也可看出, 来自信号过程的事例和本底过程的事例中两个陶轻子之间呈现明显不同的空间角分布  $\Delta R$ 。事实上, 两个陶轻子之间的  $\Delta\phi$  分布, 以及除末态事例中除了陶轻子以外的部分, 即反冲系统与陶轻子之间的角分布都与物理过程的衰变拓扑结构有关, 因此通过此类变量的选择可有效减少本底过程的事例。

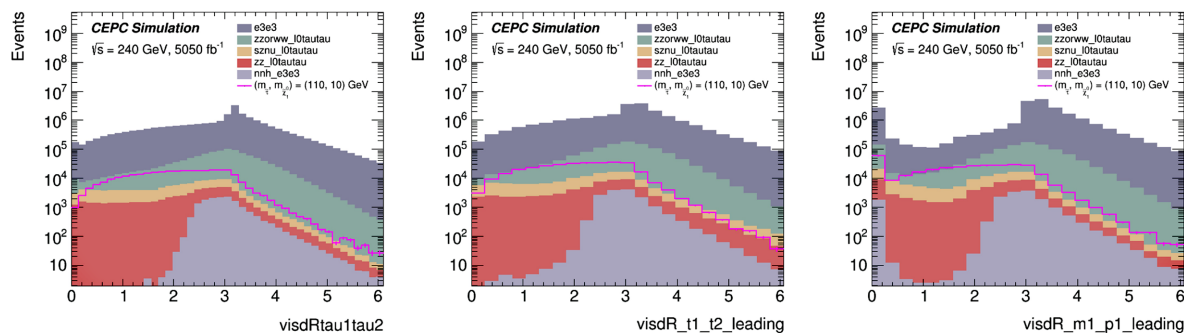


Figure 2. Comparison of schematic diagrams of the spatial angular distribution  $\Delta R$  of the trajectory of tau leptons and the highest energy opposite charge

图 2. 陶轻子及能量最高相反电荷的径迹空间角分布  $\Delta R$  对比示意图

除了角分布信息之外, 缺失质量信息对于  $R$  宇称守恒的超对称粒子寻找也至关重要。得益于正负电子对撞实验非常干净的碰撞环境, 几乎所有可见的稳定粒子都能被探测和重建, 因此可以计算出可见系统的运动学信息, 并用该可见系统的反冲质量  $m_{recoil}$  来表示缺失质量。陶轻子衰变产生的中微子也包含在反冲系统中。

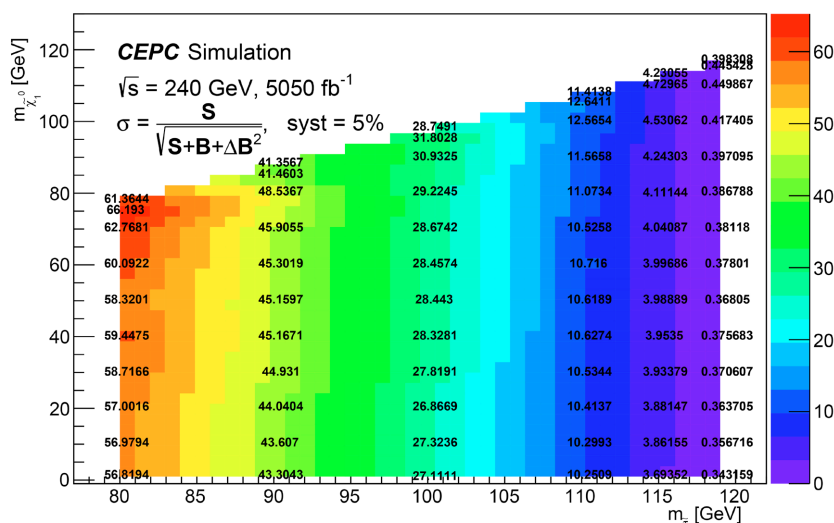
#### 4. 信号区定义与优化结果

针对信号和本底过程在角分布、缺失质量等两方面信息上的不同之处进行选择优化, 以三组质量参数(stau 质量 100 GeV, LSP 质量分别为 10 GeV、50 GeV、90 GeV)作为参考信号, 将最终信噪比最高的选择条件组合定义为信号区。表 2 列出了信号区中的定义及各选择条件对本底过程和信号过程的效率。

**Table 2.** Event yields and efficiencies of signal and main background processes after different selections in the signal region  
**表 2.** 信号区不同选择条件后信号和主要本底过程的事例数及效率

选择条件	本底过程	$m_{\text{stau}} = 100 \text{ GeV}$ $m_{\text{LSP}} = 10 \text{ GeV}$	$m_{\text{stau}} = 100 \text{ GeV}$ $m_{\text{LSP}} = 50 \text{ GeV}$	$m_{\text{stau}} = 100 \text{ GeV}$ $m_{\text{LSP}} = 90 \text{ GeV}$
原始事例	23,268,481	864,055	864,055	864,055
$ \Delta\phi(\tau, \text{反冲系统})  > 1$	3,779,050	680,916	681,279	676,700
$0.2 <  \Delta R(\tau, \tau)  < 2.8$	854,888	507,134	510,884	555,638
$M_{recoil} > 100 \text{ GeV}$	348,797	490,762	510,884	555,638
选择效率	1.50%	56.80%	59.13%	64.31%

将表 2 所示的选择条件应用于所有的信号样本, 同时, 使用 5% 的系统误差作为保守估计, 可以得到信号质量参数空间中的分析灵敏度图, 如图 3 所示。其中, 灵敏度  $\sigma = 1.68$  对应 95% CL 排除限区域,  $\sigma = 5$  对应发现区别[18]。



**Figure 3.** Parameter space sensitivity map with 5% systematic uncertainty assumption  
**图 3.** 5% 系统误差假设下的参数空间灵敏度图

#### 5. 结论

本文利用基于全模拟样本的 cut-and-count 方法对未来正负电子对撞实验中直接产生 stau 的基准超对



称物理寻找方案进行了可行性预研, 并针对 5% 系统不确定性的假设给出了的 95% CL 排除限区域和  $\sigma = 5$  的发现区域等值线。结果表明, 在 240 GeV 质心能量以及  $5050 \text{ fb}^{-1}$  积分亮度的条件下, 正负电子对撞机实验对无质量 LSP 假设下的 stau 质量排除极限达到 116 GeV, 无质量 LSP 的发现灵敏度达到 112 GeV, 大幅提高了过去及现有实验的发现及排除限, 也验证了正负电子对撞机实验在新物理寻找中的优越性。同时, 本研究中使用的分析方法主要根据物理过程的事例衰变特性, 对所用对撞机及探测器性能参数等依赖较小, 可通过归一化等方式移植到国际上正在筹备中的同类型大型正负电子对撞机实验上作为参考, 也可作为相似物理预研的分析范例。

## 参考文献

- [1] Gelfand, Y.A. and Likhtman, E.P. (1971) Extension of the Algebra of Poincare Group Generators and Violation of P Invariance. *JETP Letters*, **13**, 323-326.
- [2] Wang, F., Wang, W., Yang, J., Zhang, Y. and Zhu, B. (2022) Low Energy Supersymmetry Confronted with Current Experiments: An Overview. *Universe*, **8**, Article 178. <https://doi.org/10.3390/universe8030178>
- [3] Baer, H., Barger, V., Sengupta, D., Salam, S. and Sinha, K. (2020) Status of Weak Scale Supersymmetry After LHC Run 2 and Ton-Scale Noble Liquid WIMP Searches. *The European Physical Journal Special Topics*, **229**, 3085-3141. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2020-000020-x>
- [4] Farrar, G.R. and Fayet, P. (1978) Phenomenology of the Production, Decay, and Detection of New Hadronic States Associated with Supersymmetry. *Physics Letters B*, **76**, 575-579. [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(78\)90858-4](https://doi.org/10.1016/0370-2693(78)90858-4)
- [5] Ellis, J., Hagelin, J.S., Nanopoulos, D.V., Olive, K. and Srednicki, M. (1984) Supersymmetric Relics from the Big Bang. *Nuclear Physics B*, **238**, 453-476. [https://doi.org/10.1016/0550-3213\(84\)90461-9](https://doi.org/10.1016/0550-3213(84)90461-9)
- [6] ATLAS Collaboration (2020) Search for Direct Stau Production in Events with Two Hadronic  $\tau$ -Leptons in  $\sqrt{s} = 13$  TeV  $pp$  Collisions with the ATLAS Detector. *Physical Review D*, **101**, Article ID: 032009.
- [7] CMS Collaboration (2023) Search for Direct Pair Production of Supersymmetric Partners of  $\tau$  Leptons in the Final State with Two Hadronically Decaying  $\tau$  Leptons and Missing Transverse Momentum in Proton-Proton Collisions at Formula Presented. *Physical Review D*, **108**, Article ID: 012011.
- [8] Berggren, M. (2001) Stau Searches at LEP. *Nuclear Physics B—Proceedings Supplements*, **98**, 342-347. [https://doi.org/10.1016/s0920-5632\(01\)01247-6](https://doi.org/10.1016/s0920-5632(01)01247-6)
- [9] Ruan, M., Zhao, H., Li, G., Fu, C., Wang, Z., Lou, X., *et al.* (2018) Reconstruction of Physics Objects at the Circular Electron Positron Collider with Arbor. *The European Physical Journal C*, **78**, Article No. 426. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-018-5876-z>
- [10] Behnke, T., *et al.* (2013) The International Linear Collider Technical Design Report—Volume 1: Executive Summary. arXiv :1306.6327.
- [11] Biçer, M., *et al.* (2014) First Look at the Physics Case of TLEP. arXiv: 1308.6176.
- [12] Lou, X. (2019) The Circular Electron Positron Collider. *Nature Reviews Physics*, **1**, 232-234. <https://doi.org/10.1038/s42254-019-0047-1>
- [13] Ahmad, M., *et al.* (2018) CEPC Conceptual Design Report: Volume 2—Physics & Detector. arXiv: 1811.10545.
- [14] Kilian, W., Ohl, T. and Reuter, J. (2011) Whizard—Simulating Multi-Particle Processes at LHC and ILC. *The European Physical Journal C*, **71**, Article No. 1742. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-011-1742-y>
- [15] Mora de Freitas, P. and Videau, H. (2002) Detector Simulation with MOKKA/GEANT4: Present and Future. *Proceedings of International Workshop on Linear Colliders (LCWS 2002)*, Seogwipo, 26-30 August 2002, 623-627.
- [16] Gaede, F., Aplin, S., Glattauer, R., Rosemann, C. and Voutsinas, G. (2014) Track Reconstruction at the ILC: The ILD Tracking Software. *Journal of Physics: Conference Series*, **513**, Article ID: 022011. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/513/2/022011>
- [17] ATLAS Collaboration (2017) Measurement of the Tau Lepton Reconstruction and Identification Performance in the ATLAS Experiment Using  $pp$  Collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV. ATLAS-CONF-2017-029. <https://cds.cern.ch/record/2261772>
- [18] Read, A.L. (2002) Presentation of Search Results: The  $CL_s$  Technique. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, **28**, 2693-2704. <https://doi.org/10.1088/0954-3899/28/10/313>