



中国科学院高能物理研究所

Institute of High Energy Physics Chinese Academy of Sciences

# 季度考核报告

---

报告人：沙其雨

导师：方亚泉/李刚

报告日期：2023.1

# 研究工作（2022.9-2022.12）

---

- CEPC上探测希格斯粒子的CP性质
- ATLAS上Di-higgs  $\gamma\gamma$ +multilepton末态的研究
- ATLAS上低质量 $Z' \rightarrow \mu\mu$ 的研究
- 量子机器学习
- ATLAS上HGTD的MUX64芯片的批量测试与可靠性测试

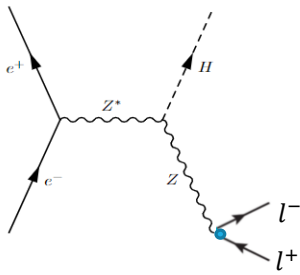
# CEPC探测希格斯粒子的CP性质

该分析通过 $e^+e^- \rightarrow ZH \rightarrow l^+l^-H(\rightarrow b\bar{b}/c\bar{c}/gg)$  这一过程，在 $5.6\text{ ab}^{-1}$ 与 $20\text{ ab}^{-1}$ 积分亮度下得到CP-violating 变量 $\hat{c}_{Z\gamma}$ 和 $\hat{c}_{ZZ}$ 在68% 置信区间下的值为：

| Collider                                      | $pp$            | $e^+e^-$        | $e^+e^-$        | $e^+e^-$        |
|-----------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| $E\text{ (GeV)}$                              | 14000           | 3000            | 240             | 240             |
| $\mathcal{L}\text{ (fb}^{-1}\text{)}$         | 3000            | 5000            | 5600            | 20000           |
| $\tilde{c}_{Z\gamma}\text{ (}1\sigma\text{)}$ | $[-0.22, 0.22]$ | $[-0.18, 0.18]$ | $[-0.30, 0.27]$ | $[-0.16, 0.14]$ |
| $\tilde{c}_{ZZ}\text{ (}1\sigma\text{)}$      | $[-0.33, 0.33]$ | $[-0.12, 0.12]$ | $[-0.06, 0.06]$ | $[-0.03, 0.03]$ |

For  $5.6\text{ab}^{-1} : f_{CP}^{HZZ} < 9.16 \times 10^{-6}$

- 本季度工作进展：
- 回答编辑问题并发表文章。
  - 增加与CLIC等已发表的CP相关研究的对比。



这一结果优于HL-LHC给出的结果，充分展现了未来在CEPC上探测希格斯粒子的CP性质的可能性和优越性。  
(arXiv:1902.00134)

- 报告：
- The 2022 International workshop on the high energy circular electron-positron collider.
  - IDT-WG3-Phys open meeting.

- 文章：
- EPJC Published(第一作者)

Eur.Phys.J.C 82 (2022) 11, 981

Eur. Phys. J. C (2022) 82:981  
https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-022-10926-5  
Regular Article - Experimental Physics

Probing Higgs CP properties at the CEPC in the  $e^+e^- \rightarrow ZH \rightarrow l^+l^-H$  using optimal variables

Qiyu Sha<sup>1</sup>, Abulhasan Faizi<sup>2,3</sup>, Fangqi Guo<sup>2,3</sup>, Gang Li<sup>4,5</sup>, Yiquan Fang<sup>2,3</sup>, Jinyi Guo<sup>2,3</sup>, Xiaohu Lou<sup>2,3</sup>  
<sup>1</sup> Institute of High Energy Physics, University of Chinese Academy of Sciences (UCAS), 10B, Yiqian Road, Shijing District, Beijing 100049, China  
<sup>2</sup> Department of Physics and Center for Field Theory and Particle Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China  
<sup>3</sup> Key Laboratory of Nuclear Physics and Ion Beam Application (IMEK), Fudan University, Shanghai 200433, China  
<sup>4</sup> University of Texas at Dallas, Richardson, TX 75080-3021, USA

Received: 2 August 2022 / Accepted: 15 October 2022  
© The Author(s) 2022

**Abstract** In the Circular Electron Positron Collider (CEPC), a measurement of the Higgs CP mixing through  $e^+e^- \rightarrow ZH \rightarrow l^+l^-H$  ( $l = e, \mu$ ) ( $H \rightarrow b\bar{b}/c\bar{c}/gg$ ) process is presented, with  $5.6\text{ ab}^{-1}$   $e^+e^-$  collision data at the center-of-mass energy of 240 GeV. In this study, the CP-violating parameter  $c_{Z\gamma}$  is constrained between the region of  $-0.30$  and  $0.27$  and  $c_{ZZ}$  between  $-0.06$  and  $0.06$  at 68% confidence level. This study demonstrates the great potential of probing Higgs CP properties at the CEPC.

**1 Introduction**

The historic discovery of Higgs boson with a mass around 125 GeV in 2012 by the ATLAS and CMS collaborations at the Large Hadron Collider (LHC) [1–3] completed the Standard Model (SM). This particle provides a new portal to search for new physics beyond the SM (BSM). The Higgs boson is predicted to be a scalar particle ( $J^P = 0^{++}$ ) under the SM of particle physics. As a result, any observation of charge-parity violation (CPV) in Higgs would be a sign of physics BSM and could account for the explanation of the observed baryon asymmetry of the universe.

At present, the Higgs boson CP-mixing measurements are performed at hadron colliders. The hypothesis of spin-1 or spin-2 Higgs has been excluded by ATLAS and CMS at 99% confidence level (CL) with  $\sqrt{s} = 7$  and 8 TeV, 25 fb<sup>-1</sup> data [3]. Studies of the CP properties of the Higgs boson interactions with gauge bosons have been performed by the ATLAS [4–6] and CMS [7–9] experiments, and the results show no deviations from the SM predictions. ATLAS and CMS also finished analyses of  $H\ell$  coupling, which provides an alternative and independent avenue for CP testing in the Higgs sector because it is particularly sensitive to deviations from the SM coupling [10, 11]. Their results show exclusion of the pure CP-odd structure of the top quark Yukawa ( $t\bar{t}H$ ) coupling at 3.5σ (3.2σ) and the fractional contribution of the CP-odd component is measured to be  $f_{CP}^{H\ell} = 0.00 \pm 0.33$ . However, small anomalous contributions were not excluded. At the HL-LHC [12], the CP-odd  $VVH$  couplings are introduced and the expected results constrain the CP-odd parameters  $c_{Z\gamma}$  between  $-0.22$  and  $0.22$  and the  $c_{ZZ}$  between  $-0.33$  and  $0.33$  at the 68% confidence level.

In terms of probing the CP-odd Higgs couplings, a lepton collider operating as a Higgs factory has great advantages, as it is free of the QCD background and has tunable and precisely defined initial energies. Several future lepton colliders, including the International Linear Collider (ILC) [13], the  $e^+e^-$  Future Circular Collider (FCC-ee) [14], the Compact Linear Collider (CLIC) [15], and the Circular Electron-Positron Collider (CEPC) [16], have been proposed with the capability of precise measurement of Higgs boson parameters. There are plenty of approaches to the Higgs CP measurements at the future lepton colliders by using different probes, like the  $VH$  process, the  $HH$  process, the VBF

\*e-mail: shaqiyu@ihep.ac.cn (corresponding author)  
\*e-mail: anshunian@fudan.ac.cn  
\*e-mail: guofangqi@hep.ac.cn  
\*e-mail: li.gang@hep.ac.cn  
\*e-mail: fanqiyu@hep.ac.cn  
\*e-mail: jinyi.guo@fudan.edu.cn  
\*e-mail: xiaohu@hep.ac.cn

# ATLAS上Di-higgs multilepton的研究

本人主要工作:负责 $\gamma\gamma + \text{multilepton}$  末态的全部研究与相关内容的撰写（多次在ATLAS di-higgs multilepton会上进行报告）

## 本季度工作进展:

- 完成理论误差的计算。
- 代表HH multilepton组做了第二次EB meeting报告，回答完所有意见。
- 更新了note(以 $\gamma\gamma + \text{multilepton}$  末态的更新为主)，并在12月9日circulate。
- 代表HH multilepton组做了unblinding approval request报告。
- 目前已完成全部action items和cds comments。预计2023.1月初传阅closure slide并正式揭盲。
- 计划在2023.3月份完成该分析。

### Stat only:

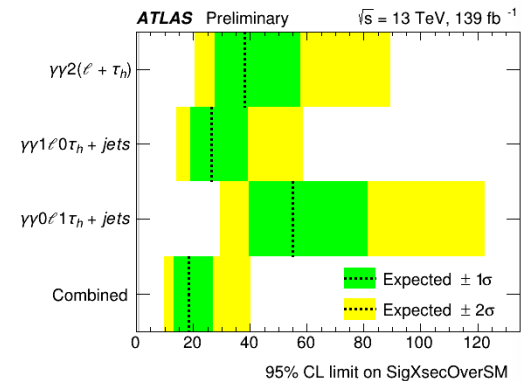
|                                         | $-2\sigma$ | $-1\sigma$ | Expected | $+1\sigma$ | $+2\sigma$ | Observed |
|-----------------------------------------|------------|------------|----------|------------|------------|----------|
| $\gamma\gamma+1\ell 0\tau_{\text{had}}$ | 13.67      | 18.04      | 25.46    | 36.99      | 53.24      | blinded  |
| $\gamma\gamma+0\ell 1\tau_{\text{had}}$ | 28.29      | 37.98      | 52.70    | 76.71      | 110.80     | blinded  |
| $\gamma\gamma+2L$                       | 19.86      | 19.07      | 37.01    | 54.79      | 81.62      | blinded  |
| Combined                                | 9.51       | 12.77      | 17.72    | 25.52      | 36.21      | blinded  |

### With all sys uncertainties:

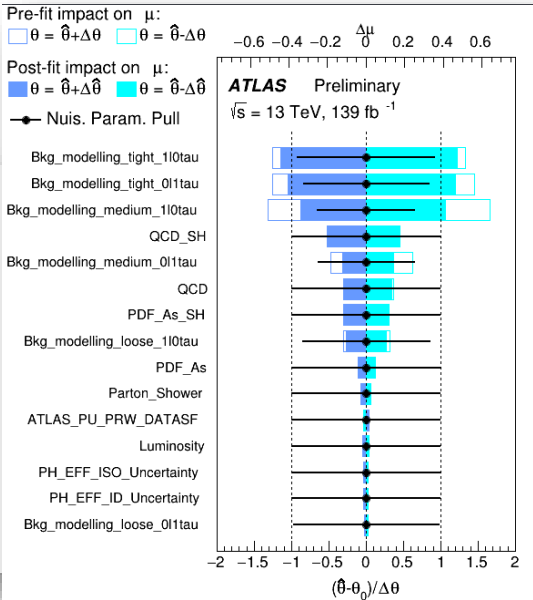
|                                         | $-2\sigma$ | $-1\sigma$ | Expected | $+1\sigma$ | $+2\sigma$ | Observed |
|-----------------------------------------|------------|------------|----------|------------|------------|----------|
| $\gamma\gamma+1\ell 0\tau_{\text{had}}$ | 14.19      | 19.05      | 26.44    | 39.21      | 58.76      | blinded  |
| $\gamma\gamma+0\ell 1\tau_{\text{had}}$ | 29.47      | 39.56      | 54.91    | 81.56      | 122.60     | blinded  |
| $\gamma\gamma+2L$                       | 20.47      | 27.49      | 38.15    | 57.66      | 89.34      | blinded  |
| Combined                                | 9.88       | 13.26      | 18.41    | 27.12      | 40.18      | blinded  |

| Channel                                 | Process      | Parton Shower (%) | PDF + $\alpha_s$ (%) | QCD Scale (%)    |
|-----------------------------------------|--------------|-------------------|----------------------|------------------|
| $\gamma\gamma+1\ell 0\tau_{\text{had}}$ | HH signal    | 2.51              | 4.46                 | +13.03<br>-12.26 |
| $\gamma\gamma+0\ell 1\tau_{\text{had}}$ | HH signal    | 1.18              | 4.53                 | +13.15<br>-12.35 |
| $\gamma\gamma+2L$                       | HH signal    | 2.85              | 4.47                 | +13.03<br>-12.33 |
| $\gamma\gamma+1\ell 0\tau_{\text{had}}$ | Single Higgs | -                 | 5.86                 | +3.73<br>-3.82   |
| $\gamma\gamma+0\ell 1\tau_{\text{had}}$ | Single Higgs | -                 | 5.98                 | +10.49<br>-7.10  |
| $\gamma\gamma+2L$                       | Single Higgs | -                 | 5.35                 | +9.09<br>-7.67   |

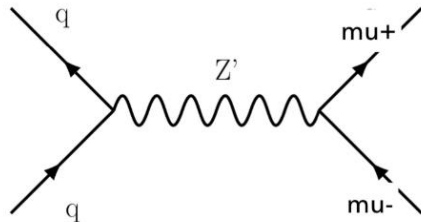
### Combined results:



### Sys Ranking:

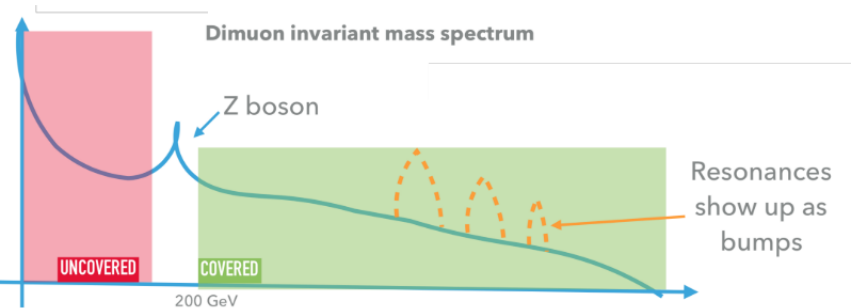


# ATLAS上低质量 $Z' \rightarrow \mu\mu$ 的研究



## 研究目的:

- ATLAS已经对大质量 $Z'$  进行了完善的搜索，目前有很多理论预测存在低质量 $Z'$  介子。
- 质谱较轻的一侧寻找新粒子有独特的挑战性：本底通常有复杂的特征，MC样本无法很好的描述。
- 尝试使用高斯过程（Gaussian Process）对本底进行建模（并将其纳入现有的分析框架中）。



- 在(10,68) GeV寻找共振 $Z'$ ：
  - 避免4-10 GeV的夸克偶素本底与90GeV附近的Z介子

## 本季度工作进展与计划:

- 准备好MC 样本并构建完成workspace，正在学习高斯过程相关的机器学习知识。
- 预计在2023.3月开展具体工作并领导这一分析。

| MC Type                  | DSID                                                                     | Generator Used                 |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| $Z > \mu\mu$             | 364100 - 364113 , 364198-364203                                          | Fast Simulation through PYTHIA |
| $Z > \tau\tau$           | 364128 - 364141 , 364210-364215                                          | Sherpa                         |
| $t\bar{t}$               | 410472                                                                   | Sherpa                         |
| Diboson                  | 364253 - 364255 , 363355 - 363360 ;<br>363489 ; 364250 ; 364288 - 364290 | Sherpa                         |
| Top decay                | 410644 - 410645 , 410658 - 410659 ;<br>410648 - 410649                   | Powheg+Pythia8                 |
| $W + \text{jets} \mu\nu$ | 364156 - 364169                                                          | Sherpa                         |
| $b\bar{b}$               | 363833                                                                   | Pythia8b                       |
| $c\bar{c}$               | 363834                                                                   | Pythia8b                       |

# 量子机器学习

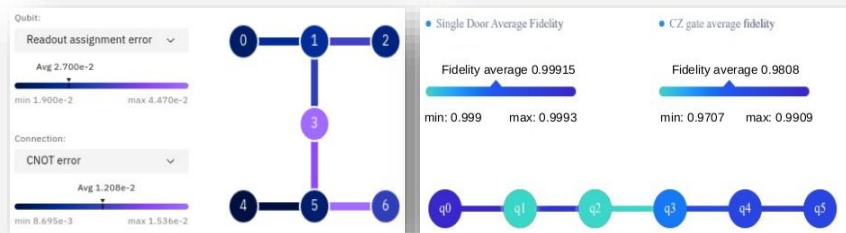
arxiv.org: 2209.12788

该研究目的是将量子计算运用到高能物理分析中，以期得到比经典的机器学习更好更快的结果。

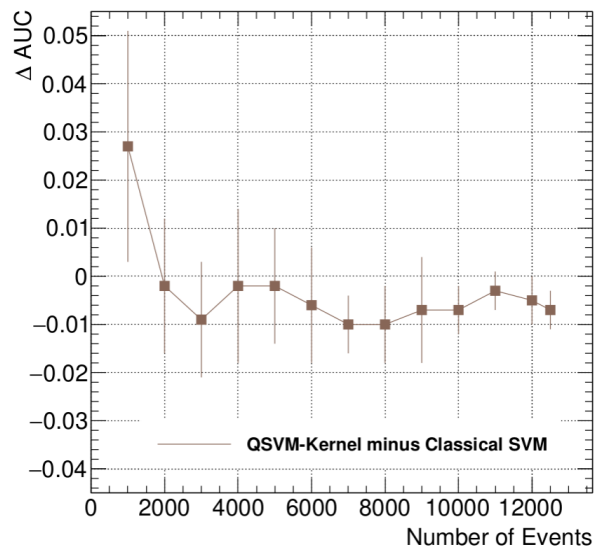
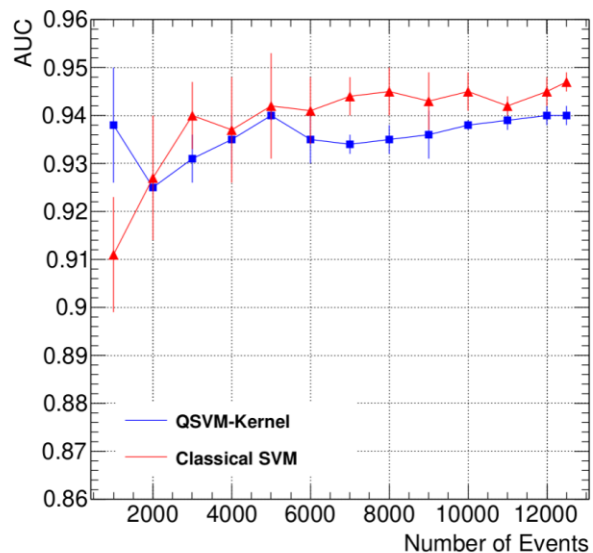
本季度工作进展1:

- 完成基于6个量子比特的 $qq\gamma\gamma$ 末态研究，使用IBM/本源 真实量子计算机与模拟量子计算机进行运算。已投稿PLB（共同第一作者），目前已收到评审意见，正在进行回答。

■ 真实量子计算机:

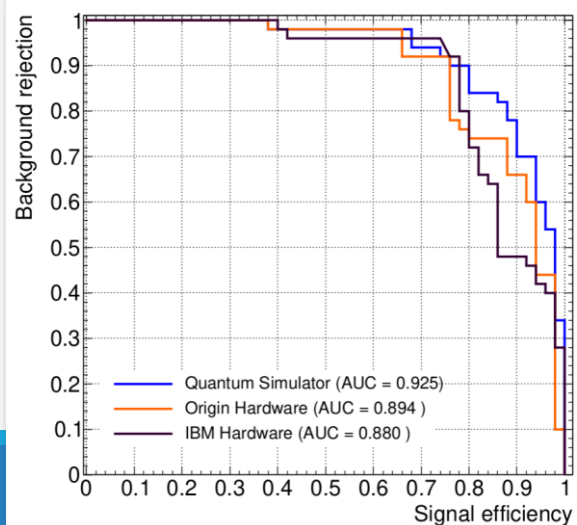


■ 比较量子模拟机与经典SVM算法，经典机器学习略占优势:



■ 在100事例数下比较量子模拟机与真实量子计算机:

- 由于噪声影响，真实量子计算机必然略差于模拟结果





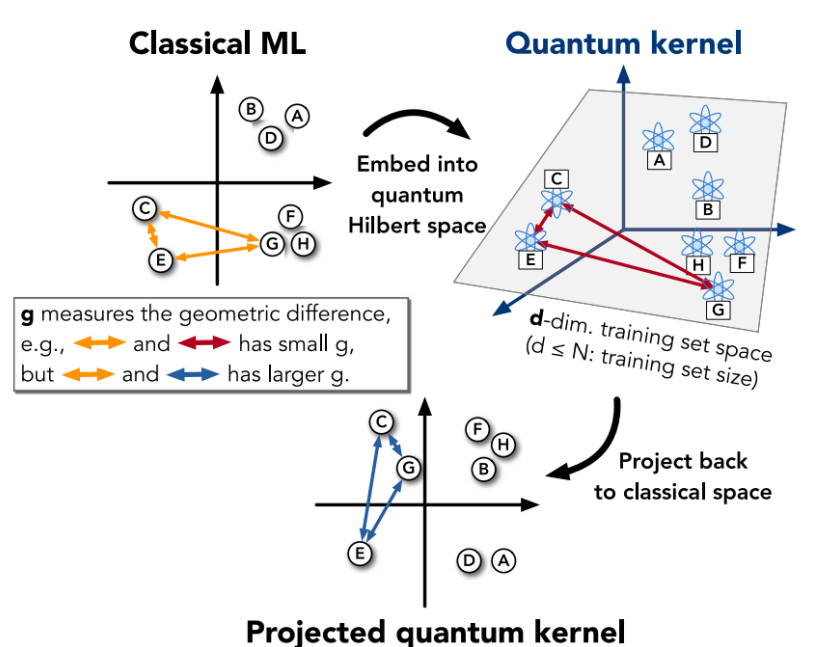
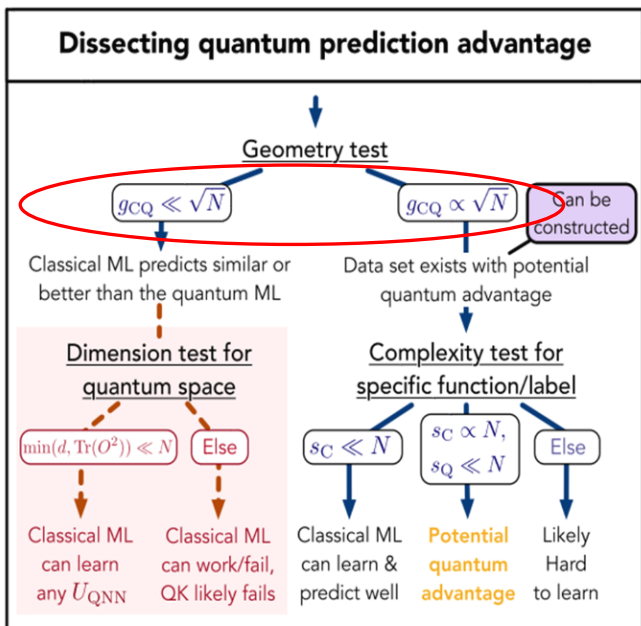
该研究目的是将量子计算运用到高能物理分析中，以期得到比经典的机器学习更好更快的结果。

本季度工作进展2:

- 开展新的基于24个量子比特且基于CEPC H to bb/cc/gg 末态的研究。已完成基础的分析准备并进行了一些基础的研究（诸如在10个量子比特虚拟机上进行了一系列简单的计算）。
- 研究如何量化不同算法的优劣：目前看来 $g_{CQ}$ （geometric difference of C&Q）与最优的结果有一定的相关性。（需进一步研究）

Power of data in quantum machine learning

$$g_{CQ} = g(K^C \parallel K^Q) = \sqrt{\|\sqrt{K^Q}(K^C)^{-1}\sqrt{K^Q}\|_\infty}$$



| feature  | depth | sqrt(N)   | qCO   | best C | best RO | ±     |
|----------|-------|-----------|-------|--------|---------|-------|
| rz(2)+ry | 1     | 70.710678 | 14.76 | 20     | 0.933   | 0.008 |
| rz+ry    | 1     |           | 15.06 | 190    | 0.933   | 0.015 |
| ry+Rz    | 1     |           | 15.06 | 190    | 0.933   | 0.015 |
| rx+rz    | 1     |           | 15.17 | 150    | 0.928   | 0.014 |
| rx+Ry    | 1     |           | 15.17 | 150    | 0.928   | 0.014 |
| ry+Rx    | 1     |           | 15.52 | 150    | 0.932   | 0.015 |
| rz+Rx    | 1     |           | 15.52 | 150    | 0.932   | 0.015 |

# ATLAS HGTD上Mux64芯片的批量测试与可靠性测试

(MUX64芯片：多路复用器，具有64个模拟输入，用于监控HGTD（高颗粒度时间探测器）模块的电源轨和温度）

该研究旨在设计一个批量测试系统，实现多芯片同时测试和在线状态监控。并且测试MUX64芯片在高温和辐照环境下的可靠性。

本人参与了从测试系统设计到可靠性测试的全部过程。（多次在ATLAS Electronics会议上进行报告）

## 本季度工作进展：

- 第二轮高低温循环测试（增加了湿度控制装置并换了升降温效率更高的温箱）
  - 基本确定了在高低温循环过程中出现的错误是由于焊接问题。
  - 现有的芯片均通过了ITK的温度循环测试标准，未通过工业标准，计划于2023年解决焊接问题。
- 投稿TWEPP会议期刊，已收到编辑意见正在修改。
- 正在撰写QT note



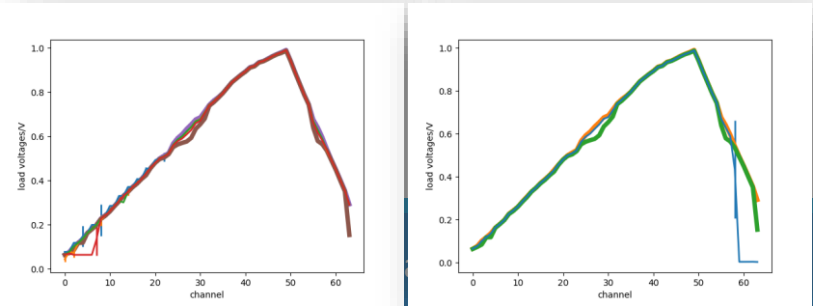
| Chip ID | HTOL | TC1 | TC2 | TC3 | TC4 |
|---------|------|-----|-----|-----|-----|
| 2       | Y    | -   | -   | -   | -   |
| 3       | Y    | Y   | Y   | Y   | Y   |
| 4       | Y    | -   | -   | -   | -   |
| 5       | Y    | Y   | Y   | Y   | Y   |
| 6       | Y    | Y   | Y   | Y   | Y   |
| 7       | Y    | Y   | Y   | Y   | Y   |
| 8       | Y    | Y   | Y   | Y   | Y   |
| 9       | Y    | Y   | Y   | Y   | Y   |
| 10      | Y    | Y   | Y   | Y   | Y   |
| 11      | Y    | Y   | Y   | Y   | Y   |
| 12      | Y    | Y   | Y   | Y   | Y   |
| 13      | Y    | Y   | Y   | Y   | Y   |
| 14      | Y    | Y   | Y   | Y   | Y   |
| 19      | Y    | -   | Y   | Y   | Y   |
| 20      | Y    | -   | Y   | Y   | Y   |
| 21      | Y    | -   | Y   | Y   | Y   |
| 22      | Y    | -   | Y   | Y   | Y   |
| 23      | Y    | -   | Y   | Y   | Y   |
| 24      | Y    | -   | Y   | Y   | Y   |
| 25      | Y    | -   | Y   | Y   | Y   |
| 26      | Y    | -   | Y   | Y   | Y   |
| 27      | Y    | -   | Y   | Y   | Y   |
| 28      | Y    | -   | Y   | Y   | Y   |
| 29      | Y    | -   | Y   | Y   | Y   |
| 30      | Y    | -   | Y   | Y   | Y   |
| 31      | Y    | -   | Y   | Y   | Y   |
| 32      | Y    | -   | Y   | Y   | Y   |
| 33      | Y    | -   | Y   | Y   | Y   |
| 34      | -    | -   | Y   | Y   | Y   |
| 40      | -    | -   | Y   | Y   | Y   |
| 60      | -    | Y   | Y   | Y   | Y   |
| 61      | -    | Y   | Y   | Y   | Y   |
| 62      | -    | Y   | Y   | Y   | Y   |
| 63      | -    | Y   | Y   | Y   | Y   |

## 高低温循环测试结果

|                                  | July                                                                                    |                                                                                         | November                                   |                                                                              |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Batch                            | TC1 (>100 cycles)                                                                       | TC1 (120 cycles)                                                                        | TC1 (100 cycles)                           | TC1 (300 cycles)                                                             |
| Temperature slope                | Cooling: 1 hour 40 minutes<br>Heating: 40 minutes                                       | Cooling: 1 hour 40 minutes<br>Heating: 40 minutes                                       | Cooling: 30 minutes<br>Heating: 30 minutes | Cooling: 30 minutes<br>Heating: 30 minutes                                   |
| Humidity control                 | No                                                                                      | No                                                                                      | Yes, ~3%                                   | Yes, ~3%                                                                     |
| First three times error occurred | The 60 <sup>th</sup> cycle begins, Then in 73 <sup>rd</sup> and 77 <sup>th</sup> cycle. | The 76 <sup>th</sup> cycle begins, Then in 79 <sup>th</sup> and 80 <sup>th</sup> cycle. | Only 9 error in this test                  | The ~40 <sup>th</sup> cycle begins                                           |
| Frequent random errors happened  | The 93 <sup>rd</sup> cycle begins, An average of one error per hour.                    | The 92 <sup>nd</sup> cycle begins, An average of one error ~ per two hours.             |                                            | The 80 <sup>th</sup> cycle begins, An average of one error ~ per half hours. |

## 测试芯片数与序号

- 一些错误类型：主要为2种：
  - 电压测试值瞬时变化，反应为开态阻抗的大幅变化（开路），该现象集中出现在偶数道中
  - 错误选通或者没有选上（某几个道电压值呈一条直线）





# ATLAS HGTD上Mux64芯片的批量测试与可靠性测试

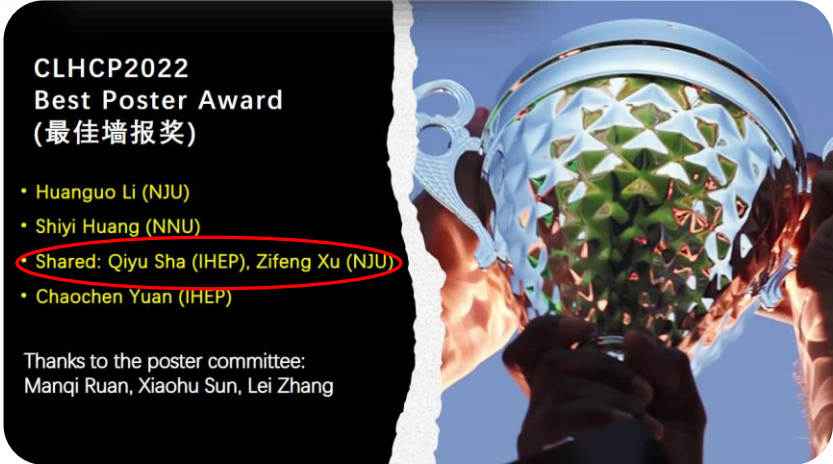
(MUX64芯片：多路复用器，具有64个模拟输入，用于监控HGTD（高颗粒度时间探测器）模块的电源轨和温度）  
该研究旨在设计一个批量测试系统，实现多芯片同时测试和在线状态监控。并且测试MUX64芯片在高温和辐照环境下的可靠性。  
本人参与了从测试系统设计到可靠性测试的全部过程。（多次在ATLAS Electronics会议上进行报告）

- 本季度工作进展：
- 第二轮高低温循环测试（增加了湿度控制装置并换了升降温效率更高的温箱）
    - 基本确定了在高低温循环过程中出现的错误是由于焊接问题。
    - 现有的芯片均通过了ITK的温度循环测试标准，未通过工业标准，计划于2023年解决焊接问题。
  - 投稿TWEPP会议期刊，已收到编辑意见正在修改。
  - 正在撰写QT note



高低温循环测试结果

|                                  | July                                                                                       |                                                                                            | November                                   |                                                                                 |
|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| Batch                            | TC1<br>(>100 cycles)                                                                       | TC1<br>(120 cycles)                                                                        | TC1<br>(100 cycles)                        | TC1<br>(300 cycles)                                                             |
| Temperature slope                | Cooling: 1 hour 40 minutes<br>Heating: 40 minutes                                          | Cooling: 1 hour 40 minutes<br>Heating: 40 minutes                                          | Cooling: 30 minutes<br>Heating: 30 minutes | Cooling: 30 minutes<br>Heating: 30 minutes                                      |
| Humidity control                 | No                                                                                         | No                                                                                         | Yes, ~3%                                   | Yes, ~3%                                                                        |
| First three times error occurred | The 60 <sup>th</sup> cycle begins,<br>Then in 73 <sup>rd</sup> and 77 <sup>th</sup> cycle. | The 76 <sup>th</sup> cycle begins,<br>Then in 79 <sup>th</sup> and 80 <sup>th</sup> cycle. | Only 9 error in this test                  | The ~40 <sup>th</sup> cycle begins                                              |
| Frequent random errors happened  | The 93 <sup>rd</sup> cycle begins,<br>An average of one error per hour.                    | The 92 <sup>nd</sup> cycle begins,<br>An average of one error ~ per two hours.             |                                            | The 80 <sup>th</sup> cycle begins,<br>An average of one error ~ per half hours. |



- 报告：
- HGTD mini week（12th, september）
  - Topical Workshop on Electronics for Particle physics, 19th – 23rd September, Bergen, Norway（TWEPP）（海报）
  - The 8th China LHC Physics Workshop, NoV.23-27,2022, Nanjing.（CLHCP）（海报，并获得最佳海报奖）

# 总结

## 工作进展:

- CEPC上探测希格斯粒子的CP性质: 已发表EPJC(一作). [Eur.Phys.J.C 82 \(2022\) 11, 981](#)
  - ◆ 会议报告:
    - [The 2022 International workshop on the high energy circular electron-positron collider.](#)
    - [IDT-WG3-Phys open meeting.](#)
- 作为主要贡献者参与ATLAS Di-higgs multilepton 的分析, 负责 $\gamma\gamma + \text{multilepton}$  末态的全部研究与相关内容的撰写。
  - ◆ 在ATLAS di-higgs multilepton组内做了多次报告, 代表HH multilepton组做了[第二次EB meeting报告](#)和[Unblinding approval request](#)报告。
  - ◆ 目前已完成全部action item和comments。预计2023.1月初传阅closure slides并正式揭盲。预计2023.3月完成研究。
- 完成ATLAS上低质量 $Z' \rightarrow \mu\mu$ 的初期准备并计划在2023.3月正式开展该项研究
- 作为主要贡献者参与量子机器学习的研究。
  - ◆ 已投稿PLB (共一)。收到评审意见, 正在回答。
  - ◆ 开展新的基于24qubits的研究
- 作为主要贡献者完成对ATLAS HGTD上的MUX64芯片的批量测试系统的设计和可靠性测试。
  - ◆ 在ATLAS Electronics组内做了多次报告, 在HGTD mini week上进行报告。
  - ◆ 在TWEPP和CLHCP上进行海报展示, 并获得CLHCP2022最佳海报奖。
  - ◆ 投稿TWEPP会议期刊, 正在回答评审意见。

---

谢谢！