

---

# 粒子物理前沿卓越中心考评报告 (2020年)

报告人：祁辉荣

中国科学院高能物理研究所

12月5日, 2020, IHEP

---

# 目录

- CEPC TPC关键物理问题
- 模块正离子研制亮点
- 激光TPC原型机研制亮点
- 国际合作和发表文章
- 小结及计划

# 环形对撞机TPC技术的关键问题

- TPC在CEPC高亮度下的挑战，需研究新的解决方案

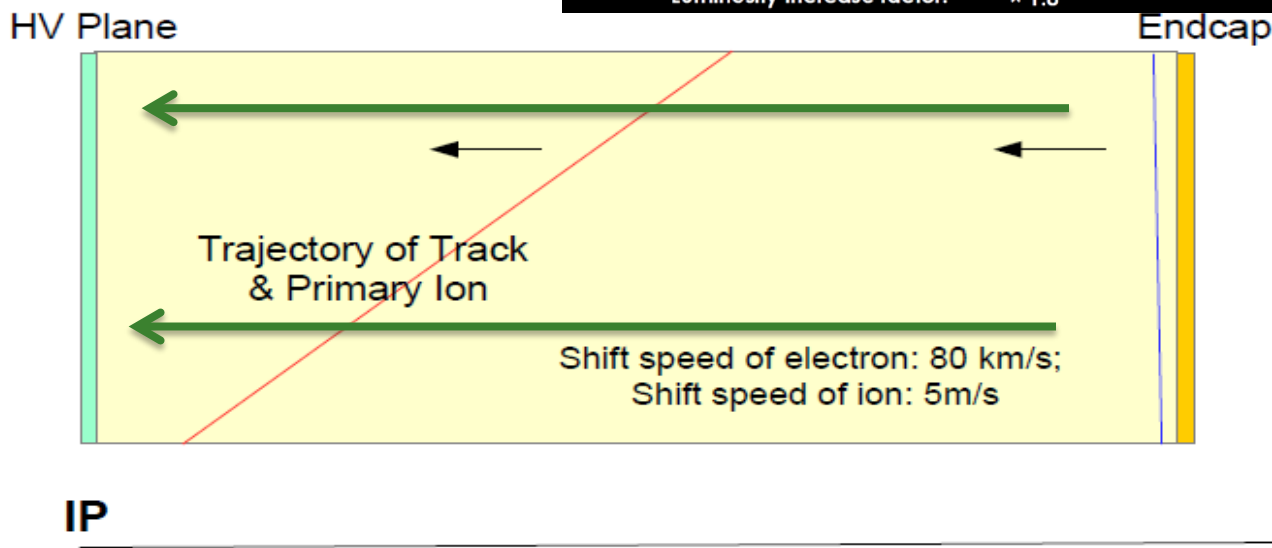
- 高亮度下Z pole，正离子反馈物理需求 ( $IBF \cdot Gain \leq 1$ )
- 激光径迹对于模块边框、时间等因素的修正 ( $\leq 10\mu m$ )
- 低功耗读出前端电子学 ( $< 5mW/ch$ )

部分物理要求高于ALICE TPC(已建)  
STAR TPC (已建)，ILC TPC (在研)

**Updated Parameters of Collider Ring since CDR**

|                                                  | Higgs               |                     | Z (2T)      |         |
|--------------------------------------------------|---------------------|---------------------|-------------|---------|
|                                                  | CDR                 | Updated             | CDR         | Updated |
| Beam energy (GeV)                                | 120                 | -                   | 45.5        | -       |
| Synchrotron radiation loss/turn (GeV)            | 1.73                | 1.68                | 0.036       | -       |
| Piwiński angle                                   | 2.58                | 3.78                | 23.8        | 33      |
| Number of particles/bunch $N_b$ ( $10^{14}$ )    | 15.0                | 17                  | 8.0         | 15      |
| Bunch number (bunch spacing)                     | 242 (0.68 $\mu s$ ) | 218 (0.68 $\mu s$ ) | 12000       | 15000   |
| Beam current (mA)                                | 17.4                | 17.8                | 461.0       | 1081.4  |
| Synchrotron radiation power /beam (MW)           | 30                  | -                   | 16.5        | 38.6    |
| Cell number/cavity                               | 2                   | -                   | 2           | 1       |
| $\beta$ function at IP $\beta_x^*/\beta_y^*$ (m) | 0.36/0.0015         | 0.33/0.001          | 0.2/0.001   | -       |
| Emittance $\epsilon_x/\epsilon_y$ (nm)           | 1.21/0.0031         | 0.89/0.0018         | 0.18/0.0016 | -       |
| Beam size at IP $\sigma_x/\sigma_y$ ( $\mu m$ )  | 20.9/0.068          | 17.1/0.042          | 6.0/0.04    | -       |
| Bunch length $\sigma_z$ (mm)                     | 3.26                | 3.93                | 8.5         | 11.8    |
| Lifetime (hour)                                  | 0.67                | 0.22                | 2.1         | 1.8     |
| Luminosity/IP L ( $10^{34} cm^{-2} s^{-1}$ )     | 2.93                | 5.2                 | 32.1        | 101.6   |

Luminosity increase factor:  $\times 1.8$   $\times 3.2$



# CEPC TPC探测器模拟研究进展

本年度取得的结果:

发表文章两篇

DOI: 10.1142/S0217751X19400165, International Journal of Modern Physics A 2 (2019,SCI)

DOI: 10.1142/S0217751X20410146, International Journal of Modern Physics A 2 (2020,SCI)

国际及国内会议报告

进展讨论报告4次

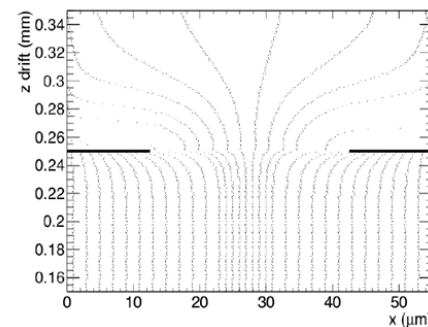
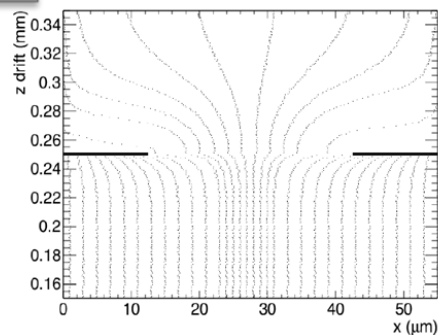
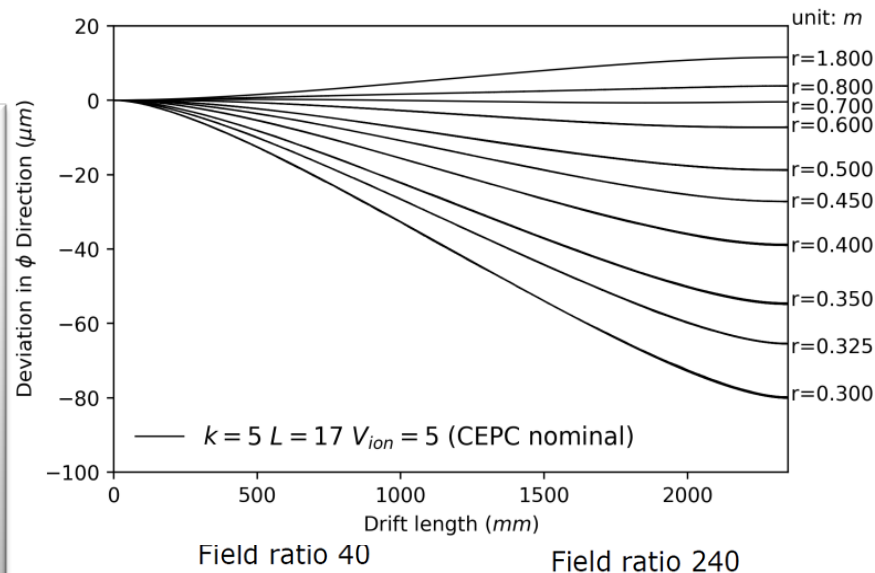
NIKEHF读出模块合作

TPC读出模块模拟目标:

- 面向更高亮度的Z运行指标, 实现探测器工作同时的正离子反馈抑制控制

TPC读出模块研制需求:

- 模拟研究结果评估满足于高计数率的物理探测需求 (Z pole run),  $IBF \times Gain < 5$  是基本的物理需求
- 与法国Scalay合作研制采用420LPI标准网和508LPI高密网, IBF等性能比较测试
- 有效探测器面积:  $200\text{mm} \times 200\text{mm}$
- 模拟考虑低增益、低正离子反馈、像素型读出的TPC模块



| Ion backflow          | Hole 30 $\mu\text{m}$ | Hole 25 $\mu\text{m}$ | Hole 20 $\mu\text{m}$ |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Top grid              | 2.2%                  | 1.2%                  | 0.7%                  |
| GridPix               | 5.5%                  | 2.8%                  | 1.7%                  |
| Total (IBF)           | $12 \times 10^{-4}$   | $3 \times 10^{-4}$    | $1 \times 10^{-4}$    |
| Electron transparency | 100%                  | 99.4%                 | 91.7%                 |

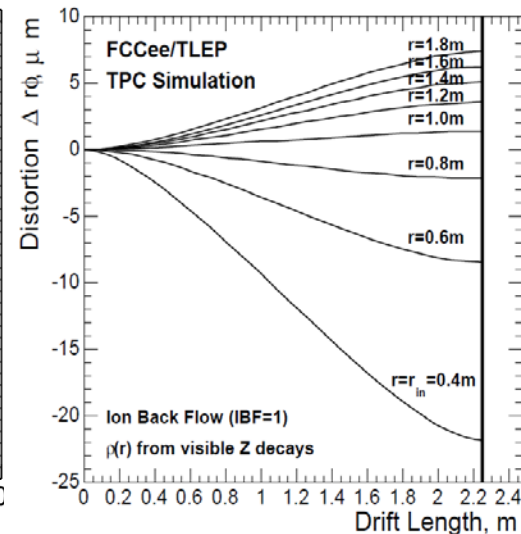
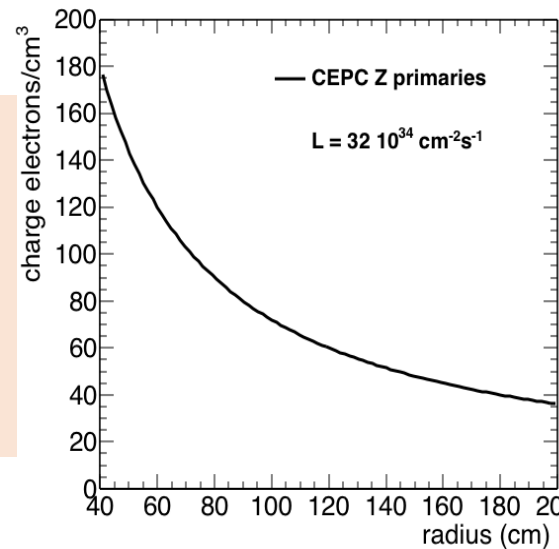
正离子反馈模块  $IBF \times Gain$

# 高亮度Z下的TPC正离子反馈评估

- Rough estimations at  $L = 35 \cdot 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  indicate primary ionisation at a ILC250 level  
 $\Rightarrow < 5 \text{ } \mu\text{m}$  distortions (This equals  $8 \text{ } \mu\text{m}$  with  $\text{IBF} = 1$ ) See [Arai Daisuke](#)
- Simulation from CEPC TPC with  $\text{Gain} \times \text{IBF} = 1$  and  $L = 32 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$   
 $\Rightarrow < 16 \text{ } \mu\text{m}$  distortions ( $\text{Gain} \times \text{IBF} = 1$  and  $L = 32 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) from [Huirong Qi](#)  
 $\Rightarrow < 46 \text{ } \mu\text{m}$  distortions ( $\text{Gain} \times \text{IBF} = 1$  and  $L = 101 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) from [Huirong Qi](#)
- FCCee/TLEP studies at  $\text{Gain} \times \text{IBF} = 1$  and  $16.8 \text{ kHz}$  hadronic Zs by [Philippe Schwemling](#)  
 $\Rightarrow < 22 \text{ } \mu\text{m}$  distortions

## Rough estimation of primary ionisation

- $10 \text{ kHz}$  Z event rate
- $500 \text{ ms}$  will accumulate 5000 Z events
- $2_0$  tracks / Z event and  $10\,000 \text{ e}^-$  / track will make  $10^8$  ions in volume
- Volume is  $\sim 4 \cdot 10^7$  resulting in  $25 \text{ e}^-/\text{cm}^3$
- Similar to ILC250 accumulated charge



国际会议: RD51 and TPC 2020

# 正离子抑制探测器模块研制（5年来）

## ❑ GEM-MM 读出模块研究

- ❑ 读出模块研究及自主模块研制
- ❑ 读出面积到200mm200mm
- ❑ UV光、X光机及55Fe放射源
- ❑ Bulk工艺与法国Saclay合作研制，更高目数微网
  - ❑ Standard Mesh: 400LPI
  - ❑ High mesh: 508 LPI
- ❑ 探测器倍增区高度：100-128 $\mu$ m
- ❑ 优化传输区高度1.25mm
- ❑ 优化高压配比
- ❑ 漂移区长度测量:2~200mm
- ❑ 长时间打火率测量
- ❑ UV紫外光电转换高电流下，电荷效应研究
- ❑ 高精度皮安计测量: Keithley 6517B
- ❑ 正离子反馈与增益实验结果:  
 $IBF \times Gain = 1 @ 2000$

DOI: 10.1088/1748-0221/12/04/P0401 JINST, 2017.4

DOI: 10.1088/1674-1137/41/5/056003, CPC, 2016.11

DOI: 10.7498/aps.66.072901 Acta Phys. Sin. 2017,7

DOI: 10.1142/S2010194518601217 (SCI) 2018

DOI: 10.1088/1748-0221/13/04/T04008 (SCI) 2018

DOI: 10.1007/978-981-13-1316-5\_20 (SCI) 2018

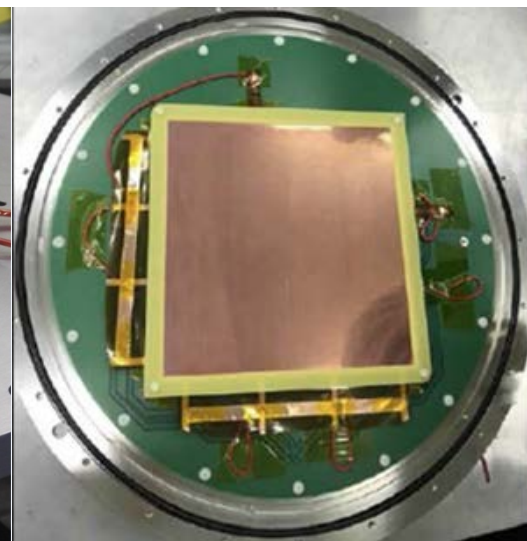
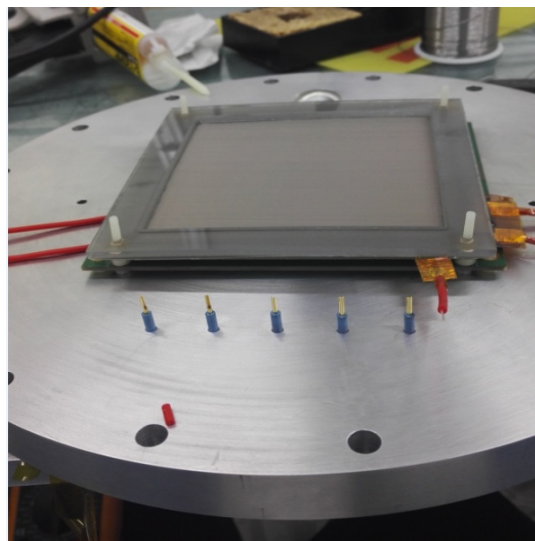
$50 \times 50 \text{mm}^2$   
2015-2016



$100 \times 100 \text{mm}^2$   
2017-2018



$200 \times 200 \text{mm}^2$   
2019-2020



GEM-MM 探测器模块实物图

# 正离子反馈实验进展

取得的结果:

发表文章两篇

DOI: 10.1088/1748-0221/13/04/T0400

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.36.03.273

LCTPC国际及国内合作

进展讨论报告5次

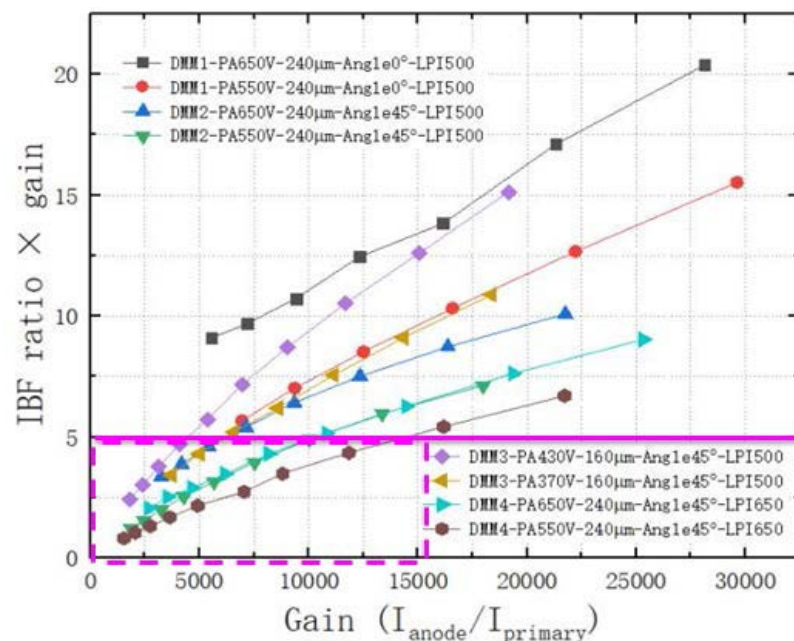
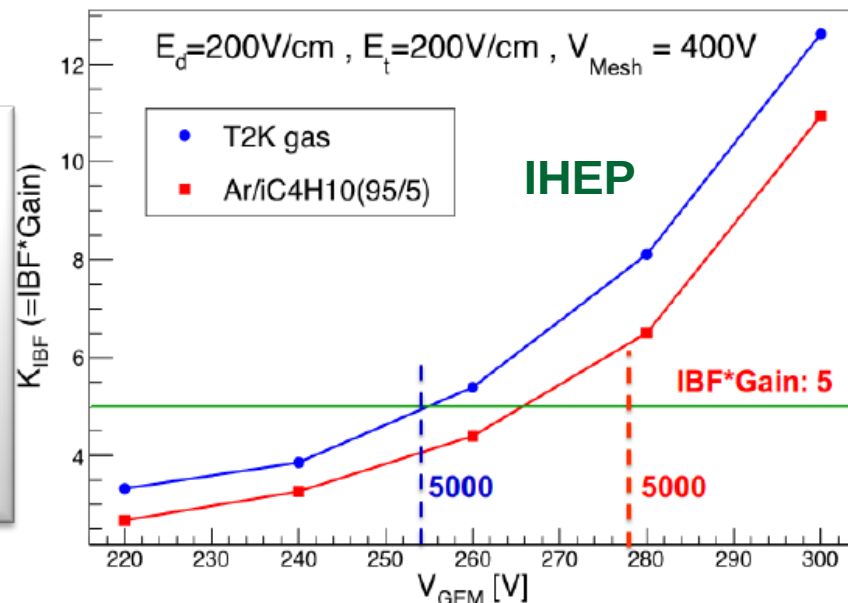
开始低增益、低IBF的模块研究

研究目的:

- 解决在环形对撞模式CEPC内无法使用快速开关门清除正离子的问题
- 实现连续的正离子反馈连续抑制以及读出模块的研制, 研究空间电荷效应影响

主要难点和解决的问题: (已完成)

- 模拟研究结果评估满足于高计数率的物理探测需求 (Z pole run),  $IBF \times Gain = 1$  是基本的物理需求
- 通过两种不同工作气体测量, 确认了空间电荷效应对于IBF值的影响
- 与ALICE、科大的结果进行比对、确认



# 正离子反馈实验电荷效应

## 研究目的和难点:

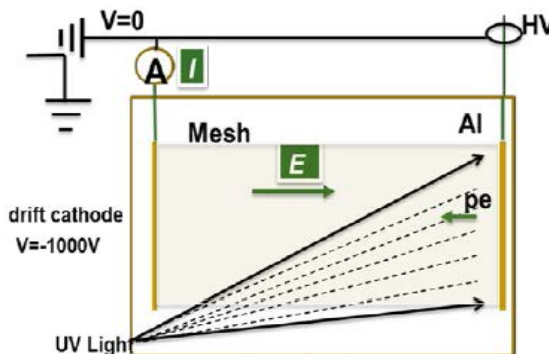
- 解决探测器增益的范围确定
- 难点:全探测面积内产生大动态范围原初电子
  - X射线源, X光机, 束流均无法产生

## 研究结论:

- Higgs run: 增益5000-6000
- Z run: 增益<2000

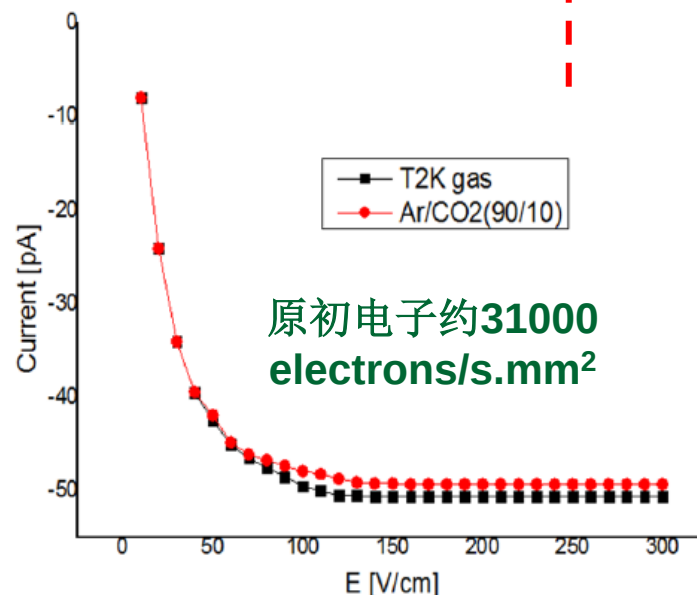
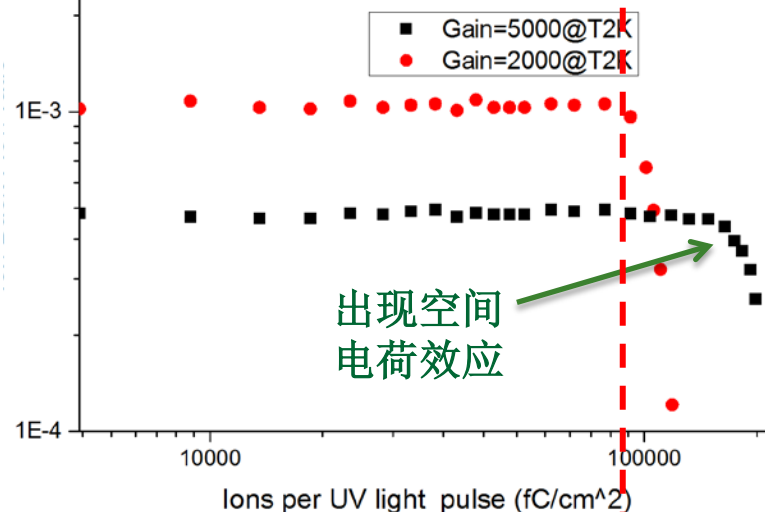


实验装置图



原理图

## 扩展ALICE TPC研究



MESH收集光电流随电压变化关系

# 激光标定TPC原型机研究

取得的结果:

发表文章4篇

DOI:10.1088/1748-0221/15/09/C09065

DOI: 10.1142/S0217751X20410146

DOI: 10.1088/1748-221/15/02/T02001

DOI: 10.7498/aps.68.20181613

发明专利

开始光路分光镜发明专利申请  
(祁辉荣, 张建, 原之洋)

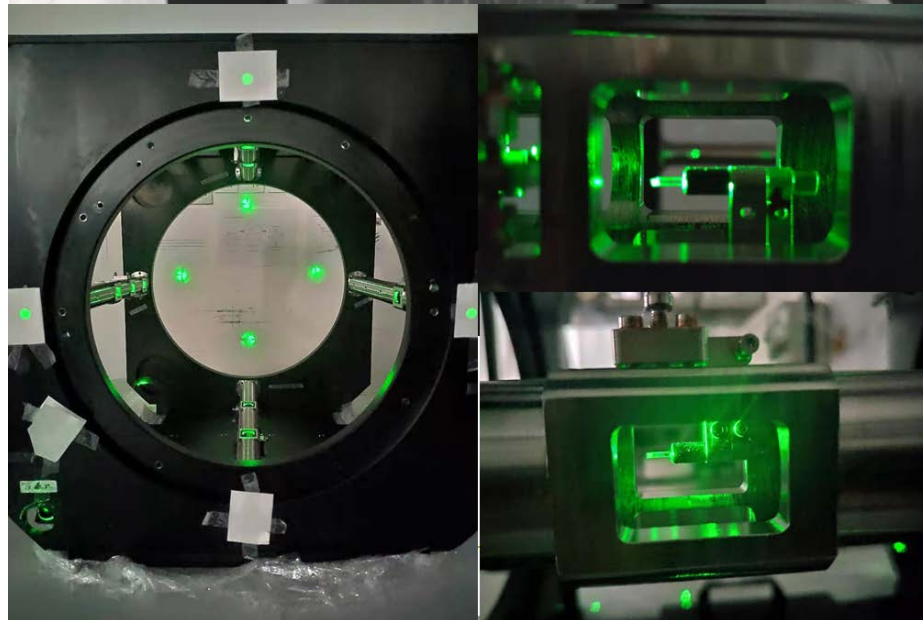
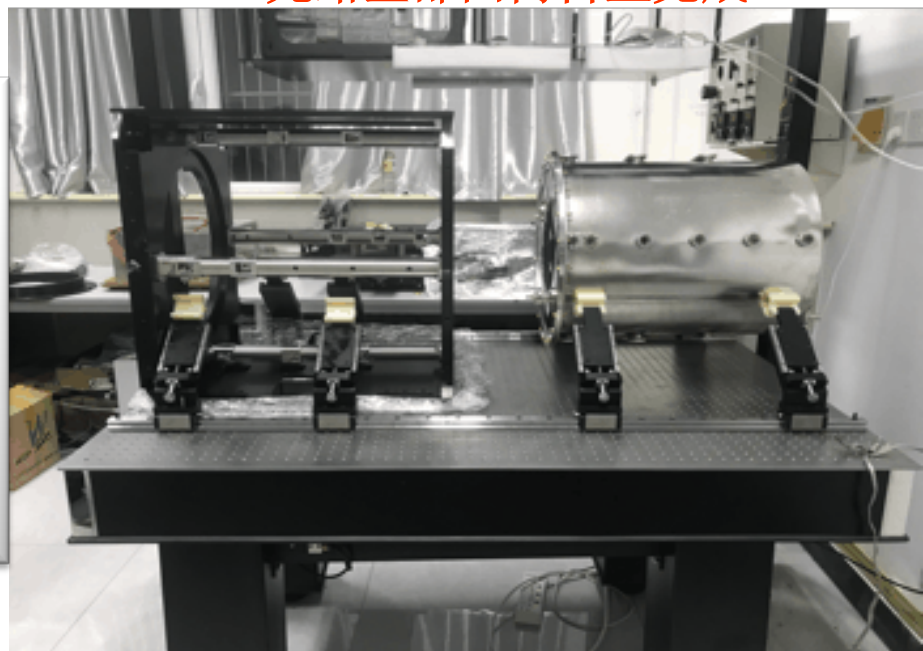
研究目的:

- 研究激光实现100 $\mu\text{m}$  (位置分辨率) 的径迹刻度及漂移速度的标定
- 实现紫外激光电离能力量化研究
- 实现激光和UV在探测器中的标定方案

主要难点和解决的问题: (已完成)

- 拆装优化设计: 20分钟拆装, 精度10 $\mu\text{m}$
- 完成Q-smart激光器的主要性能评估和测量, 信号与读出性能, 1280路读出
- 完成实验探测器模块的安装及实验测量

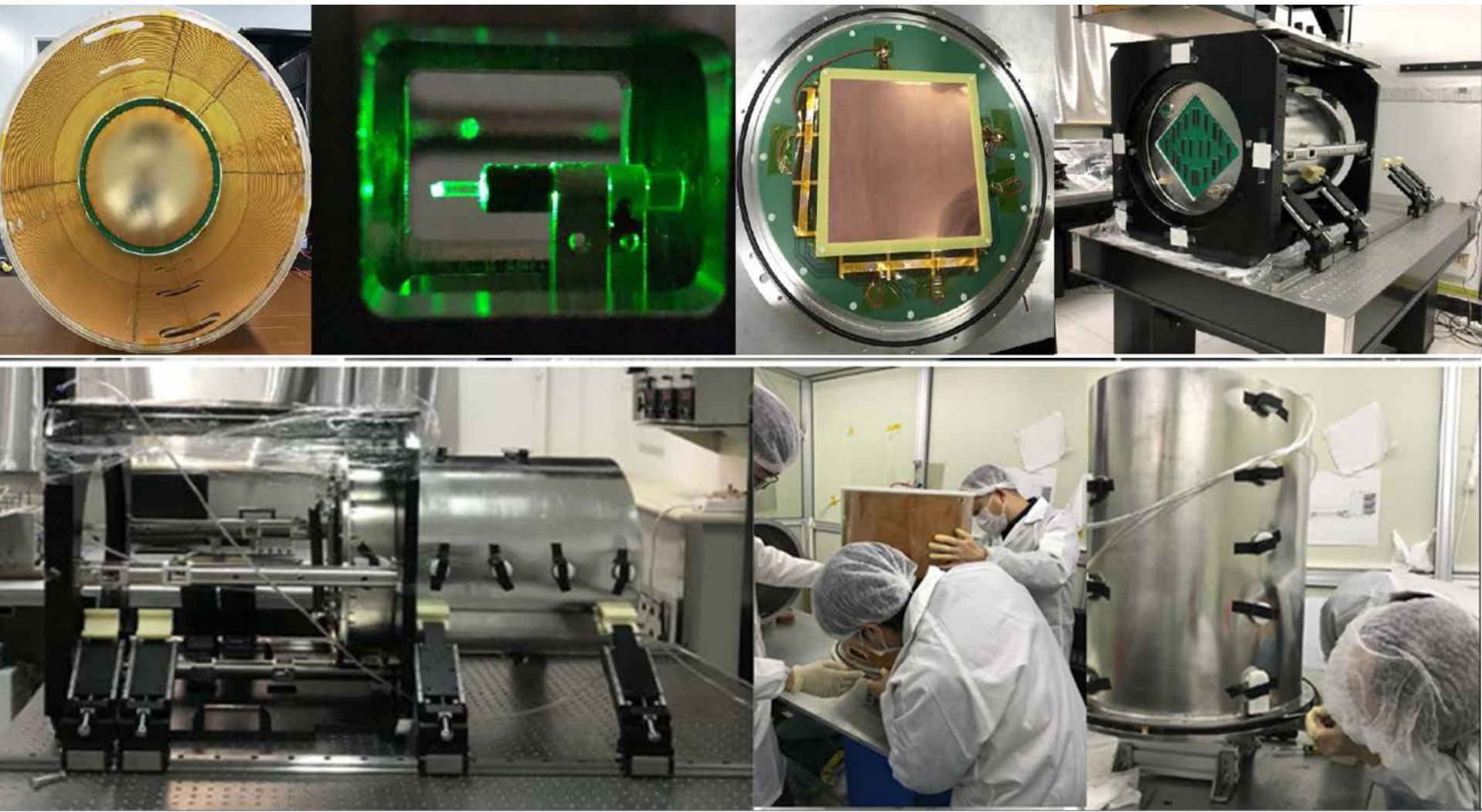
光路全部国内自主完成



探测器示意图与探测器实物图 - 9 -

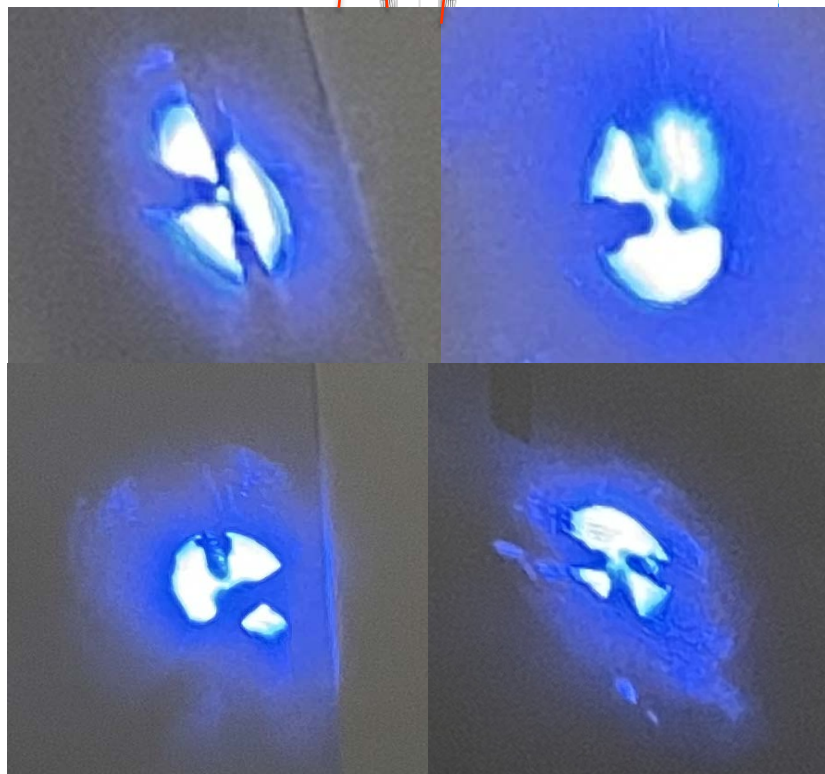
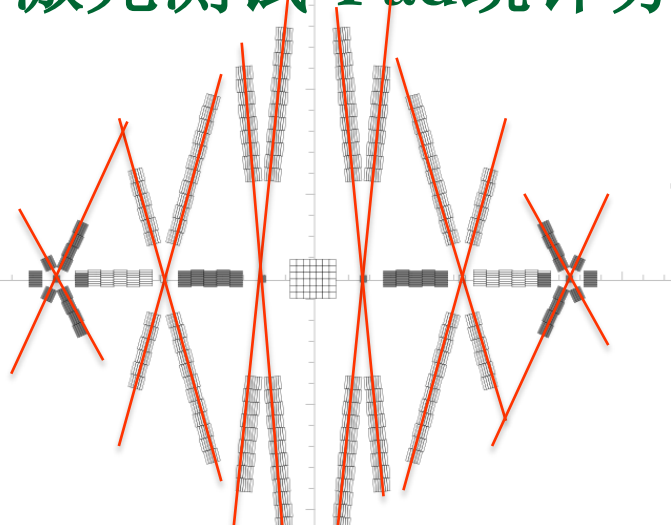
# 2020年以来的研究进展

- 解决万伏高压：完成**20000V**的高压优化，解决放电问题，实现磁场环境中**20kV**高压的顺利加载（采用贴片**0621**）
- 解决高精度对位：完成探测器气密优化，选择最优的**O**圈；完成电场优化，探测器平面电场平整化优化（**<10um**）

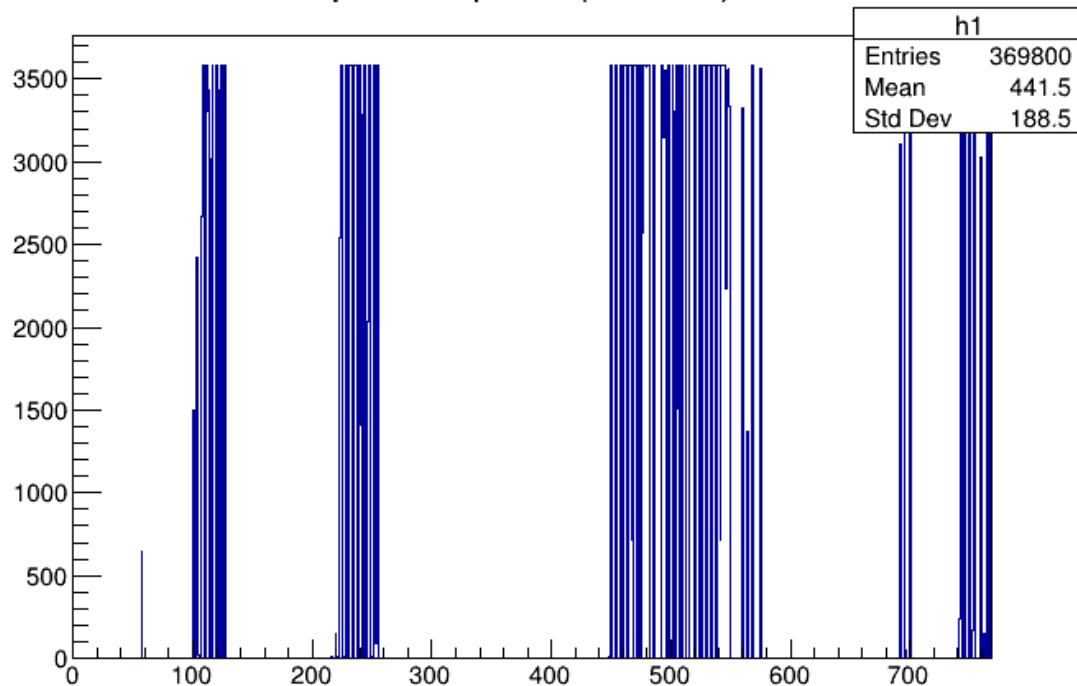


# 激光测试-Pad统计分布（有trigger）

成功验证自主激光设计方案  
成功的采集到沿光路设计的激光信号

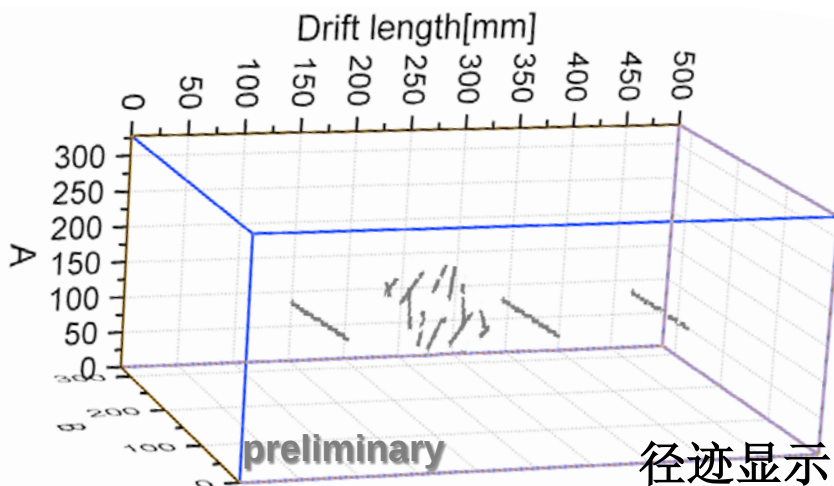
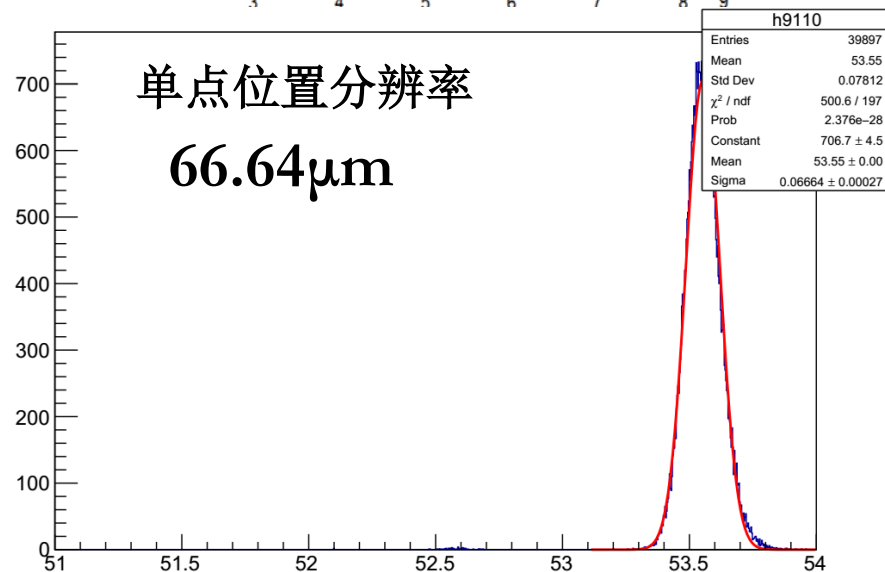
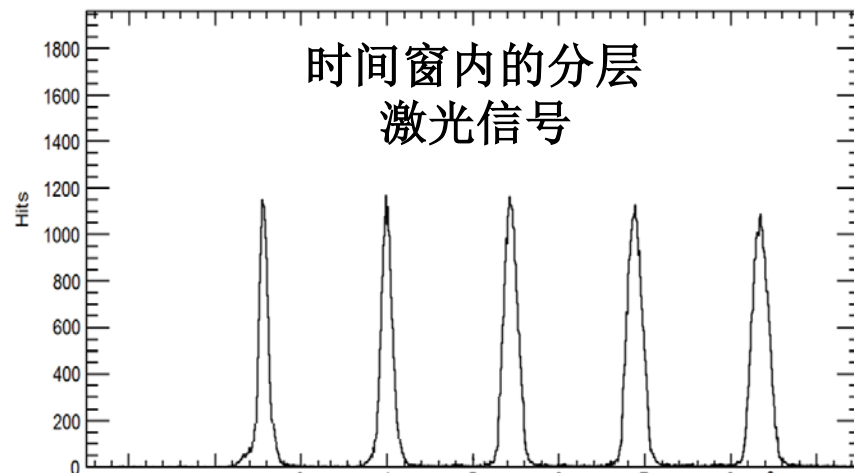
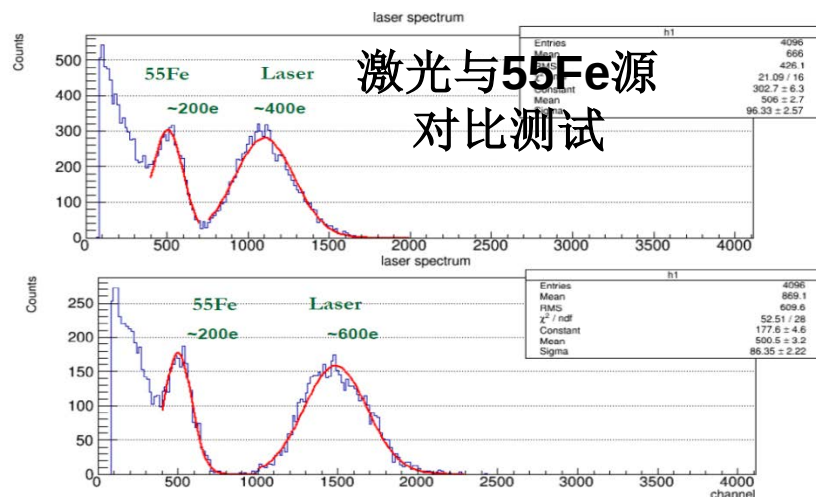


pad Response(channel)



180s (20Hz) 各通道触发统计

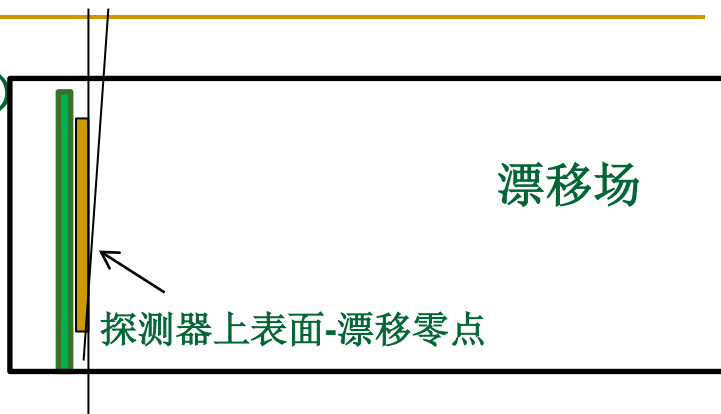
# 测试结果及文章撰写



- 实现不同气体增益测试对比，为高压优化做好实验准备
- 实现激光能谱测试，优化选择激光能量
- 实现相邻条测试统计，确认读出条设计优化结果
- 实现单点位置分辨率测试，达到66.64μm

原型机设计良好  
性能测试  
撰写文章4篇

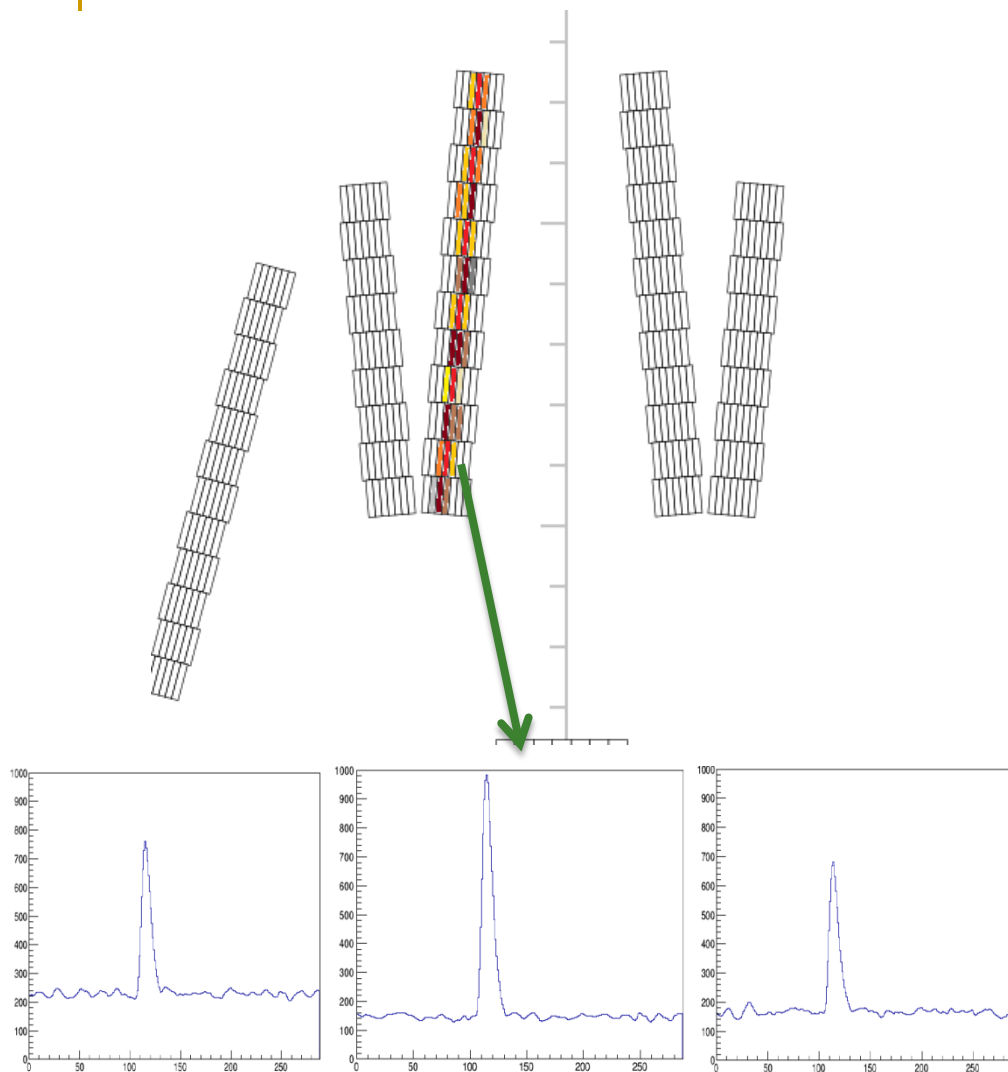
# 探测器模块安装标定研究（初步）



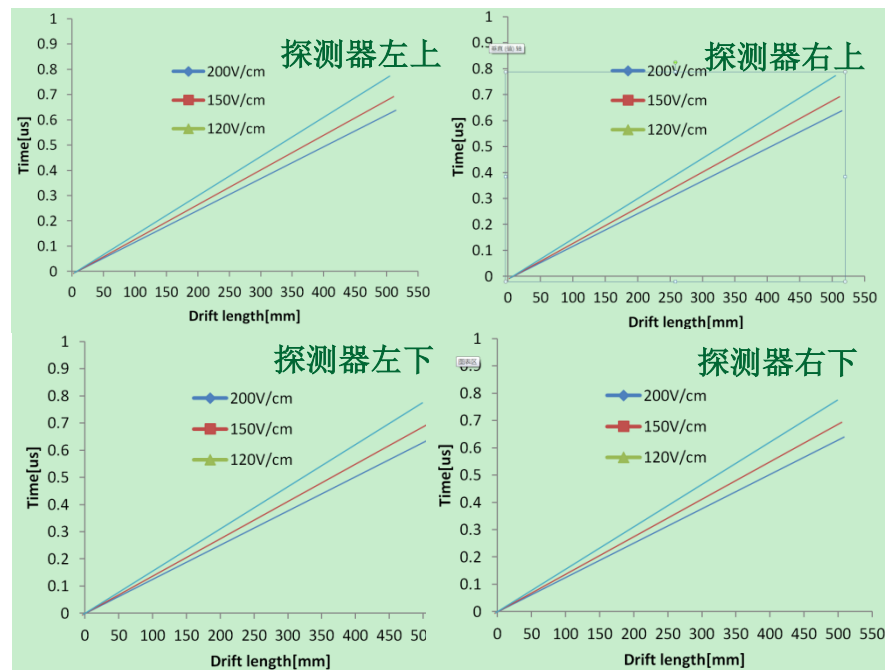
模块标定的激光方法：

探测器表面竖直安装偏移量 $1.23 \pm 0.12\text{mm}$

三种不同电场的漂移速度共同交点为探测器表面的漂移零点



激光径迹测量结果及相邻Pad分布



# 紫外激光电离性能测试研究及结果

研究目的:

- 研究266nm激光与工作气体的量化电离指标 (STAR/ALICE TPC均没有该指标)
- 为工作气体做好实验依据

主要难点和解决的问题: 已完成)

- 三种工作气体, 不同厂家, 不同批次, 不同时间

T2K

P10

Ar/CO<sub>2</sub>=90/10

- 气体纯度

Ar (99.999%)

CO<sub>2</sub> (99.999%)

CH<sub>4</sub> (99.999%)

CF<sub>4</sub> (99.999%)

Isobutane (99.9%)

- 电离结果

~100 e/cm@~1uJ/mm<sup>2</sup>

本年度取得的结果:

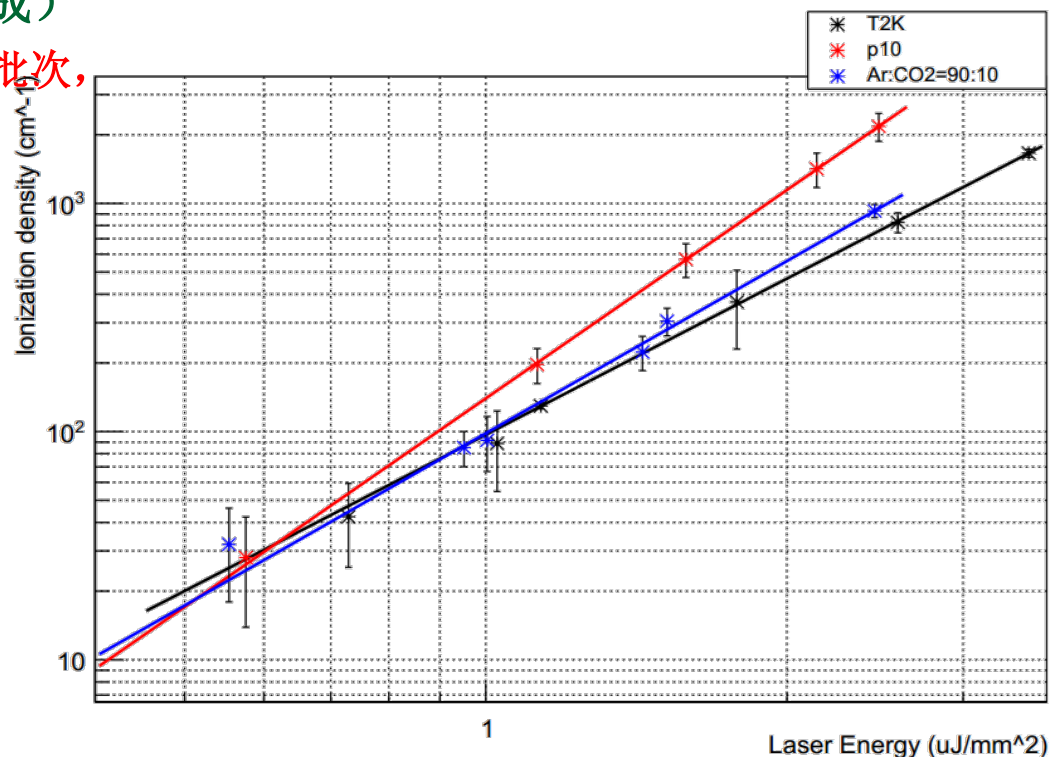
发表SCI文章一篇JINST

DOI: 10.1088/1748-221/15/02/T02001

LCTPC国际合作组

进展讨论报告6次

该数据作为激光测试工作气体选择指标



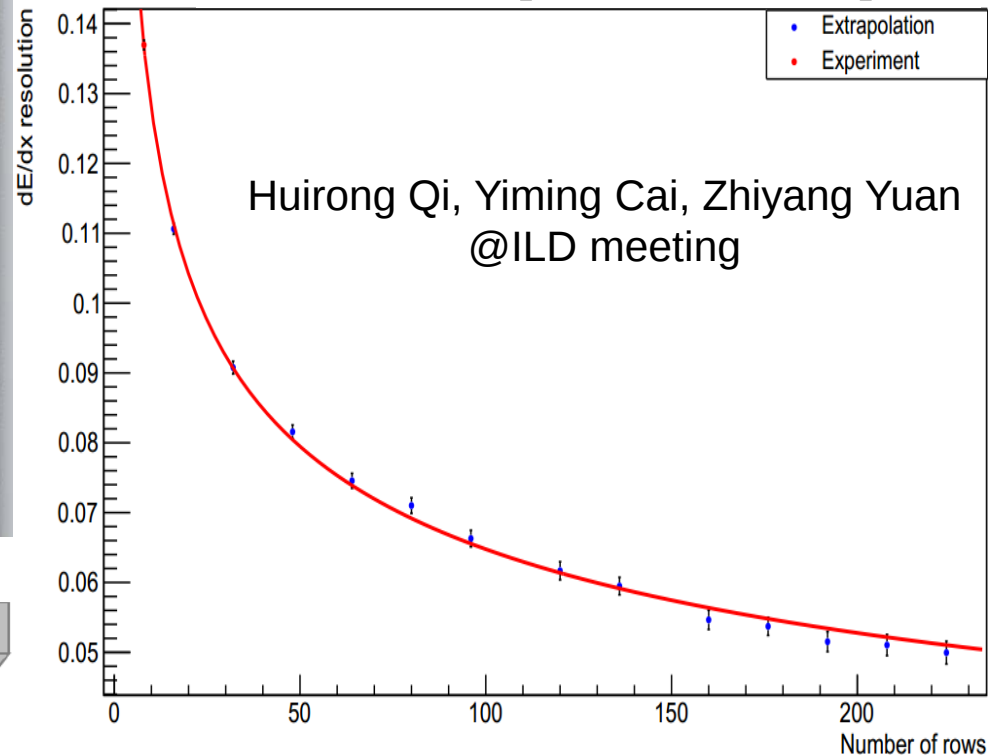
电离测试结果

# 紫外激光dE/dx研究

ILD-TPC is  $4.70 \pm 0.02\%$  ( $4.61 \pm 0.02\%$ )

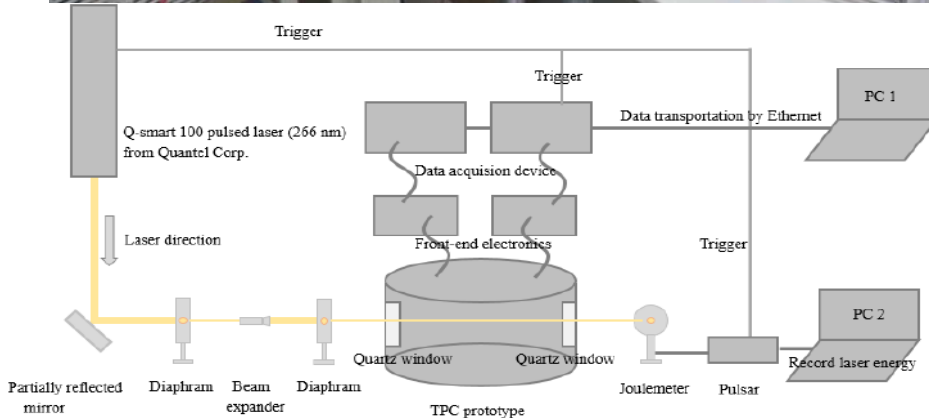
DESY and KEK

2.7% resolution is within prospects of PixelTPC [arXiv:1902.01987]



Experimental study result using laser and expanded to CEPC TPC

4.81% by UV laser



激光电离测试的dE/dx (除宇宙线, 放射源, 束流外的新方法)  
将在2021年2月的RD51 mini-workshop报告

# 激光测试性能的对比

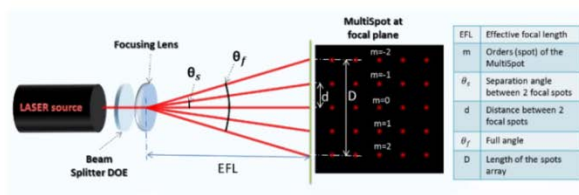
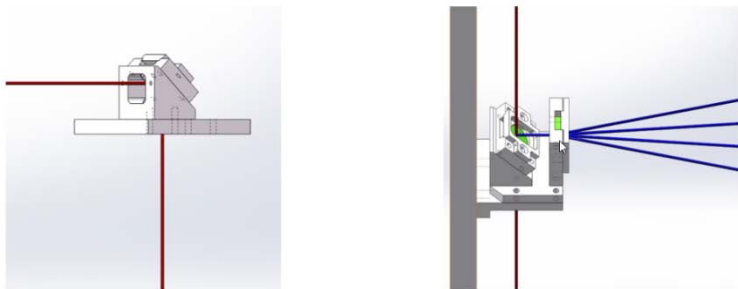
## 结论：

径迹探测器模块及原型机研制阶段，266nm紫外激光对于其物理性能测试，具有良好的优势。

|               | 能 量  | 分辨率      | 径 迹       | 重复性                   | 取束实验 | 评价     |
|---------------|------|----------|-----------|-----------------------|------|--------|
| 266nm紫<br>外激光 | 线性可调 | 可测量      | 可定制<br>设计 | 非常好                   | 可集成  | 😊😊😊😊😊😊 |
| 电子束流          | 固定可调 | 统计测<br>量 | 位置受限      | 束流宽，宽<br>度内随机<br>(mm) | 不可集成 | 😊😊😊😊😊😊 |
| X放射源          | 不可调  | 非常好      | 不可测量      | 随机                    | 可集成  | 😊😊😊    |
| X光机           | 能量连续 | 可测量      | 不可测量      | 温度影响大，<br>锥形内随机       | 不可集成 | 😊😊     |

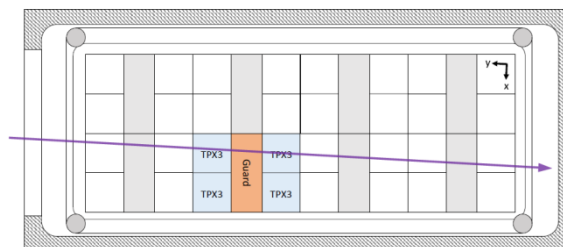
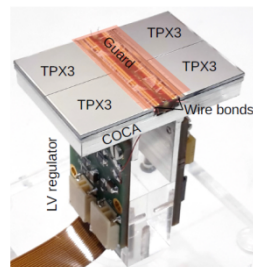
# 激光研究的合作拓展应用

## Experimental setup



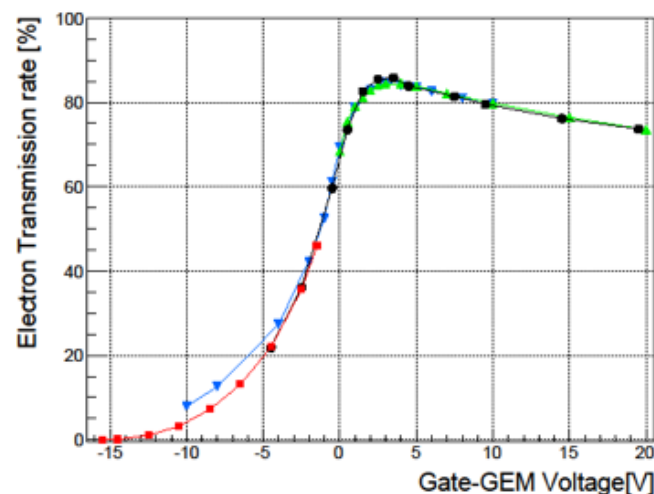
- 全反射镜、1/2反射镜
- 分束镜：1束激光入射，4束激光出射，光束夹角 $10^\circ$
- 高精度支架系统：绝缘材料加工，有微调功能
- 石英窗

近代物理研究所段利敏**CEE TPC**项目合作集成了四束激光分光标定系统（分光选择参数）



Ionisation in the gas volume is created using a pulsed  $N_2$  laser, directed in the gas volume by a remotely controlled stage  
One quad (4 chips) is read out

荷兰**NIKHEF Pixel TPC**项目合作激光激光测试（气体选择参数）



日本**KEK TPC**项目**Fujii**教授合作激光dE/dx测试（激光功率选择参数）

# TPC国际合作研究(Activities)

- ❑ 2016年签署MOA加入LCTPC国际合作组，参加实验和数据分析，例会报告和**贡献紫外激光与TPC的实验研究数据**
- ❑ 2020年加入ILD国际合作组，计划申请加入RD51国际合作组，**计划深度参与和贡献紫外激光dE/dx研究**
- ❑ 与日本KEK Fujii研究组和法国Saclay Paul研究组合作，参与束流测试与探测器模块研制
- ❑ 与荷兰NIKEHF Peter研究组合作，**激光小像素TPC及正离子反馈研究@高亮度Z**

## TPC R&D

Subcategory for groups working on R&D for TPC's or in general gas

June 2020

- 18 Jun LCTPC WP meeting #329

May 2020

- 28 May LCTPC WP meeting #328
- 14 May LCTPC WP meeting #327

April 2020

- 30 Apr LCTPC WP meeting #326
- 16 Apr LCTPC WP meeting #325
- 02 Apr LCTPC WP meeting #324

March 2020

- 25 Mar Charge spreading (protected)
- 19 Mar LCTPC WP meeting #323
- 11 Mar MM Beam test analysis meeting
- 05 Mar LCTPC WP meeting #322

February 2020

- 13 Feb LCTPC WP meeting #321

LCTPC Collaboration Meeting

13-15 January 2020  
DESY  
Europe/Zurich timezone

LCTPC合作会议

Overview  
Timetable  
Contribution List  
Registration  
Participant List

Contribution List

2 / 31

Huiron

2. CEPC  
Huirong Qi (Institute of High Ene...)  
13/01/2020, 17:10  
Session 2: General Report

17. Costing of laser system  
Huirong Qi (Institute of High Ene...)  
14/01/2020, 17:45  
Session 6: Costing

New consideration for lowest IBF at low gain

CEPC Pixel TPC with double mesh

荷兰NIKEHF TPC合作

Question: can one reduce the Ion Back Flow of a GridPix detector?

IHEP and Nikehf

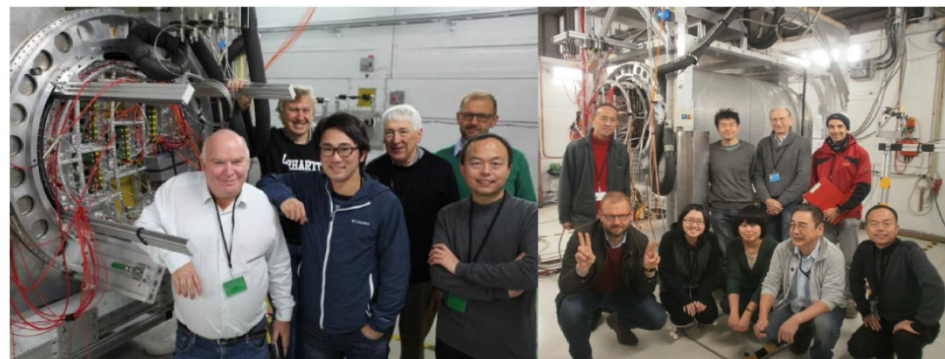
- Too design a GridPix detector using a double grid
- The idea is that by creating two field regions, one with a medium field with a high field (Standard Grid Pix) one could reduce the ion backflow stages.

## International cooperation



### LCTPC collaboration group (LCTPC)

- ❑ Signed MOA and joined in LC-TPC collaboration @Dec. 14, 2016
- ❑ As coordinator in ions test and the new module design work package
- ❑ CSC funding: PhD Haiyun joint CEA-Saclay TPC group(6 months)
- ❑ Joint beam test in DESY with Micromegas detector module in 2018



Beam test in 2018

Beam test in 2016

# 已发表文章和专利

## 2017年-2020年

### 合作指导：已毕业博士生3名

张余炼，温志文，王云海

### 通讯作者（SCI 12篇+SCIE 2篇）

DOI:10.1088/1748-0221/15/09/C09065 (SCI) 2020

DOI: 10.1142/S0217751X20410146, International Journal of Modern Physics A 2 (SCI) 2020

DOI: 10.1088/1748-221/15/02/T02001, JINST (SCI) 2020

DOI: 10.7498/aps.68.20181613 (SCI) 2019

DOI: 10.1142/S0217751X19400165 (SCI) 2019

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.36.03.273 (SCIE) 2019

DOI: 10.1142/S2010194518601217 (SCI) 2018

DOI: 10.1088/1748-0221/13/04/T04008 (SCI) 2018

DOI: 10.1007/978-981-13-1316-5\_20 (SCIE) 2018

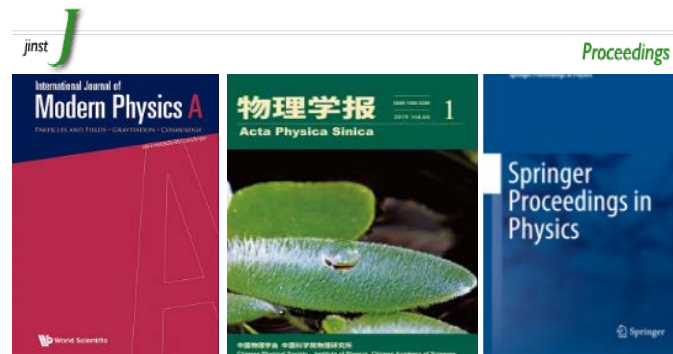
DOI: 10.7498/aps.67.20172618 (SCI) 2017

DOI: 10.7498/aps.66.142901 (SCI) 2017

DOI: 10.7498/aps.66.072901 (SCI) 2017

DOI: 10.1088/1748-0221/12/04/P0401 (SCI) 2017

## 授权发明专利一项 NO. 201711097601.9



证书号 第3427559号



## 发明专利证书

发明名称：密闭气体自驱动循环装置

发明人：祁辉荣；温志文；张建；欧阳群；陈元柏

专利号：ZL 2017 1 1097601.9

专利申请日：2017年11月09日

专利权人：中国科学院高能物理研究所

地址：100049 北京市石景山区玉泉路19号乙

授权公告日：2019年06月21日

授权公告号：CN 108050052 B

国家知识产权局依照中华人民共和国专利法进行审查，决定授予专利权，颁发发明专利证书并在专利登记簿上予以登记。专利权自授权公告之日起生效。专利权期限为二十年，自申请日起算。

专利证书记载专利权登记时的法律状况。专利权的转移、质押、无效、终止、恢复和专利权人的姓名或名称、国籍、地址变更等事项记载在专利登记簿上。



# 下一步工作计划

基于已有研制进展，继续相关研究工作如下：

- 继续深入开展复合结构GEM+Micromegas探测器实验测量研究
- 完成结合1280路电子学、266nm激光标定与TPC的原型机，实现漂移速度等参量的分析，参与ILD的国际合作KEK/DESY，落实 1.0 T测试，解决CEPC TPC关键技术问题
- 按照计划完成CEPC关键技术预研项目中的科技部重点研发任务
- 面向CEPC TPC部分的TDR研究工作，协调组织NIKHEF和LCTPC的国际合作，组织人力（研究生）和队伍（国内外合作组）深入开展研究项目
- 积极参与相关学术论文审稿（NIMA,JINST,RDTM）及研究生培养等社会活动

**谢谢各位专家老师！**