



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences



深紫外光应用于高精度TPC径迹探测器的实验研究

余信，祁辉荣，常悦，王建春，喻丽雯，张建，张锦闲，
伍灵慧，赵光，李刚，阮曼奇，邓智，李玉兰

中国科学院大学，中国科学院高能物理研究所，核探测与核电子学国家重点实验室，
南开大学物理科学学院，复旦大学，清华大学

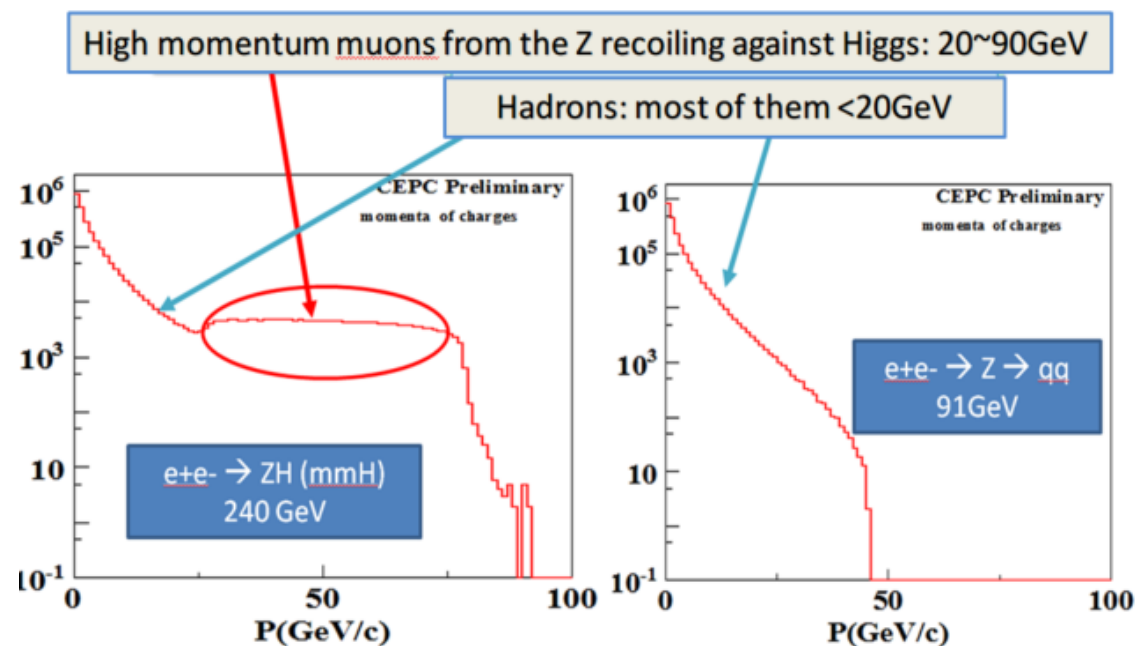
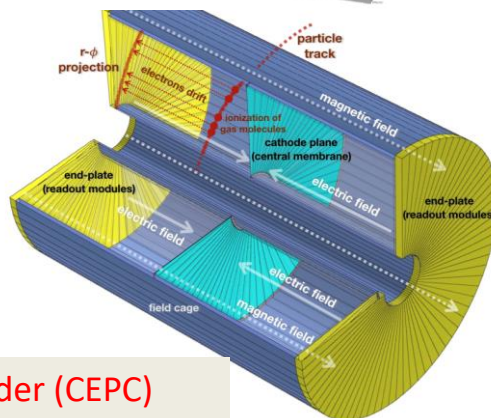
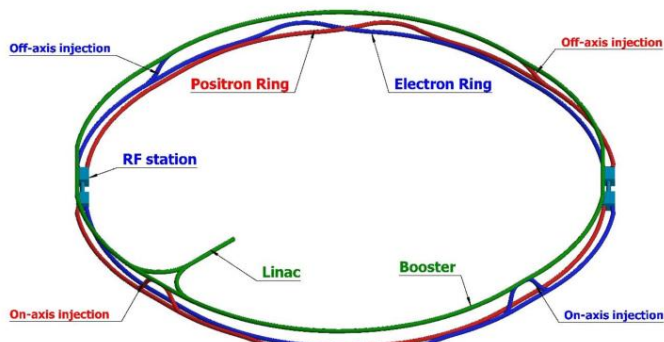
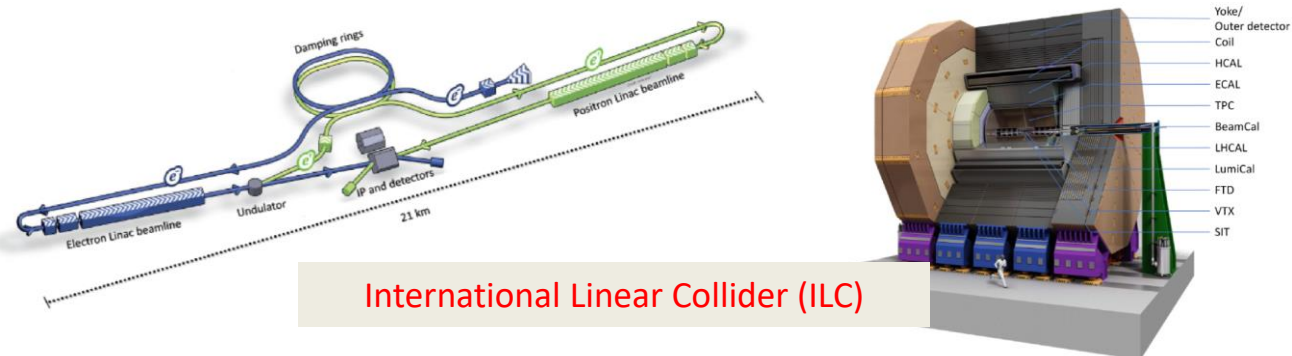
第21届全国核电子学与核探测技术学术年会
Aug 8-12 2023 湖北·恩施

报告内容

- 未来正负电子对撞机物理需求
- 深紫外光与气体径迹探测器的物理作用机制
- 深紫外光与气体径迹探测器实验研究
- 小结

未来正负电子对撞机物理需求

- 时间投影室TPC可提供与粒子流算法(PFA)兼容的高空间分辨率的测量点, 为未来多个对撞机实验的主径迹探测器备选方案
 - ILD和CEPC概念设计报告中都将TPC作为基准主径迹探测器,Higgs物理(3 Tesla),Z pole (2 Tesla)实现米级径迹探测
- 未来高能正负电子对撞机对径迹探测器的物理需求不断提高
 - 满足高亮度($10^{36}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)Z-pole模式下高精度味物理的物理需求



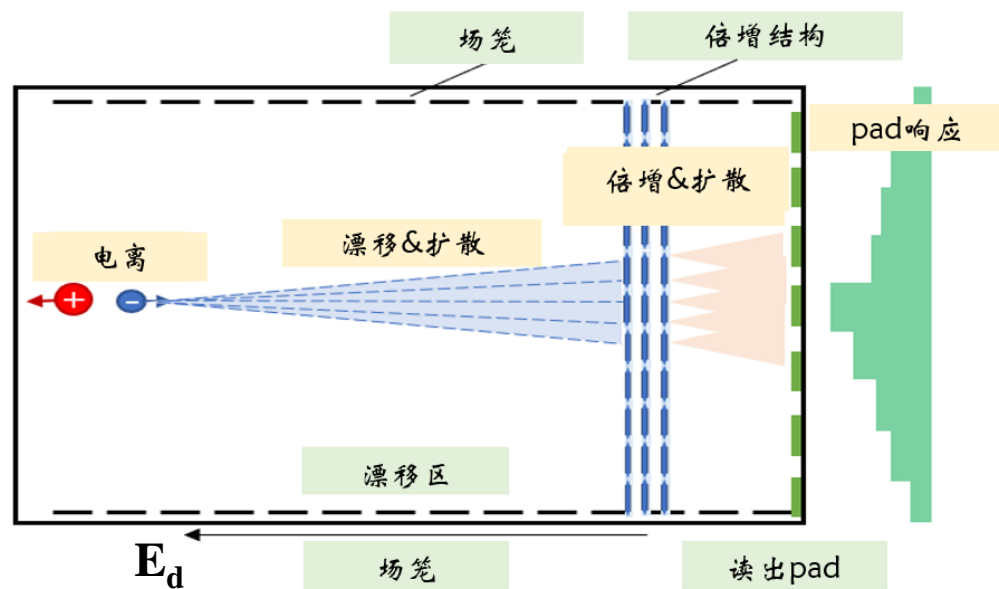
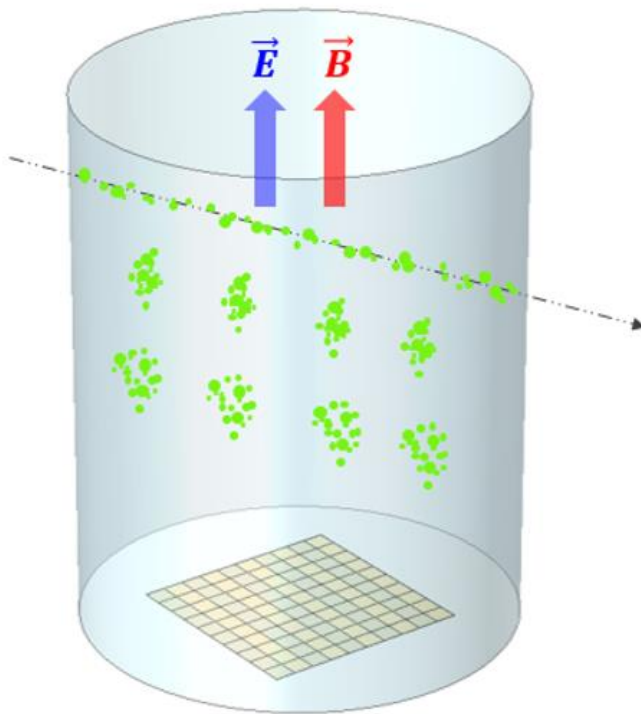
时间投影室(TPC)工作原理

时间投影室(TPC)是一种能同时测量带电粒子三维径迹的气体探测器

- 读出平面上电极位置坐标+收集的电荷量 Q 重建得到径迹在 X, Y 方向的坐标
- 由漂移时间 T_{drift} 重建径迹在 Z 方向的坐标 $Z = v_{drift}T$

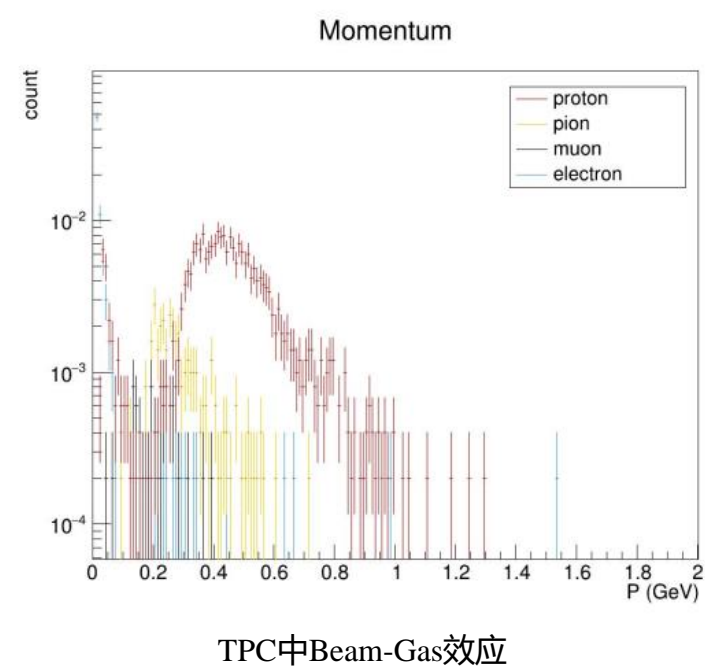
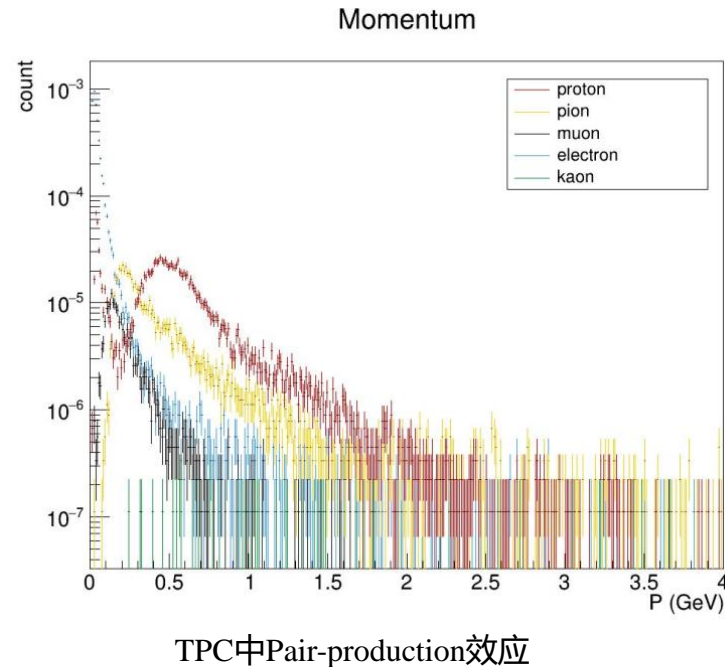
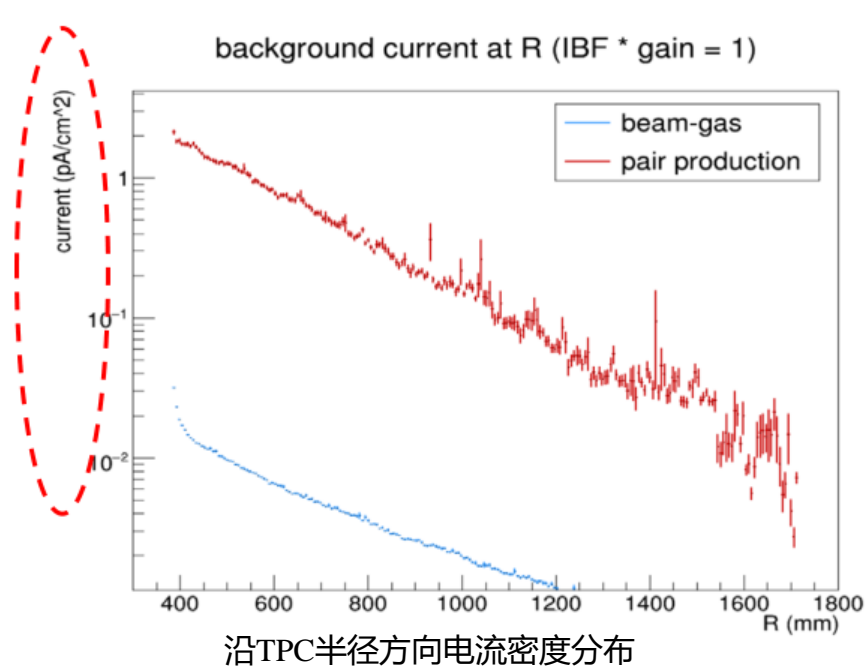
时间投影室(TPC)的优势

- 提供粒子径迹大量三维空间测量点(沿半径方向~220)
- 物质质量极低: $<1\% X_0$
- dE/dx 分辨: $<5\%$
- 位置分辨: $\sigma_{r\phi} \sim 100\mu m, \sigma_z \sim 500\mu m$
- 动量分辨: $\frac{\Delta p}{p} \sim 10^{-4} GeV^{-1}$ (TPC本身)
- 双径迹分辨能力: $\sim 2mm @ r\phi$
- 探测效率: $>97\% @ P_T > 1 GeV$
- 读出方式: pad型, pixel型



时间投影室关键研究问题

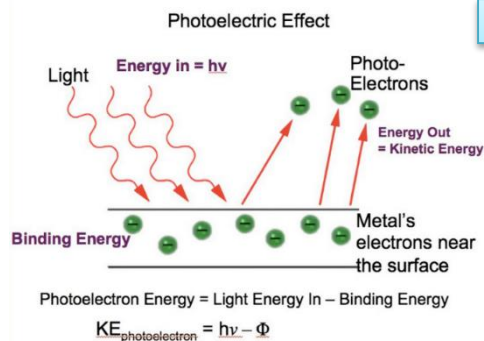
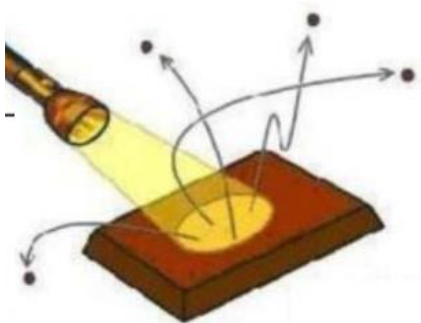
- 面向未来更高亮度的物理需求,TPC中**正离子反馈(IBF)**带来的**空间电荷效应**是目前关键的研究热点
 - 显著的径迹畸变,影响TPC空间位置分辨
 - 影响dE/dx测量和粒子鉴别(PID)
- 基于CEPC在高亮度Z-pole (2T) 下设计参数,模拟高对撞亮度下产生的原初电子数,探测器腔体中将会有大量的电子-离子对,沿TPC半径方向电流密度最大将达到**1pA/cm²**
 - IBF×Gain=1 @2T
 - Beam-gas效应和pair-production效应(占本底90%以上)需要深入研究



深紫外光与TPC探测器的物理作用机制

■ 紫外光子:光电效应($<10\mu\text{J}/\text{cm}^2$)

- 每个光子携带的能量: $E_\gamma = h\nu = hc/\lambda$, 每个电子只吸收一个紫外光子
- 能够产生稳定的光电电流

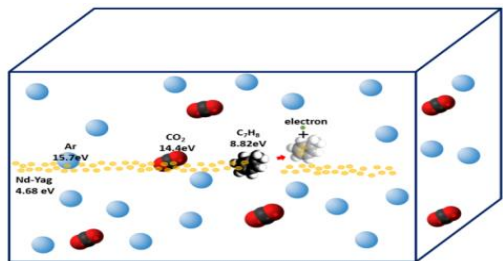


有效产生全面积, 足量且均匀原初电子

研究高对撞亮度下空间电荷效应带来的径迹畸变问题

■ 紫外激光:双光子电离($>10\mu\text{J}/\text{cm}^2$)

- 工作气体中的有机杂质分子同时吸收两个光子, 发生电离
- Nd-Yag激光波长: 4.66eV ($2 \times 4.66\text{eV}$)
- 模拟TPC中带电粒子径迹, 研究TPC性能



$$n_i(T) = \frac{1}{2} n_0 \sigma_e \sigma_i^* N^2 T^2$$

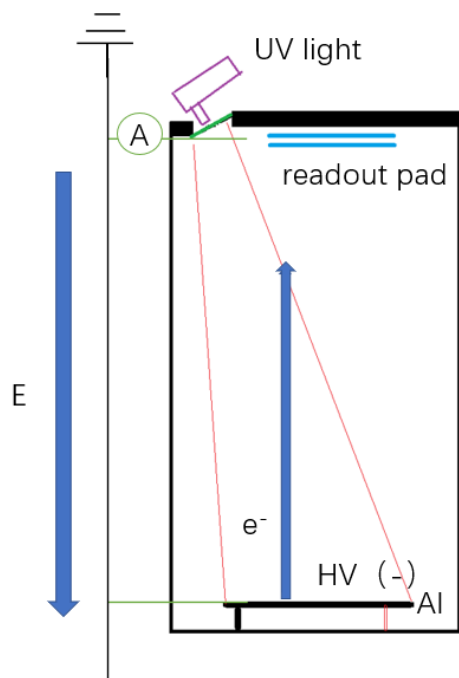
N是光子通量
 σ 为过渡横截面
n是电离密度
T是激光脉冲的宽度

集成深紫外激光径迹TPC原型机性能研究

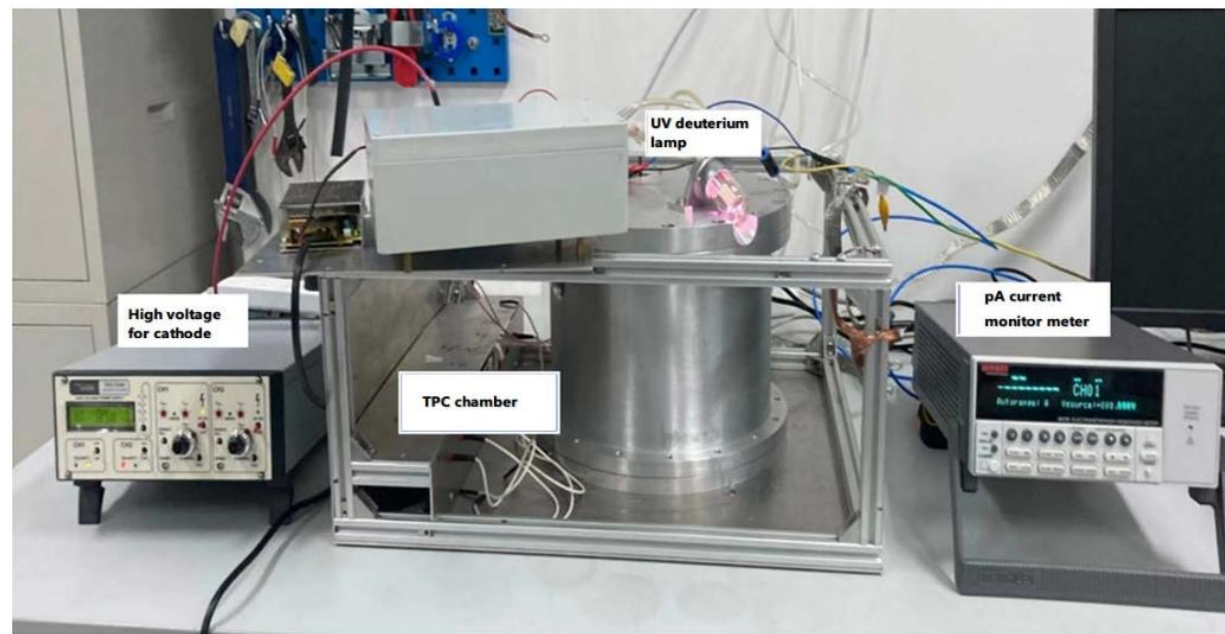
深紫外光电转换实验研究——方案设计

■ 通过对物理机制的深入研究，优化了探测器腔体设计，利用“紫外光电转换法”技术方案，在不影响工作气体的情况下，有效解决了产生和实验测量原初电子的稳定性问题

- 金属材料：表面平整光滑金属铝板,逸出功 $W_0=4.08\text{eV}$ (对应截止波长 251nm)
- 紫外氘灯发射波长范围 $200\text{nm}-400\text{nm}$,包含Al的截止波长,束状发射, 均匀覆盖整个Al板表面
- 高硬度不锈钢实验腔体, 通过O圈压力密封, 保证气密性



实验原理示意图

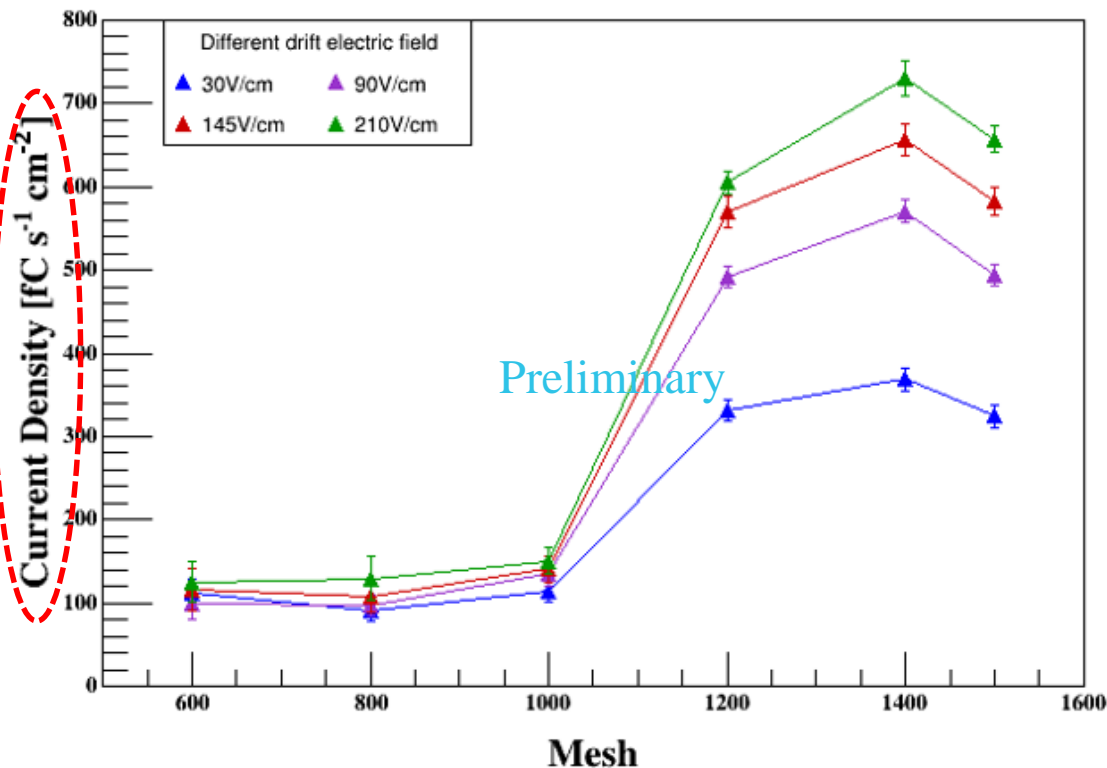


紫外光电转换实验系统搭建

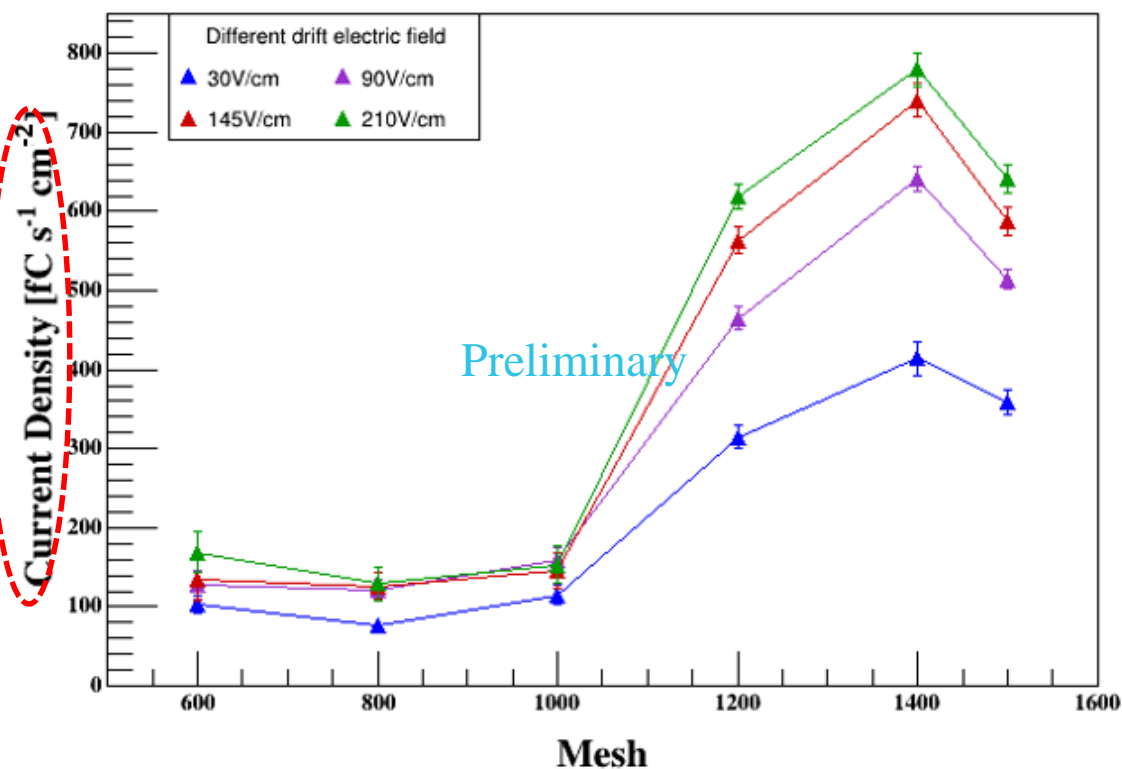
深紫外光电转换实验进展1——光电流测量

- 测试紫外氙灯照射金属Al板，**稳定重复实现了全面积，足量且均匀原初电子的产生和测量问题**
- 在两种不同的工作气体（Ar/CO₂=90/10,T2K）中测得类似的趋势，T2K气体中，Al板产生最高的电流密度为**780 fA cm⁻²**,与模拟结果相比较，**电流密度量级取得一致**

Ar:CO₂=90:10



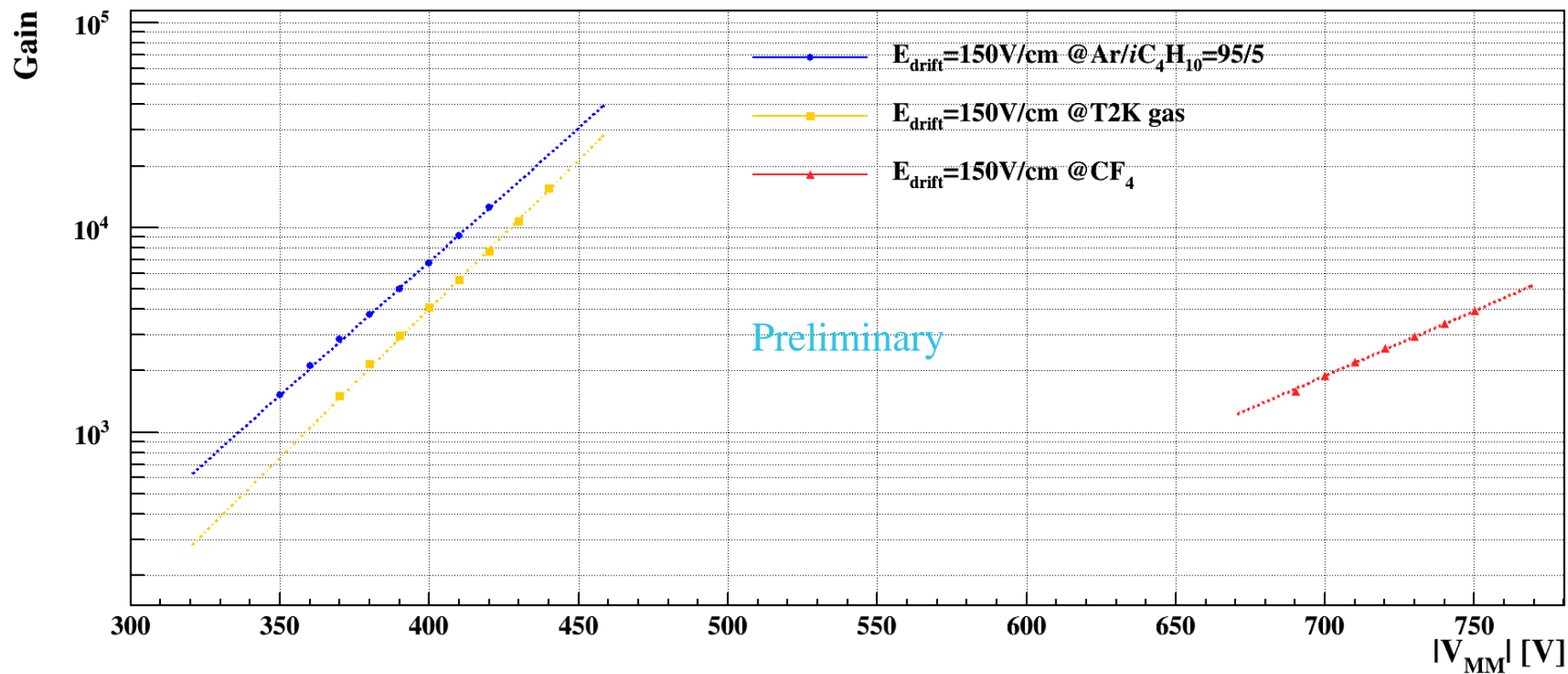
T2K



两种不同工作气体中测得的电流密度随金属目数变化结果

深紫外光电转换实验进展2——倍增电流测量

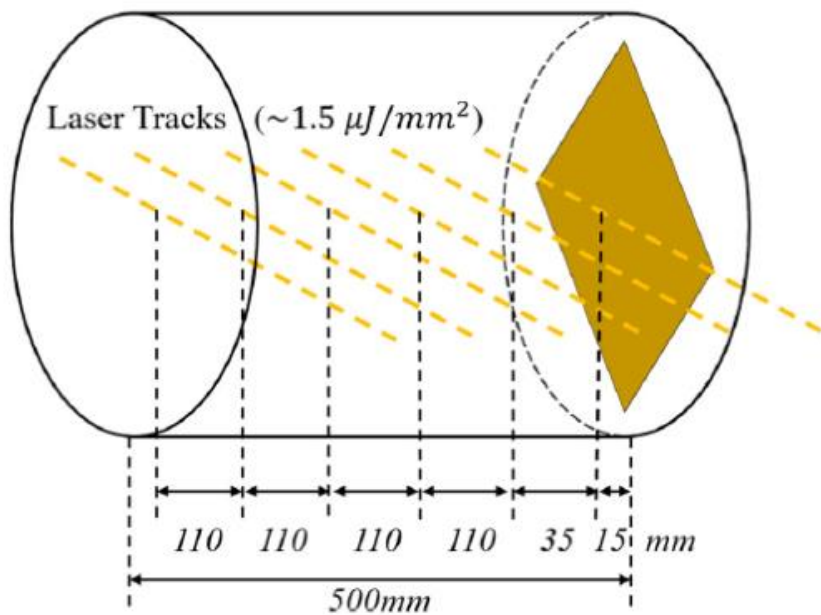
- 利用MicroMegas微结构气体探测器，实现对紫外光电转换产生的大量原初电子的倍增放大，**成功在三种不同工作气体中测得稳定的倍增电流和增益曲线**
- 为研究TPC在高亮度运行环境下读出模块**正离子反馈 (IBF)** 引起的**空间电荷效应**，**径迹畸变**等关键问题提供一种全新的实验方法



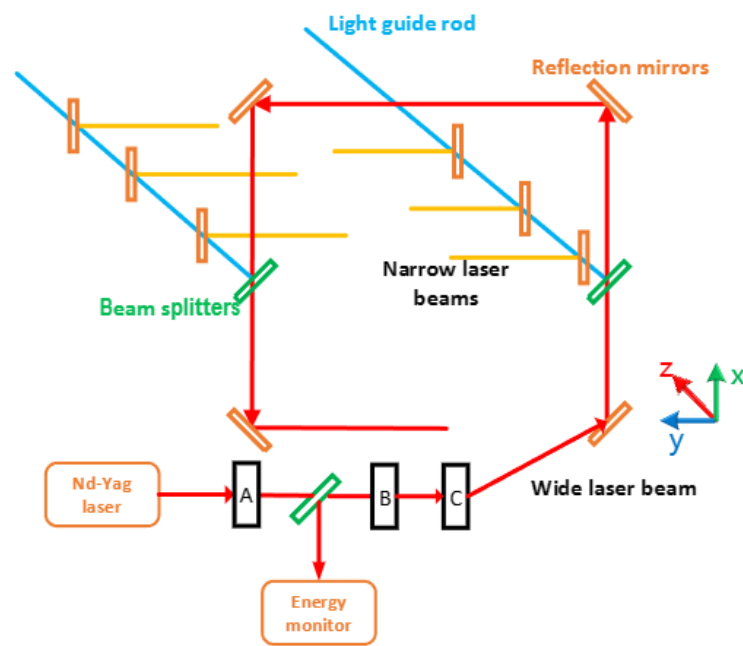
三种气体中MicroMegas的增益曲线测试结果

基于深紫外激光束双光子电离实验研究——激光TPC原型机设计

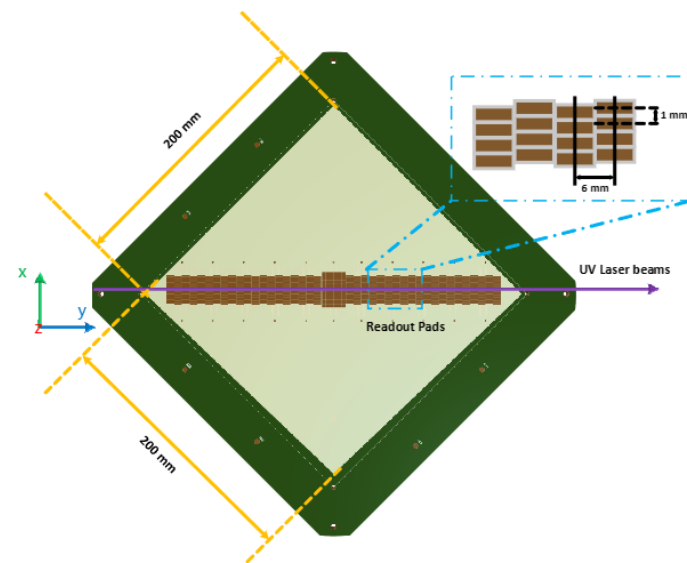
- 设计分光系统，将Nd-Yag激光器输出的宽束激光沿漂移方向分成6层窄束激光，同时射入TPC原型机腔体内部，工作气体T2K
- 窄束激光光斑直径0.8mm,能量密度约 $1.5\mu\text{J}/\text{mm}^2$
- 采用双层级联GEM探测器进行信号读出，有效面积 $200\text{mm}\times 200\text{mm}$ ，工作增益 ~ 3000 ，读出pad尺寸 $1\text{mm}\times 6\text{mm}$ ，沿激光径迹方向错位排布



沿TPC原型漂移方向激光径迹相对位置



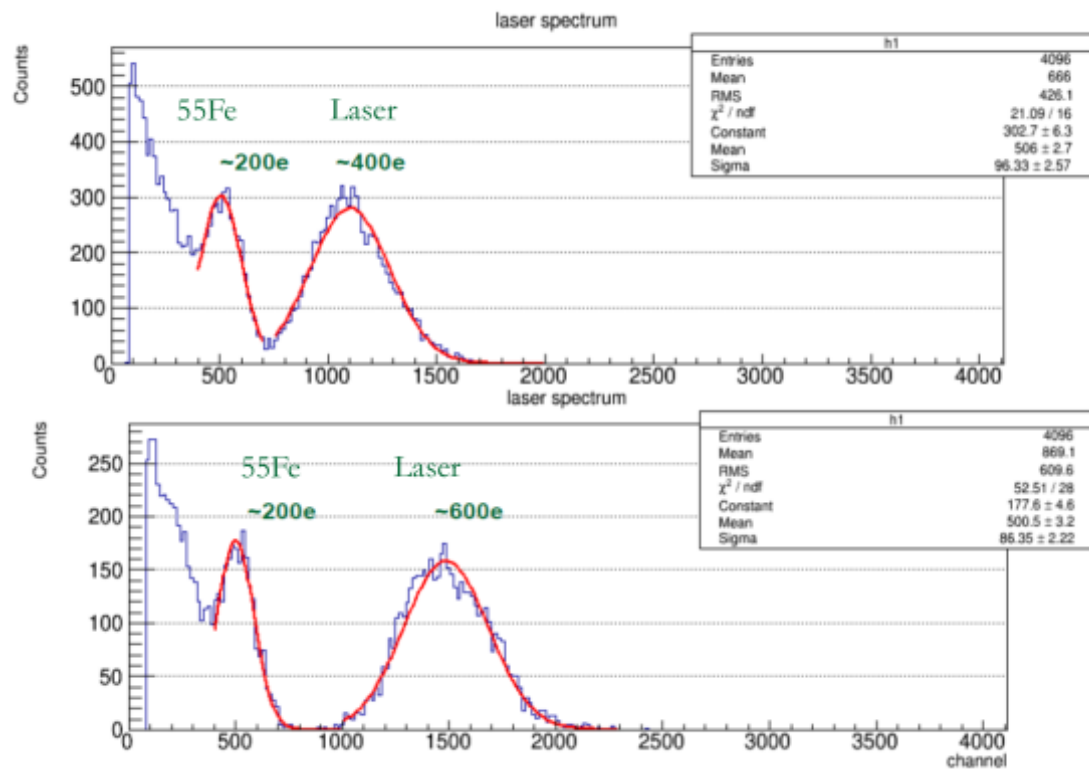
紫外激光分光系统设计示意图



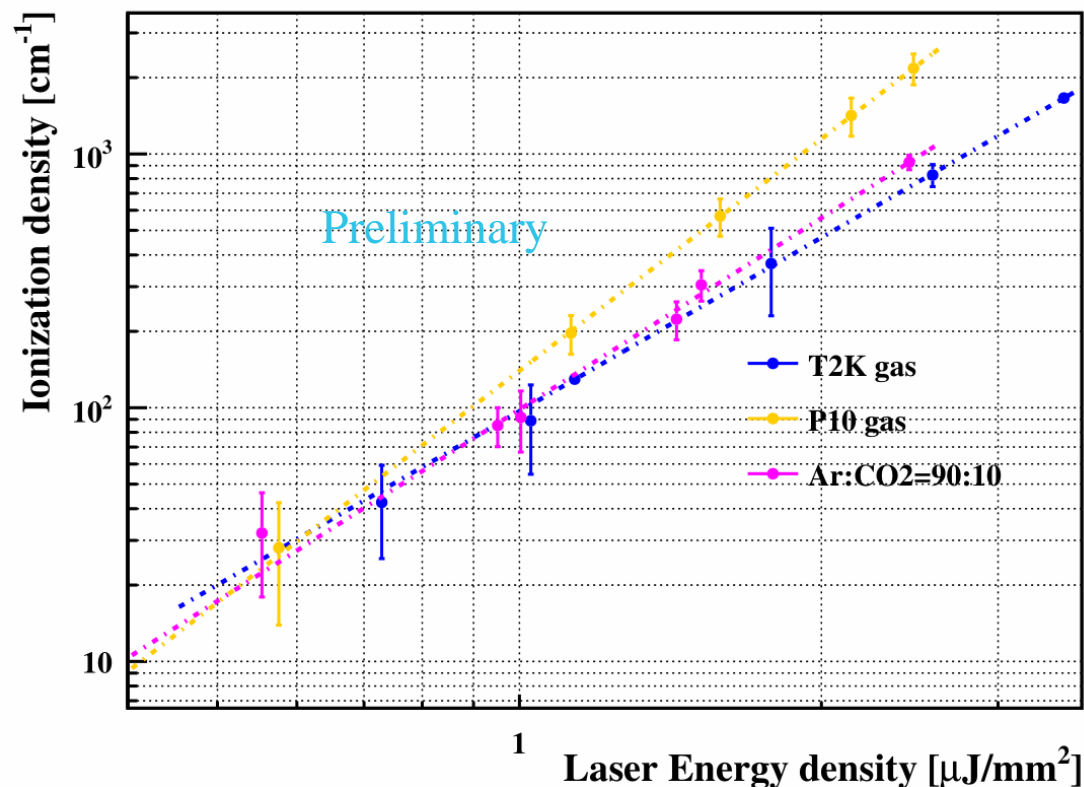
读出PCB板设计以及读出pad排布

深紫外激光束双光子电离实验进展1——电离能力测试

- 通过对比实验,完成 ^{55}Fe 与不同能量的激光电离信号的测量
- 在不同工作气体中(T2K,P10,Ar/CO₂=90/10),定量测得紫外激光电离能力与激光能量密度的关系
 - 通过优化激光能量密度,在氩基气体中激光每厘米可以产生100-200个原初电子,接近1~2个最小电离粒子(MIPs)
 - 与LCTPC等国际合作组工作气体对比,为深紫外激光应用于TPC研究提供了重要的气体及能量选择参考



不同能量激光电离能谱与 ^{55}Fe 能谱实验测试结果

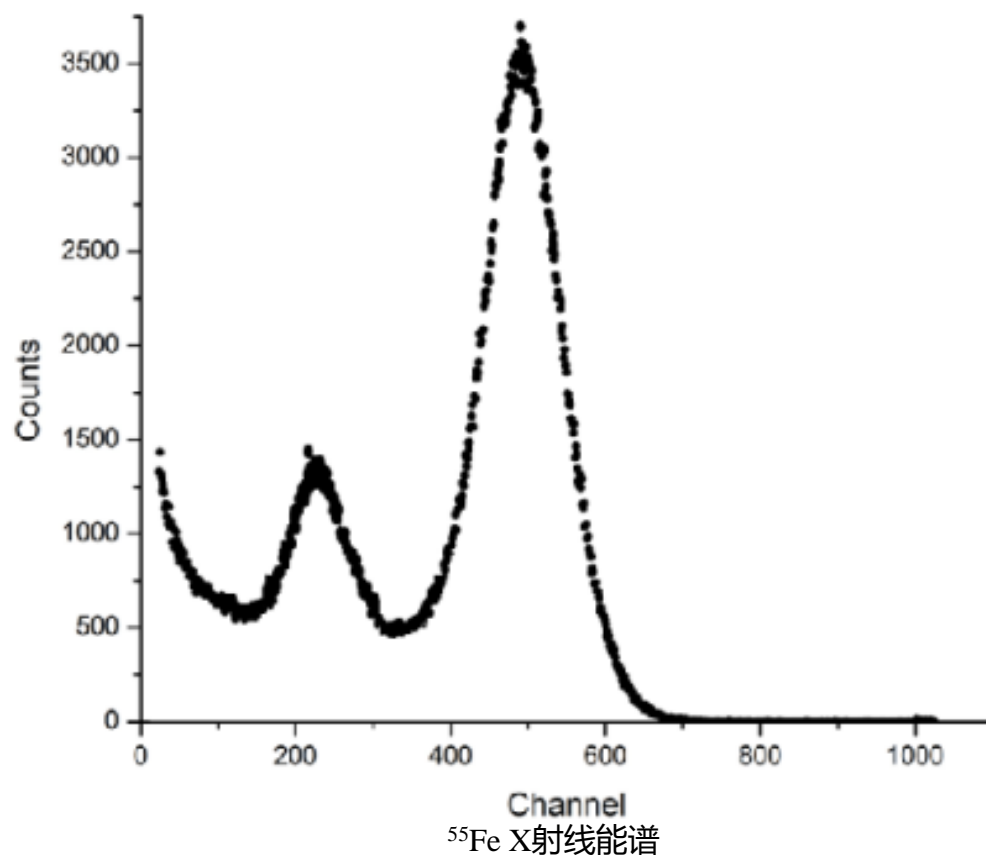
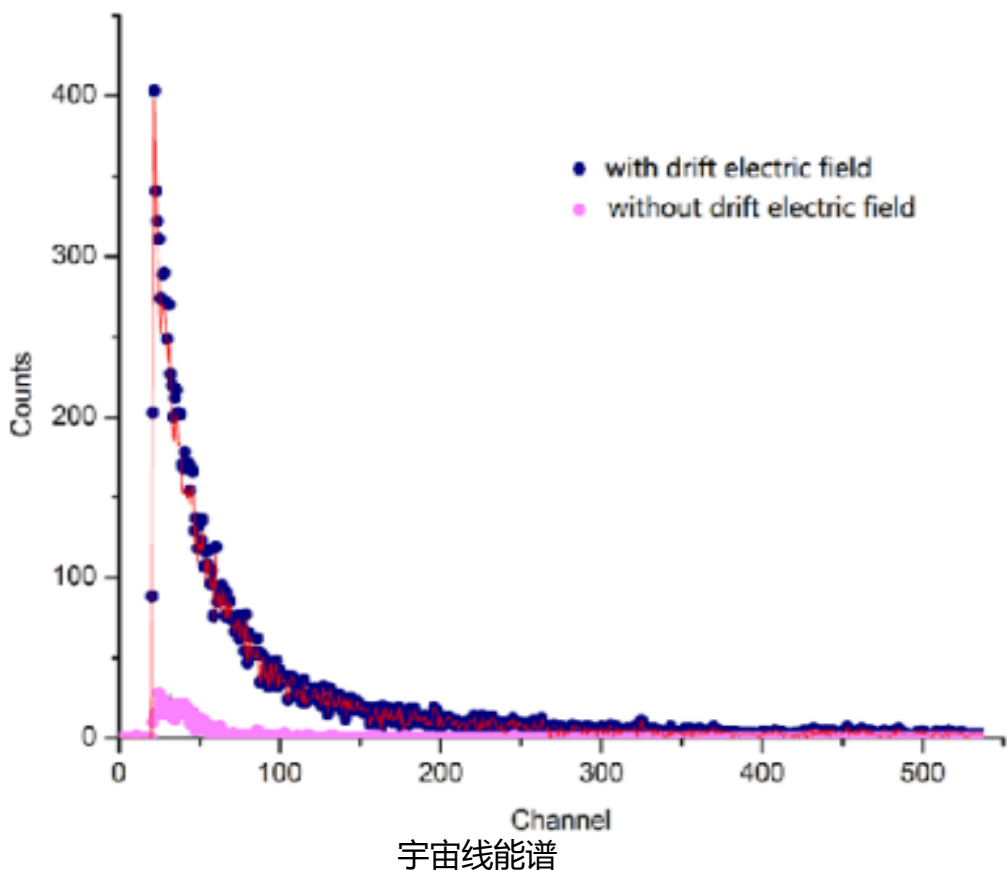


激光在不同气体中的电离能力实验测试结果

深紫外激光束双光子电离实验进展2——能谱测试

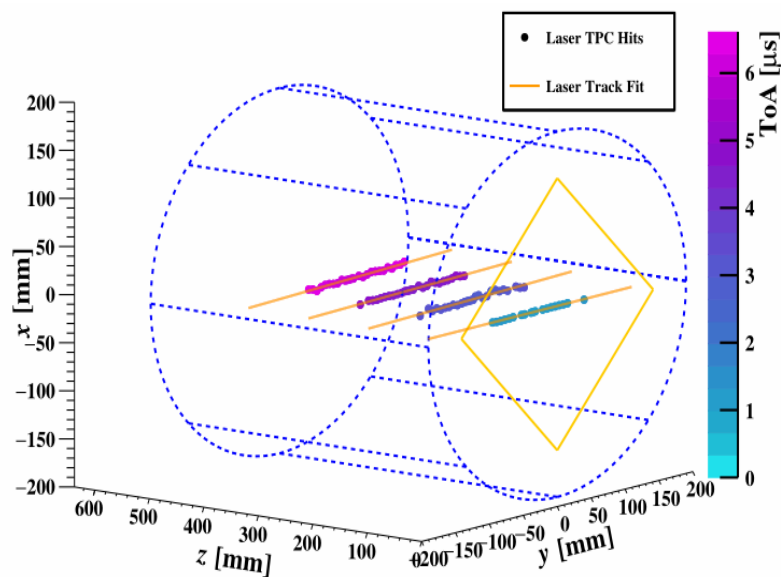
■ 基于集成多束紫外激光径迹系统的TPC原型机取得实验研究成果：

- 成功测得呈Landau分布的宇宙线能谱和 ^{55}Fe X-ray能谱
- 利用多束深紫外激光径迹，研究了TPC时间投影室原型机的空间分辨， dE/dx 分辨以及漂移速度等性能

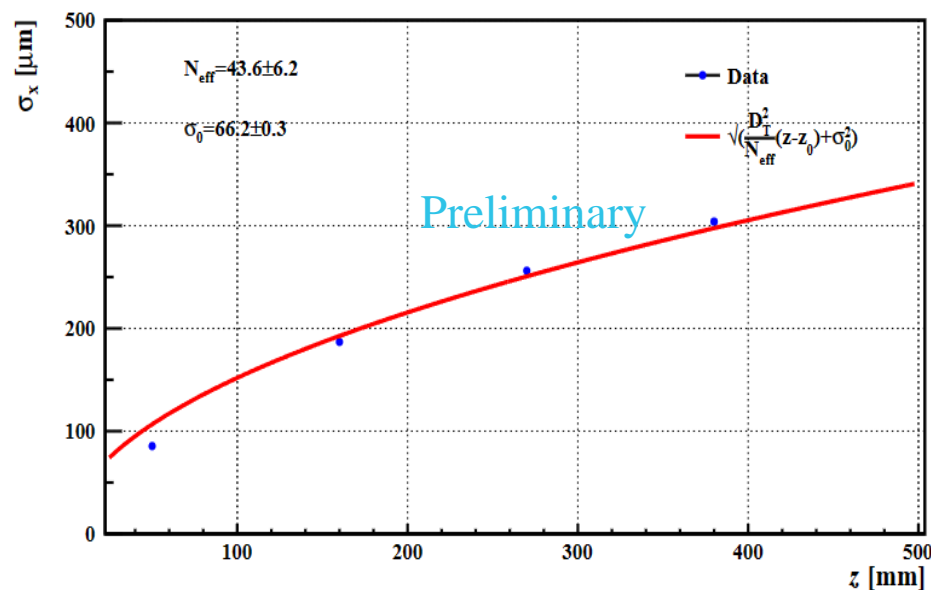


深紫外激光束双光子电离实验进展3——原型机性能分析

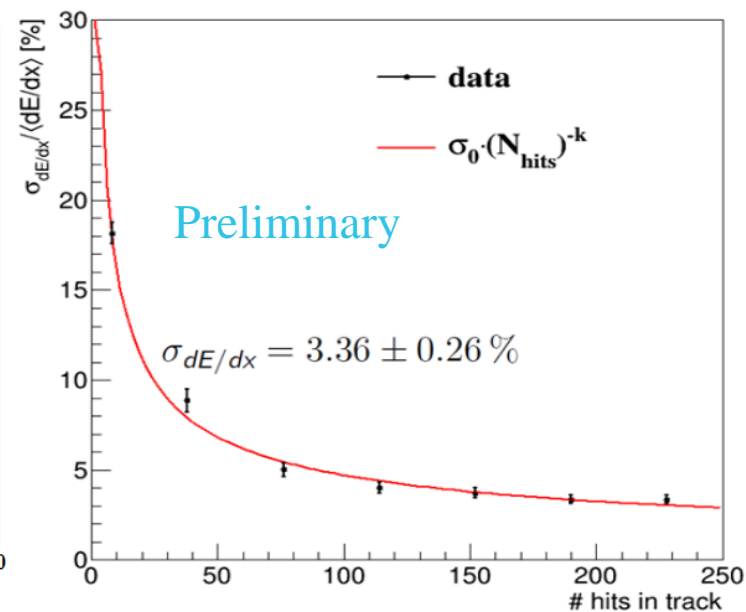
- TPC原型机在**无磁场条件**下可以实现 **$100\mu\text{m}$** 的空间分辨率(**@50mm**漂移距离)
- 拟合位置分辨 σ 和漂移距离 z , 表明深紫外激光束可以模拟 **$N_{\text{eff}}\sim 40$** 的带电粒子径迹
- 通过径迹拼接形成长径迹, 外推至 **$N_{\text{hit}}=220$** (与**CEPC基准探测器设计报告中一致**), dE/dx 分辨为 **$3.4\pm 0.3\%$**



TPC原型机激光径迹重建



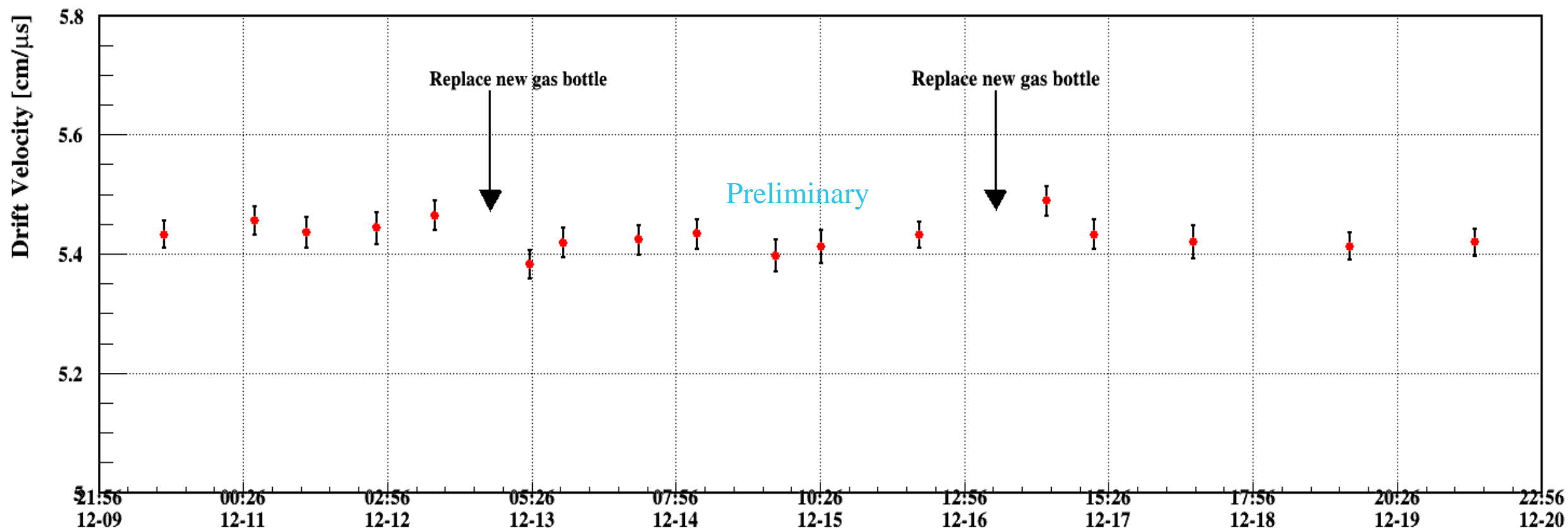
沿 z 向不同漂移测得的激光位置分辨率



激光 dE/dx 分辨率与空间点(hits)数目关系曲线

深紫外激光束双光子电离实验进展4——漂移速度监测

- 利用紫外激光束完成对TPC原型机漂移速度的长时间监测（实验周期2周）
- 原型机漂移速度可以达到 $5.4\text{cm}/\mu\text{s}$ ，并且对气体组分因素十分敏感

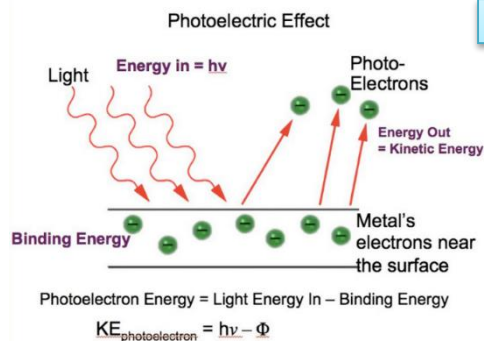
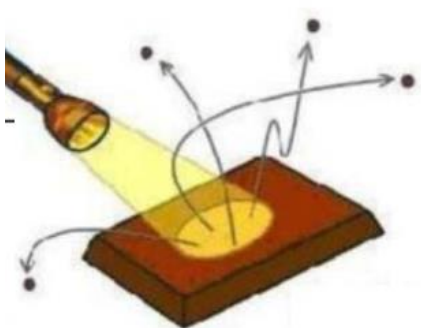


深紫外激光束长时间监测TPC原型机漂移速度实验结果

基于深紫外光物理作用机制研究成果

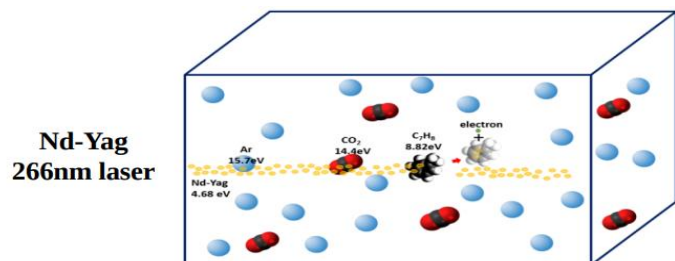
■ 紫外光子:光电效应($<10\mu\text{J}/\text{cm}^2$)

- 每个光子携带的能量: $E_\gamma = h\nu = hc/\lambda$, 每个电子只吸收一个紫外光子
- 能够产生稳定的光电电流



■ 紫外激光:双光子电离($>10\mu\text{J}/\text{cm}^2$)

- 工作气体中的有机杂质分子同时吸收两个光子, 发生电离
- Nd-Yag激光波长: 4.66eV ($2 \times 4.66\text{eV}$)
- 模拟TPC中带电粒子径迹, 研究TPC性能



深紫外光光电效应机制研究成果:

- 实现全面积, 足量且均匀的原初电子的产生和稳定重复测量, 最大电流密度 780 fA cm^{-2}
- 实现对深紫外光电转换的大量原初电子的倍增大

深紫外光双光子电离机制研究成果:

- 成功研制集成UV激光径迹TPC原型机
- 定量研究了激光电离能力与能量密度的关系
- 空间分辨 $<100\mu\text{m}$ @B=0T,50mm漂移距离
- dE/dx 分辨 $3.4 \pm 0.3\%$ ($N_{\text{hit}}=220$)

小结

- 基于深紫外光子光电效应机制，实验产生与模拟结果一致的全面积、大量且均匀的原初电子；并实现对大量原初电子的倍增放大，为研究TPC在高亮度运行环境下读出模块正离子反馈（IBF）引起的空间电荷效应，径迹畸变等关键问题提供一种全新的实验方法；
- 基于深紫外激光双光子电离机制，定量测定紫外激光束电离能力与能量密度的关系，为紫外激光应用于TPC研究提供了重要的气体和能量选择；
- 基于深紫外激光双光子电离机制，成功研制集成多束紫外激光束的TPC原型机，完成了径迹重建，位置分辨，粒子鉴别能力以及漂移速度等相关性能分析；
- 深入理解了紫外光的物理机制，为TPC径迹探测实验研究积累了丰富的经验；

谢谢各位老师同学！

Back up

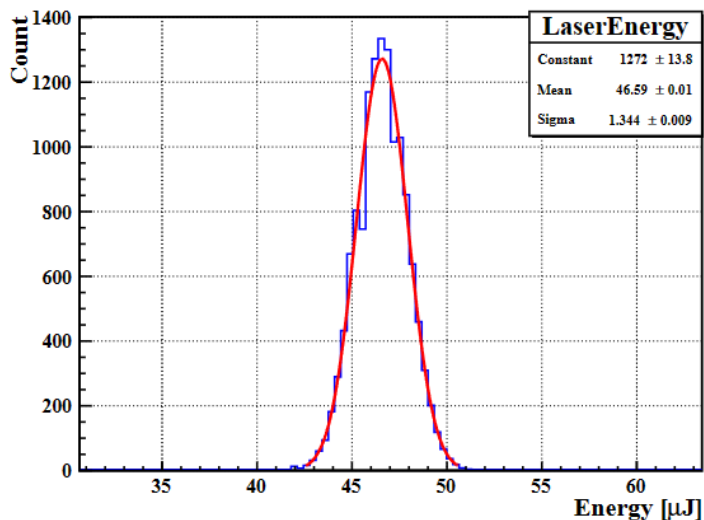
深紫外光激光束双光子电离实验研究——激光性能测试

■ Nd-Yag紫外激光器参数(Q-smart 100 model):

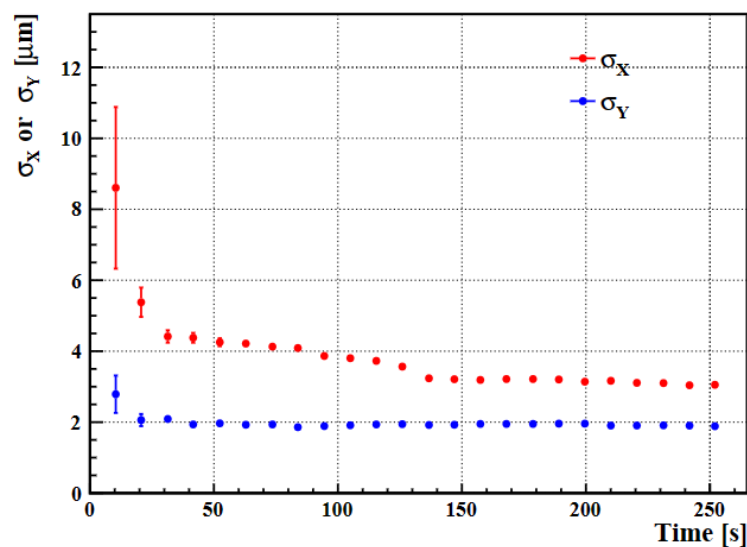
- 输出激光波长1064nm,四倍频后输出波长266nm的紫外激光束
- 光斑直径4.5mm,发散角~0.5mrad
- 输出能量范围20 μ J-100mJ(可调), 重复频率20Hz

■ 紫外激光束稳定性满足TPC原型机物理需求

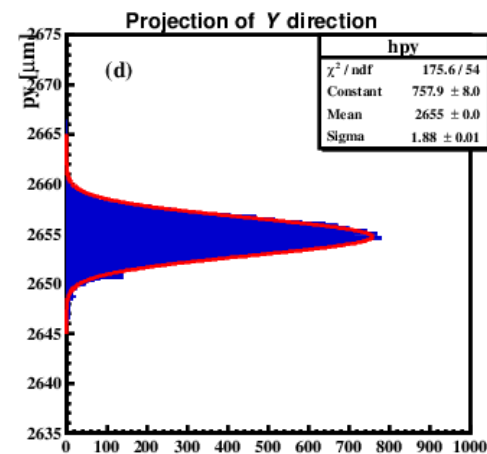
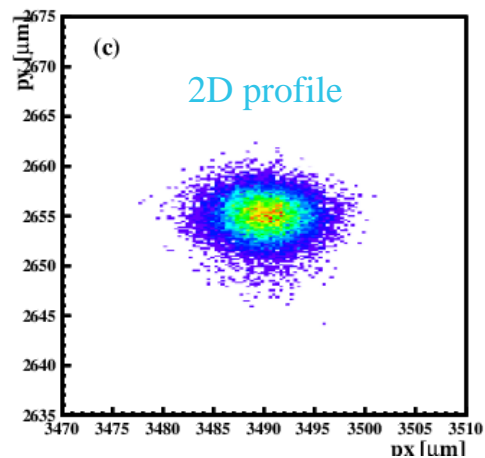
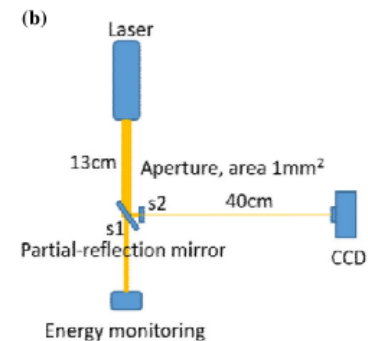
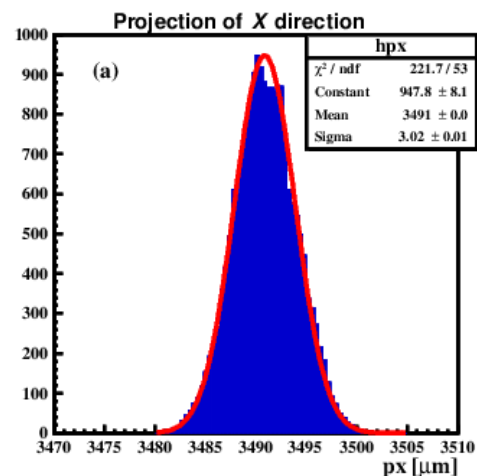
- Nd-Yag激光器能量稳定性<3%
- CCD相机监测窄束激光光斑中心指向稳定性3.02 μ m @X,1.88 μ m @Y
- 激光光斑中心在XY两个方向的波动随时间变化趋于稳定(T>3min)



Nd-Yag激光器能量稳定性实验结果



窄束激光光斑中心涨落随时间变化实验测试结果



窄束激光光斑中心指向稳定性实验装置及结果