

激光标定时间投影室原型机 设计和实验进展

报告人：王海云/高能物理研究所

祁辉荣 蔡一鸣 刘凌 原之洋 张建 黄宇雁
邓智 龚辉 李玉兰 李金 陈元柏 欧阳群

2018. 10. 14 第八届先进气体探测器研讨会，衡阳，湖南

主要内容

- 物理目标
- 激光标定TPC原型机设计
- 关键技术问题
- 实验测试与分析
- 小结

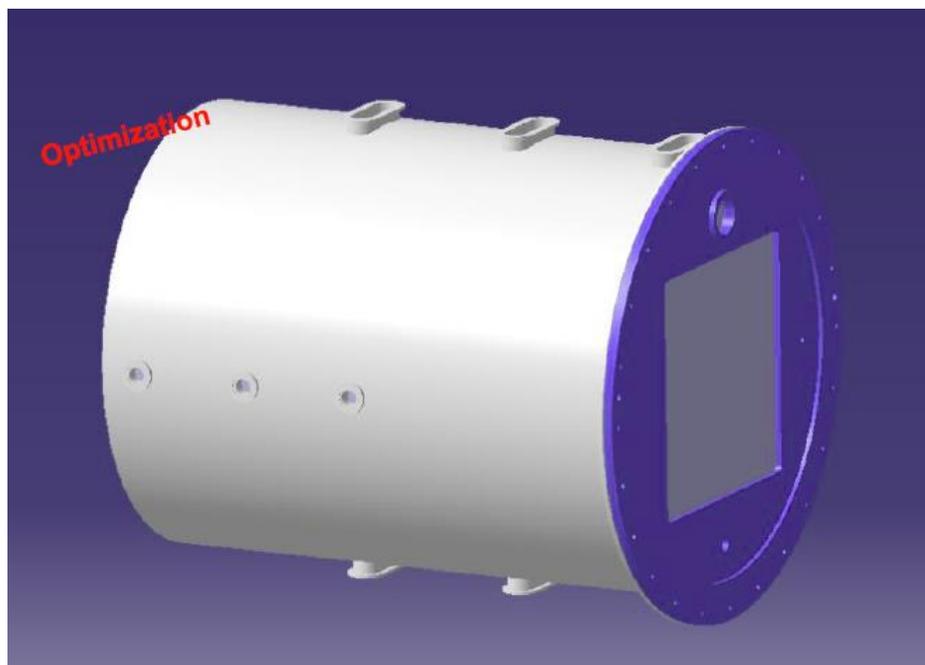
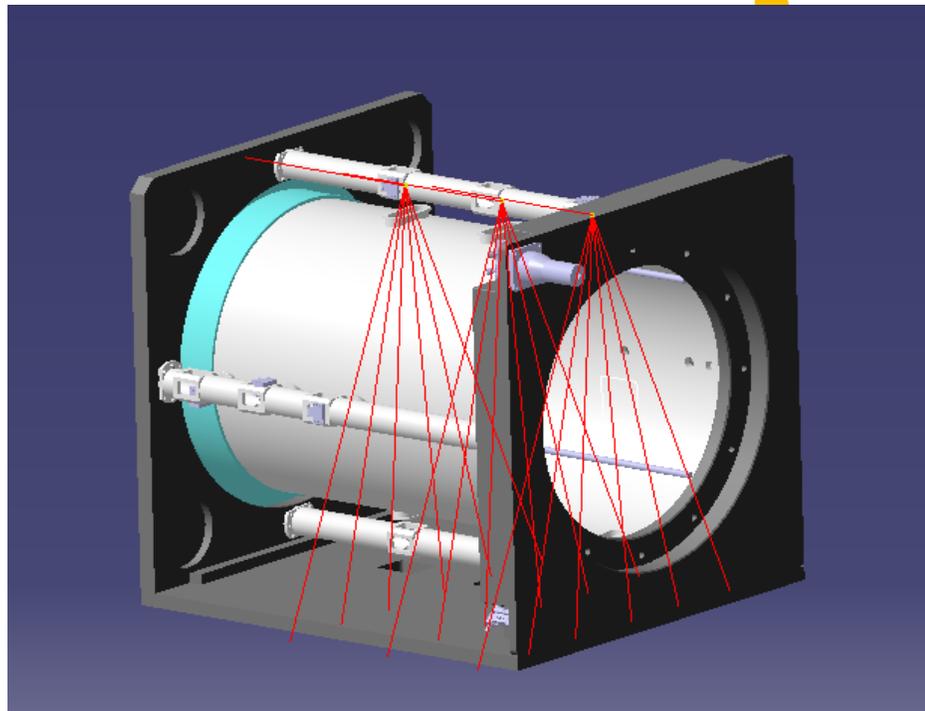
研究目标及设计参数

研究目标

- 研究评估由正离子反馈 (IBF: Ions Back Flow) 引起电场变化而带来的径迹畸变
- 采用激光标定系统对漂移速度、增益均匀性等参量进行监测评估
- $\sigma_{r\phi} < 100\mu\text{m}$, $\sigma_{rz} < 500\mu\text{m}$, $\delta_v < 10^{-3}$

设计参数

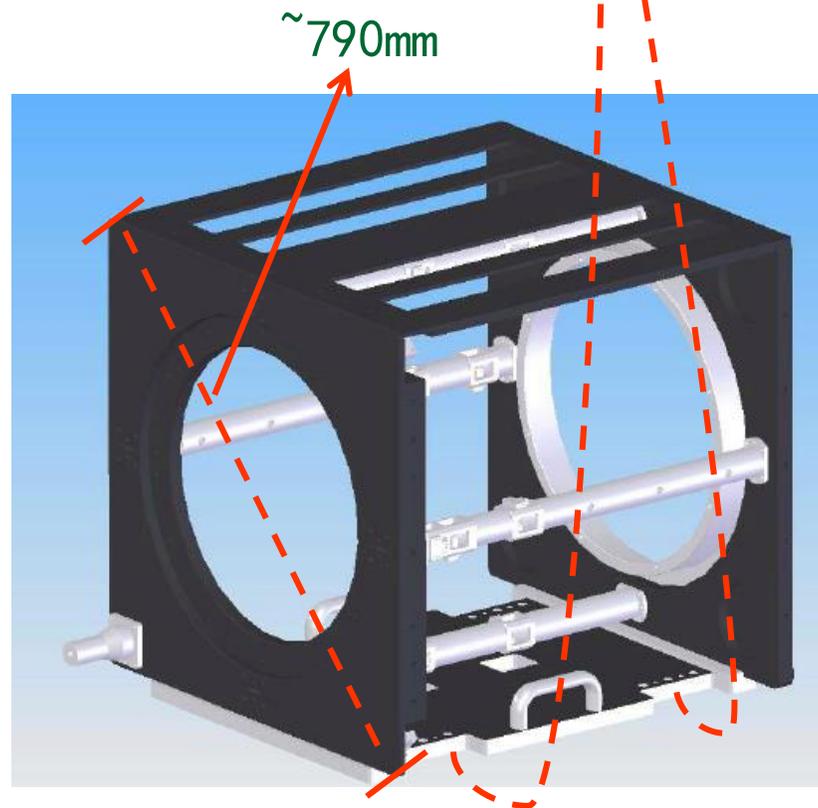
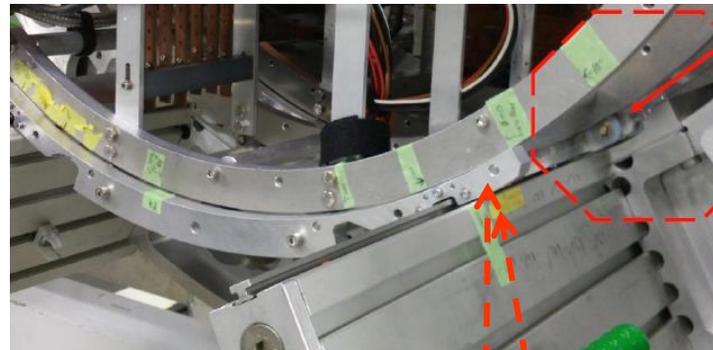
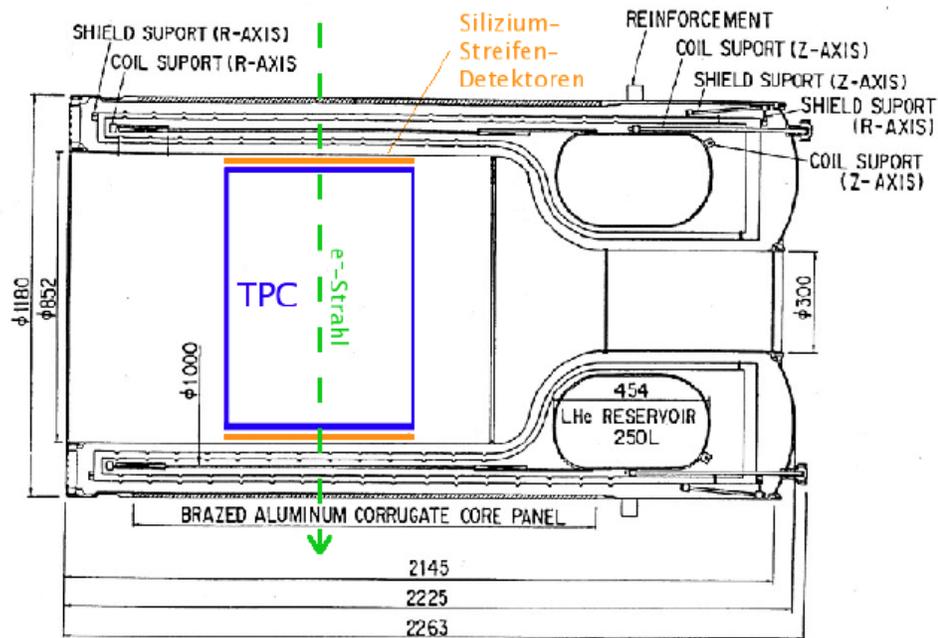
- 漂移长度 $\sim 510\text{mm}$,
- 读出面积: $200\text{mm} \times 200\text{mm}$
- 结构: 探测器系统+激光系统
- 集成266nm激光标定系统
- 读出端采用: GEMs/Micromegas
- 设计需满足磁场测试环境 (1.0T)



激光标定系统设计

主要机械设计

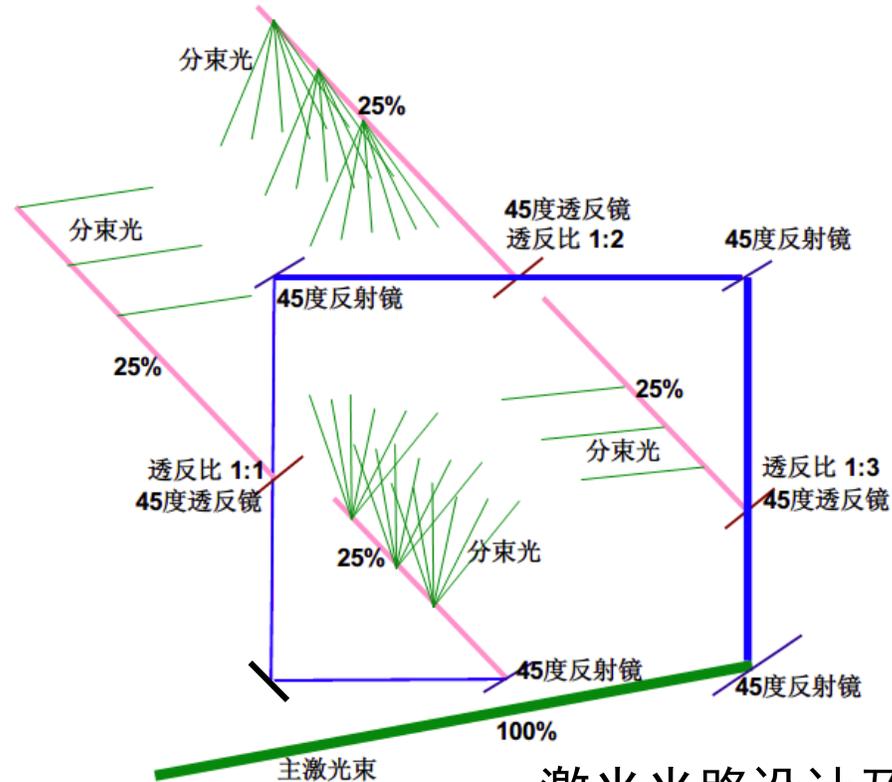
- 易于搬动（集成了外部支撑台）
- 易于组装，适用于磁场测试环境
- 可拆分的独立系统： TPC + Laser system
- 适用于宇宙射线测试和束流测试



放入PCMAG磁场系统中的探测器示意图

激光标定系统光路设计

- 激光: Quantel Q-smart100, 波长266nm, 出束频率20Hz, 单脉冲能量25mJ, 出束模式为高斯分布
- 激光光束总数: 42束
- 光路上分布有扩束镜、反射镜、透反镜等光学器件
- 标定激光束尺寸: $0.8\text{mm} \times 0.8\text{m}$

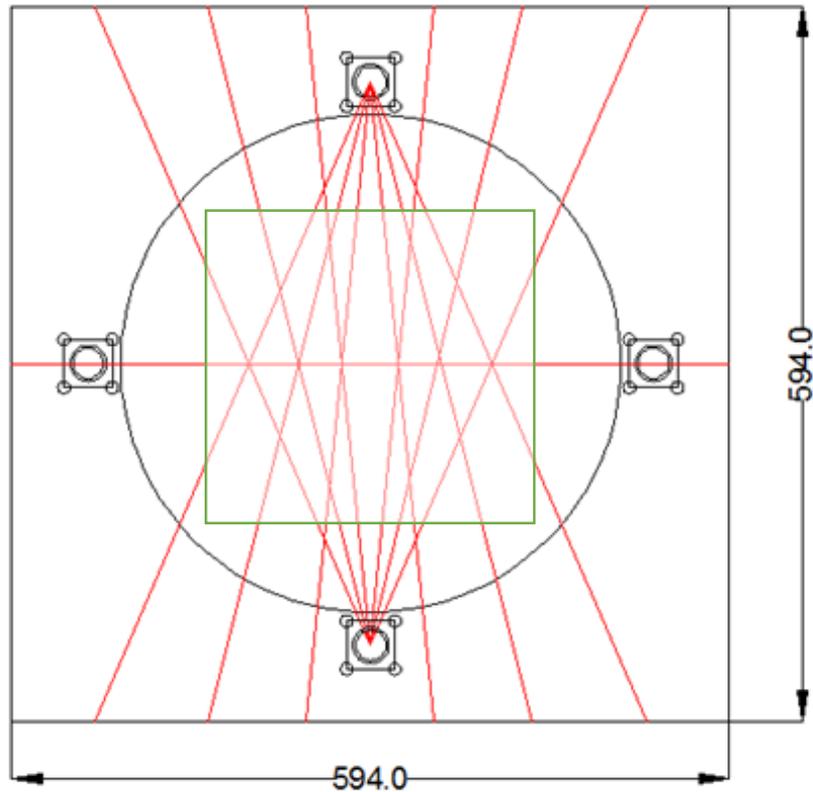


激光光路设计及光路导光棒机械图

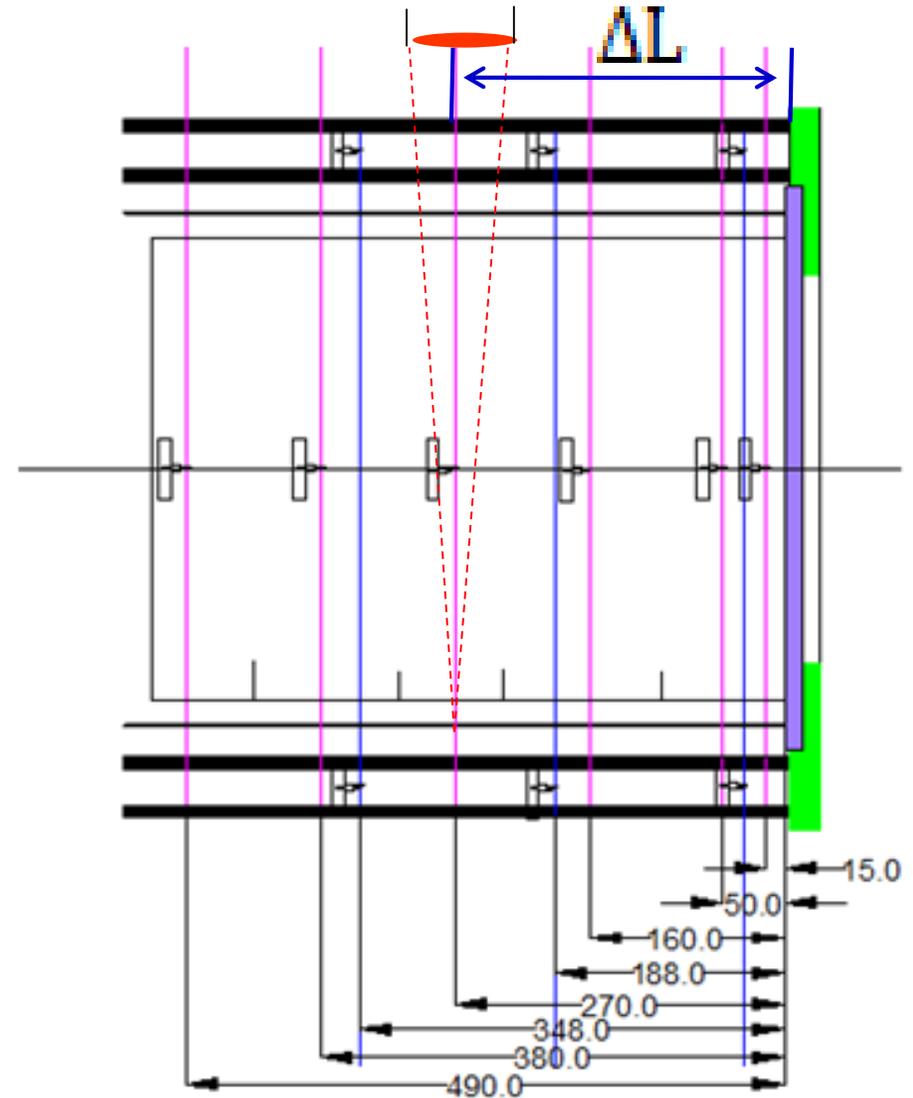
激光标定系统 —— 均匀性及漂移速度标定

光路图设计的主要参数：

- 沿Z向：共9层激光光束
- 其中：
 - 单束激光层数：6层
 - 多束激光层数：3层



(r - φ) 二维平面增益、电场均匀性标定示意图



(Z向) 沿漂移距离的漂移速度标定示意图

激光标定的关键技术问题

➤ 激光光束调光精度：

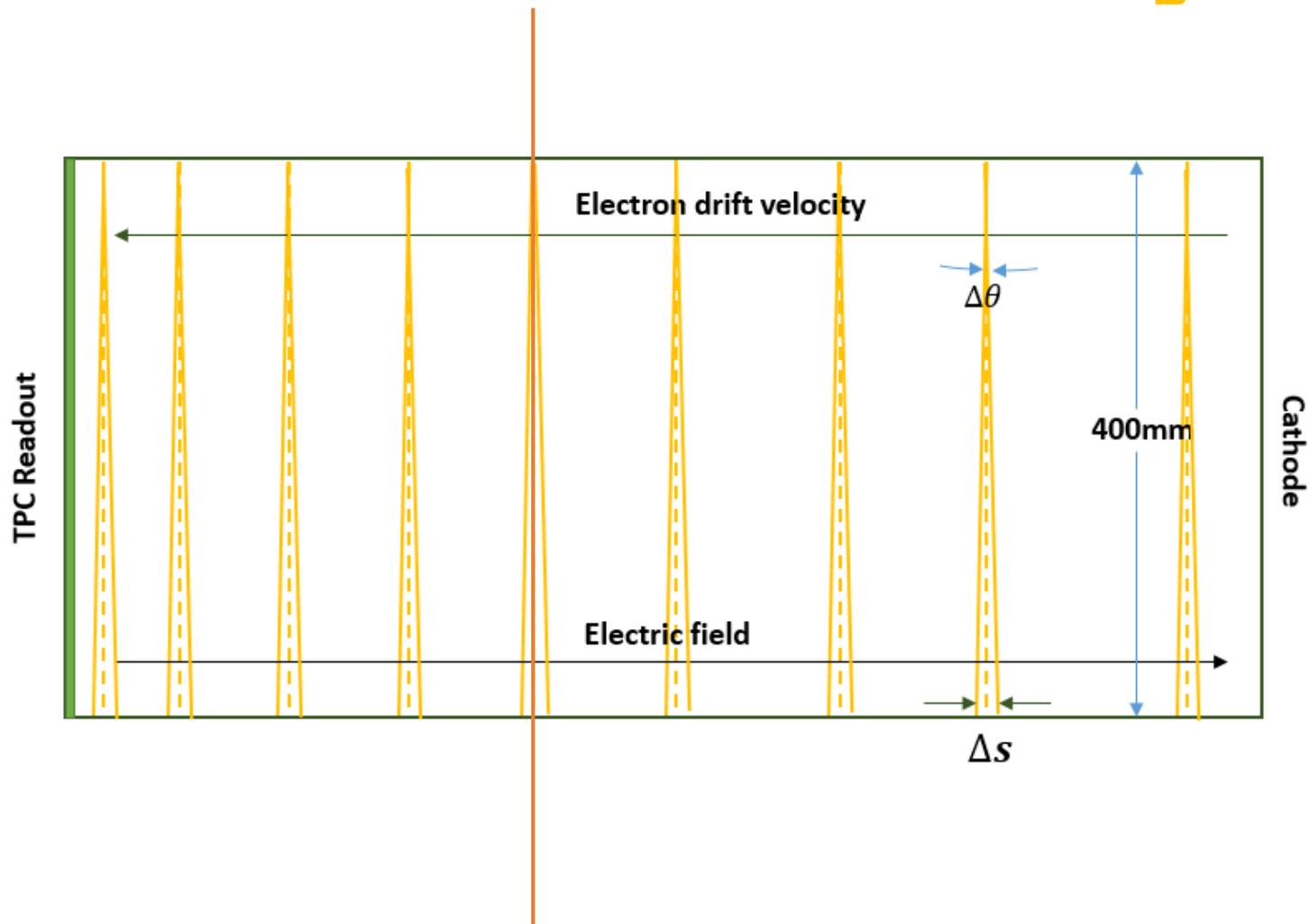
- 需求：结合ALICE、STAR和ILC TPC的物理需求， $\sigma_{r\phi} < 100\mu m$ ， $\sigma_{rz} < 500\mu m$ （500mm漂移长度），漂移速度测量精度 $< 10^{-3}$

➤ 激光光束能量稳定性：

- 需求：能量变化 < 2 倍
- 满足前端电子学信号动态范围

➤ 激光光束指向稳定性：

- 可较短时间完成标定过程
- 长时间光束指向位置变化较小



激光标定系统 —— 激光的精度

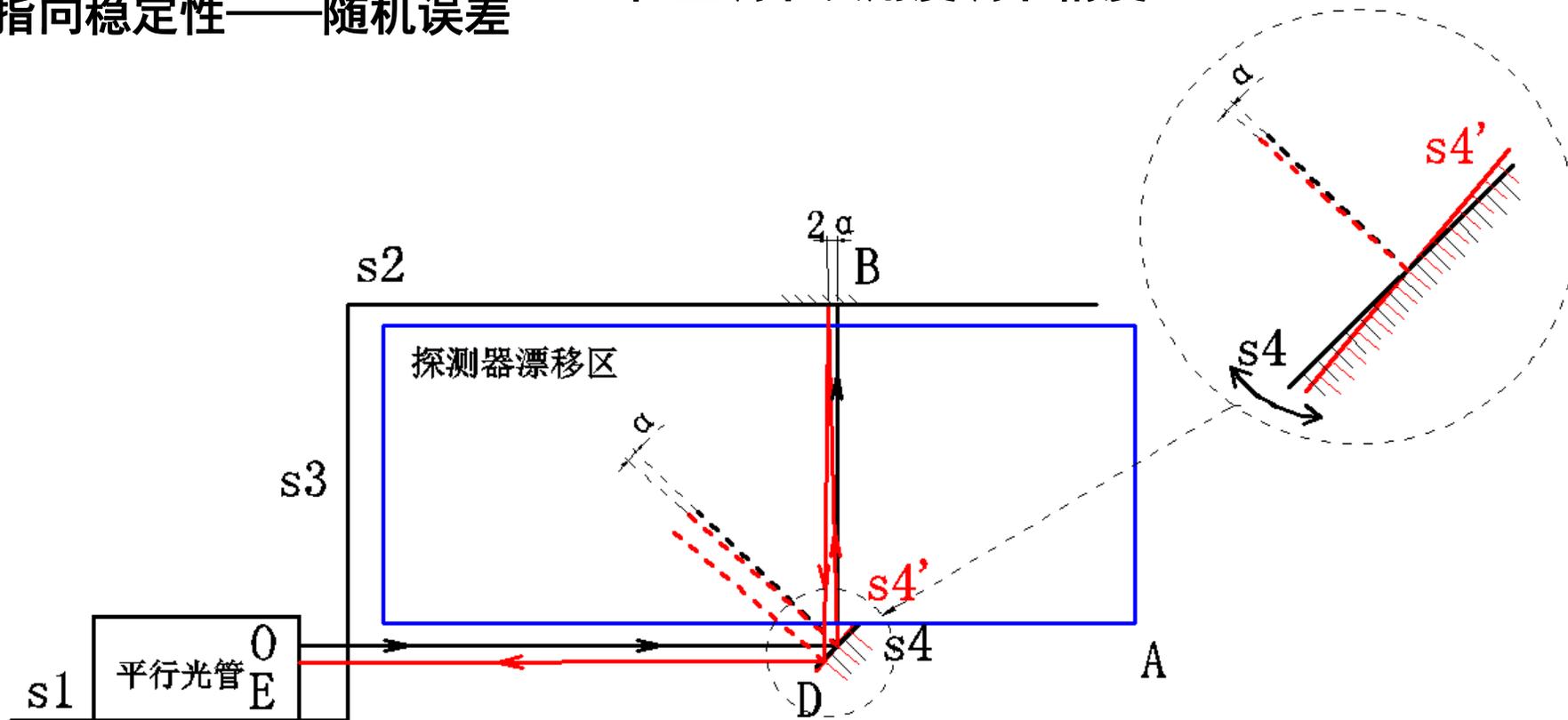
➤ 激光测量精度：

- 调光精度——系统误差
- 激光指向稳定性——随机误差

主要影响参量：

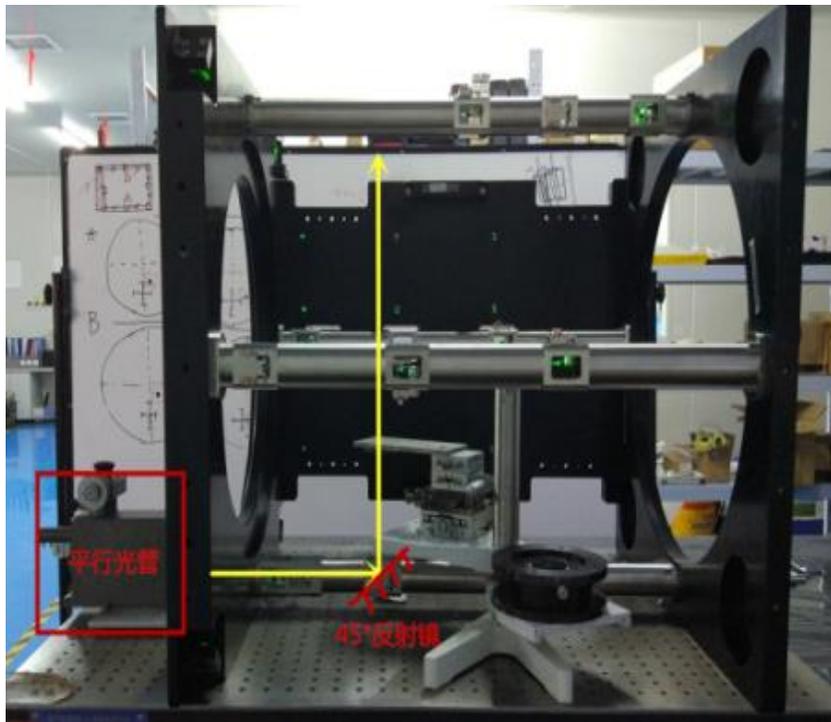
光路上阵列反射镜(图中S4) 位置调节及角度调节精度

平行光管实现激光束精度调节

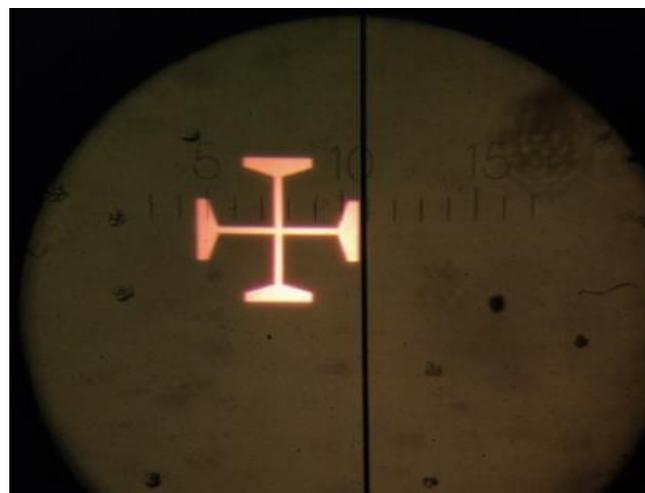
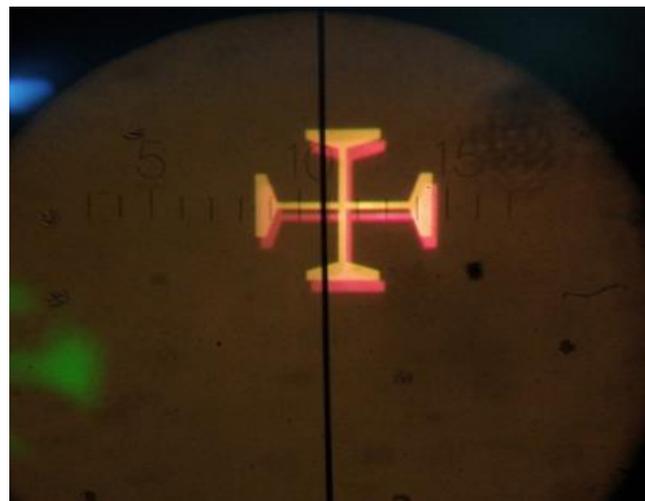


激光调光示意图

激光标定系统 —— 调光的实现



激光调光装置图



- 平行光管实现激光束精度调节
- 平行光管精度：
~ 5" (1" = 1/360°)

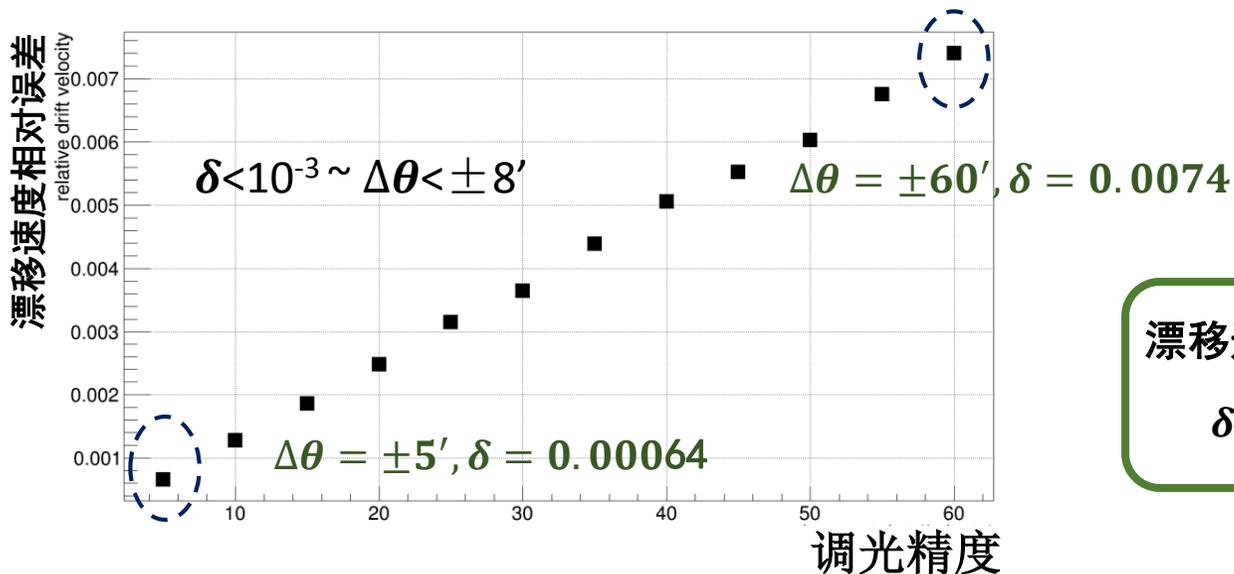
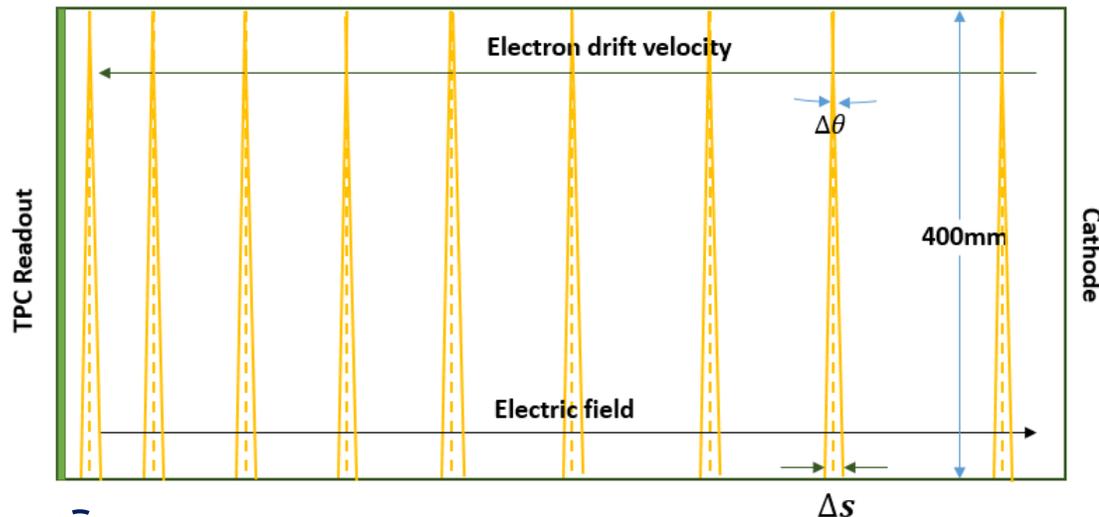
平行光管内视野图

激光标定系统 —— 调光精度对漂移速度的影响

➤ 激光精度:

- 调光精度——系统误差
- 激光指向稳定性——随机误差

➤ 激光系统误差调光精度 ($\Delta\theta = \pm 5' \sim \pm 60'$) 对漂移速度影响:



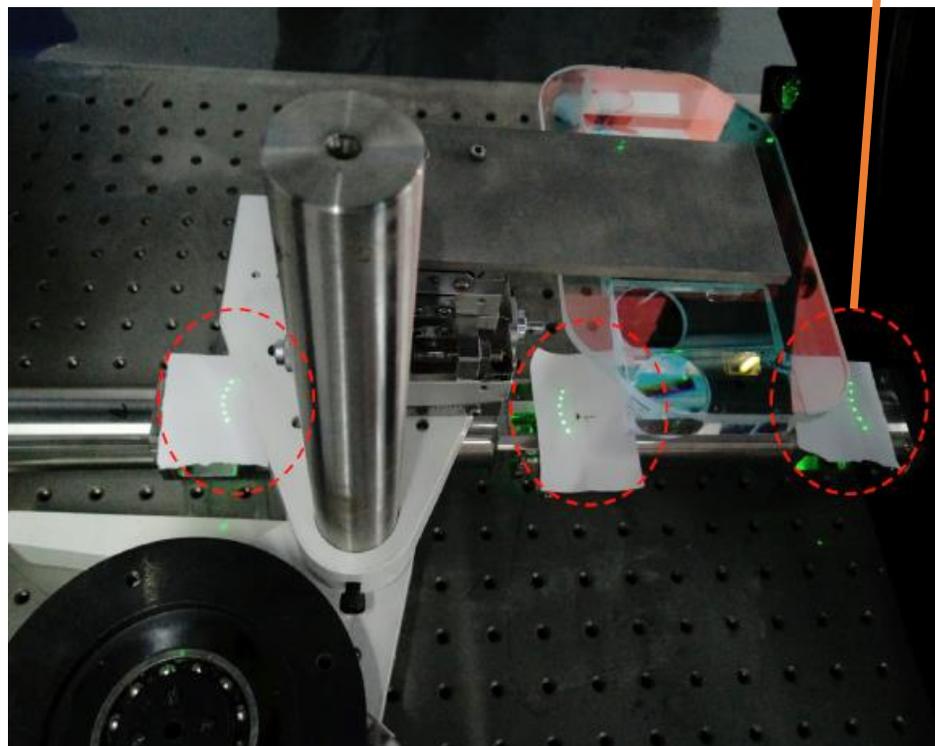
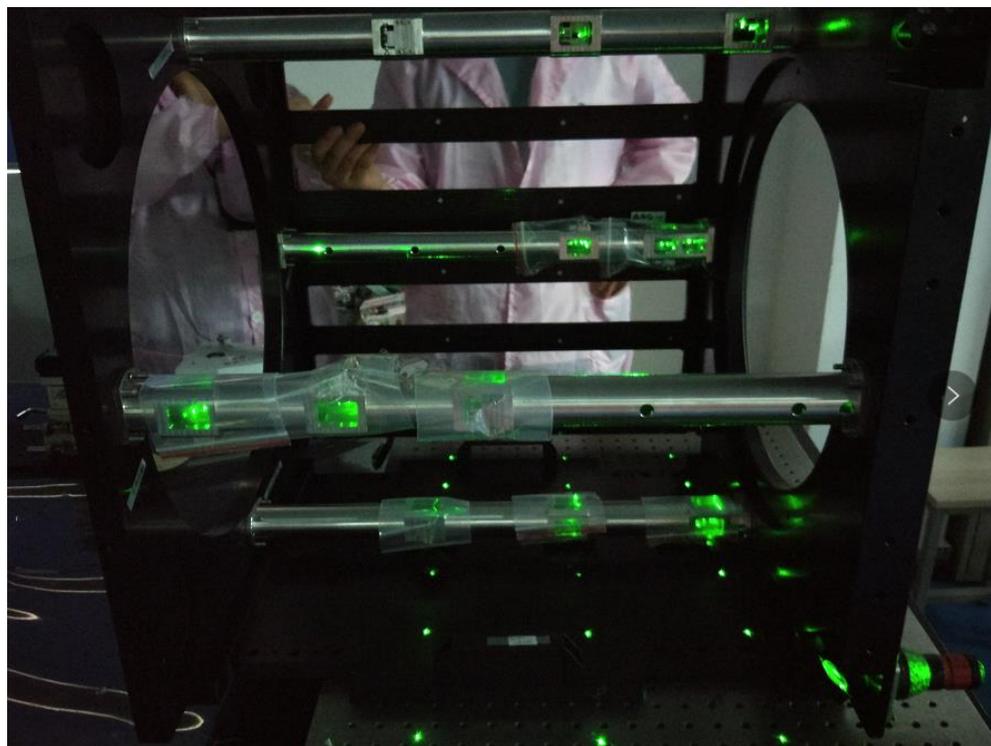
漂移速度相对误差:

$$\delta = \frac{\sigma_v}{v_{mean}}$$

- $\Delta\theta = \pm 5'$ 时, 由 Δv 引入的 Z 向偏差 $\Delta Z = 0.33mm$ (@500mm drift length) (ILC 在 Z 向位置分辨 0.4~1.4mm for zero ~ full drift)

激光标定系统 —— 激光系统的装配调试

- 反射镜、透射镜调试安装
- 铝制金属板集成激光的光路支撑、激光分束等光学部件
- 采用平行光管实现的调光精度： $< \pm 5'$



调光完成后的实验装置图

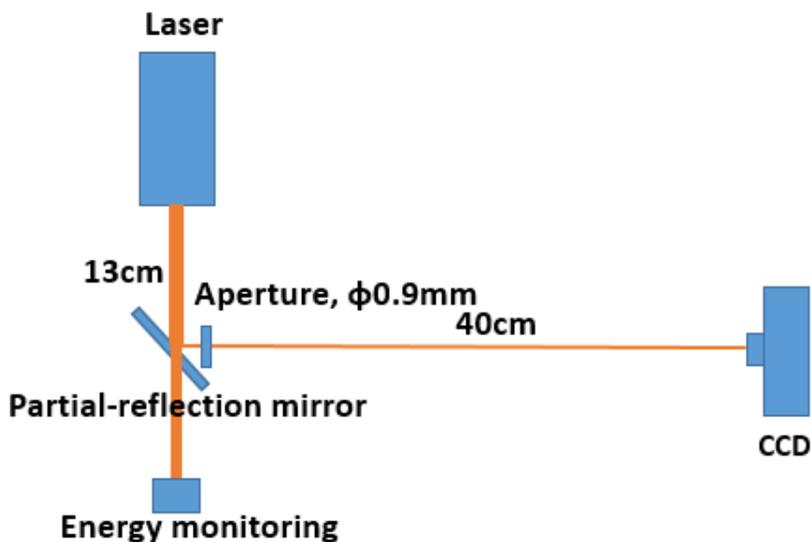
激光标定系统 —— 激光指向稳定性

➤ 激光测量精度:

- 激光指向稳定性——随机误差
- 调光精度——系统误差
- 测量时间: ~10min
- 激光束指向稳定性:

X维度: 2.0 μm

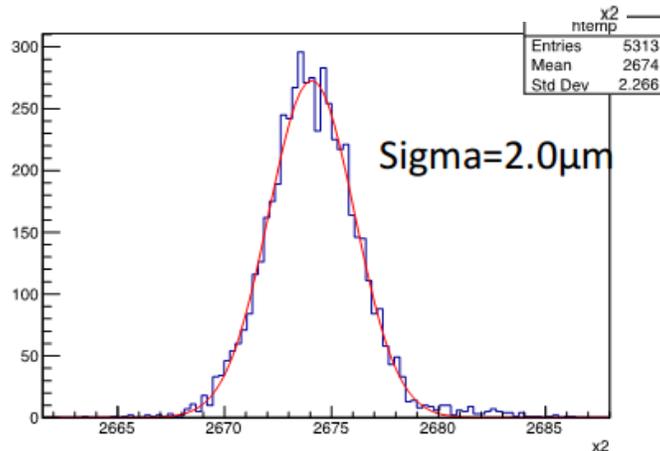
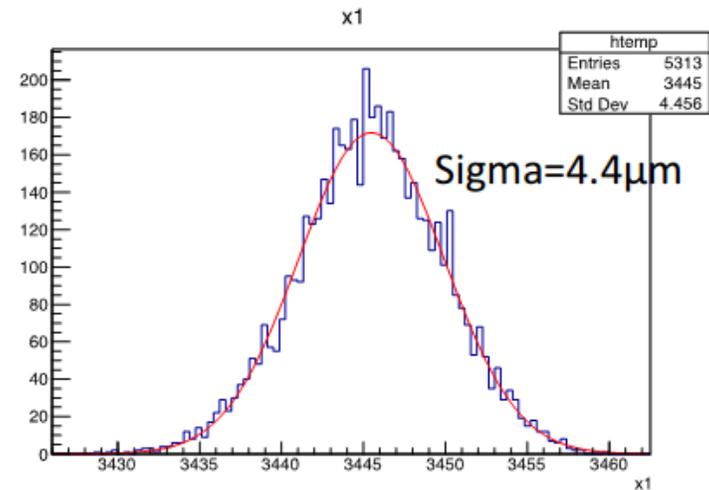
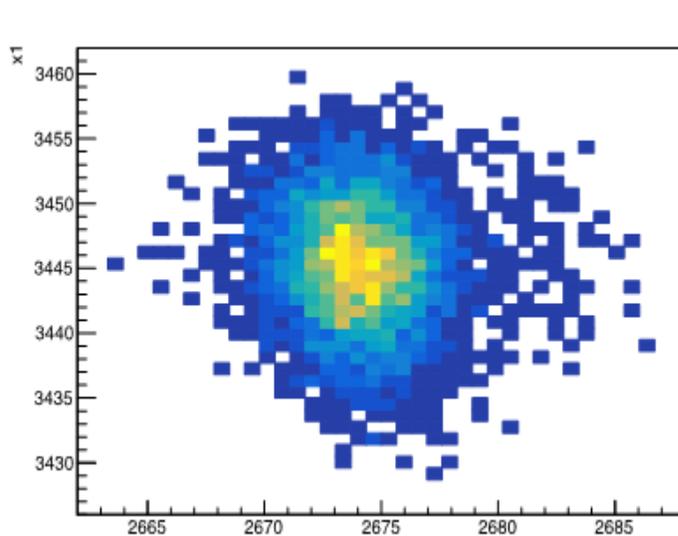
Y维度: 4.4 μm



测量装置示意图

监测一定时间内
激光指向稳定性

事例统计量、指向稳定性
对测量精度、标定时间影响



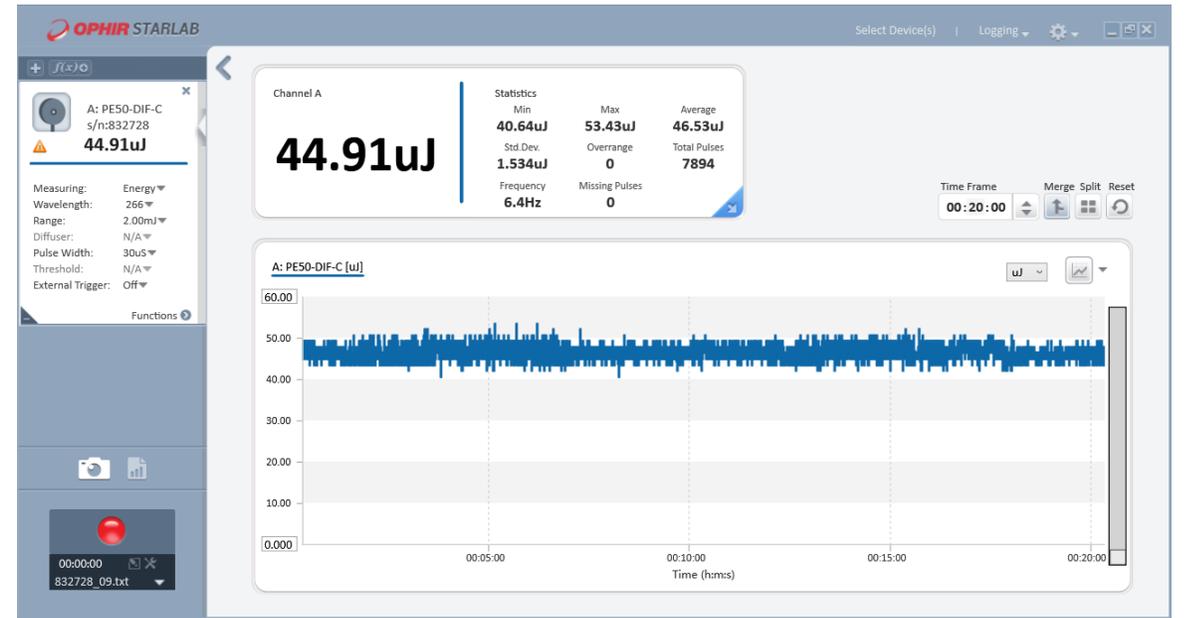
激光指向稳定性测量结果

激光标定系统 —— 标定时间的选择

- 标定需在较短时间内完成，同时保证标定精度可以满足探测需求
- 标定时间的选取与激光指向稳定性和能量稳定性相关
- 激光能量稳定性（高功率/低功率）测量分析：
 - 测量时间：20mins
 - 激光平均能量：24.79mJ/shot（高功率）；46.53 μ J/shot（低功率）
 - 激光能量稳定性：3.84%（高功率）；3.3%（低功率）



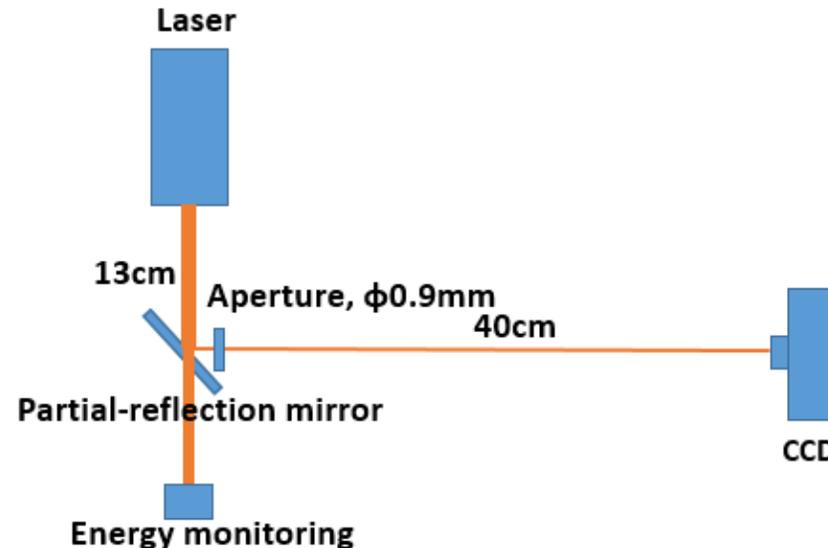
激光器高功率状态下能量稳定性测量



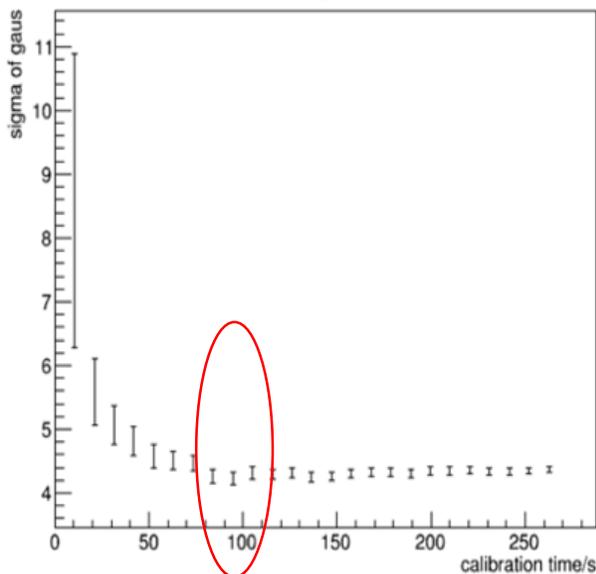
激光器低功率状态下能量稳定性测量

激光标定系统 —— 标定时间的选择

- 标定需在较短时间内完成，同时保证标定精度可以满足探测需求
- 标定时间的选取与激光指向稳定性和能量稳定性相关
- 激光指向稳定性测量与分析：
 - 测量时间：4.5mins
 - 事例数：5400events
 - 激光出束频率：20Hz
 - 光斑中心波动： $< 3.5\mu m$



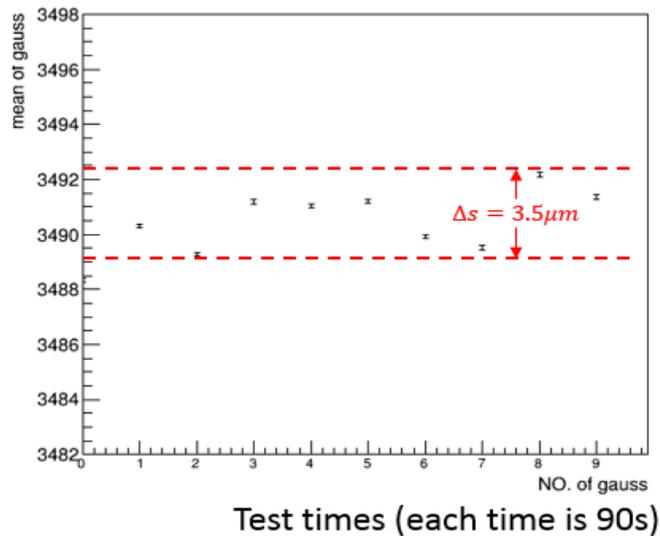
中心位置sigma随时间变化



激光中心位置分布的sigma随时间增大而减小

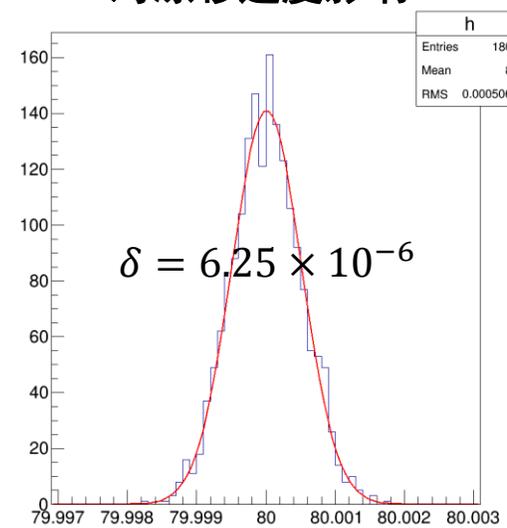
光斑中心波动量
(每90s标定一次，共9次)

fluctuate value of the laser spot center



3.5um光斑中心波动量引入的漂移速度相对误差： 6.25×10^{-6}

激光指向稳定性
对漂移速度影响

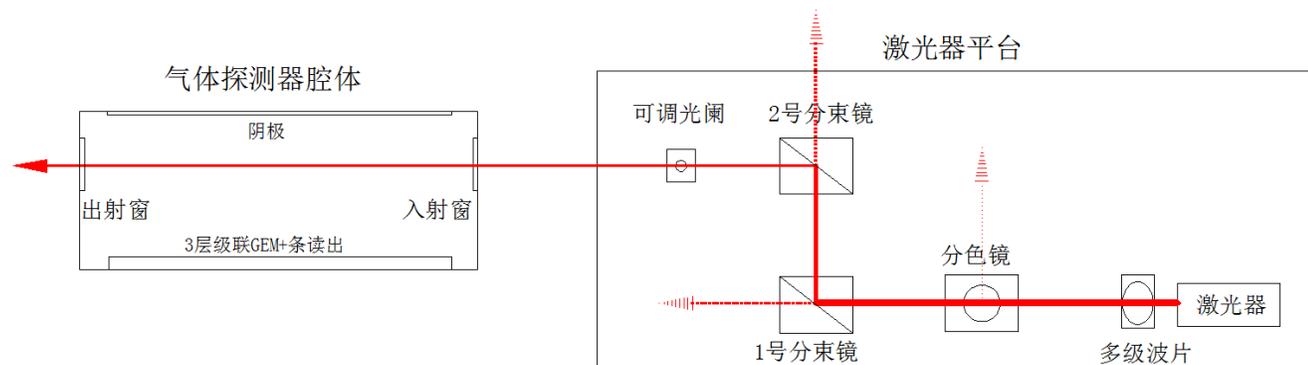
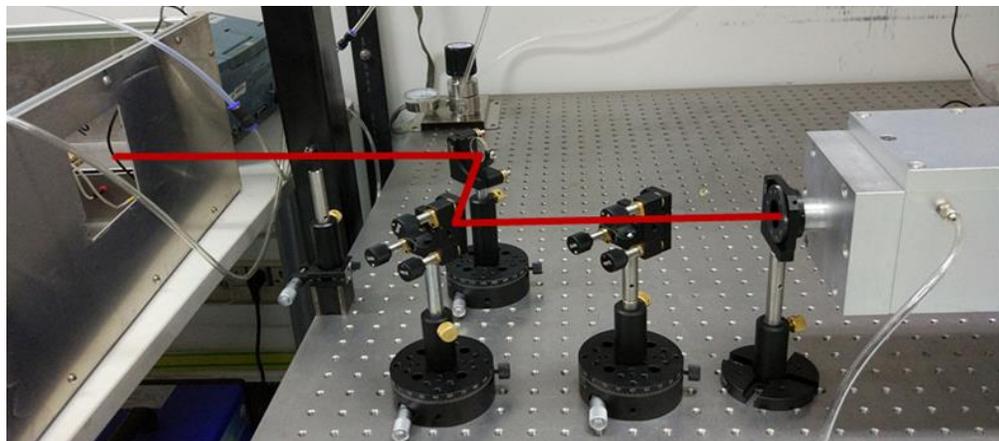


激光信号测试结果分析——激光信号随光斑面积变化

实验条件：

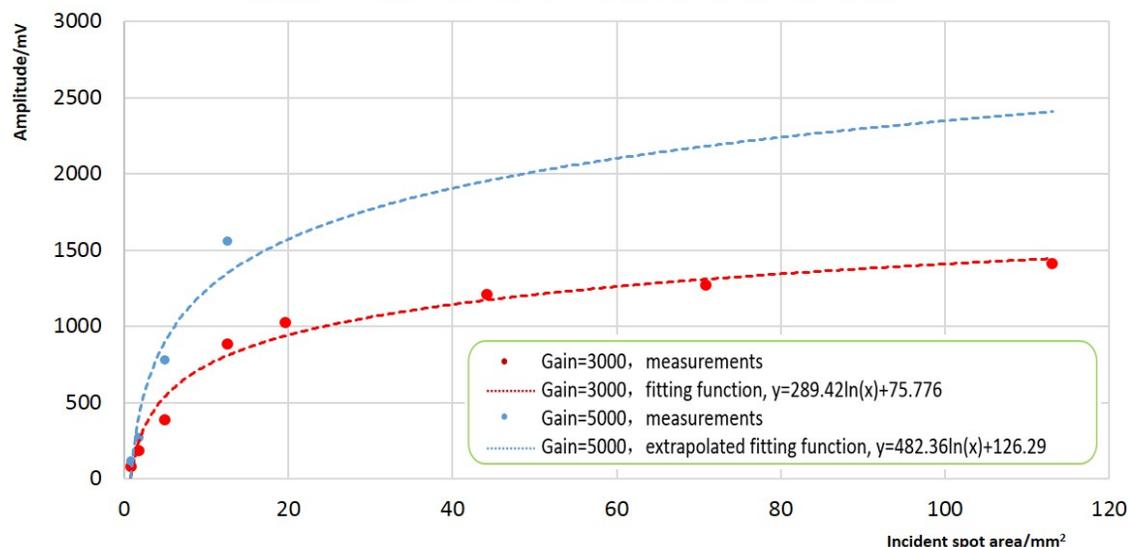
- 气体：Ar:CO₂=70:30
- 前放：IHEP研制前放板
- 主放：ORTEC 572A，放大倍数10，成形时间：0.5us
- 3层级联GEM放大
- 源：266nm激光，出束频率10Hz，单脉冲能量15mJ，出束模式为高斯分布
- 读出条，分别为1mm、2mm、4mm、6mm和8mm

实验装置：



结果分析：

Signals of different laser beam size at specific gain



激光标定探测器系统 —— TPC探测器+激光光路系统

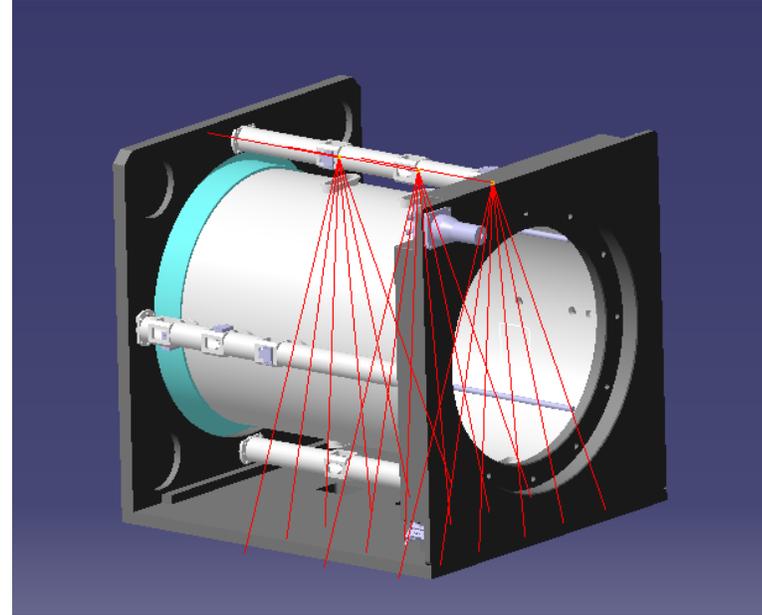
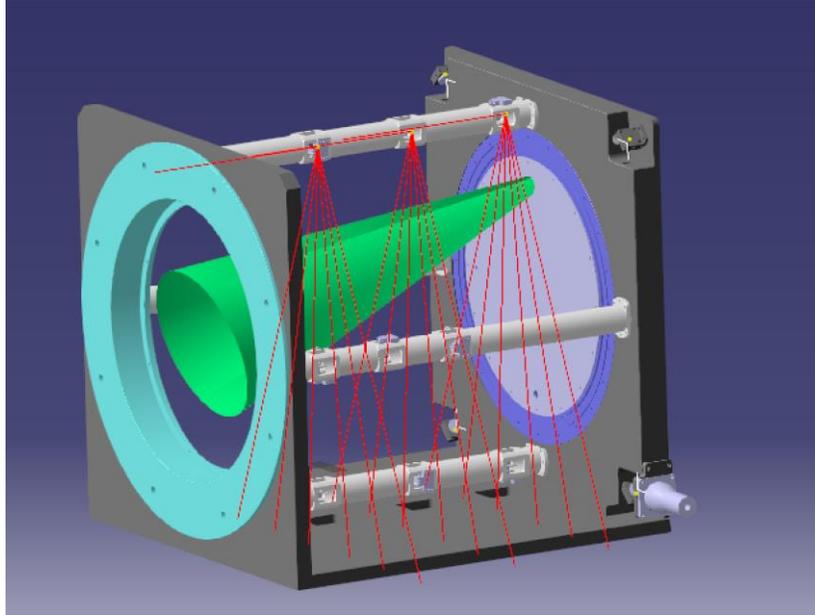


- 光学支撑平台：1200mm×1500mm
- TPC室体通过平台上辅助支架安装、拆卸

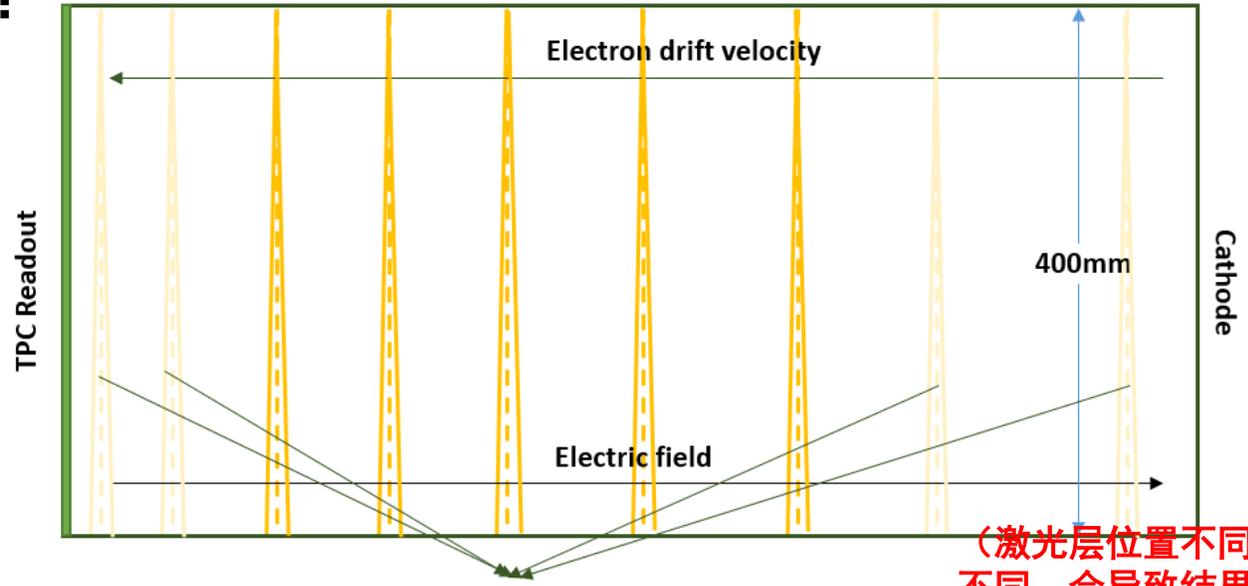
总结

- 面向气体探测中正离子反馈、漂移速度等标定研究，漂移长度500mm、读出有效面积200mm²，42束入射标定激光束的TPC探测器系统已经完成设计、加工、光学调试
- 对于激光调光精度关键技术问题，结合前期TPC的物理需求，采用平行光管，实验完成了标定激光束位置调光，调光精度可达到 $<\pm 5'$
- 实验测量了随时间变化的激光能量、激光束中心位置稳定性，给出了满足需求的优化标定时间
- 结合测试结果，下一步完成激光标定TPC探测器系统的实验测量，实现正离子反馈、漂移速度标定的分析研究

谢谢各位老师！

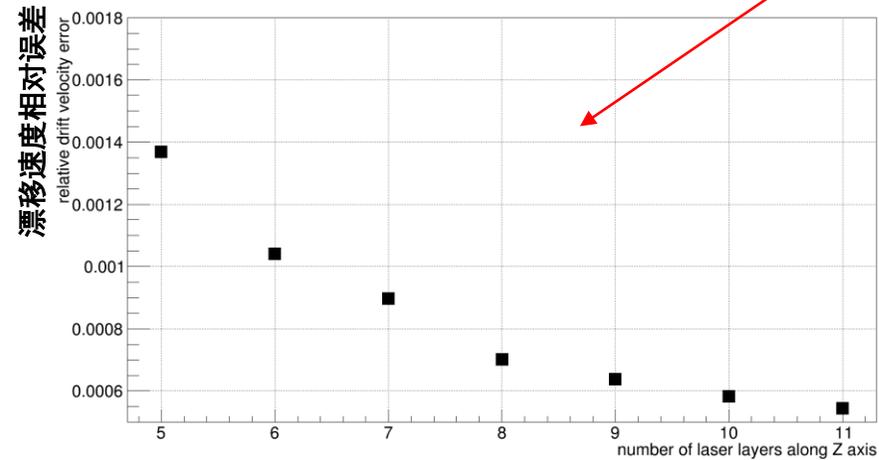
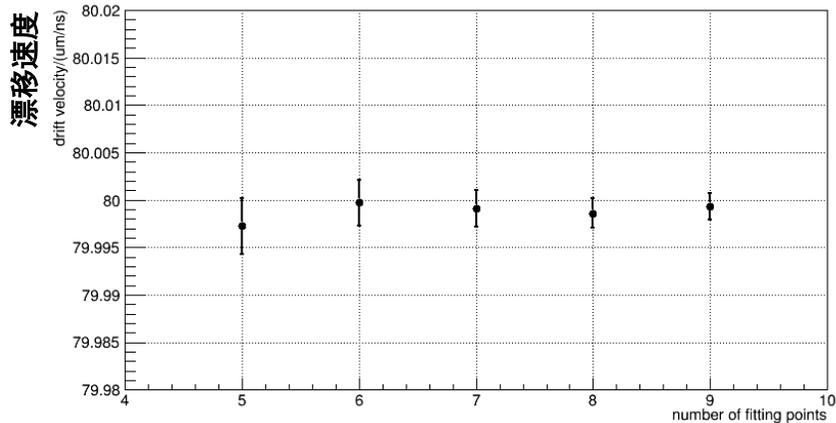


激光标定层数对漂移速度的影响： BACKUP



(激光层位置不同, 激光层递减顺序不同, 会导致结果有差别, 比较结果见Backup第1页)

➤ 调光精度 $\Delta\theta = 5'$, 拟合得到的漂移速度: $v_{\text{mean}} \pm \delta$ 激光层数目的影响



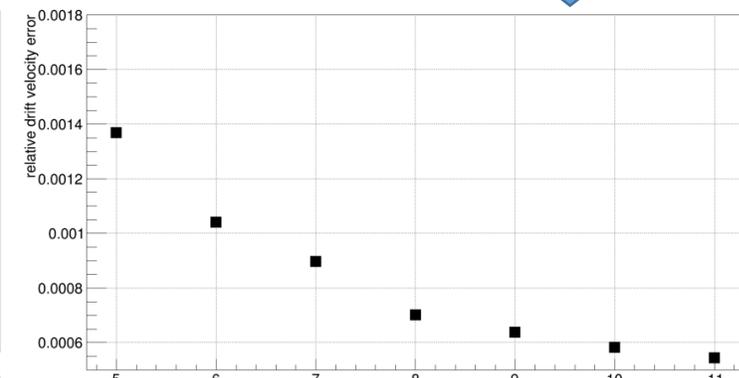
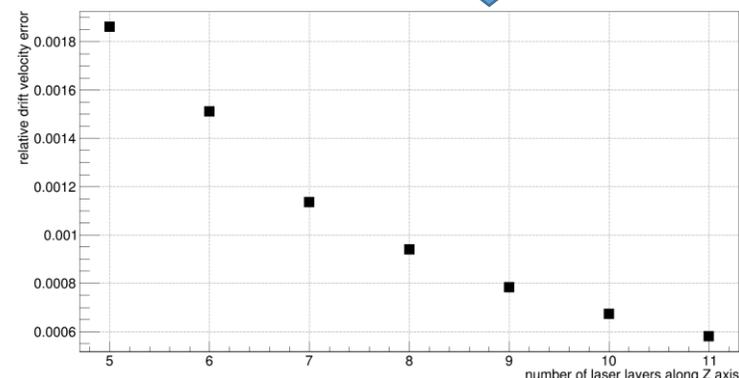
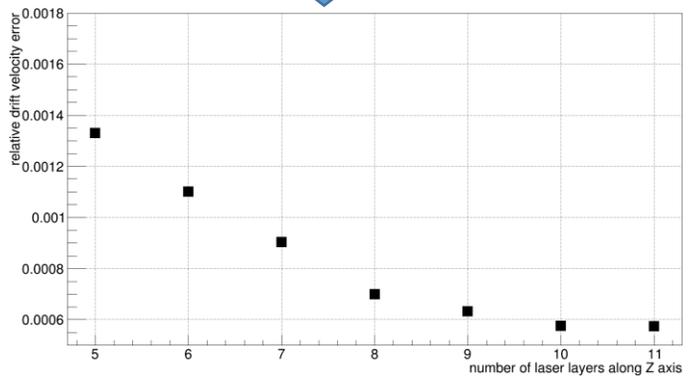
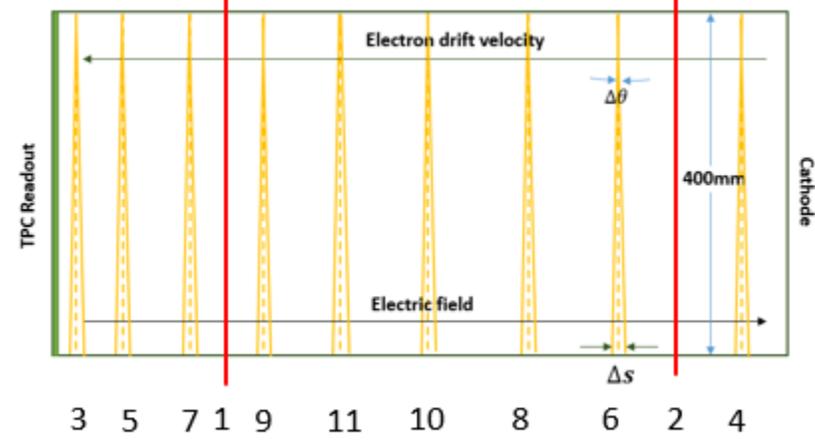
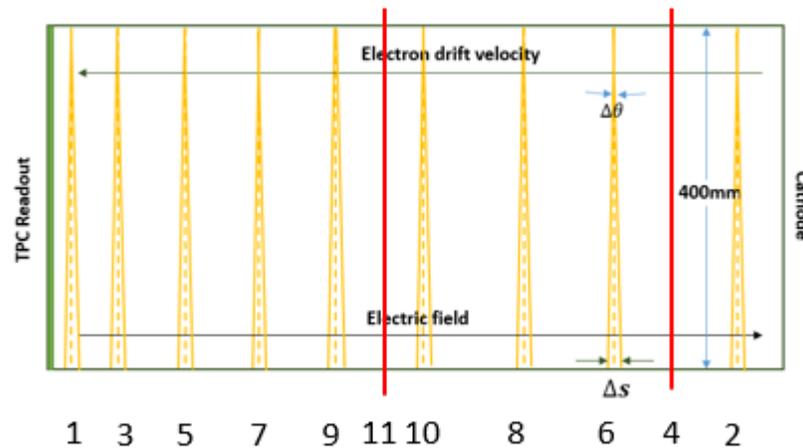
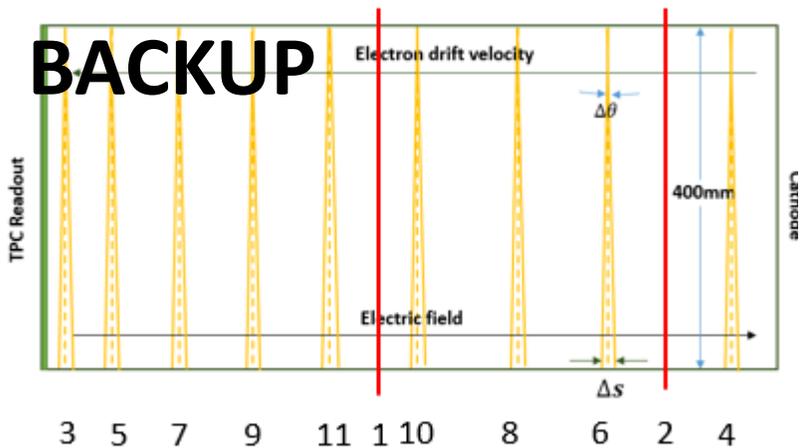
- T2K气体, $v_{\text{drift}} = 80\mu\text{m/ns}$,
- 11层激光束: $\delta = 5.4 \times 10^{-4} \sim \Delta z = 0.27\text{mm}$
- 9层激光束: $\delta = 6.4 \times 10^{-4} \sim \Delta z = 0.33\text{mm}$
- 5层激光束: $\delta = 1.37 \times 10^{-3} \sim \Delta z = 0.685\text{mm}$



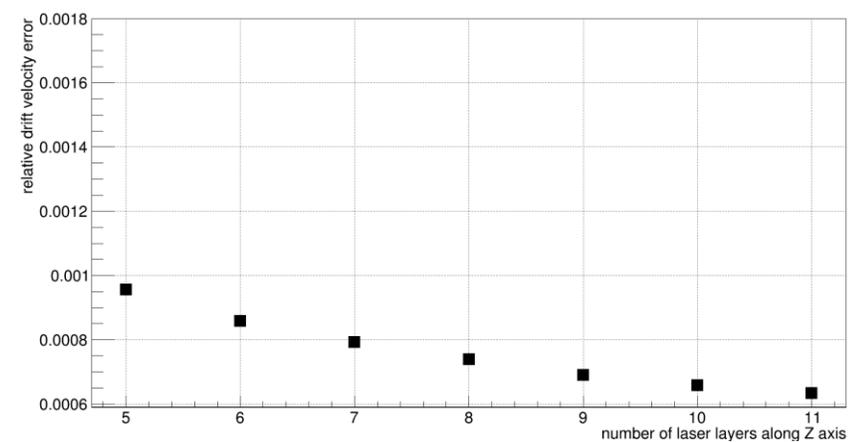
适当增加标定激光层数可以减小z向位置偏差 (500mm漂移距离上, 9~10层激光束比较适宜)

数字为见光层数递减的顺序排布

BACKUP

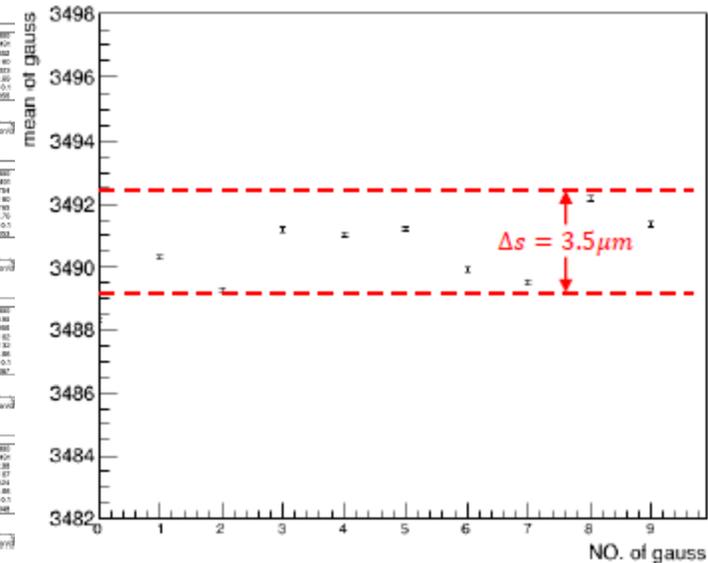
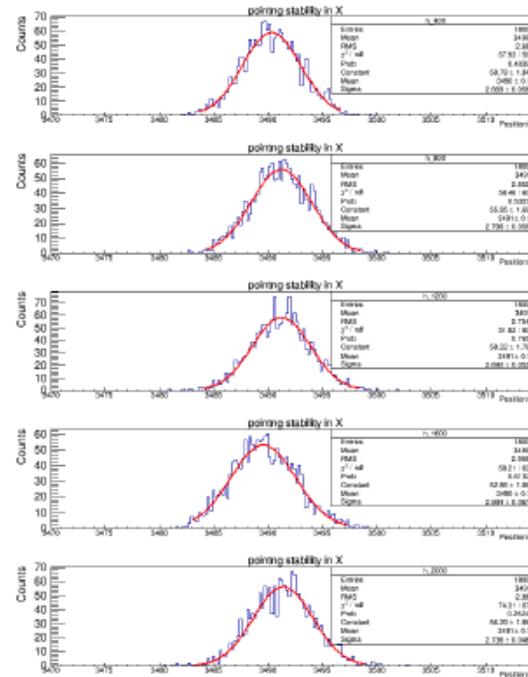
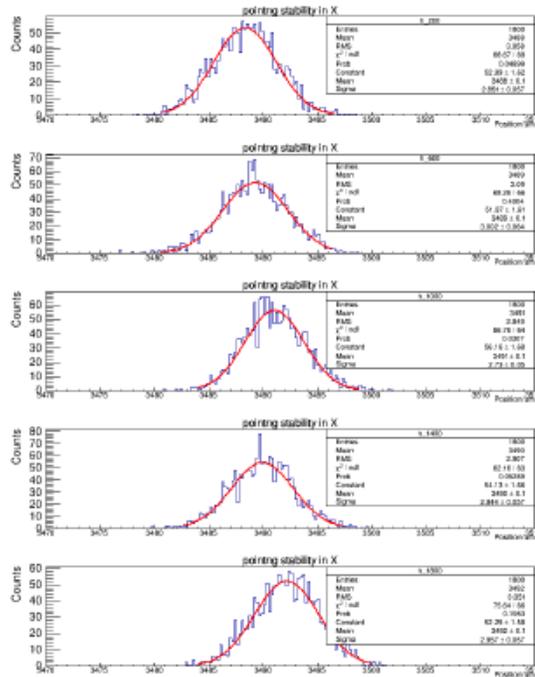
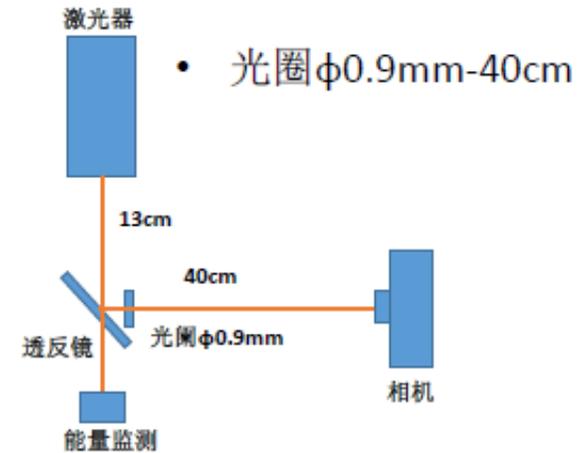


除前2层外laser都均匀分布的结果



Time selection of the laser calibration

- Duration of measurement time: **90seconds**
- Frequency of the laser beam: **20Hz**
- Stability of the laser beam profile's center: **<3.5um**



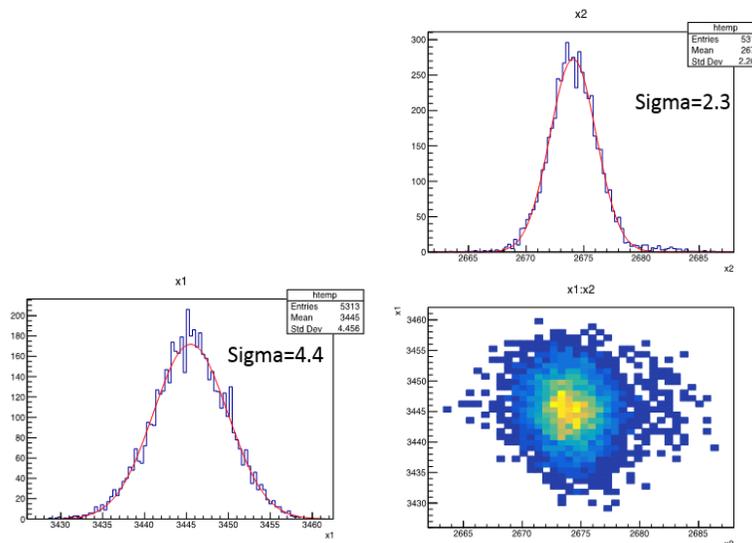
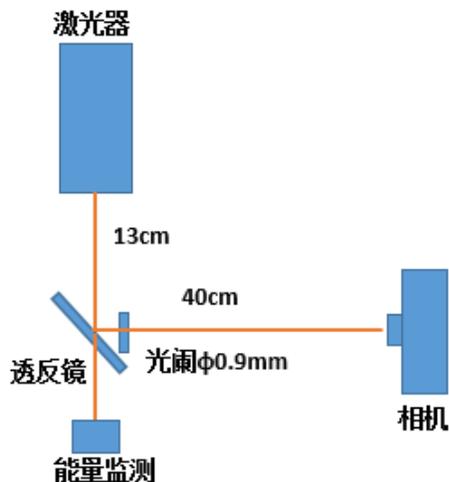
Calibration each 1min30sec(Calibration each 1800 shots):

标定时间的选择:

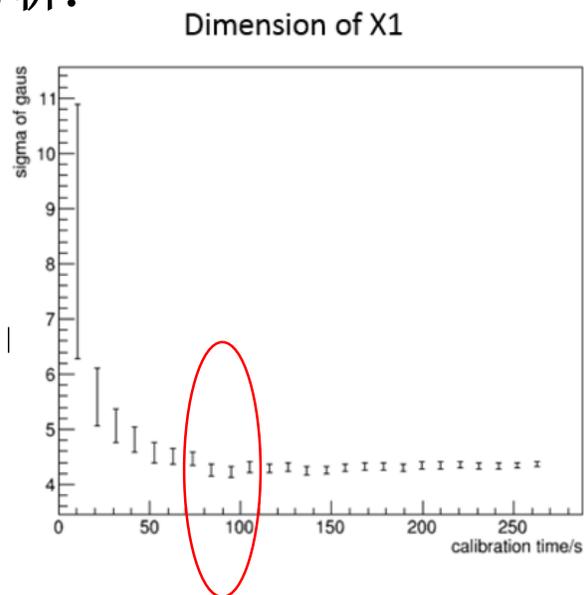
- 标定时间过长: 耗费时间, 耗费存储空间
- 标定时间过短: 标定精度低

➔ 激光指向稳定性测量: 监测4.5min内的激光指向稳定性

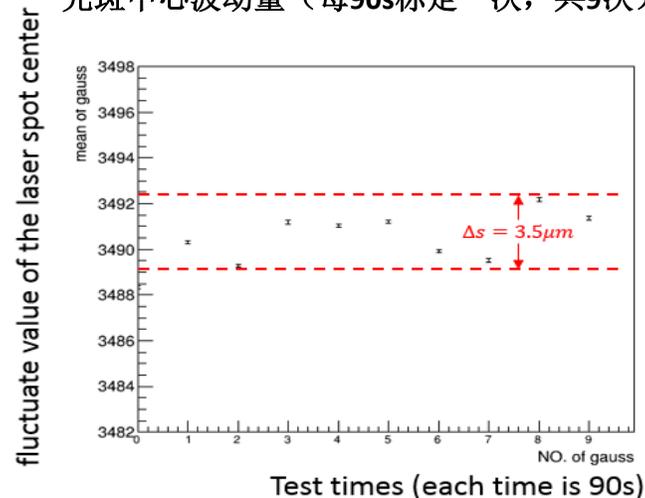
实验装置:



激光指向稳定性分析:



光斑中心波动量 (每90s标定一次, 共9次)

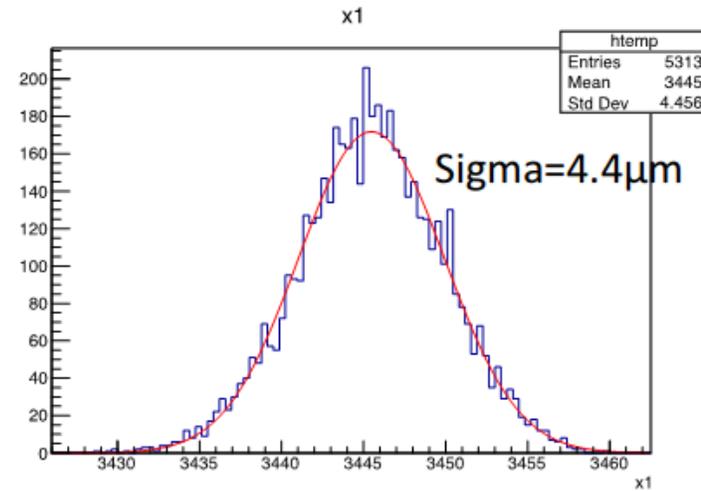
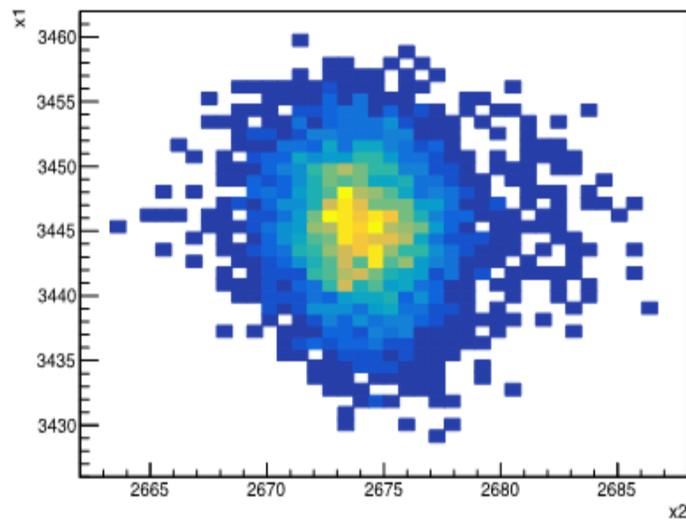
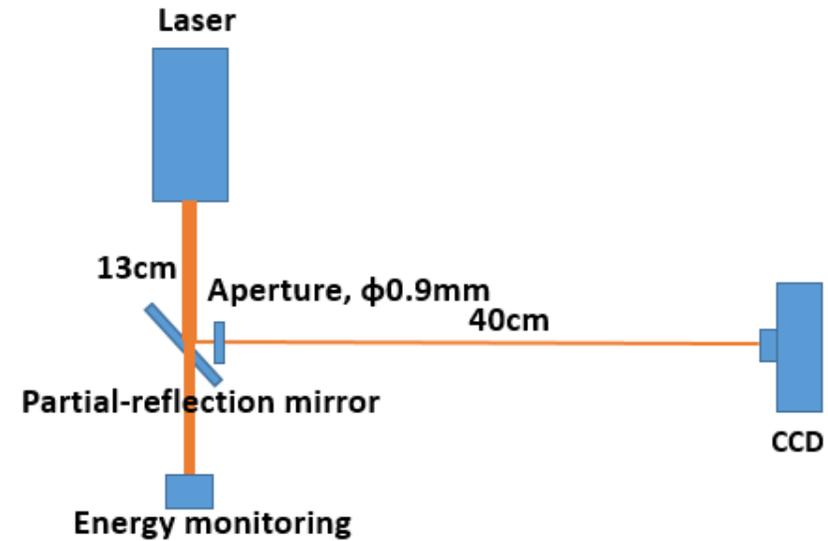
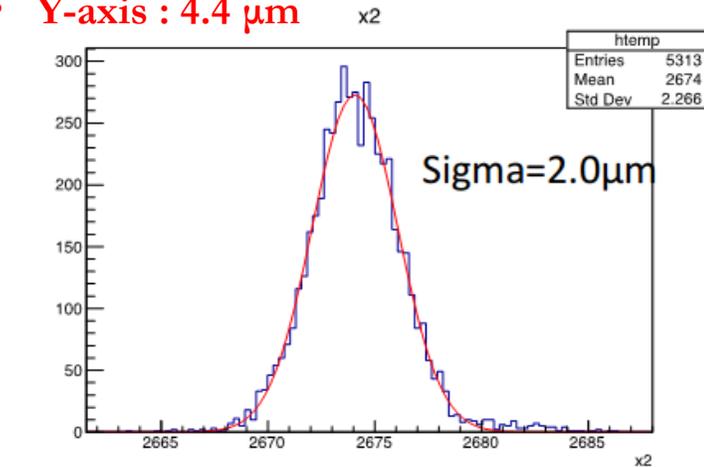


➔ 标定时间:
1分30秒

Stability of the laser beam position

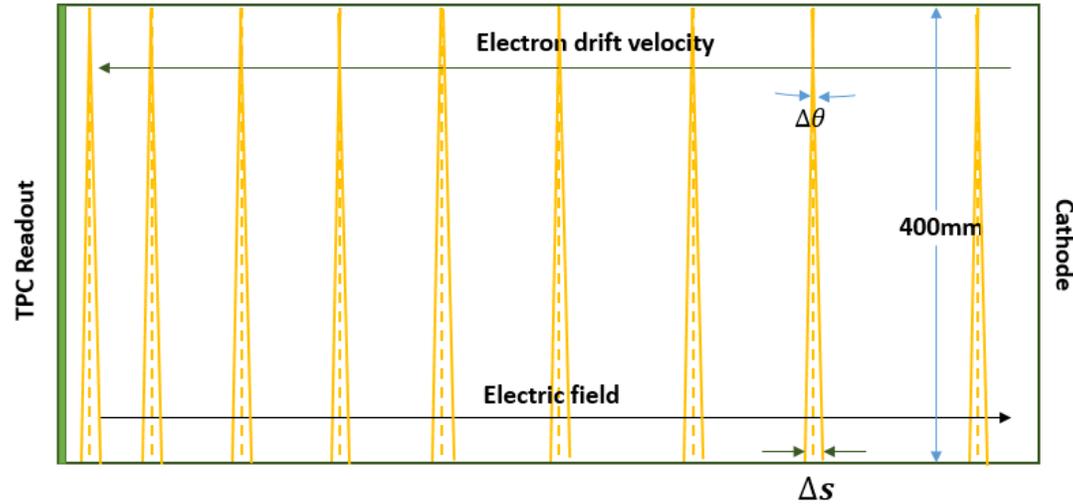
GOOD!

- Duration of measurement time: **10mins**
- Stability of the laser beam energy
 - **X-axis : 2.0 μm**
 - **Y-axis : 4.4 μm**

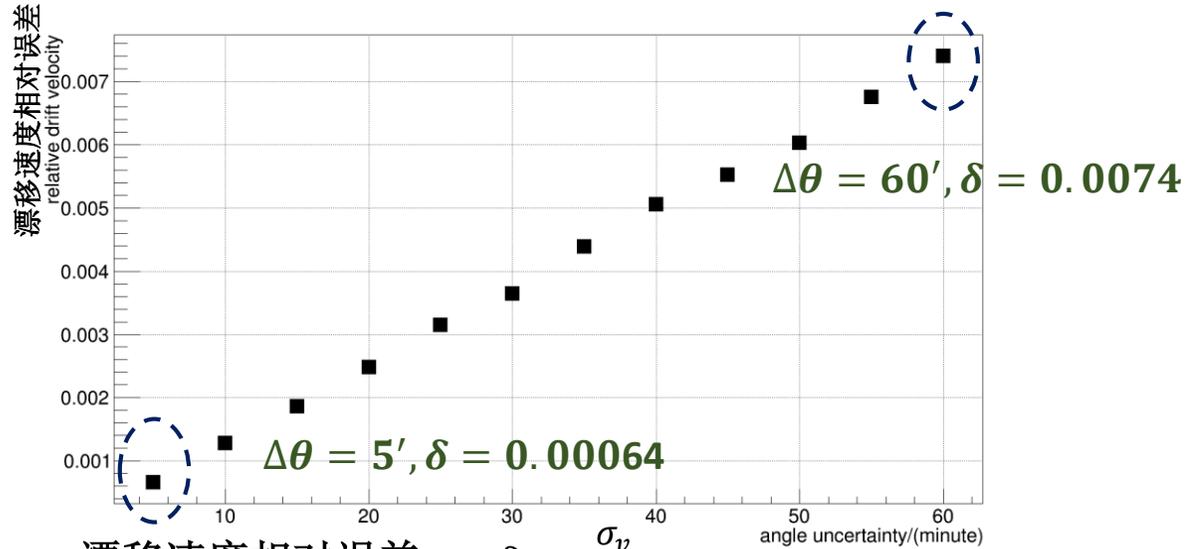


激光精度（调光精度+指向稳定性）对漂移速度的影响：

- 调光精度——系统误差
- 指向稳定性——随机误差

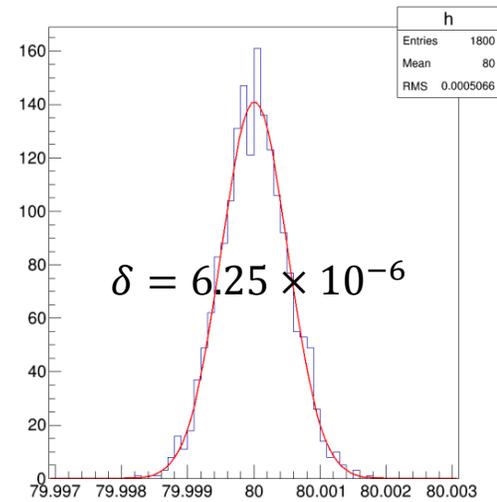


➤ 激光系统误差调光精度（ $\Delta\theta=5'\sim 60'$ ）对漂移速度影响：



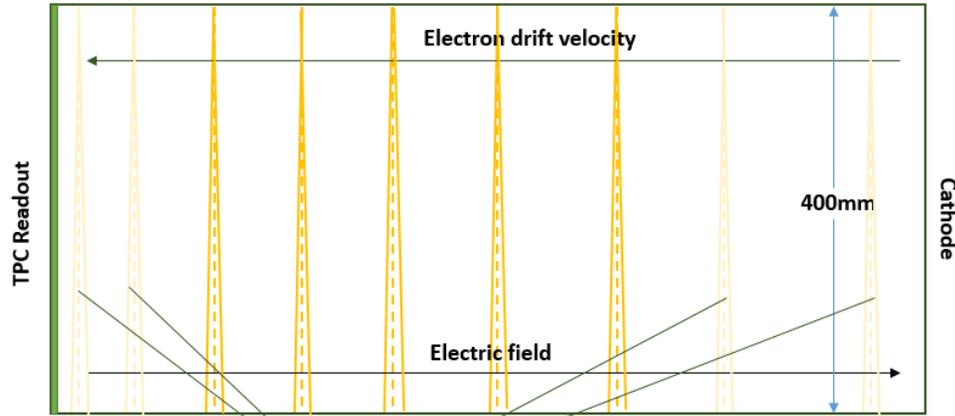
- 漂移速度相对误差：
$$\delta = \frac{\sigma_v}{v_{mean}}$$
- $\Delta\theta=5'$ 时，由 Δv 引入的Z向偏差 $\Delta Z = 0.33mm$
(ILC在Z向位置分辨 $0.4\sim 1.4mm$ for zero ~ full drift)

➤ 激光随机误差指向稳定性对漂移影响：



- 3.5um光斑中心波动量引入的漂移速度相对误差： 6.25×10^{-6}

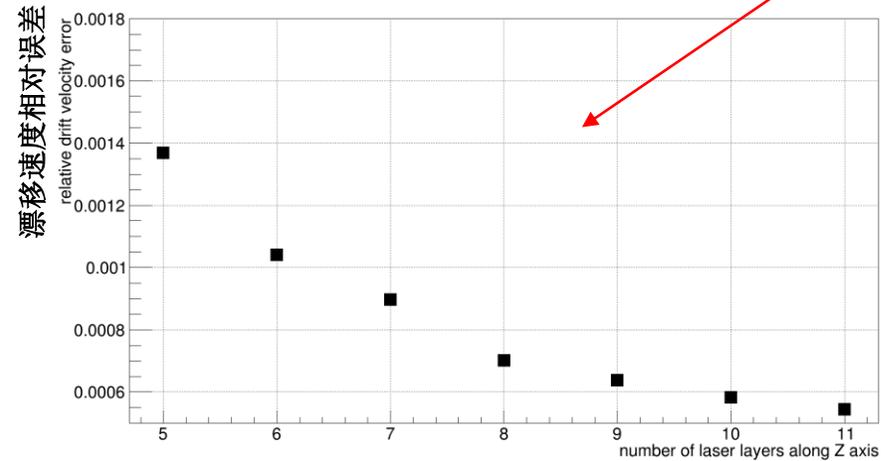
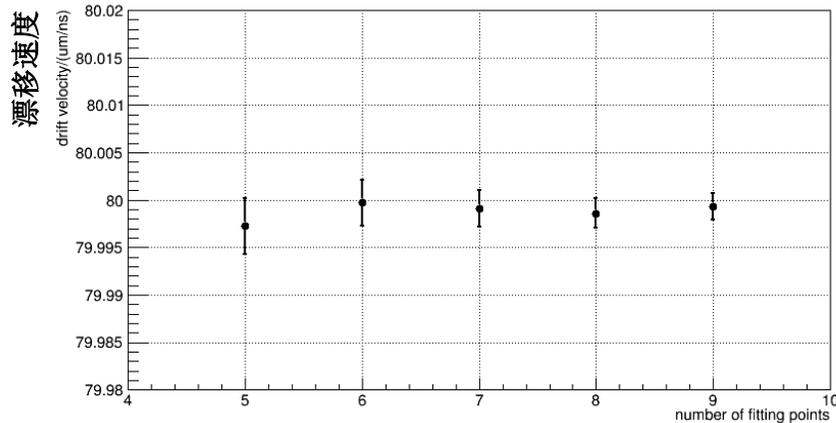
激光标定层数对漂移速度的影响:



激光层数目对漂移速度的影响

(激光层位置不同, 激光层递减顺序不同, 会导致结果有差别, 比较结果见Backup第1页)

➤ 调光精度 $\Delta\theta = 5'$, 拟合得到的漂移速度: $v_{\text{mean}} \pm \sigma_v$



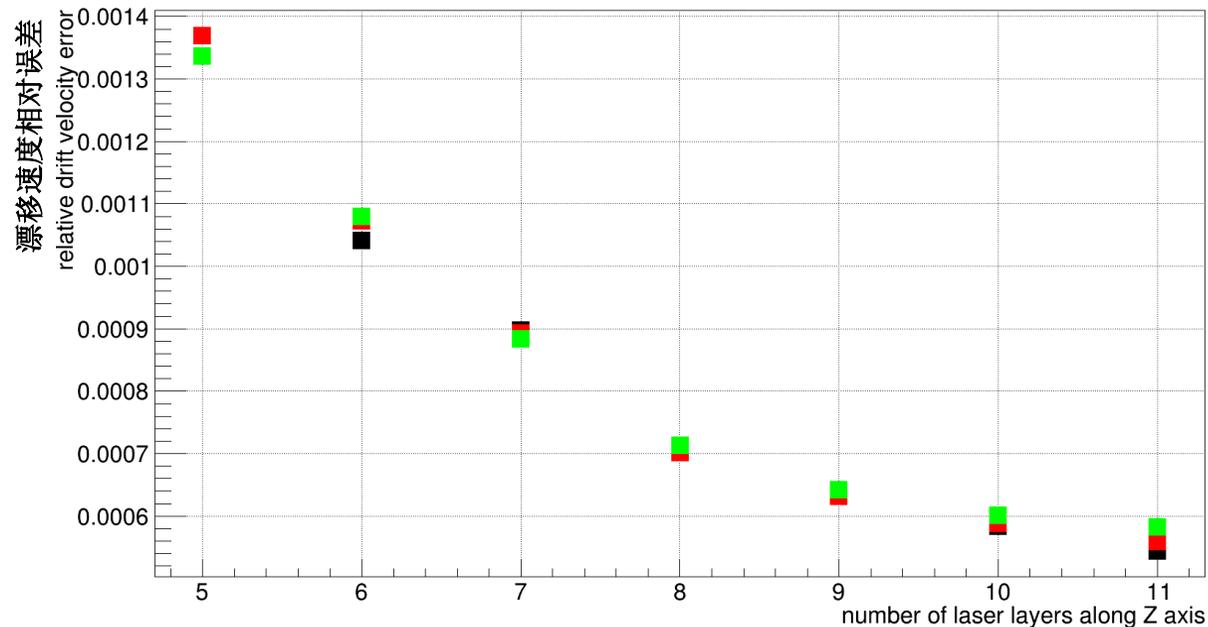
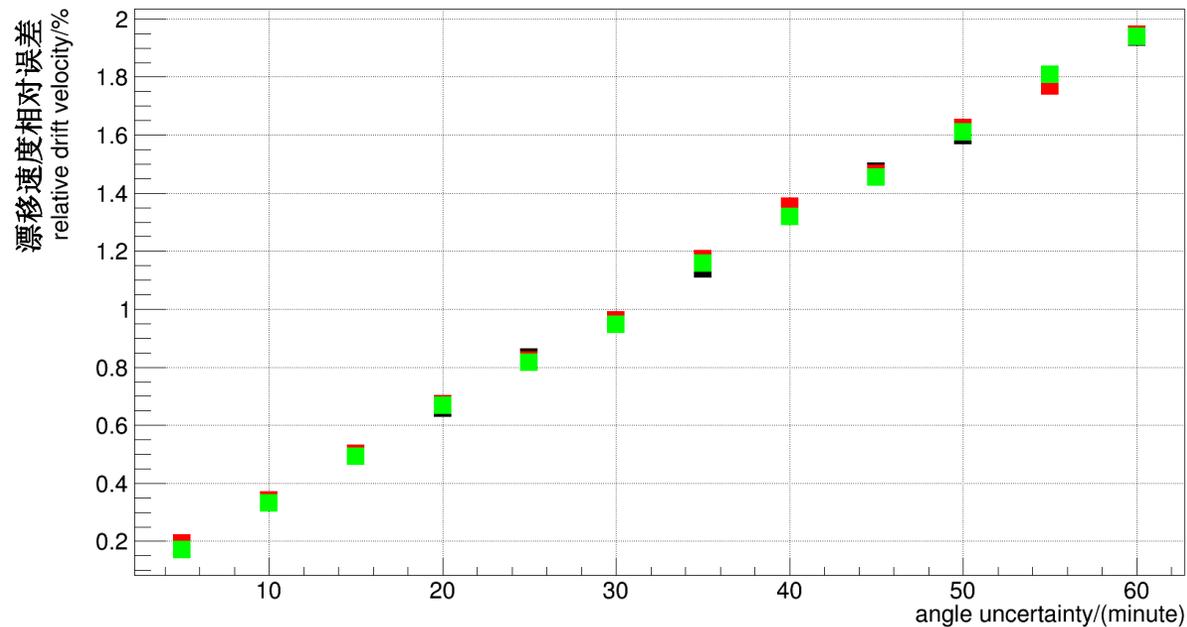
➤ T2K气体, $v_{\text{drift}} = 80\text{um/ns}$,

- 11层激光束: $\delta = 5.4 \cdot 10^{-4} \sim \Delta z = 0.27\text{mm}$
- 9层激光束: $\delta = 6.4 \cdot 10^{-4} \sim \Delta z = 0.33\text{mm}$
- 5层激光束: $\delta = 1.37 \cdot 10^{-3} \sim \Delta z = 0.685\text{mm}$



适当增加标定激光层数可以减小z向位置偏差 (500mm漂移距离上, 9~10层激光束比较适宜)

不同气体下（调光精度 $\Delta\theta = 5'$ ，标定激光9层）对漂移速度的影响：

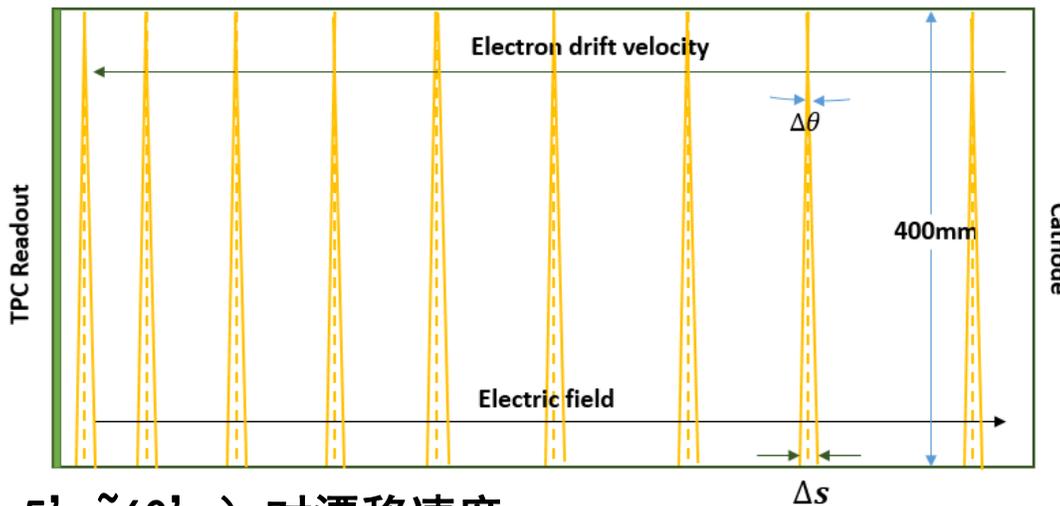


➡ 改变不同工作气体，对漂移速度相对误差变化影响不大

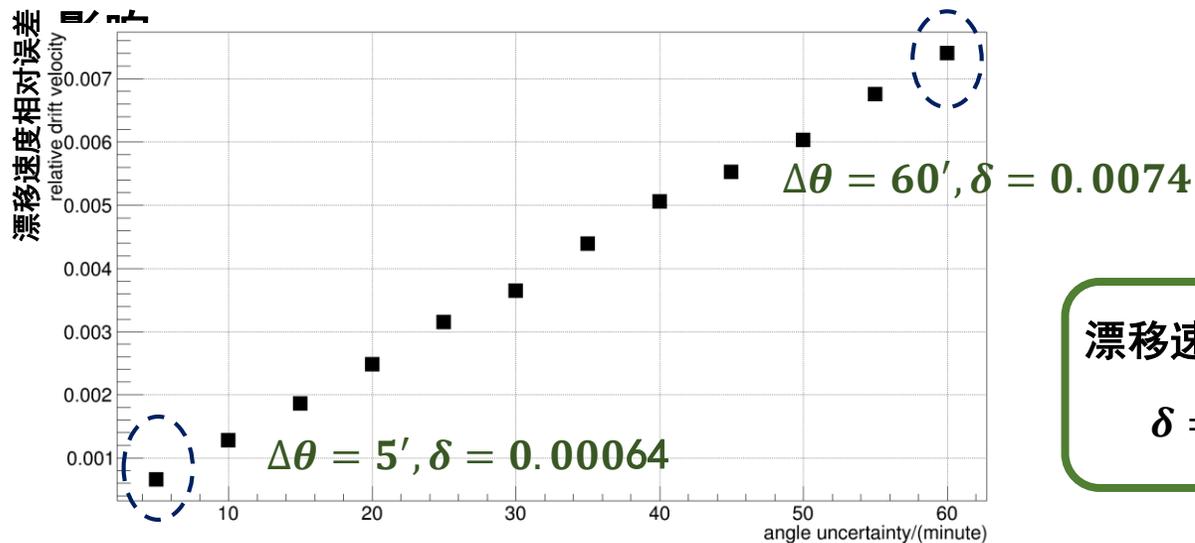
激光标定系统

激光精度对漂移速度的影响

- 调光精度——系统误差
- 指向稳定性——随机误差



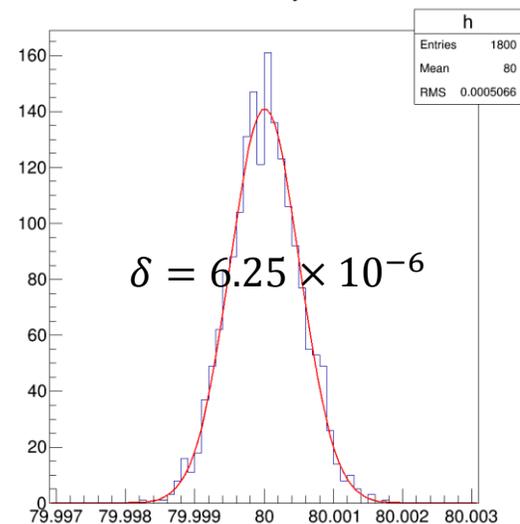
- 激光系统误差调光精度 ($\Delta\theta=5' \sim 60'$) 对漂移速度



漂移速度相对误差:

$$\delta = \frac{\sigma_v}{v_{mean}}$$

- 激光随机误差指向稳定性对漂移影响:

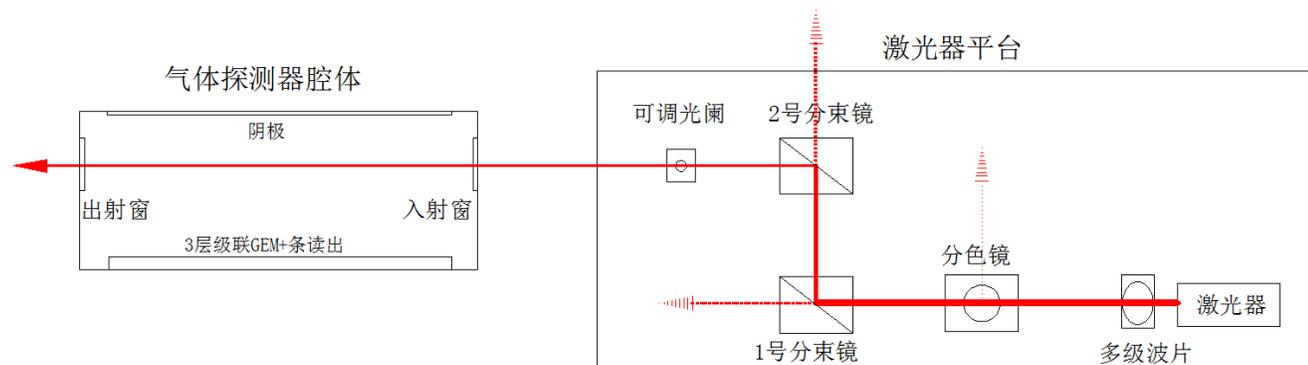


- $\Delta\theta=5'$ 时, 由 Δv 引入的Z向偏差 $\Delta Z = 0.33mm$ (ILC 在Z向位置分辨 $0.4 \sim 1.4mm$ for zero \sim full drift)
- 3.5um光斑中心波动量引入的漂移速度相对误差: 6.25×10^{-6}

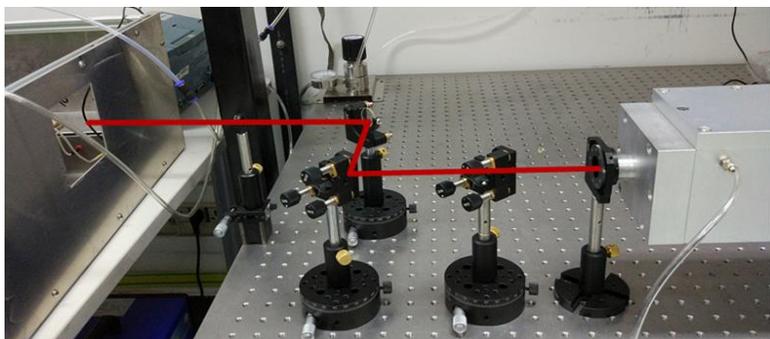
激光信号测试结果分析——激光信号随光斑面积变化

实验条件:

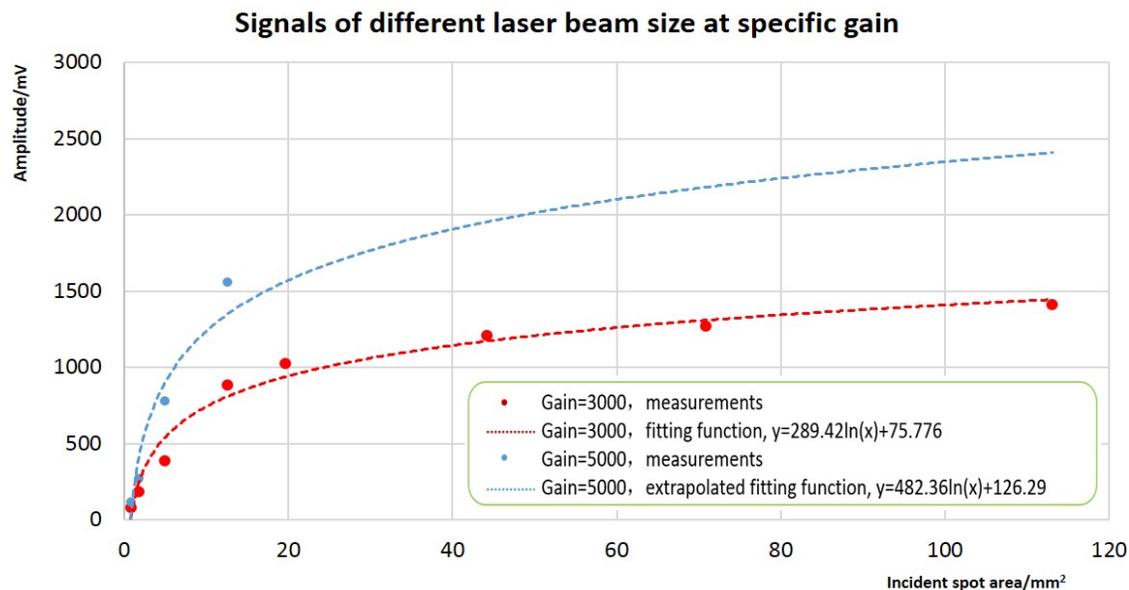
- 气体: Ar:CO₂=70:30
- 前放: IHEP研制前放板
- 主放: ORTEC 572A, 放大倍数10, 成形时间: 0.5us
- 3层GEM, 每层GEM压差310V
- 源: 266nm激光, 出束频率10Hz, 单脉冲能量15mJ, 出束模式为高斯分布
- 读出条, 分别为1mm, 2mm、4mm、6mm和8mm



实验装置:



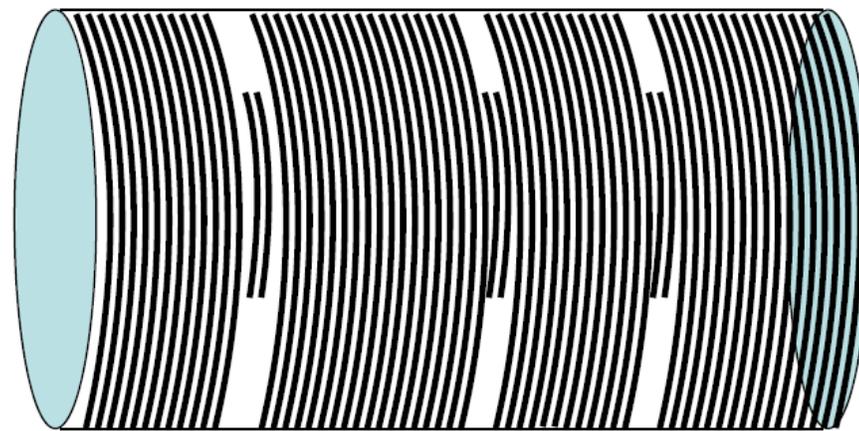
结果分析:



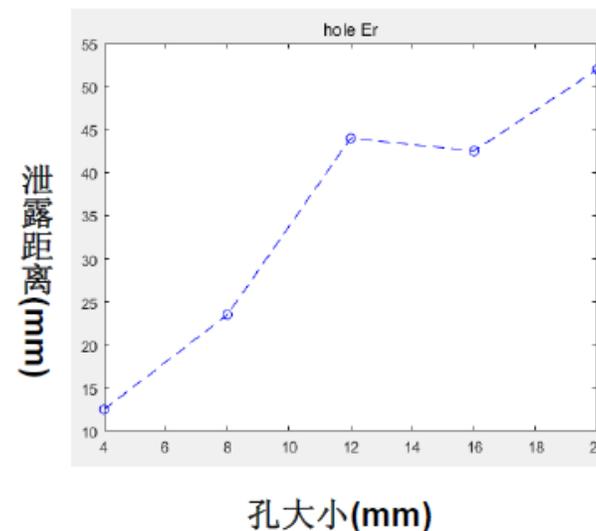
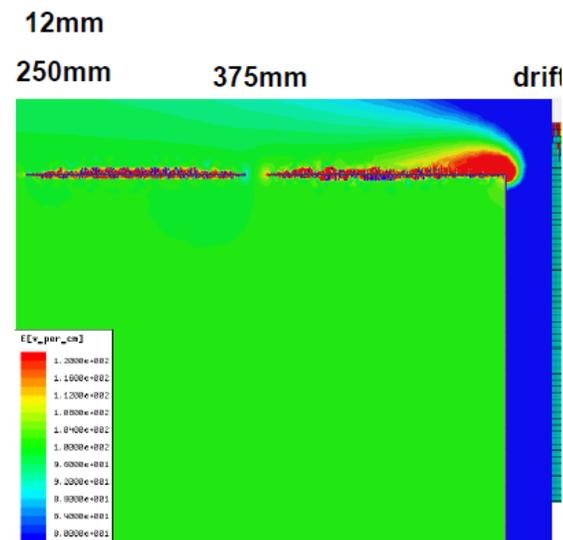
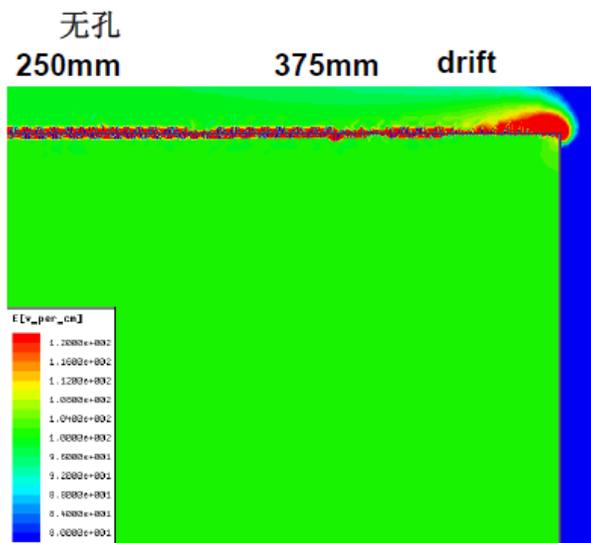
2018/10/14

漂移场部分设计

- Field cage设计
 - 需要预留的激光入射孔
 - 其余部分保留均压环
 - 漂移长度~510mm
 - 开孔选择了Z向最大不超10mm

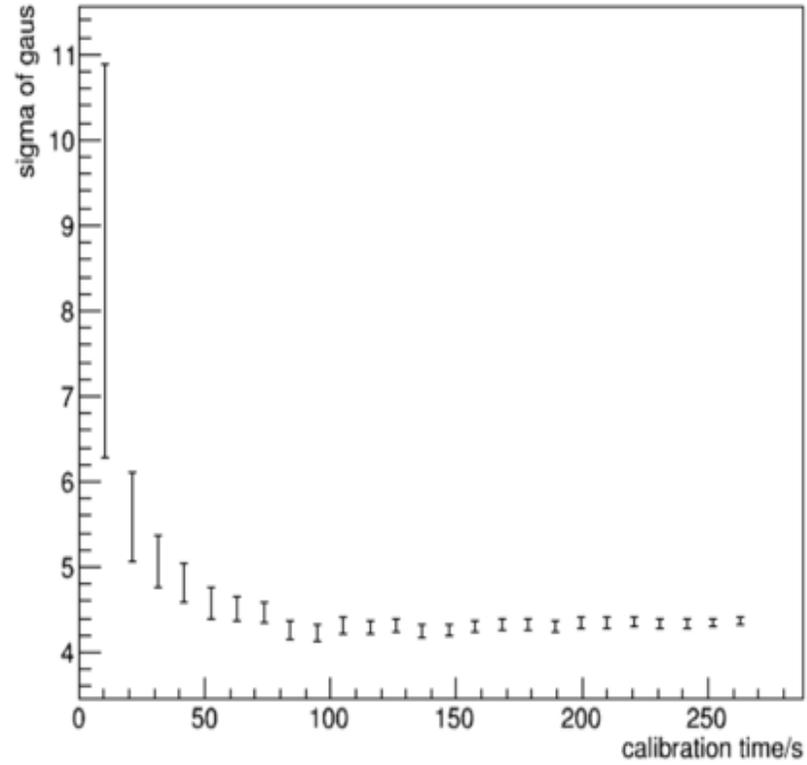


漂移场柔性电路设计的示意图



开孔大小与Er方向的关系

Dimension of X1



Dimension of X2

