

面向未来对撞机应用的时间投影室原型机 激光实验研究进展

原之洋, 常悦

祁辉荣, 喻丽雯, 欧阳群, 张建, 李玉兰, 邓智, 宫辉, 蔡一鸣

中国科学院高能物理研究所, 清华大学

yuanzy@ihep.ac.cn

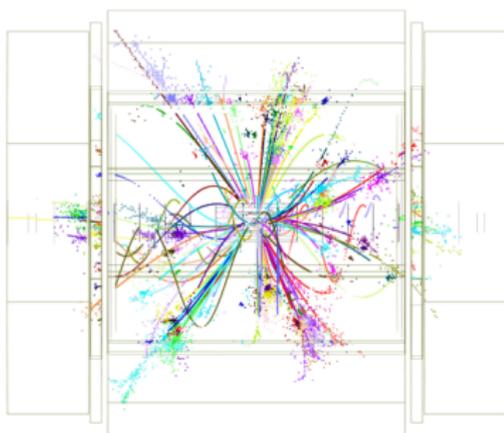
2021 年 10 月 22 日

- 1 研究背景和目标
- 2 TPC 原型机测试结果与进展
 - 位置分辨率研究
 - 电离能损研究
 - 漂移速度研究
- 3 小结

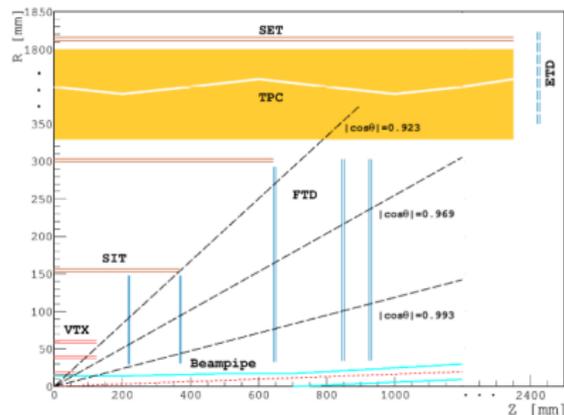
研究背景和目标

未来对撞机

ILC



CEPC



对撞机参数及 TPC 性能指标:

	质心能量 (GeV)	亮度峰值 ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)	动量分辨率 ($\Delta(1/p_t) / \text{GeV}/c$)	$\sigma_{r\phi}$ (μm)	σ_{rz} (mm)	dE/dx 分辨率	TPC 物质的量 ($r z$)
ILC	200 – 500	2×10^{34}	$\sim 9 \times 10^{-5}$	< 100	~ 0.5	5%	$\sim 0.04 0.15X_0$
CEPC	91.2 – 240	$3-32 \times 10^{34}$	$\sim 10^{-4}$	< 100	~ 0.5	5%	$\sim 0.04 0.15X_0$

面向未来对撞机，一个简单有效的标定方法被需要用来进行时间投影室探测器的性能标定和监控。

标定方法	优点	困难
宇宙射线	不受空间限制/粒子单一	计数率较低/标定时间长/精度受限
放射源	计数率较高/针对性测量	放射性残留/范围有限
X 光机	计数率高/易控	能量不单一/全能峰叠加于连续谱上
激光	计数率径迹可控/可重复	激光光路搭建和维护

紫外激光是一种有效的标定手段

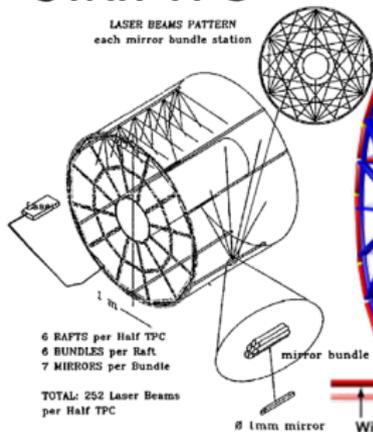
- 具有良好空间分辨和时间分辨的长径迹，适用于大型气体径迹室测试；
- 利用激光来模拟在预定义位置上的带电粒子径迹；
- 可实现双径迹分辨测量；
- 激光光束在磁场中不发生偏转，可以用来研究磁场对粒子径迹的影响；

国内外研究现状

应用:

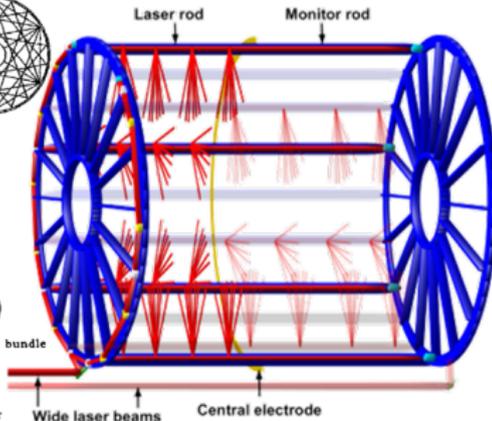
STAR-TPC

LASER BEAMS PATTERN
each mirror bundle station



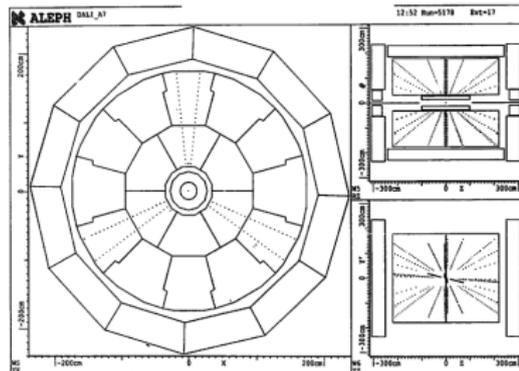
ALICE-TPC

Laser rod Monitor rod



ALEPH-TPC

ALEPH Collaboration / Detector for electron - positron annihilations

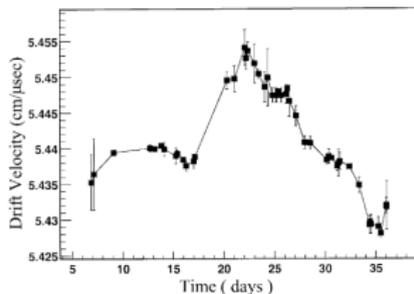


合作:

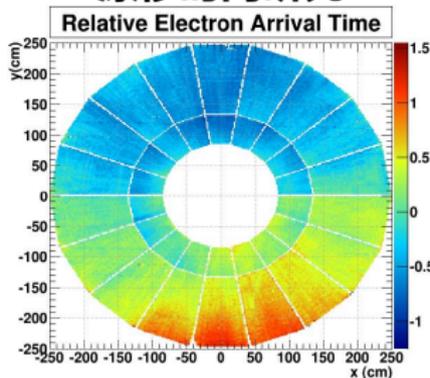
- 中国近代物理研究所段利敏教授 CEE TPC 项目合作集成了四束激光分光标定系统;
- 荷兰 NIKHEF Pixel TPC 项目合作激光测试;
- 日本 KEK Fujii 教授 TPC 项目合作激光 dE/dx 测试;

成果:

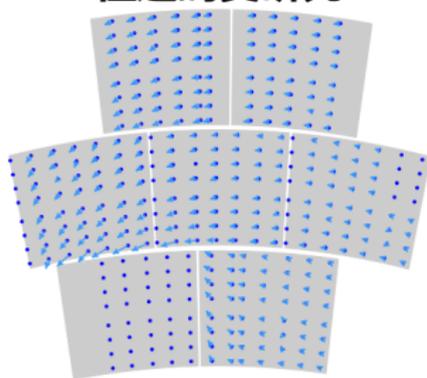
漂移速度监控



漂移时间研究



径迹畸变研究

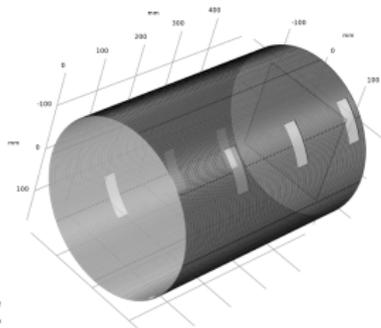
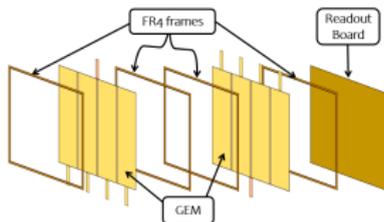


高能所 TPC 原型机测试目标:

- 空间径迹分辨率的研究;
- 电离能损的研究;
- 漂移速度的研究;

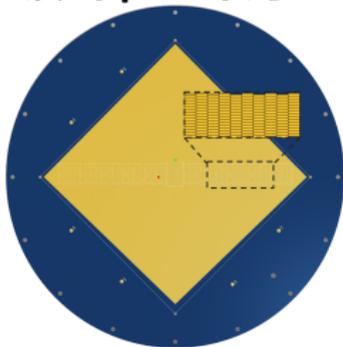
TPC 原型机搭建与测试结果

读出双层 GEM

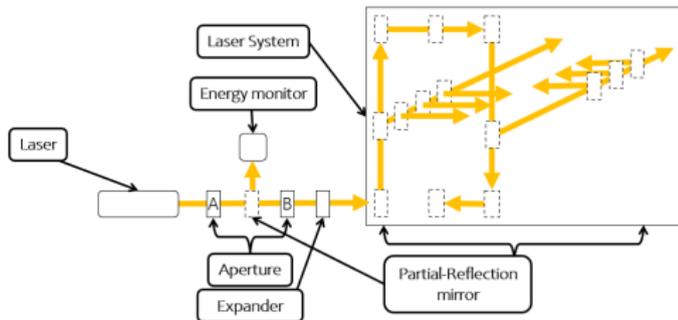


场笼

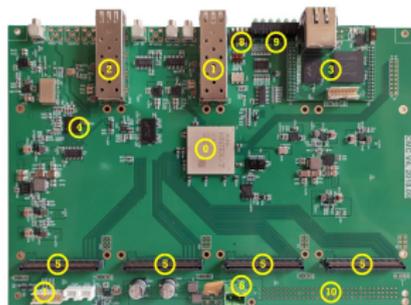
读出 pad 布局



激光光路设计



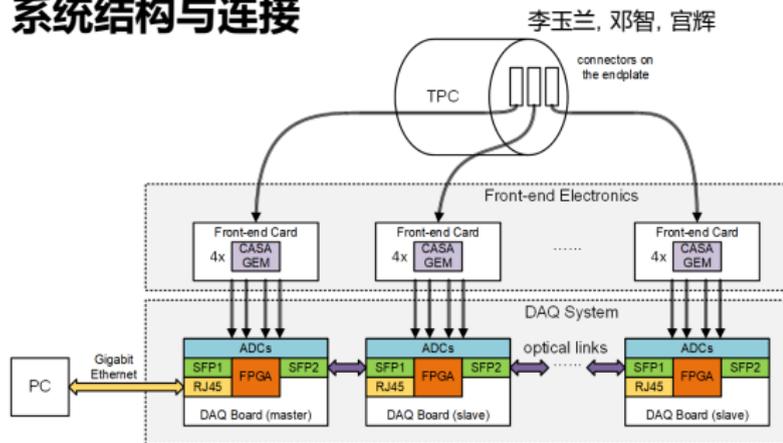
母板 PCB



子板 PCB

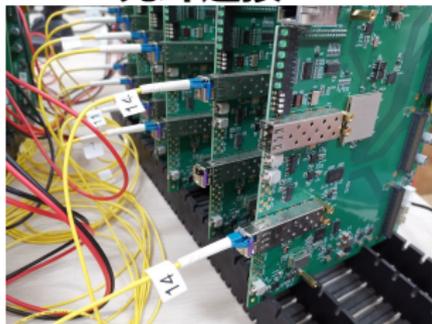


系统结构与连接



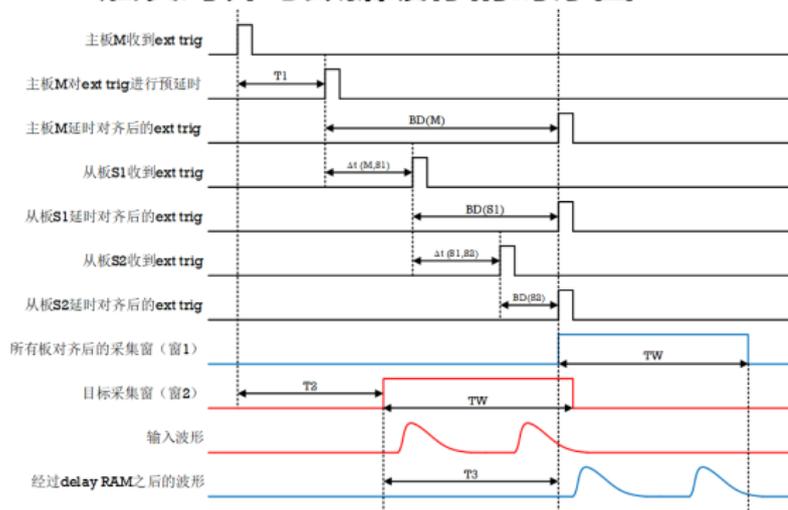
数据采集系统用于采集前端电路输出的模拟信号，该系统由一块主板和若干块从板串行连接构成。上位机与主板通过以太网通信，主板与从板、从板与从板之间通过光纤通信。

光纤连接

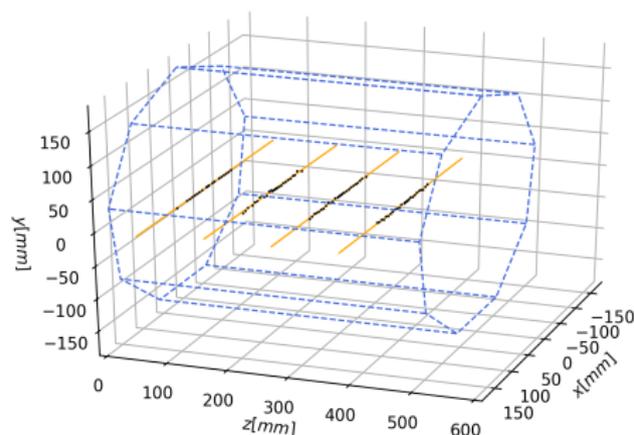


外触发信号从主板上的接插件输入，占用光纤链路中的一位进行传输，沿下行方向依次达到各个节点。

触发对齐与数据缓存的时序图



单个事例重建



激光能量监控	变化范围	$E_{mean} \pm \sigma$
--------	------	-----------------------

TPC 探测器	漂移时间	$2.6 \sim 2.9 \mu s$
---------	------	----------------------

$5.7 \sim 6.0 \mu s$

$8.2 \sim 8.5 \mu s$

$10.5 \sim 11.0 \mu s$

触发数	每列 ≥ 2
-----	-------------

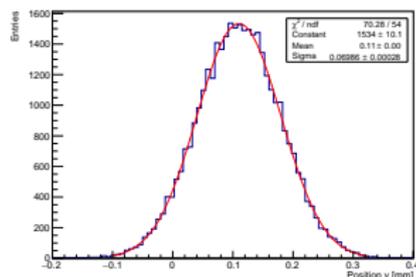
整体	激光控制机箱给出触发信号 使能量监控和采数同时进行
----	------------------------------

位置分辨率与横向扩散

定理 (横向扩散系数)

$$\sigma_y^2 = \frac{D_T^2}{N_{\text{eff}}}(z - z_0) + \frac{h^2}{12N_{\text{eff}}} + \frac{w^2}{12N_{\text{eff}}} \quad (1)$$

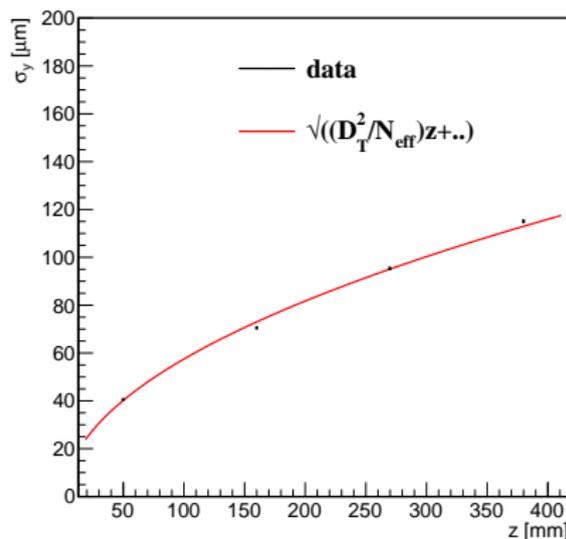
位置分辨率 $\sigma_y = (69.9 \pm 0.3) \mu\text{m}$



单点位置分辨率与漂移距离关系

$$D_T = (310.7 \pm 7.6) \mu\text{m}/\sqrt{\text{cm}}$$

实验拟合与模拟结果相近



空间径迹分辨率-电荷修正

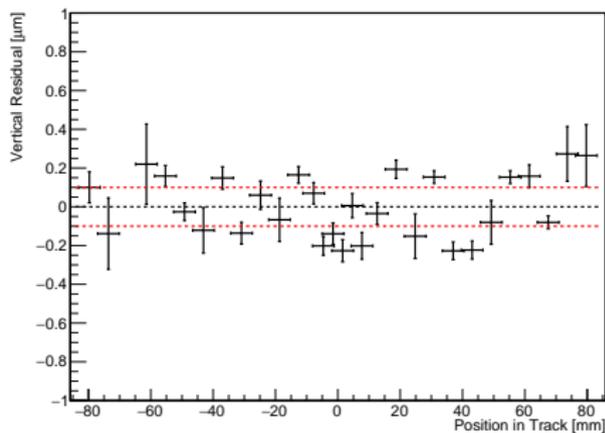
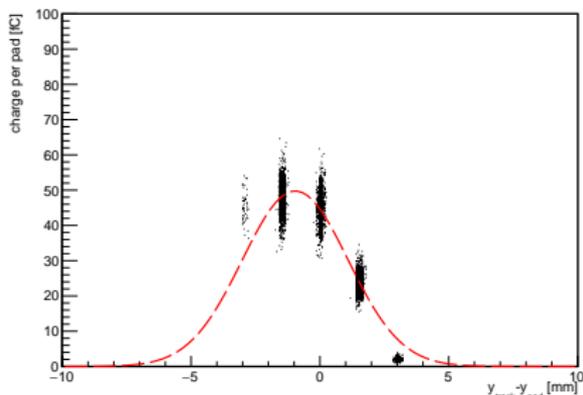
定理 (PRF 方程)

$$PRF = \frac{\exp \left[-4 \ln 2 (1 - r) x^2 / w^2 \right]}{1 + 4 r x^2 / w^2} \quad (2)$$

$$\sigma_y = \frac{\sum \sigma_i \times \frac{1}{e_{\sigma_i}^2}}{\sum \frac{1}{e_{\sigma_i}^2}}$$

电荷修正后的 y 位置残差分布
(38cm 漂移距离) $\sigma_y = 144.60 \mu\text{m}$

重建径迹与 pad 位置差值

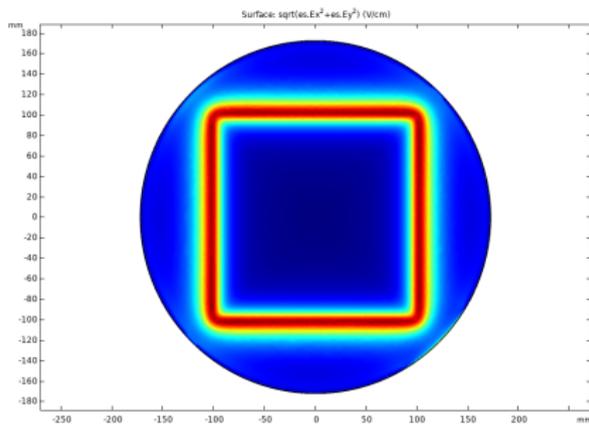


空间径迹分辨率-电场修正

定理 (y 方向畸变)

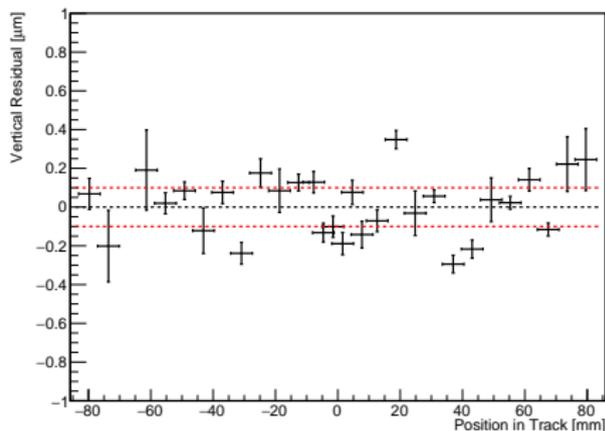
$$D_y = \int_{Z_0}^{Z_{drift}} \frac{E_y}{E_z} \times dZ \quad (3)$$

读出上表面的畸变电场



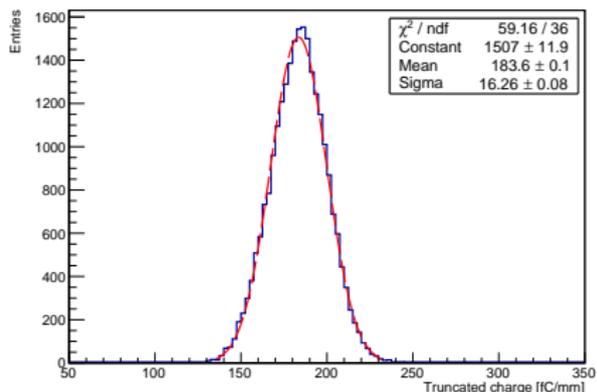
$$\sigma_y = \frac{\sum(\sigma_i - D_i) \times \frac{1}{e_{\sigma_i}^2}}{\sum \frac{1}{e_{\sigma_i}^2}}$$

电场修正后的 y 位置残差分布
(38cm 漂移距离) $\sigma_y = 130.52 \mu\text{m}$

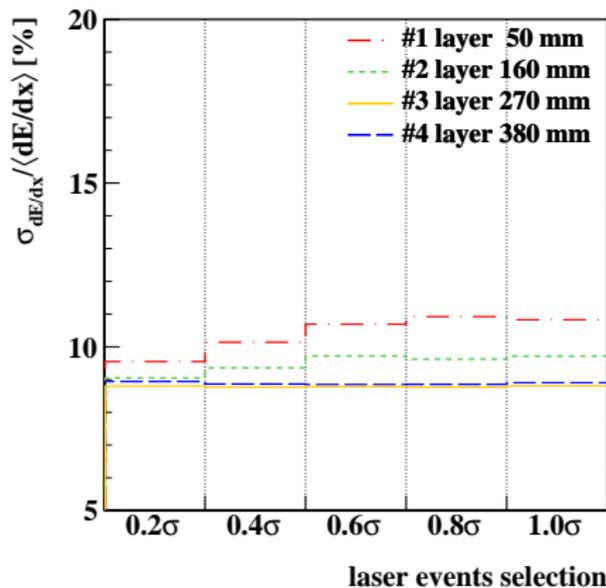


电离能损

$$\sigma_{dE/dx} = (8.9 \pm 0.4) \% (38\text{hits})$$



不同漂移距离, 不同激光能量截断



定理 (电离能损与 hits 数目关系)

$$\sigma_{dE/dx} = \sigma_0 N_{hits}^{-k} \quad (4)$$

对于全尺寸 TPC(220hits):

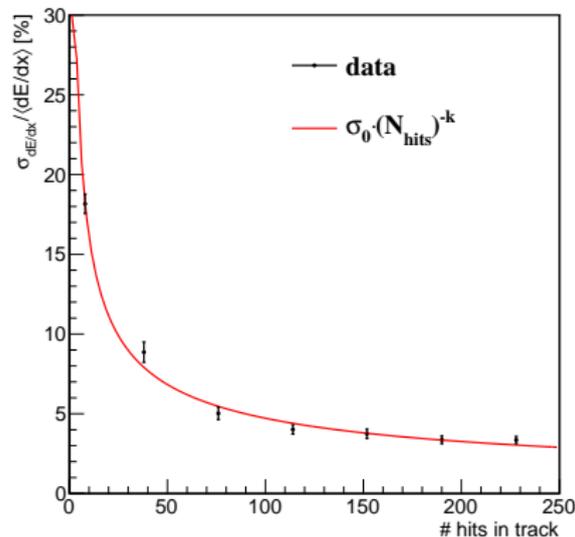
$$\sigma_{dE/dx} = 3.36 \pm 0.26 \%$$

GridPixel TPC DESY 2.5GeV 电

子束流实验: $\sigma_{dE/dx} = 4.1 \%$

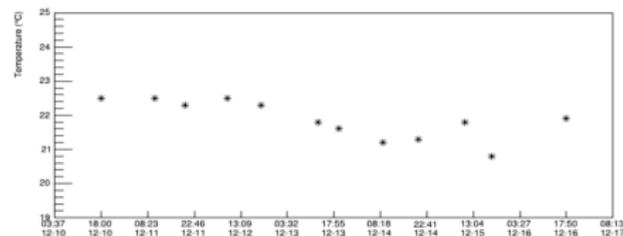
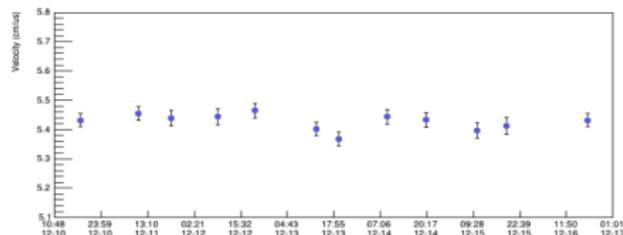
激光实验重复稳定性在一定程度上
好于束流实验

电离能损与 hits 数目关系

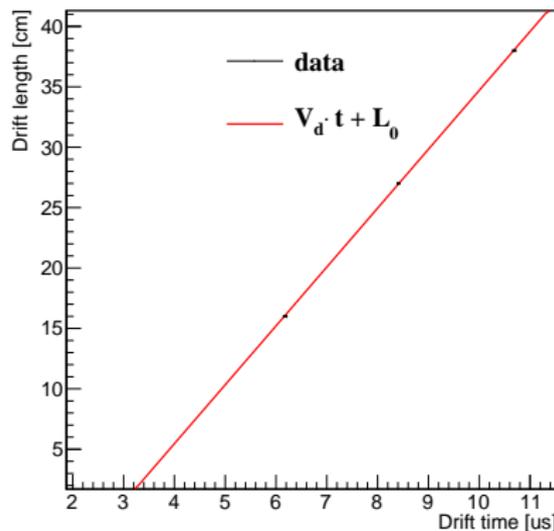


漂移速度

漂移速度, 温度监控 (160V/cm)



漂移速度



漂移电场 180V/cm

$$V_{Drift} = (6.81 \pm 0.15) \text{ cm}/\mu\text{s}$$

Garfield++ 模拟值 $7 \text{ cm}/\mu\text{s}$

标定方法:

- 宇宙射线, 放射源, X 光机, 激光
- **激光是一种有效的标定手段**

高能所 TPC 原型机测试结果:

- **空间径迹分辨率:** $130.52 \mu\text{m}$ (38cm 漂移距离, 无磁场)
- **电离能损分辨率:** $8.9 \pm 0.4 \%$ (38hits), $3.36 \pm 0.26 \%$ (220hits)
- **漂移速度:** $V_{\text{Drift}} = (6.81 \pm 0.15) \text{ cm}/\mu\text{s}$ (漂移电场 180V/cm)
- **实验结果表明: 紫外激光模拟特定径迹, 是一种进行气体探测器和原型机实验研究的有效方法和实验手段**

下一步:

- 对于电场畸变和漂移速度关系进一步研究

谢谢!
各位老师 and 同学!