

# 高能质子束能量测量方案设计

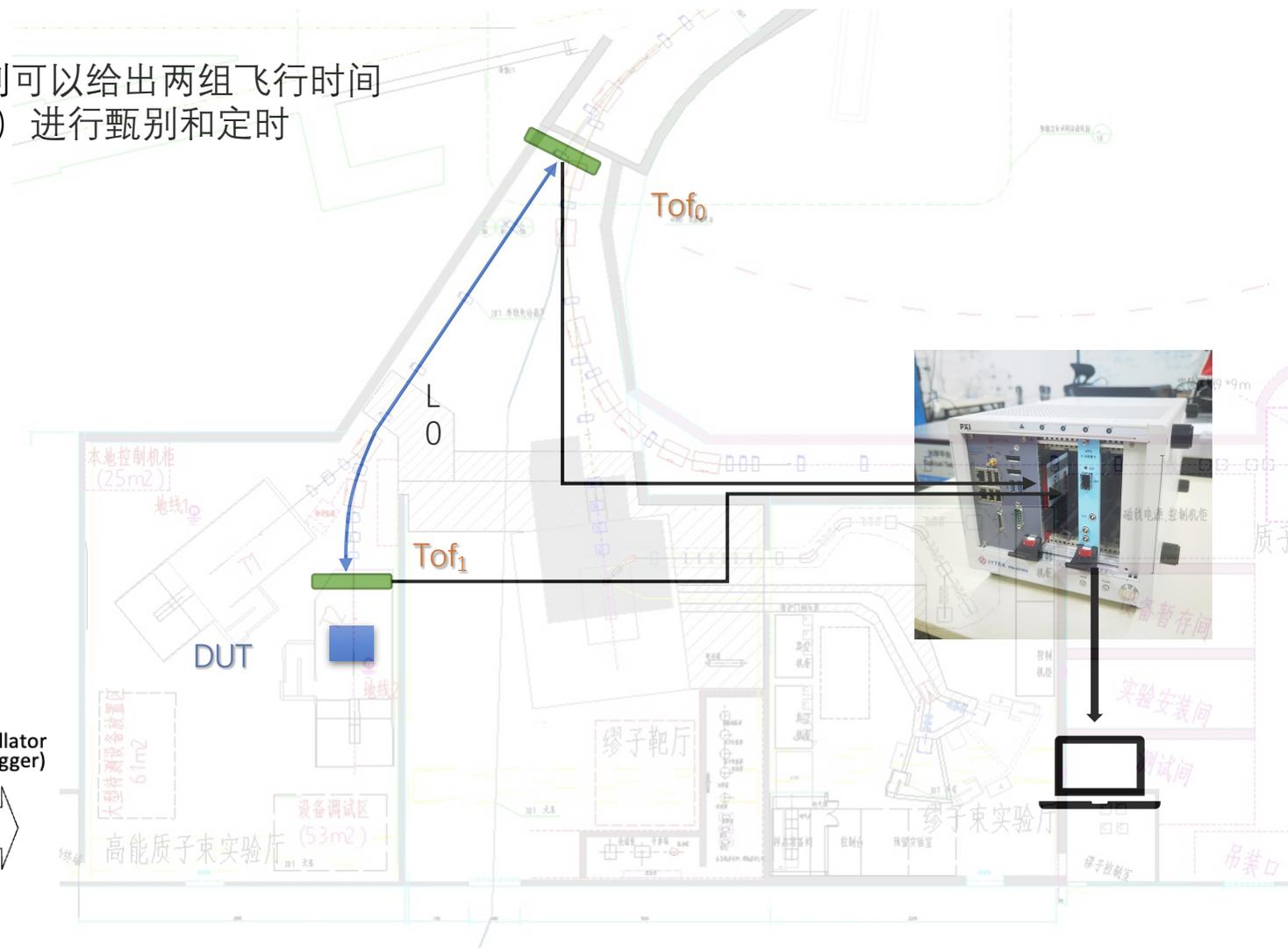
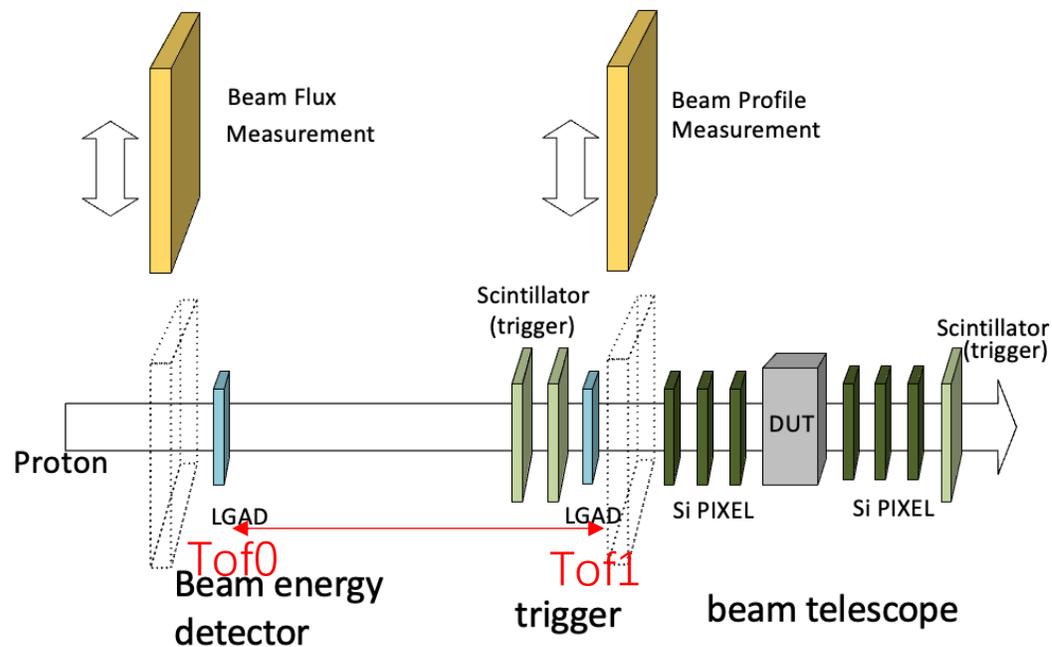
梁志均

中国科学院高能物理研究所

# 质子束能量测量探测器

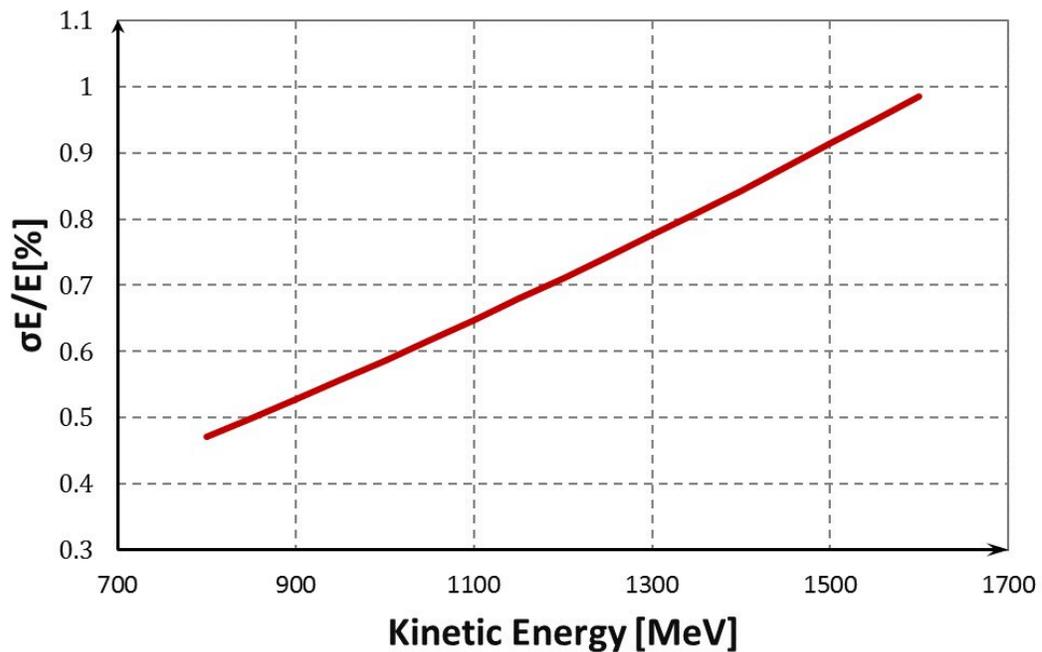
- 前定时探测器 (Tof0) 和后定时探测器 (Tof1) 分别可以给出两组飞行时间
- 所有探测器给出模拟信号进入逻辑单元 (Logic Unit) 进行甄别和定时

时间分辨好于100皮秒  
飞线距离 40米

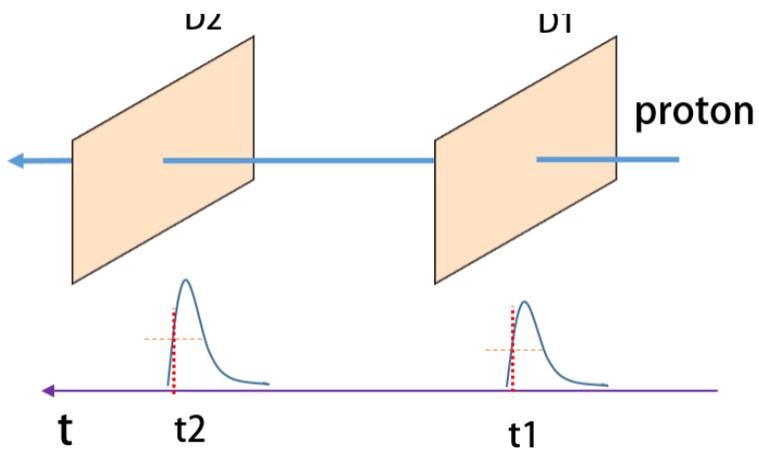


# 质子束流动量测量

## 质子能量分辨率好于1%



参数类型	参数名称	参数值
探测器设计参数	探测器尺寸	2cm*2cm
	时间分辨率	100ps
	电子学通道	12
	质子能量测量区间	0.8~1.6GeV
	能量分辨率	1%



# 传感器方案：LGAD传感器

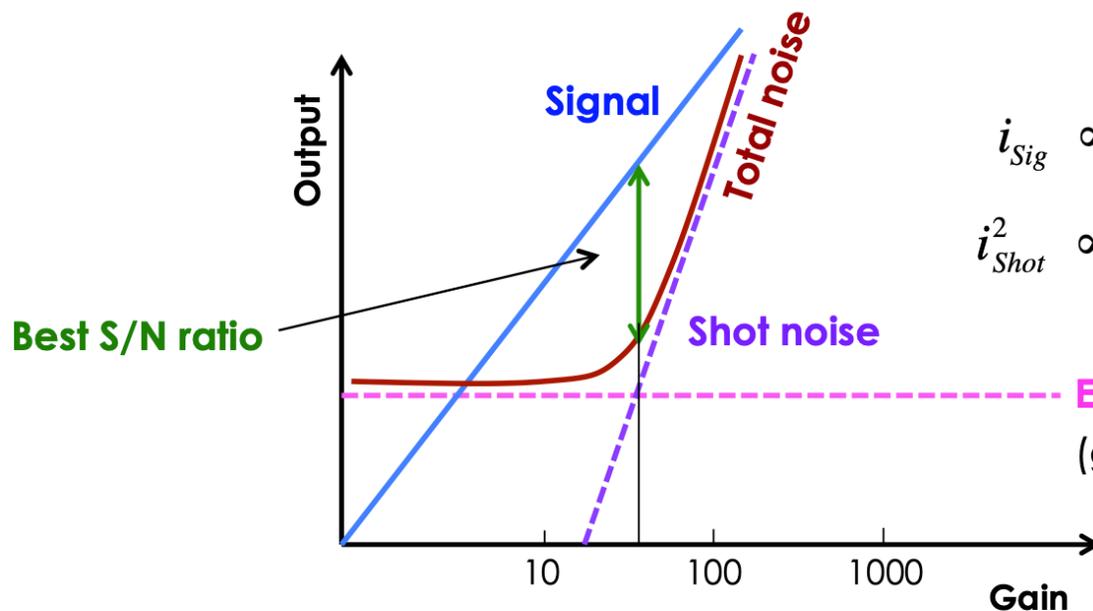
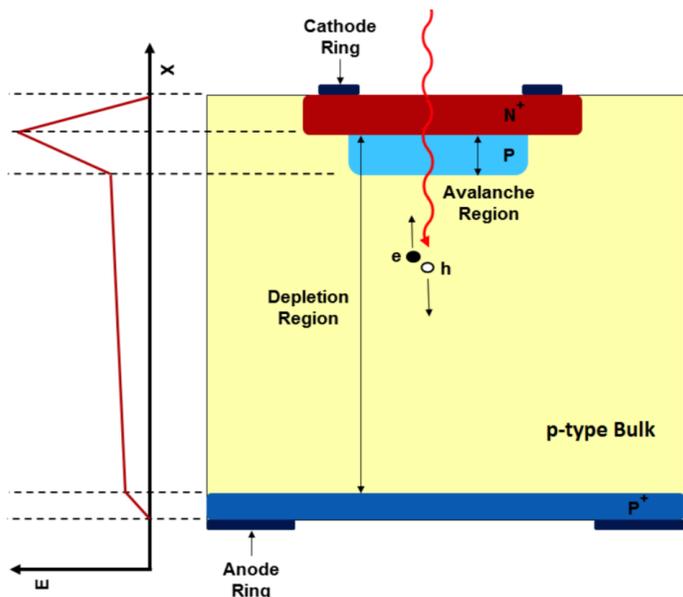
LGAD是近年出现新型硅传感器，可以高精度测量时间（20-30皮秒）

与APD和SiPM比较，LGAD has 适中的增益(10-50)

- 信噪比高，无自触发
- 减薄耗尽区（漂移区），提高电场与电子漂移速度

$$\sigma_{jitter}^2 = \left( \frac{t_{rise}}{S/N} \right)^2$$

## 超快传感器原理



Noise increases faster than then signal

→ the ratio S/N becomes worse at higher gain

$$i_{Sig} \propto G$$

$$i_{Shot}^2 \propto [I_{Surface} + (I_{Bulk})G^2F]$$

Excess Noise Factor

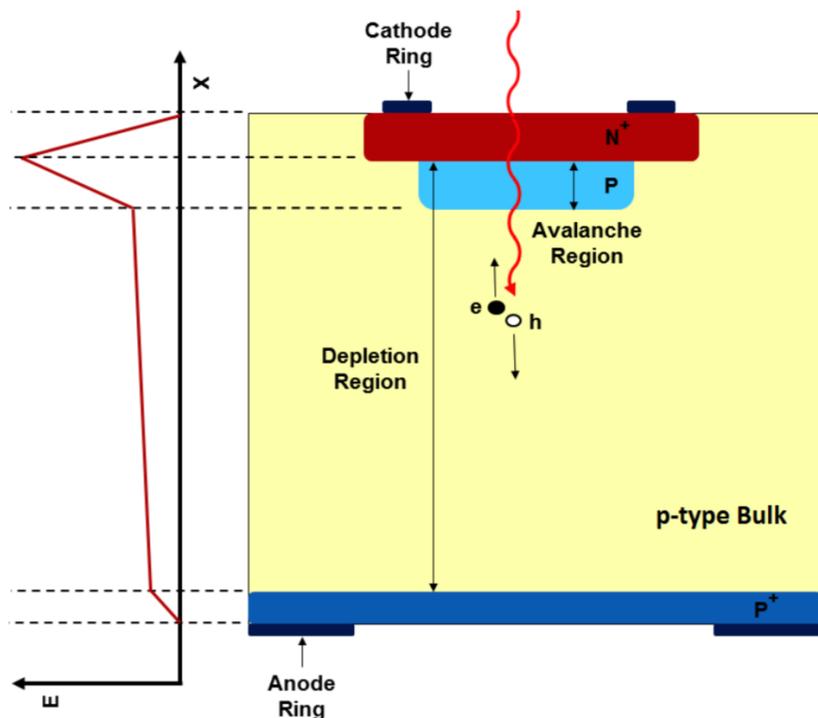
Electronic noise  
(gain independent)

# 传感器方案：国产LGAD传感器

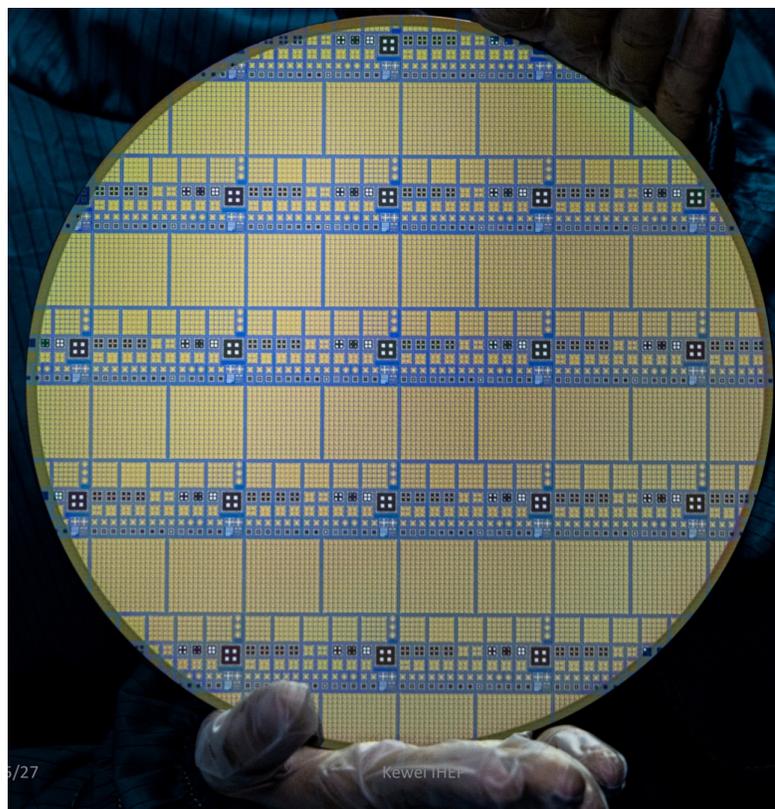
- 拟采用高能所研发出大面积国产低增益雪崩放大传感器（LGAD）
  - 对比SiPM，LGAD没有自触发，信噪比高，雪崩增益~50
  - 高能所负责版图设计，工艺设计，测试，微电子所流片
  - 传感器尺寸：2cm×2cm（15×15像素）

$$\sigma_{jitter}^2 = \left( \frac{t_{rise}}{S/N} \right)^2$$

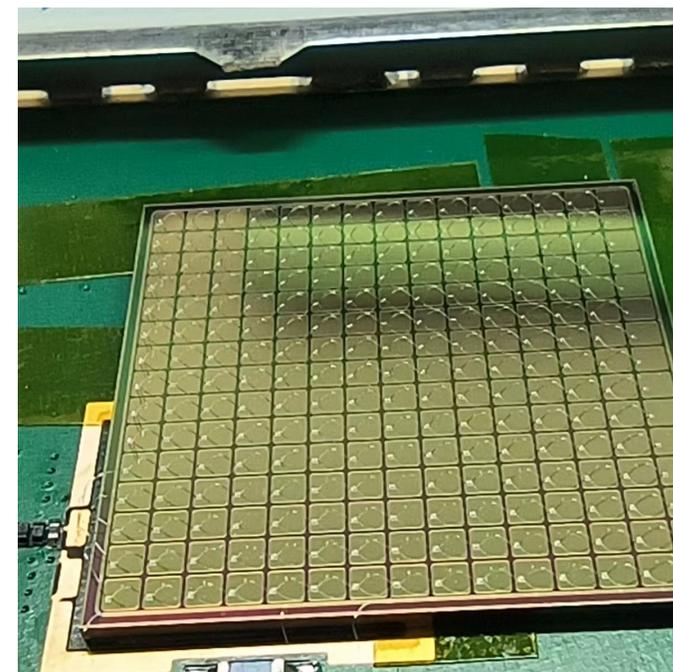
## 超快传感器原理



## LGAD传感器8寸晶圆



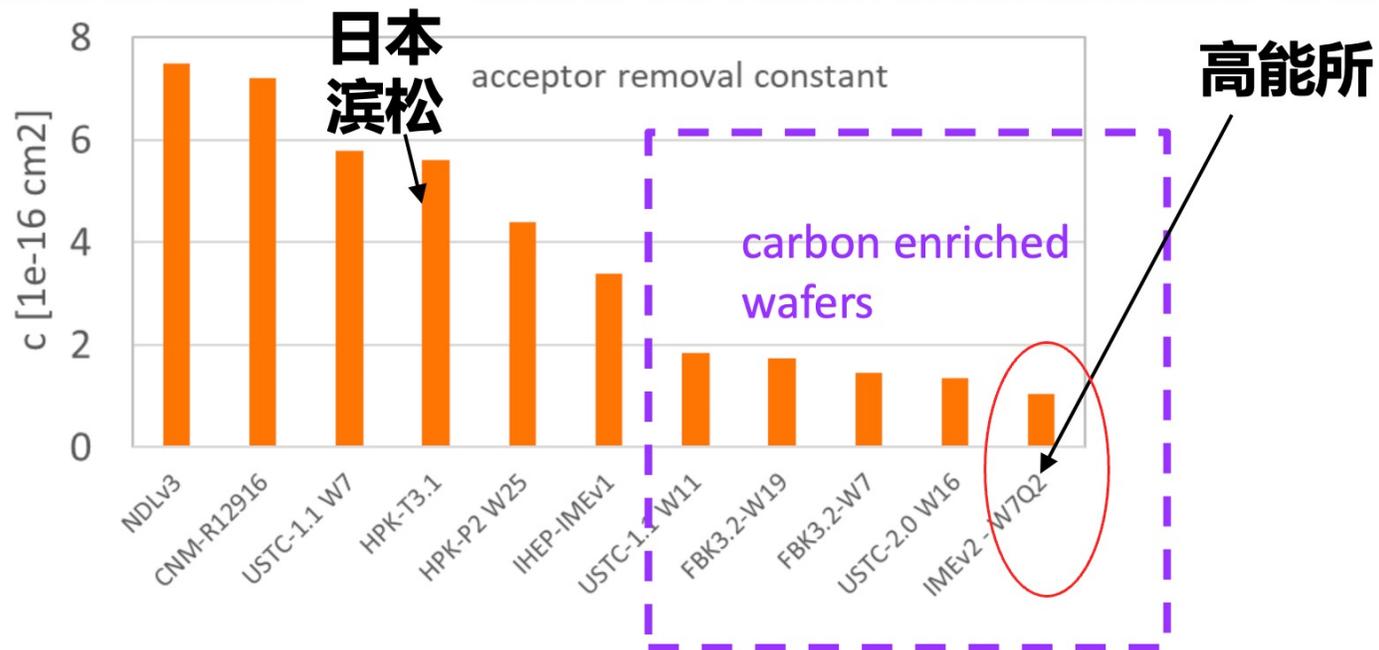
## 单个LGAD传感器



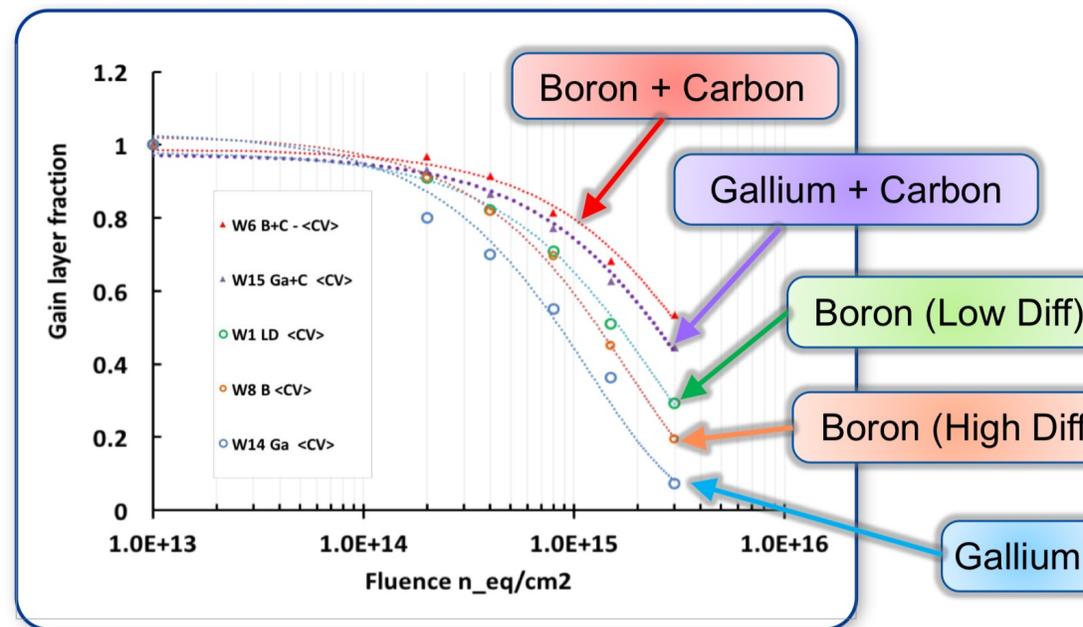
# 传感器方案：国产LGAD传感器（2）

- 针对CERN的LHC质子对撞机上ATLAS实验时间探测器的应用
  - 通过掺碳工艺加固，辐照后移除率目前最低，即最佳的抗辐照性能
  - 性能显著超越日本滨松公司的LGAD硅传感器
  - 首个国产传感器在LHC实验上使用
  - 非常适用于高能质子束能量测量

高能所研制的LGAD辐照移除率最低（最佳抗辐照性能）



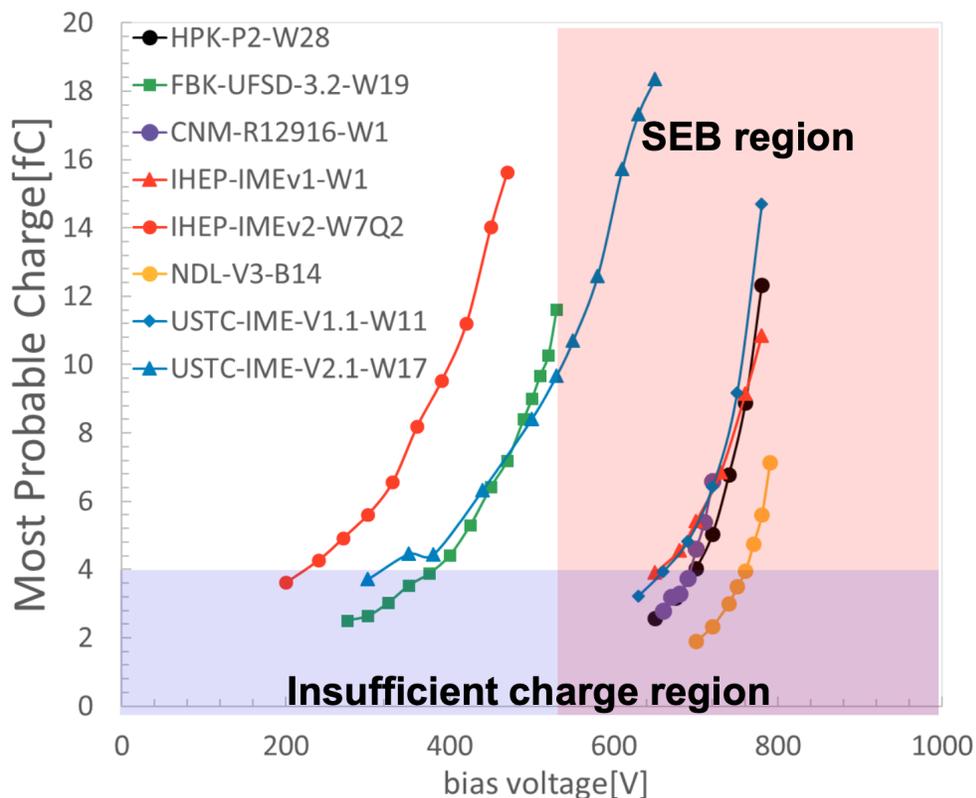
硼移除速率 vs 掺碳浓度



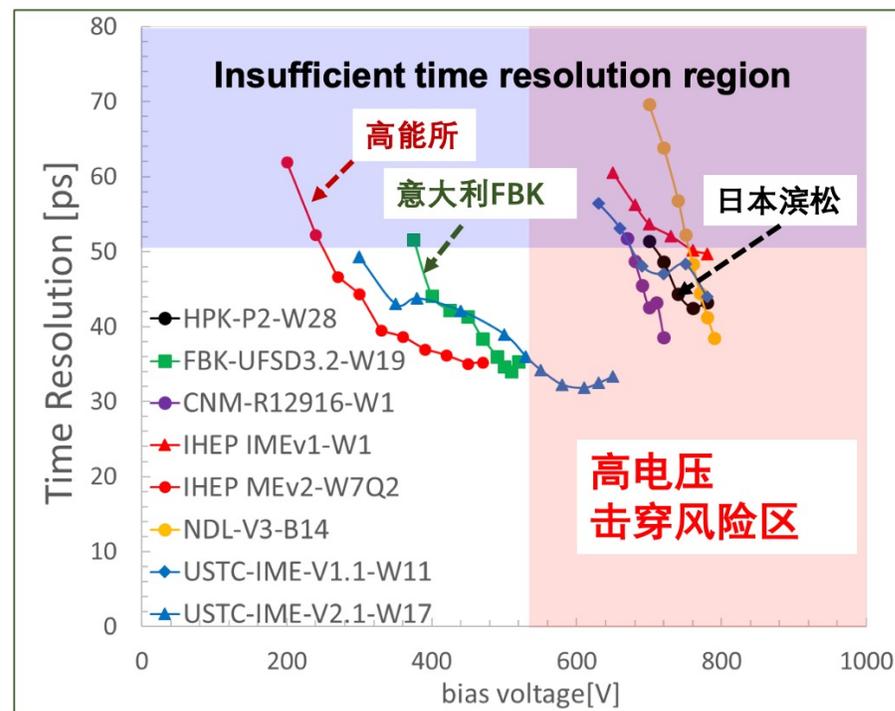
# LGAD辐照后的性能

- 可以承受 $2.5 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ 等效中子通量
  - 辐照后，可以达到**35皮秒**的时间分辨，电荷收集大于**10fC**
  - 辐照后可以工作在300V左右，小于单粒子击穿效应的危险电压600V
  - 国际上日本滨松等LGAD等都要工作在600V以上，击穿风险非常高

各国LGAD辐照后的电荷收集 Vs 电压

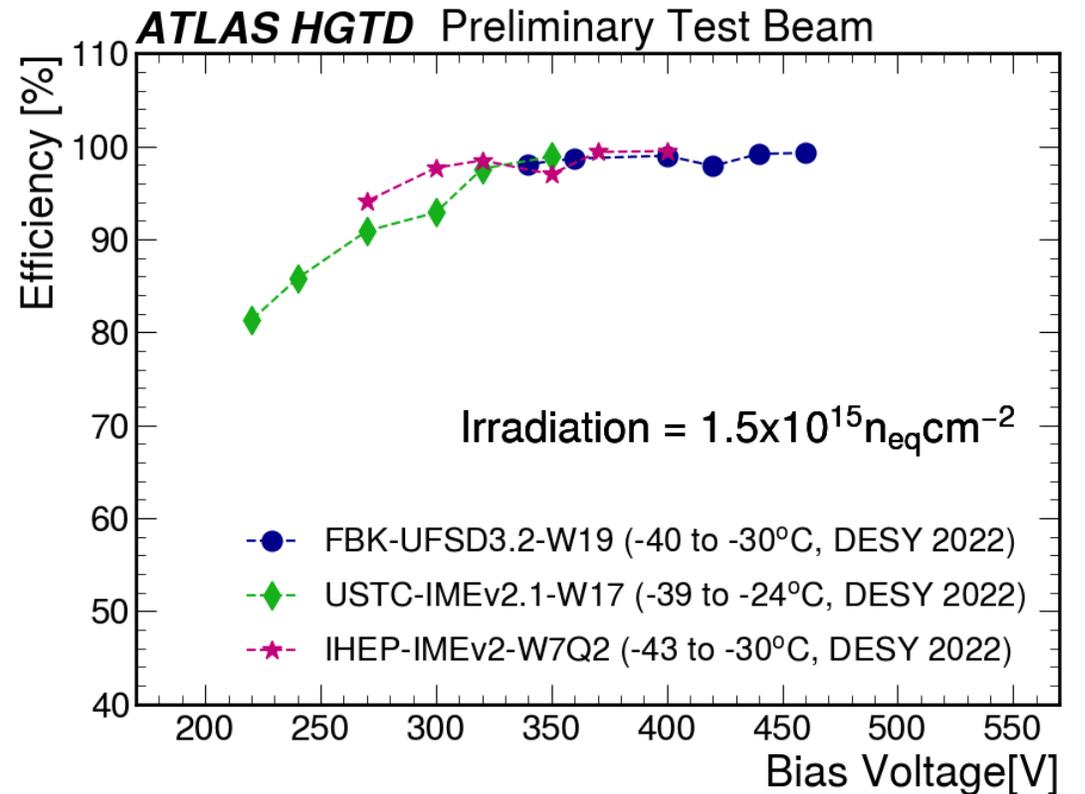
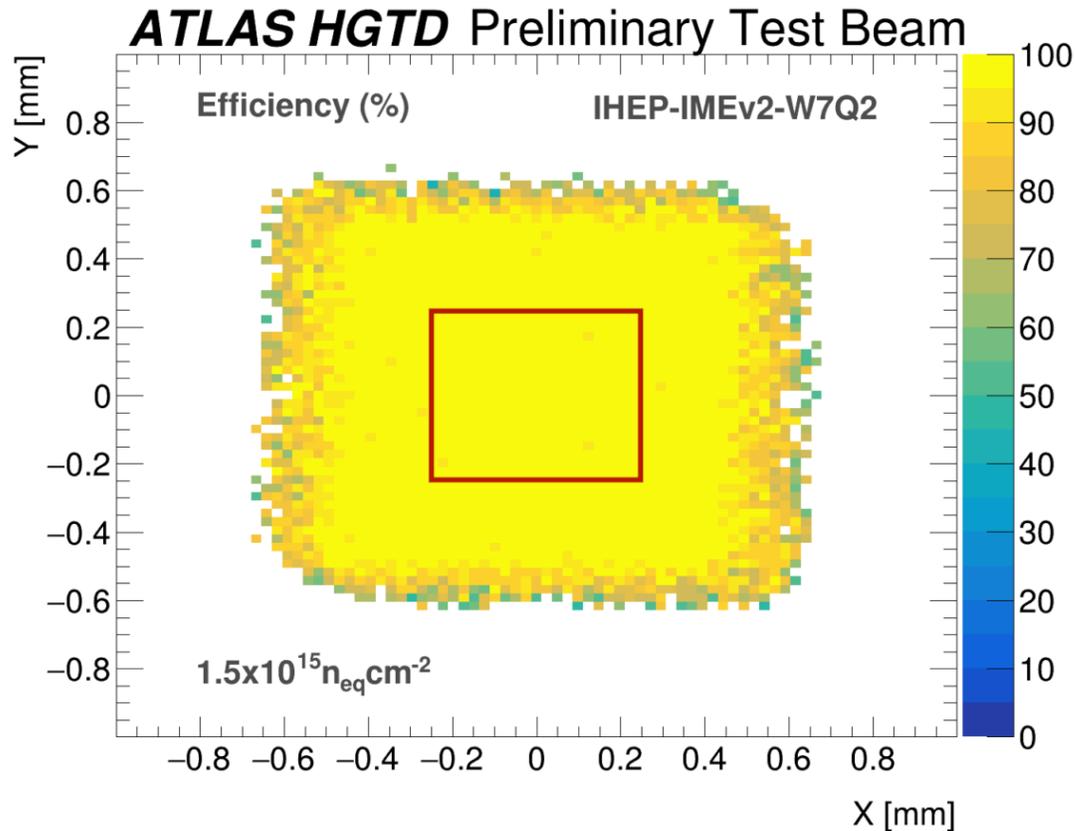


各国LGAD辐照后的时间分辨率 Vs 电压



# 束流测试的探测效率

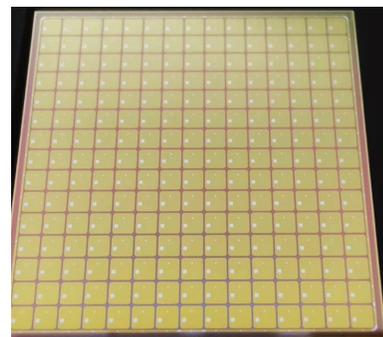
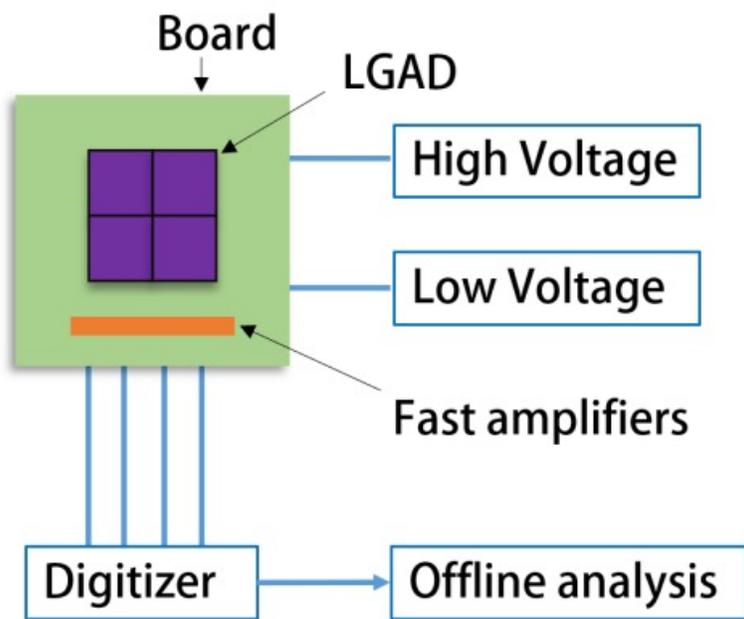
- 辐照后, LGAD传感器束流测试中有近100% 探测器效率
- 可以承受 $2.5 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ 等效中子通量。



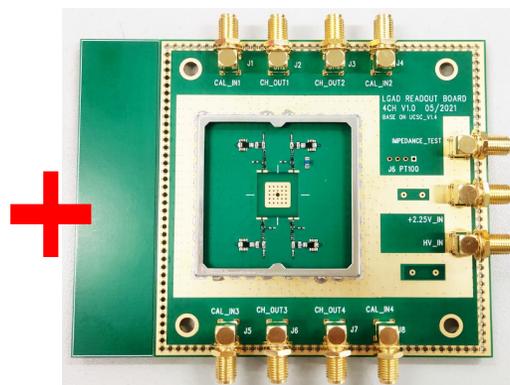
# 读出电子学方案

一个LGAD探测器模块有4个读出通道

- 每个通道均可独立实现时间的测量，每个通道时间分辨率均可好于100皮秒。
- 在束流线上前后放置两组LGAD探测器模块
- 可以精确测得质子经过一定距离的飞行时间，进而计算得到质子的飞行速度和动量。



HEP-LGAD探测器  
像素 1.3mm×1.3mm  
整片 2cm×2cm



读出板

- 4通道
- 跨阻470欧姆
- 带宽1GHz
- 高压、低压输入
- 刻度输入



波形采集卡

- 时间分辨率 ~100ps
- 能量分辨率 1%

## 读出电子学方案（2）

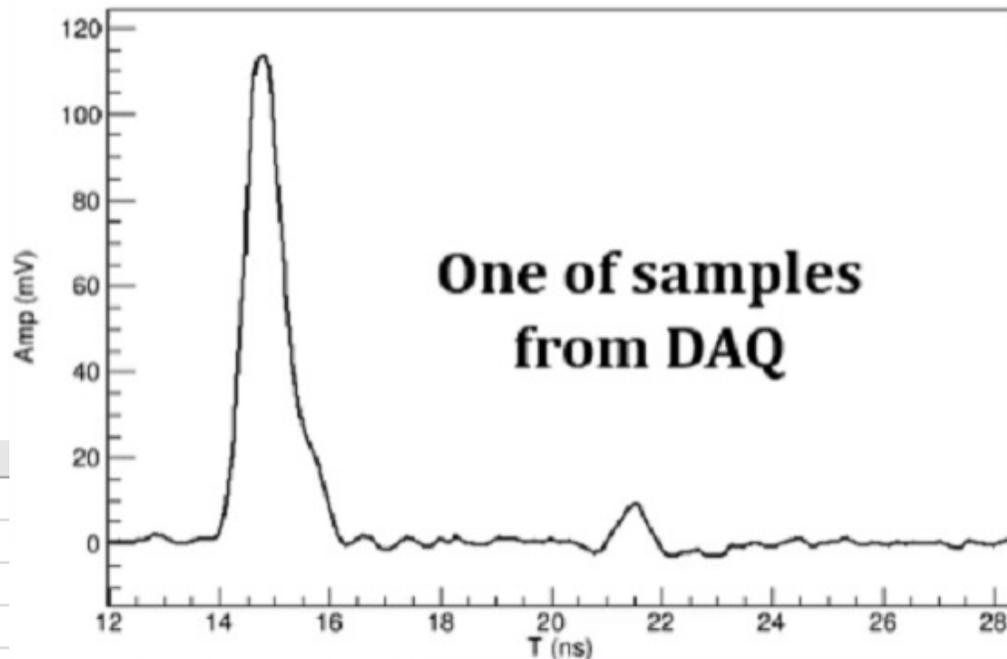
拟采用PXIe-X1012波形数字化采集卡

- 具有1GHz带宽
- 6.4GS/s采样率
- 12bit垂直分辨率



A	B	C	D
	触发频率hz	每次触发采集点数	数据率MB/S
1K	1000	100	0.2
1M	1000000	100	200
10M	10000000	100	2000

通道数	2
垂直分辨率	12 bit
采样率	最高3.2 GS/s（2通道）或6.4 GS/s（1通道）
耦合方式	直流耦合
模拟带宽	DC-1 GHz
输入信号范围	800 mVpp
输入接口	单端LEMO
有效位	8.5 bit（带宽500MHz）、8.0 bit（带宽1000MHz）

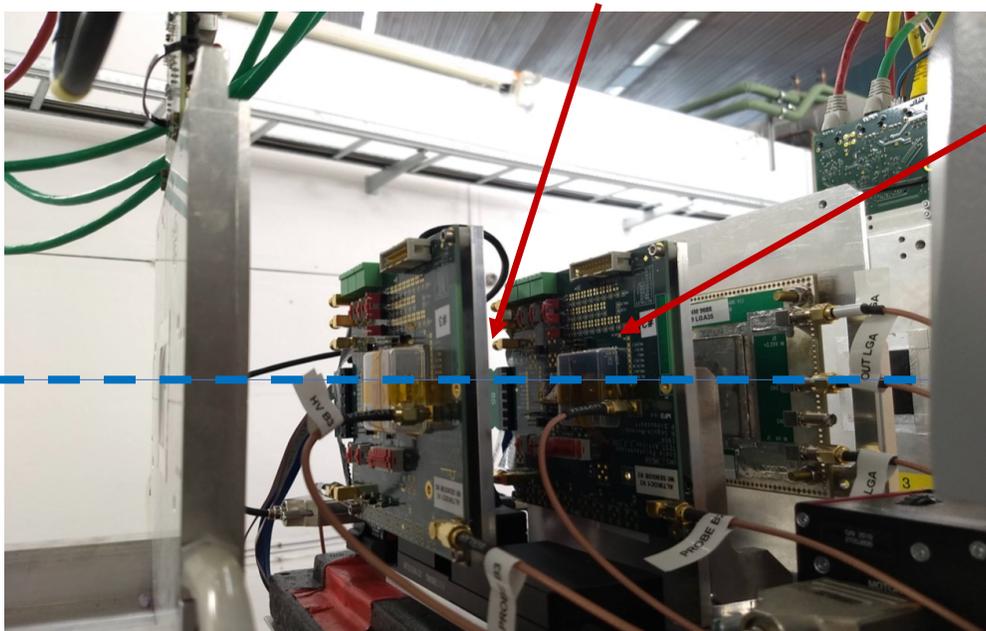


## 所需设备列表

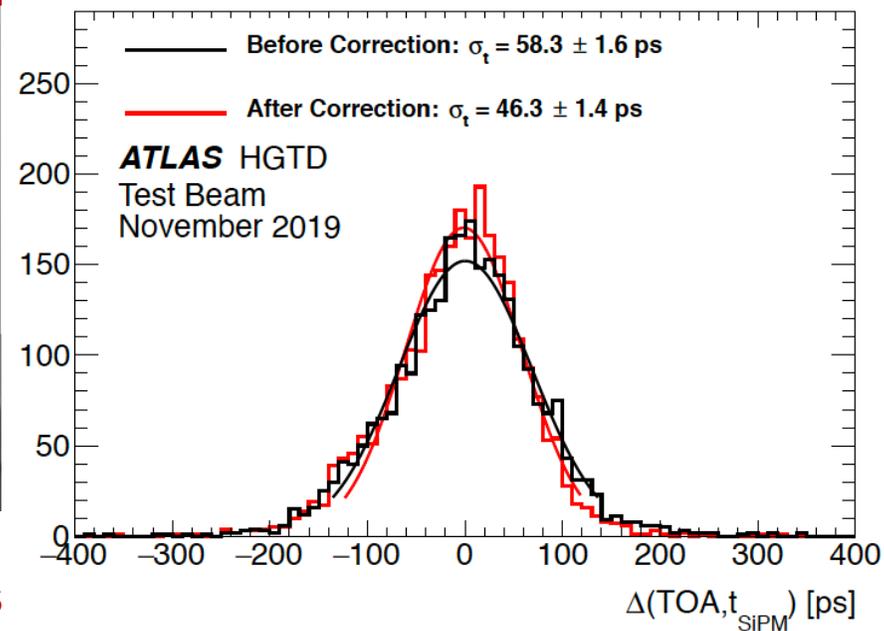
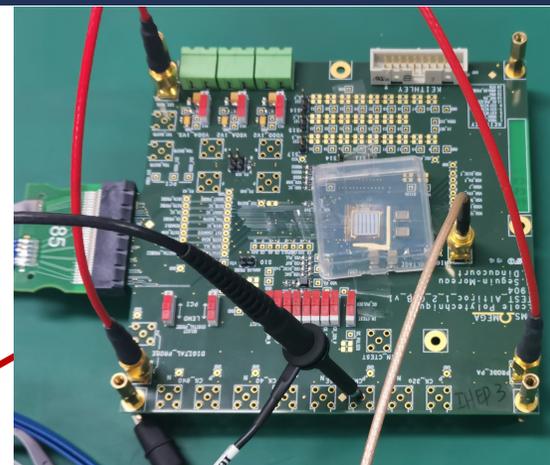
项目	数量/通道	参数
高压电源	16 道	-500V-0V
低压电源	16道	0-24V
快读出板	4块	4ch, TIA 470Ω
LGAD器件	4片	2cm×2cm
波形采集卡	16道	6.4Gs/s 1GHz
采集卡机箱	4台	-
计算机	1台	-
工装支架	4套	-
...	...	...

# 前期实验结果

在DESY电子束流测试中，  
模块级别的时间分辨率达到50皮秒

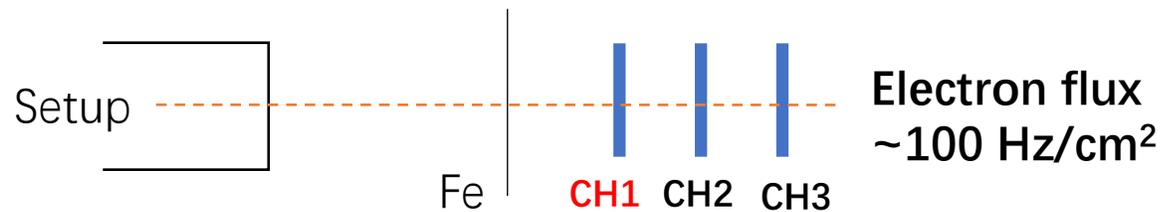
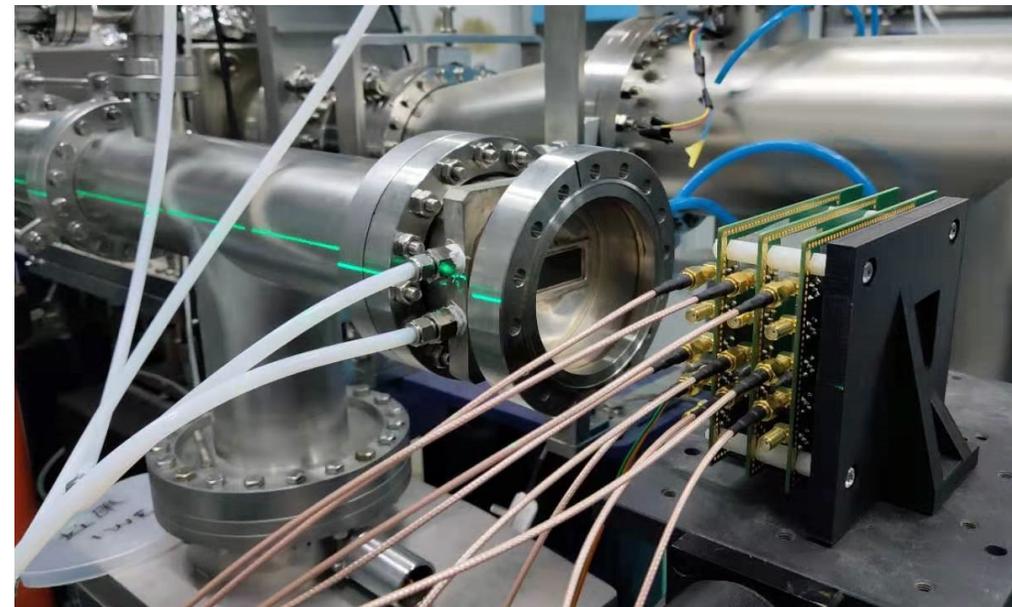


2019 DESY beam test for HGTD modules



IHEP module time resolution  
In DESY 2019 test beam

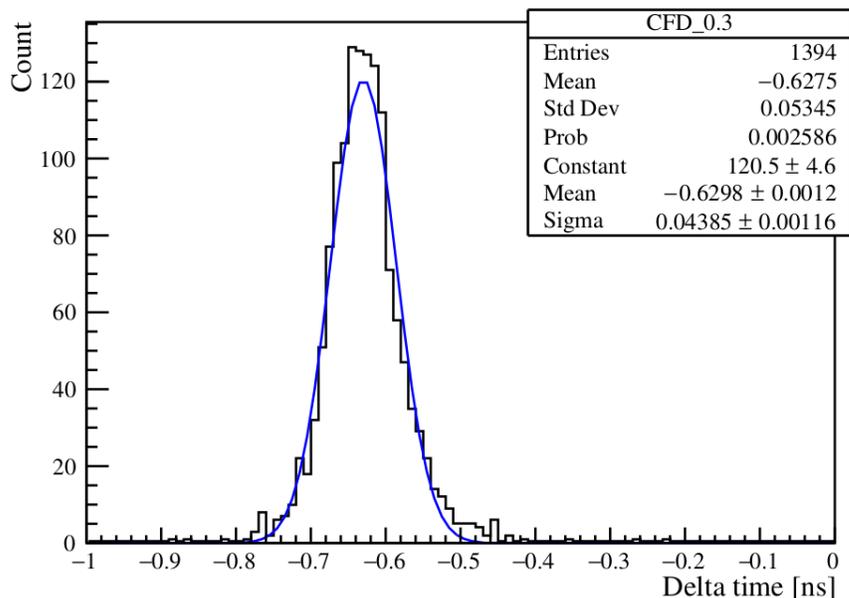
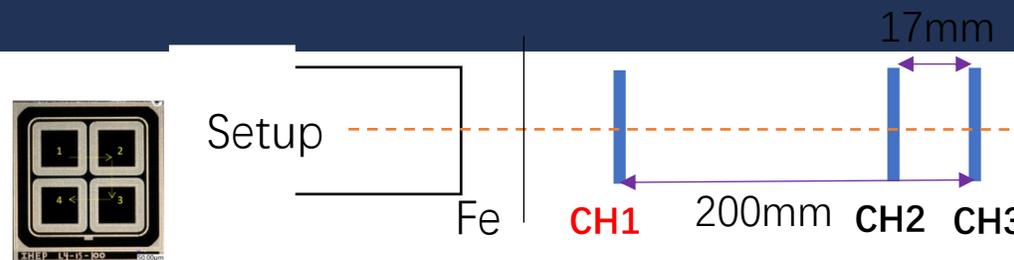
# 前期实验结果 (2)



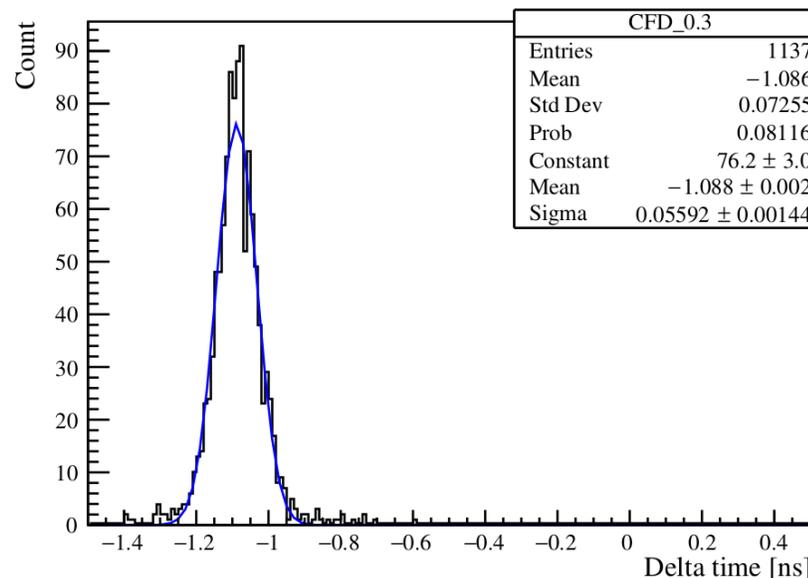
# 前期实验结果 (3)

**CH1** : B14-1 H1 **LGAD** 1.3mm\*1.3mm 28.5ps@220V  
**CH2** : B14-3 H3 **LGAD** 1.3mm\*1.3mm 35.02ps@220V  
**CH3** : W8-IV-E4-L4-15\_100 3mm\*3mm 47.5ps@ 160V

在BSRF同步辐射的电子束流测试中，  
时间分辨率 ~ 50皮秒



CH1_CH2	1B3 test	Beta test
Timing. sigma	43.85ps	45.15ps

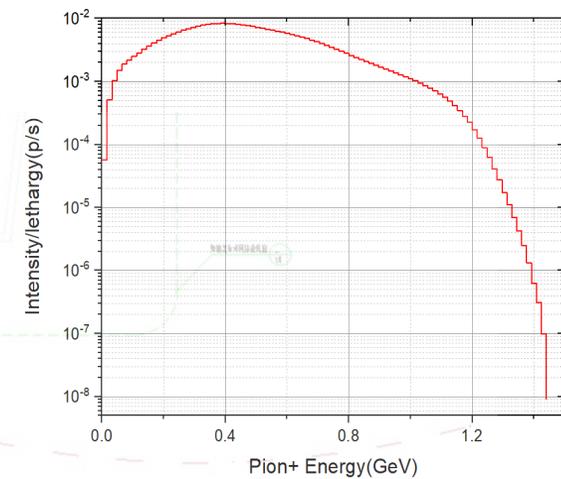


CH1_CH3	1B3 test	Beta test
Timing. sigma	55.92ps	55.39ps

# 次级pion束的初步设计

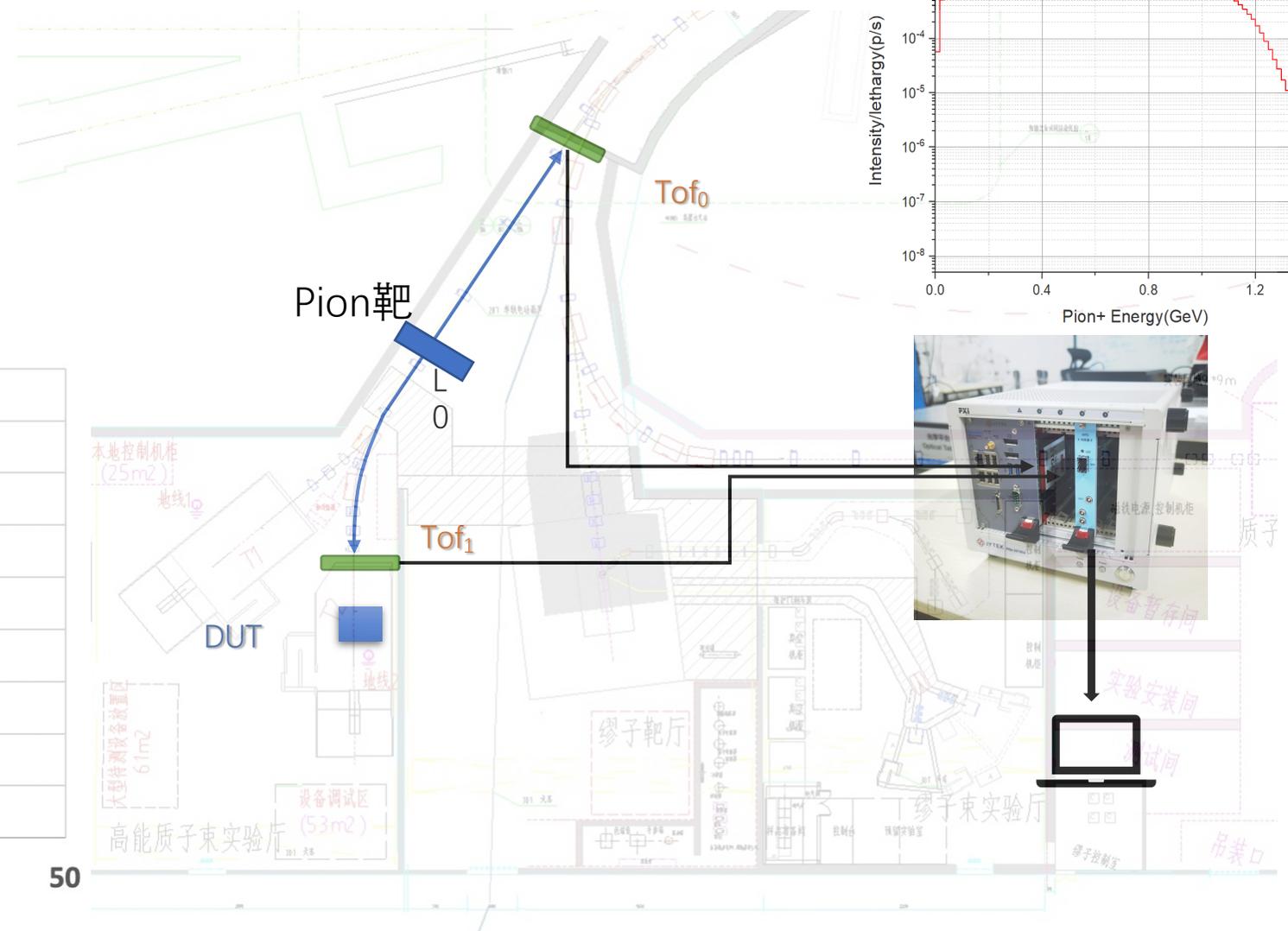
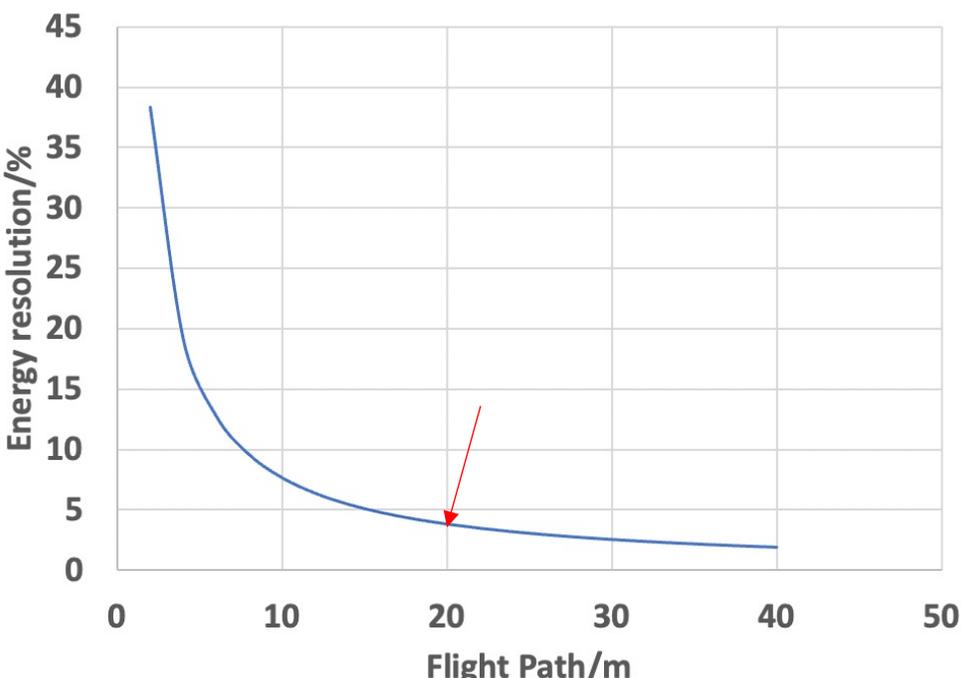
- 对次级pion靶, 有效飞行距离:  $\sim 20$ 米 ( pion靶 到 TOF1)
- 对400MeV pion束, 能量分辨率:  $\sim 4\%$

次级pion束能谱



400MeV Pion束的能量分辨率

Pion energy resolution



## 总结

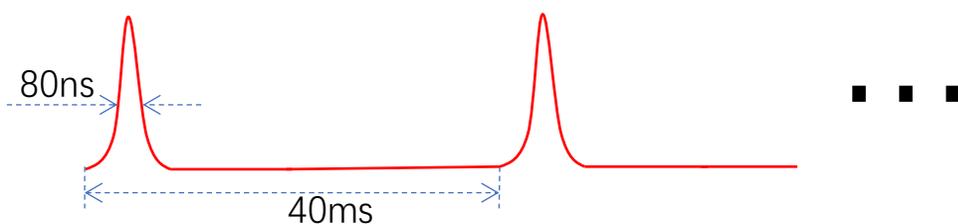
- 通过用飞行时间法测量质子能量，能量测量精度好于1%。
  - 拟使用高能所研发的LGAD硅传感器
  - 使用波形数字化采集卡做电子学读出

参数类型	参数名称	参数值
探测器设计参数	探测器尺寸	2cm*2cm
	时间分辨率	100ps
	电子学通道	12
	质子能量测量区间	0.8~1.6GeV
	能量分辨率	1%

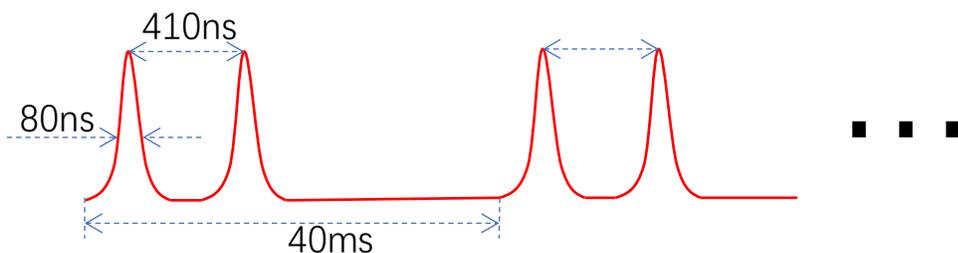
# 引出质子束的周期结构 (25Hz)



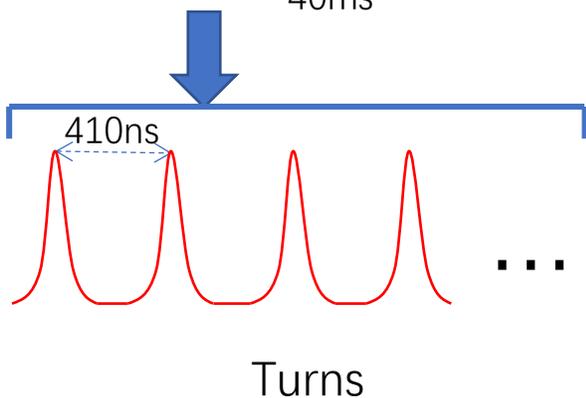
特殊运行模式  
(单束团)



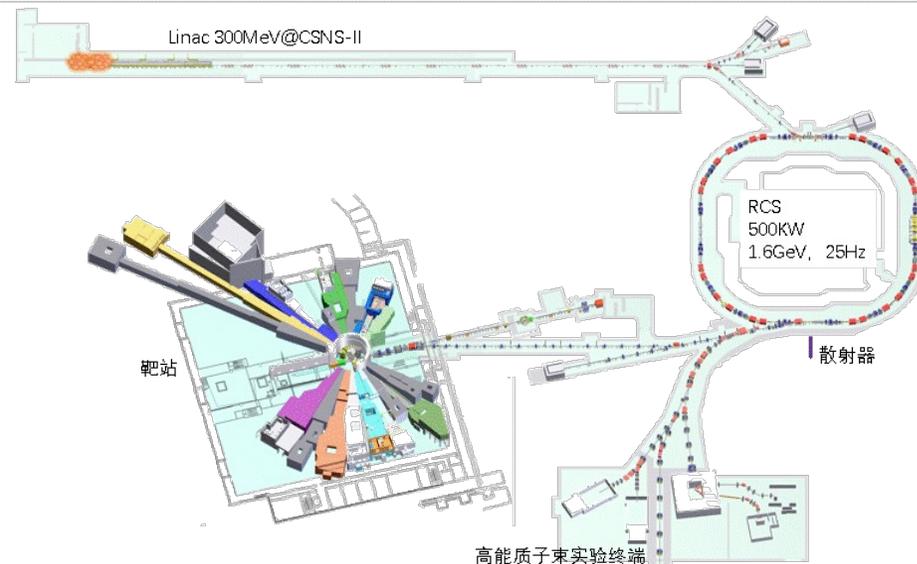
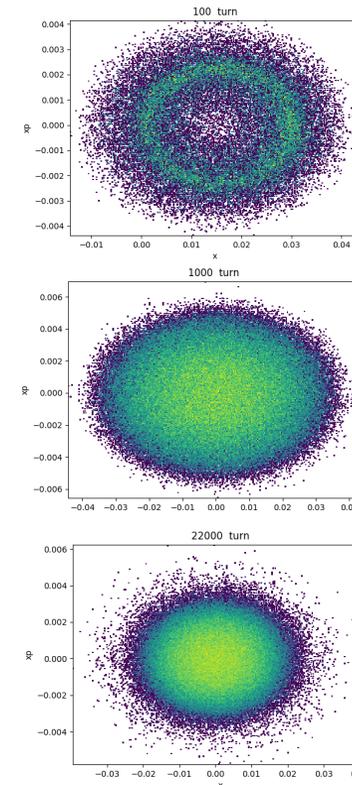
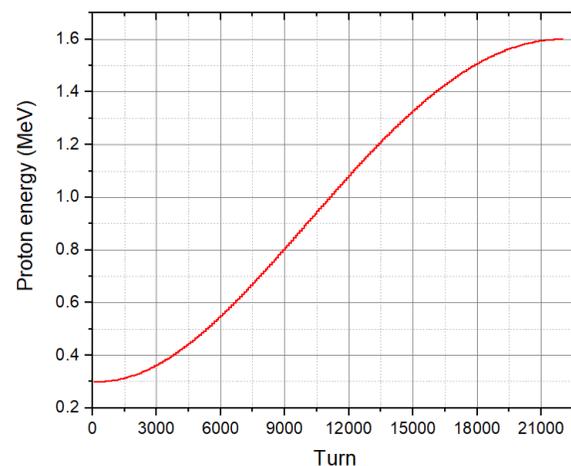
正常运行模式  
(双束团)



多圈引出质子的  
周期结构

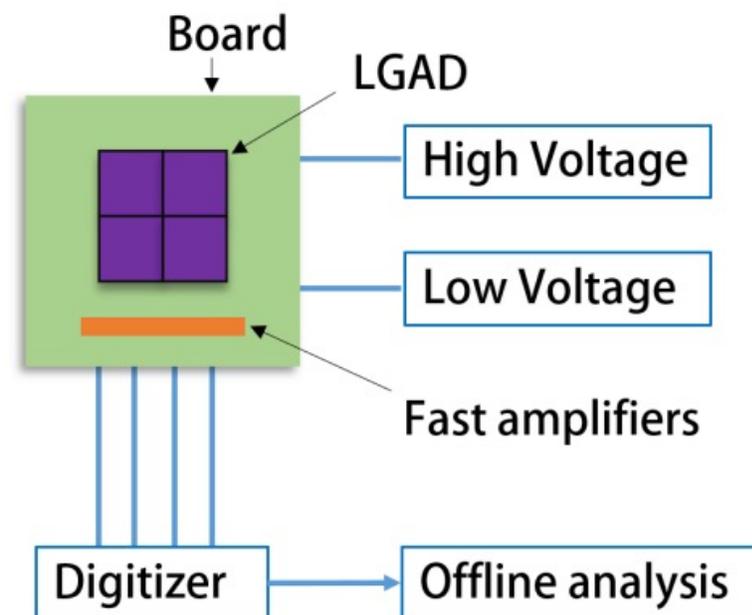
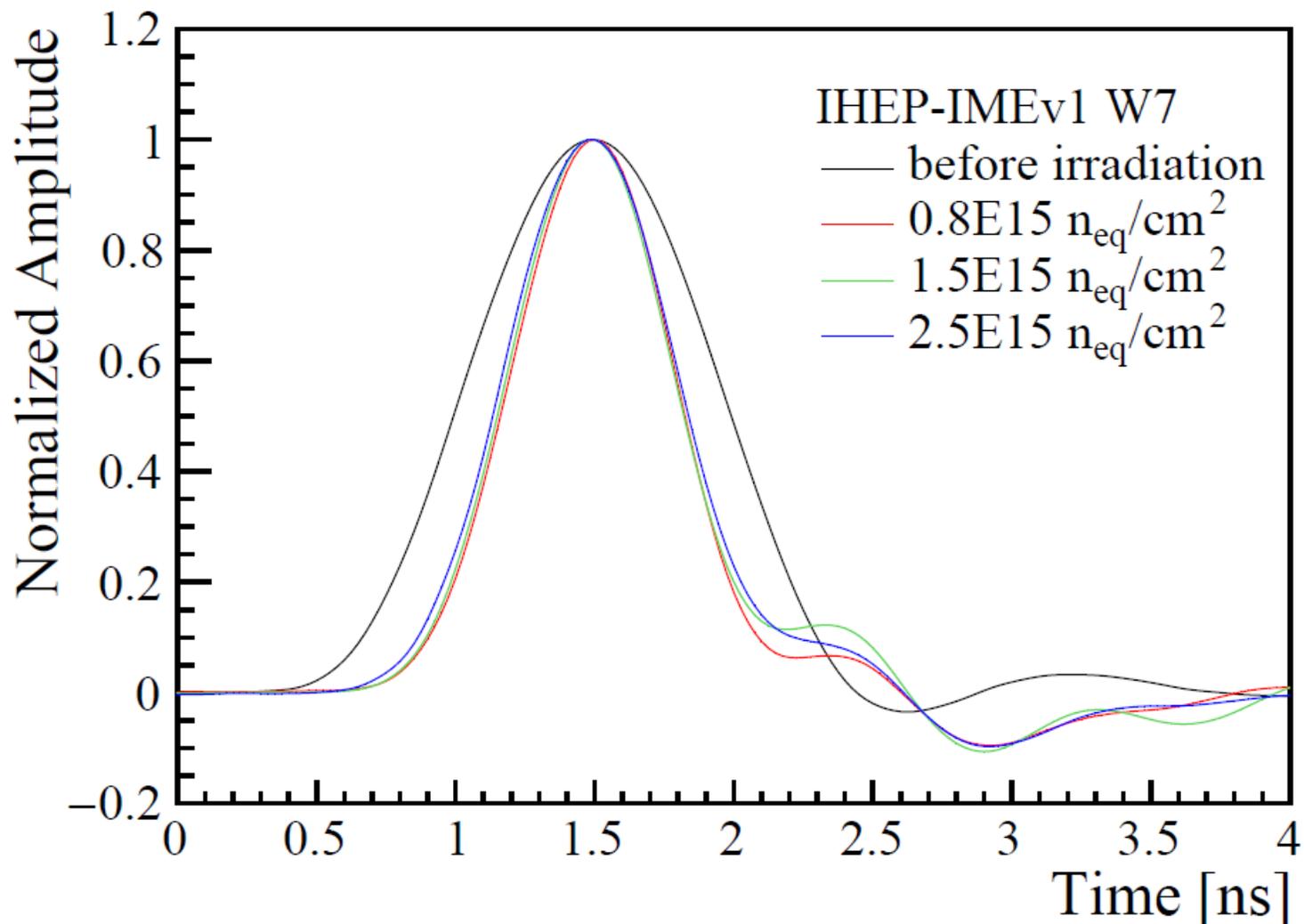


20ms内能量、束斑变化  
300-1600MeV



# LGAD传感器的信号上升沿

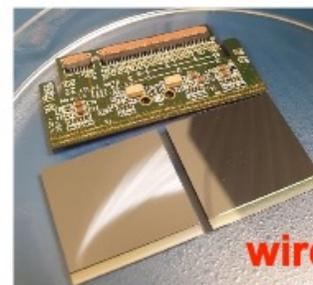
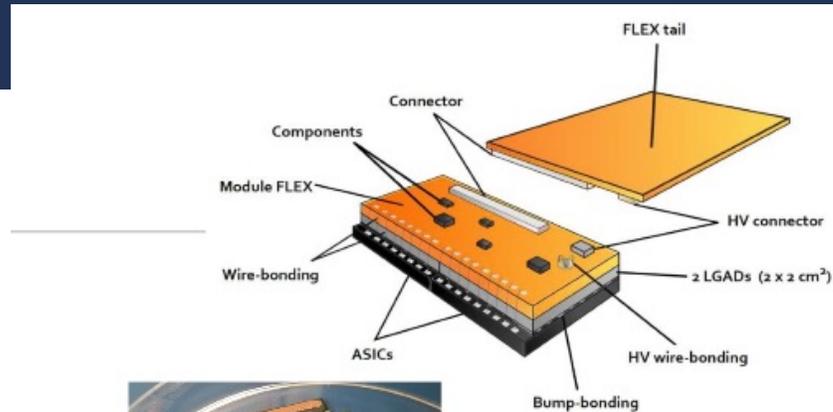
LGAD传感器的信号上升沿为0.5ns左右



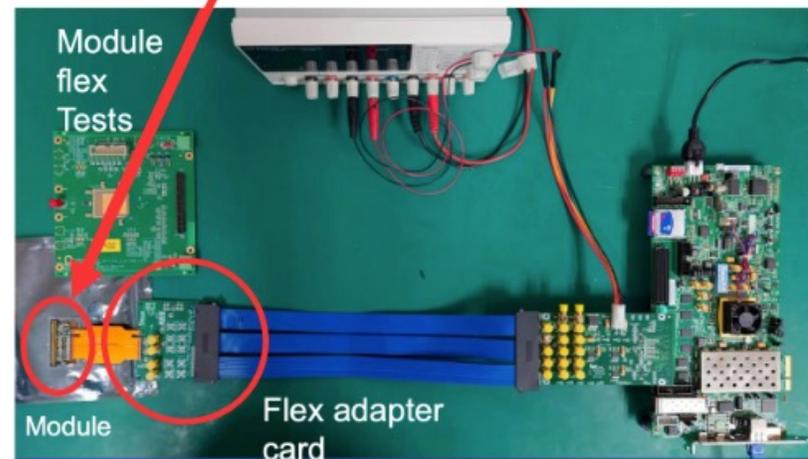
# 备选方案：探测器模块

- 硅时间探测器模块读出系统
  - 探测器模块通过柔性电缆
  - 柔性电缆目前最长约75cm

1/2探测器模块：225通道  
(到达时间数字读出)



glue+  
wire-bonds



# 超快读出ASIC芯片

**研究目标：**抗辐照芯片能承受200MRad的电离辐照

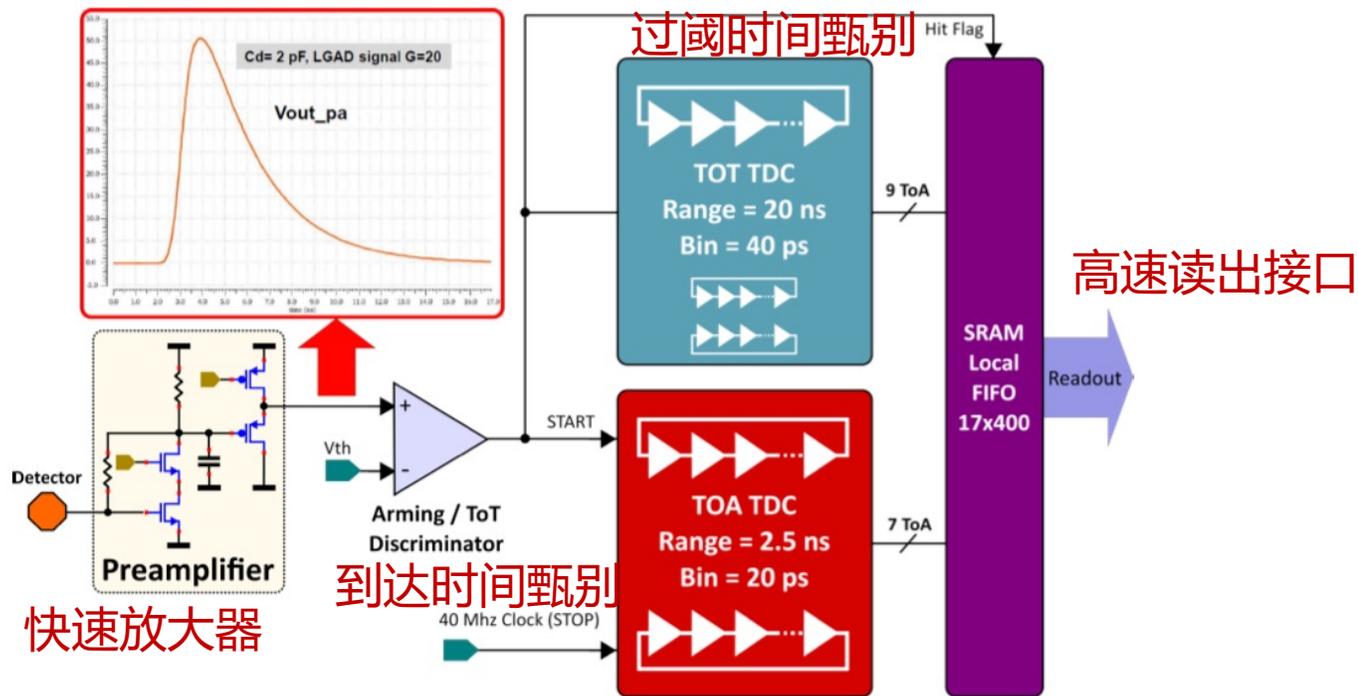
**研究方案：**基于快速时间-数字转换器（Time-to-Digital Converter, TDC）

主导高速读出芯片的抗辐照冗余校验电路的设计

**研究难点：**抗辐照芯片与超快芯片都是卡脖子禁运技术

十皮秒级别快速时间-数字转换器芯片技术是国内亟需技术

超快读出ASIC芯片的功能示意图

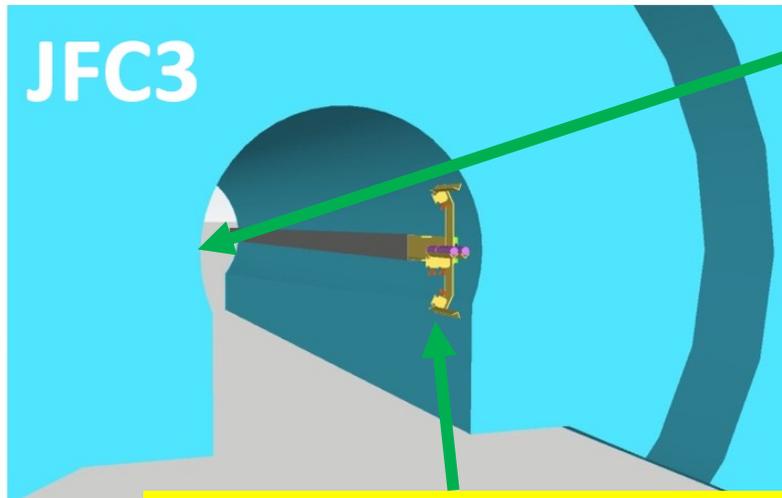


高能所X射线辐照仪  
芯片抗辐照研究



# BMA (Beam Monitor of ATLAS)

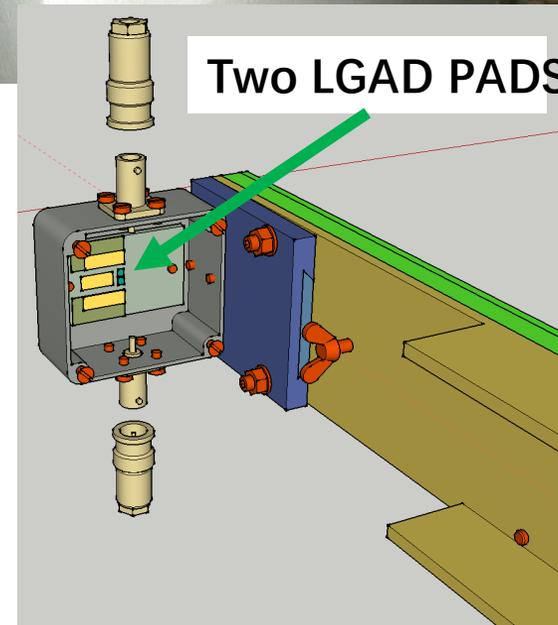
- Two LGAD pads (1.7 mm<sup>2</sup>) installed this year on Feb. 22 in JFC3 side C as Run-4 lumi monitor prototypes.
- Innovative detector readout scheme.



**LUCID Run-4 prototype**

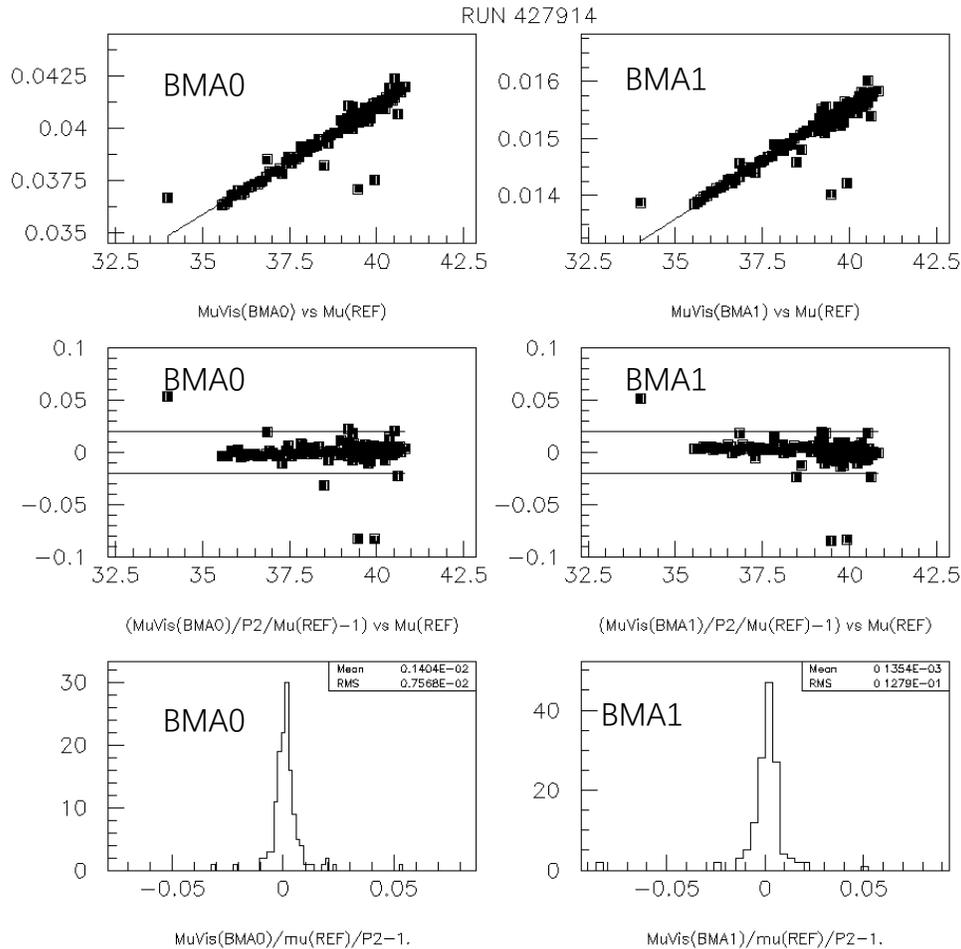
In the original proposal the installation of a standard CERN RP 90 Sr source for routinely calibrations is foreseen (NOT ADDED IN THIS FIRST VERSION).

Good thermal contact with the JFC3. NO COOLING NEEDED!

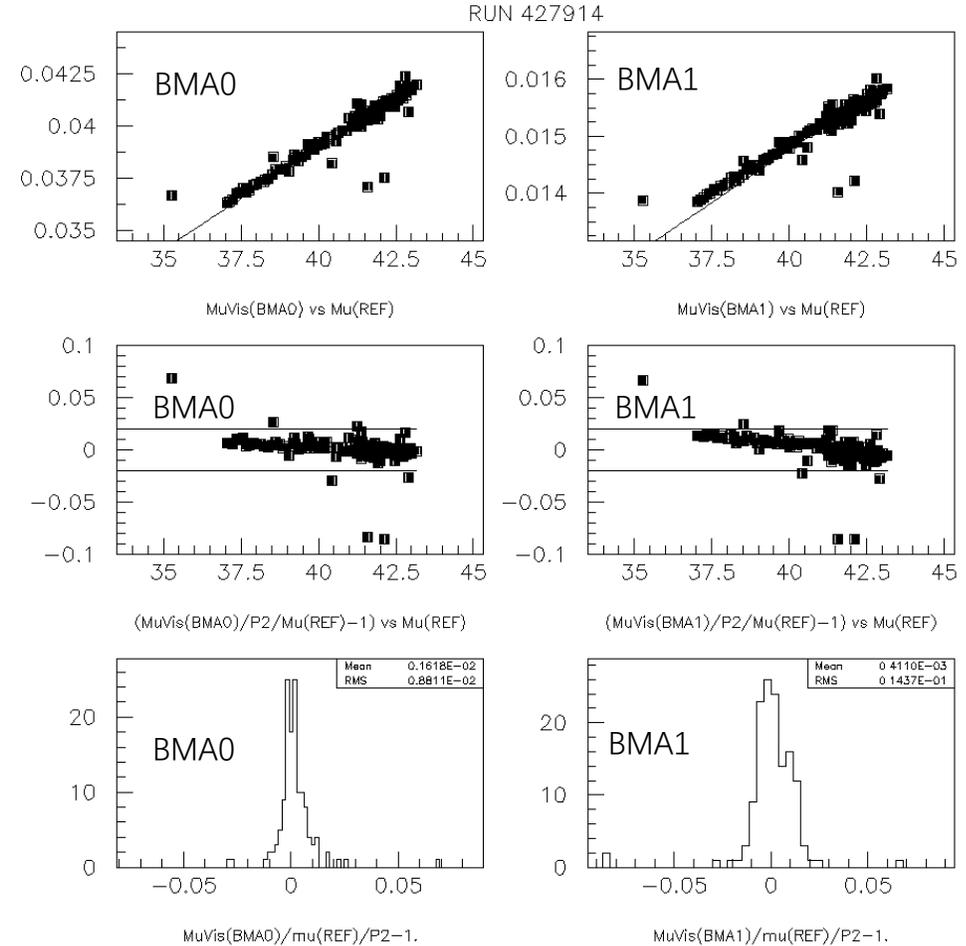


# More on $\mu$ -dependance

BMA vs LCD ( $\mu$ -dep corrected)



BMA vs LCD (NO  $\mu$ -dep corrected)



- RUN 427914, taken after  $L_{int} \sim 0.02/\text{fb}$ : both BMA0 and BMA1 had stable gain
- A clear effect is visible, for both BMAs, when normalizing to LCD ( $\mu$ -dep corrected and NOT corrected)
- As long as the gain was stable, the two BMAs appears to be  $\mu$ -dep correction free !