



# $\mu$ SR谱仪样机的研究进展

倪晓杰，潘子文，邓凡水，刘建党，  
梁昊，叶邦角

核探测与核电子学国家重点实验室  
中国科学技术大学

# OUTLINE

---

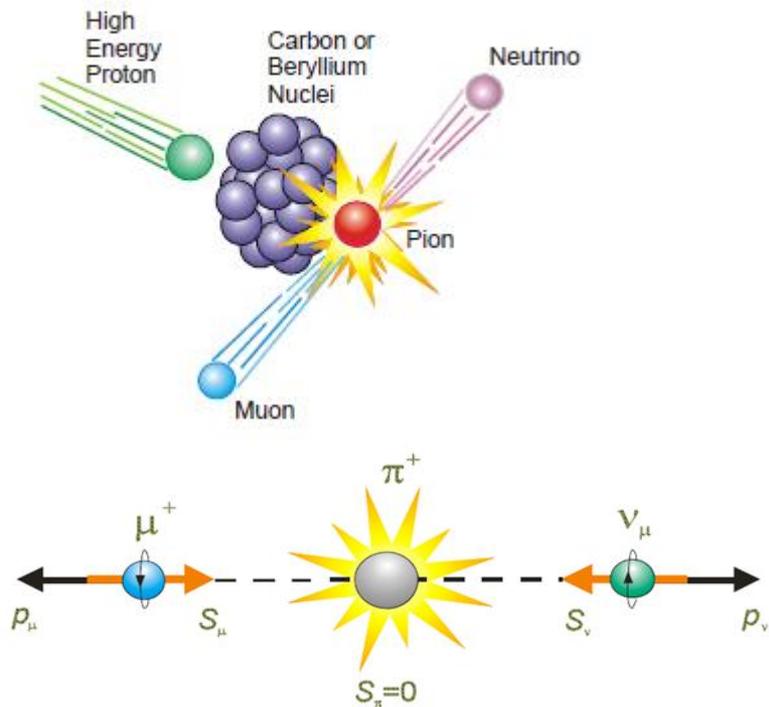
**$\mu$ SR技术的原理和应用**

**$\mu$ SR谱仪样机的研究进展**

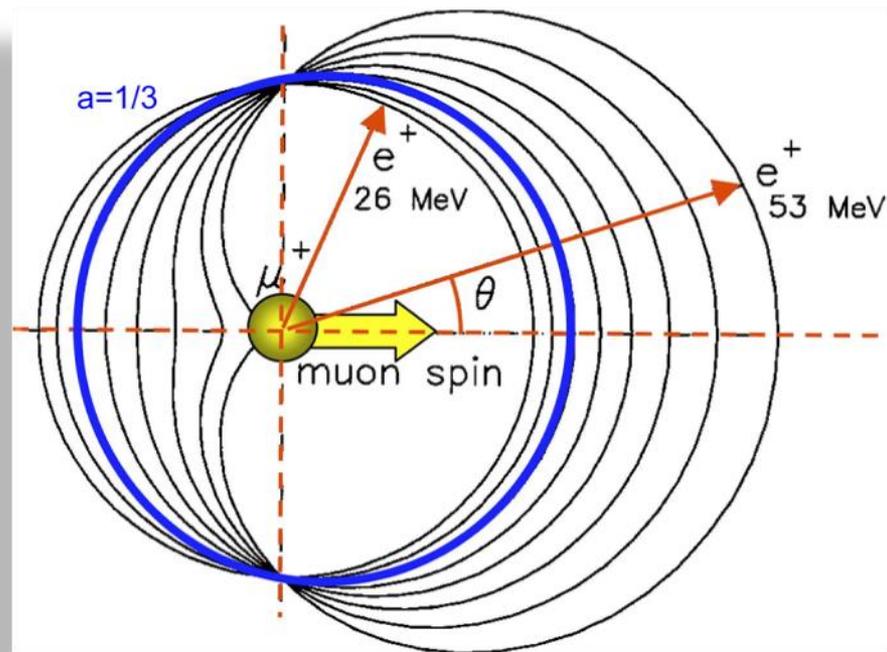
**总结**

# μSR技术的原理和应用

μSR ( μ Spin Rotation, Relaxation and Resonance ) 是利用极化μ衰变产生正电子的空间分布不对称性研究物质的微观结构和磁性的一种技术。



$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e$$



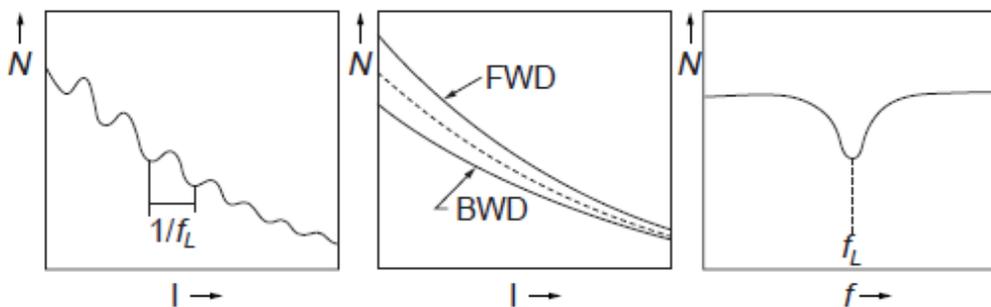
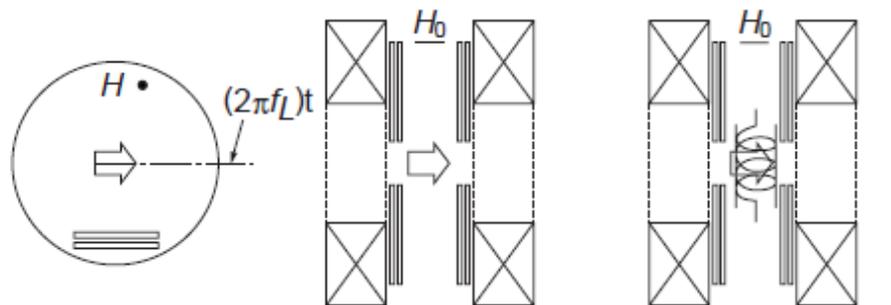
- ✧ 停在靶表面附近的π衰变
- ✧  $p=28\text{MeV}/c$  ,  $E=4\text{MeV}$
- ✧  $\mu^+$ 极化率~100%

$$W(E,\theta) = 1 + a(E)\cos(\theta)$$

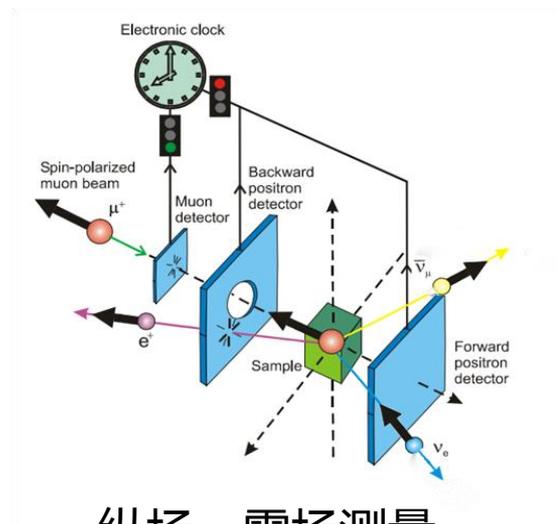
$$N(t) = N_0 \exp(-t / \tau_\mu) [1 + A G(t)] + B_g$$

# $\mu$ SR技术的原理和应用

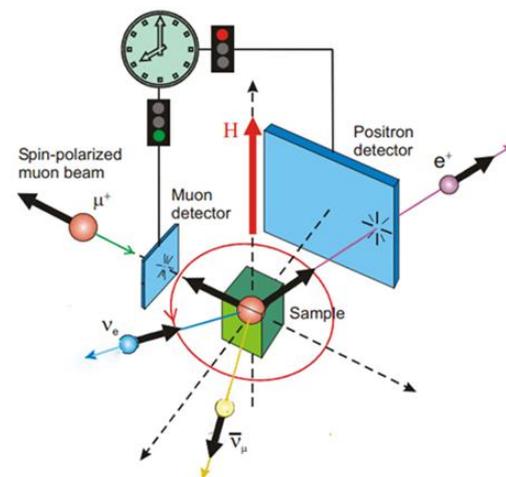
(a) Muon spin rotation (b) Muon spin relaxation (c) Muon spin resonance



$\mu$ 子自旋转动、弛豫、共振实验安排示意图

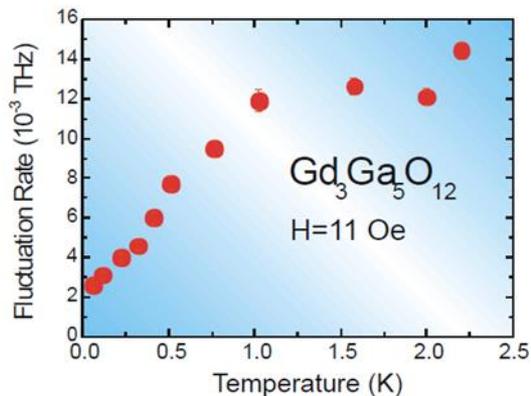


纵场、零场测量

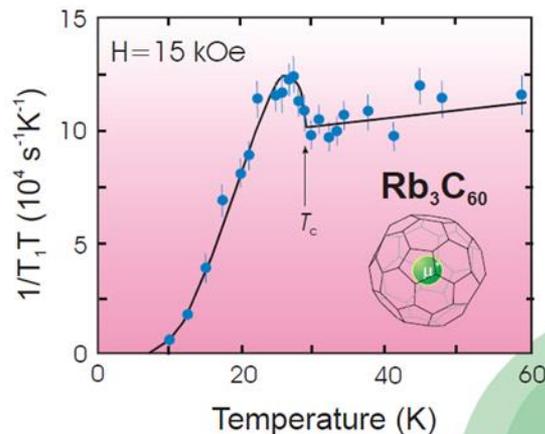


横场测量

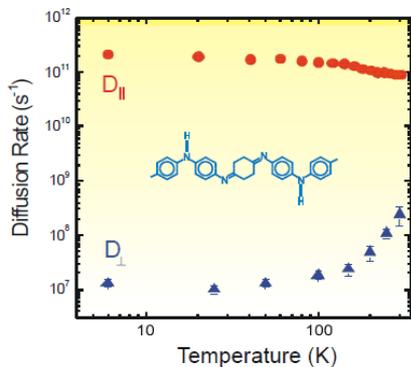
# $\mu$ SR技术的原理和应用



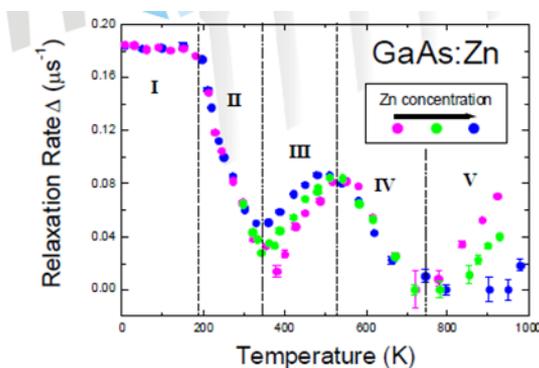
磁性系统：磁有序、自旋玻璃系统、巨磁阻重费米子系统和低维系统等



超导体：磁相图、微观相分离、涡旋相、特征长度尺度和配对特性；



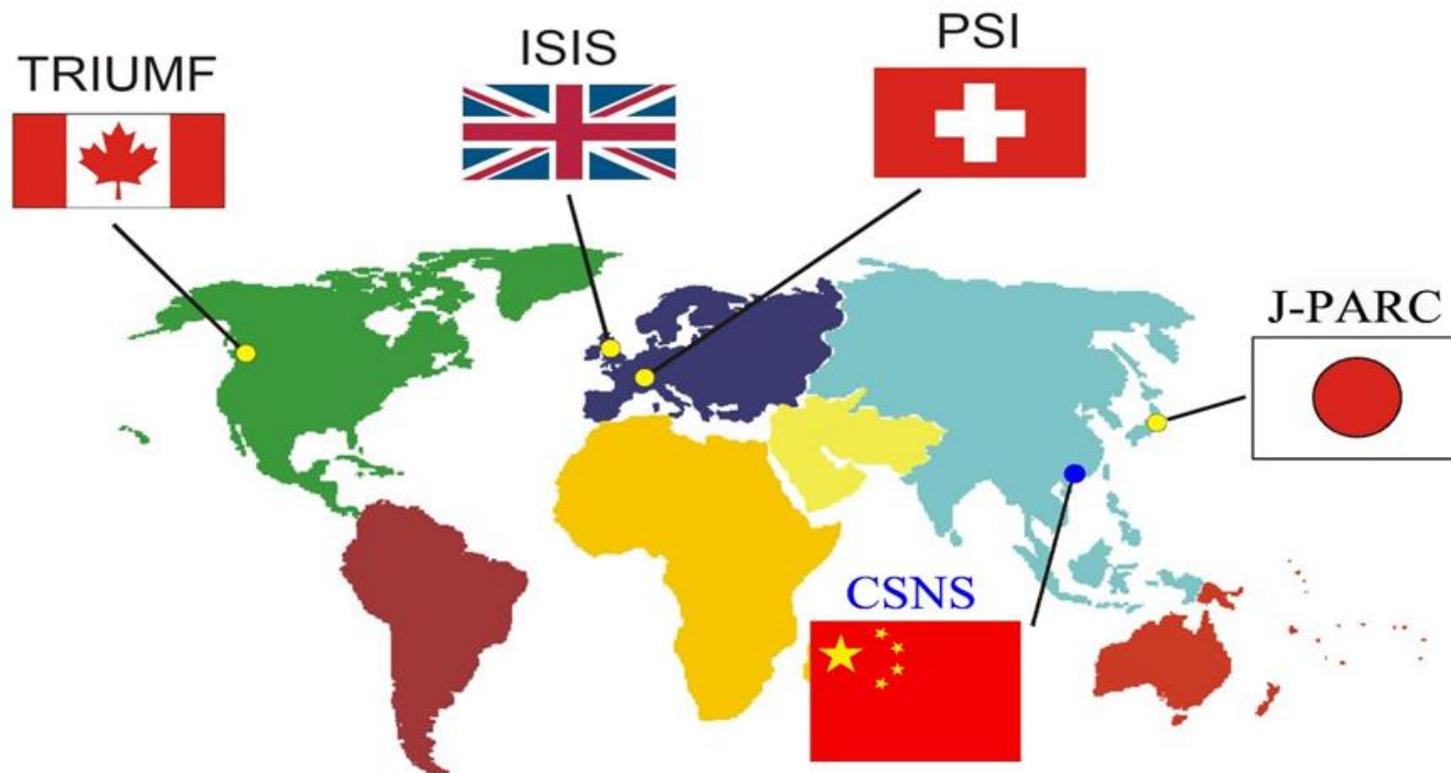
中性或带电粒子传输：量子扩散、电子在非金属中的传输、离子迁移等



半导体、化学和生物方面也有应用

# $\mu$ SR技术的原理和应用

## 国际上基于加速器的Muon源



CSNS的建造为我国开展基于加速器的脉冲型MuSR研究提供平台。国内第一台 $\mu$ SR谱仪将建在CSNS的高能质子应用区。本自主课题主要是对 $\mu$ SR谱仪搭建的关键技术做预研。

# $\mu$ SR谱仪样机的研究进展

$\mu$ SR谱仪样机的整体设计

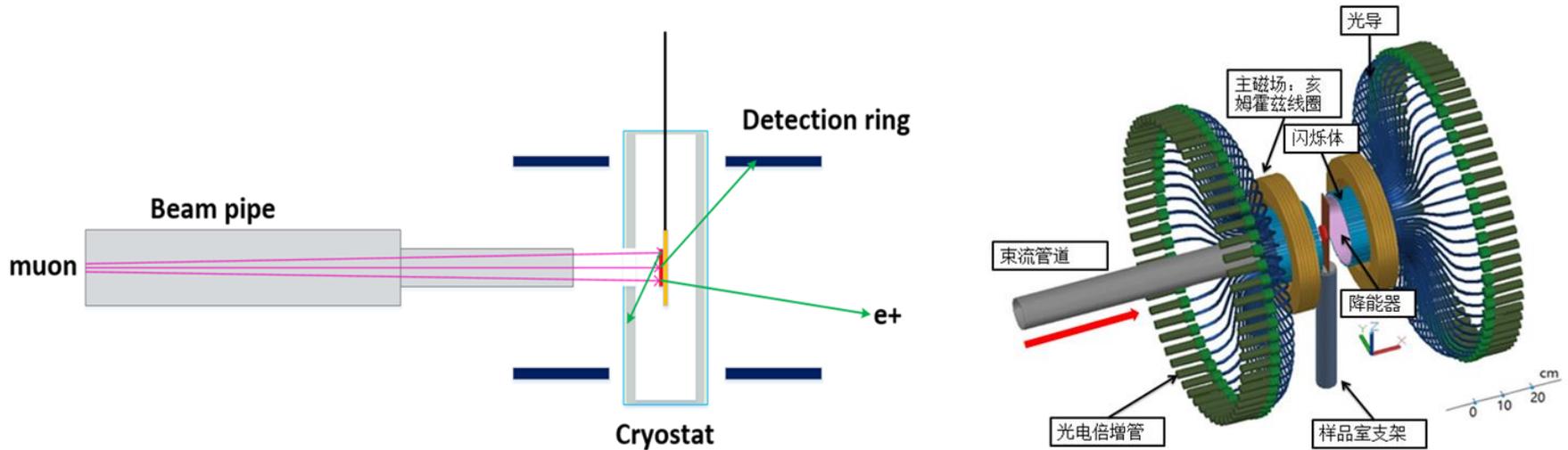
$\mu$ SR探测器的研究进展

电子学进展

国外测试

# $\mu$ SR谱仪样机的研究进展

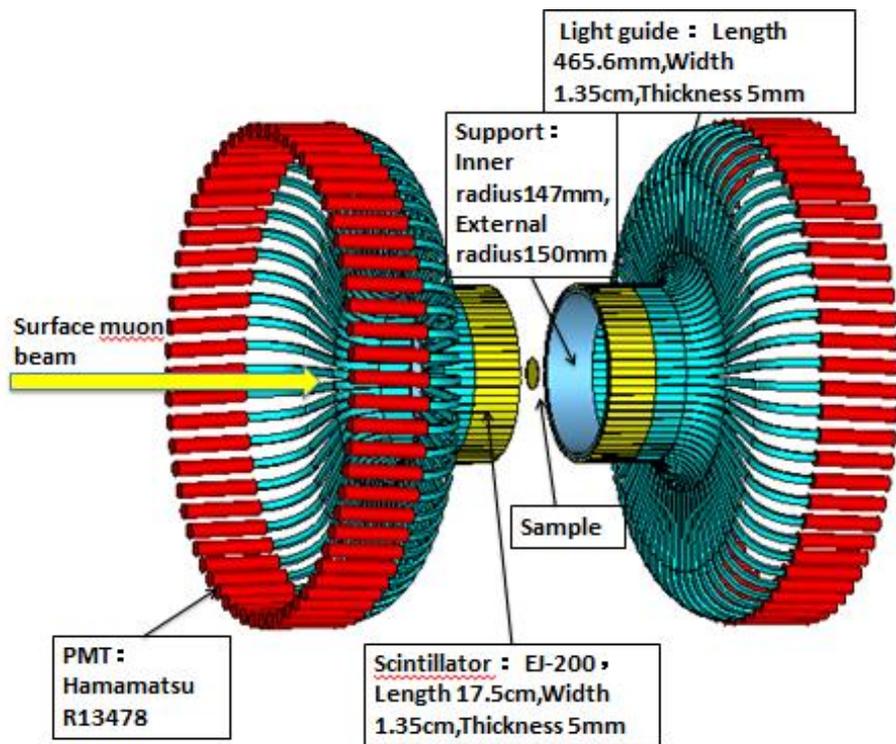
## $\mu$ SR谱仪样机的整体设计



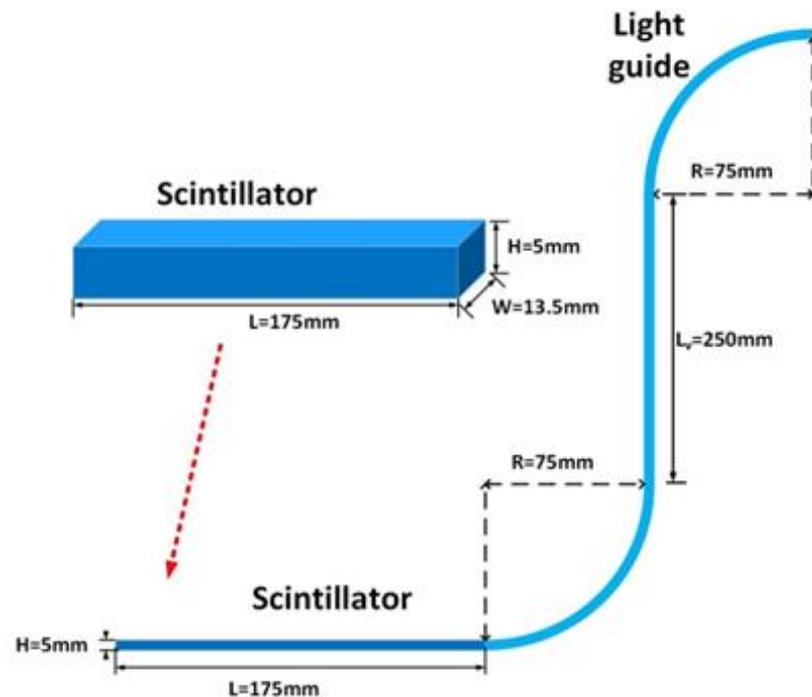
一套脉冲型 $\mu$ SR谱仪基本部分包含：探测器阵列，电子学和数据获取系统，样品室和外磁场，控制系统、运行监控软件以及数据处理软件等。我们谱仪采用128路（前后各64路）的阵列式布局，每一路包括塑料闪烁体，光导和光电倍增管。在整体设计的时候，主要考虑以下几个部分：束流管道、样品室（样品支架，低温恒温器）、探测器系统（闪烁体、降能器、光导、光电倍增管）、主磁场（纵场初步定为0~300高斯）。

# $\mu$ SR谱仪样机的研究进展

## $\mu$ SR谱仪样机的整体设计



128路 $\mu$ SR谱仪整体设计图



每一路闪烁体和光导尺寸

# $\mu$ SR谱仪样机的研究进展

## $\mu$ SR探测器的研究进展



**PMT:** R13478

Diameter=1 inch

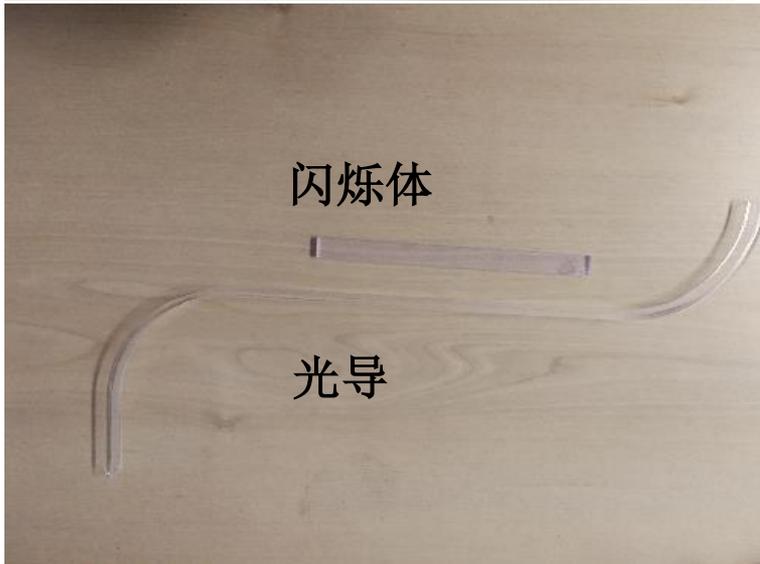
$\lambda_{\max}$  = 420 nm

Transit time = 9.1 ns

TTS = 130 ps

Gain =  $5.3 \times 10^5$

Linear acceleration



**Scintillator** : made by



similar to EJ200

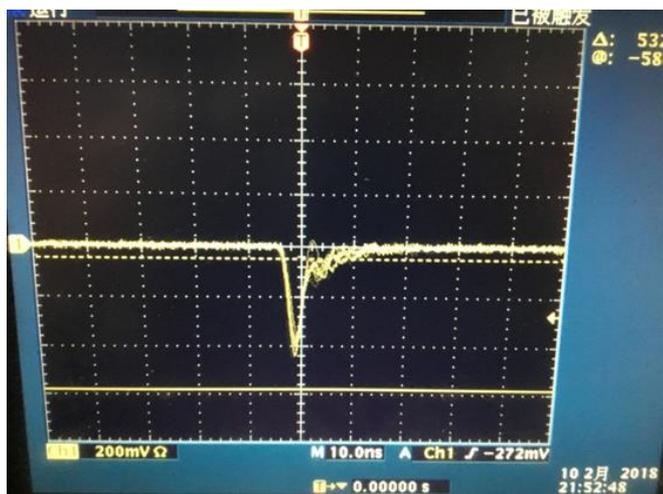
$\lambda_{\max}$  = 425 nm

Decay time = 2.1 ns

Size:  $175 \times 13.5 \times 5$  mm<sup>3</sup>

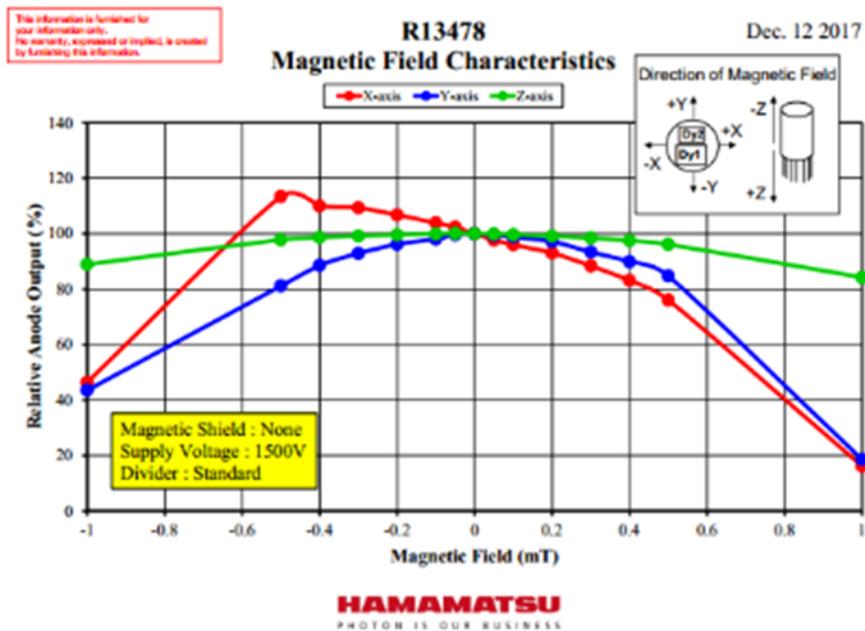
# $\mu$ SR谱仪样机的研究进展

## $\mu$ SR探测器的研究进展



# $\mu$ SR谱仪样机的研究进展

## $\mu$ SR探测器的研究进展--磁屏蔽



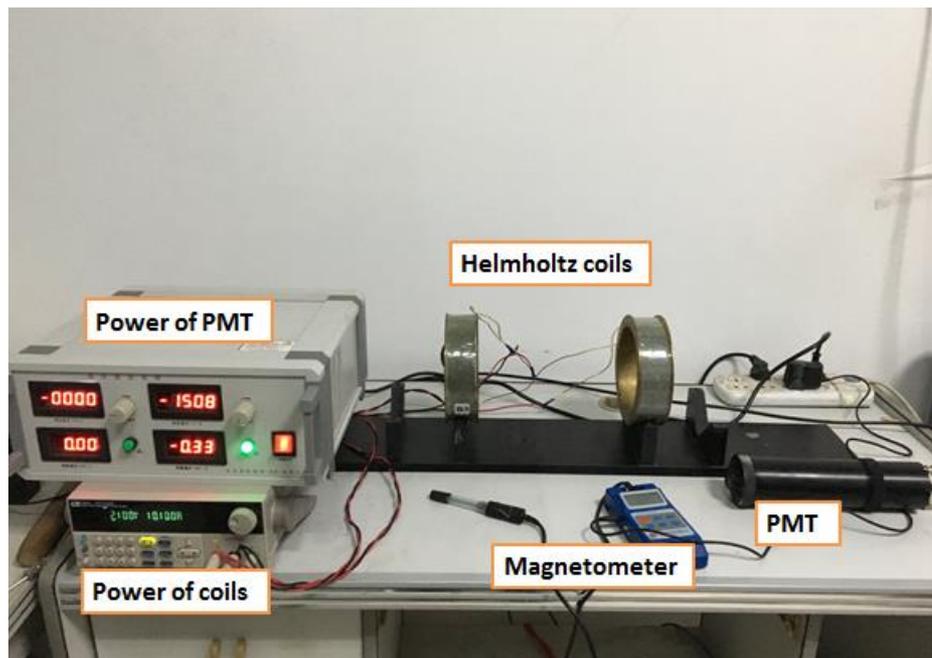
R13478的磁场测试结果

磁屏蔽套筒

R13478的磁场测试结果表明当磁场在PMT的X/Y方向的时候，对阳极输出的影响很大，而当磁场为Z轴方向的时候，对PMT的影响很小。因为PMT对磁场很敏感，所以我们设计了一个磁屏蔽套筒（两层0.1mm厚的坡莫合金）

# $\mu$ SR谱仪样机的研究进展

## $\mu$ SR探测器的研究进展--磁屏蔽



磁屏蔽测试系统

加两层0.1mm的坡莫合金后，无论PMT平行于磁场方向还是垂直于磁场方向，都至少可以屏蔽20高斯的磁场，满足我们的需求。



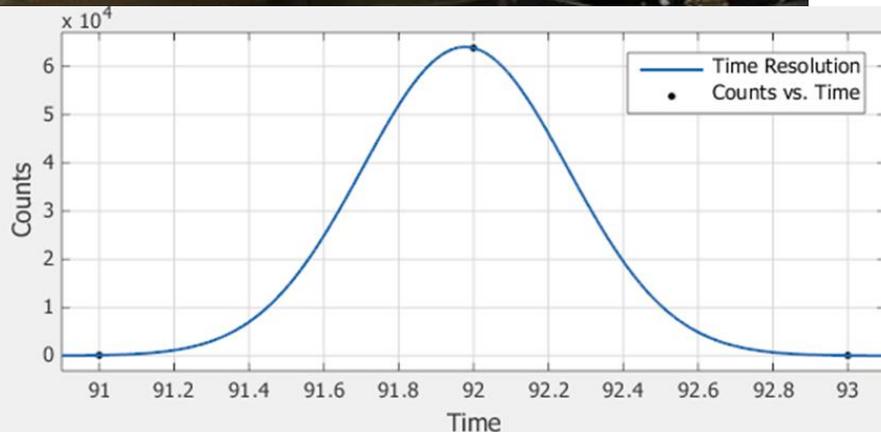
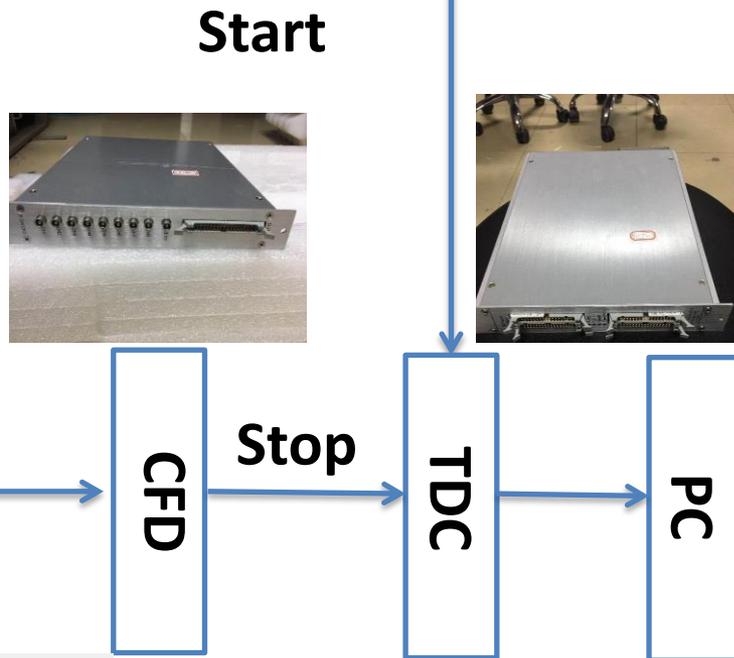
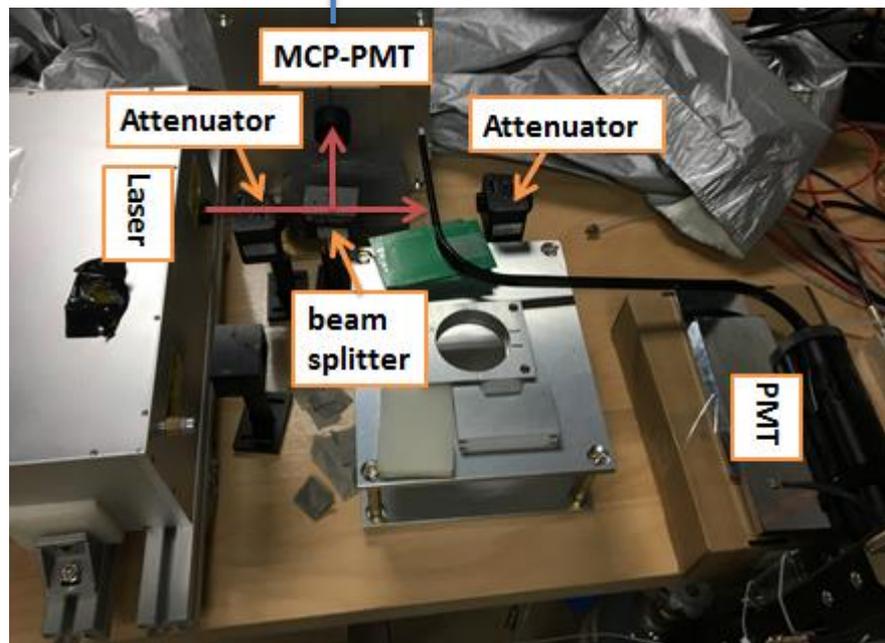
PMT平行于磁场方向



PMT垂直于磁场方向

# $\mu$ SR谱仪样机的研究进展

## $\mu$ SR探测器的研究进展—单路时间分辨

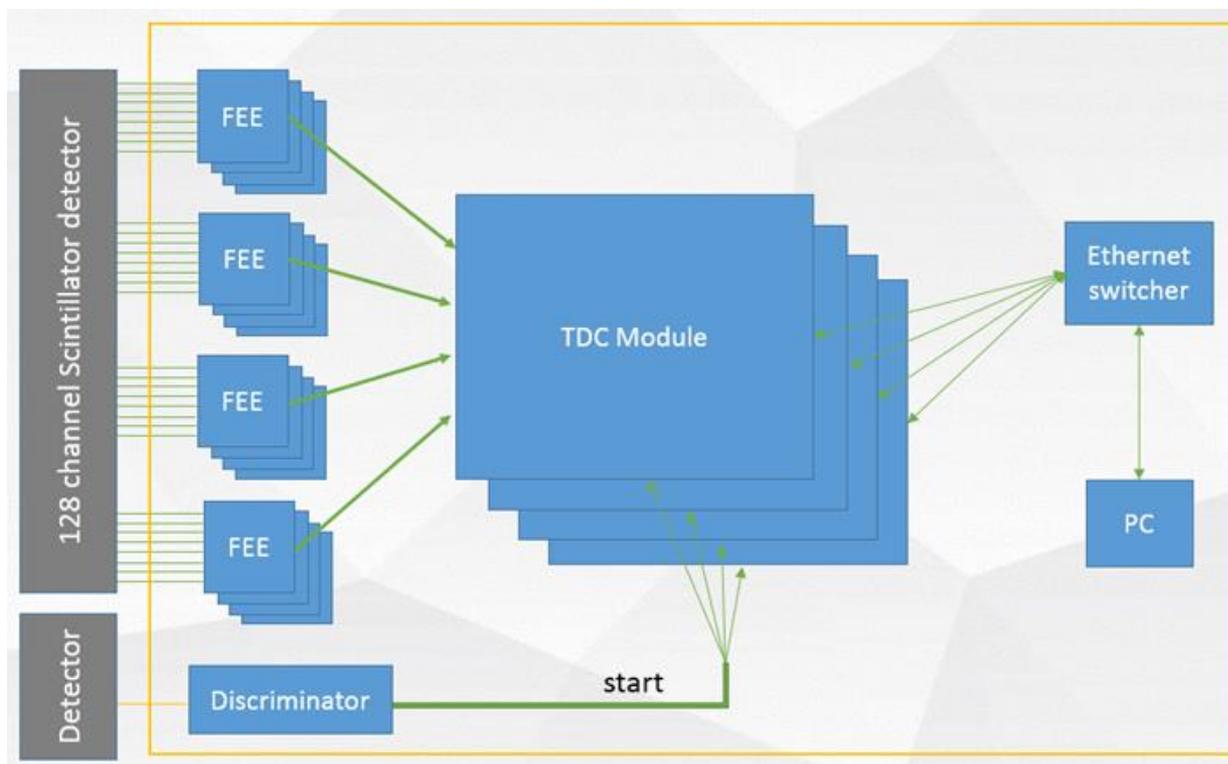


我们单路 $\mu$ SR探测器的整体测试，我们的探测器和电子学都可以正常工作，单路时间分辨是**555.9ps**(FWHM).

# $\mu$ SR谱仪样机的研究进展

## 电子学进展

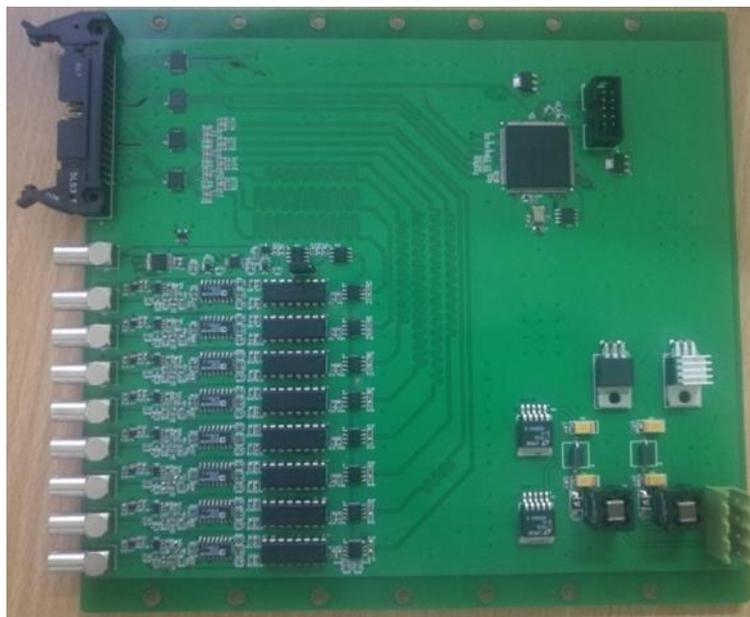
$\mu$ SR谱仪的电子学设计整体框架如图所示，总共有128个电子学通道作为stop信号，对应128个接收正电子信号的探测器通道，和1个电子学通道作为start信号，对应1个检测Muon子脉冲束打靶的探测器，电子学分为前端电子学模拟板（FEE）和后端TDC板（TDC Module）两部分。



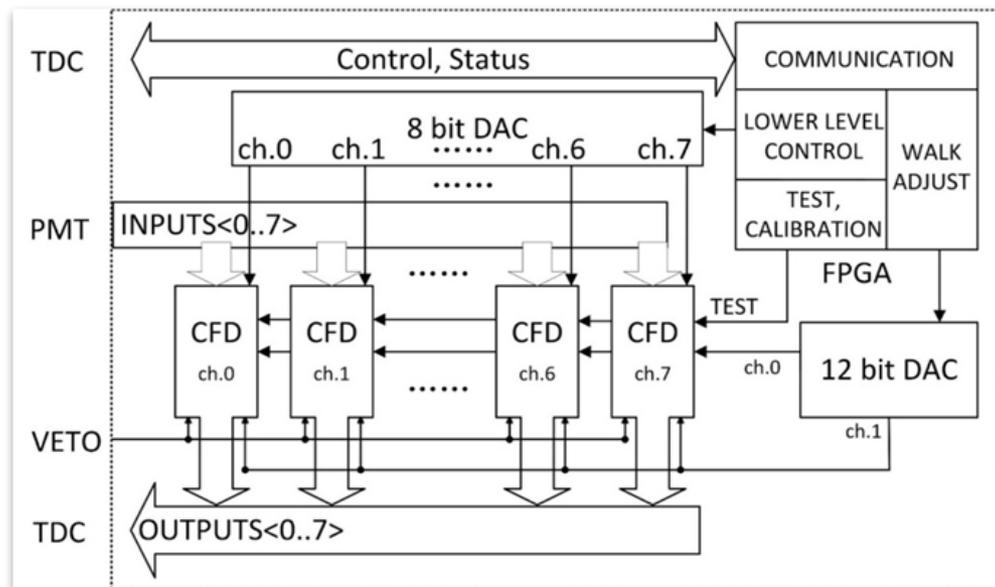
128路 $\mu$ SR谱仪的电子学设计整体框架

# $\mu$ SR谱仪样机的研究进展

## 电子学进展



前端电子学模拟板实物图



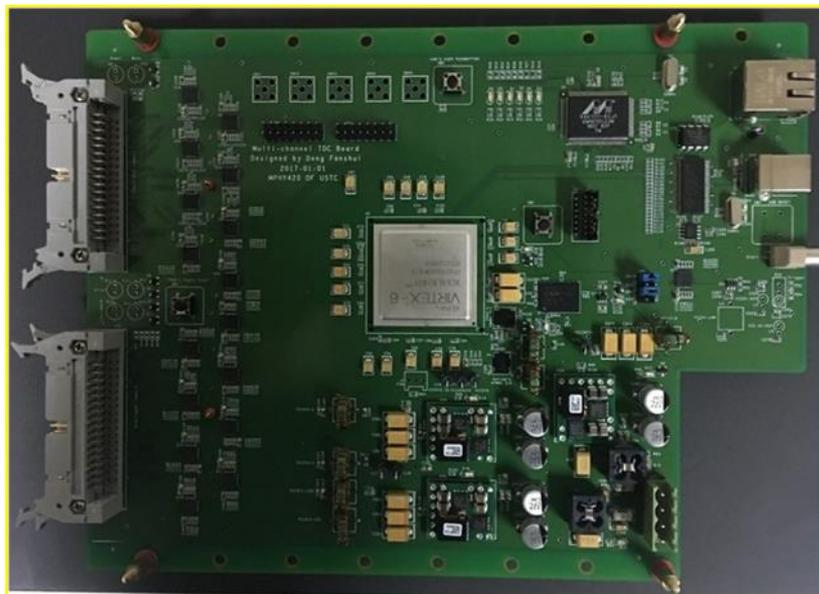
前端电子学模拟板逻辑框图

前端电子学模拟板是离探测器最近的电子学，它的主要任务就是将探测器信号转换成定时信号。

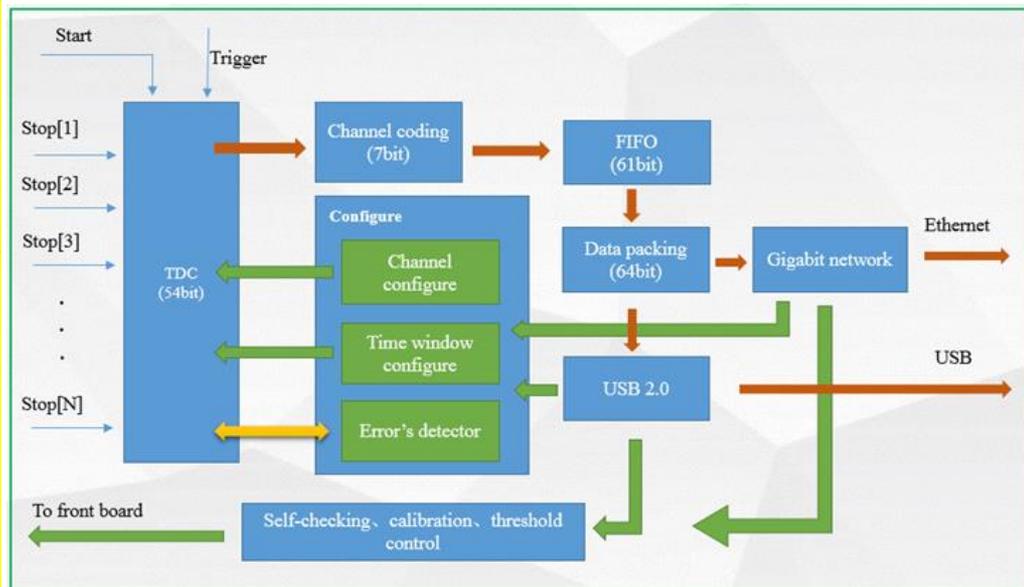
连接探测器的8路信号分别经过1个恒比定时器（CFD）将探测器信号转换成定时信号，由两个DAC（1个8bit DAC和1个12bit DAC）分别调节CFD内部两个比较器的阈值，DAC由FPGA来控制，同时FPGA负责整个电路的自检、校准及与TDC Module的通信，DAC阈值、自检及校准都由TDC Module来控制。

# $\mu$ SR谱仪样机的研究进展

## 电子学进展



后端TDC板实物图

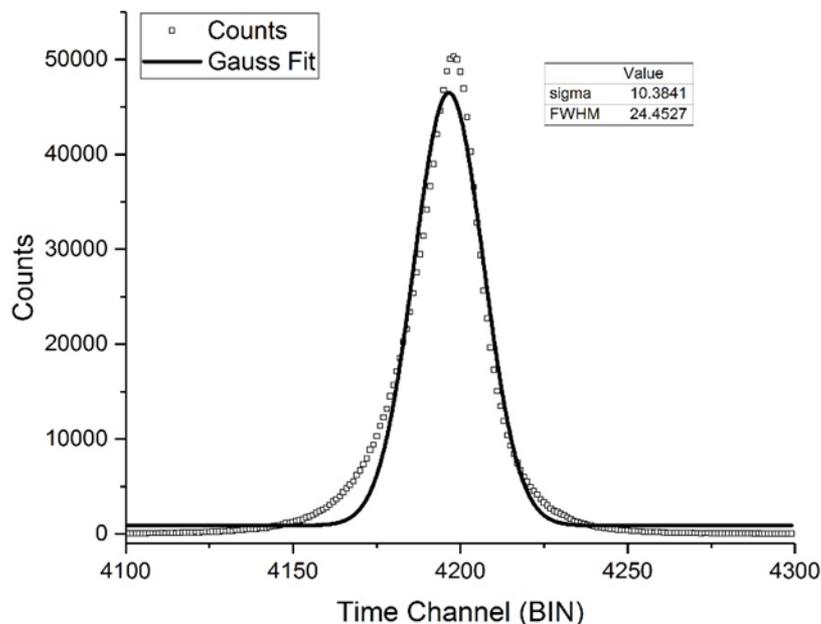


FPGA的内部逻辑框图

后端TDC板的核心器件就是一片FPGA，主要任务是对start信号与stop信号之间的时间进行测量，并将测量结果进行打包后发送到主机。

本方案是基于FPGA来实现32通道的TDC设计，32个stop信号和1个start信号接到TDC模块进行时间间隔的测量，然后将有效数据依次经过通道编码（channel codeing）、缓存（FIFO）、数据打包，通过千兆以太网或USB2.0将数据上传到主机，同时上位机可以通过以太网或USB对TDC和前端电子学进行控制。

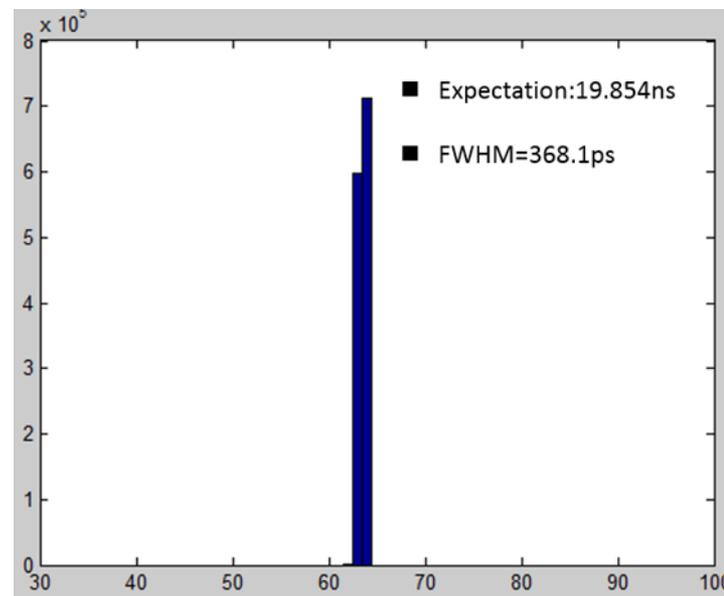
### 测试结果



### 前端电子学的定时精度测试结果

前端电子学的定时精度测试结果，FWHM=24.45Bin ( 1Bin=3.2ps )，所以定时精度等于55ps ( FWHM/ $\sqrt{2}$  )

TDC板的精度测试结果，FWHM=368.1ps，进行了多次测试 ( 27次 )，最差FWHM=385.8ps，所以单通道的精度好于273ps ( FWHM/ $\sqrt{2}$  )。

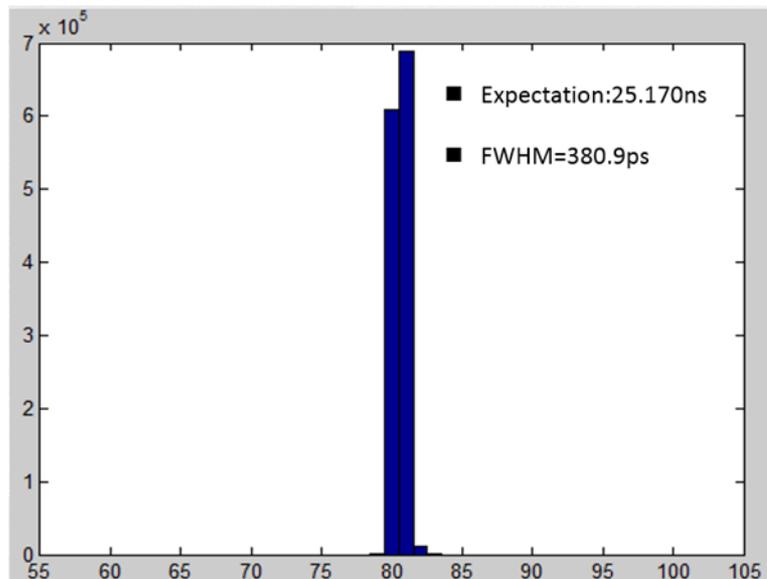


### TDC板的精度测试结果

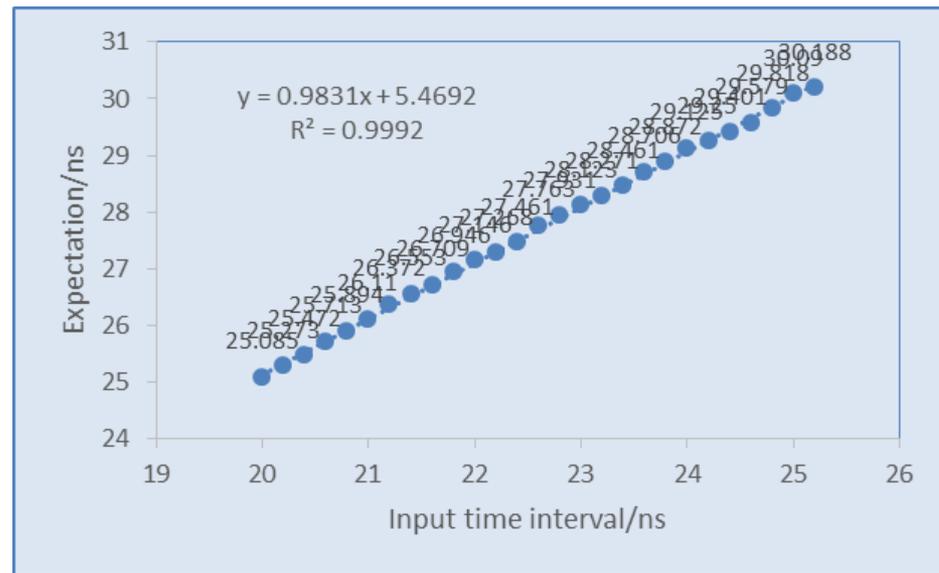
# $\mu$ SR谱仪样机的研究进展

## 电子学进展

### 测试结果



联合精度测试结果



线性度测试结果

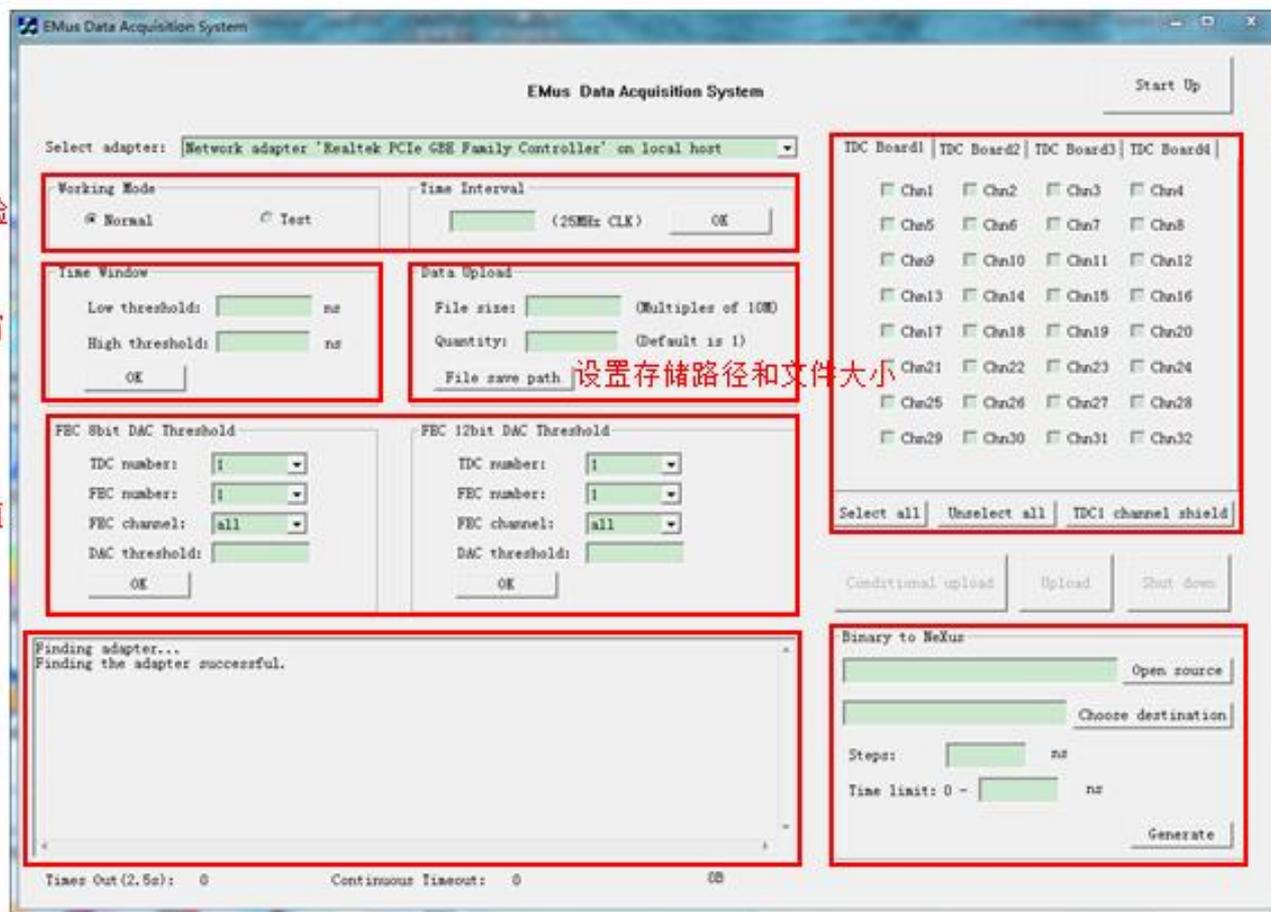
前端电子学模拟板与后端TDC板联合精度测试结果如图所示，FWHM=380.9ps，进行了多次测量（27次），最差FWHM=432.0ps，所以单通道的精度好于304ps（FWHM/ $\sqrt{2}$ ）

线性度测试如图所示， $R^2=0.9992$

# μSR谱仪样机的研究进展

## 电子学进展

### 数据获取软件



正常工作or自检

设置时间窗

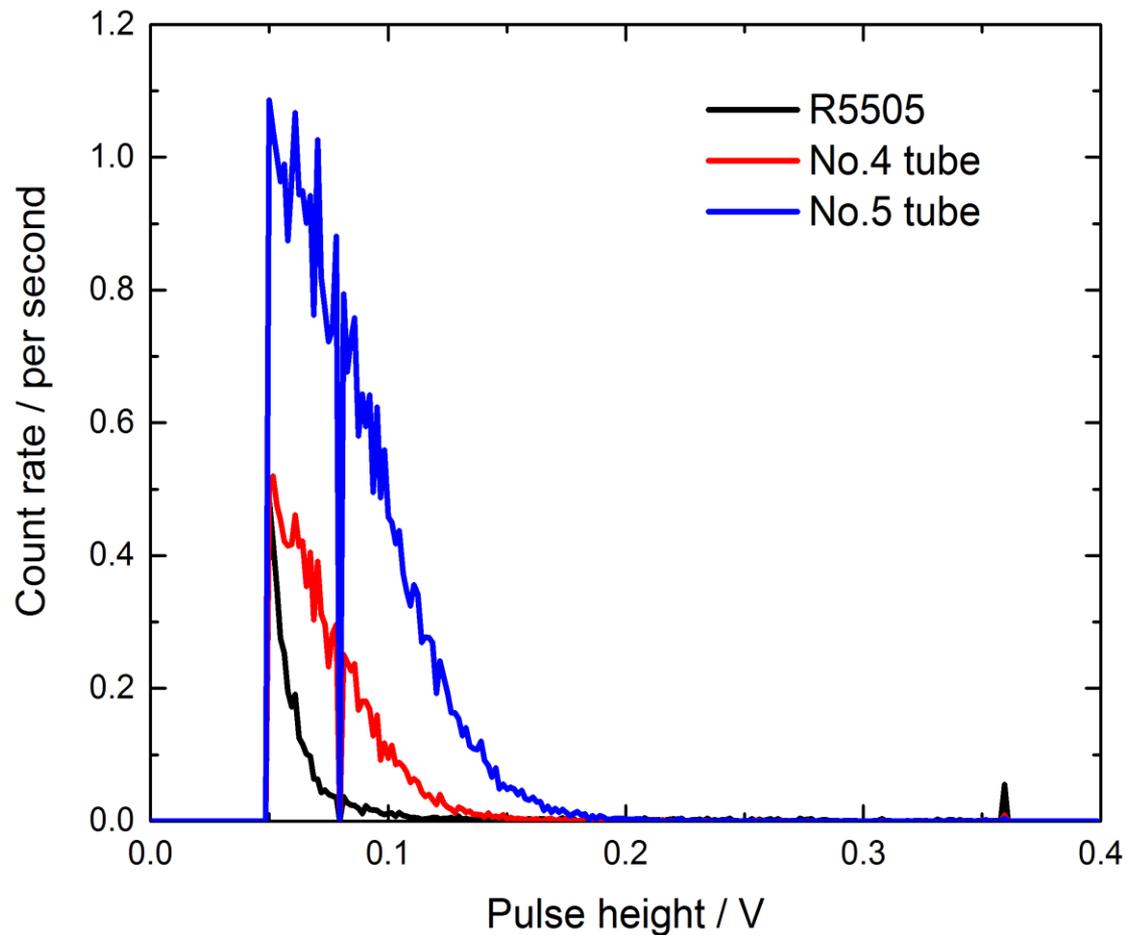
设置DAC阈值

显示面板

设置通道屏蔽

数据格式转换

## 国外测试

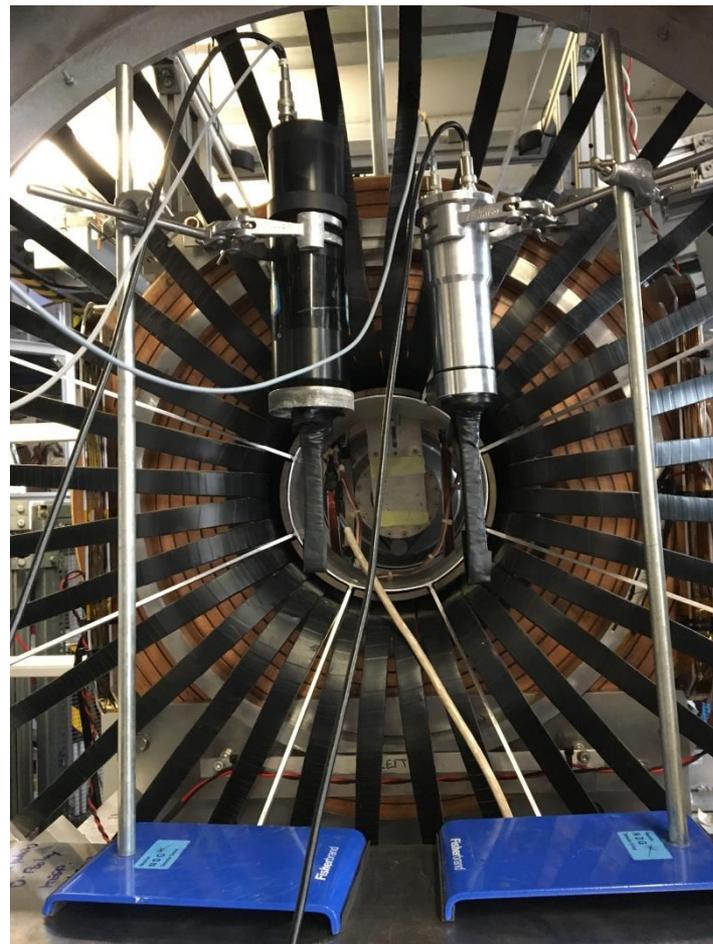


噪声测试(tested in ISIS)

# $\mu$ SR谱仪样机的研究进展

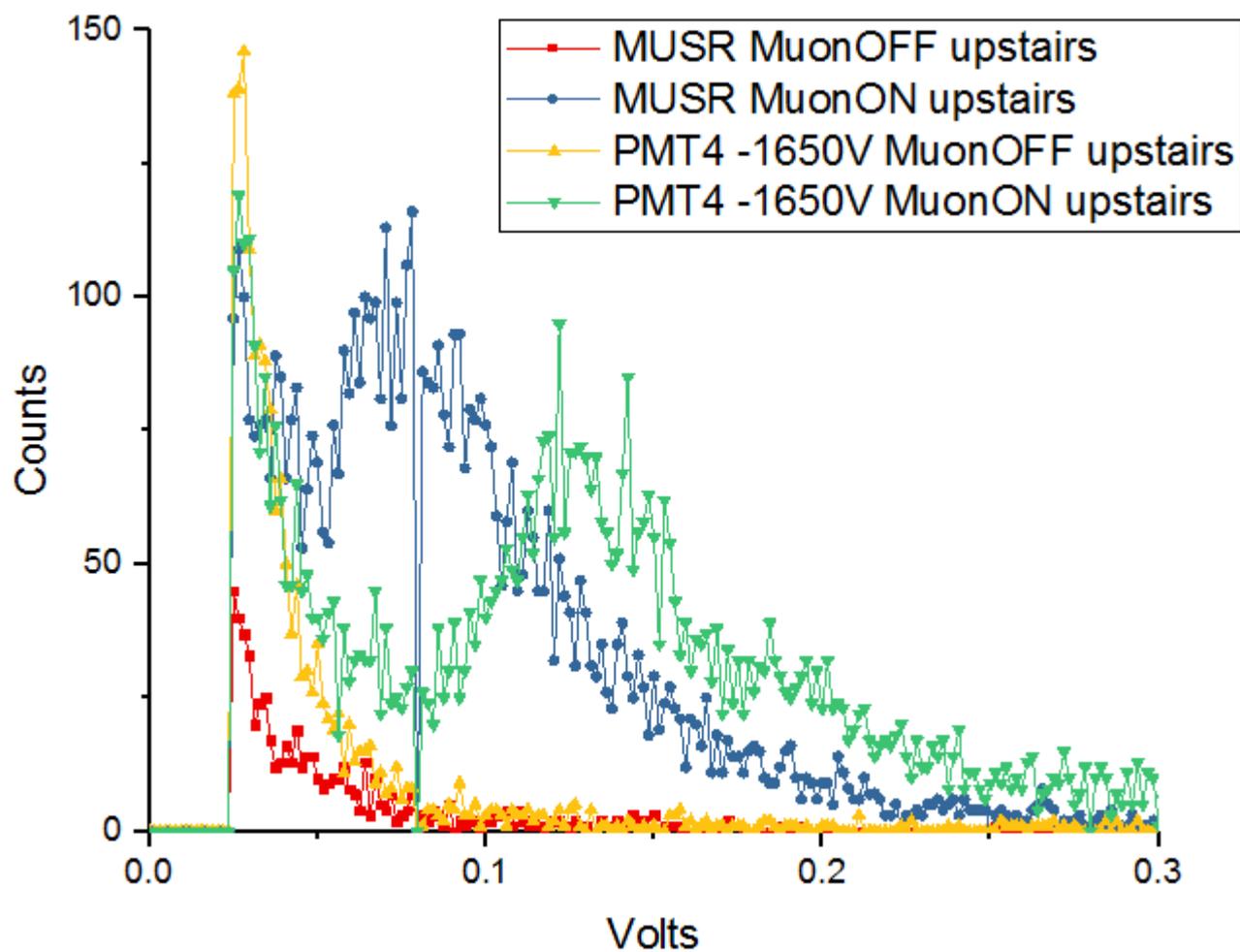
## 国外测试

探测器安装在束流上

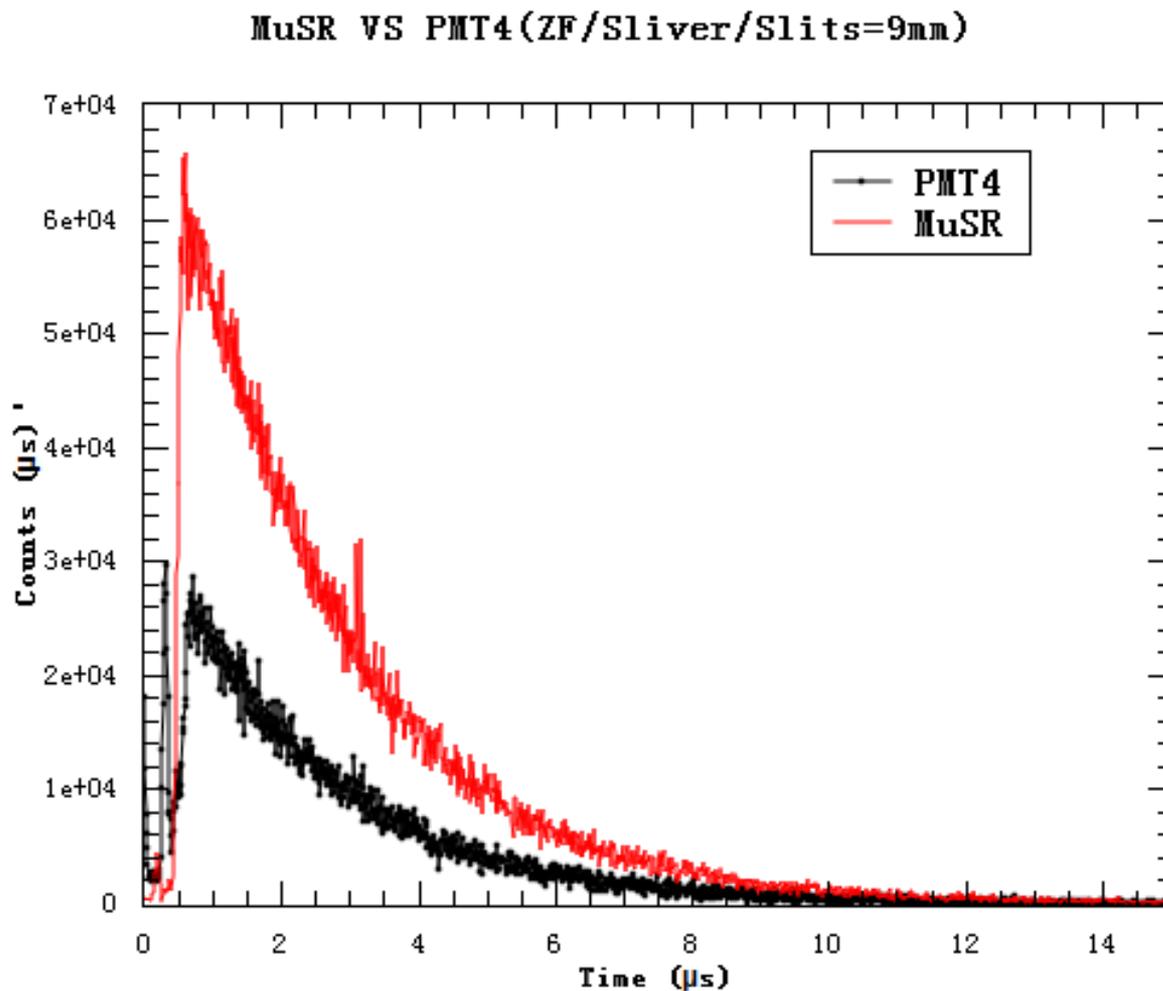


PMT4 and EMU R5505

## 国外测试



## 国外测试



# 总结

本自主课题对 $\mu$ SR谱仪搭建中的关键技术做了良好的预研，完成了 $\mu$ SR谱仪的整体设计，单路探测器的搭建和测试以及电子学的设计，并完成了整套系统在国外muon源的测试，取得了成功。

国外测试表明我们的探测器和电子学都可以正常工作，满足 $\mu$ SR测量的需求，但是也是存在一些小问题。下一步，根据在国外测试的情况，进一步完善我们的设计。同时也进行样品室和磁场系统的关键技术预研工作。



*Thank you !*

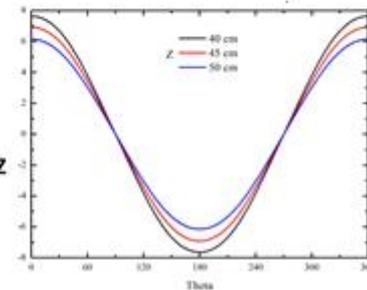
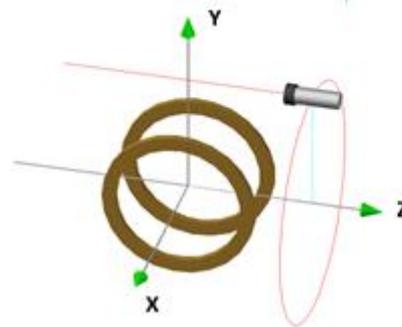
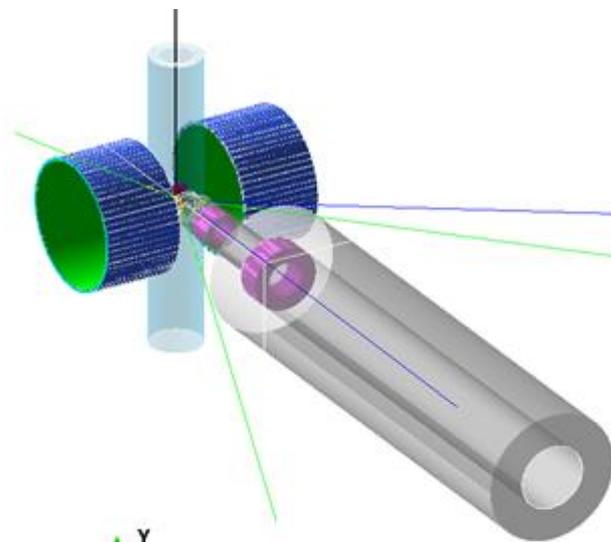
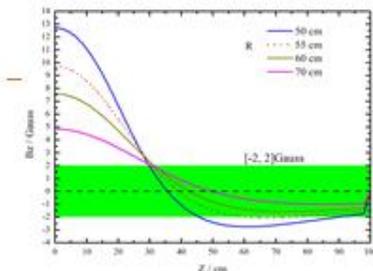
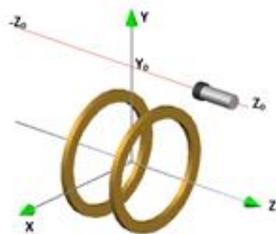
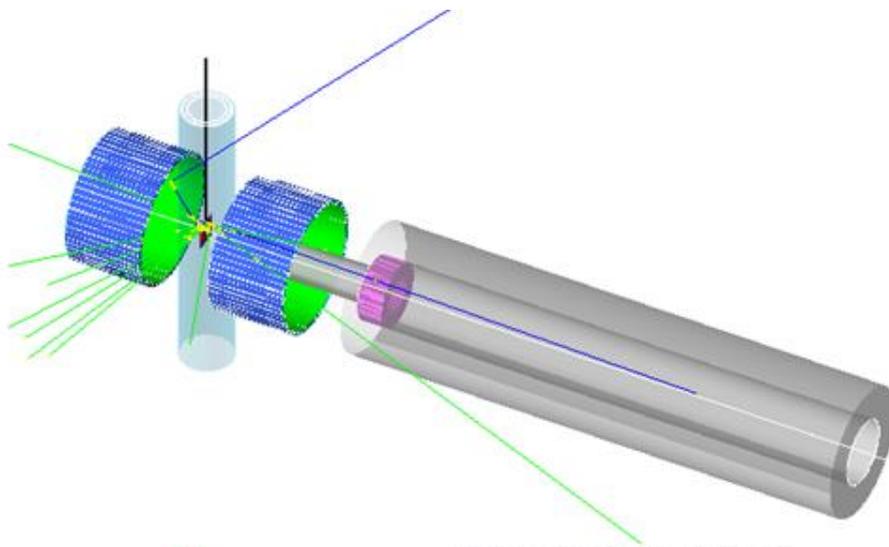
# $\mu$ SR谱仪样机的研究进展

## $\mu$ SR探测器的研究进展--磁屏蔽

最大磁场强度：300高斯

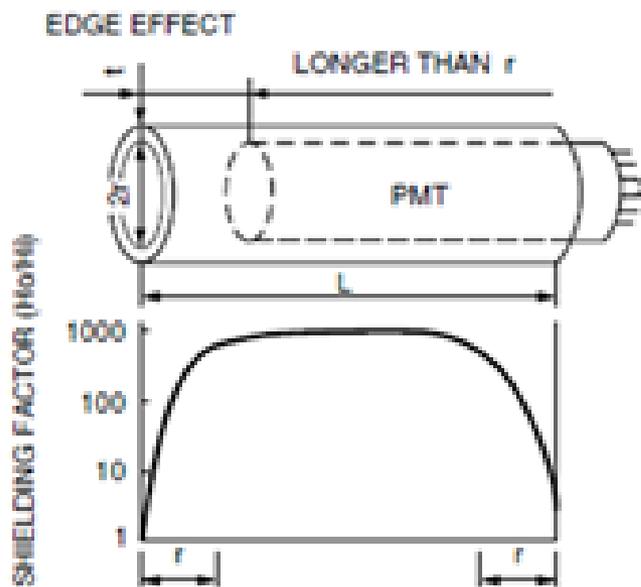
零场 / 纵场

横场



# $\mu$ SR谱仪样机的研究进展

## $\mu$ SR探测器的研究进展--磁屏蔽

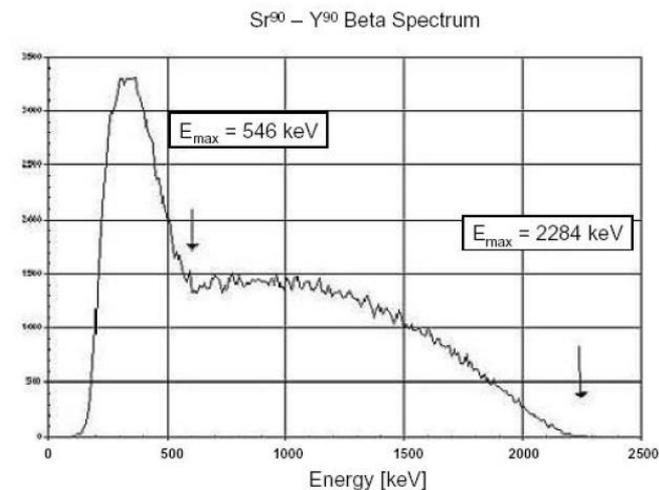
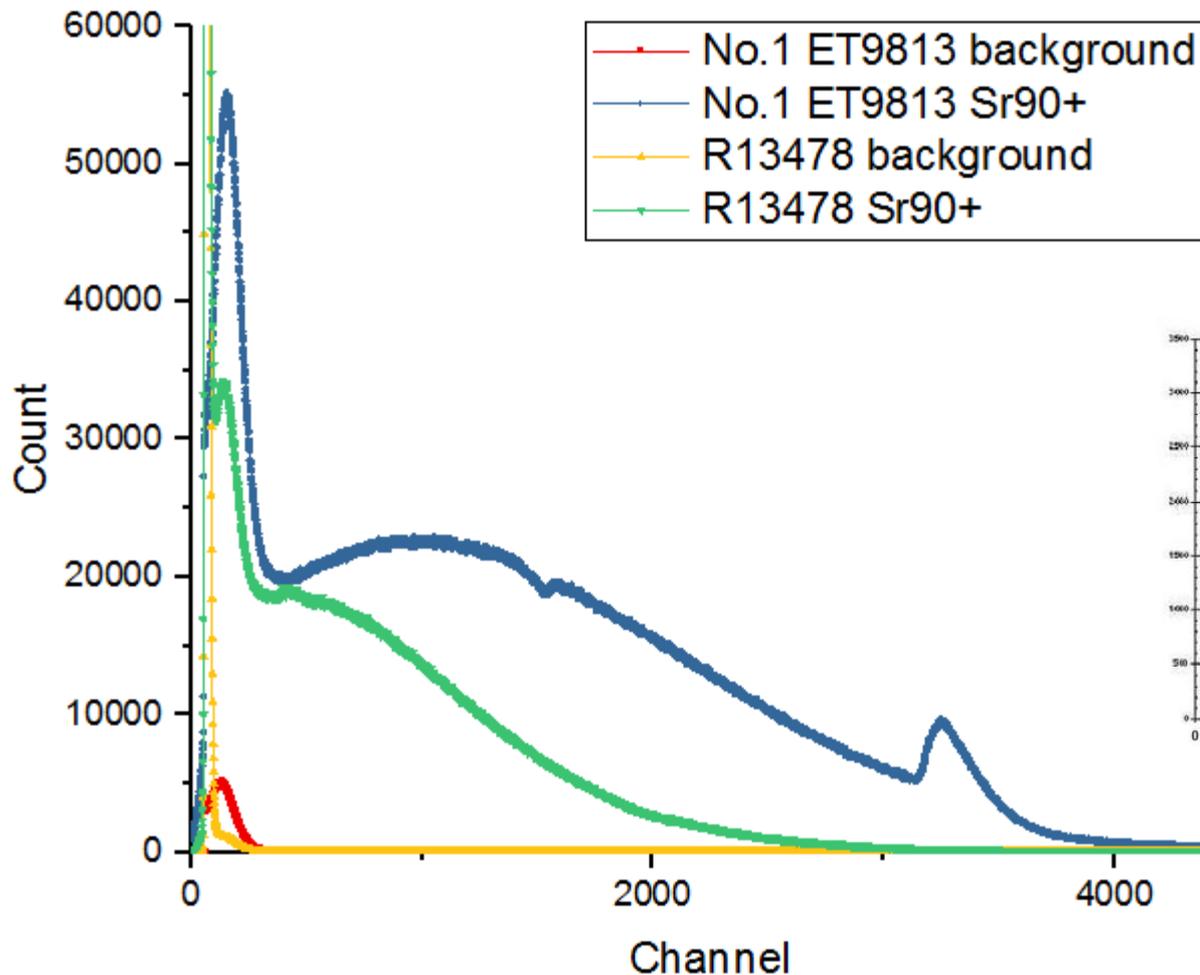


### 磁屏蔽的边缘效应

因为光阴极到第一级打拿极是受磁场影响最大的区域，所以PMT要放在磁屏蔽套筒的里面。光阴极端面距离磁屏蔽套筒边缘的距离要大于等于磁屏蔽套筒的半径，这样才能保证磁屏蔽效果最好。在我们的设计中，套筒的半径是24mm，PMT的光阴极到套筒边缘的距离是40mm。PMT和磁屏蔽之间的绝缘也很重要，否则会增加噪声。

# $\mu$ SR谱仪样机的研究进展

## $\mu$ SR探测器的研究进展



# $\mu$ SR谱仪样机的研究进展

## $\mu$ SR探测器的研究进展—单路时间分辨



**Laser: Compiler 213**

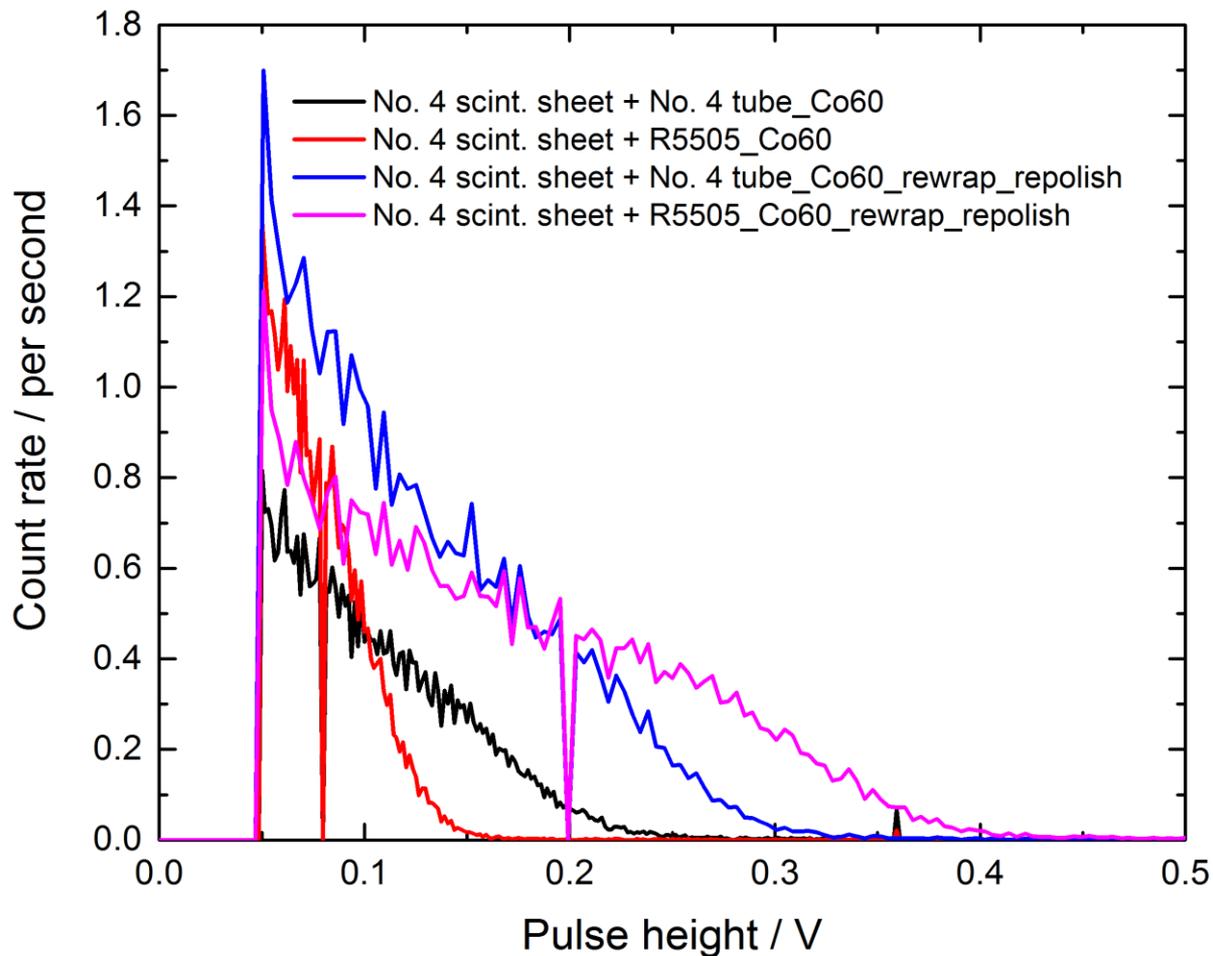
Wavelength: 213nm;  
Repetition Rate:400Hz;  
Pulse width: 4ps;



**MCP-PMT R3809U-50**

Range:160 to 850nm;  
Peak Wavelength:430nm;  
Rise time:160ps;  
TTS:25ps;

## $\mu$ SR探测器的研究进展—国外测试



闪烁体条测试in ISIS

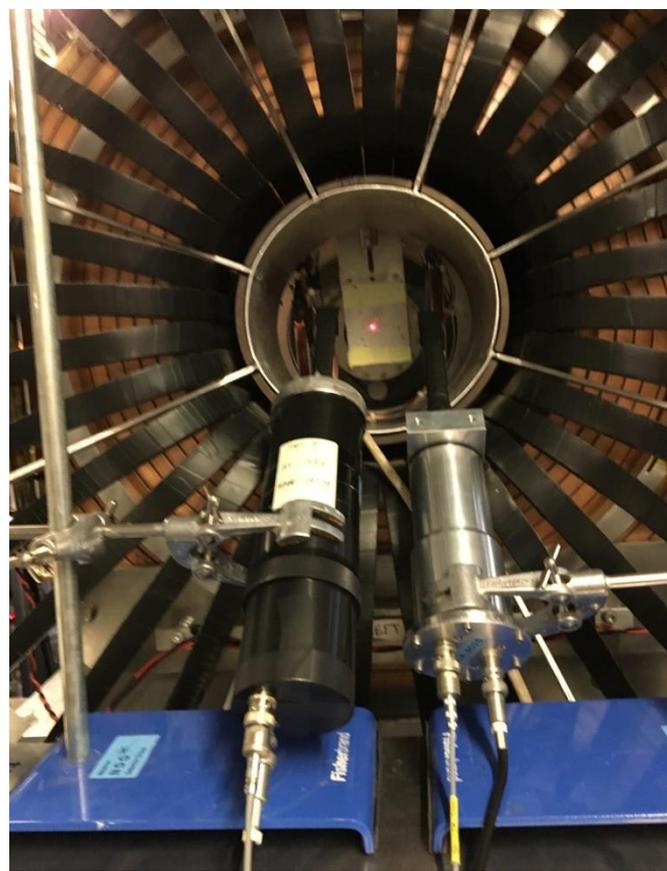
# $\mu$ SR谱仪样机的研究进展

## $\mu$ SR探测器的研究进展—国外测试

三路探测器安装在束流上



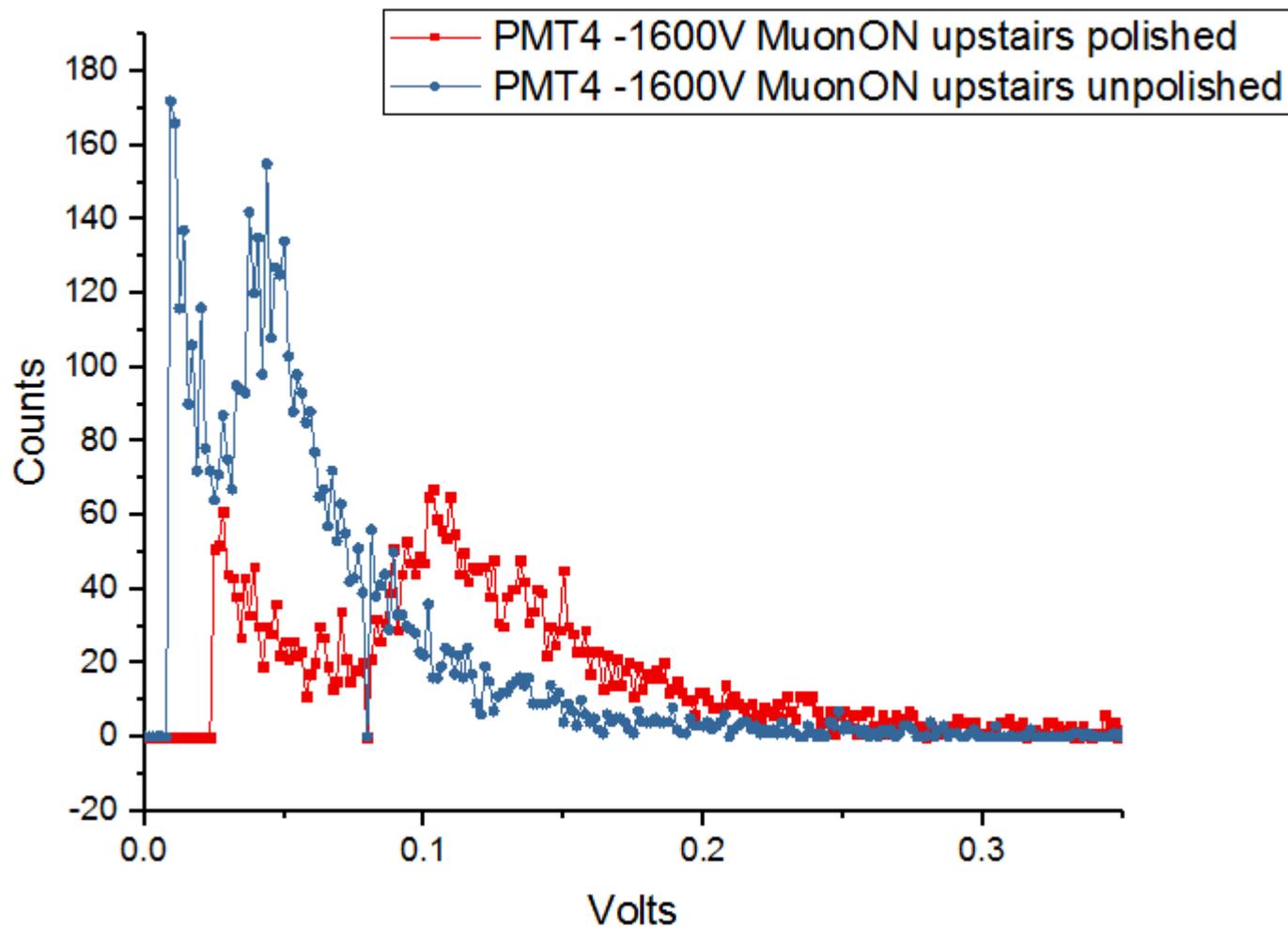
PMT5



PMT4 and EMU R5505

# $\mu$ SR谱仪样机的研究进展

## $\mu$ SR探测器的研究进展—国外测试



# $\mu$ SR谱仪样机的研究进展

## $\mu$ SR探测器的研究进展—国外测试

