



**Search for Muon to electron conversion at J-PARC**  
**在J-PARC寻找缪子到电子的转换**

邢天宇, IHEP

On behalf of the COMET collaboration

# 概要

- 物理背景
- COMET实验设计及现状
- COMET中方合作组贡献
- 展望
- 总结

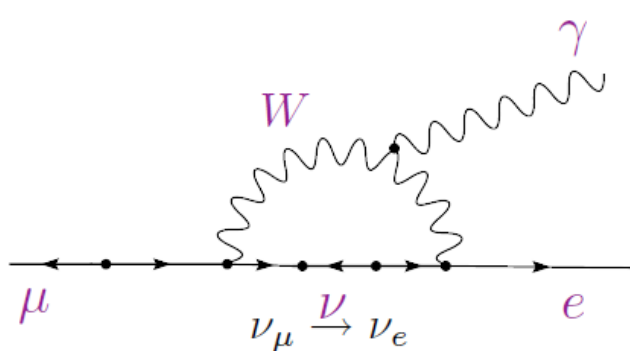
# 带电轻子味破坏 ( cLFV )



- 实验上, 已存在味破坏现象
  - 夸克: CKM矩阵
  - 中微子: PMNS矩阵
    - 轻子的味并非严格守恒量!
- 新的味破坏机制可能存在
  - FCNC → cLFV
  - 其他的味破坏机制?

## • 标准模型中的cLFV

- 轻子的FCNC被GIM机制以及中微子质量与W质量比值压低



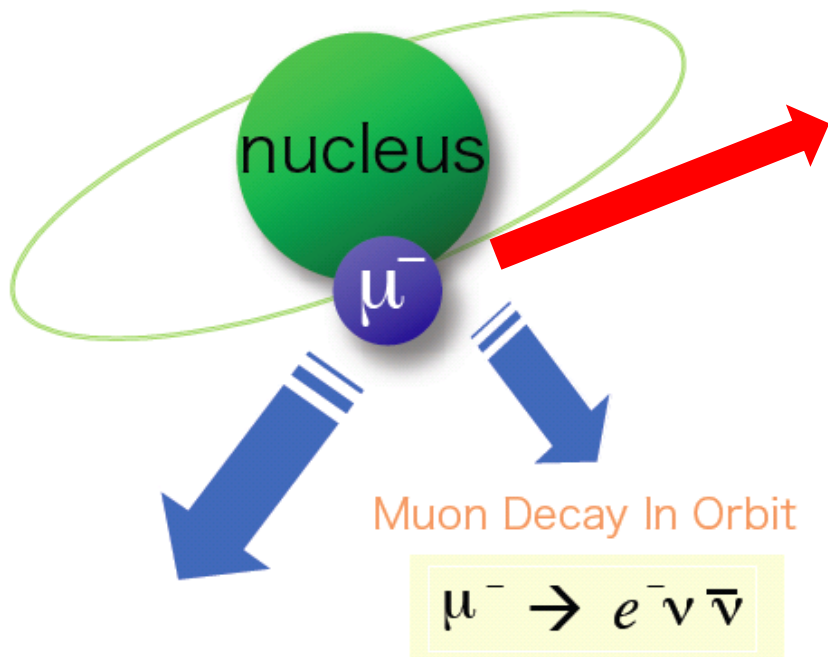
$$B(\mu \rightarrow e\gamma) = \frac{3\alpha}{32\pi} \left| \sum_{i=2,3} U_{\mu i}^* U_{ei} \frac{\Delta m_{i1}^2}{M_W^2} \right|^2 \sim 10^{-54}$$

\* 定义:  $Br = \Gamma_{CLFV} / \Gamma_{capture}$

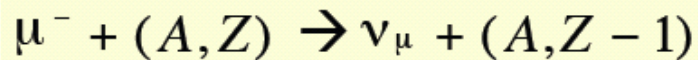
不受标准模型本底干扰  
非零信号=新物理!

# $\mu - e$ 转换

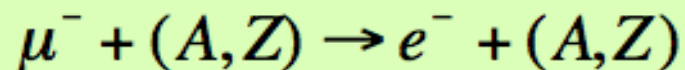
1s state in a muonic atom



nuclear muon capture



寻找无中微子的缪子核俘获：  
 $\mu - e$ 转换



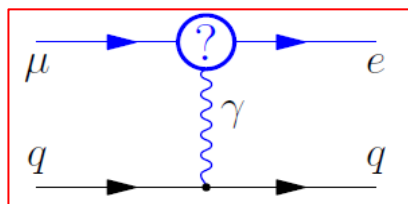
带电轻子味破坏 (cLFV)过程

- 信号特征：
    - 105 MeV的单能电子
  - 本底特征：
    - 无束流相关偶发本底
    - 束流本底主导
    - 物理本底有限
- 机遇：  
新一代  
质子源
- 不受束流亮度制约  
可用脉冲束流抑制  
现有探测器技术足以应对

# 用 $\mu - e$ 转换探索高能区新物理

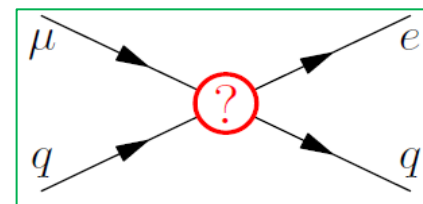
在有效理论中做扩展  $\mathcal{L} = \mathcal{L}_{SM} + \sum_{n \geq 1} \frac{C_{ij}^{4+n}}{\Lambda^n} \mathcal{O}^{4+n}$ , cLFV由Dim-6算符贡献:

$$L = \frac{m_\mu}{(\kappa+1)\Lambda^2} \bar{\mu}_R \sigma_{\mu\nu} e_L F^{\mu\nu} + \frac{\kappa}{(\kappa+1)\Lambda^2} \bar{\mu}_L \gamma_\mu e_L \sum_{q=u,d} \bar{q}_L \gamma_\mu q_L$$



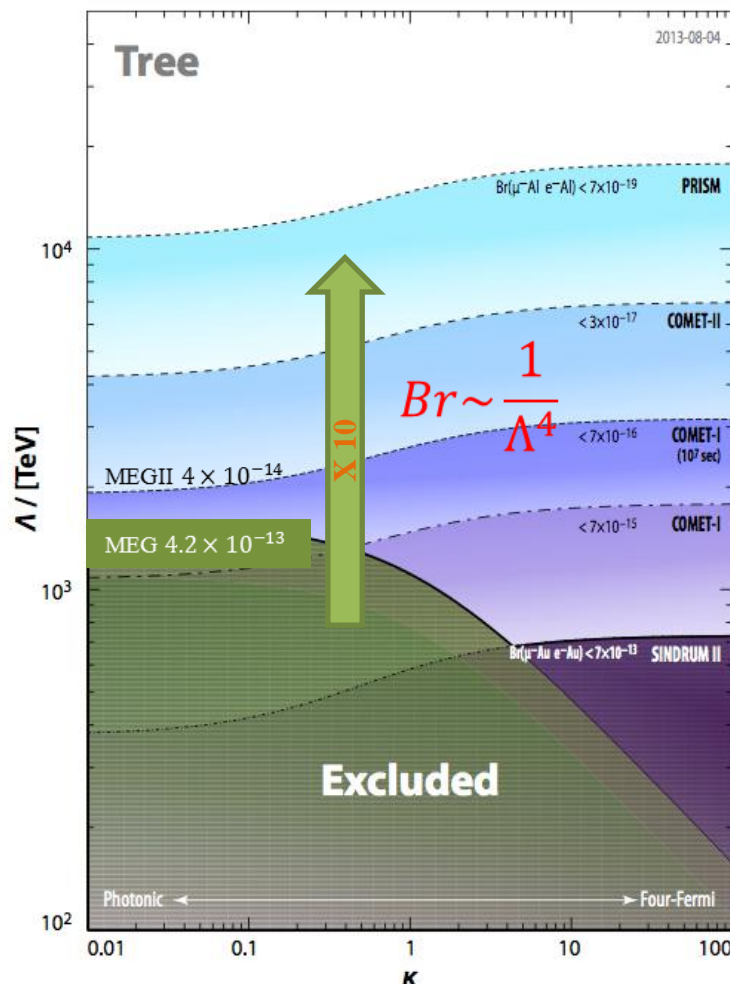
Photonic 过程  
 $\kappa \ll 1$

$\mu \rightarrow e\gamma$	$\mu - e$
强	有



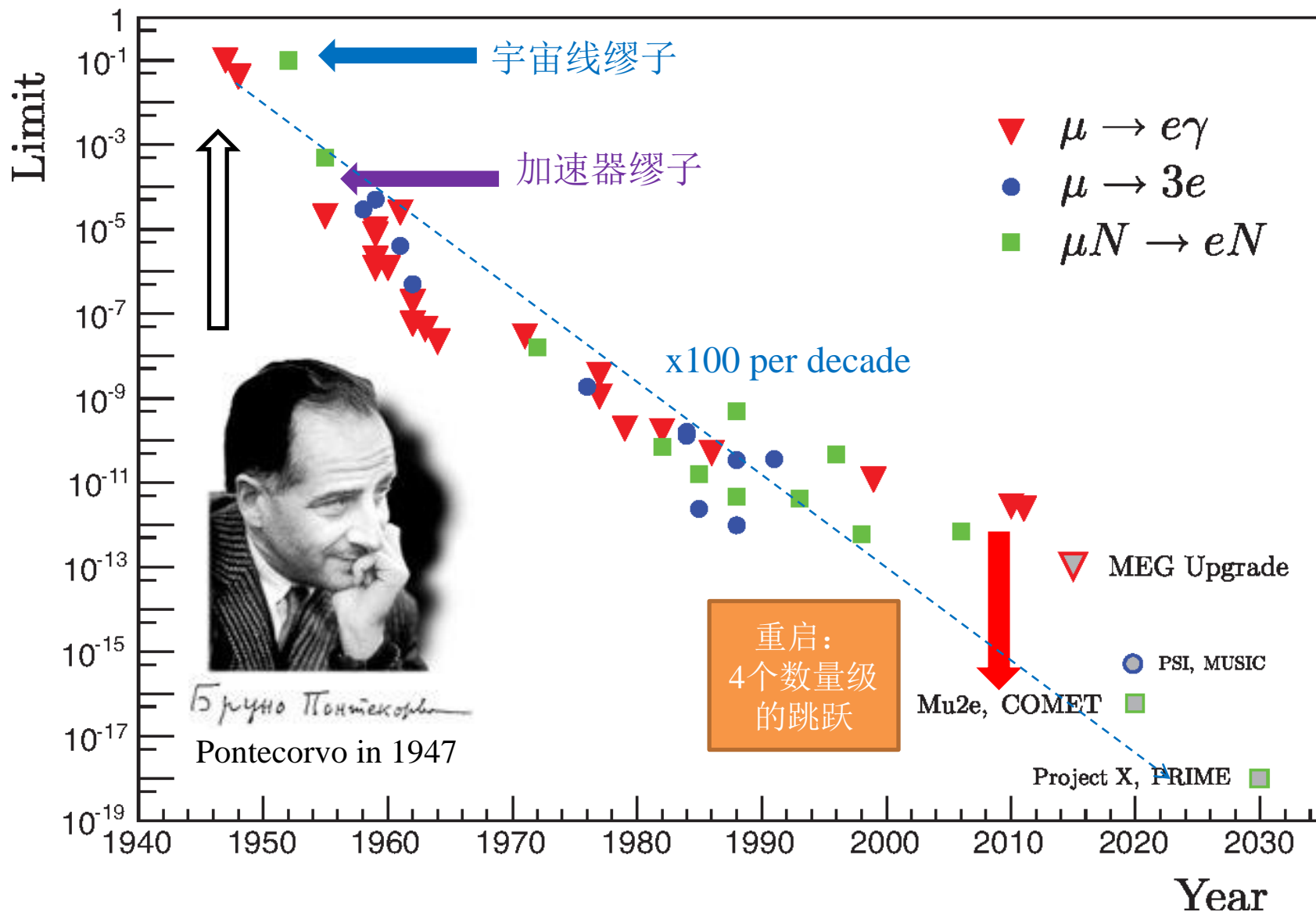
Four-Fermi 过程  
 $\kappa \gg 1$

$\mu \rightarrow e\gamma$	$\mu - e$
无	有



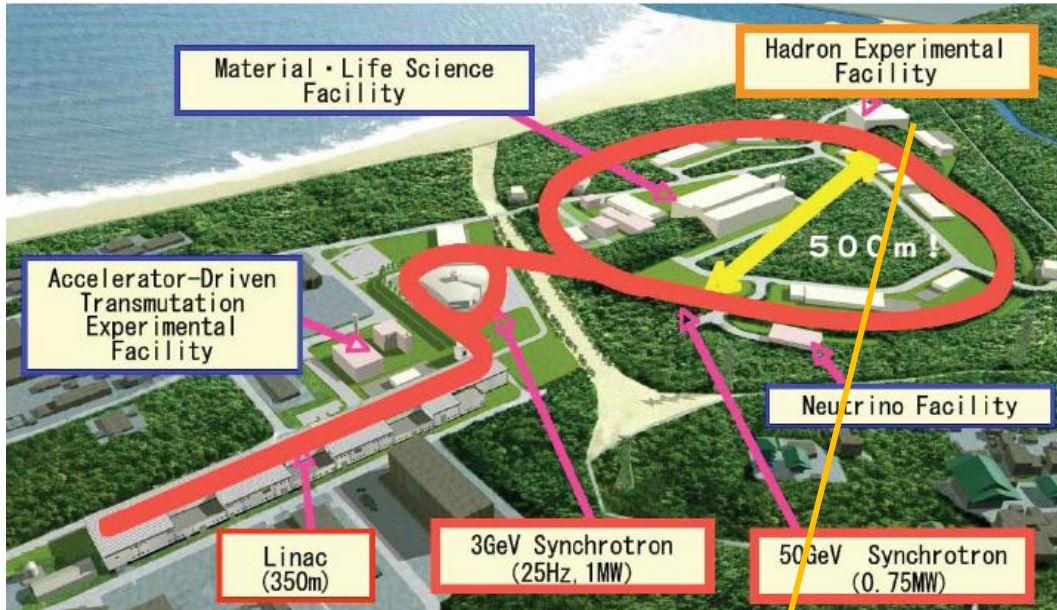
相比较于  $\mu \rightarrow e\gamma$  需要 Photonic 过程贡献,  $\mu - e$  可同时检验两种过程

# 历史上的缪子cLFV实验





# COherent Muon Electron Transition (COMET) at J-PARC



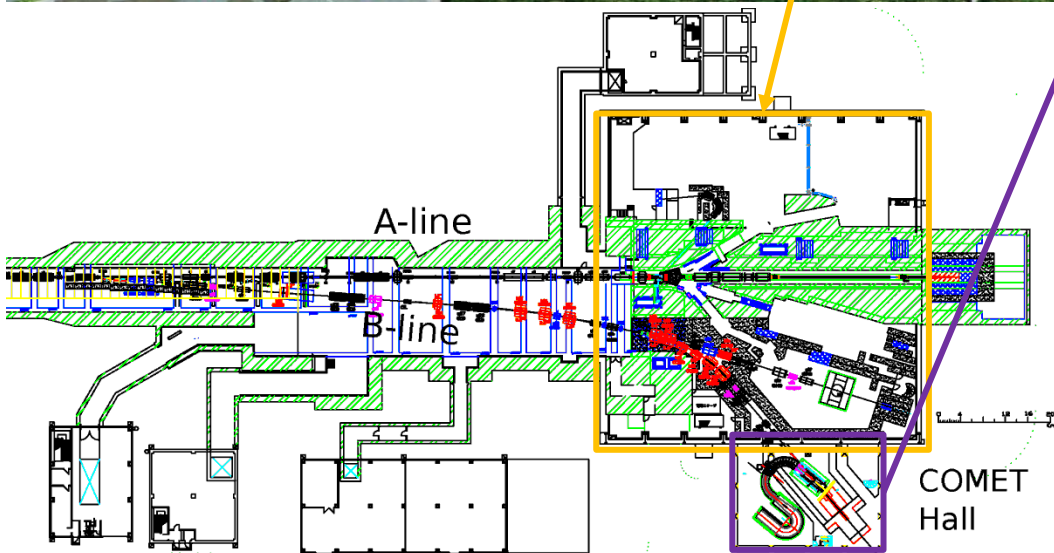
目前最好的  $\mu N \rightarrow e N$  限制:

$$7 \times 10^{-13} \text{ (90\% C.L.)}$$

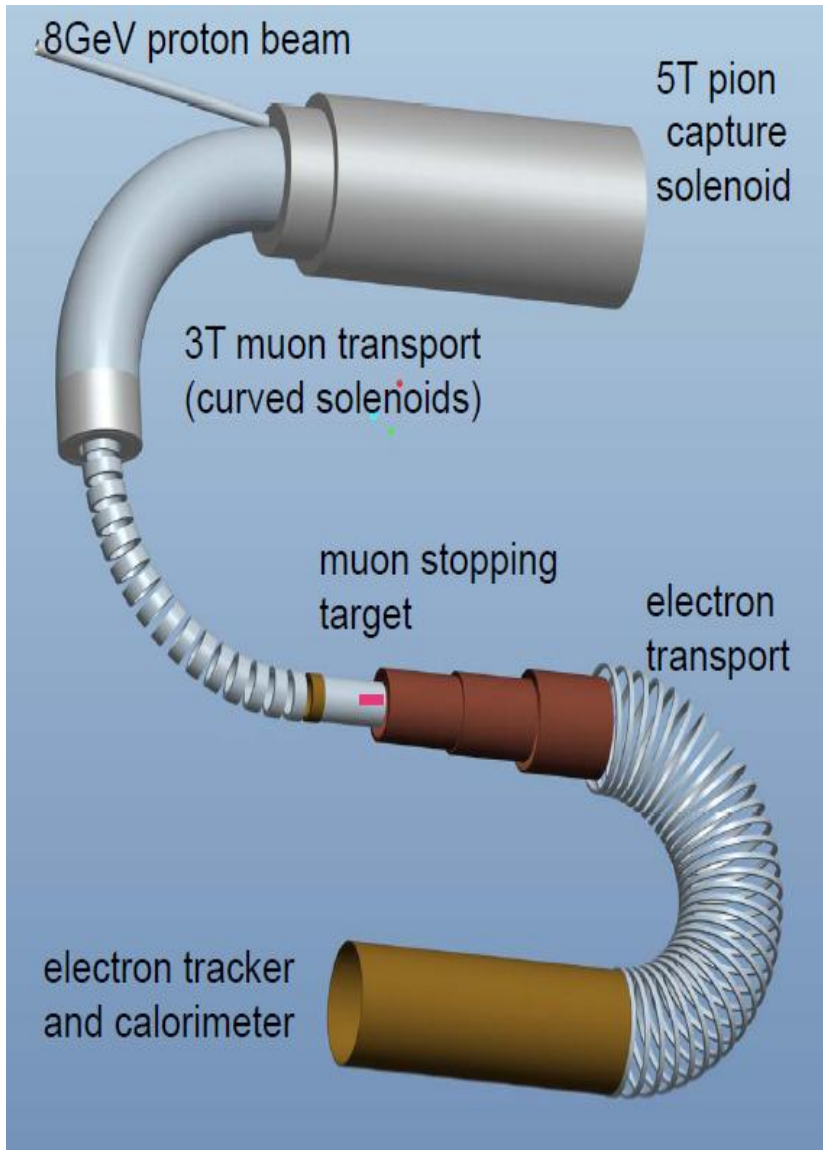
SINDRUM II experiment at PSI

COMET目标:

**提升10000倍!**



# COMET实验概况

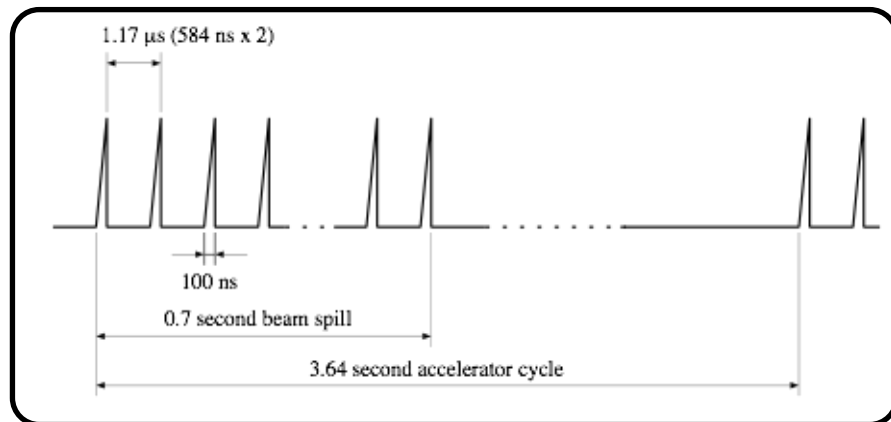
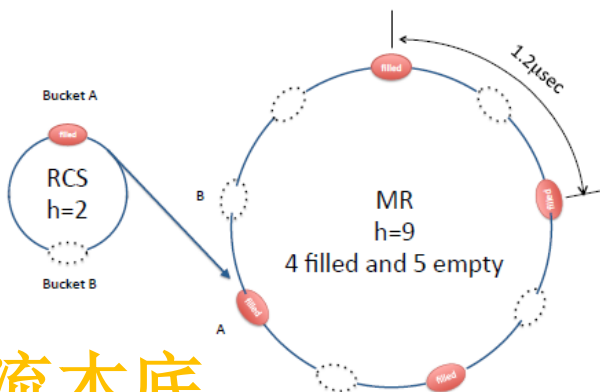


- 预期灵敏度:  $2.6 \times 10^{-17}$ 
  - 打靶质子:  $8.5 \times 10^{20}/\text{年}$
  - 停留缪子:  $2.0 \times 10^{18}/\text{年}$要求缪子束流:  
 $10^{11} \text{ muon/sec! } (10^8 @ \text{PSI})$
- 实验难点:
  - 产生并俘获大量缪子  
厚靶, 超导俘获磁体
  - 挑选干净的低能缪子  
长输运线, 弯曲螺线管
  - 从大量束流粒子中挑选信号  
C形电子输运线

提高缪子流强,  
控制本底!



# 本底来源与控制方法



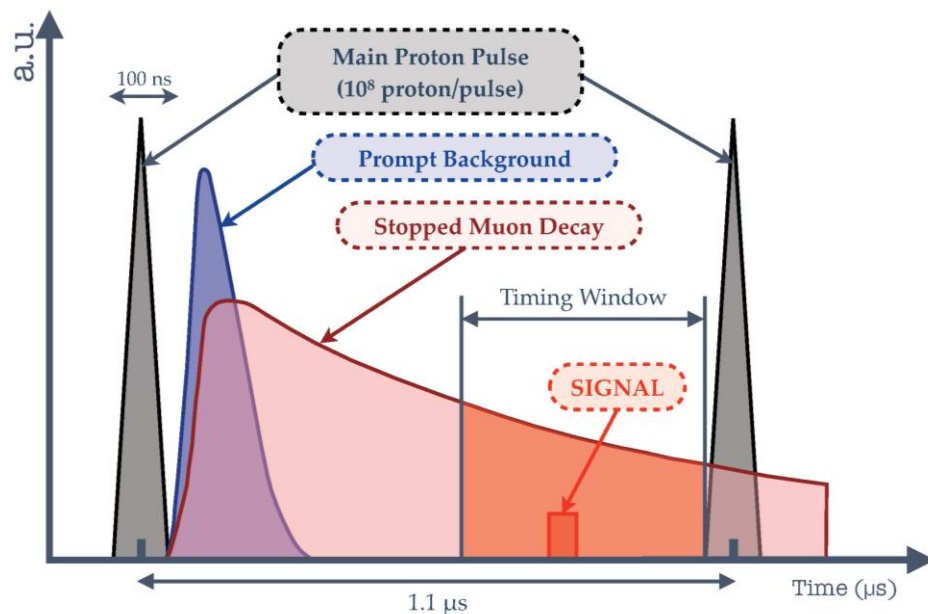
## 1. 束流本底

### • 来源

- 缪子束流中存在能量大于100MeV的粒子

### • 控制方法

- 使用脉冲束流
- 绝大多数在脉冲前沿，可用延迟时间窗控制：700ns延迟
- 少数散落分布，由质子泄露造成，故要求质子泄露率低于 $10^{-10}$ 。



# 本底来源与控制方法

## 2. 物理本底

### • 来源

- 主要来源于在轨缪子衰变(DIO)
- 已有带辐射修正的精确计算 (Czarnecki), 信号附近的DIO尾巴以5次函数形式降低

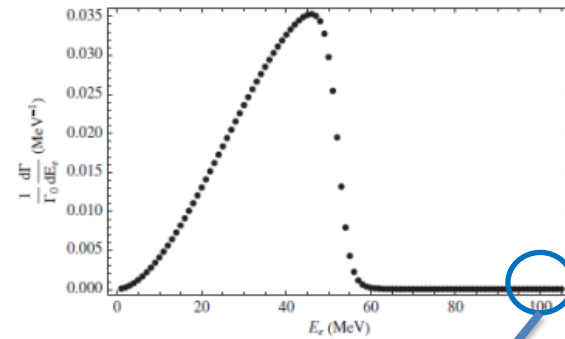
### • 控制方法

- 通过精确的径迹重建防止信号区出现物理本底。
- 动量分辨要求在400 keV/c以内。

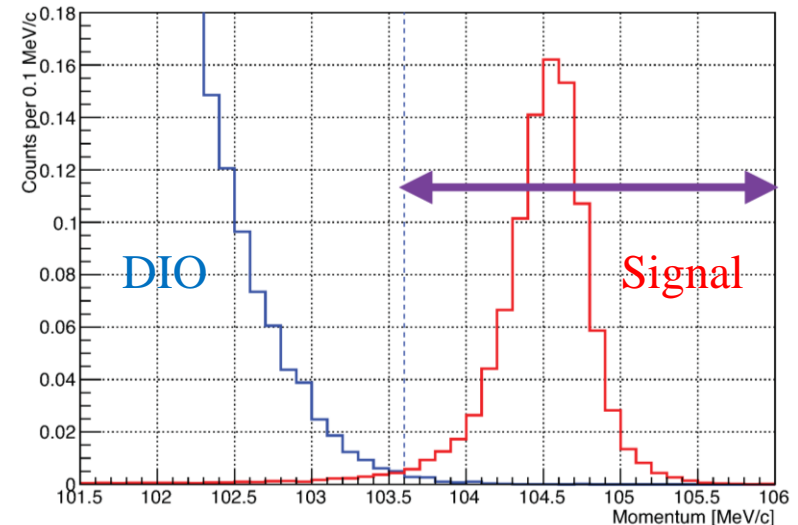
## 3. 宇宙线、误重建

### • 控制方法

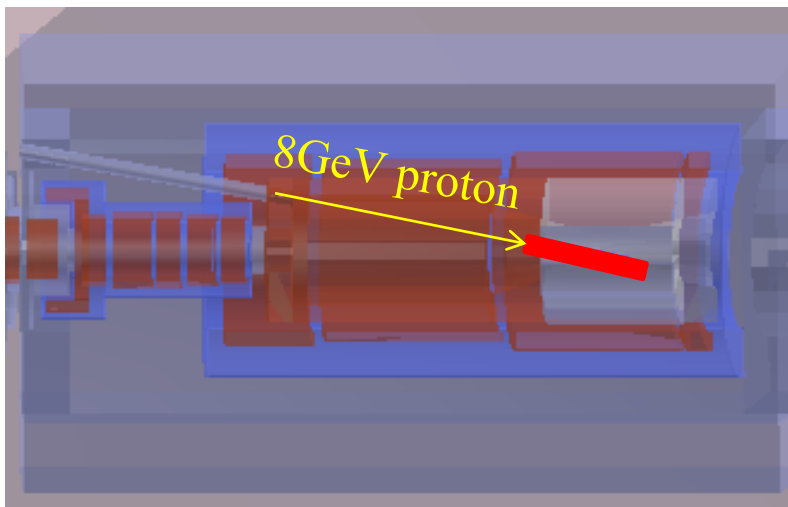
- 用宇宙线屏蔽系统做反触发
- 严格控制重建质量



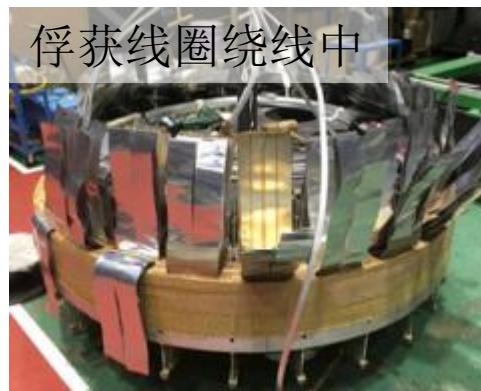
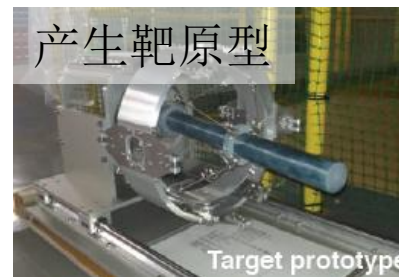
Signal and DIO (BR=3 × 10<sup>-15</sup>)



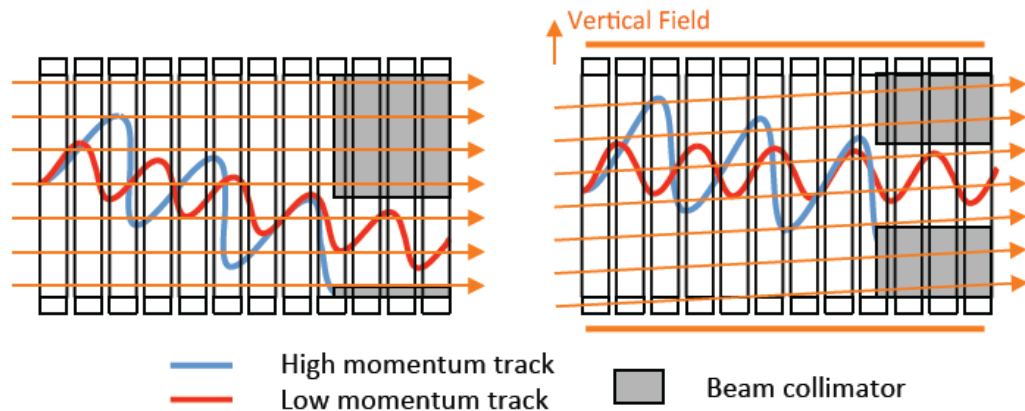
# 产生靶和超导俘获磁体



- 为提高缪子产生效率：
  - 倾向高能质子: 2~8 GeV
  - 厚靶: 1~2个强相互作用长度
    - 高温: 钨或碳
  - 高强度俘获磁场: 5特斯拉
    - 超导磁体: 大半径线圈大体积屏蔽以抵抗辐射热量
    - 绝热衰减: 提高接收率



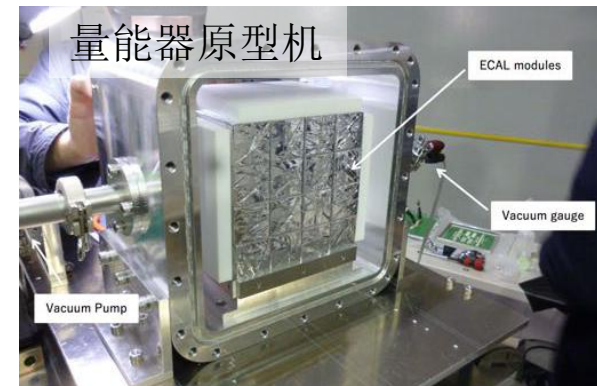
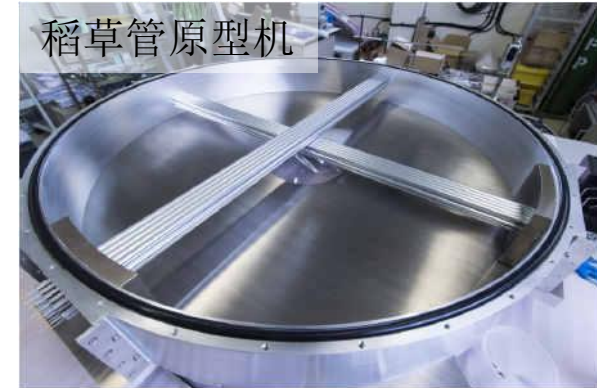
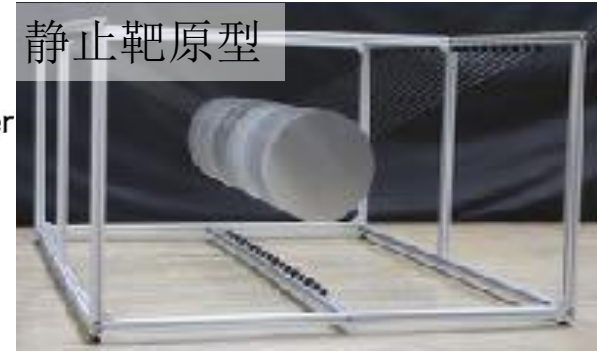
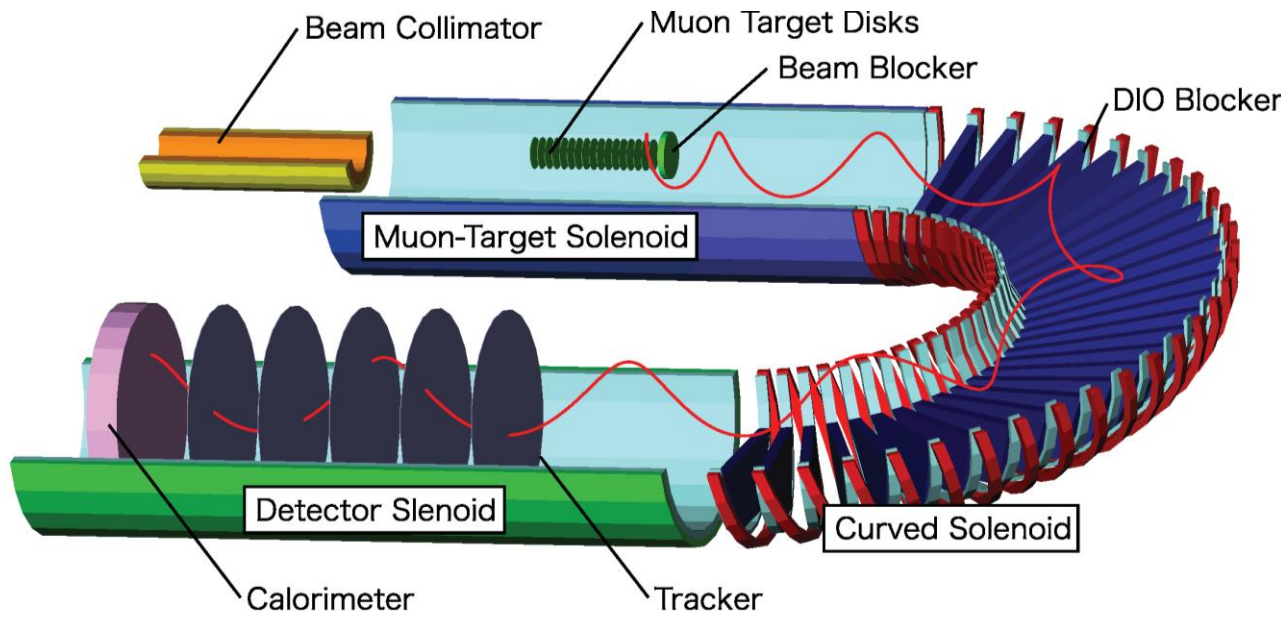
# 运输螺线管



- 为提高缪子束纯净度：
  - C型弯曲螺线管用于筛选粒子
    - 带电粒子会垂直于弯曲平面平移。平移距离正比于粒子动量。平移方向取决于粒子电荷。
    - 垂直方向的补偿磁场可以将希望保留的 ( $\sim 40 \text{ MeV } \mu^-$ ) 粒子拉回弯曲平面。
    - 末端的准直器可以截止无关的束流粒子。



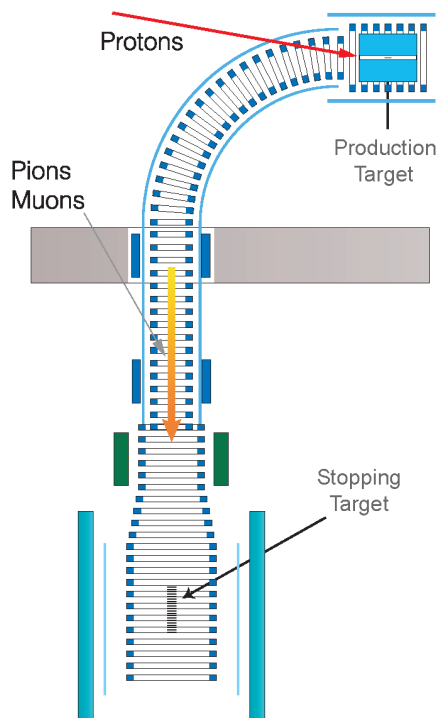
# 静止靶和探测器系统



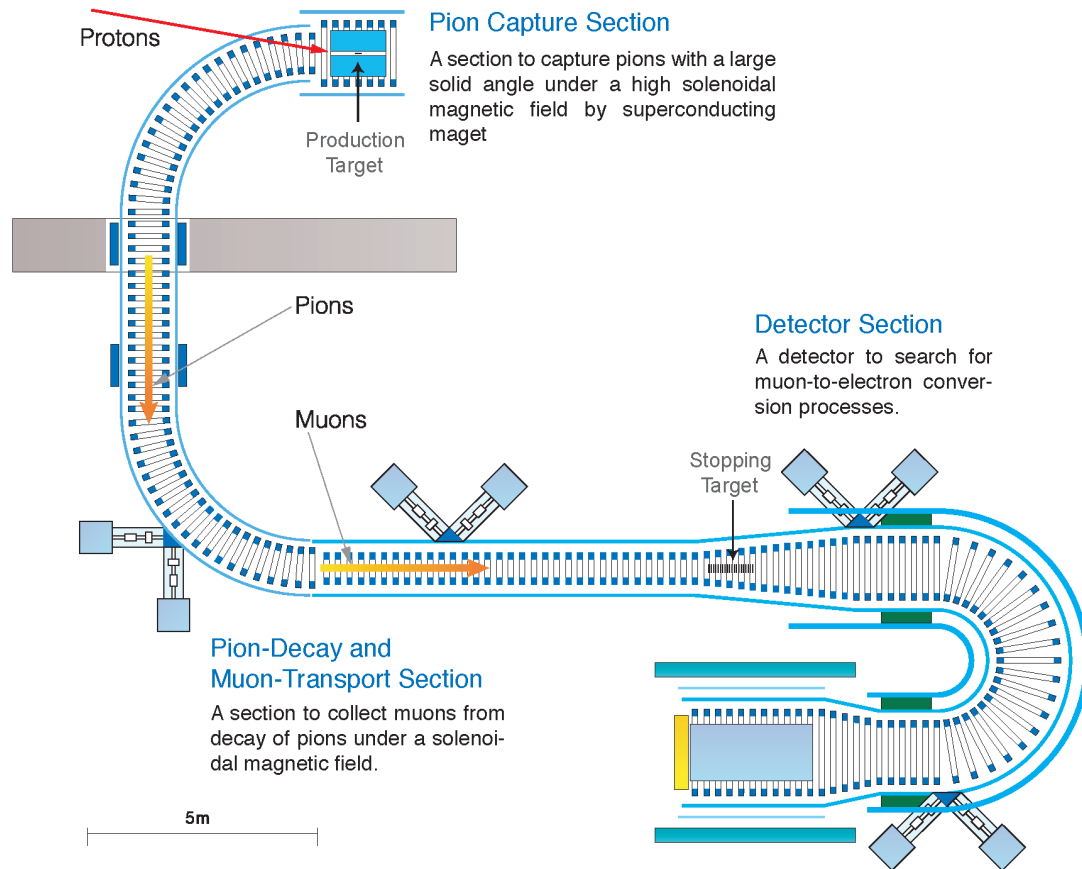
- 低能缪子停留在静止靶内。
  - 由一系列铝或钛的薄片组成，控制避免能损。
- 束流通过另一端C型螺线管进行筛选
  - 降低探测器噪声。
- 高分辨率高接收度的探测器系统位于C型螺线管的另一端。

# COMET分阶段计划

8GeV, 0.4mA, 3.2 kW



8GeV, 7mA, 56 kW



COMET 一期, 5个月取数时间

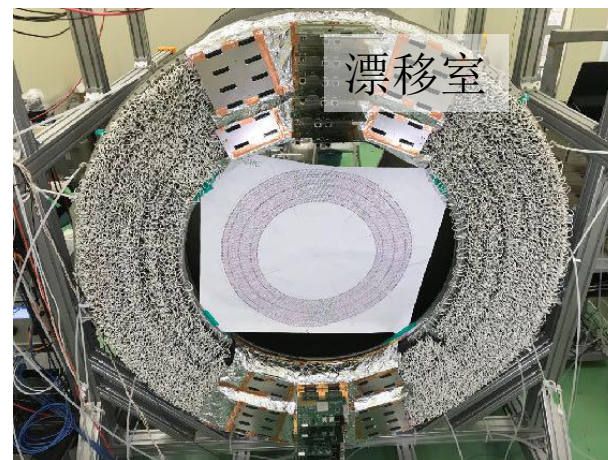
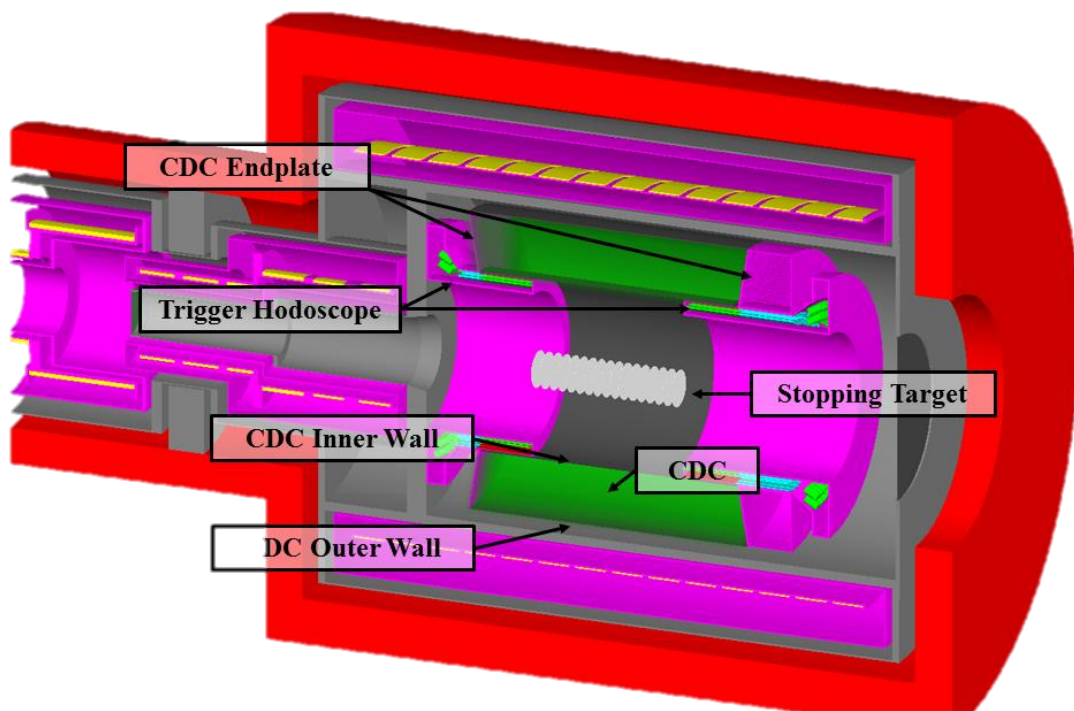
- 研究束流本底, 为二期实验做准备
- 利用专用圆筒探测器 (CyDet) 直接寻找  $\mu - e$  转换, 单事例精度  $3 \times 10^{-15}$  (100倍提升)

COMET 二期, 一年取数时间

- 达到最终预期单事例精度  $2.6 \times 10^{-17}$  (10,000倍提升)



# 圆筒探测器(CyDet)



- 为一期实验专门设计。由漂移室和圆筒触发探测器组成
- 圆筒触发探测器：
  - 分塑料闪烁体和切伦科夫探测器两层。提供触发T0和粒子鉴别。
- 漂移室：
  - 全斜丝：为短径迹保留径向位置信息。
  - 氨基混合气体：降低散射效果，保障动量分辨。
  - 大内径：避免过高的DIO击中率。

# COMET合作组



~200 个成员，  
41 个研究机构, 17 个国家



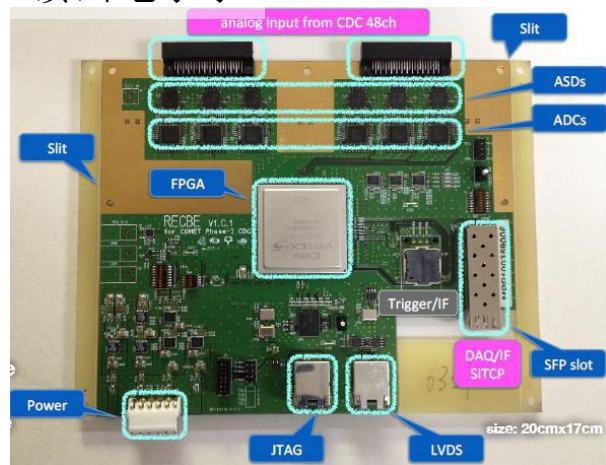
中方合作组：高能物理所，南京大学，北京大学，中山大学

# COMET中方合作组

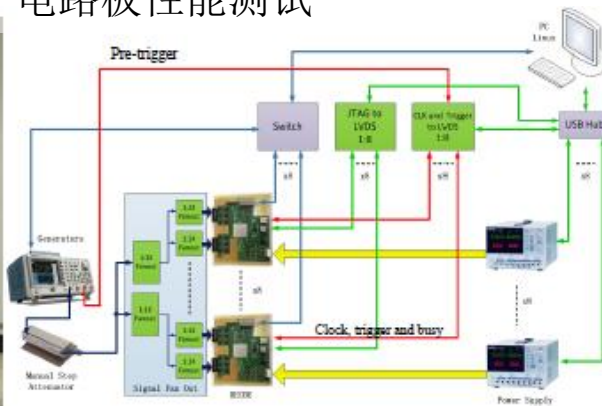
## -- 负责漂移室的前端读出电子学

- 2015年完成了128块前端电路板的生产
  - 设计基于 BELLE-II漂移室的前端电子学
  - 48通道
  - 1 nsec时间分辨
  - ADC采样率30 MHz，~5微秒环形缓存。
- 2016年完成对所有电路板的抗老化测试及各项指标新能测试

读出电子学



电路板性能测试



生产完毕的电路板



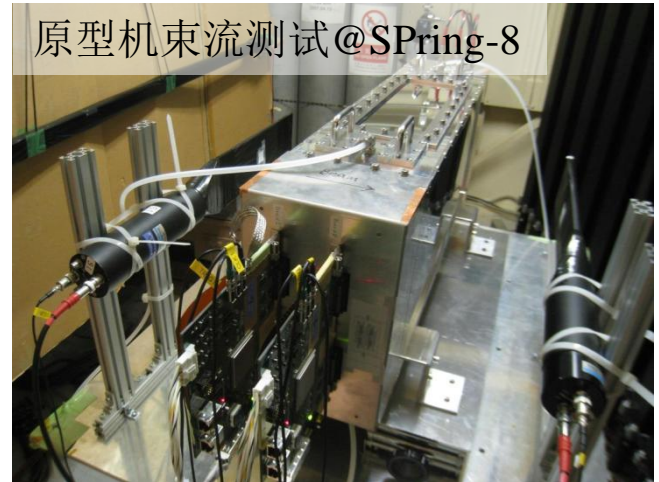


# COMET中方合作组

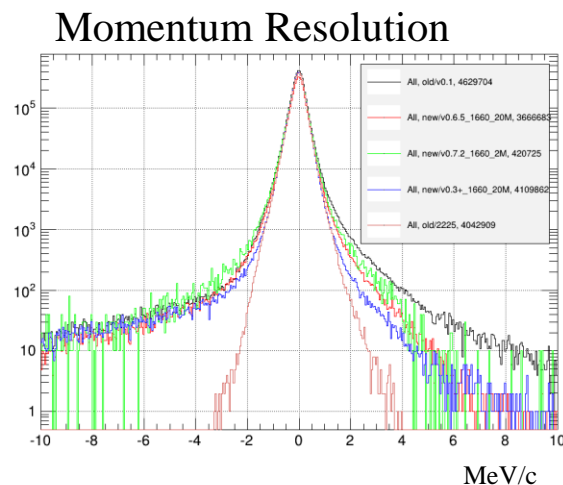
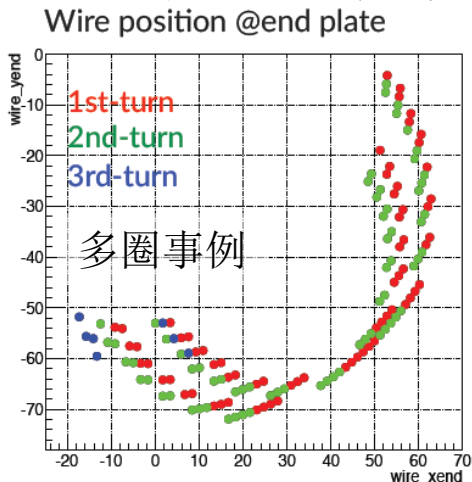
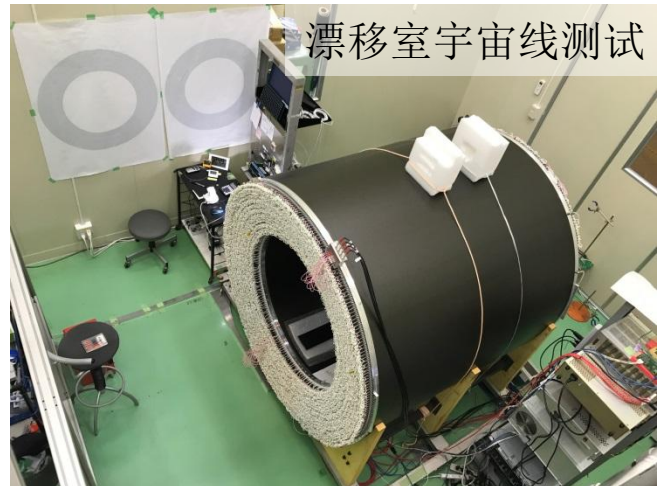
## -- 漂移室的建造, 测试及重建研究

- 原型机的设计和测试
  - 参与早期设计, 负责数据分析。
- 漂移室的搭建
  - 参与漂移室的搭建与问题排查。
- 宇宙线测试与校准
  - 参与取数调试, 负责数据分析, 开发校准框架。
- 重建算法的开发
  - 独立领导漂移室重建工作, 重点负责多圈径迹分辨。展开传统拟合与神经网络两个方向的工作。

原型机束流测试@SPRING-8



漂移室宇宙线测试

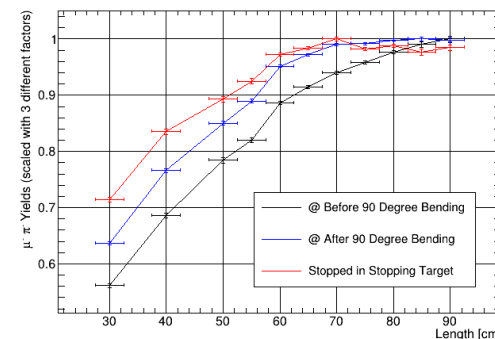


# COMET中方合作组

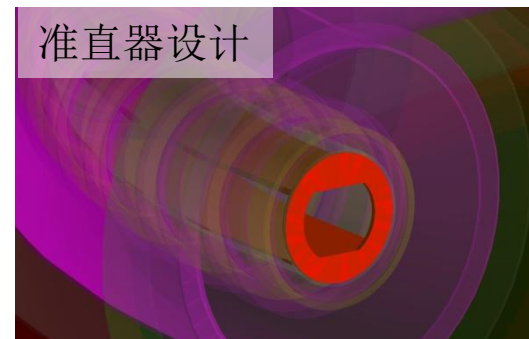
## -- 软件，优化和计算

- 参与软件框架的开发
  - 针对COMET实验重构框架，完善探测器模拟
- 基于蒙卡模拟优化实验设计
  - 利用高能所计算资源对COMET一期设计进行优化：产生靶，输运束流，螺线管磁场，准直器，静止靶以及探测器屏蔽。
  - 研究各项本底，评估一期的物理精度（TDR2018）
- 利用高性能计算平台提供更细致的蒙卡研究
  - 正在开发基于天河2号的并行计算，为大批量束流模拟，宇宙线模拟及重建工作做准备。

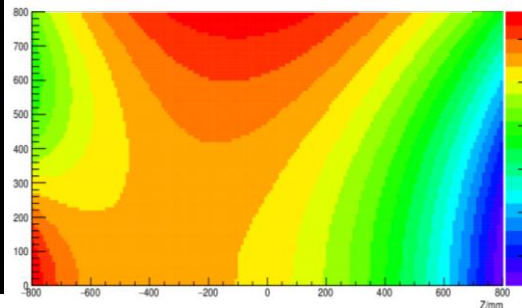
产生靶几何优化



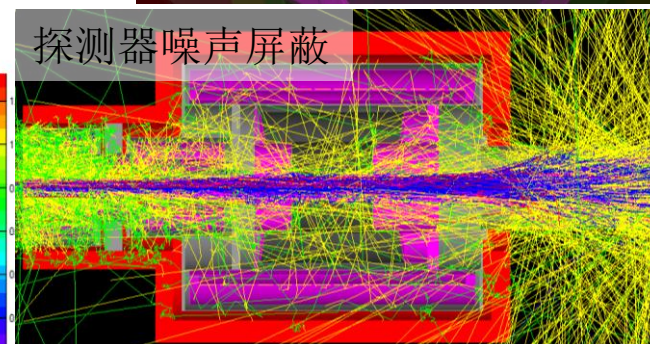
准直器设计



探测器区域磁场计算



探测器噪声屏蔽



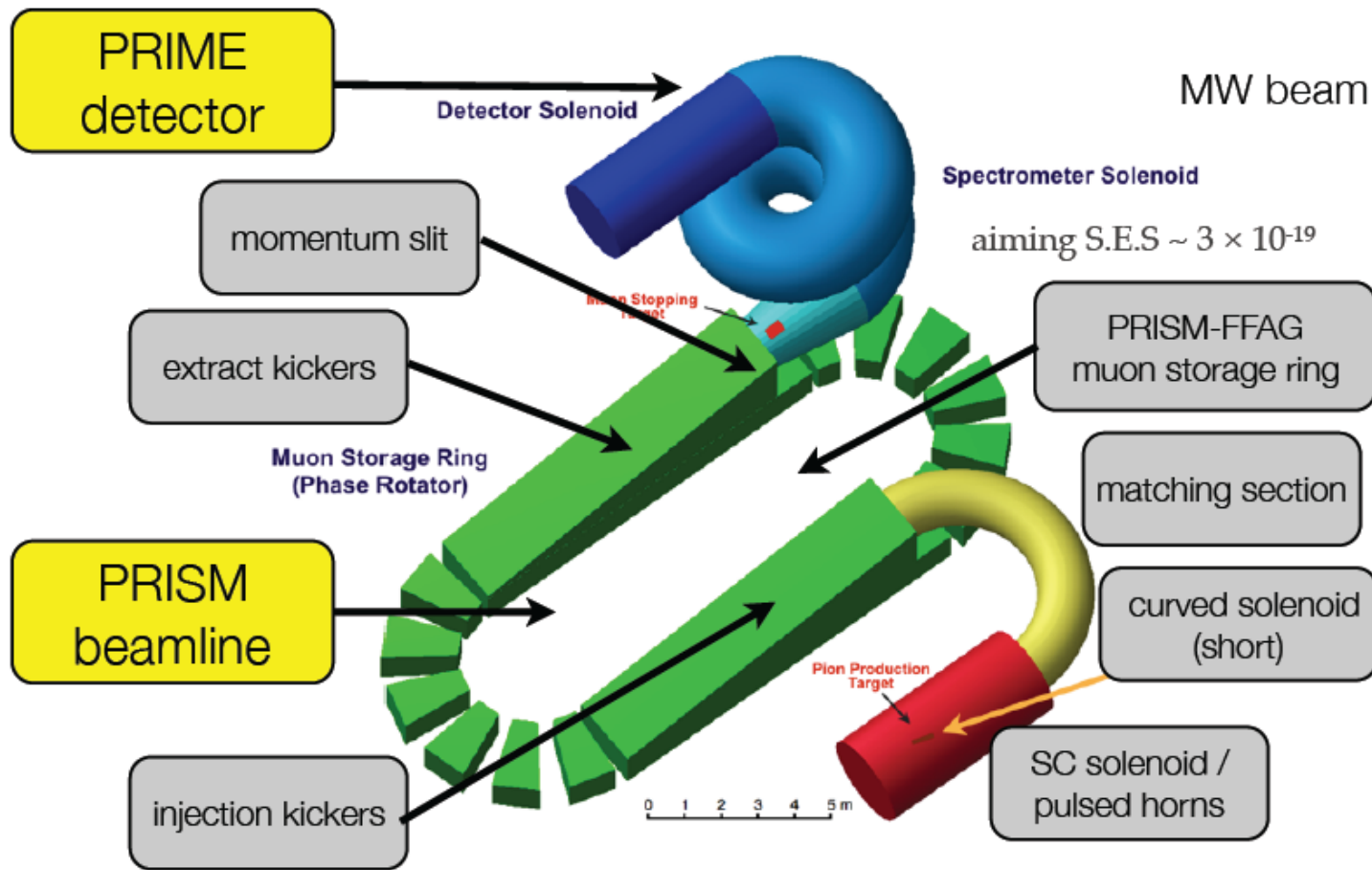
# 展望下一代cLFV实验

- CLFV在陶子区域:
  - 期待在Belle II 和 LHCb 有1~2数量级的提高
- CLFV在缪子区域:
  - 缪子衰变, 直流束流, 受制于探测器
    - $\mu \rightarrow e\gamma$ : 1个量级
    - $\mu \rightarrow eee$ : 3~4个量级
  - 缪子电子转换, 脉冲束流, 受制于亮度前沿
    - $\mu N \rightarrow eN$ : 4~6个量级
- $\tau$  亮度:
  - 当前2/sec
  - 未来100/sec
- $\mu$  亮度:
  - 当前 $10^8$ /sec
  - 未来 $10^{11}$ /sec ~  $10^{12}$ /sec

Reaction	Current Limit	Future Limit	Location
$\tau \rightarrow \mu\gamma$	$4.4 \times 10^{-8}$	$< 10^{-9}$	Flavor factory
$\tau \rightarrow e\gamma$	$3.3 \times 10^{-8}$	$< 10^{-9}$	Flavor factory
$\tau \rightarrow \mu\mu\mu$	$2.1 \times 10^{-8}$	$< 10^{-9} \sim 10^{-10}$	Flavor factory
$\tau \rightarrow eee$	$2.7 \times 10^{-8}$	$< 10^{-9} \sim 10^{-10}$	Flavor factory
$\tau \rightarrow \mu ee$	$1.5 \times 10^{-8}$	$< 10^{-9} \sim 10^{-10}$	Flavor factory
$\mu \rightarrow e\gamma$	$4.3 \times 10^{-13}$	$4 \times 10^{-14}$	MEG II
$\mu \rightarrow eee$	$1 \times 10^{-12}$	$10^{-15} \sim 10^{-16}$	mu3e/MuSIC
$\mu N \rightarrow eN$ (Au)	$7 \times 10^{-13}$	$< 10^{-18}$	PRISM/Mu2e II
$\mu N \rightarrow eN$ (Al)	--	$10^{-15}/10^{-17}$	COMET/Mu2e
$\mu N \rightarrow eN$ (Ti)	$4.3 \times 10^{-12}$	$< 10^{-18}$	PRISM/Mu2e II
$\mu^- N \rightarrow e^+ N$ (Al)	$4.3 \times 10^{-12}$	?	COMET



# $\mu - e$ 终极计划: PRISM/PRIME



位于J-PARC,  
精度提升 $10^6$ 倍!

- 质子源
  - MW功率
  - 超短脉冲 (~10ns)
- 缪子产生与俘获
  - 产生靶: 高温工作
  - 超导俘获磁体: 耐辐射, 冷却

## • 缪子运输

- 马蹄形缪子储存环
- 采用FFAG技术(Fixed Field Alternating gradient)

# 总结

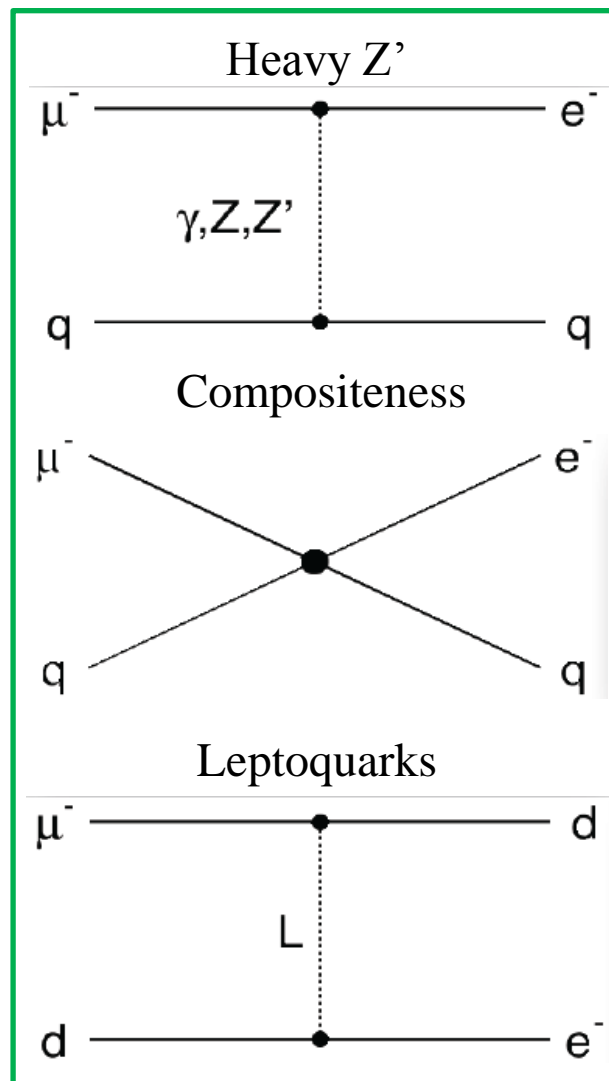
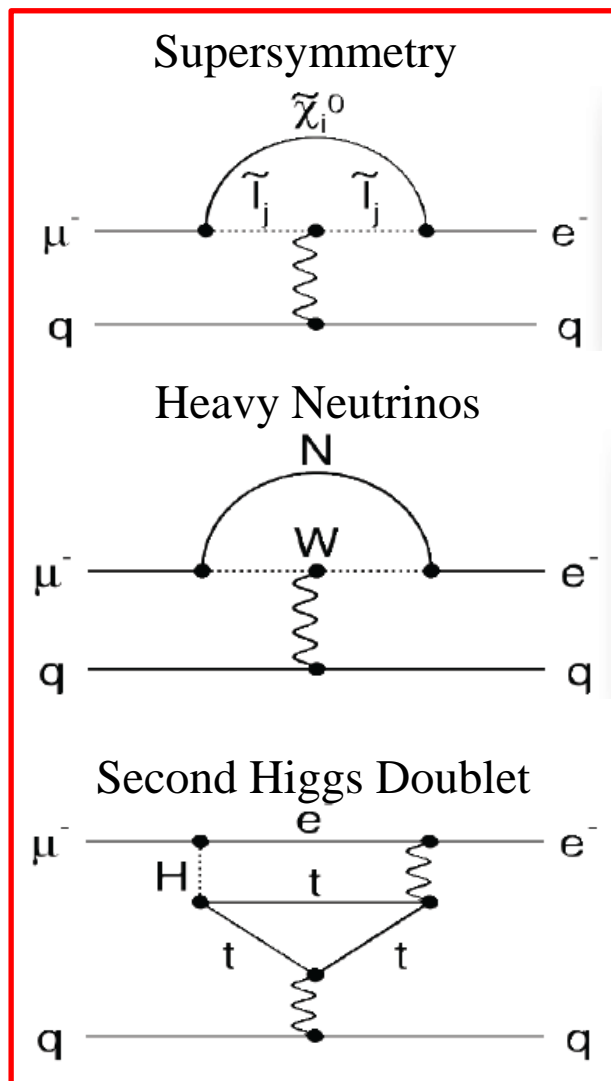
- cLFV是**极其**干净的新物理探针，其所需要的FCNC过程广泛存在于新物理模型之中。
- $\mu - e$ 转换受益于简单的信号特征，可以利用高亮度脉冲质子源显著提升探测精度（4~6个数量级），并对photonic过程和four-fermi过程同时寻找。
- J-PARC的COMET实验单事例精度为 $S.E.S = 2.6 \times 10^{-17}$  (4个数量级提升) 计划从2022年取数，为期一年。
  - COMET一期将先行启动，以 $3 \times 10^{-15}$  精度（2个数量级提升）搜寻 $\mu - e$ 转换，并对束流进行直接测量。
  - 一期项目的质子束流及探测器部分将于2019年完工，等待取数。
  - 中方合作组参与了电子学，探测器和软件方面的工作并作出了重要贡献。
- 下一代cLFV实验（PRISM）的设计还在讨论中。

Back up

# $\mu - e$ 转换的模型依赖

Photonic 过程

Four-Fermi 过程



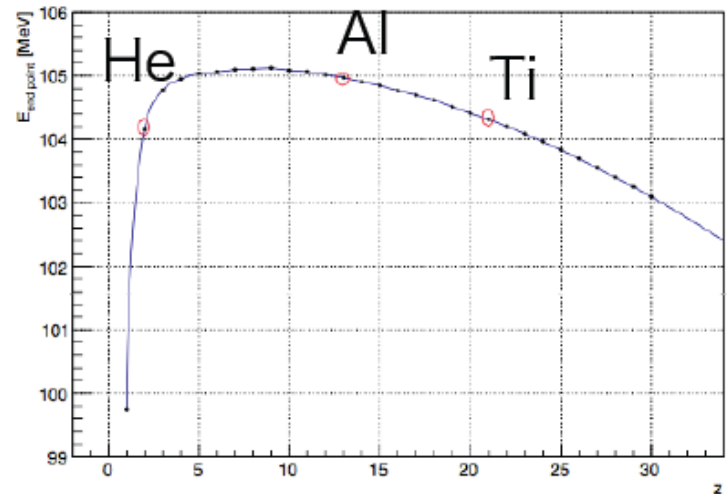
# 产生靶的选择

- 耐高温，稳定，高强度
  - 碳靶（3.2kW），无需制冷
  - 钨靶（56kW），需要冷却系统
  - 流动靶？（~MW）
- 尽可能高密度
  - 击中产生击中收集，提高收集效率

# 静止靶的选择

## Selection of the Target Material

- DIO  $E_{\text{endpoint}}$  extends to the  $E_{\mu-e}$ 
  - Recoil energy
  - Muon binding energy
- Select the target material with high  $E_{\mu-e}$  and avoid using the material with larger  $E_{\text{endpoint}}$  around the target
  - When the target is made of aluminium, we should avoid using materials from  $Z=5$  to  $Z=12$ .
  - He ( $Z=2$ ) is OK to use around the target
- Lifetime of muon in muonic atoms
  - Shorter in larger  $Z$  because of the larger nuclear muon capture rate

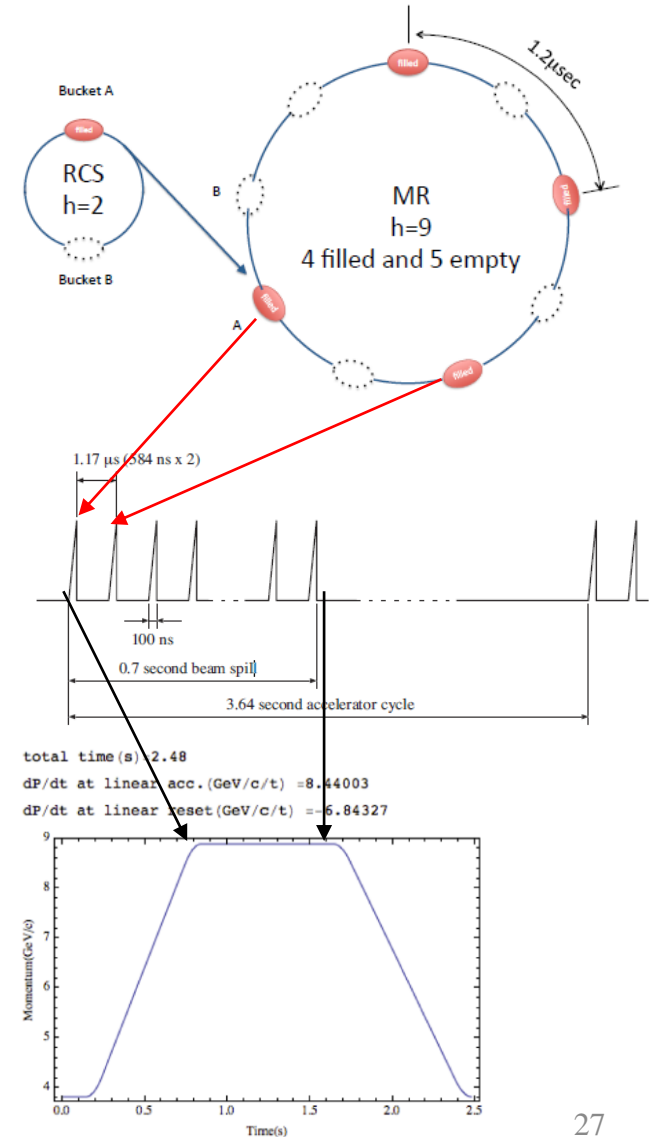


	Al	Ti
lifetime	864 ns	330 ns
time window	0.3	0.2
signal	1	1.5
net	0.3	0.3



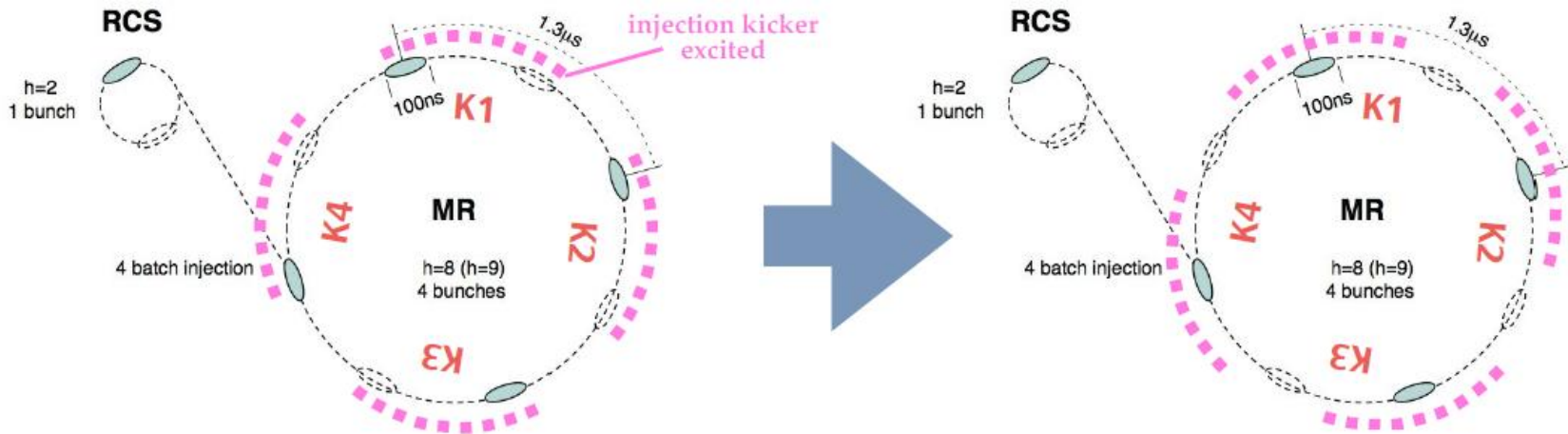
# J-PARC质子束流

- J-PARC质子束流通过RCS整形和MR加速后，单脉冲宽度在100ns。通过空一个位置注入的方法可实现1.17 $\mu$ s的脉冲间隔。
- MR的运行周期是2.48秒，实际可利用时间0.8秒，占空比DF=0.32。
- J-PARC目前最大功率500kW。不同于T2K的快速提取(FX)，COMET采用慢提取方案(SX)，56kW

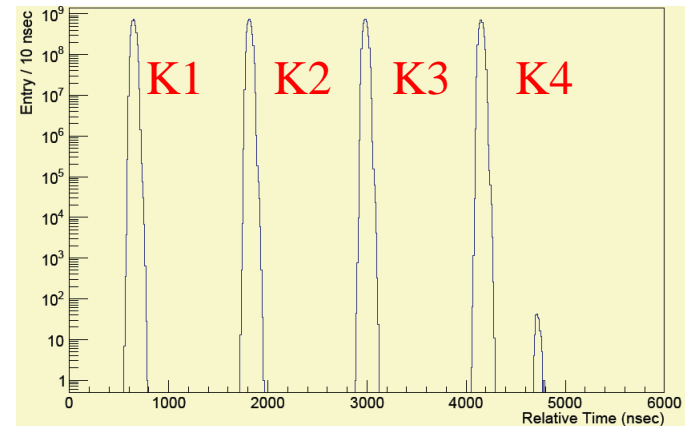
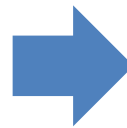
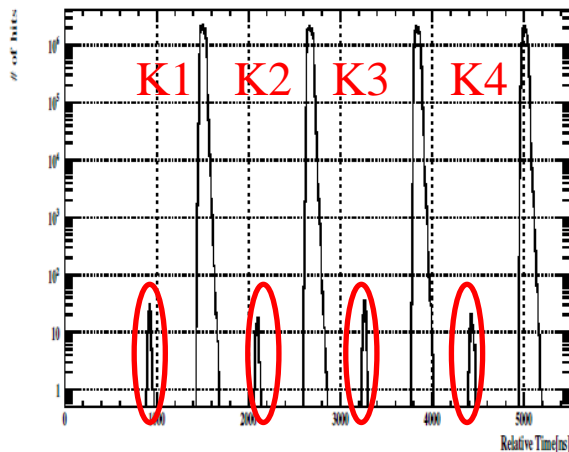


# J-PARC质子束流

- 为保证质子泄露率低于 $10^{-10}$ ，J-PARC在MR采用特殊的注入机制
  - 注入动作提前半个相位进行以避免空位处残留质子

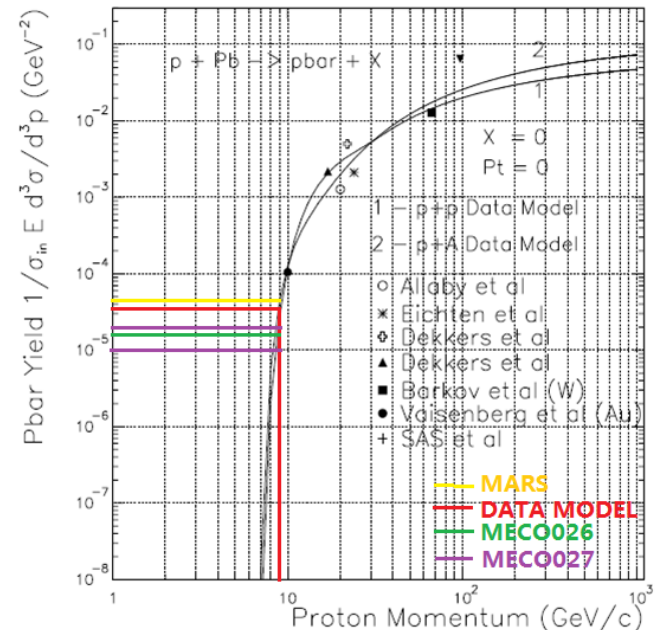
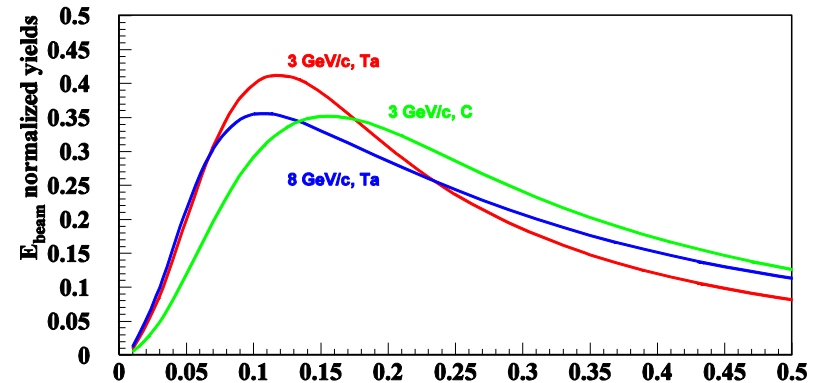


- 2018年初的束流测试结果证明了这个方案的成功：泄露率 $< 6 \times 10^{-11}$



# 束流能量的选取

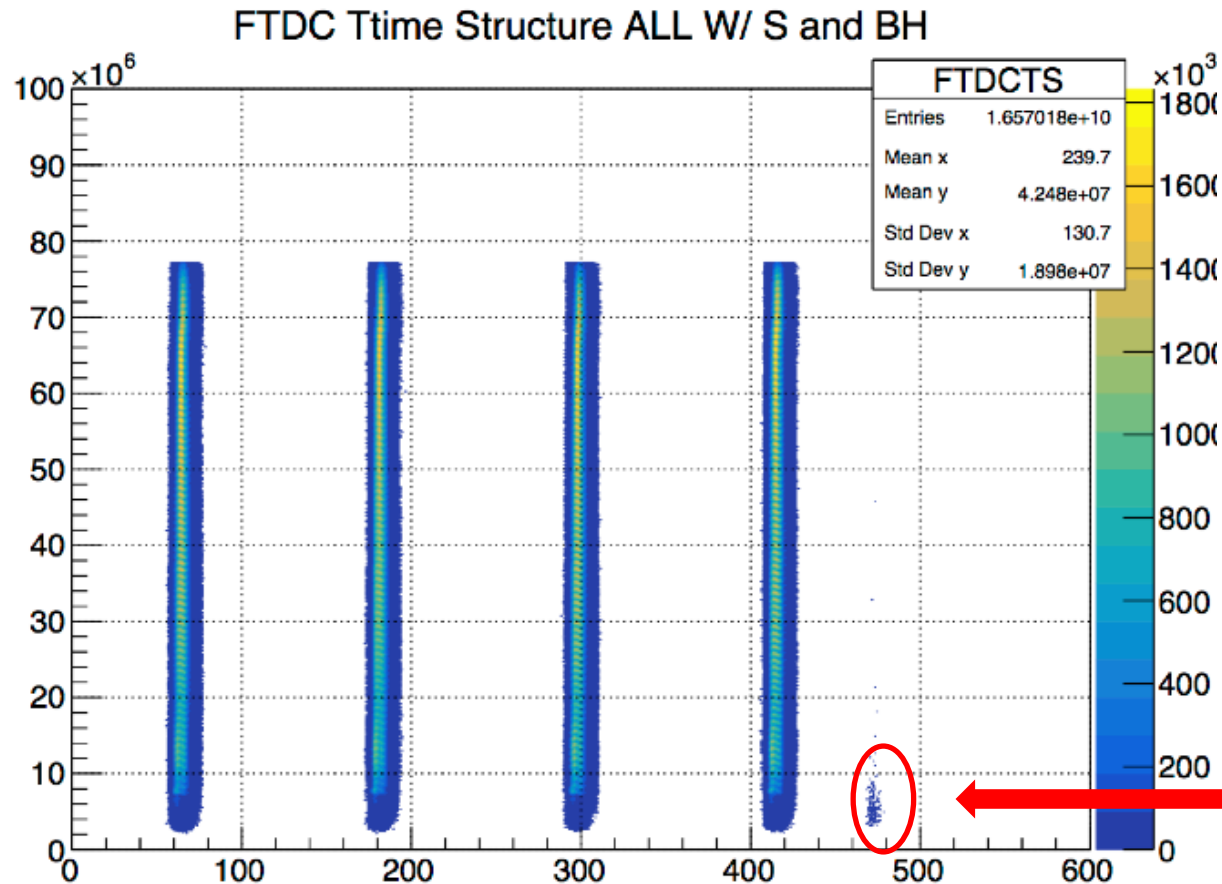
- 提供尽可能高的缪子产生效率
  - $\sim 3\text{ GeV}$ 或许最好
  - 低动量 $\pi$ 缺乏实验数据
- 避免反质子的生成：潜在本底来源。
  - $< 8\text{ GeV}$



# K4 远端泄露

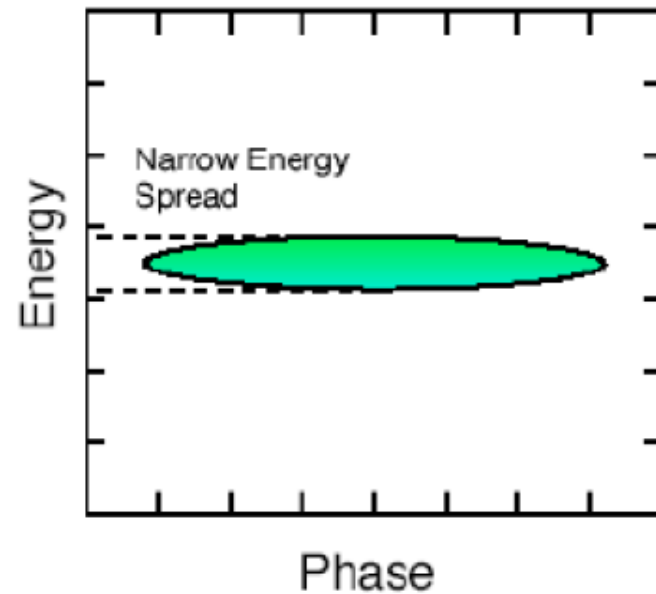
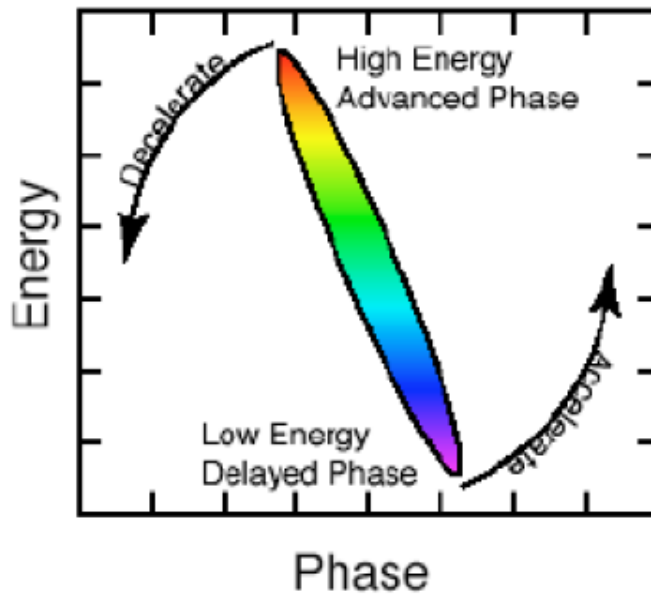
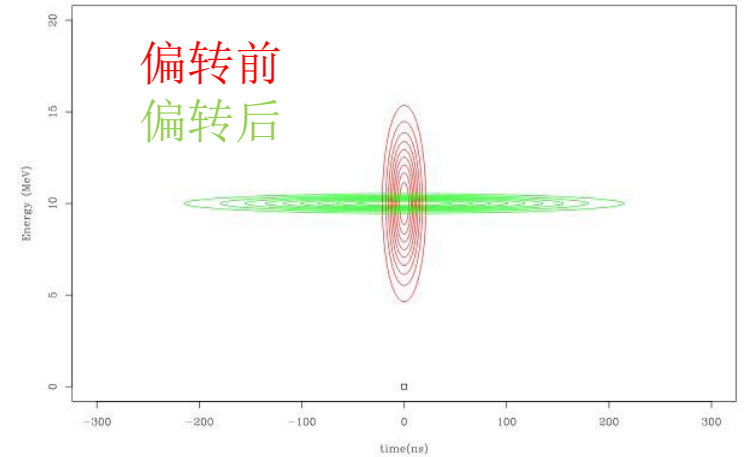
2018年年初J-PARC的束流测试发现了K4的远端泄露现象

- 若能遮蔽K4，质子泄露率可控制在 $10^{-10}$
- 若能解决这个问题，质子泄漏率可达 $6 \times 10^{-11}$



# FFAG技术

- 利用时间换能量量
  - 需要超短脉冲注入:  $\sim 10\text{ns}$



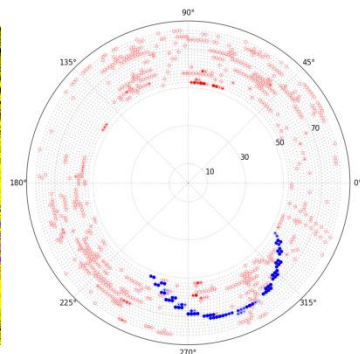
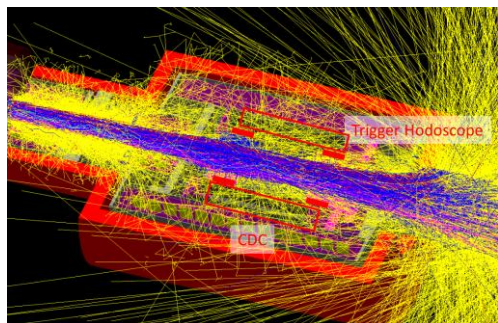
# COMET一期预期性能

- COMET一期设计已完成优化，并依据软件框架对预期性能进行了评估。TDR(2018)即将发表。
  - 灵敏度：
    - 信号接受度评估为0.041，如右上。
    - 150天时间可以达到 $3 \times 10^{-15}$ 单事例精度
  - 本底：在99.99%宇宙线屏蔽效率下，总共本底事例预期为0.032，具体分析如右下所示。
  - 触发率：
    - 由束流带来的触发率预计为~10kHz（经过漂移室触发判选之后，触发事例展示如下图）

Event selection	Value
Online event selection efficiency	0.9
DAQ efficiency	0.9
Track finding efficiency	0.99
Geometrical acceptance + Track quality cuts	0.18
Momentum window ( $\epsilon_{\text{mom}}$ )	0.93
Timing window ( $\epsilon_{\text{time}}$ )	0.3
<b>Total</b>	<b>0.041</b>

Type	Background	Estimated events
Physics	Muon decay in orbit	0.01
	Radiative muon capture	0.0019
	Neutron emission after muon capture	< 0.001
	Charged particle emission after muon capture	< 0.001
Prompt Beam	* Beam electrons	
	* Muon decay in flight	
	* Pion decay in flight	
	* Other beam particles	
	All (*) Combined	$\leq 0.0038$
	Radiative pion capture	0.0028
Delayed Beam	Neutrons	$\sim 10^{-9}$
	Beam electrons	$\sim 0$
	Muon decay in flight	$\sim 0$
	Pion decay in flight	$\sim 0$
	Radiative pion capture	$\sim 0$
	Anti-proton induced backgrounds	0.0012
Others	Cosmic rays <sup>†</sup>	< 0.01
<b>Total</b>		<b>0.032</b>

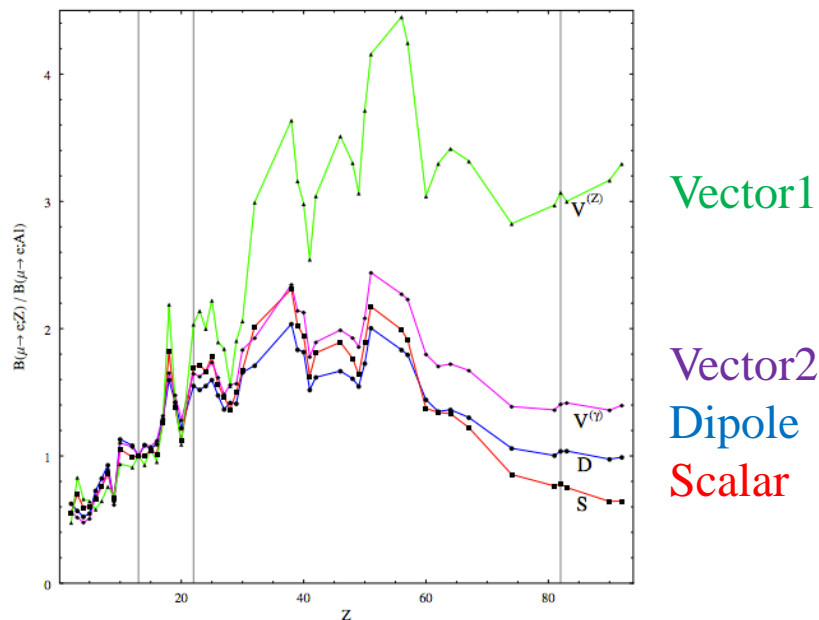
<sup>†</sup> This estimate is currently limited by computing resources.



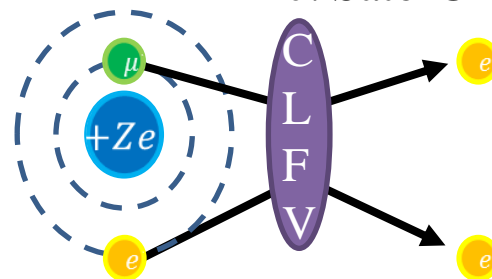


# COMET物理结果探讨

- 如果 **发现信号**:
  - 新物理的直接证据
  - 扫描静止靶材料, 研究新物理性质
- 如果 **未发现信号**:
  - 依然可以给新物理模型以广泛而强力的制约
  - 更高精度的实验!
- $\mu - e$ 转换以外:
  - 精确测量 $\mu$ ,  $\pi$ 的核俘获能谱及 $\mu$ 的在轨衰变 (DIO) 能谱
    - 加深对 $Q \sim 100\text{MeV}$ 时核结构的理解
  - 其他的CLFV过程:
    - $\mu^- N_Z \rightarrow e^+ N_{Z-1}, \mu^- e^- \rightarrow e^- e^-, \mu^- \rightarrow e^- X$ .
    - 已展开理论研究和实验方法的讨论

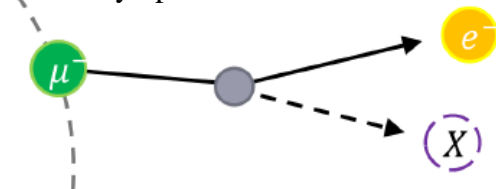


J. Sato @ Nufact18



Y. Uesaka @

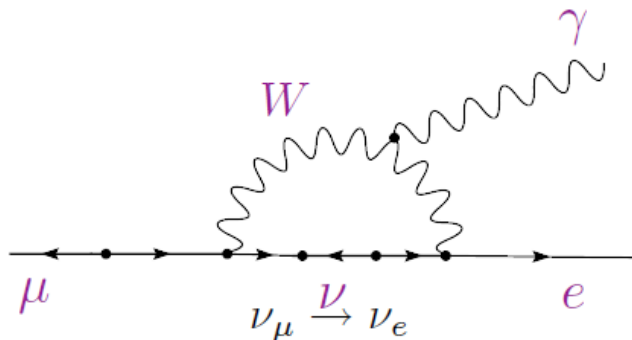
Symposium for muon and neutrino physics



# cLFV作为干净的新物理探针

- 标准模型中的cLFV

- 轻子的FCNC被GIM机制以及中微子质量与W质量比值压低



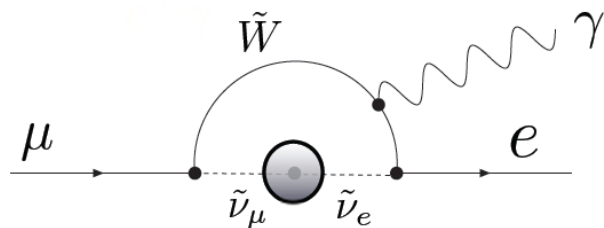
$$\mathcal{B}(\mu \rightarrow e \gamma) = \frac{3\alpha}{32\pi} \left| \sum_{i=2,3} U_{\mu i}^* U_{ei} \frac{\Delta m_{i1}^2}{M_W^2} \right|^2 \sim 10^{-54}$$

\* 定义:  $Br = \Gamma_{CLFV} / \Gamma_{capture}$

不受标准模型本底干扰  
非零信号=新物理!

- 新物理模型中的cLFV

- 在新的扩展区域, 没有理由认为味混合为零。
- 以SUSY为例:



$$Br(\mu \rightarrow e \gamma) = 10^{-11} \times \left(\frac{2\text{TeV}}{\Lambda}\right)^4 \left(\frac{\theta_{\mu e}}{10^{-2}}\right)^2$$

理论预言可被当前实验手段检验!

# 稻草管量能器系统 (StrEcal)

- 稻草管探测器
  - 完成20微米厚稻草管的搭建，并成功完成真空测试。
  - 利用100MeV电子束测试空间分辨为150微米，满足实验要求
- 电磁量能器
  - 测试了GSO与LYSO两种晶体，分别得到5.7%和4.6%的能量分辨。选取LYSO。
- 前端读出电子学
  - 基于DRS4的GHz采样电子学 (ROESTI/EROS) 已完成开发。
  - 抗辐照测试进行中。

