

寻找缪子到电子转换：通过带电轻子味破坏探索新物理

吴琛

CSNS, IHEP

2024年6月8日

目录

- 带电轻子味破坏简介
- COMET实验简介
- COMET实验上的研究工作
- 未来展望
- 总结

带电轻子味破坏

Charged Lepton Flavor Violation (CLFV)

- 带电轻子的轻子味道守恒被破坏的物理过程

- 轻子数守恒不必被破坏
- 历史上曾被叫做缪子数破坏过程

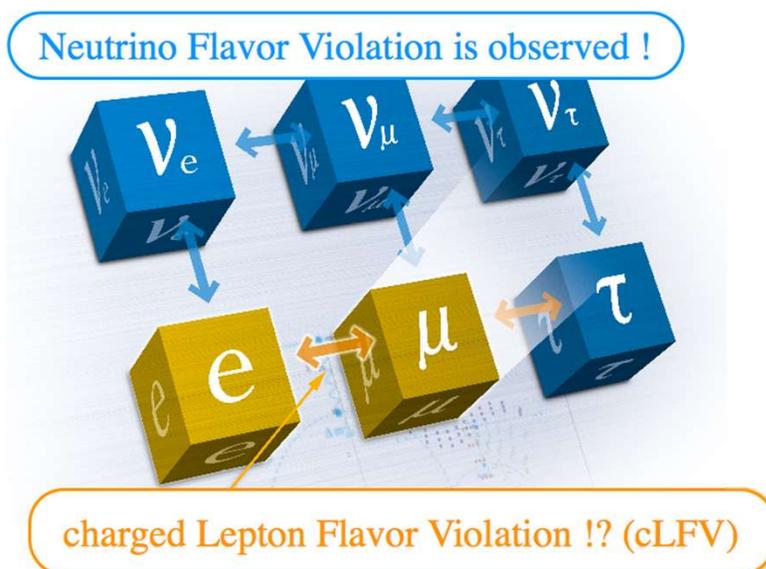
- 缪子CLFV过程的实验对标准模型的建立和新物理的寻找起到了引领作用

- $\mu \rightarrow e\gamma, Br = \frac{\Gamma(\mu \rightarrow e\gamma)}{\Gamma(\mu \rightarrow e\nu\bar{\nu})}$ } 衰变类型, μ^+

- $\mu \rightarrow eee, Br = \frac{\Gamma(\mu \rightarrow eee)}{\Gamma(\mu \rightarrow e\nu\bar{\nu})}$ }

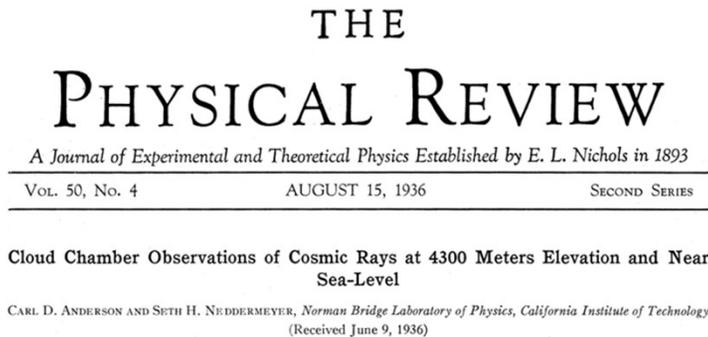
- $\mu N \rightarrow eN, Cr = \frac{\Gamma(\mu N \rightarrow eN)}{\Gamma(\mu N \rightarrow \nu N \bar{\nu})}$ 核俘获类型, μ^-

- 最近实验物理为方便计数也会将其定义为
 $Cr = \frac{\Gamma(\mu N \rightarrow eN)}{\Gamma(\mu N \rightarrow anything)}$



缪子的发现

- 1936年，缪子在云室中被发现
 - 来自于宇宙射线
 - 由于质量介于质子和电子之间而被叫做mesotron（中间子）
- 很自然的被认为是汤川提出的核力传递媒介meson（介子）
 - 在1935年被提出
 - 真正的传递核力的 π 介子于1937年被发现.
- Decay mode conceived as $\mu \rightarrow e + \nu$



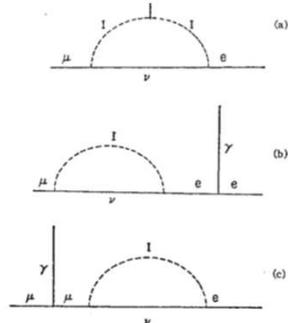
“缪子疑难”

- Feinberg根据中间介子理论计算出 $\mu \rightarrow e + \gamma$ 分支比为 10^{-4}
- BNL加速器被用来寻找 $\mu \rightarrow e + \gamma$
 - 加速器带电轻子味破坏实验的开端
- Nishijima(西岛)和Schwinger提出了“两个中微子”理论

Decays of the μ Meson in the Intermediate-Meson Theory*

G. FEINBERG

Brookhaven National Laboratory, Upton, New York
(Received May 8, 1958)



Vanishing of the Neutrino Rest Mass*

K. NISHIJIMA†

Brookhaven National Laboratory, Upton, New York
(Received September 12, 1957)



A Theory of the Fundamental Interactions

JULIAN SCHWINGER

Harvard University, Cambridge, Massachusetts

Search for Improbable Muon Decays

S. Lokanathan, J. Steinberger
Phys.Rev. 98 (1955) 240

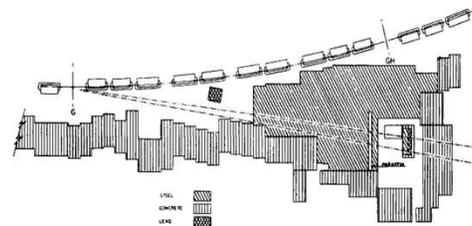
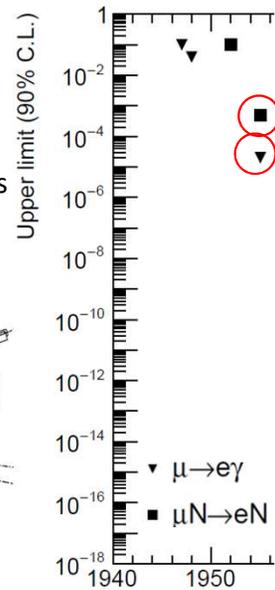


Fig. 3: Plan view of AGS neutrino beam experiment



1930 1940 1950 1960 1970 1980 1990 2000 2010 2020 7

缪子中微子

- Pontecorvo提出寻找缪子中微子实验
- BNL加速器的实验组终于正式了 $\nu_\mu \neq \nu_e$
 - 两代轻子的存在得到证实。提出缪子数作为新的守恒量子数。
 - 味的概念在夸克的理论中被提出，但是在轻子物理中首先被广泛认可。
 - 更多的加速器实验试图验证缪子数守恒。

Electron and Muon Neutrinos

B. Pontecorvo (Dubna, JINR)
1959

7 pages

Published in: *Sov.Phys.JETP* 10 (1960) 1236-1240, *Zh.Eksp.Teor.Fiz.* 37 (1959) 1751-1757



OBSERVATION OF HIGH-ENERGY NEUTRINO REACTIONS AND THE EXISTENCE OF TWO KINDS OF NEUTRINOS*

G. Danby, J-M. Gaillard, K. Goulianos, L. M. Lederman, N. Mistry, M. Schwartz,† and J. Steinberger†

Columbia University, New York, New York and Brookhaven National Laboratory, Upton, New York
(Received June 15, 1962)

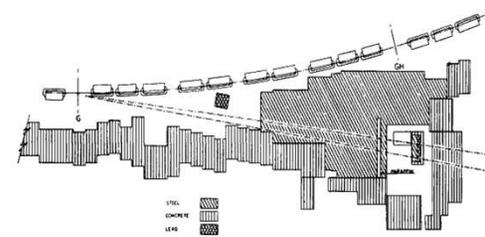
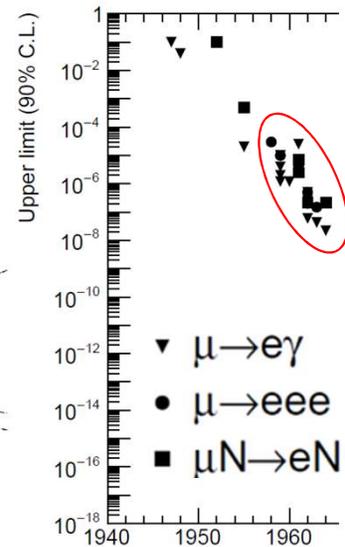


Fig. 3: Plan view of AGS neutrino beam experiment



1930 1940 1950 1960

1970 1980

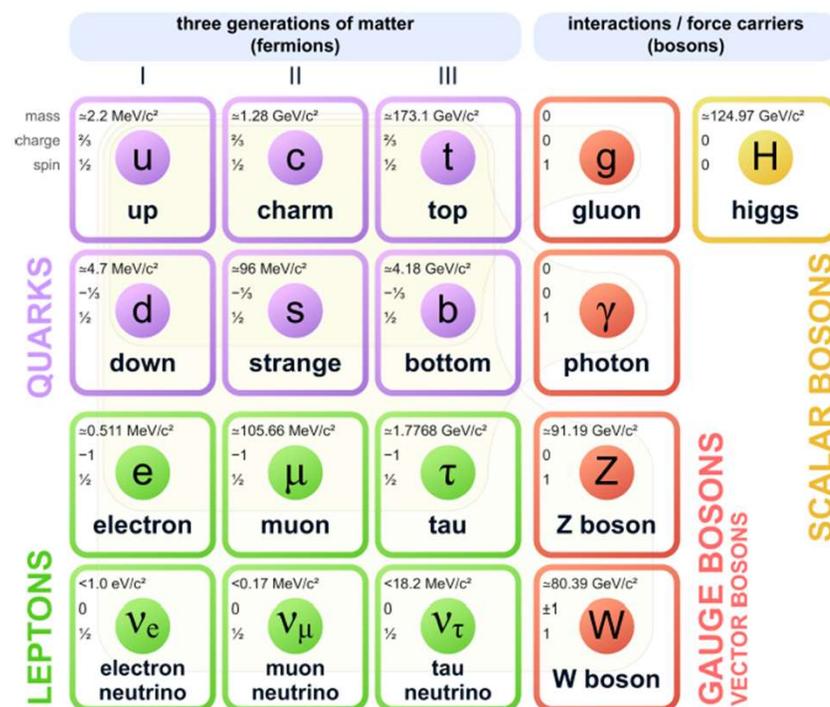
1990 2000 2010

2020 8

标准模型的建立

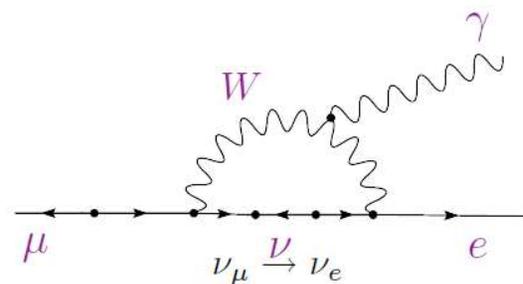
- 标准模型建立于1960s到1970s
 - $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ 规范对称性的可重整化量子场论。
 - 描述三种基本作用力：强相互作用，弱相互作用，和电磁相互作用。
 - 电弱统一理论，自发对称性破缺和希格斯机制构成了标准模型的基石。
 - 强相互作用：大统一理论(GUT)?
 - 基本粒子：构成物质的费米子，传递三种基本作用力的规范玻色子，以及希格斯玻色子。
 - 建立初假设两代费米子。后来扩展为三代费米子（CP破坏）。
 - 费米子的味结构仍是一个谜题。

Standard Model of Elementary Particles



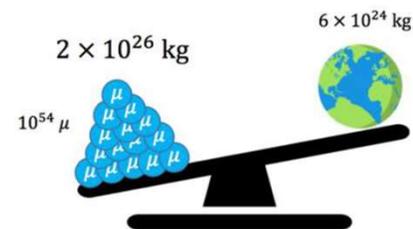
标准模型中的带电轻子味破坏

- 标准模型中没有中微子质量项
 - 右手中微子不存在。
 - 轻子味量子数严格守恒
- 中微子振荡实验证实了中微子有质量
 - 早在1960s就发现太阳中微子疑难，怀疑中微子振荡存在。
 - 中微子质量非常微小。由于GIM机制的压低，带电轻子味破坏的过程仍然可以忽略不计。



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

S.T. Petcov, Sov.J. Nucl. Phys. 25 (1977) 340



M.J.Lee, NuFACT2023



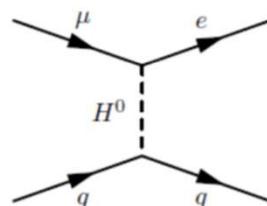
超越标准模型的新物理

- 标准模型是自然科学的一座丰碑，成功地经历了实验检验（中微子振荡除外）。但是它仍有很多问题不能解答：

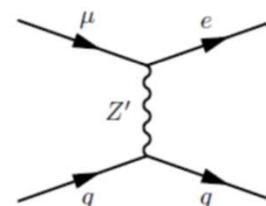
- 味疑难：Flavor puzzle
- 层级问题：Hierarchy problem
- 中微子质量起源
- 暗物质暗能量等宇宙学现象

- 新物理模型不断地涌现

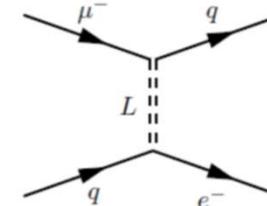
- 新的带电轻子味破坏机制可以被自然地引入。



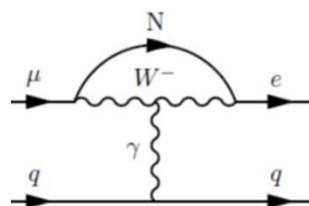
(a) Exotic Higgs



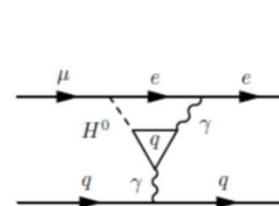
(b) Z-prime



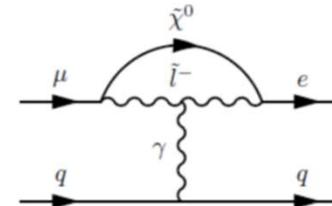
(c) Leptoquarks



(d) Heavy Neutrinos



(e) Exotic Higgs



(f) Supersymmetry



介子工厂 Meson factories

- 同一时期，介子工厂被建造出来
 - SIN (PSI) 1960, TRIUMF 1968, LAMPF 1972
 - 所有介子工厂都提供有缪子源，用于在亮度前沿研究基础物理
 - 设计指标均超过 10^6 缪子每秒
 - SIN (PSI) 持续升级，现已达到 $10^7 \sim 10^8$ 缪子每秒，是当前世界范围内最高亮度的缪子源

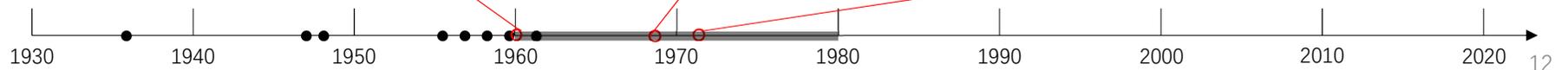
SIN (PSI)



TRIUMF

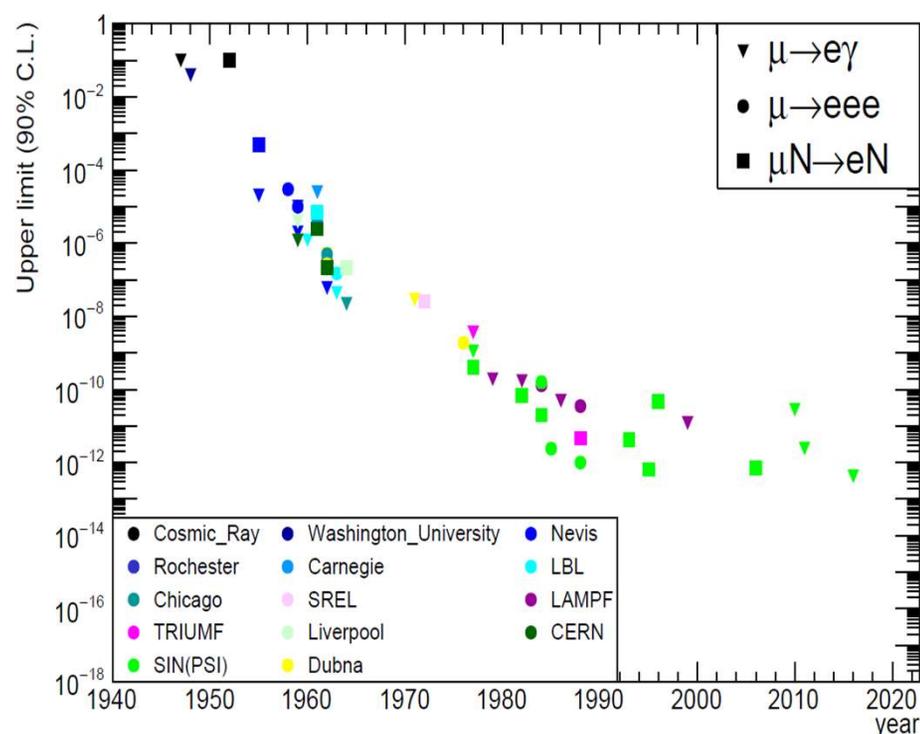


LAMPF



介子工厂时代的带电轻子味破坏实验

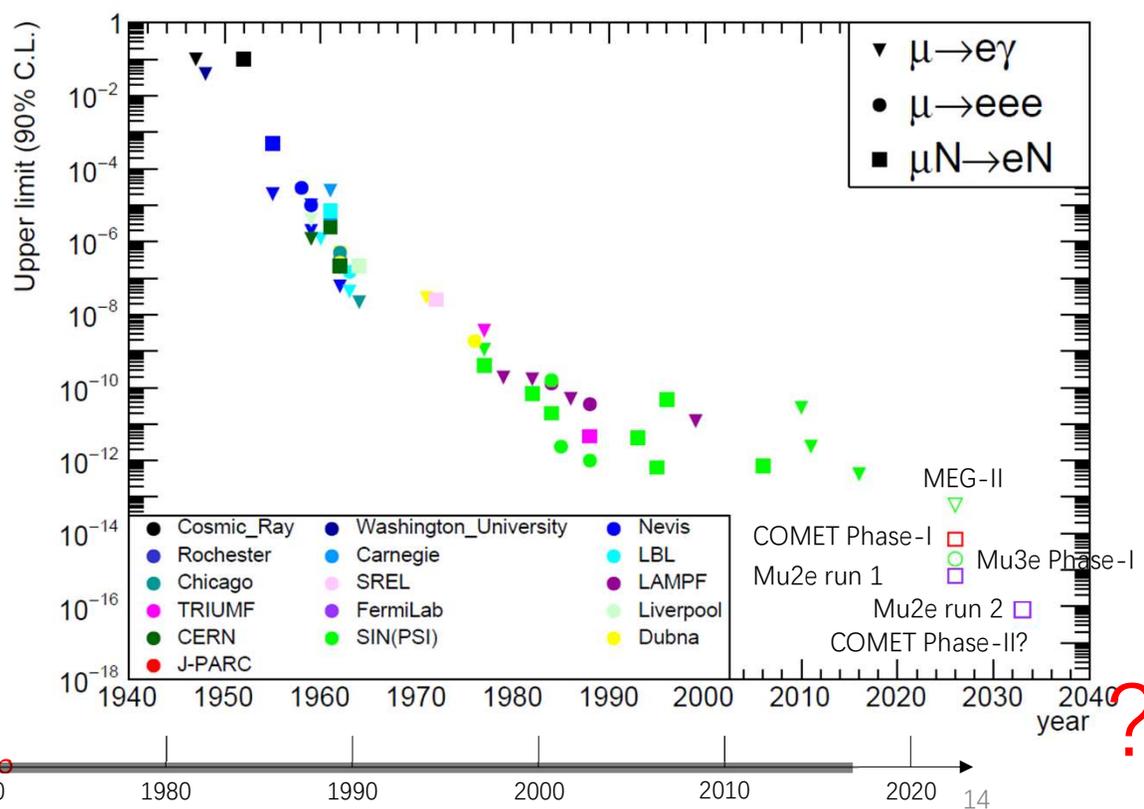
- 1970s到1980s, 带电轻子为破坏实验取得了显著进步
 - 精度提升了四个数量级
- 1990s之后进展放缓
 - 探测器方面的挑战
 - 缪子源升级的挑战
- 未来的带电轻子味破坏实验?



?

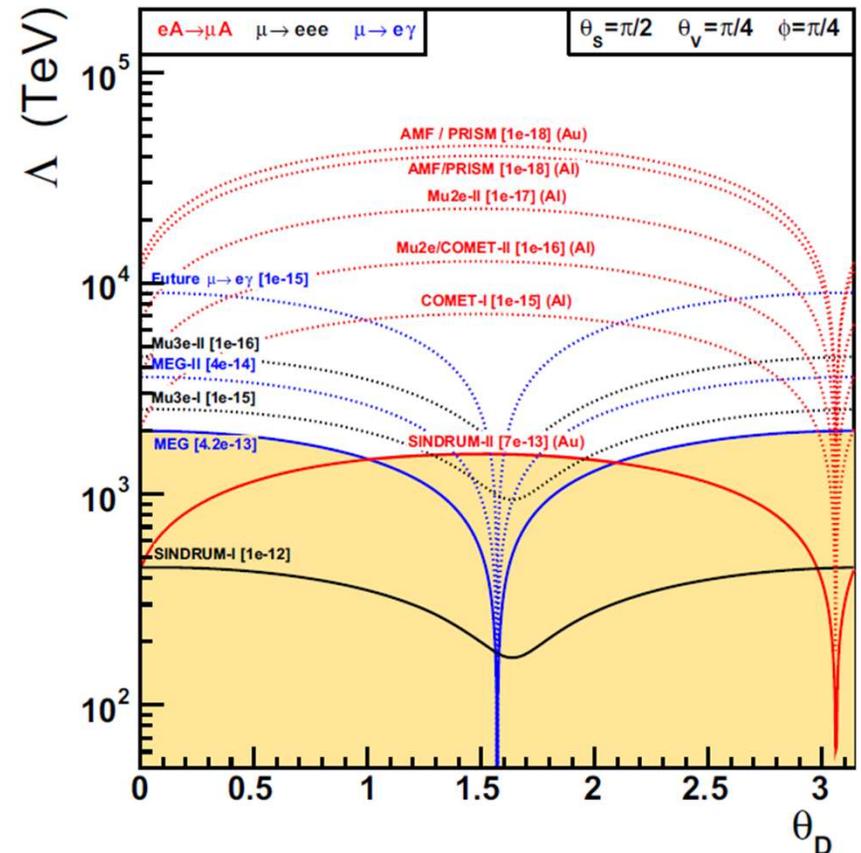
未来的带电轻子味破坏实验?

- 更多的实验!
 - 正在取数的实验: MEG-II
 - 正在建造的实验: COMET, Mu2e, Mu3e
- 更多更多的实验:
 - PSI缪子源的升级计划 (HiMB) 预计将提供 10^{10} 缪子每秒的亮度
 - Mu3e Phase-II 和下一代 $\mu \rightarrow e\gamma$ 预期提升精度 $\times 10$.
 - COMET Phase-II+ 和 Mu2e-II 尝试再提升精度 $\times 10$, 达到 10^{-18} 的精度
 - FeimiLab 的 AMF 计划的目标则是突破 10^{-19} 的精度。



不依赖模型的有效场理论EFT

- Weinberg把有效场理论引入到了粒子物理。通过加入不可重整化的高阶算符可以不依赖模型地扩展标准模型：
 - $\mathcal{L} = \mathcal{L}_{SM} + \sum_{n \geq 1} \frac{C_{ij}^{4+n}}{\Lambda^n} \mathcal{O}^{4+n}$
 - dim-5 Weinberg算符可以解释中微子质量
- 带电轻子味破坏可以通过dim-6算符引入： $Br \sim \frac{1}{\Lambda^4}$
- 在可预见的未来，新物理能标 Λ 可以达到 $\mathcal{O}(10^3 \sim 10^4)$ TeV!
 - 可以有效地弥补能量前沿探测能力的不足
 - $\mu N \rightarrow e N$ 过程潜力最为突出。



θ_D parameterizes the relative magnitude of dipole and four-fermion coefficients

History of detector upgrades for $\mu \rightarrow e\gamma$

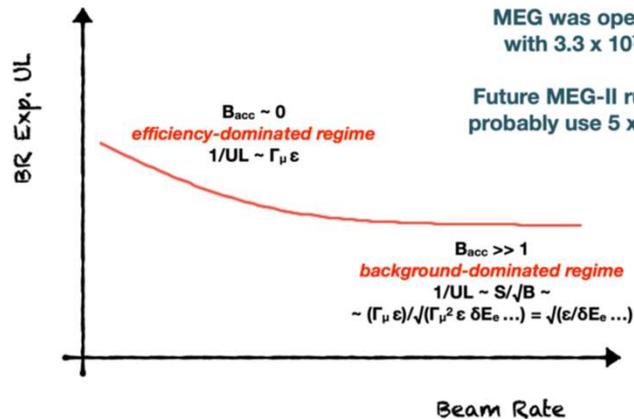
Experiment (year)	Rate (Hz)	Duty f.	ΔE_e	ΔE_γ	$\Delta t_{e\gamma}$	$\Delta\Theta_{e\gamma}$	Upper limit
TRIUMF (1977) [265]	2×10^5	100%	10.3%	8.7%	6.7 ns	80 mrad	3.6×10^{-9}
SIN (1980) [266]	5×10^5	100%	8.7%	9.3%	1.4 ns	—	1×10^{-9}
E32S (1982) [267]	2.4×10^6	6.4%	8.8%	8%	1.9 ns	37 mrad	1.7×10^{-10}
Crystal Box (1988) [269]	4×10^5	6.6%	8%	8%	1.8 ns	87 mrad	4.9×10^{-11}
MEGA (1999) [260]	2.5×10^8	6.5%	1.2%	4.5%	1.6 ns	17 mrad	1.2×10^{-11}
MEG (2016) [49]	3×10^7	100%	1.5%	4.7%	0.28 ns	30 mrad	4.2×10^{-13}
MEG II (2020) [313]	7×10^7	100%	0.6%	2.3%	0.19 ns	20 mrad	$5 \times 10^{-14(a)}$

(a) Expected.

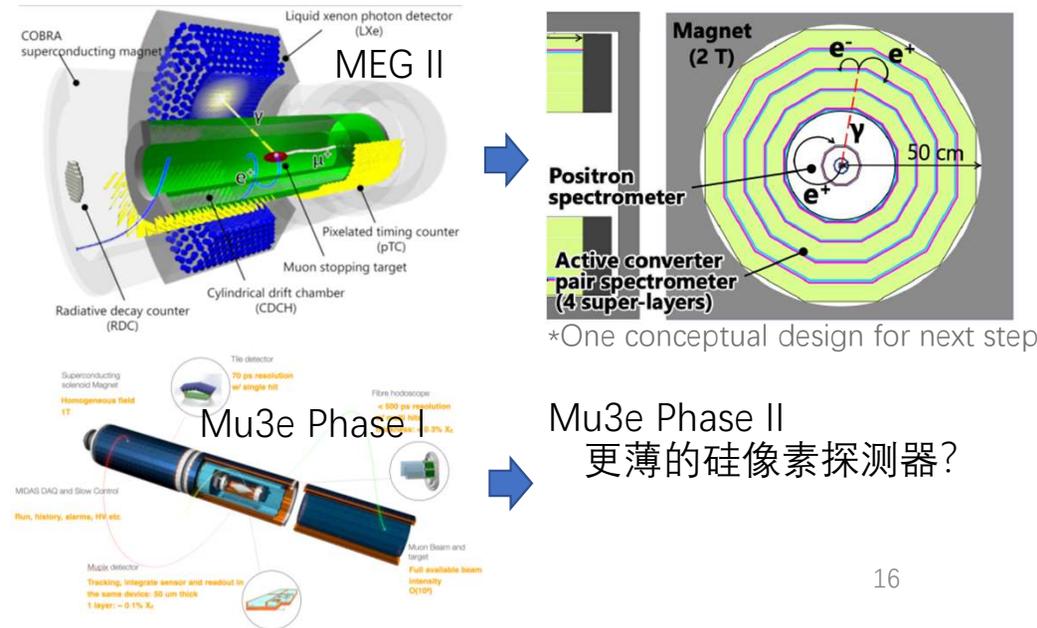
$\mu \rightarrow e\gamma$ 和 $\mu \rightarrow eee$

- 两个过程中都存在偶然符合本底, 与亮度的平方成正比
 - 需要不断地提升探测器性能

$$B_{acc} \propto \Gamma_\mu^2 \cdot \delta E_e \cdot (\delta E_\gamma)^2 \cdot \delta T_{e\gamma} \cdot (\delta\Theta_{e\gamma})^2$$



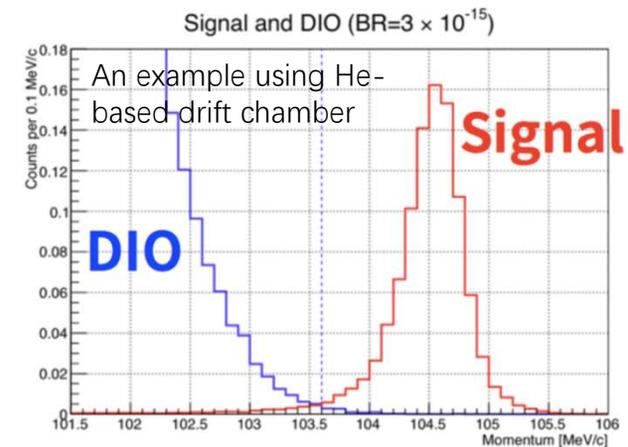
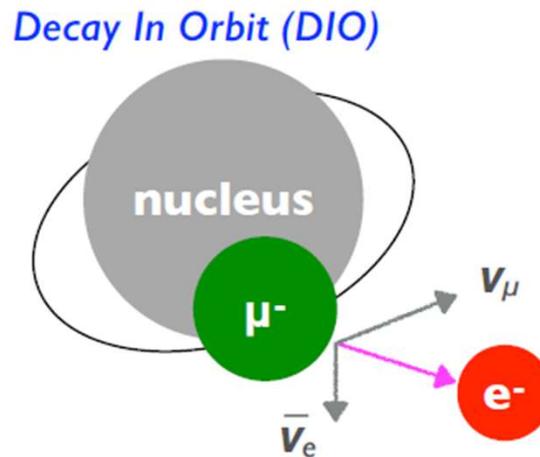
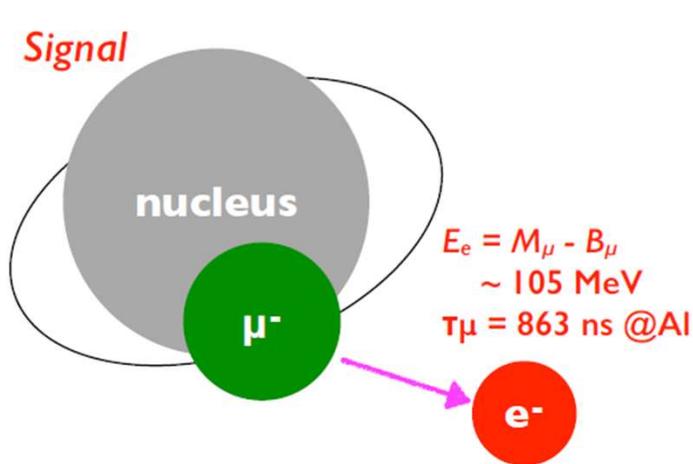
$\mu \rightarrow e\gamma$ 的预期精度受制于偶然符合本底。



Mu3e Phase II
更薄的硅像素探测器?

缪子电子转换 ($\mu N \rightarrow e N$)

- 缪子的核俘获过程
 - 由于各个核子贡献的相干加强，反应模态大概率为基态原子核。相干过程的增益正比于总核子数。
- 信号事例：一个单能电子 $E_e = M_\mu - B_\mu - E_{recoil} \sim 105 \text{ MeV}$
- 本底事例：物理本底，束流本底，宇宙线本底，**无偶然符合本底！无探测器制约！**
 - 物理本底来自于缪子的在轨衰变(DIO)。其反应截面在接近信号区呈五次函数形式下降，在目前计划的精度范围内可以由传统探测器简单区分。
 - 束流和宇宙线中存在高能粒子，可能在信号区引入本底事例，需要分别处理。



COMET 实 验简介



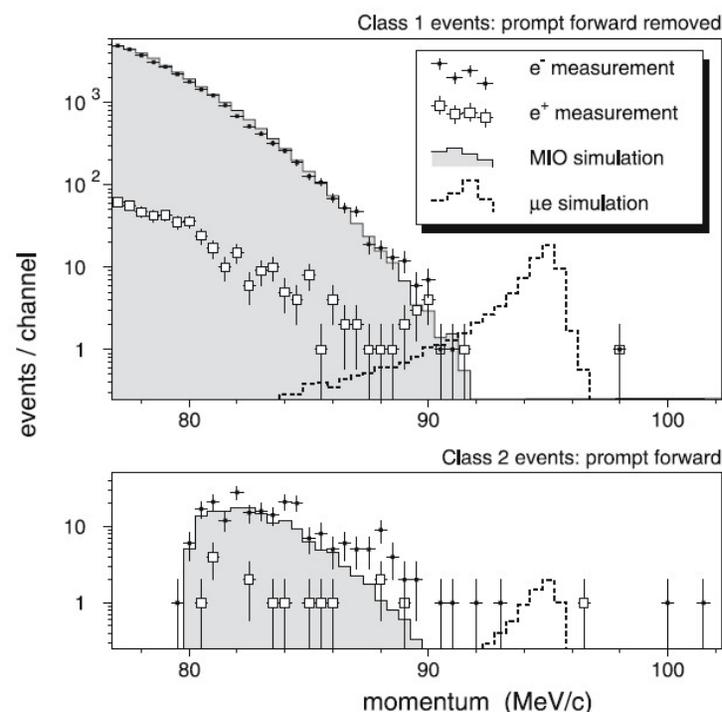
超越SINDRUM-II的精度

SINDRUM-II利用了SIN(PSI)的质子源。其重复频率为50.6 MHz，脉冲间隔20ns。 π^\pm 的寿命为26 ns，可以在脉冲间大量存在。

- 之前的实验方案：利用塑料闪烁体做标记
 - 由于精度的提升，这一方案无法继续
- SINDRUM-II的新方案：
 - 用窄动量窗口和飞行时间筛选：非常依赖对束流的理解。
- 由于预期外本底事例的发现，SINDRUM-II不得不终止取数：
 - π 本底压低计划未能完全奏效

未来的实验不单要提升缪子束流亮度，更要解决 π 本底的问题！

另外，在更高精度下，宇宙线的被动屏蔽不再有效，需要用主动的监控测量做反符合。

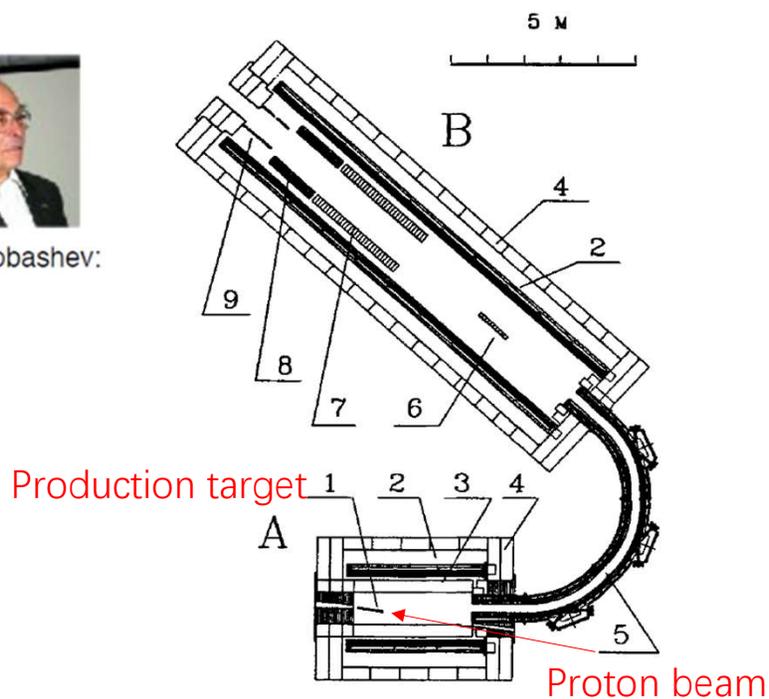


Eur. Phys. J., 2006, C47:337-346

Lobashev方案

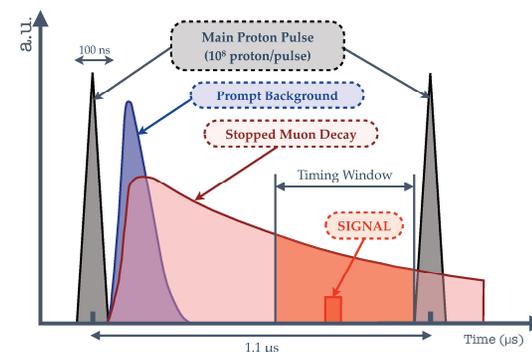
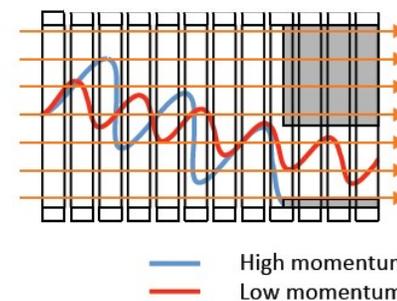


V.M. Lobashev:



- 为了得到更多的缪子
 - 厚靶, 让每个入射质子充分反应
 - 超导俘获磁铁 >2.5 T, 尽可能多的俘获 π
- 为了控制辐射
 - 只收集反向的束流粒子
 - 利用弯曲螺线管过滤束流粒子
- 为了压低束流本底
 - 构造MHz级别脉冲束流, 通过延迟信号窗口避开包括 π 在内的束流本底

$$D_{\text{drift}} \propto \frac{p}{qB} \frac{s}{R}$$



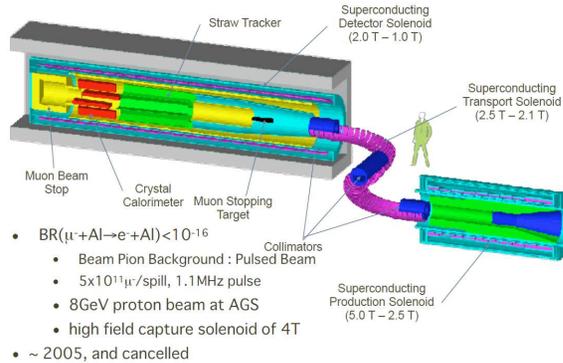
Djilkibaev R.M. and Lobashev V.M., Sov.J.Nucl.Phys. 49(2), 384, (1989).

缪子源亮度 > 10^{10} muons/sec, 目标精度 < 10^{-16} !

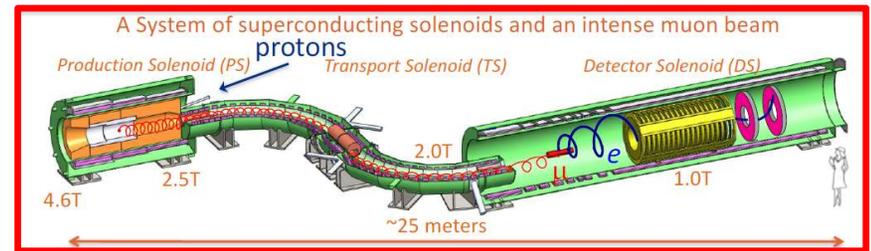
Lobashev型缪子源的建设尝试

Proposed in 1999: MECO
 Canceled in 2005

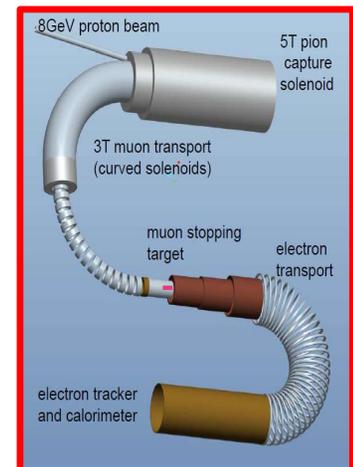
MECO @BNL/AGS



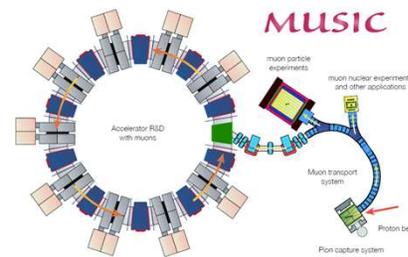
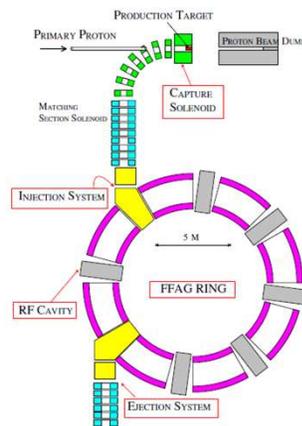
Revived at FermiLab: Mu2e
 Proposed in 2007. Under construction



COMET, Phase-I of PRISM/PRIME.
 Proposed in 2007. Phase-I Under construction



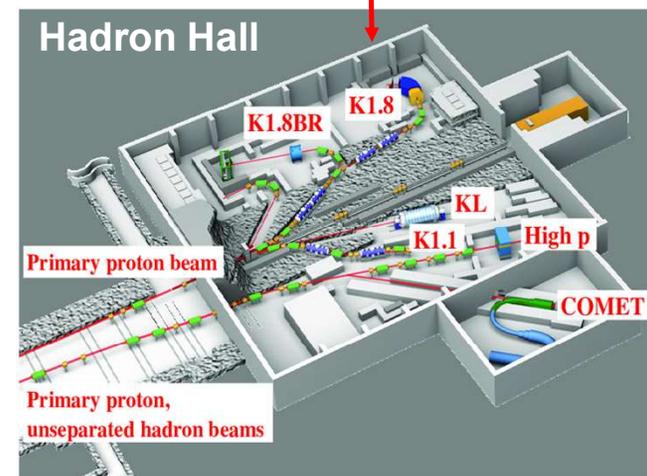
PRISM/PRIME
 Conception started ~ 2003



MUSIC, proposed in 2010
 Under construction

COMET实验

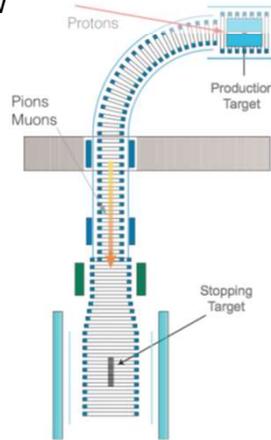
- COMET位于日本东海。计划利用J-PARC主环的8 GeV质子束流寻找缪子电子转换过程。
- COMET是一个国际合作实验。由来自17个国家，44个研究单位的~300名合作组成员。
 - 中方的参与单位是高能物理研究所，近代物理研究所，中山大学，南京大学和北京大学。



COMET实验

COMET Phase-I

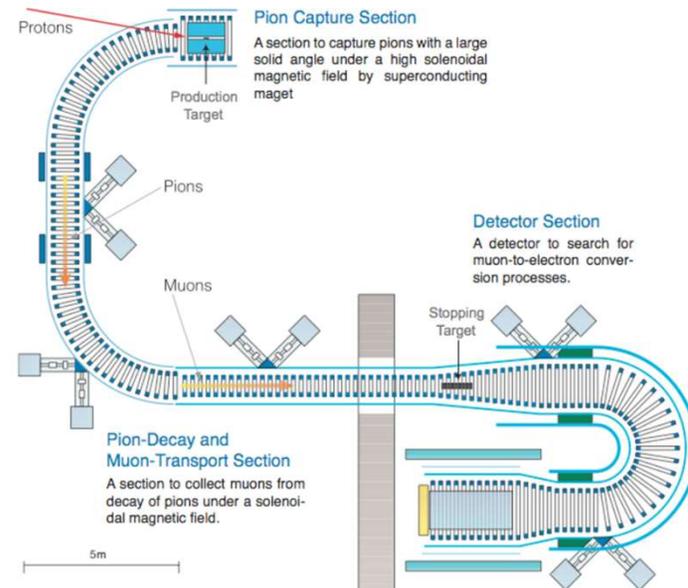
- 利用Phase-II探测器的原型机直接测量缪子束流，指导Phase-II的设计
- 利用Phase-I专有探测器寻找缪子电子转换过程，并将精度提升x100
- 2011年第一阶段批准，2016年第二阶段批准。2019年发布技术设计报告。
- 8 GeV, 3.2 kW



- 上游部分会在Phase-II中复用
 - 产生靶和辐射屏蔽部分除外

COMET Phase-II

- 寻找缪子电子转换过程，并将精度提升x10000
- 概念设计提交于2009。技术设计报告正在准备中。
- 8 GeV, 56 kW,

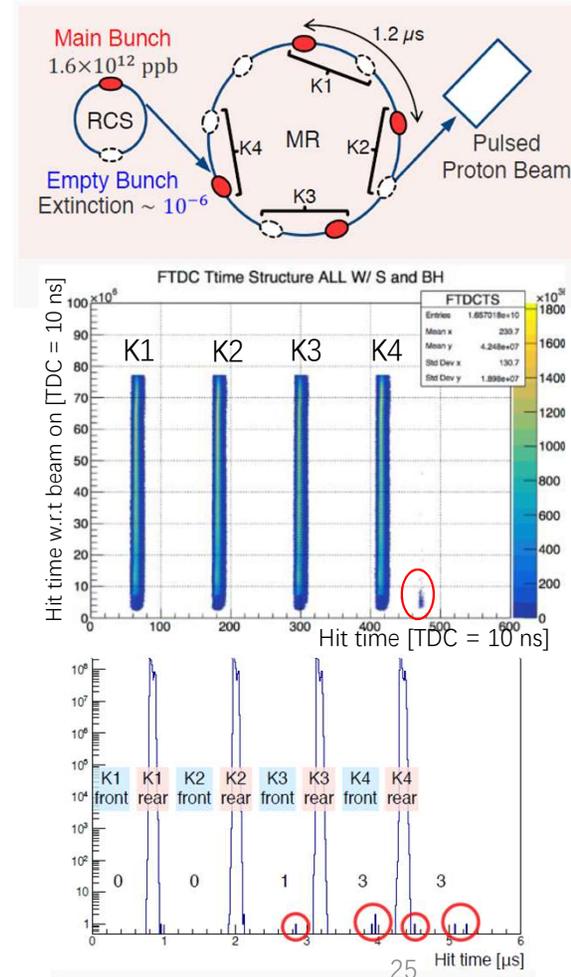


COMET实验 上的研究工 作



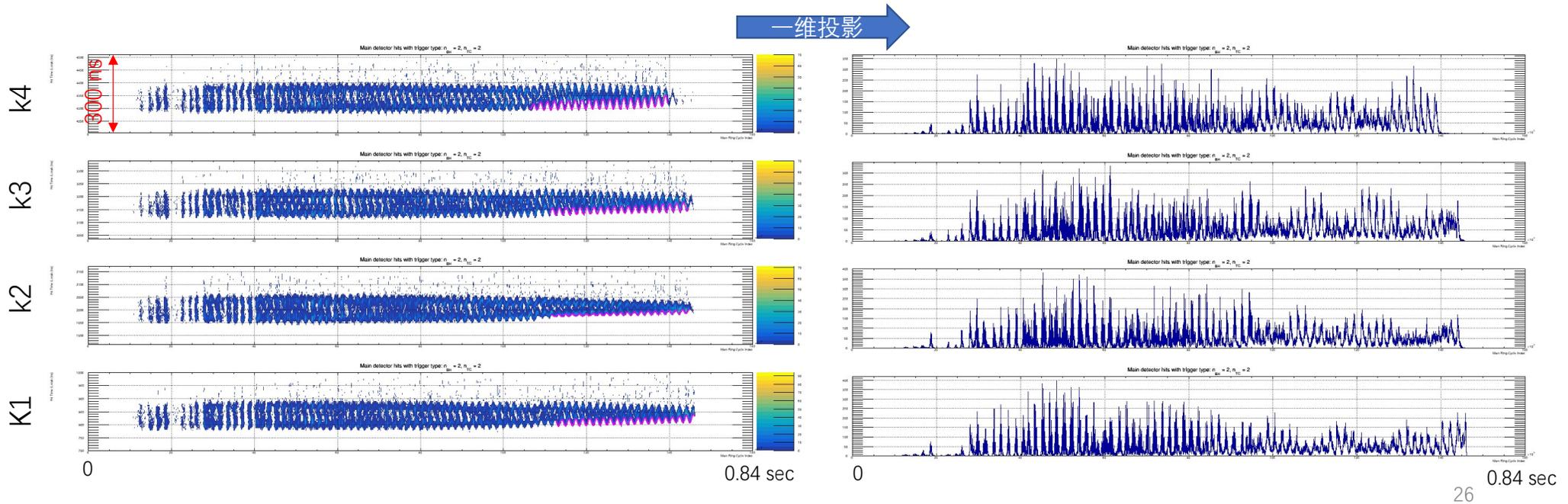
J-PARC上的质子束流：脉冲结构

- 为构造MHz脉冲质子束流，J-PARC采用主环存储，并慢速提取的方式。
 - 实验要求质子泄露率 $R (N_{leak}/N_{pulse}) < 10^{-10}$ 。
- 2018年，首次测量了慢引出脉冲质子束流的泄露率
 - 分析实验数据发现K4脉冲远端存在泄漏，且泄漏仅存在于取数周期的初期，随后慢慢消失。
 - 与加速器部门的排查，该泄漏原因被锁定为Kicker磁场的尾部涟漪。
- 2021年，在T78实验中再次测量了慢引出脉冲质子束流
 - 验证了2018年的猜想，并采用了相位调整解决了该泄漏问题，首次验证了 $R < 3.2 \times 10^{-12}$



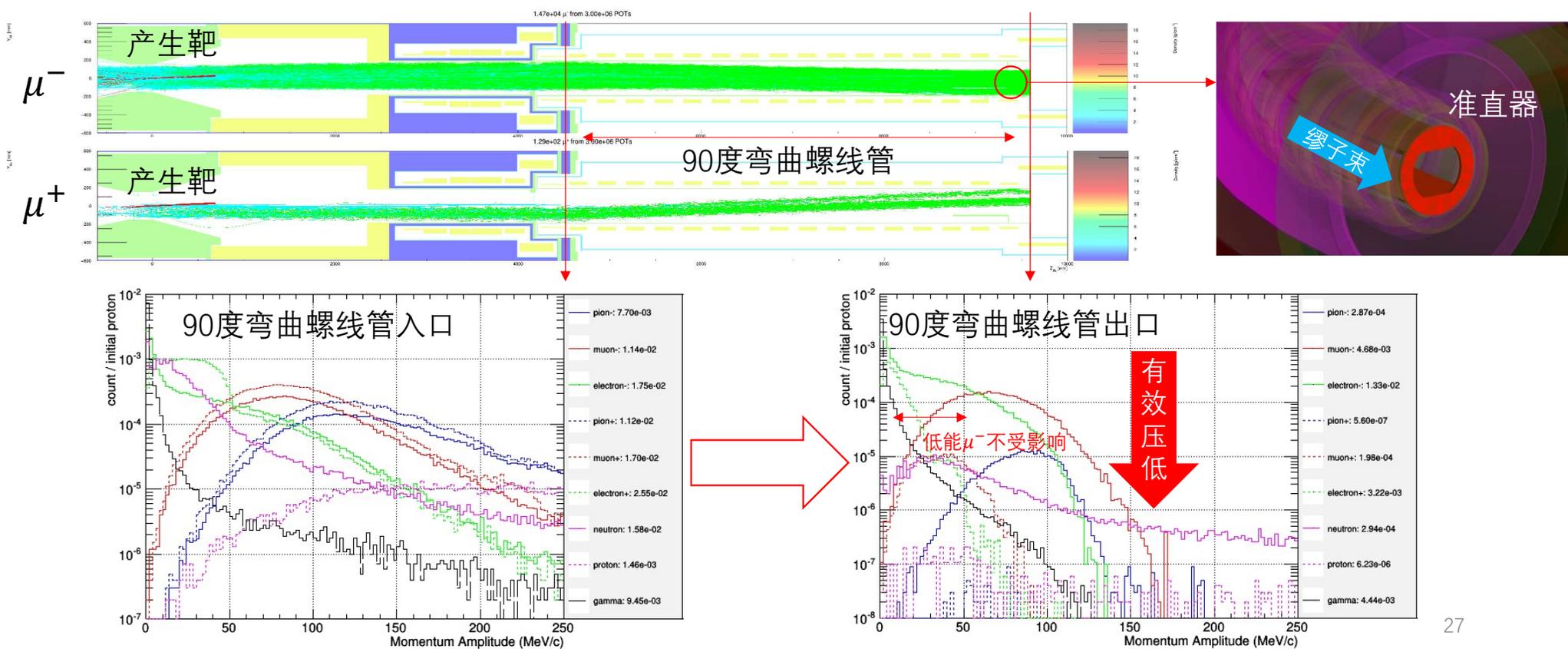
J-PARC上的质子束流：亮度稳定性

- 在脉冲束流的慢速提取中保持质子束流亮度的稳定型是从未有过的挑战
 - 亮度波动会带来探测效率的损失。
- 在T78实验中，我们观察到了束流脉冲结构和亮度的波动。
 - 计划利用更精确的测量提供负反馈信号，帮助加速器拉平束流亮度



缪子束线设计：动量筛选

- 设计了缪子束线中的准直器，并优化了偏转磁场的强度，在保持静止靶中缪子产额（来自0~50 MeV/c的缪子）不变的前提下尽量去除其他粒子，控制束流本底。



缪子束线设计：探测器区辐射控制

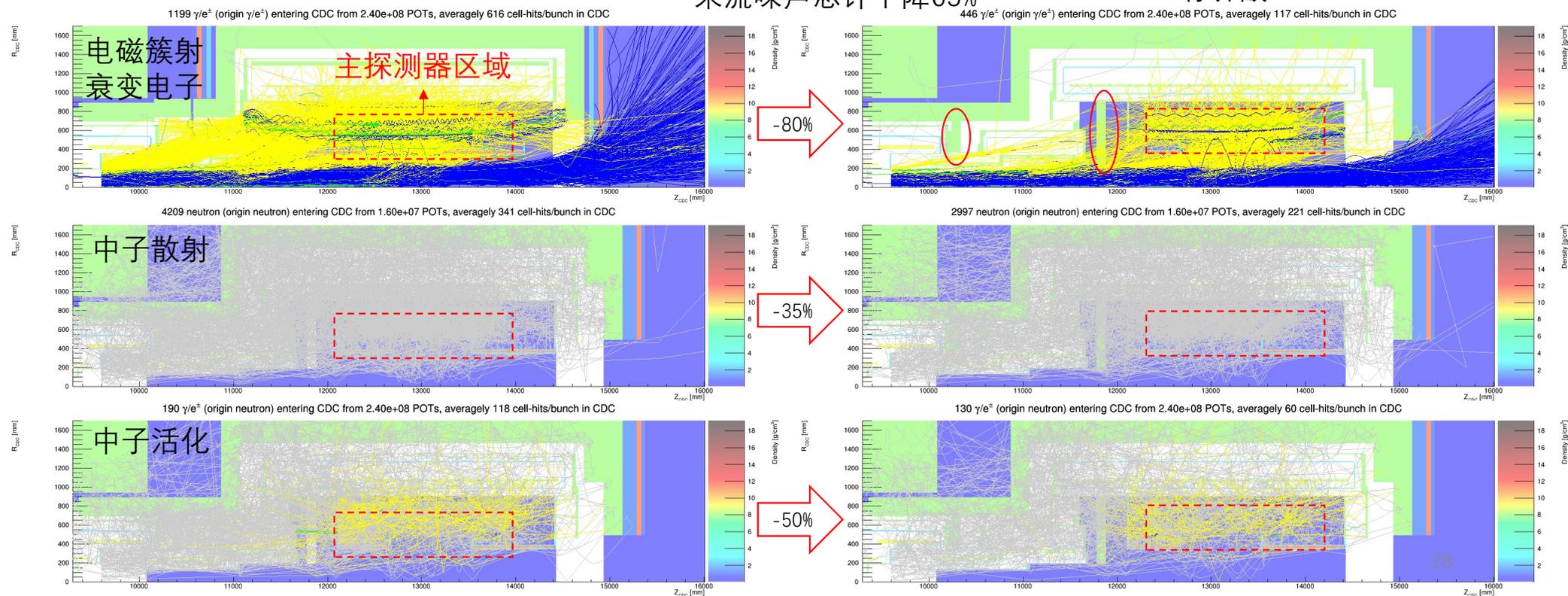
- 设计算法记录了探测器噪声的生成路径并分类。
- 在路径上引入了两个额外的屏蔽装置，成功将束流噪声降低了65%。

径迹颜色
 蓝色: e^-
 绿色: e^+
 黄色: 光子
 灰色: 中子

无屏蔽

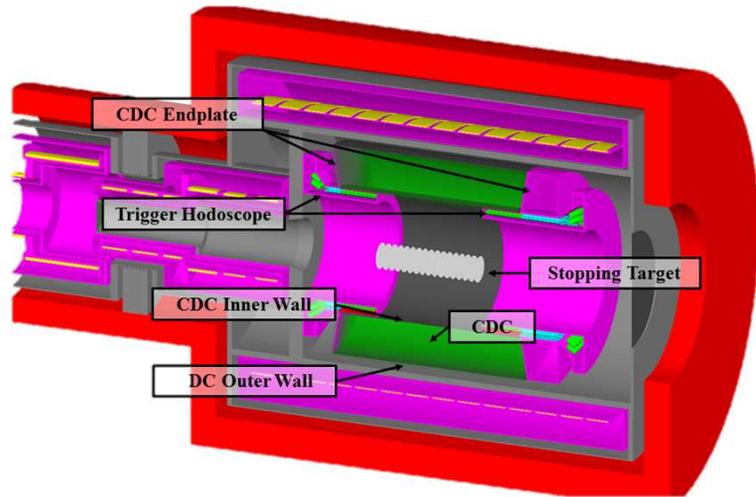
束流噪声总计下降65%

有屏蔽



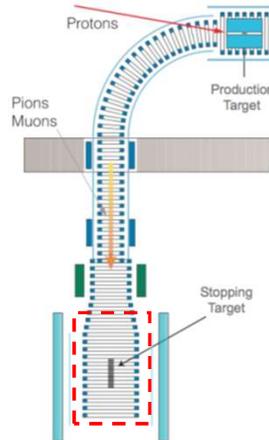
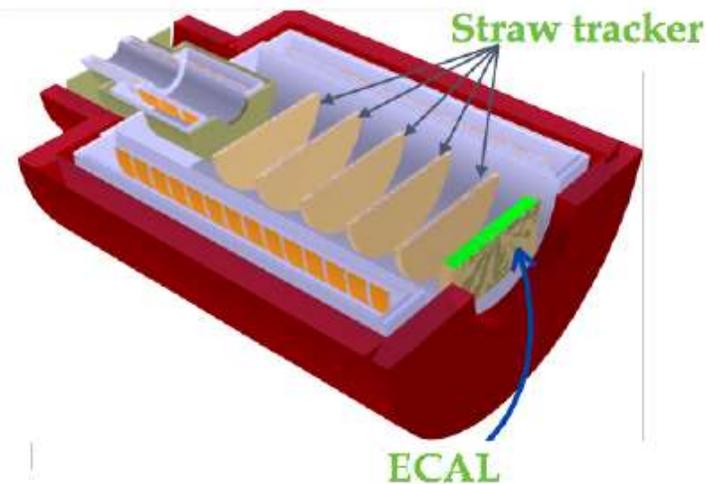
COMET Phase-I 的探测器

主探测器：圆筒形探测器 (CyDet)



替换

稻草管和量能器原型机 (StrEcal)



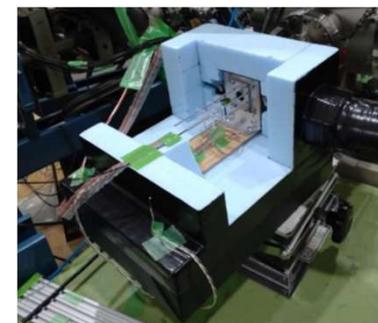
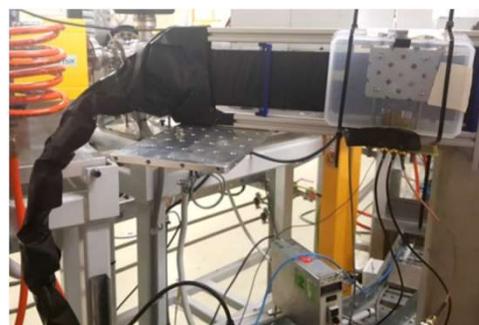
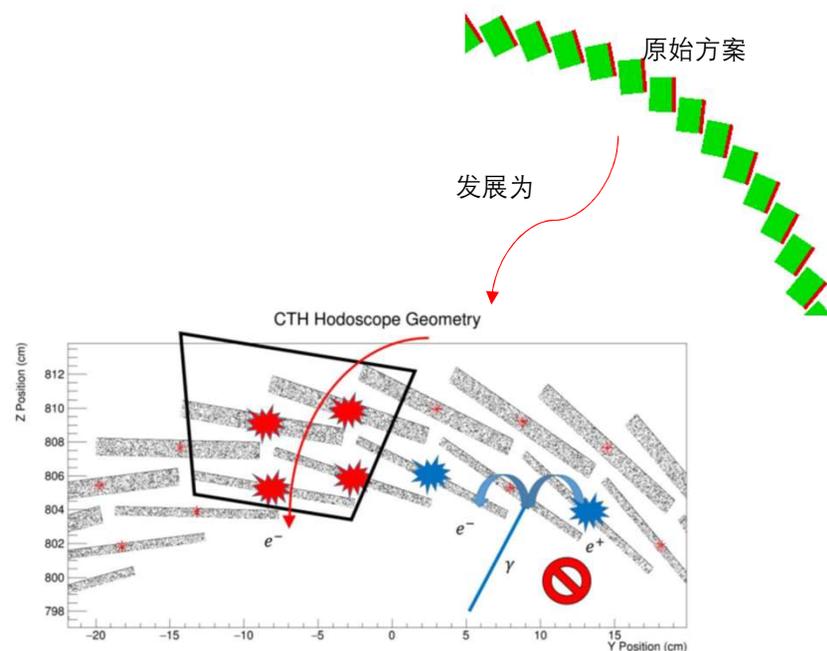
• 专为COMET Phase-I设计。主要组成部分：

- 圆筒形触发探测器：
 - 上下游各一个。每一个由一层塑料闪烁体和一层切伦科夫探测器组成。提供触发，飞行时间，和粒子鉴别。
- 圆筒形漂移室：
 - 全斜丝层，氦基工作气体。
 - 大内径，避开束流粒子的轰击。

- 为测量束流成分，提供时间，位置，动量，和粒子类型等信息。
- 也作为COMET Phase-II探测器的性能测试。

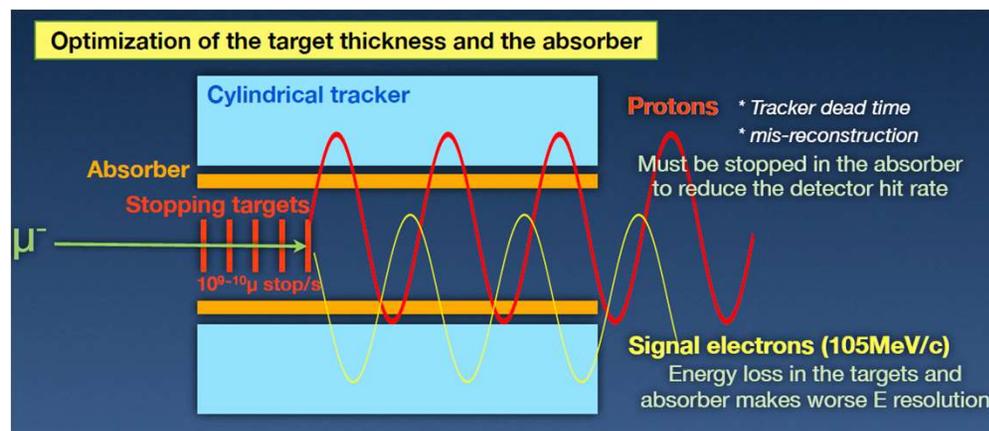
辐射对触发探测器的影响

- 在高辐射水平下，原始设计方案无法工作。
 - 经过一系列模拟研究，一个四重符合的新方案被提出：有效降低误触发率
 - 包裹晶体的屏蔽层很重要：通过模拟确定了最优物质分布设计。
 - 瞬时触发率 1 MHz \rightarrow 84 kHz。
- 光子的读出问题：强磁场下普通光电倍增管有读出问题。SiPM是一个经济选项。但是中子辐射水平会带来噪声。
 - 需要用长光纤将信号引导至低辐射区域
 - 利用低温控制噪声水平。

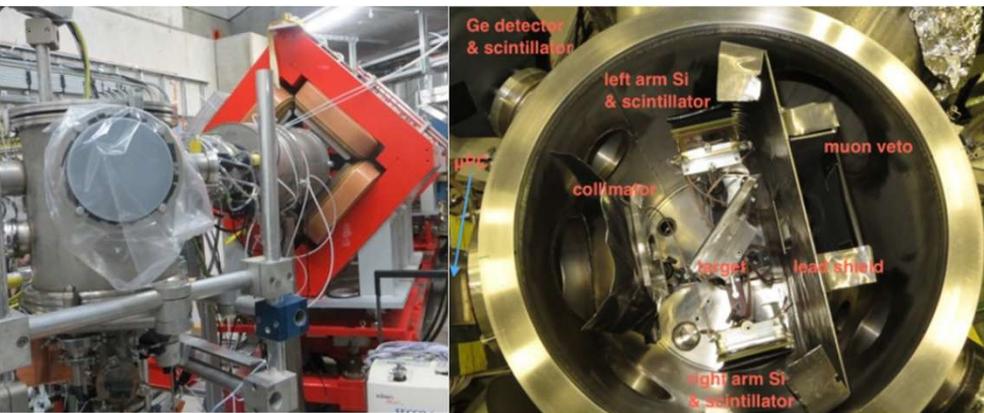


缪子核俘获对漂移室的影响

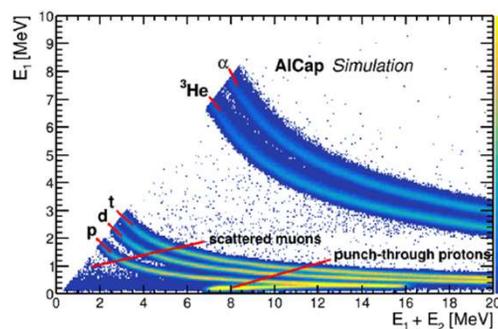
- COMET和Mu2e探测器受缪子核俘获产生质子的影响：
 - 死时间，误重建
- 使用缪子在硅中核俘获质子能谱的模拟研究
 - 需要引入吸收层，影响动量分辨
- 2013年，COMET和Mu2e联合完成了AlCap实验，证实缪子在铝中核俘获质子发射率比硅低两倍多
 - 无需吸收层！



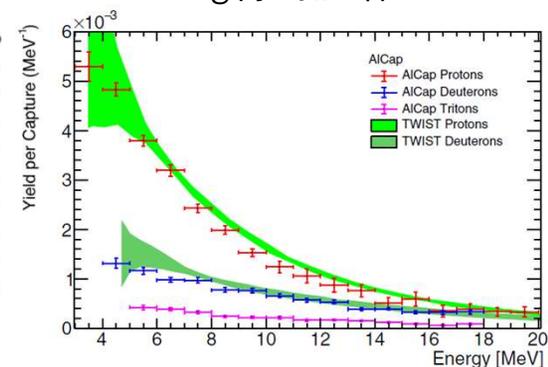
AlCap @ PSI $\pi E1$, 29~36 MeV/c, ~6 kHz



利用dE/dX做例子鉴别

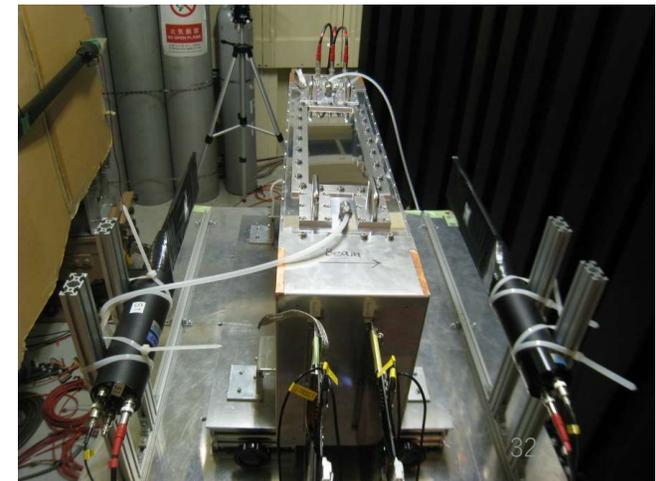
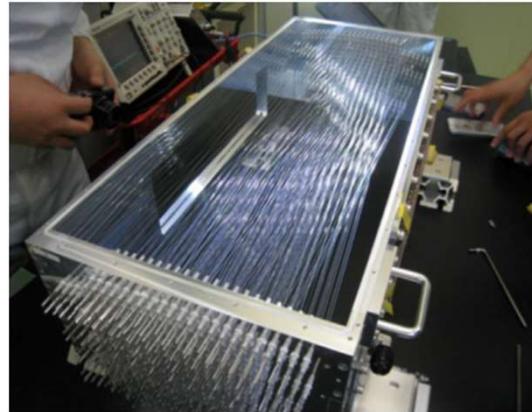
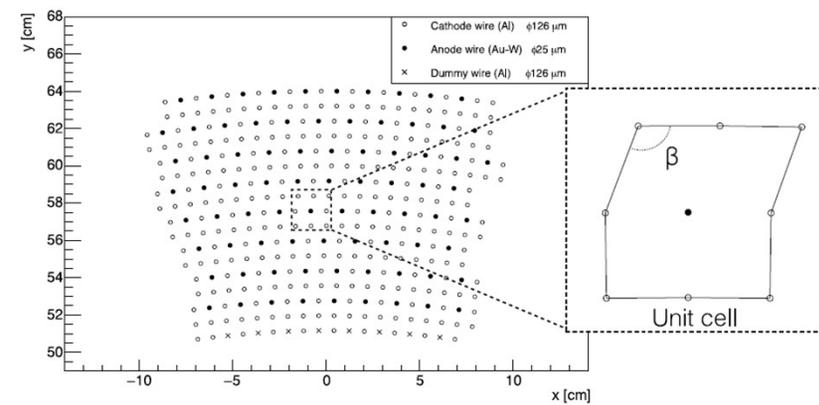
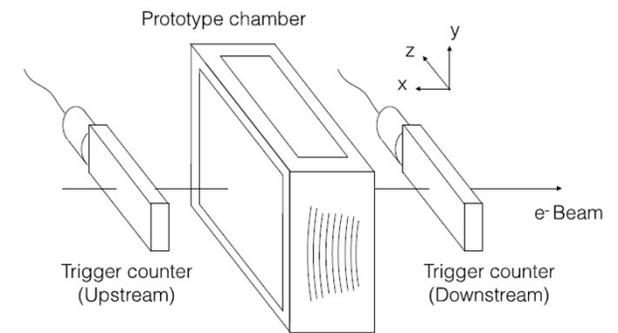


Unfolding得到能谱



漂移室原型机测试

- 漂移室的丝室设计和气体搭配没有先例，需要原型机测试提供性能数据
 - 关键性能指标：击中效率，空间分辨。
- 原型机采用与漂移室设计完全相同的丝室结构，利用SPring-8的1 GeV电子测试了三种备选工作气体
 - He:iC₄H₁₀ (90:10), He:C₂H₆ (50:50), He:CH₄ (80:20)

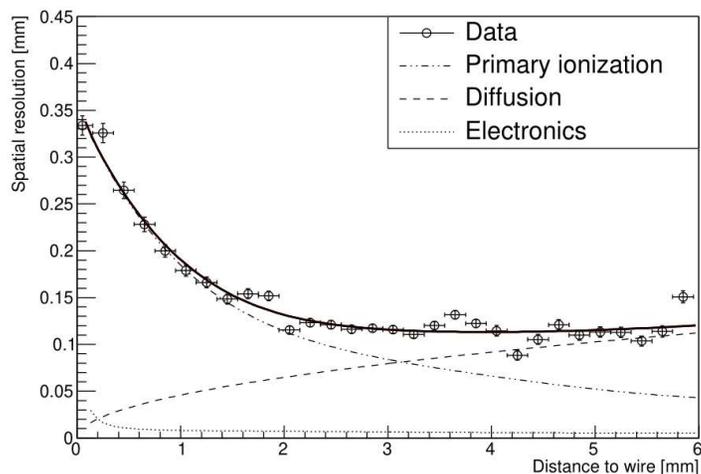


漂移室原型机测试

➤ 根据空间分辨的成份分析，可以得出决定空间分辨的重要参数：初级电离密度 N_P

- 以基准方案He:iC4H10 (90:10)为例，对于1 GeV 电子， $N_P = 14.2 \text{ cm}^{-1}$ ，与PDG中数据基本一致。
- Geant4的光子吸收电离模型 (PAI) 也可以得出相似的结论，但模型的精度有待改善 (外层电子能级缺失)

The composition of spatial resolution



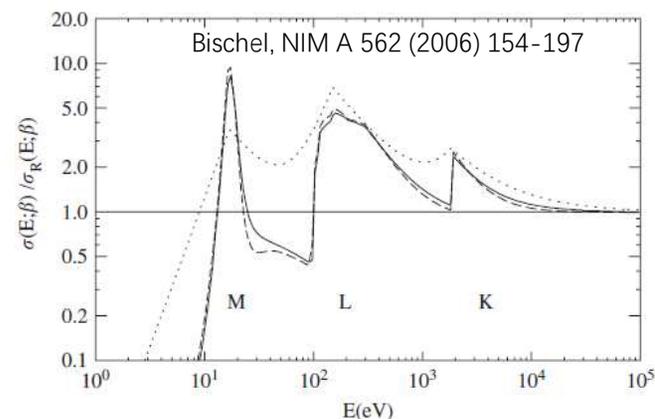
气体的初级电离密度	PDG数据*	Geant4 模拟验证 (PAI)
He:iC4H10 (90:10)	12.15 cm^{-1}	13.5 cm^{-1}

*PDG中无混合气体的数据，这里根据下面公式计算，忽略Penning效应。

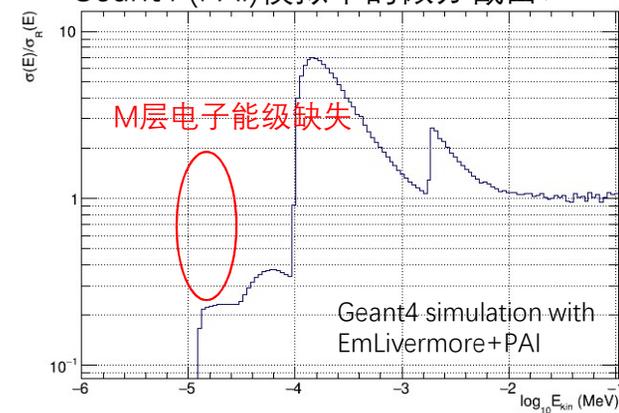
$$\frac{dE}{dx} = WN_P \quad W(f) = \frac{W_2 + (\frac{Z_1}{Z_2}W_1 - W_2)f}{1 + (\frac{Z_1}{Z_2} - 1)f}$$

$f = \text{fraction of the 1}^{\text{st}} \text{ component}$

微分散射截面的计算值 (以硅为例) :

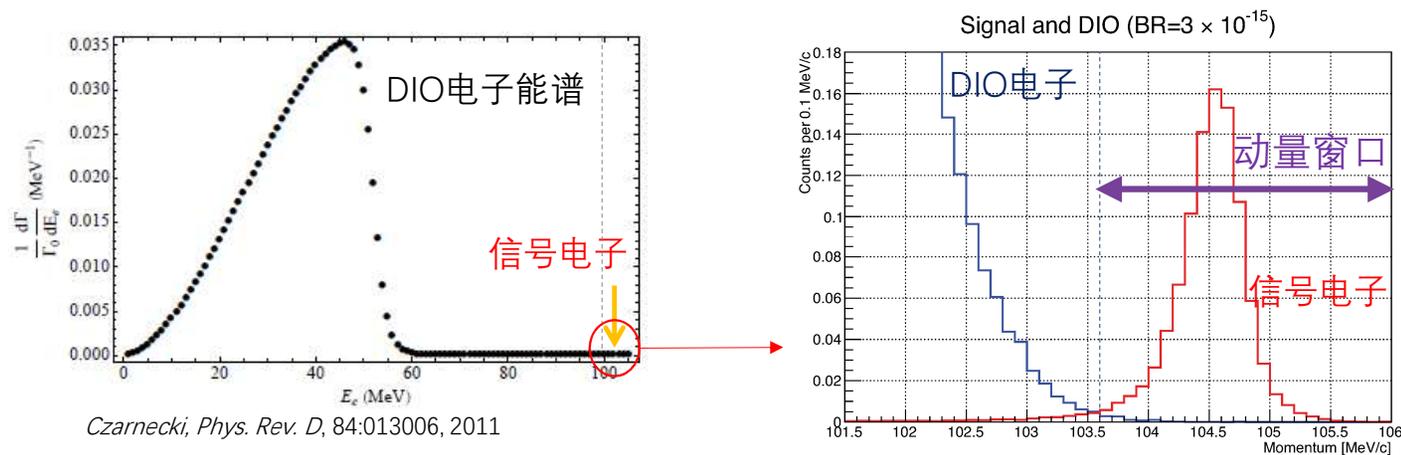


Geant4 (PAI)模拟中的微分散射截面:



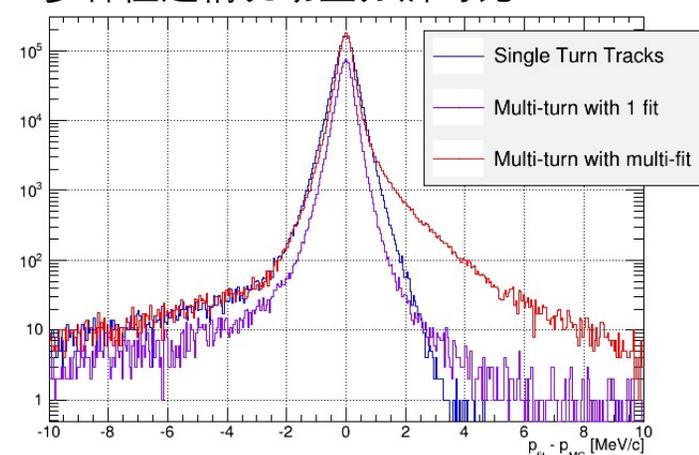
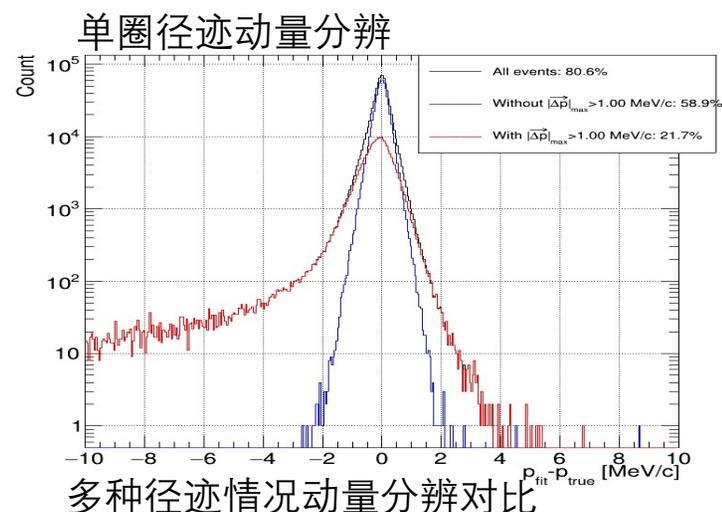
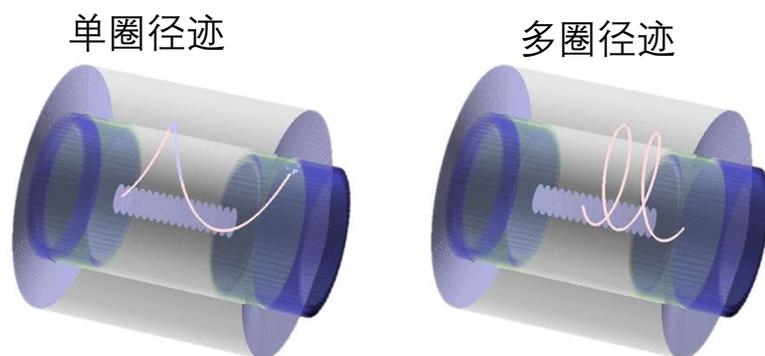
漂移室径迹重建：物理要求

- 主探测器为COMET实验提供径迹的动量信息，这是区分信号和本底的最重要信息
- 主要难点：
 - 最主要本底来源，缪子的在轨衰变（DIO），在信号能量区域陡峭下降。
 - 误重建可能将DIO本底误判为信号：要求极低误重建率。
 - 辐射环境：在大量束流噪声下实现高重建效率和极低误重建率成为实验的一大挑战。



漂移室径迹重建：不带束流噪声的重建研究

- 基于Genfit2利用Kalman Filter开发了重建算法，分别对单圈和多圈两种径迹进行了重建研究
 - 单圈径迹重建质量高，而且结果表明，电极丝上的大角散射是造成误2 MeV/c以上重建的根本原因。
 - 多圈径迹面临击中分圈的困难
 - 开发了基于模式扫描的算法，成功重建了多圈事例动量。但是误重建率有待进一步压低。

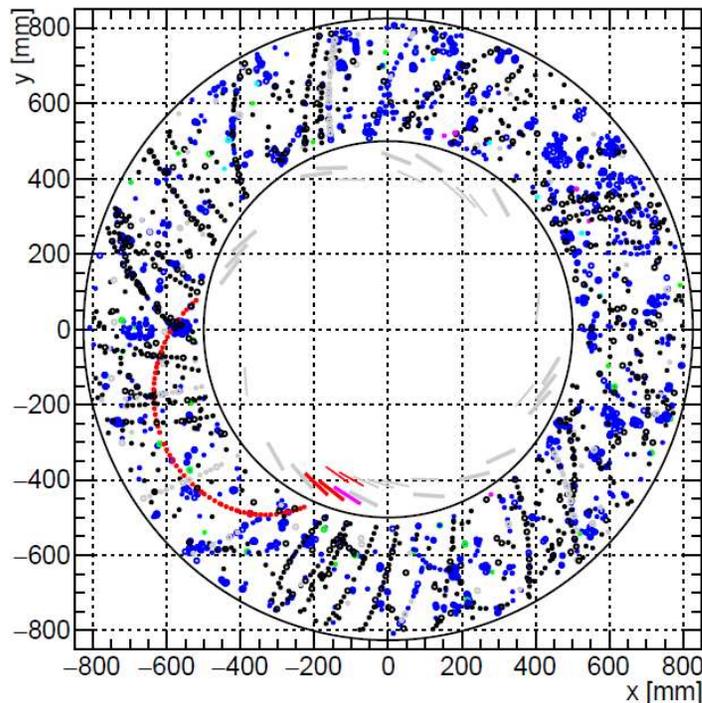


漂移室径迹重建：带束流噪声的重建研究

- 带上束流噪声后，一个事例中~2000个信号丝有击中，但只有~60个来自信号电子
 - 需要极高效的击中筛选算法

一个包含信号电子和束流噪声的典型事例
击中位置使用径迹蒙卡信息绘制

击中按照留下电离信息的粒子种类标注颜色：
蓝色： e^-
绿色： e^+
紫色： μ^\pm
浅蓝色： π^\pm
黑色：质子
灰色：离子
红色：信号电子



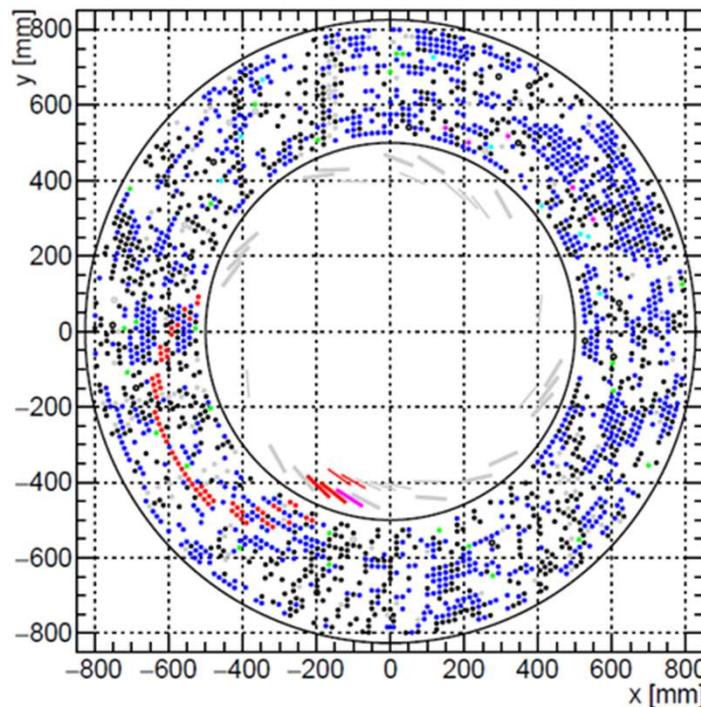
- 电子击中自电磁簇射
- 质子击中来自两种：
 - 高能径迹击中来自缪子和 π 介子在静止靶核俘获
 - 低能散点击中来自中子散射

漂移室径迹重建：带束流噪声的重建研究

- 带上束流噪声后，一个事例中~2000个信号丝有击中，但只有~60个来自信号电子
 - 需要极高效的击中筛选算法

一个包含信号电子和束流噪声的典型事例
击中位置使用端盖版丝位绘制

击中按照留下电离信息的粒子种类标注颜色：
蓝色： e^-
绿色： e^+
紫色： μ^\pm
浅蓝色： π^\pm
黑色：质子
灰色：离子
红色：信号电子

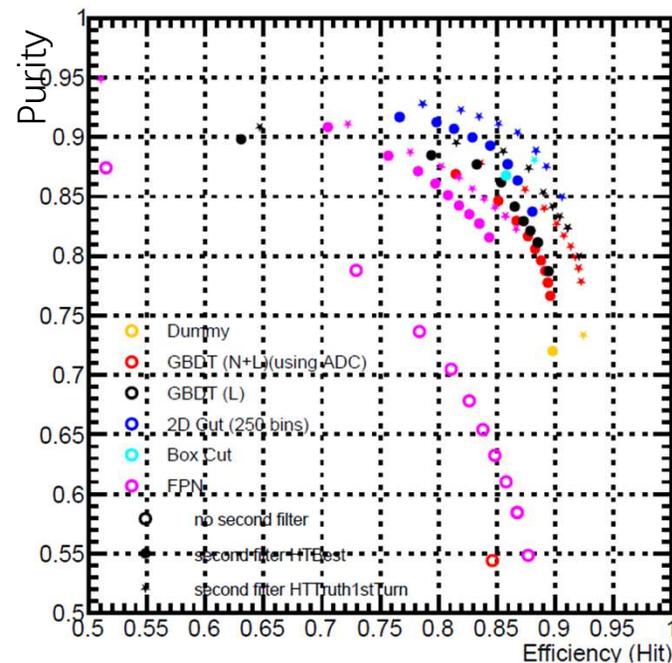


考虑到全斜丝的设计，径迹形状更加难以辨别！

- 电子击中自电磁簇射
- 质子击中来自两种：
 - 高能径迹击中来自缪子和 π 介子在静止靶核俘获
 - 低能散点击中来自中子散射

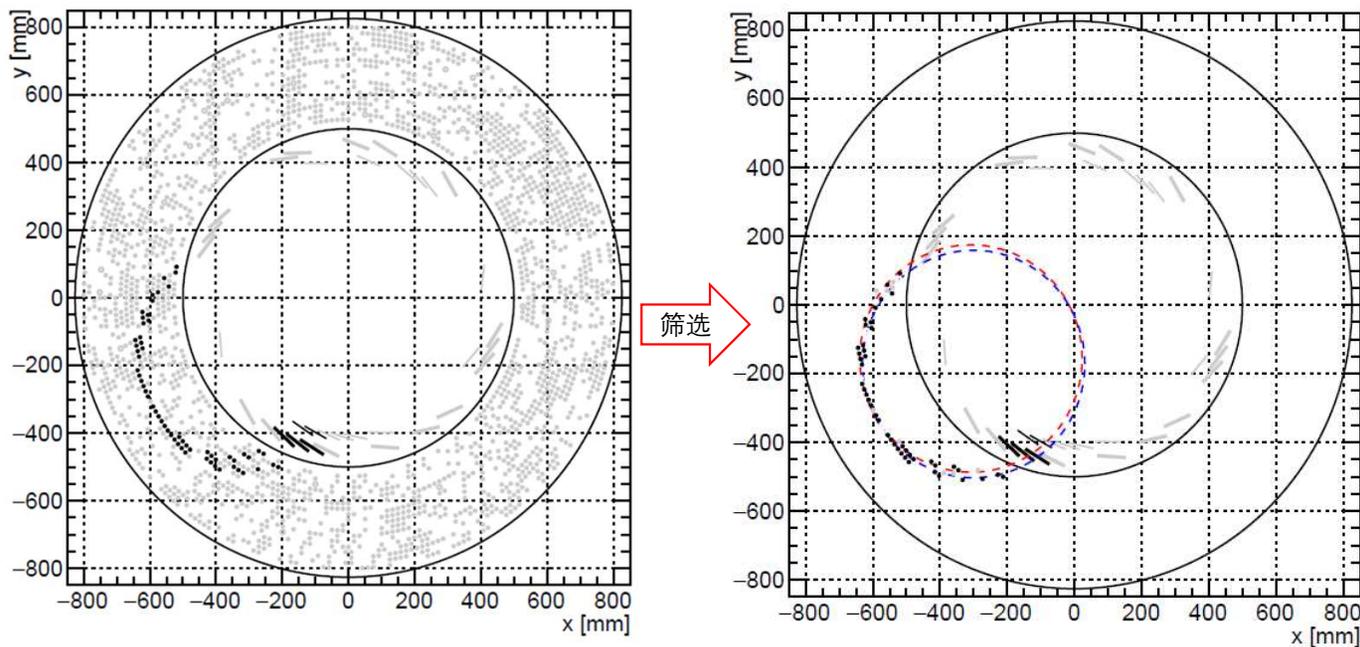
漂移室径迹重建：带束流噪声的重建研究

- 开发了二维直方图算法、梯度提升算法（GBDT）、和神经网络算法（FPN）筛选击中，配合霍夫变换，实现了85%的信号筛选效率90%的样本纯净度
 - 利用随机噪声样本做训练，在模拟样本上检验。神经网络算法（FPN）的训练样本需要改进。



漂移室径迹重建：带束流噪声的重建研究

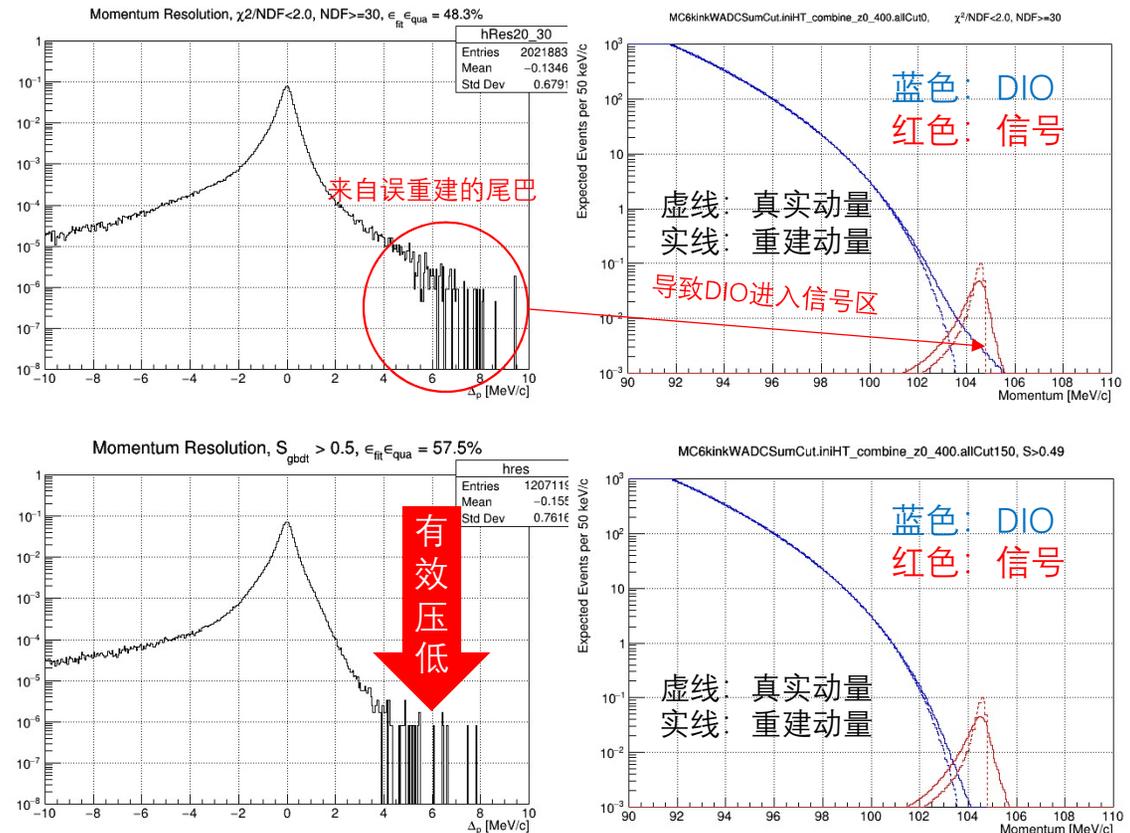
- 开发了二维直方图算法、梯度提升算法（GBDT）、和神经网络算法（FPN）筛选击中，配合霍夫变换，实现了85%的信号筛选效率90%的样本纯净度
 - 以前面展示的事例为例，筛选效果满足重建需求



漂移室径迹重建：带束流噪声的重建研究

假设信号分支比 $Br = 3 \times 10^{-15}$

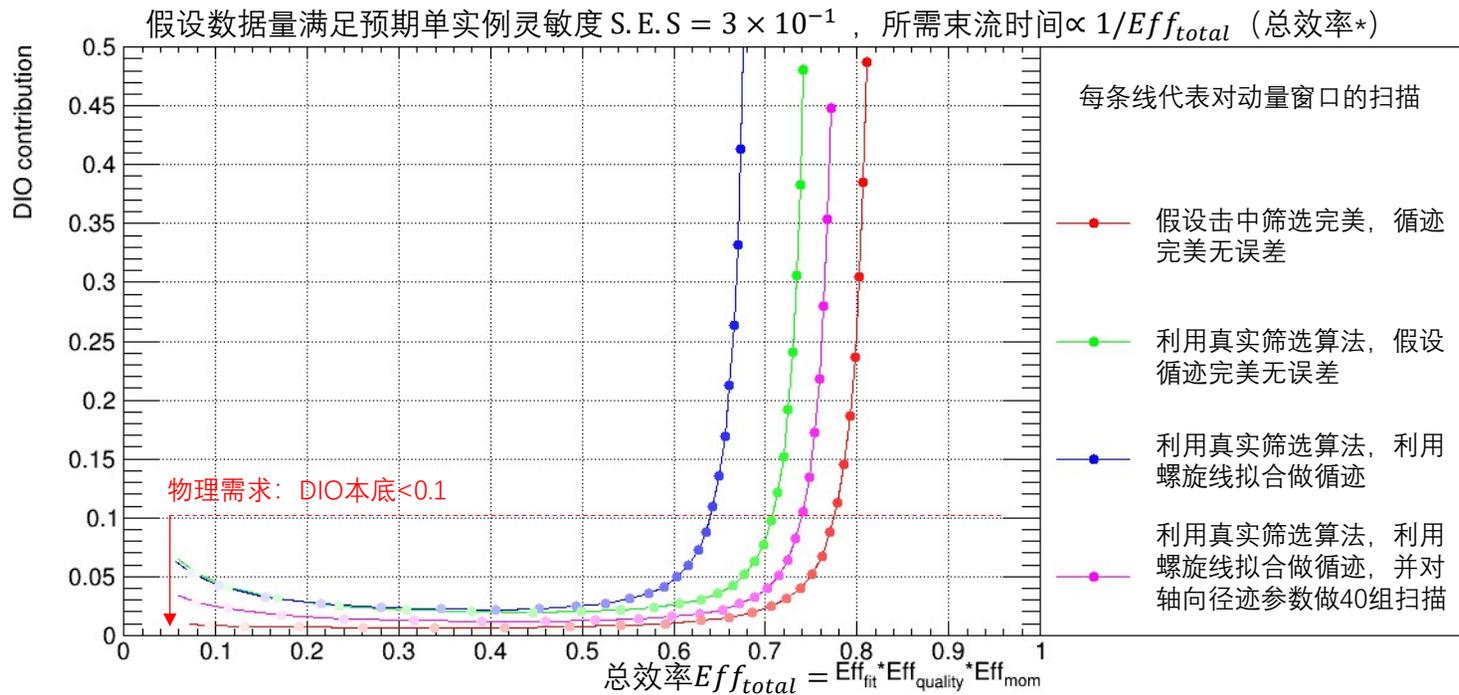
- 传统的拟合质量控制依赖拟合自由度 (NDF) 和标准卡方 (χ^2 / ν)
 - 带上噪声击中后，该判断方法有可能指向错误的局域最优解，造成误重建，增加DIO本底。
- 利用梯度提升算法 (GBDT) 开发了基于更多参数的控制算法，可以有效控制拟合质量。
 - 本底在信号区得到了很好的抑制



漂移室径迹重建：全流程重建结果

➤ 基于以上开发的算法，对两千万带束流噪声的信号蒙卡模拟事例完成了全流程重建

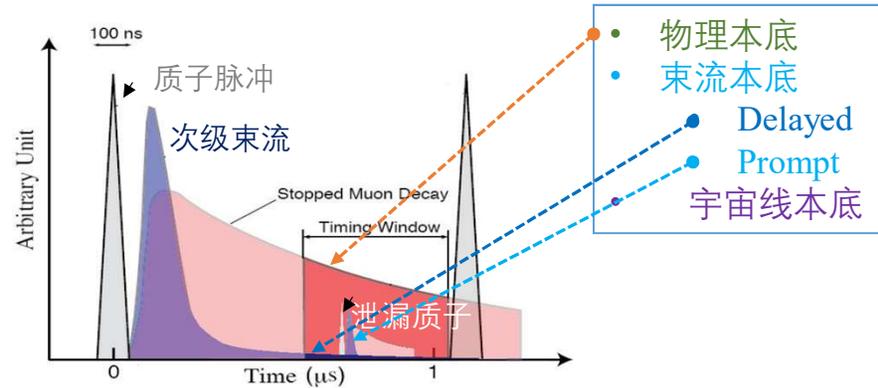
- 螺旋线循迹结果作为拟合初值效果不够好，特别是轴向径迹参数不准确
- 但是对轴向径迹参数扫描，利用拟合质量控制算法对结果进行排序后，综合表现优于真实值做初值
- 如仅考虑单圈情况（约占60%），本底控制和信号总效率已接近理论极限。多圈情况需进一步研究。



*图中总效率仅限于单圈径迹情况（约占60%）

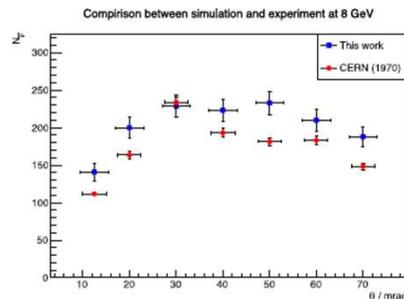
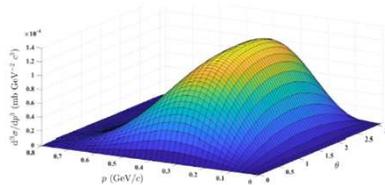
COMET Phase-I的本底研究

- 修正了Geant4中的相关物理过程： π 介子辐射核俘获 (RPC)、 μ 子辐射核俘获 (RMC)、和 μ 子在轨衰变 (DIO) 模型，并利用近阈近似的理论模型制作了反质子产生子，为本底研究打下基础。



反质子产生子近域近似理论公式，微分界面分布，及与实验的对比工作发表于Nucl.Instrum.Meth.A 1039 (2022)

$$(E \cdot \frac{d^3\sigma}{d^3p})_{LE}(x_R, x_T, p_T) = (E \cdot \frac{d^3\sigma}{d^3p})_{RS}(x_R, p_T) \cdot R(x_T, \sqrt{s})$$



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	≤ 0.0038
	Radiative pion capture	0.0028
	Neutrons	~ 10 ⁻⁹
Delayed Beam	Beam electrons	~ 0
	Muon decay in flight	~ 0
	Pion decay in flight	~ 0
	Radiative pion capture	~ 0
	Antiproton-induced backgrounds	0.0012
	Others	Cosmic rays [†]
Total		0.032

[†] This estimate is currently limited by computing resources.

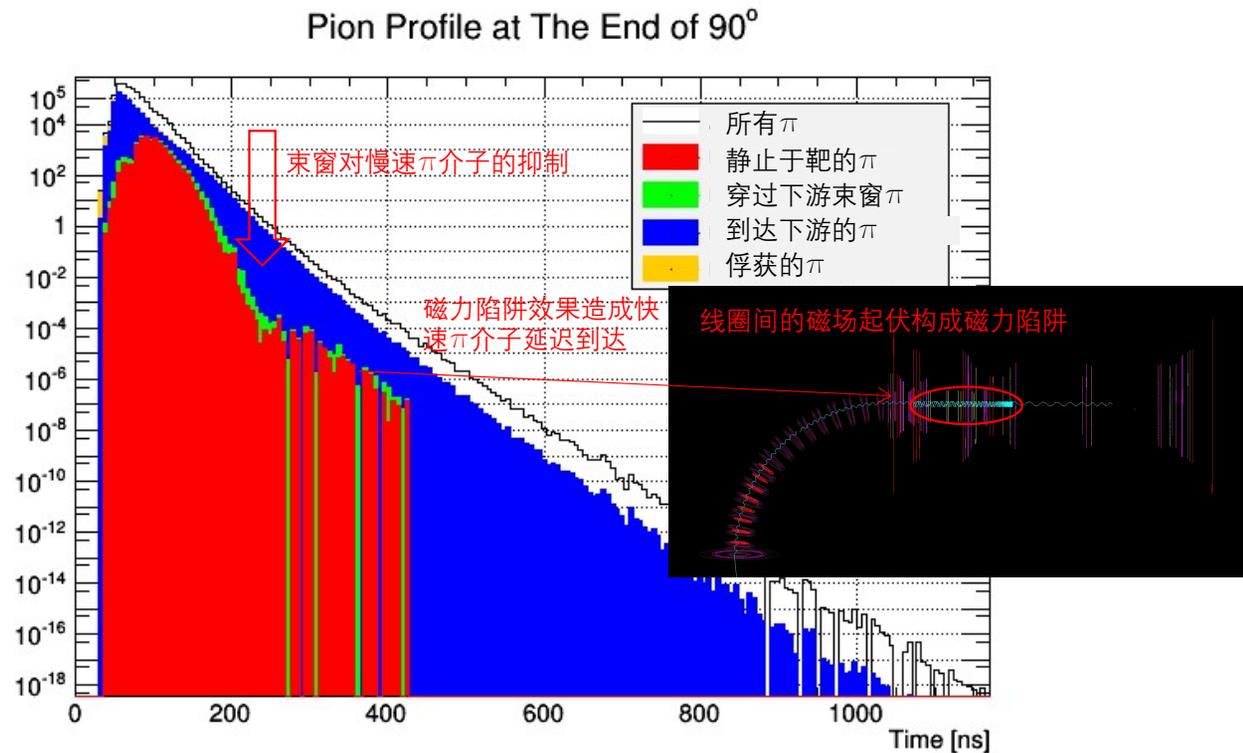
- 提出了分段式采样的方法，增大样本统计量，最终完成了束流本底的估算：总本底事例预期为0.032

COMET Phase-I的本底研究

- 束流本底中的Delayed部分最主要的贡献来自束流中的 π 介子辐射核俘获
 - 决定700 ns延迟取数窗口的原因!

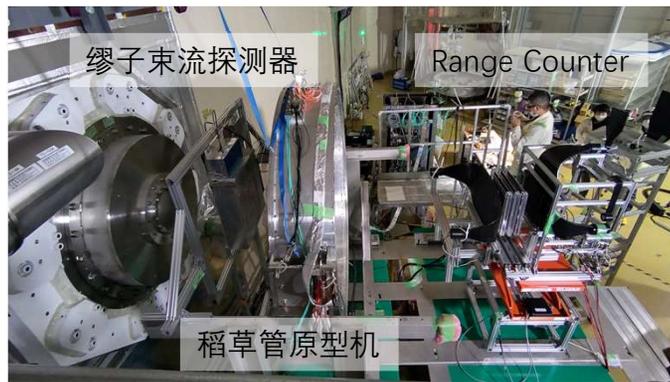
- 利用稳定 π 介子模拟，根据权重分析的方法，预测了束流中的 π 介子的时间结构。

- 解释了束窗的抑制作用
- 指出了线圈间磁场起伏的危险
- 提出了可能使用500 ns延迟取数窗口
 - 可提高50%信号接收度!
 - 但是需要磁场测量或束流时间结构测量结果的支持。



COMET Phase-alpha: 缪子束首次出束

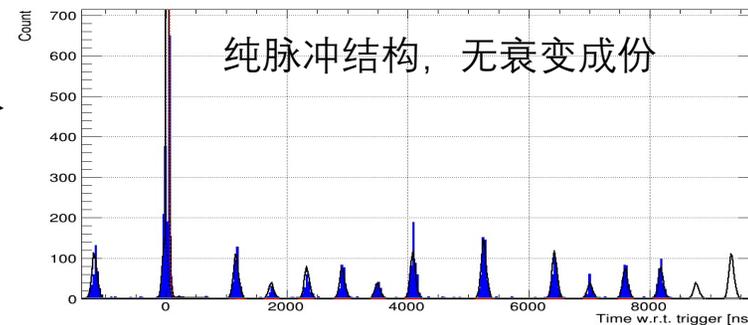
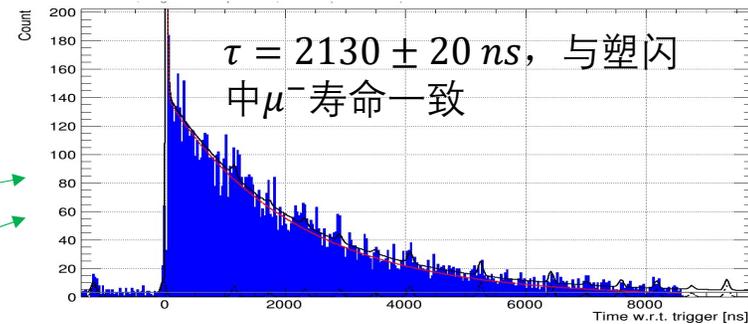
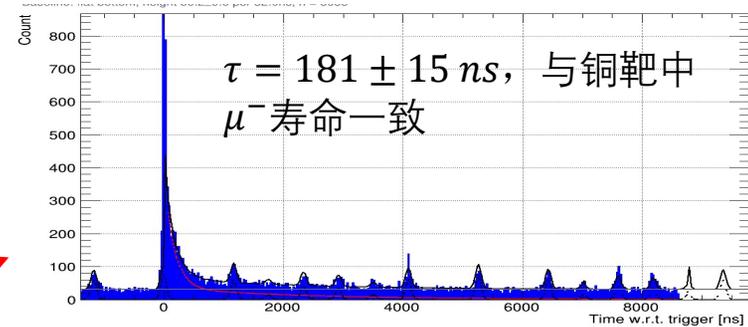
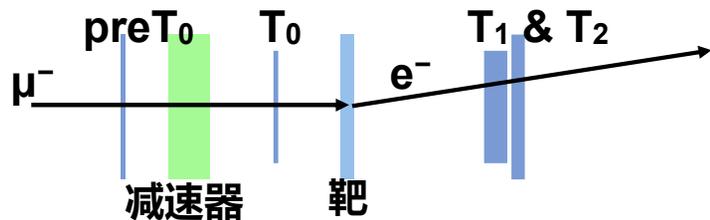
- 不带俘获磁铁的试运行（COMET Phase-alpha）于2023年2月到3月完成
 - 测试了质子束线和缪子束线。
- 主要探测器：缪子束流探测器，稻草管原型机，Range Counter
 - 缪子能谱信息通过Range Counter还原，可用来检验质子打靶的反应截面。



COMET Phase-alpha: 主探测器数据分析

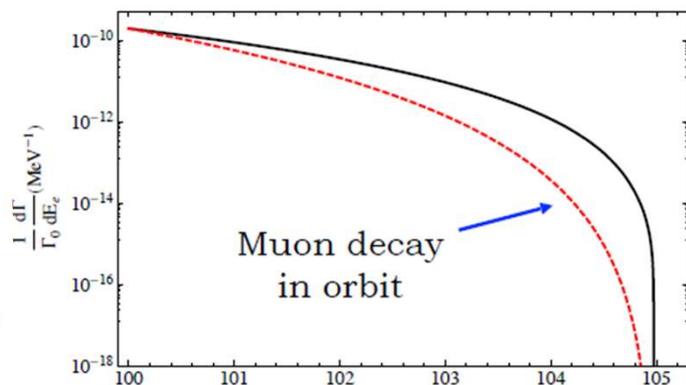
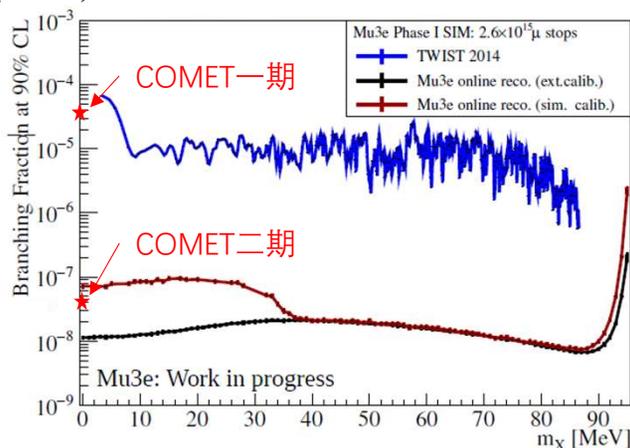
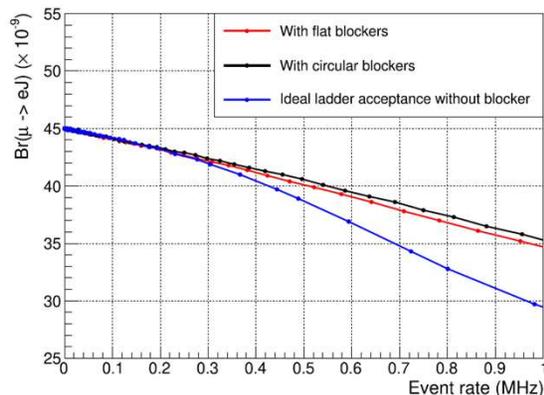
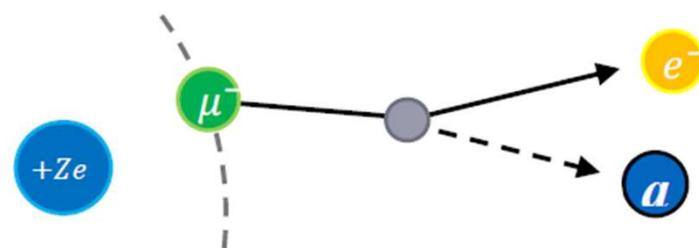
- 对触发和延迟信号分组，信噪比大幅提升，识别了事例类别
 - 还原了衰变常数，确定了缪子的位置
 - 有助于缪子准确定量
 - 为动量谱还原和模型检验打下基础

Trigger VS Event	T1/T1+T2	preT0+T0	T2 only	T0+T1/T2
preT0+T0	缪子静止于靶	电子学噪声	束流或噪声	束流, 或 缪子塑闪
T0+T1	缪子静止于塑闪	电子学噪声	无	缪子静止于塑闪
T0+T1+T2	束流穿过	电子学噪声	束流或噪声	束流穿过

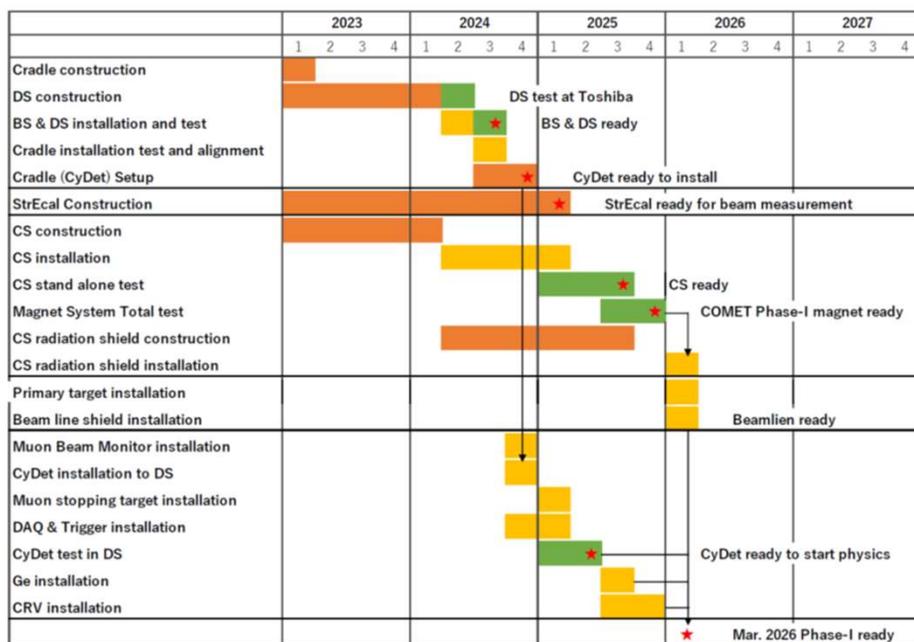


COMET上寻找暗物质粒子

- 轻的不可见的新粒子 a 也可以引入缪子的带电轻子味破坏衰变
 - 如破坏全局 $U(1)$ 对称性的类轴子，利用其衰变中电子能谱与DIO的不同可以在缪原子中寻找类轴子。
- 通过似然性分析探讨了利用COMET实验数据寻找缪子到零质量类轴子的实验前景
 - 一期数据已经具备了寻找这种衰变的潜力， $\mathcal{B}(\mu \rightarrow eJ) < 2.3 \times 10^{-5}$
 - 二期探测器可将实验精度提升三个数量级，与Mu3e竞争
 - 研究结果发表在Chin.Phys.C 47 (2023) 1



COMET实验的时间表



- COMET Phase-I的物理取数时间为150天，计划将现有精度提升100倍。
- COMET Phase-II 将在Phase-I完成取数后开始建造。模拟研究表明，利用56kW的质子束流，实验有潜力将现有精度提升100000倍(COMET Phase-II+)。

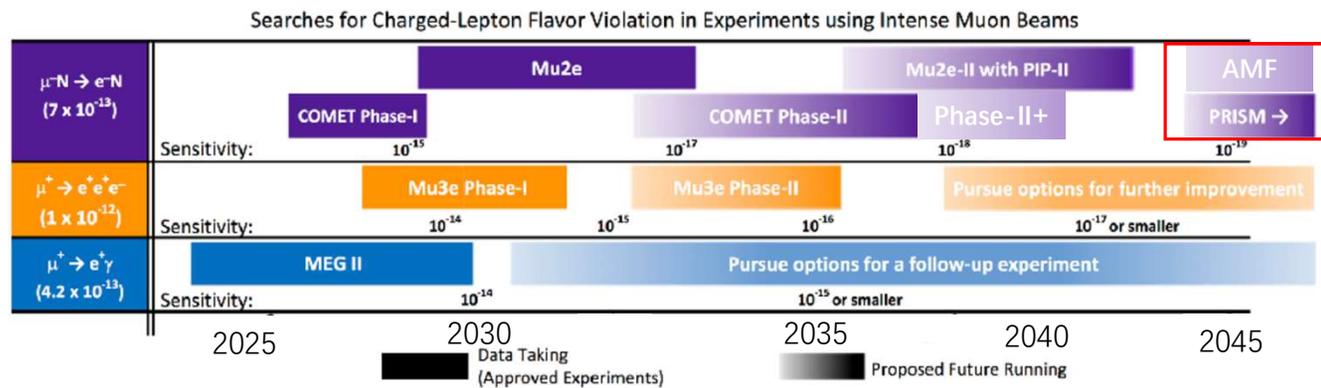
	Phase-I	Phase-II	(Phase-II)+
proton beam	8 GeV, 3.2 kW	8 GeV, 56 kW	8 GeV, 56 kW
proton target	graphite	tungsten	tungsten
transport	90° bend	180° bend	180° bend
muons stop	1.2x10 ⁹ /s	1x10 ¹⁸	2x10 ¹¹ /s
run time	150 days	200 days	300 days
detector	CyDet	StrECAL	StrECAL
90% CL	<7x10 ⁻¹⁵	<4.6x10 ⁻¹⁷	<7x10 ⁻¹⁸
backgrounds	0.03 events	0.32 events	0.6 events

• 国际竞争：FermiLab的Mu2e实验

- Mu2e run1: 2026, 6个月取数，精度提升1000倍。之后是加速器的PIP-II升级。
- Mu2e run2: 2029~2033，精度最终提升到现有的10,000倍。
- Mu2e-II: 2019年提出构想。计划在2033年后，将精度提升到现有的100000倍。

未来展望

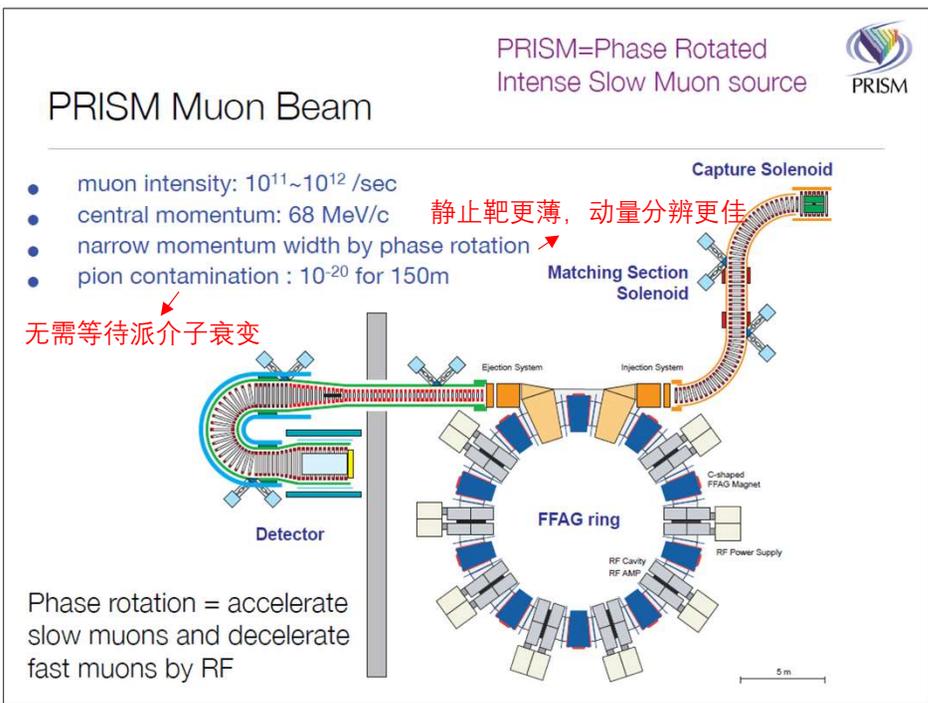
目标 10^{-19}



* modified from the muon CLFV white paper for the 2020 update of European Strategy of Particle Physics

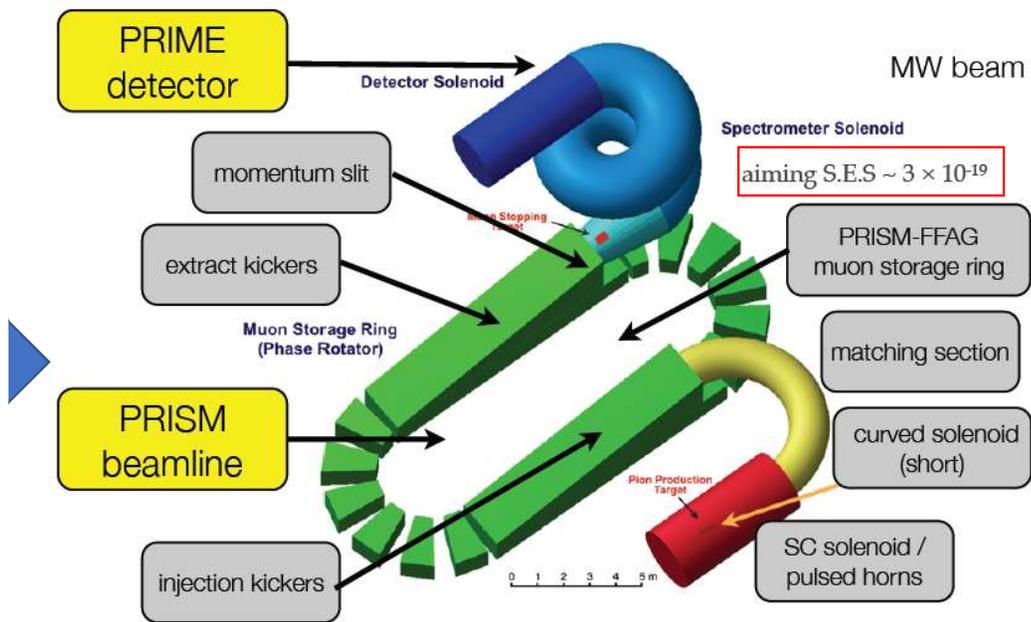
下一代 $\mu N \rightarrow e N$ 实验

最初的设计在2005年左右，COMET的前身PRISM



Y.Kuno, NOW2006

PRISM继续更新着实验方案，尝试在终极精度上寻找 $\mu N \rightarrow e N$

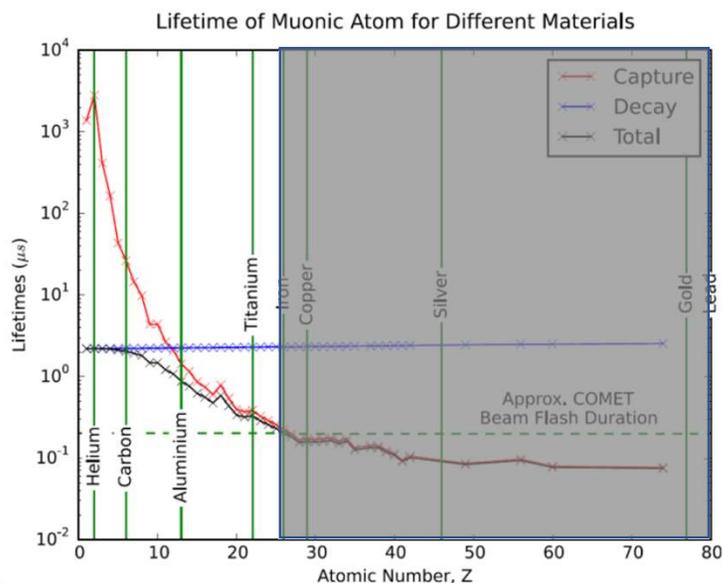


MW缪子源是巨大的挑战，但这一计划与缪子对撞机的准备工作高度协同：

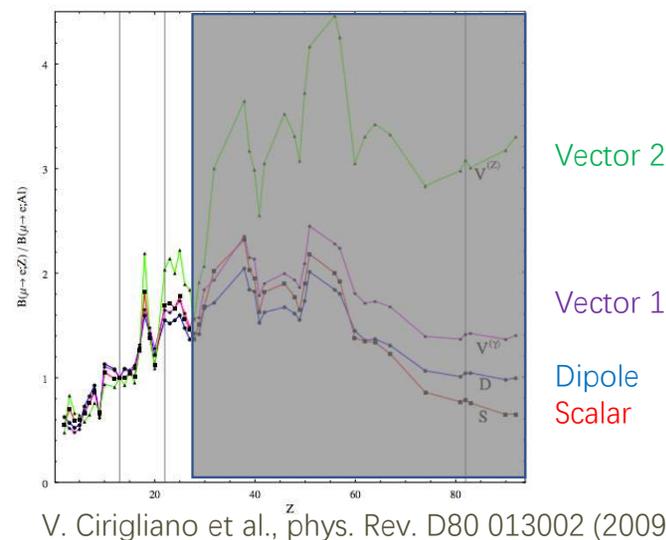
- 可以测试产生靶，俘获磁铁，缪子储存环的技术
- 将会是缪子对撞机运行之前最亮的缪子源

下一代 $\mu N \rightarrow eN$ 实验：突破靶材限制

- 在现有的MHz脉冲束流方案下，静止靶只能选取低原子序数的材料
 - 高原子序数的靶中，缪子会迅速被原子核俘获，来不及等待束流脉冲经过。
- 高原子序数的材料对于新物理的探索有着不可取代的地位
 - 除了更高的信号分支比和更低的在轨衰变本底的优势，如果缪子电子转换过程被发现，那么对其分支比与原子序数的关系的扫描可以直接告诉我们关于新物理的更多性质。



通过缪子储存环，灰色区域可以被直接探测。



下一代 $\mu N \rightarrow eN$ 实验：探测器方面的挑战

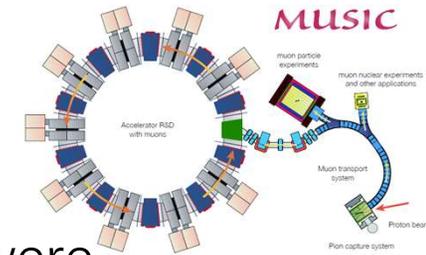
- 需要更高的动量分辨率
 - 稻草管探测器管壁的厚度要小于12微米
- 需要绝对动量的直接刻度
 - 不能再依赖从低能端信号(70MeV)的外推
 - 考虑建造小型直线加速器提供100 MeV单能电子源
- 需要更好的抗辐射性能
 - 利用缪子储存环后束流的占空比会进一步下降，瞬时辐射强度会更高
 - 模拟和测试需要论证屏蔽的充分性。对电子学的抗辐射要求更高。

总结

- 带电轻子味破坏过程为寻找新物理提供了一个干净的试验场。
- 对缪子的带电轻子味破坏过程的寻找为标准模型的建立做出了重要贡献，并在亮度前沿寻找新物理的领域中处在领先地位。
- 缪子电子转换过程的实验精度在未来几年内有望从 10^{-13} 提升到 10^{-17} ，甚至 10^{-18} 。
 - 实验设计可以追溯到34年前的Lobashev方案
 - FermiLab的Mu2e和J-PARC的COMET是当前的活跃实验项目，均计划在2030年代实现最初的设计目标。第一期结果有望在2026年取得。
- 在更远的未来，利用MW功率束流和缪子储存环的PRISM方案有潜力将实验精度提升到 10^{-19}

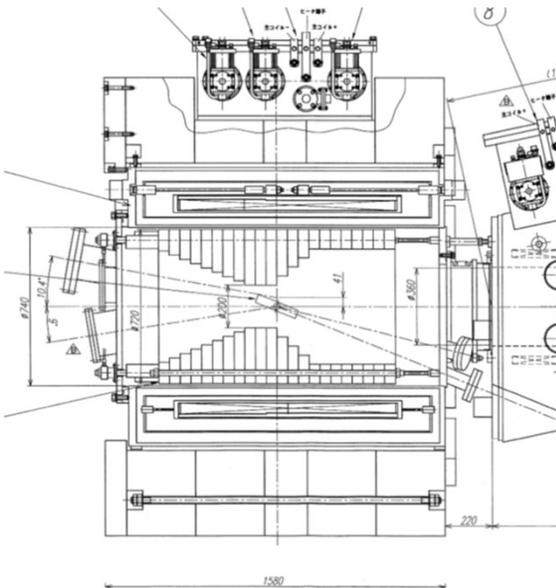
谢谢！





MuSIC

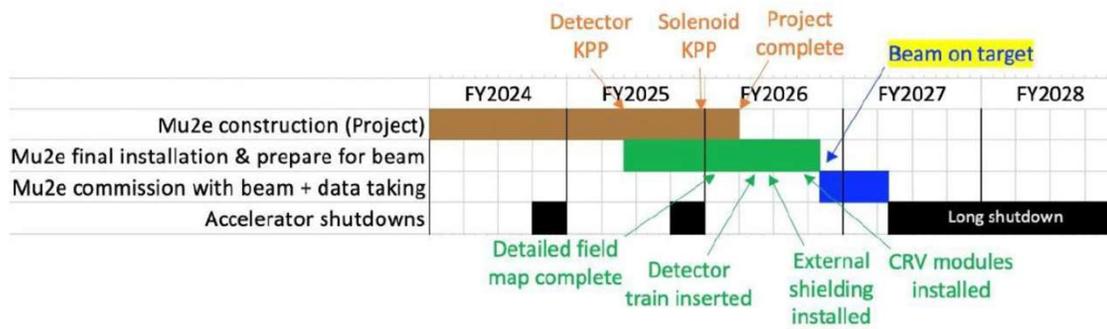
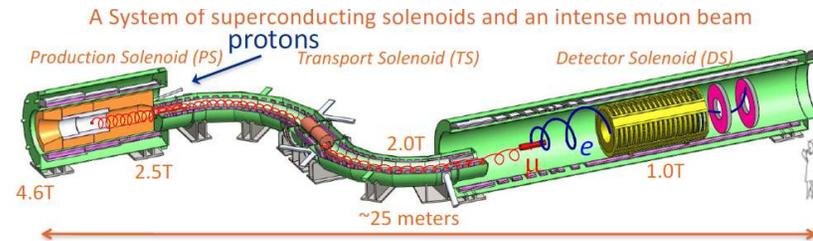
- The capture solenoid and 36 degree of transport solenoid were constructed in 2010.
- Beam measurements done in 2013~2015, with 1 μA proton beam.
 - First demonstration of lobashev scheme muon source!



Measured muon yield at the exit of the 36° transport solenoid		
	設計値	測定結果
正電荷ミューオン [μ^+ /sec/ μA]	2×10^8	$(4.2 \pm 1.1) \times 10^8$
負電荷ミューオン [μ^- /sec/ μA]	1.4×10^8	$(1.7 \pm 0.3) \times 10^8$

Mu2e

- All of the components of the experiment are currently being fabricated, many of which are completed or nearing completion!
- The physics run is going to be separated into two:
 - run-1 in FY2026. Sensitivity improves x1000!
 - run-2 after the long shut down, from FY2029. Aiming another x10 improvement.



Mu2e-II

- Uses ~100 kW of PIP-II 800 MeV protons
 - Discussions ongoing to increase the beam energy up to 2-3 GeV
- Data taking period: ~2035-2040, aiming at improving sensitivity by x10.
- Capture solenoid might need to be replaced (redesigned?)
- Need to replace the bronze heat and radiation shield with tungsten shield
- Heat load in the target increases from ~1kW to 15 kW
 - Novel production target designs are being discussed



Transitions with μ in the final state

Results from LHCb

- Improved upper limits at 90%(95%) CL

$$B(B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ e^-) < 5.7(6.9) \times 10^{-9}$$

$$B(B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^- e^+) < 6.8(7.9) \times 10^{-9}$$

$$B(B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^\pm e^\mp) < 10.1(11.7) \times 10^{-9}$$

wrt Belle's result ($\mathcal{O}(10^{-7})$) [PRD 98, 071101(R) (2018)]

- World's first limit at 90%(95%) CL

$$B(B_s^0 \rightarrow \phi \mu^\pm e^\mp) < 16.0(19.8) \times 10^{-9}$$

Results from NA62, based on Run1 (2016-2018). Run2 on going (2021-CERN LS3)

Channel	BR UL (PDG 2019)	BR UL : NA62	Expected Background	Observed	Publication
$K^+ \rightarrow \pi^- \mu^+ e^+$	50×10^{-11}	4.2×10^{-11}	1.07 ± 0.20	0	PRL 127 (2021) 131802
$K^+ \rightarrow \pi^+ \mu^- e^+$	52×10^{-11}	6.6×10^{-11}	0.92 ± 0.34	2	PRL 127 (2021) 131802
$\pi^0 \rightarrow \mu^- e^+$	34×10^{-10}	3.2×10^{-10}	0.23 ± 0.15	0	PRL 127 (2021) 131802
$K^+ \rightarrow \pi^- \mu^+ \mu^+$	8.6×10^{-11}	$4.2 \times 10^{-11} *$	0.92 ± 0.34	1	PLB 797 (2019) 134794
$K^+ \rightarrow \pi^- e^+ e^+$	64×10^{-11}	5.3×10^{-11}	0.43 ± 0.09	0	PLB 830 (2022) 137172
$K^+ \rightarrow \pi^- \pi^0 e^+ e^+$	N/A	8.5×10^{-10}	0.044 ± 0.020	0	PLB 830 (2022) 137172
$K^+ \rightarrow \mu^- \nu e^+ e^+$	N/A	8.1×10^{-11}	0.26 ± 0.04	0	PLB 838 (2023) 137679

Results from BES III

	J^P	Generate	$e\mu$
η'	0^-	$J/\psi \rightarrow \gamma \eta'$, $(5.25 \pm 0.07) \times 10^{-3}$	4.7×10^{-4}
$\eta_c(1S)$	0^-	$J/\psi \rightarrow \gamma \eta_c(1S)$, $(1.7 \pm 0.4) \%$	no result
J/ψ	1^-	$e^+ e^- \rightarrow J/\psi$, 1×10^{10}	4.5×10^{-9}
$\psi(3686)$	1^-	$e^+ e^- \rightarrow \psi(3686)$, 2.7×10^9	no result
χ_{cJ}	J^+	$\psi(2S) \rightarrow \gamma \chi_{cJ}$, $\sim 10 \%$	no result
$h_c(1P)$	1^+	$\psi(2S) \rightarrow \pi^0 h_c(1P)$, $(7 \pm 5) \times 10^{-4}$	no result

Results from Belle/Belle II

Belle opened world best constraints of the LFV $K^* l^+ l^-$ modes

$$B(B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ e^-) < 1.2 \times 10^{-7}$$

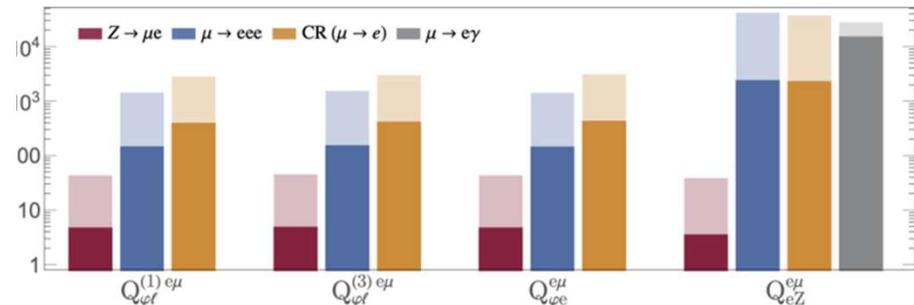
$$B(B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^- e^+) < 1.6 \times 10^{-7}$$

$$B(B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^\pm e^\mp) < 1.8 \times 10^{-7}$$

Belle II can reach 90% of UL at $\mathcal{O}(10^{-8})$ with 50 ab^{-1}

Tomoyuki Konno, CLFV 2019

Expectation from FCC-ee/CEPC, and a comparison in EFT.



L. Calibbi, X. Marcano and J. Roy, Eur. Phys. J. C 81 (2021) 1054

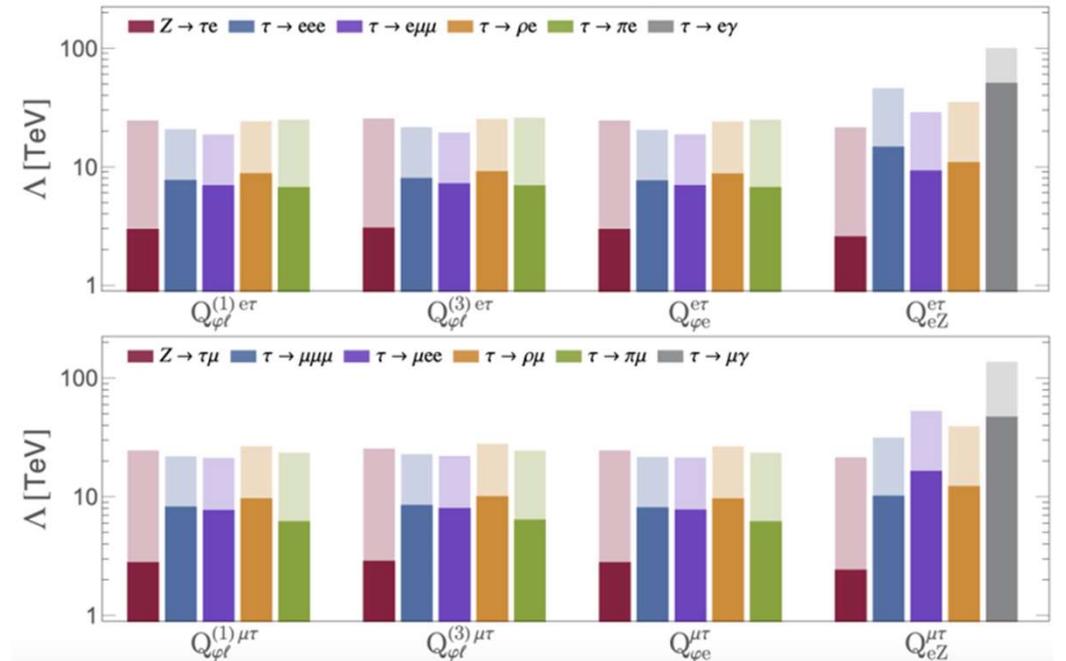
Transitions with τ in the final state

Current limits: [arXiv:2203.14919](https://arxiv.org/abs/2203.14919)

Channel	Upper limit	Experiment [Ref.]
$J/\psi \rightarrow e^\pm \tau^\mp$	7.5×10^{-8}	BES III 108
$J/\psi \rightarrow \mu^\pm \tau^\mp$	2.0×10^{-6}	BES 109
$B^0 \rightarrow e^\pm \tau^\mp$	2.8×10^{-5}	BaBar 110
$B^0 \rightarrow \mu^\pm \tau^\mp$	2.2×10^{-5}	BaBar 110
	1.2×10^{-5}	LHCb 62
$B^+ \rightarrow \pi^+ e^\pm \tau^\mp$	7.5×10^{-5}	BaBar 111
$B^+ \rightarrow \pi^+ \mu^\pm \tau^\mp$	7.2×10^{-5}	BaBar 111
$B^+ \rightarrow K^+ e^\pm \tau^\mp$	3.0×10^{-5}	BaBar 111
$B^+ \rightarrow K^+ \mu^\pm \tau^\mp$	4.8×10^{-5}	BaBar 111
$B^+ \rightarrow K^+ \mu^- \tau^+$	3.9×10^{-5}	LHCb 63
$B_s^0 \rightarrow \mu^\pm \tau^\mp$	3.4×10^{-5}	LHCb 62
$\Upsilon(1S) \rightarrow e^\pm \tau^\mp$	2.7×10^{-6}	Belle 112
$\Upsilon(1S) \rightarrow \mu^\pm \tau^\mp$	2.7×10^{-6}	Belle 112
$\Upsilon(2S) \rightarrow e^\pm \tau^\mp$	3.2×10^{-6}	BaBar 113
$\Upsilon(2S) \rightarrow \mu^\pm \tau^\mp$	3.3×10^{-6}	BaBar 113
$\Upsilon(3S) \rightarrow e^\pm \tau^\mp$	4.2×10^{-6}	BaBar 113
$\Upsilon(3S) \rightarrow \mu^\pm \tau^\mp$	3.1×10^{-6}	BaBar 113
$Z \rightarrow e^\pm \tau^\mp$	5.0×10^{-6} (*)	ATLAS 69
$Z \rightarrow \mu^\pm \tau^\mp$	6.5×10^{-6} (*)	ATLAS 69
$H \rightarrow e^\pm \tau^\mp$	0.47% (*)	ATLAS 65
	0.22% (*)	CMS 66
$H \rightarrow \mu^\pm \tau^\mp$	0.28% (*)	ATLAS 65
	0.15% (*)	CMS 66
	26% (*)	LHCb 64

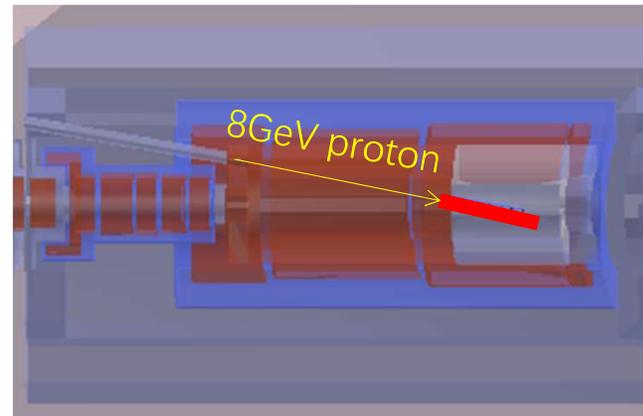
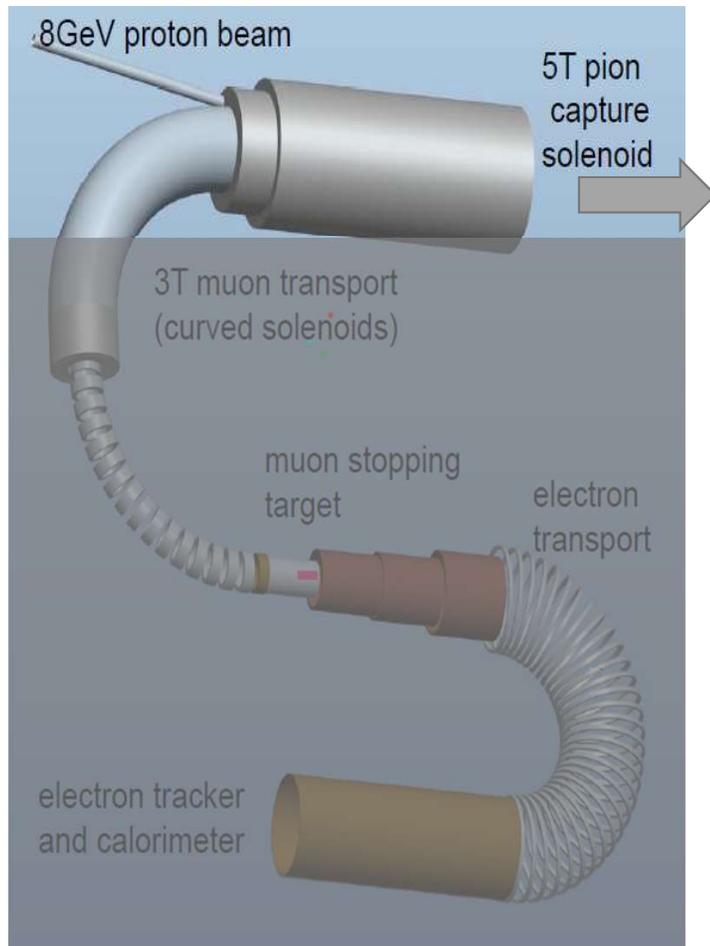
Expectation from FCC-ee/CEPC, and a comparison in EFT.

- High energy processes keep competitive with low energy ones!



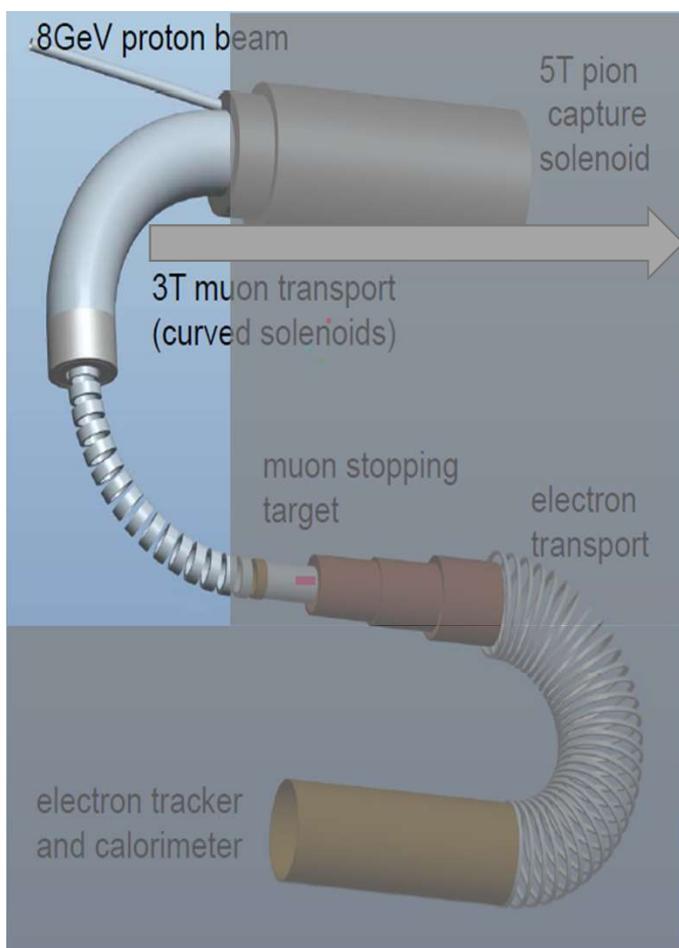
L. Calibbi, X. Marcano and J. Roy, Eur. Phys. J. C 81 (2021) 1054

产生靶和俘获磁铁

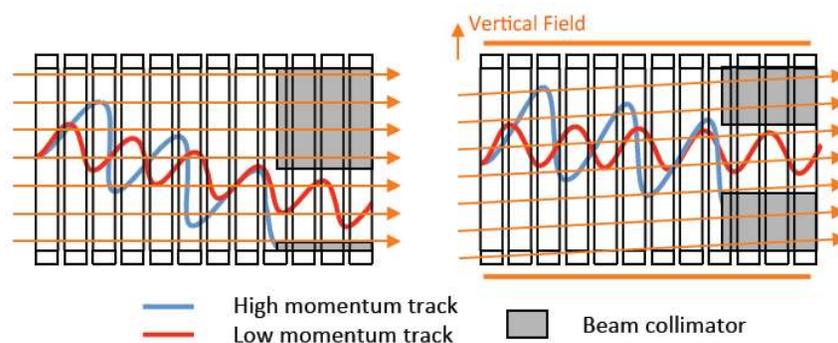


- 以10度倾角引入8 GeV质子束
- 产生靶需要有相当于1个以上强相互作用自由程的长度
- 超导线圈提供5 T强磁场俘获 π
 - 俘获效率近似正比于磁场强度
 - 需要大的内径以容纳热屏蔽材料
- 56 kW下的缪子源预期亮度 10^{11} muon/sec! (10^8 @ PSI)

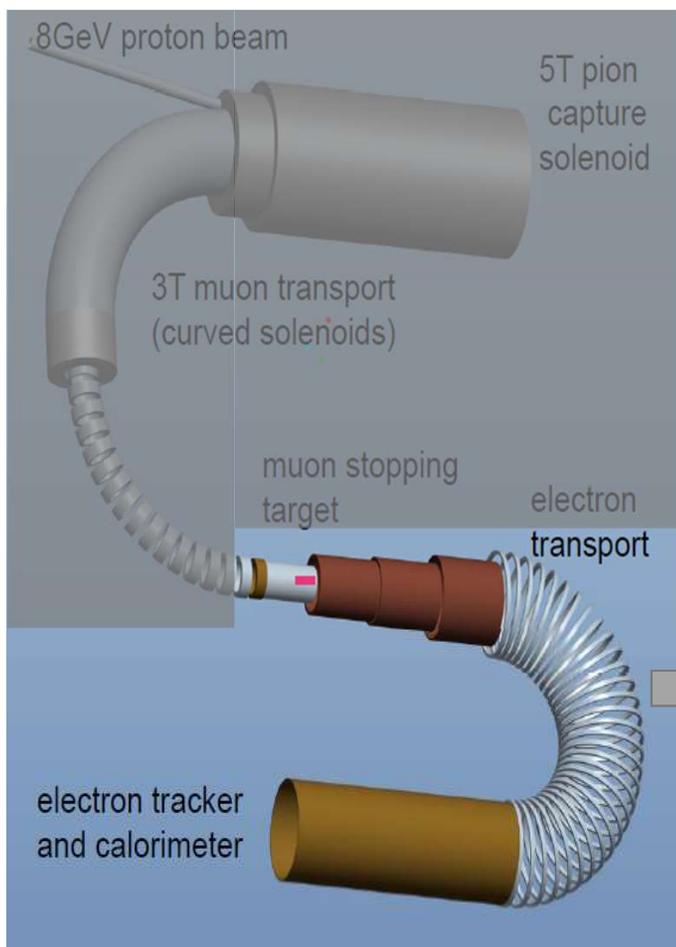
缪子输运线



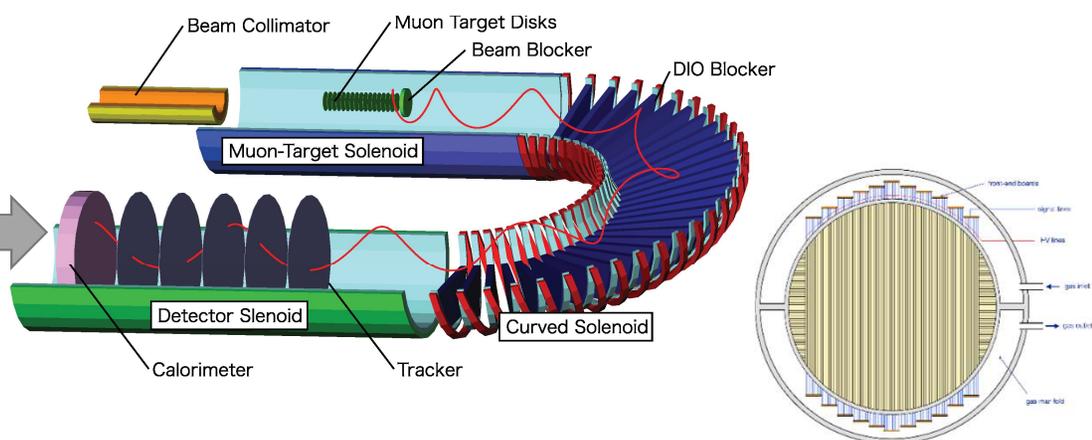
- 利用C形弯曲螺线管筛选束流粒子
 - 在弯曲螺线管中，带电粒子逐渐在垂直于弯曲平面方向发生色散
 - 方向由电性决定，大小由动量决定
 - 用二级铁提供的垂直方向磁场提供补偿
 - 将目标动量(~ 40 MeV)的缪子拉回水平面
 - 利用准直器对束流成分进行筛选
 - 过滤掉不必要的高动量粒子和带正电粒子



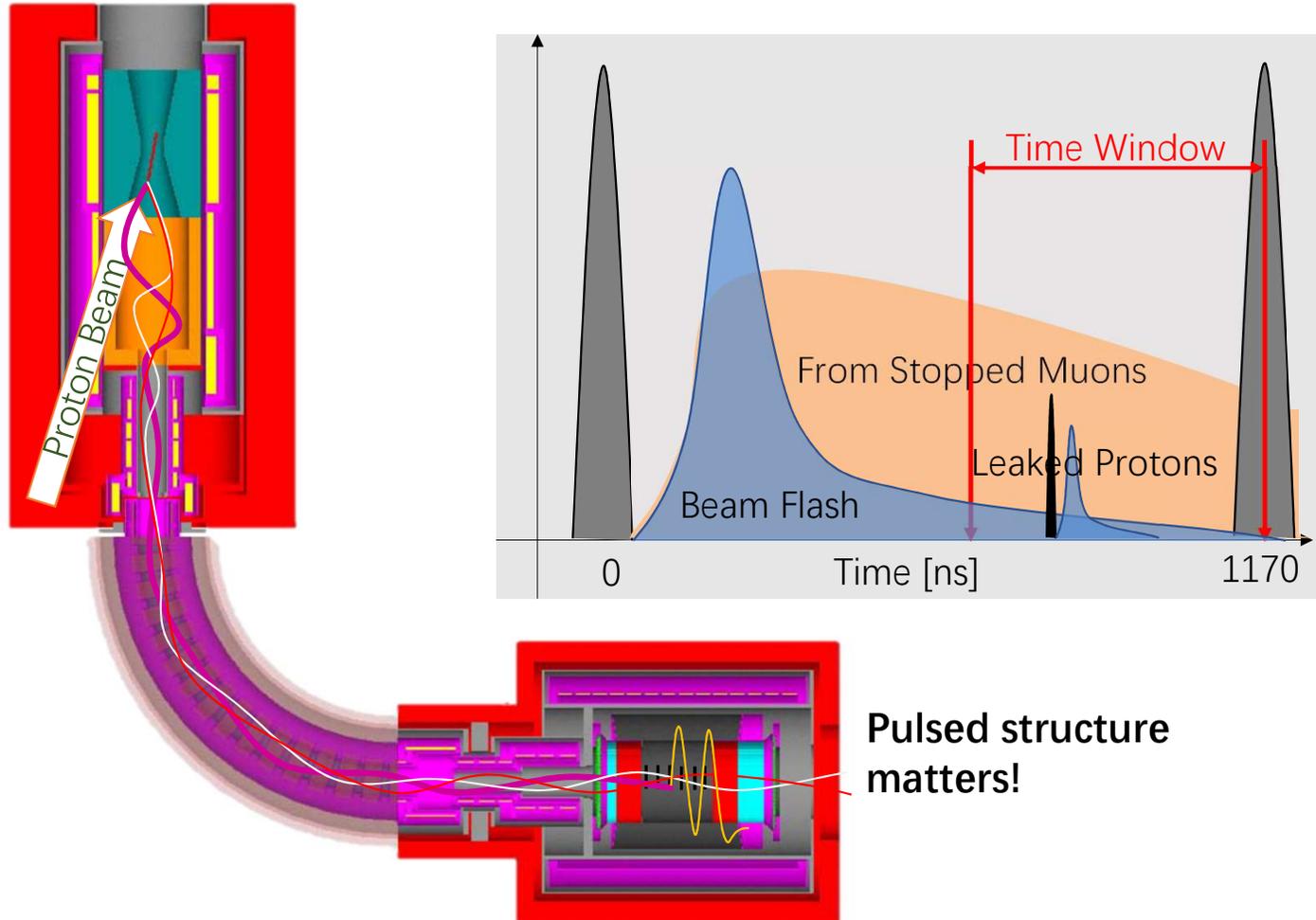
静止靶和探测器系统



- 利用稻草管探测器提供动量分辨
 - 低能电子动量分辨由多次散射过程主导
 - 稻草管探测放置于真空中，管壁厚度仅为12微米。
- 利用晶体量能器提供触发，飞行时间，和粒子鉴别
 - 选用LYSO晶体，保证效率和能量分辨。



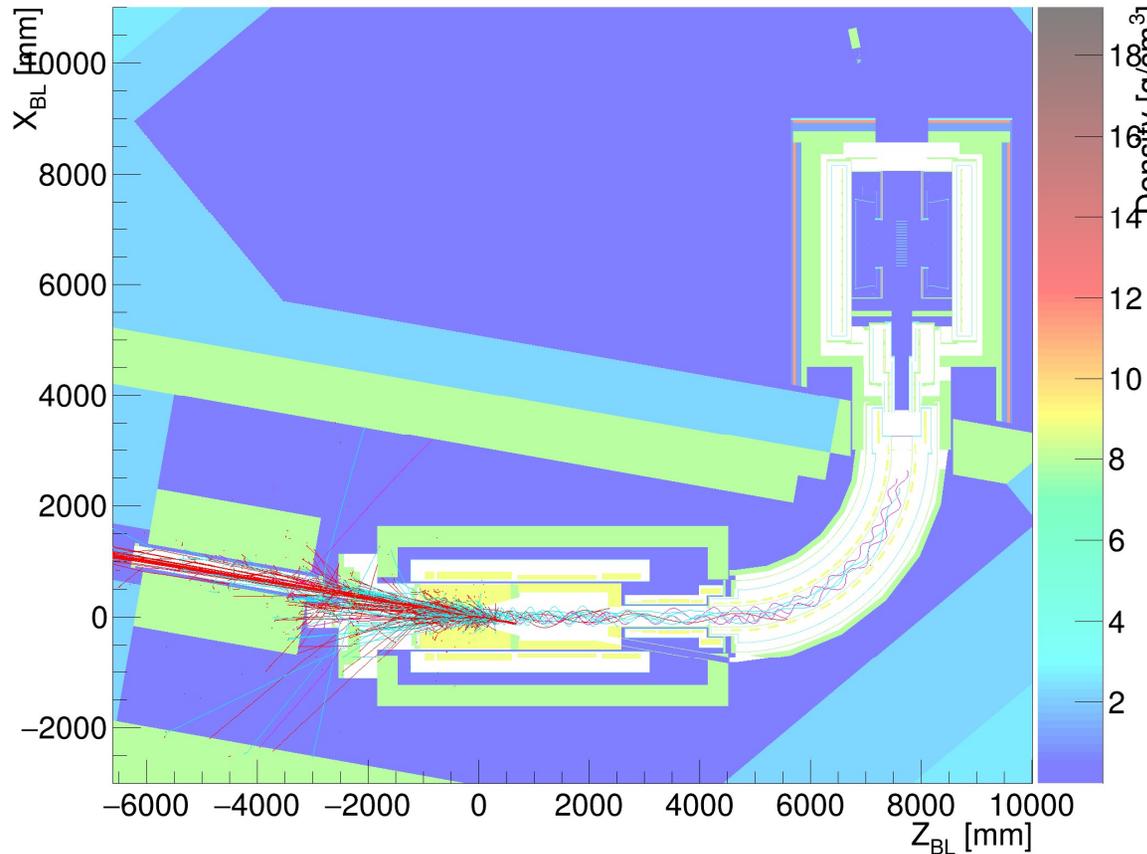
Beam Structure



缪子束流的全模拟，以COMET Phase-I为例

From 100 proton hitting the target

- 径迹颜色
- 蓝色: e^-
- 绿色: e^+
- 紫色: μ^\pm
- 浅蓝色: π^\pm
- 黄色: 光子
- 灰色: 中子
- 红色: 质子
- 黑色: 离子



$\frac{1}{160000}$ 脉冲

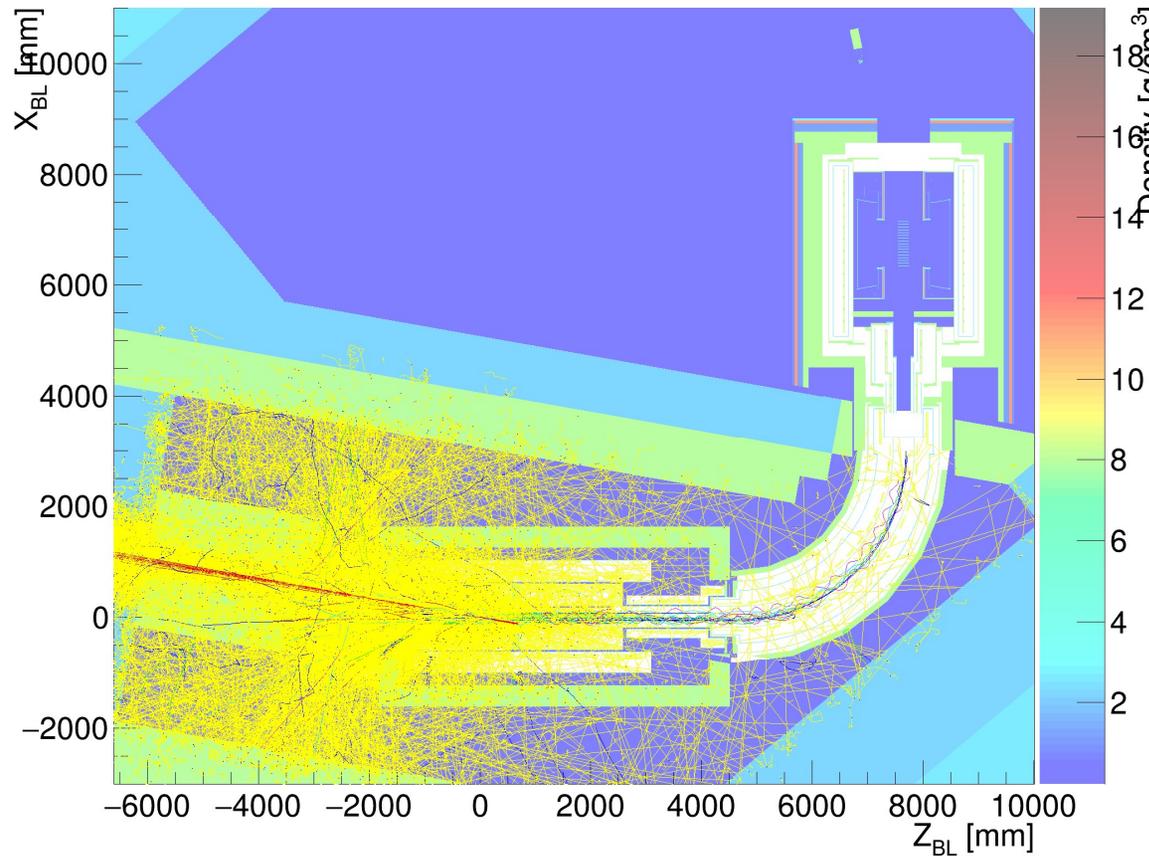
或者 0.00625 ns

只考虑缪子和派介子束流

缪子束流的全模拟，以COMET Phase-I为例

From 100 proton hitting the target

- 径迹颜色
蓝色: e^-
绿色: e^+
紫色: μ^\pm
浅蓝色: π^\pm
黄色: 光子
灰色: 中子
红色: 质子
黑色: 离子



加入电磁辐射后

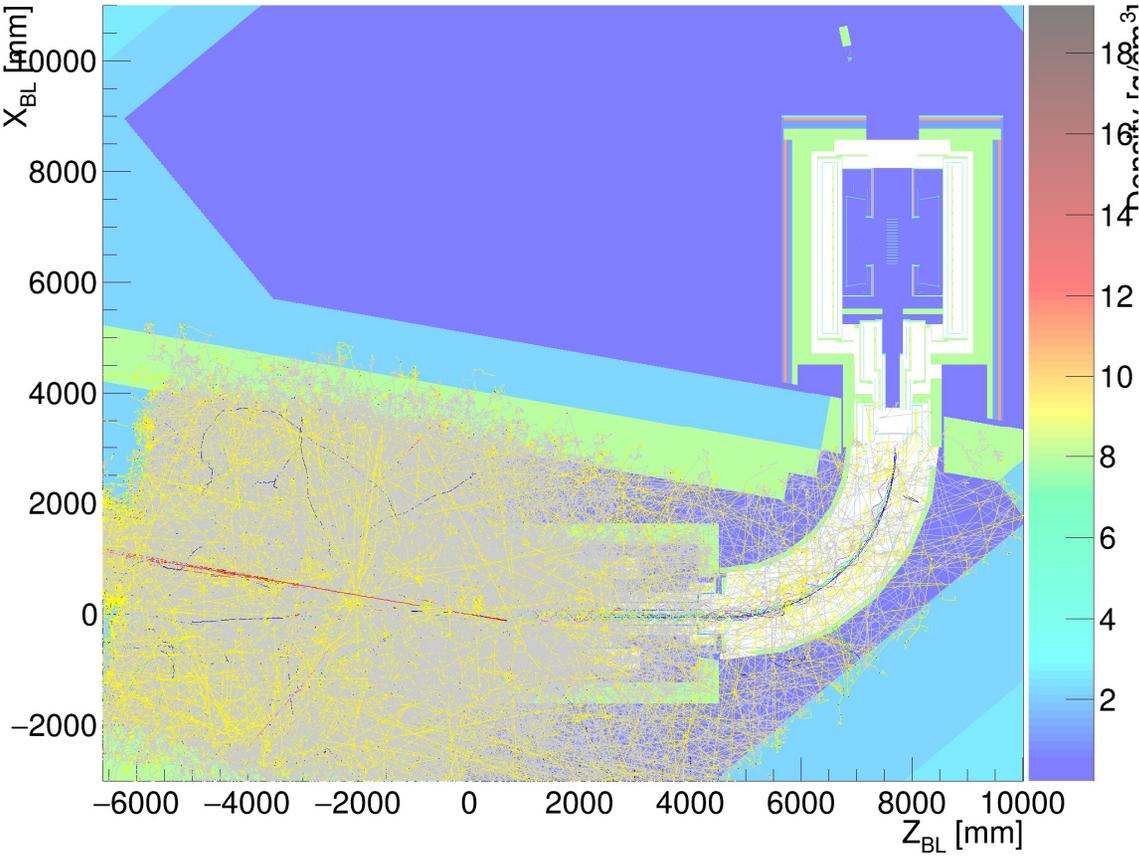
$\frac{1}{160000}$ 脉冲

或者0.00625 ns

缪子束流的全模拟，以COMET Phase-I为例

From 100 proton hitting the target

- 径迹颜色
- 蓝色: e^-
- 绿色: e^+
- 紫色: μ^\pm
- 浅蓝色: π^\pm
- 黄色: 光子
- 灰色: 中子
- 红色: 质子
- 黑色: 离子



加入中子辐射后

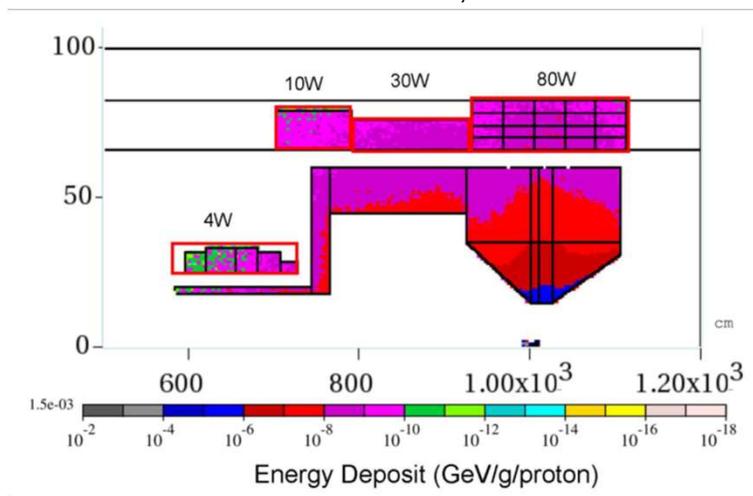
$\frac{1}{160000}$ 脉冲

或者0.00625 ns

超导线圈上的辐射和热沉积问题

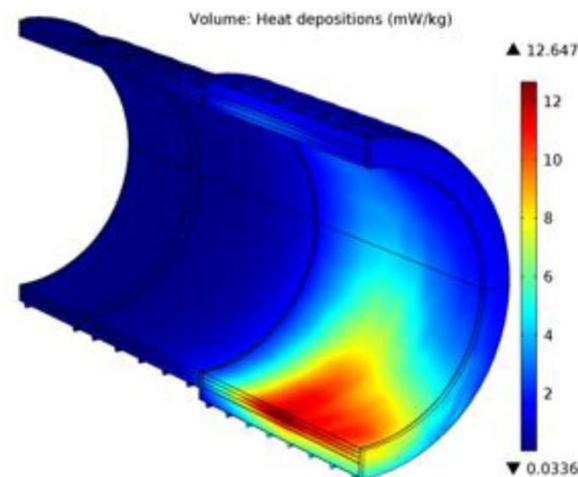
- COMET和Mu2e都选择了1~1.2米口径的线圈，并利用厚度为45厘米左右的钨（铜）做屏蔽，降低超导线圈上的辐射和热沉积水平。
- 线圈的散热设计需要在安全范围内承受 $16 \mu\text{W/g}$ 的热沉积。
- 由于辐射损伤的存在，必须选择铝基稳定器，通过升温淬火的方式消除晶格位移。

COMET Phase-II, 56 kW



$16 \mu\text{W/g}$, a neutron flux of 1.5×10^{21} neutrons/m² in COMET Phase-II

Mu2e, 8 kW



$16 \mu\text{W/g}$, 350 kGy/yr

产生靶上的辐射和热沉积问题

COMET Phase-I (3.2 kW) 产生靶由IG-43号石墨制成

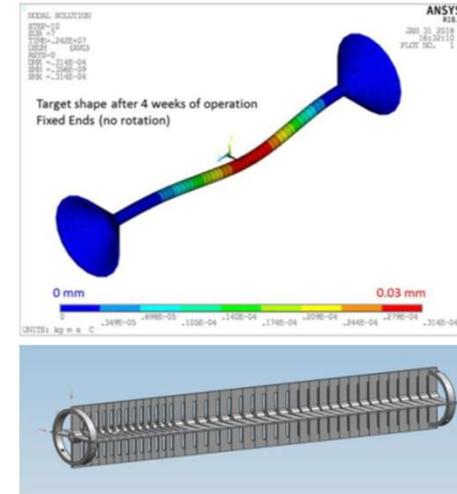
- 不需要主动冷却

COMET Phase-II (56 kW) 产生靶由钨制成

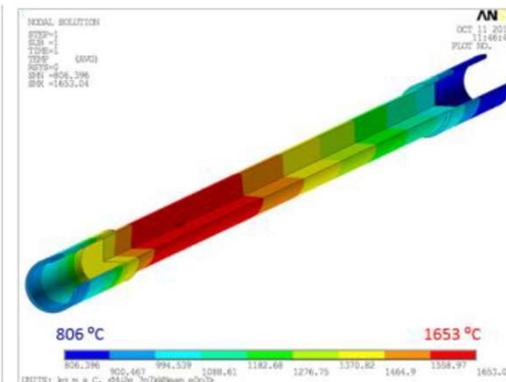
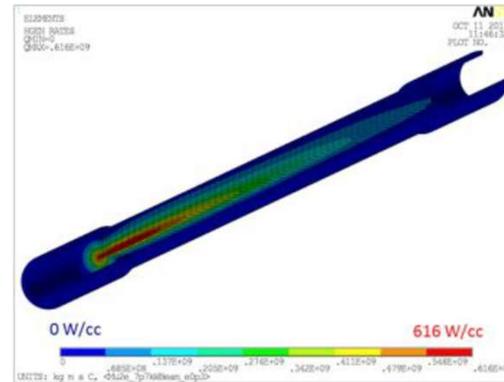
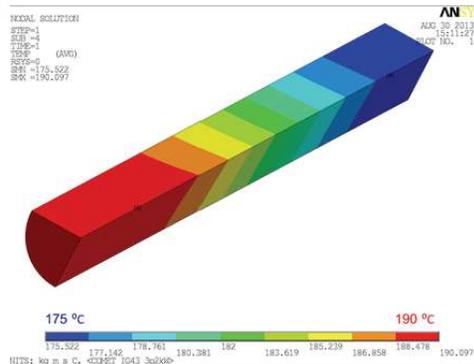
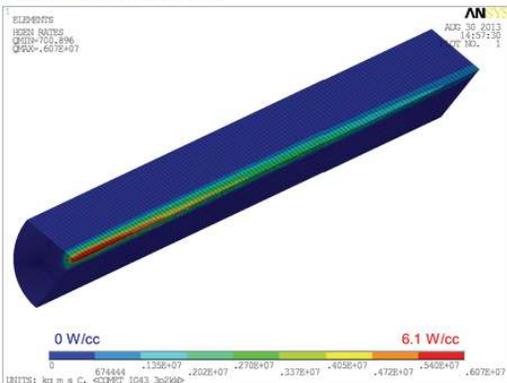
- 需要主动冷却 (水冷系统)
- 在考虑其他的特殊材料

Mu2e (8 kW) 产生靶由钨制成

- 不需要主动冷却
- 但是存在氧化钨侵蚀问题
 - 0.12 mm/year at $10^{-5} Torr$.
- 引入鳍状结构增加散热和力学稳定性
 - 降低了缪子产额

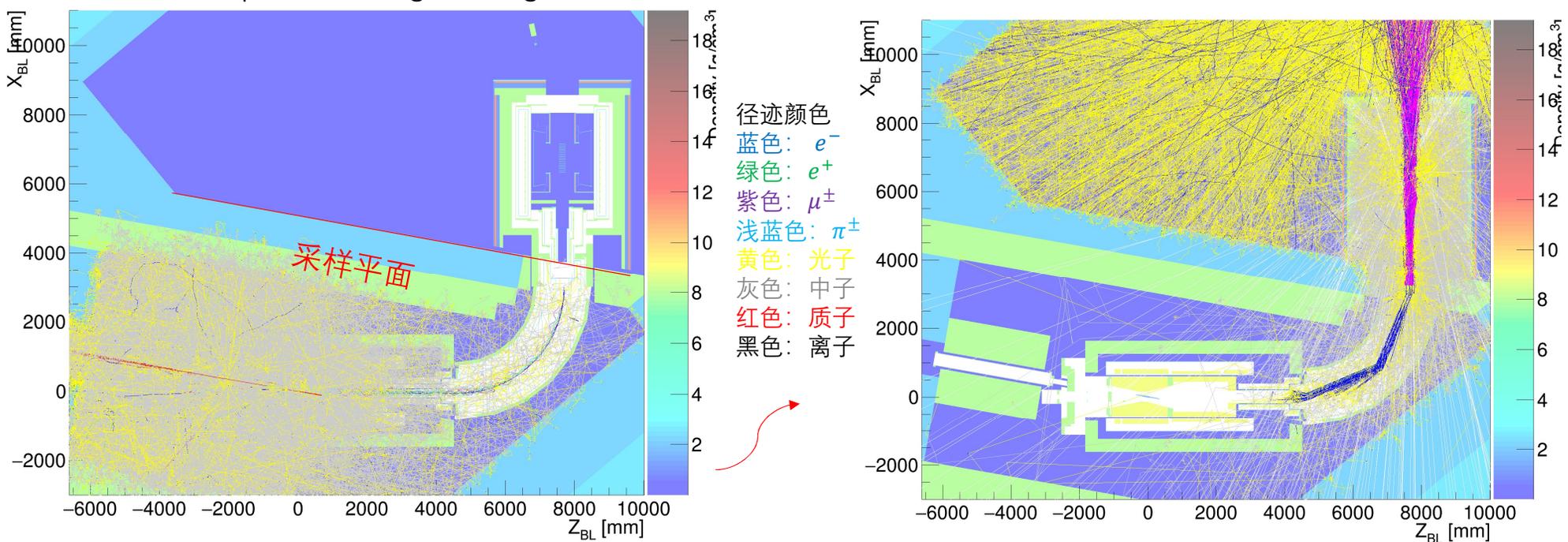


Simulation Results



探测器端的辐射问题

From 100 proton hitting the target



$\frac{1}{160000}$ 脉冲, 或者 0.00625 ns

在采样面积累10000倍样本, 放入第二部分模拟

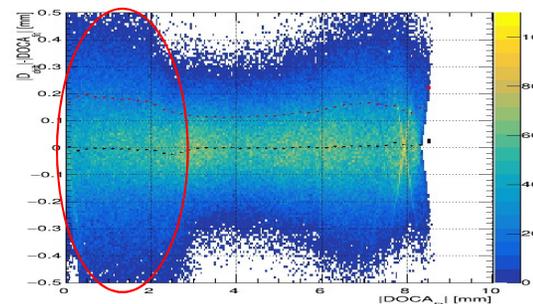
$\frac{1}{16}$ 脉冲, 或者 62.5 ns

* 图片中样本量的选择处于视觉效果考虑。模拟研究用到了~300个脉冲的全模拟

漂移室原型机测试

- 分析结果显示，空间分辨的成份有奇怪的位置依赖
 - 无法用已知误差来源解释。阻碍了成分分析。
- 排查后发现，该结构来自电子学中触发时间的采样误差
 - 利用模拟完美复现并解释了该结构。
 - 利用对击中模式的挑选可以有效控制该误差成份的影响。

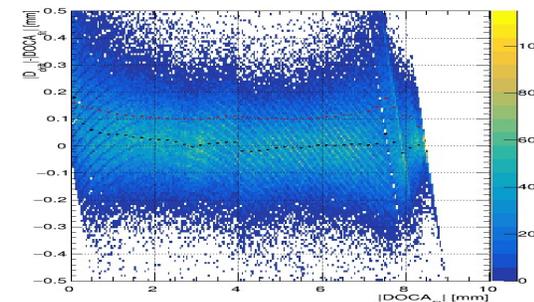
数据中的残差分布



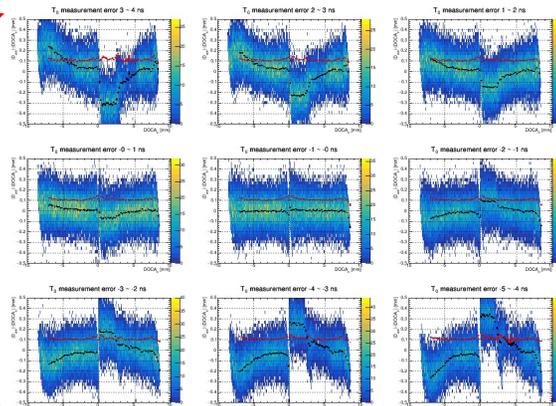
模式挑选后



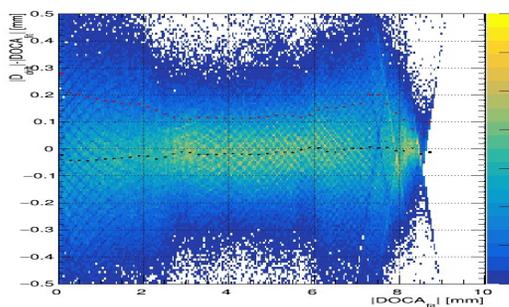
干扰成分消失!



可分解为不同触发时间偏差下的残差分布

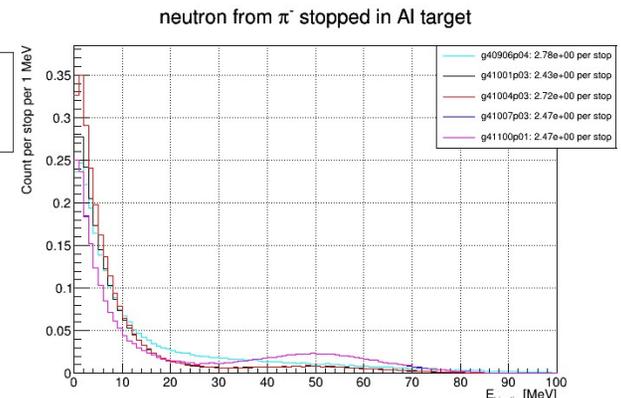
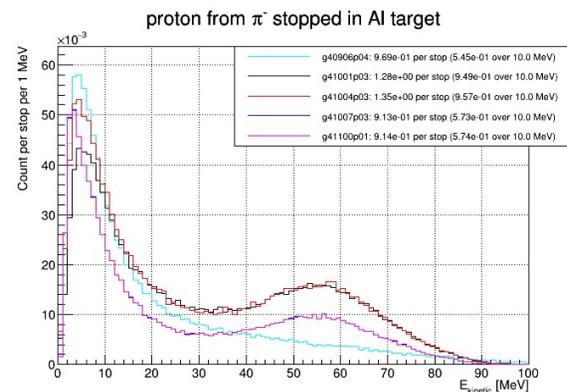
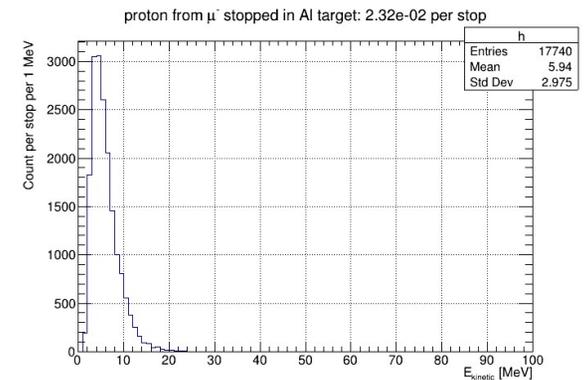
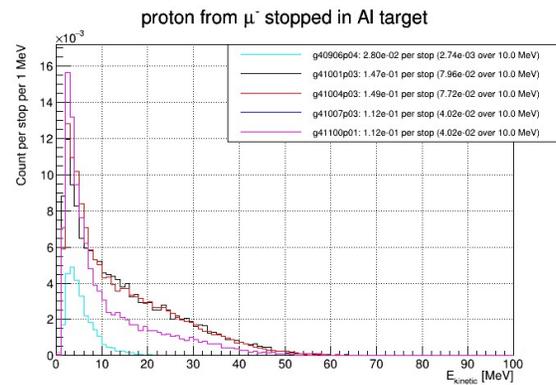


带触发时间采样误差的模拟中残差分布



The nuclear capture models in Geant4 are mostly questionable

- For muon capture, we performed direct measurement at PSI (AlCap, with Mu2e group). The measured spectra were implemented as new physics models.
- For pion capture, recent updates caused concerns.
 - Further investigations needed.



The neutron scattering model

- The neutron radiation level is very important to guide the design.
- Some part of the scattering model in Geant4 doesn't seem correct.
- Comparisons with other simulations tools are under investigation.

