arXiv:2611.29331v1 [physics.ins-det] 22 Nov 2026

用于 FCC-ee 的混合闪烁体条–漂移管缪子探测器的研制

Jiajin Ge[a]代表密歇根大学 FCC-ee 研发团队

[a]密歇根大学物理系，美国密歇根州安娜堡

电子邮箱：jiajinge@umich.edu

未来环形对撞机（FCC-ee）是一项拟议中的高亮度 e^+e^- 对撞机，旨在电弱、希格斯和顶夸克能标开展精密测量。高性能且具成本效益的缪子系统对于缪子鉴别、触发、动量测量和长寿命粒子探测至关重要。我们介绍一种混合式缪子探测器概念的研发，该探测器将快速挤出式塑料闪烁体条带与精密漂移管相结合。闪烁体条由费米实验室制造，而配备SiPM读出和加压漂移管的探测器原型则由密歇根大学设计、建造并集成。该混合式探测器于2025年和2026年在CERN测试束流设施进行了测试。闪烁体条的位置分辨率达到1.6 mm，时间分辨率约为350 ps；漂移管的单击空间分辨率则优于 100 μm。这些结果证明了为FCC-ee研制高性能混合式缪子谱仪的可行性。

1. 引言

未来环形对撞机（FCC-ee）是一项拟议中的高亮度环形 e^+e^- 对撞机，设计运行能量对应于产生 Z 玻色子（~ 91 GeV）、WW对（~ 160 GeV）、 ZH（~ 250 GeV），以及 $t\bar{t}$（~ 365 GeV）。为充分发挥其在电弱、希格斯和顶夸克能标上的精密物理研究潜力，所有正在研发中的FCC-ee探测器概念都需要先进的径迹探测、量能测量和高性能缪子系统 [1]。

为 FCC-ee 开发高性能、经济且稳健的缪子系统，密歇根大学（UM）FCC-ee研发团队提出了图1所示的混合式探测器概念，将快速挤出式塑料闪烁体条带与精密漂移管相结合 [2]。作为最外层的探测器子系统，缪子探测器可高效地进行缪子鉴别和触发，同时充当强子过滤器。其精密径迹测量可补充内层径迹探测器进行动量测量；对于重建长寿命粒子（LLP）在内层探测器中留下有限信号所对应的径迹，这一能力尤为重要。出色的空间分辨率与时间分辨率相结合，进一步提升了对标准模型以外物理的探测灵敏度：它不仅能够通过飞行时间鉴别大质量稳定带电粒子，还能重建长寿命粒子衰变在大型缪子探测器体积内产生的位移顶点。

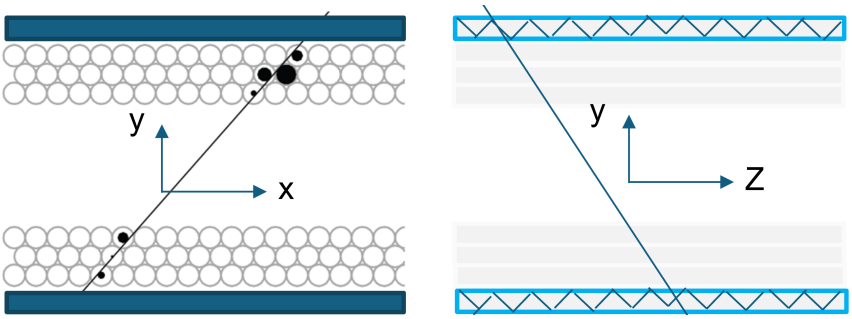


图 1：混合缪子探测器概念示意图：由六层精密漂移管和顶部、底部相互正交的闪烁体条层组成，并展示了一条重建的缪子径迹。左：漂移管横截面。右：漂移管侧视图及三角形闪烁体条横截面。

这两种互补技术都已在大型粒子物理实验中成功验证。ATLAS监测漂移管（MDT）缪子谱仪 [3] 表明，加压铝制漂移管能够实现 80μm 的单管空间分辨率，同时具有出色的长期可靠性。与此同时，D0中央预淋浴探测器 [4, 5]展示了挤出式塑料闪烁体条带在快速计时方面的有效性。尽管其读出依赖低温可见光光子计数器（VLPC），但硅光电倍增管（SiPM）的近期发展提供了一种紧凑、可靠且经济高效的读出方案，使闪烁体条探测器对 FCC-ee 缪子系统尤其具有吸引力。

基于这些成熟技术，我们的研发目标是开发一种高性能缪子系统，实现精确的时间分辨率（σ_t ~ 200，ps）和优于 100μm 的空间分辨率。我们将优化探测器几何结构和读出配置，在保证所需径迹测量和计时性能的同时，尽量减少通道数。

2. 拟议的缪子探测器配置与布局

如图 1所示，每个探测器模块由两个漂移管多层结构组成，两者由一个中央间隔件隔开；模块的上方和下方分别安装了由正交闪烁体条带构成的快速计时层。这种混合设计将精密径迹测量和计时分配给相辅相成的子系统：漂移管在横向（x–y）平面提供高分辨率径迹测量，用于动量测量和位移顶点搜索；闪烁体条则测量纵向（z）坐标并提供精确计时，同时支持低延迟触发和宇宙射线抑制。

为在实验尺度上评估这一概念，我们利用基于GEANT4的DD4hep模拟，在ALLEGRO探测器框架中实现了缪子系统 [6]。探测器模块采用八重方位几何结构，并以重叠方式覆盖，几何接受度超过98%。如图2所示，该设计包括32个桶部模块，分别对称分布于 $+\eta$ 和 $-\eta$ 半球，以及两个端盖轮上的32个模块，共设有27,648个漂移管通道和30,080条双端闪烁体条带，读出通道总数为87,808个。单个探测站即可实现高效的缪子鉴别和量能器尾部捕获，其定时与径迹测量能力还可提高对大质量稳定粒子和长寿命粒子的探测灵敏度。与实验的磁铁系统集成后，还可增加多个探测站，以实现独立动量测量。

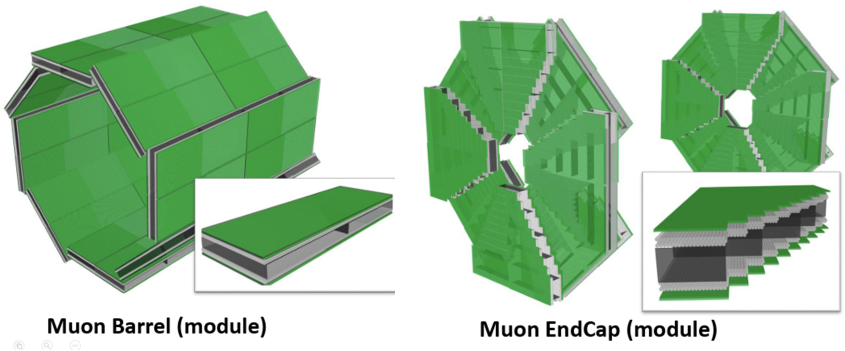


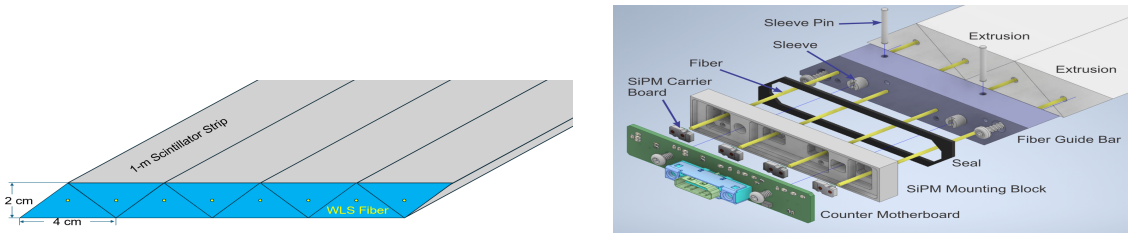
图 2：基于 GEANT4 的 DD4hep ALLEGRO缪子探测器几何结构实现。左：桶部模块，包含直径为 30 mm、长度为 6000 mm、分六层排列的漂移管，以及长度为 2200 mm 的三角形闪烁体条；右：端盖模块，包含长度为 1000–3700 mm 的漂移管和长度为 586–2170 mm 的闪烁体条，且它们的方向均垂直于束流线。

3. 闪烁体条探测器原型与读出电子学

快速计时子系统采用费米实验室研发的挤出式塑料闪烁体条带 [5]。我们两次访问费米实验室，获得了16根大型三角形条带（底边4厘米、高2厘米、长1米）以及若干较小的条带（底边2厘米、高1厘米、长1米），并学习了在UM进行组装所需的制作技术。原型中使用了大型条带，如图3（a）所示。每根条带均包裹反射层：顶部和底部表面镀有TiO_2，侧面则覆以白色Tyvek纸，以最大限度地收集光线并确保光学隔离。三角形横截面使相邻条带能够相互重叠

，从而消除死区，并利用游标电荷共享效应实现精确的击中重建 [7]。每根条带中央都有一个导孔，内置直径为1.5毫米的Kuraray YS-2M或YS-4M波长转换光纤 [8]。

如图3所示，在每个四条带单元的两端均安装了精密加工的光纤导向杆，以固定光纤；光纤端面经过金刚石抛光，以最大限度地提高光子传输效率。定制的硅光电倍增管载板将 Hamamatsu S13360-3075PE 硅光电倍增管（3×3毫米^2、 75 μ米间距）与光纤端部对准，并使用 Cargille 光学凝胶进行耦合。每端的读出印制电路板主板将偏置电压和模拟信号传送至前端电子学；该印制电路板还集成了 LED 校准电路，每个 LED 照明相邻的四条带。两个四条带单元组合形成一个八条带原型模块。



(a) **(b)**

图3： (a) 八条带闪烁体原型模块。三角形条带（底边4厘米、高2厘米、长1米）以交替上下重叠的方式排列，每条带的中央导向孔内均装有一根直径1.5毫米的波长转换光纤。(b) 闪烁体四计数器探测器模块的分解图 [9]。

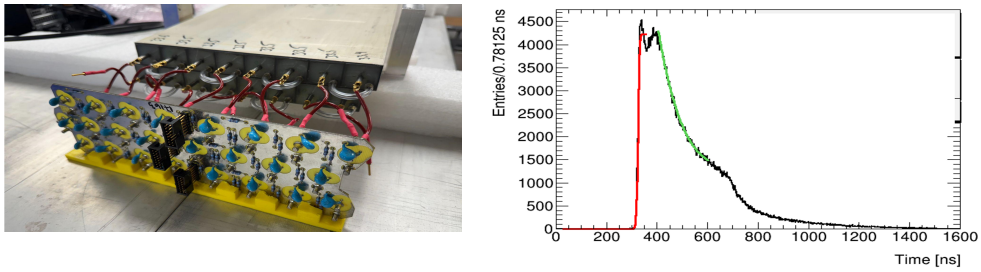
我们采用双端读出方案读取闪烁体条：两个硅光电倍增管的信号到达时间差可得出纵向击中坐标，而平均时间则用于定时测量。硅光电倍增管信号通过 2 m 同轴电缆传输至 CAEN DT5202 前端模块 [10], ，该模块为一台配备两片 Citiroc-1A 芯片的 64 通道设备。每个通道均设有用于单光电子校准的高增益（HG）通道和用于最小电离粒子（MIP）信号的低增益（LG）通道，并包含一个前置放大器、一个带峰值检测器的慢成形器，以及一个后接鉴别器的快成形器。板载 FPGA 的到达时间（TOA）和阈上时间（TOT）分辨率约为 0.25 ns。单台 DT5202 通过以太网连接至 PC；对于更大型的系统，可通过光链路将多台设备串联。

4. 漂移管探测器

气体漂移管凭借机械坚固、长期运行稳定且制造成本低等优点，已广泛应用于对撞束流实验。该径迹子系统采用了 ATLAS MDT 谱仪的成熟技术。ATLAS MDT 使用直径为 30 mm 的铝制漂移管，充入 3 bar 的 Ar : CO_2 (93%:7%) 混合气体，实现了 80 μm 的本征单管分辨率；在运行超过 18 年后，其正常工作通道比例仍达到 99.7%，展现出卓越的可靠性。针对高亮度大型强子对撞机升级，已开发出直径更小（15 mm）的 sMDT，分辨率为 $\sim 82\,\mu$m。

我们正在探索两种互为补充的低成本缪子探测器方案：重复利用现有的 ATLAS MDT 室，以及开发新型低成本矩形漂移管。由于

希格斯工厂对动量分辨率的要求较低，因此 e^+e^- 1 英寸方形漂移管是颇具前景的替代方案。它可以简化探测室的组装，并有望在保持竞争力的性能的同时，将制造成本降低至原来的五分之一。我们制作了一个方形漂移管原型（图 4(a)），并在 UM 使用八层小型漂移管（sMDT）跟踪器作为参考进行了测试，测得的空间分辨率约为 100μm。在 1.65 bar 的工作压力和 2176 V 的电压下，该漂移管表现出较高的电离效率。然而，角落附近的电场畸变使漂移时间响应变得复杂，导致时间数字转换器（TDC）谱中出现拖尾，如图 4b所示。目前的研究着重于优化接地配置并开发校准算法，以减轻这些影响。



(a) **(b)**

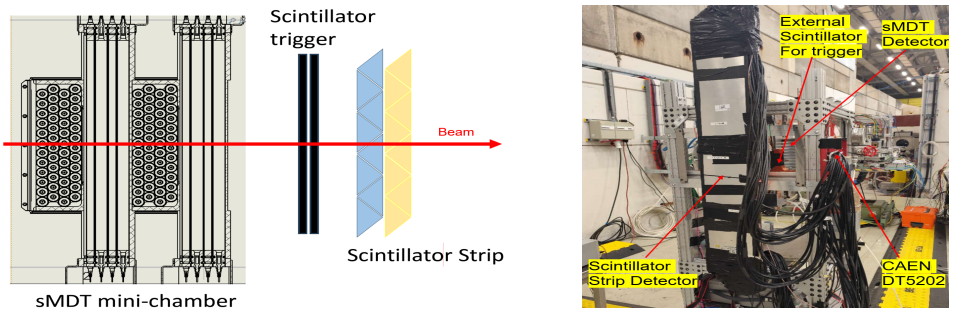
图 4： (a) 1 英寸见方漂移管探测器原型的照片，该原型使用新型 ATLAS MDT电子学进行读出。原型将由法拉第笼屏蔽，以抑制噪声。(b) 使用宇宙射线测得的时间数字转换器（TDC）谱，显示漂移时间分布具有长尾。该长尾归因于方形截面角部附近电场减弱，导致这些区域产生的电离电子收集延迟。

与此同时，UM 已建成一套气体混合系统，用于研究漂移气体组分并探索环保替代方案。使用工作在 3 bar 压力下的 sMDT 室，我们观察到，增加 CO_2 的比例可以提高跟踪分辨率，但代价是漂移时间更长。

5. 测试束流实验及初步结果

在 2025 年 11 月和 2026年3月，利用 10 GeV 强子束流，在欧洲核子研究中心质子同步加速器（PS）的 T9实验设施进行了两次测试束流实验，对已建成的原型模块进行了性能测试。测试束流装置如图 5 所示。装置集成了两个 8 通道闪烁体模块，组成一个 16 通道阵列。精密径迹测量由四个小型 sMDT 室（两个垂直放置，两个水平放置）提供，工作气体为 3 bar 的 Ar： CO_2 （93%:7%）混合气体，工作电压为 +2730 V。这些 sMDT 室的本征三维跟踪分辨率约为 85 μm，可为束流径迹重建提供理想的空间基准。两个外部塑料闪烁体通过符合产生触发。

通过沿条带长度方向移动探测器原型，使其处于8个不同的纵向位置，并在条带宽度方向设置7个横向位置，从而完成了完整的空间扫描。通过将探测器框架相对于束流轴倾斜至 $\pm 30°$，进行了角度扫描。每次移动后，均执行一次LED校准运行，以便为后续数据处理提供逐通道增益校准，如图6a所示。横向位置上的光产额与束流位置的关系（图6b）显示为92 PE/cm。



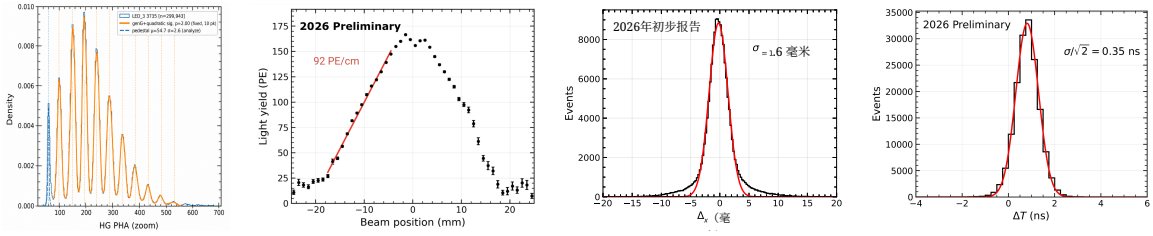
(a) **(b)**

图 5： (a) 测试束流装置的俯视图。四个小型 sMDT 室提供三维径迹测量，两个垂直放置的 8 通道闪烁体条探测器采用双端 SiPM 读出，用于时间测量。两个外部闪烁体提供符合触发。(b) 装置照片。

横向入射位置通过对触发条带中沉积电荷进行电荷加权平均值重建：

$$x = \frac{\sum_i Q_i x_i}{\sum_i Q_i}, \tag{1}$$

其中 Q_i 是条带 i中的经 LED 标定的 LG 振幅，而 x_i 是条带 i的中心位置，其中 $x_i = x_0 + i \cdot (w/2)$，其中 x_0 是最左侧条带中心的位置， w 是三角形条的底边宽度。通过比较闪烁体重建的击中位置与 sMDT 室给出的参考径迹位置，评估了闪烁体条探测器的空间分辨率。图 6c 展示了一个模块的残差分布；对于在两个相邻条上均有击中的事件，结果综合了条带两端的 LG 测量值。高斯拟合得到的核心分辨率约为 1.6 mm，证明了采用经 LED 标定的振幅进行游标式电荷共享重建的有效性。在 2026年3月测试束流实验中测得的单通道时间分辨率约为 350 ps，如图 6d所示。通过全面的时间走动修正、低噪声电子学和高精度时间测量，预计时间性能将接近 200 ps 设计目标。



(a) **(b)** **(c)** **(d)**

图 6： (a) 高增益（HG）LED 校准谱，显示用于通道增益均衡的单光电子（PE）峰。(b) 三角形闪烁体条上光产额随束流位置的变化。(c) 对于在两个相邻条中均有击中事件，闪烁体条探测器相对于 sMDT 参考径迹的空间残差分布，对应的空间分辨率为 1.6 毫米。(d) 在2026年3月测试束流实验期间测得的单通道时间分辨率，表明时间分辨率约为 350 皮秒。

6. 结论

我们为 FCC-ee 实验开发了一种混合缪子探测器方案，将精密漂移管与快速闪烁体条相结合，以实现高效的缪子鉴别、触发和三维径迹重建。初步设计可提供近乎完整的立体角覆盖，总计包含 87,808 个读出通道。该方案以 ATLAS MDT 技术为基准，同时探索采用 1 英寸方形管作为一种经济高效的替代方案。采用三角形条带和双端 SiPM 读出的两种闪烁体原型，在测试束流中实现了 1.6 mm 的空间分辨率和 350 ps 的初步时间分辨率，证明了这种混合方案用于构建经济高效的 FCC-ee 缪子探测器的可行性。

致谢

我们感谢费米实验室的 Alan Bross 和 Jim Freeman，以及弗吉尼亚大学的 E. Craig Dukes 在闪烁体条原型材料和设计方面给予的协助。本研究部分由美国能源部通过 DE-SC0007859 号资助项目提供支持。

参考文献

[1] *M. Dam*，《*FCC-ee* 希格斯、电弱和顶夸克工厂的探测器要求、设计与技术》，*Nucl. Instrum. Meth. A 1080 (2025) 170648*。[2] *F. Anulli* 等，《面向 *FCC-ee* 的高精度、快速、稳健且经济高效的缪子探测器概念》，*arXiv:2504.10448*。[3] *F. Bauer* 等，《*ATLAS* 缪子谱仪监测漂移管室的建造与测试》，*Nucl. Instrum. Meth. A 461 (2001) 17*。[4] *D0* 合作组，《升级后的 *D0* 探测器》，*Nucl. Instrum. Meth. A 565 (2006) 463*。[5] *A. Pla-Dalmau* 等，《低成本挤压成型塑料闪烁体》，*Nucl. Instrum. Meth. A 466 (2001) 482*。[6] *M. Frank* 等，《*DD4hep*：面向高能物理实验的探测器描述工具包》，*J. Phys. Conf. Ser. 513 (2014) 022010*。[7] *M. Adams* 等，《利用三角形闪烁体条测量最小电离粒子位置的新型探测器技术》，*Nucl. Instrum. Meth. A 378 (1996) 131*。[8] *S. Kodama* 等，《可乐丽新型短衰减时间波长转换光纤的性能》，*Prog. Theor. Exp. Phys. 2024 (2024) 053H01*。[9] *A.D. Bross* 等，《吉萨大金字塔的缪子断层成像》，*Journal of Advanced Instrumentation in Science 2022 (2022)* 280 [2202。08184]。[10] *CAEN Technologies*，《*DT5202 - FERS-5200* 用 *64* 通道 *Citiroc* 台式设备》，*2026*年。