

缪子散射探测及新物理探索

刘承恩¹, 高乐耘¹, 王子健¹, 李金柠¹, 范旻骁¹, 秦梓博¹, 张荣峰¹, 徐宇^{3,4}, 章学恒^{2,3,4}, 李奇特^{1*}, 陈良文^{2,3,4*}, 周辰^{1*}, 李强^{1*}, 孙志宇^{2,3,4}

1. 核物理与核技术全国重点实验室, 北京大学物理学院, 北京 100871

2. 中国科学院大学核科学与技术学院, 北京 100049

3. 先进能源科学与技术广东省实验室, 惠州 516000

4. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000

* 联系人, E-mail: liqt@pku.edu.cn; chenlw@impcas.ac.cn; czhouphy@pku.edu.cn; qliphy0@pku.edu.cn

2025-08-30 收稿, 2025-11-05 修回, 2025-11-06 接受, 2025-11-07 网络版发表

国家自然科学基金(12325504)和核物理与核技术国家重点实验室开放课题(NPT2022ZZ02)资助

摘要 本文介绍了基于缪子散射的科学研究项目PKMu (Probing and Knocking with Muons)及其近期进展, 该项目旨在利用缪子探索超越标准模型的潜在物理现象. 在缪子散射探测暗物质研究中, 项目利用阻性板气体室等高精度缪子径迹探测器, 建立宇宙射线缪子散射实验平台, 开展了为期63天直接探测实验, 通过详细的宇宙射线散射模拟与实测对比, 揭示了宇宙射线多组分对散射信号的贡献, 对缪子和低速暗物质的散射截面给出实测限制; 在缪子散射对暗玻色子与带电轻子味破坏的研究中, 结合高原子序数靶材和缪子-电子散射的实验设计, 模拟结果展现出在亚GeV质量区间及独立参数空间探索中的独特优势. 此外, 对缪子-电子散射中的量子纠缠与Bell不等式进行了模拟分析, 模拟结果显示在GeV能区具备良好的观测条件. 未来, 也将在国内国际缪子源上进行更深入的缪子散射研究. 总体而言, PKMu研究项目不仅提出了新一系列缪子散射实验构想, 还结合模拟与实验验证提供了系统的可行性分析, 为暗物质搜寻、暗玻色子探索及量子力学基础问题研究开辟了新的途径.

关键词 缪子物理, 超越标准模型, 暗物质, 暗玻色子, 带电轻子味破坏, 量子纠缠

缪子在基础物理研究与应用研究中占据着独特的地位. 无论是天然产生的宇宙射线缪子, 还是加速器产生的人工缪子, 都已成为探索宇宙奥秘和未知物理的重要探针. 粒子物理的标准模型(standard model, SM)虽在解释绝大多数实验现象方面表现出色, 但仍存在明显局限, 例如无法说明中微子质量的起源以及暗物质(dark matter, DM)的性质. 为应对这些难题, 理论物理提出了多种超越标准模型的框架, 涉及新的粒子与相互作用机制. 暗物质的本质问题已成为宇宙学与粒子物理的核心科学议题之一. 长期以来, 弱相互作用大质量粒子(weakly interacting massive particles, WIMPs)一直是主流研究范式, 相关实验也已进行了大规模探

索. 然而, 迄今尚未获得其存在的直接证据. 这一结果推动研究重心逐渐拓展至其他合理情景, 其中包括低质量暗物质以及可能与缪子存在特殊相互作用的缪子亲和型暗物质(muon-philic dark matter)^[1-3].

在国际范围内, 缪子散射实验相对较为稀少. 20世纪60~80年代, 欧美曾开展过相关实验^[4], 其研究重点主要集中在原子核性质的探测. 当时标准模型尚未完全建立, 利用缪子探索新物理(如带电轻子味破坏或暗物质搜索)的研究方向尚处于萌芽阶段. 进入21世纪以来, 基于缪子的前沿研究逐渐兴起, 其中具有代表性的是美国的缪子反常磁矩实验, 以及欧洲的MEG^[5]和Mu3e^[6]实验, 它们均聚焦于异常缪子衰变过程, 并主

引用格式: 刘承恩, 高乐耘, 王子健, 等. 缪子散射探测及新物理探索. 科学通报, 2026, 71: 894–903

Liu C-E, Gao L, Wang Z, et al. Probing and knocking with muons and new physics exploration (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 894–903, doi: 10.1360/CSB-2025-5452

要依赖自由缪子或缪子衰变信号。日本的COMET^[7]和美国的Mu2e^[8]实验则致力于研究缪子向电子的转变过程。而我国正在开展的MACE实验则关注正反缪子素之间的转化。与此同时, CERN的NA64实验^[9]和MUonE实验^[10]重新将高能(约160 GeV)缪子用于靶散射研究, 通过缪子与玻色子或电子的散射过程, 探索新物理并测量标准模型中的关键观测量。尽管已有一定进展, 缪子散射仍蕴含着大量尚未深入挖掘的物理问题。值得强调的是, 不同能区的缪子束对应于对不同新物理领域的敏感性, 这为未来实验的拓展提供了重要契机。

随着MELODY、HIAF、CiADS等中国缪子源的建设与发展, 未来在国内开展系统性的缪子物理实验成为可能。例如, 位于广东惠州的“强流重离子加速器装置”(High Intensity Heavy-ion Accelerator Facility, HIAF)中的放射性次级束流分离器(HIRIBL), 预计在未来几年内可产生并输运高强度GeV能区缪子束^[11]。这一进展为利用GeV缪子束开展多样化的前沿物理研究提供了重要契机。

基于这些背景, 北京大学物理学院技术物理系研究团队提出了利用缪子散射探索新物理的方法^[12]。该实验项目命名为PKMu (Probing and Knocking with Muon), 旨在结合缪子散射成像技术与前沿物理研究, 通过对缪子散射的测量研究核物理、标准模型和超出标准模型的新物理。PKMu项目涉及的物理目标可归纳

在图1中, 主要包括如下几个方面: (1) 缪子暗物质探测: 缪子在散射过程中可能出现大角度偏转, 从而揭示新型暗物质存在的迹象^[13,14]; (2) 探测原子轨道电子加速效应: 在固定靶实验中, 高原子序数靶材能够有效地充当电子加速器, 从而提升电子与缪子碰撞时的质心系能量, 利用这个效应可以拓展新物理的探索^[15,16]; (3) 缪子-电子散射: 缪子和靶中电子散射则可作为探测带电轻子味破坏以及暗玻色子的有效途径^[17]; (4) 此外, 在GeV能区对缪子-电子散射进行高精度测量, 还可用于探索量子关联等基础物理问题^[18,19]。

结合技术优势与成本效益的综合考量, 实验选用气体电子倍增器(gas electron multiplier, GEM)^[20]和阻性板气体室(resistive plate chamber, RPC)^[21]作为缪子径迹探测器。GEM属于成熟的气体探测器, 能够对带电粒子位置进行高精度测量, 已在包括CMS实验在内的多项高能物理研究中得到广泛应用^[22,23]。RPC在高能物理实验中也已拥有近50年的使用历史, 其优势在于结构简洁坚固、运行稳定可靠、时间分辨率优异、维护便捷且成本低廉。凭借上述特性, GEM与RPC均能满足宇宙射线测试下缪子径迹探测的实验需求。在高强度束流测试的情况下, 径迹探测器也可升级为GEM、硅微条和低增益雪崩硅探测器(low gain avalanche detectors, LGAD)^[24,25]。

下文将分别介绍目前PKMu项目在各个物理方向的进展和计划。

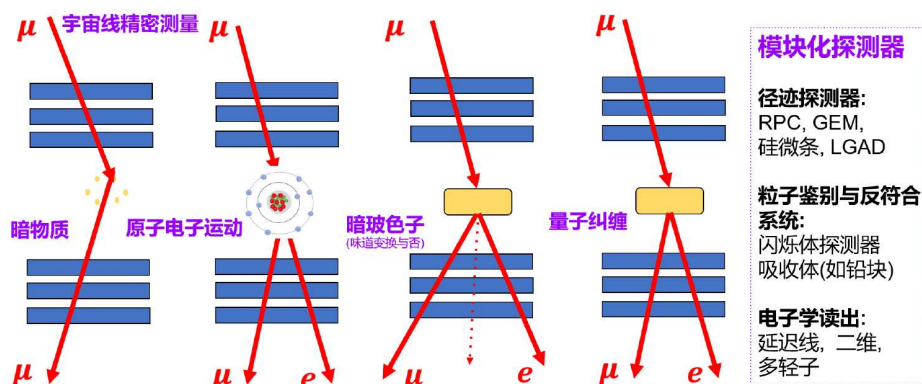


图1 PKMu项目示意图。通过缪子散射可进行宇宙线成分的精密测量, 探寻暗物质, 研究原子轨道电子加速效应; 利用缪子-电子散射研究带电轻子味破坏以及寻找暗玻色子, 并探索量子纠缠等新物理现象。其中, 探测系统由多个模块组成, 主要包括径迹探测器(如阻性板气体室)、粒子鉴别与反符合系统(如闪烁体探测器), 以及电子学读出技术(例如利用延迟线实现二维读出)

Figure 1 Schematic illustration of the PKMu project. Through muon scattering, precision measurements of cosmic-ray composition can be performed, dark matter can be probed, and the acceleration effects of atomic orbital electrons can be studied. Muon-electron scattering is employed to investigate charged lepton flavor violation and to search for dark bosons, while exploring new physics phenomena such as quantum entanglement. The detector system is composed of modular components, including tracking detectors such as the resistive plate chamber (RPC), particle identification and veto systems such as scintillator detectors, and electronic readout techniques such as two-dimensional readout using delay lines

1 暗物质探寻

1.1 基于缪子散射探测暗物质简介

PKMu提出了一种利用宇宙射线缪子或加速器缪子束发生散射,直接探测轻质量暗物质的新方法.首先,可利用自由宇宙射线缪子与暗物质的相互作用,在由跟踪探测器包围的体积内追踪可能的散射事件.其次,可将实验装置与国内或国际缪子束结合.由于缪子束流强度更大、束团更集中,探测器设计可进一步紧凑,从而提升暗物质搜索的灵敏度.图2为缪子散射探测暗物质的示意图,实验装置采用立方体结构,边长在0.1~10 m范围内.立方体内部为真空结构,周围布置径迹探测器.为了抑制背景,可利用入射与出射缪子径迹的交点信息确定散射探测的灵敏区域.

缪子在穿过探测体积时可能与亲缪子的暗物质产生散射.对不同质量的暗物质,缪子产生的散射角分布会有所不同,该特征可作为潜在信号的重要标志.值得注意的是,该实验方案与其他暗物质搜索实验具有互补性,例如XENON1T^[26]和PandaX^[27]中,原子核被视为准静止靶,而暗物质作为入射粒子.PKMu项目所提出的方法在某些特定暗物质情景下显示出优势^[28].在这些情景中,与物质存在强相互作用的暗物质可在地球内部大量积累,并在到达探测器靶之前,通过与大气或地球物质的散射显著减速.此类情况下,暗物质数密度的聚集效应倍增因子可达到约 10^{15} ^[28-32],使对暗物质-缪子散射截面的灵敏度接近微靶恩量级.PKMu项目模拟研究表明,即使在不考虑倍增因子的情况下,利用GEM探测器对1 m³空间进行1年时间的记录,在95%置信区间下宇宙线缪子与亚GeV的暗物质散射截面上限约为 10^{-7} ~ 10^{-9} cm²,流强为 10^6 s⁻¹的100 MeV、1 GeV和10 GeV束流缪子分别与亚GeV的暗物质散射截面上限可达 10^{-9} ~ 10^{-12} 、 10^{-11} ~ 10^{-13} 和 10^{-12} ~ 10^{-13} cm²^[14].

1.2 宇宙射线缪子暗物质探测

研究的第一阶段是利用宇宙射线缪子源建立实验平台,开展原型验证.目前已搭建了一套由四层自主研发RPC组成的缪子散射探测系统,如图3所示.该RPC为二维延迟线读出型大面积玻璃阻性板气体室,其构型于2012年研制完成,能够将宇宙射线缪子的位置分辨率提升至亚毫米量级,同时保持探测效率高于90%^[14,33,34].在现有平台中,四层灵敏面积为28 cm×28 cm的RPC依次以20、50、20 cm的间隔排列,形成

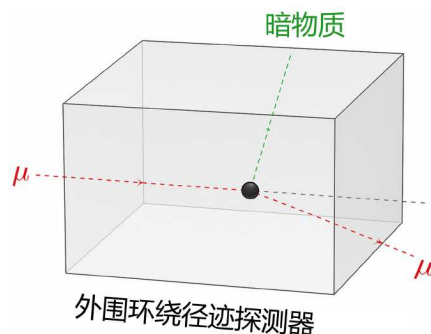


图2 利用缪子散射探测暗物质实验的示意图^[14].由暗物质作用而受到散射的缪子,其运动学偏移可通过环绕真空区域布置的径迹探测器加以测量.沿真空腔体可根据入射与出射径迹的交点定义反符合区域(veto region),以抑制背景事件

Figure 2 Illustration of an experiment to detect DM with muon^[14]. The kinematic shifts of muons scattered by interactions with DM can be measured using tracking detectors surrounding a vacuum region. A veto region along the chamber can be defined based on the intersection point of the incoming and outgoing tracks to suppress background events

完整的宇宙射线测试装置.利用该系统已开展了为期63天对宇宙射线缪子散射连续测试,得到了约118万的事件数^[35].这是首次利用宇宙射线缪子进行暗物质的直接探测实验.

该实验方案基于缪子散射探测系统,通过测量入射与出射缪子轨迹的夹角 θ 以及散射位置,识别潜在的缪子-暗物质相互作用.实验采用Geant4^[36]和CRY (Cosmic-ray Shower Generator)^[37]等模拟程序,构建了与实验装置参数一致的缪子散射探测系统.模拟中分别考虑了宇宙射线缪子在与不同质量暗物质及空气背景相互作用时的散射情形^[35,38].通过对比模拟数据与实验结果,实现本底排除与信号筛选.

PKMu研究结果表明,当散射角超过0.05 rad时,实验数据显著高于模拟预期,提示该角度区间可能存在宇宙线其他成分的贡献.为此,在后续模拟中引入了宇宙线的多种组分,包括缪子、电子、质子、中子、光子、 π 介子及其对应的反粒子.结果显示,大角度散射事件主要来源于电子.进一步对散射点分布的分析表明,无论是在模拟还是实验数据中,均有相当比例的大角度事件记录在RPC上.追踪其成因发现,宇宙线缪子在穿越探测系统时会产生次级粒子,这些次级粒子显著干扰了RPC对缪子径迹位置的测量,从而导致部分散射点被误判为发生在RPC处.此外,研究还表明,实验装置处于室内环境,屋顶厚度对散射点的重建结果有明显影响.模拟中改变室内屋顶厚度后发现,RPC位

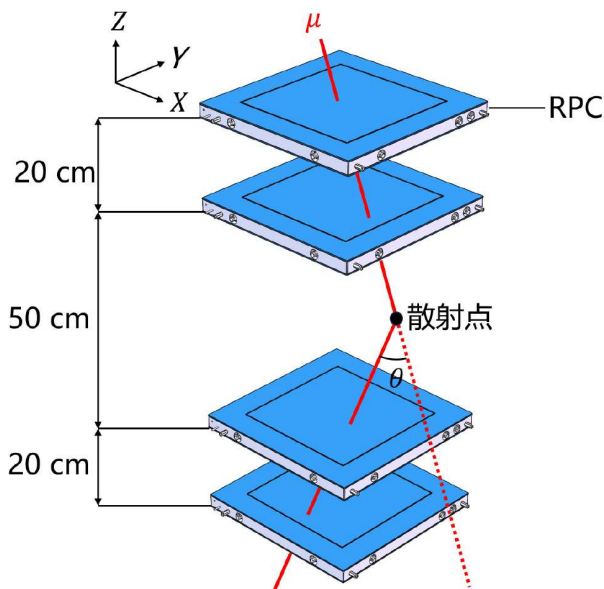


图3 宇宙射线缪子散射成像装置探寻暗物质^[35]。散射成像装置由4层RPC组成, 层间距依次为20-50-20 cm, 通过上两层RPC可重建宇宙射线缪子的入射径迹, 下两层RPC则用于重建出射径迹。利用入射径迹与出射径迹可以确定缪子在探测区域的散射点位置及散射角 θ , 从而识别潜在的缪子-暗物质相互作用

Figure 3 Cosmic-ray muon tomography system for dark matter search^[35]. The tomography system consists of four layers of RPCs, with inter-layer spacings of 20-50-20 cm. The top two RPC layers are used to reconstruct the incoming tracks of cosmic-ray muons, while the bottom two layers reconstruct the outgoing tracks. By analyzing the incoming and outgoing tracks, the scattering point and scattering angle θ of the muons in the detector region can be determined, allowing the identification of potential muon-dark matter interactions

置的散射点分布随之发生显著变化^[39]。

在排除了RPC处的散射事件后, 为探测潜在暗物质, 仅分析散射角在0.05~0.5 rad范围内的事件, 约3.4万个。散射角小于0.05 rad的事件被排除, 原因在于该区域受探测器角分辨率限制较大, 且材料中的多重散射占主导, 使可靠散射信息难以提取, 同时该区域主要由库仑散射支配, 而非暗物质相互作用。散射角大于0.5 rad的事件也被排除, 这主要是因为该部分的统计量有限。模拟数据显示, 在筛选出来的角度区间内, 电子贡献略高于实验观测值, 这可能源于CRY程序提供的电子占比与实际情况存在偏差。尽管对电子和光子等宇宙线组分的测量早在50多年前就已开展, 但当时探测器技术限制导致结果不确定性较大, 约在10%~20%之间^[40-42]。PKMu团队通过RooFit^[43]将模拟得到的各粒子散射角分布与实测散射角分布联合拟合, 重新确定了实验条件下宇宙线各粒子的占比。其中, 缪子

占比为 $(35.1 \pm 5.2)\%$, 电子占比为 $(52.5 \pm 2.5)\%$ 。此处缪子的统计误差约为0.3%, 电子的统计误差约为0.5%, 详细的误差分析可参见文献^[35]。最终, 基于HiggsCombine^[44]对模拟数据与实验数据进行联合分析, 在95%置信水平下, 1 GeV低速暗物质的散射截面限制可达 $1.61 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$ ^[35]。该结果若不考虑倍增因子的影响, 测得的截面上限约为 10^{-2} cm^2 。进一步分析表明, 若能有效利用灵敏区内约60万个宇宙射线事件, 截面上限有望降至 10^{-5} cm^2 ^[35]。

为进一步降低散射本底并提升缪子散射信号的探测灵敏度, 后续工作将在现有实验基础上进行改进, 如引入真空靶室, 以去除空气分子引起的散射本底; 增设粒子鉴别装置, 以确定实验中测得粒子种类; 增加活性靶时间投影室(active target time projection chamber, AT-TPC)及侧向RPC, 增强对大角度散射事件的重建能力和收集效率^[14]。

1.3 缪子束流暗物质探测

我们也可以把装置与国内或国际缪子束连接起来。由于缪子束流强度更大、能量更单一, 我们可以单独设计适用于国内束流装置的缪子散射探测系统(图4), 提高暗物质搜索的灵敏度和准确性。

正在广东省惠州市建设中的HIAF是一台束流指标领先、面向多学科研究的重离子科学装置, 预计最早于2025年底建成并出束。HIAF可加速从质子至 ^{238}U 等多种重离子, 提供高达 $10^{11}/\text{s}$ 的高能离子束流。其上建设的HIRIBL是重要的次级束产生装置, 束线长192 m, 磁刚度最大25 Tm, 可传输动量高达7.5 GeV/c的 π/μ 粒子。研究表明, 基于HIAF-HIRIBL装置可获得流强达 $10^6 \sim 10^7/\text{s}$ 的GeV能区缪子束流, 动量展宽约4%, 束斑直径约10 cm^[11]。

由于缪子束流中常伴随 π 介子等其他粒子, PKMu项目也在持续优化探测器设计以实现粒子鉴别。例如, 通过引入金属吸收层和闪烁体探测器, 可对不同粒子类型进行区分。针对缪子束流散射测量和背景排除的需求, 设计了综合飞行时间(time of flight, ToF)、散射径迹及能量沉积等多测量量的探测系统与粒子鉴别方法。如图4所示, 粒子鉴别功能由缪子散射探测系统前后的两部分探测器承担: 在粒子进入缪子散射探测系统前, 一对薄闪烁体探测器用于测量约100 m距离上的飞行时间, 结合磁刚度对带电粒子动量进行筛选, 从而甄别缪子束流; 在灵敏区域后, 多层铅等重金属吸收层

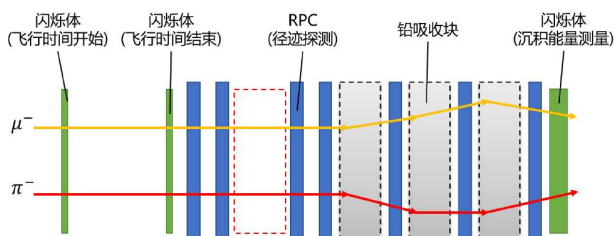


图4 束流缪子散射探测系统示意图

Figure 4 Schematic of the beam muon scattering detection system

与位置灵敏探测器交错排列,并在探测系统末端设置闪烁体探测器进行能量沉积测量。利用缪子在物质中散射角度较小、能量损失较低的特点,可进一步排除缪子衰变及缪子与原子核反应产生次级粒子的干扰。

模拟结果表明,该设计能够有效区分约1 GeV/c的缪子事件与主要背景干扰。以1 GeV/c束流模拟为例,前端飞行时间谱可有效区分同动量下的 e^- 和 π^- 等背景粒子;后段能量沉积谱显示 μ^- 与其衰变产生的 e^- 及次级 π^- 、质子等粒子的响应存在显著差异,表明该设计能够有效抑制主要背景事件。

2 探测原子轨道电子加速效应

由于海森堡不确定性原理,局域在原子核势阱中的原子电子具有特征性的动量分布。在高原子序数元素中,该分布可延伸至相对论量级,典型规模约为 $O(10)$ MeV。因此,在固定靶实验中,原子电子能够有效地充当天然加速器,从而在不改变入射粒子能量的情况下显著提升质心系能量^[15]。这一效应为新型暗玻色子的搜索提供了新的思路:通过选用高原子序数靶材料,可在固定束流能区条件下拓展可探测的质量范围,进而增强新物理研究的灵敏度^[16]。在PKMu实验设计中,计划首先利用宇宙射线缪子与加速器束流缪子分别对铝、铁和铅等高原子序数靶材开展固定靶实验,以在能区对该效应进行验证。随后,将结合该效应开展缪子-电子散射实验,用于探索暗玻色子并进一步研究带电轻子味破坏等相关物理课题。

3 暗玻色子探寻

在最简化的情景下,为使轻质量(亚GeV级)暗物质通过热退耦机制达到当前的残留密度,通常需要引入额外的暗区(dark sector),其中可能包含轻介子。其中一个特别有吸引力的方案是引入新的“暗”矢量规范玻

色子^[45]。此外,许多此类模型还假设暗物质与缪子存在新的微弱相互作用,该相互作用可由标量、赝标量或类矢量粒子介导。

一种简洁而有效的模型类别基于 $L_\mu-L_\tau$ 规范理论^[46~49],其中 L_μ 与 L_τ 分别表示缪子与 τ 粒子的轻子数。该理论引入了一种新的规范对称性,对应的规范玻色子通常具有质量,被称为 $L_\mu-L_\tau$ 规范玻色子或 Z' 。

PKMu对基于缪子打靶实验搜索 Z' 玻色子的潜力进行了初步探讨。所考虑的过程为 $\mu e^- \rightarrow \mu e^- X$,其中 X 发生不可见衰变。该过程的典型实验信号表现为:靶上散射产生的缪子和电子在大角度方向上显著区别于背景分布,同时在相互作用点下游的探测器中几乎不产生活动。该实验方案可依托HIAF-HIRIBL装置提供的1~10 GeV缪子束实施,该装置预计于2025~2026年建成并投入运行^[11]。与现有实验或基于CERN MUonE(160 GeV缪子束)的方案相比,该方法在 Z' 质量约10 MeV区间内展现出更高的灵敏度^[12]。

4 带电轻子味破坏

在标准模型框架下,带电轻子味破坏(charged lepton flavor violation, CLFV)过程的发生率极低,几乎无法在实验中观测。然而,在多种新物理情景中,CLFV的发生率可能显著增强,从而成为检验标准模型和探索新物理的重要探针。其中一种典型模型引入额外的 $U(1)$ 规范对称性,其对应的规范玻色子为带质量的中性玻色子 Z' 。例如,文献^[50,51]提出,该模型中的 Z' 电流在规范耦合和手征结构上与标准模型的 Z 玻色子相似,但允许发生带电轻子味破坏过程,其相互作用可形式化表示为矩阵结构:

$$\lambda = \begin{pmatrix} \lambda_{ee} & \lambda_{e\mu} & \lambda_{e\tau} \\ \lambda_{\mu e} & \lambda_{\mu\mu} & \lambda_{\mu\tau} \\ \lambda_{\tau e} & \lambda_{\tau\mu} & \lambda_{\tau\tau} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

在PKMu实验中,大气正缪子或加速器产生的正缪子束流可与可调靶材料中的核束缚电子发生散射。入射的 μ^+ 与靶电子 e^- 可能发生湮灭,产生 Z' 玻色子,该粒子随后衰变为同一代的带电轻子对,从而引发CLFV。典型过程包括 $\mu^+ e^- \rightarrow e^+ e^-$ 。通过对入射缪子及其产生的轻子对径迹进行分析,可以有效探测或约束CLFV模型的参数空间,基于蒙特卡罗模拟^[17],已利用Geant4^[36]框架开展了初步的可行性研究。

图5展示了不同靶材料下的95%置信水平上限结果。所有事例产额均已归一化至 3×10^{13} 个靶上缪子, 对应约一年的运行量。虽然该实验在低能区的灵敏度低于MEG实验, 但需要强调的是, MEG实验仅能对多种耦合给出整体限制, 例如 $\lambda_{ee}\lambda_{e\mu}$ 与 $\lambda_{e\mu}\lambda_{\mu\mu}$ 的相干组合。然而, 这些耦合项之间可能存在显著的相互抵消, 从而导致部分参数空间未被现有实验有效约束。相比之下, PKMu实验能够独立且明确地探测 $\lambda_{e\mu}\lambda_{\mu\mu}$, 在该参数的探索方面具有独特优势。另一方面, 实验拓展仍面临电子学读出的挑战。探测系统必须能够有效区分同时产生的双电子或双缪子事例, 并对其飞行方向进行高精度测量。为此, 当前的改进方案包括: 将缪子探测器的空间分辨率提升至0.3~0.5 mm, 并设计与优化波形读出算法, 以实现相邻缪子信号的高效解码与重建。

5 量子纠缠

量子纠缠^[52]是量子力学中最具代表性且最具非经典特征的现象之一。它刻画了一类无法由经典理论充分解释的量子关联, 并导致对Bell不等式的违反^[53]。在实验层面, 量子纠缠已通过相关光子与束缚电子体系得到验证。近年来, 在高能物理前沿, 量子纠缠的测量与检验逐渐成为重要研究方向, 其核心途径是研究高能对撞机中产生的粒子体系, 包括 τ 轻子、介子、顶夸克以及规范玻色子等^[54]。值得注意的是, 欧洲大型强子对撞机(LHC)的ATLAS与CMS实验宣布观测到顶-反顶夸克对之间的量子纠缠, 这一结果标志着在最高能量

尺度下对量子纠缠的突破性确认^[55-57]。

量子纠缠的探测通常依赖于“纠缠见证量”, 其中典型指标为纠缠度(concurrence), 可由密度矩阵在适当变换后导出^[18]。对于缪子-电子散射及正负电子散射过程, 密度矩阵可通过散射矩阵元以及实验测得的动量与角分布信息推导得到^[18]。当纠缠度大于零时, 体系即表现出量子纠缠特征。进一步地, 还可基于密度矩阵计算最优CHSH值, 用于检验所得纠缠态是否可能违反Bell不等式^[18]。PKMu团队计划使用前文提到的RPC作为探测器进行实验, 其研发搭建的RPC位置分辨 σ 可达0.5 mm, 单个RPC盒体厚度约为30 mm, 灵敏面积为 $280 \times 280 \text{ mm}^2$, 中间工作气隙为2 mm^[14]。为研究量子纠缠效应, 计划用6块RPC搭建探测系统, 沿束流方向, 前3块RPC重建入射径迹, 探测区域放置靶材如铝, 后3块RPC重建出射径迹。这与研究CLFV的探测器摆放非常类似^[12]。但是目前的模拟工作中暂未考虑探测器响应, 后面的预期结果均为产生子水平。图6给出了在 $\mu^-e^- \rightarrow \mu^-e^-$ 与 $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ 两类过程中的纠缠度及最优CHSH值的计算结果。

对于 μ^- 靶上散射实验, 图6显示入射能量在1~10 GeV范围内事件发生率较高, 且 $I_2 \geq 2$, 散射角主要集中在1~3 mrad区间, 具备良好的观测条件。更为有利的是, 对于 e^+ 靶上散射, 模拟结果表明纠缠强度普遍更大, 且CHSH不等式的违背更为显著。从量化角度来看, 在极端情况下, 量子力学对 $C(\rho_f)$ 和 I_2 的理论上限几乎可达到。上述实验事件率较高, 主要由于散射截面

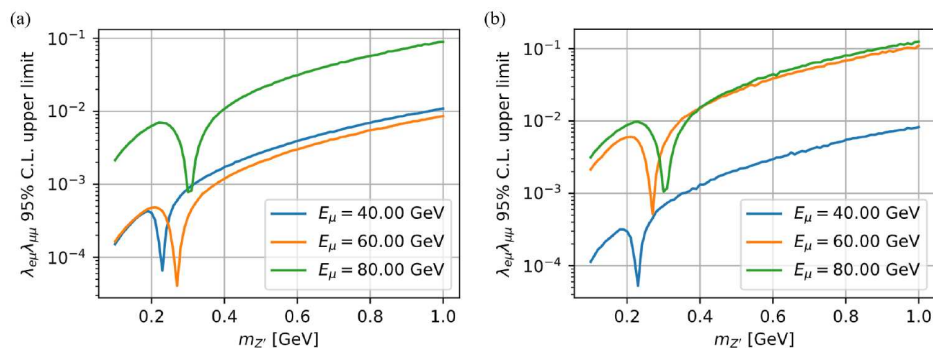


图5 不同靶材料在95%置信水平下的上限结果, 产额已归一化至 3×10^{13} 个入射到靶上的缪子, 对应于一年的运行量。蓝线, 橙线与绿线为不同缪子能量下PKMu的预期结果, 而红线与紫色虚线分别为MEG的实测结果与MEG-II的预期结果。(a) 3 cm Al靶, 带电子甄别; (b) 8 cm Pb靶, 带电子甄别^[12]

Figure 5 95% C.L. upper limit results of various targets. The yields are normalized to 3×10^{13} muons on target, corresponding to a one-year run. The blue, orange, and green lines represent the expected results of PKMu at different muon energies, while the red solid line and purple dashed line correspond to the experimental results from MEG and expected results from MEG-II, respectively. (a) 3 cm Al target, with e-veto; (b) 8 cm Pb target, with e-veto^[12]

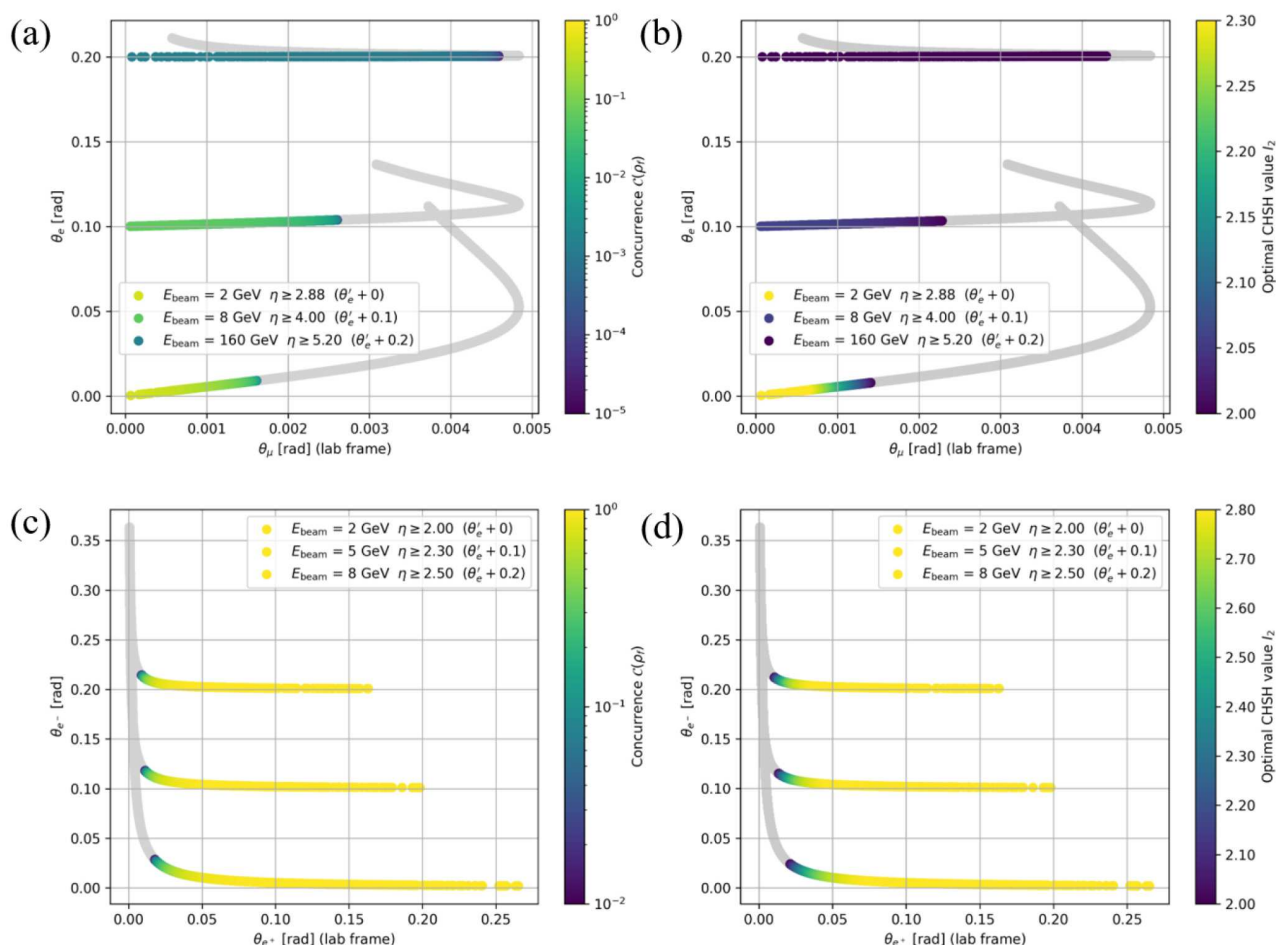


图6 末态散点图, 颜色表示纠缠度 $C(\rho_f)$ 或最优CHSH值 I_2 . 这些图对应实验室系下不同入射缪子/正电子的能量. 浅灰色区域表示或 $I_2 \leq 2$. 事件按照图中标注的最小赝快度要求生成^[12]. (a) $\mu^-e^- \rightarrow \mu^-e^-$, 纠缠度 $C(\rho_f)$; (b) $\mu^-e^- \rightarrow \mu^-e^-$, 最优CHSH值 I_2 ; (c) $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$, 纠缠度 $C(\rho_f)$; (d) $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$, 最优CHSH值 I_2 . 这些结果均为预期结果

Figure 6 Final state scatter plots colored by the concurrence $C(\rho_f)$ or the optimal CHSH value I_2 . These plots correspond to various incoming muon/positron energies in the lab frame. The light gray regions indicate where $C(\rho_f)=0$ or $I_2 \leq 2$. Events are generated with the labeled minimum pseudorapidity requirements^[12]. (a) $\mu^-e^- \rightarrow \mu^-e^-$, concurrence $C(\rho_f)$; (b) $\mu^-e^- \rightarrow \mu^-e^-$, optional CHSH value I_2 ; (c) $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$, concurrence $C(\rho_f)$; (d) $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$, optional CHSH value I_2 . All the results shown here are expected results

较大. 假设使用通量为 $10^5/\text{s}$ 的10 GeV缪子束照射厚度为10 cm的铝靶运行一天, 预期可产生约 2.6×10^4 个纠缠末态事件; 而使用通量为 $10^{12}/\text{s}$ 的1 GeV正电子束照射相同厚度铝靶, 预期纠缠事件率可达 $1.9 \times 10^9/\text{s}$ ^[18].

此外, 在Bhabha散射产物情景下, 末态可近似为Bell态, 其中电子-正电子对自旋的 z 分量在实验室参考系中测量时保持一致. 利用对自旋态的先验信息, 可通过电子-正电子对在次级靶上的极化敏感散射测量纠缠对的极化关联. 正如文献^[18]所示, 针对次级散射产物联合分布的模拟结果表明, 对于100%极化靶, 不同态之间可明显区分, 包括主导Bell态与非极化态的区别. 即使靶极化度降低至20%, 区分能力依然存在. 该测量

方法对统计量的要求较低: 在20%极化靶条件下, 仅需几百秒事件累积即可获得具有统计显著性的结果. 更多细节可参见文献^[18].

6 总结

本文系统介绍了PKMu项目在暗物质探寻、暗玻色子、带电轻子味破坏以及量子纠缠等方向的最新研究进展. 在缪子暗物质探测方面, 首次开展的宇宙射线缪子暗物质散射直接探测实验表明, 在95%置信水平下, 对于1 GeV低速暗物质的散射截面限制可达 $1.61 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$. 在暗玻色子与带电轻子味破坏研究中, 基于高原子序数靶材与缪子-电子散射的实验设计, 展

现了在亚GeV质量区间及独立参数空间探索中的独特优势. 在量子力学研究方面, 模拟结果显示缪子-电子散射为量子纠缠与Bell不等式的检验提供了良好的实验条件. 总体而言, PKMu方法不仅建立了新的实验框架, 而且结合模拟与实验研究验证了其可行性, 为暗物质搜寻、新玻色子探索及量子力学基础问题研究提供了新的途径.

当前, PKMu实验正与中国科学院近代物理研究所HIAF团队紧密合作, 共同推进束流缪子散射装置搭建, 进行暗玻色子探测与量子纠缠测量等前沿研究. HIAF的HIRIBL装置预计将在近年完成束流调试, 并

可提供GeV能量的高品质缪子束流. 与此同时, 正在研制的STCF装置可在束线尾端提供流强高达 $10^{12}/\text{s}$ 的正电子束流, 为正电子-电子散射过程中的量子纠缠研究(包括二次打靶实验)提供充足的统计支撑. 此外, PKMu团队还与MUonE实验团队开展深入合作, 借鉴其在模拟、探测器设计与数据分析等方面的成熟经验. 随着国内高强度缪子源的建成与应用, 以及多方合作的不断深化, PKMu有望在未来开展更大规模、更高精度的实验研究, 从而在暗物质搜寻、新相互作用探索以及量子信息与高能物理的交叉领域开辟新的方向.

参考文献

- 1 Essig R, Giovanetti G K, Kurinsky N, et al. Snowmass2021 cosmic frontier: the landscape of low-threshold dark matter direct detection in the next decade. 2023. arXiv: [2203.08297](#)
- 2 Harris P, Schuster P, Zupan J. Snowmass white paper: new flavors and rich structures in dark sectors. 2022. arXiv: [2207.08990](#)
- 3 Bai Y, Berger J. Lepton Portal dark matter. *J High Energy Phys*, 2014, 2014: 153
- 4 Drees J, Montgomery H E. Muon Scattering. *Annu Rev Nucl Part Sci*, 1983, 33: 383–452
- 5 Afanaciev K, Baldini A M, Ban S, et al. New limit on the $\mu^+ \rightarrow e^+$ decay with the MEG II experiment. *Eur Phys J C*, 2025, 85: 1177
- 6 Hesketh G, Hughes S, Perrevoort A K, et al. The Mu3e experiment. 2022. arXiv: [2204.00001](#)
- 7 Xu Y, Ning Y S, Qin Z Z, et al. Development of a scintillating-fiber-based beam monitor for the coherent muon-to-electron transition experiment. *Nucl Sci Tech*, 2024, 35: 79
- 8 Bernstein R H. The Mu2e experiment. *Front Phys*, 2019, 7: 1
- 9 Andreev Y M, Banerjee D, Banto Oberhauser B, et al. First results in the search for dark sectors at NA64 with the CERN SPS high energy muon beam. *Phys Rev Lett*, 2024, 132: 211803
- 10 Carloni Calame C M, Passera M, Trentadue L, et al. A new approach to evaluate the leading hadronic corrections to the muon g-2. *Phys Lett B*, 2015, 746: 325–329
- 11 Xu Y, Zhang X, Yu Y, et al. The feasibility study of the GeV-energy muon source based on HIAF. 2025. arXiv: [2502.20915](#)
- 12 Gao L, Liu C E, Li Q, et al. Probing and knocking with muons. *Mod Phys Lett A*, 2025, 40: 2530008
- 13 Ruzi A, Zhou C, Sun X, et al. Probing dark matter using free leptons: PKMUON. *Int J Mod Phys A*, 2023, 38: 2350154
- 14 Yu X, Wang Z, Liu C, et al. Proposed Peking University muon experiment for muon tomography and dark matter search. *Phys Rev D*, 2024, 110: 016017
- 15 Arias-Aragón F, Grilli di Cortona G, Nardi E, et al. Atoms as electron accelerators for new physics searches. 2025. arXiv: [2504.00100](#)
- 16 Arias-Aragón F, Darmé L, Grilli di Cortona G, et al. Production of dark sector particles via resonant positron annihilation on atomic electrons. *Phys Rev Lett*, 2024, 132: 261801
- 17 Gao L, Wang Z, Liu C, et al. Probing charged lepton flavor violation in an economical muon on-target experiment. 2024. arXiv: [2410.20323](#)
- 18 Ruzi A, Gao L, Li Q, et al. Testing quantum entanglement via quantum state tomography with muons. *J Phys G-Nucl Part Phys*, 2025, 52: 075002
- 19 Gao L, Ruzi A, Li Q, et al. Testing entanglement between free-traveling electron-positron pairs. *Phys Rev D*, 2025, 111: 116018
- 20 Bouclier R, Capeans M, Dominik W, et al. The gas electron multiplier (GEM). *IEEE Trans Nucl Sci*, 1997, 44: 646–650
- 21 Riegler W, Lippmann C. The physics of resistive plate chambers. *Nucl Instruments Methods Phys Res Sect A-Accelerators Spectrometers Detectors Associated Equipment*, 2004, 518: 86–90
- 22 Abbas M, Abbrescia M, Abdalla H, et al. Quality control of mass-produced GEM detectors for the CMS GE1/1 muon upgrade. *Nucl Instruments Methods Phys Res Sect A-Accelerators Spectrometers Detectors Associated Equipment*, 2022, 1034: 166716
- 23 Pellicchia A, Verwilligen P, Stamerra A. Performance of triple-GEM detectors for the CMS Phase-2 upgrade measured in test beam. *Nucl Instruments Methods Phys Res Sect A-Accelerators Spectrometers Detectors Associated Equipment*, 2023, 1046: 167618
- 24 Peisert A. Silicon microstrip detectors. In: *Instrumentation in High Energy Physics*. Singapore: World Scientific Publishing, 2010. 1–79
- 25 Pellegrini G, Fernández-Martínez P, Baselga M, et al. Technology developments and first measurements of Low Gain Avalanche Detectors

- (LGAD) for high energy physics applications. [Nucl Instruments Methods Phys Res Sect A-Accelerators Spectrometers Detectors Associated Equipment](#), 2014, 765: 12–16
- 26 Aprile E, Aalbers J, Agostini F, et al. The XENON1T dark matter experiment. [Eur Phys J C](#), 2017, 77: 881
- 27 Cui X, Abdurkerim A, Chen W, et al. Dark matter results from 54-ton-day exposure of PandaX-II experiment. [Phys Rev Lett](#), 2017, 119: 181302
- 28 McKeen D, Morrissey D E, Pospelov M, et al. Dark matter annihilation inside large-volume neutrino detectors. [Phys Rev Lett](#), 2023, 131: 011005
- 29 Pospelov M, Ramani H. Earth-bound millicharge relics. [Phys Rev D](#), 2021, 103: 115031
- 30 Leane R K, Smirnov J. Floating dark matter in celestial bodies. 2023. arXiv: [2209.09834](#)
- 31 Berlin A, Liu H, Pospelov M, et al. The terrestrial density of strongly-coupled relics. 2023. arXiv: [2302.06619](#)
- 32 Neufeld D A, Farrar G R, McKee C F. Dark matter that interacts with baryons: density distribution within the earth and new constraints on the interaction cross-section. [Astrophys J](#), 2018, 866: 111
- 33 Li Q, Ye Y, Wen C, et al. Study of spatial resolution properties of a glass RPC. [Nucl Instruments Methods Phys Res Sect A-Accelerators Spectrometers Detectors Associated Equipment](#), 2012, 663: 22–25
- 34 Li Q T, Ye Y L, Ji W, et al. A sub-millimeter spatial resolution achieved by a large sized glass RPC. [Chin Phys C](#), 2013, 37: 016002
- 35 Liu C, Zhang R, Wang Z, et al. Probing cosmic ray composition and muon-philic dark matter via muon tomography. 2025. arXiv: [2507.23458](#)
- 36 Agostinelli S, Allison J, Amako K, et al. Geant4—a simulation toolkit. [Nucl Instruments Methods Phys Res Sect A-Accelerators Spectrometers Detectors Associated Equipment](#), 2003, 506: 250–303
- 37 Hagmann C, Lange D, Wright D. Cosmic-ray shower generator (CRY) for Monte Carlo transport codes. In: 2007 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, 2007, 2: 1143–1146
- 38 Bonomi G, Checchia P, D’Errico M, et al. Applications of cosmic-ray muons. [Prog Particle Nucl Phys](#), 2020, 112: 103768
- 39 Zhang R, Qin Z, Liu C, et al. Revealing secondary particle signatures in PoCA-based muography. 2025. arXiv: [2507.03914](#)
- 40 Beuermann K P, Wibberenz G. Secondary spectra of electrons and photons in the atmosphere. [Can J Phys](#), 1968, 46: S1034–S1037
- 41 Grieder P K F. Cosmic Rays at Earth. Amsterdam: Elsevier, 2001
- 42 Allkofer O C, Knoblich P. The momentum spectra of cosmic-ray particles at sea level in the momentum range (0.05–6) GeV/c. [Lett Nuovo Cimento](#), 1970, 3: 6–8
- 43 Verkerke W. RooFit. [EPJ Web Conf](#), 2010, 4: 02005
- 44 Hayrapetyan A, Tumasyan A, Adam W, et al. The CMS statistical analysis and combination tool: combine. [Comput Softw Big Sci](#), 2024, 8: 19
- 45 Battaglieri M, Belloni A, Chou A, et al. US cosmic visions: new ideas in dark matter 2017: community report. 2017. arXiv: [1707.04591](#)
- 46 Foot R. New physics from electric charge quantization? [Mod Phys Lett A](#), 1991, 06: 527–529
- 47 He X G, Joshi G C, Lew H, et al. New- Z' phenomenology. [Phys Rev D](#), 1991, 43: R22–R24
- 48 He X G, Joshi G C, Lew H, et al. Simplest Z' model. [Phys Rev D](#), 1991, 44: 2118–2132
- 49 Foot R, He X G, Lew H, et al. Model for a light Z' boson. [Phys Rev D](#), 1994, 50: 4571–4580
- 50 Ding R, Li J, Lu M, et al. Study of charged Lepton Flavor Violation in electron muon interactions. [J High Energy Phys](#), 2025, 2025: 165
- 51 Langacker P, Plümacher M. Flavor changing effects in theories with a heavy Z' boson with family nonuniversal couplings. [Phys Rev D](#), 2000, 62: 013006
- 52 Horodecki R, Horodecki P, Horodecki M, et al. Quantum entanglement. [Rev Mod Phys](#), 2009, 81: 865–942
- 53 Bell J S. On the Einstein Podolsky Rosen paradox. [Phys Physique Fizika](#), 1964, 1: 195–200
- 54 Barr A J, Fabbrichesi M, Floreanini R, et al. Quantum entanglement and Bell inequality violation at colliders. [Prog Particle Nucl Phys](#), 2024, 139: 104134
- 55 Aad G, Abbott B, Abeling K, et al. Observation of quantum entanglement with top quarks at the ATLAS detector. [Nature](#), 2024, 633: 542–547
- 56 CMS Collaboration T. Observation of quantum entanglement in top quark pair production in proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV. [Rep Prog Phys](#), 2024, 87: 117801
- 57 Hayrapetyan A, Tumasyan A, Adam W, et al. Measurements of polarization and spin correlation and observation of entanglement in top quark pairs using lepton + jets events from proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV. [Phys Rev D](#), 2024, 110: 112016

Summary for “缪子散射探测及新物理探索”

Probing and knocking with muons and new physics exploration

Cheng-En Liu¹, Leyun Gao¹, Zijian Wang¹, Jinning Li¹, Minxiao Fan¹, Zibo Qin¹, Rongfeng Zhang¹, Yu Xu^{3,4}, Xueheng Zhang^{2,3,4}, Qite Li^{1*}, Liangwen Chen^{2,3,4*}, Chen Zhou^{1*}, Qiang Li^{1*} & Zhiyu Sun^{2,3,4}

¹ State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China

² School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³ Advanced Energy Science and Technology Guangdong Laboratory, Huizhou 516000, China

⁴ Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

* Corresponding authors, E-mail: liqt@pku.edu.cn; chenlw@impcas.ac.cn; czhouphy@pku.edu.cn; qliphy0@pku.edu.cn

The PKMu (Probing and Knocking with Muons) project is an advanced and comprehensive research initiative aimed at exploring potential physics phenomena beyond the standard model through precision studies of muon scattering. The project utilizes high-resolution muon tracking detectors, including resistive plate chambers (RPCs) and other state-of-the-art instrumentation, to establish a dedicated experimental platform for investigating cosmic-ray muon interactions with various materials. Over a sustained 63-day direct detection campaign, extensive measurements were conducted, which were systematically compared with detailed cosmic-ray scattering simulations. This comparison allowed the project team to identify and quantify contributions from multiple cosmic-ray components to the observed scattering signals and to derive experimental constraints on the scattering cross sections between muons and low-velocity dark matter. These results provide the first direct experimental limits in this regime and significantly advance our understanding of possible interactions between cosmic-ray muons and hypothetical dark matter particles in the sub-GeV mass range.

Beyond the direct search for dark matter, PKMu also investigates muon scattering processes relevant to hypothetical dark bosons and charged lepton flavor violation. By employing high-atomic-number target materials and carefully optimized muon–electron scattering configurations, extensive simulation studies demonstrate that the experimental setups possess unique sensitivity for probing previously inaccessible regions of parameter space. These studies indicate that the project can explore the sub-GeV mass region with unprecedented precision, offering potential insights into rare processes that are otherwise difficult to access in traditional high-energy physics experiments. In addition to particle searches, PKMu addresses fundamental quantum mechanical phenomena, including the investigation of entanglement and tests of Bell inequalities in muon–electron scattering. Simulation results suggest that these quantum effects could be observed under realistic experimental conditions at GeV-scale energies, providing a promising platform for precision tests of foundational principles of quantum mechanics in the context of particle physics experiments.

Looking forward, PKMu plans to expand its studies to include both domestic and international high-intensity muon sources, enabling more comprehensive measurements and higher-statistics data collection. Such efforts are expected to improve sensitivity to rare scattering processes, facilitate detailed exploration of new physics scenarios, and allow systematic validation of simulation models against experimental observations. Overall, the PKMu research initiative integrates innovative experimental design, rigorous simulation studies, and direct measurement validation to construct a robust framework for studying novel muon interactions. By combining methodological innovation with thorough feasibility analysis, the project opens new possibilities for probing dark matter interactions, searching for dark-sector particles, investigating charged lepton flavor violation, and performing high-precision studies of quantum entanglement phenomena. The results achieved to date demonstrate the versatility and scientific potential of muon scattering as a tool for investigating physics beyond the standard model, while also laying a solid foundation for future high-precision experiments. In summary, PKMu not only proposes a new class of muon scattering experiments but also establishes a systematic, multi-faceted approach to advancing high-energy and fundamental particle physics, contributing to a deeper understanding of the interactions and underlying structure of matter and the universe.

muon physics, beyond the standard model, dark matter, dark boson, charged lepton flavor violation, quantum entanglement

doi: [10.1360/CSB-2025-5452](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5452)