

缪子物理实验现状及发展前景

唐健¹ 李亮² 袁野^{3,4,†}

(1 中山大学 广州 510275)

(2 上海交通大学 上海 200240)

(3 中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

(4 中国科学院大学 北京 100049)

2021-03-29收到

† email: yuany@ihep.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20210406

Research status and prospect of muon physics experiments

TANG Jian¹ LI Liang² YUAN Ye^{3,4,†}

(1 Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

(2 Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

(3 Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

摘要 寻找超出标准模型的新物理是当前粒子物理学最重要的任务之一。缪子物理实验,包括带电轻子味道破坏,缪子反常磁矩和电偶极矩,缪子素到反缪子素转换等是高强度前沿新物理研究的热点领域。文章介绍了国际上在这一领域开展实验的现状和展望,特别的,介绍了未来在中国开展相关实验的前景。

关键词 缪子物理, 带电轻子味道破坏, 缪子反常磁矩, 电偶极矩, 缪子素

Abstract Search for Beyond Standard Model physics is one of the most important tasks of particle physics. Within the high intensity frontier, muon physics experiments including charge Lepton Flavor Violation, Muon $g-2$ & Muon EDM, muonium to anti-muonium transition are exciting research areas for new physics. The status and prospect of those experiments around the world are introduced in this paper, and especially, the possible breakthroughs from experiments hosted by China in future are showed.

Keywords muon physics, charge lepton flavor violation, Muon $g-2$, electric dipole moment, muonium

1 引言

粒子物理标准模型理论认为物质世界由三代夸克、三代轻子和传递相互作用的玻色子组成。标准模型自建立以来在描述强相互作用、电磁与弱相互作用现象方面经受住了全球粒子物理学家使用各种高精度实验测量发起的极限挑战,理论计算结果与实验观测结果几乎完美符合。随着希

格斯(Higgs)粒子在大型强子对撞机(LHC)上的发现^[1],标准模型预言的所有基本粒子都已在实验中观测到,这毫无疑问宣告了标准模型的巨大成功。但是标准模型远远称不上完美,一些重大基础问题在标准模型的框架内难以解决或者给出解释,比如:规范等级问题(gauge hierarchy),费米子味疑惑(flavor puzzle),以及是否存在强、电磁与弱作用的大统一理论,等等。尤其是标准模型

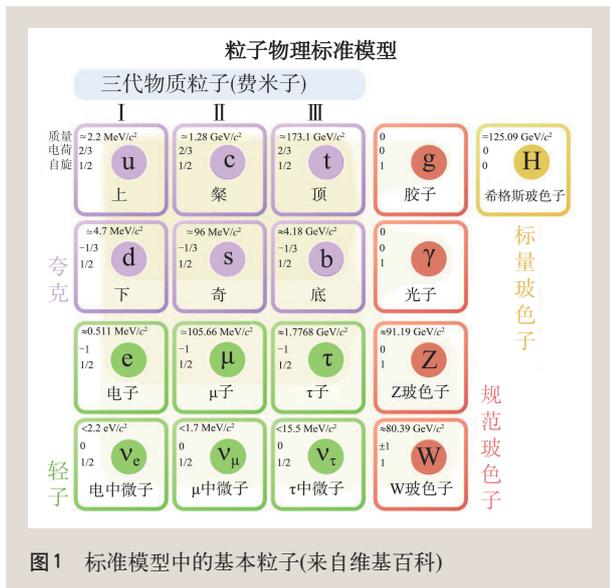


图1 标准模型中的基本粒子(来自维基百科)

的CP破坏机制不足以解释宇宙中正反物质不对称性，它也不能提供暗物质的候选粒子，不包括暗能量。因此寻找超出标准模型的新物理，成为当前粒子物理学最前沿和最重要的课题之一。

粒子物理学在三个研究前沿开展着新物理的寻找工作：高能量前沿、高强度前沿和宇宙学前沿。高能量前沿使用不断提高的质心系能量，通过观测极高能量下粒子相互作用的过程和产物，通过发现新的粒子和作用过程来寻找新物理的直接证据。典型代表是LHC以及未来拟建设的环形正负电子对撞机(CEPC)和国际线性对撞机(ILC)等大型粒子对撞机上的实验；高强度前沿则在相对低的能量区间使用不断提高的束流强度，在极高强度下获得大统计量的数据样本，利用不断突破极限的精确测量去寻找新物理模型预言的稀有过程，通过高精度测量粒子和相互作用的基本物理参数对标准模型预期值进行验证，从而揭示在极高能标处的新物理规律。其代表性成就是电子反常磁矩实验观测值与理论计算值达到了物理学理论和实验符合精度的最高标杆——小数点后11位相同。宇宙学前沿观测宇宙的结构和演化，建立大尺度宇宙现象与微观物理过程的联系。宇宙中存在暗物质、暗能量这一猜测便正是因为宇宙学观测结果与现有物理模型不符，从而有必要引入新的质量和能量来源。

在这三个前沿中，高强度前沿，特别是其中

带电轻子区的寻找具有突出的意义，这是因为：首先，标准模型的三代夸克和三代轻子中，夸克部分的味道混合已经得到实验证实，相关工作获得了2008年诺贝尔奖。中性轻子也就是中微子味道的混合(中微子振荡)同样已经被实验完全观测到，相关工作获得2015年诺贝尔奖。物理学界普遍认为带电轻子存在味道混合是自然的推论，因此进行带电轻子味道破缺(cLFV)的实验有着充分的理由；其次，近几年来，在粒子物理实验中看到一些迹象，暗示实验测量值可能偏离了标准模型的预言值，例如：缪子反常磁矩实验(Muon g-2)的测量值^[2]与其标准模型预言值^[3]存在3.7σ的偏差，B介子的半轻衰变中存在轻子味道普适性破坏的迹象^[4]等等。值得注意的是，这些偏离都与轻子有关，指向带电轻子部分可能存在新物理；此外，高强度前沿与高能量前沿的实验所起的作用是相互补充的。在许多情况下，高精度实验探测的有效能量标度甚至要远远超出高能加速器所能达到的能量。当前技术条件下高强度前沿对新物理的检验其有效能量标度可以达到10⁴ TeV，而目前最高能量的对撞机LHC其质心系能量为14 TeV，即使进行预期中的重大升级之后也只能达到27 TeV。因此，缪子物理实验成为国际上最前沿的热点研究领域之一。

2 缪子与缪子物理

缪子(muon)又称μ子，于1936年由美国加州理工学院的物理学家Carl D. Anderson和Seth Neddermeyer在宇宙射线实验中发现^[5]。他们发现这种粒子带有负电荷，其质量比电子大，比质子小，因而将其称为μ介子，并以为这正是日本物理学家汤川秀树(Yukawa)所预言的强相互作用的媒介子。随着实验结果的不断涌现，人们发现μ子并不参与强相互作用，其性质和后续发现的各种介子完全不同。最终，当标准模型建立时，缪子归类为轻子中的一种，如图1所示。缪子是构成世界最基本的粒子之一，而各种介子反而不是最基本的粒子，是由参与强相互作用的两个夸克组成的束缚态。

缪子及其反粒子分别带有负电荷(μ^-)和正电荷(μ^+), 自旋为1/2, 静止质量为105.658 MeV/c², 约为电子质量的207倍。缪子和其他带电轻子一样带有一个单位电荷, 参与电磁和弱相互作用, 与它们相对应的不带电的中微子(ν_e, ν_μ 和 ν_τ , 以及它们的反粒子)则只参与弱相互作用。在三代轻子中, 电子是稳定粒子不发生衰变; 缪子会衰变为电子且由于质量不够大, 不能衰变成强子。缪子静止寿命为2.2 μ s, 在高速运动状态下会由于相对论效应而延长寿命; 陶子(Tau)又称 τ 子, 其寿命为 2.9×10^{-13} s, 寿命短到在实验中不能被直接探测到。陶子静止质量为1776.86 MeV/c², 可以衰变到强子。只有电子和缪子是实验中可以直接探测的末态轻子粒子。

由于不参与强相互作用并且不会衰变到强子, 与电子和 μ 子($e\mu$)轻子相关的物理过程具有两个重要的特点: (1)理论计算可以达到很高的精度, 甚至达到或超过实验测量的精度, 从而可以进行理论与实验符合程度的高精度验证; (2)相互作用过程末态构成简单清晰, 信号重建质量高, 本底易于排除, 从而在实验上可以达到最高的测量精度。正是由于这两个特点, 与 $e\mu$ 轻子相关的物理过程在高能量前沿和高强度前沿的粒子物理实验分析之中的运用非常普遍, 常用于具有挑战性的探索型实验, 也用于复杂实验的刻度和校准。事实上, 首先证实Higgs粒子存在的两个物理过程之一便是末态为4个 $e\mu$ 轻子的ZZ衰变($H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu/2\mu 2e/4e$)。这两个特点使得缪子物理成为在高强度前沿进行高精度新物理寻找和测量的理想环境。

缪子具有2.2 μ s寿命, 这个时间尺度非常特别, 在不稳定粒子的寿命中仅比中子短, 是它在应用中的重要优势。其寿命足够短, 允许人们通过其衰变对物理特性和衰变过程进行充分的研究; 其寿命又足够长, 使得人们能够以相对经济的方式大量产生、收集、加速或者减速以获得高强度的缪束流, 这为精确测量提供了理想的实验条件。此外, 缪子(μ^-)可以与原子核束缚成缪子原子(μ^-N), 反缪子(μ^+)可以和电子束缚成缪子素(muonium, 简称Mu)。缪子、缪子原子、缪子素

等相关的物理研究课题非常丰富, 并且具有重大的物理意义。典型的与缪子相关的基础前沿物理研究包括: 带电轻子味道破坏(cLFV)过程的寻找, 缪子反常磁矩(Muon g-2)和电偶极矩(EDM)的测量, 缪子素相关物理的研究等。

3 带电轻子味道破坏

在标准模型中, 不同代夸克之间通过带电流发生弱相互作用, 而同电荷夸克之间味改变的中性流过程只发生在量子圈图水平, 几率相对很小。因此, 味改变中性流过程一直是精确检验标准模型、寻找新物理的黄金过程。实验上已经在K、B、D等介子系统中观测到夸克中性流弱作用过程。中微子振荡实验表明不同代轻子之间也会发生弱相互作用。但是, 实验上至今没有观测到带电轻子之间发生味改变的物理过程, 比如 $\mu \rightarrow e\gamma$ 。如果将标准模型做最小扩充, 以容纳中微子质量和不同代轻子之间的带电流弱作用, 上述 $\mu \rightarrow e\gamma$ 衰变的分支比大约是 10^{-54} 水平^[6], 完全不可能在实验上观测到。因此, 如果实验观测到这类过程, 或者能给出更好的上限, 将会有力推动超出标准模型最小扩充的新物理研究。

已知的标准模型框架内缪子的三种衰变模式如下:

$$\begin{cases} \mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu, & \sim 100\% \\ \mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu + \gamma, & (1.4 \pm 0.4) \times 10^{-2} \\ \mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu + e^+ + e^-, & (3.4 \pm 0.4) \times 10^{-5} \end{cases}$$

超出标准模型新物理预言的主要缪子cLFV过程除了 $\mu \rightarrow e\gamma$, 还有 $\mu \rightarrow eee$ 和缪子—电子转换过程 $\mu N \rightarrow eN$ 。事实上, 在缪子发现之后不久, 相关的实验就已经开展。1947年Hincks和Pontecorvo通过分析宇宙射线中的缪子得到 $\mu \rightarrow e\gamma$ 的第一个分支比上限^[7]。之后一系列的实验测量精度不断提高, 其历史进展如图2所示。目前国际上对cLFV过程最精确的结果由瑞士保罗谢勒研究所(PSI)的缪子电子光子实验(MEG)于2017年通过 $\mu \rightarrow e\gamma$ 过程测得, 其90%置信水平分支比上限为 $\mathcal{B}(\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma) < 4.2 \times 10^{-13}$ ^[8]。

3.1 缪子电子光子实验 II 期 (MEGII)

缪子束流强度是制约实验精度提高的主要因素。目前加速器获得缪子束流的方式是通过高能质子束流打靶产生 π 介子，然后收集 π 介子衰变产生的缪子^[9]。PSI的回旋加速器可以产生目前世界上最大功率1.5 MW的590 MeV/c动量连续波质子束流。通过质子打靶并从侧向收集在2016年获得最高强度为 $8 \times 10^7 \mu^+ / s$ ，动量为28 MeV/c的连续

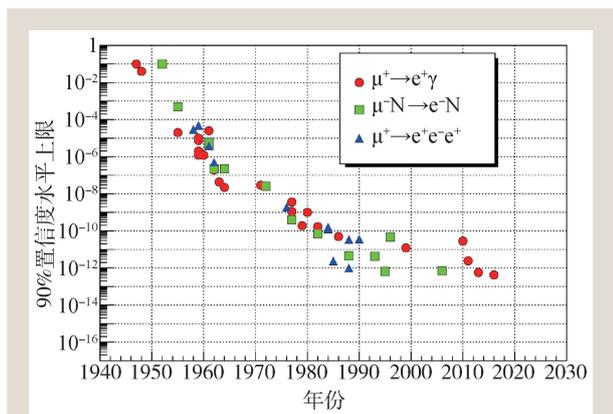


图2 缪子物理cLFV实验结果历史进展

波表面 μ^+ 束流，正在通过改进束线以将强度提高到 $10^8 \mu^+ / s$ 以上。其下一步计划是在2025年建设一条新的强度达到 $10^{10} \mu^+ / s$ 的束线。依托这一条件PSI正在建设下一代 $\mu \rightarrow e\gamma$ 探测实验MEGII^[10]，实验探测器如图3所示。

MEGII与MEG采用类似的探测器设计：缪子停止靶位于探测器中心，超导磁铁提供从中心沿Z向强度逐渐下降的梯形磁场。静止缪子衰变后产生的正电子首先被圆柱形漂移室探测，偏转半径逐渐加大从而在两端穿出漂移室击中像素型时间计数器。光子由外部的液氙量能器探测。

MEGII探测器分辨率相比MEG在各个方面均有一倍左右的提高，例如漂移室位置分辨由210 μm 提高到120 μm ，时间计数器时间分辨由70 ps提高到35 ps，量能器能量分辨由2.4%提高到1.1%，再加上预期使用两倍的累积缪子束流强度，物理目标为2023年将实验灵敏度提高一个量级到 4×10^{-14} 。

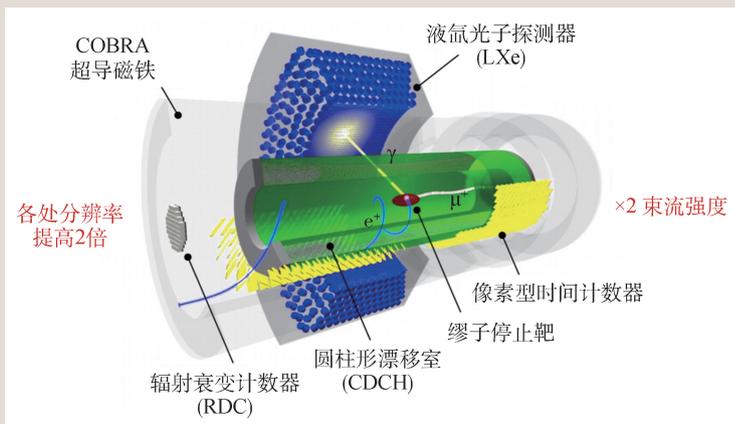


图3 MEGII探测器设计

3.2 Mu3e

$\mu \rightarrow eee$ 过程目前最好的结果是PSI的SINDRUM实验测得，在90%置信水平下分支比上限为 $\mathcal{B}(\mu^+ \rightarrow e^+ e^- e^+) < 1 \times 10^{-12}$ ^[11]。依托于MEGII同样的连续波表面 μ^+ 束流，PSI正在筹建下一代 $\mu \rightarrow eee$ 探测实验Mu3e^[12]。其实验装置设计如图4所示。缪子停止靶同样位于探测器中心，衰变后产生的正电子和电子在1 T的均匀磁场中偏转，首先击中2层内部硅像素探测器，然后穿过闪烁光纤再击中2层外部硅像素探测器。末态粒子在真空中偏转一周后再次击中硅像素探测器和闪烁光纤或者闪烁条探测器。

由于末态为3个带电粒子，偶然符合本底计数很高，因此Mu3e需要大面积、高性能、低质量的硅像素

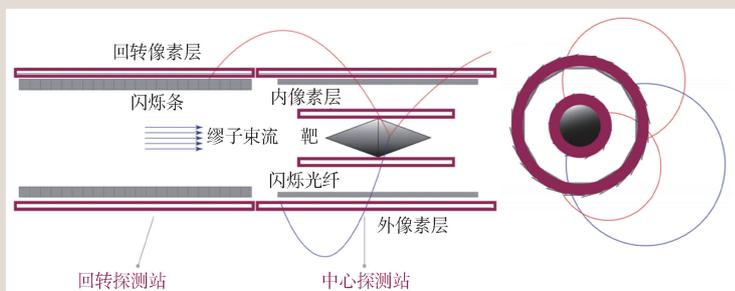


图4 Mu3e探测器设计

芯片以及高时间分辨的闪烁探测器来压低本底。其探测器技术尚在研发之中，物理目标为在2025年达到 10^{-15} 灵敏度，之后可能开展二期实验以达到 10^{-16} 灵敏度。

3.3 COMET与Mu2e

$\mu \rightarrow e\gamma$ 和 $\mu \rightarrow eee$ 实验虽然有望将测量上限进一步降低1—2个数量级，但由于需要探测衰变产生的多末态粒子，受探测器精度和偶然符合本底的影响，不能充分利用束流强度的提高，在技术上很难实现测量精度的进一步大幅提升。 $\mu N \rightarrow eN$ 与衰变不同，被原子核俘获的缪子与核交换一个虚光子或者未知的中性玻色子实现缪子到电子的直接转换，如图5所示。

缪子电子转换过程产生的末态粒子是一个单能的电子，能量大小与所选择的靶材料有关。探测单能电子不受偶然符合本底影响，可利用的束流强度没有限制，同时还可以利用脉冲束流的时间信息排除束流本底，因此是更具实验前景的缪子cLFV过程。目前最精确的 $\mu N \rightarrow eN$ 结果为SINDRUM II实验测得的 $\mathcal{B}(\mu^- \text{Au} \rightarrow e^- \text{Au}) < 7 \times 10^{-13}$ [13]。

日本J-PARC的COMET^[14]和美国Fermilab的Mu2e^[15]正在开展 $\mu N \rightarrow eN$ 过程的进一步寻找，两者的实验目标均为单事例灵敏度的测量精度达到 10^{-17} ，比SINDRUM II的上限测量值改善4个数量级。物理目标能够实现如此大跳跃的根本原因是一种创新的粒子俘获技术于2011年在日本大阪大学MUSIC实验^[16]中得到验证。与MEGII和Mu3e采用的将磁铁放置在质子靶侧面收集次级粒子的传统俘获技术不同，这种在中微子工厂设计中提出的方案直接将质子靶置于产生高强度磁场的超导磁铁内部，利用高强度的磁场对带电次级粒子进行俘获并输运，可以将收集效率提高3个数量级，从而大幅度提高了可利用的缪子束流强度。两种收集方式的原理见图6。基于这一创新技术，COMET与Mu2e的实验装置设计见图7。

二者采用相同的设计思想：利用沿Z向5 T→3 T逐渐下降的高强度磁场进行缪子的反向收集从而排除正向束流带来的本底；缪子经过弯曲的输运

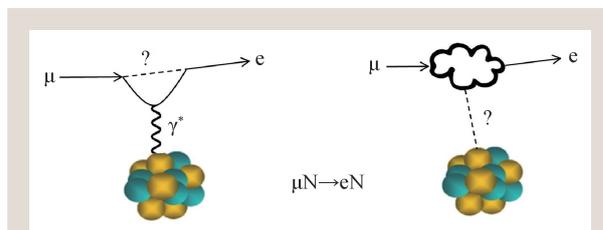


图5 新物理模型下 $\mu N \rightarrow eN$ 转换过程

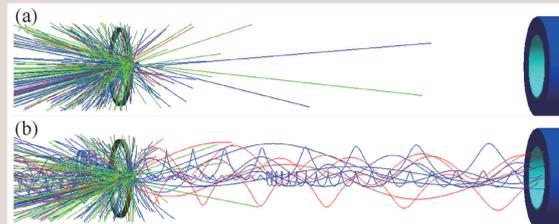


图6 (a)传统侧面收集，次级粒子无约束直线传播，仅有很小部分能进入输运束线；(b)磁铁内收集，次级粒子在磁场约束下偏转，从而高效率进入输运束线

线进行动量筛选，排除动量大于 $75 \text{ MeV}/c$ 的高能缪子，进一步压低束流本底；使用沿Z向排列的一系列缪子停止靶来提高俘获缪子的效率。均使用铝靶，末态电子能量为 104.973 MeV ；使用晶体量能器和稻草管探测器进行末态单能电子的径迹重建和粒子鉴别。COMET还在电子输运段采用了进一步弯曲的设计以排除缪子衰变产生的低能电子。

COMET将实验分为两期，二期使用 56 kW ， $8 \text{ GeV}/c$ 的质子束流获得 $2 \times 10^{10} \mu^-/\text{s}$ 缪子束流。一期则只使用 3 kW 质子束流并建设 90° 弯曲的缪子输运线，使用漂移室作为径迹探测器。目前COMET实验已经完成一期的束流输运线和探测器建设，并计划于2023年开始一期的实验研究，预期物理灵敏度为 10^{-15} ，之后开始二期建设和运行。Mu2e实验使用 8 kW ， $8.9 \text{ GeV}/c$ 的质子束流，正在进行实验设施建设，计划在2022年开始安装，2025年初开始运行。两者均有计划未来进行升级以达到 10^{-18} 量级灵敏度。

4 缪子反常磁矩和电偶极矩

4.1 缪子反常磁矩实验(Muon $g-2$)

缪子反常磁矩是缪子的基本物理特性之一，它反映了缪子内禀磁矩与其自旋角动量之间的微

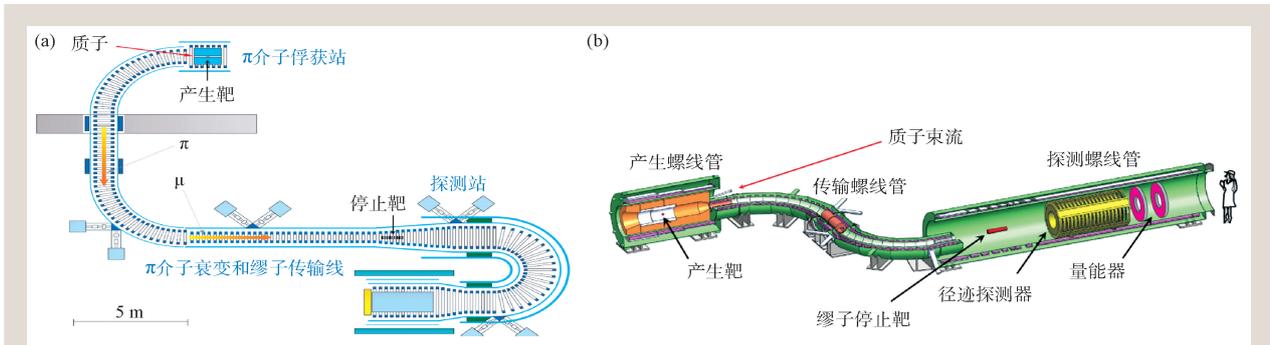


图7 (a) COMET二期实验设计; (b) Mu2e 实验设计

妙关系。“g”代表旋磁比(gyromagnetic ratio),为粒子磁矩与自旋角动量之间的比值。对于缪子,“g”的实验测量值与经典物理的预期值“2”之间有着0.1%左右的差距($g_\mu=2.0023318418$)^[2],这一细微的差距被称为缪子反常磁矩,而这也是缪子反常磁矩实验名称“Muon g-2”的由来。

缪子在磁场中运动时由于内禀磁矩、自旋角动量和磁场的相互作用将产生进动,就好比倾斜旋转的陀螺在重力场的作用下会发生进动一样。缪子反常磁矩的大小可以通过对进动频率和磁场强度的测量而得到。那么缪子反常磁矩的来源是什么呢?物理学家认为这背后有着深刻的物理背景,涉及到时空的深层次结构。粒子和宇宙万物所处的空间并不是静态的,即便是所谓的“真空”也并不“空”。真空中存在着大量的虚粒子(也被称为“量子泡沫”),它们在极短的时间尺度和极小的空间尺度内不断产生又不断湮灭。一般的实验探测手段很难捕捉到虚粒子的蛛丝马迹,但是在缪子附近产生的虚粒子会在极短的时间内与缪子发生相互作用并改变缪子的进动频率。这些虚粒子包括比较轻的电子、光子,也有比较重的W/Z和上帝粒子希格斯粒子等等,甚至还可能包括很多未知的新奇粒子。人们可以通过测量缪子反常磁矩来发现新的未知的相互作用,进而寻找新粒子和新物理。通过基于标准模型的一系列复杂计算,缪子反常磁矩的理论预言精度可以达到千万分之3.5^[3]。如果实验测量精度也能达到相同的水平,那么人们就可以对比理论值和实验值进行精确检验。实际上,前期在美国布鲁克海文实验室(BNL)进行的缪子反常磁矩实验中

已经发现了实验值和理论值有着大于3倍标准平方差的差距(被称为“缪子反常磁矩疑难”),这在统计学上意味着实验结果和标准模型不相符的概率已经达到了99.7%以上。即便如此,仍然不能宣布标准模型已经失败或者发现了新物理,因为这一差距还达不到“5倍标准平方差”——粒子物理界的“黄金判据”标准。进一步提升结果可信度的最佳方法就是提高实验测量精度,正在美国费米实验室(FNAL)进行的最新缪子反常磁矩实验的测量精度可达千万分之1.5^[17],有望对标准模型发起终极挑战并解答持续20年之久的缪子反常磁矩疑难问题。

费米实验室的缪子反常磁矩实验通过束流线把加速器产生的缪子引导到放置于总控制室内的缪子储存环(Storage Ring)中(图8)进行测量。

实验大约每秒钟进行12次质子打靶,每次注入约 10^{12} 个质子。实验预计运行3年采集约1亿万个能量为3 GeV左右的高能正缪子。通过对正缪子衰变产生的正电子进行频率计数测量并排除各种复杂的背景(图9),实验精度可达到千万分之一左右的水平。这将是世界上最精确的缪子反常磁矩实验,也是世界上对标准模型的最严格检验之一。缪子反常磁矩实验在精确检验标准模型和寻找新物理方面一直起着关键性的作用,推动了标准模型的建立并使其不断完善。缪子反常磁矩的高精度测量是非常灵敏的新物理探针,对各种新物理模型有着强大的鉴别能力,与高能量前沿的实验结果互为补充。近日费米实验室g-2实验组公布了缪子反常磁矩的测量结果^[18],偏离标准模型预言达3.3倍标准差,确认了早年BNL实验结

果。该结果是迄今为止最精确的测量结果，为缪子物理领域新物理的发现提供强有力的证据，也为下一步的精确测量和研究提供指引。

除此之外，日本高强度质子加速器实验室(J-PARC)另辟蹊径，准备采用“超冷缪子法”(ultra-cold Muon)来建造新的缪子源：先通过表面慢缪子束流(28 MeV)生成缪子素，再利用激光电离慢化的方法得到超冷缪子，然后再经过一段加速过程后(300 MeV)注入到一个紧凑型的储存环中进行实验测量^[19]。J-PARC的缪子反常磁矩实验和费米实验室采用了完全不同的测量技术和方法，预计2025年发表首批实验结果。这两个独立进行的实验测量结果将会互相验证，从而为解决长期困扰粒子物理学界的“缪子反常磁矩疑难”做出突破性贡献。

4.2 缪子电偶极矩实验(Muon EDM)

当今宇宙的物质组成高度不对称：正物质远远多于反物质。为什么会有这种不对称性现象？现有的粒子物理标准模型并不能提供一个令人满意的回答。一个拥有永久电偶极矩(electric dipole moment, EDM)基本粒子的存在意味着时间反演(T)的对称性破缺(图10)。这将是正反物质对称性破坏的直接证据(根据CPT守恒定律，T破坏即意味着CP正反物质对称性破坏)，这将大大改变人们对正反物质对称性破缺乃至宇宙本源的理解，其物理意义十分深远。

在实验中寻找基本粒子的电偶极矩非常具有挑战性。在标准模型中，基本粒子的电偶极矩预言值一般都极小，难以在实验室中观测到^[20]。受到缪子反常磁矩测量实验的启发，人们发现缪子电偶极矩的存在也会让缪子在带电磁场中产生进动，其进动的方向恰恰与缪子反常磁矩产生的进动方向成90°角。通过巧妙的设计实验，粒子物理学家可以同时测量缪子在这两个方向的进动，这样就可以采用与缪子反常磁矩类似的测量方法对



图8 (左)缪子反常磁矩实验总控制室(MC-1)的外观；(右)置于总控制室内部的缪子储存环(来源：<https://muon-g-2.fnal.gov/>)

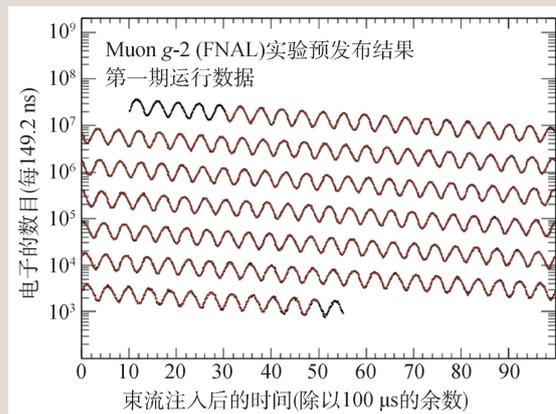


图9 缪子衰变所得电子的计数率随时间的分布图(电子能量大于能量阈值)，根据该曲线的周期关系可以得到缪子的进动频率

缪子电偶极矩进行精确测量。(前期在布鲁克海文实验室进行的缪子反常磁矩实验，给出了缪子电偶极矩的测量上限 $d_{\mu} < 1.8 \times 10^{-19} \text{ e}\cdot\text{cm}^{[21]}$ ，它与标准模型预言值之间数十个数量级的差距意味着新物理存在的空间很大。正在费米实验室进行的缪子电偶极矩的测量灵敏度将提高2个数量级左右达到 $10^{-21} \text{ e}\cdot\text{cm}^{[17]}$ ，日本J-PARC的缪子电偶极矩实验预计也将达到相近的灵敏度^[19]。缪子电偶极矩实验是对基本粒子电偶极矩的直接测量，这点是其他类型的电偶极矩测量实验所不能提供的(电子和陶子电偶极矩的测量方法均为间接测量，而中子或者分子等电偶极矩测量的对象并非基本粒子)。下一代缪子电偶极矩实验将进一步提高测量精度，探索正反物质和时间反演不对称性的本源，为新物理的寻找提供前瞻指引。

5 缪子素与反缪子素的转换

反缪子(μ^+)俘获一个电子后形成的束缚态称



图10 (左)粒子自旋方向向左,电偶极矩方向向上(球体下方的小突起代表着电荷分布的不均匀性,电偶极矩不为零)。(右,时间反演态)粒子自旋方向向右,电偶极矩方向仍然向上。这两个粒子量子态互为时间反演态却各不相同,而根据粒子全同定律,一个粒子只能存在一种量子态,因此必然有一种时间反演态不存在,即时间反演发生了对称性破缺(来源: <https://sitn.hms.harvard.edu/>)

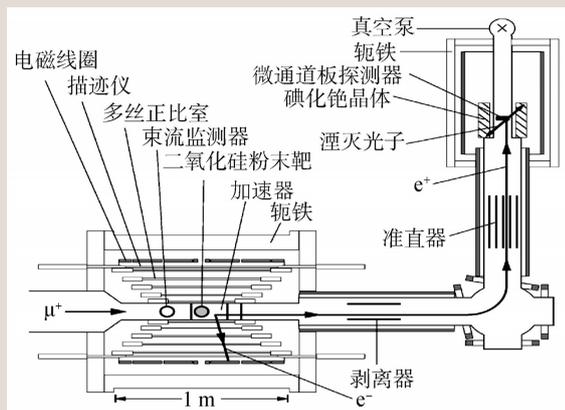


图11 PSI 缪子素转化实验探测器系统

为缪子素。在标准模型中缪子素中的 μ^+ 会按照缪子三种衰变模式进行衰变并释放俘获的电子。如果cLFV存在,缪子素中的 μ^+ 和 e^- 就可能同时发生转换从而变成反缪子素: μ^- 和 e^+ 组成的束缚态。在标准模型最小扩充中,由于中微子质量极小,这一转换过程被强烈压低,不可能在实验室中观测到。但是在其他模型中(如超对称理论^[22]和大统一理论^[23]),该过程转换几率大幅提升。缪子素与反缪子素的转换过程同时破坏缪子味、电子味两个单位,是单个单位cLFV过程的有力补充。

当今最好的实验结果是由1999年瑞士PSI缪子素转换实验得到,在95%置信度水平下给出该过程的转换概率小于 8.3×10^{-11} ^[24]。实验装置如图11所示,利用连续表面缪子束流轰击二氧化硅粉末产生缪子素。实验期待观测的反缪子素衰变信号是Michael电子与原子轨道上动能约13.5 eV的

正电子。实验采用高精度磁谱仪确认Michael电子的径迹和时刻,利用直线加速剥离轨道正电子后运输至远端晶体符合探测器。采用时间和顶点的双符合探测以便压低本底。目前,国际上尚无同类实验挑战PSI结果。如果在新一代加速器缪子源实验上观测到正反缪子素转换过程,将提供超出标准模型新物理的有力证据。

6 中国未来的缪子物理实验展望

由于过去没有合适的高强度质子/重离子加速器装置,中国没有正在开展的缪子物理实验。近年来条件有了很大变化:中国散裂中子源(CSNS)的100 kW,1.6 GeV质子加速器已经建成^[25];国家“十二五”重大科学工程项目“强流加速器装置(HIAF)”正在建设重离子加速器;“十四五”计划启动建设的“加速器驱动嬗变系统(CiADS)”^[26]拟建设连续流直线质子加速器;中国原子能科学研究院正大力推动高功率质子回旋加速器的建设^[27];未来还有正在筹划的超级质子对撞机项目(SPPC)^[28]等,我国已经具备了建造加速器缪源探究缪子前沿科学和技术应用的先决条件。

在已经提上日程的CSNS升级计划中,拟依托CSNS建设我国第一个加速器缪子源设施(EMuS)^[29]。EMuS已经形成技术设计报告并得到国内外同行的高度评价,其正缪子强度有望达到 $10^8 \mu^+/s$ 以上(高于PSI用于正反缪子素转换实验的缪子源将近两个数量级)。基于EMuS正在开展我国主导的正反缪子素转换实验(MACE)的方案设计,得益于缪子束流强度的大幅提高和近20年来探测器技术的进步,有望超越PSI的结果2—3个数量级^[30]。

CiADS预期的质子束流指标为能量600 MeV,功率2.5 MW,经测算如果采用类似COMET和Mu2e的实验设计,能够达到 10^{-19} 的灵敏度,实现缪子—电子转换实验探索的进一步突破^[26]。

按照HIAF-U的升级计划,将具备提供大约在 1×10^{13} ppp时10 AGeV的重离子束流能力。通

过与费米实验室 $g-2$ 实验质子束流(8 GeV)打靶过程的对比, HIAF-U 上缪子束流强度将能够达到目前费米实验室 $g-2$ 实验的 30 倍左右, 总体误差预期可以提高一倍, 从 0.140 ppm 提高到 0.070 ppm^[26]。这将为缪子反常磁矩的高精度测量作出重要贡献。

针对以上实验计划, 我国科学家在关键技术

方面也已经有多项具有创新的前瞻性研究在进行中, 包括质子靶、缪子慢化、缪子素产生、高分辨率径迹探测器等^[31]。高强度前沿缪子物理实验具有巨大的科学发现潜力, 抓住这一难得的机遇, 深入开展关键技术研发, 仔细规划并适时启动相关的实验计划, 将使我国在基础物理研究领域做出重要的创新性贡献。

参考文献

- [1] Aad G *et al* (ATLAS Collaboration). Phys. Lett. B, 2012, 716: 1; Chatrchyan S *et al* (CMS Collaboration). Phys. Lett. B, 2012, 716: 30
- [2] Bennett G W *et al*. Phys. Rev. D, 2006, 73: 072003
- [3] Aoyama T *et al*. Phys. Rept., 2020, 887: 1
- [4] Aaij R *et al* (LHCb Collaboration). Phys. Rev. Lett., 2014, 113: 151601; Aaij R *et al* (LHCb Collaboration). 2017, arXiv:1705.05802 [hep-ex]; Hiller G, Kruger F. Phys. Rev. D, 2004, 69: 074020; Bordone M, Isidori G, Pattori A. Eur. Phys. J. C, 2016, 76: 440
- [5] Neddermeyer S H, Anderson C D. Physical Review, 1937, 51(10): 884
- [6] Marciano W J, Mori T, Roney J M. Annu. Rev. Nucl. Part. Sci., 2008, 58: 315
- [7] Hincks E P, Pontecorvo B. Phys. Rev., 1948, 73: 257
- [8] Baldini A M *et al* (MEG Collaboration). Eur. Phys. J. C, 2016, 76: 434
- [9] 唐靖宇, 周路平, 洪杨. 物理, 2020, 49(10): 645
- [10] Baldini A M *et al* (MEG II Collaboration). Eur. Phys. J. C, 2018, 78(5): 380
- [11] Bellgardt U *et al* (SINDRUM Collaboration). Nucl. Phys. B, 1988, 299: 1
- [12] Blondel A *et al*. 2013, arXiv:1301.6113[physics.ins-det]
- [13] Bertl W H *et al* (SINDRUM II Collaboration). Eur. Phys. J. C, 2006, 47: 337
- [14] The COMET Collaboration. Prog. Theor. Exp. Phys., 2020, 033C01 (102 pages), DOI: 10.1093/ptep/ptz125
- [15] Bartoszek L, Barnes E, Miller J P *et al*. 2015, arXiv: 1501.05241
- [16] Cook S *et al*. Phys. Rev. Accel. Beams, 2017, 20: 030101
- [17] Grange J *et al*. 2015, arXiv:1501.06858[hep-ex]
- [18] Abi B *et al* (Muon $g-2$ Collaboration). Phys. Rev. Lett., 2021, 126: 141801
- [19] Abe M *et al*. Prog. Theor. Exp. Phys., 2019, 2019(5): 053C02
- [20] Pospelov M, Ritz A. Phys. Rev. D, 2014, 89: 056006
- [21] Bennett G W *et al*. Phys. Rev. D, 2009, 80: 052008
- [22] Halprin A, Masiero A. Phys. Rev. D, 1993, 48: 2987
- [23] Frampton P H, Ng D. Phys. Rev. D, 1992, 45: 4240
- [24] Willmann L *et al*. Phys. Rev. Lett., 1999, 82: 1
- [25] China Spallation Neutron Source. <http://csns.ihep.cas.cn/>
- [26] Sun Z Y *et al*. Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica, 2020, 50(11): 112010
- [27] An S Z, Zhang T J. presentation at the workshop on future program of intensity frontier of particle physics at China's high power hadron accelerators. 2018.9.8. Institute of Theoretical Physics in CAS, China
- [28] <http://www.ihep.ac.cn/dkxzz/cepc/>
- [29] Tang J Y *et al*. Quantum Beam Sci., 2018, 2: 23
- [30] Han C C, Huang D, Tang J *et al*. Phys. Rev. D, 2021, 103: 055023
- [31] Cai H J *et al*. Phys. Rev. Accel. Beams, 2017, 20: 023401

读者和编者

《物理》有奖征集封面素材

为充分体现物理科学的独特之美, 本刊编辑部欢迎广大读者和作者踊跃投寄与物理学相关的封面素材。要求图片清晰, 色泽饱满, 富有较强的视觉冲击力和很好的物理科学内涵。

一经选用, 均有稿酬并赠阅该年度《物理》杂志。

请将封面素材以附件形式发至: physics@iphy.ac.cn; 联系电话: 010-82649029。

《物理》编辑部