

当实验与理论在千万分之一处握手 —— μ 子反常磁矩的精密测量与理论突破

冯旭¹ 靳路昶² 刘朝峰³

(1. 北京大学 100091; 2. 美国康涅狄格大学 06269;

3. 中国科学院高能物理研究所 100049)

2025年,围绕一个微小的物理量—— μ (缪)子的反常磁矩(muon g-2),物理学界经历了一场堪称“极限精度”的长跑。这一进展被 *Science* 评选为2025年十大科学突破之一,评价其为“高精度实验与第一性原理理论计算共同推动基础物理认知边界的重要范例”。

在美国费米国家加速器实验室 Muon g-2 实验(图1)的最新实验结果中^[1], μ 子反常磁矩的测量精度达到了十亿分之127。更引人注目的是:最新理论预测与实验结果高度一致。此前被广泛讨论,甚至被视为“新物理”线索的偏差,在更新后的理论评估下显著缓解。

这种变化,并非简单的统计涨落,而是理论计算体系在强相互作用部分取得实质进展后的结果——其中,格点QCD计算的突破起到了关键作用。

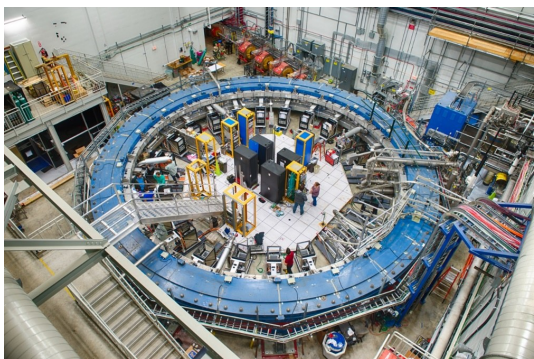


图1 美国费米国家加速器实验室 Muon g-2 实验装置全景图

1. 从一个小数点后的数字说起

μ 子是电子的“重兄弟”,质量约为电子的200倍。按照狄拉克方程, μ 子的磁矩因子应为 $g=2$,但量子涨落会带来微小修正,使其略微偏离2,这个偏离量就是所谓的“反常磁矩”。正是这个微小的偏差,成为检验粒子物理标准模型最灵敏的窗口之一。

实验上, μ 子在磁场中的进动频率可以被极其精确地测量(图2)。2025年的实验精度达到十亿分之127——相当于测量出北京到上海的距离,误差只有一个手掌大小。这种精度的取得,凝聚了数十年持续改进的努力。但实验越精确,理论就越不能“含糊”。

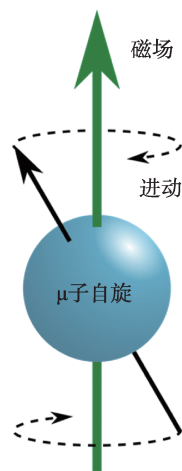


图2 μ 子在磁场中进动

2. 真正的难题:强相互作用

μ 子的反常磁矩来自三种基本相互作用的共同影响:

1) 电磁相互作用——由光子传递,作用于所有带电粒子之间的基本相互作用。

2) 弱相互作用——由 W 和 Z 玻色子传递,能够引起粒子种类发生转变的基本相互作用。

3) 强相互作用——由胶子传递,负责将夸克束缚在质子和中子等强子内部的基本相互作用。

前两种作用力的计算相对成熟,可以非常精确地处理。真正困难的是第三种——强相互作用。

物理学家把描述强相互作用的理论称为“量子色动力学”(Quantum Chromodynamics, QCD)。在存在强相互作用的量子真空中,夸克与胶子不断涨落,产生复杂的强子态与连续谱结构,并通过两类主要机制影响 μ 子磁矩:强真空极化(Hadronic Vacuum Polarization, HVP)和强光子-光子散射(Hadronic Light-by-Light Scattering, HLbL)(图 3)。其中,强真空极化贡献数值最大,长期以来也是理论不确定度的主要来源。

过去几十年,理论界主要采用“数据驱动”方法:利用电子-正电子对撞实验测得的强子产生截面,通过色散关系间接推算强真空极化贡献。中国的北京谱仪实验(BES)在北京正负电子对撞机上的一系列精确测量(图 4),为低能区色散积分提供了关键输入数据。未来规划中的超级 τ -粲工厂(STCF)



图 4 国家大科学装置——北京正负电子对撞机鸟瞰图

将在更高亮度下开展精密对撞实验,有望大幅提升低能强子截面的测量精度。

然而,就目前而言,不同实验数据之间仍存在差异,系统误差的压缩面临挑战。

2021 年,美国费米国家加速器实验室公布首批 μ 子 $g-2$ 精密测量结果时,实验与当时主流理论预测之间出现了约 4.2σ 的差异。这一偏差迅速成为全球粒子物理学界的焦点,被视为可能指向标准模型之外的新物理信号。然而,随着理论计算的持续改进,尤其是强相互作用部分处理方式的更新,这种差异逐步被重新审视。

3. 格点 QCD:从第一性原理出发

真正的转折来自格点 QCD。

所谓格点 QCD,是把连续的四维时空离散成一个有限的格点网络,在这些格点上定义夸克场和胶子场的自由度,并在超级计算机上直接从 QCD 拉格朗日量出发进行数值求解。这种方法不依赖强子截面的实验输入,而是通过夸克与胶子的基本动力学自行给出强相互作用的贡献。某种意义上,它就像在超级计算机上进行了一场“数值实验”(图 5)。

近年来,随着 1) 超级计算机性能大幅提升, 2) 算法不断优化, 3) 统计与系统误差得到控制, 格点 QCD 在强真空极化贡献的计算中取得突破,给出了与数据驱动方法不同但更为稳定的结果,并显著压缩了理论不确定度。

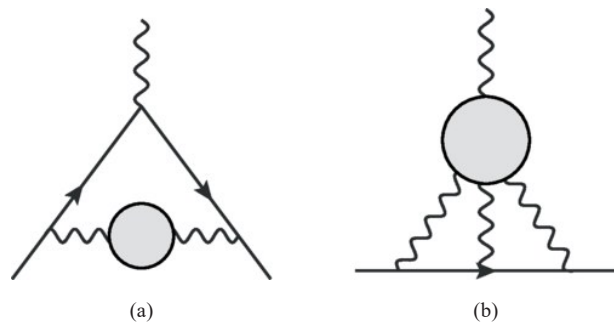


图 3 强真空极化(a)和强光子-光子散射(b)的费曼图示意

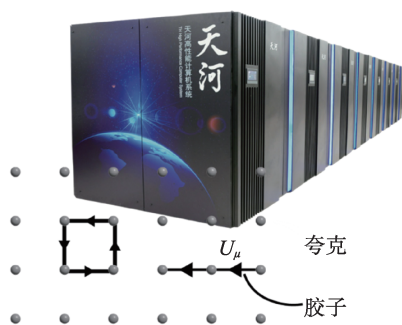


图5 格点QCD:通过超级计算机实现强相互作用第一性原理计算

与此同时,在强光子-光子散射(HLbL)贡献方面,格点计算也取得重要进展。其中,中国格点QCD研究团队发展了新的方法计算 π 介子对HLbL的贡献,并澄清了该计算长期存在的符号问题,使系统误差评估更加可靠。

2025年,一个汇集全球相关领域专家的国际合作组织——Muon g-2 Theory Initiative发表综述,总结了这一系列突破^[2]。格点计算显著降低了强真空极化与强光子-光子散射贡献的理论不确定度,使这些复杂的强相互作用效应能够从第一性原理进行高精度计算,且理论精度开始接近实验测量水平。

Muon g-2 Theory Initiative 整合全球理论成果,采用最新格点结果更新了标准模型预测值。结果令人震撼——实验与理论高度符合。

4. 科学精神:不是寻找偏差,而是追求精度

许多人曾希望 μ 子g-2成为打开新物理的大门。几年前实验与理论之间的偏差,曾点燃人们的期待。但科学的价值,不在于“制造偏差”,而在于不断提高精度、逼近真相。如果说奥林匹克精神是“更高、更快、更强”,那么高精度前沿物理研究的精神则是“更小的误差、更严的检验、更深的理解”。

在 μ 子g-2的研究中,人类不断刷新“精度纪

录”:1)实验精度达到了前所未有的水平;2)理论计算突破了长期瓶颈;3)强相互作用的第一性原理计算进入精密时代。格点QCD不再只是处理复杂强相互作用的工具,而是成为精确检验标准模型的核心力量。

这一成果被*Science*评选为2025年十大科学突破之一,正是对这种长期积累与技术飞跃的认可。

5. 一个更深层的启示

μ 子g-2的故事告诉我们:1)基础科学的突破往往来自几十年的耐心积累;2)超算与理论方法的进步,可以改变整个领域的判断;3)“没有发现新物理”本身,也可能是重要发现。

从实验室中精确测量 μ 子进动频率,到超级计算机上进行亿级自由度的格点QCD数值演算——这是科学家对一个小数点后数字的执着追求。

当实验与理论在千万分之一的精度上握手,这不仅是一次结果的对齐,更是人类理解自然能力的一次飞跃。而格点QCD,正站在这场飞跃的中心。

参考文献

- [1] Muon g-2 Collaboration, Phys. Rev. Lett. 135 (2025) 101802.
- [2] Muon g-2 Theory Initiative, Phys. Rept. 1143 (2025) 1-158.

