

缪子反常磁矩与暗物质间接探测

冯磊[†]

(中国科学院紫金山天文台 南京 210023)

近日美国费米国家实验室公布了最新的缪子反常磁矩实验的首个结果,发现缪子的磁矩偏离标准模型理论预期达3.3倍标准方差^[1].结合布鲁克海文实验室2004年的实验结果^[2],缪子反常磁矩和理论计算的偏差可达4.2倍标准方差^[1].

对于这一实验结果,通常有两种物理解释.第一种认为标准模型的计算,尤其是强子部分的贡献不够完备.这是因为强相互作用的耦合系数比较大,无法用微扰论的方法进行计算. Borsanyi等人利用格点量子色动力学的方法得到的结果和最新的实验结果基本相符^[3].另一种观点认为理论和实验的偏差来自于某种(或多种)未知粒子的量子涨落.事实上这样的模型实在是太多了,比如超对称模型、左右手对称模型、解释中微子质量的跷跷板机制、双希格斯粒子二重态模型、重子数减轻子数(B-L)模型和缪子轻子数减陶子轻子数($L_\mu - L_\tau$)模型等,详细情况见Lindner等人的综述^[4].

缪子反常磁矩可以通过多种方式与暗物质粒子产生联系.比如在最小超对称模型和次最小超对称模型中,作为暗物质粒子候选体的最轻中性伴随子的量子涨落对缪子的反常磁矩有直接的贡献^[5].此外解释缪子反常磁矩引入的新粒子还可以作为传递暗物质和标准模型之间相互作用的传播子.这种新粒子的性质同时也限制了暗物质湮灭的末态产物,可以利用暗物质间接探测的数据来限制这类模型.基于上述思想,我们开展了两个相关的研究.

首先,我们研究了次最小超对称标准模型.超对称是一种时空对称性,是庞加莱群的最大扩充.超对称算符作用到粒子态上,会使粒子的自旋改变1/2,也就是费米子和玻色子的转换.最小超对称标准模型是把已知粒子扩充一倍,每种粒子都有对应的超对称伴子,但是大型强子对撞机的实验结果对这一模型有非常强的限制.而次最小超对称标准模型又额外增加了一个标量粒子和其伴子,新粒子的加入能够帮助超对称模型符合强子对撞机的观测数据.在超对称模型里有一个自然的暗物质粒子候选体—最轻中性伴随子.通过自由参数扫描,发现存在能同时解释缪子反常磁矩、银心GeV超出和AMS-02反质子超出的参数^[5],同时这些参数还满足大型强子对撞机和暗物质直接探测的限制.满足所有实验结果的参数所对应的暗物质质量大约为60 GeV,湮灭截面 $\langle\sigma v\rangle$ 约为 $10^{-26} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,暗物质主要的湮灭产物是正反底夸克粒子,这些信息还暗示了后续暗物质信号搜寻的方向.底夸克后续的衰变和强子化过程会产生大量的高能光子、正电子和反质子等次级粒子,这表明研发新一代大天区伽马射线望远镜是非常有必

2021-04-25收到原稿

[†]fenglei@pmo.ac.cn

要的.

我们的第2项工作是带有 $L_\mu - L_\tau$ 核的暗物质粒子模型^[6]. 这一模型引入了一个新的 $U(1)_{L_\mu - L_\tau}$ 对称性, 这表明缪子轻子数减陶子轻子数是一个守恒量. 这一对称性的自发对称破缺过程会产生一个新的适量粒子X, 它的量子涨落可以用来解释缪子的反常磁矩. 暗物质粒子也带有这一守恒核, 通过X粒子传递相互作用湮灭为中微子、缪子和陶子等轻子. 在这一模型中, 暗物质质量比较大的参数空间受到暗物质直接探测很强的限制而被排除, 只剩小于几个GeV的参数空间未被排除. 暗物质粒子主要的湮灭产物是中微子, 其他湮灭末态则依赖于暗物质的质量. 大于1.78 GeV的暗物质粒子湮灭为缪子和陶子, 而更轻的暗物质只湮灭为缪子. 这些带电轻子可以进一步衰变为低能电子, 成为电子宇宙线的一部分, 进而受到各种传播效应的影响. 这些低能电子受到宇宙线重加速效应的影响可以被加速到GeV能段, 所以会受到电子宇宙线观测数据的限制. 我们的计算结果表明: AMS-02的数据对暗物质模型参数的限制在小质量区间强于微波背景辐射, 能够排除暗物质粒子质量在110–300 MeV之间的参数区域.

总之, 缪子反常磁矩可能预示存在一种未知粒子, 而新粒子可能和暗物质粒子有直接或者间接的联系. 结合两方面的数据, 或将帮助我们揭开新物理和暗物质的神秘面纱.

参 考 文 献

- [1] Abi B, Albahri T, Al-Kilani S, et al. PhRvL, 2021, 126: 141801
- [2] Bennett G W, Bousquet B, Brown H N, et al. PhRvL, 2004, 92: 161802
- [3] Borsanyi S, Fodor Z, Guenther J N, et al. Nature, 2021, 593: 51
- [4] Lindner M, Platscher M, Queiroz F S. PhR, 2018, 731: 1
- [5] Abdughani M, Fan Y Z, Feng L, et al. arXiv:2104.03274
- [6] Zu L, Pan X, Feng L, et al. arXiv:2104.03340