

浅述缪子科学与技术

钟嘉豪 唐健

(中山大学 510275)

1. 什么是缪子

1.1 认识缪子

目前科学家给组成物质世界的基本粒子分类，缪子(μ)、电子(e)和陶子(τ)同属于带电的轻子。电子与我们生活最贴切，通电导线里的电流，“流动”的就是电子，如图1所示。

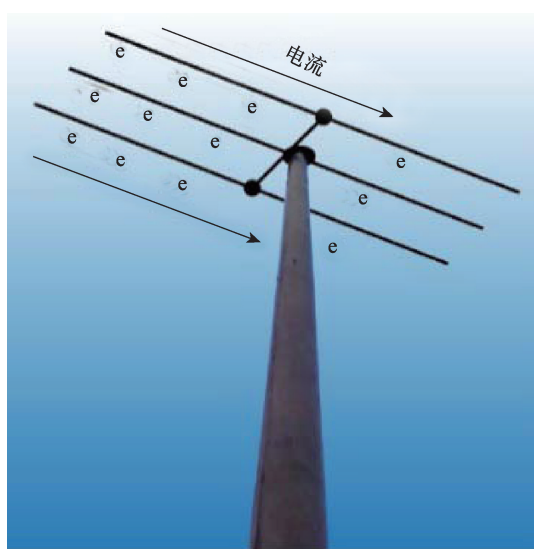


图1 电子在导线中流动的示意图

电子、缪子、陶子都带有1个单位的负电荷，缪子质量约是电子质量的200倍，陶子质量约是电子质量3550倍！陶子和缪子均会衰变，无法长时间稳定存在。电子是稳定的基本粒子，不会衰变。电子可以长时间存在，所以我们生活中接触到更多的是电子，而很少谈论缪子和陶子。

缪子质量较大，它与物质碰撞过程中损失的能量少，因此缪子穿透物质的能力比电子强，如图2所示。伴随着缪子穿透能力强的特点孕育而生的缪子成像技术，可用于海关防止核物料走私，火山内部结构探测，墓穴暗道探测，探究被测物质局域磁性等。如图3所示，缪子会衰变生成电子和中微子，意味着缪子不能像电子那样长时间存在。

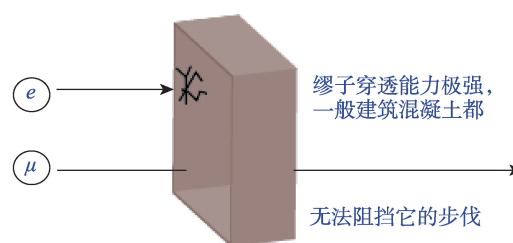


图2 电子和缪子穿透能力对比的示意图

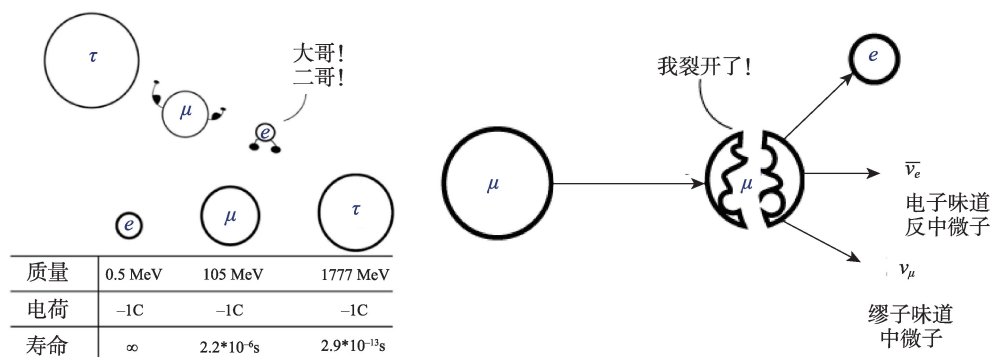


图3 电子、缪子和陶子属性对比与缪子衰变产物

1.2 粒子物理标准模型

大到宇宙演化的奥秘,小到水分子的微观结构,我们生活在神奇的粒子世界。物质都是由不同粒子组成的,粒子物理有一套阐述物质基本结构组成规律的理论,称为“粒子物理标准模型”,如图4所示。在“标准模型”中,电子、缪子、陶子、中微子和他们的反粒子共同分类为轻子。“轻子”的命名是建立该理论之初,发现电子质量比较小而得名。事实上,现在我们知道,陶子质量并不“轻”。因为“轻子”概念已广泛,故“轻子”的称呼沿用至今。

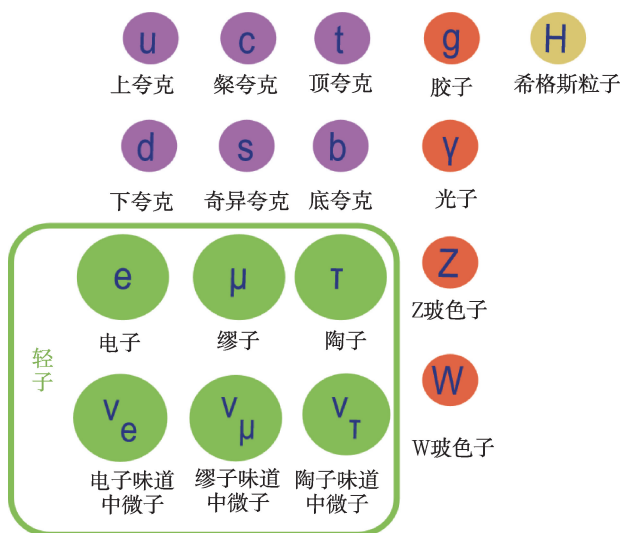


图4 粒子物理标准模型

2. 缪子来源和应用

2.1 缪子成像原理

缪子成像技术主要分为两类,一类是透过待检测物体前后缪子计数差异的“透射成像技术”;另一类是追踪缪子穿过被检测物体前后偏转角改变情况的“散射成像技术”。如图5所示,缪子经过物质时,与物质中的原子核发生碰撞。那么缪子穿过物质时的运动方向偏离原来的入射方向,这个偏离的角度就是偏转角。一般情况下,缪子经过密度高,原子序数大的物质时会产生较大的偏转角。如果我们追踪每个方向上缪子的偏转角,就可以反推出缪子经过的物质密度变化情况,原子序数等信

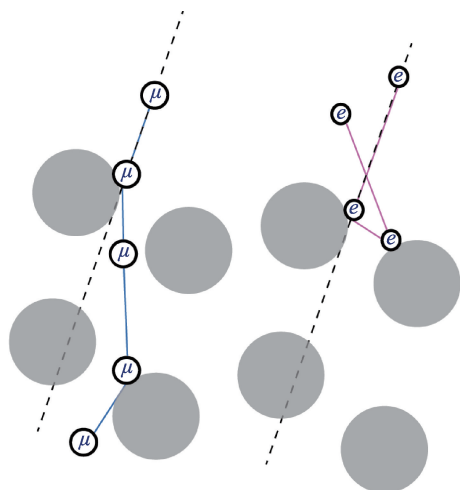


图5 缪子(左,蓝色路径)穿过物质时偏转与电子(右,粉色路径)穿过物质时偏转示意图

息。这就是缪子“散射成像”技术的基本原理。

缪子经过物质时会损失能量,即使这种缪子部分能量被吸收的现象非常弱。一般来说,缪子经过的物质越厚、密度越高,那么物质对缪子损失能量的吸收则会越强。如图6所示,缪子更容易穿过低密度的物质。假设等量的缪子均匀经过物质,探测缪子经过物体前后缪子计数的差异,我们就可以得到物质的密度信息。这就是透射成像,亦称为吸收成像。

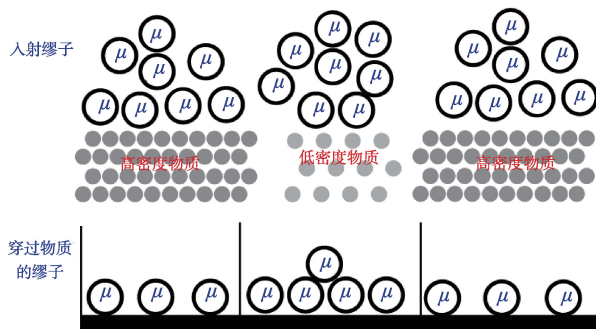


图6 缪子更容易穿过密度低物质

2.2 宇宙线缪子

宇宙中充斥着高能量带电粒子流,被称为宇宙射线。高能宇宙射线主要成分是氢原子核,通量(单位时间单位能量的粒子数密度)随能量呈现幂指数定律,能量变化横跨多个数量级。高能宇宙射线携带的能量,甚至远超人造加速器。高能宇宙射线

到达地球大气层,与大气层的气体分子碰撞,产生K和 π 等次级粒子。这些不稳定粒子衰变可以产生缪子。在地球水平面上,每平方米每分钟我们约接收到一个缪子^{[1][3]},其能量在GeV量级(eV是一种能量单位,1 eV=1.6×10⁻¹⁹焦耳,1 GeV=10³ MeV=10⁹ eV)。宇宙射线缪子是一种天然的、广泛分布的、相对稳定的高能粒子源。几乎不受时间和空间限制,考虑其高穿透性和“纯天然”特性,宇宙射线缪子广泛应用于非侵入式结构成像和国防安全领域,监控活火山等危险地质结构,为大型古建筑开展无损结构成像,核材料管控,核反应堆与乏燃料监测等领域。其中,宇宙射线缪子成像技术探测金字塔内部密道的基本原理如图7所示。利用宇宙射线缪子可探测货柜车内高密度核物料,如图8所示。

2.3 加速器缪子

类似于宇宙线缪子的产生原理,在地球上人们利用电场和磁场给予氢原子核能量,使它不断加速达到高能量。然后,高能量氢原子核撞击特定“靶”物质,例如铝箔,也可以产生K和 π 等粒子。我们利用磁场收集K和 π 等粒子衰变而产生的缪子,即可获得加速器缪子源。加速器缪子源的优势是能量确定,且具有较好的方向性,单位时间内获得的数量多(即强度高)。

缪子是自旋1/2的费米子粒子。缪子在磁场中运动,若自旋轴方向与磁场方向不平行,则会发生进动,如图9所示,缪子的自旋轴会绕着磁场方向旋转。同时,缪子衰变时产生的电子总倾向于朝自旋

轴方向发射而出。利用这些特性,我们先获得一系列自旋轴方向已知并确定的缪子,即极化缪子。当这些极化缪子穿过被检测的物体,缪子自旋轴方向受检测样品影响发生偏转,偏转后的缪子受外加磁场的影响发生进动。探测缪子衰变后的电子信息,我们可以得到进动的频率和强度,反推出样品对缪子的影响,即可得到该样品局部磁性特征,如图10所示。极化缪子对磁场的敏感性发展出一门缪子自旋谱仪技术,简称 μ SR技术。例如通过该技术探测超导材料(电阻为零材料)Na_xCoO₂的磁性特征变化^[4]。

3. 缪子前沿科学实验

物理学家开展大量与缪子有关的科学研究,对比测量结果与理论预期值的差异,以此判断理论是否有瑕疵。当今缪子前沿科学研究,主要集中在缪子性质的精确测量和寻找超出标准模型的新物理现象^[5]。

3.1 精确测量实验

即使在真空中,缪子周围也可以发生各种粒子的产生与消失过程,产生和消失过程都符合能量守恒。由于产生和消失的时间极短,短到产生和消失的粒子几乎无法被仪器所探测到。但是,这些产生和消失的粒子仍然会对缪子产生微弱的影响。针对这些微弱影响,理论物理学家计算出该影响的数值大小,而实验物理学家则通过精确测量来检验理

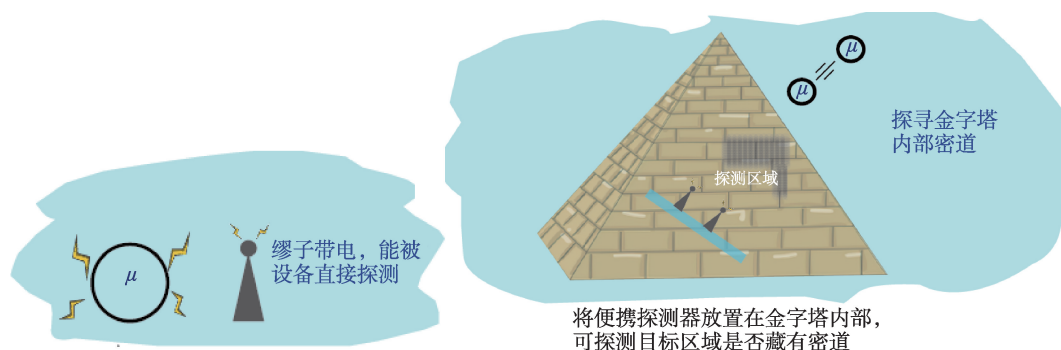


图7 缪子成像技术探测金字塔内部密道

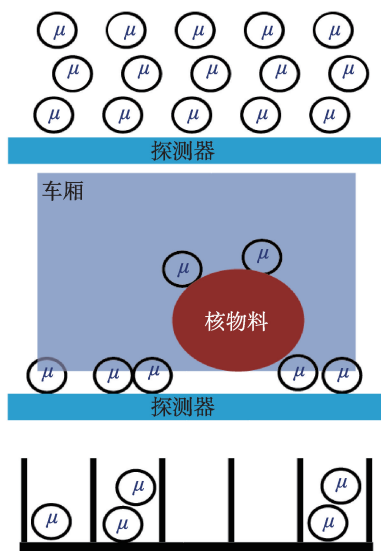


图8 缪子成像技术协助管控核物料走私的基本原理

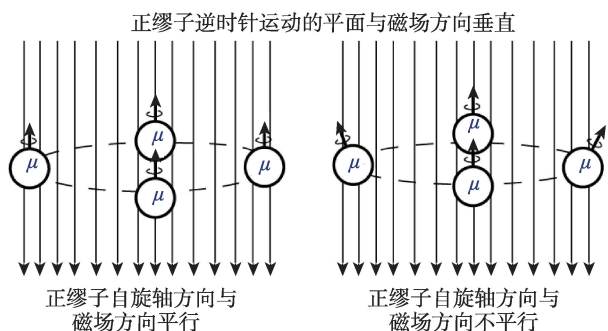


图9 缪子在磁场中进动示意图

论有效性。当前,该类型缪子实验测量精度甚至已达到小数点后十位^[6],已有迹象表明实验测量值与理论预期值之间存在差异。这预示着目前的粒子目录可能不完整,有新的未知粒子等待着被发现。

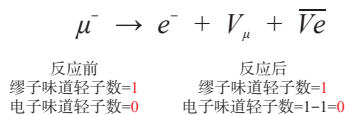
3.2 寻找超出标准模型的新物理

标准模型理论中提出了多种守恒量,反应前后守恒量不变,能量是我们最熟悉的守恒量,通常描述是“能量守恒”,即物理反应前整体能量等于物理

反应后整体能量。粒子物理标准模型中,不同种类轻子的“味道”也是一个守恒量,我们定义正轻子的“轻子味道轻子数”为+1,反轻子的“轻子味道轻子数”为-1。反粒子与正粒子的质量和自旋大小都相等,但是电荷相反。与图11冰激凌类似,冰激凌味道有巧克力、草莓、香草等,轻子的味道指的是“电子”“缪子”或“陶子”。

因此,电子和电子味道中微子,分别具有+1电子味道轻子数。相对应地,反电子和反电子味道中微子分别具有-1电子味道轻子数。根据各种轻子味道轻子数守恒,我们可以推断出反应前和反应后各轻子味道轻子数不变。如果我们发现实验结果与这个推断结果不符合,则称为“破坏”。寻找轻子味道轻子数“破坏”现象,是发现超出标准模型新物理的方式。

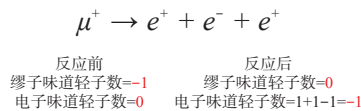
前面我们提到缪子会衰变成电子,反电子味道中微子,缪子味道中微子,反应表达式如下:



反应前缪子味道轻子数为+1,电子味道轻子数为0,反应后缪子味道轻子数为+1,电子味道轻子数为0,则我们称轻子味道轻子数是守恒的。

3.2.1 缪子转换到三个电子

但新物理预言轻子味道轻子数不是一直守恒的,某些理论给出缪子衰变反应的新模式:



该反应前后缪子和电子味道轻子数不守恒,目

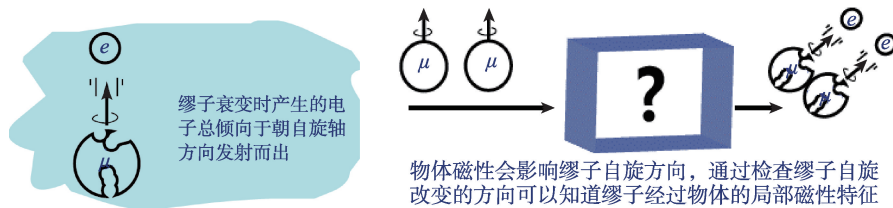


图10 缪子经过磁性物质自旋方向发生变化



图11 来一份缪子味道轻子数冰激凌

前根据实验测得结果表明:在90%置信度下,该过程发生概率小于 10^{-12} ,即 10^{12} 次缪子衰变反应下,我们并未观测到1次该过程^⑦。未观测到的原因可能是这个反应本身就不成立,或者这个反应发生的机率非常小。为了验证是哪种情况,科学家用加速器产生大量的缪子,观察它们的衰变,以此确认是否存在轻子味道轻子数破坏现象。

“90%置信度”可以理解为信心程度或把握程度,例如,小明连续5天早上出门经过公交站时,刚好有一辆公交车进站,于是他很有信心预言觉得第6天早上出门经过公交站时也会有一辆公交进站,假如过去5天中只有1天遇到公交车刚进站的情形,预言第6天会遇到公交车刚进站的情形就没有那么可信了。“90%”是由概率分布模型得出的,假如小明记录了100天公交进站时间,发现该时间呈现如图12所示正态分布,且平均值是8:00,标准差为2分钟,那么他就可以有约95%的信心说公交会

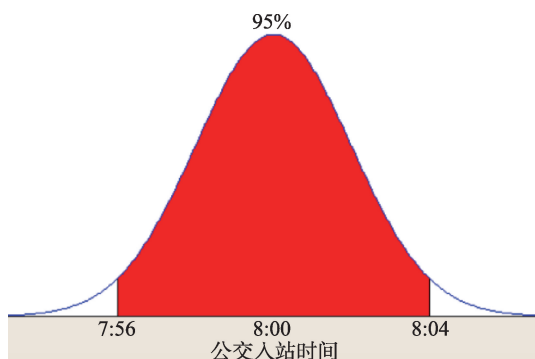


图12 公交进站时间呈正态分布

在7:56-8:04之间进站。

缪子前沿实验中一个热门领域就是观察加速器打靶产生并收集大量的缪子,观察缪子衰变产物,如果实验观测出轻子味道轻子数破坏现象,则说明发现新的物理规律。

3.2.2 正反缪子素转换

原子由带正电的原子核和带负电的核外电子组成,原子总体不带电。类似于原子结构,由带负电荷的缪子和带正电荷的正电子组合成的整体称为缪子素。相对应的,由带正电荷的缪子和带负电荷的电子组合成的整体称为反缪子素。在超出标准模型的新理论下,缪子素与反缪子素存在互相转换的可能性,正如图13所示。由于转换前后轻子味道轻子数出现破坏,若实验能发现正反缪子素转换现象,则我们也将有机会发现新的物理规律。

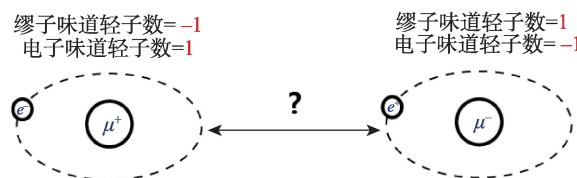


图13 正反缪子素转换过程也是一种不同味道轻子数破坏的过程

4. 结语

缪子是标准模型中带电轻子,人们对缪子性质有深刻的认识并逐渐使它成为改造自然的利器。宇宙射线缪子应用在非侵入式结构成像、地球物理学、国防安全等领域大放异彩,利用加速器缪子的自旋谱仪技术可探究新材料晶格、电子输运、微观磁性质、表面物理和临界现象、分子动力学、多聚物和生物大分子解析和化学反应等,缪子技术拥有多学科应用前景。加速器缪子前沿科学实验已发现超出粒子物理标准模型新物理的迹象。从发现缪子至今约90年,缪子性质的精确测量依旧是科学家追逐的目标,粒子物理的研究仍道阻且长。粒子物理前沿研究上中国力量凸显,我国加速器技术突飞猛进,北京正负电子对撞机和中国散裂中子源已经建成,国家“十二五”重大科学工程项目“强流重离

子加速器”等装置正在建设中,未来还有规划中的环形正负电子对撞机项目。缪子前沿科学与技术应用大有可为,希望更多青年才俊踊跃投身该领域,为科技发展贡献力量。

参考文献

[1] 陈羽, 杜沛尔, 罗光, 赵先和, 唐健. 缪子探测及其多学科应用[J]. 物理实验, 2019, 10, 39: 1-13.

[2] BONECHI L, D' ALESSANDRO R, GIAMMANCO A. Atmospheric muons as an imaging tool [J]. Reviews in Physics, 2020, 5.
[3] M. P. De Pascale *et al.*, J. Geophys. Res. 98, A3, 3501(1993).
[4] MENDELS P, BONO D, BOBROFF J, *et al.* Cascade of bulk magnetic phase transitions in Na_xCoO_2 , as studied by muon spin rotation [J]. Phys Rev Lett, 2005, 94(13): 136403.
[5] 唐健, 李亮, 袁野. 缪子物理实验现状及发展前景[J]. 物理, 2021, 50(4): 239-247.
[6] Aoyama T *et al.* Phys. Rept., 2020, 887: 1.
[7] U. Bellgardt *et al.* (SINDRUM), Nucl. Phys. B299, 1(1988).



科苑快讯

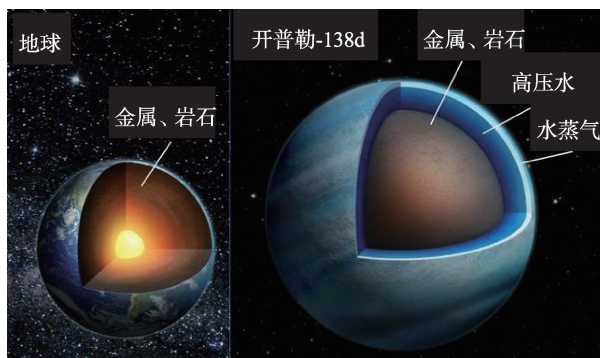
美国宇航局发现一对拥有 1000 英里深海洋的超级地球

美国宇航局(NASA)的哈勃(Hubble)和斯皮策(Spitzer)太空望远镜发现了两颗主要由水组成的超级地球。不同于太阳系中已发现的任何行星,他们是真正的“水世界”。

它们比地球稍大一点,而密度却比环绕太阳的气体巨星要大。最大的可能是,其全部海洋至少比地球海洋的平均深度深 500 倍。而与其相比,地球海洋只能算是岩石球上的一层潮湿贴面。

这些行星围绕 218 光年外天琴座(constellation Lyra)的矮星开普勒-138 运行,最初由 NASA 的开普勒太空天文台发现。通过比较其大小和质量而计算出的密度,科学家判定它们一定由水组成。不过,这里可没有鱼,它们太热了,而且压力巨大,所以在海洋表面和行星大气层之间没有一个离散边界。

以前认为比地球大些的行星是由金属和岩石构成的放大版地球,也就是超级地球。然而开普勒-138c 和 d 却完全不同,体积是地球的 3 倍多,质量是地球的 2 倍,密度却比地球低得多,体积中很大一部分可能由水组成。它们就像放大的木卫二(Europa)和土卫二(Enceladus),但距离恒星更近,表面不是冰,而是由大量水蒸气包裹。在这种蒸汽条件下,可能存在高压下的液态水,甚至超临界流体。



地球(左)和系外行星开普勒 138d(右)的横截面:开普勒 138d 与地球一样,内部也由金属和岩石构成(棕色部分),但开普勒 138d 有一层厚厚的高压水,上面有延伸的水蒸气包层(蓝色阴影),这些水层占其体积的 50% 以上、深度约为 2000 千米;相比之下,地球的液态水比例可以忽略不计

天文学家发现开普勒-138c 和 d 不在宜居带内,而开普勒-138e 位于宜居带。开普勒 138b 被证实是一颗火星质量的小行星,是迄今为止已知最小的系外行星之一。研究人员认为,随着仪器和技术灵敏度的提高,可能会发现更多像开普勒-138c 和 d 这样的水世界行星。

(高凌云编译自 2022 年 12 月 23 日 SciTechDaily 网站)