

**编者按:**标准模型建立已有半个世纪,这期间可以说经历了无数次的检验,然而她迄今仍“屹立不倒”。除中微子质量问题需适当修补外,其他方面均与目前各种实验结果没有明显冲突。这意味着,人们还需在标准模型框架下“修修补补”不知到什么时候。虽然各种迹象表明,标准模型只是一个电弱对称性破缺能标下的有效理论,然而人们就是寻觅不到新物理的“芳踪”。这也难怪乎2021年4月7日美国费米实验室一宣布综合缪子反常磁矩实验值与标准模型下计算结果有4.2个标准差的偏离后,物理学界一下就沸腾了起来,大有标准模型之“大厦”即倒,我辈将匡扶之的态势。各种新闻报道、科普文章频现。然而客观地说,不少报道和对实验现象的解释有失之偏颇之嫌。为正视听,我们特别邀请了三组既谙熟相关科学前沿又善于科普的专家,就缪子反常磁矩问题进行详细的诠释,以飨各路科学爱好者。

# 新物理的魅影?

## ——浅谈缪子 $g-2$ 实验

张昊

(中国科学院高能物理研究所 100049)

由于新冠疫情的影响,2021年4月7日上午,美国费米国家加速器实验室(Fermi National Accelerator Laboratory, FNAL)选择召开网络视频发布会,公布了缪子 $g-2$ 实验组对于缪子反常磁矩的首个测量结果。一石激起千层浪,现有结果与粒子物理标准模型预言之间4.2倍标准差的偏离,不仅吸引了全球粒子物理学家的关注,也引来了媒体的目光。一时间,超出标准模型的新物理再次成为了大家讨论的话题。缪子是什么?“ $g-2$ ”是什么意思?这个实验结果到底告诉我们什么?我们希望这篇小文能对大家大略地了解这些问题有所帮助。

书归正传,让我们从头说起。这个实验测量了缪子的反常磁矩,那么磁矩是什么呢?

### 磁矩——旋转的带电陀螺

人类对磁现象的认识,已经有数千年的历史。这大概要感谢自然界中的天然磁化物,比如大家常见的磁铁,俗称吸铁石。在我国,从两千多年前春秋时期就对磁石(当时记为“慈石”)有所记载,包括

《管子》、《山海经》、《鬼谷子》在内的古文献都提到了这种特殊的“石头”。《吕氏春秋》更是明确提出:“慈石召铁,或引之也。”同一时期的西方,正处于希腊古典文明的沐浴中。据记载,大约在公元前600年左右,来自米利都(Miletus)的古希腊哲学家泰勒斯(Thales. 没错,就是那个用大金字塔影子的长度测算了塔高的泰勒斯)记录了一种被他称为“Lodestone”的矿石。在希腊时代,这种矿石主要分布在麦格尼西亚(Magnesia)(图1)。这个地名,日后成为了西方语言中“磁铁”(magnet)一词的词源。

在现代自然科学诞生之前,人类虽然也在不断地积累对自然的认识,但是鲜有定量系统的处理方法。这种情况被杰出的英国物理学家伊萨克·牛顿所终结。伟大的牛爵爷,几乎凭借一己之力,改变了人们描述自然规律的手段。从他开始,人们用公式和数学总结和预言自然规律。利用这种方法,人类对于磁现象的描述,也有了长足的进步。1823年,安培(André-Marie Ampère)发现通电螺线管会产生一个与磁铁类似的磁场(图2)。这一重大发现将



图1 巴尔干半岛上磁铁洋文名称的词源地

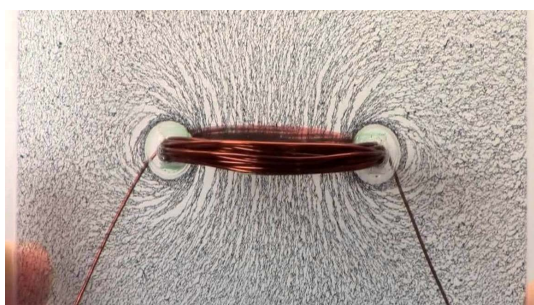


图2 铁屑展示出一坨通电螺线管产生的磁场

磁现象与电现象联系起来,凭此在中学物理课本中占据了一席之地。

如果有一个带电的陀螺(注意,是带电的陀螺,不是电动陀螺),当它转起来的时候,由于它身上的电荷跟随它的自转在运动,那实际上就是一群环形电流。所以,一个匀角速度自转的陀螺,或者一个匀角速度自转的物体,会像一节磁铁一样,而这节“磁铁”的南北极,就在自转轴的方向上。但是我们知道,磁铁在外磁场中是受力的,它受力的大小取决于自身的磁性,也就是自己能产生磁场的大小。这样,人们就可以用一个像电荷一样的数记录转动的带电陀螺或者小球受到的磁力大小与外磁场(不是它自己产生的那个)大小的比值。这个数,反映的是陀螺或者小球自己的性质,叫做它的“磁矩”(magnetic moment),一般用拉丁字母  $m$  或者希腊字母  $\mu$  表示。当然,转得越快,陀螺身上的那些电荷就跑的越快,等效的“环形电流”就越强,磁性也就越

强。另一方面,陀螺原本带的电荷越多,同等转速下“环形电流”也就越大。所以很容易理解,带电自转体的磁矩与转速和电量成正比。在这里,物理学家们一般将物体的自转转速用它的自转角动量与质量的比值反映,因此

$$\text{磁矩} \propto \text{电量} \times \text{自转角动量} \div \text{质量}$$

这个表达式的左右两边相差一个比例系数,这个比例系数的具体数值和这个“陀螺”的形状、电荷分布等等细节有关。

费米国家实验室这次测量的,就是缪子的这个比例系数。

## 自旋的故事

1925年8月,来自荷兰莱顿的青年物理学家乌伦贝克(George Eugène Uhlenbeck)和古施密特(Samuel Abraham Goudsmit)(图3),对解决长久以来氢原子光谱精细结构中的一个疑难提出了建议,他们在一个简单的公式中通过猜测手动加了一个  $1/2$ 。两位小伙子大概没有想到,这个人为参数  $1/2$  的背后,反映了量子物理和时空结构相结合的深刻结果。

光谱这个词儿,听起来很高大上。实际上人类在生产生活中利用光谱的历史十分悠久。成书于春秋战国时期的《周礼 考工记》中曾有记载:“黑浊

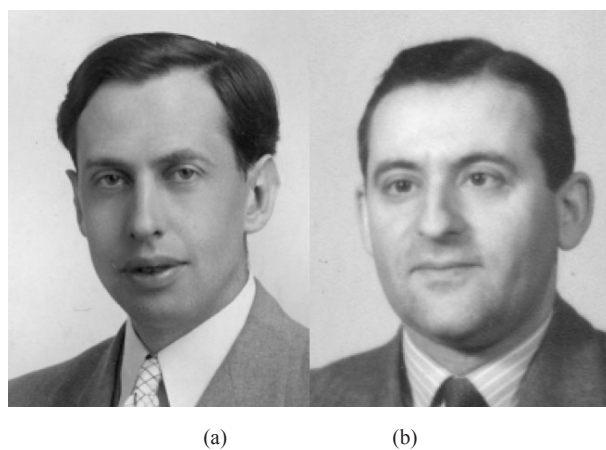


图3 (a)莱顿大学硕士、荷兰驻罗马大使小儿子的私人教师,著名物理学家埃伦费斯特的学生 George Eugène Uhlenbeck (1900/12/06-1988/10/31);(b)略萌的是被朋友们称为山姆的 Samuel Abraham Goudsmit (1902/07/11-1978/12/04)

之气竭,黄白次之;黄白之气竭,青白次之;青白之气竭,青气次之,然后可铸也。”这段话说的,正是古代青铜冶炼技术中,根据火焰的颜色判断炉温高低的方法。自从牛爵爷用三棱镜将不同颜色的光分开,物理学家开始可以按照不同频率的光所占的比例研究发光体的性质。慢慢的,人们发现,单一元素的发光是具有选择性的,它们只会发出或者吸收特定频率的光。在19世纪后半叶和20世纪初,光谱学是物理学家研究物质微观结构的重要手段。复杂而有选择性的光谱特征,暗示着发光体具有更精细的微观结构。

玻尔的氢原子模型,通过引入量子化轨道的概念,成功地解释了氢原子光谱(图4)。但是随着物理学家对氢原子光谱的观测越来越精确,实验中看到的一些光谱结构已经无法用玻尔的模型解释。从1913到1925年的12年间,物理学家们尝试将玻尔的量子论与爱因斯坦的狭义相对论结合起来解释这些“精细结构”。乌伦贝克和古施密特的工作,就是其中之一。在他们的八月文章发表两个月后,1925年10月17日,二人再度合作,给八月文章中的那个1/2,赋予了一个直观的物理意义:

“绕核运动的电子,在不停地自转,这个1/2反映了电子的自转角动量。”

电子的“自转”,被称为自旋(spin),由自旋导致的角动量,称为电子的自旋角动量(用来与电子绕着原子核公转的角动量——称为轨道角动量——相区分)。人们很快发现,把电子看作一个不停自转的小球这种经典力学的图像尽管直观,但必定是错误的。它会带来电子表面线速度远超光速等荒谬的结果,而且也没人能让它停下来不转或者转得更快。电子的自旋,是狭义相对论时空对称性与对世界的量子描述相结合的必然产物,不是宏观物体的一种机械运动。正确理解电子自旋的起源,必须用到相对论性量子场论。但是在我们的这篇小文



图4 氢原子光谱

中,姑且把电子想象成一个自转的小球,可以帮助我们直观地理解一些问题。只要你记得这样做严格讲是有问题的就好。

我们前面提到过,一个带电小球自转的时候会产生磁矩,使它在磁场中像一块磁铁一样受力。既然电子有自旋,那么它有没有磁矩呢?答案是肯定的,乌伦贝克和古施密特甚至给出了电子磁矩  $\vec{\mu}_e$  与自旋角动量  $\vec{s}$  的关系(图5),这个公式是如此的重要,我们不得不把它写下来

$$\vec{\mu}_e = g_e \frac{e\hbar}{2mc} \vec{s}$$

其中  $m$  是电子质量,  $e$  是单位电荷电量(也就是电子的电量),比例系数  $g_e = 2$  被称为电子的朗德(Landé)  $g$  因子。这个2,与天才物理学家狄拉克写下的相对论性电子运动满足的量子力学方程——狄拉克方程给出预言完全一致。实验组测量的所谓“ $g-2$ ”,正是朗德  $g$  因子与2的差异。

朗德  $g$  因子不是被狄拉克方程认定为2吗,为什么又有差异了?

## 量子效应与 QED 的胜利

20世纪的前30年,是理论物理学的革命时期,可谓“遍地是黄金”。1925到1926年间量子力学的建立,无疑是其中最重要的成果之一。从此之后,物理学家在面对量子效应的时候,终于摆脱了自玻尔的量子论以来半经典、半人为的处理方法,有了一个理论框架。然而薛定谔的量子力学波动方程,并没有考虑20世纪初物理学的另一大发现,相

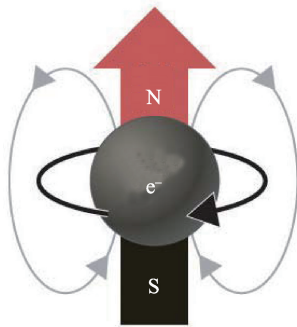


图5 电子自旋与磁矩

对论。这不是因为他不想(他肯定不傻),而是因为简单的结合给出与实验相矛盾的结果,于是只好退而求其次。

但是人们面临的问题是,要解决经典原子模型中核外电子圆周运动产生电磁辐射导致能量损失最终使得原子不稳定这一疑难,必须量子化地考虑电磁场。而电磁场满足的经典运动方程就是相对论性的,不存在非相对论量子电动力学。因此,早在量子力学建立的同一年,物理学家们就开始构建一个更宏大的理论框架——相对论性量子场论。

在量子力学中,今天最广为人知的量子效应可能就是不确定性关系(也叫测不准原理),最简化的版本就是说,人们永远无法同时确切地确定和言说一个遵循量子力学运动规律的粒子的动量和位置。在量子场论中,量子效应深入到时空的每一点。不仅对于一个粒子,存在不确定性关系,由于空间中存在包括电磁场在内的各种场,这些场在时空中每一点的场强和场强的变化速度,也要服从不确定性关系。所以在时空中的每一点,各种量子场都在不确定性关系的指导下,发生所谓的“量子涨落”。场可以赊账,借来能量产生它的激发——粒子,只要在满足不确定性关系给出最短时间以内再把这些能量还回去,就不会有任何实际上破坏能量守恒定律的事情被观测到。这样的过程,被称为“虚过程”,我们可以脑补真空中的各种场,实际上无时无刻不在发生这些虚过程(图6)。

正所谓看似风平浪静,实则波诡云谲。

同样的,当一个电子岁月静好地坐在那里的时

严格的图像,这个电子无时无刻不在变为其他的粒子,只要在不确定性关系允许的范围内变回电子就可以了。比如,现在我们知道,一个电子可以默默地“变成”一个W玻色子和一个电子中微子(都是“虚”的),只要后者很快复合成原先的电子,那么在不确定性原理的保护下,这种过程对于能动量守恒的违反就是无法被观测到的,因而是允许且时刻“发生”的。

然而这些虚过程并非毫无观测效应,它们只是不破坏能量守恒定律这类基本原理,却完全可以微弱地改变物理常数的数值。狄拉克方程只是说电子的朗德g因子是2,但是中间这些虚粒子的运动状态和朗德因子都可能与原先的电子不同。因此这些虚过程最终将使得电子的g因子微弱地偏离2。在量子场论的框架下计算这个微小的偏离,不是一件容易的事情。1947年12月,著名物理学家朱利安·施温格(Julian Seymour Schwinger)(图7)第一次给出了对这个偏离的计算结果

$$a_e = \frac{g_e - 2}{2} = \frac{\alpha}{2\pi}$$

其中的常数 $\alpha$ 是电磁相互作用的强度,称为精细结构常数(库仑定律里面那个常数的另一种形式)。这个偏离,由于与之前的预言2不符,被称为电子“反常”磁矩。

施温格的计算,考虑的是量子涨落发生一次的效应。实际上,量子涨落中还可以有量子涨落,中间的虚粒子自己还能够瞬间幻化成其他虚粒子。这种层层相套的效应,计算起来相当复杂,在各种理论工具和高性能计算机的帮助下,今天人们给出



图6 量子场就像狡猾的鼹鼠,在空间中的每一点每时每刻都可能冒出来,然后在人们没有看到它之前藏回去。我们看到的,只是一直在洞外跑的那些鼹鼠

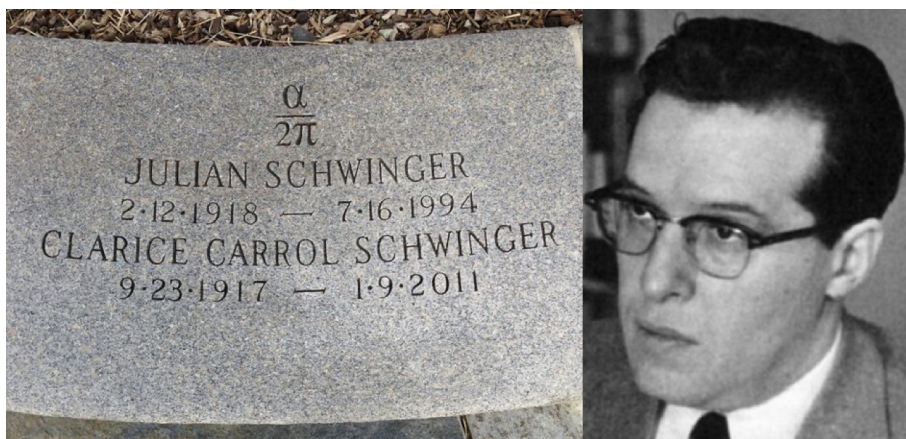


图7 朱利安·施温格(1918/02/12-1994/07/16),据传费曼曾经承认自己嫉妒他的聪明。他的墓碑上镌刻着电子反常磁矩的第一个计算结果

的电子反常磁矩的计算结果,已经包含了产生5重虚粒子的微弱量子涨落。其精度之高,使得电子反常磁矩的测量反过来成为了对精细结构常数最精确的确定方法。目前人类在实验室中测到的电子反常磁矩的数值为<sup>①</sup>

$$a_e = \frac{g_e - 2}{2} = 0.00115965218073 \pm 0.000000000000028$$

精度达到了惊人的百万分之0.00024。由此利用复杂的计算公式,给出的<sup>②</sup>

$$\alpha^{-1}(a_e) = 137.0359991496(13)(14)(330)$$

括号中的三个数是最后三位来自不同原因的误差。电子反常磁矩的计算,被视为量子场论版的电磁理论——量子电动力学(Quantum Electrodynamics, QED)最成功的结果之一。

然而这次问题出在了缪子身上。

缪子是谁?

## 缪子是谁?

20世纪30年代中期,因为在宇宙线中发现了正电子而获得诺贝尔物理奖的安德森和他的合作者尼德迈耶,着手分析当时宇宙线中的“硬”成分。这种成分不像是当时人们已知的电子,实验结果也不支持它是质子的猜测。最终,在1936年11月的一篇文章中他们提出,这是一种质量介于电子和质子之间,带一个单位电荷的新的粒子。很快,更多

的测量预示着这种粒子的质量大约是电子质量的200倍。

当时的市场上,确实有人预言过一种具有类似质量的尚未被发现的粒子。这种粒子原本是为了解释质子和中子之间的吸引力而提出的。众所周知,带电物体同号相斥,然而原子核中的诸多质子都带正电,却没有炸开。这说明质子之间存在一种新的相互作用力,把它们强烈地吸引在一起。日本物理学家汤川秀树就构造了这样一个核子之间吸引力的理论模型。与电磁相互作用会给出电磁波类似,这种相互作用预言了一个充当力的传递者的新粒子。经过计算,汤川说,它的质量大概是电子质量的200倍左右,并将它称为“介子”。

质量一致,人们自然地把宇宙线中发现的新粒子看作是介子的候选者。然而事后的种种迹象表明,这种新粒子与汤川预言的介子性质大为不同。十几年后人们才确定,真正的介子另有其人(今天称为 $\pi$ 介子, pion),而安德森他们发现的是一种全新的粒子——缪子( $\mu$ 子。一直到很久之后,“ $\mu$ 介子”这种称呼仍然可以见到,这也算是个历史遗留问题了)(图8)。

缪子的发现解决了什么问题吗?坦率地讲,除了解释了宇宙线硬成分,在当时似乎没有其他用处。它除了比电子重很多以外,其他性质与电子几乎完全一致。由于太重,缪子无法长期存在,它会变成一个电子和一对正反中微子,这个过程称为

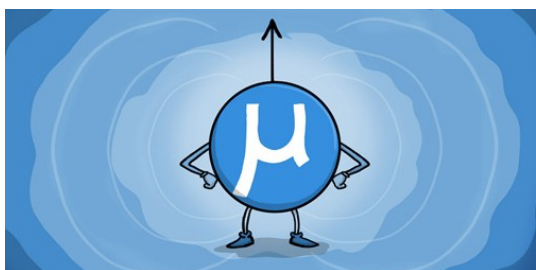


图8 电子的胖哥哥——缪子  
注意,它和电子一样,也是个小磁铁

“衰变”。一个缪子产生后,在衰变前大约仅能存在0.0000022秒,短命得很。今天我们知道,在粒子物理标准模型中,缪子与电子同属一类,它们参与相互作用的性质和所带的各种荷(除了质量)完全一致。对我们的问题而言,重要的是,缪子也是个“带电小陀螺”,也有朗德 $g$ 因子( $g_\mu$ )。但是由于缪子的质量比电子大,它能激发的量子涨落效应比电子更显著,这使得物理学家们对于缪子反常磁矩的测量产生了极大的兴趣。

## 缪子反常磁矩的测量

在费米实验室的测量结果之前,物理学家已经不止一次测量过缪子的反常磁矩。其中最为著名的实验,就是美国布鲁克海文国家实验室(Brookhaven National Laboratory, BNL)(图9)的



图9 美国布鲁克海文国家实验室始建于1947年,位于纽约州长岛东端。图中所示为其标志性科学装置:相对论重粒子对撞机(Relativistic Heavy Ion Collider, RHIC)

E821实验。这次费米国家实验室测量缪子反常磁矩的方法,在原理上,与E821实验基本相同。

如何测量缪子磁矩呢?

缪子的寿命只有短短的2微秒,显然不可能把它老老实实放在磁场里观察。物理学家们利用了一种带磁矩的粒子在匀强磁场中运动的特有现象——托马斯进动(Thomas precession)。

通过对经典陀螺进行受力矩分析,人们发现一个高速转动的陀螺,当它的转动轴与地面不完全垂直时,转动轴也会转动。这背后的原因,是因为陀螺始终受到一个垂直它角动量方向的力矩。中学物理课上大家都学过匀速圆周运动,知道如果一个质点始终受到垂直它动量方向的力,它就会做匀速圆周运动。类似的,如果一个陀螺始终受到一个垂直它“角”动量方向的力“矩”,它的转轴——也就是角动量方向,也会做一个“匀速圆周运动”。转动物体转动轴的这种变化模式,就叫做“进动”(precession)。

在我们的身边最宏伟的进动过程,恐怕就是地球自转轴的进动(图10)。地球的自转轴与地球绕太阳公转的平面并不垂直,而是有一个大约23.5度的夹角。这个夹角决定了南北回归线的纬度。地球的自转轴也在发生公转,也就是说,地球的北极并不固定地指着星空中的一个方向,而是在画圈。画一圈的周期有多长呢?大约26000年。所以这个进

动是非常缓慢的。这里有一个有趣的现象,由于地球自转轴的进动与地球公转的周期不一样,所以地球绕太阳转一圈回来的时候,自转轴偷偷地移动了一点方向。经过半个进动周期,也就是13000年左右,自转轴会向另一个方向倾斜23.5度。到时候,太阳直射北回归线的那天,地球将位于公转轨道上现在对应冬至那天的位置,而不是夏至的位置(但是由于通常所用的是盯住季节的“回归年”,而不是盯住轨道位置的“恒星年”,所以届时仍然是夏至日太阳直射北回归线。)。另一个著名后果是,由于正北方是自转轴确定的,北极星在夜空中不会永远是正北。比如,2000年后在夜空中位于正北方的,将是紫微左垣七(仙王座的Gamma Cephei)。

地球的自转轴进动周期和地球的公转周期不相同,导致地球公转一周后自转轴不在原来的位

置。一般而言,对于机械转动,把两个周期调节到严格相等一点不差,即便不是不可能也是挺难的。那么有没有可能自转轴的进动周期和公转周期完全一致呢?

还真有!

中学物理上老师讲过,作为一个带电粒子,缪子在一个匀强磁场中会做匀速圆周运动(公转)。但是缪子的自旋方向(自转轴)如果与磁场不平行的话,它会受到磁力产生的一个力矩,从而导致自转轴在磁场中发生进动(图11)。这个进动,被称为托马斯进动。神奇的是,这个进动的周期与缪子在磁场中的公转周期有一个确定的关系。原理上,这是因为导致缪子公转和自旋轴进动的力都是源自同一个外磁场的磁力,前者与缪子的电量成正比,后者与缪子的磁矩成正比。而缪子的磁矩又与它的

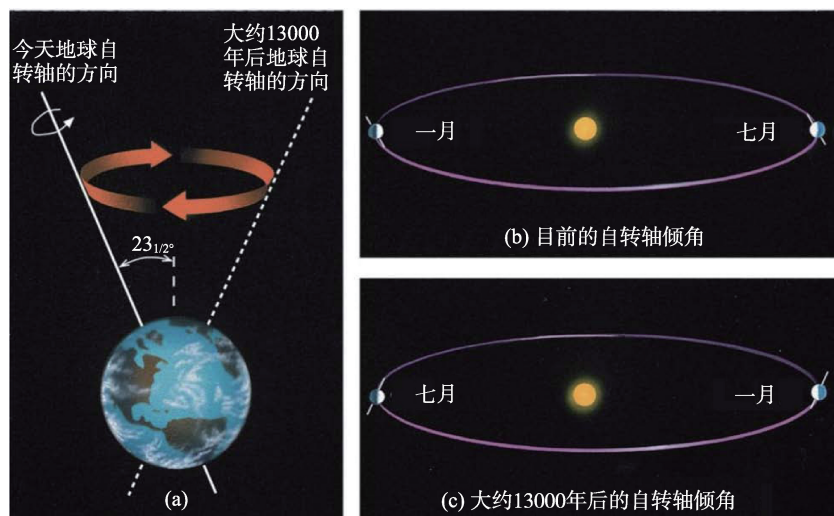


图10 地球自转轴的进动

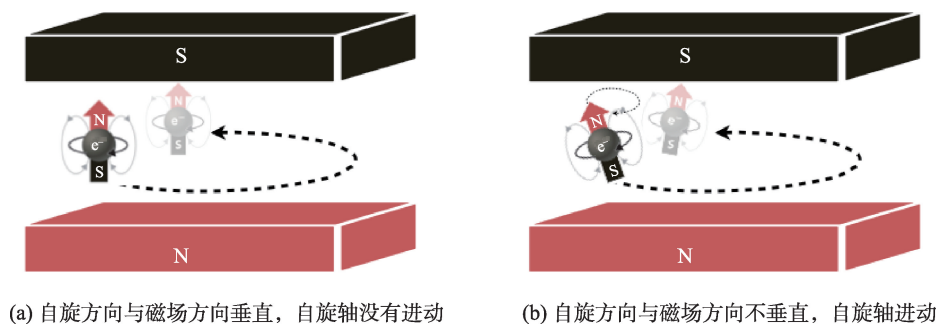


图11 自旋粒子的自旋轴在外磁场中的进动

电量成正比(比例系数反映了缪子的朗德g因子)。因此,这两个力本质上来来源是相同的。今天,人们知道缪子自旋  $\vec{s}$  (也就是磁矩)在匀强磁场  $\vec{B}$  中进动满足的动力学方程——托马斯方程。经过计算,物理学家可以知道,如果缪子的反常磁矩  $a_\mu \equiv (g_\mu - 2)/2$  严格等于0的话,这个自旋轴进动一周的周期,与缪子在磁场中做圆周运动一周的周期是严格一致的。而如果  $a_\mu$  不等于零,它就会导致缪子的自旋进动周期与公转周期不一致。因此,物理学家们只要把自旋轴不平行于磁场的缪子扔进一个匀强磁场里,看看它转一圈回来的时候自旋轴是不是还指着原来的方向、偏差了多少,就能够知道缪子的  $a_\mu$  有多大了。

费米国家实验室缪子g-2合作组的实验家们把自旋轴垂直于外磁场(也就是自旋轴“躺在”圆周运动的平面上)且平行于运动方向的缪子(这种自旋轴高度同向的缪子称为“极化”缪子)打到一个叫做“磁储存环”的环形轨道里,他们在这个轨道里制造了一个高度均匀的稳定磁场,使得缪子沿着磁储存环做匀速圆周运动。利用物理学家早已熟知的公式,可以计算出缪子公转的角速度(圆周运动单位时间内转过的角度)

$$\vec{\omega}_c = -\frac{q\vec{B}}{m} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

这个角速度称为“回旋频率”(Cyclotron frequency);缪子自旋轴进动的角速度(也就是自旋小箭头在公转平面上扫圈的角速度)

$$\vec{\omega}_s = -g_\mu \frac{q\vec{B}}{2m} - \frac{q\vec{B}}{m} \left( \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} - 1 \right)$$

这两个角速度的差,会导致缪子公转一圈回到起点的时候自旋轴没有回到原方向,其大小

$$\vec{\omega}_a = \vec{\omega}_s - \vec{\omega}_c = -a_\mu \frac{q\vec{B}}{m}$$

严格正比于缪子的反常磁矩  $a_\mu$ 。所以,只要能够精确控制磁场、精密测量出基本电荷和缪子的质量,通过精确测量缪子回旋一周后自旋轴的指向(因为角度差等于角速度差乘以时间)就可以给出它的反常磁矩了(图12)。

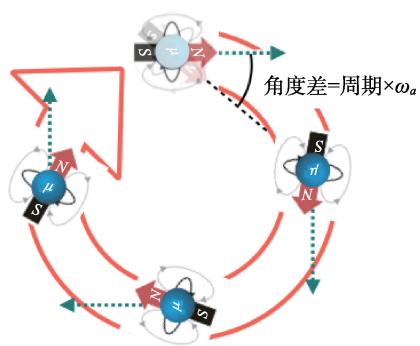


图12 缪子反常磁矩的测量原理

由于做匀速圆周运动的缪子,每时每刻的运动方向都沿着圆周的切线方向,所以剩下的问题,就是如何测量缪子自旋轴的指向了。聪明的物理学家利用了缪子衰变的一个特性,而这个特性,与1954年李政道和杨振宁猜想、并被吴健雄通过实验证实的弱相互作用宇称破坏有关。我们在此只需要知道,由于宇称破坏,缪子衰变(炸裂)产生的那个电子,在大部分情况下,更喜欢沿着衰变前那个缪子的自旋轴方向飞出来。所以,衰变电子的运动方向,可以作为缪子自旋轴方向的指标。实际上,人们并不需要测量电子的运动方向。因为缪子本身是高速运动的,当电子飞出来时,就好像从一节高速飞驰中爆炸的车厢上跳下车的人,如果它顺着火车行驶的方向跳,落地的动能就大,如果它逆着火车行驶的方向跳,落地的动能就小(图13)。因此,只要在实验室中测量电子的能量,就能知道缪子(相当于车厢)的运动方向与电子(相当于跳车的人)的运动方向是否一致了。电子的普遍能量越高,它们的运动方向与衰变前缪子的运动方向夹角就越小,缪子的自旋轴方向与运动方向夹角也就越小;

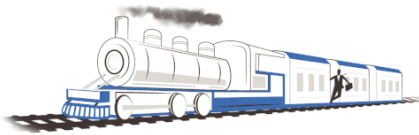


图13 在实验室中,缪子衰变产生的电子就好像一个从飞驰的火车上跳下来的人



反之,电子的普遍能量越低,它们的运动方向与衰变前缪子的运动方向夹角就越大,缪子的自旋方向与运动方向夹角也就越大。由于反常磁矩导致每转一圈这个夹角都会变大一点,直到夹角涨到360度再重新开始。所以,观测到的电子能量的大小也会周期变化,相应的角频率就是 $\omega_a$ 。

于是,实验家们只需要在磁储存环上开几个观察窗,测量一下从窗口飞出的缪子衰变产生的电子的能量随时间的周期变化情况,就可以确定 $\omega_a$ 了。测量的次数越多,获得的结果也就越精确。至于其他的问题,比如如何用一辆小车上的核磁共振探针测量储存环中的磁场、怎样给这些探针校准等,属于具体的实验细节,我们在此就不赘述了。

2006年,布鲁克海文国家实验室E821实验的缪子反常磁矩测量结果显示<sup>②</sup>

$$a_\mu = \frac{g_\mu - 2}{2} = 0.00116592080(63)$$

精度为百万分之0.54。这一结果与当时的标准模型理论计算相差2.7倍标准差。随着时间的推移,在费米实验室发布他们新结果的时候,E821的老结果与理论预言的偏差已经达到了3.7倍标准差。

费米实验室不仅利用了与布鲁克海文国家实验室完全相同的实验原理,连磁铁也是直接把布鲁

克海文国家实验室E821组的那块老磁铁直接千里迢迢运来的。为此,他们先是海运,接着走内河,最后一段用卡车才把这块巨大的磁铁从纽约州长岛运到位于芝加哥西郊的费米国家实验室(图14)。磁储存环的直径有14.2米(图15),其中的匀强磁场的磁感应强度达到了1.45特斯拉(特斯拉是一个比较大的单位,一般的磁铁是没有这么强的,医院核磁共振仪的磁场磁感应强度可以达到几个到十个特斯拉左右,所以做核磁共振检查之前大夫会反复叮嘱你把身上的所有金属物件都摘下来,否则一开机……)。这时的频率差大概使得每跑27圈,缪子的自旋轴会再度与运动方向重合。

经过对一期运行数据的仔细分析,2021年4月7日当地时间上午10点,费米实验室缪子反常磁矩合作组召开线上新闻发布会,公布了他们对缪子反常磁矩测量的最新结果(图16)。新的结果与E821实验组的结果基本一致,但其中心值略微接近了标准模型的预言,且具有更小的实验误差。当物理学家们综合了布鲁克海文国家实验室的结果后,最终得到<sup>③</sup>

$$a_\mu(\text{实验}) = \frac{g_\mu - 2}{2} = 0.00116592061(41)$$

精度提高到了百万分之0.35,而标准模型理论的预言为<sup>①</sup>:



图14 卡车装载着巨型磁铁,抵达位于美国芝加哥市西郊的费米国家实验室。图中的建筑,是费米国家实验室的标志性建筑威尔逊楼(Wilson Hall)

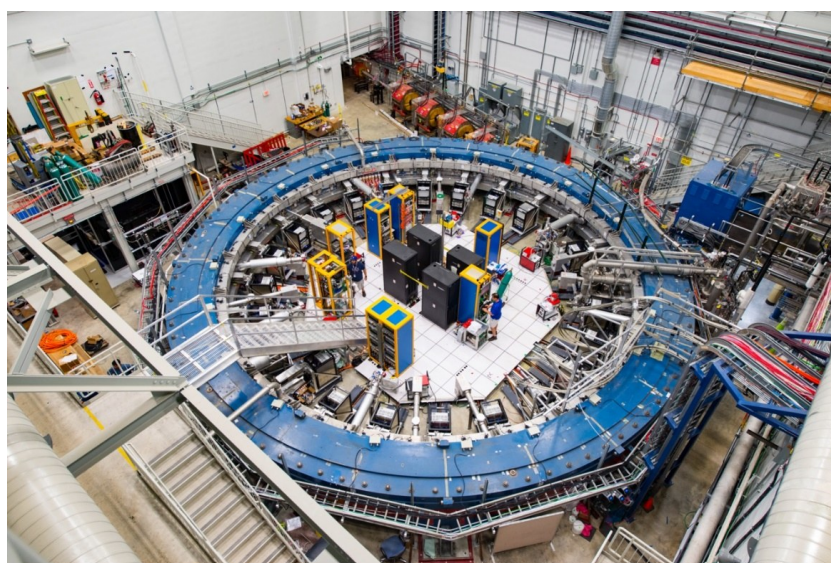


图15 费米实验室缪子反常磁矩测量实验。蓝色的环就是磁储存环

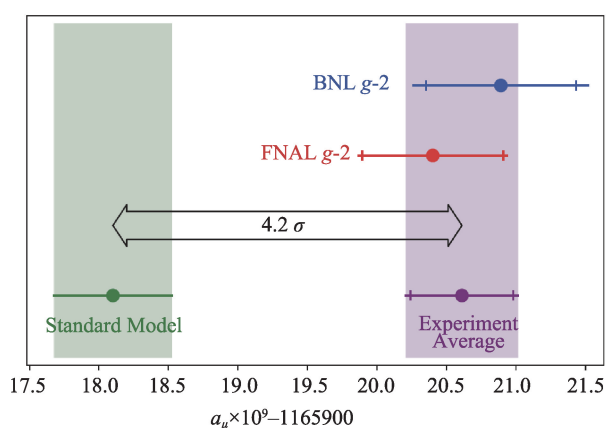


图16 费米国家实验室缪子反常磁矩合作组公布的最新结果<sup>③</sup>

$$a_{\mu}(\text{标准模型}) = \frac{g_{\mu} - 2}{2} = 0.00116591810(43)$$

精度为百万分之0.37。新的结果表明，实验结果比标准模型理论的预言大了4.2倍标准差。

费米实验室这次的新结果，与15年前布鲁克海文国家实验室的测量值相比，距离标准模型的预言更近了，单独看其偏差，统计显著性更小(3.3倍标准差)。当实验家把E821的结果拿来与新结果做综合时，由于E821旧结果距离标准模型的预言更远，所以综合后的最终结果比单独的新结果更为远离标准模型预言。但是新结果的大量数据，在综合后减小了总的统计误差。因此，综合后的结果与单独费米实验室的新结果相比，数值上离标准模型预言更

远，误差更小，这就直接导致了综合后的结果偏离显著地高于单独实验结果。

## “5个 $\sigma$ ”的意义

在众多介绍这次实验结果的重要意义的文章中，都提到了理论与实验结果的不一致性达到了4.2倍标准差。这意味着，这么大的偏离仅仅源于各种误差的概率，不足0.002%。换句话说，这里面一定是哪里出了问题。哪里出了问题呢？大概可能有以下几个原因：标准模型本身有问题，需要超出标准模型的新物理；理论计算的结果有问题；理论计算的误差估计有问题；实验方法有问题；实验结果的误差分析有问题。

在我们讨论这些可能行之前，首先介绍一个高能物理界判定新发现的金标准——5个 $\sigma$ 。它的意思是说，只有当理论与实验的偏差达到5倍标准差时，高能物理学家才会认定发现了一种新现象。这个标准要求，偏差仅仅源于各种误差的概率，要小于0.000029%。

为什么高能物理界要选择这么严苛的判定标准呢？要知道，在很多自然科学领域，判定新发现的标准是偏差仅源于误差的概率不高于5%。5和4、或者6的差异有那么重要吗？

首先,这源于标准模型在解释现有各种高能物理现象中取得的巨大成功,以及高能物理学的精确性。从贝叶斯统计的观点看,这就是说每当人们通过一次新的实践验证了某个经验或者模型的时候,这个经验或者模型的可靠性就被提高了。如果一个规律前一百万次都成立,而在第一百零一万次的时候被破坏了一下,人们会更倾向于认为是这次操作出了什么偏差,而不是规律本身的问题。卡尔萨根曾经说过,“非凡的断言需要非凡的证据”,正是这个道理。高能物理的新实验结论往往会深刻改变人们对世界的认识,做出如此重要的结论,当然要更为小心一些。

其次,在当今如此复杂的高能物理实验中,准确分析全部实验误差,是非常困难的工作。无论是分析数据采用的统计学模型(在分布的尾端很可能不靠谱),还是对于实验方法和设备带来的系统误差估计,都有可能带来甚至数量级上的偏差。当物理学家把这些误差组合起来时,采用较高的标准,可以一定程度上避免犯激进的错误。

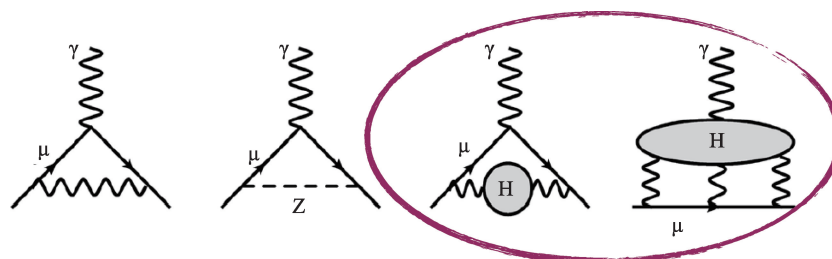
当然,选取数字5也难免有人为因素。“以史为镜,可以知兴替。”如果非要问5和4、3有什么区别的话,那么我们只好援引历史。在高能物理历史上,出现过不少3倍标准差左右、甚至达到4倍标准差左右的所谓“信号”事后烟消云散的例子。笔者从业以来二十年不到的时间里,就有“Tevatron上240 GeV正负电子共振峰”、“Tevatron上顶夸克对产生的前后不对称性”、“DAMA/LIBRA暗物质实验观测结果”、“Tevatron上W玻色子联合双喷注产生中的150 GeV双喷注共振峰”、“OPERA超光速中微子”、“LHC上750 GeV双光子共振峰”等风靡一时的“新现象”。事后,这些现象有些被证明是统计涨落,有些被证明是理论计算精度不够,有些被证明是实验错误,有些被证明是理论的计算机模拟软件设定问题。结合更久远以前的经历,今天的高能物理界仍然公认,只有当理论和实验的偏差达到5个 $\sigma$ ,并且经过反复分析没有发现理论和实验存在误差估计问题的情况下,才可以严肃地声称“发现了超出标准模型的新物理”。

## 新物理还是其他?

尽管金标准是5个 $\sigma$ ,费米实验室新公布的缪子反常磁矩超出标准模型预言 $4.2\sigma$ 的结果,仍然吸引了众多物理学家的关注。由于这一实验的测量结果非常精密,数据量极大,因此不太可能是随机统计涨落的后果。物理学家们普遍认为,它的背后一定有更为基本的原因。目前对这样几种可能性的讨论比较多。

第一种可能性,就是真的存在超出标准模型的新物理,并且缪子反常磁矩就是新物理的信号。我们前面已经提到过,量子场的涨落,会影响缪子的反常磁矩。如果有新的未知量子场,它的涨落就可能影响缪子的反常磁矩,尽管这种场对应的粒子可能很重,因此影响很小,但是它却可能被高度精确的实验所捕捉到。在包括著名的超对称模型在内的不少新物理模型中,都可能存在对缪子反常磁矩有贡献的新粒子。费米实验室的结果公布当天,高能物理预印本网站arXiv.org上就上线了34篇用新物理模型解释它的科研论文,其受关注程度可见一斑。由于反常磁矩本身就是一种量子涨落现象,要达到足够大的贡献,所需要的新粒子的质量不能过大。因此,尽管仅凭借缪子反常磁矩实验我们并不能知道到底是哪种新物理模型的新粒子导致了这个反常,人们仍然有可能、且只能通过(一个新粒子最终的发现,需要直接观测它,而不仅是看到它的影响)在未来的大型强子对撞机实验或者更高能量和精度的对撞机实验中找到它。

第二种可能性,是标准模型理论计算的精度估计有所偏差(图17)。理论物理学家对缪子反常磁矩的计算精度,比对电子反常磁矩的计算精度要低。这部分地源于缪子具有较大的质量,因而可以激发更强的量子涨落。在这些量子涨落中,有一些涉及到一类被称为“强子”的粒子的贡献。顾名思义,这些粒子之间彼此的相互作用很强,所以在计算的时候,涨落两次的概率不一定远远小于涨落一次的概率,人们也就很难判断计算究竟达到了



别问我们是谁，我们很难算 🐱

图17 标准模型理论计算的难点

何种精度。

近年来理论家用超级计算机直接对这些粒子的贡献进行数值计算(图18中那些绿色的方块),给出的结果显示先前的理论方法给出的结果(图中红色的点)有较小且低估了误差的可能。然而,迄今为止,物理学家对新的数值计算方法的结果的误差分析和准确数值,还没有完全达成一致,不同组给出的计算结果和误差各不相同。这也是实验组此次没有采用新结果作为理论比较对象的原因之一。目前,理论界对于新结果的最终“结论”,也表现了极大的兴趣。

当然,还有其他可能的原因。比如,费米实验室缪子反常磁矩实验的技术有了进步,但是实验原理与十几年前的E821并无不同。4月7日晚上报告人在回答听众提问时就半认真半玩笑地表示,如果有人能找到这个实验方法中的漏洞,那将是重要的工作。

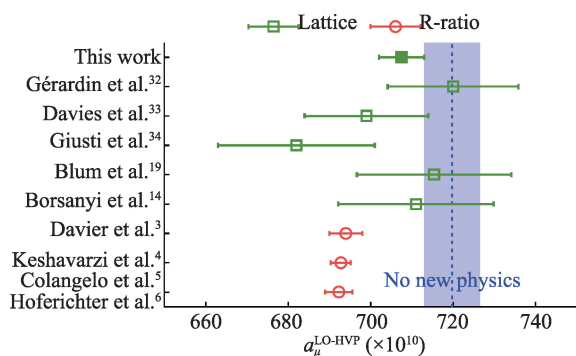


图18 不同理论计算对强子真空极化效应的结果。绿色结果是来自不同合作组的格点量子色动力学数值计算的结果,红色的点是通过R值散关系计算的结果,竖直的蓝色虚线为实验测量值<sup>④</sup>

### 展望

费米国家实验室的缪子反常磁矩实验,以及前不久大型强子对撞机上的LHCb实验组对于B介子衰变中轻子同一性的测量得到的高于3倍标准差的反常。也许是后疫情时代高能物理高亮度前沿的第一批结果中,最吸引人的结果之二。不知道是否是巧合,这两个实验结果对标准模型的偏离,观测的都是和缪子相关的过程。这其中是否蕴含着超出标准模型的新物理的信息,我们今天还无法做出定论。然而毫无疑问的是,理论家和实验家将在今后的一段时间继续关注这些问题。

目前缪子反常磁矩实验组仅公布了2018年收集的实验数据的分析结果。在一期运行之后,缪子反常磁矩实验组对他们的实验设备进行了升级。2019和2020年度收集的实验数据(二期和三期)正在分析之中,预计届时实验误差将减小到目前的一半左右。四期运行正在进行和计划中,他们准备将实验误差再减小一半。除此之外,未来还有计划中的新实验,准备用不同的实验原理测量缪子的反常磁矩。相信在不远的将来,缪子反常磁矩的实验和理论结果,能够对其中是否蕴含着新物理信号,给出更为确定和坚实的答案。

### 参考文献

- ① T. Aoyama, et al., Phys. Rep. 887 (2020) 1-166
- ② G. W. Bennett, et al., Phys. Rev. D 73 (2006) 072003
- ③ B. Abi, et al., Phys. Rev. Lett. 126 (2021) 141801
- ④ Sz. Borsanyi, et al., Nature (2021). <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03418-1>