

# 对W粒子质量的精确测量 为什么这么重要

陈缮真

(中国科学院高能物理研究所 100049)

2022年4月8日,费米实验室在《科学》杂志上发文,他们最新研究结果表明,W粒子的质量严重偏离标准模型的理论预言。这一研究结果可能是继十年前希格斯粒子(也就是媒体常说的“上帝粒子”)被发现之后粒子物理学领域最重要的成果。《科学》杂志将这一期的封面设计成图1的这个样子。图1中岩石质感的W字母砸碎了一个圆盘,而这个圆盘代表着粒子物理学的“标准模型”。《科学》杂志在用很直观的图片传递了一个信息,也就是这次的测量结果显示,一种叫做“W粒子”的微观粒子

的质量比理论预想的更重,而这一结果有可能会打破粒子物理学的基础——标准模型。

## 1. W粒子是什么?

我们所能认知的宇宙中的一切,都是由无数个微观粒子所组成的,而微观粒子组成更复杂的结构的过程中,不但需要累积“砖块”(也就是实物粒子),还需要将这些“砖块”粘接起来的“水泥”(也就是粒子间的相互作用力)。科学家们描述微观粒子以及它们之间的相互作用的理论叫做粒子物理学的标准模型。图2简单描述了标准模型中所涵盖的所有粒子,外圈的12种粒子是构成物质世界的实物粒子,中圈是四类传递相互作用力的粒子,而最里面是赋予其他粒子质量的希格斯玻色子。

在微观世界当中,除了电磁力与引力以外,还有两种相互作用力,分别叫做强相互作用力(以下简称“强力”)和弱相互作用力(以下简称“弱力”)。而电磁力、强力、弱力的传播,在微观层面下来看,都是通过交换一些粒子来实现的。这类被交换的粒子叫做规范玻色子,也就是图2中圈里的四类粒子。传递电磁力的规范玻色子我们大家都能深刻地感知,就是能给世界带来光明的光子,也就是图2中的 $\gamma$ (gamma),传递强力的规范玻色子叫做胶子,也就是图2中的g,而传递弱力的规范玻色子有两类三种,分别是电中性的Z粒子和分别带有正负电荷的两种W粒子。这其中,W粒子之所以被称为W,就是在描述它可以传递弱(Weak)相互作用力。



图1 《科学》杂志4月8日期封面

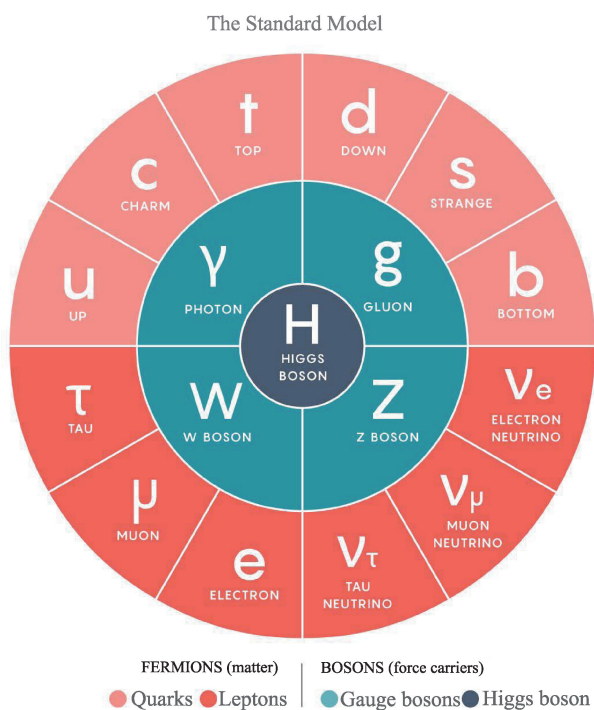


图2 粒子物理学的标准模型。外圈的12种粒子是构成物质世界的实物粒子,中圈是传递相互作用力的规范玻色子,而最里面是赋予其他粒子质量的希格斯玻色子

早在20世纪30年代,当年还在意大利生活的科学家恩里科·费米为了解释 $\beta$ (beta)衰变,借鉴电动力学的理论,提出了对弱相互作用最早的描述理论。在此后的三十多年间,科学家们发现弱相互作用中存在着许多令人着迷的现象,李政道与杨振宁就是在此期间提出了弱相互作用中的宇称不守恒的理论。尽管关于弱相互作用的实验现象一再刷新科学家们对于微观世界的认知,但是关于“弱相互作用究竟是如何发生的”这一问题,一直到了20世纪60年代,才出现了比较系统的解答。在此期间,谢尔顿·格拉肖、阿卜杜勒·萨拉姆以及史蒂文·温伯格等人统一了电磁相互作用力和弱相互作用力,并预言了传递弱相互作用力的W粒子和Z粒子的存在。而W粒子与Z粒子的质量,则被认为是与希格斯机制以及弱相互作用的强度有关。但是,Z粒子和W粒子一直到接近20年后才在实验中被发现。这是因为,由于实验上观测到弱相互作用的作用范围非常短,这就说明传递弱相互作用的粒子是很重、很不稳定、很快就会衰变的粒子。因此,想要在

实验上产生这些很重的粒子,根据爱因斯坦的质能关系方程,就需要给粒子注入很大的能量。粒子物理学家产生粒子的工具,也就是给粒子注入能量的工具,就是对撞机。欧洲核子研究中心为了发现W和Z粒子,以及做一些其他的研究,曾建造了一台周长6.3千米的、叫做“超级质子同步加速器”(SPS)的对撞机。这台对撞机最终不负众望,在1983年1月和5月分别发现了W和Z粒子。而带领科学家团队实现这一发现的实验物理学家卡洛·鲁比亚和西蒙·范德梅尔在仅仅一年后的1984年就被授予了诺贝尔物理学奖。前文说到,W粒子与Z粒子的质量与希格斯机制以及弱相互作用的强度有关,因此,对于W、Z粒子质量的测量从它们被发现时起到现在仍然是粒子物理学领域重要的课题。随着对撞机技术的发展,粒子物理学家建造了越来越高精确性的设备,获得了越来越多的实验数据,因此不断地提高了实验的精度。此次的这个结果,便是在美国费米国家实验室的Tevatron对撞机上的一个实验——CDF实验上获得的。这个成果分析、筛选了CDF实验从2002年到2011年期间收集到的实验数据,获得了大约420万个W粒子衰变的事件。基于如此庞大的数据量,CDF实验得到了前所未有的W质量的测量精度。

## 2. CDF实验是什么?

在美国芝加哥附近的一片草原上,坐落着一个著名的粒子物理研究实验室,这就是用前文提到的意大利科学家恩里科·费米(后来加入美国国籍)的名字命名的美国费米国家实验室。费米实验室曾在一段时间是世界粒子物理研究舞台上的中心表演者,因为在这里,曾拥有着一台世界上能量最高的正负质子对撞机,这就是Tevatron。Tevatron也是一个拥有6千米多周长的巨大对撞机。相比起它在欧洲的前辈SPS,Tevatron不但对撞的能量更高,还能获取更大的数据统计量。根据海森堡不确定性原理,能量越高,就能研究尺度越小的结构,而统



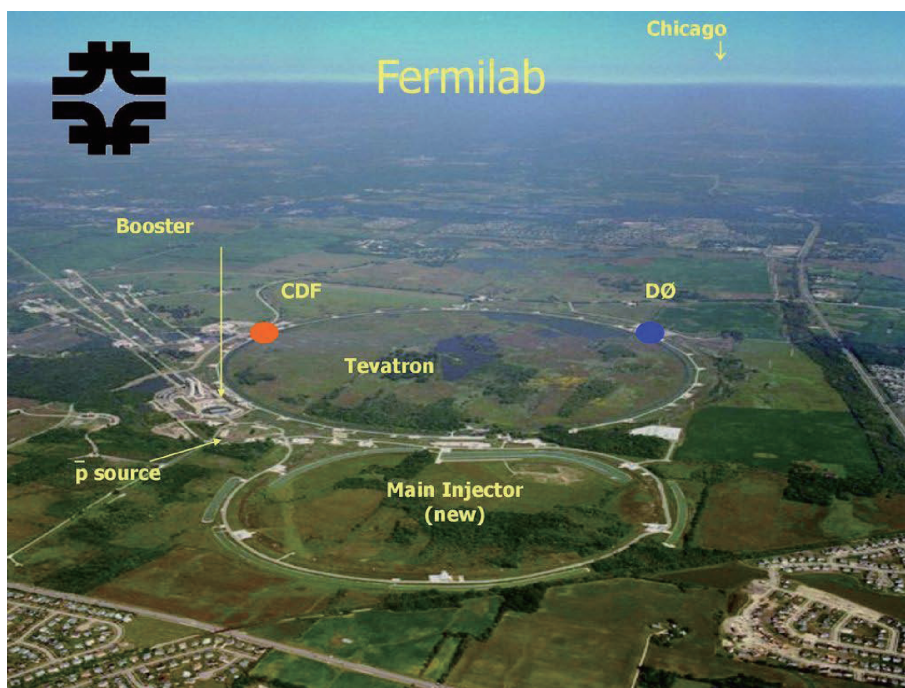


图3 美国费米实验室鸟瞰图。图中较远处的圆环的地下就埋藏着 Tevatron 对撞机。而在地平线附近,能隐约看到芝加哥

计量更大则能减小测量过程中的统计误差。因此, Tevatron 成为了一台有更强能力的粒子物理学研究设备。在 Tevatron 这台巨大的对撞机上,正负质子分别在环形真空管道中朝着相对的两个方向绕圈,

并在两个点交汇、对撞,在这两个对撞点上,分别建有两台巨大的探测器,分别是 CDF 探测器(图 4、图 5)和 DØ 探测器。这两台探测器就像是两台巨大的数码相机,如实地记录下来每次正负质子对撞时产

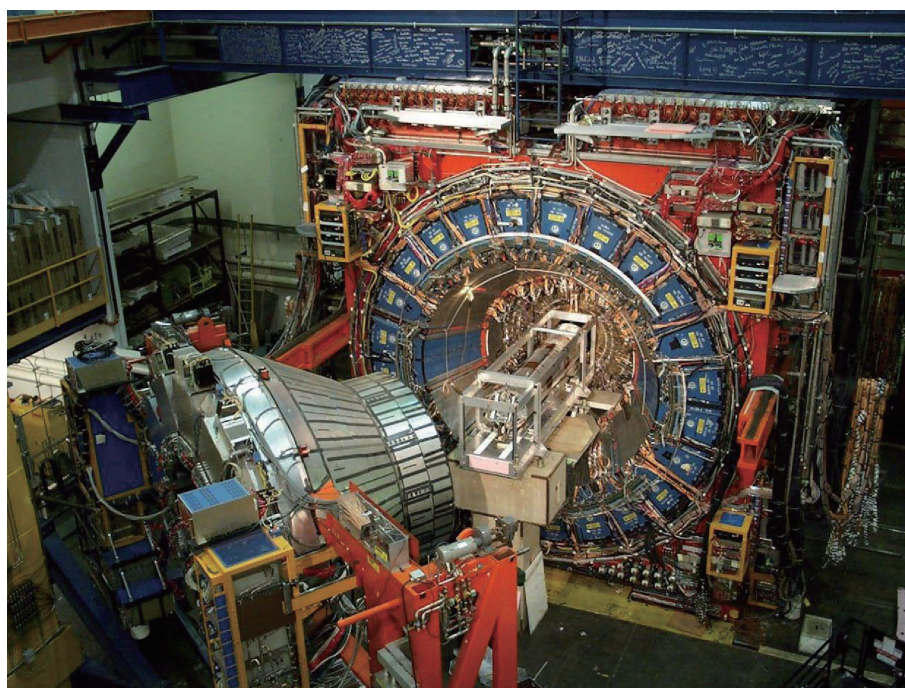


图4 在安装升级中的 CDF 探测器

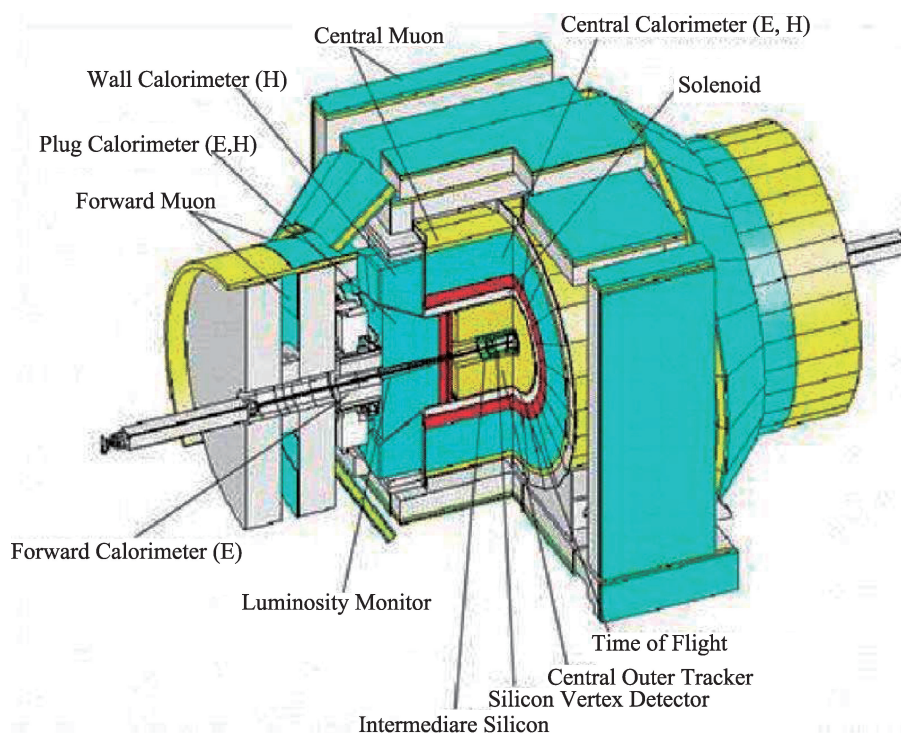


图5 CDF探测器的剖面结构示意图

生的对撞产物。

CDF 实验探测器是一个重达 5000 多吨、大约有四层楼高的巨大探测器。它就像是一个巨大的多层圆桶,将对撞点包围在了圆桶的中心。正负质子在对撞点对撞的那一刻,巨大的能量被瞬间释放了出来,在对撞中心就像是爆炸的烟花一样,溅射出大量对撞产物粒子,而这些对撞产物粒子就会穿过 CDF 探测器的一层一层的结构,在探测器中留下轨迹,并沉积下能量。在探测器的中央区域内有强大的磁场,带电粒子的轨迹会在这种磁场中弯曲。探测器记录下来这些粒子弯曲的轨迹和沉积的能量,就能推断出留下每一条轨迹的粒子的动量、能量是多少,进而推断出这些轨迹究竟是来自于哪一种粒子。前文说到,W 粒子带有一个正电荷或者一个负电荷。为满足电荷守恒,W 粒子的主要衰变产物是一个带电的粒子(如电子  $e$  或缪子  $\mu$ ),以及一个不带电的粒子(如中微子  $\nu$ )。中微子是自然界中一种很难与其他物质发生相互作用的粒子,因此也就几乎不能被探测器探测到。那么,在实践中,像 CDF 这样的实验是怎样探测 W 粒子的呢? 其实思

路也不复杂,因为在粒子对撞的过程中,两束粒子几乎是方向完全相对撞的,那么根据动量守恒定律,在桶的任何的直径方向上,所有的对撞产物的总动量之和应该都接近于 0。那么,想要知道那些我们探测不到的中微子是去了哪个方向,以及径向动量是多少,只要把全部的能探测得到的对撞产物的径向动量都测出来,然后加在一起,与所得到的总径向动量大小相等、方向相反的那份径向动量,就是那些实验探测不到的粒子所带走的径向动量。正是由于 W 粒子的衰变产物中存在不能被探测器探测到的中微子,所以在实验上对 W 粒子进行测量一直是一个难题,并且测量的精度也会远低于那些对撞产物全是带电粒子的衰变。这也就是为什么在 W 粒子被发现后已经过了接近 40 年的今天,科学家们仍然在对它的质量进行测量。CDF 实验在 1985 年就已投入运行,并在 1989 年和 2001 年进行过两次大的升级改造,每次升级之后,CDF 探测器的性能就迈上了一个新台阶。而在 2011 年,由于欧洲建造完成了更大、能力更强的质子-质子对撞机 LHC, Tevatron 和 CDF 实验便正式



的被关停了。此次公布的结果,便使用了在CDF探测器第二次升级改造后一直到停机这接近十年间的全部数据。而现在,CDF停机之后又已过了超过10年,基于这些数据的W粒子测量分析才得以完成,可见这类研究的难度有多么的大。

### 3. 这次实验的结果说明了什么?

此次公布的这项成果,有两个值得关注的点。一个是,这个测量的不确定度(误差)如此之“小”,另一个是,这个测量结果的中心值与标准模型的理论计算以及其他实验测量的平均值之间的差距如此之“大”。一般来说,实验测量的不确定度的来源有两大类,一类是来源于实验的系统,比如探测器的分辨率极限,实验设备的校准等,另一类则是来源于数据的统计,越大的数据量,就能获得越小的统计误差。测量的误差在示意图中通常会用一条两端带有端线的线段来表示,误差越小,线段越短,代表测量越精确。图6是几个不同的对撞机实验对W粒子质量的测量的结果,图6中,W粒子质量的测量结果用了 $\text{MeV}/c^2$ 来当做质量的单位,这是一个非常非常小的质量的单位,大小只有大约一个氢原

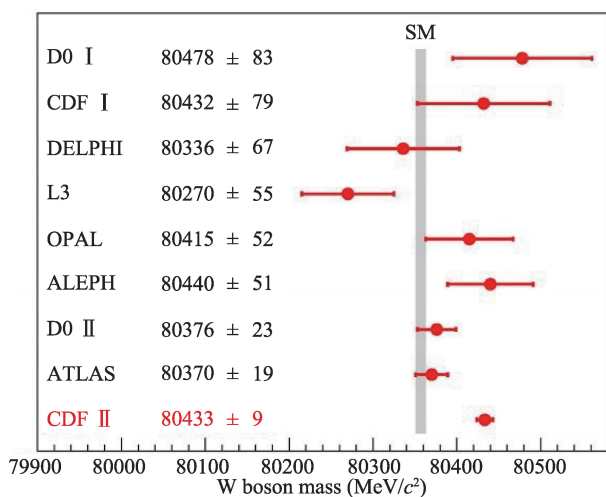


图6 CDF实验公布的此次测量结果(最后一行)与几个其他实验的结果(其他几行)的对比。每个实验的结果的误差用红色横线表示,横线越短表示越精确。根据标准模型的计算,标准模型理论计算所允许的数值的范围用灰色的竖条表示。可以看见,此次公布的测量结果的误差最小,并且它的结果中心值距灰色竖条的距离与其误差之比最大

子的质量的千分之一。CDF此次实验结果将W粒子的质量的不确定度测到了9个 $\text{MeV}/c^2$ ,可以看到,这个误差明显小于世界上其他的实验测量结果,并且与标准模型(图6中灰色竖条)的差异还不小,达到了大约W粒子质量测量不确定度的7倍。从统计的观点来看,7倍的不确定度代表着,如果此次测量的结果是正确的,那么“标准模型的计算结果和测量结果的差异只是来源于统计涨落和测量误差,而非新的未知物理现象造成的”这一解释的可能性就只有不到亿分之一的概率了。

大多数报道了此次发现的媒体都形容说,这个成果将颠覆现有粒子物理学的版图。为何一个粒子的质量的测量能有如此颠覆性的影响?这是因为,在粒子物理学的理论中,每一个参数都不是孤立的,都会对相互作用的强度、尺度等产生影响。W粒子的质量会通过内部对称性和标准模型中的其他参数紧密联系在一起,理论学家可以通过已经测量到的希格斯粒子的质量、Z粒子的质量、顶夸克的质量、缪子的寿命等参数计算出W粒子的质量。此次的测量结果和之前的希格斯粒子的质量、Z粒子的质量、顶夸克的质量、缪子的寿命的测量结果是矛盾的,因此,如果此次CDF的测量结果是真实的,那么就说明之前的理论计算是不完善的,也就是说,这个结果可能预示着新的、未知的相互作用或者新粒子的存在,不论是哪种情况,粒子物理学标准模型的版图都会被改写。根据CDF实验合作组的同事们的消息,这篇文章其实在去年6月份就已经投稿了,而《科学》杂志的审稿过程经历了超过9个月。可以想见,《科学》杂志的审稿人对于这一结果的发布一定也是慎之又慎,或许已要求了CDF合作组做了一系列检查,以最大可能地确保实验结果没有问题。

### 4. 未来可能会发生什么?

尽管这一结果的发布经历了《科学》杂志的严格审查,但是由于这项结果太具有冲击性,并且测量不确定度远小于其他几个实验的结果,很多物

理学家对这一结果很兴奋,但还有不少实验粒子物理学家对这一结果仍保持着谨慎的态度。在实验粒子物理学领域,也存在着孤证难立的逻辑。一旦在某一个实验上发现了与预期不同的结果,最合理的操作就是在其他的实验上进行重复,看看能否重现这一结果。由于CDF实验的这一轰动性结果,Tevatron上的另一个实验,DØ实验,有可能会重启对W质量的测量,而在欧洲的更大的对撞机LHC上,有三个对撞机实验(ATLAS实验,CMS实验,LHCb实验)也能进行W质量的测量。在LHC上,ATLAS实验和CMS实验已经收集到比CDF实验高出十几倍的数据,预期测量精度可能会和CDF实验接近,而LHCb实验预期的测量精度预期可以达到20个MeV,这些实验都能互相验证,并检验标准模型是否真的出现了漏洞。而在更久远的未来,还有另外一类对撞机技术,可以对W粒子质量进行更精确的测量,那就是正负电子对撞机。前文说到,发现W粒子的对撞机SPS,以及完成了此次研究的CDF实验所在的对撞机Tevatron,和欧洲的对撞机LHC的对撞粒子都是质子,质子就是氢原子的原子核,可以用字母p来表示。再回过头去看看标准模型中的那些粒子,会发现其中其实并没有质子。那是因为,这类对撞机中使用的质子,并不是一个基本粒子,而是一个复合粒子,在质子之中存在着极为复杂的结构,因此在使用质子对撞机对W质量进行的过程中,会有大量的其他粒子被同时产生,污染实验数据,给分析造成困难。而电子(e)是标准模型中的基本粒子,结构简单,更适合用来进行精确测量。并且,正负电子对撞机可以在刚好可以产生一对W粒子所需的能量处进行运行,“精准合成”出两个W粒子,因此能大幅提高W粒子性质的测量精度。目前,欧洲核子研究中心已公布了建造这类大对撞机FCC的计划,中国也有自

己的建造这类大对撞机CEPC的计划。这类对撞机预期能将W粒子质量的测量不确定度减小到1个 $\text{MeV}/c^2$ 以下。如果在未来这两个计划中至少有一个能建成,那么到时候,对于标准模型到底有没有漏洞的问题,科学家们就能给出一个明确又清晰的答案了。

## 5. 结语

在19世纪末,物理学家在对几乎所有的宏观现象都建立了公式化的描述之后,曾表示物理学的天空上仅剩两朵未知的乌云了。经过科学家们一个多世纪的努力,人类对宇宙万物的认知逐渐深入到微观层面,并利用量子理论和相对论这两套理论逐渐驱散了这两朵乌云,也建立了对宇宙和万物的基本构成更深刻的认知。但是,现在人类对微观世界的认知是完备的吗?物理学的天空上还有乌云吗?在最近几年的中文互联网上,曾有不少人讨论过,经历过二十世纪五六十年代那个大师辈出的年代,粒子物理学是否“盛宴已过”。而现实是,随着科技水平与研究能力的提升,科学家们建造了更有效的能用来认知世界的工具,因此能进行更为精细的研究。而越来越多的精细测量结果表明,现有的描述微观世界的理论也并不完备。正因为现在的我们有了更强大的能力去更仔细地眺望这片物理学的天空,我们发现,视野越广,已知与未知的边界就越长,物理学天空中更远的地方其实早已乌云密布。巧合的是,一年之前,也是4月8日,同样是美国费米实验室公布了一个缪子反常磁矩的研究结果,那项研究的结果与标准模型也不相符。而更早发现的中微子的质量等问题更是标准模型所无法解释的。不断出现的新的、未知的物理现象或许在向我们指明,下一场对物理学认知的革命似乎离我们并不遥远。