

W玻色子质量精确测量:新物理隐藏其中?

于江浩

中国科学院理论物理研究所, 北京 100190

摘要 W玻色子是一种传递弱力的媒介粒子,其质量来自于电弱对称性破缺,对其精确测量可以检验标准模型的自洽性,提供揭示可能的新的物理迹象的重要途径。介绍了美国费米国家实验室对W玻色子质量的最精确测量结果,即比标准模型的预期结果偏离高了7个标准偏差,这一结果直接挑战粒子物理学的标准模型。分析了该实验结果以及理论误差的可能来源,解读了其可能引发的新物理效应。

关键词 W玻色子;质量精确测量;粒子物理标准模型;新物理

2022年4月7日,美国费米国家加速器实验室公布了Tevatron质子-反质子对撞机探测器(CDF)实验组迄今为止对W玻色子质量的最精确测量,其精度达到前所未有的0.01%。测量结果比标准模型的预期结果偏离高了7个标准偏差,意味着粒子物理学的“标准模型”面临新的挑战。这一发现在《Science》以封面文章的形式发表后^[1],立刻引起全球实验与理论物理学家的关注。

1 W玻色子与质量起源的奥秘

自然界存在4种基本相互作用:引力、电磁力、

强力和弱力,其中强、弱和电磁相互作用成为粒子物理标准模型的基本作用力,是由某种自旋为整数的媒介粒子局域传递的,这些粒子被称为玻色子(图1)。电荷之间通过光子传递电磁相互作用,同时基本粒子之间普遍存在弱相互作用,W玻色子就是一种传递弱力的媒介粒子,可以导致原子核的 β 衰变、太阳的核聚变等。李政道和杨振宁1960年在一篇文章中将这种粒子命名为W粒子(这里W就是weak的首字母缩写)^[2]。

1967年,温伯格统一了电磁和弱相互作用^[3],预言了弱作用粒子不仅包含W玻色子,还包含一种重光子Z玻色子。这一理论的强大之处还在于,由

收稿日期:2022-05-03;修回日期:2022-06-28

基金项目:国家自然科学基金项目(12022514)

作者简介:于江浩,研究员,研究方向为粒子物理理论及粒子宇宙学,电子信箱:jhyu@itp.ac.cn

引用格式:于江浩. W玻色子质量精确测量:新物理隐藏其中? [J]. 科技导报, 2023, 41(15): 6-11; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.15.001

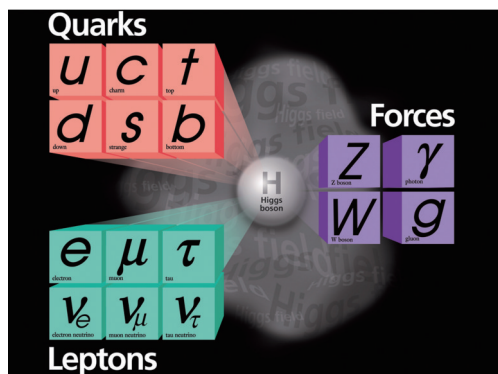


图1 粒子物理标准模型中的所有17种基本粒子

于电弱对称性破缺的Higgs机制, W 和 Z 玻色子的质量可以被预言(大概是质子质量的80多倍)。虽然 W 和 Z 玻色子是在1983年发现的,但在其发现之前的1979年,温伯格等就因为这一理论预言获得诺贝尔物理学奖。近50年来,这一理论经历了各种严格的实验验证,因此被称为粒子物理标准模型。2012年,“上帝粒子”希格斯粒子的发现^[4-5],标志着标准模型取得极大成功。

基础物理学的一个重要问题是基本粒子的质量起源,而 W 和 Z 玻色子的质量直接揭示了质量起源的奥秘。 W 和 Z 的质量来源于一种被称作希格斯机制的理论^[6-8],在这一理论中, W 和 Z 玻色子通过“吃掉”一种类似于 π 介子的粒子而获得质量,这被称为电弱对称性破缺。因为 W 和 Z 的质量来源一致,所以 W 玻色子和 Z 玻色子的质量比可以被预言,这一预言和后来的实验测量结果一致。与此同时, W 玻色子的质量直接影响了现实世界,因为其直接影响了原子核弱衰变,以及太阳中轻核聚变的速率,如果其质量远轻于80倍的质子质量,那么太阳的寿命就会比现在短很多,甚至可能现在已经燃烧殆尽。基于太阳的标准模型,测量 W 质量可以确切计算出太阳的寿命。

2 W 玻色子质量的精确测量

1983年在欧洲核子中心(CERN)的质子-反质子对撞机(SPS)上发现了 W 玻色子,同时也第一次测量了 W 玻色子的质量为 $80.2 \pm 0.8 \text{ GeV}^{[9-10]}$ 。20世纪90年代,CERN升级到正负电子对撞机(LEP)以

后,LEP-II持续改进 W 玻色子的质量测量精度,在2013年公布其最终结果: $80.376 \pm 0.033 \text{ GeV}^{[11]}$ 。后期更精确的测量是由费米实验室的Tevatron质子-反质子对撞机进行的,基于其Run II的部分数据在2012年得到结果 $80.385 \pm 0.016 \text{ GeV}^{[12-14]}$ 。可以发现这3个阶段实验(图2)的测量精度一直在提高,这对标准模型理论本身有着重要意义,因为 W 玻色子质量是标准模型的重要基本参数。 W 玻色子质量经常被选为标准模型理论计算的输入参数,很多物理过程的预言敏感依赖于 W 玻色子质量的输入值,例如带电流四费米子相关的过程等。

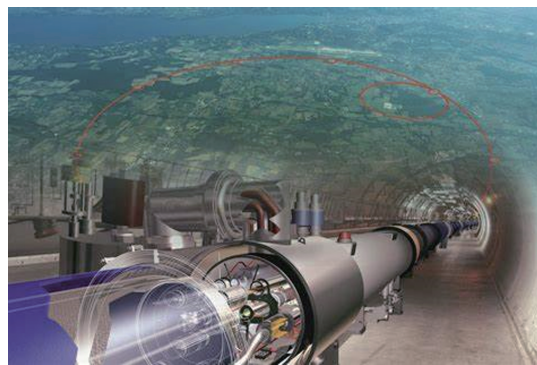


图2 加速器对撞机示意(质子或者电子在加速器中加速到很高的能量,然后对撞)

尽管 W 玻色子质量在LEP实验上已经测量得非常精确,早已超出了人们熟知的原子核衰变以及太阳寿命的精度(一般误差在1 GeV以内),一代代的实验物理学家仍然接力进行 W 玻色子质量测量,这不仅是因为 W 玻色子质量测量是高能物理实验的一个基准性课题,更是因为科学家们希望通过 W 玻色子质量的精确测量,间接揭示可能超出标准模型的新物理迹象。

尽管目前的高能物理实验并没有明确超出标准模型的迹象,然而标准模型不能解释宇宙中的物质与反物质不对称,也不能解释暗物质和暗能量的存在。因此标准模型只是一定能量标度下的有效理论,必定存在更加普适的理论,也就是超出标准模型的新物理,这是粒子物理学家一直追求的目标。寻找新物理通常有“直接”寻找和“间接”寻找2种途径,测量 W 玻色子的质量属于后者。因为粒子物理标准模型的高度可预言性, W 玻色子质量的

改变牵一发而动全身,会影响到已有物理测量之间的自洽性。精确测量 W 玻色子质量可以检验标准模型的自洽性,提供揭示可能的新物理迹象的重要途径。

W 玻色子质量的精确测量是间接探测新粒子的一种手段,如果对其质量测量十分精确,就可能检测到某些新粒子、新物理产生的影响。具体而言,粒子物理标准模型不但预言了电磁和弱相互作用的统一,同时也确定了 W 玻色子和 Z 玻色子质量成正比于弱作用混合角,如果测量的比值偏离这一关系,那么很可能预示着存在超出标准模型的新物理。20世纪90年代末,LEP实验已经非常精确地测量了 Z 玻色子的质量,达到了万分之0.2的精度,甚至CERN附近经过的列车都会对这一测量精度有影响。为了得到 W 和 Z 玻色子精确的质量比,对 W 玻色子质量的测量达到类似于 Z 玻色子的质量测量精度至关重要。

W 粒子的质量高阶修正正比于顶夸克质量平方,对顶夸克的质量十分敏感(图3)。在顶夸克发现以前,一部分科学家认为顶夸克质量应该不会大于100 GeV,不过在20世纪90年代初对 W 和 Z 玻色子质量比的测量却预言了顶夸克质量应该大于130 GeV(图4^[15])。1995年,费米实验室发现顶夸克质量为173 GeV^[16-17],这符合 W 和 Z 玻色子质量



图3 W 玻色子质量的圈图修正,其中圈图的贡献主要来自于顶夸克及希格斯粒子

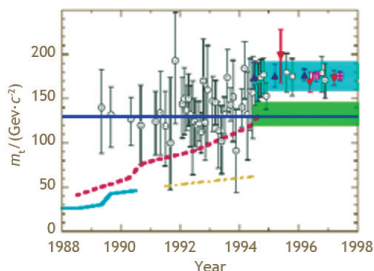


图4 1989—1994年电弱物理的整体拟合对顶夸克质量的预言(白色圆点)基本在130 GeV附近(蓝线)

比作出的预言,因此十分重要。类似地,目前 W 质量的精确测量如果发现偏离标准模型的预言,很可能存在类似于顶夸克效应的新物理效应。

3 CDF 高精度测量结果

美国费米国家加速器实验室的Tevatron质子-质子对撞机是一个长达6.3 km的环形装置,在其中质子束加速到TeV以上然后进行对撞,产生各种基本粒子,包括 W 玻色子。1983年建成以后,CDF和D0这2个实验合作组分别在2个探测器上收集数据,于1995年发现顶夸克后不久结束其第1轮运行。Tevatron于2002年重启第2轮运行(Run II),并于2011年关闭,CDF和D0探测器也被拆解并用于其他实验(图5)。尽管Tevatron已经被永久关闭,其实验数据仍在进行分析。

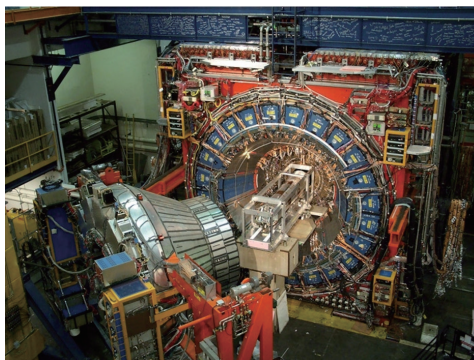


图5 费米实验室CDF探测器,于2011年拆解并用于其他实验

CDF实验合作组分析了2002—2011年其在Run II上的所有数据,发表了目前最精确的关于 W 玻色子质量的测量结果: 80.4335 ± 0.0094 GeV^[11],误差首次降到个位数(9 MeV,包括统计误差和系统误差),其精度达到前所未有的0.01%(图6^[11])。在这一里程碑式的测量精度下,CDF实验合作组测量的 W 玻色子质量中心值和其2012年的测量结果相比偏离不大,但由于误差的极大压低,测量结果发现比标准模型的预期结果(80.357 ± 0.006 GeV)^[16]偏离高了7个标准偏差。在粒子物理领域,通常高于5个标准偏差就意味着确信和现有理论不符,这是该实验结果令人激动的原因。

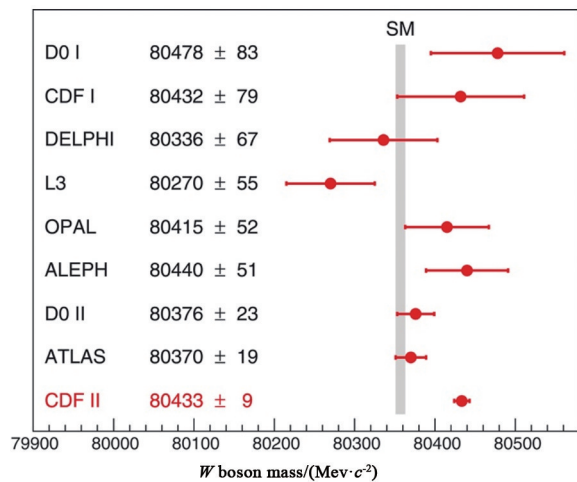


图6 CDF实验结果与LEP、Tevatron和LHC实验测量的对比

W 玻色子的质量精确测量是对撞机实验上的旗舰式课题,需要对探测器、事例重建、模拟软件、理论预言等有很深刻的理解和掌控。在质子-质子对撞中人们不能直接观测到 W 玻色子,它的寿命太短,会很快衰变成其他粒子,任何探测器都无法直接捕捉。实验物理学家通过研究其衰变产物(主要是电子和缪子以及中微子)重构其横向质量来推断它的存在和质量。CDF合作团队发现实验数据中约有400万个 W 玻色子衰变的事例,通过测量这些事例中的电子和缪子的能量和动量,以及丢失的(中微子)动量,实验物理学家推断出 W 玻色子的质量。与此同时, W 玻色子质量的精确测量结果还依赖于理论上的不懈努力,其中最显著的就是对部分子分布函数的理论误差的大大降低,以及对横向动量分布的理论误差的控制。《Science》发表的一篇文章^[1]中引用了美国密歇根州立大学袁简鹏关于部分子分布函数以及横向动量重求和的工作^[18-19],并采纳ResBos计算程序^[18]为该实验分析的理论模版,与实验结果进行参照。

基于这些努力, W 玻色子质量精确测量的实验和理论误差得以进一步降低,从而让CDF实验组可以得到确定无疑的、具有统计显著性的结论: W 玻色子质量比粒子物理标准模型的理论预言值高了7个标准差。CDF的测量结果超越了之前任何一个 W 玻色子质量的实验精度,也超越了之前所有

相关实验结果的加权综合精度。这需要对实验误差(如丢失能量等)的进一步控制,同时要大大降低部分子分布函数的误差(首次降至3.9 MeV),并把 W 截面以及重求和(这直接影响横向动量的分布)计算到很高的精度。尤其是,Tevatron实验装置在2011年关闭后逐渐被拆除,很多实验物理学家转身投入新的设备——大型强子对撞机(LHC)开展研究,只有少量的实验物理学家,其中包括CDF合作组的负责人Ashutosh Kotwal,选择继续挖掘,十年磨一剑,终于“淘金”。

虽然Tevatron实验能量较低,但是在 W 粒子相关测量上比目前运行的对撞机LHC的优势更加明显。LHC运行了7、8年后才得到 W 玻色子质量的测量结果,而且第1次公布的结果比Tevatron 2012年公布的结果还要差一些^[20]。主要原因有2个:LHC是质子和质子较高能量对撞,需要用到海夸克以及价夸克较小 x 的部分子分布函数(x 代表质子中部分子的动量占质子动量的比例),这比Tevatron上中间 x 的价夸克部分子分布函数测量精度要低;LHC的高亮度使得pileup要比Tevatron大很多,这会影响到丢失能量的测量精度,因此会影响其质量重构。当然随着数据量的提升,目前LHC的实验结果精度远超Tevatron 2012年公布的结果,不过要超过最新的CDF的结果,LHC还需要进一步降低误差。这说明,旧的实验设备仍有可能获得新发现,只要坚持在正确的方向上,依然可以做出领先世界的成果。

4 测量结果的新物理解读

这一统计显著性(7个标准差)意味着CDF合作组所得到的结果并非偶然,有可能是超出标准模型的新物理引起的。但是由于这一偏差体现在 W 质量的高阶修正上,新物理的效应只是间接体现,因此无法直接敲定是何种新物理。此外,实验的系统误差、 W 玻色子衰变宽度的影响、部分子分布函数因子化误差以及非微扰的理论输入的模式依然存在,所以虽然偏离达到7个标准偏差,对是否是新物理的贡献仍需持谨慎态度。另外,CDF的

质量测量中心值与先前另外2个独立的(D0和ATLAS实验组的结果^[13,20])、接近符合粒子物理标准模型的实验测量结果不一致,因此CDF的最新结果有待进一步独立核验与深入研究以确定是否由新物理导致,并且从相关新物理的直接寻找中排除一部分可能的物理。

尽管很多实验学家和部分理论学家仍然持谨慎态度,更多的理论物理学家对这一结果感到十分兴奋且更加乐观,期待该结果来自于新物理的贡献,并对之进行了多种可能的物理的解读。因为这一偏差来自于W玻色子质量的高阶修正(图3),加入新粒子就可以对W玻色子质量进行量子修正,使得W玻色子质量修正变大。但是要注意的是,W和Z玻色子是由电弱统一理论联系起来的紧密伙伴,通常Z玻色子的质量也会得到相应的修正。如果W和Z玻色子质量比仍保持不变,就不能解释目前的偏差,除非考虑的新物理模型中的W和Z玻色子质量修正有所不同,这与电弱对称性破缺中的整体剩余对称性直接相关。

另外,为了解释较大的标准偏差,如果加入的新粒子较轻,可以更容易产生大的质量修正。这些新的考虑对新物理理论(如最小超对称理论等)提出新的挑战(图7^[11])。目前缪子反常磁矩实验也存在理论和实验结果的偏离,或许某种新物理可以同时诠释两种或更多的反常现象。

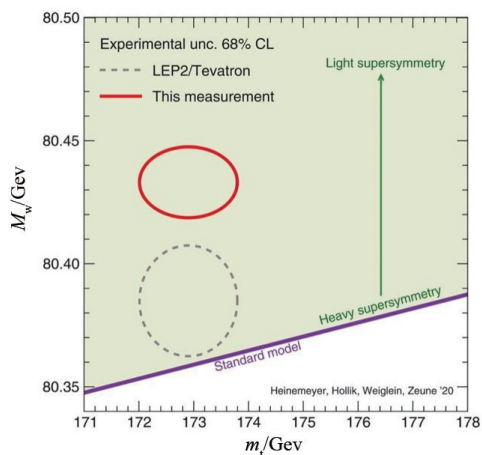


图7 W玻色子和顶夸克质量的测量(圆圈)与标准模型预言(紫线)的比较(这里超对称理论参数区间倾向于绿色区域)

5 结论

美国费米实验室CDF实验组对W玻色子质量的精确测量结果比标准模型的预期结果高了7个标准偏差,粒子物理学的“标准模型”因此面临新的挑战。可以期待,在不远的未来,大型强子对撞机上会收集更多的实验数据,有望提高测量精度,进一步检验CDF的实验结果。在更远的将来,中国提出的高能环形正负电子对撞机(CEPC)以及欧洲核子中心的未来环形对撞机(FCC-ee)预期能把CDF目前关于W玻色子质量的测量精度提高一个量级^[21]。这些都有助于确定W玻色子的质量偏离是否超出标准模型的新物理效应,从而打开寻找新物理的大门。

参考文献(References)

- [1] CDF Collaboration, Aaltonen T, Amerio S, et al. High-precision measurement of the W boson mass with the CDF II detector[J]. Science, 2022, 376(6589): 170-176.
- [2] Lee T D, Yang C N. Implications of the intermediate boson basis of the weak interactions: Existence of a quartet of intermediate bosons and their dual isotopic spin transformation properties[J]. Physical Review, 1960, 119(4): 1410-1419.
- [3] Weinberg S. A model of leptons[J]. Physical Review Letters, 1967, 19(21): 1264-1266.
- [4] ATLAS Collaboration. Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC[J]. Physics Letters B, 2012, 716: 1-29.
- [5] CMS Collaboration. Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC[J]. Physics Letters B, 2012, 716: 30-61.
- [6] Higgs P W. Broken symmetries and the masses of gauge bosons[J]. Physical Review Letters, 1964, 13(16): 508-509.
- [7] Englert F, Brout R. Broken symmetry and the mass of gauge vector mesons[J]. Physical Review Letters, 1964, 13(9): 321-323.
- [8] Guralnik G S, Hagen C R, Kibble T W B. Global conservation laws and massless particles[J]. Physical Review Letters, 1964, 13(20): 585-587.

- [9] UA1 Collaboration. Experimental observation of isolated large transverse energy electrons with associated missing energy at $\sqrt{s}=540$ GeV[J]. *Physics Letters B*, 1983, 122: 103–116.
- [10] UA2 Collaboration. Observation of single isolated electrons of high transverse momentum in events with missing transverse energy at the CERN anti-p p collider[J]. *Physics Letters B*, 1983, 122: 476–485.
- [11] Schael S, Barate R, Bruneliere R, et al. Electroweak measurements in electron-positron collisions at W -boson-pair energies at LEP[J]. *Physics Reports*, 2013, 532(4): 119–244.
- [12] Aaltonen T, Alvarez Gonzalez B, Amerio S, et al. Precise measurement of the W -boson mass with the CDF II detector[J]. *Physical Review Letters*, 2012, 108(15): 151803.
- [13] Abazov V M, Abbott B, Acharya B S, et al. Measurement of the W boson mass with the D0 detector[J]. *Physical Review Letters*, 2012, 108(15): 151804.
- [14] Aaltonen T, Abazov V M, Abbott B, et al. W -boson mass measurements[J]. *Physical Review D*, 2013, 88(5): 052018.
- [15] Quigg C. The state of the standard model[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2000, 542: 3–28.
- [16] Abe F, Akimoto H, Akopian A, et al. Observation of top quark production in p p collisions[J]. *Physical Review Letters*, 1995, 74(14): 2626–2631.
- [17] D0 Collaboration. Observation of the top quark[J]. *Physical Review Letters*, 1995, 74(14): 2632–2637.
- [18] Balázs C, Yuan C P. Soft gluon effects on lepton pairs at hadron colliders[J]. *Physics Review D*, 1997, 56(9): 5558–5583.
- [19] Hou T J, Gao J, Hobbs T J, et al. New CTEQ global analysis of quantum chromodynamics with high-precision data from the LHC[J]. *Physical Review D*, 2021, 103(1): 014013.
- [20] Zyla P A, Barnett R M, Beringer J, et al. Review of particle physics[J]. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2020(8): 083C01.
- [21] Campagnari C, Mulders M. An upset to the standard model: Latest measurement of the W boson digs at the most important theory in particle physics[J]. *Science*, 2022, 376(6589): 136.

W boson mass: New physics hidden in precision measurement?

YU Jianghao

CAS Key Laboratory of Theoretical Physics, Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract W boson is the elementary bosonic particle mediating the weak force and its mass is originated from electroweak symmetry breaking. Precision measurements of W boson mass provide a self-consistence check of the standard model theory and could hint at new particles or other mysteries of physics yet to be discovered. The Fermilab CDF group published the most precise result on W boson mass and found that this new measurement disagreed with the standard model's expectation by 7 sigma on the statistical significance. This finding would possibly challenge the current understanding of the standard model of particle physics.

Keywords W boson; precision mass measurement; standard model of particle physics; new physics ●



(责任编辑 王志敏)