

挑战粒子物理标准模型： “超重”的W规范玻色子

卢致廷 武 雷 吴永成

(南京师范大学 210023)

一、W玻色子在粒子物理发展过程中的地位

提到W玻色子的历史,必须简要地回顾弱相互作用的发展过程。弱相互作用首先是从核 β 衰变($n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$)的观测中推断出来。在1935年,恩里科·费米(Enrico Fermi)率先提出了第一个弱相互作用理论,其相互作用的形式与电磁相互作用的形式类似,并以所谓的费米常数(G_F)为此相互作用的特征耦合。通过比较电磁与弱相互作用的大小,弱相互作用的强度约为电磁作用的万分之一,这也是“弱相互作用”名称的由来。费米的理论在当时成功地描述了低能弱相互作用,因此被物理学家们广泛地使用。然而此理论在高能时会破坏么正性,只能被视为低能时的有效理论。完整的弱相互作用理论要延迟到20世纪60年代,通过格拉肖(Sheldon L. Glashow)、温伯格(Steven Weinberg)和萨拉姆(Abdus Salam)提出的电弱SU(2) \times U(1)规范理论,将弱相互作用和电磁作用统一起来^[1]。该理论假设弱相互作用是通过重的W和Z玻色子所传递,并预测它们的质量约为100 GeV,这与传递电磁作用的无质量光子产生强烈的对比。在1983年发现质量为 81 ± 5 GeV的W玻色子^[2],是该电弱理论巨大成功的重要证据之一,将在下节做介绍。此后电弱SU(2) \times U(1)规范理论被多数人称作粒子物理的标准模型,并且通过不同的实验反复地被检验。

随着不断地提升W玻色子质量的精确测量,不

仅验证了标准模型预言的W玻色子质量的领头项,实验上的精度更达到了检验该质量项的量子圈图修正,这意味着我们有能力对标准模型的理论自洽性做作更深入的探索。通过量子圈图修正的计算,除了证实标准模型的可重整化特性,并且在希格斯玻色子发现前,通过对W玻色子与顶夸克质量的精确测量,预言标准模型希格斯玻色子的质量范围^[3]。在标准模型中,W玻色子质量的量子圈图修正主要贡献来自于(1)顶夸克与底夸克圈图和(2)希格斯玻色子圈图,如图1所示。其中顶夸克和底夸克对希格斯玻色子有很大的汤川耦合,它们之间的耦合大小差异也很大,这种差异严重破坏了W,Z玻色子质量在领头项的简单关系,即W玻色子质量可以通过弱相互作用混合角与Z玻色子质量连结,也就是所谓的custodial SU(2)对称性。因此顶夸克与底夸克圈图对W和Z玻色子质量之间的劈裂给出了额外的贡献。由于目前仅有对W玻色子质量的测量结果产生异常,对于Z玻色子质量的测量则没有,所以新物理所产生的custodial SU(2)对称性破坏,将是解释此异常的可行方案之一。2012年7月在希格斯玻色子发现后,标准模型的所有粒子与参数皆为已知,通过W玻色子质量的量子圈图修正能够准确地验证标准模型,以及间接探测其他新物理的效应。因此,对W玻色子质量的精确测量有非常重要的物理意义,特别是这次CDF实验组所发表的高精度测量结果。

在电弱精确量测的物理量中,新物理的贡献主

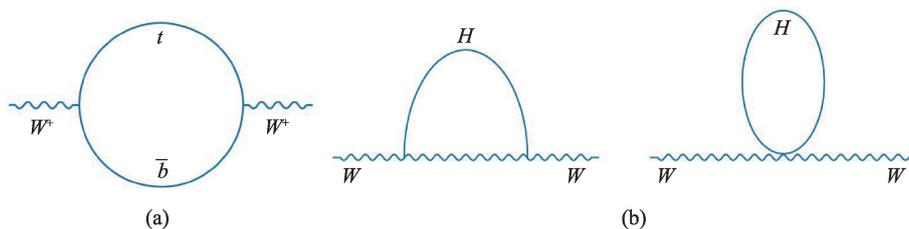


图1 标准模型W玻色子质量的量子圈图修正: (a)顶夸克与底夸克圈图、(b)希格斯玻色子圈图(图片取自文献[4])

要是通过对规范玻色子自能的量子圈图修正。其中Peskin, Takeuchi与其他理论物理学家在1990年所提出的一组S, T, U倾斜(oblique)参数,能够量化新物理模型对电弱精确量测物理量的贡献^[5]。相较于个别计算每个电弱精确量测的物理量,使用这组S, T, U倾斜参数更能体现这些物理量间的关联性。首先,S参数代表规范玻色子的自能函数对重整化能标的斜率,T参数代表W, Z玻色子自能函数之间的差异,最后U参数则代表W, Z玻色子自能函数斜率之间的差异。以下有两点需要注意到:(1)新物理所产生的custodial SU(2)对称性破坏将被T, U参数所记录、(2)由于新物理对U参数的贡献往往比对S和T参数的贡献来自更高阶的修正,因此为了简单起见,通常我们使用U=0的近似条件。我们将在第三节针对这次CDF实验组的新测量值对S, T, U倾斜参数的修正与暗示做讨论。

二、W玻色子发现的历史以及目前已有的W玻色子质量测量

W玻色子在1983年由欧洲核子中心超级质子同步加速器(Super Proton Synchrotron)的UA1与UA2实验组率先发现^[2]。通过正反质子在质心能量540 GeV的碰撞产生W玻色子与其余的标准模型

粒子(主要为QCD喷流),如图2所示。通过对相同事例所产生的高能电子与横向能量缺失(missing transverse energy)的测量,可以推知W玻色子质量为 $81 \pm 5 \text{ GeV}$ 。后续UA2实验组更是在1990年首次将W玻色子质量测量的精确度推展到低于1%^[7],此后便进入了W玻色子质量精确测量的时代。值得一提的是,在强子对撞机的复杂QCD环境下,W玻色子无法像其姐妹粒子—Z玻色子一样,通过测量末态的带电轻子对来重建其质量。因此提高W玻色子质量测量的精度一直是很有挑战性的任务。美国费米实验室(Fermilab)的万亿电子伏特加速器(Tevatron)同样是正反质子对撞机,其质心能量可高达约2 TeV,仍然主要通过图2的过程产生W玻色子。截至2013年为止,CDF与D0实验组结合他们对W玻色子质量的精确测量,其结果为 $m_w = 80.387 \pm 0.016 \text{ GeV}$ ^[8]。

另一方面,欧洲核子中心的大型正负电子对撞机(LEP II)同样能精确测量W玻色子质量。然而其主要通过双W玻色子产生过程(如图3所示),而非单个W玻色子产生过程。相较于强子对撞机的复杂QCD环境,正负电子对撞机能够大幅度地压低相关的背景噪音,因此便有了以下两个方式测量W玻色子质量:(1)由于双W玻色子产生过程的截面为对撞机质心能量的函数,通过扫描截面在阈值

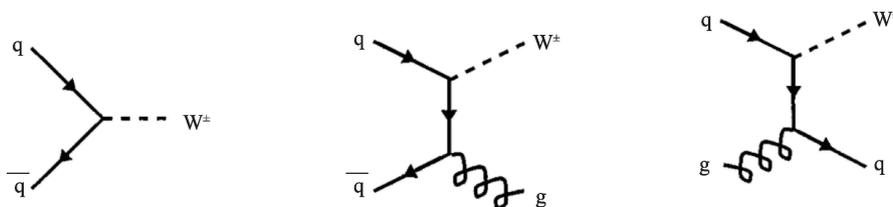


图2 通过正反质子对撞产生单个W玻色子过程的费曼图(图片取自文献[6])

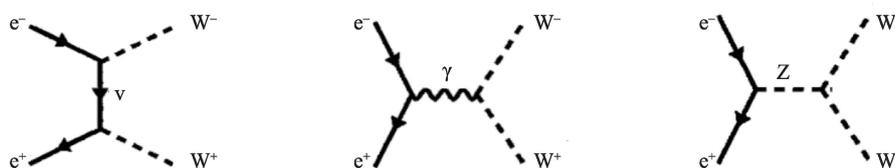
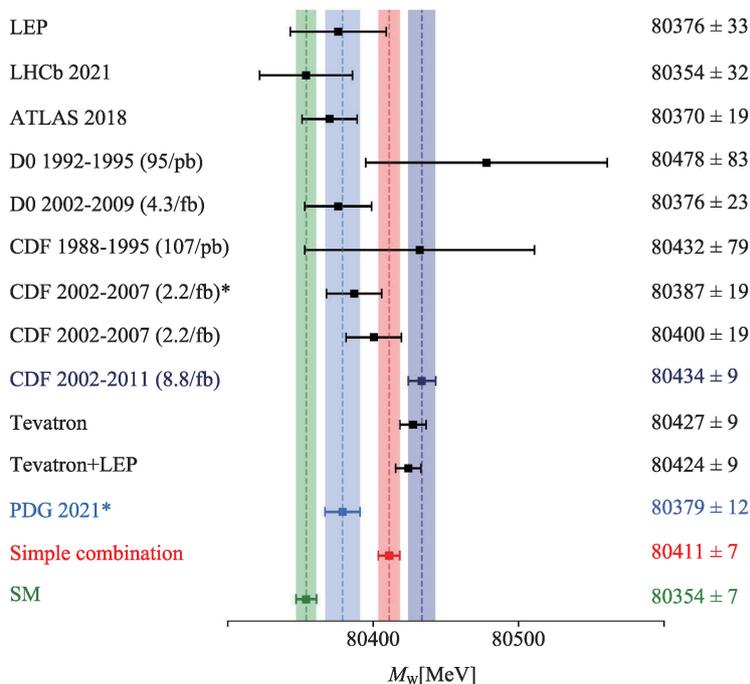


图3 通过正负电子对撞产生双W玻色子过程的费曼图(图片取自文献[6])

处的灵敏度,测量W玻色子质量、(2)通过W玻色子的完全强子衰变模式,或是半强子半轻子衰变模式,重建W玻色子质量。截至2013年为止,LEP II的所有实验组(ALEPH, DELPHI, L3 and OPAL)结合他们对W玻色子质量的精确测量,其结果为 $m_w = 80.376 \pm 0.033 \text{ GeV}$ [9]。更多关于Tevatron与LEP II测量W玻色子质量的介绍与讨论,读者可以参考综述文章[4,6]。

最后欧洲核子中心的大型强子对撞机(LHC)是质子对撞机,W玻色子的主要产生过程同样如图2所示。目前仅有ATLAS实验组发布质心能量7 TeV,亮度 4.7 fb^{-1} 对W玻色子质量测量的结果: $m_w = 80.370 \pm 0.019 \text{ GeV}$ [10],以及LHCb实验组发布质心能13 TeV,亮度 1.7 fb^{-1} 对W玻色子质量测量的

结果: $m_w = 80.354 \pm 0.032 \text{ GeV}$ [11]。正当众人以为往后更精确的 m_w 测量会将其推向标准模型的理论预言值($m_w^{SM} = 80.357 \pm 0.006 \text{ GeV}$)时,最新CDF实验组所发布在亮度 8.8 fb^{-1} 对W玻色子质量测量的结果: $m_w^{CDF} = 80.4335 \pm 0.0094 \text{ GeV}$ [12],完全超出了先前的预期。此结果有两大亮点,其一它是目前世界上最精确的W玻色子质量测量值,精度达到了0.01% (误差在10 MeV之下),其二它与标准模型的理论预言值有高达七个标准差的统计偏差,因此引起了很大的轰动。总结目前所有测量W玻色子质量的实验结果于图4[13]。值得注意的是,这次CDF实验组最新的结果与先前实验的结果不尽符合(统计偏差高达约三个标准差),因此系统误差的估算将会受到专家们的谨慎检视。



* Does not include 13.5 MeV shift in CDF 2002-2007 (2.2/fb)

图4 目前所有测量W玻色子质量的实验结果总结(图片取自文献[13])

未来通过 LHC 更多关于 W 玻色子质量的测量数据,将有可能独立地检验这次 CDF 实验组所发表的结果,但依然充满了很大的挑战。基于目前 LHC 的实验环境,以及 ATLAS、CMS 与 LHCb 探测器的设计架构,其精度在近几年内将很难超越 CDF 实验组所达到的误差在 10 MeV 以下。建造新的高能正负电子对撞机(例如 CEPC, FCC-ee 等)将是一个精确检验 W 玻色子质量的热门方案,其中 FCC-ee 实验计划将为改进 W 玻色子质量测量提供最佳前景,预计灵敏度可达到 7 ppm,比当前最佳的测量好 10 倍以上^[14]。最后在假设目前对于 W 玻色子质量的标准模型理论计算没有重大的偏差或修正,以及没有额外的实验系统误差的前提下,我们将在下节讨论这次 CDF 实验组的新测量值对新物理的暗示。

三、CDF 实验组的新测量值对新物理的暗示

由于 CDF 实验组最新发表的 W 玻色子质量测量值比标准模型的理论预言值大了 76.5 MeV,在假设目前标准模型对于高阶修正的计算是可信任的前提下,额外新物理的贡献似乎是需要的。如何在提升 W 玻色子质量的同时,不违反其他已有的约束条件,将是通过新物理模型解释此现象的一大挑战。以下的讨论将分成新物理是否通过量子圈图对 W 玻色子质量做修正。第一个可行的方案便是在第一节所提及,通过新物理所产生的 custodial SU(2) 对称性破坏,提升 W 玻色子的质量。此方案将通过新物理在量子圈图的贡献对 W 玻色子的自能做修正,通常暗示着在圈图中的新粒子彼此具有较大的质量劈裂,借以提升 W 玻色子的质量,常见的超越标准模型有超对称^[15]、双希格斯二重态、额外维度与小希格斯等模型^[16]。以超对称模型为例,夸克超伴子对 W 玻色子自能修正的圈图如图 5 所示,完整计算最小超对称模型(MSSM)显示其能有效地提升 W 玻色子的质量^[12, 15],如图 6 所示。

另一方面,对于某些希格斯三重态模型,能够

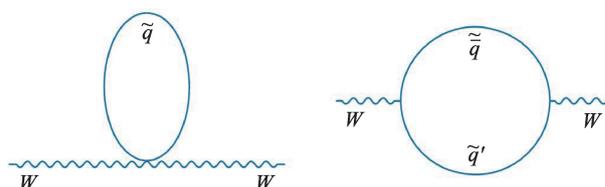


图 5 夸克超伴子对 W 玻色子自能修正的量子圈图 (图片取自文献[1])

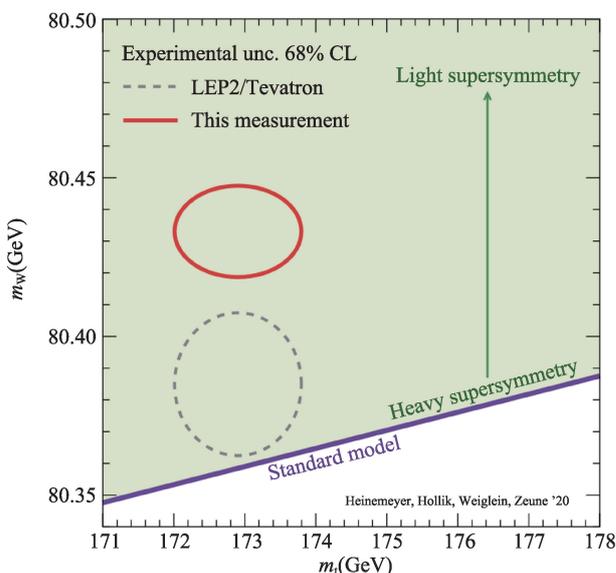


图 6 最小超对称模型(MSSM)所允许的 W 玻色子与顶夸克质量的参数空间(图片取自文献[12])

通过对 W 玻色子质量的领头项加上一个小的贡献,借此提升 W 玻色子的质量^[17]。此外,上述的两种情况是在新物理模型没有加入额外的规范对称性,在加进新的规范对称性后,如果新的规范玻色子与标准模型的规范玻色子有足够大的混合,则将会对 W 玻色子的质量产生额外的贡献。具体的例子如新的 U(1)'规范玻色子 Z' 与 Z 玻色子的混合^[18],以及新的 SU(2)'规范玻色子 W' 与 W 玻色子的混合^[19]。

正如在第一节中所提及,S, T, U 倾斜参数能够量化新物理模型对电弱精确量测物理量的贡献,过往人们将其视为约束新物理模型的重要工具。由于此次新的 W 玻色子质量测量值比先前大了不少,在 U=0 的近似条件下,必须同时调高 S, T 参数以符合 W 玻色子质量的新数据。此改变将会大幅度地移动原先的椭圆曲线,使其往 S-T 平面的右上角移动,如图 7 所示,届时许多新物理模型的参数空间将

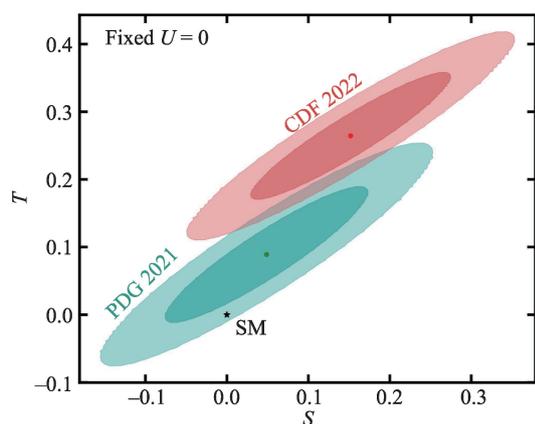


图7 在 $U=0$ 的近似条件下,S-T平面能符合电弱精确量测的约束条件所产生的参数空间,红色(绿色)区域为使用最新的CDF 2022 (PDG 2021) 拟合,星号为标准模型的预言值(图片取自文献[20])

随之改变。因此基于新的W玻色子质量测量值,全新的电弱精确量测拟合,以及新的S, T, U参数容许区间,是至关重要的^[20, 21]。

总而言之,对W玻色子质量的精确测量,是严格检验标准模型的有效性,以及间接探测新物理效应的强有力方式。此次CDF实验组的测量值与标准模型的理论预言值高达七个标准差的统计偏差,并且精度达到了0.01%,十足地挑战了目前的标准模型。除了在未来改进探测仪器、测量手段与建造新型对撞机之外,验证W玻色子质量的标准模型高阶修正,以及提出新物理的可能解决方案,将是今后粒子物理的重要方向,需要理论物理学家和实验学家来共同跟进并阐明这个谜团。

参考文献

[1] S. Glashow, Nucl. Phys. 22, 579 (1961); A. Salam and J. C. Ward, Phys. Lett. 13, 168 (1964); S. Weinberg, Phys. Rev. Lett. 19, 1264 (1967).
 [2] UA1 Collaboration. Phys. Lett. B122:103 (1983); UA2 Collaboration. Phys. Lett. B122:476 (1983).
 [3] First Run II Measurement of the W Boson Mass, T. Aaltonen et al. [CDF], Phys. Rev. D 77, 112001 (2008).
 [4] Measurement of the W Boson Mass at the Tevatron, V. Kotwal and J. Stark, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 58, 147-175 (2008).
 [5] M. E. Peskin and T. Takeuchi, Phys. Rev. Lett. 65, 964 (1990); M. Golden and L. Randall, Nucl. Phys. B 361, 3 (1990); B. Holdom and J. Terning, Phys. Lett. B 247, 88 (1990); M. E. Peskin and T. Takeuchi, Phys. Rev. D 46, 381 (1992); G. Altarelli and R. Barbieri,

Phys. Lett. B 253, 161 (1991); G. Altarelli, R. Barbieri and S. Jadach, Nucl. Phys. B 369, 3 (1992) [Erratum-ibid. B 376, 444 (1992)].
 [6] Precision measurements of the W^- boson mass, D. A. Glenzinski and U. Heintz, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 50, 207-248 (2000).
 [7] UA2 Collaboration. Phys. Lett. B 241:150 (1990).
 [8] Combination of CDF and D0 W-Boson Mass Measurements, T. A. Aaltonen et al. [CDF and D0], Phys. Rev. D 88, no.5, 052018 (2013).
 [9] Electroweak Measurements in Electron-Positron Collisions at W-Boson- Pair Energies at LEP, S. Schael et al. [ALEPH, DELPHI, L3, OPAL and LEP Electroweak], Phys. Rept. 532, 119-244 (2013).
 [10] Measurement of the W-boson mass in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector, M. Aaboud et al. [ATLAS], Eur. Phys. J. C 78, no.2, 110 (2018) [erratum: Eur. Phys. J. C 78, no.11, 898 (2018)].
 [11] Measurement of the W boson mass, R. Aaij et al. [LHCb], JHEP 01, 036 (2022).
 [12] High-precision measurement of the W boson mass with the CDF II detector, T. Aaltonen et al. [CDF], Science 376, no.6589, 170-176 (2022).
 [13] The W boson Mass and Muon $g-2$: Hadronic Uncertainties or New Physics? Peter Athron, Andrew Fowlie, Chih-Ting Lu, Lei Wu, Yongcheng Wu, and Bin Zhu, Nature Commun. 14 (2023) 659.
 [14] Future Circular Colliders succeeding the LHC, M. Benedikt, A. Blondel, P. Janot, M. Mangano and F. Zimmermann, Nature Phys. 16, no.4, 402-407 (2020).
 [15] Implications of LHC search results on the W boson mass prediction in the MSSM, S. Heinemeyer, W. Hollik, G. Weiglein and L. Zeune, JHEP 12, 084 (2013).
 [16] Updated Status of the Global Electroweak Fit and Constraints on New Physics, S. Heinemeyer, W. Hollik, G. Weiglein and L. Zeune, JHEP 12, 084 (2013).
 [17] Precise prediction for the W boson mass in the MRSSM, P. Diessenner and G. Weiglein, JHEP 07, 011 (2019).
 [18] Importance of $Z-Z'$ Mixing in $b \rightarrow s'l'l'$ and the W mass, M. Alguer'o, A. Crivellin, C. A. Manzari and J. Matias, [arXiv:2201.08170 [hep-ph]].
 [19] Mass mixing effect and oblique radiative corrections in extended $SU(2)(R) \times SU(2)(L) \times U(1)$ effective theory, Y. Zhang, Adv. High Energy Phys. 2012, 761953 (2012).
 [20] Electroweak Precision Fit and New Physics in light of W Boson Mass, Chih-Ting Lu, Lei Wu, Yongcheng Wu, and Bin Zhu, Phys. Rev. D 106 (2022) 3, 035034.
 [21] Impact of the recent measurements of the top-quark and W-boson masses on electroweak precision fits, J. de Blas, M. Pierini, L. Reina and L. Silvestrini, Phys. Rev. Lett. 129 (2022) 27, 271801.