

# W 玻色子与粒子物理标准模型

阮建红 (华东师范大学物理与电子科学学院 上海 200241)

**摘 要** 最近, W 玻色子的实验测量值与理论预言值之间的差异引起了人们关于粒子物理标准模型的热烈讨论。本文简要介绍了标准模型对基本粒子的分类和主要内容, 以及费米实验室的对撞机探测器(Collider Detector at Fermilab, 简称 CDF)实验组对 W 玻色子质量的精确测量, 并对可能的物理进行了简单的分析。

**关键词** W 玻色子 标准模型

**文章编号** 1002-0748(2022)10-0002

**中图分类号** G633·7

**文献标识码** B

北京时间 2022 年 4 月 8 日(芝加哥当地时间 4 月 7 日), 美国费米实验室的 CDF 国际合作组通过全球多家媒体同时发布了对 W 玻色子质量测量的最新也是最精确的结果, 它比粒子物理标准模型的预期值偏高了 7 个标准偏差。该项成果作为封面文章发表于同一天的《Science》杂志上<sup>[1]</sup>。此发现一经发布, 立即引起了粒子物理学界的热烈讨论, 这是否表明“新物理”来临了呢?

## 1 粒子物理标准模型

什么是粒子物理标准模型? 何为 W 玻色子呢? 简单来说, 粒子物理标准模型就是目前人们普遍认可的描述组成物质的基本粒子之间的电磁、强和弱相互作用的理论, 即描述四种基本相互作用中除了引力相互作用之外的其他相互作用。到目前为止, 粒子物理学家认为, 基本粒子共有 61 种, 其中包括 12 种轻子, 36 种夸克, 12 种传播子, 以及 1 种希格斯粒子<sup>[2]</sup>。W 玻色子是 12 种传播子中传播弱相互作用的带电粒子  $W^+$  和  $W^-$ 。

表格 1 中列出了 6 种轻子, 包括电子、缪子和tau子, 以及与之相应的中微子。之所以把它们称为“轻子”是因为电子很轻, 缪子和tau子从质量上来看就名不副实了。每一种轻子都有相应的反粒子, 因而一共有 12 种。轻子都是自旋为 1/2 的费米子。这 12 种粒子中人们最熟悉的自然是电子了。自从 J. J. Thomson 发现电子以来, 一百多年过去了, 人们依然没有发现电子的内部结构, 把它看成是点粒子, 是自然界的基本粒子之一。在轻子家族中, 缪子和tau子除了比电子重得多以及寿命有限外, 其他的性质

与电子完全一样。每一种带电轻子, 都有相应的中微子。标准模型理论认为, 中微子质量为零, 但实验发现了中微子振荡现象, 证明中微子质量不为零, 迄今人们只是测量到了它们质量之间的关系以及质量的上限值, 对每一种中微子质量的确切值仍未知。

表 1 轻子

轻子	质量(MeV/c <sup>2</sup> )	电荷
电子 e <sup>-</sup>	0.511	-e
缪子 μ <sup>-</sup>	105.7	-e
tau子 τ <sup>-</sup>	1777	-e
电子中微子 ν <sub>e</sub>	?	0
缪子中微子 ν <sub>μ</sub>	?	0
tau子中微子 ν <sub>τ</sub>	?	0

在 12 种轻子中, 只有电子和正电子在自由状态下是稳定的, 其他粒子都会衰变。

表 2 夸克

夸克	质量(MeV/c <sup>2</sup> )	电荷
上夸克 u	1.5~4.0	$\frac{2}{3}e$
下夸克 d	4.0~8.0	$-\frac{1}{3}e$
粲夸克 c	1150~1350	$\frac{2}{3}e$
奇异夸克 s	80~130	$-\frac{1}{3}e$
顶夸克 t	169000~174000	$\frac{2}{3}e$
底夸克 b	41000~4400	$-\frac{1}{3}e$

表 2 中列出了迄今人们知道的 6 种味道的夸克(“味道”是对一种量子数的形象表述), 每一种味道的夸克具有 3 种不同的颜色(“颜色”是另一量子

数),而每个夸克都有其相对应的反粒子,因此共有  $6 \times 3 \times 2 = 36$  种夸克。与轻子不同的是,夸克不是实验上直接观察到的,而是根据大量的实验结果从理论上推断出来的。最重的顶夸克  $t$  是 1995 年在美国费米实验室的 Tevatron 粒子加速器上发现的<sup>[3]</sup>。顶夸克的质量非常大,是底夸克的 40 倍。产生顶夸克需要足够高的能量,在 2008 年欧洲大型强子对撞机 LHC 开始运行之前,费米实验室粒子加速器是世界上唯一能产生顶夸克的加速器。

所有的夸克都是自旋为  $1/2$  的费米子。与宏观物质不同,夸克带分数电荷,分别为  $\frac{2}{3}e$  或  $-\frac{1}{3}e$ 。根据标准模型的理论,夸克被禁闭在强子中,我们无法观察到自由的夸克。强子是由夸克组成的、通过强相互作用结合在一起的粒子。

表 3 中列出了三种相互作用的传播子。强相互作用的传播子是胶子,胶子共有 8 种,其质量为零。电磁相互作用的传播子是光子,光子没有质量。弱相互作用的传播子有三种,其中带电的传播子为  $W^+$  和  $W^-$ ,分别带一个单位正电荷和负电荷, $W^+$  和  $W^-$  质量相等。不带电的弱相互作用传播子为  $Z^0$ 。因此,传播子一共有  $8 + 1 + 3 = 12$  种。这 12 种传播子都是自旋为 1 的玻色子。

表 3 传播子

相互作用	传播子	质量( $\text{MeV}/c^2$ )
强作用	胶子(8种)	0
电磁作用	光子	0
弱作用	$W^\pm$ (带电)	80 433(?)
	$Z^0$ (中性)	91 190

标准模型的最后一个基本粒子即希格斯粒子,于 2012 年在欧洲大型强子对撞机 LHC 上被发现<sup>[4]</sup>。提出希格斯机制的两位理论物理学家希格斯和恩格勒因此获得 2013 年的诺贝尔物理学奖,他们的理论早在上世纪 60 年代就已提出。目前,实验测得希格斯粒子的质量约为  $125.1 \text{ GeV}/c^2$ ,不带电,是自旋为零的玻色子。

标准模型是一个理论的集合,包括描述基本粒子电磁相互作用的量子电动力学 QED、描述强相互作用的量子色动力学 QCD,以及由格拉肖,温伯格和萨拉姆提出的针对电弱过程的理论。

粒子物理的标准模型无疑是一个成功的理论,它的几乎所有的理论预言都得到了实验的精确检验。但它也并非完美无缺,理论上、实验上都存在一些未解决的难题。因此,物理学家们普遍认为,与经

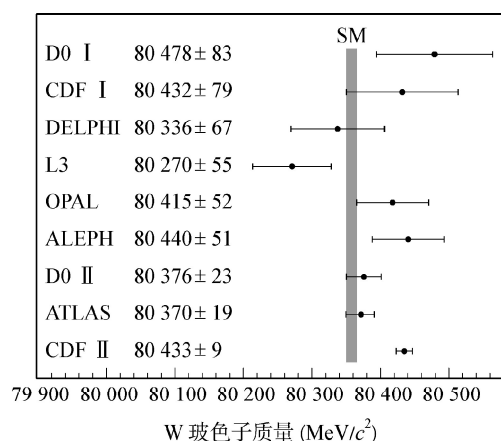
典物理理论一样,标准模型也只是适用于一定能量范围内的有效理论,超出一定的能标,比如  $\text{TeV}$  ( $10^{12} \text{ eV}$ )能级,可能会出现超出标准模型的新物理。

## 2 W 粒子的发现与精确测量

上世纪 60 年代,格拉肖-温伯格-萨拉姆模型的弱电统一理论预言存在三个矢量玻色子( $W^\pm$  和  $Z^0$ ),并估计这种粒子比质子约重 100 倍。1970 年代,欧洲核子研究中心(CERN)开始建造专门为产生这些极重粒子而设计的质子-反质子对撞机。1983 年 1 月,CERN 的 UA1 实验组宣布发现了 W 粒子<sup>[5]</sup>,5 个月,他们宣布发现了 Z 粒子<sup>[6]</sup>。W 和 Z 粒子的发现是标准模型的关键胜利之一,是粒子物理学家们众望所归的结果,也是极端实验技术的胜利。在这个大型实验项目中,鲁比亚和范德梅尔因为在攻克与反质子相关的一系列关键技术中的重要贡献而获得了 1984 年的诺贝尔物理学奖。在此之后,1995 年,最重的夸克——顶夸克被发现。2012 年,标准模型的最后一个基本粒子——希格斯粒子被发现,至此整个的基本粒子版图完美地呈现在人们面前,粒子物理学家们终于长舒一口气。

W 玻色子是基本粒子间弱相互作用的传播子,其质量受到粒子物理标准模型对称性的严格限制。在希格斯玻色子被观测到后,对 W 玻色子质量的测量提供了对标准模型的严格检验。目前,根据标准模型理论计算,W 玻色子的质量  $m_W = 80 357 \pm 6 (\text{MeV}/c^2)$  (图 1 中阴影部分),而 CDF II 合作组的最新测量结果为  $m_W = 80 433 \pm 9 (\text{MeV}/c^2)$  (图 1 中 CDF II),这是迄今为止 W 粒子测量精度最高的结果。在此之前,位于欧洲核子研究中心的大型正负电子对撞机 LEP 上的 ALEPH 实验、DELPHI 实验、L3 实验、OPAL 实验,大型强子对撞机 LHC 上的 ATLAS 实验,以及美国费米实验室 Tevatron 加速器上的 CDF 实验、D0 实验都对 W 玻色子的质量进行过测量(见图 1)。

在 CDF II 实验中,质子和反质子被加速到它们静止质量的 1 000 倍,然后发生对撞,质子与反质子中的正反夸克发生湮灭从而产生大量的 W 粒子。W 粒子的寿命非常短,只有约  $3 \times 10^{-25} \text{ s}$ 。人们通过测量其衰变产物的能、动量来推测 W 粒子的质量。W 粒子可以衰变成电子和电子中微子或缪子和缪子中微子,即  $W \rightarrow e\nu$  或  $W \rightarrow \mu\nu$ 。由于中微子几乎无法看见(极少与其他物质发生相互作用),这给精确测量 W 粒子的质量带来了极大的困难,导致长期以来 W 粒子质量测量的误差较大。而 W 粒子的姐妹

图 1 W 粒子质量的实验测量与理论预测<sup>[1]</sup>

粒子——Z 粒子,它衰变成正负电子对或正负缪子对,不存在类似问题,因而其测量结果要精确得多。经过十多年的努力,最近 CDF 的物理学家们发展了一套全新的数据分析方法,使得 W 粒子的测量精度达到了 0.01%,大大超过了以往所有的实验,从而对标准模型的检验达到了一个新的高度。

### 3 W 粒子的质量与新物理

根据标准模型理论,W 粒子的质量可以解析地表示为一个基于内部对称性的微扰展开式,其输入参数为希格斯玻色子质量、Z 玻色子质量、顶夸克质量、电磁耦合常数以及缪子的寿命。根据最新测得的这些输入参数值进行计算,W 粒子质量的理论预言值与最新的 CDF II 的测量结果之间存在着 7 个标准偏差。也就是说,如果标准模型的预言是正确的,那么 CDF II 的测量结果出现的几率几乎为零。如果 CDF II 的测量结果是正确的,那就说明在标准模型框架下 W 玻色子的质量与以前测得的希格斯玻色子质量、Z 玻色子质量、顶夸克质量或缪子的寿命等是不相容的<sup>[7]</sup>。

这是否说明出现了新物理、标准模型需要修正呢?尽管人们对此已进行了很多探讨,但还不能给出确切结论。原因主要有两方面:首先从理论上来看,作为计算 W 粒子质量的输入参数的物理量,在实验上还有不确定性,同时,更主要的不确定性是来自

微扰计算过程中未考虑的更高阶的电弱圈图过程的贡献。从实验上来看,尽管 CDF II 实验与理论计算值之间存在 7 个标准偏差,但它与 ATLAS 的测量结果之间也存在约 3 个标准偏差的差距,而 ATLAS 的结果与标准模型的理论预言在一个标准偏差范围内是一致的。因此,标准模型对 W 粒子质量的预测与实验之间是否真的存在偏差还需要其他实验来进一步检验。目前,大型强子对撞机 LHC 上的 ATLAS 实验、CMS 实验以及 LHCb 实验等正在进行相关的研究。

事实上,除了最近发布的关于 W 粒子质量的测量外,在 2021 年 4 月 7 日,费米实验室还发布了关于缪子反常磁矩的测量结果,也激起了人们关于新物理的讨论。另外,中微子有质量的问题,人们普遍认为是新物理存在的第一个证据。越来越多的证据表明,标准模型需要进行修正,相应地,对标准模型进行新物理修正的工作近年来层出不穷,人们希望将来有更高能量的实验对新物理模型进行检验。

#### 参考文献

- [1] CDF Collaboration, et al. High-precision measurement of the W boson mass with the CDF II detector [J]. Science, 2022, 376:170—176.
- [2] 大卫 J. 格里菲斯. 粒子物理导论[M]. 王青译. 北京:机械工业出版社,2017.
- [3] F. Abe, et al. Observation of Top Quark Production in pp (bar) Collisions with the Collider Detector at Fermilab [J]. Physical Review Letters, 1995,74:2626.
- [4] G. Aad, et al. ATLAS Collaboration, Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC [J]. Phys. Lett. B, 2012, 716:1—29.
- [5] UA1 collaboration. Experimental observation of isolated large transverse energy electrons with associated missing energy at s= 540 GeV [J]. Phys. Lett. B, 1983,122:103.
- [6] UA1 collaboration. Experimental observation of lepton pairs of invariant mass around 95 GeV/c<sup>2</sup> at the CERN SPS collider [J]. Phys. Lett. B,1983,126:398.
- [7] 优质科学领域创作者,中科院理论所. 新物理,真的要来了吗? [OL]https://baijiahao.baidu.com/s? id=1729821581741119473&wfr=spider&for=pc. 16—19.
- [2] 俞燕燕. 多视角下楞次定律的应用研究[J]. 中学物理教学参考,2021(15):14—15.
- [3] 刘杭州,宋书婷. 电磁感应问题中变化的电流问题中电量的计算[J]. 湖南中学物理,2021(4):89—91.
- [4] 朱巧萍,张永刚. 2021 年高考全国乙卷物理第 25 题解法探析 [J]. 教学考试,2021(49):29—32.

(上接第 8 页)

通过构建知识框架、细化问题分类、强化综合应用的方式建构知识网络是一种可行的方式。

#### 参考文献

- [1] 戴小民. TPACK 视域下的高中物理单元教学设计与实践——以“电场”单元教学片段内容为例[J]. 物理教学,2021(3):