



高能前沿W玻色子物理进展

关喆*, 彭靖*, 肖杰, 安莹, 郭启隆, 钱思天, 牟天钰, 冒亚军, 班勇, 李强*

北京大学物理学院, 核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871

* 联系人, E-mail: zhe.guan@cern.ch; j.peng@cern.ch; qliphy@gmail.com

2022-12-23 收稿, 2023-04-05 修回, 2023-04-20 接受, 2023-04-23 网络版发表

国家自然科学基金(12061141002)资助

摘要 2012年, 位于大型强子对撞机(Large Hadron Collider, LHC)上的CMS(Compact Muon Solenoid)探测器和ATLAS探测器分别独立地观测到了Higgs粒子, 有力验证了标准模型. 在标准模型中, W玻色子是传递电弱相互作用的规范矢量玻色子, 通过电弱对称性自发破缺(electroweak symmetry breaking, EWSB)的Higgs机制获得基本质量及纵向极化分量; 随着LHC数据的累积, 在高能标下更加细致地检验和研究W规范矢量玻色子的相互作用成为可能. 本文简要回顾W玻色子研究的相关内容, 并重点介绍近期在大型强子对撞机CMS实验上由北京大学高能组主导完成的W玻色子相互作用的研究, 包括 $W\gamma$ 的联合产生、 $W\gamma$ 的散射过程、WW散射过程(极化散射、Majorana中微子搜寻)以及WWW共振态的寻找. 当前, LHC已经进入三期取数阶段, 相信随着亮度的持续增加, LHC上CMS实验有关W玻色子的研究会更加拓展和深入.

关键词 矢量玻色子, 散射共振态, 大型强子对撞机, CMS实验

2023年是W玻色子发现40周年. 作为弱相互作用的载体粒子之一, W玻色子的发现对于验证电弱统一理论、进一步研究基本粒子之间的相互作用具有重要意义. 自1950年以来, 随着量子电动力学的大获成功, 以及在粒子物理实验方面的不断探索, 人们对电磁相互作用、弱相互作用和强相互作用的理解不断深入. 其中关于弱力理论发展的重要一步就是Glashow(格拉肖)^[1]、Weinberg(温伯格)^[2]和Salam(萨拉姆)^[3]的弱电理论: 这个理论通过假设W玻色子的存在, 可以用来解释 β 衰变, 同时还可预测一种未被发现的Z玻色子. 但这套理论的严重缺陷在于W和Z玻色子有质量, 而光子却没有. 1960年后, 由Higgs(希格斯)^[4]提出的阿贝尔规范理论中的希格斯机制成功解释了这个问题. 随着希格斯机制的引入, Weinberg^[2]逐步建立了自洽的标准模型. 标准模型不仅可以解释矢量玻色子的质量来源, 还很好地统一描述了基本粒子在很宽能量范围内的电弱和

强相互作用. 在标准模型中, 电弱作用力相关的W和Z玻色子, 通过自发对称性破缺机制获得质量. 这个机制引入了一个具有4个自由度的复标量场, 其中3个自由度导致了W和Z玻色子获得质量, 而第4个自由度则生成了一个标量Higgs玻色子. 费米子的质量是通过费米子与标量场的Yukawa相互作用而产生的^[4,5].

同时, 世界上也并存着许多对撞机实验来研究矢量玻色子, 美国费米实验室的Tevatron就是其中之一, 它最重要的研究目标之一就是精确测量矢量玻色子的质量. 考虑到W玻色子轻子衰变会伴随一个中微子, 相比Z玻色子, 精确测量W玻色子的质量十分困难. CDF(Collider Detector at Fermilab)是Tevatron上的一个通用型粒子探测器, 可以利用CDF探测到的W玻色子轻子衰变产生的电信号, 来精确计算W玻色子的质量. 利用CDF二期运行期间收集的所有数据, 人们首次将W玻色子的质量精度提高到最佳水平, 为 $9 \text{ MeV}/c^2(0.01\%)$ ^[6].

引用格式: 关喆, 彭靖, 肖杰, 等. 高能前沿W玻色子物理进展. 科学通报, 2023, 68: 2634–2641

Guan Z, Peng J, Xiao J, et al. Progress of W boson physics at the energy frontier (in Chinese). Chin Sci Bull, 2023, 68: 2634–2641, doi: 10.1360/TB-2022-1294

然而, 根据理论学家的预测, W 玻色子的质量应为 $80357 \pm 6 \text{ MeV}/c^{2[5]}$, 而CDF合作组的测量结果显示, 其 W 质量测量值为 $80433.5 \pm 9.4 \text{ MeV}/c^{2[6]}$, 二者之间明显存在着7个标准偏差. 如果实验结果没有问题, 理论结果与实验结果之间有如此大的偏差, 很可能说明粒子物理标准模型并不完备, 需要引进新物理的修正. 因此, 作为新物理研究探针的矢量玻色子也越来越引起大家的兴趣.

欧洲核子研究中心(European Organization for Nuclear Research, CERN)对矢量玻色子的研究作出了重要贡献. 1983年, 在欧洲核子研究中心的超级质子同步加速器上, Rubbia和van der Meer等人带领的UA1和UA2合作组^[7,8], 在实验上证实了 W 玻色子和 Z 玻色子的存在. Rubbia和van der Meer于次年获得了诺贝尔物理学奖. 2012年7月4日, 欧洲核子研究中心ATLAS和CMS实验组的研究人员宣布, 发现疑似希格斯的新粒子^[9,10]. 其后, 进一步的分析表明, 这个粒子就是长久以来亟待验证的希格斯玻色子. 这项重大成果标志着20世纪提出的粒子物理标准模型得到了最终的完全验证, 同时也为电弱破缺机制的深入探测和新物理的寻找开辟了新的领域.

随着玻色子被逐个发现, 人们将目光逐渐转移到多玻色子间的相互作用. 在LHC^[11]之前, 多玻色子过程的研究以玻色子对产生(即反应过程包含两个玻色子)为主. 比如, 大型正负电子对撞机(Large Electron-Positron Collider, LEP)实验研究了 WW 和 WZ 玻色子对产生与质心系对撞能量的关系. 这些实验发现, 三规范玻色子作用顶点是限制截面随能量增长的关键, 这有力地证实了标准模型的正确性. 随着LHC质心对撞能量的提高和相关过程产生截面的大幅增加, 三规范玻色子和四规范玻色子作用顶点的能量已被提高到TeV能级. 目前, LHC是世界上正在运行的最大的高能物理装置, 也是目前国际高能量前沿唯一正在运行的基于加速器的高能物理研究装置, 其上的CMS和ATLAS探测器是研究矢量玻色子间相互作用的最重要的两个探测器.

LHC上质子-质子对撞的取数主要分为两个阶段: 2011和2012年分别进行质心系对撞能量为7和8 TeV的对撞取数, 一般称为Run I阶段, 也就是利用这批数据, 首次发现了Higgs粒子; 2016~2018年的对撞取数, 一般称为Run II阶段^[12]. 利用LHC上的高能束流, 一方面能为标准模型在TeV能标下作出精确检验, 如多玻色子

的联合产生及散射等过程; 另一方面, LHC的高能标能为标准模型新物理的探索提供一个可用可靠的探针及新的途径, 如多玻色子共振态的过程.

北京大学高能组借助LHC上的CMS实验, 对探索含 W 的多玻色子过程做出了很多重要的工作. 本文针对其中 $W\gamma$ 的联合及散射产生的截面测量、 WW 散射过程(极化散射、马约拉纳(Majorana)中微子探索), 以及 WWW 共振态相关研究进行重点介绍.

1 $W\gamma$ 的联合产生以及散射过程的测量

1.1 $W\gamma$ 的联合产生

在LHC实验中, 多玻色子过程通常是指包含两个及以上电弱矢量玻色子产生的反应过程, 这允许在电弱(electroweak, EW)和量子色动力学(quantum chromodynamics, QCD)的理论框架下测试标准模型, 研究标准模型粒子的特性, 并搜寻超出标准模型(beyond the Standard Model, BSM)的新物理现象. 多玻色子过程可以精确检验电弱对称性自发破缺(electroweak symmetry breaking, EWSB)机制. 同时, 多玻色子过程包含三规范玻色子耦合(triple gauge couplings, TGC)或四规范玻色子耦合(quartic gauge couplings, QGC)的相互作用顶点, 因此也可以研究这些相互作用耦合常数是否符合标准模型预测.

W 玻色子和光子的联合产生过程是LHC上截面最大的双玻色子产生过程, 也是对应于标准模型中的一个基本双玻色子过程. 对此, 联合产生过程的截面测量不仅可以对标准模型预言进行精确验证, 也有助于探测 $WW\gamma$ 三规范玻色子耦合及其高阶修正. LHC上 $W\gamma$ 过程的先前测量都是基于2011年质心系能量7 TeV收集的数据, 因数据量有限, 以及涉及复杂的本底估计, 无法精确测量此类过程^[13,14]. 直到利用2016~2018年运行在13 TeV质心系能量下LHC收集到的数据, CMS对 $W\gamma$ 横截面及其对应的过程进行了更精确的研究^[15].

利用Run II的数据, 图1显示了这项工作中电子-光子的不变质量分布, 数据与蒙特卡洛模拟结果较好地符合. 在这项工作中, 利用CMS收集的Full Run II 13 TeV对撞数据, 首次得到13 TeV对撞能量下 W 玻色子与光子直接产生过程的反应截面 $\sigma = 15.44 \pm 0.05(\text{stat}) \pm 0.84(\text{exp}) \pm 0.12(\text{theory}) \text{ pb}$, 测量精度达到4.5%. 如表1所示, 此分析同时也对量纲6有效场论的相关耦合系数给出了最严格的限制.

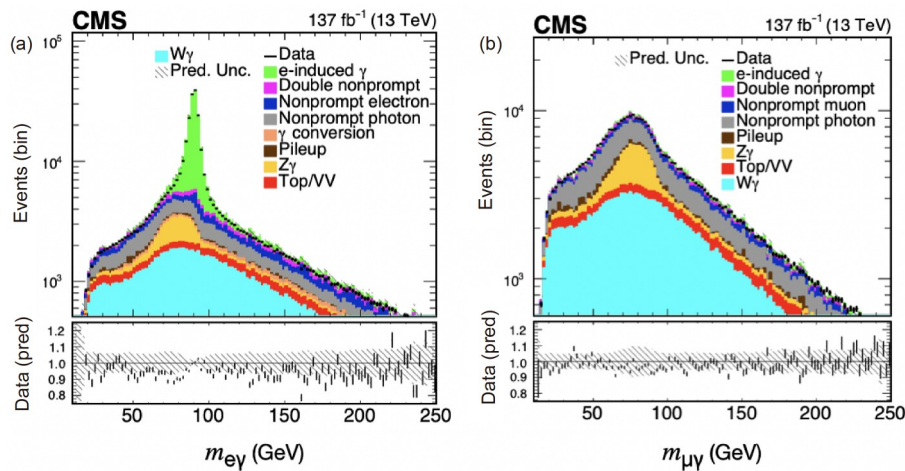


图 1 电子-光子(a)和缪子-光子(b)的不变质量分布^[15]
Figure 1 The distribution in the invariant mass of the electron-photon (a) or muon-photon (b) system^[15]

表 1 95%置信水平下量纲6有效场论的相关耦合系数期望和观测上下限^[16]
Table 1 Expected and observed limits of corresponding dimension-6 effective field theory coupling coefficients at a 95% confidence level^[16]

有效理论参数	期望下限	期望上限	观测下限	观测上限
C_{WW}/Λ^2	-0.85	0.87	-0.90	0.91
C_{B}/Λ^2	-46	45	-40	41
C_{WW}/Λ^2	-0.43	0.43	-0.45	0.45
C_{WW}/Λ^2	-23	22	-20	20

1.2 $W\gamma$ 的散射过程

$W\gamma$ 的散射过程研究了W矢量玻色子和光子散射。所谓矢量玻色子散射过程，又被称为对纵向分量进行测量的黄金过程(vector boson scattering, VBS)。具体而言，两个入射的部分子分别辐射出一个矢量玻色子，这两个矢量玻色子之间发生散射，得到另外两个矢量玻色子。在探测器中，入射部分子辐射之后的剩余部分将经历强子簇射(也包括一些电磁簇射)，形成两个喷注。这类VBS过程有以下特点：一是末态两个喷注为背对背方向，两者之间的赝快度差值很大；二是两个喷注的不变质量很大，可以达到TeV量级；三是由于玻色子之间没有色荷流存在，因此两个喷注之间的强相互作用活动被极大地压低。

$W\gamma$ 的散射过程是指W玻色子和光子在电弱作用下同时产生两个喷注的过程。在这个过程中，W玻色子轻子衰变，最终候选事例包括一个或两个电子、一个光子、两个大分离度的喷注和一定量的丢失的横向能量。

图2为Run I数据本底在muon-barrel控制区域光子横动量的分布，数量与本底过程在误差范围内较好地吻合。结合Run I和Run II数据，CMS组分析得到 $W\gamma$ 的散射过程观察(预期)显著度为5.3(4.8)倍标准偏差^[16]。电弱产生的基准截面为 20.4 ± 4.5 fb，结合EW和QCD产生的基准截面为 108 ± 16 fb，这与标准模型的预言结果相一致。类似地，在量纲8有效场论算子框架下，VBS $W\gamma$ 分析得到置信水平为95%时aQGC(anti quartic gauge couplings, aQGC)参数和的限制。

2 WW散射过程: 极化散射、Majorana中微子探寻

同电荷WW散射过程是首个发现的VBS过程。但是对VBS过程的总截面测量只是研究此类过程的开始。对于大质量的矢量玻色子，其螺旋度可分为横向极化或纵向极化。假设没有Higgs玻色子存在，纵向极化的矢量玻色子散射截面在极高能极限下是发散的，这将破

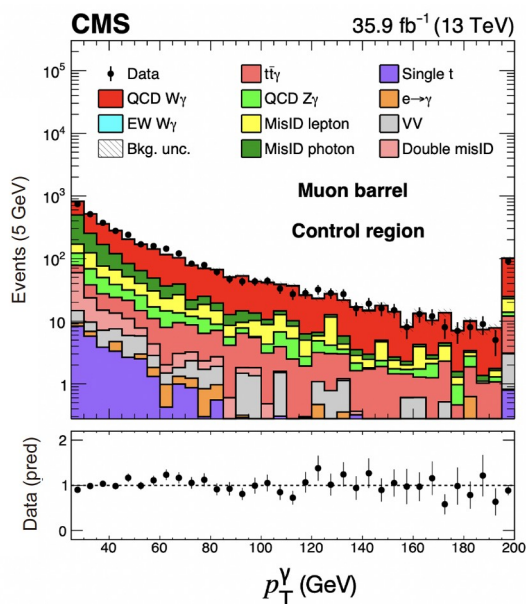


图2 数据本底在muon-barrel控制区域光子横动量 p_T^γ 的分布^[16]
Figure 2 The photon transverse momentum p_T^γ distribution in the muon-barrel control region for data and background estimations^[16]

坏么正性. Higgs机制的存在可以保证么正性不被破坏, 同时也预测了在1.2 TeV下, 可能会存在Higgs粒子^[17~19]. 目前, 实验已经发现了质量约为125 GeV的Higgs玻色子, 但这不代表研究纵向极化的矢量玻色子散射没有意义. 相反, 纵向极化的矢量玻色子散射能够深入研究EWSB机制, 探索是否存在额外的Higgs玻色子, 以及Higgs玻色子与矢量玻色子的耦合常数是否符合标准模型. 因此, 研究极化的矢量玻色子散射具有重要的意义.

由于矢量玻色子通过EWSB与Higgs机制获得质量和极化分量, 在Higgs粒子发现之前, 通过对玻色子散射的么正性分析, 可以得到Higgs粒子的质量必须在TeV之下, 从而为LHC在TeV能级运行提供了物理动机. 在Higgs粒子发现之后, 大量的理论研究表明, 通过对玻色子散射的精细测量, 可以直接验证Higgs粒子的么正保护机制, 进而探索高能量前沿的新物理, 如额外的Higgs粒子等. 因此, Quigg^[20]将此课题称为继Higgs粒子发现之后深入理解电弱对称破缺机制的10个关键问题之一.

2.1 同号WW极化散射研究

在典型的VBS同号WW散射过程中, 考虑到W玻色子可以横向极化或者纵向极化, WW贡献可以分为横向-横向、纵向-横向、纵向-纵向三类. 由于统计量较低, 分析极化过程并不容易^[21]. 利用CMS实验在2016~2018年收集的138/fb的13 TeV对撞数据, 北京大学高能组^[22]主导完成了同电荷W玻色子极化散射的首次测量. 图3利用Run II数据同号WW极化散射研究中BDT(boosted decision trees) score分布, 数据与蒙特卡罗模拟较好地符合. 在分析中, 当考虑同电荷W玻色子质心系时, 使用了BDT变量自动拟合, 给出单纵向W玻色子极化散射的观测(预期)敏感度为2.3(3.1)倍标准偏差. 如图4所示, 此分析也对双纵向散射分量截面给予了限制, 设立了同电荷WW散射纵向极化分量产生截面在95%置信度的观测(预期)上限1.17(0.88) fb. 测量结果为0.32(+0.42, -0.40) fb, 理论预测结果为0.44±0.05 fb^[22].

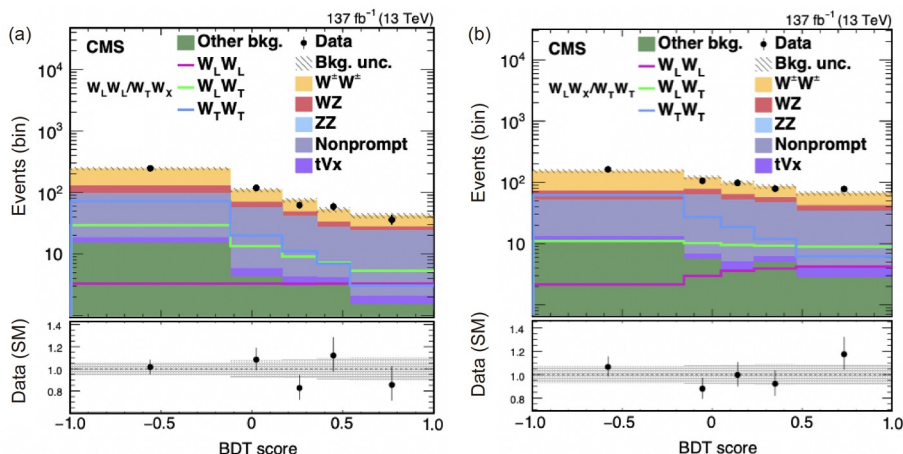


图3 极化散射研究中同号 $W_L W_L / W_T W_X$ (a)和 $W_L W_X / W_T W_T$ (b)的BDT score分布^[22]
Figure 3 BDT score distribution of same-sign $W_L W_L / W_T W_X$ (a) and $W_L W_X / W_T W_T$ (b) polarized scattering^[22]

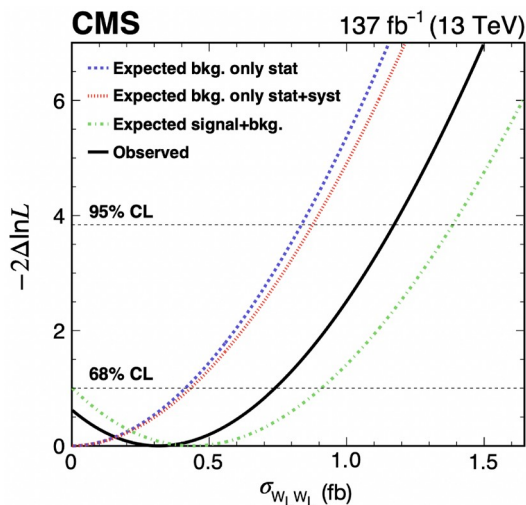


图4 同号WW散射过程纵向-纵向分量截面68%和95%置信水平下的期望和观测限制^[22]

Figure 4 Expected and observed 68% and 95% confidence level limits on the same sign WW scattering process longitudinal-longitudinal cross-section^[22]

2.2 马约拉纳中微子的探寻

对于同电荷WW玻色子散射,除了进行标准模型稀有过程的研究,还可以用来搜寻超出标准模型的新物理现象,如对重马约拉纳中微子的搜寻.中微子振荡实验表明,中微子质量是非零的,标准模型并不能解释中微子质量的问题^[23].这是目前实验上发现的明确超出标准模型范畴的现象.为了解释中微子质量来源,一个可能的方法是对中微子引入狄拉克(Dirac)质量.然而,这将引入右手中微子,由于右手中微子从来没有被发现,因此人们寻求另一种机制,即所谓的跷跷板模型(seesaw model)^[24-27].跷跷板模型是一类模型的统称,这类模型通过假设各种与标准模型轻子以及Higgs玻色子耦合的新粒子来产生中微子质量.然而,实验数据中信号事件的数量与本底过程非常吻合,没有在数据中发现马约拉纳中微子的迹象.不过,研究人员能够为跷跷板模型中用于描述已知轻中微子和假设的重中微子之间量子混合的参数,设定新的边界值.根据引入新粒子方案的不同,可以将跷跷板模型分为不同的种类.对于第一类跷跷板模型,可引入一个重马约拉纳中微子,该马约拉纳中微子质量越大,则对应的中微子质量越小.通过研究,可以对不同质量的重马约拉纳中微子与标准模型轻子的混合矩阵元相关参数作出限制.对比以往对重马约拉纳中微子的研究,此分析大大扩展

了探测的质量范围,直至20余TeV,同时在重马约拉纳中微子质量大于650 GeV时,给出了最好的限制.

由于没有明确的理论指导,不同于给定具体的理论模型进行新物理搜寻,与模型无关的EFT(effective field theory)方法被提出,并且受到了越来越多的关注.在EFT中,有且仅有一个满足规范变换不变的五维算子,也被称为温伯格算子.温伯格算子也可以解释马约拉纳中微子的质量,同时此算子会产生标准模型中微子相互作用顶点.该分析的整体策略借鉴了对极化同电荷WW散射过程的研究,也对部分选择条件进行了优化,通过更大的 m_{ij} 阈值,可以提高实验对该过程的敏感度.同时,考虑到末态轻子更倾向于背靠背产生,对信号区间,进一步分出了正交的高 $\Delta\phi_{ll}$ 区域和低 $\Delta\phi_{ll}$ 区域,进一步提升了区分信号和本底的能力.如图5所示,黑色虚线表示预期的上限,其中一个和两个标准偏差带分别以绿色和黄色区域表示,实心黑色曲线是观察到的上限,通过拟合可以得到等效马约拉纳中微子质量上限的观测(预期)值为10.8(12.8) GeV^[27].

3 WWW共振态

研究矢量玻色子,利用其反应末态来寻找多玻色子共振态也是人们感兴趣的研究方向.一般来说,散射或中间态粒子衰变得到的共振峰属于共振态粒子.而在现代高能物理实验中,共振态可以说就是新粒子.当然对X、Y、Z这一类新粒子而言,还存在如分子态和多夸克态等的假说,人们把它们归结为新粒子并不意味着它们是基本粒子或基本强子.在多玻色子共振态的寻找中,最简单的模式是双玻色子的共振态,把玻色子衰变末态组合起来,将产生一系列的双玻色子共振态寻找的反应末态.尽管双玻色子的衰变模式是可用的最简单模式,然而在参数空间的某些区域,两次的级联衰变也可能是显著,甚至是主要的.在这个过程中,重矢量粒子衰变为SM-EW(标准模型-电弱理论)玻色子,再加上一个较轻的标量粒子,标量粒子随后衰变为一对SM-EW玻色子.因此,最终状态包含3个SM-EW玻色子.

通过Run II的数据,北京大学高能组^[28]首次研究了共振态 $W_{KK} \rightarrow WR$,其中 $R \rightarrow WW$ 的三重W玻色子级联衰变过程,其中 W_{KK} 是Kaluza-Klein激发的大质量规范玻色子, R (或 ϕ)是标量radion.图6展示了WWW共振态信号的“类似费曼图” W_{KK} 衰变^[28],此类过程为LHC新物理的寻找提供了新途径.但是,与此同时,三玻色子

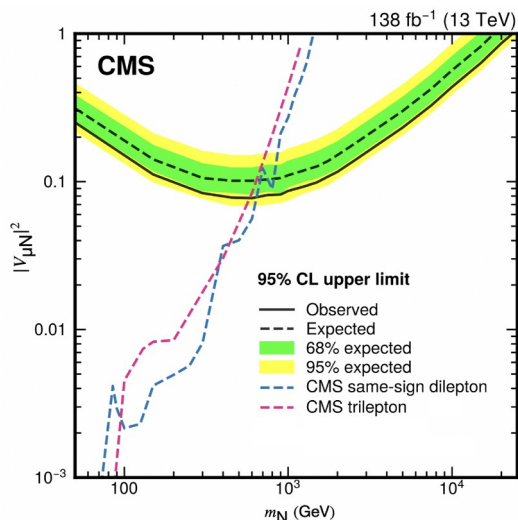


图 5 95%置信水平下的中微子质量的期望和观测限制^[27]
Figure 5 Expected and observed 95% confidence level limits on the neutrino mass^[27]

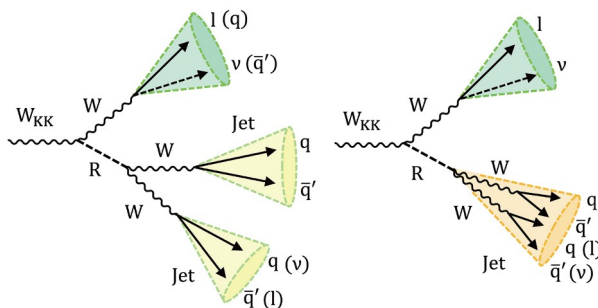


图 6 “Kaluza-Klein”共振态 W_{KK} 衰变图^[28]
Figure 6 “Kaluza-Klein” resonance W_{KK} decay diagram^[28]

共振态的寻找在实验分析中也带来了新的技术挑战。首先, 其衰变产物靠得很近, 需要采用特定的重建及子结构分析技术; 其次, 当它们的质量在不同的参数区间时, 信号特征会有很大的不同, 如来自 W_{KK} 的W末态会形成聚集(窄的锥形)的W喷注等, 其鉴别和校准的方法需特别处理。

大动量的 $W \rightarrow 2q$ 会形成2夸克特征喷注, 而 $\phi \rightarrow WW$ 会形成3或者4夸克的特征喷注(由于 $WW \rightarrow 4q$ 中的一个夸克可能泄漏, 从而可以形成3夸克喷注), 但由于W与radion不带QCD色荷, 其衰变末态之间没有色流(color flow), 从而与本底QCD喷注有很大的不同。利用CMS基于图像识别深度学习技术开发的DeepAK算法, 可以对 $W \rightarrow 2q$ 与 $\phi \rightarrow WW \rightarrow 3q, 4q$ 的喷注进行标定。相比Run I阶段基于NSubjettiness的方法, 新方法更加优

越。通过开发对深度学习DeepAK标记的校准方案, 利用不同的控制区域构建并求解方程, 从而得到DeepAK的数据与蒙特卡洛差异的修正因子, 通过Top夸克 $t \rightarrow 3q, 4q$ (额外喷注来自QCD末态辐射)与信号 ϕ 喷注的类比, 将修正因子应用于信号喷注。未来, 相关的技术和分析也可以推广到其他类似的问题中, 如全强子衰变的 $H \rightarrow WW \rightarrow 4q$ 的测量等。

同时, 基于LHC上CMS探测器在2016~2018年间收集到的对应积分亮度为137/fb的数据, 两个强子衰变W合并成单个WW喷注(合并radion情形)和重建为两个W喷注(分立情形)都被同时探查, 如图7所示。采用数据驱动的方法探测了 W_{KK} -WR质量平面, 研究者发现, 拟合后数据与估计的本底相近, 并没有新物理存在的迹象。对应合并和分立情形, 可以排除 W_{KK} 质量分别为3.5和3.3 TeV^[28]。

4 总结与展望

大型强子对撞机上高能质子-质子对撞中的大量数据, 不仅使得我们可以更加精确地检验和验证标准模型中W矢量玻色子的相关理论, 更使得我们对W玻色子中某些稀有过程的精细研究成为可能^[29]。除此之外, W玻色子过程也可以作为寻找标准模型之外新物理的探针。截至2018年Run II结束, 实验上LHC已收集到约140/fb的13 TeV对撞数据, 现在已进入Run III阶段, 预计将收集到150/fb数据。随着大型强子对撞机Run III阶段的开启, 以及伴随亮度的持续增加, 相信LHC-CMS实验上对W矢量玻色子的相关研究和新物理的探

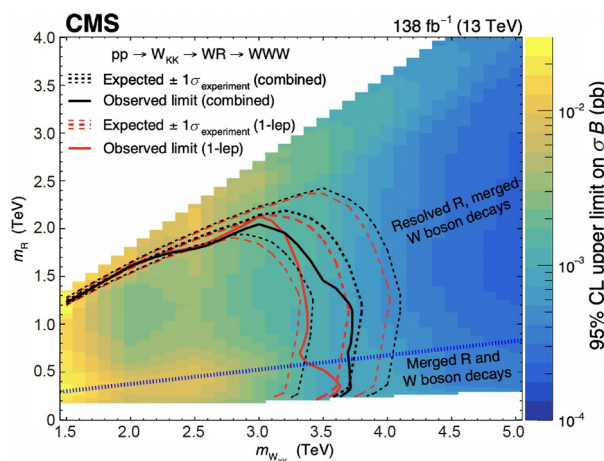


图 7 95%产生横截面的排除线(包括WWW的分支比)^[28]
Figure 7 95% exclusion limits on the cross-section (including branch ratio of WWW)^[28]

索将得到极大的扩展和深入。预计在2025~2026年, LHC将进入高亮度LHC(HL-LHC)阶段, 为期约10年, 预计将收集到约3000/fb的海量数据。相信高能对撞机物理将进入前所未有的关键时期。

参考文献

- 1 Glashow S L. Partial-symmetries of weak interactions. *Nucl Phys*, 1961, 22: 579–588
- 2 Weinberg S. A model of leptons. *Phys Rev Lett*, 1967, 19: 1264–1266
- 3 Salam A. Weak and electromagnetic interactions. *Conf Proc C*, 1968, 680519: 367–377
- 4 Higgs P W. Broken symmetries and the masses of gauge bosons. *Phys Rev Lett*, 1964, 13: 508–509
- 5 Englert F, Brout R. Broken symmetry and the mass of gauge vector mesons. *Phys Rev Lett*, 1964, 13: 321–323
- 6 Aaltonen T, Amerio S, Amidei D, et al. High-precision measurement of the W boson mass with the CDF II detector. *Science*, 2022, 376: 170–176
- 7 Arnison G, Astbury A, Aubert B, et al. Experimental observation of isolated large transverse energy electrons with associated missing energy at $s=540$ GeV. *Phys Lett B*, 1983, 122: 103–116
- 8 Arnison G, Astbury A, Aubert B, et al. Experimental observation of lepton pairs of invariant mass around 95 GeV/c² at the CERN SPS collider. *Phys Lett B*, 1983, 126: 398–410
- 9 ATLAS Collaboration. Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC. *Phys Lett B*, 2012, 716: 1–29
- 10 Chatrchyan S, Khachatryan V, Sirunyan A M, et al. Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC. *Phys Lett B*, 2012, 716: 30–61
- 11 Lyndon E, Philip B. LHC machine. *J Instrum*, 2008, 3: S08001
- 12 Jorg W. Operation and configuration of the LHC in Run 2. 2019, <https://cds.cern.ch/record/2668326>
- 13 Chatrchyan S, Khachatryan V, Sirunyan A, et al. Measurement of the $W\gamma$ and $Z\gamma$ inclusive cross sections in pp collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV and limits on anomalous triple gauge boson couplings. *Phys Rev D*, 2014, 89: 092005
- 14 Aad G, Abajyan T, Abbott B, et al. Measurements of $W\gamma$ and $Z\gamma$ production in collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV with the ATLAS detector at the LHC. *Phys Rev D*, 2013, 87: 112003
- 15 Sirunyan A, Tumasyan A, Adam W, et al. Measurement of the $W\gamma$ production cross section in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV and constraints on effective field theory coefficients. *Phys Rev Lett*, 2021, 126: 252002
- 16 Sirunyan A M, Tumasyan A, Adam W, et al. Observation of electroweak production of $W\gamma$ with two jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV. *Phys Lett B*, 2020, 811: 135988
- 17 Covarelli R, Pellen M, Zaro M. Vector-Boson scattering at the LHC: Unraveling the electroweak sector. *Int J Mod Phys A*, 2021, 36: 2130009
- 18 Biedermann B, Denner A, Pellen M. Complete NLO corrections to $W+W+$ scattering and its irreducible background at the LHC. *J High Energy Phys*, 2017, 2017(10): 124
- 19 Sirunyan A M, Tumasyan A, Adam W, et al. Measurements of production cross sections of WZ and same-sign WW boson pairs in association with two jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV. *Phys Lett B*, 2020, 809: 135710
- 20 Quigg C. Dream machines. *Rev Accel Sci Tech*, 2019, 10: 3–12
- 21 Ballestrero A, Maina E, Pelliccioli G. Different polarization definitions in same-sign WW scattering at the LHC. *Phys Lett B*, 2020, 811: 135856
- 22 Sirunyan A M, Tumasyan A, Adam W, et al. Measurements of production cross sections of polarized same-sign W boson pairs in association with two jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV. *Phys Lett B*, 2021, 812: 136018
- 23 Nakamura K, Petcov S T. Neutrino masses, mixing, and oscillations. *Rev Part Phys*, 2018, 78: 1137–1152
- 24 Minkowski P. $\mu \rightarrow e\gamma$ at a rate of one out of 109 muon decays? *Phys Lett B*, 1977, 67: 421–428
- 25 Gell-Mann M, Ramond P, Slansky R. Complex spinors and unified theories. *Conf Proc C*, 1979, 790927: 315–321
- 26 Yanagida T. Horizontal gauge symmetry and masses of neutrinos. *Conf Proc C*, 1979, 7902131: 95–99
- 27 CMS Collaboration. Probing heavy Majorana neutrinos and the Weinberg operator through vector boson fusion processes in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV. 2022, arXiv: 2206.08956
- 28 CMS Collaboration. Search for resonances decaying to three W bosons in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV. *Phys Rev Lett*, 2022, 129: 021802
- 29 Lu M, Li Q, Dai Z L, et al. Vector boson scattering from the compact muon solenoid (CMS) experiment at the large hadron collider (in Chinese). *Sci Sin Phys Mech Astron*, 2021, 51: 081001 [卢梦, 李强, 戴自霖, 等. 大型强子对撞机上CMS实验矢量玻色子散射的物理研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 081001]

Summary for “高能前沿W玻色子物理进展”

Progress of W boson physics at the energy frontier

Zhe Guan^{*}, Jing Peng^{*}, Jie Xiao, Ying An, Qilong Guo, Sitian Qian, Tianyu Mu, Yajun Mao, Yong Ban & Qiang Li^{*}

State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China

** Corresponding authors, E-mail: zhe.guan@cern.ch; j.peng@cern.ch; qliphy@gmail.com*

The Higgs boson discovery in 2012, the final piece of the Standard Model (SM) puzzle, marked a new era in particle physics. At the Large Hadron Collider (LHC), it is a hot research topic at the high-energy frontier of high-energy physics to precisely test the SM by measuring processes such as multi-bosons coupling with W or exploring new physical phenomena containing W boson beyond the Standard Model (BSM) in the Standard Model. With the accumulation of data at LHC, it becomes possible to examine and study the interaction of the W gauge vector bosons in more detail at the LHC at the frontier of high-energy physics. At CMS (compact muon solenoid), the first measurement of the associated production of a W boson and a photon process and both the electron and the muon decay modes of the W boson were used to extract the cross section by a maximum likelihood fit to the lepton-photon mass distribution. The measured cross section in a defined fiducial region is $\sigma=15.58\pm0.75$ pb, consistent with theoretical expectations at next-to-leading order in quantum chromodynamics. This search further studied possible new physics by the limits on the coefficients of the dimension-six operators relevant to anomalous triple gauge couplings with the effective field theory (EFT) approach at the 95% confidence level (CL), and finally gave a world's best limit on the C_{www} parameter, which provides important input information for the indirect search for new physics beyond the SM. The first observation $W\gamma$ with two jets was also performed at CMS, with observed (expected) significance 5.3 (4.8) standard deviations, where the W boson decays events were selected by requiring one identified electron or muon and an imbalance in transverse momentum, and the two jets were required to have a high di-jet mass and a large separation in pseudorapidity. CMS also reported polarized same-sign W boson pairs search for the first time in the world. The longitudinally polarized vector boson scattering can verify if the Higgs boson preserves the unity and help deeply understand the electroweak symmetry breaking. The observed (expected) upper limit at 95% CL on the production cross section for longitudinally polarized same-sign WW scattering is provided to be 1.17 (0.88) fb. Based on the same-sign WW scattering, CMS researchers also probed heavy Majorana neutrinos at the TeV energy scale and the dimension-five Weinberg operator for the first time at a collider, and the observed (expected) upper limit at 95% confidence level on the effective $\mu\mu$ Majorana mass was reported in this study to be 10.8 (12.8) GeV. For the decay of a resonance to two heavy bosons, various final states have also been searched at CMS. By studying WWW resonance, the theoretical hypothesis of W_{KK} with mass less than 3 TeV can be excluded at 95% confidence level. The studies of the W boson at the high-energy frontier contain a wealth of content, and it is believed that W boson physics at high-energy colliders will enter an unprecedented crucial period with the high-luminosity LHC (HL-LHC) phase.

vector boson, scattering resonance, Large Hadron Collider, CMS experiment

doi: [10.1360/TB-2022-1294](https://doi.org/10.1360/TB-2022-1294)