

中国基于加速器的粒子物理发展战略研究

第一章：中国基于加速器的粒子物理领域的科学意义和战略价值

第二章：中国基于加速器的粒子物理领域的现状及其形成

第三章：中国基于加速器的粒子物理领域的关键科学问题，关键技术问题与发展方向

(整体要求：一是从前沿领域发展态势、国家战略需求以及如何应对国际竞争的角度，前瞻未来15年、特别是未来5年领域的发展趋势，提出未来5~15年前沿领域的关键科学问题和关键技术问题、发展思路、发展目标、优先发展领域或重要研究方向。二是结合上述角度，对以上优先发展领域的战略重要性进行研判并排序，并对其理由进行充分阐述。)

一、高能量前沿

粒子物理学标准模型很成功地描述了基本粒子在很宽的能量范围内的电弱和强相互作用。在标准模型里，电弱作用力的重质量传递介质，W和Z玻色子，通过自发对称性破缺机制来获得质量。这个机制引入了一个具有四个自由度的复标量场，其中三个自由度导致了W和Z玻色子获得质量，而第四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。目前希格斯粒子已经被发现，标准模型取得了极大的成功，但是不能解释什么是暗物质，什么是暗能量，也不能解释宇宙中物质与反物质的不对称，因此它只是一定能标下的有效理论。也就是说必定存在更加普适的理论，这是粒子物理学所要追求的目标。

标准模型的电弱部分与自发对称性破缺机制即Higgs粒子密切相关，富含丰富的物理。首先，电弱精确观测（electroweak precision observables (EWPO)）可以用来检验标准模型的自洽性，如W和Z玻色子的质量，Top夸克质量，Weinberg混合角 $\sin^2\theta_W$ ，以及对撞机上极化或前后不对称性等等；其次，电弱物理过程是很多新物理寻找过程的本底，同时也可有效约束部分子分布函数(Parton Distribution Function (PDF))，这些对于完成对撞机的整体物理目标至关重要；再次，电弱物理可以用于探测规范玻色子反常耦合与有效理论（EFT），从而为探测非阿贝尔相互作用以及间接探测新物理提供了重要途径；此外，在高能量高亮度情形下，标准模型的很多稀有过程得以被观测到，如三规范玻色子产生及矢量玻色子散射过程，为深入检验标准模型打开了新的相空间。

标准模型中顶夸克作为第三代费米子，有着许多基本粒子独一无二的性质：顶夸克质量为172.5GeV左右，是标准模型中最重的基本粒子；顶夸克与希格斯玻色子的耦合接近于一，是与希格斯玻色子耦合最强的费米子；顶夸克的寿命短至 4×10^{-25} 秒，是唯一在形成强子之前衰变的夸克。这些独特的性质，使得顶夸克研究成为精确测量标准模型，发现新物理最理想的渠道。

1. LHC、Tevatron等实验结果的介绍：

LHC的标准模型测量涉及范围很广，其综合结果可参看[1, 2]，具体包括单玻色子、单玻色子与多喷注的联合产生、双玻色子、三玻色子、矢量玻色子融合及散射、单及双top夸克产生、top夸克与规范玻色子的伴随产生、以及四top夸克产生过程等。

单个W/Z玻色子产生过程，在ATLAS、CMS以及LHCb得到了大量精确检验：其总截面测量误差达到1%以下[如3, 4,5]；多维微分截面与NLO乃至NNLO等高精度理论预言符合较好，且对PDF较为敏感[如6, 7]；角分布及前后不对称性同样得到了精确验证[如8, 9, 10]。基于上述结果，CMS抽出有效弱混合角为 0.23101 ± 0.00053 [11]，同时Tevatron的结果给出强子对撞机最精确的结果为 0.23179 ± 0.00035 [12]，这些精确测量结果对于理解LEP与SLD实验结果近3倍标准偏差的差异 [13] 有着重要意义。基于7TeV对撞数据，ATLAS得到W玻色子质量为 $80370 \pm 19 \text{MeV}$ [14]，与之前Tevatron CDF与D0得到的结果 $80385 \pm 15 \text{MeV}$ 非常接近，但是两者的误差都比电弱拟合得到的结果 $80358 \pm 8 \text{MeV}$ [15]要大不少，还需要进一步改进，例如，目前ATLAS结果的主要误差来自理论模拟，包括QCD和PDF误差，对这些误差的理解和控制需要理论和实验界进一步密切配合。

双玻色子产生过程在LHC和Tevatron等实验也得到了大量验证，特别是在LHC上已经进入精确测量阶段。例如，基于Full Run2数据，通过4轻子衰变道，CMS实验测量的Z玻色子对产生的总截面精度已经达到4%[16]，结果与NNLO QCD的理论预言非常吻合。同样是基于Full Run2数据，ATLAS实验给出了Z与光子联合产生过程的测量结果，总截面的精度在3%以下，同时微分截面的结果与高精度理论模拟有很好的符合。

双玻色子产生过程以及单玻色子的矢量玻色子融合过程(Vector Boson Fusion (VBF))涉及玻色子自相互作用，相关测量可以用于精确检验电弱理论的非阿贝尔相互作用。例如ATLAS和CMS利用2016数据测量双W玻色子产生，在有效理论(EFT)框架下对多个6维反常耦合算子给出了一批最严格的限制[17,18]。LHC实验目前对反常三规范玻色子相互作用的综合结果见[19]，结果分别在LEP参数化和EFT框架给出。从[19]可以看到，LHC的实验结果已经超越LEP，在某些参数限制的改善程度甚至已经超过或接近一个数量级。

由于LHC相比之前实验具有高能高亮度的优势，一批标准模型稀有过程进入初次测量乃至首次发现阶段。由[1,2]可见，LHC在截面的探测数量级已经深达 $O(1) \text{fb}$ 以下。以近几年的亮点为例，2018年前后同电荷W玻色子散射分别在CMS和ATLAS实验上以超过5倍标准偏差水平被观测到[20,21]，标志着矢量玻色子散射(Vector Boson Scattering (VBS))被最终确立。其后，WZ[22]、ZZ[23]和 $W\gamma$ [24]散射等也相继被发现。值得指出的是，VBS以及纵向极化散射是LHC电弱物理的热点，特别是纵向极化散射更是HL-LHC的最重要的物理目标。相关研究可以直接验证Higgs幺正性机制，探测高能玻色子散射行为。与此同时，LHC也完成了一批三规范玻色子过程的测量工作，包括 $WW\gamma$ ， $WZ\gamma$ ， $W\gamma\gamma$ ， $Z\gamma\gamma$ 等[25]。特别是，利用Full Run2数据，CMS实验近期在5倍标准偏差水平上观测到了3个重规范玻色子联合产生过程[26]。VBS与三规范玻色子过程同时也对反常四规范玻色子耦合给予了严格限制，在8维有效算子的框架下，LHC综合探测结果参见[19]，其中大部分情形最敏感的限制来自于VBS。

[1] <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/PhysicsResultsCombined>

[2] <https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/PUBNOTES/ATL-PHYS-PUB-2020-010/>

[3] ATLAS Collaboration, *Phys. Lett. B* 759 (2016) 601

[4] CMS Collaboration, *CMS-PAS-SMP-15-004*; *CMS-PAS-SMP-15-011*

[5] LHCb Collaboration, *JHEP* 10 (2016) 030; *JHEP* 09 (2016) 136

[6] ATLAS Collaboration, *EPJC* 77 (2017) 367

[7] CMS Collaboration, *JHEP* 12 (2019) 059

[8] ATLAS Collaboration, *JHEP* 08 (2016) 159

[9] CMS Collaboration, *PLB* 750 (2015) 154; *EPJC* 76 (2016) 325

[10] LHCb Collaboration, *JHEP* 1511(2015) 190

[11] CMS Collaboration, *Eur. Phys. J. C* 78 (2018) 701

[12] The Tevatron Electroweak Working Group, *FERMILAB-CONF-16-295-E*; D0 collaboration, *Phys. Rev. Lett.* 120, 241802 (2018)

- [13] LEP collaborations, Phys. Rep.427, 257 (2006).
- [14] ATLAS Collaboration, Eur. Phys. J. C 78 (2018) 110
- [15] M. Baak et al., The global electroweak fit at NNLO and prospects for the LHC and ILC. Eur. Phys. J. C 74, 3046 (2014)
- [16] CMS Collaboration, CMS-PAS-SMP-19-001
- [17] ATLAS Collaboration, Eur. Phys. J. C 79 (2019) 884
- [18] CMS Collaboration, CMS-PAS-SMP-18-004
- [19] <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/PhysicsResultsSMPaTGC>
- [20] CMS Collaboration, Phys. Rev. Lett. 120, 081801
- [21] ATLAS Collaboration, Phys. Rev. Lett.123 (2019) 161801.
- [22] ATLAS Collaboration, Phys. Lett. B793 (2019) 469; CMS Collaboration, arXiv:2005.01173
- [23] ATLAS Collaboration, arXiv:2004.10612
- [24] CMS Collaboration, CMS-PAS-SMP-19-008
- [25] CMS Collaboration, Phys. Rev. D 90, 032008 (2014), JHEP 10 (2017) 072; ATLAS Collaboration, Eur. Phys. J. C 77, 646 (2017), Phys. Rev. D 93, 112002 (2016)
- [26] CMS Collaboration, arXiv:2006.11191

2. LHC Post-Run2及HL-LHC计划：

LHC目前处于第二次长期停机状态，在2021年将进入所谓Run3。此外，在2025-2026年之后，LHC将进入高亮度LHC (HL-LHC)阶段 [1, 2, 3]，为期约10年，将总共收集到约3000/fb的海量数据。随着LHC对撞能量及数据量的提升，更高能标下的物理过程变得可以测量及得到高精度验证。与此同时，在Higgs粒子被发现之后，高能粒子物理目前正处于关键时期：一方面，直接寻找新物理比如超对称及额外维目前所给出的都是排除性质的结果；另一方面，随着越来越多对撞数据的累积，对标准模型的检验在深度和广度上得到很大的提升。

电弱精确观测量 (electroweak precision observables (EWPO)) 可以用来检验标准模型的自洽性，如W和Z玻色子的质量，Top夸克质量，Weinberg混合角 $\sin^2\theta_W$ ，以及对撞机上极化或前后不对称性等等。其中W玻色子质量目前LHC的测量结果 $80370 \pm 19 \text{ MeV}$ 其误差仍比电弱拟合得到结果 $80358 \pm 8 \text{ MeV}$ 的误差要大2倍以上，需要进一步改进。对于有效混合角 $\sin^2\theta_W$ ，CMS目前测量值为 0.23101 ± 0.00053 ，同时Tevatron的结果给出强子对撞机最精确的结果为 0.23179 ± 0.00035 ，这些精确测量结果对于理解LEP与SLD实验结果近3倍标准偏差的差异有着重要意义。在HL-LHC情形下，取决于对PDF的进一步控制，有效混合角的测量误差预期可达0.0001水平[4]，这个结果将与电弱拟合的精度相当。以上结果的进一步改进，很大程度上也依赖理论界PDF和高阶QCD及EW效应的工作进展。

在HL-LHC上，V，V+Jets,VV的统计量将大大增加，同时这些过程是所有新物理过程的重要本底。对这些标准模型过程的精确测量对于寻找新物理、测量Higgs性质以及约束PDF具有至关重要的意义。这里所说的精确测量不光体现在总截面上，更侧重于微分截面，特别是在大横动量和高散射能量区域[5]。

由于LHC相比之前实验具有高能高亮度的优势，一批标准模型稀有过程进入初次测量乃至首次发现阶段。在Post-Run2以及HL-LHC阶段，预期将有更多标准模型过程的新发现，包括， $WW\gamma$ ， $ZZ\gamma$ ，以及WWW等三规范玻色子产生过程，以及异电荷号WW和半轻乃至全强子VV的VBS散射过程。对标准模型的检验将继续深入，达到截面 $O(0.1) \text{ fb}$ 以下级别的探测。

纵向极化散射是HL-LHC的最重要的物理目标。VBS的纵向极化部分虽然只占整体的5-10%，但由于W/Z玻色子正是合并了Higgs场的Goldstone分量才变得有质量，其纵向极化散射部分的测量将能直接检验高能散射的么正机制，以及探测额外的Higgs等新物理。对于同号WW散射，传统方法预期HL-LHC可以给出预期敏感度为3-4倍标准偏差[6]，为了改进测量敏感度，多变量方法、矩阵元方法和机器学习等近期得到广泛的应用[7]，相比传统结果，灵敏度有了很大的提高。

对于VBS和多玻色子产生过程，利用越来越多的数据，可进行更加精确的测量，给出更多微分截面分布信息，进而深入检验标准模型的自治性，以及间接地探索高能标的新物理。例如，在ATLAS和CMS之前的VBS分析中，对反常规范玻色子耦合的研究大都是在维度8的有效理论框架下进行[8]，并且忽略维度6的有效算子，认为后者已经在其他测量如双玻色子研究中受到很强的限制。然而，从W玻色子散射的么正性机制可以看到，反常规范玻色子耦合与HVV耦合密切相关。随着数据量的增加以及VBS研究的深入开展，在更一般性的有效理论EFT框架下全局性检验标准模型的自治性，已经变得越来越迫切[9]。

HL-LHC的探测器升级对于改进相关结果具有重要意义。例如高颗粒度量能器和时间分辨探测器，可以有效压低Pile-Up效应，提高VBS过程的前向喷注鉴别效率；大快度区域扩充的径迹探测器以及触发系统的升级，对于多玻色子末态如轻子的鉴别效率有很大的提升[1,2,3,5]。

- [1] High-Luminosity Large Hadron Collider (HL-LHC) Technical Design Report [CERN-2017-007-M](#); [HL-LHC book](#)
- [2] CMS Technical Design Report for Phase-2 upgrade, [CERN-LHCC-2015-10](#)
- [3] ATLAS and CMS Collaborations, [arXiv:1902.10229](#)
- [4] [CMS-PAS-FTR-17-001](#)
- [5] <https://indico.cern.ch/event/647676/>
- [6] CMS Collaboration, [CMS-PAS-SMP-14-008](#), [CMS-PAS-FTR-18-005](#)
- [7] [Phys. Rev. D 99, 033004 \(2019\)](#)
- [8] [Phys.Rev.D74:073005.2006](#).
- [9] [JHEP 10 \(2010\) 085](#); [arXiv:1901.05965](#); [Eur.Phys.J. C77 \(2017\) no.4, 262](#).

3. CEPC, ILC和FCC等的前景

§顶夸克物理目标综述：

顶夸克作为标准模型第三代费米子，有着许多基本粒子独一无二的性质：顶夸克质量为172.5GeV左右，是标准模型中最重的基本粒子；顶夸克与希格斯玻色子的耦合接近于一，是与希格斯玻色子耦合最强的费米子；顶夸克的寿命短至 4×10^{-25} 秒，是唯一在形成强子之前衰变的夸克。这些独特的性质，使得顶夸克研究成为精确测量标准模型，发现新物理最理想的渠道。具体包括：

· 通过顶夸克测量标准模型

标准模型中的夸克禁闭效应，禁止了我们观测到单个的夸克。在所有的夸克中，只有顶夸克由于超短的寿命而在和其他夸克形成强子态之前衰变，从而把单个顶夸克的相关信息保留到了其衰变产物中。通过研究顶夸克的衰变产物，能够了解到单个顶夸克的性质。如自旋，宇称，以及顶夸克发生衰变时的信息，从而和标准模型的预言进行比较。因此，顶夸克是检验标准模型理论的理想场地，为我们精确测量夸克质量，自旋，极化，电荷，CKM矩阵元 $|V_{tb}|$ 等提供了绝佳的平台。

· 顶夸克质量精确测量：

取决于顶夸克质量和希格斯粒子质量的大小，顶夸克与希格斯粒子的相互作用对希格斯势能的修正有可能改变希格斯势能的最小值，使得在特高能量下，希格斯场的势能变得比目前的最小值更小，从而使真空有可能通过隧穿效应从目前的希格斯粒子势能的最小值，跃迁到更小的希格斯势能的位置，同时释放出巨大的能量，这时真空就发生了衰变。目前测的顶夸克质量表明，我们目前的宇宙真空处于亚稳定状态和稳定状态的边缘。这个结论所依赖的参数中，目前带来最大不确定性的就是顶夸克质量的大小，虽然顶夸克的质量的测量已经综合了所有实验测量的结果，但是真空稳定性的研究，对顶夸克质量的测量提出了更高的要求。如果未来的测量显示真空处于亚稳定，则意味着高能标下的新物理。

· 顶夸克和希格斯的耦合测量：

标准模型预言希格斯粒子与费米子的相互作用强度（耦合常数）与费米子质量成正比（ $\sqrt{2} * M_f / V_{EW}$ ），测量其大小可以揭示费米子的质量起源。而顶夸克（top quark）的质量（173.1 GeV）比排在第二位的费米子（底夸克，4.2 GeV）的质量大四十多倍。因此，希格斯粒子与顶夸克的耦合常数是在大型强子对撞机上首先可能直接测量的希格斯粒子与费米子的相互作用强度常数。此外，标准模型预言的希格斯粒子与顶夸克粒子的汤川耦合常数 ~ 1 ，处于非微扰的边缘，对于理论计算有特别的意义。因此，精确测量希格斯粒子与顶夸克粒子的汤川耦合常数（ Y_t ）的性质是理解费米子质量起源的关键。这些测量研究包括：

- 1: 精确测量 Y_t 的大小
- 2: 测量 Y_t 与希格斯玻色子和W玻色子耦合的常数的相对相角
- 3: 测量顶夸克与希格斯玻色子耦合顶点的CP性质

· 稀有顶夸克产生过程的寻找和测量

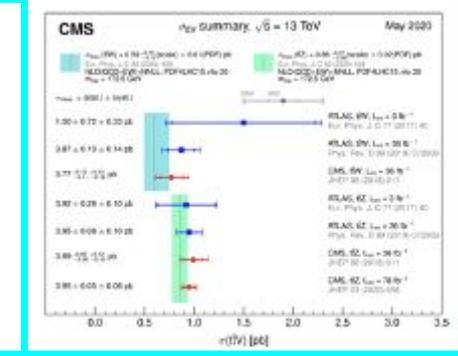
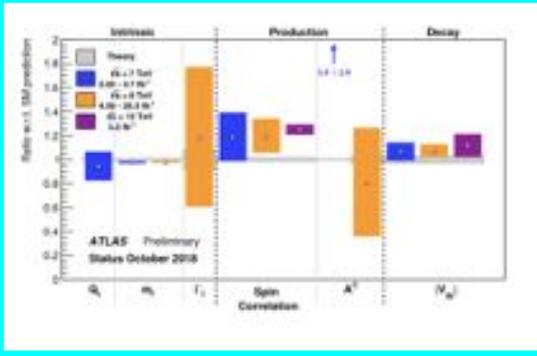
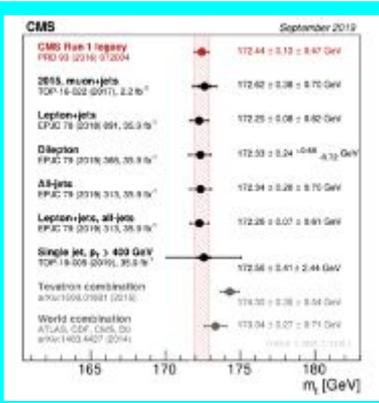
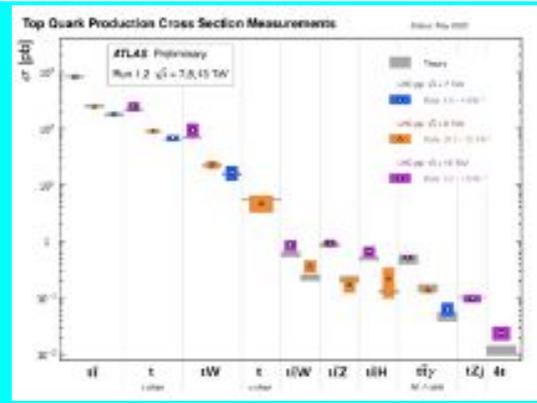
到目前为止，世界上仅有2台粒子对撞机产生过顶夸克，一个是发现顶夸克的Tevatron，现在已经停止运行了；一个是发现希格斯玻色子的大型强子对撞机，目前已经产生了1.9亿顶夸克事例，占计划的5%左右。如此海量的顶夸克事例，使得测量稀有顶夸克产生过程变为可能，包括 ttX ， tXj ， $tttt$ ，FCNC top等（其中X为光子，希格斯玻色子，W/Z玻色子等）。

· 通过顶夸克寻找新物理

由于顶夸克的质量比其他夸克的质量至少高1到2个数量级，因此，顶夸克在与电弱破坏(质量)相关的新物理方面有着独特的作用。如很多新物理更加倾向于与顶夸克耦合，从而衰变到顶夸克。这样，精确研究顶夸克的性质、产生、衰变能有更大可能发现新物理的迹象。而顶夸克由于其巨大的质量，独特的衰变产物，是高能物理实验中比较容易鉴别的粒子，因此从实验的角度来说是比较容易和本底区分开来。

§LHC和HL-LHC的进展及计划

顶夸克物理是LHC实验上的重点研究方向之一，主要通过ATLAS和CMS实验来进行。目前已经对其主要的强产生过程和电弱产生过程均进行了精确的测量，并测量了部分物理过程的微分截面。对顶夸克的质量测量精度达到了0.5 GeV左右，发现了希格斯玻色子和顶夸克的耦合，发现了单顶夸克 tW ，以及稀有 tZq ， ttV 顶夸克产生过程等。



高亮度LHC计划从2026年运行到2035年，顶夸克物理将继续作为重点研究目标。其中，顶夸克质量测量精度将达到0.1%-0.7%的相对精度。发现一些列稀有过程如tttt过程等。

§CEPC, ILC和FCC等的前景

目前正在预研的未来正负电子对撞机，包括中国的环形正负电子对撞机(CEPC)，日本国际直线对撞机(ILC)，欧洲的未来环形电子对撞机(FCC-ee)等，能达到顶夸克对产生所需的350 GeV质心能量，其中ILC能够达到ttH产生所需的500GeV质心能量，从而能在正负电子对撞的干净环境下，精确测量顶夸克质量(精度17MeV)，顶夸克与希格斯玻色子耦合(10%)等参数。

第四章：围绕中国基于加速器的粒子物理领域发展的相关政策建议