

2021年粒子物理学热点回眸

何吉波^{1,2}, Kim Siang Khaw^{3,4}, 李数^{3,4,5,6}, 周浩^{3,4}, 周宁⁴

1. 中国科学院大学物理科学学院, 北京 100049
2. 国科大杭州高等研究院基础物理与数学科学学院, 杭州 310124
3. 上海交通大学李政道研究所, 上海 201210
4. 上海交通大学物理与天文学院, 上海 200240
5. 北京大学高能物理研究中心, 北京 100871
6. 宿州学院机械与电子工程学院, 宿州 234000

摘要 粒子物理学是研究微观物质基本组成及其相互作用的前沿基础学科。聚焦粒子物理领域的几大研究热点方向——暗物质物理、中微子及粒子天体物理、缪子反常磁矩、重味物理与强子物理、希格斯物理与电弱物理及其他超标准模型新物理现象寻找,回顾了2021年粒子物理领域所取得的重要进展,并对相关方向的未来研究前景及未来大科学工程计划作了初步的展望。

关键词 暗物质;中微子;希格斯物理;超标准模型新物理;强子物理;大科学装置

粒子物理是研究构成物质基本粒子的性质和相互作用的学科,是研究物质内部结构规律最基础和前沿的学科。随着理论和实验的不断发展,物理学家逐步建立了粒子物理的“标准模型”(图1)。在这个模型下,整个宇宙的基本粒子分为4类,分别是夸克、轻子、矢量玻色子和标量希格斯粒子。其中,矢量玻色子是相互作用的媒介子,通过规范

作用传递着基本粒子之间的强相互作用、弱相互作用和电磁相互作用。所有的基本粒子通过和希格斯子发生相互作用而获得质量。随着2012年希格斯粒子在实验中发现,粒子物理标准模型完成最后一块“拼图”,证明了标准模型的巨大成功。但是目前宇宙中仍然有许多标准模型解释不了的问题,如暗物质、暗能量、中微子质量、宇宙正反物质不对称

收稿日期:2021-12-22;修回日期:2022-01-03

基金项目:国家自然科学基金项目(11775141, 11775227, 11875041, 12075151, 12050410233, 12061141004, 12061141006);国家重点研发计划重点专项(2017YFA0402102);国家重点研发计划项目(2018YFA0404000)

作者简介:何吉波,教授,研究方向为高能物理实验,电子邮箱:jibo.he@ucas.ac.cn;Kim Siang Khaw(共同第一作者),李政道学者,研究方向为高精度前沿缪子物理实验,电子邮箱:kimsiang84@sjtu.edu.cn;李数(共同第一作者),李政道学者,研究方向为高能物理实验,电子邮箱:shuli@sjtu.edu.cn;周浩(共同第一作者),李政道学者,研究方向为粒子天体物理实验,电子邮箱:hao_zhou@sjtu.edu.cn;周宁(共同第一作者),特别研究员,研究方向为高能物理实验,电子邮箱:nzhou@sjtu.edu.cn;署名单位为共同第一单位

引用格式:何吉波, Kim Siang Khaw, 李数, 等. 2021年粒子物理学热点回眸[J]. 科技导报, 2022, 40(1): 6-24; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857. 2022.01.001



图1 粒子物理标准模型

等问题。这表明粒子物理标准模型并不是“终极”理论,而是电弱能标下的“有效”理论,仍然有超出标准模型的新物理亟待去发掘,这也是当前粒子物理学界的主要研究内容。本文从暗物质探测、中微子和粒子天体物理、缪子反常磁矩、重味与强子物理、高能前沿希格斯物理、电弱物理与新物理寻找等方面介绍2021年粒子物理学的重要进展。

1 暗物质研究

现代天文学大量的证据表明暗物质的存在,普朗克卫星最新结果显示,暗物质在宇宙物质能量构成中占据27%,比已知由原子分子组成的重子物质多5倍。但是,暗物质的本质仍然是个谜,超出了粒子物理标准模型,是当今物理学和天文学亟待解决的重大问题。粒子物理学家提出了很多暗物质模型,例如弱相互作用重粒子(WIMP)模型、轴子(axion)模型、惰性中微子(sterile neutrino)模型、引力子(graviton)模型等。在实验中探测到暗物质并研究其物理属性,将是物理学的重大突破。暗物质实验探测有3个主要方向——直接探测、间接探测和对撞机探测。在过去1年中,不断向前推进探测灵敏度。国际新一代暗物质直接探测实验PandaX-4T 4t级液氙实验率先投入运行,取得大质量暗物质世界最强的限制。间接探测包括暗物质粒子探测(DAMPE)和AMS-02空间实验积累了更多数据,给出更加精确的测量。欧洲核子研究中心大型强子对撞机LHC上的暗物质寻找不断深入更加复杂的参数

空间,并为即将开始的Run-3阶段取数做准备。

暗物质直接探测实验是探测银河系中分布的暗物质与探测器靶原子发生碰撞产生的原子核或电子反冲信号,一般在深地低辐射本底“极其安静”的环境中开展探测。中国锦屏地下实验室(CJPL)是世界上最深的实验室,岩石覆盖达到2400 m,有效屏蔽了来自宇宙线的干扰,提供了极其优越的实验环境。在这个实验室中,中国开展了PandaX液氙实验和CDEX高纯锗实验直接探测暗物质。

近20年来,位于意大利的DAMA/LIBRA实验一直宣称观测到暗物质在NaI(Tl)晶体中产生的年调制信号,置信度高达13个标准偏差。然而相应的暗物质信号参数被各种类型的直接探测实验所排除。例如CDEX高纯锗实验,在4年多的曝光量数据中,没有发现年调制现象^[1]。为了更加确切地检验这个疑似信号,国际上试图用同样的低本底NaI(Tl)晶体开展实验。2021年5月,西班牙Canfrac地下实验室采用112.5 kg的低本底NaI(Tl)晶体探测器的ANAIS实验公布了3年曝光量的探测结果,并没有发现显著年调制现象^[2],如图2(a)所示。预计到2022年底,该实验将有超过3倍标准偏差灵敏的曝光量,可以给出更加确切的结论。另一个采用106 kg低本底NaI(Tl)晶体的COSINE-100实验在韩国Yangyang地下实验室1.7 a曝光量的数据也没有发现显著的年调制现象^[3],如图2(b)所示。

2020年,位于意大利Gran Sasso地下实验室的XENON1T液氙实验在0.65 t·a曝光量的低能量电子反冲数据中,观测到了大于3倍标准偏差的疑似信号^[4],可以用轴子暗物质、非弹性散射暗物质、中微子反常磁矩等模型解释,引起了暗物质理论和实验研究领域的广泛关注^[5-6],亟需同类型实验的进一步检验。中国PandaX-II二期580 kg级液氙实验积累了100 t·d的曝光量数据,直接从刻度数据中获取了氙中主要的放射性杂质本底(氙、氦和氩)的特征谱,进而根据这些高可靠性的本底特征谱对电子反冲数据进行分析。这是对XENON1T观测的疑似信号唯一的同类型独立检验^[6]。PandaX-II的结果显示,该疑似信号和当前数据并不矛盾(图3),还需要提高数据统计量和探测灵敏度以给出确

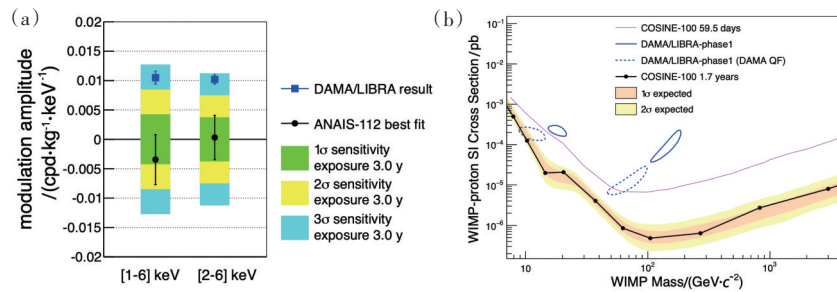


图2 ANAIS实验3 a曝光量结果(a)与COSINE-100实验1.7 a曝光量结果(b)

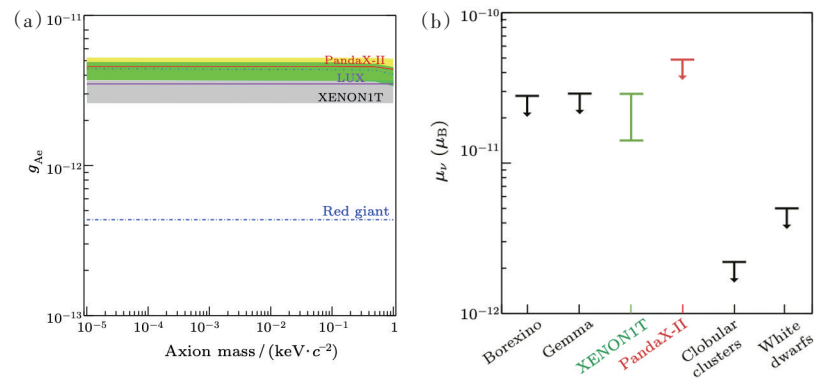


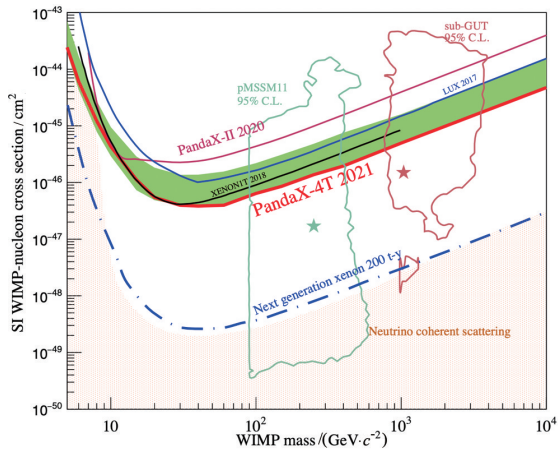
图3 PandaX-II实验对轴子暗物质耦合常数(a)和中微子反常磁矩(b)的排除限, 和XENON1T的疑似信号并不矛盾

定性结论。

为了进一步寻找暗物质,国际上开展了多种类型暗物质探测的实验升级和研发。3个以液氙作为靶物质的实验,位于中国的PandaX-4T、欧洲的XENONnT和美国的LZ实验,将探测体量提升到了多吨级,预期能够将探测灵敏度比之前提升1个数量级以上。其中PandaX-4T液氙实验在2020年底完成安装和调试,成为国际上首个投入运行的多吨级液氙探测实验。PandaX-4T在2021年上半年试运行的曝光量达到0.63 t·a,比PandaX-II二期实验提高了近2倍。PandaX-4T探测器中应用了一系列新开发的技术:研制了新一代超大尺寸高透光的时间投影室探测器,大幅提高了探测器电场的均匀性和电子信号放大率,从而实现高分辨率的信号重建;采用了无触发数据读出方式,有效降低了微弱信号的探测阈值;研制了新型低温精馏氙系统,成功提纯6 t原料氙,将放射性杂质氙85的含量降低到PandaX-II时的1/20;有效利用液氙自屏蔽并结合多种放射性测量方法和表面清洗工艺,将单位探

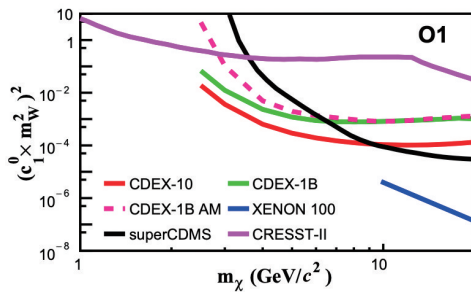
测靶中放射性本底降低到1/20,放射性杂质氙222的含量降低到1/6。通过这些新技术,PandaX-4T首批数据的探测灵敏度较PandaX-II提升了2.6倍,最终给出了大质量暗物质和原子核自旋无关散射截面世界最强的限制(图4)^[7]。这批数据也显示,在暗物质质量10 GeV/c²附近区域,PandaX-4T实验开始触碰到所谓的“中微子地板”,即有可能探测到太阳中核聚变产生的硼8中微子同氙原子核的相干散射信号,这种散射将是未来探测中微子的一个重要途径。与此同时,国际上开始计划几十吨级“终极”液氙探测实验,其中一个目标是将暗物质探测灵敏度推进到“中微子地板”。PandaX实验团队已经开展了相应的关键技术研发。除了液氙,以液氙为靶物质的探测器对大质量暗物质也有独特的探测灵敏度,几十吨级的低本底氙探测器的研发也在持续推进中。

中国CDEX实验利用点电极高纯锗探测器,可实现低能量阈值的探测,对轻质量暗物质具有高灵敏度。2021年CDEX实验公布了利用942.5 kg·d

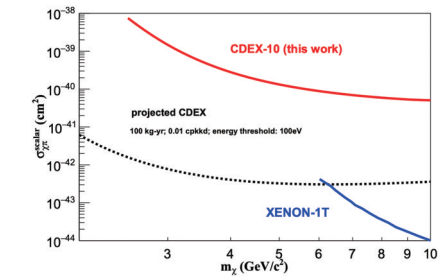


黄色区域为“中微子地板”，即探测灵敏度可以探测到太阳或大气中中微子在探测器中的信号贡献

图4 PandaX-4T首批数据对暗物质自旋无关散射截面的排除限



(a) 对一种自旋无关有效场耦合常数的排除限



(b) 暗物质和pion介子散射截面的排除限

图5 CDEX实验针对小质量暗物质,系统研究了非相对论下有效场暗物质模型

通过独立电离电子信号(S2-only)、Migdal或韧致辐射这些次级效应来寻找小质量暗物质。如PandaX实验在2021年初发表的S2-only数据分析结果,寻找暗物质和电子散射信号,在15~30 MeV/c²暗物质质量区间给出世界最强的散射截面限制^[9](图6(a))。SENSEI实验采用了约2 g的高阻抗

Skipper-CCD,在2020年底发表了24 d运行数据的结果,给出0.5~10 MeV/c²质量的暗物质和电子散射信号世界最强的限制,以及1.2~12.8 eV/c²质量的暗光子世界最强的限制^[10](图6(b))。SENSEI实验正在组装测试100 g探测模块,将大幅度提升该质量范围的暗物质探测灵敏度。

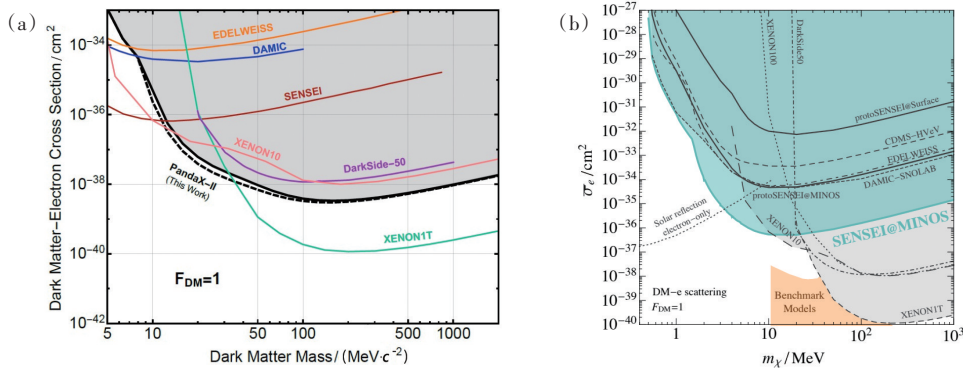


图6 PandaX实验(a)与SENSEI实验(b)对暗物质和电子散射截面的限制

在暗物质间接探测方面,中国暗物质探测卫星 DAMPE 实验和位于国际空间站的 AMS-02 实验继续积累数据。2021 年发表了 AMS-02 实验运行 7 a 以来的物理数据(图 7),给出更加精确的反电子、反质子等测量结果^[11]。

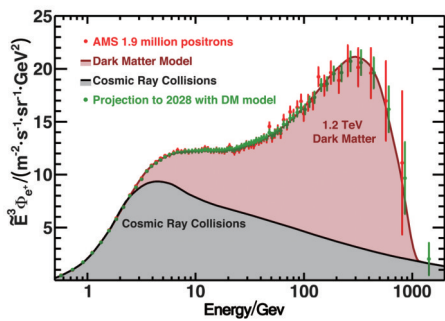


图 7 AMS-02 运行 7 a 的反电子谱,在高能量部分的来源可以用暗物质模型来拟合,需多方面的验证

在对撞机探测方面,位于欧洲大型强子对撞机 LHC 上的 ATLAS 和 CMS 实验不断深入分析 Run-2 运行时期的全部数据,寻找暗物质产生过程以及中

间传播子信号。对撞机探测和直接探测相互补充,特别是自旋相关的暗物质和原子核散射过程,对撞机探测不受原子核自旋大小的压制,通过寻找夸克或者胶子湮灭产生暗物质的过程($E_{\text{miss}}+X$)以及通过双喷注共振峰(Dijet)直接寻找轴矢量中间传播子,在一定的耦合常数下,可以有效补充直接探测实验的结果(图 8(a))^[12]。除了这些简化中间传播子模型,对撞机实验同时寻找一些复杂过程的暗物质模型,如希格斯子引导的暗物质模型(Higgs-portal)、双希格斯子模型(2HDM+a)、暗希格斯子模型等。其中,暗希格斯子模型认为暗物质的质量起源有可能也存在类似希格斯子的破缺机制——暗希格斯子,暗希格斯子可以有和希格斯子类似的衰变过程。ATLAS 实验在 2021 年发表了首个暗希格斯子衰变到 2 个矢量玻色子最终态的寻找结果,对中间传播子和暗希格斯子质量给出了限制(8(b))^[13]。LHC 第三期取数 Run-3 即将开始,将累计更多的数据量进一步扫描多种暗物质产生模型。

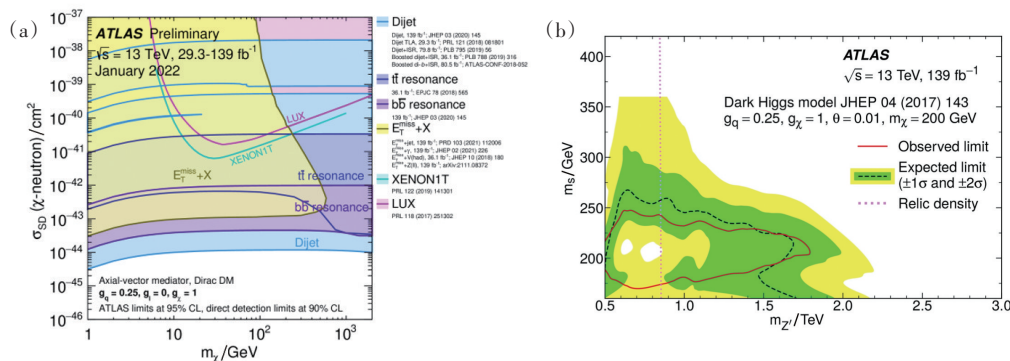


图 8 ATLAS 实验多个反应道分析综合给出暗物质和原子核自旋相关相互作用截面排除限(a)与对暗希格斯子寻找的最新结果(b)

2 中微子和粒子天体物理研究

回顾粒子物理的发展历史,来自宇宙空间的高能粒子提供了最初的实验平台,标准模型中的许多粒子最初于宇宙线中发现。超新星 1987A 的中微子信号、太阳中微子缺失等天体中微子观测促进了中微子科学的快速突破。时至今日,粒子天体物理和粒子物理研究依然紧密联系,宇宙线具有地球上人造加速器无法达到的高能量,为我们认识极端高能物理过程、寻找新物理提供了宝贵的物质样本。

2021 年粒子天体物理领域最显著的成果来自中国国家重大科技基础设施——高海拔宇宙线观测站 LHAASO (Large High Altitude Air Shower Observatory)。LHAASO 位于四川稻城海子山,于 2021 年完成建设并顺利通过工艺验收,正式进入科学运行阶段,以前所未有的灵敏度开展伽马射线、宇宙线巡天观测。在建设期间,基于 1/2 阵列数据,LHAASO 合作组发布了首批观测结果:发现银河系中大量超高能宇宙加速器,为寻找河内宇宙线起源做出了重要推进;记录到能量达 1.4 PeV 的伽

马射线光子,这是人类迄今为止观测到的最高能量光子,开创了超高能伽马射线这一崭新的天文窗口^[14]。蟹状星云是首批发现的12个超高能伽马射线源之一,这个由宋朝司天监记录的“客星”经千年演化而形成的著名天体,一直作为伽马射线天文学的“标准烛光”,LHAASO的最新结果为此“标准烛光”在超高能波段设定了亮度标准(图9)^[15]。这些超高能伽马射线辐射产生PeV以上能段的电子,接近经典电动力学和理想磁流体力学理论所允许的加速极限,对现有的粒子加速理论提出了严峻挑战。未来几年,LHAASO将持续对北天区开展巡天观测,扫描伽马射线源并精确测量“膝”区宇宙线能谱,冲击宇宙线起源的世纪之谜。

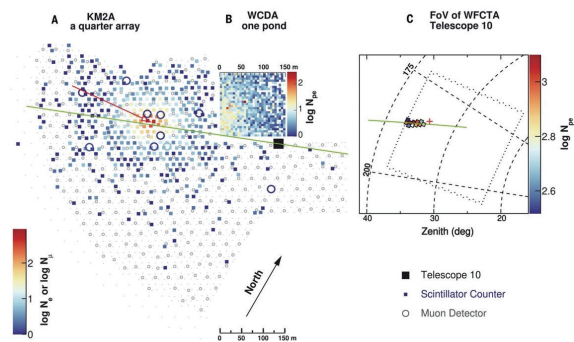


图9 LHAASO观测到来自蟹状星云方向的0.88 PeV伽马射线光子

另一种来自宇宙深处的重要物质样本是高能中微子。2021年,位于南极冰层中的冰立方中微子天文台公布了首个格拉肖共振事件^[16]。60年前,格拉肖预言,反电子中微子可与电子相互作用生成W-玻色子。产生格拉肖共振的中微子峰值能量为6.3 PeV,这远超地球上人造加速器可达到的能量,但可从极端天体环境中得到。冰立方在此次簇射事例中测得 6.05 ± 0.72 PeV的能量,考虑到簇射中的不可见能量,中微子能量被修正为约6.3 PeV,与格拉肖共振的峰值能量高度吻合;事例中测到次级缪子的信号预示着W-玻色子的强子衰变过程,为格拉肖共振提供了进一步证据。冰立方的格拉肖共振事件再次验证了粒子物理标准模型,揭示了天体反电子中微子的存在。作为区分正反中微子的方法之一,对格拉肖共振事件的观测有望对天体中

微子的产生机制做出限制。未来几年是中微子天文学发展的关键时刻,国内外多个实验组提出了冰层、海洋、湖泊中的多种下一代中微子望远镜方案,结合伽马射线、宇宙线、引力波的观测数据开展多信使天文学研究。

在超出标准三味中微子模型的新物理寻找方面,位于美国费米国家加速实验室的MicroBooNE实验发布了新的测量结果,没有找到惰性中微子存在的迹象^[17]。此前20多年间,LSND、MiniBooNE等短基线实验相继发现中微子的数量异常,引入第四种中微子——惰性中微子,被认为是解释这个异常的途径之一。MicroBooNE实验没有找到惰性中微子,并不意味着此前的两个实验出了错,其中有趣的差异还需要进一步研究,中微子数量异常仍然是未解之谜。

2021年,国际无中微子双贝塔衰变实验方向发展势头迅猛。大型实验中,CUORE和KamLAND-ZEN实验分别在意大利、日本的地下实验室继续取数,GERDA的继任实验LEGEND-200即将开始运行。国内无中微子双贝塔衰变实验在最近几年蓬勃发展,多个实验组提出了多种不同的实验方案,再次彰显了马约拉纳中微子这一问题的重要性和显著度。

2021年,中国江门中微子实验的建设进展顺利,预期2023年开始取数,剑指中微子质量顺序、中微子混合参数的精确测量,有望率先获得具有国际竞争力的实验成果。

3 缪子反常磁矩研究

缪子是粒子物理标准模型的第二代带电轻子,在标准模型的发展中扮演着举足轻重的角色。缪子本身拥有磁矩 $\vec{\mu}$,而磁矩与内禀属性之一的自旋 \vec{S} 有着密切的关系:

$$\vec{\mu} = g_{\mu} \frac{e}{2m} \vec{S}$$

其中, g_{μ} -因子在“裸”缪子的情况之下为2,为狄拉克方程对于费米子的预测^[18]。由于量子涨落,虚粒子会在真空中不断迅速地出现和消失,导致 g_{μ} -因

子还包含了量子辐射修正。

目前关于缪子磁矩的讨论都围绕此修正的大小进行,一般被称为反常磁矩 $a_\mu=(g_\mu-2)/2$ 。缪子的反常磁矩是众多粒子基本性质中可以通过理论计算和实验测量获得非常精准的物理量之一。在标准模型的框架内,反常磁矩的计算一般被分成4个部分:量子电动力学、电弱相互作用、强子真空极化以及强子光-光散射(图10)。反常磁矩的首个量子电动力学修正计算是由斯温格在1948年针对电子完成, $a_e=0.00116\approx 0.1\%$ ^[19]。有趣的是,这个量子电动力学的一圈图修正无论是电子还是缪子都是等值的。

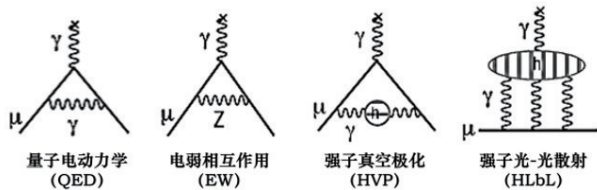


图10 用于计算缪子反常磁矩的费曼图分类

缪子反常磁矩首次被测量是在1957年。李政道和杨振宁在1956年提出了“在弱相互作用下宇称不守恒”^[20],提出利用 π 介子和缪子的弱衰变实验来验证宇称的不守恒。莱德曼的团队当时在尼维斯回旋加速器实验室刚好可以进行这个实验,在验证宇称不守恒的同时也间接获得了与零相符的一个实验结果, $a_\mu=0.0\pm 0.1$ ^[21]。之后通过欧洲核子研究中心(CERN)的一系列实验(1959—1979年)^[22]以及美国布鲁克海文国家实验室(BNL)的Muon g-2实验的多年测量(1997—2001年),其精度已经达到了低于百万分之一级别的 0.54×10^{-6} ^[23]。

此时,基于标准模型的理论计算也已经达到了相当的精确度,但是比测量值还要小2.7个标准偏差。这个差异暗示可能存在着超越标准模型的新物理。此结果在2006年发布后,获得了物理学界重大的关注,也得到了世界各大主流媒体的报导。为进一步了解这个差异,粒子物理的理论家和实验家开展了一系列工作,希望可以进一步提高理论计算和实验测量的精度。

缪子反常磁矩的大理论团队(Theory Initiative)由世界各国与缪子反常磁矩计算相关的理论专家和实验合作组代表组成。他们自2017年开始

分别在美国、德国和日本等国家召开工作会议,希望可以获得一个共识的缪子反常磁矩理论计算值。在此之前,理论值几乎每年都被其中一个理论团队更新。对于实验团队来说,无论取哪一个理论值作为参考都会导致争议。最终,经历了一系列工作会议之后,在2020年中旬,大理论团队发布了大家达成共识的理论值,此值和实验值两者之差已经达到了3.7个标准偏差^[24]。这让物理学界困惑已久的反常磁矩之谜受到了更大的重视,在物理期刊上几乎每天都出现各种可以解释此差异的新物理模型。

实验方面,从2009年起,便有2个团队规划利用2种不同的实验方案提高测量精度,一个是位于美国费米国家加速器实验室(简称费米实验室)的Muon g-2实验^[25],一个是位于日本强流质子加速器研究联合装置(简称J-PARC)的Muon g-2/EDM实验^[26]。费米实验室采用和BNL同样的测量手法,不同的是,研发了性能更好的电磁量能器和磁场测量核磁共振探针以及其他仪器的改良。而J-PARC采用的是不同的缪子动量、缪子束流的储存方法以及衰变电子的测量方法,两实验主要参数对比如表1所示。

表1 费米实验室和J-PARC研究所的缪子反常磁矩实验的主要参数比较

参数	费米实验室	J-PARC
目标统计误差/ppb	100	400
磁场/T	1.45	3.0
缪子储存环半径/mm	7112	333
回旋运动周期/ns	149.1	7.4
缪子寿命/ μs	64.4	6.6
缪子自旋极化率/%	97	50
目标事例数/(10^{11} 个)	1.8	8.1

费米实验室的Muon g-2合作组于2009年成立,早期成员包括BNL实验的一些物理学家。在2013年,BNL实验的储存环被分拆,分批运到位于芝加哥郊外的费米实验室。其中,超导导线更是耗时1个月经过水路运到目的地。2014年开始重新组装储存环,2015年起进行了为期1年的储存环磁场均匀化工作,2017年中旬完成实验搭建之后,开始实验试运行(图11),最终在2018年采集到第一批物理数据(Run-1)。

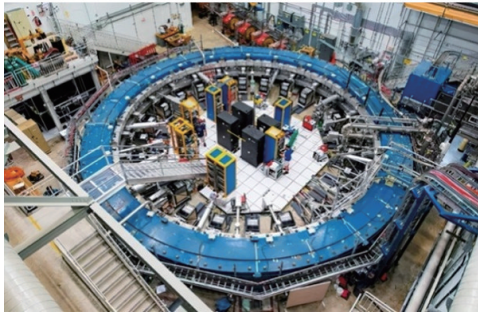


图11 费米实验室的 Muon g-2 实验装置
(图片来源:Reidar Hahn, 费米实验室)

如图11所示,正缪子束流从上方进入储存环后进行顺时针的回旋运动,在平均绕了400圈后衰变,其衰变产物的正电子被储存环内的电磁量能器捕抓。反常磁矩的物理分析主要分成3大部分,缪子自旋的反常进动频率、储存环的磁场分布以及缪子束流在储存环的时间和空间分布。(1)反常进动频率可以通过测量正电子数量随时间的振荡获得;(2)磁场分布可以通过安装在储存环上下的核磁共振探针和在储存缪子束流区域扫描的核磁共振探针台车获得;(3)缪子束流分布可以通过径迹探测器的测量和束流动力学模拟的对比获得。

Run-1 数据历经3年的分析后,于2021年4月7日发表在《物理评论》系列期刊上,精确度是迄今最好的,达到 0.46×10^{-6} ^[27-30]。结合BNL的测量值后,实验理论差异则达到了4.2个标准偏差(图12)^[27,31]。

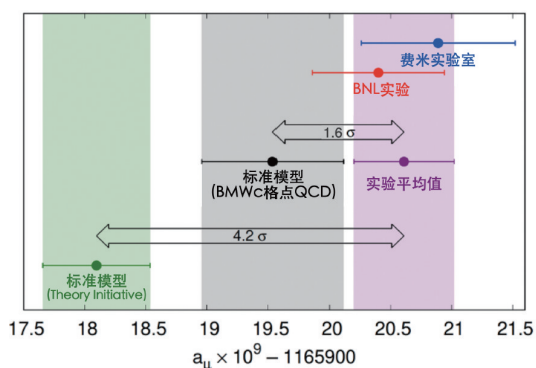


图12 缪子反常磁矩最新的理论计算值和实验测量结果

在费米实验室发表结果的同时,基于格点QCD计算强子真空极化(HVP)对反常磁矩贡献的BMWc团队也在《Nature》发表了最新计算结果^[31],结果表明,理论实验只有1.6个标准偏差的差异,而

且他们的计算值与其他基于色散关系的理论值有3.7个标准偏差的差异。基于色散关系的计算主要是利用了低能量正负电子对撞机(如BES III, Belle II, BaBar)中强子末态的产生截面测量(如 $e^+e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- (+\gamma)$)。目前其他格点QCD团队正在验证这一新结果的计算和系统误差的估算,希望在近期可以解决理论值之间的矛盾。

费米实验室的 Muon g-2 实验目前正在采集第5批数据(Run-5),计划至少还会运行1年,并且从Run-6开始转向测量负缪子的反常磁矩。除了反常磁矩的精确测量, Muon g-2 实验的数据也可以用于寻找缪子的电偶极矩^[32]以及与缪子有耦合的超轻暗物质^[33]。与此同时, J-PARC 的 Muon g-2/EDM 实验在2020年获得日本学术振兴会的资助后,也逐渐步入正轨。该实验通过产生缪子偶素和激光离子化的方法产生冷缪子,然后对其进行反常磁矩精确测量。在2018年实现了利用RF谐振腔加速缪子后^[34],在缪子偶素的生产额、缪子加速束流线、径迹探测器模块等方面已经获得重大进展。该实验计划于2027年开始取数,以不同的测量方式互相验证费米实验室的测量结果(图13)^[26]。

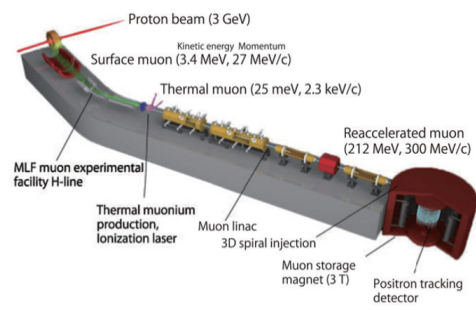


图13 J-PARC的 Muon g-2/EDM 实验装置示意

2021年是缪子物理非常重要的一个节点。历经15年成功更新反常磁矩的测量值,并且在费米实验室成功累积取得了比BNL多13倍的数据。预计2022年,美国和日本的反常磁矩实验将取得更进一步的突破,为揭开缪子反常磁矩之谜做出贡献。

4 重味与强子物理研究

在粒子物理标准模型中,三代轻子(e^\pm, μ^\pm, τ^\pm)

与规范玻色子 (W^\pm, Z) 具有相同的耦合强度, 这被称为“轻子普适性”。测量含不同代轻子末态的衰变分支比的比值, 例如 B 介子衰变到缪子对和 K 介子, 与衰变到电子对和 K 介子的分支比的比值, $R_K = \frac{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-)}{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ e^+ e^-)}$, 可以抵消大部分的理论误差和实验误差, 因此是理想的搜寻超出标准模型新物理的方法。B 工厂 (Babar 实验与 Belle 实验) 此前测量了 R_K , 由于测量精度有限, 未发现与标准模型预言偏离的迹象。LHCb 实验国际合作组 2014 年发布的测量结果与标准模型预言有 2.6 倍标准差的偏离^[35], 2019 年利用更多的数据提高测量精度后, 结果与标准模型预言仍有 2.5 倍标准差的偏离^[36]。2021 年, LHCb 实验国际合作组进一步提高了 R_K 的测量精度, 结果与标准模型预言有 3.1 倍标准差的偏离^[37], 可能是新物理影响的迹象。目前关于 R_K 测量结果如图 14 所示。

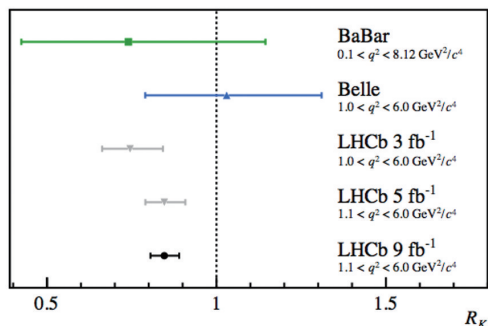


图 14 B 介子衰变中轻子普适性检验结果汇总

中性底介子 B^0, B_s^0 、粲介子 D^0 和 K 介子 K^0 是粒子物理标准模型中仅有的 4 种可以在正反物质粒子之间“振荡”的粒子, 犹如“薛定谔的猫”, 正反粒子“振荡”是量子力学重要性质的体现。中性粲介子 D^0 (夸克组分: $c\bar{u}$) 相对于底介子振荡频率更小, 在实验上难以测量, LHCb 实验国际合作组于 2013 年才在实验上确立其振荡属性^[38]。2021 年, LHCb 实验国际合作组测量了决定中性底介子振荡频率的物理量——2 个质量本征态的质量差, 测量结果如果用 g 表示的话, 约为 $10^{-38} g$, 这是实验上首次确立中性粲介子 2 个质量本征态的质量差^[39]。

强子谱研究可以帮助深入理解夸克模型和强相互作用, 是粒子物理的前沿热点课题。继 2003

年 Belle 实验国际合作组发现 $X(3872)$ 粒子以来, 实验上发现了一系列的奇特强子态, 其中一些粒子带电, 不可能是传统的电中性的重夸克偶素 (夸克组分: $c\bar{c}$ 或 $b\bar{b}$), 例如四夸克态 $Z_c(3900)$ (夸克组分: $c\bar{c}u\bar{d}$), 五夸克态 $P_c(4312)^+$ (夸克组分: $c\bar{c}uud$)。2021 年, 实验上又发现了新型的奇特强子态, 奇异隐粲四夸克态 $Z_{cs}(3985), Z_{cs}(4000), Z_{cs}(4220)$ 和双粲四夸克态 T_{cc}^* 。

北京谱仪 III 实验国际合作组^[40] 在 $e^+e^- \rightarrow K^+(D_s^- D^{*0} + D_s^{*-} D_0)$ 反应过程中, 在 $D_s^- D^{*0}$ 和 $D_s^{*-} D_0$ 的质量阈值附近发现一个增强结构, 需要引入新的四夸克态候选者 $Z_{cs}(3985)$ 来解释, 如图 15 所示。 $Z_{cs}(3985)$ 质量为 3982.5 ± 3.3 MeV, 宽度为 12.8 ± 6.1 MeV。该共振态衰变到 1 个中性粲介子 (夸克成分: $c\bar{u}$) 和 1 个带电且含奇异夸克的粲介子 (夸克成分: $c\bar{s}$), 所以至少由 4 个夸克 $c\bar{c}u\bar{s}$ 组成。

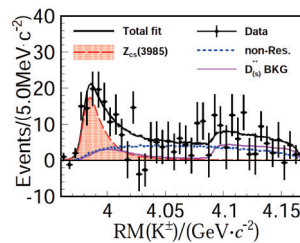


图 15 $e^+e^- \rightarrow K^+(D_s^- D^{*0} + D_s^{*-} D_0)$ 反应过程中 K 介子反冲质量谱

LHCb 实验国际合作组^[41] 通过对底介子的衰变道 $B^+ \rightarrow J/\psi \phi K^+$ 进行振幅分析, 在粲夸克偶素 J/ψ 和带电 K 介子组合的不变质量谱中发现明显的增强结构。进一步的分析表明, 该系统存在 2 个共振态结构 $Z_{cs}(4000)$ 和 $Z_{cs}(4220)$ 。这些共振态通过强相互作用衰变到粲夸克偶素 (夸克组分: $c\bar{c}$) 和带电 K 介子 (夸克组分: $u\bar{s}$), 所以至少由 4 个夸克 $c\bar{c}u\bar{s}$ 组成。 $Z_{cs}(4000)$ 的不变质量分布如图 16 所示, 其质量为 4003 ± 15 MeV, 宽度为 131 ± 30 MeV。 $Z_{cs}(4000)$ 的质量与北京谱仪 III 实验国际合作组发现的 $Z_{cs}(3985)$ 在误差范围内一致, 而宽度大 1 个数量级, 它们是否是同一个粒子, 有待理论与实验的进一步研究。

LHCb 实验国际合作组^[42] 于 2017 年发现了双粲重子 Ξ_{cc}^{++} (夸克组分: ccu), 使得对于含 2 个相同重味

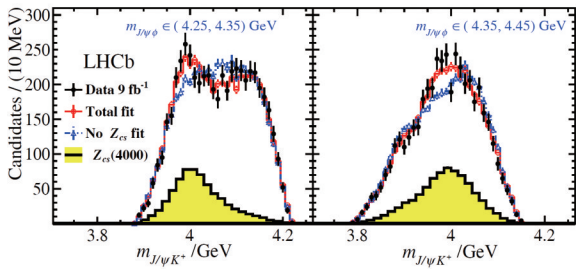


图 16 $B^+ \rightarrow J/\psi \phi K^+$ 衰变中不同 $J/\psi \phi$ 质量区间的 $J/\psi K^+$ 不变质量分布

夸克的奇特态的研究成为新一轮理论热点。在实验方面, LHCb 实验国际合作组^[43]于 2020 年发现了由 2 对正反粲夸克组成的 $X(6900)$ (夸克组分: $c\bar{c}c\bar{c}$)。2021 年, LHCb 实验国际合作组^[44]在 $D^0 D^0 \pi^+$ 的不变质量谱中发现一个新的共振态 T_{cc}^* , 至少含有 4 个夸克 $cc\bar{u}\bar{d}$, 其不变质量谱如图 17 所示。该共振态质量约为 3875 MeV, 稍低于 $D^{*+} D^0$ 质量的阈值; 宽度很窄, 约为 0.4 MeV。 T_{cc}^* 是由 D^{*+} 介子与 D^0 介子组成的分子态, 还是紧致型四夸克态, 有待理论与实验的进一步研究。

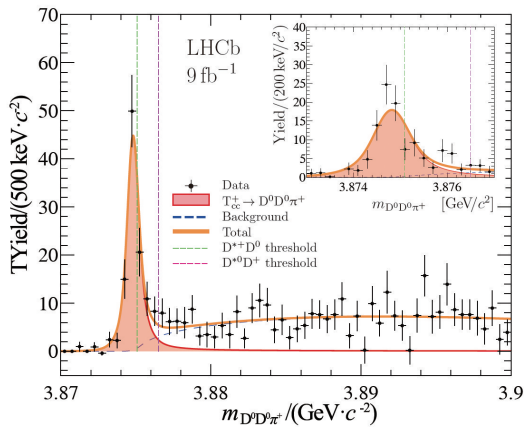


图 17 四夸克态 T_{cc}^* 不变质量谱

在理解核子结构方面, 北京谱仪 III 实验国际合作组^[45]对类时空中子的电磁结构进行了精确测量。实验结果如图 18 所示, 表明光子与质子耦合比光子与中子耦合更强, 从而解决了长期存在的光子-核子耦合反常问题。同时, 北京谱仪 III 实验国际合作组也观测到中子电磁形状因子随质心能量变化的周期性振荡结构, 其振荡频率与质子的相同, 相位接近正交, 如图 19 所示。这暗示着核子内

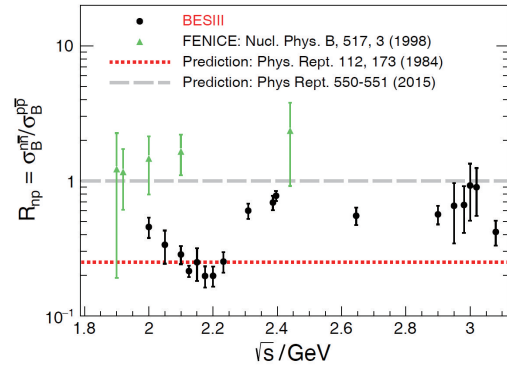


图 18 光子-中子和光子-质子的相互作用截面比率

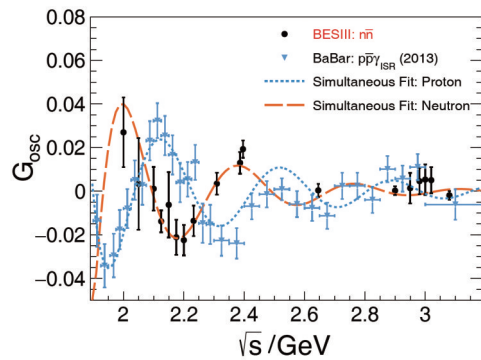


图 19 中子和质子电磁结构振荡比较

部存在尚未理解的动力学机制, 有待理论与实验进一步研究。

5 高能前沿希格斯物理、电弱物理与新物理寻找

希格斯玻色子作为人类发现的第一个自旋为零的标量玻色子, 于 2012 年在欧洲核子研究中心大型强子对撞机 (LHC) 上的超环面仪器 (ATLAS) 和紧凑缪子线圈 (CMS) 实验中被发现^[46-47]。希格斯玻色子是标准模型预言的质量起源粒子, 是电弱对称性破坏机制的理论基础, 同时也是标准模型中最后一个被发现的粒子。它的发现补全了标准模型的理论框架、提升了人类对于粒子物理微观世界的认知。在后希格斯发现时代, 精确测定希格斯粒子的性质、研究希格斯粒子与其他标准模型粒子的作用机制以及通过希格斯作为探针来寻找超越标准模型的新物理现象成为高能前沿对撞机实验研究的核心之一。基于 LHC 第二期实验运行 (Run-

2)的质子-质子对撞数据, ATLAS与CMS实验国际合作组(分别采集了近 140 fb^{-1} 的数据量)开展了一系列深入研究工作,除希格斯物理外,其他新物理现象的寻找、标准模型的精确检验与稀有过程寻找、暗物质与超对称粒子的探索等,均取得了相当多成果。

希格斯粒子的寿命很短,它的存在只能通过具体的衰变末态进行测量。ATLAS与CMS国际合作组基于LHC Run-2实验数据,联合希格斯的主要衰变道测量希格斯玻色子的主要产生模式(如胶子聚合产生 ggF , 矢量玻色子聚合产生 VBF , 矢量玻色子协同产生 VH 以及顶夸克协同产生模式 $tH+ttH$)的反应截面和衰变分支比,以及耦合参数等。以ATLAS结果为例,最终全局拟合获得希格斯粒子总体信号强度为 1.06 ± 0.06 (标准模型预言为1),测量误差相比以前实验结果有显著的降低,在误差范围内与标准模型预言吻合,是2021年度标准模型希格斯测量的重要代表性进展(图20)^[48]。

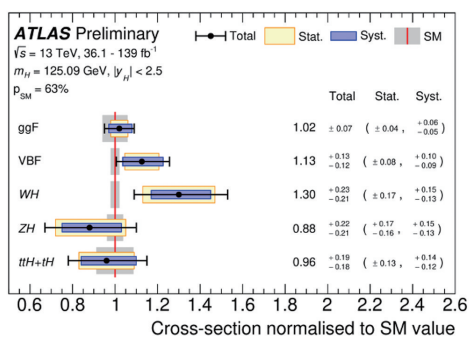
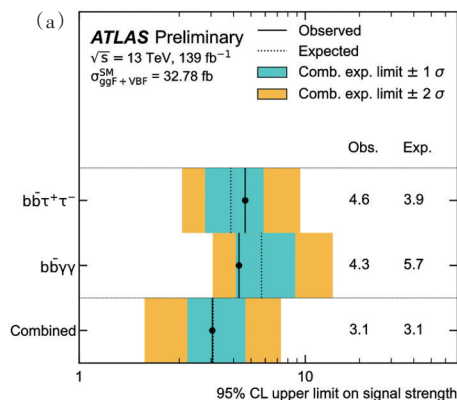


图20 ATLAS希格斯玻色子产生截面联合统计分析最新结果



双希格斯过程是LHC上希格斯产生的稀有过程(仅占希格斯总截面的0.1%),对于探索希格斯自耦和机制、研究希格斯势的形状、探索反常自耦和及双希格斯超标准模型共振态新物理有着重要意义。ATLAS与CMS合作组在该研究方向上深耕Run-2 13 TeV对撞数据,获得了重要研究进展^[49-57]。图21(a)为ATLAS标准模型双希格斯联合测量结果,图21(b)为重质量双希格斯共振态新物理寻找的最新实验限制(以自旋为2为例),目前尚未发现新物理迹象。

此外,作为希格斯性质测量的重要组成课题,希格斯衰变宽度与寿命测量及离壳衰变研究至关重要。CMS合作组基于希格斯双Z玻色子衰变道,给出了离壳希格斯的实验证据(3.6倍标准偏差显著度)和希格斯宽度测量的最新结果,与标准模型预言高度吻合^[58-59]。作为希格斯复杂衰变道的未来挑战之一——二代费米子汤川耦合研究至关重要,继2020年希格斯缪子衰变道测量在ATLAS与CMS实验中测量取得突破后,ATLAS于2021年完成了粲夸克衰变道的完整测量研究^[60-61]。

在寻求新物理直接探索突破的同时,标准模型过程的精确测量可提供新物理寻找的模型参数限制、作出高精度理论与实验吻合度检验,从而成为间接发掘新物理迹象的重要手段。在该研究方向上,有多个重要热点成果值得关注。(1) CMS合作组在W-玻色子衰变分支比精确测量中取得重要突破,所获结果首次超过LEP正负电子对撞机的高精度历史结果^[62]。此外在电弱精确测量全局拟合中

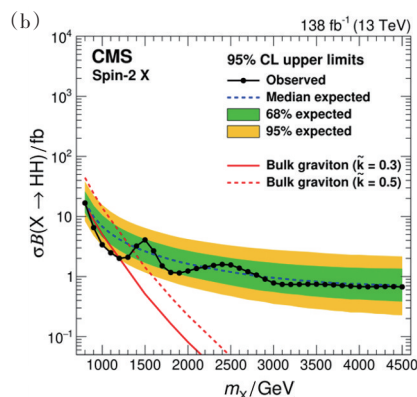


图21 ATLAS标准模型双希格斯联合测量(a)与CMS双希格斯共振态新物理最新实验限制(b)

PDG2020指出了2倍标准偏差,有待实验和理论的进一步论证。(2) 在电弱稀有过程三规范玻色子产生研究中,ATLAS和CMS合作组先后获得研究突破,首次在实验中观测到三规范玻色子协同产生过程^[63-67],图22展示了三规范玻色子的强子衰变(a)和轻子衰变过程(b)的探测器示意图^[63-86]。(3) 在矢量玻色子散射(VBS)的研究中,ATLAS和CMS实验继早期的同号 WW 、遍举双光子 $WW/WZ/ZZ$ 的散射测量获得突破性发现后^[68-75,80-82,87-88],进一步发现了 $W+$ 光子、 $Z+$ 光子末态和异号 WW 散射过程^[76-77,83-86],并获得具有很大挑战性的 $Z+$ 光子散射过程中微子衰变道散射的首次发现^[78],图22展示了 ZZ 散射示意图(c)和 VV 散射强子衰变示意图(d)。VBS过程的研究突破是高能前沿电弱物理研究的重要里程碑^[69],对深刻理解电弱对称性破坏、希格斯在矢量玻色子散射过程中的么正性机制、规范玻色子自相互作用等意义重大,同时也是四规范反常耦合与希格斯矢量玻色子融合产生过程的重要研究工具。(4) 此外,ATLAS在四顶夸克产生稀有过程测量^[89-91]、CMS在 $3J/\psi$ 产生测量等方向均有重要进展发表^[92-93]。

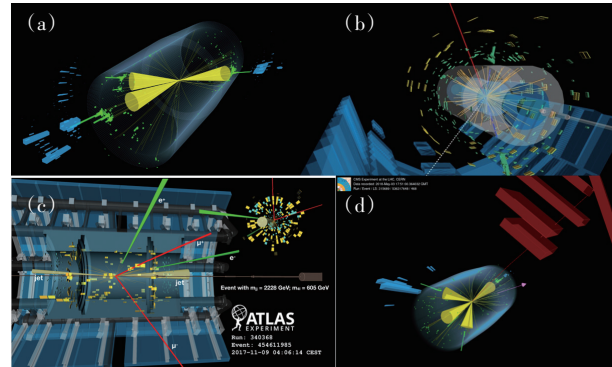


图22 ATLAS与CMS实验中三玻色子产生过程与矢量玻色子散射过程探测器示意图

在新物理现象的实验寻找过程中,ATLAS与CMS实验基于超对称理论、长寿命粒子理论模型、重质量共振态、反常耦合测量等不同手段,开展了广泛的研究,目前尚未发现足够显著的偏离标准模型的实验迹象。以长寿命粒子寻找与超对称实验数据分析相关研究成果为例(图23),相关工作为新物理理论的进一步研究提供了大量的实验数据参考和检验,并为未来理论与实验的发展提供重要的指引与借鉴作用^[84-99]。

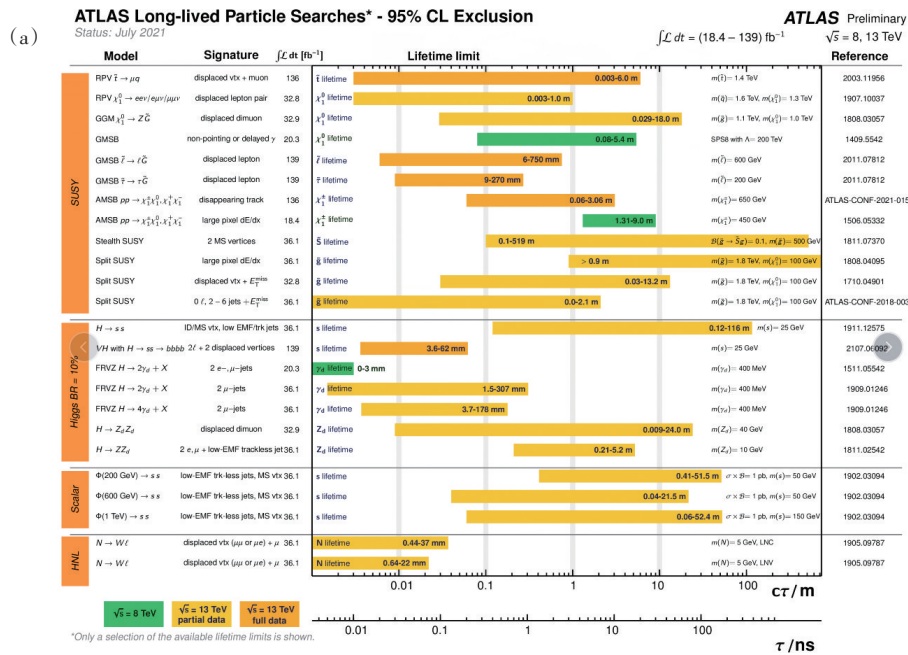


图23 ATLAS与CMS实验关于新物理寻找统计限制的部分结果展示

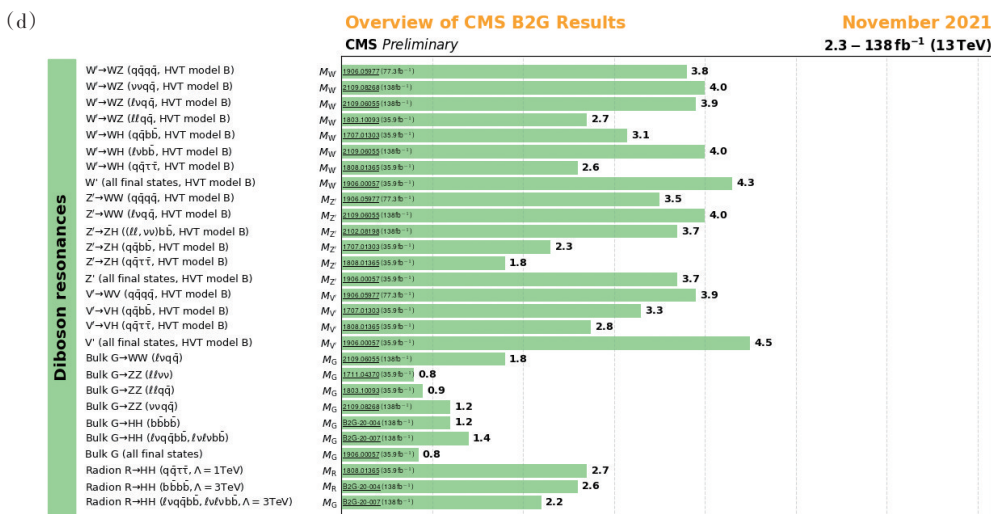
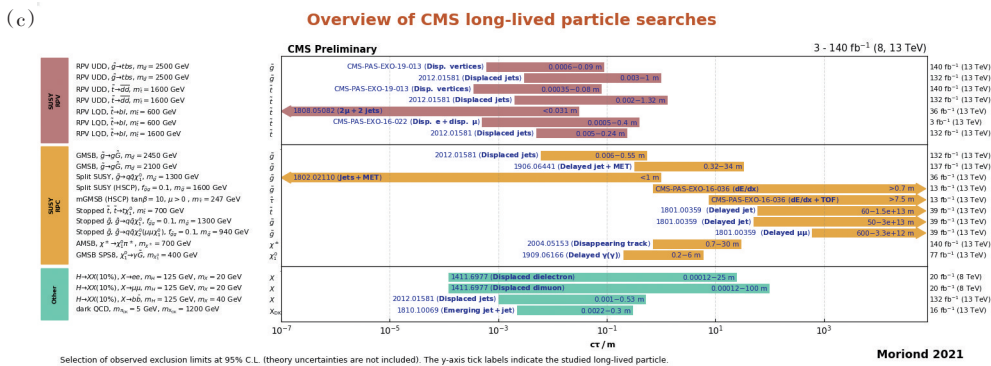
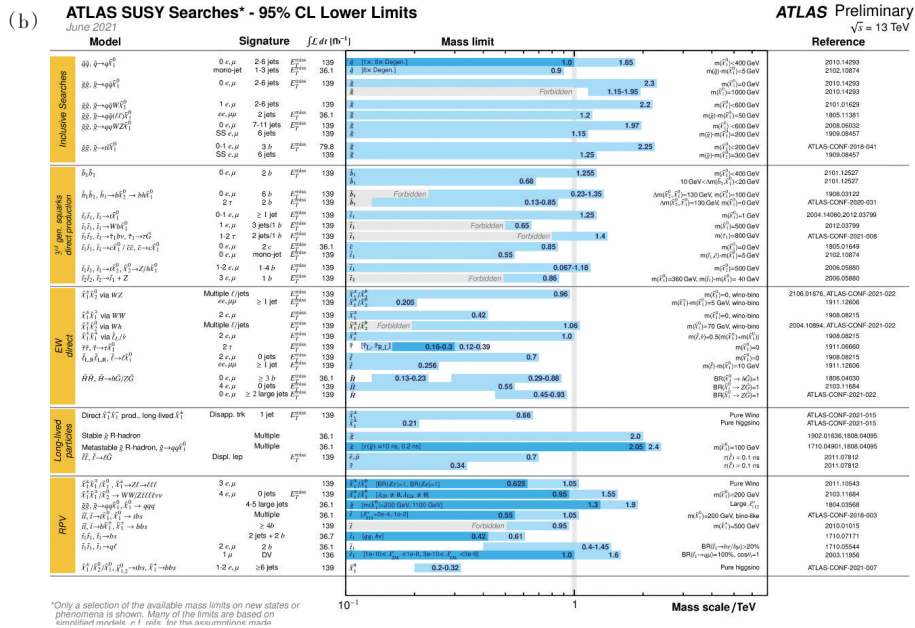


图 23 ATLAS 与 CMS 实验关于新物理寻找统计限制的部分结果展示 (续)

6 结论

2021年粒子物理研究领域热点不断,在多个研究方向取得了一系列令人瞩目的研究成果:在暗物质研究方面,直接探测、间接探测和对撞机探测不断推进探测灵敏度。在中国锦屏地下实验室的PandaX和CDEX实验发表了一系列世界领先的探测结果;在粒子天体物理与中微子实验方面,以LHAASO为代表的高能宇宙线实验取得重大观测成果引起世界瞩目,此外高能宇宙中微子观测、惰性中微子研究、无中微子双贝塔衰变研究、中微子质量序等一系列实验亦进展迅速,以江门中微子实验为代表的下一代中微子实验前景可期;在缪子物理研究方面,美国费米实验室g-2实验取得了缪子反常磁矩研究的突破性进展,在更高统计显著性上印证了之前布鲁克海文国家实验室的测量结果与标准模型预言的偏差,该可能存在的新物理曙光松动了粒子物理标准模型大厦,亟待更多实验数据及更深入的理论与实验验证;在重味物理与强子物理研究方面,BES-III与LHCb等味物理与高精度前沿实验在轻子普适性研究、强子谱研究、四夸克态研究、核子结构与电磁结构等方向取得一系列重要成果;在高质量前沿希格斯物理电弱物理与新物理寻找方面,LHC上的ATLAS/CMS实验积累完整的二期实验运行数据,在希格斯性质精确测量、标准模型精确检验、矢量玻色子散射等电弱稀有过程的发现、高能标下新复杂末态(4-top, 3-J/ψ)的发现等方面取得重要进展,并基于大量的实验数据继续为超对称理论、长寿命粒子、暗物质产生过程的新物理现象寻找等提供更严格的实验限制和指引。目前中国与国际同行一起在粒子物理学前沿开展全面而深入的理论与实验研究,并进一步全面布局如江门中微子实验^[100-102]、未来环形正负电子对撞机^[103-105]、超级陶粲工厂^[106-108]、中国电子离子对撞机^[109-110]等一系列紧跟学科前沿发展的基于加速器与非加速器装置的“未来大科学设施”,为解锁宇宙物质构成之谜、联系并探秘宏观无穷大与微观无穷小尺度的物理现象而不懈努力!让我们对未来粒子物理的发展拭目以待。

致谢 本文得到何红建教授的推荐与支持。

参考文献(References)

- [1] DEX Collaboration. New limits on WIMP dark matter from annual modulation analysis of the CDEX experiment at the China Jinping Underground Laboratory[C/OL]. 40th International Conference on High Energyphysics. [2021-12-20]. <https://pos.sissa.it/390>.
- [2] Amare J, Cebrión S, Cintas D, et al. Annual modulation results from three-year exposure of ANAIS-112[J]. Physical Review D, 2021, 103(10): 102005.
- [3] COSINE-100 Collaboration. Strong constraints from COSINE-100 on DAMA dark matter results using the same sodium iodide target[J]. Science Advances, 2021, 7(46): abk2699.
- [4] XENON Collaboration. Excess electronic recoil events in XENON1T[J]. Physical Review D, 2020, 102(7): 072004.
- [5] He H J, Wang Y C, Zheng J M. GeV scale inelastic dark matter with dark photon mediator via direct detection and cosmological/laboratory constraints[J]. Physical Review D, 2021, 104(11): 115033.
- [6] PandaX Collaboration. A search for solar axions and anomalous neutrino magnetic moment with the complete PandaX-II data[J]. Chinese Physics Letters, 2021, 38 (1): 011301.
- [7] PandaX Collaboration. Dark matter search results from the PandaX-4T commissioning run[J]. Physical Review Letters, 2021, 127(26): 261802.
- [8] CDEX Collaboration. First experimental constraints on WIMP couplings in the effective field theory framework from CDEX[J]. Science China (Physics, Mechanics & Astronomy), 2021, 64(8): 281011.
- [9] PandaX Collaboration. Search for light dark matter-electron scatterings in the PandaX-II experiment[J]. Physical Review Letters, 2021, 126(21): 211803.
- [10] SENSEI Collaboration. SENSEI: Direct-detection results on sub-GeV dark matter from a new skipper-CCD[J]. Physical Review Letters, 2020, 125(17): 171802.
- [11] AMS-02 Collaboration. The Alpha Magnetic Spectrometer (AMS) on the international space station: Part II — results from the first seven years[J]. Physics Reports, 2021, 894: 1-116.
- [12] ATLAS Collaboration. Dark matter summary plots for s-channel and 2HDM+a models[EB/OL]. (2021-12-25) [2022-01-03]. <https://cds.cern.ch/record/2798737?ln=en>.
- [13] ATLAS Collaboration. Search for dark matter produced in association with a dark Higgs boson decaying into W^{\pm}

- W^\pm or ZZ in fully hadronic final states from $\sqrt{s}=13$ TeV pp collisions recorded with the ATLAS detector[J]. *Physical Review Letters*, 2021, 126(12): 121802.
- [14] LHAASO Collaboration. Ultrahigh-energy photons up to 1.4 petaelectronvolts from 12 γ -ray Galactic sources[J]. *Nature*, 2021, 594: 33–36
- [15] LHAASO Collaboration. Peta-electron volt gamma-ray emission from the Crab Nebula[J]. *Science*, 2021, 373(6553): 425–430.
- [16] IceCube Collaboration. Detection of a particle shower at the Glashow resonance with IceCube[J]. *Nature*, 2021, 591: 220–224.
- [17] MicroBooNE Collaboration. Search for an excess of electron neutrino interactions in MicroBooNE using multiple final state topologies[J]. arXiv.org, 2021, arXiv: 2110.14054.
- [18] Dirac P A M. The quantum theory of the electron[J]. *Proceedings of the Royal Society of London A*, 1928, 117(778): 610–624.
- [19] Schwinger J. On quantum-electrodynamics and the magnetic moment of the electron[J]. *Physical Review*, 1948, 73(4): 416–417.
- [20] Lee T D, Yang C N. Question of parity conservation in weak interactions[J]. *Physical Review*, 1956, 104(1): 254–258.
- [21] Garwin R L, Lederman L M, Weinrich M. Observations of the failure of conservation of parity and charge conjugation in meson decays: The magnetic moment of the free muon[J]. *Physical Review*, 1957, 105(4): 1415–1417.
- [22] Bailey J, Borer K, Combley F, et al. Final report on the CERN muon storage ring including the anomalous magnetic moment and the electric dipole moment of the muon, and a direct test of relativistic time dilation[J]. *Nuclear Physics B*, 1979, 150(1): 1–75.
- [23] Muon $g-2$ Collaboration. Final report of the E821 muon anomalous magnetic moment measurement at BNL[J]. *Physical Review D*, 2006, 73(7): 072003.
- [24] Aoyama T, Asmussen N, Benayoun M, et al. The anomalous magnetic moment of the muon in the Standard Model[J]. *Physics Reports*, 2020, 887: 1–166.
- [25] Grange J, Guarino V, Winter P, et al. Muon ($g-2$) technical design report[J]. *Physics*, 2015, 155(1): 372–374.
- [26] Muon $g-2$ /EDM Collaboration. A new approach for measuring the muon anomalous magnetic moment and electric dipole moment[J]. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2019(5): 5.
- [27] Muon $g-2$ Collaboration. Measurement of the positive muon anomalous magnetic moment to 0.46 ppm[J]. *Physical Review Letters*, 2021, 126(14): 141801.
- [28] Muon $g-2$ Collaboration. Measurement of the anomalous precession frequency of the muon in the Fermilab Muon $g-2$ experiment[J]. *Physical Review D*, 2021(103): 072202.
- [29] Muon $g-2$ Collaboration. Magnetic-field measurement and analysis for the Muon $g-2$ experiment at Fermilab [J]. *Physical Review A*, 2021, 103(4): 42208.
- [30] Muon $g-2$ Collaboration. Beam dynamics corrections to the Run-1 measurement of the muon anomalous magnetic moment at Fermilab[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2021, 24(4): 044002.
- [31] Borsanyi S, Fodor Z, Guenther J N, et al. Leading hadronic contribution to the muon magnetic moment from lattice QCD[J]. *Nature*, 2021, 593: 51–55.
- [32] Chislett R, D'Ambrosio G, Iacovacci M, et al. The muon EDM in the $g-2$ experiment at Fermilab[J]. *EPJ Web of Conferences*, 2016, doi: 10.1051/epjconf/201611801005.
- [33] Janish R, Ramani H. Muon $g-2$ and EDM experiments as muonic dark matter detectors[J]. *Physical Review D*, 2020(102): 115018.
- [34] Bae S, Choi H, Choi S, et al. First muon acceleration using a radio frequency accelerator[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2018, doi: 10.1103/PhysRevAccelBeams.21.050101.
- [35] LHCb Collaboration. Test of lepton universality using $B^+ \rightarrow K^+ l^+ l^-$ [J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(15): 151601.
- [36] LHCb Collaboration. Search for lepton universality violation in $B^+ \rightarrow K^+ l^+ l^-$ [J]. *Physical Review Letters*, 2019, 122(19): 191801.
- [37] LHCb Collaboration. Test of lepton universality in beauty-quark decays[J]. arXiv.org, 2021, arXiv:2103.11769.
- [38] LHCb Collaboration. Observation of $D^0-\bar{D}^0$ oscillations [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(10): 101802.
- [39] LHCb Collaboration. Observation of the mass difference between neutral charm-meson eigenstates[J]. *Physical Review Letters*, 2021, 127(11): 111801.
- [40] BESIII Collaboration. Observation of a near-threshold structure in the K^+ recoil-mass spectra in $e^+e^- \rightarrow K^+(D_s^- D^{*0} + D_s^- D^0)$ [J]. *Physical Review Letters*, 2021, 126(10): 102001.
- [41] LHCb Collaboration. Observation of new resonances de-

- caying to $J/\psi K^+$ and $J/\psi \phi$ [J]. Physical Review Letters, 2021, 127(8): 082001.
- [42] LHCb Collaboration. Observation of the doubly charmed baryon Ξ_{cc}^{++} [J]. Physical Review Letters, 2017, 119(11): 112001.
- [43] LHCb Collaboration. Observation of structure in the J/ψ -pair mass spectrum[J]. Science Bulletin, 2020, 65(23): 1983–1993.
- [44] LHCb Collaboration. Observation of an exotic narrow doubly charmed tetraquark[J]. arXiv.org, 2021, arXiv: 2109.01038.
- [45] BESIII Collaboration. Oscillating features in the electromagnetic structure of the neutron[J]. Nature Physics, 2021(17): 1200–1204.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] ATLAS Collaboration. Combined measurements of Higgs boson production and decay using up to 139 fb⁻¹ of proton–proton collision data at $\sqrt{s}=13$ TeV collected with the ATLAS experiment[EB/OL]. (2021–11–01)[2022–01–03]. <https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/CONFNOTES/ATLAS-CONF-2021-053>.
- [49] CMS Collaboration. Twice the Higgs, twice the fun![EB/OL]. (2021–11–01)[2022–01–03]. <https://cms.cern/news/twice-higgs-twice-fun>.
- [50] CMS Collaboration. How does the higgs boson interact with itself?[EB/OL]. (2021–01–14)[2022–01–03]. <https://cms.cern/news/how-does-higgs-boson-interact-itself>.
- [51] CMS Collaboration. Search for heavy resonances decaying to a pair of Lorentz–boosted Higgs bosons in final states with leptons and a bottom quark pair at $\sqrt{s}=13$ TeV[EB/OL]. (2021–12–06) [2022–01–03]. <https://arxiv.org/abs/2112.03161>.
- [52] ATLAS Collaboration. Two Higgs bosons are better than one[EB/OL]. (2021–07–30) [2022–01–03]. <https://atlas.cern/updates/briefing/two-Higgs-better-one>.
- [53] ATLAS Collaboration. Probing new physics with pairs of Higgs bosons[EB/OL]. (2021–07–28)[2022–01–03]. <https://atlas.cern/updates/briefing/double-Higgs-to-bottoms>.
- [54] ATLAS Collaboration. Twice the Higgs, twice the challenge[EB/OL]. (2021–03–29)[2022–01–03]. <https://atlas.cern/updates/briefing/twice-higgs-twice-challenge>.
- [55] ATLAS Collaboration. Combination of searches for non-resonant and resonant Higgs boson pair production in the $bb\gamma\gamma$, $bb\tau^+\tau^-$ and $bb\bar{b}b$ decay channels using proton–proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector[EB/OL]. (2021–10–16)[2022–01–03]. <https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/CONFNOTES/ATLAS-CONF-2021-052>.
- [56] ATLAS Collaboration. Search for resonant pair production of Higgs bosons in the $bb\bar{b}b$ - final state using proton–proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector[EB/OL]. (2021–07–23)[2022–01–03]. <https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/CONFNOTES/ATLAS-CONF-2021-035>.
- [57] ATLAS Collaboration. Search for Higgs boson pair production in the two bottom quarks plus two photons final state in proton–proton collisions at 13 TeV with the ATLAS detector[EB/OL]. (2021–12–22)[2022–01–03]. <https://arxiv.org/abs/2112.11876>.
- [58] CMS Collaboration. Life of the Higgs boson[EB/OL]. (2021–11–30) [2022–01–03]. <https://cms.cern/news/life-higgs-boson>.
- [59] CMS Collaboration. Evidence for off-shell Higgs boson production and first measurement of its width[EB/OL]. (2021–12–21) [2022–01–03]. <https://cds.cern.ch/record/2784590>.
- [60] ATLAS Collaboration. New search for charming decay of the Higgs boson[EB/OL]. (2021–06–07) [2022–01–03]. <https://atlas.cern/updates/briefing/charming-Higgs-decay>.
- [61] ATLAS Collaboration. Direct constraint on the Higgs–charm coupling using Higgs boson decays to charm quarks with the ATLAS detector[EB/OL]. (2021–06–04) [2022–01–03]. <https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/CONFNOTES/ATLAS-CONF-2021-021>.
- [62] CMS Collaboration. A precision measurement of the W boson decay branching fractions in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV[EB/OL]. (2021–03–24) [2022–01–03]. <https://cds.cern.ch/record/2758905>.
- [63] ATLAS Collaboration. ATLAS reports first observation of WWW production[EB/OL]. (2021–07–26) [2022–01–03]. <https://atlas.cern/updates/briefing/observation-www-production>.
- [64] ATLAS Collaboration. Observation of WWW production in proton–proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector[EB/OL]. (2021–07–26) [2022–01–03]. <https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/CONFNOTES/ATLAS-CONF-2021-021>.

- FNOTES/ATLAS-CONF-2021-039.
- [65] CMS Collaboration. WWW. TRIBOSON. CMS[EB/OL]. (2021-10-25)[2022-01-03]. <https://cms.cern/news/www-tribosoncms-0>.
- [66] CMS Collaboration. Triple treat! CMS observes production of three massive vector bosons[EB/OL]. (2020-06-20) [2022-01-03]. <https://cms.cern/news/triple-treat-cms-observes-production-three-massive-vector-bosons-0>.
- [67] CMS Collaboration. Observation of the production of three massive gauge bosons at $\sqrt{s}=13$ TeV[J]. Physical Review Letters, 2020, 125(15): 151802.
- [68] Sarah Charley. The large boson-boson collider[EB/OL]. (2020-04-30)[2022-01-03]. <https://www.symmetrymagazine.org/article/the-large-boson-boson-collider>.
- [69] ATLAS Collaboration. New milestone reached in the study of electroweak symmetry breaking[EB/OL]. (2019-07-15) [2022-01-03]. <https://atlas.cern/updates/briefing-milestone-electroweak-symmetry-breaking>.
- [70] ATLAS Collaboration. Quarks observed to interact via minuscule "weak lightsabers"[EB/OL]. (2018-07-05) [2022-01-03]. <http://atlas.cern/updates/physics-briefing-weak-lightsabers>.
- [71] CMS Collaboration. LHC as the vector boson collider[EB/OL]. (2021-09-13)[2022-01-03]. <https://cms.cern/news/lhc-vector-boson-collider>.
- [72] ATLAS Collaboration. Observation of electroweak production of a same-sign W boson pair in association with two jets in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector[J]. Physical Review Letters, 2019, 123(16): 161801.
- [73] ATLAS Collaboration. Observation of electroweak W^+Z boson pair production in association with two jets in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector[J]. Physics Letters B, 2019(793): 469.
- [74] ATLAS Collaboration. Observation of electroweak production of two jets and a Z-boson pair with the ATLAS detector at the LHC[EB/OL]. (2020-04-22) [2022-01-03]. <https://arxiv.org/abs/2004.10612>.
- [75] ATLAS Collaboration. Observation of photon-induced W^+W^- production in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV using the ATLAS detector[J]. Physics Letters B, 2021(816): 136190.
- [76] ATLAS Collaboration. Evidence for electroweak production of two jets in association with a $Z\gamma$ pair in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector[J]. Physics Letters B, 2020(803): 135341.
- [77] ATLAS Collaboration. Measurement of the cross-section of the electroweak production of a $Z\gamma$ pair in association with two jets in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector[EB/OL]. (2021-07-26) [2022-01-03]. <https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/CONFNOTES/ATLAS-CONF-2021-038>.
- [78] ATLAS Collaboration. Observation of electroweak production of two jets in association with an isolated photon and missing transverse momentum, and search for a Higgs boson decaying into invisible particles at 13 TeV with the ATLAS detector[EB/OL]. (2021-09-02)[2022-01-03]. <https://arxiv.org/abs/2109.00925>.
- [79] ATLAS Collaboration. Search for electroweak diboson production in association with a high-mass dijet system in semileptonic final states in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector[J]. Physical Review D, 2019(100): 032007.
- [80] CMS Collaboration. Observation of electroweak production of same-sign W boson pairs in the two jet and two same-sign lepton final state in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV[J]. Physical Review Letters, 2018, 120(8): 081801.
- [81] CMS Collaboration. 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[J]. Physics Letters B, 2020(809): 135710.
- [82] CMS Collaboration. Evidence for electroweak production of four charged leptons and two jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV[J]. Physics Letters B, 2020(812): 135992.
- [83] CMS Collaboration. Measurement of the cross section for electroweak production of a Z boson, a photon and two jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV and constraints on anomalous quartic couplings[J]. Journal of High Energy Physics, 2020(6): 76.
- [84] CMS Collaboration. Observation of electroweak production of $W\gamma$ with two jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV[J]. Physics Letters B, 2020(811): 135988.
- [85] CMS Collaboration. Measurement of the electroweak production of $Z\gamma$ and two jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV and constraints on anomalous quartic gauge couplings[J]. Physical Review D, 2021(104): 072001.
- [86] CMS Collaboration. First observation of the electroweak production of a leptonically decaying W^+W^- pair in association with two jets in $\sqrt{s}=13$ TeV pp collisions[EB/OL].

- OL]. [2022-01-03]. <http://cms-results.web.cern.ch/cms-results/public-results/preliminary-results/SMP-21-001/index.html>.
- [87] CMS Collaboration. Search for anomalous electroweak production of vector boson pairs in association with two jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV[J]. *Physics Letters B*, 2019(798): 134985.
- [88] CMS Collaboration. Evidence for WW/WZ vector boson scattering in the decay channel $\ell\nu qq$ produced in association with two jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV[EB/OL]. (2021-12-10)[2022-01-03]. <https://arxiv.org/abs/2112.05259>.
- [89] ATLAS Collaboration. ATLAS finds further confirmation of evidence for four top quark process[EB/OL]. (2021-03-24)[2022-01-03]. <https://atlas.cern/updates/briefing/further-evidence-four-top>.
- [90] ATLAS Collaboration. Measurement of the $t\bar{t}t\bar{t}$ production cross section in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector[J]. *Journal of High Energy Physics*, 2021(11): 118.
- [91] ATLAS Collaboration. Evidence for $tt\bar{t}\bar{t}$ production in the multilepton final state in proton-proton collisions $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector[J]. *The European Physical Journal C*, 2020(80): 1085.
- [92] CMS Collaboration. Trio of J/Ψ particles in one go[EB/OL]. (2021-10-29)[2022-01-03]. <https://cms.cern/news/trio-jps-particles-one-go>.
- [93] CMS Collaboration. Observation of triple J/ψ meson production in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV[EB/OL]. (2021-11-09)[2022-01-03]. <https://arxiv.org/abs/2111.05370>.
- [94] CMS Collaboration. CMS exotica summary plots for 13 TeV data[EB/OL]. [2022-01-03]. <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/SummaryPlotsEXO13TeV>.
- [95] CMS Collaboration. CMS beyond-two-generations (B2G) public physics results-dibosons[EB/OL]. [2022-01-03]. <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/PhysicsResultsB2GDibosons>.
- [96] ATLAS Collaboration. ATLAS summary plots[EB/OL]. [2022-01-03]. https://atlaspo.cern.ch/public/summary_plots.
- [97] ATLAS Collaboration. SUSY June 2021 summary plot update[EB/OL]. (2021-06-06)[2022-01-03]. <https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/PUBNOTES/ATL-PHYS-PUB-2021-019>.
- [98] ATLAS Collaboration. hMSSM summary plots from direct and indirect searches[EB/OL]. (2021-07-23)[2022-01-03]. <https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/PUBNOTES/ATL-PHYS-PUB-2021-030>.
- [99] ATLAS Collaboration. Summary plots for heavy-particle searches and long-lived particle searches[EB/OL]. (2021-07-24)[2022-01-03]. <https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/PUBNOTES/ATL-PHYS-PUB-2021-033>.
- [100] Adam T, An F, An G, et al. JUNO conceptual design report[EB/OL]. (2015-09-28)[2022-01-03]. <https://arxiv.org/abs/1508.07166>.
- [101] An F, An G, An Q, et al. Neutrino physics with JUNO[J]. *Journal of Physics G Nuclear Physics*, 2016(43): 030401.
- [102] JUNO Collaboration. Neutrino physics and astrophysics with the JUNO detector[J]. *Universe*, 2018, 4(11): 126.
- [103] The CEPC Study Group. CEPC conceptual design report: Volume 1—accelerator[EB/OL]. (2018-09-02)[2022-01-03]. <https://arxiv.org/abs/1809.00285>.
- [104] The CEPC Study Group. CEPC conceptual design report: Volume 2—physics & detector[EB/OL]. (2018-11-23)[2022-01-03]. <https://arxiv.org/abs/1811.10545>.
- [105] The FCC Collaboration. Future circular collider study volume 2: The Lepton Collider (FCC-ee) conceptual design report, CERN-ACC-2018-0057[J]. *The European Physical Journal Special Topics*, 2019(228): 261-623.
- [106] 彭海平, 郑阳恒, 周小蓉. 中国超级陶粲装置[J]. *物理*, 2020, 49(8): 513-524.
- [107] Peng H P. High Intensity Electron Positron Accelerator (HIEPA) Super Tau Charm Facility (STCF) in China[Z]. *Charm2018*, Novosibirsk, 2018.
- [108] Luo Q. Progress of preliminary work for accelerators of a 2-7 GeV Super Tau Charm Facility at China[Z]. *eeF-ACT'18*, Hong Kong, 2018.
- [109] 梁羽铁, 杨一玻, 赵宇翔. 中国极化电子离子对撞机[J]. *物理*, 2020, 49(8): 525-536.
- [110] Anderle D P, Bertone V, Cao X, et al. Electron-ion collider in China[J]. *Frontiers of Physics*, 2021, 6(16): 64701.

Review of particle physics in 2021

HE Jibo^{1,2}, KHAW Kim Siang^{3,4}, LI Shu^{3,4,5,6}, ZHOU Hao^{3,4}, ZHOU Ning⁴

1. School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
2. School of Fundamental Physics and Mathematical Sciences, Hangzhou Institute for Advanced Study, University of Chinese Academy of Sciences, Hangzhou 310124, China
3. Tsung-Dao Lee Institute, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 201210, China
4. School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China
5. Center for High Energy Physics, Peking University, Beijing 100871, China
6. School of Mechanical and Electronic Engineering, Suzhou University, Suzhou 234000, China

Abstract Particle physics is a fundamental physics discipline that aims to explore the mysteries of microscopic constituents of matter and their interactions. This article reviews the major progress and breakthroughs of particle physics in 2021, including dark matter physics, neutrino and astroparticle physics, muon anomalous magnetic moment, flavor physics, new exotic hadron state and strong interaction physics, Higgs physics, electroweak physics and searches for beyond the standard model new physics. A brief outlook of near future particle physics hotspots and large scale scientific facilities is also presented.

Keywords dark matter; neutrino; higgs; new physics beyond the Standard Model; hadron physics; large scale scientific facilities ●



(责任编辑 傅雪)