

2018年粒子物理学热点回眸

陈明水¹, 李衡讷², 李玉峰^{1,3}, 吕晓睿³, 阮曼奇¹, 周宁⁴

1. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049
2. 华南师范大学量子物质研究院, 广州 510006
3. 中国科学院大学物理科学学院, 北京 100049
4. 上海交通大学物理与天文学院, 上海 200240

摘要 粒子物理是研究物质的基本组成和相互作用的前沿学科。从希格斯物理、新物理寻找、中微子物理、暗物质寻找、新强子态和强作用力机制研究、以及未来对撞机研究等方面回顾了2018年粒子物理学取得的重大进展及突破。

关键词 粒子物理; 希格斯; 新物理; 中微子; 暗物质; 新强子; 未来对撞机

自从文明诞生之日起,人类便一直在探寻这个世界到底是由什么构成的,它又是以怎样的规律运转的。3000多年前的古中国,人们曾经认为世界是由金、木、水、火、土这5种元素组成。公元前6世纪,古希腊哲学家提出了物质是由基本粒子组成的猜测。1802年约翰·道尔顿正式提出所有物质是由原子组成的理论。到了20世纪,随着近代物理学的发展和技术的进步,人们逐渐具备了深入理解原子的能力,了解到原子是由更基础的粒子组成的,并且能够定量地研究其相互作用力。在人类文明史中,物质的基本组成及其相互作用始终是人类认知领域最前沿的问题,而粒子物理学便是当代物理学中研究这个基本问题的分支。

在过去的三四十年里,物理学家逐步建立了粒子

物理的“标准模型”框架(图1)。在这个框架里,人们是以基本粒子的概念理解这个世界的。基本粒子分为两类,构成物质的费米子和传递相互作用的玻色子。物质粒子分为轻子和夸克2个类别,每个类别又有3代6个之分。上夸克和下夸克组成了宇宙中绝大部分物质的原子核,而原子核加上核外电子组成了原子,原子又进一步组成了分子,分子继而组成了包括我们每一个人的身体在内的宇宙万物。宇宙中还有不计其数的中微子在穿行,很少与物质发生相互作用,数以亿计的中微子每时每刻都在穿过人的身体。其他的夸克和轻子寿命一般很短,在宇宙射线中会出现,或在高能加速器中被瞬间产生出来。这些物质之间的相互作用由玻色子传递。其中电磁相互作用由光子来传递,弱相互

收稿日期:2018-12-20;修回日期:2019-01-13

基金项目:国家重点研发计划项目(2015CB856700, 2016YFA0400400, 2018YFA0403900, 2018YFA0404100, 2018YFA0404004);国家自然科学基金项目(11775141, 11755001, 11835005, 11822506, 11822507, 11835013);中国科学院先导科技专项(XDA10010100);中国科学院大学优秀青年教师科研能力提升项目(Y8540XX192);华南师范大学青年拔尖人才项目(8S0324)

作者简介:陈明水,研究员,研究方向为高能物理实验,电子信箱:chenms@ihep.ac.cn;李衡讷(共同第一作者),教授,研究方向为高能物理实验及核物理实验,电子信箱:hengne.li@m.scnu.edu.cn;李玉峰(共同第一作者),副研究员,研究方向为中微子物理,电子信箱:liyufeng@ihep.ac.cn;吕晓睿(共同第一作者),教授,研究方向为高能物理实验,电子信箱:xiaorui@ucas.ac.cn;阮曼奇(共同第一作者),研究员,研究方向为高能物理实验及探测器物理,电子信箱:manqi.ruan@ihep.ac.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,电子信箱:nzhou@sjtu.edu.cn

引用格式:陈明水,李衡讷,李玉峰,等. 2018年粒子物理学热点回眸[J]. 科技导报, 2019, 37(1): 6-15; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2019.01.001

作用由 W 和 Z 玻色子传递,强相互作用由胶子来传递。除此之外还有一个希格斯(Higgs)玻色子,它是给予物质粒子质量的希格斯场的激发态,是标准模型中最后一个被发现的粒子。



图1 粒子物理标准模型

标准模型虽然很成功,但它不能解释全部问题。如标准模型中并不包括人们日常生活中感受到的万有引力。如何将引力统一进来,到目前为止仍然是个迷,仍无法理解从天文学观测中所预言的造成宇宙加速膨胀的暗物质和暗能量。据推算,如果宇宙的加速膨胀是由暗物质和暗能量造成的,那暗物质和暗能量要占据宇宙总量的96%,而粒子物理标准模型只能描述宇宙总量的不到4%。除此之外,物质粒子都有其对应的反物质粒子,正、反物质的数量如果严格相等,那这个正物质组成的世界是不存在的。

为解开这个由正物质组成的世界得以存在的谜团,人们利用现代科技建设了各种实验装置。其中包括位于欧洲核子研究中心(CERN)的大型强子对撞机、位于北京的北京正负电子对撞机、位于日本筑波的高能加速器设施、位于广东沿海的大亚湾中微子实验、位于四川锦屏山隧道中的锦屏地下实验室以及发射到太空中的“悟空”探测器等。本文从希格斯物理和新物理寻找、中微子物理、暗物质研究、新强子态及未来对撞机研究等方面介绍2018年粒子物理学的进展。

1 希格斯物理和新物理寻找

在粒子物理标准模型理论中,希格斯粒子占据着至关重要的位置,负责了基本粒子的质量起源。在

2012年,希格斯粒子被位于欧洲核子研究中心的大型强子对撞机(LHC)上的两大实验组超环面仪器(ATLAS)和紧凑缪子线圈(CMS)同时发现,这是人类发现的第一个基本标量粒子,也是标准模型框架中最后一个被发现的粒子。但是受限于数据量,科研人员对它的属性尚没有足够精确的认识。它的属性是否与标准模型理论的预测相符,特别是它是否如标准模型理论所预言的与费米子也有直接相互作用,这些问题是利用希格斯粒子进行新物理寻找的突破口,需要实验上获取更多数据进行检验,是LHC的主要物理目标之一。

2018年12月LHC完成了自2015年开始的第二轮运行,CMS和ATLAS实验分别采集了约150 fb⁻¹质子-质子对撞数据,此后进入了为期2年的长停机及维护升级阶段。在基于前期部分对撞数据的分析中,CMS和ATLAS实验组于2018年分别独立地以超过5倍标准偏差的统计显著性先后发现并确认了希格斯粒子与顶夸克粒子(top quark,标准模型理论中最重的夸克)伴随产生的机制和希格斯粒子到底夸克粒子的衰变模式,完成了希格斯粒子与第三代费米子直接相互作用的实验观测^[1-2]。这些结果入选了美国物理学会评选的2018年度国际物理学十大进展。其中,中国ATLAS和CMS研究团队也在这些结果中做出了重要贡献。目前实验上测得的希格斯粒子与基本粒子的相互作用强度在数个量级的质量区间与标准模型的预测在实验允许的误差范围内相符(图2)^[3]。

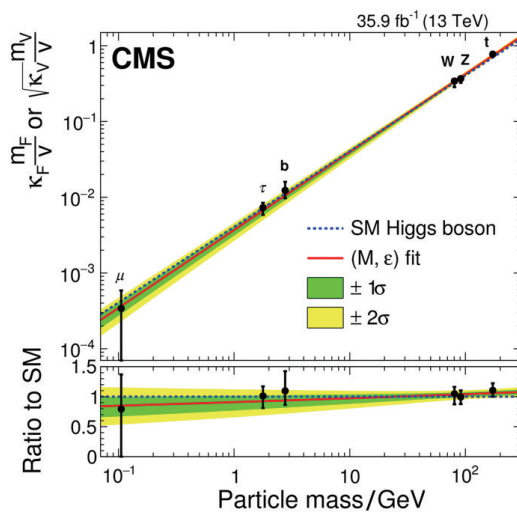


图2 希格斯粒子同基本粒子的耦合常数测量及其同标准模型预言的对比

在超出标准模型的新物理寻找方面, CMS 和 ATLAS 两大实验组仍然没有任何显著的偏离标准模型理论预测的公开结果。目前, 研究人员正在紧张地对第二轮运行采集的所有数据进行分析。首批基于全部数据的物理分析结果将有望于 2019 年相继公布。届时希格斯粒子性质的测量及大量新物理寻找的灵敏度都会有显著提升, 有望取得新的重大进展。

2 中微子物理

最近 20 年来, 中微子科学的研究取得快速的突破, 从 1998 年日本超级神冈实验发现大气中微子振荡到 2002 年加拿大 SNO 实验发现太阳中微子味转化效应, 再到 2012 年中国大亚湾实验发现 θ_{13} 驱动的新型振荡模式。一系列中微子振荡的实验结果确立了三代中微子振荡的完整框架。

标准模型存在三代费米子, 而相应的中微子分别为电子中微子 ν_e 型中微子和 τ 型中微子。三代中微子的振荡现象可以用中微子混合矩阵式(1)以及 2 个独立的质量平方差 $\Delta m_{21}^2 \equiv m_2^2 - m_1^2$, $\Delta m_{31}^2 \equiv m_3^2 - m_1^2$ 描述。其中 3 个混合角 θ_{12} 、 θ_{13} 和 θ_{23} 表示不同类型中微子之间的转化强度, δ 相位描述中微子和反中微子之间振荡行为的差别。此外, 如果中微子的反粒子是其本身, 也就是具有马约拉纳(Majorana)粒子属性, 那么中微子混合矩阵还将包括 2 个马约拉纳相位。马约拉纳相位不影响中微子振荡效应, 但是会出现在破坏轻子数的无中微子双贝塔衰变($0\nu\beta\beta$)过程。

2018 年中微子领域的重大事件, 最显著的是南极的冰立方(IceCube)实验首次观测到遥远星系的耀变体发出的高能中微子信号^[4](图 3^[5]), 并且与美国费米伽玛射线太空望远镜等全球多家光学望远镜观测到的信号一致, 首次实现了高能中微子信号参与的多信使的天文学观测, 具有重大的开创意义。这次耀变体的观测和 2017 年中子星合并事件的引力波和光学信号联合观测一起推动了多信使天文学时代的来临。此成果被《Science》评为杂志 2018 年度最重要的十大科学突破之一。

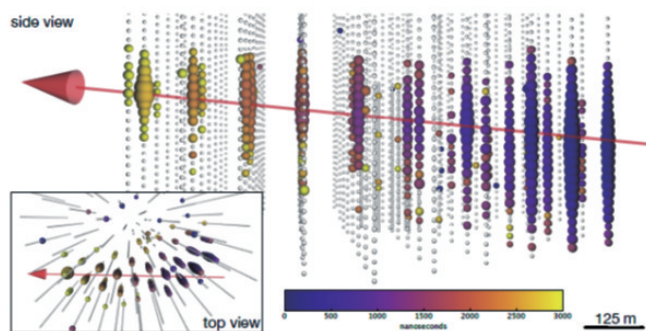


图3 冰立方实验观测的耀变体高能中微子信号(IceCube-170922A)^[5]

2018 年, 中微子振荡的实验研究也取得了一系列重要进展^[6]。中国的大亚湾中微子实验再次发布了混合角 θ_{13} 和质量平方差 Δm_{31}^2 的测量, 精度分别达 3.4% 和 2.8%^[7]。其中 θ_{13} 继续保持国际领先地位, 质量平方差的精度已经可以和加速器中微子实验最好的结果相当。其他振荡参数方面, 日本的加速器中微子实验 T2K 在 2σ 置信水平发现 CP 破坏的迹象, 且其最佳拟合值和“最大 CP 破坏”一致^[6]; 几个加速器和大气中微子实验都在 2σ 左右倾向“正质量顺序”, 虽然结果的置信水平还很低, 但这些实验“有趣的一致性”值得持续关注^[6]。

在超出三代中微子振荡框架的新物理寻找方面, 基于一系列短基线中微子实验的轻惰性中微子是近年来中微子物理的热点问题之一。2018 年, 美国 Fermi 实验室的 MiniBooNE 发布了新的测量结果^[5], 发现中微子事例能谱的低能量区域存在明显的超出现象, 与之前 LSND 实验的反常超出信号类似, 再次引起了中微子相关领域的广泛关注。但是在最小的惰性中微子模型中, LSND 和 MiniBooNE 的反常信号和其他加速器和反应堆实验的结果存在矛盾^[8]。未来可能的出路包括更复杂的惰性中微子模型或者某些实验存在可质疑的地方。

在非振荡中微子实验领域, 寻找 $0\nu\beta\beta$ 变的实验正在如火如荼地进行。基于 Ge76、Xe136 和 Te130 等同位素的 $0\nu\beta\beta$ 变实验相继给出了结果, 但还没有找到 $0\nu\beta\beta$ 衰变的信号, 此过程的寿命已经限制到大于 $10^{25} \sim 10^{26}$ 年^[6]。如果中微子是马约拉纳粒子并且标准的三代中

$$\begin{bmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_{23} & \sin\theta_{23} \\ 0 & -\sin\theta_{23} & \cos\theta_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_{13} & 0 & \sin\theta_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_{13}e^{i\delta} & 0 & \cos\theta_{13} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_{12} & \sin\theta_{12} & 0 \\ -\sin\theta_{12} & \cos\theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

微子是产生 $0\nu\beta\beta$ 衰变的主要来源,那么将有很大可能 $0\nu\beta\beta$ 衰变的寿命小于或接近 10^{28} 年,因此未来几年是 $0\nu\beta\beta$ 衰变实验快速发展的关键阶段。

2018年另一个非振荡实验的进展是建设多年的 ^3H 贝塔衰变实验 KATRIN 在德国的卡尔斯鲁厄开始正式运行^[6],将直接测量中微子的绝对质量。其灵敏度相对之前实验将提高1个量级,达到 0.2 eV 的水平。

未来几年还将是中微子物理蓬勃发展的阶段,中微子质量顺序、轻子 CP 破坏相位的测量以及 $0\nu\beta\beta$ 衰变的搜寻构成未来实验的三大物理目标。中国江门中微子实验将有望针对质量顺序率先获得国际具有竞争力的实验成果。2018年江门实验建设进展顺利,预期2021年开始运行取数。此外,中国也有多家单位开始布局 $0\nu\beta\beta$ 衰变的实验研究,力争在这项高竞争、高风险、高回报的研究领域达到国际先进水平。此外,中微子天文学的研究也是方兴未艾,冰立方等实验的高能中微子探测,以及未来中国江门和锦屏中微子实验的太阳、地球、超新星中微子的探测必将引领中微子天文学的蓬勃发展。

3 暗物质研究

暗物质和暗能量被称为“笼罩在21世纪物理学天空中的两朵乌云”。为了揭示暗物质的本质,粒子物理学家和天文物理学家正通过不懈的努力研发、设计各种精密实验,进而探测暗物质粒子和普通物质之间可能存在的微弱相互作用。目前科学家采用的探测手段可以分成3类,包括直接探测(探测暗物质粒子碰撞探测器引起的靶物质反冲信号)、间接探测(探测宇宙中暗物质衰变或者湮灭的产物)和对撞机探测(通过高能粒子加速对撞产生暗物质)。如果某个实验出现了暗物质疑似信号,其他实验可以进行独立的检验和物理性质测量。

在暗物质直接探测上,多种探测物质类型和信号探测方式各显神通,覆盖暗物质参数空间的不同区域。在约 $6 \text{ GeV}/c^2$ 以上的大质量暗物质区间,气液二相型氙探测实验通过采集反冲产生的光和电信号,继续向更低相互作用区域推进。位于锦屏地下实验室的中国 PandaX 二期 580 kg 液氙实验在2017年公布世界领先的暗物质探测结果之后,继续采集暗物质数据,至2018年末将数据曝光量又提升了1倍以上,目前最新的

实验数据正在紧张分析中。同时,PandaX 实验利用已公布的 $54 \text{ t}\cdot\text{d}$ 曝光量的数据对多种暗物质模型进行了搜索,其中对轻传播子暗物质模型的结果对能够解释星系尺度宇宙结构“小尺度危机”的自相互作用暗物质模型给出了目前为止最强烈的限制(图4)^[9]。另外,PandaX 实验进一步推进了自旋相关的暗物质模型的世界限制,并对轴矢量、张量、磁偶极和电偶极等有效场模型给出新的限制。

位于意大利 Gran Sasso 地下实验室的 XENON1T 液氙实验在2018年公布了吨年(使用1 t 液氙进行实验运行1年,下同)曝光量的数据,对自旋无关的暗物质模型有了更强的限制(图5)^[10]。值得关注的是,吨级的 XENON1T 实验在信号区间开始观测到一些事例,并研究了来自 200 GeV 暗物质信号的概率。虽然 XENON1T 结果中没有出现显著的信号超出,但这使得未来多吨级液氙实验更加令人期待。目前,正在紧张研发的下一代多吨级液氙实验有中国的 PandaX-4T^[11]、欧洲的 XENONnT 实验和美国的 LZ 实验,预期在2~3年后能有物

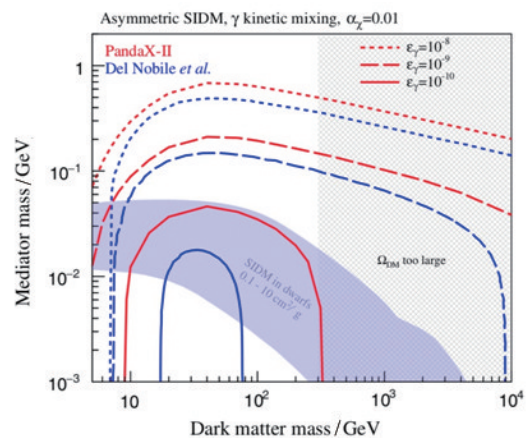


图4 中国 PandaX 实验对自相互作用暗物质模型的最新限制^[9]

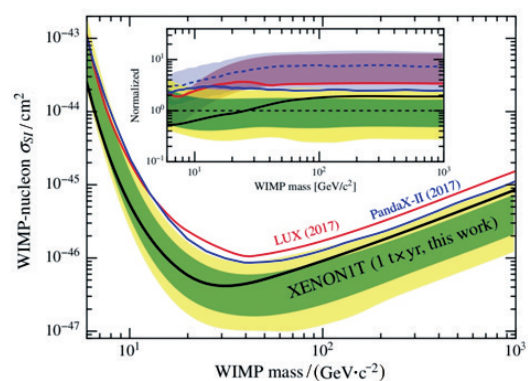


图5 液氙实验对自旋无关的暗物质和核子相互作用的最新限制^[10]

理结果,最终能够把探测灵敏度提高1个数量级,达到暗物质理论参数范围的中心区域。

同样对大质量暗物质有灵敏度的液氙探测实验也在不断向前发展。中国参与的DarkSide-50实验利用46 kg低放射性的液氙进行暗物质探测,在2018年也公布了近17 t·d曝光量的数据分析结果,利用氙发光的波形甄别技术给出了相应的暗物质排除上限^[12]。未来多吨级的液氙升级计划也在逐步研发中。

由于小质量暗物质引起的反冲信号能量低,探测器的能量阈值是小质量暗物质探测的关键指标。中国的CDEX实验利用10 kg高纯锗点电极探测反冲信号,探测阈值在160 eV,在2018年公布了103 kg·d曝光量的数据,在5 GeV/c²质量附近的暗物质区域取得世界最强的限制(图6)^[13]。对于更低质量的暗物质,一些新的探测方式发挥了重要作用。如液氙探测实验DarkSide-50利用反冲产生的电信号放大效应同时降低光信号的要求,将探测阈值降到100 eV^[14];高纯锗探测实验CDMSlite利用新型高压模式,将探测阈值降低到56 eV^[15]。晶体探测实验CRESST利用超低温CaWO₄探测,甚至取得了低于1 GeV/c²质量暗物质和核子相互作用的探测灵敏度^[16]。

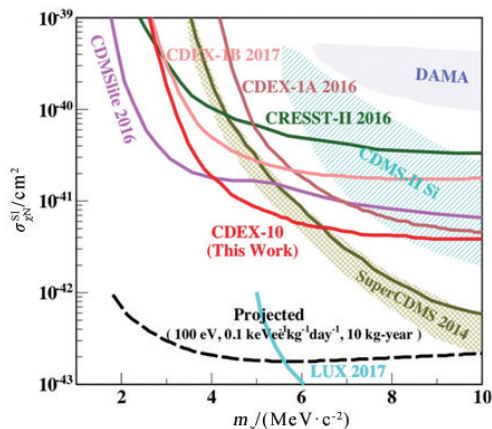


图6 中国CDEX实验对自旋无关小质量暗物质和核子相互作用的最新限制^[13]

暗物质除了可能和原子核碰撞,也有可能和核外电子发生相互作用。由于电子质量远小于原子核,暗物质和电子碰撞产生的反冲信号更加微弱。一些小型研发性探测实验专门针对这种信号开展了探测,如利用硅晶体的CDMS HVeV实验(图7)^[17]和利用新型电荷耦合器件(CCD)技术的SENSEI实验^[18]在2018年的结果验证了暗物质和电子相互作用的探测灵敏度。

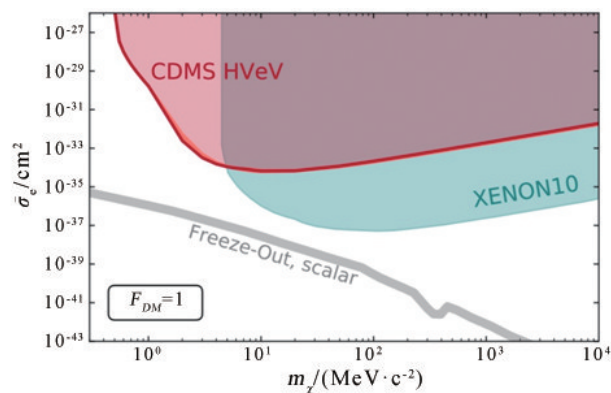


图7 CDMS HVeV实验对暗物质和电子相互作用的最新限制^[17]

在暗物质间接探测方面,中国暗物质间接探测卫星“悟空”DAMPE实验在2017年公布了电子观测数据,在1.4 TeV高能电子处有明显信号超出,有可能起源于暗物质,引起了国内外科学家的高度关注。至2018年12月,卫星发射已满3年,达到预期使用寿命。目前卫星运行状态仍然良好,关键科学数据仍在积累,卫星科研团队决定让其继续运行2年。期待“悟空”最新数据研究结果的公布。同时,美国AMS实验继续积累高能反电子和反质子数据,进一步探索宇宙中的暗物质衰变或湮灭的产物。

位于欧洲核子中心大型强子对撞机LHC上的ATLAS和CMS实验在对撞机暗物质探测上继续向前推进。中国科学家深度参与这两个实验,利用这个世界对撞能量最高的实验环境,积极展开暗物质探测研究。LHC利用高能质子对撞直接产生暗物质从而进行探测,在2015年和2016年采集到的约36 fb⁻¹数据的分析结果在2017—2018年陆续发布。由于暗物质直接穿越探测器不沉积能量,能够探测的过程为高能可见粒子伴随横向丢失能量(暗物质带走的能量)最终态。这里可见粒子包括了夸克或胶子形成的喷注^[19](包括顶夸克^[20]、光子、矢量玻色子、希格斯粒子^[21]、甚至超出标准模型新粒子Z'^[22]等。这些实验结果对暗物质和夸克相互作用的中间传播子质量在1.5 TeV以下给出了限制。另外,对撞机探测还可以直接寻找对撞产生的中间传播子。中间传播子既可以衰变产生暗物质,也可以衰变到1对夸克从而得到双喷注最终态。在一定的中间传播子衰变过程和耦合常数的假设下,通过对双喷注最终态的寻找^[23]可以给出很强的中间传播子限制,甚至可以覆盖到2.5 TeV质量区间(图8)。

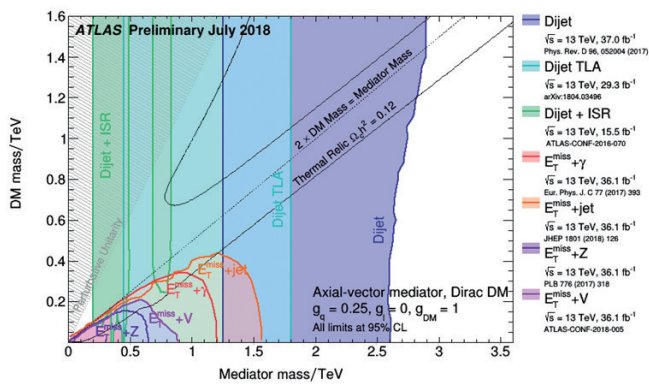


图8 ATLAS实验对暗物质和中间传播子参数空间的实验限制(图片来源:ATLAS实验组)

2018年,暗物质探测向更高的灵敏度推进,一方面在探测器体量和暗物质数据量上不断积累提升,另一方面各种新型探测方式在不同暗物质参数空间得到验证。中国在直接探测、间接探测和对撞机探测这三个方面积极主导或者深度参与,继续发挥着举足轻重的作用,期待2019年会有更多的探测结果。

4 新强子态

新强子态寻找和性质研究是进一步理解强作用力机制的重要手段,是当前粒子物理研究的重要热点课题。在含有奇异夸克的轻重子谱学方面,2018年实验上取得了很大进展。如含有2个奇异夸克和1个上(下)夸克的 $\Xi_c^{(0)}$ 重子谱学中,Belle实验组在分析 $\Xi_c^+ \rightarrow \Xi^- \pi^+ \pi^+$ 过程中,在其中 $\Xi^- \pi^+$ 的质量谱上发现了一个新的 Ξ^0 激发态 $\Xi(1620)^0$ (夸克成分ssu),质量约为1610 MeV,宽度约为60 MeV;在含有3个奇异夸克的 Ω 重子谱学中,Belle实验组通过研究 $\Xi^0 K^-$ 和 $\Xi^- K_s^0$ 末态的不变质量能谱上同时发现了一个新的窄 Ω^+ 激发态(夸克成分sss),质量约为2012.4 MeV,宽度只有6.4 MeV左右,可能是理论上预言的一个3/2的 Ω^+ 激发态。

在含有单个粲夸克的重子(包括 $\Lambda_c, \Sigma_c, \Xi_c$ 和 Ω_c)谱学方面,2017年LHCb实验组在 $\Xi_c^+ K^-$ 末态上发现了5个新的窄宽度 Ω_c^0 激发态(夸克成分css)。至此在单粲重子谱学中,实验上共发现了6个 Λ_c 激发态,2个 Σ_c 激发态,9个 Ξ_c 激发态,6个 Ω_c 激发态。在2018年Belle实验组同样在 $\Xi_c^+ K^-$ 末态上确认了LHCb发现的新 Ω_c^0 激发态中的4个。此外,Belle实验组分别在 $B^- \rightarrow K^- \Lambda_c^+ \bar{\Lambda}_c^-$ 和 $\bar{B}^0 \rightarrow K_s^0 \Lambda_c^+ \bar{\Lambda}_c^-$ 过程的 $K^- \Lambda_c^+$ 和 $K_s^0 \Lambda_c^+$ 的不变质量谱上报道

了 Ξ_c 激发态 $\Xi_c^0(2930)$ 发现和 $\Xi_c^+(2930)$ 的证据,这些结果均与之前BaBar实验上报道的 $\Xi_c^0(2930)$ 结果相符。

含单个粲夸克的重子是在20世纪80年代相继发现的,但其后30多年,对其性质的实验和理论研究却非常有限。2014年北京谱仪三期(BESIII)实验在 Λ_c 对质量阈值处获取了0.5 fb⁻¹的实验数据,截至2018年,发表了一系列 Λ_c 的单举衰变、半轻衰变和强子衰变分支比的精确测量。Belle实验组利用 $B^- \rightarrow \Lambda_c^- \Xi_c^0$ 的过程,首次实现了 Ξ_c^0 衰变绝对分支比的测量,给出了 $\Xi_c^0 \rightarrow p K^- K^- \pi^+, \Xi_c^- \pi^+$ 和 $\Lambda K^- \pi^+$ 的绝对分支比。这些研究推动了理论上对整个粲重子领域的理解。另外一个重要进展是关于 Ω_c^0 寿命的测量。LHCb实验通过细致分析底强子衰变到 Ω_c 的数据,精确测量了 Ω_c^0 的寿命约为268 fs。这一结果相对于之前固定靶实验上测量的寿命(约69 fs)结果大了近4倍,颠覆了之前对单粲重子寿命顺序的认知,引发了理论上对粲重子上强力机制的进一步深入理解。

单粲重子发现之后,在实验上并没有顺理成章地发现含有双粲夸克或三粲夸克的重子,这一情况一直持续到了2017年。由于单粲重子的研究持续进展,很好地帮助研究人员在理论上预测了双粲重子或三粲重子的性质,特别是中国理论家更准确地预言了在LHCb实验上寻找多粲重子最有可能的衰变方式。根据这些建议,2017年LHCb实验组在 $\Lambda_c^+ K^- \pi^+ \pi^+$ 末态上首次发现了双粲重子 Ξ_{cc}^{++} (夸克成分ccu),质量约3621 MeV,带有2个单位电荷,内部由2个较重的粲夸克和1个上夸克组成。2018年LHCb进一步分析,利用 $\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Lambda_c^+ K^- \pi^+ \pi^+$ 过程测量了其寿命约为256 fs(图9)^[24],并通过另外一个独立的衰变模式 $\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Xi_c^+ \pi^+$ 确认了 Ξ_{cc}^{++} 的存在^[25],得到了一致的质量测量值。

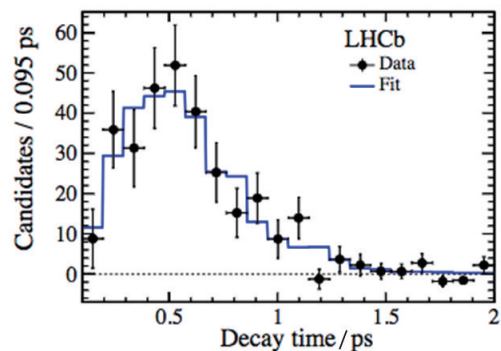


图9 Ξ_{cc}^{++} 寿命测量

含底夸克的重子谱研究方面,由于能量限制,已有的研究都是在强子对撞机上开展的,总体进展也相对较慢,截至2015年只发现6个激发态。直到2018年LHCb实验组又有了新的进展。首先LHCb发现了一个新的 $\Xi_b^{*0}(6227)^-$ 激发态(夸克成分bds),质量约为6227 MeV,宽度约为18 MeV,它可以衰变到 $\Lambda_b^0 K^-$ 和 $\Xi_b^0 \pi^-$ 这2种模式。另外,在 $\Lambda_b^0 \pi^+$ 和 $\Lambda_b^0 \pi^-$ 末态中分别看到了2个同位旋对称的 Σ_b 激发态, $\Sigma_b^{*+}(6097)^+$ (夸克成分buu)和 $\Sigma_b^{*0}(6097)^0$ (夸克成分bdd),质量和宽度分别大约在6097和30 MeV。

含有4夸克或5夸克的奇特粒子研究仍然是当前强子谱研究的热点,特别是含粲夸克的XYZ系列粒子候选态。由于存在大量的实验结果,在理论上无法完全理解,成为了科学家非常关心的课题。自从X(3872)在2003年日本Belle实验上发现以来,经过了很细致的研究,但目前仍然无法明确其内部结构是否为普通的粲偶素、分子态或者是四夸克态等。BESIII实验在2018年发现了一个同位旋破坏强衰变过程 $X(3872) \rightarrow \pi^0 \chi_{c1}$,其衰变率与 $X(3872) \rightarrow \pi^+ \pi^- J/\psi$ 相当。该结果对进一步理解X(3872)的内部结构性质非常重要。在Y粒子方面,Belle和BaBar实验上 $\pi^+ \pi^- J/\psi$ 末态中发现了一个在4.26 GeV附近的增强结构,称为Y(4260)。但后来BESIII实验在正负电子湮灭的精细扫描数据中,通过分析一系列含粲偶素的强子末态发现4.26 GeV附近的共振结构并非是一个简单的共振态Y(4260)线型,很可能是由2个相近质量的Y(4220)和Y(4320)共振态线形叠加形成的。在2018年BESIII实验 $e^+ e^- \rightarrow \pi D^* \bar{D}$ 末态上发现的共振结构,是首次观测到Y(4220)衰变到粲介子对的反应,有助于进一步澄清该共振态的结构性质。在带电Z粒子方面,LHCb实验在 $B^0 \rightarrow \eta_c K^+ \pi^-$ 衰变中,通过详细的中间共振态振幅分析,发现了一个在 $\eta_c \pi^-$ 质量谱上的增强结构 $Z_c(4100)$ 的证据,显著性为 3.4σ 。经测量给出其质量约为4096 MeV,宽度约152 MeV,量子数 J^P 可能为 0^+ 或 1^- 。该结构由于内部含有1对正反粲夸克对,并带负电荷,因此是一个含有4夸克的奇特粒子候选态。 $Z_c(4100)$ 与Belle实验曾报道的 $Z_c(4050)^- \rightarrow \chi_{c1} \pi^-$ 的质量和宽度接近。若它们是同一共振态,则 $Z_c(4100)$ 倾向于 J^P 为 0^+ 的态,并且 $Z_c(4100)$ 衰变到 $\eta_c \pi^-$ 的概率大约是衰变到 $\chi_{c1} \pi^-$ 的1.5倍,符合预期。

5 未来对撞机研究

2012年,在希格斯粒子发现后,对其性质的精确测量随即成为粒子物理实验的核心课题。相比于发现了希格斯粒子的LHC,正负电子对撞机具有初态准确可控、本底噪声低等优点,有望能以远高于LHC的精度对希格斯粒子性质进行测量。因此,高能物理学界倡议了多种可作为希格斯工厂的正负电子对撞机,其中包括欧洲核子中心提议的未来环形对撞机(FCC)、紧致直线对撞机(CLIC)、可能被日本政府支持的国际直线对撞机(ILC)、由中国高能物理学界提议的环形正负电子对撞机(CEPC)。目前,这些项目正积极推动相关设计和技术预研工作。日本政府就能否批准国际直线对撞机的建设仍在进行磋商。2018年11月,CEPC研究工作组在北京正式发布CEPC的两卷《概念设计报告》(CDR)^[26-27],意味着CEPC项目的初步设计蓝图完成(图10)。紧随其后,FCC合作组也发布了其《概念设计报告》^[28]。

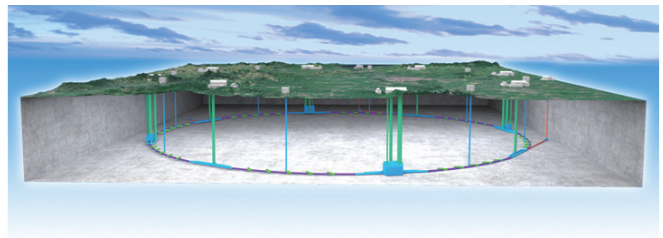


图10 CEPC示意

CEPC的概念设计报告包括《加速器卷》和《探测器和物理卷》两部分。《加速器卷》介绍了加速器整体设计,包括直线加速器、阻尼环、增强器和对撞机。另外,还介绍了低温系统、土木工程、辐射防护等一系列重要支撑设施,并讨论了CEPC升级的可能选项。《探测器和物理卷》展示了CEPC的物理潜力,介绍了探测器的设计概念及其关键技术选项,重点对CEPC的探测器和物理研究做了深入评估,并讨论了未来探测器研发和物理研究的初步计划。根据该设计报告,CEPC的主环周长达100 km,是目前世界上最大的高能物理对撞机LHC的4倍。CEPC上将至少会有2台探测器同时进行科学实验(图11)。在目前的概念设计报告中,CEPC将在10年的运行时间中产生100万个希格斯粒子,1亿个

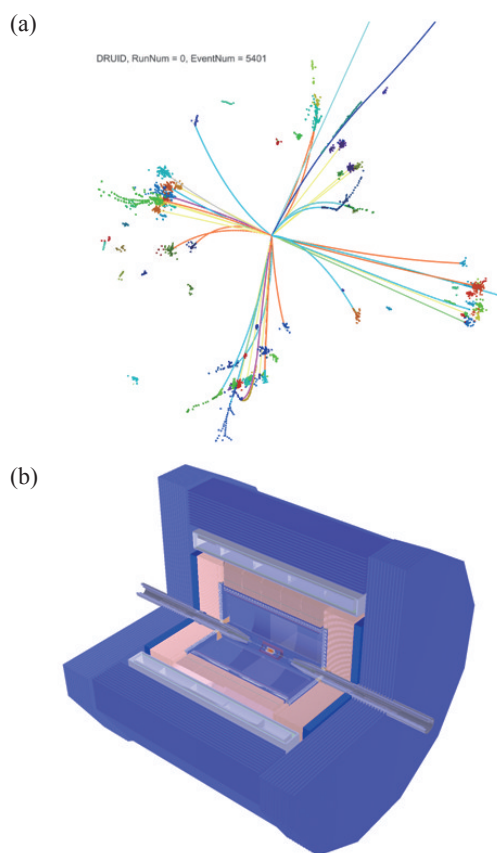


图11 CEPC上的典型希格斯粒子示例(a)
以及基线探测器(b)

W玻色子,以及近1000亿个Z玻色子。利用这些数据,人类有望以超越LHC 1个数量级的精度对希格斯粒子的属性进行精确测量,并将目前的电弱物理测量精度提高超过1个数量级。同时,CEPC在量子色动力学(QCD)、味物理等关键测量上也将发挥巨大的作用。CEPC未来可能发展方向之一是升级为一个超级质子-质子对撞机,质心能量将达到100 TeV,可以在大范围内直接寻找新的物理现象和物理规律。

CEPC项目团队将以《概念设计报告》为基础完成关键技术预研,计划于2018—2022年建成一系列关键部件的原型机用来验证技术和大规模工业加工的可行性。

CEPC《概念设计报告》的完成受到了广泛的赞誉和支持(图12)。国际未来加速器委员会和亚洲未来加速器委员会主席、墨尔本大学教授Geoffrey Taylor评价:“这是CEPC这样一个用于基础研究的大型科学装置的重要发展里程碑”“毫无疑问,国际高能物理界非常希

望参加CEPC的研发和将来的科学实验,这将会大大促进对物质最基本组成单元的进一步理解。”2017年度诺贝尔物理学奖获得者、加州理工大学教授Barry Barish(领导LIGO实验发现引力波)祝贺说:“加速器的发展历史是实现越来越高的能量,并在过去几十年中一直都是众多粒子物理重大发现所依赖的核心工具。而CEPC将延续这一伟大传统!我衷心祝贺CEPC《概念设计报告》团队做了如此出色的工作。”



图12 CEPC《概念设计报告》发布现场

6 结论

2018年,ATLAS和CMS实验验证了Higgs粒子的性质和标准模型预言高度吻合,同时在现有扫描范围之内尚未发现新物理的信号。利用已有的或不断积累的对撞机数据(包括LHCb, Belle, BESIII等实验),粒子物理学家不断发现新的强子、新的结构,并对其性质进行了测量。

暗物质探测实验扫描了更大的参数空间,目前尚未找到暗物质存在的直接证据。中微子实验,特别是耀变体高能中微子信号,是2018年最让人兴奋的进展之一。技术的积累和观测手段的不断进步推动了多信使天文学时代的来临。通过光学和电磁信号、中微子、引力波信号的联合观测,天空这一“穷人的高能物理实验室”将不断带给人们新的惊喜。

与此同时,粒子物理学家正积极设计下一代的实验设备,并积极争取政府的支持。归根结底,物理学是一门实验学科,新的设备和新的观测是粒子物理的知识之源。

致谢: 曹俊研究员、何苗研究员的支持和帮助。

参考文献(References)

- [1] ATLAS Collaboration. Observation of Higgs boson production in association with a top quark pair at the LHC with the ATLAS detector[J]. *Physics Letters B*, 2018, doi: 10.1016/j.physletb.2018.07.035.
- [2] CMS Collaboration. Observation of $t\bar{t}H$ production[J]. *Physics Review Letters*, 2018, 120(23): 231801.
- [3] CMS Collaboration. Combined measurements of Higgs boson couplings in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV, CMS-HIG-17-031, CERN-EP-2018-263[J/OL]. (2018-12-17) [2019-01-12]. <https://arxiv.org/abs/1809.10733>.
- [4] The IceCube Collaboration, Fermi-LAT, MAGIC, et al. Multimessenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A[J]. *Science*, 2018, 361(6398): eaat1378.
- [5] MiniBooNE Collaboration. Significant excess of electronlike events in the MiniBooNE short-baseline neutrino experiment [J]. *Physics Review Letters*, 2018, 121(22), 221801.
- [6] XXVIII International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics[EB/OL]. (2018-06-09) [2019-01-12]. <https://www.mpi-hd.mpg.de/nu2018/>.
- [7] Daya Bay Collaboration. Measurement of electron antineutrino oscillation with 1958 days of operation at Daya Bay[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(24), 241805.
- [8] Gariazzo S, Giunti C, Li Y F, et al. Updated global 3+1 analysis of short-baseline neutrino oscillations[J]. *Journal of High Energy Physics*, 2017(6): 1-38.
- [9] PandaX Collaboration. Constraining dark matter models with a light mediator at the PandaX-II experiment[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(2): 021304.
- [10] XENON Collaboration. Dark matter search results from a one tonne-year exposure of XENON1T[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(11): 111302.
- [11] PandaX Collaboration. Dark matter direct search sensitivity of the PandaX-4T experiment[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2019, 62(3): 031011.
- [12] DarkSide Collaboration. DarkSide-50 532-day dark matter search with low-radioactivity argon[J]. *Physical Review D*, 2018, 98(10), 102006.
- [13] CDEX Collaboration. Limits on light weakly interacting massive particles from the first 102.8 kg-day data of the CDEX-10 experiment[J]. *Physical Review Letters*, 2018, doi: 10.1103/PhysRevLett.120.241301.
- [14] DarkSide Collaboration. Low-mass dark matter search with the DarkSide-50 experiment[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(8): 081307.
- [15] SuperCDMS Collaboration. Low-mass dark matter search with CDMSlite[J]. *Physical Review D*, 2018, 97(2), 022002.
- [16] CRESS Collaboration. A prototype detector for the CRESST-III low-mass dark matter search[J]. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*, 2018, 845: 414-417.
- [17] SuperCDMS Collaboration. First dark matter constraints from a SuperCDMS single-charge sensitive detector[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(5): 051301.
- [18] SENSEI Collaboration. First direct-detection constraints on sub-GeV dark matter from a surface run[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(6): 061803.
- [19] ATLAS Collaboration. Search for dark matter and other new phenomena in events with an energetic jet and large missing transverse momentum using the ATLAS detector[J]. *Journal of High Energy Physics*, 2017, 2018(1): 126.
- [20] CMS Collaboration. Search for dark matter in events with energetic, hadronically decaying top quarks with missing transverse momentum at $\sqrt{s} = 13$ TeV[J]. *Journal of High Energy Physics*, 2018(6): 27.
- [21] CMS Collaboration. Search for dark matter produced in association with a Higgs boson decaying to $\gamma\gamma$ or $\tau^+\tau^-$ at $\sqrt{s} = 13$ TeV[J]. *Journal of High Energy Physics*, 2018(9): 046.
- [22] ATLAS Collaboration. Search for dark matter in events with a hadronically decaying vector boson and missing transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector[J]. *Journal of High Energy Physics*, 2018(10): 180.
- [23] ATLAS Collaboration. Search for resonances in the mass distribution of jet pairs with one or two jets identified as b -jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector[J]. *Physical Review D*, 2018, 98(3): 032016.
- [24] LHCb Collaboration. Measurement of the lifetime of the doubly charmed baryon Ξ_{cc}^{++} [J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(5): 052002.
- [25] LHCb Collaboration. First observation of the doubly charmed baryon decay $\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Xi_{cc}^+ \pi^+$ [J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(16): 162002.
- [26] The CEPC Study Group. The CEPC conceptual Design Report, Vol II: Physics and Detector[J/OL]. [2018-12-20]. http://cepc.ihep.ac.cn/CEPC_CDR_Vol2_Physics-Detector.pdf.
- [27] The CEPC Study Group. The CEPC conceptual design report, Vol I: Accelerator[J/OL]. [2018-12-20]. http://cepc.ihep.ac.cn/CEPC_CDR_Vol1_Accelerator.pdf.
- [28] CERN accelerating science. The FCC conceptual design report [EB/OL]. (2018-12-17) [2019-01-12]. <https://fcc-cdr.web.cern.ch/>.

Review of particle physics in 2018

CHEN Mingshui¹, LI Hengne², LI Yufeng^{1,3}, LYU Xiaorui³, RUAN Manqi¹, ZHOU Ning⁴

1. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
2. Institute of Quantum Matter, South China Normal University, Guangzhou 510006, China
3. School of Physical Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
4. School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract Particle physics is a branch of physics that studies the fundamental constituents of matter and their interactions. This article reviews the major progress and breakthroughs of particle physics in 2018, including Higgs physics, searches for new physics, neutrino physics, searches for dark matter, studies of new quark states and strong interaction, and the developments of future colliders.

Keywords particle physics; Higgs; new physics; neutrino; dark matter; new hadron state; future collider ●



(责任编辑 傅雪)