

“探索”P5 报告

——2023 年美国粒子物理 P5 报告内容详解

张 昊

(中国科学院高能物理研究所 100049; 中国科学院大学 100049)

2023 年 12 月 8 日,美国粒子物理学界的“粒子物理项目优先级评定小组”发布了被称为“P5”的《探索量子宇宙——粒子物理创新与探索路线》报告。我们在之前的一篇文章中简要地转述介绍了报告的要点内容。当人们抛开国际关系、地缘政治、大国竞争、经费条件等因素,将注意力集中在粒子物理学本身时,该报告为今后十年的粒子物理发展建议了三个重点方向,即:

- 1) 解密量子领域(Decipher the Quantum Realm);
- 2) 探索物理学的新范式(Explore New Paradigms in Physics);
- 3) 照亮隐藏的宇宙(Illuminate the Hidden Universe)。

对比 2014 年 P5 报告五大方向——

- 1) 以希格斯玻色子作为新的发现手段;
- 2) 致力于与中微子质量相关的物理;
- 3) 确认暗物质新物理;
- 4) 理解宇宙加速:暗能量与暴胀;
- 5) 探索未知:新粒子、相互作用与物理原理。

与这些直白的题目相比,2023 年 P5 的这三个方向的题目显得既新颖又高大上。那么,当我们剥离修辞的艺术,这些主题的内涵与外延,与哪些具体的粒子物理学课题相关呢?它们针对的是哪些已有的和预期的物理学,又主要涉及哪些在运行、

在建和计划中的实验装置?与十年前的相比,物理学家在其中相近的方向上取得了哪些成就?本文试图回答这些问题。

一、解密量子领域

解密量子领域实际上包含了两大子课题,一是中微子振荡与中微子质量,一是精确希格斯物理。

中微子振荡与中微子质量

五十多年前,当温伯格、格拉肖和萨拉姆构建粒子物理电弱标准模型的时候,没有任何实验证据表明中微子具有非零质量。基于奥卡姆剃刀原则,他们在写下标准模型动力学的时候没有(在当时看来可能是画蛇添足的)包含中微子质量部分。20 世纪 90 年代末,物理学家在解决“太阳中微子消失之谜”的过程中发现了中微子振荡现象,该现象意味着目前已知的三代中微子中,至少有两种具有非零质量。尽管人们可以照搬其他费米子质量起源的机制,通过简单地引入三代右手中微子以及相应的汤川相互作用项,利用电弱对称性自发破缺机制为中微子引入非零质量,这种解决方案却并非别无代价。新引入的费米子自由度不带有标准模型的守恒荷,也不参与任何标准模型规范相互作用,其性质与其他右手费米子截然不同^①,从而可能导

^① 严格地讲,右手中微子携带轻子数,是标准模型微扰过程中的守恒荷。但与其他右手费米子所携带的守恒荷不同的是,该守恒荷没有被规范冗余保护,在标准模型的非微扰过程中存在破坏,因而不是标准模型的严格守恒量子数。

致诸如马约拉纳质量项等全新的物理效应。因此,中微子质量在费米子质量中是非常特别的,它的出现可能极大地丰富标准模型本身、揭示其背后的新物理。当下,为了回答中微子质量起源及其背后可能出现的新物理,粒子物理学家首先需要知道中微子质量的基本性质。比如:三代中微子的质量是多少?导致中微子振荡的中微子混合效应有多强,其中的CP破坏效应又有多大?中微子是否存在马约拉纳质量,它有多大?三代中微子的质量顺序如何,谁比谁重?所以,中微子物理,以及相关的大科学装置与实验,是目前粒子物理领域比较热门的方向。在本世纪的第一个二十年里,粒子物理学对中微子质量的了解已经有了长足进步,这其中就有我国大亚湾中微子实验的重大贡献,该实验完成了人类首次对中微子混合矩阵中一个重要参数的精准测量。

由于物理学家已经知道在中微子物理领域有大量我们尚不准确了解的物理参数和机制,作为确定的未知,可以预见的是,在接下来的十年乃至更长的时间里,中微子物理都将是粒子物理理论和实验发展的一个重要且活跃的方向。对这一论断最

好的佐证,也许就是各种大科学装置的运行和规划。中微子实验装置的形式较为多样,包括加速器实验、反应堆实验、宇宙线实验等等。仅P5报告中提到的正在运行的实验装置,就有NOvA, T2K, SBN, DUNE 第一阶段, Ice-Cube 等。P5报告中主推的美国费米国家加速器实验室(Fermi National Accelerator Laboratory, FNAL)“深层地下中微子实验”(Deep Underground Neutrino Experiment, DUNE)就是加速器中微子实验的代表(我国的清华大学和中山大学是该合作组成员单位)。它由在位于费米国家实验室内的近端探测器和位于1300千米外南达科他州桑福德地下研究装置(Sanford Underground Research Facility, SURF)中的远端探测器组成,利用长基线中微子实验装置(Long Baseline Neutrino Facility, LBNF)提供的中微子束流完成实验。其基本原理是利用费米实验室加速器的强流质子束流打靶,产生大量的带电 π 介子衰变产生中微子束流,在近端和远端探测器中分别探测各种中微子的比例和数量,以研究不同中微子之间的振荡效应,特别是中微子质量顺序(图1)。该实验项目将建造美国最大的地下实验室(计划于2025年完工),其远端

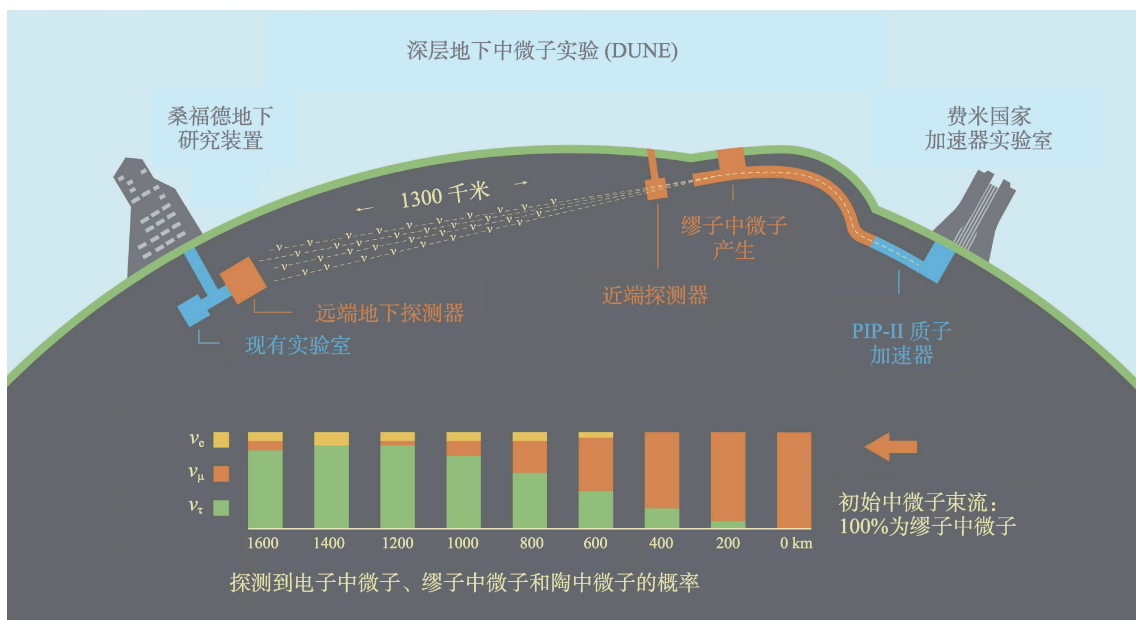


图1 DUNE 实验图示(译自捷克科学院物理研究所网页

<https://www.fzu.cz/en/research/research-topics/deep-underground-neutrino-experiment-dune>)

的液氩时间投影室(Liquid Argon Time Projection Chamber, LArTPC)探测器含有7万吨高纯液氩,将是世界上同类型最大的探测器。为了满足实验需要,提供全球最“亮”的中微子束流,费米实验室的质子束流升级计划PIP-II(Proton Improvement Plan-II)目标产生1.2兆瓦的质子束流。该升级计划基于超导射频腔技术,预计建设能量800兆电子伏的质子直线加速器(图3)。所产生的强流质子束流,除用于DUNE实验外,还有更广泛的潜在应用,其中可以公之于众的,包括污水净化等。除中微子质量顺序的测量外,DUNE还可以结合其他实验,如IceCube、

费米国家加速器实验室加速器复合体

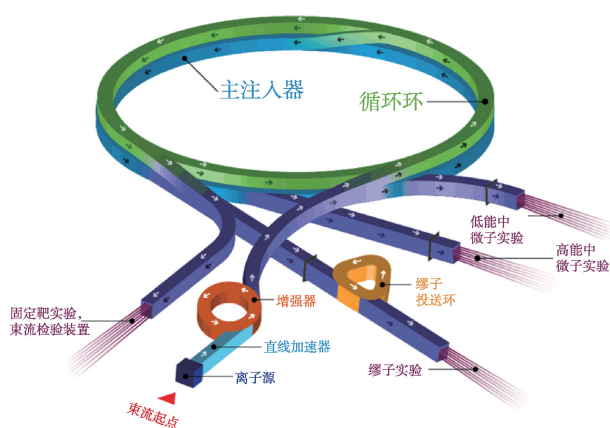


图2 美国费米国家加速器实验室加速器复合体(Accelerator Complex)示意图(译自美国费米国家加速器实验室网页 <https://www.fnal.gov/pub/science/particle-accelerators/accelerator-complex.html>)

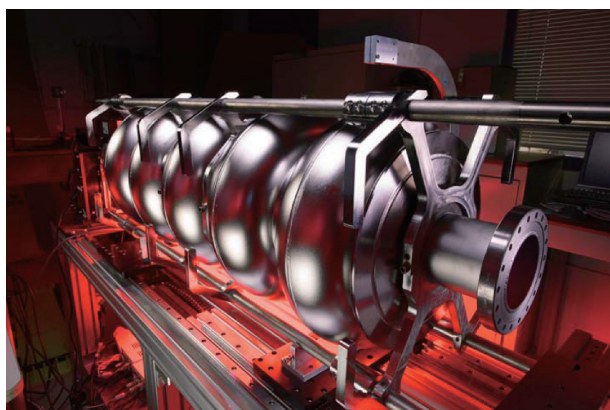


图3 PIP-II计划的核心技术装置之一,5-cell 650MHz超导射频腔(图片来自美国费米国家加速器实验室网页 <https://pip2.fnal.gov/about/photos-and-videos/>)

我国的江门地下中微子实验(Jiangmen Underground Neutrino Observatory, JUNO),为研究中微子与物质的相互作用及其在宇宙中的行为提供帮助。

P5报告还对DUNE项目未来的第二阶段升级进行了讨论,除了更换灵敏度更高、阈值更低的先进探测器外,其核心技术升级也在于进一步提高质子束流流强。项目计划利用费米实验室的ACE (Accelerator Complex Evolution, ACE, 加速器复合体发展)项目将质子束流的强度再提高一倍,达到2.4兆瓦。这些升级将支持DUNE项目对中微子与物质相互作用的性质、甚至相关的新现象做更为精确的研究。在更远的未来, μ 子束流或许可能进一步帮助物理学家提高中微子实验的测量精度,为此建设的 μ 子加速器和储存环与其他高能物理项目甚至可能形成协同效应。在对中微子进行科学探索的过程中,随着科学目标的要求,粒子物理学在接下来的一段时期内可能追求更高能量、更高亮度、更高精度的中微子束流。尽管P5报告中没有点明,也许现在是我们思考随之衍生的中微子束流在其他学科科研、工业生产、医学影像与治疗等领域应用前景的时候了。

精确希格斯物理

希格斯机制是目前标准模型中所有基本粒子质量(这里我们不考虑中微子质量)的来源。在电弱对称性自发破缺的最简单的线性实现中,它会导致一个纯中性的大质量标量玻色子,这就是著名的希格斯玻色子。因此,希格斯玻色子是证实粒子物理标准模型中电弱对称性自发破缺和规范玻色子质量起源的希格斯机制的重要标志。然而希格斯玻色子的发现只是研究电弱对称性自发破缺的第一步,研究该激发背后量子场——希格斯场的物理性质才是解答问题的核心。希格斯场真空期望值的性质,决定着低能弱相互作用过程的强度,从而间接决定了诸如太阳的恒星的寿命,以及组成我们身体的原子核内中子的稳定程度。可以说,它是我们眼中的世界能够稳定存在的基础。另一方面,希格

斯场在早期宇宙演化中的相变行为,会根本上影响宇宙中正反物质不对称性的起源。同时,希格斯玻色子也是标准模型作为低能有效理论最为不自然的部分,这可能预示着它与超出标准模型的新物理、即更为微观层次上的物质结构与相互作用形式有着较为密切的关系。因此,精确研究希格斯玻色子乃至希格斯场的性质,是帮助物理学家理解电弱能标物理规律及宇宙演化行为的主要手段,也是打开通向更微观层次物质世界大门的一把钥匙。

大型强子对撞机(Large Hadron Collider, LHC)运行十余年来,不仅发现了半个世纪前理论家预言的希格斯粒子,并且对它的性质进行了初步的测量。就目前已经发现的它与其他粒子的相互作用而言,这个希格斯粒子的行为与标准模型希格斯粒子的性质在理论和实验误差允许范围内可以说完全相符。然而,为了回答希格斯机制的起源问题、早期宇宙电弱相变的性质问题等最为关键的物理问题,物理学家必须检验希格斯场的自相互作用——也就是测量希格斯场的势函数,而这是目前的实验还不能回答的。另一方面,人们对标准模型的相互作用测量得越精确,就越有可能从测量结果

与理论预言的微小偏差中窥得新物理的蛛丝马迹。鉴于希格斯玻色子很可能是与新物理关系最为密切的标准模型粒子,粒子物理学家对于精确测量其性质的需求,是当前实验远远不能满足的。因此,研究精确希格斯物理几乎是粒子物理学界对本学科未来相当长一段时间发展方向的一个共识。

P5 报告在希格斯物理精确研究的主要大科学装置方面,当然重点提到了目前正在运行的LHC,并且指明是LHC上的ATLAS和CMS实验。LHC是目前世界上唯一能够直接产生希格斯玻色子的对撞机实验,它是一台设计对撞质心系能量为14 TeV的质子-质子对撞机,安置于位于瑞士法国边界欧洲核子中心(Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, CERN)地下长达26.7千米的环形隧道内(参见图4)。ATLAS和CMS是LHC上四个主要实验组中的两个,其重要任务就是研究希格斯玻色子的性质以及发现超出标准模型的新物理。目前,LHC已经经历了一期、二期的运行,正处于三期的运行中,其对撞质心系能量从7 TeV、8 TeV提升到了13 TeV甚至13.6 TeV。下一步,在经历一段较长时间的停机升级之后,LHC准备升级为高亮度LHC(High-Lu-



图4 位于欧洲核子中心的大型强子对撞机加速器隧道一瞥

minosity LHC, HL-LHC), 最终实现在 ATLAS 和 CMS 两个探测器上各积累 1.8 亿个希格斯玻色子事例的水平, 相当于利用与当今 LHC 已经运行的大致相当的运行时间, 产生 10 倍于目前水平的反应次数。因此, 这一升级是粒子物理的一次全方位的技术挑战, 对于探测器的稳定性、精度, 数据储存、处理和分析能力, 都提出了极高的要求。特别是数据分析方面, 将广泛应用人工智能技术, 推进使用量子计算技术。通过 HL-LHC 的运行, 精确研究希格斯粒子的性质, 提高目前已有结果的精度, 同时直接发现希格斯粒子与 μ 子的相互作用和希格斯玻色子的自相互作用, 是目前的主要任务。由于后两者是标准模型预言的希格斯粒子的性质, 对它们的测量也当归属“确定的未知”, 如果测量结果不符合标准模型的预言, 则当被认为是超出标准模型的新物理的迹象。

当然, 作为一台发现型的强子对撞机, LHC(包括其升级项目 HL-LHC) 无法完全胜任完成精确希格斯物理研究的要求。P5 报告也认为, 这项任务应当由未来的一台“希格斯工厂”完成。P5 报告中所谓的希格斯工厂, 是指一台对撞质心系能量覆盖 90 GeV 到 350 GeV 的正负电子对撞机, 其主要物理目标是利用正负电子对撞机背景简单、相关过程计

算理论误差小的优势, 对希格斯玻色子的性质进行精确测量, 同时涵盖精确 Z 玻色子物理、W 玻色子物理以及顶夸克物理等问题。目前世界上进入预研阶段的希格斯工厂, 主要包括我国的 CEPC 项目(图 5), CERN 的 FCC-ee 项目和 CLIC 项目, 以及日本的 ILC 项目。希格斯工厂不仅有望将希格斯玻色子的各种测量精度较之 HL-LHC 提高一个数量级左右, 还能够精确测量 W 玻色子质量和顶夸克质量, 从而帮助物理学家回答诸如电弱真空稳定性等基本物理问题。P5 报告认为, 尽管美国没有在本土建设一台希格斯工厂的计划, 但美国应积极投资盟友的希格斯工厂计划, 并追求革命性的加速器和探测器技术研发工作, 在希格斯工厂的设计和建设中起到领导作用。

尽管希格斯工厂能够完成对希格斯玻色子进行精确测量的绝大部分任务, 它对于希格斯玻色子自相互作用以及希格斯势形状的测量能力是非常有限的。为了最终回答电弱对称性自发破缺的起源问题以及宇宙早期电弱相变的属性问题, 粒子物理学需要在希格斯工厂之后规划更长远加速器项目。基于这一动机, 2023 年 P5 报告提出了一个涵盖了多种可能性的新概念——10 TeV 部分子质心系能量对撞机(10TeV Parton Center-of-Momentum

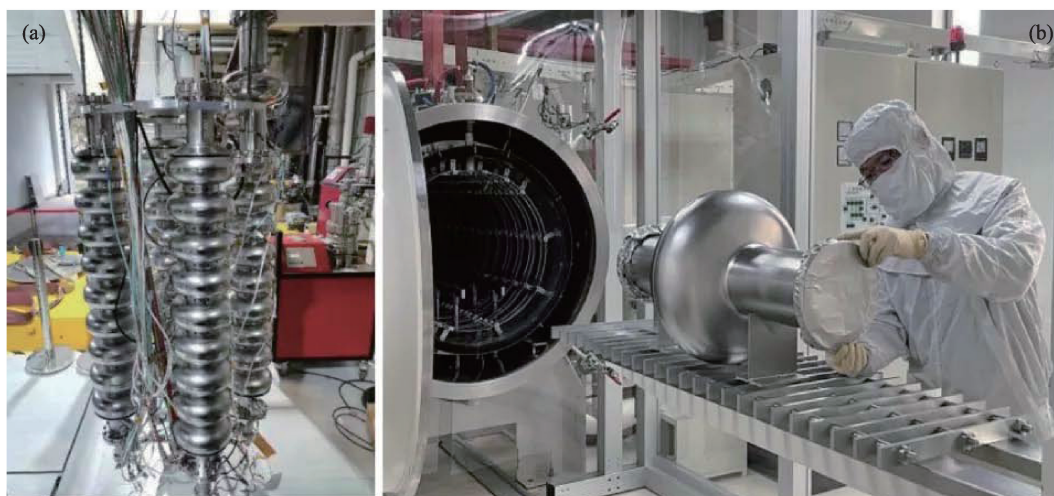


图5 中国科学院高能物理研究所的科学家为希格斯工厂项目研制的高性能 1.3 GHz(a) 和 650 MHz(b)超导体射频腔(本图摘自《现代物理知识》2003 年第 35 卷 S1 期第 98 页图 5)

Colliders, 10TeV pCM collider)。目前,我国建议的SPPC项目、CERN规划的FCC-hh项目和美国设想的 μ 子对撞机项目,在P5报告看来都属于10 TeV部分子质心系能量对撞机。简言之,这一概念要求对撞机中实际参与高能硬散射过程对撞的粒子对的对撞质心系能量达到10 TeV量级。对于正负电子对撞、正反 μ 子对撞,这相当于要求加速器产生能量约为5 TeV的带电轻子。对于基于康普顿背散射原理的光子-光子对撞机,这要求加速电子的能量略高于5 TeV。对于强子对撞机,由于参与反应的夸克与胶子(统称为部分子)只能携带质子或反质子的部分能量,如果希望实现部分子质心系能量能够有效地达到10 TeV量级,强子对撞的质心系能量需要在100 TeV左右,也就是一台100 TeV质心系能量的质子-质子对撞机。P5心目中的10 TeV部分子质心系能量对撞机,可能是FCC-hh(即100 TeV强子对撞机),10 TeV的 μ 子对撞机,或者一台基于等离子体尾场加速技术的正负电子对撞机。这些对撞机的首要任务,就是将希格斯玻色子自相互作用的强度测量精度提高到百分之几的量级。值得注意的是,无论是哪种10 TeV部分子质心系能量对撞机,都需要对加速技术和探测器技术进行重大的改进甚至革命。特别是,如果 μ 子对撞机技术实现突

破,那将是人类粒子物理学继电子、质子(以及各种带电重离子)之后能够有效加速利用的第三种微观粒子,而物理学家能够有效加速利用的基本粒子的种类,已经有几十年没有增加过了。 μ 子对撞机具有一系列优势:首先,由于不参与强相互作用,它与电子对撞机一样具有背景干净精度高的优势;其次,由于 μ 子的荷质比远小于电子,在环形轨道中做极端相对论运动的 μ 子具有同步辐射能量损失小的优势;最后, μ 子直接参与高能硬散射过程,因此10 TeV的 μ 子对撞机对高能过程的探索范围与100 TeV的强子对撞机相当。所以,不仅美国的P5报告关注 μ 子对撞机项目,CERN也在欧洲粒子物理战略计划2020年更新版中将 μ 子对撞机项目列为未来考虑的新加速器之一。更为重要的是,由于 μ 子的寿命只有 2.2×10^{-6} 秒,加速产生稳定的 μ 子束流,在技术上需要突破一系列难题(图6)。在其研发的过程中可能衍生的各种技术手段和思路,可能为相关国家在新技术领域提供独特的优势。

二、探索物理学的新范式

始于19世纪末20世纪初的物理学范式革命,彻底改变了物理学的样貌。在此基础上,经过一个多世纪的努力,物理学在回答世界基本构成及其相

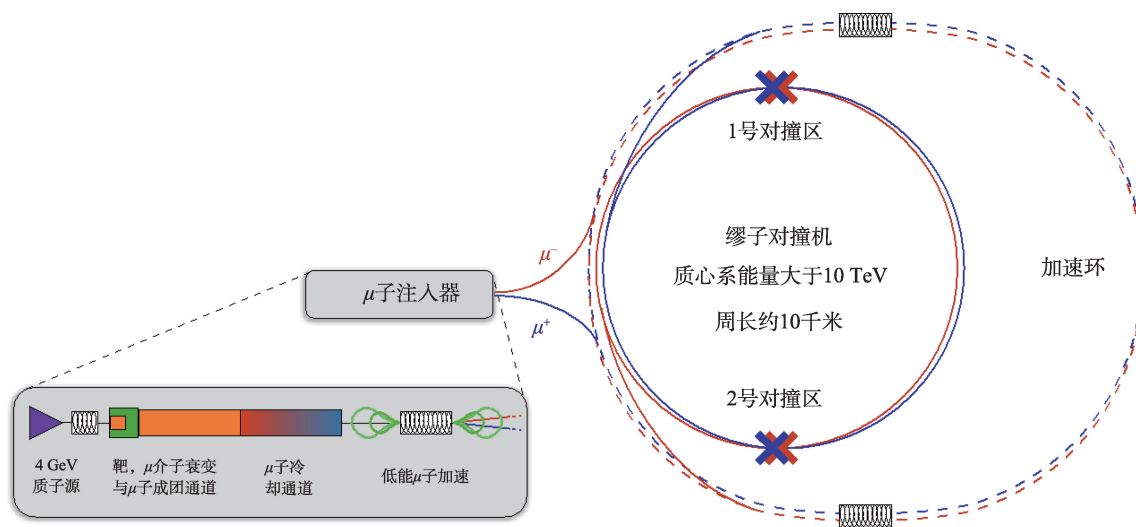


图6 基于质子驱动方案的缪子对撞机实现方案设想(译自国际缪子对撞机合作组(International Muon Collider Collaboration, IMCC)网页 <https://muoncollider.web.cern.ch/about-the-study>)

相互作用,以及宇宙演化的一般规律上取得了巨大的成就,被总结为粒子物理电弱标准模型和宇宙学标准模型。尽管这两大标准模型在解释目前的观测现象上非常成功,这不意味着它们是完美的。二者都有一些无法回答的问题,比如粒子物理标准模型并不能回答暗物质与暗能量的本性问题,而这两种客体是宇宙学标准模型中今天宇宙主要的组成成分。因此,物理学家仍然在追求超出标准模型的新物理。2023年P5报告中有关“探索物理学的新范式”的部分,即与此相关。因此,此处的“新范式”,未必能像19世纪末20世纪初的范式革命那样,根本上改变物理学的面貌,但的确至少能够帮助物理学突破目前的认知定式。

寻找新粒子存在的直接证据

在能量前沿——也就是能量足够高的对撞机上——直接产生并探测新粒子的信号,始终是寻找超出标准模型的新物理的决定性工作。超出标准模型的新物理存在的证据有很多,比如暗物质与

暗能量,宇宙正反物质不对称性的起源,宇宙暴胀及其起源,中微子质量起源,量子引力等等。针对这些物理动机,理论家提出了各式各样的新物理模型,其中预言了不少超出标准模型的新物理粒子。当今粒子物理学实验中位于高能量前沿直接寻找这些新物理粒子的,毫无疑问是CERN的LHC实验。因此,在此问题下P5报告重点提及的在运行项目,就是LHC上的ATLAS、CMS和LHCb实验(图7),以及即将运行的HL-LHC。众所周知,对新物理粒子的寻找,主要受限于实验能力。目前的LHC实验,其设计质心系能量为14 TeV,大部分分子之间高能硬散射过程的有效质心系能量通常不会超过5 TeV,它几乎不可能直接产生(数量足以用来探测的)质量超过约10 TeV的新物理粒子。另一方面,即便新物理粒子质量在1 TeV左右甚至更低,它也有可能由于与标准模型粒子相互作用较弱而难于在LHC上直接产生并探测。尽管质心系能量提升极为有限,HL-LHC通过对LHC的束流强度进行升级,与LHC二期运行的亮度相比可以把亮度提高

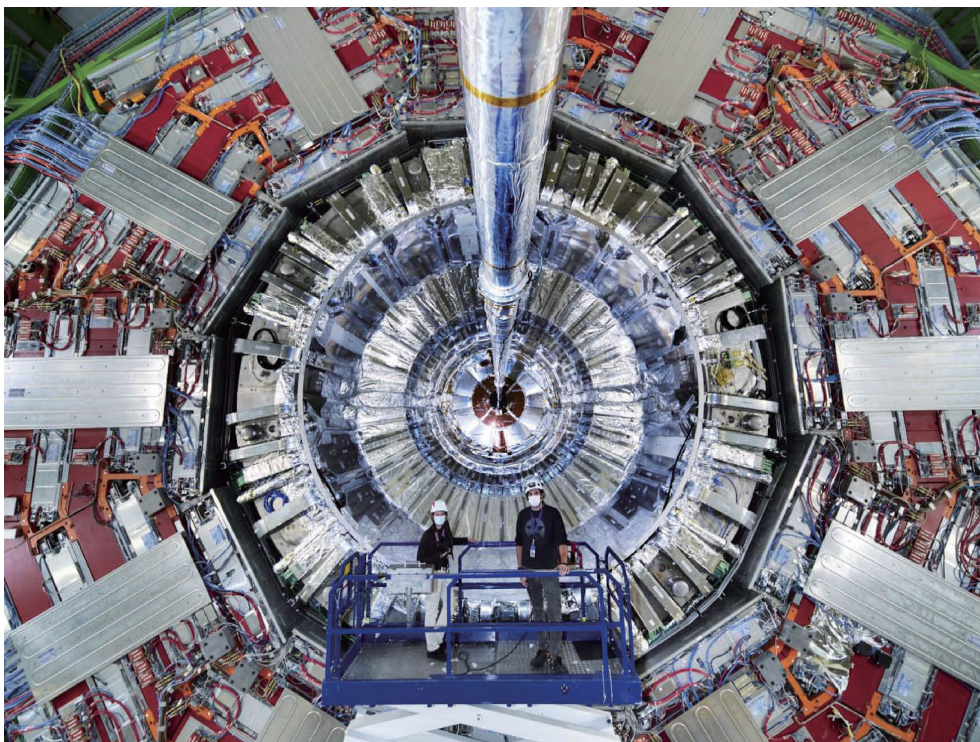


图7 大型强子对撞机上的CMS探测器(图片来自欧洲核子中心网页<https://cds.cern.ch/record/2777919?ln=en>)

20倍。这将帮助物理学家寻找与标准模型粒子相互作用较弱但质量仍在LHC探索能力范围内的新物理粒子,其中较为被物理学家关注的途径,包括标准模型希格斯玻色子的反常衰变信号,以及对特定WIMP暗物质粒子的寻找。为了将HL-LHC能力提升到极限,实验物理学家和工程技术人员还将更换甚至增加新的探测器模块(比如MoEDAL-MAPP, SND@LHC等),使用蟹形腔(Crab cavities)和更强大的超导磁铁,同时大量使用人工智能和机器学习方法处理海量的复杂数据。针对当下的研究热点之一——长寿命新物理粒子,LHC也具有较好的探索能力,特别是LHCb以及一系列灵活的小型探测器实验,如:CODEX-b, MATHUSLA, FASER和FORMOSA。这些小型探测器往往布置(或计划布置)在距离对撞点较远的位置,或位于前端(如FASER),或位于横向远端(如CODEX-b和MATHUSLA),专职探测寿命较长的新物理粒子,以弥补ATLAS、CMS和LHCb等对撞点探测器对这些长寿命粒子探测能力的不足。

对于近期未来的项目,P5报告不出意外地推荐了希格斯工厂。虽然希格斯工厂的对撞质心系能量远低于LHC,在探测重粒子方面没有优势,但是其在精确测量方面较之LHC具有一定的优势。比如,它对于希格斯玻色子反常衰变中的新物理粒子信号的敏感度,就高于LHC。在20年远景规划中,P5报告,针对直接寻找新物理粒子的项目,推荐了10 TeV部分子质心系能量对撞机项目。更高的质心系能量、更高的束流强度和更精密的探测器,当然意味着对新物理粒子更强大的探测能力。如前文所述,这样一台对撞机的实现方案,可能是100 TeV质心系能量的强子对撞机,也可能是10 TeV质心系能量的 μ 子对撞机。二者对高能量前沿的覆盖能力和优势各不相同,但基本上能够将大质量新物理粒子的质量探测能力提升到10 TeV左右。报告中显示出美国粒子物理学界对于在本土建造一台10 TeV质心系能量的 μ 子对撞机有一定的兴趣,相比之下,对于100 TeV质心系能量的强子对撞机,他

们更倾向于离岸的FCC-hh。然而,这些方案是否能够推进和完成,取决于未来二十年间粒子物理技术在强场磁铁、兆瓦级质子驱动器、等离子体尾场加速和 μ 子冷却等方面取得的进展。技术的进步将极大地影响项目实现方案的选择,也将决定下一阶段粒子物理学在高能量前沿能走多远。

追求新现象的量子印记

直白地讲,这个方向意指利用各种高亮度高精度实验,寻找新物理和新物理粒子的间接效应。当对撞机能量不足以直接产生新物理粒子时,这是寻找新物理现象的补充途径,其结果也可能为未来对撞机的预研和建设提供进一步的依据和推动。

量子物理规律告诉我们,即便某种新物理粒子由于其质量较大或者相互作用较弱,使其无法在对撞机实验中直接产生并被探测到,该种新物理粒子对应的场仍存在于虚空之中并无时无刻不在发生涨落。这些新物理场对真空量子涨落的影响,会反映在各种物理观测量中。历史上对物理场真空量子涨落效应较为著名的测量,包括获得了诺贝尔物理学奖的电子反常磁矩测量和兰姆位移测量等。物理学家可以借助新物理场的真空量子涨落效应对各种观测量产生的间接影响,窥伺背后的新物理场。当然,天下没有免费的午餐,新物理粒子的质量越大、它与标准模型粒子的相互作用越弱,其所对应的量子场的真空涨落幅度及其对标准模型粒子相关的物理观测量的影响就越小,也就越难以发现。因此,通过这一途径间接寻找新物理迹象的实验,对实验仪器的灵敏程度和数据统计量往往有着极高的要求,而高度灵敏的实验仪器又往往迫使物理学家寻找低本底的环境。所以,这类实验往往具有如下特点:对实验仪器的环境洁净度要求较高,对探测器的灵敏程度要求较高,标准模型背景贡献非常小,需要较高的统计量。一般而言,粒子物理学界较为关注的几种过程包括:夸克味道混合效应的测量,特别是在标准模型中被极大压低的FCNC过程;在标准模型微扰过程中被禁戒的带电轻子数破

坏过程;测量精度极高的 μ 子反常磁矩;以及反映超出标准模型CP破坏的各种电偶极矩的测量等等。

除了前文中已经多次提到的LHC实验(包括ATLAS、CMS和LHCb,它们对夸克味道改变过程可以进行高精度测量,对带电轻子数破坏过程和超出标准模型的CP效应、特别是与顶夸克相关的CP破坏效应也具有相当的敏感度)外,P5报告在针对本问题的已有装置中,还点名提到了Mu2e和Belle II。前者是美国费米国家加速器实验室正在建设(预计2025年运行)的测量 μ 子通过不产生中微子的带电轻子数破坏过程直接衰变到电子的过程的实验。它将利用升级改造的费米实验室加速器复合体产生的8 GeV质子束流打钨靶产生带电 π 介子进一步衰变产生高强度的 μ 子束流,计划每年产生 2×10^{17} 个 μ 子。后者利用日本SuperKEKB的高亮度非对称正负电子对撞机(电子束流能量7 GeV,正电子束流能量4 GeV)探测产生的大量底夸克强子的衰变,可以寻找底夸克相关的味道改变过程中超出标准模型的反常迹象。

P5报告认为,近期在相关问题上的主要改进,在于对Belle II和LHCb的升级。Belle II的升级将利用SuperKEKB上的纳米束流达到的前所未有的束流强度积累25倍于今的数据。这项升级的技术要点在于产生纳米尺度的束流,以及更高真空度的管道。这些技术对于所有未来的正负电子对撞机都很重要,因此报告建议美国务必要参与相关技术的研发中。至于LHCb实验,基于HL-LHC的强大平台,它有望在未来积累海量的底夸克物理相关的事例,从而为研究夸克味道改变的稀有过程的发现提供条件。当然,Belle II和LHCb等对撞机实验同时也可以用来研究带电轻子数破坏过程。对于追求新现象量子印记的新建大科学装置,P5报告重点再次推荐了希格斯工厂。其原因是显而易见的,希格斯工厂是一台背景干净的高精度高亮度轻子对撞机,特别是当前主要的希格斯工厂计划(我国的CEPC和CERN的FCC-ee)都有在90 GeV质心系能量处积累 $10^9\sim 10^{12}$ 左右的Z玻色子事例的运行计划。

因此,它对于夸克味道改变过程以及带电轻子数破坏过程这些稀有过程的敏感程度要高于HL-LHC。除此之外,一台在350 GeV质心系能量处运行的希格斯工厂,能够对顶夸克质量进行精确测量,将现有的顶夸克质量测量精度提高一个数量级左右。这一结果与Z玻色子、W玻色子以及希格斯玻色子质量的精确测量结果一起,将使物理学家能够检查标准模型量子真空涨落效应的自愈性,以确认其中是否有新物理量子场真空涨落效应的余地。至于20年后的未来项目,P5报告建议费米国家加速器实验室专注于其加速器复合体的升级,以提供更高亮度的强流质子束,以及研究建设先进 μ 子设施。这些技术进步将为未来的高亮度实验提供更强大的束流支持。

三、照亮隐藏的宇宙

20世纪物理学的一大成就,就是将研究宇宙的性质与演化成功地纳入到科学研究的范畴中。而热大爆炸宇宙学模型一个惊人的结果,就是指明了以微观高能过程为主要研究对象的粒子物理学的一大应用场景——早期宇宙的演化。因此,粒子物理学与宇宙学研究,特别是早期宇宙演化的研究紧密相关。后者也越来越多地为前者提供研究动机。P5报告中“照亮隐藏的宇宙”这一题目涵盖的具体科学问题,就主要指粒子物理研究的宇宙学前沿部分,包括寻找暗物质,CMB偏振的精确研究,原初引力波,暗能量与暴胀等一系列粒子宇宙学问题。

确定暗物质的本性

暗物质,是宇宙学标准模型中今天宇宙物质组成的重要成分之一,它占今天宇宙总成分的接近27%。与之相比,由标准模型粒子构成的可见物质只占宇宙成分的4%左右。遗憾的是,物理学家目前对暗物质的了解非常有限,坦白地讲我们只能确定它参与引力相互作用,对于其成分、各成分的质量、分布规律、以及参与其他相互作用的性质等等并没有确定的了解。所以,探索暗物质的秘密自然成了粒子物理与宇宙学的跨学科共同课题。

目前通过实验手段探索暗物质的方法主要有四大方向:通过观测宇宙中可见物质分布及分布演化的规律、根据广义相对论倒推暗物质的性质的宇宙调查方法;利用特定暗物质模型中的暗物质候选者可以通过高能对撞机对撞产生的性质,在对撞机上寻找由此导致的丢失横能量信号,甚至是模型中其他相关粒子信号的加速器实验方法;通过观测宇宙中暗物质(之间通过模型假设存在的)相互作用产生的可见物质产物信号——如高能宇宙线正电子、光子、反质子等——寻找具有特定相互作用性质的暗物质候选粒子的间接探测实验方法;以及通过地下高精度探测器直接探测暗物质与原子(通过假设存在的)相互作用产生的光电信号来寻找具有特定相互作用性质的暗物质候选粒子的直接探测实验方法。

过去几十年间,暗物质的粒子物理候选者是一大类统称为弱相互作用重粒子(WIMP)的模式粒子。这种类型的暗物质候选粒子与粒子物理标准模型粒子存在一定的相互作用,通过早期宇宙演化中的热退耦过程产生合适量的残留丰度。其典型质量在1 GeV到1 TeV左右,与标准模型粒子之间的相互作用强度约相当于弱相互作用强度。该模型从理论上具有结构简单,演化过程清晰,物理

参数自然等诸多吸引理论家的性质,因此很长时间以来被认为是最具竞争力的暗物质候选者。目前的暗物质直接探测实验,大部分都是针对WIMP暗物质粒子设计的。由于至今为止的几乎所有暗物质直接探测实验都没有观测到正面的信号,实验对于WIMP模型的参数空间已经给出了极大的限制。剩余的参数空间往往不够自然,因此近年来以轴子、类轴子为代表的其他类型的暗物质模型也开始更多地受到关注。

P5报告关注的目前正在进行或建设的暗物质探测大型项目,包括:LHC, IceCube, 以及以LZ、ADMX-G2、DarkSide-20k、XENONnT和SuperCDMS SNOLAB为代表的第二代(G2)暗物质直接探测实验。其中的LHC无需多言,是典型的利用对撞机高能散射过程直接产生暗物质粒子或暗物质模型中的其他相关粒子,继而探测它们的信号的加速器暗物质实验。IceCube,是位于南极阿蒙森-斯科特科考站附近的大型宇宙线中微子探测实验,其主体探测器包括铺设在地表用于探测高能宇宙线大气簇射信号的IceTop阵列,和位于地下1450米到2450米深的冰层中的体积约1立方千米的大型切伦科夫探测器(见图8)。其主要实验目标,是探测宇宙中刷

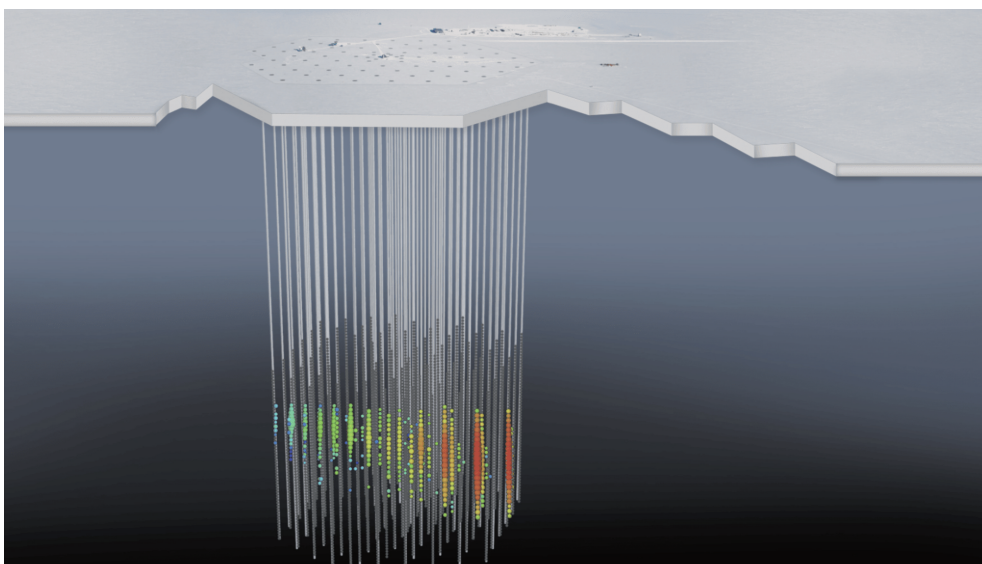


图8 IceCube及其探测到的高能中微子事例示意图(图片来自IceCube实验组网页https://res.cloudinary.com/icecube/images/q_auto/v1602528691/gal_Multimessenger_IceCube_wNeutrino/gal_Multimessenger_IceCube_wNeutrino.png?_i=AA)

烈的天体物理源产生的高能宇宙线中微子。为了完成实现这一目标, IceCube 实验在冰层中安置了 5160 个数字光学模块, 每个模块由一个 10 英寸光电倍增管和相应的电子学设备组成, 它们被串在 86 个竖直深入在地下(1450 米到 2450 米)冰层中的链上, 每个链上串了 60 个数字光学模块, 模块与模块之间的垂直距离为 17 米, 这 86 根链在水平面上的投影构成边长 125 米的六边形顶点阵列; 其中 8 根位于核心区的链排布更为紧密(间距由 125 米缩减为 70 米), 链上的模块间距也缩小至 7 米, 它们构成了地下探测器的核心部分 DeepCore。IceCube 可以探测能量高于 10 GeV 的高能中微子与冰相互作用产生的带电粒子辐射的切伦科夫光。利用 IceCube 实验寻找暗物质——主要是 WIMP 暗物质候选粒子的原理是: 由于引力相互作用, WIMP 可能在太阳这样的大质量天体处富集, 这些在太阳内部的暗物质粒子有一定的可能性通过散射过程湮灭到标准模型粒子, 而这些粒子及其衰变的次级产物中可能存在高能中微子, 于是物理学家可以通过分析来自太阳方向的宇宙线中微子信号, 寻找 WIMP 在太阳中富集的证据。所以, 从原理上讲, IceCube 寻找暗物质粒子的方式, 属于间接探测方法。而后面五个第二代暗物质直接探测实验, 其实验原理都是直接探测暗物质粒子与实验装置中的物质直接反应的信号, 属于直接探测方法。其中的 LZ、DarkSide-20k、XENONnT(XENON 合作组主页显示, 我国的清华大学是该合作组成员单位)装置大多置于地下实验室(以屏蔽宇宙线 μ 子背景), 采用以吨级高纯度惰性元素作为靶物质(LZ 与 XENONnT 采用液氙, DarkSide-20k 采用液氙)的时间投影室(Time-Projection Chamber, TPC)或两相时间投影室(Dual-Phase TPC)收集反应产生的光信号和电信号寻找稀有的暗物质-核子散射信号(参见图 9)。我国的暗物质探测项目 PandaX 也属于此类实验。而 SuperCDMS, 作为 CDMS 的升级实验, 则是以高纯度的半导体锗作为靶物质, 探测暗物质散射产生的电信号或声子信号。我国的 CDEX 实验也属于此类实验。由于来自太

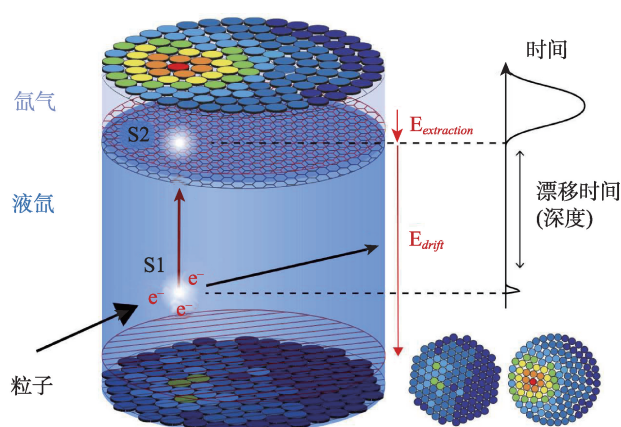


图9 两相时间投影室原理示意图(图片译自 XENON 实验合作组图片, 参见 <http://nigroup.ucsd.edu/research-projects/technology/>)

阳的中微子可以与核子反应产生与 WIMP 暗物质类似的信号, 该方法对 WIMP 暗物质的寻找存在固有背景——俗称“中微子地板”(neutrino floor, 参见图 10)。目前, 这类实验已经逼近、在个别质量区间上甚至触及了中微子地板。而 ADMX-G2 实验, 是一个专一搜寻轴子、类轴子的实验设备, 如果暗物质是特定质量的轴子或类轴子, 它在强磁场的环境下就可能转化为微波光子, 该信号经过微波谐振腔的放大, 可以通过一定的量子电子学器件读取。该实验目前已经排除了质量在 2.66~4.2 μeV 之间的 QCD 轴子, 正在努力将灵敏度提高到更高的质量。

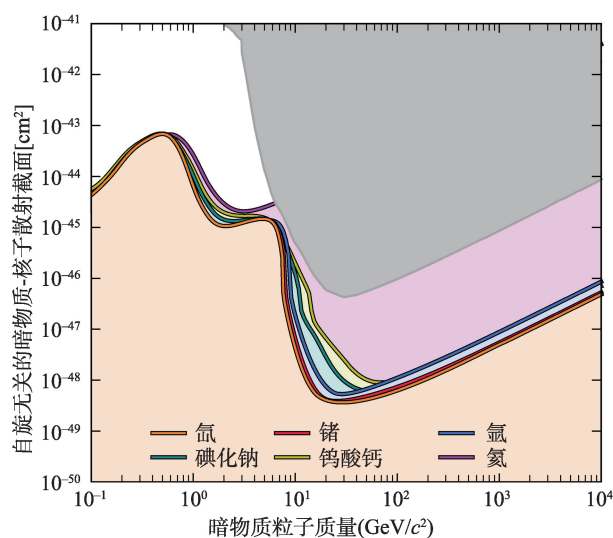


图 10 不同探测器靶物质对应的中微子地板, 图中灰色区域为目前暗物质直接探测实验已经排除的区域(本图译自 C. A. J. O'Hare, Phys. Rev. Lett. 127 (2021) 251802)

针对目前广受关注的轴子-类轴子暗物质模型和隐藏部分模型,特别是其中往往质量较轻的暗物质粒子候选者,P5报告重点提及了近期将直接探测实验的灵敏度提升到亚eV水平的需求。而对于轴子、类轴子暗物质的寻找,建立一系列协作实验,彻底探索质量在1 peV到40 neV质量范围的类轴子暗物质候选者似乎是一个合适的项目选择。P5报告指出,DMNI实验计划正是这样一个项目,目前该项目正在等待建设经费。在IceCube实验方面,未来的升级计划IceCube-Gen2将提供比IceCube高十倍的天体物理中微子灵敏度,并将成为最灵敏的衰变型重暗物质的探测器。至于其他间接探测实验,P5报告还提到了切伦科夫探测器阵列CTA项目,该实验与SWG0(Southern Wide-field Gamma-ray Observatory,南天大视场伽马射线天文台)实验一起,有望为第三代暗物质直接探测实验所无法涵盖的可能模型提供探测灵敏度。

为了更好地寻找WIMP暗物质,P5建议未来着重开展第三代(G3)暗物质直接探测实验。其实验原理与G2基本相同,但灵敏度将进一步提高一个数量级左右。因此,G3暗物质直接探测实验将触及中微子地板(P5报告中称为“中微子雾”,neutrino fog)。这些实验将进一步搜索各种WIMP暗物质模型的剩余参数空间,而对G3的超越,将无法回避中微子地板问题,因而需要实验方法和技术革命。间接探测方面,P5建议美国支持以IceCube-Gen2和CTA为代表的地面阵列高能宇宙线观测项目,前者关注宇宙线高能中微子,后者关注宇宙线高能伽马射线。

P5报告注意到,探测暗物质的宇宙调查方法,基于天体物理和宇宙学观测为模型依赖的粒子物理暗物质实验形成了互补。这些方法利用对银河系卫星星系、星流、强透镜系统和宇宙微波背景的观测,可以在小尺度上绘制暗物质的分布图。在这些尺度上,通常在大尺度研究中对暗物质的低速和无碰撞近似处理可能会失效,因此这些尺度的研究可能为物理学家了解暗物质在宇宙中的状态(比

如,是否相对论性运动)和暗物质除引力相互作用外的其他可能存在的相互作用形式(如自相互作用)提供新的途径。P5报告着重提及的相关大科学装置,包括CMB-S4,鲁宾天文台LSST,以及后续的DESI-II和Spec-S5。

在这些实验中,CMB-S4是下一代陆基宇宙微波背景实验。与之前的探测器相比,CMB-S4的包含550000个探测器单元,分布在500个晶片上,其探测单元的数目比之前的任何装置都高了至少一个数量级。CMB-S4的核心装置是新的大口径望远镜,这是一台具有超大焦平面的相机,每个焦平面包含130000个超导探测器,能够大幅提高绘制宇宙微波背景图的灵敏度。两台这样的6米口径望远镜被部署在智利阿塔卡马沙漠,它们每天可以绘制大约70%的天图,用以从事暗宇宙、物质分布等课题的研究。另一台5米口径的三反望远镜(Three Mirror Anastigmat Telescope)将被部署在南极,每天对3%大小的天图进行多次绘制,主要用于宇宙暴胀研究,也可用于极深场物质分布等问题的研究(图11)。此外,CMB-S4还将部署9台小口径望远镜专门负责在1角度尺度上探测B-模式极化。这些望远镜使得CMB-S4对于大角度与小角度、大场与小场都能够进行很好的探测。其超导探测器的工作温度为0.1 K,能够覆盖11个波段,并消除灰尘和同步辐射等银河系前景污染。CMB-S4对CMB涨落和极化的高精度探测,使之能够搜寻早在宇宙温度高达1 GeV到100 GeV时就与标准模型粒子退耦的弱相互作用粒子由于其能量密度贡献导致的宇宙膨胀速率的微小变化。这项能力,较之现有的实验(如Planck卫星实验)提高了约10000倍,使得物理学家能够探测早在早期宇宙QCD相变之前就已经退耦的新物理粒子的效应。

鲁宾天文台(图12)LSST项目,即鲁宾天文台空间与时间遗产调查项目(Legacy Survey of Space and Time, LSST),利用位于智利塞罗·帕穹山的维拉·鲁宾天文台的8.4米大口径天文望远镜及其重达2.8吨的相机,在十年的时间内每晚为南天拍摄

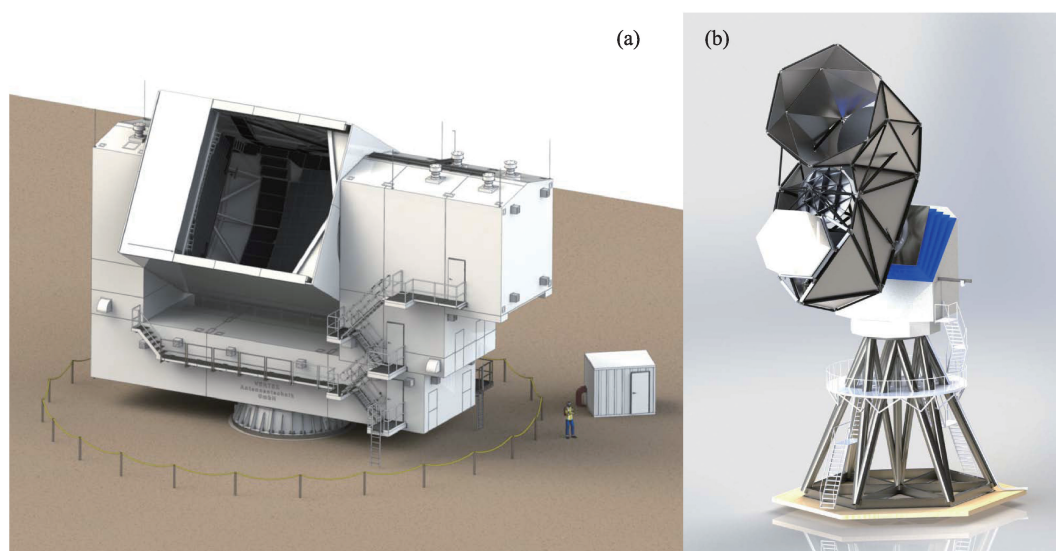


图11 CMB-S4计划部署在阿塔卡马沙漠的6米大口径望远镜(a)和计划部署于南极的三反望远镜(b)的想象图
(图片来自CMB-S4项目网页 <https://cmb-s4.org/experiment/telescopes/>)

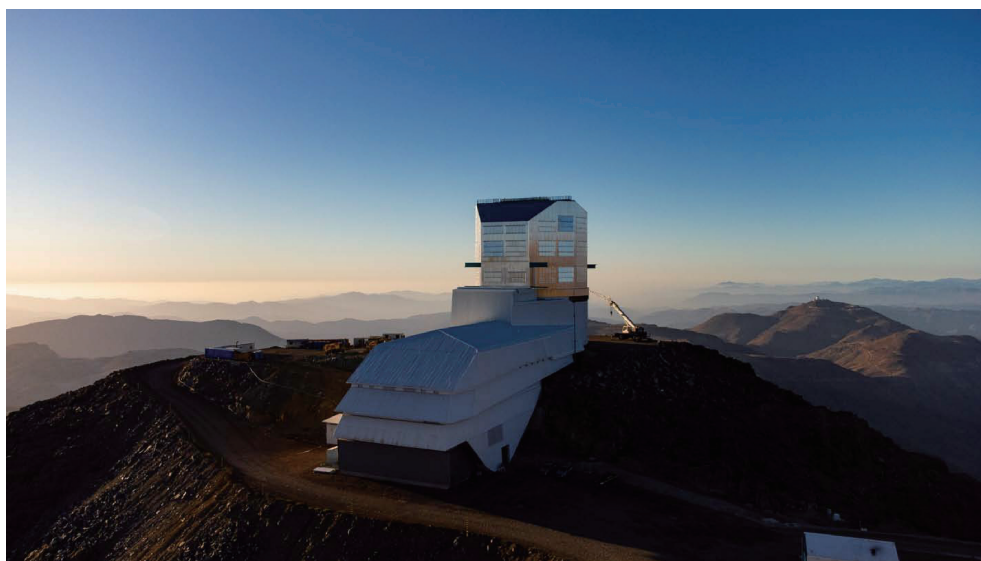


图12 维拉·鲁宾天文台(图片来自维拉·鲁宾天文台主页 <https://rubin.canto.com/v/gallery/album/HDSNU?display=curatedView&viewIndex=2>)

数百张五彩色照片(综合可区分六色段)。LSST将收录超过100亿个南天星系,它们的空间分布(丝状结构)、大小分布(小型星系的存在与比例)等信息,反映了暗物质对宇宙结构形成的影响。

两个后续实验中,DESI-II项目是对DESI(我国的中国科学院国家天文台、北京大学和清华大学都是该项目的合作单位)的升级,后者部署于美国基特峰国家天文台,是通过对大量星系和类星体的光谱进行观测,绘制110亿光年内3维天图以对比研

究暗能量对宇宙膨胀影响的天文观测实验。在此基础上,DESI-II计划对更高红移的宇宙深处进行探测。而更远未来的Spec-S5,则是指第五阶段光谱实验(Stage-V Spectroscopic experiment),其主要目标也是利用星系红移研究暗能量物理,将作为DESI实验的后续。

在展望这一领域20年远景时,P5强调了10 TeV部分子质心系能量对撞机在加速器探测暗物质方法中将具有的重要地位,同时强调了模型无关的上

述各种天文学和宇宙学观测实验的重要补充作用。

了解宇宙演化的驱动力

宇宙中的可见物质与暗物质,占今天宇宙总量的30%强,而今天宇宙中占比最大的成分则是被称为暗能量的成分。该成分与其余物质成分迥然不同,为宇宙膨胀提供加速。受物态方程决定,暗能量的地位随着宇宙的膨胀愈发重要,今天已经占宇宙总成分约70%。正是这些提供“万有斥力”的奇特成分,左右着当今宇宙演化的方向。然而当我们回到宇宙演化的早期,宇宙学标准模型告诉我们在宇宙的极早期存在过一个被称为暴胀的历史阶段,该阶段虽然非常短暂,且其对应的能量远高于粒子物理标准模型的能标,但暴胀导致的宇宙物质密度涨落作为初始条件决定了后续宇宙的演化与结构形成。暗能量是什么?何种机制或物理场驱动了暴胀?这对今天的物理学而言,仍然是未解之谜。近几年的哈勃常数疑难问题,也为研究这些驱动了宇宙演化的源动力增添了动机。

作为基础物理学中较为活跃的领域,在过去的十年中,通过观测CMB的Planck卫星实验等实验,物理学家对暗能量、暗物质乃至暴胀的了解有了较大的进展。P5报告认为,眼下在这一领域需要推进的重要实验,首先是前文提到的CMB-S4项目。该

项目除前文已经提到的观测能力外,还能够测量中微子质量之和(中微子退耦时间之晚,使得CMB-S4探测它们没有困难)。此外,对于CMB极化模式的测量,可以用于间接探测原初引力波,而原初引力波将携带宇宙甚早期的信息,从而对暴胀动力学给出约束。P5报告认为,CMB-S4巧妙的双站点设计,将使得整体的能力远大于各部分之和,而天基Lite-BIRD实验(测量CMB极化的卫星实验)计划在未来十年发射,它将可能为CMB-S4的结果提供补充。

P5报告在此问题下提到的其他重要项目,还包括我们在前文中已经介绍过的鲁宾天文台LSST、DESI、DESI-II和Spec-S5。这些多任务的天文观测实验,将帮助物理学家了解暗能量对宇宙演化的影响,以及早期暴胀导致的密度涨落的细节信息,从而为理论研究提供观测素材。其中DESI-II升级可以拓展DESI的探测深度,并为鲁宾天文台的LSST测量减少不确定度,同时也是Spec-S5的探路项目,具有很高的科学回报,因而被P5列为较为优先的升级项目。此外,在未来的十年中对线强度绘图(Line Intensity Mapping, LIM)方法的预研,也是值得投入的。该方法利用宇宙中原子分子的特征光谱线,绘制相应物质组分随红移(即宇宙演化时间)的分布情况,为宇宙绘制一张3维图谱(图13)。

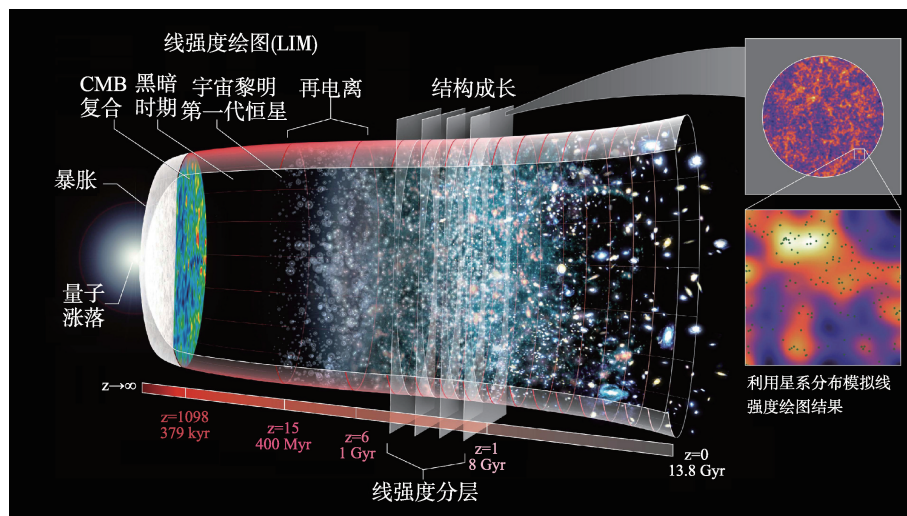


图13 线强度绘图(LIM)原理图示

(译自美国国家航空航天局网站图片 https://lambda.gsfc.nasa.gov/education/graphic_history/intensitymapping.html)

针对领域 20 年尺度上的远景展望, P5 动议了下一代光谱调查项目 Spec-S5。P5 预期该项目将助力物理学家通过原初涨落的统计性质探索暴胀物理, 了解晚期宇宙加速, 测量中微子质量与光遗迹, 以及探索暗物质的性质。如何在这些科学任务之间保持适当的平衡, 将取决于前述实验项目的结果。而在拥有 Spec-S5 项目之前, 还需要进行相关的技术研发工作。而 LIM 则可能通过对原初氢构建一幅精确的图谱为理论解释提供完美的素材。由于该技术较之 Spec-S5 可能探测更早期的宇宙, 为了证明其可行性, 美国能源部已经与美国宇航局合作, 构建了一个探索性的 LIM 实验 LuSEE-Night。总之, P5 对未来探索宇宙演化驱动力的实验项目的主线规划, 是从 CMB-S4、LSST 和 DESI, 到 Spec-S5 和 LIM。该领域的未来, 有望汇聚大量的宇宙学观测实验。

名词缩写

ADMX: Axion Dark Matter Experiment, 轴子暗物质实验。
 ATLAS: A Toroidal LHC Apparatus, LHC 环形超导磁铁探测器。
 Belle II: Belle 实验二期。
 CDEX: China Dark Matter Experiment, 中国暗物质实验。
 CEPC: Circular Electron Positron Collider, 环形电子正电子对撞机。
 CLIC: Compact Linear Collider, 紧凑直线对撞机。
 CMB: Cosmic Microwave Background, 宇宙微波背景。
 CMB-S4: CMB Stage 4, 第四阶段宇宙微波背景实验。
 CMS: Compact Muon Solenoid, 紧凑 μ 子线圈探测器。
 CODEX-b: COmpact Detector for EXotics at LHCb, LHCb 奇特粒子紧致探测器。
 CP: Charge-Parity, 正反粒子与空间反射联合变换。
 CTA(或 CTAO): Cherenkov Telescope Array Observatory, 切伦科夫探测器阵列。
 DESI: Dark Energy Spectroscopic Instrument, 暗能量光谱仪。
 DMNI: Dark Matter New Initiatives experiments, 暗物质新倡议实验。
 FASER: Forward Search Experiment, 前向探测实验。
 FCC-ee: Future Circular Collider, 未来环形对撞机(正负电子对撞模式)。
 FCC-hh: Future Circular Collider, 未来环形对撞机(强子对撞模式)。

FCNC: Flavor Changing Neutral Current, 味道改变中性流。

IceCube: IceCube Neutrino Observatory, 冰立方实验(位于南极的宇宙线中微子探测实验)。

ILC: International Linear Collider, 国际直线对撞机。

LHCb: Large Hadron Collider beauty, 大型强子对撞机美夸克实验。

Λ CDM: Λ and Cold Dark Matter, 基于宇宙学常数、冷暗物质与暴胀产生的密度涨落的宇宙学演化模型。

LZ: LUX(Large Underground Xenon dark matter experiment, 大型地下氙暗物质实验)-ZEPLIN experiment, LZ 暗物质探测实验。

MATHUSLA: Massive Timing Hodoscope for Ultra-Stable neutral pArticles, 超稳定中性粒子大规模时间描述仪。

MoEDAL-MAPP: Monopole and Exotics Detector at the LHC-MoEDAL Apparatus for Penetrating Particles, LHC 磁单极子与奇特粒子探测器-MoEDAL 穿透粒子装置。

Mu2e: Muon-to-electron conversion experiment, μ 子转化为电子实验。

NOvA: NuMi(Neutrinos at the Main Injector) Off-axis ν_e Appearance, 主注入器中微子致离轴电子中微子起源实验。

P5: Partical Physics Project Prioritization Panel, 粒子物理项目优先级评定小组。

PandaX: Particle and Astrophysical Xenon Experiments, 粒子与天体物理氙实验。

SBN: Short Baseline Neutrino Program, 短基线中微子项目。

SND@LHC: Scattering and Neutrino Detector at the LHC, LHC 散射与中微子探测器。

SNOLAB: 位于加拿大安大略省萨德伯里市克雷顿矿的地下实验室。

SuperCDMS: Super Cryogenic Dark Matter Search, 超低温暗物质探测实验。

SuperKEKB: 超级 KEK B 工厂, KEK 为日本高能加速器研究机构(High Energy Accelerator Research Organization)的简称。

TeV: Tera-electron Volt, 特电子伏特。

T2K: Tokai to Kamioka, 东海至神冈(长基线中微子实验, 以其中微子源——位于日本东海的大强度质子加速器设施, 和探测器——位于日本神冈町的超级神冈探测器的所在地代称)。

WIMP: Weakly-Interacting Massive Particle, 弱相互作用重粒子。

参考文献

“Exploring the Quantum Universe: Pathways to Innovation and Discovery in Particle Physics”, Particle Physics Project Prioritization Panel, High Energy Physics Advisory Panel. <https://www.usparticlephysics.org/2023-p5-report/>