

从美国 P5 报告看我国粒子物理装置发展规划

王贻芳 赵 强

(中国科学院高能物理研究所 100049)

一、前言

2023年12月8日,美国能源部(DoE)和美国国家科学基金会(NSF)联合设立的高能物理顾问委员会(High Energy Physics Advisory Panel, HEPAP)批准了“粒子物理优先项目委员会”(Particle Physics Project Prioritization Panel, 简称P5)撰写的美国粒子物理学未来10年发展规划报告——《探索量子宇宙——粒子物理学创新与发现之路》(以下简称“P5报告”)^[1]。该报告展望了未来美国粒子物理的发展方向,提出了项目建议及排序,为美国政府的政策制定和投资方向提供了主要依据。

根据美国国会通过的《联邦顾问委员会法》(Federal Advisory Committee Act),政府科技部门均需成立由专家学者组成的顾问委员会,对政府资助的规划、方向、项目等提供意见建议。没有得到顾问委员会支持的规划、方向与项目,很可能得不到国会的拨款而无法执行。美国能源部(DoE)和美国国家科学基金会(NSF)依法行政,联合设立了高能物理顾问委员会(HEPAP)。但由于法律规定这类顾问委员会必须公开举行,而规划和项目等讨论不可能完全公开,因此HEPAP成立了P5,来讨论具体规划与项目。P5每5~10年制定一次规划,HEPAP举行公开会议投票批准后交给DoE和NSF。后二者据此制定预算并向国会报告,申请拨款。美国上次发布P5报告为2014年,报告获得美国DoE、NSF和国会的支持,国会据此拨付了经费,DoE和NSF也很好执行了规划。

尽管P5报告基于美国自身的发展目标而制定,但其影响力不限于美国,对国际粒子物理的未来发

展也会产生重要影响,且将持续超过10年以上。P5报告在很大程度上代表了国际粒子物理学界对未来发展项目优先级的一种共识,因此受到各界的广泛关注。我国粒子物理学界自2012年以来积极研讨和推动自己的发展战略,探寻合理的发展路线,对比P5报告有助于我们更清晰地把握未来粒子物理发展的基本方向,制定符合我国国情的发展战略。

二、美国粒子物理未来十年发展规划

P5报告强调粒子物理作为一门研究亚原子世界基本组元的科学,核心本质是由人类好奇心所驱动的。通过研究基本粒子及其相互作用,理解微观极小尺度的规律与极大宏观尺度的联系,将人类的探测能力推到极限以发现新的物理现象与规律。根据这种研究范式,P5报告规划了未来十年甚至更长时间美国粒子物理研究应聚焦的三大科学主题,其中每个主题包括两个驱动方向:

- 解密量子领域——阐明中微子之谜,揭开希格斯玻色子的秘密
- 照亮隐藏的宇宙——确定暗物质的本质,理解宇宙演化的动因
- 探索物理学的新范式——寻找新粒子的直接证据,追寻新现象的量子印记

除此之外,P5报告还探讨了DoE和NSF对规划制定和实施保障的关键作用,明确指出粒子物理发展“全球化”的特点,因此需要合理分配和利用资源,在当前和未来的大中型项目与一些小型灵活的项目之间找到平衡,以保证美国科学利益的最大化和维持美国在科学上的国际引领地位。根据科学

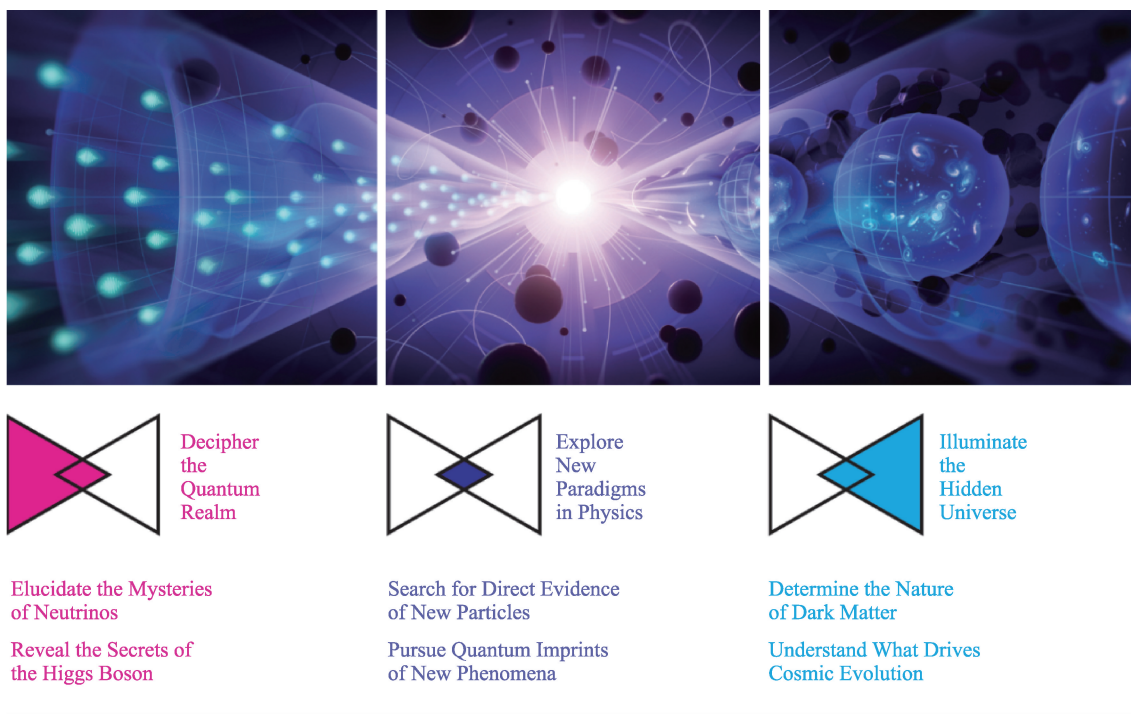


图1 P5主题图(图片摘自P5报告^{[1])})

目标的重要性、预算的现实性以及不同规模项目之间的平衡,P5报告将粒子物理领域的项目分为大型项目(投资大于2.5亿美元)、中型项目(5千万到2.5亿美元)和小型项目(小于5千万美元),并对不同规模的项目提出投资优先级的考量标准:

- 1) 大型项目(大于2.5亿美元):
 - 具有潜在的改变科学范式的发现能力;
 - 国际引领;
 - 国际上独一无二
- 2) 中等项目(5千万到2.5亿美元):
 - 具有优越的科学发现潜力或者研发主要科研工具的能力;
 - 国际领先;
 - 具有国际竞争力
- 3) 小型项目(小于5千万美元):
 - 具有科学发现的潜力、成熟的观测手段,或者突出的技术研发;
 - 达到国际水平;
 - 可以提供优越的科研训练条件和场地

P5报告特别强调了投资建设高技能科学工程

技术人员队伍、加强计算和科技基础设施建设的重要性。建议将有限的资源集中,以确保具有卓越发现能力的突破性研究的持续性,并且必须开展国际合作。为了支持中小型实验计划,报告特别建议美国能源部创建一个新的竞争性项目,用于支持中小型项目的研究和建设。

基于以上考量,P5针对三大科学主题及其六个驱动方向提出了未来10年美国高能物理领域发展的具体规划建议。首先,独立于任何预算方案的最高优先事项是完成有关大型项目建设、支持正在进行的实验和研究,从而实现科学价值的最大化。这些项目包括:1) 参与欧洲核子中心高亮度大型强子对撞机(HL-LHC)项目的ATLAS和CMS探测器研发和升级,目标是理解希格斯粒子的性质、寻找新粒子存在的直接证据,以及追寻新现象并最终确定暗物质本质;2) 费米实验室以测量中微子质量顺序为目标的DUNE实验;3) 维拉·鲁宾天文台的时空遗迹巡天(Legacy Survey of Space and Time, LSST)望远镜,将在前所未有的深度、广度和精度上研究可见宇宙,并利用其观测结果研究暗能量和宇宙的

动力学演化。P5 报告建议对一些中型项目给予持续性支持,包括 NOvA、T2K、XENON-nT、Belle II、LHCb 等。

P5 报告的第二个建议是,构建一系列重要项目,协同研究宇宙中几乎所有的基本组成及其相互作用,以及这些相互作用如何决定宇宙过去和未来。对此,报告特别强调应规划和启动五个项目,按照优先级,它们先后为:1) 第四阶段宇宙微波背景辐射实验(CMB-S4),该地面实验计划利用位于智利和南极站的望远镜,进一步提高宇宙微波背景辐射的测量精度,特别是 B-模式的极化;2) DUNE 实验的升级;3) 参与美国境外盟友建设运行的希格斯工厂,即欧洲的 FCC-ee 或日本的 ILC,以精确研究希格斯玻色子的性质。美国应积极参与项目的可行性和设计研究,支持力度应与对 LHC 的支持力度相当;4) 与盟友合作,争取在美国本土建设第三代暗物质探测实验;5) 建设第二代 IceCube-Gen2 实验,作为 DUNE 中微子实验的补充。

此外,报告还建议美国:1) 在大中小型项目之间建立更好的平衡,以开辟新的科学机会,最大限度地发挥其效益,加强人力资源发展,促进创造力,并在国际舞台上竞争。2) 支持全面开发该领域 20 年愿景所必需的理论、计算和技术资源。这包括一项积极的研发计划,即缪子对撞机技术的研发,以实现中心对撞能量达到 10 TeV 量级(约为希格斯工厂的 100 倍)的对撞机。3) 投资旨在发展人力资源、扩大参与度和提升学术道德的举措。4) 在下一个 10 年的后期,召集一个由粒子物理学领域广泛参与的专家组,讨论美国有关希格斯工厂的重大决策或可能的重大调整,同时审查费米实验室加速器综合体计划。

2023 年美国在粒子物理方向的投入大约为 12 亿美元。P5 报告预测,到 2035 年美国年经费将增加到 20 亿美元左右^[1]。上述任务可以在此边界条件下完成。P5 报告展示了美国引领国际科技前沿的目标和决心,并清晰地保证美国利益的最大化和维持美国在科学上的国际引领地位作为规划制

定的核心考虑。这对我们制定既符合自身发展特点,又要抢占科技制高点的战略规划和目标定位是一个重要参考,也是一个严峻的挑战。

三、我国粒子物理发展的现状、目标和规划

1. 我国粒子物理在世界上的“一席之地”

我国基于加速器的粒子物理研究起步于 20 世纪 80 年代初,小平同志亲自拍板决定建设北京正负电子对撞机、北京谱仪及北京同步辐射装置(BEPC),总投资 2.4 亿元人民币。2009 年,BEPC 完成了一次重大设备改造,总投资 6.4 亿元,技术指标继续保持国际领先。这台先后共投资 8.8 亿元人民币的设备将运行至 2030 年,科学寿命超过 40 年,迄今已获得国家最高科学技术奖 1 项、国家科学技术进步特等奖 1 项,以及国家自然科学基金二等奖 5 项,在国际顶级期刊发表了 600 余篇论文。在轻强子物理、粲物理、XYZ 粒子等方面的研究领先国际。

我国在粒子宇宙学领域的研究起步更早一些,自 20 世纪 50 年代开始,中国科学家根据当时的环境条件、能力和学科发展目标任务,开展了高海拔宇宙线研究。2021 年,大型高海拔宇宙线观测站(LHAASO)投入运行,成为国际领先的旗舰装置,取得一批重大成果,如发现银河系拍电子伏加速器,捕捉到迄今为止能量最高的伽马暴等,在宇宙线起源和加速机制、伽马天文等方面引领国际。

进入新世纪以来,中国的粒子物理研究开始覆盖更多的方向。经过 8 年的努力,大亚湾中微子实验于 2011 年投入运行,3 个月后,就发现了一种新的中微子振荡模式,精确测得其振幅 $\sin^2 2\theta_{13}$, 获颁许多国内外大奖。在此基础上,大亚湾团队提出了江门中微子实验方案,以研究中微子质量顺序等中微子振荡参数,并通过太阳、地球、超新星中微子研究天体物理。在四川锦屏的地下实验室,PandaX 和 CEDX 合作组均完成了相关实验,在暗物质寻找方面取得了一批国际领先的成果。

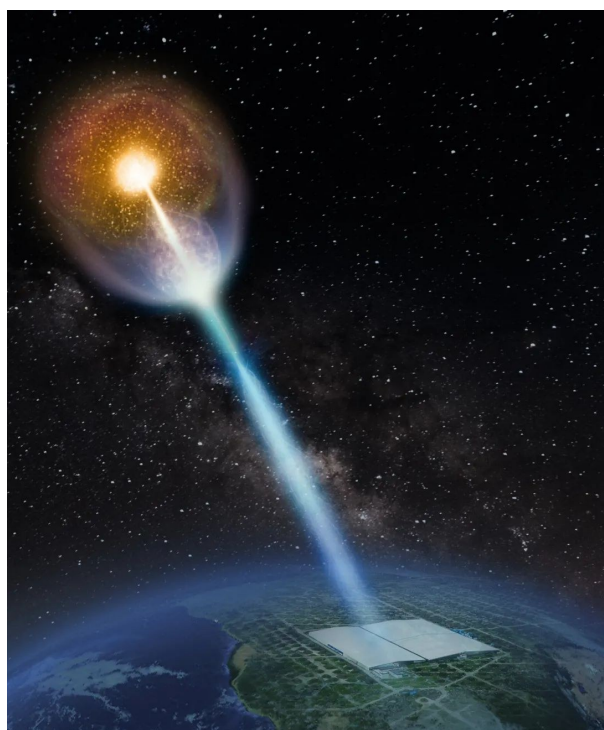


图2 拉索“发现史上最亮伽马暴的极窄喷流和十万亿电子伏特光子”入选2023年度“中国科学十大进展”

这些装置覆盖了粒子物理研究的部分前沿,在国际上有独特地位,科学研究和技术能力已达到国际平均水平。自20世纪70年代末,中国科学家还积极参与了国际上的各种实验,目前仍在进行的主要有位于欧洲核子中心(CERN)大型强子对撞机(LHC)上的ATLAS、CMS、LHCb等实验,日本的Belle II和COMET实验,国际空间站上以美国为主的AMS实验等,覆盖了高能量希格斯物理、强子物

理和味物理、宇宙线物理等,做出了一些关键性的贡献。可以说,通过这些大装置的建设、运行和国际合作,我国的粒子物理研究不仅取得了一系列重要的科学成果,也培养了一大批具有国际视野和国际影响力的优秀人才,实现了邓小平同志要求的“在世界高科技领域占有一席之地”的目标。

然而应该看到,我们现在只是处于“一席之地”,距离“领跑者”还存在差距。由于历史原因,我们对标准模型的建立没有实质性贡献,几十项诺贝尔奖与中国无缘。在加速器和探测器等核心技术方面少有实质性的重大原创性贡献,技术输出很少。中国的科学家在国际上还没有获得重大影响,尚未通过竞争获得国际大型实验与项目的主要领导位置,有国际影响力的学界领袖太少,各种国际奖项获得较少。除此而外,我国对基础研究、特别是高能物理研究的经费和人员投入与美国和欧洲相比也具有明显的差距,相关数据及与美国的比较见表1。从表中可以看到,尽管我国2020年的GDP与美国已经比较接近,研发经费(R&D)投入在GDP中的占比尚可,但R&D中基础研究的占比太低,基础研究的总经费只有美国的1/5左右,其中用于大科学装置和高能物理的经费更少,仅有美国的1/8左右。欧洲的经济总规模与美国基本相当,对高能物理的投入也基本相当。随着我国的经济发展及国家对基础科学研究的重视,未来对高能物理的投入会相应增加,表1对2050年我国的经费投入

表1 我国基础研究及粒子物理研究的经费投入现状及未来预期与美国的比较。据预测,美中两国2035年的GDP均较2020年增长一倍左右(注1: P5预测2035年美国投入粒子物理研究与建设的经费约为20亿美元,按照目前1美元兑7.1元人民币汇率,约为142亿元人民币,与按照GDP增长一倍的预测约168亿元人民币相当。
注2: 美国2035年GDP较2020年增长一倍的估算与德国Statista机构的测算一致^[2])

	美国2020	中国2020	美国2035	中国2035	中国2050
GDP(万亿元人民币)	140	100	280	200	~400
R&D在GDP中占比(%)	3.0	2.4	3.0	2.4	2.4
基础研究经费R&D占比(%)	15	6	15	10	15
基础研究总经费(亿元人民币)	6300	1440	12600	4800	14400
大科学装置相关经费占基础研究总经费(%)	10	5	10	8	10
大科学装置相关经费(亿元人民币)	630	72	1260	384	1440
粒子物理研究与建设经费(亿元人民币)	~84	~10	~168	~50	~150

情况也给出了一个偏保守的预测。显然,中美之间的差距会缩小,投入规模将逐步接近,水平和成果也应该基本相当。表2列出了我国粒子物理领域的人员规模与美国、日本等发达国家的比较。可以看出我国的科研队伍人数仅是美国的1/5左右,甚至比日本还少。显然我国目前在基础研究领域的投入和人员队伍规模与我国经济大国的地位不相称,不足以支撑成为世界科技强国的战略定位和目标。

表2 目前我国粒子物理领域科研人员数量与美国、日本的比较,数据来源于国际高能物理数据库INSPIRE统计

中国(人数)	美国(人数)	日本(人数)
2751	15076	3040

2. 成为“科技强国”的目标和标志

2013年7月,习近平总书记在调研中国科学院和高能物理研究所时发表重要讲话,对我国基础研究的发展提出了更高的战略定位:“希望你们积极抢占科技竞争和未来发展制高点,突破关键核心技术,在重要科技领域成为领跑者”。到2035年,我国基础研究特别是粒子物理研究的经费投入有望达到美欧的~1/3,考虑到实际购买力,可以说是基本相当。面对未来,如何合理有效利用这些经费和资源,如何采取更大胆有效的步骤,在整体上赶超国际先进水平,实现“国际领跑”是我们面临的核心问题,也是我们必须完成的任务。通过对标发达国家,我们认为在粒子物理领域的“国际领跑者”应该满足以下重要的标志性指标:

(1) 有国际旗舰型的大型装置(如LHC、LIGO等)和大型国家实验室(如CERN、Fermi Lab、BNL等),兼顾有独特性能和重要意义的中小型装置;

(2) 有国际影响的重大科学成果(类似于希格斯、中微子振荡、引力波等重大发现);

(3) 有一批大科学家(类似于诺贝尔奖获得者、领域权威,以及大型实验国际合作组如ATLAS、CMS、LHCb等的负责人);

(4) 有一批重大原始创新技术和方法,并得到广泛应用,有大批同行愿意来学习、进修,并使用相

应的实验室、设备、装置等;

(5) 有大家都知道的新理论、新思想;

如何实现这些标志性指标是我国粒子物理学发展规划理应思考和面对的核心问题。可以预见,到2035年,我国粒子物理研究的经费投入和人员队伍规模与美欧基本相当,自然也应该有基本相当的装置、成果、人才、技术和理论。特别是粒子物理的旗舰型大装置,一般需要5~10年左右的准备时间和5~10年左右的建设时间,如果我们现在不准备,2035年的目标自然无法实现。

3. 我国的粒子物理规划

为实现“国际领跑”,占领世界科技制高点,中国科学院于2022年组织了面向“十五五”和2035年国家大科学装置发展规划研究,粒子物理是其中的重点之一。该研究基于过去多年的研讨成果,吸收欧洲2020粒子物理战略规划及美国Snowmass战略规划讨论的经验与结论,分析了国际粒子物理发展的现状及未来发展趋势,包括关键科学问题及研究方法手段,回顾了国内粒子物理及相关大科学装置的现状,充分考虑国际发展态势、我们的研究基础及可能的竞争优势,分析了有关资源的边界条件,针对前述的战略目标和关键重大的科学问题,提出未来大科学装置发展的思路如下^[1]:

(1) 通过建设国际领先的旗舰型实验室和实验装置、获得历史性的重大发现、推出一批国际著名科学家,实现我国在全球粒子物理领域的国际引领。

(2) 通过广泛征集建议项目,并采取科学有效的方式组织国内国际专家进行评估遴选,确定符合发展目标和我国国情的项目。

(3) 及时布局“十五五”,建设旗舰型大装置的同时兼顾多个性能独特、意义重要的中小型装置,吸引国际科学家参与研究,形成以我为主的国际合作。

(4) 通过加速器、探测器等关键技术研发,支撑国家在核科学与核技术应用领域的重大需求,具备拓展新领域、研发新技术、引领新发展方向、带动新产业的能力。使我国在粒子物理整体水平可以和

美国和欧洲并列、并在一些优势方向实现引领。

(5) 到2035和2050年,这些大科学装置的建成和稳定运行将陆续产出重大成果,与此同时,我们将继续更加长远的布局,以保持我国在粒子物理的持续领先优势,夯实大装置为国民经济、国防建设和人民健康所提供的重要支撑作用。

具体遴选规则、项目介绍、排序结果等见参考文献[3]。以下的讨论也基于该文献。

四、美国P5规划与我国粒子物理大科学装置发展规划的比较

下面我们就P5报告所列的关键领域与科学驱动方向,逐项比较中美两国粒子物理研究的现状与未来规划。

• 解密量子领域——阐明中微子之谜,揭开希格斯玻色子的秘密

1) 中微子领域

【P5报告】

P5报告建议美国未来5~10年的高能物理投资主要集中于正在建设的大型中微子实验—DUNE,在2030年左右完成前两个探测器模块(灵敏靶质量共为2万吨液氩)的研制并实现加速器功率升级,其测定中微子质量顺序的灵敏度可达56以上。2030年之后考虑进一步提高加速器功率,并再建造两个液氩探测器模块。

P5报告还建议继续支持中等规模的美国NOvA实验,支持与日本合作的T2K实验,以测量中微子振荡参数,特别是中微子质量顺序。这两个实验测定中微子质量顺序的灵敏度分别在26左右,目前也都在26的统计显著水平上看到了质量顺序为正的迹象。但其联合拟合并没有超过26的统计显著性,显示出统计涨落的偏差还比较大。P5报告也建议继续支持一些小型的近点中微子实验,以研究不活跃中微子,测量中微子与物质的相互作用截面、中微子能谱,研究中微子相干散射等。

另一方面,2022年发布的美国核物理发展规划提议发展大型中微子双 β 衰变实验,包括欧美合作

的LEGEND、XLZD和美国为主nEXO实验等。但显然美国无力支持三个实验,目前具体的支持计划和方案还没有确定。

【我国的布局】

与此相对应,我国的江门中微子实验(JUNO)正在建设,其测量中微子质量顺序的灵敏度可达46,取数时间比DUNE早4~5年,在中微子质量顺序方面有望最早给出结果。同时,正在建设的台中微子实验(JUNO-TAO)是一个小型近点反应堆实验,可以研究不活跃中微子和中微子能谱等。该实验室距反应堆只有40米,且空间较大,还可以容纳其他实验,比如寻找中微子磁矩、研究反应堆中微子的相干散射等。JUNO实验在2030年左右可以升级改造为一个无中微子双 β 衰变实验,灵敏度有望达到世界最好。计划中的PandaX-xT和CDEX-1T分别与XLZD和LEGEND竞争,有望在时间进度上取得先机,在“十五五”至“十六五”期间启动,将在暗物质寻找、无中微子双 β 衰变实验方面实现国际领先。

【比较结论】我国的中微子研究在各方面均有布局,到2030年左右,有望在各方面超过美国,实现国际领先。

2) 希格斯玻色子

【P5报告】

P5报告将参加大型强子对撞机(LHC)及其升级—高亮度LHC(HL-LHC)列为美国最高优先级的资助项目之一;P5同时建议如果盟友的未来希格斯工厂——包括欧洲的未来环形对撞机(FCC-ee)或日本国际直线对撞机(ILC)获批,美国将积极参与设计与建设。P5报告同时还提出开展中心对撞能量达到10 TeV的未来对撞机的研发和技术验证,这可能是缪子对撞机、未来强子-强子环形对撞机(FCC-hh)等。这些设施将使未来的高能量对撞机前进一大步,增加重大发现的潜力,使美国保持其国际领先地位。

【我国的布局】

我国科学家全面参与了LHC实验及其升级,在



图3 正在建设中的JUNO

希格斯物理方面获得了丰富的经验和成果,也培养了人才队伍。基于三十多年北京正负电子对撞机的经验,我国科学家于2012年提出建设环形正负电子对撞机(CEPC)作为未来的希格斯工厂,包括一个100公里周长的地下环形隧道、正负电子对撞机、两个大型探测器及与之匹配的地下实验大厅。以此旗舰型装置为核心,可以建设一个类似CERN的国际科学研究中心。

CEPC的倡导与启动早于欧洲的FCC-ee,关键技术指标(亮度)远远领先于日本的ILC。自2013年开展设计与预研以来,已完成了“概念设计报告”和

“技术设计报告”,目前已进入工程设计阶段。在关键技术预研方面也取得重大进展,完成了大多数设备的样机研制,填补了多项国内空白,多数样机性能达到国际先进水平,部分关键技术指标引领国际,如高效率速调管、超导高频腔、基于等离子体加速技术的注入器、与粒子流算法匹配的晶体电磁量能器和闪烁玻璃强子量能器等。

面对更遥远的未来,我们没有采用美国的缪子对撞机路线,而是希望充分利用CEPC的100公里环形隧道,规划未来的超级质子对撞机(SPPC),与欧洲的FCC-hh竞争,其科学能力与10 TeV的缪子

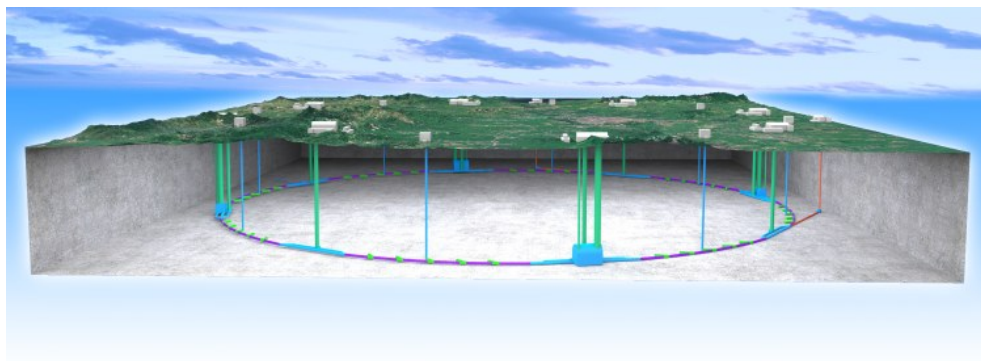


图4 CEPC概念设计图

对撞机相当。为此高能所开展了基于铁基高温超导材料的高场磁体研制以提高性能,并大幅度降低SPPC的造价。同时积极开展基于粒子驱动的等离子体加速器的研制,为未来超高能($\sim 1-10$ TeV)直线轻子加速器奠定基础。

【比较结论】如果能在“十五五”期间开工建设,我国的CEPC将领先FCC-ee与ILC,在希格斯领域领先国际。正在开展预研的铁基高场磁体与等离子体加速器也可以在更远的未来占领相关科技的制高点与先机,领先FCC-hh。

• 照亮隐藏的宇宙——确定暗物质的本质,理解宇宙演化的动因

1) 确定暗物质本质

【P5 报告】

P5在暗物质研究方面的布局涵盖了所有可能的暗物质候选者。美国正在运行的暗物质装置包括可用于直接探测的第二代实验装置LZ、ADMX-G2、DarkSide-20k、XENONnT、SuperCDMS,以及基于IceCube、LHC等的大型设施。新倡议的暗物质实验DMNI支持开展寻找轴子和类轴子的研究。计划中的第二代IceCube-G2将成为探测宇宙中微子和重暗物质的最佳设施。升级后的HL-LHC在探测希格斯粒子与暗物质相互作用方面独具优势,可以检验包含暗物质的各种理论和弱标度超对称模

型。这些设施将提升暗物质探测的灵敏度至少一个数量级。P5也提出了第三代实验装置对弱耦合暗物质(WIMP)探测灵敏度的要求,并建议资助一个基于本土的实验,使美国保持国际领先地位,同时资助一个与之互补的项目以扩大发现潜力。切伦科夫望远镜阵列(CTA)和南天 γ 射线天文台(SWGO)将提高暗物质间接探测的灵敏度,与IceCube-G2形成多信使观测网。除此而外,来自天体物理和宇宙学方面的观测(CMB-S4和鲁宾天文台)将为轻暗物质寻找提供重要的互补信息。P5报告同时也指出在未来希格斯工厂的建设以及10 TeV的未来对撞机的研发和技术验证中应该考虑其对暗物质粒子的探测能力。

【我国的布局】

在暗物质的直接探测方面,我国的锦屏地下实验室(CJPL)位于锦屏山隧道中部埋深2400米处,是世界上宇宙线本地最低的深地实验室。CDEX和PandaX两个暗物质实验已取得多项国际领先成果。其未来升级CDEX-1T和PandaX-xT与P5报告中的第三代实验相当,在完成技术预研和本底研究后,率先开工建设可以取得竞争优势。

在间接探测方面,已经建成的高海拔宇宙线观测站(LHAASO)的暗物质探测灵敏度远超正在建设中的CTA,与规划中的SWGO基本一致。与

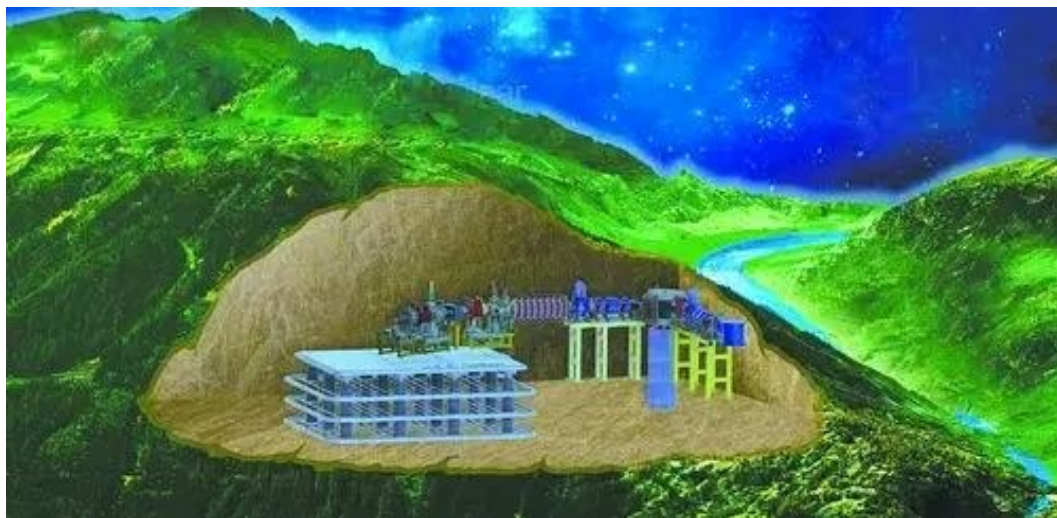


图5 锦屏地下实验室模型图,源自原子能科学研究院

IceCube-G2相比,规划中的中国HUNT或海玲计划(Trident)也有不俗的表现。另一方面,“悟空”卫星已获得很好的结果,即将开建的HERD实验将常驻中国空间站上,粒子接受度和能量范围超过AMS,具有很好的暗物质探测潜力。

在轴子、类轴子和暗光子等方面,我们还没有本土实验。可以通过国际合作实现全面覆盖,也可以布置一些中小型的本土实验。

【比较结论】我国在暗物质实验寻找方面有很好的基础和布局。如能实现率先建设第三代暗物质探测实验及其他间接探测设施,可以实现国际领先。

2) 理解宇宙演化的动因

【P5报告】

P5报告建议的最高优先级项目之一是正在进行的时空遗迹巡天(LSST)望远镜,通过多种测量对宇宙加速膨胀给出最精确的描述,研究宇宙学标准模型,同时与DESI-II升级和未来Spec-S5项目结合,在中微子质量总和测量、暗物质寻找等重大科学问题上获得突破。

未来的规划主要集中在宇宙微波背景辐射(CMB)的观测,包括南极天文台的BICEP-array和智利的西蒙天文台。CMB-S4望远镜将在南极和智利台站实现对原初引力波的最灵敏观测,验证宇宙暴涨过程。P5报告也指出CMB-S4与地面观测项目以及天基项目LiteBIRD协作的重要性。

P5报告还建议开展Line intensity mapping(LIM)技术的验证性研究,同时强调应该加强对下一代引力波探测项目的资助,开展对多频段引力波的理论研究,为未来20年长期发展打下基础,保持美国在该领域的国际领先。

【我国的布局】

我国并无LSST类型的望远镜,在暗能量和宇宙膨胀等方面的实验研究仍依赖国际合作。

阿里原初引力波探测实验(AliCPT)是北半球首个高海拔CMB实验,也是我国CMB实验的起点。目前位于海拔5250米的观测台址及望远镜已建成,首个探测器模块预计2024年投入运行。3年内

将安装10个模块,与正在建设的BICEP-array相当。未来将争取建设与CMB-S4相当或更先进的望远镜,并与南半球的CMB-S4开展协作与联合拟合,争取发现原初引力波,验证暴涨理论。

除了P5报告提到的设施以外,我国500米口径球面射电望远镜(FAST)的灵敏度卓越,对纳赫兹引力波和脉冲星等有强大的发现能力,通过测量中性氢在宇宙中的分布,研究宇宙中的大尺度结构的形成和演化。高海拔宇宙线观测站(LHAASO)是国际上最灵敏的超高能伽马射线探测装置,将为理解高能宇宙线起源、加速机制和传播效应提供关键数据和线索。

【比较结论】我国在射电天文、高能伽马天文和宇宙线起源与加速机制等方面国际领先,CMB方面正在奋起直追,在LSST、LIM、引力波等方面,我们与国际水平还有较大差距。

● 探索物理学的新范式——寻找新粒子的直接证据,追寻新现象的量子印记

1) 寻找新粒子的直接证据

【P5报告】

P5报告明确将继续利用LHC和HL-LHC上的ATLAS和CMS实验寻找超出标准模型的新粒子,也将利用LHCb寻找希格斯粒子衰变到长寿命粒子。P5强调在未来希格斯工厂寻找超出标准模型新粒子的优势,即可以通过希格斯粒子衰变直接寻找新粒子,也可以通过Z玻色子衰变寻找其存在的证据,这些研究也是未来希格斯工厂的主要物理目标之一。在未来20年的长期规划内,P5还提出了对撞能量达到10 TeV的未来对撞机计划,如缪子对撞机、未来强子-强子环形对撞机(FCC-hh)等,以大大增加发现新物理的潜力。

【我国的布局】

我国正在运行的北京正负电子对撞机不能探测直接产生的、超出标准模型的新粒子,但通过参与LHC上的国际合作实验,在ATLAS、CMS、LHCb和ALICE上都做出了重要贡献。在未来希格斯工厂的竞争,我国的CEPC在设计、预研和时间进度

上都处于领先,有望率先获得超出标准模型新粒子的直接证据。正在开展的SPPC和等离子体尾场加速器的设计与预研将使我们在更长远的未来获得先机,占领制高点。

【比较结论】CEPC将使我国在新粒子直接寻找方面领先国际,也为未来更高能量的SPPC奠定基础。

2) 追寻新粒子的量子印记

【P5报告】

P5报告建议支持新物理的间接探测,包括基于费米实验室的Mu2e带电轻子味破坏实验,以及基于日本KEK的Belle II和基于CERN的LHCb实验。HL-LHC实验和未来对撞机实验也将提供间接寻找新物理迹象的机遇。这是美国投入较少但是预期有重要成果产出的国际合作项目。另一方面,希格斯工厂对间接探测新物理的量子印记有天然的优势,也是其建设的主要物理动机之一。P5报告建议利用费米实验室加速器综合平台提供的强流质子束扩展对新物理量子印记的寻找,并研发先进的缪子加速器设施。这些未来大装置可以为新粒子寻找提供直接和间接的实验证据。

【我国的布局】

我国参加了日本的COMET实验,类似于Mu2e,但目前没有类似费米实验室加速器综合平台提供的基于加速器的新物理寻找实验。未来可以探索基于强流质子束和散裂中子源设施开展寻找暗光子和超出标准模型的新物理实验,或者布局一些中小型实验寻找新粒子的量子印记。

我国BEPCII上的BESIII从多个方面开展了对新物理的寻找,包括:寻找标准模型中稀有或禁戒过程以及奇特现象;通过测量粲强子纯轻和半轻衰变,超子的极化参数等,寻找偏离标准模型预言的实验证据我国也参加了Belle II和LHCb实验。针对当前BESIII的运行状况以及在陶粲能区的新科学问题和机遇,我国也提出了建设超级陶粲装置(STCF)的构想。但寻找新物理的最佳平台还是未

来的希格斯工厂,所幸的是我国在CEPC上的领先优势将为我们赢得先机。

【比较结论】追寻新粒子量子印记的最佳平台是未来的希格斯工厂,CEPC将为我们赢得先机。

五、小结

从美国的P5报告并与中国的规划相比较,一方面我们看到美国基础研究领先国际的雄心、规划的前瞻性与引领性,以及长期积累的优势,另一方面也看到了我们迎头赶上的势头。在P5聚焦的三大科学主题和六个驱动方向,我们虽然没有100%覆盖,但已有相当基础,有些设施已经达到国际领先,有些还在规划中,有些则依赖于国际合作。事实上美国也非常依赖国际合作,没有能力全部自己独立完成。可以预见,我国在这些重大科学问题的研究中将与美国、日本以及欧洲等发达国家或地区形成竞争,同时也会开展全面合作。能否抓住时机、聚焦科学问题、形成合力,最终抢占制高点,是我们面临的关键问题。从上述规划的比较中可以清楚地看出,如果我国能率先开建CEPC,则可以领先FCC-ee,在2大科学主题的3个驱动方向上国际领先,再叠加中微子等其他方面的优势,可以实现粒子物理研究的“国际领跑”。事实上CEPC也是我国粒子物理发展规划中的第一优先^[1]。制定有国际竞争力的规划,设法在经费上保证规划的实施,布局大型旗舰型项目以占领制高点,是我们实现国际领先的关键和未来努力的方向。

参考文献

- [1] Particle Physics Project Prioritization Panel, High Energy Physics Advisory Panel, Exploring the quantum universe - Pathways to innovation and discovery in particle physics, December 7, 2023
- [2] <https://www.statista.com/statistics/1070632/gross-domestic-product-gdp-china-us/>
- [3] 中国科学院“重大科技基础设施战略研究”高能物理领域报告, 2024