

从 BEPC 到 CEPC: 中国的高能物理将如何追寻其下一个宏伟目标?

江亚欧*, 郑文莉

中国科学院高能物理研究所, 北京 100049

* 联系人: E-mail: jiangyo@ihep.ac.cn



江亚欧 2008 年本科毕业于北京外国语大学英语学院国际新闻与传播专业, 同年入职中国科学院高能物理研究所文献信息部; 2016 年获中国科学院大学工程科学学院工程硕士学位。从事科技文献信息支撑和研究工作。曾获得中国科学院高能物理研究所“谢家麟青年人才创新基金”资助。

1 背景和动机

2019 年 5 月召开的格兰纳达 (Granada) 论坛是针对 “The European Strategy for Particle Physics” (ESPP) 所组织的研讨会, 会上就国际高能物理界在希格斯粒子发现后如何推动高能物理基础研究达成了一些重要共识, 特别是会议聚焦在将希格斯工厂作为未来对撞机的选项, 并明确希格斯粒子性质的研究将是揭示隐藏在目前粒子物理标准模型后面更深层次基本规律的关键。科学家们提出的 10 种可能的基于加速器的方案中, 国际直线对撞机 (International Linear Collider, ILC)、紧凑直线对撞机 (Compact Linear Collider, CLIC)、未来环形正负电子对撞机 (Future Circular Collider e^+e^- , FCC-ee) 和我国环形正负电子对撞机 (Circular Electron-Positron Collider, CEPC) 备受关注。这些加速器大致可以按照“直线”和“环形”加速方式分为两种不同的类型, 前者易于提升到更高能区, 但是在亮度和对撞站点数量上面临挑战; 相比之下, “环形”对撞机则在亮度和对撞站点数量方面优势明显。

欧洲核子研究组织 (European Organization for Nuclear Research, 成立于 1954 年 9 月 29 日, 通常被简称为 CERN) 理论部主任 Gian Giudice 教授强调未来对撞机需要回答四个重要的科学问题: (1) 我们能否在某种程度上回答希格斯粒子是基本粒子还是复合粒子? (2) 在电弱能标附近或之上是否存在新的基本相互作用或新粒子? (3) 是否仍然有热力学遗迹的相互作用微弱的重质量粒子 (Weakly Interacting Massive Particles, WIMP) 没有被探测到, 并且这些粒子正好处于未来对撞机的探测范围? (4) 现有的和未来的加速器在什么范围内能有效探测相互作用微弱的物理过程? (<https://cerncourier.com/a/granada-symposium-thinks-big/>)。这些关键问题反映出

科学家们对于宇宙中最为基本的物理规律的极大的好奇心，同时他们也在寻求如何通过科学手段获得相关的答案，实现人类认知的重大突破。从某种意义上来看，格兰纳达会议的重要性不仅在于研讨高能物理未来发展方向，同时也起到凝聚国际高能物理领域共识的作用，对未来国际合作交流、公众科普教育和宣传都有深远的影响。

2020 年 CERN 理事会发布的 ESPP 报告明确将希格斯工厂作为大型强子对撞机 (Large Hadron Collider, LHC) 之后 CERN 首选拟建设的大科学装置。其中, FCC-ee 不仅具有开展希格斯粒子性质研究的重大科学意义, 也将在技术创新方面带来外溢价值, 因此成为 CERN 建设希格斯工厂的首要选项。近年来随着各项项目的推进发展, 对全球科学家而言, FCC-ee 和 CEPC 越来越成为更加现实的选项。根据 CERN 理事会发布的报告, FCC-ee 预研团队已于 2025 年 3 月 31 日向 CERN 理事会提交最终版本的 FCC-ee 可行性研究报告 (<https://home.cern/news/news/accelerators/cern-releases-report-feasibility-possible-future-circular-collider>), CERN 理事会将根据该可行性研究报告在 2026 年发布新一版的 ESPP 报告, 并在 2028 年之前对 CERN 是否建设 FCC-ee 做出决定。

事实上, 2023年12月8日美国“粒子物理优先项目委员会”(Particle Physics Project Prioritization Panel, 简称P5)发布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》(简称“P5报告”)也将希格斯粒子性质的研究列为未来美国粒子物理聚焦的三大主题之一的主要内容, 而参与CERN的高亮度大型强子对撞机 (High-Luminosity Large Hadron Collider, HL-LHC) 是其优先资助的项目。

CEPC 是我国高能物理学界提出的希格斯工厂选项。尽管我国高能物理实验研究的历史相对较短, 然而我国的高能物理和相关基础研究在近几十年内得到了快速发展, 并取得了许多具有重大国际影响力的成果。我国目前仍在运行的高能物理实验设施“北京正负电子对撞机 (Beijing Electron Positron Collider, BEPC)”于 1988 年建成, 三十多年来发表了许多重要成果, 在国际主流期刊发表论文超过 822 篇 (BESIII 正式发文 663 篇), 是粲能区国际上最重要的实验装置。CEPC 作为未来高能量前沿物理可能的选项所带来的影响、甚至可以说冲击可能是巨大的。值得注意的是, CEPC 自从 2012 年被提出来, 我国物理学家一直在快速有效地进行预研, 经过近 12 年的持续推进, CEPC 已经发表了《CEPC 概念设计报告》(2018 年) 和《CEPC 技术设计报告》(2023 年)^[1], 目前已经进入到工程设计阶段; 关于未来物理研究的白皮书正在研究进展中, 其中已于 2024 年 12 月提交至 *Journal of High Energy Physics* (简称 JHEP) 的文章有“CEPC 的味物理学: 一般视角”^[2]。与历史上每一个大型设施建设提出时面对的问题相似, 在 CEPC 预研推进的过程中也参杂了许多不同的意见和看法, 特别是“中国是否应该投资建设 CEPC?”成为一个不可回避的现实问题。事实上, 中国是否应该投资 CEPC 这样的巨大设施的考虑与很多问题密切关联, 在所有大家关注和颇具争议的问题中, “我国高能物理领域的科学家在过去三十余年科研积累的基础上将如何追寻其未来发展的宏伟蓝图”这一问题似乎可以从多个角度进行解读, 例如: 我国的国力是否能负担一个数百亿的项目? 我国的科学家是否有能力建设 CEPC 这样的超大型实验设施? 甚至 CEPC 这样的希格斯工厂是否具有其宣称的重要科学价值? 等等。

关于 CEPC 或者希格斯工厂科学价值的问题在 ESPP 报告和 P5 报告中已经得到了佐证, 这里不再赘述。同时, CEPC 的研制和建设将产生相应的技术外溢成果, 并带来深远的影响。正如 CERN 现任总干事 Fabiola Gianotti 所说, “像 CERN 这样的地方贡献了不仅丰富人类知识的成果, 还为未来技术提供了源源不断的创意” (原文是 “Places like CERN contribute to the kind of knowledge that not only enriches humanity, but also provides the wellspring of ideas that become the technologies of the future. — Fabiola Gianotti, Director-General of CERN”, 来源网址: <https://knowledge-transfer.web.cern.ch/about-us>)。关于我国国力是否能负担 CEPC 这样超大设施建设的问题理应由国家综合布局考虑。笔者注意到 CEPC 建设周期 10 年, 预算共计约 364 亿元人民币^[3], 这对于我国综合国力似乎也并非高不可及。剩下的关键问题就只能是 “我国的科学家是否有能力建设 CEPC 这样的超大型实验设施? ”。这也正是本文拟通过一些客观数据分析来回答的问题。基于 Web of Science、arXiv、INSPIRE-HEP 等国际学术数据库信息, 本文将分析我国高能物理领域的研究现状和人才分布, 并从科研和人才储备的角度为我国布局 CEPC 提供一些有用的参考。

2 科学依据

“北京正负电子对撞机 (BEPC)” 是我国首个大型高能物理实验装置, 国家投入了大量经费和资源来支持其建设和运行。在过去 30 余年 BEPC 的科研历程中, 基于 BEPC 的北京谱仪 (Beijing Spectrometer, BES) 合作组不仅产出了大量的科研成果, 其中不乏具有国际影响力的重要发现, 也成功有效地推动了国际合作, 更重要的是为我国高能物理学科培养了大量科研人才, 把我国粒子物理研究水平提升到了一个前所未有的高度。可以说, BEPC 不仅具有重要的科学价值, 同时也具有不同寻常的历史意义。基于 BEPC 的科学成果产出、国际合作状态、人才培养情况, 以及对于学科发展的辐射效应, 我们有望获得我国高能物理发展状态的准确信息。本节以 BEPC 的建设和运行为线索, 对我国高能物理几个重要的发展阶段进行简单回顾。

2.1 我国基于加速器的实验研究基本情况

2.1.1 历史背景

为了弥补高能物理实验基础设施的空白, 在李政道先生的倡导下, 1977 年 12 月, 李政道与袁家骝、吴健雄一起, 写信给时任中国科学院高能物理研究所所长张文裕, 提出在中国建造正负电子对撞机的建议^[4]。经过多方面的论证, 国家决定建设运行在粲偶素能区的北京正负电子对撞机项目。1974 年, 丁肇中先生和伯顿·里克特 (Burton Richter) 教授分别带领团队发现了 J/ψ 粒子, 并在两年后获得 “诺贝尔物理学奖”, 对 J/ψ 及其伴随的粲强子的研究在当时是高能物理研究的最前沿课题之一。决定建造正负电子对撞机不仅是我国在高能物理领域迈出的关键一步, 也是高瞻远瞩的一个决策, 一方面 BEPC 抓住了重要科学问题, 另一方面该项目也在科研能力和经费投入上做出了平衡。国家为 BEPC 拨出了大量专项经费, 充分体现了对科学发展的重视和支持。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升级为 BEPC-II, 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，科学寿命预期超过40年（https://www.ncsti.gov.cn/kjdt/xwj/202105/t20210524_32862.html）。BEPC 的投入和建设也成为了中国科学发展史上具有里程碑意义的事件。当然，BEPC 的建设注定是充满巨大的挑战的，文献[5]回顾了当时我国建设 BEPC 的一些重大困难。

2.1.2 研究队伍情况

BEPC 建立之初离不开 BEPC 所属单位中国科学院高能物理研究所前身原子能研究所等相关单位在人才方面的长期积累。中华人民共和国成立后，一大批在欧美的学术界已有很高声誉的科学家义无反顾地归来。正是这样一批科学家，在十分艰苦的生活和工作条件下，数十年如一日努力奋斗，逐步创建了国家核科技事业最初的科研团队，并培养了一批优秀的青年物理工作者。这是一个艰苦的学习过程，几乎可以说一切从零开始。对比 BEPC 立项前我国的研究队伍情况，那时科研人员的知识和经验基本上来源于1953年建成的700 keV 静电加速器、1958年建成的2.5 MeV 静电加速器，以及1964年建成的30 MeV 电子直线加速器。虽然是一切从零开始，但是也并非一蹴而就，这些当时相对较为落后的加速器设施的建设事实上为国家高能物理实验基地的建设培养了人才、积累了技术。

2.1.3 经费投入情况

BEPC 建设始于1984年10月7日。1988年10月16日，BEPC 首次实现了正负电子对撞，宣告建成。这4年正是我国改革开放的初期，国家投入2.4亿元建设对撞机，这个经费约占 BEPC 建设期间4年 GDP 4.68 万亿元的0.0051%。CEPC 的建设经费总投资约为364亿元，这笔预算并非一次性投入，预计分为10年投入，年均摊费用为36.4亿元（<https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>）。以2024年第四季度和全年国内生产总值初步核算结果，即2024年全国GDP 134.9万亿元计算，在不考虑经济增量的情况下，每年在 CEPC 上的经费投入约占一年 GDP 的0.0027%。可以看出，现在经费投入的困难远不及当年 BEPC 面临的困难，或者说 CEPC 的经费投入对国家的财政收入而言压力不及当年。

2.1.4 国际合作情况

BEPC 建设初期国内的技术条件还很差，所需尖端器材受国际封锁。谢家麟带领团队以“想吃馒头，先种麦子”的自力更生精神，建立了微波实验室和脉冲调制器实验室，研制了驻波测量线、微波信号发生器、核磁共振磁场测量仪、波导管等多种微波元件和火花球高压触发器、脉冲变压器磁芯绕制机等设备，并建立了加速器装配车间和精密金工车间，设计制造了加速管热膨胀蒸汽包和阑片冷缩装置等，还与北京电子管厂建立了大功率速调管研制工艺的合作关系，为加速器部件进行玻璃阴极套筒的封接等。可以看出，当时几乎没有国际合作。

时至今日，回顾当初建造高能加速器装置 BEPC 的决定，可以说不仅需要极大的勇气和决心，还需要基于国家发展的整体布局 and 科学判断力。2024年8月6日，王贻芳院士接受《科技日报》采访中提到，李政道先生为了推动 BEPC 的立项和建设，“他押上了自己的全部声誉”。1988年10月16日，BEPC 成功实现正负电子对撞产生 J/ψ 事例。1988年10月24日，邓小平同志视察北京正负电子对撞机工程时发表了“中国必须在世界高科技领域占有一席之地”的讲话，并且指出“过去也好，今天也好，将来也好，中国必须发展自己的高科技，在世界高科

技领域占有一席之地。如果六十年代以来中国没有原子弹、氢弹，没有发射卫星，中国就不能叫有重要影响的大国，就没有现在这样的国际地位。这些东西反映一个民族的能力，也是一个民族、一个国家兴旺发达的标志。”^[6]

2.2 北京正负电子对撞机和北京谱仪的运行和升级改造

北京谱仪（BES）作为北京正负电子对撞机（BEPC）的核心实验装置，其发展历程可大致划分为三个主要阶段：BESI、BESII 及 BESIII。这些阶段分别标志着实验设备和技术水平的不断提升，以及基于实验所取得的阶段性重要科学成果。这里对 BES 三个阶段的分隔以论文发表年为界限，这个时间分隔与加速器建成和运行年份略有差别。

在本文中，“BES 合作组”为北京谱仪（Beijing Spectrometer）系列国际合作项目的统称，涵盖装置的三代版本（BESI/BESII/BESIII）。因实验团队、物理目标及探测器技术具有延续性，学界采用统称 BES 指代该系列研究，罗马数字后缀仅区分迭代阶段，特此说明以避免歧义。

（1）BESI 阶段（1989~1998 年）

BESI 阶段是在 1989~1998 年间进行的首个取数运行阶段，其主要目标是探测和研究 τ -轻子和质子-反质子对的产生等现象。该阶段的探测器系统包括一个飞行时间测量器、一个多丝正比室和一个电磁量能器等。在这个阶段，一方面通过这些仪器设备的设计建设，培养了硬件领域的人才。另一方面，这些设备的成功运行为 BESI 在轻夸克物理和 J/ψ 物理研究方面取得许多重要的实验成果创造了必要的条件，并为后续的升级改造和确定新的物理目标奠定了基础。

（2）BESII 阶段（1998~2010 年）

在 BESII 阶段，从 1998 年到 2008 年的十年期间是对 BESI 的升级改造期，目的在于提升探测器性能和测量精度，以应对愈加复杂的实验需求。在此阶段，探测器系统得到了显著改进，包括更高效的飞行时间测量器、更精确的电磁量能器以及更灵敏的径迹探测器等。BESII 阶段在质子-反质子对构成的奇特态、 χ_{cJ} 态以及 J/ψ 物理等领域取得了显著成果，同时也大大推进了相关理论的发展。

（3）BESIII 阶段（2010 年至今）

BES 合作组于 2008 年启动实验装置的全面升级，并进入 BESIII 阶段，BEPC-II 注入器的完善设计显著提升了亮度和探测精度。此阶段引入了先进的探测器系统，包括高分辨率的飞行时间探测器、更高精度的电磁量能器、小单元氦基气体主漂移室和 RPC μ 子探测器等新型探测器装置等。BESIII 在 τ -轻子物理、粲物理、轻强子谱学和新物理现象等方面取得了诸多突破性发现。例如，类粲偶素粒子 $Z_c(3900)$ ^[7]等新粒子的发现极大地丰富了粒子物理研究内容。

通过这三个阶段的不断演进，BEPC 已经成为国际高能物理研究的重要实验基地之一，在粲偶素能区独具优势。下面我们将看到每一次升级不仅提升了实验设备的性能和探测能力，产出了大量具有重要国际影响力的科学成果，为全球科学家提供了大量宝贵的实验数据和研究成果，也培养了一大批活跃在国际高能物理前沿的青年科研人才，极大推动了相关领域的科学探索和理论发展。

3 数据信息来源与统计说明

基于 Web of Science、arXiv、INSPIRE 等数据库等的详细分析，我们确定了一些有用的指标和标准，这些指标和标准能够提供对中国高能物理科研力量的规模和实力的定量评估。特别显著的是，我们可以看到在相对较短的时间内，科研力量是如何增长的，以及在良性的国家基础科学发展布局下，这种力量是如何得以加强的。这些数据可为中国高能物理规划提供一些有用的支撑数据，尤其是能够为回答“中国是否有能力建设超大型科学设施”这一问题提供独特的信息来源。

Web of Science（简称 WoS）(<https://www.webofscience.com/>) 是一个由科睿唯安（Clarivate Analytics）公司运营的学术引文索引数据库，是学术研究、科研评估和项目申请的重要工具。它覆盖了各种学科的众多学术期刊、会议论文、专著等，是全球最为广泛使用的科研资源之一。WoS 以引文索引著称，可以查询到文献的被引用次数，以及引用文献的信息。这对于评估研究影响力、寻找新研究方向、了解领域内的研究动态非常有帮助。作为综合性学术数据库，WoS 收录了经过同行评审的高质量期刊文章，但其在高能物理领域的覆盖范围可能略窄于 INSPIRE-HEP。

arXiv (<https://arxiv.org/>) 是一个由康奈尔大学图书馆主办的开源电子预印本存储库，成立于 1991 年。arXiv 主要用于存储和共享科学论文，它最初主要服务于高能物理领域，但随着时间的推移，它扩展到了其他科学领域，特别是物理学、数学、计算机科学、定量生物学、定量金融和统计学领域。许多 arXiv 上的预印本后来都会在科学期刊上发表，因此常常得到很高的引用率，成为许多领域内一线科研人员发布和获取最新研究成果的首选平台，得到了科研界的广泛认可和信赖。arXiv 作为预印本平台，提供了高能物理领域最新研究成果的快速发布渠道，但其数据未经同行评审，可能存在一定的误差。

INSPIRE-HEP (<https://inspirehep.net/>) 是一个专门用于高能物理（HEP）领域的综合性学术数据库。它由多个国际高能物理机构合作管理，包括 CERN、DESY、Fermilab、SLAC、高能物理研究所（IHEP）和 IN2P3。INSPIRE 能够为用户提供完整和高效的高能物理信息搜索能力和高质量的作者档案，是存储高能物理领域信息的综合型平台。INSPIRE-HEP 针对高能物理领域的文献数据覆盖全面且更新及时，但由于其数据来源于众多数据库，数据格式、字段标准存在不一致，会在一些指标上存在一定误差。

WOS、arXiv 和 INSPIRE 是统计数据的主要来源。本文通过综合利用三个数据库的数据，确保了 STAR、LHCb、Belle-II、BES 四个合作组的发文数量、署名作者数量以及 PRL 文章数量的统计结果具有较高的一致性和可靠性。尽管存在一定的数据误差，但其范围在可接受范围内，不影响对各个合作组整体发文特征的分析 and 呈现。通过综合利用这三个数据库的全面数据，可以从一个文献信息的层面了解中国高能物理研究力量的发展轨迹及其未来潜力，从而获得关于中国环形正负电子对撞机（CEPC）未来的独特视角，尤其是为 CEPC 这一重大科学装置的建设前景提供重要的信息支持。

4 中国高能物理三十年来的快速发展

4.1 BES 合作组科研成果态势

BES 合作组从 1990 年成立, 经历了 BES I、BES II、BES III 三个国际合作阶段, 对应探测器的三次升级改造和加速器的一次升级改造。北京谱仪 (BES) 合作组的实验进程可分为三个阶段: BES I 阶段于 1989 年启动, 数据采集持续至 1995 年, 其研究成果发表周期延伸至 1998 年, 表明实验数据在采集结束后仍经历系统性分析; BES II 阶段自 1995 年运行至 2004 年, 对应研究成果发表于 1998~2010 年, 显示其数据分析周期与后续实验阶段存在部分重叠; 当前运行的 BES III 阶段自 2004 年持续开展数据采集, 研究成果自 2010 年起持续发表。三个阶段的数据获取与成果产出周期呈现递进式衔接 (BES I: 1989~1995 年采集/1989~1998 年发表; BES II: 1995~2004 年采集/1998~2010 年发表; BES III: 2004 年~至今采集/2010~至今发表), 体现了实验装置迭代与长期数据深度挖掘相结合的科研范式, 验证了高能物理实验中硬件升级与离线分析并行的可行性。

从发表论文来看, BES I 和 BES II 基本上共用 BES 作为合作组名称, 也就是说 BES I 和 BES II 阶段合作组发文基本上都是署名 BES Collaboration, 只是在 BES III 阶段明确署名“BES III”。截至 2024 年 12 月 31 日, BES 合作组共计发表科研论文 822 篇, 年均发表论文数约为 23.49 篇。从发文的时间看, 发文数量的提升主要集中在 BES III 阶段, 特别是近年来年均发文量已经超过了 100 篇。

BES 合作组的第一篇科研成果论文“陶轻子质量精确测量”于 1992 年 11 月 23 日发表在 *Physics Review Letters* (后文简称为“PRL”) [8], 该项成果在当时具有重要意义。在 BES 合作组的成果发表前, 由于对陶轻子质量测量存在较大的误差, 科学家们一度怀疑刚建立不久的粒子物理标准模型轻子普适性是否被破坏。BES 合作组对陶轻子质量的精确测量不仅证实轻子普适性在误差范围内很好地成立, 同时也将标准模型的研究大大推进了一步。

事实上, BES 合作组的第一篇科研成果论文, 不仅是一篇具有重要科学价值的论文, 也具有独特的历史价值。该论文署名作者 146 位, 其中国内作者 110 位, 国外作者 36 位。就国际合作规模而言, 这是一个中等甚至偏小的国际合作组, 并且由于设施建造在国内, 合作组成员以国内参与者为主, 这看上去并无特别之处。然而, 如果我们注意到合作单位的署名情况, 我们一定会惊讶于我国彼时高能物理研究力量的薄弱: 在 10 个署名单位中, 国内单位只有“中国科学院高能物理研究所”一家科研单位, 其余 9 所署名单位全部都是国外的科研机构, 而且这 9 家科研机构均来自美国。1979 年 1 月 1 日, 中美两国正式建立大使级外交关系。

1979 年 1 月, 李政道先生促成中美在高能物理领域的正式合作。两国政府签订中美两国高能物理合作执行协议, 成立中美高能物理联合委员会, 中国科学院高能物理研究所与美国能源部五大国家实验室合作开始 [4]。作为对比, 我们选取 BES III 合作组一篇 2023 年被引次数最高的发表在 PRL 上的论文 [9], 可以看到 BES III 已经是 610 余位署名作者的大中型国际合作组, 其中 100 个合作单位分布在 16 个国家和地区, 国内的合作单位达到了 60 个, 包含了 477 位国内署名作者。

这个对比所反映出的变化是不言而喻的。我们将在本节中对不同阶段合作组发文数量、合作单位地区和数量、科研影响力等指标的变化进行分析。这些指标

将进一步反映我国高能物理国际地位的提升。我们也将分析 BES 物理带来的科研辐射效应，特别是在人才培养方面不可替代的作用。

图 1 中统计了 BES 合作组从 1992 年首篇科研产出到 2024 年 12 月 31 日提交到 arXiv 的预印本、会议文章、报告等各类文献共计 1407 篇，其中 861 篇论文正式发表(检索来源：INSPIRE-HEP，最新检索时间 2025-04-24)。图 1 中，我们用不同颜色标出了 BES 合作组三个阶段的时间，考虑到大型实验合作科研产出的特点，在项目建设和运行初期科研产出相对较少，并且改造升级阶段的成果产出大部分是前一阶段分析工作的延续。图 1 展示了截至 2024 年 12 月 31 日 BES 合作组每年的发文情况。整体来看，BESI 和 BESII 阶段论文发表的数量远远低于 BESIII，这充分反映了 BES 初期阶段开展科研工作所面临的困难和逐步积累的过程。

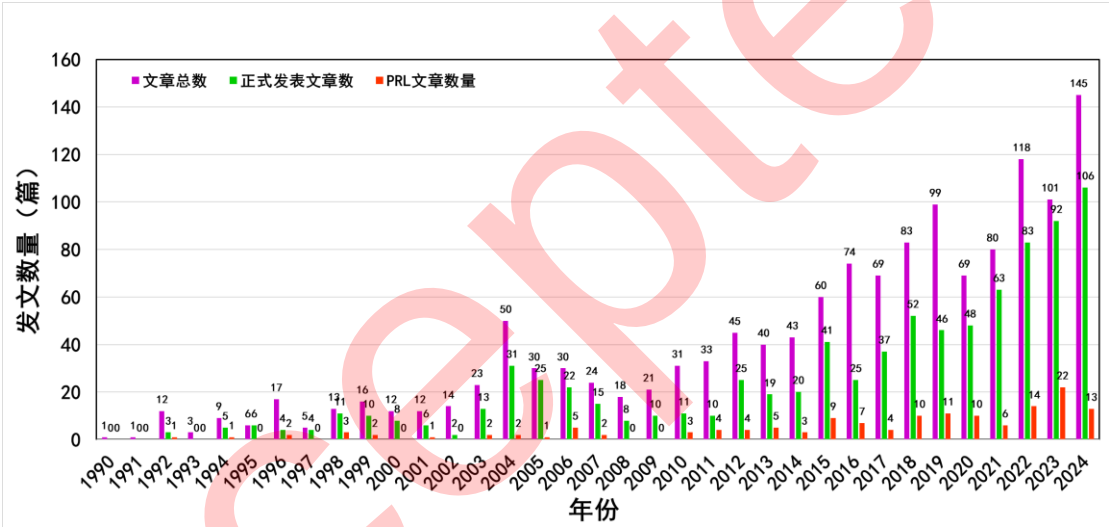


图 1 BES 合作组每年发文数量统计，包括了合作组的三个阶段。数据来源：arXiv, INSPIREHEP

Figure 1 Annual publication statistics of the BES Collaboration across its three phases, data from arXiv and INSPIREHEP

从图 1 展示的 BES 合作组每年发表论文的数量来看，其成果产出具有以下阶段性特点。

(1) BESI（1989~1998 年）和 BESII 阶段（1995~2010 年）

1990~1994 年：这几年发表论文的数量极少，从 0 到 5 篇不等。其中，1990 和 1991 两年没有正式发表任何论文，这是由于这段时期是实验调试、取数和分析的起步阶段。

1995~2004 年：从 1995 年开始，发表论文数量逐步增加。特别是从 2001 年开始，年均发表论文数大多在两位数以上。例如，2003 和 2004 年分别发表了 13 和 31 篇论文。这反映出 BES 合作组在这一时期从研究资源有限、研究团队规模小到团队逐渐壮大、研究成果也变得更为丰富的一个上升趋势。

2004~2010 年：这个阶段大部分的论文实验数据来源于 BESII 实验，合作组

的论文产出也进入了一个相对稳定的发展区,年均发表论文维持在两位数。从图 1 可以看出,BES 合作组的论文产出从 BESII 到 BESIII 的过渡很平滑,随着 BESIII 的取数和分析,2010 年以后论文发表呈现整体上升的趋势。

(2) BESIII 阶段 (2010 年至今)

从 2010 年至今, BESIII 发表论文基本保持逐年增长。例如, 2010 和 2011 年正式发表论文 (如图 1 所示) 保持在 10 篇左右, 并在 2012 年达到 25 篇。2014 和 2015 年分别发表 20 和 41 篇, 表明进入 BESIII 阶段后, BES 合作组的工作效率明显提升, 研究成果丰硕。

2016~2023 年: 这一阶段明显是论文发表数量快速增长的时期。2017~2023 年, 每年的发表数量都在不断攀升, 2022 年更是达到了最高值 83 篇。这段时间为 BESIII 合作组时期, 也是研究工作的高产期, 科研能力达到了一个新的高峰。

图 1 中也列出了各个阶段 BES 合作组在 PRL 发表论文的情况, 可以看到 BESI 和 BESII 合作组在 PRL 发文的数量和比例都偏低, 进入 BESIII 阶段后, 合作组在 PRL 发文的数量和比例都得到了明显稳步的提升。截至 2024 年 12 月 31 日, BESI 正式发表 PRL 论文 2 篇, BESII 正式发表 PRL 论文 23 篇, BESIII 已正式发表 PRL 论文 122 篇。

整体来看, 这些数据揭示了论文发表数量随时间变化的总体趋势和波动特征。BES 合作组发表论文数的年度变化大致经历了初始阶段、成长阶段、快速增长阶段和稳定输出阶段。数据表明, 近几年 BES 合作组的产出非常高, 已经达到了一个大型国际合作组的规模。

4.2 BES 合作组历年高引文章被引数与合作组作者规模

根据 1990~2024 年的数据分析, 我们可以对“每年论文总体被引用数”、“年度最高引论文被引数”和“高引论文作者人数”这三个变量进行详细描述和分析, 相关数据见图 2。

围绕数据可以看出以下重要信息:

(1) 历年论文被引用数的增长趋势, 表明科学影响力的提升。从图 2 可以看出, BESI 和 BESII 阶段的整体引用情况是偏低的, 这也充分体现了彼时我国科研水平和科研力量的客观状况。特别是 BESI 阶段, 仅有个别重要成果获得了较好的引用, 但是随着新的更高精度实验结果的出现, 其被引用的频次也大大减少, 例如 BESI 最重要的“陶轻子质量精确测量”成果^[8]目前年均引用不足 1 次。

进入 BESIII 阶段后, BESIII 成果每年论文总体被引用数大部分都超过 1000 次, 在 2013 和 2015 年则分别超过了 3000 和 2500 次, 这其中不仅包含单篇超过 1000 次引用的论文, 还包含了多篇超过 100 次的高被引论文。

(2) 年度最高引用论文被引用数有特别高引的, 表明产出成果具有国际影响力和重要的学术价值。BESIII 探测器设计和建造的论文^[10], 以及 BESIII 发现含粲四夸克态 $Z_c(3900)$ 的论文^[7]分别是 2009 和 2013 年的最高引论文, 均超过了

1000 次。特别是 2013 年， $Z_c(3900)$ 的论文引用次数为 1172 次，除去自引的引用数也达到了 765 次（检索日期：2025 年 3 月 20 日）。前者是 BESIII 探测器设计和建造的关键文献，表明 BESIII 探测器设计和建造都获得了国际同行的广泛认可；后者是 BESIII 最重要的物理成果产出， $Z_c(3900)$ 的发现被美国物理学会 *Physics* 杂志评选为当年全球最重要的物理进展之首^[11]，其高被引也充分表明 BESIII 实验取得的重要成果在国际上的影响力。

（3）“高引论文作者人数”展示 BES 合作组的发展壮大，特别是国内参与单位数和总人数的增加，表明我国在该领域的科研队伍发展和人才培养取得的成绩。从图 2 可以看出，BESIII 合作组人数稳步增加，到 2024 年已经达到了 666 人。对比 BES 合作组最初的 146 位合作组成员，BESIII 已经达到了一个大型国际合作的规模，这点我们在下一节将进一步分析。

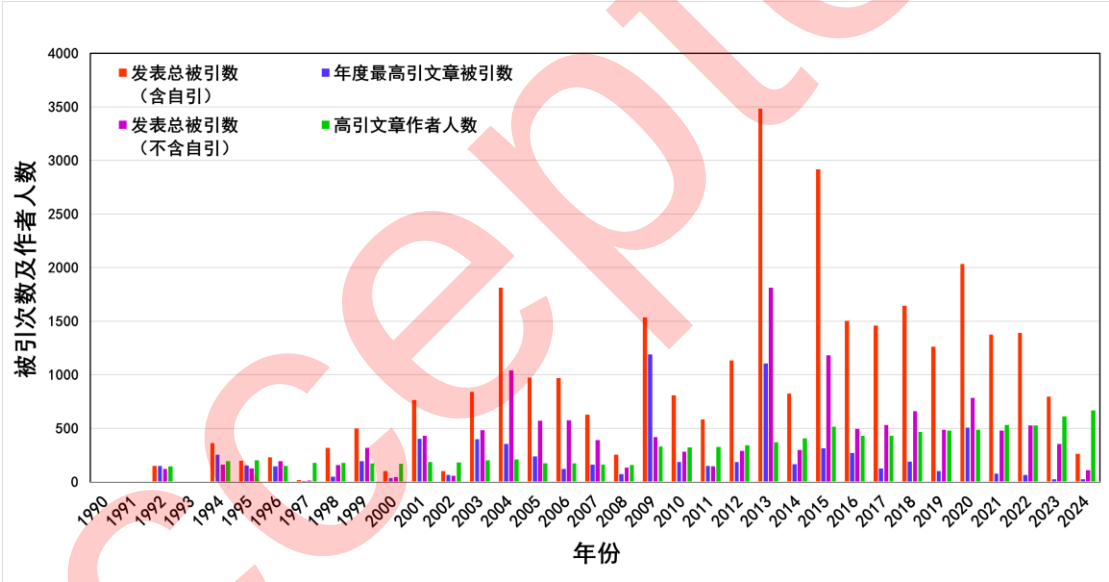


图 2 BES 合作组历年发表论文被引总数、最高引论文被引数和论文作者人数统计。数据来源：INSPIREHEP

Figure 2 Total citations, top-cited paper citations, and author counts for publications by the BES Collaboration, data from INSPIREHEP

4.3 BES 合作组作者单位及国际合作变化

BES 合作组（BESI）作为基于我国设施的第一个国际合作项目，以一种独特的方式开始。合作组一共有 10 个单位，包括来自国内的高能物理研究所（IHEP）和来自美国的 9 个科研机构。BES 首篇正式发表的论文共有 146 位署名作者，他们分别来自以下科研机构：高能物理研究所（Inst. High Energy Phys.），作为发起和主要参与单位，共有 110 位作者参与，占总作者人数的 67.53%；麻省理工大学（MIT, LNS）6 人；SLAC 国家加速器实验室（SLAC）4 人；加州理工学院（Caltech）5 人；波士顿大学（Boston U.）4 人；加州大学尔湾分校（UC, Irvine）5 人；德

州大学达拉斯分校 (Texas U., Dallas) 3 人; SSCL 实验室 (SSCL)、科罗拉多州立大学 (Colorado State U.) 以及华盛顿大学 (Washington U.) 各 1 人; 从国家分布来看, 这篇论文的作者来自中国和美国, 中国占 67.53%, 美国占 32.47%。可以看出, 最早的 BES 合作组无论是研究人员的规模和国际合作单位的数量都是相当小的。更为突出的是, 国内的科研单位只有高能物理研究所一家单位具有相关科研团队, 其他高校和研究所在当时尚缺乏高能物理实验研究的基础或者相关人员队伍。

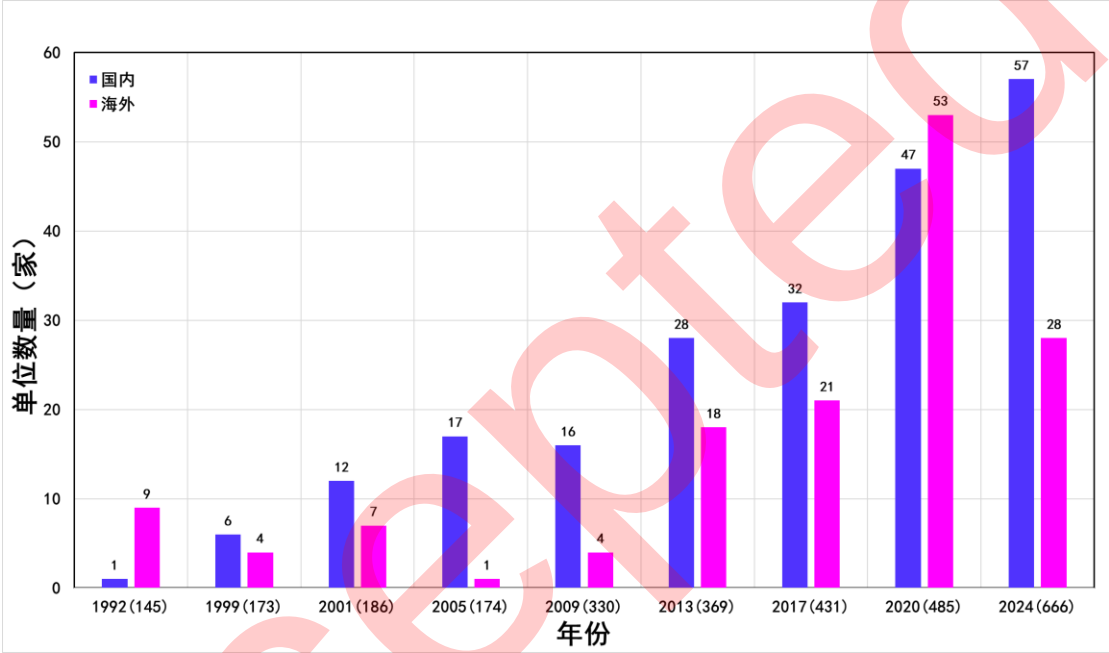


图 3 BES 合作组国内 (蓝色柱状) 与国外 (红色柱状) 参与单位数量及署名作者数量 (在横轴年份后括号中标注) 的抽样统计

Figure 3 Sampling statistics of the number of participating domestic (blue bars) and international (red bars) institutions, as well as the number of contributing authors (annotated in parentheses after the years on the horizontal axis) in the BES collaboration group

虽然在 BES I 阶段合作组人数基本保持在接近 200 人的规模, 但是 BEPC 实验对高能物理领域发展的带动作用明显和巨大的, 其中最为重要的一个方面是培养的人才进入国内高校和其他科研单位, 形成新的研究团队。如图 3 所示, 在 BES I 和 BES II 阶段国内参与单位数量增加到接近 20 个单位, 而国外参与单位数量则有较大的起伏。BES II 阶段部分国外单位加入 CLEO-c 合作组实验, 使得参加 BES II 合作组的国外单位一度减少。2010 年, BES III 的升级改造成功使得 BEPC 实验成为国际上粲偶素能区性能最好的实验装置, 大大吸引了来自国外的更多合作单位。

进入 BES III 阶段后, 可以看到随着 2009 年 BES III 实验取数运行, 合作组人数和参与单位逐年稳步上升。这一方面得益于 BES III 升级改造成功极大地吸引了来自国内外的同行专家参与 BES III 合作组, 另一方面则得益于 BES I 和 BES II 培养的青年人才的成长和回流。值得注意的是, 从 2020 和 2024 年的数据可以看出, BES III 合作组国内成员单位参与数量稳步增加, 国外参与单位数量明

显回落。据 BESIII 官网的最新信息，截至 2025 年 3 月 20 日，BESIII 合作组拟发表文章的署名成员将达到 710 人，合作单位数量也达到了 85 家科研单位，其中国内单位 57 家，国外单位 28 家。在众多新加入的国内单位中，其学科代表或学术骨干大多数经历过 BESI 或者 BESII 阶段的学习和培养。

表 1 BESIII 合作组在署名作者数、合作单位数、年发文量等指标上与美国 STAR 合作组和 CERN 的 LHCb 合作组以及日本的 Belle II 合作组的比较。数据来源:arXiv, INSPIRE

Table 1 Comparison of the BESIII collaboration with the U.S. STAR collaboration, CERN's LHCb collaboration, and Japan's Belle II collaboration in terms of metrics including the number of listed authors, participating institutions, annual publication volume, and related indicators. Data sources: arXiv, INSPIRE

合作组	2023/2024 年署名作者数 (位)	2023/2024 年合作单位数 (个)	2023/2024 年发文量 (篇)
STAR	355/348	65/70	26/8
LHCb	1063/1095	79/82	60/56
Belle II	454/438	123/138	26/31
BESIII	610/666	81/80	80/106

将 BESIII 合作组目前的署名作者数、合作单位数、年发文量等指标与美国美国 Brookhaven National Laboratory (简称 BNL) 实验室 RHIC 重离子对撞机实验上最大的实验合作组 STAR 合作组 (<https://www.star.bnl.gov/>) 和 CERN 的强子对撞机 LHC 装置上最大的强子物理实验合作组 LHCb 合作组 (<https://lhcb.web.cern.ch/>) 以及位于日本筑波科学城日本高能加速器研究机构超级 KEKB 正负电子对撞机上的升级版探测器 Belle II 合作组 (<https://www.belle2.org/>) 比较 (表 1)。通过分析 2023/2024 年的数据变化，可以对 BESIII 合作组目前的国际地位有一个较为直观的了解。

从署名作者数来看，STAR 合作组从 2023 年的 355 人略微减少至 2024 年的 348 人，LHCb 合作组从 1063 人增至 1095 人，Belle II 合作组从 454 人减少至 438 人，而 BESIII 合作组则从 610 人显著增加至 666 人，显示出规模不断扩大。

在合作单位数方面，STAR 合作组从 65 个增至 70 个，LHCb 合作组从 79 个增至 82 个，Belle II 合作组从 123 个增至 138 个，而 BESIII 合作组则从 81 个略微减少至 80 个。尽管 BESIII 合作组的合作单位数略有下降，但其署名作者数的显著增加表明其合作单位的影响力可能进一步增强。

在年发文量方面，STAR 合作组从 2023 年的 26 篇减少至 2024 年的 8 篇，LHCb 合作组从 60 篇减少至 56 篇，Belle II 合作组从 26 篇增至 31 篇，而 BESIII 合作组则从 80 篇增至 106 篇。BESIII 合作组在发文量上的持续增长，尤其是在其他合作组发文量普遍下降的背景下，进一步凸显了 BESIII 科研产出的高效性和稳定性。

对比这三个指标可以看出, 目前 Belle II 合作组处于上升阶段, 未来文章成果数量会有进一步提升。BESIII 合作组在署名作者数和年发文量等指标上均处于领先地位, 这也意味着在规模和科研产出上 BESIII 合作组都已经进入高能物理领域大型国际合作组的行列。

4.4 小结

北京正负电子对撞机 (BEPC) 是我国第一个大科学装置, 具有重要的历史和科学意义。作为中国自主研发的一项重大科学工程, BEPC 从建设到运行, 见证了中国高能物理研究从无到有、从弱到强的发展历程。

BES 合作组从最初阶段 (BESI) 科研人才匮乏、经费投入有限、科研产出相对较少的状态, 经过近 40 年的努力发展到现阶段 (BESIII), 不仅培养了大量的优秀人才, 也实现了许多重要成果的产出。特别是随着人才进入国内更多的院校和科研机构, 国内的研究力量得到了极大的提升, 有更多的科研机构建设起自己的高能物理科研团队, 国内的研究力量得到了极大的增强。BEPC-II 在过去 20 年中积累了粲偶素能区最大的数据样本, 是该能区最重要的实验设施。与国际上其他具有代表性的大型国际合作组相比, BESIII 合作组在署名作者数、合作单位数、年发文量等指标上已经进入国际前列。不仅如此, 我国粒子物理领域的大科学装置建设都直接受益于 BEPC 在关键技术研发、人才培养、国际合作等方面所积累的经验和创造的条件, 例如: 大亚湾中微子实验、锦屏暗物质实验、羊八井宇宙线观测站、LHAASO 超高能宇宙线观测站、JUNO 实验等实验设施。这些大装置的建设和成功运行充分体现了我国在粒子物理基础研究领域科研实力的提升。

作为第一个基于国内大科学装置建立起来的国际合作实验, BES 对我国高能物理参与国际合作也起到了重要的推动作用。许多 BESIII 合作组成员和单位同时也是国际大型实验合作组的成员, 例如: ATLAS、CMS、LHCb、ALICE、RHIC-STAR、Belle II 等。并且, 我国科学家在这些大型国际合作组中正在发挥越来越重要的作用。

5 前景展望

按照国际大科学装置投入和运行的规律, BEPC 已经服务运行三十多年, 接近其科学寿命。我国科学家于 2012 年提出将希格斯工厂“环形正负电子对撞机 (CEPC)”作为 BEPC 退役后基于加速器的大装置建设目标, 这一方面是基于其科学目标的重要性, 另一方面则是布局未来高能物理基础研究发展的方向。文献 [12] 围绕基础科学研究中关键领域与科学驱动方向详细阐述了我国粒子物理大科学装置发展规划, 与美国 P5 报告所列举的核心领域高度重合, 包括暗物质研究、宇宙演化研究、寻找新粒子的直接证据和追寻新粒子的量子印记等。其中, CEPC 的建设将成为追寻新粒子量子印记的优先平台。

从 CEPC 过去 12 年的预研和关键技术研发的成果^[1]可以看出, BEPC 在人才培养、国际合作等方面都起到了关键作用, 同时也帮助我国的科学家更好地凝练

科学目标, 为未来 CEPC 的建设提供了坚实的基础和保障。随着科研力量的持续增长和国家发展规划的有力支持, 中国在高能物理领域已具备建设大型科学设施的潜力和能力。更为重要的是, CEPC 为我国基于加速器的高能物理未来发展提出了一个更高的目标, CEPC 的规模将大于现在欧洲核子研究组织 LHC 的规模, 不仅将极大推动高能物理最前沿的发展, 也将吸引全球最前沿科学家的参与, 带来众多技术领域的快速发展, 有望超越我国在基础科学研究领域“占领一席之地”的现状, 实现在科技最前沿的全面领先。

致谢 感谢中国科学院高能物理研究所王贻芳院士、房双世研究员、李海波研究员、马海龙研究员、赵强研究员以及复旦大学沈成平教授对本文提供的有益支持与帮助。

参考文献

- 【1】 Abdallah W, Freitas T, Afanaciev K, et al. CEPC Technical Design Report: Accelerator. Radiat Detect Technol Methods, 2024, 8: 1–1105
- 【2】 Ai X, Altmannshofer W, Athron P, et al. Flavor Physics at CEPC: A General Perspective. 2024, arXiv: 2412.19743
- 【3】 Conroy G. China could start building world's biggest particle collider in 2027. Nature, 2024, 630: 801-802
- 【4】 China Center for Advanced Science and Technology. Selected Works of Tsung-Dao Lee: Science and Humanities (in Chinese). Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2008. 412 [中国高等科学技术中心. 李政道文选: 科学和人文. 上海: 上海科学技术出版社, 2008. 412]
- 【5】 Zhang C. Inheritance and development of IHEP through a strategic plan (in Chinese). Mod Phys, 2023, 35(S1): 15–22 [张闯. 从一份计划书看高能所的传承与发展. 现代物理知识, 2023, 35(增刊 1): 15–22]
- 【6】 Party Literature Research Center of the CPC Central Committee. Selected Works of Deng Xiaoping (Volume III) (in Chinese). Beijing: People's Publishing House, 2001. 279 [中共中央文献编辑委员会. 邓小平文选 (第三卷). 北京: 人民出版社, 2001. 279]
- 【7】 Ablikim M, Achasov M, Ai X, et al. Observation of a charged charmoniumlike structure in $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$ at $\sqrt{s}=4.26$ GeV. Phys Rev Lett, 2013, 110: 252001
- 【8】 Bai J, Bardon O, Becker-Szendy R, et al. Measurement of the mass of the tau lepton. Phys Rev Lett, 1992, 69: 3021-3024
- 【9】 Ablikim M, Achasov M, Adlarsonet P, al. Observation of Three

Charmoniumlike States with $J^{PC}=1^-$ in $e^+e^- \rightarrow D^{*0}D^{*-}\pi^+$. Phys Rev Lett, 2023, 130: 121901

- 【10】 Ablikim M, An Z, Bai J, et al. Design and Construction of the BESIII Detector. Nucl Instrum Meth A, 2010, 614: 345–399
- 【11】 Rini M, Thomas J. Highlights of Physics. Physics, 2013, 6: 139
- 【12】 Wang Y F, Zhao Q. Particle physics facility development in China: Insights from the US P5 report (in Chinese). Mod Phys, 2024, 36(1): 3–12 [王贻芳, 赵强. 从美国 P5 报告看我国粒子物理装置发展规划. 现代物理知识, 2024, 36(1): 3–12]

From BEPC to CEPC: How China's High-Energy Physics Pursues Its Next Ambitious Goal

Yaou Jiang* & Wenli Zheng

Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

* Corresponding author, E-mail: jiangyo@ihep.ac.cn

China's accelerator-based high-energy physics (HEP) research commenced with the construction of the Beijing Electron-Positron Collider (BEPC) in 1984, a milestone marking the nation's entry into advanced particle physics. Officially operational in 1988, BEPC facilitated groundbreaking advancements in charm physics through the Beijing Spectrometer (BES) collaboration. Over three decades, BEPC has evolved into a cornerstone of China's HEP infrastructure, enabling the BES collaboration to achieve international leadership in charm physics and cultivate a robust talent pool. This study synthesizes data from Web of Science, arXiv, and INSPIRE to analyze China's HEP research trajectory, talent development, and the expanding role of BESIII, while providing critical insights for the proposed Circular Electron-Positron Collider (CEPC).

The BES collaboration has transitioned from its initial phase (BESI: 146 authors, 10 institutions, 2 PRL publications) to BESIII, a large-scale international effort encompassing 666+ authors from 100 institutions across 16 countries/regions by 2024. BESIII's scientific output demonstrates remarkable growth: annual Physical Review Letters (PRL) publications surged to 118, with citations exceeding 1000 annually since 2013. Landmark achievements include the discovery of the $Z_c(3900)$ tetraquark (1182 citations, 2013 top breakthrough in Physics) and advancements in detector design, recognized as pivotal by global peers. Notably, BESIII's 2023 high-impact PRL paper involved 610 authors from 60 domestic and 40 international institutions, reflecting China's expanded research capacity. Comparative analysis with major collaborations—STAR (348 authorship counts, 70 institutions), LHCb (1095 authorship counts, 124 institutions), and Belle II (438 authorship counts, 138 institutions)—reveals BESIII's unique trajectory: by 2024, it led in annual publications (99 vs. Belle II's 30) and sustained authorship countship growth (666 authorship counts), despite geopolitical challenges reducing foreign participation.

BEPC's legacy extends beyond physics discoveries. It established a framework for talent cultivation and international collaboration, enabling subsequent projects like the China Jinping Underground Laboratory, Jiangmen Underground Neutrino Observatory (JUNO), and Large High

Altitude Air Shower Observatory (LHAASO). These facilities, underpinned by BEPC-derived expertise, underscore China's growing capabilities in particle astrophysics and detector technology. The proposed CEPC, a Higgs factory targeting precision studies of the Higgs boson and new physics, leverages BEPC's technical and collaborative foundations. CEPC's design, surpassing CERN's Large Hadron Collider (LHC) in scale, integrates advanced superconducting radiofrequency and cryogenic systems developed through domestic R&D.

BESIII's evolution mirrors China's strategic shift toward self-reliance in HEP. Domestic participation rose from 1 institution (BESI) to 60 (BESIII), with 610 authorship counts in 2023, while international partners transitioned from U.S.-centric to globally distributed. This growth reflects systematic talent retention: over 80% of BESIII's principal investigators trained through earlier BES phases. Geopolitical tensions post-2020 further amplified domestic contributions, with annual PRL outputs doubling since 2015.

CEPC's scientific agenda aligns with global priorities outlined in the European Strategy for Particle Physics (ESPP), emphasizing Higgs properties, dark matter, and quantum imprint studies. China's progress in accelerator engineering, coupled with BESIII's collaborative model, positions CEPC to advance frontier HEP research while fostering cross-disciplinary innovation. As BEPC nears its operational lifespan, CEPC represents a strategic leap from regional contributor to global leader, consolidating China's role in shaping the next era of fundamental physics.

Keywords: High-energy physics, BESIII collaboration, Circular Electron-Positron Collider (CEPC), Scientific collaboration metrics, Talent cultivation, Higgs factory