

中日两国对撞机建设与运行对比： 基于历史和科学计量视角

李华东¹, 刘细文^{1,2*}

1. 中国科学院文献情报中心, 北京 100190

2. 中国科学院大学经济与管理学院图书情报与档案管理系, 北京 100190

摘要 从历史发展和运行表现2个角度,对比了中日两国的对撞机工程建设与运行情况。分析表明,建设相对更早的中国对撞机的参数受限于资金、技术等条件,其研究方向为能区较低的聚物理领域;有工程技术基础的日本在确立对撞机建设方向时更具针对性,瞄准了物理前景更为丰富的B物理领域。中日两国对撞机皆取得了重要的科学成果,日本在科研成果产出方面更为突出,国际合作程度更高;中国近年来的成果产出量提升明显,且在聚物理领域的研究方面保持了领先水平。

关键词 中国对撞机;日本对撞机;科学计量

加强基础科学研究力度、提高基础科学研究水平是科技强国愿景的战略共识。当前,中国在基础科学研究方面已是成果产出大国,相关领域的国际影响力也在日益提升,但与世界主要发达国家相比,还有很大的提升空间。2018年,国务院印发《关于全面加强基础科学研究的若干意见》(简称《若干意见》),强调要“进一步加强基础科学研究,大幅提升原始创新能力,夯实建设创新型国家和世界科技强国的基础”。《若干意见》中明确提出要强化基础研究系统部署,潜心加强基础科学研究,对

数学、物理等重点基础学科给予更多倾斜。此外,还要推进聚焦于以材料、粒子物理和核物理、空间天文等为代表的前沿领域的国家重大科技基础设施建设。

重大科技基础设施(以下简称“重大设施”)是为科学技术发展服务、解决经济社会发展和国家安全重大科技问题的大型科学研究系统。如今的基础科学,特别是实验科学的发展离不开以重大设施为代表的科学装置的运行。相关政策文件如《国家重大科技基础设施建设中长期规划(2012—2030

收稿日期:2021-09-06;修回日期:2022-05-30

作者简介:李华东,博士后,研究方向为科研评价,电子信箱:lihuadong@mail.las.ac.cn;刘细文(通信作者),研究员,研究方向为情报学理论与方法,电子信箱:liuxw@mail.las.ac.cn

引用格式:李华东,刘细文. 中日两国对撞机建设与运行对比:基于历史和科学计量视角[J]. 科技导报, 2022, 40(13): 65-74; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2022.13.007

年)》于2013年出台。在“世界主要发达国家普遍强化基础研究战略部署,全球科技竞争不断向基础研究前移”的时代大背景下,把握中国相关领域现状,剖析与发达国家差距,分析发展中存在的问题是一项具有重要意义的工作。

对撞机是用于粒子物理实验的专用型设施。在世界范围内,现运行的对撞机只有7个。在亚洲只有中国和日本建有对撞机,即北京正负电子对撞机(BEPC)和非对称正负电子对撞机(KEKB),它们同属于电子对撞机。以下分别从历史和科学计量的角度出发,对比分析二者的建设和运行情况。

1 中日两国对撞机概况

1.1 中国北京正负电子对撞机

北京正负电子对撞机由中国科学院高能物理研究所运行管理,始建于1984年,于1988年实现正负电子对撞。自1989年9月BEPC上的探测器北京谱仪(BES)正式开始实验探测后,BEPC和BES分别经历了1和2次升级,目前运行的BEPCII是在BEPC的基础上经过5年的改造升级而来,于2009年7月通过国家验收。北京谱仪经过2次升级后,目前简称为BESIII。为简洁起见,下文不再区分KEKB和SuperKEKB,以及BEPC和BEPCII。

BEPC的对撞环周长约240 m,对撞能量为3~5 GeV,覆盖了粒子物理领域中粲物理的能量区域。在长达30年的运行时间里,BEPC产出了一系列重要成果,其中包括精确测量 τ 轻子质量、2~5 GeV能区强子反应截面(R 值)测量、发现带电类粲偶素 $Z_c(3900)$ 、发现新粒子 $X(1835)$ 等^[1]。这些成果奠定了中国在粲物理领域的国际领先地位。

1.2 日本非对称正负电子对撞机

坐落于日本筑波高能加速器研究中心(KEK)的KEKB是世界上亮度最高的对撞机。KEKB的对撞环周长约3 km,它与BEPC最大的不同除了在对撞能量外,还在于KEKB中的正负电子束流的能量不同,这也是其名字中“非对称”的由来。KEKB中参与对撞的电子束流的能量为8 GeV,正电子束流的能量为3.5 GeV。升级后的SuperKEKB中电子

束流的能量为7 GeV,正电子束流的能量为4 GeV。1998—2010年运行的第一代探测器Belle也随之升级为BelleII。

KEKB又被称为 B 介子工厂,因为在其对撞能区可以产生大量 B 介子。2001年,KEKB的实验结果^[2]验证了关于 CP 破坏的理论假设,而直接促成了2位日本物理学家被授予2008年诺贝尔物理学奖。此外,KEKB在CKM混合角的精确测量、中性 D 介子混合与 CP 破坏、 B 介子稀有衰变等方面积累了大量实验事例,发表了众多具有高影响力的成果^[3]。KEKB能量范围集中、实验亮度高,以及实验本底干净,因此一直是学界研究 B 物理及相关领域的重要设施。

2 中日两国对撞机建设历史

2.1 北京正负电子对撞机工程提案

对撞机是进行高能物理(粒子物理)研究的专用型重大科技基础设施。在对撞机工程真正付诸实施之前,中国的科技工作者先后为建设何种能量、何种类型的加速器反复论证提议多次。表1列出了中国科技工作者在跨度近30年的时间里,曾提议建设的加速器装置。

表1 中国历年提出的加速器(对撞机)

年份	装置类型	装置能量 指标/GeV	结局
1956	电子同步加速器	2	未果
1958	质子同步加速器	12	未果
1959	中强流回旋加速器	0.42	未果
1965	质子同步加速器	6	未果
1969	质子直线加速器	1	未果
1975	质子回旋加速器	40	未果
1977	质子环形加速器	400	未果
1983	北京正负电子对撞机	4.4	完成

表1中列有8个装置,除了北京正负电子对撞机完成建设并运行至今,其余的都未曾真正步入建设。中国的高能物理实验之路充满坎坷,在此历史背景下,有学者将该事业的起伏发展浓缩诠释为“八上七下”^[4-5]。那些未能实际推行的加速器工程,虽曾被寄予过厚望,但这些夭折的工程存在着

种种问题,其中最主要的是它们不具备明确的高能物理研究前景。例如,1959年提议建设中强流回旋加速器,终止的一个重要原因是其物理意义不大;1969年的“698方案”将提议的1 GeV质子直线加速器定位为生产核燃料的装置,最终也不了了之。最接近实施工程建设,也为后来建设北京正负电子对撞机打下大量基础的是1977年明确的“八七工程”。该工程的目标是建设一台能量为400 GeV的质子环形加速器,不过为了与欧美已有设施产生差异化,又将目标能量改为了1.2 TeV。若完成建设,此加速器将超过美国费米实验室当时在建的1 TeV加速器^[6]。不过,由于国家大政策的调整与实际的经济、技术条件限制,该工程最终也未实施。

2.2 北京正负电子对撞机的规划选择

自1956年提出建设加速器装置始,中国在20

多年的时间里一直在论证其可行性^[6]。进入20世纪80年代后,美欧等西方国家在高能物理实验方面已有多年积累,中国在此领域也开始有了进展。

早在“八七工程”确定时,李政道曾建议中国建造一台正负电子对撞机,而不是质子加速器^[6]。由于更高能量的加速器对相对低能加速器在研究领域方面的覆盖,以及国际上加速器能量水平的快速迭代,耗时费资的加速器在长期价值方面大打折扣。20世纪70年代,以轰击固定靶为主的加速器装置正逐渐被同等能量下造价更低的对撞机所取代,世界发达国家已建设有多台对撞机。除了造价方面的优势外,各对撞机能量范围的相对固定保证了设施之间研究领域的相对独立,即不存在高能覆盖低能的情况。表2列出了该时期国际上正开始运行的对撞机^[7]。

表2 20世纪70年代开始运行的对撞机

运行年份/年	装置与类型	对撞能量/GeV	国家机构
1971—1984	ISR(质子对撞机)	63	欧洲CERN
1972—1990	SPEAR(正负电子对撞机)	6	美国SLAC
1974—2000	VEPP-2M(正负电子对撞机)	1.4	苏联BINP
1974—1993	DORIS(正负电子对撞机)	10	德国DESY
1978—1986	PETRA(正负电子对撞机)	40	德国DESY
1979—2002	CESR(正负电子对撞机)	12	美国康奈尔大学

考虑到以上对撞机的参数情况,建设一台新对撞机首先要回答一个问题:在表2已有能量之外,是否还有富含物理研究价值的能量区间值得挖掘? 20世纪70年代,实验发现了多个基本粒子,其中之一是1974年在布鲁克海文国家实验室的加速器AGS(Alternating Gradient Synchrotron)和SLAC(Stanford Linear Accelerator Center)国家实验室的SPEAR(Stanford Positron Electron Asymmetric Ring)对撞机上同时发现的 J/ψ 粒子。该粒子由正反粲夸克组成,其中粲夸克早在1970年就被理论家预言存在。 J/ψ 粒子被发现后,粲物理逐渐成为一个热点领域。当时国际上并无专门针对粲物理能区的对撞机,这意味着此领域还有很大的研究窗口存在。

在上述背景下,截止1981年,中美双方已就中国高能物理实验设施的建设方案进行了多次会谈。在充分考虑物理研究意义和预算经费的限制后,形

成的意见是建造一台对撞能量为4.4 GeV的正负电子对撞机^[4-6],该意见得到通过并最终促成了BEPC的建设运行。BEPC的成功是中国科技人员克服重重困难得来的。在BEPC建成30周年纪念文章专题中,王贻芳写道^[8]:“事实证明我们不仅成功建造了BEPC,还使之成为国际 τ -粲能区最好的对撞机。在决策BEPC重大改造方案前,面对美国康奈尔大学加速器CESR的正面竞争……事实是康奈尔大学的加速器CESRc的改造只达到了预期性能的1/5~1/8,而我们的BEPCh性能比它高了1个量级。BEPCh投入运行后,CESRc就关闭了,在其上工作的美国6所大学的物理学家参加了BEPCh实验的合作。”截止2019年,BEPCh上的BEPCh实验合作组有来自14个国家和地区的60多个研究单位的450多位科学家参加,其在粲物理领域的研究风头正盛。

2.3 日本建设正负电子对撞机前的高能物理

20世纪70年代中期,描述宇宙间基本粒子组成及其相互作用的粒子物理标准模型完成。不过,在KEKB开工建设(1994年)时,不论是实验现象,还是寻找基本粒子方面,都还有几个重要问题未被解决。

在实验现象方面,研究人员于1964年在布鲁克海文国家实验室的加速器AGS上首次观测到了中性 K 介子的 CP 破坏现象。1972年,日本物理学家小林诚和益川敏英提出了夸克间弱相互作用耦合的模型(KM矩阵),该模型允许在夸克混合矩阵中出现一个 CP 破坏相位,并同时预言了3代共6种夸克的存在。在1976年,有物理学家指出,通过选取合适的参数值,KM矩阵可以很好地解释之前发现的 CP 破坏现象。不过, CP 破坏是一个涉及底层基本原理的问题,其背后还有不少疑问存在,如为什么会在弱相互作用中出现此现象?强相互作用中存在吗?可以从其他粒子的反应过程中观测到 CP 破坏效应吗?

在寻找粒子方面,质量约为4.6 GeV的底夸克于1977年被美国费米国家实验室的E288实验组发现,该实验性质为能量达400 GeV的质子-原子核对撞实验^[9]。此后,对顶夸克的寻找便成了国际焦点。CERN的超级质子同步加速器(SPS)于1983年发现了质量在90 GeV附近的 W 、 Z 玻色子,但后续未能发现顶夸克。美国SLAC实验室和德国DESY也曾尝试寻找,但未获成功。包括顶夸克在内,彼时还剩 τ 中微子、希格斯玻色子共3个基本粒子未被发现。

2.4 非对称正负电子对撞机的研究目标

20世纪70年代后,高能物理实验的水平和技术在持续进步,但探索物理学基本原理的难度也在飞速增长。表3列出了最后几个被发现的基本粒子,以及发现它们的对撞机(加速器)情况^[10-13]。从中可以看出,为了在实验中证实标准模型中基本粒子的存在,所需的设施能量越来越高。此外,这些设施无一例外地归属于美国或欧洲,也从侧面反映了前沿的高能物理实验对国家科技水平和综合实力的高要求。

表3 基本粒子与其发现设施

发现年份/年	基本粒子	设施	设施束流能量/GeV	设施所在国家或地区
1974	粲夸克	AGS、SPEAR	33.3	美国
1977	底夸克	Fermilab Main Ring	400	美国
1983	W 、 Z 玻色子	SPS	300	欧洲
1995	顶夸克	Tevatron	980	美国
2000	τ 中微子	Tevatron	980	美国
2012	希格斯玻色子	LHC	4000	欧洲

与中国不同的是,日本在建设KEKB前已经有了多年的加速器和对撞机工程经验。KEK在1976年便运行了能量达12 GeV的质子同步加速器PS,在1987—1995年运行了对撞能量达60 GeV的正负电子对撞机TRISTAN。不过,经过多年的实验运行,PS和TRISTAN并未在物理实验中产出重大成果。在未能发现新粒子、又无重要成果的现实下,日本是如何走向后来的KEKB工程的?

回顾 CP 破坏效应,虽然粒子物理标准模型将其纳入,但这是一个(直到如今)并未得到足够解释的问题。在 CP 破坏效应首次被发现的17年后,即1981年,物理学家预言当 B 介子的寿命足够长、且中性 B 介子的混合足够大时,实验可以探测到中性 B 介子系统内的 CP 破坏效应。如果这2个条件得到满足,那么实验上就有足够多的事例来研究 CP 破坏。1983年,美国SLAC国家实验室的对撞机SPEAR上测得 B 介子寿命比原本预期的要长得多(约 10^{-12} s);1987年,德国DESY的对撞机DORIS发现了中性 B 介子系统的大混合(large mixing)。至此,实验证实了从 B 介子系统中研究 CP 破坏效应的可行性。

通过多角度分析,推测KEKB工程实施的必然性如下:(1)日本多年的加速器(对撞机)设施并未取得重要发现,其需要在一个具有物理前景的领域做出一番成果;(2)在欧美具有显著优势的现实下,应避免竞争建设能量更高的对撞机;(3) CP 破坏效应的理论解释是由2个日本物理学家提出的,在情感方面,日本或许更希望能由本国的实验证实该理论;(4)20世纪80年代的美、德2个实验结果为在 B 介子系统中研究 CP 破坏提供了可行性支

持,这为KEKB项目提供了先决条件;(5)底夸克的质量约为4.2 GeV,那么研究 B 介子所需的对撞机能量在10 GeV量级即可。相比于能量动辄几百、上千GeV的质子对撞机,日本在建造正负电子对撞机方面有前期技术积累,且TRISTAN原址的部分设施与隧道都可直接使用。(6)美国SLAC国家实验室的正负电子对撞机PEP于1994年开始升级,升级后的PEP-II将专门被用于研究 B 介子及其中的 CP 破坏效应^[14]。对于KEKB和PEP-II这两个项目,目前尚无法确定哪个更早被提出,但由于具有共同的研究目标,它们二者必然存在竞争关系。

总结以上分析,日本建设KEKB的物理目标十分明确,即深入研究 B 介子系统及其中的 CP 破坏。这个研究方向既有重要的科学意义、明确的成果前景,也不会对技术、工程、成本等方面的要求过高。因此,KEKB工程的实施既是追寻科研目标的历史性必然,也是重大科技设施工程研究的战略性决断。

2.5 小结

对比发现,由于资金、技术、人才等方面条件的明显欠缺,中国的BEPC项目客观上受到了不少限制。不过,与BEPC能区所对应的粲物理领域是最符合当时国情与领域发展机会的选择;日本在选择建设KEKB时更具针对性,其在高能物理发展的大潮流下占据了 B 物理领域,并产出了很多重要成果。当然,BEPC和KEKB都是各自领域内最为先进的对撞机,也为各自国家相关领域的发展起到了重要的推动作用。

3 中日两国对撞机的科研情况

科研人员以合作组的形式在对撞机上开展研究。合作组作为论文发表的团体作者,其名字对应于对撞机上探测器的简称。本文以Web of Science核心合集为数据源,检索到BEPC产出论文439篇,KEKB产出论文568篇(限定发表时间为2020年及之前,检索日期为2021年5月15日)。

3.1 论文产出与主题领域

图1给出了BEPC和KEKB在**高能物理领域发

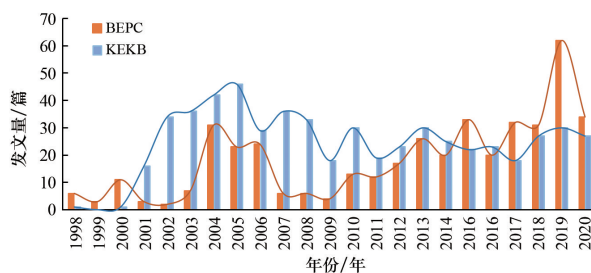


图1 中日对撞机发文量

文的年度分布情况。对撞机实验是以前(短)期采集大量数据后(长)期进行数据分析的模式进行,因此即使在对撞机未运行期间,实验组也可以产出论文。不过,对撞机的中止运行对产出规模会有一定的负面影响,如中国的BEPC在2004—2009年的升级期间,论文产出量呈现明显下降趋势(图1),而在升级完成后,BEPC发文量在整体趋势上逐年上升,并于2015年超过了KEKB的发文量。从2017年至今,BEPC的发文量较KEKB已保持了4年领先。

日本的KEKB在1998—2010年完成了实验运行的第一阶段,在此期间,KEKB的发文量相较于BEPC有明显优势。在2010—2008年的升级阶段内,其发文量虽然在波动中保持了相对稳定,但被升级后的BEPC超越。升级后的KEKB自2018年4月至今已运行了近3年,其后续表现值得期待。

为了对比中日对撞机上学术产出的影响力情况,图2给出了利用二者所发表的论文中,被引频次大于100的文献分布。在数据库有记录的20多年里,BEPC共有12篇符合条件的文献,其中被引数最高的1篇文章(被引数521)发表于2013年,余下11篇的被引数分布在100~300。KEKB共有54篇符合条件的文献发表,并且在2001—2017年的

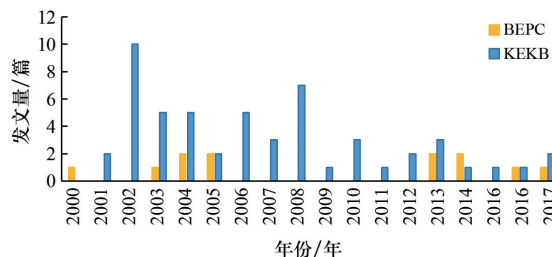


图2 利用中日对撞机发文中被引数大于100的文献

每一年中都有分布。在这些高被引文献里,被引数大于300的有10篇,排在前三位的文献被引数和发表年份依次为1252(2003年)、509(2013年)、496(2001年)。

引文的时序分布可直观地展示设施学术产出影响力的持续性。在高被引文献方面,KEKB的引文分布和所有文献的引文分布达到了极高的一致性,而BEPC的高被引文献的引文分布曲线在2016年后表现出疲软的态势,这与其全体文献的引文分布走势有较大差别(图3)。

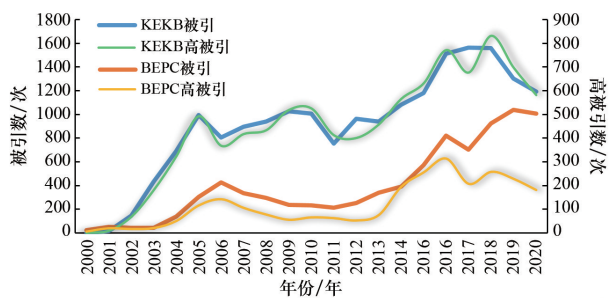


图3 被引数大于100文献的引文分布

从以上论文产出和被引情况可以看出,KEKB在20多年的运行中,其整体表现更为突出,特别是它具有更多高影响力的成果。BEPC的论文产量与被引数自2009年起步步追赶,目前在论文数量方面已维持了几年的领先地位,但在论文被引数、高被引论文数方面与KEKB相比仍有差距。特别是从图3的高被引文献与所有文献的引文分布来看,BEPC全体论文的被引数上升很大程度上是由于论文数量的增加,高被引文献的影响并不突出。

对撞机是为粒子物理研究服务的专用型重大科技基础设施,其研究的领域较为聚焦。在分析确定文献的研究主题时,不论是WOS数据库中的分类体系(Web of Science category)还是常用的模型算法,如LDA主题模型^[15]、TF-IDF关键词提取算法^[16]、TextRank算法^[17]等都难以完成精细的抽取。因此,本节利用前期已完成构建的主题抽取程序和领域主题词库^[18],对BEPC和KEKB产出论文的主题进行识别(表4)。

表4 论文主题领域

	主题	文献数	主题	文献数	主题	文献数	主题	文献数
BEPC	粲物理	93	Zc共振态	13	微扰色动力学	8	五夸克态	5
	奇特态	18	味物理	13	τ 轻子物理	7	强子谱	5
	量子色动力学	16	稀有衰变	11	格点色动力学	6		
	辐射衰变	14	CP破坏	9	B物理	6		
KEKB	B物理	274	奇特态	23	稀有衰变	10	因子化	6
	CP破坏	122	量子色动力学	21	味道改变中性流	8	强子谱	6
	粲物理	42	新物理	15	电弱相互作用	8	格点色动力学	5
	τ 轻子物理	28	味物理	13	中微子物理	7		

注:表中仅考虑了涉及文献数大于等于5的领域主题,在做“独有领域”分析时,结论会受到数据范围的制约,不过仍是合理的。

从表4可以看出,2个对撞机产出论文的研究主题有不少重叠,如奇特态、粲物理、量子色动力学、 τ 轻子物理、B物理、CP破坏等。不过,BEPC侧重研究在粲物理、奇特态等主题,KEKB侧重于B物理、CP破坏等主题。除了这些共有的研究主题,二者发表的论文中也有各自独有的领域存在(表中阴影部分),如BEPC所涉及的辐射衰变、微扰量子色动力学、Zc共振态、五夸克态等主题;KEKB发表论文中所涵盖的新物理、味道改变中性流、电弱相互作用、中微子物理、因子化等主题。

此外,还有一个值得关注的点是两实验组发表论文的领域主题所涉及的文献数。BEPC在研究最多的粲物理领域只有93篇论文,占发表论文总数的21.7%。在之后的奇特态领域的论文数则降到了18篇。与之相比,KEKB在B物理领域发表了274篇论文,占发表论文总数的48.4%,在CP破坏领域有122篇,占论文总数的21.6%。在一定程度上,可以认为KEKB实验比BEPC实验的领域聚焦性更强。即从论文主题的角度来看,KEKB至少有近半数的研究集中在B物理和CP破坏方面,而

BEPC在以粲物理、奇特态为主要研究领域的前提下,研究领域较为分散。

3.2 研究内容与重要成果

中国的BEPC是处于粲物理能区的对撞机,日本的KEKB则处于 B 物理能区,能区的不同也造成了二者研究内容的明显差异。

BEPC自建成运行后先后在精确测量 τ 轻子质量、 R 值,研究含粲夸克粒子的衰变模式,发现新的共振态等方面取得重要成果^[19]。(1) τ 轻子质量。基于验证轻子普适性的重要价值,BEPC一直在尝试提高 τ 轻子质量的测量精度。20世纪90年代,BEPC的测量结果显示 τ 轻子质量比世界平均值低了7.2 MeV,有效降低了轻子普适性出现偏差的可能,而其在2011年的测量则从更高精度的层面支持了轻子普适性。(2) R 值。在零阶近似下,由反应截面导出的 R 值与夸克电荷值有直接联系。在5 GeV以下的低能区,由于微扰论的失效,对于计算某些重要的物理量如电磁耦合常数、缪子反常磁矩来说, R 值必须作为基本的输入参数存在。BEPC的测量使2~5 GeV能区的 R 值误差从约20%降到了约6.6%,这对粒子物理标准模型的精确检验具有重要意义。BEPC对 R 值的未来测量目标是使误差降到3%左右。(3) 粲偶素。由正反粲夸克组成的粒子,1974年发现的 J/ψ 粒子便是其中之一。BEPC在粲偶素方面积累了世界上统计量最高的实验事例,无论是对粲偶素的衰变测量,还是对类粲偶素候选态的确认,BEPC都有显著优势。(4) 四夸克态。由4个夸克组成的粒子,其存在对研究夸克紧闭问题具有重要意义。BEPC于2013年发现了一个新的共振态 $Z_c(3900)^+$,根据其衰变产物,科研人员推测其内部至少含有四夸克成分,该成果以及其后发现的 $Z_c(4020)$ 受到了国际同行的高度评价,具有重要价值。(5) 粲强子衰变。强子包括介子(两夸克粒子)和重子(三夸克粒子),研究粲强子的纯轻或半轻衰变过程,精确测量衰变常数、跃迁形状因子是粲物理领域的重要课题。BEPC在此方面拥有世界上精度最高,误差最小的测量水平^[19]。此外,BEPC提供的中性粲介子相对强相角对于KEKB测量 CP 破坏相位至关重要。

KEKB是研究 B 物理、 CP 破坏等领域,以及寻找新物理的重要装置。2001年,KEKB在中性 B 介子中发现 CP 破坏的存在预示着其最初的实验目标已经达到,同时也意味着更广阔研究领域的出现。KEKB在之后取得的成果包括但不限于在 B 介子的不同衰变道中精确测量了CKM矩阵元、在 B 介子的非轻衰变中发现了直接 CP 破坏的存在、首次发现了 B 介子的稀有衰变过程、证实了中性 B 介子对的量子纠缠等。此外,味道改变中性流过程对新物理的存在具有较高的敏感性,KEKB具有研究该过程的理想条件,并发现了该过程的多个 B 介子半轻衰变道^[20]。

KEKB的研究领域具有丰富的物理内容。当前, B 介子的多个衰变道的实验结果与理论计算值存在偏差,而这或许意味着现有理论的不足。除此之外,是否有新的 CP 破坏相位存在、轻子普适性是否存在破坏、是否有新的对称性解答CKM矩阵的等级问题、是否有新的右手流存在等很多重要的基本问题仍待KEKB的实验研究。

3.3 国际合作

拥有对撞机的国家能显著吸引国际同行参与科研合作,参与KEKB实验的国家有34个,BEPC有16个。表5列出了两者在国际合作发文中参与程度排在前十位的国家,并分别给出了BEPC和KEKB上的合作国家以及各国在论文产出量中所占的比重。从中可以看出,美国在中日对撞机上的国际合作科研中同时扮演着重要角色,德国、俄罗斯、意大利、韩国、印度是中日共同的主要合作国家(表5中用阴影标出)。从图4对比中日对撞机共同的主要合作国家情况可以看出,除美国外,BEPC与欧洲国家(德国、俄罗斯、意大利)的合作比重要高于亚洲国家(韩国、印度、日本),KEKB与亚洲国家(韩国、印度、中国)的合作比重则要高于欧洲国家(俄罗斯、德国、意大利)。

图5(横坐标中斜杠左右分别对应参与KEKB、BEPC实验的国家)展示了排名前10位合作国家发文所占比重。KEKB的合作国家中,前8位的发文数占发文总量的80%以上。BEPC的合作国家中,除美国外,前6位合作国家的发文数占发文总量的

表5 国际合作与论文占比

序号	BEPC 发文/篇	合作国家	占比/%	KEKB 发文/篇	合作国家	占比/%
0	428	所有	100	566	所有	100
1	350	美国	81.78	475	美国	83.92
2	281	德国	65.65	469	韩国	82.86
3	276	俄罗斯	64.49	466	印度	82.33
4	275	意大利	64.25	464	中国	81.98
5	272	荷兰	63.55	463	澳大利亚	81.80
6	272	巴基斯坦	63.55	461	俄罗斯	81.45
7	252	土耳其	58.88	455	波兰	80.39
8	224	瑞典	52.34	454	斯洛文尼亚	80.21
9	201	韩国	46.96	449	奥地利	79.33
10	132	蒙古	30.84	435	瑞士	76.86
11	100	印度	23.36	362	德国	63.96
12	68	英国	15.89	233	捷克	41.17
13	19	塞浦路斯	4.44	194	意大利	34.28
14	16	日本	3.74	163	西班牙	28.80
15	1	法国	0.23	125	沙特阿拉伯	22.08

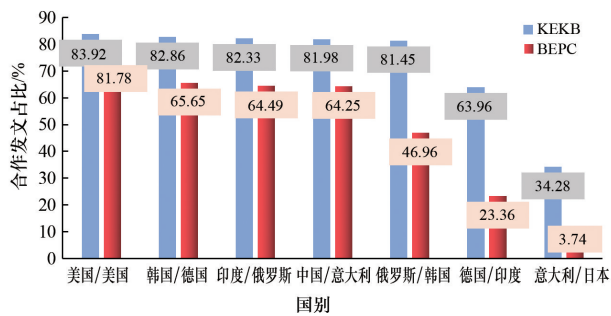


图4 共同主要合作国家及其发文占比

65%左右。后4位合作国家的发文比重则从58.88%下降到了30.84%。从以上数据可以看出,参与KEKB实验的国家参与程度相对更高。

综上所述,中日对撞机的科研活动都具有较高的国际化程度,这种国家间合作代表了国际学术界对BEPC和KEKB的依赖与认可。参与KEKB上科研活动的国家数量和参与程度都相对较高,这与KEKB的研究领域具有更高的关注度有关,而这在一定程度上也会为其产生的科学成果带来更高的知名度与影响力。另外,中日对撞机在合作国家分布方面有明显的差异。除美国外的中日共同合作国家中,欧洲国家(德国、俄罗斯、意大利)与中国BEPC的合作比重要高于亚洲国家(韩国、印度、日

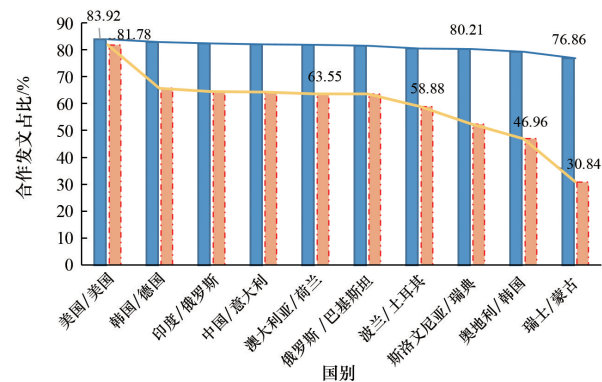


图5 排名前10位参与KEKB/BEPC实验的合作国家及其发文占比

本)与中国BEPC的合作比重,日本KEKB则正好相反。

4 结论

从历史和运行表现出发,对比研究了我国BEPC和日本KEKB的整体情况,结论如下:

1) 从历史角度来看,中国的正负电子对撞机是在综合考虑国情、领域发展,以及尽可能花最少的钱办更多的事(BEPC的“一机两用”,即它既可以被用来进行粒子物理实验,也可作为同步设施光源使用)后的选择。与之相比,日本对撞机的建设时间相对更晚,其经费实力也更强,且其在立项之初

便朝着物理内容更为丰富的 B 物理领域设计^[21],这也保证了其能产出更多高价值的成果。

2) 在设施运行方面,分析了论文产出与被引情况、论文主题领域、主要研究方向与重要科研成果等。BEPC 的论文产出近 10 年快速增长,目前的年产出量已经超过 KEKB,但在整体影响力方面仍需继续追赶。此外,BEPC 在运行期间取得了多项具有重要意义的科研成果,奠定了中国在粲物理领域的领先地位。

3) 国际合作对于提升国家的科研领域形象和影响力方面有正面促进作用,中日两国在对撞机实验方面皆有较高的国际合作程度,但参与日本对撞机实验的国家相对更多,参与程度也更高。

总之,随着中国综合国力的增强和对科技发展需求投入的增加,过去由于经费不足等多方面带来的掣肘^[22]将会得到缓解,但底气足的同时更需要加强对未来设施的战略规划研究。结合形势,把握学科领域发展的未来趋势,找准发力点,可使重大设施对领域发展带来事半功倍的效果。

参考文献 (References)

- [1] 北京正负电子对撞机建成 30 周年[EB/OL]. (2018-10-02). http://www.ihep.cas.cn/zt/bepec30/index_73390.html.
- [2] Abe K, Abe R, Adachi I, et al. Observation of large CP violation in the neutral B meson system[J]. *Physical Review Letters*, 2001, 87(9): 091802.
- [3] Brodzicka J, Browder T, Chang P, et al. Physics achievements from the KEKB experiment[J]. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2012, 2012(1): 04D001.
- [4] 柳怀祖. 北京正负电子对撞机工程的回顾与思考[J]. *科学文化评论*, 2019, 16(6): 32-45.
- [5] 王晓义, 白欣. 北京正负电子对撞机方案的初步提出与确立[J]. *中国科技史杂志*, 2011, 32(4): 472-487.
- [6] 丁兆君, 胡化凯. “七下八上”的中国高能加速器建设[J]. *科学文化评论*, 2006(2): 85-104.
- [7] List of accelerators in particle physics[EB/OL]. (2021-05-14)[2021-08-20]. https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_accelerators_in_particle_physics#Colliders.
- [8] 王贻芳. 从 BEPC 到 CEPC[EB/OL]. (2018-10-16) [2022-02-01]. http://www.ihep.cas.cn/zt/bepec30/jnwz/zwx/2018-10/20181016_5142918.html.
- [9] 肖振军, 吕才典. 粒子物理学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [10] Campagnari C, Franklin M. The discovery of the top quark[J]. *Reviews of Modern Physics*, 1997, 69(1): 137.
- [11] Kodama K, Ushida N, Andreopoulos C, et al. Observation of tau neutrino interactions[J]. *Physics Letters B*, 2001, 504(3): 218-224.
- [12] Aad G, Abajyan T, Abbott B, et al. 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): 1-29.
- [13] Chatrchyan S, Khachatryan V, Sirunyan A M, et al. Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC[J]. *Physics Letters B*, 2012, 716(1): 30-61.
- [14] 中国科学院高能物理研究所. 斯坦福直线加速器中心[EB/OL]. (2003-04-30) [2022-04-01]. http://www.ihep.cas.cn/kxcb/zmsys/200910/t20091030_2643482.html.
- [15] 单斌, 李芳. 基于 LDA 话题演化研究方法综述[J]. *中文信息学报*, 2010, 24(6): 43-49.
- [16] 张瑾. 基于改进 TF-IDF 算法的情报关键词提取方法[J]. *情报杂志*, 2014, 33(4): 153-155.
- [17] 李航, 唐超兰, 杨贤, 等. 融合多特征的 TextRank 关键词抽取方法[J]. *情报杂志*, 2017, 36(8): 183-187.
- [18] 李华东, 张晶晶, 刘细文. 重大科技基础设施对学科领域发展影响的计量评价——以对撞机为例[J]. *科技管理研究*, 2022, 42(8): 74-81.
- [19] 黄光顺, 李海波, 吕晓睿. 北京谱仪实验物理成果[J]. *物理*, 2020, 49(8): 499-512.
- [20] Aushev T, Bartel W, Bondar A, et al. Physics at super B factory[J]. arXiv preprint arXiv: 1002.5012, 2010.
- [21] Super KEKB and BelleII[EB/OL]. (2017-02-24)[2021-07-05]. https://www.belle2.org/project/super_kekb_and_belle_ii/.
- [22] 黄涛. 理论物理室在 BEPC 建设中做出重要贡献[EB/OL]. (2018-10-12) [2022-02-01]. http://www.ihep.cas.cn/zt/bepec30/jnwz/zwx/201810/t20181012_5141729.html.

Comparison of construction and operation of colliders between China and Japan: Based on historical and scientometrics perspectives

LI Huadong¹, LIU Xiwen^{1,2*}

1. National Science Library, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2. Department of Library, Information and Archives Management, School of Economics and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract To compare the colliders between China and Japan from the perspectives of historical development and running performance and to learn the development experience of Japan and provide references for future technological layout, especially for large research infrastructure planning, this study discovers that the parameters of Chinese collider, which was constructed earlier, are limited by funding, technology, and other factors. Its research field is charm physics, whose energy range is lower than that of B physics. Whereas Japan, which has a foundation in engineering technology, targets at the B physics with richer physics prospects. Both colliders have obtained significant scientific achievements. Japan is more prominent in the research output and the degree of international cooperation is higher. The output of Chinese collider has increased significantly in recent years, and China keeps leading in the research of charm physics.

Keywords Chinese collider; Japanese collider; scientometrics ●



(责任编辑 王志敏)