**中国基于加速器的粒子物理发展战略研究**

**第一章：中国基于加速器的粒子物理领域的科学意义和战略价值**

（整体要求：一是本领域能够解决的我国经济社会发展及国家安全领域中的关键科学问题和关键技术问题，尤其是对该领域能够解决的制约我国产业结构升级的关键技术问题、制约我国提高国际竞争力的卡脖子技术问题等所起到的作用进行具体、深入论证。二是本领域对于国家科学事业本身的意义和价值。重点回答该领域对于带动相关科学技术领域发展的贡献等问题。 ）

一、中国基于加速器的粒子物理领域的科学意义（分高能量前沿和高亮度前沿阐述）

二、中国基于加速器的粒子物理领域的战略价值（分高能量前沿和高亮度前沿阐述）

高能对撞机实验的探测器代表当今世界粒子与核探测技术最前沿，其关键技术不仅在基础前沿研究领域有广泛应用。同时极大地推动了国家安全、辐射探测和防护、核医学、空间实验、抗辐照半导体芯片等众多领域相关技术的蓬勃发展和应用。

通过未来对撞机实验探测器关键技术预研，积极参与大型国际合作实验并承担部分核心探测器建造任务，我国能在新一代粒子探测和读出电子学技术和方法领域培养一批具有国际视野和竞争力的专家和技术人才。建立起相关的实验室、测试平台及数据库系统，掌握核心技术工艺，拥有新器件设计和研制能力。逐渐形成自主的核心技术和器件研发生态系统，突破禁运、推动我国在关键材料器件、技术和方法的全面发展，并辐射至其他领域。

**第二章：中国基于加速器的粒子物理领域的现状及其形成**

（整体要求：一是对该前沿领域的形成进行回溯，从该前沿领域发展历程出发，回答是哪些内生性的动力和外在性的需求促成了该前沿领域的出现？由哪些关键科学发现、科学问题、技术问题或者哪些人物推动了该前沿领域的出现、使该领域成为前沿研究领域？二是对本前沿领域的研究现状进行综合回顾，从主要研究成果、专利、期刊著述、研究学会、研究人员的学科背景、人才培养、研究组织形式、经费与投入、资助管理模式等方面，来形成关于本领域发展现状的综合性认识。三是立足国际，对于本前沿领域在国际上的位置和竞争力进行综合评估，包括本前沿领域在国际上的发展状况、本领域在国际上的地位和发展态势等。）

一、中国基于加速器的粒子物理领域的形成（分高能量前沿和高亮度前沿阐述）

中国基于加速器的粒子物理领域最初形成于上世纪七十年代。在李政道先生和一批国内外粒子物理学家的积极推动下，获得政府批准建设高能物理实验中心。邓小平同志大力支持高能对撞机项目，发表了著名的“中国必须在世界高科技领域占有一席之地”的重要讲话。1984年10月7日，北京正负电子对撞机（BEPC）正式破土动工建造，同时与之配套的高能物理实验探测器北京谱仪（BES）开始建造；1988年10月16日，北京正负电子对撞机实现首次对撞。北京谱仪探测器是精密的通用型磁谱仪，用于探测并记录高能正负电子对撞后在纳秒时间尺度内发生的全过程。2004-2008年北京正负电子对撞机进行了重大改造（BEPCII），成为粲物理能区国际领先的双环对撞机，设计对撞亮度相比改造前提高100倍。2016年4月，BEPCII对撞亮度达到设计指标1×1033cm-2s-1，创造了该能区对撞亮度的世界纪录【1】。期间，北京谱仪不断更新换代，经历了三个发展阶段，依次为第一代北京谱仪（BES，1988-1995）、第二代北京谱仪（BESII ,1998-2004）和第三代北京谱仪（BESIII，2009-至今）。北京谱仪国际合作组由最初来自中国（60余名）和美国（20余名）物理学家组成；发展到如今BESIII国际合作组由来自中国、美国、德国、意大利、英国、俄罗斯、瑞典、日本、荷兰等15个国家72家研究单位的近500名合作者组成，其中国外合作者约占四分之一【1】。三十多年来，北京正负电子对撞机和北京谱仪实验获得了一系列重要的研究成果，并培养了一大批加速器、探测器、数据获取和物理分析、计算机软件系统，系统运行和维护等专业人才。

在高能物理国际合作方面，早在改革开放初期，1978年1月，国内派遣首批高能物理学家到西德的德意志同步加速器中心（DESY），参加由丁肇中先生领导的Mark-J实验。中国科研人员参加了Mark-J探测器的设计、建设和运行，对胶子的发现做出重要贡献。随后，中科院高能所和中国科大等单位参与了欧洲核子研究中心（CERN）大型正负电子对撞机（LEP）上的L3合作组，对L3实验量能器的设计、建造和运行，及实验数据分析做出了重要贡献【2】【3】。中科院上海硅酸盐研究所为L3实验研制和生产了大量的锗酸铋晶体，开启了国内晶体产业的蓬勃发展，后来在国际市场上占据重要份额。

2000年底LEP实验结束后，CERN在同一隧道里开始建造当今世界规模最大、对撞能量最高的大型强子对撞机LHC。中国研究机构自1999年起陆续加入LHC的四大合作组（ATLAS，CMS，LHCb, ALICE）【4】。最初参与的骨干人员约20余名，经过二十余年的快速发展和研究队伍的扩充，2020年LHC中国组拥有100余名骨干成员，来自高能所、北大、清华、科大、国科大、南大、山大、交大、复旦、浙大、北航、华中师大、武大、中山、华南师大、南京师大等单位，加上工程师、技术人员、博士后和研究生，团队规模近400人。

2007年成立了中法粒子物理联合实验室（FCPPL），大大促进了中法粒子物理实验领域特别是LHC实验团队之间的深度合作，开展广泛的学术交流和人才培养【5】。

2011年，中科院高能所和中国科大联合成立了核探测与核电子学国家重点实验室。

2015年起，专门组织和召开年度中国大型强子对撞机物理研讨会（CLHCP），增进实验与理论，实验组之间的广泛学术交流和讨论，参会人数逐年快速增加到300余人。

1977年创立《高能物理与核物理》中英文期刊；

2008年《高能物理与核物理》改为英文期刊，刊名为《Chinese Physics C》（中国物理C）；

2017年创立期刊《Radiation Detection Technology and Methods》（辐射探测技术与方法）。

二、中国基于加速器的粒子物理领域的现状（分高能量前沿和高亮度前沿阐述）

在科技部、基金委和中科院的联合支持下，中国组承担了LHC实验探测器的部分建造任务（约1%），包括缪子谱仪MDT和TGC的建造，完成了量能器吸收体的研制，探测器前端读出模块的研制和检测，积极参与探测器安装、运行和维护等。2008年起，中国组积极和广泛参与实验数据物理分析工作，对多个研究方向进行了合理布局和人员安排。在希格斯玻色子、五夸克态粒子、双粲重子、双规范玻色子散射过程、四顶夸克协同产生的发现，新物理寻找及标准模型精确检验等重要课题均做出了重要贡献。

目前LHC实验已经运行了十年（2009-2018），但仅积累5%的对撞数据，LHC升级后将产生余下的95%对撞数据，是现有数据量的19倍。为应对LHC高亮度升级的要求及探测器长期运行带来的老化、效率降低等问题，LHC计划两次探测器升级改造，一期（Phase I）升级计划在2021年完成，二期（Phase II）升级计划在2026年完成。在LHC一期探测器升级改造阶段，中国组承担ATLAS缪子谱仪端盖NSW触发探测器sTGC的建造和安装，前端电子学读出系统FEB设计和PCB板制作及测试；承担CMS端盖缪子探测器CSC、触发探测器RPC的建造和安装，以及缪子一级触发预处理（CPPF）系统的研制和建造。中国组计划继续深度参与LHC二期探测器升级改造，包括研制高空间分辨且抗辐照的硅微条探测器用于粒子顶点和径迹精确测量(ATLAS)、高计数率的大面积RPC和GEM气体探测器用于提高粒子触发效率(ATLAS, CMS)、高颗粒度量能器提高喷注能量分辨（CMS，LHCb，ALICE）、高粒度时间探测器（ATLAS）、探测器读出电子学系统和触发系统（ATLAS，CMS，ALICE）等。探测器的成功升级和正常运行为LHC实验未来10-15年进行高能量前沿的物理研究提供强有力的保障。

2012年希格斯粒子发现后，中国科学家率先提出了建造100公里长的环形正负电子对撞机CEPC作为希格斯粒子工厂，在干净的正负电子对撞环境下精确测量希格斯粒子的各项性质，并以希格斯粒子作为探针探索超出标准模型的新物理，如暗物质，物质与反物质不对称，早期宇宙的演化等重大科学问题【6】。十三五期间，CEPC预研团队获得了科技部大科学装置国家重点研发计划资助，开展探测器关键技术预研，包括高空间分辨率/高密度/高集成度低功耗/硅探测器ASIC芯片设计、高位置分辨的时间投影室TPC、高颗粒度电磁和强子量能器样机研制、契伦科夫探测器用于大动量范围粒子鉴别技术，加速器对撞区与探测器接口设计优化等。

中国研究团队经过三十多年孜孜不倦的努力，在探测器和核电子学领域积累了较为丰富技术和经验，培养了一批优秀的探测器研发人才。团队深度参与LHC国际合作实验探测器升级改造、积极参与未来探测器国际合作研发（譬如CALICE，LCTPC， RD， AIDA-2020）【7】和主导CEPC探测器关键技术预研。团队瞄准高能量前沿粒子探测的核心技术，迎头赶上，逐渐融入到先进探测技术国际合作研究的主流方向上，取长补短，从跟跑状态，逐渐过渡到部分领域与国际同行并跑的态势。

**第三章：中国基于加速器的粒子物理领域的关键科学问题，关键技术问题与发展方向**

（整体要求：一是从前沿领域发展态势、国家战略需求以及如何应对国际竞争的角度，前瞻未来15年、特别是未来5年领域的发展趋势，提出未来5~15年前沿领域的关键科学问题和关键技术问题、发展思路、发展目标、优先发展领域或重要研究方向。二是结合上述角度，对以上优先发展领域的战略重要性进行研判并排序，并对其理由进行充分阐述。）

一、高能量前沿

当前，粒子探测和实验技术朝着高精度和多功能的方向发展，探测器和读出电子学的规模和复杂度与日俱增。LHC上的四个大型谱仪设计先进，整体性能优越，在粒子探测技术、高集成度大规模高速电子学、抗强辐照ASIC芯片、软件模拟重建和分析框架及全球分布式网格技术等方面集中了当今技术的最高水平。LHC实验探测器升级改造拟采用的探测技术和方法，基本上代表和引领高能量前沿粒子探测器未来5-15年的主流发展趋势。

具有高空间分辨且抗辐照的硅像素、硅微条探测器在粒子物理实验中应用越来越广泛，LHC实验粒子顶点和径迹探测器有大规模的应用。目前的趋势是进一步提高其空间分辨率、抗强辐照能力，同时降低功耗。受相关工业基础、材料及工艺等制约，硅探测器的研制在我国起步很晚，与国际先进水平有很大差距。近十年来，高能所、科大、山大和华师等单位投入大量人力和经费建设硅探测器和ASIC芯片研发实验室，目前已初具规模。团队与国际领先的研究机构紧密合作，通过承担部分LHC硅探测器升级研制任务和负责CEPC硅探测器ASIC芯片关键技术的预研，学习和掌握相关的设计，制作和性能测试等，培养一批富有创新能力的硅探测器技术研发人才。

受制于ASIC芯片和电子学核心技术的长期禁运，国内在高能粒子探测器读出电子学方面跟国际先进水平差距较大。希望通过CEPC探测器关键技术预研和LHC实验探测器升级项目，加强在大规模/高密度/高集成度、低噪声/低功耗、高速电子学方面的研发和不断积累经验，同时培养一批优秀的电子学专业人才。

基于粒子流算法的高颗粒度量能器对提高强子喷注的能量分辨有显著效果【8】，目前开展的技术方案主要包括基于硅-钨取样型高粒度和高时间分辨电磁量能器，闪烁体-硅光电倍增管（SiPM）作为灵敏器件和信号读出的取样型量能器。上述新型技术已经纳入LHC实验量能器升级改造方案，中国组积极参与CMS（2026完成）和LHCb（2031完成）量能器升级项目并开展相关预研。2016年起，科技部大科学装置国家重点研发计划资助开展CEPC探测器关键技术预研，团队开展基于闪烁体-硅光电倍增管的取样型量能器样机预研，取得了显著进展，预计2020年底进行电磁量能器束流测试。目前正在尝试用国产的硅光电倍增管（NDL SiPM），拟用于强子量能器样机研制，预计2022年进行束流测试。随着微型化硅光电探测器件如SiPM的迅速发展，通过新的纵向分段设计与读出，基于晶体的全吸收型电磁量能器不仅具有优异的能量分辨率，还可以获取电磁簇射的纵向信息，提升粒子鉴别效率。此外，还可以采用分别读出契伦科夫光和闪烁光信号的双读出方案（Dual-Readout）显著提高喷注的能量分辨。为了针对下一代加速器实验研发高性能量能器技术和方法，专门成立了CALICE国际合作组【7】。高能所、科大、清华和交大近年来加入CALICE合作组。积极参与国际合作研究，开展广泛学术交流，并培养一批优秀青年人才。

高计数率、大面积的窄气隙阻性板室（RPC）、微气隙气体探测器（GEM、THGEM和MicroMegas）、时间投影室（TPC）等已经成功应用于粒子物理实验作为粒子径迹或者触发探测器。团队在RPC研制方面有较长历史并积累了丰富的经验，与国际同行大致处于同步合作研制状态。特别是低阻玻璃阻性板材料方面，国内有专利产品，在国际上处于相对领先地位。在时间投影室和微气隙气体探测器研制方面，团队一直参与国际合作（如LCTPC，CALICE），有相当的人才和技术积累，但仍需要进一步加强。

MDI部分内容（宏博帮助添加）

粒子探测器研发过程中需要对器件或样机进行各种性能研究和抗辐照测试，需要利用高流强的粒子束流测试装置，国际上主要的粒子束流测试装置如表一所示【9】。国内的束流测试装置能量较低，对于高能量前沿粒子探测器的束流测试，大多依赖于欧洲核子研究中心、美国费米实验室等研究机构。如果未来在国内建造大型对撞机实验，高能量的束流测试装置是必不可少的。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 束流测试装置 | 粒子束流 | 粒子动量 |
| CERN SPS | 电子，缪子，强子 | 10-400 GeV |
| CERN PS | 电子，缪子，强子 | 1-15 GeV |
| DESY | 电子 | 1-6 GeV |
| Fermilab | 电子，质子，p，K | 1-120 GeV |
| SLAC | 电子，质子，p | 1-20 GeV |
| KEK | 电子 | 0.5-3.4 GeV |
| 北京高能所 | 电子，质子，p | 0.1-1.2 GeV |
| 东莞散裂中子源 | 中子 | 低能中子 |

表一：国际上主要的粒子束流测试装置

二、高亮度前沿

**第四章：围绕中国基于加速器的粒子物理领域发展的相关政策建议**

1. 中国基于加速器的粒子物理领域发展的政策建议

（针对关键科学问题、关键技术问题和优先发展领域的表述，提出前沿领域发展的资助策略等政策建议。）

1. 中国基于加速器的粒子物理领域资助战略实现的配套措施

（从能力建设、队伍建设、制度建设、法规建设、环境建设、国际合作政策、组织保障等方面出发，提出有利于前沿领域资助战略实现的配套措施。）

**第五章：中国基于加速器的粒子物理领域发展路线图**

（总结前面四章内容，对我国基于加速器的粒子物理领域发展给出一个明晰的路线图。）

**参考文献**

1. 苑长征，吕晓睿，李海波，北京谱仪实验30年，现代物理知识31卷4期，2019

[http://mp.ihep.ac.cn:8080/jwk\_xdwlzs/CN/volumn/volumn\_1320.shtml#](http://mp.ihep.ac.cn:8080/jwk_xdwlzs/CN/volumn/volumn_1320.shtml)

<http://www.ihep.cas.cn/exhibit/kxyj/201705/t20170516_4792638.html>

1. <http://www.ihep.cas.cn/xwdt/cmsm/2019/201909/t20190903_5375006.html>
2. <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2019/11/432413.shtm>
3. ATLAS Collaboration, <https://atlas.cern/>

CMS Collaboration, <https://cms.cern/>

LHCb Collaboration, <https://lhcb-public.web.cern.ch/>

ALICE Collaboration, <https://aliceinfo.cern.ch/>

1. FCPPL，<http://fcppl.in2p3.fr/cgi-bin/twiki.source/bin/view/FCPPL/WebHome>
2. CEPC Conceptual Design Report: Volume 2 – Physics and Detector , [arxiv:1811.10545](https://arxiv.org/abs/1811.10545), <http://cepc.ihep.ac.cn/>
3. CALICE Collaboration, <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CALICE/WebHome>

LCTPC Collaboration, <https://www.lctpc.org/>

RD Collaboration, <https://rd51-public.web.cern.ch/>

AIDA-2020, <http://cern.ch/aida2020>

1. PFA algorithms, Pandora @ arXiv:1308.4537, Arbor @ arXiv:1403.4784
2. Test beam facility, CERN arXiv:1905.07657,

DESY test beam facility, NIM A922 (2019) 265-286, [arXiv:1807.09328](https://arxiv.org/abs/1807.09328)

<https://indico.ihep.ac.cn/event/7186/session/4/contribution/24/material/slides/0.pdf>