

高能所与我的科研生涯

——从直线对撞机ILC到环形对撞机CEPC

高 杰

(中科院高能物理研究所 100049)

中国科学院高能物理研究所于1973年2月1日建所,2023年是高能所建所50周年,这五十年也是中国高能物理大发展的50年。作为高能所的一员,我的学习、工作和成长也都与高能所分不开。本文通过回顾个人学习、工作和成长过程中的点滴经历,从一个具体且特殊的角度祝贺高能所建所50周年。

70年代初,读初中学时,我热衷于无线电,自己动手组装各种类型收音、无线电发射机等,那时候的梦想就是今后能在无线电厂工作,用上专业的示波器。1977年高考制度恢复,那股春风扑面的感觉到现在都记忆犹新。1978年夏的一天,父亲兴奋地从传达室取回了我的清华大学录取通知书。还记得当年选择报考专业时的情形,在报纸上刊登的清华大学专业中选择了工程物理系的加速器物理与技术专业,感觉这是个核科学领域有力量的专业。

入学不久,大约是1978年的10月份,加速器教研组便组织新生到中国科学院高能物理研究所参观。参观实验室感觉就像是亲临战场前线一样,有着一一种真实感和神圣感,既是一种感性认识,又是一种理性认识。科研人员办公桌上成堆的厚厚的外文期刊杂志,给我留下很深的印象。参观完实验室,同学们来到了高能所主楼二层的阶梯教室,一位年近花甲、精神矍铄的老教授在讲台上给学生们介绍高能所的研究领域、科研情况及对中国高能物理未来发展的展望,他讲的具体细节现在记不起来了,但他重点讲到高能所计划在昌平建造的“87工程”项目(50 GeV质子同步加速器计划),他就是我国著名加速器物理与技术专家及“87工程”项目总

设计师谢家麟教授。这次参观给我留下了深刻的印象,在我人生中与高能所的缘分就是那时建立的。

大学期间,中美建交,80年代初,加速器教研室老师们有机会出访美国各大国家加速器实验室,如SLAC, FNAL, BNL等,带回了大量先进的加速器和对撞机实物照片,并制成教学幻灯片。看到这些世界一流的先进的加速器和对撞机,同学们对什么是当代先进加速器和对撞机有了直观的感性认识,既感受到我国加速器发展水平与世界的巨大差距,也明确了今后努力的目标和方向。

五年大学时光一晃就过去了,到了拿上猎枪试着自己猎取食物的毕业论文阶段。我被教研组推荐到中科院高能物理研究所做毕业论文实习研究。高能所的指导老师周立农研究员因为在湖北还有谢家麟先生提出的新型高梯度驻波剑耦合直线加速器的加工任务,他介绍了装备齐全的微波实验室和微波测量仪器的使用方法,留下一张精心准备的任务书和一长串英文期刊文献目录就匆匆出差了。在周老师给出的期刊文献和实验室中不断摸索前进,看着推导出的新的电磁场微扰测量理论公式与实验测试结果的高度吻合,我慢慢感觉到了独立从事科学研究的乐趣。三个月后,大学毕业论文顺利完成了,也是我在高能所完成的第一个科研题目,多年后这个大学期间的毕业论文研究成果发表在美国的学术杂志上^[1]。

1983年大学毕业后,我顺利考上了清华本专业的硕士研究生。我的硕士论文是关于产生亚微米Ga离子束的四电极静电透镜系统的研制,目的是提

升我国集成电路制造水平。1986年,电子部提出“七五”期间我国集成电路技术“531”发展战略,即普及推广5微米技术,开发3微米技术,进行1微米技术科技攻关。三年的学习和研究进展顺利,经过艰苦努力终于在1986年从实验上得到了亚微米Ga离子束。

自1983年在高能所开始建造的北京正负电子对撞机(BEPC)工程始终是我关注的重点,心里总有着要为国家大科学工程做贡献的追求与理想。1986年硕士毕业后,我考取了中科院高能所北京正负电子对撞机工程总经理谢家麟先生的博士生。来到高能所,谢先生给我定的博士论文工作是用于北京自由电子激光装置的微波电子枪的理论与实验研究。在1986年,基于直线加速器的自由电子激光装置世界上只有美国的实验搞成功了。在当时的“里根时代”,美国苏联正在进行大国战略竞争,美国的“星球大战”计划中的天基武器之一就是当时只有美国掌握的基于直线加速器的自由电子激光器技术。我的研究工作的起点就是从谢先生到美国斯坦福大学直线加速器中心访问并从自由电子激光发明人John M. J. Madey教授那里带回来的一些草图和John M. J. Madey的博士生G.A. Westenskow等撰写的微波电子枪手册^[2]开始的。记得那时时常到谢先生的家里讨论问题,从微波技术到阴极材料,从粒子动力学到束流实验。谢先生邀请美国洛斯阿拉莫斯(Los Alamos),阿贡(Argonne)和美国其他国家实验室的科学家来讲解自由电子激光原理和加速器物理。在这段时间里,无论是通过谢先生的介绍还是与国外科学家的面对面讨论都感到国际视野、国际交流与国际合作的重要性和必要性。谢先生时常对井底之蛙式的狭窄视野的批判和“想吃馒头,先种麦子”的迎难而上,从研制基本关键部件做起,从人才培养抓起的研究方法对我之后的思想方法和工作方法都起到了重要的指导性作用。

我的研究工作除了理论设计,就是画图纸,跑材料,找工厂,出差,联系合作伙伴,安装和实验。

在实验方面,谢先生强调的要把东西做出来是最重要的观点对我也产生了很大的影响。一年多以后,工作有了很大进展,微波电子枪系统开始联调,电子返轰阴极问题基本得到控制。

1988年暑期的一天,谢先生领着一对法国夫妇来实验室参观。被告知那位先生是法国国家科研中心(CNRS)直线加速器研究所(LAL)的所长Prof. M. Davier后,我给他们介绍了北京自由电子激光微波电子枪装置和实验结果^[3]。临别前,所长对我说:欢迎你到法国LAL来。之后很快我就收到了法方的邀请信。1989年4月,我来到了巴黎法国国家科研中心直线加速器研究所,我的博士学习阶段也转到了巴黎第十一大学加速器物理与技术专业。我于1992年获得博士学位,1996年获得大博士学位(Habilitation à diriger des recherches, 指导研究资格),1993年1月1日成为法国国家科研中心的终身研究员。

位于法国巴黎郊区奥赛的LAL,是世界上第一台环形正负电子对撞机Ada实验验证成功的诞生地,并建有世界第一台带有螺线管探测器的环形正负电子对撞机ACO和第一台双环正负电子对撞机DCI^[4]。一些世界知名的科学家在这里的对撞机上开展过研究工作,如B. Touschek, P. Marin, J. Haïssinski, J. Le Duff(我的法国导师)等。除了环形正负电子对撞机加速器物理与技术方面历史厚重,在正负电子直线加速器方面也有深厚积淀与传统。欧洲核子中心CERN的27km周长的正负电子对撞机LEP于1989年8月13日首次实现对撞,其600MeV正负电子直线加速器注入器LIL由法国LAL承建。在粒子物理领域,LAL的前任所长Andre Lagarrigue(任期1969—1975),在1964年提出并领导在CERN建造的Gargamelle实验装置(运行1970—1979)和实验合作组。于1973年在Gargamelle上发现的中性流首次在实验上预示着Z⁰玻色子的存在,为电弱理论的后续证实奠定了重要的实验基础。

LAL的图书馆收藏了很多宝贵学术资料,有机

会在像 LAL 这样在高能物理领域有着深厚历史积淀的研究所学习和研究感到是十分幸运的。LEP 建成以后,世界各大高能物理实验室继续从两个方向寻找标准模型预测的 Higgs 玻色子,一个是正负电子直线对撞机,如苏联的 VLEPP,美国的 NLC,日本的 JLC, CERN 的 CLIC,德国的 SBLC 和 TESLA,一个是强子对撞机,如美国的 SSC 和 CERN 的 LHC。正是在这样的以高能物理前沿为目标的工作环境中和国际高能物理发展大趋势的历史背景下,自 1992 年起,我的研究方向指向了以发现和研究希格斯玻色子的未来高能对撞机,并在直线对撞机总体设计、加速器结构和粒子动力学方面取得了一系列成果^[5-9],我的法国大博士学位论文题目就是未来高能正负电子直线对撞机相关加速器物理研究^[10]。1996 年 8 月,应李政道教授的邀请,我回国在中国高等科技中心(CCAST)做了为期三天的未来正负电子直线对撞机加速器物理关键问题的系列报告。1999 年应 SLAC R.Ruth 教授的邀请赴 SLAC 与 T.Raubenheimer 教授开展 NLC(Next generation Linear Collider)MDI 合作研究。

在环形正负电子对撞机方面,除了正在 CERN 运行的 LEP,在上世纪 90 年代中期高能所 BEPC 进行亮度升级,日本 KEK B Factory 美国 SLAC PEP-II 开始建设,因此,环形正负电子对撞机设计与实验中关键物理问题也开始成为我的主要研究内容,在例如束团纵向和横向不稳定性、动力学孔径解析理论、束束相互作用物理机制与极限解析公式等方面取得一系列重要突破性成果^[11-16],其中束束相互作用极限解析公式在后来的 CEPC 设计中发挥了重要作用^[16]。2003 年应美国 SLAC PEP-II 加速器负责人 J. Seeman 的邀请赴 SLAC 开展 PEP-II 亮度优化提升及束束相互作用合作研究。2004 年应 J. Urakawa 教授的邀请,赴 KEK 在直线对撞机阻尼环 ATF 开展合作研究。

在法国近 16 年中,我的研究工作集中在高能粒子直线对撞机和环形对撞机研究,解决了一系列相

关加速器领域的理论难题。我的法国同事、国际著名正电子源专家 Dr. R. Chehab 一次在自助咖啡机前看到我的手在兜里一个劲地找零钱,便跟我开玩笑地说:“高先生,您丢了您的公式吗?”对于我来说,这不只是一个高水平的法国式幽默,更是对我研究工作成果的一种认可,是我到目前为止听到的最为受用的“恭维”话,毕竟科学的最终目标是建立起基于数学公式体系并与实验相符的科学规律。

通过与欧洲核子中心 CERN (CTF2/CTF3/CLIC),德国 DESY(SBLC/TESLA)的密切合作,和赴美国 SLAC,日本 KEK 等实验室进行短期访问交流等国际合作研究,为今后的科学研究和国际合作打下了重要的基础。

2005 年我辞去法国国家科研中心 LAL 的终身职位,回到高能所任研究员,并得到 2005 年度国家杰出青年科学基金和中科院“百人计划”择优支持资助。临行前,中国驻法国大使馆教育处和全法中国科技工作者协会为我举行了欢送会,使我终生难忘。

2004 年 8 月国际未来高能粒子加速器委员会(ICFA)决定下一代高能粒子对撞机为超导型直线对撞机,命名为国际直线对撞机(International Linear Collider, ILC)。2005 年 1 月回国后我立即组织研究所内及国内各方面的力量建立国际合作团队,成立 ILC 国际合作组,开展 ILC 国际合作。2005 年在美国 Snowmass 召开的 ILC 启动会上,我成为代表中国参加的 ILC GDE 成员,并作为 ILC 阻尼环负责人之一和 ILC 参数变化控制委员会成员在 Barry Barish 教授的领导下开展国际合作研究^[17],并从中学习和体会国际大科学工程推进过程中的经验与艰辛。Barry Barish 教授因引力波在 LIGO 上的实验发现而分享 2017 年的诺贝尔奖,他在 ILC 推进过程中的踏实务实的工作方式与领导 LIGO 的成功经验密不可分。

ILC 所采用的先进超导加速器技术是当时我国相对落后的技术和人才队伍短板,积极参加 ILC 国

际合作不仅可以融入国际高能物理发展前沿,也能尽快提升我国超导加速器技术水平和建立起一支高水平的人才队伍。2006年12月申请成功并召开了议题为:“面对国际直线对撞机(ILC)大科学国际合作项目,中国将如何应对”第294次香山会议,来自国内外的高能物理理论、物理实验、加速器和探测器专家参加了会议,对希格斯粒子研究的重要性、紧迫性,及相关加速器和探测器关键技术预研等方面进行了充分讨论,形成了重要的会议成果。在随后的所创新项目、中央财政部、北京市科委等方面的经费支持下,经过大家的艰苦努力,掌握了1.3GHz超导加速组元,超导腔,高功率耦合器,调谐器,低电平,超导腔表面处理、实验室测试装备等一系列关键技术,并实现我所1.3GHz超导腔生产产业化。在这发展过程中,通过ILC国际合作,与日本KEK,美国JLab, FNAL等国家实验室在超导加速器技术方面开展了实质性合作,促进了关键技术的掌握,培养和锻炼了队伍,同时也培养了一批对撞机加速器物理与技术的博士生。在环形正负电子对撞机研究方面也结合BEPCH的亮度设计目标在2007年提出了小动量压缩因子,短束长和小 β_x (1.2cm)的优化方案^[18]。

在开展相关对撞机加速器物理与超导加速器技术的研究及人才培养的同时,也着眼未来及时开展了等离子体加速研究和人才培养。2005年11月作为会议主席在中国高等科技中心(CCAST)召开了激光等离子体加速研讨会,并以此为契机积极开展与国内国际合作研究与人才培养,为今后的发展,特别是在等离子体加速技术在CEPC注入器的可能应用积蓄了力量。

2010年5月我接替日本KEK黑川真一教授,被亚洲未来加速器委员会ACFA任命为亚洲直线对撞机指导委员会主席,并在ICFA直线对撞机理事会(LCB)的十年工作中经历和见证了国际国内高能物理发展的重要历史阶段。

2012年7月4日,欧洲核子中心宣布发现了标

准模型预言的希格斯玻色子,这个是科学领域的历史性重大发现,科学意义和影响极为深远。我国科学家于2012年9月及时提出了在中国建设未来环形正负电子对撞机CEPC-SppC的宏伟设想。我国的高能物理发展在希格斯粒子等前沿科学研究方面终于有了以为我为主开展国际合作的高远目标。作为CEPC的核心科学家之一,我与CEPC团队同事和年轻学子们投入到这一具有宏伟科学目标的国际合作项目研究中去,并发挥了自已应有的作用。2013年6月首次提出了带角度Crab-waist对撞的局部双环对撞机的设想^[19]。2015年3月CEPC完成了预概念设计报告(Pre-CDR),2018年11月CEPC团队对外发布了CEPC概念设计报告(CDR),开展了关键技术预研,并于2022年底完成CEPC技术设计报告(TDR)。在建所50周年之际,CEPC也将进入关键的工程设计报告(EDR)阶段,并为开工前的建设做好准备,希望CEPC在2035年左右建成并投入使用。自2012年希格斯粒子被发现和CEPC-SppC设想被提出并不断推进的这十年,中国高能物理在国际的影响力和竞争力有了巨大的提升,中国的高能物理也必将在多变的国际合作与竞争中发展壮大,并为人类的知识增长做出中国贡献。

除了本职工作,还在全国政协、致公党、侨联等平台,通过建言献策发挥自己的社会作用,我建议的北京海外学人中心于2008年12月正式挂牌成立。我于2009年、2013年、2018年连续三次获得中国侨联和国务院侨办授予的全国归侨侨眷先进个人荣誉称号,2012年获得中国侨联第四届中国侨界贡献奖(创新人才)。

回想起1978年第一次参观高能所,到2023年作为高能所的一员庆祝高能所建所50周年,个人的成长经历、人生轨迹和所取得的研究成果都与高能所这一大平台的发展壮大密不可分,我也将同大家一起共同努力,通过坚实的科学研究继续为高能所和高能物理事业的发展添砖加瓦^[20,21],高能所未来的发展也将

收获更加丰硕的科学技术成果与辉煌(图1)。



图1 高杰办公室照

参考文献

- [1] J. Gao, "Effects of the cavity walls on perturbation measurements", IEEE trans.Instr. and Measurements, Vol. 40, no. 3, June 1991, p. 618.
- [2] G.A. Westernskow, J.M.J. Madey, L.C. Vintro, S.V. Benson, "Owner's Manual for the microwave electron gun", HEPL Technical Note TN-86-1, February, 1986.
- [3] J. Gao and J. L. Xie, "Rf gun development at IHEP for BFELP", Nucl. Instr. and Meth., A304 (1991), p. 375-363.
- [4] J. Gao, "Review of different colliders", International Journal of Modern Physics A,(2021) 2142002 (25 pages)
- [5] J. Gao, "Analytical formula for the coupling coefficient of a cavity-waveguide coupling system", Nucl. Instr. and Meth., A309 (1991), p. 5-10.
- [6] J. Gao, "Analytical formulae for the resonant frequency changes due the opening apertures on the cavity walls", Nucl. Instr. and Meth., A311 (1992), p. 437-443.
- [7] J. Gao, "Analytical approach and scaling laws in the design of disk-loaded travelling wave accelerating structures", Particle Accelerators, Vol. 43(4) (1994), p. 235-257.
- [8] J. Gao, "Analytical formulae and the scaling laws for the loss factors and wakefields in disk-loaded periodic structures", Nucl. Instr. and Method, A381 (1996), p.174.
- [9] J. Gao, "Analytical treatment of the emittance growth in the main linacs of future linear colliders", Nucl. Instr. and Methods, A441 No. 3 (2000), p. 314.
- [10] J. Gao, "Analytical researches on the accelerating structures, wakefields, and beam dynamics for future linear colliders", La thèse d' Habilitation à Diriger des Recherches, LAL 96-45.
- [11] J. Gao, "Bunch lengthening and energy spread increasing in electron storage rings", Nucl. Instr. and Methods A418 (1998), p. 332.
- [12] J. Gao, "Analytical estimation on the dynamic apertures of circular accelerators", Nucl. Instr. and Methods, A451 (2000), p. 545.
- [13] J. Gao, "Analytical estimation of the beam-beam interaction limited dynamic apertures and lifetimes in e^+e^- circular colliders", Nucl. Instr. and Methods, A463(2001), p. 50.
- [14] J. Gao, "On the scaling law of the single bunch transverse instability threshold current vs the chromaticity in electron storage rings", Nucl. Instr. and Methods, A491 2002, p. 346.
- [15] J.Gao, "Analytical treatment of some selected problems in storage rings and linear accelerators", LAL/RT 03-04, 2003. (191 pages)
- [16] J. Gao, "Emittance growth and beam lifetime limitations due to beam - beam effects in e^+e^- storage ring colliders",Nucl. Instr. and Methods A 533 (2004) P.270 - 274.
- [17] J. Gao,"Parameter choice for ILC", High Energy Physics & Nuclear Physics,Vol. 30(S1): 156158, (2006) NSFC.
- [18] Yi-Peng Sun, Jie Gao, "Some Studies on Increasing the Luminosity of BEPCII", High Energy Physics & Nuclear Physics, Vol. 31 (2) 1-5, 2007.
- [19] J. Gao, "关于 CEPC 采用亚毫米 β ,带角度对撞以减小辐射功率并保证对撞亮度的 Lattice 优化设计建议", IHEP-AC-LC-Note 2013-012.
- [20] 高杰, "高能粒子对撞机加速器物理与设计", 上海交通大学出版社, 2019 年出版.
- [21] 高杰, 李煜辉, 翟纪元, "高能粒子加速器关键技术", 上海交通大学出版社, 2021 年出版.