

慢正电子束流技术在 中国的发展

于润升 王宝义 魏 龙

(中国科学院高能物理研究所 100049)

1. 引言

1930年,赵忠尧先生在研究硬 γ 射线在重金属中的散射现象时发现除康普顿散射和光电效应外的“反常吸收”,同时伴随能量约为0.5 MeV、辐射角分布各向同性的“特殊辐射”。1932年,赵忠尧先生在美国加州理工学院的同学安德森(C.D. Anderson)受此启发而在宇宙线的云雾室照片上首次观察到了正电子的轨迹。赵忠尧先生是发现正负电子湮没现象的第一人,对正电子的发现有重要贡献。

现在正电子湮没技术已经发展为一门学科。其基本原理是正电子作为电子的反粒子,和电子结合变成光子,遵从爱因斯坦公式: $E=mc^2$,正负电子湮没辐射的光子携带湮没电子的信息。正电子湮没谱学是测量正电子在物质中与电子发生湮没后放出的湮没 γ 射线的时间谱、能谱、动量谱等参数的一种现代核谱学测量方法。正电子湮没研究材料微观缺陷独具特色,可提供缺陷种类、缺陷浓度、缺陷化学环境、缺陷深度分布等信息;而且正电子对尺寸小于1 nm的缺陷十分敏感,同时对含量少至1 ppm的缺陷也可进行探测。正电子湮没技术在材料科学中的应用已非常广泛,包括研究淬火、氢损伤等在材料内部造成的各种缺陷,研究材料中的各种相变过程等;原则上涉及材料电子密度及电子动量变化有关的问题,都可以用正电子湮没技术来研究。

慢正电子束的建立使正电子湮没技术涉入当今十分活跃的表面、界面、团簇等科学领域,成为包

括半导体薄膜、高分子薄膜等高端膜材料,以及金属合金、先进陶瓷等先进材料的表面和界面微结构和原子级缺陷的衍化的灵敏核探针。与传统正电子湮没技术利用放射性同位素产生的正电子具有能量连续分布的特性从而得到材料内部缺陷的体分布信息不同,慢正电子束的产生是创新性地利用慢化技术及加速器技术得到能量单色并连续可调的慢正电子束流,从而给出固体表面、近表面缺陷随深度分布的信息。这也直接导致了与表面科学中电子探针相对应的一系列新颖正电子探针的出现。例如,由于不存在入射电子散射造成的二次电子背底,正电子衍射比电子衍射可以更有效地、更清晰地研究固体表面的周期性排列;正电子激发的俄歇能谱也有比电子俄歇能谱更高的信噪比,可研究固体最表面的原子状态;用正电子代替电子作为入射束流可组成新的显微镜,正电子从固体表面的重发射受表面和近表面空位型缺陷的影响,因此正电子显微镜可用于无损探测和研究表面层下的缺陷。

正电子湮没技术在物理学、化学等基础学科的应用也较为广泛。作为电子的反物质,正电子一直吸引着众多的物理学家,通过研究它和电子之间的相互关系可以验证量子电动力学中的有关结论,探讨正反物质世界的对称性;正电子素化学已经形成一门学科,在研究分子筛、催化分离等问题中有独特的作用。此外,基于正电子湮没辐射成像原理的正电子发射断层成像技术在生命科学领域影响日益扩大。在高能物理领域,正负电子对撞机已成为

人们研究物质组成最小单元和基本粒子性质与相互作用的大型科研基础设施。令人鼓舞的是我国科学家在上述各领域长期以来一直从事与世界同步的科学研究。表1列出了我国正电子湮没谱学领域部分重要的科研进展和事件。

2. 我国正电子湮没谱学早期部分重要进展

20世纪70年代末期,我国老一代核科学专家紧跟国际核分析技术的发展以及正电子湮没谱学

技术的发展,在中国科学院高能物理研究所建立了我国第一台正电子湮没寿命谱仪,部分插件示于图1,并利用这台谱仪培养了国内包括清华大学、中国科技大学、武汉大学、兰州大学等高校的一批青年学者,部分成长为本领域及所在单位学术研究带头人。

1979年4月,在中国科学院的主持下,由上海原子核所承办召开的“文革”后首次“核电子学与核探测器”学术会议,会上发表与正电子湮没寿命谱仪相关论文2篇(张天保等,《核探测器与核电子学》(1979年会议资料汇编),pp.307-311, 328-333)。同年,我国科学家首次参加了在日本召开的第5届

表1 我国正电子谱学领域部分重要研究进展及事件简表

年份	重要进展	研究单位等
1970s	第一台正电子湮没寿命谱仪	中科院高能所
1978	第一批研究生入学(何元金、郁伟中等)	清华大学
1979	第一次参加国际正电子湮没会议ICPA-5	中科院高能所、中科院上海原子核所
1979	第一篇正电子湮没相关论文(《核探测器与核电子学》)	中科院高能所
1980	第一篇中文文章(《核技术》工作简报栏目)	中科院高能所
1980	第一套ORTEC正电子湮没寿命谱仪购置引进	清华大学
1981	第一届全国正电子湮没会议(赵忠尧先生出席了会议)	中科院高能所主办
1983	第一次全国性正电子湮没讲习讨论班	清华大学
1983	第一本专业书籍出版,《正电子湮没技术》	清华大学何元金、郁伟中翻译
1983	第一次邀请国外正电子学者(徐孝华,美籍)来华举办讲习班	南京大学
1985	第一台湮没角关联谱仪	中国科技大学、中科院高能所、中科院沈阳科仪厂
1987	第一位正电子谱学博士毕业(王天民,国外培养)	兰州大学
1988	第一台正电子湮没时间选择能谱仪	中科院高能所
1989	第一位正电子谱学博士毕业(周先意,国内培养)	中国科技大学
1990	第一台慢正电子束流装置	中国科技大学
1994	第一次举办国际正电子湮没会议ICPA-10	清华大学
1997	第一位国际正电子专业顾问委员会委员(何元金)	清华大学
1999	第一次在国内举办慢正电子束流技术发展与应用研讨会	中科院高能所&中国高等科技中心
1999	第一位正电子谱学博士后出站(王宝义,导师:叶铭汉)	中科院高能所
2002	第一位国际正电子与正电子素化学委员会委员(王少阶)	武汉大学
2004	第一次在国内举办慢正电子束流的国际研讨会	武汉大学
2004	第一台基于电子直线加速器的慢正电子强束流系统	中科院高能所
2004	第一台高性能符合多普勒展宽(CDB)系统	中科院高能所
2005	第一台高性能正电子湮没寿命-动量关联(AMOC)谱仪	中科院高能所
2006	第一台数字化正电子湮没寿命谱仪	中国科技大学
2007	第一台基于Ne晶体慢化器的慢正电子源系统	武汉大学
2008	第一次举办国际正电子与正电子素化学会议PPC-9	武汉大学
2012	第一次中日正电子科学论坛	武汉大学
2012	第一套Ps-TOF测量系统	中科院高能所
2021	第一批赵忠尧正电子青年科学家奖(张宏俊、袁悦、靳硕学)	中国科技大学、北京航空航天大学、中科院高能所
2022	第一位中国物理学会吴有训奖(魏龙)	中科院高能所

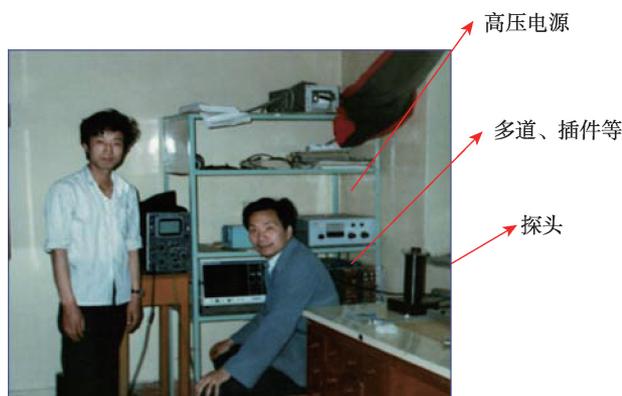


图1 第一台正电子湮没寿命谱仪所采用的部分组件(探头、多道、高压电源、插件等)。图中研究人员为张天保(右,高能所)、王宝义(左,兰州大学)

国际正电子湮没会议,并提交研究论文(Y.Y. Wang, T.B. Chang, S.Y. Wang, Proc. 5th Int. Conf. Positron Annihilation (Japan, 1979), pp. 227-229)。1981年,中国科学院高能物理研究所在苏州主办了正电子湮没技术学术讨论会,即第一届全国正电子湮没学术会议。赵忠尧先生出席了本次会议(图2)。参会单位还包括武汉大学、清华大学、兰州大学、中国科技大学、北京钢铁学院(现北京科技大学)等国内高校以及中国科学院上海原子核研究所、金属研究所、福建物构所以及中国原子能科学研究院等研究单位。29篇会议论文刊登在《核技术》1982年第6期。

人才培养方面,1978年,清华大学固体物理班的何元金、郁伟中、顾秉林、范守善等成为第一批开展正电子湮没工作的研究生,导师为熊家炯,高乃飞等。学生们初期在中科院高能所做实验,后来在



图2 第一届全国正电子湮没学术会议合影(赵忠尧先生,第2排居中)

高能所的技术指导下购置自己的仪器。1983年,何元金、郁伟中翻译出版了《正电子湮没技术》,([芬兰]P. 豪托贾维主编),为我国第一部正电子谱学出版专著。

正电子湮没谱学基本实验技术也不断发展。由中国科学技术大学、中国科学院高能物理研究所、中国科学院沈阳科学仪器厂和中国科学院金属研究所协作,1980年7月开始研制的我国第一台正电子湮没辐射一维角关联实验装置于1985年通过中国科学院数学学部鉴定后投入运行。1986年中国科学院高能物理研究所研制成功BaF₂晶体探测器的高分辨正电子湮没寿命谱仪,并在全国进行推广,使我国正电子湮没谱仪的性能得到极大的提高,在国际上处于先进水平。1988年,张天保应邀参加第8次国际正电子湮没会议并做大会报告,介绍在高能所发展的正电子湮没时间选择能谱仪(TSES)技术及所完成的正电子素物理方面的研究工作。

随着慢正电子束流技术的发展,国际上在1984年、1985年和1986年先后举办过慢正电子束流技术方面的国际研讨会。自1990年开始,每2年定期举办一次慢正电子束流在固体及表面中应用(International Workshop on Slow Positron Beam Techniques for Solids and Surfaces - SLOPOS)的国际研讨会,并有正式会议文集出版。国内于90年代后,中国科技大学和清华大学先后建立了早期模式的慢正电子束流装置,进行了相当数量和质量的工作;武汉大学也有慢正电子束流装置建设计划。但由于诸多原因(主要是超高真空设备费用、进口固体密封源需要大量外汇等),限制了慢正电子束流技术在中国的发展和应,国内情况相对国际来说依然相当落后。

3. 北京慢正电子束流平台的研制与应用

1996年,中国科学院高能物理研究所联合清华大学、北京航空航天大学、中国原子能科学研究院开始共建北京慢正电子束流装置。经过束流设计、真空部件及磁场输运系统等的加工调试,装置于

1998年统调成功,2001年购置 ^{22}Na 放射源到位后即开始正式运行。图3为建成的慢正电子束流装置。



图3 建成的北京慢正电子束流装置

考虑到正电子的产生除了放射性同位素外,也可依赖高能电子束打靶发生正负电子对效应而产生;同时高能所在加速器科学与技术方面具有优势,而且是国内唯一一家在电子直线加速器正电子靶源方面有成功经历的单位,完全有能力建成基于电子直线加速器(LINAC)的慢正电子强束流装置。鉴于此,在叶铭汉院士等专家关心支持下,1999年初中科院高能所联合中国高等科技中心召开了慢正电子束流技术发展与应用研讨会。参会学者包括清华大学、中国科技大学、北京航空航天大学、武汉大学、中国原子能科学研究院、中科院兰州化学物理所,以及高能所自由电子激光装置和北京正负电子对撞机试验束等单位及设施相关专家,大家一致认为加速性(或跟踪式)发展、提高我国的慢正电子束流技术势在必行。慢正电子强束流项目在酝酿过程中,曾考虑选择利用北京正负电子对撞机或北京自由电子激光装置电子直线加速器打靶产生正电子,得到谢家麟院士、郑林生先生等老一辈科学家的大力支持。国家自然科学基金委员会在1998年批准的“用于材料表面、界面研究的单色正电子束研究”项目(负责人魏龙)基础上,于2000年立项支持了专项项目“基于北京正负电子对撞机

的慢正电子强束流”的研究工作。北京正负电子对撞机国家实验室给予大力支持,批准新建实验大厅并为束流装置提供年度运行费。2003年,全部完成了北京慢正电子强束流装置(图4)的电子束流模拟调试、脉冲慢正电子束流性能的测试、脉冲慢正电子的直流化效果和性能测试、正电子湮没能谱仪的调试、慢正电子强束流加速场的设计。2007年后因北京正负电子对撞机二期工程LINAC升级改造,该装置又增加了 ^{22}Na 放射源插件件,以保证慢正电子强束流装置的连续稳定运行。

同时,基于慢正电子强束流装置,2007年完成慢正电子湮没寿命谱测量装置的研制;设计的微束团化装置由反射式斩波器、三电极预聚束器、主聚束器三部分组成。2012年,研制成功基于北京慢正电子强束流的Ps-TOF谱仪(图5);其核心探测系统



图4 基于北京正负电子对撞机LINAC的慢正电子强束流装置

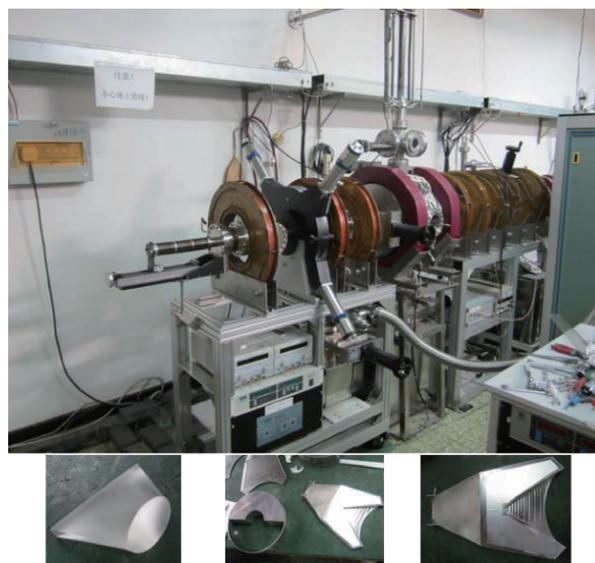


图5 第一套电子偶素飞行时间(Ps-TOF)测量系统

采用新的闪烁体几何构型和四探头探测系统,并采用增加辅助反射面的方法提高了光收集效率。

2013年,高能所王宝义等在财政部中央级科学事业单位修缮购置专项基金资助下开展基于Ne慢化体的慢正电子束流材料表征系统(图6)建设,系统涉及的各项仪器建成后面向国内外用户开放运行。

在慢正电子束流装置建设的同时,基于慢正电子束流的正电子测量方法学也一直在不断完善。2003至2006年,魏龙、王宝义等开展了高时间分辨率、高稳定性正电子湮没寿命谱仪的研制改进,以及正电子湮没符合多普勒展宽(CDB)系统(图7)、正电子湮没寿命-动量关联(AMOC)谱仪等基于二重和三重符合测量技术的新型谱仪的建设,特别是在国内首次自主设计加工制造了二维多道所需电子学板卡。

因上述一系列开创性的工作,2005年高能所正电子团队获得慢正电子束流研究平台的研制和应用北京市科学技术一等奖(图8);并再次于2015年获得高分辨正电子时间测量技术的研究应用北京市科学技术一等奖。

高能所正电子研究平台在新型功能材料微结构表征中得到了广泛的应用,特别是慢正电子束流技术的发展和新型多参数符合测量技术的实现,为新型功能材料和功能薄膜材料微观结构及其微环境的表征提供了一种有效的核分析方法,从微观的角度开展功能材料结构与物性内在机制的分析和解释。2013年以来,在正电子研究平台上进行相关

研究的国内外科研单位总计达到70多家,国内用户包括中科院兄弟研究所、综合性大学等,国外用户主要有德国、日本、芬兰、新加坡、罗马尼亚的科研单位。国内外用户利用高能所正电子研究平台发表的高水平论文200多篇,其中包括 *Science*, *Energy Environ. Sci.*, *JACS*, *PRL*, *Adv. Mater.* 等多个学科的顶级期刊。同时为我国国防项目的测试需求提供了大量宝贵机时。清华大学物理系的学生每年都分批来到高能所参观和学习,虽然清华老师事先介绍了基本原理,但是只有当学生站在高精尖的设备面前,听高能所老师详细介绍,才理解什么是国际一流、什么是自力更生,体会到学习物理的重要性,学生常感叹得到一次极好的学习机会。

4. 未来展望

北京慢正电子束流平台的研制是中国慢正电子束流技术发展的一个代表性缩影。自1999年我国举办第一次关于慢正电子束流的研讨会以来,国内正电子湮没领域同行一直在不断推动先进设备方法学以及正电子多学科交叉应用研究,并与国际同行保持密切的合作交流。例如,2014年武汉大学在国内举办了慢正电子束流的国际研讨会;并购置建成了国内第一台基于Ne晶体慢化器的慢正电子源系统。中国科学技术大学用慢正电子进行了大量材料微结构的研究,并主持了2008至2012年“慢正电子束技术的发展与薄膜材料的基础应用”国家自然科学基金重点项目。国内学者近年也多次参与了国际

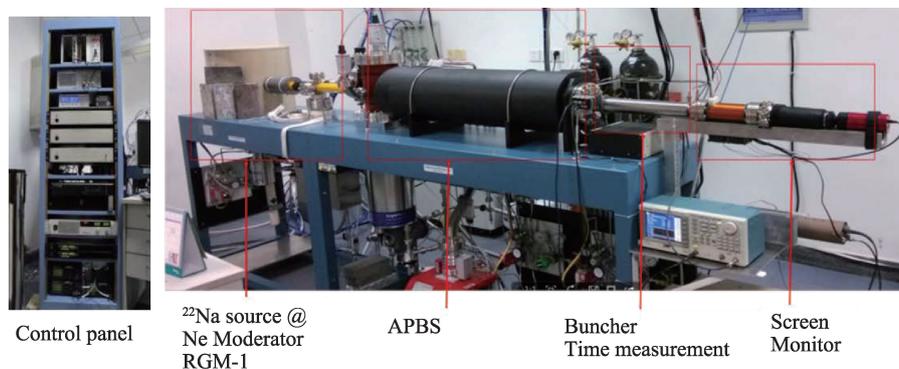


图6 基于Ne慢化体的慢正电子束流材料表征系统

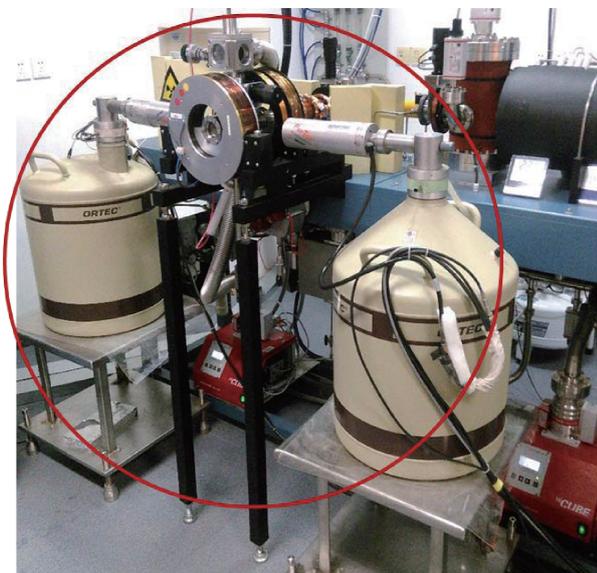


图7 基于慢正电子束流的正电子湮没符合多普勒展宽(CDB)系统



图8 北京市科学技术一等奖证书(2005年)

SLOPOS 慢正电子会议学术会 SLOPOS-12 (2010年澳大利亚), SLOPOS-13(2013年德国)、SLOPOS-14 (2016年日本)、SLOPOS-15(2019年捷克)等。

21世纪科学的发展将是微观与宏观的相互渗透与密切结合,凝聚态物理、材料科学等的研究已经深入发展到物质的原子层次,微观粒子的量子效应越来越显示出重要作用。原子尺度局域缺陷及微观物相变化信息是慢正电子束流技术的特长研究内容,同时慢正电子也可探测物质表面最外层原子的状况,这是其他探测微观信息的手段如电子显

微镜、二次离子谱、中子衍射等所不具备的。我们相信,慢正电子束流技术在基础研究和工业方面有着十分广泛的应用前景,并将不断发展新技术和拓宽研究领域。

在喜迎中科院高能所建所50周年并且恰逢赵忠尧先生诞辰120周年之际,高能所魏龙研究员荣获中国物理学会2021~2022年度吴有训物理奖;吴有训先生是高能所的前身——中科院近代物理所成立时的首任所长。同时,我国正电子界在2021年第十五届全国正电子谱学会议上,颁发了第一批赵忠尧正电子青年科学家奖(图9)。正电子与高能所有不解之缘:第一个发现正电子湮没现象的科学家,我国第一台大科学装置北京正负电子对撞机;我国第一台正电子湮没寿命谱仪、第一台正电子湮没时间选择能谱仪、第一台基于加速器的慢正电子强束流装置、第一台正电子湮没寿命-动量关联谱仪、第一台正电子发射断层扫描仪,第一台小型高分辨正电子发射断层扫描仪,第一台乳腺专用正电子发射断层扫描仪……今后会有更多第一,我们拭目以待!



图9 赵忠尧正电子青年科学家奖颁奖现场

随着国家经济实力和科技水平的日益提高,我国正电子谱学研究水平必将更上一层楼,中国必将屹立于国际正电子研究领域之巅。

致谢

本文得到清华大学物理系郁伟中教授、中科院高能所张天保研究员等正电子谱学前辈专家的教正,在此表示深深的感谢。