

物理学研究生基础课程教学改革的探索与实践

——以“高等电动力学”为例

邹德滨, 刘可, 银燕, 余同普, 邵福球
(国防科技大学 文理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 物理学研究生基础课程存在理论性强、抽象内容多、公式推导繁琐等特点, 注重理论知识讲授的传统教学模式很难激起学生的学习兴趣, 使学生保持长期的专注度。以我校“高等电动力学”课程为例, 依托“基础理论教学与前沿研究、科研实践相融合”的模式, 探索新型教学模式改革和优化教学效果的创新性方法。总结多年教学实践和经验体会, 以期在教学内容选取、教学模式设计和考核形式优化上为高等院校物理学研究生基础课程的教学改革提供参考。

关键词: 物理学研究生基础课程; 高等电动力学; 教学模式

中图分类号: G642 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-8874 (2019) 01-0102-06

Exploration and Practice of Teaching Reform of Postgraduate Basic Courses in Physics: The Case of Advanced Electrodynamics

ZOU De-bin, LIU Ke, YIN Yan, YU Tong-pu, SHAO Fu-qiu

(College of Liberal Arts and Sciences, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Postgraduate basic courses in physics are characterized by being very theoretical and abstract, and having complicated derivation of formulas. Traditional teaching mode that pays more attention to teaching theoretical knowledge can hardly arouse students' learning interest and long-term attention. Taking Advanced Electrodynamics for example, innovative teaching methods and optimization of the teaching effect are explored, based on a new mode combining the fundamental theoretical teaching, frontier exploration and research practice. Some suggestions for the teaching content, mode and final examination form are then proposed, which can provide a certain reference for the teaching reformation of postgraduate basic courses in physics in colleges and universities.

Key words: postgraduate basic courses in physics; advanced electrodynamics; teaching mode

一、引言

物理学研究生的基础课程具有拓展学生学科理论和提升学生科研素养的作用。这些课程通常理论性强、抽象内容多和公式推导繁琐, 对学生

数理基础和思维能力要求较高。考虑到课程内容的深度和广度, 传统上主要采取教师讲授、学生听讲和课后作业的教学模式。这种模式过于注重知识的垂直灌输, 以致学生兴趣不足、专注度不高且独立思考和自主学习时间过少。此外, 课程考核形式也比较单一, 通常以期末闭卷笔试为主。

收稿日期: 2018-08-28

基金项目: 2018年湖南省学位与研究生教育改革研究课题(JG2018B002)

作者简介: 邹德滨(1987-), 男, 黑龙江讷河人。国防科技大学文理学院物理系讲师, 博士, 主要从事激光聚变等离子体领域研究。

为进一步提升物理学研究生的培养质量, 研究生基础课程的教学改革与创新非常必要。如何将教学内容合理化、将抽象内容通俗化、将乏味问题风趣化、将考核评估多样化, 是摆在研究生基础课程教学改革面前的难题。

国内外相关高校已开始对研究生基础课程的教学模式开展改革探索^[1-4], 在教学过程中注重引导学生学习方法和思维的转变^[5], 同时结合课程特点围绕教学内容和教学方法进行了初步改革尝试^[6-7]。不过在课程内容、教学模式、科研实践、考核方式和挖掘学生个性化以及成效等方面, 相对于教学改革的既定目标仍有较大差距。我校“高等电动力学”教学组依托“基础理论教学与前沿探究、科研实践相融合”模式, 在过去的几年内积极探索高等院校物理学研究生基础课程教学改革的思路和方法。论文总结我校该课程教学组在改革实践中的经验体会, 从规划教学内容、设计教学模式和完善考核体系等多个维度提出创新性优化方案, 以期达到构建物理学研究生的专业知识体系和提升学生科研创新能力的教学目标。

二、课程背景及开设情况

随着超强超短激光技术的迅猛发展, 研究人员发现基于超强激光与等离子体相互作用的新型激光粒子加速器可将加速梯度提升至传统加速器的三个数量级以上, 因此可在厘米甚至更短的空间尺度内将带电粒子加速到极高能量^[8-9]。这些高能带电粒子在强激光场中呈现高度相对论性的振荡, 在作特定运动时会激发 X 射线、 γ 射线、太赫兹和高次谐波等新型超快辐射^[10]。这些辐射源在高分辨率成像、材料诊断、医疗和基础科学等领域具有重要应用前景。此外, 相对论性带电粒子在物质或等离子体中传输时, 由于碰撞等效效应伴随着能量的交换损失, 使得带电粒子的能量能够有效地沉积在物质中, 实现高温高密度的极端条件, 从而实现聚变点火^[11]。以上这些重要应用都涉及相对论性带电粒子的动力学及其能量损失和转移。因此, 开设“高等电动力学”一门课程, 在狭义相对论的范畴里认识电磁场的普遍规律, 掌握相对论性带电粒子的动力学及其能量损失和转移的基本规律, 可以为学生未来从事理论物理、原子分子物理、等离子体物理、加速器物理和辐射物理等相关专业方向的研究工作奠定坚实的理

论基础。

我校“高等电动力学”课程的重点就是帮助学生建立相对论性经典电动力学的理论体系, 在本科“电动力学”课程的基础上更加系统和深入地学习处理经典电磁学问题的基本理论和方法, 在深度、广度和系统性方面比本科阶段“电动力学”课程内容均有明显的提升。课程的主要任务和特色是全面讲述相对论性带电粒子和电磁场相互作用动力学及其相对论性带电粒子的能量损失和转移。

值得一提的是, 国内开设“高等电动力学”这门课程的高等院校很多, 但由于授课对象和学生培养目标的不同在该课程内容设置上存在较大差异。例如, 清华大学的“高等电动力学”课程主要关注非相对论的宏观电磁理论、微波与光子学中的场与波的问题, 为学生开展微波和光子学领域的科研工作奠定一定基础。中国科学技术大学和南方科技大学的“高等电动力学”课程着重于相关学科所需而本科电动力学未充分展开的内容, 使学生学会在不同边界限制下各种媒质中求解电磁场与波的基本方法, 认识场与波的各种形态, 是非相对论宏观电磁理论的深化。上海交通大学“高等电动力学和分析力学”课程中的“高等电动力学”部分更关注电磁波的传播、辐射及其光的散射和衍射。我校“高等电动力学”课程从教学重心上看, 基本与中国科学院大学一致。

三、教学改革实践与探索

(一) 规划课堂教学内容

教材的编写、教学体系的构建和课程内容的选取是一门课程能得到良好教学效果的重要基础。张杨等人^[12]在《国外研究生主干教材的特色分析——以美国“经典电动力学”分析为例》一文中研究发现, 国内外各知名高校在《电动力学》教材和教学内容的选取上因学校科研侧重点不同而并不一致, 甚至很多教师使用自己编写的讲义。国外大学所使用的教材主要是 Jackson、Schwinger 等人和 Greiner 分别编著的《经典电动力学》以及 Griffiths 所编著的《电动力学导论》, 国内使用较多的教材包括郭硕鸿、汪映海、蔡圣善等人和李承祖等人分别编著的《电动力学》及俞永强等人编著的《电动力学简明教程》。在研究生的教学过程中, 教师通常会选取以上这些教材中部分本科

《电动力学》未充分展开的内容和前沿理论作为教学内容,而这些综述性强、范围广且内容深的教学内容非常适于高学历层次研究生的教学。

立足于我校物理学专业研究生培养的实际情况与所覆盖的科研方向,在“高等电动力学”课程的教学内容选取中我们牢牢把握“电磁场”和“相对论带电粒子”两个关键教学要素及其之间的紧密联系。为使学生更加深入了解电磁场的基本属性,我们增加了衔接本科“电动力学”课程的麦克斯韦方程组及电磁场的物质性作为第一章讲授内容,主要从麦克斯韦方程组的完备性和对称性的角度来重新审视电磁场的性质和特点,从电磁场的能量、动量和角动量守恒定律来理解电磁场的本质。同时,系统地讲授相对论性带电粒子电动力学,包括狭义相对论、运动电荷的辐射、带电粒子间的碰撞以及电磁场与物质的相互作用。

教学内容不是封闭的而应是开放的,我们让学生的调研内容也成为课堂教学内容的一部分。加强学生知识探索和实践能力是研究生课程教学的重要任务。中山大学“电动力学”课程教学组在本科“电动力学”的教学改革中提出“基础理论教学与科研实践训练、文献研读与讨论结合”的改革思路^[13]。考虑到研究生学习更加注重科研实践训练的特征,我们依托“基础理论教学与前沿探究、科研实践相融合”模式,开展“高等电动力学”课程的教学改革。为了提升学生的课堂参与度,我们在授课过程中时常会根据课程内容抛出一些关键性命题,围绕这些命题安排学生在课堂进行半个小时左右的专题报告,并且形成文献阅读总结。通过这些报告,不仅提升了学生的调研、总结和语言表达能力,还拓展了学生甚至老师的视野,报告内容目前已经成为教学内容不可或缺的部分。

“高等电动力学”的课程学习需要较强的数学基础,与“高等数学”和“数学物理方法”两门课紧密相关,数学基础不牢会是课程学习的不小障碍。考虑到授课对象层次不同,有些是硕士研究生,有些是博士研究生,且专业方向也不尽相同,授课之初一定的数学准备必不可少。利用较短时间温故一些数学知识可使学生在后面的课程学习中能保持专注,学习效果甚佳。

(二) 设计课堂教学模式

近年来,国内一些高等院校在“电动力学”的教学过程中已经在优化课程设置、丰富教学手

段等方面进行了积极的探索与改革,希望能够提升教学质量和培养学生综合素质,以适用各种层次的教学^[14-15]。作为物理学研究生基础课程的“高等电动力学”要顺应时代潮流,不断优化课堂教学模式。尤其是随着计算机及互联网技术的迅猛发展,当代教学中越来越重视引进现代科学技术的新成果,应充分利用先进的教学条件来设计课堂教学模式^[16]。此外,当前新的教学思想也层出不穷,“翻转课堂”以及“慕课”等新型教学形式如雨后春笋般涌现,给传统教学模式带来了极大的挑战。传统教学模式重点在于“教师如何去教”,而美国著名教育学家 Dewey 的“反传统”教学理念使人们逐渐开始意识到“学生如何去学”这个问题的重要性。现代教学模式应该重视学生对教学的参与,由“以教为主”向“重学为主”发展,这样能否在教学中激发学生的学习兴趣就成为决定学生“学”的效率高低的关键因素。因此,在教学改革实践中我们通过以下三个环节来优化设计“高等电动力学”的课堂教学模式:

1. 丰富教学手段

使用先进教学手段可大幅提升课堂教学效果。“高等电动力学”作为物理学研究生基础课程,其教学内容涵盖大量物理概念的解释和数学公式的推导。我们主要采用多媒体和板书相结合的讲授模式。这种教学模式利用多媒体展示大多数的物理知识和复杂数学公式,对主要结论和重点公式或公式中变化项做特殊标记,如采用不同颜色、加粗、下划线或闪烁等。这不仅能够帮助学生认清学习重点,还可促使学生课堂保持专注,大幅提高授课效率。针对重点知识和公式推导难点,利用板书进行演绎,能够给予学生更多理解和思考的时间,使学生对教学重点和细节准确把握。

互联网中的视频和动画是不可或缺的教学资源。将物理原理及其潜在应用以视频或动画方式展示,不仅使抽象问题表现的更为直观,加深学生理解,还可激起学生的求知欲望。如通过飞行器以超音速飞行时产生冲击波的视频可定性解释契仑柯夫辐射的基本原理,以相对论性带电粒子驱动惯性约束聚变点火的动画可凸显学习相对论性带电粒子的能量损失和转移的重要性。当然,这也要求教师日常要注重收集与课程相关的视频,或根据授课内容自制大量动画或图像。

教学不要仅停留在课上,还要注重课下教学。依托微信或QQ平台建立“微信群”或“QQ群”

进行互动交流是进行课下教学的重要手段。利用这种平台可以分享教学体会和与课程内容相关的科研动态, 增加学生和教师的互动和个性化沟通并得到及时教学反馈, 有助于提升教学效果。

2. “部分翻转”课堂

对于“高等电动力学”这样的研究生核心基础课程, “完全翻转”课堂的课下学习与课程内容理论性较强存在一定矛盾, 学生完全课下学习很难准确把握物理思想和捕捉推到关键点, 因此需要根据教学内容合理设计“教”与“学”的活动。实际上, 以上所介绍的学生课堂报告就是以适于自主学习的内容做“部分翻转”。学生课下调研, 总结调研和学习结果, 课上给与学生有限的时间展现自主学习的成果, 与教师和其他学生进行面对面互动学习。这种方式使得学生的学习更加灵活、主动, 参与感更强。这属于“学”的部分。考虑到大部分研究生已开始从事相关科研工作, “教”的方式相对于本科教学也要有较大区别。针对“高等电动力学”课程, 讲授的基本内容要密切联系最新科研进展, 结合教师自身或相关研究者的科研体会和实践心得, 培养学生的科学思维 and 创新能力, 启发学生走向科研道路。因此, 在该课程教学设计上, 我们采用“教材讲授+热点问题融入+前沿研究专题讲座+已修读学生返堂报告”这样一种开放型模式来开展教学。

“高等电动力学”课程内容中带电粒子的输运和辐射等内容仍属当前强场物理的热点研究方向。我们在完成“高等电动力学”教学主干内容的同时, 特别注重前沿课题的引入。介绍强激光驱动的带电粒子束在聚变点火中的应用, 可提升学生对科学前沿的关注度和激发学生学习新知识、掌握新技能的兴趣; 介绍激光辐射压新型离子加速机制和涡旋光束的概念可帮助学生更加直观地掌握电磁场的动量和角动量, 深化对电磁场的物质性理解; 简述同步辐射光源大科学装置的原理和发展可凸显同步辐射机制的重要性, 利于学生兴趣点的生成, 促进对教学主干内容的掌握。融入前沿热点的另一种有效手段是邀请青年学者来课堂做专题讲座, 这种方式不仅可以加深学生对课程内容的理解, 而且还能够同讲座人进行充分讨论, 了解青年学者的学术成长历程, 增进学术交流, 扩宽学术视野, 推动科学创新。基础理论对前沿科学研究具有重要的启发性。许多修读过本门课程的学生基于课程教授基础已开展了深入的

科学研究。例如, 2017年春季学期, 我们邀请了已修读过本门课程的某博士研究生返回课堂做了“超强激光驱动等离子体光栅靶产生高次谐波的物理机制研究”的课堂报告, 他的部分报告内容已发表在国际物理学期刊《Phys. Rev. E》^[17]等杂志上。报告从课堂授课内容出发, 讲述了该同学所开展研究的物理模型与本课程基础理论之间的紧密联系, 以身示范, 突出“学以致用”。

3. 活跃教学氛围

“高等电动力学”所涉及的内容范围广、物理概念抽象、数学推导复杂, 不利于学生兴趣点的生成。在教师在授课过程中, 不仅要注重物理知识传授, 还要注意调动课堂气氛。在讲授相关内容时, 可穿插些历史和人物传记, 激发学生的兴趣, 使得课堂变得生动, 气氛更加活跃。伟大的科学家背后总有许多津津乐道的故事, 物理学家麦克斯韦和爱因斯坦是现代物理学的开创者, 更是“电动力学”学科的奠基人。在讲授麦克斯韦方程组的性质时, 我们讲述了麦克斯韦的指导教师霍普金斯教授因其笔记上涂得乱七八糟而批评他的故事, “小伙子, 如果没有秩序, 你永远成不了优秀的数学物理学家!” 而这句话也让麦克斯韦逐渐成为一个有“秩序”的人, 这种品质是成就其建立麦克斯韦方程组、完善地阐述经典电磁理论的关键。讲授狭义相对论一章时, 我们播放了一段美国国家地理频道剧集《天才-爱因斯坦》中关于思考“当一个人以光速运动时会看到什么现象”的视频, 了解他对经典理论内在矛盾所产生的困惑, 揭示狭义相对论创立的历史背景。这些人物传记的介绍不仅有助于调动课堂教学氛围, 也对学生理解物理问题大有裨益。

(三) 完善考核评估体系

随着时代的发展, 如今学生的思想更加活跃, 传统的教学评价模式已经不适应新时代研究生综合能力和科研素质的培养。课程评价体系的设置必须从学生的实际情况出发, 才能督促学生的课堂学习使其迈入正确的学习轨道。针对研究生课程教学的任务和培养目标, 在课程考核评价方式上应有所创新。分层次教学法是美国大学物理教学取得成功的宝贵经验之一。我们在制定课程标准和考核方式时设定了实践环节, 充分考虑了学生基础和能力的不同, 使得学生有更多的选择和提升空间。实践环节不仅可以提升学生的动手能力, 还能加深对课程内容的理解。针对前沿热点

问题,我们要求学生利用数值模拟程序进行科学计算,如利用英国 Warwick 大学 Brady 等人开发的针对高能密度物理的开源程序 EPOCH^[18]对带电粒子的运动、辐射及其在物质中的传输过程开展数值模拟工作。学生可以组成讨论小组,通过模拟结果开展研究性学习,亮点结果可以撰写研究

论文进行投稿。此外,我们还鼓励研究生参与本科“电动力学”课程的答疑工作,不断夯实电动力学基础。在考核中增添实践环节,可以克服传统讲授型教学模式对学生科学研究与团队协作能力训练的不足,加强思维拓展训练和探究性学习,让学生在团队协作中不断提升科研能力。

表1 国防科技大学“高等电动力学”课程的学生成绩单

姓名	学号	课堂表现 (10分)		课堂报告 (20分)			教学实践 (20分)	考试成绩 (50分)	总成绩
		课堂出勤 (50%)	活跃度 (50%)	内容组织 (40%)	课堂反馈 (40%)	总结报告 (20%)			
学生1	学号A	5.0	4.5	8.0	7.5	4.0	18.0	45.0	92.0
学生2	学号B	4.5	5.0	7.0	7.0	3.5	14.0	38.0	79.0
学生3	学号C	4.0	4.5	6.0	6.5	3.0	10.0	30.0	64.0
...

基于以上“高等电动力学”的课程教学改革实践,我们完善了该课程的考核评估体系。最终成绩除了与卷面相关联,充分考虑了学生的课堂报告情况、教学实践环节、平时出勤率和课堂活跃度等因素,全面考核学生的学业水平。可以考虑将以上评价因素按照一定合理比例综合确定学生最终成绩,如表1所示。

教学评价不应是单向的,学生需要对教师的课堂教学进行评估和反馈,教师可合理采纳学生的意见进行教学方式的调整。针对“高等电动力学”课程,教学小组积极开展问卷追踪调查,学生结合自身知识和科研能力的提升情况,对老师教学水平和教学组织情况进行综合评估和发表建议,以期共同提升课程改革成效。

四、改革成效及存在问题

根据近几年我校“高等电动力学”课程教学改革情况的反馈,学生普遍反映通过课程学习,理论基础得到加强,学科视野得到拓展。热点问题引入和前沿研究专题讲座激发了学习兴趣和科研热情,研究能力和协作能力通过课堂报告和教学实践环节得到一定提升。丰富的教学模式和全面的评价机制使得学生从灌输式学习和消极应试向积极主动学习和乐于接受挑战进行转变。此外,学生课堂报告和教学实践报告的质量和深度正逐

年提升,少数研究生结合课程的相关基础理论、教学实践内容和课题方向,后续开展了非常有意义的科学研究工作,一系列相关成果相继发表在国内外物理学或光学重要刊物上,体现了课程教学改革对学生创新能力培养的良好推动。

在实际教学过程中仍遇到很多问题需要解决。“高等电动力学”课程范围广、内容深、涉及公式繁琐,使用多媒体教学时存在跳跃性强,若不保持专注便很难跟上节奏,这为学生听课和老师授课带来很大挑战。除此之外,研究生综合性素质培养带来了课程考核内容多、战线长的问题,为学员平衡其他课程学习带来一定困难。考虑到这些情况,一方面要精简主干教学内容,进一步凝练教学重点;另一方面要求学生课前将讲义打印出来便于课堂上标记重点和疑点,同时在课后微信群中进行答疑,使学生尽量在课堂上或课后短时间内消化所授内容,从而降低学生课程学习的压力。

近年来,在线“慕课”教学成为教学模式改革的热点。对于本科生的“电动力学”课程,在“中国大学 MOOC”和“在线学堂”已有视频资源。针对理论性较强的“高等电动力学”课程,我们正计划开展部分内容的“慕课”建设,申请专项经费制作在线课程,对部分课程内容实施视频教学。一方面可以丰富教学手段,缩短课堂教学时间,更好地加强学生与教师之间互动与沟通,

提升学生的自主学习能力、创新意识和团队协作意识;另一方面,可以扩大本课程的影响,让更多的人有机会了解和学习本课程。

五、结语

根据我校“高等电动力学”课程教学组多年教学的经验和学生反馈情况,本文总结了课程教学组在该门课程的内容设置、教学方法和考核评估三个方面进行的积极探索和思考,在课程建设中不断总结经验教训,逐步解决研究生基础课程理论性强、抽象内容多、数学推导繁琐和考核形式单一等问题。我们依托“基础理论教学与前沿探究、科研实践相融合”的模式,实现“部分翻转”课堂和教学实践训练,达到提升学生课程学习效果和科研素养的目的。这些尝试可为高等院校物理学研究生的培养和国内院校研究生基础课程的教学改革提供一定参考。

每一事物的发展过程中自始至终存在着矛盾运动,“电动力学”的两大支柱理论也是在发现矛盾、解决矛盾的过程中产生的。为了解决静态场的规律推广到随时间变化情形时与电荷守恒定律的严重矛盾,麦克斯韦通过引入位移电流的概念,建立了麦克斯韦电磁理论;为了解决经典力学的时空观与麦克斯韦电磁理论之间的矛盾,爱因斯坦提出了两条基本假设,建立了狭义相对论。“高等电动力学”是为了解决经典电动力学在相对论性带电粒子运动及其与电磁场相互作用时产生的矛盾而建立起来的课程理论体系。“高等电动力学”的教学内容将随着科学问题研究的持续深入而不断拓展,教学方式也将在与新时代学生的兴趣和接受新事物的能力的磨合中得到逐步改进。

参考文献:

- [1] 孙万钧.促使学生的能力发生跃变——谈《量子电动力学》课教学体会[J].学位与研究生教育,1987(5):42-45.
- [2] 邱建华.《高等量子力学》教学改革探索[J].产业与科技论坛,2011(18):152-153.

- [3] 廖文虎,钟宏华.高等量子力学课程教学改革与建设措施研究[J].中国西部科技,2012(11):89-90.
- [4] 胡苹,彭志华,郭萍,等.研究生教育课程高等量子力学教学改革[J].学科探索,2017(七月上):34-35.
- [5] 孙万钧.促使学生的能力发生跃变——谈《量子电动力学》课教学体会[J].学位与研究生教育,1987(5):42-45.
- [6] 邱建华.《高等量子力学》教学改革探索[J].产业与科技论坛,2011(18):152-153.
- [7] 廖文虎,钟宏华.高等量子力学课程教学改革与建设措施研究[J].中国西部科技,2012(11):89-90.
- [8] Esarey E, Schroeder C B, Leemans W P. Physics of laser-driven plasma-based electron accelerators [J]. Review Modern Physics, 2009(3):1229-1285.
- [9] Macchi A, Borghesi M, Passoni M. Ion acceleration by superintense laser-plasma interaction [J]. Review Modern Physics, 2013(2):751-793.
- [10] Corde S, Phuoc K Ta, Lambert G, etc. Femtosecond x rays from laser-plasma accelerators [J]. Review Modern Physics, 2013(1):1-48.
- [11] 沈百飞.惯性聚变物理[M].北京:科学出版社,2008:34-35.
- [12] 张杨,张立彬.国外研究生主干教材的特色分析——以美国《经典电动力学》分析为例[J].科教导刊:电子版,2014(11):25-26.
- [13] 段敬红,王磊,段刚龙.嵌入式实验教学建设与实践体系的建立[J].电气电子教学学报,2007(3):35-37.
- [14] 熊万杰,陆建隆.对电动力学课程改革的探索[J].高等理科教育,2003(6):72-75.
- [15] 汪映海,赵鸿,薛德胜,等.电动力学教学中培养学生科学思维能力和创新能力的思考与实践[J].高等理科教育,2004(1):53-56.
- [16] 刘晓军,李奇楠,丁振瑞.经典电动力学现代化学习的思考与设计[J].物理通报,2012(11):20-23.
- [17] Zhang S J, Zhuo H B, Zou D B, etc. Model of high-order harmonic generation from laser interaction with a plasma grating [J]. Physical Review E, 2016(5):053206.
- [18] Brady C, Ridgers C, Arber T, etc. Gamma-ray emission in near critical density plasmas [J]. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2013(12):124016.

(责任编辑:邢云燕)