

硼中子俘获治疗装置与运行

朱凌波 欧阳华甫 包 贵

(国科中子医疗科技有限公司 523808)

硼中子俘获治疗(BNCT, Boron Neutron Capture Therapy)是基于 $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)^7\text{Li}$ 二元靶向核反应的细胞级精准放疗技术,具有靶向性强、疗程短、副作用小等优势,是当前难治性实体肿瘤治疗的前沿研究方向。近年来,加速器型BNCT凭借其安全性、小型化、医院化适配等优势,成为全球技术发展主流,而我国高端放疗装备长期面临核心技术“卡脖子”问题。本文梳理了BNCT技术的发展历程,系统阐述了加速器型BNCT装置核心系统的技术路线与发展现状,重点介绍了全链条自主可控的国产BNCT装置的构成原理、核心性能、运行现状与临床试验进展,为我国BNCT技术的国产化与临床转化提供参考。

一、硼中子俘获治疗技术的发展历程

在广东东莞松山湖科学城四百亩的园区内,中

国散裂中子源的质子束日复一日以接近光速的速度狂奔,在微观世界里探寻物质的本源。而在几十公里外的东莞市人民医院,一套脱胎于这台国之重器的射线装置,正用同样源自强流质子加速器的核心技术,为肿瘤患者打开一扇全新的生命之门。

如果把攻克癌症比作一场旷日持久的城市巷战,人类则始终在寻找一种只摧毁敌军阵地、不伤及平民百姓的“精准制导武器”——这种制导的科学本质,是利用硼药在肿瘤与正常组织间的代谢浓度差,引导物理射线进行靶向定点照射。其“二元制导”机制绝妙:先将含硼-10靶向药注入体内,使其特异性富集于癌细胞中,随后进行中子照射,详细原理见图1。中子按能量分为快中子($>10\text{ keV}$)、超热中子($0.5\text{ eV}\sim 10\text{ keV}$)和热中子($<0.5\text{ eV}$)。快中子对正常细胞杀伤力强,需在设备中被慢化减速;热中子极易与硼反应但对体表组织伤害较大。因此,临床选用穿透力优异的超热中子照射。其在穿

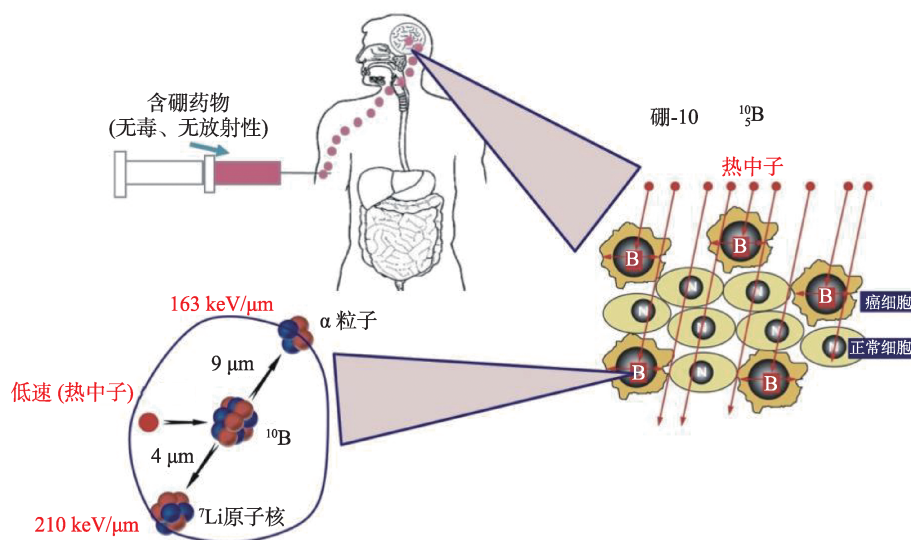


图1 BNCT治疗原理图

透正常组织时不断碰撞减速,能量持续降低,最终到达深部肿瘤时成为热中子。热中子与癌细胞内的硼-10相遇,瞬间触发核反应,产生高能 α 粒子和锂-7离子(能量约2.31 MeV),这比入射的超热中子能量高出上万倍。上述两种粒子射程仅5~10 μm (约1~2个细胞长度),如同在癌细胞内引爆“微型核弹”。其本质是高线性能量传递粒子在细胞尺度内高密度沉积能量,精准打断癌细胞DNA双链,而对周围未富集硼药的健康组织几乎无损。

纵观这项技术的百年发展脉络,从实验室的理论构想到医院的临床应用,大致可以划分为三个核心阶段,每一步跨越,都伴随着人类对粒子控制技术的极致突破。

(一) 理论奠基与反应堆型探索期(1936~2000年)

早在1936年,美国科学家洛克(G. L. Locher)就极具前瞻性地提出了中子俘获治疗的构想^[1],为这项技术埋下了第一颗理论的种子。到了1951年,全球首例基于核反应堆的BNCT临床治疗装置在美国落地,首次将这项理论从纸面带入了现实。随后日本学者也利用反应堆开展了大量脑胶质瘤的临床研究,取得了令人瞩目的疗效,让全世界看到了BNCT技术的临床潜力^[2]。然而,这一时期的BNCT面临着一个致命瓶颈——中子源依赖于大型核反应堆。反应堆不仅造价极其昂贵、占地面积巨大,而且受限于核安全法规,根本无法建在人口密集的城市医院里。同时,反应堆因自身中子束性能的特点,仅能治疗人体浅表肿瘤,治疗时间也相对较长,这也使得BNCT在半个多世纪里,始终只是“实验室里的奇迹”。

(二) 加速器型技术突破与产业化期(2000~2020年)

进入21世纪,随着粒子加速器技术的突飞猛进,BNCT技术迎来了历史性的转折。科学家们开始尝试用小型化的加速器型BNCT装置(AB-

BNCT, Accelerator Based BNCT),替代庞大的核反应堆作为中子源。与核反应堆相比,加速器一断电中子辐射便立即停止,安全性极高,且体积大幅缩小,可直接安装在医院内,让BNCT技术真正具备了临床落地和普惠化的条件。这一时期,日本、美国、意大利等发达国家竞相投入研发,赛道竞争日趋激烈。2020年3月,日本住友重工研发的加速器BNCT设备与配套硼药双双获批上市,率先实现了产业化突破,也确立了加速器型BNCT装置是全球医院化临床应用的主流方向^[3]。

(三) 国产自主化攻坚期(2020年至今)

我国在AB-BNCT领域的研究起步相对较晚,但在强流质子加速器技术方面,有着超过20年的深厚技术积累,尤其是中国散裂中子源的建成落地,为国产BNCT技术的突破,打下了坚实的工程基础^[4]。近年来,国产BNCT技术实现了跨越式发展,在临床推进方面成功跻身全球“第一梯队”(加速器运行功率>30 kW,热中子通量> 1×10^9 n/s/cm²,硼药纯度 $\geq 99.9\%$)。2020年,中国科学院高能物理研究所所在东莞中国散裂中子源建成国内首台AB-BNCT实验装置,并系统开展细胞、动物及药物相关实验,不仅积累了临床设备建设经验,还确定了技术方案、验证了技术可行性^[5-7]。2022年,基于这套实验装置,国科中子医疗科技有限公司首个BNCT项目正式落地东莞市人民医院,建成我国首台具备完全自主知识产权的临床BNCT装置^[8,9],让散裂中子源这一国之重器的核心技术真正走进医院。

接下来,我们将揭开这台“国产抗癌利器”的神秘面纱,带领读者深入了解其内部构造、运行原理与最新临床进展。

二、国产硼中子俘获治疗装置的构成

在AB-BNCT领域,产生高能质子束的加速器是整套装置的核心“发动机”,技术路线的选择直接决定设备性能与推广前景。当前国际上已形成射频直线加速器、回旋加速器、静电加速器三大主流

技术路线,三者各有优势,能够满足不同场景的应用需求。

射频直线加速器的粒子能量覆盖范围广,可灵活适配各类临床治疗场景的需求,整体结构高度紧凑,能完美适配医院有限的场地空间,大幅降低场所建设门槛。同时,该路线的束流传输效率优异,可稳定实现高流强、高功率连续波运行,输出束流品质出众,是当前国际 BNCT 领域最前沿、最具发展潜力的主流技术路线。

基于回旋加速器的 BNCT 研究主要集中在日本,该路线技术成熟度高,加速器与靶体的工程化实现难度低,同时具备结构紧凑、小型化的突出特点,便于在医院场景内完成安装部署,是早期推动 BNCT 技术从实验室走向临床应用的重要技术方案。

静电加速器凭借造价成本低、技术体系成熟、整体结构紧凑的特点,成为全球 BNCT 研发领域的重要技术方向,俄罗斯布德克尔核物理实验室^[10]、阿根廷国家原子能委员会^[11]等多家机构,均基于该路线开展了深度研发,并形成了多款成熟的工程化装置方案。

我国自主研发的 BNCT 装置采用基于射频四极加速器 RFQ(Radio-Frequency Quadrupole)的直线加速器先进技术路线,整套装置如同一条精密的

“中子束流生产流水线”,质子束流从源头诞生,历经聚束、加速、传输、轰击靶材转化为中子,最终整形为合格的治疗束流精准照射患者病灶。整套 BNCT 装置的运行,恰似一场周密规划的精准作战,每个系统各司其职、环环相扣,结构示意图如图 2 所示。BNCT 治疗前,治疗计划系统导入患者医学影像,精准勾画肿瘤靶区,完成个性化治疗方案设计,生成专属治疗处方。患者摆位系统依托三维激光定位技术,实现病灶与照射靶区高精度对位。治疗启动后,治疗控制系统作为总指挥下发束指令,各系统协同联动作业:离子源产出质子束,经低能传输系统聚焦整形,送入射频四极加速器完成高能加速;高能传输系统输送质子束至旋转锂靶,通过核反应完成质子向中子的核心转化;中子束流整形组件对中子进行慢化与整形,形成合规治疗束,精准灭杀肿瘤细胞。靶体维护辅助系统全程提供运维支撑,保障整套装置持续稳定运行,全方位保障治疗安全与疗效。

(一) 离子源及低能传输系统

离子源是 BNCT 装置的质子兵工厂,也是整条流水线的起点,核心功能是产生并输出稳定的质子束流,为后续全流程提供基础粒子“弹药”。其工作原理并不复杂:借助微波能量与轴向磁场的共同作

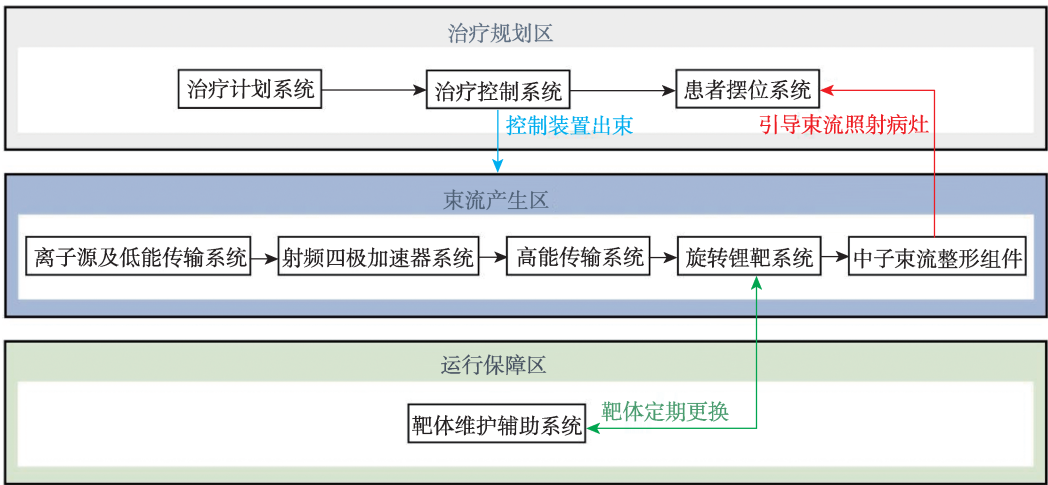


图 2 BNCT 装置系统结构示意图

用,将氢气电离形成高密度等离子体,再通过高压电场从中引出质子束流。国产装置采用面向医用场景专属设计的微波离子源,结合低引出电压、低驻波比与方形放电室结构,大幅降低工程实现难度,进一步提升了放电的可获得性、稳定性与可靠性。

低能传输系统(LEBT, Low Energy Beam Transport)是衔接离子源与加速器的核心传输单元,也是质子束流的交通疏导员,主要承担低能强流质子束的聚束、高效传输及匹配任务。从离子源引出的初始质子束能量低、束流大,大量带正电的质子聚集在一起,极易因同性相斥的空间电荷效应发生发散,就像刚驶出厂区的密集车队,极易偏离路线、出现紊乱。为此,LEBT采用双螺线管聚焦搭配校正磁铁的优化设计,借助螺线管形成的聚焦磁场,为质子束筑起一道“无形护栏”,有效抑制束流扩散,将散乱的质子束规整为有序编队,稳定输送至后续加速环节。

(二) 射频四极加速器系统

射频四极加速器(RFQ)是BNCT装置的“心脏”,也是整条流水线的超级加速引擎,被誉为整套设备最核心的部件之一。其核心工作原理,是利用RFQ特殊结构产生的射频电场,在极为紧凑的尺寸内,同步完成质子束横向聚焦、纵向聚束与加速三项核心操作,将离子源引出的低能质子快速提升至临床治疗所需的MeV能量级。这就好比在数百米赛道上把车队速度从步行量级直接拉升至超音速,同时将车队整编为严整有序的队伍。

国产RFQ(图3)针对医用BNCT场景完成自主优化,采用适配临床需求的工作频率,搭配双耦合器与超低表面场强设计方案,结合自动跟频及老练技术,可实现高功率稳定运行与高效束流传输,实现了核心部件全链条自主可控,彻底打破国外技术垄断。

(三) 高能传输系统

质子经RFQ加速后进入高能传输系统(HEBT, High Energy Beam Transport),该系统作为连接加速



图3 国产BNCT装置RFQ系统

器与靶体的核心传输通道,主要负责高能质子束的高效传输,同时保障束流稳定与设备安全运行。经加速后的质子束能量极高,且RFQ输出的束斑仅毫米级,若持续单点轰击靶体,极易瞬间烧蚀靶材。为此,HEBT采用束流均匀化、消色散及靶上大束斑设计,结构紧凑简洁,可在靶面形成稳定均匀的大尺寸束斑,将束流热负荷密度均匀分散,避免高能质子束单点聚焦损伤靶材。同时,该系统支持多治疗室间束流稳定切换,在确保束流高效、安全传输的前提下,显著提升临床治疗的整体运行效率。

(四) 旋转锂靶系统

锂靶是实现质子向中子转化的核心“转换器”,也是整套BNCT装置的“中子生产车间”,其性能直接决定设备的中子产额与长期运行稳定性。来自高能传输系统的高能质子束轰击锂靶材并引发核反应,完成治疗流程中最核心的“质子—中子”转换,为后续治疗提供稳定的中子束源,该技术瓶颈为高真空、强辐射极限工况下的靶体高效散热。金属锂熔点仅180℃,而高能质子束定点轰击靶面的瞬间,局部热负荷堪比火箭发动机喷口,极易造成锂膜熔化与靶面损毁。国产装置采用高速旋转圆盘式结构,依靠高速旋转将质子束的集中热负荷均匀分散,如同烧烤时不断旋转肉串以避免局部烤焦。同时搭配铜基底微通道水冷系统实现高效强力散热,结合磁流体真空动密封与旋转接头水密封

技术,彻底解决了锂熔点低、易过热烧毁的行业痛点,在稳定保障中子产额的同时,大幅延长了靶体使用寿命。

(五) 中子束流整形组件

质子打靶产生的中子为能量极高的快中子,这类中子不仅无法直接用于治疗,还会损伤人体正常组织,如同刚出膛的高速子弹,杀伤范围广、破坏力强。中子束流整形组件(BSA, Beam Shaping Assembly)的核心作用,正是将快中子慢化、整形为临床适用的超热中子,同时滤除其余有害射线。

BSA内部由六大核心部件协同工作,构成一条精密的中子“筛选整形流水线”,最终为患者输出安全、适配临床治疗的专用中子束:慢化体将快中子高效减速至0.5 eV-10 keV的超热中子能区,该能量段是BNCT治疗的“黄金能量窗口”,中子既能穿透人体抵达肿瘤部位,又可高效触发硼-10核反应;反射体将向外逸散的中子回聚至中心束流通道,大幅提升中子利用率;热中子吸收层与 γ 吸收层如同精密滤网,最大限度削弱热中子、伽马射线等有害辐射成分;准直器则对中子束进行聚焦,保证束流照射方向精准,如同枪管为子弹赋予稳定弹道。为保障临床环境的辐射安全,反射体外部采用含硼聚乙烯、不锈钢与混凝土复合屏蔽设计,严密阻隔辐射外泄。

(六) 治疗计划系统

治疗计划系统(TPS, Treatment Planning System)是BNCT实现个性化治疗的“作战总参谋部”,也是临床医师制定治疗方案的核心工具。精准抗癌如同实战,绝不能盲目施治,需先摸清病灶特征、制定周密方案,TPS正是承担这一核心职能的关键。它可导入患者CT、核磁共振等医学影像,辅助医师精准勾画肿瘤靶区与周边正常器官、危及器官,如同在作战地图上精准标注敌军阵地、平民区域及关键保护目标。依托临床处方剂量,系统可完

成精准剂量计算,生成可视化治疗方案并模拟中子照射后的剂量分布。同时对方案进行评估与验证,确保治疗剂量全面覆盖肿瘤靶区的同时,最大限度保护正常组织,最终开出适配患者的定制化治疗处方。

(七) 患者摆位系统

中子治疗的核心在于极致精准,差之毫厘便谬以千里。患者摆位系统作为整套治疗流程的精准瞄准系统,核心作用是将患者病灶精准送至中子束的有效照射靶区内。该系统配备七自由度机械臂治疗床,结合高精度体位固定技术与三维激光定位,可实现多维度空间微调,定位精度达亚毫米级。既保证了患者从模拟定位到实际治疗全程体位高度一致、可重复,确保照射靶点始终不偏移。又充分兼顾治疗舒适度,让患者在平稳舒适的状态下完成精准定位,保障中子束精准杀伤肿瘤组织。

(八) 治疗控制系统

治疗控制系统(TCS, Treatment Control System)是BNCT装置的“中枢大脑”,也是整场抗癌作战的总指挥中心,承担着全治疗流程统筹调度的核心职能。系统接收TPS制定的治疗计划,读取并执行各项治疗参数,统一调度各子系统协同运行,精准控制出束时机、束流功率与照射时长。在整个照射过程中,TCS实时监测全设备运行状态,通过多层级安全联锁机制保障治疗精准与安全。一旦出现异常,可在毫秒级内触发安全保护,紧急切断束流。此外,系统还可支撑设备日常质量保证与控制工作,实现治疗数据全流程完整可追溯,全方位保障每一次治疗的精准性与绝对安全。

(九) 靶体维护辅助系统

锂靶在持续质子束轰击下,会出现锂层损耗、中子通量降低等问题,需定期更换以保证中子束品质。经辐照后的靶体带有强放射性,人工更换将使

运维人员面临严重的辐射风险。

靶体维护辅助系统便是专为靶体运维设计的自动化保障系统。该系统以七轴机械臂、工装夹具及屏蔽转运储存容器为核心,可在高辐照环境下全自动完成旧靶片拆卸、新靶片安装与废靶的屏蔽转运、安全储存,全程无需人员进入辐射区域,从根本上避免了辐射暴露风险。

三、自主国产硼中子俘获治疗装置的运行

BNCT是实现细胞级清除癌细胞的前沿精准放疗技术。国产加速器型BNCT装置作为抗癌诊疗的核心载体,核心任务是稳定输出符合临床标准的高品质超热中子束,为肿瘤治疗筑牢基础。在该装置的研发过程中,科研团队已攻克多项严苛工程难题与关键技术壁垒,成功搭建起从质子生成、束流调控到靶向施治的完整链路,构建起成熟完备的临床应用技术闭环。

BNCT装置的核心运行难点,集中在低能量、高流强、大功率工况下的长期连续稳定可靠运行,这也是医用设备区别于实验室装置的关键门槛。目前,国产BNCT装置已全面攻克上述核心技术难题,通过全流程工程验证与临床验证,实现了长期、稳定、可靠的临床运行。整套装置各系统性能表现优异,年开机率突破98%。离子源累计无故障运行超7600小时,束流强度输出平稳。在2025年10月26日8:00至24:00的连续16小时出束测试中,离子源引出束流强度全程稳定维持在36 mA,运行过程中未观测到任何打火、束流中断或明显的流强波动现象,系统运行状态高度稳定。RFQ加速器高功率运行稳定性突出,日均停束保护次数仅为个位数,运行过程中各项束流参数稳定,束流传输效率大于99%。高能传输系统束流传输效率接近100%,几乎无束流损耗,并可实现双治疗室分钟级快速切换。靶体在真空、辐射及水冷复合环境下稳定高速旋

转,实时靶面温度始终位于安全区间,中子产额稳定,为临床治疗提供了持续均匀的中子源保障。

截至2026年5月,该国产BNCT装置已顺利完成20例患者的一期临床试验治疗,累计束流照射时长约800分钟,单例患者照射时间为23~57分钟。整个治疗过程仅出现秒量级的机器快保护,未发生任何设备故障,加速器束流功率与中子束流量始终平稳无明显波动,充分验证了装置在临床实际应用中的高可靠性,也标志着我国BNCT技术临床转化迈出了里程碑式的重要一步。

四、结语

从占地四百亩的大科学装置,到数千平方米的临床治疗装备;从技术跟跑、核心部件依赖进口,到全链条自主可控、实现创新引领;从物理实验室的基础研究,到病房里的生命救治——国产BNCT装置的破茧成蝶,不仅是中国高端医疗装备领域的重大突破,更彰显了我国在全球BNCT赛道上抢占核心话语权的坚定实力。在人类攻克癌症的漫漫征程中,中国科研工作者从未止步。这台源自“国之重器”中国散裂中子源的国产BNCT装置,必将在守护生命的道路上,绽放出属于中国智造的璀璨光芒!

参考文献

- [1] Locher G L. Biological effects and the therapeutic possibilities of neutrons[J]. Am. J. Roentgenol, 1936, 36: 1-13.
- [2] Le F, WH S, HB L, et al. Neutron capture therapy of gliomas using boron[J]. Transactions of the American Neurological Association, 1954, 13(79th Meeting): 110-113.
- [3] Suzuki M. Boron neutron capture therapy (bnct): A unique role in radiotherapy with a view to entering the accelerator-based bnct era [J]. International journal of clinical oncology, 2020, 25(1): 43-50.
- [4] 傅世年, 方守贤, 关遐龄. 强流质子加速器物理与技术关键问题 [J]. 中国核科技报告, 2001(00): 121-146.
- [5] 欧阳华甫, 肖永川, 刘盛进, 等. BNCT加速器设计和调试 [J]. 白城师范学院学报, 2020, 34(02): 1-9.

- [6] Huang L, Xiao Y, Ouyang H, et al. Design of BNCT ECR ion source discharge chamber and beam experiments. Radiat Detect Technol Methods (2025).
- [7] Huang L, Xiao Y, Ouyang H, et al. Design and Experiments of High Duty Factor and High Stability ECR Ion Source for BNCT, ICIS2025, Oxford, UK, September 8-12, 2025.
- [8] 欧阳华甫, 肖永川, 曹秀霞, 等. BNCT02加速器设计及离子源调试 [J]. 白城师范学院学报, 2022, 36(05): 1-8.
- [9] Huang L, Cao X, Ouyang H, et al. BNCT02 accelerator beam commissioning. Radiat Detect Technol Methods (2025).
- [10] Bayanov B, Burdakov A, Chudaev V, et al. First neutron generation in the binp accelerator based neutron source [J]. Applied Radiation and Isotopes, 2009, 67(7, Supplement): S285-S287.
- [11] Kreiner A J, Castell W, Di Paolo H, et al. Development of a Tandem-Electrostatic-Quadrupole facility for Accelerator-Based Boron Neutron Capture Therapy [J]. Applied Radiation and Isotopes: Including Data, Instrumentation and Methods for use in Agriculture, Industry and Medicine, 2011, 69(12): 1672-1675.

她用物理的情趣,引我们科苑揽胜; 她用知识的力量,助我们奋起攀登!

欢迎投稿,欢迎订阅

《现代物理知识》杂志隶属于中国物理学会,由中国科学院高能物理研究所主办,是我国物理学领域的中、高级科普性期刊。

科技创新、科学普及是实现创新发展的两翼。《现代物理知识》旨在普及科学知识、弘扬科学精神,设有物理知识、物理前沿、科技经纬、科学源流、教学参考、中学园地、科学书屋和科苑快讯等栏目。诚邀在物理学及相关领域工作的科技、教育和科普等方面的专家学者,以公众喜闻乐见的文字,深入浅出、图文并茂地与读者分享现代物理知识、科学前沿成果和大科学装置进展等精彩故事,共襄“两翼齐飞”之盛举。投稿时请将稿件的 Word 文档发送至本刊电子信箱 mp@mail.ihep.ac.cn,并将联系人姓名、详细地址、邮政编码,以及电话、电子信箱等联系方式附于文章末尾。

所投稿件一经本刊录用,作者须将该篇论文各种介质、媒体的版权转让给编辑部所有,并签署《现代物理知识》版权转让协议书(全部作者签名),如不接受此协议,请在投稿时予以声明。来稿一经发表,将一次性酌情付酬,以后不再支付其他报酬。

2026年《现代物理知识》每期定价15元,全年6期90元,欢迎新老读者订阅。

需要往期杂志的读者,请按下列价格付款:
2022~2025年单行本每期15元;2010~2021年合订本每本60元,2022~2023年合订本每本90元。

订阅方式

- (1) 邮局订阅邮发代号: 2-824。
- (2) 编辑部订阅(请通过银行转账到以下账号,并在附言中说明“现代物理知识 **年**期”)
名称: 中国科学院高能物理研究所
开户行: 工商银行北京永定路支行账号: 0200004909014451557
- (3) 科学出版社期刊发行部: 联系电话 010-64017032 64017539;
- (4) 网上购买: 搜淘宝店、微店店铺名称: 中科期刊; 淘宝、微信购买二维码:



微信购刊



微信购刊