

散裂中子源靶站谱仪的物理设计*

王芳卫[†] 贾学军 梁天骄 何伦华 殷雯 张绍英 朱涛 于全芝 王平

(中国科学院物理研究所 中国散裂中子源靶站谱仪工程中心 北京 100190)

摘要 中子散射广泛地应用于凝聚态物质研究和应用的众多学科领域,是研究物质微观结构和动态的理想工具之一.散裂中子源是新一代的加速器基脉冲中子源,能为中子散射提供高通量的脉冲中子.文章重点介绍了散裂中子源项目 CSNS 中靶站和谱仪的建设内容和设计工作的进展.

关键词 中子散射,散裂中子源,靶站,中子谱仪

Physical design of the target station and spectrometers for a spallation neutron source

WANG Fang-Wei[†] JIA Xue-Jun LIANG Tian-Jiao HE Lun-Hua YIN Wen
ZHANG Shao-Ying ZHU Tao YU Quan-Zhi WANG Ping

(Engineering Center for Target Station and Spectrometers of Chinese Spallation Neutron Source Institute of Physics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract Neutron scattering has been widely used in condensed matter research and applications in many industrial areas, as it is an ideal tool for investigating the microscopic structure and dynamics of materials. Spallation neutron sources are a new generation of pulsed neutron sources based on the proton accelerator, and can provide high-flux pulsed neutron beams for neutron scattering. This paper will focus on the basic structure and design of the target station and neutron instruments of the Chinese spallation neutron source project (CSNS).

Keywords neutron scattering, spallation neutron source, target station, neutron instruments

1 散裂中子源的发展

科学研究表明,原子、分子和原子分子团簇等的微观结构和运动是理解物质宏观性质的基础和出发点.人们已发展了多种了解物质微观结构和运动的技术和方法,其中最为重要的有 X 射线、中子、光和电子等波段的散射技术和核磁共振、电子自旋共振等磁共振技术.这些技术覆盖不同的物质结构和运动的空间、时间区域,互为补充.中子因其具有电中性、亚纳米到亚微米范围的波长及与物质中多种动态能量相近的能量范围等特性,成为研究物质微观结构和运动的理想工具.自 1936 年成功地进行了首次中子衍射实验以来,中子散射已广泛应用于物理、化学、材料、生物、地质、能源、医疗卫生和环境保护等众多研究领域^[1-5].

中子散射通常需要高中子通量的中子源.能提供高通量的中子源主要有两类:反应堆和散裂源^[5].表 1 列表简要比较了两类中子源的特点.

表 1 典型中子散射用中子源特点比较

	反应堆中子源	散裂中子源
中子产生	核裂变链式反应	高能质子轰击重核的散裂反应
反应方式	连续	脉冲
时间结构	无	有
中子能谱	较宽	宽
中子通量	$\sim 10^{15}$ n/cm ² · s	$\sim 10^{17}$ n/cm ² · s
每产生一中子靶内能量沉积	180 MeV	20—45 MeV
γ 本底	高	低

核反应堆是一种稳定连续的中子源,通常使用²³⁵U 作为核燃料,每次核裂变产生一个有效中子,而释放 180MeV 的热量.堆芯中如此大量的热量限制了其中子通量的提高.上世纪六七十年代,反应堆

* 中国科学院知识创新工程重要方向性项目(批准号 KJXC2-SW-W07)科技部国际合作重点项目(批准号 2002CB913903)国家自然科学基金(批准号 30375088)资助项目

2008-05-18 收到初稿,2008-05-25 收到修改稿

[†] 通讯联系人. Email: fwwang@aphy.iphy.ac.cn

中子通量达到了饱和,在 $\sim 10^{15} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ 量级.

为突破反应堆中子源中子通量的限制,上世纪 70 年代,科学家开始研制加速器基的散裂中子源——加速器加速到 GeV 能量的质子轰击重金属靶而产生中子的大科学装置. 通过原子的核内级联和核外级联等复杂的核反应,每个高能质子能产生 20—40 个中子,每产生一个中子释放的热量仅为反应堆的约四分之一 ($\sim 45 \text{ MeV}$). 英国卢瑟福实验室的散裂脉冲中子源 ISIS 束流功率 160 kW,即能产生通量为 $8 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ 的脉冲中子. 中子散射的有效通量已与世界上公认最好的 58MW 的反应堆 ILL 相当. 美国在橡树岭国家实验室成功地建造了一台束流功率为 1.4 MW 的散裂中子源 SNS. 中子通量高达 $10^{17} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$,总投资高达 14 亿美元. 设计中子散射谱仪 24 台,现已有 5 台开始了为用户提供中子散射实验时间. 日本投资约 18 亿美元,正在建造强流质子加速器研究联合装置 J-PARC,其中一台 3 GeV 的快循环同步加速器将提供 1 MW 质子束流用于驱动散裂中子源. 2008 年将提供 0.6 MW 的质子束供散裂中子源使用.

2 我国散裂中子源项目 CSNS

CSNS 装置建设包括强流质子直线加速器、快循环同步加速器、靶站、中子谱仪等设施 and 科学实验测试系统,以及相应的辅助设施和土建工程等. 建成后将与英国、美国、日本的散裂中子源相并列,成为世界四大主要脉冲散裂中子源科学中心之一,并且是发展中国家第一台散裂中子源.

CSNSg 一期总体设计目标为:打靶质子束流功率 100 kW,脉冲重复频率 25 Hz,每脉冲质子数 1.56×10^{13} (平均流强 $62.5 \mu\text{A}$),质子束动能 1.6 GeV,最高脉冲中子通量约为 $2.0 \times 10^{16} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$. 高通量粉末衍射仪、多功能反射仪和小角散射仪 3 台谱仪设计指标如下:探测器对波长为 0.2nm 的中子探测效率分别为 80%、60% 和 65%,空间分辨分别达到 $2.54 \times 1.5 \mu\text{m}$ 、 0.3×0.3 和 $0.8 \times 0.8 \text{ cm}^2$,时间分辨为 $2 \mu\text{s}$,相应的 Q 值范围分别超过 10—400、 $0.5—5$ 和 $0.02—15 \text{ nm}^{-1}$,分辨率 $\Delta Q/Q$ 分别为 $< 1\%$ (散射角 2θ 大于 90°)、 $< 10\%$ 和 $< 40\%$. 参照国际同类装置的建造及运行经验,预计自工程建造竣工后三年内达到总体设计指标^[6].

图 1 给出了 CSNS 系统构成示意图. 其中离子源 (IS) 产生的负氢离子 (H^-) 束流,通过射频四极

加速器 (RFQ) 聚束和加速后,由漂移管加速器 (DTL) 把束流能量进一步提高,负氢离子经剥离注入到一台快循环同步加速器 (RCS) 中,使束流达到最后能量 1.6 GeV. 从环引出后的质子束流经传输线打向钨靶,在靶上产生的散裂中子经慢化,再通过中子导管引向谱仪,供用户开展实验研究.

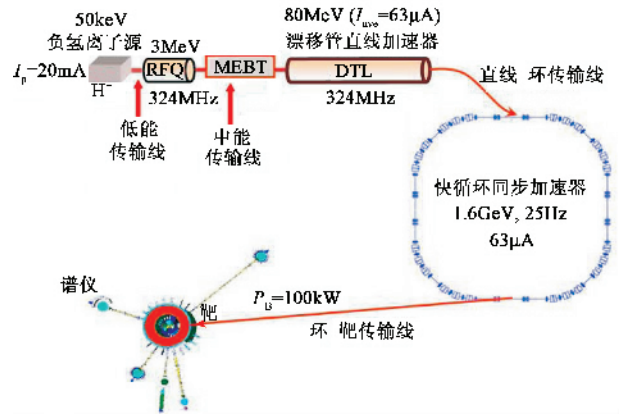


图 1 CSNS 系统构成示意图

CSNS 是我国第一台散裂中子源. 建造综合性能位居世界前列的 CSNS, 设计和技术上必然存在挑战, 众多关键技术必须进行预制研究, 研究成果也将为世界散裂中子源技术的发展作出重大贡献. CSNS 的建设将广泛调研国际上散裂中子源的建设和运行情况, 尽可能地采用先进成熟的技术, 确保建成后的 CSNS 达到设计指标.

3 CSNS 靶站

靶站是散裂中子源中将经过加速器加速的高能质子脉冲入射重金属靶体, 通过散裂效应产生大量中子, 并用慢化器将其慢化成适合中子散射用的慢中子脉冲的设施. CSNS 靶站为中子散射谱仪提供了 18 条中子孔道. 靶站是将高能质子脉冲转化成适合中子散射用的慢中子脉冲的转换器, 它的散热和抗辐射损伤等关键问题是进一步提高散裂中子源的中子通量的难点所在. 表 2 给出了 CSNS 靶站的设计指标.

表 2 靶站设计指标

束流功率/kW	120
质子束能量/GeV	1.6
平均束流强度/ μA	76
脉冲重复频率/Hz	25
靶	钨靶, 钨包覆, 重水冷却 ($150 \times 50 \times 500 \text{ mm}$)
慢化器	3 个
反射体	Be/Fe ($\Phi 700/2000 \times 1000 \text{ mm}$) Cd 衬套
屏蔽体	厚 5m 的铁 + 厚 1m 的重混凝土
中子束道	18 条中子束道, 垂直开闭装置, 内置中子导管

图 2 显示的为 CSNS 靶站的结构示意图. 从加速器来的质子束在 1.8 m 的高度水平入射靶站, 靶站位于大厅中间靠近质子束入射方向的一端. CSNS 靶站的核心系统为靶 - 慢化器 - 反射体系统 (TMR), CSNS 的靶体材料选用固体钨靶, 冷却剂为重水, 靶体容器由在核工业广泛应用的耐辐照及腐蚀的核级 316 不锈钢加工而成. 低温液氢耦合慢化器和常温水慢化器分别位于靶体的正下方和正上方. 有直径大约为 700 mm 的金属钨加工成的反射体将靶和慢化器包围起来, 外围采用直径为 1 m 的钢作为外部反射体, 同时兼顾内层屏蔽体的功能. 整个 TMR 系统 (靶、慢化器和反射体) 被密封于不锈钢制作的圆桶状的氩容器系统内. 氩容器系统将为该区域提供氩气气氛, 可以减少放射性气体的产生, 同时防止放射性气体的泄漏, 氩容器系统同时也为低温慢化器系统失效情况下的氩泄漏提供了额外的防泄漏保护. 在氩容器系统之外, 是厚为 5 m 的铁/厚度为 1 m 的重混凝土构成的生物屏蔽体 (包括中子孔道开闭装置), 它保护在中子散射大厅里的实验人员免受高能粒子和各类射线的辐射.

CSNS 靶站的维护拟参考英国散裂中子源 ISIS 的设计, 即 TMR 系统包括氩容器整体放置在水平拖动的车上从水平方向拖出, 在紧邻屏蔽体的维护区进行维护. 维护区包括一个配备动力机械手及相关辅助设备的热室, 主要对靶 - 慢化器 - 反射体进行遥控操作维护以及对相关的维护区进行 TMR 辅助系统的现场维护.

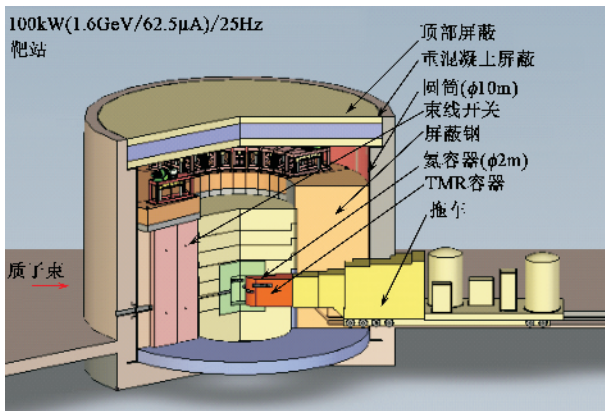


图 2 散裂中子源的靶站结构示意图

CSNS 靶的散裂反应产生的大量快中子通过和慢化器内的氢原子发生多次弹性和非弹性碰撞, 快中子就会将能量转移给慢化工质而转化成适合于中子散射用的热中子和长波中子 (1 eV—0.01 meV). CSNS 慢化器包括 coupled 液氢慢化器、decoupled 和

poisoned 液氢慢化器以及 decoupled 室温水慢化器, 这种慢化器的分布组态可以初步统筹兼顾各类谱仪对中子能谱 (波长)、中子脉冲的峰值、脉冲宽度的要求. 图 3 显示了 CSNS 的 3 个慢化器输出的中子能谱和随波长变化的中子脉冲宽度.

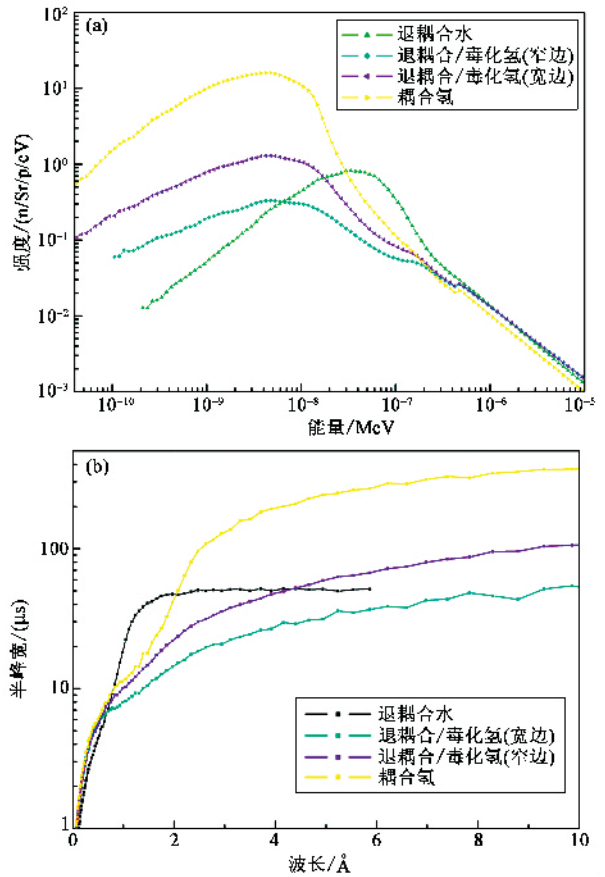


图 3 CSNS 的 3 个慢化器输出的中子能谱 (a) 和随波长变化的中子脉冲宽度 (b)

4 CSNS 中子散射谱仪

中子散射谱仪按其探测中子物理量的变化可分为两类: 弹性散射谱仪和非弹性散射谱仪. 弹性散射谱仪所探测的散射中子仅在空间分布上产生了变化, 而能量仍与入射中子一致, 主要研究物质中原子、分子等的位置, 即结构信息. 非弹性散射谱仪不仅探测散射中子在空间分布上的变化, 而且还同时探测散射中子的能量变化, 主要研究物质中原子、分子等是如何运动的, 即动力学过程. 根据目前国内用户需求和国际相关领域的发展及经费状况, CSNS 拟建设高通量粉末衍射仪、宽 Q 小角散射仪和多功能反射仪 3 台. 同时, 将配备高温、低温、磁场、压力等样品环境设备.

高通量粉末衍射仪 (HIPD) 是 CSNS 首批建设

的 3 台谱仪之一,主要用于研究物质的晶体结构和磁结构,以满足来自材料科学、纳米科学、凝聚态物理和化学等众多领域的科学研究和工业应用的需求. HIPD 谱仪设计的基本目标包括 (1) 满足大多数用户研究物质晶体结构和磁结构的要求 (2) 最佳分辨率达到 $\Delta d/d = 0.2\%$ (3) 具有研究小样品的结构、相变和实时化学反应的能力 (4) 提供低温、高温和高压等特殊样品环境. CSNS 高通量粉末衍射谱仪 HIPD 的主要参数见表 3.

表 3 高通量粉末衍射仪的基本参数

慢化器		水(300 K)
慢化器中子脉冲宽度(FWHM)		$\sim 15\mu\text{s}@0.1\text{nm}$ $< 50\mu\text{s}@0.2-0.6\text{nm}$
中子波长范围		0.03—0.48 nm
最大中子束宽		40(高) \times 40(宽) mm
样品到慢化器距离 L_1		30 m
中子导管		$3\theta_c$ 超镜
样品到探测器组中心距离 L_2	$2\theta = 150^\circ$ 背散射探测器组	1.5 m
	$2\theta = 90^\circ$ 探测器组	2.0 m
	$2\theta = 15^\circ$ 低角度探测器组	3.8 m

蒙特卡罗模拟不同探测角度下的粉末衍射峰. 图 4(a) 给出散射角度 $2\theta = 90^\circ$ 时, 多晶铝在 $d = 2.34\text{\AA}$ 处(111) 模拟衍射峰和相应的拟合, 从而得到使用导管的反射率系数为 $m = 1, 3$ 时, 分辨率 $\Delta d/d$ 分别为 $= 0.58\%$ 和 0.49% . 不同 d 值处的分辨率模拟结果见图 4(b) $2\theta = 90^\circ$ 时, $\Delta d/d < 1\%$; $2\theta = 160^\circ$ 时 $\Delta d/d < 0.2\%$.

中子反射仪用于研究物质表面和界面的结构特性, 是中子散射谱仪中最年轻的成员, 主要设计参数见表 4.

表 4 多功能反射仪的基本设计参数

谱仪结构	参数设计值
慢化器	液氢 20K
中子带宽	0.69 nm (0.2 — 0.89 nm)
Q 范围	0.5 — 5 nm^{-1}
分辨率	$< 10\%$
谱仪几何	
样品到慢化器距离	21 m
样品到探测器距离	2 m

中子折射率通常可表述为 $n = 1 - b(\lambda^2 N/2\pi)$. 一般地, 空气折射率为 1, 其他介质的折射率小于 1. 因 $(1 - n)$ 在 10^{-6} 量级, 发生全反射的临界角很小. 因此, 实验中需要准直性很好的长波中子. 对于磁性材料的表面和界面, 折射率中还有与磁相互作用有关的一项: $\pm c\mu(\lambda^2 N/2\pi)$, \pm 号取决于中子自旋方向与表面上外加磁场的方向平行或反平行. 如果磁场垂直于表面, 则无此项. 如果 $c\mu = b$, 反射中子将被极化. 入射中子束通过三维聚焦的弯曲超

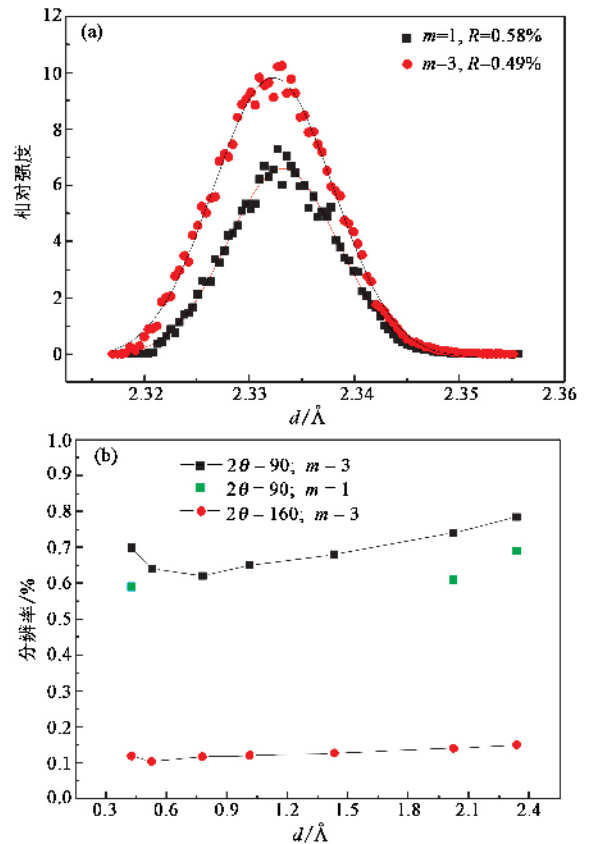


图 4 多晶铝的(111) 衍射峰(a) 和不同 d 值处的分辨率(b)

镜导管引导到样品表面. 同样, 使用二维探测器既能探测镜面反射, 又能探测非镜面散射. 镜面反射包含了垂直于膜面方向上的结构信息. 非镜面散射则起源于膜面内的结构涨落, 如磁畴以及粗糙的层间界面等. 主要应用领域包括: 二维结构和表面及界面磁性、固液界面、聚合物及 LB 膜、生物膜结构、界面现象等.

小角散射是用来研究空间尺度 $R = 10-1000\text{\AA}$ 的空间密度分布的变化. 中子小角散射技术已经成功地应用于许多不同的学科和研究领域, 例如材料科学、生物物理和结构生物学、高分子聚合物、以及凝聚态物理等. 它不仅是电镜技术, X 射线小角散射技术, 以及光散射技术的重要补充, 而且是不可替代的独特手段. 结合目前国内的研究现状、用户需求以及经费支持, CSNS 一期建造的小角散射仪(EQ-SANS) 选择为通用目的类型的小角散射仪, 其结构如图 5 所示.

使用蒙特卡罗法对谱仪各部件进行了模拟计算及优化设计, 确定了小角谱仪的关键参数. EQ-SANS 是基于时间飞行法的小角散射仪, 利用脉冲中子进行波长扫描, 一次测量就得到很宽的 Q 范围. 谱仪设计

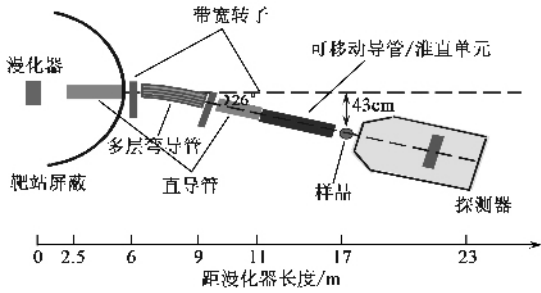


图 5 小角散射谱仪示意图

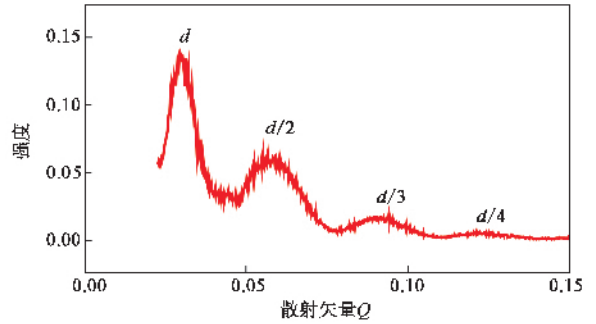


图 6 10 nm 球形颗粒在 1°和 4.5°两个探测单元上的模拟散射谱

的 Q 范围为 $0.02\text{--}15\text{ nm}^{-1}$ 适合研究团簇尺寸在 $0.2\text{--}150\text{ nm}$ 范围内的结构信息. 因需要高通量的长波中子, 谱仪使用 $m = 3$ 的高反射率导管, 以保证长波中子以很小的角度入射到样品上; 为缩短谱仪长度, 增大带宽, 使用多层弯导管 (bender), 既起到 T_0 转子的作用, 又可提高中子通量; 准直距离在 $1\text{--}6\text{ m}$ 范围可变, 可针对不同实验选取最佳的 Q 区间、中子通量和分辨率; 小角探测器使用大面积的高分辨位置灵敏探测器. 图 6 为模拟得到的 10 nm 的球形颗粒在 1° 和 4.5° 两个探测单元上的散射谱.

4 结束语

CSNS 作为一种多学科应用的大型科研平台, 将在很多基础学科 (如凝聚态物理, 化学, 生物工程, 材料科学, 核物理, 核医学, 核化学等) 的研究中被

广泛采用. 产生中子和利用中子的靶站及谱仪的总体设计基本完成. 关键参数已经确定, 详细的物理设计正在进行, 工程设计已经逐步开展, 部分关键设备预制研究取得了积极成果.

致谢 本文部分内容源于“散裂中子源项目建议书”, 作者感谢全体 CSNS 项目成员在其中的贡献.

参考文献

- [1] Sköld K, Price D L. Methods of Experimental Physics (Vol. 23 : Neutron Scattering). London : Academic Press , INC. , 1988
- [2] Bacon G E. Neutron Diffraction , 3rd. Oxford Calrendon Press , 1975
- [3] Shull C G, Morton G, Davidson W L. Phys. Rev. , 1948 , 73 : 842
- [4] Brockhouse B N. Phys. Rev. , 1955 , 99 : 60
- [5] Windsor C G . Pulsed Neutron Scattering. London (Taylor & Francis , 1981
- [6] 陈和生, 韦杰, 奚基伟等. 散裂中子源项目建议书. 中国科学院高能物理研究所和物理研究所 2007

中国科学院物理研究所 2008 年度人才招聘启事

中国科学院物理研究所是以凝聚态物理研究为主, 包括凝聚态物理、光物理、原子分子物理、等离子体物理、理论物理等多学科的综合性科研机构. 现将 2008 年度人才招聘计划公布如下, 邀请有物理、化学、材料科学及相关领域技能的人才申请科研、技术职位.

一、招聘岗位

(一) 科研人才

从事超导、表面物理、磁学、光学物理、先进材料与结构分析 (电子显微镜)、纳米物理与器件 (真空物理)、极端条件物理、凝聚态理论与材料计算、软物质物理、固态量子信息与计算等学科的科学研究的.

(二) 技术人才

为本所科研人员的物理实验工作提供技术支持.

二、应聘材料

1. 个人简历;
2. 发表的代表性论文 (复印件);
3. 推荐信.

三、联系方式

通讯地址 北京海淀区中关村南三街 8 号中国科学院物理研究所人事处 (邮编 100080)

联系人: 周明波; 传真 (010) 82649218; 电话 (010) 82648166; Email: zhoubm@iphy.ac.cn