

编者按 大科学装置是建立国家大型科研基地的重要条件,其建设能带动国家高新技术的发展.目前我国已建成了一批大科学装置,其中有不少与物理学相关.《物理》从本期开始开辟“大科学装置”栏目,介绍与物理学相关的我国大科学装置的建设、运行和相关的研究等,以增进广大读者对大科学装置的了解与认识,促进大科学装置的开放与共享.

上海光源

(上海光源工程经理部 上海 201204)

同步辐射是由以接近光速运动的电子在磁场中作曲线运动改变运动方向时放出的电磁辐射,其本质与我们日常接触的可见光和 X 射线一样,都是电磁辐射.由于这种辐射是在同步加速器上被发现的,因而被命名为同步辐射.同步辐射光源具有许多常规光源无法比拟的优良性能,如宽的频谱范围、高光谱亮度、高光子通量、高准直性以及具有脉冲时间结构等,已经成为材料科学、生命科学、环境科学、物理学、化学、医药学、地质学等学科领域的基础和应用研究的一种最先进的、不可替代的工具,并且在电子工业、医药工业、石油化工、生物工程和微纳加工等领域具有重要而广泛的应用.

上世纪 70 年代开始,发达国家逐步开展了同步辐射的应用研究.随着同步辐射技术和实验方法的发展和不断开拓,对同步辐射光源的要求也不断提高,到目前为止,同步辐射光源的发展已经历了三代.第一代同步辐射光源“寄生”于高能物理实验用的电子储存环中.随着同步辐射光巨大的应用前景和需求的显现,专门用来产生同步辐射光的第二代同步辐射光源应运而生.第三代同步辐射则是在此基础上实现低发射度电子储存,并主要利用插入件来产生高亮度同步辐射的装置,其最高亮度与第二代同步辐射光源相比可提高上千倍.迄今为止,国际上已有 15 台第三代同步辐射光源投入运行,正在建造和设计中的第三代同步辐射光源也达到了 10 台.

1 上海光源简介

上海光源(Shanghai Synchrotron Radiation Facility,简称 SSRF)是一台高性能的中能第三代同步辐射光源,由中国科学院和上海市人民政府共同建议和建设,由中国科学院上海应用物理研究所承建,座落于上海浦东张江高科技园区.

上海光源工程经国家批准,于 2004 年 12 月 25

日正式破土动工,建设周期为 52 个月.建设内容包括一台能量为 150MeV 的电子直线加速器,一台周长为 180m、能量为 3.5GeV 的增强器,一台周长为 432m、能量为 3.5GeV 的电子储存环,首批建设的 7 条光束线和实验站,公用设施以及主体建筑和辅助建筑.

至 2009 年 4 月,上海光源工程建设内容已全部完成.其中建筑安装工程和公用设施工程于 2006 年底完成.直线加速器于 2007 年 6 月完成调束并达到性能指标,增强器于 2007 年 10 月 5 日成功实现 3.5 GeV 升能,2008 年 7 月达到性能指标;储存环调束于 2007 年 12 月 24 日成功实现了束流储存并出光,2008 年 9 月 30 日达到主要设计指标.2008 年,首批 7 条光束线站的 X 射线小角散射线站、衍射线站、X 射线吸收精细结构(XAFS)线站、X 射线成像及生物医学应用线站、软 X 射线谱学显微线站、硬 X 射线微聚焦线站、生物大分子晶体学线站分别顺利实现了调试目标.

根据上海光源工程指挥部的意见,工程科学技术委员会 2009 年 4 月组织了测试委员会,共邀请了国内 30 位专家,分别对直线加速器、储存环、增强器和 7 条光束线站的总体性能指标进行了现场测试.4 月 26—27 日,指挥部组织了国际专家评估会,34 位国内外中能光源的专家参加评审.测试和评审结果表明,上海光源各项指标均达到或优于设计指标,达到同类装置世界一流水平.上海光源全貌见图 1.

2009 年 4 月 29 日,上海光源国家重大科学工程竣工典礼隆重举行(见图 2 和图 3).

2 上海光源主要性能指标

上海光源包括电子直线加速器(见图 4)、增强器(见图 5)、电子储存环(见图 6)和首批建造的 7 条光束线和实验站,其设计性能指标位居国际前列.SSRF 具有容纳 26 条插入件光束线、36 条弯铁光束



图1 上海光源全貌



图2 上海光源竣工典礼



图3 中共中央政治局委员、国务委员刘延东(左三)、中共中央政治局委员、上海市委书记俞正声(左二)、全国人大常委会副委员长、中国科学院院长、上海光源工程领导小组组长路甬祥(左一)和全国政协原副主席、中国工程院院长徐匡迪(左四)共同启动上海光源运行并为上海光源国家科学中心(筹)揭牌

线和若干条红外光束线等共六十多条光束线的能力,可以同时为近百个实验站供光,可望成为21世纪我国重要的多学科交叉研究和高新技术开发的实验平台. SSRF 首批建造的7条光束线,其中5条基于插入件光源,分别是生物大分子晶体学光束线站、XAFS 光束线站、硬 X 射线微聚焦光束线站、X 射线

成像及生物医学应用光束线站、软 X 射线谱学显微光束线站 2 条基于弯转磁铁的光束线站,分别是衍射光束线站与 X 射线小角散射光束线站. 图 7 为实验大厅的一角.

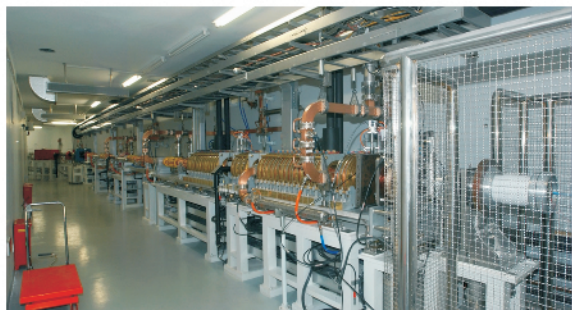


图4 直线加速器



图5 增强器



图6 电子储存环一个单元



图7 实验大厅一角

2.1 加速器主要性能指标

表1 加速器主要性能指标

加速器	
直线加速器	能量 150MeV
	单束团模式 1ns 1nC, 多束团模式 20ns 3nC
	中心能量稳定性 0.5% ,能散度 0.5%
增强器	注入能量 150MeV ,引出能量 3.5GeV
	自然发散度 <105nm · rad ,重复频率 2Hz
	单束团流强 >1mA 多束团流强 >5mA 能散度 <1×10 ⁻³
储存环	电子束能量 3.5GeV ,流强 200—300mA
	最小自然发射度 4 nm · rad ,能散度 1×10 ⁻³
	垂直方向轨道稳定度 1μm ,束流寿命 10 小时

2.2 SSRF 首批光束线和实验站主要性能及设备配置

2.2.1 生物大分子晶体学光束线/实验站(BL17U1)

科学目标:高分辨生物大分子晶体结构测定,包括:生物大分子复合物结构,膜蛋白结构,面向结构基因组学的大规模、高通量蛋白结构研究以及与新药物研发相关的结构测定等.生物大分子晶体学光束线的主要性能及实验站的设备配置见表2. BL17U1 实验站的主要设备见图8.



图8 BL17U1 实验站主要设备

表2 生物大分子晶体学光束线的主要性能及实验站的设备配置

光源类型和参数		真空室内波荡器,周期长度为 2.5cm,最小磁隙为 6mm
样品处同步辐射光特性	能量范围	5—18keV
	能量分辨	< 2×10 ⁻⁴
	样品处光通量	2×10 ¹² phs/s (12keV@200mA)
	样品处光斑尺寸	150×50 μm ² (12keV)
实验站	实验站设备	Mar225 CCD 探测器, Mar Dib 系统、荧光探测器、样品低温冷却装置 (CryoStream700)显微镜、高性能计算机
	实验方法	生物大分子晶体结构测定 多波长反常散射法(MAD) 单波长反常散射法(SAD) 高通量大分子晶体学

2.2.2 X 射线衍射光束线/实验站(BL14B1)

科学目标:以粉末衍射、掠入射(反常)衍射、掠入射小角散射、反射率、倒易空间映射、衍射反常精细结构测量等实验方法为主,面向材料科学、凝聚态物理和结构化学等学科,研究单晶、多晶粉末、薄膜/超薄膜的表面和界面、纳米材料的微结构等对象.X 射线衍射光束的线的主要性能及实验站设备配置见表3. BL14B1 实验站的主要设备——6 圆衍射仪如图9所示.

表3 X 射线衍射光束线的主要性能及实验站设备配置

光源类型和参数		弯铁,电子能量 3.5GeV,束流 300mA,磁场强度 1.27T,临界能量 10.35keV,水平自然发射度 3.9nm · rad
样品处同步辐射光特性	能量范围	4—22keV
	能量分辨	2×10 ⁻⁴ @10keV
	样品处光通量	2×10 ¹¹ phs/s
	样品处光斑尺寸	(高)0.4mm×(宽)0.4mm
实验站	实验站设备	Huber5021 型6 圆衍射仪及相关附件、NaI 闪烁体探测器、电离室、固体荧光探测器
	实验方法	粉末衍射(XRD) 掠入射衍射/掠入射反常衍射(GID/GIXAD) 反射率测量(XRR) 倒易空间二维强度分布测量(RSMs) 衍射异常精细结构(DAFS)

2.2.3 XAFS 光束线/实验站(BL14W1)

科学目标(1)金属蛋白质结构与功能关系的研究(2)分子环境科学领域确定各种复杂体系环境样品中低浓度的污染元素的化学种态,了解元素在地球表面的循环过程(3)研究纳米电子学材料、非线性光学材料以及半导体材料等功能材料中心原子的配位结构、氧化态以及与基体之间的相互作用;(4)研究催化剂中活性部位的结构及其在催化反应中的行为.XAFS 光束线的主要性能及实验站设备配置见表4. BL14W1 光束线及实验站主要设备如图10所示.



图9 BL14B1 实验站主要设备——6 圆衍射仪

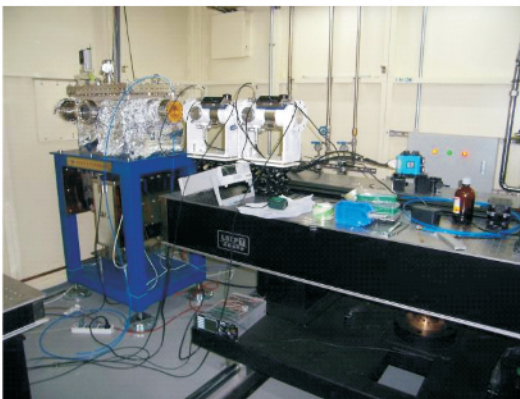


图10 BL14W1 光束线及实验站主要设备

表4 XAFS 光束线的主要性能及实验站设备配置

光源类型和参数		多极 Wiggler 38 极 1.2 T 周期长度 80mm
样品处同步 辐射光特性	能量范围	4—22.5 keV
	能量分辨	2×10^{-4} Si(111)晶体@10keV
	样品处光通量	$\geq 2 \times 10^{12}$ phs/s (100mA) @10keV
	样品处光斑尺寸	$\leq 0.5 \times 0.5 \text{ mm}^2$ (高 × 宽)
实验站	实验站设备	32 元 Ge 固体探测器, Oxford 闭气路 谱学电离室, Lytle 荧光电离室、 高低温原位设备(10—1000K)、 5 维样品平台
	实验方法	透射 XAFS、荧光 XAFS、掠入射 XAFS、 时间分辨 QXAFS、原位 XAFS

2.2.4 硬 X 射线微聚焦光束线/实验站(BL15U1)

科学目标:通过高性能、多用途的硬 X 射线扫描微探针,应用 X 射线荧光、吸收光谱、衍射散射和成像等多种实验手段,获得物质高空间分辨和高灵敏的成分、化学特性和结构等信息,研究具有高度空间复杂性的物质或微、纳米尺度的物质.硬 X 射线微聚焦光束线的主要性能及实验站设备配置见表 5. BL15U1 实验站的主要设备见图 11.

表5 硬 X 射线微聚焦光束线的主要性能及实验站的设备配置

光源类型和参数		真空室内波荡器,周期数 80,长度 2m
样品处同步 辐射光特性	能量范围	5—20 keV
	能量分辨	$(\Delta E/E) \sim 2 \times 10^{-4}$
	样品处光通量	$\sim 6 \times 10^{10}$ phs/s @10keV 200mA
	样品处光斑尺寸	$\leq 3 \mu\text{m}$
实验站	实验站设备	探测器 7 元 Si(Li)探测器,硅漂移 探测器,成像用 X 射线 CCD, 电离室,样品台 7 轴高精度电动 扫描台,2 维压电陶瓷扫描台, 其他 样品对光显微镜, 调光 X-CCD
	实验方法	微束 X 射线荧光分析(μ -XRF): 探测样品中微区元素含量和分布, 2 维 3 维. 微束近边 X 射线吸收精细结构 (μ -XANES) 特定元素在样品中的 化学状态. 微束 X 射线衍射、散射(需要借用 X 射线面探测器)表面分析方法、 X 射线成像

2.2.5 X 射线成像及生物医学应用光束线/实验站 (BL13W1)

科学目标:样品内部结构的微米或亚微米分辨动态或三维成像研究,成像衬度主要包括吸收衬度、相位衬度及 X 射线荧光.研究领域主要包括两个方面(1)生物软组织及低 Z 材料的低剂量、无损、高分辨、动态、三维成像研究(2)材料、古生物、考古、地球物理等样品的无损、高分辨、三维成像研究.X 射线成像及生物医学应用光束线的主要性能及实验站设备配置见表 6. BL13W1 光束线及实验站主要设备见图 12.

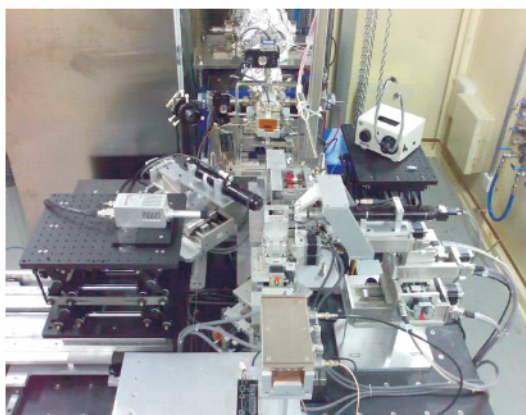


图 11 BL15U1 实验站主要设备



图 12 BL13W1 光束线及实验站主要设备

表 6 X 射线成像及生物医学应用光束线的主要性能及实验站设备配置

光源类型和参数		多极 Wiggler, 1.944T/16poles/14cm
样品处同步辐射光特性	能量范围	10—60keV
	能量分辨	$\leq 5 \times 10^{-3}$
	样品处光通量	1×10^9 phs/s/mm ² @20keV
	样品处光斑尺寸	45mm(高)×5mm(宽)@30m@20keV
实验站	实验站设备	精密隔振平台、高分辨 X 射线 CCD、多维样品台、精密导轨、电离室、快门、斩波器等
	实验方法	同轴相衬成像(IL-PCI) 显微 CT(MCT)

2.2.6 软 X 射线谱学显微光束线/实验站(BL08U1 A)

这是目前国内唯一的同步辐射软 X 射线谱学显微实验站,其科学目标是:利用高空间分辨(优于 50nm)与高化学态分辨(NEXAFS)相结合,研究多相聚合物复合材料的掺杂对材料性能的影响;细胞、菌类等自然状态下的亚微米级的空间与化学分析;人工材料与蛋白质的相互作用及兼容性研究;土壤、菌类与有害金属的亲合作用以及新型材料设计等的研究.软 X 射线谱学显微光束线的主要性能及实验站设备配置见表 7. BL08U1 A 光束线及实验站主要设备见图 13.

表 7 软 X 射线谱学显微光束线的主要性能及实验站设备配置

光源类型和参数		椭圆极化波荡器 EPU100, 周期长度 100mm λ : 2m
样品处同步辐射光特性	能量范围	250—2000 eV
	能量分辨	3000@410eV, 1500@1840eV
	样品处光通量	$\geq 10^8$ (phs/s)@410 eV $\geq 10^7$ (phs/s)@1840 eV
	样品处光斑尺寸	≤ 150 nm
实验站	实验站设备	主体 STXM 显微镜一台 快速正比计数管、光电二极管 湿样品槽二个(供湿样品用) 工作站一台 分析软件: NEXAFS 分析软件、 元素成分分析软件、三维图像分析 光学显微镜
	实验方法	透射软 X 射线近边吸收谱分析 (NEXAFS 谱)、光谱显微分析——空间、 能量三维(x, y, E)扫描形态三维显微 成像——空间三维(x, y, ϕ)扫描

2.2.7 小角散射光束线/实验站(BL16B1)

科学目标:以小角散射、广角散射、反常小角散射、掠入射小角散射以及动态过程研究等实验方法,面向化学、材料科学、生物学等领域,研究聚合物、纳米材料、生物大分子、液晶等材料的结构.小角散射光束线的主要性能及实验站设备配置见表 8.

BL16B1 光束线及实验站主要设备见图 14.

表 8 小角散射光束线的主要性能及实验站设备配置

光源类型和参数		弯铁光源,电子能量 3.5GeV; 自然水平发射度 3.9nm·rad; 流强 300mA;磁场强度 1.27T
样品处同步辐射光特性	能量范围	5—20keV
	能量分辨	$\leq 6.0 \times 10^{-4}$ @10keV
	样品处光通量	$\geq 3 \times 10^{11}$ phs/s@200mA
	样品处光斑尺寸	0.4×0.5mm @10keV
实验站	实验站设备	一维广角气体探测器、一维小角气体探测器、成像板探测器、单色光狭缝、电离室系统、掠入射小角散射样品台、真空管道及支架系统等
	实验方法	小角散射 同时广角和小角散射 掠入射小角散射 反常小角散射

表9 同步辐射实验方法和应用领域

相关实验技术领域	X射线衍射/散射	光子非弹性散射/磁散射	EXAFS, XANES	X射线荧光分析	X射线反射/漫散射	光谱显微术	光发射谱学	光电子谱学	光电子衍射	光电子显微	光电子谱学	圆二色、磁圆二色	穆斯堡尔谱学	小角X射线散射	X射线吸收成像	X射线衍射/相干成像	显微X射线CT	X射线形貌术	X射线干涉术	光激励分解	软X射线显微术	全息成像	超快时间分辨术	X射线光刻	光子吸收治疗	微细加工
凝聚态物理	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		●	●			●	●		●	●			
材料科学	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		
原子物理	●	●	●				●	●				●	●						●				●			
分子物理		●	●				●	●				●	●						●				●			
化学	●	●	●	●	●	●		●	●			●	●	●		●				●		●	●			
光化学	●		●	●	●		●	●				●	●	●						●		●	●			
核物理													●													
结构生物学	●		●	●	●		●	●				●	●	●		●			●		●	●	●			
细胞生物学			●	●		●						●		●	●						●	●				
医学诊断						●									●	●					●					
辐射治疗															●									●		
分子环境科学	●		●	●					●					●	●		●									
地质学	●		●	●	●		●	●				●	●	●				●			●					
工业制造与检测	●			●	●									●										●	●	
药学及制药	●							●				●	●													



图13 BL08U1 A 光束线及实验站主要设备

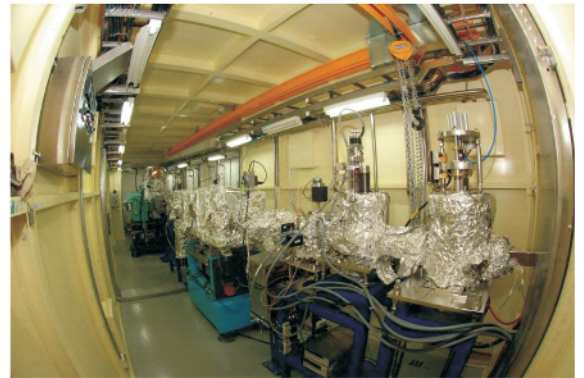


图14 BL16B1 光束线及实验站主要设备

3 同步辐射的应用

同步辐射光照射到样品上时,会产生衍射、散射、折射、透射、吸收等现象,与物体相互作用可以激发产生荧光和光电子(见图15),引起物体的激发、

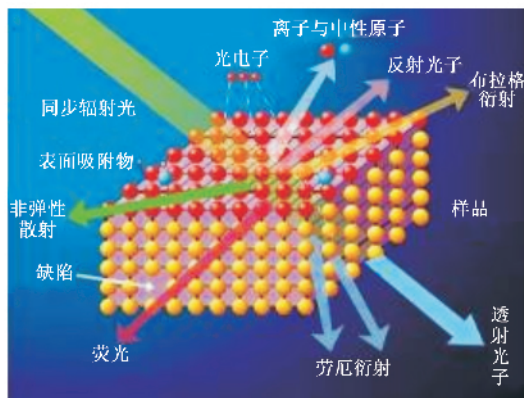


图 15 同步辐射光照射到样品上时可以产生衍射、散射、折射、透射、吸收等现象,可以激发产生荧光和光电子

电离和碎裂等现象,科学家正是借助于这些现象,利用各项参数为已知的、特定的、同步辐射光探索未知的世界。利用同步辐射实验技术开展实验研究所涉及的学科之众多,应用的领域之广泛,是其他大科学装置无法比拟的。上海光源犹如一台多用户的超级显微镜,是多学科前沿研究和高技术开发应用的一种最先进又不可替代的工具,成为照亮微观世界的“神奇之光”。同步辐射实验方法和应用领域见表 9。

4 用户指南

2009 年 5 月上海光源开始对国内用户开放,经国家验收后将对用户全面开放。欢迎广大在职科研人员、企业研发人员申请上海光源实验课题机时,机时申请每年两次(3 月至 9 月,10 月至次年 3 月),申请书可在网上下载。上海光源将对申报课题组织专家进行评审,主要根据其科学意义、实验方案的可行性以及同步辐射实验经验等方面进行评估。对已评审通过的课题,根据各线站运行机时并结合用户需求进行分配实验时间,一般每个课题执行两年。上海光源对用户,在实验期间将提供必要的辅助实验和办公条件。目前,配备有生化实验室、暗室、实验准备间等公用实验室以及用户办公室、用户招待所、食堂等基本支撑条件,根据用户需求,SSRF 将不断完善实验室和用户支撑条件的建设。

●联系方式

❖ 通讯地址:上海浦东新区张衡路 239 号 用户办公室 邮编 201204

❖ 办公室 综合办公楼 115 室

❖ 工作时间 8:30—16:30(周一至周五)

❖ 电话 021-33933039 021-33933044

❖ 传真 021-33933060 021-33933021

Email: ssrcf-user@sinap.ac.cn

❖ 网址 <http://ssrf.sinap.ac.cn/>

· 物理新闻和动态 ·

纳米流体的热输运

在流体中,热量的输运有两种方式:一种是热传导;另一种是对流。热传导是通过分子间的碰撞来传递能量的,这种方式不会在流体内部产生大范围的分子迁移。当在流体系统的下部加热时,在底部获得热能的分子将上升到流体表面,使热区的分子密度逐渐变小,这时上层的冷分子将下降,从而形成一个在垂直方向上的环流。这就是对流的热输运方式。在自然界中,海洋与大气之间的热交换就是被对流环流所控制,它们输运的热能要比热传导多得多。

最近意大利米兰大学的 A. Vailati 教授和他的同事们对纳米流体进行了一项有趣的实验,他们在一个高度为 3mm 的容器中注入普通的水,容器的上下部分是由两片宝蓝色透明的盘状材料构成。再在水中加入 4% 的特氟纶纳米溶液,这是一种“喜热”的纳米粒子,促使这些“喜热”纳米粒子总是向温度较高的区域移动的原因目前尚不清楚。漂浮在水中的纳米粒子开始时是均匀分布的,接着粒子会向热源附近聚集,形成为一个较稳定的对流状态。类似于普通水的对流,在过了几分钟后,对流就出现了一个垂直方向的滚

动、涟漪和波动的状态。这种“振荡式”的对流是很不稳定的,当上下的温差足够大时,就会呈现出复杂的花纹斑图。这个实验结果与理论模型的预测不太相同,理论模型认为,具有纳米粒子的流体将会保持与水的对流状态一样,这说明在理论模型中没有考虑溶于水中的纳米粒子之间以及它们与水分子之间的复杂相互作用,这些相互作用都会影响到流体的流动。所以,研究组希望理论学家们能利用这些新的实验成果来修正纳米流体热输运的理论模型。

在实验中,研究组还观察到普通流体与纳米流体的对流分别具有两种不相同的形态:普通流体是当热源将下部流体加热后再由热分子上升到表面形成对流来进行热输运的,而纳米流体是由于纳米粒子自动沉入下部并接近热源处,然后再逐步进行热传导,形成对流环流。这两种形式在传热时,前者耗散的能量要比后者大得多。这个结果给传统的经典热输运理论引入了一些新的观点,显然这是一个相当基础性的话题。

(云中客 摘自 Physics Review Letters, 13 March 2009; 原文题目为 Bistable Heat Transfer in a Nanofluid)