



上海光源

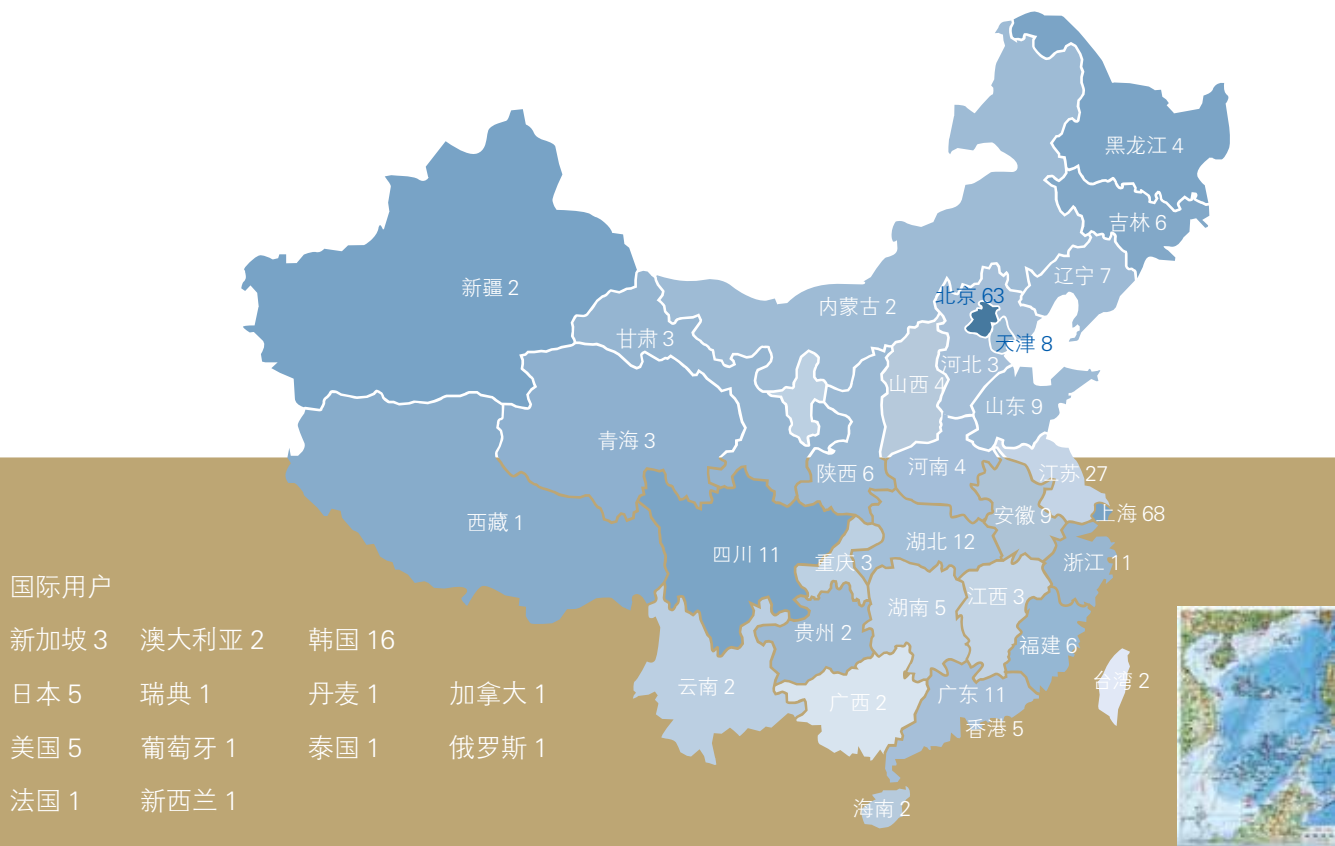
SSRF

装置概况

上海光源（Shanghai Synchrotron Radiation Facility, SSRF）是第三代中能同步辐射光源，坐落在上海浦东张江高科技园区，包括一台 150 MeV 电子直线加速器、一台全能量增强器，一台 3.5 GeV 电子储存环及首批建造的 7 条光束线和实验站。SSRF 于 2004 年 12 月开工建设，2009 年 5 月向全国用户开放。

SSRF 属于“公共实验平台”型重大科技基础设施，每年运行约 7 000 h，其中向公共用户供光 4 500 h。2014 年用户供光期间开机率达 98.6%，平均两次故障时间间隔（MTBF）81.1 h，平均故障时间（MDT）1.2 h，表征光源运行水平的两大指标均居世界领先水平。SSRF 用户需求强劲，实验机时供不应求，用户申请机时为首批 7 条线站可开放机时的 3—4 倍。

截至 2014 年底，SSRF 累计提供用户机时超过 16 万 h，来自全国各省区、直辖市及香港和台湾地区的 341 家单位（高校 170、研究所 115、医院 19、公司 37）的万余名用户利用光源开展实验研究，用户遍布全国各地，并已有部分



上海光源用户单位分布图

国际用户。来自生物、材料、化学、物理、环境和医学等众多学科领域的用户，能够及时、便捷地利用 SSRF 开展高水平研究工作，显著增强了科研竞争能力。基于 SSRF 的实验研究，用户已发表论文近 2 300 篇，其中 *SCI-1* 区论文近 500 篇，并在 *Science*、*Nature*、*Cell* 三种刊物发表论文 48 篇。SSRF 平台已显示出对我国科学研究与技术发展的强大支撑作用，成为多个学科领域前沿研究和高技术发展不可或缺的实验平台。

SSRF 自主研发了近百项关键技术，研制成功包括高性能真空内波荡器、高精度数字化电源控制器、数字化高频低电平控制卡、数字化 BPM 信号处

理器、500 MHz 超导高频腔等关键设备与关键技术，同时，还积极开展基于设施的加速器和同步辐射实验方法学及应用研究，包括恒流注入运行模式运行、轨道快反馈、100 nm 硬 X 射线探针的实现、快速低剂量 CT 成像方法的建立与发展等，为线站向用户稳定、高效开放提供了重要保障。

2013 年 12 月 9 日，刘延东副总理对 SSRF 开放运行成效做了重要批示：“大光源完善机制、科学管理，为多学科高水平研究提供最佳服务，为我大科学装置的管理、使用提供了宝贵经验”。

运行与开放

SSRF 投入运行 5 年多来，用户数量和成果产出都超过了国际同类装置建成同期的水平。其首批线站应用领域涵盖多个学科领域，大幅提升了我国在蛋白质结构、材料结构与表征、催化、生物医学成像等

方面的实验研究能力，促进了我国多个学科的快速发展，取得了丰硕的成果。此外，已有近 40 家企业利用 SSRF 进行技术开发，涉及行业包括制药、化工、技术鉴定等，取得了良好的效果和效益。

荣誉与奖项

SSRF 的高水平运行开放，产生了较好的社会效益，并在科技界获得了高度评价。

- 2011 年获中科院杰出科技成就奖；
- 2012 年获上海市科技进步奖特等奖；
- 2013 年获国家科学技术进步奖一等奖。

SSRF 上诞生的世界级用户研究成果：

● 清华大学施一公研究组解析出 TAL 效应蛋白特异性识别 DNA 的结构基础，入选 2012 年度“中国科

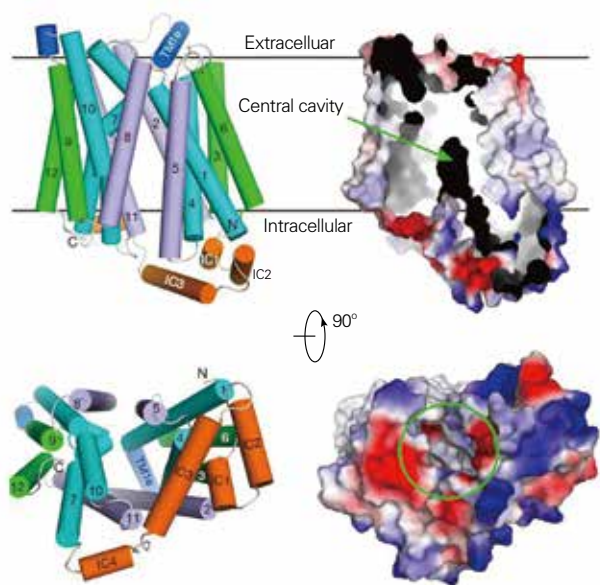
学十大进展”；

● 中科院大连化学与物理所包信和研究组甲烷高效转化研究，入选 2014 年“中国十大科技进展新闻”和 2014 年度“中国科学十大进展”；

● 清华大学颜宁研究组首次获人源葡萄糖转运蛋白结构，入选 2014 年“中国十大科技进展新闻”。

用户典型成果

人源葡萄糖转运蛋白 GLUT1 的结构及工作机制研究



人源 GLUT1 的三维晶体结构图

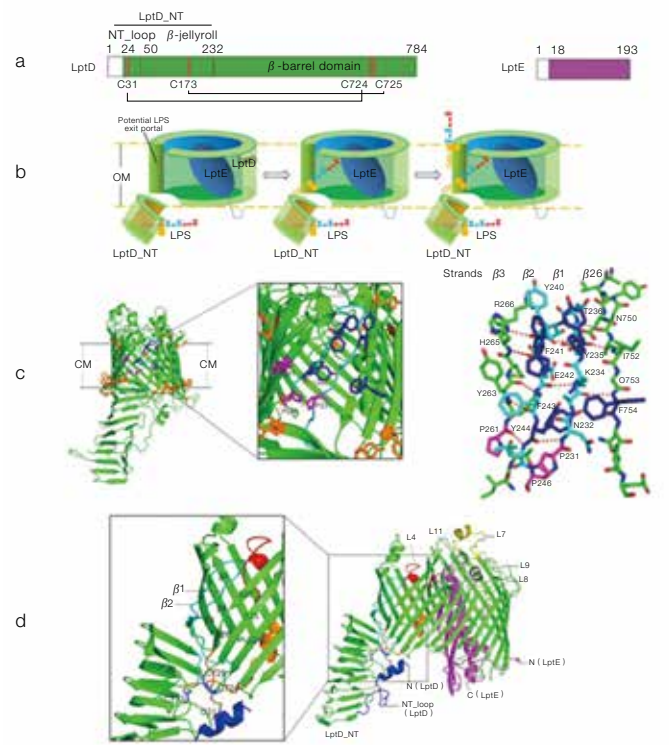
葡萄糖（D-glucose）是地球上包括从细菌到人类各种生物已知最重要、最基本的能量来源。葡萄糖代谢的第一步就是进入细胞：亲水的葡萄糖不能自由穿透疏水的细胞膜，其进出细胞需要通过镶嵌于细胞膜上的葡萄糖转运蛋白完成。其中一类属于主要协同转运蛋白超家族（Major Facilitator Superfamily, MFS）的转运蛋白是大脑、神经系统、肌肉、红细胞等组织器官中最重要的葡萄糖转运蛋白（Glucose Transporters, GLUTs）。在人体的 14 个 GLUTs 中，GLUT1 因发现最早而得名。GLUT1 几乎存在于人体每一个细胞中，对于维持血糖浓度的稳定和大脑供能起关键作用。利用 SSRF 生物大分子晶体学线站（BL17U1），清华大学颜宁教授研究组最终解析了 GLUT1 的三维晶体结构，在世

界上首次报道了人源葡萄糖转运蛋白 GLUT1 的晶体结构，初步揭示其工作机制以及相关疾病的致病机理。诺贝尔化学奖得主、斯坦福大学教授布莱恩·科

比尔卡 (Brian Kobilka) 评价该成果 “是一项伟大的成就”。研究成果发表在 *Nature* 上。

细菌脂多糖转运组装膜蛋白复合体结构解析

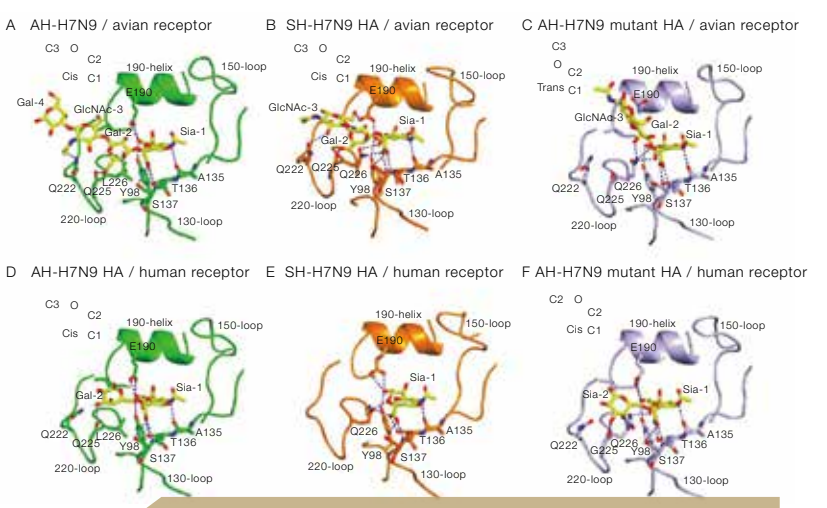
脂多糖又称内毒素，不仅是革兰氏阴性细菌外膜的主要组成成分，也是导致炎症和人体天然免疫反应的主要原因。21世纪初，科学家发现细菌脂多糖的跨膜转运以及在外膜上的组装由 7 个脂多糖转运蛋白 (LptA-F) 负责完成。而定位于细菌外膜上的 LptD-LptE 膜蛋白复合体完成脂多糖生成的最后一步，转运脂多糖跨过细菌外膜并组装形成细菌外膜的外小叶。LptD-LptE 膜蛋白复合体因此可以说是革兰氏阴性细菌存活的“命门”。中科院生物物理所黄亿华研究组通过艰苦努力，最终利用 SSRF BL17U1 成功解析了致病菌福氏志贺菌来源分子量约为 110 KDa 的 LptD-LptE 膜蛋白复合体 2.4 Å 的高分辨率晶体结构。LptD-LptE 膜蛋白复合体晶体结构的成功解析不仅是外膜蛋白结构生物学领域的一个重大突破，也是细菌脂多糖生成这一研究领域的一个重大进展，为设计新型抗革兰氏阴性细菌药物提供了重要信息。研究成果发表在 *Nature* 上。



LptD-LptE膜蛋白复合体的晶体结构与脂多糖跨外膜的转运组装模型图
a LptD与LptE结构域示意图；b LptD-LptE膜蛋白复合体晶体结构；c LptD桶壁上脂多糖出口的结构特征；d 脂多糖跨细菌外膜的转运与组装机理示意图

高致病性禽流感 H7N9 感染人传播机制研究

高致病性流感病毒溯源和跨种传播机制研究是流感疫情科学预判和科学防控的基础。2013 年 2 月底爆发的人感染 H7N9 禽流感病毒是一种新型重配病毒，中科院北京生命科学院/微生物所高福课题组着重关注此次流感爆发事件中最早报道的两个毒株，安徽株 (A/Anhui/1/2013) 和上海株 (A/Shanghai/1/2013)，利用 SSRF BL17U1 成功解析了两个毒株的血凝素蛋白及其突变体与受体类似物的复合体



H7N9 病毒血凝素蛋白及其突变体与受体类似物的复合体结构

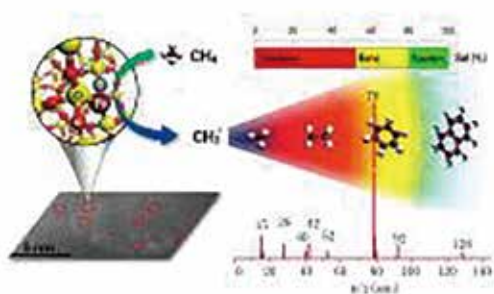
结构，阐明了受体结合特性发生变化的结构基础。此次人感染 H7N9 禽流感事件中，我国科学家们从病毒溯源，病毒跨宿主传播，流行病学，免疫和临床

医学等不同角度对该 H7N9 病毒进行了细致的阐释，为 H7N9 病毒再发和新型流感爆发的防控策略提供了重要的理论基础。研究成果发表在 *Science* 上。

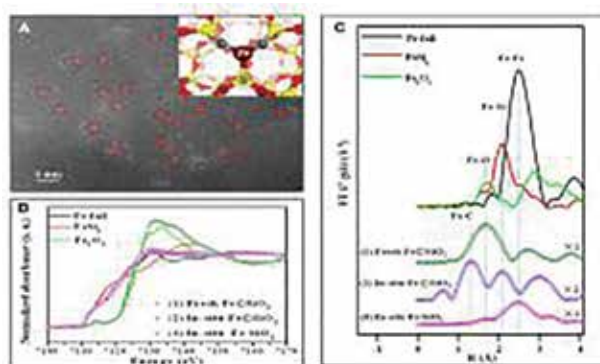
甲烷高效转化研究

随着世界范围内富含甲烷的页岩气、天然气水合物、生物沼气等的大规模发现与开采，以储量相对丰富和价格低廉的天然气替代石油生产液体燃料和基础化学品成为了学术界和产业界研究和发展的重点。中科院大连化学物理所包信和院士团队利用 SSRF BL14W1 在甲烷无氧条件下选择活化的研究中取得

了重大突破，基于“纳米限域催化”的新概念，创造性地构建了硅化物晶格限域的单中心铁催化剂，成功实现了甲烷在无氧条件下选择活化，一步高效生产乙烯、芳烃和氢气等高值化学品。研究成果发表在 *Science* 上。



直接、无氧化条件下的高效甲烷转化



手性单壁碳纳米管可控生长研究



以钨基双金属合金纳米晶为催化剂生长单一手性的单壁碳纳米管

导体。这一独特而优异的性质同时也是碳纳米管制备上的巨大挑战。北京大学李彦教授课题组利用 SSRF BL14 W 1 获取了 Co 元素 K 边和 W 元素 L3 边的 X 射线吸收精细结构 (XAFS)，高质量的实验数据保证了 W-Co 双金属结构的确定，证实了 W 和 Co 元素在 1030 °C 下形成了 W-Co 合金，

单壁碳纳米管是一类重要的碳基材料，由于具有优异的电学性质而被人们广泛应用于碳基纳电子科学研究中，它可看作是由石墨烯沿一定方向卷曲而成的空心圆柱体，根据卷曲方式（通常称为“手性”）的不同，可以是金属性导体或带隙不同的半

导体。这一独特而优异的性质同时也是碳纳米管制备上的巨大挑战。北京大学李彦教授课题组利用 SSRF BL14 W 1 获取了 Co 元素 K 边和 W 元素 L3 边的 X 射线吸收精细结构 (XAFS)，高质量的实验数据保证了 W-Co 双金属结构的确定，证实了 W 和 Co 元素在 1030 °C 下形成了 W-Co 合金，这为剖析单壁碳纳米管的手性选择性生长机制提供了重要的实验证据。该研究为解决单壁碳纳米管的结构可控生长这一困扰学界已久的难题提供了一种可能的方案，为碳纳米管的应用，尤其是碳基电子学的发展奠定了基础。研究成果发表在 *Nature* 上。

超强连续石墨烯纤维研究

由纳米尺度的基本单元出发制备宏观高性能材料是纳米科技领域的重要方向，也是将自组装科学推进到现实材料应用的重要途径。2011年，氧化石墨烯液晶的发现引发了制备石墨烯宏观有序材料的热潮。从氧化石墨烯液晶出发，研究组实现了石墨烯纤维的连续制备，并进一步制备了大片的氧化石墨烯，利用 SSRF BL16B1 同步辐射 SAXS 实验技术，确认了

其溶液中内部的有序结构。这种石墨烯纤维在具有高强度的同时还兼具良好的导电性和柔韧性，预示着石墨烯纤维这一新品种高性能纤维材料在多功能织物、柔性可穿戴传感器、超级电容器、轻质导线等领域具有广泛的应用前景。该项研究由浙江大学高超课题组完成，研究成果发表在 *Advanced Materials* 上。

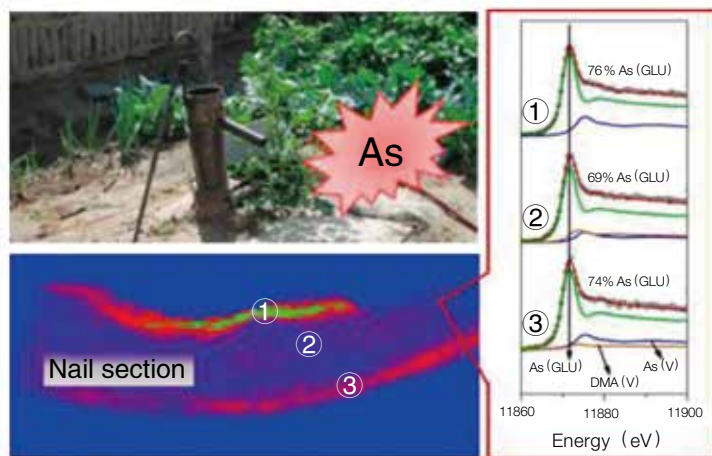


从石墨制备石墨烯纤维

砷暴露地区生物标志物中砷含量及形态的研究以及对人类健康的影响

近年来，砷 (As) 污染问题引起了世界各地的广泛关注。砷可通过地下水饮用及食物链传递进入人体，严重威胁人类的健康。大量研究表明，大米和米制品可能是砷摄入的来源之一。因此，可将生物标志物和地下水中砷水平结合起来用以评估砷对人类的健康风险，生物标志物中砷的形态对于研究其在人体内的转化、代谢及毒性至关重要。中科院生态环境中心景传勇课题组利用 SSRF BL15U1 研究了水和饮食在砷暴露中的贡献，比较了砷在生物标志物中的含量和形态以及地方性砷中毒的成因。研究表明，所调查地区的水、蔬菜、谷物、尿液、指甲和毛发的砷含量均高于正常水平；当水中砷浓度低于 $10 \mu\text{g/L}$ 时，饮食中的砷占平均每日剂量 (ADD) 的 92%；摄入的无机砷可在体内转

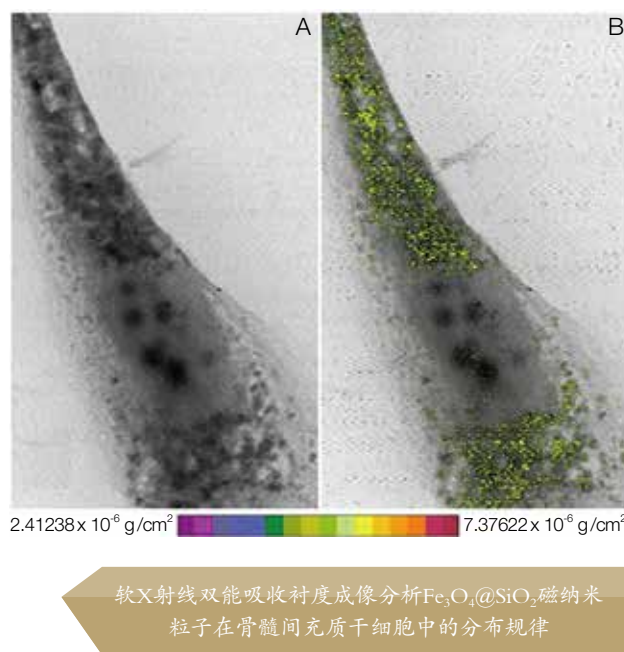
化为甲基砷；对于尿液和毛发、指甲，更适合作为地方性砷中毒的生物标志物；而过高的平均每日砷摄入量及低排泄可能是引起砷中毒的原因。研究成果发表在 *Environmental Science & Technology* 上。



左上：地下水砷污染；左下：As元素在指甲中的分布；
右：As元素的近边吸收谱

磁纳米探针开发取得新进展

基于干细胞的细胞移植治疗是目前治愈人类重大疑难疾病最具前景的方法之一。因此，开发安全、稳定及高灵敏的干细胞纳米示踪技术，揭示移植干细胞在活体内迁移、增殖、定向分化及其最终归宿，对于干细胞疗法的开发具有重要意义。中科院苏州纳米技术与纳米仿生所王强斌课题组利用 SSRF 软 X 射线谱学显微线站，发现 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ 磁纳米粒子能被干细胞大量摄取并均匀分布在细胞质中，证明了 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ 磁纳米粒子是一种高效、安全、稳定的干细胞示踪纳米探针，也为本研究以 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ 磁纳米粒子作为纳米探针能够实现体外单细胞及体内 100 个细胞的高灵敏磁共振成像提供了重要证据。研究成果发表在 *Biomaterials* 上。



寒武纪早期磷足类（*Phosphatocopina*）甲壳动物的内部软组织结构

含软躯体的甲壳动物化石归属于“Orsten”型特异化石宝库（Lagerstätte），这类化石在 20 世纪 70 年代由德国 K. J. Müller 首次发现并命名，主要包括一些微小的分类位置不明的胚胎和具外皮的后生动物（多为节肢动物）幼体。它们经亿万万年埋藏被磷酸盐化，其软躯体部分可显示体表微米级的刚毛、腺孔，甚至细胞构造。云南大学张喜光教授在 SSRF BL13W1 上利用同步辐射显微 CT 技术（SR- μ CT）结

合扫描电镜方法对此类古生物甲壳类化石进行研究，发现少许保存近于完整的柄眼、触角和一系列腿肢的磷足类化石。该研究是一项利用特异保存化石，论证寒武纪早期磷足类甲壳动物的躯体构建（body plan）基本特征的原创成果，为探讨早期节肢动物的适应分异与演化提供了新信息。研究成果发表在 *Current Biology* 上。

研究成果

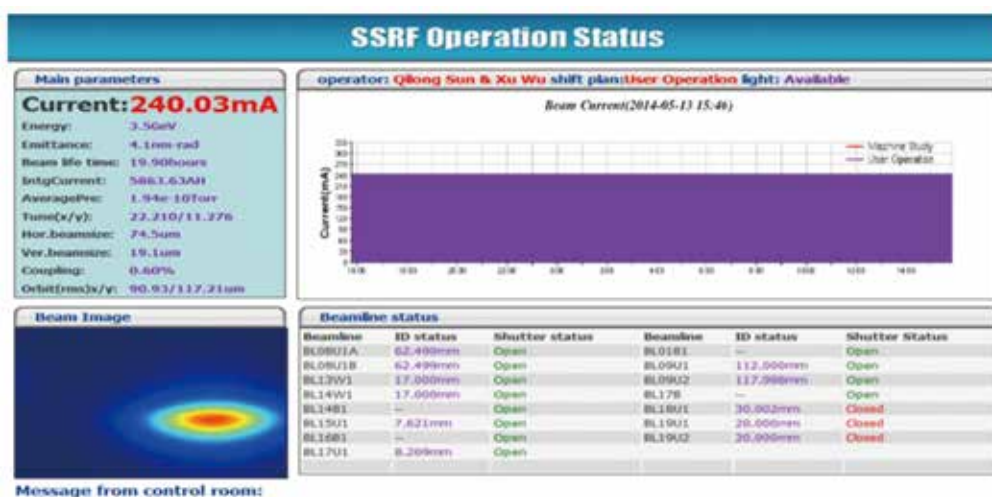
SSRF 开展了系列机器研究，在更小发射度、更小耦合度及更高单束团流强等指标上获得重大进展；实现了恒流注入模式运行；通过隔离机械振动、控制环境温度、消除噪声源、降低电源纹波、采用恒流注

恒流模式用户运行

恒流运行是同步辐射光源近年来发展起来的高性能运行方式，SSRF 于 2012 年 12 月实现了恒流注

入及插入件前馈、轨道反馈等技术措施，使得储存环束流轨道稳定性长期保持在亚微米量级，为线站向用户稳定、高效开放提供了重要保障。

入，2014 年实现了 240 mA 恒流运行。光源稳定，实验结果良好。



SSRF恒流运行模式下束流强度及其他主要参数

高性能插入件

插入件是第三代同步辐射光源的主要发光部件，SSRF工程在吸收国内外先进技术的同时，注重提高创新能力，攻克了超高真空中磁体技术难题，发展了

强磁力下的微米精度组装和磁场垫补技术，自主研发成功达世界先进水平的真空内波荡器、椭圆极化波荡器等系列插入件，填补了国内空白。



左：SSRF真空内波荡器；右：SSRF椭圆极化波荡器

定时系统

定时系统的主要作用是各种束流测控设备提供与束流信号同步的时序和回旋时钟信号。SSRF从2009年至今一直致力于数字化定时技术研究，研制完成的VME总线定时板卡填补了国内空白，现已成功用于SSRF、韩国浦项光源改进项目PLS-II、日本高能加速器研究机构（KEK）的SuperKEKB项目，并与巴西光源Sirius签署合作协议。



SSRF定时系统硬件

高精度数字化电源控制器

SSRF 磁铁电源采用了数字化技术，电流分辨率好于 10 ppm，长期稳定性好于 50 ppm，为 SSRF 的成功运行打下了基础。自行研制的 SDYK-601 系列卡已成功应用于直线加速器、高低能输运线，最新研制的 SDYK-1001 卡也已成功用于储存环四极磁铁、斜四极磁铁及快校正线圈电源。



SSRF 数字电源控制卡

数字化 BPM 信号处理器

束流位置测量系统是粒子加速器中最为重要的诊断系统之一，其中的数字化信号处理器是决定系统性能最为关键的设备。SSRF 于 2007 年启动了新型数字化 BPM 信号处理器的研制工作，现已完成样机研制及束流测试，主要技术指标与目前国际最新的商业产品相当，能够满足不同加速器应用对束流位置高精度、高稳定测量的需求。



SSRF 数字化束流位置信号处理器 BPM

100 纳米级硬X射线探针装置研制

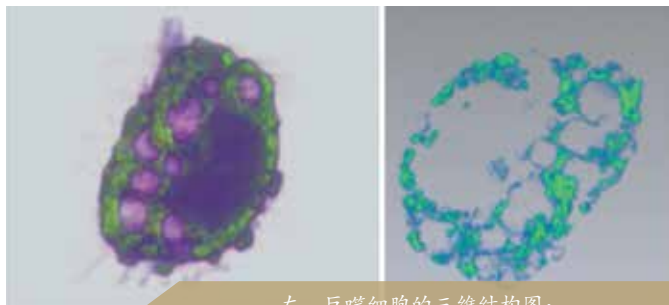
高性能纳米探针是纳米尺度内物质特性研究的重要手段。SSRF BL15U1 自行设计和调试成功了硬 X 射线波带片聚焦 100 nm 级探针系统，探索了一整套硬 X 射线波带片纳米聚焦和检测的实验方法，首次成功地在国内将 10 keV 的硬 X 光聚焦到 120 nm x 130 nm，并成功进行了细胞实验研究。这标志着我国同步辐射硬 X 射线纳米探针已经步入了世界先进行列，为相应的实验研究和硬 X 射线纳米探针技术的发展奠定了坚实的基础。



SSRF 100 纳米级硬X射线探针装置研制

软X射线纳米CT三维成像

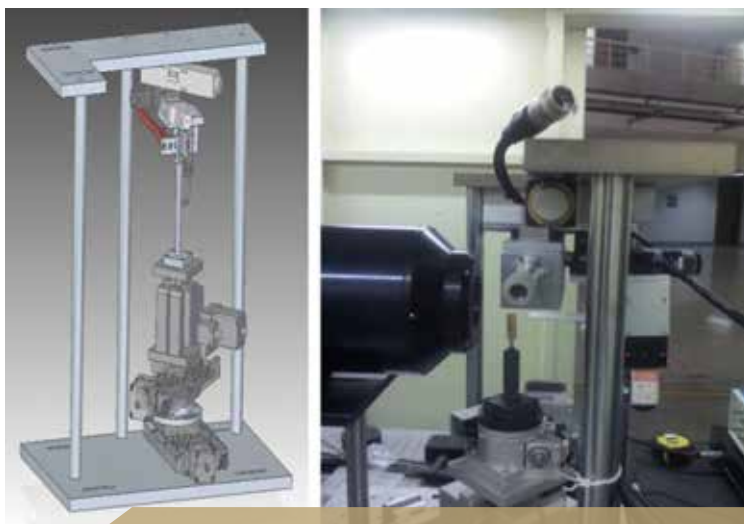
目前 SSRF BL08U1-A 的扫描透射 X 显微技术 (STXM) 只能观测样品的二维结构，无法满足用户对样品三维精细结构的迫切需求。依托已有平台基础，自主研发了软 X 射线纳米 CT 系统，空间分辨率达 50 nm，现已向用户开放。



左：巨噬细胞的三维结构图；
右：其内的 Gd 元素的三维空间分布图

快速X射线荧光成像CT

X 射线荧光 CT 是样品内部元素空间分布原位无损研究的重要手段，用户需求强劲。已有技术的数据采集时间长，严重制约了该方法的推广和应用。SSRF BL13W 线站，基于图像重建算法、控制与数据采集等领域的理论与技术手段，采用“飞行”扫描模式提高数据采集效率，同时将 PET 和 SPECT 中常用的 OSEM 算法应用到 X 射线荧光 CT 图像重建中，减少图像重建对投影数据量的需求，成功建立了快速 X 射线荧光 CT 成像方法，现已正式对用户开放。



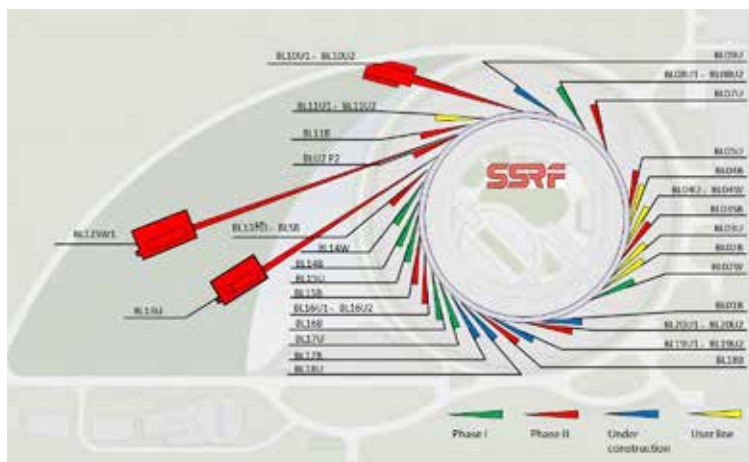
SSRF BL13W 线站快速 X 射线荧光成像装置

发展规划

SSRF 的建设和运行促进了国内同步辐射整体研究水平的提高，促进了众多学科领域的发展，作为多学科综合研究平台的重要性得到广泛认同。目前 SSRF 用户众多，实验机时严重供不应求，因此在统一规划和避免重复建设的前提下，SSRF 的后续线站建设正在多渠道经费支持下进行。国家发改委投资建设公共线站，用户投资建设一些与基础和应用研究、国防研究及产业研究相关的专用线站。

后续线站建设完成后，SSRF 平台将拥有近 40 条性能优异的光束线站，上百种先进的同步辐射实验方法，形成对能源科学、环境科学、物质科学、生命科学以及产业应用等的强大支撑线能力。SSRF 综

合研究能力将跨入国际先进行列。未来，将形成基于 SSRF 的先进光子科学研究中心，不断产出重大成果，有力支撑我国多学科跨越发展和创新突破，不断满足我国国防和产业发展的相关需求，为提高我国科技核心竞争力做出新的贡献。



SSRF首批线站:

BL08U1-A: 软X射线谱学显微光束线站
BL08U1-B: 软X射线干涉光刻 (XIL) 分支线站
BL13W1: X射线成像及生物医学应用光束线站
BL14W1: XAFS光束线站
BL14B1: 衍射光束线站

BL15U1: 硬X射线微聚焦光束线站
BL16B1: X射线小角散射光束线站
BL17U1: 生物大分子晶体学光束线站

2014年在SSRF上建成并投入运行的线站:
BL01B1: 时间分辨红外谱学与红外显微成像线站
BL09U1: 超高分辨宽能段光电实验系统 (梦之线)

BL17B1: 高通量蛋白质晶体结构光束线站
BL18U1: 蛋白质微晶体结构光束线站
BL19U1: 蛋白质复合物晶体结构光束线站
BL19U2: 生物X射线小角散射光束线站

SSRF 线站布局图