

我国物质结构研究的大型实验平台（续）

——原子、分子层次的实验设施

张 闯 组稿

大家知道，我们在日常生活中见到的物体大多是由分子组成的，而分子由原子构成。在分子和原子的层次上开展物质结构的研究，对于深入了解物质的性质及其相互转化的规律十分重要，涉及物理、化学、材料科学、生命科学、信息科学和能源与环境等诸多领域。分子和原子的尺寸在 $10^{-8} \sim 10^{-6} \text{cm}$ 的数量级。要看这么小的粒子，不但要看得见（高分辨率），还要看清楚（高准确度），光学显微镜和一般的电子显微镜就做不到了，需要性能更好的“显微镜”。科学家发明了同步辐射和中子源装置，可以在原子和分子的层次对物质结构进行深入的研究。

带电粒子在以接近光速在电磁场中偏转时，沿轨道的切线方向发出一种电磁辐射，它最初是在电子同步加速器上发现的，故被称为同步辐射。同步辐射具有宽阔的连续光谱、高度的准直性和偏振性等特点，加上高功率和高亮度，使电子储存环成为一种性能优异的新型强光源而得到广泛应用，并从起初寄生在高能物理用的正负电子对撞机上的第一代光源，到同步辐射专用的第二代光源，又发展到以插入元件为主的第三代光源，现在科学家正在研究以亮度更高、相干性更强的新一代光源。我国的同步辐射装置自从20世纪80年代起步以来，取得了长足的进展，经历了第一代的北京同步辐射装置、第二代的合肥同步辐射装置和第三代的上海光源，并已开展上海软X射线自由电子激光装置研制和北京先进光源前期研究。

中子散射也是物质微观结构研究的有力手段。中子不带电、能量低、具有磁矩、穿透性强、无破坏性，能分辨轻元素、同位素和近邻元素，不仅可探索物质静态微观结构，还能研究其动力学机制。中子源与同步辐射光源互为补充，已经成为基础科学研究和新材料研发的重要平台。目前世界上的中子源主要有两种，即基于核反应堆的直流中子源和基于加速器的散裂中子源。前者具有较高的平均通量，后者具有高脉冲通量和脉冲时间结构，两者互相补充。我国已建成了一台中国先进研究堆，并在建造中国散裂中子源，为相关领域的研究提供高性能的平台。



中国散裂中子源



上海光源



北京先进光源



中国先进核研究反应堆



北京同步辐射装置

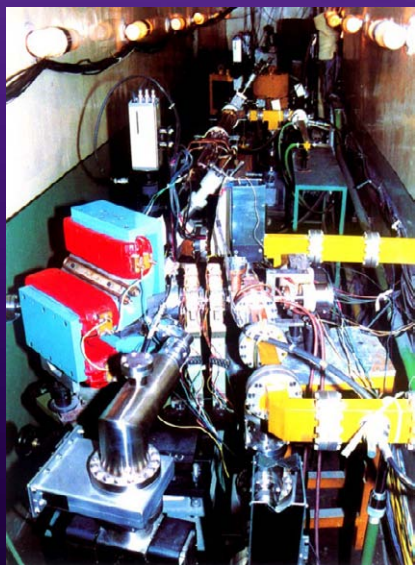
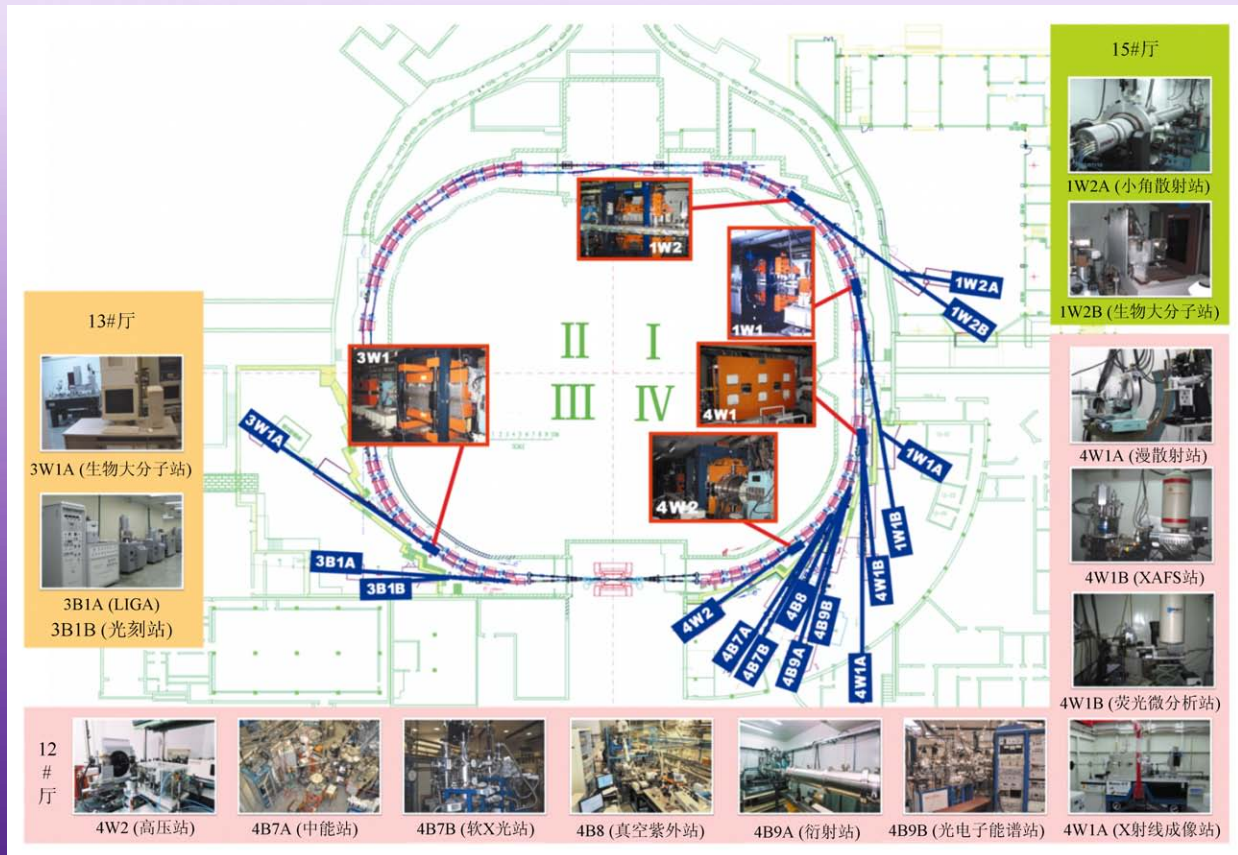


合肥光源

本期彩页的图片资料由中科院上海应用物理所赵振堂、国家同步辐射实验室李为民和原子能研究院柳卫平提供。

北京同步辐射装置

北京正负电子对撞机一机两用，既是一台高亮度的高能物理实验装置，又是一台高性能的光谱X射线光源，即北京同步辐射装置（BSRF），其建有3个实验大厅，5个插入件，14条光束线和实验站，为来自国内外数百个研究机构的用户提供高性能的同步辐射光，开展多学科的研究，取得一批世界一流的研究成果。



北京自由电子激光装置是亚洲第一台产生自饱和振荡的装置。



正在设计和研究的北京先进光源 BALS 是一台高能量（5 GeV）、高亮度（电子束流强 200 mA，发射度优于 0.5 nm·rad）的同步辐射光源，是规划中的北京综合研究中心的核心设施，用以满足我国科技前沿研究、国家重大战略目标和自主创新研究的广泛和迫切需求。

合肥光源

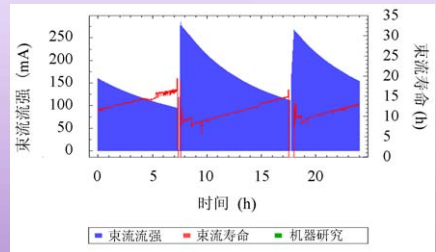
坐落在中国科技大学校园的合肥光源（HLS），是我国第一台以真空紫外和软 X 射线为主的专用同步辐射光源。其主体设备是一台能量为 800 MeV、峰值流强为 300 mA 的电子储存环，用一台能量 200 MeV 的电子直线加速器作注入器。HLS 于 1989 年建成出光，2004 年完成二期工程。HLS 上建有 X 射线光刻、红外与远红外等 15 条光束线和相应的实验站，向国内外用户开放，取得了大批研究成果。目前正在实施重大升级改造项目，降低束流发射度、提高光源亮度、增强束流稳定性和增加插入元件。



直线加速器速调管长廊



合肥光源鸟瞰



束流流强和寿命曲线



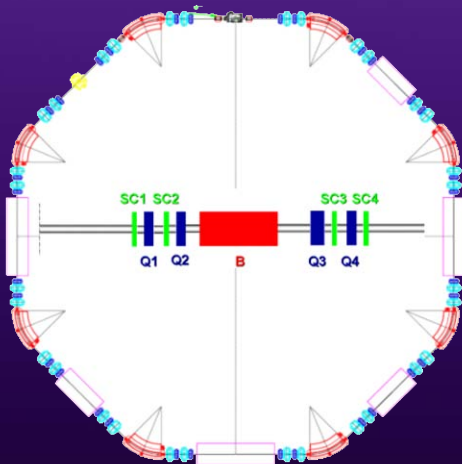
合肥光源的储存环和光束线、实验站



高频加速器



同步辐射实验站



磁聚焦结构示意图

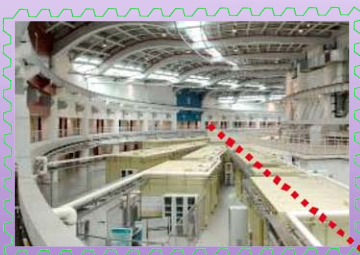


新研制的磁铁、电源、真空盒和插入件等设备

HLS 储存环将采用双偏转磁铁消色散（DBA）磁聚焦结构，束流发射度小于 $40 \text{ nm}\cdot\text{rad}$ ，可提供 4 个 4 m 长直线节和 4 个 2.32 m 中直线节，新建 4 台插入件和相应的光束与实验线站。

上海光源

上海光源（SSRF）由 150 MeV 电子直线加速器、全能量增强器、3.5 GeV、周长 432 m 的电子储存环以及沿环外侧分布的同步辐射光束线和实验站组成，总投资 14.3 亿元，是我国迄今建成的规模最大的大科学装置。SSRF 产生的同步辐射光覆盖从远红外到硬 X 射线的宽广波段，在用途最广泛的 X 射线能区（光子能量为 0.1 ~ 40 keV）产生高耀度和高通量的同步辐射光，其主要性能在许多重要方面位于目前世界上第三代中能同步辐射光源的前列。SSRF 于 2009 年建成并向用户开放，取得了一系列重要的研究成果。



同步辐射实验大厅



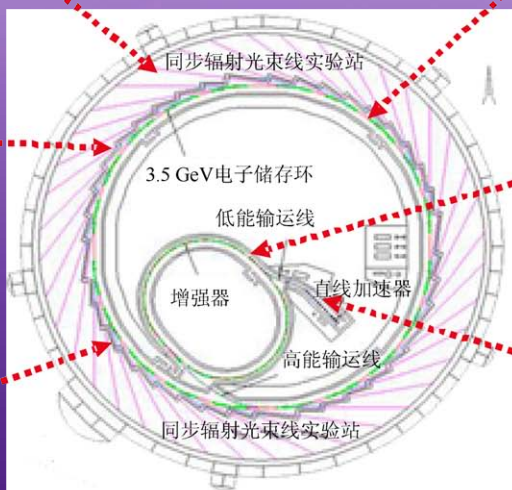
上海光源英姿



3.5 GeV 电子储存环



同步辐射实验站



上海光源布局图



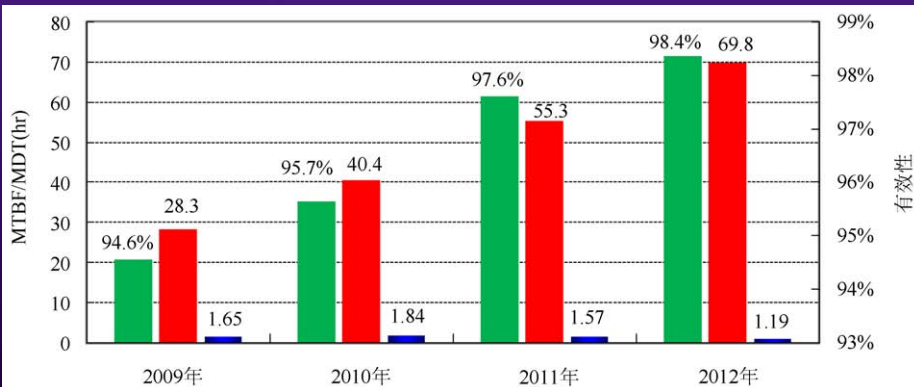
全能量增强器



同步辐射实验站



150 MeV 直线加速器



上海光源建成以来的运行情况

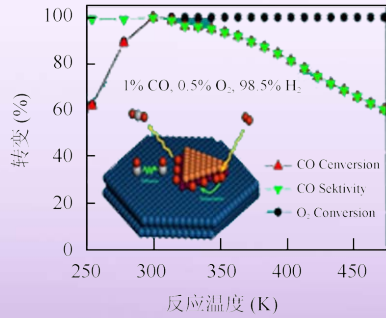
绿色：开机率—装置全年正常运行的百分比

红色：MTBF—装置运行平均无故障时间（小时）

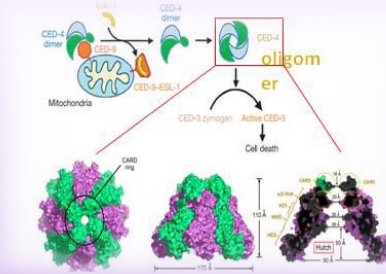
蓝色：MDT—每次故障的平均停机时间（小时）

有效性

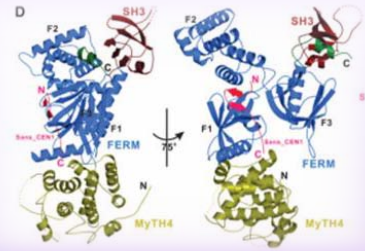
上海光源在投入运行三年多来，在促进我国生命科学、化学与催化、材料科学、环境科学、生物医学、地质考古等学科的发展上发挥了重要作用，这里是用户成果的一些例子。



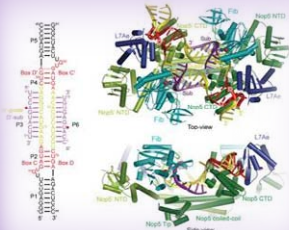
Science, 328, 1141(2010)
中科院大连化物所包信和组：
PtFe 纳米催化剂原位动态
反应结构表征



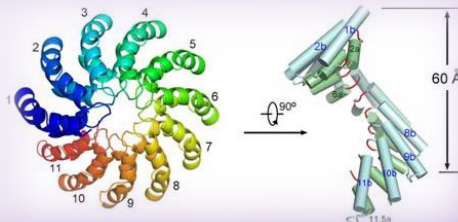
Cell, 141: 446-457(2010)
清华大学颜宁和施一公组：
线虫 CED-4 凋亡体蛋白质复合物结构



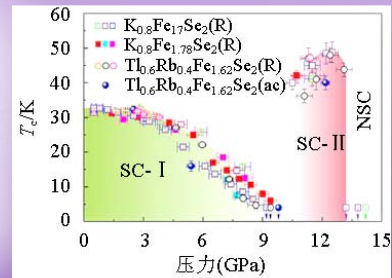
Science, 331(2011)
香港科技大学张明杰组：
肌动蛋白 7a 的突变如何导致
先天性失聪失明



Nature, 469(2011)
北京生命科学研究所以宽穷组：
C/D RNA 蛋白质复合物催化
RNA 核糖甲基化的结构机理

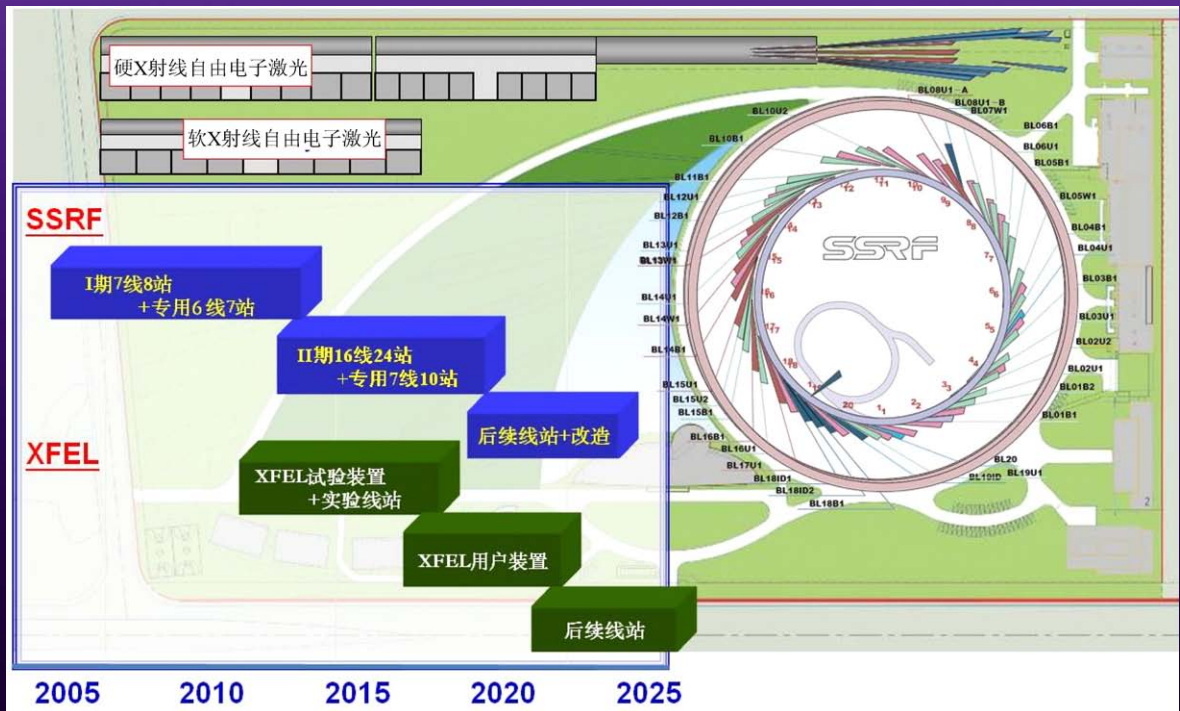


Science, 335: 720-723 (2012)
入选 2012 年度“中国科学十大进展”
清华大学颜宁和施一公组：
蛋白质特异性识别的机理研究



Nature, 483:67-69(2012)
中科院物理所赵忠贤 / 孙立玲组：
高压下铁基超导体的新性质

为满足学科发展及用户的迫切需求，以国家重大战略需求与世界科技前沿为导向，上海光源将建设一批高性能光束线站，与此同时开展 X 射线自由电子激光装置的研究。依托上海光源和上海自由电子激光装置，建设世界级的光子科学研究中心。



中国先进研究反应堆



国家投资 7.7 亿元在北京建设的中国先进研究反应堆 (CARR) 于 2012 年 3 月成功实现满功率稳定运行。CARR 共有 9 个切向水平孔道。依托 CARR, 建立研究手段配套、覆盖中子散射研究主要领域、强调应用又具备基础研究能力的中子散射装置。



CARR 一期建造 10 台谱仪, 包括: 高分辨粉末衍射仪、残余应力谱仪、四圆谱仪、织构谱仪、小角散射谱仪、反射谱仪、三轴谱仪 -I、三轴谱仪 -II、热中子照相和冷中子照相。



残余应力谱仪



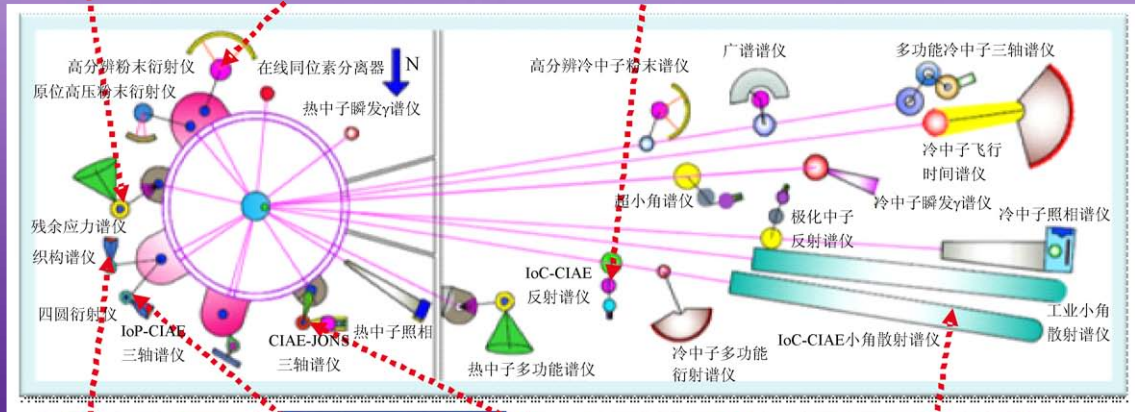
高分辨粉末衍射仪



反射谱仪



中子散射实验大厅



织构谱仪



四圆谱仪

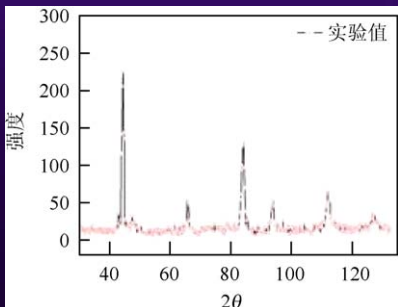


三轴谱仪 I



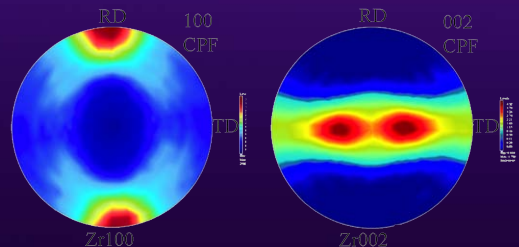
小角散射谱仪

在 CARR 上已建成的 7 台谱仪并成功实现在线调试, 应力谱仪取得 CARR 堆第一个中子衍射峰, 织构谱仪获取国内第一张由中子测量获取的极图, 此外粉末衍射、四圆、三轴、反射、小角散射等谱仪也均获得了数据。标志着 CARR 中子科学平台达到了开展科学实验的能力。



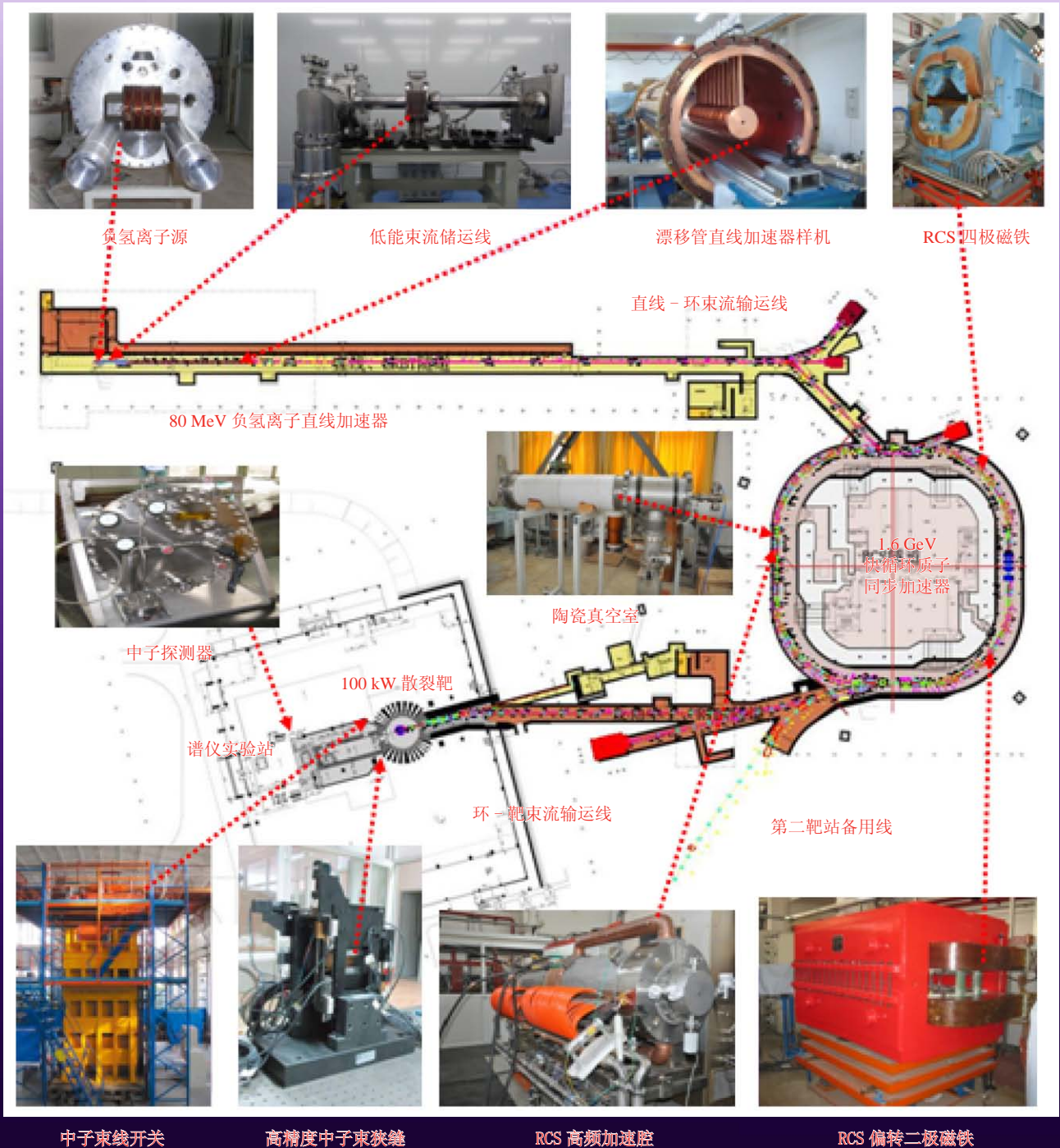
残余应力谱仪上率先获得了第一个 Fe (211) 衍射峰

织构谱仪上完成的 Zr 合金标样的极图测量



中国散裂中子源

与基于反应堆的中子源不同，在散裂中子源里，中子不是通过核裂变，而是由高能质子束打靶产生的。正在广东省东莞建设的中国散裂中子源（CSNS），包括一台 80 MeV 负氢离子直线加速器，一台 1.6 GeV 快循环质子同步加速器（RCS），两条束流输运线，一个靶站和 3 台谱仪及相应的配套设施。CSNS 靶站采用有扁平截面的多片厚度不同的钨片叠合而成的靶体，可为中子散射谱仪提供高通量脉冲中子束。CSNS 的束流功率为 100 kW，并可升级到 500 kW。CSNS 的经费预算约 17 亿元人民币，建成后将使我国拥有世界一流的中子科学综合实验装置，在中子科学领域内居国际先进地位。





散裂中子源在各行业的应用

散裂中子源为诸多学科的前沿研究提供先进的、不可替代的研究手段，并产生长远的经济和社会效益。我国在凝聚态物理、化学、材料、生物学、聚合物与软物质、地球科学、核物理、质子成像和医学应用的等领域拥有强大的研究队伍和迫切的实验需求，他们将是未来中国散裂中子源的用户。



2012年11月，中国散裂中子源工程现场，基坑开挖即将结束



2017年，这里将建成一座国际先进的中子科学综合研究中心