

国之重器： 同步辐射光源驱动未来科技进步

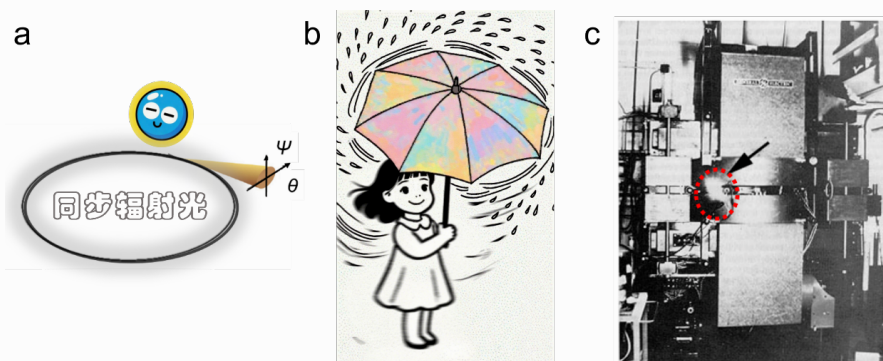
王丽华¹ 陈建辉² 谢红兰² 汪启胜² 樊春海³ 赵振堂²

¹(上海大学材料生物研究所, 上海, 201800)

²(中国科学院上海高等研究院, 上海, 201204)

³(上海交通大学化学化工学院, 上海, 200240)

同步辐射光是在超高真空环境中, 以接近光速运动的带电粒子在改变运动方向时释放出的电磁波。1947 年美国科学家在一台 70 MeV 电子同步加速器上首次观察到同步辐射光; 产生同步辐射光的科学装置被称为同步辐射光源。同步辐射光的发现有力推动了前沿科学研究的进步, 1997 年 Walker 因发现钠钾离子泵 (Na^+ , K^+ -ATP 酶) 获得诺贝尔化学奖。此后, 从 2003 年阐明细胞膜水通道和离子通道结构、到 2006 年解析 RNA 聚合酶、2009 年揭示核糖体、2012 年发现 G 蛋白偶联受体, 这些相继斩获诺贝尔化学奖的重要成果, 都离不开同步辐射光源的支持。迄今为止国际

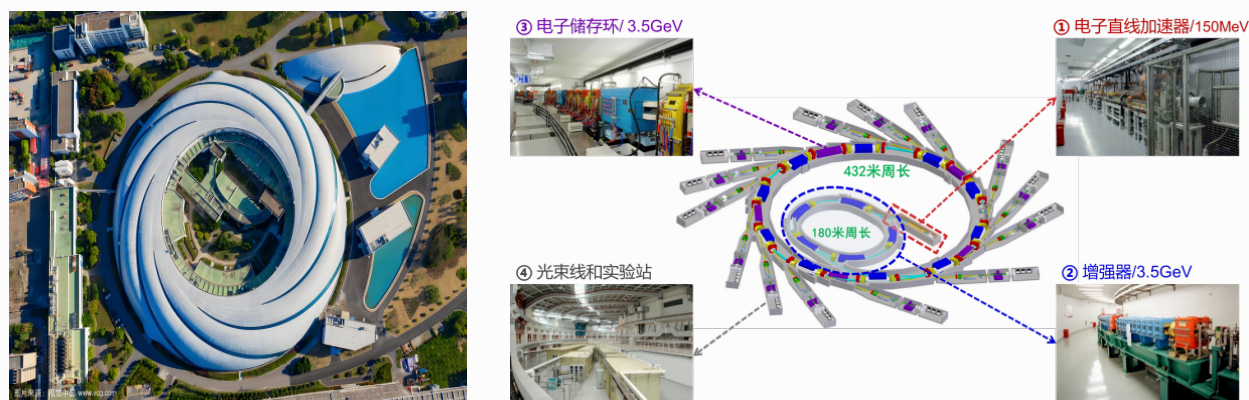


【图 1】(a) 同步辐射光的产生; (b) 沿着快速转动雨伞边缘切线方向飞出的水滴; (c) 通用电气 GE 公司的 70 MeV 电子同步加速器^[1]

上已建成和在建的同步辐射光源大约有 70 个, 支撑了材料、石油、环境、微电子和文化遗产等多个领域的前沿研究。

上海同步辐射光源(图 2)作为 3.5 GeV 的中能第三代同步辐

射装置, 具有宽波长范围、高强度、高亮度、高准直性、高偏振与准相干性、可准确计算、高稳定性等一系列优异的特性。2009 年上海光源的建成, 被 Nature 评价为“中国正式加入世界级同步辐射俱乐部”的里程碑事件。上海



① 【图 2】上海同步辐射光源外景图（左）和组成（右）

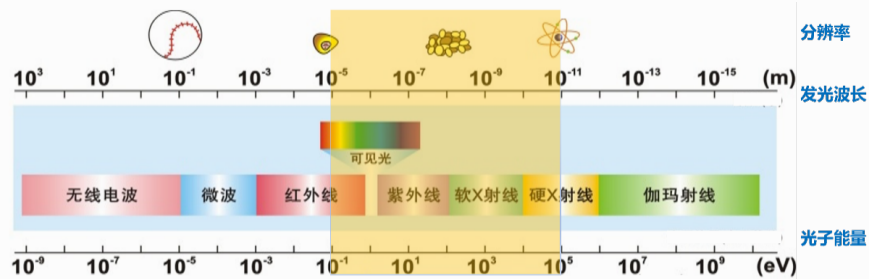
光源是我国第一个进入国际领先行列的大型多学科研究平台，是当之无愧的“大国重器”。目前上海光源共拥有 40 条光束线和 55 个实验站，其中 34 条光束线和 46 个实验站正在运行，面向全世界科学家开放，共同推动大科学时代的交叉科学和前沿科学研究。

上海光源主要由四个部分组成，分别是电子直线加速器、电子增强器、电子储存环、光束线和实验站。电子由直线加速器一端的电子枪打出并加速到 150 MeV，然后注入环形的增强器中进一步提高能量到 3.5 GeV，随后被注入到周长 432 m 的储存环中，电子在其运动轨迹的切线方向上释放出稳定的同步辐射光。科学家在光束线和实验站中对同步辐射光进行筛选处理和进一步使用，开展各种科学研究。

上海光源的特点是宽频谱、高强度、高亮度（图 3），涵盖了从远红外到硬 X 射线的连续光谱波段，波长从 1 mm~1 pm，跨越 6 个数量级。其产生同步辐射光的强度是 X 光机的上万倍，亮度是 X 光机的上亿倍，可以大大提高成像检测的分辨率和灵敏度，因此上海光源又被称为“探索微观世界的超级显微镜”。当同步辐射光打到物体上可以发生透射、反射、散射、衍射和激发等各种现象，通过测量这些光线

的强度、方向和性质，可以还原出物体本身的结构。目前在上海光源已经看到了从亚原子到活体的结构信息，尺度跨越 9 个数量级。

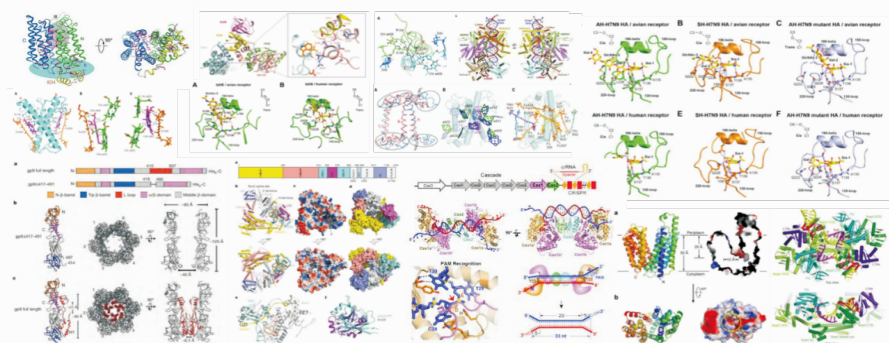
上海光源在生命科学领域发挥了巨大作用，尤其在蛋白结构解析和病毒研究方面。在结构生物学领域，上海光源建成前我国只解析了 99 个蛋白结构，到今天已经超过 10000 个 (PDB Bank)，在全球 130 多个生物大分子线站中名列第一。产生了一



① 【图 3】上海同步辐射光源波谱范围及研究物体的尺度范围^[2]

批重大成果：转录激活样效应蛋白特异性识别 DNA 的结构机理研究、首次解析人源 GLUT1 的三维晶体结构、解析光合物种硅藻捕光新机制、揭示抗结核新药的靶点和作用机制等；在《自然》、《科学》和《细胞》等国际顶级刊物发表论文 200 余篇（图 4），助力我国结构生物学实现跨越式发展。

在流行病毒领域，上海光源从 2013 年起，陆续解析了禽流感病毒、埃博拉、寨卡、MERS 以及新冠等多种病毒的关键蛋白结构，为遏制病毒爆发做出了重大贡献（图 5）。在新冠疫情期间，我国科学家依托上海光源率先解析了新冠病毒关键蛋

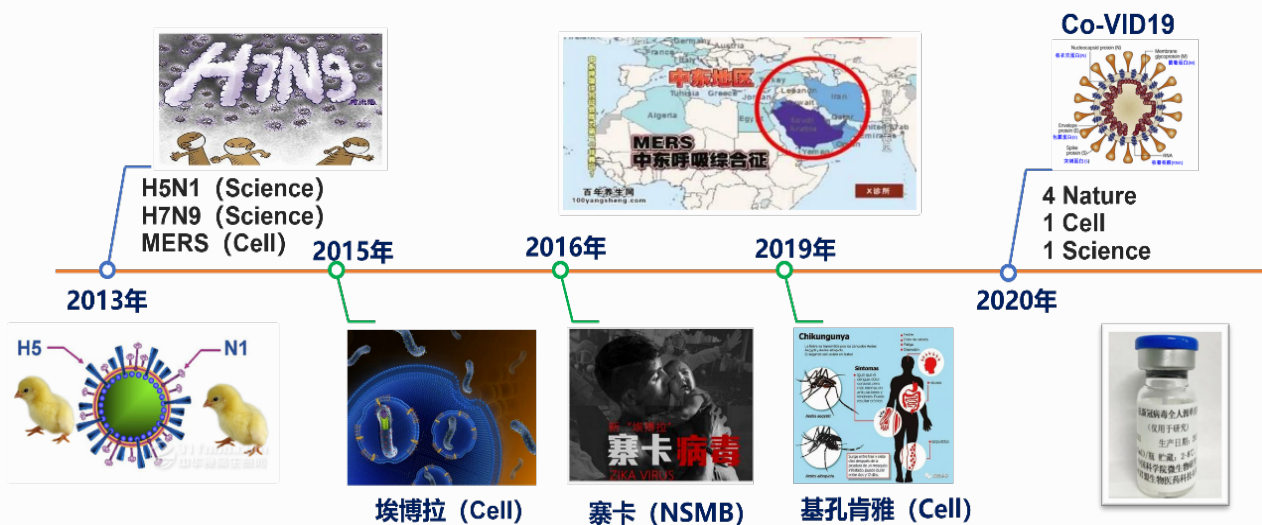


❶【图 4】上海光源助力我国结构生物学实现跨越式发展，图中为部分蛋白质结构研究案例

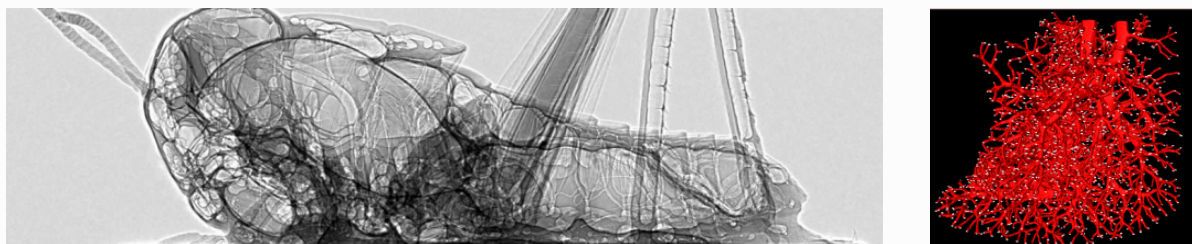
白（水解酶 Mpro、S 蛋白、N 蛋白、非结构蛋白）的高分辨结构，揭示了新冠病毒表面 S 蛋白与人受体相互作用的过程，并快速开发了多个小分子药物以及抗体药物，为国家和人民健康保驾护航。

在生物医学成像领域，上海

光源为活体研究提供了高分辨的动态成像方法（图 6）。利用 X 射线动态相衬成像，可以观察蝗虫幼虫触角微细管道、气管和腿上的刚毛等微小结构以及动态呼吸过程中的身体变化。还可以对血管等软组织、直径微米级的毛细血管清晰成像，这是常规 CT



❶【图 5】上海光源为流行病毒研究以及药物和疫苗研发提供支撑



❶ 【图 6】动态 X 射线相衬成像探索高原蝗虫的呼吸机理^[3] (左) 和复杂血管三维结构^[4] (右)

无法做到的。

目前,上海光源已经成为了全国/全球用户数量最多的大科学装置之一,服务用户涉及物理、化学、材料、生命科学、能源和考古等数十个学科或领域,例如在能源领域探索催化剂的结构和催化机理、工业关键部件研制分析材料晶型的动态变

化、文物鉴定保护过程中的原位无损检测等。服务了首款国产飞机发动机长江 1000A 的高温合金机匣的研制、京沪高铁接触线的铜合金分析、明清时代陶瓷工艺研究等领域等,助力我国工业建设和文明延续。

上海光源打破了我国科学家依赖国外大装置开展研究的局

面,在结构生物学快速发展的关键阶段及新冠病毒等重大研究中保障我国占据世界领先地位,并因此先后获得了国家科技进步一等奖、上海市科技进步特等奖、中国科学院杰出科技成就奖等重大奖项。目前,上海光源已经成为全国爱国主义教育示范基地和上海市科普教育基地,为科学传播提供了重要载体。

参考文献:

- [1] Elder F R, Gurewitsch A M, Langmuir R V, et al. Radiation from electrons in a synchrotron[J]. Phys Rev J Arch 1947, 71(11): 829-830.
- [2] https://zhuanlan.zhihu.com/p/398369333?ivk_sa=1024320u&utm_id=0
- [3] 陈荣昌, 杜国浩, 谢红兰, 等. 上海光源X射线成像实验站相位衬度CT初步结果[J]. 核技术, 2009, 32(4): 241-245.
- [4] Wang F X, Zhou P T, Li K, et al. Sensitive imaging of intact microvessels *in vivo* with synchrotron radiation[J]. IUCrJ, 2020, 7(5): 793-802.