

“自由电子激光与反质子加速器等重大基础研究”专题

编者按：当今，大科学装置已成为开展前沿科学研究、尤其是高能物理研究的重要平台。参加大科学装置的国际合作，对于实现中国在相关领域的跨越式发展、开展高水平的科学研究，具有重要的意义，国家对此给予了大力支持。下面 3 篇文章，分别介绍了科技部国家重点基础研究发展计划“自由电子激光与反质子加速器等重大基础研究”项目组在 X 射线自由电子激光、反质子加速器、飞行时间探测器等关键技术领域取得的重大进展。

自由电子激光：从星球大战的利器到打开新科学大门的钥匙

杨宇峰 陆辉华 葛 锐 郝建奎 李 彬 姜晓明

光是我们认识世界的重要手段。自远古时起，人类就在不断探索光的应用，形成了光学这一重要的科学分支。从萌芽开始，光学先后经历了几何光学、波动光学、量子光学几个重要的发展阶段。1895 年，伦琴发现了 X 射线，获得了第一个诺贝尔物理学奖。从此，X 射线步入历史舞台，在医疗、工业上发挥了重要的作用。1912 年，劳厄发现了晶体 X 射线衍射，开启了 X 射线探索微观世界的时代。现在 X 射线已经成为探索物质微观结构的最有效工具。

20 世纪 60 年代，激光器的出现，标志着光学进入了现代光学的新阶段。我们了解到的阳光、灯光等，都是向四面八方辐射的，没有一个确定的方向传播。但激光具有高亮度（瞬间亮度可比太阳表面高 100 亿倍）、单色性、方向性及相干性好等特点。激光

的“高精尖”的特性，将科学研究和工业应用推进到了全新的高度。例如，人们将其用于控制核聚变、天文导航（图 1）、精确测量长度和距离（图 2）、生物医学研究及临床手术、雷达预警、工业切割、探伤等。

激光简称 laser，即 Light Amplification by Stimulation Emission of Radiation 各字头的缩写，中文意思是受激辐射光放大。要了解激光，我们必须首先了解自发辐射、受激辐射和受激吸收。自发辐射是外无外界作用下，电

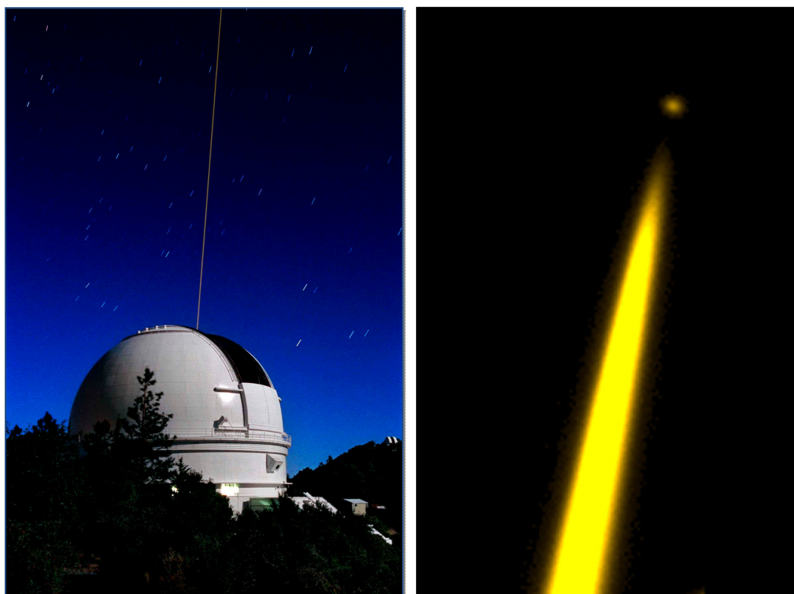


图 1 天文台的激光导航星，能够探测来自纳层的反射光（高度 100 千米）
（来源：<http://wenku.baidu.com/view/b46ac3dc5022aaca998f0fdf.html>）

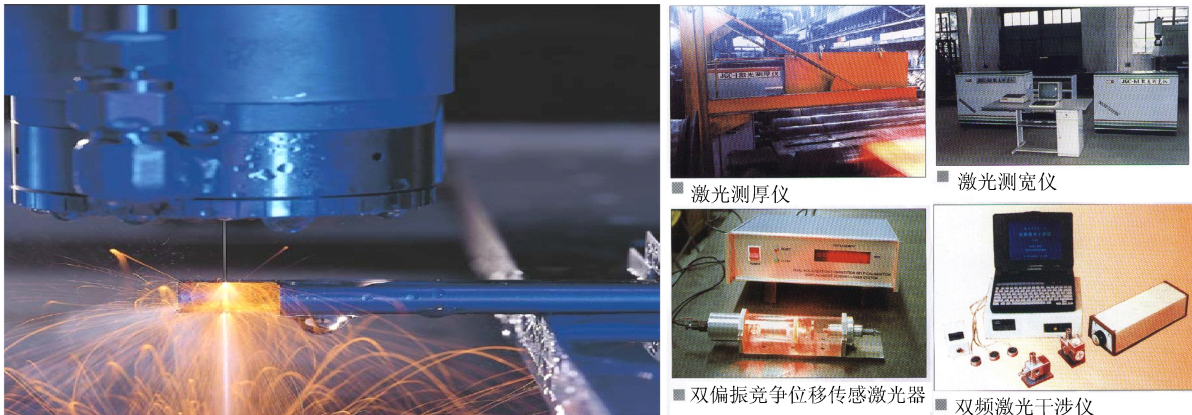


图2 激光切割与激光测距 (来源: <http://wenku.baidu.com/view/b46ac3dc5022aaea998f0fdf.html>)

子自发从高能级迁移到低能级。自发辐射的光子相互间没有联系, 状态各异, 方向性差、没有相干性。受激吸收是电子吸收外来光子的能量, 从低能级跃迁到高能级。受激辐射是指在外来光子刺激下, 电子释放出一个与外来光子状态完全相同的光子, 同时电子从高能级跃迁到低能级。诱发光子的能量要等于电子的能级差。通过一次受激辐射, 1 个光子变成了 2 个相同的光子, 这就是光的放大。

1960 年, 梅曼 (Theodore H. Maiman) 等人制成了第一台红宝石

激光器 (图3)。1961 年, 贾范 (Ali Javan) 等人制成了氦氖激光器。1962 年, 霍耳 (Robert N. Hall) 等人创制了砷化镓半导体激光器。以后, 激光器的种类就越来越多。按工作介质分, 激光器可分为气体激光器、固体激光器、半导体激光器和染料激光器 4 大类。

上述激光器的基本原理相同: 在热平衡状态下, 大部分电子分布在较低能级 E1 上。在泵浦作用下, 电子被抽运到较高能级 E3。E3 并非稳定态, 电子快速跳至稍低能级 E2 上。E2 上聚集了

大量的电子, 这在热平衡下是不可能的, 这种状态称为粒子数反转。受到能量等于 $E_2 - E_1$ 的光子激发, E2 能级上的电子受激发出同一光子。随着光子数的增多, E2 能级上更多电子产生受激辐射, 形成正反馈。在上述过程中, 产生激光必不可少的条件是粒子数翻转和增益大过损耗。所以装置中必不可少的组成部分有激励 (或抽运) 源、具有亚稳态能级的工作介质两个部分。激励是工作介质吸收外来能量后激发到激发态, 为实现并维持粒子数反转创造条件。

20 世纪 70 年代, 一种新的激光器加入到激光大家族, 这就是自由电子激光 (Free Electron Laser, FEL)。自由电子激光器利用自由电子的受激辐射, 把相对论电子束的能量转换成相干光辐射。这一设想最早由 1951 年由莫特 (Motz) 提出, 1976 年马戴 (Madedy) 小组第一次实现了自由电子受激辐射放大, 1977 年 4 月斯坦福大学迪肯 (Deacon) 等人研制成第一台自由电子激光振

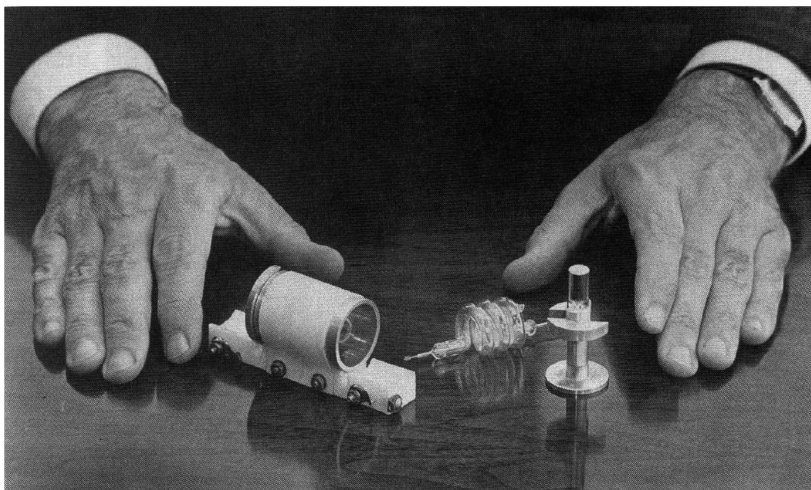


图3 第一台红宝石激光器

(来源: <http://wenku.baidu.com/view/b46ac3dc5022aaea998f0fdf.html>)

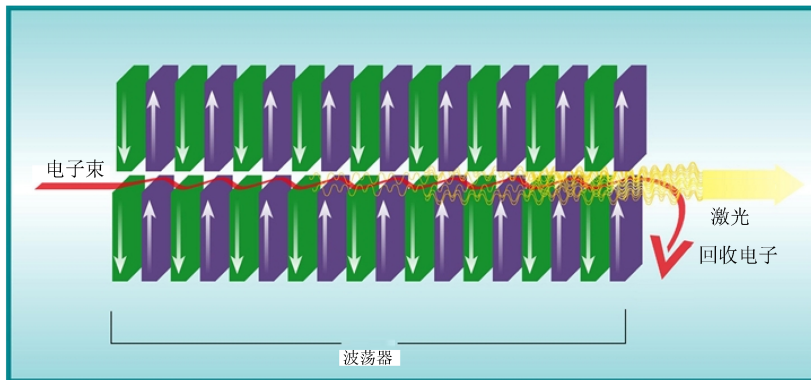


图4 波荡器出光过程 (来源: <http://blog.sciencenet.cn/blog-200301-206011.html>)

荡器。那么，自由电子是如何产生受激辐射的呢？原来，奥秘在于一种叫做波荡器（undulator）的器件。在这里，高能电子（接近光速）受到周期性磁场作用，像“障碍滑雪”那样摇摆前进，同时发出前向辐射光。以一种自放大激发辐射（Self Amplified Spontaneous Emission, SASE）的自由电子激光器为例，由于光的速度比电子快，辐射光将追上前面的电子，对其运动施加影响。这种影响反复施加的结果，是分散的电子开始群聚在一片片薄盘内。一个薄盘内的电子数以亿万计，在后方辐射的激励下，薄盘瞬间发出亿万与激励光子相同的光子，并对前方薄盘产生激励，这就是自由电子激光器内受激辐射放大的过程。图4中绿色和紫色代表了周期性磁铁，箭头代表了磁铁的磁化方向。在开始位置，电子（红色）的自发辐射很弱，但是随着距离的增加，辐射光开始逐渐放大（黄色）。

与其他激光器相比，自由电子激光器不存在工作介质发热的问题，功率可以做的很大。激光

波长不取决于工作介质的能级跃迁，而取决于自由电子的障碍滑雪运动，可以通过调节电子束能量和控制磁场任意选择。具有波长范围大（可以达到原子激光器无法达到的X射线波段）、波长易调节、亮度高、相干性好、脉冲可超短等突出优点。

因为上述特点，自由电子激光器诞生后，很快在众多的候选者中脱颖而出，入选了美国“星球大战计划”的激光武器。美国海军声称“其他激光器对制造、医学研究、生物和基本物理的

处都不如自由电子激光器”，“海军之所以选择它，是因为它具有多种用途的能力。它所独具的高功率和24小时运转的能力，对国防、工业和科学应用都很理想”。

X射线和自由电子激光的结合，产生了X射线自由电子激光器，一把打开新科学大门的钥匙、开辟新科学革命的利剑。

下面我们就通过“星球大战计划”来揭开X射线自由电子激光的神秘面纱。

一、成为星球大战利器的自由电子激光

1983年3月，美国总统里根提出“战略防御计划”，俗称“星球大战计划”。其基本设想是，如果苏联发动攻击，那么在苏方战略弹道导弹还未到达美国或其盟国本土之前，便对进犯导弹实行拦截并摧毁，即采取所谓的积极战略防御（图5）。其中，对进犯导弹拦截并摧毁，是星球大战计划中非常重要一环。其所需



图5 高能自由电子激光器武器使用想象图

的武器系统，有两个考虑方案：
1. 定向能武器（directed-energy weapon），即光速武器（speed of light weapon）；2. 动能武器（kinetic-energy weapon）。其中，自由电子激光由于可以高效率地在短波长运行，既能地基部署，又能天基部署，成为备受星球大战计划重视的候选对象。

1986年，美国战略防御倡议局（SDIO）宣称劳伦斯-利弗莫尔（LLNL）实验室关于自由电子激光的实验取得“惊人”进展，表明地基自由电子激光可能拥有足够的能量克服大气衰减而摧毁敌方飞行器。2011年1月，海军研究署报道称，位于新墨西哥州的洛斯阿拉莫斯国家实验室的科学家们，在美国海军自由电子激光器项目上取得了重大突破，对生成海军新一代武器系统兆瓦级（ 10^6W ）激光束的电子束注入器进行了演示，该项研究是美国海军未来部署兆瓦级自由电子激光武器系统的重要一步，将革新舰艇防御。海军研究署希望最早在2018年能够在海洋环境中测试100kW自由电子激光的能力。FEL有望为美国海军未来在全球任何海事环境中提供瞬时的舰艇防御能力。

这种高能激光器在未来的舰载系统中具有最好的应用前景。因为它的光波长和强度可以通过电子束能量和强度进行选择，使得穿透海面空气的光束波长和能量最优化。这意味着能够在恰当时间和恰当距离，获得合适的激

光能量打击来袭的目标，也意味着通过选择波长，可避免海面空气中所含的气溶胶和二氧化碳对光束的强烈吸收，使所选激光恰好能够穿透空气。而且，它不像固体激光器那样对热防护的要求很高。

因为“星球大战计划”，自由电子激光开始为人们所熟知，获得了大发展。在科学领域，高增益短波长的X射线自由电子激光，普遍被看好是下一代光源的代表，具有巨大的发展潜力和重大的应用前景。杨振宁博士将自由电子激光称为“新金矿”。下面我们就来看看X射线自由电子激光在科学上有哪些应用。

二、前沿科技研究的高端需求

人们使用光来观察微小物体时，所用光的波长应当大致与被观察的对象的尺度相同。可见光的最短波长为 $0.4\ \mu\text{m}$ （ $1\ \mu\text{m}=10^{-6}$ 米），这就是说人们利用可见光，最小的也只能看见微米量级的物体。生物细胞的尺度是 $20\sim 30\ \mu\text{m}$ ，细胞里的细胞核的尺度是 $5\ \mu\text{m}$ ，细胞器的尺度是 $1\ \mu\text{m}$ 。因此人们用光学显微镜也只能看到细胞的结构。如果要深入到分子、原子领域，可见光就无能为力了。

X射线的波长为纳米（nm）的量级甚至更短，利用X射线，人们能够把视野扩展到纳米尺度。生物大分子的尺度是几十纳米，人们利用X射线可以观察到分子的结构、生物遗传基因及其结构。X射线是在原子/分子尺度上揭

示物质结构和生命现象的理想探针。

传统的X射线光源的波长几乎都是不连续的，并且是固定不变的。因为它们的发光几乎都是由光源的原子状态发生改变而引起的，或者说由于原子的能级跃迁而产生的。同时，传统的X光光源亮度过低，解析一个晶体结构需要很长时间。这对我们用这些光源的光来观察和研究物质时就有许多局限性。

当前前沿科学研究需要提供能量足够高、亮度足够强、能量分辨率足够好、聚焦足够小和脉冲宽度足够小的光。例如，为了穿透获得极端条件和原位环境的各种装置，研究国家重大需求相关的特殊材料，以及工业核心技术相关的关键工程材料，需要高能量的X射线。

1947年出现的同步辐射，波长范围宽（跨9个数量级，从红外线到X射线），亮度高（连续谱亮度比最强的X射线光管大100万倍），聚焦细锐，具有脉冲时间结构，对物质精细结构的研究产生了重大影响，在凝聚态物理、磁学、结构生物学以及国家重大需求和工程材料研究等方面发挥了重要的作用。

随着科学发展，高端的前沿研究对光源相干性、单色光亮度提出了极高要求。例如，近年来呈现快速发展态势的结构生物学，以精确结构知识为基础揭示生命活动的规律，目前已成为生命科学最为活跃的研究领域。同步辐

射 X 射线单晶衍射方法是目前解析蛋白质三维结构的主要方法(占 85% 以上)。这种方法解析蛋白质结构首先需要将目标蛋白表达纯化,通过各种方法将其制成单晶,通过 X 射线照射产生衍射图,最后对衍射图分析得到蛋白质的三维空间结构。蛋白质结晶一直是 X 射线晶体学中的瓶颈。蛋白质分子巨大,分子间相互作用力非常微弱,想要将其制成单晶非常困难,有些难以制成晶体。晶体的制备耗费大量时间和费用。即使可以得到合适的结晶,大分子体系结构的测定仍然比小分子要困难得多。这是因为大分子体系结构中原子众多,确定单个原子结构很困难。更重要的是,X 射线衍射必须在分子固相中进行,由此获得的结构信息可能会与分子体系在生物活性状态的情况有所不同。X 射线晶体衍射方法也不能测量不稳定的过渡态构象。依靠这种方法,目前人体约 30000 个膜蛋白结构只解析了 6 个。

凝聚态物质的动力学研究如断裂形成,相分离以及成核过程,液体或生物环境中的快速波动,需要研究纳米材料在飞秒到皮秒时间尺度上的瞬态过程。其中有大量的行为是不重复发生的。有单脉冲成像能力的光源是破解此类机制的钥匙。

总的来说,高端的前沿研究对光源性能的要求如下:

1. 波长短到 0.1 nm,能够在原子尺度上解析物质结构;

2. 超短脉冲 ($<0.1 \text{ ps}$, $\text{ps}=10^{-12}\text{s}$),在这个时间尺度上,人们将拍下分子运动的动态图像;

3. 超高亮度,研究物质在极端条件下的表现,高亮强光源可以极快的速度获得衍射数据,便于研究快速运动和动力学过程;

4. 空间相干性,样品不同部位将获得单一入射光,使得微小物体清晰成像成为可能。如单一纳米颗粒甚至生物大分子的高分辨率成像。

同步辐射是一种非相干的第三代光源,包含了波长连续分布的各种辐射,单色光的强度、脉冲窄度都达不到上述要求。作为第四代光源的 X 射线自由电子激光,则是最理想的一种光源。与第三代同步辐射光源相比,峰值亮度高 8 ~ 10 个数量级,平均亮度高 1 ~ 4 个数量级;脉冲宽度缩短 2 ~ 4 个数量级,窄至几百到几十飞秒 (fs , $\text{fs}=10^{-15}\text{s}$);具有更好的相干性。

世界上第一台硬 X 自由电子激光(美国 LCLS, 2009 年)最短波长 0.15 nm,亮度比任何 X 射线光源高 10 亿倍以上,具有飞秒时间结构和完全的相干性。在 X 射线波段,由于没有足够强的 X 射线激励源和合适的光学谐振腔,始终未能实现基于原子的 X 射线激光器。自由电子激光是 X 射线波段唯一可选择的激光器。在 XFEL 出现以后,利用 XFEL 作为激励源,X 射线原子激光器的梦想才成为了现实。

下面我们就来了解一下

XFEL 的巨大威力。

三、X 射线自由电子激光——打开新科学大门的钥匙

X 射线自由电子激光(XFEL),以难以置信的性能,为科学研究带来了无限可能性。它为各种体系的高空间分辨和时间分辨的动力学研究提供强有力的手段,给物理、化学、材料科学、地质、生命科学和医学等多个学科的前沿研究带来突破,为人类对自然的认识打开全新的视野。

利用 XFEL 进行显微、光刻,可以大幅度地提高分辨率和精度。利用 XFEL,可对活细胞进行无损伤立体成像,直接观察细胞中的生命过程,为揭开生命之谜提供重要的工具。利用 XFEL 能够勾勒出一个原子的形貌,拍出纳米分辨率的照片,实时观测原子运动和化学键的形成与破裂,用电影记录一个化学反应的过程。

2005 年,德国电子同步加速器研究所(DESY)的软 X 射线自由电子激光装置 FLASH 开始运行,最短波长 6 nm,是世界上首台软 X 射线自由电子激光装置。2009 年,美国斯坦福直线加速器中心直线加速器相干光源(LCLS),成功实现了波长为 0.15 nm 的 X 射线自由电子激光出光,是世界上首台硬 X 射线自由电子激光装置,光的波长、脉冲强度 ($10^{17}\text{W}/\text{cm}^2$, 单脉冲足以切断钢铁,而太阳光平均为 $0.1\text{W}/\text{cm}^2$) 和时间结构 (10^{-15} 秒)能够满足几乎任何苛刻的实验要求。在这些装置上,

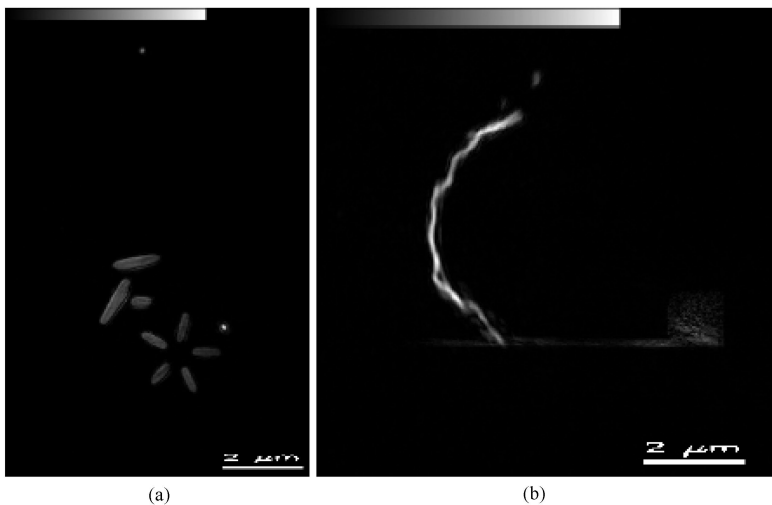


图6 XFEL 成像，均采用 13.5nm 单脉冲衍射进行图像重构

(a) 一个直径 145 nm 的球体成像，分辨率 40 nm；(b) 产蜜螺原体细胞重构图像

科学家们已经完成了大量不可思议的实验。

2009 年，科学家用波长 13.5 nm 的超亮自由电子激光脉冲实现了单脉冲成像，分辨率达到 40 nm (图 6 (a))，并用单脉冲重构了一个生物细胞的衍射图像(图 6 (b))。这个实验表明，短波长自由电子激光飞秒脉冲具备了单脉冲成像的能力，1 个脉冲即能够提供清晰成像所需的强度。

科学家们还利用单个的软 X 射线 FEL 飞秒脉冲，对一个纳米尺度的阵列 (图 7 (b) 上图的 URA) 实现了高分辨率全息成像 (图 7)，

相对于传统的 X 射线衍射成像技术，XFEL 的短脉冲和超高强度，意味着人们能够从非常微小的晶体得到高分辨率的结构信息。照射光越强、脉冲越短，结构信息越清晰，所需的蛋白晶体越小 (图 8 (a))。对结构生物学而言，越小的晶体越重要，因为很多生物物质难以结晶，大

晶体的制备更是困难。2011 年，科学家利用 XFEL 找到了测定蛋白质 3 维结构的捷径——科学家用 XFEL 脉冲照射蛋白的纳米微晶得到了单脉冲图像 (图 9)，而不需要制备大的晶体。该实验表明，XFEL 解析蛋白结构只需要纳米尺度的微晶，无需制备大的蛋白晶体，这将使某些蛋白的分析时间缩短数年，大量至今结构未知的蛋白将因此能够进行结构解码。在第二个实验中，科学

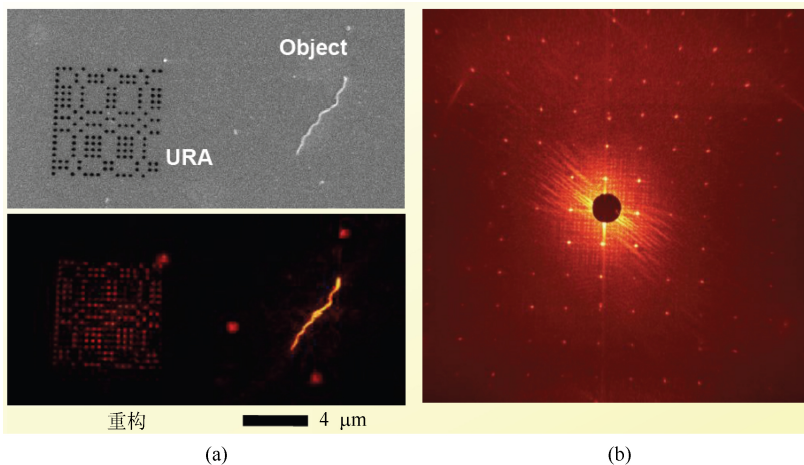


图7 脉宽 15 fs 的 X 射线 FEL 单脉冲全息成像

(a) 上图为扫描电子显微镜成像。图中 URA 为纳米尺度的阵列，而 Object 为 1 个细菌细胞；下图为重构图像；(b) 为衍射花纹

家们甚至连微晶都不要，直接用 XFEL 脉冲拍摄了原装病毒颗粒的照片，图像的分辨率可以达到 1 nm (图 8 (b))。XFEL 光脉冲持续时间只有 10^{-15} 秒，但其强度却足以产生成像所需的信息。光脉冲可以将病毒加热到 10 万摄氏度的高温，在此之前科学家们用灵敏而超快的 X 射线照相机 (CAMP) 拍下病毒体的图像。这使科学家们有望拍摄活体细胞和分子内的化学变化。

XFEL 密集的能量能够创造和探测 200 万摄氏度高温的物质。在 LCLS 的实验中，科学家用飞秒激光脉冲将铝箔加热到了 200 万摄氏度，在致密的固体中产生了等离子体。此前科学家们已经能用常规激光照射气体获得等离子体，但是没有哪种激光能够像 X 射线自由电子激光这样，有穿透致密固体的能力，产生均匀的等离子体并同时探测了它。这一壮举令科学家们有能力理解星体和巨行星内部的极端物质，分析

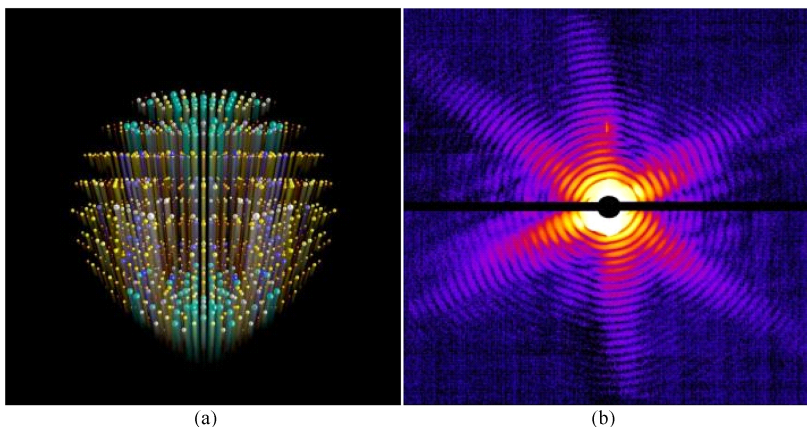


图8 (a) LCLS 用最强的 XFEL 脉冲照射推断的蛋白晶体结构图像;
(b) LCLS 的 XFEL 飞秒脉冲“拍摄”到的单病毒颗粒衍射图像

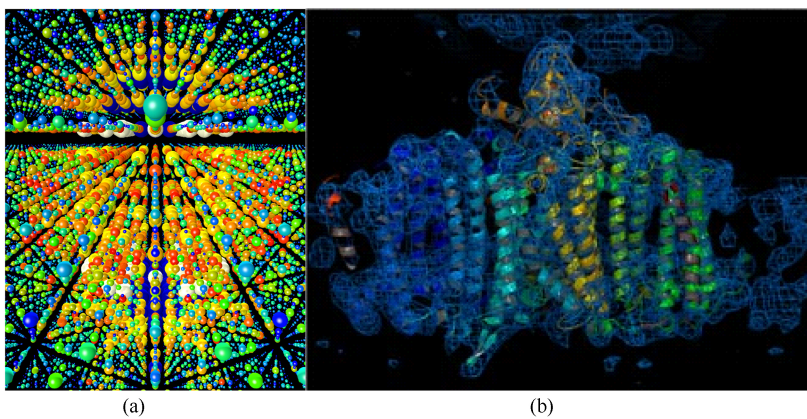


图9 在 LCLS 的 XFEL 装置上获得的 (a) 蛋白质纳米
微晶衍射图像及 (b) 重构图像

和再现太阳内部的核聚变过程。

XFEL 还使 X 射线波段的原子激光器的梦想成为了现实。1967 年, 科学家们预言利用原子内侧轨道电子能级的跃迁, 可以像制造可见光激光那样, 实现 X 射线波段的原子激光器。但是, 因为缺乏足够强的 X 射线激励源, 这一梦想始终未能实现。最近, 利用超强 XFEL 脉冲, 科学家们终于成功将氩原子内侧轨道的电子击出 (图 10), 实现了 X 射线的受激辐射放大。这是第一台 X 射线原子激光器。氩原子激光器发出的 X 光脉冲宽度只有 XFEL 的

1/8, 色度更纯, 使得观察超快化学反应的细节成为可能。这一成

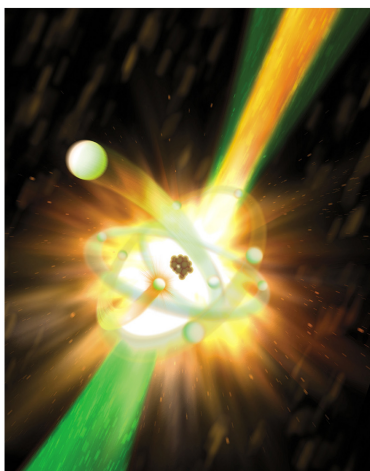


图 10 SLAC 强大的 XFEL 脉冲从左下角 (绿色) 撞击 1 个氩原子 (中心)

就将开启 X 射线研究的新天地。

四、中国自由电子激光的发展之路

为满足 21 世纪高端科学用户的需求, X 射线自由电子激光目前正向以下方向迅速发展: 时间结构和纵向相干性的完全控制, 中心波长调谐和偏振可控, 兼具高峰值亮度和高平均亮度, 高平均功率。为实现上述目标, X 射线自由电子激光无论在运行模式的完善与创新方面, 还是在相关的关键技术的改进和突破方面, 国际上都在竞相布局和加速发展。

世界各科技强国均将 X 射线自由电子激光的研究列入了未来科技发展计划的重要内容。除了美国斯坦福直线加速器中心的直线加速器相干光源 (LCLS), 位于汉堡的德国电子同步回旋加速器研究中心 (图 11 (a)) 已研制出先进的紫外线自由电子激光器, 并计划到 2015 年时推出欧洲的 X 射线自由电子激光器 (EXFEL)。EXFEL 总长 3.4 km (图 11 (b)) 产生最短波长为 0.1 nm 的 X 射线, 每秒钟 27000 个超短 X 射线激光脉冲 (LCLS 是 120 个)。峰值亮度比 LCLS 高 3 倍, 平均亮度比 LCLS 高 2 个数量级, 将是世界上最强大的 X 射线光源。它包含 1 个 1.7 km 长的超导加速器, 将电子加速到 17.5 GeV。然后电子进入长度超过 100 m 的波荡器, 实现自放大自发辐射出光。EXFEL 装置总投资超过 10 亿欧元, 包括德国在内, 共 12 个欧



图 11 (a) 德国电子同步加速器研究所 DESY 俯瞰；(b) 欧洲 X 射线自由电子激光装置的规划图
(来源: <http://www.xfel.eu/overview/desy/>)

洲国家参与建造和运行。日本、韩国也在开展类似的项目。如何用尽可能小的输入能量在尽可能短的波长上产生高增益 X 射线激光是当今各科技大国在该领域竞争的主要焦点。

中国自由电子激光经历了 20 多年的发展。1985 年，中科院上海光机所实现拉曼型自由电子激光出光。1986 年，在 863 等项目支持下，中国科学院高能物理研究所、上海光机所、上海应用物理研究所和中国原子能研究院合作，研制中红外北京自由电子激光装置 (BFEL)，1994 年率先在亚洲实现饱和振荡出光 (图

12)。此外，中国工程物理研究院的远红外 FEL 也在 2005 年出光。2000 年起，在国家科技部、国家自然科学基金委和中国科学院的支持下，启动了上海深紫外高增益自由电子激光装置的预研工作，2009 年实现了 400 nm 的 SASE 出光，2010 年实现了高增益谐波产生 (High Gain Harmonic Generation, HGHG) 饱和出光 (图 13)。

大型先进光源是我国科技基础条件建设的组成部分。鉴于 XFEL 的巨大潜力和应用前景，短波长 FEL 发展受到了我国政府和科学界的一致重视。2009 年，

中国科学院大科学装置领域战略研究组制定了《中国至 2050 年重大科技基础设施发展路线图》。根据我国经济和科技发展规划与长远的发展趋势预测，明确我国大型光源建设从跟踪、追赶、超越到领先各个阶段的发展战略，结合具体光源装置的建设确定至 2050 年的发展路线图。根据这一路线图，21 世纪二三十年代，建成未来第四代光源，使我国在光源方面达到世界先进水平。2050 年左右，我国应该在大型先进光源的概念、设计和建设方面，走在世界前列。

XFEL 是我国重点发展的第

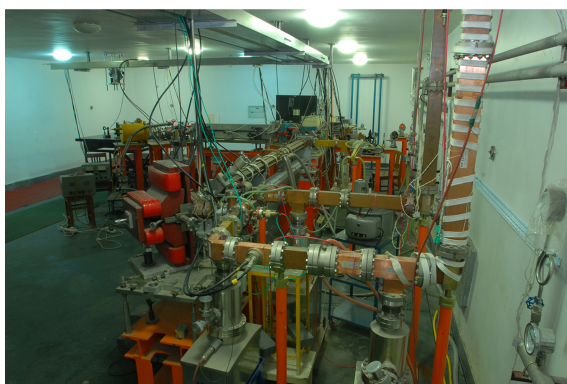


图 12 北京红外自由电子激光装置 (BFEL)



图 13 上海深紫外自由电子激光装置 (来源: http://www.cas.cn/ky/kjzj/201012/t20101230_3052291.shtml)



图 14 中科院高能所研制的 (a) EXFEL 恒温器样机; (b) EXFEL 波荡器样机

四代大型先进光源。根据上述路线图, 2015 年之前, 在 XFEL 关键工作模式探索和相关先进技术研发上取得突破。2020 年, 我国将完成 XFEL 装置关键技术预研。2030 年, 建成世界最先进的 XFEL 光源, 全面进入世界先进水平; 同时积极开展性能更为先进的新型光源装置科学原理和关键技术研究。

X 射线自由电子激光装置涉及的多项重大关键技术, 已将目前的激光技术、加速器技术、光束线和实验站技术推至极限, 极富挑战性。为了学习和掌握 XFEL 核心关键技术, 分享国际最先进科学装置的研究成果, 中国积极参与了欧洲 X 射线自由电子激光装置的国际合作。

2008 年, 在科技部 973 项目支持下, 中国科学院高能物理研究所(高能所)开展了大型低温恒温器和高性能超长波荡器关键技术的研究, 宁夏东方钽业股份有限公司开展了超导腔用大晶粒高纯钽片的研制, 北京大学开展了大晶粒 9-cell 超导腔的研制和物理性能研究。

2009 年, EXFEL 恒温器样机研制成功(图 14 (a)), 通

过 DESY 方面的低温测试, 成为首台通过 DESY 测试的低温恒温器样机, 性能优于国外同行。测试完成后的低温恒温器被安装在 DESY 正在运行的 FLASH 装置当中, 经过两年的运行, 各种性能参数稳定可靠。也正是因为该台样机的稳定可靠, 高能所通过竞标获得了 58 台(总 103 台) EXFEL 低温恒温器的批量生产合同, 彰显了中国在该领域的国际竞争力。

2011 年, 在与国内厂家联合自主研发的高性能磁性材料基础上, EXFEL 波荡器样机 U48 研制成功, 整机性能达到国际先

进水平, 是第一台专用于 EXFEL 的波荡器样机(图 14 (b)), 也是国内首次研制的高精度超长波荡器。2011 年 4 月, 这台样机安全运抵德国, 完成德方测试。由于这台样机的成功研制, 2011 年 6 月, 高能所与 EXFEL 签署了所与所间的合作框架协议, 进一步推进双方在 XFEL 各项关键技术领域的合作, 建立了所与所间的长效合作机制。目前, 中科院高能所获得了 EXFEL 相移器批量订单(>31 台)以及巴西光源的磁性材料批量订单。在创造经济效益的同时, 大大提升了我国在相关高端制造领域的技术水平。

射频超导谐振腔(简称超导腔)是一种射频加速结构, 用来加速带电粒子, 使其获得高的能量, 表面处理技术是保证腔体性能的关键。采用大晶粒钽材, 能够简化研制过程、降低成本, 性能可以与细晶钽材制造的超导腔相当, 对于大科学装置有非常可

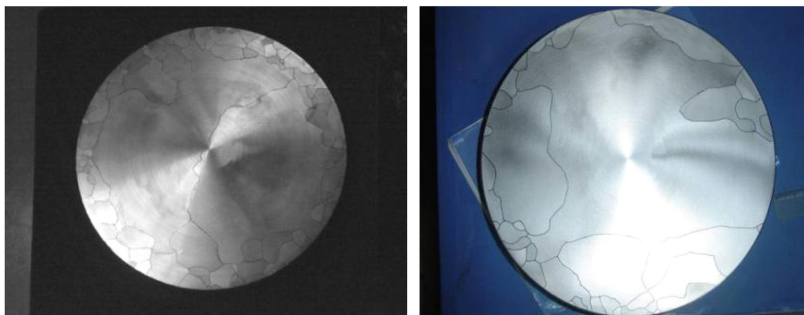


图 15 宁夏东方钽业股份有限公司研制的高纯钽材, 最大晶粒个数仅为 1 个



图 16 北京大学基于高纯钽片所研制的大晶粒 9-cell 超导腔

观的价值。

经过五年的研究开发，宁夏东方钽业股份有限公司研制出了用于超导加速腔的大晶粒高纯高性能铌片（图 15），材料性能达到国际先进水平，掌握了全套制备工艺。在 EXFEL 首次竞标中，宁夏东方钽业股份有限公司获得了全部超导腔用铌材 25% 份额，在第二次竞标中，公司获得了全部超导腔用铌材 50% 份额。宁夏东方钽业股份有限公司已成为 EXFEL 的主要供应商，并获得了其他国际商业订单，民族品牌开始走出国门、走向国际市场。

与此同时，北京大学 973 课题组成功研制出了国内首台大晶粒 9-cell 超导腔（图 16）。目前，北京大学与宁夏东方钽业股份有

限公司成立了专门的公司，实施超导腔研制技术的产业化。

EXFEL 国际合作使我国科技人员掌握了 XFEL 用超导腔、恒温器和波荡器的关键研制技术，促进了国内企业的技术进步，提高了参与国际竞争的能力。合作取得的成绩，极大的提升了中国在 XFEL 领域的国际形象和地位。对于我国发展自己的 XFEL 装置，打下了良好的人才和技术基础。

X 射线自由电子激光是最近 10 年光子科学最新进展的集中体现，将对科学研究产生巨大的推动作用，成为开启新科学大门的钥匙。通过科技部 973 项目支持，我国在 X 射线自由电子激光装置（XFEL）相关的技术水平大

幅提升，为我国未来建造自己的 XFEL 装置打下了坚实的基础。

本文及文中述及的 973 研究工作，是在科技部 973 计划项目“自由电子激光与反质子加速器等重大基础研究”支持下完成的。在此表示感谢。

（杨宇峰，陆辉华，葛锐，姜晓明，中国科学院高能物理研究所 100049；郝建奎，北京大学 100871；李彬，宁夏东方钽业股份有限公司 753000）

作者简介

姜晓明，研究员，X 射线光学专家，科技部国家重点基础研究发展计划“自由电子激光与反质子加速器等重大基础研究”项目首席科学家。



封面照片说明

照片中的是美国研制的 X51A “乘波者”极超音速喷气机，今年 8 月，搭乘 B52 轰炸机在美国加利福尼亚州莫哈韦沙漠的爱德华兹空军基地起飞测试。X51A “乘波者”极超音速喷气机是悬挂在 B52 轰炸机机翼下升空的，当 B52 轰炸机升空近 5 万英尺（约合 1.5 万米）的高度后，X51A 脱离轰炸机，火箭推进器随即点火而后释放。X51A 将速度提升到 6 马赫左右，飞行高度达到 7 万英尺（约合 2.1 万米）。X51A “乘波者”极超音速喷气机采用具有革命性的超音速冲压喷气发动机，几秒内的速度便可达

到每小时 4500 英里（约合每小时 7242 千米）。此次试飞持续 300 秒，成为 X51A 迄今为止时间最长的一次飞行。所谓的极超音速飞行是指速度超过 5 倍音速，是高速飞机的未来发展方向。如果这项技术研制成功，会给未来的航空业带来福音，同时该项目也备受美国军方的关注。

封底照片说明

这是 GRAIL 月球探测器绘制的高精度和高分辨率的月球重力图。2012 年 12 月 18 日美国国家航空航天局的 GRAIL 月球探测器（包括两颗卫星“潮起”和“潮落”），已经在美国东部时间 17 日 17:28，北京时间 18 日清晨 6:28

在地面控制下撞击月球，从而为该项目画上圆满的句号。GRAIL 探测项目由两颗相同的卫星组成阵列开展探测工作，它们发回了大量有价值的信息。这颗探测器获得了迄今为止精度最高的月球重力场数据，这些数据将帮助科学家们解开许多有关这颗星球悬而未决的重要问题。此次任务期间，GRAIL 探测器得到了精度超越历史上任何其他探测项目的月球全球重力场数据，这些数据对于研究月球起源将产生关键性的影响。策划此次撞击月球，是避免这两艘飞船在燃料耗尽后自行坠毁可能会破坏月面上的一些重要历史遗迹，如当年阿波罗探月的着陆点等。