01

大连相干光源

杨学明

中国科学院院士

大连相干光源负责人



为什么它的峰值亮度可以达到太阳光的一亿亿倍？这么亮能用来做什么？

大连相干光源的全称是“基于可调极紫外相干光源的综合实验研究装置”，由中国科学院大连化学物理研究所和上海应用物理研究所联合研制，如图 1–1 所示。作为该装置的负责人，我向大家介绍一下它的工作原理和主要用途。

大连相干光源名字中的“相干”两个字，表明了它的核心特征。普通光源（如灯泡）发出的光，就像一群随意散步的人，朝各个方向行走，步伐（相位）杂乱无章，这种光被称为“非相干光”。相干光源发出的光，则像一支训练有素的仪仗队，所有人的步伐高度一致，朝一个方向前进，节奏稳定，这种光就是激光。

大连相干光源是我国第一台大型自由电子激光科学研究用户装置，也是目前世界上唯一工作在极紫外波段的自由电子激光用户装置，还是世界上最亮的可调谐极紫外光源。

大连相干光源有最亮的“闪光灯”，峰值亮度可达太阳光的一亿亿倍。有最快的“快门”，可以工作在飞秒或皮秒脉冲模式，不但能让分子、原子无处遁形，还能给它们“拍超快电影”，动态记录化学反应的全过程。



图 1–1　坐落于辽宁省大连市的大连相干光源（图片来源：中国科学院大连化学物理研究所）

自由电子激光的产生机制及其超高亮度的原因

自由电子激光装置是近年来国际科技界飞速发展的一类重大科技基础设施，其特点是激光波长和脉冲结构可以根据需要进行设计。

自由电子激光通过相对论电子束与周期性磁场（波荡器）的相互作用实现受激辐射放大，其峰值亮度由电子束能量、磁场强度及周期长度等因素共同决定。这种机制突破了传统同步辐射光源的亮度限制，理论上可实现更高能量转换效率。

大连相干光源的工作原理和设备实景，如图 1–2～图 1–4 所示。

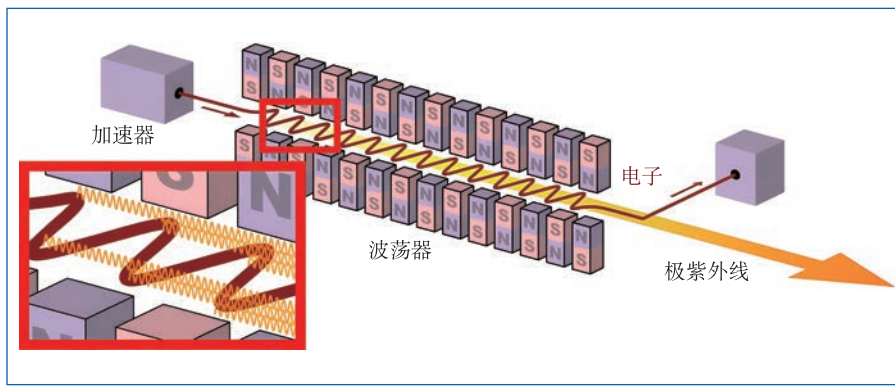


图 1–2　大连相干光源工作原理图

自由电子激光与第三代同步辐射光源相比，峰值亮度高 8～10 个量级，光脉冲短 3 个量级，相干性提高 3 个量级以上，具有超高亮度、超短脉冲、全相干等优异特性，大大提高了实验研究的时间和空间分辨率。科学家借助这些优异性能，可以在全新的时间尺度和空间尺度上理解自然过程，特别是能够直接观测电子的动态过程、分子结构及演化、物质相变等现象，从而彻底开辟一个从未被探索的世界。



图 1–3　大连相干光源加速器（图片来源：中国科学院大连化学物理研究所）

世界唯一的极紫外自由电子激光装置

在大连相干光源建成以前，世界上还没有一台工作在极紫外区域的、用于科研的自由电子激光装置，其他高增益自由电子激光装置都集中在 X 射线区域。极紫外区域是探测分子、原子及其外壳层电子结构最重要的光子能量区域，是对分子进行激发和软电离最有效的光源，有助于科学家在分子水平上开展一系列重大科学问题研究，在能源、化学、物理、材料等领域具有非常重要的作用。对此，美国《科学》杂志曾报道：“一个独特的自由电子激光实验室在中国建成。”

大连相干光源主体光源装置主要由加速器、波荡器、光束线及实验站等部分组成。目前，大连相干光源拥有了两条独立可调谐的极紫外



（50～150 纳米）波荡器束线，可以同时为两个不同的用户提供光源，实现“两翼齐飞”的运行模式，大大提高了工作效率。

大连相干光源照亮多学科前沿

前文曾提到，大连相干光源被形象地比喻为“照亮物质微观世界的超亮、超快的闪光灯”，该“闪光灯”可准确捕捉分子、原子等微观粒子在化学反应中的动态影像，实现了为分子、原子从“拍照片”到“拍电影”的跨越，这在以往是难以想象的。结合传统激光技术及离子成像技术，科研人员依托大连相干光源，发展了一系列先进的高灵敏度探测方法，在众多领域都有重要应用。

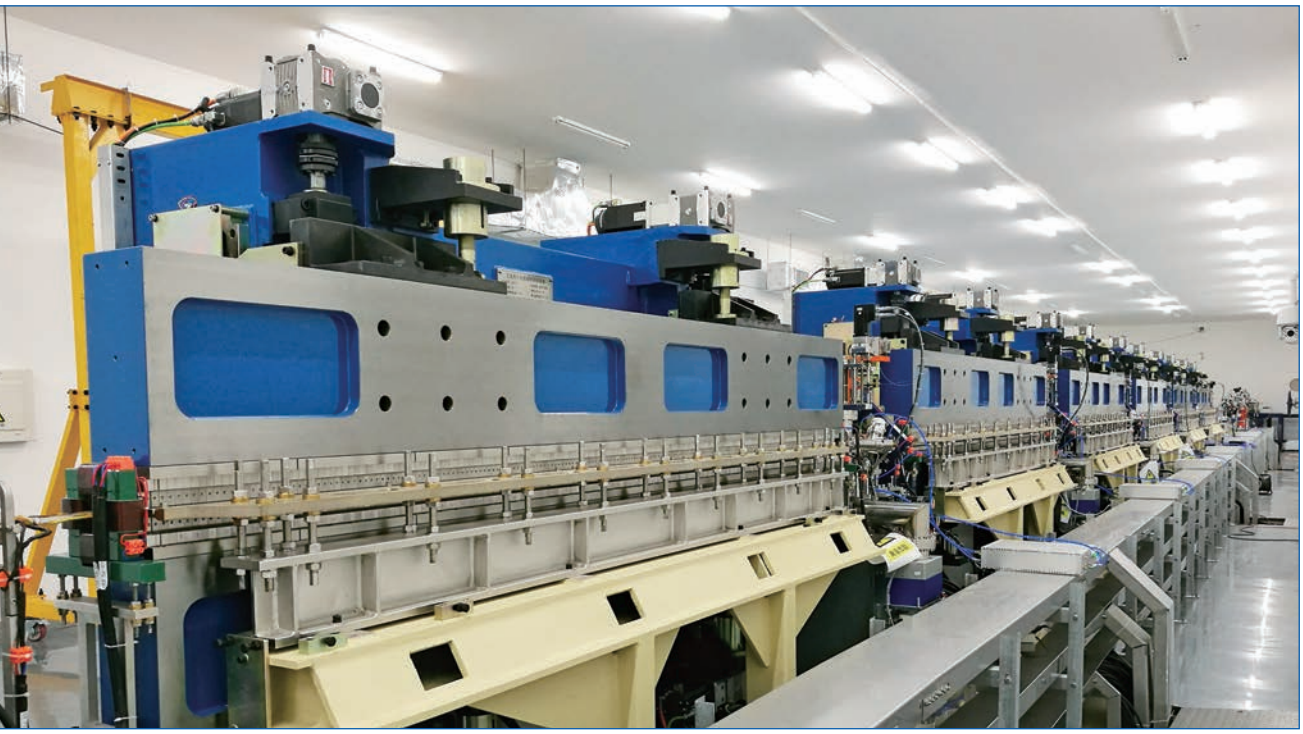


图 1–4　大连相干光源波荡器（图片来源：中国科学院大连化学物理研究所）

1. 星际化学

原子、分子与光的相互作用贯穿宇宙演化的整个过程，极紫外光驱动的化学反应是宇宙分子演化以及星云和行星形成的重要驱动力。开展星际中分子光化学反应的研究，对理解生命起源等星际化学核心问题有重要意义。

2. 能源环境

能源是制约我国未来发展的重要因素之一，大气环境是人类赖以生存和发展的基本条件。因此，利用可调高亮度极紫外光源，可以灵敏地实时探测能源催化、环境污染相关过程关键反应中间体和产物的结构及其动态演变，打开化学反应的黑匣子，具有变革性意义。

3. 生物医药

生命物质分子的微观结构决定了生物体的宏观特性和功能。利用高亮度极紫外光源，开展蛋白质组学和蛋白质结构变化的紫外激光解离研究，能够有效研究药物分子与蛋白质等生命物质大分子的相互作用，从而为药物研发提供技术支撑。

从整体来讲，作为世界上唯一工作在极紫外波段的自由电子激光装置，凭借超高亮度、超短脉冲和全相干等优异特性，大连相干光源已经成为星际化学、能源环境及生物医药等多个前沿基础研究领域独特且不可或缺的利器。

我与重器

从兴趣到国之重器：我与大连相干光源

我的科学探索之路有些曲折，但贯穿始终的是对科学的好奇、对仪器的痴迷，以及将梦想变为现实的执着。这里，我想重点讲讲我与大连相干光源的故事，那是我二十多年梦想的结晶。

我的科学之路始于兴趣，成于机遇。中学时，一位优秀的化学老师点燃了我对化学的热爱，以至于高考时我填报的所有志愿都是化学。然而，阴差阳错，我因物理成绩更佳进入了浙江师范大学物理系。这段经历让我学会了用物理思维看世界，更掌握了自学的能力——我提前自学并通过了量子力学考试，这为我后来考入大连化学物理研究所（以下简称大连化物所）打下了基础。

在大连化物所，我遇到了影响我一生的导师——朱清时院士和张存浩院士。我最初被“化学激光”这个交叉领域所吸引，虽然最终未从事该方向的工作，但从此进入了化学物理的广阔天地，并深刻认识到，先进的科学仪器是探索未知世界的“眼睛”和“手”。我的硕士生涯奠定了我科研的根基。

随后，我赴美深造，在美国加州大学圣芭芭拉分校攻读博士，随后在美国普林斯顿大学和加利福尼亚大学伯克利分校从事博士后研究。在伯克利分校，我做出了一个关键决定：学习设计和建造科学仪器。我意识到，即使理论研究未必顶尖，若能研制出独特的仪器，也能为科学开辟新路径。我亲手设计并建造了第一套交叉分子束仪器，这个决定让我真正爱上了仪器研制。我陆续设计了 8 套不同类型的交叉分子束仪器，这些“利器”让我们得以在量子水平上窥探化学反应的奥秘，并取得了一系列成果，包括观测到化学反应中的量子共振与干涉效应。

然而，我的心中还有一个更大的梦想。在伯克利分校，我接触了当时最先进的第三代同步辐射光源，它亮如炬火，照亮了许多前沿研究工作。我意识到，光源技术本身，就是推动科学进步的强大引擎。尤其是极紫外和 X 射线波段的光源，不仅是基础研究的利器，更是光刻等现代工业的核心。当时，我国在这一领域尚属空白。

于是，一个梦想悄然而生：中国要建造我们自己的、世界级的高亮度光源。

2001 年回国后，这个梦想变得愈发清晰和迫切。我回到大连化物所，一边继续用分子束仪器深耕反应动力学，一边开始不遗余力地推动自由电子激光装置的立项与建设。自由电子激光是新一代光源的方向，它能产生亮度极高、脉冲极短的激光，是探测超快过程和微观结构的终极工具之一。我们要建设的，是一个工作在极紫外波段的自由电子激光用户装置，这在当时国际上也没有先例。

这条路并不好走。从概念提出、技术路线论证，到争取国家支持、组织跨单位协作，每一步都充满挑战。我们需要攻克超导加速器、波荡器、激光种子源等一系列尖端技术。但我和我的团队，以及我们的合作伙伴——上海应用物理研究所的同事们，怀揣着共同的信念，咬牙坚持了下来。

2017 年，梦想终于照进现实。我国第一台大型自由电子激光科学研

究用户装置——大连相干光源正式建成并出光！那一刻，所有的艰辛都化成了无比的喜悦与自豪。大连相干光源是世界上最亮且唯一运行在极紫外波段的自由电子激光装置，它的成功标志着我国在这一尖端科技领域实现了从无到有、并跑甚至领跑的跨越。

对于我而言，大连相干光源不仅是一个装置，更是我的科研理念的集中体现：发展独一无二的先进科学仪器，攻克最重要的科学问题。装置建成后，迅速成为强大的科研平台，在催化反应中自由基的探测、水分子团簇结构、蛋白质光解离等前沿领域产出了一系列重要成果，推动了物理、化学、生物等学科的深度交叉与融合。

回顾从梦想到现实的这二十多年，我感触良多。我始终认为，兴趣是科学道路上最持久的动力，而研制属于自己的独特仪器，则是取得原创发现的基石。从最初的交叉分子束，到后来的大连相干光源，我始终享受着“制造工具”再去“破解谜题”的双重乐趣。

如今，我们正在布局更高重复频率、更短波长的自由电子激光装置，期待在上海、深圳等地形成覆盖更广波段的先进光源网络。我坚信，未来5到10年，中国在自由电子激光这一战略高地上，必将占据先机。

我的科学之路，是一条从发现兴趣、夯实基础，到敢于造梦并亲手将梦想铸成“国之重器”的道路。这条道路还在向前延伸，而大连相干光源那束极紫外光，将继续照亮更多年轻科学家探索未知的征程。