

同步辐射光的发展历史与现状

——介绍新书《同步辐射光源及其应用》

麦振洪

(中国科学院物理研究所 100190)

自 1947 年埃尔德 (Elder) 等人首次观察到同步辐射光至今已经 66 年, 时逢《同步辐射光源及其应用》一书由科学出版社于 2013 年 3 月出版, 本文回顾同步辐射光源的发展历史和我国同步辐射装置的现状, 并简单介绍新书《同步辐射光源及其应用》的主要内容。

1. 前言

同步辐射是相对论性带电粒子在电磁场作用下沿弯转轨道行进时发出的电磁辐射。

1947 年, 埃尔德等人在美国纽约州斯克内克塔迪的通用电气公司实验室 (GE Lab) 调试新建成的 70MeV 电子同步加速器时, 看到一种强烈的光辐射, 从此, 这种辐射便被称为“同步加速器辐射” (Synchrotron Radiation, 本文简称 SR), 在中国简称为“同步辐射”, 似应译为同步加速器辐射更为合理, 其所以得此名, 因为第一次观察到人造的这种辐射是在一台电子同步加速器中。

SR 的出现标志着一种新的光源时代开始, 它导致世界范围内很多国家为之而作出巨大的科学努力和投资。目前, 世界上已建成的同步辐射装置有 60 多个, 正在建设和设计的有 10 个。我国现有

4 个 SR 装置: 北京正负电子对撞机国家实验室 (BEPC) 的同步辐射装置 (BSRF, 属第一代光源) 于 1988 年建成、出光, 1991 年开始运行的; 合肥国家同步辐射实验装置 (HFSRF, 属第二代光源) 于 1989 年建成、出光, 1992 年开始运行; 中国台湾同步辐射研究中心 (SRRC, 属第三代光源) 于 1991 年建成、出光以及上海光源 (SSRF, 属第三代光源) 于 2007 年开始运行。本文回顾 SR 光源的发展历史和我国 SR 装置的现状, 并简单介绍新书《同步辐射光源及其应用》的主要内容。

2. SR 光源历史回顾

1895 年 11 月 8 日德国科学家伦琴 (Rontgen) 发现 X 射线, 开创了科学技术的新纪元。不久, 拉莫尔 (Larmor, 1897), 李纳 (Lienard, 1897) 和肖特 (Schott, 1907) 等人出色的工作, 奠定了加速运动带电粒子电磁辐射的经典理论基础。他们的研究是在电子发现之后, 但大大超前于粒子加速器的发展。粒子加速器的研究开始于 20 世纪 20 年代, 但发展缓慢。直至四、五十年代, 物理学家应用同步加速器产生高能带电粒子, 并应用磁场把带电粒子限制在环形轨道内运动。随

着环形加速器问世和人类加速带电粒子的能力不断增强, 人们再次注意到这种无名辐射和它引起的能量损失。从 1935 年到 1946 年, 为了“寻找加速器中丢失的能量”, 雅辛斯基 (W. W. Jassinsky)、科斯特 (D. W. Kerst)、伊凡年柯 (D. Ivanenko)、坡密兰丘克 (I. Pomeranchuk) 和布鲁埃特 (J. P. Blewett) 等一批学者进行了持续的探索。辐射损失的功率可以计算, 由于粒子损失能量, 因而带电粒子的轨道有所收缩的现象也有所表现, 但一直没有观测到辐射的第一手证据。对于基本粒子物理实验所需要的高能量, 对撞前带电粒子的速度接近光速。带电粒子加速期间, 能量损失的主要原因是电磁辐射, 因此, 40 年代 SR 被认为是限制加速器达到高能量的主要障碍。纵观当年与之有关的研究论文题目, 大有冠以“论感应电子加速器的能量获得极限”之类的标题。还推算出这个极限是 500 MeV。幸好没过多久, 苏联和美国加速器物理学家维克斯列尔 (Veksler) 及麦克米伦 (McMillan) 先后独立提出了新的同步加速器原理, 突破了 this “限速关”。通用电气实验室建造的那台机器, 就是美国人为了检验新原

理而建造的。

1944年布卢伊特(Blewett)试图在电子加速器直接观察SR失败,1947年埃尔德等人在美国纽约州为美国通用电气公司一台70 MeV电子同步加速器调试过程中,因为担心发生高频电极间的放电,即俗称的“打火”,安排了一位工人站在屏蔽墙外,用反射镜观察,偶然地看见了同步辐射的亮光。这个亮光总是当电子加速到约30 MeV才出现,随着电子能量升高,颜色有规律地由暗红转黄,再变成很亮的蓝白色光点,光点很小,位置稳定。经过一番思考和争论,波拉克等人才恍然大悟,他们看到的就是会造成被加速粒子能量损失的电磁辐射。这个发现当时引起很大的轰动。由此而得名的同步辐射就这样与20世纪的物理学家不期而遇。

同步辐射是加速器物理学家发现的,但最初它并不受欢迎,因为建造加速器的目的在于使粒子得到更高的能量,而它却把粒子获得的能量以更高的速率辐射掉(电子每绕加速器一圈辐射掉的能量 $\propto E^4$,能量越高的电子辐射损失越快),它只作为一种无可避免的现实被加速器物理学家和高能物理学家无奈地接受。但是,固体物理学家对这种辐射相当感兴趣,即使在发现同步辐射的早期,已经有人在构思它在非核物理中可能的重要应用,但真正证实有用还是10年以后。20世纪50年代前苏联和美国的科学家都进行了大量实验,并与理论计算进行比较,60年代初开

始了SR应用可行性的研究,很快SR的应用进入了实用阶段。1956年,坦布里昂(Tamboulian)与哈特曼(Hartman)对康奈尔(Cornell)大学的300 MeV电子同步加速器产生的同步辐射性质进行了研究,如同理论所预期,该加速器发出的同步辐射最丰富的谱范围在真空紫外(VUV)光波段,对光谱及角分布的实验测量结果与理论预期完全吻合,他们还测量了在铍及铝上的吸收谱,测得Be-K及Al-L_{2,3}的不连续谱线。这是同步辐射早期应用的先行性工作之一。此间,前苏联莫斯科列别杰夫(Lebedev)研究所的250 MeV加速器上也开展了类似的先行性工作。

1961年,马登(Madden)和科德林(Codling)在华盛顿国家标准局(NBS)的180 MeV电子同步加速器,沿电子轨道一点的切线方向引出了SR,以研究SR作为真空紫外波段标准光源的可行性,并首次用它来研究原子光谱学。结果表明,辐射性质完全与理论计算相符,完全可以作为标准VUV光源。他们把辐射中165~275Å真空紫外连续光谱作为连续背景源用于氦的吸收谱研究,观察到许多此前没有观测到的自电离态,它们都是处于在比氦的第一激发限(24.6 eV)高35 eV之上,由双电子同时激发的态,它们与附近的连续态相互作用的结果是非常短的寿命,只能用同步辐射作为光源才能得到它们的吸收谱,证明加速器SR是一个理想的VUV光源。实验结果澄清了关于氦原子双电子激

发理论计算的分歧,并证实了中国物理学家吴大猷及马士俊在近十年前这方面理论工作的正确性。马登和科德林的工作被认为是对走向系统应用同步辐射的巨大推动。

此时,一组日本物理学家应用东京大学原子核研究所的750 MeV电子同步加速器在软X光区域的辐射作为连续背景,进行KCl和NaCl的Cl-L_{2,3}吸收谱研究,在氯的2p电子激发阈附近观察到由于芯激子形成而产生的尖锐吸收谱线。还得到一系列金属和合金(Be、Al、Sb、Bi、Al-Mg)的软X波段的吸收谱。他们的工作是同步辐射应用于固体物理研究的开端。

受到这些先行性工作的鼓舞,人们在世界各地的电子同步加速器上,尝试进行了大量VUV-SX波段的吸收谱学实验研究,得到许多令人振奋的结果,并迅速应用到物理和化学与原子、分子、固体等许多有关的领域中。直到今天,同步辐射仍然是在真空紫外至软X光波段最强的连续光源。理论和实验结果表明,SR光源具有常规光源不具备的异常优越的特征,标志着SR光源新时代的开始。关于SR光源的性质,已有很多介绍,本文不赘述,读者如有兴趣,可参考标注①。

由于早期的电子同步加速器的能量较低,由加速器弯转磁铁产生的同步辐射的实用波长限于VUV-SX光范围,1965年德国汉堡的5 GeV电子同步加速器DESY建成,可提供X射线波段同步辐射,从此在较高能量的加速器上使用X

射线波段同步辐射的研究也就开始了。从60年代中叶开始，形成了在能量较高的电子同步加速器上开展同步辐射的应用研究的第一波热潮。

从上述可知，用于高能粒子物理研究的同步加速器，同步辐射光是其副产品。因此，SR光源的性质受到严重的影响，主要是亮度低，发散度大。如果SR实验与高能物理实验同时兼用，加速粒子能量随时间变化，因此，SR发射谱与时间有关。与高能物理实验共用一个同步加速器的SR装置称为第一代SR装置，它们大多建于1965~1975年之间。在第一代SR装置上SR实验有很大的发展，如高分辨X射线衍射，X射线光谱，X射线吸收谱，小晶体的结构分析，小角散射以及显微技术等，突显了SR光源的巨大优越性。

由于SR应用的迅速发展，第一代SR装置显然不满足应用的需求。因此，导致设计、建造和运行专门供SR应用的专用同步加速器。随着在日本东京大学第一个专为产生同步辐射用的400 MeV储存环的建成；1968年第一台专用于SR应用研究的同步加速器在美国威斯康星州（Wisconsin）的坦塔罗斯（Tantalus）建成，标志着第二代SR装置的开始，激发起世界范围内建造SR专用装置、成立同步辐射应用中心的热潮。第二代SR装置的储存环是为优化同步辐射的产生和实验特点而设计和建造，1976年提出以低电子束发射度得到高同步光亮度的磁铁聚焦结构

（Chasman-Green Lattice），是当时优化加速器光源最大的进展。这些储存环加速器为专用同步辐射设施，称为第二代同步辐射设施，大多建于1975~1990年之间。为了与科研紧密结合，许多第二代光源建造在国家已有的研究中心近旁，如美国布鲁克海文（Brookhaven）的国家同步光源（NSLS）、英国达累斯伯里（Daresbury）的同步辐射光源（SRS）、日本筑波的光子工厂（PF）等。

20世纪80年代中，已有20个SR专用同步加速器在运行，还有若干个在建造。因为第二代SR装置是SR专用装置，在加速器的设计上，从过去尽量使SR压抑到最小，反过来要使SR获得最佳输出。因此，第二代SR光源具有高的亮度，小的发散度，更好地体现SR光源的特点。

第一代和第二代SR光源的SR主要是从双极弯磁铁引出，后来人们利用多极磁铁来增加辐射光束的通量、亮度和辉度。因而，

在第一代和第二代SR光源的储存环中安装了插入件，以提高光源的品质。

SR应用的普及和发展，要求更高质量的SR光源，导致第三代SR光源的设计、建造和运行。第三代SR光源的最重要变化是在储存环的直线段设计、安装很多插入件，使SR光斑尺寸、发散度大大减小，光束的通量和亮度大大增加，其发散度小于10 nmrad，亮度达 10^{16} 量级，进一步提高光源的性质。

3. SR光源的改善

20世纪80年代，SR实验要求低发散度，高亮度的光源，导致SR光源的设计有明显的变化。要增加从弯铁出来的辐射通量，可以用增加光束水平孔径或增加储存环束流来达到。然而更理想的设计是增加能同时聚集到样品的光源点和减少电子束发射和光束发散度。这就是在储存环两个极磁铁之间的直线段加入独立组元，叫插入件。几乎与第二代光源的发展同时，插入

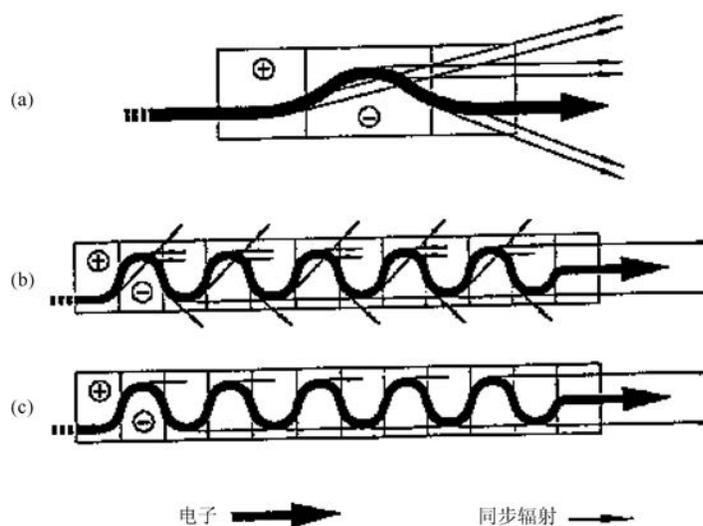


图1 不同类型的插入件，(a) 三极扭摆器，(b) 多极扭摆器，(c) 波荡器

件磁铁的研制有着重大的进展。

所谓插入件磁铁（或简称插入件），是一些极性在空间有周期性变化的磁体组件，这些组件装置在存储环的直线段中，电子在经过时走的路径是与磁场垂直的正弦形轨迹，只要在直线段中插入件的磁场积分为零，在该直线段之外电子的理想轨道将不受到影响。

常用的插入件有 3 种，它们各有其功能。

最简单的是“波长移动器”（wavelength shifter）或“三极扭摆器”（three pole wiggler）（图 1(a)），这种元件是一个中心两极磁铁工作在高磁场下，而两边是两个半场的磁铁，以保持电子束的位置和方向不变。这种元件的作用是减少特征波长 λ_c 值，在英国原达累斯伯里 SR 光源 1.2T 双极磁铁引出的 X 射线特征波长为 $\lambda_c=0.4 \text{ nm}$ 。采用“三极扭摆器”磁场为 5T，提供 $\lambda_c=0.1 \text{ nm}$ 高亮度的 X 射线，为 X 射线衍射和 X 射线散射实验使用。

对于低浓度的样品分析，需要高通量的 X 射线。这种需求可由多极扭摆器（multipole wiggler）（图 1(b)）达到。它是沿元件的长度方向，磁场交替改变其极性，其结果相当于多组独立的双极磁铁。一个 n 级的多极 Wiggler 辐射出 n 倍双极磁铁引出的通量，而辐射立体角大约与双极磁铁相等。

第三种插入件是波荡器（undulator）图 1(c)，波荡器的结构类似多极扭摆器，但减少两极之间的缝隙。在这种情况下，电子在相对电子束方向做横向振荡，其

辐射波长决定于两极间的缝隙，辐射沿向前方向，并且呈单色。这种元件可使辐射 X 射线亮度大幅度提高。由于多普勒效应，辐射的 SR 光波长偏离 λ_c ，波荡器每个磁场周期产生一束辐射光，其波长大约为 $\frac{\lambda_c}{2nr^2}$ ，其中 n 为整数。

对所有的插入件，辐射光斑的情况不仅决定于光束的发散度，而且还决定于电子束的角发散。对于很长的插入

件（例如 $10 \sim 20 \text{ m}$ ），由于磁铁缝隙很小，因而，要求储存环电子束的发散度很小，以保证电子束通过插入件时不丢束。目前，已可以设计和建造很小发散度的储存环，其电子束发散可达 10^{-9} mrad 量级。在某种程度上，它导致周长数千米的储存环诞生。

细电子束结合波荡器技术减小光束发散度，可使 SR 光亮度比 80 年代初从弯铁出射的亮度高 10^6 倍。图 2 为不同插入件输出的光谱亮度与常规 X 射线光源比较。

插入件技术的发展及应用，使同步辐射光源的发射度可以建造得非常小，不但得到束流长期稳

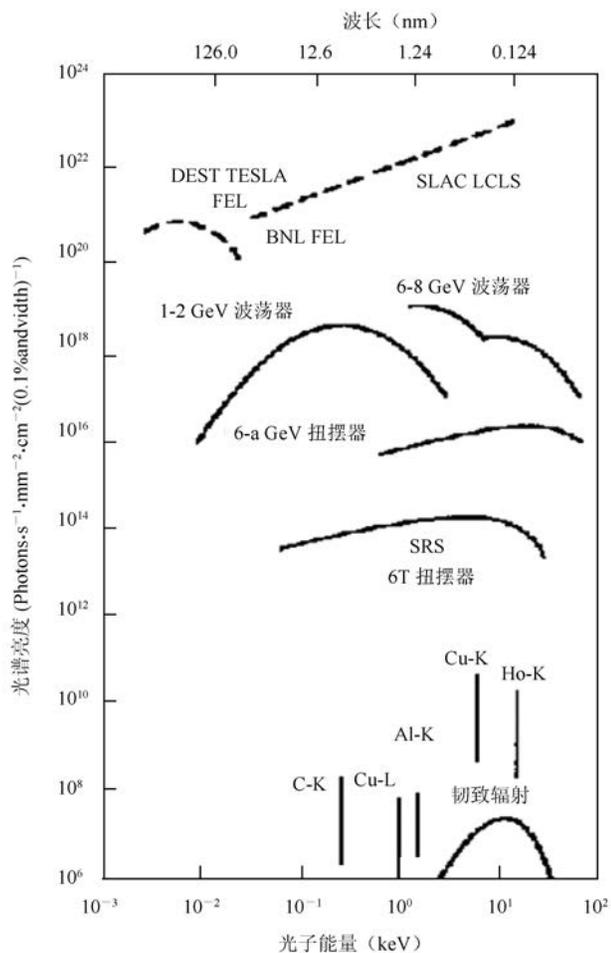


图 2 不同插入件输出的光谱亮度比较

定、亮度十分高的同步辐射光，而且在偏振、相干性方面都有很优越的品质。从 90 年代开始出现了新一代大量使用插入件的新光源——第三代光源，例如在格勒诺布尔（Grenoble）的欧洲同步辐射光源就装置了 30 多条插入件光束线，在日本的 Spring-8 同步辐射光源装置了近 40 条插入件光束线。

插入件技术的发展很快，限于篇幅，本文不作详述。

4. SR 发展趋势和我国现状

由于同步辐射光源的独特性能，同步辐射的应用给予科学技术发展提供了一个新的实验平台，一种新的研究途径。它的建造和运行

对加速器技术和其他高技术有重要推动作用，因此，世界各国普遍重视同步辐射光源的建造和应用。美国、欧洲和日本等先进国家在第二代同步辐射成功发展的基础上，20世纪末，又相继建成了第三代同步辐射光源。SR从1947年发现至今已从第一代装置发展到第三代装置，目前，全世界有21个国家现在拥有或即将拥有加速器驱动的大型同步辐射源，共49台运行装置（其中第三代/第二代/第一代同步光源/FEL装置分别为16/23/7/3台），19台在建装置（其中第三代/第二代同步光源/FEL装置分别为6/2/11台）。并且，第四代装置已成为SR装置发展的主攻方向，这充分证明SR对科学技术进步的重要作用。

随着科学技术的发展和同步辐射技术的提高，同步辐射应用要求高时间分辨、高空间分辨、高能量分辨和高偏振性的特点越来越突出，与重要的研究中心结合越来越紧密，21世纪初美国成立的5个纳米材料与技术研究中心，有3个与同步辐射装置结合。目前国际发展态势是：第三代光源性能进一步提高，第四代光源的研究迅速发展，束线技术、实验设备和实验方法面临重大突破。

出射光的相干性是SR光源性质的一个重要参数。通过改善长插入件磁场的均匀性来改善相干性是近期新建储存环的设计思想。改善相干性的另一个途径是在储存环或电子直线加速器建造自由电子激光装置（Free Electron Laser

Device, FEL），也就是，由穿越光学腔和扭摆器扰动的自由电子受激发射。高增益自由电子激光的概念是1980年提出的，1996年在实验上首次证实。高增益自由电子激光原理成功地得到实验验证后，人们对建设XFEL的信心大增。2000年，德国DESY的TTF FEL实现了109nm SASE，它由超导线性加速器和纵向束压缩器增强，运行能量为1 GeV，将使光谱在1%束宽内光谱亮度达 10^{22} ·光子 $\text{秒}^{-1}\cdot\text{mm}^{-2}\cdot\text{mrad}^{-2}$ 。打破保持了10多年的240 nm FEL最短波长记录。同年，美国ANL的SASE和BNL的HGHC也都达到饱和功率输出。2001年，TTF FEL在100 ~ 85nm紫外波段获得饱和SASE功率输出，同年10月开始第一个用户实验。2002年10月，美国BNL的深紫外波段（DUV）FEL实现了266 nm HGHC，开始供用户实验。世界上第一台亚纳米波段硬X射线自由电子激光（HXFEL）装置“线性加速器相干光源”（Linac Coherent Light Source，简称LCLS）于2009年4月在美国斯坦福直线加速器中心（SLAC）建成。LCLS可发射波长不短于0.15 nm的硬X射线飞秒激光脉冲（1 fs等于1 s的千万亿分之一），亮度比第三代同步辐射光源亮10亿倍。具体说，该装置产生周期性的激光脉冲，每个脉冲含将近 10^{13} 个光子，脉冲持续时间约10 fs，峰值功率密度达到 $10^{16}\text{W}/\text{cm}^2$ 。预示着人们可以用亚纳米尺度的空间分辨能力研究飞秒时间的超快动力学过

程。令人振奋的是，查普曼（Henry N. Chapman）在2010年6月7日一次斯坦福直线加速器中心讨论会上，以“LCLS上的首次生物学成像”为题介绍了他刚做完的一个实验，成功地采集了一套膜蛋白的单晶体衍射数据，开创了X射线激光在生物领域的应用。

目前除美国的LCLS外，日本也于2011年6月宣布其HXFEL装置（命名为SACLA）可发射出波长仅0.12 nm的激光；欧洲正在兴建更强的HXFEL，德国的TESLA-XFEL，近期将可望投入使用；瑞典和韩国的装置也正在筹建中。近年来，国际上X射线自由电子激光（XFEL）发展十分迅速，已建成2台硬X射线、2台软X射线FEL用户装置，另有4台硬X射线与5台软X射线FEL装置和分支在建和预研中，多台XFEL在建议和设计之中。

SR和激光技术结合，大大推进FEL系统的发展，标志着SR光源发展的一个前景。因此，也有人称，FEL为第四代光源。

我国现有的四台SR装置也有很大的发展：北京正负电子对撞机（BEPC）于2009年7月改造工程完成，改造后能量为2.5 GeV，北京同步辐射装置（BSRF）拥有14条光束线站（图3（a））。新的、更为先进的第三代北京先进光源一期工程即将启动；合肥同步辐射国家实验室（HFSRF）于2007年完成二期改造工程，拥有14条光束线站（图3（b））。2010年9月HFSRF重大维修改造项目正式动



图3 我国现有的四台SR装置。(a) BSRF; (b) HFSRF; (c) SSRF和(d) SRRC

工,建设目标是实现储存环直线节数目增加到8个,束流发射度降低到40 nm 弧度,直线加速器满能量注入,首批完成从插入元件引出的5条光束线及实验站的改造建设,从而提高合肥光源的整体性能,充分发挥合肥光源在真空紫外能区的优势。计划2013年底储存环出光,2014年上半年项目验收,届时光源的性能将有大的改进;台湾竹波同步辐射研究中心(SRRC)在现有的园区内,于2011年动工建设一台3 GeV的第三代SR装置(图3(d));SSRF一期建设的光束线和实验站已经取得一批重要的科学成果,“上海光源线站工程”已获国家批准,计划建设16条光束线24个实验站(图3(c)),同时,相关用户已在上海光源建成或将建

设若干专用线站。这些举措将大大提升我国同步辐射光源的性能和实验平台的水平,使我国在同步辐射发展的世界性热潮中占有比较重要的一席之地。

同步辐射的应用也引起我国工业界的广泛兴趣,20世纪末起,中国工程物理研究院与BSRF共建了一条软X射线线站和一条中能量软X射线线站,目前与SSRF讨论,准备共建X射线高压线站;中石化集团也拟与SSRF共建3条线站。我们期待,同步辐射应用对我国国民经济的发展、工业的重大需求以及国家安全起到越来越大的作用。

目前我国同步辐射应用主要体现在其发射谱宽、高亮度和准直性好,而光源的时间结构和偏振特性

没充分发挥。束线技术、实验设备和实验方法与国际先进水平仍有一定差距,还不能适应高水平研究工作的需求。近期应注重高空间分辨、高时间分辨、高能量分辨和高偏振性同步辐射先进技术和新方法研究,包括特殊光束线设计、新型光学元件研制、新型探测器探索、新的实验方法研究和新的分析方法和分析理论发展等,使我国同步辐射装置整体性能有较大的提高。

5. 《同步辐射光源及其应用》一书简介

《同步辐射光源及其应用》已由科学出版社于2013年3月出版,该书组织了中国大陆三个同步辐射装置第一线的业务骨干40多人撰稿,全面介绍同步辐射的产生、性质、加速器、光束线和实验方法、

数据分析、应用实例以及国际发展趋势。集中介绍同步辐射装置的特性、实验方法及应用实例。既有基础理论、基本原理深入浅出的介绍，也有实验装置和翔实的应用实例。力图理论联系实验、深入浅出，而又不失其先进性、实用性和普适性，全书共分二篇 19 章：

第一篇 同步辐射装置(1~4 章)，主要介绍同步辐射源、同步辐射产生原理、同步辐射装置光路和同步辐射探测器。使读者对同步辐射装置的结构、同步辐射的特性、同步辐射装置国内外现状以及同步辐射与物质相互作用有初步的了解。

第二篇 同步辐射实验方法(5~19 章)，主要介绍中国大陆三个同步辐射装置目前已有的部分光束线站、实验方法及应用实例。除了总结作者和用户在研究中解决该领域前沿问题的实例外，还尽量收集近年来国内外相关的重要结果，以供读者参考。使读者初步掌握研究所需要的实验条件、实验装置配置、实验数据处理分析以及国际研究动态等。

同步辐射装置是多学科的实验平台，涉及的学科内容很广。由

于各学科都有本学科的专业术语和英文符号，为了尊重各学科的特点和习惯，在该书撰写中，保留了各学科惯用的英文符号和定义，以便于专业读者的阅读。

该书可供从事材料科学、生命科学、环境科学、物理学、化学、医药学、地质学等学科领域的高等院校和科研院所的教师、科研人员 and 工程技术人员以及研究生应用同步辐射装置实验站参考，也可供从事同步辐射应用专业人员和各实验站管理人员参阅，尤其适合那些计划到同步辐射实验站进行实验的研究人员阅读和参考。同时，也可作为高等院校和科研院所相关专业的研究生教学用书和参考书。

正如冼鼎昌院士在该书序和书评中指出：“由用户专家与光源装置专家密切合作的专著是一件具有高度战略意义的事。首先，它将帮助众多在本行中的高手掌握这种先进的手段用于他们从事的研究，因而有着可贵的参考价值；其次，对于有志进入同步辐射应用领域的年轻人来说，它将带引他们穿过浩如烟海的文献，尽快进入这个领域；还有重要性毫不稍逊的一点，就是总结用户就同步辐射平台在

装置 (Instrumentation) 与方法学 (Methodology) 上的需求、批评与建议，将更有力促进平台在诞生之日起就开始的不断发展与创新。我谨向本书的编者与全体作者致深挚的敬意。”

SR 装置是一个耗资巨大的大科学工程，是几乎包括所有学科领域的实验平台。它的建造体现了国家科学技术发展，体现了国家综合国力和工业水平，已经引起了发展中国家和发达国家的高度重视。我们相信，SR 装置作为一个大型科学平台，将对我国在世界科学前沿研究和解决国民经济和国防重大需求发挥更大的作用。

同步辐射光源及其实验技术发展很快，应写的内容日新月异，层出不穷，异常丰富。正如一条奔腾向前的河流，任何凝固在纸面上的东西至多反映它的一个截面。加之，作者学识水平的限制，本文虽努力博览，但仍不能对当今同步辐射装置及其发展作较完整的概述，读者如有兴趣，可参阅标注①。

① 麦振洪等，《同步辐射光源及其应用》，科学出版社，2013。

科苑快讯

金鱼为什么是双尾的

一些珍贵金鱼品种的双尾并非自然天成，而是中国古代鱼迷们精心培育出来的。中国人饲养观赏鱼的历史可追溯到大约 1000 年前的宋代。到大约 600 年前的明代，出现了双尾家养金鱼的历史记录，

这样的鱼在自然界相当罕见。

研究者最近已经找到导致这种特征的突变基因，该基因控制着脊柱末端的骨骼发育。正常金鱼的尾部只有一根尾骨，而突变金鱼的尾骨却分裂成镜像的左右两部分。这本来是自然突变所致，但是从宋代到明代的饲养者却将双尾金鱼的突变基因固化保持，形成稳定的遗



传特征。研究者在《自然通信》(Nature Communications) 上做了报告。

(高凌云编译自 2014 年 2 月 25 日 www.sciencemag.org)