

同步辐射历史及现状

洗鼎昌

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

2013-02-06收到

† email: xian@ihep.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20130601

1947年, 位于美国纽约州 Schenectady 的通用电气公司实验室(GE lab)在调试新建成的一台 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), 在中国的文献中简称为“同步辐射”。同步辐射是速度接近光速的带电粒子在磁场中做变速运动时放出的电磁辐射, 一些理论物理学家早些时候曾经预言过这种辐射的存在。这些预言, 大多是针对其负面效应而作出的。以加速电子为例, 建造加速器令电子在其中运行, 通过磁场增加电子的速度, 从而得到高能量, 视为正面效应; 然而在加速器中转圈运行的电子一定要放出辐射, 从而丢失能量, 视为负面效应。通过得失的平衡, 给出了加速器提速的限制。纵观当年与加速器有关的研究论文题目, 大多冠以《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 500MeV。好在没过多久, 苏联和美国加速器物理学家 Veksler 和 McMillan 先后独立地提出了新的同步加速器原理, 总算突破了 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。

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正比于电子能量的4次方, 即能量越高的电子辐射损失越快), 它只作为一种不可避免的现实被加速器物理学家和高能物理学家接受。不过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, 就已经有人在构思它在非核物理中可能的重要应用, 但真正恢复名誉还要再等十年。

1956年, Tamboulian 与 Hartman 对康奈尔大学

的 300MeV 电子同步加速器产生的同步辐射性质进行了研究, 如同理论所预期的那样, 该加速器发出的同步辐射最丰富的光谱范围在真空紫外(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, 他们还测量了同步辐射在铍及铝上的吸收谱, 测得 Be—K 及 Al—L_{2, 3} 的不连续谱线。他们的工作是同步辐射早期应用的先行性工作之一。也就在这个时候, 在莫斯科 Lebedev 研究所的 250MeV 加速器上也开展了类似的先行性工作。

1963年, Madden 和 Codling 沿华盛顿美国国家标准局(NBS)的 180MeV 电子同步加速器中一处电子轨道的切线方向引出了同步辐射, 以研究它作为真空紫外波段标准光源的可行性, 并首次用它来进行原子光谱学的研究。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。他们把辐射中最为丰富的真空紫外连续光谱部分(16.5—27.5nm)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, 它们比氦的第一激发限(24.6eV)要高 35eV 以上, 由这些双电子同时激发的态与背景光源相互作用时间非常短, 只能用同步辐射作为光源才能得到它们的吸收谱, 可见此加速器是一个理想的真空紫外光源。他们的实验结果澄清了关于氦原子双电子激发理论计算的分歧, 并证实了近十年前中国物理学家吴大猷和马仕俊在这方面的理论工作的正确性。Madden 和 Codling 的工作被认为是走向系统应用同步辐射的巨大推动, 直至今日, 这些惰性气体内壳层双电子激发态仍然是研究电子—电子关联的重要实验手段。

大概也就在这个时候, 一组日本物理学家应用东京大学原子核研究所的 750MeV 电子同步加速器, 以软 X 射线(SX)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，观察到由芯激子形成而产生的尖锐吸收谱线。他们还得到一系列金属和合金 (Be, Al, Sb, Bi, Al—Mg) 的软 X 射线波段的吸收谱。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，而且把这种方法迅速应用到物理和化学以及与原子、分子、固体等有关的许多领域中。直到今天，同步辐射仍然是从真空紫外至软 X 射线波段中最强的连续光源。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 波段范围，较高通量的同步辐射 X 射线的产生要等到能量为几个吉电子伏量级的电子加速器建成之后。1965 年，德国汉堡的 5GeV 电子同步加速器 (DESY) 建成，那时人们认为对 DESY 提供的 X 射线波段同步辐射的性质与理论预言完全一致是理所当然的，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。

这样，从 20 世纪 60 年代中叶开始，在世界各地能量较高的电子同步加速器上，普遍地开展了同步辐射的应用研究，形成了同步辐射研究的第一波热潮。同步辐射的优异性质，使分处在十分广泛领域中的众多科技工作者看到一个巨大的机会，越来越多的研究人员成为使用同步辐射进行他们本学科研究的用户。由于这些研究都是在电子同步加速器上进行高能物理实验时一种不可避免的负面产物的应用，所以有相当一段时间被称为寄生 (parasitic) 应用，加速器的这种产生同步辐射的运行模式也就称为寄生模式，从字面上就可以知道，此称谓是不无贬义的。后来人们把这些在做高能物理实验时引出

同步辐射以供用户应用的加速器称为第一代同步辐射光源。

把同步辐射应用推向一个新阶段的事件是 20 世纪 60 年代储存环的建成。储存环本来是为高能物理研究而发展起来的设备，传统的高能物理实验是通过用加速到高能级的粒子轰击固定靶的方法来产生新粒子和探索微观世界的新现象，但是这种实验模式在能量方面看是低效的，因为只有入射粒子和靶粒子二者质心系的能量才是它们相互作用的有效能量，对于质量为 m 的静止靶粒子，虽然入射粒子被加速到很高的能量 E ，但在质心系中发生碰撞的系统能量正比于 $(mE)^{1/2}$ ，即有用能量只占加速器达到的能量 E 的小部分。1956 年，Kerst 等以及 O' Neill 建议用具有高能量的入射粒子束和靶粒子束的对撞来克服这个缺点。这种想法的可行性在 20 世纪 60 年代初随着储存环的建成得到证实，从此，对撞机在高能物理实验中开辟了一个新方向，发挥了十分重大的作用。储存环的出现，也迅速引起了广大科学技术领域中为数众多的使用同步辐射的研究群体的注意，它提供的相当稳定的电子束流和在各个频段上可调可控的同步光谱分布以及超高真空的工作环境，使人们看到一个十分有利的、能够推进他们的科研应用的先进光源——专用同步辐射光源的前景。

日本东京大学第一个专为产生同步辐射用的 400MeV 储存环的建成，推动了在世界各地建造新一轮专用同步光源、成立同步辐射应用中心的热潮。这些新中心的储存环或者是由退役的高能加速器改造而成，或者是为优化同步辐射的产生和实验特点而索性从头开始设计和建造的。从加速器的观点看来，在优化光源方面，当时最重大的进展是 1976 年提出的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)。这些同步辐射中心的建成标志着同步辐射专用运行时代的到来。它们被称为专用同步辐射设施或第二代同步辐射设施,而把依附于高能物理实验运行的设施称为第一代同步辐射设施。第一代同步辐射设施大多建于1965—1975年,而第二代同步辐射设施则大多建于1975—1990年。这个潮流的出现,有两个突出的背景:一是同步辐射用户群在各个学科领域中迅速成长,他们对机时的要求很快就超出在高能物理中心里“寄生”运行的设施所能提供的能力;二是同步辐射先进手段的迅速普及,其用户来自空前广泛的科技领域,从理工科的基础研究单位到应用研究部门,甚至到工业的研究开发和质量控制部门,其影响之大在当代大科学装置中是首屈一指的。由于有如此广泛众多的应用群体的参加,同步辐射光源很快就成为多学科融合与相互渗透的大平台,这正是适应当代科技发展规律所要求的,故很快就为各发达国家科技规划部门所认识,并予以大力支持。许多第二代光源建造在已有的国立研究中心的近旁,如美国Brookhaven的国立同步辐射光源(NSLS)(见图1)、英国Daresbury的同步辐射光源(SRS)、日本筑波的光子工厂(PF)等。

逐渐地,即使在第一代光源上,和高能物理学家一同使用加速器中的同步辐射产物的群体,在人数和领域广度都超过嘲笑同步辐射是一种寄生学科的人们及其群体,“寄生”一词更显不妥,于是有人采用了“共生”(symbiotic)一词。这两个词都来自生物学,当初引用“寄生”一词的人对20年后

同步辐射装置上发展出今日的局面想必有始料不及之感吧!

在第二代同步辐射光源发展的同时,插入件磁铁的研制有着重大的进展。所谓插入件磁铁,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。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定、亮度十分高的同步光,而且在偏振、相干性方面都有很优越的品质。从20世纪90年代开始,出现了新一代大量使用插入件的新光源——第三代同步辐射光源,如在Grenoble的欧洲同步辐射光源上就装置了三十几条插入件光束线,在日本的Spring-8同步辐射光源上装置了近40条插入件光束线。到90年代中期,全世界已建成以及在建中的同步辐射研究中心约有55个,十多年过去,还是差不多这个数目,这是因为退役与改造、新建的装置数目大致达到平衡。这些同步辐射研究中心的地理分布集中在欧洲(见图2)、亚洲及北美洲。在中国现在共有4个:1991年开始运行的北京光源(BSRF)属第一代同步辐射光源(见图3);1992年开始运行的合肥光源(NSRL)属第二代同步辐射光源(见图4);1994年建成的台湾光源(SSRC)(见图5)以及2007年开始运行的上海光源(SSRF)(见图6)属第三代同步



美国Brookhaven国立同步辐射光源(NSLS)从1983年开始运行

图1 第二代专用同步辐射装置在上世纪80年代初建成



图2 欧洲同步辐射研究中心(第三代)



图3 1991年开始运行的北京光源(BSRF)



图4 1992年开始运行的合肥光源(NSRL)



图5 1994年建成的台湾光源(SSRC)



图6 2007年开始运行的上海光源(SSRF)

辐射光源。

自同步辐射面世以来，同步辐射中心一直具有用户群体急剧增加、工作领域迅速开拓的特色。一方面，同步辐射平台的先进手段帮助用户开拓新的工作前沿；另一方面，用户专家又会对同步辐射平台在光源品质、实验方法、束线更新等方面未来的发展提出方向性的建议与要求，促进平台工作能力水平的提高。这两个方面都是以很高的速度进行的。因此，由麦振洪等编著的、于2013年由科学出版社出版的《同步辐射光源及其应用》一书在这两个方面兼具检索性与引导

性，再加上该书是由用户专家与光源装置专家密切合作共同撰写的，因此是一件具有高度战略意义的事。首先，它将帮助同步辐射光源应用方面的众多高手掌握这种先进的手段，以用于他们从事的研究，因而具有重要的参考价值；其次，对于有志进入同步辐射应用领域的年轻人来说，该书将引导他们穿过浩如烟海的文献，尽快地进入这个领域；第三，该书还总结了用户就同步辐射平台在实验装置(instrumentation)与方法学(methodology)上提出的需求和建议，这将更有力地促进同步辐射平台不断发展与创新。