

衍射极限储存环的基本原理与技术

罗 箐

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室 230029)

一、粒子加速器与同步辐射光源的发展

20世纪以来,人类社会生产力的飞跃进步与科学家们对物质微观构成和量子现象的深入认知紧密关联,而基于加速器的大科学装置已成为研究微观世界最重要的工具之一。科学家们在加速器上发展了现代核物理与粒子物理学,之后,基于电子储存环的同步辐射光源又经历了三代的发展。第一代同步辐射光源“寄生”地利用高能物理实验储存环中产生的同步光。在此过程中,原来仅仅是高能物理加速器寄生产物的同步辐射日益受到重视,利用它研究化学、材料科学和生物学等的专用光源应运而生,并迅速得到推广,成为第二代同步辐射光源。前两代光源主要从偏转磁铁引出同步辐射光,第三代同步辐射光源的电子储存环对电子束发射度进行优化设计,得到比第二代光源小很多的束流发射度,同时大量使用插入件,可引出高亮度、部分相干的准单色光,为生命科学、材料科学等前沿基础研究提供有力的实验手段。鉴于其优越性能,国际范围内广泛建造第三代同步辐射光源开展相关的前沿基础科学研究,其束流发射度多在 $1\sim 5\text{ nm}\cdot\text{rad}$ 范围^①。目前世界上的大型同步辐射光源超过50台,这种集成度高、覆盖学科最广的大科学装置已是探索重大前沿科学问题的一个不可替代的综合研究平台,每年有超过10万名各领域的用户利用同步辐射开展实验研究。

近十年来,世界各地纷纷开始研究或兴建第四代同步辐射光源,亦即基于超低发射度电子储存环的衍射极限储存环(DLSR)光源。已建成的如瑞典隆德大学MAXIV光源,正在建设中的如美国先进光子源APS-U、中国科学院高能所承建的高能光源HEPS等,正在预研中的如合肥先进光源HALF等。衍射极限储存环光源相比第三代同步辐射光源具有更低束流发射度(可低至 $0.01\sim 0.5\text{ nm}\cdot\text{rad}$)、更高亮度和更高横向相干性,其最大特点是束流水平自然发射度接近X射线衍射的极限值。衍射极限储存环光源把同步辐射X射线对各学科研究的支撑能力提升到一个前所未有的高度,可以在空间、时间、能量等维度形成具有更高精度和灵敏度的新实验方法,使同步辐射光源从支撑基础研究为主的时代过渡到基础和应用研究并重的时代。因此,各主要科技强国在此领域展开了激烈的竞争。目前国际上正在升级改造、新建、和规划建设的第四代同步辐射光源共有11台之多。

二、什么是衍射极限储存环光源

要了解衍射极限储存环光源,首先要了解两个基本概念,我们在这里省去繁杂的理论推导和数学公式证明,仅介绍基本的物理图象,使读者能在脑海中建立一个形象的认知,而不必学习其细节。

第一个概念是“束流”。粒子加速器设计和建造的基本原则是为了定制具有指定品质的带电粒子束,以下称为束流(beam,束流也可用来指代光子



图1 世界同步辐射光源的分布(图片来自: New generation of light sources: Present and future - Scientific Figure on ResearchGate. [Accessed 18 Nov, 2019])

束),一个beam可能由若干个束团(bunch)组成,首先要介绍的概念是束流“发射度”。理论上讲,我们如果考察束团当中的所有粒子的运动,写成线性代数中的向量形式,则对应所有粒子所有运动状态的集合,可以获得一个束团分布的“相空间”,它反应了粒子“所有可能的运动状态”;相空间的面积越大,则束流越发散,反指,则束流越收敛。这个相空间的面积,称之为“发射度”,对于恒定能量的储存环而言,它是守恒的。直观地说,发射度的大小反映了束流的分散程度,束流的横向发射度可理解为由束团内所有粒子横向的位置、散角所构成的相空间内所占的面积。

第二个概念是“衍射极限”。简单来说,当束团发出同步辐射光的时候,我们可以近似地将束流横向发射度比拟为光源的尺寸,这样一来,对于指定波长 λ ,当发射度 $e \leq \lambda / (4\pi)$ 时,可以把光源看作是“点光源”,所发出的光相干性已经达到最佳程度,再缩小光斑尺寸对提高相干性没有帮助。这个限制的本质是由测不准原理导致的光的衍射极限,因此我们将发射度 $e \leq \lambda / (4\pi)$ 的同步辐射光源称为衍射极限



图2 通量(Flux)一定的情况下,光源的面积(Source area)和角散度(Angular divergence)越小,就越亮

储存环光源。

显然,由上面的解释,对应不同的同步辐射光波长,就应该有不同的“衍射极限储存环光源”。例如,对于正在开展预先研究中的合肥先进光源HALF来说,它的自然发射度是 $0.085 \text{ nm} \cdot \text{rad}$,因此,对于波长 1 nm 以上的同步光(主要是真空紫外到软X射线),它的相干性是最好的;而它提供的波长 $0.3 \sim 1 \text{ nm}$ 的中能X射线也有良好相干性。另一方面,我们定义同步辐射光源的亮度为单位时间、单位方位角、 0.1% 带宽上的光子数,直观地说,好比一个手电筒,光斑越“会聚”,则越“亮”,同步辐射光源的亮度反比于束流发射度的平方。因此,衍射极限储存环光源相比第三代同步辐射光源发射度降低一个数量级,亮度也就提高了100倍。

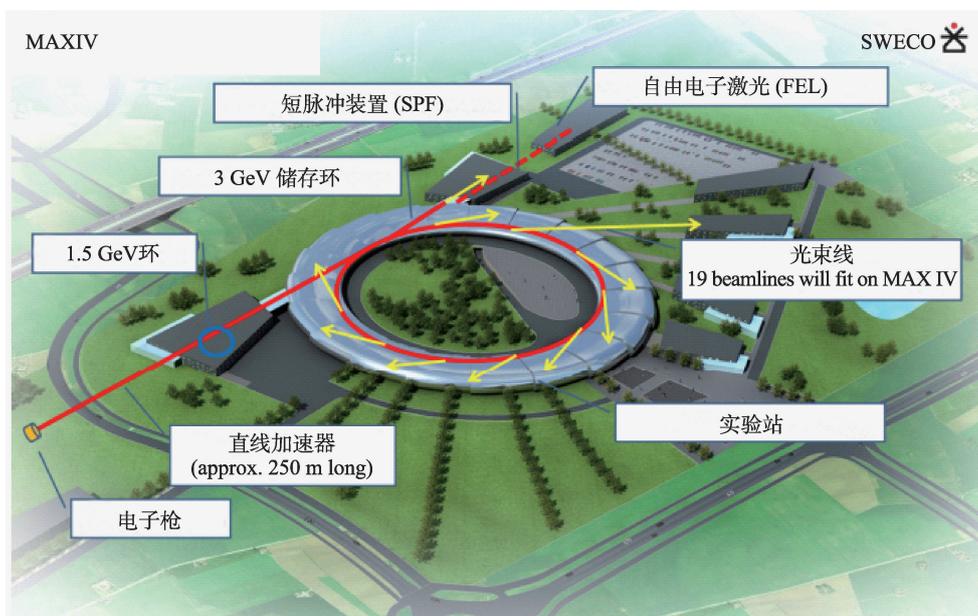


图3 世界上第一台基于衍射极限储存环技术的同步辐射光源MAX IV,包括电子枪(Electron Gun)、直线加速器(Linear accelerator)、1.5 GeV环(Ring)、3 GeV环、短脉冲装置(SPF)、自由电子激光(FEL)、光束线(Beamlines)和实验站(Experimental Station)
(图片来源: <https://www.maxiv.lu.se/accelerators-beamlines/accelerators/accelerator-documentation/max-iv-ddr/>)

在亮度迅速提升的同时,对于束流发射度小于其波长/ (4π) 的同步辐射光,可以认为其横向全相干,高亮度、高度相干的光源对于多种前沿学科的研究有极其重要的作用。同时,作为可以长期存储束流的环形加速器,衍射极限储存环可以支撑远多于直线加速器的实验线站数量。上述三者是衍射极限储存环光源的最大优势。

三、衍射极限储存环光源的物理基础

不同领域的科学家或工程师将工作需求转换为对束流性能的要求,加速器物理学家据此设计和建造加速器。对已建成的加速器,可能发现束流未

曾预料的新特性或新现象,可满足预期目标之外的用途,从而催生新的专用装置类型;对难以实现的性能指标,又需要发展新的原理与技术;这些都推动了加速器科学技术的发展,并再次带动了新一轮需求的产生。从之前的总结中,我们可以简单地得出结论,粒子加速器的核心问题有二:第一,如何加速? 第二,如何聚焦和提高束流品质? 延伸开来,还有两个拓展性的关键问题:如何获得初始的注入粒子束? 如何测量粒子束,使我们知道它的品质符合要求? 实际上,我们可以说,束流物理与加速器技术的绝大部分工作,都是围绕这四个问题所展开的。

以衍射极限储存环同步辐射光源为例,其核心的要点在于,确定能量的同时,要提供比现存大部分加速器强得多的横向聚焦。如上一节所述,我们

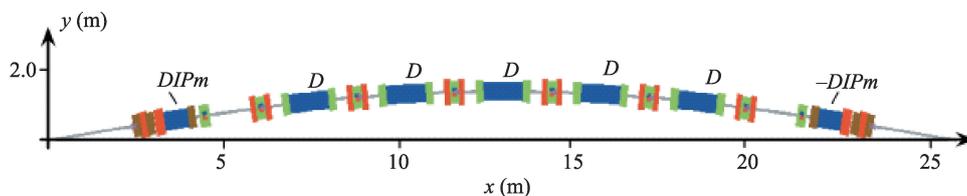


图4 MAX IV 在一个单元(Cell)中布置多块弯铁(MBA结构),增强四极磁铁,增加同步辐射阻尼,从而降低发射度
(图片来源: <https://www.maxiv.lu.se/accelerators-beamlines/accelerators/accelerator-documentation/max-iv-ddr/>)

可以简单理解为强聚焦是“把手电的光斑调小”，使得束流横向发射度减小，也可以简单理解为发光的光源尺寸极大减小，从而使同步辐射光源的性能获得了巨大的飞跃。

强聚焦的好处如此巨大，对应的代价自然也十分沉重。最典型、最首要的问题是动力学性能如动力学孔径和动量接受度等的恶化。以动力学孔径为例，我们知道粒子在加速器中是沿着轨道振荡的，那么，其横向振荡存在一个稳定区，我们称之为“动力学孔径”，跃出粒子动力学孔径的粒子就会丢失。在下一代大科学装置中，为了提供强聚焦，四极铁的强度大为提升，所产生的束流“色品”需要补偿；简单来说可以理解为，把四极铁当成光学中的透镜，四极铁越强，动量不同的粒子经过四极铁后的偏差就越大，类似透镜中的色散现象，绝对值大的负色品会导致束流丢失。为了补偿色品，需要增大六极铁等非线性元件的强度，而强大的非线性将导致动力学性能急剧恶化。首先是难以获得很好的动力学孔径，一般来说，目前正在设计的大型储存环光源的动力学孔径常常只有2~5毫米，与现有的同步辐射光源相比小了一个数量级。其次，孔径等动力学性能指标的下滑会导致现有的多种成熟技术无法继续采用，甚至束流寿命等相关的束流品质指标也会下降。

另一个关联问题是束流集体效应。上面我们讨论的所有物理问题，多半是“单粒子动力学”，单粒子动力学的含义不是说“只有一个粒子”，而是认

为粒子与粒子之间没有相互作用，“悲喜并不相通”；而显然，粒子与粒子之间是存在相互作用的。最容易理解的例如，束团包含粒子数量越多、密度越高，则相互作用几率越大，束团内部粒子间的相互作用将导致束流品质下降。除在束团内部的这种集体作用之外，束流在真空盒结构中激励起的电磁场(尾场)将反过来作用于粒子束，因此束团与束团之间还会彼此影响，产生“耦合束团不稳定性”。总而言之，各种集体效应可能诱发束流的各种不稳定，后果不太严重的可能使得束流寿命缩短、品质下降，后果严重的可能导致束流丢失，称为“相干不稳定性”。

对未来加速器大科学装置的束流物理研究，主要的工作就是优化与平衡上述问题。在这里，我们使用的词不是“解决”，而是“优化与平衡”，这是工程科学与基础科学最大的区别所在。在实际的工程设计与建设中，我们很难得到“所有性能指标都完美”的解答，一般只能根据现有技术水平或者可预期的技术发展，在各种性能指标中寻求一个平衡的综合最优解。为此，要分清各指标的权重和优先顺序，再考虑工程代价等因素。

四、加速器关键技术

一台粒子加速器的基本构成必然包括粒子源、加速电场、传输装置和粒子利用端。对于衍射极限储存环光源而言，粒子源就是注入器，加速电场由高频腔提供，传输装置就是储存环本身，粒子利用

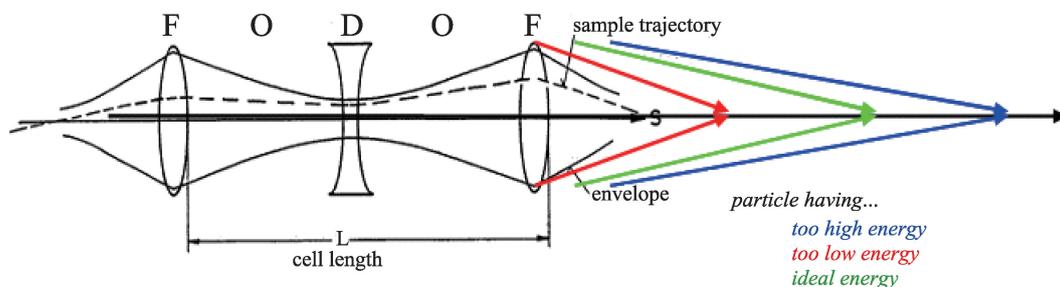


图5 动量不同的粒子，经过四极铁后会产生色散。蓝色轨迹为能量较高的粒子，红色轨迹为能量较低的粒子，绿色轨迹为标准能量的粒子

端就是各种束线和相应的实验站。在这里,我们将简单介绍一下各部分的关键技术。

如前所说,衍射极限储存环需要超强聚焦,这意味着磁铁梯度可能是三代光源同类磁铁的2~4倍。考虑到磁极头处的磁场是有饱和值的,在尽力优化磁铁物理设计、改善励磁材料性能的同时,更有效的办法是采用超导技术和减少磁极间距。超导磁铁的磁感应强度可以轻易地达到数个特斯拉,而小的磁极间距可以极大提高磁场梯度。图6展示了HALF的MBA结构单元的七分之模型,图7是HALF预研项目完成的小间隙六极磁铁样机。

束流从高频腔中获得能量,高腔压的高频腔对于调节束流能散、束团长度等参数有重要作用。因此,必要的时候需要使用超导谐振腔。



图6 HALF的1/7个MBA结构单元



图7 小间隙六极磁铁样机

束流诊断或称束流测量,可以看作加速器的“眼睛”和“耳朵”,在保障聚焦和补给的情况下,我们希望能够及时、准确地判断束流的状态,包括位置、能量、发射度和束团长度等。精准的束流测量是保证同步辐射光源顺利调试和稳定运行的必要措施。现有的三代光源束流位置测量精度和稳定度通常在 μm 和几百 nm 量级,发射度测量适用于几个 $\text{nm}\cdot\text{rad}$;而衍射极限储存环光源要求束流位置稳定度达到百 nm 量级,发射度测量可以适用于几十 $\text{pm}\cdot\text{rad}$ 的小光斑。

对第四代光源来说,稳定性的要求特别高,因此其地位相比第三代光源显著上升。从目前来看,束流的稳定性(*beam stabilization*)包含:①束流不稳定性(*beam instability*)的抑制,涉及到集体效应,要靠物理上的优化设计进行改善和后文的反馈系统来进行抑制;②轨道稳定性,利用快、慢轨道反馈系统分别针对储存环束流轨道的快速抖动和缓慢漂移进行补偿;③机械稳定性(*mechanical stabilization*),对各元件的机械性能进行改善,又分为两部分,一部分要分布到磁铁、束测等各自结构稳定性的具体要求,传达到各系统去,另一部分要归为形成全局性网络的机械支撑、准直系统的要求。三者共同形成了“全局束流稳定性”的概念。

其中,如我们前面所说的,衍射极限储存环的束流不稳定性非常严重,为此,除了在物理上做优化之外,还需要非常强大的反馈工具。一般来说,加速器的反馈工作多指逐束团反馈,包括横向和纵向,因为依赖于束测元件和电子学信号处理等,这部分工作在大部分机器上是由束测系统来完成的。轨道稳定性同样需要束测元件和电子学处理,包括快反馈、慢反馈等,也是一个全局性的系统。在此要求下,“束流测量”(beam measurement/diagnostics)的概念被拓展为“束流仪器”(beam instruments),粗略来讲,可以理解为“关于束流的工具设备集合”。

除此之外,粒子加速器的束流运行在真空环境,如何维持超高真空自然也十分关键。电子束本

身在运行时存在一定的电离辐射,因此需要完善的辐射防护连锁系统,以保护设备安全、用户和运行人员的人身安全。

最后,加速器控制系统相当于电脑的“操作系统”,它作为一个“管理系统”来为加速器其他系统服务,直白地说,它是一个“中央控制室+分布式的计算、数据处理系统”,实际上更接近于一个“IT部门”。束测与控制合作,也就完成了加速器运行时的测量、显示、上传、物理上的宏操作、下达、控制的全过程。

五、小结

随着加速器物理研究及关键技术装备水平的不断进步,衍射极限储存环同步辐射光源的时代已

经来临。发达国家和地区正在竞相建设衍射极限储存环光源,未来10~20年,衍射极限光源将逐步成为国际上同步辐射光源的主流。我国先进同步辐射光源也有明确的建设规划,其中,高能光源已在“十三五”期间开工建设,未来5~10年内将陆续建设低能区及中能区先进光源,形成我国先进光源全能区覆盖。正在进行的合肥先进光源预研工程将为未来我国低能区衍射极限储存环光源的建设打下坚实的基础。

参考文献

- ① Zhao Zhentang, Storage ring light sources, *Reviews of Accelerator Science and Technology*, 2010, 3(1): 57—76.
- ② 焦毅,徐刚,陈森玉等,衍射极限储存环物理设计研究进展,《强激光与粒子束》,2015, 27(4): 045108-1.

科苑快讯

天文学家发现一颗含有雨云的日外宜居星系

研究人员报告,我们附近一颗大气中含有雨云的系外行星,其表面可能是有宜居条件的。这颗行星被命名为K2-18b,距离地球124光年,是地球半径的2.6倍。去年,天文学家在这颗富含氢的大气中探测到液态水云,对于这样小的行星来说还是首次。

K2-18b的大小介于地球和海王星之间,处于其恒星的宜居带内,所以其表面可能存在液态水,但是没人知道其表面是什么样。研究人员还不能确定它是否有地球一样的岩石表面和稀薄大气,或者海王星一般的高压水氨海洋和金属内核上的浓密氢大气层——这样的环境可不太友好。

现在,英国的一组研究人员在期刊《天体物理学杂志通讯》(*The Astrophysical Journal Letters*)上描述了他们是如何根据这颗行星的质量、大小,以及之前测量过的K2-18b的恒星穿越其大气层时的光谱,计算可能的大气层范围。(行星大气中的分子吸收特定频率的光,因此,如果星光通过它到达地球,在光谱中就能发现那些分子。)他们的结论是:K2-18b的核心可能



是任何东西,从一个带有浓厚氢大气层的几乎纯铁的球,到更像海王星的东西,再到一个有着更轻大气层和类似地球海洋条件的水世界。

研究人员得出结论,如果这样一颗大质量恒星仍然宜居,那么在太阳系外寻找生命,可能要打破通常的地球大小的思维惯性,去寻找比我们的小地球大得多的世界。

(高凌云编译自2020年2月26日 www.sciencemag.org)