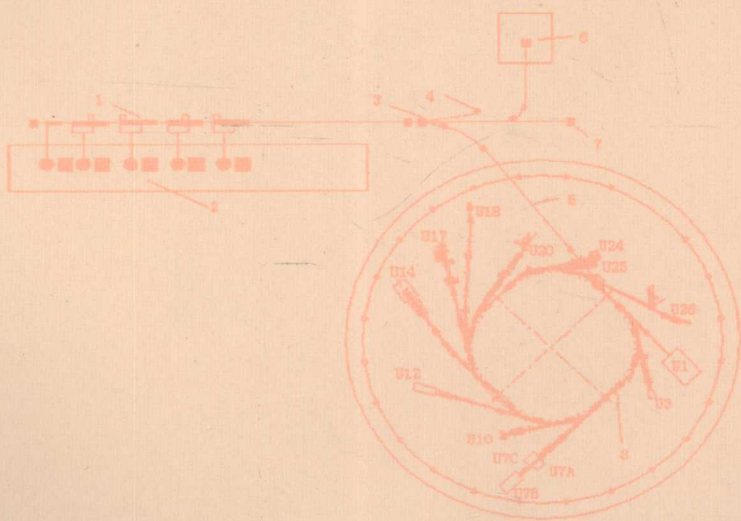



“十一五”国家重点图书 中国科学技术大学精品教材

同步辐射光源物理引论

► 刘祖平 编著



中国科学技术大学出版社



中国科学技术大学精品教材

同步辐射光源物理引论

TONGBU FUSHE GUANGYUAN WULI YINLUN

刘祖平 编著

中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

本书以深入浅出、生动形象的方式讲述同步辐射加速器的原理、特点和组成,分析储存电子束作受约束的运动并发出同步辐射的过程,介绍用以描述这种加速器的特征参数、特殊函数和影响光源性能的主要因素.重点在于基本概念和物理图像,而在数学推导或局部细节.全书分为九章,主要内容包括:引言,储存电子束的横向运动、纵向运动、束团尺寸和寿命,各种误差、束流不稳定性和高阶效应,同步辐射加速器的子系统,插入元件,同步辐射光源的发展方向.本书主要适用对象为专业方向与同步辐射光源有关的研究生或本科生.

图书在版编目(CIP)数据

同步辐射光源物理引论/刘祖平编著. —合肥:中国科学技术大学出版社,2009.7
(中国科学技术大学精品教材)

“十一五”国家重点图书

ISBN 978-7-312-02209-8

I. 同… II. 刘… III. 同步辐射—同步加速器—高等学校—教材 IV. TL54

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 102183 号

中国科学技术大学出版社出版发行

地址 安徽省合肥市金寨路 96 号,230026

网址 <http://press.ustc.edu.cn>

中国科学技术大学印刷厂印刷

全国新华书店经销

开本:710×960 1/16 印张:17.5 插页:2 字数:340 千

2009 年 7 月第 1 版 2009 年 7 月第 1 次印刷

印数:1—3000 册

定价:29.00 元

总 序

2008年是中国科学技术大学建校五十周年。为了反映五十年来办学理念 and 特色,集中展示学校教材建设的成果,学校决定组织编写出版代表学校教学水平的精品教材系列。在各方的共同努力下,共组织选题 281 种,经过多轮、严格的评审,最后确定 50 种入选精品教材系列。

1958 年学校成立之时,教员大部分都来自中国科学院的各个研究所。作为各个研究所的科研人员,他们到学校后保持了教学的同时又作研究的传统。同时,根据“全院办校,所系结合”的原则,科学院各个研究所在科研第一线工作的杰出科学家也参与学校的教学,为本科生授课,将最新的科研成果融入到教学中。五十年来,外界环境和内在条件都发生了很大变化,但学校以教学为主、教学与科研相结合的方针没有变。正因为坚持了科学与技术相结合、理论与实践相结合、教学与科研相结合的方针,并形成了优良的传统,才培养出了一批又一批高质量的人才。

学校非常重视基础课教学和专业基础课教学的传统,也是她特别成功的原因之一。当今社会,科技发展突飞猛进、科技成果日新月异,没有扎实的基础知识,很难在科学技术研究中作出重大贡献。建校之初,华罗庚、吴有训、严济慈等老一辈科学家、教育家就身体力行,亲自为本科生讲授基础课。他们以渊博的学识、精湛的讲课艺术、高尚的师德,带出一批又一批杰出的年轻教员,培养了一届又一届优秀学生。这次入选校庆精品教材的绝大部分是本科生基础课或专业基础课的教材,其作者大多直接或间接受到过这些老一辈科学家、教育家的教诲和影响,因此在教材中也贯穿着这些先辈的教育教学理念与科学探索精神。

改革开放之初,学校最先选派青年骨干教师赴西方国家交流、学习,他

前 言

我想编这本教材、讲这门课程已经有 20 年了。那是 1987 年，我刚从国外回到合肥，我所在的中国科学技术大学承建的国家同步辐射实验室工程正如火如荼地进行。这个国家重点科学工程凝聚了许多建设者的心血，他们来自四面八方，各具专长，知识背景相去甚远，很了解加速器物理的只占少数。很多潜在的同步辐射用户非常关心工程的进展，他们的专业知识往往也不包括加速器物理。当我们加速器物理工作者与同事谈论工程建设遇到的问题和解决办法时，每每有缺乏共同语言的困惑。我就会想：中国科技大学是否有一天该开一门课，为某些将与同步辐射装置打交道，然而无意也不必钻研加速器物理的学生服务？

“同步辐射光源物理引论”是 2000/2001 学年作为中国科学技术大学“核科学与技术”学科点的研究生选修课开设的。它是向各种可能进行同步辐射研究、或可能从事加速器技术工作的学生推荐的课程，已经在这种领域供职的人员进修时也可以选读。

本课程的对象是什么人？这也许是编教材之前该想清楚的最重要的问题。我设想，他或她是大学本科生、毕业生或研究生，学过高等数学和普通物理，未必学过“四大力学”，对复杂繁琐的数学推导兴趣不太高，或者不太擅长，但喜欢物理学的思维逻辑，了解物理基本概念，对物理图像有一定的想像力，对同步辐射光源如何运转及何以表现出种种性能有颇强的好奇心。这位学生的专业方向与同步辐射光源有关，而不一定打算致力于粒子加速器物理的研究。

所以，本课程尽量以深入浅出、生动形象的方式讲述同步辐射光源的原理、特点和组成，分析储存电子束作受约束的运运动的过程，介绍描述同步辐射光源性能的主要参数和特殊函数的意义，指出影响光源性能的主要因素。重点在于有关的基本概念和总体全貌，而非数学推导或局部细节。通过学习本课程，希望学生对同步辐射光源这一仅有约 40 年历史的新型光源有概要的了解，掌握重要的基本概念，对同步辐射光源的运行过程及其各个子系统、各主要参数间的关系有大体正确的印

目 次

总序	(i)
前言	(iii)
第 1 章 引言	(1)
1.1 什么是同步辐射	(1)
1.2 同步辐射的主要特性	(6)
1.3 同步辐射的发展简史	(17)
1.4 粒子加速器概述	(22)
1.5 束流物理及其主要问题概述	(32)
1.6 简介课程内容	(40)
第 2 章 储存电子束的横向运动	(48)
2.1 电子横向运动预备知识	(48)
2.2 横向运动标准方程及其解	(55)
2.3 横向振荡和工作点	(65)
2.4 描述横向振荡的 β 函数	(73)
2.5 描述偏能轨道的 η 函数和 α 因子	(80)
2.6 电子横向运动的图像, 束流发射度	(84)
第 3 章 储存电子束的纵向运动	(93)
3.1 电子纵向运动预备知识	(93)
3.2 纵向运动方程及其解	(96)
3.3 纵向振荡的特点	(102)
3.4 电子纵向运动的图像, 束流能散度和束团长度	(108)
第 4 章 储存电子束的束团尺寸	(113)
4.1 同步辐射导致的能量损失和振荡阻尼	(113)
4.2 同步辐射引起的能量涨落和量子激发	(121)

4.3 储存束流中电子的能量分布和束团尺寸	(130)
4.4 同步辐射的亮度	(135)
第5章 储存电子束的寿命	(143)
5.1 束流的量子寿命	(143)
5.2 束流的残留气体散射寿命	(149)
5.3 束流的托歇克寿命	(157)
第6章 各种误差、束流不稳定性和高阶效应	(161)
6.1 磁场误差对电子束运动的影响	(161)
6.2 束流不稳定性概述	(169)
6.3 闭轨校正、色品校正和其他校正手段	(181)
6.4 非线性效应和动力学孔径简介	(190)
第7章 同步辐射加速器的子系统	(197)
7.1 加速器子系统概述	(197)
7.2 注入器(直线加速器简介)	(202)
7.3 束流传输系统和注入系统	(209)
第8章 关于插入元件	(216)
8.1 插入元件概述	(216)
8.2 各种插入元件的特色	(226)
第9章 同步辐射光源的发展方向	(323)
9.1 SR光源的“代”	(232)
9.2 “更亮、更强、更稳定”的追求	(235)
9.3 21世纪SR光源的历史作用	(238)
主要参考书目	(240)
附录 同步辐射光源和自由电子激光	(241)

(15)	
(89)	
(93)	
(99)	
(101)	
(101)	
(111)	
(113)	
(121)	

第 1 章 引 言

1.1 什么是同步辐射

笔者在国家同步辐射实验室工作,接待过许多来自各行各业的参观者,本节的标题是他们最常提出的问题,比较懂科学的参观者常常有进一步的疑问:“你们的辐射和什么同步?”这里面有一点误解,其实辐射本身与同步无关,这个命名是历史原因造成的。

1.1.1 科学定义

同步辐射是相对论性带电粒子在电磁场的作用下沿弯转轨道行进时发出的电磁辐射。

它是电磁辐射,也就是一种光。它的波长有一定的范围,因光源而异,一般包含红外线、可见光、紫外线和 X 射线。它不同于放射性物质发出的辐射,后者是原子核内部状态改变时产生的高能粒子射线或 γ 射线(能量极高的电磁辐射)。虽然同步辐射中的 X 射线对生物也有不良效应,但一般来说比放射性物质辐射弱得多,而且对环境的不利影响几乎为零。将两者混为一谈是望文生义的人对同步辐射的另一个误解。因此,在一些“谈辐射色变”的国家,科学工作者宁可称同步辐射为“同步光”。

说到同步辐射如何产生,借用法律术语,有三个“要件”:①有带电粒子;②粒子是“相对论性”的,就是说它的能量相当高,以至于飞行的速度接近于光速;③存在与粒子速度方向有夹角的电磁场,于是粒子的轨迹弯转,呈曲线形。三件俱全,同步辐射就产生了,不论这些条件是由人工造成的,例如同步辐射光源,还是来自天然。三者任缺其一,就观察不到同步辐射。

作为同步辐射现象的后果,除了发出这种光之外,不言而喻,带电粒子的能量

必然有所损失.

1.1.2 理论背景

19世纪末,经典电动力学早已预见到这种辐射的存在,但当时未予命名.后来观察到它不算是意外的发现.相信多数读者其实听说过它,不过没有和这个名字联系起来罢了,因为它在近代科学史上曾有两次“露脸”,引起广泛注意,尽管扮演的可能都是“反面角色”.

第一次,这种辐射曾经是卢瑟福“类太阳系”原子模型无法克服的困难.卢瑟福以 α 粒子散射实验为基础提出了天才的设想,电子由库仑力牵引绕原子核旋转,与行星绕太阳运行相似,蕴含的美感令人叹服.可惜的是电动力学理论却指出,这样高速旋转的电子必定因辐射损失能量,该模型不可能稳定存在.这个卢瑟福回答不了的疑问直到近代量子力学诞生才得到解释.到今天,这种似是而非的“轨道电子”原子模型还常被用作现代科学技术的象征,令人回想起这个故事和同步辐射的关系.

第二次,随着人类加速带电粒子的能力不断增强,这种能量损失的机制成为高能加速器继续提高粒子能量的最严重的障碍.在某种意义上,高能加速器是“电老虎”,辐射损失是能量的“无底洞”.

为了更好地理解同步辐射,简略地复习一下运动电荷产生的电磁场.一个关键概念是李纳-维谢尔(Liénard-Wiechert)延迟势,它的道理很简单:因为电磁场只能以光速 c 传播,在任一时刻 t ,某观察点看到的电磁场是电荷在此前另一时刻 t^* 的势形成的,只与 t^* 时刻电荷的位置、速度 v 和加速度 a 有关,该“发光位置”到观察点的距离等于 $c(t-t^*)$.若假设电荷自“发光时刻”之后速度维持不变,在“观察时刻”它该到的位置算是“虚拟位置”.利用延迟势概念可推算出,运动电荷的电磁场分成两部分.第一部分只与 v 有关,相当于匀速飞行的电荷的场,其电场 E 在从虚拟位置指向观察点的矢径 r_1 的方向上.第二部分只有当 v 的大小或方向改变即加速度 a 不等于0时才存在,其电场 E 的大小与 a 成正比,方向则垂直于从发光位置指向观察点的矢径 r ,与加速度矢量 a 和矢径 r_1 共面.两个部分各有相关的磁场 B ,各自垂直于其自身的电场 E ,并且都垂直于矢径 r .各自的能量流(坡印廷矢量 S)则正比于 $E \times B$,垂直于 E 和 B 构成的平面.下面的(图 1.1)说明了一些矢量的含义.

为避免介绍下文用不着的更多的符号,定量的公式不抄了,在电动力学教科书中可以查到.在此定性地强调两点:

(1)上述第一部分电磁场不产生辐射.它形成的电磁能量流包裹着电荷并随之

向前飞行,不向远方发射能量,或者说从远处看其电磁场迅速衰减,所以这部分电磁场称为“近场”.因为近场没有能量损失,电荷可以保持匀速直线运动.上述第二部分电磁场则产生辐射,其能量流总是与矢径 r 同方向,由发光位置指向任何观察点,源源不断地向远方输送.这部分电磁场称为“远场”.一定的距离之外,只能“看见”远场.

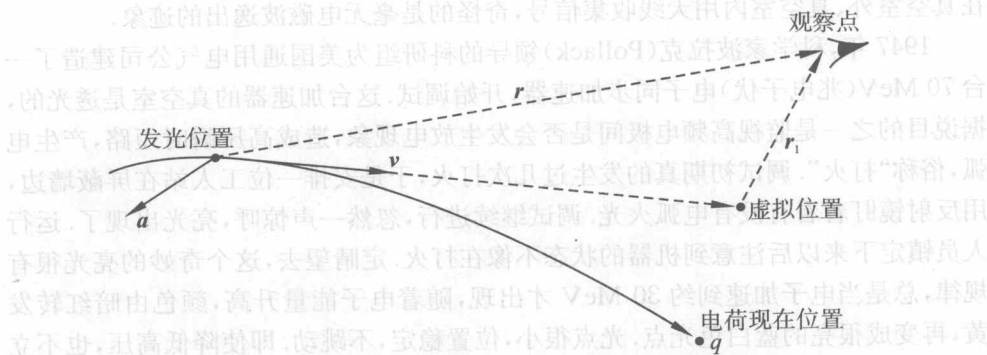


图 1.1 运动电荷的发光位置、虚拟位置和观察点的关系

(2)当电荷的速度接近光速时,它的电磁场有何特点? v 接近 c 时,近场向通过电荷虚拟位置、与速度 v 垂直的平面集中,形象地说,其电磁能量密度被“压扁”成碟形.远场的特点则是能量流强度随着 v 接近于 c 而明显增强,能量流密度向速度 v 的方向“收拢”成尖锥形.

近场容易对电荷路径附近的导体或介质产生电磁感应作用,所以是多种束流测量装置工作的基础,也是许多复杂的束流-环境相互作用的成因.远场以电荷损失能量为特征,是多种电磁辐射产生的根源.当带电粒子受外力阻滞减速($a < 0$)时是韧致辐射;当粒子低速往复运动(v 与 a 不断变号)时是振荡电荷的辐射;当粒子的速度接近于光速、方向有变化而大小几乎不变时,就是我们的同步辐射.

1.1.3 历史回眸

话说回来,同步辐射为什么叫这个古怪的名字?

它是同步加速器辐射(Synchrotron Radiation)的简称.其所以得名,是因为人首次观察到“人造”的这种辐射是在一台同步加速器中.

同步加速器是加速器的一种类型.英文是 Synchrotron,其词根有中文“同步”的意思.这种加速器的特点是:加速过程中,所有磁铁的磁场强度、高频加速系统的频率都随粒子的能量同步变化,因此粒子绕圈行进的轨道基本上始终保持不变.

20 世纪中期,加速器技术进展很快,人们学会了以磁场将带电粒子约束在准圆形轨道上,使粒子获得的能量越来越高.早已听说过的这种导致粒子损失能量的效应逐渐有所表现,但还没有观测到辐射的第一手证据.有人针对一台电子感应加速器首次组织了捕捉辐射信号的尝试,但是无功而返.当时他们知道辐射的功率并不太小,辐射的频率则估计与粒子回旋频率相当,应该在无线电波段,所以先后在真空室外、真空室内用天线收集信号,奇怪的是毫无电磁波逸出的迹象.

1947 年,科学家波拉克(Pollack)领导的科研组为美国通用电气公司建造了一台 70 MeV(兆电子伏)电子同步加速器,开始调试.这台加速器的真空室是透光的,据说目的之一是监视高频电极间是否会发生放电现象,造成高压瞬时短路,产生电弧,俗称“打火”.调试初期真的发生过几次打火,于是安排一位工人站在屏蔽墙边,用反射镜盯着看有没有电弧火光.调试继续进行,忽然一声惊呼,亮光出现了.运行人员镇定下来以后注意到机器的状态不像在打火.定睛望去,这个奇妙的亮光很有规律,总是当电子加速到约 30 MeV 才出现,随着电子能量升高,颜色由暗红转发黄,再变成很亮的蓝白色光点.光点很小,位置稳定,不跳动.即使降低高压,也不立即消失.这都说明它不是打火.经过一番思考和争论,波拉克等人才恍然大悟,“踏破铁鞋无觅处,得来全不费工夫”,这就是神秘的电磁辐射.出人意料的不是它的存在,而是其频率如此之高,能达到甚至超过可见光.这个发现当时引起不小的轰动,许多人涌到通用电气公司来参观,两年内登记的访客名单中,有 6 位后来成为诺贝尔奖获得者.第一篇报告此事件的文章称该辐射为“同步加速器中电子的辐射”,后来演变成同步加速器辐射.再简称作“同步辐射”,就是某位中译者的创造了.

这个命名过程充满了偶然性.假如另一批科学家捷足先登,在感应加速器中看到它会怎么样?假如不是一位工人首先碰巧看见,而是由某著名学者有计划地安排实验观察到它,会不会用他的名字命名为某某某辐射?历史从来不回答这种以“假如”开头的问题.

无论如何,人类认识和利用同步辐射的历史就这样开始了.1997 年,各国同步辐射学者曾在日本的一次大型国际会议上隆重纪念“人造”同步辐射问世 50 周年.

利用英文缩写,下文进一步简称同步辐射为 SR.另有两个利用英文首字母的约定,一并在在此交代:本书有时用具体数字说明一些参量的大小,常以笔者工作中的情况为例,笔者所在的“国家同步辐射实验室”可简称为 NSRL(National Synchrotron Radiation Laboratory);它的名叫“合肥光源”的 800 MeV 电子储存环简称为 HLS(Hefei Light Source).

1.1.4 千年佳话

人造 SR 的正式诞生只有大约 60 年. 自然界的 SR 就不同了, 大概与宇宙同寿.

20 世纪 30 年代, 天体物理学家指出, “超新星爆发”是恒星演变史中的一个重要的突变阶段, 是较重的恒星死亡过程的开端. 后来人们知道, 在相对短暂的爆发期间, 大量电荷高速向外喷射, 现场周围又存在着极强的磁场, 具备向远方发射很强的 SR 的条件, 一时成为天空中光辉夺目的新星. 超新星爆发之后将形成极其致密的内核(中子星)和外围的云状弥漫性物质, 后者体积庞大并不断膨胀, 该体系内部仍有很强的磁场, 约束着高速飞行的带电粒子, 这样的区域是太空中长期维持的 SR 源. 有人推算, 现在的金牛座蟹状星云是距今最近的超新星爆发的遗迹, 爆发时间(按光到达地球时算)距推算时大约有 900 年. 这个论断能得到证实吗?

自春秋以来, 我国史官有观察和记录天象的传统, 因为古代中国人相信奇异的天文现象是上天垂警世人的预兆. 人们查了中国的史书, 果然大有所获. 据《宋会要》第七十卷记载, 至和元年五月(公元 1054 年 7 月, 正值我国北宋年间)己丑日晨, 天关星(西人称金牛座 β 星)东南的天穹上出现了一颗明亮的新星, 当时习惯上称为“客星”, “昼见如太白, 芒角四出, 色赤白, 凡见二十三日”. “太白”即金星, 是离太阳较近的行星, 只有黄昏或清晨天光熹微时可见到, 相当亮. 客星与之相似, 但亮度更高, 所以连续 23 天内白天都能看到, 而且给人光芒四射的感觉, 足证辐射之强. 《宋会要》又说, 直到 22 个月后的嘉佑元年三月, 这颗新星才从肉眼(即使在夜间)完全消失, “客星没, 客去之兆也.”这是关于星空的一次异象的完整记录, 包括时间、位置、亮度、颜色和演变过程, 也是历史典籍为现代科学服务的著名范例.

所以, 学界公认, 是我们的祖先, 近千年前的中国人首先仔细观察、准确记录了自然界中的同步辐射. 这在世界天文史和人类与 SR 的关系史中都值得一书. 据说美洲的玛雅人对此也曾有记载. 至于当年的欧洲人为何对如此瑰丽的奇观漠然视之, 没有留下只言片语, 至今令人不解.

1.2 同步辐射的主要特性

SR 是一种光,但它与人们熟悉的常规光源发出的光很不一样,具有许多对科学研究弥足珍贵的特性.这些特性一旦得到科学家的认识和运用,SR 就作为 20 世纪的一种新型光源受到广泛的重视,在科学技术的飞跃发展中扮演了重要的角色.曾几何时,加速器专家们还只把 SR 视为阻止他们获得更高的粒子能量的大敌,今天,建造与运行更新更好的 SR 光源已成为他们中许多人不解的追求.在一定的意义上,曾经令人生厌的丑小鸭,变成了优雅高贵的白天鹅.

本节从 SR 的原理出发,逐一介绍它的主要特性,重在帮助读者理解这些特性的由来和含义.

本书一般采用国际实用单位制(MKSA),基本单位是米(m)、千克(kg)、秒(s)和安培(A).有些单位则参照同行的习惯,如波长用埃(angstrom),粒子能量用电子伏(eV),气压用毫米汞柱即千(torr)^①.文中有些数值计算公式,若不另加说明,则各常用参量的符号和单位分别是:粒子能量 E 用 GeV,束流强度 I 用 A,磁场强度 B 用 T(特斯拉),曲率半径 ρ 和沿粒子轨道的长度都用 m.

常用的其他符号中,属于自然常数的有:光速 c ,普朗克常数 h ,真空介电常数 ϵ_0 ,真空磁导率 μ_0 ,电子电荷 e ,电子静止质量 m_0 和电子静止能量 $m_0 c^2$,后者约等于 0.511 MeV.

1.2.1 高辐射功率(高强度)

早在研究运动电荷的电磁辐射的初期,经典电动力学就给出了计算远场辐射功率的公式.

因为静止质量很轻的电子最容易被加速到具有相对论性,绝大多数 SR 光源中的带电粒子是电子或正电子,本书讲到粒子运动时,常用“电子”代称带电粒子以便于叙述,这并不影响有关规律的一般性.

设单个电子在磁场作用下沿弯转轨道飞行,其瞬时辐射功率是

^① 1 埃 = 10^{-10} m, 1 eV = 1.602×10^{-19} J, 1 千 = 133.3 Pa.

$$P_c = \frac{e^2 c (\beta\gamma)^4}{6\pi\epsilon_0 \rho^2} \quad (1.1)$$

这里的 β 是电子相对速度 v/c , γ 是电子相对能量 $E/(m_0 c^2)$, ρ 是电子飞行轨道的曲率半径.

本书不重视公式的常数系数. 式(1.1)主要告诉我们三点:

(1) 我们知道, 非相对论性粒子的 β 明显小于 1, γ 约等于 1; 而相对论性粒子的 β 约等于 1, γ 则远大于 1. 例如, HLS 环的电子 $E = 800 \text{ MeV}$, $\beta = 0.9999998$, $\gamma = 1565.3$. 所以, 只有相对论性粒子能发出功率可观的辐射.

(2) 如果运行轨道恒定, ρ 维持不变, 辐射功率正比于粒子能量 E 的四次方. 可见粒子被加速时 SR 增强之快.

(3) 笔者想强调的是第三点. SR 光源中的外加弯转磁场大多与电子轨道平面垂直, 这种情况下, 电子能量、磁场强度和轨道曲率半径之间的关系是众所周知的 (因为 $evB = mv^2/\rho$):

$$B\rho = \frac{mv}{e} = \frac{m_0 c}{e} \beta\gamma \quad (1.2)$$

与式(1.1)结合, 容易得出值得记住的结论: 能量为 E 的相对论性电子受到与其速度垂直的磁场 B 的作用, 电子的 SR 瞬时功率 P_c 正比于 $E^2 B^2$.

很自然, 单个电子回旋一圈辐射的总能量 U_0 是

$$U_0 = \oint P_c \frac{dz}{c} = \frac{e^2}{6\pi\epsilon_0} \gamma^4 \oint \frac{dz}{\rho^2} \quad (1.3)$$

式中 \oint 表示对轨道积分一圈, 以哪里为起点无关紧要. dz 是沿轨道的路程元. 已认定电子是相对论性的, 取 $\beta = 1$ (文中多处如此, 不另说明).

一台 SR 光源的总辐射功率 P_{SRS} 呢? 设束流强度为 I , 其中共有 N_e 个电子, 电子回旋频率为 f_c , 显然有

$$I = eN_e f_c \quad (1.4)$$

$$P_{\text{SRS}} = N_e f_c U_0 = IU_0/e \quad (1.5)$$

很多 SR 光源中所有弯转磁场的磁场强度相同, ρ 都一样, 式(1.3)最右边的积分等于 $2\pi/\rho$. 此时的 U_0 和 P_{SRS} 都正比于 E^4/ρ 或 $E^3 B$. 这种情况下, E 、 B 、 I 的单位如前所述, 可得数值公式:

$$U_0 (\text{keV}) = 26.54 E^3 B \quad (1.6)$$

$$P_{\text{SRS}} (\text{kW}) = 26.54 I E^3 B \quad (1.7)$$

例如, NSRL 的 HLS 是中能 SR 光源, 它的 $E = 0.8 \text{ GeV}$, $B = 1.2 \text{ T}$, $I = 0.3 \text{ A}$. 所以 $U_0 = 16.3 \text{ keV}$, $P_{\text{SRS}} = 4.89 \text{ kW}$.

单个电子每圈的能量辐射损失 U_0 与电子总能量相比并不大, 但已相当于上万伏直流电压的“减速”作用. 整台光源的辐射功率颇为可观, 比常规 X 射线光源强得多. 后者即使用功率为数千瓦的电子束轰击阳极, 因为转换成 X 射线的效率低, 辐射功率只有几十瓦, 而且大多集中在阳极的特征谱线上, 连续的韧致辐射功率很小. 高能 SR 光源的电子能量比 HLS 高好几倍, P_{SRS} 达到几十甚至上百千瓦, 就更是光源中的巨无霸了.

高辐射功率是 SR 雄踞光源之林的基础条件. 作为连续光源, SR 在许多波段上大大强于其他可用光源. 仅此一点, 就可能使实验时间大为缩短, 信噪比大为提高, 使有些研究由不可能变为可能.

1.2.2 高度准直性(方向性)

SR 有与生俱来的良好的准直性.

想象一列高速行驶的火车, 车上有人不断用力向外抛掷石子. 他自己觉得扔出石子的方向差不多平均分布于四周, 速度或者动能也基本一样. 车外人的观察却是: 大部分石子的飞行路线明显地向火车前进方向集中, 向前方或侧前方扔的石子的动能也明显高于扔向侧后方的. 谁都知道, 这是相互间有运动的两个坐标系之间变换的结果. 在车外人的眼里, 火车坐标系的空间变形了, 似乎被“折拢”向火车前进的方向, 变形的程度取决于车速. 假如车速接近光速, 情形又当如何?

现在看一个正在发光的相对论性电子. 在固定于电子身上的坐标系里看, 光辐射差不多各向同性. 若通过电子设一个与其速度垂直的平面, 平面两侧即电子向前、向后发出的辐射能量是相等的. 但是, 人在实验室坐标系中观察, 却发现 SR 几乎全集中在电子的前进方向附近. 刚才说的运动坐标系中的平面在实验室坐标系里变成了一个圆锥面, 锥的尖顶是发光的电子, 圆锥的半顶角 $\theta_{1/2}$ 非常小.

看电子发出的“光线”与电子前进方向的夹角 θ , 设该夹角在固定于电子的运动坐标系中为 θ_{tr} , 在实验室坐标系中变成 θ_{lab} . 根据相对论的动量合成公式, 两者间的关系是

$$\tan\theta_{\text{lab}} = \frac{\sin\theta_{\text{tr}}}{\gamma(\beta + \cos\theta_{\text{tr}})} \quad (1.8)$$

式中的 β 和 γ 属于运动的电子. 请注意分母中的 γ 和它一般很大.

代入前述平面的 $\theta_{\text{tr}} = \pi/2$, 就得到前述圆锥面的半顶角: