



同步辐射的昨天和今天

王德武

(中国科学院高能物理所)

从科学家预言有同步辐射的存在,一直到1947年观察到同步光,整整经历了30年。从看见同步光到第一个同步辐射实验室建立,又花了20年的时间。这里简单回顾一下,在漫长的岁月里围绕同步辐射这个课题科学家们所做的贡献。

众所周知,1873年伟大的物理学家麦克斯韦创建了麦克斯韦方程组,为电磁学的发展奠定了坚实的理论基础。如今越来越多的人都了解加速了的带电粒子,例如电子和正电子,能发射电磁波。它的能谱范围可以从几个电子伏能量的远红外延伸到几十千电子伏的硬X射线。从80年代起,同步辐射获得了极大的发展,在物理、化学、生物、医学、地矿、微电子技术等各个领域得以广泛应用。

人类认识自然界的第一个带电粒子是电子。1858年普鲁凯尔发现了阴极射线,这种射线是从放电管的阳极发射出来的;1883年,物理学家赫兹指出,磁铁可以使阴极射线偏转,但是在磁铁上觉察不到任何效应。四年后,赫兹就发现了电磁波。英国物理学家汤姆逊利用转动的平面镜测量了阴极射线的传播速度,并确认阴极射线就是粒子束。1897年汤姆逊把电场和磁场结合起来,测量了这种粒子的电荷(e)和质量(m)之比 e/m ,即今天通称的荷质比。他计算了这种粒子的质量大约为氢的质量 $1/2000$ 。他还指出,当光照射在金属表面时,能测量到和阴极射线有相同荷质比的粒子。一年后,也就是1898年,利纳德指出,一个能量为 E ,质量为 m 的电子,沿着半径为 R 的圆形轨道运动,若电子以均匀速率 $|v|$ 运动,而速度的方向在改变,则因向心力产生匀加速运动。利纳德推断,它将是强的电磁辐射源,其发射功率由下式表示:

$$P \propto \frac{1}{R^2} \beta^4 \left(\frac{E}{mc^2} \right)^4, \text{ 其中 } \beta = v/c, c \text{——光速。}$$

利纳德的理论揭开了同步辐射史上的新篇章。在利纳德理论的基础上,1908年,年轻的物理学家斯格特向Adams奖金征文委员会递交了他的论文,题目是“电磁辐射”,这篇论文长达327页,对电磁辐射做了较详细的阐述。这里要补充一句,Adams奖金是英国

剑桥大学为数学论文选题而设立的。斯格特在文章中指出,在圆形轨道上运动着的电子会发出辐射,即现在通称的同步辐射。运动着的电子损失的能量变成光子发射。斯格特还做了一种大胆的尝试,试图用电子在圆形轨道上运动的模型来解释原子发射的分立光谱线。然而,这种尝试失败了。学过原子物理的人都知道,这个难题最终由丹麦物理学家玻尔借助能量和角动量的量子化予以圆满解决。尽管如此,斯格特的思想——辐射干涉来自许许多多的电子,是当今世界在同步辐射光源上建造扭摆磁铁,以及产生自由电子激光的思想基础。

斯格特的论文对电子的能量辐射率,辐射频率的角分布等参量都做了详细的计算。虽然理论工作是如此的完美,可是要证实同步辐射的存在,并不是件容易的事。1940年,美国的Illinois大学建造一台能量为2.3 MeV的电子感应加速器(Betatron),这台机器的成功大大地激起美国通用电器公司(以下简称G. E. 公司,下设G. E. 研究室)的兴趣。他们认识到,它可能是个强的X射线源。紧接着,在Illinois大学任职的凯斯特来到设在斯凯艾克拉克底的G. E. 研究室,着手建造20 MeV电子感应加速器,这台机器于1941年全部完工,并投入工作。凯斯特本人和他的合作者塞贝尔知道斯格特有关电磁辐射方面的工作,期望加速了的带电粒子会发出辐射。可是,他们从自己的工作得出结论,电子能量为20 MeV时,辐射是微不足道的,他们认为应该提高电子的能量。凯斯特本人对寻找新的X射线源发生了极大的兴趣,他决定离开G. E. 研究室,带着20 MeV电子感应加速器回到了Illinois大学。当时,对此感兴趣的还有查尔顿和韦斯坦都。他俩决定建造一台100 MeV的加速器。与此同时,随着二次世界大战结束,前苏联的科学家重新回到实验室,理论物理学家波莫朗楚克等人又重操旧业,重新研究二次大战前苦心思考过的问题——高能电子(数百兆电子伏)加速器的能量损失和辐射问题。他们还讨论了高能电子加速器能量损失的意义。俄国科学家的想法引起了美国G. E. 研究室胡尔的关注。他让助手布莱威特去研究俄国人的结论。布莱威特做了深入的理论研究后得出结论:俄国人的论断是正确的,而且认为在100 MeV的电子感应加速器上就能看到辐射。布莱威特还对辐射性质做了进一步理论分析,断定辐射是在朝前方向一个很小的锥角内发射出来的。纵

然,理论家的预言是如此美妙并富有想像力,但是,在寻找同步辐射过程中,却使他们大失所望.1945年布莱威特用微波探测器试图探测100MeV加速器的辐射.他估算辐射的最大强度应分布在电子轨道频率 $\omega = 2\pi R/\tau$ (τ 是电子转一圈所花的时间)的谐波谱上,可是他把谐波的范围低估了一万倍(他估计是 10^1 谐波,实际上应该是 10^7).布莱威特预言,从这台机器发出的最大辐射频率应落在光谱的可见光部分.实际上,在他测量时什么也没有测到.当时他还没有认识到,由于电子感应加速器有一层不透明的罩子,导致本来应该发现的辐射却没有被发现.1946年他在《物理评论》上发表了她的结果.

1946年在英国曼彻斯特大学物理系学习的中国学者朱洪元先生着手研究宇宙线中的高能电子在地球磁场中运动发出辐射的问题.1947年,他将研究结果写成一篇论文,题目是“论高速荷电粒子在磁场中发出的辐射”.无疑,这篇著作对同步辐射的初期发展作出了重要贡献.

1945年,加速器的原理有了革命性的突破,麦克米伦和维克思勒发明了同步加速器,从而给电子感应加速器的前景提出了挑战.此后不久,G.E.公司筹划建造一台能量为70MeV的同步加速器,这是世界上第一台同步加速器.1947年4月24日这台机器投入运行.由于有些部件被迫推到更高的运行水平,因而发生了打火现象.为了观察打火的出处,在安全屏蔽墙壁的末端树立一块大镜子,用它来观察真空盒内部的工作情况.这个真空盒是透明的,而电子感应加速器的真空盒是不透光的.当时在70MeV加速器运行组任职的机械师弗劳德·哈贝尔,经过非常细心的观察,终于弄明白,他所看到的光不是高压打火放电,而是理论上预言的同步辐射.他看到的光斑很小,而且很亮,一个蓝色的光斑出现在真空盒的一侧.他们的实验发现,当加速器在低能量下运行时,光斑呈现黄色;30MeV时,光斑变成红色,而且光很微弱;当加速电子为20MeV时,再也看不见有光从真空盒发射出来.从电磁学角度看,辐射是存在的,只不过光子的频谱移向长波段,进入红外或远红外区,用肉眼则看不见它们.

科学家们经过30年理论研究、实验观测,终于亲眼在同步加速器上直接看到了同步光.从此,“同步辐射”这个名词被科技界所公认,一直延续到今天.由于G.E.公司首先发现了同步辐射,一时间G.E.公司的声望大增,来访者络绎不绝,其中还有六位诺贝尔奖金的获得者前来参观,祝贺这一伟大的发现.

尽管科学家们早已注意到同步辐射是个十分理想

的强光源,有着巨大的应用潜力.但是,由于加速器造价昂贵,技术复杂,使得同步辐射实验工作大大地推迟了.在哈贝尔发现同步辐射之后九年(1956年),汤姆鲍里安和哈特门在美国康乃尔的1GeV电子加速器上完成了紫外光谱研究.这恐怕是世界上第一个用同步辐射做的实验.大约又经过20年,1974年美国加州的SPEAR加速器实验室的维尼柯等人率先建起同步辐射实验室,首批工程建成了几条光束线和五个实验站.这些光束线可提供光子能量范围为150eV—40keV,用它开展了物理学、化学、生物学等领域的研究.此后十几年间是同步光源大发展的时代.世界上许多科学家都对新光源的兴建和利用产生了极大的兴趣.到目前为止,据不完全统计,约有大小五十四台电子贮存环分布在世界39个实验室.就光源的性能而论,通常划分成三代同步光源.第一代同步光源是指贮存环的发射度为100—几百纳米·拉德(nm·Rad),这类贮存环主要为高能物理实验提供对撞方式,部分时间供同步辐射应用.它所能提供的光强比实验室转靶X光机高数千倍,北京正负电子对撞机就属于这种;第二代同步光源是指电子贮存环发射度为40—150nm·Rad的加速器,它是同步辐射专用光源,设有若干直线段和插入件.所提供的光强一般是 10^{13} — 10^{16} 光子/秒·(毫米)²·(毫拉德)²,比第一代同步光源的强度高出数百倍;第三代同步光源是指发射度小于40nm·Rad的电子贮存环.小的发射度、多级扭摆磁铁插入件、高流强(~ 300 mA),可得到十分高的光子通量,一般 10^{16} — 20^{20} 光子/秒·(毫米)²·(毫拉德)².新一代强同步光源的出现,使同步辐射的应用领域大大拓宽了.它几乎涉及现代科学技术的各个领域.例如:凝聚态物理、表面科学、材料科学、化学、生物学、农业、医学和诊断、地矿等等.同时也推动着新技术的大发展.例如:大规模集成电路的刻蚀,即光刻技术,超微细加工、微束断层成像技术等等.同步光源对科学和工业所产生的推动作用在未来的岁月将会看得更清楚,它的应用会越来越广泛深入.

第4届国际声子物理会和第8届凝聚态

声子散射国际会议联合召开学术会议 (PHONON 95)

地点: 日本札幌

会议联系人: 日本札幌 060

北海道大学应用物理系

T. Nakayama 教授

FAX: +81-11-706-7880