



同步辐射光源史话

先 鼎 昌

编者按:

由北京正负电子对撞机国家实验室同步辐射室“青年工程师和科学家俱乐部”主持的、由学部委员朱洪元先生题写栏名的《青年之光》栏目,带着新春的喜悦同大家见面了。“发展科技待后生”,这是老一辈科学家的共识、呼唤与心愿。“不负众望,迎头赶上”的后生们,在同步辐射这一崭新的学科领域内获得了可喜的成就。人们将从他们撰写的文章中了解到同步辐射技术在物理学、化学、生物、材料科学、微电子学、显微技术等方面的应用。由他们的导师洗鼎昌教授撰写的《同步辐射光源史话》一文,作为本栏目的首篇奉献给广大读者,希望大家能从中获得启迪。

同步辐射光源的出现,是继X光光源、激光光源之后在科技领域中又一次革命性的事件。

用光来观测微小物体的一个重要原则是所使用的光的波长,应当大致相当于被观测对象的尺度。例如,用可见光,不能观测比微生物小得多的物体,而对晶体结构的研究,就需要使用波长为 \AA (10^{-8}cm)量级的X光。但是,科学迅速的发展,使得即使是同一门学科中需要观测的对象的尺度也有很大的差异,例如生物学,它研究的对象从微米尺度的细胞形态到 10^4\AA 尺度的生物大分子到 1\AA 尺度的蛋白晶体的间距,也就是说,希望一个波长覆盖从可见光直到X光波段的光源。现代科技发展的另一个要求是,希望能够有提供连续可调的光源。这两点,在同步辐射之前的所有光源,都是不能满足的。无论X光或激光,它们的波长都受到原子能级的限制,只能提供波长特定的光子。虽然X光管也提供连续谱的光子,但是由于强度弱,在应用上受

到严重的限制。同步辐射不但具有激光的许多优点,而且能够满足上面说到的两个要求。

什么是同步辐射?同步辐射是速度接近光速的电子在运动中改变方向时所放出的电磁辐射。早在上一个世纪末,人们已经知道,一个具有加速度的带电粒子,无论是线性的加速度(Lamor, 1897)或是圆周运动的向心加速度(Lienard, 1898),都会放出电磁辐射。这就是我们日常使用的无线电广播、电视广播的物理基础—电磁波就是从在天线中振荡的电子辐射出来的。在微观世界里,电子在原子核的轨道运动中不断由于辐射而丧失能量,早在1907年便由Schott指出,并促使玻尔原子模型的形成。但是,变速电子的速度接近光速时,它的辐射有着十分独特的性质,这就是同步辐射。

最早研究同步辐射的是苏联理论物理学家Pomeranchuk,而其动机,却是探讨加速粒子所能达到的极限或者与地球磁场有关的宇宙线现象,这从最早发表的论文的题目便可以看到:“在地面上测到的宇宙线电子能量上限”(Pomeranchuk, 1939)、“电子回旋加速器可能达到的最大能量”(Iwanenko, Pomeranchuk, 1944)讨论的出发点是:当一个电子在磁场中走着圆弧形轨道时,放出的辐射使它丢失能量,在宇宙线现象中,宇宙线的原初电子在远离地球时便辐射能量,使能在到达地球表面时,宇宙线初级电子的能量被限制在 10^{11}eV 以下。在加速器的研究中,人们一方面希望电子得到高能,但电子在加速器沿着圆形轨道运动使它不断失掉能量,人们希望知道电子能够达到的能量的极限是什么。

对同步辐射性质的研究也是由理论物理学家从上述两个方面着手进行的。1946年我国研究同步辐射的先驱朱洪元到英国曼彻斯特大学念研究生学位时,分析了他的导师P. Blackett的一个问题:宇宙线中的高能电子在进入地球大气层前,由于地球磁场的影响,已经放出辐射,在经过地球大气层后,是否会在地球表面产生一个特大范围的光电簇射。朱洪元研究的结果,得到这种后来被称为同步辐射的能谱、角分布和极化表

除此之外,大会还对含Cu的或不含Cu的氧化物超导体的物性及结构进行了细致的研究。值得一提的是发现电子型超导体 $\text{Sr}_{1-x}\text{Nd}_x\text{CuO}_2$,其 T_c 达40K。这是目前所发现的 T_c 最高的电子型超导体。这种材料是在高温、高压下制成的。

我国的超导研究在某些方面仍处在世界领先水平,例如新材料的研制及结构分析和物性研究,临界电流密度、钉扎机理等研究引起了国际上的广泛重视。要保持这一地位就要靠广大的科技工作者的努力奋斗,同时要靠各界的大力支持。

编者按:

这是本刊记者芜茗在1991年中科院青年学者物理学讨论会上所约的稿件。作者李晓光,31岁,六安人,1982年毕业于安徽大学,1982—1988年在中科院固体所攻读硕士及博士学位,师从何怡贞教授。1989—1990年在中国科大进行博士后研究工作,1990年提升为副教授。已在Phys. Rev. B, J. Appl. Phys., J. Phys., Phys. Stat. Sol., 物理学报等国内外核心期刊发表论文35篇。作者陈兆甲,50岁,南京人,中国科大物理系副主任,教授,该校超导中心主任。

达式,指出由于辐射集中在一个沿电子瞬时速度十分小的一个角度范围中,实际上是不会产生特大范围的光电簇射的。朱洪元的结果,写成一篇题为“论在磁场中的快速荷电粒子放出的辐射”,于1947年在英国发表。它与 J. Schwinger 在研究加速器中电子辐射所得的结果相同,至今仍为同步辐射研究早期的基础文献。

在实验室里同步辐射是在1947年发现的。那时在美国纽约州 Schenectady 的通用电器公司实验室中,为了检验新提出的同步加速原理建造了一台70MeV的电子同步加速器。在一次调机中发现电子枪出现打火的现象,便让一位技工用一面镜子去观察水泥防护墙内的加速器到底出了什么事。那位技工从镜子里看到加速器里有“弧光”,即使关掉电子枪这“弧光”还存在。起先物理学家以为这是契仑科夫辐射,但很快便弄清楚,这就是 Pomeranchuk 最初讨论的那种辐射,便报道了“在同步加速器中电子的辐射”,从此,这种辐射被称为同步辐射。

原则上所有带电粒子在作圆周运动时都放出同步辐射。但辐射功率反比于粒子质量的平方,亦在同样的条件下,质子的同步辐射比电子的要弱13个数量级,这就是为什么所有同步辐射光源都是使用电子的原故。同步辐射在天体物理中起着十分重要的作用,宇宙中许多天体放射出同步辐射,有名的蟹状星云便

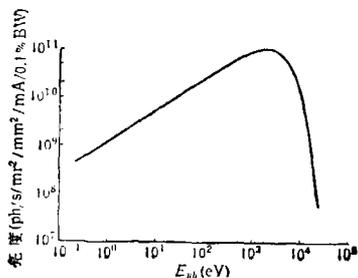


图1 BEPC 同步源在 2.2GeV 专用模式运行时的谱亮度

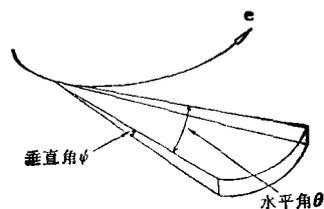
是这些天体中的一个,它是最早在我国宋代(1054年)被观测并记录下来的一次超新星爆发的遗迹。

同步辐射有如下的特点:

(一) 它有着连续的谱分布。图1是北京正负电子对撞机在 2.2 GeV 的能量运行时的同步辐射谱分布,我们看到,它复盖着从远红外到 X 光的一个相当宽广的领域。表征同步辐射光源的光谱的量是特征波长 λ_c , 光源的波长比 λ_c 小及 λ_c 大的两部分的辐射功率相等。 λ_c 处在靠近谱分布的最高点附近。 λ_c 和电子能量 E 及偏转半径 R 的关系是 $\lambda_c [\text{Å}] = 5.59 R [\text{m}] / E^3 [\text{GeV}]$ 。BEPC 在 2.2 GeV 运行时的同步光的特征波长是 $\lambda_c = 5.4 \text{Å}$ 。一般说来,可用的高能量光子,波长范围可达 λ_c 的 1/4 到 1/5。

(二) 它是一个很强的光源。在电子加速器里的同步辐射功率 P 是 $P [\text{kW}] = 8.87 \times 10^3 E^4 [\text{GeV}] I [\text{A}] /$

图2 同步辐射的水平张角及垂直张角



$R [\text{m}]$, 式中 I 是电子的电流。

(三) 它有着很好的准直性。同步辐射沿着电子轨道切线方向射出,集中在轨道平面一个很小的垂直张角 ψ 之内(图2)。对于波长 $\sim \lambda_c$ 的同步辐射光子, $\psi [\text{mrad}] \sim 0.33/E [\text{GeV}]$, 其中 E 是电子的能量。在 BEPC 以 2.2 GeV 运行时所放出的能量为 5 Å 的 X 光,其偏离轨道平面的发射角为 0.2 mrad。波长越长的同步光的发射角越大,同样条件下波长为 5000 Å 的同步光的发射角为 2.5 mrad。

(四) 它有很高的谱亮度。由于在加速器中电子束流的截面的尺度为零点几个毫米,而同步光的角散度又小,所以同步辐射光源的谱亮度是十分高的(图3)。

(五) 它是偏振的。在轨道面方向的同步辐射,是 100% 线偏振的,极化矢量平行轨道面。偏离轨道面放出的同步光,是椭圆偏振的。

(六) 它是脉冲的。由于电子在加速器中,是以束团的形式运动的,束团的长度决定脉冲的宽度,而束团数及加速器的周长决定脉冲频率。对于 BEPC 来说,当电子以单束团方式运行时,脉冲频率是 1.47 MHz,

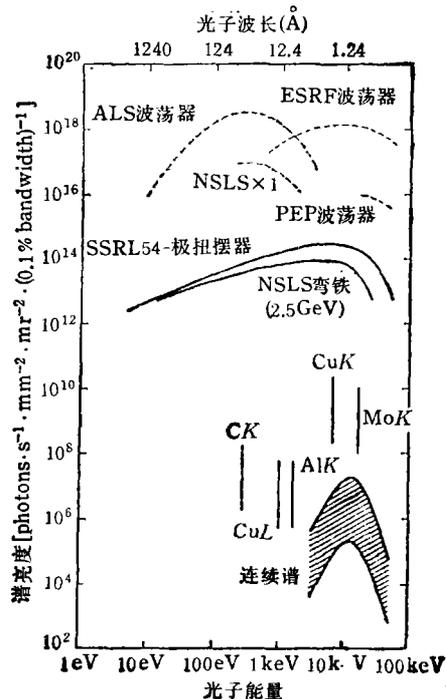


图3 同步辐射光源与常规 X 光源的谱亮度的比较。图的下端阴影部分是常规光源的连续谱,垂直线是特征谱的亮度范围

脉冲宽度一般为 200ps。

(七) 它的光谱是“纯净”的。由于同步辐射是由在超高真空 ($<10^{-9}$ Torr) 中的电子直接发射出来的, 它没有通常光源由于电极杂质、工作气体杂质、窗口等难以避免杂散辐射。

(八) 它的光谱是可以精确计算的。这一点, 使得它可以作为标定其他光源的标准光源。

不过, 当人们真正认识到所有这些优点, 已经是同步辐射发现很多年以后的事了。从 50 年代起是高能物理大发展的时代, 加速器一个接一个地建造, 粒子能量越来越高, 但只要涉及电子加速器, 同步辐射便被视为祸害。但在 1956 年, 个别科学家已起意识到同步辐射可以作为真空紫外及软 X 光源, 为它恢复名誉: “看来向心加速的高能电子放出的电磁辐射是这些加速器的有用的副产品, 其本身有着突出的优点”。1963 年, 美国的科学家在国家标准局的 180MeV 电子同步加速器上系统地用真空紫外波段的同步光研究稀有气体的吸收, 立即得到很有价值的结果—发现了自电离结构, 欧州的同步辐射也于这个时候在汉堡大学的电子同步加速器上开展。这个阶段, 可以看作同步辐射应用的预研阶段, 科学家通过这些早期的工作, 展示了同步辐射的应用前景。

60 年代初期, 高能物理学家开始了正负电子对撞机的设计。对撞机的核心是贮存环, 它把正、负电子贮存在环形的轨道上, 让它们对撞。一位杰出的法国女科学家 Y. Cauchois 马上看出, 贮存环是一个理想的同步辐射源, 无论从流强、束流截面、稳定性和束流寿命来说, 都比同步加速器要好得多。在 1963 年, 当法国第一台对撞机 ACO 还在设计的时候, 她就提出使用 ACO 作为同步辐射源, 而且要求利用 ACO 的直线段, 作为“热点”, 装在在以下要提到的扭摆磁铁, 以得到较硬的 X 光。不过她的意见没有被采纳, 人们告诉她等几年后再说, 可是这一等便是九年, 等第一条同步光束建成, 已经是 1972 年了。

在 60 年代及 70 年代初的同步辐射应用, 都是在做高能物理实验的加速器上作为副产品的。这些加速器, 便是第一代同步辐射光源, 如德国的 DORIS, 法国的 ACO, 英国的 NINA, 意大利的 ADONE, 美国的 SPEAR 等。

同步辐射应用与高能物理实验对加速器的要求是不同的, 甚至是矛盾的。例如说, 高能物理的要求是在对撞点尽量收小电子束的截面, 也就是说这时电子束有着较大的角散度, 而其结果就是整个贮存环的发射度较大, 一般为几百个 nm. rad。而同步辐射要求角散度尽量小的电子束流, 也就是说要求发射度小的贮存环。另外, 在高能物理实验装置中开辟出一条同步辐射光束线, 其难度一如在热带雨林中开辟一条行人通道, 这时候由于同步辐射的优点越来越被显示出来,

不但从高能物理研究中退役下来的贮存环被改为专用于同步辐射的贮存环, 1967 年, 日本建成的 INS-SOR 贮存环便是新一代(第二代)同步辐射光源的开始。到目前, 已经运行的第二代同步辐射光源数目近 20 个。它们的发射度比第一代的小半个量级, 典型值是 100nm. rad。

第二代光源的出现使同步辐射应用得到前所未有的发展, 促使各国政府及工业界作更大的投资。在我国, 北京正负电子对撞机作为同步辐射光源, 属于第一代光源。在安徽合肥和台湾新竹建造同步辐射光源, 属于第二代光源。

目前, 世界各国都在建造第三代同步辐射光源, 这是由发射度更小(大约为 10nm. rad)的贮存环与大量使用磁铁插入件组成的同步辐射光源。所谓插入件, 就是一些周期排列的磁铁, 它们安装在贮存环的直线段部分。在磁场中电子的运动轨道是周期性的扭动(图4)。一般地说, 扭动轨道的曲率半径小而周期长的磁铁, 称为扭摆器(Wiggler), 而扭动轨道的曲率半径大且周期短的磁铁, 称为波荡器(Undulator)。由于轨道曲率半径变小, 扭摆器可以用来得到能量较高的 X 光, 而波荡器则用来得到近单色的高亮度同步光, 改善同步光的准直性和调整同步光的偏振。

为什么提出要建造第三同步辐射光源? 在物理、化学、地球科学等学科中, 极端条件下的物态研究是学科的前沿, 如温度、压力、电场、磁场、重力场等极端条件下的物态研究, 只有在很小的范围中才能达到, 涉及的样品, 也是极为细微的。这样, 用常规的光源就因亮度不足而实际上无法进行。只有用更高亮度的光源, 才能研究诸如在 1 兆巴下的结晶学(这在地球科学上有重要的价值)及不同元素化合物的相变, 微米级的单晶(这时吸收、消光的就可略去), 毫秒级的实时测量(这时固相反应的研究便成为可能), 微米束的扫描荧光分析及 X 光 CT 成像等。

使用波荡器得到的高亮度单色光, 可开展穆斯堡尔型的谱学工作。由于同步辐射谱的连续性质, 我们

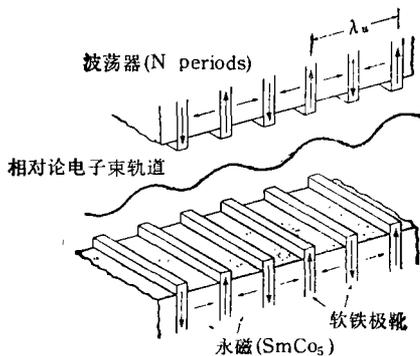


图4 波荡器插入件及电子在其中的轨道

