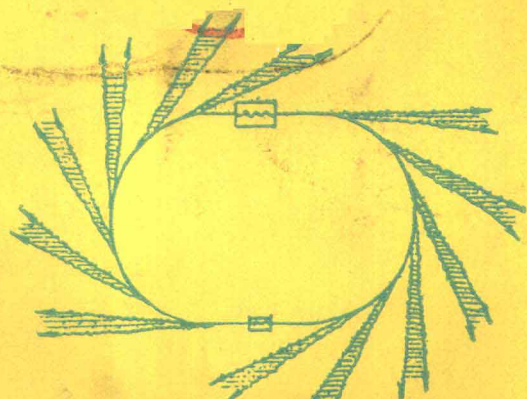


中学生课外读物



同步辐射及其应用

唐孝威 著



人民教育出版社



外读物
现代科学技术丛书

同步辐射及其应用

唐孝威 著

人民教育出版社

内 容 提 要

“同步辐射”是一种新“光源”，是首先在电子同步加速器上发现的，是接近光速的高速电子在磁场中沿曲线轨道运动时产生的一种电磁辐射。这种辐射正在成为科学技术研究的有力工具，并已有了重要应用。当前，我国已把建设国家同步辐射实验室的工程列为重点建设项目。本书介绍同步辐射及其应用的基本知识。书中从什么是同步辐射谈起，讨论了同步辐射的特性、应用原理和实验方法，介绍了同步辐射实验室的概况，以及同步辐射在许多科学技术中应用的一些例子。

本书可供对现代科学技术有兴趣的高中学生和具有中等文化程度的其他青年阅读，也可供中学教师 and 大学生参考。

中学生课外读物
现代科学技术丛书
同步辐射及其应用

唐孝威 著

人民教育出版社出版
新华书店北京发行所发行
北京市联华印刷厂印装

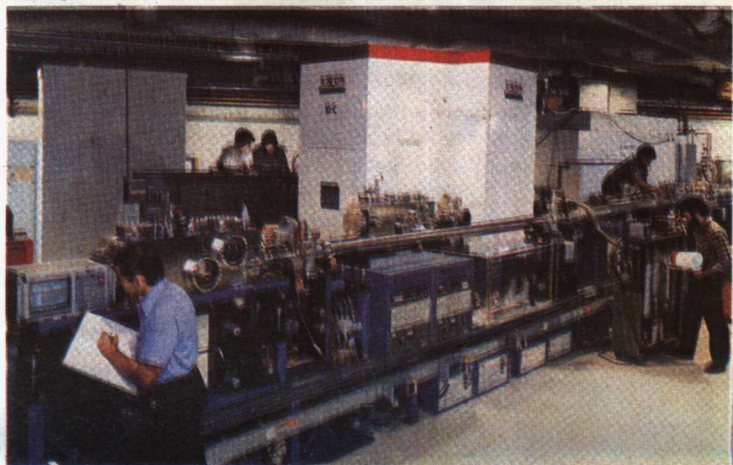
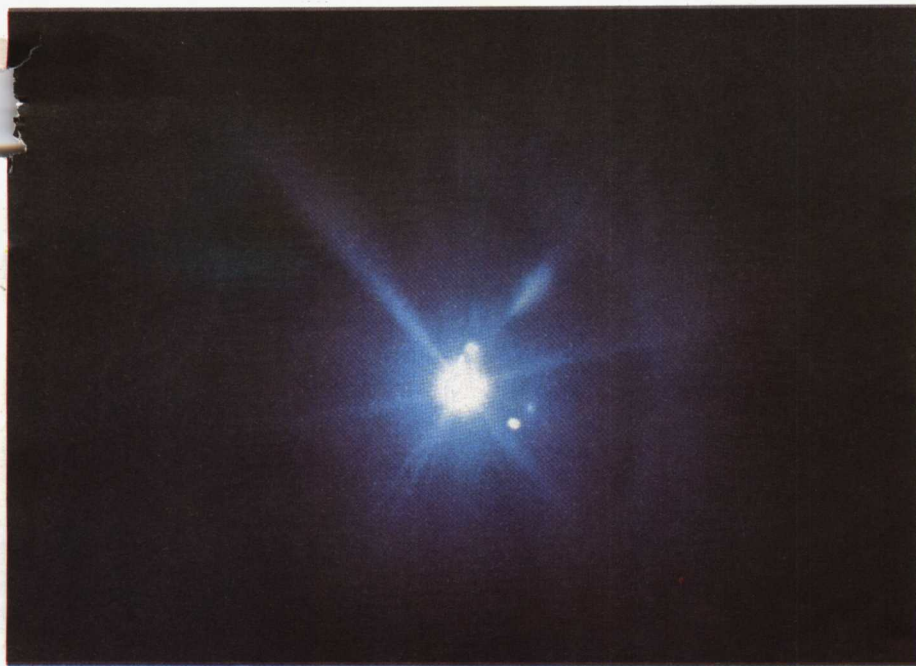
开本 787×1092 1/32 印张 2.125 插页 1 字数 42 000

1986 年 10 月第 1 版 1987 年 6 月第 1 次印刷

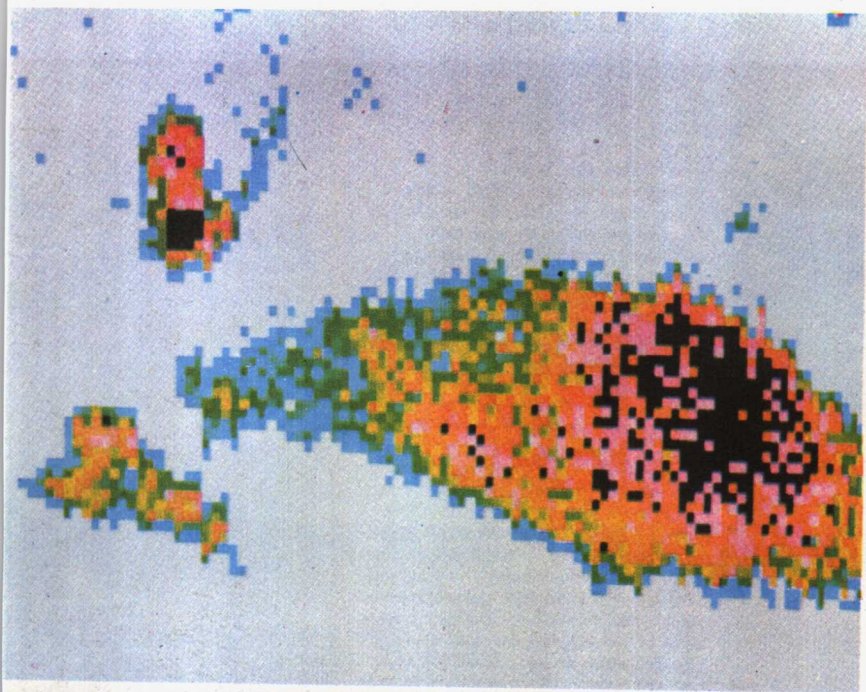
印数 1—2,500

书号 7012·01121 定价 0.33 元

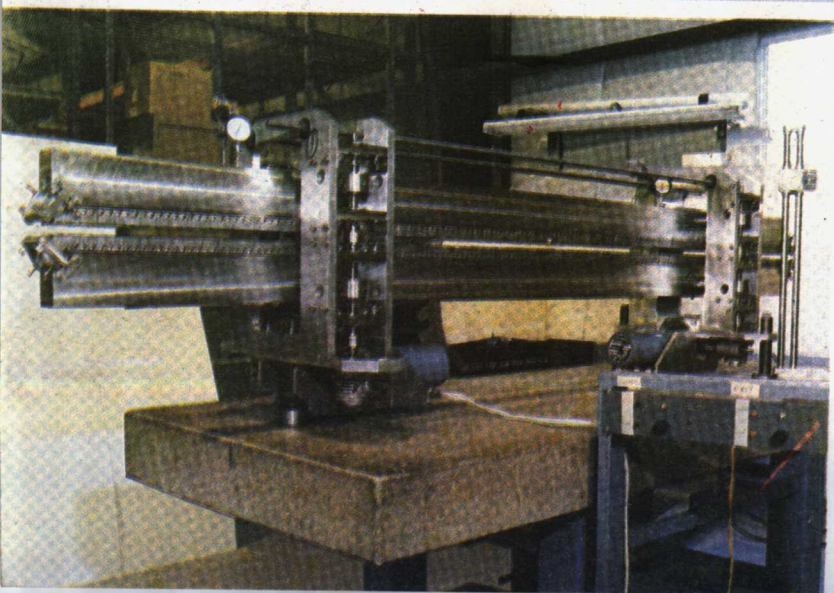
1. 同步辐射的光斑



2. 进行X射线散射的一条光束线



3. 单细胞硅藻的显微照像



4. 自由电子激光器

《现代科学技术丛书》

物理学科编委会

主编：王殖东

编委：（按姓氏笔划为序）

王殖东 祁有龙 吕如榆 刘佑昌

张元仲 聂玉昕 唐孝威 郭奕玲

目 录

一、什么是同步辐射	1
(一) 自然界里的重要角色——光	1
(二) 发光的电子	3
(三) 同步辐射的发现	5
(四) 宇宙同步辐射	7
二、同步辐射的特性	10
(一) 同步辐射的光谱	10
(二) 同步辐射的空间分布	13
(三) 同步辐射的时间分布	15
(四) 同步辐射——一种优越的新光源	16
三、同步辐射装置的历史和现况	20
(一) 同步辐射应用的历史	20
(二) 目前世界各国的同步辐射装置	21
(三) 我国正在建造同步辐射装置	21
四、同步辐射实验室	23
(一) 庞大的光子工厂	23
(二) 合肥同步辐射实验室	29
(三) 同步辐射实验用的光子探测器	34
五、同步辐射的应用原理和方法	37
(一) 光和物质相互作用	37
(二) X射线在晶体上的衍射	38
(三) 介质中光子强度的衰减	39

(四) 光子和原子散射·····	44
(五) 吸收曲线和吸收边·····	45
(六) 光电效应和光电子·····	48
(七) 扩展X射线吸收精细结构·····	50
(八) 受激原子是怎样复原的·····	52
六、同步辐射正在成为科学技术研究的有力工具·····	54
(一) 同步辐射在研究物质结构中的应用·····	54
(二) 同步辐射在生命科学中的应用·····	56
(三) 同步辐射在技术科学中的应用·····	58
(四) 同步辐射应用的前景·····	61

一、什么是同步辐射

(一) 自然界里的重要角色——光 在我们周围的世界里,光是重要的角色。没有光,我们什么也看不见,什么活动也不能进行。人类成千上万年过着日出而作日没而息的生活,不就是受光的制约而形成的吗?但是,我们在这本书中要讨论的还不只是这种狭义的可见光,而是广义的光,即所有的电磁辐射。

我们知道,在空间传播的光不是连续的,而是一份一份的,每一份叫做一个光子。光子的能量 E 和它的频率 ν 成正比, $E = h\nu$, h 是普朗克常数。因此,光子能量 E 和光的波长 λ 的关系可以用下面的式子表示:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}.$$

$$\text{因 } h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ 焦} \cdot \text{秒},$$

$$c = 3.0 \times 10^8 \text{ 米/秒},$$

$$1 \text{ 电子伏} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ 焦},$$

所以

$$E = \frac{12400}{\lambda}.$$

式中 E 的单位是电子伏 (一个电子穿过一伏的电位差时, 所获得的动能等于 1 电子伏, 即 1eV。有时, 光子能量用千电子伏表示, 即用 keV 表示, 1 keV = 10^3 eV)。 λ 的单位是

$\text{\AA}$ ① ($1 \text{\AA} = 10^{-10} \text{米}$)。表 1 是在 0.01keV 到 80keV 能区中, 光子能量 E 和光的波长 λ 的对照表。

表 1. 光子能量 E 和波长 λ 的对照表

$E(\text{keV})$	0.01	0.02	0.04	0.06	0.08
$\lambda(\text{\AA})$	1240	620	310	207	155
$E(\text{keV})$	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
$\lambda(\text{\AA})$	124	62	31	20.7	15.5
$E(\text{keV})$	1	2	4	6	8
$\lambda(\text{\AA})$	12.4	6.2	3.1	2.07	1.55
$E(\text{keV})$	10	20	40	60	80
$\lambda(\text{\AA})$	1.24	0.62	0.31	0.21	0.16

各种电磁辐射都是光子流。按光子能量从小到大排列, 电磁辐射包括从无线电波、红外线、可见光、紫外线、X射线到 γ 射线的范围宽广的能区(见表 2)。人的眼睛可见的光子能区在 1.8eV 到 3eV 之间。红外线的光子能量比可见光的小, 紫外线的光子能量比可见光的大。光子的能量不同, 跟物质相互作用的效果也不同。其中容易被空气吸收、只能在真空中传播的紫外线叫真空紫外线(大致从 10eV 到 100eV)。光子能量更大的电磁辐射是 X 射线和 γ 射线。其中穿透能力较小的 X 射线叫软 X 射线($<1 \text{keV}$), 穿透能力较大的 X 射线叫硬 X 射线($>1 \text{keV}$)。但真空紫外线、软 X 射线和硬 X 射线的划分界限并不是很严格的。

① 长度单位埃($\text{\AA}$)是以前习惯用的波长单位, 在国际单位制中可用纳米(nm)代替。由于 $1 \text{nm} = 10^{-9} \text{m}$, 所以 $1 \text{nm} = 10 \text{\AA}$ 。

表2. 各种电磁辐射的能量范围

电磁辐射	大致的光子能量范围
无线电波	$<10^{-3}\text{eV}$
红外线	$10^{-3}\text{eV}—1.8\text{eV}$
可见光	$1.8\text{eV}—3\text{eV}$
紫外线	$3\text{eV}—100\text{eV}$
X射线	$100\text{eV}—100\text{keV}$
γ 射线	$>100\text{keV}$

(二) 发光的电子 同步辐射就是高速电子在磁场中以曲线轨道运动时产生的一种电磁辐射。通常只有电子的运动速度接近真空中光速时才产生这种辐射。这种高速的粒子叫做相对论性粒子。也就是说, 高能的电子是相对论性粒子。例如总能量等于 2GeV 的电子($1\text{GeV} = 10^9\text{eV}$, GeV 的译名是吉电子伏), 其速度等于 $0.99999997c$, 已非常接近真空中光速(c)了。

磁场对运动的电荷有作用力。如果电子在磁场中运动的方向垂直于磁场方向, 它们就会做圆周运动。曲线运动总是加速运动。例如: 在圆周运动中, 电子速度的大小不变, 但方向变了; 电子在圆周上相邻两个点的速度矢量的差值和相应的时间间隔的比, 就是它的加速度的大小。

我们从电磁理论知道, 带电粒子在加速运动时会以电磁辐射形式发射能量。因此, 电子在磁场中做圆周运动时, 由于不断地向心加速而不断地辐射能量。当电子速度很小时(速度远小于真空中光速), 辐射的分布象图1所示。



图 1 低速电子的电磁辐射

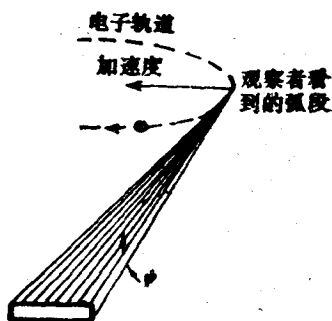


图 2 同步辐射示意图

当电子速度接近光速时,由于相对论性效应,辐射是沿电子圆周轨道的切线方向发射的,见图 2。这就是同步辐射。我们假设观察者看圆周上一段圆弧,图中画出的是电子在这个弧段上发出的同步辐射。

如果相对论性电子在磁场中以固定的半径做圆周运动,它在单位时间内发射同步辐射的能量,是和电子总能量的四次方成正比的。因此,高能电子发射同步辐射的强度比低能电子大得多。我们知道,电磁波是电磁场在空间的传播。引起人的视觉的主要是电磁场中的电场强度,因此这个电场强度矢量又叫光矢量。做圆周运动的相对论性电子发射的同步辐射是偏振的,光矢量的振动方向垂直于磁场方向。

在现有高能加速器的能量范围中,只有质量最轻的电子才能产生显著的同步辐射。因为带电粒子发射同步辐射的强度,是和粒子静质量的四次方成反比的。如果质子和电子的总能量相等,而且它们在磁场中以相同半径做圆周运动,由于质子静质量约为电子静质量的 1840 倍,电子在单位时间内发

射同步辐射的能量,即发射同步辐射的强度,将是质子发射同步辐射强度的 10^{13} 倍(1840 的四次方约是 10^{13})! 和电子相比,质子发射同步辐射的“本领”是微不足道的,因此我们可以只研究电子发射的同步辐射。

这种辐射是相对论性电子在磁场中加速而产生的,有人把它称为“磁轫致”辐射。但是因为首先在电子同步加速器上发现这种辐射,所以通常把它称为同步加速器辐射,或同步加速辐射。实际上,相对论性电子在各种形态的磁场中加速,都会产生这种辐射,并不限于电子同步加速器的情况。在译名中,把同步加速器辐射的“加速器”三个字省略了,简称同步辐射。所以,这里的“同步”二字只有发现史上的意义,并不是这种辐射本身有什么同步含义。

前面提到过,广义的光是电磁辐射的同义词。所以讲同步光和同步辐射是一个意思。

由于同步辐射包括可见光成分,人的眼睛可以直接看到在加速器中做圆周运动的相对论性电子发出同步辐射的可见光成分。因此人们形象地把发出同步辐射的电子称为“发光的电子”。(当然,如果用眼睛直接观看“发光的电子”,必须要有适当的防护措施。)有趣的是,在这里要“看到”电子,并不需要用别的光源去“照明”它们,而可以从它们自身发出的光来“看到”它们。

(三) 同步辐射的发现 1947 年,人们在实验室里首次观测到同步辐射。在那个年代里,高能物理发展的需要,促使物理学家以很大热情投入高能加速器的物理原理和工程技术问题的研究。

同步加速器是一种加速带电粒子的环形加速器。在加速器磁铁的磁极间，安放环形的真空管道。磁力线方向垂直于圆环平面。电子在加速器中做圆周运动。用高频电场反复地加速电子。

当时人们已经知道，相对论性电子在磁场中做圆周运动，会发出电磁辐射而损失能量。这是同步加速器中进一步提高电子能量的障碍。理论上曾定量地计算过这种辐射的光谱、角分布和偏振性。这些理论预言对后来的实验观测起了指导作用。

同步辐射是在调试同步加速器中的高能电子流时发现的。当时美国通用电气公司的波洛克(H. Pollock)小组正在调试一台能量 70 MeV ($1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$) 的电子同步加速器。这台加速器的电子轨道半径是 29.3 厘米。为了能从加速器外面观看真空室里电极的位置，加速器的真空室壁做成透光的。这就提供了直接用眼睛看到新的辐射的机会。调试中可使电子轰击加速器内的一个靶子，产生 X 射线。通过测量 X 射线的强度，能知道加速器中电子束流的大小。

有一次，在加速器运行时，加速器内曾断续发生过几次高压打火。小组里的一位技工，到屏蔽 X 射线的水泥墙角上，用反射镜看看加速器内部的情形。这个技工报告说，他见到里面有强的电弧，要赶快停机。但是，当时加速器的真空度一直很好，所以运行人员不相信是电弧。当他们一起再去观看时，看到里面有亮的小光点。使他们感到惊奇的是，即使去掉高电压，在短时间内还能看到这光点。所以他们肯定这不是电弧。但光点是从哪里来的呢？

他们进一步测量表明,这光点是迎着电子运动方向、沿着电子轨道的切线方向看到的。光点很亮,在白天眼睛也能看到它。光点的亮度随着电子束能量的增加而很快增大。如果电子束能量降低到 30 MeV 以下,就看不到光点了。

他们把电子能量固定在 70 MeV, 改变电子束流的大小, 看光点亮度的变化。当离开靶子 1 米远处的 X 射线强度每分钟 50 伦时(伦是 X 射线剂量的单位。1 伦的 X 射线可在 1 立方厘米空气中产生 2.08×10^9 对离子对), 这个光点很亮。如果减低电子束流的大小, 该处 X 射线减低到原来强度的 $\frac{1}{500}$, 即每分钟 0.1 伦时, 这个光点变弱了, 但是仍可以在白天看到它。

这样, 他们肯定了看到的光点是电子产生的辐射。他们认为, 当去掉高电压后, 在短时间内, 加速器里的电子束流仍在运动, 所以还能看到这光点。

为了检验光是偏振的理论预言, 他们再用偏振片观察光点。偏振片是有特征偏振化方向的, 只允许光矢量振动方向和这个特征方向平行的那些光波成分透过, 但会吸收光矢量振动方向和这个特征方向垂直的那些光波成分。当他们把偏振片转动了 90° 角, 就看不到光点。这有力地说明光是偏振的。

这个小组在 1947 年美国《物理评论》杂志上报导了他们观测的结果, 论文题目是“同步加速器中电子的辐射”。

(四) 宇宙同步辐射 人类从远古年代起就注视着星空。在我国, 有记载的天文历史已经有四千多年了。

在九百多年前, 太空出现过一次奇景: 一颗超新星爆发

了。我国古书《宋会要》上，曾详细地记载过公元 1054 年 7 月的这次特亮超新星事件，包括它的方位、颜色和光变曲线：“至和元年五月晨出东方，守天关，昼见如太白，芒角四出，色赤白，凡见二十三日”。

现在看到的蟹状星云，就是 1054 年爆发的超新星的遗迹。因为它形似螃蟹而被称为蟹状星云（见图 3）。它是无线电波的源，也是宇宙线高能粒子的源。

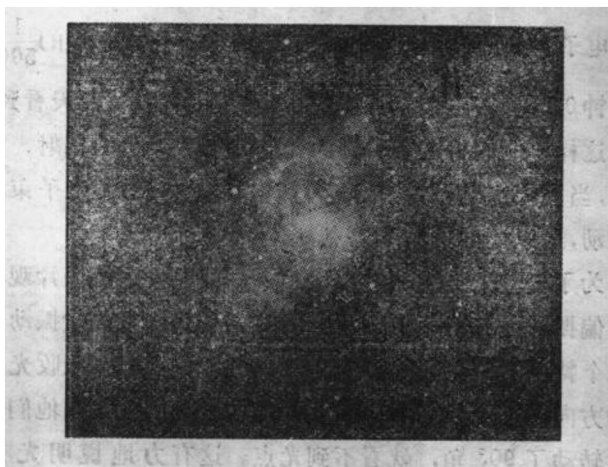


图 3 蟹状星云

天文学家们测量过蟹状星云中心部分发射的光，发现它有连续光谱。他们用蓝色滤光片和偏振片，对蟹状星云拍摄了照片。把偏振片分别放在互相成 90° 角的两种方位时，拍出两张照片上的图象不一样，这表示蟹状星云的光是偏振的。

在一张照片上，蟹状星云中的一些区域是亮的；而在另一

张照片上,这些区域却是暗的。还有些区域则正好与此相反。对这个现象的解释是:在蟹状星云里有局部的磁场和高能的电子,磁场对高能电子起到类似同步加速器的作用。高能电子在磁场中做曲线运动而放出同步辐射。在蟹状星云各个区域中的磁场强度和方向都不相同,因此从不同区域发出的同步辐射,它们的光矢量振动方向不同。这样,在上述两张照片上,就得到不同的图象。

在宇宙空间,普遍存在着磁场和高能电子。因此,宇宙空间中同步辐射是平常的现象,例如许多射电天体是同步辐射源,它们发出的同步辐射包含无线电波、红外线、可见光、紫外线、X射线和 γ 射线。人的眼睛能看到其中的可见光成分。因此,人类在实验室中产生同步辐射之前,早已看到了宇宙同步辐射。