



可见光外天文学

祥 邹惠成 徐春娴 编著



科学出版社

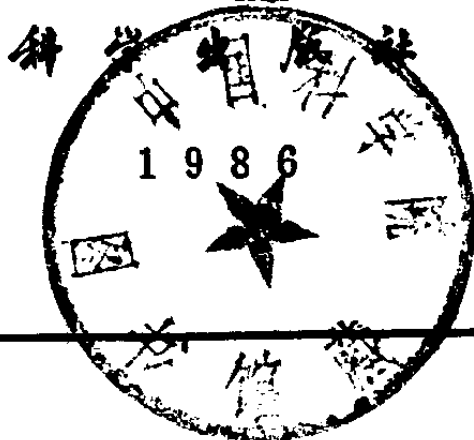
SS.324

540

861184

可见光外天文学

黄天祥 邹惠成 徐春娴 编著



一九八六年五月廿五日
33.03

内 容 简 介

可见光外天文学是近二十年来蓬勃发展的年轻学科。本书对可见光外天文学作了深入浅出的描述。书中依次介绍了红外天文学、紫外(远紫外)天文学、X射线天文学和 γ 射线天文学。对它们的诞生、发展、观测手段和主要发现都作了较详细的叙述。对于已经取得的成果给予现代天文学的重大影响和意义也作了论述。本书可供具有中等文化程度的广大青年和天文爱好者阅读,也是青年科学工作者的参考书。

可见光外天文学

黄天祥 邹惠成 徐春娴 编著

责任编辑 黎昌颢

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1986年6月第一版 开本: 787×1092 1/32

1986年6月第一次印刷 印张: 4 3/4

印数: 0001—1,900 字数: 106,000

统一书号: 13031.3183

本社书号: 4520·13—5

定价: 0.90 元

目 录

第一章 电磁波谱与大气外天文学	1
一、电磁波谱	1
二、地球大气与天文观测	18
三、大气外天文学产生的条件和价值	33
第二章 红外天文学	35
一、红外天文学的发展	35
二、红外天文学的重要意义	40
三、利用高空科学气球进行红外天文观测	42
四、球载红外望远镜	45
五、红外调制技术	48
六、红外探测器	49
七、红外天文工作的技术要求	54
八、红外天文观测的一些结果	56
九、红外天文卫星(IRAS)	65
第三章 紫外天文学	74
一、紫外天文学的发展	74
二、紫外天文学的观测技术	78
三、令人兴奋的发现	83
第四章 X射线天文学	90
一、X射线天文学的发展	90
二、X射线产生的机制	93
三、X射线探测器	101
四、X射线天文学研究现状	106
第五章 γ 射线天文学	124
一、 γ 射线天文学的简史和实验上的困难	124

二、 γ 射线的发射机制	126
三、 γ 射线探测器	129
四、 γ 射线天文学研究的现状	134
后记	146

第一章 电磁波谱与大气外天文学

一、电磁波谱

即使我们到了已经进入空间观测时代的今天，关于宇宙天体的各种知识仍然几乎都是从观测和分析天体的辐射而得到的。宇宙天体的辐射包括了电磁波谱的所有波段。一般地讲，天体的各种辐射与天体表面温度有相应关系。例如，大多数恒星表面温度是 4500—10,000 K（太阳表面温度是 6000K），辐射大部分在可见光区和红外区；更炽热的恒星所发射能量大部分在紫外区和 X 射线、 γ 射线波段，现已经发现很多这类辐射源；宇宙中还有很多表面温度很低的天体，辐射红外线在 90% 以上，现在已经发现 -203°C 的星云，早在六十年代就已探测到 2.7 K 宇宙微波辐射。

天文学家们都清楚，对天体辐射范围观测愈广，就愈能较全面地认识宇宙，将会解决更多的难题，所以天文学家总是努力把研究领域扩展到所有波段，这在今天已经成为现实，尽管有些还处于初始阶段。

1. 可见光的分解

盲人的痛苦，我们都能理解。他们看不见自己周围和自然界的一切，他们对于光是一无所知的。而人类没有生活于黑暗混沌之中，不能不感谢光对人类的帮助，但是人类一直到三百年前，对于光的本性同样是一无所知的。

开始探讨光的本性的第一个重要实验是牛顿进行的。1666年他在一间暗室里，让一束阳光通过窗帘上的小孔射入，斜照在玻璃三角棱镜的一个侧面上，光束经过两次连续偏折从棱镜的另一个侧面射出。牛顿想看看加强的折射会有什么变化，就让射出的光束照在一面白屏上。他惊异地发现：这束光不再形成一个白光点，而是散开成美丽的彩色光带，按红、橙、黄、绿、蓝、紫的颜色顺序排列。他又让光束进一步通过倒置棱镜，则这个彩色光带重新综合成白色光。他企图分解彩色光带的黄色光，结果发现是不可能的。

牛顿由此推断说，普通白光是几种不同的有色光的混合物，他把这条彩色光带称为“光谱”。这个发现不仅解释了虹的现象，还说明了早期伽利略折射望远镜出现色散缺陷的原因。

一块棱镜之所以能把各种颜色分开，是因为不同的颜色的波长不同，而不同的波长在玻璃中有不同程度的折射：波长越短，偏折越大。紫色光受到的折射最大，红色光折射最小。

现在我们知道，整个电磁波谱中可见光的范围从波长7600埃(红色光)至3900埃(紫色光)，一埃等于一亿分之一厘米，符号为 \AA 。

2. 赫歇尔的实验

1800年威廉·赫歇尔做了一个非常简单的实验，却获得十分有意义的发现。这个演奏风琴出身的科学家，重复牛顿的实验以后，在光谱的不同颜色区域各放置一根温度计，检测其温度有什么不同。他发现光谱红色区的温度计的水银柱升得高一些，但是当他把一根温度计(温度计的水银球被涂黑)放在光谱红色区域之外时，一个奇怪的现象出现了：这个没有光照射的温度计水银柱竟然升高了，而且超过了红色光区域

的温度。可以肯定，那里一定存在不可见的辐射。这种不可见的光线后来被称为“红外辐射”或“热辐射”。现在我们知道，太阳的辐射中有一半以上是红外辐射。

红外线在电磁波谱中，介于无线电微波与可见光红光之间，波长从 0.76 微米到 1000 微米。其中波长在 2.5 微米以下的是近红外区域，30 微米以上的为远红外区域。

3. 紫外光的发现

红外线的发现，自然引起人们这样的疑问：光谱紫色区外面是否也有看不见的辐射呢？但是温度计放在那里，一点变化都没有。

难道不存在紫外线吗？当然不是。那是什么原因呢？现在知道，紫外线不能穿透玻璃棱镜，而且太阳发射紫外线比红外线弱得多，同时，大气层将大部分紫外线吸收掉了。不过，紫外线还是很快被人类觉察到了。

1801 年，德国物理学家里特发现：硝酸银放在光谱的蓝色光和紫色光区域曝光以后，硝酸银会分解出黑色的金属银；如果把硝酸银放在紫色光已经消失不见的地方，它分解得更快。从而证实了紫外线的存在。

现在知道，紫外线的波长从 3900\AA 到 100\AA ，其中 1000\AA 到 100\AA 为远紫外区。

4. 赫兹的著名实验

电磁波的发现，是科学史上最令人振奋的事件之一。

1820 年丹麦科学家奥斯特发现电流的流动能产生磁场，法国的物理学家安培也独立地注意到这一现象。1831 年，法

国的法拉第用一块磁铁在一个电线回路内移动，回路内会感生电流；如果使一载流电路相对于另一电路移动的话，也会出现同样的现象。这一系列现象吸引了苏格兰的物理学家麦克斯韦，他运用数学进行理论研究，认为振动着的电荷或迅速交变的电流都会引起其周围电磁场以波的形式向外传播。1862年，他总结了电磁场的基本规律，预言电磁波的存在，并提出光本身就是电磁波的假说。

麦克斯韦死后不到十年，1888年，亨利希·赫兹用实验证实了他的预言。这个德国物理学家在实验室里将两个用空气隙隔开的金属小球接上高压交流电，使电荷交替地涌入两个小球；每当两个球的电势差最大时，就有电火花跳过空气隙。赫兹又用一根导线弯成环形，线的两端之间隔开一点，这样就成了一个简单的检波线圈。当两个小球之间出现火花时，如果能产生出辐射，那么就应该使检波线圈激起振荡电流，导线之间会出现小小电火花。赫兹果然看到了。

赫兹将检波器分别放在房间里不同的地点，根据火花较亮(波峰或波谷)和没有火花的地方(波峰与波谷之间的零值)求出了辐射的波长(60厘米至几米)。

1898年，意大利的马可尼最先利用这种辐射实现了英吉利海峡两岸的远距离通讯(45公里)，到1901年，无线电电波就已经能够飞越大西洋了(3700公里)。

这种电磁波就是无线电波，或称射电波。它们的波长范围从1000微米一直延伸到几十亿微米以上，因此被分为亚毫米波、毫米波、厘米波及微波、短波、中波、长波、超长波。不过，无线电波经常用频率来表示，“频率”就是每秒钟内所产生的辐射波的数目，用 f 或 ν 符号代表，单位为赫兹(1次/秒)、千赫(10^3 赫)、兆赫(10^6 赫)等。

5. 伦琴的意外收获

德国物理学家伦琴为了研究阴极射线的发光，曾进行了一系列的实验，却偶然地发现了一种神秘的辐射。

他当时为了使实验效果更好，把房间弄成暗室，并把阴极射线管装在一个黑纸板制成的盒子里。1895年11月5日这一天，当伦琴把阴极射线管电源接通时，突然发现屋子里有什么东西在发光。原来光是从一张涂有氰亚铂酸钡（这是一种能发光的化学药品）的纸上发出来的，难道是来自封闭盒子中的辐射使它发光的吗？伦琴断掉阴极射线管的电源，发光果然消失了，他再通上电，光又有了。当他把那张纸拿到隔壁的房间里，它仍然发光，说明阴极射线管发出的辐射是能穿透纸板和墙壁的。

我们现在知道，构成阴极射线的高速电子在碰到金属障碍物时会大大减速，这时所损失的动能就转变成轫致辐射。伦琴发现的射线就属于这一类辐射，但是他当时不知道，所以只好把它称为“X射线”，德国人称为“伦琴射线”。

X射线的波长范围在 100\AA 至 0.01\AA 之间，其中软X射线波长从 1\AA 到 100\AA ， 0.01\AA 到 1\AA 的波段为硬X射线。

6. 走运的贝克勒尔

X射线的发现，引起了物理学家的极大重视，企图发现新射线的浪潮几乎席卷所有的实验室。结果仅在几个月内，就发现了放射性，打开了原子内部的世界。

1896年，正在研究磷光现象的法国物理化学家贝克勒尔，

猜测磷光物质是否也能产生类似X射线的辐射。他曾检验了所有的磷光和荧光物质，但都看不到这种效应。可是后来当他把少量的醋酸铀晶体放在包着黑纸的照相底片上面时，却意外地发现不该有变化的底片发生了曝光，这说明什么呢？这只能说明：铀盐能发出某些与X射线完全不同的不可见的穿透辐射，因而引起曝光，因为可见光线不能穿过黑纸。

用这样的简单方法得到重大的发现，在科学发现史上并不是罕见的。据说，当时有位研究人员早已看到了这个现象，但是他只得出不能放在一起的实用结论。看来，缺乏好奇精神的研究，是不会有发现的。

这些贯穿辐射中包括有 γ 射线。现在知道， γ 射线波长在电磁波谱中 0.1\AA 开始，一直渗透到宇宙线辐射的波长部分。

X射线和 γ 射线的表示，有时用能量而不用波长。波长 10\AA 的能量为1000电子伏（用keV表示）；波长 0.01\AA 的能量为1兆电子伏（用MeV表示），大于这个波长（即低于这个能量）为低能 γ 射线；波长 10^{-5}\AA 的能量为1千兆电子伏（用BeV或GeV表示），低于这个能量的为中能 γ 射线，高于这个能量的为高能 γ 射线；超过1百万兆电子伏（用TeV表示）的是超高能 γ 射线。它们的关系是：

$$\begin{aligned} 1\text{TeV} &= 10^3\text{GeV} \\ &= 10^6\text{MeV} \\ &= 10^9\text{keV} \\ &= 10^{12}\text{eV} \end{aligned}$$

这里说明一下：一个电子通过电势差为1伏特的电场时所获得或减少的能量为1电子伏特（用eV表示）， $1\text{eV} = 1.602 \times 10^{-12}$ 尔格，相当于波长 10^4\AA 辐射的能量。

7. 电磁辐射的性质

二十世纪以前，对于光的性质的争论，主要是惠更斯、麦克斯韦提出的光的波动说与牛顿认为的光的微粒学说的争论。争论几起几落，谁都不能立于不败之地，因为两种学说都不能完全解释光的各种现象。后来德国科学家德布罗意首先提出波粒二象性的理论。他认为：一切微观粒子都具有波粒二象性，粒子的质量或能量越大，波动性愈不显著，反之亦然。

今天现代物理学已经建立了量子力学的基本理论，来解释包括电磁波在内的微观粒子运动规律。现在，我们需要进一步了解。

光子与物质的相互作用

(1) 光电效应 物质由原子组成，原子有一个密实的核心——原子核，核外有“卫星”似的电子。1913年丹麦物理

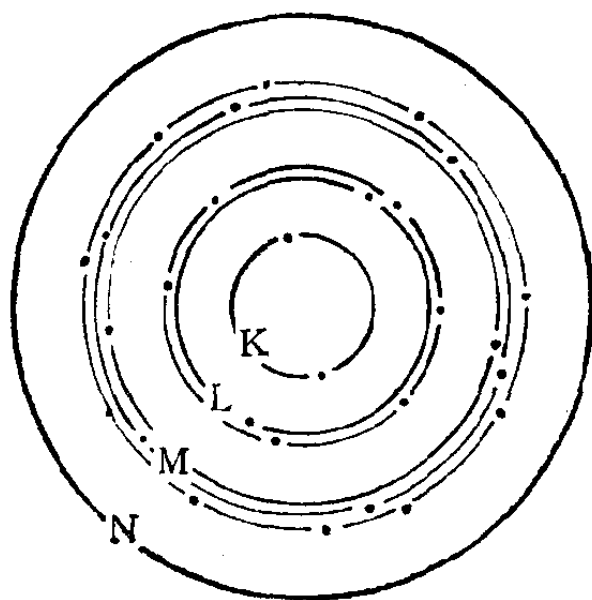


图 1.1 原子核及不同壳层的轨道电子

本书有些图中的外文字母该排斜体而排成正体了，特此说明——编者。

学家玻尔提出了原子结构的两个基本假说：原子中的电子各按一定轨道绕原子核运动，电子运动的动量矩等于 $h/2\pi$ 的整数倍时，轨道才是稳定的（ h 为普朗克常数： 6.626176×10^{-27} 尔格·秒）。在每一稳定轨道中，电子具有一定能量，这些不连续的能量值组成原子的各个能级。而当电子从能量为 E_n 的能级跃迁到另一个能量为 E_m 的能级时，将发射或吸收一定频率的光子，频率值为 $|E_n - E_m|/h$ 。有人曾用电子壳层简单形象地描述原子内部电子的分布状况。

当一个光子与原子碰撞时，有可能把它的全部能量交给一个轨道电子，使这个电子脱离原子核的束缚跑出来。因这种光电作用而跑出来的电子叫光电子。电子在原子核里结合得越紧，因光电作用逃逸的几率越大，所以光电子大都来自内层轨道电子。跑出来的光电子能量为 $E_{\text{光电子}} = E_{\text{光子}} - \mathcal{E}_{\text{束缚能}}$ （ $E_{\text{光子}}$ 表示光子的能量， $\mathcal{E}_{\text{束缚能}}$ 表示原子对电子的束缚能）。

理论上已算出光电作用的截面如下：

当 $h\nu \ll m_e c^2$ 时，

$$\sigma_{\text{光电}} = \frac{8\pi}{3} r_e^2 \frac{Z^5}{137^4} 4\sqrt{2} \left(\frac{m_e c^2}{h\nu} \right)^{7/2}$$

当 $h\nu \gg m_e c^2$ 时，

$$\sigma_{\text{光电}} = \frac{8\pi}{3} r_e^2 \frac{Z^2}{137^4} \frac{3}{2} \left(\frac{m_e c^2}{h\nu} \right)$$

其中 r_e 为电子经典半径， $r_e = 2.8 \times 10^{-13}$ 厘米

$m_e c^2$ 为电子静止能量， $m_e c^2 = 0.511$ 兆电子伏

Z 为靶物质的原子序数 $h\nu$ 为光子能量。

从上面公式可以看到：对于低能光子或重元素靶，光电效应是光子损失能量的主要方式。

这里需要说明截面的概念。截面代表一个光子或其它粒子与一靶物质发生某种作用的几率，记作 σ ，它有面积的量

纲。直观的可以认为在一单位面积只含一个原子的靶上，只要入射粒子落在面积 σ 上，就发生了作用，所以作用的几率为 $\sigma/\text{厘米}^2$ ，所以 σ 是几率的直接量度。从图 1.2 中可以看到，K 壳层上的一个电子吸收了光子的能量成为一个光电子。

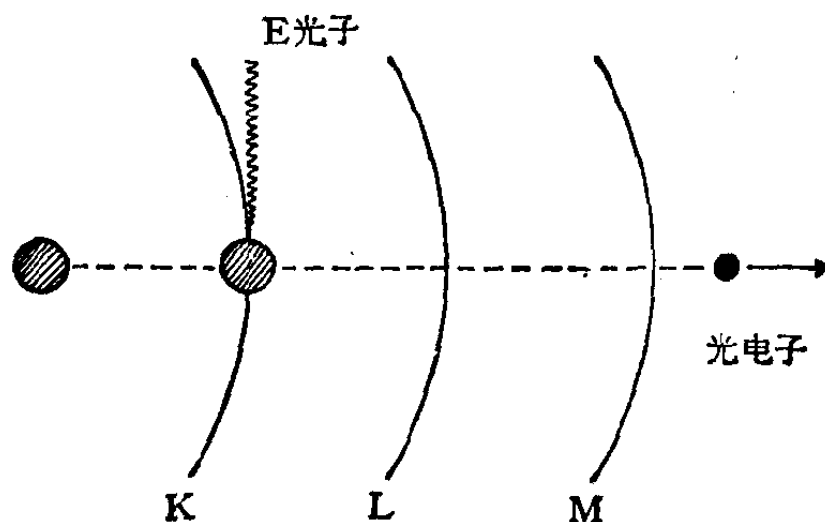


图 1.2 光电效应示意图

(2) 康普顿效应 康普顿作用是入射光子和原子中的一个电子的弹性作用。光子作为一个粒子与电子碰撞，其结果，光子把能量的一部分交给了电子，自己改变了能量和方向飞出。一般认为，碰撞前轨道电子是静止的，碰撞后沿某一方向运动。碰撞后光子的能量由下式给出：

$$E'_r = \frac{E_r}{1 + \frac{E_r}{m_0 c^2} (1 - \cos\theta)}$$

其中 E_r 为碰撞前光子的能量， E'_r 为碰撞后光子的能量， θ 为散射后光子与原来方向的夹角。

经量子力学计算给出康普顿散射截面公式，也叫克莱因-仁科公式，

$$\sigma_{康} = 2\pi r_e^2 \left\{ \frac{1+\alpha}{\alpha^2} \left[\frac{2(1+\alpha)}{1+2\alpha} - \frac{1}{2} \ln(1+2\alpha) \right] + \frac{1}{2\alpha} \ln(1+2\alpha) - \frac{1+3\alpha}{(1+2\alpha)^2} \right\}$$

其中 $\alpha = \frac{E_r}{m_e c^2}$ 。

当 $\alpha \gg 1$ 时,光子的能量比电子的静止能量大很多,截面公式变为

$$\sigma_{康} = \pi r_e^2 / \alpha \left(\ln Z\alpha + \frac{1}{2} \right)$$

由此式可知,在光子能量较高时,发生康普顿作用的几率随光子能量的增加而减少。

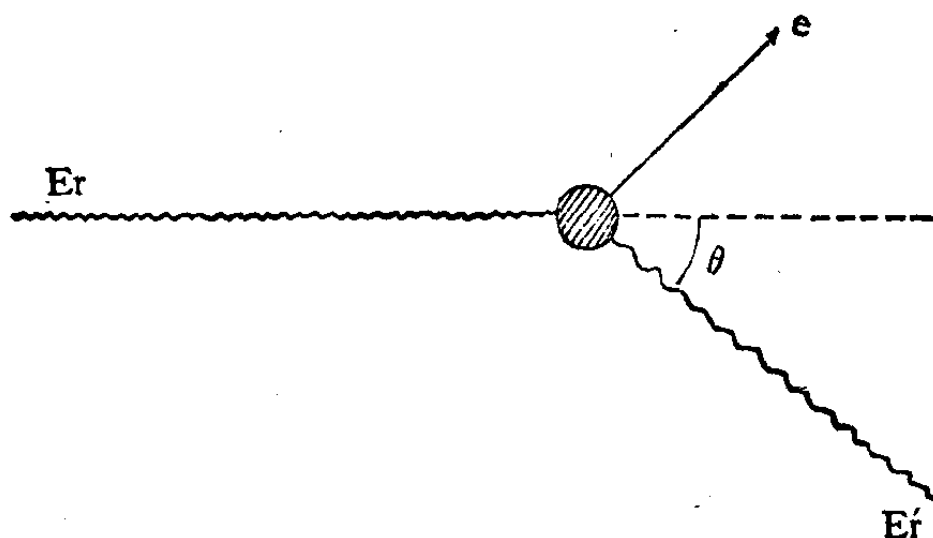


图 1.3 康普顿散射示意图

(3) 电子对的生成 光子在原子核附近,只要光子的能量大于两个电子的静止质量(1.02 MeV/c),则光子就有可能生成正负电子对,而光子本身则整个地消失了。如果是在轨道电子的库仑场中,则需要有大于 4 个电子的静止质量才可能生成正负电子对。以下只考虑在核库仑场中的电子对产生。理论上计算出电子对产生的截面是

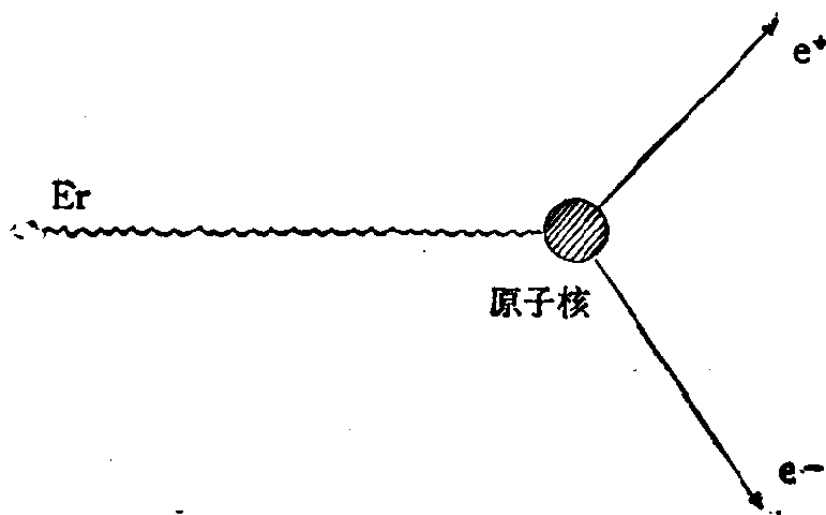


图 1.4 电子对产生示意图

$$\sigma_{\text{对}} = \frac{Z^2}{137} r_0^2 \left(\frac{28}{9} \ln \frac{183}{Z^{1/3}} - \frac{2}{27} \right)$$

最后要说明的是,对于一个给定的物质靶,随着光子能量的不同,上面三种过程的发生几率各不相同。图 1.5 显示出光子作用于铅中时这三种作用的几率随光子能量的变化情况。大体的趋势是:光子能量低时,以光电效应为主;光子能量极高时,以电子对产生为主;光子能量中等,则以康普顿效应为主。

在图 1.6 中纵坐标为吸收物质的原子序数 Z , 横坐标是

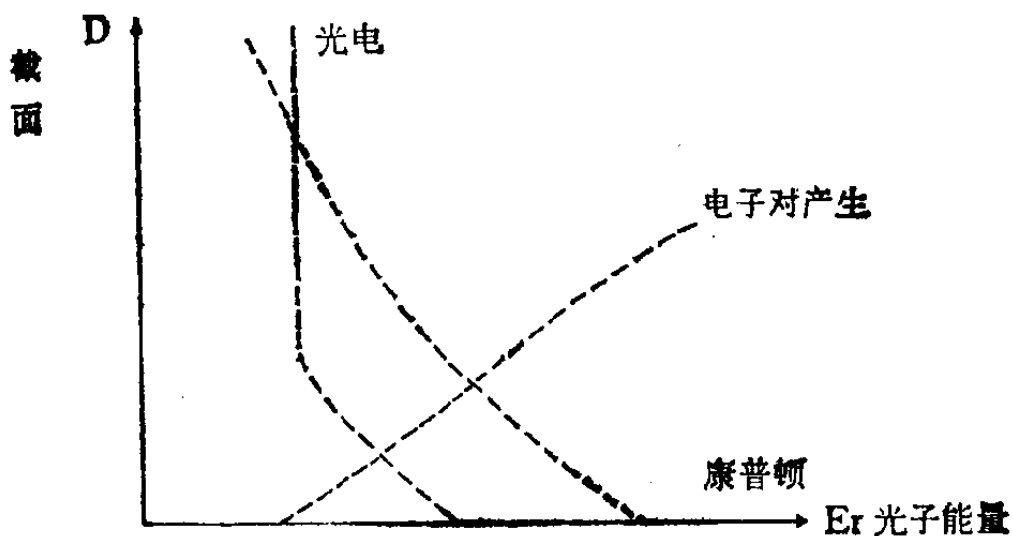


图 1.5 光子在铅中的作用截面随能量的变化

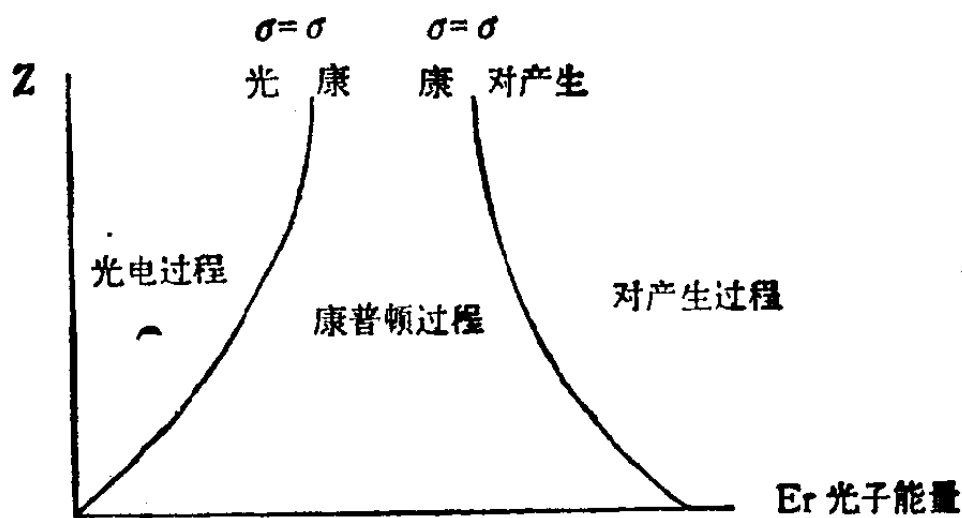


图 1.6 光子作用截面与靶物质的关系

光子能量 E_γ 。两条实线分别是

$$\sigma_{\text{光电}} = \sigma_{\text{康}} \text{ 和 } \sigma_{\text{康}} = \sigma_{\text{对}}$$

光子在传播中的吸收

(1) 星际气体的吸收 前面已经讲到，当光子经过物质时，由于光电效应、康普顿效应和电子对产生三种作用，使得光子的强度衰减，即当一束光子通过一厚度为 x 的物质时，强度由 I_0 衰减到 I ，

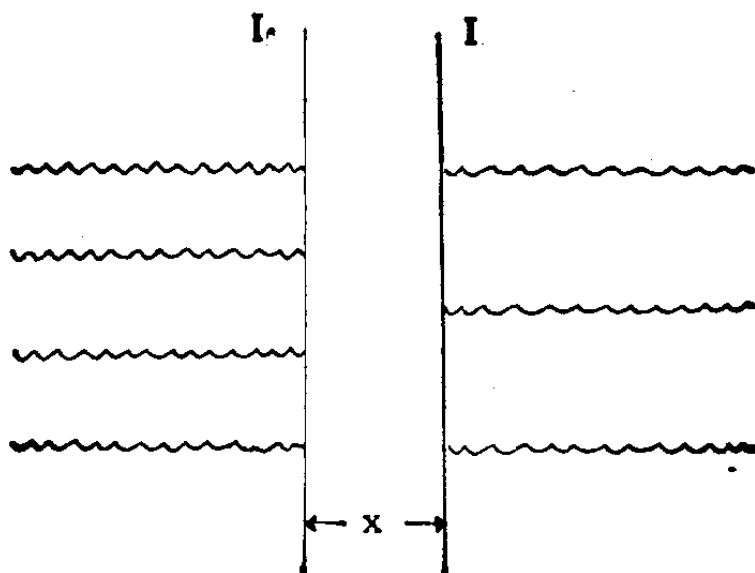


图 1.7 光的吸收