

辐射物理及其应用

丁声耀

(中国原子能科学研究院 计量测试部, 北京 102413)

摘要: 文章介绍了辐射物理所研究的领域及特点, 各种辐射源及所发射粒子与物质相互作用的特点, 主要辐射量的物理意义, 并指出辐射物理技术在科学研究、工业、航天和医学等诸多领域的应用。

关键词: 辐射物理; 辐射量; 辐射源

中图分类号: TL571.436

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2004)S0-0075-05

Radiation Physics and Application

DING Sheng-yao

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-20, Beijing 102413, China)

Abstract: Description of radiation physics is given to its research area and feature; a variety of radiation sources and their characteristics; the meaning of quantifying radiation. The emphasis is on the technology application in academic research, industry, aerospace and medicine.

Key words: radiation physics; quantifying radiation; radiation sources

1 辐射物理简介

辐射物理所研究的领域有别于原子物理、核物理、粒子物理和材料科学, 这些学科所研究的对象均集中于物质的性质, 而辐射仅作为一种探针。辐射物理的着眼点刚好相反: 着重于辐射, 而物质则起探针的作用。

这里所说的辐射既可来自自然界, 也可来自人工制造。天然辐射源包括空间辐射, 岩石中的氡和铀以及人体和别的有机体中的微量放射性等。人造放射源包括各种放射性同位素、加速器产生的各种射线, 如 X 射线, 各种离子束流等, 还有核反应堆和核武器所产生的链式反应。

辐射物理在科学研究、工业、航天和医学等诸多领域都有广泛的应用。例如, 一些特殊用途的机械、材料和器件均须经受高辐射剂量。在治疗癌症时, 辐照的束流必须精确地产生和控制。因此, 在辐射生物学领域中从事辐射的生物组织效应研究时, 其工作人员通常由辐射物理的专家来承担^[1]。

辐射效应是辐射物理的一个重要分支。辐射在物质中沉积能量, 这些能量又在原子和分子中以各种方式分配。辐射粒子可以把原子激发到更高的能态或者使它们移动。辐射物理的中心围绕着光子或粒子与固体、液体和气体的相互作用。能量的初级传递尽管很复杂, 但已被很好地了解; 但能量与物质相互作用的次级

收稿日期: 2004-04-15; 修回日期: 2004-05-12

作者简介: 丁声耀(1937—), 男, 江西上饶人, 研究员, 核物理专业

过程则更复杂,除了少数情况如电子束引起硅中原子移动外,大多数情况人们尚未很好理解。

辐射物理在技术方面的应用很广泛。测量辐射的仪器如剂量计和计数器已经广泛使用,预防材料的电性能和光学性能变坏也是一个重要方面(辐射加固)。在某些情况下,有控制的辐照还可以改善产品的质量。例如,食品保鲜和使塑料变得更坚韧常常通过射线或电子辐照产品来达到,还可以用辐射去污,给医疗器械消毒等。

辐射物理还有一个相当重要的应用领域是在犯罪学中的非侵犯性审问。机场、港口也应用放射性对旅客的行李进行非破坏性检查。放射性还可用来探伤、测厚,在工业上应用越来越广泛。

2 辐射源

术语“辐射”所考虑的能量范围为 $1 \text{ keV} \sim 100 \text{ GeV}^{[2]}$ 。大多数感兴趣的辐射能量在 1 keV 以上,但能量低得多的中子仍然作为辐射粒子,原因是这种能量的中子仍会产生很强的辐射效应(如热中子),紫外光子也有足够的能量,引起与 X 射线或高能光子所起的化学效应。

2.1 光子

具有能量为 keV 到 MeV 范围的光子(X 和 射线)能够穿透深度物质,当被吸收时,会产生强的效应。当电子束打击物质时会产生 X 射线。X 射线通常通过强流电子束打击金属靶产生。应用于 X 射线结晶学研究的光子能量为 $5 \sim 30 \text{ keV}$,产生金属原子光谱加韧致辐射连续谱。对于显像和辐照,能量通常要扩展到 3 MeV 。有些高能研究可采用同步辐射和直线加速器产生,其光子能量一直到 GeV 范围。

射线是单指原子核在蜕变过程中产生的光子。目前工业、农业中应用最广泛的是 ^{60}Co 射线源。

近年来,同步辐射已成为研究和分析应用中的主要光子源。产生的光子能量从几十 eV 到 100 keV ,主要优点是光子强度大,能量单色性好,利用可见光或紫外光的强激光束与从加速器产生的 GeV 能量的电子碰撞,可以泵浦从 eV 直到 MeV 能量的激光。

2.2 中子

核裂变和核聚变反应是主要的中子源,裂变所产生的初级中子能量大都在 1 MeV 以上,而聚变主要产生 14 MeV 的中子。中子与物质作用,其能量逐渐降低,可以得到热中子和冷中子。快中子与物质碰撞时会造成很大的辐射损伤,而热中子则往往产生更多的放射性,中子处于低温状态时,具有长而有效的波长,这在表面物理和固体物理研究中(如中子散射)是很有用的工具。

3 与物质相互作用

辐射与物质的作用是指辐射被减弱和在吸收过程中所产生的放射性,这里主要描述光子和中子与物质的作用及有关的定律。

3.1 光子(包括 X 射线、射线、韧致辐射)

光子是一种电磁波,它比可见光波长更短,能量更高,但在真空中速度相同。光子也可当作粒子看待,它所具有的能量 E 与波长 λ 存在倒数关系^[3]。

$$E = 12\,398.42/\lambda$$

因为是粒子,在散射和吸收过程中,光子可以把动量传递给带电粒子,如电子。在通常考虑的能量范围内,光子具有很强的穿透能力。对于每种元素,物质与入射光子的作用几率可以看成光子能量与物质的原子序数 Z 的函数,主要有 4 种作用过程:光电作用、康普顿散射(非弹性)、Rayleigh 散射(弹性)和电子对产生。此外,还存在几率更小的如光核反应。

1) 光电吸收()

在这一相互作用中,光子完全被原子所吸收,并打出一个电子,对于这一过程的原子电子壳层或者次壳层,光子的能量 $h\nu$ 可比电子壳层或次壳层的束缚能 B 更大,打出的电子所得到的动能为 $h\nu - B$ 。对于给定元素, B 的最大值是在最内层的 K 壳层, B 的能量范围从 13.598 eV ($\text{H}, Z = 1$) 到高 Z 元素,如 $\text{Pb} (Z = 82)$, B 值为 88.005 eV 。从核最内层向外, L 壳有三个次壳,即 L_I, L_{II} 和 L_{III} ,每次壳的 B 略有不同,这些不同的 B 值使得光电效应截面与入射光子能量形成“锯齿形”的特征曲线。虽然光子能量刚好在这些“锯齿”吸收边(阈)的上面会显示精细结构,但一般在医学或辐射屏蔽设计中都忽略这种次级影响;然而 EXAFS(X 射线吸

收精细结构)方法是一种重要的分析工具并得到了广泛的应用。

对于低能光子,光电效应()是主要的作用过程。

2) 康普顿散射(inc)

这一相互作用也叫做非相干或非弹性散射,仅仅是光子能量的一部分传递给电子。由于碰撞引起散射的光子和电子的能量与飞行方向由偏转的光子和反冲电子的动量与能量守恒来决定。偏转光子的能量 E 与入射光子能量 E 存在下述关系:

$$E = E/[1 + (E/mc^2)(1 - \cos \theta)]$$

式中: $mc^2 = 0.511 \text{ MeV}$, 是电子(或正电子)的静止质量能量; θ 是散射光子的偏转角度。

上式也可写成光子波长移动的形式:

$$\lambda - \lambda_0 = 1 - \cos \theta$$

式中: λ 和 λ_0 分别是以康普顿为单位的偏转和入射光子的波长。

$$\lambda - \lambda_0 = mc^2/E = 0.511/E$$

可看出,波长的最大移动是二个康普顿单位,当光子反射角 $\theta = 180^\circ$ 时,不管入射光子能量 E 有多大,其反射光子能量 E 不会超过 $\frac{1}{2} mc^2 = 0.2555 \text{ MeV}$ 。

从几十到几百 keV 一直到几 MeV,康普顿散射(inc)是主要作用过程。对于低 Z 元素有最宽阔的范围。

3) Rayleigh 散射(coh)

这一相互作用称作相干或弹性散射,光子是被原子电子云作为一整体散射的。与电子相比较,核子要重得多,整个原子反冲时,根据能量与动量守恒定律,偏转光子所遭受的能量损失或者波长的改变是可以忽略的。

Rayleigh 散射对于光子能量在 γ 射线范围内,其光子角分布在光子的前进方向有尖锐的峰,偏转光子的能量损失可以忽略。但在低能光子(4~40 keV),在 X 射线晶体学研究中,当光子波长与晶体中原子间的晶格空间可以比较时,这种效应变得相当重要。由于在入射和偏转光子之间的相干引起晶体层散射波的干涉,使得不仅对无机晶体材料,而且对生物结构如 DNA 的研究成为可能。

4) 电子对和三产生(Kn 和 Ke)

对于能量超过 2 个电子静止质量能($2mc^2 = 1.022 \text{ MeV}$)的光子能够引起这类相互作用。光子和带电粒子的静电场作用时,光子消失同时在该位置产生一个正负电子对(e^-, e^+),当入射光子能量超过 1.022 MeV 时,剩下的能量由电子和正电子以所携带的动能分配。

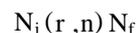
如果参与这一相互作用过程的靶带电粒子是一个原子电子,则靶带电粒子朝前方向反冲,与所产生的电子-正电子对一道,有 3 个质量相同的粒子($2e^-, e^+$)共同分享剩余光子的能量作为动能,这就称三产生(Ke)。

电子对产生的几率近似地正比于靶粒子电荷的平方。因此,在原子核场中,电子对产生的截面随 Z^2 变化;而三产生的截面简单地随 Z 而变,对于氢原子($Z = 1$),当光子能量高于电子对阈时, Ke 和 Kn 截面近似相等。但对于高 Z 元素, Ke 与 Kn 之比 = $Z/Z^2 = 1/Z$ 。

在几个 MeV 以上,光子和原子相互作用时,电子对和三产生是占优势的过程。

5) 光核吸收(ph,n)

光核吸收的阈能在 5 MeV 或更高,这种过程类似于原子光电效应,但在这一过程中光子为原子核所吸收而不是由围绕核转动的壳层电子,光核吸收一般会引起单个中子的发射:



式中, N_i 、 N_f 分别是靶核和产物核。

除了发射一个中子以外,发射带电粒子、射线和多于 1 个中子的几率也存在。光核吸收最显著的特点是“巨共振”。对于轻核,吸收截面的中心约在 24 MeV。随着靶核质量数增加,中心能量减小,最重的稳定为 12 MeV,巨共振的宽度(相应于半最大高度截面的能量差)随靶核而变化,大约为 3~9 MeV。

即使是共振峰,光核截面比前面提到的光电截面要小,它对总截面的贡献小于 10%,然而在辐射屏蔽设计中,光核吸收很重要,因为所发射的中子比入射的光子在重核中具有更大的穿透性。在辐照技术中引起的放射性显得更重要。

6) 总截面(tot)和质量衰减系数(μ/ρ)^[4,5]

对于给定的物质和给定的光子能量,总光子相互作用截面 σ_{tot} 是下列分截面之和:光电

效应截面,非相干(Compton)和相干(Rayleigh)散射截面 μ_{tot} 和 μ_{coh} ,电子对和三产生截面 μ_{Kn} 和 μ_{Ke} ,以及光核反应截面 $\mu_{\text{ph,n}}$ 即:

$$\mu_{\text{tot}} = \mu_{\text{inc}} + \mu_{\text{coh}} + \mu_{\text{Kn}} + \mu_{\text{Ke}} + \mu_{\text{ph,n}}$$

对6个分截面,在入射光子的不同能量区间,其重要性也不同。

目前光核截面 $\mu_{\text{ph,n}}$ 还没有系统的编纂和图表,因为作为稳定元素的各种同位素的质量 A 和原子序数 Z 相应的核结构存在不规则变化的复杂关系。因此,尽管在5或10 MeV以上光子能量在生物和技术应用中很重要,但这类数据在系统的X射线衰减系数和能量吸收系数数据的表格中仍然找不到,目前能够提供的质量衰减系数 $\mu/$ 由下式构成:

$$\mu/ = (\mu_{\text{inc}} + \mu_{\text{coh}} + \mu_{\text{Kn}} + \mu_{\text{Ke}}) / (uA)$$

式中: $\mu/$ 的单位是 cm^2/g , $u = 1.66 \times 10^{-24}$ g,是原子质量单位,即碳原子质量单位的1/12。

7) 质量能量传递系数 $\mu_{\text{tr}}/$ 和质量能量吸收系数 $\mu_{\text{en}}/$ 对于计算一给定点在一吸收介质中由于光子通量经过该点时的能量传递系数 $\mu_{\text{tr}}/$ 和质量能量吸收系数 $\mu_{\text{en}}/$ 是很有用的量。除了在碰撞处以带电粒子动能形式的整个光子的能量沉积以外,这些系数还可以计算从碰撞点出发的次级辐射在碰撞处的能量损失。用以计算空气比释功能(Kerma)的质量能量传输系数 $\mu_{\text{tr}}/$ 定义为:

$$\mu_{\text{tr}}/ = (f_{\text{inc}} \mu_{\text{inc}} + f_{\text{Kn}} \mu_{\text{Kn}} + f_{\text{Ke}} \mu_{\text{Ke}}) / (uA)$$

式中: f 是入射光子在每一种相互作用中在碰撞点除了以带电粒子的电离、激发和动能形式保留的那部分能量外,其余的以康谱顿散射光子、光电吸收的荧光光子、湮灭辐射的形式跑掉的那部分能量,相干(Rayleigh)散射由偏转光子所损失的能量可以忽略,所以, $\mu_{\text{tr}}/$ 不包括 μ_{coh} 。质量能量吸收系数 $\mu_{\text{en}}/$ 表示为:

$$\mu_{\text{en}}/ = (1 - g) \mu_{\text{tr}}/$$

式中: g 是在光子与介质碰撞中所产生的光电子,Compton电子,对和三电子等全部带电粒子的平均韧致辐射的产额分量。

3.2 中子吸收机制

中子不带电,因而它很容易与带正电的原

子核作用以产生各种吸收过程;但这种作用的几率很低,故中子被看成具有强穿透力的辐射。在弹性散射中,中子使原子核移动而损失部分能量,对于低原子质量特别是氢核,碰撞时这种能量转移相当可观。所以含氢材料是中子有效的屏蔽和探测材料。在和含氢材料如聚乙烯和水的弹性碰撞中会产生含相当能量的质子。

中子在室温下与介质材料大量碰撞之后,其能量降到0.025 eV量级,与固体中原子在室温下的平均振动能平衡,成为热中子,如果固体冷却到室温之下,可以产生更低能量的中子,即冷中子。冷中子在材料物理中很有用,如美国国家标准技术研究院在反应堆中产生晶格温度的中子,由于其有效波长很长,对进行表面物理的研究很有价值。

热中子被原子核俘获,引起核的激发和射线发射并产生新的同位素,如果中子的吸收产生更多的中子,可能产生链式反应,特别是铀元素吸收中子而引起裂变时,会释放巨大的能量。

3.3 电子(射线)吸收^[5]

电子通过碰撞转移其动能有二种主要方式:产生原子的电离或激发,产生韧致辐射。还有第3种方式,切连科夫效应,在能量沉积中起次要作用,但在透明介质的折射中起重要作用。

1) 碰撞

电子通过与物质中原子的碰撞逐渐损失能量,这些能量为别的电子(称为次级电子)所带走。有时,原子由于经受碰撞而在原来的晶格位置附近移动,在固体中留下缺陷。次级电子再次碰撞后,产生电子-空穴对或电子-离子对(与介质有关)。在液体或气体中,电子-离子对产生复杂的径迹,产生强电离中心和小刺,叫做delta射线。

2) 电磁辐射(韧致辐射)

高能电子在核的库仑场(静电场)偏转或减速时所产生的光子叫韧致辐射(德文bremsstrahlung,是指“制动”辐射),电子-电子也能产生韧致辐射,但几率很小,薄靶韧致辐射的能量和角分布可用Schiff方程描写,X射线机产生宽的连续谱用于显影和治疗照射,电子直线加速器和另外的高能加速器所加速的高能电子打到重元素韧致辐射转换靶上用于肿瘤的放射

治疗。

3) 切连科夫辐射

光在真空中的传播速度是常数 c 。然而,如果透明介质其折射系数 $n > 1$,那么,光在这种介质中其传播速度就降低到 c/n 。若某种高能粒子以 $v = c$ 速度传播,如果 $v > c/n$,那么,我们可以说这种粒子在介质中“传播比光还快”。切连科夫在 1934 年首先实验观察到这种现象,接着 Frank 和 Tamm 用麦克斯韦理论加以解释。当一种带电粒子在介质中以超过光的速度传播时,会发射范围在光波波长内的光辐射。这种光就叫切连科夫辐射,它形成具有干涉光环的圆锥的轴与带电粒子的传播方向重合,类似于超音速飞机产生的冲击波。光传播圆锥孔的张角 θ 为:

$$\cos \theta = 1/n$$

式中: v 是粒子的速度和真空中光速之比; n 是介质的折射系数。

在水慢化和屏蔽研究反应堆中,可以看见核燃料元件,水中围绕燃料元件周围奇异的蓝光就是切连科夫辐射,大多数来自自由高能射线引起的康普顿电子。

3.4 质子辐射吸收^[6]

质子主要与原子的电子作用,因此,它们的效应包括生物效应与 X 射线作用相类似,但是它们的深度剂量曲线是很不同的。如 200 MeV 质子在水中所显示的深度剂量曲线,有如下的特征,相对低的入射剂量坪区域,跟着在射程的终端有很尖锐的剂量峰(布拉格峰),在布拉

格峰的后面是尖锐的切割,质子及其剂量不会进入物质的更深的内部。质子散射很小,横向的剂量切割很干净,所以放射性治疗癌变时,如果与肿瘤连接的重要组织需要保护,用质子束可以做到针对性辐照,避免周围不必要的伤害。

参考文献:

- [1] Greening J.R. Fundamentals of Radiation Dosimetry [M]. U.K., Briston: Adam Hilger Ltd, 1981. 96 ~ 115.
- [2] Knoll G.F. Radiation Detection and Measurement (3rded) [M]. USA, New York: Wiley, 2000. 581 ~ 639.
- [3] Hubbell J.H. Photon Mass Attenuation and Energy Absorption Coefficients From 1 keV to 20 MeV [J]. Int J Appl Rad Isotopes, 1982, 33(11): 1 269 ~ 1 290.
- [4] Seltzer S.M. Calculation of Photon Mass Energy Transfer and Mass Energy Absorption Coefficients [J]. Rad Res, 1993, 136(2): 147 ~ 170.
- [5] Hubbell J.H. Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition, Volume 13) [M]. USA, New York: Academic Press, 2002. 561 ~ 574.
- [6] Harima Y. An Historical Review and Current Status of Buildup Factor Calculation and Applications [J]. Rad Physics Chem, 1993, 41 (4/5): 631 ~ 672.