

8

核工程丛书

核辐射测量

J. 歇普著 錢景华等译

內 容 提 要

本书系“核工程丛书”的第八册,书中介绍了探测器的基本物理原理,主要内容包括:辐射与物质的相互作用,探测器的一般考虑,辅助仪器,特定辐射探测器的应用等。本书适宜于学习核物理和核工程的学生及从事放射性同位素应用的读者阅读。

Nuclear Engineering Monographs
NUCLEAR RADIATION MEASUREMENT

J. Sharpe

Temple Press Limited

核工程丛书(8)

核 辐 射 测 量

钱景华 等译

上海科学技术出版社出版 (上海瑞金二路450号)
上海市书刊出版业营业许可登记证 093号

商务印书馆上海厂印刷 新华书店上海发行所发行

开本 850×1156 1/32 印张 2 16/32 排版字数 60,000
1964年11月第1版 1964年11月第1次印刷
印数 1-3,000

统一书号 13119·604 定价(科六) 0.40 元

序

核輻射探測的內容可按照所採用的篇幅作各種不同的處理。本書的範圍很小，我們已把注意力集中於探測器操作的基本物理原理上，對於構造技術方面則較少注意。話雖如此，我們仍然劃出一章簡略地評述有關的電子學裝置，因為這些裝置都是為達到有效探測所必須配備的。

本書的一部分內容是根據《核工程》期刊上已發表的幾篇論文編寫的，我感謝該期刊的出版社給予轉載圖表的便利。有關光電倍增管和閃爍計數器的幾節內容，曾經和我的同事湯姆遜 (E. E. Thomson) 博士和歐文 (R. B. Owen) 先生討論了好多次，在此一并致謝。

J. 歇 普

1959 年 6 月

目 录

序

第一章 緒論.....	1
第二章 輻射与物质的相互作用.....	3
第三章 探测器——一般性的討論.....	27
第四章 輔助仪器.....	48
第五章 特定輻射探测器的应用.....	55
参考文献.....	69
索 引.....	73

第一章 緒 論

基本粒子和高能量子在低于致死剂量时，往往不能为人们直接感觉，因而已设计出各种类型的仪器以记录它们的踪迹，并提供有关其能量、数目及性质方面的定量资料。

这些探测器有两大类：一类是“被动器件”(passive elements)，只要它们一受到辐射照射就把信息贮存起来，但必须进行检查后才能取得资料(例如照相乳胶)；另一类是“主动器件”(active elements)，它能产生指示出辐射存在的电讯号(例如盖革计数器)。但是不管探测器本身的工作方式如何，第一个要求必须是核辐射应将其能量的一部分在灵敏的器件内消散掉。这部分能量，本来是归属于单个原始粒子的，那时将分布在相当范围的探测介质内，并且引起在宏观尺度上可进行观察的一些事件。在某些情况下，这些事件引起电离，并由电场把正负离子分开而产生可放大和记录的信号。在另外一些情况下，粒子的能量用来产生许多光量子，它们能被光电管的介质加以记录。在许多“被动”探测器中，应使其能引起一种永久的化学或物理变化，例如在照相乳胶的卤化银微小晶粒中所发生的变化或在某些化学剂量计中所发生的变化。

核辐射存在三种基本的类型：带电粒子，例如电子、 α 粒子、质子等；不带电的粒子，例如中子和中微子；以及电磁辐射，例如 γ 射线和X射线。能量在物质中的分配是由于这些辐射与电子结构相互作用的结果，因此只有带电粒子才起作用，而中子与 γ 射线则必须首先以一种特殊方式使之发生相互作用从而产生带电粒子，才能探测得到。

因此，在详细讨论探测器本身以前，必须考虑使相互作用得以

发生的方式，以及把这些方式与可以采用的各种探测介质联系起来。这将是第二章的题材。

一旦粒子将其能量的一部分消散于探测器中以后，事件的结果一般就与最初能源的性质无关，因此，在讨论为了在特定的条件下使用探测器所需进行的各项修改以前，可以先考察探测器的基本形式。这就是第三章的任务，其中包括这类仪器如电离室，盖革计数器，闪烁计数器及云雾室等的基本理论。

本书的其余部分，大多数的内容是考虑不同类型的辐射所引起的特殊问题，以及处理探测技术方面的某些问题。

由于篇幅的限制，不可能详尽地考察与探测器一起使用的电子仪器，只是在短短的第四章中，讨论了探测器的特性与电子学特性之间的关系。

第二章 輻射与物质的相互作用

质能相当性

在討論輻射与物质发生相互作用的方式以前, 把与基本粒子有关的数据及质量和能量的单位摘录一下, 对讀者是有帮助的。

狭义相对論提供了质量与能量之間的关系: $E = mc^2$, 式中 c 是光速, 而 m 与静止质量 m_0 的关系可表为 $m = m_0 / \sqrt{1 - \beta^2}$, 其中 $\beta = v/c$ (v = 粒子的速度)。于是, 电子的静止质量可用能量表示, 而习用的单位是 10^6 电子伏 (= 1 兆电子伏 = 1.6×10^{-6} 尔格)。在这些单位中, 电子或正电子的 $m_0 c^2$ 是 0.51 兆电子伏; 质子为 936 兆电子伏; α 粒子为 3718.4 兆电子伏; 中子为 937.3 兆电子伏; μ 介子为 106 兆电子伏; 而 π 介子则为 135~139 兆电子伏。电荷的数值, 以电子电荷 $e = 1.6 \times 10^{-19}$ 庫倫的整数倍表示, 即: 正电子为 $+e$; 质子为 $+e$; α 粒子为 $2e$; μ 介子为 $+e$; π 介子为 0 或 $\pm e$; 中子为 0。

在所列举的各种粒子中, 介子在核工程方面的实际重要性最小, 因此, 除了把它們当作本底輻射的一种成分外, 对它們的性质就不再专门描述。在另外的許多粒子中, 可以看出, 只有中子不带电, 这是它的一个特点, 但它的质量与质子一样大。

在物质中的能量損失

当一个中能带电粒子 (例如 5 兆电子伏的质子) 通过物质时, 它将通过一系列的非彈性相互作用, 把它的大部分能量損耗于接近它軌道的那些原子中的电子, 可以直接看出, 当粒子速度变慢

时,就会有更多的时间把能量传递给任何一个电子,因此在这一过程中能量损失的速率愈来愈大。

在原子序数为 Z , 原子量为 A , 以及密度为 ρ 的元素中,每克中的电子数目是 LZ/A , 式中 L 是阿佛加德罗(Avogadro)数,其数值为 6×10^{23} . 因此每平方厘米的电子总截面为 $\pi r_0^2 LZ/A$ 厘米²/克, 或 $\pi r_0^2 L \rho Z/A$ (厘米)⁻¹, 这里 r_0 是经典电子半径^[1], 即 $e^2/m_0 c^2$ ($\pi r_0^2 L = 0.154$), 而能量损失的速率正比于这个因子。当带电粒子通过物质时,在带电粒子静电场作用半径内的这些电子,将受到“拉引”而使带电粒子速度变慢,电子所得到的能量将用于使每一个原子的电子壳层中发生各种跃迁,其中某些电子将发生电离。贝特(Bethe)^[1]已就速度为 βc 质量为 M 的一个粒子,算出了它的能量损失率(每克/厘米²中的能量损失)为

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi r_0^2 L \frac{Z}{A} \cdot \frac{m_0 c^2 \cdot z^2}{\beta^2} \left[\log \frac{2m_0 c^2 \beta^2}{ZI(1-\beta^2)} - \beta^2 \right]$$

式中 ZI 是每个原子的平均激发能, I 约为 11.5 兆电子伏, ze 为粒子所带的电荷。令 $\pi r_0^2 L = 0.154$, $m_0 c^2 = 0.51$ 兆电子伏, 代入上式, 即得

$$-\frac{dE}{dx} = 0.314 \frac{Zz^2}{A\beta^2} \left[\log \frac{1.02\beta^2}{ZI(1-\beta^2)} - \beta^2 \right]$$

对质量为 M 而 $\beta \ll 1$ 的粒子, 此式化为:

$$-\frac{dE}{dx} = 2\pi e^4 L \frac{Z}{A} \frac{z^2}{E} \frac{M}{m_0} \log \left[\frac{4m_0}{M} \frac{E}{ZI} \right]$$

因此,具有 4 倍于质子能量的 α 粒子,其损失的能量也将为质子的 4 倍, 故而两种粒子将具有相同的射程;但在低能区域时则不同,那时由于电子的俘获和失落使质子的射程与 α 粒子相比在空气中要减少 3 毫米。粒子的射程 $\int_0^E dE / \frac{dE}{dx}$ 近似地正比于 $E^{1.8}/z^2 M^{0.8}$ (与更为近似的盖革关系 $R \propto E^{3/2}$ 比较)⁽²⁾。

[1] 经典电子半径 $r_0 = e^2/m_0 c^2 \approx 2.8 \times 10^{-13}$ 厘米。——译者注

图1表示1兆电子伏的质子在氩气中射出时的轨迹上的 dE/dx 曲线，还一起画出了质量为 98000 和 148000 兆电子伏的裂变碎片的曲线。图中可以看出，这些裂变碎片的曲线并不显示

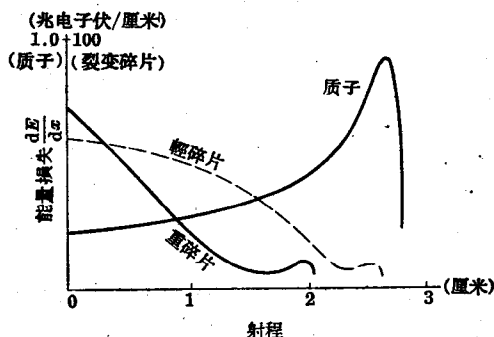


图1 质子(能量1兆电子伏)和裂变碎片的能量损失速率，
在760毫米汞高，15°C的氩气中

在最低能量处具有最大能量损失的布拉格曲线的典型特性。这是因为它们是在裂变中形成具有 $z \approx 25$ 碎片，当它们慢化时，就从周围物质中俘获电子，从而使能量损失的速率降低。表1列出各种粒子在不同物质中的射程。

表1 α 粒子，电子和裂变碎片在各种物质中的射程

α 粒 子					电 子	
能 量 (兆电子伏)	空 气* (厘米)	H ₂ * (厘米)	A* (厘米)	Al (毫克/厘米 ²)	空 气* (厘米)	Al (毫克/厘米 ²)
0.01	—	—	—	—	0.22	0.27
0.05	—	—	—	—	3.6	5
0.1	0.1	0.3	—	—	11.2	13
0.5	0.3	0.88	—	0.5	145	170
1.0	0.5	1.9	0.5	0.8	370	405
2.0	1.0	3.9	1.1	1.6	830	926
4.0	2.5	11	2.8	—	—	—
5.3	3.8	17.6	4.2	5.8	—	—
7.0	5.9	27.8	6.4	—	—	—
10	10.6	51.5	10.9	—	—	5200

裂变碎片：轻碎片， R (毫克/厘米² Al) = 4.25。

重碎片， R (毫克/厘米² Al) = 3.6。

* 760毫米汞高，15°C。

在低能时,重粒子可以与原子核发生弹性碰撞,这种过程使得在裂变碎片的軌迹末端处能量损失增加,正如在图 1 中已表明的那样。在高能时,貝特公式中的相对論項引起能量损失的增加;对于 $\beta=0.98$ 的粒子,所得损失速率为最小,那时,单个带电粒子在中等原子序数的物质中,将大約损失 2 兆电子伏/克·厘米⁻²的能量。

当粒子速度升到 $\beta=0.98$ 以上时,发现能量损失率的增加小于貝特的預計值,特别是在具有高电子密度的象碳这样一类物质⁽³⁾中。

描述电子能量损失速率的方程与上述方程稍有不同,这是由于在电子-电子相互作用中涉及两个等同粒子,但与重粒子情况的主要差别却是由于电子經受到高度的散射。因此,任何一个电子的軌迹可以与直綫有很大的偏离,而且假如把起初准直束中的电子数目对射程作图,則会得到一近似于指数式的吸收曲綫。来自放射性同位素的电子使物理图景更为复杂化,因为电子是按連續能譜发射的,一直要延續到表征放射性同位素特性的高能极限 $E_{\text{最大}}$ 为止。然而,事实上,这些 β 射綫的射程与在具有同一最大能量的单能电子中所見到的射程并无很大的差异,已經得出了两个經驗方程,可把在鋁中的射程 R 与 $E_{\text{最大}}$ 相联系,即

$$0.1 < E_{\text{最大}} < 0.8 \text{ 兆电子伏, } R(\text{毫克/厘米}^2 \text{ 鋁}) = 407 E_{\text{最大}}^{1.33}$$

(E 以兆电子伏为单位)

$$0.8 < E_{\text{最大}} < 2.5 \text{ 兆电子伏, } R(\text{毫克/厘米}^2 \text{ 鋁})$$

$$= 541(E_{\text{最大}} - 0.245)$$

(第二类关系式称为費梭(Feather)方程)。

由于 β 粒子的指数式吸收,可得到吸收体的半吸收厚度与 $E_{\text{最大}}$ 的关系式为: $a_{1/2} \sim 32 E_{\text{最大}}^{1.33}$ (a 毫克/厘米² 鋁, $E_{\text{最大}}$ 兆电子伏),一般說来,半吸收厚度近似为 $R_{\text{最大}}$ 的七分之一。

表 1 汇列了与 β 射綫有关的一些数据。正电子上的正电荷使

得散射的程度各有不同，但在鋁中的射程却和电子的大致相同。然而，在高 Z 的物质中則发现正电子射程較大。

正电子在发射終了时成为大量負电子中的一个孤独的正粒子，靜电力使它与电子結合放出能量各为 0.51 兆电子伏的两个 γ 射綫量子(湮沒輻射)，此輻射的出現即是正电子发射的特征。

探 測 介 质

以上，我們已經考虑了带电粒子的能量損失，但未探究除了引起电子激发以外，所損失的能量在介质中分配的形式。在某些情形中，带电粒子有足够的能量傳遞給其中某一电子而使它帶有足够大的速度离开母原子，并能独立地再去产生激发和电离。在气体中，由快速粒子，如高能电子或介子所产生的电离，大約有一半是由这些起媒介作用的 δ 射綫所造成的^[1]。

显然，只有与电子发生相互作用的一部分带电粒子才能引起一个原子或分子的电离，同时产生一个自由电子和一正离子，又在另一些情形中，受激的原子，或分子，其激发还未达到电离的程度，当从激发态回至它們的基态时就导致光的輻射或者热能的产生。在有些物质中，例如气体，产生电离一般就是所要求的結果，在其他一些物质中，要求能产生高效率的光，而在另外一些物质中，要求能发生化学变化或引起温度升高。

电 离 介 质

气 体

若已知气体从粒子上吸收来的能量，測量由此产生的离子数目，就可得到每对离子所具有的能量数值 w ，其某些数值已列于

[1] 当入射粒子的能量足够大时，由电离而产生的次級电子速度很高，以致在云雾室或照相乳胶中，不仅能观察到原入射粒子的徑迹，而且也能观察到次級軌迹，后者即被称为 δ 射綫。——譯者注

表 2 中, 与其一起的还列出了各种气体的电离势 E_i 的数值。从表中可以看到, 混合气体比起纯粹气体可产生更多的电离, 这是由于有效地利用了高电离势气体中的某些激发能, 使其在碰撞过程中傳給了較低 E_i 的气体。从表中还可以看到, 对于十分慢的粒子, 其电离效率有减小的趋势, 这正是可预料到的: 因为那时发生的彈性碰撞所产生的反冲原子, 对引起电离而言能量太低, 以致不能再产生电离。

表 2 各种气体的电离势 E_i 及每对离子的能量 w

气 体	氫+ 0.2% 氮	氫+ 苯	氮	氮+ 0.3% 氫	氬	氬+ 0.12% 氫	氬	氬	空气	氫	BF ₃	CH ₄
E_i (电子伏)	15.7		24.5		21.5		13.9	12.1	16.7 和 12.8†	15.9	10.3	15.2
w (电子伏) 对于 5.3 兆电 子伏的 α 粒子	26.3	22.9	41.3	29.7	36.3	26.1	26.0	23.6	35.6	36	35.2	30.0
w (电子伏) 对于氚的 β 射 綫	28.5								31.0			28.5

氫 + 0.2% 氮, w 对于: 輕的裂变碎片为 27.6 电子伏, 重的裂变碎片为 29.4 电子伏, 从 Po 衰变的反冲核为 70 电子伏。

† 对于氬为 12.8, 对于氬为 16.7。

原始的电离包括电子和正离子, 它們在电場的影响下可以被分开, 以阻止其复合。在某些气体中, 电子保持自由状态, 并以高的迁移率向正电极运动, 而质量比它大得多的正离子則緩慢地向阴极运动。然而, 在另一些气体中, 电子迅速地附着在中性分子上而形成負离子, 这样就和正离子相似, 具有低的迁移率。表 3 給出了有关自由电子气体的一些数据, 正离子迁移率 μ_+ 的数值, 它定义为在一个大气压下的速度, 以厘米·秒⁻¹/伏·厘米⁻¹为单位。对电

表 3 在气体中正离子和电子的迁移率

气 体	离 子	μ_+ 厘米 ² /伏·秒	μ_- [1] 厘米 ^{3/2} /伏 ^{1/2} ·秒
He	He ⁺	10.8	3.5×10^4
	He ₂ ⁺	19.0	
A	A ⁺	1.63	7×10^4
	A ₂ ⁺	1.9	
A+1% N ₂			8×10^4
A+10% C ₂ H ₅ OH	C ₂ H ₅ OH ⁺	0.7	
N ₂	N ₂ ⁺	2.7	3×10^4
H ₂	H ₂ ⁺	14.7	

[1] $W = \text{电子速度} = \mu_- (X/p)^{1/2}$, 式中 X 是电场强度(伏/厘米)而 p 是压力。

子的迁移率 μ_- 所给出的十分近似的值可以由方程: W (电子速度) $= \mu_- (X/p)^{1/2}$ 来确定, 式中 X 是电场强度, 以伏特/厘米为单位, p 为压力, 以大气压量度。图 2 表示出, 对于各种气体, 电子速度实际上如何随 X/p 而变化, 并再一次看到对于象氩气那样的隋性气体加入少量混合气体后所产生的影响。在此情形中, 产生这种

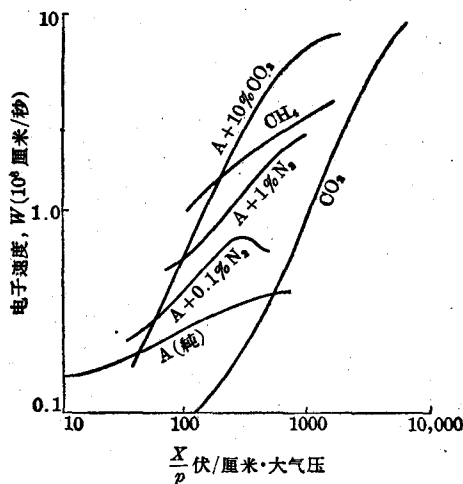


图 2 在各种气体中, 电子漂移速度 W 与 $\frac{X}{p}$ 的关系

影响的原因是由于与更复杂的分子作非弹性碰撞后引起电子骚动能的减少，结果就使平均自由程增加。此通称为冉邵尔效应 (Ramsauer effect)⁽⁵⁾。

形成负离子的气体是 H_2O , O_2 , SiF_4 和卤素气体。在电场不存在时，正离子和电子将在它们形成点周围扩散，或者将直接复合，或者在电子形成负离子以后再复合。在弱电场中，复合仍将发生，且正比于在这区域中的离子密度。复合系数可以由下式定义： $-dn/dt = \alpha n_+ n_-$ ，此处 n_+ 和 n_- 分别表示正和负离子（或电子）的密度。由于在离子形成后某一定时刻，离子的密度与它们的漂移速度成反比。因此，在弱电场中复合比在强电场中进行得快，在形成负离子的气体中复合过程比在 X/p 值大的自由电子气体中进行得快。

固体

即使在固体中，在带电粒子通过的路径上也将发生电离，而在大多数的物质中，如在金属中，所产生的自由电子将迅速地失去能量而不能独立地存在。在具有完美晶体或接近完美晶体结构的绝缘体和半导体中，自由电子通过物质时，在陷入电子空穴（或正的孔）或与它复合以前，将在导带中运动。若在晶体两端加上电场，则这种自由电子将向着正电极漂移，因而可以用来在外电路中产生一讯号，正如离子在气体探测器中所起的作用那样。由某一电子所产生的讯号大小，将依赖于在形成该电子处和它陷入空穴的位置之间平行于电场所经过的距离。而此距离等于 $S = \tau W$ ，这里的 τ 是电子的平均自由寿命， W 是漂移速度，即等于 $\mu_- X$ (μ_- 是电子迁移率)。 $S/X = \tau \mu_-$ 是一定材料的特性，与每一电离事件的能量值 w ，以及 μ_- 和 μ_+ 的数值一起列于表 4 中。 μ_+ 代表正空穴的迁移率，由于各邻近原子的电子的一系列相继的替换正空穴向阴极漂移。表 4 也列出了为得到所需的电子迁移率和电绝缘而要求材料必须达到的温度数值。

表 4 固体电离探测器常用材料的数据

材 料	温 度 (°K)	w (电子伏)	S/X (厘米 ² /伏)	μ_+ (厘米 ² /伏·秒)	μ_- (厘米 ² /伏·秒)
金刚石	290	7~25	5×10^{-4}	>1200	>400
CdS	290	5~15	5×10^{-5}		30
AgCl	70	7	5×10^{-4}	0	139
Ge	290	3		1700	3500

次级发射体

在某些绝缘体中, 由于带电粒子的通过而产生的 δ 射线有时可以作为次级电子从材料的表面挣脱出来, 具有高数值 $\tau\mu$ 的材料成为良好的次级发射体. 次级发射系数 δ (定义为每个入射粒子所产生的次级粒子数目) 的一些数值列于表 5 中. δ 是入射电子能量的函数, 从零开始上升, 当电压为 500~600 伏左右时达到极大值, 数值在 1 到 12 之间, 然后再下降. 这些数值是对于从被粒子轰击的表面离开的次级粒子而言的.

表 5 关于次级发射体的一些数据

($\delta_{\text{最大}}$ 表示在电压 $V_{\text{最大}}$ 处, 次级发射系数的最大值)

材 料	$\delta_{\text{最大}}$	$V_{\text{最大}}$	材 料	$\delta_{\text{最大}}$	$V_{\text{最大}}$
Al	0.97	300	BeO	5 到 10	400 到 800
Be	0.90	400	MgO	4 到 8	400 到 600
Cu	1.35	500	AgMgOCs	10	400
Cs	0.90	400	SbCs	12	500
Al ₂ O ₃	2.6				

对于 AgMgOCs, 以 δ 对 V 作图, 曲线起首近似随 $V/40$ 变化; 对于 SbCs, 曲线起首近似随 $0.2V^{0.7}$ 变化.

磷 光 体

至此, 我们已经考虑了利用带电粒子的能量来产生电离, 但是显然, 由于每个离子的能量是一原子的电离能的二或三倍(表 2),

因此用于产生不足以电离的激发态的总能量是相当可观的，在适当的条件下此能量将以光的形式放出。

在有些材料中，粒子能量转变为光的效率比较高，这类材料称为磷光体，它有两种基本的类型：有机的和无机的。

有机磷光体

象蒽那样的透明有机材料，在它们的苯环结构中具有共轭双键，它们将把其激发能的大部分以光的形式逸散掉，而这种光的波长与材料的复杂程度有关，此已表明在表 6 中。

表 6

材 料 ^[1]	发 射 光 谱
苯 	2600~3000 Å
萘 	3000~3650
蒽 	3800~4550
丁省 	4500~6500
戊省 	光谱带位于红区

对于这样一些材料的电子结构，退激发时间是十分短的，因而观察到 10^{-8} 秒数量级的荧光^[2]衰减时间(表 7(a))。

一般，因为从磷光体发出之光在光阴极的光电表面中被吸收，而产生光电子，最为有效的表面，在光谱的蓝区中(即在 4200 埃附近)具有最高的灵敏度，因此一般就选择具有蓝光输出的磷光体用

[1] 为了清楚起见特在各材料名称后画上相应的化学结构。——译者注

[2] 磷光和荧光的区别即在于光的衰减时间的长短，磷光衰减时间长，荧光短。

——译者注

于辐射探测器。表 7(a), 7(b) 和 7(c) 列出磷光体和光阴极的詳細性质, 以及为了从某一与磷光体光耦合的光敏面(Photosurface)产生光电子而从粒子中取出的能量值 w 。

表 7(a)

磷 光 体	光 阴 极	光灵敏度 (微安/流明)	最大发 光效率 (%)	对 1/2 兆电子伏 电 子 的 w (电子伏/光电子)	衰减时间 τ_1 (毫微秒)
NaI-Tl (0.1% Tl)	SbCsO	60	15	250	250
	SbCs	25	10	370	
	Sb-Na-K-Cs	150	20	180	
(0.01% Tl)	SbCsO	60	15	500	
ZnS-Ag	SbCsO	60	15	250	3000 (t^{-n} 定律)
CsI-Tl	SbCsO	60	15	1000~2000	1100
LiI-Eu	SbCsO	60	15	1000~2000	
葱	SbCsO	60	15	500	32
苙 ^[1]	SbCsO	60	15	1200	6
塑料*	SbCsO	60	15	1500	5
液体†	SbCsO	60	15	1500	2
Xe	SbCsO	60		1000 气体	1 微秒
	涂于石英壳内			350 固体(α 粒子)	

* 聚乙烯甲苯和三联苯和 2, 5 二苯噁唑 (Polyvinyl toluene and terphenyl and 2, 5 diphenyloxazole).

† 甲苯及 5 克/升对三联苯(p-terphenyl)再加 16 毫克/升 POPOP.

許多有机磷光体可以生长成十分大的单晶, 这在閃爍計数器中非常有用, 而且对这些大单晶观察表明, 由某种粒子, 譬如短程的 α 粒子, 傳遞到晶体中某一点的能量, 可以在辐射发生以前由某种共振傳移而傳到晶体中更远的一些点。假如掺入一分子, 其发射的波长比母液的长, 那末从母液接受到的任何能量将以其特征波长被辐射出去^[2]。此过程的效率可从下列事实得到說明: 假如

[1] 又名 1, 2-二苯乙烯, 或均二苯代乙烯 (Stilbene), $C_6H_5CH:CHC_6H_5$ 。

——譯者注

[2] 可參閱于群等編: 原子核物理实验方法第 100 頁。液体有机閃爍体部分。

——譯者注