

原子能出版社

辐射屏蔽与剂量学

〔美〕A. E. 普罗菲奥 著

FUSHE PINGBI YU
JILIANGXUE



辐射屏蔽与剂量学

[美] A. E. 普罗菲奥 著

顾俊仁 鲍世宽 张文浩 张书贤 译
李树德 龚德荫 华旦 郝彦威 杜德林 校

原子能出版社

内 容 简 介

本书概括地介绍了辐射屏蔽与剂量学的各个主要方面的知识,並重点阐述了其有关物理概念和用途。书中用七章篇幅分别介绍了电离辐射及其在物质中的减弱;辐射源;射线与物质的相互作用;辐射运输的计算;各种辐射量的定义及其测量或计算方法;电离辐射的生物效应和防护标准;以及 γ 射线和中子对人体的外照射剂量、放射性核素对人体的内照射剂量。书中还另用一章篇幅介绍了屏蔽工程和屏蔽材料,并包括屏蔽设计的举例。

本书可作为高等学校的教学参考书,也可供从事核工程、辐射防护和医学物理学、辐射物理和辐射化学工作的科技人员参考。

A. Edward Profio
Radiation Shielding and Dosimetry
John Wiley & Sons, Inc., 1979

辐射屏蔽与剂量学

[美] A. E. 普罗菲奥 著

顾俊仁 鲍世宽 张文浩 张书贤 译

李树德 龚德荫 华 旦 郝彦威 杜德林 校

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

北京电子外文印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行·新华书店经售

☆

开本787×1092 1/16·印张16.625 字数414千字

1989年11月北京第一版·1989年11月北京第一次印刷

印数1—800

ISBN 7-5022-0111-4

T L · 47 定价: 16.45 元

2671/31

前 言

本书是为核工程师、辐射防护工作者和医学物理学工作者编写的一部教科书或参考书。书中论述了辐射源、X射线机、低能加速器和核反应堆的屏蔽设计问题。还讨论了如何预计和测量体外源和体内源造成的剂量以及电离辐射的生物效应问题。

本书是按照大学高年级学生和毕业生的程度编写的，并认为读者对近代物理学的一些概念以及微积分和微分方程这样的数学知识是熟悉的。本书的重点放在物理概念的了解和应用上，而不是放在理论和数学推导上。如果读者预先学一点核物理和核测量方面的课程对阅读本书会有所裨益，但是有许多工程师并无这方面的基础，所以本书对电离辐射同物质的相互作用以及辐射探测的内容作了适当的介绍。如果读者欲作更详细的了解，可查阅作者以前出版的《Experimental Reactor Physics》。

本书第一章介绍了电离辐射及其在物质中的减弱这个课题。离子、电子、光子和中子等源的讨论放在第二章中。第三章中讨论了射线同物质的相互作用问题。关于辐射输运的计算方法列入第四章，其中对蒙特卡罗法、离散纵标法和点核法作了重点介绍。关于“剂量”的定义以及注量和剂量的测量或计算方法放在第五章中，而电离辐射的生物效应和辐射防护的标准则是第六章的内容。第七章讨论的是屏蔽工程和屏蔽材料，其中还包括屏蔽设计的举例。第八章则是论述体外的光子和中子束对人体造成的剂量，以及通过吸入、食入或注入放射性核素对人体造成的剂量。

我要感谢Darcy Radcliffe，他精心地为我的讲稿进行打印和绘制插图，而本书是根据这些讲稿编写的；感谢Tod Still为出版本书在制作供照相制版用的稿件方面所做的工作；感谢编辑Beatrice Shube，她在我编写这两本书的过程中给了我有力的帮助，并始终不渝地给予我鼓励；还要感谢我的家属Janet, Chris, Claudia和Suzy给予我的爱。

A. E. 普罗菲奥

1978年12月于加利福尼亚州圣巴巴拉

目 录

第一章 绪论	1
第二章 辐射源	6
2.1 放射性核素	6
2.2 X射线机和加速器	14
2.3 聚变装置	24
2.4 核反应堆	24
2.5 源的表达方式	30
习题	33
参考文献	34
第三章 射线与物质的相互作用	36
3.1 通量密度和截面	36
3.2 离子与物质的相互作用	39
3.3 电子和物质的相互作用	46
3.4 光子和物质的相互作用	52
3.5 中子和物质的相互作用	59
3.6 截面的描述	70
习题	81
参考文献	82
第四章 输运	84
4.1 蒙特卡罗方法	84
4.2 离散纵标法	99
4.3 其它精确的方法	107
4.4 点核法	109
4.5 其它近似方法	115
4.6 大气输运	119
习题	121
参考文献	122
第五章 剂量学	124
5.1 辐射量的定义	124
5.2 注量	126
5.3 比释动能	147
5.4 照射量	149
5.5 吸收剂量	152
5.6 剂量当量	157
5.7 发热	161
5.8 损伤	162
习题	163
参考文献	163
第六章 效应	166

6.1 辐射生物学.....	166
6.2 突变.....	169
6.3 致癌效应.....	173
6.4 放射病.....	178
6.5 其它生物效应.....	182
6.6 辐射防护标准.....	183
6.7 放射治疗.....	188
6.8 材料的损伤.....	191
习题.....	194
参考文献.....	194
第七章 工程	196
7.1 屏蔽设计.....	196
7.2 材料.....	197
7.3 减弱结果.....	203
7.4 贯穿.....	215
7.5 发热和应力.....	226
7.6 检查方法.....	229
7.7 实例.....	230
习题.....	236
参考文献.....	237
第八章 放射学	240
8.1 诊断放射学.....	240
8.2 治疗放射学.....	245
8.3 核医学.....	251
8.4 内照射剂量学.....	253
8.5 外照射剂量学.....	258
习题.....	259
参考文献.....	259
书中使用的单位与法定计量单位对照表	260

第一章 绪 论

辐射屏蔽是关于电离辐射在物质中输运和其与物质发生相互作用的一门学科。“屏蔽”一词的含意是指在辐射源和某一物体之间精心地设置一些材料；以降低辐射的强度从而减少辐射对该物体的损伤。但在辐射治疗和辐射加工中辐射的减弱和吸收也是重要的，在这种情况下屏蔽的目的是把某一具有精确数值的辐射剂量传给肿瘤或样品。在本书中我们要讨论中子、光子和带电粒子在包括人体在内的各种不同的材料中的贯穿和效应。

“剂量学”是表征电离辐射潜在危害的一个常用的术语。生物学损伤与单位质量组织中电离作用引起的能量沉积（即吸收剂量）有关，並要由诸如电离作用的微观空间分布、（组织中的）氧浓度和能量沉积速率等因子来修正。金属材料的中子损伤，同原子的位移和核反应引起的金属原子的转变有关。而钢的脆化往往同能量大于1MeV的中子的注量有关。可以通过计算和某些实验来获得通量密度的能谱，然后把这种能谱同与能量相关的“损伤函数”相褶积，就可获得辐射引起的潜在危害的量度。我们将讨论计算和测量这种能谱以及“剂量”的方法。

图1.1示出了一个经过简化了的反应堆的屏蔽问题，它要求确定出为使中子和 γ 射线在D处的剂量小于规定限值所需要的厚度X和Y。图中符号S表示源所在的区域（即堆芯）。区域1所用材料为铁，区域2的为混凝土。

解决一个辐射屏蔽和剂量学问题可按下述八个步骤进行：

1. 确定辐射源。它包括确定源的强度（每秒发射的粒子数）、能谱、角分布、空间分布；假如不是稳定的源，则还要确定源对时间的依赖关系。

2. 确定源-屏蔽层-探测器在空间中的相对关系、材料的成分和所有材料的密度。在组合屏蔽、不均匀屏蔽中或者在人体中，对几何形状作出某种程度的简化常常是需要的，也是合适的。

3. 获取有关材料的相互作用的截面或减弱系数；若有需要还要获取形成次级辐射的截面，以及其它放射学资料，並把这些资料简化成适于辐射输运计算的形式。

4. 根据计算的目，定出一个或一个以上探测器^①的位置、能量和角响应。再定出响应函数或损伤函数，以便计算有关场所如屏蔽层外可直接进入的区域处的剂量值。为了适合于对所讨论的问题求取平均值，要确定究竟用点、面还是体状的探测器。

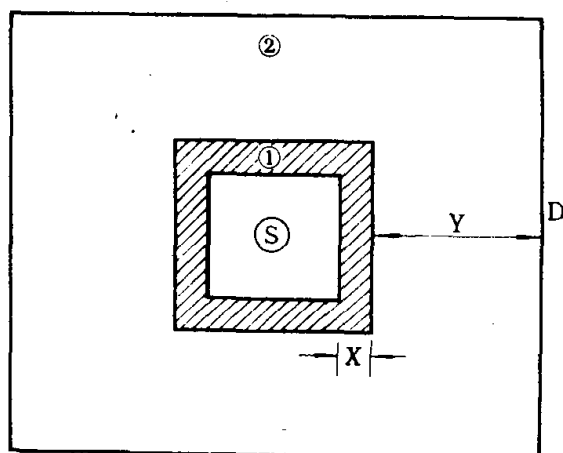


图 1.1 一个简化了的反应堆屏蔽问题示意图
（区域S包含有辐射源，区域1为铁，区域2为混凝土；要求确定在D处达到规定剂量值所需要的厚度X和Y）

① 在屏蔽计算中，则指剂量计算点或剂量计算区域，它们分别相应于测量中设置的点、面、体三种探测器。——译者注

5. 根据问题的复杂程度和对结果的准确度要求,确定是使用计算机程序还是用其它的计算方法。然后从源开始计算辐射通过屏蔽物和其间的任何间隔内的输运,并根据所要求的精密度算出每个探测器中的响应值(即吸收剂量)。

6. 把计算得到的响应值同限值标准(例如辐射防护条例中的最大容许剂量)进行比较。若达不到要求,则变更屏蔽设计(即增厚屏蔽层,或换用别的屏蔽材料)并重新进行计算,直至所得剂量值或是别的响应值处于限值之内为止。只要屏蔽材料的性质不改变,响应值可根据源强大小进行线性换算。

7. 设计中还有其它的制约,例如在选用一些材料和把它们加工成屏蔽层时应考虑它的成本问题。一般来说,屏蔽设计可以在成本、厚度或重量方面进行最佳化选择。设计过厚的屏蔽层(给出的剂量值小于实际所需值)可能“更安全”些,但这要付出代价。所以人们总希望要一种较薄的屏蔽层,以减少周围结构物件的尺寸和成本,或缩短屏蔽层内所敷设管道和其它等等物件的长度。就运送放射性材料和对于可移动的辐射源而言,则希望把屏蔽块做得小一些。而在像宇宙飞船那样的一些特殊场所中使用时,轻的屏蔽重量将压倒所有的其它一切设计标准。

8. 在开始启动或是首次使用时,我们将利用实测值鉴定屏蔽的性能或核实人体或试样所接受到的剂量。假若实际上不能这样做,则可在1:1比例的屏蔽模型中或者是能代表人体或试样的模型中进行此类测量。

虽然在放射治疗和辐射加工中有一部分问题将涉及到选择辐射的类型和能量,以便这种辐射对某一给定体积所授与的某一剂量具有相当的均匀性,而且不会使该体积周围的组织或部件所接受的剂量超过另一个规定的数值,但一般来说辐射源总是给定的。我们所关心的辐射源的类型有:发射 α 和 β 粒子、 γ 射线和中子的放射性物质;X射线机;产生X射线和电子以及能量低于20~30 MeV的氢和氦离子的中压和低压加速器;作为中子和 γ 射线源的核裂变反应堆;作为中子源的核聚变装置。高能加速器发射出的粒子、宇宙辐射和核武器爆炸引起的直接辐射则不属我们讨论之列。我们也要讨论同空气或水混在一起的或者沉积在地面上的那些放射性核素。我们还要研究吸入、食入或(像在核医学中)注入人体内的放射性核素所构成的内部源。表1归纳了电离粒子和电磁辐射(X射线和 γ 光子)的若干重要的性质。

表 1.1 电离辐射的某些性质

类 型	粒 子	符 号	电 荷 ^①	静止质量(u) ^②	半 衰 期
离 子	质 子	p	+ e	1.007	稳 定
	氘 核	d	+ e	2.014	稳 定
	氚 核	t	+ e	3.015	12.3 a
	α 粒子	α	+ 2e	4.002	稳 定
	裂变碎片	f	约+ 20e	约100	变 化 的
电 子	负 电 子	β^-, e^-	- e	4.586×10^{-4}	稳 定
	正 电 子	β^+, e^+	+ e	4.586×10^{-4}	稳 定
中性粒子	光 子	γ	0	0	稳 定
	中 子	n	0	1.009	11.7 min

① 一个电子的电荷, $e = 1.60210 \times 10^{-19}$ 库仑(C)。

② 统一的质量单位 $u = 1.6604 \times 10^{-24}$ 克(g) = 9.31478×10^8 电子伏(eV)。

在核医学和放射学中，以及从辐射防护的目的估计深部剂量时，我们需要研究辐射在人体组织和器官中的减弱和吸收。由于人体的大小和发育的不同，通常要规定一个标准的或称为参考的人体模型（有时还要考虑到不同的年龄和性别）。制作得最为精致的模型要考虑到许多器官的尺寸和它们的近似形状，通常骨和软组织总是要区分开来的，而且软组织还要用密度和用脂肪、肌肉或其它含水组织的含量作出明确的规定。图1.2示出的是一个用于计算沉积在体内的放射性核素对器官造成的剂量的人体模型，在某些计算中，人体形状用椭球形或其它简单形状作近似，组分采用均质作近似，甚或就用水或塑料作为它的组分。市场上有商品拟人体模出售，这种体模具有人体骨骼，用塑料作成与软组织的组分和密度近似的模体，并用一个密度较低的空间作为肺。

除了辐射治疗外，在剂量计算中准确度能达到30%就认为是好的了；但在辐射治疗中，为了达到所希望的疗效（杀死所有的肿瘤细胞）而又不致使肿瘤附近的正常组织遭受过度的损伤，可能需要好于10%的准确度。

屏蔽设计的主要内容是要详细地定出屏蔽层的几何形状、组分和密度。为了能设计出高效能的屏蔽，必须要有经验。虽然需要考虑到高能电子会产生具有贯穿能力的X射线（韧致辐射），但对裂变碎片、离子和电子进行屏蔽是容易的，因为它们在固体或液体物质中的射程不大（几微米到几毫米）。减弱X射线和γ射线可采用密度大的尤其是高原子序数的物质，如铅或铁，或者用混凝土。热中子是容易被吸收的，尤其容易被某些像硼、镉之类的物质所吸收。在像水、塑料或混凝土这类物质中，快中子通过与氢原子的碰撞而被慢化。与中子屏蔽有关的一个问题是，中子的俘获或非弹性散射会生成次级γ射线，因此屏蔽层必须含有能减弱这些γ射线的物质。实际的屏蔽层通常有人孔、敷设管线和电缆的贯穿孔，以及类似的结构。另外考虑到加工误差和膨胀可能会留下一些间隙，这就造成γ射线和中子的泄漏，并使屏蔽层产生局部“短路”。屏蔽分析是按前面所说的步骤进行的。屏蔽层的组合原则包括工程和经济观念，以及反复的逼近计算、剂量的限值或其它的设计标准等。若已经知道单位厚度屏蔽层所能减少的剂量值，则对逼近计算处理是有益的。

辐射与物质的相互作用是用截面描述的。而截面给出的是每个靶原子同单位通量密度的入射辐射发生某一给定的相互作用的几率，其数值依赖于入射粒子的类型和它的能量。微分散射截面的大小还同散射角有关。我们还要对能量传递和生成次级辐射（如中子俘获γ射线或非弹性散射γ射线）的截面作出定义。截面同中子能量、γ射线能量有关；除非假定γ射线是各向同性分布，否则截面还同γ射线的角分布有关。足够详尽地获取截面值只是我们工作的一部分，还必须把截面值简化成辐射输运计算机程序或其它计算方法所适用的形式。这经常要牵涉到获取对某一能量间隔求平均的“群”截面和群与群之间的转移截面，以及某种有关角分布的表达式（如后文要讨论到的勒让德多项式的展开）。我们在点核方法中采用了线性减弱系数和积累因子。线性减弱系数是（材料中）每种元素的原子密度同相应的总截面乘积的总和。用积累因子修正剂量值就计入了散射辐射的贡献，而积累因子是介质中贯穿深度、源能量和角分布的函数。在中子计算的近似方法中，我们还要利用到物质的其它的性质。处理带电粒子的传输问题，我们可以简化地利用射程和阻止本领（ dE/dx ）的概念，或是利用一些能给出出射通量密度和谱的更精确的方法。

在大多数计算中所用的探测器给出的是剂量或其它的响应值，可用下式表示：

$$D(\vec{r}) = \int h(E) \phi(\vec{r}, E) dE$$

其中 $h(E)$ 为能量相关响应函数或能量相关损伤函数,而 $\phi(\vec{r}, E)$ 为 $\vec{r}$ 处的通量密度谱。采用别的探测器可能会给出通量密度谱和粒子流密度谱,甚或能给出通量密度的角分布及

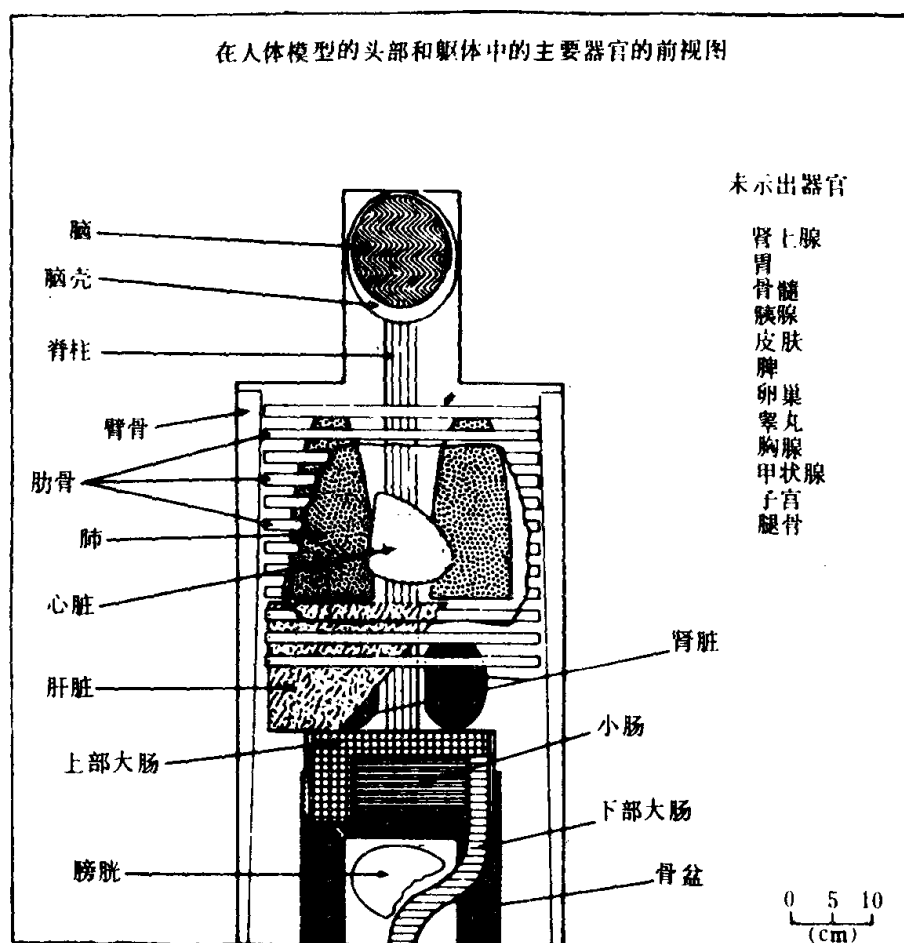


图 1.2 由沉积在某一器官中发射 γ 射线的放射性核素对另一器官造成的剂量进行计算时用的身体解剖模型

(引自核医学协会的《医用内照射剂量》小册子第5册, 1969年)

其能量分布。使 $h(E) = 1$, 我们就可很容易地获得能量积分通量密度 (即“通量”)。有时需要分别计算未受碰撞的通量密度 (或通量密度谱, 或剂量) 和经过散射的通量密度 (或通量密度谱, 或剂量)。对上述这些量都可以计算出它们在某一给定点处的数值, 或求出它们在某一给定表面上或给定体积内的平均值。

由于大型的快速数字计算机的利用, 因此, 现在已经有可能采用蒙特卡罗法即随机法, 计算三维的源-屏蔽-探测器配置中, 基本上包括了所有的材料和各种相互作用的辐射输运问题。不过, 若要达到良好的统计精确度, 则这种计算就会变得非常冗长, 而且也很费钱, 尤其是对厚屏蔽或是复杂的屏蔽。如果还需要某种微分量的数据, 诸如能量分布或角分布之类的数据时, 困难就会更多。而且要想正确地使用蒙特卡罗法来解决深部贯穿问题还要求具备一些技巧, 以便在计算过程中选择好方差缩减的参数。离散纵坐标输运程序可以以合理的计算费用对一维几何条件 (如平板、球或无限长圆柱体) 的微分分布和微分剂量进行相当精确的计算。虽然我们也可利用二维分离散纵坐标程序, 但在解决深部贯穿屏蔽问题中它要求计算机具有很大的存贮容量和很长的计算时间。因此我们经常采用那些虽是近似的, 但却是快速而又费用较少的程序, 如果用这些程序能够获得我们所要求的具有适

当精度的结果的话。这些方法包括用于 γ 射线的点核-积累因子方法和用于快中子的分出-扩散法。单单用扩散理论不适于计算屏蔽层中各向异性的快中子通量密度，尽管它经常在热中子反应堆临界计算中十分成功。

职业性工作人员和公众的剂量是由联邦和州的法令限定的。这种法令是根据辐射的生物效应和专业组织如（美国）国家辐射防护和测量审议会（NCRP）和国际放射防护委员会（ICRP）的建议书制订的。作为其它方面应用的剂量或响应标准还未正式确定，但在后文我们要对辐射的效应和标准进行讨论。

验证屏蔽设计和组织或样品的剂量，将需要测量剂量或通量的密度和谱。截面和其它像反射或反照率因子的测量也需要各种类型的探测器、谱仪或剂量仪。我们将在后文对这些装置及其相应的电子仪器进行讨论。

（顾俊仁译 龚德荫校）

第二章 辐 射 源

2.1 放射性核素

放射性核素衰变可能会伴随发射 α 粒子、正电子或负电子、 γ 射线或X射线，或裂变碎片和中子。

放射性衰变定律

放射性衰变的几率，也就是一种核素自发转变为另一种核素的几率，是同核的年龄的大小和周围的环境无关的。平均放射性活度，即衰变率为

$$A = \lambda N \quad \text{衰变数/s} \quad (2.1)$$

式中 N 为某一给定时刻的核数； λ 为衰变常数(s^{-1})，它是单位时间内一个核发生衰变的几率。放射性活度的国际单位只是指每秒的核衰变数(s^{-1})，其它还有以贝可勒尔(简称贝可，用Bq表示)和居里(Ci)为单位的，

$$1\text{Bq} = 1.0 \text{ 衰变数} \cdot s^{-1} \quad (2.2a)$$

$$1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ 衰变数} \cdot s^{-1} \text{ (精确值)} \quad (2.2b)$$

辐射源的强度(简称源强)即每秒发射的粒子数，为每秒的衰变数与每次衰变平均发射出的该种形式的粒子数 n 的乘积，因此

$$S_i = n_i A \quad (2.3)$$

式中脚标 i 是标记所发射的某一给定形式的粒子的，如指电子或 γ 射线。

放射性活度等于放射性核素的原有核数的衰减率，因此有

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad (2.4)$$

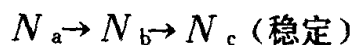
当核的初始核数为 N_0 时，上式经积分就得到

$$A(t) = \lambda N(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t} \quad (2.5)$$

衰变常数的倒数即为平均寿命 τ ，它是放射性活度衰变到其原有值的 $(1/e) = 0.368$ 时所经历的时间；但更常用的度量单位是半衰期 $T_{1/2}$ ，它是指放射性活度衰变到其原有值的一半时所经历的时间，

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (2.6)$$

衰变后的生成核，也有可能是放射性的。如果衰变链为



则子核(即 b 核)数的微分方程为

$$\frac{dN_b}{dt} = \lambda_a N_a - \lambda_b N_b \quad (2.7)$$

等式右边第一项为母核衰变为子核的生成率，第二项为子核减少的速率。假设初始条件：

$A_a(0) = A_{a0}$ ， $A_b(0) = A_{b0}$ ，则子核的放射性活度为

$$A_b(t) = A_{b0} \exp - \lambda_b t + A_a(t) \frac{\lambda_b}{\lambda_b - \lambda_a} \left(1 - \exp - (\lambda_b - \lambda_a) t \right) \quad (2.8)$$

而 $A_a(t)$ 由采用 A_{a0} 和 λ_a 为参数的方程(2.5)给出。若子核半衰期大于母核半衰期(即 $\lambda_b < \lambda_a$)，则表明方程(2.8)右端的第二项是一个积累项，并且一直积累到其衰变接近于只存在 b 核的衰变为止。若子核半衰期小于母核半衰期(即 $\lambda_b > \lambda_a$)，则子核的放射性活度最终将随母核的衰变速率而变化，称作“暂时平衡”状态，这时子核与母核的放射性活度的比值等于 $\lambda_b / (\lambda_b - \lambda_a)$ 。关于衰变链的详细资料可参见 Evans^[1] 的著作。

衰变方式和能谱

表2.1列出了对辐射屏蔽和剂量学有重要意义的一些放射性衰变的类型。我们可以从《同位素表》^[2]中找到衰变纲图、半衰期和其它有用的资料。表2.2给出了某些核素的性质。

表 2.1 放射性衰变方式

名 称 (符号)	生 成 核	主 要 辐 射	其 它 辐 射
α 衰变(α)	$Z-2$ $A-4$	α 射线	γ 射线 (常伴有)
负电子衰变(β^-)	$Z+1$ A	β^- 连续谱	γ 射线 (常伴有)
正电子衰变(β^+)	$Z-1$ A	β^+ 连续谱	γ 射线 (常伴有)
电子俘获(EC)	$Z-1$ A	中微子 (观察不到)	0.511MeV 湮没辐射 X或俄歇 e^- 射线 (子体)
内转换(IC)	Z A	e^- 射线	X或俄歇 e^- 射线 (母体)
同质异能跃迁(IT)	Z A	γ 射线	
自发裂变(SF)	约 $1/2Z$ 约 $1/2A$	两个裂变碎片	n 连续谱 γ 连续谱

α 衰变是以发射一个或一个以上的 α 粒子(4He^{++} 离子)为特征的。如果子体核处在某一个激发态上，退激和返回基态(或返回到较低能级的激发态)时会伴随着发射 γ 射线。图2.1为 ^{220}Rn 的 α 衰变纲图。 ^{220}Rn 衰变到 ^{216}Po 的0.550MeV激发态的占总衰变数的0.07%，而衰变到其基态的则占99.93%。跃迁能量 $E_i = Q_\alpha - E_s$ ，其中 E_s 为高于基态的(即激发态的)能量。跃迁能量 E_i 由 α 粒子和反冲核(^{216}Po)分配，即

$$E_\alpha + E_R = E_i \quad (2.9)$$

式中 E_α 为 α 粒子的能量， E_R 为反冲核的能量。根据动量守恒的要求，

$$E_\alpha = E_i \frac{M_0}{M_\alpha} \quad (2.10)$$

式中 M_0 为折合质量，

$$M_0 = \frac{M_\alpha M_R}{M_\alpha + M_R} \quad (2.11)$$

① Q_α 为 α 衰变能。——译者注

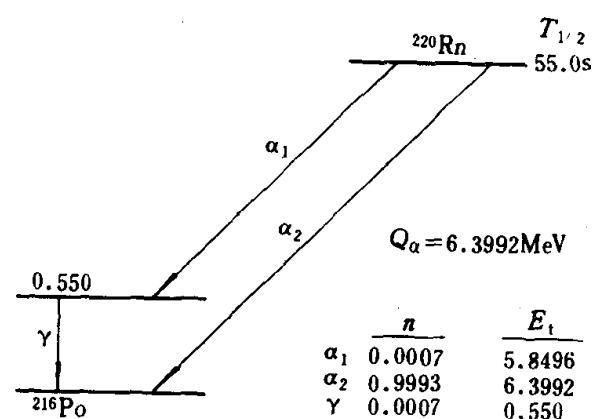


图 2.1 ^{220}Rn 衰变纲图

α 粒子的能量为 $E_{\alpha_1}=5.7470\text{ MeV}$, 反冲离子 ^{216}Po 的能量为 0.1064 MeV ; $E_{\alpha_2}=6.2870\text{ MeV}$, $E_{\text{R}2}=0.1164\text{ MeV}$ 。发射的 γ 射线能量为 0.550 MeV , 其所伴随的反冲可忽略, 即使是轻核这种反冲也可忽略(图2.2示出了这种能谱)。发射是各向同性的。

在 β -衰变中, 核中的一个中子转变为一个质子、一个负电子和一个中微子(实际上是反中微子), 即 $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$ 。质子留在核内, 故子体核的原子序数比母体核的大 1, 而中微

表 2.2 放射性核素源

核素(衰变方式) ^①	$T_{1/2}$	粒 子		光 子	
		粒子数/衰变	最大能量 $E_{\text{max}}, \text{MeV}$	平均能量 E, MeV	粒子数/衰变 能量, MeV
$^3\text{H}(\beta^-)$	12.3 a	1.00	0.018	0.0057	0.00
$^{14}\text{C}(\beta^-)$	5730.0 a	1.00	0.156	0.0493	0.00
$^{16}\text{N}(\beta^-)$	7.2 s	0.26	10.4		0.05 7.11
		0.68	4.27		0.69 6.13
		0.05	3.31		0.01 2.75
		0.906	0.546	0.216	1.00 1.275
$^{22}\text{Na}(\text{EC}, \beta^+)$	2.60 a	0.094		电子俘获	1.81 0.511
$^{24}\text{Na}(\beta^-)$	15.0 h	1.00	1.392	0.555	1.00 2.754
					1.00 1.368
$^{32}\text{P}(\beta^-)$	14.3 d	1.00	1.710	0.695	0.00
$^{35}\text{S}(\beta^-)$	87.0 d	1.00	0.167	0.049	0.00
$^{55}\text{Fe}(\text{EC})$	2.70 a	俄歇电子 5 到 6 keV			0.26 0.006
$^{57}\text{Co}(\text{EC})$	270.0 d	0.01	0.129	内转换	0.10 0.136
		0.02	0.115	内转换	0.86 0.122
		0.68	0.007	内转换	0.10 0.014
$^{60}\text{Co}(\beta^-)$	5.26 a	1.00	0.313	0.094	1.00 1.332
					1.00 1.173
$^{85}\text{Kr}(\beta^-)$	10.7 a	1.00	0.672	0.246	0.004 0.514
$^{90}\text{Sr}(\beta^-)$	28.1 a	1.00	0.546	0.196	0.00
$^{90}\text{Y}(\beta^-)$	64.0 h	1.00	2.27		0.00
$^{99\text{m}}\text{Tc}(\text{IT})$	6.0 h	0.09	0.119	内转换	0.88 0.140
		0.01	0.138	内转换	
		0.90	0.606	0.192	0.07 0.637
$^{137}\text{Cs}(\beta^-)$	30.0 a	0.054	1.176	0.427	0.82 0.364
		0.946	0.514	0.175	见 $^{137\text{m}}\text{Ba}$
		0.08	0.624	内转换	
$^{147}\text{Pm}(\beta^-)$	2.62 a	1.00	0.224	0.070	0.90 0.662
$^{210}\text{Po}(\alpha)$	138.0 d	1.00	5.305		0.00
$^{220}\text{Rn}(\alpha)$	55.0 s	0.0007	5.747	α_1	0.0007 0.550
		0.9983	6.287	α_2	
		0.85	5.484	α	0.38 0.06
$^{241}\text{Am}(\alpha)$	458.0 a	0.13	5.442	α	
		0.32	0.039	内转换	

① 衰变方式符号参见表 1。——译者注

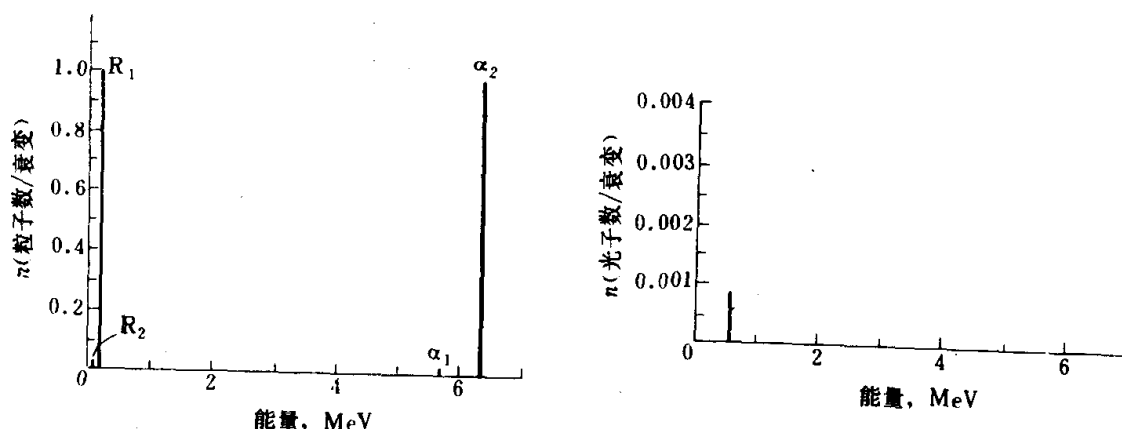


图 2.2 ^{220}Rn 衰变中的离子谱 (α 粒子、反冲核) 和 γ 射线能谱

子和电子从核中逸出。中微子几乎完全不与物质作用，因此它对物质的损伤和发热没有什么影响。但我们可以觉察到中微子的存在，因为跃迁能量是由它和电子分去的（剩余核所分得的能量可忽略不计，因为其它粒子比剩余核轻得多）。电子（ β 粒子）谱的形状依赖于跃迁能量的大小，因此谱形与电子可获得的最大能量 $E_{\max}$ （当中微子所带走的能量为零时）、原子序数 Z 以及核自旋和宇称的变化有关^[3]。在核自旋变化一个单位（或者不发生变化， $0 \rightarrow 0$ 除外）和宇称没有变化的情况下，状态间的跃迁称为“容许的（跃迁）”。许多 β 衰变就属于这种容许跃迁形式的。图2.3示出了纯 β 发射体 ^3H 、 ^{14}C 和 ^{32}P 衰变发出的容许跃迁谱的例子。在辐射屏蔽和剂量学中，很少需要对 β 谱形了解得很清楚，许多问题只要知道 β 粒子的最大能量和它的平均能量就可以解决了。最大能量 $E_{\max} = Q_{\beta^-} - E_s$ ，其中 E_s 为某一激发态的能量（ Q_{β^-} 为 β^- 衰变的衰变能——译者注）； β 粒子的最大贯穿深度

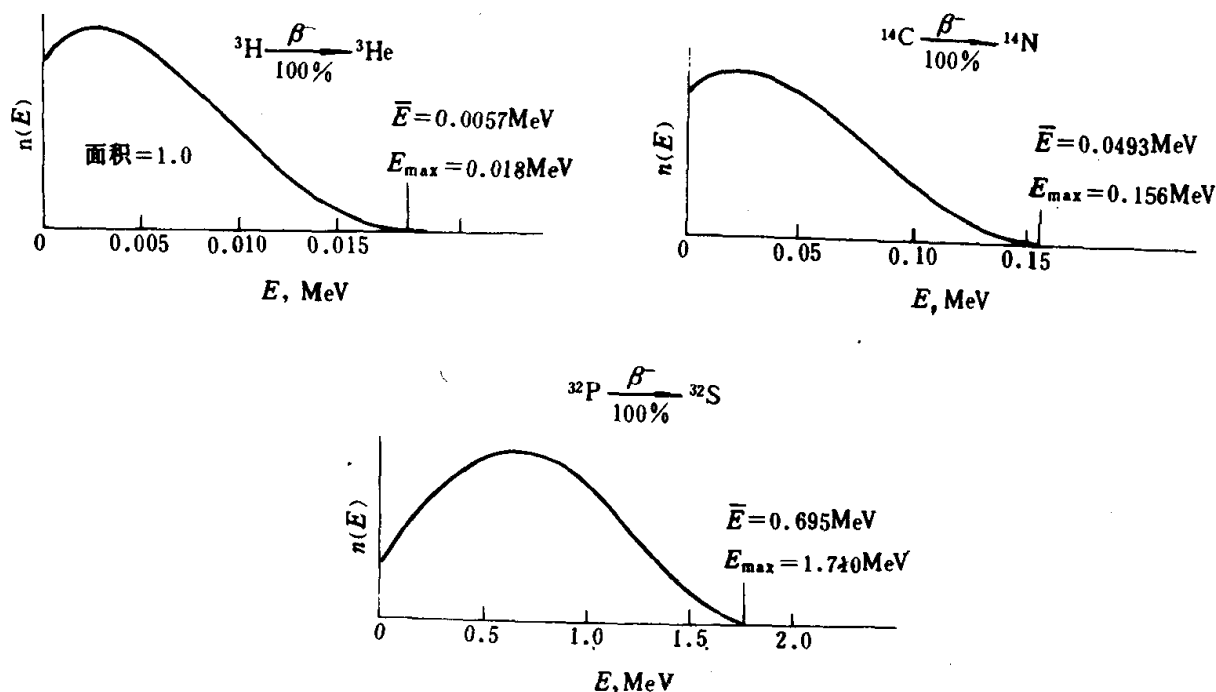


图 2.3 ^3H 、 ^{14}C 和 ^{32}P 的 β^- 衰变发出的 β 粒子能谱图

纵坐标 $n(E)$ 的单位为电子数 $\cdot \text{MeV}^{-1} \cdot \text{衰变}^{-1}$

它是 β^- 粒子能量的函数

即它的射程是同 $E_{\max}$ 有关的。由于 β 粒子在固体或液体中的射程很短，所以假定 β 粒子的能量就沉积在发射点处往往是一种很好的近似假设。而被吸收的平均能量就等于 β 粒子能谱的平均能量 $\bar{E}$ 。文献[4]发表了容许跃迁和禁戒跃迁的 $\bar{E}/E_{\max}$ 值相对于 $E_{\max}$ 和子体核 Z 之间的关系曲线。

许多由 β 衰变生成的子核从激发态退激时会伴随放出 γ 射线。图2.4示出了 ^{60}Co 的衰变纲图和它衰变时放出的 γ 射线的能谱。除非衰变核被置于磁场中，一般来说 β 粒子和 γ 射线的发射都是各向同性的。

在 β^+ 衰变中，核中的一个质子转变成一个中子、一个正电子和一个中微子，即 $P \rightarrow n + e^+ + \nu$ 。子体核的原子序数比母体核的小 1。人们发现当母体原子和子体原子（包括中和用的轨道电子）的静止质量达到平衡时，跃迁能量中一定减少了相当于两个电子的静止质量的静止能量，总计为 1.022MeV 。因此，只有当跃迁能量至少有 1.022MeV 时才有可能发生正电子衰变，否则从能量上讲是不可能发生正电子衰变的。图2.5示出了 ^{22}Na 的正电子衰变。电子俘获常同正电子衰变竞相发生。在 ^{22}Na 的情况下，经过这两种方式的衰变后其子体 ^{22}Ne 都处于 1.275MeV 的激发态上，并放出 1.275MeV 的 γ 射线。正电子衰变将伴随发射两个湮没光子，每个湮没光子的能量为 0.511MeV 。这种湮没辐射，是正电子在物质中慢化并同物质中的一个自由电子结合时发生的。由于核库仑场的影响，正电子谱多少与负电子谱有些不同，但在其它方面都遵从同样的理论。通常知道它的最大能量和平均能量就够了。

量子力学告诉我们，原子的轨道电子进入该原子核中的几率是有限的。K层电子，有时或为L层电子，可能会被核所俘获。在电子俘获衰变中，一个质子转变为一个中子，并放出一个中微子。中微子实际上是探测不到的，但当K层或L层中的空位被充填时会发射X射线或俄歇电子。而放出的X射线的能量就标志着子体核 ($Z-1$)

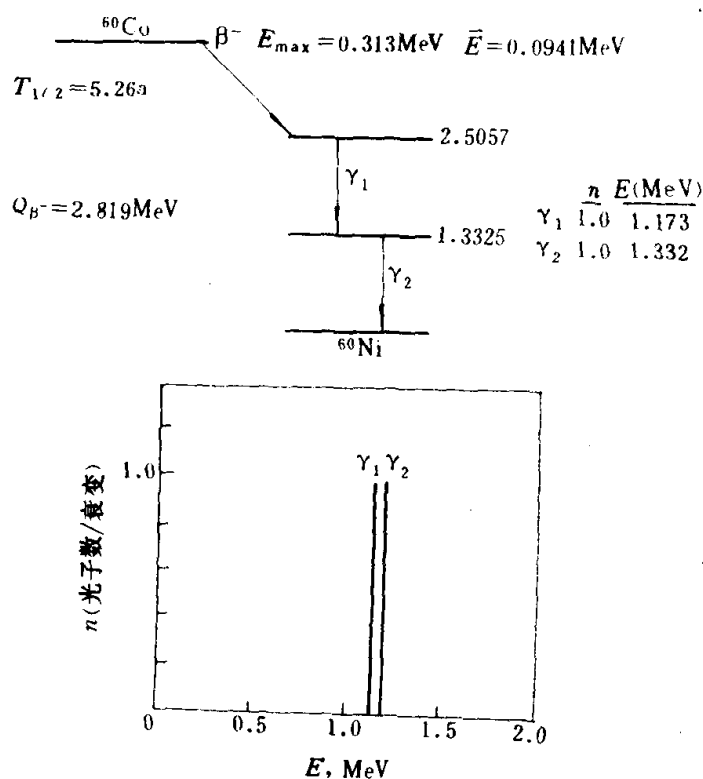


图 2.4 ^{60}Co β^- 衰变的衰变纲图及其衰变时放出的 γ 射线能谱

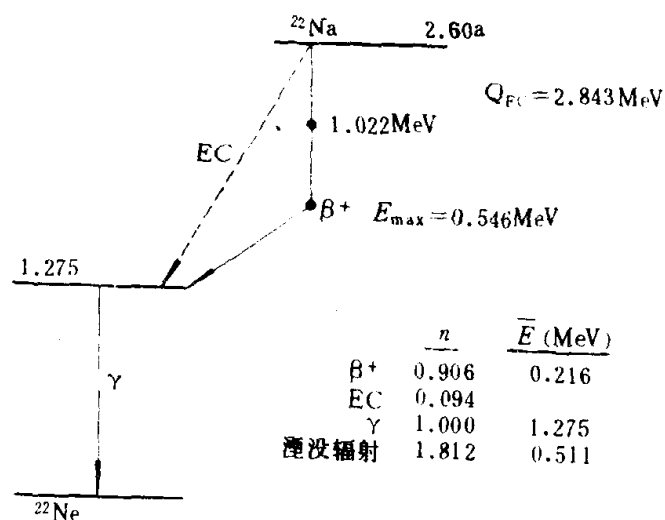


图 2.5 ^{22}Na 的 β^+ 衰变和电子俘获衰变

的跃迁。在发射俄歇电子过程中，本来要传给X射线的原子的那部分跃迁能量现在没有传给X射线，而是传给了外层电子，随后这个外层电子被发射出去。发射出的X射线光子数同内层空位数之比被称为“荧光产额”。在重元素中发射X射线的可能性较大，而在轻元素中发射俄歇电子的可能性较大。在 ^{22}Na 的电子俘获衰变中，所发射的俄歇电子的平均能量为 0.0008MeV 。电子俘获同 β^+ 衰变常竞相发生， Z 值大、跃迁能量小则电子俘获的可能性就大。

内转换是和 γ 辐射竞相发生的一个衰变过程， Z 值大、跃迁能量小时内转换的几率就大。在发生内转换时，本来要传给 γ 射线的那部分能量现在传给了原子的（K、L或许是M壳层的）一个电子。这种内转换电子的能量为

$$E_c = E_\gamma - E_B \quad (2.12)$$

式中 E_B 为（内转换电子）在母体原子中的结合能，或为该母体原子光电吸收的K边界、L边界或M边界的能量^①。内转换系数 α 为内转换电子数 N_c 与 γ 射线光子数 N_γ 之比

$$\alpha = \alpha_K + \alpha_L + \dots = \frac{N_c}{N_\gamma} \quad (2.13)$$

但经常给出的是光子或电子的百分数，而不是这种比值。要注意，内转换电子是单能的，它与连续谱的 β 粒子不同。放出内壳层电子后，结合能 E_B 就很快以发射X射线（它标志了母体原子能级间的跃迁）或俄歇电子的形式释放出来，或是两者同时都被释放出来。 ^{60}Co 的内转换小得可以忽略不计，但重元素的内转换就值得注意了。

我们从图2.6中可以看到同质异能跃迁的一个例子，图中的同质异能素为 $^{137\text{m}}\text{Ba}$ 和 ^{137}Ba 。跃迁发生在寿命相当长的激发能级上，事实上其寿命之长足可使 $^{137\text{m}}\text{Ba}$ 通过化学分离方法从 ^{137}Cs 中分离出来，并可把 $^{137\text{m}}\text{Ba}$ 看作是一个能和 ^{137}Ba 相区别的放射性核素。 $^{137\text{m}}\text{Ba}$ 衰变时伴随放出 0.6616MeV 的 γ 射线。由于有内转换，所以如图2.6所示出的，也放出内转换电子、X射线和俄歇电子。如果不进行化学分离，那么通常就把 0.6616MeV 的 γ 射线当成是 ^{137}Cs 放出的，这就象其它的 β 衰变之后伴随发射 γ 射线那样。

自发裂变是一个重原子核近似地分成两半（实际上轻、重裂变碎片的分布范围很宽）并放出具有连续能谱的中子和 γ 射线的一种放射性衰变方式。自发裂变经常同 α 衰变发生竞争，母体核的衰减速率用组合衰变常数

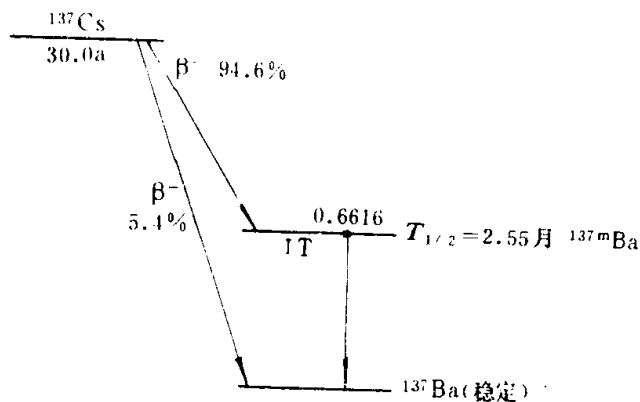


图 2.6 ^{137}Cs 的 β^- 衰变和 $^{137\text{m}}\text{Ba}$ 的同质异能跃迁衰变

$^{137\text{m}}\text{Ba}$ 衰变（同质异能跃迁）

辐 射	n (粒子数·衰变 $^{-1}$)	E (MeV)
γ	0.8981	0.6616
K (壳层)内转换 e^-	0.0820	0.6241
L (壳层)内转换 e^-	0.0147	0.6560
M (壳层)内转换 e^-	0.0049	0.6605
K (壳层)X射线	0.0728	0.0348
		平 均
L (壳层)X射线	0.0133	0.0044
俄歇电子	0.0133	0.001—
		0.0263

① E_i 为跃迁能量。——译者注