

上海第一医学院教材

# 核医学讲义

(医学专业用)

一九八三年二月

1954年出版

# 核医学讲义

（内部发行）

—1954—

## 编 写 说 明

这本《核医学讲义》系根据高等院校《核医学与放射防护教学大纲(试用稿)》，并结合我院的教学实际情况而编者的，主要供医学专业(五年制)内部试用，其它专业可根据自己专业的教学目的与要求选用。由于我们水平有限，经验不足，错误之处，敬希批评指正，并提出宝贵的意见，以便今后修订时参考。

编者

一九八三年二月

## 第一章 核医学概论

### 一、内容：

核医学(或称原子核医学)是和平利用原子能事业的一个重要组成部分它包括放射性核素及核射线在临床诊断及医学基础理论研究上的应用,世界上先进国家对核医学发展都十分重视,应用十分普及,这是因为核医学在医学上占有重要地位,它是医学现代化的主要标志之一。核医学通过近40年的发展,已成为独立的专门学科,而且根据工作的需要,临床核医学又发展为许多分支。比如心血管核医学、内分泌核医学、神经核医学、肝脏核医学、老年病核医学、儿科核医学等。以往国内曾称为原子医学,目前趋向于称核医学(nuclear medicine)或原子核医学。

### 二、国外发展动向：

1. 短半衰期核素的应用：半衰期小于10~12小时者称为短半衰期核素。近年来国外先进国家,短半衰期核素应用越来越多。例如,国内目前常用的 $^{198}\text{Au}$ 、 $^{131}\text{I}$ 、 $^{203}\text{Pb}$ —新醇等有些国家已不用或少用。短半衰期核素多依赖加速器生产,另外亦可由同位素发生器(俗称母牛)生产,我国目前已有 $^{99}\text{Tc}$ — $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 $^{113}\text{Sn}$ — $^{113\text{m}}\text{In}$ 发生器,以及它们的十余种标记化合物供临床应用。短半衰期核素在医学上应用有下述优点：

- (1) 对受检查者辐射剂量很小,使用安全、适合于孕妇、儿童患者;
- (2) 在快速显象中可使用较大强度,从而获得分辨好的影象及统计学上准确可靠的结果;
- (3) 可在短期内重复使用。

缺点是：

(1) 应用地点限于加速器附近的医院,特别对超短半衰期核素应用尤其如此。如用母牛,若母体同位素物理半衰期足够长者,则边沿地区亦可使用(例如: $^{113}\text{Sn}$ — $^{113\text{m}}\text{In}$ 母牛);

- (2) 不适于长期重复观察;

(3) 需要快速合成标记技术及仪器条件。

短半衰期核素的生产方式有二种，一是医用回旋加速器，国外先进国家已有装备，且有商品供应，如医学诊断和研究中应用的重要核素 $^{11}\text{C}$ 、 $^{15}\text{O}$ 、 $^{13}\text{N}$ 、 $^{18}\text{F}$ 、 $^{123}\text{I}$ 等均为加速器生产。另近年对心肌显象有价值的 $^{201}\text{Tl}$ 以及对肿瘤诊断有价值的 $^{67}\text{Ga}$ 、 $^{111}\text{In}$ 亦由加速器生产的。医用加速器的功能除生产同位素外，还可以作活化分析及快中子治疗之用，国外小型医用加速器可装在医院，多用于研究；较大的加速器则由政府支持筹备，负责生产供应同位素。近年来由于CT的问世及应用，放射性核素静态显象已逐渐向了解器官功能（血液动力学）及代谢、生化改变的方向发展。因此对加速器生产的核素及其标记合成的化合物（放射性药物）的研究领域较为活跃，这是一个十分值得注意的动向，除加速器外，另一生产短半衰期同位素的方法是同位素发生器（俗称母牛）装置，该装置有一个长半衰期同位素（即母体），它的衰变产物（子体）即为所需要的短半衰期同位素，如果将母体同位素吸附在装有吸附剂的交换柱内，并使发生器内母体同位素与子体同位素达到辐射平衡，那么使用时只要用一定的淋洗剂淋洗，即可以将子体同位素从发生器上淋洗下来达到与母体同位素分离目的，以供临床应用。加之同位素标记试剂药箱化供应，这样不仅标记合成快，而且放射性药物也标准化，又保证质量，现将国内目前应用的 $^{99}\text{Mo}$ — $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 及 $^{113}\text{Sn}$ — $^{113\text{m}}\text{In}$ 母牛及其各种标记化合物临床应用例表1，以供参考。



表 1 国内目前常用的<sup>99m</sup>Tc及<sup>113m</sup>In标记化合物及其主要用途

同位素母牛	淋洗液及标记化合物名称	用 途
<sup>99m</sup> MO— <sup>99m</sup> Tc发生器	(1) 淋洗液: 高 <sup>99m</sup> Tc锝酸钠	脑显象、甲状腺、腮腺显象及放射性核素血管造影等
	(2) 硫化 <sup>99m</sup> Tc( <sup>99m</sup> Tc <sub>2</sub> S <sub>7</sub> )胶体	肝显象
	(3) <sup>99m</sup> Tc—植酸盐	肝显象
	(4) <sup>99m</sup> Tc—DMSA(二巯基丁二酸)	肾显象
	(5) <sup>99m</sup> Tc—葡萄糖酸钙	肾显象
	(6) <sup>99m</sup> Tc—焦磷酸盐	骨显象、心肌梗塞显象、脑梗塞显象。
	(7) <sup>99m</sup> Tc—MDP(次甲基二磷酸)	骨显象
	(8) <sup>99m</sup> Tc—多聚磷酸盐	骨显象
	(9) <sup>99m</sup> Tc—乙酰苯胺亚氨基五醋酸(IDA)类衍生物( <sup>99m</sup> Tc-HIDAEHIDA, P-BIDA)	胆系功能
<sup>113m</sup> Sn— <sup>113m</sup> In发生器	(1) <sup>113m</sup> In洗脱液(pH < 3.0)	心、肝血池、胎盘显象
	(2) <sup>113m</sup> In—磷酸胶体	肝显象
	(3) <sup>113m</sup> In—DTPA(二乙三胺五醋酸)	脑、肾显象
	(4) <sup>113m</sup> In—MDP	骨显象

2 放射性核素体外显影：近年来，由于电子学、核物理、电子计算机技术的发展，促进了核医学显象仪器的改进与发展，特别是ECT的发展较为迅速。

(1)  $\gamma$ -照相机和扫描机在器官显象方面优缺点比较：(见表2)

表 2

$\gamma$ -照相机	扫描机
(1) 一次成象，检查时间大为缩短。	较慢，一般需10~30分钟，最快者2分钟。
(2) 灵敏度较高。	较差。
(3) 便于应用短半衰期或超短半衰期同位素。	半衰期太短者不能应用。
(4) 病人体位移动影响小。	有影响。
(5) 快速连续动态显象及功能研究(核素血管造影术)。	不能进行快速动态连续显象。
(6) 仪器价格相对较贵。	较便宜(相对地)。

(2) 放射性核素发射型计算机断层摄影(Radionuclide Emission Computerized Tomography, ECT)。目前应用的ECT系统主要分为两大类，即：(1) 湮没符合探测(Annihilation Coincidence Detection, ACD)系统，其优点为① 湮没光子同时由相隔 $180^\circ$ 的角度发射，可用电子学准直，不需要铅准直器；② 分辨率及对比度好；③ 均匀性及探测效率高；④ 可使用正电子发射的 $^{11}\text{C}$ 、 $^{15}\text{O}$ 、 $^{13}\text{N}$ 及 $^{18}\text{F}$ 等标记化合物观察人体组织的功能、血流及代谢改变。但要实现此一目标要PCT，加速器生产的短半衰期核素 $^{11}\text{C}$ 、 $^{15}\text{O}$ 、 $^{18}\text{F}$ 及 $^{13}\text{N}$ ，且必须具备快速合成，快速进行药物、生物学、放射化学鉴定等条件。(2) 单能光子计数(Single Photon Counting, SPC) 其优点：① 可用 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 标记的放射性药物；② 仪器可用 $\gamma$ -照相机改装，结构较简单(探头旋转30-

用计算机重建三维图象)；③ 能作常规  $\gamma$ -照相机使用。

3. 核素显象技术与其他显象技术的比较 (见表3)

表3 医学影像学(Medical Imageology)各种方法比较

项目 \ 方法	X线摄影	B型超声	X线 CT	核素显象
显象原理	利用物质对X-射线吸收的差别成象。	利用不同物质对超声透射和回声的差别成象。	同 X 射线	利用各种放射性核素标记化合物在体内代谢过程使器官组织成象。
图形特征	各方位投射的整体象, 冠状面和矢状面的断层象, 在有足够对比情况下, 图象的分辨率很高。	矢状面、横断面和斜面的断层象, 对区别病变与实质性病变十分有效。	横断面的断层象, 利用电子计算机图象重建, 可得到矢状面和冠状面及斜面的断层象, 能分辨体内密度微小差别的解剖结构。	有关器官和组织的整体象, 亦可利用电子计算机重建图象(三维图象), 可实现结构和功能、代谢、血流等的联合观察。
造影剂或诊断用药	用或不用	不用	用或不用	用
形态或功能检查。	主要观察形态也可粗略了解部份器官功能。	形态	同 X 线摄影	可实现形态及功能联合检查。
检查性质	非损伤性或损伤性。	非损伤性	非损伤性	非损伤性
仪器价格	较贵或很贵	较贵	极贵	较贵或很贵



### 3. 放射免疫分析(Radioimmunoassay): (见第三章)。

4. 电子计算机的应用: 近年来电子计算机已成为原子核医学中不可缺少的重要工具。这一新技术的应用, 使原子核医学向定量和动态测定的方向迈进。由于放射性核素的本身性质(衰变规律)、探测仪器及所得数据的复杂性, 造成了核医学比医学其它领域对电子计算机的依赖性更大, 目前国际上较大的同位素实验室已普遍采用电子计算机, 尤其是小型和微型的专用计算机的使用更加广泛, 电子计算机在核医学中的应用主要有下列几项:

- (1) 分析器官扫描或摄影的结果, 进行图象重建及数据处理。
- (2) 示踪动力学研究。
- (3)  $\gamma$ -射线能谱的定量分析。
- (4) 体外测定装置的自动化。
- (5) 放射自显影的定量。
- (6) 放射治疗辐射剂量的计算。
- (7) 资料贮存、检索及处理。
- (8) 实验室管理与计划制订。
- (9) 计算机辅助断层扫描等。

5. 活化分析: 活化分析对环境污染测定、食品检查、肿瘤、冠心病、职业病、地方病、法医学、考古学研究等均很有用, 也是原子核医学中一种重要的技术。主要有以下二种方式的活化分析:

- (1) 带电粒子活化分析。
- (2) 人体局部活化分析。

6. 稳定性同位素应用概况: 由于高能核磁共振仪, 气层-质谱联机和活化分析技术的发展, 且稳定性同位素已可大规模生产, 成本降低, 使稳定性同位素的应用受到重视, 其应用有下列优点: ① 除氘外, 一般无毒性, 可用于人体内进行代谢过程研究; ② 无辐射损伤; ③ 它不会衰变与发生化合物的辐射分解; ④ 核磁共振谱分析和质谱分析不仅能测量稳定性同位素的含量, 也可以直接测定标记原子在标记分子中的位置。

目前,  $^2\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{18}\text{O}$ ,  $^{26}\text{Mg}$ ,  $^{36}\text{S}$ ,  $^{41}\text{K}$ ,  $^{46}\text{Ca}$ ,  $^{58}\text{Fe}$ ,  $^{64}\text{Ni}$ ,  $^{70}\text{Zn}$ ,  
 $^{74}\text{Se}$ ,  $^{196}\text{Hg}$  等约 20 余种稳定性同位素均可进行测定。

(林祥通)

## 第二章 核物理基础知识及核子仪器

### 一、原子结构

世间一切物质都由元素所组成，构成元素的基本单位是原子，一个原子恰如一太阳系，原子核位于中心，核外电子以固定的轨道围绕着原子核运行。原子核在原子中所占的空间极小，质量几乎等于原子的质量，但它并不是构成原子的最小单位，原子核又由质子和中子组成。质子和中子质量数相同，中子不带电，质子带有一个阳电荷，原子核所带正电荷数与核外电子数相同。通常以  $A$  表示原子的质量数， $Z$  表示原子核内的质子数（即原子序数）， $A - X$  表示原子核内的中子数，用  $X$  代表元素符号，故以  ${}^A_Z X$  表示原子核的结构。因为元素符号本身就确定了原子数，所以简便地只记元素符号和质量数，即  ${}^A X$ ，如  ${}^1_1\text{H}$ 、 ${}^{22}_11\text{P}$ 、 ${}^{131}_53\text{I}$ 。

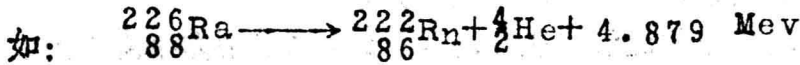
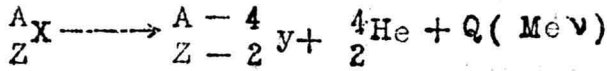
原子核结构及其所处能量状态的差异又可有核素，同位素，同质异能素之别。凡具有一定原子序数及质量数的原子称为一种核素，如  ${}^1_1\text{H}$ 、 ${}^{12}_6\text{C}$ 、 ${}^{198}_{79}\text{Au}$  都表示不同的核素。核素可分为两大类：一类称稳定性核素，它能够稳定地存在，不发生自发的变化。另一类称放射性核素，它是不稳定的，会自发地转变为别的核素，同时放出射线。对于核内质子数相同而中子数不同的核素，称为同位素如  ${}^1_1\text{H}$ 、 ${}^2_1\text{H}$ 、 ${}^3_1\text{H}$  互称同位素，但它们是不同的核素。核内中子数和质子数都相同的核素，它们所处的能量状态可能不一样，这样的核素互称为同质异能素，例如： ${}^{99m}_{43}\text{Tc}$ （或  ${}^{99m}_{43}\text{Tc}$ ）和  ${}^{99}_{43}\text{Tc}$ ，两者的能量不一样， ${}^{99m}_{43}\text{Tc}$  具有的能量高，是  ${}^{99}_{43}\text{Tc}$  的亚稳态（metastable state），对此亚稳态的核素，在元素符号的右上角（或左上角），注以“m”表示。

### 二、核衰变方式

放射性原子核自发地发生结构及能量状态的改变，放出射线，转变成另一种核素的过程称为核衰变，放射性核素的核衰变有以下几种方式：

(一)  $\alpha$  衰变：放射性原子核放出  $\alpha$  粒子后变成另一个核的过程称为  $\alpha$  衰变。 $\alpha$  粒子带有 2 个单位正电荷，它的质量数  $A = 4$ （实际

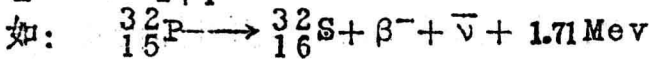
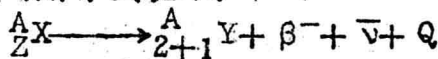
为氦原子核 ${}^4_2\text{He}$ ) 因此经过 $\alpha$ 衰变之后, 子核比母核少了两个中子和两个质子, 若以 $X$ 代表母核,  $Y$ 代表子核,  $Q$ 表示衰变能,  $\alpha$ 衰变方式可以下式表示:



放射性核素进行 $\alpha$ 衰变时, 所产生的 $\alpha$ 粒子构成 $\alpha$ 射线, 这种射线电离能力强, 射程短, 穿透力弱, 一张纸即可阻挡它的通过。

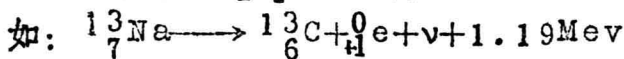
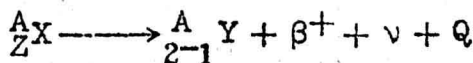
### (二) $\beta$ 衰变:

1.  $\beta^-$ 衰变:  $\beta^-$ 粒子实际上就是负电子( $e^-$ )。它的质量比核小得多。原子核内中子过多而造成不平衡时, 放出 $\beta^-$ 粒子, 放出 $\beta^-$ 粒子后母核和子核的质量数 $A$ 相同, 原子序数提高了一个单位,  $\beta^-$ 衰变可用下式表示:



式中 $\bar{\nu}$ 为反中微子, 系质量极小的中性粒子,  $\beta^-$ 衰变时 $\beta^-$ 所带的能量大小与 $\bar{\nu}$ 所带的能量相关, 当 $E_{\bar{\nu}}(E_{\bar{\nu}} \text{ 的能量}) \approx Q$ 时,  $\beta^-$ 能量近于零。反之, 当 $E_{\bar{\nu}}$ 很小, 可以忽略不计时,  $\beta^-$ 粒子的能量达最大, 这个最大值称为 $\beta^-$ 最大能量。因此,  $\beta^-$ 具有连续能谱, 其平均能量系指自零开始的 $\frac{1}{3}$ 处。 $\beta^-$ 粒子的穿透力较 $\alpha$ 粒子强得多, 可以穿透数毫米的铝箔。

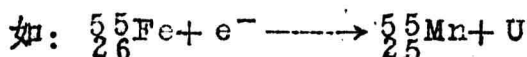
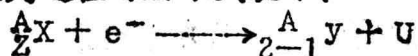
2.  $\beta^+$ 衰变:  $\beta^+$ 粒子就是正电子( $e^+$ ), 只有人工放射性核素才有 $\beta^+$ 衰变, 当原子核内质子相对过多而造成不平衡时, 即放出 $\beta^+$ 粒子, 其衰变方式表示如下:



$\beta^+$ 粒子的能谱也是连续的。

(三) 电子俘获 (EC) 又称K电子俘获, 原子核自一个轨道上 (往往是K层) 俘获一个电子, 使核里的一个质子转变成中子并放出中微

子，其衰变过程可用下式表示：



此处中微子所带的能量即衰变能  $Q$ ， $E U = Q$ 。

电子俘获过程中伴随着发生标志 X 射线， $\gamma$  射线和俄歇电子。俄歇电子 (Auger electron) 指电子俘获过程中，有时也可不放出标志 X 射线，而把过剩能量传递给另一个壳层电子，使它成为自由电子而放射出来，此电子就是俄歇电子。

(四)  $\gamma$  辐射：处于激发态的原子核通过放出  $\gamma$  光子而回到基态，这个过程称  $\gamma$  辐射。

$\gamma$  射线是一种电磁辐射，和 X 线相似，不带电，但具有一定的质量和能量，它在真空中的传播速率为每秒 30 万千米，穿透力极强。

在  $\gamma$  辐射过程中原子核的能量状态发生改变，称为同质异能跃迁，其质量及原子序数均未改变。由于原子核激发状态的时间十分短暂 ( $10^{-12}$  秒)，这种跃迁多伴随着  $\alpha$ 、 $\beta$  等衰变而发生的，激发状态的原子核，还可以内转换电子方式将能量直接传给核外电子，把壳层电子呈单能电子束发射出去。这种内转换现象产生的电子称为内转换电子，在 K 层或 L 层电子发射之后留下的空位，将继续发生次级射线，即发射标志 X 射线或俄歇电子。

### 三、放射性衰变规律及强度和辐射剂量单位

#### (一) 放射性衰变规律：

放射性核素的原子核不断地自发地发生衰变，但原子核的衰变并不是同时发生的，放射性核素在单位时间内衰变的原子核数与在该时间内存在着的原子核数成正比例，其衰变规律可如下式表示：

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

式内  $N_0$  为原始放射性原子核数， $N$  是经过  $t$  时间以后的原子核数， $\lambda$  是衰变常数，即表示每一个原子核在单位时间内发生衰变的心率，衰变快者  $\lambda$  值大，衰变慢者  $\lambda$  值小， $\lambda$  值是每个放射性核素的特



征常数，它不会随外界条件的变化而变化。

放射性核素进行核衰变的同时，放射性强度，亦按指数规律随着时间减弱，通常以下式表示：

$$I = I_0 e^{-\lambda t}$$

式内  $I_0$  为原始放射性强度， $I$  为经过  $t$  时间以后的放射性强度， $\lambda$  的意义同前。放射性强度减弱一半所需要的时间，称为物理半衰期，通常以  $T_{1/2}$  表示。它表示放射性核素的衰变速率， $T_{1/2}$  和  $\lambda$  之间的关系为： $T_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda}$ ，显然，每一种放射性核素都有其固定的  $T_{1/2}$  值。

核医学领域中常将放射性核素引入体内，此时放射性强度的减弱不仅与核素的物理半衰期有关，而且与核素在体内的代谢过程有关。通常将生物体内的放射性核素由于生物代谢过程从体内排出到原来的一半所需要的时间称为生物半衰期，以  $T_b$  表示。放射性核素由于放射性衰变和生化代谢过程共同的作用，减少到原来一半所需时间称有效半衰期：以  $T_{eff}$  表示，其间的关系为：

$$\frac{1}{T_{eff}} = \frac{1}{T_{1/2}} + \frac{1}{T_b}$$

$$T_{eff} = \frac{T_{1/2} T_b}{T_{1/2} + T_b}$$

## (二) 放射性强度单位：

放射性强度单位是由单位时间内衰变的数目来表示，常用单位为居里 (Ci)，毫居里 (mCi) 及微居里 ( $\mu$ Ci)，其含义为：

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ 次核衰变}$$

$$1 \text{ mCi} = 3.7 \times 10^7 \text{ 次核衰变}$$

$$1 \text{ } \mu\text{Ci} = 3.7 \times 10^4 \text{ 次核衰变}$$

1974 年国际辐射单位和测量委员会建议放射性强度的单位改为贝克勒尔 (Becquerel) 即 Bq，定义为 1 次核衰变/秒，故  $1 \text{ Bq} \approx 2.703 \times 10^{-11} \text{ Ci}$ 。

实际应用中放射性核素多以溶液形式存在，有时也以结晶或气体形式存在，单位容积的溶液内所含的放射性强度称放射性浓度以  $\text{Ci}/\text{ml}$ ，

表示，单位重量所含放射性强度为比活性以  $\text{mCi}/\text{ml}$  或  $\mu\text{Ci}/\mu\text{g}$  表示。

### (三) 辐射剂量单位：

为研究射线对物体的作用，衡量射线对物体作用的大小，多采用辐射的剂量单位，辐射的剂量单位又可分辐照量，吸收剂量及剂量当量。

1. 辐照量又称曝射量，通常指射线对空气的电离能力，单位为伦琴，以 R 表示，按 1967 年国际辐射单位委员会 (ICRU) 建议，1 伦琴指照射 0.001293 克空气（即在  $0^\circ\text{C}$  和 760 毫米汞柱时的 1 立方米的干燥空气），使其中产生正负离子的总电荷各为 1 静电单位所需 X 线或  $\gamma$  射线的剂量，伦琴这个单位数大，通常使用毫伦 (mR)，微伦 ( $\mu\text{R}$ ) 等较小单位其转换关系为： $1\text{R} = 10^3\text{mR} = 10^6\mu\text{R}$ 。

2. 吸收剂量，指每单位质量的放射性物质吸收的辐射能量。吸收剂量专用单位是拉德 (rad)，其含义为任何每公斤质量的被照射物质吸收辐射或射线的能量数为  $10^{-2}$  焦耳时称为 1 拉德，即： $1\text{rad} = 10^{-2}\text{焦耳}/\text{公斤} = 100\text{尔格}/\text{克}$ 。拉德单位数大，常以毫拉德 (mrad) 表示，其间关系为  $1\text{rad} = 1000\text{mrad}$ ，1974 年国际辐射单位和测量委员会提出吸收剂量的专用单位改为格雷 (Gray)，符号 Gy，rad 与 Gy 的关系为  $1\text{Gy} = 100\text{rad}$ 。

剂量当量：衡量人体所受的各种电离辐射剂量产生的生物效应，单位雷姆 (rem)，限于放射防护中应用。rem 与 rad 之间的关系： $\text{rem} = \text{rad} \times Q \times N$  Q 为射线的品质因子，N 为分布因子。

## 四 射线和物质的相互作用

### (一) 带电粒子和物质的相互作用：

带电粒子和物质的相互作用有以下几种类型：

1. 电离和激发： $\alpha$ 、 $\beta$  等带电粒子通过物质时，按照它带电的极性，吸引或排斥核外电子，在路径周围留下了许多离子对，这种现象称为电离，每单位长度路径上所产生的离子对数目称电离密度，它代表电离作用的大小，电离密度是和带电粒子的速率，电荷数和物质

的密度有关。粒子的电荷数大，速率小，物质的密度大。可产生的电离密度就大，反之则小， $\alpha$ 粒子比 $\beta$ 粒子的带电量，速率慢，所以 $\alpha$ 粒子的电离本领比 $\beta$ 粒子大得多。

带电粒子通过物质的过程中，如果壳层电子所获得的能量比较小，不能够脱离原子变成自由电子，只能从内层轨道跳到外层轨道，使原来处于稳定状态的原子变成处于较高的能量状态，这种现象称为激发。这种原子所处的较高能量状态，称为激发态，这种激发态的原子极不稳定，很容易放出多余的能量而恢复至基态。

2. 散射作用，带电粒子通过物质时，因受原子核静电场的相互作用，而改变运动方向，但能量不变，这种现象称为散射。 $\beta$ 粒子因其质量较 $\alpha$ 粒子小，散射较大，所以散射作用较为显著。

3. 韧致辐射，快速的带电粒子通过物质时，被物质的原子核所阻止，突然减低其速率，将一部分能量转变成具有连续能谱的电磁辐射，这种辐射称为韧致辐射。

4. 湮没辐射， $\beta$ 粒子被物质所阻止，完全丧失了动能之后，与物质中的自由电子相结合，转化为方向相反，能量各为 $0.511\text{mev}$ 的两个光子，这种辐射称为湮没辐射，或称光化辐射。

当带电粒子通过物质时，可由上述因素被吸收。

## (二) $\gamma$ 射线与物质的相互作用

放射性核素放射的 $\gamma$ 光子与物质的相互作用，可有以下三种类型：

1. 光电效应： $\gamma$ 光子与原子的壳层电子相互作用把能量全部交给电子时，使之离开原子成为自由光电子，这个过程就称为光电效应。在重元素中，能量低的光子这个效应比较显著。

2. 康普顿——吴有训效应，光子与原子最外壳层电子呈弹性碰撞，将部分能量交给电子，使之脱离核的束缚从原子中逸出，这种电子称为康普顿电子，而光子本身能量减小，且运动方向偏转。

3. 电子对生成效应，能量大于 $1.02\text{MeV}$ 的光子，经过原子核时受原子核电场的作用，转化成一对负电子和一个正电子，即一对正负电子，在物质原子序数较大时，这种效应比较显著。

## (三) 中子与物质的相互作用

中子由于它不带电，因此与所通过的物质原子核没有库伦作用，与原子核碰撞的机会较带电粒子大，中子碰到物质的原子核后，给出部分能量，使原子核受到反冲，而在物质中快速运动，引起物质电离。中子与其质量相当的原子核相碰撞时，能量消耗大，反冲核得到的能量大，引起的电离较强烈，如中子与氢原子核即如此。因此，中子容易被含有很多氢原子的轻物质（如水，石蜡等）所吸收，中子与重核相碰撞时，仅失去其能量的一小部分，故能通过很厚的重物质如铅等。

### 三 放射性探测仪器

记录射线和物质的相互作用时，产生的特殊现象，可以直接或间接地探测到粒子或光子的存在及其数量。通常将探测射线强度的装置称做放射性探测仪，临床医学上常用的放射性探测仪，可分做两种类型：一类，供测量样品如 $\gamma$ 计数器，液体闪烁计数器。另一类，供体外显影或体外测量如甲状腺功能测定仪，肾功能测定仪，扫描仪， $\gamma$ 相机，放射性核素计算机处理断层摄影仪（ECT）。

放射性探测仪虽有多种，就结构而言，主要有两个组成部分：即探测器（探头）及电子测量仪器，近年来除这两部分之外，多数仪器附有计算机或微处理机。

（一）探头：其主要功能是将射线能量转变成可记录的电讯号，实质上是一种能量转换器，常用的探头有：

1. 电离室：是气体探测器的一种。从结构看，电离室相当于一个充气的密闭容器，由两个电极（收集电极和高压电极）和两极间的有效灵敏体积组成。在两极间加一定电压，测量射线进入后产生的电离电流，以表示射线的强弱。

2. 盖革-弥勒计数管（G-M管）：形状有多种，基本结构是一个圆柱形密闭的充气容器，中央是作为阳极的金属细丝，周围以金属筒或在玻璃管内喷金属物质作为阴极，管内充以氩或氖等惰性气体及少量“猝灭”气体。射线进入计数管内，引起惰性气体电离，电离形成的电子被阳极所收集。在原来加有一定电压的阳极上产生瞬时电压降，向电子线路输出，即形成脉冲信号，在工作电压范围内，放射性越强，单位时间内输出脉冲信号越频繁。