



第七章 放射线的测量

学习目标

- ◆掌握照射量及吸收剂量测量的方法及肿瘤放射治疗剂量学计算的基本概念
- ◆熟悉诊断X射线辐射剂量学评价测量方法
- ◆了解放射线测量的基本方法





放射线测量的目的

1.在应用放射线进行**诊断和治疗**中，要了解放射源所输出的射线强度，以确定所采取的照射量是否符合临床的要求；

需要定量测量被照射的肢体或病灶所吸收的射线剂量的大小，从而判断能否达到预期的疗效；

2.在**放射防护**中，需要对X、 γ 射线或其他类型的辐射所形成的射线场进行定量测量，以判断对辐射所设置的屏蔽以及为工作人员所提供的放射防护水平能否达到所规定的安全标准





射线的测量种类

1. 辐射场分布的**照射量**测量
- 机房内射线分布
 - 机房外透射线、散射线强度
 - 放射源输出量的大小

2. 放射学诊断、治疗中的被检者、患者所接收的**吸收剂量**测量

测得某点的照射量可以换算出其他物质中的吸收剂量





第一节 照射量的测量

$$X = \frac{Q}{m}$$

照射量 是以X、 γ 射线在空气中产生的电离电荷的数量来反映射线强度的物理量

照射量的测量

就是通过空气电离室来收集、测量X、 γ 射线在空气中所产生的微量电离电荷

一、自由空气电离室（标准电离室）

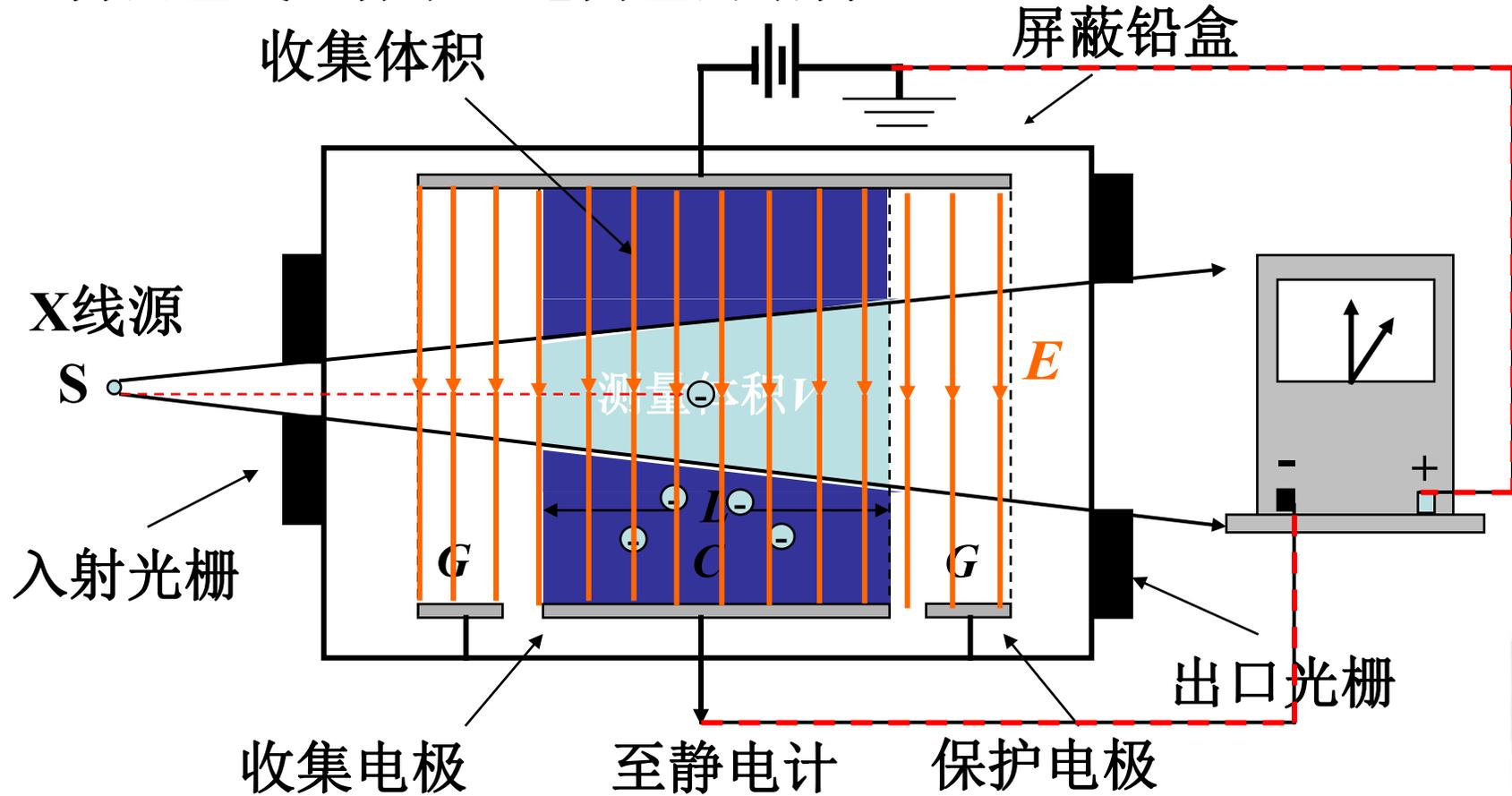
1. 测定X、 γ 射线照射量的原理：

对质量已知的隔离空气，测量在给定质量的空气中由X、 γ 射线释放出来的次级电子在空气中所产生的任何一种符号的离子总电量





2. 自由空气（标准）电离室的结构



电极板与X线束边缘的距离 $>$ 次级电子在空气中的射程



在电子平衡条件下

设被收集的离子总电荷量为 Q （库仑），“测量体积”内空气的质量为 m

$$m = \rho \cdot V$$

式中： ρ 为标准状况下（0°C, 760mmHg）的空气密度
 V 为“测量体积”内空气的有效体积

X线的照射量为

$$X = \frac{Q}{m} = \frac{Q}{\rho \cdot V}$$

注意：由于很难完全达到电子平衡及空气质量的稳定
所测照射量往往偏离正确值，需进行适当校正



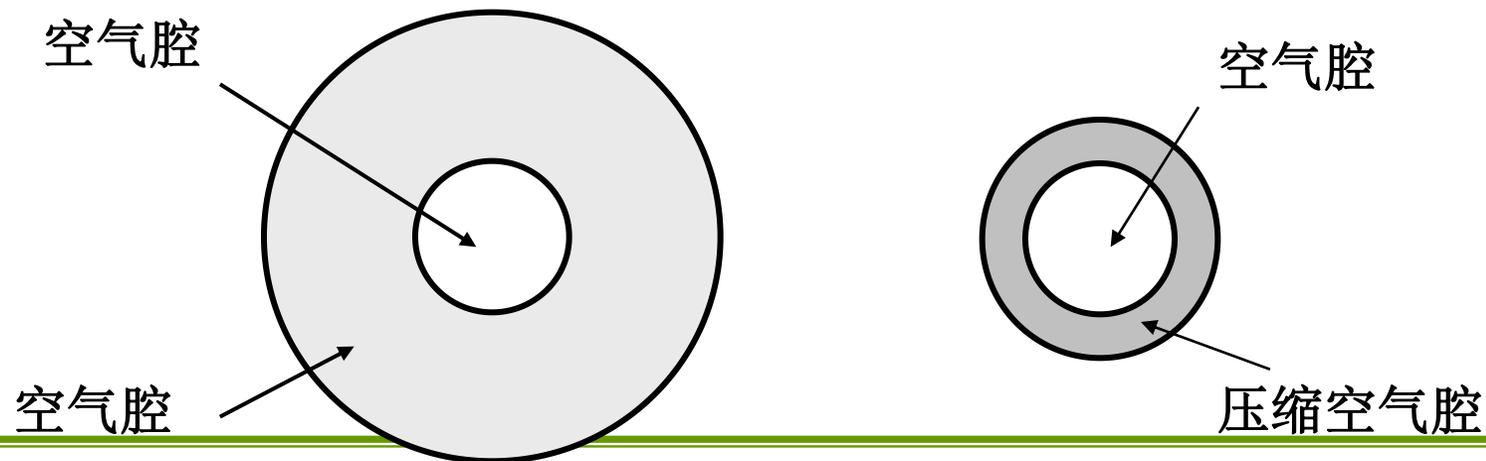


二、实用型电离室

标准型电离室由于体积庞大，应用技术复杂，当X、 γ 射线光子能量较高时，建立“电子平衡”的空气厚度较大，因此只能放置在国家标准实验室内作为次级标准计量仪使用，不能作为现场测量仪器

现场测量——实用型电离室

将“收集体积”外的空气进行压缩
压缩的空气壁用空气等效材料代替



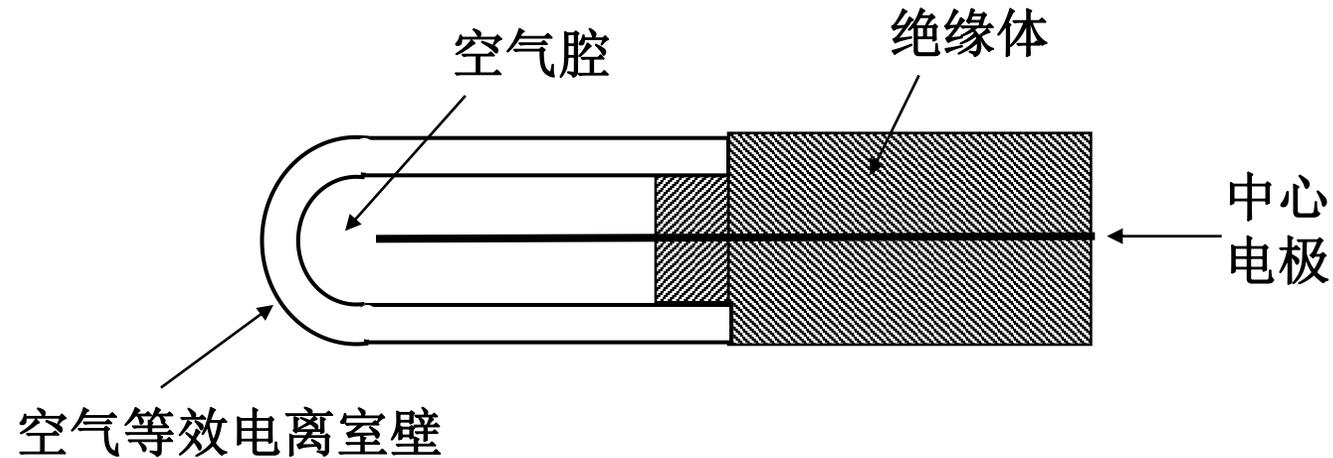


(一) 实用型电离室室壁

电离室室壁材料和中心电极的有效原子序数与自由空气基本等等效

保证电离室室壁内释放的次级电子的能谱与空气相似

常用室壁材料：石墨、电木或塑料



当测定较高能量X、 γ 射线时，需在原电离室室壁上套上适当厚度的平衡罩





(二) 电离室的校准

实用型电离室直接用于照射量测量的条件：

1. 它与空气等效
2. 它的空气腔体积能够准确得知
3. 它的室壁厚度足以提供电子平衡

实际很难同时满足，需要用自由空气电离室对实用型电离室做校准刻度

方法：用两种电离室同时测量已知强度的X、 γ 射线源给出实用型电离室测量校准因子，用于校正实用型电离室所测照射量值





使用一段时间后对电离室的校准

校对时：室温一般为20°C，气压为760mmHg

当实际应用偏离校对气温和气压时，会造成测量误差

要对所测的数值进行温度、气压校正，其校正系数为 K_{TP}

$$K_{TP} = \frac{273.2 + t}{293.2} \times \frac{760}{P} \quad (7-1)$$

式中：
 t 为测量时的气温（°C）
 P 为测量时气压（mmHg）





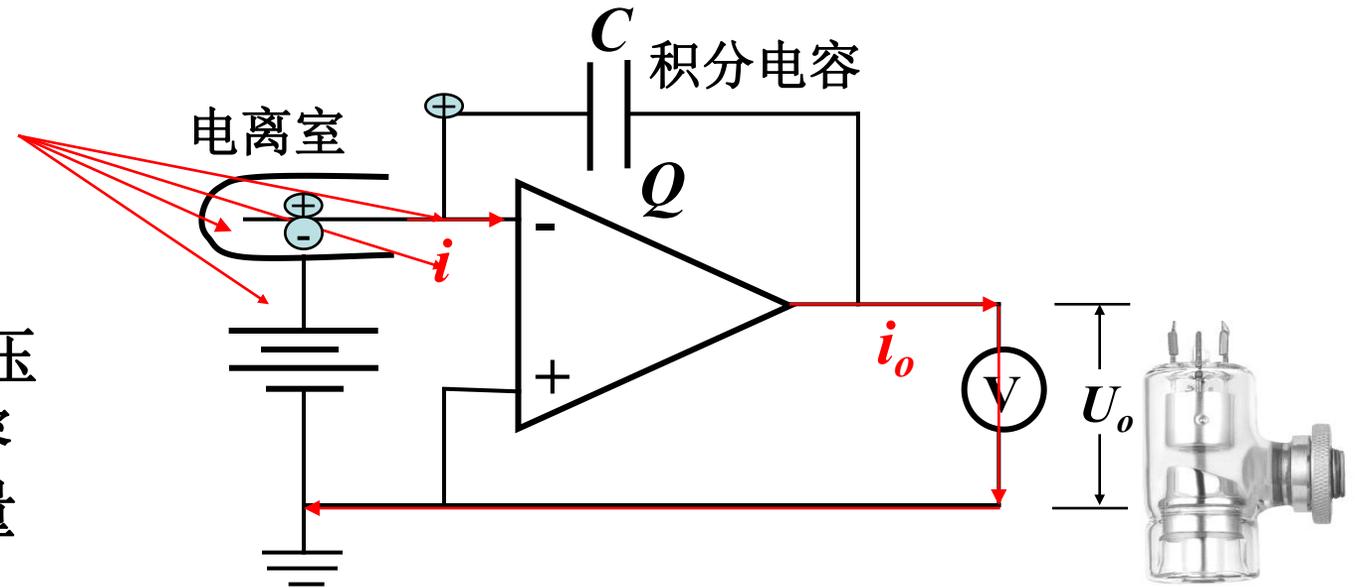
三、电离电荷测量电流

X 、 γ 射线在电离室中产生的电离电荷量非常小，所形成的电离电流在 $10^{-6}\sim 10^{-15}\text{A}$ 之间

一般情况下，不直接测量电离电量，用积分放大电路将电离电流在一个积分电容上充电，通过测量积分电容两端的积分电压来推算积分电荷量

$$U_0 = -\frac{Q}{C}$$

式中： U_0 为输出电压
 C 为积分电容
 Q 为电离电量





第二节 吸收剂量的测量

对医学和辐射防护学有意义的量是物质中某点的吸收剂量

为了测定物质中某点的吸收剂量，需要测量射线在介质中该点沉积的能量的大小

方法是：用探头取代该点为中心的一小块物质，用探头测量物质中该点吸收射线能量后产生的理化变化，间接反映该点吸收的射线能量，经过适当校准、刻度，从而给出该点的吸收剂量大小

探头要足够小，使它的引入不显著地干扰原来辐射场的分布

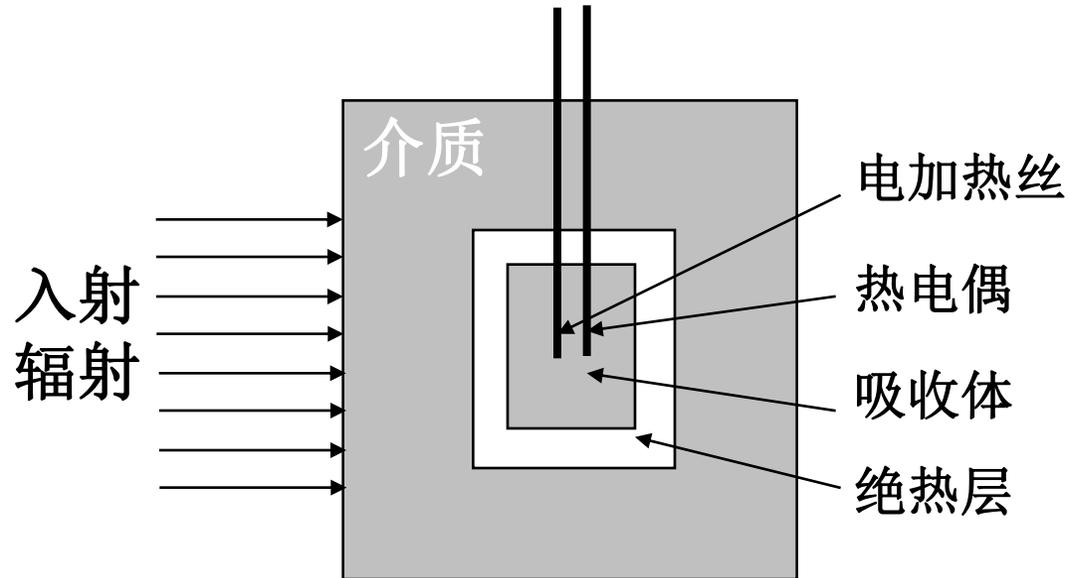




一、吸收剂量的基本测量法

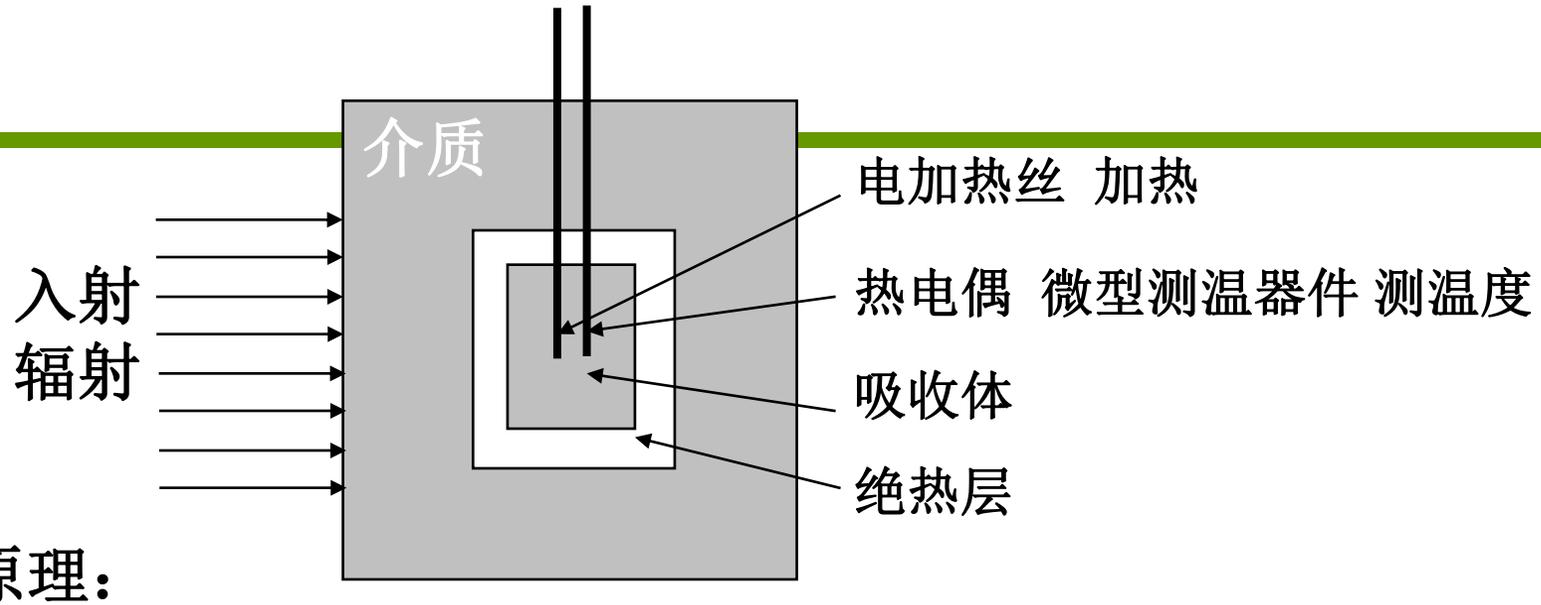
当物质受到辐射照射后，其吸收的射线能量将以热的形式表现出来，吸收的能量越大，产生的热量亦越高

将介质吸收的能量与其释放的热量进行已知的吸收能量与热量的刻度，就可以定量给出吸收剂量的大小



量热剂量计原理示意图





1. 当X、 γ 射线照射时，吸收体吸收了射线能量，温度升高，用热电偶测出吸收体的温升 dT ，计算出吸收体吸收的能量，以求出小块吸收体材料的吸收剂量 D

$$D = \frac{d\varepsilon}{dm} \approx \frac{dE}{dm} \quad (7-3)$$

式中： dm 为吸收体质量； $d\varepsilon$ 为射线授予该吸收体的平均能量； dE 为以热量形式出现的能量





2. 热量的测量:

电加热丝通电, 电能为 dE_c , 加热吸收体, 使吸收体的温升 dT_c 与射线辐射能使吸收体的温升 dT 相同

dE_c/dT_c 表示每单位温升相应的能量吸收

吸收体的吸收剂量

$$D = \frac{dE_c}{dT_c} \cdot \frac{dT}{dm} \quad (7-4)$$

注意: 量热法虽然是测定吸收剂量的标准方法, 但因为制造和使用技术复杂, 只能作为标准仪器使用, 经校准其他测定吸收剂量的仪器





二、电离室测量法

吸收剂量的现场测量大多通过测量照射量，然后换算成介质的吸收剂量

(一) 空气介质中的吸收剂量

已知：1个电子电量 $e=1.6\times 10^{-19}\text{C}$

在空气中产生一对离子所需的平均电离能量
 $\omega=33.73\text{eV}$ ，又 $1\text{eV}=1.60\times 10^{-19}\text{J}$

满足电子平衡的前提下

1C.kg⁻¹的照射量，能使每千克标准空气吸收射线的能量为

$$\begin{aligned} D_{\text{空气}} &= \frac{1\text{库仑}\cdot\text{千克}^{-1}}{1.6\times 10^{-19}\text{库仑}\cdot\text{电子电量}^{-1}} \times 33.73\text{电子伏}\cdot\text{电子电量}^{-1} \times 1.6\times 10^{-19}\text{焦耳}\cdot\text{电子伏} \\ &= 33.73\text{焦耳}\cdot\text{千克}^{-1} = 33.73\text{戈瑞} \end{aligned}$$





若在空气中已测知某点的X线照射量为X，那么这一点空气的吸收剂量为

$$D_{\text{空气}} = 33.73 \cdot X \text{ 戈瑞} \quad (7-5)$$





(二) 任意介质中的吸收剂量

没有体模存在时，射线在空间一点的能量注量为 Ψ ，根据吸收剂量与能量注量的关系，在电子平衡条件下，该点空气吸收剂量为

$$D_{\text{空气}} = \Psi \cdot \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{\text{空气}} \quad (7-6)$$

式中： $\left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{\text{空气}}$ 为射线在空气中的质能吸收系数

当体模存在时，在体模内该点的吸收剂量为

$$D_{\text{物质}} = \Psi \cdot \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{\text{物质}} \quad (7-7)$$

式中： $\left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{\text{物质}}$ 为射线在介质中的质能吸收系数





$$D_{\text{物质}} = \frac{\left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{\text{物质}}}{\left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{\text{空气}}} \cdot D_{\text{空气}} = f \cdot X \quad (7-8)$$

$$f = \frac{\left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{\text{物质}}}{\left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{\text{空气}}}$$

式中：**f**为照射量—吸收剂量转换系数，
或称照射量—吸收剂量转换因子





例题1 已测知 ^{60}Co - γ 射线在空气中某点处的照射量为 $0.1\text{C}\cdot\text{kg}^{-1}$, 求空气中该点处的吸收剂量 $D_{\text{空气}}$

已知: $X=0.1\text{C}\cdot\text{kg}^{-1}$ 求: $D_{\text{空气}}=?$

解: $D_{\text{空气}} = 33.73X = 33.73 \times 0.1 = 3.373\text{Gy}$

例题2 用电离测得体模内一点空气照射量率为 $2.58 \times 10^{-5}\text{C}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$, 已知光子的能量为 0.1MeV , 求处于体模内同一位置的吸收剂量率?

已知: $\dot{X} = 2.58 \times 10^{-5}\text{C}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$

当光子能量= 0.1MeV 时, 查表得: $f_{\text{水}} = 36.74\text{Gy}/(\text{C}\cdot\text{kg}^{-1})$

求: $\dot{D}_{\text{水}}=?$

解: $\dot{D}_{\text{水}} = f_{\text{水}} \cdot \dot{D}_{\text{空气}} = 36.74 \times 2.58 \times 10^{-5}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$
 $= 9.48 \times 10^{-4}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$

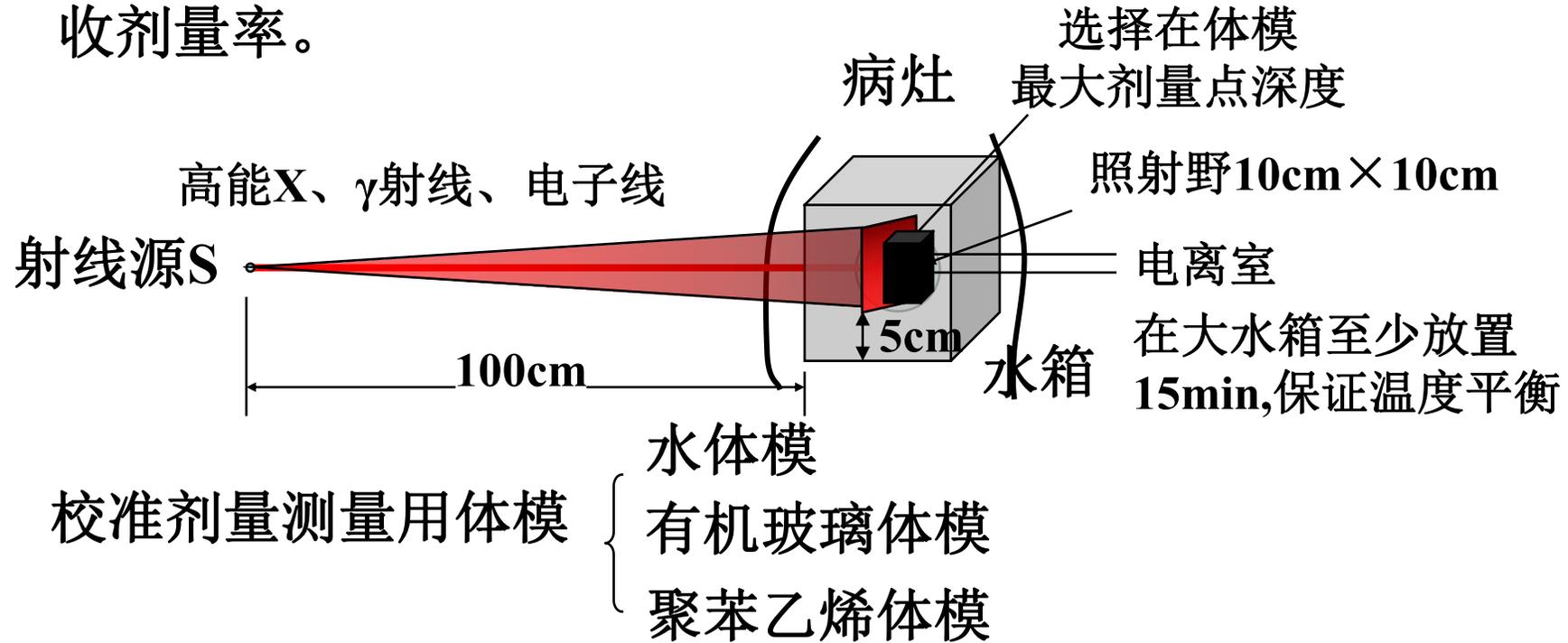




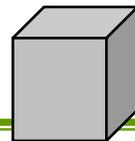
(三) 放射治疗校准剂量的测量

放射治疗的校准剂量：

是指治疗射线在测量体模内某深度处的吸收剂量或吸收剂量率。



大小：



$30\text{cm} \times 30\text{cm} \times 30\text{cm}$
或 $40\text{cm} \times 40\text{cm} \times 40\text{cm}$





测量：水箱温度、大气压、以备计算空气密度修正因子(K_{tp})

开机：出射线，读取3~5个读数，取其平均读数M

测量点的吸收剂量计算公式：

1. X线或 γ 射线： $D_{dc} = M \cdot K_{tp} \cdot N_c \cdot F$

2. 电子束： $D_{dc} = M \cdot K_{tp} \cdot N_c \cdot C_E$

式中： D_{dc} 为测量点处水体模中的吸收剂量，单位为cGy

M为剂量仪表读数，单位为 $C \cdot kg^{-1}$ N_c 为剂量仪的校准因子

K_{tp} 为空气密度修正因子 $K_{TP} = \frac{273.2 + t}{293.2} \times \frac{760}{P}$ t为测量时的水温
($^{\circ}C$), P为大气压

N_c 为剂量仪校正准因子

F为照射量-吸收剂量转换因子 [$cGy/(C \cdot kg^{-1})$]

C_E 为高能电子线的转换因子 [$cGy/(C \cdot kg^{-1})$]





三、吸收剂量的其他测量方法

(一) 热释光测量元件及其剂量读出装置

热释光剂量仪

热释光测量单元——热释光剂量片+读出装置

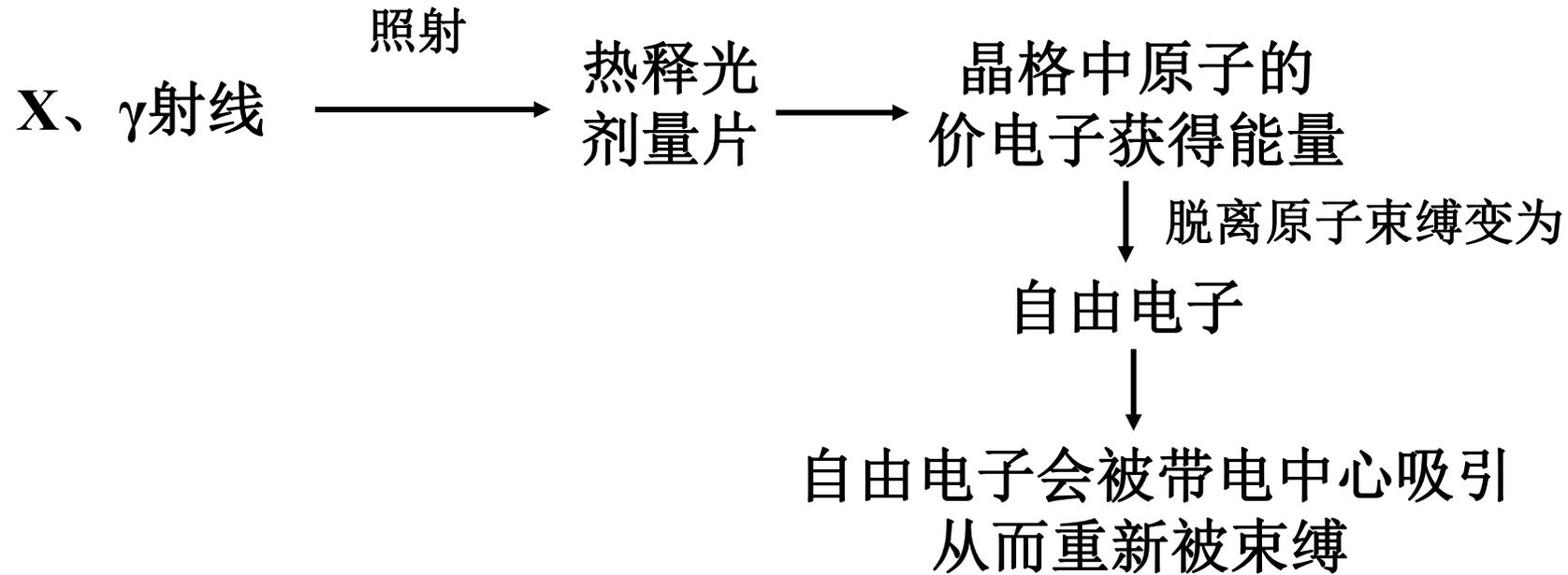
1.热释光剂量片：具有**晶格结构**的固体粉末，可根据测量要求制成散装粉末、烧结圆片、热压方片和圆棒等形状

晶格缺陷带电中心：晶格内含有杂质或其中的原子、离子缺位，造成晶格缺陷形成带电中心，具有吸引、束缚异性电荷的本领



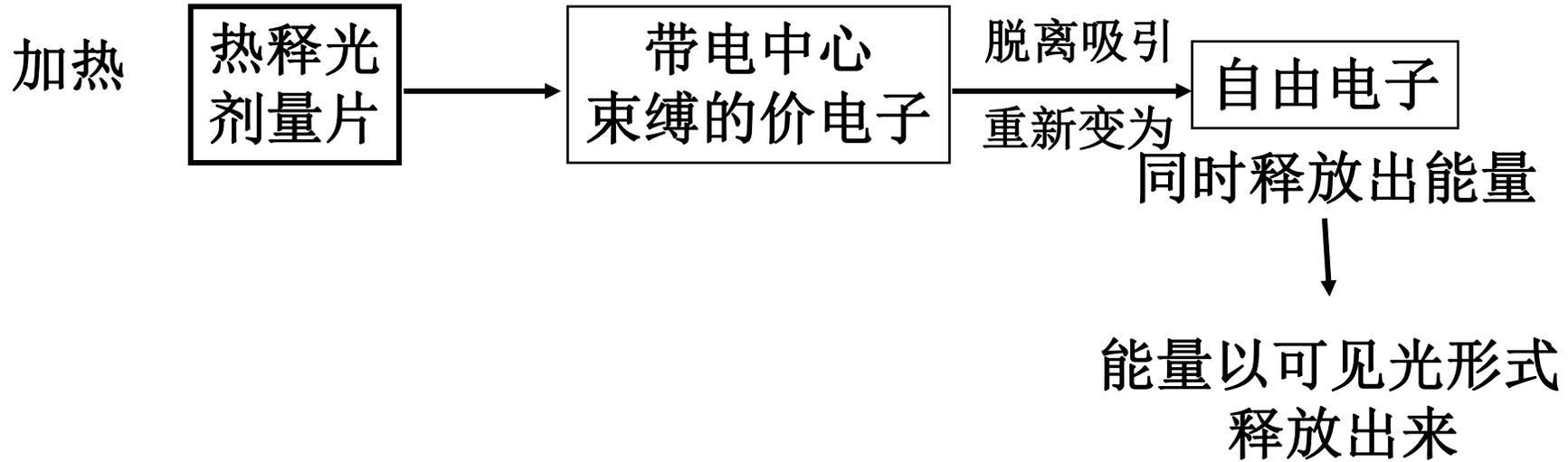


原理:



吸收的辐射能越多，则束缚于带电中心的电子数目越多





发光强度与束缚中心释放的电子数成正比，
而电子数又与物质吸收辐射能量有关





热释光元件品种

最常见的有氟化锂（LiF）材料，有效原子序数为8.2，接近空气和生物组织的有效原子序数

$\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7(\text{Mn})$ 、 $\text{CaF}_2(\text{M}_2)$ 、 BeO 、 $\text{CaSO}_4(\text{Mn})$ 和
 $\text{CaSO}_4(\text{Dy})$





2.热释光剂量片测量装置

用来读出剂量片所存贮的辐射能量的装置

被照射过的热释光元件，放入热释光测读仪的加热单元，进行加热，元件受热后发光，光经过滤光后照射到光电倍增管上，转化为电流信号，经电流/频率转换后，以脉冲率形式输给计数系统，打印记录。

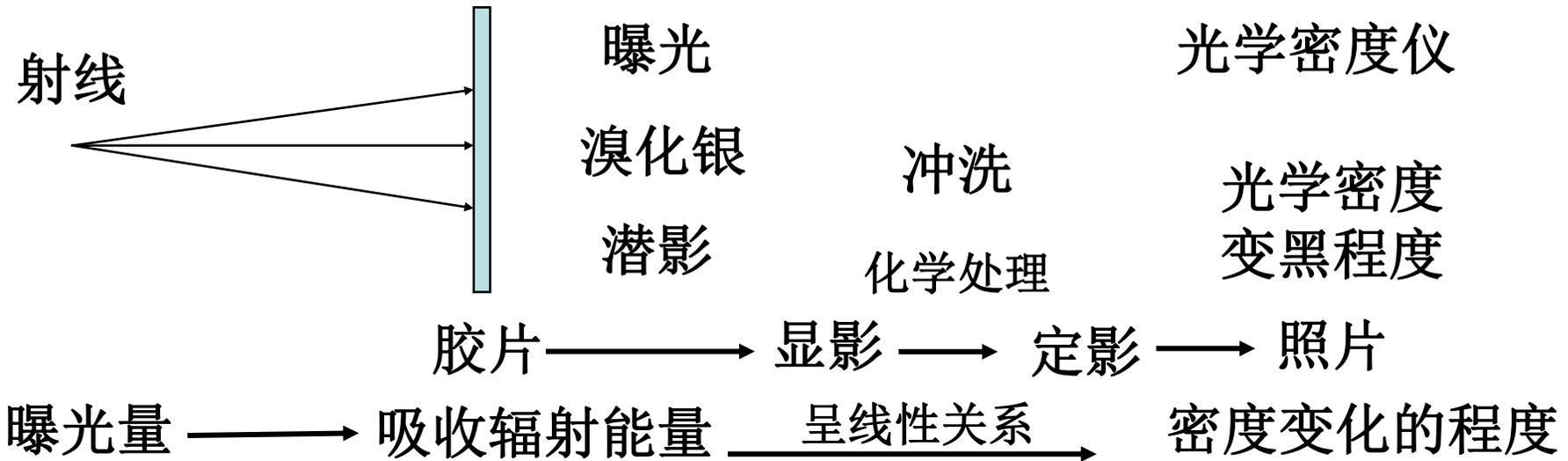
优点：灵敏度高、量程范围宽、体积小、重量轻、携带方便
材料来源丰富

应用于：X、 γ 射线的个人剂量监测以及辐射场所和环境
监测





(二) 胶片剂量测定法



感光曲线的线性范围内，用光学密度曲线来表示相对的剂量曲线





(三) 半导体剂量仪——固体电离室





第三节 射线质的测定

射线的质即射线的能量，它决定了射线在物质中的穿透能力

一、400kV以下X线的测定

X线能谱是连续的，直接测量射线能谱的分布是困难的，临床上关心的是射线的穿透能力

穿透能力的大小一般用半价层来表示

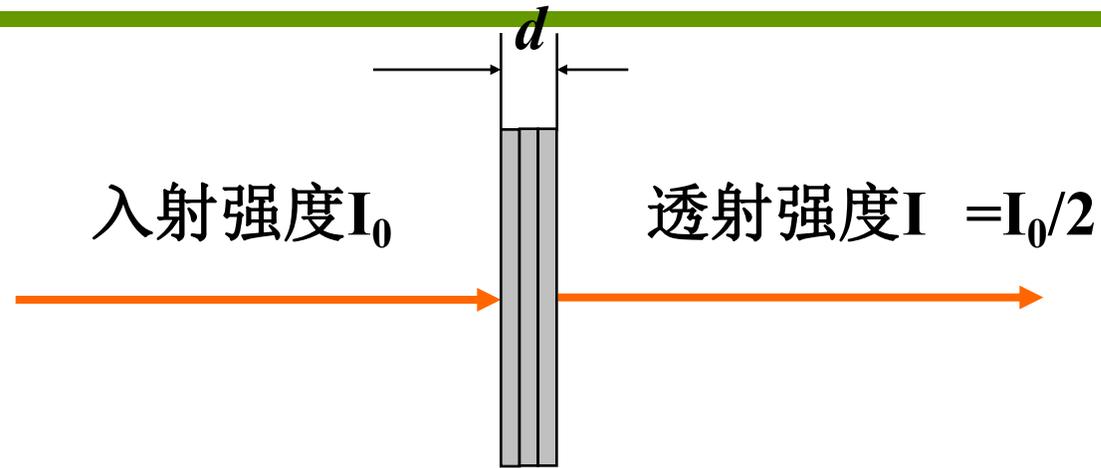
半价层：是使原射线强度衰减一半时所需的某种吸收材料的厚度

半价层的值越大，射线的穿透本领越强





测定半价层的方法:



吸收片（铝片或铜片）

同时测出射线穿透不同厚度的吸收片后的射线量，做出厚度射线量的坐标曲线，从曲线上查出使射线量减少一半的吸收厚度——即为被测X线的半价层

注意：必须对直接用于治疗X线，要明确所用的管电压、滤过板条件、测量装置的几何安置。

即使管电压相同，若滤过板不同，半价层也不一样





二、高能X线能量的测定

医用直线加速器加速电子到同一额定能量产生医用高能X线

高能X线能量用水体模中1/2最大剂量深度（也称半值深度HVD表示）法，即水体模中射线中心轴上50%剂量深度来确定X线的质

或用测定10cm和20cm两个深度处的电离比 $J_{10/20}$ 确定射线的质





三、高能电子束能量的测定

放射治疗用的电子线由加速器产生

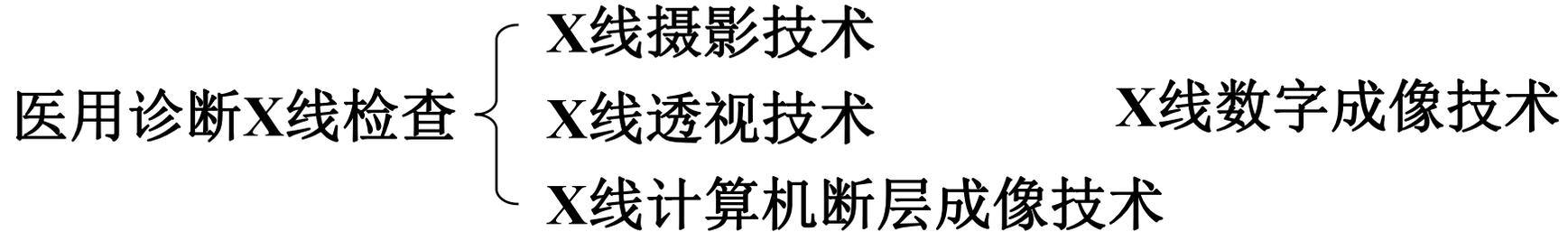
表征加速器电子线能量谱一般用三个能量参数：

最大能量、对应于能谱峰位的最可几能量、平均能量





第四节 医用诊断X线检查技术的辐射剂量学评价



图像噪声与成像质量的关系

成像质量与曝光量的关系

曝光量与被检查者辐射剂量学关系

由于不同X检查方法具有不同的技术特点，通常采用不同的剂量学概念来合理评价不同检查技术所涉及的辐射剂量学问题





1. 入射剂量(incident dose, ID)

是指X线摄影时投射到被检者体表部位的X线所致空气吸收剂量，它不包含被检者对X线所形成的背向散射

2. 表面入射剂量(entrance surface dose, ESD)

是指X线摄影成像时，受检查者体表处照射野中心的空气吸收剂量

表面入射剂量=入射剂量+被检者或体模背向散射剂量

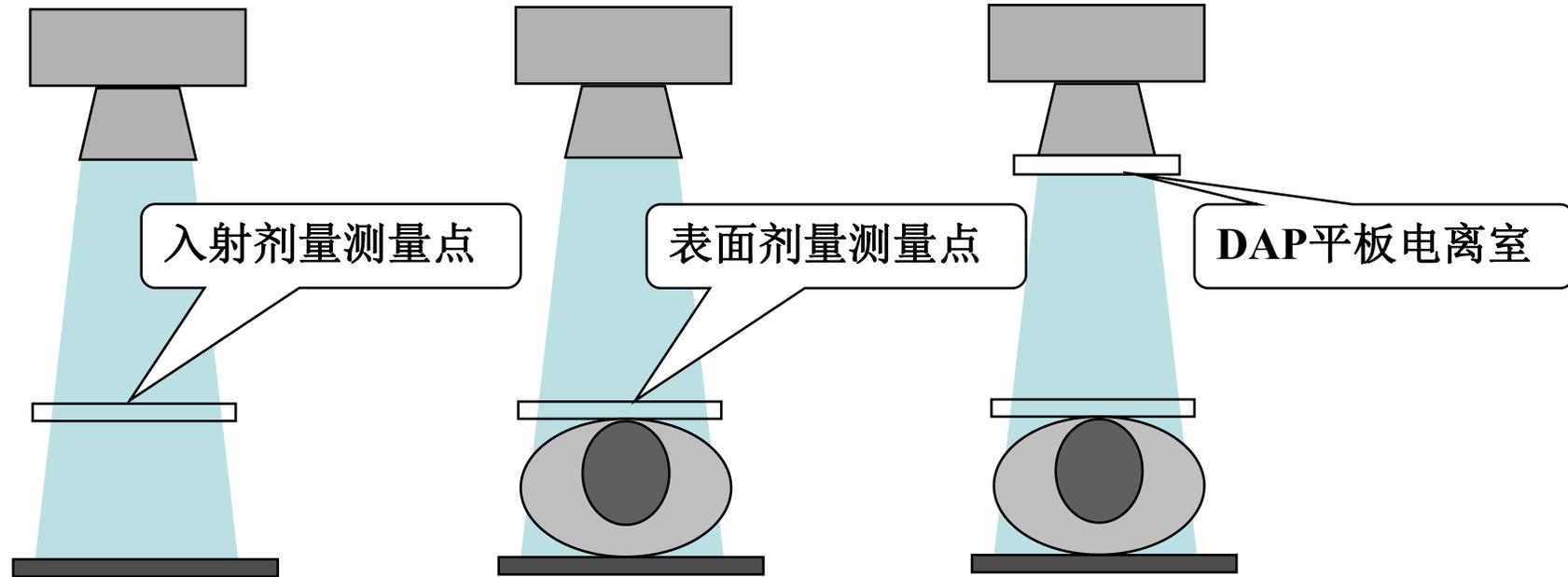
3. 剂量面积之积(dose-area product, DAP)

是指照射到人体表面的X射线束的横截面积与照射野内平均空气吸收剂量的乘积





入射剂量(ID) 表面入射剂量(ESD) 剂量面积之积(DAP)

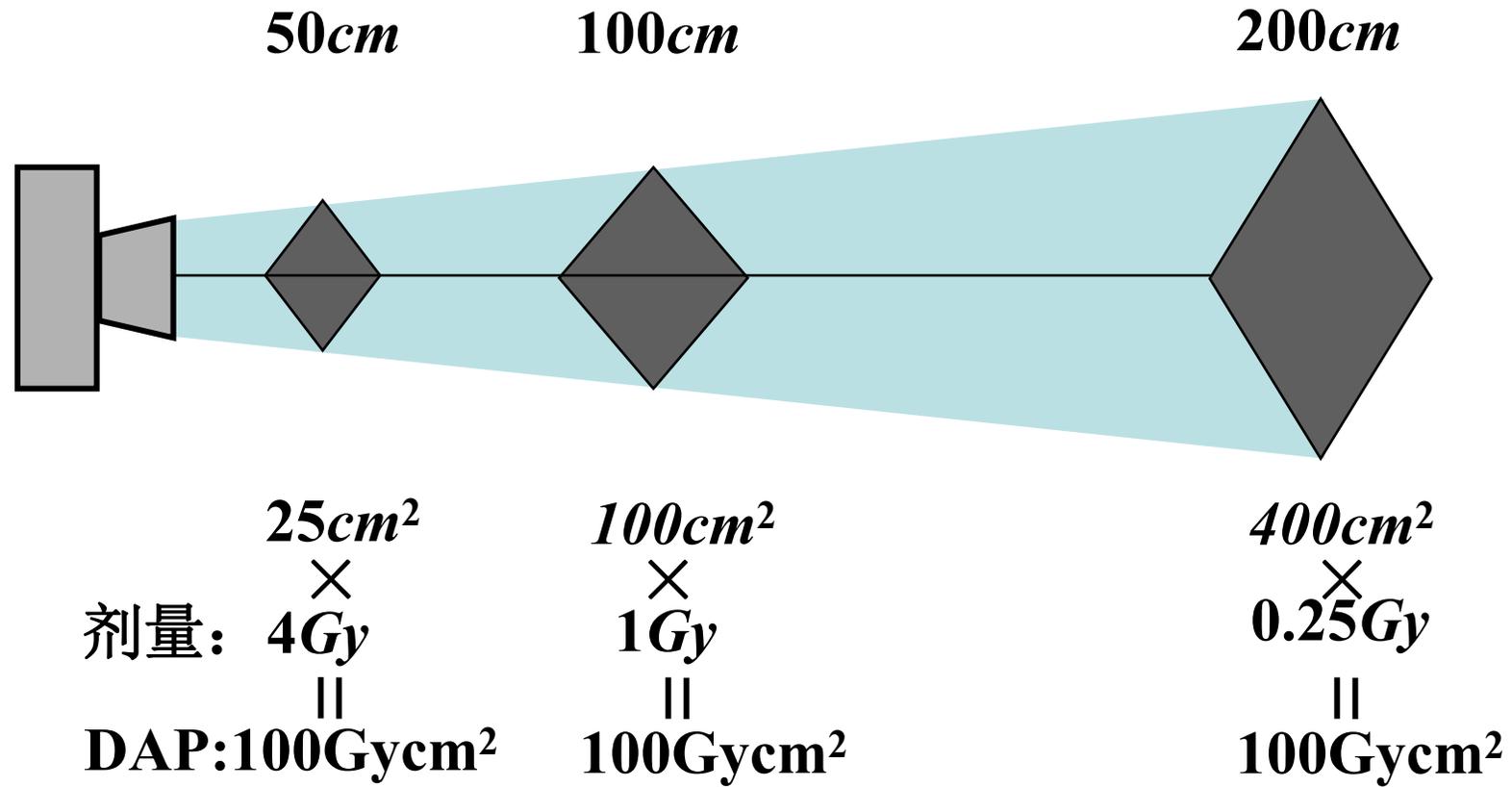


ESD用于X射线摄影
时被检者受照剂量的
间接评价

DAP用于透视检查
时被检者剂量评估



X射线摄影被检者辐射剂量评价示意图



剂量面积之积测量示意图



4. CT剂量指数(computed tomography dose index, CTDI)

单次扫描CT剂量(CTDI)指数

多次扫描CT剂量(MSAD)指数

CTDI₁₀₀:

沿着垂直于断层平面方向(Z)上的吸收剂量剂量分布D(z), 除以x射线管在360°的单次旋转时产生的断层切片数N与标称厚度T之积的积分。积分区间可取-7T到+7T, 也可取-50mm到+50mm。

$$CTDI_{100} = \int_{-50mm}^{+50mm} \frac{D(z)}{NT} dz$$

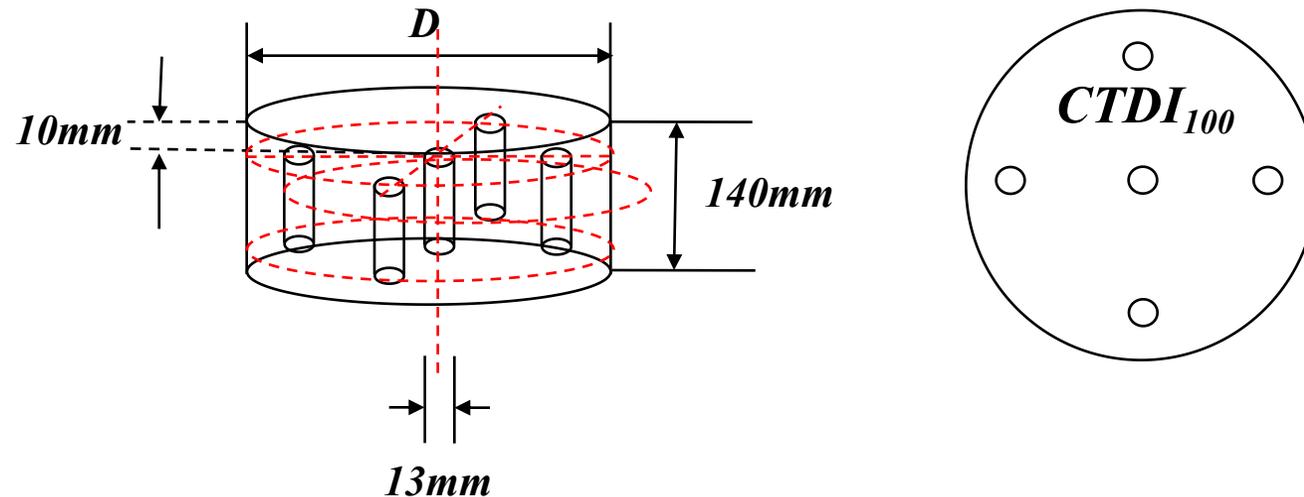




测量CT剂量指数的体模：

由组织等效材料均质聚甲基丙烯酸酯制成柱形体模

- (1) 头部体模：直径160mm，高度不小于140mm
- (2) 体部体模：直径320mm，高度不小于140mm



$CTDI_{100}$ ：反映的是X-CT在标准体模中某一点所沉积的X射线能量

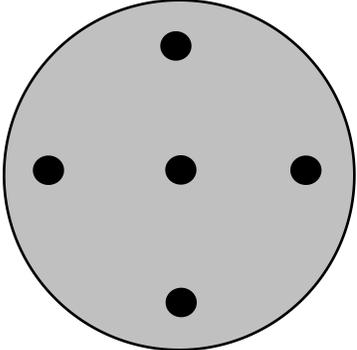




加权 $CTDI_w$

由于 $CTDI_{100}$ 在体模表层向中心不同深度呈线性变化，在实际检测中分测中心孔和4个周边孔的 $CTDI_{100}$ ，对4个周边孔的 $CTDI_{100}$ 测量值取平均，再计算加权 $CTDI_w$

$CTDI_w$

$$CTDI_w = \frac{1}{3} CTDI_{100}(\text{中心}) + \frac{2}{3} CTDI_{100}(\text{周边})$$


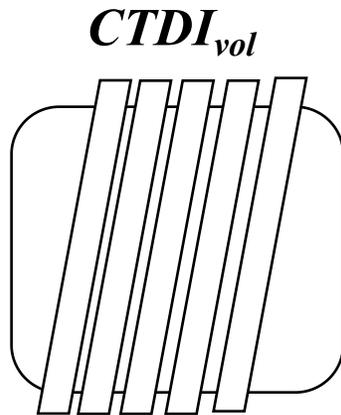
加权 $CTDI_w$ ：反映CT扫描在某一断层平面上的平均剂量状况





CT剂量指数 $CTDI_{vol}$

反映多排螺旋CT在整个扫描扫描容积内的平均剂量



$$CTDI_{vol} = \frac{CTDI_w}{D} = \left(\frac{NT}{d} \right) \cdot CTDI_w$$

式中：

D 为多层扫描的层间距（即扫描螺距）；

N 为一次扫描产生的总层数；

T 为扫描层厚；

d 为X射线管每转一周诊视床移动的距离

