

辐射防护与剂量学

常用量及单位

成都理工大学核自学院

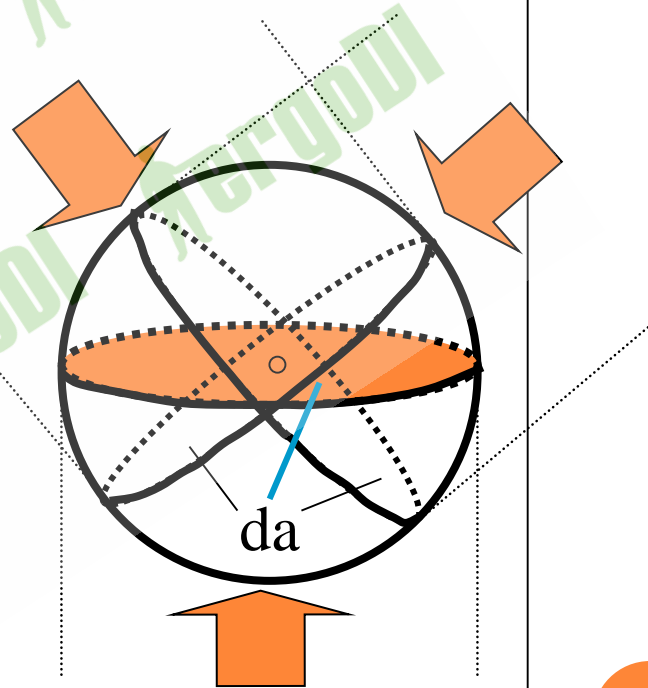
描述辐射场的量

○ **辐射场**：辐射源产生的电离辐射无论在空间还是在介质内通过、传播以至经由相互作用发生能量传递的整个空间范围，称为（电离）辐射场。

○ **单位截面小球**

○ **理想探测器**

等效率接收各四面八方入射粒子的
粒子探测器（或计数器）。



单位截面小球-理想探测器示意图



描述辐射场的量

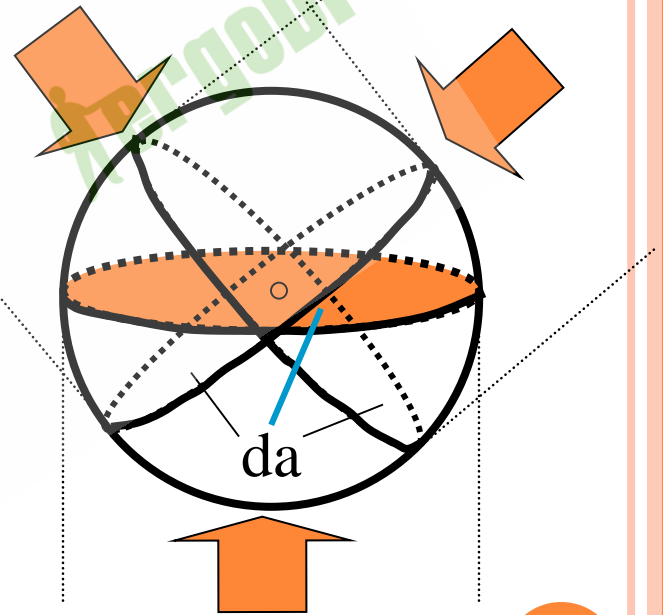
○ 1. 粒子注量(通量)和粒子注量率

定义： 辐射场中某点P为中心，划出一小的球形区域，如果球形的截面积为 da ，从各个方向射入该球体粒子总数为 dN ，则辐射场P点处的粒子注量为

$$\phi = dN / da$$

○ 单位： m^{-2}

T时间内，辐射场中粒子进入单位截面立体小球的数目



单位截面小球-理想探测器示意图

描述辐射场的量

- 思考：为什么要用小球体来定义注量？
 - 小球体内的截面积可任意选取，对**任何方向**入射到小球体上的粒子，都可选取出相应的截面积。（既适用于**定向**辐射场，也适用于**非定向**辐射场）
 - 当致电离粒子与**活细胞**或物质中的**原子**发生相互作用时，活细胞或原子可视为一个小球体，不管致电离粒子从什么方向击中活细胞或原子，都可能发生某种效应。（在辐射防护上，关心的是辐射**作用于某点所产生的效应**，而不管辐射的入射方向）



描述辐射场的量

○ 1. 粒子注量和粒子注量率

- 辐射场中单位时间间隔内进入单位截面立体小球的粒子数目

$$\dot{\phi} = \frac{d\phi}{dt} = \frac{d^2 N}{da dt}$$

○ 单位: $m^{-2}s^{-1}$

○ 粒子注量和粒子注量率的应用

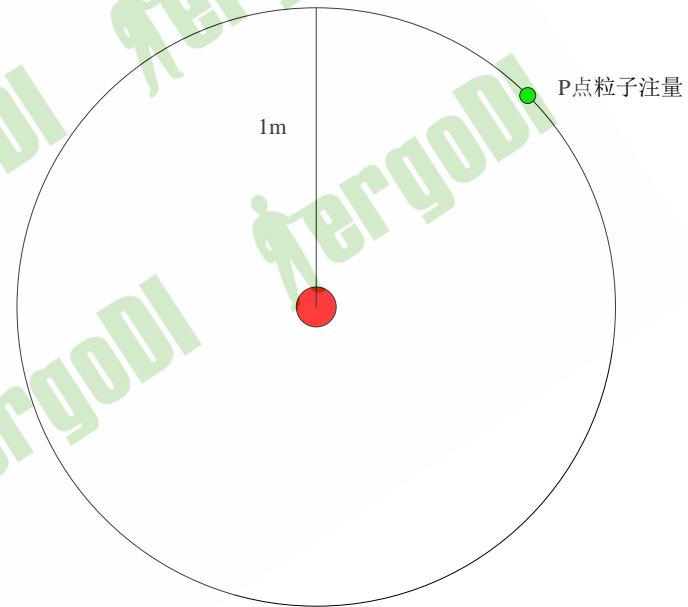
- 通过放射性物质的活度, 计算出空间某一点的粒子注量和粒子注量率



描述辐射场的量

实际例子：点源粒子注量率

- 假设有一个点源的活度为 A ，并且各向同性放射出 γ 光子，在不考虑空气吸收的情况下，求出离该源1米处P的粒子注量率。



描述辐射场的量

计算方法：

○ 粒子注量：
$$\phi = \frac{A \times t}{4 \times \pi \times r^2} = \frac{A \times t}{4 \times \pi}$$

○ 粒子注量率：
$$\dot{\phi} = \frac{A \times t}{4 \times \pi \times r^2} = \frac{A}{4 \times \pi}$$

○ 为什么可以直接除以时间t?



描述辐射场的量

2. 能注量和能注量率

- 定义：空间一给定点处，射入以该点为中心的小球体的所有粒子的能量总和（不包括静止能量）除以该球体的截面积 da .

$$\Psi = \frac{dE_R}{da}$$

- 辐射场中粒子带入单位截面立体小球的能量
- 单位： J/m^2



描述辐射场的量

2.能注量和能注量率

- 定义：表示在单位时间 dt 内能注量的增量。

$$\psi = \frac{d\Psi}{dt} = \frac{d^2 E_R}{da \cdot dt}$$

- 单位： $J/(m^2 \cdot s)$

- 思考：粒子注量和能注量之间的关系？



描述辐射场的量 谱分布

1. 积分分布 $\Phi(E)$

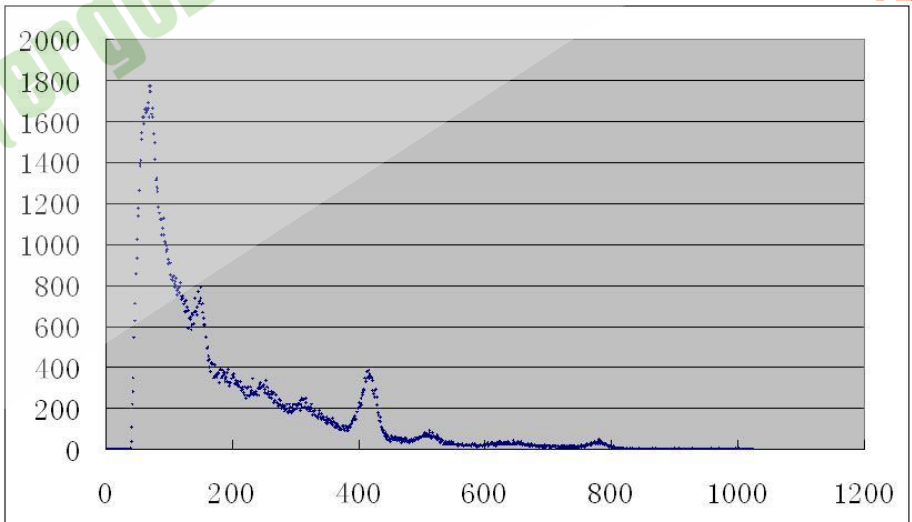
定义：能量在 $0-E$ 之间的粒子组成的粒子注量

2. 微分分布

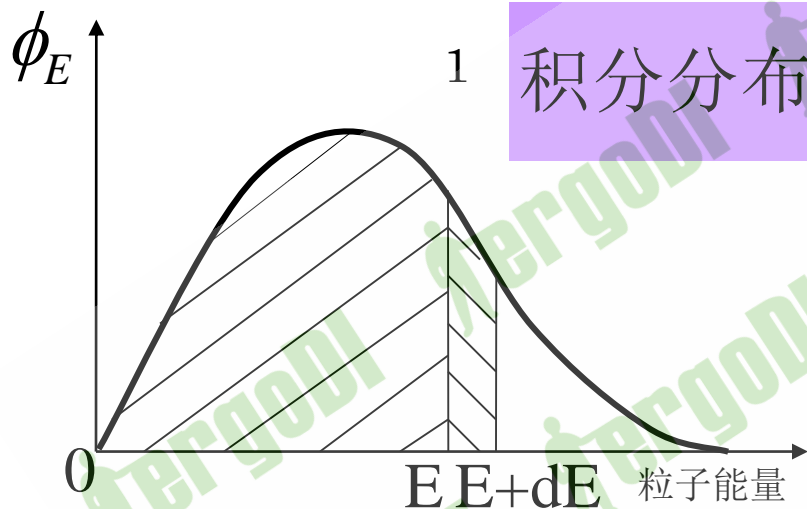
定义：积分分布 $\Phi(E)$ 对能量 E 的导数

$$\phi_E = \frac{d\phi(E)}{dE}$$

入射到辐射场 r 点为球心单位截面小球上，单位能量间隔内能量为 E 的粒子数。



能量分布



微分分布 ϕ_E : 单位能量间隔的注量

1 积分分布: $\phi(E) = \int_0^E \phi_E dE$

$$\phi_E = \frac{d\phi(E)}{dE}$$

$E \sim E+dE$ 间隔内粒子注量:

$$\phi_E dE = \left[\frac{d\phi(E)}{dE} \right] dE$$

$$\text{粒子通量 } \phi = \int_0^{\infty} \phi_E dE$$

习题: 试写出

${}^{235}_{92}\text{U}$ 裂变中子能谱, 绘出曲线, 并计算平均能量。

$$\text{粒子平均能量 } \bar{E} = \frac{\int_0^{\infty} E \phi_E dE}{\int_0^{\infty} \phi_E dE} = \frac{1}{\phi} \int_0^{\infty} E \phi_E dE$$

描述辐射场的量

○ 要求：会灵活运用以上的两个概念。

1、能量从E到E+dE之间粒子所组成的粒子注量

$$\phi_E dE = [d\phi(E) / dE] dE$$

2、0-E_{max}之间的积分分布

$$\phi = \int_0^{E_{\max}} \phi_E dE$$

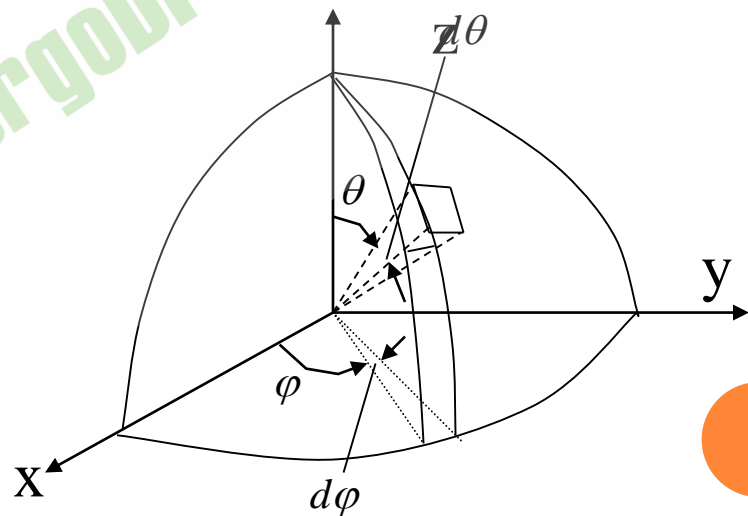


描述辐射场的量

- 粒子的类型
 - α 射线, 质子, 重离子
 - β 射线
 - γ 射线
 - n 中子
 - ν 中微子; $\bar{\nu}$ 反中微子
 - 基本粒子

- 方向分布

单向平行束
各向同性场
各向异性场



辐射场分类：

- 单一场

单种粒子的辐射场（近似）

- 混合场

多种粒子的辐射场，如裂变n-混合场等。



描述辐射场的量——小结

- ◆ 描述辐射场中粒子自身所拥有的特性，如粒子的注量
- ◆ 未涉及粒子同物质的相互作用
- ◆ 辐射防护中要考虑：粒子自身的情况以及同物质可能形成的作用



相互作用系数（非带电粒子）

○ 根据不带电粒子（X, γ 射线和中子）穿过物质时发生的物理现象

➤ 质量减弱系数

$$\mu / \rho$$

➤ 质量能量转移系数

$$\mu_{tr} / \rho$$

➤ 质量能量吸收系数

$$\mu_{en} / \rho$$



相互作用系数（非带电粒子）

1. 质量减弱系数 μ/ρ

- 作用过程： γ 射线同物质发生三种效应
- **线衰减系数**：各种过程的线衰减系数的总和

$$\mu = \tau + \sigma + k$$

$$\mu = \tau + \sigma_{coh} + \sigma_c + k$$

- **质量减弱系数**：

$$\mu/\rho = \frac{\tau}{\rho} + \frac{\sigma}{\rho} + \frac{k}{\rho}$$



相互作用系数（非带电粒子）

1. 质量减弱系数 μ/ρ

- 国际辐射单位与测量委员会(ICRU)定义
 - 某物质对不带电粒子的质量减弱系数：

$$\mu/\rho = \frac{1}{\rho dl} \bullet \frac{dN}{N}$$

- 单位： m^2/kg



相互作用系数（非带电粒子）

1. 质量减弱系数

○ 质量减弱系数特点和作用

- 1、只涉及到物质中入射不带电粒子数目的减少，并不涉及进一步的物理过程。
- 2、数值不因材料物理状态的改变而改变。
- 3、康普顿占优势的光子能量范围内，几乎所有物质的质量减弱系数大致相同。



相互作用系数（非带电粒子）

2. 质量能量转移系数

- γ 射线（X射线）同物质相互作用，其能量分为两个部分：

$$\mu = \mu_{tr} + \mu_p$$

入射
光子的
能量

1、光子能量转化为电子（如光电子、反冲电子和正、负电子对）的动能

2、能量被能量较低的光子（如特征X射线、散射光子和湮灭辐射）所带走。

相互作用系数（非带电粒子）

2. 质量能量转移系数

1) 线能量转移系数

定义：辐射在物质中穿过**单位长度**距离后，由于相互作用，其**能量转移给电子**的份额。

$$\begin{aligned}\mu_{tr} &= \tau_a + \sigma_a + k_a \\ &= \tau \left(1 - \frac{\delta}{h\nu}\right) + \sigma_c \frac{E}{h\nu} + k \left(1 - \frac{2mc^2}{h\nu}\right)\end{aligned}$$

单位：cm⁻¹



相互作用系数（非带电粒子）

2.质量能量转移系数

2)质量能量转移系数

定义： γ 射线在物质中穿过单位质量厚度后，因相互作用，其能量转移给电子的份额。

$$\begin{aligned}\frac{\mu_{tr}}{\rho} &= \frac{\tau_a}{\rho} + \frac{\sigma_a}{\rho} + \frac{k_a}{\rho} \\ &= \frac{1}{\rho} \left[\tau \left(1 - \frac{\delta}{h\nu} \right) + \sigma_c \frac{E}{h\nu} + k \left(1 - \frac{2mc^2}{h\nu} \right) \right]\end{aligned}$$

单位： m^2/kg



3) 直接计算公式

物质对不带电粒子的质量能量转移系数的计算:

$$\frac{\mu_{tr}}{\rho} = \frac{1}{\rho dl} \bullet \frac{dE_{tr}}{NE}$$

总结:

- **辐射剂量学中**, 重要的是光子能量的电子转移部分。(光子最后在物质中吸收的能量来自这部分)。
- 只涉及到在物质中**入射不带电粒子能量的转移**, 而**不涉及能量是否被物质吸收**的问题。



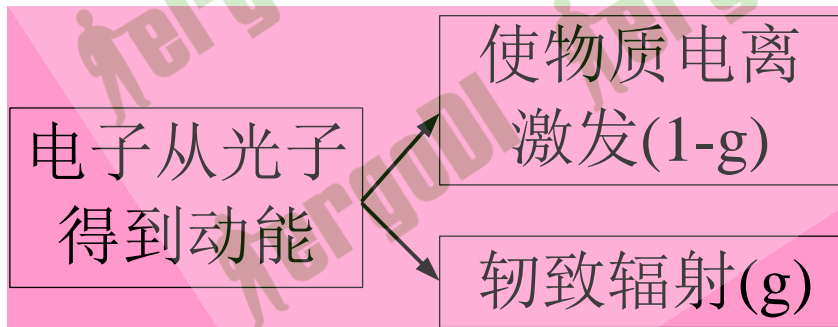
相互作用系数（非带电粒子）

3.质量能量吸收系数

1)线能量吸收系数

定义： γ 射线在物质中穿过**单位长度**路程后，其**能量真正被物质吸收的份额**。

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



相互作用系数（非带电粒子）

3.质量能量吸收系数

2)质量能量吸收系数

定义： γ 射线在物质中穿过单位质量厚度后，其能量被物质吸收的份额。

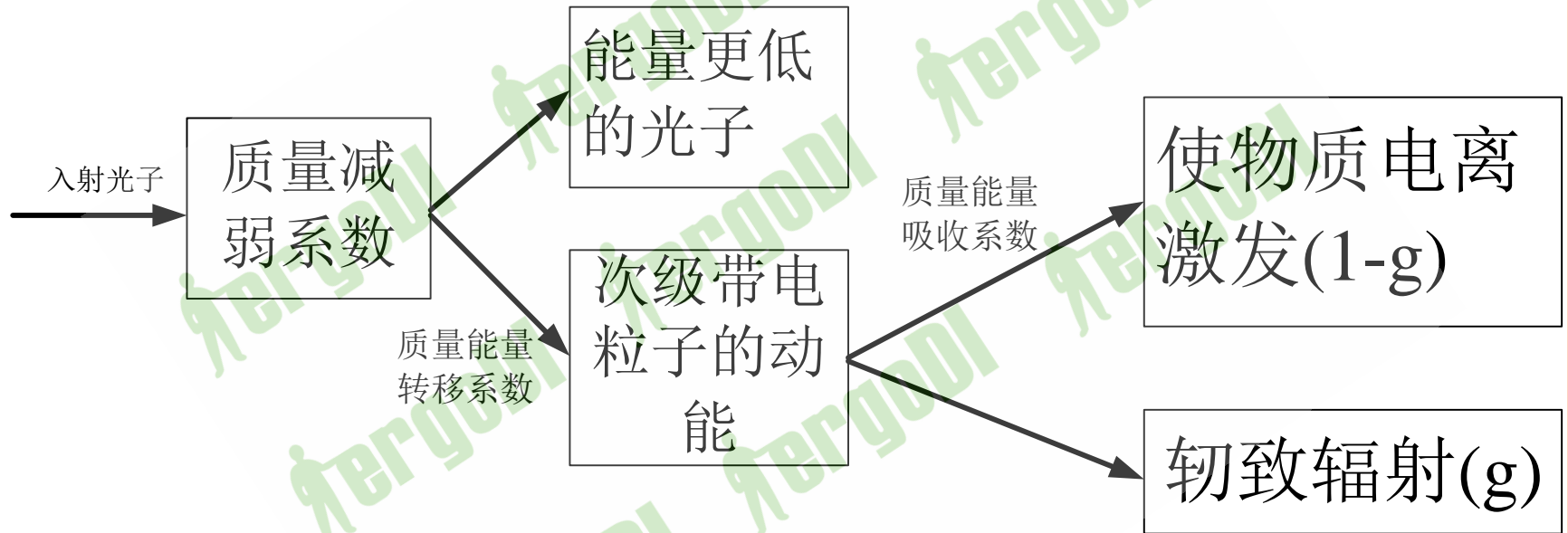
$$\mu_{en} / \rho = \frac{\mu_{tr}}{\rho} (1 - g)$$

单位： m^2/kg

- 1、当带电粒子动能可与其静止能相比拟或大于其静止能时，吸收和转移可能会有差异；
- 2、原子序数大高，差异大；原子序数小，两者差异小。
(轫致辐射产生的概率)



相互作用系数（非带电粒子）



相互作用系数（带电粒子）

1、碰撞阻止本领

线碰撞阻止本领定义：指一定能量的带电粒子在指定物质中穿过单位长度路程时，由于**电离、激发过程所损失的能量**。

$$S_{col} = (dE / dl)_{col}$$

质量碰撞阻止本领：指一定能量的带电粒子在指定物质中穿过单位质量厚度的物质层时，由于**电离、激发过程所损失的能量**。单位： $J \cdot m^2/kg$

$$\left(\frac{S}{\rho}\right)_{col} = \frac{1}{\rho} (dE / dl)_{col}$$



2、辐射阻止本领

线辐射阻止本领：指一定能量的带电粒子在物质中穿过单位长度路程时，由于**轫致辐射过程**所损失的能量。

$$S_{rad} = (dE / dl)_{rad}$$

质量辐射阻止本领：

$$\left(\frac{S}{\rho}\right)_{rad} = \frac{1}{\rho} (dE / dl)_{rad}$$

单位：J · m²/kg



3、总质量阻止本领

$$\frac{S}{\rho} = \left(\frac{S}{\rho}\right)_{rad} + \left(\frac{S}{\rho}\right)_{col}$$

$$\left(\frac{S}{\rho}\right) = \frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dl}\right)$$

带电粒子能量

弹性碰撞->热能

电离和激发

韧致辐射能量

电子能量损失的主要形式

单位： $J \cdot m^2/kg$



放射性活度 A (ACTIVITY)

定义：放射性核素在单位时间(dt)内发生核衰变的数目(dN)

$$A=dN/dt$$

单位：

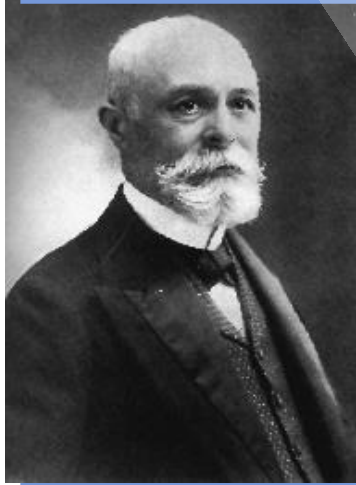
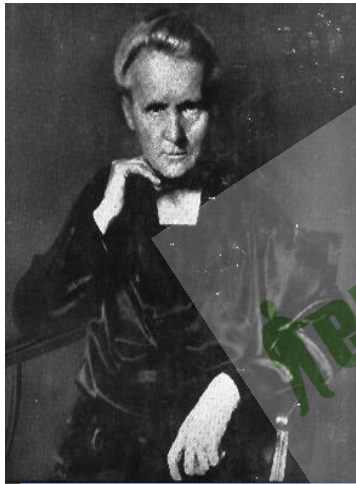
SI: Becquerel(Bq) $1\text{Bq}=1\text{s}^{-1}$

专用单位：

居里 $1\text{Ci}=3.7\times 10^{10}\text{Bq}$

$1\text{mCi}=10^{-3}\text{Ci}=3.7\times 10^7\text{Bq}$

$1\mu\text{Ci}=10^{-3}\text{mCi}=10^{-6}\text{Ci}$



放射性活度 A (ACTIVITY)

比放射性活度

- 定义：单位质量或体积中放射性核素的放射性活度
- 单位：Bq/kg; Bq/m³; Bq/l
- 放射性活度与质量的关系：

$$A = \lambda N$$

$$= (0.693/T_{1/2}) [(Q/M) N_A]$$

- Q: 以克为单位的质量(g)
- M: 摩尔质量(g/mol)
- N_A: 阿伏伽德罗常数 = 6.023 × 10²³mol



放射性活度 A (ACTIVITY)

例题：求1mg碘131的放射性活度？

$$A = (0.693 / T_{1/2}) [(Q / M) N_A]$$
$$= 0.693 / (8 * 24 * 3600) * (10^{-3} / 131) * 6.023 * 10^{23}$$

作业：求1gRa的放射性活度。

仪器常用单位：

dps: disintegration per second

cps: counts per second



照射量X (EXPOSURE)

定义：照射量X (exposure)

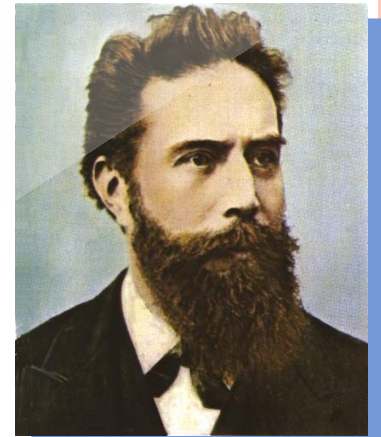
光子(γ, χ -ray)在单位质量(dm)空气中释放出来的所有正负电子被阻止在空气中时，产生的同一符号的离子的总电荷量(dQ)。

$$X = \frac{dQ}{dm}$$

单位： SI: $C kg^{-1}$;

曾用单位：伦琴, R

$$1R = 2.58 \times 10^{-4} C kg^{-1}$$



用来表示X射线或 γ 射线在空气介质中产生电离能力大小


平均电离能 \bar{w} 的定义

在气体中每形成一对离子所消耗的平均电离能。称**平均逸出功**。单位为eV/离子对。

\bar{w} 既没有把成为辐射损失的那部分能量计算在内，也没有把辐射损失而形成的光子所产生的电离计算在内，因此，照射量中也将他们排除在外。

对于X和 γ 射线，在干燥空气中，当前其最精确的值为**33.97**eV/离子对。**ICRP**建议值为**33.85**eV/离子对。

对于能量在几个keV以上的X和 γ 射线， \bar{w} 对各种气体均可视为常数而**与光子能量无关**。



照射量X是个历史悠久、变化较大的一个辐射量，也是目前争论较多的一个量。历史上曾使用照射量单位是伦琴（在1962年之前曾称之为“照射剂量”）

伦琴：在1伦琴X射线照射下，0.001293克空气（标准状况下，1立方厘米空气的质量）中释放出来的次级电子，在空气中总共产生电量各为1静电单位的正离子和负离子。

$$1R = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$$



照射量X (EXPOSURE)

1R是指在**1CM³** (0.00129 g)标准状态(T=0°C , P=760MMHG)空气中, r射线产生 2.08×10^9 离子对或电离总电荷(一种符号)量为**1静电单位的照射量**。

$$1R = \frac{1}{3 \times 10^9} \times \frac{1}{1.29 \times 10^{-6}} \approx 2.58 \times 10^{-4} C kg^{-1}$$

1静电单位电量对应于 $\frac{1}{3 \times 10^9} / 1.602 \times 10^{-19} = 2.081 \times 10^9$ 离子对

由于空气的**平均电离能** $\bar{W} = 33.85 eV$ 。

因而, 1R相当于 0.001293克空气中 γ (或X) 射线损失的能量为 $2.082 \times 10^9 \times 33.85 eV = 0.1128 \text{erg}$ 。故:

$$1R \text{ 相当于 } \frac{0.1128 \text{erg}}{0.001293 \text{g}} = 86.6 \text{erg} / \text{g}$$

$$= 8.66 \times 10^{-3} J / \text{kg}$$



照射量X应用条件

X、 γ 射线；
介质为空气。

- 有些文献提到介质的照射量时，是指在介质中放置少量空气后测得的照射量值。



照射量X (EXPOSURE)

注意事项： 另一个定义式
$$X = \Psi \frac{\mu_{en}}{\rho} \frac{e}{W}$$

- 照射量只用于度量X或 γ 射线在**空气介质**中产生的**照射效应**。
 - X、 γ 射线；
 - 空气，有些文献提到介质的照射量时，是指在介质中放置少量空气后测得的照射量值。
- 不包括**次级电子**韧致辐射被吸收后产生的电离。
($>3\text{MeV}$ 时，才予以考虑)
- 按照定义来测量照射量时，要求满足**电子平衡条件**。在电子平衡条件下，鉴于目前的测量技术及对精确度的要求，所能测量的光子能量限于 **$10\text{keV}-3\text{MeV}$** 。在此能量范围内，由次级电子产生韧致辐射对测量值dQ的贡献可忽略不计。在辐射防护中，能量的**上限**可扩大到 **8MeV** 。

照射量X (EXPOSURE)

照射量率 (EXPOSURE RATE)

定义： 单位时间(dt)内的照射量(dX)。

$$\dot{X} = \frac{dX}{dt}$$

与能注量关系：

$$\dot{X} = \psi \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_a \cdot \frac{e}{W}$$

单位： $Ckg^{-1}s^{-1}$; Rs^{-1} ; mRh^{-1}

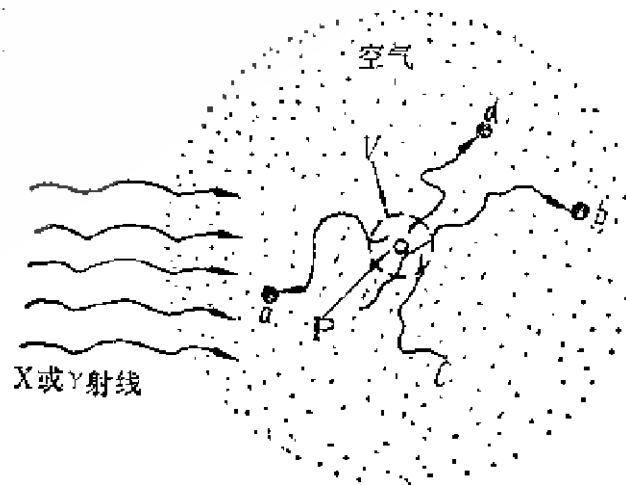


照射量X (EXPOSURE)

照射量率

概念理解:

- 次级电子在体积以内和以外的空气中走完它们的路程时，总共产生的电离电荷；
- 只适用于X、 γ 射线；
- 只对空气；
- 测量时必须满足电子平衡；
- **不能作为剂量的单位**，历史误会。



照射量X (EXPOSURE)

照射量因子

单能:

$$\psi = E \phi$$

$$X = \psi \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_a \cdot \frac{e}{\overline{W}} = E \cdot \phi \cdot \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_a \cdot \frac{e}{\overline{W}}$$

若令 $X = f_x \phi$

则 $f_x = E \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_a \cdot \frac{e}{\overline{W}}$, 称为照射量因子。

谱分布:

$$X = \int \phi_E f_x(E) dE$$



空气中的照射量因子

光子能量(MeV)	$f_x(\text{C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^2)$	光子能量(MeV)	$f_x(\text{C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^2)$
0.01	2.200-17	0.40	5.583-18
0.015	9.258-18	0.50	7.019-18
0.02	4.958-18	0.60	8.383-18
0.03	2.136-18	0.80	1.091-17
0.04	1.270-18	1.0	1.319-17
0.05	9.556-19	1.5	1.807-17
0.06	8.542-19	2.0	2.217-17
0.08	9.065-19	3.0	2.918-17
0.10	1.098-18	4.0	3.537-17
0.15	1.771-18	5.0	4.115-17
0.20	2.529-18	6.0	4.674-17
0.30	4.078-18	8.0	5.763-17
		10.0	6.839-17

注,表中形如 2.200-17 的数据表示 2.200×10^{-17} 。

照射量X (EXPOSURE)

照射量率与放射性活度的关系

对于点源:

$$X = \frac{A \times \Gamma}{R^2}$$

Γ : 照射量率常数

取决于自身的衰变特性（光子的数目和能量），恒等于
 $A=1\text{Bq}$, $R=1\text{m}$ 处的照射量率。可查表得出。



「照射量率常数

核 素	照射量率常数 Γ	空气比释动能率常数 Γ_k
	$C \cdot m^2 \cdot kg^{-1} \cdot Bq^{-1} \cdot s^{-1}$	$Gy \cdot m^2 \cdot Bq^{-1} \cdot s^{-1}$
Na-24	3.532-18	1.23-16
Sc-46	2.097-18	7.14-17
Sc-47	1.051-19	3.55-18
Fe-59	1.203-18	4.80-17
Co-57	1.951-19	6.36-18
Co-60	2.503-18	8.67-17
Zn-65	5.950-19	1.77-17
Sr [*] -87	4.490-19	1.13-17
Mo-90	3.261-19	1.18-17
Ag [*] -110	3.000-18	9.38-17
Ag-111	3.427-20	1.32-18
I-125	2.938-19	—
I-131	4.198-19	1.44-17
Cs-134	1.699-18	5.72-17
Cs-137	6.312-19	2.12-17
Ga-182	1.304-18	4.47-17
Ir-192	8.966-19	3.15-17
Au-198	4.488-19	1.51-17
Au-199	9.034-20	5.91-17
Ra-226	1.758-18	6.13-17(5.4-17)*
U-235	1.382-19	4.84-18
U-238	—	4.71-19
Am-241	2.298-20	4.13-18

* ()内值是经 0.5mm 厚铂过滤后的值。

例题: 一个20万居里的 ^{60}Co 源一旦泄漏时, 100米处的照射量率有多大?

解法一 (查表法) :

$$\Gamma = 2.503 \times 10^{-18} \text{ C} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\dot{X} = \frac{A \times \Gamma}{R^2}$$

$$= \frac{2 \times 10^5 \times 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq} \times 2.503 \times 10^{-18} \text{ C} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}}{(100\text{m})^2}$$

$$\approx 1.85 \times 10^{-6} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\left(= 0.007 \text{ R} \cdot \text{s}^{-1} = 7 \text{ mR} \cdot \text{s}^{-1} \right)$$



解法二（物理法）：

$$\dot{\psi} = \frac{An_{\gamma}\bar{E}_{\gamma}}{4\pi R^2}$$

$$\dot{X} = \dot{\psi} \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_a \frac{e}{\bar{W}}$$

$$= \frac{An_{\gamma}\bar{E}_{\gamma}}{4\pi R^2} \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_a \frac{e}{\bar{W}}$$

$$= \frac{2 \times 10^5 \times 3.7 \times 10^{10} \text{ s}^{-1} \times 2 \times 1.25 \times 10^6 \text{ eV}}{4 \times 3.1415926 \times (100 \text{ m})^2} \times 2.66 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1} \times \frac{1.602 \times 10^{-19} \text{ C}}{33.85 \text{ eV}}$$

$$\approx 1.85 \times 10^{-6} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\left(= 0.007 R \cdot \text{s}^{-1} = 7 mR \cdot \text{s}^{-1} \right)$$

比释动能K (KERMA , KINETIC ENERGY IN MATERIAL)

* 转移能 ϵ_{tr}

- 不带电粒子在某一体积元内转移给次级带电粒子的初始动能总和，其中包括在该体积内发生的次级过程所产生的任何带电粒子的能量。为随机量。
- 转移能的数学期望值，即平均转移能 $\bar{\epsilon}_{tr}$ ，是非随机量。

* 比释动能 K

- 不带电粒子授与物质能量的过程分成两个阶段。
 - 第一，不带电粒子与物质相互作用，释放出带电粒子，不带电粒子将能量转移给这些次级带电粒子；
 - 第二，次级带电粒子将通过电离、激发把从不带电粒子那获得的能量授与物质。
 - 吸收剂量是表示第二过程的结果。
 - 为了表示第一过程的结果，引进一个新辐射量，即比释动能K，



比释动能K

间接电离粒子的能量沉积过程:

间接带电粒子 → 带电粒子 (比释动能)

带电粒子 → 物质 (吸收剂量)



比释动能K

- 不带电粒子在体积元内产生的所有带电粒子的初始动能总和的平均值除以物质质量的商。

$$k = \frac{d\bar{\varepsilon}_{tr}}{dm}$$

- SI单位：戈瑞，Gy
- 历史上曾使用过的单位：拉德，符号rad

$$1\text{Gy} = 100\text{rad}$$



○ 比释动能K

$$d\bar{\epsilon}_{tr}$$

• 不带电粒子在质量为 dm 的体积元物质中释放出的全部带电粒子的初始动能总和的平均值，

• 既包括这些带电粒子在韧致辐射过程中释放的能量，

• 也包括该体积元内发生的次级过程所产生的任何带电粒子的能量。

• 注意点：

1、比释动能的单位与吸收剂量相同，即 J/kg ； $1Gy$ ； rad 。

2、比释动能只适用于不带电粒子，但适用于任何物质。它也是一个与无限小体积元相联系的辐射量。在受照物质中每一点都有它特定的比释动能值。所以在给出比释动能值时，也必须同时指出该值对应的物质和在该物质中的位置。



○ 比释动能K

○ 比释动能K与能注量 ψ 通量 ϕ 的关系

单能不带电粒子:
$$K = \psi \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho} \right) = \phi \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho} \right) E$$

$\frac{\mu_{tr}}{\rho}$ 质量能量转移系数, $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$

不带电粒子具有能谱分布:

$$K = \int \psi_E \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho} \right) dE = \int \phi_E \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho} \right) E dE$$

相同注量情况下不同物质间比释动能转换:

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{\left(\frac{\mu_{tr}}{\rho} \right)_1}{\left(\frac{\mu_{tr}}{\rho} \right)_2}$$



比释动能K的使用条件

对不带电粒子适用；

适用于所有介质；

针对“点”的概念。



比释动能率 \dot{K}

时间 dt 内比释动能的增量 dK

$$\dot{K} = \frac{dK}{dt}$$

即单位时间里的比释动能。单位同吸收剂量率：

$$\text{J kg}^{-1} \text{ s}^{-1}; \quad \text{Gy s}^{-1}; \quad \text{rad s}^{-1}$$

SI单位：戈瑞/秒，Gy/s



吸收剂量D (ABSORBED DOSE)

(1) 授与能 ε

电离辐射以电离、激发的方式授与某一体积中物质的能量。随机量

$$\varepsilon = R_{in} - R_{out} + \sum_i Q_i \quad \text{平均授与能 (数学期望) } \bar{\varepsilon} \text{ 为非随机量}$$

R_{in} (R_{out}) —— 所有进入 (逸出) 所考察体积的带电不带电粒子带入 (出) 的能量总和 (不包括静质量能)

$\sum_i Q_i$ 所考察体积中发生任何核变化, 所有原子核或粒子静质量能变化的总和, 正数为减少, 负数为增加。

(2) 吸收剂量的定义和单位

- 授予单位物质 (dm) (或被单位物质吸收) 的任何致电离辐射的平均能量 ($d\bar{\varepsilon}$) 【单位质量受照物质所吸收的平均辐射能量】

$$D = \frac{d\bar{\varepsilon}}{dm}$$

单位: J/kg; 专门名称: 戈瑞Gy

$$1 \text{ J/kg} = 1\text{Gy}; 1\text{Gy} = 100\text{rad}$$



吸收剂量D (ABSORBED DOSE)

(3) 吸收剂量率 \dot{D}

单位时间(dt)内吸收剂量的增量(dD)

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} \quad \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}; \quad \text{Gy} \cdot \text{s}^{-1}; \quad \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

(4) 吸收剂量与照射量的关系

空气中:

$$D_a = \psi \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_a = \frac{\bar{W}}{e} \chi = 33.97 \chi \text{ [Gy ; } \chi : \text{C kg}^{-1}\text{]}$$

$$= 8.76 * 10^{-3} \chi \text{ [Gy ; } \chi : \text{R]}$$

$$1\text{R} = 8.73 \times 10^{-3} \text{Gy}$$



吸收剂量D (ABSORBED DOSE)

某物质中:

$$D_m = \psi \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_m = \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_m \left[\frac{\bar{W}}{e} \chi / \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_a \right]$$

$$= \frac{\left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_m}{\left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_a} \cdot \frac{\bar{W}}{e} \chi = 33.97 \frac{\left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_m}{\left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_a} \chi \quad [\text{Gy}; \chi : \text{C kg}^{-1}]$$

$$= f_m \chi$$

照射量吸收剂量转换因子(照射量因子)

$$= \text{????} \chi \quad [\text{Gy}; \chi : \text{R}]$$

思考题: 1、为什么授与能是随机量, 而平均授与能为非随机量?

2、照射量为何是以空气介质来定义的? 吸收剂量呢?

(MeV)	水	软组织	肌肉	骨
0.01	35.31	32.56	35.70	131.11
0.015	34.88	32.13	35.70	149.22
0.02	34.57	31.82	35.62	157.75
0.03	34.26	31.67	35.58	164.34
0.04	34.38	32.05	35.74	156.20
0.05	34.88	32.91	36.01	136.43
0.06	35.50	33.99	36.32	112.40
0.08	36.51	35.58	36.78	75.19
0.1	37.05	36.43	37.05	56.20
0.15	37.48	37.05	37.21	41.09
0.2	37.56	37.17	37.25	37.91
0.3	37.60	37.25	37.29	36.47
0.4	37.64	37.25	37.29	36.16
0.5	37.64	37.29	37.29	36.05
0.6	37.64	37.29	37.29	35.97
0.8	37.64	37.29	37.29	35.93
1	37.64	37.29	37.29	35.93
1.5	37.64	37.29	37.29	35.93
2	37.64	37.25	37.29	35.93
3	37.52	37.13	37.17	36.09
4	37.40	37.02	37.05	36.32
5	37.44	36.86	36.90	36.51
6	37.13	36.71	36.74	36.71
8	36.86	36.43	36.47	37.09
10	36.63	36.16	36.24	37.40

组织中的照射量因子



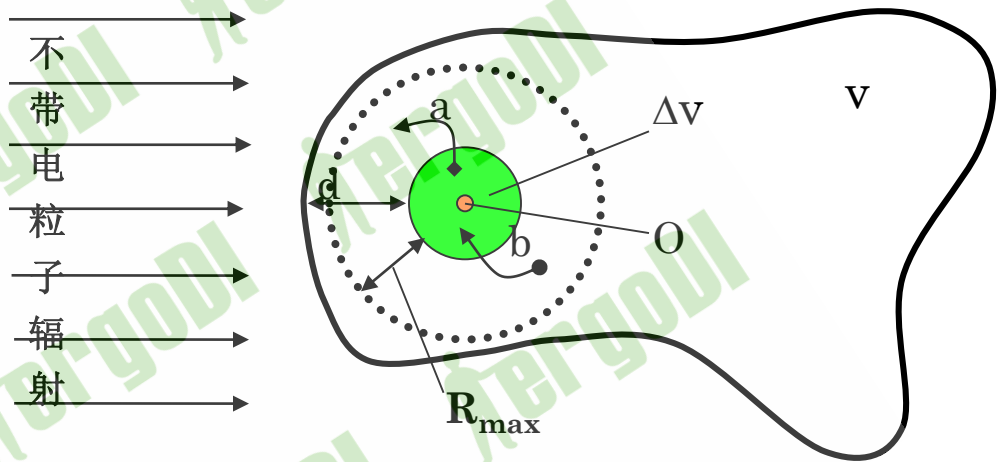
吸收剂量D的使用条件

对所有射线适用；
适用于所有介质；
针对“点”的概念。



带电粒子平衡 (CHARGED PARTICLE EQUILIBRIUM)

设不带电粒子通过体积为 V 的物质，如右图所示。在 V 内任取一点 O ，并以 O 为中心，取一小体积元 ΔV 。不带电粒子传递给 ΔV 的能量等于在 ΔV 内所产生的次级带电粒子动能的总和。这些次级带电粒子有的产生在 ΔV 内，也有产生在 ΔV 外的。在 ΔV 内产生的次级带电粒子有可能离开体积元 ΔV ，如径迹 a ，也有可能是在 ΔV 外产生的次级带电粒子进入该体积元，如径迹 b 。



带电粒子平衡示意图

若每一个带电粒子离开 ΔV ，就有另一个同种类、同能量的带电粒子进入 ΔV 来补偿，则称 O 点存在带电粒子平衡。



注意：带电粒子平衡概念总是与辐射场内特定位置相联系的。如果涉及的带电粒子特指电子，则就称为电子平衡。

带电粒子平衡条件：

- 以小体积元边界向各个方向伸展的距离 d ，至少应大于初级入射粒子在该体积元内产生的次级带电粒子的最大射程 R_{\max} ，并且在 $d > R_{\max}$ 的区域内，**辐射场应是恒定的**，即入射**粒子注量和谱分布恒定不变**；（**粒子特性**）
- 在上述 $d > R_{\max}$ 的区域内，**物质对次级带电粒子的阻止本领以及对初级入射粒子的质能吸收系数也应该是恒定不变的**。（**介质特性**）
- 显然，上述条件是很难实现的，但在某些情况下，能够达到相当好的近似。例如：对于 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 的 γ 射线，如果认为入射辐射1%左右的减弱可以忽略不计，那么在受照物质（如水）中可能存在很好的近似电子平衡；对于中子，由于建立带电粒子平衡相对容易，因此，即使中子能量高达30MeV，在某些物质（如水）中仍然有较好的近似带电粒子平衡。

带电粒子平衡 (CHARGED PARTICLE EQUILIBRIUM)

- 不存在带电粒子平衡的情况
 - 辐射源附近
 - 辐射场不均匀
 - 两种物质相邻的界面附近
 - 辐射场不均匀
 - 介质的质能吸收系数和阻止本领不同
 - $D \ll R_{\max}$
 - 高能辐射



比释动能与吸收剂量的关系

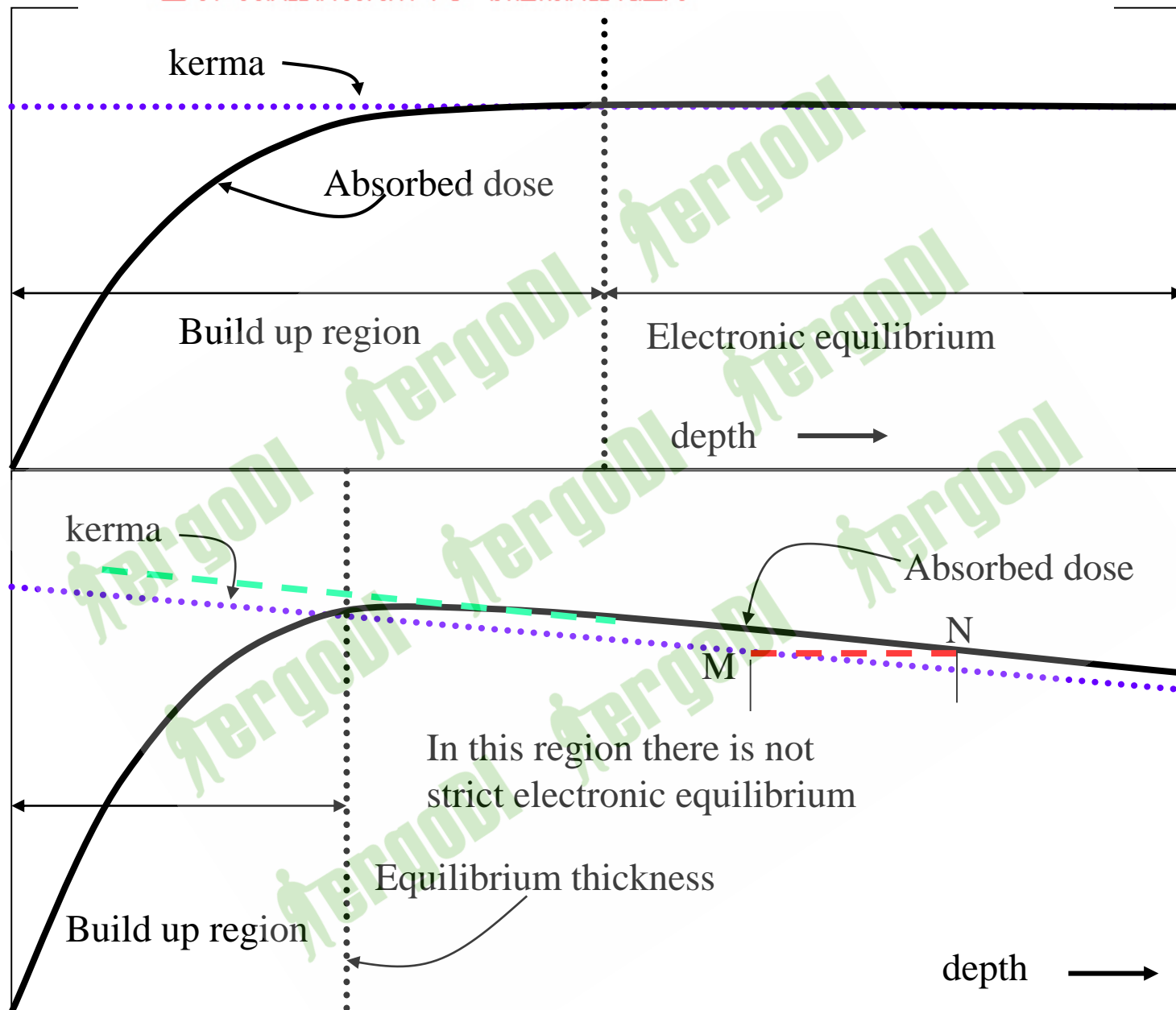
○ 带电粒子平衡条件下

$$K = \frac{d\bar{\varepsilon}_{tr}}{dm} = \frac{d\bar{\varepsilon}}{dm} = D$$

该式成立，还应满足一个条件，次级带电粒子所产生的**韧致辐射可忽略不计**，这只是在低能光子($\gamma, X\text{-ray}$)情形可认为满足。对与高能光子，则由于次级带电粒子是电子，有一部分能量在物质中转变为韧致辐射光子而离开所关心的体积元，故使 $K \neq D$ 此时的表达式为

$$D = \frac{d\bar{\varepsilon}}{dm} = \frac{d\bar{\varepsilon}_{tr}}{dm} (1 - g) = (1 - g)K$$

高能电子在高原子序数的物质内 g 值很大，不可忽略。而中子能量低于 30MeV ，完全可以忽略 K 、 D 间差别。



习题：试解释上面两幅图。



带电粒子准平衡状态

QUASI EQUILIBRIUM CONDITION OF CHARGED PARTICLES

如果随着物质层厚度增加入射不带电粒子有明显减弱，则比释动能将随深度的增加而不断地减小。但是，在靠近物质层表面的浅层内随着深度的增加，达到每一深度的次级带电粒子数目还是增加的，所以在受照物质浅层内吸收剂量随深度增加而增加，一直到由于深度增加而增加的次级带电粒子数目正好等于因不带电粒子的减弱导致其释放的次级带电粒子减少的数目时，吸收剂量达到极大值。此后随着物质层厚度的增加，吸收剂量与比释动能均按指数规律按一定比例减小。这就是所谓的带电粒子准平衡状态。

由于不带电粒子释出的次级带电粒子主要沿着原入射粒子方向发射，因此，次级带电粒子在N点消耗的能量，一般起源于在它之前的M点。因为M点的比释动能比N点的大，所以次级带电粒子在N点被吸收的能量要比初始不带电粒子在N点释放的能量大。故在准平衡状态下，同一点上的吸收剂量比比释动能大。

辐射量比较

辐射量	照射量X	比释动能K	吸收剂量D
计量学含义	表征X,γ线在考察的体积内用于电离空气的能量	表征非带电粒子在考察的体积内交给带电粒子的能量	表征任何辐射在考察的体积内被物质吸收的能量
适用介质	空气	任何介质	任何介质
适用辐射类型	X、γ射线	非带电粒子辐射	任何辐射
单位	C kg ⁻¹	Gy	Gy
老单位	R	rad	rad

器官剂量 D_T

- 为了辐射防护目的，而且我们平时所研究的**器官或组织并不是一个无限小体积**的介质，都具有一定的体积和质量，因此，定义一个器官或组织的**平均吸收剂量**。
- 也就是说，在辐射防护中感兴趣的是某一器官或组织的吸收剂量的平均值，而不是某一点上的剂量。



器官剂量 D_T

D_T 是很有用的量，定义为

$$D_T = \varepsilon_T / m_T$$

式中： ε_T 是授予某一器官或组织的**总能量**；

m_T 是该器官或组织的**质量**。

例如 D_T 的范围可以不到10g（卵巢）到大于70kg（全身）。

D_T 的单位与 D 相同。

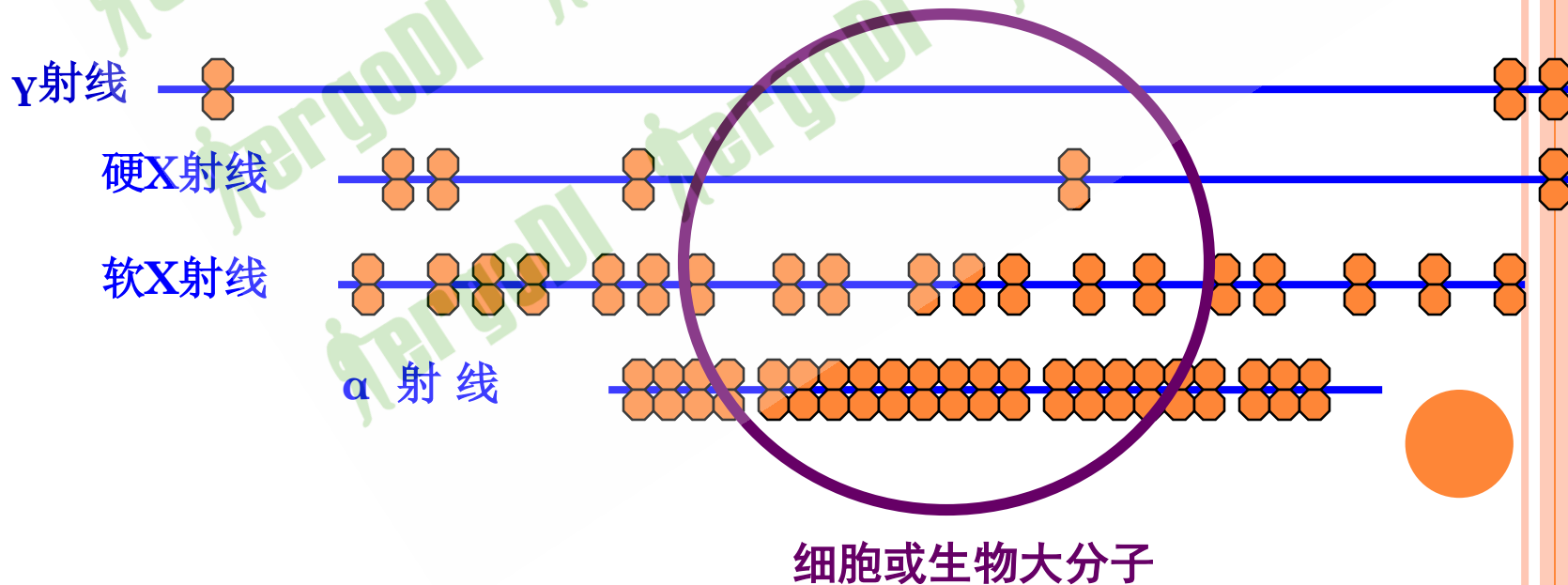


线传能密度 (LET)

定义：带电粒子在组织(或其他物质)中经过一定距离时由于碰撞而损失的能量。(J/m)

$$\text{LET} \propto \frac{Q^2}{v^2}$$

生物损害与LET值正相关。高LET粒子在给定体积内产生变化的几率高，但并非无限增加。



各种电离粒子的LET值

粒子种类	电荷	能量(MeV)	LET(GeV/m)
电子	-1	0.01	12.3
		0.1	2.3
		0.1	0.42
光子		1	0.25
		200kV(电子击出)X线	0.4~36
		⁶⁰ Co γ线	0.2~2
质子	+1	小	92
		2	16
		5	8
		10	4
		α粒子	+2
3.4	140		
5	95		
中子(间接)		2.5	15~80(峰值20)
		14.1	3~30(峰值7)

相对生物效应 (RBE)

辐射种类	相对生物效应
X、 γ 射线	1
β 粒子	1
热中子	3
中能中子	5~8
快中子	10
α 粒子	10
重反冲核	20



当量剂量 $H_{T,R}$ (EQUIVALENT DOSE)

- 相同的吸收剂量未必产生同等程度的生物效应
- 生物效应
 - 辐射类型与能量
 - 剂量与剂量率大小
 - 照射条件
 - 个体差异等等
- 为了用同一尺度表示不同**类型和能量**的辐照对人体造成的生物效应的严重程度或发生几率的大小，引入了**当量剂量**



当量剂量 $H_{T,R}$ (EQUIVALENT DOSE)

- 这是一个与个体相关的辐射量
- 定义：组织或器官的当量剂量是此组织或器官的**平均吸收剂量**与**辐射权重因子**的乘积。

$$H_{T,R} = w_R \cdot D_{T,R}$$

w_R —辐射权重因子,无量纲;

$D_{T,R}$ —辐射R在器官、组织T内产生的平均吸收剂量



当量剂量 H_T (EQUIVALENT DOSE)

- 当辐射场由具有不同 W_R 值的不同类型和(或)不同能量的辐射所构成时

$$H_T = \sum_R D_{T,R} \times W_R$$

单位: **J/kg**

专用名称: 希沃特 **Sievert, Sv**



辐射权重因子

(RADIATION WEIGHTING FACTOR, W_R)

- 数值上：依据辐射在低剂量率时诱发随机效应的相对生物效应值选取的。
- 性质：表征射线种类，能量与生物效应关系。

旧名称：辐射品质因子 (Q)

为辐射防护目的，对吸收剂量乘以的因数，用以考虑不同类型的辐射对健康的相对危害效应。



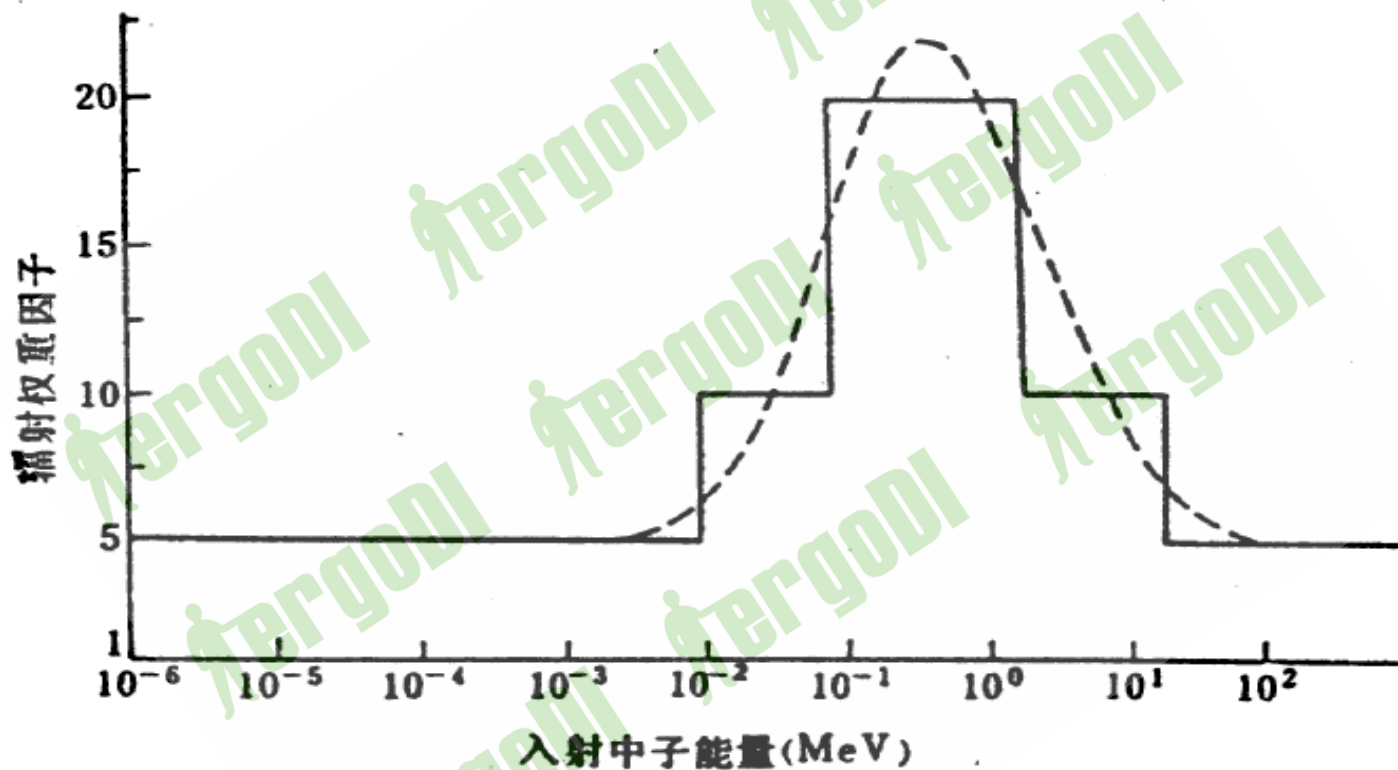
辐射权重因子 (W_R)

GB18871-2002、IAEA No115、ICRP60

辐射类型	能量范围	W_R
光子	所有能量	1
电子和介子	所有能量	1
中子	<10keV	5
	10-100keV	10
	>100keV-2MeV	20
	>2-20MeV	10
	>20MeV	5
质子（反冲质子除外）	能量>2MeV	5
α 粒子，裂变碎片，重核		20

辐射权重因子 W_R

辐射类型和能量范围	ICRP60	ICRP103
所有能量的光子	1	1
所有能量的电子、 μ 子	1	1
质子（能量 $>2\text{MeV}$ ）和带电介子	5	2
α 粒子、裂变碎片和重离子	20	20
中子（能量 $<10\text{keV}$ ）	5	随中子能量变化是一个连续函数，给出一个能谱与 W_R 曲线图和一个计算公式，求出 W_R 值
（能量 $10-100\text{keV}$ ）	10	
（能量 $100\text{keV}-2\text{MeV}$ ）	20	
（能量 $2-20\text{MeV}$ ）	10	
（能量 $>20\text{MeV}$ ）	5	



中子辐射权重因子平滑曲线将作为一种近似值对待



中子辐射权重因子 w_R (ICRP103)

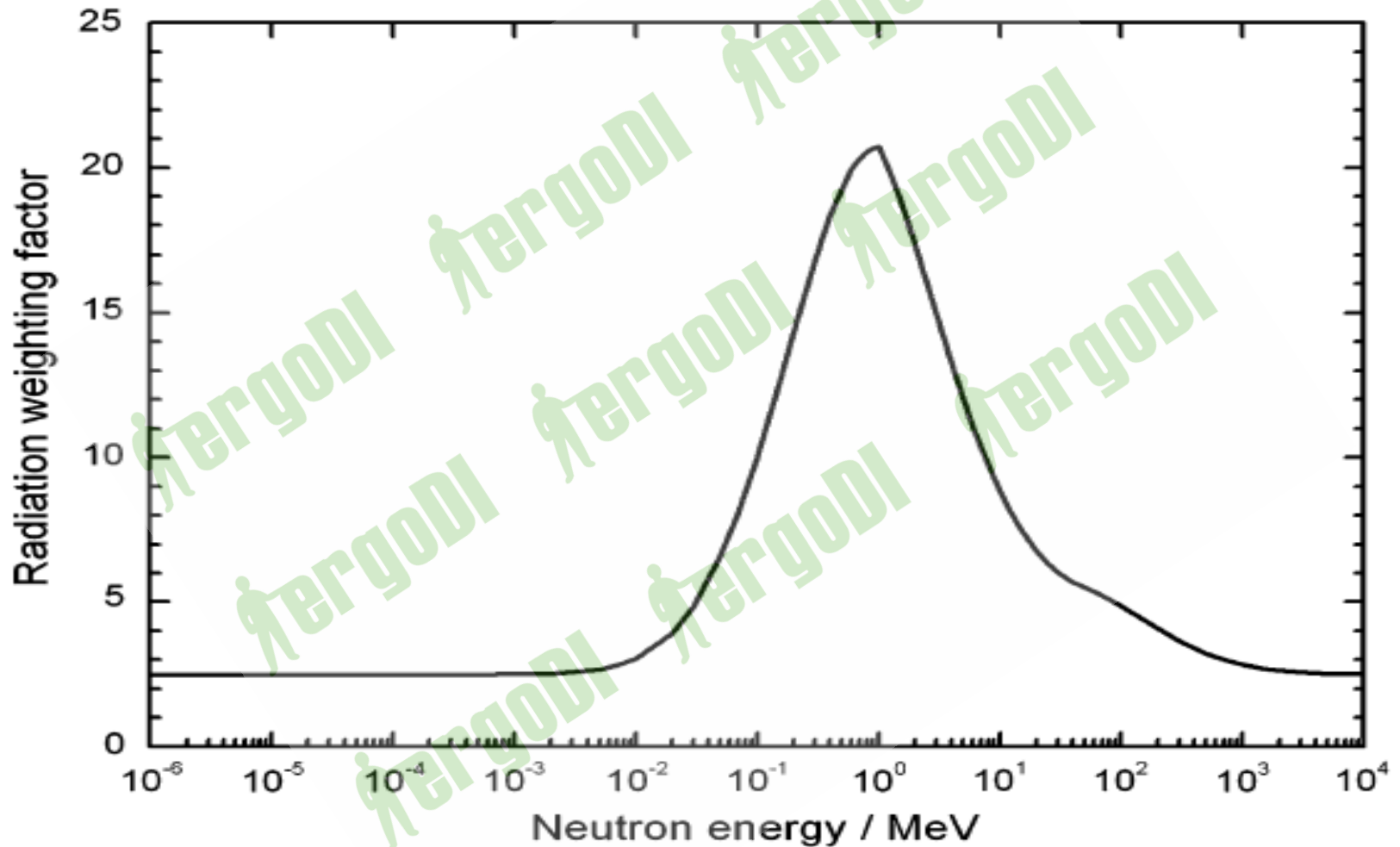


Fig. 1. Radiation weighting factor, w_R , for neutrons versus neutron energy.

中子的辐射权重因子也可以用下列公式进行计算：

$$2.5 + 18.2e^{-[\ln(E_n)]^2/6} \quad E_n < 1\text{MeV}$$

$$5.0 + 17.0e^{-[\ln(2E_n)]^2/6} \quad 1\text{MeV} \leq E_n \leq 50\text{MeV}$$

$$2.5 + 3.25e^{-[\ln(0.04E_n)]^2/6} \quad E_n > 50\text{MeV}$$



有效剂量E(EFFECTIVE DOSE)

- 这也是一个与个体相关的辐射量
- 随机性效应发生概率与当量剂量之间的关系还随受照器官或组织的不同而变化
- 当所考虑的效应是随机效应时，在全身受到不均匀照射的情况下，人体所有组织或器官的加权后的当量剂量之和。

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T$$

w_T —器官或组织T的组织权重因子，无量纲；

H_T —器官或组织T的当量剂量



有效剂量E(EFFECTIVE DOSE)

- 有效剂量表示了在非均匀照射下随机性效应发生率与均匀照射下发生率相同时所对应的全身均匀照射的当量剂量。
- 有效剂量也表示了为身体各器官或组织的双叠加权的吸收剂量之和：

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R \cdot D_{T,R}$$

- SI单位：希沃特，Sv $1\text{Sv} = 1\text{J/kg}$
- 历史上曾使用过的单位：雷姆，rem
 $1\text{Sv} = 100\text{rem}$
- 意义：评价随机效应的危险度，使辐射防护走向定量化。

组织权重因子 (TISSUE WEIGHTING FACTOR, WT)

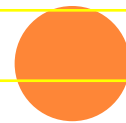
- 组织权重因子 W_T 是器官或组织受照射所产生的危险度与全身均匀受照射所产生的总危险度的比值；
- 它反映了在全身均匀受照下各该器官或组织对总危害的相对贡献。换句话说，不同器官或组织对发生辐射随机性效应的不同敏感性。

$$W_T = \frac{T \text{ 器官或组织接受 } 1\text{Sv} \text{ 照射时危险度}}{\text{全身接受 } 1\text{Sv} \text{ 均匀照射时总危险度}}$$



组织权重因子 W_T

组织或器官	W_T (ICRP26)	W_T (ICRP60)	W_T (ICRP103)
性腺	0.25	↓ 0.20	0.08 ↓
(红) 骨髓	0.12	0.12	0.12
结肠 ^a	—	0.12	0.12
肺	0.12	0.12	0.12
胃	—	0.12	0.12
乳腺	0.15	↓ 0.05	0.12 ↑
膀胱	—	0.05	0.04 ↓
肝	—	0.05	0.04 ↓
食道	—	0.05	0.04 ↓
甲状腺	0.03	↑ 0.05	0.04 ↓
脑	—	—	0.01
唾液腺	—	—	0.01
皮肤	—	↑ 0.01	0.01
骨表面	0.03	↓ 0.01	0.01
其余组织或器官 ^b	0.30	↓ 0.05	0.12 ↑



有效剂量E(EFFECTIVE DOSE)

例题：

某人(甲)骨表面接受0.3Sv的剂量当量，而另一个人(乙)骨表面受0.2Sv的照射，同时肝脏又受到0.1Sv的照射，哪个人危险更大些？

答：根据表给出的 W_T 值按公式计算如下：

$E_{\text{甲}}=0.01 \times 0.3=0.003 \text{ Sv}$ (骨表面 $W_T=0.01$)
甲相当于全身均匀照射0.003Sv的危险性。

$E_{\text{乙}}=0.01 \times 0.2+0.05 \times 0.1=0.007 \text{ Sv}$ (肝脏 $W_T=0.05$)

乙相当于全身均匀照射0.007Sv的危险性。
显然乙受到辐射的危害大于甲。



概念理解

- ▶ 当量剂量 针对某个器官或组织，是平均值；
- ▶ 有效剂量 针对全身而言，取平均值。
- ▶ 辐射权重因子 描述了辐射类型、能量的不同对生物效应的影响；
- ▶ 组织权重因子 则描述了不同器官、组织对全身总危害的贡献。



待积当量剂量与待积有效剂量

1. 待积当量剂量 (committed equivalent dose)

- 人体**单次摄入**放射性物质后，某一器官或组织中接受的当量剂量率在时间 τ 内的积分【总剂量】。

$$H_T(\tau) = \int_{t_0}^{t_0 + \tau} \dot{H}_T(t) dt$$

- t_0 是摄入放射性物质的起始时刻；
- $\dot{H}_t(t)$ 是在 t 时刻器官或组织受到的**当量剂量率**；
- τ 是摄入放射性物质之后经过的时间。当没有给出积分的时间期限时，成年人—50年；儿童—70年



待积当量剂量与待积有效剂量

2.待积有效剂量 (committed effective dose)

- 受到辐射危害的各器官或组织的待积当量剂量 $H_T(\tau)$ 经 W_T 加权处理后的总和称为待积有效剂量 $E(\tau)$ ，即

$$E(\tau) = \sum_T w_T \cdot H_T(\tau)$$

$H_T(\tau)$ 是积分到 τ 时间时器官或组织 T 的待积当量剂量；
 W_T 是器官或组织 T 的组织权重因子。

τ 以年为单位

待积有效剂量可用来预计个人因摄入放射性核素后将发生**随机性效应**的**平均几率**。

$H_T(\tau)$ 与 $E(\tau)$ 的单位、名称与符号都和 H 、 E 相同。



放射性物质在机体内的有效半衰期：

$$T = \frac{T_r \times T_b}{T_r + T_b}$$

T_r ：放射性半衰期

T_b ：体内代谢的生物半排期



集体当量剂量与集体有效剂量

一次大的放射性实践或放射性事故，会涉及许多人。因此，采用集体剂量来定量地**表征某一实践对社会的总危害。**

1. 集体当量剂量 S_T (collective equivalent dose)

- 表示一组人某指定的器官或组织的当量剂量的总和。

$$S_T = \sum_i \bar{H}_{T,i} \cdot N_i$$

式中： $\bar{H}_{T,i}$ 是所考虑的群体中，第*i*组的人群中每个人的T器官或组织所受到的平均当量剂量； N_i 是第*i*人群组的**人数**。

单位：人•希



集体当量剂量与集体有效剂量

2.集体有效剂量 S_E (COLLECTIVE EFFECTIVE DOSE)

- 受照群体每个成员的有效剂量的总和。

$$S_E = \sum_i E_i \bullet N_i$$

式中： \bar{E}_i 是第I组人群接受的平均有效剂量。

单位： 人•希

注意： 时间、人群



运行实用量

- 与人体相关的剂量学量，如当量剂量和有效剂量，实际上是不可测量的。
- ICRU(国际辐射单位与测量委员会)定义了一些量，可以用来评价当量剂量和有效剂量等防护量。【运行实用量】
 - 目的：为相关受照的防护量提供一个估计值或上限
 - 主要针对外照射



运行实用量

○ 剂量当量

- 定义：在组织中某一点的**吸收剂量D**、反映吸收剂量微观分布的**品质因数Q**、反映吸收剂量不均匀的空间与时间分布等因素的**修正系数N**的乘积。

$$H = DQN$$

- 品质因数Q，又叫**线质系数**，它是所关心的那一点，水中传能线密度L的函数；
- 修正系数N，ICRP指定为1。
- 剂量当量与**射线种类、能量及受照条件**有关



运行实用量

○ 品质因数

- 定义：依据授予物质能量的带电粒子的相对生物学效能（RBE），对特定位置上软组织吸收剂量施加修正的一个权重。

○ 剂量当量和当量剂量的区别

- 前者与特定位置 r 处的吸收剂量相关，用于辐射防护 **监测**（ Q ）。
- 后者与组织体积内的 **平均吸收剂量** 相关，用于辐射 **危害评价**（ W_R ）。



运行实用量

○ 扩展场和齐向扩展场

- 扩展场和齐向扩展场是为定义场所辐射监测的实用量而定义的两个虚拟辐射场。

○ 扩展场

- 场的**注量**和它的**角分布**、**能量分布**与参考点(r点)处实际辐射场具有相同的数值



运行实用量

○ 扩展场和齐向扩展场

- 扩展场和齐向扩展场是为定义场所辐射监测的实用量而定义的两个虚拟辐射场。

○ 齐向扩展场

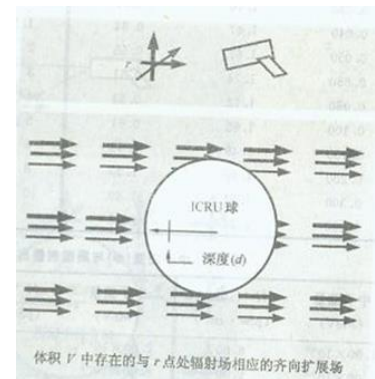
- 场的注量和能量分布与参考点(r 点)处实际辐射场具有相同的数值，但注量是单向的。

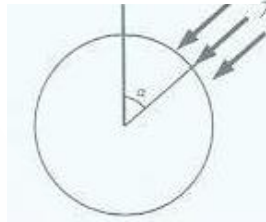


运行实用量

○ 周围剂量当量 (Ambient dose Equivalent)

- 定义：辐射场 r 点处的周围剂量当量 $H^*(d)$ 是与 r 处实际辐射场相应的 **齐向扩展场** 在 ICRU 球中 **逆向** 齐向场方向的 **半径上深度 d** 处的剂量当量。
- **场所(环境)监测**
- 用途：用于 **强贯穿辐射**。 $d=10\text{mm}$ ，此种情况下 $H^*(d)$ 可以写作 $H^*(10)$ 。
- 常常可以作为仪器所在位置上人体 **有效剂量的合理近似值**。
- 对于高能辐射场，使用 10mm 不合适。
 - 高能加速器；宇宙射线
 - 不足以完成带电粒子积累，低估有效剂量





运行实用量

○定向剂量当量 (Directional dose Equivalent)

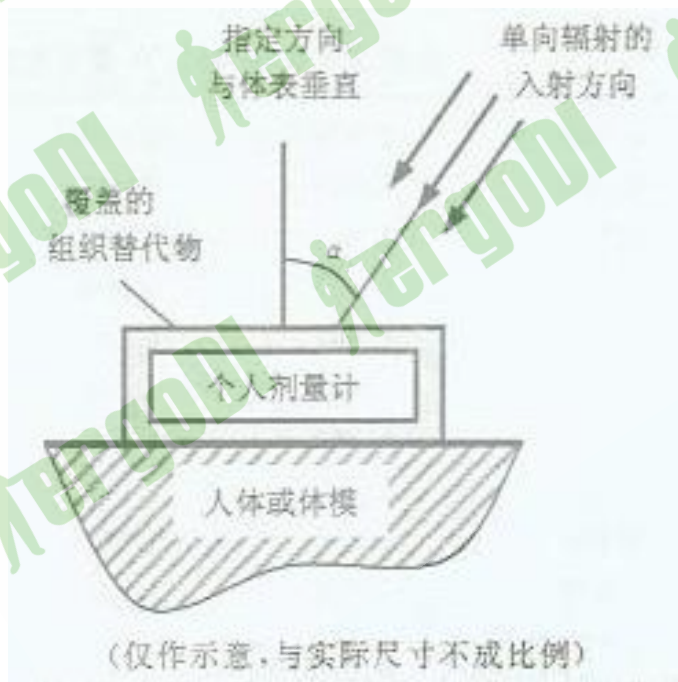
- 定义：辐射场 r 点处的定向剂量当量 $H'(d, \Omega)$ $[(d, \alpha)]$ 是与 r 处实际辐射场相应的扩展场在ICRU球中某一指定方向 Ω 方向的半径上深度 d 处的剂量当量。
- 场所(环境)监测
- 用途：定向剂量当量用于弱贯穿辐射的监测
- 此时，关心的深度 d ：
 - 对于皮肤 $d=0.07\text{mm}$, $H'(0.07, \Omega)$
 - 对于眼晶体 $d=3\text{mm}$, $H'(3, \Omega)$
- 通常可作为仪器所在位置皮肤、眼晶体当量剂量的合理近似值。
- 与角度有关，不指定方位角时，指最大值。



运行实用量

○ 个人剂量当量 (Personal dose equivalent)

- 定义：人体指定一点下深度 d (mm) 处按ICRU球定义的软组织的剂量当量。
- **个人监测**，一般由各类个人剂量计进行测量。



运行实用量

○ 个人剂量当量 (Personal dose equivalent)

- 1) $H_p(d)$ 具有 **方向性** $H_p(d, \alpha)$
- 2) 强贯穿: $d=10\text{mm}$; 弱贯穿: $d=0.07\text{mm}$
- 3) 用在辐射防护中:
 - $H_p(10)$ 有效剂量估值;
 - $H_p(0.07)$ 皮肤局部当量剂量估值;
 - $H_p(3)$ 眼晶体当量剂量估值。
- 4) $H_p(d)$ 使用应说明个人受照射情况、剂量计佩戴位置 (若个人剂量计方向响应不同, 需考虑入射辐射的方向- $H_p(d, \Omega)$)
- 5) 刻度是个人剂量计放体模上, 充分考虑人体对射线的影响

