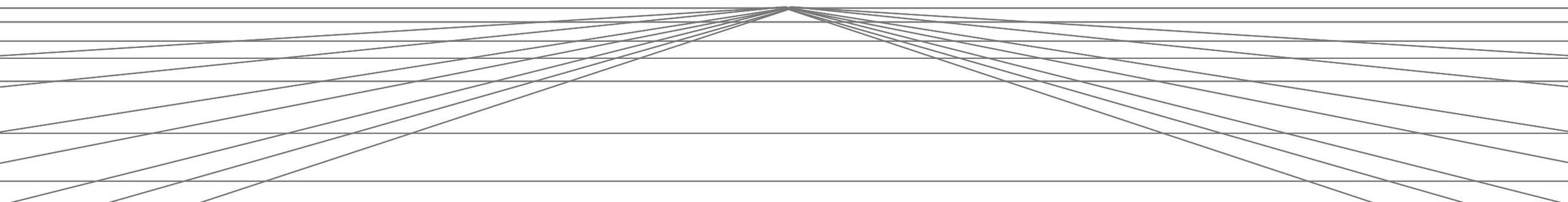


# 放射防护的物理学基础 与生物学基础

南昌大学公共卫生学院

范广勤

2020.09



# 内容

CONTENT

- 一、放射防护的物理学基础
- 二、放射防护的生物学基础

**放射本质**

PART ONE

**物理基础**

PART ONE

**辐射计量**

PART TWO

**物理基础**

PART TWO

**放射损伤**

PART THREE

**生物基础**

PART THREE



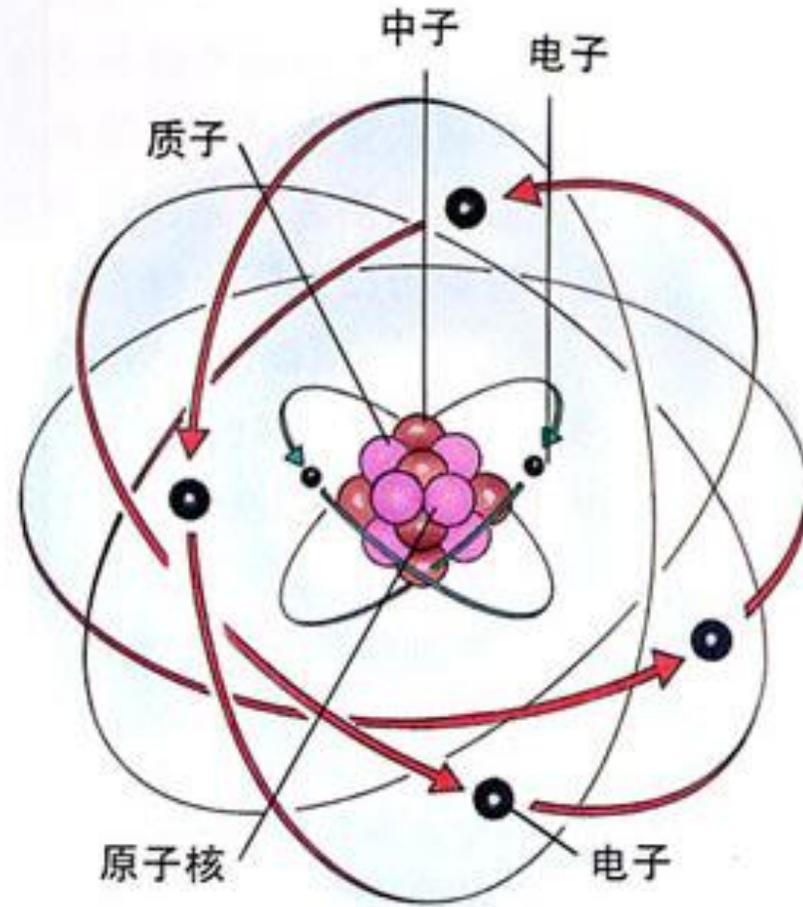
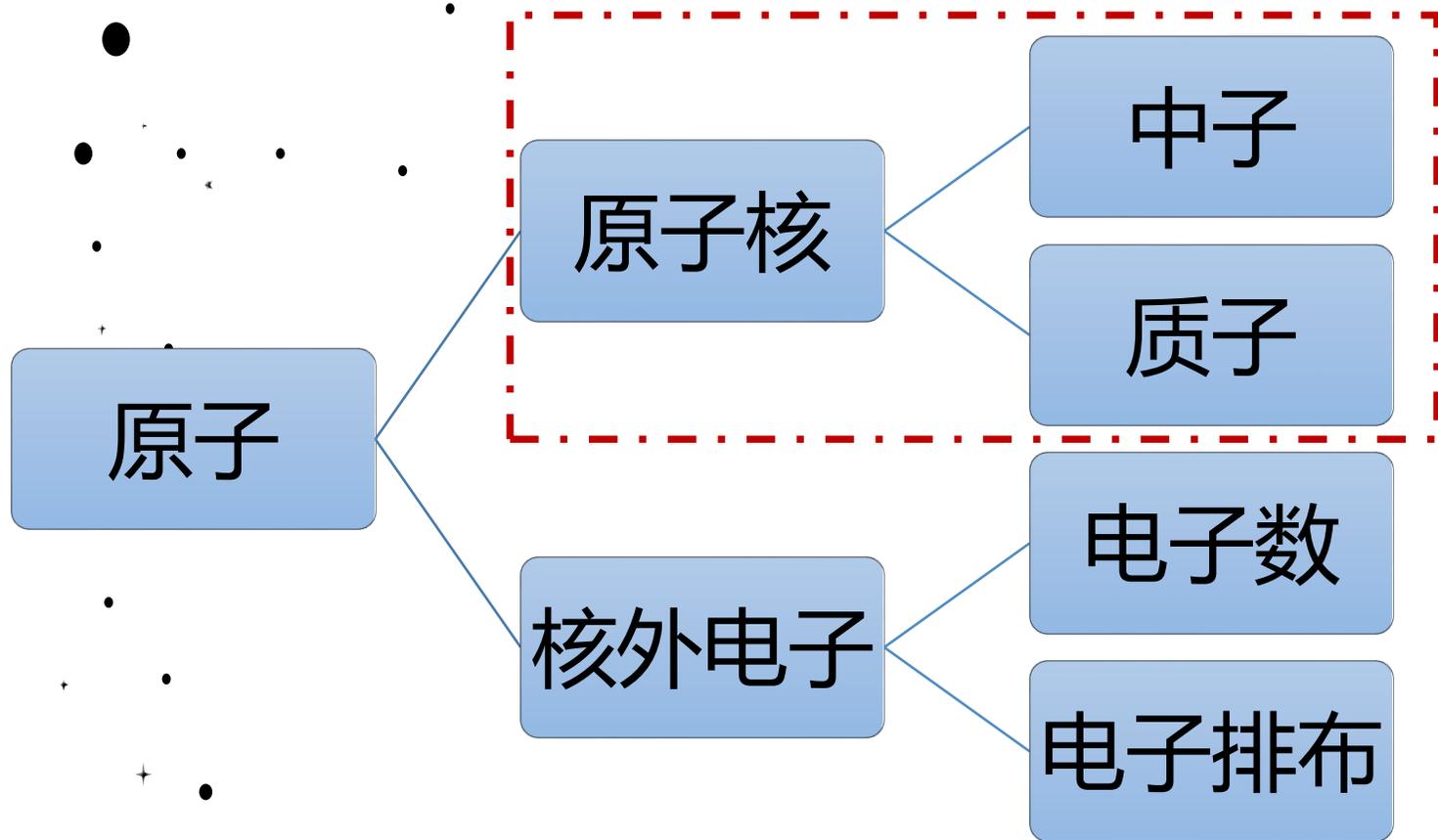
# 放射本质

## PART ONE

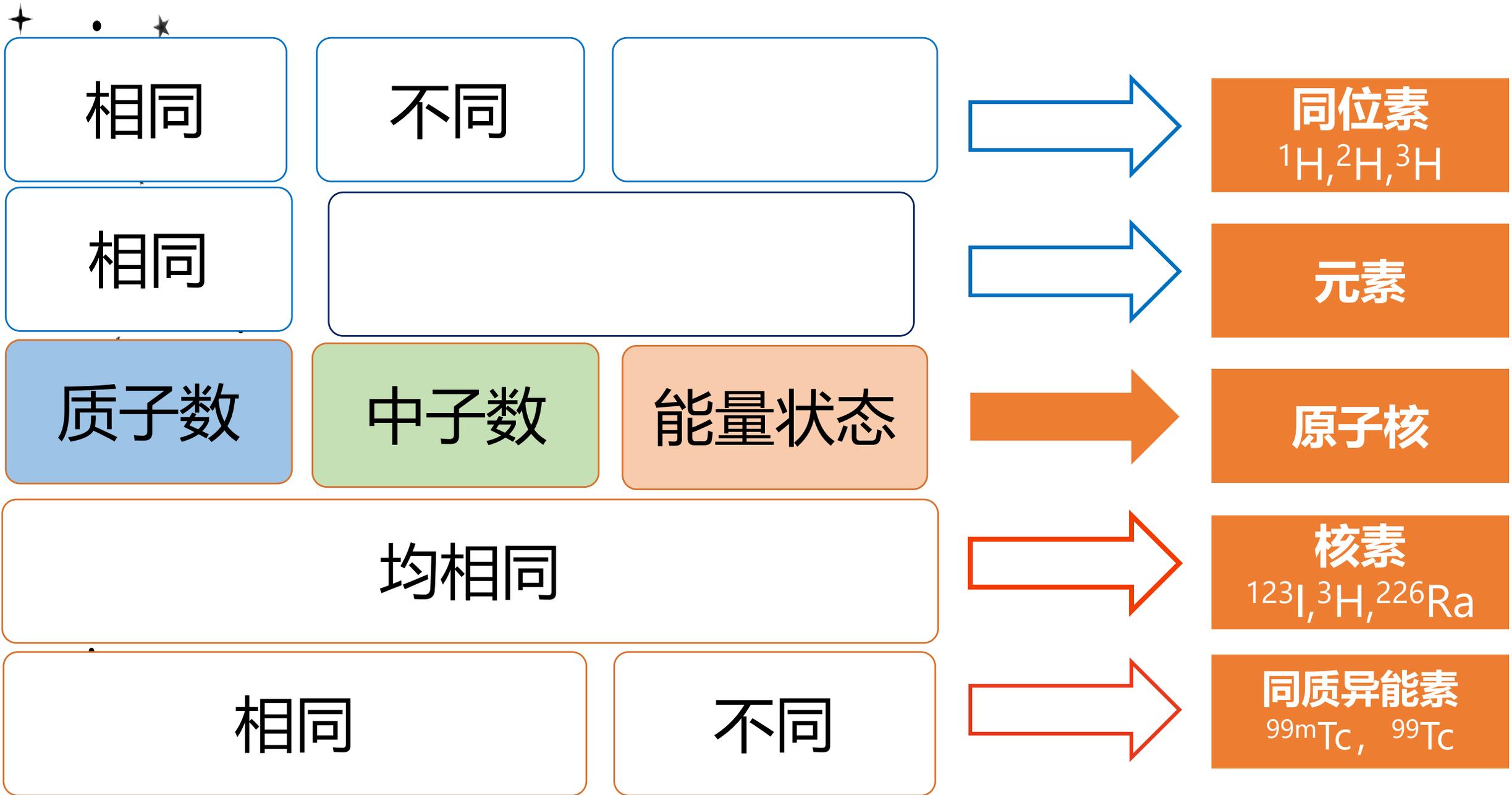
---

放射性的本质是原子核的衰变

# 原子结构

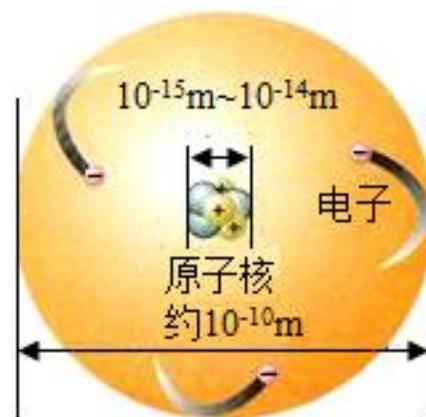


原子由三种不同的粒子组成。它们是质子、中子、电子。质子和中子挤在位于原子中心的原子核里。电子在核周围运动，就像模糊的云。电子在核外形成不同壳层。

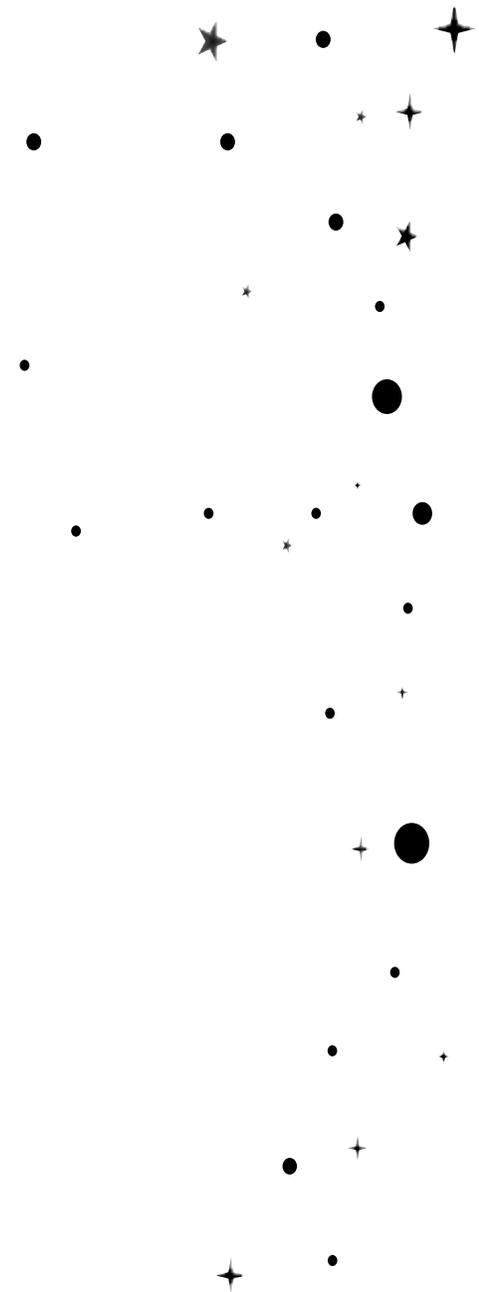


# 原子核的特点

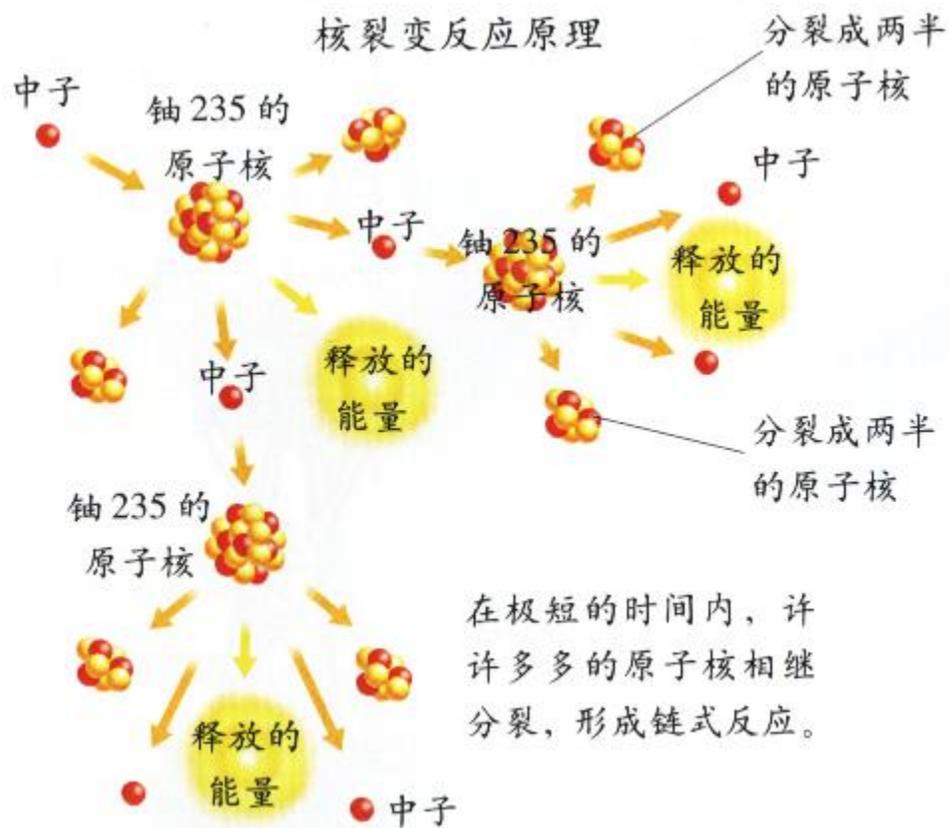
体积极小，质量却大



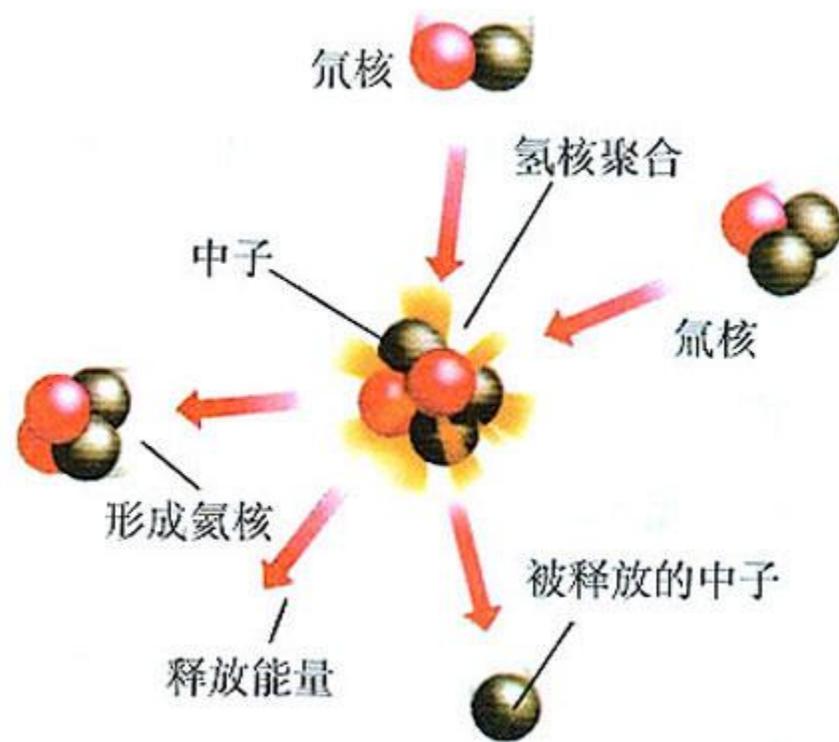
能量极大，却很稳定



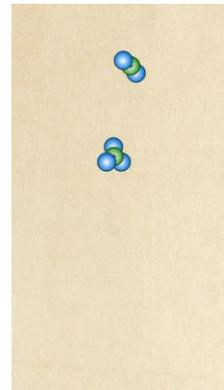
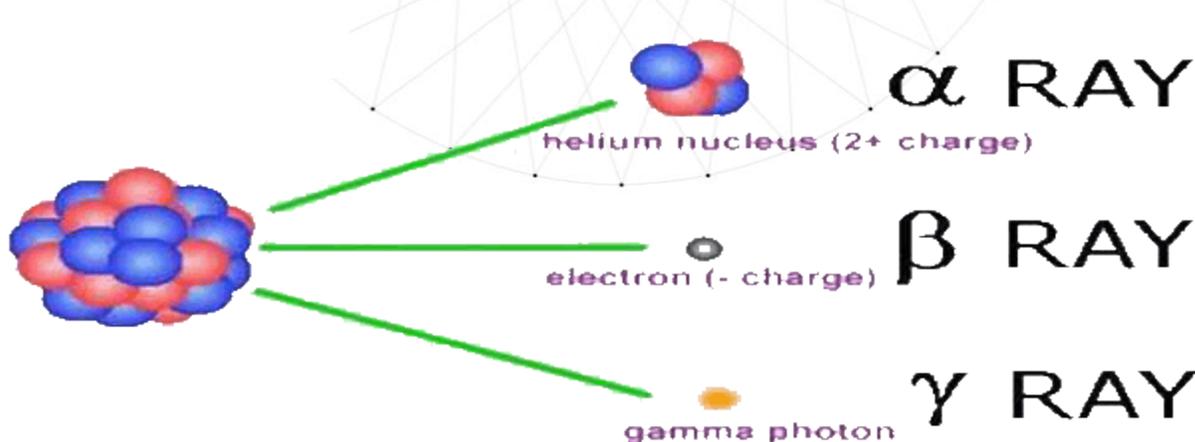
# 核裂变



# 核聚变



# 核衰变



# 核衰变与放射性

**核衰变：**是不稳定的原子核自发射出某种**粒子**而变为另一种原子核的过程。

**放射性：**是不稳定的原子核自发地发射各种粒子（射线）的行为。



## 稳定性核素与放射性核素



### 稳定性核素

当核内质子和中子数比例维系在1: (1~1.5) 时，核力与静电斥力基本平衡，原子核处于稳定状态。处于稳定状态的核素称为~

### 放射性核素

当核内质子和中子数比例不当，或核子数过多时，原子核处于不稳定状态而产生质子和中子之间相互转化或释放一部分核子。释出具有一定能量粒子（放射线）的核素称为~



# 天然放射性核素与人工放射性核素

## 天然放射性核素

是自然界天然存在的，大多属于由重元素组成的三个放射系（即钍系、铀系和锕系）。此外，还存在一些非系列的天然放射性核素，例如 $^3\text{H}$ ， $^{14}\text{C}$ ， $^{40}\text{K}$ ， $^{138}\text{La}$ ， $^{176}\text{Lu}$ 等。半衰期一般较长。

## 人工放射性核素

是指通过反应堆和加速器等人工手段生产出来的一类放射性核素。例如 $^{18}\text{F}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{125}\text{I}$ 、 $^{131}\text{I}$ 等。半衰期一般较短。

人类已经发现近3000种核素

天然核素330多种

人工合成约2600种

有近300种核素是稳定的，其余都是不稳定核素。

# 常见核衰变类型

## 放射性衰变 常见类型

### $\alpha$ 衰变



子核在元素周期表中的位置左移2格

### $\beta$ 衰变



子核在元素周期表中的位置左移1格

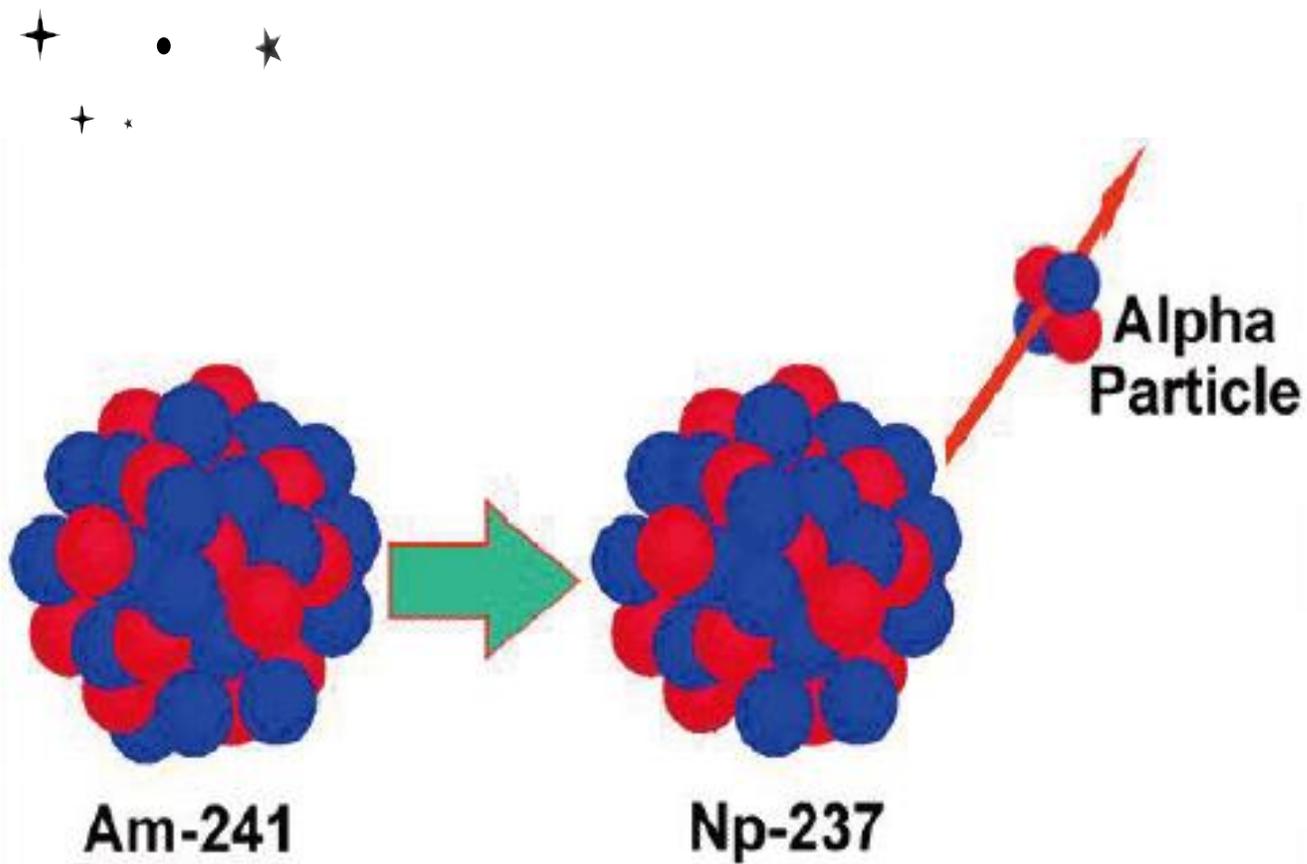
### $\gamma$ 衰变



高能短波电磁辐射 (即电子波)

$\beta^-$ 衰变

$\beta^+$ 衰变

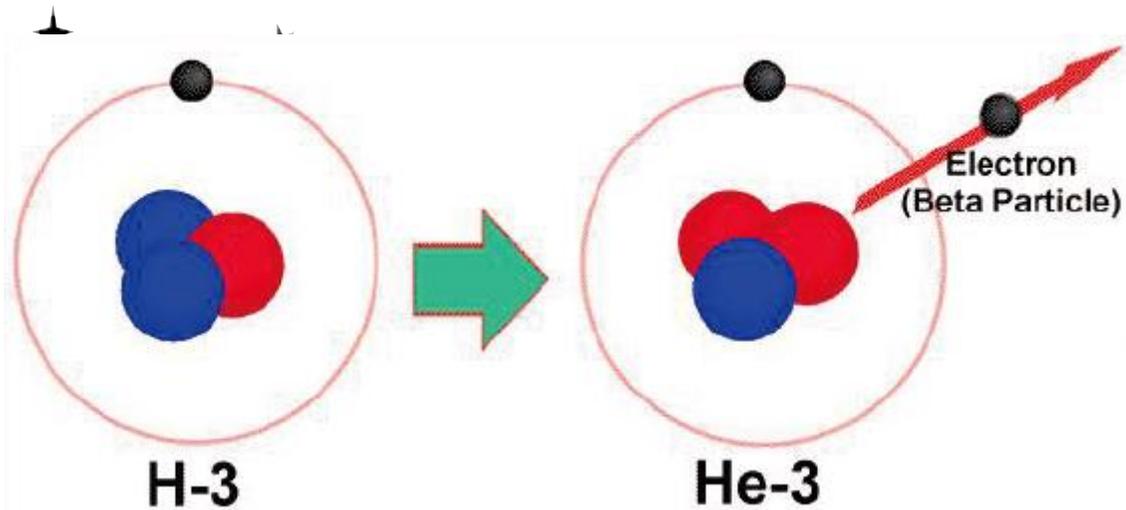


## $\alpha$ 衰变

**原因：核子数过多，原子核内要释放2个质子和2个中子组成的氦核He。**

**见于：主要发生在原子序数  $> 82$  的重元素的核素。**

**特点：速度每秒可达两万公里，带正电荷，具有最强的电离作用，穿透本领很小，在云室中留下粗而短的径迹。**

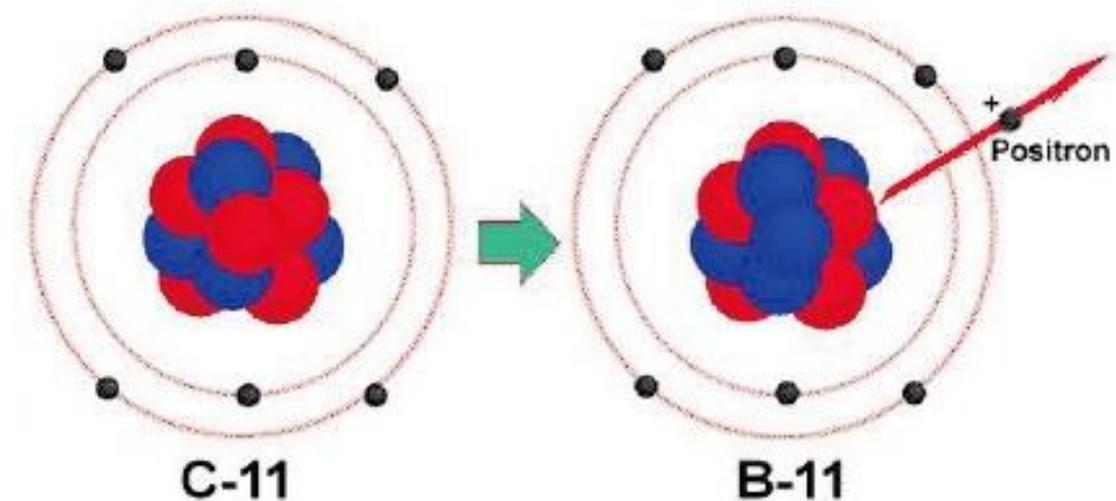


## $\beta^-$ 衰变

原因：核内中子转化为质子，释放负电子

见于：主要发生在中子相对过多的核素

特点：释出的高能量电子，其速度可达至光速的90%，电离作用较弱，穿透本领较强，云室中的径迹细而长。



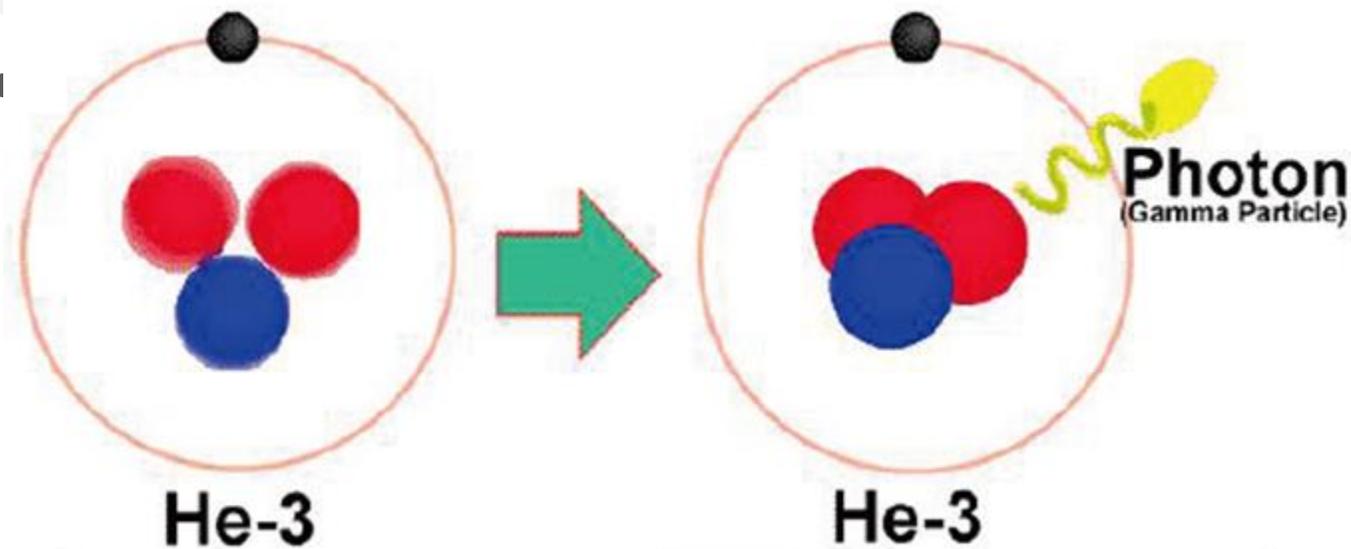
## $\beta^+$ 衰变

原因：核内由质子转化为中子，释放正电子

见于：主要发生在中子数相对不足的核素

# $\gamma$ 衰变

- 原因：原子核从不稳定的高能状态跃迁到稳定或较稳定的低能状态，核内多余能量以电磁辐射（ $\gamma$ 光子）形式释放。
- 见于：通常在发生 $\alpha$ 衰变或 $\beta$ 衰变时，所生成的核处于不稳定的较高能态（激发态），在转化到处于稳定的最低能态（基态）过程中。
- 特点： $\gamma$ 射线是波长很短的电磁波。电离作用最弱，穿透本领最强，云室中不留痕迹。



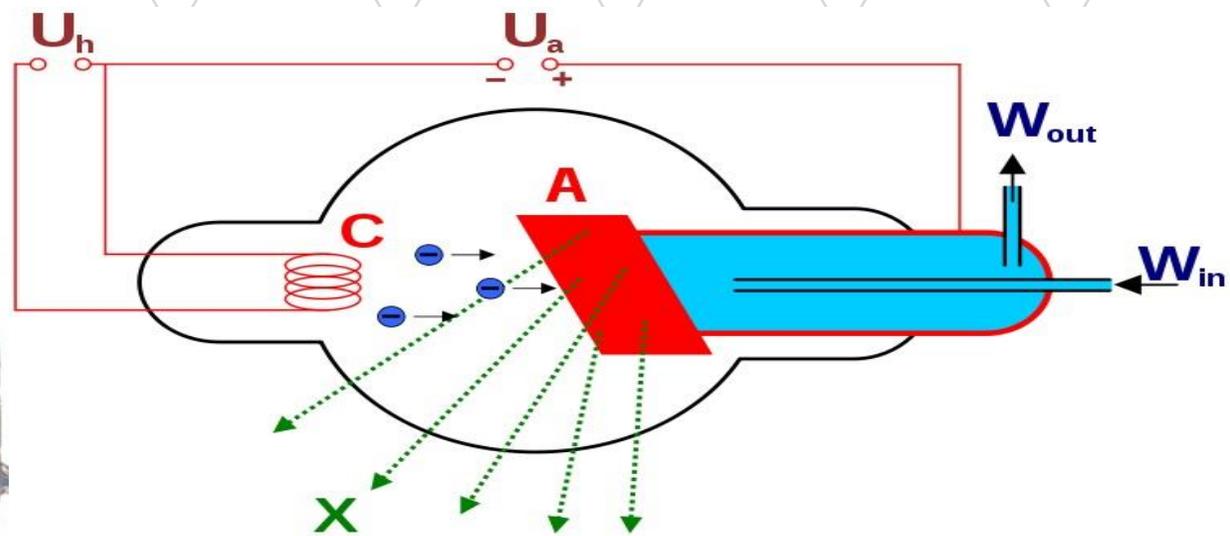
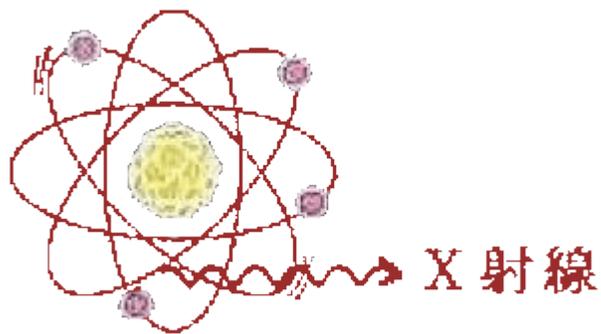
# 天然放射现象

射线	成份	速度	贯穿能力	电离能力
$\alpha$ 射线	氦原子核	1/10光速	弱	很容易
$\beta$ 射线	高速电子流	接近光速	较强	较弱
$\gamma$ 射线	高能量电磁波	光速	很强	很小

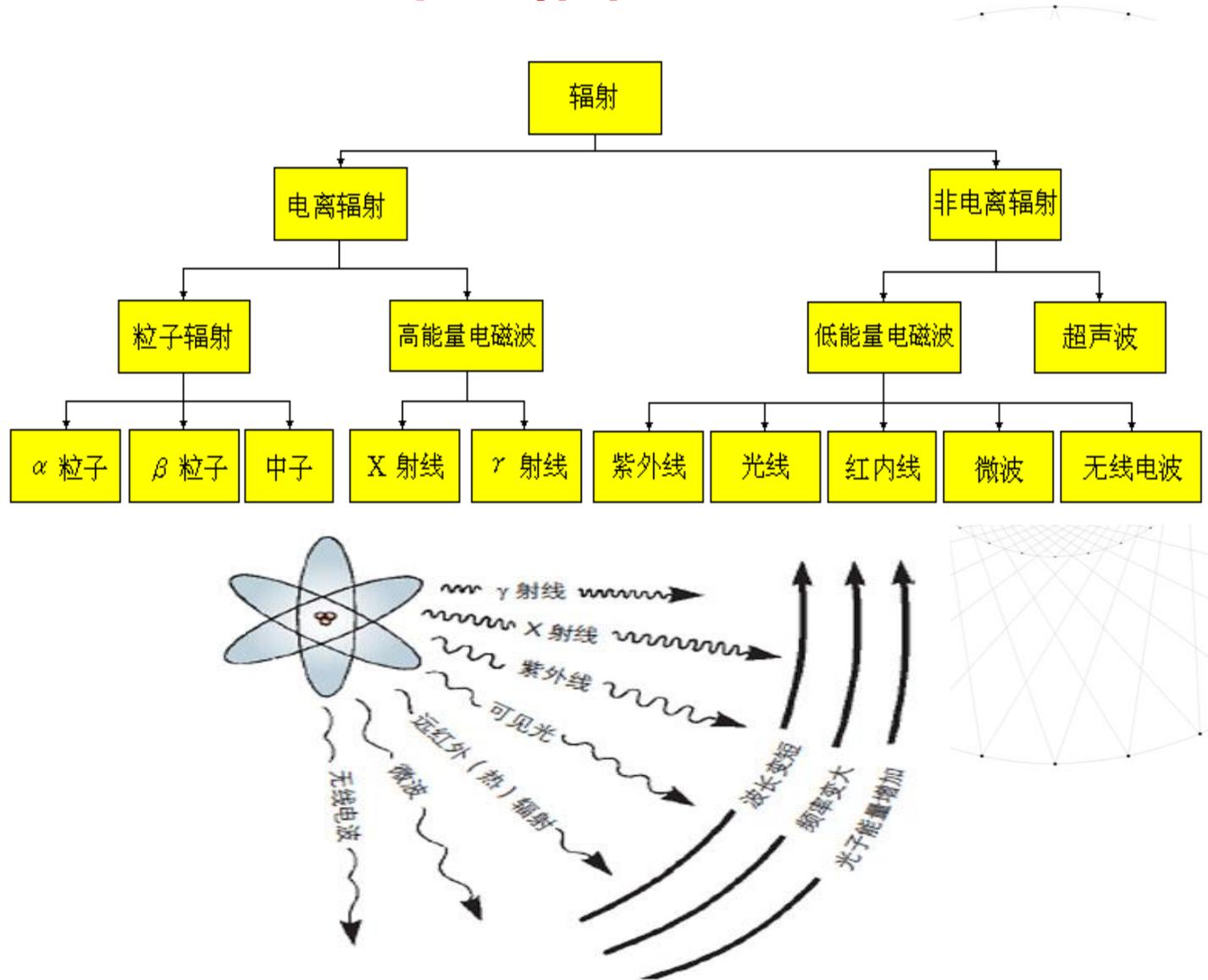
# X射线

原因：原子中的电子在能量相差悬殊的两个能级之间的跃迁而产生的粒子流。

见于：当高速移动的电子撞击任何形态的物质时；高能电子与物质相互作用时。



# 电离辐射

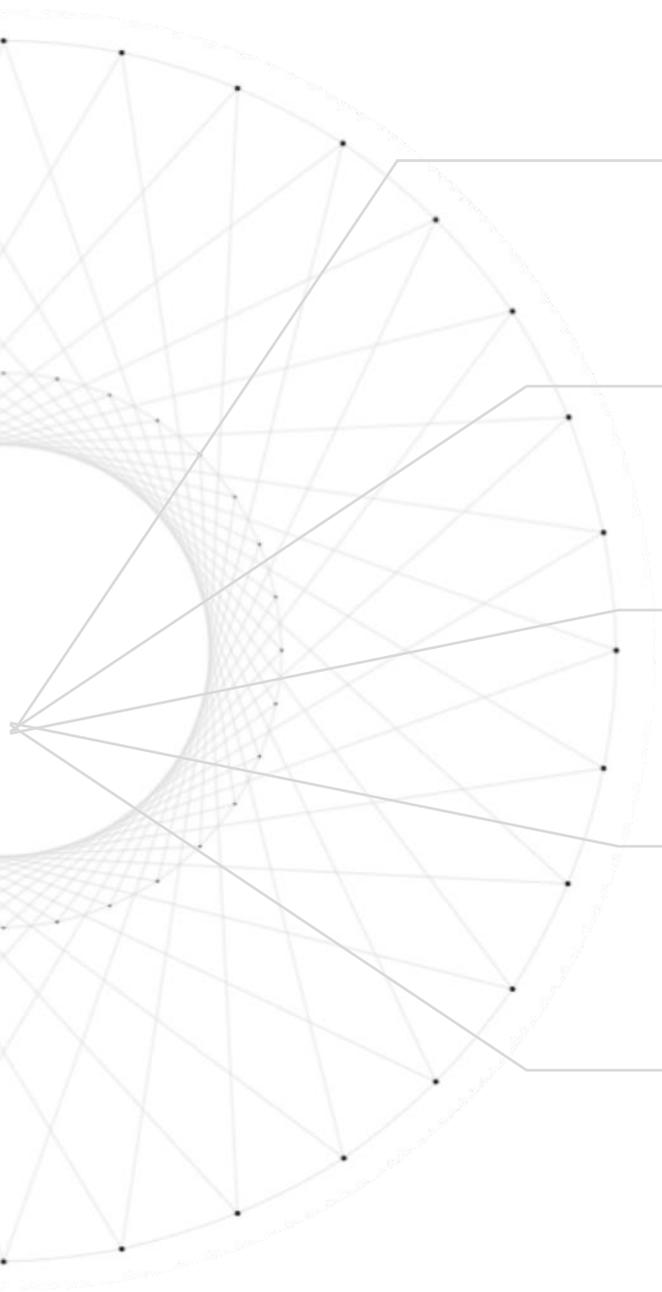


电离辐射特性表

名称	来源	性质	电荷	穿透力
α粒子	原子衰变	一粒氦原子核	2+	一张纸或皮肤外层可有效地阻挡
β粒子	原子衰变	一粒电子	1-	一块数毫米的铝片可有效地阻挡
中子	核反应堆	一粒中子	无	含氢量高的物质如石蜡或水可有效地阻挡
γ射线	原子衰变	高能电磁波	无	高密度物质如厚的水泥可有效地阻挡
X射线	受激发的电子云	高能电磁波	无	高密度物质如厚的水泥可有效地阻挡

常见的放射性核素所放出的辐射

核素	原子序	α粒子	β粒子	γ射线
氡	1		★	
钴-60	27		★	★
铯-90	38		★	
□-99	43		★	
碘-131	53		★	★
铯-137	55		★	★
钋-210	84	★		★
镭-226	88	★		★
钍-232	90	★		★
铀-238	92	★		★
□-236	94	★		★
□-241	95	★		★



- 具有穿透力
- 视觉不能感知
- 遇到某些物质可能发光
- 释放能量
- 能使被照物质电离或激发

# 电离辐射



# 各种射线的穿透能力不同

Alpha particles

α 粒子

Beta Particles

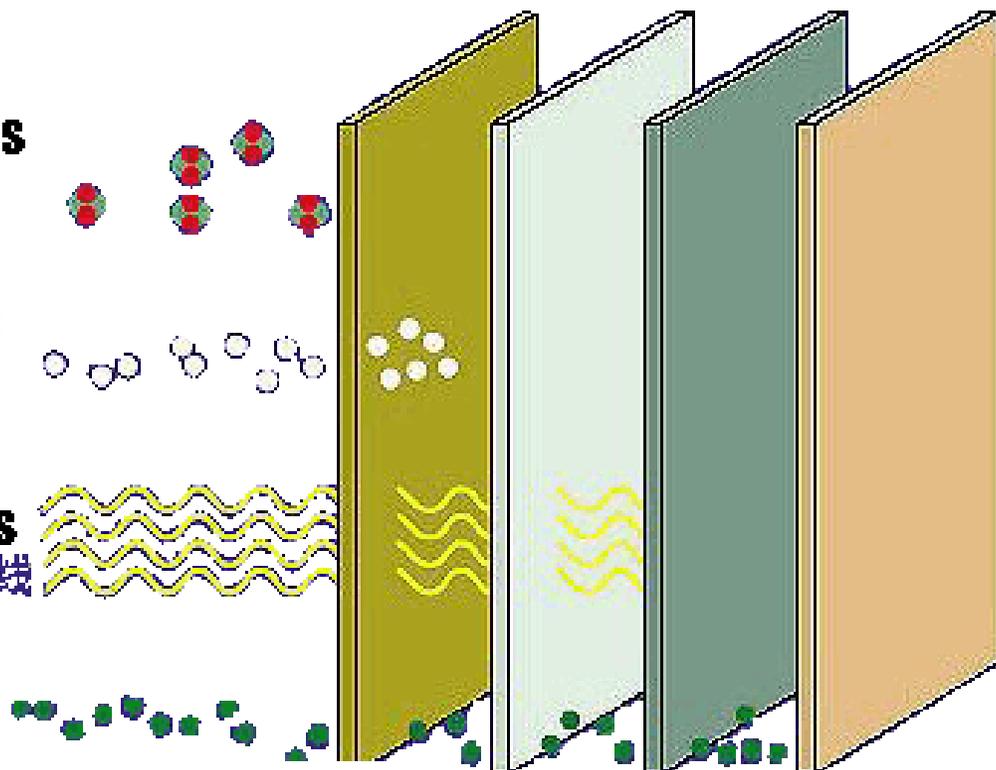
β 粒子

X-rays or Yrays

x 射线或 γ 射线

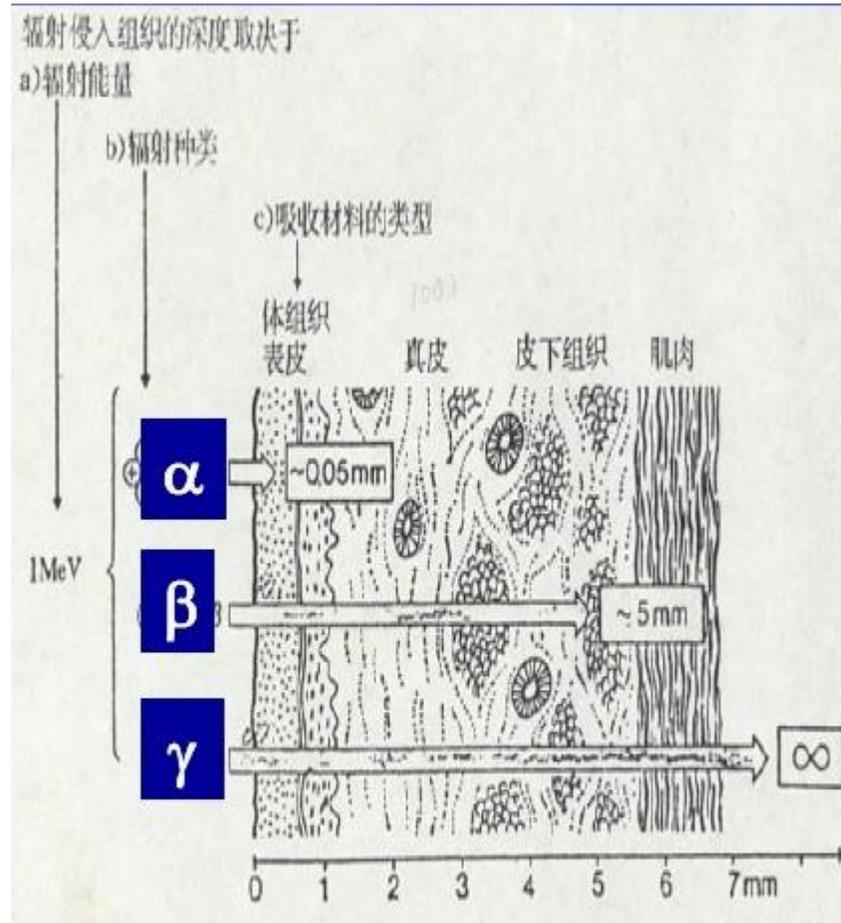
Neutrons

中子



Cardboard Aluminium Lead Paraffin

硬纸板 铝 铅 石蜡



α β γ 射线穿透

人体皮肤情况



## 放射诊断

穿透性  
感光效应



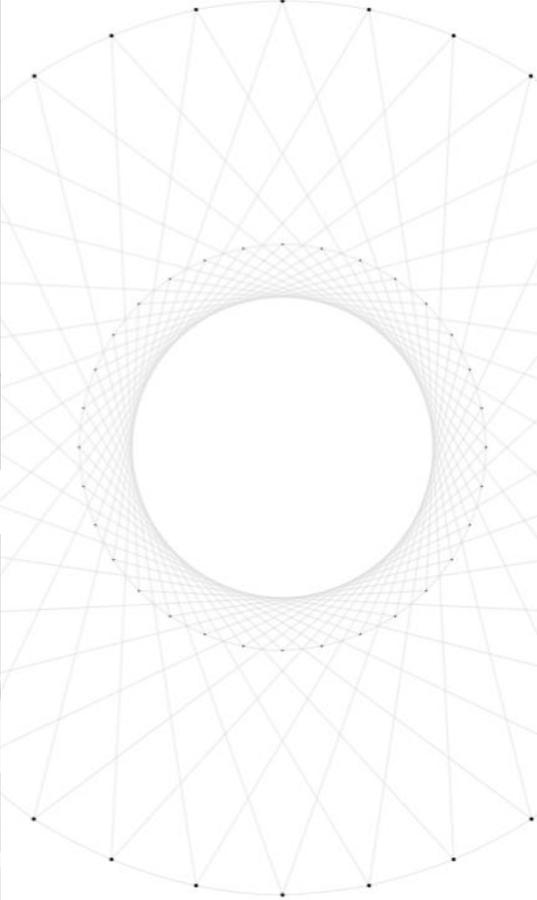
## 放射治疗

穿透性  
生物效应

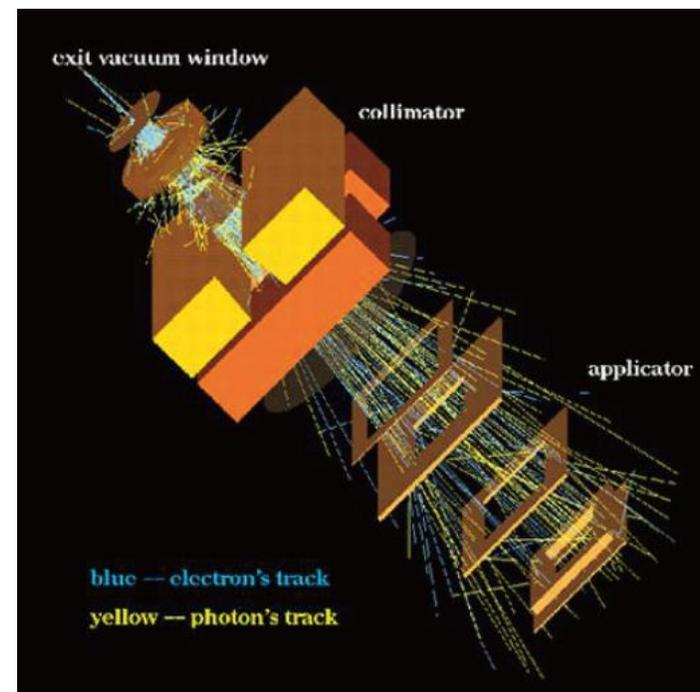
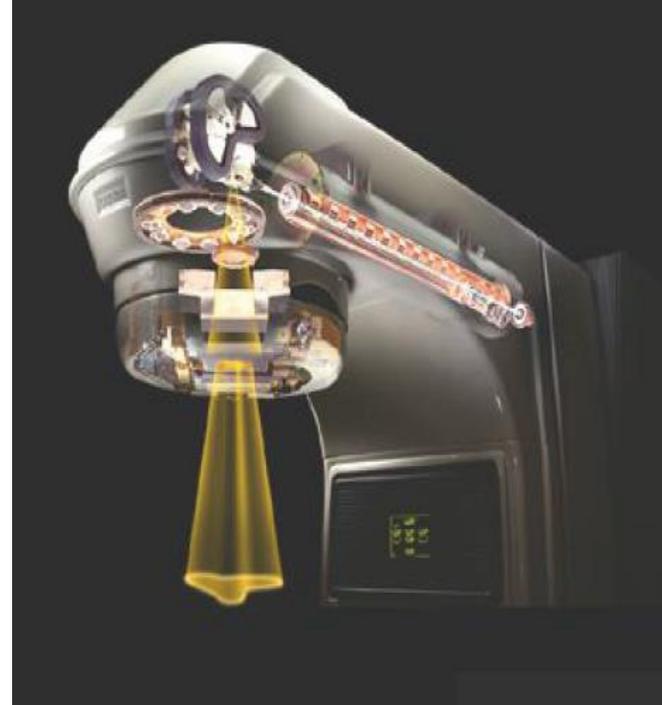


## 放射防护

穿透性  
生物效应



# 医用电子直线加速器







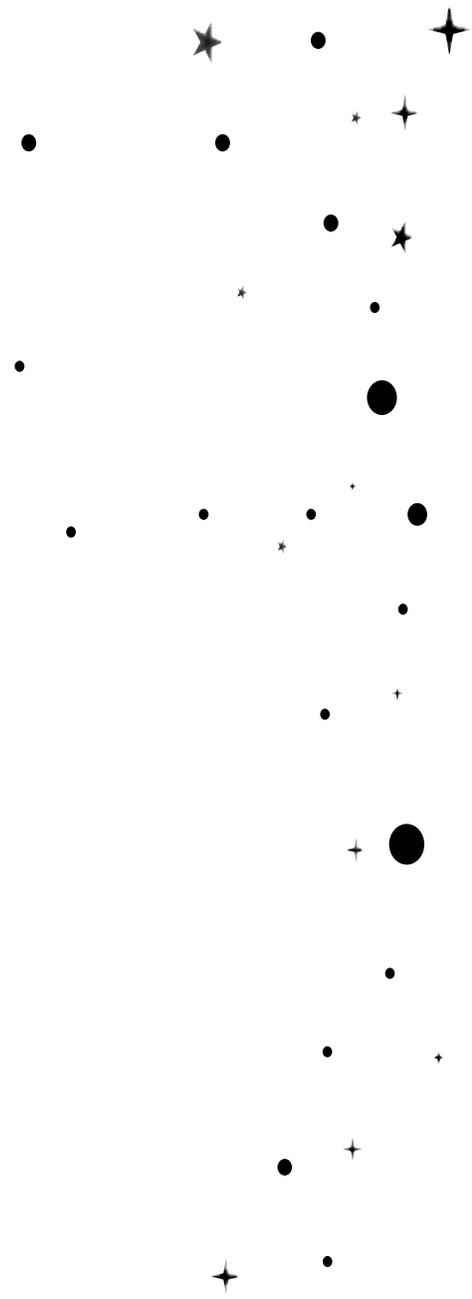
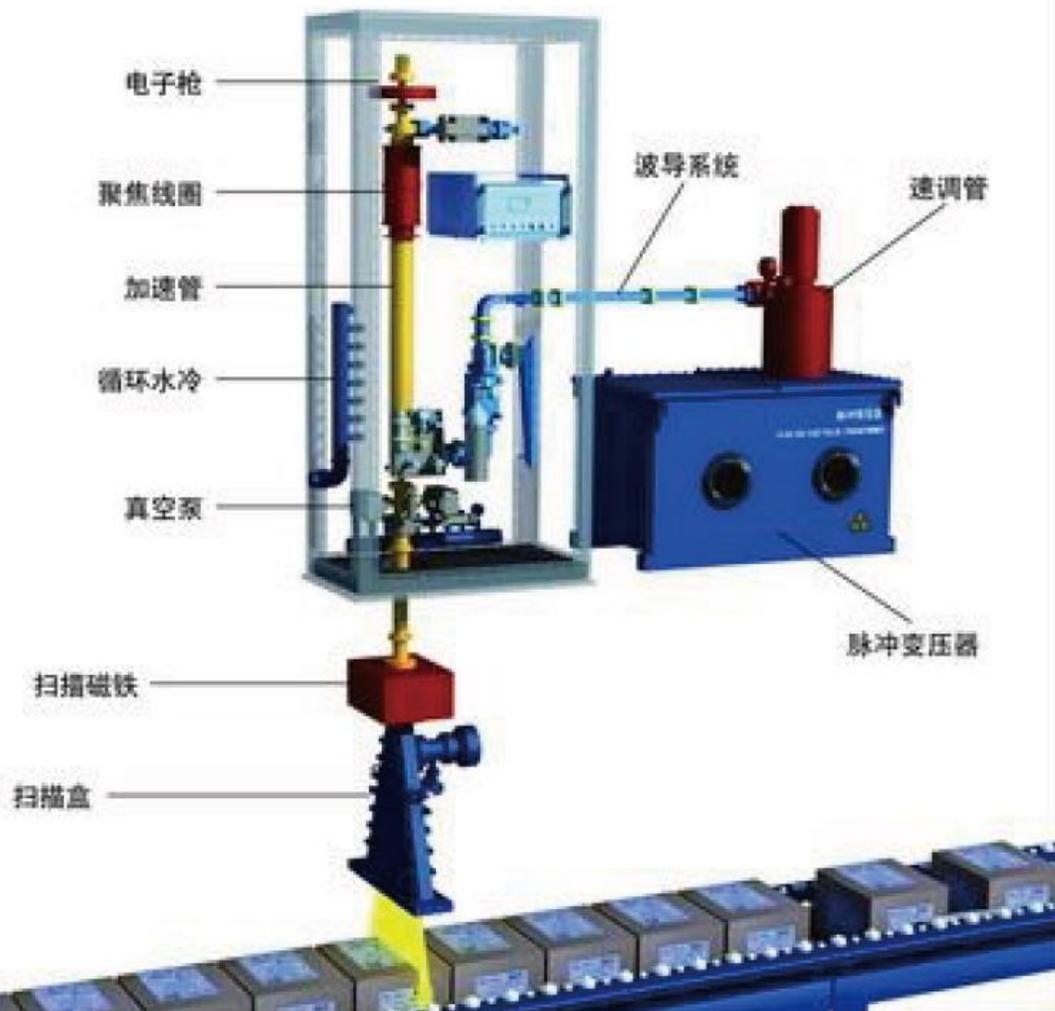
脉冲调制器



恒温循环水机组



控制台





**辐射计量**  
**PART TWO**

---

# 吸收剂量与吸收剂量率

## ◆ 吸收剂量D

——单位质量受辐射物质所吸收的平均辐射能量。

——表达式为： $D = d\bar{\epsilon}/dm$

$d\bar{\epsilon}$  电离辐射授予某一体积元中的物质的平均能量

$dm$  在这个体积元中的物质的质量

——单位是 J/Kg，专有符合Gy

——适用范围 任何类型的辐射和受辐射物质。在给出吸收剂量数值时，必须指明确辐射类型、介质种类和所在位置。

## ◆ 吸收剂量率

——单位时间内的吸收剂量

——表达式为： $D = dD/dt$

——单位是 Gy/s

**两只双胞胎雄性狗受到辐射**

**一只狗受到 $\gamma$ 射线（能量1250keV）全身照射的吸收剂量为12Gy**

**另一狗狗受到中子（能量100keV）全身照射的吸收剂量为12Gy**

**受照射后2只狗均出现呕吐和腹泻**

**出现相对晚些**

**出现早，并伴有皮肤出血点和便血**

**2只狗均诊断为急性放射病**

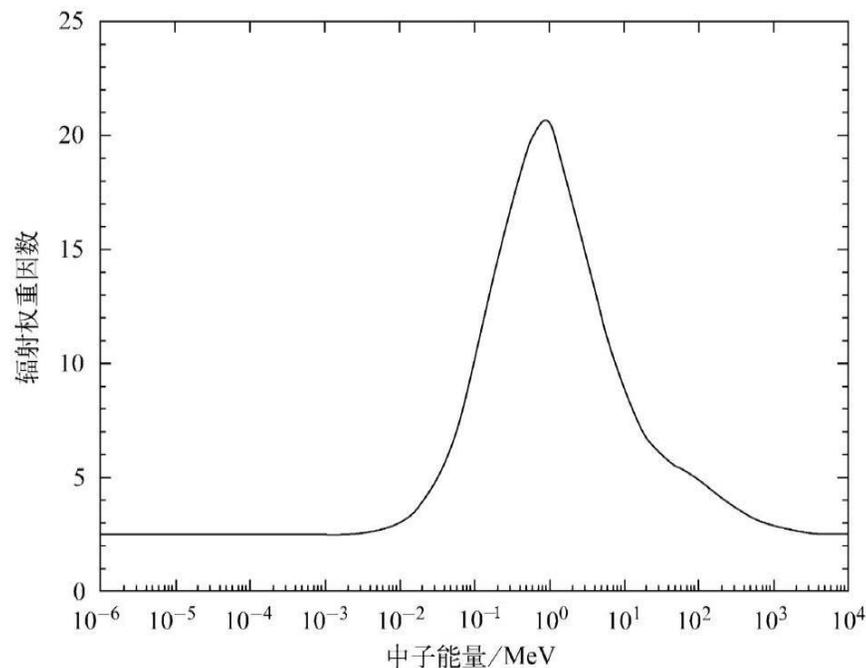
**存活**

**死亡**

# 辐射权重因子

辐射类型	1990年推荐值	2007年推荐值
光子 (x、γ射线)	1	1
电子和μ介子	1	1
质子和带电π介子	5 (没有π介子)	2
α粒子、重离子 裂变碎片	20	20
中子	依中子能量分5个 区间, 分别为5、 10、20、10、5	能量 $E_n$ 的连续函数

$$\omega_R = \begin{cases} 2.5 + 18.2e^{-[\ln(E_n)]^2/6}, & E_n < 1 \text{ MeV} \\ 5.0 + 17.0e^{-[\ln(2E_n)]^2/6}, & 1 \text{ MeV} \leq E_n \leq 50 \text{ MeV} \\ 2.5 + 3.25e^{-[\ln(0.04E_n)]^2/6}, & E_n > 50 \text{ MeV} \end{cases}$$



$$W_R = 2.5 + 18.2e^{-[\ln(E_n)]^2/6} = 2.5 + 18.2e^{-[\ln(0.1)]^2/6} = 11.6$$

# 当量剂量与剂量当量

## ◆ 当量剂量 $H_{T,R}$

——人体某一组织器官吸收剂量与辐射权重因数 ( $W_R$ ) 的乘积。

——表达式为:  $H_{T,R} = D_{T,R} * W_R$

$D_{T,R}$  组织或器官T接受来自R类辐射的平均吸收剂量

$W_R$  R类辐射的辐射权重因数

——单位是 J/Kg, 专有符合Sv

## ◆ 剂量当量 $H_{r,R}$

——人体某一组织器官中某点处的吸收剂量与辐射品质因数 (  $Q$  ) 的乘积。

——表达式为:  $H_{r,R} = D * Q * N$

D 该点处的吸收剂量; Q 辐射的品质因数 (Q值与 $W_R$  相同)

N 其他修正因数

——单位是 J/Kg, 专有符合Sv

在一次意外放射源丢失事故中，有甲、乙两人均受到了 $\gamma$ 射线照射，经估算：

甲仅骨骼表面受到了照射

乙则有两个部位分别受到了照射

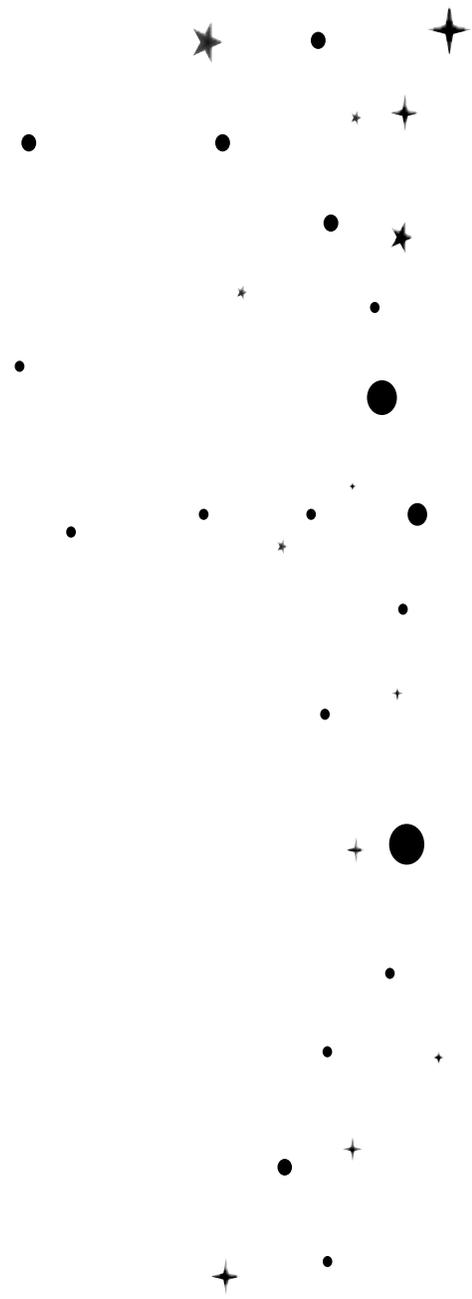
0.3 Sv的当量剂量照射

骨骼表面0.2 Sv，肝0.1 Sv的当量剂量照射

?

0.3 Sv

$0.2\text{ Sv} + 0.1\text{ Sv} = 0.3\text{ Sv}$



# 辐射敏感性的差异

## 个体

- 年龄：胎儿 > 新生儿 > 婴幼儿和老年 > 少年 > 青壮年
- 性别：雄性 > 育龄雌性
- 生理状况、健康状况等

## 组织器官

- 最敏感：骨髓、性腺、胃肠道上皮、淋巴组织
- 中度敏感：感觉器官、血管、上皮组织、唾液腺、肝肾肺
- 低度敏感：中枢神经系统、内分泌腺、心脏
- 不敏感：肌肉、骨、软骨组织、结缔组织

## 细胞

- 高度敏感细胞：淋巴细胞、造血细胞、生殖细胞、小肠隐窝上皮细胞等
- 中度敏感细胞：内皮细胞、皮肤上皮细胞、肝肾肺的上皮细胞等
- 低度敏感细胞：神经细胞、心肌细胞等
- 不敏感细胞：成纤维细胞、脂肪细胞等

# 组织权重因子

组织或器官	1990年推荐值	2007年推荐值
红骨髓、结肠、肺、喂	0.12	0.12
<b>乳腺</b>	<b>0.05</b>	<b>0.12</b>
其余组织	0.05 (只规定10个组织进行计算)	0.12 (分男女各取13个组织)
<b>性腺</b>	<b>0.20</b>	<b>0.08</b>
膀胱、食道、肝、甲状腺	0.05	0.04
骨表面、脑、唾液腺、皮肤	0.01	0.01

肾上腺、胸外区、胆囊、心脏、肾、淋巴结、肌肉、口腔黏膜、  
胰腺、**前列腺 (男)**、小肠、脾、胸腺、**子宫和宫颈 (女)**

# 有效剂量

## ◆ 有效剂量

——体内所有组织器官加权后的当量剂量。

——表达式为：
$$E = \sum_T w_T \cdot H_T = \sum_T w_T \cdot \left( \sum_R w_R \cdot D_{T,R} \right)$$

$H_{T,R}$  组织或器官T受到R类辐射的当量剂量

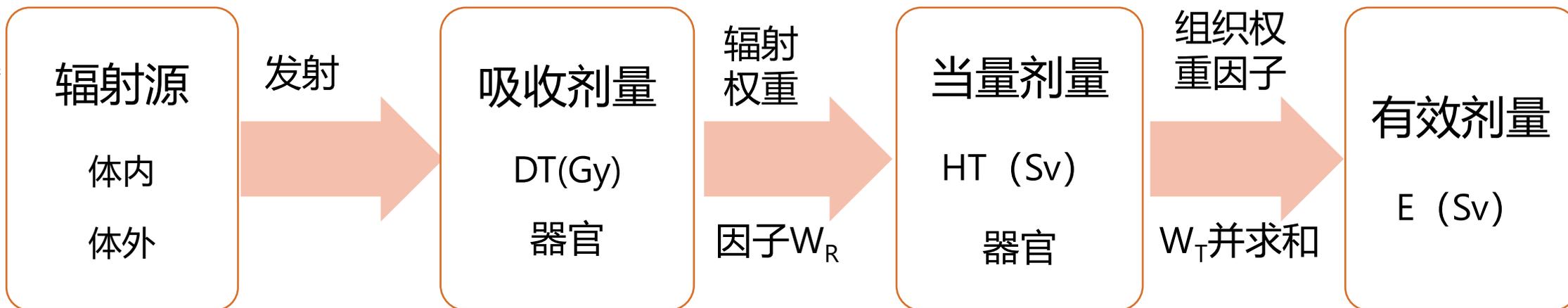
$w_T$  组织或器官T的组织权重因子

——单位是 J/Kg，专有符合Sv

## ◆ 淘汰的剂量单位

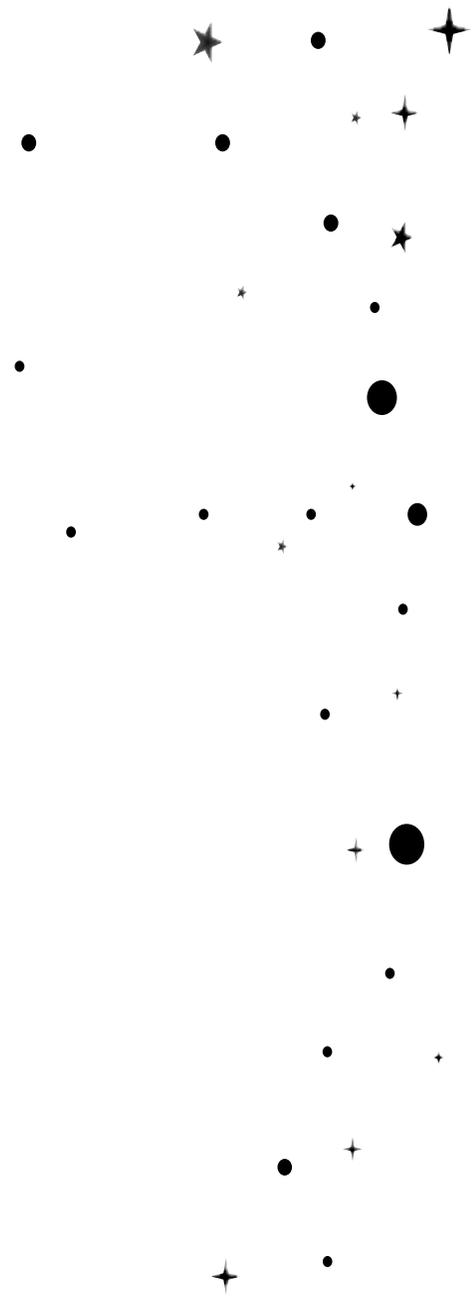
——吸收剂量：拉得 (rad) 1rad=1cGy

——有效剂量：蕾姆 (rem) 1rem=1cSv



## 常用辐射量间的关系

# 放射性度量



## ◆ 放射性活度A

——表示放射性核素每秒钟发生衰变的原子个数。单位贝可 (Bq) , 1 Bq=1次衰变/秒。

——放射性活度A不属于剂量学量, 与Gy、Sv之间没有必然联系, 不可混淆。

——在使用放射性核素的工作中, 由于衰变的原因, 常要依据衰变规律公式进行活度校正。 $A_t = A_0 e^{-0.693t/T_{1/2}}$   
 $A_t$  为现在的核素放射性活度,  $A_0$  为原来的 (初始的) 放射性活度,  $T_{1/2}$  是该核素的物理半衰期,  $t$  为衰变间隔的时间。

# 任何物质



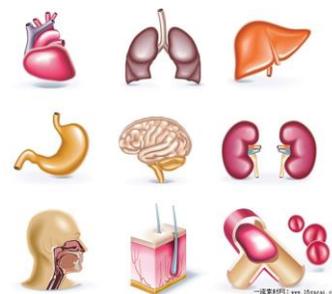
**吸收剂量 (D)**  
1戈瑞=1焦耳/千克  
1Gy=1J/Kg

# 有机体



**当量剂量 (H)**  
1希沃特=1焦耳/千克  
1Sv=1J/Kg

# 器官组织



**有效剂量 (E)**  
1希沃特=1焦耳/千克  
1Sv=1J/Kg

**放射源 活度 (A)**  
1贝可 (Bq) =1次核衰变/秒



# 辐射监测实用量



用于个人监测的实用量



用于环境监测的实用量

# 用于个人监测的实用量

## ◆ 个人剂量当量 $H_p(d)$

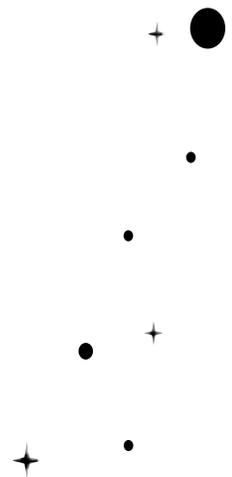
——指人体某一指定点下面适当深度 $d$ 处软组织的剂量当量，单位 $J/Kg$ ，专用名称 $Sv$ 。

——对弱贯穿辐射（能量 $< 15keV$ ），以 $0.07mm$ 、 $3mm$ 对应皮肤和眼晶体的深度，记作 $H_p(0.07)$ 和 $H_p(3)$ 。

——对强贯穿辐射（能量 $> 15keV$ ），以 $10mm$ 对应的深度，记作 $H_p(10)$ 。

—— $H_p(d)$ 可以通过佩戴在身体表面由不同厚度组织等效材料覆盖的探测器进行测量

# 热释光个人剂量计



# 用于环境监测的实用量

## ◆ 周围剂量当量 $H^*(d)$

——ICRU球内部逆向齐向场半径的某一深度 $d$ 处的剂量当量，单位J/Kg，专用名称Sv。

——主要用于强贯穿辐射的监测，记作 $H^*(10)$ 合理近似有效剂量E。

## ◆ 定向剂量当量 $H'(d, \Omega)$

——ICRU球内部指定方向 $\Omega$ 的半径的某一深度 $d$ 处的剂量当量，单位J/Kg，专用名称Sv。

——主要用于弱贯穿辐射的监测，以 $H^*(0.07, \Omega)$ 合理近似皮肤当量剂量，以 $H^*(3, \Omega)$ 合理近似眼晶体当量剂量。





# 生物效应

## PART THREE

---

# 电离辐射的生物学效应

**概念：**电离辐射作用机体后，其能量传递于机体的分子、细胞、组织或器官所造成的形态结构和功能的变化。

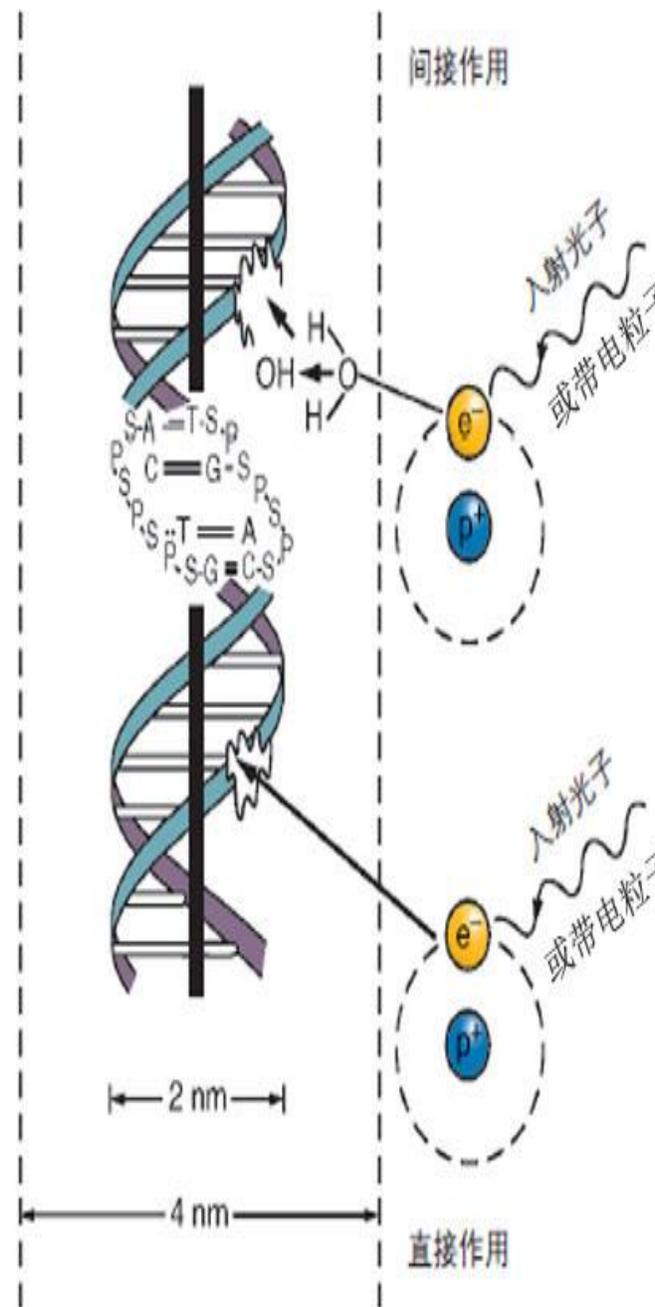
**机制：**电离辐射使生物活性分子电离和激发。

**方式：**直接作用

电离辐射直接作用于核酸、蛋白质、脂质等生物大分子产生结构损伤。

间接作用

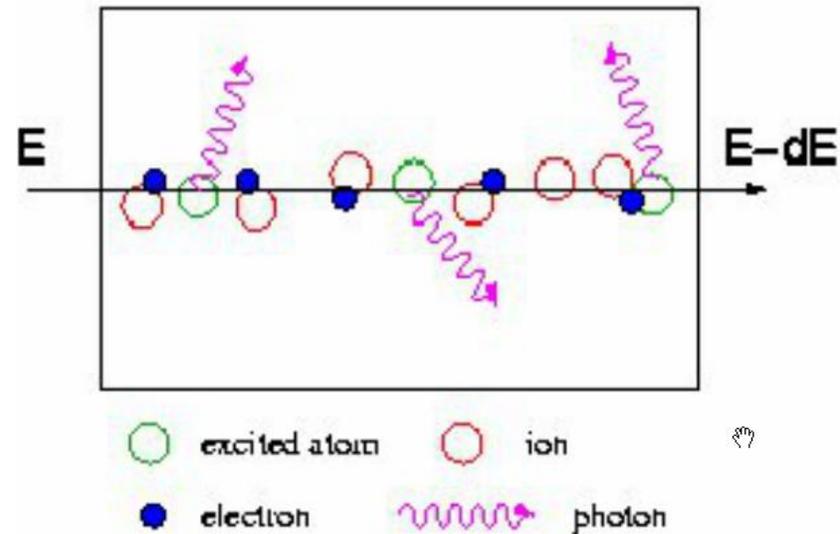
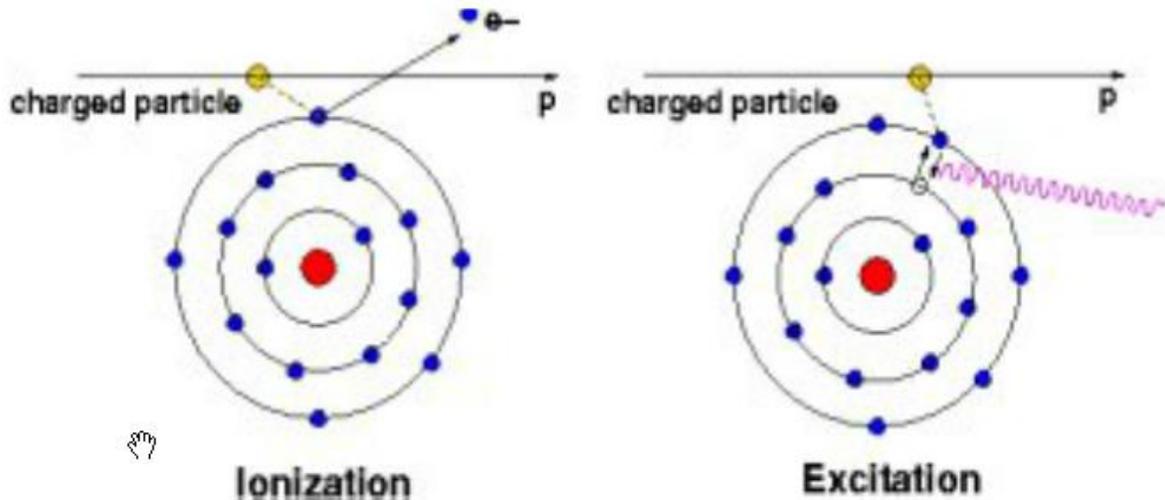
电离辐射通过与水分子作用，产生自由基等间接物质使生物大分子受到损害。



# 带电粒子与物质的相互作用

$\alpha$ 、 $\beta$ 粒子+靶原子  $\xrightarrow{\text{静电作用}}$  正离子+电子+ $\alpha$ 、 $\beta$ 粒子

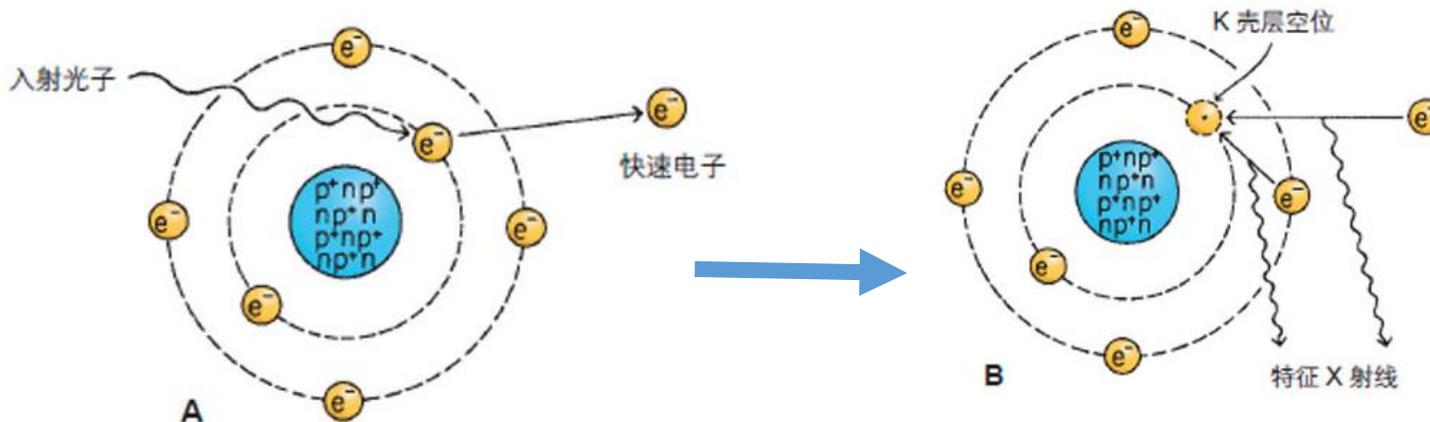
如:  ${}^4\text{He} + \text{Ar} \longrightarrow \text{Ar}^+ + \text{e}^- + {}^4\text{He}$



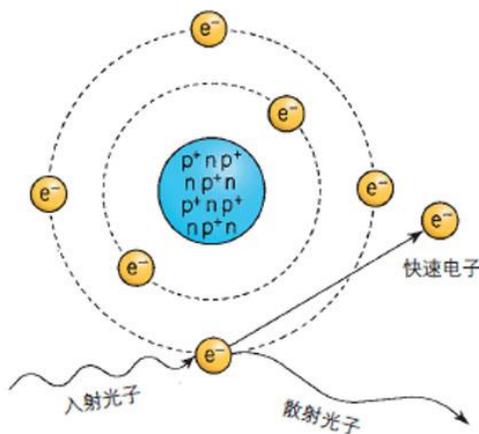
电离辐射与物质的相互作用

# X、 $\gamma$ 射线与物质的相互作用

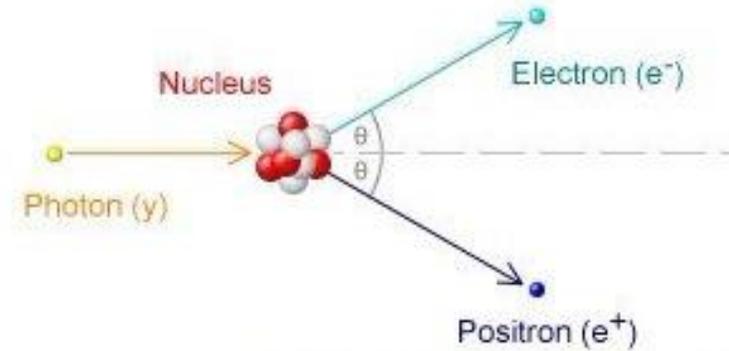
电离辐射与物质的相互作用



光电效应



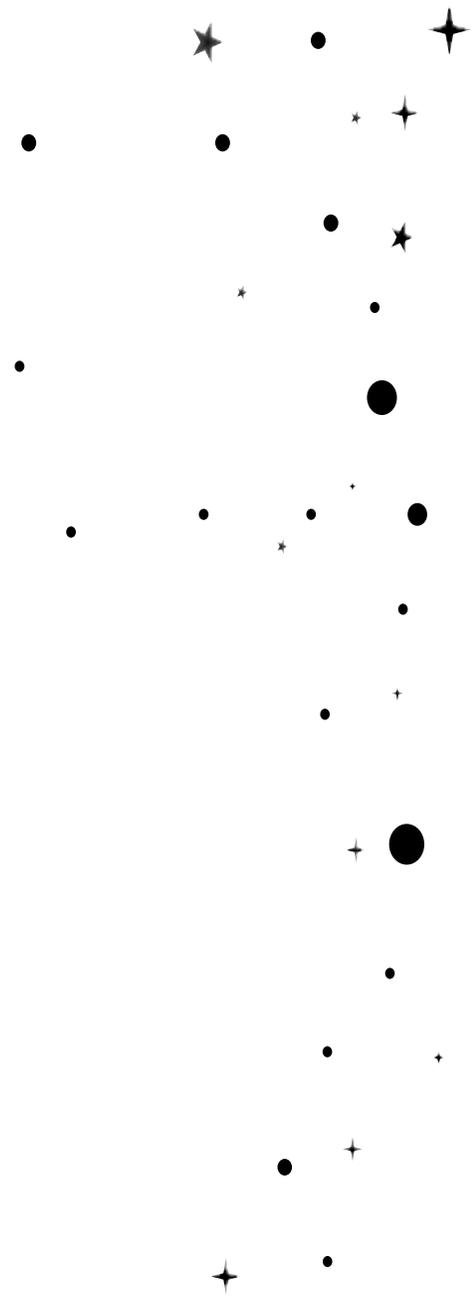
康普顿效应

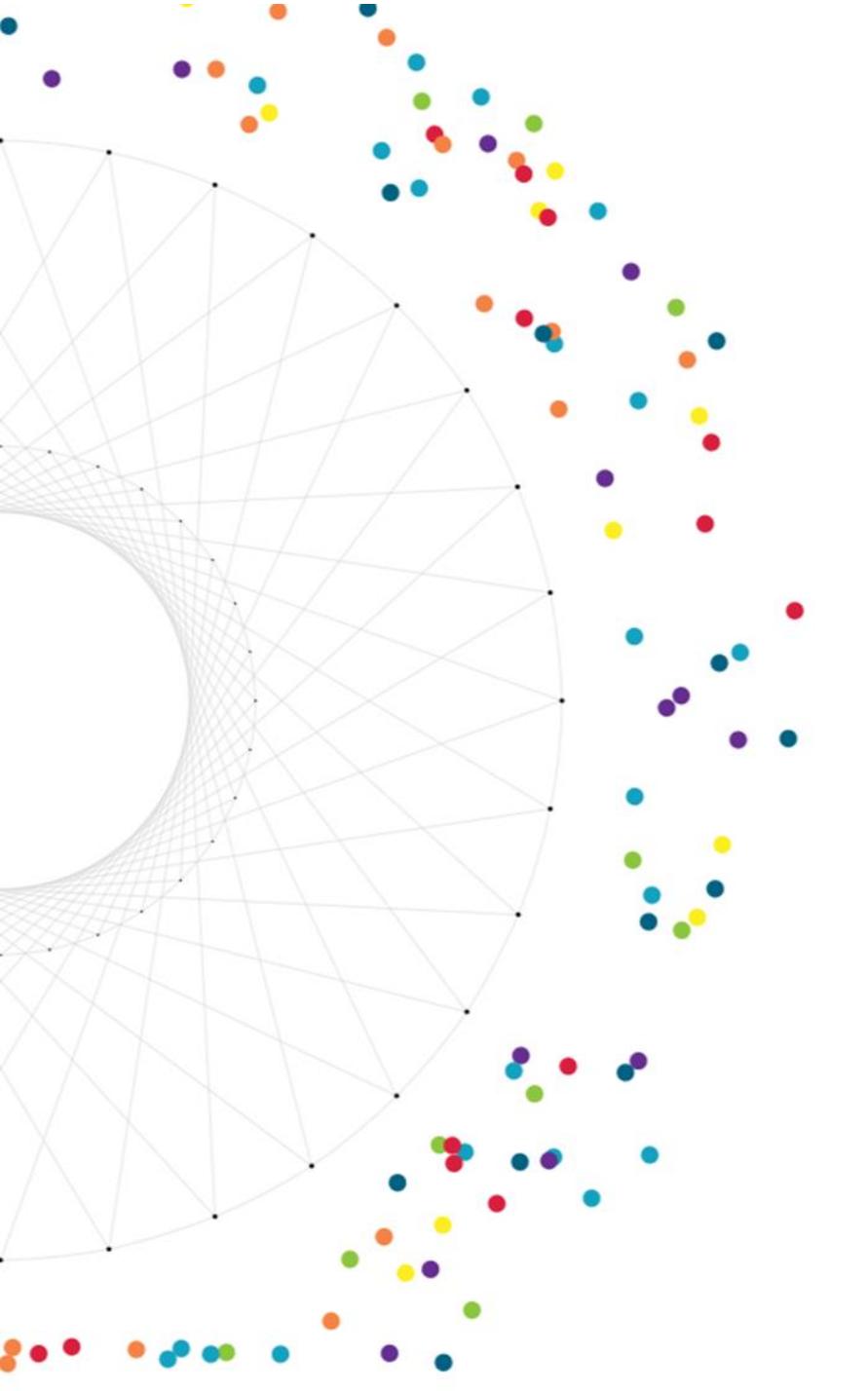


电子对生成

# 效应发生的物理阶段

- ◆  $\leq 10^{-14}$ 秒：电离辐射作用于细胞中的生物大分子和水，辐射能量的沉积引起水分子、无机和有机组分形成激发态和超级态，或发生电离  
一个 $10\mu\text{m}$ 直径的细胞，每吸收 $1\text{Gy}$ 的照射剂量将发生超过 $10^5$ 次电离。量子能量超过 $12\text{eV}$ ，就会发生电离。
- ◆  $10^{-14} \sim 10^{-12}$ 秒：发生能量的迁移和转移，电离辐射产生的活泼基团与正常代谢产物的自由基和酶发生反应，产生异常产物。





## 效应发生的化学阶段

- ▶  $10^{-12} \sim 10^{-3}$ 秒：核酸的损伤开始，酶的激活或灭活，细胞内巯基含量开始下降，脂质过氧化开始，因辐射损伤而产生的稳定和亚稳定的异常产物的毒性开始出现。

## DNA分子碱基的破坏或脱落

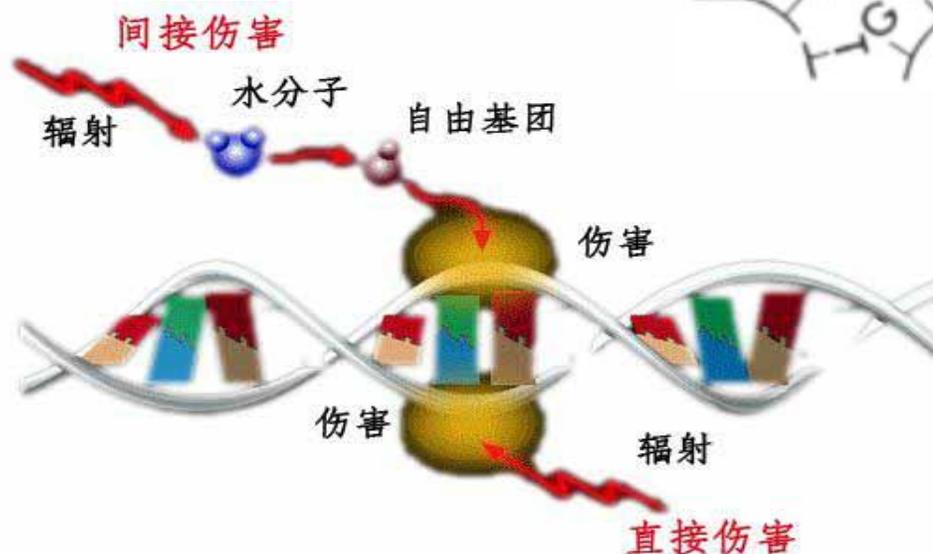
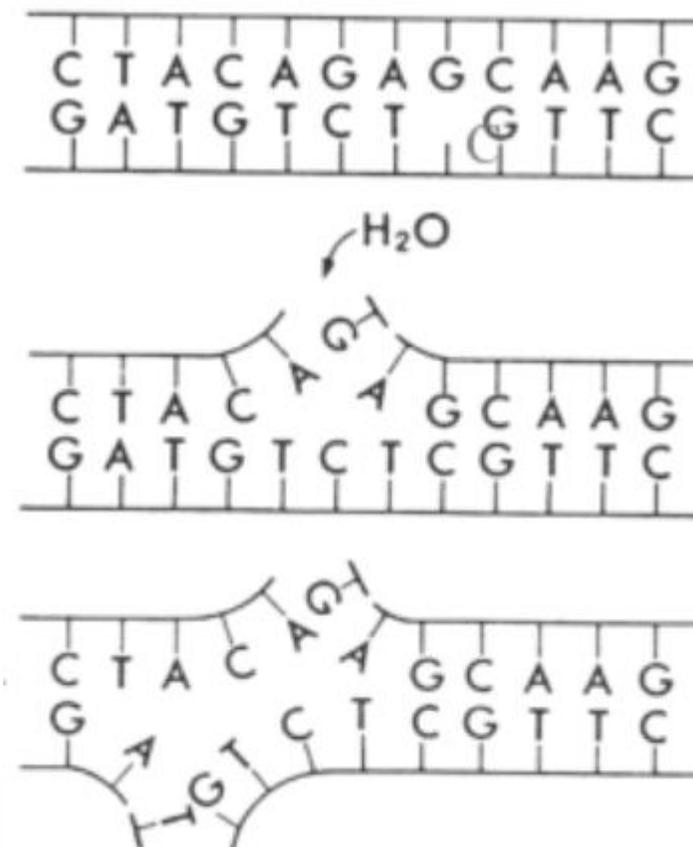
DNA链断裂：是辐射损伤的主要形式

单链断裂：可以实现无差错修复

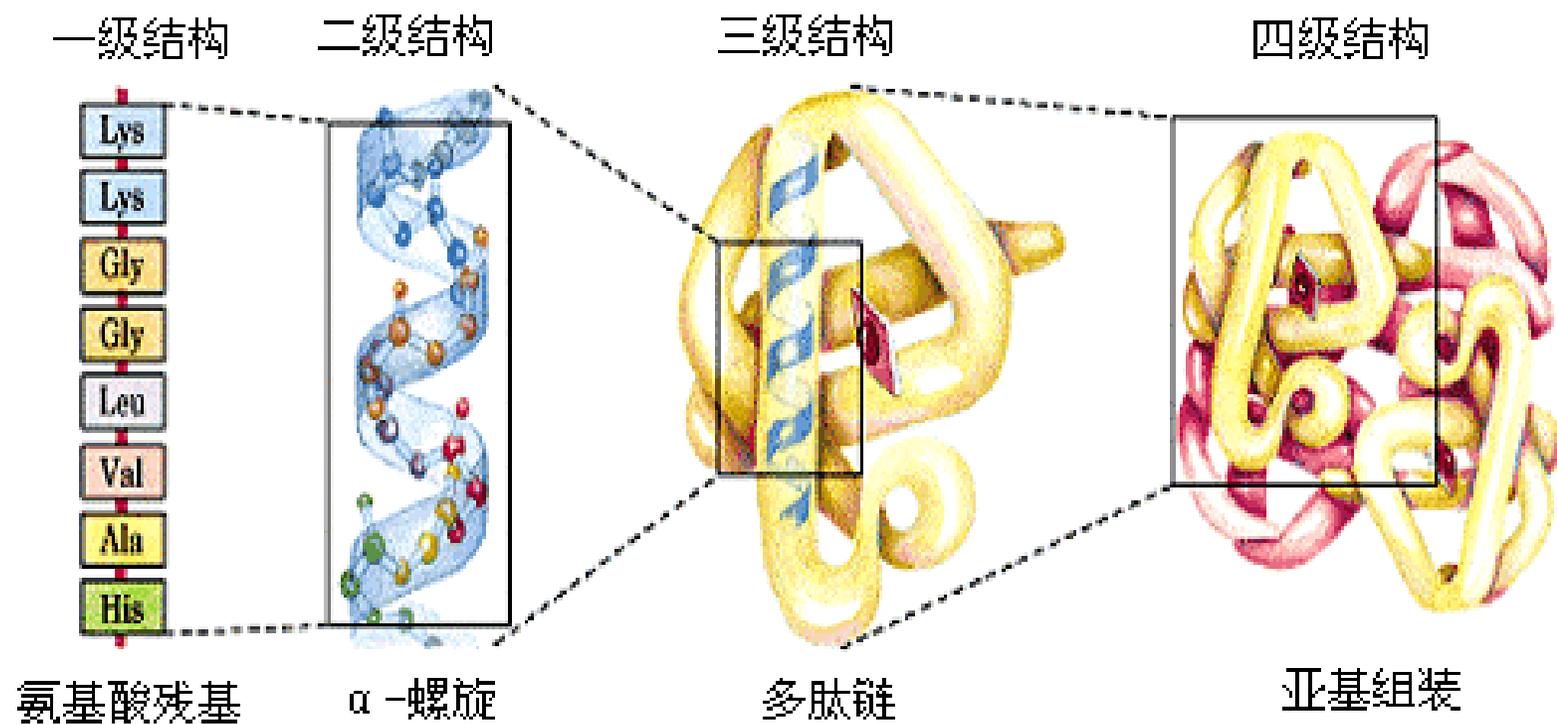
双链断裂：难以修复

磷酸基损伤

DNA交联

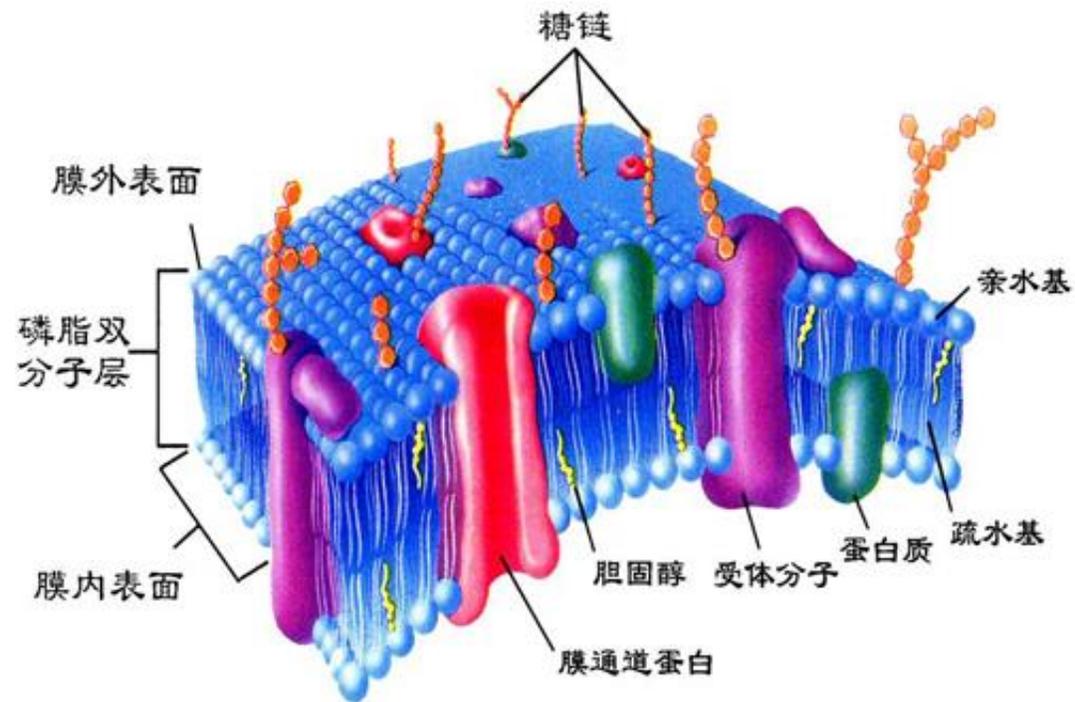


蛋白质侧链改变，氢键和二硫键断裂，导致空间结构改变。

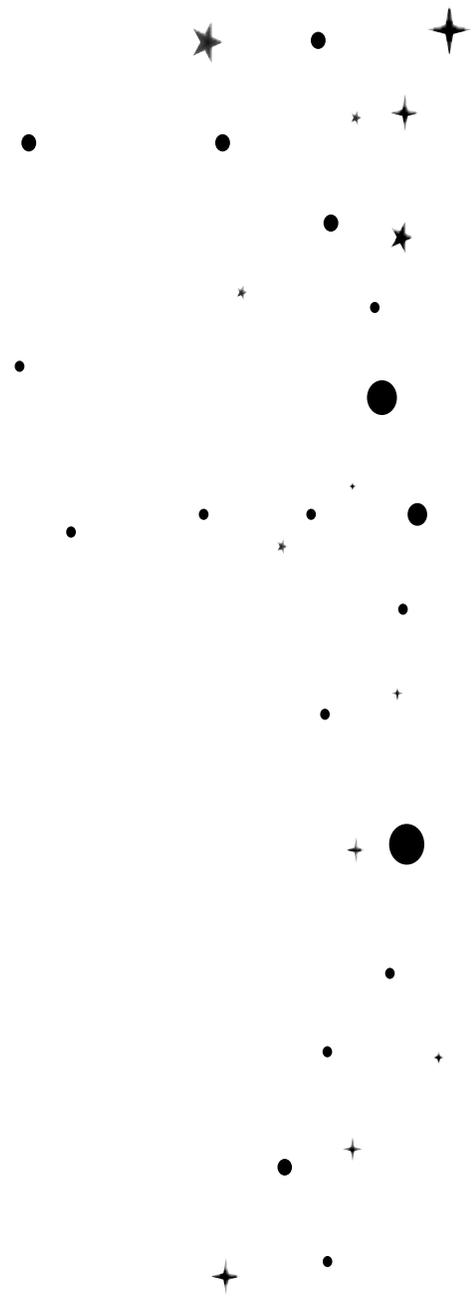


**直接：脂肪、磷脂和类固醇分子化学键断裂等。**

**间接：细胞膜脂质过氧化，细胞蛋白质氧化、结构变化  
糖分子链断裂和失活等。**



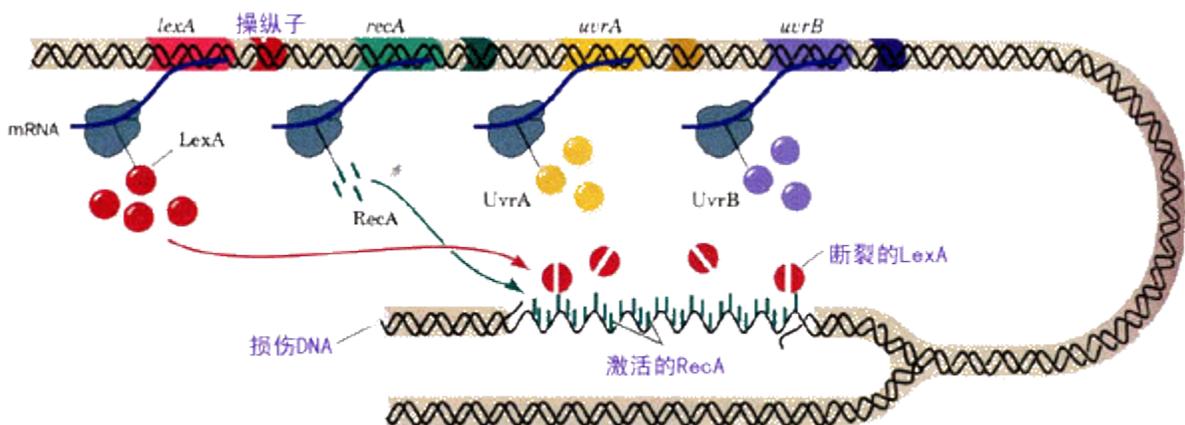
细胞膜的液体镶嵌模型



# 效应发生的生物化学阶段

◆  $10^{-3} \sim 10^1$ 秒：许多正常生化反应开始受到干扰。

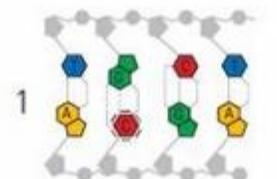
DNA开始修复，如果错误修复事件发生在DNA的重要部位，则可能对细胞产生长期影响，并能导致细胞增殖死亡或者在存活细胞中引起稳定的遗传变化或最终导致恶性肿瘤的转化。



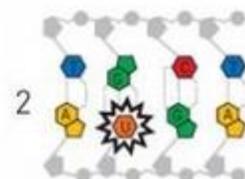
损伤的DNA与RecA结合，激活LexA的自身断裂，SOS修复类得以合成

## Base excision repair

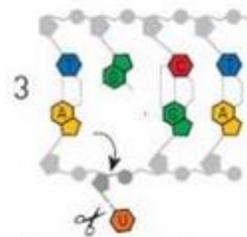
Base excision repairs DNA when a base of a nucleotide is damaged, for example cytosine.



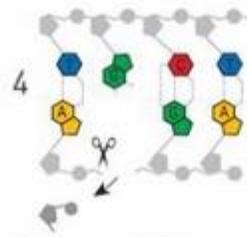
Cytosine can easily lose an amino group, forming a base called uracil.



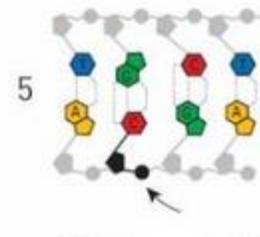
Uracil cannot form a base pair with guanine.



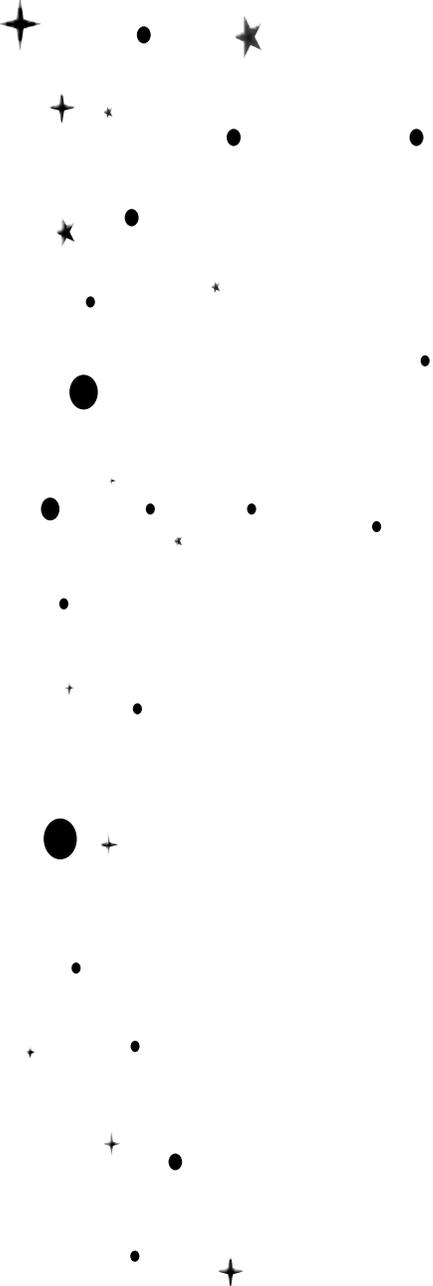
An enzyme, glycosylase, discovers the defect and excises the base of uracil.



Another couple of enzymes remove the rest of the nucleotide from the DNA strand.



DNA polymerase fills in the gap and the DNA strand is sealed by DNA ligase.



## 早期生物学效应阶段

### ◆数小时至数天：

重要生物大分子的损伤，能量供应发生紊乱；

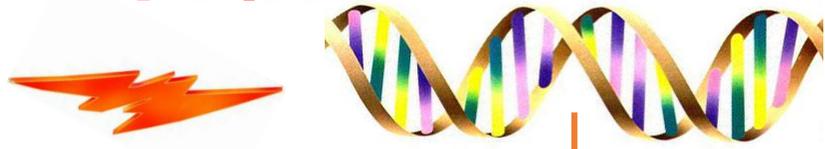
生物合成前体供应不足，许多重要生化反应受到干扰；

细胞质膜和核膜被破坏；

细胞的辐射生物效应开始出现。

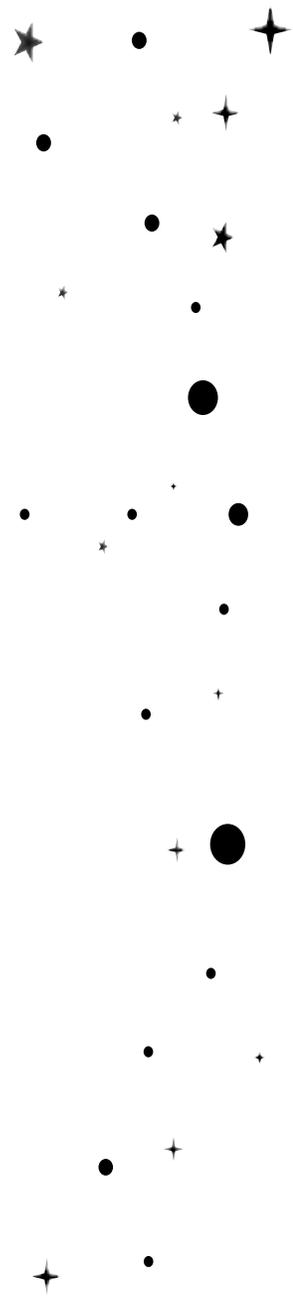
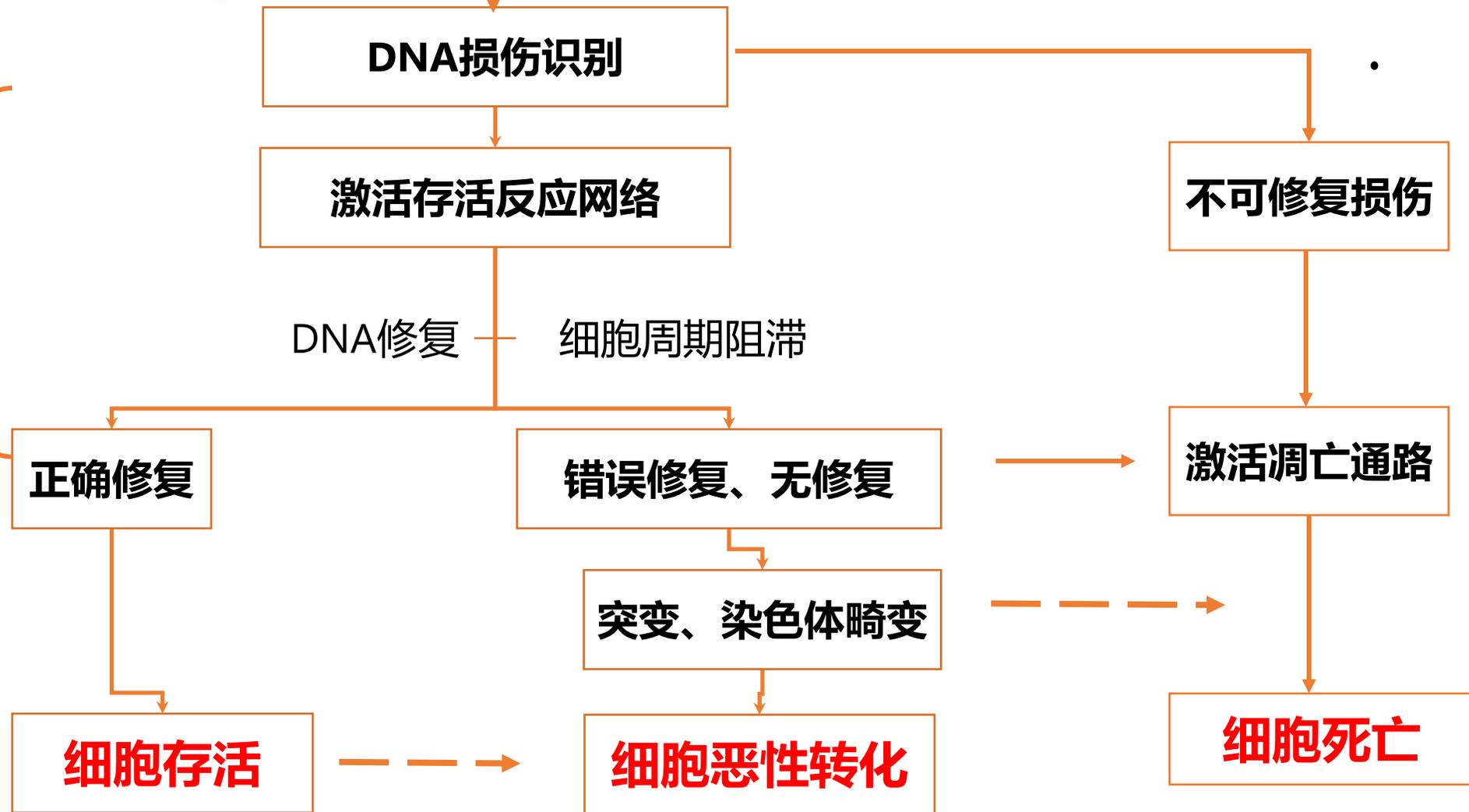
# 电离辐射DNA损伤的细胞反应

电离辐射



细胞反应

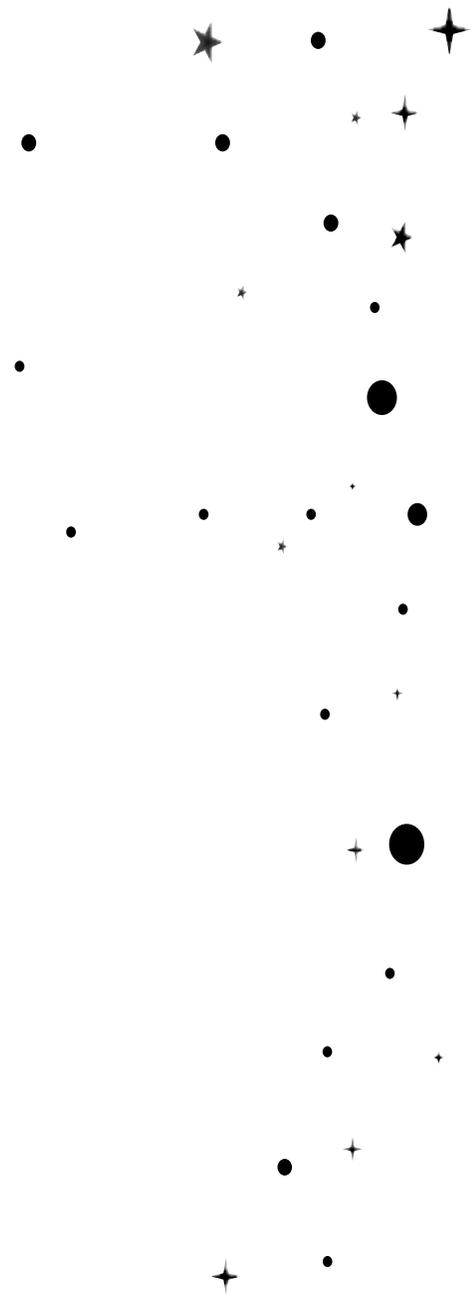
细胞结果



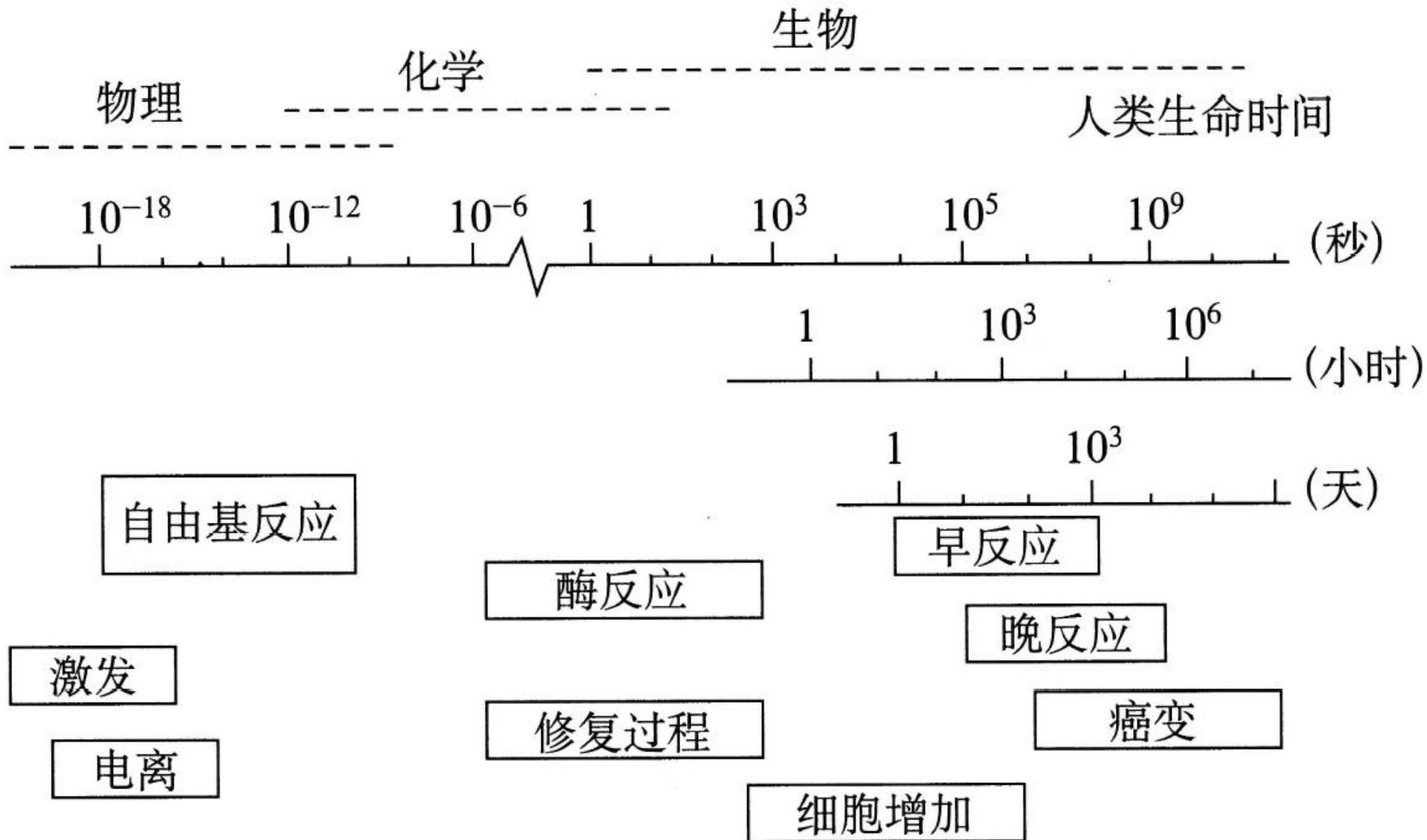
## 远期生物学效应阶段

### ◆数月至数十年：

生物大分子损伤的异常修复或不修复，物质代谢紊乱进一步发展，生理功能障碍导致组织或器官的一系列病理变化，甚至死亡。



# 电离辐射效应的时标尺



# 电离辐射的损伤效应

分子水平

细胞水平

临床表现

DNA损伤

细胞死亡

体细胞

功能障碍

生殖细胞

不孕

细胞变异

体细胞

肿瘤

生殖细胞

遗传效应

确定性效应  
多细胞死亡导致

随机性效应  
单一细胞变异导致

# 电离辐射的生物效应类型

## 按效应的严重程度

- 变化
- 损伤
- 损害
- 危害

## 按效应出现的时间

- 近期效应
- 远期效应

## 按效应发生的个体

- 躯体效应
- 遗传效应

## 按剂量-效应关系

- 确定性效应
- 随机性效应

## 变化:

——辐射照射引起的轻微改变，可能有害，可能无害。

## 损伤:

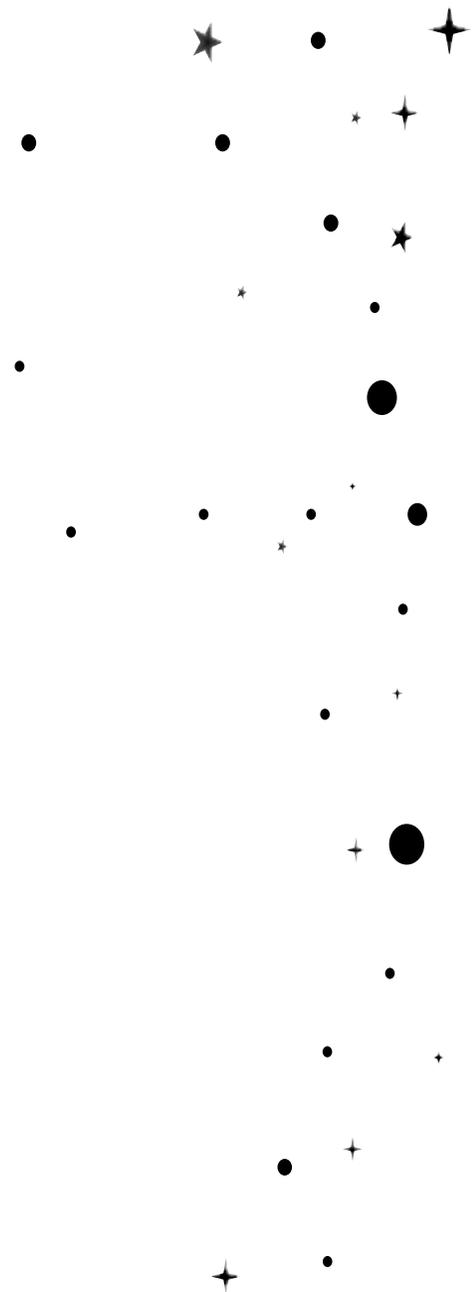
——辐射照射引起的某种程度的有害变化，人感受不到。

## 损害:

——辐射照射引起的临床上可观察到的有害效应。

## 危害:

——辐射照射不仅有害于个人，而且有害于群体及后代。



## 近期效应：

- 指受辐射数小时至几周内出现的效应。可分为急性效应和慢性效应。
- 主要发生于核事故或核武器袭击的受害者，或较长时间内受到超过剂量限值的辐射引起的全身慢性损伤。
- 例如，急性放射病、急性皮肤放射损伤、慢性放射病和慢性皮肤放射损伤等。

## 远期效应：

- 指受辐射后数月至数年乃至数十年后才发生的效应。
- 包括躯体晚期效应和遗传效应
- 例如，辐射致癌、辐射致白内障、辐射性遗传效应等。

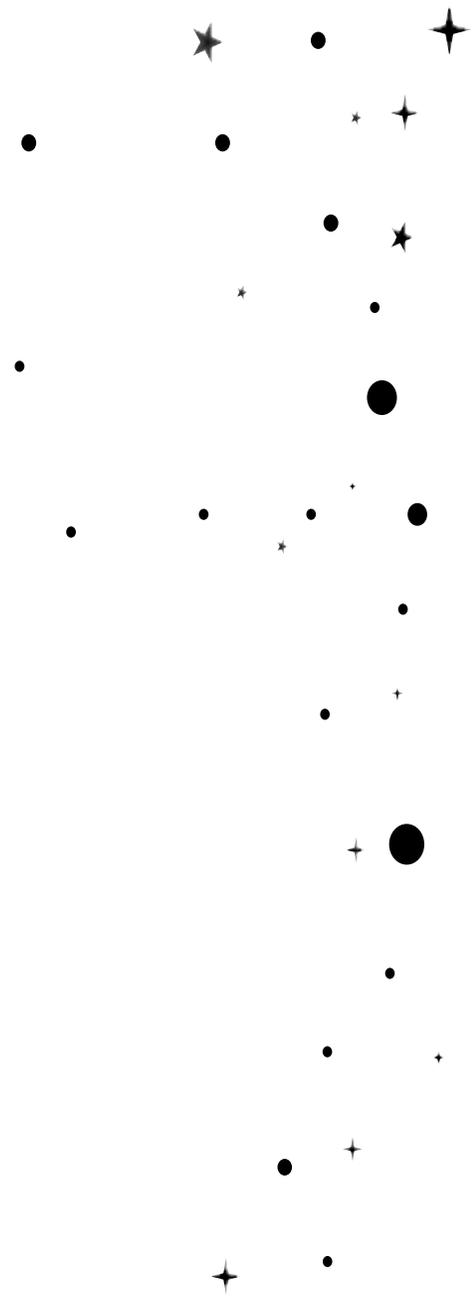


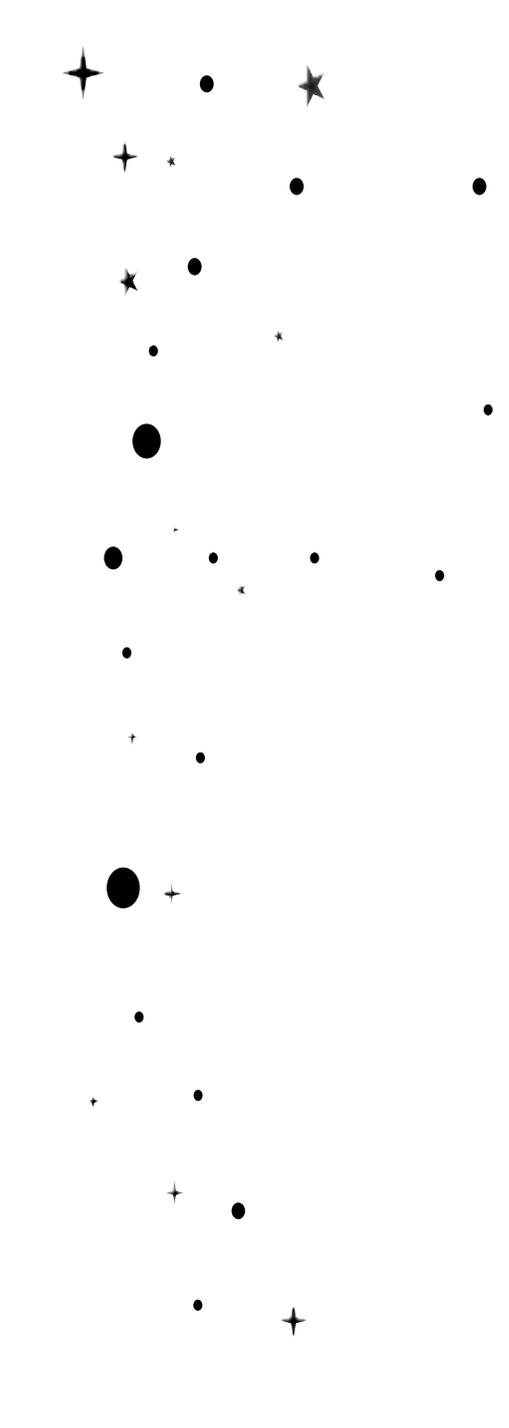
## 躯体效应:

- 指出现在受辐射者本身的效应。可分为全身效应和局部效应。
- 主要发生体细胞损伤所致。

## 遗传效应:

- 指出现在受辐射者后代的有害效应。
- 主要发生生殖细胞损伤所致。生殖细胞非致死辐射损伤遗传至下一代，致子代变异及畸形。





## 确定性效应：

- 指辐射引发的某种健康效应存在剂量阈值，效应的严重程度与剂量有关。
- 发生的基础是细胞死亡所致。指除了癌症、遗传和突变以外的所有躯体效应和不孕症等。
- 例如，皮肤红斑、辐射后白细胞减少、白内障等。

## 随机性效应：

- 指辐射引发效应不存在剂量阈值，发生几率与剂量成正比，严重程度与剂量无关。
- 发生的基础是单一细胞损伤，修复变异所致。
- 例如，辐射致癌、辐射性遗传效应等。

## 成人睾丸、卵巢、眼晶体和骨髓的确定性效应阈剂量的估计值 (ICRP, 1990)

器官/组织	确定性效应	在单次短时间受到的总剂量 Sv	在多次或迁延照射的总剂量 Sv	多年中每次或多次获迁延的年剂量 Sv
睾丸	暂时不育	0.15	NA	0.4
	永久不育	3.5~6.0	NA	2.0
卵巢	不育	2.6~6.0	6.0	> 0.2
晶体	可检出浑浊	0.5~2.0	5	> 0.1
	白内障	5.0	> 8	> 0.15
骨髓	造血功能低下	0.5	NA	> 0.4

NA (Not Applicable) 不适用。因为该阈剂量取决于剂量率，而不取决于总剂量。

## 器官或组织避免确定性效应的阈剂量

器官和组织	确定性效应	阈剂量, Gy
全身	呕吐	0.5
骨髓	死亡	1.0
皮肤	一时性红斑和暂时性脱毛	3.0
肺脏	肺炎	5
肺脏	死亡	10
甲状腺	功能紊乱, 粘液性水肿和破坏	10

# 人类受低LET全身均匀急性照射诱发 综合征和死亡的剂量范围 (ICRP-60, 1991a)

全身吸收剂量 Gy	造成死亡的主要效应	辐射照后时间 d
3~5	骨髓损伤	30~60
5~15	胃肠道及肺损伤	10~20
> 15	神经系统损伤	1~5

# 皮肤确定性效应

## ◆ 急性效应

- 红斑→干性脱屑→湿性脱屑：基底细胞受损**
- 急性溃疡：成纤维细胞、血管内皮细胞间期死亡**
- 急性上皮坏死：大量能量 $\leq 0.2\text{MeV}$ 的 $\beta$ 粒子导致基底细胞间期死亡**

## ◆ 晚发效应

- 30~40Gy急性照射5年后发生，皮肤硬化、萎缩，血管损伤。**

# 1996年伊朗GILAN放射事故

## ◆ 时间

——1996年7月24日

## ◆ 放射源

——Ir—192, 185GBq (2Ci)

## ◆ 受照剂量

——生物剂量：全身 3~4Gy

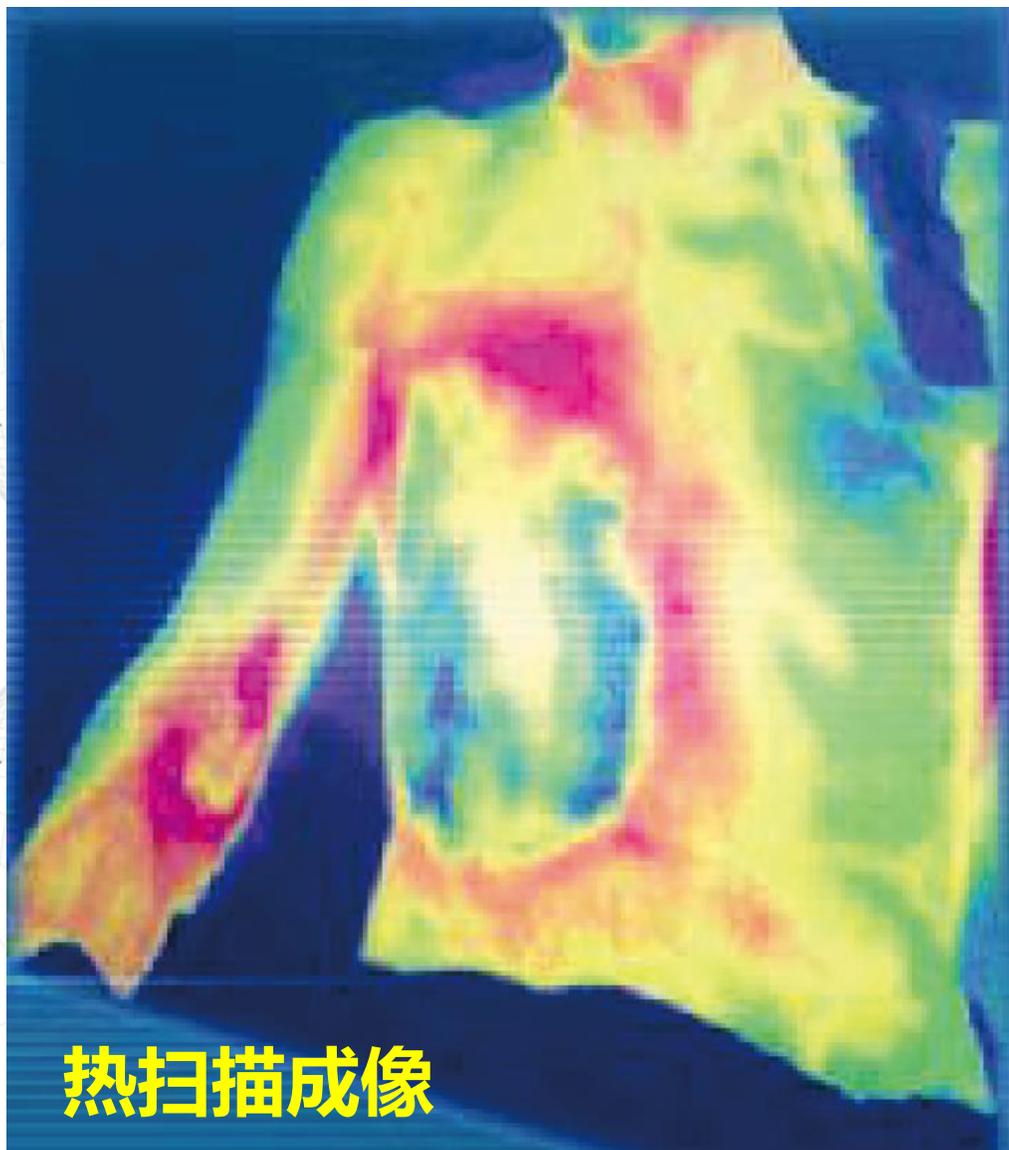
——物理剂量：全身 2Gy

局部 10~40Gy





铯-192源镶嵌在一个钢笔大小的源座中供工业射线照相用，它被放置在这名工作人员的外衣口袋中约2个小时。



注：白色为银色软膏

事故后25天



事故后35天

治疗过程



事故后85天



事故14月后



事故16月后



事故16月后  
整体情况

# 2001年丢失探伤放射源受照事故

## ◆ 时间

——2001年9月2日

## ◆ 放射源

——Ir-192

## ◆ 受照剂量

——全身  $1.0 \pm 0.5 \text{Gy}$

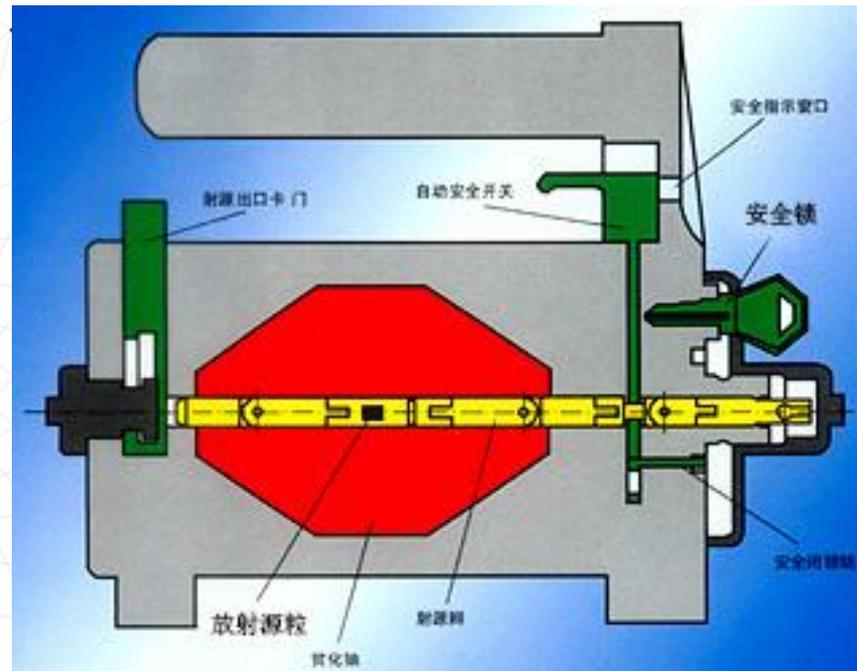
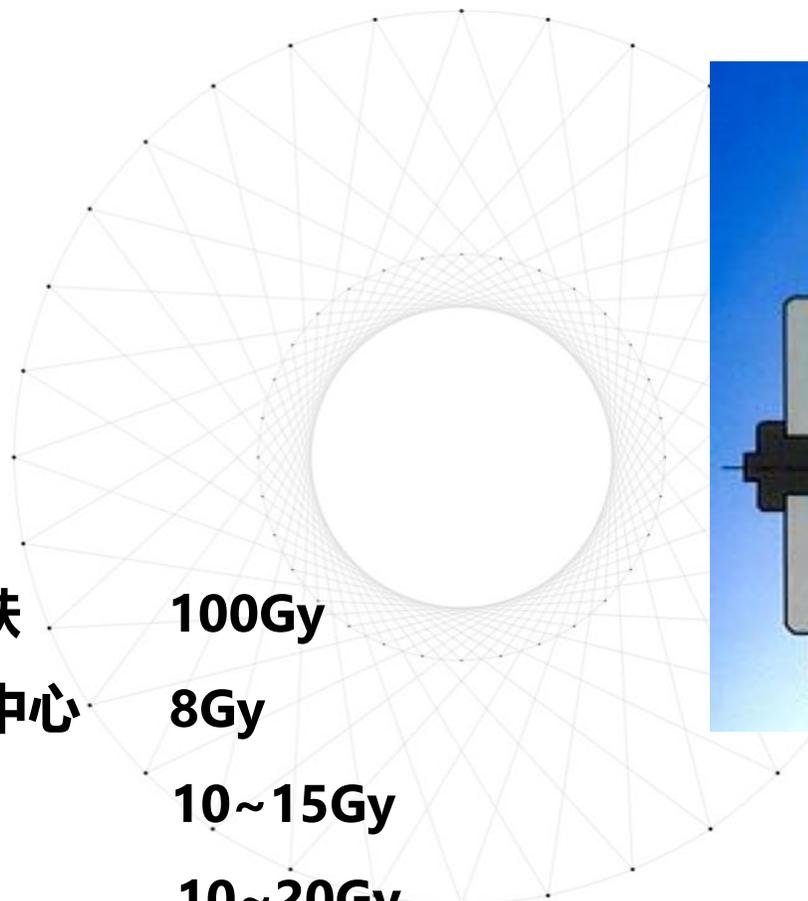
——局部 右大腿皮肤 100Gy

右大腿骨中心 8Gy

左大腿 10~15Gy

手部 10~20Gy

胸部 10~15Gy





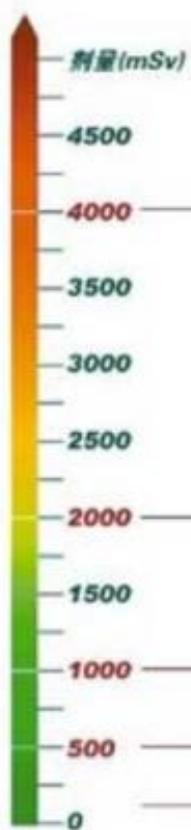






# 辐射剂量与效应

## 短时大剂量辐射的医疗反应



大于4000

死亡

2000-4000

产生几种射线疾病:骨髓和骨密度遭到破坏,红细胞和白细胞数量极度减少,有内出血、呕吐、腹泻症状

1000-2000

轻微的射线疾病,疲劳、呕吐、食欲减退、暂时性脱发、红细胞减少

100-500

没有疾病感觉,但血样中白细胞数量在减少

小于100

对人体没有危害

## 整个身体瞬间接受剂量

>50Gy 急性放射病,脑型

10.0Gy 急性放射病,胃肠型

5.5Gy LD99/60 (4.75~6.25Gy)

3.5Gy LD50/60 (3.0~4.0Gy)

2.0Gy LD3/60 (1.75~2.25Gy)

1.0Gy 25%受照人员出现症状

0.5Gy 5%受照人员出现症状

0.25Gy 亚临床剂量,“无症状性过量照射”

0.05 Sv/a

0.002Sv/a

低水平照射

天然本底辐射

急性放射病,骨髓型

◆ **遗传效应是电离辐射的随机性效应。**

◆ **胚胎或胎儿宫腔内受辐射照射**

——**胚胎死亡：怀孕最初2周最敏感，发生率高；动物实验0.1Gy即出现**

——**畸形：器官成型期（怀孕3~8周）受辐射照射， $\geq 0.1\text{Gy}$**

——**智力障碍：孕期8~15周为高峰，以0.4/Sv比例增高；  
16~25周，以0.1/Sv比例增高。**

——**癌变：主要白血病，胎儿期受辐射照射患儿童致死性  
肿瘤的危险估计 $2.8 \times 10^{-2}/\text{Sv}$ 。**

◆ 致癌效应是电离辐射的随机性效应。

◆ 放射性肿瘤病因判断(GBZ 97-2009)

● 病因概率 ( $PC$ ) :

当辐射所致危险用超额**相对**危险表示时,  $PC = ERR / (1 + ERR)$

当辐射所致危险用超额**绝对**危险表示时,  $PC = EAR / (B + EAR)$

——  $ERR$ : 辐射所致癌症超额相对危险;  $ERR = F \times T \times K$

——  $EAR$ : 辐射所致癌症超额绝对危险;  $EAR_A = EAR_E / (B_A / B_E)$

$$EAR_E = F(D) \times ERR_D$$

PC: probability of causation

ERR: exposure relative risk

EAR: exposure absolute risk

B: baseline rate

$F = F(D)$ , 照射因子,  
是吸收剂量的函数

$T = T(Y)$ , 潜伏期校正系数,  
是受照经Y年后被诊断的可能性

$K = K(A, S)$ , 是年龄A1受照、  
性别为S发生该癌症的相对危险  
增加系数。

放射科的某医生（男，30岁），从24岁开始连续从事X线工作6年，30岁时被医院诊断为急性白血病，来自职业照射患急性白血病的概率是多少？

省级具有资质的剂量检查单位提供了他外照射个人剂量档案的6年骨髓受到照射的记录分别是：7cGy、7cGy、6cGy、3cGy、3cGy、2.5cGy。

### 癌症ERR值及其相关参数

年龄 (岁)	剂量 (cGy)	F(D)	T (A1,Y)	E (A1,S)	I (A2,S)	K (E/I)	ERR (F×T×K)
24	7.0	7.422	$T(24,7)=0.0710$	$E(24,m)=1.45$	2.12	0.684	0.360
25	7.0	7.422	$T(25,6)=0.0674$	$E(25,m)=1.47$	2.12	0.693	0.295
26	6.0	6.310	$T(26,5)=0.0569$	$E(26,m)=1.50$	2.12	0.708	0.254
27	3.0	3.078	$T(27,4)=0.0380$	$E(27,m)=1.53$	2.12	0.722	0.084
28	3.0	3.078	$T(28,3)=0.0147$	$E(28,m)=1.56$	2.12	0.736	0.033
29	2.5	2.554	$T(29,2)=0.0012$	$E(29,m)=1.60$	2.12	0.755	0.002

pn5

pn9

pn12

pn12

依据《放射性肿瘤病因判断标准》（GBZ97-2009）获得照射因子（F）、潜伏期修正因子（T）和年龄、性别、受照危险增加系数（K），然后计算癌症超额相对危险（ERR），见表2。根据 $PC=ERR/(1+ERR)$ 计算职业照射患急性白血病的概率。

$$ERR(\text{合计})=1.029$$

$$PC=ERR/(1+ERR)=1.029/2.029=0.507=50.7\%$$

据此，可判断吴医生所患急性白血病是职业性放射性肿瘤。

男性，40~44岁间从事铀矿下井作业5年，50岁时被医院诊断为肺癌，来自职业照射患肺癌的概率是多少？

历年暴露量是：8.5WLM、7.0WLM、7.2WLM、4.0WLM、4.0WLM。井下 $\gamma$ 外照射年吸收剂量0.8cGy。

### 癌症ERR值及其相关参数

年龄(岁)	WLM	FcGy/6	合计 (F)	诊断时间 (年)	T(Y)	K	ERR (F×T×K)
40	8.5	0.13	8.63	10	1.000	0.015	0.129
41	7.0	0.13	7.13	9	0.926	0.015	0.099
42	7.2	0.13	7.33	8	0.741	0.015	0.081
43	4.0	0.13	4.13	7	0.500	0.015	0.031
44	4.0	0.13	4.13	6	0.259	0.015	0.016

pn5

pn5

pn5

pn8

依据《放射性肿瘤病因判断标准》（GBZ97-2009）获得照射因子（F）、潜伏期修正因子（T）和年龄、性别、受照危险增加系数（K），然后计算癌症超额相对危险（ERR），见表2。根据 $PC=ERR/(1+ERR)$ 计算职业照射患肺癌的概率。

$$ERR(\text{合计})=0.356$$

$$PC=ERR/(1+ERR)=0.356/1.356=0.263=26.3\%$$

如果该人目前吸烟10~20支/天，由《标准》附表3，得知 $W=0.707$

则 $ERR(\text{校正})=0.356 \times 0.707=0.252$ ， $PC=0.252/1.252=0.201=20.1\%$

由此可见，如果此人不吸烟的话，他的PC值为26.3%，由于吸烟，扣掉吸烟所致的PC增加，他的PC值就是20.1%。

男性，25岁间时甲状腺受到25cGy的 $\gamma$ 线照射，33岁时（也就是8年之后）被医院诊断为甲状腺癌，来自受照射的病因概率是多少？

年龄(岁)	剂量(cGy)	F(D)	T (8年后诊断)	K	ERR (F×T×K)
25	25	25	T=0.741	0.139	0.257

pn5

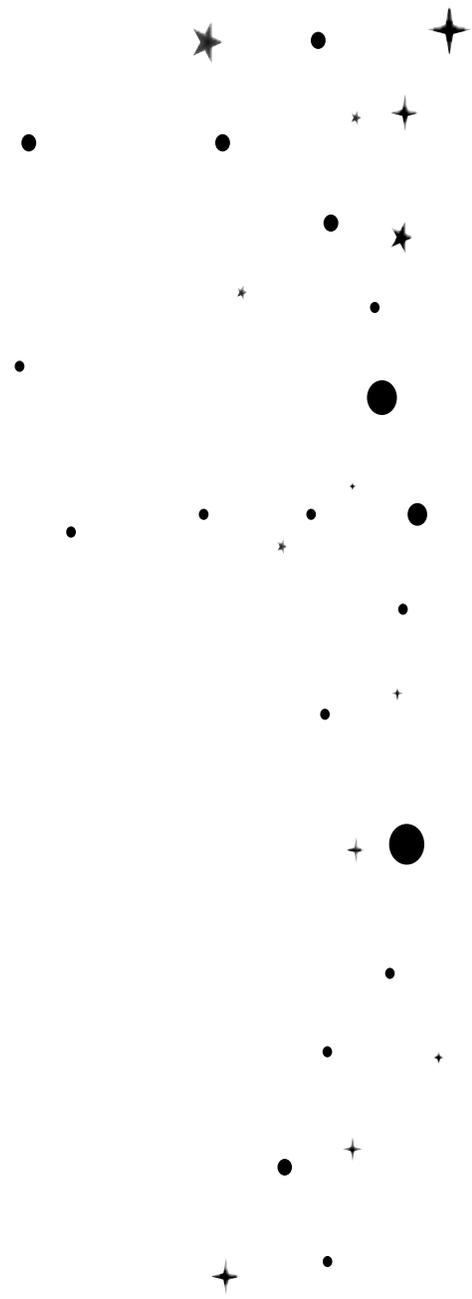
pn5

pn17

依据《放射性肿瘤病因判断标准》（GBZ97-2009）获得照射因子（F）、潜伏期修正因子（T）和年龄、性别、受照危险增加系数（K），然后计算癌症超额相对危险（ERR），见表2。根据 $PC=ERR/(1+ERR)$ 计算受照射患肺癌的病因概率。

$$ERR(\text{合计})=0.257$$

$$PC=ERR/(1+ERR)=0.257/1.257=0.204=20.4\%$$





**正确认识  
积极防护  
辐射危害**