

人类生存发展与核科学 18 春笔记 By GSM16 WY

➤ 绪论 (Page 1-5, 第一周)

➤ 放射性的发现

- 居里夫妇发现铀矿渣中含有比铀更强的放射性。自此发现了镭和钋两种新的放射性元素。
- 卢瑟福确立了放射性射线发生于原子内部。并且通过发射射线，一种元素会转化为另一种元素，确立了元素变化的规律。卢瑟福还开创了一条用射线束来研究物质结构的途径，对核物理的基础研究起了很大的作用。
- 卢瑟福的又一大实验证明，它们利用 alpha 粒子来研究原子结构。用 alpha 粒子轰击金属薄膜，来观测穿过膜后粒子飞行方向的分布。……产生了卢瑟福原子模型 (第 2 页)
- 卢瑟福 1911 年建立原子核模型，1919 实现了人工核反应（用 alpha 粒子轰击氮打出质子），1932 年发现中子（用 alpha 粒子轰击铍），1934 年发现放射性元素磷（用 alpha 粒子轰击铝）

➤ 核科学的诞生 (Page 6-8, 第二周、第三周 A, PPT~1)

➤ 【1】19 世纪经典物理学

- **物理学**是研究物质结构、物质相互作用和运动规律的自然学科，是一门以实验为基础的自然科学。物理学的目的是揭示自然现象的本质及其规律性。
- 称之为“好”的物理理论能够：①准确描述所观测的现象②对未来的预测结果给出明确的预言，并且能够被实证证实。
- **第 1 次物理理论统一**：牛顿力学（1665-1687）三大定律和万有引力定律。
- **第 2 次物理理论统一**：法拉第电磁感应定律（1831）为发电的基本原理，麦克斯韦（1864）被誉为“十九世纪最伟大的科学家”，其电磁学方程组的发现①解释了电磁现象②预测了电磁波的存在。
- 物理现象的解释，起源于 1808 年道尔顿所发表的“原子论”；原子是不可分割的最基本原子。
- **物理学界的两朵乌云**：
 - **紫外灾难**：热辐射理论无法解释实证现象。按照热辐射理论，辐射波长越小，能量越高；但实证中当辐射波长趋于 0 时，能量却不趋于正无穷（不增大），反而逆着实证的规律走（无法与实证数据吻合）。说明了经典热辐射理论的局限性。
 - **以太理论灾难**：科学家认为，光的介质是以太；则光要传播，则宇宙间充满以太。但“漂移实验”得出了“零漂移结果”，证明以太不存在。两相矛盾。
- 1895 年 X 射线以及 1896 年放射性的发现，又使得经典物理学出现了危机。
- 产生危机的原因：①19 世纪末人类对自然界的认识仅停留于宏观、低速②对于微观和高速，即原子内部和宇宙外部知之甚少。

➤ 【2】人类观测尺度的发展

- 1 光年为 10^{16} 次方米。
- 原子的大小为 10^{-10} 次方，原子核的大小为 10^{-14} 次方；要利用加速器，使粒子间进行碰撞，使原子打开才能进行研究。

➤ 新的重要发现与核科学诞生

~基本粒子与原理的发现~

- **【1】1895 年德国科学家伦琴利用阴极射线管发现 X 射线。**发现利用阴极管射击金属，会产生 X 射线；这种射线可以穿透纸张，对远处的荧光屏产生感光现象。医学应用为 X 光片，用来照射器官结构。
- **【2】1896 年法国科学家贝克勒尔发现放射性。**含铀的矿物晶体，能使用纸包着的照相底片感光（贯穿不透光的纸，使底片的银盐还原）。他发现含铀的物体可以发出具有穿透能力的射线。这些射线被他称为“放射性射线”。放射性的发现是核科学的开端。
- **【3】1897 年丹麦科学家汤姆孙发现了第一个基本粒子：电子。**认定了阴极射线是负电荷粒子，比原子小得多，质量为氢原子的 $1/1840$ 。
- **【4】1898 年来自波兰的居里夫妇发现了钋 (^{210}Po) 和镭 (^{226}Ra)，**一般镭元素的荧光效应会应用于夜光表、军事表盘。这是核科学发现的里程碑，有以下三点贡献：
 - ①指出了放射性是原子的一种性质；
 - ②有了强放射源，可以进行大量试验研究；
 - ③首先将放射性用于治疗疑难疾病，创立了放射医学。

~核结构与原子模型的发现~

- **【5】开辟了原子探索新方向：**①原子比电子小，且电子可以从原子中跑出来，说明电子是组成原子的一种粒子：动摇了原子是组成物质的基本“砖块”的认识；②发现放射性，且这种放射性来自于原子：令人们对于原子内部结构的探索产生了兴趣。
- **【6】汤姆孙原子模型：“葡萄干面包”。**利用了“原子为电中性”的基本事实，汤姆孙认为原子由正电物质以及电子（负电荷）组成；而正电荷均匀分布在原子内，电子则“镶嵌”在原子内部的一些平衡位置上。电子在平衡位置做简谐运动，发射和吸收特定频率的电子辐射。
- 汤姆孙电子模型解释了三件事情：①原子电中性，②原子稳定性（电荷的流动），③元素周期表中的某些事实、元素的化学性质等。局限性为，不能解释原子发光问题。(Page7)
- **【7】1909 年卢瑟福进行散射实验，**实验出现异象：当用 α 粒子轰击金箔时，大部分 α 粒子在入射方向上朝前偏折出去（散射角小于 90° ），但有极少数 α 粒子被反弹回来（散射角大于 90° ）。这一点从汤姆孙的原子模型来看，由于原子的质量和正电荷都是均匀分布的，所以 α 粒子不应该反弹回来。
- 1911 年卢瑟福为了解释这一异象，**提出了原子“行星结构模型”，**主要有以下特点：①原子中的全部正电荷和原子的绝大部分质量集中在原子中心的一个很小的区域内，这个区域就是原子核；②由于原子核半径相对原子半径极小（ 10^{-14} 对 10^{-10} ），所以原子内部是十分空旷，电子散布于原子核的周围。**【得名是因为原子类似于太阳系，原子核类似于太阳，电子类似于诸多行星】**

● “行星模型”所遗留下来的问题：

- 问题 1：原子中的电子绕原子核转动会不断辐射能量，最终冲向原子核使原子塌陷，原子应当是不稳定的。但实际上，通常的原子都是稳定的。这与经典电磁理论存在严重矛盾。
- 问题 2：没有涉及到电子分布问题，未能解释原子线状光谱现象。
- **【8】1913 年，丹麦科学玻尔将“量子论”用于研究氢原子，**解决了罗瑟夫所遗留的“原子塌陷”以及“线状光谱”问题，建立了现代原子模型。

- **【9】**1914 年卢瑟福发现质子。1932 年英国科学家查德威克发现中子，这种例子质量与原子相近，且为电中性。同年，海森堡提出了“质子-中子模型”，表明原子核由质子和中子构成。这个模型很好地说明了“原子量”与“原子序数”的关系，故很好地被人们接受。

● 核子 = 质子 & 中子

➤ **【4】两大理论支柱：量子力学、（狭义）相对论** **【主要看 PPT】**

- 两大理论体系：为探索原子核提供了坚实的理论基础、且原子核中发生的物理现象为两大理论的确立和发展提供了有力依据。
- **【1】量子力学：**量子假设→量子论→量子力学
 - **量子假设：**“紫外灾难”再重申；普朗克驱散乌云新观点：能量不连续（量子化），且自然界中能量有跳跃。但是，这与传统认识矛盾，让公众难以接受。
 - **量子论：**1905 年爱因斯坦将光波看做光量子解释光电效应、并于 1907 年利用量子概念解释了热容量量子性质；1913 年玻尔用量子轨道概念解释氢原子线状光谱，建议现代原子模型。
 - **量子力学：**1924-1926。
- **【2】相对论（质能关系）：**
 - 即“质能关系”， $E=mc^2$ ，核能发电实际上就建立在这个原理之上。表明质量只是一种能量的存在形式，质量和能量等价。
 - **重要意义：**解释了放射性元素放出大量能量的原因，揭示了越微观放出能量越大的秘密，能量是人类研究物质结构的基本指标。

➤ **【*1】核科学中常用的质量单位（意义很重要，Page10）**

$$1u = \frac{C^{12}}{12} = 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Jouel}$$

$$1\text{fm} = 10^{-15} \text{ m}$$

- **原子质量单位 u：**由于微观粒子利用 kg 来表示过大，故科学家通常以原子质量单位 u 来表示粒子质量。u 被定义为 ^{12}C 原子质量的 $1/12$ ，即 $M(^{12}\text{C})=12.000000u$ 。由“质量关系” $E=mc^2$ 推导得到质量和能量间的对应关系。 $1u$ 也等于 $931.5\text{MeV}/c^2$
- **电子伏特 eV：**是微观物理的常用能量单位， 1eV 的能量表示 1 个电子通过 1V 的电位差所获得的动能。 eV 是一个相当小的单位，在核物理中通常用下面较大的单位：

eV-KeV	MeV	GeV	TeV
原子中电子结合能	原子核物理	高能物理、粒子物理（1GeV 大约为一个核子静止质量全部转化的能量）	超高能物理（夸克、轻子等）

- **常用 eV 数据：**

Me (MeV/c^2)	Mp (MeV/c^2)	Mn (MeV/c^2)	1u (MeV/c^2)
0.511	938.272	939.565	931.5

➤ 【5】物质基本构造与基本作用力【看 PPT】

- 标准模型的意义：确立了一套基本物质粒子和作用力粒子，并可以让人们借助这些“基本粒子”阐明其他几百种粒子的构成和复杂的作用，从而即使物质世界发生的许多现象：比如“大爆炸”后宇宙的演变过程。（希格斯粒子、夸克、媒介子等等）

➤ 原子核与放射性物理基础(Page 9-30, 第三周 B、第四周, PPT~2)

➤ 【1】原子核的组成、质量与能量 (Page 9)

- 原子核由质子 (Z) 与中子 (N) 组成，核子 (A) 即质子、中子的统称。故我们有公式：

A (核子, 质量数) = Z (质子, 原子序数, 元素周期表位置) + N (中子)

- 原子为 10^{-10}m , 原子核为 10^{-14}m , 核子为 10^{-15}m , 电子为 10^{-18}m , 夸克为 10^{-18}m 。
- 质子 2 个上夸克, 1 个下夸克, 带 1 个正电荷。中子 1 个上夸克, 2 个下夸克, 不带电。
- 核素符号: 比如 ^{12}C , 则可以分析: C 的原子序数为 6, 中子数为 6, 故其质量为 $6+6=12$ 。
 - 同位素: 质子数 (原子序数) Z 相同, 例如 ^1H 、 ^2H 、 ^3H (氕、氘、氚, 详细 Page10)
 - 同中子数: 核子数 A 相同, 例如 ^{14}C 、 ^{14}N 、 ^{14}O 。
 - 同量素: 中子数 N 相同, 例如 ^{14}C 、 ^{15}N 、 ^{16}O 。

➤ 【*1】原子核大小、质量 (Page10, 作业)

- 原子核内部: 质子和中子紧密地靠在一起, 几乎没有空隙。原子核中每个核子平均占有体积 7.24fm^3 。
- 原子核半径公式: 定义 R 为原子核半径, A 为原子核质量数, r_0 为原子核半径常数。

$$R(^{238}\text{U}) = r_0 \sqrt[3]{A} = (1.2 \times 10^{-15} \text{m}) \times \sqrt[3]{238} = 7.4 \text{fm}$$

- 原子核质量: 原子核质量, 即原子质量—原子内部的电子质量; 即公式:

$$M_N = M_a - (Z * m_e)$$

- 定义 M_N 为原子核质量, M_a 为原子质量 (通过原子质量表查询), Z 为质子数, m_e 为电子质量、定义 $m_e=0.00549\text{u}$
- 原子核密度: 定义为 ρ , 那么通过指导原子核质量 M_N , 以及原子核体积 V (假设球形, $V=4/3 * \pi * R^3$), 则有原子核密度公式:
- 一般核物质密度为 $2.3 \times 10^{14} \text{g/cm}^3$, 则 1cm^3 的核物质有 2×10^8 吨重!

$$\rho = \frac{M_N}{V} \quad V = \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{4}{3} \pi (r_0 \sqrt[3]{A})^3$$

➤ 【*2】质量亏损与结合能 (Page12, 作业)

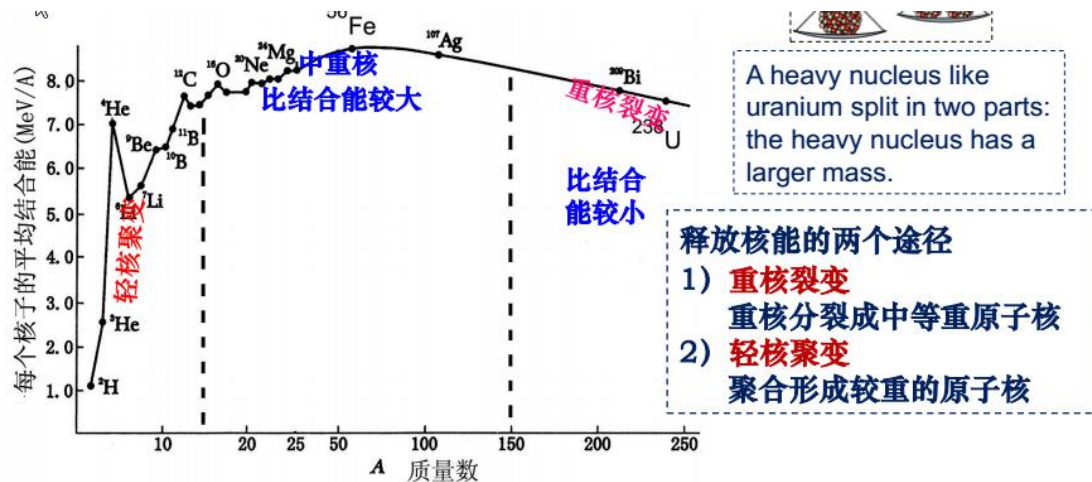
- 原子核的质量+亏损质量=两个原子的质量之和, 即在两个原子形成一个新原子的过程中, 必然会有有一定的能量损失。即 2 个质子和 2 个中子形成 1 个 α 粒子, 会有如下关系:

$$2m_p + 2m_n = M(^4_2\text{He}) + \Delta M(^4_2\text{He}), \quad \Delta E = \Delta M(^4_2\text{He})c^2 = 28.3\text{MeV}$$

- 其中 $\Delta M(4\text{He})$ 被称为质量亏损，对于 alpha 粒子而言，此值=0.030373u。
- 而后可以用爱因斯坦的“质能关系”，利用质量亏损，求出损失的能量大小 ΔE 。
- 计算的时候先看 Z、N 的数量(比如 $56\text{Fe}=26Z(\text{表序数})+30N$)；并转换单位， $1\text{u}=931.5\text{MeV}$ 。

- **原子平均结合能：**即原子核结合能(Q)/核子数(A)，下表为常用原子平均结合能数据：

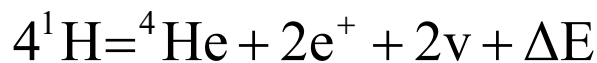
核素	4He	12C	16O	56Fe	107Ag	208Pb	238U
E/A (MeV)	7.07	7.68	7.98	8.80	8.55	7.87	7.57



- **原子核中平均结合能曲线：**发现四个现象：①原子核中的每个核子的平均结合能随质量数而变化② 56Fe 和 62Ni 比结合能最大③中间高 (A 介于 16 至 150 之间)，两端低：中等重的原子核平均结合能最大，核子间结合得较紧；轻的和重的原子核结合能较小④处于中间的原子核相对于两端的更稳定。
- **CASE 1: 重核裂变——中子与 $\text{U}235$**



- 裂变能释放的能量巨大，达到了 $2 \times 10^8 \text{eV}$ 。(PPT 上有其他反映的参照，化学能只有 4eV)
- 应当是“原子核能”，而不是“原子能”；但为什么我们一直称之为“原子能”？(PPT)
- **CASE 2: 氢核聚变—— 1H 的聚合**



- 聚变释放的能量为 $2.67 \times 10^7 \text{eV}$ (26.7MeV)。
- 太阳能量就是氢核不断聚变而产生的，这种反应只发生在太阳的中心。(PPT)

➤ 【2】放射性衰变及衰变规律 (书 P127 有穿透能力比较)

- **核辐射：**不稳定的原子核自发地放出 alpha、beta、gamma、中子等粒子的现象为放射性。放出的粒子称之为核辐射。核辐射是来自于原子核衰变所放出的载能的亚原子粒子。

亚原子粒子	实际粒子名称	大小	带电情况
Alpha 射线	氦原子核 (4He)	$2.2 \times 10^{-15} \text{m}$	+2
Beta 射线	电子 (e^-)	$2.8 \times 10^{-18} \text{m}$	一般带-1，但也带+1
Gamma 射线	光子		不带电
n 射线	中子	$\sim 10 \times 10^{-15} \text{m}$	不带电

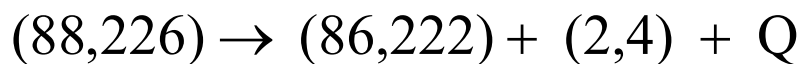
- 衰变服从表达式：其中 X 表示母核，Y 表示子核，b 表示发射射线， ΔE 表示衰变能量。

$$X \rightarrow Y + b + \Delta E$$

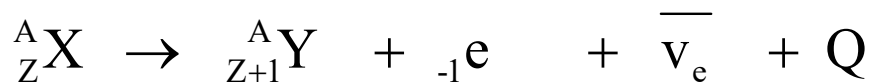
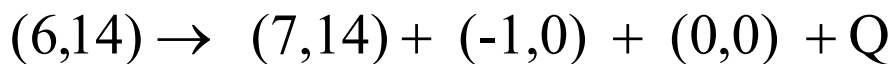
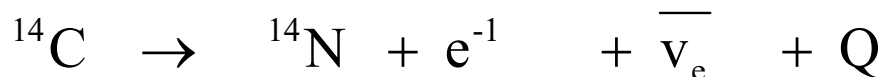
- 衰变过程服从：动量守恒、能量守恒、核子数守恒、电子数守恒等。
- 中微子：是由费米命名的，中微子几乎不与物质发生反应（100 亿个有 1 个）。大型中微子探测器见 (PPT)

➤ **【*3】放射衰变的类型： α 衰变、 β 衰变， γ 衰变 (Page15)**

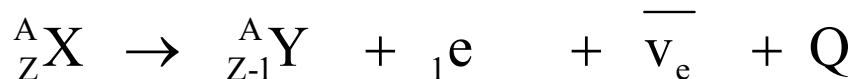
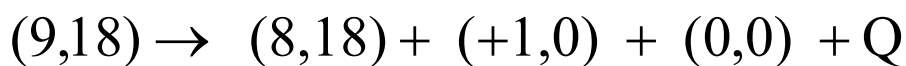
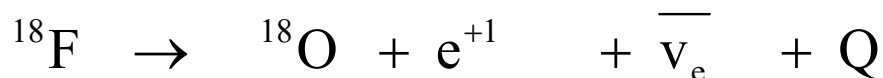
- Alpha 衰变：发射 alpha 粒子（氦核）的衰变。



- Beta 衰变：发射 beta 粒子（电子）的衰变，分为两种：beta-衰变与 beta+衰变。
- Beta (-) 衰变：发生在中子数过多的不稳定原子核中，其中 $\bar{\nu}_e$ 为反中微子。(P16)



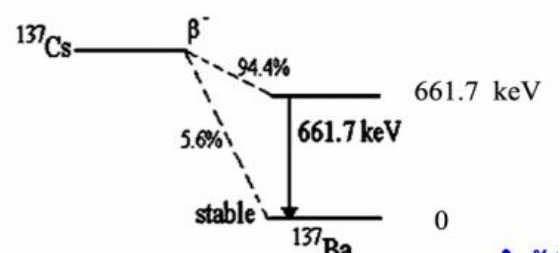
- Beta (+) 衰变：特别注意，只有在质子数过多的不稳定原子核中，束缚状态下的质子才有可能发生 beta(+)衰变；自由质子 p(1H)是非常稳定的。(P16)



- Gamma 衰变：发射 gamma 粒子（光子）的衰变。(P17)



(激发态)



- Gamma 射线往往是高能量电磁辐射。能量达到了几百 KeV-MeV；这种衰变的本质是：激发态原子核（ ^{137}Cs ）通过发射 gamma 射线，而退激（跃迁）到低能态或基态，只是原子核能态发生变化。
- Gamma 衰变一般不能自发地、不能单独地发生，而是伴随 alpha 与 beta 衰变或核反应所生成的、处于激发态的原子核。

➤ 【*4】指数衰减规律 (Page18)

- **指数衰减统计规律：**一定量的放射性核素由于衰变，其放射性原子核数目随时间而逐渐减少，实验证明服从“指数衰减规律”。
- **衰减公式：**其中 N_0 是 $t=0$ 时样品中放射性原子核的数目。 $N(t)$ 是经过 t 时后未发生衰变的放射性原子核数目。
- λ 是衰变常数，即表示一单位时间内每个放射性原子核发生衰变的几率（可能性），这个数值只与放射性原子核本身的性质有关，与外界条件无关； λ 越大，表明衰变越快。

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

- **放射性衰变：**①是一个统计过程，并不能确切说明那一个放射性原子核在核是发生衰变；只能说一个原子核某一时刻发生衰变的概率。②指数衰减规律是对样品中存有大量放射性的原子核而言。
- **半衰期：**指的是一定量的某种放射性原子核，其中有 1/2 发生了衰变所经过的时间。（改变半衰期的方法）

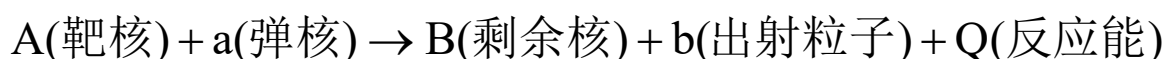
$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \quad N = N_0 e^{\frac{0.693 \cdot t}{T_{1/2}}}$$

- **剩余质量的计算：**假设 M_0 为现有质量， $T(1/2)$ 为半衰期， T 为目标天数， M 为现有质量。

$$M = M_0 \times (0.5)^{\frac{T}{T_{1/2}}} \quad T = \frac{T_{1/2} * \lg \frac{M}{M_0}}{\lg 0.5}$$

➤ 【3】原子核反应的 4 条事实 (Page 19-20)

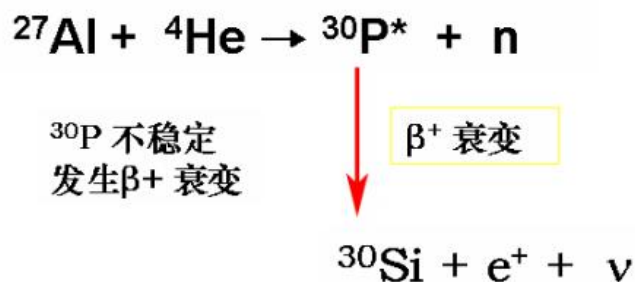
- **1：**核反应，为入射核粒子（弹核）轰击原子核（靶核），它们之间有动量和能量的交换或者核子交换，使原子核状态发生了变化或产生出新的粒子。



- **2：**1919 年卢瑟福产生质子的反应是第一个人工核反应。这开辟了人工方法改变原子核的基本途径，人类能够将一种元素变成另一种元素。



- **3：**世界上第一个制造的人工放射性核素： ^{30}P ，1934 年来自于居里夫妇。



- 这个 ^{30}P 的发现有两个“第一”：首先 ^{30}P 是第一个人工制造的放射性核素。也是第一个发现 β^+ 衰变的放射性核素。
- 4: 已发现核素 2800 种，不稳定的占 89%，估计共有 6000 种核素。预言可能存在以 114 号为中心的核素稳定岛。至 114 号的元素中，有很多都是用核物理和核化学方法通过人工制造发现的。

➤ 【4】核辐射与物质的相互作用 (Page 22)

- 重新回顾基本粒子及其性质：

种类	符号	电荷	质量 (单位: u)
Alpha	^4He	+2	4.00279
Beta	$\text{e} (+/-)$	$(+/-) 1$	5.486×10^{-4}
Gamma	γ	0	0
质子	p	+1	1.007276
中子	n	0	1.008665

- 手机、微波炉的射线强度不强，其发射的电磁辐射不可让其他物体被电离激发。

➤ 【*5】电离效应 (Page 23-28)

- **电离**：载能的 α 粒子与原子中的电子发生库伦作用，电子获得足够的电能后从原子中逃跑，导致原子被电离。
- α 粒子通过的路径上会有很多原子被电离或激发，故出现许多正离子和自由电子组成的离子对。(射线探测)
- 射线导致机体变化的最根本物理机制是电离 (原子或分子的化学状态发生变化)。足够大的能量使中性原子发生电离辐射。

粒子名称	电离作用	电离效应	离子对数目	轨迹
Alpha	强	强	多，密集	直、粗
Beta	弱	弱	少，稀疏	弯、细

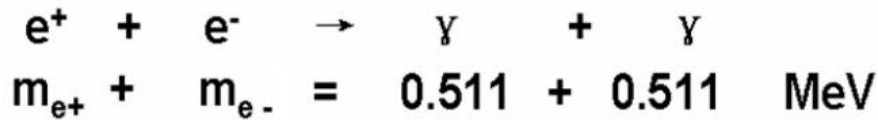
- α 射线中氦核由于质量大，电离能力强，最终用一张纸就可以挡住。

α 射线是一种带电粒子流，由于带电，它所到之处很容易引起电离。 α 射线有很强的电离本领，这种性质既可利用。也带来一定破坏处，对人体内组织破坏能力较大。由于其质量较大，穿透能力差，在空气中的射程只有几厘米，只要一张纸或健康的皮肤就能挡住。

β 射线也是一种高速带电粒子，其电离本领比 α 射线小得多，但穿透本领比 α 射线大，但与 X、 γ 射线比 β 射线的射程短，很容易被铝箔、有机玻璃等材料吸收。

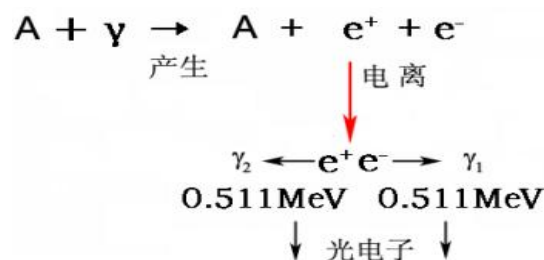
X 射线和 γ 射线的性质大致相同，是不带电波长短的电磁波，因此把他们统称为光子。两者的穿透力极强，要特别注意意外照射防护。(百度问答)

- **正电子湮灭**：正电子是反物质，所谓湮灭就是正电子遇上负电子生成 2 个光子的过程。
- **正电子与物质作用有两步过程**：①正电子直接电离效应②湮灭作用所产生的 0.511MeV gamma 射线开始对物质进行作用，产生次级电子并继续电离过程。（P25）
- 光电效应，康普顿效应，电子对效应（P26）
- 即，正物质与反物质产生能量（高能电磁波）。



质量转化为能量 转化效率 (100%) $E = mc^2$

- **Gamma 射线对物质的作用**：由于 gamma 射线不带电，但由于它载有动量和能量，所以它可以和原子由动量和能量的交换，故 gamma 射线与原子可产生次级电子，引起原子的激发和电离。
- 即首先产生次级电子（三种效应同时作用：光电效应、康普顿效应、电子对效应；这三种效应的分别解释[请见附录部分](#)），然后刺激电子引起原子电离。
- 事实上，电信号电流与 gamma 射线强度相同。
- 发生条件：①Gamma 射线能量 $\geq 1.02\text{MeV}$ ②在原子库伦场中可能产生一对正-负电子。



- **Gamma 射线的衰减**：也符合指数衰减规律。Gamma 射线的强度随着介质层厚度的增加而减小。
- 此处引入公式：其中 μ 为指数衰减因子。对于线性吸收系，gamma 射线能量越高， μ 值越小；原子序数越高， μ 值越大。
- **铅吸收 Gamma 射线的能力最强，水的吸收能力最弱。**（详细见 PPT）
- **中子反应原理**：1 中子不带电，但是通过与物质碰撞可以轻易进入原子核内，和原子核发生作用会引起核反应，产生载能粒子——进而对物质发生电离作用。所以中子能够使物质产生电离效应。
- **中子反应实例**：上述所说的一种情况是中子与 H 原子核进行弹性碰撞，首先打出载能质子，然后质子引起物质电离。另一种情况是中子引起核反应，与 ^{14}N 反应打出 ^{14}C 与 1 个质子(p)。
- **人体危害**：因为人体含有大量的 H 与 N 原子，所以中子会对人体产生非常严重的电离效应，对人体有很大危害。
- **中子慢化剂**：轻水（ $^1\text{H}_2\text{O}$ ）、重水（ $^2\text{D}_2\text{O}$ ）。

➤ **【5】核辐射量度**（Page 29-30）

- **放射性活度 (A)**：样品中放射性原子核在单位时间内发生衰变的原子核数目。公式：

$$A = \frac{dN}{dt}$$

- **单位：**贝克 (Bq)，(放射性活度的国际单位)，1Bq 意味着每秒发生 1 次核衰变。

(必考!!!!)

- **专用单位：**居里 (Ci)， $1\text{Ci}=3.7 \times 10^{10}\text{Bq}$ ，1 个居里等于 1g 纯 ^{226}Ra 的放射性活度。
- **吸收剂量 (D)：**即电力辐射对物质作用所产生的效应，以传递的能量来量度。定义为单位质量受照射物质所吸收的平均电离辐射能，以 D 表示：

$$D \equiv d\varepsilon / dm$$

其中， $d\varepsilon$ 是电离辐射基于质量为 dm 物质的平均能量。单位：J/kg，专用单位为“戈瑞” (Gy)。(对单位的进一步解释可以看 P133)

- **当量剂量 (HT)：**人们关心的是核辐射照射身体所产生的生物效应。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。公式如下，其中 $D(T,R)$ 表示辐射 R 在器官或组织 T 内产生的平均吸收剂量； W_R 为辐射 R 的辐射权重因子。
- 总的而言，表征不同辐射种类或能量，在组织或器官内所导致的生物效应大小。

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

- **W_R 作为权重因子：**光子、电子几乎不产生效果。则表示的是等吸收剂量的照射，对机体辐射的中子影响，比光子大 W_R 倍。这个值修正了导致生物效应的严重程度。

- **W_T 组织权重因子：**表示组织 T 接受照射所导致的随机效应的危险系数与全身所受到均匀照射时总危险系数的比值。假设对于各个器官的全部权重进行考虑，人们最需要防护【睾丸】，其次是红骨髓、结肠、肺、胃等。

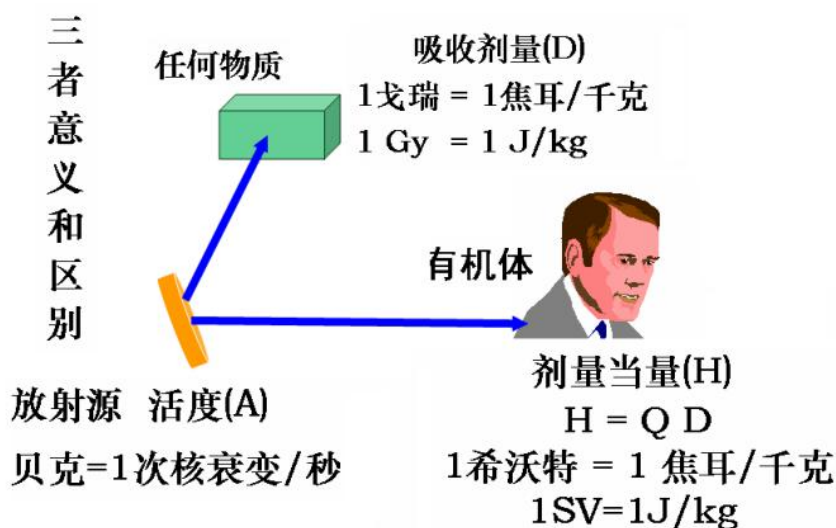
- 这个值有两个意义：①表征组织和器官对辐射的敏感性；②反映了在全身均匀照射下各组织或器官对总危害的相对贡献。

- **有效剂量 (HE)：**各组织或器官的当量剂量与相应的组织权重因子乘积的总和。

$$H_E = \sum_T H_T \times W_T$$

- **单位：**J/kg；意义：①辐射防护管理上的量，评价随机效应的危险度（建立体系）；②使核安全与辐射防护管理走向定量化（使得任意两种辐射对人体的危害可以进行比较）。

- **小结---放射性活度 A，吸收剂量 D，剂量当量 H 三者的区别：**



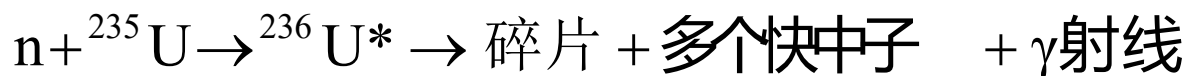
➤ 核科学应用：核武器 (Page 39-40、62-82, 第五周, PPT~3)

➤ 【1】认识原子弹与核能 (Page 39-40)

- **简要回顾：**1911 年卢瑟福发现原子核，1919 年发现质子；1920 年卢瑟福提出中子存在假说，1931 年居里夫妇发现铀射线，1932 年查德威克发现中子；中子的发现是核物理发展的里程碑。

- **原子核裂变：**

- **费米——裂变的发现者：**1938 年德国科学家费米发现“中子慢化”现象。并提出了“自持链式反应”的设想，建立了第一个自持反应反应堆。1942 年芝加哥大学第一个反应堆临界。(1932-1938 前历史前 PPT)
- **原子核裂变原理：**即用中子轰击 ^{235}U 原子核。



- **裂变链式反应：**放出 2~3 个中子，200MeV 能量；如果实现了自持链式反应，则可形成带有巨大能量的爆炸！1kg 核燃料 \approx 2 万吨 TNT。

➤ 【2】原子弹的基本原理 (Page 43-44)

- **反应条件与中子命运：**中子轰击原子共有 4 种命运 (见 PPT)，其中若要实现链式反应，需要中子直接击中原子核，而并非被漏失、散失、俘获。
- **中子增殖系数及其公式：**由于中子轰击原子核并非 100% 概率，所以引入不泄露几率 P ，引入 ^{235}U 不吸收概率 q ，以及裂变几率 f (即中子达到第 4 种命运的几率为 Pqf)。中子若成功轰击原子核产生 ν 个中子。规定 k 为“中子增殖系数”，则有公式：

$$k = P * q * f * \nu$$

- **中子增殖系数的意义：** k 总共有三种情况，分别代表三种意义：

$k > 1$	超临界	要爆炸了!!!!!! $>_<$
$k = 1$	临界 (自持)	
$k < 1$	次临界	移动过程中放到飞机里，必须保持这种状态。0_0

- **实际的核参数检验：**采用 ^{235}U ， ^{238}U ， ^{239}Pu 。只采用这三者的原因，是因为他们是衰变链上的起始核素，且是自然界中原始存在的。

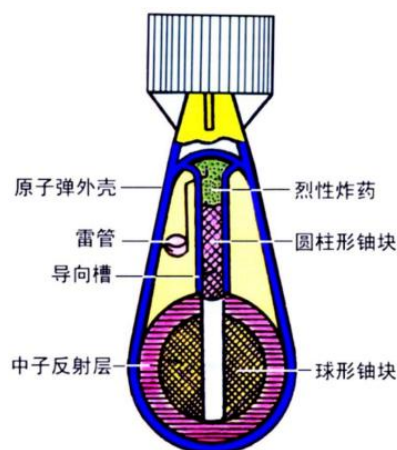
核材料	每次裂变放出的中子数 ν	裂变几率 f	吸收一个中子放出的中子数 η
^{235}U	2.6	0.848	2.21
^{238}U	2.6	0.373	0.97
^{239}Pu	2.98	0.877	2.61

- **上表表明：**

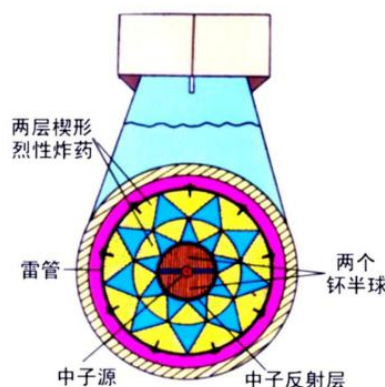
- ① ^{238}U 不可能实现支持裂变链式反应 (i.e. 达到临界)
- ② 做核材料的核素只有 ^{235}U 和 ^{239}Pu (即铀-235，钚-239)
- ③ η 值由核物理特性决定。
- **临界状态的应用：**当达到临界状态即 $k=1$ 时，和材料相应的体积为“临界体积”，相应的质量为“临界质量”；
 - 对于纯金属球 $q=1$ ，增殖系数 $k=Pf\nu=P\eta$ (此处 $\eta=f\nu$)
 - 则可得出决定增殖系数的两个重要因素：① η ，核材料性质：裂变核吸收一个中子所放出的平均中子数；② P ，体积、形状：不泄露概率 P 与核材料的表面积有关；球

形时表面积最小，泄露最小，P 最大。

- 增大球体的半径（即增大系统体积），提高不泄露几率 P， $k=Pn\eta\geq 1$ ，引起核爆炸的基本条件；
- 金属裸球状态下，高浓度铀-235 的临界质量为 50kg，武器级钚-239 为 16kg。
- **如何减少临界质量(使得 $k<1$)**: ①**增加反射层**: 减少表面反射层泄露，提高不泄露几率 P，减少临界体积（质量）、比如说在“裸球”外加 24cm 厚的铀反射层，临界质量减少 2/3，变为原来的 1/3；②**压缩核材料，提高密度**: 临界质量与核材料密度的平方成反比。
- **核爆原理**: ①最初为次临界状态 ($k<1$)；②瞬间达到超临界状态 ($k>1$): 压拢式、内爆式；③适时提供中子源，触发裂变链式反应；④繁殖足够代数，触发核爆炸。**枪式原子弹**: 独立时达不到临界状态，方便运输储存，此时 $k<1$ ；可以控制铀块向下，向下时 $k>1$ ，引爆炸弹。
- **枪式原子弹**: 使得球形铀块与圆柱形铀块分离（均为次临界状态），在点火后圆柱形铀块向下与球形铀块合并。合并后的铀块达到临界质量，这时达到临界状态。
- **内爆式原子弹**: 利用炸药的压缩原理，点火后的化学爆炸产生内聚冲击波和高压，刺激中子发射，使得原先为次临界状态的燃料球密度急剧升高，导致内部产生核反应。但由于力学平衡问题，具体实现较难。
- 内爆式比枪式更好，因为内爆式可以少装燃料，对核燃料的利用率升高。



“枪式”原子弹结构原理图



“内爆式”原子弹结构原理图

- **核爆炸与中子增长速率（每秒中子增长速度），公式：**

$$N(t) = N(0)e^{\lambda t} \quad \frac{dN}{dt} = \frac{N(k-1)}{\tau} = \lambda N$$

- 其中 $N(t)$ 为 t 时刻中子数， k 为增殖系数， τ 表示每代平均时间， λ 为每秒增加的中子数。一般核爆炸最需要的就是增殖越快越好，也就是 k 尽量高，每代平均时间 τ 尽量少。因为能量的 99% 都为最后几代。

示例：

$$N(t) = N(0)e^{\lambda t} = N(0)e^{(k-1)n}$$

$$n = t / \tau = \text{“代数”}$$

设初始裂变数 $N_0=1$, $k=2$,

释放核能：200吨（TNT）	$n = 51.7$
2万吨	56.3

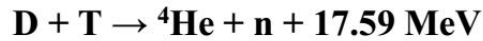
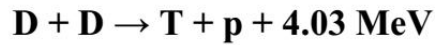
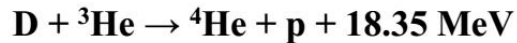
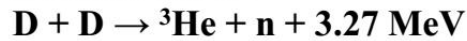
➤ 【3】原子弹制造与核燃料生产（Page 62）

- 为什么需要生产核燃料：天然纯铀中， ^{235}U 占 0.7%， ^{238}U 占 99.3%。只有 ^{235}U 可作为高纯度核燃料。
- 如何分离 ^{235}U 和 ^{238}U ：电磁分离法、离心法、扩散法等。（不像伊朗等国出售离心机的原因就是害怕他们提纯 ^{235}U ）
 - 电磁法：【书 P66】：把天然铀形成的气体化合物（ UF_6 ）引入离子源，这些粒子受电场作用后获得几乎相同的动能。然后引进与其运动轨道相垂直的磁场区域。他们受磁场作用后，沿圆形轨道运动，轻的离子半径小，中的离子半径大。质量不同运动的轨迹也就不同。
 - 气体扩散法：【书 P46】首先让 U 全部变为 UF_4 气体，然后由压缩机驱动通过多孔分离膜，然后利用 $^{235}\text{UF}_4$ 和 $^{238}\text{UF}_4$ 的质量差异，进行同位素分离。质量较轻的 $^{235}\text{UF}_4$ 运动速度稍快，穿过分离膜的几率比较大。反之， ^{238}U 穿过分离膜的几率比较小。
 - 离心机法：【书 P46】：在高速旋转的离心机中，由于两种不同质量的同位素受到的离心力不同，因而使他们在离心机不同区域得到浓集。从而达到分离同位素的效果。
- 如何生产 ^{239}Pu ：铀-石墨堆或铀-重水堆。注意 ^{239}Pu 天然不存在，故必须靠反应堆生产：利用重水堆烧掉天然铀中的 1 个 ^{235}U ，可获得 0.8 个 ^{239}Pu ；这之后还有经过冷却等复杂处理才能成为核燃料。
- Pu 的特性：Pu 中掺入了少量镅，一般 ^{239}Pu 占 93%。它在 $-75\sim 475^\circ$ 间是稳定的。要注意 Pu 具有强烈的放射性以及化学毒性。

➤ 【4】氢弹的基本原理（Page 48-50）

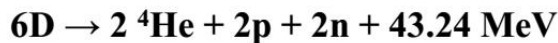
- 氢弹的基本原理是聚变：通过 D（氘）和 T（氚）进行聚变进行聚合，产生了氦核（ ^4He ）和中子（n），以及 17.6MeV 的能量。

最重要的聚变反应



D是氘核(重氢 ${}^2\text{H}$), T是氚核(超重氢 ${}^3\text{H}$),
p为质子, ${}^3\text{He}$ 和 ${}^4\text{He}$ 为氦-3和氦-4

- 总效果



- 聚变反应每核子平均放3.6 MeV

- 裂变每核子平均放出 $200 / 236 = 0.85 \text{ MeV}$

- **聚变原理:** 氘氚聚变, 相对裂变会放出大量能量。但不能大量应用的原因, 是因为这个聚变反应的条件很苛刻: 高温、高密, 必须克服库伦之间的排斥。

- **热核装料:** 氘化锂-6 (利用原子弹产生的中子造氚)

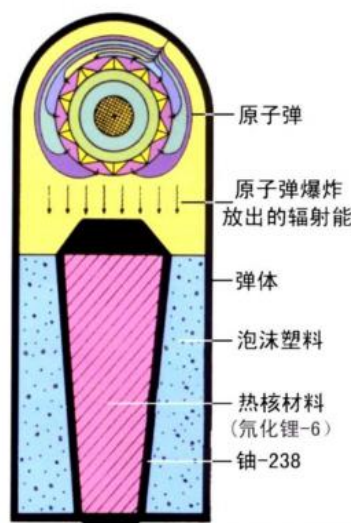


- **核裂变 (原子弹) 引爆产生高温高密条件并造氚**

- **威力:** 烧掉1公斤氘化锂-6, 释放4~5万吨TNT当量, 原则上不受限制 (一般百万吨级)

前苏联5800万吨当量 (1961.10.30)

- **氢弹原理 (Page 63)**



- 因为氢弹的爆炸条件需要高温高压, 条件苛刻, 所以一般的氢弹包含两个部分: 第一是需要为创造自持热核反应条件而专门设计的用于引爆的原子弹“扳机”; 第二部分是热核聚变燃料。

- 首先引爆其中的原子弹，核裂变释放出的能量瞬间使得热核燃料加热到高温。裂变释放的中子轰击 6Li 产生 3H ，而后 3H 与 2H 发生自持热核反应，产生巨大能量。
- 1952 年，美国首先进行了世界上的第一次氢弹试验。

➤ **【5】关于原子弹的种种历史，请具体看 PPT~**

- 1945 年 8 月，美国向日本投了 2 颗原子弹，第一颗“小男孩”铀弹，投向广岛；第二颗“胖子”钚弹投向长崎。而后日本投降。
- “曼哈顿工程”是美国在第二次世界大战期间研制原子武器大型工程的秘密代号。
- 战后科学家与政治家在原子弹的应用问题上产生分歧。杜鲁门总统决策。
- 德国研制原子弹失败原因，是因为法西斯 P68。
- 美国垄断封锁核技术。

➤ **二战后反核垄断的斗争**

- 苏联首先进行相关试验；而后英、法奋起直追。中国 1955 年被迫上马。
- **氢弹的优点：**①燃料便宜，分离 6Li ， 7Li 相对容易；②较干净，产物 4He 稳定，氦易燃烧；③威力大且不受限制；④可制成特殊性能武器。
- 美国 1952 年于氢弹研究产生突破。
- 苏联 1955 年世界上第一次空投氢弹。英中法奋起直追。中国 1967 年第一次氢弹实验成功。
- **中子弹：**美国 1963 年研制成功；中国 70~80 年代掌握技术。

➤ **全面禁止核试验**

- 海基、空基。
- 1968 年《不扩散核武器条约》(NPT) P81；1996 年《全面禁止核试验条约》
- 核武器的未来？
- 1964 年中国爆炸第一颗原子弹；1967 年成功爆炸第一颗氢弹。中国于 1964 年 10 月在罗布泊进行第一次核试验。(P75-77)

➤ 核科学应用：核电 (Page 41-62, 第六周, PPT~4)

- 原子核裂变就是【中子+ $^{235}\text{U} \rightarrow ^{236}\text{U}$ 】
- 核潜艇就是利用核燃料，因为不消耗氧气；利用化学燃料会消耗氧气。
- 第一个民用反应堆诞生于前苏联，以石墨堆为主。
- 反应堆按【中子能量分类】：热堆（热中子反应堆）、快堆（快中子反应堆）这里的快主要指的是中子快。
- 热堆：裂变释放快中子（ $\sim 1\text{MeV}$ ），其中有诸如轻水、重水、石墨等的慢化剂，使其变为热中子。

P42

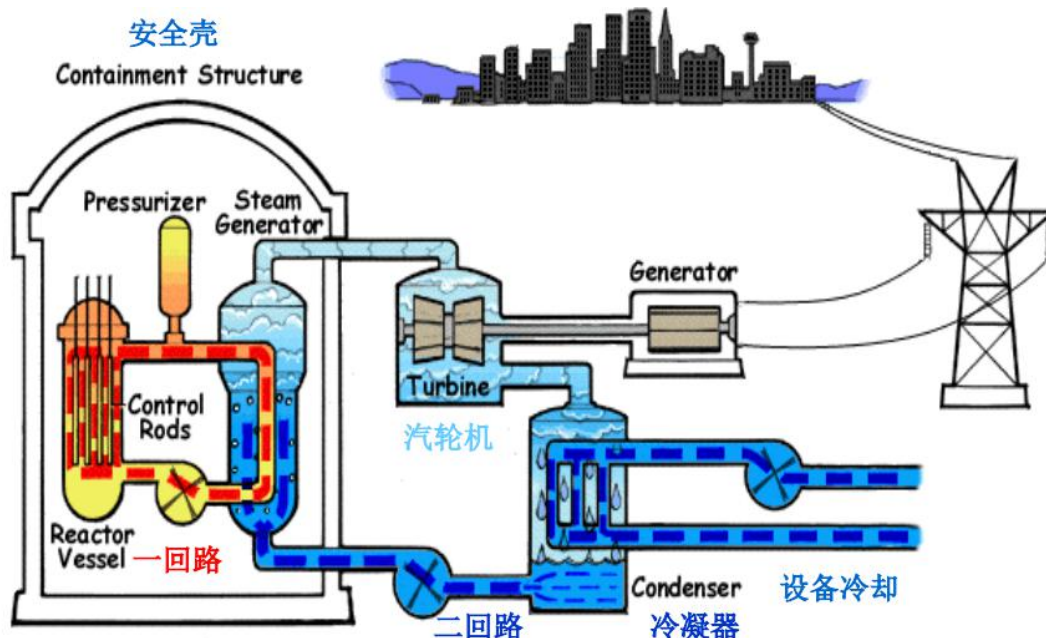
【慢化剂】分类：轻水、重水、石墨堆。

- 其中，轻水堆分为压水堆（PWR）、沸水堆（BWR）。
- 核电材料为 ^{235}U ，但在现实中，一个铀块一般含 99.3% 的 ^{238}U ，而仅含 0.7% 的 ^{235}U 。这 0.7% 需要大型离心机浓缩。一般【核电】需要 3-5% 左右的 ^{235}U ；而【核武器级】需要 ^{235}U 接近 100%。

考试会问：核电发电和火电的区别？最大的区别是从原理上讲，发电的可控与不可控。两者生产后续发电的部分原理差不多一样，但产生蒸汽的锅炉部分是不一样的。（火电产生整齐的部分是一个是锅炉，而核电产生蒸汽的部分是一个原子炉，及反应堆）原子炉的堆芯有裂变反应。

P44, 一回路与二回路

- BWR 与 PWR 的最大区别是。BWR 只有一个回路（回路里面是水）
- BWR 有两个好处：①热能利用效率高，这是一个所有水过堆芯的设计；②正因为是所有水过堆芯，所以所有水都拥有了极高的放射性；这使得水的去污变难，形成了巨大的棘手问题，只能储藏起来。



- 现在核电站 70% 为 PWR，因为它拥有关键的“蒸汽发生器”，在高压系统下， 350°C 的水形成回路。回路 1 负责给水，这个水是放射性的、拥有高温高压的。而回路 2 是由厂房、汽轮机的，主要是进行能量交换作用，通过输送冷水冷却回路 1 使其放出蒸汽。

P45 压水反应堆

- 核武器和核反应堆的根本区别在于，核反应堆是可控的链式反应。
- 而核反应堆对于堆芯的要求很高，一般为 $3\sim 4\text{m}$ ，还需要耐受高温高压。
- 反应堆芯的元素有 200 多种，主要运用中子活化反应。还会产生占总能量 5% 的衰变能和衰变热。福岛核电站在地震后的爆炸就是来源于衰变能。
- 此外惰性气体为何活动的敏感指标。
- 重水堆现在只有加拿大在用。
- 一般用快堆，快堆产生中子快，故核反应产生能量的速度快。不用热堆，因为热堆对核燃料的利用率太低。

■ 铀-238再生核燃料钚-239:



■ 快堆电站:

燃料：钚-239、无慢化剂，钠或氦冷却剂

- 中子增殖：1个快 $n \rightarrow {}^{239}\text{Pu}$ 吸收 \rightarrow 2.45个快 $n \rightarrow$ 余 1.45个快 $n \rightarrow {}^{238}\text{U} \rightarrow {}^{239}\text{Pu}$ (再生)

结果：只“烧掉” ${}^{238}\text{U}$ ，再生 ${}^{239}\text{Pu}$ ，天然 ${}^{238}\text{U}$ 可利用（包括热堆乏燃料！）

- 高温气冷堆一般使用石墨球。外面是石墨，里面是核材料。

会考到的：是否要限制“核电反应”？（PPT 发展核电的必要性）

- 实际上内陆核电考虑到“福岛”的前车之鉴，以及邻近长江涉及几亿人的饮水问题，不敢大幅去做。一般所说的“基本符合安全”，不等于马上就要装料。但是有不同的声音，有争论才是最好的。
- 法国是做核燃料后处理比较好的。
- 核聚变的资源是海水，取之不尽，用之不竭；放能大，所以有很大的发展前景。但是，利用条件过于苛刻，需要高温高压。

➤ 电离辐射的生物效应 (Page 112-116, 第八周, PPT~5)

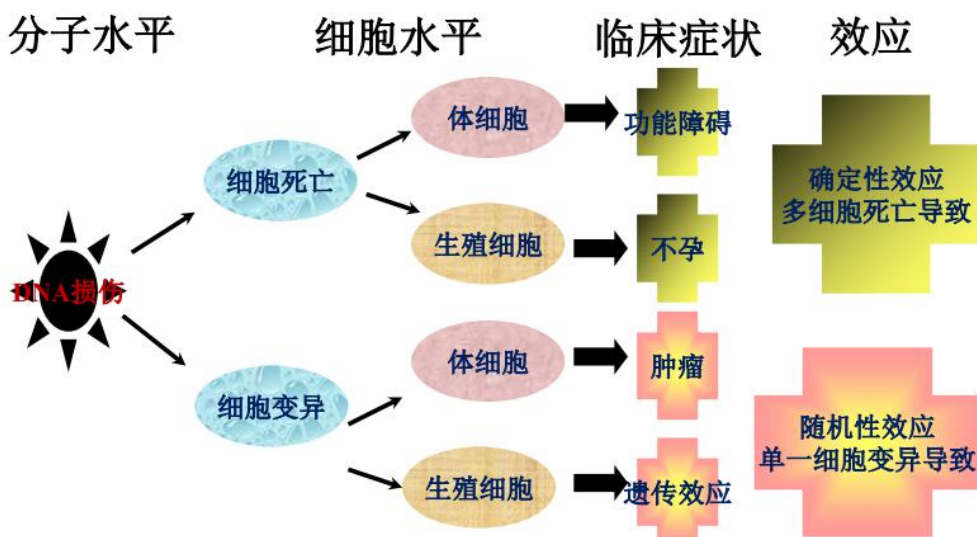
- 物理过程与能量转移, 电离产生初级电子和次级电子, 而这些作用于生物大分子
- 产生的生物效应的物理机制: 电离现象。(结果为: 自由基的产生)
- 一般电离辐射有两种情况: 直接作用和间接作用。都会使组成细胞的分子结构和功能发生变化。
- **直接作用:** 电离辐射直接同生物大分子 (DNA\RNA) 作用, 从而使这些大分子电离或激发。
- **间接作用:** 与人体细胞中大量的水分子 (H_2O) 作用, 是水分子被电离或激发。被电离或激发后形成的自由基容易与 DNA 作用。
- DNA 损伤有两种情况: 一种是单链断裂, 可以实现无差错修复; 另一种双链断裂将造成错误修复。短时间内, 如果细胞受到大量辐射照射, 就会死亡。如果细胞死亡达到一定程度, 就会产生临床现象, 可以观测到功能障碍以及细胞的结构改变。(即, 细胞变异/细胞死亡)
- DNA 是电离辐射作用的“target”。DNA 分子结构的破坏和代谢功能的障碍都将导致细胞丧失增殖能力, 最终死亡。
- 异常细胞克隆, 进行细胞转化后会导致癌症。
- 细胞凋亡是细胞的程序性死亡现象, 镜下表现主要是胞核的浓缩与破裂, 会产生诸多凋亡小体。机理是 53P 基因的激活会使得机体发出命令, 自动令变异的细胞死亡。同时, 这也是使变异细胞免于患癌症的重要机制。

辐射对于染色体有作用:

辐射对染色体作用

- 染色体是DNA和蛋白质的复合体, 它对电离辐射非常敏感。
- 染色体畸变 (Chromosome Aberration, CA) 指在某些条件下染色体组发生的数量或结构的改变。染色体畸变是反映电离辐射损伤的**良好指标**。
- 辐射诱发的染色体型畸变具体类型有七种: 末端缺失、微小体、无着丝粒环、着丝粒环、倒位、相互易位、双着丝粒体和无着丝粒体。

之前部分小结一下就是这样:



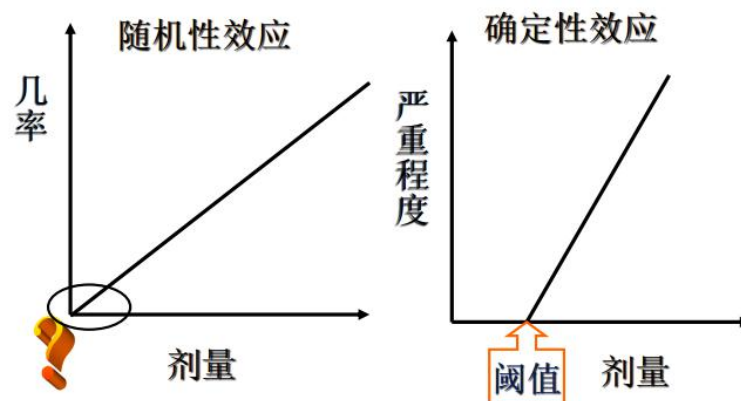
- 对于受到大剂量照射的人体，由于细胞被杀死或受到损伤，最终会出现一些病症。从性质上面分的话，可以分成随机性效应和非随机性效应。**（注意这里的描述和课件是反着的，一个是“确定”、一个是“随机”）**

➤ **确定性效应和非确定性效应（根据“效应-剂量关系”分类），防护目的见（P124）**

- **确定性效应{非随机性效应}：**有剂量限值、效应的严重程度与剂量成正比。
- **非确定性效应{随机性效应}：**无剂量限值、发生的几率与剂量成正比、严重程度与剂量无关。
- **生物效应的分类（P113，P115）：**

类别	躯体效应	遗传效应
随机性效应（非确定性效应）	辐射致癌、白血病	各种遗传隐患
非随机性效应（确定性效应）	白内障、生育力减退、血管或结缔组织损伤等	

- 其中，**非随机性效应（确定性效应）**有剂量阈值，及达到或超过某一剂量数值才会发生。在剂量阈值下不会发生。此外，非随机效应的严重程度与辐射剂量大小有关。（诱发机制为大量细胞的被杀和受损）
- 此外，**随机性效应**是指生物效应的发生，没有剂量阈值。只要受到照射就有发生的可能。发生的概率与剂量大小有关，而严重程度与剂量大小无关。（诱发机制为基因突变）
- **机理：**确定性效应是多细胞的，细胞死亡达到一定数量就会得病，有阈值。随机性效应是由单细胞变异造成的。



- **躯体效应：**发生在受照者本人身上的效应。
- **遗传效应：**发生在受照者后代身上的效应。一般遗传效应是由于**生殖细胞的变异**引起。辐射照射引起的遗传效应**没有特异性**。并且，迄今为止没有人类资料肯定，辐射所致遗传效应的发生。
- 电离辐射所致生物效应的分类：潜伏期、早期效应、晚发效应。
- 潜伏期指从照射到临床上特定效应的发生所需时间，早期效应指受到照射后数周之内发生的效应，晚发效应指的是受到照射后数月以后发生的效应。
- **早期效应：**比如说日本核临界事故，受到了 17Gy 和 10Gy 的受害者，产生了呕吐、腹泻等症状。
- **潜伏期：**日本原爆受害者肿瘤发生率随时间变化。
- **确定性效应（非随机性效应）出现的症状：**
 - 急性放射病：人体一次或短时间内受到大剂量照射所引起的疾患。>1Gy
 - 造血组织（根据剂量实施救助方案）、生殖系统（男性比女性更敏感）、皮肤的放射损伤
 - **眼组织的放射损伤：放射性白内障。**白内障是人类，眼晶体混浊的一种疾病；眼

晶体的放射敏感性大于结膜等其他组织。并且,电离辐射诱发白内障有明显的剂量阈值。

Ppt 上的数据是 0.5Gy。(P115)

➤ 随机性效应(非确定性效应)出现的症状:

➤ 辐射致癌,使正常细胞转变为恶性细胞。比如说肿瘤的发生。

➤ **危险系数:**指的是导致恶性肿瘤发病率的大小。

➤ 放射性部位的防护。

➤ 最容易被辐射后诊断的是:青少年白血病高发。胰腺癌为毒性最高的肿瘤。

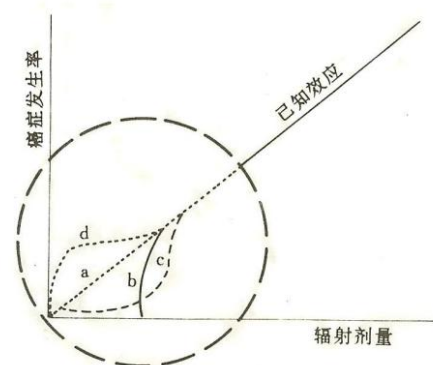
● 如何理解这张图?

❖ 已知效应中辐射剂量和癌症发生率关系的呈现是直线,说明两者是确定的线性相关的。这是从矿物生产、军事与能源利用,并且从流行病学所依据科学调查获得的结果,是相对确定的。

❖ 圆圈部分中辐射剂量和癌症发生率的关系是模糊的。因为其影响因子高,非常容易受到其他因素的干扰而导致癌症发生率受到其他因素影响,而非辐射剂量影响。根据课上老师的介绍,100mSv 以下的检出力几乎到达极限。

❖ 我们至今仍然利用这个图,甚至把圆圈部分化为直线的原因,就是因为他简单。

线性无阈的剂量-效应关系



● 为什么这两个数不一样?

12种癌症,低LET(DDREF=2)校正

对一般公众: $5 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$

职业照射: $4 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$

✓ 因为职业危险度是针对于 18~60 岁的人,他们相对健康,设置一个低于一般公众的值,可以使得管理危险度下降。此外,对一般公众的数据数值比较科学性,是因为其中包含了各个年龄段的人群,包括老弱病残。

● 前沿研究

● **小剂量刺激作用:**小剂量→小剂量→小剂量→大剂量,抗辐射能力强。相对于是激活免疫系统,提高抗辐射能力。

● **要防止“旁效应”:**比如说 alpha 粒子打细胞核,打中的突变,但是没打中的地方也会突变,甚至比被打中突变的部分还要危险。

➤ 人类生活环境中的放射性 (Page 116-122, 第九周, PPT~6)

➤ 人类受到的照射 (P117):

- 人类主要受到来自两方面的和辐射源的照射: **天然放射性源、人工放射性源**
- **天然放射性源:** 客观存在, 它对人体的照射称为天然本底照射。包含三类: **宇宙射线、宇生放射性核素、原生放射性核素。**(+三大衰变链)
- **人工放射性源:** 自从人类发现放射性和能够制造放射性物质以来, 又产生了一些新的放射性物质, 它们直接或间接地造成了对于人体的照射, 这一类核辐射照射, 称作人工放射源照射。(活化产物、核裂变产物, 主要来源于和军事活动、民用核反应堆)
- **天然放射性源(天然本底)的种类:**
- **【1】宇宙射线:** 来自地球外层空间的高能粒子流, 有初级宇宙射线和次级宇宙射线之分。注意, 地球上各处的宇宙射线强度是不一样的, 与海拔高度、纬度等多种因素有关。
 - **海拔高度因素:** 海拔 60km 以上空间几乎没有大气, 只有初级宇宙射线; 海拔 20-60km 处大气密度逐渐增大, 初级宇宙射线与大气的相互作用也随之增强, 次级宇宙射线增多, 这时总宇宙射线达到极大值; 最后, 20km 以下地区大气对次级宇宙射线的吸收变得更强大, 导致到海平面的宇宙射线基本都是次级宇宙射线。
 - **纬度因素:** 赤道附近强度最低, 随纬度升高而增大。这种现象的产生主要是地磁场对宇宙射线的作用。
 - **磁场分布:** (略)
- **初级宇宙射线:** 指从宇宙空间入射到地球大气层的高能粒子。
- **次级宇宙射线:** 指初级宇宙射线与大气作用的产物, 初级宇宙射线会与大气层中各种元素的原子核发生碰撞, 产生很多新的粒子和新的放射性核素。其中, 新产生的核素称为“宇生放射性核素”。(人类受到的宇宙射线主要为次级宇宙射线)
- **【2】宇生放射性核素:**
- (1) **^{14}C :** 可用于人类文明史的考察。



大气中 ^{14}C 浓度稳定, 1万年间有10%的波动

自然界中所有物质, 有机, 无机, 有生命的动植物体内 ^{14}C 含量一定。

停止外界的物质交换后, ^{14}C 按自身的半衰期衰减, $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 发生变化。

通过测定 $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$, 并与参考样品比较, 即可确定样品

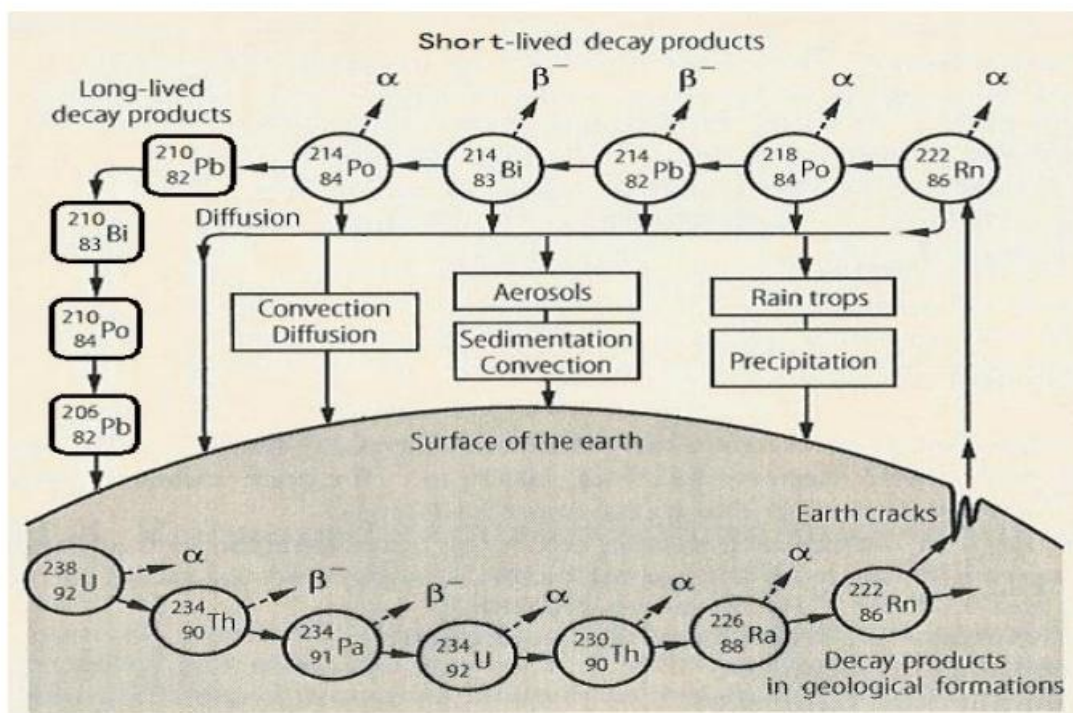
的历史年龄。
$$\frac{\left(\frac{^{14}\text{C}}{^{12}\text{C}}\right)}{\left(\frac{^{14}\text{C}}{^{12}\text{C}}\right)_s} = \exp\left(-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t\right)$$

- (2) **^3H :** N、O、Ar 与高能质子和中子反应生成, 既是宇生核素、又可人工生成。T_{1/2} 位 12.3 年, 和 ^{14}C 同为 β 衰变。参与自然界水循环, 生态系统的循环和迁移。
- **【3】原生放射性核素 (Page119, 也可见 ppt):**
- 定义: 从地球诞生至今一直还存在于地壳中的放射性核素称为原生放射性核素。半衰期至少在 10^8 年以上的放射性核素才有可能存活并被检测到。

- 原生放射性核素主要是以 ^{238}U （铀系）、 ^{232}Th （钍系）、 ^{235}U （锕系）为起始的 3 个天然放射系。自带大部分产物具有 alpha 放射性，少部分具有 beta 放射性。其中 ^{238}U 和 ^{232}Th 占原生放射性核素的 80% 以上。
- **天然放射衰变系的共同特点：**①它们都具有很长的寿命： $10^8\sim 10^{10}$ 年；②系列最后都是稳定的 Pb（铅）的同位素；③每个系列都有一个氡的同位素，是气体。
- 几个常见核素的特征（铀、钍、镭）：见 ppt
- **^{235}U 占天然铀的 0.7%。 ^{238}U 占 99.3%。**
- **外照射：**体外辐射源对人体的照射。比如：宇宙射线照射、原生放射性核素存在与地面和建筑材料中的。
- **内照射：**进入体内的放射性核素的照射。比如： ^{14}C 通过食物、饮水等方式进入人体、氡气和 ^{40}K 进入人体构成内照射。
- 铀系衰变链：



铀系衰变链： $^{238}\text{U} \Rightarrow ^{206}\text{Pb}(\text{stable})$



- **不成系列的天然放射性元素：** ^{40}K , ^{222}Rn , ^{220}Rn
- **^{40}K ：**半衰期与地球年龄相近，放出 beta-射线。
- **^{222}Rn , ^{220}Rn ：**氡气属于致癌物质之一，是除了吸烟之外的第二个肺癌起因。
- **天然本底辐射量：**岩石和土壤
- 地球上不同天然本底所造成的辐射强度很不一样，不同地区不同人群不同个体受到的放射性照射差别也很大。（印度、里约热内卢、广东阳江）
- 注意：火成岩放射性活度高于沉积岩；而火成岩中，酸性岩的放射性活度最高。土壤中的核素含量主要取决于风化岩石的种类、以及土壤形成过程。
- 人工放射源照射：
- **主要分为四个部分：**1. 医疗照射；2. 核试验落下灰；3. 核动力生产中的废物；4. 放射性同位素技术应用。
 - **医疗照射主要分：**X 光检查、核医学诊断、放射治疗。

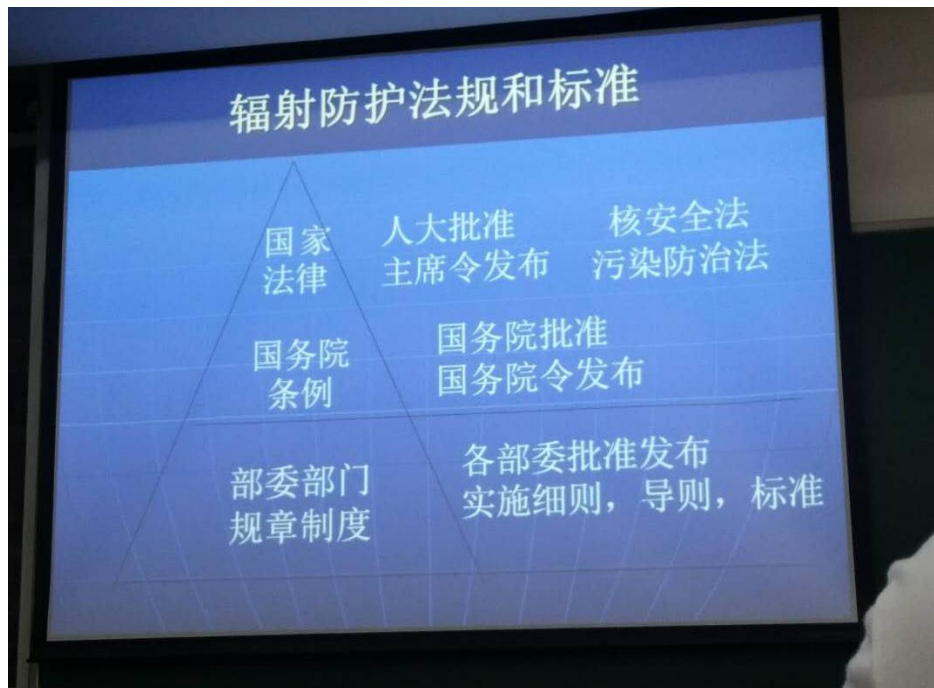
- **核试验落下灰：**主要是大气中核爆炸所产生的放射性物质最初进入大气层上部，然后向大气层下部转移，最终落向地面。可产生外照射或者人体通过空气、食入等方式产生内照射。
- **人体也是一个放射源。**可以通过食物、饮水、呼吸等途径摄入，核素种类包含 40K, 14C, 87Rb 等。
- **氡的防治：**226Ra—（alpha 衰变）→222Rn；室内氡的来源是由于 226Ra、232Th 衰变而来的。
- **为什么氡于 6-8 时含量最高，16-17 时含量最低？**
 - 首先，氡的来源是不变的，是来源于地表土壤扩散。每当早上太阳升起时，地表温度升高，分子运动扩散开始加剧，从而向高空进行稀释，浓度变低。但是太阳下山之后，分子活动变缓，氡开始累计增加。（所以一般说空气最脏的时候就是凌晨，因为扩散条件差）
- 受到氡的高浓度暴露会导致肺癌，因为氡和短寿命子体衰变会产生 alpha 粒子，对器官细胞造成辐射照射。
- 天然辐射的增加，是由于人类生产实践活动导致的。比如说：矿山的开采、冶炼与加工；化石燃料的开采与使用；航空与宇航导致宇宙射线照射增多；建筑材料的生产和使用等等。
- 此外，还有一种被称为 NORM(Natural Occurring Radioactive Material)的问题，天然辐射与人工辐射生物效应相同；涉及公众广泛，有可能造成社会影响；持续照射，有可能在局部无处不在。
- 就我国的情况来看，近 30 年室内氡水平升高 80%，是由于建材成分和结构的改变。（根据《经济循环法》，诸如煤渣砌块等进行再循环后，氡的析出率增加）
- **其他细碎的知识**
 - 切尔诺贝利事故发生于 1986 年 4 月 6 日， 10^{18} Bq
 - 福岛第一核电站事故发生于 2011 年 3 月 11 日， 10^{17} Bq
 - **Bq 是什么？1Bq 意味着每秒发生 1 次核衰变。**
 - 核设施中包括关键核素：3H、14C、90Sr、137Cs、惰性气体等
 - 核素应用：医用放射性核素、核技术应用、示踪剂等等。
 - Pu 的全球沉降特征
 - 公众所受辐射照射比例
 - 公众接受的天然辐射照射

➤ 辐射防护体系及法规与标准 (Page 123-129; Page 195-196)

第十二周, PPT~7)

【正课部分】

- 国际放射防护委员会 (ICRP, 是一个民间学术组织); 拥有主委员会和分委员会。
- ICRP 的性质是什么? 地位与作用: 【ICRP 的出版物, 是制定法规的依据和参考, 但不代表法律性质。IAEA 和中国制定法律, 全部现行国标采用 ICRP 所采用的标准, 包括剂量的现值以及核管理体系的搭建等】
- UNSCEAR (联合国下属组织, 联合国原子辐射效应委员会), 在 1955 年根据联合国大会决议成立。专门的委员会成立, 定期的综述全世界与核行为、射线应用的最新认识成果, 也有其建议书 (类似于百科全书), 会向联合国提供报告。地位与作用: 委员会对辐射源和效应的评估, 使各国政府和国际组织估计辐射危害、制定辐射防护核安全标准。
- IAEA (国际原子能机构), **P195** 政府间的国际扩散组织, 拥有法律效应, 性质: 国际核能核技术领域的政府间科学技术合作组织, 同时监管地区核安全及核辐射监测, 总部在维也纳。地位: 制定法规、标准、及导则, 以及技术报告 (technical report) 及安全丛书 (BSS)。(IARC, WHO, P195)
- 这几个机构之间的关系?
- 科学基础 (UNSCEAR) 中国原子能出版社出版, 1994 年一本书, 论述了【科学基础】;
- 国际放射防护委员会 (ICRP) 提供建议书, 制定民间最高学术组织制定【基本原则】;
- 根据原则, 各个国家指定自己的【法律法规标准】。



- 人大颁布法律, 今天只有两个法律: 今年刚刚通过的“核安全法”, 还有一个多年前通过的“污染防治法”。但至今没有龙头大法“原子能法”。但“核安全法”不是“龙头大法”。
- 中华人民共和国核安全法, 2018 年 1 月 1 日起执行。涉及到了所有的核材料和和放射性废物的法律, 现在在中国只有 1 个公司授权可以。IAEA 建议所有核电站在建造核电站后以 5% 资金存入国库, 以确保资金处理核废物。也可以申请信息公开 (家中有核电

站……运行情况与剂量等等), 与公众参与等等的内容。

- 污染法确立了由国务院哪个部门来牵头执行? 其实在没有诞生之前是利益纠葛在一起, 但勉强强出来之后, 第一次确认了在中华人民共和国, **【环保部】**(生态环境保护部) 来实施统一监督管理地位。
- 与我们生活息息相关的是《放射性同位素与射线装置放射防护条例》。效力范围: 中华人民共和国境内从事生产、使用、销售放射性同位素的个人和群体。环保部门统一监管, 也涉及到环保部、卫生部、公安部。(比如说被投毒)。
 - 加速器是最典型的射线装置。放射性同位素使用最多的是生科等学院, 不是物理学院。
- 目前中国的基本标准为 GB18871-2002, 电离辐射防护与辐射源安全基本标准。这是由中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局(质检总局)发布。
- **辐射防护的目的:** 1、提供保护人类的适当的标准, 而不过分限制有益的引起照射的实践(人类活动令辐射剂量增加的 practise 都要尽量避免); 2、防止确定性效应(为什么可以它是可以防止的呢? 因为确定性效应有阈值, 如果低于就可以防止。)的发生; 3、减少随机性效应(什么是随机性效应?) 的发生率。**【会变一个形式来问】(书 P124)**
- **1+3=**是它的标准达到可接受水平。可接受水平是什么? 这个对个体来说, 是因人而异的。比如说去底下煤矿挖煤, 你可能不去, 因为家中比较富有, 不愿意冒这个危险; 去核电站工作也伴随着危险。模糊的解释是研究社会危险, 从事各行各业都有不同的危险, 如果把其危险控制到行业居中的水平, 就认为它是可接受的。
- 辐射防护的三大基本原则: **1、实践的正当化**(正当理由, 要做代价-利益分析, 最终决定是否采取这种行动); **2、防护的最优化**(剂量要尽可能的低, 拥有 ALARA, as low as reasonably achievable) 假如要降低 1mSv, 墙要加厚, 材料要升级; 对应的是代价, \$, 如果 as low as possible 就没法发展了。降低 1mSv 得到的是什么? 随机性效应发病率的降低, 比如说危险度的降低, 就是生命的代价。对于不同的国家代价是不一样的。**3、个人剂量限值**, 来保护每一个个体的安全, 对于“基本限值”中的“有效剂量限值”是不同的。一般用 20mSv 来确保每个人的安全, 超过这个现值是违法的。**(书 P124)**

A) 有效剂量限值		
受照群体	照射条件	剂量限值
放射工作人员	全身	20mSv(5年平均, 但其中任何一年<50 mSv)
	眼晶体	150 mSv
	其他单个器官或组织	500 mSv
	孕妇	2 mSv/余下妊娠期间内照射<1/20ALI
	有计划特殊照射	一次 100 mSv
一般公众	全身	1mSv (特殊情况下, 5年均值为 1 mSv)
	眼晶体	15 mSv
	皮肤	50 mSv

剂量限值为内外照射之和, 但不包括天然本底照射和医疗照射

- 这张表中底下的文字要注意:【一】所有数值均为内外照射之和,【二】其中不包括天然本底(只要生活就会受到辐射照射, 2.4mSv 是平均剂量)照射和医疗照射。假如说我是放射工作人员, 我去做 CT 或者治疗肿瘤, 那么这个不在里面有伦理学的问题: 医疗是为了救命。
- “有计划特殊照射”指的是应急核事故(日本福岛核电站, 自卫队就是 100mSv, 后来被更改了法律)下的情况, 这个时候涉及到国家财产以及不可想象的危害的时候, 必须去。生命是受法律保护的, 危险度大 100mSv, 但其实没什么事情。
- 对于一般公众, 即使在地里种田也会受到 2.4mSv, 核电站的放射性排放也会给我额外的剂量, 对于不相干的公众来说, 附加剂量不可超过 1mSv, 那么你烟囱的下风向地区的排放不能超过多少, 来回推空气导出浓度现值等等。
- 导出空气浓度(DAC), 同位素生产车间的浓度等等。
- 为什么会 alpha 和 beta 差一个数量级? Alpha 的电离本领很强, 如果摄入到了体内, 就会产生比较大的内照射剂量。
- 调查水平: 个人剂量计每 3 个月要收回一次, 剂量防护工作; 如果超过了调查水平(20mSv/年)所以就要调查上 3 个月的工作条件, 为什么收到了比以往超过很多的剂量。(因为他要写报告, 说原因, 进行一系列反馈, 就这样做日常的管理)
- 防止内照射, 其中 40K 和 14C 是防不住的。但可以尽量去减少室内氡的浓度, 防护氡的内照射。(书 P126)
- 防止外照射。Alpha 粒子用一张纸就可以挡住, 所以主要防护对象是 beta 射线、X 射线、gamma 射线以及中子等。由“距离”“屏蔽”“时间”三个维度考虑(书 P126-127)
- Beta 射线屏蔽(P127)
- 中子屏蔽(P128), 常用的中子屏蔽材料有: 水、混凝土、石蜡、土壤等。

➤ 核科学技术在医学上的应用 (170-206, 第十四周, PPT~8)

- 辐射照射分为职业照射（剂量限值）、医疗照射（不适用于剂量限值）；概念清楚，但不是一个体系里面的东西。公众照射，会受到不同形式的辐射照射。基本上公众照射的一年是 2.4mSv，天然来说 55%是 Radon(氡)导致的内照射。氡为什么会有这么大的计量贡献？（1987 年）
- **Nuclear medicine（核医学）**：放疗科，核医学科，放射科...
- 发展到 2006 年，变成了彩图。这个选取的是美国，因为和经济水平、生活状态、天然本底水平不同等因素影响。现在，37%为氡，氡的计量不变，但因为社会结构和社会水平变了，所以不同类别所占的比例变了。这之中，核医学（Nuclear Medicine，核素相关）由 4%扩展到了 12%。
- **Computed tomography（计算机断层扫描，CT）**：11%扩展到了 24%，医学的辐射照射，对于社会的一般公众，比例大大提高。处于医学目的导致辐射照射地计量极大的增高了；这个趋势在未来还会直线地向上增长。
- 核素可以动态地、功能性地准确的告诉你身体内部器官的问题。

【1】放射诊断学（P170-172）

- 放射诊断学是一门利用 X 射线诊断疾病的学科。从 1895 年德国科学县伦琴发现 X 射线至今仍在利用。剂量是一个医学投药量的词汇，却用在了描述射线的大小上，都是和医学是相关的。（可透视、可感光）
- **X 射线**：X 射线本质和光一样是电磁波，只不过它的波长较短，能量较大而已。此外，X 射线也有波动和微粒双重性。（P173）
- 1. **X 射线透视**：利用 X 射线的穿透性、荧光作用。
- 2. **X 射线摄影**：利用 X 射线穿透性、感光性。
- X 射线造影技术：（吃钡餐的意义：使在 X 光下的各个结构显示的更加清楚，增加可透光的对比度，可以理解为一个造影剂）；也可以用在脑血管里，比如脑血管的变形与否。都是出于诊断的目的。

【2】X 射线计算机断层（XCT）（P172-180）

- 新型数字化 X 射线技术，这是伴随着计算机的发展。因此，才会发展计算机断层的 XCT 技术等。1972 年英国 EMI 公司研制第一台 XCT 机。CT（Computed tomography）是计算机断层的缩写，是一个三维立体的技术。一片一个断层。
- XCT 的关键参数。怎么构建的？伟大的重离子研究所，medical physics。描述一个光子，光子的本质，带电吗？物理含义！（不要忘了这课是从物理学院开出来的 Orz）
$$E=h\nu=hc/\lambda$$
- **X 射线与人体的相互作用**：X 射线光子和人体组织的原子相互作用，导致通过人体后的 X 射线的强度衰减。衰减的原因包括：不变散射、康普顿散射、光电吸收。（P174）
- X 射线的衰减，衰减 I_0 （穿越前的剂量率）， W 是手的厚度， μ 是线性衰减系数。（定义见 P174）
- **XCT 系统**，主要由采样系统、图像处理系统两大部分组成。采样系统分为 X 射线管、探测器。图像处理系统：核心是计算机。（P178）

【3】放射治疗学（P180--190）

- **放射治疗学**是一门利用核射线（X、gamma、beta-和中子流等）对疾病进行辐射治疗的学科。因为射线达到一定剂量时，射线照射对病变细胞有抑制和杀伤作用（直接效应、间接效应）。（P180）
- 肿瘤放射治疗学的历史。60Co 为主要应用于肿瘤放射治疗学。因为它的 gamma 射

线的能量很强。他无时无刻都在发出射线，但是他的半衰期为 5 年，相对来说不是很理想。很快，人们就发明了医用加速器。加速器都是人工的把粒子提高能量，让他飞快的跑，产生高能粒子。肿瘤的三大治疗手段：手术、化疗、放疗（占比 70%）。

➤ **治疗放疗的放射源**

➤ 除了数值与广泛应用的 gamma 之外，alpha、beta 也都有用。不光是体外照射，也有很少一部分是在体内照射的（敷贴法-主要是 beta、腔内照射法-主要是 alpha-前列腺炎）。

➤ **放射治疗设备（P181）**

➤ X 射线治疗机：种类繁多，由接触性治疗的、表层治疗的、中层治疗的等等。因为射线的能量不同。

➤ Co60 的照射机，gamma 射线能量大所以穿透能力强，可以进行深度照射。

➤ 医用加速器，比 Co60 在管理上要安全得多得多，Co60 控制不好就有很多事故发生。医用靠 On/Off 控制，可以定向、控制能量。（P183）

➤ **立体定向放射治疗（P184）**

➤ 将高能射线有定向靶地进行照射。一般被称之为 gamma 刀，X 射线能量要比 gamma 小一些。Gamma 刀是适用于脑动静脉畸形、脑肿瘤等等。

➤ **Gamma 刀是什么？**因为他非常有不可取代的优越性、之所以成为“刀”，是因为它可以像手术刀一样，“立体定向”地切除肿瘤就没了。

➤ 就是把无数个上百个小放射源，利用头盔对准不同位置，20 分钟定点定向的精确到一个物理点上。利用脑部开刀的物理方法治疗很危险，所以最适合用 gamma 刀治疗。

➤ 多个放射源定向静止地照射到一点，使该点以极大剂量把肿瘤摧毁，如同手术般的医疗效果。但是对于适应症的要求非常苛刻。

➤ **Gamma 刀的特点：**1.无手术治疗，病人无痛苦（核恐怖来源的起因之一，大剂量照射却没有很大感觉）；2.手术精确，误差小；3.简便省时，不需要超过 3 小时；4.治疗过程自动化和程序化。（P185）

➤ **硼中子治疗（P189）：**吸收一个中子，产生 alpha 粒子。这是最理想的，alpha 粒子是一个带两个正电子的氦核，是一个重电子离子，电离能力极强，吃下去会对人体其他组织破坏极强。Alpha 粒子的防护，alpha 穿透能力很弱，所以 alpha 只能在非常微小的距离，产生很大的杀伤力。

➤ **致癌与治癌：**射线可以杀死肿瘤，这是肿瘤治疗的原理。但射线也可以导致肿瘤，他仍然会杀伤旁边的正常细胞。我们需要在肿瘤细胞得到最大剂量的同时，正常细胞得到的剂量越小越好。

【4】核医学概论(Nuclear Medicine) (P190--194, 196-205)

- 核医学是跟【核素】有关的。是一门利用开放性放射性核素，诊断和治疗疾病的学科。
- 核医学的临床应用主要分为：诊断、治疗两方面。核科学诊断又分为体内检查法、体外检查法。主要应用为诊断。



- 核医学的核素要进入体内，在体内发生衰变，在体外可以检测到。这是基本的原理。**核医学有四个特点：**1.非常敏感，检测容易，可以进行物理测量；2.无创伤性；3.反映体内的生化和生理过程；4.反应组织或脏器的形态与功能 (P191)
- **核医学的必备条件：**有大量放射性核素的操作。核医学的应用也有很多一起，比如gamma照相机；SPECT, PET, 扫描机等。也有用的核科学仪器。**核医学，与肿瘤射线和X射线诊断是不同的。X射线、肿瘤的放射（射线）源都在体外，无论是为了治疗还是诊断。而核科学要吃进去，注射进去，而放射源从身体内部向外面发射的。**
- 工作场所严格进行检查，要求严格。
- **XCT和ECT的区别：**X射线计算机断层（XCT）是X射线透视型计算机断层；放射性核素计算机断层（ECT）是发射型计算机断层，是从身体内部释放。核医学已有和他配套的一系列机器。(P196)
- **单光子发射计算机断层（SPECT）的三个优点：**1.三维立体图像信息（很多机器只能得到二维的）2.提供了全定量的分析手段；3.改变了脏器深度方面的空间分辨率，更好分辨脏器深部 (Page 198)
- **SPECT和XCT比较：**

2. SPECT与XCT比较

- (1) **XCT是透射式成像设备**，射线源在人体外部；**SPECT是发射式成像设备**，射线源在人体内部。
- (2) XCT的空间分辨率较高，可达到小于0.5mm，所以图像清晰；SPECT的图像分辨率只有4mm左右，图像清晰度不如XCT。
- (3) XCT的射线源是X射线；SPECT的射线源是γ射线。

(4) XCT测得的图像反映的是脏器形态；而SPECT测得的图像可反映脏器的结构和功能。

(5) 在图像重建方面，SPECT和XCT一般都采用滤波反投影的重建方法。

(6) SPECT的价格一般比XCT便宜，约为XCT的1/3，为核磁共振（MRI）的1/5。

- 正电子发射计算机断层（PET） *(Page 199-200)*
- 放射性核素显像：体外检测试验。不仅可以成像，还可以给出生理曲线（功能诊察，比如说肾功能检测），来判断功能改变与否。 *(Page 201-202)*
- 放射性核素治疗（治疗核医学）：是将开放型放射性核素，或其标记物引入体内，利用核素发出的 beta-离子电离辐射的生物效应，抑制或破坏病变组织，达到治疗的目的。b 比如用 ^{131}I 治疗甲状腺疾病。 *(Page 204)*

➤ 核科学技术的广泛应用 (Page142-148, 156-166, 207- 第十五周, PPT~9)

核科学技术分为什么？一个是能量的应用：利用的是它的裂变能。应用聚变能似乎还需要50年，面临的挑战还比较多，真正到达试验堆的路程还很长。

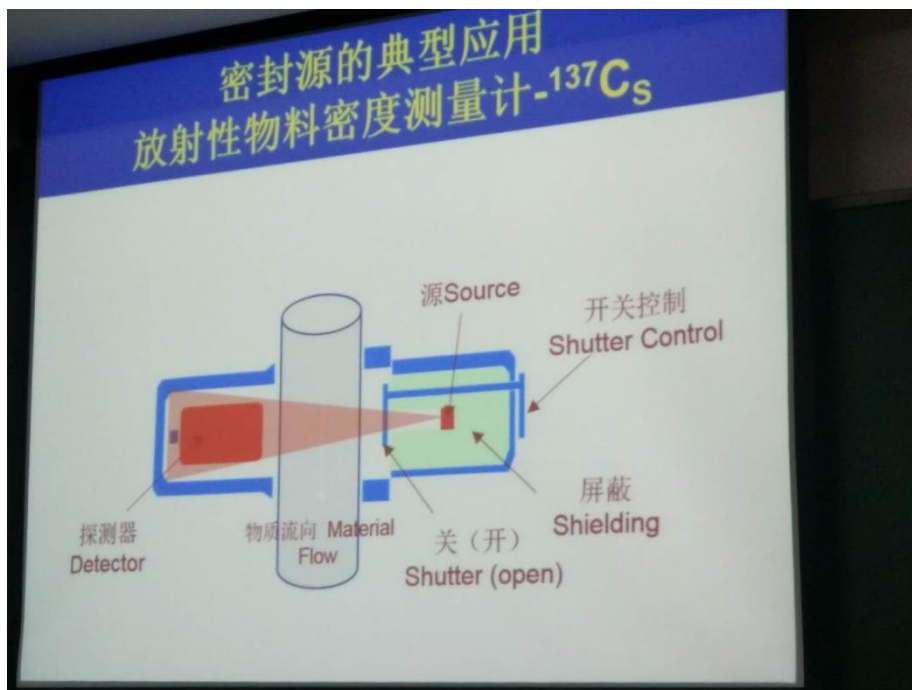
还有一个就是核素，根据他的衰变周期和衰变特性，进行利用。

今天主要讲核技术在农业、环境、科研等的应用。

放射源长什么样？密封源有一个不锈钢的外壳，使用过程中不会污染、不会泄露、不会挥发、不会溢出来这些可能性都没有。（南京丢源事件）

密封源的应用：1. **消除静电**（因为摩擦起电，基本原理是利用放射性同位素产生的射线产生电离效应，从而电离空气中的分子，使其电性消失），应用领域比如说纺织、造纸等等。

2. **测量仪器**。厚度计、物位计、密度计。利用放射性核素辐射出的粒子或射线与物质发生相互作用时的产生的种种效应测量。（基本结构：有一侧是放射源，另外一侧是测量仪；这个仪器要求射线有比较强的穿透作用，所以大多用 gamma 射线）优点：操作简单、快速、不接触与破坏被测物质。



根据物质密度放一个射线源。探测器根据获得射线注入的密度和量，反推物质的性质。

3. **密度测量仪**。通过射线从发射到探测器接受量发生的改变，来检测其质量。

4. **物位测量仪**。通过放射源的测量，测量里面不可知物质的水平。这是一个 ^{60}Co 的辐射，用 ^{60}Co 的射线会相对比较强。

5. **gamma 探伤机（无损探伤）**。与安全相关的焊接问题十分问题，有没有焊孔或裂隙？比如利用 ^{192}Ir （这也是南京丢的那个源）。

6. **辐射加工**。利用电离辐射与物质的相互作用，使物质的品质或性能得以改善、或合成新产品的技术。（原理：物理效应、化学效应、生物效应）就是一个大量的、高密度的能量转移的过程，会引起高分子结构的改变，比如说材料的辐射交联与降解。最大的希望，是想让他有很多抗性。

【食品领域】(P159-166)

7. **食品消毒保鲜。**直接或间接消灭生物钟的微生物或病菌。这个和转基因技术完全不同，这个是从生物学的、基因的水平，来增加苹果的甜度等等，达到想要的效果。辐射照射对苹果来说，是为了保鲜，消灭食物中的微生物和病菌（类似于低温冷藏），延长它的保存期的技术。

- 三个特点：①杀菌种类广泛；②易于规模化生产；③不改变外观和口感、不含防腐剂。

- 食品卫生领域应用的安全性问题：

- IAEA 等 1980 年公报，平均吸收剂量在 10kGy 下的辐照食品，无毒性，也不会引起任何问题。

- 前景的主要障碍，来自于消费者心理。(P160)

- 一般应用：抑制发芽（土豆）、消毒（谷物）、推迟成熟（香蕉-辐照可以抑制产品中的一些生物化学反应，比如酶的活性）、延长贮藏寿命（草莓、鲜肉-消灭细菌和霉菌等致腐败微生物的存在），(P162-163)

8. **消毒方法。**与传统消毒方法比较，传统方法耗能高、消毒不彻底。辐射消毒灭菌彻底，而且操作简便安全。(P142-148)，以 60Co，gamma 射线为主

- 放射源 60Co 和 137Cs

- 这类放射源很多。如果肿瘤比较深，则需要用 60Co；如果比较表浅，那么 137Cs 足矣。两个 Egamma 差距很大。（但 137Cs 半衰期长，难以处理）

9. **加速器。**10MeV 以下的电子束。

10. **X 射线探伤机。**（现场应用设备）

【农业领域】(P156-159)

11. **辐射育种。**诱使其遗传物质发生改变，然后通过选择（有同样几率变得不好）和培养是有益的变异传下去，达到改良和创新品种的目的。(P156)

12. **防治和根除害虫。**有限性：土壤污染、害虫耐药原理。但是有辐射不育法，造成遗传不平衡后，可以根除。(P157)

【环境领域】

13. **烟道气体脱硫脱硝的净化技术。**点加速器产生电子束，照射烟道废气，会使得 SO₂ 与 NO_x 离子化、分子分解、形成自由基。并且，生成硫酸铵、硝酸铵，作为农业化肥使用。

【核示宗 (tracer)，一般用 222Rn】(P207)

14. 一种带有特殊标记的物质，加入到研究对象中后，可根据其运动和变化，来洞悉原来不易或不能辨认的被研究对象的运动和变化规律。（扩散过程、扩散模式）

- **放射性示宗的特点：**①灵敏度高（和化学物质比灵敏，比如分辨 239Pu 和 240Pu）；②测量简便、易分辨（压成片放在探测器上）；③提供原子、分子水平的研究手段；④合乎生理条件；⑤能定量定位。

- TRACER 的性质：①化学性质完全相同；②核素的放射特性不改变物质的物理和化学性质。(P207)

- TRACER 怎么选？考虑：半衰期、辐射类型核能量、放射性比活度、放射性核素的纯度、放射性核素的毒性。（这个部分老师只是简单的说一说）(P208)

【化学中的应用】

- **化学中的应用：**可以考察化学反应的机理研究、化学键的形成方式等等（简单说说）

- 放射分析化学方法：拥有同位素稀释法（P&G 公司洗衣粉的化学残留量）、放射分析法等等

【生物学中的应用】

- **生物学中的应用：**植物的营养机理研究、生物体内的代谢研究等等。比如说研究光合作

用，标记 ^{14}C 。再比如研究植物对磷肥的吸收过程，利用 ^{32}P 标记，测量肥料的分布情况。(P212)

- 核分析与核检测。利用中子、光子和带电粒子与物质或原子或原子核相互作用，采用核物理实验技术，探测和研究物质的成分和结构的方法。(比如说，耶稣的裹尸布)
- 核分析技术的优点和特点：和利用核素做示踪的差不多。注意的是，与化学检测手段相比，并不破坏样品结构。并且，可以同时测多种结构。

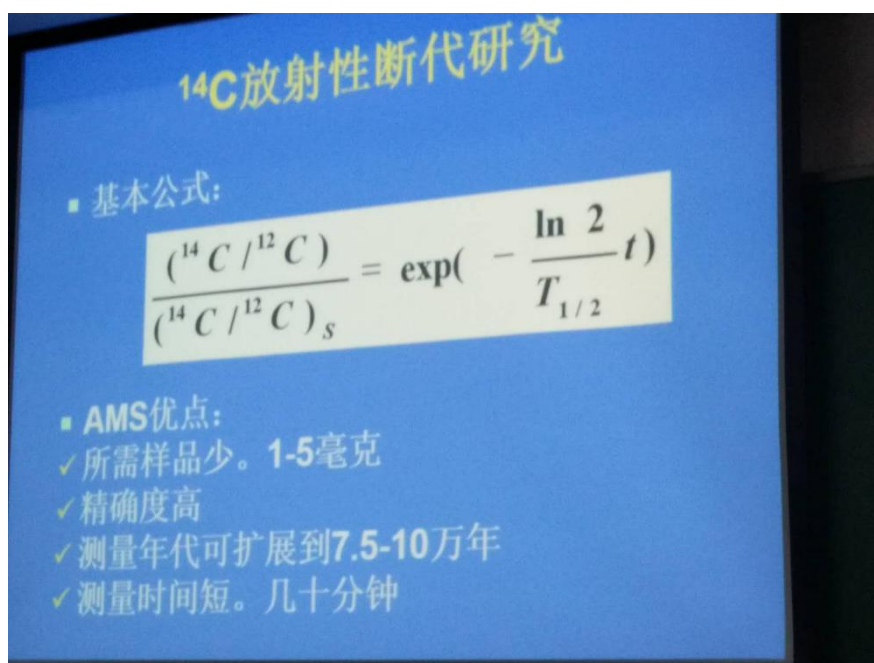
【加速器】(P32-34)

- 今天广为应用的加速器：AMS(加速器质谱分析)。比如 gamma 和 alpha 在谱仪上面的成像是不一样的。但是 AMS 是质量谱。(比如分辨 ^{239}Pu 和 ^{240}Pu)
- 原理：根据不同质量和电荷态的离子在电磁场中的不同偏转路径，来鉴别和测量离子的方法。(P32)

【 ^{14}C 断代研究】

- 为什么 ^{14}C 可以断年？可以用于考古学的原理是什么？
- ^{14}C 是有宇宙射线中的中子与大气中的 N 发生核反应所生成的，它是 beta 放射性核素，半衰期为 5730 年。利用 ^{14}C 作为考古学研究是因为其拥有 3 条重要前提：1. 大气中 ^{14}C 的生产率不变；2. 自然界中所有活着的动植物体内 ^{14}C 的比例是一定的；3. 生物样品死亡后， ^{14}C 与外界交换停止。在这些前提下， ^{14}C 按照自身物理半衰期衰减，其中 $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 的比例发生变化，根据公式，我们可以通过测算 ^{14}C 和 ^{12}C 的多少，计算出衰变了多少年，从而达到了断代的效果。

~~~~~答题思路~~~~~首先说它是哪儿来的，基本信息，种类，半衰期；前提 3 条。主要前提第 2 条： $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  比例是一样的，不是质量是一样的，如果写错了就错了……呵呵~



- 看上面那个比例变化的程度，就知道这个罐子是多少年前烧制的。
- 考试问你：你知道的天然放射性核素有什么（地球诞生时就存在的）？不要写“铀”！

#### 【 $^{235}\text{U}$ 、 $^{238}\text{U}$ 】

- 哪个核素既是天然的、也可以人工产生，与人类活动相关的？【 $^{14}\text{C}$ 】

核分析技术的特点和优点 P86



## 附录

- 2,3周 第一章 原子核与放射性基础知识
- 4,5周 核能利用：核武器与核电
- 6周 专题讲座-福岛核事故
- 7周 核辐射生物效应
- 8周 核与辐射的安全防护
- 9周 电离辐射与人类生活及环境
- 10周 课堂讨论
- 11周 核技术在医学上的应用
- 12周 核技术在现代社会中的广泛应用
- 13周 参观加速器(13:00重离子所楼前集合)
- 14周 校外专家专题讲座
- 15周 备用
- 16周 随堂期末考试（6月13日）

### 期末考试的事情：

开卷考试。下节课内容量会很大，讲核科学技术在工业、农业中的应用和原理。

考试怎么考？可以拿来任何东西，ppt、教科书、笔记，所有任何相关材料。

会有选择题（单选）、判断题（对错）、填空（很准确的，alpha 粒子是什么，个人剂量限制，辐射防护的三大原则，哪一种症状是随机效应，确定性效应）、解释（天然辐射本底，会受到哪些辐射构成？对小问题的理解，这个电离辐射既可以致癌，也可以治癌，你怎么理解？）；内容每年会彻底换。

考试范围：课堂讲授的范围。可以看到，课件就是提纲挈领。大量的文字在教科书上。解释需要教科书的语言和更准确与精炼？如果教科书上有一个数，ppt 上有一个数，那么必须以最新的内容答。（中国核电情况？）但基本的原理，物理性的问题，教科书是没有错的。

因为是开卷，所以会有一定题量。怎么复习？简单地说，不是要难为大家，涉及的计算可以解决，你要知道这个东西在材料里面去哪里找，就可以了。除了逻辑和概念的理解，还要在对材料和教科书中的内容有一定熟悉。（久经考验的考试经验）复习的要细致一点。200 多人正态分布是几乎做不到的。不要想当然的去判断。

## ➤ 物理学的两朵乌云

第一朵乌云，主要是指迈克尔逊-莫雷实验结果和以太漂移说相矛盾；他所说的第二朵乌云，主要是指热学中的能量均分定理在气体比热以及热辐射能谱的理论解释中得出与实验不等的结果

### 第一朵乌云

#### 迈克尔逊-莫雷实验与“以太”说破灭

人们知道，水波的传播要有水做媒介，声波的传播要有空气做媒介，它们离开了介质都不能传播。太阳光穿过真空传到地球上，几十亿光年以外的星系发出的光，也穿过宇宙空间传到地球上。光波为什么能在真空中传播？它的传播介质是什么？物理学家给光找了个传播介质——“以太”。最早提出“以太”的是古希腊哲学家亚里士多德。亚里士多德认为下界为火、水、土、气四元素组成；上界加第五元素，“以太”。牛顿在发现了万有引力之后，碰上了难题：在宇宙真空中，引力由什么介质传播呢？为了求得完整的解决，牛顿复活了亚里士多德的“以太”说，认为“以太”是宇宙真空中引力的传播介质。后来，物理学家又发展了“以太”说，认为“以太”也是光波的传播介质。光和引力一样，是由“以太”传播的。他们还假定整个宇宙空间都充满了“以太”，“以太”是一种由非常小的弹性球组成的稀薄的、感觉不到的媒介。19世纪时，麦克斯韦电磁理论也把传播光和电磁波的介质说成是一种没有重量，可以绝对渗透的“以太”。“以太”既具有电磁的性质，又是电磁作用的传递者，又具有机械力学的性质，它是绝对静止的参考系，一切运动都相对于它进行。这样，电磁理论因牛顿力学取得协调一致。“以太”是光、电、磁的共同载体的概念为人们所普遍接受，形成了一门“以太学”。但是，肯定了“以太”的存在，新的问题又产生了：地球以每秒30公里的速度绕太阳运动，就必须会遇到每秒30公里的“以太风”迎面吹来，同时，它也必须对光的传播产生影响。这个问题的产生，引起人们去探讨“以太风”存在与否。为了观测“以太风”是否存在，1887年，迈克尔逊（1852—1931）与美国化学家、物理学家莫雷（1838—1923）合作，在克利夫兰进行了一个著名的实验：“迈克尔逊-莫雷实验”，即“以太漂移”实验。实验结果证明，不论地球运动的方向同光的射向一致或相反，测出的光速都相同，在地球同设想的“以太”之间没有相对运动。因而，根本找不到“以太”或“绝对静止的空间”。由于这个实验在理论上简单易懂，方法上精确可靠，所以，实验结果否定“以太”之存在是毋庸置疑的。迈克尔逊-莫雷实验使科学家处于左右为难的境地。他们或者须放弃曾经说明电磁及光的许多现象的以太理论。如果他们不敢放弃以太，那么，他们必须放弃比“以太学”更古老的哥白尼的地动说。经典物理学在这个著名实验面前，真是一筹莫展。

### 第二朵乌云

#### 黑体辐射与“紫外灾难”

在同样的温度下，不同物体的发光亮度和颜色（波长）不同。颜色深的物体吸收辐射的本领比较强，比如煤炭对电磁波的吸收率可达到80%左右。所谓“黑体”是指能够全部吸收外来的辐射而毫无任何反射和透射，吸收率是100%的理想物体。真正的黑体并不存在，但是，一个表面开有一个小孔的空腔，则可以看作是一个近似的黑体。因为通过小孔进入空腔的辐射，在腔里经过多次反射和吸收以后，不会再从小孔透出。19世纪末，卢梅尔（1860—1925）等人的著名实验—黑体辐射实验，发现黑体辐射的能量不是连续的，它按波长的分布仅与黑体的温度有关。从经典物理学的角度来看，这个实验的结果是不可思议的。怎样解释黑体辐射实验的结果呢？当时，人们都从经典物理学出发寻找实验的规律。前提和出发点不正确，最后都导致了失败的结果。例如，德国物理学家维恩建立起黑体辐射能量按波长分布的公式，

但这个公式只在波长比较短、温度比较低的时候才和实验事实符合。英国物理学家瑞利和物理学家、天文学家金斯认为能量是一种连续变化的物理量，建立起在波长比较长、温度比较高的时候和实验事实比较符合的黑体辐射公式。但是，从瑞利——金斯公式推出，在短波区（紫外光区）随着波长的变短，辐射强度可以无止境地增加，这和实验数据相差十万八千里，是根本不可能的。所以这个失败被埃伦菲斯特称为“紫外灾难”。它的失败无可怀疑地表明经典物理学理论在黑体辐射问题上的失败，所以这也是整个经典物理学的“灾难”。