

## 目录

第一章 绪论 .....	6
第二章 核科学诞生及其基本工具 .....	7
一、19 世纪经典物理学的辉煌和局限 .....	7
1 牛顿对力学总结 .....	7
2 电磁学的统一 .....	7
3 热力学形成系统的理论框架（整合） .....	7
4 物质构造：原子分子论“科学”的建立 .....	7
经典物理学的问题与局限 .....	7
二、人类观测尺度的扩展和认识的发展 .....	7
三、新的重要发现与核科学的诞生 .....	7
1 伦琴发现 X 射线 德国（1901 年诺贝尔物理奖） .....	7
2 发现放射性 1896 .....	8
5 汤姆逊“原子模型” 1904 年 .....	8
6 卢瑟福散射实验结果和解释 发现原子核 .....	8
7 卢瑟福提出原子“行星”模型 1911 年 .....	8
8 现代原子模型的建立 1913 .....	9
9 原子核质子-中子模型 .....	9
四、两大理论支柱 .....	9
1 量子假设 → 量子论 → 量子力学 .....	9
1) 量子假设诞生 1900 普朗克 德国物理学家 .....	9
2) 量子论确立 .....	9
3) 量子力学的建立 .....	10
2 爱因斯坦质能关系 .....	10
五、物质基本构造和基本作用力 .....	10
1 人类寻找物质构造基本单元的历程 .....	10
2 物质构造的基本单元（基本“砖块”） .....	11
3 标准模型 .....	11
4 基本作用力与原子核的研究 .....	11
第三章 原子核与放射性物理基础 .....	12
一、原子核的组成、质量与能量（P9） .....	12
1 现代原子核的组成 .....	12
2 核素及表示符号 .....	12
1) 原子核大小 .....	12
2) 原子核的质量 .....	12
3) 核物质密度 .....	12
4) 质量亏损和原子核结合能 .....	12
二、放射性衰变类型和衰变规律（P127 有穿透能力比较） .....	13
1 放射性衰变（decay）及其表示 .....	13
2 放射衰变的类型 $\alpha$ 衰变、 $\beta$ 衰变、 $\gamma$ 衰变（P15） .....	13
1) $\alpha$ 衰变：发射 $\alpha$ 粒子（ $^4\text{He}$ ）的衰变——比较重的核素 .....	13
2) $\beta^-$ 衰变：发射 $\beta^-$ 射线（电子）和反中微子的衰变 质量数不变，电荷数加一 .....	13
3) $\beta^+$ 衰变：发射 $\beta^+$ 射线（正电子）和中微子的衰变 质量数不变，电荷数减一 .....	13
4) $\gamma$ 衰变：发射 $\gamma$ 粒子（光子）的衰变 .....	13
3 放射性衰减规律（P18） .....	13

1) 指数衰减统计规律 .....	13
2) 半衰期 .....	14
三、原子核反应 (P19-20) .....	14
1 核反应 .....	14
2 卢瑟福 第一个人工核反应 (1919) 产生质子 .....	14
3 世界上第一个制造的人工放射性核素                      30P .....	14
4 元素 (Z) 有多少, 周期表的眼神, 核素 (A,Z) 有多少 .....	14
四、核辐射与物质的相互作用 (P22) .....	14
1 核辐射与物质的主要作用 .....	14
2 带电粒子与物质的作用 .....	15
1) 电离作用 (P23-28) $\alpha$ 粒子与物质作用 .....	15
2) $\alpha$ 射线与 $\beta$ 射线电离效应比较 .....	15
3) 理解高能电子的电离效应 .....	15
3 $\gamma$ 射线对物质的电离作用 .....	15
1) 电子对效应 .....	15
2) 发生条件 .....	15
3) $\gamma$ 射线的衰减* .....	16
4 中子与物质的作用 .....	16
1) 与 H 原子核进行弹性碰撞打出质子 (载能) 质子引起物质电离 .....	16
2) 中子引起的核反应: 中子活化反应 $n + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^{14}\text{C} + p$ .....	16
五、核辐射量度 (P29-30) .....	16
1 放射性活度 (A) .....	16
2 吸收剂量 (D) .....	16
3 当量剂量 (H <sub>T</sub> ) .....	16
<b>第四章 核能应用: 核武器部分</b> .....	17
一、核裂变发现震惊世界 .....	17
1 中子的发现 .....	17
2 原子核裂变 .....	17
1) 费米——做了裂变实验 因寻找超铀核素, “在核分裂上成了盲人” .....	17
2) 伊伦·居里 1937 中子→铀→半衰期 3.5 小时放射性产物 (Z=57、钷) .....	17
3) 哈恩、斯特拉斯曼 德国 1944 年诺贝尔化学奖 纯化学方法取得 .....	17
3 原子核裂变 .....	17
二、原子弹的基本原理 .....	17
1 实现裂变链式反应条件 .....	17
2 核装料——临界质量 .....	18
3 实现核爆炸原理 .....	18
三、氢弹的基本原理 .....	19
1 聚变与聚变能 .....	19
2 氢弹原理 .....	19
四、核燃料生产 .....	19
1 分离铀同位素 .....	19
1) 电磁法 (P66) .....	19
2) 气体扩散法 ( P46) .....	19
3) 离心机法 ( P46) .....	19
2 分离钚同位素 .....	19
五、二战之后的世界和平与核武器 .....	19

1 二战后反核垄断的斗争 .....	20
1) 苏联奋起直追率先法破核垄断 .....	20
2) 英、法迎头赶上 .....	20
3) 中国 .....	20
2 氢弹研制的激烈竞争 .....	20
1) 氢弹的优点 .....	20
2) 美国氢弹突破 .....	20
3) 苏联不甘示弱 后来居上 .....	20
4) 英中法三国紧随美苏成为核大国 .....	20
5) 中子弹 .....	21
3 庞大的核武储备 .....	21
4 核不扩散条约 .....	21
1) 沉重负担、冷静思考 .....	21
2) 核军备竞赛与核威胁 .....	21
3) 《不扩散核武器条约》 (P81) .....	21
4) 《全面禁止核试验条约》 .....	21
5 核武器的未来 .....	21
<b>第五章 核能利用-核电部分</b> .....	22
军用建立的基础和推动 .....	22
一、核电反应堆：燃料、结构及堆型分类 (P42) .....	22
1 燃料 .....	22
2 反应堆分类 (P46) .....	22
3 核燃料元件、组件 (P45) .....	22
1) 压水反应堆 (P44) .....	22
2) 核燃料增殖的快堆电站 (P47) .....	23
二、我国核电发展现状 (P61) .....	23
1 发展背景 .....	23
2 发展势头 .....	24
三、世界核电发展现状 (P60) .....	24
四、聚变能利用前景 (P48) .....	24
1 聚变反应 .....	24
2 实现聚变能利用条件 .....	24
3 托卡马克装置进展 .....	24
4 国际热核聚变实验堆 ITER 计划 .....	24
五、思考题 .....	25
<b>第六章 电离辐射的生物效应</b> .....	25
一、生物效应的产生过程和机理 .....	25
1 物理过程与能量转移 ( $10^{-16}$ s 以下) .....	26
2 物理化学作用：自由基的生成 .....	26
3 分子组成及性质发生改变 (细胞膜、核膜的破坏) .....	26
1) 电离辐射产生的过程和机理 .....	26
2) DNA 损伤 (分子水平) .....	26
3) 细胞水平损伤 .....	26
二、电离辐射所致生物效应的分类 .....	26
1 依据效应发生的个体 .....	26
2 依据效应发生的时期 .....	26

3 依据效应-剂量关系分类 .....	26
三、确定性效应 .....	27
1 急性放射病 .....	27
2 对造血组织的影响 .....	27
3 生殖系统的影响 .....	27
4 皮肤的放射损伤 .....	27
5 眼组织的放射损伤 .....	27
四、随机性效应——辐射致癌 .....	27
1 癌症的概念与起源 .....	27
2 癌症的多阶段发生学说 (multi-stage) .....	27
3 人类辐射致癌的分析方法 .....	28
4 人类的放射性癌症 .....	28
1) 辐射致癌的潜伏期: 白血病最小潜伏期 2 年 中央值 8 年 最大潜伏期 40 年 .....	28
2) 关于遗传效应 .....	28
3) 辐射致癌危险系数与合计危害 12 种癌症, 低 LET (DDREF=2) 校正 .....	28
4) 线性无域的剂量—效应关系 .....	28
5 影响人类辐射致癌的因素 .....	28
<b>第七章 人类生活环境中的放射性</b> .....	28
一、天然放射性核素与本底辐射 .....	28
1 天然本底照射 .....	28
1) 宇宙射线: 连接地球与宇宙的无形纽带 .....	29
2) 宇生放射性核素 .....	29
3) 原生放射性核素 .....	29
二、NORM 问题 (人类生产实践活动导致的天然辐射增加) .....	30
1 NORM 问题特点 .....	30
2 NORM 领域我国特点与问题 .....	30
三、环境中的人工放射性核素 .....	30
1 裂变核素及中子活化产物 .....	30
2 应用 .....	31
3 环境中 Pu 的产生及来源 .....	31
4 公众所受辐射照射比例 .....	31
<b>第八章 核与辐射安全防护法规及事故</b> .....	31
一、核与辐射领域法规和标准 .....	31
1 两个法律 .....	31
1) 《中华人民共和国核安全法》《Law of the People's Republic of China on Nuclear Safety》 ...	31
2) 《中华人民共和国放射性污染防治法》(简称放污法) .....	31
2 我国核与辐射安全领域的行政法规 .....	31
3 我国加入的本领域主要国际公约 .....	31
二、电离辐射防护基本内容国家标准 (GB18871-2002) P124 .....	32
三、密封源与外照射防护 .....	32
1 密封源 .....	32
2 外照射防护三原则 ( P126) .....	32
四、开放源与内照射防护 .....	32
1 开放源或非密封源 .....	32
2 放射性物质进入体内的途径 ( P126) .....	33
3 内照射防护 .....	33

1) 防护措施和安全操作 .....	33
2) 放射性工作场所控制区的标志 (P129) .....	33
五、核事故 .....	33
1 国际核事故分级 (IAEA 制定的分级) .....	33
2 历史上几次重大核事故 .....	33
1) 切尔诺贝利核电站 4 号堆事故 (1986 年 4 月 26 日) .....	33
2) 重大放射事故: 上海辐照室事故 .....	34
3) 2011 日本福岛核事故-7 级 .....	34
4) 几次核事故 .....	34
第九章 核科学技术的医学应用 .....	35
一、放射诊断应用 .....	35
1 X 射线透视与摄影技术 .....	35
1) X 射线透视 (胸透) P170 .....	35
2) X 射线摄影 .....	35
3) X 射线造影技术 .....	35
2 X 射线计算机断层摄影技术 (XCT) P173 .....	35
1) X 射线与人体相互作用 .....	35
二、放射治疗应用 .....	36
1 肿瘤放疗的发展历史——肿瘤治疗的三大手段之一 P180 .....	36
2 放射治疗的原理及射线源 P180 .....	36
3 放射治疗设备 .....	36
1) X 射线治疗机: Energy6 Mev (较大能量) Dose Rate 2 Gy/min .....	36
2) $^{60}\text{Co}$ 治疗机: Energy 1.17 Mev/1.33 MeV .....	36
3) 加速器——电子直线加速器 .....	36
4) 立体定向治疗 .....	36
三、核医学的应用 .....	37
1 核医学的分类 .....	37
2 核医学特点 .....	37
3 核医学必备条件 .....	37
1) 放射性药物 .....	37
2) 放射性试剂 .....	37
3) 核医学仪器 .....	37
4) 工作场所——开放性放射性核素工作场所 .....	37
4 核医学影像设备 .....	37
1) 医学影像设备分类 .....	38
2) 放射性核素显像的基本条件 .....	38
3) 放射性核素显像方式 .....	38
5 放射性非显像检查法 .....	38
三、核医学应用 .....	38
1 核科学诊断应用领域 .....	38
2 放射性核素治疗 (治疗核医学) .....	38
第十章 核技术在当今社会的广泛应用 .....	39
一、辐射射线的应用 .....	39
1 辐射源与辐照装置 .....	39
1) 放射性核素源 .....	39
2) 辐照装置 .....	39

3) 典型应用 .....	39
2 辐射测量技术应用 .....	39
1) 放射性仪表 .....	39
2) 密封源的典型应用 .....	40
3 辐射照射技术应用 .....	40
1) 工业领域 .....	40
2) 食品卫生领域 .....	40
3) 医疗卫生领域 .....	40
4) 农业领域 .....	40
5) 环境保护领域 .....	41
6) 海关安检领域 .....	41
二、同位素示踪技术应用 .....	41
1 放射性示踪技术的特点 .....	41
2 放射性示踪剂的选择——根据实验目的和要求 .....	41
3 放射性示踪技术在化学中的应用 .....	41
4 放射性示踪技术在生物学中的应用 .....	41
5 放射性示踪技术在光合作用研究中的应用 .....	41
6 放射性示踪技术在生物化学中的应用 .....	42
三、核分析技术应用 .....	42
1 中子活化技术 .....	42
2 加速器质谱 AMS 分析技术 .....	42
第十一章 协和医院历史 .....	43
附录一 物理学的两朵乌云 .....	45
附录二 目录 .....	46

## 第一章 绪论

核技术是（美国工程技术界评出的）20 世纪最伟大工程技术成就之一：

核能技术的社会影响虽然有争论，如核威慑，但核技术用于发电、医学诊断和治疗是无可争议的。核聚变是地球上未来取之不尽的清洁能源。

核科学技术与人类生存发展密切相关：巨大无比的能量、神秘莫测的射线……

核技术使用不当或错误使用会给人类带来危险、破坏、甚至是灾难。特别是由于长期的核讹诈政策和公众缺乏对核科学技术的了解，再加上媒体的渲染，造成了人们普遍的核恐惧心理，所谓谈“核”色变。

因此有必要在社会公众中进行核科学技术知识的普及，特别是对大学生群体。大学生群体对核科学、核技术的认识和理解，将直接关系到我国核能、核技术发展的未来。

开展通识教育，提高大学生科学素养对遇到的“核”问题，在知识上有基本的了解，知道它的利与弊，树立正确的科学观点。通过科学的、逻辑的推理程序，进行社会、经济和技术的综合分析发表见解，作出理智科学的判断和正确的选择。

人类生存：和平、富足、健康、文明、美好；

发展：持续发展；

基本问题：能源、资源、食品、环境、卫生、保健、材料、安全、知识、探索……

## 第二章 核科学诞生及其基本工具

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。

研究目的：揭示自然现象的本质及其规律性

### 一、19 世纪经典物理学的辉煌和局限

#### 1 牛顿对力学总结

(1665-1687) 三大定律和万有引力定律

第 1 次物理理论的统一，出色的力学理论体系。

1) 地球上的物体运动 重力

2) 太阳系行星运动 万有引力

地上和天空中的物体力学规律服从牛顿力学

数学推导预言并发现海王星 (1781-1846 年) 冥王星 (1915, 1930) 。

#### 2 电磁学的统一

第 2 次物理理论的统一：电、磁、光

1) 静电库仑定律 (1785)

2) 法拉第电磁感应定律 (1831)

3) Maxwell 1864 电磁学方程组

很好地解释了电磁现象，并且预言存在电磁波；赫兹 1888 年发现了电磁波，证实了麦克斯韦的预言。第一篇电磁学论文《论法拉第的力线》

#### 3 热力学形成系统的理论框架（整合）

热力学四大定律成功地运用，并且科学地判决永动机是不可能的。

#### 4 物质构造：原子分子论“科学”的建立

道尔顿 1808 确认原子存在，原子是构成物质的“砖块”，创立原子论。《化学哲学的新体系》

阿佛加德罗 1811 创立了分子假说 (1860 年被确认)

门捷列夫 1869 发现元素周期律 (构筑了元素自然分类的完整体系，揭示了元素之间的内在联系) 1955 年 101 号元素 Mendelevium, Md (钔)

光谱分析精确地指明化学元素名称等。

19 世纪后期原子分子论的科学体系已经建立。

十九世纪末，经典物理学达到了辉煌的顶峰。

#### 经典物理学的问题与局限

(1) 两朵乌云：紫外灾难 (热辐射理论解释问题) 以太理论困难 (零漂移结果)

(2) 特别是 1895 年发现 X 射线和 1896 年发现放射性，使经典物理学出现了“危机”

经典理论无法解释，尖锐矛盾。

#### 分析与认识

(1) 19 世纪末人类对自然的认识仅限于宏观和低速

(2) 对于微观和高速、对于原子内部和更大的宇宙是不知或知之甚少

宏观：人眼睛和借助光学望远镜、光学显微镜观测到的范围，远到太阳系，小到细胞。

低速：运动的速度  $v \ll c$  太阳系各星球的运动 地球上宏观物体的运动等。

### 二、人类观测尺度的扩展和认识的发展

1. 物体尺度：宇观、宏观、介观、微观 (原子、原子核、夸克...)

2. 伴随物理学观测尺度的扩展，物理学研究向宇宙和微观两个方向发展，同时，学科之间又互相渗透和交叉，创立了许多新学科。

### 三、新的重要发现与核科学的诞生

十九世纪末的几项重大发现揭开了现代科学的序幕：物理学革命

物理学开始向微观方向发展：原子物理学 原子核物理学 粒子物理学

#### 1 伦琴发现 X 射线 德国 (1901 年诺贝尔物理学奖)

1895.11.8 发现 X 射线      12.22 第一张手部照片    12.28 “论一种新射线”

## 2 发现放射性 1896

贝克勒耳 (1852-1908) 法国 (1903 年诺贝尔物理奖) 1896 年 2 月 24 日法科院周例会记载: 该磷光物质可放  
射一种射线, 它能贯穿不透光的纸, 并使底片上的银盐还原。

## 3 发现电子 ( $e^{-}$ ) 1897 年 汤姆孙 (1856-1940) (1906 年诺贝尔物理奖)

实验上认定: 阴极射线是负电荷粒子, 荷质比  $q/m$  是氢原子离子的 1000 多倍; 若电荷都为 1 个单位, 则该粒  
子质量为氢原子的  $1/1800$ , 命名为电子 (现在精确值  $1/1840$ )

遗憾: 1887 考夫曼, 1890 舒斯特都曾得到过类似实验结果, 但由于不相信阴极射线会是由粒子组成的, 特别  
比原子还小很多, 不可思议, 没有勇气发表得到的结果。

## 4 发现钋和镭 1898 玛丽 居里 (1867-1943) 皮埃尔 居里 (1859-1906)

1898 年 4 月 第一次引入新术语“放射性”

7 月 发现放射性元素钋 (Po) 比铀盐放射性强 400 倍

12 月 发现镭 (Ra) 比铀盐放射性强 400 万倍

1. 指出放射性是原子的一种性质。
2. 有了强的放射源可以进行大量实验研究。
3. 首先将放射性用于治疗疑难疾病, 创立了放射医学。

开辟物理学新方向——向原子内部进军

基本事实和动力

1) 电子比原子小, 在强电场作用下能够从原子中跑出来, 说明电子应是组成原子的一种粒子。**动摇了原子  
是组成物质基本“砖块”的认识。**

2) 发现放射性, 并确认放射性来自原子。**原子内部有什么? 长什么样? (好奇心)**

## 5 汤姆逊 “原子模型” 1904 年

基本事实 原子电中性

原子模型 原子 = 电子 (负电荷) + 正电物质

原子内部状况: 正电荷均匀分布在一个球体内, 电子镶嵌在一些平衡位置上, 类似于葡萄干甜点 (布丁) 结  
构; 电子在平衡位置做简谐振动, 发射和吸收特定频率的电磁辐射。

解释: 原子电中性、原子稳定性;

可以解释元素周期表中某些事实及元素的化学性质等。

汤姆逊 “原子模型” 在当时被公认为是一个比较完整的、比较好的原子模型。

## 6 卢瑟福散射实验结果和解释 发现原子核

绝大部分  $\alpha$  粒子直接通过金箔, 或只有很小的偏角 ( $2 \sim 3^\circ$ ); 有少数  $\alpha$  粒子偏转角度大, 有的大于  $90^\circ$ ,  
更有甚者反弹回来。

卢瑟福评述说: 如同你对准一张纸发射一颗 15 吋的炮弹, 炮弹返回来并且打中了你一样, 令人难以置信。(1911  
年 3 月: 原子的有核结构)

思考: 快速运动的粒子 (正电荷、重) 穿过金箔时, 如果原子中正电荷是均匀分布就不会使 粒子发生大的  
偏转, 更不可能使粒子向后跑。汤姆逊原子模型不能解释所得到实验结果。(否定汤姆逊模型)

提出假设:

1. 原子内部应是空旷的。
2. 粒子比电子重 7000 多倍, 速度又很快, 一定碰到了某一个什么 “硬的物质”, 有强力作用在粒子上引起  
明显地偏转, “硬的物质”不可能是电子。
3. 一定是碰上了与粒子质量差不多或更重的、带有正电的、体积很小的一种东西。

## 7 卢瑟福提出原子 “行星” 模型 1911 年

- 1) 原子的正电荷集中在原子中心很小的区域 (点), 这个小区域载有原子绝大部分质量, 原子核 (nucleus)
- 2) 电子分布在原子核周围, 原子内部空间十分空旷;

原子类似于太阳系: 地球、水星、金星等行星绕太阳转动

现在已知:



原子 大小  $10^{-10}$  米 原子核大小  $10^{-14} \sim 10^{-15}$  米

原子核载有原子质量 (99.99999%) 以上

卢瑟福原子“行星”模型留下的问题

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。(与经典电磁理论存在严重矛盾)

2) 没有涉及到电子分布问题, 未能解释原子线状光谱现象。卢瑟福当年在给朋友的信中说: “希望在一、二年内能对原子构造说出一些更明确的见解。”

#### 8 现代原子模型的建立 1913

尼波尔 (1885-1962) 丹麦物理学家将“量子论”用于研究 H 原子, 解决了卢瑟福“原子塌陷”和“线状光谱”问题。

##### 1913 年第一次提出原子中电子角动量量子化:

H 原子中的电子处于分立 (定态) 能级上, 这些电子是稳定的, 不辐射能量, 解决了原子不稳定的困惑; 同时由电子在能级间的跃迁解释了 H 原子的发光和线光谱问题。

#### 9 原子核质子-中子模型

1914 年卢瑟福发现质子 (proton)

1932 年查德威克 (英国) 发现中子 (neutron) 电中性, 质量与质子相近。

1932 年海森堡和伊凡宁柯各自独立提出质子-中子模型: 原子核由质子和中子组成, 质子和中子统称为核子 (nucleon)

质子-中子模型可以很好说明原子量与原子序数的关系, 很快被人们接受。

查德威克 (1891-1974) 海森堡 (1907-1976)

#### 四、两大理论支柱

两大理论体系为探索原子核提供了坚实的理论基础。

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的证据。

#### 1 量子假设 → 量子论 → 量子力学

普朗克 爱因斯坦 玻尔 德布洛依 薛定鄂 海森堡 等

##### 1) 量子假设诞生 1900 普朗克 德国物理学家

1900 年 (英) 瑞利根据经典统计力学和电磁辐射理论导出黑体辐射能量分布公式: **瑞利-金斯公式**: 在长波部分与实验符合很好; 但在短波部分辐射能量密度  $\rightarrow \infty$ , 与实验结果  $\rightarrow 0$  严重不符。正好处于紫外线波段, 所以称“紫外灾难”。

普朗克利用内插法将适用于短波的维恩公式和瑞利-金斯公式衔接起来得到普朗克公式, 与实验结果符合很好。

普朗克从理论上寻找对公式的解释, 发现只要假定辐射能**不是连续变化**, 而是分立变化, 就可做出合理解释。

• 1900/12/24 普朗克向德国物理学会报告

谐振子的能量与频率  $\nu$  呈正比,  $\epsilon = h\nu$ ,  $h\nu$  称作能量子,  $h$  是一个普适常量, 成为普朗克常数。谐振子与辐射场交换能量只能取其基本能量子的整数倍。

• 1900/12/24 量子论诞生日 开创了物理的新时代

由能量的不连续假设得到的公式能够很好地与黑体热辐射实验结果符合, 完全解决了“紫外灾难”的困难, 驱散了第一朵“乌云”。

经典物理基本观点: 能量连续变化, 自然界无跳跃。

普朗克新观点: 能量不连续 (量子化), 自然界有跳跃。

“量子假说”与传统认识直接矛盾, 令许多人难以接受, 普朗克本人也非常动摇。他认为这个假说破坏了经典物理学的完美, 曾试图 3 次修改量子论, 甚至放弃自己提出的能量量子概念, 力图将其纳入经典物理范畴。他试图从经典物理学找到一种方法代替“量子假说”去解决“紫外灾难”问题。但是, **量子假设是物理概念一次革命、一次创新**, 被更多的微观实验事实所证实, 发展趋势锐不可挡。

1900 年普朗克提出量子概念, 但爱因斯坦和玻尔坚持、捍卫、发展和确立了量子论。

##### 2) 量子论确立

1. 爱因斯坦：利用和坚持能量量子概念第一人

1905 年 把光波看作光子 (E=hv) , 解释了光电效应。

1907 年 利用量子概念解释了热容量量子性质。

普朗克指责爱因斯坦光子论 “太极端了”

2. 玻尔 1913 年利用量子轨道概念成功地解释了 H 原子线状光谱，建立现代原子模型。

3) 量子力学的建立

1. 德布罗依 1924 年 提出物质波概念

2. 海森堡 1925 年 创立矩阵力学

3. 薛定谔 1926 年 创立波动量子力学

量子论终于取得了胜利，量子论发展为量子力学

2 爱因斯坦质能关系

爱因斯坦 1905 年 6 月 特殊相对论基本原理：光速不变原理（常数）+ 相对性原理

→ 1905 年 9 月 物体质量是它所含能量的量度，物体质量伴随运动速度的增大而增大

$$E = Mc^2 \quad M = \frac{M_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

E: 物体总能量                      M: 总质量（相对论质量）    M<sub>0</sub>: 静止质量（牛顿体系中惯性质量）

v: 物体运动速度                      c: 2.998×10<sup>8</sup> m/s 光速在真空中为常数

1) 与它的总质量成正比，质量越大能量越多。

2) 由于 c<sup>2</sup> 很大，质量很小，能量也巨大。1 克物质的静止能量 9×10<sup>13</sup> J 相当于 2.7 kt 煤燃烧

3) 当物体的能量变化时，其质量也相应地发生变化，反之也一样。ΔE = ΔMc<sup>2</sup>

对于电子有

v(c)	γ	E	M(M <sub>0</sub> )
0.02c	1	100 eV	1
0.94c	2.96	1 MeV	2.96
≈ c	>10 <sup>3</sup>	1 GeV	>10 <sup>3</sup>

逻辑推理能够建立前提与结论之间的对应关系，只要前提正确，逻辑推理不管走多远其结论绝对可靠。这种确定性对科学的发展起到不可估量的重要作用。

质能关系 E=Mc<sup>2</sup> 是一个重要例证，从相对论基本原理出发，应用动力学基本概念逻辑推导出来的，把质量和能量两个概念紧密地联系在一起，表明质量只是能量存在的一种形式，质量和能量是等价的，在一定的条件下粒子载有的能量和质量可以转化，产生新粒子或释放出能量。

一起，表明质量只是能量存在的一种形式，质量和能量是等价的，在一定的条件下粒子载有的能量和质量可以转化，产生新粒子或释放出能量。

重要意义：解释了放射性衰变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。

E=Mc<sup>2</sup> 是打开原子（核）能的钥匙，划时代的、改变世界的公式。

· 核科学中常用的质量、能量、长度单位

1 原子质量单位 1u=mass <sup>12</sup>Catom/12 = 1.66×10<sup>-27</sup> kg

2 能量单位 电子伏特 1 eV = 1.6×10<sup>-19</sup> J

keV 化学，原子物理

MeV 原子核物理

GeV 高能物理（粒子物理） TeV 超高能物理（夸克，轻子等）

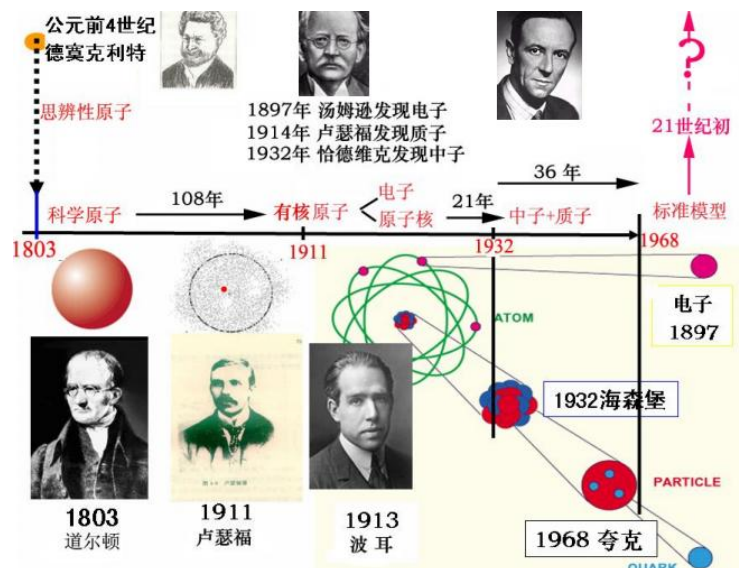
1TeV 大约相应于 1 个蚊子飞行动能

3 长度单位 费米 1 fm = 10<sup>-15</sup> 米

m<sub>e</sub> 0.511 MeV/c<sup>2</sup> m<sub>p</sub> 938.272 MeV/c<sup>2</sup> m<sub>n</sub> 939.565 MeV/c<sup>2</sup> 1u 931.494 MeV/c<sup>2</sup>

五、物质基本构造和基本作用力

1 人类寻找物质构造基本单元的历程



## 2 物质构造的基本单元 (基本“砖块”)

基本砖块 = 基本粒子 简单、没有结构、不可再分割的最小单元

思想者问题: 万物是由什么构成的? 是什么把他们组合在一起?

物理学家每发现一个新粒子总发问同一个问题: “你是一个基本粒子吗?”

- 0) 原子是基本的吗? Yes No 古希腊 两派
- 1) 科学原子是基本的吗? Yes 19 世纪 No 20 世纪初
- 2) 质子和中子是基本的吗? No 1964 年 “标准模型” 现在
- 3) 电子是基本的吗? Yes
- 4) 夸克是基本的吗? Yes
- 5) 中微子是基本的吗? Yes 希格斯粒子 (CERN, 2012 年)

## 3 标准模型

上世纪 60 年代物理学家创立的理论, 不断完善至今仍在发展。

“标准模型”确立了一套基本物质粒子和作用力粒子 (但不包括引力), 借助这些“基本粒子”不仅能够阐明其它几百种粒子的构成和复杂的作用, 能够解释物质世界发生的许多现象, 而且能够“解释”大爆炸后宇宙的演变过程。目前认为是现阶段人类对“思想者”问题“最适宜”的答案。

物质粒子		作用力粒子	质量粒子	合计
轻子	夸克	媒介子	希格斯粒子	
12	36	13	1	62

标准模型“基本砖块”: 简单、不可再分、没有内部结构的粒子

希格斯粒子: 引起粒子质量的粒子。2012 年宣布被发现 (CERN)。

## 4 基本作用力与原子核的研究

四种基本作用力

名称	引力	电磁力	弱力	强力
力程	$\infty$	$\infty$	$10^{-18}$ m	$10^{-15}$ m
相对强度	$10^{-38}$	$10^{-2}$	$10^{-5}$	1
媒介子	引力子 ?	光子	$W^{\pm}, Z^0$	胶子 (8)
距离	天体 黑洞	原子 分子	$\beta$ 衰变	夸克 核子

研究原子核对基本作用力的贡献和意义

- 1. 发现新作用力: 强力 (核力), 弱力 ( $\beta$  衰变)
- 2. 新观点: 基本作用力通过媒介子传递 (核力介子交换理论)
- 3. 原子核是探索基本作用力、基本物理现象、基本规律的“综合实验室”

原子核中四种基本力都存在, 引力太弱, 可忽略不计。

主要是电磁力、弱力和强力, 决定着原子核的组成和性质, 支配着原子核的运动规律。

### 第三章 原子核与放射性物理基础

#### 一、原子核的组成、质量与能量 (P9)

##### 1 现代原子核的组成

原子核由质子 (Z) 与中子 (N) 组成, **核子 (A)** 即质子、中子的统称。

**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。

##### 2 核素及表示符号

核素: 具有确定质子数和中子数的原子核

**问哪个适合做核弹一定要答到核素 (如铀 235)**

核素符号: 比如  $^{12}\text{C}$ , 则可以分析: C 的原子序数为 6, 中子数为 6, 故其质量为  $6+6=12$

##### 3 三个常用的术语

名称	质子数 Z	中子数 N	质量数 A	举例
同位素	<b>相同</b>	不同	不同	$^1\text{H}$ $^2\text{H}$ $^3\text{H}$
同中子素	不同	<b>相同</b>	不同	$^2\text{H}$ $^3\text{He}$
同量素	不同	不同	<b>相同</b>	$^3\text{H}$ $^3\text{He}$

##### 4 原子核大小、质量和结合能

###### 1) 原子核大小

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  $7.24 \text{ fm}^3$

原子核的半径  $R = r_0 A^{1/3}$  原子核半径常数  $r_0 = 1.2 \text{ fm}$  A 为原子核的质量数

例如:  $R(^{238}\text{U}) = 7.4 \text{ fm}$   $V(^{238}\text{U}) = 1270 \text{ fm}^3$

###### 2) 原子核的质量

原子核质量 = 原子质量 - 全部电子质量  $M_N(Z, A) = M_a(Z, A) - (Z \times m_e)$

$M_N$  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  $m_e = 0.00549 \text{ u}$

###### 3) 核物质密度

核物质是由“无限”多原子核放在一起构成的物质

一般核物质密度为  $2.3 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$ ,  $1 \text{ cm}^3$  的核物质有  $2.3 \times 10^8$  吨重!

###### 4) 质量亏损和原子核结合能

原子核的质量 + 亏损质量 = 两个原子的质量之和, 在两个原子形成一个新原子的过程中, 必然会有一定的能量损失。

原子核结合能: 自由核子 (质子和中子) 结合构成原子核时所释放的能量, 数值上等于质量亏损相应的能量。原子平均结合能 (比结合能) 等于 **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:

①原子核中的每个核子的平均结合能随质量数而变化

② $^{56}\text{Fe}$  和  $^{62}\text{Ni}$  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 (**比结合能越大越稳定**)

释放核能的两个途径: 重核裂变, 轻核聚变

**例 1: 重核裂变**——中子与  $\text{U}235$ :  $^1_0\text{n} + ^{235}_{92}\text{U} = ^{92}_{36}\text{Kr} + ^{141}_{56}\text{Ba} + 3^1_0\text{n} + \Delta E \sim 200 \text{ MeV}$

裂变能  $2 \times 10^8 \text{ eV}$  化学能  $4 \text{ eV}$  汽油和氧的爆炸一个分子  $40 \sim 50 \text{ eV}$  TNT  $30 \text{ eV}$

应当是“**原子核能**”, 而不是“原子能”

**例 2: 氢核聚变**—— $^1\text{H}$  的聚合:  $4^1_1\text{H} = ^4_2\text{He} + 2e^+ + 2\nu + \Delta E \sim 26.7 \text{ MeV}$

聚变释放的能量为  $2.67 \times 10^7 \text{ eV}$  (26.7 MeV)

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

## 二、放射性衰变类型和衰变规律 (P127 有穿透能力比较)

### 1 放射性衰变 (decay) 及其表示

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（放射性最早由居里夫人定义）。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 ( $^4\text{He}$ )	$2.2 \times 10^{-15} \text{ m}$	+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 (电磁辐射)		不带电
n中子射线	中子	$\sim 10^{-15} \text{ m}$	不带电

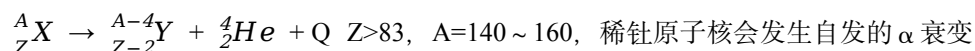
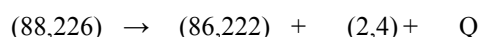
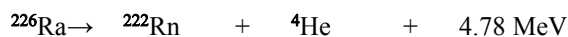
衰变表达式：母核  $X \rightarrow$  子核  $Y +$  发射射线  $b +$  衰变能量  $\Delta E$

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：由费米命名，中微子几乎不与物质发生反应（100 亿个有 1 个）。

### 2 放射衰变的类型 $\alpha$ 衰变、 $\beta$ 衰变、 $\gamma$ 衰变 (P15)

1)  $\alpha$  衰变：发射  $\alpha$  粒子 ( $^4\text{He}$ ) 的衰变——比较重的核素

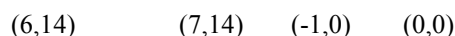


(记住氡  $^{222}\text{Rn}$ ) 老师研究这个气体，放射性的惰性气体

2)  $\beta^-$  衰变：发射  $\beta^-$  射线 (电子) 和反中微子的衰变 质量数不变，电荷数加一



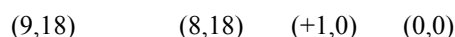
母核  $\rightarrow$  子核  $\beta^-$  射线 反中微子 (上划线)



3)  $\beta^+$  衰变：发射  $\beta^+$  射线 (正电子) 和中微子的衰变 质量数不变，电荷数减一

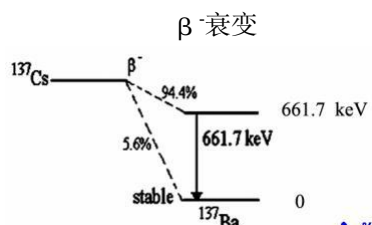
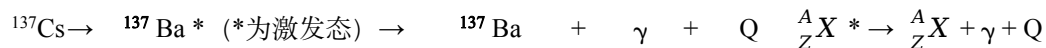


母核  $\rightarrow$  子核  $\beta^+$  射线 中微子



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  $p(^1\text{H})$  是非常稳定的

4)  $\gamma$  衰变：发射  $\gamma$  粒子 (光子) 的衰变



$\gamma$  衰变

$\gamma$  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 ( $^{137}\text{Cs}$ ) 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  $\alpha$  衰变、 $\beta$  衰变或核反应所生成的、处于激发态的原子核

### 3 放射性衰减规律 (P18)

1) 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： $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$

$N_0$  为  $t=0$  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

$\lambda$ 是衰变常数，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； $\lambda$ 越大，表明衰变越快

放射性衰变是一个统计过程，并不能确切说明哪一个放射性原子核在何时发生衰变；只能说一个原子核某一时刻发生衰变的概率

指数衰减规律是对样品中存有大量放射性的原子核而言（衰变是一个随机事件，规律不是描述某一个，而是一大群核素）

## 2) 半衰期

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

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda = 0.693 / \lambda \quad N = N_0 \exp(-0.693 \times t / T_{1/2})$$

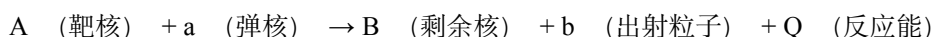
剩余质量的计算：假设  $M_0$  为现有质量， $T_{1/2}$  为半衰期， $T$  为目标天数， $M$  为现有质量

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

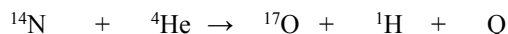
## 三、原子核反应 (P19-20)

### 1 核反应

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



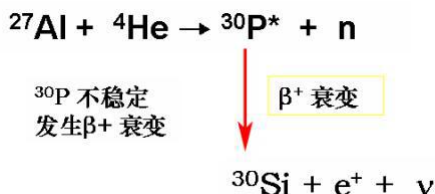
### 2 卢瑟福 第一个人工核反应 (1919) 产生质子



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 30P

1934 年 居里夫妇 奠定放射性核素广泛应用的科学基础 1935 年诺贝尔化学奖



“两个第一”：第一个人工制造的放射性核素（现在基本上都是人工核素了）

第一个发现  $\beta^+$  衰变的放射性核素

开辟了人工制造放射性核素途径，为研究和应用开辟了广阔前景。目前人造放射性核素超 2000 种。

### 4 元素 (Z) 有多少，周期表的眼神，核素 (A,Z) 有多少

已发现核素 2800 种，稳定的 271，不稳定的 2500，占 89%（绝大多数）。

估计共有 6000 种核素，3000+尚未发现。

原子核壳层模型理论预言：可能存在以 114 号为中心的核素稳定区域——超重稳定岛。至 118 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。

## 四、核辐射与物质的相互作用 (P22)

### 1 核辐射与物质的主要作用

基本粒子及其性质：

种类	符号	电荷	质量 (单位: u)
$\alpha$	$^4\text{He}$	+2	4.00279
$\beta$	$e \text{ (+/-)}$	(+/-) 1	$5.486 \times 10^{-4}$
$\gamma$	$\gamma$	0	0
质子	$p$	+1	1.007276
中子	$n$	0	1.008665

无论带电还是不带电，物理机制都是电离和激发

主要作用：库仑作用 原子发生电离 产生电离效应

注：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

## 2 带电粒子与物质的作用

### 1) 电离作用 (P23-28) $\alpha$ 粒子与物质作用

载能的  $\alpha$  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。

$\alpha$  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。

### 2) $\alpha$ 射线与 $\beta$ 射线电离效应比较

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

$\alpha$  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。

$\alpha$  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。 $\alpha$  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**。

$\beta$  射线也是一种高速带电粒子，其**电离本领比  $\alpha$  射线小得多**，但**穿透本领比  $\alpha$  射线大**，但与 X、 $\gamma$  射线比  $\beta$  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  $\gamma$  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。

### 3) 理解高能电子的电离效应

高能电子在树脂玻璃中前进的同时，不断电离，产生次级电子；

次级电子在树脂玻璃继续前进，不断电离，又产生次级电子；

电子密度越高的地方，颜色越深。

## 3 $\gamma$ 射线对物质的电离作用

由于  $\gamma$  射线不带电，但由于它载有动量和能量，与原子由动量和能量的交换可产生次级电子，引起原子的激发和电离。

两步过程：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）

载能的次级电子引起原子电离

### 1) 电子对效应

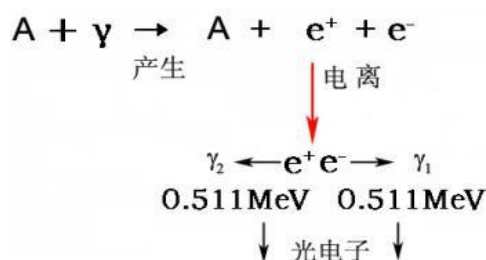
正电子湮灭：正电子是反物质，所谓湮灭就是正电子遇上负电子生成 2 个光子的过程。

正电子与物质作用  $e^+ + e^- \rightarrow \gamma_1 + \gamma_2$  有两步过程：

①正电子直接电离效应

②湮灭作用所产生的两倍 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

正物质与反物质产生能量（高能电磁波）质量转化为能量的转化效率为  $100\% E = mc^2$



### 2) 发生条件

$\gamma$  射线能量  $\geq 1.02 \text{ MeV}$       在原子库伦场中可能产生一对正-负电子



### 3) $\gamma$ 射线的衰减\*

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。

$\mu$  为指数衰减因子。对于线性吸收系， $\gamma$  射线能量越高， $\mu$  值越小；原子序数越高， $\mu$  值越大

铅吸收  $\gamma$  射线的的能力最强，水的吸收能力最弱

### 4 中子与物质的作用

中子不带电，但是通过与物质碰撞可以轻易进入原子核内，和原子核发生作用引起核反应，产生次级载能粒子，进而对物质发生电离作用。

1) 与 H 原子核进行弹性碰撞 打出质子（载能） 质子引起物质电离

$H + n \rightarrow n + p$  (质子) 传递能量：质子获得能量跑出来，中子能量减少——慢化

· 中子慢化剂：轻水 ( $^1H_2O$ )，重水 ( $^2D_2O$ )

· 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；人体甚至也是慢化剂

· 快中子：散射；慢中子：快中子释放能量后速度降低，这样被原子核吸收的概率比较高

2) 中子引起的核反应：中子活化反应  $n + ^{14}N \rightarrow ^{14}C + p$

## 五、核辐射量度 (P29-30)

### 1 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  $A = dN / dt$

单位：贝克 (Bq)，(放射性活度的国际单位)，1Bq 意味着每秒有 1 个原子核发生衰变 (北大花园每公斤泥土里 Ra 含量大概有 30 Bq，即 Ra 的浓度是 30 Bq / kg——这也是全国均值)

专用单位：居里 (Ci)， $1 Ci = 3.7 \times 10^{10} Bq$ ， $1 mCi = 10^{-3} Ci = 3.7 \times 10^7 Bq$ ， $1 \mu Ci = 10^{-6} Ci$

1 居里等于 1g 纯  $^{226}Ra$  的放射性活度 (先有居里再有贝克)

常用活度浓度：Bq /  $m^3$ ，Bq / kg，Bq / L

在不通风的教室中， $^{222}Rn$  的浓度为 20Bq/ $m^3$ ，密云水库水中  $^{226}Ra$  的浓度约为 0.00 几 Bq/L

### 2 吸收剂量 (D)

电力辐射对物质作用所产生的效应，以传递的能量来量度。

定义为授予单位物质 (dm) (或被单位物质吸收) 的致电离辐射的平均能量 (dE)  $D = dE / dm$ 。

单位：J/kg 专用单位为：戈瑞 (Gy)。这是直接可以测量的物理量 (单位的进一步解释 P133)

吸收剂量率：单位时间 (dt) 内吸收剂量的增量 (dD) 单位：Gy/h

### 3 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。

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

$D_{T,R}$  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

$W_R$  作为权重因子：光子、电子几乎不产生效果，权重为 1。表示等吸收剂量的照射，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，人们最需要防护性腺，其次是红骨髓、结肠、肺、胃等——对电离辐射敏感的是新陈代谢比较快的细胞，比如生殖、造血细胞 (头部是神经组织，其形成之后一般不怎么变化，所以不怎么敏感)。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，一般落脚到恶性肿瘤发病率上

4 有效剂量 ( $H_E$ )：各组织或器官的当量剂量 ( $H_T$ ) 与相应的组织权重因子 ( $W_T$ ) 乘积的总和

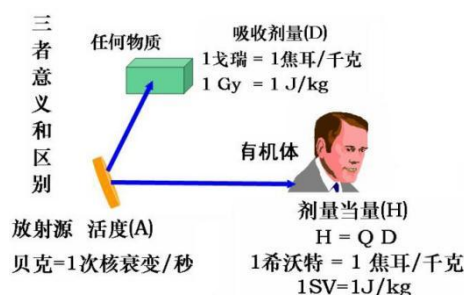
$$H_E = \sum_T H_T \times W_T$$

单位：J/kg 专用名称为希沃特 (Sv)

意义：①辐射防护安全管理上的量，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) ②评价随机效应的危险度 (建立体系)：不是针对个人进行评价的量



放射性活度 A，吸收剂量 D，当量剂量 H 及有效剂量的区别：



## 第四章 核能应用：核武器部分

### 一、核裂变发现震惊世界

#### 1 中子的发现

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 年约里奥居里夫妇发现铀射线

1932 年英国科学家**查德威克**发现中子，1935 年获得诺贝尔奖

中子发现是核物理发展史上重要的里程碑

#### 2 原子核裂变

1) **费米**——做了裂变实验 因寻找超铀核素，“在核分裂上成了盲人”

发现中子慢化现象（1934 年），提出自持链式反应设想，建立了第一个自持链式反应反应堆。

因“发现新放射性物质和慢中子的选择性”1938 年获诺贝尔物理学奖。

1934 年约里奥居里夫妇制造了第一个人工放射性核素  $^{30}\text{P}$

1934 年费米用中子→各种元素，发现中子慢化现象，发现了 47 种新放射性核素。

中子→铀→半衰期 13 分钟产物（最早的裂变现象）

2) **伊伦·居里** 1937 中子→铀→半衰期 3.5 小时放射性产物（Z=57、镧）

3) **哈恩、斯特拉斯曼** 德国 1944 年诺贝尔化学奖 **纯化学方法取得**

1938 年 8 月 中子→铀→半衰期 4 小时放射性产物（Z=56、钡）

写信给**迈特纳**（瑞典）、**弗罗施**→“原子核分裂”

**弗罗施**实验验证了铀巨大能量的释放，1939.1 “自然” 《中子导致的铀裂体 一种新的核反应》

发现核裂变：**哈恩** 理论解释：**迈特纳**

1942 年在芝加哥大学体育场搭建第一个反应堆

#### 3 原子核裂变

$n + {}^{235}\text{U} \rightarrow {}^{236}\text{U}^* \rightarrow \text{裂变碎片} + \text{多个快中子} + \gamma \text{射线}$

1 个  ${}^{235}\text{U}$  原子核裂变，放出 2~3 个中子和 200 MeV

实现自持链式反应可形成带有巨大能量的爆炸！1kg 核燃料  $\approx$  2 万吨 TNT

### 二、原子弹的基本原理

#### 1 实现裂变链式反应条件

中子轰击原子共有 4 种命运：

从系统中漏失，一次（或几次）散射后漏失，中子被核俘获，使裂变和裂变放出 3 个中子。

其中若要实现链式反应，需要中子直接击中子核，而并非被漏失、散失、俘获。

**中子增殖系数及其公式：**不泄露几率 P， ${}^{235}\text{U}$  吸收概率 q，裂变几率 f，每次裂变原子核产生  $\nu$  个中子，则中子增殖系数  $k = Pqf\nu = P\eta$ （第二代中子数）

**k=1 临界**（自持）**k>1 超临界** **k<1 次临界**

核燃料系统的核参数（还要考虑中子的泄漏和吸收）

核材料	每次裂变放出的中子数 $\nu$	裂变几率 f	吸收一个中子放出的中子数 $\eta$
铀-235	2.6	0.848	<b>2.11</b>
铀-238	2.6	0.373	0.97

钚-239	2.98	0.877	2.61
-------	------	-------	------

$^{238}\text{U}$  不能实现自持裂变链式反应（临界），不可能作为核材料

自然界中没有的，人为生成的是  $^{239}\text{Pu}$ ，中子产额核特性比  $^{235}\text{U}$  好

核武器、核反应堆的**天然**的材料  $^{235}\text{U}$ （不能只写铀）。原子弹、核电的**非天然**核素  $^{239}\text{Pu}$ 。

## 2 核装料——临界质量

系统  $k=1$ （临界）时，相应体积为**临界体积**，相应质量为**临界质量**。

决定增值系数的两个重要因素：

核材料性质（裂变核吸收一个中子放出的平均中子数  $\eta=fv$ ）

体积、形状：不泄露几率与它的表面积有关。球形时表面积最小，泄露最小， $P$  最大

增大球的半径（即增大系统体积），提高不泄露几率  $P$ ，使  $k \geq 1$ ，是引起核爆炸的基本条件  
金属裸球状态下，武器级铀-235 的临界质量为 50kg，武器级钚-239 为 16kg。

钚-239 临界质量仅为铀-235 的 1/3

自然界中，一块铀矿石， $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}=0.7\%$

减少临界质量方法：

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，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。

贫铀弹用  $^{238}\text{U}$  来做弹头→利用高强度

## 3 实现核爆炸原理

最初为次临界状态（ $k < 1$ ）；

瞬间达到超临界状态（ $k > 1$ ）：压拢式、内爆式；

适时提供中子源，触发裂变链式反应；

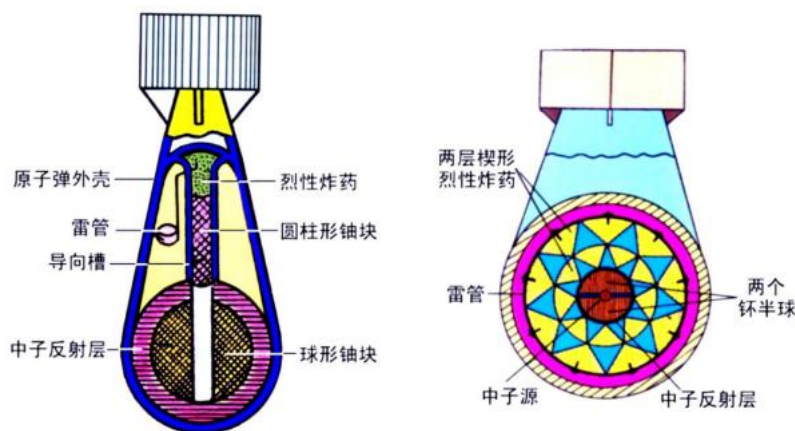
繁殖足够代数，触发核爆炸。

### 1) 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。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。

### 2) 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

1964 年 10 月 16 日，中国的原子弹爆炸，是内爆式钚弹

美国第一次核试验（1945 年 7 月 16 日）

8 月 6 日第一颗“小男孩”（铀弹）投向广岛 8 月 9 日第二颗“胖子”（钚弹）投向长崎

### 三、氢弹的基本原理

#### 1 聚变与聚变能

1934 年卢瑟福和奥利芬特用加速器发现 DD 反应，后又发现 DT 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： $6D \rightarrow 2 {}^4\text{He} + 2 p + 2 n + 43.24 \text{ MeV}$

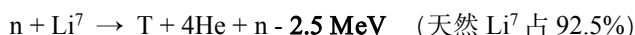
聚变反应每核子平均释放 3.6 MeV 裂变反应每核子平均放出  $200/236 = 0.85 \text{ MeV}$

#### 2 氢弹原理

氘氚聚变，相对裂变会放出大量能量。 $D + T \rightarrow 4\text{He} + n + 17.59 \text{ MeV}$

不能大量应用的原因：这个聚变反应的条件很苛刻，高温、高密，必须克服核之间的库仑排斥。

热核装料：氘化锂-6（利用原子弹产生高温高密条件并产生中子造氚）



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 TNT 当量（1961.10.30）

### 四、核燃料生产

核不扩散条约的关键是限制核燃料生产的环节

**为什么需要生产核燃料：**天然纯铀中， ${}^{235}\text{U}$  占 0.7%， ${}^{238}\text{U}$  占 99.3%。只有  ${}^{235}\text{U}$  可作为高纯度核燃料。

#### 1 分离铀同位素

##### 1) 电磁法（P66）

把天然铀形成的气体化合物（ $\text{UF}_6$ ）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。

##### 2) 气体扩散法（P46）

首先让 U 全部变为  $\text{UF}_4$  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。质量稍轻的  ${}^{235}\text{UF}_4$  运动速度稍快，穿过分离膜的几率比较大。反之， ${}^{238}\text{U}$  穿过分离膜的几率比较小。理想分离因数 1.0043，需要 2000~3000 级分离。

例如：分离高浓缩铀  ${}^{235}\text{U}$  (>90%)  $1.002^n = 90/0.7$ ,  $n = 2430$

##### 3) 离心机法（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。

$\text{UF}_6$  通过蒸发离心分离法来分离同位素，理论分离因数为 1.08（即 8%），比气体分离法高，也需要多级串联，达到武器级浓缩度。

#### 2 分离钚同位素

铀-石墨堆或铀-重水堆（注意： ${}^{239}\text{Pu}$  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  ${}^{235}\text{U}$ ，可获得 0.8 个  ${}^{239}\text{Pu}$ ；这之后还有经过冷却、化学分离等复杂处理才能成为核燃料。

武器钚的特性：掺少量镓的钚合金，一般  ${}^{239}\text{Pu}$  占 93%，其余为  ${}^{240}\text{Pu}$  和  ${}^{241}\text{Pu}$ 。

它在 -75~475° 间是稳定的。要注意 Pu 具有强烈的放射性以及强烈的化学毒性。

### 五、二战之后的世界和平与核武器

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。

## 1 二战后反核垄断的斗争

美国→苏联→英国→法国→中国

### 1) 苏联奋起直追率先法破核垄断

1940.7 成立**铀问题委员会**

1945.8 斯大林决定成立专门委员会领导核武器研制

1946.12.25 第一座石墨反应堆运行

1945 通过特工获得美国第一颗内爆式原子弹资料，48 年决定采用

**1949.8.29 成功爆炸了第一颗原子弹（钚弹）2.2 万吨 TNT 当量，打破美国核垄断**

1951.9.24 苏联自己设计的原子弹试验成功

### 2) 英、法迎头赶上

英国

1941.9 研制核武器的“**合金管计划**”

1943.11 与美签订“**魁北克协定**”，把人员和已有研究成果都并入“曼哈顿工程”

**1947.1 决定自制原子弹**，建立生产堆气体扩散工厂，撤回查德维克、玻尔等 28 名英科学家

**1952.10.3 在澳大利亚蒙特贝洛群岛水下爆炸了第一颗原子弹**

法国

1929~1940 在核裂变和原子弹研制等方面领先

1940.6 巴黎沦陷，计划中断

战后戴高乐总统决心迎头赶上，由约里奥·居里负责研制原子弹

1960.2.13 在法属阿尔及利亚撒哈拉沙漠进行了第一次核试验（6 万吨当量）

### 3) 中国

1955.1.15 中共中央书记处扩大会议决定：建立核工业、研制核武器

1964.10.16 核爆成功“**向心聚爆钚弹**”掌握先进的聚爆技术，建立完整的核工业

## 2 氢弹研制的激烈竞争

### 1) 氢弹的优点

1. 燃料便宜，分离  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^7\text{Li}$  相对容易

2. 较干净，产物  ${}^4\text{He}$  稳定，氘易燃烧

3. 威力大且不受限制

4. 可制成特殊性能武器。

1949.8.29 苏联成功爆炸了第一颗原子弹后，促使美国加快氢弹研制工作

1950.1.31 杜鲁门总统下令结束争论、加快美国超级弹研制工作

### 2) 美国氢弹突破

1952.11.1 在马绍尔群岛的比基尼岛上进行了第一次氢弹（原理）试验，用液氘，重 65 吨，威力 1000 万吨当量（地面爆炸）

1954.3.1 在比基尼岛爆炸了第一颗氢弹（MK17）用氘化锂-6，威力 1500 万吨，美国威力最大的试验。（从此“比基尼”扬名世界）

\*在 4.5MeV 以上  ${}^7\text{Li}$  造氦截面比  ${}^6\text{Li}$  还大，由于低估了这一截面，爆炸威力比预计的（~600 万吨）大，所以造成了放射性污染和人员伤亡。

1956.5.21 第一次空投氢弹，几百万吨

### 3) 苏联不甘示弱 后来居上

原子弹爆炸后苏联最高领导下令抓紧氢弹研究

1949 物理所就提出用氘化锂-6 做热核燃料

1953.8.12 爆炸了含氘化锂-6 加强型原子弹（40 万吨当量）

1955.11.22 世界第一次空投氢弹，用氘化锂-6，威力 160 万吨。

1961.10.31 威力最大的氢弹试验，原设计 1 亿吨，后因新地岛核试验场限制，减少装料爆炸威力 5000 万吨 TNT 当量。

### 4) 英中法三国紧随美苏成为核大国

1957.5 第一颗氢弹（百万吨）  
1967.6.17第一次氢弹空爆成功（330 万吨）  
1968.8.24第一次氢弹试验成功

#### 5) 中子弹

小当量（千吨级）、强中子辐射，降低冲击波的破坏、增加核辐射的杀伤力，坦克的天敌。

小型氢弹（内加~15 克氚）裂变：100 MeV/每个中子 聚变：3.5 MeV/每个中子

美国：1963 年试验成功、现有多种型号。

中国：20 世纪 70~80 年代掌握了核武器小型化和中子设计技术。

### 3 庞大的核武储备

核弹头：数万颗（战略 6~7 千颗）

威力：160-180 亿吨 TNT 当量，可毁灭地球多次，人均 3 吨 TNT 当量

运载工具：3000 多件，（美俄占~90%）

1. 陆基—弹道导弹（洲际）弹道导弹、巡航导弹
2. 海基—核潜艇；
3. 空基—战略轰炸机

### 4 核不扩散条约

#### 1) 沉重负担、冷静思考

1940~1996 美核军备指出 5.5 万亿美元

全球核燃料储备量：

铀 235（浓缩度 20%）2000 吨	氚 200 公斤，每个中子弹 15 克
钚 239 年产量 1600 吨，可装 20 万颗	武器钚 260 吨，可装 3.5 万颗

#### 2) 核军备竞赛与核威胁

5 个核大国及印、巴、以等有核国家

核门槛国家：伊朗、伊拉克、利比亚、朝鲜

有核能力国家：日~100 吨钚、韩、德、加

全世界~5 万个核弹头，160~180 吨 TNT 当量，人均~3 吨

#### 3) 《不扩散核武器条约》（P81）

1968.1.7 《不扩散核武器条约》美英苏等 59 国签署规定：1967.1.1.前爆炸核装置国家允许保留核武器，不得向任何无核国家直接或间接转让核武器或核爆炸装置，不帮助无核国家制造核武器。

1970.3 生效，有效期 25 年

1992.3 中国正式加入

1995.5.11 期满，178 国协商决定无限期延长

现缔约国 187 个，印、巴、以、古巴没加入

#### 4) 《全面禁止核试验条约》

1996.9.24 50 届联合国代表大会通过 158 赞成，3 票反对（印、不丹、利比亚），5 票弃权（黎、叙、毛、坦、古）

2000.4 签署国 155 个，政府批准的 45 个。规定：所有 44 个裁军谈判会议成员国（包含印度），批准后 180 天生效。

1998.5 印巴核试验，对核禁试条约的挑战

2000.12 美国参议院否决，条约生效、前景暗淡！

### 5 核武器的未来

未来核武器的作用

核武器仍为国家安全的支柱

核武器实战化的趋势会有所发展

核武器在相当长时期内不可能完全消失

核禁试条件下的核武器研究

实验室实验研究；次临界实验；计算机模拟

核武器的发展趋势

具有更高突防能力的核武器；小型化、高精度、低威力的核武器

## 第五章 核能利用-核电部分

### 军用建立的基础和推动

核武器研制为核能利用打下物质基础

50 年代初 军用推动：核动力潜艇。取代柴油发电、蓄电池。

1950 ~ 1951 美国两座反应堆尝试核能发电取得成功

1951.8 美海军与厂方签订建造第一艘核潜艇合同，次年美国国会批准经费。

1954 年 苏联建成世界第一座 5000KW 核电站

### 一、核电反应堆：燃料、结构及堆型分类 (P42)

#### 1 燃料

可用的唯一的天然核素 U 中：U-235 占比 0.7%，U-238（未被利用）占比 99.3%。

浓缩后，**低浓缩铀（核电用的核材料）**中 U-235 占比 3%-5%。**核武器**中 U-235 占比约 100%。

与原子弹根本区别：核电实现**可控制链式裂变反应**，核武器中的完全不可控。

核电站与其他发电站只有**原料、锅炉不同，发电形式相同。**

#### 2 反应堆分类 (P46)

按中子能量：热堆（热中子反应堆）：裂变释放的快中子**慢化为热中子**

快堆（快中子反应堆）：中子**不需要慢化**

按慢化剂分类：轻水堆（压水堆 PWR、沸水堆 BWR）、重水堆（氘）、石墨堆

沸水堆与压水堆区别：

沸水堆热利用效率比压水堆高得多（只有一个回路，所有水都过堆芯，U-235 产生大量裂变产物），但是所有水都是放射性水，控制棒从顶部插入堆芯。

压水堆（P44）有两个回路，一回路过主泵、堆芯，有放射性，两回路水不直接接触，只进行热量交换，二回路无放射性。目前压水堆核电站占 70%左右，占绝对的市场主流。

#### 3 核燃料元件、组件 (P45)

轴芯块元件：陶瓷包裹低浓缩铀 U-235~3%

燃料棒（直径 10mm，长 3-4m）成分之一：锆（热传导效应好，抗辐射抗高热）

燃料组件：由多束燃料棒组成（121、157 束等）

控制棒：银 80% 镉 15% 镅 5% 物理上通过控制燃料组件（棒）来控制链式反应（原理是控制中子数-插入，吸收中子，中子数下降，功率减少；拔出反之）

控制中子数-燃料棒、回路水中加硼酸等

##### 1) 压水反应堆 (P44)

优越性：技术成熟、（正常运行情况下）安全

堆芯：成分有燃料组件、控制棒、冷却剂、慢化剂、启动中子源。

140 大气压，350℃ — 维持液态（压水堆）

压力容器：高 13 米，内径 5 米，厚 20 厘米钢筒包裹堆芯-反应堆是否安全、破损。

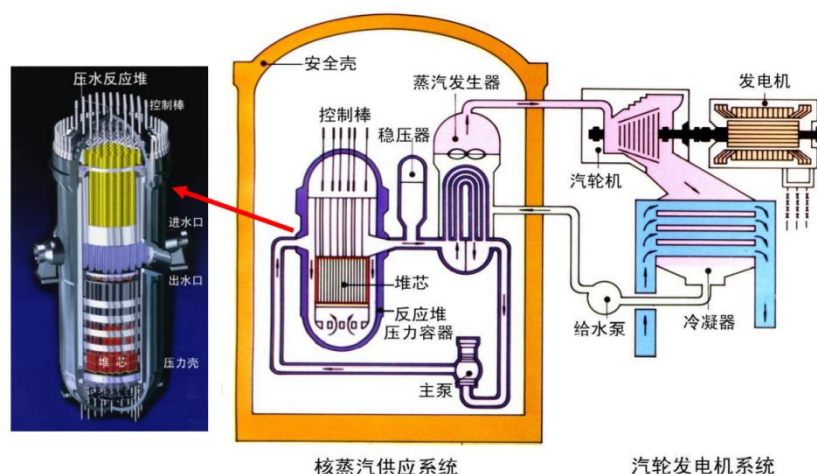
安全壳：最后一道屏障：高 60 ~ 70 米，厚 1 米钢筋水泥壳，内衬 5 毫米不锈钢（可承受民用飞机撞击）

反应堆芯中的放射性核素：

裂变产物：U-235 吸收一个中子裂变核素 200 多种，铯等概率最大，是造成核污染的主要核素

中子活化反应

裂变能与衰变热



热量利用的核心：蒸汽发生器

评价反应堆安全性能的核心：（极端情况下）堆芯熔化可能性、放射性核素释放到环境可能性。

确保安全的屏蔽/纵深防御-燃料棒、压力容器、水泥建筑包裹

#### · 福岛核事故

泄露放射性核素：铯 137（主要，半衰期 30 年）、铯 134、碘 131（甲状腺癌-服用稳定碘进行预防，核应急的关键措施）  
物理去污-将表层土壤掩埋于深层土壤之下

衰变能：占反应堆产生能量的 5% 左右（不可控）。福岛核事故中反应堆终止后，由于衰变能不断释放，热力冷却系统没有电，所有泵、仪表失灵，堆芯温度缓慢上升，进入核应急状态。随温度上升，水汽化，燃料棒裸露，锆产生氢气，压力容器承受压力增加-人为放气使氢气与氧气接触爆炸。**放射性核素的衰变特性由原子核内部结构决定，人类无法改变。**

#### 2) 核燃料增殖的快堆电站（P47）

热堆电站铀利用率太低

铀-238 再生核燃料钚-239： $n \rightarrow {}^{238}\text{U} \rightarrow {}^{239}\text{U} \rightarrow {}^{239}\text{Np} \rightarrow {}^{239}\text{Pu}$  制作核武器的宝贵资源

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  $n \rightarrow {}^{238}\text{U} \rightarrow {}^{239}\text{Pu}$

结果：只“烧掉” ${}^{238}\text{U}$ ，再生更多  ${}^{239}\text{Pu}$ ， ${}^{238}\text{U}$  利用率可达 60%-70%（包括热堆乏燃料）

铀资源可用 2000 年！

#### · 核燃料增殖的快堆电站——明天的核电技术

安全性好的第四代堆：解决核燃料问题；有助于废物最小化，缓解核废物处理问题。

美、俄、法、日：研究推进中。中俄合作，商业示范堆推进中。

堆型	燃料	慢化剂	冷却剂	优点
压水堆	低浓铀	高压水	高压水	成熟
重水堆	天然铀	重水	重水、轻水	天然铀
沸水堆	低浓铀	沸腾轻水	沸腾轻水	效率高
气冷堆	低浓铀	石墨	氦气	生产堆
快堆	钚、高浓铀		液钠、氦气	增殖

## 二、我国核电发展现状（P61）

起步晚，自行设计、建造、运营管理的第一座核电站，1984 施工建设，1991 联网发电

### 1 发展背景

#### · 我国能源形势严峻

能源在可持续发展中的战略地位；我国人均资源占用量远低于世界平均水平；我国是第一大石油进口和消耗国家；预测到 2050 年，我国将成为世界第一能耗大国。

#### · 发展核电的必要性

能源结构不合理，煤炭占 80.6%；北煤南运、铁路运输紧张状况无法解决；煤炭污染严重、环境无法



承受。；煤炭是重要的不可再生的化工原料。；；水能资源不可能成为主要能源；《京都议定书》限制，形势更为严峻；**2030 年前达到 CO<sub>2</sub> 碳峰值；2060 年前争取“碳中和”。**

## 2 发展势头

“适度发展核电”转变迈向“大力发展核电”→“安全高效发展核电”→“安全适度”→“积极有序发展核电”（2021~2025 的十四五）

现状：核电能源比例 4~5%（世界平均 10%）

运行：55 台（世界第 3 位）；在建：26 台（装机容量世界第 1 位）。

全球最先进的第三代反应堆 AP1000、CAP400 和华龙一号在我国诞生并运行。

福建省宁德市霞浦核电站：快堆示范堆（600MW；金属钠冷却）2 个堆在建设中，计划 2023 年和 2026 年开始运行。

山东省石岛湾：高温气冷堆示范堆 1 号堆临界（2021.8；211MW）

小型堆（SMR）“玲龙一号”（10 万 kW）；2021 年 7 月 13 日在海南岛开始建设

福建省福清 5 号堆（华龙 1 号 HPR1000）2021 年 1 月 30 日开始商业运行

巴基斯坦卡拉奇核电站的 2 号堆是华龙 1 号，2021.3 开始商运，3 号堆 2021.1 开始燃料装料在欧洲、东欧、南美、南非开发海外市场。

## 三、世界核电发展现状 (P60)

2017 年世界各国核电占比：法国最高 72%，中国 4%。

世界核能今后走向：小堆/微堆

## 四、聚变能利用前景 (P48)

聚变能是解决能源问题的根本途径。

### 1 聚变反应

$D + D \rightarrow {}^3\text{He} + n + 3.27 \text{ MeV}$ ； $D + T \rightarrow {}^4\text{He} + n + 17.59 \text{ MeV}$

聚变能比裂变能大 4 倍（平均每核子）

燃料资源丰富：海水氘（D）在氢中占 1/6500 每升海水聚变能 = 300 升汽油

海水中氘总量 35 万亿吨，可用百年。

太阳能：每天聚变“燃烧”50 万吨氢

地球只接受总太阳能的（5/万亿分）= 全球使用的所有能源 的 10 万倍

### 2 实现聚变能利用条件

高温：燃料（氘、氚）需要 1~10 亿度（克服静电排斥）——高温氘氚等离子体

约束：足够密度与足够长时间 DT 反应要求相对低，DD 反应要求高

因此只有实现原子弹爆炸后，聚变能才以氢弹爆炸形式得到释放。

### 3 托卡马克装置进展

1950 年前后由苏联的塔姆和萨哈罗夫提出

1991.11 欧共体“JET”突破性进展，第一次实现 DT 聚变反应：

高温 3 亿度、约束 2 秒、反应 1 分钟、产生  $10^{18}$  中子、输出 1.8 兆瓦。

1997.12 提高到 16.1 兆瓦，为输入功率的 65%。离“点火”不远了！

中国环流器研究也取得重要成果

### 4 国际热核聚变实验堆 ITER 计划

1985 里根-戈尔巴乔夫首脑会议上提出，在核聚变能方面进行国际合作，后来密特朗、戈尔巴乔夫、里根又进行几次会晤，确定设计和建造**国际热核聚变实验堆（ITER）**

1990 完成了 ITER 概念设计。

1999 美国宣布退出 ITER 计划。

2001.6 欧、日、俄经过三年努力，完成了 ITER 的工程设计阶段，造价已降至约 46 亿美元。邀请中美参加。

经过 15 年曲折过程，完成了工程设计。

2003.1 我国经历了 3 年的重大争论，正式宣布参加协商。



2003.1 美国总统布什也宣布重新加入 ITER 计划。  
2003.2.18/19 ITER 第八次政府间谈判在俄罗斯圣彼得堡举行，中国和美国出席本次会议。  
2005 韩国、2006 印度也参加了计划协商谈判。  
2006.11.22 中、欧盟、印、日、韩、俄和美国 7 方代表在法正式签署建设国际热核聚变实验堆。  
目标：功率达 50 万千瓦小型热核电站。

2035 年开始建设第一个示范性核聚变发电站。 2055 年完成商业核聚变发电站的建设。

本世纪后期，人类通过受控核聚变获得永不枯竭能源的愿望将有可能成为现实。

ITER 建在法国，项目预计持续 35 年，建造期 10 年，开发利用阶段 20 年，退役期 5 年，总费用约为 50 亿美元，欧盟承担 40% 的费用，其余 6 方分别承担 10%，这是历史上总投入仅次于国际空间站的第二大国际科技合作项目。经各国议会批准后，协议正式生效。2007 年 10 月 24 日欧盟委员会宣布，ITER 合作协定当天正式开始实施，同时“国际热核实验反应堆”组织当天也正式成立。

ITER 模型主要设计参数：

大半径 6.2m 小半径 2.0m 等离子体电流 15MA

环向磁场 5.3T 能量增益因子  $Q_{DT} \geq 10$  聚变功率 50 万千瓦

## 五、思考题

### 1. 什么是链式裂变反应?怎样才能实现自持链式反应?

如果在一个大的铀块内有一个中子轰击  $^{235}\text{U}$  核引起裂变（第一代），释放核的问时还放出 2~3 个中子，为方便起见，我们假定为 3 个中子。这 3 个新的中子又轰击周围的  $^{235}\text{U}$  核，再引起 3 个  $^{235}\text{U}$  核的裂变（第二代），同时放出 9 个中子，这样过程再继续下去，就引起 9 个  $^{235}\text{U}$  核裂变（第三代），产生 27 个中子。这样一代一代发展下去，就是一连串数目越来越多的裂变反应，这样反应过程称原子核的链式裂变反应。

如果一个中子被  $^{235}\text{U}$  吸收引起裂变，发出来的裂变中子扣除泄漏和有害吸收后，平均还有一个中子又能引起新的裂变，这时链式裂变反应能继续维持下去，称自持链式裂变反应。

### 2. 热中子反应堆是由哪些部分组成的?

核燃料、慢化剂、冷却剂及其他金属结构、安全控制系统等。

### 3. 压水反应堆的基本结构及其核能发电的基本原理是什么?

堆芯、堆内构件、压力壳、控制棒、驱动机构

利用原子核裂变释放的核能，使热水变成蒸汽，蒸汽推动汽轮发电机发电

### 4. 实现聚变能利用要求达到哪些条件?

首先，对于 D-D 聚变反应的燃料应加热至很高的温度。其次，高温等离子体还必须要有足够高的密度，并被约束维持足够长的时间（称约束时间）。

DD 反应  $n^{\text{t}}=10^{22}$  秒/米<sup>3</sup>  $T=10^9\text{K}$

DT 反应  $n^{\text{r}}=10^{20}$  秒/米<sup>3</sup>  $T=10^8\text{K}$

### 5. 实现受控热核聚变反应有哪些主要途径? 发展前景如何?

惯性约束与激光核聚变、磁约束与托卡马克核聚变装置

### 6. 为什么说人类生存与社会发展面临能源的严峻挑战? 如何解决这一问题?

世界化石燃料资源有限，不可能长期满足人类生存发展需要；

直接燃烧化石燃料对人类生存环境构成严重威胁。

核能将为人类生存发展提供长期稳定的能源。

### 7. 为什么说核电是一种经济、清洁、安全的新能源? (P54)

核电站高能量、少耗料，发电成本低；核电是一种清洁的新能源；安全性有三道屏障保证

### 8. 压水堆电站有什么优点?为什么说它是安全的? (P56)

投资低、技术成熟、安全性高；三道屏障：燃料包壳、压力容器、安全壳

### 9. 试分析世界核电发展形势与前景，说明新世纪必将迎来核电发展的新高潮 (P60)

### 10. 我国煤炭资源丰富，为什么还要发展核能电站? (P61)

## 第六章 电离辐射的生物效应

### 一、生物效应的产生过程和机理

## 1 物理过程与能量转移 ( $10^{-16}\text{s}$ 以下)

电离：产生初级电子，次级电子。

作用对象：生物大分子（核酸、蛋白质、酶）

靶物质取决于剂量：高剂量可能破坏细胞膜、核膜，通常剂量小的时候破坏的是 DNA。

**产生电离生物效应的最根本的物理过程是什么？就是电离**

## 2 物理化学作用：自由基的生成

由物理过程到物理化学过程最重要的步骤就是自由基的生成。

自由基：身体内有水分子参与的形成的生物集团， $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{HO}_2$ ,  $\text{H}^\cdot$ ,  $\text{OH}^\cdot$

## 3 分子组成及性质发生改变（细胞膜、核膜的破坏）

### 1) 电离辐射产生的过程和机理

**直接过程**：在高能的情况下产生的  $\alpha$  粒子直接与细胞核作用

**间接过程**：先产生自由基，活跃的自由基再与 DNA 作用的过程。

### 2) DNA 损伤（分子水平）

**单链断裂**：分子水平，电离辐射更多的可能导致的是单链的断裂，破坏单链，另一条链还可以继续作用，这个 DNA 就可以实现无差别修复

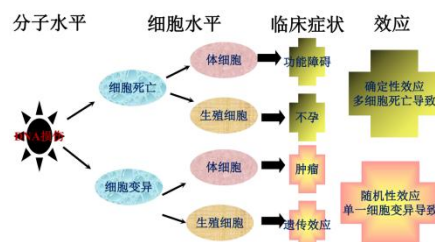
**双链断裂**：短时间内受到大量电离辐射照射，且电离本领很强种类的电离辐射，就可能同时破坏双链，这是修复的结果会导致错误修复。

（双链断裂的过程表明肿瘤的产生是一个概率性事件）

### 3) 细胞水平损伤

DNA 突变  $\rightarrow$  短时间大量细胞死亡（增殖死亡、间接死亡） $\rightarrow$  功能障碍、结构改变

细胞变异（异常细胞克隆） $\rightarrow$  细胞转化  $\rightarrow$  癌症



## 二、电离辐射所致生物效应的分类

依据效应发生的个体：躯体效应和遗传效应

依据效应发生的时期：潜伏期、早期效应、晚发效应

依据效应-剂量关系分类：确定性效应和随机性效应

### 1 依据效应发生的个体

躯体效应 (somatic effects)：发生在受照者本人身上的效应

遗传效应 (hereditary effects)：发生在受照者后代身上的效应

关于遗传效应：由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（所有可能的遗传效应都有可能发生）；迄今没有人类资料肯定辐射所致遗传效应的发生

### 2 依据效应发生的时期

潜伏期 (latent period)（电离辐射导致生物效应的特点）：从受到照射到临床上特定效应的发生所需的时间

早期效应 (early effects)：受到照射后数周之内发生的效应。（大量辐射导致，会产生脱发、恶心、呕吐等）

晚发效应 (Late effects)：受到照射后数月以后发生的效应

日本核临界事故中短至数分钟受辐照人就产生了恶心、呕吐、意识丧失等症状，体内检测到自然界不存在的钠 22 存在峰值，应该是受到了中子照射。

日本原爆受害者肿瘤发生率：2~10 年内白血病发病率达到峰值，10 年后白血病之外的肿瘤发生率上升。

**确保安全的辐射剂量是多少？法定年剂量限值 20mSv。**

### 3 依据效应-剂量关系分类

确定性效应 (deterministic effects)：有剂量阈值，效应的严重程度与剂量呈正比

随机性效应 (stochastic effects)：无剂量阈值，发生几率与剂量呈正比，严重程度与剂量无关  
**什么是随机性效应？其实就是肿瘤的发生。**

### 三、确定性效应

#### 1 急性放射病

定义：人体一次或短时间内分次受到大剂量照射引起的全身性疾病。

剂量阈值：外照射 > 1Gy

临床特点：①损伤范围广，波及机体所有组织和器官，表现为复杂的临床症状和体征；  
 ②主要损伤器官的变化，决定和影响病情发展和预后；  
 ③在一定照射剂量范围内，机体有自动恢复的潜力。

症状与剂量的关系：

0.1	染色体变化	0.5	末梢血中淋巴细胞减少	1.0	10%的人恶心呕吐
1.5	死亡阈值	3-5	LD <sub>50/60d</sub> 造血器官死亡	7-10	LD <sub>100/60d</sub> 消化器官死亡

#### 2 对造血组织的影响

造血组织对电离辐射敏感，淋巴细胞对电离辐射最为敏感

细胞寿命：红细胞 120d 血小板 8-9d 淋巴细胞 3-4d

减少阈值：白细胞 0.5 红细胞 1.0 血小板 1.0

生物剂量剂：与照射剂量之间呈良好剂量—效应关系的生物学体系。

外周血淋巴细胞的染色体畸变率 适应剂量范围 0.1 ~ 5Gy 符合统计学要求 (NRPB 英国国家防护委员会)

一般情况：500 个细胞 大剂量：200 个细胞 小剂量：1000 个细胞

#### 3 生殖系统的影响

不孕的阈值 (Gy)	男性		女性	
	1 次急性照射	慢性照射	1 次急性照射	慢性照射
一时性不孕	0.15	0.4/年	0.65 ~ 1.5	0.4/年
永久性不孕	3.5 ~ 6	2.0/年	2.5 ~ 6	2.0 年

#### 4 皮肤的放射损伤

剂量 (Gy)	急性损伤	慢性损伤
0.5	染色体畸变	无
5	一时性脱发及红斑，红肿，疼痛，烧灼感	伴有功能障碍
10	一时性溃疡，水泡疤痕色素沉着，WBC 上升全身中毒症状	萎缩
15	永久性溃疡，合并感染，败血症	慢性顽固性溃疡

#### 5 眼组织的放射损伤

放射性白内障 眼晶体确定性效应阈值 0.5Gy (2011 年 ICRP 国际放射防护委员会)

当量剂量限值：20mSv (5 年平均)

眼晶体放射敏感性大于结膜等其他眼组织，前面部位的上皮细胞发生分裂障碍 → 混浊 → 白内障  
 潜伏期：6 个月 ~ 35 年，与剂量成反比

### 四、随机性效应——辐射致癌

随机性效应主要分为肿瘤和遗传性疾病两类 (关于遗传性疾病在人身上没有统计学意义上的证据)

#### 1 癌症的概念与起源

癌症 (cancer)：增生失控并侵入周围组织或向远隔部位转移的恶性肿瘤

病理机理：DNA 变异

致癌因子 (carcinogen)：能使正常细胞转变为恶性细胞最后发展为癌症的因子。

化学因素、物理因素、病毒、机体遗传特性、激素水平、环境因素、生活因素……

#### 2 癌症的多阶段发生学说 (multi-stage)

始动期 (initiation)：原癌基因激活，抑癌基因失活。

淘汰机制：DNA 修复，免疫系统的识别监视消除。癌症是否出现，何时出现。

促进期 (promotion)：变异细胞 → 癌细胞

发展期 (progression)：癌细胞的恶性性质增加，或转移 → 癌症

### 3 人类辐射致癌的分析方法

流行病学：对人群中某种疾病的时间，空间分布及其影响因素的研究

癌症危险：危险指某种有害效应发生的概率。发病率，死亡率。

危险系数：单位剂量照射引起的危险。

超额绝对危险 (EAR)：照射组癌症发病率与对照组癌症发病率之差。辐射致癌危险系数以 EAR 为指标。

EAR 系数：单位剂量的增加例数；单位： $10^{-2}\text{Sv}^{-1}$

### 4 人类的放射性癌症

1) 辐射致癌的潜伏期：白血病 最小潜伏期 2 年 中央值 8 年 最大潜伏期 40 年

其他癌症 最小潜伏期 10 年 中央值 16~24 年 最大潜伏期终生

放射性辐射可能会导致放射性癌症，要关注青少年群体的白血病（因为白血病在青少年中最为敏感）

2) 关于遗传效应

仍然没有直接证据能证明双亲受辐射照射导致后代遗传疾病增加。但辐射在实验动物引起了遗传效应。

因此委员会继续慎重地把遗传效应的危险包括到放射防护体系之中。

3) 辐射致癌危险系数与合计危害 12 种癌症，低 LET (DDREF=2) 校正

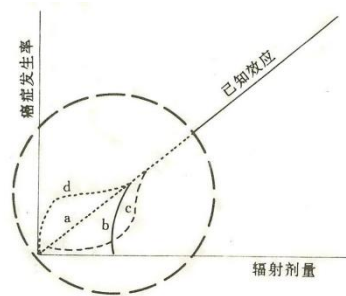
对一般公众  $5 \times 10^{-2} \text{Sv}^{-1}$  每 100 个人中有 5 个人患病

职业照射  $4 \times 10^{-2} \text{Sv}^{-1}$  每 100 个人中有 4 个人患病

考虑严重遗传效应：合计危害  $6 \times 10^{-2} \text{Sv}^{-1}$

职业辐照致癌危险系数比公众低：公众里面包含老弱病残，而职业人群基本上是 18-60 的健康人群

4) 线性无域的剂量—效应关系



### 5 影响人类辐射致癌的因素

宿主因素：性别与激素、遗传学易感性、年龄与时间因素、环境及生活因素的复合作用、剂量学因素

①小剂量刺激作用 (Hormesis) (已经被否定)：平时多受小剂量的刺激从而增强免疫效果

②旁效应 (Bystander Effects)：用粒子轰击特定细胞时，旁边的细胞也产生了反应

## 第七章 人类生活环境中的放射性

### 一、天然放射性核素与本底辐射

天然电离辐射源 贝可勒尔在 1896 年第一次发现天然的放射性核素



环境中放射性核素的来源：天然放射性核素  $\leftarrow {}^3\text{H}, {}^{14}\text{C} \rightarrow$  人工放射性核素

三大衰变链 核军事活动/民用核反应堆产生的活化/核裂变产物

### 1 天然本底照射

人类自古以来受到的天然存在的各种电离辐射源的照射。  
组成成分：宇宙射线、宇生放射性核素、原生放射性核素

1) 宇宙射线：连接地球与宇宙的无形纽带

初级宇宙射线：从宇宙空间进入地球大气层的高能粒子，质子， $\alpha$  粒子和高能电子等，能谱宽， $1 \sim 10^{14}\text{MeV}$   
次级宇宙射线：初级宇宙射线与大气层中 N、O 等原子核作用产生，电子、光子、质子、中子和  $\pi$  介子等。  
宇宙射线强度与海拔高度、纬度（地磁场）相关，我国中科院宇宙射线研究所在拉萨（因为海拔高）。  
还与太阳活动引起的磁场变化、地表建筑物屏蔽有关。

宇宙射线所致个人年均有效剂量为  $0.38\text{mSv}$ （机组人员要注意！）

2) 宇生放射性核素

在大气层上部，宇宙射线与大气层中的原子核相互作用（散裂和中子俘获）产生的放射性核素。

放射性核素	半衰期	主要 $\beta$ 射线能量 (keV)	主要生成方式
<b>H-3</b>	12.3a	18.6	N-14 或 O-16 散裂
<b>Be-7</b>	53d	EC	N-14 或 O-16 散裂
Be-10	2.5e6a	555	N-14 或 O-16 散裂
<b>C-14</b>	5760a	156	$^{14}\text{N}(\text{n},\text{p})\ ^{14}\text{C}$
<b>Na-22</b>	2.62a	545	Ar-40 散裂
Si-32	$\sim 700\text{a}$	210	Ar-40 散裂
P-32	14.3d	1710	Ar-40 散裂
P-33	24.4d	28	Ar-40 散裂
S-35	87.9d	167	Ar-40 散裂
Cl-36	3.1e5a	714	Ar-40 散裂

1.  $^{14}\text{C}$

生物学半衰期 40 天  $^{14}\text{C} \rightarrow ^{14}\text{N} + \text{电子}$   $^{14}\text{C}$  半衰期 5730 年，可用来考古断年  
环境中  $^{14}\text{C}$  来源与产量：

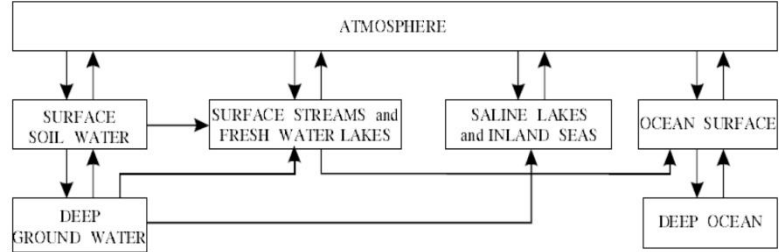
大气层反应 年产量  $1.4 \times 10^6 \text{GBq}$  核设施 总量  $2.8 \times 10^6 \text{GBq}$ （至 1997 年）  
核爆  $^{14}\text{C}$  总量  $2.2 \times 10^8 \text{GBq}$  远多于前两者

2.  $^3\text{H}$

来源：大气中 N、O、Ar 与高能质子和中子反应生成。  
既是宇生核素（本底），又可人工生成（核实验和核反应堆）。

物理特性：半衰期 12.32 年； $\beta$  辐射

存在形式：大气中宇生核素氚以气态（ $^3\text{H}_2$ ，0.1%）、氚水（ $^3\text{H}_2\text{O}/\text{HTO}$ ，>99%）参与生物圈循环。  
**饮用水中的氚多于海水中。**来源为核爆，含量逐年降低。全球水圈中氚循环隔室模型↓



3) 原生放射性核素

1. 陆地地壳中存在的三大天然放射性衰变系

**钍系（ $4n$  系）**  $^{232}\text{Th}$  半衰期  $1.41 \times 10^{10}$  年，10 次连续衰变后至稳定核素  $^{208}\text{Pb}$   
**铀系（ $4n+2$  系，铀镭系）**  $^{238}\text{U}$  半衰期  $4.468 \times 10^9$  年，14 次连续衰变后至稳定核素  $^{206}\text{Pb}$   
**锕系（ $4n+3$  系，锕铀系）**  $^{235}\text{U}$  半衰期  $7.038 \times 10^8$  年，11 次连续衰变后至稳定核素  $^{207}\text{Pb}$

天然放射衰变系的共同特点：长寿命  $10^8 \sim 10^{10}$  年（导致我们今天仍受到辐射）；

系列最后都是稳定的铅同位素；每个系列中都有一个氦的同位素，是气体。

几个常用核素的特征：铀（ $Z=92$ ）银色金属，3 个同位素， $^{235}\text{U}$  核燃料 铀系比钍系多 0.7%

钍（ $Z=90$ ）银白色金属，不易氧化，未广泛应用

镭（ $Z=88$ ）银白色金属，作为辐射源等广泛应用

## 2. 陆地上不成系列的天然放射性核素

铷  $^{87}\text{Rb}$  半衰期  $4.6 \times 10^{10}$  年 人体内 8.5 Bq/kg

钾  $^{40}\text{K}$  半衰期  $1.27 \times 10^9$  年

3 种同位素  $^{39}\text{K}$  丰度 93.31%  $^{40}\text{K}$  丰度 0.012%  $^{41}\text{K}$  丰度 6.7%

1g 天然钾每秒放出 28 个能量为 1.31 MeV 的  $\beta$  粒子和 3 个 1.46 MeV 的  $\gamma$  光子

钾为生命的必要元素，成人体内 60 Bq/kg， $^{40}\text{K}$   $4.11 \times 10^5/\text{min}$

### · 天然辐射无处不在：岩石和土壤

火成岩中放射性核素含量高于沉积岩。

火成岩中酸性岩（例如：花岗岩）比放射性活度最高。

土壤中核素含量取决于风化岩石的种类和土壤形成过程。

地球表面中天然放射性核素的分布因各地岩石和土壤的不同有很大差异。

北京地区地表  $\gamma$  辐射水平：80-120 nSv/h； 平均 100nSv/h.

**我国特点：**天然放射性南高北低，土壤中钍系含量相对世界偏高。

**高辐射本底地区：**印度喀拉拉地区 8 万居民年最高剂量 28mGy

巴西里约热内卢周 街道上  $1 \sim 2 \mu\text{Gy/h}$

广东阳江地区 世界有名的高天然辐射地区，0.34Gy/h。

### · 人体也是一个小小放射源

摄入途径：食物、饮水、呼吸 核素种类： $^{40}\text{K}$ 、 $^{14}\text{C}$ 、 $^{87}\text{Rb}$ 、氡子体

**氡和氡子体对人体的影响较大，半衰期 3.8 天。**氡在早晨浓度最高，下午最低。

**原因：扩散对流：早晨太阳照射，地表温度上升，扩散加剧，气流向上稀释，空气质量逐渐变好。**

氡是无色无味的惰性气体，从土壤、岩石和建材表面等逸出，可随呼吸进入呼吸器官，氡和其短寿命子体衰变产生的  $\alpha$  粒子可对气管支气管细胞造成辐射照射，导致损伤。《WHO Handbook on Indoor Radon》2009：流行病学研究结论：肺癌患者中 3-14%是由于室内氡的辐射照射所致。

**氡的辐射对健康的影响？肺癌，是肺癌的第二大诱因。**

天然辐射所致的年平均有效剂量：2.4 mSv。（氡占了 1.2mSv）

## 二、NORM 问题（人类生产实践活动导致的天然辐射增加）

矿山的开采、冶炼与加工 铀矿与放射性伴生矿

化石燃料开采与使用 建筑材料的生产和使用：煤渣、粉煤灰的再利用

航空与宇航：宇宙射线照射 高钍含量产品的加工和使用

### 1 NORM 问题特点

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”

### 2 NORM 领域我国特点与问题

《循环经济法》对煤渣砌块、粉煤灰砖、石煤渣砖、发泡砖、加气混凝土规定 氡析出率上升

建材成分和结构的改变导致了：钍及钍射气（ $^{220}\text{Rn}$ ）的辐射照射，近 30 年室内氡水平升高 80%

## 三、环境中的人工放射性核素

### 1 裂变核素及中子活化产物

核爆实验：大量放射性落下灰

核事故：切尔诺贝利事故（1986 年 4 月 6 日） $10^{18}\text{Bq}$

福岛第一核电站事故（2011 年 3 月 11 日） $10^{17}\text{Bq}$

核设施：关键核素包括： $^3\text{H}$ 、 $^{14}\text{C}$ 、 $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、碘及惰性气体等

## 2 应用

医用放射性核素 核技术应用 示踪剂等其他领域应用

## 3 环境中 Pu 的产生及来源

核武器试验、核燃料后处理、核动力卫星、核电站事故、放射性沸水排放

大气层核爆：约 543 次（其中两次为战争使用）共造成  $1.1 \times 10^{16}$  Bq<sup>239</sup>Pu/<sup>240</sup>Pu 排放到环境中。

## 4 公众所受辐射照射比例

中国辐射水平分布：天然本底 93.42% 医疗 6.33% 核武器试验 0.18%

燃煤电站 0.07% 核电及燃料循环 0.00%

氡吸入暴露 52% 宇宙射线与宇生放射性核素 16% 地球外部辐射 20%

摄入暴露 (ingestion exposure) 12% 氡以外的吸入暴露 极少

北大土壤里有什么核素？铀、钍、镭-226、铯-137

# 第八章 核与辐射安全防护法规及事故

## 一、核与辐射领域法规 and 标准

国家法律：人大批准，主席令发布

国务院条例：国务院批准，国务院令发布

部委部门规章制度：各部委批准发布，实施细则、导则、标准

### 1 两个法律

1) 《中华人民共和国核安全法》《Law of the People's Republic of China on Nuclear Safety》

**2017 年 9 月 1 日**，第十二届全国人民代表大会常务委员会第二十九次会议表决通过。

**2018 年 1 月 1 日起施行。**

内容第一章 总则 第二章 核设施安全 第三章 核材料和放射性废物安全 第四章 核事故应急

第五章 信息公开和公众参与 第六章 监督检查 第七章 法律责任 第八章 附则

第一章 总则 第一条 为了保障核安全，预防与应对核事故，安全利用**核能**，保护公众和从业人员的安全与健康，保护生态环境，促进经济社会可持续发展，制定本法。在中华人民共和国领域及管辖的其他海域内，对**核设施、核材料及相关放射性废物**采取充分的预防、保护、缓解和监管等安全措施，防止由于技术原因、人为原因或者自然灾害造成核事故，最大限度减轻核事故情况下的放射性后果的活动。

• **核设施**的定义：

- (一) 核电厂、核热电厂、核供汽供热厂等核动力厂及装置；
- (二) 核动力厂以外的研究堆、实验堆、临界装置等其他反应堆；
- (三) 核燃料生产、加工、贮存和后处理设施等核燃料循环设施；
- (四) 放射性废物的处理、贮存、处置设施。

2) 《中华人民共和国放射性污染防治法》（简称放污法）

**2003 年 6 月 28 日**全国人民代表大会通过，**2003 年 10 月 1 日**执行，中华人民共和国主席令-第六号-胡锦涛

意义/作用：确定了**生态环境部（掌管核安全、辐射安全的国家监管部门）**实施统一监督管理的地位

涵盖内容：**核技术应用**（密封源、非密封源、射线装置）、伴生放射性矿和放射性废物

**放射性污染的定义**：由于人类活动造成物料由于人类活动造成物料、人体、场所、环境介质表面或者内部出现超过国家标准的放射性物质或者射线。

### 2 我国核与辐射安全领域的行政法规

《民用核设施安全监督管理条例》（1986.10）

《核材料管制条例》（1987.6）

《放射性同位素与射线装置放射防护条例》（1989.10）同北大相关

《核电厂核事故应急管理条例》（1993.8）

《核两用品及相关技术出口管制条例》（2007.1）

《民用核安全设备监督管理条例》（2007.7）

《放射性物品运输安全管理条例》（2009.9）

### 3 我国加入的本领域主要国际公约

《国际原子能机构规约》 IAEA（国际原子能机构，国际联合国下属具有制定法律、执行法律的机构）

《及早通报核事故公约》 临界/泄漏/辐射事故要向 IAEA 及时通报

《核事故或辐射紧急情况援助公约》

《核材料实物保护公约》 核材料的管制（运输、使用、处置）

《不扩散核武器公约》

《核安全公约》 反对恐怖行为

《制止核恐怖行为国际公约》

《乏燃料管理安全和放射性废物管理安全联合公约》 乏燃料：使用过了的燃料（spent）

## 二、电离辐射防护基本内容国家标准（GB18871-2002）P124

我国的国标：《中华人民共和国国家标准》（GB18871-2002）

1) 放射防护的目的：“防止确定性效应的发生；减少随机性效应的发生率，使之达到可以接受的水平”

为什么确定性效应可以防止？因为有阈值，所以可以防止发生；同理，但是随机性效应没有阈值，所以不能防止只能减少。减少发生率实际上是指减少恶性肿瘤的发病率

2) 放射防护的基本原则：

1. 实践的正当性（justification of practice）

对于一项实践，只有在考虑了社会、经济和其他有关因素之后，其对受照个人和社会所带来的利益足以弥补其可能引起的辐射危害时，该实践才是正当的。

2. 防护的最优化（optimization of radiation protection） IAEA 统一领导

可合理做到的尽量低的原则（ALARA: as low as reasonably achievable）培育安全文化；定量和定性方法

3. 剂量限值（dose limits） 确保每一个个人的安全，为了保护个人而制定的防护水平

（下表的剂量限值为内外照射之和，不包括天然本底辐射和医疗照射，医疗辐射远比下表多）

生活在地表上的人每天都受到辐射的平均值大致为 2.4mSv（天然本底辐射）

受照群体	照射条件	剂量限值
放射工作人员	全身	20 mSv（5 年平均，其中任何一年<50 mSv）
	眼晶体	150 mSv（20 mSv）
	其他单个器官或组织	500 mSv
	孕妇	2mSv/余下妊娠期间内照射<1/20 ALI
	有计划等特殊照射*	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

\*有计划等特殊照射：发生核事故的应急人员工作

## 三、密封源与外照射防护

### 1 密封源

正常工作状态下没有开封或破损的可能性；不会因为泄露、渗透等导致溢出或者扩散的放射源  
有足够强度的包壳；正常使用条件下不污染设备、环境

分类：（按形状）点源、线源、平面源、圆柱源等；（按活度不确定度）检查源、照射源、标准源

### 2 外照射防护三原则（P126）

1) 时间防护：累计剂量与受照时间成正比 措施：充分准备，减少受照时间

2) 距离防护：剂量率与距离的平方成反比 措施：远距离操作

3) 屏蔽防护：放射源  $\alpha \rightarrow$  纸  $\beta \rightarrow$  铝板（0.5cm）  $\gamma \rightarrow$  铅板（2.5cm）  $n \rightarrow$  混凝土

射线类型	作用形式	材料选择原则	常用屏蔽材料
$\alpha$	电离、激发	一般低 Z 材料	
$\beta$	电离、激发、韧致辐射	低 Z 材料+高 Z 材料	铝、有机玻璃、混凝土、铅
$\gamma$ 、X	光电、康普顿、电子对	高 Z 材料	铅、铁、钨、混凝土、砖
中子	弹性、非弹性、吸收	含 H 低 Z 材料、含硼材料	水、石蜡、含硼聚乙烯

## 四、开放源与内照射防护

### 1 开放源或非密封源



通常没有密封，或使用时需要打开密封包装的放射性物质。

用途：放射性药物、农业、生物、地质及科学研究用示踪剂。

种类： $^{125}\text{I}$ 、 $^{131}\text{I}$ 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 $^3\text{H}$ 、 $^{14}\text{C}$ 、 $^{18}\text{F}$  等

## 2 放射性物质进入体内的途径 (P126)

经口，消化道的摄入 (ingestion)    经呼吸道的吸入 (inhalation)    经皮肤，伤口的进入 (injection)

## 3 内照射防护

### 1) 防护措施和安全操作

基本防护用品：工作服，帽子，靴鞋，手套，口罩，防护眼镜。

遵守规章制度，严禁在放射性工作场所吸烟，饮水，进食，化妆等。

安全操作：

必须在通风柜或操作箱操作。

在铺有瓷砖，塑料，不锈钢，橡皮等材料的工作台面或搪瓷盘内进行。

使用移液器具。

使用适当屏蔽及远程操作器材，如长柄夹子等。

污染区与非污染区的区分。

### 2) 放射性工作场所控制区的标志 (P129)

正三角形外边  $a_1$  为  $0.034L$ ，内边  $a_2=0.700a_1$ ， $L$  为观察距离)



## 五、核事故

### 1 国际核事故分级 (IAEA 制定的分级)

中国目前没有发生过 2 级以上的核安全事件。

7 级 特大事故 大量的放射性元素被释放到环境中，不断恶化的健康和环境问题需要履行既定或因应对策

6 级 重大事故 较多放射性元素泄漏，可能需要履行既定对策

5 级 具有场外风险事故 放射性物质有限释放，核反应堆堆芯和辐射屏障出现严重损坏

4 级 场外无显著风险事故 放射性物质小量释放，公众遭受相当于规定限值辐射影响，核反应堆堆芯和辐射屏障出现显著损坏，可能出现工作人员遭受致命辐射情况

——3 级以上为事故，1~3 级为事件——

3 级 严重事件 放射性物质极小量释放，公众所受辐射程度小于规定限值，核设施工作人员健康受严重影响

2 级 普通事件 没有产生场外影响，核设施内工作人员遭受过量辐射

1 级 异常

### 2 历史上几次重大核事故

1979 美国三哩岛核事故 5 级 人为操作失误，发生了反应堆融堆

1986 苏联切尔诺贝利核事故 7 级 4 月 26 日，人类历史上第一个 7 级事故

2011 日本福岛核事故 7 级

#### 1) 切尔诺贝利核电站 4 号堆事故 (1986 年 4 月 26 日)

27 日上午，瑞典核电站检测出放射性异常

29 日政府通过塔斯社正式发布：发生堆心爆炸事件

· 发生时间：1986 年 4 月 26 日凌晨 1: 24

· 发生经过：停堆前的涡轮发电机组惰性转动供电实验；超临界反应 → 切断反应堆冷却系统 →

切断了自动保护系统 → 没能及时停堆；中子功率剧增 → 控制棒下落时发生碰撞，  
无法插入堆心 → 26 日 1 时 24 分，两次强烈爆炸，厂房内大火 30 余处，烟柱 1.8km 高

- 严重缺陷：没有物理保护壳

- 核应急抢救：

4 分钟后站内消防队员赶到：奋不顾身救火，18.5 小时后扑灭。

现场剂量率：100Gy/h；1 小时后出现急性放射病症状

1000 名空勤人员，投下 5000 吨碳化硼，铅，砂，白云石，土来屏蔽辐射和灭火。140 – 260mSv。

- 照射剂量及伤害：

86-97 年数十万人参加现场清理工作，平均剂量 100mSv；10%超过 250mSv

公众：10%超过 50mSv；5%超过 100mSv

237 人疑为急性放射病；28 人死于急性辐射照射

- 后果

放射性物质释放： $12 \times 10^{18}$ Bq      死亡人数：31 人（90 天内）      辐射照射：237 人接受 1-16Gy

迁移人群：11.6 万（30km）      远期效应：少儿甲状腺癌增多      直接、间接经济损失惨重

稳定碘的发放：瑞典      欧洲各国影响：希腊：930mSv

## 2) 重大放射事故：上海辐照室事故

- 发生时间：1990 年 6 月 25 日上午 9:00

- 事故经过：7 人误入  $60\text{Co}$  ( $8.5 \times 10^{14}$ Bq) 照射室，受到大剂量照射（2 ~ 12Gy）

- 事故后果：2 人极重度骨髓型放射病，25 天、90 天死亡，  
2 人重度骨髓型放射病，3 人中度骨髓型放射病，  
事故处理投入大量人力、物力，经济损失上千万。

## 3) 2011 日本福岛核事故-7 级

- 发生经过：

2011 年 3 月 11 日北京时间 13 点 46 分海域发生 9 级大地震

东海岸沿岸 11 座反应堆自动停堆，柴油机开始发电，冷却

20min 后海啸袭来，导致备用应急电源全部失效，冷却水系统全部失灵

（大地震引发海啸，浪高 40m，到达核电站海浪高 14m，但防护堤坝只有 10m）

堆芯温度升高，进入核应急状态

- 后果：

1 号反应堆：70%燃料棒受损；2 号反应堆：30%燃料棒受损；

3 号反应堆：25%燃料棒受损；

环境污染：西北 40-50km 处的沉积通量  $10^6$  Bq/m<sup>2</sup>； $^{137}\text{Cs}$  15000 Bq/kg 土壤（停止所有农作物种植）

- 职业人员防护：（没有发生过量辐射照射导致的急性放射病或者死亡）

现场工作人员辐射照射情况应急时的最大容许剂量：100-250mSv（毫希伏）

时间防护的应用

17 人大于 100mSv；3 人剂量 170-180mSv，其中 2 人皮肤辐射烧伤

- 公众的防护：

核应急的必备环节：稳定碘的储备与服用（强调应当在放射性烟云来到之前服用）

目的：保护甲状腺

原理：同位素竞争性吸附

放射性气溶胶降下时如何防护-切断一切摄入体内的途径-吸入、食入

- 严重污染区域：西北方向 50km×20km-70%耕地、20%耕地、10%住宅城镇

- 福岛核事故去污与复原：现在进行时

超乎想象的自然灾难    七级重大核事故    超乎想象艰难和持久

人类目前还离不开核能，所以关键问题是如何进一步提高核能的有效性和安全性，使其真正为人类所造福

## 4) 几次核事故

山西忻州事故、两次辐射照射事故（施工队，江苏南京  $^{192}\text{Ir}$ ）、巴西事故（ $^{137}\text{Cs}$ ）

时间	地点	事故简况	后果
1963	安徽	把 0.43TBq $^{60}\text{Co}$ 废源带回家	死亡 2 人；急性放射病 4 人
1969	北京	将来路不明的 37GBq $^{60}\text{Co}$ 源浇铸在混凝土建筑底层内	集体剂量：10 人 Sv
1985	牡丹江	370GBq $^{137}\text{Cs}$ 源被盗转移	8-15Gy，3 人急性放射病

法定计量单位以贝可（Bq）计，1Bq=1 次核衰变/秒。

常用的单位还有千贝可（kBq）、兆贝可（MBq）、吉贝可（GBq）。

## 第九章 核科学技术的医学应用

公众所受核辐射剂量提高，医学方面收到的核辐射占比提高（15% → 36%）

### 一、放射诊断应用

放射诊断学（利用 X 射线诊断疾病）1895 年德国科学家伦琴发现 X 射线

#### 1 X 射线透视与摄影技术

##### 1) X 射线透视（胸透）P170

利用 X 射线的穿透性和荧光作用进行动态透视检查，X 射线穿过受检组织或脏器将他们投影到荧光屏上，共医生观察和诊断。短时间持续照射，对人体带来的危害或大于利益，不符合实践的正当性。

##### 2) X 射线摄影

利用 X 射线的穿透性和感光性，将受检组织或脏器显象在胶片上。瞬间曝光成像。

##### 3) X 射线造影技术

用造影剂注入到受检脏器，以增加它们与周围组织的对比度，提高影像分辨率的技术。

· 典型应用：消化道检测常用的硫酸钡（钡餐）等心血管造影（介入放射学）

· 造影剂（对比剂）：为增强影像观察效果而注入（或服用）到人体组织或器官的化学制品。这些制品的**密度高于周围组织**，形成的对比用图像显示出来。各种碘制剂；注入动脉或静脉。最主要的成分是**碘**。碘不透 X 线，拍 X 光片时，可利用碘在体内的分布产生对比，用于诊断。对比剂不参与体内代谢，经泌尿系统排出体外。

· 机理：X 射线与不同密度物质发生相互作用，密度不同，射线吸附系数不同，影像上的灰暗程度不同。是一种二维成像技术。

#### 2 X 射线计算机断层摄影技术（XCT） P173

1972 年英国 EMI 公司 Hounsfield 研制成世界上第一台 XCT 机。CT（Computed Tomography）是计算机断层摄影的缩写。它克服了 X 射线平面图像在深度方向的重叠，可以得到人体脏器断层（即一薄层）图像，许多断层像重建成三维立体像。是一种三维成像技术。照射剂量也较大，比胸片大很多（体检没有 CT，有胸片——X 射线透视）

##### 1) X 射线与人体相互作用

· 康普顿散射：光子与自由电子或原子中束缚得不太紧的电子碰撞，将一部份能量传递给电子，使之脱出原子成为反冲电子，光子则因损失能量成为能量更小的光子，且改变运动方向。

· 光电效应：光电效应导致 X 射线光子在作用处被吸收。

· X 射线的衰减：指数衰减规律

X 射线穿过人体后，强度呈指数衰减， $I = I_0 \times e^{-\mu W}$ ，其中  $\mu$  是组织的线性衰减系数，W 是组织厚度。

· 建像方程  $I/I_0 = e^{-W\Sigma\mu} = e^{-\Sigma\mu/n}$   $\Sigma\mu = 1/W \ln(I_0/I)$

· CT 值  $\text{CT 数} = \frac{\mu_{\text{组织}} - \mu_{\text{水}}}{\mu_{\text{水}}} \times 1000(\text{H})$

	空气	脂肪	水	血液	脑白质	脑灰质	凝固血	致密骨
$\mu$	-1000	-100 ~ -80	0	12	22 ~ 32	36 ~ 46	56 ~ 76	1000

· XCT 扫描系统组成 P178

采样系统：X 射线发生器、准直器、探测器、计算机借口和冷却系统等。

图像处理系统：核心是计算机，硬盘、软盘、打印机、磁带机、D/A、图像显示器、照相机和系统软件等

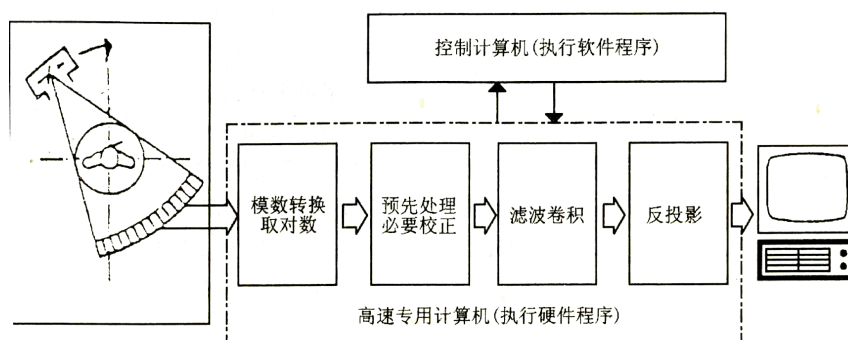


图 6.2.7 CT 中计算机建像功能简图

## 二、放射治疗应用

### 1 肿瘤放疗的发展历史——肿瘤治疗的三大手段之一 P180

1895 年伦琴发现 X 射线

1942 年原子反应堆问世，制造出多种人工放射性同位素。

50 年代  $^{60}\text{Co}$ （半衰期短只有五年，有强的伽马射线，有一定的危险性）治疗机出现。 P181

60 年代医用电子感应加速器、医用电子直线加速器应用于临床。

70 年代开始对 neutron、质子、负  $\pi$  介子和重离子等的应用进行研究，出现 X-刀和  $\gamma$ -刀。

80 年代后对恶性肿瘤的 70% 进行放射疗法。

### 2 放射治疗的原理及射线源 P180

- 定义：放射治疗学是利用核射线（X、 $\beta$ 、 $\gamma$  和质子，中子流等）对疾病进行辐射治疗的学科。
- 基本原理：当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。
- 射线的来源：放射性同位素产生的  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  射线；X 射线治疗机和各类加速器产生的不同能力 X 射线；各类加速器产生的电子束、质子束、中子束、负  $\pi$  介子和重离子束等。

放射性核素：可以体外照射、腔内照射或组织间照射，也可口服或静脉注射，进行内用同位素治疗。

射线装置类：**只能体外照射**（考试分清问的是射线装置还是核素）

### 3 放射治疗设备

- 1) X 射线治疗机：Energy 6 Mev（较大能量） Dose Rate 2 Gy/min

按照病灶深度的不同，所采用的方法分为接触治疗机（皮肤癌）、表层治疗机（浅层）、中层治疗机（皮下中层组织）、深部治疗机（组织深部的病灶）。

- 2)  $^{60}\text{Co}$  治疗机：Energy 1.17 Mev/1.33 MeV

穿透力强，深部治疗比 200 千伏的 X 射线大 15%。

皮下反应轻，骨骼和软组织的吸收剂量相等，旁向散射小，经济可靠，结构简单。

\*骨组织和其他组织的吸收剂量在低能射线时差别很大（骨组织高），高能射线近于相等。

- 3) 加速器——电子直线加速器

医用电子直线加速器是医疗器械领域设计制造复杂、技术含量最高的产品，也是目前治疗肿瘤的主流设备。

- 4) 立体定向治疗

1949 年瑞典神经科学家 Leksell 首先提出了放射外科学理论，设想利用定向技术，使用大剂量的高能射线束（X、 $\gamma$ 、质子、中子等）一次性摧毁靶点的病变组织。

**1968 年 世界上第一台  $\gamma$  刀** 此后  $\gamma$  刀开始用于治疗各种神经外科和癌症疾病。

- $\gamma$  刀 P184

原理：将多个放射源静止地照射到一点上，使该点的剂量很大，从而达到治疗的目的。

组成：六部分，放射系统、校准系统（头盔）、手术台、控制台、液压系统和计算机治疗计划系统。

特点：**无手术治疗**，病人无痛苦；手术**精确**，误差小（ $\pm 0.1\text{mm}$ ）；**简便省时**，通常治疗不超过 3 小时；

新一代  $\gamma$  刀配合 CT、MRI 及计算机，使治疗过程**自动化和程序化**

临床适应症：**所有脑内良、恶性肿瘤**（脑膜瘤、垂体瘤、脑转移瘤、松果体瘤、三叉神经瘤、听神

经瘤、血管网织细胞瘤、脊索瘤、雪旺氏神经鞘瘤等）；**癫痫；脑血管畸形、脑血管瘤；五**

**官肿瘤**（鼻咽癌、颅咽管瘤、鼻血管纤维瘤、内耳肿瘤、眼球后肿瘤）；**功能性脑神经疾病**（三叉神经痛、顽固性头痛等）

· 硼中子俘获癌症治疗（BNCT）

原理：将含  $^{10}\text{B}$  元素的 BNCT 药物注射到人体中，药物对肿瘤的选择性越高越好，每克肿瘤组织达到  $30\mu\text{g}$  的  $^{10}\text{B}$ ；由加速器产生的中子源经慢化后变为  $1\text{eV}-1\text{keV}$  范围内的**超热中子**，**照射到病变组织**，与  $^{10}\text{B}$  发生俘获反应，反应方程为  $^{10}\text{B} + \text{n} \rightarrow {}^4\alpha \text{ (1.78 MeV)} + {}^7\text{Li} \text{ (1.01 MeV)} \text{ 4\%}$

${}^4\alpha \text{ (1.47 MeV)} + {}^7\text{Li} \text{ (0.84 MeV)} + \gamma \text{ (0.48 MeV)} \text{ 96\%}$

${}^4\alpha$  粒子和  ${}^7\text{Li}$  核**射程都很短** ( $5\mu\text{m}$  和  $8\mu\text{m}$ )，它们能有效地杀死癌细胞而对周围正常细胞损伤很小。

突出优点：中子的穿透性比质子和重离子好，容易实现深部癌症治疗；

BNCT 用的是低能中子，与快中子治疗相比，低能中子**对人体正常细胞的伤害要小得多**；

发挥治疗作用的  $\alpha$  粒子和  ${}^7\text{Li}$  重离子具有**局域性好**的特点；

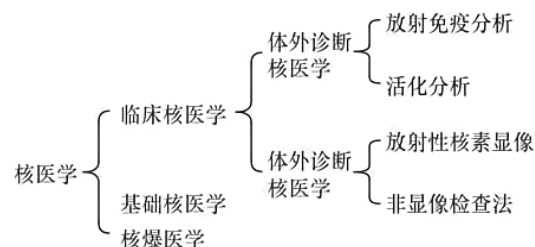
药物的选择性提高了 BNCT 治疗癌症方面的优势。

### 三、核医学的应用

上世纪 30 年代开创 核医学就是一门利用开放型放射性核素来做诊断和治疗的医学科学。

肿瘤治疗可以不用核素， $^{60}\text{Co}$  用的只是照射源放出的射线，如果有危害是来自于**内照射**。

#### 1 核医学的分类



#### 2 核医学特点

高灵敏度，目前已可测量 300 种以上的活体，可探测到  $10^{-9} \sim 10^{-15}$  克

无创伤性 反映体内的生化和生理过程 同时反映组织或脏器的形态与功能 动态观察

#### 3 核医学必备条件

##### 1) 放射性药物

凡需引入人体内的放射性核素和放射性标记物称作放射性药物按不同用途分为诊断用放射性药物和治疗用放射性药物。

##### 2) 放射性试剂

不需引入人体的放射性核素和放射性标记物。

##### 3) 核医学仪器

显像用的核医学仪器： $\gamma$  照相机；单光子发射计算机断层（SPECT）；

正电子发射计算机断层（PET）；扫描机（scanner）

非显像用核医学仪器：甲状腺功能测定仪、肾图仪、 $\gamma$  心功能仪、局部脑血流测定仪和骨密度测量仪等  
体外诊断用的核医学仪器

##### 4) 工作场所——开放性放射性核素工作场所

用于核医学的工作场所必须符合辐射安全与防护要求。

对工作场所按三区制原则配置：非活性区、低活性区、高活性区

#### 4 核医学影像设备

X 射线和超声成像设备都是由外部向人体发射某种形式的能量，根据能量的衰减或反射情况来成像。

核医学影像设备则是向人体注射放射性核素示踪剂，使带有放射性核素的示踪原子进入人体内要成像的脏器或组织，使它们变成射线源，然后通过测量放射性核素在人体内的分布来成像。

X 射线计算机断层是属于透射式计算机断层（transmission computed tomography，简称 TCT 或 XCT）**体外**  
放射性核素计算机断层属于发射型计算机断层（emission computed tomography，简称 ECT）**体内**

## 1) 医学影像设备分类

### • 单光子系统

用这种系统造成的平面投影图像的设备称为  $\gamma$  相机

产生断层图像的设备称为单光子发射计算机断层 SPECT

目前医院中用得最多的 SPECT 称为旋转  $\gamma$  相机型的 ECT，这种 SPECT 是  $\gamma$  相机探头加上旋转机构和图像重建软件，它包含了  $\gamma$  相机的功能，增加了断层图像获取和图像重建功能。

SPECT 与  $\gamma$  相机比较：

SPECT 优点	SPECT	$\gamma$ 相机
三维立体信息	由许多二维断层图像重建形成三维图像	只能得到二维重叠图像
全定量的分析手段	可得到单位体积的放射性浓度，能反映脏器深度方面的活性差异，这是开展定量分析的基本依据	测得的放射性强度是单位面积的迭加信息
改变了脏器深度方面的空间分辨率		对表浅部位容易探测，对脏器深部就困难，深部信息重叠在一起，很难分辨

SPECT 与 XCT 比较：

SPECT	XCT
<b>发射式成像设备，射线源在体内</b>	<b>透射式成像设备，射线源在体外</b>
图像分辨率只有 4mm，图像清晰度不如 XCT	空间分辨率高，可达到小雨 0.5 mm，图像清晰
射线源为 $\gamma$ 射线	射线源为 X 射线
测得的图像反映脏器的结构和功能	测得的图像反映脏器形态
在图像重建方面，一般都采用滤波反投影的重建方法	

### • 正电子发射计算机断层 PET

ECT 的另一大类就是 PET。SPECT 探测器接收来自体内的示踪核素发出的  $\gamma$  射线，而 PET 探测器接收体内正负电子湮没辐射所产生的一对 511 keV  $\gamma$  光子，在物理上两者无明显区别，但方法上有很大不同。

发射正电子的核素： $^{11}\text{C}$ 、 $^{15}\text{O}$ 、 $^{18}\text{F}$ 、 $^{13}\text{N}$

在脑功能研究、心肌显像、肿瘤学有非常广泛和独特的应用。

### • 医学上的核素半衰期是越长越好还是越短越好？

短一些好，今天用量最多的是锝 99 基态， $\gamma$  射线衰变的核素，半衰期 6 个多小时；例如想知道心肌哪一块坏死，只需口服放射性物质，在一个小屋里，都是受照者也都是放射源。

## 2) 放射性核素显像的基本条件

具有能够选择性聚集在特定脏器、组织和病变的放射性核素或放射性标记物，使该脏器、组织或病变与邻近组织之间的放射性浓度差达到一定程度；

利用核医学显像装置探测到这种放射性浓度差，根据需要以一定的方式将它们显示成像，即是脏器、组织或病变的影像。

## 3) 放射性核素显像方式

静态 / 动态 局部 / 全身 平面 / 断层 阳性 / 阴性

## 5 放射性非显像检查法

方法一：测量时间—放射性曲线 方法二：直接探测肿瘤和淋巴引流区的放射性计数

## 三、核医学应用

### 1 核科学诊断应用领域

神经、心血管、消化、呼吸、泌尿生殖、骨骼、内分泌、肿瘤和感染

### 2 放射性核素治疗 (治疗核医学)

放射性核素是将开放型放射性核素或其标记物引入体内，利用核素发射出的  $\beta$  粒子的电离辐射生物效应，抑制或破坏病变组织，达到治疗目的。由于合适的放射性核素或其标记物能有选择性地浓聚于病变组织，所以病变部位的局部受到大剂量的照射，二周围正常组织所受辐射很低，损失较小。

前列腺癌已经不致命了 (局部的强  $\alpha$ ， $\beta$  核素)；结肠癌也是；最早有效走向临床的

## • 电离辐射既可以导致肿瘤有可以治疗肿瘤，解释矛盾？

电离辐射具有足够的能量来电离原子和分子，从而损伤 DNA。DNA 损伤如果得不到修复或修复错误，可能导致基因突变，这些突变有时会导致细胞失去正常的生长控制，进而形成肿瘤。在肿瘤治疗中，电离辐射被精准地应用于肿瘤细胞以破坏其 DNA，阻止其分裂和生长。两者作用的对象和控制程度不同：

1. 剂量和暴露时间：肿瘤形成通常是由于长期低剂量辐射或短期高剂量辐射的累积效应。而在治疗中，使用的是高剂量辐射，短时间内集中作用于肿瘤细胞。
2. 精确性：放疗中的电离辐射是精确控制和定向的，旨在最大限度地杀死肿瘤细胞并保护正常细胞。而导致肿瘤的辐射暴露往往是非定向的，影响广泛的细胞。
3. 生物效应：电离辐射对细胞的影响取决于细胞类型和其对辐射的敏感性。癌细胞通常比正常细胞对辐射更敏感，放疗利用这一特点选择性地破坏癌细胞。

## 第十章 核技术在当今社会的广泛应用

### 一、辐射射线的应用

#### 1 辐射源与辐照装置

##### 1) 放射性核素源

$^{60}\text{Co}$	半衰期：5.27 年	$E_{\gamma}$ ：1.17MeV；1.33MeV	应用最广，医学照射肿瘤/供照射动物等实验
$^{137}\text{Cs}$	半衰期：30.2 年	$E_{\gamma}$ ：0.6MeV	一般以 CsCl 的形式存在
$^{192}\text{Ir}$	半衰期：73.8 天	$E_{\gamma}$ ：0.4MeV	能量小，装在铅罐里，可移动式工业 $\gamma$ 照相探伤

##### 2) 辐照装置

X 射线机和加速器：X/  $\gamma$ -ray；电子束；质子及多种重离子等

##### 3) 典型应用

##### 1. 放射性静电消除器

工业生产过程中，由于摩擦、剥离等原因，在绝缘体上容易产生静电荷的积累。

- 原理：利用放射性核素产生  $\alpha$  射线，电离空气，形成正负离子，以中和积聚在带电体表面的异性电荷。
- 应用领域：纺织、印刷、造纸、卷烟、橡胶、塑料、电子和感光胶片等行业。
- 常用核素： $^{210}\text{Po}$  极毒组

##### 2. 烟雾报警器

- 原理：浓烟进入探测器空气密度改变， $\alpha$  粒子穿透本领弱，探测器探测不到时报警。今天多用电子报警器
- 核素： $^{241}\text{Am}$  剧毒组

##### 3. 核电池

- 原理：衰变热转换电能
- 应用领域：航天器、海岸灯塔、南北极等环境，150 mg  $^{238}\text{Pu}$  起搏器可连续工作 10 年
- 常用核素： $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{238}\text{Pu}$  半衰期上万年，稳定

#### 2 辐射测量技术应用

##### 1) 放射性仪表

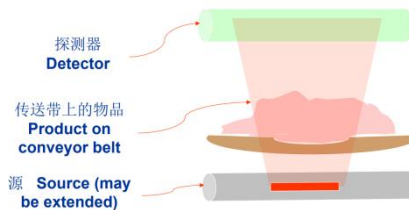
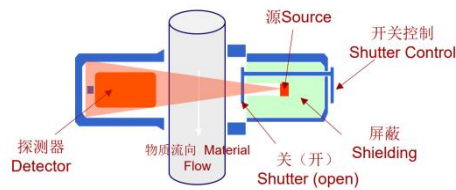
厚度、质量、料位、水分、密度、温湿度、转速等重要参数，应用在**自动化生产**和**质量控制**等方面。

- 基本原理：利用射线与物质发生相互作用时产生的种种效应（如贯穿、散射、电离、激发、吸收、衍射等），制作成各种各样的检测、控制和分析测定仪表。
- 基本结构：  
在测量对象的一侧布放准直的放射源，正对着另一侧，安装相应的辐射探测器和电子测量装置。  
料位计和密度计： $\gamma$  射线  
厚度计：根据厚度范围要求。钢板： $\gamma$  射线， $^{60}\text{Co}$ ，强；塑料等高分子材料：强  $\beta$  射线；特征 X 射线  
水分计：快中子，测量土壤、沙中水分
- 优点：操作简单，快速，不接触不破坏被测物质



## 2) 密封源的典型应用

1. 放射性物料密度测量计- $^{137}\text{Cs}$  (外用铅层屏蔽)
2. 传送带称重仪器 (核子秤) Belt weighing gauge



## 3. 料位测量仪 Level Gauges

通常一个或多个仪器和探测器被用作“开/关”，用来控制料箱或料斗中物料的位置等。大、厚壁容器可能使用 GBq 的  $^{60}\text{Co}$ 。(无需打开容器，简便、高效地判断液面)

## 4. $\gamma$ 射线探伤机

在建筑、造船和机械制造等行业，利用辐射贯穿能力强的  $\gamma$  射线，进行无损探伤检测，是检查焊缝、铸件和锻件质量的常用手段。

常用放射源： $^{192}\text{Ir}$  (射线能量弱，多用于移动式探伤机)、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{60}\text{Co}$

## 5. X 射线探伤机 三个主要部件：X 线管、控制板、高压电缆

## 3 辐射照射技术应用

### 1) 工业领域

- 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。
- 辐射作用：物理效应 化学效应 生物效应
- 广泛应用：

辐射改性：聚烯烃材料的**辐射交联与降解** (分子结构改变，改变抗辐射性、坚固性)

电线电缆，热收缩材料，泡沫塑料

表面涂层固化：液体涂料迅速固化成膜技术

### 2) 食品卫生领域

- 食品的消毒保鲜技术：

消灭食物中的微生物或病菌，杀虫，灭卵，延长保存期

抑制和控制新陈代谢和呼吸代谢，推迟成熟，减少腐烂 (灭芽)

- 特点：杀菌种类广泛 (以食物为载体的病菌：沙氏门菌，大肠杆菌，O157，链球菌)

易于规模化生产。不改变外观和口感，不含添加剂 (不是转基因技术，是一个物理的辐射过程)

- 安全性问题：IAEA, FAO, WHO 1980 年公报

平均吸收剂量在 10 kGy 以下的辐照食品，无毒性，也不会引起营养学和微生物上的任何问题

- 前景：主要障碍来自消费者心理 (建议：有法可依的基础上加强宣传)

- 现状：我国是第一辐照食品大国

### 3) 医疗卫生领域

医疗卫生用品器具的辐照消毒

- 传统的消毒方法：**加热消毒法** 耗能高，消毒不彻底

一次性使用医疗用品：塑料，乳胶等热敏材料，使用环氧乙烷气体的**化学消毒法**

- 辐照消毒

优点：消毒灭菌彻底，操作简便安全

现状：辐射消毒的普遍应用。国外产值 250 亿美元；市场占有率 30%

### 4) 农业领域

- 辐射育种

利用电离辐射处理作物种子，花粉或植株等材料，诱使遗传物质发生基因突变 (突变方向不确定)，然后通过**选择和培育**使有益的变异遗传下去，达到改良和创新品种的目的。让植物具备抗病虫、耐寒、耐



旱、高产以及形状颜色改变等特性。中国是辐射育种的大国。

- 防止和根除害虫

化学杀虫剂：土壤污染；害虫耐药

辐射不育法：“以虫灭虫”生物防治

- 5) 环境保护领域

- 烟道气体脱硫脱硝的净化技术：电子加速器产生电子束（MeV 级）

100MW 煤电厂，副产品化肥的产量：2470 kg/h（农业化肥）

烟道废气主要成分：水蒸气和  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$

原理：加入氨 + 辐射照射  $\rightarrow$  离子化、分子分解、自由基形成，同时生成硫酸铵和硝酸铵，化肥主要成分

- 6) 海关安检领域

应用辐射照射成像原理的海关港口集装箱检测系统

- 钴源或加速器；固定检测装置、流动检测装置；断层成像，精确检测

- X 射线源：6MeV 电子直线加速器；分辨率：1.5 mm；

- 平均检测速度：25 个 40 英尺标准集装箱/小时；

- 小型化和智能化；打击走私；爆炸物检测；应用在海关、机场、码头、车站等

## 二、同位素示踪技术应用

**示踪技术：**将可探测的放射性核素添入化学、生物或物理系统中，标记研究材料，以便追踪发生的过程、运行状况或研究物质结构等的科学手段。

**示踪剂（TRACER）：**一种带有特殊标记的物质，当加入到被研究对象中后，人们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。

### 1 放射性示踪技术的特点

灵敏度高	可探测 $<1 \text{ nCi}$ , $10^{-14} \sim 10^{-13} \text{ g}$	化学分析只能达到 $10^{-9} \text{ g}$
测量简便、易分辨	不受非放杂质干扰，活体研究，体外测量	
提供原子、分子水平的研究手段	微观作用机理、动态变化过程	
合乎生理条件	不扰乱体内生理过程的平衡状态	
能定量定位	组织器官、细胞、亚细胞水平	

### 2 放射性示踪剂的选择——根据实验目的和要求

- 放射性半衰期

- 辐射类型和能量：

$\beta$  探测效率高，易于防护 ( $^{32}\text{P}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^3\text{H}$ )； $\gamma$  穿透性好，100-600 keV ( $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ,  $^{111}\text{In}$ ,  $^{201}\text{Tl}$ )

- 放射性比活度：原始比活度足够高

- 放射性核素的纯度：检验放射性纯度和放射化学纯度；提纯

- 放射性核素的毒性：尽量选择低毒组核素； $^{90}\text{Sr}$  高毒， $^{89}\text{Sr}$  中毒

- 示踪剂的生物半衰期：选择生物半衰期短的示踪剂，减少辐射剂量

### 3 放射性示踪技术在化学中的应用

分子结构的研究：同位素交换反应

化学反应机理研究

化学键的形成方式

反应中发生的分子重排、异构、裂解、水解过程

催化反应中吸附催化机理、吸附分子寿命

### 4 放射性示踪技术在生物学中的应用

17 世纪：光学显微镜发明标志着生物医学发展中的里程碑

20 世纪：放射性示踪技术的诞生对生物学推进同样重要

研究植物的营养生理、对营养元素以及农药的吸附、转运、分配和积累规律。

研究人和动物体内物质吸收、分布、代谢和排泄情况。

为分子生物学提供原子和分子水平的研究手段。

**应用于基因工程。**（基因学的突破与同位素示踪技术的应用有密切的关系）

### 5 放射性示踪技术在光合作用研究中的应用

单细胞绿藻悬液+光+ $^{14}\text{C}\text{O}_2 \rightarrow$  纯化悬液, 提取内含物  $\rightarrow$  双向纸层析分离  $\rightarrow$  放射自显影

$^{14}\text{C}$ -3-磷酸甘油酸  $\rightarrow$   $^{14}\text{C}$ -1, 3-二磷酸甘油酸  $\rightarrow$   $^{14}\text{C}$ -葡萄糖

1940: Calvin 确定了碳固定循环, 并发现了相应的酶

1961: 获诺贝尔生物学奖

## 6 放射性示踪技术在生物化学中的应用

生物体内的物质代谢: 确定代谢途径或中间代谢环节; 找出代谢物在体内发生变化之后的产物;

找出体内存在的各种生化物质的前身

例: 研究植物对磷肥的吸收过程

$^{31}\text{P}$  (稳定)  $^{32}\text{P} \rightarrow ^{32}\text{S} + \text{e}^- + \bar{\nu}$  半衰期 14.3 天, 电子能量 1.7 MeV

## 三、核分析技术应用

定义: 核分析方法是利用中子, 光子和带电粒子与物质的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。

分类: 活化分析 (Activation Analysis)、离子束分析 (Ion Beam Analysis)、核效应分析 (Nuclear Effect Analysis)

优点和特点: 灵敏度高 准确度好, 误差小, 不破坏样品的宏观结构

可多元素同时分析

易于自动化和远距离控制

### 1 中子活化技术

- 原理: 中子辐照稳定核素, 通过活化反应生成放射性核素, 测量放射性核素的半衰期、衰变类型与能量等衰变特性进行鉴定。

- 应用: 定性和定量地测定复杂样品原子组成的一种高灵敏度无损检验方法, 应用于空气、水、土壤样品、地质样品、海洋系统和生物系统中痕量组分的分析。

- 特点: **高灵敏** ppm ( $10^{-6}$ ) /ppb ( $10^{-9}$ ) **多元素** 一次同时分析 30~40 种核素  
**非破坏** 利用原样品

中子活化分析广泛用于: 头发样品、土壤、水质分析

- 获得痕量核素的定量分析应用举例: 恐龙灭绝原因

6500 万年前小行星 (高含 Ir) 或者彗星冲撞地球, 在空气中产生了大量碎片, 地球上阳光大大减少, 植物不能生长, 食物稀缺, 动物数量毁灭性减少, 导致大多数动物包括恐龙灭绝了。

中子活化分析技术测定了世界上几个地方, 相应于白垩系/第三系 (K/T) 的界限内黏土层中铱 (Ir) 的含量比普通背景值高出 30-160 倍, 认为铱是地外物质指示元素, 提出了小行星撞击地球的假设; 后来在许多地方, 包括我国在内也发现了类似的结果, 进一步支持了小行星撞击地球灾变学说。

地球表层 Ir  $1\mu\text{g/kg}$  (ppb) 陨石  $n \times 100\mu\text{g/kg}$  (数量级差异)

- 中子活化分析应用举例: 破解拿破仑与牛顿死亡之谜

拿破仑 1821 年 5 月 5 日死于流放的小岛上。有许多猜测: 胃癌、谋害、进入金字塔受惊而死等。

1961 年一位瑞士人给英国法医部门送去了一个写有“不朽的拿破仑之发”的信封。拿破仑死后第 2 天整容时取下的。中子活化分析分段测量发现头发中部 45cm 范围内砷 (As) 含量高达  $11 \times 10^{-6}$  克, 超出正常人 13 倍。推算砷中毒时间长达数月。

结论: 拿破仑死于砒霜 ( $\text{As}_2\text{O}_3$ ) 慢性中毒急性发作。

牛顿 (1642-1727) 两束头发中汞 (Hg) 铅 (Pb) 铋 (Sb) 等含量超标。因汞、铅、铋中毒而死, 否认了内脏结石症的传统说法。牛顿怎样会重金属中毒呢? 晚年开展光学和化学实验经常与这些重金属打交道; 喜欢鉴赏重金属, 经常用手抚摩; 一间居室用含有有毒硫化汞漆粉刷。

### 2 加速器质谱 AMS 分析技术

**原理:** 质谱分析是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分析方法。

**组成:** 质谱技术+粒子加速器技术+离子探测和计数技术

北京大学物理学院-加速器质谱计 (一楼加速器实验室): 1992 年建成, 1993 年投入工作

$^{14}\text{C}$  放射性测量年代研究-AMS (dating)

- $^{14}\text{C}$  生成: 宇宙射线中子与大气中的 N 发生核反应生成。β 放射性核素; 半衰期: 5730 年

- 前提条件: 大气中  $^{14}\text{C}$  生产率不变; 同年代自然界中有生命的物质,  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  比率一定;

生物样品死亡后 C 与外界交换停止。

• 基本公式:

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

- AMS 优点: 所需样品少 (1~5 毫克)      灵敏度高 ( $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  比率约  $10^{-16}$ )  
测量年代可扩展到 7.5-10 万年      测量时间短 (几分钟)

**\*太原是一个冬天严重烧煤的城市，而北京则相对没那么严重，那么空气中  $^{14}\text{C}$  和  $^{12}\text{C}$  的比例孰高孰低？**

由于燃料形成于数百万年前，其中的  $^{14}\text{C}$  已经全部衰变，燃烧化石燃料不会向大气中增加新的  $^{14}\text{C}$ ，因此北京空气中的  $^{14}\text{C}$  和  $^{12}\text{C}$  的比例更高。

• AMS 应用举例: 耶苏裹尸布年代考察

1988 年 4 月 21 日，关闭了保安系统，大不列颠博物馆考古权威和大主教一起进入都灵教堂，从裹尸布上取下 3 小块分别装入标有号码的金属瓶子，同时还有类似的已知年代的物品 3 种 (1 世纪, 11 世纪, 14 世纪)，都只有编号没有任何其他标示，分发给 3 个当时最权威的 AMS 实验室测量。

亚利桑那大学 牛津大学 苏黎世工学院

结果惊人一致: 在公元 1260-1380 年的可能性 95%，决不会早于公元 1200 年 100%

• AMS 应用举例: 冰人

1991 年在阿尔卑斯山中发现，与现代人不同，引起轰动。取了骨骼和臀部肌肉 20-30mg，用加速器质谱测量  $^{14}\text{C}$  的含量。结果表明: 冰人生活年代

3350-3300 BC 56%      现在认为 公元前 3350-3100 年

3210-3160 BC 36%      与历史发展 (铜器时代) 吻合

3140-3120 BC 8%

## 第十一章 协和医院历史

• 放射治疗起源于 X 线和镭的发现

1895 年      伦琴在德国发现 X 射线      1896 年      贝克勒尔发现铀放射现象

1898 年      居里夫妇提取出放射性镭

• 放疗历史与发展

1896      第一例放射治疗      1920      X 线治疗喉癌 镭治疗宫颈癌

1930      建立了分次放疗的方法      1950      钴-60 治疗恶性肿瘤

1970      CT 应用于肿瘤诊断和治疗: 加速器治疗恶性肿瘤; 模拟定位机应用

1980      MRI 应用于肿瘤诊断和放疗: 放疗计划系统 (TPS) 应用

1990      适形放射治疗及调强放射治疗 (IMRT): CT 模拟机

• 放疗设备和技术飞速发展

上世纪三十年代      KV 级 X 射线      五十年代      钴治疗机 1.12MeV

七十年代后      高能直线加速器

二十一世纪 高精度集成加速器来发展: 高 LET 射线; 二维常规放疗 2DRT

• 模拟定位与计划采用二维工具

二维常规模拟定位机再现加速器机械几何设计; 在模拟机下能够拍摄 X 光胶片

局限性: ①二维影像、2-D TPS 在确定下属范围时精度太低——肿瘤空间分布与侵袭范围、关键器官与组织的空间分布、肿瘤/正常组织的空间关系

②高剂量区与靶区的适形度较低

随着技术进步, 出现了立体定向技术 (1.0 版-头部)

SRT: Stereotactic Radiotherapy 立体定向放射治疗      SRS: Stereotactic Radiosurgery 立体定向放射外科  
三维适形放疗 3D-CRT (3D Conformal Radiotherapy)

• 普通放疗 vs 适形放疗: 更好的剂量适形度, 周围正常组织受量更低

• 什么是多叶准直器 MLC? MLC: Multi- Leaf Collimator

- **立体定向放射外科技术 (2.0) -全身**

立体定向放射手术, SRS: Stereotaxic Radiosurgery

立体定向体部放射治疗, SBRT: Stereotaxic Body Radiotherapy

立体定向消融放疗, SABR: Stereotactic Ablative Radiotherapy

- **在线自适应放射治疗 (人工智能驱动)**

Ethos 系统

1. 初始计划设计: 交互式 4D 处方系统、全自动结构勾画、生成多个治疗计划

2. 在线自适应: 15 分钟、患者摆位和 iCBCT 图像引导、全自动结构勾画、勾画评估、计划生成、质量控制和计划审核、治疗实施

3. 治疗监测: 自动剂量学监测、自动结构监测、辅助离线自适应治疗

在任一阶段 多模态影像自动融合

- **质子治疗是更精准的前沿放疗技术**

质子治疗是通过质子射线杀灭癌细胞的放疗前沿技术, 相比传统放疗:

质子线具有 Bragg 峰效应, 实现肿瘤细胞的精准“分破”; 肿瘤后端无穿透剂量;

减少治疗对肿瘤临近正常组织的损伤; 明显提高肿瘤控制率, 减少放射引起的副作用

降低继发性肿瘤发生率

- **质子治疗的发展趋势**

质子设备小型化是趋势, 小型单室设备占地面积小 (仅数百平方)、投资成本大幅下降、复杂性大幅降低可安装任现有院区, 做为现有放疗科的组成部分, 共享现有放疗医疗资源;

设备操作和维护过程简单易行; 方便患者在医院内部就诊治疗; 有可能进一步降低患者使用质子治疗的费用;

如果病人数量特别多, 大型多室治疗在病人摆位上节省时间

- **主要放疗设备**

体外远距离治疗 (外照射) -EBRT

钴-60 治疗机; 医用直线加速器 (C 形臂、环形机架、其它);  $\gamma$  刀; 粒子治疗 (质子、重离子系统)

体内近距离治疗 (内照射) -Brachytherapy

后装治疗机 (HDR); 永久性粒子植入 (LDR)

放疗配套设备

X 线常规模拟机, CT 模拟机、MR 模拟机、多模态图像引导设备

治疗计划系统, 放疗信息系统

- **放射治疗设备下一步努力方向和建议**

大型公立医院承担了超过 80% 的肿瘤治疗任务, 已超负荷运转, 难以满足日益增长的肿瘤治疗需求, 需要发展基层公立医院和民营医院。

- **怎样解决发展不平衡**

建立国家和区域医疗中心; 发展壮大基层医疗; 发挥互联网优势, 建立诊疗技术网络

## 附录一 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：迈克耳逊－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，迈克耳逊（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：“迈克耳逊－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。迈克耳逊—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看来，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”。

## 附录二 目录

第一章 原子核与放射性	6
1. 原子与原子结构	6
2. 原子核与原子核的基本性质	8
3. 放射性衰变和衰变规律	15
4. 原子核反应	19
5. 核辐射通过物质时的作用与效应	21
6. 核辐射的量度及其单位	28
7. 核科学的基本工具与测量	31
第二章 核能利用与核武器	39
1. 裂变能利用原理与核电站	39
2. 聚变能的利用	48
3. 核电在世界能源中的地位与作用	53
4. 世界核电发展形势与中国核电发展战略	60
5. 核武器与美国的“曼哈顿工程”	62
6. 中国原子弹制造	69
第三章 高灵敏的核分析与核检测	83
1. 核分析——不可替代的现代分析方法	83
2. 几种常用的核分析方法	86
3. 现代化工业生产的尖兵——放射性同位素核检测	105
第四章 电离辐射人体效应与安全防护	112
1. 电离辐射对人体的作用	112
2. 人类受到的核辐射照射和水平	116
3. 核辐射防护的原则、剂量限值和评价	123
4. 核辐射安全防护方法与剂量监测	126
第五章 电离辐射技术在工农医中的应用	131
1. 导论	131
2. 聚烯烃绝缘材料辐射交联改性	136
3. 医疗用品的辐射消毒	142
4. 辐射固化	148
5. 核农业	156
6. 其他应用领域	166
第六章 放射诊断治疗与核科学	170
1. 放射诊断学	170
2. X射线计算机断层成像系统 (XCT)	172
3. 放射治疗学	180
4. 核医学概论	190
5. 核医学影像设备	196
6. 核医学的临床应用	201
第七章 科学之晨星——核示踪	207
1. 示踪法特性	207
2. 放射性核素在化学中的演示	209
3. 生物科学中的放射性示踪物	212
4. 当代疑难病的解药——核药物	217
5. 放射性标记化合物	226
6. 核示踪评估	230