

核化学

OCT 18



星云的细线是一颗恒星的遗骸，该恒星在大约 11,000 年前的一次巨大的超新星爆炸中结束了生命。在这个巨大的气体壳的中心附近是一颗快速旋转的中子星，它是原始恒星幸存的核心

学习内容

- 25.1 区分 α 、 β 粒子和正电子
- 25.2 描述放射性衰变系及其一些应用
- 25.3 写出轰击给定元素以产生放射性核素的核反应的化学方程式
- 25.4 讨论超铀元素是如何产生的
- 25.5 使用放射性粒子衰变率的数学表达式来确定它们的半衰期
- 25.6 描述核结合能的含义以及它与核聚变和裂变的关系
- 25.7 确定影响核稳定性的因素
- 25.8 描述一个核裂变核反应堆
- 25.9 讨论核聚变的潜在应用及其局限性和危险
- 25.10 讨论辐射可能与物质相互作用的类型
- 25.11 描述放射性同位素的一些应用

25-1 放射性

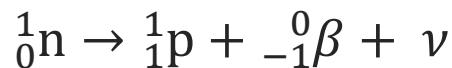
- 元素起源于恒星——包括太阳；恒星中的核聚变从较轻的元素产生较重的元素
- 原子序数大于等于83的重元素的原子核是不稳定的，它们具有放射性
- 某些较轻元素的同位素也具有放射性，例如碳-14的物理和化学性质与碳-12和碳-13基本相同，但碳-14具有放射性；根据这种特性开发了放射性碳测年技术
- 此前我们学习的化学都围绕着原子核外的电子展开，本章将学习与原子核有关的现象，这些现象统称为核化学
- 放射性是居里夫人提出的，用来描述某些较重元素发射的电离辐射
- 电离辐射可与物质相互作用产生离子，也就是说辐射的能量足以破坏化学键
- 有些电离辐射是粒子的，是非粒子的；我们已经学习了 α ， β 和 γ 辐射

25-1 放射性

- **α 粒子**是氦-4原子的原子核， ${}^4_2\text{He}^{2+}$ ， 其从某些放射性原子的原子核中自发地喷射出来
- 可将 α 粒子发射视为一个过程， 不稳定的原子核发射两个质子和两个中子， 留下更轻的原子核
- α 粒子在穿过物质时与原子的碰撞和接近碰撞产生大量离子， 但它们的穿透力很低（通常几张纸就可阻挡）
- 因为它们带有正电荷， 粒子会被电场和磁场偏转
- 通过**核反应方程式**来表示粒子的产生， 书写核方程的规则：
- 两边的质量数之和必须相同； 两边原子序数之和必须相同
$${}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\text{Th} + {}^4_2\text{He}$$
- 质量数总计238， 原子序数总计92； α 粒子的丢失导致原子序数减少2， 原子核质量数减少4

25-1 放射性

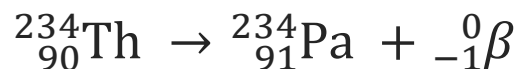
- β^- 粒子在电场和磁场的作用下沿与 α 粒子相反的方向偏转；它们比 α 粒子质量小，因此偏转得更强烈；它们比 α 粒子具有更大的穿透物质的能力（大概需要一本书，而不仅仅是几张纸来阻止它们）
- β^- 粒子是电子，但它们是核衰变过程中原子核产生的电子，因此具有极高的能量；原子核周围的电子更常用 e^- 表示
- 产生 β^- 粒子的最简单的衰变过程是自由中子的衰变，自由中子在原子核外是不稳定的



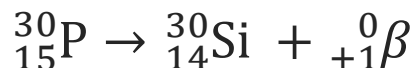
- β^- 粒子没有原子序数，但它的 -1 电荷等价于 -1 的原子序数；核方程中， β^- 粒子表示为 ${}_{-1}^0\beta$ ；此外相比于质子和中子， β^- 粒子足够小，在大多数计算中可以忽略其质量
- 式中的 ν 表示中微子，1930年人们提出 β^- 衰变会产生中微子，但直到1950年才发现；直到现在人们对中微子也知之甚少，例如其静止质量

25-1 放射性

- 对于典型的 β^- 衰变过程，可以认为原子核内的中子自发转换为质子和电子；质子保留在原子核中，而电子作为 β^- 粒子发射；最终原子序数增加1，而质量数不变；难以捉摸的中微子通常不包括在核方程中



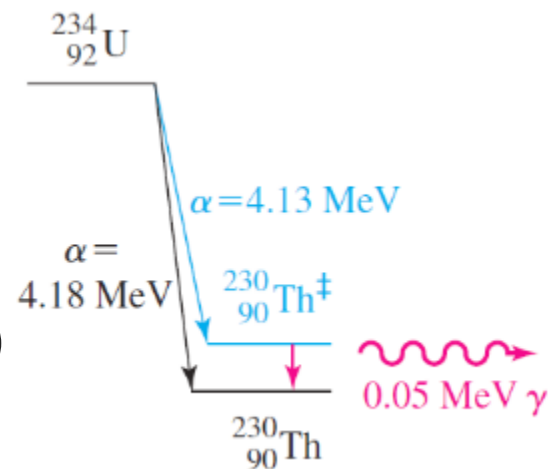
- 类似的，在某些衰变过程中，原子核内的质子转化为中子，并发射出 β^+ 粒子和中微子： ${}_1^1\text{p} \rightarrow {}_0^1\text{n} + {}_{+1}^0\beta + \nu$
- β^+ 粒子也叫**正电子**，其具有与 β^- 粒子相似的性质，但其带有正电荷；核方程中记为 ${}_{+1}^0\beta$ ，常见于人工产生的较轻元素放射性衰变



- **电子捕获(EC)**所达到的效果和正电子发射相同，这一情况下，内部电子能层（通常 $n = 1$ ）的电子被原子核吸收，它将质子转化为中子；之后更高量子能级的电子回到到被捕获电子腾出的能级时，就会发射X射线： ${}_{81}^{202}\text{Tl} + {}_{-1}^0\text{e} \rightarrow {}_{80}^{202}\text{Hg}$

25-1 放射性

- 一些产生 α 或 β 粒子的放射性衰变过程使原子核处于激发态，原子核失去能量回到基态，并发射伽马射线
- γ 射线是一种高度穿透的辐射形式，不会被电场和磁场偏转（可能需要超过几厘米厚的铅砖才能阻止）
- 在 ${}^{234}_{92}\text{U}$ 的放射性衰变中，77%的原子核会发射能量为4.18 MeV的 α 粒子；其余23%的 ${}^{234}_{92}\text{U}$ 原子核产生能量为4.13 MeV的 α 粒子
- 在后一种情况下， ${}^{230}_{90}\text{Th}$ 原子核剩余的能量为0.05 MeV；这种能量以 γ 射线的形式释放；如果不稳定的激发态Th核表示 ${}^{230}_{90}\text{Th}^\ddagger$ ，可以写：

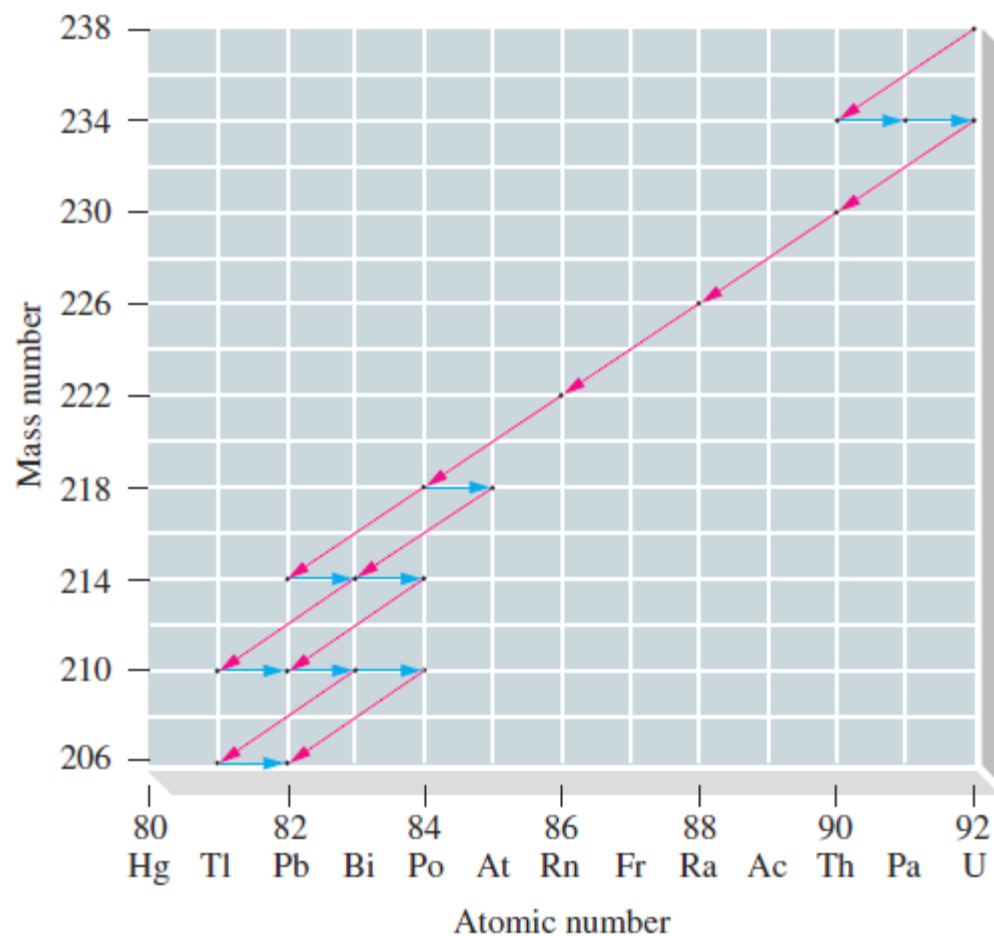


25-2 天然存在的放射性同位素

- 稳定的核素中， $^{208}_{82}\text{Pb}$ 的原子序数和质量数最大；所有已知的原子数和质量数超出它的核素都是放射性的
- 天然存在的 $^{238}_{92}\text{U}$ 具有放射性，会发射 α 粒子
- $^{234}_{90}\text{Th}$ 也具有放射性，它通过 β^- 发射衰变
- $^{234}_{91}\text{Pa}$ 也通过 β^- 发射衰变产生 $^{234}_{92}\text{U}$ ，它也是放射性的
- 子体一词通常用于描述放射性衰变中产生的新核素；因此 ^{234}Th 是 ^{238}U 的子体， ^{234}Pa 是 ^{234}Th 的子体，依此类推
- 以 $^{238}_{92}\text{U}$ 开始的放射性衰变链继续通过 α 和 β^- 发射的多个步骤，最终以稳定的铅同位素 $^{206}_{82}\text{Pb}$ 结束
- 所有天然存在的高原子序数放射性核素都属于三种放射性衰变系列之一：刚刚描述的铀系、钍系或锕系（锕系列实际上是从铀-235开始的，曾经被称为锕-铀系）

25-2 天然存在的放射性同位素

- 尽管自然放射性衰变系列中的一些子体的半衰期非常短，但所有子体都一直存在，因为它们不断地产生和衰变
- 玛丽居里在1898年发现镭时，几吨铀矿石中只有大约1 g镭-226；尽管如此，她还是成功地将其分离出来
- 铀矿石中还含有几分之一毫克的钋，她能够检测但无法分离



25-2 天然存在的放射性同位素

- 放射性衰变可用于确定岩石的年龄，从而确定地球的年龄；环境中某些放射性物质的出现也可以通过放射性衰变系列来解释
- 在香烟烟雾中可检测到核素 ^{210}Po 和 ^{210}Pb ；这些放射性同位素来自磷肥中的 ^{238}U ，吸烟与癌症和心脏病之间的联系与放射性有关
- 放射性在高原子序数的同位素中非常普遍，但在天然存在的较轻同位素中却相对较少； ^{40}K 是一种放射性同位素， ^{50}V 和 ^{138}La 也是如此； ^{40}K 通过 β^- 发射和电子捕获而衰变
- 在地球形成时， ^{40}K 比现在丰富得多；大气中的高氩含量（体积%为0.934%，几乎全部为 ^{40}Ar ）源自 ^{40}K 的放射性衰变
- 除了 ^{40}K 和 ^{14}C （由宇宙辐射产生）之外，较轻元素最重要的放射性同位素是人工产生的

25-3 核反应和人工放射性

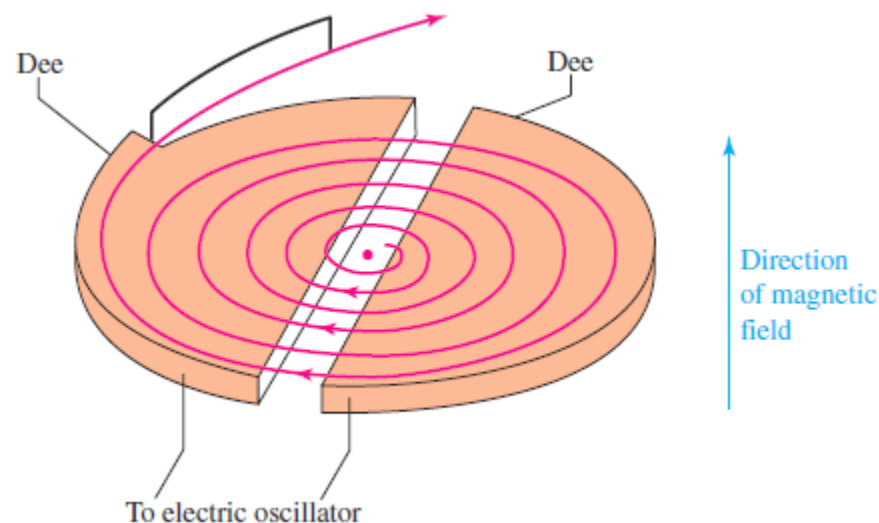
- 卢瑟福发现一种元素的原子可以转化为另一种元素的原子；他在1919年通过用 α 粒子轰击 $^{14}_7\text{N}$ 原子核，产生 $^{17}_8\text{O}$ 和质子
- 通过这一核反应，他能获得自由的质子，该过程可以表示为：
- 这一反应不是自发分解， $^{14}_7\text{N}$ 必须被另一个粒子撞击才能引发核反应
- 1934年，Irène Joliot-Curie（玛丽和皮埃尔·居里的女儿）和她的丈夫Frédéric Joliot用 α 粒子轰击 $^{27}_{13}\text{Al}$ 时，观察到中子和正电子的发射
- 当 α 粒子轰击停止时，中子停止发射；然而，正电子仍在继续发射，请通过核反应方程式解释：
- 现在已经产生了1000多种人工放射性核素，远超非放射性核素(≈ 280)

25-4 超铀元素

- 1940年以前，人们只知道自然产生的元素；1940年，人们用中子轰击 $^{238}_{92}\text{U}$ ，得到了第一个合成元素
- 首先中子轰击得到不稳定的原子核 $^{239}_{92}\text{U}$ ，然后通过经历 β^- 衰变镎 $Z=93$
- 中子轰击是发生核反应的有效方式，因为不带电的中子在接近原子核时不会被排斥
- 如今我们已经合成了 $Z=93\sim 118$ 的所有元素，许多具有高原子序数的新元素是通过用较轻元素的原子核轰击超铀原子而形成的
- $Z=105$ 的同位素 $^{260}_{105}\text{Db}$ 可以通过用 $^{15}_7\text{N}$ 原子核轰击 $^{249}_{98}\text{Cf}$ 产生：
- 要引起这样的核反应，需要用高能粒子轰击原子核；高能粒子可以在加速器中获得

25-4 超铀元素

- 顾名思义，带电粒子加速器只能产生带电粒子束作为发射体；在许多情况下，中子作为核轰击的发射体是最有效的，所需的中子可以通过带电粒子束产生的核反应产生
- 在以下反应中， ${}^2_1\text{H}$ 代表来自加速器的氘核束，即氘的原子核
$${}^9_4\text{Be} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^{10}_5\text{B} + {}^1_0\text{n}$$
- 核反应的另一个重要中子来源是核反应堆



25-5 放射性衰变速率

- 随着时间的推移，放射性核素的每个原子核都会衰变，但无法预测任何一个原子核何时会瓦解
- 尽管我们无法对特定原子进行预测，但我们可以使用统计方法对一组原子进行预测；根据实验观察，建立了**放射性衰变规律**：
- 放射性物质的分解率 A ，叫做活度或衰变速率——与存在的原子数成正比
- 活度以每单位时间的原子数表示，例如每秒原子数； N 是被观察样品中的原子数； λ 是**衰变常数**，其单位为时间 $^{-1}$ ；考虑一个1,000,000个原子的样品，其以每秒100个原子的速度分解；在这种情况下， $N = 1.0 \times 10^6$ ， $\lambda = \frac{A}{N} = 1.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$
- 放射性衰变是一级过程，将活度视为反应速率；放射性原子数视为浓度，衰变常数视为速率常数 k ，那么可以写出**半衰期**的表达式

25-5 放射性衰变速率

$$\ln\left(\frac{N_t}{N_0}\right) = \lambda t \quad t_{1/2} = \ln 2 / \lambda$$

- 一级反应的半衰期是一个常数，因此如果放射性样品的一半原子在2.5 min分解，剩余的原子数将在5.0 min减少到原始量的四分之一，在7.5 min减少到八分之一，依此类推
- 半衰期越短， λ 值越大，衰减过程越快。放射性核素的半衰期从极短到极长不等，如表 25.1 中的代表性数据所示。
- 放射性衰变是否与温度有关？在第20章中了解到，化学反应速率的一个重要决定因素是反应物和产物之间的能垒高度（活化能）；温度越高，由于碰撞而越过屏障的分子数量越多，反应进行得越快
- 虽然也有能垒将核粒子限制在原子核内，但分子碰撞不会在核粒子上投入任何能量；此外在放射性衰变中，核粒子不会通过克服能量障碍而逃离原子核；因此，放射性衰变过程的速率与温度无关。

25-5 放射性衰变速率

- 在高层大气中，中子轰击 $^{14}_7\text{N}$ 以恒定速率形成 $^{14}_6\text{C}$ ；中子是由宇宙射线产生的； $^{14}_6\text{C}$ 通过 β^- 发射衰变
- 活生物体中的含碳化合物与大气中的 ^{14}C 处于平衡状态——活的生物通过与环境的相互作用，用“新鲜”的 ^{14}C 原子替换已经发生放射性衰变的 ^{14}C 原子
- ^{14}C 同位素具有放射性，半衰期为5730年；与其环境平衡的 ^{14}C 相关的活性为每克碳约0.25 Bq（Bq是单位贝克勒尔，表示每秒衰变一次）
- 当一个有机体死亡时，这种平衡被破坏，衰变速度下降，因为死亡的有机体不再吸收新的 ^{14}C ；根据后来测量的衰变率，可以估计年代

Nuclide	Half-Life ^a	Nuclide	Half-Life ^a	Nuclide	Half-Life ^a
^3_1H	12.33 a	$^{40}_{19}\text{K}$	1.26×10^9 a	$^{214}_{84}\text{Po}$	1.64×10^{-4} s
$^{14}_6\text{C}$	5715 a	$^{80}_{35}\text{Br}$	17.6 min	$^{222}_{86}\text{Rn}$	3.823 d
$^{13}_8\text{O}$	8.7×10^{-3} s	$^{90}_{38}\text{Sr}$	29.1 a	$^{226}_{88}\text{Ra}$	1.599×10^3 a
$^{28}_{12}\text{Mg}$	21 h	$^{131}_{53}\text{I}$	8.021 d	$^{234}_{90}\text{Th}$	24.10 d
$^{32}_{15}\text{P}$	14.3 d	$^{137}_{55}\text{Cs}$	30.2 a	$^{238}_{92}\text{U}$	4.47×10^9 a
$^{35}_{16}\text{S}$	87.9 d				

25-5 放射性衰变速率

- 自然放射性衰变系表明自然界中所有 $^{238}_{92}\text{U}$ 都最终转化为铅；天然存在的铀矿物通常与放射性衰变形成的非放射性铅共生
- 测量矿物中 $^{206}_{82}\text{Pb}$ 与 $^{238}_{92}\text{U}$ 的质量比，可以估计所在的火成岩的年龄；岩石年龄是指自熔融岩浆凝固形成岩石以来经过的时间
- 该方法的一个假设是初始放射性核素、最终稳定核素和衰变系列的所有产物都保留在岩石中
- 另一个假设是岩石最初形成时的铅的同位素丰度是固定的
- $^{238}_{92}\text{U}$ 的半衰期为 4.5×10^9 年， $^{238}_{92}\text{U}$ 及其子体的原子完成整个放射系发生的总核反应方程式为：



- 这一过程有14步，但第一步的半衰期相比其他长得多，是决速步；后反应是快速的，因此 ^{238}U 的半衰期基本等于将初始 ^{238}U 的一半衰变为 ^{206}Pb 所需的时间

25-5 放射性衰变速率

- 假设岩石最开始不含铅，1.000 g $^{238}_{92}\text{U}$ 已经过一个半衰期 (4.5×10^9 a)，将有0.500 g $^{238}_{92}\text{U}$ 分解，剩下0.500 g $^{238}_{92}\text{U}$ ； $^{206}_{82}\text{Pb}$ 的质量为0.433 g
- 地球上最古老的岩石年龄约为 4.5×10^9 a
- 通过质谱法来分析母核素或子核素，质谱仪可用于确定地质材料中各种同位素的数量，用于计算材料的年龄
- 另一对用于测年的同位素是钾-40和氩-40；钾-40具有放射性，主要通过 β 衰变成钙-40；但一些钾-40也经历电子捕获衰变成氩-40
- 人们过去尝试对钾-40和钙-40进行放射性定年，但由于钙的天然丰度很大，结果不可靠
- 例题： ^{40}K 半衰期为1.248亿年，其衰变为 ^{40}Ca 和 ^{40}Ar ，后两者比例为89.1:10.9；在岩石形成前Ar会逃逸，只有岩石凝固后的Ar才能保存下来；由于 ^{40}K 过于稀少，实际上测量的是 ^{39}K 。并假定两者比例为0.0117:93.2581；在某次实验中，发现 ^{39}K 与 ^{40}Ar 的比例为53480:1，计算岩石的年龄

25-6 核反应能量变化

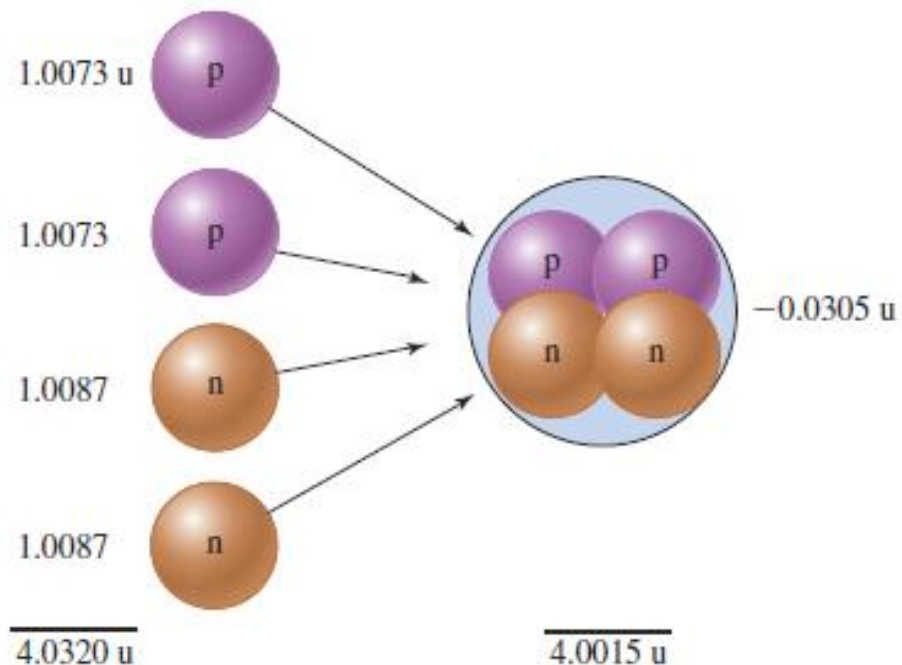
- 核反应的能量变化可用爱因斯坦推导的质能方程描述：

$$E = mc^2$$

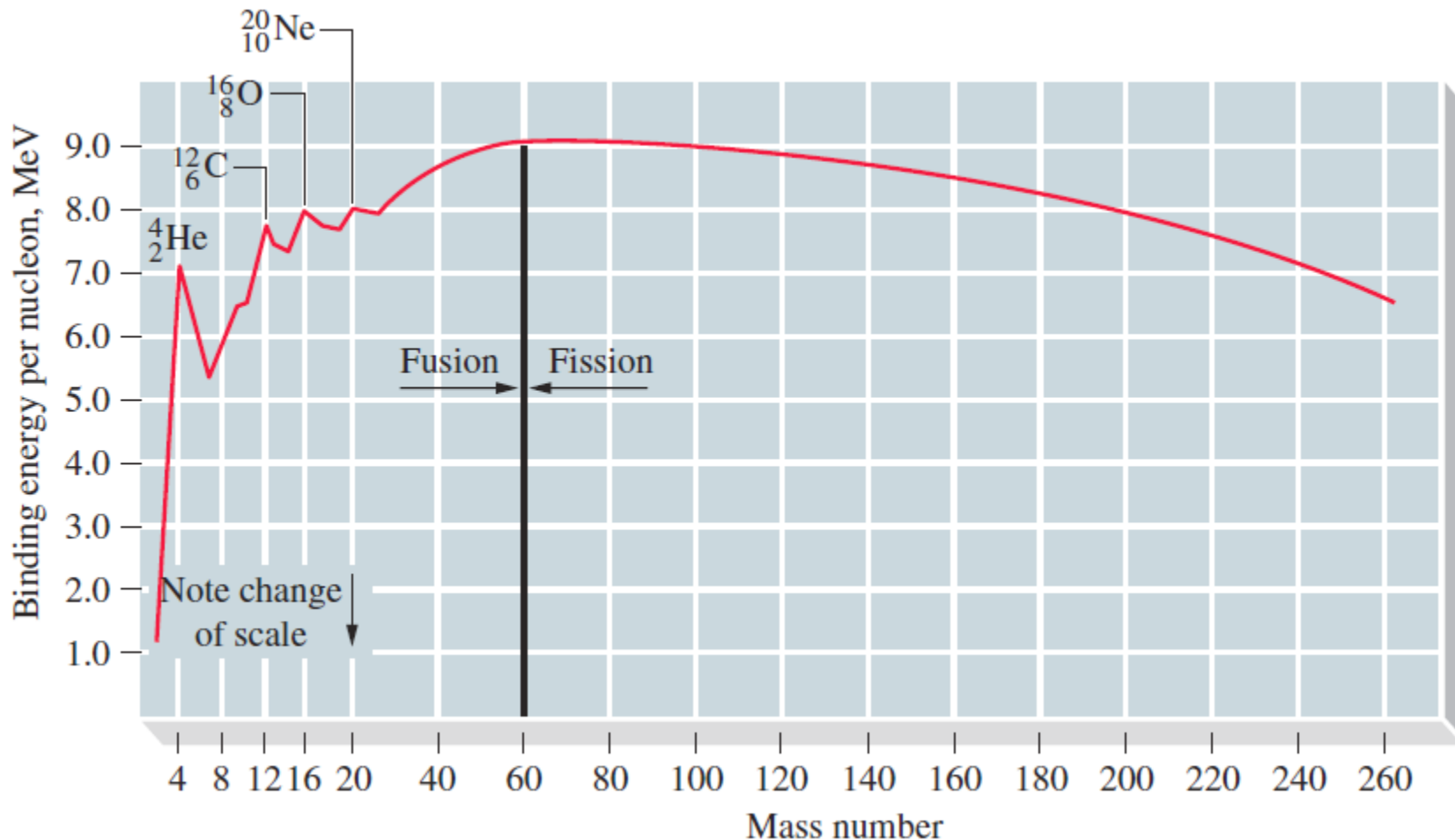
- 过程中的能量变化总是伴随着质量变化，相关的常数是光速的平方；化学反应中能量变化非常小，以至于无法检测到质量变化
- 因此化学反应中质量是守恒的；而在核反应中，能量变化比化学反应大几个数量级，所带来的质量变化是可察觉的
- 如果知道原子前后的精确质量，核反应的能量用质能方程计算； m 是质量的净变化，单位是kg；光速 c 单位是m/s；产生的能量单位是J；另一个表示核能量的常用单位是兆电子伏特(MeV)， $1 \text{ MeV} =$
- 例题：计算1 u的质量相当于多少能量（以J和MeV表示）
- 例题：计算能量变化：核反应 ${}_{92}^{238}\text{U} \rightarrow {}_{90}^{234}\text{Th} + {}_2^4\text{He}$ ，已知各原子核的质量为： ${}_{92}^{238}\text{U} = 238.0508 \text{ u}$ ， ${}_{90}^{234}\text{Th} = 234.0437 \text{ u}$ ， ${}_2^4\text{He} = 4.0026 \text{ u}$

25-6 核反应能量变化

- 上述反应前后质量存在“丢失”，丢失的质量以能量的形式释放出来；类似的，两个中子和两个质子形成 ${}^4\text{He}$ 也会放出能量
- 这一过程质量差 0.0305 u ，相当于 28.4 MeV 能量
- 这种能量称为**结合能**，我们可以认为每个核子（质子和中子）的结合能为 7.10 MeV
- 例题：计算碳-12、铁-56和铀-235的结合能，已知这些原子的质量分别为 12.000 u 、 55.934972 u 、 235.043927 u



25-6 核反应能量变化



- 重原子分解成较轻的原子是放热的；氢原子组合成较重的原子也是放热的；最稳定的原子其质量约为60

25-7 核稳定性

- 描述核衰变过程时，你可能有很多疑问：为什么有些核发生 α 衰变，有些发生 β^- 衰变？为什么较轻元素的天然放射性核素很少，而所有较重元素似乎都具有放射性？
- 这些问题的答案的第一个线索是上页图，图中特别指出了几个元素，其结合能相比附近元素更高
- 这些原子核特别稳定，核壳层理论认为：原子核的形成过程中，质子和中子占据了一系列核壳层；这一过程类电子填充能层；正如aufbau过程周期性地产生稳定电子构型（稀有气体构型）一样，某些原子核也会在核壳关闭时获得特殊的稳定性
- 特定数量的质子或中子称为幻数

Number of Protons	Number of Neutrons
2	2
8	8
20	20
28	28
50	50
82	82
114	126
	184

25-7 核稳定性

- 另外，稳定的原子核中质子数和中子数通常为偶数；质子数和中子数为奇数的稳定原子核较少（只有四个元素： ${}^2_1\text{H}$ ${}^6_3\text{Li}$ ${}^{10}_5\text{B}$ ${}^{14}_7\text{N}$ ）
- 奇数原子序数的元素通常只有一个或两个稳定同位素，而偶数原子序数的元素则较多几个；例如F和I各只有一个稳定核素，而Cl和Cu有两个；O有3个，Ca有6个
- 中子被认为提供了一种核力，可以将质子和中子结合成一个稳定的单位；如果没有中子，带正电的质子之间的静电斥力会导致原子核崩溃
- 对于原子序数较低的元素（最高约 $Z=20$ ），稳定原子核所需的中子数约等于质子数，例如 ${}^4_2\text{He}$ ${}^{12}_6\text{C}$ ${}^{16}_8\text{O}$ ${}^{28}_{14}\text{Si}$ ${}^{40}_{20}\text{Ca}$
- 更高的原子序数使得质子之间的排斥力增加，需要更多的中子，中子与质子 (N/Z) 的比例增加；Pb的比例约为1.5:1
- 原子序数大于82的元素都是不稳定的

25-7 核稳定性

- 科学家预测可能存在具有很长的半衰期的高原子序数原子
- 1999年，科学家用钙-48离子轰击铀-242靶产生了同位素 ^{287}Fl 和 ^{289}Fl
- 半衰期分别为0.5秒和3.0秒，相比于其他超重元素大得多

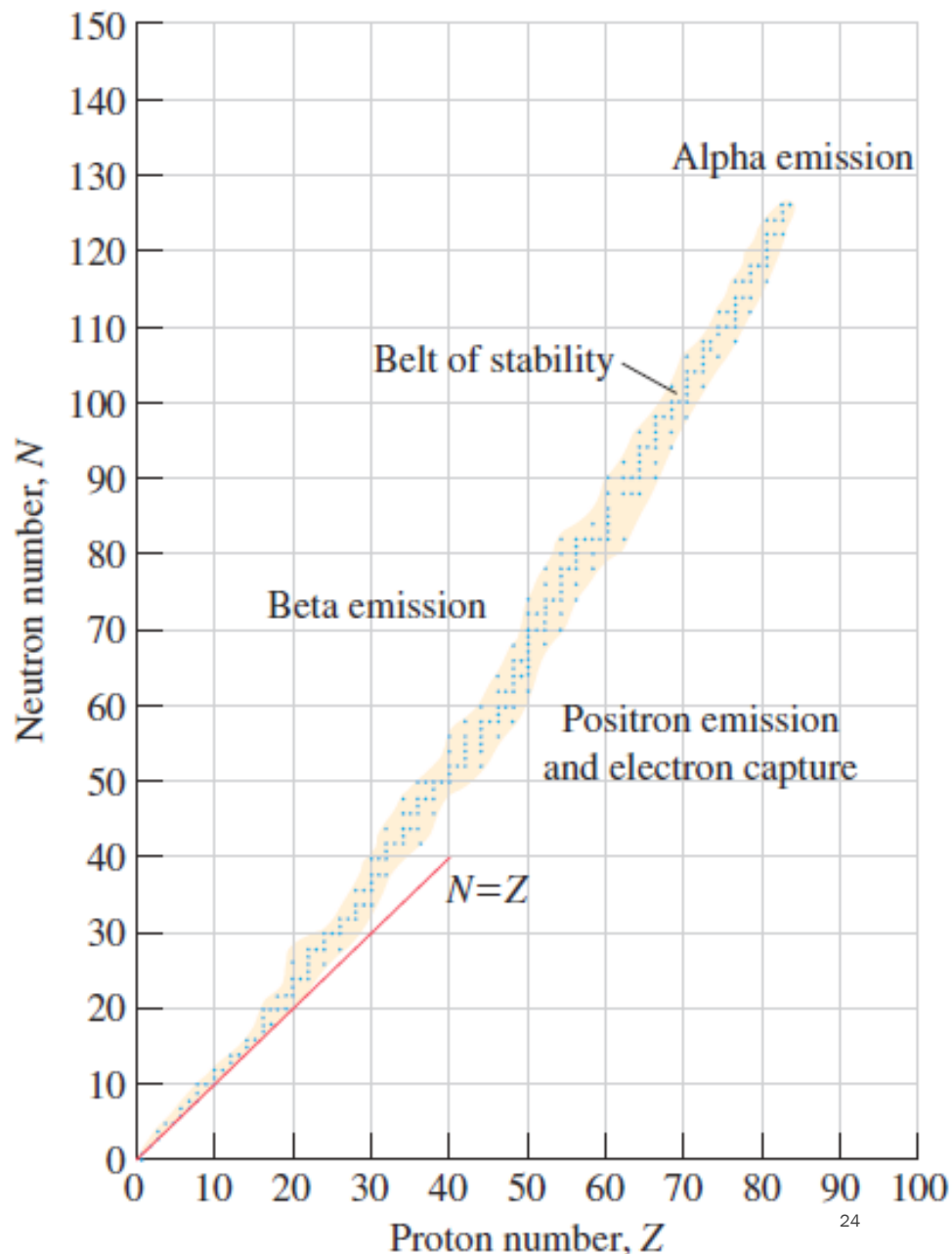


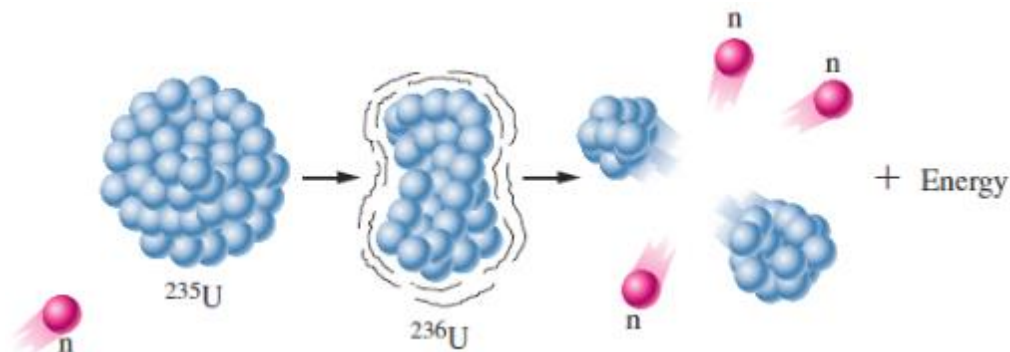
TABLE 25.4 Longest Lived Isotopes of Elements 100–118

Number	Name	Longest-Lived Isotope	Half-Life
100	Fermium	^{257}Fm	100.5 days
101	Mendelevium	^{258}Md	51.5 days
102	Nobelium	^{259}No	58 minutes
103	Lawrencium	^{262}Lr	3.6 hours
104	Rutherfordium	^{266}Rf	~10 hours
105	Dubnium	^{268}Db	26 hours
106	Seaborgium	^{269}Sg	~2.1 minutes
107	Bohrium	^{270}Bh	61 seconds
108	Hassium	$^{277\text{m}}\text{Hs}$	~12 minutes
109	Meitnerium	^{278}Mt	~5 seconds
110	Darmstadtium	$^{281\text{m}}\text{Ds}$	~3.7 minutes
111	Roentgenium	^{281}Rg	22 seconds
112	Copernium	$^{285\text{m}}\text{Cn}$	~8.9 minutes
113	Ununtrium	^{286}Uut	~0.9 seconds
114	Flerovium	^{288}Fl	~0.8 seconds
115	Ununpentium	^{288}Uup	173 milliseconds
116	Livermorium	^{293}Lv	80 milliseconds
117	Ununseptium	^{294}Uus	~50 milliseconds
118	Ununoctium	^{294}Uuo	0.7 milliseconds

Note: The superscript m indicates that the half-life is for an excited state of the isotope. This excited state is sometimes referred to as a metastable state or isomer of the nuclide.

25-8 核裂变

- 1934年，费米提出超铀元素可能可以通过用中子轰击铀而产生，他推测 β^- 粒子的连续发射会导致原子序数增加，最高可达96
- 但进行此类实验时，产物确实会释放 β^- 粒子，但化学分析发现这些产物并不是 $Z > 92$ 的元素，也不是铀的相邻元素——Ra、Ac、Th和Pa
- 产物是更轻元素的放射性同位素，如Sr和Ba：铀原子核被中子轰击会发生裂变，变成更小的碎片
- 裂变过程所放出的能量取决于具体方式，其平均能量约为 3.20×10^{-11} J，这一能量看起来很小，但其为单个 ${}_{92}^{235}\text{U}$ 核裂变产生的；如果1.00 g ${}_{92}^{235}\text{U}$ 发生裂变会放出巨大的能量！相当于三吨煤完全燃烧所产生的



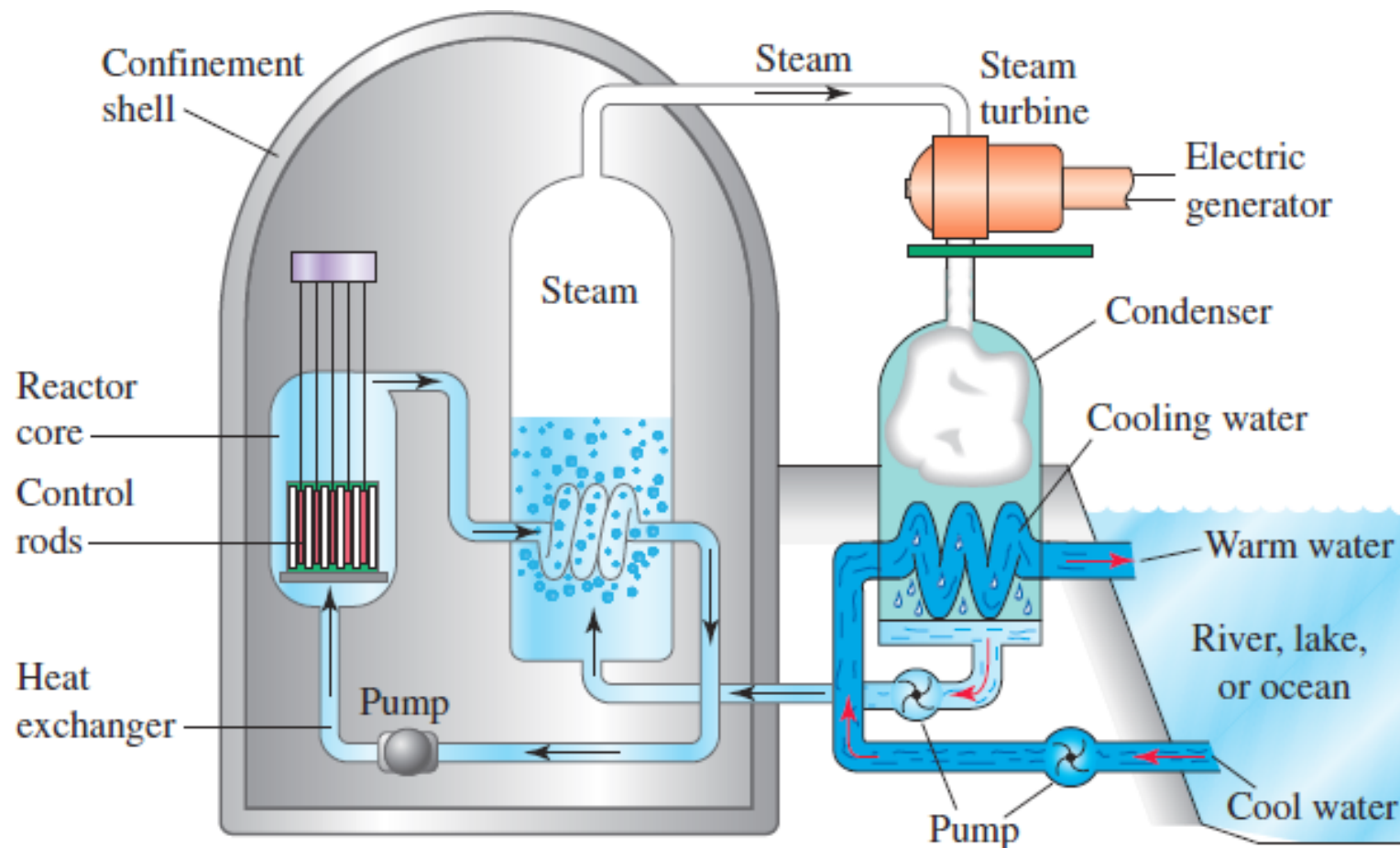
25-8 核裂变

- 在 $^{235}_{92}\text{U}$ 的裂变中，每次裂变平均释放2.5个中子；这些中子平均会产生两个或更多个裂变事件；第二轮裂变产生的中子又产生了四五个事件，依此类推
- 最终发生连锁反应，如果反应不受控制，释放的能量会引起爆炸；这是原子弹的原理
- 只有当 ^{235}U 的数量超过临界质量时，才会发生导致不受控制爆炸的裂变；临界质量是 ^{235}U 数量足够大以保留足够的中子以维持链式反应所需的质量，更少的质量则是次临界的；此时中子的逃逸速度太快，无法产生连锁反应
- 在核反应堆中，裂变能的释放是受控的



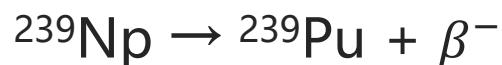
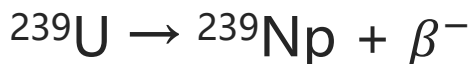
25-8 核裂变

- 一种称为压水反应堆(PWR)的设计如下图所示，反应堆的堆芯中，富铀燃料棒悬浮在压力保持在70至150个大气压的水中



25-8 核裂变

- 水有双重用途：它减慢裂变过程中的中子速度，使它们仅具有正常的热能，这些热中子比高能中子更能引发裂变；水充当调节剂
- 水还起到传热介质的作用，裂变能将水保持在高温（约300 °C）；高温水在热交换器中与较冷的水接触，较冷的水被转化为蒸汽，蒸汽驱动涡轮机，涡轮机又驱动发电机
- 核反应堆的最后一个部件是一组控制棒，通常是镉金属，其功能是吸收中子；当棒下降到反应堆中时，裂变过程减慢；当棒被抬起时，中子的密度和裂变率增加
- 引发 ^{235}U 裂变所需的是普通热能的中子；相反铀的主要核素 ^{238}U (99.28%)的原子核只有在被高能中子撞击时才会发生反应：



25-8 核裂变

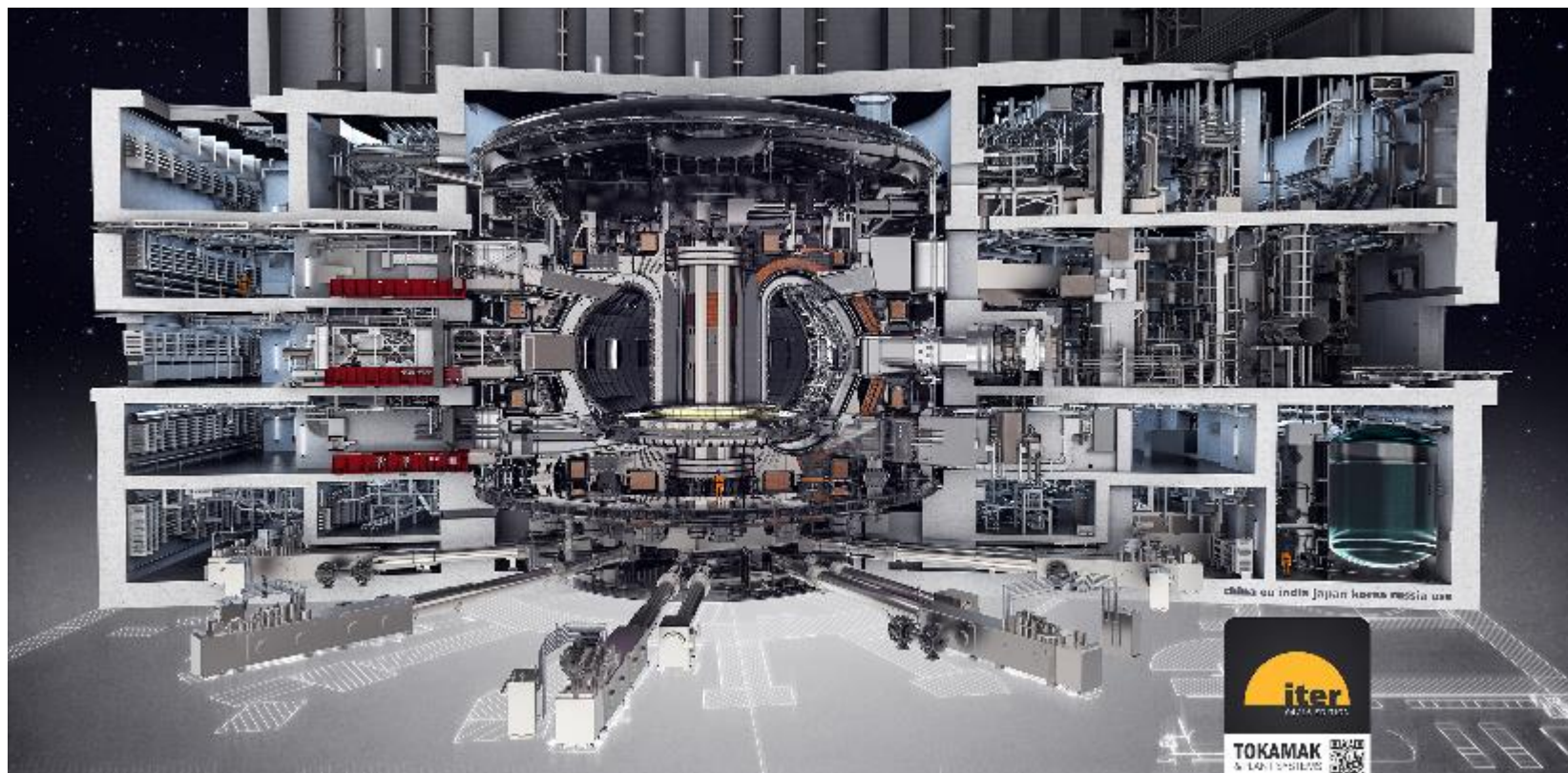
- ^{235}U 等可裂变核素称为裂变核素； ^{239}Pu 也是易裂变的； ^{238}U 可转化为裂变核素，其被称为可增殖的；增殖核反应堆中，少量可裂变核素提供中子，将大量可增殖核素转化为可裂变核素
- 增殖反应堆的一个明显优势是可用铀燃料的数量增加约100倍，这是自然界中 ^{238}U 与 ^{235}U 的比率；此外增殖反应堆可以使用铀含量非常低的材料作为核燃料
- 增殖反应堆有一些重要的缺点，特别是液态金属冷却快中子增殖反应堆(LMFBR)：系统包含液态金属（如钠），它在反应堆中具有高放射性；此外LMFBR中的热量和中子产生率都高于PWR，因此材料劣化得更快；最大的未解决问题是处理放射性废物和后处理钚燃料的问题，钚是已知的毒性最强的物质之一，吸入甚至微克的量都会导致肺癌；钚的半衰期很长（24,000 a），任何涉及它的事故都可能使受影响的区域几乎永久受到污染

25-9 核聚变

- 太阳产生能量的过程是核聚变，不受控的聚变反应是氢弹的基础；受控聚变反应可以提供几乎无限的能源，最有希望的核反应是氘-氚反应
- 开发聚变能源非常困难，受控聚变反应的可行性尚未得到充分证明；为了让轻原子融合，必须迫使氘和氚的原子核靠近
- 由于原子核相互排斥，要求原子核具有非常高的热能；引发聚变反应所需温度超过40,000,000 K，此时材料以等离子体形式存在
- 必须设计一种方法来限制等离子体不与其他材料接触；此外等离子体必须在足够长的时间内处于足够高的密度以允许发生聚变反应
- 目前最受关注的两种方法是磁场限制和用激光束加热冷冻的氘氚颗粒
- 另一系列技术问题涉及液态锂的处理，液锂是预期的传热介质和氚源（中子撞击 ^6Li 和 ^7Li 都能产生氚）

25-9 核聚变

- ITER（国际热核实验反应堆）将在2021年完成建设，2025年开始等离子体实验，2035开始全氘-氚聚变实验
- 聚变的优势非常巨大，其燃料基本是无尽的；核聚变不会产生核废物

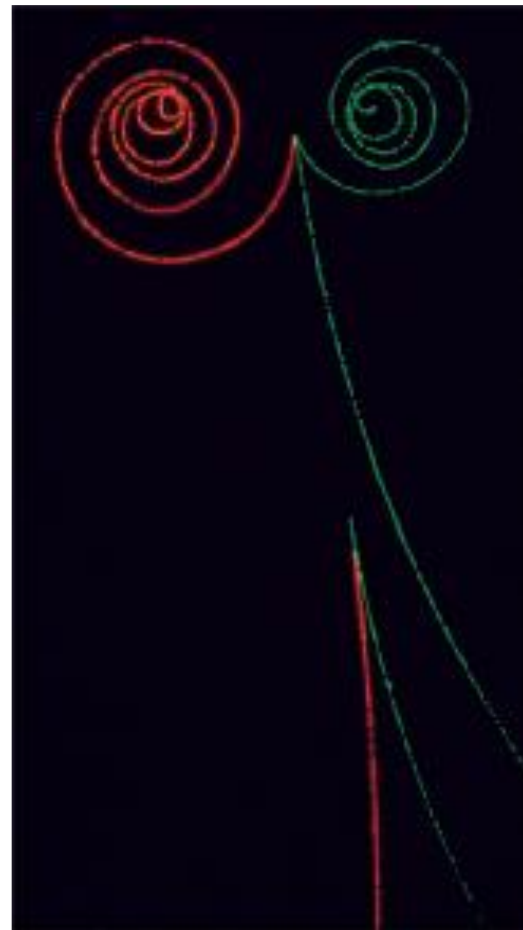


25-10 辐射对物质的影响

- 尽管 α 、 β^- 和 β^+ 粒子与物质相互作用的方式存在很大差异，但它们都有一个重要特征：它们可从物质中移出电子以产生离子
- 辐射的电离能力可以用每厘米穿过材料的路径形成的离子对的数量来描述，离子对由电离的电子和产生的正离子组成
- α 粒子具有最大的电离能力，其次是 β 粒子，然后是 γ 射线；辐射粒子与原子碰撞直接产生的电离电子称为初级电子，这些电子本身可能拥有足够的能量来引起二次电离
- 并非辐射和物质之间的所有相互作用都会产生离子对，某些情况下，电子只是被提升到更高的原子或分子能级；这些电子返回到它们的正常状态会伴随着辐射——X射线、紫外线或可见光，这取决于所涉及的能量

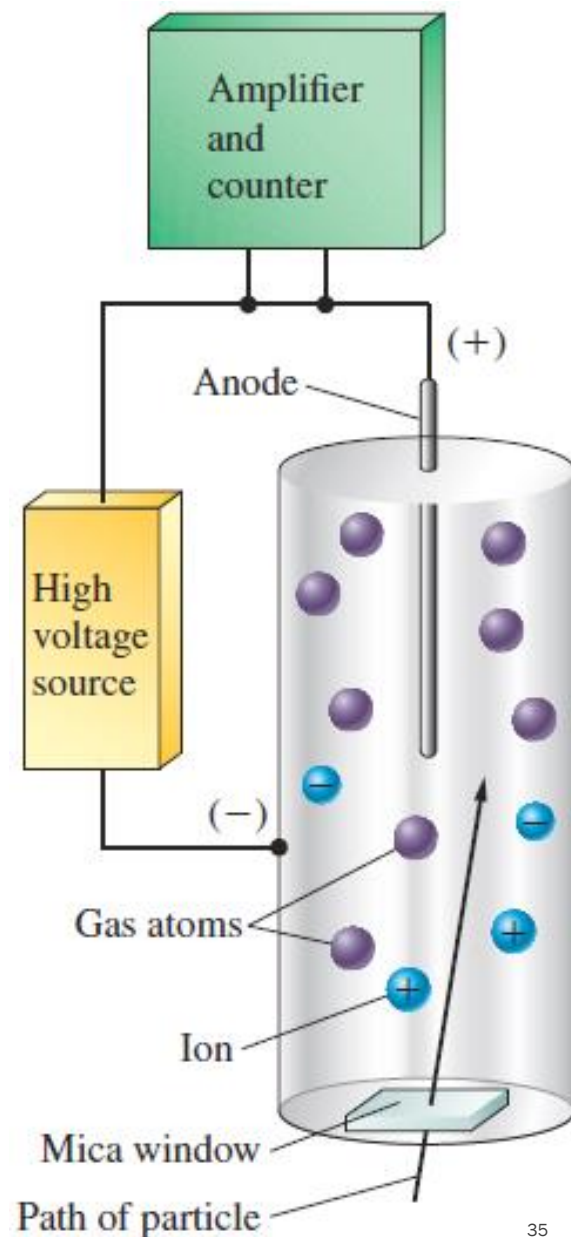
25-10 辐射对物质的影响

- 辐射与物质的相互作用是检测辐射和测量其强度的基础，最简单的方法之一是Henri Becquerel在他发现放射性时使用的方法——摄影胶片的曝光： α 和 β 射线对感光乳剂的影响类似于X射线
- 一种用于研究高能辐射（如射线）的探测器是气泡室，装置中某些液体（通常是氢气）保持在它的沸点；由于离子对是由电离射线的传输产生的，因此在离子周围会形成气泡
- 通过拍摄和分析气泡的轨迹可以判断辐射类型，例如带电粒子可以通过它们在磁场中的偏转来检测



25-10 辐射对物质的影响

- 检测和测量电离辐射最常用的设备是盖革-米勒(G-M)计数器；G-M 计数器由圆柱形阴极和沿其轴延伸的金属丝阳极组成；阳极和阴极密封在充气玻璃管中，穿过管子的电离辐射产生初级离子，然后发生次级电离；正离子被吸引到阴极，电子被吸引到阳极，产生电流脉冲；管子被快速充电以准备下一次电离
- 在生物学研究通常使用闪烁计数器，它可检测能量不足以引起电离的辐射；辐射激发检测介质中的某些原子；这些原子恢复到基态时，会发出可计数的光脉冲，类似于电视屏幕中的荧光粉被阴极射线照射时产生的发光



25-10 辐射对物质的影响

- 所有生命都存在于自然发生的电离辐射的背景下——宇宙射线、紫外线和放射性元素的辐射（如岩石中的铀）；辐射的水平因地球上的位置而异，例如海拔越高辐射更大
- 辐射与生命物质的相互作用与其他形式的物质（分子的电离、激发和解离）相同，但即使是轻微的电离辐射暴露也会引起细胞染色体的变化
- 低剂量的电离辐射会导致出生缺陷、白血病、骨癌和其他形式的癌症
- 现在并不能明确回答特定水平的辐射可能会导致出生缺陷和癌症发病率的增加有多大，但显然越少接触电离辐射越好
- 长期用于描述辐射暴露的一个单位是rad；1 rad对应于每千克物质吸收 10^{-2} J的能量
- 然而1 rad剂量对生命物质的影响是可变的，rem是rad乘以相对生物有效性(Q)；系数Q考虑到不同类型的相同剂量的辐射可能会产生不同的影响

25-10 辐射对物质的影响

- 在短时间内吸收1000 rem的剂量是100%致死的，450 rem的短期剂量可能会导致约50%的人在30天内死亡

	Unit	Definition
Radioactive decay	Becquerel, Bq Curie, Ci	s^{-1} (disintegrations per second) An amount of radioactive material decaying at the same rate as 1 g of radium ($3.70 \times 10^{10} \text{ dis s}^{-1}$) $1 \text{ Ci} = 3.70 \times 10^{10} \text{ Bq}$
Absorbed dose	Gray, Gy Rad	One gray of radiation deposits one joule of energy per kilogram of matter $1 \text{ rad} = 0.01 \text{ Gy}$
Equivalent dose	Sievert, Sv Rem	$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$ $1 \text{ rem} = 1 \text{ rad} \times Q$ The quality factor, Q , is about 1 for X-rays, γ rays, and β^- particles; 3 for slow neutrons; 10 for protons and fast neutrons; and 20 for α particles

25-10 辐射对物质的影响

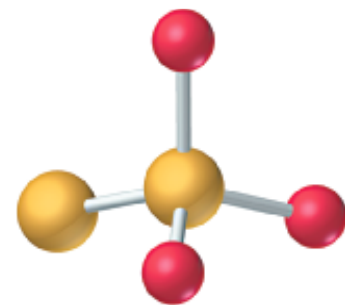
- 每100万人接受1雷姆的单次暴露可能会在20-30年内产生大约100例癌症；大多数人从正常背景源接收到的全身辐射总量约为每年0.13 rem，一次胸部X光检查的剂量约为20 mrem
- 氡是一种非常危险的放射性物质，大理石中的U衰变可以产生氡，并被人体吸入
- 氡-222是一种无色、无味的气体，是由镭-226发生 α 衰变产生的，而镭-226又是铀-238经过几个步骤的放射性衰变得到的
- 大理石是常用的建筑材料，在通风不良的地下室可能含有超标的氡

25-11 放射性同位素的应用

- 低剂量的电离辐射可诱发癌症，但同样的辐射，尤其是 γ 射线，也可用于治疗癌症
- 虽然电离辐射往往会破坏所有细胞，但癌细胞比正常细胞更容易被破坏；因此，仔细定向的 γ 射线束或适当剂量的高能X射线可用于阻止癌细胞的生长，另外也有使用质子或中子束进行放射的疗法
- 元素同位素之间的微小质量差异可能会导致物理性质的微小差异， $^{238}\text{UF}_6$ 和 $^{235}\text{UF}_6$ 的不同扩散速率源于质量差异
- 不过，一般来说，一种元素的各种同位素的物理和化学性质实际上是相同的；但如果其中一种同位素具有放射性，则可以使用辐射探测器跟踪其位置；这一方法称为同位素示踪
- 如果将少量放射性 ^{32}P （以磷酸盐形式）添加到植物的营养液中，磷原子（放射性和非放射性）吸收到何种部位可通过放射性跟踪

25-10 辐射对物质的影响

- 碘（作为碘离子）在体内的位置可以通过让人饮用含有少量放射性碘作为示踪剂的碘溶液来确定，这种方式可检测甲状腺的异常，因为碘集中在甲状腺中，人们可以通过在接触放射性碘之前摄入非放射性碘来保护自己
- 示踪剂的工业应用也很多，例如在Pt-Ir催化剂中加入 ^{192}Ir ，监测 ^{192}Ir 的活性可以确定催化剂被带走的速度以及它被带到工厂的哪些部分
- 通常可以使用放射性同位素作为示踪剂，推断出化学反应的机理或物质的结构
- 硫代硫酸根离子中的两个S 原子不等价：
- $\text{SO}_3^{35}\text{S}^{2-}$ 由放射性硫 ^{35}S 和非放射性的亚硫酸根离子制备，其被酸化分解时，沉淀的硫中可检测到放射性，但二氧化硫中没有



25-10 辐射对物质的影响

- 而非放射性 KIO_4 和放射性 ^{128}I 标记的碘离子混合，产物是放射性的 $^{128}\text{I}_2$ 和非放射性的 KIO_3
- 分析化学中一种重要的方法是中子活化分析，被分析的样品（通常非放射性的）用中子轰击，感兴趣的元素被转化为放射性同位素；测量形成的放射性同位素的活性，即可计算样品中元素的数量
- 该方法的优点有：可以测定痕量元素；不破坏样品；样品可以是生物材料
- 中子激活分析已被用于确定旧画的真实性，因为颜料配方之间的差异很容易通过它们所含的微量元素检测出来
- ^{60}Co 产生的 γ 射线可用于生产某些材料或改变其性能，例如破坏并重新形成聚合物链，
- 电离辐射用于医疗用品消毒、污水处理、食品保鲜