

高等学校教材

# 核反应堆物理分析

上册

谢仲生 主编 罗经宇 审校

原子能出版社

## 内 容 简 介

本书介绍核反应堆物理的基础理论和分析计算方法，分上、下两册。上册内容包括：与堆物理有关的核物理知识，中子在介质中的扩散和慢化，临界理论，非均匀效应，能耗，反应性控制和核反应堆动力学。下册内容包括：中子输运理论基础、慢化能谱的计算、多群扩散理论与数值计算方法、中子的热化和微扰理论。

本书是高等学校核反应堆工程专业的教材，也可供有关专业的工程技术人员及研究人员参考。

高等学校教材

核反应堆物理分析 上册

谢仲生、尹邦华  
潘国品、傅龙舟 编著

罗经宇 审校

原子能出版社出版

(北京 2108 信箱)

重庆印制一厂印刷

(枇杷山后街 87 号)

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 850×1168 1/32·印张 11·字数 247 千字

1985年11月重庆第二版·1985年11月重庆第一次印刷

印数 1—1,400·统一书号：15175·595

定价：2.50元

## 再版前言

一九八二年五月，核工业部教育司组织有关高等学校，对本书第一版使用情况进行了交流、总结，并决定对本书进行修订再版。

修订再版本分上、下两册。上册着重介绍核反应堆物理的最基本的内容，包括：与堆物理有关的核物理知识，中子在介质中的扩散和慢化，临界理论，非均匀效应，燃耗，反应性控制和核反应堆动力学。下册着重介绍核反应堆物理计算方法，包括：中子输运理论基础，慢化能谱的计算，多群扩散理论与数值计算方法，中子的热化和微扰理论。各校可根据教学大纲的具体要求选择有关内容进行讲授。

一九八三年九月，对修订再版本的初稿进行了深入的讨论，有关同志提了许多宝贵意见和建议。因此，编者和审校者对该书稿再次进行了修改。

本书由西安交通大学谢仲生主编。参加修订本书工作的有：西安交通大学的谢仲生、尹邦华、傅龙舟，上海交通大学潘国品。全书由清华大学罗经宇审校。

侯凤旺、张育曼、李植华、杨修周、吴清泉、龚世璋、徐及明、刘正伦、单文志等同志参加了本书修订再版初稿的讨论并提出许多宝贵意见。在此，我们表示衷心的感谢。

编者

一九八四年四月

# 前 言

本书是根据1978年6月在北京召开的反应堆工程专业教材会议审定的《核反应堆物理分析》编写大纲编写的。

本书着重介绍核反应堆物理的基础理论和分析方法，以及核设计中一些基本的计算方法。在编写中，努力贯彻理论联系实际的原则并尽量反映反应堆物理近代计算方面的内容。在内容的选择和安排上，力求做到由浅入深，浅显易懂，尽量避免艰深的理论和复杂的公式推导。对于各种计算方法和程序，则着重于阐述它们之间具有共性的理论基础和算法思想，尽量避免过多的具体数学过程。

全书共分十三章。第一章介绍与堆物理有关的中子物理知识；第二至九章讨论中子在反应堆系统内运动的基本规律（扩散、慢化和热化等）以及临界问题的计算；第十至十二章则属于动态方面的问题；第十三章介绍微扰理论基础。带\*号部分是属于参考性的章节，可根据具体情况选用，也可作为课外阅读的参考材料。由于各校反应堆工程专业的培养目标和教学时数不同，使用本书时，可根据具体情况对部分章节内容作适当的删减或补充。

阅读本书的读者应具有高等数学、原子核物理、数理方程和数值分析等方面的知识。

本书由谢仲生主编。参加编写的有：西安交通大学尹邦华（第一、六、八章，附录和第五章第2节）、于文砚（第二、三章）、傅龙舟（第十二章）、谢仲生（第四、五、七、九、十三章和第一章第7节）和上海交通大学潘国品（第十、十一章）。

本书由清华大学罗经宇审校。他对本书各章内容和主要公式都进行了详细、认真的审校并提出许多宝贵的意见和建议。在此

编者表示衷心的感谢。

在本书编写过程中得到了有关科研和设计单位的大力支持和帮助。许汉铭、马大园、蒲富痒、杨顺海、章宗耀、徐及明、刘正纶、李植华、侯凤旺、杨修周、邬国伟和吴清泉等同志参加了本书初稿的讨论并提出许多宝贵意见；许汉铭、马大园同志参加了本书的定稿工作，并提出了许多宝贵的修改意见，对提高书稿质量有很大帮助。在此，我们表示深切的谢意。

由于我们水平有限，工程实践和教学经验不足，加之编写时间匆促，书中缺点和错误一定不少，恳切地希望同志们批评指正。

编 者

1980年3月

# 目 录

第一章 核反应堆的核物理基础 .....	1
1. 中子与原子核的相互作用 .....	1
2. 中子截面和核反应率 .....	9
3. 共振吸收 .....	25
4. 核裂变过程 .....	30
5. 热中子能谱和热中子的平均截面 .....	36
6. 链式裂变反应 .....	42
第二章 单速中子扩散理论 .....	51
1. 单速中子扩散方程 .....	52
2. 非增殖介质内中子扩散方程的解 .....	63
3. 扩散长度 .....	70
*4. 扩散方程的积分形式 .....	73
第三章 中子慢化能谱 .....	77
1. 中子的散射过程 .....	78
2. 无限均匀介质内中子的慢化能谱 .....	89
*3. 均匀介质中的共振吸收 .....	100
4. 扩散-年龄近似 .....	115
第四章 均匀反应堆的临界理论 .....	123
1. 均匀裸堆的单群理论 .....	124
2. 有反射层反应堆的单群扩散理论 .....	140
3. 双群扩散理论 .....	158
4. 多群扩散理论 .....	172

5. 年龄理论的临界条件·····	174
第五章 栅格的非均匀效应·····	177
1. 栅格的非均匀效应概述·····	177
2. 栅格的均匀化处理·····	180
3. 热中子不利因子和热中子利用系数·····	184
*4. 碰撞几率方法计算 $\xi$ 和 $f$ ·····	190
5. 快中子倍增效应·····	201
6. 栅元有效共振积分·····	205
7. 栅格几何参数的选择·····	217
第六章 能耗及中毒·····	220
1. 核燃料中重同位素成分随时间的变化·····	220
2. 裂变产物的中毒·····	228
3. 核反应堆堆芯寿期与能耗深度·····	248
4. 核燃料的转换与循环·····	251
5. 核燃料管理·····	260
第七章 反应性温度系数和反应性控制·····	265
1. 温度系数·····	265
2. 反应性控制的任务和方式·····	274
3. 控制棒控制·····	278
4. 可燃毒物控制·····	299
5. 化学补偿控制·····	303
第八章 核反应堆动力学·····	307
1. 核反应堆动态方程·····	308
2. 不考虑缓发中子的核反应堆时间特性·····	312
3. 倒时方程·····	314
4. 阶跃扰动时的核反应堆动态方程的解·····	319

附录	.....	327
附录1	物理常数.....	327
附录2	换算因子.....	327
附录3	元素与一些分子的截面和核参数.....	328
附录4	非 $1/v$ 因子.....	333
附录5	$\psi(\zeta, x)$ 和 $\chi(\zeta, x)$ 的表.....	334
附录6	$J(\zeta, \beta)$ 的表( $\zeta=0.1-1.0$ ; $\beta=2^j \times 10^{-5}$ ) .....	336
附录7	$\delta$ 函数.....	338
附录8	指数积分函数.....	338
附录9	$E_n(x)$ 函数.....	339
附录10	误差函数 $\text{erf}(x)$ .....	340
附录11	贝塞尔函数.....	340



# 第一章 核反应堆的核物理基础

核反应堆是一种能以可控方式产生自持链式裂变反应的装置。核反应堆内的主要核过程是中子与核反应堆内各种元素的相互作用的过程。因此，在讨论核反应堆的物理过程之前，必须对中子与原子核的相互作用有一定的了解。本章首先概略地介绍核反应堆物理分析中常碰到的有关中子与原子核相互作用的一些核物理知识，然后讨论实现自持链式裂变反应的条件和热中子反应堆内的中子循环过程。

## 1. 中子与原子核的相互作用

### 1.1 中子

中子是组成原子核的核子之一。它的静止质量稍大于质子的静止质量。

$$\begin{aligned} \text{中子的静止质量 } m &= 1.6749543 \times 10^{-24} \text{克} \\ &= 1.0086650 \text{原子质量单位} \end{aligned}$$

工程计算中通常取 $m$ 等于1原子质量单位。

中子不带电荷，因此它在靠近原子核时不受核内正电的斥力，它亦不能产生初级电离。中子在原子核外自由存在时是不稳定的，它通过 $\beta$ 衰变转变成质子，其半衰期约为12分钟。在热中子反应堆内，瞬发中子的平均寿期约为 $10^{-8}$ 至 $10^{-4}$ 秒，它比自由中子的半衰期短得多，因此在反应堆物理分析中可以不考虑自由中子的不稳定问题。

中子具有粒子性和波动性。它与原子核的相互作用过程有时

表现为两个粒子的碰撞，有时表现为中子波与核的相互作用。中子的波长 $\lambda$ 为

$$\lambda = \frac{2.86 \times 10^{-9}}{\sqrt{E}} \text{厘米}, \quad (1-1)$$

式中 $E$ ——中子能量，电子伏。（这里取中子静止质量 $m$ 等于1。）  
在实际计算中，一般用中子折算波长 $\lambda$ ：

$$\lambda = \frac{\lambda}{2\pi} = \frac{4.55 \times 10^{-10}}{\sqrt{E}} \text{厘米}. \quad (1-2)$$

从(1-1)式可知，中子波长随能量增加而变短。例如， $E=1$ 兆电子伏， $\lambda$ 约等于 $10^{-12}$ 厘米； $E=0.03$ 电子伏， $\lambda$ 约等于 $1.7 \times 10^{-8}$ 厘米。可见能量为1兆电子伏的中子的波长和原子核的直径相当，而能量为0.03电子伏的中子的波长就变得和原子的直径相当了。以后我们会看到，中子的能量不同，它与原子核相互作用的几率、方式也就不同。

在反应堆物理分析中研究中子与原子核的相互作用时，通常按中子能量把它们分为：(i) 快中子；(ii) 超热中子；(iii) 热中子。

## 1.2 中子与原子核的相互作用过程

### 1.2.1 中子与原子核相互作用的机理

中子与原子核相互作用的机理有三种：复合核的形成、势散射和直接相互作用。

势散射是最简单的核反应。它是中子波和核表面势相互作用的结果，中子并未进入靶核。任何能量的中子都有可能引起这种反应。这种作用的特点是：散射前后靶核的内能没有变化。入射中子把它的一部分或全部动能传给靶核，成为靶核的动能，势散射后，中子改变了运动方向和能量。势散射前后中子与靶核系统

的动能和动量守恒，所以势散射为一种弹性散射。

所谓直接相互作用是指：入射中子直接与靶核内的某个核子碰撞，使某个核子从核里发射出来，而中子却留在核内。如果从靶核里发射出来的核子是质子，这就是直接相互作用的  $(n, p)$  反应。如果从核里发射出来的核子是中子，而靶核发射  $\gamma$  射线，同时由激发态返回基态，这就是直接非弹性散射过程。入射中子要具有较高的能量才能与原子核发生直接相互作用。不过，在核反应堆内具有那样高的能量的中子，其数量是很少的。所以在反应堆物理分析中，这种直接相互作用方式是不重要的。

复合核的形成是最重要的中子与原子核的相互作用形式。在这个过程中，入射中子被靶核  ${}_Z^AX$  吸收，形成一个新的核——复合核  ${}^{A+1}_Z X$ 。中子和靶核两者在质心坐标系的总动能  $E_0$  就转化为复合核的内能。同时中子的结合能  $B$  也给了复合核，于是使复合核处于基态以上的激发态（或能级） $E_0 + B$  上（见图1-1）。

复合核的激发态衰变有多种方式。由于激发态的能量是统计地分配在许多核子上的，因此复合核可以在激发态上停留一段时间。当核内某一个或一组核子得到足够的能量时，复合核便通过放出一个核子或一组核子而衰变。若放出一个质子而衰变，就称为  $(n, p)$  反应；放出  $\alpha$  粒子的衰变称之为  $(n, \alpha)$  反应（如图1-1所示）。若放出的核子是一个中子，而余核  ${}_Z^AX$  又重新直接回到基态，就称这个过程为共振弹性散射或称为复合弹性散射，简称  $(n, n)$  反应。如果放出中子后，余核  ${}_Z^AX$  仍处于激发态，然后通过发射  $\gamma$  射线返回基态，就称这个过程为共振非弹性散射或称为复合非弹性散射，简称  $(n, n')$  反应。复合核也可以通过发射俘获  $\gamma$  射线而衰变，称这个过程为辐射俘获，简称  $(n, \gamma)$  反应。复合核一旦发射  $\gamma$  射线而衰变到束缚态时，它就不能再通过放出核子而衰变了。复合核还可以通过分裂成两个较轻的核的方式而衰变，称这一过程为核裂变，简称  $(n, f)$  反应。

当具有某些特定的能量值的入射中子恰好使形成复合核激发态接近于一个量子能级时，那么，形成复合核的几率就显著地增

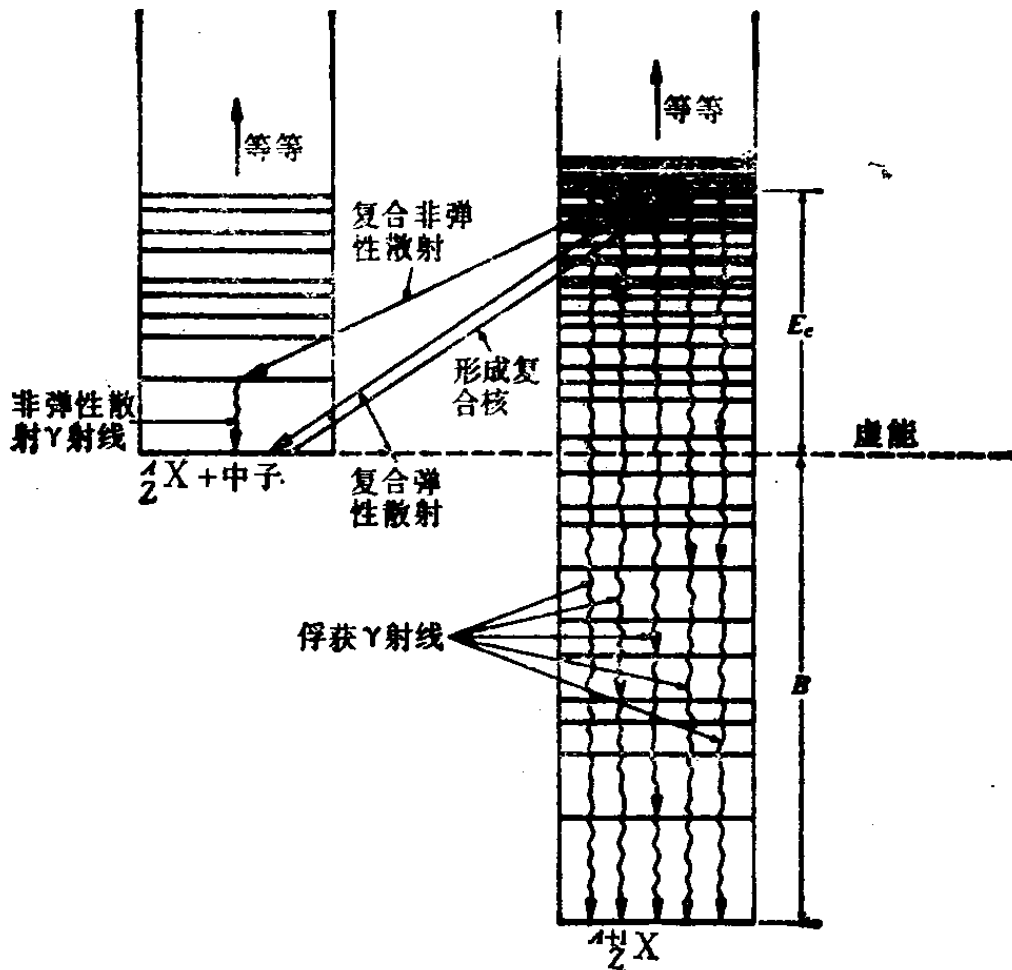


图1-1 复合核的形成和衰变

大。这种现象就叫做共振现象（包括共振吸收，共振散射和共振裂变等）。共振吸收对反应堆的物理过程有着很大的影响。

可以发现，天然放射性的基本定律，即某个系统在单位时间内的衰变几率为一常数，也适用于核在激发态的自发衰变。但是，在讨论激发态的衰变时，通常用能级宽度 $\Gamma$ 来描述处于激发态的核的衰变，即用 $\Gamma$ 来表示衰变常数 $\lambda$ ：

$$\Gamma = \hbar \lambda \text{ 电子伏,} \quad (1-3)$$

式中 $\hbar$ ——普朗克常数 $h$ 除以 $2\pi$ ，即 $\hbar = h/2\pi$ 。这样，能级宽度为 $\Gamma$ 的激发态，其平均寿命 $\bar{t}$ 便等于：

$$\bar{t} = \frac{1}{\lambda} = \frac{\hbar}{\Gamma}. \quad (1-4)$$

由此可见，复合核的激发态的寿命与能级宽度成反比。辐射俘获反应要求复合核有较长的寿命，因而能级宽度 $\Gamma$ 小。例如，铀-239在第一个虚能级处的俘获共振宽度 $\Gamma$ 为0.027电子伏， $\bar{t}$ 为2.4

$\times 10^{-14}$ 秒。而氧-16 在第一个虚能级的散射共振宽度 $\Gamma$ 为41千电子伏，此时复合核的平均寿命 $\bar{t}$ 为  $1.5 \times 10^{-24}$ 秒。

单位时间内处于激发态的复合核的某种衰变方式的几率，可以用该过程的能级分宽度来表示。例如，发射 $\gamma$ 射线的分宽度 $\Gamma_\gamma$ 通常叫做辐射宽度，它表示单位时间内复合核发射 $\gamma$ 射线而衰变的几率； $\Gamma_n$ 叫做中子宽度，它表示单位时间内复合核放出中子而衰变的几率，等等。因为总衰变几率是所有可能衰变方式的几率的总和，所以与之相对应的有

$$\Gamma = \Gamma_\gamma + \Gamma_n + \dots, \quad (1-5)$$

复合核以某种方式衰变的相对几率，显然等于该衰变方式的分宽度与总宽度之比。例如，以放出中子的方式衰变的相对几率便等于 $\Gamma_n/\Gamma$ ，等等。

综合以上所述，在反应堆内，中子与原子核的相互作用可分为两大类：

(1) 散射：有弹性散射和非弹性散射；

(2) 吸收：包括辐射俘获、核裂变、 $(n, \alpha)$ 、 $(n, p)$ 反应等。

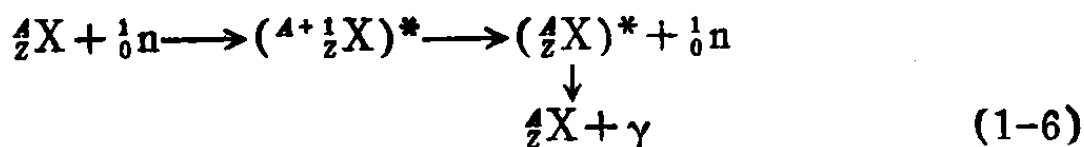
下面分别介绍这些过程。

### 1.2.2 中子的散射

散射是使中子慢化的主要核反应过程。它有非弹性散射和弹性散射两种。

(1) 非弹性散射

它的一般反应式为



在这个过程中，入射中子把它的一部分动能（通常为绝大部分）转变成靶核的内能，使靶核处于激发态，然后靶核通过发射 $\gamma$ 射线又返回基态。因此，散射前后中子与靶核系统的动量守恒，

但动能不守恒。从图 1-1 中可以看出，只有入射中子的动能高于靶核的第一激发态的能量时才能使靶核激发，也就是说，只有入射中子的能量高于某一数值时才能发生非弹性散射。由此可知，非弹性散射有阈能的特点。

表1-1 几种核的前两个激发态的能量

核	第一个激发态 兆电子伏	第二个激发态 兆电子伏
$^{12}\text{C}$	4.43	7.65
$^{16}\text{O}$	6.06	6.14
$^{23}\text{Na}$	0.45	2.0
$^{27}\text{Al}$	0.84	1.01
$^{56}\text{Fe}$	0.84	2.1
$^{238}\text{U}$	0.045	0.145

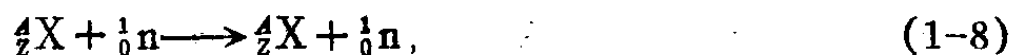
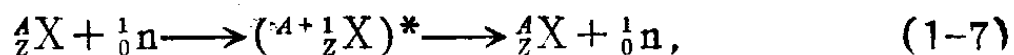
表 1-1 列出几种堆内常用元素核的前两个激发能级的能量。从表中可以看出，轻核激发态的能量高，重核的低。但即使对于铀-238核，中子至少必须具有45千电子伏以上的能量才能发生非弹性散射。因此，只有在快中子反应堆中，非弹性散射过程才是重要的。

由于裂变中子的能量在兆电子伏范围内，因此在热中子反应堆内仍会发生一些非弹性散射现象。但是，在中子能量很快降低到非弹性散射阈能以下后，便需借助弹性散射来使中子慢化。

## (2) 弹性散射

弹性散射还可分为共振弹性散射和势散射两种。前者经过复合核的形成过程，后者不经过复合核的形成过程，因此共振弹性散射只对特定能量的中子才能发生。

弹性散射的一般反应式为：



(1-7) 式为共振弹性散射，(1-8) 式为势散射。

在弹性散射过程中，由于散射后靶核的内能没有变化，它仍

保持在基态，散射前后中子-靶核系统的动能和动量是守恒的，所以可以把这一过程看作“弹性球”式的碰撞，根据动能和动量守恒，用经典力学的方法来处理。

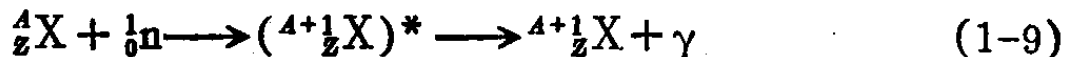
在热中子反应堆内，中子从高能慢化到低能起主要作用的是弹性散射。

### 1.2.3 中子的吸收

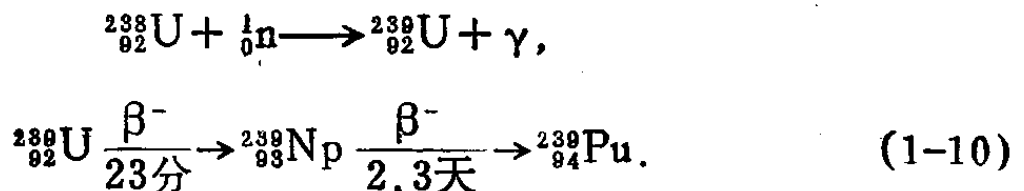
中子吸收反应有  $(n, \gamma)$ ,  $(n, f)$ ,  $(n, \alpha)$  和  $(n, p)$  反应等。

#### (1) 辐射俘获 $(n, \gamma)$

辐射俘获是最常见的吸收反应。它的一般反应式为

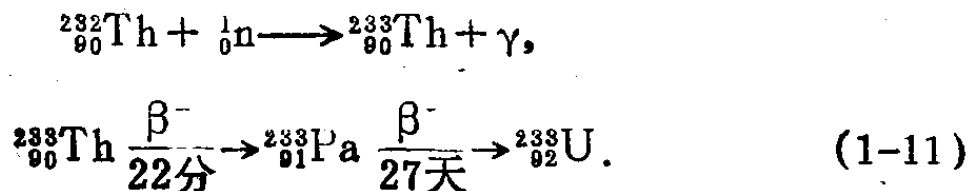


生成的核  ${}^{A+1}_ZX$  是靶核的同位素，往往具有放射性。低能中子与中等质量核、重核作用时易于发生这种反应。例如，在堆内重要的俘获反应有：



铀-238核吸收中子后生成铀-239，铀-239经过两次 $\beta^-$ 衰变转变成钚-239。钚-239在自然界里是不存在的，它是一种人工裂变材料。这一过程对核燃料的增殖和原子能的利用有重大的意义。

类似的反应还有：



铀-233在自然界中也不存在，它也是一种人工裂变材料。钍-232在自然界的蕴藏量是很丰富的，因此这一过程对于利用钍的资源是非常重要的。

应该指出，由于辐射俘获会产生放射性，这就给反应堆设备

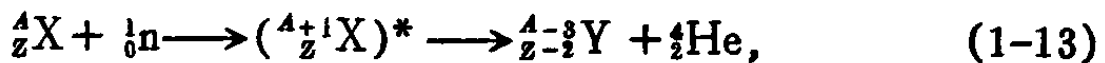
维护、三废处理、人员防护等等带来不少问题。例如，在用轻水作慢化剂、冷却剂、反射层或屏蔽材料时，就要考虑中子与氢核的辐射俘获反应：



此反应放出高能 $\gamma$ 射线（能量超过2.2兆电子伏）。此外，还有空气中的氩-40在辐射俘获反应后，生成半衰期为1.82小时的氩-41，等等。

## (2) (n, $\alpha$ )、(n, p) 等反应

(n,  $\alpha$ ) 反应的一般式为



例如，热中子与硼-10引起的 (n,  $\alpha$ ) 反应为



在低能区，这个反应的截面很大，所以硼-10被广泛地用作热中子反应堆的控制材料。同时这个反应在很宽的能区内很好地满足 $1/v$ 变化规律，硼-10也经常用来制作热中子探测器。

对 (n, p) 反应，例如有

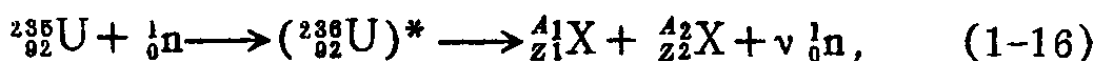


氮-16的半衰期为7.3秒，它放出 $\beta$ 和 $\gamma$ 射线，这一反应是水中放射性的主要来源。

## (3) 核裂变

核裂变是反应堆内最重要的核反应。同位素铀-233、铀-235、钚-239和钚-241在各种能量的中子作用下均能发生裂变，并且在低能中子作用下发生裂变的可能性较大，通常把它们称为易裂变同位素或裂变同位素。而同位素钍-232、铀-238和钚-240等只有在在中子能量高于某一阈值时才能发生裂变，通常把它们称为可裂变同位素。目前，热中子堆内最常用的核燃料是裂变同位素铀-235。

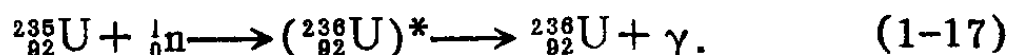
铀-235的裂变反应一般为





式中 ${}_{21}^A X$ ,  ${}_{22}^A X$ ——中等质量数的核, 叫做裂变碎片;  $\nu$ ——每次裂变平均放出的中子数。在这过程中, 还释放出约 200 兆电子伏的能量。

然而铀-235核吸收中子后并不都产生核裂变, 除产生上述裂变反应外还可能产生辐射俘获反应, 如:



## 2. 中子截面和核反应率

现在我们来定量地讨论中子与原子核的相互作用情况。

### 2.1 微观截面

假定有一单向均匀平行中子束, 其强度为  $I$  (即: 在单位时间内, 通过垂直于中子飞行方向的单位面积上有  $I$  个中子), 该中子束垂直地打在一个薄靶上, 靶的面积是 1 平方厘米, 厚度为  $\Delta x$ , 靶片内单位体积中的原子核数是  $N$ 。在靶后某一距离处放一中子探测器 (见图1-2)。如果未放靶时测得的中子束强度是  $I$ , 放靶后测得的中子束强度为  $I'$ , 那么,  $I' - I = \Delta I$  就是由靶造成的中子束强度的降低量。

因为中子一旦与靶核发生作用 (不论是散射还是吸收) 就会使中子离开它原来的飞行方向, 中子探测器就不能探测到这些中子了。所以, 通过靶以后的中子

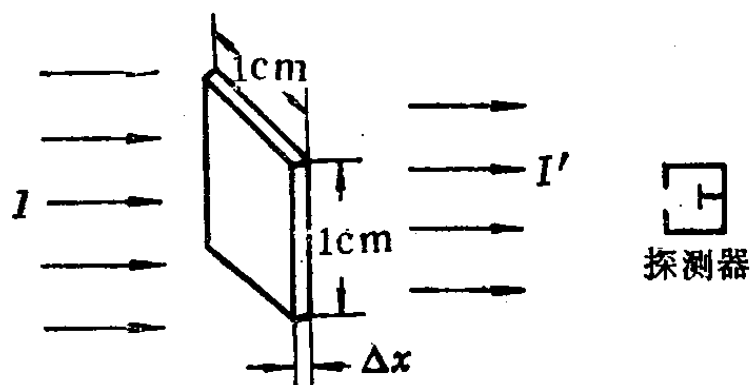


图1-2 穿过薄靶后平行中子束的衰减

束的强度的降低量  $\Delta I$  便等于与靶核发生作用的中子数。实验表明: 在靶面积不变的情况下,  $\Delta I$  正比于中子束强度  $I$ 、靶厚度  $\Delta x$  和靶的核密度  $N$ 。即: