

中子源及其应用

袁汉谔 俞安孙 王连璧 编著

科学出版社

53.8332
456

中子源及其应用

袁 汉 谔
俞 安 孙 编著
王 连 璧

科 学 出 版 社

1978

内 容 简 介

本书是一本中级性科普读物，简要地介绍各种中子源及其在各个领域中的应用。全书共分八章：常用中子源；中子辐射的剂量和防护；中子活化分析；中子测井；中子测水分；中子照相；中子辐射育种；中子治癌及中子源的其它应用。

本书可供核物理工作者、高等院校的师生以及中等文化程度的有关人员参考。

中 子 源 及 其 应 用

袁 汉 镨
俞 安 孙 编著
王 连 璧

*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中 国 科 学 院 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1978 年 2 月 第 一 版 开本：787×1092 1/32

1978 年 2 月 第一次印刷 印张：6 7/8

印数：0001—11,260 字数：156,000

统一书号：13031·683

本社书号：986·13—3

定 价： 0.56 元

目 录

引言	1
第一章 常用中子源	4
第一节 中子源的主要特性	4
一、中子和中子源	4
二、中子源的强度	6
三、中子的能量	9
第二节 同位素中子源	12
一、(α , n) 中子源	13
二、(γ , n) 中子源	23
三、自发裂变中子源	28
第三节 加速器中子源	33
一、几种用于产生中子的加速器	34
二、(d, n) 反应中子源	37
三、(p, n) 反应中子源	47
四、利用韧致辐射通过 (γ , n) 反应获得中子	55
第四节 反应堆中子源	57
一、反应堆的结构	57
二、反应堆中子的强度和能谱	59
三、反应堆中子的使用方式	64
四、在堆上获得各种能量中子的方法	66
第二章 中子辐射的剂量和防护	70
第一节 中子与物质的相互作用和中子辐射对人体的影响	70
一、中子与物质的相互作用	70

32974

• i •

二、中子与生物组织的相互作用	73
三、中子辐照对人体的影响	73
第二节 中子辐射的剂量	74
一、与中子剂量有关的几个基本概念	74
二、中子通量与吸收剂量、剂量当量的关系	77
三、中子剂量的测量	77
第三节 中子辐射的防护	82
一、最大容许剂量当量	82
二、中子的屏蔽	82
三、几个需要注意的问题	86
第三章 中子活化分析	88
第一节 基本原理和特点	89
第二节 分析方法和基本设备	94
一、有关分析方法和误差来源问题	94
二、基本设备	96
第三节 中子活化分析的应用简介	99
一、在工业上的应用	99
二、在农业上的应用	102
三、在医学、生物学上的应用	102
四、在环境科学上的应用	104
五、在地球化学和宇宙化学上的应用	105
六、在其他科学领域中的应用	106
第四章 中子测井	107
第一节 油田地质勘探中的中子测井	107
一、一般中子测井	108
二、中子寿命测井	113
三、能谱测井	118
第二节 金属矿地质勘探中的中子测井	127
一、中子活化测井	127
二、缓发中子测井	135

第五章 中子测水分	140
第一节 原理和特点	141
第二节 主要的仪器设备	144
一、中子水分计的分类	144
二、中子水分计的基本组成部分	145
第三节 中子水分计的应用	149
一、在农业中的应用	149
二、在土木建筑工程中的应用	150
三、在水文地质中的应用	151
四、在工业中的应用	152
第六章 中子照相	155
第一节 热中子照相的一般原理和特性	157
第二节 利用照相胶片的像探测方法	161
一、直接曝光法	163
二、间接曝光法	164
第三节 其它象探测方法	166
一、径迹腐蚀法	166
二、中子电视系统	167
三、其它	167
第四节 其它能量中子照相	168
第五节 中子照相的应用	171
第七章 中子辐射育种	175
第一节 辐射育种的基本原理和特点	176
第二节 不同辐射类型的比较	179
第三节 辐射育种的一般方法	181
一、关于辐射处理的材料、部位问题	181
二、照射剂量和有关的中子源问题	182
三、种子的辐射后代处理	184
第四节 利用中子进行辐射育种的一些典型结果简	

介	186
第五节 利用中子辐照、刺激生物体的生长	191
第八章 中子治癌及中子源的其它应用	194
第一节 中子治癌	194
一、快中子治癌	196
二、慢中子俘获治癌	202
第二节 中子源的其它应用	207
一、在原子能科学技术中的应用	207
二、在原子、分子和固体物理学研究上的应用	210
三、在化学、化工研究上的应用	212
四、其它	213

引 言

自从1932年发现中子、1938年发现中子能引起重原子核裂变释放核能以来,原子能科学技术得到了迅速的发展.中子在核能的释放过程中起着关键的作用,具有独特的性能.人们对中子本身也进行了深入的研究,并建立起一门独立的学科——中子物理学.随着科学技术的发展,中子的应用也不断从一个领域扩展到另一个领域,从一个学科扩展到另一个学科,现在已远远地超出了当初核物理研究的范围,扩展到了工业、农业、国防、科学和国民经济其它许多重要的部门,而成为一种多用途的科研、生产工具了.

在工业方面,中子活化分析技术已被广泛用来分析和控制工业产品的质量,测定高纯物质中的微量元素,分析钢中氧及其它杂质的含量;中子测水分技术已被用来测定和控制烧结料、铸造砂、焦炭、煤、化肥、纸张、水泥以及建筑物的地基、路基等的含水量;中子测井技术已被用来勘测油田,划分油、气、水层,测量有关的地球物理资料和勘探其它的一些金属和非金属矿藏;中子照相技术已被用来进行非破坏性检查,考察一些不宜用其它方法来检验的器件.利用中子的辐照效应可以生产新型的半导体器件,研制一些耐磨性能高的模具.在农业方面,中子辐射育种已经成为培育农作物新品种的一种有效方法;利用镅-铍中子源照射柞蚕卵,试验结果表明能够有效地提高蚕茧产量和蚕丝质量.在农业科学领域里,中子活化分析技术已被用来测定动植物及土壤中的微量和超微量

元素，研究农药在农作物上的代谢、分解和残留；中子测水分技术已被用来测量地表和地层深处土壤的含水量、研究农作物生长和土壤水分的关系。在医疗卫生方面，中子治癌已经成为人们颇感兴趣的一个研究课题；利用快中子照射一些抗菌素菌种进行诱变筛选也已获得良好结果；中子活化分析则可以在大型医院对血、尿、组织样品中微量元素进行快速、准确的分析化验，成为临床诊断和医学研究中的一种有力的工具；中子照相技术还是检查骨膜的胶质和癌细胞的一种有效方法，这种方法在临床诊断上也已开始得到应用。

在科研领域和原子能事业中，中子的应用也更加广泛。首先，在核科学技术方面，要研究中子与核的相互作用以及中子在物质中的行为；要利用中子研究核结构；测定许多与中子有关的核参数；进行一些裂变物质、聚变材料和各种放射性同位素的生产；也要用它进行一些材料、元件的辐照试验；中子还常被用于调试、刻度一些核物理仪器，研究防护设备和有关的生物学效应问题。在天体化学、水文、地质、气象、考古、环境污染、生命科学以及海洋科学等方面，中子活化分析更是一种深受欢迎的先进的分析技术，它的应用已经为这些学科的研究工作开拓了一个更加广阔的天地。在原子、分子和固体物理学的研究上，热中子散射已成为一种很有特色、很能解决问题的研究手段，并且已发展成为一门内容丰富，应用广泛的新的“边缘”学科。中子在化学、化工和其它方面也有很多应用。可以说，中子的应用虽然还历史不长，但它作为一种新技术，已经显示了旺盛的生命力，在许多领域中已经取得了引人注意的成果。

中子的应用首先必须要有产生中子的源，即中子源。由于科学技术的发展，中子源的种类越来越多，它的应用也越来越广泛。在本书中，我们首先谈谈各种常用的中子源和有关的

剂量防护知识,然后从六种主要应用技术——中子活化分析、中子测井、中子测水分、中子照相、中子辐射育种和中子治癌入手,对中子源的应用作简要的、一般性的论述.对一些比较专门的知识 and 应用技术,可以参看有关的专著和资料,这里就不准备详细叙述了.

在本书的编写过程中得到了许多单位的大力支持,提出了宝贵的意见.孙汉城同志为本书写了第八章的第一节中子治癌,黄胜年同志审阅了全部书稿,并对某些章节协助作了修改和做了大量的技术工作.张春芳同志为描绘本书的插图付出了巨大的劳动,作者在此向他们表示感谢.

第一章 常用中子源

第一节 中子源的主要特性

一、中子和中子源

自从三十年代初期发现中子以来,人们对中子进行了深入的研究,对它的性质有了较深的了解。中子的静止质量为 1.00866520 原子质量单位¹⁾(即 1.674920×10^{-24} 克),电荷的上限是 10^{-18} 电子电荷,所以可以认为是不带电的中性微粒。

中子的自旋是 $\frac{1}{2}h$ (h 是普朗克常数),磁矩为负 1.913159 核磁子。由于中子的质量比质子与电子质量之和还大 0.340×10^{-3} 原子质量单位,因此它能够通过 β 衰变转变为质子,并放出最大能量为 $0.840 \times 10^{-3} \times 931.48$ 兆电子伏 $= 782$ 千电子伏的电子,半衰期 $T_{1/2} = 11.7 \pm 0.3$ 分。

由于中子不带电,当它射入物质时,和核外电子几乎没有作用,主要是与原子核发生作用;因此中子的反应几率主要决定于核的性质,这和电磁辐射(X 、 γ 射线)大不一样。电磁辐射与物质的相互作用几率主要决定于原子序数 Z 。中子不需要克服库仑力的障碍,能量很低(即速度很慢)的中子也能进入原子核内,引起各种反应,反应几率往往很大。对于能量较高的中子(快中子)来说,则具有很强的穿透性。由于中子具

1) 一个原子质量单位 $= \frac{1}{12}^{12}\text{C}$ 原子质量 $= 1.660531 \times 10^{-24}$ 克,根据质能关系($E = mc^2$),它相当于 931.4812 兆电子伏的能量。

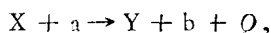
有磁矩,它能与磁性材料发生磁作用,因此,也是研究材料磁结构的有力工具。有关中子与物质的种种相互作用,我们在第二章里还要谈到。总之,中子具有与电磁辐射、带电粒子不同的一系列特性,使它在许多方面有着独特的应用。

因为中子的平均寿命很短(半衰期 11.7 分),自然界几乎不存在自由中子。但是,中子与质子结合在一起能够形成稳定的原子核。这种“束缚态”中子大量地存在于原子核内,人们只要以某种方式使中子从核内释放出来,我们就可以获得单个的自由中子。也就是说,可以人工产生自由中子,这种能够产生中子的装置,就叫做“中子源”。

组成原子核的质子和中子(统称核子)在核内受到很强的核力作用,牢固地束缚在一起。要使一个核子从原子核里释放出来,就必须给以一定的能量,我们称这个能量为核子在核内的结合能。反过来,当一个核子进入到某个原子核中时,也会释放出结合能。

我们知道中子在不同的核内结合能是不一样的,结合能大约在 1.7 到 20 兆电子伏之间。如果设法使原子核获得大于中子结合能的能量,中子就可能发射出来。我们可以利用所谓“核反应”来实现这一过程。

用某些具有一定动能的粒子去轰击原子核时,可以使它转变为另一种核,同时放出其它粒子。这种“核反应”可以用方程表示为



或简写为 $X(a,b)Y$ 。这里用 a 代表轰击粒子, X 代表被轰击的原子核,又称靶核, Y 是核反应所产生的终核, b 是核反应放出的粒子。 Q 叫做反应能量。 $Q > 0$ 表示反应过程放出能量,称为放热反应;反之, $Q < 0$ 被称为吸热反应,也就是说,必须吸收大于 $|Q|$ 的能量时,反应才能发生,这部分能量通常

是由轰击粒子的动能来提供的。

有许多这样的核反应能释放出中子。常用的轰击粒子有 α 粒子、氘核、质子和 γ 光子。 α 粒子就是氦核 ${}^4_2\text{He}$ ，这里化学元素符号He左下角的数字表示原子序数 Z ，也就是核内的质子数目，左上角的数字表示质量数 A ，也就是核内质子与中子数目之和。氘核是质量数为2的氢同位素核，由一个质子和一个中子组成。经常选用一些轻原子核作靶核，这是因为带电粒子轰击靶核时要受到核库仑力的排斥，它们与重核的反应只有在能量较高时才能实现。按照轰击粒子的不同，产生中子的主要核反应大体有 (α, n) 、 (d, n) 、 (p, n) 、 (γ, n) 等。这里字母d, p, n分别表示氘核、质子和中子。重原子核的裂变也是产生中子的重要反应，它的机制与上面这些反应不大一样。在裂变过程中，重原子核(如铀、钚)分裂成为两个大小相差不多的碎片，同时释放出几个中子。所有的中子源都是利用上述的核反应或裂变过程来获得中子的。

最早的中子源是用天然放射性同位素(如镭、钋、钋等)的 α 射线去轰击铍，引起核反应而产生中子。这种中子源构造比较简单，强度也较低。随着中子应用的发展，中子源的种类越来越多，性能也逐步提高。目前大体可以把常用的中子源分成三大类，即：同位素中子源、加速器中子源和反应堆中子源。同位素中子源体积小，使用起来方便，但一般强度不高。用加速器得到的各种带电粒子束去轰击适当的靶，可以产生各种能量的中子，其强度比普通的同位素中子源要高出好几个数量级。但就热能区中子而言，原子反应堆仍是目前能达到的强度最大的中子源。

二、中子源的强度

中子源最重要参数之一是它的强度，即单位时间里所发

射出来的中子数目。对于每次核反应释放一个中子的过程，中子源强度就等于单位时间内靶物质中所发生的核反应数目。

经过准直的平行粒子束垂直地射到厚度为 Δx 的薄靶上时(如图 1.1)，如果单位时间内入射粒子数为 I_b ，那么在与入

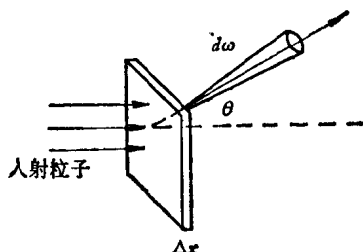


图 1.1 平行粒子束射到薄靶上

射束方向构成 θ 角的很小的立体角元 $d\omega$ 内，单位时间发射的中子数 $I_n(\theta)$ 为

$$I_n(\theta) = I_b N \Delta x \frac{d\sigma(\theta, E)}{d\omega} \cdot d\omega, \quad (1.1)$$

其中 N 为单位体积靶物质内所包含的靶核数目，可以由靶的密度 ρ 和靶核质量数 m_t 求得：

$$N = \frac{\rho}{m_t} \times 6.02217 \times 10^{23},$$

式 (1.1) 中 $\frac{d\sigma(\theta, E)}{d\omega}$ 为产生中子反应的“微分截面”，它代表

一个轰击粒子与一个靶核相作用时在 θ 方向单位立体角内发射中子的几率。要求出单位时间内靶上产生的中子总数，就应对所有的立体角求和，也就是将式 (1.1) 对立体角求积分得

$$I_n = I_b N \Delta x \sigma(E), \quad (1.2)$$

其中 $\sigma(E) = \int \frac{d}{d\omega} \sigma(\theta, E) d\omega$ 为轰击粒子与靶核产生中子反

应的“总截面”。截面具有面积的量纲，常用的截面单位是靶，
 $1 \text{ 靶} = 10^{-24} \text{ 厘米}^2$ 。每个轰击粒子在靶上产生的中子数我们称之为靶的产额 Y ：

$$Y = I_n/I_b = N\Delta x\sigma(E). \quad (1.3)$$

实际上，产额的定义随情况而定，并不严格，对于加速器中子源，人们常常把单位强度束流（微安或微库）在靶上产生的中子数称为产额，而对于同位素中子源，人们又习惯于把每居里放射性物质所产生的中子强度称为产额。

轰击粒子进入靶物质后，由于它与靶物质内电子的库仑相互作用，其能量将逐渐降低。由于反应截面通常是轰击粒子能量 E 的函数，所以式(1.1)、(1.2)、(1.3)只有当靶厚 Δx 很薄时才成立，也就是轰击粒子能量损失很小的情况下才成立。这种薄靶主要用于产生单能中子。当人们主要关心的是提高中子源的强度时，可以使用厚靶，它的厚度大于轰击粒子在靶物质中的射程 R ，厚靶的中子产额可以表示为

$$\begin{aligned} Y &= N \int_0^R \sigma(E) dx = N \int_E^0 \frac{\sigma(E)}{dE/dx} dE \\ &= N \int_0^E \frac{\sigma(E)}{-dE/dx} dE. \end{aligned} \quad (1.4)$$

由上式可以看出，要估算厚靶中子产额，除了需要知道截面 σ 与粒子能量 E 的关系以外，还应该知道轰击粒子在靶物质中的阻止本领 $-dE/dx$ 。如果反应截面 $\sigma(E)$ 随能量的变化不大，式(1.4)可以近似为

$$Y \cong N\bar{\sigma} \int_0^R dx = N\bar{\sigma}R. \quad (1.5)$$

对于一般产生中子的反应，当选用适当的平均截面 $\bar{\sigma}$ 数值时，式(1.5)可用来近似估算厚靶中子产额。

三、中子的能量

中子源的另一个重要参量是它所发射中子的能量。中子的速度不同即能量不同，它与物质相互作用时的行为就大不相同。这里先谈谈有关中子能量的一些概念。

在非相对论性条件下（即速度与光速之比 $v/c \ll 1$ 时），通常所说中子的能量是指它的动能 $E_n = \frac{1}{2} m_n v^2$ ，其中 m_n 是

中子静止质量。中子的能量常用电子伏作单位。经常遇到的中子能量区域是 10^{-3} — 10^7 电子伏，也就是说有从毫电子伏到几十兆电子伏约十个数量级的差别。习惯上把 0.1 兆电子伏以上的中子叫作快中子，把 1 千电子伏以下的中子叫作慢中子，介于其间的叫做中能中子。在电子伏到千电子伏能区的中子，由于它们与物质相互作用的截面常呈共振结构，所以又称为共振中子。 10^{-2} 电子伏左右的中子，由于相当于与分子、原子、晶格处于热运动平衡的能量，所以又叫做热中子。比热中子能量更低的，就又叫做冷中子。各类中子的能量区分并不是很严格的。

慢中子在大块物质中扩散时，如果中子很少被吸收，那末由于碰撞热平衡的结果，其能谱常接近一般分子运动中相应一定温度的麦克斯韦分布，所以中子的能量又可以用温度来表示。另外，中子和其它粒子一样，也具有微粒和波动两重性。中子的波长 $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2m_n E_n}}$ ， $p = m_n v$ 是中子的动

量， h 为普朗克常数。可见中子的能量又可以用波长来表示。温度与波长的概念在研究中子与分子、原子、固体相互作用时是很有用的。如果中子能量 E_n 用电子伏作单位，速度 v 用每秒厘米作单位，温度 T 用 K 作单位，波长 λ 用厘米作单

位,那末就有以下的换算关系式:

$$E_n = 8.6171 \times 10^{-5} T,$$

$$E_n = 5.22695 \times 10^{-9} \nu^2,$$

$$E_n = 8.18015 \times 10^{-18} / \lambda^2.$$

举例来说,对于标准热能中子,其速度为 $v = 2200$ 米/秒,相应的量是

$E_n = 0.0252984$ 电子伏, $T = 293.58\text{K}$, $\lambda = 1.79818$ 埃(埃即 10^{-8} 厘米).

具有单一能量的中子叫作单能中子,或者采用光学的说法,称为单色中子. 能量不单一具有连续能量分布的就叫作连续谱中子.

一般中子源初始发射出来的中子能量多数在兆电子伏量级,这是因为核反应的反应能与轰击粒子的能量大都在这一区域的原故. 如果轰击粒子和所发射中子的速度与光速相比都不很大时,可以用经典力学的能量和动量守恒定律来处理核反应过程. 例如 $a + A \rightarrow B + n + Q$ 这样的核反应,我们以 $E, p, m; E_i, p_i, m_i; E_r, p_r, m_r$ 和 E_n, p_n, m_n 分别表示轰击粒子、靶核、终核和中子的动能、动量和质量. 假定反应开始时靶核是静止的,即 $E_i = 0$, 根据能量守恒定律,可以得到

$$E + Q = E_r + E_n,$$

由动量守恒定律

$$p_r^2 = p^2 + p_n^2 - 2pp_n \cos \theta,$$

其中 θ 为中子发射方向与轰击粒子入射方向的夹角, Q 为反应能. 利用动量与能量的关系式 $p = \sqrt{2mE}$, 从前面两个方程式中消去 E_r , 可以得到

$$Q = \left(1 + \frac{m_n}{m_r}\right) E_n - \left(1 - \frac{m}{m_r}\right) E - \frac{2}{m_r} \sqrt{m m_n E E_n} \cos \theta,$$

由此式可以解出 E_n 为