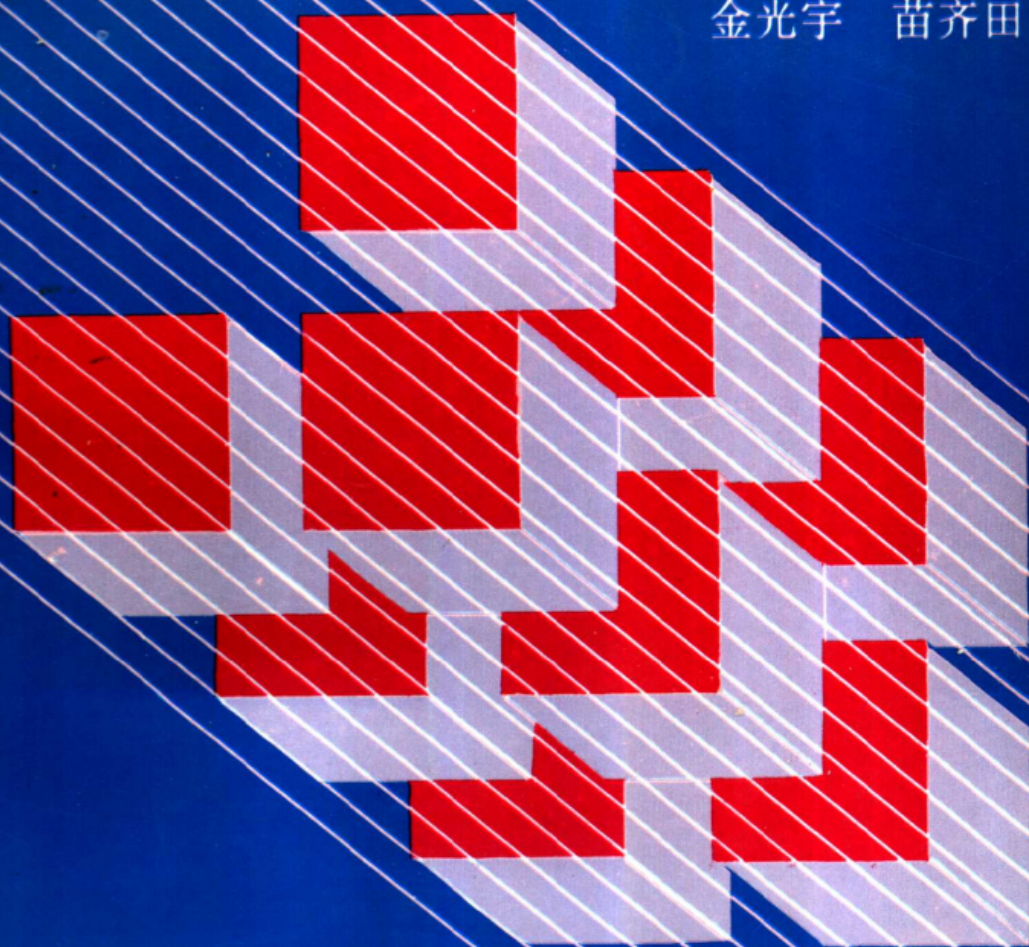


中子照相

貂大卫 刘以思 编著
金光宇 苗齐田



原子能出版社

ISBN 7-5022-1455-0



9 787502 214555 >

ISBN 7-5022-1455-0
TB879 定价:20.00 元

中子照相

貂大卫 刘以思
金光宇 苗齐田 编著

原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

中子照相/靳大卫 刘以思 金光宇 苗齐田 编著. —北京:原子能出版社,1996.3

ISBN 7-5022-1455-0

I. 中 II. 靳 III. 中子衍射-摄影 IV. TB879

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 23353 号

内 容 简 介

本书著者从事中子照相研究、应用工作达十余年之久,积累了大量的工作经验,总结于本书之中。本书既介绍了中子照相的基础知识和基本工作原理,也用相当多的篇幅介绍了中子照相的应用和推广。本书适用于初学者和无损检测专业的大学本科及专科学生,也可供长期从事无损检测工作的研究和检测人员作为参考。对从事各种学科研究的人员选择检测方法和研究方法及工具,也提供了一本有用的参考书。

中子照相

靳大卫 刘以思 金光宇 苗齐田 编著

©原子能出版社

责任编辑:袁祖伟

社址:北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码:100037

原子能出版社 印刷厂印刷 新华书店经销

开本:787×1092mm 1/16 印张 10.125 字数 280 千字

1996 年 3 月北京第 1 版 1996 年 3 月北京第 1 次印刷

印数:1—1000

定价:20.00 元

目 录

序言	(1)
1 中子物理和中子照相	(3)
1.1 中子的基本物理常数	(3)
1.2 中子能组的划分	(3)
1.3 自由中子的产生	(4)
1.4 中子与物质的相互作用	(4)
1.4.1 截面	(4)
1.4.1.1 微观截面	(4)
1.4.1.2 宏观截面	(5)
1.4.2 中子反应	(5)
1.4.2.1 中子弹性散射(n, n)	(6)
1.4.2.2 中子非弹性散射	(7)
1.4.2.3 中子的吸收	(9)
1.5 热中子及其主要特性	(9)
1.5.1 热中子能谱	(10)
1.5.2 热中子的获得	(10)
1.5.3 热中子的核反应	(10)
1.6 冷中子和甚冷中子	(16)
1.6.1 冷中子的获得	(16)
1.6.2 冷中子和甚冷中子的特性	(16)
1.7 中子和 X 射线与物质相互作用的差异	(17)
1.8 中子照相	(18)
1.8.1 原理	(19)
1.8.2 中子照相装置	(20)
1.8.3 中子照相的分类	(20)
1.8.3.1 热中子辐射照相	(21)
1.8.3.2 冷中子辐射照相	(21)
1.8.3.3 超热中子辐射照相	(21)
1.8.3.4 快中子辐射照相	(21)
参考文献	(21)
2 中子源	(23)
2.1 反应堆中子源	(23)
2.1.1 反应堆的分类	(23)
2.1.2 反应堆中的核反应	(24)
2.1.3 热中子反应堆的中子能谱	(24)
2.1.4 反应堆中的 γ 辐射	(25)
2.1.5 中子束的引出	(25)
2.1.6 进行中子照相研究的反应堆简介	(26)

2.2	加速器中子辐射源	(29)
2.2.1	加速器的分类	(29)
2.2.2	产生中子的核反应和中子产额及中子能谱	(29)
2.3	同位素中子源	(31)
2.4	次临界装置	(34)
2.4.1	链式反应	(34)
2.4.2	反应系数 K 和反应堆临界	(34)
2.4.3	次临界装置	(35)
2.5	四种类型中子源特性的比较	(36)
2.6	热中子束的获得	(37)
2.6.1	慢化剂	(37)
2.6.2	慢化体	(37)
2.6.3	热中子束	(38)
2.6.3.1	中子束强度	(38)
2.6.3.2	热中子与共振中子之比	(39)
2.6.3.3	热中子束准直度	(40)
2.6.3.4	干扰射线	(40)
2.6.3.5	热中子束纯度指示器	(40)
2.7	冷中子的获得	(41)
参考文献		(42)
3	准直器	(43)
3.1	准直器的作用及其与中子照相质量的关系	(43)
3.1.1	准直器与中子照相系统分辨率的关系	(43)
3.1.2	准直器与中子照相系统反差灵敏度的关系	(45)
3.2	准直器的构成及类型	(46)
3.3	准直器设计中应考虑的几个因素	(47)
3.3.1	中子过滤	(47)
3.3.2	γ 过滤	(48)
3.3.3	杂散中子和散射中子的影响	(48)
3.4	准直器的设计	(48)
3.4.1	准直器入口的设计	(49)
3.4.2	准直比的设计	(49)
参考文献		(51)
4	被检测物	(52)
4.1	对被检测物的要求	(52)
4.2	被检测物的尺寸	(52)
4.2.1	射线穿过被检测物的尺寸	(52)
4.2.2	被检测物的反差灵敏度	(53)
4.3	被检测物的安全	(56)
4.4	被检测物的放置	(56)
4.5	特殊的被检测物	(56)
参考文献		(57)
5	转换屏	(58)

5.1	转换屏的作用及分类	(58)
5.2	瞬态屏的类型及特点	(59)
5.2.1	发光屏	(59)
5.2.2	金属屏	(61)
5.3	活化屏的特点及使用方法	(62)
5.4	转换屏与中子照相质量的关系	(63)
参考文献		(68)
6	照相胶片	(69)
6.1	胶片可见影像的形成	(69)
6.1.1	胶片的材料与结构	(70)
6.1.2	胶片潜像的形成	(71)
6.1.3	潜像的化学处理	(71)
6.2	中子辐射照相胶片	(72)
6.2.1	中子辐射照相胶片的选择	(72)
6.2.2	关于胶片性能方面的常用术语	(72)
6.2.3	工业射线照相胶片的特性	(73)
6.2.3.1	工业射线照相胶片的特性曲线	(73)
6.2.3.2	胶片对图像对比度的贡献	(75)
6.2.4	互易定律	(77)
6.2.5	互易定律失效	(77)
6.3	其它图像探测器	(78)
参考文献		(78)
7	影响中子照相图像质量的因素	(79)
7.1	分辨力	(79)
7.1.1	几何因素(U_g)	(79)
7.1.2	固有因素(U_i)	(81)
7.1.2.1	转换屏厚度的影响	(81)
7.1.2.2	转换屏发射的二次射线能量的影响	(82)
7.1.2.3	转换屏和胶片之间的几何因素的影响	(83)
7.1.2.4	转换屏的加工质量	(83)
7.1.2.5	胶片	(83)
7.1.3	散射因素 U_s	(83)
7.1.3.1	准直器器壁的散射	(83)
7.1.3.2	周围物体的散射	(84)
7.1.3.3	被检测物体产生的散射	(85)
7.1.3.4	其它射线的干扰	(86)
7.1.4	总的不清晰度 U_{TOT} 的计算	(86)
7.2	图像对比度	(87)
7.2.1	被检测物体对图像对比度的贡献	(87)
7.2.2	胶片对图像对比度的贡献	(88)
7.3	人为因素对图像质量的影响	(88)
7.3.1	曝光过程中人为因素的影响	(88)
7.3.2	胶片贮藏、装卸、显影等过程中人为因素的影响	(88)

7.3.2.1	未处理胶片的贮藏	(88)
7.3.2.2	胶片装拆过程中引起的伪缺陷	(90)
7.3.2.3	胶片冲洗过程中人为因素的影响	(92)
参考文献		(98)
8	质量控制和标准	(99)
8.1	目的	(99)
8.2	具体标准介绍	(99)
8.3	关于标准的说明	(100)
8.4	几个值得注意的问题	(101)
8.5	检测人员的管理	(101)
参考文献		(102)
9	中子照相系统	(103)
9.1	照相系统	(103)
9.1.1	核反应堆中子照相系统	(103)
9.1.2	加速器中子照相系统	(105)
9.1.3	中子管中子照相系统	(106)
9.1.4	同位素中子源中子照相系统	(108)
9.2	对系统图像质量的要求	(110)
9.2.1	对中子照相系统图像质量的要求指标	(110)
9.2.2	估算对对中子照相系统的要求	(110)
9.3	系统的选择	(112)
9.3.1	明确要求	(112)
9.3.2	具体的选择	(112)
9.3.3	几点结论	(114)
参考文献		(114)
10	实时中子照相系统	(115)
10.1	实时照相系统	(115)
10.2	实时照相系统的特点	(115)
10.3	实时照相系统的构成	(116)
10.3.1	转换屏	(116)
10.3.2	像倍增器	(117)
10.3.3	图像转换器(记录器)	(121)
10.3.4	光学耦合问题	(123)
10.4	图像(实时)的质量	(124)
10.4.1	图像对比度	(124)
10.4.2	图像不清晰度	(125)
10.5	图像的后处理	(125)
10.6	发展前景	(126)
10.6.1	中子数字照相	(126)
10.6.2	扫描中子照相	(127)
10.6.3	中子断层成像	(127)
10.6.4	中子照相的图像处理	(127)

参考文献	(127)
11 中子照相的应用	(129)
11.1 标记照相	(129)
11.2 混凝土渗水特性的测试	(130)
11.3 腐蚀的检查	(131)
11.4 两相流的研究(管内)	(132)
11.5 火工品的中子照相	(133)
11.6 核燃料元件的检测	(133)
11.7 电子元件的中子照相检测	(134)
参考文献	(135)
12 附录	(136)
12.1 世界中子照相工作概况	(136)
12.1.1 中子照相应用范围	(136)
12.1.2 世界中子照相概况	(137)
12.2 反差灵敏度	(139)
12.3 细节灵敏度	(140)
12.4 散射中子的影响	(142)
12.5 美国 ASTM 标准	(144)
12.6 美国军用标准	(152)
参考文献	(154)

序 言

中子照相是射线照相的一种。它属于材料无损检测和无损评价(NDT,NDE)学科领域。中子与物质的相互作用有许多特殊性质,如:中子与物质相互作用截面与原子序数的关系复杂,同一能量的中子对于不同核素的相互作用截面变化很大;可使用的中子能量范围变化又大,有冷中子、热中子、中能中子、快中子等;这些特性都可利用来进行无损检测工作,所以造成了“中子照相”这个无损检测技术的多样性和复杂性。本书则着重介绍热中子照相,也涉及其它能量的中子照相。

射线无损检测是从 X 射线开始的。X 射线同物质的相互作用截面与核素的原子序数有确定的函数关系;而在同一元素的同位素间差别又甚小,不同于中子的情况。但应用 X 射线进行无损检测的贡献无论在工业上还是在医疗上是有目共睹的。中子则在这些方面优于 X 射线,从原理上来讲,当可在无损检测中发挥更大的作用。

从历史的角度看,X 射线从发现到成为一个优越的无损检测技术经历了数十年的发展过程,而其关键的一步是 X 射线管(热阴极)的出现。它解决了 X 射线的来源问题,因而 X 射线的应用才有了长足的发展。中子辐射看来似乎也在经历一个相似的过程。1932 年 Chadwike 发现了中子;1935 年 Ra-Be 中子源和小型加速器中子源相继出现;1946~1947 年中子照相图片开始出现,直至 1956 年,在英国 Harwell,BEPO 反应堆上 Thewlis 等才得到了优质中子照相图片;后来就发展得越来越快。世界上大多数的研究用反应堆上都曾进行过或现在还在进行着中子照相工作(见表 12.1)。而中子照相的应用范围已远远超出了作为无损检测工具所应具有的范围(见表 12.2)。中子源的发现和强中子源(实验反应堆)的出现给中子照相发展提供了必要的物质基础。但中子照相对中子源的高要求却制约了中子照相的发展,因为到目前为止,优质的中子照相照片大都来自利用核反应堆的中子;而反应堆中子源最大的特点是中子流密度高、费用高并且设备笨重,这对于某些工业应用来说,要求现场射线无损检测是较难实现的。

目前中子照相面临着其它射线无损检测技术的挑战,如 ICT(Industrial Computerized Tomography)等也可以完成某些中子照相的检测任务,如:金属包壳内有机物(含氢材料)的检查。当然,ICT 也有它的局限性,它仅能检测(被检测物)切片内的平均情况,而不是整体投影;并且分辨率差,检测时间长。但 ICT 有一极具挑战性的优点,即比核反应堆灵活,设备投资少。

当然,任何一种无损检测技术都不是万能的,也不是停滞不前的。

就中子照相而言,它仅是射线无损检测方法的一种。目前中子源技术正日新月异地发展

着,如中子管、高密度等离子体脉冲、小型加速器、中子倍增器、中子倍增次临界装置等,都有了长足的进展。我们相信总有一天,中子源技术的突破和成像技术的革新会给中子照相技术的发展带来一次质的飞跃。

在我国从事中子照相研究工作的单位仅仅局限在有关核技术及相关技术部门,如清华大学核能技术设计研究院、中国原子能科学研究院、九院、北京航空航天大学、东北师范大学等单位,布局也不尽合理。希望随着我国四个现代化的发展、更多研究用反应堆的建立,我国的中子照相事业也将取得长足的进展;也希望国内同行携起手来共同促进我国中子照相事业的发展。

最后,我们顺便提一下,所有的射线照相技术,不论 X、 γ 、中子、质子等,都存在一个射线的辐射防护问题,中子照相也不例外。有关中子辐射的防护问题,有相应的标准、手册和专著可以参阅,这里就不再赘述了。

1 中子物理和中子照相

英国科学家 J. 恰德威克(J. Chadwike)于 1932 年发现中子。后经实验证明除氢原子核以外,在所有原子核中都能找到中子,因此,中子和质子一样,都是构成原子核的基本粒子。中子和质子统称为核子。

自由中子是不稳定的,它通过弱相互作用衰变为质子、电子和反中微子。

$${}_0^1\text{n} \longrightarrow {}_1^1\text{p} + \beta^- + \bar{\nu} + Q \quad (1.1)$$

1.1 中子的基本物理常数

表 1.1 给出了中子的基本物理常数。

表 1.1 中子的基本物理常数

电荷	中性
静止质量	$1.675 \times 10^{-27} \text{kg}$
经典半径	$1.532 \times 10^{-18} \text{m}$
磁矩	$-9.646 \times 10^{-27} \text{J/T}$
康普顿波长	$1.319 \times 10^{-15} \text{m}$
半衰期	11.7min

1.2 中子能组的划分

中子能量分布很广,可由 10^{-7}eV 以下的超冷中子直到 10^7eV 以上的相对论中子。中子一般按能量进行分类:表 1.2 给出了常用的能量区间及中子分类名称。

表 1.2 中子能组的划分

序号	能量区间	能组
1	$<10^{-7} \text{eV}$	超冷中子
2	$10^{-7} \sim 0.001 \text{eV}$	甚冷中子
3	$0.001 \sim 0.005 \text{eV}$	冷中子
4	$0.005 \sim 0.5 \text{eV}$	热中子
5	$0.5 \text{eV} \sim 1 \text{keV}$	超热中子,镉上中子,共振中子
6	$1 \text{keV} \sim 0.5 \text{MeV}$	中能中子
7	$0.5 \sim 10 \text{MeV}$	快中子
8	$10 \sim 50 \text{MeV}$	极快中子
9	$>50 \text{MeV}$	相对论中子

注:能组的界限并不是很严格的。

1.3 自由中子的产生

能产生自由中子的装置称为中子源。中子源是研究中子及中子照相必不可少的设备。中子源可分为同位素中子源、加速器中子源和反应堆中子源。

中子源中产生自由中子的核反应主要有：用 α 粒子轰击原子核产生中子的 (α, n) 反应、用 γ 光子轰击原子核产生中子的 (γ, n) 反应、用氘核轰击原子核产生中子的 (d, n) 反应、用质子轰击原子核产生中子的 (p, n) 反应和原子核裂变产生中子的 (n, f) 反应。裂变反应又分两种，即人为使核发生裂变和原子核自发发生裂变。

衡量中子源的指标为：发出的中子辐射的注量率，中子能量分布（即中子能谱）及角分布， γ 射线本底以及购置、使用的经济性和安全性。

1.4 中子与物质的相互作用

中子不带电荷，它不受原子电场的作用。因此，中子通过物质时，在与原子核非常靠近、以短程核力与核发生相互作用之前，都不会受到阻碍，所以中子的透射力很强。

中子与原子核发生相互作用能改变入射中子的能量及运动方向，这称之为散射；或是中子被原子核吸收。中子散射过程有两种：其一是整个系统动能保持不变的弹性散射；其二是系统的一部分动能转变成原子核的激发能，这种散射称为非弹性散射。原子核吸收中子后能发射出一个或几个 γ 光子，也可以发射带电粒子，有时也能发射一个或几个中子，甚至可引起自身的核裂变。非弹性散射也能导致被作用物质的二次发射。所以，除弹性散射外，所有的中子相互作用都能造成次级辐射源。

1.4.1 截面

截面是表示入射中子和靶核之间发生某一特定核反应的概率大小的物理量。靶核的种类、物质内原子核的密度、入射中子的方向分布和入射中子的能量分布等对截面值的大小都有很大影响。

截面分为微观截面和宏观截面两种。

1.4.1.1 微观截面

微观截面是用来量度中子与靶原子核相互作用概率大小的基本量，它只涉及入射中子注量与单个靶核发生相互作用的概率，习惯上用符号 σ 表示。微观截面定义为：

$$\sigma = \frac{\text{单位时间内每个核发生指定事件概率}}{\text{单位时间内单位面积入射中子数}} \quad (1.2)$$

可以用各种脚注来指明相互作用的类别，例如： σ_a 代表吸收截面， σ_s 代表散射截面， σ_{in} 代表非弹性散射截面， σ_t 代表总截面。符号中还经常表示出相应的函数关系：例如 $\sigma_a(E)$ 表示

作为入射中子能量 E 的函数的微观吸收截面。

这里之所以采用截面这个术语是因为微观截面与面积有同一量纲。可以将截面看成为以靶原子核为中心的球体的有效横截面的面积,入射中子只有穿过它时才能与靶核发生相互作用。一般说来,这个有效横截面的面积反映了入射中子与靶原子核之间的相互作用力的范围,而和原子核的大小没有直接关系。对于相同的靶原子核和入射中子,吸收有效截面(σ_a)和散射有效截面可以大不相同。

微观截面值很小,过去通常采用 b、mb 和 μb 作为量度单位,1b 等于 10^{-28}m^2 (10^{-24}cm^2),1mb 等于 10^{-31}m^2 (10^{-27}cm^2), $1\mu\text{b}$ 等于 10^{-34}m^2 (10^{-30}cm^2)。

1.4.1.2 宏观截面

微观截面只涉及中子与单个靶原子核相互作用的概率,而宏观截面反映的是中子与全体靶原子核相互作用的概率。宏观截面总是可以根据已知的微观截面和靶原子核的成分通过计算得到。宏观截面通常用符号 Σ 表示。和微观截面一样,可以在这个符号上加脚注或函数标记,表示不同类型的相互作用。

假设 N 是靶原子核的密度(核数/ cm^3),对于某种特定的相互作用,作为入射中子能量 E 的函数的宏观截面和相应的微观截面的关系是:

$$\Sigma(E) = N\sigma(E) \quad (1.3)$$

由公式(1.3)可以看出,所定义的宏观截面的量纲是长度的倒数(m^{-1} 或 cm^{-1}),常被称为线吸收系数。实际上宏观截面就是单位体积内物质的原子核与中子发生相互作用的总的表观截面(m^2/m^3)。

对于由各种靶原子核组成的混合物,某个特定相互作用过程的宏观截面由下式给出:

$$\Sigma(E) = \sum_i N_i \sigma_i(E) \quad (1.4)$$

式中: N_i 为第 i 种靶原子核的体密度;

$\sigma_i(E)$ 为第 i 种靶原子核的微观截面。

可以证明:

$$\Sigma(E) = \sum \frac{N_A}{A_i} \rho_i \sigma_i(E) \quad (1.5)$$

式中: N_A 为阿佛加德罗常数(6.022×10^{23});

A_i 为第 i 种靶原子核的原子量;

ρ_i 为混合物中第 i 种靶元素的分密度。

通常各种相互作用的微观截面和宏观截面通过相加求出总反应截面:

$$\sigma_t = \sigma_s + \sigma_a + \dots \quad \Sigma_t = \Sigma_s + \Sigma_a + \dots \quad (1.6)$$

1.4.2 中子反应

中子与靶原子核发生核反应是复杂的,反应的种类也很多,如散射、吸收和裂变等,这与入射中子的能量及靶核的精细结构有关。在不同的能区,中子的反应截面与能量的关系曲线也有很大的差别。

在热中子能区,中子的吸收截面常随中子速度的倒数而变化,所以这一能区也称作 $1/v$ 区。

在 $0.5\text{eV} \sim 1\text{keV}$ 的超热能区,截面呈现一个或几个共振峰,所以这一能区也称为共振区。在共振区中,共振峰的截面值比基准值高几个数量级,共振峰对共振区平均截面的影响取决于共振峰的数目和宽度;不同的原子核,它们的共振峰的数目和宽度差别很大。共振区上限有时可延至 50keV ,因核而异。

0.5MeV 以上为快中子能区,在这一能区内反应截面也有共振现象,但大多数出现在低能部分。在这一能区内大部分截面相当平滑,一般说来,其截面值也比低能区的截面值低。

1.4.2.1 中子弹性散射(n,n)

发生中子弹性散射时,系统的动能和动量是守恒的,所以在计算散射中子、反冲核的运动方向和速度与入射中子的运动方向和速度(能量)之间的关系时,可采用简单的台球碰撞模型。

中子弹性散射包含两个过程,第一个过程叫做共振散射,即中子被靶原子核吸收,形成复合核,然后再从别的方向重新发射出来。第二个过程叫做势散射,即中子并不进入靶原子核,而是与短程作用的核力在原子核周围形成的势阱发生相互作用,从而发生弹性散射。弹性散射的截面为两个过程之和,用 σ_{es} 表示。因为有相干效应,所以求和时还必须考虑粒子的自旋状态,而不是简单地相加。

在低能区和中能区,共振弹性散射占优势,弹性散射截面随能量分布呈现出忽大、忽小的剧烈变化;而在快中子能区共振散射几乎全是非弹性散射,在此能区弹性散射主要是势散射,势散射的截面随中子能量变化比较平滑。

图 1.1 用图解的方法说明了在实验室系和质心系两种坐标系中发生碰撞时各种量之间的关系。

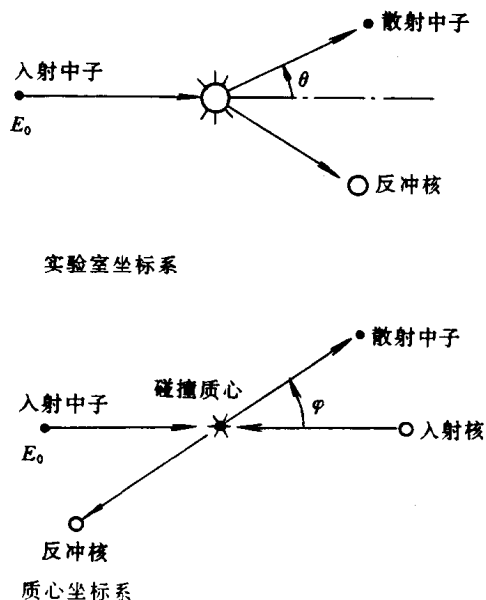


图 1.1 在实验室坐标系和质心坐标系中发生碰撞时各量之间的关系

在质心坐标系中,弹性相互作用的散射角和能量之间的关系具有最简单的形式,在这种坐标系中发生弹性散射,系统的总动量是常数且等于零,质心在发生碰撞后的速率等于碰撞前的速率。发生弹性散射时,散射中子的能量 E 与入射中子的能量 E_0 、靶原子核的原子量 A 以及散射角 ψ (质心坐标系)的关系如下:

$$E/E_0 = \frac{A^2 + 2A\cos\psi + 1}{(A + 1)^2} \quad (1.7)$$

实验室坐标系中散射角 θ 与质心坐标系中的 ψ 有如下的关系:

$$\cos\theta = \frac{A\cos\psi + 1}{(A^2 + 2A\cos\psi + 1)^{1/2}} \quad (1.8)$$

当 $\psi=\pi$ 时中子能量损失最大,即散射中子能量最小,

$$\frac{E_{\min}}{E_0} = \left(\frac{A-1}{A+1}\right)^2 \quad (1.9)$$

从能量损失的公式来看,对于中重核和重核,弹性散射后的出射中子主要是中子运动方向的变化,能量变化很小;而对于轻核,由于靶原子核的反冲效应,弹性散射后不但中子的运动方向发生变化,而且能量也显著降低。尤其是对于氢原子核,由(1.9)式可以看到,只要在氢上发生一次 $\psi=\pi$ 的散射(氢的 $A=1$),中子将会失去其全部能量。

对于低能中子,在质心系中的弹性散射接近各向同性;而在实验室系中,它是各向异性的,其平均散射角为:

$$\cos\theta = \frac{-2}{3A} \quad (1.10)$$

对于低能区和重核,随 A 的增大, θ 可趋向于 $\frac{\pi}{2}$ 。所以,对于低能区和重核,在实验室坐标系中散射也接近各向同性。随着入射中子能量的增大,散射对各向同性的偏离也越来越大,当入射中子能量大约在 0.1MeV 以上时,除最轻的核外,在所有核上发生的散射都是各向异性的,

$$\bar{\theta} = \frac{200}{(E_0)^{1/2} \cdot A^{1/3}} \quad (1.11)$$

式中: E_0 以 MeV 为单位。由上式可见,对于高能入射中子,各向异性随着 A 的增大而增大。

1.4.2.2 中子非弹性散射

中子的非弹性散射一般用 (n, n') 表示。非弹性散射和弹性散射的主要差别在于,当发

生非弹性散射时,入射中子的一部分动能变成了靶原子核的激发能,激发核接着通过发射光子而退激。非弹性散射后中子的运动方向发生改变,能量也大为降低。非弹性散射是使能量大于 1MeV 的快中子能量逐渐减小的主要过程,这不仅由于一次非弹性碰撞中中子可以将大部分能量传递给靶原子核,而且也由于在 1~14MeV 的能量范围内,非弹性散射的重要性随着能量增高而增大。因为对于大多数元素来说,其弹性散射截面通常随能量缓慢起伏变化,在快中子能区其值逐渐下降;又因为非弹性散射是个阈反应,所以,截面通常随入射中子能量增高而增大,只有当存在发射粒子的竞争反应时,非弹性散射截面将随能量增高而减小。

发生非弹性散射时,入射中子的动能必须稍高于靶原子核的第一激发态,这一能量被称为非弹性散射的阈能。对于大多数元素,反应阈能通常在 0.1MeV 到 4 或 5MeV 之间,因核而异。当入射中子的动能超过靶原子核的第二或更高的激发态时,这些较高的动能也可以变成靶原子核的激发态,所以,入射中子可以将靶原子核激发到以其入射动能为上限的任何一个能级。激发态能级之间的间隔随激发能量的增加而减小,最后成为连续能级。对于给定的原子核和中子能量,激发到每一能级的概率是固定的。除了第一激发态的所有能级,原子核还可以用几种不同的方式释放出激发能。可以只发射一个光子而使原子核回到基态;由于存在着中间能级,也可以发射出几个级联光子。相应于原子核被激发到各能级有一组概率,而每一能级通过不同方式衰变又有另一组概率。因此,涉及到所有这些反应的截面数据必定是相当复杂的。

常把所有的非弹性散射的总截面分成两个部分: $\sigma_{nn'}(L)$ 是把原子核激发到不连续的任一激发态(用 L 表示)的概率; $\sigma_{nn'}(C)$ 是把原子核激发到能级密布的区域(用 C 表示)的概率。表 1.3 给出了四种元素的中子能量阈及相应于四种中子能量的 $\sigma_{nn'}(C)$ 和 $\sigma_{nn'}(L)$ 的值。

表 1.3 四种元素的中子非弹性散射截面

元素		近似的阈能值 MeV	中子能量			
			14MeV	5.16MeV	2.0MeV	1.0MeV
W	$\sigma_{nn'}(L)$	0.0115	0	0.095	1.23	2.34
	$\sigma_{nn'}(C)$	0.99	2.49	2.47	1.35	0.005
Pb	$\sigma_{nn'}(L)$	0.57	0	0	7.7	0.34
	$\sigma_{nn'}(C)$	3.13	2.52	2.06	0	0
Ni	$\sigma_{nn'}(L)$	1.4	0	0	0.6	0
	$\sigma_{nn'}(C)$	4.02	1.13	1.17	0	0
C	$\sigma_{nn'}(L)$	4.91	0.268	0.0436	0	0
	$\sigma_{nn'}(C)$	9.4	0.216	0	0	0