



《中国工程物理研究院科技丛书》第051号

中子核反应激发函数

Excitation Functions in Neutron-induced Reactions

田东风 孙伟力 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

《中国工程物理研究院科技丛书》第 051 号

中子核反应激发函数

**Excitation Functions
in Neutron – induced Reactions**

田东风 孙伟力 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书简述了中子与原子核相互作用的机制及相关理论模型,简要介绍了国际上几个著名的中子评价核数据库,如 BROND-2(俄罗斯)、CENDL-2(中国)、ENDF-VI(美国)、JEF-2(欧共体)、JENDL-3(日本),提供了 102 个常用核素的中子核反应激发曲线。随书附有一张光盘,其中内容包括本图集的 e 版本和相关图形软件及其安装使用说明。读者除可直观查阅中子激发曲线图外,还可通过个人电脑直接显示本图集的相关内容,如截面曲线及所对应的能量-截面(E-X)值等。

本书可作为核反应理论、核数据评价及其应用、中子物理学、粒子输运计算和某些核技术应用研究方面的科研人员,以及大学有关专业高年级学生、研究生和教师的实用工具书。

图书在版编目(CIP)数据

中子核反应激发函数 / 田东风,孙伟力编著. —北京:
国防工业出版社,2006. 11
(中国工程物理研究院科技丛书)
ISBN 7-118-04689-2

I. 中... II. ①田...②孙... III. 中子反应-激发
函数 IV. 0571.42

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 088185 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

北京四季青印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 19½ 字数 466 千字

2006 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价: 48.00 元(含光盘)

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010) 68428422

发行邮购: (010) 68414474

发行传真: (010) 68411535

发行业务: (010) 68472764

《中国工程物理研究院科技丛书》

出版说明

中国工程物理研究院建院 40 多年来,坚持理论研究、科学实验和工程设计密切结合的科研方向,完成了国家下达的各项国防科研任务。通过完成任务,在许多专业学科领域里,不论在基础理论方面,还是在实验测试技术和工程应用技术方面,都有重要发展和创新,积累了丰富的知识经验,造就了一大批优秀科技人才。

为了扩大科技交流与合作,促进我院事业的继承与发展,系统地总结我院 40 多年来各个专业领域里集体积累起来的经验,吸收国内外最新科技成果,形成一套系列科技丛书,无疑是一件十分有意义的事情。

这套丛书将部分地反映中国工程物理研究院科技工作的成果,内容涉及本院过去开设过 20 几个主要学科。现在和今后开设的新学科,也将编著出书,续入本丛书中。

这套丛书将在今后几年里陆续编辑出版。我院早些年零散编著出版的专业书籍,经编委会审定后,也纳入本丛书系列。

谨以这套丛书献给 40 多年来为我国国防现代化而献身的人们!

《中国工程物理研究院科技丛书》

编审委员会

1999 年 6 月 4 日修改

《中国工程物理研究院科技丛书》
第五届编审委员会

顾 问 俞大光

编委会主任 杜祥琬

副 主 任 彭先觉 孙 颖 李志民

委 员 (以姓名笔画为序)

华欣生 江 松 刘柯钊 孙承纬 陈银亮

何建国 李 凡 李泽仁 苏 伟 苏 毅

汪小琳 吴志杰 张方晓 张富堂 张 健

罗顺火 孟凡宝 郑志坚 周德惠 竺家亨

顾 援 唐永建 黄 辉 彭述明

科技丛书编辑部负责人 李代斌

本册编辑 李天惠

《中国工程物理研究院科技丛书》 已出版书目

- | | | |
|-----|---------------------------|---------------------|
| 001 | 高能炸药及相关物性能
董海山 周芬芬 主编 | 科学出版社 1989 年 11 月 |
| 002 | 光学高速摄影测试技术
谭显祥 编著 | 科学出版社 1990 年 02 月 |
| 003 | 凝聚炸药起爆动力学
章冠人 等编著 | 国防工业出版社 1991 年 09 月 |
| 004 | 线性代数方程组的迭代解法
胡家赣 编著 | 科学出版社 1991 年 12 月 |
| 005 | 映象与混沌
陈式刚 编著 | 国防工业出版社 1992 年 06 月 |
| 006 | 再入遥测技术(上册)
谢铭勋 编著 | 国防工业出版社 1992 年 06 月 |
| 007 | 再入遥测技术(下册)
谢铭勋 编著 | 国防工业出版社 1992 年 12 月 |
| 008 | 高温辐射物理与量子辐射理论
李世昌 编著 | 国防工业出版社 1992 年 10 月 |
| 009 | 粘性消去法和差分格式粘性
郭柏灵 著 | 科学出版社 1993 年 03 月 |
| 010 | 无损检测技术及其应用
张俊哲 等著 | 科学出版社 1993 年 05 月 |
| 011 | 半导体材料辐射效应
曹建中 著 | 科学出版社 1993 年 05 月 |
| 012 | 炸药热分析
楚士晋 编著 | 科学出版社 1994 年 12 月 |
| 013 | 脉冲辐射场诊断技术
刘庆兆 主编 | 科学出版社 1994 年 12 月 |
| 014 | 放射性核素活度的测量方法和技术
古当长 编著 | 科学出版社 1994 年 12 月 |
| 015 | 二维非定常流和激波
王继海 编著 | 科学出版社 1994 年 12 月 |

- 016 抛物型方程差分方法引论
李德元 陈光南 著
科学出版社 1995 年 12 月
- 017 特种结构分析
刘新民 韦日演 主编
国防工业出版社 1995 年 12 月
- 018 理论爆轰物理
孙锦山 朱建士 著
国防工业出版社 1995 年 12 月
- 019 可靠性维修性可用性评估手册
潘吉安 编著
国防工业出版社 1995 年 12 月
- 020 脉冲辐射场测量数据处理与误差分析
陈元金 编著
国防工业出版社 1997 年 01 月
- 021 近代成像技术与图像处理
吴世法 著
国防工业出版社 1997 年 03 月
- 022 一维流体力学差分方法
水鸿寿 著
国防工业出版社 1998 年 02 月
- 023 抗辐射电子学—辐射效应及加固原理
赖祖武 等著
国防工业出版社 1998 年 07 月
- 024 金属的环境氢脆及其试验技术
周德惠 谭云 编著
国防工业出版社 1998 年 12 月
- 025 试验核物理测量中的粒子分辨
段绍节 编著
国防工业出版社 1999 年 06 月
- 026 实验物态方程导引(第二版)
经福谦 著
科学出版社 1999 年 09 月
- 027 无穷维动力系统
郭柏灵 著
国防工业出版社 2000 年 01 月
- 028 真空吸取器设计及应用技术
单景德 编著
国防工业出版社 2000 年 01 月
- 029 再入飞行器天线
金显盛 编著
国防工业出版社 2000 年 03 月
- 030 应用爆轰物理
孙承纬 著
国防工业出版社 2000 年 12 月
- 031 混沌的控制、同步与利用
陈式刚 等著
国防工业出版社 2000 年 12 月
- 032 激光干涉测速技术
胡绍楼 著
国防工业出版社 2000 年 12 月
- 033 空气炮理论与实验技术
王金贵 著
国防工业出版社 2000 年 12 月
- 034 一维不定常流与激波
李维新 著
国防工业出版社 2000 年 12 月

- 035 X 射线与真空紫外辐射源及其计量技术**
孙景文 编著 国防工业出版社 2001 年 03 月
- 036 含能材料热谱集**
董海山 等编著 国防工业出版社 2001 年 03 月
- 037 材料中的氦及氚渗透**
王佩璇 宋家树 著 国防工业出版社 2002 年 04 月
- 038 高温等离子体 X 射线谱学**
孙景文 编著 国防工业出版社 2003 年 01 月
- 039 激光核聚变靶物理基础**
张钧 常铁强 著 国防工业出版社 2004 年 11 月
- 040 系统可靠性工程**
金碧辉 主编 国防工业出版社 2004 年 06 月
- 041 核材料 γ 特征谱的探测和分析技术**
田东风 等编著 国防工业出版社 2004 年 06 月
- 042 高能激光系统**
苏毅 万敏 编著 国防工业出版社 2004 年 06 月
- 043 近可积无穷维动力系统**
郭柏灵 高平 陈瀚林 著 国防工业出版社 2004 年 06 月
- 044 半导体器件和集成电路的辐射效应**
陈盘训 著 国防工业出版社 2005 年 06 月
- 045 高功率脉冲技术**
刘锡三 编著 国防工业出版社 2005 年 08 月
- 046 热电池**
陆瑞生 刘效疆 编著 国防工业出版社 2005 年 08 月
- 047 原子结构、碰撞与光谱理论**
方泉玉 颜君 著 国防工业出版社 2006 年 01 月
- 048 非牛顿流动力系统**
郭柏灵 林国广 尚亚东 著 国防工业出版社 2006 年 02 月
- 049 动高压原理与技术**
经福谦 陈俊祥 主编 国防工业出版社 2006 年 03 月
- 050 直线感应电子加速器**
邓建军 主编 国防工业出版社 2006 年 10 月
- 051 中子核反应激发函数**
田东风 孙伟力 编著 国防工业出版社 2006 年 11 月

前 言

对于核工程计算(如核反应堆设计、辐射屏蔽计算)以及其他有关中子、光子输运问题的计算,中子评价核数据是必不可少的,中子或光子核数据(包括群常数)的精度是影响中子学计算精度的主要因素之一。在过去几十年里,国际上核数据工作者在改进实验测量技术、理论计算模型以及微观数据的评价方法等方面开展了大量的研究工作,微观核数据的精度得到了不断的提高。至 20 世纪末,国际上几个主要核数据中心经过几十年的艰苦努力,相继建立并不断完善了各具特色的中子评价核数据库,如 BROND-2(俄罗斯)、CENDL-2(中国)、ENDF-VI(美国)、JEF-2(欧共体)、JENDL-3(日本)。

对于所有的辐射输运计算程序,核反应截面数据的输入是最基本的而且是绝对必要的。正是由于这些核反应截面数据包含了中子和光子与物质中原子核(或原子)发生碰撞的基本信息,因此这些数据决定着输运方程的解。本书作者在多年相关研究工作中深深体会到,如果能有一套简明直观的核反应激发曲线图,对于定性判断和分析所研究的核系统的物理图像将是很有帮助的。基于上述体会,本书提供了这套《中子核反应激发函数》,旨在为相关研究领域的研究工作者提供一本简便实用的工具书。

全书共分四部分,第 1 章简要介绍了与本书所涉内容有关的中子与原子核相互作用的基础知识,由孙伟力研究员(北京应用物理与计算数学研究所)和田东风研究员(中国工程物理研究院)负责编写。第 2 章简要介绍了国际上几个著名的中子评价核数据库,并以美国 ENDF/B-VI 库为例介绍中子评价核数据库的应用问题,由伊炜伟(博士研究生,中国工程物理研究院研究生院)和田东风研究员负责编写。第 3 章则重点介绍了本图集的 e 版内容,包括图形处理软件——KaleidaGraph 软件和安装使用说明,以及读者如何使用本书所附的光盘内容,由胡泽华(博士研究生,中国工程物理研究院研究生院)和田东风研究员负责编写。第 4 章则提供了本书的主要内容——102 个常用核素的中子核反应激发曲线,由胡泽华和伊炜伟负责图形制作,由孙伟力研究员和田东风研究员审核。

另外,李志民研究员(中国工程物理研究院科技信息中心)、竺家亨研究员(北京应用物理与计算数学研究所)和李天惠副研究员(中国工程物理研究院科技信息中心)为本书的出版给予了热情支持和帮助。在此表示感谢。

限于作者水平以及图形制作的软硬件条件,错误和不尽如人意之处在所难免,诚恳欢迎广大读者和同行专家不吝赐教。

作 者

2006 年 6 月于北京

目 录

第 1 章 中子与原子核相互作用

用知识简介 1

1.1 原子核反应的一般描述	1
1.2 核反应截面	1
1.3 核反应机制和理论模型	3
1.4 复合核反应	4
1.5 直接反应	4
1.6 预平衡反应	5
1.7 裂变反应	5
1.8 共振	6
参考文献	6

第 2 章 中子核数据库 7

2.1 中子核数据	7
2.2 ENDF 数据库	8
参考文献	13

第 3 章 本图集的 e 版图形文件 14

3.1 KaleidaGraph 软件简介	14
3.2 本图集 e 版图形文件的使用说明	16
参考文献	18

第 4 章 中子核反应激发曲线 19

4.1 中子核反应激发曲线的制作	19
4.2 102 个常用核素的激发曲线图	20
^1H (图 4-1 ~ 图 4-3)	21
^2H (图 4-4 ~ 图 4-7)	22
^3H (图 4-8 ~ 图 4-10)	24
^3He (图 4-11 ~ 图 4-15)	26
^4He (图 4-16 ~ 图 4-17)	28
^6Li (图 4-18 ~ 图 4-23)	29
^7Li (图 4-24 ~ 图 4-28)	32
^9Be (图 4-29 ~ 图 4-32)	35

^{10}B (图 4-33 ~ 图 4-38)	37
^{11}B (图 4-39 ~ 图 4-43)	40
^{12}C (图 4-44 ~ 图 4-48)	42
^{14}N (图 4-49 ~ 图 4-54)	45
^{16}O (图 4-55 ~ 图 4-59)	48
^{19}F (图 4-60 ~ 图 4-64)	50
^{23}Na (图 4-65 ~ 图 4-69)	53
^{24}Mg (图 4-70 ~ 图 4-74)	55
^{27}Al (图 4-75 ~ 图 4-79)	58
^{28}Si (图 4-80 ~ 图 4-84)	60
^{28}Si (图 4-85 ~ 图 4-89)	63
^{31}P (图 4-90 ~ 图 4-94)	65
^{32}S (图 4-95 ~ 图 4-100)	68
^{32}S (图 4-101 ~ 图 4-106)	71
^{35}Cl (图 4-107 ~ 图 4-112)	74
^{39}K (图 4-113 ~ 图 4-118)	77
^{40}Ca (图 4-119 ~ 图 4-125)	80
^{45}Sc (图 4-126 ~ 图 4-131)	83
^{48}Ti (图 4-132 ~ 图 4-136)	86
^{51}V (图 4-137 ~ 图 4-139)	89
^{52}Cr (图 4-140 ~ 图 4-146)	91
^{55}Mn (图 4-147 ~ 图 4-151)	94
^{56}Fe (图 4-152 ~ 图 4-156)	96
^{59}Co (图 4-157 ~ 图 4-161)	99
^{58}Ni (图 4-162 ~ 图 4-166)	101
^{60}Ni (图 4-167 ~ 图 4-171)	104
^{63}Cu (图 4-172 ~ 图 4-176)	106
^{65}Cu (图 4-177 ~ 图 4-181)	109
^{69}Ga (图 4-182 ~ 图 4-186)	111
^{74}Ge (图 4-187 ~ 图 4-190)	114
^{75}As (图 4-191 ~ 图 4-194)	116
^{80}Se (图 4-195 ~ 图 4-198)	118

⁷⁹ Br(图4-199~图4-202)	120
⁸⁴ Kr(图4-203~图4-207)	122
⁸⁸ Sr(图4-208~图4-211)	124
⁸⁹ Y(图4-212~图4-216)	126
⁹⁰ Zr(图4-217~图4-221)	129
⁹³ Nb(图4-222~图4-227)	131
⁰ Mo(图4-228~图4-232)	134
¹⁰² Ru(图4-233~图4-236) ...	137
¹⁰³ Rh(图4-237~图4-241) ...	139
¹⁰⁶ Pd(图4-242~图4-246) ...	141
¹⁰⁷ Ag(图4-247~图4-251) ...	144
¹¹² Cd(图4-252~图4-256) ...	146
⁰ In(图4-257~图4-261)	149
¹²⁰ Sn(图4-262~图4-265)	151
¹²¹ Sb(图4-266~图4-271)	153
¹²⁷ I(图4-272~图4-277)	156
¹²⁹ Xe(图4-278~图4-282) ...	159
¹³² Xe(图4-283~图4-287) ...	162
¹³³ Cs(图4-288~图4-292)	164
¹³⁸ Ba(图4-293~图4-297) ...	167
¹³⁹ La(图4-298~图4-301)	169
¹⁴⁰ Ce(图4-302~图4-305) ...	171
¹⁴¹ Pr(图4-306~图4-311)	173
¹⁴² Nd(图4-312~图4-315) ...	176
¹⁵³ Eu(图4-316~图4-321) ...	178
¹⁵⁸ Gd(图4-322~图4-326) ...	181
¹⁵⁹ Tb(图4-327~图4-330) ...	184
¹⁶⁴ Dy(图4-331~图4-335) ...	186
¹⁶⁵ Ho(图4-336~图4-340) ...	188
¹⁶⁷ Er(图4-341~图4-344)	191
¹⁷⁵ Lu(图4-345~图4-349) ...	193
¹⁷⁸ Hf(图4-350~图4-354)	195
¹⁸¹ Ta(图4-355~图4-359)	198
¹⁸³ W(图4-360~图4-364)	200

¹⁸⁴ W(图4-365~图4-369)	203
¹⁸⁶ W(图4-370~图4-374)	205
¹⁸⁷ Re(图4-375~图4-379) ...	208
¹⁹³ Ir(图4-380~图4-384)	210
¹⁹⁷ Au(图4-385~图4-389) ...	213
²⁰⁶ Pb(图4-390~图4-394) ...	215
²⁰⁸ Pb(图4-395~图4-399) ...	218
²⁰⁹ Bi(图4-400~图4-405)	220
²³² Th(图4-406~图4-411) ...	223
²³² U(图4-412~图4-417)	226
²³³ U(图4-418~图4-423)	229
²³⁴ U(图4-424~图4-429)	232
²³⁵ U(图4-430~图4-435)	235
²³⁶ U(图4-436~图4-441)	238
²³⁸ U(图4-442~图4-447)	241
²³⁷ Np(图4-448~图4-453) ...	244
²³⁸ Pu(图4-454~图4-459) ...	247
²³⁹ Pu(图4-460~图4-465) ...	250
²⁴⁰ Pu(图4-466~图4-471) ...	253
²⁴¹ Pu(图4-472~图4-477) ...	256
²⁴² Pu(图4-478~图4-483) ...	259
²⁴¹ Am(图4-484~图4-489) ...	262
²⁴² Am(图4-490~图4-493) ...	265
²⁴⁷ Cm(图4-494~图4-499) ...	267
²⁴⁸ Cm(图4-500~图4-505) ...	270
²⁴⁹ Bk(图4-506~图4-511) ...	273
²⁵² Cf(图4-512~图4-517)	276
²⁵³ Es(图4-518~图4-520)	279

附表1 自然界元素的物理常数表 ... 281

附表2 元素表(按原子序数排序) ... 289

附表3 元素表(按英文名字母排序)

..... 291

附表4 物理和化学基本常数 293

第1章 中子与原子核相互作用知识简介

1.1 原子核反应的一般描述

原子核反应或简称核反应是指一个原子核与其他的粒子(或原子核)发生相互作用而引起的各种现象的总称。原子核反应的种类很多,分类的方式也各种各样,常以入射粒子与出射粒子的异同来区分,或以入射粒子的能量来划分,也常用靶核的质量来区分等等。通常,核反应过程可简单分为散射和反应。散射包含弹性散射和非弹性散射。弹性散射是指反应后入射粒子和靶核的状态不发生任何变化,出射粒子与入射粒子相同。散射前后系统的总动能相同,仅动能的分配方式发生了变化。任何种类的人射粒子都可发生弹性散射,无论其能量大小。弹性散射发生的概率是所有的反应类型中最大的。非弹性散射是指反应后入射粒子与靶核的种类不变,但剩余核的内部状态发生了变化。反应则是指除散射以外的所有类型的反应过程,这类反应又可称为变换反应。变换反应是指反应后剩余核与靶核的种类不同的反应。这种类型的反应很多,其中,俘获反应和裂变反应是常见的两种变换反应类型。

1.2 核反应截面

描述核反应过程的一个常用物理量是核反应截面。当一定能量的入射粒子轰击靶核时,可能发生各种类型的反应,每种反应都有一定的概率。核反应截面就是用于描述反应概率大小的物理量。它的物理意义是表示一个粒子入射到单位面积内只含一个靶核的靶上所发生反应的概率,或者说,表示一个入射粒子同单位面积靶上一个靶核发生作用的概率。这个物理量实验上可以测量,理论上也可以计算,可方便地用于实验与理论比较。

对于一定的入射粒子和靶核,往往有若干个反应道,每一个反应道均可定义一个分截面,所有分截面之和为总截面。截面的单位通常采用“巴恩”表示,简称“巴”,记作 barn 或 b, $1\text{b} = 10^{-24}\text{cm}^2$,约等于中等大小原子核的几何截面。常用的截面单位还有毫巴,记作 mb, $1\text{mb} = 10^{-27}\text{cm}^2$ 。核反应中的各种截面均与入射粒子的能量有关。截面仅随入射粒子能量的变化关系称为激发函数,由此函数绘制的曲线称为激发曲线,俗称截面曲线。

当中子与原子核发生相互作用时将会出现许多不同的反应形式,通常用不同的符号表示不同的反应截面,例如, σ_t 表示总截面,即所有可能反应的截面之和; σ_n 表示弹性散射(n,n)截面; $\sigma_{n'}$ 表示非弹性散射(n,n')截面; σ_γ 表示辐射俘获(n,γ)截面; σ_f 表示裂变(n,f)截面; σ_p 表示(n,p)反应截面; σ_α 表示(n,α)反应截面; σ_{2n} 表示($n,2n$)反应截面;如此等等。这些分截面与总截面的关系如下:

$$\sigma_t = \sigma_n + \sigma_{n'} + \sigma_\gamma + \sigma_f + \sigma_p + \sigma_\alpha + \sigma_{2n} + \sigma_{3n} + \cdots$$

在不同应用情况下,有时将中子被靶核吸收后的核反应截面总和称为吸收截面,用 σ_a 表示,即

$$\sigma_a = \sigma_\gamma + \sigma_f + \sigma_p + \sigma_\alpha + \sigma_{2n} + \sigma_{3n} + \cdots$$

有时,也有将除去弹性散射截面的所有其他分截面之和称为去弹截面,用 σ_{non} 表示,即

$$\sigma_{\text{non}} = \sigma_t - \sigma_n$$

或

$$\sigma_{\text{non}} = \sigma_n + \sigma_\gamma + \sigma_f + \sigma_p + \sigma_\alpha + \sigma_{2n} + \sigma_{3n} + \cdots$$

在核反应理论及其应用,也常常使用微分截面的概念。它比总截面或分截面能更细致地反映核反应过程的特征,而且在实验测量中通常是一个可直接测量的物理量。微分截面与前面所述的激发函数有所不同,即不仅随入射粒子能量变化,而且随出射粒子的角度或能量变化。若微分截面仅随入射粒子能量和出射粒子的角度变化,该微分截面常被称作角分布,一般用符号记为: $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ 或 $\sigma(\theta)$ 。它的物理意义是指一个粒子以能量 E 入射到单位面积的靶上与一个靶核作用,出射粒子出射到 (θ, ϕ) 方向单位立体角内的概率。应注意上述角分布的符号 $\sigma(\theta)$ 中,入射粒子的能量 E 隐含其中,并未写出。另外幅角 ϕ 也未写出。这是因为在相同幅角方向上,常被认为发现出射粒子的概率是相同的。将角分布记为符号 $\sigma(\theta)$,主要强调的是出射粒子的微分截面随极角 θ 的变化。若角分布的数值在所有或若干极角 θ 上不同,称角分布是各向异性的;若相同,即角分布数值不随 θ 变化,则此时称该角分布各向同性。

类似地,若微分截面仅随入射粒子能量和出射粒子的能量变化,则该微分截面常被称作能谱。一般用符号记为: $\frac{d\sigma}{dE'}$ 或 $\sigma(E')$,其中 E' 是出射粒子的能量。它的物理意义是指一个粒子以能量 E 入射到单位面积的靶上与一个靶核作用,出射粒子能量在 $E' - E' + \Delta E'$ 范围内的概率。同样,在能谱的记号中,入射粒子的能量 E 也隐含其中,并未写出,而仅明确写出出射粒子的能量,强调的是微分截面随出射粒子能量的变化。

在某一个角度出射的某出射粒子可能具有各种能量,角分布是指具有所有可能出射能量的该出射粒子的微分截面随某一个角度的变化。同样在某一个出射能量上,出射粒子可能具有各种角度,能谱是指具有所有可能出射角度的该出射粒子的微分截面随出射能量的变化。

另外,在核反应理论及其应用,还常用双微分截面的概念。它比微分截面更细致地进一步描述核反应的特征,而且在实验测量中也是一个可直接测量的物理量。双微分截面的物理含义是指一个粒子以能量 E 入射到单位面积的靶上与一个靶核作用,出射粒子以能量 E' 出射到 (θ, ϕ) 方向单位立体角内的概率,一般用符号记为: $\frac{d^2\sigma}{dE'd\Omega}$ 。在理论计算中,若将双微分截面对出射粒子能量进行积分,就可得到角分布,而对出射粒子的角度进行积分就可得到能谱。若同时对出射粒子能量和角度进行积分就可得到截面,即激发

函数。

1.3 核反应机制和理论模型^[1,2]

核反应过程大致可分为 3 个阶段:独立粒子阶段、复合系统阶段和最后阶段。

1. 独立粒子阶段

独立粒子阶段也是核反应过程的第一阶段。当入射粒子进入到靶核核场的作用范围内,一部分被散射,又称势(形状)弹性散射,另一部分被吸收进入靶中发生反应。这就像一束光投在半透明的玻璃球上会发生光的吸收或反射和折射一样。因此,描述这一阶段的核反应模型被称为“光学模型”。在这一阶段,入射粒子在靶核核场中做独立运动,所以通常叫作独立粒子阶段。

2. 复合系统阶段

复合系统阶段是核反应过程的第二阶段。入射粒子被靶核吸收后,与靶核核子交换能量、动量,形成一个入射粒子与靶核的复合系统。能量交换有下面几种方式:

(1) 直接作用。入射粒子与靶核表面或核内一个或几个核子作用使反应直接推向第三阶段,即直接从初态通向末态,这种过程分别叫做表面或核内直接作用。入射粒子与靶核进行多次碰撞,交换能量、动量,再发射出去,这称为多次碰撞。还包括库仑激发,即入射粒子把部分能量交给靶核后飞出,这时靶核产生集体激发,引起核的集体转动、振动等。以上几种过程统称为直接作用,直接作用过程中出射粒子在不同程度上保留了原有特性。

(2) 形成复合核。入射粒子与靶核相互作用,经历多次碰撞,交换能量、动量,达到统计平衡,最后停留在靶核内,形成一个处于激发态的复合核。复合核形成后,就失去了对它初始形成情况的“记忆”,即复合核形成后,已不可能由复合核本身得知其初始信息。

(3) 中间过程。除了直接作用和复合核形成的其他过程。大量的实验事实表明还存在着介于直接作用和复合核形成之间的中间过程,作用时间介于二者之间,这些中间过程是系统达到平衡态之前的一系列过渡阶段,在每一个阶段都有可能发射粒子,因而又称作预平衡发射。

3. 最后阶段

最后阶段即核反应过程的第三个阶段。在此阶段中,复合核分解成出射粒子与剩余核,可以出射中子,质子,光子, α 粒子等,通称发生复合核反应。这里有两个特殊情况,一个是如果出射粒子与剩余核分别与入射粒子和靶核相同,而且出射粒子和剩余核均处于基态,这就是弹性散射。但是它不同于独立粒子阶段的势弹性散射,它经过了复合核阶段,通常称为复合核弹性散射。总的弹性散射截面是势弹性散射截面与复合核弹性散射截面之和。一般情况下,复合核弹性散射截面在 10MeV 以下的贡献约占势弹性散射截面的 20% 左右。随着入射能增加,复合核弹性散射的贡献相比势弹性散射的贡献可忽略不计。另一个特殊情况是如果出射粒子与剩余核分别与入射粒子和靶核相同,但剩余核处于激发态,它就是复合核非弹性散射。

1.4 复合核反应

直到 20 世纪 60 年代,人们仅能够分辨出复合核和直接反应这两种核反应机制。在复合核反应过程中,入射粒子与靶核核子发生多次碰撞,能量和动量的交换是很大的。通过多次碰撞,入射粒子的能量分配给几乎所有的靶核核子而使其不再具有克服核力的束缚逃离靶核的能量,最终入射粒子与靶核核子的能量交换达到统计平衡而停留在靶核中,形成一个入射粒子与靶核的复合核系统,复合核系统此时一般处于激发态。这一复合核系统形成后,并不立即通过发射粒子进行衰变,这是因为粒子需要具有足够高的能量才能克服核力的束缚而逃离。一般说来,逃离粒子的能量应高于核子的分离能(约 8MeV)。尽管复合核的激发态能量有时会很高,但分配给每个核子的能量却很低。因此,要从复合核中发射出某一粒子,需使该粒子聚集到足够高的能量。这就需要多次的能量交换才可能使该粒子得到的能量高于分离能而飞出复合核,形成复合核衰变。相应地,由于多次的能量交换需要一定的时间,因此复合核反应过程的时间通常较长,约为 $10^{-18}\text{s} \sim 10^{-15}\text{s}$ 。

复合核的衰变方式可以有多种,通常可以蒸发中子、质子、 α 粒子或发射 γ 光子等。各种衰变方式各具有一定的概率,这种概率与复合核的形成方式无关,仅仅决定于复合核本身的性质。复合核反应过程发射的粒子能谱接近于 Maxwell 分布,角分布为各向同性或 90° 对称。常用的描述复合核反应的理论模型有蒸发模型(evaporation model)和 Hauser-Feshbach 理论。

1.5 直接反应

实验表明,形成复合核不是所有核反应的必经阶段。在很多情况下,核反应不是经过复合核阶段,而是通过入射粒子与靶核中的少数核子直接相互作用来完成的。对于直接反应,入射粒子与靶核核子之间的能量交换较少。入射粒子与靶核核子进行一次或几次碰撞,而后一个粒子或一组粒子发射出来。因此与复合核过程相反,直接反应过程所经历的时间很短,约为 $10^{-22}\text{s} \sim 10^{-20}\text{s}$,与入射粒子直接穿过靶核的时间相当。最简单的直接过程是非弹性散射。由于在核内碰撞次数较少,反应的末态与反应前的初始状态有很强的关联。出射粒子的能量具有一系列的单值,角分布表现为前冲和震荡的分立结构。这表明在反应过程中,出射粒子的运动方向仍然保留了入射粒子运动方向的记忆。角分布的分立结构对应于剩余核分立能级的激发,根据这一对应,通过对直接反应的分析,可以了解许多核结构方面的信息,如自旋、宇称等。常用的描述非弹性散射过程的方法有扭曲波玻恩近似方法(Distorted Wave Born Approximation, DWBA)和耦合道方法(Coupled-Channel Method)。

直接反应的类型很多,除了非弹性散射外,其他典型的反应还有削裂反应、拾取反应、敲出反应等。削裂反应是指入射粒子打到靶核边上,其中一个或几个核子被靶核俘获,其余部分继续飞行前进。显然,能够引起削裂反应的入射粒子至少要由两个核子组成。削裂反应的逆反应是拾取反应,它是指入射粒子与靶核作用时,从靶核拾取一个或几个核子

结合成较重的粒子并向外飞出的反应。敲出反应则是指入射粒子把部分能量直接交给靶核中的一个或几个粒子而使其飞出靶核的反应。此时入射粒子往往先被靶核吸收,与削裂反应和拾取反应不同,出射粒子中不包含原来入射粒子的成分。

1.6 预平衡反应

除了上述两种主要反应机制外,人们还发现存在介于两种机制之间的反应过程。该反应发射出的粒子能谱既不是呈现 Maxwell 分布也不是分立能谱形状,而是呈现出比较平滑的形状;角分布也既不是各向同性也不是分立的震荡模式,而是前冲型。这些现象不能由复合核理论或直接反应模型充分解释。现在该反应类型称作预平衡反应,到目前为止,该反应机制尚未完全了解。该反应机制的物理图像通常有如下解释,入射粒子与靶核核子发生少数碰撞而使系统增加了复杂性,在能量、动量交换达到统计平衡之前就有粒子发射出来,在出射粒子发射过程中,对入射粒子运动方向的记忆逐渐失去但仍有部分保留,因此出射粒子角分布呈现出前冲倾向。预平衡反应过程的时间尺度介于复合核反应和直接反应之间,约为 $10^{-21}\text{s} \sim 10^{-18}\text{s}$ 。随着入射能量的增加,预平衡反应过程的贡献逐渐增加。唯象激子模型被广泛用于描述预平衡反应,近年来各种量子力学性质的多步过程理论的发展弥补了激子模型的不足。

1.7 裂变反应^[3]

裂变反应分为自发裂变和诱发裂变。自发裂变是指原子核在没有外来粒子轰击的情形下自行发生的核裂变。除了自发裂变,在外来粒子轰击下,重原子核也会发生裂变,这种裂变称作诱发裂变。

从经典物理看,一个原子核从基态要经过一系列的形状变化才能分裂成为两块或几块碎片。核体系的最低能量是随核的形状而改变的,这种变化的函数关系称作位能曲面。在位能曲面上,不同的形变路线会经过不同高度的位垒,其中最低的一个称作裂变位垒,与裂变位垒顶相对应的核的形变称为鞍点。由于有裂变位垒,处于基态的核只有通过位垒穿透的量子效应才能发生裂变,称作自发裂变,其几率主要决定于位垒穿透的几率。重核和中重核,从能量上看都是可发生自发裂变的,但由于位垒过高,实际上并没有观测到比钷轻的核发生自发裂变。一般而言,核愈重, Z 愈大,裂变位垒就愈低,自发裂变寿命也就愈短。自发裂变的寿命不仅与位垒高度有关,还与整个位能曲面的形状以及惯性张量有关,因此难于从寿命定量给出位垒高度。对于通过核反应而形成的处于激发态的核(复合核或剩余核),若激发能足够高,则可能通过各种运动形态的耦合而发生裂变,称作诱发裂变,其概率大小由裂变截面 σ_f 表示,代表一个入射粒子与单位面积上一个靶核相互作用时靶核发生裂变的概率。

由于原子核的裂变过程相当复杂,目前还没有较成熟的理论。最早使用玻尔(N. Bohr)和惠勒(J. A. Wheeler)提出的液滴模型及其壳模型修正,随后有双中心壳模型、自恰模型、无旋流模型和强制转动(曲柄)模型等。

1.8 共振^[4]

若用低能粒子去轰击各种靶核并测量其激发曲线时,当入射粒子能量为某些值时,激发曲线的形状出现许多“尖峰”,即通常所称的“共振峰”,每个共振峰的最高点所对应的激发能通常被称作共振能量。共振现象主要是由于入射粒子的能量加上结合能正好等于复合核的某个激发能级而形成的,此时入射粒子被强烈吸收,而在激发曲线上形成尖峰。如果复合核的能级很密集,则形成密集尖锐的共振峰。一般来说,低能区的激发曲线共振峰之间多是分离开的,这段能区称为可分辨共振能区。随着能量的增高,激发曲线的共振峰之间逐渐出现重叠现象,虽然能够测量到共振峰,但无法将各个共振峰清晰分离开,故该能区称为不可分辨共振能区。随着能量继续升高,共振峰之间的间距相对入射能量来说变得非常小,受到探测器能量分辨率的限制,已无法测出共振峰,所测量到的只是很多很密集的共振峰在一小段能区间距中的平均值,该能区称为光滑能区。随着探测器能量分辨率的提高,可测量到共振现象的共振能区也会向高能区扩展。一般来说,靶核越轻,共振能区越向高能区延伸。描述共振的方法常用的有单能级或多能级 Breit - Wigner 公式。

参 考 文 献

- [1] 徐四大. 核物理学. 北京:清华大学出版社,1989.
- [2] 卢希庭主编. 原子核物理. 北京:原子能出版社,2001.
- [3] 胡济民. 原子核理论(第二卷). 北京:原子能出版社,1987.
- [4] 申庆彪. 低能和中能核反应理论. 北京:科学出版社,2005.