

# 低能和中能 核反应理论

(上册)

申庆彪 编著



科学出版社

## 内 容 简 介

本书概括了低能和中能核反应的基础理论及相关实用计算方法。上册包括微分截面坐标系变换,  $S$  矩阵和  $R$  矩阵理论, 球形和耦合道光学模型, 直接核反应, 能级密度和态密度, 平衡态复合核及经典和半经典预平衡核反应理论。下册包括量子预平衡理论, 核力, 少体核反应, 多体格林函数方法, 微观光学势, 微观 RPA 巨共振理论, 辐射俘获, 裂变, 重粒子反应, 相对论光学模型, 相对论核多体理论, BUU 方程, 核内级联, QMD 模型。

本书比较详细地介绍了理论公式推导的主要步骤, 有利于读者尽快投入前沿领域的科研工作, 可作为核物理专业和理论物理专业教师、研究生、本科生及科研工作者的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

低能和中能核反应理论. 上册/申庆彪编著. —北京: 科学出版社, 2005

ISBN 7-03-015630-7

I. 低… II. 申… III. 核反应—理论… IV. 0571.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 055766 号

责任编辑: 胡 凯/责任校对: 包志虹

责任印制: 钱玉芬/封面设计: 王 浩

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码 100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社编务公司排版制作

科学出版社发行, 各地新华书店经销

\*

2005 年 7 月第 一 版 开本: A5 (890×1240)

2005 年 7 月第一次印刷 印张: 25 1/2

印数: 1—2 000 字数: 789 000

定价: 82.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈新欣〉)



申庆彪，中国原子能科学研究院研究员。1938 年生于河北省固安县。1963 年毕业于中国科学技术大学近代物理系理论物理专业，同年，分配到中国原子能科学研究院工作。长期从事低能和中能核反应理论及核数据科研工作。发表学术论文二百余篇，获十多项国家级和部级科学技术进步奖，并多次出国参加国际学术会议和开展合作研究。

## 序

从 1896 年发现天然放射性, 1919 年由卢瑟福实现了人工核反应, 到 1932 年发现中子, 1938 年发现裂变, 实验核物理学与原子核理论也随之诞生和发展。关于核反应机制的最早的模型理论是 1936 年由 N. Bohr 提出的复合核模型和由 G. Breit 和 E. P. Wigner 提出的共振反应理论, 相继又发展了光学模型和直接核反应理论。1966 年由 J. J. Griffin 提出了描述介于直接反应和复合核反应之间预平衡反应过程的激子模型。同时, 辐射俘获理论、裂变理论、重离子和熔合反应理论以及量子预平衡核反应理论、微观核反应理论等也相继得到发展。随着加速器能量不断提高, 近年来轻粒子和重离子中高能核反应理论也有了很大发展。

通过核反应可以研究原子核结构与核反应机制, 同时通过研究核反应所获得的各种核反应数据也有广泛的应用前景。核数据是各种核工程设计的基础之一, 新的核能源、核医学、核天体物理等多个领域也对核数据提出了越来越迫切的需要。

本书概括了低能和中能核反应理论的主要内容, 既包含了在国内外低能和中能核数据计算、评价及实验数据分析中经常用到的核反应理论, 也包括了近年来国内外新发展的主要的经典、量子及微观核反应理论。该书比较详细地介绍了理论公式推导的主要步骤, 将有助于年轻的核物理工作者比较快地深入了解和掌握相关理论知识, 有利于读者尽快投入前沿领域的科研工作。我衷心祝贺《低能和中能核反应理论》出版。

中国科学院院士

吴式枢

2005 年 3 月 17 日

## 前 言

原子核作为物质结构的一个重要层次,是研究微观世界运动规律的内容丰富的对象。核反应过程是一个复杂的核多体问题,研究核反应是研究原子核结构及核反应机制的主要手段。通过实验测量可以获得多种核反应数据,为研究核反应提供了基础和前提。但是,由于受实验条件的限制,很多核数据要通过理论计算而获得。为了描述低能和中能核反应,从 20 世纪 30 年代开始,逐渐发展了大量经典或量子、唯象或微观的核反应理论模型。

核数据是各种核工程设计的基础之一。为了满足国内对核数据的需求,1973 年 12 月在原子能研究所(中国原子能科学研究院前身)成立了核数据筹备组,作者与同事合作开始进行与核数据理论计算相关的核反应理论研究工作。1975 年 10 月中国核数据中心成立,建立了有十多名成员的核数据理论组,并建立了由一些大学和研究所组成的核数据理论工作协作网,国内著名的老一辈核理论学家吴式枢、徐躬耦、胡济民、杨立铭等都参加了这项工作。在卓益忠研究员的组织 and 学术指导下,按照“任务带学科”的指导思想,该理论组及其协作网一方面开展与核数据计算直接有关的核反应理论工作,完成核工程项目所提出的各项核数据任务;同时也开展了与核数据计算相关的基础性和前沿性的核反应理论研究工作,主要包括以下三个方面:①预平衡反应理论,包括用激子模型计算核子和复杂粒子双微分截面等;②微观光学势理论,包括非相对论和相对论、on-shell 和 off-shell、与温度无关和有关等多种情况;③非平衡态扩散模型,包括用输运理论研究裂变过程等。作者在某些项目中任课题负责人或参加者,对于没有直接参加的项目,周围同事的科研工作也为作者了解相关理论提供了便利条件和良好环境。1985~1987 年期间,作者在美国肯塔基大学物理系参加了微观 RPA 巨共振理论的合作研究项目。20 世纪 90 年代初,中能核数据理论计算工作开始引起人们重视。从 1994 年开始的加速器驱动核能系统(ADS)的研究工作在国外兴起

和发展的同时,国内也成立了相关课题组,作者是成员之一。ADS项目对中能核数据提出了更迫切的需求。相应地,在中国核数据中心和理论物理研究室对于中能核数据理论、中能核反应理论也开展了多项研究工作。本书是作者根据在中国原子能科学研究院从事几十年低能和中能核反应理论、核数据理论科研工作所积累的素材及广泛研究相关文献基础上写成的。在科研工作中与国内外同事、同行有很多合作与交流,从中得到很多启示和帮助,在此要特别感谢卓益忠研究员与作者的多年合作以及给予作者的真诚帮助,并衷心感谢吴式枢院士、张竞上研究员、余自强教授、刘福庆教授对作者在学术上给予的帮助和支持。

本书将比较详细地介绍现有的低能和中能核反应理论的主要内容,包括相应的基础理论及相关的实用计算方法。《低能和中能核反应理论》分上、下两册,上册内容包括:第一章,核反应理论知识;第二章,微分截面的坐标系变换与能量平衡;第三章,原子核碰撞理论,重点介绍 $S$ 矩阵理论;第四章, $R$ 矩阵和推广 $R$ 矩阵理论;第五章,光学模型与唯象光学势;第六章,耦合道光学模型,用于描述大变形核集体激发态的直接非弹性散射;第七章,扭曲波直接核反应理论;第八章,原子核能级密度与激子态密度理论;第九章,平衡态复合核反应理论,主要介绍与Hauser-Feshbach理论有关的内容;第十章,经典和半经典预平衡核反应理论。下册将包括:第十一章,多步复合核量子预平衡核反应理论;第十二章,多步直接量子预平衡核反应理论;第十三章,核力与低能核子-核子相互作用;第十四章,少体核反应理论;第十五章,核多体格林函数方法;第十六章,核物质近似微观光学势理论;第十七章,Skyrme-Hartree-Fock与核结构近似微观光学势理论;第十八章,微观RPA巨共振理论;第十九章,辐射俘获及光核反应理论;第二十章,原子核裂变理论;第二十一章,重离子、熔合与天体核反应理论;第二十二章,相对论量子力学基础与强子间相互作用;第二十三章,相对论光学模型与相对论直接核反应理论;第二十四章,相对论核多体与相对论微观光学势理论;第二十五章,中能和相对论核-核碰撞理论(着重介绍BUU方程);第二十六章,核内级联与量子分子动力学(QMD)模型。

南开大学蔡崇海教授和北京应用物理与计算数学研究所张本爱研究员对本书上册做了认真仔细的审校,提出了很多宝贵意见,在此表示衷

心感谢。

本书是作者参加国家重点基础研究发展规划项目《加速器驱动洁净核能系统的物理及技术基础研究》(G1999022600)并在该项目资助下编著的,在此诚挚感谢该项目负责人中国原子能科学研究院丁大钊院士、赵志祥研究员、夏海鸿研究员及其子项目负责人韩银录研究员对本书编著所给予的大力支持。作者非常感谢赵凤泉同志为本书所完成的大量文稿、公式、图表的排录、修改工作。

在此感谢我的大学同学、同事、夫人田野副研究员对作者在资料整理和内容讨论等多方面所给予的全力支持和帮助。

申庆彪

2005 年 1 月 25 日于北京

# 目 录

## 序 前言

### 第一篇 核反应基础理论

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 第一章 核反应理论基础知识 .....                  | 3  |
| 1.1 引言 .....                         | 3  |
| 1.2 核反应中的守恒定律 .....                  | 5  |
| 1.2.1 电荷和质量数守恒 .....                 | 5  |
| 1.2.2 能量守恒 .....                     | 5  |
| 1.2.3 动量守恒 .....                     | 6  |
| 1.2.4 角动量和宇称守恒 .....                 | 7  |
| 1.3 概率流密度和粒子数守恒定律 .....              | 7  |
| 1.4 两粒子之间的相对运动方程 .....               | 9  |
| 1.5 微分截面与积分截面 .....                  | 12 |
| 参考文献 .....                           | 14 |
| 第二章 微分截面的坐标系变换与能量平衡 .....            | 15 |
| 2.1 引言 .....                         | 15 |
| 2.2 分立能级角分布质心系和实验室系之间的变换关系 .....     | 16 |
| 2.2.1 从质心系向实验室系变换 .....              | 16 |
| 2.2.2 从实验室系向质心系变换 .....              | 22 |
| 2.2.3 弹性散射和非弹性散射情况 .....             | 25 |
| 2.3 分立能级角分布 Legendre 展开系数的坐标变换 ..... | 25 |
| 2.3.1 从质心系向实验室系变换 .....              | 25 |
| 2.3.2 从实验室系向质心系变换 .....              | 30 |
| 2.4 分立能级反冲核角分布的坐标变换 .....            | 32 |
| 2.5 放射性核束逆几何反应分立能级角分布的坐标变换 .....     | 35 |
| 2.6 连续能级双微分截面的坐标变换 .....             | 40 |

|        |                                                |     |
|--------|------------------------------------------------|-----|
| 2.7    | 连续能级反冲核双微分截面的坐标变换 .....                        | 47  |
| 2.8    | 从连续能区向连续能区多次发射双微分截面的坐标变换 .....                 | 49  |
| 2.9    | 从连续能区向分立能级多次发射双微分截面的坐标变换 .....                 | 63  |
| 2.10   | 从分立能级向分立能级多次发射双微分截面的坐标变换 .....                 | 73  |
| 2.11   | 从分立能级向连续能区多次发射双微分截面的坐标变换 .....                 | 82  |
| 2.12   | 核反应的能量平衡 .....                                 | 90  |
| 2.12.1 | 分立能级一次粒子发射 .....                               | 90  |
| 2.12.2 | 连续能区一次粒子发射 .....                               | 92  |
| 2.12.3 | 从连续能区向连续能区多次粒子发射 .....                         | 94  |
| 2.12.4 | 从连续能区向分立能级多次粒子发射 .....                         | 96  |
| 2.12.5 | 从分立能级向分立能级多次粒子发射 .....                         | 98  |
| 2.12.6 | 从分立能级向连续能区多次粒子发射 .....                         | 99  |
|        | 参考文献 .....                                     | 100 |
| 第三章    | 原子核碰撞理论 .....                                  | 101 |
| 3.1    | 平面波展开公式 .....                                  | 101 |
| 3.2    | 分波法与相移 .....                                   | 105 |
| 3.2.1  | 散射振幅 .....                                     | 105 |
| 3.2.2  | 相移的计算方法 .....                                  | 112 |
| 3.2.3  | 复数势散射 .....                                    | 113 |
| 3.3    | 库仑势散射 .....                                    | 116 |
| 3.3.1  | 在旋转抛物面坐标中库仑势散射的描述 .....                        | 116 |
| 3.3.2  | 在球坐标中库仑势散射的描述 .....                            | 123 |
| 3.4    | 自旋为 $\frac{1}{2}$ 粒子的散射与极化 .....               | 128 |
| 3.5    | 自旋为 $\frac{1}{2}$ 带电粒子的散射与极化 .....             | 143 |
| 3.6    | $S$ 矩阵引入 .....                                 | 146 |
| 3.7    | $S$ 矩阵的基本性质 .....                              | 149 |
| 3.7.1  | 在 $S$ 矩阵表示中总角动量 $J$ 守恒并与总角动量的磁量子数 $M$ 无关 ..... | 149 |
| 3.7.2  | 在 $S$ 矩阵表示中总宇称 $\Pi$ 守恒 .....                  | 150 |
| 3.7.3  | $S$ 矩阵的幺正性 .....                               | 150 |
| 3.7.4  | $S$ 矩阵元的对称性 .....                              | 153 |
| 3.8    | 核反应微分截面 .....                                  | 155 |

|                                                           |            |
|-----------------------------------------------------------|------------|
| 3.9 微分截面的 Legendre 展开系数 .....                             | 160        |
| 3.10 积分截面公式与细微平衡原理 .....                                  | 165        |
| 3.11 无自旋粒子势散射的 Born 近似 .....                              | 169        |
| 3.12 一般二体核反应的 Born 近似 .....                               | 175        |
| 3.13 Lippmann-Schwinger 方程 .....                          | 182        |
| 3.13.1 弹性散射严格解 .....                                      | 182        |
| 3.13.2 一般二体核反应的形式理论 .....                                 | 187        |
| 3.14 核反应的跃迁概率 .....                                       | 191        |
| 参考文献 .....                                                | 198        |
| <b>第四章 <math>R</math> 矩阵和推广 <math>R</math> 矩阵理论 .....</b> | <b>199</b> |
| 4.1 引言 .....                                              | 199        |
| 4.2 组态空间与道半径 .....                                        | 200        |
| 4.3 $R$ 矩阵的引入 .....                                       | 201        |
| 4.4 $R$ 矩阵和碰撞矩阵的关系 .....                                  | 211        |
| 4.5 能级矩阵 .....                                            | 216        |
| 4.6 能级矩阵的级数展开和对角近似 .....                                  | 223        |
| 4.7 单能级 Breit-Wigner 共振公式 .....                           | 226        |
| 4.8 多能级 Breit-Wigner 共振公式 .....                           | 233        |
| 4.9 Reich-Moore 共振公式 .....                                | 240        |
| 4.10 Adler-Adler 共振公式 .....                               | 249        |
| 4.11 Block 算符 .....                                       | 252        |
| 4.12 推广 $R$ 矩阵理论 .....                                    | 257        |
| 4.13 $S$ 矩阵与各种平均截面的关系 .....                               | 264        |
| 参考文献 .....                                                | 272        |

## 第二篇 直接核反应理论

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| <b>第五章 光学模型与唯象光学势 .....</b> | <b>275</b> |
| 5.1 核反应机制与光学模型的基本思想 .....   | 275        |
| 5.2 光学模型径向方程及其边界条件 .....    | 276        |
| 5.3 光学模型径向方程的数值解法 .....     | 282        |
| 5.4 库仑波函数的计算 .....          | 286        |

|        |                               |     |
|--------|-------------------------------|-----|
| 5.5    | 光学模型中截面、角分布和极化公式 .....        | 290 |
| 5.6    | 唯象光学势 .....                   | 302 |
| 5.7    | 色散光学势与折叠光学势 .....             | 307 |
| 5.8    | 非定域光学势 .....                  | 309 |
|        | 参考文献 .....                    | 311 |
| 第六章    | 耦合道光学模型 .....                 | 314 |
| 6.1    | 引言 .....                      | 314 |
| 6.2    | 耦合反应道(CRC)方程 .....            | 315 |
| 6.3    | 原子核的转动 .....                  | 317 |
| 6.4    | 转动核的相互作用势 .....               | 322 |
| 6.5    | 振动核的相互作用势 .....               | 329 |
| 6.6    | 耦合道方程 .....                   | 337 |
| 6.7    | 转动核的耦合矩阵元 .....               | 342 |
| 6.8    | 偶质量振动核的声子态 .....              | 344 |
| 6.9    | 偶质量振动核的耦合矩阵元 .....            | 352 |
| 6.10   | 耦合道光学模型中截面和角分布的计算公式 .....     | 371 |
| 6.11   | 绝热近似下转动核耦合道光学模型 .....         | 374 |
| 6.12   | 耦合道光学模型径向方程解法与边界条件 .....      | 382 |
| 6.12.1 | Stormer 方法 .....              | 382 |
| 6.12.2 | 存在 $E_n < 0$ 情况下耦合道方程解法 ..... | 388 |
| 6.12.3 | 绝热近似耦合道方程的解法 .....            | 389 |
| 6.12.4 | Noumerov 方法 .....             | 396 |
| 6.13   | 耦合道光学势 .....                  | 399 |
|        | 参考文献 .....                    | 401 |
| 第七章    | 扭曲波直接核反应理论 .....              | 403 |
| 7.1    | 引言 .....                      | 403 |
| 7.2    | 扭曲波 Born 近似(DWBA)理论 .....     | 404 |
| 7.3    | 无自旋-轨道耦合势的 DWBA 方法 .....      | 412 |
| 7.3.1  | 非弹性散射 .....                   | 412 |
| 7.3.2  | 敲出反应 .....                    | 419 |
| 7.3.3  | 削裂反应 .....                    | 425 |
| 7.3.4  | 拾取反应 .....                    | 431 |

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 7.4 有自旋-轨道耦合势的 DWBA 方法  | 431 |
| 7.5 DWBA 理论的相互作用形状因子    | 444 |
| 7.5.1 非弹性散射             | 444 |
| 7.5.2 削裂反应              | 446 |
| 7.5.3 拾取反应              | 451 |
| 7.5.4 交换或敲出反应           | 455 |
| 7.6 耦合道 Born 近似(CCBA)理论 | 462 |
| 7.7 集体激发态直接非弹性散射的扭曲波理论  | 470 |
| 7.8 扭曲波冲量近似(DWIA)理论     | 474 |
| 参考文献                    | 480 |

### 第三篇 核反应统计理论

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 第八章 原子核能级密度与激子态密度理论             | 485 |
| 8.1 引言                          | 485 |
| 8.2 单费米子系统能级密度理论                | 486 |
| 8.3 双费米子系统能级密度理论                | 494 |
| 8.4 包含角动量和宇称的能级密度理论             | 501 |
| 8.5 参数化能级密度公式                   | 516 |
| 8.5.1 常温-费米型 Gilbert-Cameron 公式 | 517 |
| 8.5.2 反移费米型公式                   | 519 |
| 8.5.3 超流型 Ignatyuk 费米型公式        | 519 |
| 8.5.4 裂变核鞍点态能级密度公式              | 522 |
| 8.6 Ericson 激子态密度公式             | 522 |
| 8.7 考虑了泡利原理的 Williams 激子态密度公式   | 524 |
| 8.8 严格考虑泡利原理的激子态密度公式            | 531 |
| 8.9 考虑了有限势阱深度的激子态密度             | 538 |
| 8.10 多步复合核反应的粒子-空穴态密度公式         | 543 |
| 8.11 激子态密度公式中的对修正               | 546 |
| 8.12 包含角动量和宇称的激子态密度公式           | 548 |
| 8.13 包含线性动量的激子态密度               | 553 |
| 8.13.1 用配分函数方法求包含线性动量的激子态密度     | 554 |
| 8.13.2 小激子数的包含线性动量的激子态密度        | 557 |

|                                                     |            |
|-----------------------------------------------------|------------|
| 8.13.3 大激子数的包含线性动量的激子态密度 .....                      | 560        |
| 参考文献 .....                                          | 561        |
| <b>第九章 平衡态复合核反应理论</b> .....                         | <b>564</b> |
| 9.1 复合核反应与蒸发模型 .....                                | 564        |
| 9.2 Hauser-Feshbach 理论的积分截面 .....                   | 568        |
| 9.2.1 由 Bohr 独立假设推导 .....                           | 568        |
| 9.2.2 由 $R$ 矩阵理论推导 .....                            | 571        |
| 9.3 Hauser-Feshbach 理论的微分截面 .....                   | 576        |
| 9.4 Hauser-Feshbach 理论微分截面 Legendre 展开系数的递推关系 ..... | 578        |
| 9.4.1 入射粒子与出射粒子自旋为任意值情况 .....                       | 578        |
| 9.4.2 入射粒子与出射粒子自旋均为 $\frac{1}{2}$ 情况 .....          | 582        |
| 9.5 粒子发射穿透系数与衰变宽度 .....                             | 585        |
| 9.6 辐射俘获穿透系数与衰变宽度 .....                             | 586        |
| 9.7 裂变穿透系数与衰变宽度 .....                               | 590        |
| 9.7.1 计算势垒穿透的 WKB 近似方法 .....                        | 590        |
| 9.7.2 计算势垒透射系数的 Hill-Wheeler 公式 .....               | 601        |
| 9.7.3 计算裂变率的 Bohr-Wheeler 公式 .....                  | 605        |
| 9.8 Hauser-Feshbach 理论中截面、能谱和双微分截面的计算公式 .....       | 609        |
| 9.9 宽度涨落修正因子 .....                                  | 611        |
| 9.10 $\gamma$ 退激过程与同质异能态 .....                      | 616        |
| 参考文献 .....                                          | 620        |
| <b>第十章 经典和半经典预平衡核反应理论</b> .....                     | <b>622</b> |
| 10.1 预平衡核反应模型的基本思想 .....                            | 622        |
| 10.2 激子模型的物理图像 .....                                | 623        |
| 10.3 激子模型主方程及其解 .....                               | 624        |
| 10.4 激子态粒子发射率 .....                                 | 628        |
| 10.5 蒸发模型与激子模型相结合计算粒子发射截面和能谱 .....                  | 631        |
| 10.6 核物质中核子-核子准自由散射双微分截面 .....                      | 634        |
| 10.7 激子态的跃迁速率 .....                                 | 663        |

|                                           |     |
|-------------------------------------------|-----|
| 10.8 推广激子模型主方程与核子双微分截面 .....              | 672 |
| 10.8.1 能量-角度关联散射核的半经典多步直接过程 .....         | 673 |
| 10.8.2 能量平均散射核的半经典多步复合核过程 .....           | 680 |
| 10.9 预平衡粒子发射的组合因子 .....                   | 686 |
| 10.10 复杂粒子在复合系统中的预形成概率 .....              | 691 |
| 10.11 复杂粒子发射的双微分截面 .....                  | 715 |
| 10.12 轻粒子发射双微分截面的 Kalbach 系统学及反冲核能谱 ..... | 741 |
| 10.12.1 轻粒子发射双微分截面的 Kalbach 系统学 .....     | 741 |
| 10.12.2 反冲核实验室系能谱 .....                   | 742 |
| 10.12.3 轻粒子发射双微分截面 Kalbach 系统学的物理基础 ..... | 747 |
| 10.13 与角动量和宇称有关的激子模型 .....                | 749 |
| 10.14 $\gamma$ 射线预平衡发射理论 .....            | 766 |
| 10.14.1 与自旋无关的 $\gamma$ 射线预平衡发射理论 .....   | 766 |
| 10.14.2 与自旋有关的 $\gamma$ 射线预平衡发射理论 .....   | 769 |
| 10.15 轻核反应理论 .....                        | 776 |
| 10.16 两分量激子模型 .....                       | 778 |
| 10.17 预平衡混合模型 .....                       | 783 |
| 10.18 预平衡衰变的 Boltzmann 主方程理论 .....        | 785 |
| 10.19 计算预平衡反应的 Monte-Carlo 方法 .....       | 787 |
| 参考文献 .....                                | 791 |

## 下册目录

### 核反应统计理论(续)

第十一章 多步复合核量子预平衡核反应理论

第十二章 多步直接量子预平衡核反应理论

### 第四篇 微观核反应理论

第十三章 核力与低能核子-核子相互作用

第十四章 少体核反应理论

第十五章 核多体格林函数方法

第十六章 核物质近似微观光学势理论

第十七章 Skyrme-Hartree-Fock 与核结构近似微观光学势理论

第十八章 微观 RPA 巨共振理论

### 第五篇 专题核反应理论

第十九章 辐射俘获及光核反应理论

第二十章 原子核裂变理论

第二十一章 重离子、融合与天体核反应理论

### 第六篇 中能核反应理论

第二十二章 相对论量子力学基础与强子间相互作用

第二十三章 相对论光学模型与相对论直接核反应理论

第二十四章 相对论核多体与相对论微观光学势理论

第二十五章 中能和相对论核-核碰撞理论

第二十六章 核内级联与量子分子动力学(QMD)模型

附录

# 第一篇 核反应基础理论

