

现代物理基础丛书

26

中子引发轻核反应的 统计理论

张竞上 著



科学出版社

www.sciencep.com

现代物理基础丛书 26

中子引发轻核反应的 统计理论

张竞上 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

由于轻核的核反应行为与中重核有明显的不同,为此发展了专门描述轻核反应的统计理论.建立了可以描述粒子预平衡发射末态为分立能级的统一的 Hauser-Feshbach 和激子模型理论,给出描述非有序粒子发射的理论方法以及严格考虑反冲效应的核反应运动学.

本书介绍了各轻核反应道开放的分析,给出了轻核反应动力学和运动学有关理论公式的详细表示和计算结果.使读者了解核反应统计理论在轻核反应中发展的新内容.

本书可作为理论核物理专业教师、研究生、高年级本科生和相关领域的科研人员的参考书.

图书在版编目(CIP)数据

中子引发轻核反应的统计理论/张竞上著. —北京: 科学出版社, 2009
(现代物理基础丛书; 26)

ISBN 978-7-03-024183-2

I. 中… II. 张… III. 中子反应: 核反应-应用统计学 IV. O571.42

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009) 第 028529 号

责任编辑: 胡 凯 刘凤娟/责任校对: 张怡君
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>

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 3 月第 一 版 开本: B5(720×1000)
2009 年 3 月第一次印刷 印张: 19 3/4
印数: 1—2 000 字数: 382 000

定价: 59.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈路通〉)

《现代物理基础丛书》编委会

主 编 杨国桢

副主编 阎守胜 聂玉昕

编 委 (按姓氏笔画排序)

王 牧 王鼎盛 朱邦芬 刘寄星

邹振隆 宋菲君 张元仲 张守著

张海澜 张焕乔 张维岩 侯建国

侯晓远 夏建白 黄 涛 解思深

序

1p 壳核的 Li, Be, B, C, N 和 O 通常被称为轻核. 这些核素的核反应研究不仅具有学术价值, 还具有很强的应用价值. 但是长期以来, 由于轻核的反应机制的复杂性, 理论上它是一个难度颇大的课题. 国内外自 20 世纪 70 年代就开始着手进行轻核反应的理论研究, 但是始终没能找到成功的理论模型方法. 我很高兴地看到这个难度大的理论课题有所突破, 这就是“统一的 Hauser-Feshbach 和激子模型理论”的建立. 本书清晰、深入地论述了轻核反应机制的理论基础, 恰当地介绍了理论的最新发展并着重地阐述了作者及合作者长期从事这方面科研工作所取得的创造性成果.

以往用平衡态核反应统计理论或用直接核反应理论都不能成功描述轻核反应的行为, 然而新的研究表明, 轻核反应是应以预平衡机制为主, 这正是国际上现有核反应统计模型计算程序中所缺少的, 也是描述不好轻核反应行为的主要原因. 本研究成果成功揭示了轻核反应中的预平衡机制的重要性及其伴随的复杂粒子的形成与发射的规律, 得到了新的认识和相应的理论计算公式, 建立了一套完整的轻核反应理论.

作者以明晰地方式分析出了轻核各有独自特色的反应开放道状况, 为建立计算程序打下扎实的基础. 计算结果能在相当好的程度上再现实验测量的中子双微分截面数据, 这是以前的理论所不能及的, 证实了新理论的成功之处. 在分析中发现了轻核的许多反应道中包含了剩余核的两体和三体崩裂过程, 以及直接三体崩裂过程, 这种非有序发射过程是轻核不同与中重核反应的特点之一.

对于低能中子诱发的轻核反应, 从复合核发射粒子后, 所有的剩余核都是处在分立能级状态. 而分立能级具有自身的自旋和宇称. 而在统一的 Hauser-Feshbach 和激子模型理论中, 包含可以描述以预平衡发射粒子方式到分立能级并保证角动量和宇称守恒的机制, 这是轻核反应理论创新的关键点.

研究中还建立了各种复杂粒子的预形成概率和双微分截面的理论计算公式. 并考虑了不稳定核 ${}^5\text{He}$ 发射的可能性, 以改善理论计算与实验测量的双微分截面在低能端的符合.

由于轻核质量轻, 核反应过程中的反冲效应很强, 需要严格考虑粒子发射过程中的反冲效应. 通过作者细致深入的研究, 发现所有的有序与无序粒子发射过程的运动学可以归为四类. 使得很复杂的轻核发射的运动学行为只需要四类公式就可以进行严格的描述. 这些运动学公式严格保证了核反应的能量平衡. 这是新轻核反

应模型中的另一个创新关键点. 轻核反应动力学给出了发射各种粒子的概率大小, 而轻核反应的运动学给出了各种粒子发射分谱在各发射角度上准确的位置和形状. 在此基础上, 作者提供了建立轻核的中子评价数据库中双微分截面文档的理论方法.

我认为该书论述严谨, 内容详实, 是学术上有所创新的优秀科技著作, 比较系统地发展了在轻核反应领域的核反应理论模型方法, 不仅对军工、民用核工程有应用价值, 对核反应理论本身也有学术意义. 我衷心祝贺《中子引发轻核反应的统计理论》一书的出版.

吴式枢

中国科学院院士

2007 年 4 月 23 日

前 言

随着核能应用和核技术的发展,核数据应用的领域也越来越广泛.裂变聚变反应堆等核工程、核医学、核天体等诸多领域的探索,都需要越来越精确的核数据.就核反应领域而言,已经建立了各种类型的核反应的理论,并取得了行之有效的理论成果.核反应统计理论在中重核、裂变核的应用中取得了很大成功,国内外已经有许多程序进行全套核数据的计算.在这种理论模型程序中,包含了光学模型,直接反应,核反应的平衡统计、预平衡统计.但在计算 $1p$ 壳的轻核反应时便显得无能为力,其原因是 $1p$ 壳的轻核反应中出现了独特的反应行为,以致长期以来缺少合适的理论方法能描述好 $1p$ 壳核反应双微分截面的物理图像.

$1p$ 壳轻核包括从 Li 到 O 等核素,简称轻核.轻核的能级结构与中重核有明显的不同.对于中重核和易裂变核,它们分立能级的平均间距从千电子伏特量级到电子伏特量级,而轻核的分立能级的平均间距却达到兆电子伏特量级.另外,轻核的第 1 激发态除 ${}^7\text{Li}$ 为 0.4776MeV 外,其他都大于 1MeV .特别是 ${}^{16}\text{O}$,竟高达 6.049MeV .此外,核谱学目前给出的轻核分立能级纲图的能量区域相当高.例如, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{14}\text{N}$ 和 ${}^{16}\text{O}$ 给出的最高能级能量分别达到 33.47MeV , 24.0MeV 和 35.0MeV ,能级条数分别达到 56 条、120 条和 134 条.目前核谱学测量也在不断精细化,能级纲图还在不断地更新.轻核是否在更高激发态有分立能级存在,随着测量技术的发展可能还会发现少数不稳定的共振态,但是也可能不再存在有实际意义的分立能级了.因为,在 $1s$ 壳核中, d , t , ${}^3\text{He}$ 始终没有发现存在激发态能级结构存在,一旦被足够能量激发,便会破裂.对于 ${}^4\text{He}$ 已经测量到有 15 个激发态,能量达到 29.89MeV .那么,对于下一个轻核 ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$ 是否有激发态的上限,这就需要核谱学的进一步研究才能回答.因此,对研究核反应而言,冒然在目前轻核的分立能级之上加入连续能级是很不可靠的.因为目前没有关于轻核能级密度的知识,而能级密度是属于中重核研究的内容.

当前有直接反应及平衡态统计的 Hauser-Feshbach 理论,是能够描述保证角动量守恒的向分立能级发射的核反应理论.前者是描述复合核形成之前的核反应过程,而后者是描述平衡态的核反应理论,而介于两者之间的预平衡核反应过程的核反应理论中,恰恰缺少了包含有角动量守恒的机制.而研究表明,从复合核向剩余核分立能级的预平衡发射正是轻核反应最主要的核反应机制.为此,核反应非统计理论中发展包含角动量守恒的物理因素成为关键性的研究课题.由于核反应的平衡统计理论及直接反应理论是比较成熟的核反应理论,本书仅做扼要介绍,而集中阐

述了用非平衡统计方法描述中子引发轻核反应过程的理论模型内容. 当然, 可以在此基础上可以比较容易地推广到带电粒子引发的轻核反应过程.

目前计算核反应数据最通用的理论方法是核反应的半经典理论, 在这种模型理论中有模型参数, 通过合理调整这些参数可以大范围地与实验测量数据有很好符合. 另外, 描述核反应的理论中还有量子理论方法, 包括多步复合核和多步直接反应的量子理论, 其特点是在理论上比较严格的. 但是还尚未达到计算全套核反应数据的程度. 从目前发展状态来看, 量子理论的理论性强, 半经典理论的实用性强, 这种局面还将持续相当长的时间.

本书第 1 章中分析了中子引发轻核反应道开放情况, 给出轻核反应的独有特征. 轻核反应道的开放个性极强. 除了粒子的有序发射外, 还出现了非有序的粒子发射, 使得仅描述有序粒子发射的核反应统计理论无能为力. 而要描述好轻核反应的这些特征, 需要在通常的核反应非平衡统计理论的基础上继续发展一些新内容, 这些内容在第 1 章中进行了阐述.

第 2 章对描述轻核反应机制的理论基础进行了介绍. 集中介绍如何在预平衡反应的理论中加入角动量守恒这一物理因素. 这就是统一的 Hauser-Feshbach 和激子模型理论的建立. 为了在理论上可以描述好轻核这个最主要的核反应机制, 介绍了与角动量有关的激子模型. 还介绍了对任意单粒子密度的核系统求解激子态密度核 Pauli 原理修正值的置换群方法, 以及对粒子发射率、光学模型、宽度涨落修正等理论的简介. 第 3 章介绍了单粒子发射率和单粒子发射的双微分截面的理论公式, 以及推广的激子模型主方程. 第 4 章主要介绍复杂粒子发射率, 并考虑了在轻核反应中 ^5He 的发射. 在原有的 Iwamoto-Harada 理论模型基础上, 考虑了与激子数有关的动量分布后, 用占据数方程得到的在相空间的平均占据数, 得到了复杂粒子预形成概率改进的理论公式及其各种复杂粒子发射的双微分截面理论模型公式.

由于轻核质量轻, 核反冲效应很强, 甄别出射粒子双微分谱的正确性之一是否是在核反应理论中能保证能量平衡. 在第 5 章中给出了各种粒子有序发射过程中以及包括三体崩裂过程的非有序发射过程, 严格考虑粒子发射反冲效应的核反应运动学公式. 结果发现, 所有有序与无序粒子形形色色的发射过程的运动学可以归纳为四类. 看来很复杂的轻核粒子发射的运动行为只需要四类公式就可以描述. 这些运动学公式可以给出在各种形态下严格保证了能量平衡的粒子发射的双微分谱公式描述. 另外, 在本章中还对核医学等领域中关心的 Kerma 系数进行了简介.

第 6 章给出理论计算结果如何与实验测量数据比较的内容, 包括能谱展宽效应, 运动坐标系转换的公式. 检验数据的准确性可以来自两个方面, 一个是与实验测量的双微分截面的符合, 称为核数据的微观检验, 另一个是与中子穿透大块物质的中子泄漏谱实验测量数据的符合, 称为核数据的基准检验 (Benchmark). 第 6 章

给出在上述两个方面检验的示例。

由于以前没有合适的理论方法对轻核反应行为进行准确的描述, 1995 年, 在当时主管核数据的胡进修女士建议下开展了轻核反应理论研究这个课题。在其后不断得到她的大力支持和鼓励, 在这里表示我的诚挚的感谢。

在统一的 Hauser-Feshbach 和激子模型理论框架下, 发展了一个专门描述轻核反应的理论模型。对个性极强的轻核反应, 逐核编写了中子引发轻核反应数据理论计算的 LUNF 程序系列。在此基础上, 成功地再现了中子双微分截面实验测量数据, 提供了用理论方法建立双微分截面文档手段, 给出了保证了能量平衡的全部出射粒子的发射信息。研究发现, 确实是以预平衡方式发射粒子到分立能级的反应机制占了最主要的成分, 这是当初发展统一的 Hauser-Feshbach 和激子模型理论所始料未及的, 这才展现了这个半经典核反应理论的真正价值所在, 也就理解了在预平衡发射过程中, 不考虑角动量守恒这个物理因素就不能描述好轻核反应行为的主要原因。

通过对复杂轻核反应途径的明晰分析以及在轻核反应中粒子非有序发射的特征, 建立了轻核反应理论, 由此将核反应统计理论应用的核素范围拓宽到了 $1p$ 壳轻核。

一位德高望众理论物理界老前辈的话铭记心头: “理论要联系实际, 但是一个‘理论’是不能完全准确地描述好‘实际’的, 因为‘实际’是包罗万象的, 太复杂了, 我们要看能不能抓住主要矛盾。因此, 理论的发展永远是无止境的, 需要继续不断创新”。轻核反应理论的发展仍是任重道远, 正如书中指出的存在问题那样, 需要进行不懈的继续努力, 做出更好的成果。

参加轻核反应理论研究的还有韩银录研究员和研究生们, 大家协同合作, 共同完成了这一研究课题。蔡崇海教授和孙小军副教授对本书稿进行了认真的审阅, 并提出了宝贵的建议, 段军锋博士在理论计算、数据评估和本书绘图等方面做了大量工作, 在此表示衷心的感谢。本书出版获得了中国核数据中心和国家重点研究项目“加速器驱动洁净核能系统的物理及技术基础研究”的资助。

作 者

2008 年 1 月 20 日于北京

《现代物理基础丛书》已出版书目

(按出版时间排序)

1. 现代声学理论基础	马大猷 著	2004.03
2. 物理学家用微分几何 (第二版)	侯伯元, 侯伯宇 著	2004.08
3. 数学物理方程及其近似方法	程建春 编著	2004.08
4. 计算物理学	马文淦 编著	2005.05
5. 相互作用的规范理论 (第二版)	戴元本 著	2005.07
6. 理论力学	张建树, 等 编著	2005.08
7. 微分几何入门与广义相对论 (第二版.上)	梁灿彬, 周彬 著	2006.01
8. 物理学中的群论 (第二版)	马中骥 著	2006.02
9. 辐射和光场的量子统计	曹昌祺 著	2006.03
10. 实验物理中的概率和统计 (第二版)	朱永生 著	2006.04
11. 声学理论与工程应用	朱海潮, 等 编著	2006.05
12. 高等原子分子物理学 (第二版)	徐克尊 著	2006.08
13. 大气声学 (第二版)	杨训仁, 陈宇 著	2007.06
14. 输运理论 (第二版)	黄祖洽 著	2008.01
15. 量子统计力学 (第二版)	张先蔚 编著	2008.02
16. 凝聚态物理的格林函数理论	王怀玉 著	2008.05
17. 激光光散射谱学	张明生 著	2008.05
18. 量子非阿贝尔规范场论	曹昌祺 著	2008.07
19. 狭义相对论 (第二版)	刘 辽, 等 编著	2008.07
20. 经典黑洞与量子黑洞	王永久 著	2008.08
21. 路径积分与量子物理导引	侯伯元, 等 著	2008.09
22. 量子光学导论	谭维翰 著	2009.01
23. 全息干涉计量——原理和方法	熊秉衡, 李俊昌 编著	2009.01
24. 实验数据多元统计分析	朱永生 编著	2009.02
25. 微分几何入门与广义相对论 (第二版.中)	梁灿彬, 周彬 著	2009.03
26. 中子引发轻核反应的统计理论	张竞上 著	2009.03

目 录

第 1 章 中子引发 1p 壳轻核反应道的开放途径	1
1.1 引言	1
1.2 $n+{}^6\text{Li}$ 的反应道的开放途径	7
1.3 $n+{}^7\text{Li}$ 的反应道的开放途径	13
1.4 $n+{}^9\text{Be}$ 的反应道的开放途径	17
1.5 $n+{}^{10}\text{B}$ 的反应道的开放途径	25
1.6 $n+{}^{11}\text{B}$ 的反应道的开放途径	29
1.7 $n+{}^{12}\text{C}$ 的反应道的开放途径	33
1.8 $n+{}^{14}\text{N}$ 的反应道的开放途径	37
1.9 $n+{}^{16}\text{O}$ 的反应道的开放途径	40
1.10 核反应统计概念的概述	44
参考文献	48
第 2 章 轻核反应的动力学机制	51
2.1 引言	51
2.2 激子态密度和 Pauli 原理修正值的置换群方法	53
2.3 光学模型简介	66
2.4 细致平衡原理和粒子发射率	71
2.5 统一的 Hauser-Feshbach 和激子模型	74
2.6 与角动量有关的激子模型	78
2.7 宽度涨落修正因子	94
2.8 分立能级的粒子发射	96
参考文献	99
第 3 章 单粒子的预平衡发射	102
3.1 单粒子预平衡态的发射率中的组合因子	102
3.2 Pauli 原理和费米运动对单粒子发射双微分截面的影响	105
3.3 动量线性相关的激子态密度	118

3.4 费米能	120
3.5 推广的激子模型主方程	121
参考文献	127
第 4 章 复杂粒子的预平衡发射	129
4.1 复杂粒子预平衡发射率	129
4.2 中子诱发的轻核反应中 ^5He 的发射	131
4.3 复杂粒子发射的预形成概率	135
4.3.1 相对运动内禀坐标	135
4.3.2 氘核的预形成概率	139
4.3.3 氚和 ^3He 的预形成概率	143
4.3.4 α 粒子的预形成概率	147
4.3.5 ^5He 的预形成概率	149
4.4 与激子态有关的复杂粒子预形成概率	152
4.5 复杂粒子发射的双微分截面	166
4.5.1 前言	166
4.5.2 氘核预平衡发射的双微分截面	167
4.5.3 ^3He 和 t 预平衡发射的双微分截面	171
4.5.4 α 粒子预平衡发射的双微分截面	174
4.5.5 ^5He 预平衡发射的双微分截面	178
4.5.6 复杂粒子发射双微分截面的综合讨论	183
参考文献	185
第 5 章 轻核反应的运动学	187
5.1 引言	187
5.2 一次粒子发射过程	191
5.3 直接三体崩裂	193
5.4 二次粒子发射过程 —— 从分立能级到分立能级	200
5.5 分立能级到连续谱的发射过程	221
5.6 连续谱到分立能级的发射过程	226
5.7 连续谱到连续谱的发射过程	238
5.8 Kerma 系数的简介	246
参考文献	253

第 6 章 能谱展宽和坐标系转换以及数据的检验	255
6.1 引言	255
6.2 能谱展宽效应	255
6.3 分立能级角分布的坐标系转换	258
6.4 双微分截面的坐标系转换	263
6.5 总出射中子双微分截面的计算示例	267
6.6 轻核评价中子数据库的基准检验	283
参考文献	298

第1章 中子引发 1p 壳轻核反应道的开放途径

1.1 引言

1p 壳轻核包括 Li, Be, B, C, N, O 等核素, 被称为轻核. 其中有的轻核仅有一个稳定同位素, 而有的轻核具有几个稳定同位素. 以下所称的轻核就是指 1p 壳的核素. 从目前来说, 中子引发的中重核以及易裂变核的核反应行为已经有比较成熟的统计理论模型来描述, 并且有相当多的理论计算程序, 可以计算各种类型的核反应数据, 而且国际上已建立了相当多核素的评价中子数据库.

然而, 在中子引发轻核的核反应过程中, 却出现了中重核反应所没有的某些独特行为, 比如会出现非有序的粒子发射, 不同轻核之间开放的反应道会是彼此非常的不同. 同样, 由带电粒子引发的轻核反应也具有相同的特征. 因此轻核反应机制具有相当的复杂性, 使得描述轻核反应过程比描述中重核反应具有更大的难度. 粒子入射到靶核之中, 形成了被激发的复合系统 (Excited Composite Nuclear System). 当初, 在仅有低能核反应的玻尔 (Bohr) 时代, 建立了著名的复合核理论, 从此复合核 (Compound Nucleus) 一词就意味着平衡态核反应统计理论. 但是, 随着入射粒子能量的提高, 从该激发的复合系统发射的粒子行为超出平衡态统计理论所能描述的理论框架, 因此, 继而发展了平衡前发射的非平衡统计理论, 被称为预平衡发射机制. 这时从激发的复合系统发射的粒子, 既有平衡态发射, 又有预平衡态发射. 需要强调说明的是, 本书中仍称这个激发的核系统为复合核 (Composite Nucleus), 但是它已超出了原有玻尔的复合核含义. 因此, 下面的复合核一词就指粒子入射到靶核之中形成的被激发的复合系统, 从而它既可以有平衡态机制的发射, 也可以有预平衡机制的发射.

在入射中子能量不是很高时, 中子诱发轻核反应的一个突出的特点是, 从复合核发射一次粒子后, 其剩余核都是处于分立能级态, 而二次以上的粒子发射, 这被称为次级粒子发射, 都是从剩余核的分立能级发射到其后剩余核的分立能级. 从轻核的能级纲图上可以看出, 它们的分立能级中有相当多的能级宽度达到几百千电子伏特, 甚至达到几个兆电子伏特的数量级, 这说明了这些分立能级是很不稳定的, 可以继续发射次级粒子, 而有些不稳定能级存在既可发射次级粒子又可伴随 γ 退激的竞争过程. 中子引发轻核反应的另一个特点是, 由于这些核的质量比较小, 发射粒子后的有些剩余核会是不稳定的核素, 例如, ${}^5\text{Li}$, ${}^5\text{He}$, ${}^6\text{He}$, ${}^8\text{Be}$ 等, 它们都会自发产生两体崩裂或三体崩裂, 上述这种核反应机制在中重核反应中是没有的. 另

外, 由于核素的能级结构都具有各自的自旋和宇称, 因此, 从不同的分立能级发射粒子的行为彼此各不相同. 这就会造成发射到同一个剩余核的不同能级可以属于不同的核反应道. 同时, 由于轻核的质量轻, 其发射粒子的反冲效应比较强, 由运动学的结果可以看出, 一次粒子发射的剩余核的能量在质心系中虽然是单能的, 但是在质心系中, 从这个剩余核的分立能级发射次级粒子时, 出射粒子在质心系中的双微分截面谱是环型谱, 其能量宽度可以达到几个兆电子伏特以上, 在第 5 章中将详细介绍这方面的内容. 因此, 这种次级粒子发射在质心系中是一个连续谱, 这是需要用双微分截面来描述的. 而一次粒子发射后, 剩余核是通过 γ 退激来结束核反应过程, 这时是两体问题, 用角分布来描述. 中子诱发的轻核反应的又一个特点是, 由于它们的核素内的核子数较少, 入射粒子进入核内发射级联碰撞的概率较小, 使得到达平衡态的概率比较小, 因此轻核反应的一个重要特征是在平衡前发射的概率很大.

在表 1.1 中给出了 ${}^5\text{Li}$, ${}^5\text{He}$, ${}^6\text{He}$ 的能级纲图, 包括能级能量、自旋、宇称, 它们分别取自 (Firestone et al., 1996) 和 (Tilley et al., 2004). 可以看出, 20 世纪末与 21 世纪初之间相比较, 这些轻核的能级纲图内容已经有了明显的改进. 某些能级的能量、自旋、宇称有了改变. 有增加的新能级, 也有被新实验测量证实要删除的能级. 可以说随着实验测量手段和精度的提高, 能级纲图将会不断更新. 特别是, ${}^5\text{Li}$ 的第 2 激发能级由原来的 7.5 MeV 变为 1.49 MeV, ${}^5\text{He}$ 的第 2 激发能级由原来的 4.0 MeV 变为 1.27 MeV, 这就会使该能级的开放阈能大大降低. 同样, 新测量出 ${}^6\text{He}$ 的第 2 激发能级在 5.6 MeV, 这样从 ${}^6\text{He}$ 发射中子的阈能比原来在 13.6 MeV 的第 2 激发能级下降很多, 相应的双微分截面谱也会发生明显变化. 这样在 $n + {}^6\text{Li}$, $n + {}^7\text{Li}$, $n + {}^9\text{Be}$ 等中子引发的轻核反应中, 剩余核是在 ${}^6\text{He}$ 的情况下, 会较早地出现由 ${}^6\text{He}$ 的第 2 激发能级发射中子, 而这时剩余核是 ${}^5\text{He}$, 它是不稳定核素, 会自发崩裂为 $n + \alpha$. 而原来 ${}^6\text{He}$ 的第 2 激发能级在 13.6 MeV 时, 当入射中子能量在 17 MeV 以下时, 没有激发

表 1.1 ${}^5\text{Li}$, ${}^5\text{He}$, ${}^6\text{He}$ 的能级纲图

${}^5\text{Li}$		${}^5\text{He}$		${}^6\text{He}$	
1996	2004	1996	2004	1996	2004
$[E(J^\pi)]/\text{MeV}$	$[E(J^\pi)]/\text{MeV}$	$[E(J^\pi)]/\text{MeV}$	$[E(J^\pi)]/\text{MeV}$	$[E(J^\pi)]/\text{MeV}$	$[E(J^\pi)]/\text{MeV}$
$gs(3/2^-)$	$gs(3/2^-)$	$gs(3/2^-)$	$gs(3/2^+)$	$gs(0^+)$	$gs(0^+)$
	1.49(1/2 ⁻)		1.27(1/2 ⁻)	1.797(2 ⁺)	1.797(2 ⁺)
7.5(1/2 ⁻)		4.00(1/2 ⁻)			5.6(2 ⁺)
16.66(3/2 ⁺)	16.87(3/2 ⁺)	16.75(3/2 ⁺)	16.84(3/2 ⁺)	13.6(1 ⁻)	14.6(1 ⁻)
18.0(1/2 ⁻)			19.14(5/2 ⁺)	15.5	15.5
	19.28(3/2 ⁻)		19.26(3/2 ⁺)	25	23.3
20.0(3/2, 5/2 ⁺)	20.53(1/2 ⁺)	19.8(3/2, 5/2 ⁺)	19.31(7/2 ⁺)	32	32
				36	36

注: 1996 表示取自同位素第八版 (Firestone et al., 1996), 2004 表示取自美国三角大学国家实验室 (Tilley et al., 2004).

${}^6\text{He}$ 的第 2 激发能级的反应途径出现. 因此, 按照老的能级纲图进行理论计算时, 就会丢失来自 ${}^6\text{He}$ 的第 3 激发能级出射中子后, 相继产生的两个中子和一个 α 粒子, 使得理论计算中的双微分截面谱丢掉了相应的分谱成分.

由此可见, 随着新的能级测量手段的不断精确化, 能级能量位置可以出现几个兆电子伏特的变化, 新能级被添加, 未被确定的能级自旋宇称逐渐被确定. 当然, 在更高激发态的分立能级还有相当多的不确定因素. 可以说, 核结构的知识在不断深化, 而且这个发展过程还任重道远.

上述这些不稳定核素, 它们的基态和激发态都会自发进行两体崩裂, 如对于基态而言, 对两体崩裂 ${}^5\text{Li} \rightarrow \text{p} + \alpha$, 释放出 1.966MeV 的能量, 而对两体崩裂 ${}^5\text{He} \rightarrow \text{n} + \alpha$, 释放出 0.894MeV 的能量. 另外, 对于 ${}^5\text{Li}$ 核, 第三分立能级 $E_k = 16.87(3/2^+)$ 及以上的激发态还可以发射 d 核, 剩余核为 ${}^3\text{He}$, 表示可以发生 ${}^5\text{Li} \rightarrow \text{d} + {}^3\text{He}$ 的衰变过程, 同时释放出 $E_k - 16.387\text{MeV}$ 的能量. 同样, 对于 ${}^5\text{He}$ 核, 第三分立能级 $E_k = 16.84(3/2^+)$ 及以上的激发态也可以发射 d 核, 剩余核为 t, 表示可以发生 ${}^5\text{He} \rightarrow \text{d} + \text{t}$ 的衰变, 同时释放出 $E_k - 16.696\text{MeV}$ 的能量.

尤其特殊的是 ${}^6\text{He}$ 核, 其基态是不稳定的, 是由 β^- 衰变到 ${}^6\text{Li}$ 核. ${}^6\text{He}$ 核第 1 激发态能级的激发能是低于发射中子的阈能, ${}^6\text{He}$ 是通过三体崩裂反应 ${}^6\text{He} \rightarrow \text{n} + \text{n} + \alpha$ 进行衰变, 释放出 0.824MeV 的能量, ${}^6\text{He}$ 的第 2 激发态已经允许发射中子, 即 ${}^6\text{He} \rightarrow \text{n} + {}^5\text{He}$, 而 ${}^5\text{He}$ 又是不稳定核, 自发崩裂为 $\text{n} + \alpha$. 虽然其结果也是 ${}^6\text{He} \rightarrow \text{n} + \text{n} + \alpha$, 但是上述两个不同反应过程的出射中子能谱是彼此不相同的. ${}^6\text{He}$ 的第 3 激发态 $E_k = 14.6(1^-)$ 及以上的分立能级还可以分裂为两个氦核, 即 ${}^6\text{He} \rightarrow \text{t} + \text{t}$ 过程, 并释放出 $E_k - 12.306\text{MeV}$ 的能量.

对于 ${}^8\text{Be}$ 核, 其能级纲图的最新版本是在 2004 年公布的 (Tilley et al., 2004), 它的基态和低激发态分立能级都是不稳定的, 可自发崩裂为两个 α 粒子, 即 ${}^8\text{Be} \rightarrow \alpha + \alpha$ 过程, 并释放出 $E_k + 0.092\text{MeV}$ 的能量, 其中 E_k 是 ${}^8\text{Be}$ 的激发能级的能量. 在 ${}^8\text{Be}$ 的第 5 激发态 17.640(1⁺) 及以上的分立能级都可以发射质子, 剩余核为 ${}^7\text{Li}$, 而在它的第 7 激发态 18.91(2⁻) 及以上的分立能级都可以发射中子, 剩余核为 ${}^7\text{Be}$, 而 ${}^7\text{Be}$ 又是不稳定核, 由电子俘获衰变为 ${}^7\text{Li}$, 寿命是 53.29 天. 因此, ${}^8\text{Be}$ 的第 5 和第 6 激发态存在 ${}^8\text{Be} \rightarrow \alpha + \alpha$ 与 ${}^8\text{Be} \rightarrow \text{p} + {}^7\text{Li}$ 的竞争, 而在第 7 激发态以上则存在 ${}^8\text{Be} \rightarrow \alpha + \alpha$ 与 ${}^8\text{Be} \rightarrow \text{p} + {}^7\text{Li}$ 以及 ${}^8\text{Be} \rightarrow \text{n} + {}^7\text{Be}$ 的竞争.

由上面的介绍可以看出, 在中子诱发的轻核反应过程中, 由于若包含了上述的不稳定剩余核, 就会出现剩余核集团的两体崩裂或三体崩裂过程, 以及高激发态能级存在多种粒子发射竞争的反应机制, 这是造成轻核反应复杂性的原因之一, 也是轻核反应的特征之一.

记中子入射能为 E_n , 而 m_n , M_T 和 M_C 分别表示中子、靶核和复合核的质量. 当中子轰击在实验室系中处于静止的靶核时, 入射中子必然要付出一定能量产生复

合核在实验室系中的运动动能, 由动量守恒条件, 在非相对论情况下得到质心运动速度为

$$V_C = \frac{\sqrt{2m_n E_n}}{M_C} \quad (1.1.1)$$

而复合核在实验室系中的动能 E_R 为

$$E_R = \frac{1}{2} M_C V_C^2 = \frac{m_n}{M_C} E_n \quad (1.1.2)$$

由能量守恒条件, 入射粒子进入靶核贡献到核激发的动能为 $E_C = M_T E_n / M_C$, 再加上中子带到复合核中的结合能 B_n 后, 得到的复合核激发能公式:

$$E^* = \frac{M_T}{M_C} E_n + B_n \quad (1.1.3)$$

可以看出, 入射中子贡献到激发能部分与贡献到复合核在实验室系中的动能部分之比为 M_T/m_n . 对于质量重的靶核, 这个比值很大, 而对于轻核而言, 这个比值就明显相对小了. 这说明, 对于轻核而言, 质心运动速度就比较大, 因此, 在质心系和实验室系中的运动行为就有明显差别, 而对中重核的这种差别就相对比较小了. 特别是易裂变核, 质量数超过 200 时, 在质心系和实验室系的行为就几乎相同了.

下面介绍反应道的 Q 值和阈能值的计算方法. 一个反应道的 Q 值是指核反应前后的质量差, 可以用质量表计算给出. Q 值大于 0 的反应是放能反应, 而 Q 值小于 0 的反应是吸热反应, 也称有阈反应. 对于中子引发的核反应过程中的非弹性散射道而言, 是指发射一个中子后, 达到剩余核的某个激发态能级, 而这个能级只是由 γ 退激方式来结束核反应过程. 上面所说非弹性散射道, 对于中重核来说, 总是由第 1 激发态能级开始, 而对于轻核却有所不同, 例如, ${}^6\text{Li}$ 的第 1 激发态能级能发射氦核, 剩余核是 ${}^4\text{He}$, 属于 $(n, nd)\alpha$ 反应道, 而第 2 激发态能级才是以 γ 退激的方式来结束核反应过程, 因此发射中子到 ${}^6\text{Li}$ 的第 2 激发态能级才属于真正的非弹性散射. 这又是轻核反应不同于中重核反应的特征之一.

所谓一个反应道的阈能是指开放这个反应道需要最小的中子入射能量. 以中重核反应为例, 对于仅发射一个粒子的反应道而言, 复合核激发能需要付给出射粒子发射带走的结合能 B_1 , 再考虑发射粒子产生的反冲动能后, 反应道的阈能值为

$$E_{\text{th}} = \max \left\{ 0, \frac{M_C}{M_T} (B_1 - B_n) \right\} = \max \left\{ 0, -\frac{M_C}{M_T} Q \right\} \quad (1.1.4)$$

其中, 一个反应道的 Q 值等于入射中子结合能减去出射粒子的结合能. (1.1.4) 式是在中重核反应中常用的公式. 但是, 这个公式的应用是具有局限性的, (1.1.4) 式的成立仅用于剩余核为稳定核素. 对于轻核反应, 由于发射各种粒子后剩余核都处于分立能级态, 而有些剩余核是不稳定的, 会在自发崩裂过程中释放能量, 这时就不能