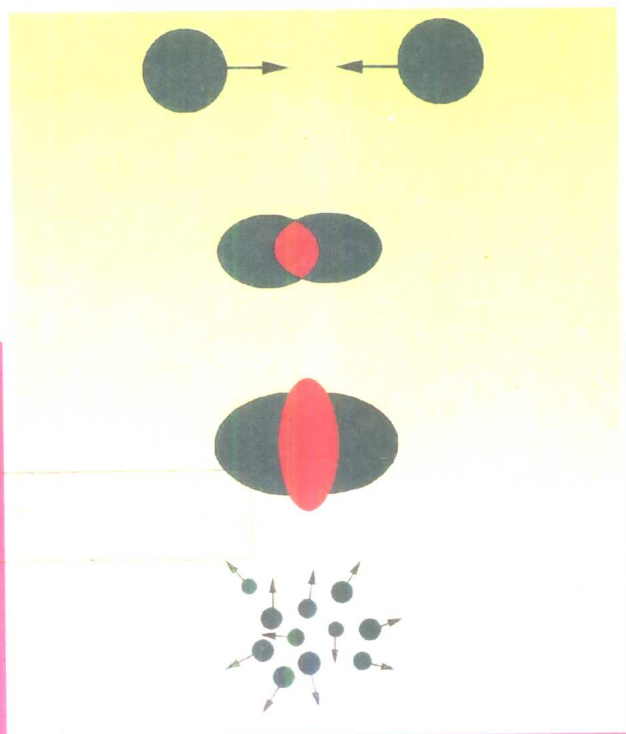


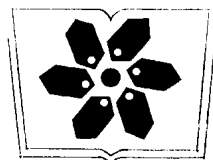
科学出版社

原子核多重碎裂

张丰收 葛凌霄 著



博士丛书 · 博士丛书 · 博士丛书 · 博士丛书



中国科学院科学出版基金资助出版

博 士 丛 书

原子核多重碎裂

张丰收 葛凌霄 著

科 学 出 版 社

1998

内 容 简 介

本书对近十几年来原子核多重碎裂研究的现状从理论上和实验上进行了总结,有很多内容是作者自己的研究结果和观点。本书内容分为四篇:第一篇是对原子核反应机制的概括描述和对国际上几台主要加速器的简单介绍;第二篇是对原子核多重碎裂实验现象的总结;第三篇是对原子核多重碎裂的各种理论模型和方法的叙述和分析;第四篇是本书的总结和对原子核多重碎裂发展的展望。

本书为从事重离子物理研究的研究生和研究人员尽快了解和认识这一前沿领域提供了可能,也可作为从事原子核物理、理论物理和其他相关学科的研究人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

原子核多重碎裂/张丰收,葛凌霄著.

北京:科学出版社,1998.10

(博士丛书/白春礼主编)

ISBN 7-03-006681-2

I. 原… II. ①张… ②葛… III. 原子核-碎裂-研究 IV. O571.43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 08150 号

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

科 地 亚 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1998年10月第 一 版 开本:850×1168 1/32

1998年10月第 一 次印刷 印张:9 1/2

印数:1~1 500 字数:242 000

定价:25.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

序

环顾当今世界，国家的发达，民族的振兴，无一例外地离不开科学技术的推动作用。年轻博士们历来是科技队伍中最活跃、最富创造性的生力军。他们的科研成果是学科发展强有力的推动力量，是体现一个国家高层次教育水平和科研水平的窗口。为了系统地反映年轻博士们的科研成果，促使他们的快速成长，加强国际国内的学术交流，在老一辈科学家的热心支持下，科学出版社决定出版一套《博士丛书》。

我们指导思想是突出本丛书的学术性、创造性、新颖性、先进性和代表性，使之成为所有青年博士平等竞争的学术舞台和优秀科研成果的缩影。

这套丛书以专著为主，并适时组织编写介绍学科最新进展的综述性著作。它将覆盖自然科学各个领域，是一套充分体现我国青年学者科研成果和特色的丛书。

丛书编委会将在由著名科学家组成的专家委员会指导下开展编辑工作。本丛书得到了国家自然科学基金委员会和全国博士后管理协调委员会的特别资助。在此我们深表谢意。

《博士丛书》编委会

一九九三年十月

《博士丛书》专家委员会

王 元	王 仁	母国光	庄逢甘
庄 毅	刘西拉	沈克琦	汪培庄
李 未	肖纪美	谷超豪	张存浩
陈述彭	张光斗	郝柏林	赵忠贤
唐敖庆	郭慕孙	谈德颜	阎隆飞
谢希德	路甬祥		

序

应用现代加速器技术，能在实验室里产生高激发态的原子核。这种高激发态的原子核会衰变成多个具有中等质量的核碎片，即原子核的多重碎裂。多重碎裂现象是原子核物理领域中的新发展，是当前原子核物理研究的前沿之一。原子核的多重碎裂不同于原子核融合、裂变和原子核的直接反应。对产生低激发态原子核的原子核融合、裂变和原子核的直接反应的研究有半个多世纪的历史，已有比较成熟的理论。而对高激发态原子核的多重碎裂现象的研究只有在中高能重离子加速器出现后才有可能，这大约在近 20 来年。不仅仅原子核系统会发生碎裂现象，天体物理中的星球、大气物理中的云块和凝聚态物理中的原子分子系统也会出现碎裂现象。碎裂现象极有可能反映了自然界的一般规律。而对原子核这一有限强束缚系统，其多重碎裂又有其自己的特点。

原子核多重碎裂的研究有重要的理论意义和实际应用前景。国际国内已投入运行的和正在建造的几台重离子加速器，如我国正在运行的兰州重离子加速器 HIRFL 和正在酝酿建造的兰州重离子加速器-冷却储存环 HIRFL-CSR，美国、德国、日本、法国和意大利等国正在运行的五台中能重离子加速器及其后继工程，都把这方面的研究作为其主要目标之一。在目前和在以后相当长的时间内，原子核多重碎裂在国际和国内都将是一个竞争十分激烈的研究方向。人们相信，在以后若干年内，原子核多重碎裂的研究将取得重大突破。

原子核多重碎裂是原子核融合、裂变和直接反应机制在中高能重离子碰撞的发展。本书的作者是长期从事这个领域研究的高级科研人员，他们不仅做出了很好的工作，特别是他们深入了解

这个领域的全面情况。该书全面总结了原子核多重碎裂实验和理论两方面研究的主要成就，重点叙述了原子核多重碎裂的理论模型和方法，反映了国内外这方面研究的最新成果，特别是含概了很多作者的研究结果和看法。关于这个领域的专门书籍还很缺乏，所以出版该书将是十分有意义的。

魏宝文

1998 年元月于

兰州重离子加速器国家实验室

前 言

1982 年在美国费米实验室用高能质子轰击 Kr 和 Xe, 发现了原子核新的衰变方式, 即原子核会碎裂成为多个具有中等质量的核碎片, 这种现象被称之为原子核多重碎裂。原子核多重碎裂是原子核融合、裂变在高激发能时的自然推广。对原子核多重碎裂的研究有三个方面的意义: 首先, 原子核多重碎裂的研究为人们认识原子核极限状态的性质提供了可能性; 其次, 原子核多重碎裂的研究是人们研究远离平衡态的量子多体系统的实验室; 最后, 对原子核多重碎裂的研究能够为人们提供研究碎裂的一般规律的知识, 也对人们研究有限系统的相变和临界现象有重要的理论意义。这也可以从当前大量的发表在各种国际国内学术刊物、会议报告和各大实验室所提交的实验建议书中看出来。已运行的和正在建造的几台重离子加速器, 都把这方面的研究作为其主要的研究目标之一。实验上这方面的研究已积累了大量的数据, 目前向系统性和精确性方向发展。理论上已为分析和解释实验数据建立了许多模型, 当前需要为实验提出新的观测量来检验理论和发展理论。这些研究结果目前大都彼此独立地发表在各种学术刊物和会议报告中。因此迫切需要一本既对已有的实验结果进行总结, 又对已有的理论模型进行分析的书籍, 它能够使从事重离子物理研究的研究生和研究人员尽快了解该前沿领域, 也能够作为他们从事原子核物理和其他学科的参考书。

原子核多重碎裂是原子核融合、裂变和直接反应机制在中高能重离子碰撞中的反映。本书是已成熟的“复合核反应”、“原子核的裂变”和“原子核的直接反应”的自然推广。对低激发态原子核所表现的原子核融合、裂变和原子核的直接反应的研究, 已有比较成熟的理论。而对高激发态原子核所表现的多重碎裂现象只有在

中高能重离子加速器出现后才有可能。本书总结了当前国内外关于原子核多重碎裂研究的主要成果,重点叙述了原子核多重碎裂的理论模型和方法。材料大都来源于国内外学术刊物和国际国内学术会议报告,特别有很多作者的研究结果和看法。本书的内容分四篇,第一篇是对原子核反应机制的概括描述和国际上几台主要加速器的简单介绍,使读者了解原子核反应特别是重离子反应的一般知识和国际加速器发展的情况,进而了解原子核多重碎裂发生的条件;第二篇是对原子核多重碎裂现象的总结和分析;第三篇是对原子核多重碎裂的各种理论模型和方法的介绍和分析;第四篇是本书的总结和原子核多重碎裂发展的展望。

首先感谢中国科学院院士、兰州重离子加速器国家实验室主任魏宝文教授,他始终关心和支持本书的写作工作,并为本书作序。江栋兴教授、卓益忠研究员、靳根明研究员阅读了本书的初稿,并对本书提出了许多改进意见,谨致谢忱。王素芳、景成祥对本书做了许多文字加工,在此表示感谢。作者感谢王顺金、孙相富、邢正、朱介鼎、刘正明、刘兆远、刘建业、冯恩普、何易、汪映海、陈星萁、杨孔庆、罗亦孝、夏佳文、诸永泰、徐树威、徐珊珊、唐靖宇、詹文龙和戴光羲等专家教授以各种方式给予的支持和鼓励。

笔者曾于1992到1996年在法国重离子加速器国家实验室GANIL和欧共体高级研究培训中心CERFACS与苏厚(E. Suraud)、拉伟勒(J. L. Laville)、阿依克(S. Ayik)等教授合作,从事原子核多重碎裂的研究,为本书的写作打下了一些基础。

葛凌霄研究员是本书的作者之一,他为重离子物理研究和培养年轻人献出了毕生的精力,是他把笔者引入原子核物理大门,并积极支持笔者从事原子核多重碎裂的理论研究的。

本书得到了中国科学院出版基金、国家自然科学基金编号19609033、中国科学院留学人员择优支持基金、国家教委留学回归人员科研基金和中国科学院“九·五”重大科研项目基金的资助。

张丰收

1997年12月于兰州

目 录

序 前 言

第一篇 原子核碰撞的基础知识

第一章 引言	(1)
§ 1.1 原子核物理	(1)
§ 1.2 重离子物理和重离子反应能量范围的划分	(7)
§ 1.3 低能重离子碰撞	(11)
1.3.1 DIC 是弛豫过程	(11)
1.3.2 全融合反应	(15)
§ 1.4 高能重离子碰撞	(18)
1.4.1 参加者和旁观者	(18)
1.4.2 介子产生	(19)
§ 1.5 极端相对论区重离子碰撞	(22)
1.5.1 强子相到夸克-胶子等离子体的相变	(22)
1.5.2 夸克-胶子等离子体出现的信号	(24)
§ 1.6 极端条件下原子核的性质	(25)
§ 1.7 原子核多重碎裂的定义	(27)
§ 1.8 几台中能区重离子加速器简介	(29)
1.8.1 兰州重离子加速器(HIRFL)简介	(31)
1.8.2 法国国家大型重离子加速器实验室(GANIL) 简介	(32)
1.8.3 德国重离子研究中心(GSI)简介	(32)

1.8.4 美国密歇安州立大学国家超导回旋加速器 实验室(MSU-NSCL)简介	(33)
1.8.5 日本理化学研究所(RIKEN)简介	(33)
参考文献	(34)
第二章 中能重离子碰撞的特征和现象	(37)
§ 2.1 中能反应机制特点	(37)
§ 2.2 中能重离子碰撞的反应总截面	(39)
§ 2.3 非完全融合反应和线性动量转移	(42)
§ 2.4 激发能储藏和极限激发能	(48)
§ 2.5 热核的形成和衰变性质	(54)
§ 2.6 前平衡粒子发射	(59)
§ 2.7 高能光子和阈下介子产生	(66)
§ 2.8 集体流	(70)
2.8.1 动能流张量和流角	(71)
2.8.2 横动量	(73)
2.8.3 方位角分布	(75)
2.8.4 平衡能	(76)
2.8.5 直接流	(77)
2.8.6 径向膨胀流	(80)
2.8.7 关于集体流的简单讨论	(81)
参考文献	(82)

第二篇 原子核多重碎裂的实验事实和分析

第三章 实验事实	(85)
§ 3.1 在质子-核反应中核的多重碎裂	(85)
3.1.1 在质子-核反应中核多重碎裂的单举测量	(85)
3.1.2 在质子-核反应中核多重碎裂的关联特征	(88)

3.1.3 质子-核反应的物理分析	(90)
§ 3.2 中高能重离子碰撞中核的多重碎裂	(91)
3.2.1 碰撞参数的确定	(93)
3.2.2 带电粒子多重性和中等质量碎片多重性的 关联测量	(94)
3.2.3 中等质量碎片平均多重性的能量和碰撞参 数的依赖性	(95)
3.2.4 中间质量碎片谱	(99)
3.2.5 中等质量碎片发射的时间尺度	(101)
3.2.6 从蒸发到汽化	(101)
3.2.7 碎片衰变前的激发能和温度	(110)
参考文献	(115)
第四章 原子核多重碎裂的一般性质	(117)
§ 4.1 渗透模型	(117)
§ 4.2 间歇混沌	(123)
4.2.1 间歇混沌的基础知识	(123)
4.2.2 阶乘矩	(125)
参考文献	(127)

第三篇 原子核多重碎裂的理论模型和分析方法

第五章 一体输运理论	(129)
§ 5.1 BUU 类型理论总结	(129)
§ 5.2 随机一体输运理论 Boltzmann-Langevin 方程	(130)
5.2.1 方程推导	(130)
5.2.2 碰撞项和关联函数	(135)
§ 5.3 Boltzmann-Langevin 方程的数值模拟	(138)
5.3.1 BUU 方程的数值模拟	(139)
5.3.2 动量多极矩投影法	(142)

5.3.3 其他随机方法·····	(147)
5.3.4 暂态过程·····	(151)
§ 5.4 应用于原子核多重碎裂研究·····	(154)
5.4.1 动力学涨落·····	(154)
5.4.2 动力学不稳定性·····	(156)
5.4.3 原子核多重碎裂的一般分析·····	(156)
5.4.4 原子核多重碎裂的关联分析·····	(159)
§ 5.5 冷原子核多重碎裂·····	(164)
§ 5.6 小结·····	(171)
参考文献 ·····	(172)
第六章 量子分子动力学 ·····	(174)
§ 6.1 经典分子动力学·····	(174)
§ 6.2 量子分子动力学·····	(175)
6.2.1 引言·····	(175)
6.2.2 量子分子动力学模型·····	(176)
6.2.3 量子分子动力学模型求解·····	(181)
§ 6.3 多重碎裂的量子分子动力学模型分析·····	(182)
§ 6.4 原子核多重碎裂中核子的运动形态 ·····	(188)
§ 6.5 量子分子动力学模型的进一步发展·····	(194)
6.5.1 反对称化的分子动力学模型·····	(194)
6.5.2 费米子分子动力学模型·····	(198)
参考文献 ·····	(199)
第七章 统计模型和热力学模型 ·····	(201)
§ 7.1 引言·····	(201)
§ 7.2 统计碎裂模型的物理图像·····	(201)
§ 7.3 统计多重碎裂模型的形成·····	(203)
7.3.1 碎裂组态和碎裂配分·····	(203)
7.3.2 统计系综·····	(206)
7.3.3 多重碎裂系统的自由能·····	(207)

§ 7.4	核多重碎裂的数学模拟	(211)
§ 7.5	核碎裂后碎片的演化和退激发	(213)
§ 7.6	碎裂统计模型的计算结果	(214)
§ 7.7	统计模型和动力学模型的组合	(219)
	参考文献	(221)
第八章	相继衰变模型	(222)
§ 8.1	膨胀和蒸发	(222)
§ 8.2	相继衰变链模型	(223)
8.2.1	二元衰变链	(223)
8.2.2	链相继衰变模型中间歇混沌出现的信号	(229)
§ 8.3	碎裂滞二元模型	(236)
	参考文献	(241)
第九章	静态模型	(242)
§ 9.1	状态方程和有限核 ^{197}Au 的液-汽相变	(242)
§ 9.2	有限原子核的相空间模拟	(245)
§ 9.3	多重碎裂及其分析	(248)
§ 9.4	临界现象和间歇类型	(250)
9.4.1	定标阶乘矩分析	(250)
9.4.2	条件矩分析	(253)
§ 9.5	小结	(256)
	参考文献	(257)

第四篇 原子核多重碎裂研究发展展望

第十章	不同理论模型之间的关系	(259)
§ 10.1	原子核多重碎裂的物理图像	(259)
§ 10.2	原子核多重碎裂的理论模型	(262)
10.2.1	动态学描述	(263)
10.2.2	静态描述	(264)

§ 10.3 原子核多重碎裂的统一描述	(265)
参考文献	(266)
第十一章 碎裂物理发展展望	(268)
§ 11.1 宇宙中天体碎片的形成	(268)
11.1.1 模型简介	(268)
11.1.2 数值模拟	(270)
11.1.3 计算结果和讨论	(272)
11.1.4 结论	(274)
§ 11.2 乳胶在电解质中的碎裂	(274)
11.2.1 引言	(274)
11.2.2 理论模型	(275)
11.2.3 结果分析和讨论	(276)
11.2.4 结论	(278)
§ 11.3 多电荷原子团簇的碎裂	(279)
11.3.1 引言	(279)
11.3.2 理论模型	(280)
11.3.3 计算结果和讨论	(283)
11.3.4 结论	(285)
§ 11.4 发展中的碎裂物理学	(286)
参考文献	(287)

第一篇 原子核碰撞的基础知识

第一章 引 言

§ 1.1 原子核物理

原子核是由质子和中子（统称核子）组成的非常致密的物体，是物质结构的一个重要层次，图 1.1 是物质结构的简明示意图。原子核物理学是研究原子核的性质、结构、核力、核与核、核与粒子间相互作用规律的学科，是深入探索微观世界规律的基础学科之一。

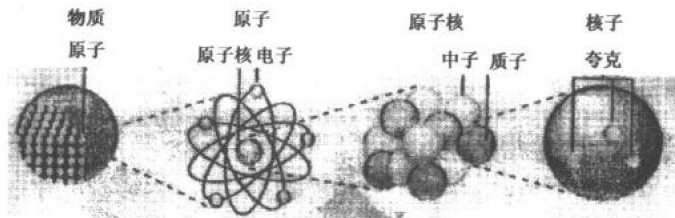


图1.1 物质结构简明示意图

人类对原子核的认识可以追溯到 1896 年法国物理学家贝可勒尔 (A. H. Becquerel) 发现铀的天然放射性现象。对原子核体系的研究在实验上是采用核反应并通过相应的探测手段来进行的。在原子核物理发展的初期，人们就利用天然放射性核的衰变所产生的粒子做为炮弹来轰击不同的靶核引起核反应，来研究原子核的结构及其衰变性质的。对原子核这一具有强、弱电共同起作用的有限量子体系，要更深入地研究其结构和其激发态性质，就需要更高的弹核能量和多种类的炮弹。由于重离子加速器的建

成和发展，人们得以将全部稳定原子核进行加速，得到重离子束流。同轻离子反应相比，重离子反应能产生更大的激发能、更高的角动量和形成大质量的反应体系。基于重离子反应，可以合成新元素和研究更加远离 β 稳定线新核素，也能研究处于很高激发能时核物质的性质及其衰变规律，以及原子核的高自旋态结构性质。新一代加速器如冷却储存环 CSR (Cooling Storage Ring)^[1]和相对论重离子对撞机 RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) 的建造^[2,3]，使人们能够进行极端条件下原子核的性质和原子核的非核子自由度的研究。重离子物理学是在原子核物理学基础上发展起来的一门综合性学科，是原子核物理研究中的前沿领域之一。原子核物理的发展可以简单地分为三个阶段，即重离子碰撞研究(50年代中期)以前、重离子碰撞研究以后到90年代初和现代核物理三个阶段。在第一阶段，对原子核物理的发展有重大意义的事件有：

1896年贝可勒尔(A. H. Becquerel)发现了铀的放射性，这是人类首次观测到的核变化现象，人们把这一发现看成原子核物理的开端；

1898年居里夫妇(M. & P. Curie)从铀矿石中发现镭和钋这两种放射性元素；

1911年卢瑟福(E. Rutherford)根据 α 粒子与原子的大角度散射的事实，建立了原子的核结构模型：原子是由占很小体积的原子核和核外电子组成；

1919年卢瑟福(E. Rutherford)用 α 粒子轰击氮人为引起的核蜕变中发现了质子；

1931年泡利(W. Pauli)提出了中微子假说；

范德格拉夫(Van de Graaff)发明了静电加速器；

1932年钱德威克(J. Chadwick)用 α 粒子轰击Be核发现了中子；

海森堡(W. Heisenberg)提出了原子核是由质子和中子组成；