



中央民族大学青年学者文库
China Minzu University Young Scholars' Series

◎ 梁玉洁 / 著

原子核的晕结构 和高自旋态 研究

Study on
the Nuclear Halo Structures
and High Spin States

中央民族大学出版社
China Minzu University Press



中央民族大学青年学者文库
China Minzu University Young Scholars' Series

◎ 梁玉洁 / 著

原子核的晕结构 和高自旋态 研究



Study on
the Nuclear Halo Structures
and High Spin States

中央民族大学出版社
China Minzu University Press

图书在版编目 (CIP) 数据

原子核的晕结构和高自旋态研究/梁玉洁著. —北京: 中央民族大学出版社, 2018.5 重印

ISBN 978 - 7 - 5660 - 0598 - 4

I. ①原… II. ①梁… III. ①原子核—晕结构—研究
②原子核—高自旋态—研究 IV. ①O571.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 295240 号

原子核的晕结构和高自旋态研究

著 者 梁玉洁

责任编辑 李 飞

特约编辑 周宏余

封面设计 布拉格

出 版 者 中央民族大学出版社

北京市海淀区中关村南大街 27 号 邮编: 100081

电话: 68472815(发行部) 传真: 68932751(发行部)

68932218(总编室) 68932447(办公室)

发 行 者 全国各地新华书店

印 刷 厂 北京建宏印刷有限公司

开 本 880 × 1230 (毫米) 1/32 印张: 7.5

字 数 200 千字

版 次 2018 年 5 月第 2 次印刷

书 号 ISBN 978 - 7 - 5660 - 0598 - 4

定 价 28.00 元

版权所有 翻印必究



梁玉洁 1975年9月生，2009年于北京师范大学核科学与技术学院获理学博士学位，现任中央民族大学理学院教师。主要研究方向：原子核结构和核反应的理论及实验研究；纳米结构热电材料的制备及其性能研究。

中央民族大学
青年教师学术著作出版
编审委员会

主任：鄂义太 陈 理

委员：（按姓氏笔画排序）

云 峰	文日焕	白 薇	冯金朝	刘永佶
李东光	李曦辉	杨圣敏	邹吉忠	宋 敏
郭卫平	游 斌			

总 序

中央民族大学是我们党为解决民族问题、培养少数民族干部和高级专门人才而创办的高等学府。建校六十多年来，中央民族大学认真贯彻党的教育方针和民族政策，坚持社会主义办学方向，坚持为少数民族和民族地区发展服务的办学宗旨，培养了成千上万的优秀人才，取得了许多具有开创性意义的科研成果，创建和发展了一批民族类的重点学科，走出了一条民族高等教育又好又快发展的成功之路。

今天，荟萃了56个民族英才的中央民族大学，学科门类齐全、民族学科特色突出，跻身于国家“211工程”和“985工程”重点建设大学的行列。中央民族大学已经成为我国民族工作的人才摇篮，民族问题研究的学术重镇，民族理论政策的创新基地，民族文化保护和传承的重要阵地。

教师是学校的核心和灵魂。办好中央民族大学，关键是要有一支高素质的教师队伍。为建设一支能够为实现几代民大人孜孜以求的建成国际知名的、高水平的研究型大学提供坚实支撑的教师队伍，2012年4月，学校做出决定，从“985工程”队伍建设专项经费中拨出专款，设立“中央民族大学青年学者文库”基金，持续、择优支持新近来校工作的博士、博士后出站人员以及新近取得博士学位或博士后出站资格的在职教职工出版高水平的博士学位论文和博士后出站报告。希望通过实施这一学术成果出版支持计划，不断打造学术精品，促进学术探究，助推中央民

族大学年轻教师成长，形成长江后浪推前浪、一代更比一代强的教师队伍蓬勃壮大的良好局面。

青年教师正值学术的少年期。诚如梁启超先生脍炙人口的名言所祈愿：少年智则国智，少年富则国富，少年强则国强，少年独立则国独立，少年自由则国自由，少年进步则国进步，少年胜于欧洲，则国胜于欧洲，少年雄于地球，则国雄于地球。希望在各方面的共同努力下，在广大青年教师的积极参与下，《中央民族大学青年学者文库》能够展示出我校年青教师的学术实力，坚定青年教师的学术自信，激发青年教师的学术热忱，激励广大青年教师向更高远的学术目标攀登。唯有青年教师自强不息，中央民族大学的事业才能蒸蒸日上！

中央民族大学青年教师学术著作出版

编审委员会

2013年6月19日

前 言

原子核的晕结构是放射性核束实验中所发现的最重要的新物理现象之一，激发了人们探寻和研究奇异核的浓厚兴趣。另外，处于高自旋态的原子核具有许多新的特点，揭示了许多新的现象，同时也提出了许多新的问题。晕结构和高自旋态是当前核结构物理学研究的前沿领域。本书在对现有的原子核的晕结构和高自旋态的知识进行总结的基础上，重点介绍了我们近几年在这两个方向上研究的一些新结果。

本书主要对原子核的晕结构和高自旋态两部分研究内容进行介绍。第一部分（第一至五章）主要介绍用渐进归一化系数方法、相对论平均场理论、Woods - Saxon 平均场理论研究一些轻的镜像核的晕结构；第二部分（第六至九章）主要介绍用重离子融合反应布居一些稀土区奇奇核和奇质子核高自旋态所得到的能级结构信息，系统分析了这两类核一些转动带的交叉、旋称劈裂和反转的规律及其物理机制。

本书介绍的主要研究成果是作者在北京师范大学做博士论文期间完成的，得到了北京师范大学的周宏余教授、中国原子能科学研究院的刘祖华教授和杨春祥教授

及清华大学的李岩松老师的悉心指导。书中的高自旋态部分内容是由北京师范大学周宏余教授课题组成员邓富国、王祥生、宋海等参与完成的。本书的出版得到了中央民族大学理学院各位同事的支持帮助。在此一并表示感谢。

由于水平有限，加之时间仓促，难免有疏漏之处，恳请读者批评指正。

作者

2012 年 6 月 6 日

目 录

第一章 原子核的晕结构	(1)
1.1 晕核的发现	(1)
1.2 晕核的研究概况	(3)
1.3 晕核的判据	(10)
第二章 用渐近归一化系数方法研究 $^{17}\text{O} - ^{17}\text{F}$ 和 $^{17}\text{N} - ^{17}\text{Ne}$ 的晕结构	(16)
2.1 核 ANC	(16)
2.2 从转移反应提取核 ANC	(20)
2.3 核 ANC 的近似模型无关性	(23)
2.4 用 ANC 方法研究镜像核 $^{17}\text{O} - ^{17}\text{F}$ 和 $^{17}\text{N} - ^{17}\text{Ne}$ 的晕结构	(25)
第三章 用相对论平均场理论研究库仑 效应对质子晕形成的影响	(46)
3.1 相对论平均场理论	(46)
3.2 用相对论平均场理论研究库仑效应 对单质子晕形成的影响	(67)
3.3 用相对论平均场理论研究库仑效应 对双质子晕形成的影响	(83)
第四章 用 Woods - Saxon 平均场研究库仑 效应对质子晕形成的影响	(95)
4.1 Woods - Saxon 平均场模型	(95)

4.2 用 Woods - Saxon 平均场研究库仑效应	
对单质子晕形成的影响	(97)
4.3 用 Woods - Saxon 平均场研究库仑效应	
对双质子晕形成的影响	(101)
第五章 用相对论平均场理论研究	
P 和 S 同位素链的晕结构	(104)
第六章 原子核的高自旋态	(114)
6.1 回弯现象与转动带交叉	(114)
6.2 高自旋态的布居 ^[3,4]	(121)
6.3 旋称反转 ^[3]	(125)
6.4 尼尔逊单粒子能级	(128)
第七章 奇质子核 ¹⁶⁹ Ta 1/2 ⁺ [411]带高自旋态研究	(136)
7.1 实验装置与测量	(138)
7.2 实验数据获取和预处理 ^[4,6,7]	(141)
7.3 $\gamma - \gamma$ 符合数据处理—开窗投影谱分析	(142)
7.4 一些 f 射线主要来源的确定和	
能级纲图建立的基本方法	(143)
7.5 ¹⁶⁹ Ta 1/2 ⁺ [411]带能级纲图的建立	(145)
7.6 ¹⁶⁹ Ta 1/2 ⁺ [411]带组态的确定	(150)
7.7 关于 ¹⁶⁹ Ta 1/2 ⁺ [411]	
带“偶然退化”观点的讨论	(152)
7.8 ¹⁶⁹ Ta 1/2 ⁺ [411]带的转动参考系的	
准粒子能量、顺排角动量和带交叉频率	(155)
第八章 奇奇核 ¹⁷⁰ Ta 的高自旋态研究	(158)
8.1 ¹⁷⁰ Ta 能级纲图的建立	(159)
8.2 ¹⁷⁰ Ta 半退耦带的能级纲图	(166)
8.3 ¹⁷⁰ Ta 第三转动带能级纲图	(171)

8.4 ^{170}Ta 能级纲图中的各转动带组态、 能级自旋和宇称的确定	(176)
8.5 ^{170}Ta 晕带的旋称反转	(177)
8.6 ^{170}Ta 半退耦带的旋称反转	(179)
8.7 $Z = 73$ 的几个奇奇核的半退耦带旋称反转比较	(181)
8.8 稀土区奇奇核半退耦带旋称反转系统学比较	(182)
8.9 稀土区奇奇核晕带与半退耦 带旋称反转差异系统比较	(184)
8.10 稀土区奇奇核旋称反转形成机制	(186)
第九章 稀土区奇质子核旋称反转的系统学研究	(194)
9.1 奇质子核转动带的旋称劈裂	(194)
9.2 奇质子 Lu 和 Ta 核 $\pi h_{11/2}(9/2[514])$ $\otimes (\nu i_{13/2})^2$ 带的旋称反转	(197)
9.3 奇质子核旋称反转机制的探讨	(200)
9.4 奇质子核 Re 的 $\pi h_{11/2}(9/2[514]) \otimes (\nu i_{13/2})^2$ 带的旋称反转	(204)
9.5 奇质子核 Lu、Ta 和 Re 的 $\pi h_{11/2}(9/2[514]) \otimes (\nu i_{13/2})^2$ 带的带交叉	(206)
9.6 稀土区奇质子核基于 $\pi d_{3/2}1/2[411]$ 组态转动带的旋称反转	(211)
9.7 稀土区奇质子核基于 $\pi d_{5/2}5/2[402]$ 组态转动带的旋称反转	(213)
9.8 稀土区奇质子核基于 $\pi g_{7/2}7/2[404]$ 组态转动带的旋称反转	(216)
9.9 稀土区奇中子核 Yb 和 Hf 的 负宇称带的旋称反转	(218)

第一章 原子核的晕结构

原子核的晕结构是放射性核束实验中所发现的最重要的新物理现象之一，它开辟了核物理研究的新领域，激发了人们探寻和研究奇异核的浓厚兴趣。

1.1 晕核的发现

中子晕现象是 1985 年 Tanihata 研究小组在美国伯克利国家实验室测量高能 (790MeV/u) 的 ${}^6\text{-}^{11}\text{Li}$ 和 ${}^{7,9,10}\text{Be}$ 轰击 Be、C 和 Al 等靶核的相互作用截面 (σ_I) 的实验中首次发现的^[1]。这些实验主要是为了研究弹核的核物质半径。对稳定核的碰撞系统研究表明, σ_I 在能量大于 200MeV/u 的情况下与能量的依赖性很小, 而且与反应截面 σ_R 相差很小, 在 790MeV/u 的能量下, σ_I 趋于饱和值, 能够很好地反应原子核的大小。基于这种情况下弹核半径和靶核半径可分离的假设, 他们通过下面的硬球公式来定义相互作用半径 R_I :

$$\sigma_I = \pi [R_I(p) + R_I(t)]^2, \quad (1.1)$$

其中, $R_I(p)$ 和 $R_I(t)$ 分别表示弹核和靶核的相互作用半径。若靶核半径已知, 则可以通过测量相互作用截面 σ_I 由 (1.1) 式提取弹核的相互作用半径 $R_I(p)$, 把测量的相互作用截面与 Glauber 模型截面相比较, 可以得到弹核物质分布的均方根半径^[2]。

图 1.1 显示了 Li 同位素的相互作用半径随质量数 A 的变化规律，稳定核的相互作用半径能够比较好地遵循 $A^{1/3}$ 的规律（图中虚线所示），而丰中子核 ^{11}Li 的半径明显大于通常核的半径，表明 ^{11}Li 中存在奇异的中子分布。

有人提出用一个稳定的核芯核和它周围与它松散结合的价核子的图像来描述这种奇异核^[3]，获得了成功，成为晕核的经典模型。实验结果表明 ^{11}Li 有一个较完好的 ^9Li 核芯，剩余的两个价中子在空间弥散分布，均方根半径很大，可以与 ^{43}Ca 和 ^{208}Pb 的核半径相比拟，如图 1.2 所示。这种最外层分离能比较小的价核子，在短程核力的作用下通过量子隧道效应可以伸展到核势外很远的位置，在空间形成的非常弥散的结构被称为晕结构。

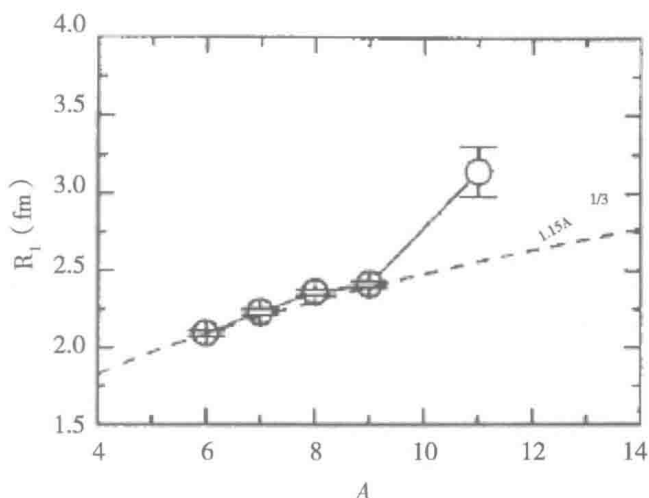


图 1.1 Li 同位素的相互作用半径随质量数 A 的变化，数据取自文献 [1]。

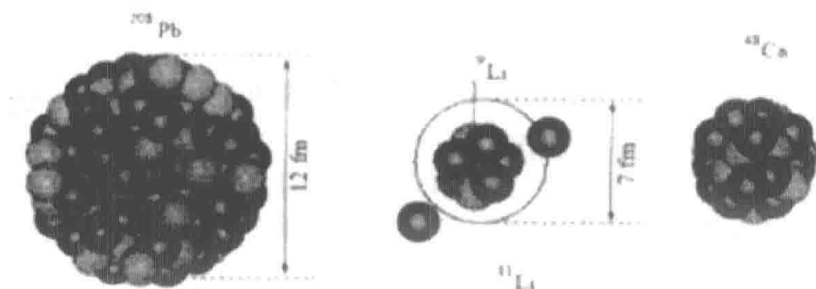


图 1.2 ^{11}Li 与 ^{43}Ca 和 ^{208}Pb 的大小示意图

1.2 晕核的研究概况

在发现晕核之前，人们认为通常的原子核具有一种非常紧凑的强束缚结构，核的半径与质量数的 $1/3$ 次幂成正比，核表面的厚度基本一样，在核内中子和质子具有基本相同形状的密度分布。研究表明，当价核子的分离能小于 1MeV 时，核子能够呈现出比较扩展的空间分布，形成晕结构^[4]。另外，离心位垒和库仑位垒也会阻碍晕结构的形成，因此价核子没有或者仅有小的离心位垒和库仑位垒也是形成晕核的条件。一般说价核子处于 s 态 ($l=0$) 或者 p 态 ($l=1$) 有利于形成晕结构。由于库仑位垒的影响，通常情况下质子晕比中子晕更难形成，但是对于轻核，情况恰好相反。因为晕核的价核子分布非常弥散，由海森堡测不准原理可知，很大的空间分布必然导致很窄的动量分布，即核反应碎裂产物的动量分布的宽度很窄；而且由于价核子的弥散空间分布，必然使核反应的相互作用几率增大，因此相互作用截面或总反应截面会异常增大。一般情况下，晕核有很小的价核子分离

能、很广的空间弥散、很大的均方根半径、很窄的动量分布和很大的相互作用截面。

自从发现双中子晕核 ^{11}Li ，人们从实验和理论两个方面对晕核进行了大量的研究。

到目前为止，实验上研究晕核的方法主要有以下几种：

(1) 相互作用截面

第一个晕核 ^{11}Li 就是 Tanihata 等人通过测量核反应的相互作用截面发现的，这是寻找晕核最常用的方法之一。通过测量某一束流的原始强度和穿过靶后的强度之比，可以得到相互作用截面 σ_I ，由测得的 σ_I 给出弹核的相互作用半径 $R_I(p)$ ，利用 Glauber 模型可以导出核物质分布和均方根半径^[2]。

(2) 碎裂产物的动量分布

利用碎裂反应测量晕核的核子逃逸截面和碎片动量分布也被广泛应用在晕核研究中^[5,6]。对于晕核散射，测量的碎片动量分布非常窄，核子的逃逸截面很大。测量高能的 ^{11}Li 在C靶上碎裂产生的反应碎片 ^9Li 的横向动量分布^[6]，得到的动量分布远远窄于在稳定核实验中测得的分布宽度，这意味着从 ^{11}Li 中分离出去的两个中子具有很小的动量涨落，从而验证了 ^{11}Li 中的两个价核子具有很大的空间弥散。

(3) 转移反应

传统的表面转移反应也是探索晕核的有效工具^[7-11]。Lewis 等^[7]通过测量转移反应 $^{16}\text{O}(d, n)^{17}\text{F}$ 和 $^{16}\text{O}(d, p)^{17}\text{O}$ 的角分布，与扭曲波玻恩近似(DWBA)理论计算结果比较，抽取了 ^{17}F 最后一个质子和 ^{17}O 最后一个中子的密度分布，得出了 ^{17}F 的第一激发 $(1/2)^+$ 态是质子晕态的结论，其结果与 R. Morlock 等^[8]的实验结果一致。Xu 等^[9]提出了从表面转移反应的角分布抽取价核子束缚态波函数的渐近归一化系数(ANC)的方法，利用实验上抽取的核ANC，计算价核子处于核势外的几率和价

核子密度分布的均方根半径等物理量,根据晕核的判定规律对晕核的候选者考察,确定是否具有晕结构。用这种 ANC 方法证实了 ^8B 是质子晕态^[10], ^{12}B 的第二和第三激发态和 ^{13}C 的第一激发态都是中子晕态^[11]。

(4) 弹性散射

测量弹性散射的角分布是寻找和研究晕核的另一个重要实验方法。Moon 和 Alkhazov 等人^[12,13]用 ^{11}Li 打氢靶,测量了质子与 ^{11}Li 弹性散射的角分布,Karataglidis 等^[14]通过理论模型分析与实验结果的比较,确认了 ^{11}Li 的晕结构。

(5) 熔合反应

研究晕核在熔合反应中的效应也是研究晕核的重要途径^[15,16]。两个核接近时,熔合位垒会阻碍熔合反应的发生,因此位垒越高会导致反应截面越小。晕核的核子有很大的弥散分布,导致熔合位垒降低,垒下的熔合截面增大;另一方面,晕核容易破裂,破裂使入射道流量减小,因而可能会使熔合截面减少。关于晕结构对垒下熔合反应的影响,理论上有两种相互矛盾的观点,实验上尚未定论。

(6) 电四极矩

因为很大的形变也会使核的均方根半径增大,所以仅凭均方根半径的异常增大还不能完全确定晕核的存在。由于形变会导致电四极矩增大,为了排除形变效应,应该测量电四极矩。Arnold 等^[17]测量了 ^{11}Li 的电四极矩,测量值只有 ^9Li 电四极矩的 1.14 倍,从而排除了 ^{11}Li 有大形变的可能,从而确定 ^{11}Li 的晕结构。

通常用来研究核结构和性质的模型是在稳定线附近核素的实验结果和理论研究的基础上建立起来的,适用于稳定核性质的描述,要想推广到实验数据比较少的远离稳定线的丰中子或丰质子的核素以及晕核,还有待进一步的研究和探讨。近十几年来,壳模型、非相对论 Skyrme - Hartree - Fock (SHF) 理论以及相对论