放射性核束物理研究中的一些热点问题*

曹中鑫　叶沿林†

（北京大学物理学院　核物理与核技术国家重点实验室　北京　100871）

摘　要　文章介绍了放射性核束物理的现状和进展，给出了一些目前热点的研究问题和方向，比如垒下融合反应、费米能区和高能区直接核反应、滴线核性质、非稳定核区的新幻数和新的集体运动模式等.

关键词　放射性核束，垒下融合，直接核反应，核幻数

Progress in radioactive nuclear beam physics

CAO Zhong-Xin　YE Yan-Lin†

(*School of Physics and State key laboratory of nuclear Physics and Technology*, *Peking University*, *Beijing* 100871, *China*)

Abstract　We review the current status and progress in the field of radioactive nuclear beam physics, including its key problems and major research directions, such as sub – barrier fusion, direct nuclear reaction at Fermi and high energies, properties of the drip – line nuclei, new nuclear magic numbers, and new collective motion modes.

Keywords　radioactive nuclear beam, sub – barrier fusion, direct nuclear reaction, nuclear magic number

1　引言

自从1896年法国物理学家贝克勒尔发现放射性以来，核物理的研究已经走过了一百多年的历史. 进入21世纪，在核物理基础研究继续蓬勃发展并面临着新的重大突破的同时，核能和核安全在国家核心利益中的地位也愈加显著，核技术的交叉应用方兴未艾. 除自身的前沿发展之外，核物理还关系到许多其他领域的发展，比如粒子物理、原子物理、天体物理、宇宙学、材料科学、能源科学、生命科学等（图1）.

核物理自身发展的前沿主要包括强子物理、放射性核束物理、高温高密度核物质、核天体物理、原子核中的基本相互作用与对称性等. 基于过去几十年实验装置建设和实验研究队伍的基础，我国把放射性核束物理作为核物理发展的主攻方向之一. 为此布局了大科学工程的建设、国家重点基础研究发展计划（“973”）项目等等.

放射性核束物理是指用非稳定的（放射性的）次级束流作为研究手段的核物理. 如图2（a）所示，居于β稳定线附近的天然存在的原子核（图中黑点）只有近300个，传统的核物理知识主要是建立在对这些稳定核研究的基础之上的. 1986年，I. Tanihata等人在美国洛伦兹伯克莱实验室（LBL）利用放射性次级束观察到丰中子核^{11}Li的相互作用截面的反常增大[1]，也就是发现了晕核存在的证据，由此开创了放射性核束物理研究的新时期. 目前，可以在实验室产生和研究的非稳定核达到约2000个（图2（a）中的黄色区域），而理论预言的最后一个核子结合能大于0的放射性核素可以达到约8000个（图2（a）中的紫色线以内区域）. 由于宇宙中比较重的元素产生过程主要是通过恒星内部的远

* 国家重点基础研究发展计划（批准号：2007CB815002，2005CB724800）、国家自然科学基金（批准号：10775003，10221003）资助项目

2008－02－01收到

† 通讯联系人. Email：yeyl@pku.edu.cn

图1　核物理学关联其他众多领域的发展

离稳定线的快速核反应过程(r-过程),因此放射性核束物理又和核天体物理密切相关. 如图2(b)示例,远离稳定线核结构的知识对解释宇宙中的元素丰度有至关重要的作用. 另外,在新的广大的核素版图中,可以预见会有许多可供应用的核样本. 比如已经发现同核异能素在非稳定核区大量存在,他们很可能提供核能存储和释放的新途径.

远离稳定线核的特征是,价核子的束缚能低,包括连续态在内的多重耦合影响大,同位旋(质子数与中子数的差别)效应显著等等. 在初期的研究中,已经发现晕结构、集团自组织、新幻数、新的集体运动模式、同位旋相变、多反应道耦合、多步转移等奇特现象,这些都涉及对传统核物理的基本认识的改变,因而成为国内外关注的热点[2].

在初期的实验中,由于受到可以提供的束流条件和探测条件的限制,主要是测量总反应截面、动量分布等宏观量,并借助理论模型了解弱束缚奇特核的物质密度分布等宏观形态. 随后,由于束流强度和品质的提高以及探测手段的改进,有可能开展各种产物的角分布测量,从而可以利用弹性散射、库伦激发、破碎反应、转移反应等选择性更强的手段研究奇特核的内部结构和量子态关联,认识规律,发展新的理论[3-5]. 为此,各国的相关实验室都在发展新型的探测装置,其主要特点是大立体角覆盖,能量、动量、位置分辨率高,多粒子关联测量等. 与此同时,典型的衰变谱学测量也在奇特核结构的研究中发挥特殊的作用. 远离稳定线奇特核的衰变有与稳定核不同的特征,通常优先发生β衰变并释放出很大的衰变能,从而容易到达子核的高激发态,这提供了研究不稳定核高激发能级的新途径. 实验上,需要采用多粒子(γ,β,α,p,n等)关联技术以跟踪不同激发范围的能态. 与此同时,反应和衰变结合(比如在束γ)的测量也正在发展,并在确认量子态分布中发挥独特

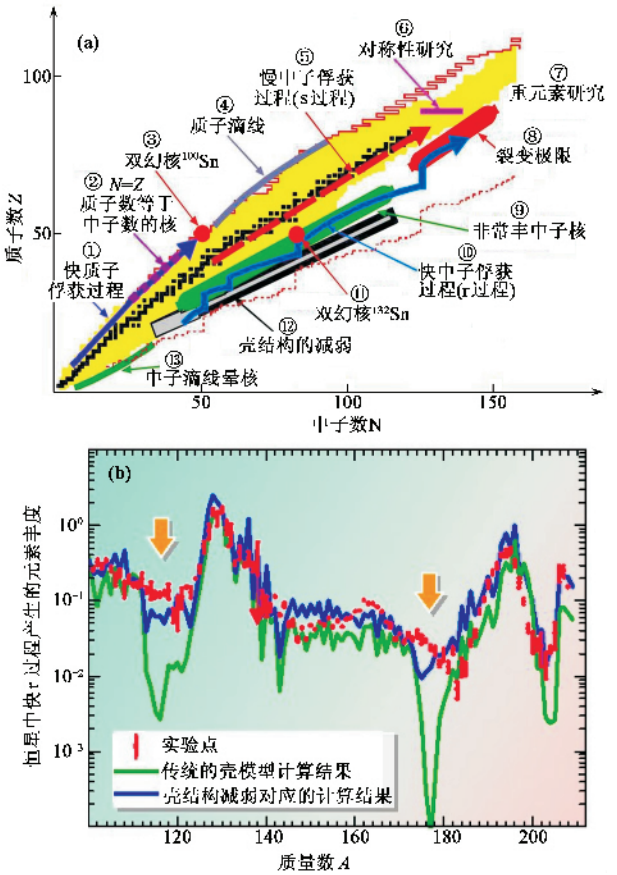

图2　(a)放射性核素在质子数Z和中子数N平面上的分布:黑点为稳定核;黄色区域是目前人工方法可以产生的放射性核素;紫色线以内是理论预言的最后一个核子结合能大于0的放射性核素分布范围,该范围的边沿就是中子滴线和质子滴线. 标号①等引出重要物理问题;(b)恒星中快速核反应过程(r-过程)产生的元素丰度随核质量数A的分布. 红点是实验点,绿线是传统的核结构模型给出的计算结果,蓝线是利用远离稳定线核物理模型修正之后的计算结果

作用. 但不论国外还是国内,目前奇特核的实验研究都还在初级阶段. 随着束流条件和探测设备的改进,今后实验研究会逐步扩展和深入. 随着实验的进展,理论上也面临许多新问题,比如少体关联和平均场的结合,连续谱的贡献,形变与对关联的自洽处理,激发态和共振态的综合处理,核反应中的多反应道耦合,多步过程描写等.

我国过去十几年间,在兰州重离子加速器国家实验室和北京串列静电加速器国家实验室建成了RIBLL和GIRAFFE放射性束流线,目前兰州的大科学工程CSR开始投入使用,北京的大科学工程BRIF正在兴建,将为放射性核束物理和核天体物理研究提供前所未有的基础条件和机遇.

本文简述当前放射性核束物理研究的一些关键热点问题. 与英语里的用法类似,我们这里说的放射

性核、非稳定核、弱束缚核等具有相近的含义.

2 轻奇特核结构和反应机制研究

弱束缚核奇特结构的研究可以认为是从总反应截面(或相互作用截面)的测量中发现反常增大开始的. 随后又开展了核芯碎片纵向动量分布的测量. 通常以截面的增大和纵向动量分布宽度的减小来标志晕核的发现(如图 3). 比如^{11}Li 的均方根半径可以大到和^{208}Pb 的差不多. 核物质分布的晕是由核芯(比如^{11}Li 的核芯^{9}Li)之外的价核子造成的. 通常只有束缚得很浅的 S 波或 P 波,才能给出显著的晕. 比如^{11}Li 的两个价中子处于 $P_{1/2}$态,双中子分离能只有 0.306MeV,比通常的十几个 MeV 的双核子分离能小很多. 正是这种小的分离能和小的离心位垒,使得价核子波函数能够形成扩展的晕分布. 目前比较确定的双中子晕核如^{6}He、^{11}Li、^{14}Be,单中子晕核如^{11}Be,质子晕核如^{8}B 等. 由于晕的存在,原子核的反应截面可以比通常的情况大很多,这在实际应用中非常重要. 同时,在晕区域,由于势能接近总能量,价核子的动能比通常原子核中核子的费米动能小得多,运动速度很慢,因此理论上原来适用于高能的某些简单模型可以近似应用到中低能的周边核反应过程. 然而,由于弱束缚条件下连续态的影响和多步过程的概率增大,实际上从反应截面中提取核的半径有许多不确定性[6]. 从不同实验中用不同方法提取的有关晕核的信息往往差别很大,甚至互相矛盾[7]. 对弱束缚核结构的研究,往往必然与反应机制的研究交织在一起,产生许多复杂的过程和奇特的现象[6].

2.1 近库仑位垒熔合反应

弱束缚核的熔合反应呈现出新的机制和效应,比如作为两步过程的级联完全熔合(图 4 中的 SCF 过程)可以变得非常重要[3]. 实验上观察到弱束核熔合反应截面在一定条件下有很强的增强效应,比如^{6}He + ^{209}Bi,^{6}He + ^{206}Pb 等系统在垒下能区观察到相对于^{4}He 的显著的熔合截面增强效应. 这种效应后来被认为是由两步过程引起的[8]:丰中子核^{6}He 的两个价中子先与靶核熔合(中子流),释放出的能量对核芯^{4}He 有加速作用,从而造成第二步^{4}He 与靶核的熔合在更高的有效能量下进行,截面就大得多. 但对^{6}He + ^{238}U 系统,比较精细的实验发现,完全熔合反应截面相对于稳定核的熔合没有明显的增强[3]. 最近的实验发现,在深垒下能区,丰中子 Ni 同位素的熔合截面还有压低的现象. 可见弱束缚核的熔合反应依赖于具体的量子过程,需要具体分析. 特别是弱束缚核的破裂反应的截面特别大,对熔合反应的耦合影响也很大,从理论和实验结合的角度来认识破裂反应与熔合反应的耦合特别重要. 由于熔合反应在超重核合成和许多其他方向有应用价值,深入理解弱束缚核熔合反应截面增强问题是十分必要的. 与垒下熔合反应相联系的是光学势反常. 通常由于熔合截面在垒下很小,稳定核的光学势的虚部在能量很低时趋于 0. 对于非稳定的弱束缚核,光学势的虚部在低能下却出现反常增大现象[3]. 这可能也是由于很大的破裂反应截面造成的. 光学势是研究各种复杂反应的基础,光学势的反常会引起许多关联效应. 目前对弱束缚核光学势的实验研究还十分缺乏. 中国原子能科学研究院的科学家近年来也开展了一系列弱束缚核的垒下熔合反应和光学势反常的研究,如^{6}Li + ^{208}Pb,^{32}S + ^{90}Zr(或^{96}Zr)等系统,取得了重要成果[10].

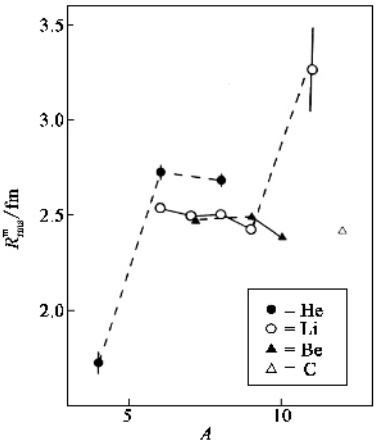

图 3 1985 年,Tanihata 等观察到^{11}Li 半径反常增大[1]. 图中纵轴表示均方根半径,横轴表示质量数 A

2.2 直接核反应

直接核反应在这里指费米能区和高能区的势弹性散射(elastic scattering)、破裂和敲出反应(break-up and knockout reaction)、转移反应(transfer reaction).

2.2.1 弱束缚核的弹性散射

弱束缚核的弹性散射携带了核表面弥散的信息,与连续态(破裂反应)有比较强的耦合. 从弹性散射中提取的光学势本身体现两个核之间整体相互作用,同时又是处理其他反应道时必不可少的输入

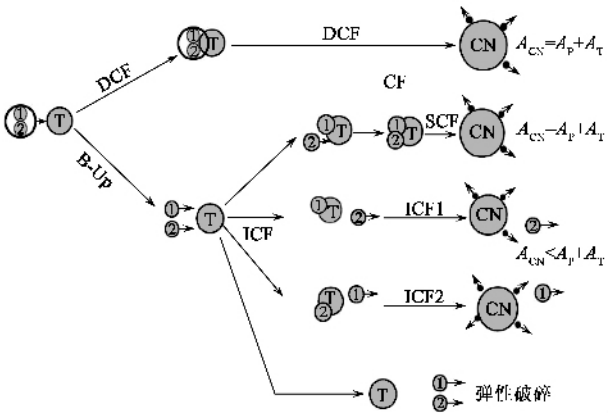

图4　弱束缚核的融合反应机制[3]（DCF 为直接完全融合，SCF 为级联完全融合，ICF 为非完全融合）

量，因此具有基础地位. 弱束缚核弹性散射的典型例子如在法国 GANIL 开展的^{6}He + ^{12}C 在每核子 38MeV 下的实验[9]，发现了破裂道耦合的影响是重要的. 理论处理可以唯象地引入所谓动力学极化势（dynamic polarization potential），也可以采用更复杂的连续态分离耦合道（CDCC）分析. 北京大学组在日本理化学所开展的实验中，获得了每核子 25MeV 下晕核^{6}He 在^{9}Be 上的散射的光学势[11].

2.2.2　弱束缚核的破裂和敲出反应

弱束缚核的破裂和敲出反应有与弹性散射相当的截面，可以在弱束流条件下得到比较高的统计量. 破裂和敲出反应往往引起级联过程，即弹核在第一步破裂之后，核芯碎片处于共振态，随后发生第二步的粒子衰变. 这样的破裂称为级联破裂或共振破裂[12].

为了理论上处理的方便，破裂和敲出反应实验通常选取在每核子 50MeV 以上能区. 破裂反应时弹核受到的作用较小，产物集中在前角区，特别适合用于直接观察弹核的基态和激发态集团结构. 当靶较轻时（比如 C 靶），主要是核力的作用，对应于核衍射破裂；当靶较重时（比如 Pb 靶），主要是库仑相互作用，对应于库仑（电磁）破裂. 文献[13]给出了典型的核衍射破裂测量，得到了 Be 同位素的各种集团破裂的截面[10,12,14]. 文献[14]给出了典型的^{11}Be 库仑破裂测量. 通过衰变产物的精确测量，重建^{11}Be 共振态. 再通过比较准确的电磁激发理论计算，推知^{11}Be 的基态结构. 敲出反应时，弹核的一部分（比如价核子）与靶核（通常是结构简单的轻核，如质子、^{12}C 等）发生剧烈碰撞，被靶核吸收（削裂）或者被散射到大角度区；其余部分受影响比较小，从前角度区飞出（如图 5 所示）. 敲出反应实验选在 50MeV 以上能区，特点是相互作用时间短，理论处理可采用近似（sudden approximation）和 Glauber 近似等. 敲出反应适合于观察价核子的特殊量子态结构. 如文献[15]利用敲出反应确定了^{11}Be 基态价中子处于 $2S_{1/2}$态的概率以及^{10}Be 核芯处于 2^{+} 激发态的概率. 最近在 GANIL，研究人员又利用敲出反应研究了^{12}Be 的中子组态，发现了中子数 $N=8$ 幻数的破坏. 高能下的敲出反应有许多优点，如直接得到基态信息，理论处理简单等. 通过与反冲靶粒子的关联测量，可以确定发生碰撞的（参与者）是弹核的核芯还是弹核的价核子，从而挑选出旁观者来分析它在弹核中原来的状况. 对于有多种集团结构（如^{8}He）的情况，这种挑选更加重要[16]，比如避免了原来分析碎片动量分布时多种成分混合的情况. 破裂反应和敲出反应要求精确测量带电碎片和价核子的能量动量，在级联衰变时，还要精确测定衰变粒子之间的夹角，从而保证重建的激发能谱的精确度. 根据具体的实验设置需要事先做详细的模拟计算以确定测量精度的具体要求. 带电碎片的测量一般需要磁谱仪或很高精度的带电粒子望远镜，粒子角度（位置）的测量通常要用到硅微条，多丝正比室等. 中子的测量通常需要用到飞行时间法. 多个中子在很小的立体角范围内同时进入探测系统的情况难以测定，是当前世界上各相关实验室主攻的技术难题之一.

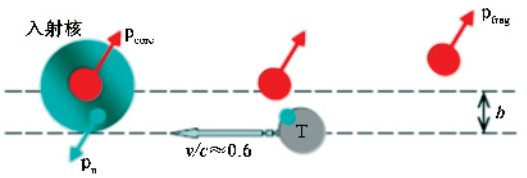

图5　敲出反应示意图：入射核（projectile）撞击靶核（T）后价中子（n）被敲掉，剩余的核心碎片（core，frag.）沿前向飞出. b 是碰撞参数

2.2.3　转移反应

由于初末态都是两体系统，相对于破裂反应而言，转移反应在理论上有比较严格的描写，因而适合于具体观察弹核和靶核之间量子态的关联，实现量子态操作. 但转移反应的截面通常很小，单核子转移截面一般在 1—10mb/sr，双核子转移还要小一、两个量级. 这就要求束流强度要达到每秒 10^{5} 粒子以上，才能得到比较好的结果. 弱束缚核的转移反应有新的特点，就是多量子态（包括连续态）的耦合比较强烈，比较容易发生多步过程等. 这增加了理论描写和程序计算的困难，但也因此使得研究内容更加丰富. 转移反应发生的合适能区通常是 10—30

MeV/u，这是与稳定核中表面核子的费米能相当的[17]. 但弱束缚的表面势弥散，处于表面的核子动能很低，因此发生转移反应的有利能区也会低一些. 目前轻奇特核^{6}He 等已经有了一些转移反应测量，结合理论工作，揭示了^{6}He 中的 2 个价中子有 80% 以上概率是配对相处的(di-neutron)[17]. 最近，文献[18]从理论上分析了在核芯提供的核物质表面密度下降到中心密度的约 0.5 倍时，^{11}Li 的 2 个价中子倾向于在位置上靠近形成 BEC 对. 类似问题在轻

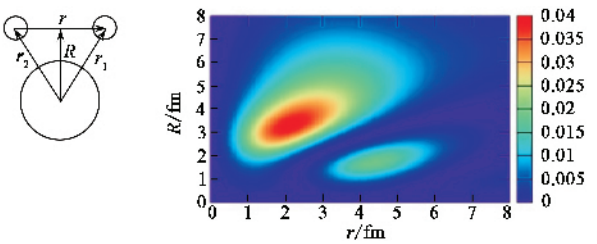

图 6 ^{11}Li 双粒子波函数的二维图显示. r 为 2 个中子间距离，R 为它们的质心到核心的距离. 图中主峰表示 2 个中子构成双中子团(di-neutron)的结构[18]

奇特核的研究中特别重要.

过去几年，中国科学院近代物理研究所、上海应用物理所、中国原子能科学研究院、北京大学等课题组，在费米能区开展了一系列的直接核反应实验，在^{27}P，^{12}B，^{13}C，^{6}Li，^{6}He，^{8}He 等奇特核的结构研究中做出了贡献[19].

3 滴线核、新幻数和新的集体运动研究

3.1 滴线核的研究

在滴线附近，各种理论模型对核结构的预言发生很大的偏差，因此实验测量滴线核的性质对检验和发展核结构理论特别重要. 另外，滴线附近核的共振态特别丰富，有利于研究束缚态和正能态的关联[20]. 目前中子滴线已经确定到氧同位素，以及发现了束缚的丰中子核如^{31}F，^{34}Ne，^{37}Na，^{38}Mg 等. 未来每核子几百 MeV 的强流装置将把丰中子滴线核的产生推进到 Ni 附近区域.

对滴线核的性质研究主要通过破裂和衰变测量. 典型的如^{11}Li 的研究[21]，通过核芯带电碎片和衰变中子的符合测量，重建共振态. 再通过理论计算推知基态价核子的量子组态. 这方面进一步的工作如^{26}O，^{33}F，^{36}Ne，^{39}Na，^{40}Mg 等的双中子衰变测量. 还有一个重要的研究方法，就是 β 延迟中子衰变测量. 很丰中子的核首先发生 β 衰变，由于衰变能很高，子核有很大概率处于高激发的粒子不稳定状态，可以接着发射中子. 实验中，将母核放射性束流注入到衰变靶中，靶本身又作为 β 粒子探测器. 靶周围安放中子探测器，通常用中子的飞行时间确定能谱. 这样可以研究母核、子核的结构，特别是子核的高激发态结构. 国际上 MSU，GANIL，RIKEN 等都在开展这种类型的实验. 北京大学组也独立建立了自己的中子球装置，开展了 N 的丰中子同位素链的研究[22].

质子滴线已经建立到 $Z=28$ 以及 $Z=29$ 至 82 之间的部分同位素. 由于库仑位垒的阻挡，滴线之外存在大量非束缚的激发态，其寿命远大于粒子穿越的时间(100ns 量级). 单质子和双质子发射是研究质子滴线核的重要途径，也包括 β 延迟质子发射. 目前研究比较多的双质子发射体如：^{45}Fe，^{48}Ni，^{54}Zn 等，他们的束流强度在每秒 0.1 到 10 个左右. 单质子发射体已经大量观察到，特别是在 $Z=51$—83 区间. 双质子发射体目前观察到的有^{45}Fe，^{48}Ni，^{54}Zn，其他候选的有^{64}Se，^{67}Kr，^{71}Sr 等. 中国科学院近代物理研究所在稀土区合成了一批质子滴线核，为滴线区核物理研究做出了重要贡献[23].

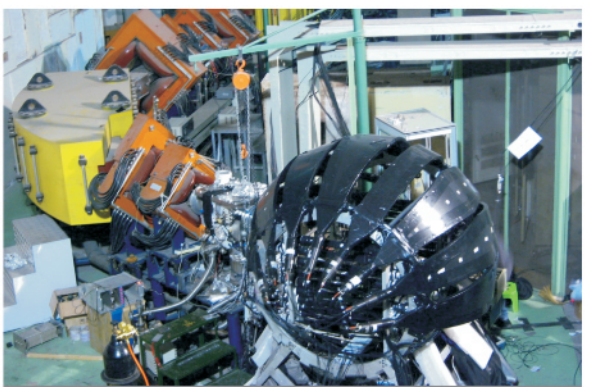

图 7 北京大学组研制的中子球装置在兰州的放射性束流(HIRFL－RIBLL)上开展实验测量

3.2 新幻数

原子核的壳结构和相应的幻数体现了原子核的最基本性质之一 独立粒子运动特性. 然而在稳定线附近有明确意义的幻数，在远离稳定线的地方却发现可以发生很大的变化. 比如在丰中子区，$N=20$ 的幻数可能移动到 $N=16$ 或 14. $N=28$ 的幻数可能移动到 32 等等. 这些变化与中子－质子相互作用有关，也就是与同位旋相关的核子之间的耦合有关[25]. 幻数移动的证据首先来自质量测量[24]. 单中子分离能通常是在幻数附近发生起伏变化. 对于稳定线附近的原子核，这种变化发生在 $N=8$，20，28

等通常的幻数位置. 但随着同位旋增加,$N = 8$ 的附近这种变化倾向于消失,而 $N = 20$ 附近的这种变化移动到 $N = 16$ 附近,这被认为是幻数在丰中子区的变化. 研究幻数的另一个重要方法是观察偶偶核的 0^+ 到 2^+ 态的跃迁[25]. 在幻数附近,跃迁能量特别高而跃迁概率 B 特别低. 在 β 稳定线附近,这种观测已经比较完整,但在远离稳定线的区域则还很缺乏. 许多核衰变和核反应的手段均可用于观察 0^+ 到 2^+ 的跃迁,如 β 衰变、γ 衰变、质子非弹散射、库仑激发等. 典型的如最近在 GANIL,研究人员通过在束 γ 测量,观察 $N = 28$ 中子幻数随着质子数的减少而逐渐消失的情况[26].

3.3 新的集体运动

在非稳定核中,发现了一些新的集体运动模式. 比如软偶极共振(pygmy dipole resonance),被认为是价中子相对于核芯的运动[27],可用于研究同位旋相关的有效核子相互作用和同位旋相关的核物质性质等. 在远离稳定线区域,原子核的形变和集体运动以及相变和对称性等,也有非常丰富的表现. 由于涉及比较重的原子核,放射性束的产生还十分困难,所以这些研究才刚刚开始[20].

4 结束语

放射性核束物理研究是对广阔的核科学未知领域的探索,正在极大地改变人们对原子核的传统认识. 由于产生放射性束的能力的限制,目前研究还比较集中在轻核和部分中重核区. 随着第二代、第三代放射性束大科学装置的发展,研究的领域将逐步扩大,观察到的新现象会逐步增加. 与此同时,超重核合成和鉴别,天体物理和大尺度核物质状态的许多重要问题,都需要非稳定核的结构和反应作为支撑. 放射性核束物理还涉及众多新的核样本和核数据,将在新型核材料、新型核能装置等方面产生难以估量的影响.

本文主要关注实验方面. 实际上,远离稳定线核结构理论在过去几年也有很大的进展[28]. 基于 QCD 的有效场论(EFT)运用于核结构的计算和基于第一原理的蒙特卡罗计算,目前已经可以算到 12 个核子左右[29]. 而壳模型、平均场理论、少体理论、形变和核的对称性理论等,也有很大发展[20,28]. 目前涉及多体问题的核反应理论相对更欠缺,但估计未来几年会有大的进展[30].

致谢 作者感谢中国原子能科学研究院柳卫平研究员,中国科学院近代物理研究所张玉虎、周小红研究员,中国科学院上海应用物理研究所马余刚研究员提供的相关资料.

参 考 文 献

[1] Tanihata I *et al*. Phys. Rev. Lett., 1985, 55:2676
[2] NuPECC Long Range Plan 2004. http://www.nupecc.org/lrp02/longrangeplan2004:pdf. Opportunities in Nuclear Science: A Long Range Plan for the Next Decade. The DOE/NSF Science Advisory Committee, April 2002.
[3] Canto L F *et al*. Physics Reports, 2006, 424:1
[4] Oertzen W V *et al*. Physics Reports, 2006, 432:43
[5] Epelbaum E. Progress in Particle and Nuclear Physics, 2006, 57:654;
[6] Thompson I J. Nuclear Physics A, 2002, 701:7c
[7] Korsheninnikov A A. Nuclear Physics A, 2005, 751:501c
[8] Penionzhkevich Y E *et al*. Phys. Rev. Lett., 2006, 96:162701
[9] Lapoux V *et al*. Phys. Rev. C, 2002, 66:034608
[10] Wu Y W *et al*. Phys. Rev. C, 2003, 68:044605; Lin C Jet *al*. Phys. Rev. C, 2001, 63:064606.
[11] Ye Y *et al*. Phys. Rev. C, 2005, 71:014604
[12] Chatterjee R. Fragmentation of Light Drip Line Nuclei. Ph. D Thesis of Jadavpur University, 2003; Fletcher N R *et al*. Phys. Rev. C, 2003, 68:024316
[13] Ashwood N I *et al*. Phys. Lett. B, 2004, 580:129
[14] Palit R *et al*. Phys. Rev., 2003, C68:034318
[15] Aumann T *et al*. Phys. Rev. Lett., 2000, 84:35
[16] Chulkov L V *et al*. Nucl Phys A, 2005, 759:43
[17] Oganessian Y T *et al*. Phys. Rev. C, 1999, 60:044605; Khoa D K. Phys. Lett. B, 2004, 595:193
[18] Hagino K *et al*. Phys. Rev. Lett., 2007, 99:022506
[19] Cai X Z *et al*. Phys. Rev. C, 2002, 65:024610; Lin C J *et al*. Phys. Rev. C, 2002, 66:067302; Liu Z H *et al*. Phys. Rev. C, 2004, 69:034326; Liu Z H *et al*. Phys. Rev. C, 2001, 64:034312; Ye Y L *et al*. J. Phys. G, 2005, 31:1647
[20] Casten R F. Nuclear Structure -Current Directions and Future Opportunities. 2007 Town Meetings for NSAC Long Range Plan. January 19—21, Chicago
[21] Nakamura T *et al*. Phys. Rev. Lett., 2006, 96:252502
[22] Lou J L *et al*. Phys. Rev. C, 2007, 75:057302
[23] Xu S W *et al*. Phys. Rev. C, 2005, 71:054318 and references therein
[24] Ozawa A *et al*. Phys. Rev. Lett., 2000, 84:5493
[25] Otsuka T. Nucl. Phys A, 2003, 722:347c-353c
[26] Bastin B. Phys. Rev. Lett., 2007, 99:022503
[27] Klimkiewicz A. Nucl. Phys. A, 2007, 788:145c
[28] Nazarewicz W. Theoretical challenges in the physics of nuclei. 2007 Town Meetings for NSAC Long Range Plan. January 19-21, Chicago

[29] Navra P. Phys. Rev. Lett., 2007, 99:042501; Richter A. Nucl. Phys. A, 2005, 751 3c

[30] Thompson I. Challenges in Nuclear Reaction Theory. 2007 Town Meetings for NSAC Long Range Plan. January 19—21, Chicago

作者简介

叶沿林,男,北京大学物理学院教授,博士生导师,国家重点基础研究发展计划项目"放射性核束物理与核天体物理"(2007—2012)首席科学家,"核物理与核技术国家重点实验室"主任、国家精品课程"核物理与粒子物理导论"主持和主讲人、中国核物理学会副理事长、北京物理学会理事长、北京正负电子对撞机国家实验室和兰州重离子加速器国家实验室学术委员会委员、中日核物理合作委员会中方组长. 早期主要从事中能极化氘弹性散射等的实验研究,取得了有重要国际影响的研究成果. 自 2000 年以来,主持国家重点基础研究发展计划项目"放射性核束物理与核天体物理"中的"丰中子核结构和核反应"课题,发展了一批关键实验装置,在通过直接核反应和 β 延迟中子衰变研究非稳定核结构方面取得重要成果,2006 年底获教育部自然科学一等奖(排名第一). 主持建立了较大规模的探测器实验室,研制了高水平的大体积 BGO 高能伽玛探测器、位置灵敏半导体望远镜系统、大型中子球装置、低压多丝正比室等. 在建设高能物理实验装置的国际大科学合作中,承担国家重大国际合作项目任务并圆满完成. 发表论文 130 多篇,SCI 引用 350 余次.

· 书评和书讯 ·

科学出版社物理类重点书推荐

书名	作(译)者	书名	作(译)者
半导体自旋电子学	夏建白 等	路径积分与量子物理导引	侯伯元 等
全息干涉计量 – 原理和方法	熊秉衡	技术磁学	钟文定
狭义相对论(第二版)	刘辽 等	量子信息物理原理	张永德
经典黑洞与量子黑洞	王永久	量子力学	张永德
量子非阿贝尔规范场论	曹昌祺	晶体振荡器	赵声衡
普朗特流体力学基础(翻译)	H. 欧特尔 等	凝聚态物理的格林函数理论	王怀玉
冲击相变	唐志平	惯性聚变物理	沈百飞
液晶物理学(影印)	P. G. de Gennes	激光的衍射及热作用计算(修订版)	李俊昌
临界现象理论(影印)	J. J. Binney	微纳米 MOS 器件失效机理与可靠性理论	郝跃、刘红侠
软凝聚态物质(影印)	Richard A. L. Jones	量子统计力学 (第二版)	张先蔚
量子力学原理(第四版)(影印)	P. A. M. Dirac	输运理论(第二版)	黄祖洽
基本粒子物理学的规范理论(影印)	T. P. Cheng	聚变能及其应用	邱励俭
介观物理导论(第二版)(影印)	Y. Imry	拉曼 布里渊散射(第二版)	程光煦
纳米薄膜分析基础(影印)	T. L. Alford	现代物理学前沿选讲	黄祖洽
统计力学(第二版)(影印)	F. Schwabl	半导体的检测与分析(第二版)	许振嘉
磁性量子理论 – 材料的磁学性能(第三版)(影印)	R. M. White	薄膜结构 X 射线表征	麦振洪等
半导体物理电子学(第二版)(影印)	Sheng S. Li	d 波超导体	向涛
碳纳米管 – 从基础到应用(影印)	A. Loiseau	薄膜材料 – 应力、缺陷的形成和表面演化	卢磊
仿真影像学技术	罗立民、舒华忠	激光光散射谱学	张明生
晶体物理学基础(第二版)	陈纲 等	热力学与统计物理	欧阳容百
引力与时空(翻译)	向守平、冯珑珑	量子力学(卷 I,卷 II)(第四版)	曾谨言
亚稳金属材料	胡壮麒	拉曼光谱学与低维纳米半导体	张树霖
高等原子分子物理学(第二版)	徐克尊	行星科学	胡中为、徐伟彪

购书与咨询电子信箱:mlhukai@ yahoo. com. cn dpyan@ sina. com