

文章编号: 1007-4627(2010)04-0390-09

利用中高能破碎和敲出反应研究非稳定核结构^{*}

叶沿林, FAISAL Jamil-Qureshi, 楼建玲, 葛愉成, 吕林辉,

曹中鑫, 肖军, 李奇特, 陈天逸, 杨帆

(1 北京大学物理学院和核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871)

摘要: 中高能区的破碎和敲出反应, 由于机制相对简单、对核的表面敏感、理论处理比较成熟等原因, 在非稳定核的晕结构、壳移动等奇特性质研究中发挥了独到作用。针对次级束流强度较弱、能散较大等特点, 实验上发展和应用了逆运动学有效立体角完全测量、轻重靶结合、高精度消色差磁谱仪、前向中子谱仪、在束 γ 测量等技术手段, 大大提升了实验的探测能力和选择性。从物理问题探索和实验路线演变的角度, 回顾了非稳定核破碎和敲出反应的发展过程与启示, 并探讨未来的走向。

关键词: 破碎反应; 非稳定核; 核结构; 反应机制; 核探测技术

中图分类号: O571.42 **文献标识码:** A

1 引言

非稳定核结构、反应和衰变的研究是近 20 年来核物理发展的主流前沿方向之一(通常称为放射性核束物理)。由于非稳定核的奇特性质, 通常由其表面弱束缚价核子的分布和运动形式来体现, 因此对核表面敏感并且机制相对清楚的直接核反应, 就成为研究非稳定核结构的重要和有效的手段^[1]。

在中高能区(约大于 50 MeV/u), 直接核反应主要包括破碎和敲出反应。较高的入射能量在实验上有若干优点, 如可以采用逆运动学在很小立体角范围做完完整测量, 可以采用厚靶, 反应截面较大等。这使得在每秒几个粒子以上的流强条件下, 就可以得到相当好的有效事件统计量。另外, 较高能量下适用的理论模型相对简单, 便于进行定量的谱学研究^[2]。

广义而言, 敲出反应也是破碎反应的一种。不同文献中对破碎反应的分类有不同的表述。大体上分为两大类: 弹性破碎(elastic breakup)和非弹破碎(inelastic breakup)。弹性破碎又称为衍射破碎或衍射裂解(diffractive breakup or diffractive dissociation), 也有的称为非弹激发(inelastic excitation), 其含义就是弹核的各个部分分别与靶核发生弹性作

用而破碎开来。弹性破碎又可根据作用力的不同分为核破碎(nuclear breakup)和库仑激发(Coulomb excitation)。非弹破碎往往又称为削裂反应(striping)或敲出反应(knockout)或吸收反应(absorption), 是指弹核的某些部分与靶核发生剧烈作用, 被直接敲出或被吸收的过程。此时靶核的其他部分被近似看作不参与作用的旁观者(spectator), 携带原有的弹核内部结构的信息从前角度飞出。非弹破碎又可以分为直接破碎(direct breakup)和级联破碎(sequential breakup), 前者是指在靶核作用下弹核突然破碎(sudden breakup)的过程, 而后者是指旁观者处于共振态(正能态)飞出靶区, 随后再衰变的过程。实验一般采用较轻的靶(H, Be 和 C 靶等)来突出非弹破碎(敲出反应)和核衍射破碎的过程, 而用重靶(Pb、Au 靶等)来突出库仑激发。

本文从实验路线的历史发展和认识物理问题的角度, 介绍破碎和敲出反应在非稳定核结构研究中的作用, 并指出当前和今后破碎和敲出反应可以应用的方面和需要改进的条件。

2 放射性核束产生之前的破碎反应

原子核的破碎反应研究开始于 1935 年奥本海

* 收稿日期: 2010-02-12; 修改日期: 2010-04-01

* 基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2007CB815002); 国家自然科学基金资助项目(10775003, 10827505, 10821140159, 10905002, J0730316)

作者简介: 叶沿林(1955—), 男(汉族), 四川富顺人, 教授, 博士生导师, 从事核物理研究; E-mail: yeyl@pku.edu.cn

默关于氘原子核在库仑场中破碎率的计算^[3]，这也是最早提出的库仑激发的概念和理论处理。实际上，氘正好是最轻的弱束缚核和晕核，它的束缚能只有 2.14 MeV，而且大部分波函数(空间分布概率)扩展到相互作用范围之外，因此破碎反应截面很大。1947 年，Serber 提出了氘核的削裂反应的概念，并基于突然破碎近似(sudden approximation)，计算了反应截面、出射中子(或质子)的动量分布等，这就是后来广为应用的破碎反应的 Serber 模型^[4]。该模型认为氘核的一部分(质子或中子)被靶核敲出或吸收，剩余的部分(中子或质子)基本不受影响，只是一个旁观者(spectator)，带着原来在弹核(氘核)中费米运动的特征从前角度飞出，其动量分布体现了原来在弹核内部的费米动量特征，也就是波函数的傅里叶变换。显然，Serber 模型只适用于入射能量较高的情况。

20 世纪 70 年代，随着国际上一批重离子加速器投入使用，重离子核反应成为当时核物理研究的前沿。在高压下的重离子破碎(敲出)反应表明，碎片集中在前向发射；碎片的动量分布与靶核的轻重无关，基本上是直接反映了弹核内部被敲出核子的费米运动^[5]，这与 Serber 模型描写的氘核削裂反应在机制上是一致的。另外，重核的破碎反应可以产生一系列的同位素，它们的每核子动量与弹核的基本相同^[6]。

3 放射性核束的产生和初期的破碎反应实验

放射性核次级束流的产生和应用是从 1985 年 Tanihata 等在美国 LBL 的实验开始的^[7]。该实验利用 800 MeV/u 的¹¹B 初级束轰击 Be 靶，产生氦的系列同位素³He, ⁴He, ⁶He 和⁸He 的次级束流。经过磁分析选择的次级束再轰击 Be, C 和 Al 等靶，用 HISS 零度谱仪测量相互作用截面，并用直接的几何关系导出弹核的相互作用半径 R_1 。对 Li 和 Be 的同位素(^{6-9, 11}Li, ^{7, 9, 10}Be)也进行了类似的实验，并用 Glauber 模型提取了弹核的物质分布均方根半径 R_{rms} 。实验观察到丰中子^{6, 8}He 和¹¹Li 同位素的 R_{rms} 反常增大，远超出核半径按 $A^{1/3}$ 增长的规律^[8]，从而引发了对非稳定核奇特结构的研究热潮。

随后，受到重离子敲出反应中碎片动量分布直接反映了被敲出的价核子在原来母核中的动量分布

的启发^[5]，Kabayashi 等人测量了非稳定奇特核¹¹Li 等在高能敲出反应之后的核芯碎片(⁹Li 等)的横向动量分布 P_{\perp} ，发现其主要成分是一个很窄的高斯峰，其约化宽度 σ_0 只有 17 MeV/c，而一般稳定原子核的 σ_0 在 80 MeV/c 左右^[9]。这意味着被敲出的价中子的动量分布很窄，按照测不准关系其相应的波函数空间分布就特别宽，也就是有很长的中子分布“尾巴”。作者据此提出了中子晕的概念(a large neutron halo)。随后，¹¹Li 在重靶(Pb 靶)上的移去两个中子的破碎反应实验给出了很大的电磁裂解(EMD)截面，理论上不能用正常的激发到很高正能量(十几个 MeV 以上)的偶极巨共振(GDR)来解释，而必须大大降低巨共振的激发能量(到 1 MeV 左右)，从而提出了软巨共振(soft GDR)的概念，这是指¹¹Li 外围价中子相对于核芯整体的振动^[10]。假定非稳定核具有大小基本不变的核芯加外围价核子的结构，利用 Glauber 模型对相互作用截面的分析，可以分别提取电荷分布半径和中子分布半径，从而得出中子皮或质子皮的厚度^[11]。

这一时期，实验工作主要集中在美国 LBL，采用的实验手段还比较初级，基本上是直接使用重离子核反应的设备。观察量集中在零度出射的碎片数目及其横向动量分布。选择横向动量分布的原因，主要是入射的放射性核束本身的纵向动量展宽很大(百分之几)，掩盖了核内费米运动造成的动量分布展宽，而横向动量分布受入射束的影响就比较小。这一时期最重要的就是发现了⁶He, ¹¹Li, ¹¹Be, ¹⁴Be 和 ¹⁷B 等晕核，以及观察到软巨共振和轻丰中子核的较厚的中子皮。

4 专用放射性束流线的建设和对非稳定核反应与衰变模式的认识

由于受前述新发现的激励，世界上若干著名核物理实验室在 20 世纪 90 年代初期新建了若干条专用的放射性束流线，如在美国 NSCL 建成了 A1200 束流线^[12]，在德国 GSI 建成了弹核碎片分离器 FRS^[13]，在日本 RIKEN 建成了 RIPS 束流线^[14]等。在丰中子核的研究中，除了带电碎片之外，增加了对前向发射中子的探测，典型的探测装置如德国 GSI 的 LAND，以及早些时候在欧洲建造的分立式液闪中子探测器 DEMON 和在美国 MSU 建造的液闪中子墙^[15]。中子和带电碎片的符合测量大大推

进了人们对非稳定核碎裂机制的认识。

原则上横向动量分布会受到衍射效应、库仑相互作用和多次散射等的干扰，因此人们对横向动量分布是否可用来分析弹核内部费米运动有所质疑。NSCL 的 Orr 等人采用消色散模式 (dispersion matched mode) 磁谱仪基本消除了次级束流本身的动量展宽效应，从而有效地测量了 ^{11}Li 破碎后核芯碎片 ^9Li 的纵向动量分布 P_{\parallel} ，并证明了纵向动量分布与靶的轻重无关^[16]。消色散磁谱仪由此成为非稳定核破碎反应中一种常用的动量分析手段。

与核芯碎片的动量分布不同，对于 ^6He 等破碎后前向中子的横向动量分布的测量，却发现与弹核直接破碎模型 (Serber 模型) 给出的分布差别很大，实验测量的峰比理论估算的窄得多。由此引发了对使用动量分布推知核内费米运动这一方法是否有效的怀疑。1994 年，Korshennikov 等人对晕核破碎反应可能的几种机制进行了全面的分析^[17]。当 ^6He 在 C 靶上破碎时，传统上认为直接破碎机制为主 (sudden approximation, 见图 1(a))，相当于前述的弹性破碎，可用 Serber 模型描写。在使用 Serber 模

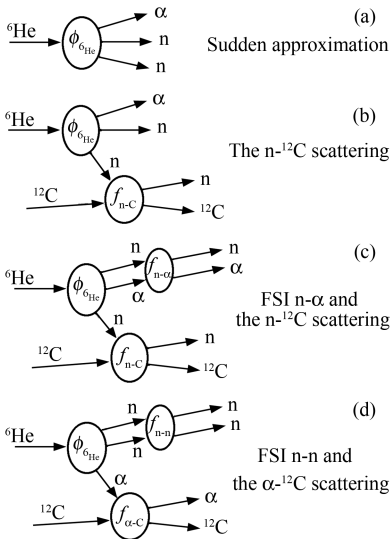


图 1 弹核破碎过程^[17]

(a) 直接破碎 (sudden approximation); (b) 价中子被靶核敲出，旁观者直接破碎; (c) 价中子被靶核敲出，旁观者经共振态 (FSI) 衰变; (d) 核芯碎片被靶核敲出，中子对经末态相互作用 (FSI) 衰变。

型时，要提供价中子的量子态分布。由于 ^6He 的单粒子波函数是很清楚的，因此可很好地用来检验反应机制。图 2 中虚线 1 是 Serber 模型计算的结果，

它与实验结果差得很远。可见直接破碎机制在这里不适用。第 2 种机制 (图 1(b)) 是价中子敲出机制 (非弹破碎)，敲出过程可用 Glauber 模型描写，但需要考虑价中子在弹核中的运动。敲出中子的横向动量分布展得很宽，通常表现为实验测量的动量谱下部的一个很宽的本底，而碎片的后续破碎与第 1 种机制相同，得到的中子动量分布也基本同图 2 中的虚线 1，不能符合实验数据。第 3 种机制是在敲出一个价中子后，剩余的旁观者 ^5He 处于共振态，然后通过末态相互作用 (FSI) 衰变。这里的敲出和共振态衰变是两步过程。衰变中子都是前向发射的，横向动量分布正好重合实验测得的比较窄的峰 (图 2 实线)。这说明 ^6He 和 ^{11}Li 等双价中子晕核 (Borromean 核) 不是按照直接破碎方式出射，而主要是按照两步过程 (敲出 + 衰变) 破碎。第 4 种机制是敲出核芯 α 粒子然后双价中子衰变的过程。这种过程的中子横向动量分布比较接近第 3 种机制的共振态衰变得到的中子分布，但峰的宽度也比实验测得的稍大一些，可见这种机制也不占主导地位。随后对 ^8He 的破碎反应研究，也证明了上述敲出 + 共振态衰变的机制占主导地位^[18]。好在经过这种两步过程之后的核芯碎片动量分布，与直接一步破碎反应的碎片动量分布相差不大，因此原来利用碎片动量分布得出的关于弹核价核子费米运动和波函数分布的概念 (特别是晕核的概念) 仍然是可以成立的。

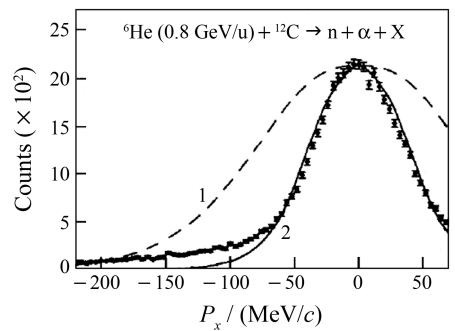


图 2 ^6He 破碎反应的中子横向动量分布

虚线 1 采用 Serber 模型计算得到，实线 2 采用图 1 中的过程 (c) 计算得到，黑点是实验数据。

在较清楚认识晕核破碎机制的基础上，在 GSI 开展了一系列 ^6He 、 ^8He 和 ^{11}Li 等在每核子几百 MeV 能区的破碎反应实验^[19-22]，并做核芯碎片与前向发射中子的符合测量。实验得到许多重要结果，包括：反应机制中除中间共振态衰变之外还有

弹核高激发态衰变的贡献;对移去0个、1个或2个中子截面的分别测量并应用于反应机制的选择;得到 ^5He , ^7He 和 ^{10}Li 等的共振态结构,特别是 $^{7,8}\text{He}$ 中的反常单粒子态结构^[21]。理论上,这一时期普遍采用Glauber模型来描写敲出过程,用末态相互作用来描写旁观者衰变过程^[17, 18, 23]。

这一时期NSCL等实验室的研究表明,对弱束缚核而言,敲出反应机制和Glauber模型的应用在较低能区(20—100 MeV/u)也是有效的^[24, 25],这很可能是因晕区的价核子费米运动速度比通常核子慢得多,因而与弹核碰撞过程中自身的运动更容易被忽略。实验从比较简单的采用零度带电粒子望远镜(同时为active target)^[24],发展到采用靶后磁铁偏转带电粒子并与前向中子做符合测量的办法^[25],大大提高了敲出反应(移去中子反应)的测量精度。

与此同时,在RIKEN、NSCL、GSI等实验室,采用重靶(通常为Pb靶)通过库仑激发到软巨共振态来研究非稳定核(^{11}Li , ^6He 和 ^8He 等)结构的工作也取得许多进展。实验上主要是通过核芯与破碎中子的完全测量,来直接重建弹核在破碎之前的激发能和动量矢量^[20, 22, 25—27]。库仑激发的理论比较成熟,可以把测量的偶极强度函数与弹核的基态结构直接联系起来,还可以定量分析核芯和价核子对相对运动的情况以及两个价核子的相互关联情况。但困难是两个中子符合测量的效率低,串扰(cross talk)信号难以有效排除等,从而造成不同实验的库仑激发测量结果差别较大^[20, 26, 27],而对于两个晕中子关联情况的分析,也与转移反应等其他类型的研究差别很大^[28]。

这一时期,我国在中国原子能科学研究院建成了低能放射性束流线GIRAFFE^[29],在中国科学院近代物理研究所建成了中能放射性束流线RIBLL^[30],并开展了一系列核结构、核反应和核天体物理测量工作。

5 第三代放射性束流线和定量的谱学研究

5.1 纵向动量分布与在束 γ 测量

本世纪以来,随着对较为复杂的非稳定核结构研究的展开,除晕核之外,又陆续观察到壳结构的

反常变化(如新幻数、反转岛)^[31]以及集团和分子态结构在滴线附近加强^[32]等。实验上,破碎反应与在束 γ 测量相结合,逐渐发展为定量研究非稳定核壳结构和集团结构的有效工具。各种结构组合的谱因子的提取,成为这一时期结构研究的标志。

实验手段方面的重要进展,首先是以NSCL的A1900为代表的第三代放射性束流线的投入使用^[33]。它的标志是:次级束的产生紧接在初级加速器之后,有很大的角度和动量接收度,采用超导磁铁增加偏转能力,有很高的传输效率等。NSCL还在A1900之后连接了S800磁谱仪^[34],使得在消色差模式下动量分辨率可以达到0.025%(一般次级束流动量弥散在1%以上)。另外,在比较复杂体系的破碎和敲出反应实验中,发现剩余碎片往往处于各种激发状态,与价核子状态的对应关系不清楚,难于提取价核子的量子态信息。因此,除了带电碎片和中子的测量外,增加在束 γ 测量以区分不同量子态组合成为一项重要手段。在MSU、RIKEN和GSI等都发展了在束 γ 测量,最初主要是考虑库仑激发实验的需要,实际上后来在敲出反应实验中发挥了重要作用。

Hansen等人在文献^[35]中,总结了利用破碎和敲出反应研究非稳定核结构的特点和优点。中高能区破碎反应截面比较大,由于逆反应动力学和厚靶的应用以及逐个事件做径迹测量,实验只需在每秒几个粒子以上的束流强度就可以得到有意义的结果。采用消色散的磁谱仪使得次级束能散大的缺点得以克服,使零度左右发射粒子的纵向动量分布与在束 γ 的关联测量成为直接获得单粒子态谱因子的重要手段,也就是一种量子态操作的精确手段。另外,中高能区的反应理论相对比较简单和准确,通常采用Glauber模型或CDCC计算。

我们以比较简单的单中子晕核 ^{11}Be 为例,简单说明敲出反应的灵敏程度。 ^{11}Be 基态是反常的 $1/2^+$ 态,理论计算和其他各种实验认为这个状态可能来自于 ^{10}Be 核芯的 0^+ 态与价中子 $1s_{1/2}$ 态的耦合,或者 ^{10}Be 核芯的 2^+ 激发态与价中子 $0d_{5/2}$ 态的耦合,但两种成分的比例(谱因子)很不确定。Aumann等^[36]利用NSCL提供的60 MeV/u的 ^{11}Be 次级束打Be靶,用消色差的S800磁谱仪测量 ^{10}Be 碎片的纵向动量分布,在靶周围用位置灵敏闪烁体探测器测量在束 γ 。图3(a)显示多普勒修正的在束

γ 能谱, 图 3(b) 显示对应于基态(没有符合的 γ 光

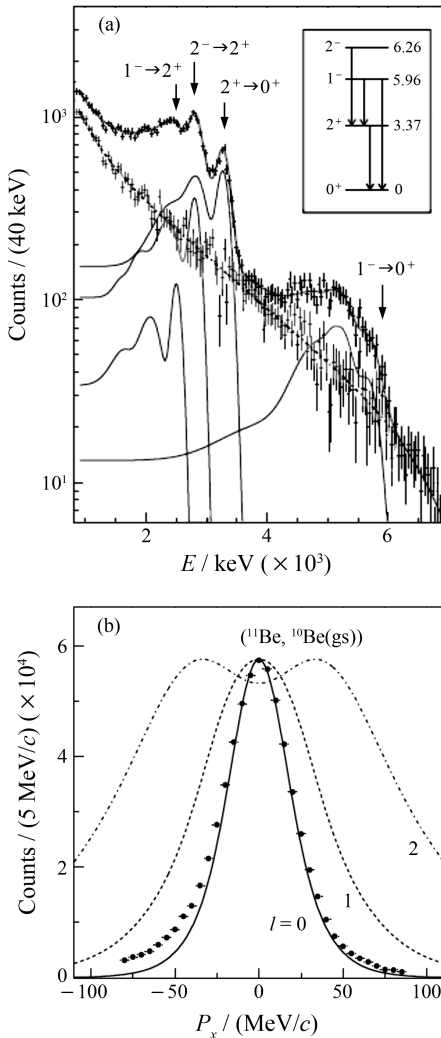


图 3 ${}^9\text{Be}({}^{11}\text{Be}, {}^{10}\text{Be} + \gamma)X$ 反应中测量的 (a) 多普勒修正的 γ 能谱和 (b) 对应于基态的 ${}^{10}\text{Be}$ 的纵向动量分布

子)的 ${}^{10}\text{Be}$ 碎片的纵向动量分布。该动量分布与理论计算的 $l=0$ 态一致, 说明敲出的价中子是 $s_{1/2}$ 态。 ${}^{10}\text{Be}$ 核芯处于 2^+ 态的情况可以通过与之符合的在束 γ 谱开窗选出。从相应的纵向动量分布可推出敲出价核子为 d 态, 从而验证了 ${}^{11}\text{Be}$ 基态中确实存在一定比例的核芯 2^+ 激发态与价中子 $0d_{5/2}$ 态的耦合, 相应的谱因子可从实验截面和理论截面的比较中算出^[35]。

过去 10 年来, 在 NSCL 和 GSI 等实验室开展了一系列类似的实验^[37, 38], 特别是用于确定非稳定核区幻数的改变, 即确定幻数附近单粒子态的组合形式及其谱因子、能量间隙和角动量宇称等; 研究的核区, 也从 sd 壳, 扩展到 pf 壳。实验中, 消色

差的磁谱仪和在束 γ 测量起到关键作用。需要指出的是, 这些测量中的碎片来源, 包括衍射碎裂(σ_{diff})和敲出反应(σ_{str})两种, 也就是图 1 中的 (a) 和 (b)、(c)。两种机制对应的碎片纵向动量分布可视为相同(而横向动量分布就不同), 理论计算通常直接采用波函数的傅里叶变换, 但要考虑靶核的吸收作用(black disk)^[35]。在利用 Glauber 模型计算截面值时, 需要把两种机制相加, 并通过与实验截面的比较抽取谱因子。Glauber 模型中包含了绝热近似(sudden approximation)和 eikonal 近似(straight-line path)。在采用轻靶时, 库仑激发截面可以忽略。而图 1 中的机制(d), 认为核芯碎片被靶核吸收或大角度偏转, 不出现在前向发射碎片中, 因而也被忽略。

敲出反应不仅可以用于探测表面弱束缚价核子的量子态, 也可以用于探知深束缚核子的量子态, 比如从丰中子核中敲出质子或从丰质子核中敲出中子, 从而分析更加接近滴线的类弹碎片以及非对称中子费米面和质子费米面之间的耦合^[37, 39]; 不仅可以敲出一个核子, 也可以敲出两个核子^[35, 39, 40], 以获得更加奇特的结构。但在这些情况下, 靶的效应需要仔细分析, 因为敲出内部或多个核子时, 剩余部分很难再被看作理想的与靶无关的旁观者(绝热近似)。理论上, 谱因子的含义也变得不那么确定, 比如需要较大的淬灭因子(quenching factor)等^[35, 40]。

5.2 重建非束缚态的实验

在没有消色差磁谱仪的情况下, 破碎和敲出反应也可以有效地开展, 但需要恰当地选择反应体系和机制。一个重要的办法, 是用通常的偏转磁铁或零度带电粒子望远镜测量碎片, 此时动量分辨率没有消色差磁谱仪的那么高, 但增加测量前向出射的中子加以补偿。通过碎片和中子重建发射体的激发能谱(或相对运动正能态), 基本上与入射粒子的能量(动量)展宽无关, 这就避开了放射性次级束能散比较大的缺点。在 RIKEN、NSCL 和 GSI 等都发展了这种方法, 可研究的体系和过程包括:

(1) 衍射碎裂过程(图 1(a))。如对 ${}^{11}\text{Be}$ 的另一种方式的研究^[41], 同时测量前向出射的核芯碎片 ${}^{10}\text{Be}$ 和价中子, 重建发射体激发能谱。从实验上选择了衍射过程, 避开了敲出过程。通过与 Glauber

模型计算的 σ_{diff} 比较得到谱因子,并可提取相应的价核子波函数分布和衍射碎裂发生的表面区域及其强度分布。结果的精确度与采用纵向动量分布测量得到的结果^[36]相当。

(2) 库仑激发过程。与(1)的情况类似,但采用重靶,重建出来的是库仑激发谱,对晕核就是软巨共振谱为主^[41, 42]。对于从基态到激发态的库仑激发可以做相对准确的理论计算,因此可比较可靠地从库仑激发能谱中提取入射非稳定核的基态结构信息,甚至包括双中子晕核内部两个价中子关联的信息^[42]。

(3) 共振态衰变过程(图 1(c))。往往适用于 borromean 核以及敲出反应后的高激发核,它们的一个价核子被敲出后,旁观者体系是非束缚态。比如较早时期的对 ${}^7\text{He}$ 的研究^[21],后来的对 ${}^{11}\text{Li}$, ${}^{14}\text{Be}$ 和 ${}^{22-24}\text{O}$ 等的研究^[43]。

在以上研究中,涉及碎片有束缚激发态(核芯激发)的情况时,在束 γ 测量仍然是必要的^[41]。为了准确重建,对入射和出射粒子的径迹(位置)测量要求较高。(1)和(2)项研究往往涉及两个前向中子的关联测量,这对于目前的中子探测系统仍然是比较困难的,主要问题是双中子符合探测效率低,中子串扰(cross talk)不易排除等,因此往往造成不同探测系统给出的结果差别较大^[42]。发展更好的多中子关联测量谱仪是急迫的课题。

敲出反应尽管比较简单,但单举测量时仍然涉及若干种机制(图 1)的混合,需要混合的理论处理来补充,这造成了提取结构信息的不确定性。解决的办法是,针对所要研究的非稳定核结构的特点,选择适当的能区和靶以突出需要采用的反应机制。在有更特殊和更准确的要求时,则需要从实验探测上提升对反应机制的选择。最近,NSCL 的 Bazin 等对丰质子核 ${}^9\text{C}$ 和 ${}^8\text{B}$ 进行了敲出价质子与核芯碎片的符合测量,从而从实验上区分了衍射(图 1(a), σ_{diff})和敲出(图 1(b)和(c), σ_{str})两种机制^[44]。所用的办法是在通常的设置之外,增加了覆盖大角度区($11^\circ-60^\circ$)的带电粒子望远镜系统(HiRA)以测量被敲出的角度分布很宽的质子。碎片和质子能量之和接近于常数的,来自衍射过程;而二者没有关联的,来自敲出过程。经过探测系统效率和接收度的修正以及和理论(CDCC)计算比较,可以分别得出衍射截面和敲出截面。这种办法很难用于丰中

子核,因为很难在大角度范围测量被敲出中子。对丰中子的 ${}^{6,8}\text{He}$, Chulkov 等人曾经采用测量反冲的靶粒子(H 靶)与前冲碎片符合的办法,区分敲出价核子(图 1(b)和(c), σ_{str})和敲出核芯(图 1(d), σ_{core})两种机制^[45]。实际上,在敲出价核子情况下,核芯碎片基本从 0° 出射,与反冲质子之间没有两体运动学关联;而在敲出核芯情况下,核芯碎片和反冲质子之间是准弹散射关系,基本满足两体运动学。该实验验证了准弹机制并提取了两种过程的截面和对应的 ${}^{6,8}\text{He}$ 集团结构谱因子,但没有测量前向出射的中子。北京大学研究组最近在日本理化所的实验采用了类似方法区分两种机制并加入了前向中子测量^[46]。这样,在敲出价核子机制下,可以重建 ${}^{5,7}\text{He}$ (图 1(c))而不受衍射过程(图 1(a))的干扰;而在敲出核芯机制下(图 1(d)),可以直接观察 2 个(${}^6\text{He}$)或 4 个(${}^8\text{He}$)价中子的关联情况,这在过去的实验中是不可能的。

无论是纵向动量分布测量的实验,还是重建非束缚态的实验,破碎反应中靶的效应都是一个值得关注和重新考察的问题。多年来,在 NSCL 比较多采用 Be 靶,而在 GSI 比较多采用 C 靶,理论上靶都被看作强吸收的黑盘子(black disk),弹核碰上靶核的部分被吸收(stripping),而其余的部分为旁观者^[35]。实际上,在高能量下,吸收的概念很难成立,被敲出的粒子和靶核的作用,更像是在一群核子中的多次散射^[20]。当弹核结构比较复杂时,敲出过程可能涉及深束缚的核子,此时弹核内部轨道被靶核作用,剩余部分很难被视为旁观者而不受影响。最近在 GSI 观察到 ${}^7\text{He}$ 共振态的所谓靶依赖性^[47],引起人们的关注。目前看来,采用最简单的 H 靶有比较明显的优越性^[48, 49],包括反应机制比较清楚,可以用横向动量分布代替纵向动量分布的测量,从而不依赖于消色差磁谱仪。因此发展和应用液氢靶或固体氢靶会是下一步开展破碎反应研究的一个重要趋势^[50]。

值得关注的是,在日本 RIKEN 的 RIBF 建设的第三代放射性束流线 BigRIPS 正在逐步投入使用,利用零度磁谱仪(ZDS)和在束 γ 系统,通过库仑激发^[51]和非弹散射^[52]等,已经得到一些远离稳定线核壳结构的重要结果。而消色差高分辨率的磁谱仪 SHARAQ 也在最近投入实验。

5.3 集团破碎实验

原子核中存在集团结构,特别是 α 集团结构,是一个长久以来人们关注的有趣问题^[53]。对于稳定线附近的原子核,集团结构主要在高于集团分离能的高激发态出现。但近年来在近滴线丰中子核(特别是 $^{10-14}\text{Be}$)的破碎反应中,观察到基态集团结构(分子结构)增强的证据^[32, 54]。但实验采用前向位置灵敏带电粒子望远镜记录所有碎片的办法,对反应机制没有选择,碎片的来源途径可能很复杂,很难做出恰当的理论处理来得到定量的结论^[54]。利用前述敲出反应对反应机制和相应理论模型的选择(图 1(b)和(c))是未来研究集团破碎的一个较好的取向^[55]。最近关于重核的 α 集团结构的研究也有新的进展^[56],这对超重核等的结构和衰变研究也有重要意义。破碎和敲出反应也可以在重核的 α 集团研究中起到直接观测的作用。在探测技术方面,发展大立体角覆盖、高位置分辨率和高能量分辨率的带电粒子望远镜系统具有关键作用,目前典型的如 NSCL 的 HiRA 系统和法国 Saclay 的 MUST 系统^[57]。

6 结语

中高能区的破碎和敲出反应,由于机制相对简单、对核的表面敏感、理论处理比较成熟等原因,在非稳定核的晕结构、壳移动等奇特性质研究中发挥了独到作用。针对次级束流强较弱、能散较大等特点,实验上发展和应用了逆运动学有效立体角完全测量、轻重靶结合、高精度消色差磁谱仪、前向中子谱仪、在束 γ 等技术手段,大大提升了实验的探测能力和选择性。放射性核束实验正在从轻核区向中重核区进展,破碎和敲出反应还会在探索新现象中继续发挥重要作用,探测方法和手段本身也将继续发展。

参考文献 (References):

[1] Hansen P G, Tostevin J A. *Annu Rev Nucl Part Sci*, 2003, **53**: 219.
 [2] Simpsom E C, Tostevin J A, Bazin D, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2009, **102**: 132502.
 [3] Oppenheimer J R. *Phys Rev*, 1935, **47**: 845.
 [4] Srber R. *Phys Rev*, 1947, **72**: 1008.

[5] Greiner D E, Lindstrom P J, Heckman H H, *et al.* *Phys Rev Lett*, 1975, **35**(3): 152; Fujita T and Hufner J. *Nucl Phys*, 1980, **A343**: 493.
 [6] Symons T J M, Viyogi Y P, Westfall G D, *et al.* *Phys Rev Lett*, 1979, **42**(1): 40.
 [7] Tanihata I, Hamagaki H, Hashimoto O, *et al.* *Phys Lett*, 1985, **B160**(6): 380.
 [8] Tanihata I, Hamagaki H, Hashimoto O, *et al.* *Phys Rev Lett*, 1985, **55**(24): 2676.
 [9] Kobayashi T, Yamakawa O, Omata K, *et al.* *Phys Rev Lett*, 1988, **60**(25): 2599.
 [10] Kobayashi T, Shimoura S, Tanihata I, *et al.* *Phys Lett*, 1989, **B232**(1): 51.
 [11] Tanihata I, Hirata D, Kobayashi T, *et al.* *Phys Lett*, 1992, **B289**: 261.
 [12] Sherrill B M, Morrissey D J, Nolen J A, *et al.* *Nucl Instr and Meth*, 1991, **B56—57**: 1106.
 [13] Geissel H, Armbruster P, Behr K H, *et al.* *Nucl Instr and Meth*, 1992, **B70**: 286.
 [14] Kubo T, Ishihara M, Inabe N, *et al.* *Nucl Instr and Meth*, 1992, **B70**: 309.
 [15] LAND collaboration. *Nucl Instr and Meth*, 1992, **A314**: 136; Tilquin I, Masri Y E, Parlog M, *et al.* *Nucl Instr and Meth*, 1995, **A365**: 446; Zecher P D, Galonsky A, Kruse J J, *et al.* *Nucl Instr and Meth*, 1997, **A401**: 329.
 [16] Orr N A, Anantaraman N, Austin S M, *et al.* *Phys Rev Lett*, 1992, **69**(14): 2050.
 [17] Korshennikov A A, Kobayashi T. *Nucl Phys*, 1994, **A567**: 97.
 [18] Korshennikov A A, Zhukov M V, Smedberg M H, *et al.* *Europhysics Lett*, 1995, **29**(5): 359.
 [19] Nilsson T, Humbert F, Schwab W, *et al.* *Nucl Phys*, 1996, **A598**: 418.
 [20] Zinser M, Humbert F, Nilsson T, *et al.* *Nucl Phys*, 1997, **A619**: 151.
 [21] Markenroth K, Meister M, Eberlein B, *et al.* *Nucl Phys*, 2001, **A679**: 462; Meister M, Markenroth K, Aleksandrov A, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2002, **88**: 102501.
 [22] Meister M, Markenroth K, Aleksandrov A, *et al.* *Nucl Phys*, 2002, **A700**: 3.
 [23] Bertsch G F, Hencken K. *Phys Rev*, 1998, **C57**(3): 1366.
 [24] Warner R E, Patty R A, Voyles P M, *et al.* *Phys Rev*, 1996, **C54**(4): 1700; Warner R E, McKinnon M H, Shaner N C, *et al.* *Phys Rev*, 2000, **C62**: 024608.
 [25] Wang J, Galonsky A, Kruse J J, *et al.* *Phys Rev*, 2002, **C65**: 034306.
 [26] Ieki K, Sachett D, Galonsky A, *et al.* *Phys Rev Lett*, 1993, **70**(6): 730; Sachett D, Ieki K, Galonsky, *et al.* *Phys Rev*, 1993, **C48**: 118.

- [27] Shimoura S, Nakamura T, Ishirara M, *et al.* Phys Lett, 1995, **B348**: 29.
- [28] Ye Y L, Pang D Y, Zhang G L, *et al.* J Phys, 2005, **G31**: S1647; Khoa D T, Oertzen W V. Phys Lett, 2004, **B595**: 193.
- [29] Liu W P, Bai X X, Zhou S H, *et al.* Phys Rev Lett, 1996, **77** (4): 611.
- [30] Sun Z Y, Zhan W L, Guo Z Y, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2003, **A503**: 496.
- [31] Ozawa A, Kobayashi T, Suzuki T, *et al.* Phys Rev Lett, 2000, **84**(24): 5493; Kanungo Rituparna, Tanihata I, Ozawa. Phys Lett B, 2002, **A528**: 58.
- [32] Ashwood N I, Freer M, Ahmed S, *et al.* Phys Lett, 2004, **B580**: 129.
- [33] Morrissey D J, Sherrill B M, Steiner M, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2003, **B204**: 90.
- [34] Bazin D, Caggiano J A, Sherrill B M, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2003, **B204**: 629.
- [35] Hansen P G, Tostevin J A. Annu Rev Nucl Part Sci, 2003, **53**: 219.
- [36] Aumann T, Navin A, Balamuth D P, *et al.* Phys Rev Lett, 2000, **84**(1): 35.
- [37] Riley L A, Adrich P, Baugher T R, *et al.* Phys Rev, 2008, **C78**: 011303.
- [38] Kanungo R, Nociforo C, Prochazka A, *et al.* Phys Rev Lett, 2009, **102**: 152501.
- [39] Simpson E C, Tostevin J A, Bazin D, *et al.* Phys Rev Lett, 2009, **102**: 132502.
- [40] Gade A, Adrich P, Bazin D, *et al.* Phys Rev, 2008, **C77**: 044306.
- [41] Palit R, Adrich P, Aumann T, *et al.* Phys Rev, 2003, **C68**: 034318.
- [42] Nakamura T, Vinodkumar A M, Sugimoto T, *et al.* Phys Rev Lett, 2006, **96**: 252502.
- [43] Simon H, Meister M, Aumann T, *et al.* Nucl Phys, 2007, **A791**: 267; Frank N, Baumann T, Bazin D, *et al.* Nucl Phys, 2008, **A813**: 199.
- [44] Bazin D, Charity R J, Souza R T, *et al.* Phys Rev Lett, 2009, **102**: 232501.
- [45] Chulkov L V, Aksouh F, Bleile A, *et al.* Nucl Phys, 2005, **A759**: 43.
- [46] Ye Y, Cao Z, Jiang D, *et al.* Nucl Phys, 2010, **A834**: 454c.
- [47] Aksyutina Yu, Johansson H T, Aumann T, *et al.* Phys Lett, 2009, **B679**: 191.
- [48] Kondo Y, Nakamura T, Satou Y, *et al.* Phys Rev, 2009, **C79**: 014602.
- [49] Tanaka K, Yamaguchi T, Suzuki T, *et al.* Phys Rev Lett, 2010, **104**: 062701.
- [50] Ryuto H, Kunibu M, Minemura T, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2005, **A555**: 1.
- [51] Doornenbal P, Scheit H, Aoi N, *et al.* Phys Rev Lett, 2009, **103**: 032501.
- [52] Nakamura T, Kobayashi N, Kondo Y, *et al.* Phys Rev Lett, 2009, **103**: 262501.
- [53] Oertzen W V, Freer M, Kanada-En'yod Y. Phys Rep, 2006, **432**: 43.
- [54] Ashwood N I, Freer M, Angelique J C, *et al.* Phys Rev, 2004, **C70**: 024608.
- [55] Ashwood N I, Freer M, Millener D J, *et al.* Phys Rev, 2005, **C72**: 024314.
- [56] Astier A, Petkov P, Porquet M G, *et al.* Phys Rev Lett, 2010, **104**: 042701.
- [57] Wallacea M S, Famiano M A, Goethem M J V, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2007, **A583**: 302; Blumenfeld Y, Auger F, Sauvestre J E, *et al.* Nucl Instr and Meth 1999, **A421**: 471.

Study on Structure of Unstable Nuclei through Breakup and Knockout Reactions at Intermediate and High Energies^{*}

YE Yan-lin¹⁾, FAISAL Jamil-queeshi, LOU Jian-ling, GE Yu-cheng, LV Lin-hui,

CAO Zhong-xin, XIAO Jun, LI Qi-te, CHEN Tian-yi, YANG Fan

(*School of Physics and State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology,
Peking University, Beijing 100871, China*)

Abstract: The breakup and knockout reactions at intermediate and high energies are of the advantages such as simple reaction mechanism, sensitive to the surface of the nucleus, mature theoretical treatment and so on, and therefore have been applied successfully to the study of exotic structure of unstable nuclei. In order to deal with the problems of the secondary beam which often has large beam spot size and energy spread, the special experimental methods and techniques, such as inverse kinematics complete detection, combining light and heavy targets, high resolution dispersion-match magnetic spectrometer, forward neutron spectrometer, in-beam γ spectroscopy etc, have been developed and applied over the time, allowing much improved detection capability and sensitivity. This report gives an overview of the progress made with the breakup and knockout reactions for unstable nuclei study, based essentially on the new physics explored and the evolution of the experimental method applied. Possible future developments are also discussed.

Key words: breakup reaction; unstable nuclei; nuclear structure; reaction mechanism; detection technique

* **Received date:** 12 Feb. 2010; **Revised date:** 1 Apr. 2010

* **Foundation item:** Major State Basic Research Development Program of China(973 Program)(2007CB815002); National Natural Science Foundation of China(10775003, 10827505, 10821140159, 10905002, J0730316)

1) E-mail: yeyl@pku.edu.cn