

文章编号: 1007-4627(2019) 02-0135-09

## 质子滴线核 ${}^8\text{B}$ 的实验研究进展

杨彦云<sup>1,2</sup>, 庞丹阳<sup>3</sup>, 段芳芳<sup>1</sup>, 王建松<sup>1,2</sup>, 刘星泉<sup>1</sup>, 金仕纶<sup>1</sup>, 马朋<sup>1</sup>, 马军兵<sup>1</sup>, 白真<sup>1</sup>, 胡强<sup>1</sup>

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

2. 中国科学院大学核科学与技术学院, 北京 100049;

3. 北京航空航天大学物理科学与核能工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 质子滴线核 ${}^8\text{B}$ 的最后一个质子的分离能只有0.1375 MeV, 被认为是最有可能具有质子晕结构的候选核之一, 对其反应机制和奇特结构的研究吸引了人们的关注。针对 ${}^8\text{B}$ 的奇特结构和反应机制研究是一个非常有趣的课题, 研究人员在包括反应截面、碎裂产物动量分布宽度、电四极矩、熔合截面及弹性散射等方面开展了大量的工作。但是 ${}^8\text{B}$ 的研究至今仍不够充分, 需要从理论和实验上对其进行更深入的研究。

**关键词:** 质子滴线核; 晕核; 核反应; 弹性散射

**中图分类号:** O571.4

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.36.02.135

### 1 引言

近三十年来, 世界各大核物理实验室相继建成和升级了其放射性束流线, 其中包括中国原子能科学研究院的北京低能放射性核束流线<sup>[1]</sup>和中国科学院近代物理研究所(IMP)的兰州放射性束流线(RIBLL)<sup>[2]</sup>。依托这些专用装置, 科研人员完成了一系列放射性束的实验研究, 使得核物理研究取得了很大进展, 放射性束物理也已经成为非常活跃的核物理研究前沿领域。在此之前, 核结构及核反应的知识基于 $\beta$ 稳定线附近的大约300种核素及其组成的稳定系统或者长寿命系统的实验事实, 传统的核物理理论也基于稳定核的实验现象建立起来的。现在实验已经产生了3000种左右的放射性核素, 理论预言甚至可以达到8000种, 这大大扩展了核物理的研究对象。在放射性束物理的研究过程中, 有许多新的物理现象被发现, 例如, 远离稳定线核的弱束缚性、结团性、晕结构、大的表面弥散度、反常的中质比、强烈的耦合道效应、新的幻数等奇特性质。这些新的现象显著地不同于稳定核, 这使得传统的核物理理论面临着严峻挑战, 也给核物理研究的突破性发展提供了崭新的机遇<sup>[3-6]</sup>。

放射性束物理研究中, 弱束缚核的晕结构研究格外引人注目。晕核由紧密束缚的“核芯”以及外围的一个或数个松散束缚的“价核子”组成, 核芯外有非常弥散的核子分布。目前确认的晕核主要是丰中子核, 例

如 ${}^{11}\text{Be}$ ,  ${}^6\text{He}$ 和 ${}^{11}\text{Li}$ 等。由于价核子和核芯之间的库仑相互作用会抑制波函数尾部的弥散性, 质子晕核的研究更加复杂和有趣。2001年王建松等<sup>[7]</sup>通过理论计算指出 ${}^8\text{B}$ 的半径异常增大, 其最后一个质子的分离能只有0.1375 MeV, 被认为是最有可能具有质子晕结构的候选核之一。因此, 对于 ${}^8\text{B}$ 的研究吸引了核物理工作者的注意。近三十年来, 研究人员从反应总截面、破裂产物动量分布宽度、电四极矩、熔合截面及弹性散射等方面对 ${}^8\text{B}$ 的性质进行了大量的研究。本文结合在IMP开展的工作, 介绍世界各大实验室对 ${}^8\text{B}$ 在核反应方面的实验研究进展。

### 2 反应截面

核反应总截面是描述原子核反应基本特征的一个重要物理量, 从中可以提取到核的半径、形变、核内核子的密度分布等反映原子核特征的信息。反应总截面的测量方法比较简单, 常常被用来判断一种放射性核素是否具有晕结构<sup>[8]</sup>。测量反应总截面常用的方法有束流透射法、 $4\pi$ - $\gamma$ 符合法<sup>[9-10]</sup>等。其中束流透射法是Tanihata等<sup>[11]</sup>1985年第一次测量 ${}^{11}\text{Li}$ 等放射性核的反应总截面时使用的方法, 此方法测量原理简单, 不依赖于模型, 所以被经常使用。反应截面的计算公式为

$$\sigma = \frac{1}{N_t} \ln\left(\frac{N_{\text{in}}}{N_{\text{out}}}\right), \quad (1)$$

收稿日期: 2018-08-10; 修改日期: 2018-10-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1632138, 11575256, 11705242)

作者简介: 杨彦云(1984-), 男, 宁夏盐池人, 副研究员, 博士, 从事原子核与粒子物理研究; E-mail: yangyanyun@impcas.ac.cn。

其中:  $N_{in}$  为入射粒子数目;  $N_t$  为单位面积的靶核数;  $N_{out}$  为未发生反应的出射粒子数。在实验中, 在靶前和靶后一组探测器来鉴别粒子并分别探测入射和出射粒子数目。为了弥补传输过程中束流的损失以及束流在探测器上的反应事件, 通常会使用空靶实验来进行修正。利用以下的公式, 可以从相互作用截面提取到相互作用半径:

$$\sigma(p, t) = \pi [R(p), R(t)]^2, \quad (2)$$

其中  $R(p)$  和  $R(t)$  分别为炮弹和靶核的半径, 对于晕核来讲, 其半径会明显地增大。

1988年, Tanihata等<sup>[12]</sup>在美国伯克利实验室测量了790 AMeV的 $^8\text{B}$ 在Be、C和Al靶上的反应总截面, 并提取到 $^8\text{B}$ 的物质分布半径, 与B的其它同位素 $^{12,13,14,15}\text{B}$ 及镜像核 $^8\text{Li}$ 比较发现,  $^8\text{B}$ 的半径并没有明显增大, 不能推断出 $^8\text{B}$ 具有晕结构的特征。1996年, Obuti等<sup>[13]</sup>再次测量了790 AMeV的 $^8\text{B}$ 在C靶上的反应截面。综合以上两次实验, 提取到的 $^8\text{B}$ 的方均根半径为 $(2.43 \pm 0.03)$  fm。通过与其镜像核 $^8\text{Li}$ 的半径 $(2.36 \pm 0.02)$  fm比较, 人们认为虽然 $^8\text{B}$ 的单质子

分离能只有0.137 MeV, 但是这并没有引起其总反应截面的增大。 $^8\text{B}$ 被认为没有晕结构, 而是更趋向于是一个“正常的核”。

1995年, Warner等<sup>[14]</sup>测量了20~60 AMeV的 $^8\text{B}$ ,  $^{12}\text{C}$ 和 $^{14}\text{N}$ 在Si靶上的反应总截面, 图1为测量结果。数据显示, 在同样的入射能和同样的靶核上,  $^8\text{B}$ 有着比 $^{12}\text{C}$ 和 $^{14}\text{N}$ 更大的反应总截面。由此提取到的 $^8\text{B}$ 的质子和物质分布的均方根半径分别达到了2.98和2.72 fm, 表明 $^8\text{B}$ 具有质子晕的结构。1996年Negoita等<sup>[15]</sup>利用GANIL (Grand Accélérateur National d'Ions Lourds)的放射性束流线LISE产生的40 AMeV的 $^8\text{B}$ 和 $^7\text{Be}$ , 使用11层不同厚度的硅探测器, 测量了10~40 MeV的 $^8\text{B}$ 和 $^7\text{Be}$ 反应总截面及 $^8\text{B}$ 的单质子破裂截面, 提取到的质子半径和物质半径分别为 $(2.76 \pm 0.08)$  fm和 $(2.55 \pm 0.08)$  fm。文章认为 $^8\text{B}$ 的结构趋向于矮晕 (pigmy halo) 或者质子皮。1999年Fukuda等<sup>[16]</sup>通过测量40和60 AMeV的 $^8\text{B}$ 在Be、C和Al靶上的反应总截面以及相对更大的单质子转移截面, 也给出了 $^8\text{B}$ 是一个质子晕核的证据。

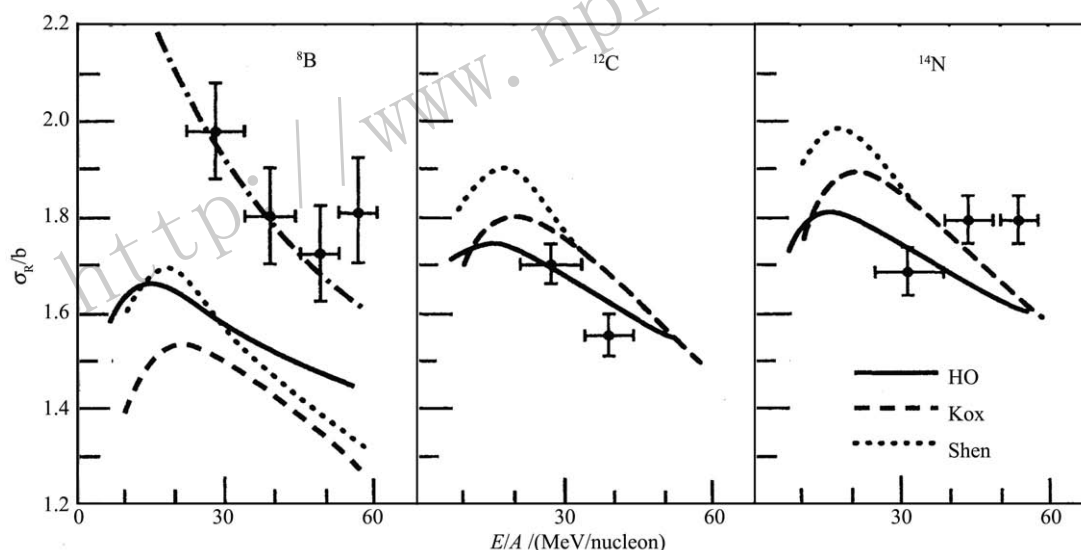


图1 Warner等<sup>[14]</sup>测量的 $^8\text{B}$ 反应截面, 并与 $^{12}\text{C}$ 和 $^{14}\text{N}$ 的结果比较

2002年, IMP测量了54 AMeV的 $^8\text{B}$ 在Si靶上的反应总截面<sup>[17]</sup>。该实验在兰州放射性束流线(RIBLL)上完成, 主束为兰州重离子加速器产生的75 AMeV的 $^{12}\text{C}$ 束流。在RIBLL的初级靶室轰击2000  $\mu\text{m}$ 的Be靶碎裂产生各种次级束之后, 经过RIBLL的传输、选择和纯化之后在次级靶室得到能量为54 AMeV的 $^8\text{B}$ 束流, 流强约3600 pps。使用厚度分别为150, 150, 150, 2000和2000  $\mu\text{m}$ 的5块硅探测器, 其中前三层硅探测器可以作为靶和探测器同时使用, 分别测量

不同能量点的反应截面。在该实验中, 伴随 $^8\text{B}$ 的杂质有 $^9\text{C}$ ,  $^7\text{Be}$ 和 $^6\text{Li}$ , 使用 $\Delta E$ -TOF来鉴别粒子(图2), 这也是RIBLL上经常使用的粒子鉴别方法之一。在数据分析的过程中只要在 $\Delta E$ -TOF二维谱上卡窗即可选出目标核。作者使用Glauber模型进行了理论计算, 与实验数据进行比较, 并且对Warner和Negoita的数据进行了分析。分析认为, 不能用正常核密度分布而需要使用一个扩展的核子密度分布来解释 $^8\text{B}$ 的实验数据, 给出了 $^8\text{B}$ 具有质子晕结构的新证据。

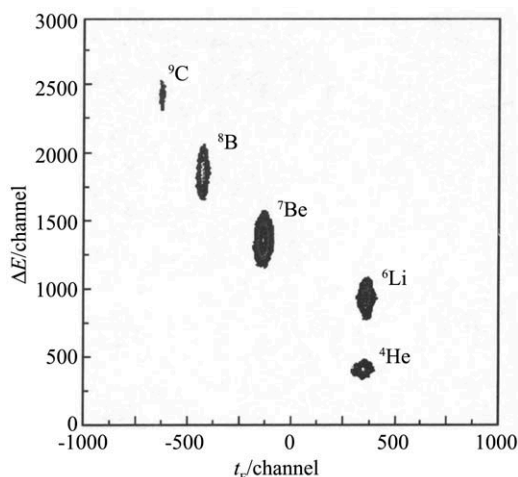


图2 RIBLL上使用 $\Delta E$ -TOF来鉴别 $^8\text{B}$ 和杂质 $^9\text{C}$ ,  $^7\text{Be}$ 和 $^6\text{Li}$ [17]

### 3 碎裂反应

一般认为, 由于弱束缚核的晕结构引起反应总截面或相互作用截面增大, 根据测不准关系, 其碎裂产物的动量分布宽度应相应变窄。研究人员已经开展了一些 $^8\text{B}$ 碎裂反应动量分布的测量工作[18–20], 物理目标主要集中在 $^8\text{B}$ 晕结构方面的研究。

1995年Schwab等[18]第一次在实验上观测到 $^8\text{B}$ 的碎裂产物的动量分布宽度。实验使用的束流能量为1471 AMeV, 分别测量在C, Al和Pb靶上碎裂产物 $^7\text{Be}$ 的动量分布, 得到的动量分布半高宽为 $(81 \pm 6)$  MeV/c。提取到 $^8\text{B}$ 的均方根半径达到2.78 fm, 表明 $^8\text{B}$ 具有质子晕结构。在此之后的1999年, Smedberg等[19]也测量到了类似的结果。1996年Negoita等[15]在GANIL完成了中低能区10~40 AMeV的 $^8\text{B}$ 碎裂产生 $^7\text{Be}$ 的动量分布的测量, 获得的动量分布如图3所示, 其宽度

为 $(93 \pm 7)$  MeV/c。在理论分析的过程中, 需要把价质子的单粒子波函数的均方根半径设置为5 fm才得以符合实验数据。基于此,  $^8\text{B}$ 被认为是一个具有矮晕或质子皮结构的原子核。

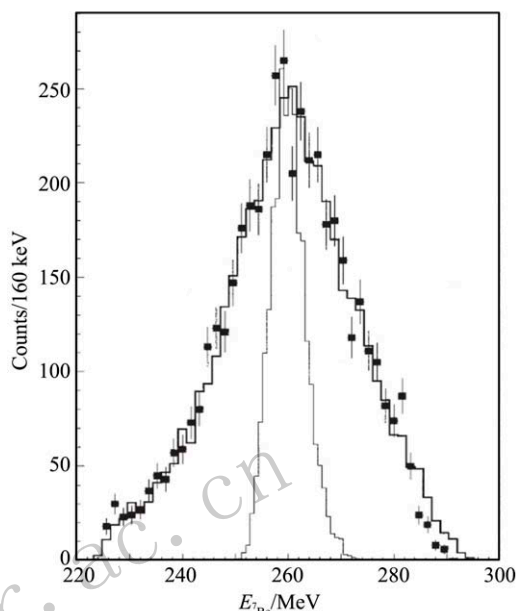


图3 Negoita等[15]测量的40 AMeV的 $^8\text{B}$ 碎裂产生 $^7\text{Be}$ 的动量分布

2015年, IMP在RIBLL上开展了36.7 AMeV的 $^8\text{B}$ 碎裂反应的实验研究[20–21]。在靶前使用两块PPAC测量了入射粒子的径迹, 在靶后使用一套 $\Delta E$ - $E$ 望远镜测量了碎裂反应事件。望远镜系统由一块双面硅条和 $8 \times 8$ 单元CsI阵列探测器组成[22]。在实验上给出了来自stripping和diffraction两种不同机制的 $^7\text{Be}$ 的动量分布, 实验结果和理论计算如图4所示。实验结果表明, 在stripping过程中损失能量导致了更宽的动量分布。通

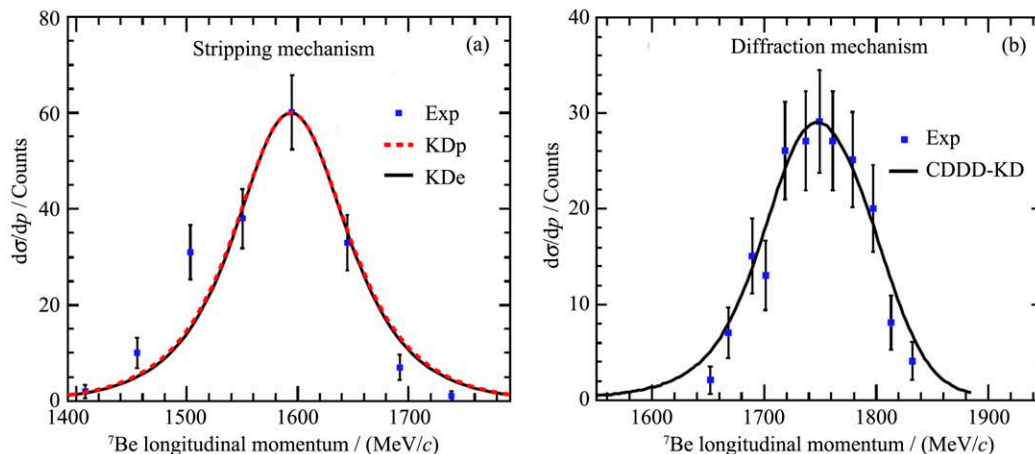


图4 (在线彩图) IMP开展的 $^8\text{B}$ 碎裂反应[20]



过eikonal模型<sup>[23]</sup>和CDCC方法<sup>[24-25]</sup>计算得到的动量分布于实验数据基本符合,在计算过程中认为 $^8\text{B}$ 由一个核芯 $^7\text{Be}$ 和一个价质子构成。这个工作也间接地给出了 $^8\text{B}$ 具有晕结构的证据。

## 4 电四极矩

1992年,大阪大学的Minamisono等<sup>[26]</sup>使用 $\beta$ -NMR (Nuclear Magnetic Resonance)方法测量了 $^8\text{B}$ 的电四极矩。其结果为 $(68.3 \pm 2.1)$  mb,是理论计算值的2倍。同时,作者还测量得镜像核 $^8\text{Li}$ 的电四极矩为 $(32.7 \pm 0.6)$  mb。这个工作中提取到 $^8\text{B}$ 的质子分布半径为2.98 fm,中子分布半径为2.20 fm。质子和中子的密度分布如图5所示。此结果支持 $^8\text{B}$ 具有质子晕的结构。在此之后的2006年,Sumikama等<sup>[27]</sup>使用类似的方法测量得到 $^8\text{B}$ 的电四极矩为 $(64.5 \pm 1.4)$  mb。

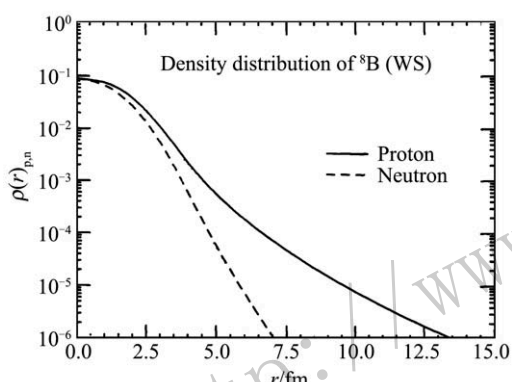


图5 Minamisono等<sup>[26]</sup>利用测量到的电四极矩提取到 $^8\text{B}$ 的质子和中子密度分布

## 5 近垒反应

本节讨论能量在库仑势垒附近的破裂和熔合反应实验研究。近库仑势垒能区重离子核反应是近几十年来的一个重要的前沿课题,对于 $^8\text{B}$ 的研究工作主要是在美国圣母大学的TwinSol(Twin superconducting solenoid magnet low-energy radioactive nuclear beam)、日本东京大学的CNS(Center for Nuclear Study)和意大利的LNL(Legnaro National Laboratories)上开展的<sup>[28-38]</sup>,已有的实验数据均表明 $^8\text{B}$ 的破裂截面和熔合截面明显增大。

2000年,Guimaraes等<sup>[28]</sup>、Kolata等<sup>[29]</sup>和Tostevin等<sup>[30]</sup>在美国圣母大学测量了能量位于库仑势垒以下(25.75 MeV)的 $^8\text{B}$ 在 $^{58}\text{Ni}$ 靶上的破裂反应截面,实验中, $^8\text{B}$ 的平均流强达到了 $2.5 \times 10^4$  pps,束斑的半高全宽(FWHM)为4 mm。使用了两套硅探测器 $\Delta E$ - $E$ 望远镜测量破裂事件,并结合TOF- $\Delta E$ 的方法区分 $^8\text{B}$

破裂产生的 $^7\text{Be}$ 和束流中的 $^7\text{Be}$ ,给出了 $^8\text{B}$ 破裂成 $^7\text{Be}$ 的微分截面角分布和不同角度的 $^7\text{Be}$ 能量分布。图6为实验数据和理论计算<sup>[30]</sup>比较, $^8\text{B}$ 的价质子需要有很大的空间分布来符合实验数据,给出了 $^8\text{B}$ 具有质子晕的直接证据。在此之后,2008年Aguilera等<sup>[31]</sup>再次测量了 $^8\text{B}+^{58}\text{Ni}$ 系统的破裂反应截面,实验测量了25.0, 26.9和28.4 MeV 3个能量点在 $45^\circ$ 角上的破裂反应截面,并且使用CDCC计算对数据进行了分析。

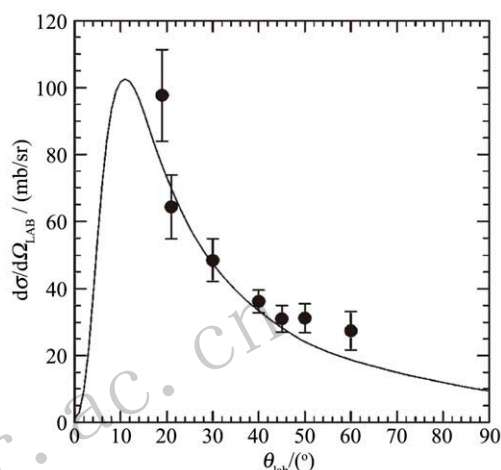


图6 Kolata等人测量的 $^8\text{B}$ 破裂截面<sup>[28-29]</sup>

另外,意大利的Mazzocco等<sup>[32-33]</sup>近期在日本东京大学CNS放射性束装置上尝试开展了 $^8\text{B}+^{208}\text{Pb}$ 的破裂反应研究,数据正在处理中。现在已发表的数据主要为弹性散射角分布的内容,将在第6节详细说明实验情况。

在熔合反应方面,2011年Aguilera等<sup>[34-35]</sup>在美国圣母大学的TwinSol上测量了 $^8\text{B}+^{58}\text{Ni}$ 的熔合反应截面,这是首次报道的质子晕候选核引起的熔合反应。实验中使用的初级束为能量在31~38 MeV之间的 $^6\text{Li}^{3+}$ ,其流强达到了50~220 pA。文章中给出了 $^8\text{B}$ 实验室系能量为22.4, 23.9, 24.6, 26.5, 25.8, 26.9, 27.5, 28.6, 29.1和30.0 MeV共10个能量点的数据,并且与稳定核 $^{16}\text{O}$ 和弱束缚核 $^6\text{Li}$ 的结果进行了比较。文章认为三个系统有着明显的差别: $^8\text{B}$ 的熔合截面在整个能量范围内均大于 $^{16}\text{O}$ ,在能量高于库仑势垒的范围内也明显大于 $^6\text{Li}$ ,显示出了 $^8\text{B}$ 的熔合截面有奇异增大。在此之后,Pakou等<sup>[36]</sup>在意大利的LNL上测量了 $^8\text{B}$ 在 $^{28}\text{Si}$ 靶上的熔合反应。通过探测蒸发过程中发射的 $\alpha$ 粒子确定了20, 25, 30和35 MeV 4个能量点的熔合截面。使用的探测器包括两块PPAC和三块厚度分别为45, 45和2000  $\mu\text{m}$ 的硅探测器。束流阻止在第三块硅之前。获得的实验数据与其它反应系统比较结果如图7所示。此实验表明 $^8\text{B}+^{28}\text{Si}$ 的熔合截面并没有明显增大。

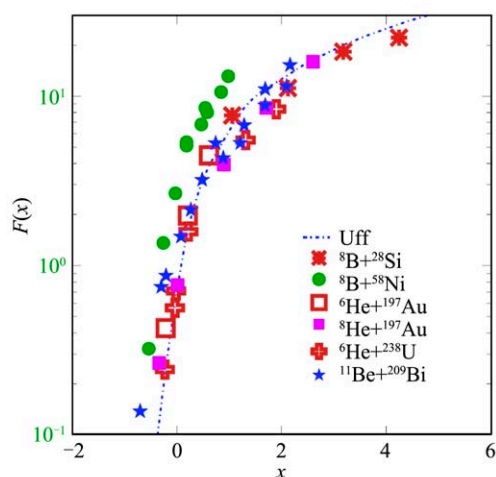


图7 (在线彩图) Pakou等<sup>[36]</sup>对不同反应系统的熔合截面进行了比较

2017年, Kolata等<sup>[37-38]</sup>在美国圣母大学的TwinSol上发展了一套使用了活性靶时间投影室(prototype active-target time projection chamber, pAT-TPC)技术测量熔合反应的方法, 可直接观测到蒸发出的带电粒子(质子和 $\alpha$ 粒子), 从而有可能区分出中子蒸发(NCP)和带电粒子蒸发(CP)事件, 这是使用活性靶技术测量熔合反应的一次尝试, 并成功地运用到 $^{10}\text{Be}+\text{P10}$ 气体靶(90%的Ar+10%的 $\text{CH}_4$ )反应系统中(图8)。经过实验数据和理论分析, 文章认为, 在以后的实验中可以很好地区分完全熔合和非完全熔合, 预期将完成 $^8\text{B}+^{40}\text{Ar}$ 的熔合反应测量。

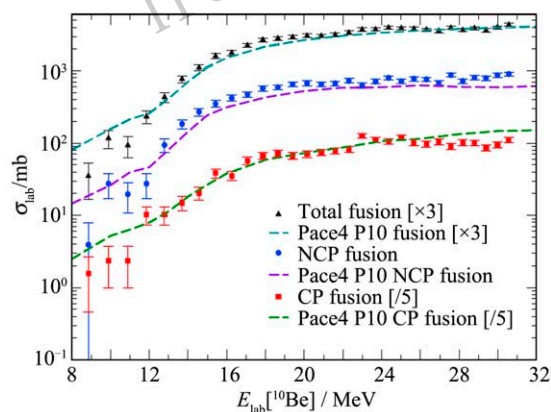


图8 (在线彩图) Kolata等<sup>[37]</sup>使用活性靶技术测量的 $^{10}\text{Be}+\text{P10}$ 反应系统的熔合截面, 并与理论计算比较

## 6 弹性散射

弹性散射是研究重离子核反应的重要手段之一, 已经有100余年的研究历史, 积累了大量的实验数据。但大部分是稳定核的数据。对于弱束缚核的弹性散射研

究主要集中在丰中子核区域, 而丰质子核的实验数据则相对缺乏。已报道的 $^8\text{B}$ 弹性散射实验主要集中在: 质子靶<sup>[40]</sup>,  $^{12}\text{C}$ <sup>[41-42]</sup>,  $^{27}\text{Al}$ <sup>[43]</sup>,  $^{58}\text{Ni}$ <sup>[44]</sup>和 $^{208,\text{nat}}\text{Pb}$ 靶<sup>[32-33, 45]</sup>上的散射。

质子散射实验是一种非常好的测量物质分布的实验方法。2018年, Korolev等<sup>[40]</sup>报道了 $^8\text{B}$ 在质子靶上的散射数据及分析结果。实验是在德国重离子研究中心(GSI)开展的, 束流能量为0.7 AGeV, 从实验数据中提取到的质子和物质分布半径分别为 $R_p=2.76(9)$  fm,  $R_{ch}=2.89(9)$  fm。这些结果明显大于 $^{10}\text{B}$ 和 $^{11}\text{B}$ 的数据, 支持 $^8\text{B}$ 存在晕结构。

1995年, Pecina等<sup>[41]</sup>测量了40 AMeV的 $^8\text{B}$ 和 $^7\text{Be}$ 在C靶上的弹性散射角分布, 并与耦合道(coupled-channels)计算的结果进行了比较。其中 $^7\text{Be}$ 的理论计算和实验数据符合很好, 而 $^8\text{B}$ 的理论计算整体上低估了实验数据。这说明弱束缚核 $^8\text{B}$ 不能使用耦合道计算得到很好的描述。之后Barioni等<sup>[42]</sup>测量了不同能量下 $^8\text{B}$ 在C靶上的散射角分布, 并使用光学模型及耦合道计算(CDCC), 结果表明, 在轻靶上破裂道对弹散道的耦合效应非常小。

2017年, Morcelle等<sup>[43]</sup>报道了入射能为15.3和21.7 MeV的 $^8\text{B}$ 在 $^{27}\text{Al}$ 靶上的弹性散射实验。实验是在巴西圣保罗大学的RIBRAS(Radioactive ion beams in Brasil)和美国圣母大学的TwinSol上完成的。 $^8\text{B}$ 的流强均可以达到 $10^4$  pps。在RIBRAS上的实验使用的探测设备为一套由两块方硅组成的 $\Delta E(20\text{ }\mu\text{m})-E(1000\text{ }\mu\text{m})$ 望远镜系统和两块厚度为1000  $\mu\text{m}$ 的方硅。其中望远镜系统放置在前角区, 而后角区使用一块方硅即可鉴别出不同的粒子。在TwinSol上的实验使用的探测设备为4块位置灵敏的硅探测器(PSD)和一套由两块方硅组成 $\Delta E(20\text{ }\mu\text{m})-E(1000\text{ }\mu\text{m})$ 望远镜系统。实验中使用 $^{27}\text{Al}$ 和 $^{197}\text{Au}$ 两种靶, 其中 $^8\text{B}$ 在 $^{197}\text{Au}$ 靶上的散射为卢瑟福散射, 可以用来作为归一的依据。实验数据使用光学模型和CDCC进行了分析(图9), 并提取到了总反应截面。实验数据和理论分析表明, 破裂及转移反应对于反应截面有明显的耦合效应, 在低能区更加明显。

2009年, Aguilera等<sup>[44]</sup>完成了 $^8\text{B}$ ,  $^7\text{Be}$ 和 $^6\text{Li}$ 在 $^{58}\text{Ni}$ 靶上的弹性散射角分布的测量, 其中 $^8\text{B}$ 的入射能量为20.7, 23.4, 25.3, 27.2和29.2 MeV;  $^7\text{Be}$ 的入射能量为15.1, 17.1, 18.5, 19.9和21.4 MeV;  $^6\text{Li}$ 的入射能量为9.9, 11.2, 12.1, 13.0和14.0 MeV。实验中使用四块位置灵敏的硅探测器 and 一组望远镜测量弹性散射事件。探测设备可移动到不同的位置以覆盖不同的角度范围。实验获得的角分布及理论计算结果如图10所示。其

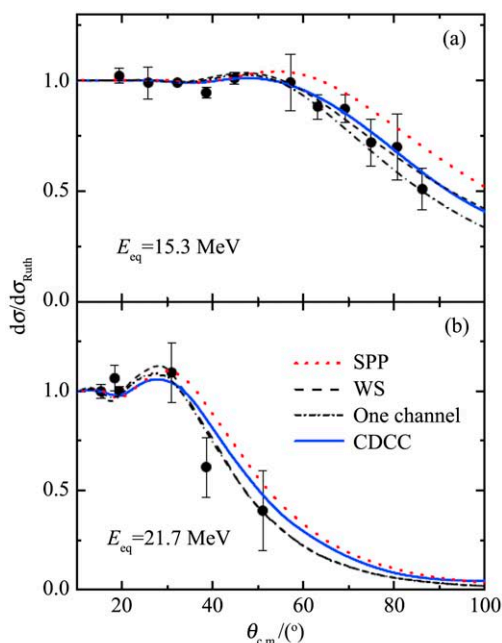


图 9 (在线彩图) Morcelle 等<sup>[43]</sup>测量的  $^8\text{B}$  在  $^{27}\text{Al}$  靶上的弹性散射角分布

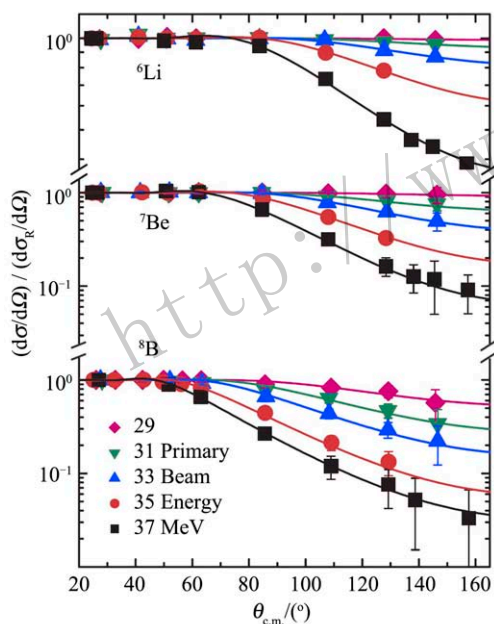


图 10 (在线彩图) Aguilera 等<sup>[44]</sup>测量的  $^8\text{B}$  和  $^7\text{Be}$  在  $^{58}\text{Ni}$  靶上的弹性散射角分布

中 5 个能量点从高到低依次对应  $^8\text{B}$ ,  $^7\text{Be}$  和  $^6\text{Li}$  5 个能量点。从实验数据中提取的总反应截面按能量从低到高分别为:  $^8\text{B}$ :  $(198 \pm 50)$ ,  $(363 \pm 50)$ ,  $(512 \pm 50)$ ,  $(812 \pm 45)$  和  $(1005 \pm 40)$  mb;  $^7\text{Be}$ :  $(20.4 \pm 10)$ ,  $(106 \pm 30)$ ,  $(182 \pm 26)$ ,  $(330 \pm 101)$  和  $(506 \pm 97)$  mb;  $^6\text{Li}$ :  $(4 \pm 2.7)$ ,  $(16.3 \pm 9)$ ,  $(43.3 \pm 12)$ ,  $(108 \pm 36)$  和  $(235 \pm 52)$  mb。 $^8\text{B}$  的总截面明显大于  $^7\text{Be}$  和  $^6\text{Li}$  的, 文章认为这些总截面的区别主要来自于  $^8\text{B}$  破裂道的贡献。

2018 年, Mazzocco 等<sup>[32-33]</sup>报道了在日本东京大学 CNS 上开展  $^8\text{B} + ^{208}\text{Pb}$  弹性散射角分布测量, 是首次完成的能量在库仑势垒附近的  $^8\text{B} + ^{208}\text{Pb}$  的弹性散射实验。放射性束流  $^8\text{B}$  通过  $^3\text{He}(^6\text{Li}, ^8\text{B})\text{n}$  反应产生,  $^8\text{B}$  的能量为 50.0 MeV 流强可以达到  $10^4$  pps。在此实验中使用了 6 套硅阵列来测量反应产物, 覆盖的角度范围为  $\theta_{\text{lab}} = 15^\circ \sim 165^\circ$ , 图 11 为实验数据和光学模拟拟合的结果。提取到的总截面为镜像核  $^8\text{Li}$  的大约两倍, 这种差别主要是由于  $^8\text{B}$  很小的结合能而导致可能存在较大的破裂截面。

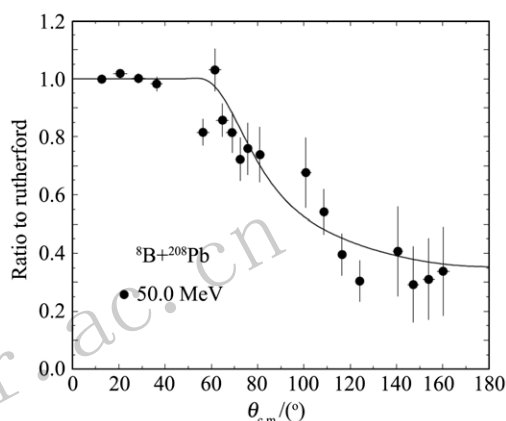


图 11 Mazzocco 等<sup>[32]</sup>测量得到的  $^8\text{B} + ^{208}\text{Pb}$  弹性散射角分布和光学模型的比较

2013 年, IMP 在 RIBLL 上开展了  $^8\text{B}$  在  $\text{Pb}$  靶上的弹性散射测量。入射能量相对较高, 为 170 MeV。在此次实验的测量和数据分析的过程中发展了一套适合在 RIBLL 上开展弱束缚核弹性散射实验的方法<sup>[46]</sup>, 解决了束斑较大且分布不均匀、立体角计算和位置校准困难等技术问题。实验中的探测器设置如图 12 所示。靶前使用两块对束流影响很小的平行板位置灵敏雪崩电离室 (PPAC) 逐事件记录下入射束流的方向和靶点位置。靶后使用两套望远镜系统探测弹性散射事件。两套望远镜系统覆盖的角度范围分别为  $4^\circ \sim 21^\circ$  和  $13^\circ \sim 38^\circ$ 。PPAC 的灵敏面积为  $80 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ ,  $X$  和  $Y$  面均由 80 根镀金钨丝分别读出, 位置分辨可达到 1 mm。每一套望远镜系统由一块硅条和一块方硅组成, 其厚度分别为  $150 \mu\text{m}$  和  $1500 \mu\text{m}$ 。硅条探测器的有效面积为  $48 \text{ mm} \times 48 \text{ mm}$ , 正反面均被分为每条 1 mm 的硅条。使用  $\Delta E$ - $E$  方法挑选目标核以及弹性散射事件, 图 13 为典型的  $\Delta E$ - $E$  二维谱, 可以清晰地鉴别出  $^8\text{B}$  与  $^9\text{C}$ ,  $^7\text{Be}$  和  $^6\text{Li}$  等杂质, 并且可以鉴别出弹性散射事件。图中实心椭圆卡的是在靶上的有效散射事件, 虚线椭圆卡的是在 PPAC 的钨丝上的散射事件, 而点虚线椭圆卡的是同时在两根钨丝上散射的事件。



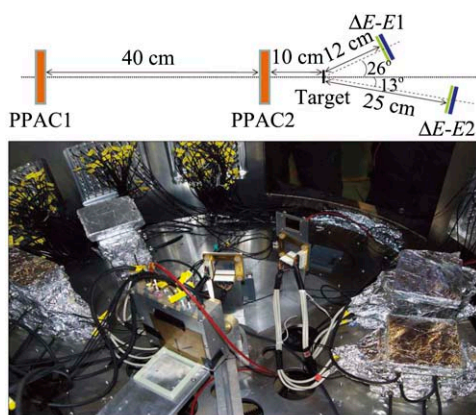


图 12 (在线彩图) IMP 开展 $^8\text{B}$ 弹性散射实验使用的探测器设置<sup>[45]</sup>

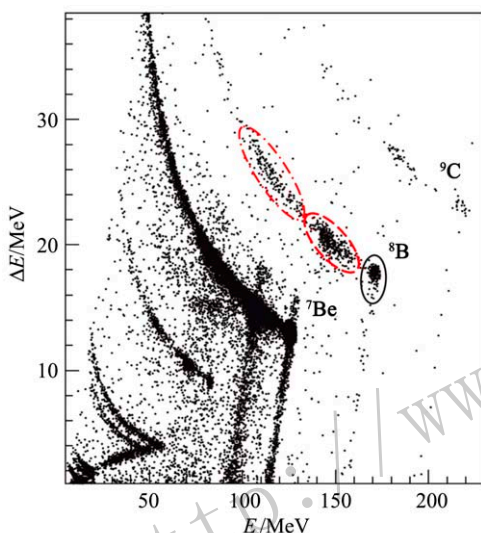


图 13  $^8\text{B}$ 弹性散射实验中的 $\Delta E$ - $E$ 二维谱<sup>[45]</sup>

在数据分析的过程中, 使用蒙特卡罗模拟的方法直接给出弹性散射截面与卢瑟福散射截面的比值, 减少了精确测量靶厚和入射粒子数以及立体角计算过程中带来的系统误差。在弹性散射角分布测量中, 由于截面对于角度非常敏感, 也就是说对于角度(位置)的精确测量要求非常高。一般在实验数据分析过程中, 均需要对探测器位置进行校准。在这次实验过程中以小角区为纯卢瑟福散射为依据, 发展了一套适用于 RIBLL 的位置校准方法<sup>[47]</sup>。

其实验数据及理论计算结果如图 14 所示。我们提取到的 $^8\text{B}$ ,  $^7\text{Be}$  和  $^6\text{Li}$  在 Pb 靶上的约化总截面在误差范围内相同。CDCC 方法的计算结果表明, 破裂反应道对 $^8\text{B}$ 的弹性散射的耦合效应很小, 在实验误差范围内发现有破裂道耦合和没有破裂道耦合得到的计算结果均能较好地描述实验数据。本次实验数据中 $^8\text{B}$ 的弹性散射角分布的库仑虹并没有被压低, 这与位于势垒附近的丰中子弹性散射角分布明显不同。虽然 $^8\text{B}$ 的单质子分

离能只有 0.1375 MeV, 但在此能区 $^8\text{B}$ 的破裂道对弹性散射截面的影响却不明显。

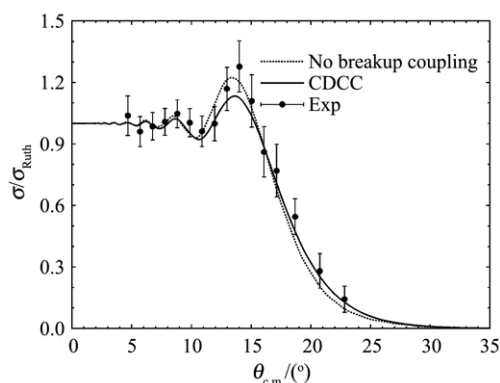


图 14 IMP 开展的 $^8\text{B}$ 在 Pb 上的弹性散射研究<sup>[46]</sup>

此后, IMP 陆续开展了丰质子核 $^9,^{10},^{11}\text{C}$ 核的弹性散射实验<sup>[48-49]</sup>, 其结果与 $^8\text{B}$ 的实验结果类似。我们进一步从理论上分析了丰中子核和丰质子核的弹性散射角分布区别的来源<sup>[50]</sup>, 分析比较了丰质子核 $^8\text{B}$ 和丰中子核 $^{11}\text{Be}$ 在不同能量、不同质量数的靶上弹性散射角分布的依赖关系。并从物理上进行了解释: 丰质子核中的价质子受到库仑势和离心势的作用, 破裂反应道的截面被压低, 并导致了破裂反应道对于弹性散射道的耦合效应也相对较弱, 这使得丰质子核的弹性散射角分布与丰中子核的结果有较大的差异。

## 7 讨论及展望

迄今为止, 已经有大量的实验和理论工作对质子晕候选核 $^8\text{B}$ 进行了研究, 但是 $^8\text{B}$ 的问题远没有解决, 其晕结构和奇特性质还非常值得深入的研究。现有的部分实验数据显示 $^8\text{B}$ 具有相对更大的均方根半径, 密度分布具有一个扩展的“尾巴”, 即 $^8\text{B}$ 具有质子晕结构。但是也有部分实验, 如 Tanihata 和 Obuti 等测量在高能情况下的反应总截面就认为 $^8\text{B}$ 的半径与 B 的其它同位素以及 $^8\text{Li}$ 相比较并没有增大, Pecina 等从 40 A MeV 的 $^8\text{B}$ 在 $^{12}\text{C}$ 靶上的弹性散射角分布提取到的总截面也没有明显增大。在弹性散射方面,  $^8\text{B}$ 在中重靶上的弹性散射实验只有 Aguilera 等<sup>[44]</sup>的数据, 实验提取到的总截面明显大于 $^7\text{Be}$ 和 $^6\text{Li}$ 的, 但是由于实验给出的角分布中数据点较稀疏, 尤其在擦边角(四分之一角)附近的数据点太少, 无法看到库仑虹是否被压低, 也不能从实验数据上获得破裂道对弹性散射道的耦合等方面的信息。在 IMP 开展的 $^8\text{B}$ 在 Pb 靶上的弹性散射测量的入射能量相对较高, 目前缺乏丰中子核在附近能量下的实验数据与之比较。对于 $^8\text{B}$ 的核子分布半径, 不同的实

验数据给出的数据差别非常大,其质子分布半径从 2.43 到 2.98 fm 不等,迫切需要有新的实验数据,尤其是使用新的、有效的实验方法去确定其半径。

Capel 等<sup>[51-52]</sup>的理论计算表明,弱束缚核的“弹散破裂截面比”对弱束缚核的单粒子结构参量,如单粒子结合能、自旋宇称等非常敏感而受靶(轻靶或者重靶)的影响很小。“弹散破裂截面比”方法作为一个新的研究弱束缚核单粒子结构的工具,还没有实验对其检验。该方法基于反弹碎裂模型<sup>[53]</sup>,主要包含两个假定:即(1)价核子和靶核的相互作用与核芯和靶的相互作用相比可以忽略;(2)核芯和价核子体系的激发能与入射能相比可以忽略。这些要求在入射能量较高(约 50 AMeV 以上)以及弹核为丰中子核(如  $^{11}\text{Be}$ )的条件下是可以很好满足的。但是,这些假定在  $^8\text{B}$  这样的丰质子核所引起的破裂反应中是否仍然成立,会有什么特殊的问题等,值得实验研究。现有的弱束缚核在重靶上的弹性散射和破裂反应截面的实验数据大多集中在能量较低的库仑势垒附近,而相对较高能区的数据很缺乏,这正好是 RIBLL 的优势和特色,所以希望可以在 RIBLL 上开展更深入的  $^8\text{B}$  的实验研究工作。

包括  $^8\text{B}$  在内的丰质子核的实验数据比丰中子核的实验数据更缺乏,这是由于丰质子核的束流更难产生。依托大科学装置 HIRFL-RIBLL,我们有机会产生较高能区的丰质子放射性束流,开展具有特色的研究。相对于丰中子核,丰质子核束流的流强和纯度更低,这就对探测设备提出了新的更高的要求,比如:高几何效率、高能量分辨、高位置分辨、高粒子鉴别能力等等。探测设备的使用也已经从单一的探测器向探测阵列发展,可以覆盖更大的立体角范围并同时进行多个反应道的测量。基于物理探测的需求,也结合 RIBLL 的实际,我们已经研制了一套硅阵列探测设备并投入到实验中<sup>[54]</sup>,通道数为 500 路左右,性能基本可以满足实验的需求。但在电子学方面使用的是传统模式,不能实现模块化,扩展升级的难度很大;由于电子学之间的互相干扰,噪声水平也很难压低。我们希望依托 RIBLL,采用芯片技术,研制一台通道数达到 1000 路以上的探测阵列,具有体积小、噪声低、集成度高、兼容性好等优良的性能,几何效率从现在的百分之二三十提高到百分之八十左右,大幅度提升束流的使用效率,积极拓展研究领域,开展  $^8\text{B}$  相关的更新的研究工作。

## 参考文献:

- [1] LIU W P, LI Z H, BAI X X, *et al.* *Nucl Instr and Meth B*, 2006, **204**: 62.
- [2] SUN Z, ZHAN W L, GUO Z Y, *et al.* *Nucl Instr and Meth A*, 2003, **503**: 496.
- [3] SHEN Wenqing, ZHAN Wenlong, YE Yanlin, *et al.* *Nucl Phys Rev*, 2001, **18**: 206. (in Chinese)  
(沈文庆, 詹文龙, 叶沿林, 等. *原子核物理理论*, 2001, **18**: 206.)
- [4] CANTO L F, GOMES P R S, DONANGELO R, *et al.* *Phys Rep*, 2015, **596**: 1.
- [5] TANIHATA I, SAVAJOLES H, KANUNGO R. *Prog Part Nucl Phys*, 2013, **68**: 215.
- [6] KOLATA J J, GUIMARAES V, AGUILERA E F. *Eur Phys J A*, 2016, **52**: 123.
- [7] WANG J S, SHEN W Q, ZHU Z Y, *et al.* *Nucl Phys A*, 2001, **691**: 618.
- [8] CAI Xiangzhou, SHEN Wenqing. *Prog in Phys*, 2001, **21**: 278. (in Chinese)  
(蔡翔舟, 沈文庆. *物理学进展*, 2001, **21**: 278.)
- [9] MITTIG W, CHOUVEL J M, ZHAN W L, *et al.* *Phys Rev Lett*, 1987, **59**: 1889.
- [10] SAINT-LAURENT, ANNE R, BAZIN D, *et al.* *Zeitschrift für Physik A*, 1989, **332**: 457.
- [11] TANIHATA I, HAMAGAKI H, HASHIMOTO O, *et al.* *Phys Rev Lett*, 1985, **55**: 2676.
- [12] TANIHATA I, KOBAYASHI T, YAMAKAWA O, *et al.* *Phys Lett B*, 1988, **206**: 592.
- [13] OBUTI M M, KOBAYASHI T, HIRATA D, *et al.* *Nucl Phys A*, 1996, **609**: 74.
- [14] WARNER R E, KELLEY J H, ZECHER P, *et al.* *Phys Rev C*, 1995, **52**: R1166.
- [15] NEGOITA F, BORCEA C, CARSTOIU F, *et al.* *Phys Rev C*, 1996, **54**: 1787.
- [16] FUKUDA M, MIHARA M, FUKAO T, *et al.* *Nucl Phys A*, 1999, **656**: 209.
- [17] WANG Quanjin, XIAO Guoqing, ZHAN Wenlong. *Prog Nat Sci*, 2002, **12**: 29. (in Chinese)  
(王全进, 肖国青, 詹文龙, 等. *自然科学进展*, 2002, **12**: 29.)
- [18] SCHWAB W, GEISSEL H, LENSKE H, *et al.* *Zeitschrift für Physik A*, 1995, **350**: 283.
- [19] SMEDBERG M H, BAUMANN T, AUMANN T, *et al.* *Phys Lett B*, 1999, **452**: 1.
- [20] JIN S L, WANG J S, YANG Y Y, *et al.* *Phys Rev C*, 2015, **91**: 054617.
- [21] JIN Shilun. Study of  $^8\text{B}$  Breakup Reaction[D]. Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese)  
(金仕伦.  $^8\text{B}$  碎裂反应实验研究[D]. 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 2015.)
- [22] YANG Yanyun. Development of  $8\times 8$  CsI(Tl) Array Detector[D]. Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 2008. (in Chinese)  
(杨彦云.  $8\times 8$  单元 CsI(Tl) 阵列探测器的研制[D]. 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 2008.)
- [23] OGATA K, YOSHIDA K, MINOMO K. *Phys Rev C*, 2015, **92**: 034616.
- [24] AUSTERN N, ISERI Y, KAMIMURA M, *et al.* *Phys Rep*,



- 1987, **154**: 125.
- [25] YAHIRO M, OGATA K, MATSUMOTO T, *et al.* *Prog Theor Exp Phys*, 2012, **1A206**: 44.
- [26] MINAMISONO T, OHTSUBO T, MINAMI T, *et al.* *Phys Rev Lett*, 1992, **69**: 2058.
- [27] SUMIKAMA T, NAGATOMO T, OGURA M, *et al.* *Phys Rev C*, 2006, **74**: 024327.
- [28] GUIMARAES V, KOLATA J J, PETERSON D, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2000, **84**: 1862.
- [29] KOLATA J J, GUIMARAES V, PETERSON D, *et al.* *Phys Rev C*, 2001, **63**: 024616.
- [30] TOSTEVIN J A, NUNES F M, THOMPSON I J. *Phys Rev C*, 2001, **63**: 024617.
- [31] AGUILERA E F, MARTINEZ-QUIROZ E, BELYAEVA T L, *et al.* *Physics of Atomic Nuclei*, 2008 **71**: 1163.
- [32] MAZZOCCO M, BOIANO A, BOIANO C, *et al.* *J Phys: Conf Ser*, 2018 **1078**: 012013.
- [33] COMMARA M, MAZZOCCO M, BOIANO A, *et al.* *J Phys: Conf Ser*, 2018 **966**: 012010.
- [34] AGUILERA E F, AMADOR-VALENZUELA P, MARTINEZ-QUIROZ E, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2011, **107**: 092701.
- [35] AGUILERA E F, KOLATA J J. *Phys Rev C*, 2012, **85**: 014603.
- [36] PAKOU A, STILIARIS E, PIERROUTSAKOU D, *et al.* *Phys Rev C*, 2013, **87**: 014619.
- [37] KOLATA J J, AGUILERA E F, GUIMARAES V. *Euro Phys Jour Web of Conference*, 2017, **163**: 00031.
- [38] KOLATA J J, HOWARD A M, MITTIG W, *et al.* *Nucl Instr and Meth A*, 2016, **830**: 82.
- [39] LEE M Y, BECCHETTI F D, O'DONNELL T W, *et al.* *Nucl Instr and Meth A*, 1999, **422**: 536.
- [40] KOROLEV G A, DOBROVOLSKY A V, INGLESSI A G, *et al.* *Phys Lett B*, 2018, **780**: 200.
- [41] PECINA I, ANNE R, BAZIN, *et al.* *Phys Rev C*, 1995, **52**: 191.
- [42] BARIONI A, ZAMORA J C, GUIMARAES, *et al.* *Phys Rev C*, 2011, **84**: 014603.
- [43] MORCELLE V, LICHTENTHALER R, LEPINE-SZILY A, *et al.* *Phys Rev C*, 2017, **95**: 014615.
- [44] AGUILERA E F, MARTINEZ-QUIROZ E, LIZCANO, *et al.* *Phys Rev C*, 2009, **79**: 021601.
- [45] YANG Y Y, WANG J S, WANG Q, *et al.* *Phys Rev C*, 2013, **87**: 044613.
- [46] YANG Y Y, WANG J S, WANG Q, *et al.* *Nucl Instr and Meth A*, 2013, **701**: 1.
- [47] CHEN Jiangbo, YANG Yanyun, WANG Jiansong, *et al.* *Nucl Phys Rev*, 2014, **31**: 53. (in Chinese)  
(陈江波, 杨彦云, 王建松, 等. *原子核物理评论*, 2014, **31**: 53.)
- [48] YANG Y Y, WANG J S, WANG Q, *et al.* *Phys Rev C*, 2014, **90**: 014606.
- [49] YANG Y Y, LIU X, PANG D Y, *et al.* *Phys Rev C*, 2018, **98**: 044608.
- [50] YANG Y Y, LIU X, PANG D Y. *Phys Rev C*, 2016, **94**: 034614.
- [51] CAPEL P, JOHNSON R C, NUNES F M. *Phys Lett B*, 2011, **705**: 112.
- [52] CAPEL P, JOHNSON R C, NUNES F M. *Phys Rev C*, 2013, **88**: 044602.
- [53] JOHNSON R C, AL-KHALILI J S, TOSTEVIN J A. *Phys Rev Lett*, 1997, **79**: 2771.
- [54] DUAN F F, YANG Y Y, HU B T, *et al.* *Nucl Sci Tech*, 2018, **29**: 165.

## Study on Proton Drip-line Nucleus ${}^8\text{B}$

YANG Yanyun<sup>1,2,1)</sup>, PANG Danyang<sup>3</sup>, DUAN Fangfang<sup>1</sup>, WANG Jiansong<sup>1,2</sup>, LIU Xingquan<sup>1</sup>, JIN Shilun<sup>1</sup>,  
MA Peng<sup>1</sup>, MA Junbing<sup>1</sup>, BAI Zhen<sup>1</sup>, HU Qiang<sup>1</sup>

(1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. School of Physics and Nuclear Energy Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** The proton dripline nucleus  ${}^8\text{B}$ , with a proton separation energy of 0.1375 MeV, is an archetypal proton halo candidate. The structure and mechanisms of reactions induced by this nucleus have received much attention from the experimental points of view. We review on the previous studies with measurements of reaction cross sections, longitudinal momentum distributions of fragments, electric quadruple moment, fusion cross sections, and elastic scattering angular distributions. More efforts, from both experimental and theoretical points of view, are needed to understand the nucleus  ${}^8\text{B}$ .

**Key words:** proton drip-line nucleus; halo nuclei; nuclear reaction; elastic scattering

**Received date:** 10 Aug. 2018; **Revised date:** 19 Oct. 2018

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(U1432247, U1632138, 11575256, 11705242)

1) E-mail: yangyanyun@impcas.ac.cn.