

奇异核特性及相关反应研究*

刘祖华

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 论述了晕核,尤其是质子晕核的特性及实验研究.探讨了放射性核引起的转移反应以及晕核的近库仑位垒融合反应.

关键词 质子晕核 同质异位相似晕 晕核融合

分类号 O571.23

1 引言

放射性核束的发展为核物理研究开拓了一个新领域,为探索大量远离稳定线的奇异核的结构和特性,以及相关的反应开辟了诱人的前景.本文讨论利用放射性核束开展晕核特性及相关反应的实验研究.

2 质子晕(皮)核探索

^{11}Li 、 ^{11}Be 、 ^{14}Be 、 ^{17}B 和 ^{19}C 等中子晕核以及 ^6He 、 ^8He 的中子皮核的发现,是放射性核束实验得到的最重要研究成果之一.由于晕核核芯外的晕核子具有异常大的弥散半径和非常小的结合能,以及晕与核芯之间可能存在软偶极共振等奇异特性,因而引起人们的广泛关注.对晕核特性及其引起反应的深入探索是目前国际上核物理研究的前沿课题.作为中子晕核研究的自然深入,国际核物理界已开始积极探索可能存在的质子晕核.理论计算表明, ^{17}Ne 、 ^{26}P 、 ^{27}S 可能为质子晕核, ^8B 、 ^{12}N 、 ^{17}F 可能是质子皮核.

晕核的存在需具备以下3个条件:(1)最后1个核子或核子对的分离能很小;(2)没有(如中子和中子对)或仅有很小的库仑位垒;(3)最后1个核子或核子对无或仅有弱的离心势垒.鉴于这3个条件,质子晕核只可能在轻核系统中存在,且仅可能使最后1个质子或质子对处于 $s(l=0)$ 和 $p(l=1)$ 轨道.

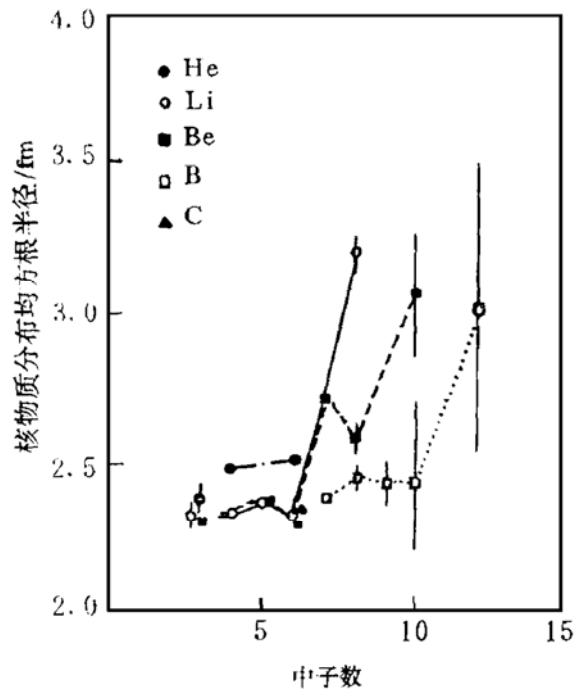


图1 若干轻核的核物质分布均方根半径

晕核现象首先是由核相互作用截面测量中观察到的^[1].由相互作用截面可推算核物质的半径.若干轻核的核物质分布均方根半径如图1所示.由图可见, ^6He 和 ^8He 核半径明显偏大,而 ^{11}Li 、 ^{11}Be 、 ^{14}Be 和 ^{17}B 的半径更大于由半经验公式计算的半径值.另一方面,根据海森堡测不准关系,空间分布很广的量子体系应具有很窄的动量分布.最近几年通过 ^{11}Li 、 ^{11}Be 和 ^{14}Be 碎裂反应实验^[2,3,4]测到的碎块纵向动量 P_{\parallel} 和横向动量 P_{\perp} 的分布宽度 $\sigma(P_{\parallel})$ 和 $\sigma(P_{\perp})$ 都在 20 MeV/c 左右,远窄于

* 1998-03-17 收稿.

稳定核实验中测到的相应动量分布. 图2是 790 MeV/u ^{11}Be 和 ^{11}Li 在 C 靶上碎裂的碎块 ^9Be 和 ^9Li 的横向动量分布. 两个动量谱都可分解为窄的和宽的两个分布. 窄的动量分布相应于晕中子具有很宽的空间弥散. 很大的核物质半径和很窄的碎块动量分布是晕核存在的主要直接判据.

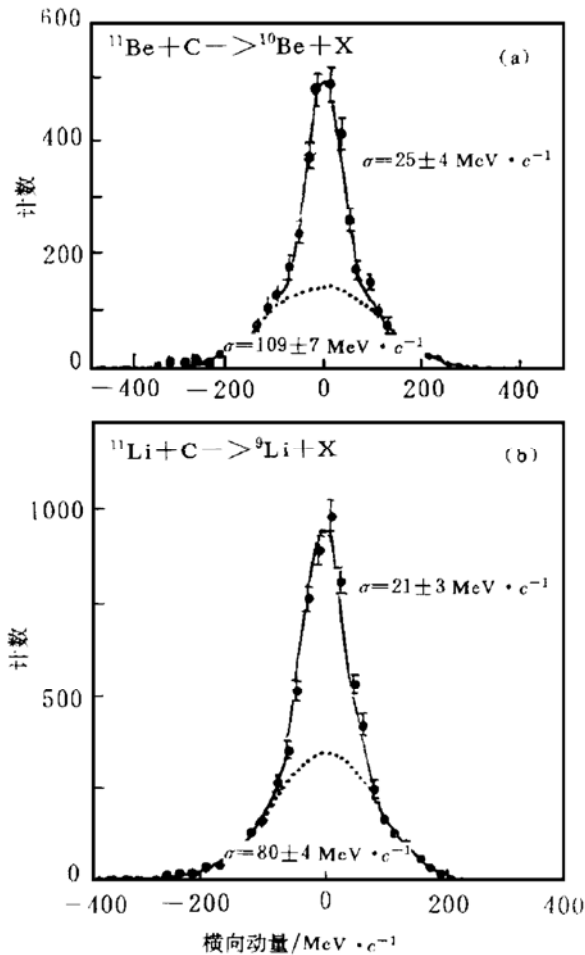


图2 ^{11}Be 和 ^{11}Li 弹核碎块 ^{10}Be 和 ^9Li 的横向动量分布

实验上研究最多的质子晕核是 ^8B . 实验证实 ^8B 有大的电四极矩^[5]、其破裂产物 ^7Be 有窄的动量分布^[6], 这些结果以及 ^8B 与天然元素 Si 总相互作用截面^[7]和 ^8B 在 ^{12}C 上的准弹散射^[8]等都断言, ^8B 是一个质子晕核. 可是, 日本 RIKEN 进行的相互作用截面测量^[9]未能找到这一实验证据, MSU 在 ^8B 破裂中测定 ^7Be 碎块的动量分布, 观察到 P_{\parallel} 分布是窄的, 但破裂过程的模型成功地解释了这些数据, 不需要假定一个异常扩展的空间

分布来解释 P_{\parallel} 动量分布^[10]. 而对 ^{12}N 、 ^{17}F 、 ^{17}Ne 、 ^{26}P 和 ^{27}S 等, 还尚未见到国际上就其是否是质子晕核开展实验研究的有关报导.

由上所述, 探索质子晕核或质子皮核是当今国际上尚未解决的核物理研究的重要前沿课题之一. 因此, 如能以不同的实验方法探索 ^8B 和 ^{17}F 等是否是质子晕(皮)核, 这将会对世人关注的这一领域作出重要的贡献.

3 同质异位相似晕

目前发现的晕核都位于中子滴线附近. 这些核具有高的同位旋. 可以想象, 晕结构很可能不只限于中子滴线附近的核. 稳定核中某些高同位旋的激发态也可能出现晕结构. 实验上 $^{12}\text{C}(n, \gamma)^{13}\text{C}(1/2^+)$ 有异常大的中子俘获截面, 暗示 ^{13}C 的 $2s_{1/2}$ 轨道可能具有晕结构^[11]. 此外, 作为例子, 可考虑具有晕结构的核的同质异位相似态. ^6He 的晕结构是清楚的, ^6Li 的 3.563 MeV (0^+ , $T=1$) 态是 ^6He 基态的相似态. 作为相似态, 其 0^+ 激发态是否具有围绕 α 核芯的质子-中子晕结构? 理论上, 用多集团模型计算结果表明, (0^+ , $T=1$) 态具有晕结构^[12], 如能从实验上证实该态具有质子-中子晕结构, 则它与 ^6He 基态就可构成同质异位相似晕. 这是一个非常吸引人的研究课题.

4 放射性核转移反应

众所周知, 一个或几个核子转移反应布居单粒子(单空穴)态或双粒子(双空穴)态, 非弹性散射会导致集体激发, 而弹性散射可得到核物质分布的信息. 放射性核的转移反应为研究远离稳定线的核结构开拓了广阔的前景. 可以相信, 远离稳定线的核谱和核结构的研究将会大大丰富人们的核知识, 改进和发展现有的核理论模型, 例如壳模型. 近年来, 国际上有放射性核束装置的实验室都在积极开展有关方面的研究. 其中最突出的实验成果是德国 HMI 和美国 Ohio 大学合

作, 用放射性核 ^{14}C 轰击放射性核 ^{10}Be 靶的双电荷交换反应 $^{10}\text{Be}(^{14}\text{C}, ^{14}\text{O})^{10}\text{He}$ 研究双满壳核 ^{10}He 的核谱^[13]. 实验用 Q3D 磁谱仪测到 ^{10}He 的基态和 2 个激发态. ^{10}He 的实验核谱见图 3. 研究表明, 在极端条件下, 由于能级的移动, 甚至能级秩序的改变, 幻数可能不是 $N=8$, 可能是 $N=10$. 他们的研究成果是轻的、丰中子核研究中的一个里程碑.

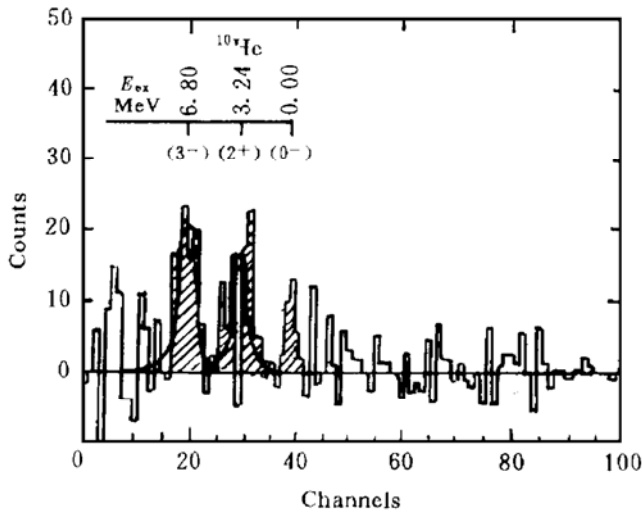


图 3 $^{10}\text{Be}(^{14}\text{C}, ^{14}\text{O})^{10}\text{He}$ 反应中 ^{10}He 的实验核谱
 $E_{\text{Lab}} = 334.4 \text{ MeV}$, $1.7^\circ < \theta_L < 3.0^\circ$.

5 晕核的近库仑位垒融合

晕核有三大特点: (1) 在核芯外有大的核子分布弥散, 即存在晕, 相互作用半径大; (2) 晕与核芯之间可能存在软偶极共振; (3) 晕中子或中子对结合能非常小, 易破裂. 这些特点构成了晕核引起反应的特殊性, 吸引着核物理界的广泛关注和极大兴趣. 其中, 晕核的近库仑位垒融合反应是近年来最热门的研究课题之一. 理论家们发表了大量文章探讨晕核的近垒融合. 普遍的看法是, 中子晕在核芯外大的弥散使融合位垒降低, 融合截面增加; 入射道与晕核的软偶极共振之间的耦合使融合位垒出现一个分布, 实际上也降低了有效位垒高度, 因而也使融合截面增大. 然而, 关于第三个特点, 易破裂对于近库仑位垒融合反应的影响, 存在着完全相反的观点. Hussein 等^[14] 在光学模型基础

上, 引入极化势来考虑破裂道效应, 得到的融合截面为

$$\sigma_{\text{fus}} = \frac{\pi}{k^2} \sum_l (2l + 1) T_l^{\text{opt}} P_l^s, \quad (1)$$

式中, T_l^{opt} 为光学势穿透系数, P_l^s 为考虑破裂后弹核的存留几率. 由于 $P_l^s < 1$, 所以破裂引起近垒融合截面明显减小, 即由于晕核易破裂, 对近垒融合起着阻禁作用. Dasso 等^[15] 在耦合道模型框架下, 考虑入射道与破裂道的耦合. 他们的计算结果表明, 与破裂道的耦合使近垒和垒下融合截面进一步增大. 图 4 是各种模型的计算结果, 其中点线是一维位垒量子穿透, 实线是加上与软偶极共振的耦合, 虚点线是 Hussein 等考虑了破裂效应后的计算结果, 虚线是 Dasso 等考虑了破裂道耦合后的预言值.

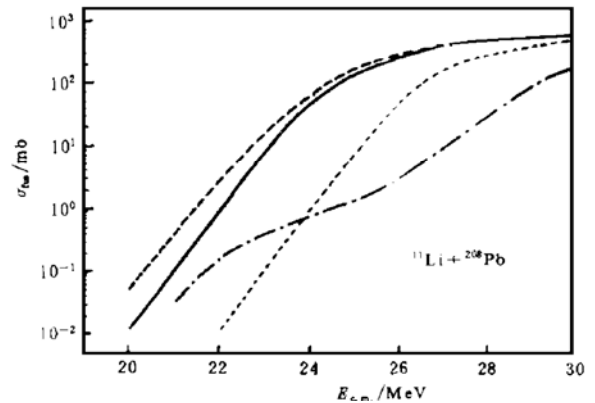


图 4 各种理论模型预言的中子晕核 ^{11}Li 和 ^{208}Pb 的融合激发函数
 详细说明见正文.

这两种完全相反的理论预言, 即晕的存在是增强还是阻禁近垒融合反应, 需要由实验来判断. 对此, 俄罗斯的 Dubna 对 $^{4,6}\text{He} + ^{209}\text{Bi}$ ^[16], 意大利 LNL、日本 RIKEN 及德国慕尼黑大学合作对 $^{9,11}\text{Be} + ^{209}\text{Bi}$, 法国 GANIL 和 Saclay 对 $^{9,11}\text{Be} + ^{238}\text{U}$ ^[17] 测量了近垒和垒下融合反应截面. 放射性核束的融合反应测量难度很大. 这主要由于放射性核束的束流强度比稳定核束低 6 个数量级, 且放射性核束的能量不单一, 而是有个分布. 因此, 尽管各

实验室作了大量努力, 至今尚未用放射性束就晕的存在是增强还是阻禁近垒融合反应作出明确的实验判断。

总之, 放射性核束在核物理、核天体物理和其它相关学科中的应用是今后核物理研究最重要的前沿领域之一. 本文所讨论的晕核的特性及其引起的反应是当今核物理界非常感兴趣的研究课题。

参 考 文 献

- 1 Tanihata I, Hamagaki H, Hashimoto O *et al.* Measurements of Interaction Cross Section and Nuclear Radii in the Light p-Shell Region. *Phys Rev Lett*, 1985, 55: 2676~2679
- 2 Orr N A, Anantaraman N, Austin S M *et al.* Momentum Distributions of ${}^9\text{Li}$ Fragments Following the Breakup of ${}^{11}\text{Li}$. *Phys Rev Lett*, 1992, 69: 2050~2053
- 3 Kelley J H. the Parallel Momentum Distribution of ${}^{10}\text{Be}$ Fragments from the Breakup of ${}^{11}\text{Be}$. In: Morrissey D J, ed. *Proc. 3rd Conf on Radioactive Nuclear Beams. East Lansing (Michigan): Editions Frontieres, 1993, 345~349*
- 4 Tanihata I, Kobayashi T, Suzuki T. Determination of the Density Distribution and the Correlation of Halo Neutrons in ${}^{11}\text{Li}$. *Phys Lett*, 1992, B287: 307~311
- 5 Minamisono T, Ohtsubo T, Minami I *et al.* Proton Halo of ${}^8\text{B}$ Disclosed by Its Giant Quadrupole Moment. *Phys Rev Lett*, 1992, 69: 2058~2061
- 6 Schwab W, Geissel H, Leske H *et al.* Observation of a Proton Halo in ${}^8\text{B}$. *Z Phys*, 1995, A350: 238~284
- 7 Warner R E, Kelley J H, Zecher P *et al.* Evidence for a Proton Halo in ${}^8\text{B}$: Enhanced Total Reaction Cross Sections. *Phgs Rev*, 1995, C52: R1166~1169
- 8 Pecina J, Aivik R, Bazin D *et al.* Quasielastic Scattering of ${}^8\text{B}$ and ${}^7\text{Be}$ on ${}^{12}\text{C}$ at 40 MeV/nucleon. *Phys Rev*, 1995, C52: 191~198
- Negoita F, Borcoa C, Carstion F *et al.* ${}^8\text{B}$ Proton Halo Via Reaction and Breakup Cross Section Measurements. *Phys Rev*, 1996, C54: 1787~1797
- 9 Obuti M M, Kobayashi T, Hirata D *et al.* Interaction Cross Section and Radius of the ${}^8\text{B}$ Nucleus. Report RIKEN-AF-NP-227, 1996
- 10 Kelley J H, Austin S M, Azhari *et al.* Study of the Breakup Reaction ${}^8\text{B}\rightarrow{}^7\text{Be}+p$: Absorption Effects and E2 Strength. *Phgs Rev Lett*, 1997, 77: 5020~5023
- 11 Otsuka T, Ishihara M, Fukunishi N *et al.* Neutron Halo Effect on Direct Neutron Capture and Photodisintegration. *Phys Rev*, 1994, C49: R2289~2292
- 12 Suzuki Y, Arai K, Ohbayasi Y *et al.* Study of Halo Structure in Light Nuclei with a Multicluster Model. *Nucl Phys*, 1995, A588: 15C~22C
- 13 Ostrowski A N, Bohlen H G, Gebauer B *et al.* Spectroscopy of ${}^{10}\text{He}$. *Phys Lett*, 1994, B338: 13~18
- 14 Hussein M S, Pato M P, Canto L F *et al.* Near-barrier Fusion of ${}^{11}\text{Li}$ with Heavy Spherical and Deformed Targets. *Phys Rev*, 1992, C46: 377~379
- 15 Dasso C H, Vitturi A. Does the Presence of ${}^{11}\text{Li}$ Breakup Channels Reduce the Cross Section for Fusion Processes? *Phys Rev*, 1994, C50: R12~14
- 16 Penionzhkevich Yu E, Cherepanov E A, David I *et al.* Investigation of the Elastic Scattering and Fission Reaction Induced by ${}^6\text{He}$ Beam. *Nucl Phys*, 1995, A583: 791~794
- 17 Fekou-Youmbi V, Sida J L, Alamanos N *et al.* Sub-coulomb Fusion with Halo Nuclei. *Nucl Phys*, 1995, A583: 811~816

Properties of Exotic Nuclei and Study of Relevant Reaction

Liu Zuhua

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

Abstract The properties of halo nuclei, especially proton halo nuclei and their experimental researches have been reviewed. The transfer reactions induced by radioactive beams and near-barrier fusion with halo nucleus are discussed.

Key words proton halo nuclei isobaric resemblance halo fusion with halo nucleus