

文章编号: 1007-1627(2001)04-0285-04

晕核和推广的 Glauber 理论^{*}

陈宝秋^{1,2}, 赵耀林¹, 马中玉^{1,2,3}

¹ 中国原子能科学研究院, 北京 102413;

² 兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心, 甘肃 兰州 730000;

³ 中国科学院理论物理研究所, 北京 100080)

摘 要: 简要介绍了中子晕和质子晕研究的最新实验进展, 同时, 讨论了近年来发展的同位旋, 能量有关的具有晕核结构的 Glauber 理论及它在描述晕核与核散射时的重要性.

关键词: 中(质)子晕; 晕核; 核反应; Glauber 理论

中图分类号: O571.21; O571.4 **文献标识码:** A

1 引言

众所周知, 放射性核束物理能成为核物理研究的前沿领域是由于近年来在放射性核束装置上的实验中发现了许多新的物理现象, 最主要是: 某些轻核中存在的中(质)子晕, 如 ${}^8\text{B}$, ${}^{26-30}\text{P}$, ${}^{11}\text{Li}$, ${}^{11}\text{Be}$, ${}^{14}\text{Be}$, ${}^{17}\text{B}$, ${}^{19}\text{C}$ 等^[1]; 超重元素如 $Z=110, 111, 112, 114$ ^[2]. 晕核是低密度, 弱束缚核系统具有非常特殊的性质: 核的中心具有正常的核密度, 而外面分布着低密度的中子(或质子)云. 由于核的费米面接近连续态, 最外面的核子的分离能很小, 核表面有很大的弥散, 最外面的一个或几个核子具有非常大的空间分布, 可能形成中(质)子晕. 弱束缚核由于束缚态与连续态之间的耦合及可能存在的低能散射, 使某些传统的核结构理论和反应机制变为不精确甚至不适用. 对低密度, 弱束缚核系统性质的描述是揭示同位旋自由度理想的实验室, 具有非常重要的物理意义, 引起国内外核物理学家的高度重视. 由于低密度、弱束缚核系统和稳定线附近核具有非常不同的性质, 所以, 如何描述从稳定线附近核到低密度、弱束缚核系统性质是对核理论挑战, 也是机遇. 因为传统的核理论模型和反应机制都是在符合稳定线附近核的性质基础上建立起来的, 当这些模型与反应机制推广到低密度、弱束缚核系统时, 它们的适用程度必须加以检验, 需要修

正或发展现有的理论模型. 大多数的晕核是滴线核, 由于人们对滴线核核谱的信息了解很少甚至连核基态的自旋和宇称都不知道, 而且实验上目前还无法直接测量晕核的密度分布. 所以, 人们希望通过测量晕核与稳定核散射的反应截面(σ_R)或相互作用截面(σ_I)来抽出晕核的密度分布. 实验上得到相互作用截面(σ_I)的增强, 这意味着存在中子晕或质子晕. 通常用来分析实验反应截面(σ_R)或相互作用截面(σ_I)的数据的理论模型有: 经验近似、光学模型和 Glauber 理论等. 最常用而有效的理论模型是 Glauber 理论. 下面将集中介绍中子晕和质子晕研究的最新实验进展和讨论推广的 Glauber 理论及它在描述晕核与核散射时的重要性.

2 晕核

晕核的种类: 理论上预言晕核有中子晕、质子晕、n-p 晕和晕集团 4 种类型. 实验上已发现了中子晕和质子晕, 目前虽然 n-p 晕和晕集团还未被实验上发现, 但是, 从实验上寻找它们的存在对于了解晕核种类和晕的形成机制都具有重要意义.

晕状态: 通常的晕核如 ${}^{11}\text{Li}$, ${}^{11}\text{Be}$, ${}^{14}\text{Be}$, ${}^{17}\text{B}$, ${}^{19}\text{C}$ 等都处于基态而且是滴线核. 但有些核如 ${}^{13}\text{C}^*$, ${}^{19}\text{F}^*$ 等它们的基态不形成晕核结构, 而它们的激发态形成晕核结构, 而且这些核都是稳定核.

在表 1 列出中子晕和质子晕的候选者. 最近,

收稿日期: 2001-09-29; 修改日期: 2001-10-28

* 基金项目: 国家重点基金研究发展规划(G2000077407); 国家自然科学基金资助项目(19835010, 19847002, 10075080)

作者简介: 陈宝秋(1940-), 男(汉族), 福建福州人. 研究员, 从事核理论研究.

Ozawa 等^[3]在 GSI 用能量为 950 A MeV 的束流 $^{10-11}\text{B}$, $^{12-20}\text{C}$, $^{14-23}\text{N}$, $^{16-24}\text{O}$ 和 $^{18-28}\text{F}$ 与 ^{12}C 核的碰撞来测量这些核的相互作用截面(σ_1)并结合以前的实验的结果给出 B, C, N, O 和 F 的同位素的相互作用截面(见图 1). 同时, 他们采用经验近似公式 $\sigma_1 = \pi[R_c(^{12}\text{C}) + r_0 A^{1/3}]^2$ 来描述这些同位素的相互作用截面, 他们的研究表明经验近似公式不能很好描述丰中子核特别是晕核的实验相互作用截面. 研究表明: 观察到 ^8B 的相互作用截面 σ_1 比邻近的核有明显增强, 所以, ^8B 是一个质子晕核; 观察到 ^{19}C 的 σ_1 比邻近的核有明显增强, 所以, ^{19}C 也是一个中子晕核, 而 ^{17}C 的 σ_1 比邻近的核没有明显增强, 它不是一个中子晕核; 观察到 ^{22}N 有很大的 σ_1 , 所以它是一个中子晕核; 同样, 观察到 ^{21}O 有很大的 σ_1 , 它也是一个中子晕核; 同时, 实验支持 ^{24}F 是一个中子晕核. 实验上新发现的这些晕核列在表 1 中.

表 1 中子晕和质子晕的候选者^[1, 3]

候选者	中子晕	候选者	质子晕
^6He	2	^8B	1
^{11}Li	2	^9C	1
^{11}Be	1	^{12}N	1
^{14}Be	2	$^{17}\text{F}^*$	1
^{17}B	2	$^{26-28}\text{P}$	1
^{19}B	2		
^{17}C	1?		
^{19}C	1		
^{22}N	1		
^{23}O	1		
^{24}F	1		
^{24}F	1		
^{29}Ne	1		
^{22}C	2		
^{29}F	2		

最近, Cortina-Gil 等^[4]测量了 800 MeV/u 的 $^{17-13}\text{C}$ 和 1 400 MeV/u 的 $^8-^{10}\text{B}$ 对靶核 C 和 Pb 的一个核子的逃逸截面, 他们发现 ^{19}C 和 ^8B 一个核子的逃逸截面比邻近核的一个核子的逃逸截面大得多. 所以, 这个实验支持了 ^{19}C 是一个中子晕核而 ^8B 是一个质子晕核. 值得指出的是早在几年前理论预示了 ^{22}N , ^{23}O , ^{24}F 是中子晕核^[5]. 另一方面, 寻找质子晕的工作倍受人们的重视. 经过长时间的争论, 人们最终确认 ^8B 是一个质子晕核^[6]. 于是更激起人们寻找质子晕的热情. 理论上首先预示了 $^{26-28}\text{P}$ 存在一个质子晕而 $^{27-29}\text{S}$ 存在二个质子晕^[7]. 后来, MSU 最新的实验证实了 $^{26-28}\text{P}$ 核存在一个质子

晕^[8]. 最近, 兰州近物所肖国青等^[9]在国际上首次鉴别出质子滴线区新核素 ^{25}P 的存在. 不久, 上海核子所和兰州近物所的实验专家用新的实验方法确定了 ^{27}P 是一个质子晕核. 我国的实

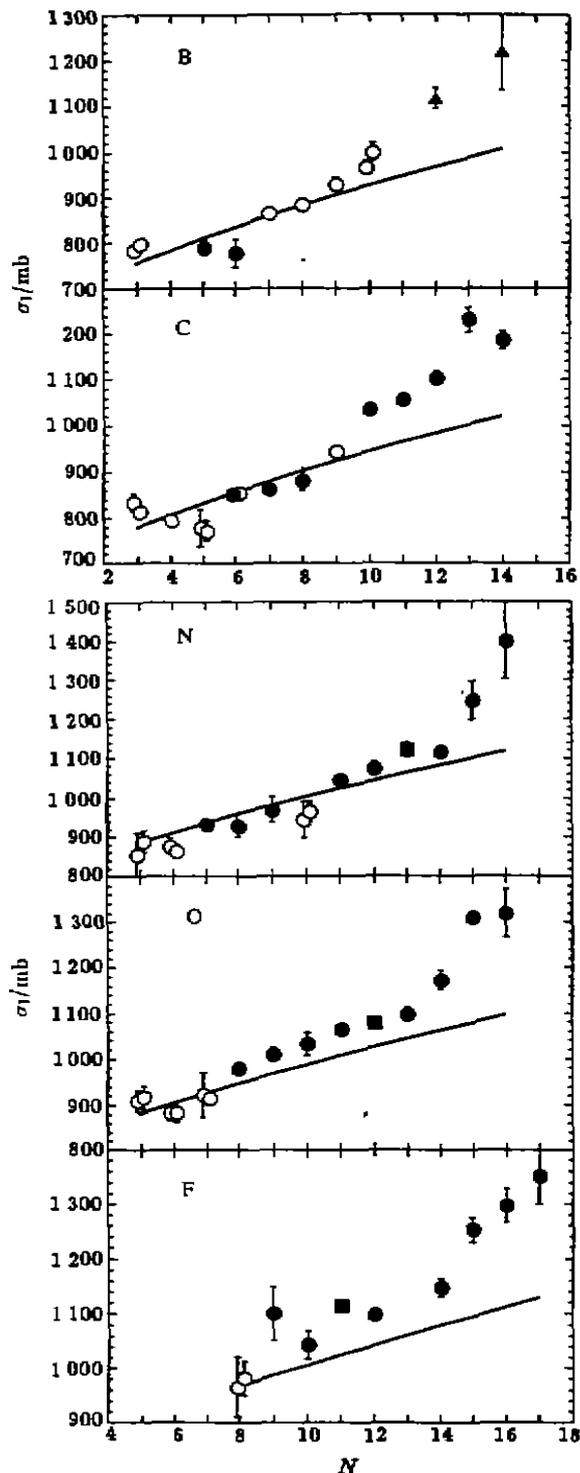


图 1 B, C, N, O, F 同位素与 ^{12}C 碰撞的相互作用截面^[3]

— 表示经验近似公式计算的结果.

验专家们正努力寻找可能存在的二个质子晕核²⁷⁻²⁸S.

3 推广的 Glauber 理论

众所周知, 在 60-70 年代, Glauber 理论是描述高能核子与核散射的强有力的工具. 在 80 年代, 由于理论上发展了相对论微观光学模型、相对论冲量近似和 Dirac Brueckner-Hartree-Fock 理论. 这些理论能同时描述高能核子与核散射的微分截面和自旋可观测量, 所以, 这些理论就成为描述高能核子与核散射的主要工具. 80 年代, Glauber 理论被推广来描述低能核-核的碰撞. 研究表明, 考虑库仑修正和有限力程在描述低能核-核的碰撞时是非常重要的^[10]. 赵耀林等^[10]系统地研究了中低能不同的人射核与靶核碰撞的总反应截面, 研究表明: 当考虑库仑修正和有限力程时, Glauber 理论才能很好地描述中低能核-核碰撞的实验数据. 从 1985 年以来, Glauber 理论一直是描述晕核与核碰撞的最主要理论方法. 这期间, 理论上最主要进展: 考虑了同位旋和能量有关的核子-核子散射截面; 考虑了炮弹的晕核结构. 近年来, 由 Ogawa 等^[11]和 Al-Khalili 等^[12]发展了具有晕核结构的 Glauber 理论或称为具有少体系统的 Glauber 理论. 这个理论考虑了价核子与核心的关联. 研究表明: 不考虑晕核结构的 Glauber 理论在光学极限近似(OLA)下计算导致过大的反应截面, 特别对晕核, 这意味着光学极限近似(OLA)计算晕核的均方根半径(RMS)偏小. 由于核的均方根半径是与同位素有关的, 它

对晕核结构是很敏感的, 为了导出合适的晕核的均方根半径, 必须采用具有晕核结构的 Glauber 理论.

我们应用具有晕核结构的 Glauber 理论分别计算了在高能 790 MeV/u 和低能 56.5 MeV/u 下晕核¹⁴Be 及其核心¹²Be 与靶核¹²C 散射的反应截面^[13], 对二者采用相同的参数 σ_{NN} , r_0 , α_{NN} (见表 2). 表 2 中 σ_R (HO) 为利用相同的谐振子参数得到的¹²Be(HO) 或¹⁴Be(HO) 密度分布计算的结果, 调整谐振子参数来拟合¹²Be+¹²C 高能反应截面与实验相符, 它同时也能很好地描述¹²Be+¹²C 低能实验数据. 但是由此计算得到的¹⁴Be+¹²C 的反应截面与实验数据相差很大. 为了拟合¹⁴Be+¹²C 高能实验数据, 必须重新调整两个中子的密度分布. 选取处在 $2s_{1/2}$ 态两个中子的谐振子长度 $b=3.00$ fm 时, 即两个中子的密度分布有很大的弥散分布, 才能得到合理的¹⁴Be+¹²C 的反应截面, 由此计算的结果记为 σ_R (HO1). σ_R (RMF) 为采用相对论平均场理论得到的¹²Be (RMF) 或¹⁴Be (RMF) 密度分布计算的结果. 研究表明, 采用 RMF 密度分布, 不仅对¹²Be+¹²C 反应, 在高能和低能情况下计算的反应截面与实验符合较好, 而且对¹⁴Be+¹²C 的反应截面也能给出很好的描述. 这是因为 RMF 自洽计算给出¹⁴Be 的处在 $2s_{1/2}$ 两个中子密度分布具有很长尾巴, 晕核-核的反应截面特别是在低能情况下, 对晕中子的弥散密度分布很敏感. 因此, 通过理论计算与实验结果的比较和分析可得出¹⁴Be 的最外层两个中子的密度有很大的弥散分布.

表 2 采用的参数、计算的反应截面及实验截面

	$E_{lab}/(\text{MeV} \cdot \text{u}^{-1})$	$\sigma_{NN}/(\text{fm}^{-2})$	r_0/fm	α_{NN}	σ_R/mb (HO)	σ_R/mb (HO1)	σ_R/mb (RMF)	σ_R/mb (Exp)
¹² Be+ ¹² C	790	4.1	0.53	-0.08	932±5		950±4	927±18
	56.5	9.4	0.86	1.0	1 161±6		1 200±6	1 238
¹⁴ Be+ ¹² C	790	4.1	0.53	-0.08	997±15	1 145±15	1 215±15	1 139±95
	56.5	9.4	0.86	1.0	1 242±19	1 486±21	1 620±21	1 900

4 总结

本文简要介绍了中子晕和质子晕研究的最新实验进展, 同时, 讨论了近年来发展的同位旋、能量有关的具有晕核结构的 Glauber 理论及它在描述晕核与核散射时的重要性. 为了推广 Glauber 理论来

描述晕核-核的散射, 必须考虑到晕核的特殊结构, 将晕核子和核心的密度分布分开处理, 给出了晕核-核散射的反应截面、相互作用截面表达式, 对表达式中出现的矩阵元的求解采用了改进的光学极限近似. 同时, 对截面的计算考虑了同位旋有关的核子-核子两体相互作用截面和由于较强库仑势存在导致

散射轨迹偏离的修正. 我们应用得到的表达式研究了晕核 ^{14}Be 与靶核 ^{12}C 的散射, 利用相对论平均场理论计算的有晕结构的密度分布和没有晕结构的谐

振子密度分布计算了在高能 790 MeV/u、低能 56.5 MeV/u 散射的反应截面, 通过与实验数据的比较发现 ^{14}Be 的两个处于 $2s_{1/2}$ 态的中子确有晕的性质.

参 考 文 献:

- [1] Tanihata I. Neutron Halo Nuclei[J]. J Phys, 1996, G22: 157-198.
- [2] Hofmann S, Munzenberg G. The Discovery of the Heaviest Elements[J]. Rev Mod Phys, 2000, 72: 733-767.
- [3] Ozawa A, et al. Measurements of Interaction Cross Section for Light Neutron-rich Nuclei at Relativistic Energies and Determination of Effective Matter Radii[J]. To be published in Nucl Phys A, 2001.
- [4] Cortina-Gil D, Baumann T, Geissel H, et al. One-nucleon Removal Cross Sections for $^{17-19}\text{C}$ and ^{8-10}B [J]. European Physical Journal, 2001, A10: 49-56.
- [5] Ren Z Z, Chen B Q, Ma Z Y, et al. One Neutron Halos in ^{22}N , ^{23}O , and ^{24}F and Three-neutron Halo in ^{24}F [J]. J Phys, 1996, G22: 523-526.
- [6] Smedberg M H, Baumann T, Aumann T, et al. New Results on the Halo Structure of ^8B [J]. Phys Lett, 1999, B452: 1
- [7] Chen B Q, Ma Z Y, Gruemmer F, et al. Relativistic Mean Field Theory Study of Proton Halos in the $2s_{1/2}$ Shell[J]. J Phys, 1998, G24: 97; Ren Z Z, Chen B Q, Ma Z Y, et al. One Proton Halo in ^{26}P and Two Proton Halo in ^{27}S [J]. Phys Rev, 1996, C53: R572.
- [8] Navin A, Bazin D, Brown B A, et al. Spectroscopy of Radioactive Beam from Single Nucleon Knockout Reaction: Application to the sd shell nuclei ^{25}Al and $^{26,27,28}\text{P}$ [J]. Phys Rev Lett, 1998, 81: 5 089.
- [9] Xiao G Q, Zhan W L, Guo Z Y, et al. Identification of New Nuclide ^{25}P in Region of Proton Drip Line[J]. Nucl Phys Rev. (in Chinese) 2000, 17: 259-263.
- [10] Charagi S K, Gupta S K. Coulomb-modified Glauber Description of Heavy-ion Reaction Cross Sections[J]. Phys Rev, 1990, C41: 1 610-1 618; Zhao Y L, Ma Z Y, Chen B Q. Nucleus-nucleus Scattering Based on a Modified Glauber Theory. To be published in Commun Theo Phys, 11.
- [11] Ogawa Y, Yabana K, Suzuki Y. Glauber Model Analysis of the Fragmentation Reaction Cross Sections of ^{13}Li [J]. Nucl Phys, 1992, A543: 722-750.
- [12] Al-Khahh J S, Tostevin J A. Matter Radii of Light Halo Nuclei[J]. Phys Rev Lett, 1996, 76: 3 903-3 906.
- [13] 赵耀林, 马中玉, 陈宝秋, 等. 推广的 Glauber 理论及其在晕核散射中的应用[J]. 高能物理与核物理, 2001, 25: 506-513.

Halo Nuclei and Extended Glauber Theory*

CHEN Bao-qu^{1, 2}, ZHAO Yao-lin¹, MA Zhong-yu^{1, 2, 3}

(1 China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;

2 Center of Nuclear Theoretical Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator of Lanzhou, Lanzhou 730000, China;

3 Institute of Theoretical Physics, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: The development of new experiments for neutron (or proton) halo is briefly described, while the isospin and energy dependence of Glauber theory and its importance in describing halo nuclei-nucleus scattering are discussed.

Key words: neutron (proton) halo; halo nuclei; reaction; Glauber theory

* Foundation item: National Major State Basic Research Development (G200077407); NSFC(19835010, 19847002, 10075080)