

文章编号: 1007-4627(2006)03-0280-04

# 丰质子核反应中轻带电粒子发射的同位旋效应\*

高 辉<sup>1, 2, 4</sup>, 肖国青<sup>1, 2</sup>, 张丰收<sup>1, 3</sup>, 高 启<sup>2, 4</sup>

(1 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)

2 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000

3 北京师范大学低能核物理研究所, 北京 100875

4 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 采用同位旋相关的 Boltzmann-Langevin 方程计算了核素<sup>12-15</sup>N 和<sup>17-20</sup>Ne 反应中轻带电粒子发射的同位旋效应。<sup>12-15</sup>N 与<sup>28</sup>Si 靶的反应结果显示轻带电粒子的产生截面有明显的同位旋效应,<sup>12</sup>N 的轻带电粒子产生截面突然增大, 与实验得出的结论相同, 由此检验了所采用的计算方法的可行性。同时还计算了<sup>17-20</sup>Ne 与<sup>9</sup>Be 靶的反应, 发现<sup>17</sup>Ne 的轻带电粒子产生截面也是突然增大, 并且其质子分布有较大的弥散, 据此认为<sup>17</sup>Ne 可能具有晕结构。

关键词: 轻带电粒子; 同位旋效应; 产生截面; 质子晕

中图分类号: O571.21 文献标识码: A

## 1 引言

研究原子核的同位旋效应对核结构及核反应机制的研究有着非常重要的意义。例如, 用量子分子动力学模型研究丰中子体系的中心和擦边反应, 发现出射核子的  $N/Z$  对对称势敏感<sup>[1]</sup>; 用微观半经典 Vlasov 方法研究同位旋矢量巨偶极共振时, 发现其峰位能量随同位旋  $I = (N - Z)/A$  的增大而增大<sup>[2]</sup>; 在相对论微观光学势中考虑同位旋效应对奇异核的研究是非常重要的<sup>[3]</sup>; 用晶格气体模型研究轻粒子产额发现轻带电粒子的产额及产额比是同位旋的敏感观测量<sup>[4]</sup>; 轻带电粒子发射产额的同位旋效应是验证丰质子核是否具有奇异结构的一种手段<sup>[5]</sup>。近年来, 随着各能区放射性束流装置的建成, 为同位旋的实验研究提供了有利的条件。随着实验条件的具备, 对同位旋的理论研究已成为目前的一个研究热点。本文用 Boltzmann-Langevin 方程 (BLE) 计算了 N 和 Ne 的同位素反应中轻带电粒子的产生截面, 并用<sup>12-15</sup>N + Si 的实验结果对模型进行了检验, 发现计算结果与实验结果基本一致。同时, 也计算了<sup>17-20</sup>Ne + Be 反应系统中轻带电粒子

的产生截面。

同位旋效应对研究质子晕核有很重要的意义, 质子晕核由于其特殊的结构会表现出一些反常的性质。近年来, 人们对质子晕核进行了很多的探索, 最先发现的质子晕核是<sup>8</sup>B, 理论上还预言了很多其它的质子晕核, 如<sup>25-28</sup>P, <sup>27-29</sup>S 以及<sup>17</sup>F 的激发态等核可能存在质子晕<sup>[6-9]</sup>。

## 2 理论模型

BLE 是研究中能碎裂反应的有效输运理论模型<sup>[10, 11]</sup>, 是 Boltzmann-Uehling-Uhlenbeck (BUU) 方程的推广。BUU 方程在描述中能重离子碰撞时取得了一定的成功。在低能重离子碰撞时, 平均场起主要作用。在高能时起主要作用的是核子之间的两体碰撞, 平均场可以忽略。在中能时比较复杂, 既有平均场的作用, 又有两体相互作用。BUU 方程恰当地包括了平均场作用和两体相互作用。但是 BUU 方程没有考虑两体关联效应, 而 BLE 包括了动力学涨落效应<sup>[12, 13]</sup>。描述涨落的单粒子密度  $\hat{f}(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t)$  的 BLE 为

\* 收稿日期: 2006-02-28 修改日期: 2006-04-20

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10105011)

作者简介: 高 辉 (1979-), 男 (汉族), 山东枣庄人, 博士研究生, 从事原子核实验及理论研究; E-mail: gaohu@inpcas.ac.cn

$$\left[ \frac{\partial}{\partial t} - \frac{\mathbf{p}}{m} \cdot \nabla_{\mathbf{r}} - \nabla_{\mathbf{r}} U(\hat{f}, \tau_z) \cdot \nabla_{\mathbf{p}} \right] \cdot \hat{f}(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) = K(\hat{f}) + \mathcal{K}(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t), \quad (1)$$

方程的左边是由平均场决定的 Vlasov 传播, 右边是碰撞项  $K(\hat{f})$  和碰撞项的涨落  $\mathcal{K}(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t)$ 。平均场采取 Skyrme 类型的参数化势, 同时还考虑库仑势和对称能。

$$U(\hat{f}, \tau_z) = \alpha \left[ \frac{\rho}{\rho_0} \right] + \beta \left[ \frac{\rho}{\rho_0} \right]^\gamma + \frac{1}{2} (1 - \tau_z) V_c + c \left[ \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho} \right] \tau_z, \quad (2)$$

式中,  $\rho_0 = 0.16 \text{ fm}^{-3}$  为核物质饱和密度;  $\rho$ ,  $\rho_n$  和  $\rho_p$  分别为总的、中子和质子的密度;  $\alpha$ ,  $\beta$  和  $\gamma$  采用软势参数;  $\tau_z$  是同位旋第三分量, 对于中子和质子分别等于 1 和 -1;  $V_c$  代表库仑势;  $c$  是对称能强度系数为 32 MeV。

数值模拟中采用试验粒子方法和网格法, 把一个真实的物理粒子投影到  $N$  个试验粒子中, 这些粒子在相空间中采用高斯分布。对平均场的微分采用网格法, 碰撞中核子所达到的实空间可以分成具有边长为  $l$  的立体元, 体元  $(M_x, M_y, M_z)$  中  $x$  方向平均场的微分

$$\nabla_x U \propto \frac{1}{2l} \{ U[\rho(M_x - l, M_y, M_z)] - U[\rho(M_x + l, M_y, M_z)] \}, \quad (3)$$

$y$  和  $z$  方向的可以类似得出。采用核内级联模型, 结合泡利原理考察在每一个时间间隔内核子能否发生碰撞。通过相对论平均场理论得出密度分布, 有密度分布随机抽样出每个试验粒子的坐标和动量, 以确定碰撞系统弹核与靶核的基态。构造碎片时采用并合重构模型, 核子之间相对位置和动量以及所占的体积要满足一定的条件才能构成碎片<sup>[13]</sup>。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 N 的同位素

$^{12}\text{N}$  是质子晕核的候选核之一, Wamer 等<sup>[14]</sup> 测得  $^{12}\text{N}$  与 Si 靶的反应总截面比其周围核的明显增大。在中国科学院近代物理研究所的 RIBLL 上进行了包括  $^{12-15}\text{N}$  在内的一系列次级产物反应的实

验<sup>[5]</sup>。RIBLL 提供的  $^{12-15}\text{N}$  束流能量约 55 MeV/u 与  $^{28}\text{Si}$  靶反应, 发现同位素前角区发射轻带电粒子产额随同位旋  $(N - Z)$  的增大而减小, 但是  $^{12}\text{N}$  的轻带电粒子产额突然异常地增大, 这表明它可能是质子晕核。反应总截面的数据也表明,  $^{12}\text{N}$  具有奇异的晕结构。因此给出了一个判断是否具有质子晕结构的方法, 就是前角区轻带电粒子产额是否突然增大。本文用 BLE 计算了 55 MeV/u 的  $^{12-15}\text{N}$  与 Si 靶反应轻带电粒子的产额, 结果如图 1 所示。可以看出,  $^{12}\text{N}$  的轻带电粒子产生截面明显地突然增大, 这与实验上的结论是一致的。RIBLL 上的实验没有区分轻带电粒子种类, 只是给出总的相对产额。我们计算出了各种轻带电粒子  $^1\text{H}$ ,  $^2\text{H}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^3\text{He}$  和  $^4\text{He}$  的产生截面, 然后得出总的相对产额。产生的轻带电粒子主要是质子, 其产生截面相对较大, 比  $^2\text{H}$  和  $^4\text{He}$  要高出 1 个量级。 $^3\text{H}$  的产生截面随着质量数的减小而减小, 这是因为它为丰中子核的原因, 它的产生截面相对其它轻粒子要小得很多, 因此实验中测到的轻带电粒子应主要是质子。计算结果中  $^{12}\text{N}$  产生带电粒子截面的增大幅度不如实验上的大, 这是因为计算的是  $4\pi$  范围内的粒子, 实验上只测到了前角区的粒子, 因此  $^{12}\text{N}$  的产生截面增加得不如实验上的明显。由于轻带电粒子的产生主要是来自直接碎裂反应, 其反应产物主要集中在前角区, 因此我们的理论计算结果与实验值基本符合。

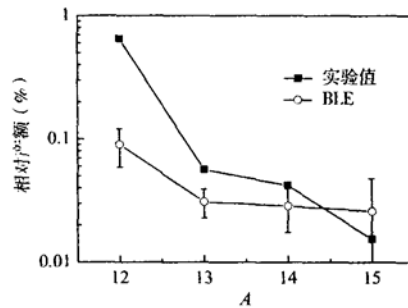


图 1  $^{12-15}\text{N} + \text{Si}$  反应轻带电粒子产额的实验值<sup>[5]</sup>与 BLE 计算值的比较

#### 3.2 Ne 的同位素

$^{17}\text{Ne}$  的最后一个质子分离能为 1.48 MeV, 最后两个质子的分离能是 0.95 MeV, 是双质子晕核候选核之一。Wamer 等<sup>[14]</sup> 对  $^{17}\text{Ne}$  的反应截面进行了测量, 发现其截面值偏大。Kanungo 等<sup>[15]</sup> 测量了  $^{17}\text{Ne}$  的反应总截面、双质子去除截面以及动量分

布宽度, 结果表明  $^{17}\text{Ne}$  可能是一个双质子晕核。Tanaka 等<sup>[16]</sup>对  $^{17}\text{Ne}$  实验数据用 Glauber 模型拟合出密度分布, 其质子密度分布拖了很长的尾巴, 他们推算出两个价质子处于  $2s_{1/2}$  态。我们用与计算  $^{12}\text{N}$  相同的方法, 计算了 60 MeV/u 的  $^{17-20}\text{Ne}$  与  $^9\text{Be}$  靶反应的轻带电粒子的产生截面, 其结果如图 2 所示。从单个的粒子来看也具有明显的同位旋效应, 随着中子数的减少, 其轻带电粒子的产额在增加。我们可以明显地看到,  $^{17}\text{Ne}$  的轻带电粒子产生截面异常的增大。由于  $^{17}\text{Ne}$  的最后两个质子的分离能比较小, 如果  $^{17}\text{Ne}$  具有弱束缚的晕结构, 那么它就很容易碎裂, 其价质子就会很容易脱离, 因而质子等轻带电粒子的产生截面会异常地增大。特别是质子产额的增大尤为明显。由文献[5]提供的判断方法, 我们认为  $^{17}\text{Ne}$  可能具有质子晕结构。

中子的分布方均根半径在减小, 而质子的分布半径在增大, 并且  $^{17}\text{Ne}$  增加得很明显, 因此  $^{17}\text{Ne}$  的质子分布有较大弥散。

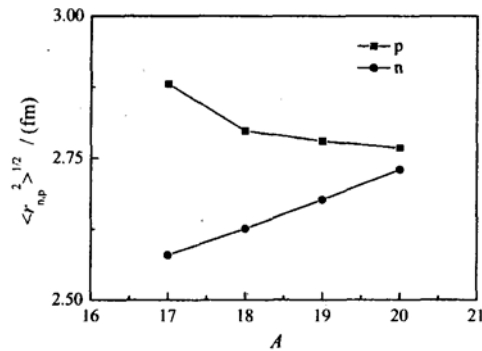


图 3  $^{17-20}\text{Ne}$  中子和质子的分布半径

综上所述,  $^{17}\text{Ne}$  最后两个质子处于  $2s_{1/2}$  态, 双质子分离能很小, 其质子等轻带电粒子很容易脱离, 表明其核外的质子是弱束缚的, 又因其质子的分布半径弥散得很大, 因此  $^{17}\text{Ne}$  极有可能是质子晕核。我们将要在中国科学院近代物理研究所的 RIBLL 上对  $^{17}\text{Ne}$  及其同位素进行精确的测量实验, 判断  $^{17}\text{Ne}$  是否是质子晕核提供更有力的证据。

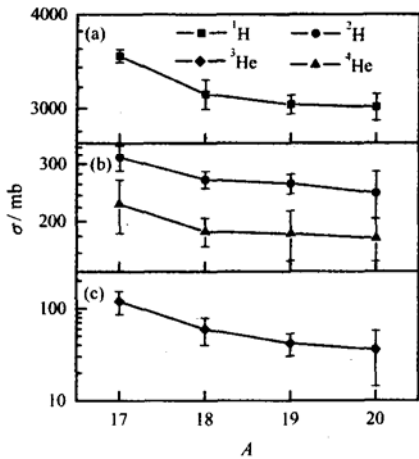


图 2  $^{17-20}\text{Ne} + ^9\text{Be}$  反应轻带电粒子的产生截面

### 4 结论

采用 BLE 方程研究了 N 同位素产生轻带电粒子的同位旋效应,  $^{12}\text{N}$  的轻带电粒子产生截面相对于  $^{13} \ ^{24} \ ^{25}\text{N}$  突然增大, 计算结果与实验结论是一致的。用同样的方法研究了 Ne 的同位素, 发现沿着同位素链的方向, 随着中子数的减少其轻带电粒子产额增加, 但是  $^{17}\text{Ne}$  的轻带电粒子产生截面突然增大, 其质子束缚得很弱, 并且密度的分布很弥散, 因此我们认为  $^{17}\text{Ne}$  可能具有晕结构。

王建松等<sup>[17]</sup>提出的方均根半径的唯象公式, 不但适合描述稳定核, 还适合描述滴线附近的非稳定核。用这个唯象公式计算  $^{17-20}\text{Ne}$  的质子和中子分布的方均根半径如图 3 所示。随着质量数的减少,

### 参 考 文 献:

[1] 李祝霞, 张英逊, 李庆峰等. 高能物理与核物理, 2004 **28** 1 343  
 [2] Wang J S, Shen W Q, Cai Y H, et al. Eur Phys J 2000 **A7** 355  
 [3] 荣 健, 马中玉. 物理学报, 2005 **54** 1 528  
 [4] Ma Y G, Su Q M, Shen W Q, et al. Phys Rev 1999 **C60** 24 607  
 [5] 王 猛, 王建松, 郭忠言等. 高能物理与核物理, 2002 **26** 803  
 [6] 陈立新, 肖国青, 郭忠言等. 原子核物理评论, 2003 **20** 231  
 [7] Chen B Q, Ma Z Y, Grunmer F, et al. J Phys 1998 **G24** 97  
 [8] Ren Z Z, Chen B Q, Ma Z Y, et al. Phys Rev 1996 **C53**

- R572
- [ 9 ] Ren Z Z, Amand F, Bobyk A. *Phys Rev* 1998, **C57** R2 752
- [ 10 ] Zhang F S, Suraud E. *Phys Lett* 1993, **B319** 35
- [ 11 ] Zhang F S, Suraud E. *Phys Rev* 1995, **C51** 3 201.
- [ 12 ] 张丰收, 葛凌霄. 原子核多重碎裂, 北京: 科学出版社, 1998 129—138
- [ 13 ] 明照宇, 张丰收, 陈列文等. 高能物理与核物理, 2000, **24** 656
- [ 14 ] Wamer R E, Thimurthy H, Woodroffe J *et al* *Nucl Phys* 1998, **A635** 292
- [ 15 ] Kanungo R, Chiba M, Adhikari S *et al* *Phys Lett* 2000, **B571** 21.
- [ 16 ] Tanaka K, Fukuda M, Mihara M, *et al* *Nucl Phys* 2004, **A746** 532c
- [ 17 ] Wang J S, Shen W Q, Zhu Z Y, *et al* *Nucl Phys* 2001, **A691** 618

## Isospin Effects on Production Cross Section of Light Charged Particles in Reaction of Proton Rich Nuclei\*

GAO Hui<sup>1, 2, 4</sup>, XIAO Guo-qing<sup>1, 2</sup>, ZHANG Feng-shou<sup>1, 3</sup>, GAO Qi<sup>2, 4</sup>

(1 *Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator of Lanzhou, Lanzhou 730000, China;*

2 *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

3 *Institute of Low Energy Nuclear Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;*

4 *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract** Within the Boltzmann-Langevin equation, the isospin effects on the production cross sections of light charged particles (LCP) in the reaction of proton rich nuclei were studied. We have calculated the LCP production cross sections of the reaction  $^{12-15}\text{N} + ^{28}\text{Si}$  at 55 MeV/u and  $^{17-20}\text{Ne} + ^9\text{Be}$  at 60 MeV/u. The LCP production cross sections of  $^{12}\text{N}$  increase abnormally in comparison with those of  $^{13-15}\text{N}$ . The result accorded with experimental one. It also happened to  $^{17-20}\text{Ne}$ . It suggests that  $^{17}\text{Ne}$  is probably a proton halo nucleus.

**Key words** light charged particle; isospin effect; production cross section; proton halo

\* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(10105011)