

同位旋相关的 Boltzmann - Langevin 方程及 新核素 ^{19}Na 产生截面的研究*

明照宇^{1,2} 张丰收^{1,2,4} 陈列文^{1,2} 朱志远^{1,3}
詹文龙^{1,2} 郭忠言^{1,2} 肖国青^{1,2}

1 (兰州重离子加速器国家实验室原子核理论研究中心 兰州 730000)

2 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

3 (中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

4 (中国高等科学技术中心 北京 100080)

摘要 介绍了一种同位旋相关的输运方程,研究了在入射能量为 28.7 和 60.0 MeV/u 时 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 的反应,对模型进行检验,发现计算结果较好地符合实验结果,说明了方程的可靠性. 利用该模型研究了在入射能量为 28.7 MeV/u 下反应系统 $^{17-20}\text{Ne} + ^{12}\text{C}$ 中核素 ^{19}Na 的产生截面,发现缺中子核引起的反应,具有更大 ^{19}Na 的产生截面,为新核素的探测找到了理论依据.

关键词 放射性核束物理 同位旋相关 Boltzmann - Langevin 方程 截面

1 引言

新核素的探索一直是国际核物理研究的前沿课题之一. 人们对此已做了大量的工作,但是,对不同弹靶体系可能产生的远离 β 稳定线核素的研究还很缺乏. 近年来,随着次级束流装置,如 IMP 的 RIBLL^[1], RIKEN 的 RIPS^[2], GSI 的 FRS^[3], GANIL 的 LISE, SISSI 和 SPIRAL^[4], MSU 的 A1200^[5] 相继建成并投入使用,使重离子物理的研究开辟了一个崭新的领域,即放射性核束(RNB)物理. 放射性核束物理的建立,为探索远离 β 稳定线的核素提供了实验基础.

目前,用于描写放射性核束引起反应的输运理论有两种类型,其一是同位旋相关的量子分子动力学(IQMD)模型^[6,7],它是从经典分子动力学发展而来的,直到现在仍没有完善的理论基础;其二是同位旋相关的玻尔兹曼类型方程(IBUU)^[8],但由于该方法未能包含由关联导致的动力学涨落,所以不适用于研究原子核的碎裂现象. 本文将传统的 Boltzmann - Langevin 方程(BLE)^[9,10] 发展为同位旋相关的 Boltzmann - Langevin 方程(IBLE)^[11],

1999-06-28 收稿

* 国家自然科学基金(19875068, 19847002), 国家重点基础研究发展规划(G2000077407)和中国科学院基金资助

并通过系统 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 分别在 60.0 和 28.7 MeV/u 入射能量下的反应,对该模型进行了验证,发现该模型计算结果较好地符合了实验结果. 利用 IBLE 分别对系统 $^{17-20,22}\text{Ne} + ^{12}\text{C}$ 在 28.7 MeV/u 入射能量下进行了研究,对各核素产生截面的比较可以发现,缺中子核引起的反应,产生缺中子核的几率更大.

2 模型和方法

2.1 Boltzmann-Langevin 方程(BLE)

描述涨落的单粒子密度 $f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t)$ 的 BLE 为

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

方程的左边描述了平均场 $U(f)$ 决定的 Vlasov 传播,右边是碰撞项 $K(f)$ 和碰撞项的涨落 $\delta K(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t)$,碰撞项的涨落来自于关联效应,它并没有包含在碰撞项中,可由关联函数表征如下

$$\langle \delta K(\mathbf{r}_1, \mathbf{p}_1, t_1) \delta K(\mathbf{r}_2, \mathbf{p}_2, t_2) \rangle = C(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2) \delta(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2) \delta(t_1 - t_2), \quad (2)$$

这里的平均是对时间步长 δt 内涨落的单粒子密度来进行的. 关联函数 $\langle \delta K(\mathbf{r}_1, \mathbf{p}_1, t_1) \delta K(\mathbf{r}_2, \mathbf{p}_2, t_2) \rangle$ 对空间和时间是局域的,与马尔可夫处理碰撞项一致.

2.2 同位旋相关的 Boltzmann-Langevin 方程(IBLE)

IBLE 从以下几个方面准确地考虑了同位旋效应:

(1) 平均场:在 IBLE 中,系统的平均场 $U(f, \tau_z)$ 可表示成下面的形式:

$$U(f, \tau_z) = U^{\text{loc}} + U^{\text{sym}} + U^{\text{C}}, \quad (3)$$

其中局域相互作用势 U^{loc} 、库仑相互作用势 U^{C} 、系统对称能 U^{sym} 分别为

$$U^{\text{loc}} = \alpha \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) + \beta \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma, \quad (4)$$

$$U^{\text{C}} = \frac{1}{2} (1 - \tau_z) V_{\text{C}}, \quad (5)$$

$$U^{\text{sym}} = C \left[\frac{\rho_n - \rho_p}{\rho} \right] \tau_z, \quad (6)$$

式中 $\rho_0 = 0.16 \text{fm}^{-3}$, 为正常核物质的饱和密度; ρ , ρ_n 和 ρ_p 分别是总的、中子的和质子的密度; τ_z 是同位旋自由度的第 3 分量,对于中子和质子分别等于 1 和 -1; V_{C} 代表库仑势. 参数 α , β 和 γ 的选择将采用所谓的软势或硬势(不可压缩系数为 200 MeV 或 380 MeV). 对称能强度系数 $C = 32 \text{MeV}$.

(2) 核子-核子碰撞截面:在碰撞项中采用了 σ_{cog} 和 σ_{exp} 两种核子-核子碰撞截面,前者与同位旋不相关,后者则与同位旋相关. IBLE 在计算中考虑了同位旋相关的核子-核子碰撞截面.

(3) 泡里阻塞效应:在 IBLE 中,泡里阻塞严格地区分了质子和中子. 核子发生碰撞后,在相空间中以核子为中心构造一个体积为 $h^3/2$ 的球(考虑了自旋自由度),然后考察此体积

元被其它的和具有相同的同位旋的核子所占据的几率,判断该碰撞被阻塞或部分阻塞.

(4) 初始化:弹核和靶核的初始化是区分中子和质子的.通过采用相对论平均场(RMF)的计算,能够给出弹核与靶核中质子与中子的密度分布.采用 Monte-Carlo 方法分别抽样得到弹核与靶核中质子与中子的空间坐标和相应动量的大小.核子在动量空间的抽样所采取的局域费米动量是区分中子和质子的.

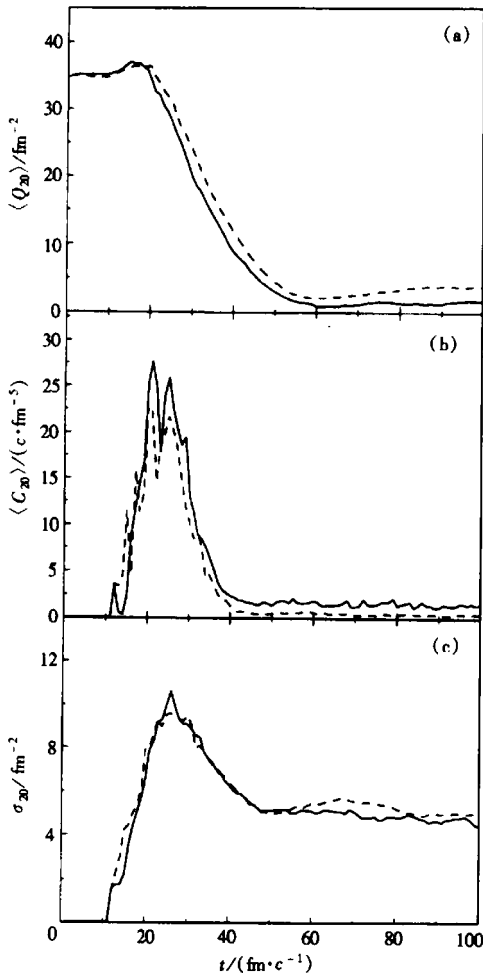


图 1 碰撞系统 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 在轰击能量为 60.0MeV/u 的对心碰撞中,动量分布四极矩的平均值 $\langle Q_{20} \rangle$ (a)、扩散系数的平均值 $\langle C_{20} \rangle$ (b)和相对应的方差(涨落)

σ_{20} (c)随时间的演化

····· 用 BLE 计算的结果,——用 IBLE 计算的结果.

比较.从图中可以看出计算结果和实验结果符合较好:最稳定核素 ^4He , ^6Li , $^{7,9}\text{Be}$, ^{11}B , ^{12}C 和 ^{14}N 相对各自的同位素产生截面最大,这与实验符合; ^{10}Be , $^8,^{12}\text{B}$, ^{10}C 和 ^{12}N 产生截面虽然较低,但仍可比较,对 ^1H — ^3H , ^3He , $^4,^8\text{Li}$, ^6Be , $^{14-16}\text{O}$ 和 $^{16,17}\text{F}$ 实验没能探测出来,这主要是由于其产额太低和实验条件所限制的缘故,在计算中没有给出 ^{14}C ,这可能是由于在计算

(5) 在并合重构模型^[12]中也考虑了同位旋效应:对核碎片的判断采用并合模型,同时为了避免线性碎片的出现,还采用了重构方法,某一核素的存在与否是通过与核素图的比较来检验的.

2.3 数值求解和模型检验

数值求解 IBLE,从原则上可以采用标准的求解随机微分方程的方法.但是,要直接求解六维相空间分布的微分方程在目前还不可能.另外,在适当的近似下可以描述密度涨落的粗糙性质.我们采用投影法来模拟求解 IBLE.涨落被投影到动量分布的区域多极矩上,即在动量空间展开时的第一和第二非零项,四极矩和八极矩.这些涨落最终以区域的形式被加入动量分布本身,它足以描述密度涨落.

为了检验 IBLE 的可靠性,首先对入射能量为 60.0MeV/u 时反应系统 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 在对心碰撞的情况下进行研究,如图 1 所示.从图中可以看出,在 IBLE 和 BLE 两种情况下, $\langle Q_{20} \rangle$, $\langle C_{20} \rangle$ 和 σ_{20} 随时间演化的趋势基本相同,这是同位旋对称系统的必然结果.但在 IBLE 计算结果中, $\langle Q_{20} \rangle$ 耗散的更为剧烈,达到平衡的时间更早,这主要是由于碰撞系统在用 IBLE 计算中比 BLE 计算中碰撞项的贡献更强所致(在 IBLE 中 $\sigma_{\text{in}} \approx 3\sigma_{\text{in}}$).

图 2 给出了 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 系统在入射能量为 28.7MeV/u 时,实验值^[13]和计算值的比较.

过程中选取的事件数不够的原因.

从上面计算可知,采用 IBLE 计算的结果能够与实验结果较好地符合,这为研究同位旋效应对某一同位素产额的影响提供了基础.

3 结果和讨论

图 3(a—e) 分别给出不同弹核^{17-20,22}Ne 在入射能量为 28.7MeV/u 时轰击同一靶核¹²C 各核素的产生截面. 首先分析稳定核²⁰Ne 轰击¹²C 引起的反应,从图 3(d) 可以看到反应产生的核素有¹⁻³H, ^{3,4}He, ^{6,7}Li, ^{6,7,9}Be, ^{11,12}B, ¹¹⁻¹³C, ¹³⁻¹⁵N, ¹⁵⁻¹⁷O, ¹⁷⁻¹⁹F, ¹⁹⁻²¹Ne 和^{21,22}Na,若不包括弹核和靶核的贡献,共 27 个核素产生.

图 3(a—c) 给出了缺中子核引起的反应. 缺中子核¹⁹Ne 轰击¹²C 生成核素的产生截面(图 3(c))与稳定核²⁰Ne 引起的反应(图 3(d))相比,它有⁶He, ⁴Li, ⁸B, ¹⁰C, ¹²N, ^{13,14}O, ¹⁶F, ^{17,18}Ne 和^{19,20}Na 共 12 个新的核素产生,其中 11 个都是缺中子的核素,这似乎表明缺中子弹核会导致缺中子核素的产生. 由¹⁸Ne 引起的反应(图 3(b))与由¹⁹Ne 引起的反应(图 3(c))相比,它多出⁹C, ¹¹N 和¹⁵F 这 3 个核素,同样它们是缺中子的核素,这和图 3(c)的结论一致,而且此时丰中子核素产额降低,甚至¹⁵N, ¹⁷O, ¹⁹F 和²²Na 这 4 个核素没有出现. 弹核¹⁷Ne 轰击¹²C 的反应(图 3(a))与¹⁸Ne(图 3(b))轰击的相比,有更缺中子的核素⁷B 和¹⁸Na 生成,并且一些丰中子核素产额降低,甚至⁶He 没有产生. 需要指出的是产生的¹⁵N, 尽管产额很低,这说明虽然缺中子核引起的反应能够增强缺中子核素的产额,但丰中子核的产生仍有一定的几率.

图 3(e) 是丰中子炮弹²²Ne 轰击靶核¹²C 反应生成核素的产生截面,相比图 3(d) 稳定核²⁰Ne 轰击靶核¹²C 有⁸Li, ¹⁰Be, ¹²B, ¹⁴C, ¹⁶N, ¹⁸O, ²⁰F, ²³Na 和^{23,24}Mg 共 10 个核素生成,而且缺中子核素产生截面减小,甚至⁶Be 没有生成,这是由于丰中子弹核引起反应所致.

从上面稳定核²⁰Ne 轰击¹²C 的反应结果分别与缺中子弹核¹⁷⁻¹⁹Ne、丰中子弹核²²Ne 轰击¹²C 的反应结果相比较来看,发现偏离 β 稳定线越远的缺中子核素引起的反应(图 3(a)—(c)),越容易产生更为远离 β 稳定线的缺中子核素,另外,比较图 3 中不同情况下各核素产生截面的数值大小,不难发现,越是缺中子多的反应系统,生成缺中子核素的产生截面数值越大,如图 3(a)—(c) 中的⁴Li, ⁸B, ¹⁰C 和¹²N 等;同样对于丰中子核素引起的反应(图 3(e)),则更容易产生丰中子核素,比较各图核素产生截面的数值大小,发现越是丰中子的反应系统,生成的丰中子核的产生截面数值越大,如图 3(e) 中¹³C 和¹⁷O 等所示.

对于 Na 的同位素如图 3 中空心三角所示,可以看到¹⁸Na 只出现在图 3(a) 中,¹⁹Na 的产生截面相比之下在图 3(a) 中的最高. ²³Na 只出现在图 3(e) 中,²²Na 产生截面在图 3(e)

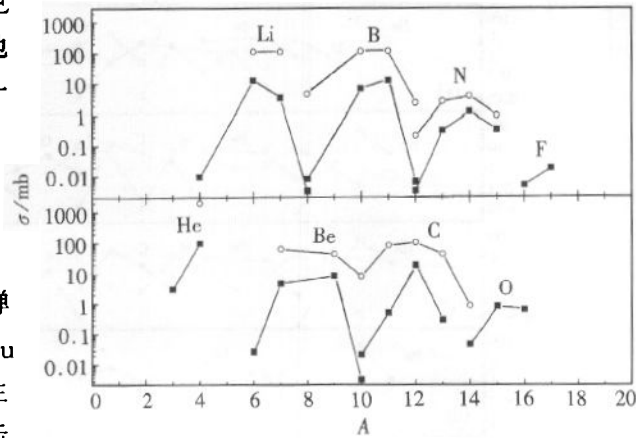


图 2 在入射能量为 28.7MeV/u 时反应系统¹²C + ¹²C 中不同核素产生截面的实验值和计算值的比较

○ 实验值, ■ 用 IBLE 计算的结果.

中的最高. 从这里可以看出, 弹核 ^{17}Ne 轰击 ^{12}C 的反应系统生成 ^{19}Na 的产生截面最大.

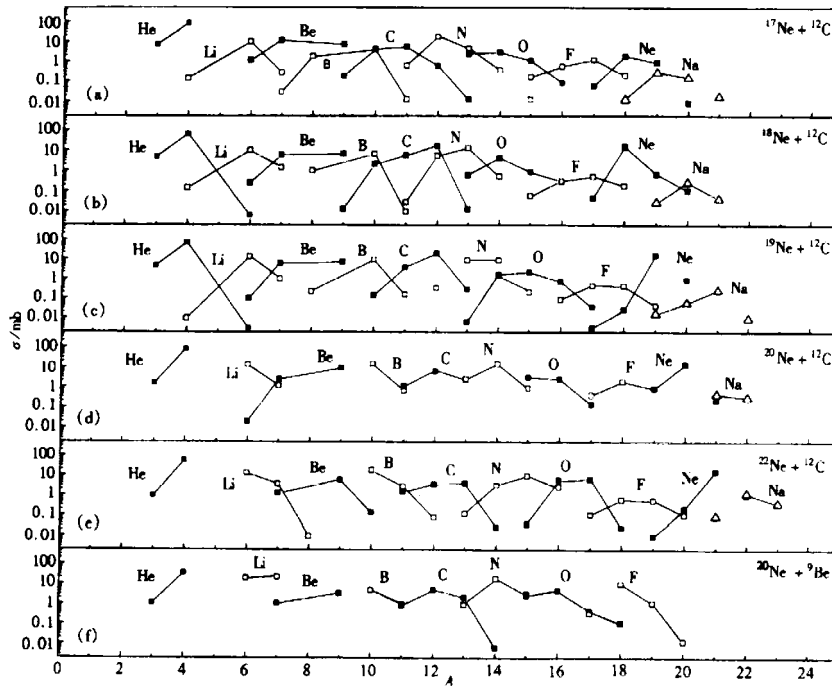


图 3 在人射能量为 28.7MeV/u 时, 不同弹核轰击相同靶核 ^{12}C 生成核素的产生截面
 □ 奇数核同位素链的结果, ■ 偶数核同位素链的结果, △ Na 同位素链的结果.

图 3(f) 是弹核 ^{20}Ne 在人射能量为 28.7MeV/u 轰击 ^9Be 生成各核素的产生截面, 它与图 3(d) 相比较可以发现, 弹核 ^{20}Ne 轰击 ^9Be 的生成核素比轰击 ^{12}C 的多出 ^{14}C , ^{18}O 和 ^{20}F , 而少了 ^6Be 和 $^{21,22}\text{Na}$ 这 3 种核素, 这说明在目前人射能量下, 对于轻靶核反应系统没有发生质子转移反应, 用轻靶核 ^9Be 不能生成 Na 和 Mg 等的同位素, 而且由于 ^9Be 是多中子核素, 所以在反应产物中多出 3 个丰中子核素, 这是可以理解的.

4 结论

在 IBLE 模型中, 考虑了同位旋相关的平均场、核子-核子碰撞截面和泡里阻塞, 而且在初始化时相空间的抽样中区分了中子和质子, 并合模型也考虑了同位旋效应, 这就将传统的 BLE 发展为 IBLE. 并通过碰撞系统 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 分别在 60.0 和 28.7MeV/u 入射能量下的反应, 对 IBLE 进行了检验, 发现计算结果较好的符合了实验结果. 利用 IBLE 分别对系统 $^{17-20,22}\text{Ne} + ^{12}\text{C}$ 和 $^{20}\text{Ne} + ^9\text{Be}$ 在 28.7MeV/u 入射能量下进行了研究, 对核素 ^{19}Na 产生截面进行计算和比较后, 发现缺中子核引起的反应, 具有更大 ^{19}Na 的产生截面.

参考文献 (References)

- 1 ZHAN W L et al. Science in China, A, 1999(in press)

- 2 Kubo T et al. Nucl. Instrum. Methods In Phys. Res. ,1992, **B70**:309—319
- 3 Geissel H et al. Nucl. Instrum. Methods In Phys. Res. ,1992, **B70**:286—297
- 4 Mueller A C, Anne R. Nucl. Instrum. Methods In Phys. Res. ,1991, **B56/57**:559—563
- 5 Sherrill B M et al. Nucl. Instrum. Methods In Phys. Res. ,1991, **B56/57**:1106—1110
- 6 CHEN L W et al. J. Phys. ,1997, **G23**:211—218
- 7 CHEN L W, ZHANG F S, JIN G M. Phys. Rev. ,1998, **C58**(4):2283—2291
- 8 LI B A, Ko C M, Bauer W. Inte. J. Mod. Phys. ,1998, **E7**(2):147—229
- 9 ZHANG F S, Surand E. Phys. Rev. ,1995, **C51**(10):1201—1210
- 10 ZHANG F S, Surand E. Phys. Lett. ,1993, **B319**:35—41
- 11 MING ZhaoYu, ZHANG FengShou, CHEN LieWen. Isospin Dependent Boltzmann - Langevin Equation. In: National Nuclear Reaction Work Shop, Anhui University(in Chinese), 1999, p. 50
(明照宇,张丰收,陈列文. 同位旋相关的 Boltzmann - Langevin 方程. 见:全国核反应讨论会文集. 安徽大学. 1999. p. 50)
- 12 ZHANG F S, Surand E. Phys. Rev. ,1995, **C51**:3201—3210
- 13 Czudek J et al. Phys. Rev. ,1991, **C43**:1248—1254

Isospin Dependent Boltzmann - Langevin Equation and the Production Cross Section of ¹⁹Na *

MING ZhaoYu^{1,2} ZHANG FengShou^{1,2,4} CHEN LieWen^{1,2} ZHU ZhiYuan^{1,3}
ZHAN WenLong^{1,2} GUO ZhongYan^{1,2} XIAO GuoQing^{1,2}

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

2 (Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Chian)

3 (Shanghai Institute of Nuclear Research, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

4 (CCAST(World Laboratory), Beijing 100080, China)

Abstract A new transport model (isospin dependent Boltzmann - Langevin equation) is developed and it is shown that this model can regenerate the experimental data for reaction of ¹²C + ¹²C at 28.7 MeV/u. The production cross section of ¹⁹Na is systematically studied for reactions of ^{17-20,22}Ne + ¹²C at 28.7 MeV/u. It is found that a neutron deficient projectile has larger ¹⁹Na cross section than a stable projectile.

Key words radioactive nuclear beam physics, isospin dependent, Boltzmann - Langevin equation, cross section

Received 28 June 1999

* Supported by National Natural Science Foundation of China (19875068, 19847002) Major State Basic Research Development Program(G2000077407), and Science Foundation of The Chinese Academy of Sciences