

重离子碰撞中的同位旋效应*

朱全伶 葛凌霄 张晓东

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

1993年3月17日收到

摘 要

在量子分子动力学模型中考虑了同位旋依赖的对称能项和库仑相互作用项, 讨论了对称能对 $^{20}\text{Ne}(30\text{MeV/u}) + ^{20}\text{Ne}$ 和 $^{28}\text{Ne}(30\text{MeV/u}) + ^{20}\text{Ne}$ 对头碰撞系统质量分布及集团形成的影响, 预言了形成丰中子同位素的有利条件。

关键词 二次束流线, 中间质量碎片, 非物理集团。

1 引 言

随着 Berkerly、GANNIL 和 RIKEN 等实验室次级束流装置的相继建成, 二次束流得到了应用, 重离子物理开辟了一个新的研究领域——放射核束学 (Radioactive Nuclear Beams Science)。它不但拓宽了重离子物理的研究领域, 也为产生丰中子或丰质子新核素提供了有利条件, 以便认识远离 β 稳定线的核素性质。可以预料, 放射核束学将成为重离子物理最前沿的研究领域。

1990年, GANNIL 利用 29MeV/u $^6\text{Li}(150\text{pps})$ 及 25.4MeV/u $^7\text{Li}(1000\text{pps})$ 次级束流分别去轰击 ^{28}Si , 结果发现两种反应的弹性散射角分布相差甚远^[1], 此外 ^6Li 等核的中子晕 (neutron halo) 问题, 也引起人们极大的兴趣。另一方面, De la Mota 等人^[2] 利用 Landau-Vlasov 模型的理论计算也表明: “同位旋在重离子碰撞中扮演着比较重要的角色”。量子分子动力学 (QMD) 模型被扩展至中低能过渡区域, 在研究重离子反应机制时已取得令人满意的结果^[3]。最近, 我们在 QMD 模型中考虑了对称能项, 将库仑相互作用修改为同位旋相关形式。对 $^{20}\text{Ne}(30\text{MeV/u}) + ^{20}\text{Ne}$ 、 $^{28}\text{Ne}(30\text{MeV/u}) + ^{20}\text{Ne}$ 的对头碰撞系统, 分别在有无对称能两种情况下进行了详细分析, 计算结果表明: 对称能对非对称系统作用较大, 由于在分析集团形成时, 采用的方法简单, 考虑对称能后, 将会改善集团形成结果, 使非对称碰撞系统形成非物理集团的数量明显减少; 对丰中子碰撞系统, 可能形成更丰中子的同位素。

2 基本公式

在 QMD 模型中, 考虑了对称能项及同位旋相关的库仑项后, 相互作用表示为

* 国家自然科学基金和中国科学院 LWTZ-1298 资助。

$$V^{tot} = V^{(2)} + V^{(3)} = V^{loc} + V^{yuk} + V^{Coul} + V^{sym}, \quad (1)$$

V^{tot} 、 $V^{(2)}$ 和 $V^{(3)}$ 分别代表总相互作用项、两体相互作用项及三体相互作用项, V^{loc} 、 V^{yuk} 、 V^{Coul} 、 V^{sym} 则分别代表局域相互作用项、Yukawa (表面)相互作用项、库仑相互作用项和对称能项。对 V^{loc} 和 V^{yuk} 两项的具体形式见文献[3], 其中的对称能项, 可从 Skyrme 相互作用的能量密度出发^[4], 得到对称能密度为

$$\varepsilon^{sym}(\mathbf{r}) = \frac{C}{2} \frac{(\rho_n(\mathbf{r}) - \rho_p(\mathbf{r}))^2}{\rho_0}, \quad (2)$$

式中 C 为对称能强度系数, 它的大小由满足有限核的基态性质来确定, 本文取 $C = 33$ MeV, $\rho_n(\mathbf{r})$ 、 $\rho_p(\mathbf{r})$ 分别为中子密度与质子密度, 且

$$\rho_n(\mathbf{r}) - \rho_p(\mathbf{r}) = \frac{1}{(2\pi L)^{3/2}} \sum_i (-t_{iz}) \cdot \exp\{-(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i)^2/2L\}, \quad (3)$$

由(2)、(3)两式可以得到总对称能为

$$U_{sym}^{(2)} = \int_{-\infty}^{+\infty} \varepsilon^{sym}(\mathbf{r}) d\mathbf{r} = \frac{C}{2\rho_0} \sum_{i \neq j} t_{iz} \cdot t_{jz} \cdot \frac{1}{(4\pi L)^{3/2}} \cdot \exp\{-(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j)^2/4L\}. \quad (4)$$

对库仑部分亦采用能量密度方法, 得到系统总库仑势为

$$U_{Coul}^{(2)} = \frac{e^2}{4} \sum_{i \neq j} \frac{(1 + t_{iz})(1 + t_{jz}) \left[1 - \operatorname{erfc}\left(\frac{r_{ij}}{\sqrt{4L}}\right) \right]}{r_{ij}}, \quad (5)$$

其中 $\operatorname{erfc}(x)$ 为余误差函数, L 为坐标空间中高斯波包的宽度, $r_{ij} = |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|$, 而

$$t_{iz} = \begin{cases} 1 & (\text{质子}), \\ -1 & (\text{中子}) \end{cases} \quad (6)$$

为第 i 个核子的同位旋 z 分量。

基态时, 用 Monte-Carlo 方法, 分别在 $R = 1.142A^{1/3}$ 及 P_F (费米动量)的球内, 对初始核的坐标及动量进行随机抽样, 核子之间的距离要求大于 1.7fm, 核子之间的坐标和动量满足测不准关系。初始核在基态时传播的稳定性已做了详细的检验。奇异核的基态性质是一个正在研究的问题, 密度分布、结合能等在没有确定情况下, 不得不假定奇异核与稳定核具有相类似的基态。碰撞过程中, 集团的形成条件及选择方法请参阅文献[3]。

3 计算结果和讨论

用改进的 QMD 模型, 对 $^{20}\text{Ne}(30\text{MeV/u}) + ^{20}\text{Ne}$ 、 $^{20}\text{Ne}(30\text{MeV/u}) + ^{20}\text{Ne}$ 对头碰撞系统, 在有对称能和无对称能两种情况下进行了详细计算。首先我们观察了 $^{20}\text{Ne}(30\text{MeV/u}) + ^{20}\text{Ne}$ 和 $^{20}\text{Ne}(30\text{MeV/u}) + ^{20}\text{Ne}$ 碰撞系统形成非物理集团的具体情况。这里所指的非物理集团是核素图上不可能存在、全部由中子或质子形成的集团(中子、质子除外)。发现对称能对 $^{20}\text{Ne}(30\text{MeV/u}) + ^{20}\text{Ne}$ 系统形成非物理集团的影响不大, 有对称能时, 形成非物理集团的几率为 4.0%, 不考虑对称能时, 非物理集团出现的几率为 3.8%, 二者差别不大。对称能的考虑并未减少非物理集团的出现几率。此时非物理集团出现的原因, 是由于在分析集团形成时没有考虑其它物理限制因素造成的。如动量限制条件, 它

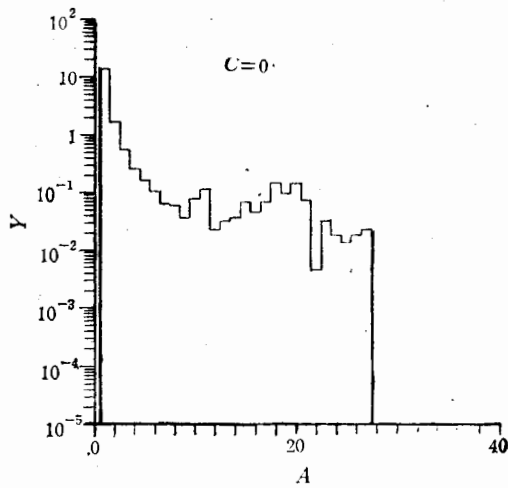


图 1 无对称能时 $^{20}\text{Ne}(30\text{MeV}/u) + ^{20}\text{Ne}$ 对头碰撞系统的质量分布

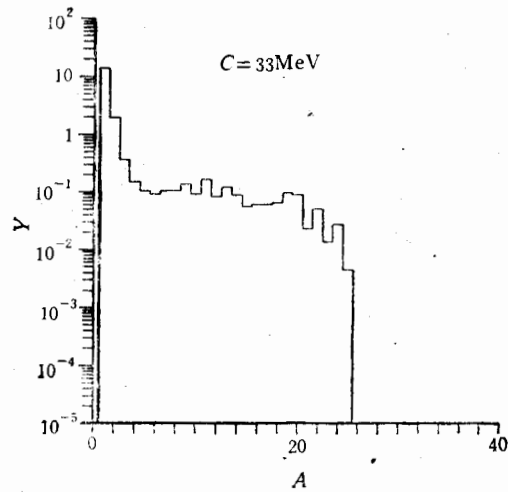


图 2 有对称能时 $^{20}\text{Ne}(30\text{MeV}/u) + ^{20}\text{Ne}$ 对头碰撞系统的质量分布

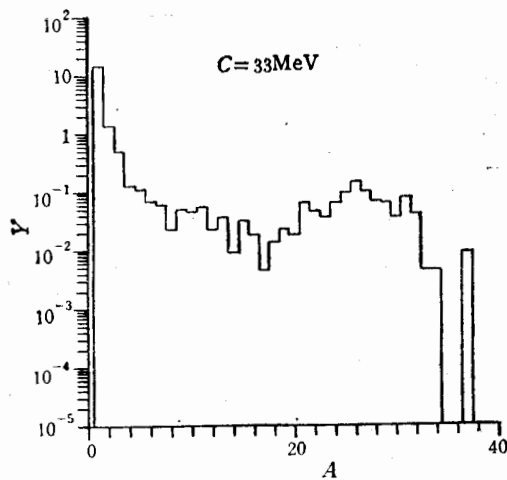


图 3 有对称能时 $^{28}\text{Ne}(30\text{MeV}/u) + ^{20}\text{Ne}$ 对头碰撞系统的质量分布

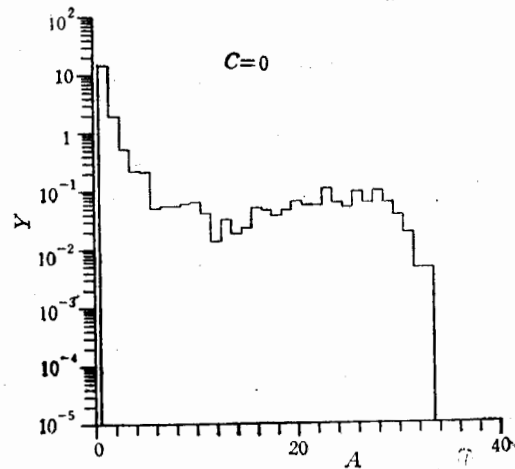


图 4 无对称能时 $^{28}\text{Ne}(30\text{MeV}/u) + ^{20}\text{Ne}$ 对头碰撞系统的质量分布

对低能轻碰撞系统比较重要,但对高能重碰撞系统,由于库仑力作用较大,可能会削弱对称能的作用。然而对非对称的 $^{28}\text{Ne}(30\text{MeV}/u) + ^{20}\text{Ne}$ 碰撞系统,情况就不同了,有对称能时,非物理集团的出现几率要比无对称能时差不多小一倍(3.1%与5.5%)。对称能对形成非物理集团的影响特别明显,当然,选择集团的方法,还需进一步改善。

图 1、图 2 分别给出了 $^{20}\text{Ne}(30\text{MeV}/u) + ^{20}\text{Ne}$ 对头碰撞系统在两种不同情况下(无对称能与有对称能)的质量分布,产额 Y 都是对 20 个反应事件 11 个时间点计算的结果。由图 1 可以看出,当 $C = 0$ (无对称能)时,这里有 $A \approx 24$ 的一个分布,它是来自于非完全融合(ICF)的贡献,也出现了比较占优势的中间质量碎片(IMF),存在着 ICF 与碎

裂机制的共存与竞争^[3];当 $C = 33\text{MeV}$ 时,图 2 与图 1 相比, $A > 20$ 的碎片明显变少,分布宽度变窄, IMF 相对增多,碎裂机制占据了主导地位,总体来说,仍然是 ICF 和碎裂机制共存和竞争。但对入射能量为 30MeV/u 丰中子核引起的反应来讲,考虑对称能后,质量分布(图 3)相对于无对称能时(图 4)变得较宽。在对头碰撞时,两者仍然是两种反应机制的共存和竞争。从质量分布图(图 3 与图 4)来看,无对称能时,不但有质量数 $A > 20$ 的分布, IMF 也占一定的优势;当 $C = 33\text{MeV}$ 时, ICF 产物增多。

丰中子核做炮弹时,质量分布变得宽广,十分有利于较重甚至更丰中子的同位素产生。表 1 给出了入射能量为 30MeV/u 的两个碰撞系统分别在有、无对称能时,由 ICF 和碎裂共存机制所形成的一些同位素情况,对 $^{20}\text{Ne}(30\text{MeV/u}) + ^{20}\text{Ne}$ 对称系统,不管是否包括对称能,形成的同位素基本上在 β 稳定线附近,都不可能形成较重的丰中子核。但对丰中子的 $^{28}\text{Ne}(30\text{MeV/u}) + ^{20}\text{Ne}$ 系统所形成的核中,丰中子同位素所占的比例较大,中子相对质子过剩最多可达 12 个(如 ^{33}Ne),这一现象似乎表明:用丰中子核做炮弹引起的反应可形成更丰中子的同位素,考虑对称能后,形成丰中子核的质量数和电荷数朝较大的方向发展。

表 1 不同碰撞系统在不同条件下形成的同位素

碰撞系统	对称能强度 (MeV)	同 位 素
$^{20}\text{Ne}(30\text{MeV/u}) + ^{20}\text{Ne}$	$C = 0$	$^{12}\text{Mg}, ^{14}\text{Na}, ^{16}\text{Ne}, ^{18}\text{F}, ^{18}\text{O}, ^{19}\text{N} \dots$
$^{20}\text{Ne}(30\text{MeV/u}) + ^{20}\text{Ne}$	$C = 33$	$^{12}\text{Mg}, ^{14}\text{Na}, ^{16}\text{Ne}, ^{18}\text{F}, ^{18}\text{O}, ^{19}\text{N} \dots$
$^{28}\text{Ne}(30\text{MeV/u}) + ^{20}\text{Ne}$	$C = 0$	$^{31}\text{Al}, ^{32}\text{Mg}, ^{33}\text{Na}, ^{34}\text{Ne}, ^{35}\text{F}, ^{35}\text{O}, ^{36}\text{N} \dots$
$^{28}\text{Ne}(30\text{MeV/u}) + ^{20}\text{Ne}$	$C = 33$	$^{37}\text{Cl}, ^{37}\text{P}, ^{38}\text{Si}, ^{39}\text{Al}, ^{40}\text{Mg}, ^{41}\text{Na}, ^{42}\text{Ne}, ^{43}\text{F}, ^{43}\text{O} \dots$

对称能的作用还可以从出射中子、质子的数目中清楚地看到,这里分析了 220 个事件。对 $^{20}\text{Ne}(30\text{MeV/u}) + ^{20}\text{Ne}$ 系统,不考虑对称能时,出射中子、质子数分别为 1506 个及 1503 个,这与考虑对称能所计算的出射中子数(1539 个)和出射质子数(1538 个)基本相同。对非对称系统 ($^{28}\text{Ne}(30\text{MeV/u}) + ^{20}\text{Ne}$),考虑对称能与不考虑对称能差别却很大,当 $C = 0$ 时,发射的中子、质子数分别为 1733 个和 1485 个,相互作用中考虑了对称能项,发射的中子数明显增多(1895 个),而质子数却相对减少(1340 个)。对称能对对称系统的核子发射几乎没有什么影响,但对丰中子核 ^{28}Ne 引起的反应,发射中子、质子数目差别却很大。

4 结 论

在 QMD 模型中,考虑了对称能项后,对非对称的碰撞系统,特别是对由二次束流产生的丰中子核引起的反应,对称能对动力学过程的影响是特别明显的。可以得出以下结论:

- (1) 对称能对对称系统的影响较小,但对非对称碰撞系统的影响却较大。
- (2) 用较丰的丰中子核做炮弹可合成更丰的丰中子核。本文初步预言了系统在 ICF 和碎裂共存机制下,产生丰中子同位素的可能性。
- (3) 非物理集团的出现,表明要增加选择集团的限制条件。对称能加入相互作用中,可以部分地减少非物理集团的形成。

本文作者之一(朱全伶)感谢北京原子能研究院李祝霞老师热情的帮助及有益的讨论。

参 考 文 献

- [1] R. anne et al., *Phys. Lett.*, **B250**(1990) 19.
- [2] V. de la Mota et al., XXVII Winter Meeting on Nucl. Phys., Bormio, Italy (1990).
- [3] 朱全伶、葛凌霄、李祝霞,高能物理与核物理,**16**(1992)658.
- [4] D. Vautherin and D.M. Brinh, *Phys. Rev.*, **C5**(1972)626.

Isospin Effects on Dynamics of Heavy Ion Collisions

Zhu Quanling Ge Lingxiao Zhang Xiaodong

(*Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou 730000*)

Received on March 17, 1993

Abstract

The interaction terms of the isospin-dependent symmetric energy and Coulomb energy are considered in the quantum molecular dynamics. The effects of the symmetric energy on the mass distribution and cluster formation in the head on collisions of the systems $^{20}\text{Ne}+^{20}\text{Ne}$ and $^{28}\text{Ne}+^{20}\text{Ne}$ at the incident energy of 30MeV/u are discussed, and the favorable condition for synthesizing neutron-rich isotopes is predicted.

Key words secondary beams, intermediate mass fragments, non-physical clusters.