

重离子反应中核子前平衡发射的 同位旋效应*

陈列文 张晓东 葛凌霄

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

1995-12-20 收稿

摘 要

考虑了同位旋相关的对称能、库仑能及核子-核子碰撞截面,对反应 $^{40}\text{Ar} + ^{40}\text{Ar}(E=25\text{ MeV}/u, b=0)$ 进行了量子分子动力学模拟,讨论了同位旋效应对核子发射的影响.观察到前平衡发射的中子和质子的比率大于反应系统的中质比,发现对称能有利于中子的发射而阻碍质子的发射,而同位旋相关的核子-核子碰撞截面对中子和质子的发射都有利,但似乎更有利于质子的发射.

关键词 前平衡发射, 同位旋效应, 核子-核子碰撞截面, 对称能.

1 引 言

在低能区核-核碰撞中发现了前平衡发射轻粒子,随着炮弹能量的增加,前平衡发射变得愈来愈重要.当进入 Fermi 能区时,实验上发现前平衡发射的中质比 $(N/Z)_{\text{free}}$ 要大于整个反应系统的中质比 $(N_p + N_t) / (Z_p + Z_t)^{1-3}$.这种现象被定性解释为核子-核子碰撞截面的同位旋相关效应.实验上测定当入射能量小于 $100\text{MeV}/u$ 左右时,中子与质子的碰撞截面约为中子-中子或质子-质子碰撞截面的3倍,于是对于丰中子靶,中子发生碰撞的机会相对地减少,从而较少地被靶核吸收,使得中子发射增多.然而,这似乎仅仅是一种猜想.这种现象的机制到底是什么?这是人们所感兴趣的问题之一.

在核-核碰撞的动力学过程中,同位旋自由度对 N/Z 的变化起了重要的作用,它是一个对同位旋自由度非常敏感的量.重离子碰撞动力学是由平均场、两体碰撞和 Pauli 原理这三个要素所支配的,为清楚 N/Z 在碰撞过程中的演化,平均场和两体碰撞中包括同位旋自由度是十分必要的.事实上,同位旋自由度也影响着其它反应机制^[4],而核子前平衡发射有可能是一种探索同位旋相关反应动力学的较好的反应机制.

为此目的,我们改善了量子分子动力学(QMD)模型,使它包含了同位旋自由度.在核子-核子相互作用中,考虑了对称能项,将库仑相互作用修改为同位旋相关的形

* 国家自然科学基金和中国科学院 LWTZ-1298 经费资助.

式,同时核子-核子碰撞截面采用了同位旋相关的从实验提取的参数化形式和同位旋不相关的 Gugnion 参数化形式. 计算结果表明:平衡前 $(N/Z)_{\text{free}} > (N_p + N_n) / (Z_p + Z_n)$, 对称能有利于中子的发射而阻碍质子的发射, 同位旋相关的核子-核子碰撞截面对中子和质子的发射都有利, 但似乎更有利于质子的发射.

2 模型的描述

在 QMD 模型中, 考虑了对称能项及同位旋相关形式的库仑项后, 系统的相互作用可表示为:

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

式中 V^{tot} 、 $V^{(2)}$ 、 $V^{(3)}$ 分别代表系统的总相互作用、两体相互作用和三体相互作用, V^{loc} 、 V^{Yuk} 、 V^{Coul} 及 V^{sym} 分别代表局域相互作用、Yukawa(表面)相互作用、库仑相互作用和对称能项. V^{loc} 和 V^{Yuk} 的具体形式见文献[5]. 系统的总对称能为^[4]:

$$U_{\text{sym}}^{(2)} = \frac{C}{2\rho_0} \sum_{i \neq j} t_{iz} t_{jz} \frac{1}{(4\pi L)^{3/2}} \exp[-(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j)^2 / (4L)], \quad (2)$$

库仑能为:

$$U_{\text{Coul}}^{(2)} = \frac{e^2}{4} \sum_{i \neq j} \frac{(1+t_{iz})(1+t_{jz})[1 - \text{erfc}(r_{ij}/\sqrt{4L})]}{r_{ij}}. \quad (3)$$

以上式子中 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, 本文取为可调参数, 以观察对称能对核子发射的影响. $\text{erfc}(x)$ 为余误差函数, L 为坐标空间的 Gauss 波包宽度, $r_{ij} = |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|$, 而

$$t_{iz} = \begin{cases} 1 & (\text{质子}), \\ -1 & (\text{中子}), \end{cases} \quad (4)$$

为第 i 个核子的同位旋 z 分量.

关于核子-核子碰撞截面这里采用了两种形式: 一种是 Cugnion 的参数化形式, 它是非同位旋相关的; 另一种是依据实验提取的参数化形式, 它是同位旋相关的, 其总截面如下^[6]:

对 p-n 碰撞:

$$\sigma = \begin{cases} -\frac{5067.4}{E^2} + \frac{9069.2}{E} + 6.9466(\text{mb}), & E \leq 40(\text{MeV}) \\ \frac{239380}{E^2} + \frac{1802.0}{E} + 27.147(\text{mb}), & 40 < E \leq 400(\text{MeV}) \\ 34.5(\text{mb}), & 400 < E \leq 800(\text{MeV}) \end{cases} \quad (5)$$

对 p-p 或 n-n 碰撞:

$$\sigma = \begin{cases} -\frac{1174.8}{E^2} + \frac{3088.5}{E} + 5.3107(\text{mb}), & E \leq 40(\text{MeV}) \\ \frac{93074}{E^2} - \frac{11.148}{E} + 22.429(\text{mb}), & 40 < E \leq 310(\text{MeV}) \\ \frac{887.37}{E} + 0.05331E + 3.5475(\text{mb}), & 310 < E \leq 800(\text{MeV}) \end{cases} \quad (6)$$

其中 E 为实验室系中每核子的入射能量.

不难发现, 当入射能量为 $E=25\text{MeV}/u$, 采用实验提取的参数化公式时, $p-p$ 或 $n-n$ 的碰撞截面约为采用 Cugnon 参数时它们相应截面的 3 倍, 而同时 $n-p$ 的碰撞截面又约为 $n-n$ 或 $p-p$ 的 3 倍. 采用以上两种不同的核子-核子碰撞截面可以研究它对核子发射的影响.

对碰撞过程中 Pauli 阻塞的考虑方法是: 核子发生碰撞后, 在相空间中, 以核子为中心构造一个大小为 $h^3/4$ 的球(考虑了自旋和同位旋自由度, h 为普朗克常数), 然后考察此球被其它核子所占驻的几率, 使该碰撞被阻塞或部分阻塞.

对初始核在基态时传播的稳定性已做了详细的检验. 由均方根半径和平均结合能随时间演化的分析, 基态传播的稳定性至少可保持在 $300\text{fm}/c$ 的范围.

3 计算结果及分析

用以上改进的 QMD 模型, 对 $^{40}\text{Ar}(25\text{MeV}/u) + ^{40}\text{Ar}$ 的对头碰撞进行了系统地计算(以下的计算结果都是 30 个碰撞事件的模拟结果). 首先采用 Cugnon 参数化截面, 在 $C=0, 20, 32\text{MeV}$ 的 3 种情况下进行计算, 得到了 $(N/Z)_{\text{free}}$ 的时间演化(图 1(a)) 以及自由核子数的时间演化(图 1(c)). 其次采用实验提取的参数化截面, 在 $C=0, 20, 32\text{MeV}$ 的 3 种情况下进行计算, 同样得到了 $(N/Z)_{\text{free}}$ 的时间演化(图 1(b)) 和自由核子数的时间演化(图 1(d)).

对于自由核子的判定, 我们选用的判据为: 核子的局域密度小于 $\rho_0/7$ ($\rho_0=0.16\text{fm}^{-3}$), 并且与其它核子的间距大于 3.5fm . 在判断碰撞系统是否达到热化方面, 已提出了不少判据^[7], 这里仅仅计算了剩余核中每核子动量分布四极矩的时间演化(图 2). 动量分布四极矩为:

$$\langle Q_{zz} \rangle = \langle 2p_z^2 - p_x^2 - p_y^2 \rangle, \quad (7)$$

这里剩余核定义为局域密度大于 $\rho_0/7$ 的核子所组成的部分.

从图 2 可以看到, 当时间 $t \approx 110\text{fm}/c$ 时碰撞系统的每核子动量分布的四极矩已接近于零, 此时我们认为碰撞系统已达到了热化. 另外可以看到, 同位旋相关的核子-核子碰撞截面似乎更有利于碰撞系统的热化.

从图 1(a)、(b) 可以看到, 对于 $C=20, 32\text{MeV}$, 平衡前的 $(N/Z)_{\text{free}}$ 明显地大于平衡后的 $(N/Z)_{\text{free}}$, 平衡以后对于 $C=0, 20, 32\text{MeV}$, $(N/Z)_{\text{free}}$ 都趋于稳定值, 并且当 $C=32\text{MeV}$ 时, 如果采用同位旋相关的核子-核子碰撞截面, 则 $(N/Z)_{\text{free}}$ 的稳定值非

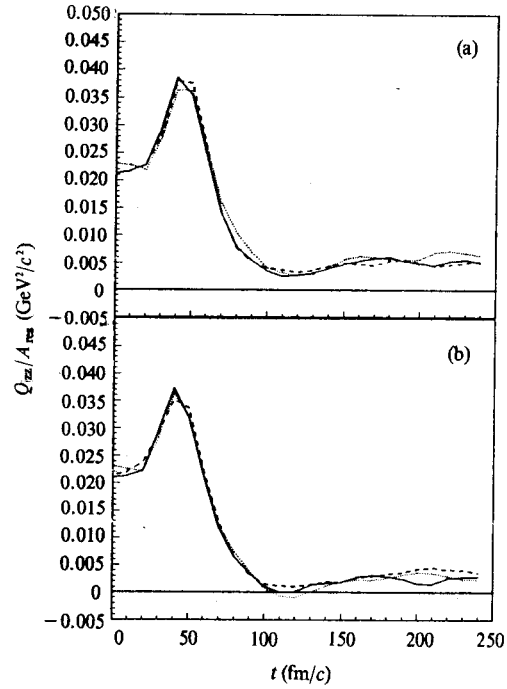
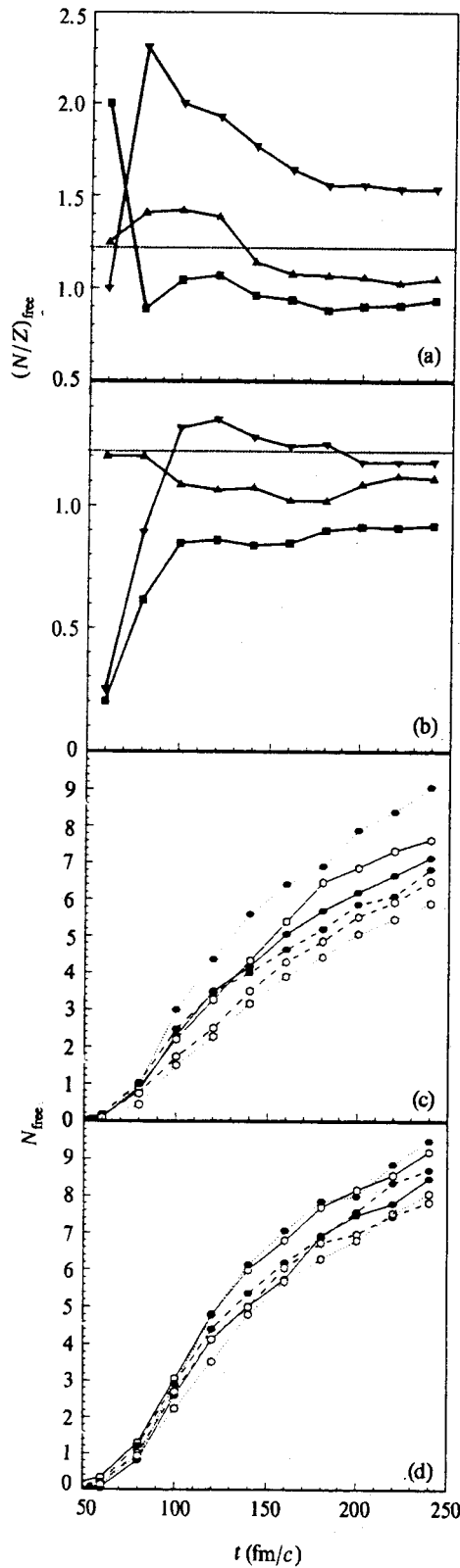


图2 剩余核每核子的动量分布四极矩的时间演化

(a) 非同位旋相关的 N-N 截面,

(b) 同位旋相关的 N-N 截面.

— $C=0\text{MeV}$; -- $C=20\text{MeV}$;

..... $C=32\text{MeV}$.

图1 发射的核子的中质比及数目的时间演化

— $C=0\text{MeV}$; — $n, C=0\text{MeV}$;

— $p, C=0\text{MeV}$; — $n, C=20\text{MeV}$;

— $p, C=20\text{MeV}$; — $n, C=20\text{MeV}$;

— $p, C=20\text{MeV}$; — $n, C=32\text{MeV}$;

— $p, C=32\text{MeV}$;

常接近于 $(N_p + N_t) / (Z_p + Z_t)$ (即图中的虚线)。同时还可以看到, 对称能和核子-核子碰撞截面对 $(N/Z)_{\text{free}}$ 的影响都很大, 但对称能使 $(N/Z)_{\text{free}}$ 增大而同位旋相关的核子-核子碰撞截面减小了 $(N/Z)_{\text{free}}$ 。这个现象从图 1(c) 和 (d) 中也不难看出, 很明显对称能 ($C=20, 32 \text{ MeV}$) 增加了中子的发射而阻碍了质子的发射, 对称能愈大质子就发射得愈少, 而中子发射得愈多, 这样当然就使 $(N/Z)_{\text{free}}$ 增大了。另外从图 1(c) 和 (d) 还能看出, 同位旋相关的核子-核子碰撞截面同时增加了中子和质子的发射, 但似乎对质子的发射更为有利, 于是相对于非同位旋相关的核子-核子碰撞截面, $(N/Z)_{\text{free}}$ 减小了。

对称能有利于中子发射而不利于质子发射, 这是由于对称能的一个系统性效应是使中子有向外的趋势, 而使质子在核内束缚得更紧, 它起的作用正好与库仑能相反, 这也是核结构中从同位素移动的对称效应中得到的一个结论^[8]。当 $C=0 \text{ MeV}$ 时, 没有出现前平衡的 $(N/Z)_{\text{free}}$ 大于平衡后的 $(N/Z)_{\text{free}}$ 的现象, 这是由于库仑能对质子的排斥作用所造成的, 文献[9]中也提到过这一点。

对于前平衡 $(N/Z)_{\text{free}}$ 大的现象, 我们认为这是由对称能、库仑能及核子碰撞共同决定的。在前平衡时, 核子的能量相差较大, 某些能量高的核子可能由于碰撞获得更高的能量而发射出去, 这是前平衡发射的一般解释。平衡以后核子发射大大减少, 这不难从图 1(c)、(d) 中曲线的梯度看出。当 $C=0 \text{ MeV}$ 时, 从图 1(a)、(b) 中看到 $(N/Z)_{\text{free}}$ 在前平衡时并未明显地出现一个极大值, 这是由于没考虑对称能而考虑了库仑能的缘故。当采用同位旋相关的核子-核子碰撞截面时, 中子和质子发生碰撞的几率都增加了, 但对于含中子较多的靶核, 不难想象质子发生碰撞的几率相对来说将增加得更多, 于是同位旋相关的核子-核子碰撞截面更有利于质子的发射。

前平衡发射 $(N/Z)_{\text{free}}$ 出现极大值这一现象是仅仅由同位旋相关的核子-核子碰撞截面引起^[1], 还是完全由平均场的同位旋相关造成, 而几乎与核子-核子碰撞截面无关^[2], 这是两种不同的观点。当然, 从前面的分析也可以看出, 平均场的同位旋相关是产生这种现象的重要因素, 但同位旋相关的核子-核子碰撞截面也是重要的。值得一提的是, 在本文的计算中没能对 Pauli 阻塞因子进行调节, 然而我们相信 Pauli 阻塞效应也是影响核子发射的一个有趣的因素。定性地说, Pauli 阻塞在核子局域密度大的地方应大于局域密度较小的地方, 于是在前平衡时, 碰撞系统中心的 Pauli 阻塞较大, 而在表面 Pauli 阻塞较小, 再加上表面核子束缚较松, 从而核子更易被发射出去。另外, 关于 Pauli 阻塞效应的同位旋相关性, 这是一个值得进一步深入探讨的很有趣的研究课题。通过前面的分析, 可以看到, 研究重离子碰撞中的核子发射对于认识动力学过程中的对称能参数以及探索同位旋相关的反应动力学都是十分有用的。

4 总 结

在重离子碰撞动力学中考虑了对称能、库仑能及核子-核子碰撞截面的同位旋相关性后, 通过对反应 $^{40}\text{Ar}(25 \text{ MeV}/u) + ^{40}\text{Ar}$ 发射核子的研究, 可以较深入地理解前平衡发射时的中质比 $(N/Z)_{\text{free}}$ 大于整个反应系统的中质比 $(N_p + N_t) / (Z_p + Z_t)$ 的实验现象。

产生这种现象的机制是同位旋相关的反应动力学. 平均场中的同位旋相关的对称能项使 $(N/Z)_{\text{free}}$ 增大, 它阻碍质子发射, 增加中子发射, 而同位旋相关的核子-核子碰撞截面同时增加中子和质子的发射, 但对质子的发射更为有利, 故降低了 $(N/Z)_{\text{free}}$ 的值, 库仑能起着与对称能相反的效应. 似乎是, 简单地肯定或否定某一方面都是不全面的.

可以预料, 碎片的 N/Z 的探测是研究同位旋相关反应动力学的重要探针之一. 在重离子碰撞过程中有趣的 N/Z 是否平衡的问题正在分析之中.

参 考 文 献

- [1] D. Hilscher *et al.*, *Phys. Rev.*, **C36**(1987)208.
- [2] D. Hilscher, in Proc. of a Specialists's Meeting on Preequilibrium Nuclear Reactions, Semmering, Austria, 10—12th, Feb. 1988.
- [3] D. Polster *et al.*, in Book of abstracts, International Nuclear Physics Conference, Wiesbaden, Germany, July 26—Aug. 1, 1992, p3.3.8.
- [4] 朱全伶、葛凌霄、张晓东, 高能物理与核物理, **18**(1994)853.
- [5] 朱全伶、葛凌霄、李祝霞, 高能物理与核物理, **16**(1992)658.
- [6] K. Chen *et al.*, *Phys. Rev.*, **166**(1968)949.
- [7] 葛凌霄, 中能重离子碰撞动力学, 中科院近物所研究生讲义, p264.
- [8] A. 玻尔, B. R. 莫特逊, 原子核结构, 第一卷, 第二分册, 科学出版社, 1976, p182.
- [9] Bao-An Li, Jørgen Randrup, Probing isospin dependent reaction dynamics using preequilibrium nucleons, *Phys. Rev.*, *C*, to be published.

Isospin Effects on Pre-equilibrium Nucleon Emission in Heavy Ion Collisions

Chen Liewen Zhang Xiaodong Ge Lingxiao

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

Received 20 December 1995

Abstract

The isospin-dependent symmetry energy, Coulomb energy and nucleon-nucleon cross sections are considered in the quantum molecular dynamics model. The influence of isospin effects on the emission of nucleons is discussed in the head-on collisions of the system $^{40}\text{Ar}+^{40}\text{Ar}$ at the incident energy of 25 MeV/u. It is observed that the ratio of neutron to proton of pre-equilibrium nucleons is higher than that of the reaction system and the symmetry energy enhances the emission of neutron but reduces the emission of proton, at the same time, that the isospin-dependent nucleon-nucleon cross sections favour the emission of both neutron and proton, but they seem to be more beneficial to the emission of proton.

Key words pre-equilibrium emission, isospin effects, nucleon-nucleon cross sections, symmetry energy.