

中能重离子反应中中子-质子有效质量劈裂的研究

林 琳, 郭文军, 黄 璐

(上海理工大学 理学院, 上海 200093)

摘要: 利用同位旋相关的量子分子动力学模型, 研究了 $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$, $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 和 $^{132}\text{Sn} + ^{132}\text{Sn}$ 在能量为 50, 100, 200 MeV/u 的反应系统中, 不同中子-质子有效质量劈裂对原子核阻止和中子、质子发射数的影响. 结果表明: 中子-质子有效质量劈裂对原子核阻止和中子、质子发射数有很明显影响, 且原子核阻止和中子、质子发射数随着有效质量劈裂的增加而递减. 可以通过实验测定的原子核阻止和中子、质子发射数来确定中子-质子有效质量劈裂的值.

关键词: 同位旋效应; 中能重离子反应; 中子-质子有效质量劈裂

中图分类号: O 571.6 **文献标志码:** A

Neutron-Proton Effective Mass Splitting in Intermediate-Energy Heavy Ion Reaction

LIN Lin, GUO Wenjun, HUANG Lu

(College of Science, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Based on the isospin-dependent quantum molecular dynamics model, the effects of different neutron-proton effective mass splitting, on the nuclear stopping and neutron-proton emission numbers were studied respectively in the reaction systems of $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$, $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ and $^{132}\text{Sn} + ^{132}\text{Sn}$ with different system energy (50, 100 and 200 MeV/u). The results show that the neutron-proton effective mass splitting has obvious influence on the nuclear stopping and neutron-proton emission numbers. When the neutron-proton effective mass splitting is increasing, the nuclear stopping and neutron-proton emission numbers are decreasing. The value of neutron-proton effective mass splitting can be confirmed by the nuclear stopping and neutron-proton emission numbers in experiments.

Keywords: *isospin effect; intermediate energy heavy ion reaction; neutron-proton effective mass splitting*

中能重离子碰撞是一个非常复杂的动力学过程. 在过去几年里, 为了研究中能重离子碰撞中的同

位旋效应^[1-4], 许多物理学家在实验和理论上^[5-9]都作了大量的探究, 研究了同位旋非对称核物质的

收稿日期: 2017-05-11

第一作者: 林 琳(1993-), 女, 硕士研究生. 研究方向: 核物理. E-mail: 778952992@qq.com

通信作者: 郭文军(1976-), 男, 副教授. 研究方向: 核物理. E-mail: impgwj@126.com

状态方程^[10],然后根据核态方程研究了横向集体流^[11].中能重离子碰撞中中子-质子有效质量劈裂 m_{n-p}^* 是重要的同位旋效应,也是核物理研究的一个重要方向.在丰中子核物质中,中子-质子有效质量劈裂反映了同位旋矢量核相互作用的时空非定域性,在早期的宇宙进化中,它影响了中质比、稀有同位素的结构以及重离子碰撞的动态结构.对于中子-质子有效质量劈裂的值是正、负或者0还没有达成共识,但是,国内外研究已经取得了显著的进展.中子和质子不同的有效质量表示它们在同位旋非对称核物质中各自动量相关的平均场势,它对解决核物理和天体物理上的许多问题具有重要的影响,为理解核子的同位旋矢量势和稀有同位素反应提供了有益的参考依据.

近年来,在实验和理论上,人们对重离子反应的有效质量劈裂进行了大量的研究.2004年Li等^[12]提出了中子-质子的有效质量劈裂,利用Bombaci的唯象单个核子势模型,分析同位旋标量和矢量势,然后与经验和实验数据作比较,研究在丰中子物质中中子-质子的有效质量劈裂,结果表明,中子有效质量劈裂小于质子有效质量劈裂($m_n^* < m_p^*$)会导致与能量依赖的Lane势不一致的对称势.2010年Xu等^[13]研究了在正常密度下从全局核子光学势中提取的对称能、对称能的密度斜率,以及中子-质子有效质量劈裂.基于Hugenholtz-Van Hove(HVH)定理,对称能 $E_{\text{sym}}(\rho)$ 及密度斜率 $L(\rho)$ 在原子核饱和密度 ρ_0 时完全由核子的全局光学势决定. $L(\rho)$ 可直接从核子-核子散射、(p,n)电荷交换作用、单个粒子束缚态能级中提取.p代表质子,n代表中子.从而得出最佳估计 $E_{\text{sym}}(\rho_0) = 31.3 \text{ MeV}$, $L(\rho_0) = 52.7 \text{ MeV}$,相应的有效质量劈裂为 0.32δ , δ 为相对中子过剩.

Li等^[14]基于HVH理论,发现核子的对称能和中子-质子的有效质量劈裂彼此相关,使用来自28组地面核实验数据和天体物理观测结果分析得到的在标准密度下的对称能 $E_{\text{sym}}(\rho)$ 及密度斜率 $L(\rho)$ 的约束值,推断相应的中子-质子有效k质量劈裂,中子-质子有效质量劈裂的平均值在 0.27δ 附近,对称势的平均值在29 MeV附近,但是, $m_{n-p}^*(\rho_0, \delta)$ 的值是正是负还是0目前的科学仍不知道.Li等^[15]发现中子-质子有效质量劈裂的大小与相对中子过剩 δ 有关,通过分析同位旋相关光学模型的核子-核子散射数据得到的丰中子物质在正常密度下的中子-质子有效质量劈裂为 $(0.41 \pm 0.15)\delta$.Li等^[16]首先回顾了中子-质子有效质量劈裂、同位旋矢量势的动量依赖性以及对称能的密度依赖性之间的关系,然后使用各种核多体理论和

其在内介质中核子-核子横截面的同位旋依赖性进一步观察计算中子-质子的有效质量劈裂,通过分析地面实验数据和天体物理观测结果表明,中子的有效质量高于质子的.

在实验上研究重离子反应,需要用到重离子加速器,实验的成本很高,所以,通常用计算机模拟核反应.人们用QMD(量子分子动力学)模型对重离子反应进行了大量的研究.Zhang等^[17]利用改进的QMD模型研究了重离子反应中的同位素分布、中质比、氦/氦3比等同位旋效应,采用多种Skyrme参数研究了同位旋扩散、对称能、核子有效质量分裂与动量相关作用^[18].李庆丰等^[19]考虑了Skyrme势能密度函数,用极端相对论量子分子动力学(UrQMD)模型研究了 $^{197}\text{Au} + ^{197}\text{Au}$ 重离子碰撞中的自旋轨道耦合效应.Xie等^[20]也对 $^{197}\text{Au} + ^{197}\text{Au}$ 的碰撞进行了研究,发现对于中子-质子有效质量劈裂,中子-质子差分集体流是一个有效的探针.郭文军等用同位旋相关的QMD模型研究了 ^{12}C 与Al同位素的反应截面^[21],激发态 ^{56}Ni 反应的原子核阻止^[22],重离子反应中由中子-质子韧致辐射产生的光子以及它与对称势的关系^[23],光核反应中的核子发射数及其与截面的关系^[24].

本文与前人工作的最大的区别是利用同位旋相关的QMD模型对中能重离子反应进行模拟,通过修改动量相关势,得出不同的中子-质子有效质量劈裂的值,根据这些不同的值来研究其对原子核阻止、核子发射数的影响,并与实验上测定的原子核阻止和核子发射数进行比较.这样的研究不仅可以确定有效质量劈裂值,而且可以给出其与原子核阻止、核子发射数的关联性.

1 模型

利用量子分子动力学^[25-28]模型来模拟重离子反应.为了考虑同位旋效应对重离子反应过程的影响,对传统的量子分子动力学模型作了适当的修改.密度相关的平均场的计算需要考虑质子和中子的区别(库仑势和对称势),计算核子-核子反应截面和泡利阻塞时也要区分质子和中子.通过这些修改,得到了改进的同位旋相关的量子分子动力学(IQMD)^[29]模型,它的平均场势能 U 的表达式为

$$U = U^{\text{Sky}} + U^{\text{Yuk}} + U^{\text{Coul}} + U^{\text{MDI}} + U^{\text{Pauli}} + U^{\text{sym}} \quad (1)$$

式中: U^{Sky} 是密度依赖的Skyrme势; U^{Yuk} 是Yukawa势; U^{Coul} 是库仑势; U^{MDI} 是动量相关作用; U^{Pauli} 是泡利势; U^{sym} 是对称势, $U^{\text{sym}} = c \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho_0}$, c 为对称势的强度系数,通常 c 的值为32 MeV, ρ_n, ρ_p 分别代表中子

密度、质子密度. 各种势的具体表示参照文献[30].

动量相关作用 U^{MDI} 可表示为^[31]

$$U^{\text{MDI}} = t_4 \ln^2 [t_5 (p_1 - p_2)^2 + 1] \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) \quad (2)$$

式中: $\rho_0 = 0.16 \text{ fm}^{-3}$ 表示原子核饱和密度; ρ 表示原子核密度; t_4, t_5 为参数; $p_1 - p_2$ 表示两粒子的动量差.

中子-质子有效质量劈裂描述的是中子、质子的势能在动量方向上的梯度差. 原有的 QMD 模型动量相关的部分没有考虑中子和质子的差别, 所以, 无法研究有效质量劈裂对反应的影响. 本文在动量相关作用中引入了中子、质子的差别, 将式(2)修改为同位旋相关的动量相关作用.

$$U_n = t_4 \ln^2 [t_{5n} (p_1 - p_2)^2 + 1] \left(\frac{\rho_n}{\rho_0} \right) + c \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho_0} \quad (3)$$

$$U_p = t_4 \ln^2 [t_{5p} (p_1 - p_2)^2 + 1] \left(\frac{\rho_p}{\rho_0} \right) - c \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho_0} \quad (4)$$

式中: U_n, U_p 分别为同位旋相关的中子、质子的动量相关作用势; t_4, t_{5n}, t_{5p} 为参数.

中子、质子的费米动量^[14]

$$k_F^\tau = (1 + \tau_3 \delta)^{1/3} k_F \quad (5)$$

式中: $k_F = (3\pi^2 \rho/2)^{1/3}$, 表示核子的费米动量, 当 $\tau_3 = -1$ 时, 表示质子的费米动量, 当 $\tau_3 = 1$ 时, 表示中子的费米动量; δ 表示相对中子过剩, $\delta = \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho_n + \rho_p} = \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho}$.

中子-质子有效质量劈裂对理解核物理和天体物理是至关重要的. 例如, 配对超流态原子核和中子星、稀有同位素的性质、重离子反应中的同位旋输运中子星的热性质. 但是, 至今为止, 中子-质子有效质量劈裂的值尚未统一. 因此, 在这个问题上一个让人信服的数据将对核物理和天体物理具有深远影响. 与 ρ, δ 相关的中子-质子有效质量劈裂 $m_{n-p}^*(\rho, \delta)$ 公式为^[16]

$$m_{n-p}^* = \frac{\frac{m}{\hbar^2} \left(\frac{1}{k_F^p} \frac{dU_p}{dk} \Big|_{k_F^p} - \frac{1}{k_F^n} \frac{dU_n}{dk} \Big|_{k_F^n} \right)}{\left(1 + \frac{m_p}{\hbar^2 k_F^p} \frac{dU_p}{dk} \Big|_{k_F^p} \right) \left(1 + \frac{m_n}{\hbar^2 k_F^n} \frac{dU_n}{dk} \Big|_{k_F^n} \right)} \quad (6)$$

式中: k_F^n 表示中子的费米动量; k_F^p 表示质子的费米动量; m 为核子的质量; $\hbar$ 为约化普朗克常数; k 为动量.

当有效质量劈裂的平均值取 $0.31\delta, 0.41\delta, 0.51\delta$ 时, 根据要求计算不同密度、不同相对中子过剩下的有效质量劈裂值, 继而确定 t_4, t_{5n}, t_{5p} 的值. 通过调整 t_4, t_{5n}, t_{5p} 的值, 增加动量相关的势能部分, 再调整对称势的强度系数 c 的值, 使对称势部分相应地减少相同的量, 使整个核在饱和点密度附

近的对称能恢复到原始状态, 这样, 整个核势仍旧满足各种实验所约束的条件. 不同参数和有效质量劈裂的值如表 1 所示.

表 1 不同参数和有效质量劈裂的值
Tab.1 Different parameters and the values of the effective mass splitting

m_{n-p}^*/δ	t_4/MeV	t_{5n}/MeV^{-2}	t_{5p}/MeV^{-2}	c/MeV
0.31 ± 0.027	10.87	2.7×10^{-4}	2.508×10^{-4}	30.29
0.41 ± 0.065	18.82	8.1×10^{-5}	7.275×10^{-5}	29.92
0.51 ± 0.112	21.53	6.2×10^{-5}	5.072×10^{-5}	28.53

在图 1 中, 由上部分的图可以看出, 两核子动量差 Δp 很大时, 6 条线几乎重叠在一起, 这是因为核子体系能量较大, 起主导作用, 有效质量劈裂所带来的能量差异相对于系统的能量差异可以忽略不计. 两核子的动量差不大时 ($12 \sim 22 \text{ MeV}$), 动量相关作用对其影响最明显. 其中, 有效质量劈裂为 0.31δ 时的动量相关作用最大, 有效质量劈裂为 0.51δ 时的动量相关作用最小. 进一步研究了有效质量劈裂带来的动量相关作用同位旋效应, 图 1 的下部分表明, 两核子动量差很小时 (12 MeV 以下), 动量相关作用所引起的对称能的变化很小, 有效质量劈裂对动量相关作用同位旋效应影响很小. 两核子动量差较大时, 动量相关作用所引起的对称能的变化很大, 有效质量劈裂对动量相关作用同位旋效应影响越来越强. 也就是说, 有效质量劈裂通过对称能的不同来影响核反应的状态. 有效质量劈裂越大, 中子和质子的动量相关作用差别越大, 即对称能越大, 动量相关作用同位旋效应越明显. 所以, 有效质量劈裂与系统的对称能紧密相关, 是描述动量相关作用的物理量.

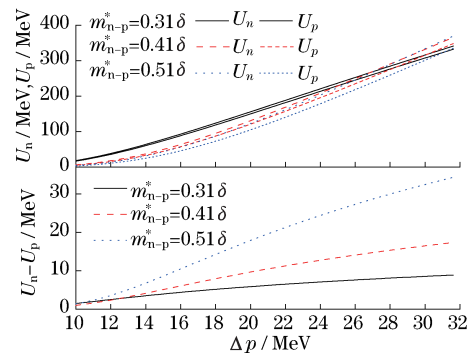


图 1 不同有效质量劈裂的中子、质子势能及其差值随相对动量的变化

Fig.1 Relationship between the neutron and proton potential energy and their difference variation with different effective mass splitting and relative momentum

图2是参数 t_4, t_{5n}, t_{5p} 选取适当值时,用表1所示的3套参数计算得到的有效质量劈裂在 $0.31\delta, 0.41\delta, 0.51\delta$ 周围随密度和相对中子过剩的演化.由图2可以看出,当 δ 相同时,随着密度的增加,有效质量劈裂的值先增加后减小.在 $\delta = 0.15$ 时作一条横线,可以看出,密度较高时,有效质量劈裂在 0.31δ 周围时,其变化最缓慢,在 0.51δ 周围时,其变化最剧

烈.而在核反应的压缩过程中,密度可以达到饱和密度的2~3倍,所以,不同的有效质量劈裂对压缩过程影响很大.密度较低时,有效质量劈裂在 0.51δ 周围时变化剧烈,会迅速降低为零,同位旋相关的动量相关作用对核反应影响变弱.而核反应过程中的膨胀和碎裂过程正处于该密度范围,所以,不同的有效质量劈裂对碎片的形成影响很大.

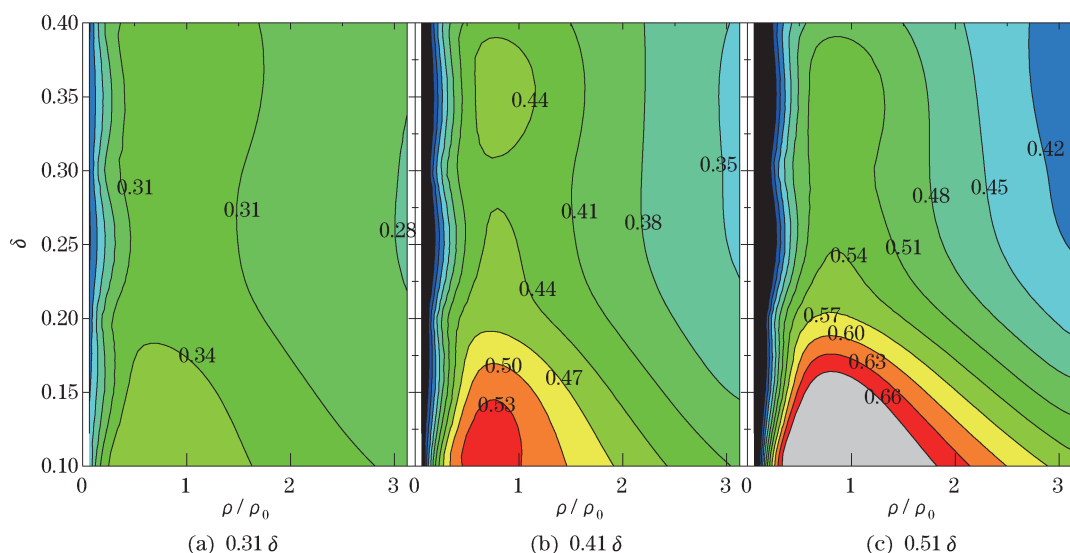


图2 有效值劈裂随密度和相对中子过剩的演化

Fig.2 Evolution of the effective mass splitting with the density and relative neutron excesses

2 结果与讨论

原子核阻止 $R^{[2,32-33]}$ 是在重离子碰撞过程中决定反应结果(终态产物)的一个重要物理量,可以用来描述同位旋自由度逐渐从非平衡向平衡过渡的过程^[34],其具体形式为

$$R = \frac{2}{\pi} \frac{\sum_i^A |P_{\perp}(i)|}{\sum_i^A |P_{\parallel}(i)|} \quad (7)$$

式中: A 为靶质量与炮弹质量之和; $P_{\perp}(i), P_{\parallel}(i)$ 分别表示第 i 个核子的动量横向分量、平行分量, $P_{\perp}(i) = \sqrt{P_x^2(i) + P_y^2(i)}$, $P_{\parallel}(i) = P_z(i)$. P_x, P_y, P_z 分别表示在3个方向的动量分量.

从式(7)可以看出,原子核阻止反映了核子间碰撞的激烈程度.前面的研究表明,动量相关作用较大时,原子核阻止较大^[35].而有效质量劈裂取不同值时,其动量相关作用不同,所以,有效质量劈裂会对原子核阻止产生影响.本文比较了不同的中子-质子有效质量劈裂对原子核阻止的影响.

图3(见下页)表示 $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}, ^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 和 $^{132}\text{Sn} + ^{132}\text{Sn}$ 分别在能量 $E = 50, 100, 200 \text{ MeV/u}$ 反应系统中原子核阻止随反应时间 t 的演化过程.图中3条线分别表示中子-质子有效质量劈裂为 $0.31\delta, 0.41\delta, 0.51\delta$ 时的原子核阻止.由图3可以清楚地看出,中子-质子有效质量劈裂的大小对原子核阻止有明显的影响,无论何种反应系统,在低能且动量差 $\Delta p = 12 \sim 22 \text{ MeV}$ 时,中子-质子有效质量劈裂在 0.31δ 时,原子核阻止 R 总是最大的.这是因为,由图1可知,中子-质子有效质量劈裂在 0.31δ 时动量相关作用比较大,总的体系能量较大,截面降低,所以,原子核阻止变大.中子-质子有效质量劈裂为 0.41δ 和 0.51δ 时,原子核阻止几乎相同.根据图1的上部分可以得到中子-质子有效质量劈裂为 0.51δ 时,动量相关作用的绝对大小小,所以,原子核阻止较小.而从图1的下部分可以得到,当中子-质子有效质量劈裂为 0.51δ 时,动量相关作用的中子-质子的相对大小大,中子、质子动量相关作用差越大,同位旋效应越明显,原子核阻止越大.影响原子核阻止的两个因素相互竞争,所以,中子-质子有效质量劈裂为 0.41δ 和 0.51δ 时,两

条曲线几乎重叠在一起. 中子-质子有效质量劈裂为 0.31δ 的绝对大小大于中子-质子有效质量劈裂为 0.41δ 和 0.51δ 的绝对大小, 所以, 动量相关作用的绝对大小的影响占主导地位, 而中子、质子动量相关作用的差的影响占从属地位. 能量为 200 MeV 时, 即能量较高时, 体系的能量远大于动量

相关作用的能量时, 中子-质子有效质量劈裂对其原子核阻止影响很小, 所以, 在能量较高时, 有效质量劈裂对原子核阻止影响很小.

图 4 表示 $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$, $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 和 $^{132}\text{Sn} + ^{132}\text{Sn}$ 分别在能量为 50, 100, 200 MeV/u 反应系统中中子、质子发射数随有效质量劈裂的变化.

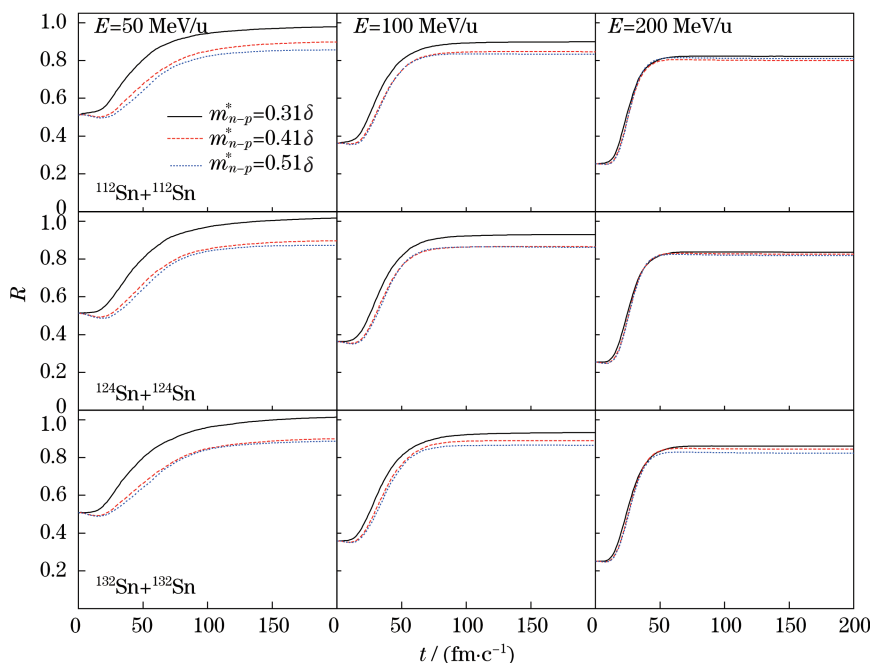


图 3 不同有效质量劈裂的原子核阻止 R 随时间 t 演化过程

Fig.3 Evolution of the nuclear stopping over time with different m_{n-p}^*

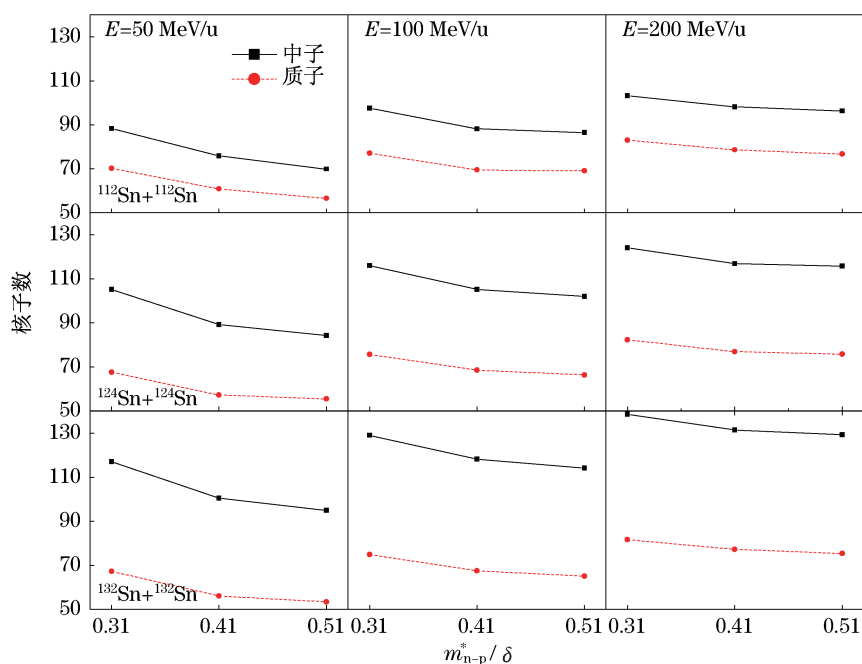


图 4 中子、质子发射数随有效质量劈裂的变化

Fig.4 Evolution of the neutron numbers and proton numbers with the effective mass splitting

在图4中可以明显看出,反应能量越高,中子和质子发射数越多.在相同的能量下,有效质量劈裂分别在 0.31δ , 0.41δ , 0.51δ 时,中子和质子发射数是依次递减的.也就是说,中子、质子发射数是随着有效质量劈裂的增加而减少的.同样,由图1的上部分可以看出,有效质量劈裂越大,动量相关作用越小,总的能量越低,所以,中子、质子发射数就少.从图4的任意一张图中可以看到,两条曲线中间的间隔相差不大,也就是说,中子发射数与质子发射数的差几乎保持不变,不同的有效质量劈裂对其发射的相对大小影响较小.有效质量劈裂对中子、质子发射数的影响同时增加,同时减少.反应系统能量越高时,中子、质子发射数的两条线的间隔越来越宽,所得结论和文献[36]相同.

3 结 论

通过修改QMD模型中的初始化程序,分析了中子-质子有效质量劈裂对中能重离子反应的影响.利用同位旋相关的QMD模型对中能重离子反应进行了模拟,在前人经验的基础上,通过修改动量相关势得出不同的有效质量劈裂,从而完善中能重离子碰撞的输运理论.通过对上述问题的模拟计算研究,可以得出以下的结论:

a. 中子-质子有效质量劈裂对原子核阻止 R 有很明显的影响.动量相关作用的相对大小和绝对大小相互竞争,共同作用到原子核阻止上.中子-质子有效质量劈裂值不同时,在高能时原子核阻止几乎重合,在低能时差别较大,因此,建议选取低能情况来研究有效质量劈裂对核反应的影响.

b. 中子-质子有效质量劈裂对中子、质子发射数有很明显影响.随着中子-质子有效质量劈裂的增加,会使中子、质子发射数减少.

c. 可以通过实验上测得的原子核阻止和中子、质子发射数,得到与中子-质子的有效质量劈裂相关的信息.

参考文献:

- [1] FENG Z Q, XIE W J, CHEN P H, et al. In-medium and isospin effects on particle production near threshold energies in heavy-ion collisions[J]. Physical Review C, 2015, 92(4): 044604.
- [2] TIAN J, YE W. Isospin effect on probing nuclear dissipation with fission cross sections[J]. Physical Review C, 2016, 94(2): 021601.
- [3] 刘建业, 陈波, 赵强, 等. 中能重离子碰撞中同位旋效应的灵敏探针[J]. 原子核物理评论, 1999, 16(3): 165 - 168.
- [4] 张丰收. 同位旋相关的输运理论[J]. 原子核物理评论, 1999, 16(3): 169 - 176.
- [5] YENNELLO S J, YOUNG B, YEE J, et al. The use of radioactive nuclear beams to study the equilibration of the NZ degree of freedom in intermediate-energy heavy-ion reactions[J]. Physics Letters B, 1994, 321(1/2): 15 - 19.
- [6] WADA R, HILDENBRAND K D, LYNEN U, et al. Isotopic-yield ratios of complex fragments from intermediate-energy heavy-ion reactions[J]. Physical Review Letters, 1987, 58(18): 1829 - 1832.
- [7] KUNDE G J, GAFF S J, GELBKE C K, et al. Multifragment Production in Reactions of $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$ and $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ at $E/A = 40$ MeV[J]. Physical Review Letters, 1996, 77(14): 2897 - 2900.
- [8] RAMI F, LEIFELS Y, DE SCHAUBURG B, et al. Isospin tracing: a probe of nonequilibrium in central heavy-ion collisions[J]. Physical Review Letters, 2000, 84(6): 1120 - 1123.
- [9] PAK R, BENENSON W, BJARKI O, et al. Isospin dependence of collective transverse flow in nuclear collisions[J]. Physical Review Letters, 1997, 78(6): 1022 - 1025.
- [10] LI B A, KO C M, REN Z Z. Equation of state of asymmetric nuclear matter and collisions of neutron-rich nuclei[J]. Physical Review Letters, 1997, 78(9): 1644 - 1647.
- [11] LI B A, REN Z Z, KO C M, et al. Isospin dependence of collective flow in heavy-ion collisions at intermediate energies[J]. Physical Review Letters, 1996, 76(24): 4492 - 4495.
- [12] LI B A. Constraining the neutron-proton effective mass splitting in neutron-rich matter[J]. Physical Review C, 2004, 69(6): 064602.
- [13] XU C, LI B A, CHEN L W. Symmetry energy, its density slope, and neutron-proton effective mass splitting at normal density extracted from global nucleon optical potentials[J]. Physical Review C, 2010, 82(5): 054607.
- [14] LI B A, HAN X. Constraining the neutron-proton effective mass splitting using empirical constraints on the density dependence of nuclear symmetry energy

- around normal density[J]. *Physics Letters B*, 2013, 727 (1/3): 276 – 281.
- [15] LI X H, GUO W J, LI B A, et al. Neutron-proton effective mass splitting in neutron-rich matter at normal density from analyzing nucleon-nucleus scattering data within an isospin dependent optical model[J]. *Physics Letters B*, 2015, 743: 408 – 414.
- [16] LI B A, CHEN L W. Neutron-proton effective mass splitting in neutron-rich matter and its impacts on nuclear reactions[J]. *Modern Physics Letters A*, 2015, 30(13): 1530010.
- [17] ZHANG Y X, LI Z X, ZHOU C S, et al. Effect of isospin-dependent cluster recognition on the observables in heavy ion collisions[J]. *Physical Review C*, 2012, 85 (5): 051602.
- [18] ZHANG Y X, TSANG M B, LI Z X, et al. Constraints on nucleon effective mass splitting with heavy ion collisions[J]. *Physics Letters B*, 2014, 732: 186 – 190.
- [19] GUO C C, WANG Y J, LI Q F, et al. Effect of the spin-orbit interaction on flows in heavy-ion collisions at intermediate energies[J]. *Physical Review C*, 2014, 90 (3): 034606.
- [20] XIE W J, ZHANG F S. Nuclear collective flows as a probe to the neutron-proton effective mass splitting [J]. *Physics Letters B*, 2014, 735: 250 – 255.
- [21] YANG L M, GUO W J, ZHANG F, et al. Study of the total reaction cross section via QMD [J]. *Chinese Physics C*, 2013, 37(10): 104101.
- [22] ZHANG A, GUO W J, HUANG J W, et al. Isospin effect of the in-medium nucleon-nucleon cross section in excited nuclear reactions[J]. *Chinese Physics C*, 2014, 38(5): 054103.
- [23] YANG L M, GUO W J, ZHANG Y P, et al. Probing the symmetry potential with neutron-proton bremsstrahlung in heavy-ion collisions[J]. *Chinese Physics C*, 2014, 38 (7): 074105.
- [24] GUO W J, HUANG J W, YONG G C, et al. Nucleon emission number as a probe of isospin-dependent N-N cross section in photonuclear reactions[J]. *Chinese Physics Letters*, 2014, 31(10): 102501.
- [25] DI TORO M, BARAN V, COLONNA M, et al. Isospin dynamics at medium energies[J]. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 1999, 42: 125 – 136.
- [26] AICHELIN J, STOCKER H. Quantum molecular dynamics——A novel approach to N-body correlations in heavy ion collisions[J]. *Physics Letters B*, 1986, 176(1/2): 14 – 19.
- [27] CHEN L W, ZHANG F S, JING G M. Analysis of isospin dependence of nuclear collective flow in an isospin-dependent quantum molecular dynamics model [J]. *Physical Review C*, 1998, 58(4): 2283 – 2291.
- [28] PEILERT G, STÖCKER H, GREINER W, et al. Multifragmentation, fragment flow, and the nuclear equation of state[J]. *Physical Review C*, 1989, 39(4): 1402 – 1419.
- [29] AICHELIN J, PEILERT G, BOHNET A, et al. Quantum molecular dynamics approach to heavy ion collisions: description of the model, comparison with fragmentation data, and the mechanism of fragment formation[J]. *Physical Review C*, 1988, 37(6): 2451 – 2468.
- [30] LANGANKE K, MARUHN J, KOONIN S E. Computational nuclear physics 1: nuclear structure [M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1991.
- [31] XU J, MARTINOT Z, LI B A. Disentangling effects of collision geometry and symmetry energy in U + U collisions [J]. *Physical Review C*, 2012, 86 (4): 044623.
- [32] LIU J Y, GUO W J, WANG S J, et al. Nuclear stopping as a probe for in-medium nucleon-nucleon cross sections in intermediate energy heavy ion collisions [J]. *Physical Review Letters*, 2001, 86(6): 975 – 978.
- [33] BUSZA W, LEDOUX R. Energy deposition in high-energy proton-nucleus collisions[J]. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 1988, 38(1): 119 – 159.
- [34] LI B A, YENNELLO S J. Isospin nonequilibrium in heavy-ion collisions at intermediate energies [J]. *Physical Review C*, 1995, 52(4): R1746.
- [35] LIU J Y, GUO W J, XING Y Z, et al. Influence of a momentum dependent interaction on the isospin dependence of fragmentation and dissipation in intermediate energy heavy ion collisions[J]. *Physical Review C*, 2003, 67(2): 024608.
- [36] LIU J Y, GUO W J, XING Y Z, et al. Probing the isospin dependent in-medium nucleon-nucleon cross section by nucleon emissions[J]. *Physics Letters B*, 2002, 540(3/4): 213 – 219.

(编辑:石 瑛)