

文章编号: 1007-4627(2010)03-0263-04

# $\alpha$ 发射数可作为提取同位旋相关平均场的灵敏探针\*

郭文军, 郭双鹤, 孙长安

(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, 对中能重离子碰撞过程中的  $\alpha$  发射数的同位旋效应进行了分析。研究表明,  $\alpha$  发射数强烈地依赖于同位旋相关平均场的影响, 而与同位旋相关核子-核子碰撞截面的依赖较弱, 可以作为提取同位旋相关平均场信息的灵敏探针。由于实验上  $\alpha$  粒子发射数的观测比较容易, 而且在很宽地能量范围内, 无论丰中子系统还是缺中子系统都较好地满足上述规律, 这样就可以通过实验上对  $\alpha$  发射数的探测, 来提取介质中同位旋相关平均场的信息。同时建议由实验对缺中子系统的质子发射数进行探测, 从中提取同位旋相关核子-核子碰撞截面的信息。

**关键词:**  $\alpha$  发射数; 同位旋效应; 同位旋相关平均场

**中图分类号:** O571.6

**文献标识码:** A

## 1 引言

随着放射性束的产生和应用, 同位旋非对称核物质状态方程一直是近年来国内外研究的热点。同位旋效应就是在重离子碰撞中各种物理观测量随碰撞系统中子-质子比(同位旋)的演化规律和机理, 对它的研究可以为同位旋非对称核物质状态方程的建立提供很多信息。由于同位旋相关平均场和介质中核子-核子碰撞截面都很不确定, 所以这一工作要求系统地研究中能重离子碰撞过程中各种物理观测量随入射道条件, 特别是沿碰撞系统同位旋自由度的演化规律和机理, 进而分析和寻找提取同位旋相关平均场和介质中核子-核子碰撞截面的灵敏探针, 并系统地与实验数据比较, 从而改进同位旋非对称核物质状态方程。同位旋非对称核物质状态方程的建立和核子-核子碰撞截面的知识不仅对于了解原子核的性质是重要的, 同时对于研究宇宙和天体演化过程也是非常重要的。但中能重离子碰撞过程中同位旋相关平均场和介质中核子-核子碰撞截面的作用常常交织在一起, 这就要求从理论方面选择主要只对同位旋相关平均场或者主要只对介质中同位旋相关核子-核子碰撞截面灵敏地物理观测量来提取关于它们的知识<sup>[1-9]</sup>。

在以前的工作中, 发现在中低能范围, 原子核

阻止强烈地依赖于同位旋相关的核子-核子碰撞截面, 而较弱地依赖于同位旋相关的平均场, 因此它可以作为提取核子-核子碰撞截面的灵敏探针。研究也发现中子(质子)发射数和原子核多重碎裂产物分布在更大的能量区间满足对同位旋相关核子-核子碰撞截面的灵敏性<sup>[10, 11]</sup>。Li Bao-An 等人也研究发现, 利用微分流可以作为提取同位旋相关的核子-核子碰撞截面的灵敏探针<sup>[5, 6]</sup>。但相对来说, 灵敏地依赖于同位旋相关平均场的物理量发现得较少。研究表明, 前平衡发射中子-质子比和同位旋分馏强度灵敏地依赖于同位旋相关平均场, 而对同位旋相关介质中截面不灵敏<sup>[12-14]</sup>, 但实验上无法直接测量。综上所述, 一方面急需寻求更多对同位旋相关平均场灵敏的物理量, 另一方面所寻求的物理量应适合与实验进行对比。本文对中能重离子碰撞过程中实验上易于观测的  $\alpha$  粒子发射数进行了研究, 试图找出  $\alpha$  粒子发射数的同位旋相关性, 这样便于与实验数据进行比较, 进而为确定同位旋相关平均场的参数或确定同位旋相关核子-核子碰撞截面的参数提供依据。

## 2 理论模型

量子分子动力学(QMD)模型是基于能够处理

\* 收稿日期: 2010-02-05; 修改日期: 2010-04-15

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10905041); 上海市教育委员会科研创新项目(09YZ207)

作者简介: 郭文军(1976-), 男(汉族), 山西临汾人, 副教授, 从事核理论研究; E-mail: impgwj@126.com

碎片形成问题的经典分子动力学方法，通过考虑测不准原理和泡利阻塞原理而发展形成，主要包含 3 个因素：密度相关的平均场、介质中核子-核子碰撞截面和泡利阻塞。而为了恰当地描述同位旋效应，该模型应该做适当的修改：密度相关的平均场应该包含同位旋相关的平均场和库仑势，对介质中核子-核子碰撞截面应该对中子-中子(质子-质子)碰撞和中子-质子碰撞加以区别，泡利阻塞也要对中子和质子进行区别。经过上述仔细考虑和包括了同位旋有关的动力学因素后建立了同位旋相关的量子分子动力学(IQMD)模型<sup>[15, 16]</sup>。IQMD 模型选取的相互作用势如下：

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

这里  $U^{\text{Sky}}$  是密度相关的 Skyrme 势， $U^{\text{Coul}}$  是库仑势， $U^{\text{Yuk}}$  表示有限核表面效应的 Yukawa 势， $U^{\text{Pauli}}$  是泡利势， $U^{\text{MDI}}$  是动量相关势， $U^{\text{sym}}$  是对称势。

在计算中，选用了两种不同的对称势<sup>[1]</sup>：

$$U_1^{\text{sym}} = 32F_1(u)\delta\tau_z (\text{MeV}), \quad (2)$$

$$U_2^{\text{sym}} = 32F_2(u)\left(\delta\tau_z - \frac{\delta^2}{4}\right) (\text{MeV}), \quad (3)$$

其中  $F_1(u) = u$ ， $F_2(u) = u^{1/2}$ ， $u \equiv \rho/\rho_0$ ；对中子  $\tau_z = 1$ ，对质子  $\tau_z = -1$ ；相对中子过剩

$$\delta = \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho_n + \rho_p} = \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho},$$

其中， $\rho$ ， $\rho_0$ ， $\rho_n$  和  $\rho_p$  分别是核密度、饱和密度、中子密度和质子密度。在计算中，核的密度分布由参数化的 Skyrme-Hartree-Fock 模型给出<sup>[17, 18]</sup>。自由同位旋相关核子-核子碰撞截面采用实验参数化的截面，介质中核子-核子碰撞截面使用经验公式(4)。这是近年来通过对中能重离子碰撞集体流研究的结果<sup>[19, 20]</sup>。

$$\sigma^{\text{med}} = \sigma^{\text{free}} \left(1 + \gamma \frac{\rho}{\rho_0}\right), \quad (4)$$

这里， $\sigma^{\text{free}}$  是实验上自由核子-核子碰撞截面， $\gamma = -0.2$ 。可以看出，介质效应使核子-核子碰撞截面变小。

为了构造碎片，采用了同位旋相关的并合模型<sup>[15, 16]</sup>。在这个模型中，把相对距离小于 3.5 fm，同时相对动量小于 300 MeV/c 的粒子并合到一个

碎片之中。为了排除非物理的线状集团，用重整模型去检查碎片是否满足条件  $R_{\text{rms}} \leq 1.14A^{1/3}$ ，如果满足则最终判定为一个碎片。这里  $R_{\text{rms}}$  和  $A$  分别为碎片的均方根半径和质量数，直到没有非物理的碎片产生。

### 3 计算结果与讨论

从以前的工作知道，中能重离子碰撞中前平衡发射中子-质子比是提取同位旋相关平均场的灵敏探针，而原子核的多重碎裂是提取同位旋相关核子-核子碰撞截面的灵敏探针<sup>[11-13]</sup>。现在的问题是  $\alpha$  粒子发射数应该更加依赖于哪一个同位旋效应。可以试想， $\alpha$  粒子属于较轻的核素，应该更加接近于前平衡发射中子-质子比的性质，也就是灵敏地依赖于同位旋相关的平均场。下面用 QMD 模型加以证明。在计算过程中，为了问题的普遍性，选取了缺中子系统和丰中子系统。在对能量的选取也尽可能达到最大的范围，这样有利于与实验进行比较来验证结论。当然最重要的是要对各种碰撞过程中  $\alpha$  发射数对于同位旋相关平均场和同位旋相关截面的依赖关系及其机理进行了详细的分析。

图 1 给出了在  $E = 200 \text{ MeV/u}$ ， $b = 0 \text{ fm}$  情况下，碰撞系统  $^{76}\text{Zn} + ^{76}\text{Zn}$  的  $\alpha$  粒子发射数随时间的演化。 $\sigma^{\text{iso}}$  和  $\sigma^{\text{noiso}}$  分别表示考虑和不考虑同位旋相关

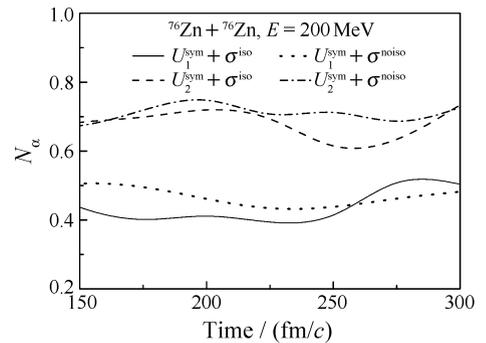


图 1 碰撞系统  $^{76}\text{Zn} + ^{76}\text{Zn}$  ( $E = 200 \text{ MeV/u}$ ， $b = 0 \text{ fm}$ )， $\alpha$  粒子发射数的随时间的演化

的核子-核子截面。可以明显看出，在达到系统平衡时间以后(大于 150 fm/c)，图中的 4 条曲线分成了两组，上面一组是考虑同位旋相关平均场  $U_2^{\text{sym}}$  的  $\alpha$  粒子发射数，下面一组是考虑同位旋相关平均场  $U_1^{\text{sym}}$  的  $\alpha$  粒子发射数，而每组曲线中的两条曲线分别是考虑和不考虑同位旋相关核子-核子碰撞截面

时的情况。这表明,  $\alpha$  粒子发射数强烈地依赖于同位旋相关的平均场, 而较弱地依赖于同位旋相关核子-核子碰撞截面, 这与本节前面的设想一致, 可以作为实验上直接提取同位旋相关平均场的灵敏物理观测量。又因为对称势  $U_2$  的不可压缩系数要小于对称势  $U_1$ , 所以取对称势  $U_2$  时, 系统比较容易压缩, 反应也更加剧烈, 造成在取  $U_2$  时  $\alpha$  粒子发射数较多。

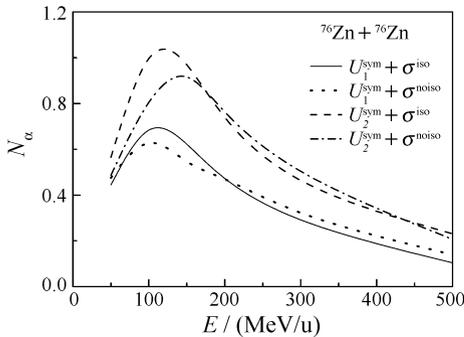


图 2 碰撞系统  $^{76}\text{Zn} + ^{76}\text{Zn}$  的  $\alpha$  粒子发射数随系统入射能量的演化

图 2 给出了与图 1 相同碰撞系统和相同碰撞参数条件下  $\alpha$  粒子发射数随系统入射能量的演化。从图中可以明显看出, 在从 150 MeV/u 到 400 MeV/u 的广大能区范围,  $\alpha$  粒子发射数都灵敏地依赖于同位旋相关的平均场。在低能区, 由于碎裂过程中  $\alpha$  粒子发射数相对较少, 随机性较大, 造成规律性不明显; 在能区, 由于随着入射能量的增加两体碰撞逐渐占到主导地位, 所以对同位旋相关平均场的依赖性减少。还可以看出, 在入射能量 150 MeV/u 附近,  $\alpha$  粒子的发射数最多, 这与原子核多重碎裂主要发生在中能区的结论相一致。实验上只要测量不同入射能量时  $\alpha$  粒子发射数, 通过与理论计算值的比较, 就可以确定哪一种同位旋相关的平均场公式更符合真实的物理情况, 从而为建立同位旋非对称物质状态方程打下基础。

图 3 给出了在入射能量 200 MeV/u 和碰撞参数  $b=0$  fm 情况下, 5 个碰撞系统  $^{60}\text{Zn} + ^{60}\text{Zn}$ ,  $^{64}\text{Zn} + ^{64}\text{Zn}$ ,  $^{68}\text{Zn} + ^{68}\text{Zn}$ ,  $^{72}\text{Zn} + ^{72}\text{Zn}$ ,  $^{76}\text{Zn} + ^{76}\text{Zn}$  (系统的中子质子比分别为 1.0, 1.13, 1.27, 1.4 和 1.53)  $\alpha$  粒子发射数随系统总的中质比的演化。从图中可以看到, 在系统中质比(从 1.0 到 1.53)变化的广大区间,  $\alpha$  粒子发射数都灵敏地依赖于同位旋相关的平均场。也就是说, 无论对于丰中子碰撞系

统还是缺中子碰撞系统,  $\alpha$  粒子发射数都可以作为提取同位旋相关平均场的灵敏探针。对于缺中子系统, 由于中子和质子的数目相近, 所以有更多的中子-质子碰撞截面, 而 400 MeV/u 以下中子-质子的碰撞截面是中子-中子(质子-质子)碰撞截面的 3 倍, 也就造成了同位旋相关核子-核子截面对缺中子系统影响较大。但从图 3 中可以看到, 虽然缺中子区两组曲线间的距离有所拉近, 但同位旋相关平均场的影响仍旧远远大于同位旋相关核子-核子碰撞截面对  $\alpha$  粒子发射数的影响。

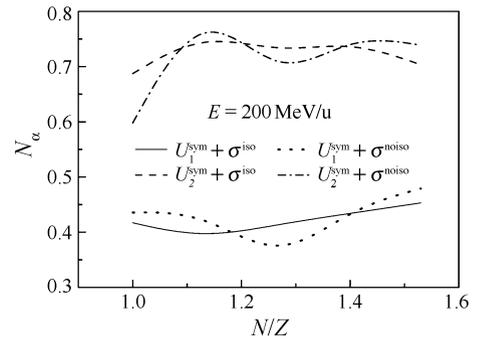


图 3 5 个不同碰撞系统的  $\alpha$  粒子发射数随系统总的中质比的演化

## 4 小结

本文利用 IQMD 理论系统研究了中能重离子碰撞过程中的  $\alpha$  粒子发射数。结果发现, 在很宽的能区内, 丰中子碰撞系统  $\alpha$  粒子发射数强烈地依赖于同位旋相关平均场, 而较弱地依赖于同位旋相关核子-核子碰撞截面的强度和形式。可以作为实验上直接提取同位旋相关平均场信息的探针。经过几年系统的研究, 理论上已经对建立同位旋非对称核物质状态方程积累了很多的经验, 建议从实验上对丰中子系统的  $\alpha$  粒子发射数和缺中子系统的质子发射数进行探测, 从中分别提取同位旋相关核子-核子碰撞截面和同位旋相关平均场的信息, 从而确定它们与实验相符合的具体表达形式和参数。

## 参考文献 (References):

- [1] Li B A, Ko C M, Bauer W. Int J Mod Phys, 1998, **E7**: 147.
- [2] Pak R, Benenson W, Bjark O, *et al.* Phys Rev Lett, 1997, **78**: 1022.
- [3] Xu H. Phys Rev Lett, 2000, **85**: 716.

- [4] Tsang M B. Phys Rev Lett, 2001, **86**, 5023.
- [5] Li Bao-an. Phys Rev, 2001, **C64**, 054604.
- [6] Li Bao-an. Ko Cheming, Ren Z Z, *et al.* Phys Rev Lett, 1997, **78**, 1644.
- [7] Pak R. Phys Rev Lett, 1997, **78**, 1026.
- [8] Colonna M, DiToro M. Phys Rev, 1998, **C57**, 1410.
- [9] Di Toro M. Nucl Phys, 2001, **A681**, 426C.
- [10] Liu Jianye, Guo Wenjun, Wang Shunjin, *et al.* Phys Rev Lett, 2001, **86**, 975.
- [11] Liu Jianye, Guo Wenjun, Xing Yongzhong, *et al.* Phys Lett, 2002, **B540**, 213.
- [12] Liu Jianye. Nucl Phys, 2001, **A687**, 475.
- [13] Liu Jianye, Guo Wenjun, Xing Yongzhong. Nucl Phys, 2003, **A726**, 123.
- [14] Liu Jianye, Guo Wenjun, Xing Yongzhong. Phys Rev, 2004, **C70**, 034610.
- [15] Hartnack C, Puri Rajeev K, Aichelin J, *et al.* Eur Phys J, 1998, **A1**, 151.
- [16] Chen Liewen, Zhang Fengshou, Jin Genming. Phys Rev, 1998, **C58**, 2283.
- [17] Reinhard P G. Computational Nuclear Physics. Berlin: Springer-Verlag, 1991, **1**, 28—50.
- [18] Danielewicz P. Nucl Phys, 2000, **A673**, 375.
- [19] Alkazzov G. Nucl Phys, 1977, **A280**, 365.
- [20] Klakow D, Welke G, Bauer W. Phys Rev, 1993, **C48**, 1982.

## Number of $\alpha$ Emitted as a Probe of the Isospin Dependent Mean-field<sup>\*</sup>

GUO Wen-jun<sup>1)</sup>, GUO Shuang-he, SUN Chang-an

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

**Abstract:** The  $\alpha$  emissions in heavy-ion collisions at intermediate energies are studied by using isospin-dependent quantum molecular dynamics model. The number of  $\alpha$  emitted is found to be strongly dependent on the isospin-dependent mean-field and weakly on the nucleon-nucleon cross sections. The number of  $\alpha$  emitted is easy to be measured in experiment and the above conclusion is still available no matter in neutron-rich systems or in neutron-deficient systems in a wide energy region, so it can be used as an excellent probe for extracting information of the isospin-dependent mean-field. After several years searching, some information of the isospin asymmetry equation of state has been obtained in theoretically. We suggest to investigate the number of  $\alpha$  emitted in neutron-rich systems and the number of proton emitted in neutron-deficient systems experimentally to obtain more information of the isospin-dependent mean-field and the isospin-dependent nucleon-nucleon cross section.

**Key words:** number of  $\alpha$  emitted; isospin effect; isospin dependent mean-field

\* Received date: 5 Feb. 2010; Revised date: 15 Apr. 2010

\* Foundation item: National Natural Science Foundation of China(10905041); Innovation Program of Shanghai Municipal Education Commission(09YZ207)

1) E-mail: impgwj@126.com