

## 中能重离子碰撞中的碰撞参数研究\*

张丰收<sup>1,2,3</sup> 陈列文<sup>1,2</sup> 明照宇<sup>1,2</sup> 朱志远<sup>1,4</sup>

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 (中国高等科学技术中心 北京 100080)

4 (中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

**摘要** 在入射能量  $E$  为 40 和 100 MeV/u 时,对  $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$  和  $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$  两个反应系统在不同碰撞参数下进行了同位旋相关的量子分子动力学模型计算,系统研究了阻塞率、线性动量转移、荷电粒子多重性、轻荷电粒子多重性、中子多重性以及束缚核总电荷  $Z_{\text{bound}}$  随碰撞参数的变化规律. 结果表明,中子多重性对碰撞参数的依赖在两个能量下都存在着明显的同位旋效应,  $Z_{\text{bound}}$  在  $E$  为 40 MeV/u 时存在着同位旋效应. 同时讨论了在较低和较高能量时如何更合理地确定反应事件的碰撞参数.

**关键词** 碰撞参数 同位旋效应 同位旋相关的量子分子动力学模型

### 1 引言

核-核碰撞引发核反应,碰撞参数  $b$  是一个重要的核反应分类的参数. 对于低能重离子碰撞,一般以角动量作为核反应类型分类的. 在中能区由于靶核对弹核俘获不全而出现非完全熔合反应,通常以线性动量转移(LMT)表征碰撞的激烈程度. 随着中高能重离子加速器的相继投入使用,中高能重离子碰撞已成为重离子物理的主要内容. 在中高能重离子碰撞中,多重碎裂已成为一种非常重要的反应机制<sup>[1]</sup>,这就使得中高能重离子反应机制变得很复杂. 随着探测设备与探测技术的进一步改善和提高,尤其有了  $4\pi$  探测器之后,如 GSI 的 ALADIN<sup>[2]</sup> 和 FOPI<sup>[3]</sup>, MSU 的 Miniball<sup>[4]</sup>, GANIL 的 INDRA<sup>[5]</sup>, LNS 的 Chimera<sup>[6]</sup> 以及 IMP 的 MUDAL<sup>[1]</sup>,人们能够对核反应进行全空间关联测量. 这样人们就可以对某一类型的事件进行挑选,例如挑选具有一定碰撞参数的反应事件,从而可以研究许多重要物理量对碰撞参数的依赖,为理论计算与实验数据进行比较带来了极大的方便.

1999-02-01 收稿

\* 国家自然科学基金(19609033,19875068,19847002),中国科学院基金和国家教委基金资助

1) 靳根明. 私人通讯

对中能重离子碰撞中反应事件碰撞参数的确定一直是实验核物理学家们十分关心的问题,也没有严格统一的方法,各自根据自己的实验条件而定.目前主要有以下几种方法:(1)用线性动量转移  $LMT$  来确定  $b$  值.(2)用中子多重性  $N_n$  来确定  $b$  值.(3)用轻荷电粒子(质子或  $\alpha$  粒子)多重性  $N_k$  来确定  $b$  值.(4)用荷电粒子多重性  $N_c$  来确定  $b$  值.(5)用束缚核总电荷  $Z_{bound}$  来度量  $b$ .(6)用阻塞率  $E_{mi}$  的大小来确定  $b$  值.

最近,MSU 实验组通过研究在入射能量  $E$  为  $40\text{MeV/u}$  时  $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$  和  $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$  的多重碎裂,观察到了两个反应系统的平均中等质量碎片多重性  $\langle N_{MF} \rangle$  和  $N_c, N_k$  以及  $N_n$  之间的关联存在着明显的差别<sup>[7]</sup>,这说明多重碎裂具有同位旋相关性.同位旋相关的量子分子动力学(IQMD)模型能够较好地定性重复出多重碎裂数据<sup>[8]</sup>.同时实验和理论计算都表明, $N_n$  与  $N_c$  之间的关联存在着明显的同位旋效应,这说明  $N_n$  对碰撞参数的标度具有同位旋相关性.本文的目的是想检验前面提到的几个提取碰撞参数的物理量是否具有同位旋相关性以及它们在较低和较高能量下的适应性.

本文基于同位旋相关的量子分子动力学(IQMD)模型<sup>[9-12]</sup>,分析了在入射能量  $E$  为  $40$  和  $100\text{MeV/u}$  时,  $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$  和  $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$  两个反应系统在不同碰撞参数下  $N_n, LMT, N_k, N_c, Z_{bound}$  和  $E_{mi}$  随碰撞参数  $b$  的变化.讨论了各个物理量是否具有同位旋相关性以及作为度量碰撞参数的适应性.

## 2 模型和方法

本文使用的 IQMD 模型<sup>[9-12]</sup>完整地包含了同位旋自由度,即同位旋相关的核子-核子碰撞截面、对称能项、库仑势及同位旋相关的泡利阻塞.另外,在初始化过程中也严格地区分了中子和质子. IQMD 模型已被成功地用来解释中能重离子碰撞中的一些同位旋效应<sup>[8-12]</sup>.在 IQMD 模型中,核的平均场可以参数化为

$$U(\rho, \tau_z) = \alpha \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right) + \beta \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma + (1 - \tau_z) V_C + C \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho_0} \tau_z + U^{Yuk}, \quad (1)$$

式中,  $\rho_0 = 0.16\text{fm}^{-3}$ , 即正常核物质的饱和密度,  $\rho, \rho_n$  和  $\rho_p$  分别是总的、中子的和质子的相互作用密度,  $\tau_z$  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,  $U^{Yuk}$  为 Yukawa(表面)势.本文中,参数  $\alpha, \beta$  和  $\gamma$  的选择采用所谓的软势(不可压缩系数  $K = 200\text{MeV}$ ).对称能强度系数  $C = 32\text{MeV}$ .

对于碰撞系统  $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$  和  $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ ,它们具有相同的电荷数,但具有不同的中质比  $N/Z$ ,即分别为 1.24 和 1.48.在初始化过程中,利用非线性相对论平均场理论(RMF)<sup>[13]</sup>得到  $^{112}\text{Sn}$  和  $^{124}\text{Sn}$  的中子及质子密度分布,抽样出稳定的基态核  $^{112}\text{Sn}$  和  $^{124}\text{Sn}$ ,其中  $^{124}\text{Sn}$  具有非常明显的中子皮结构.在非线性相对论平均场理论计算中我们使用新的参数  $NL3$ <sup>[14]</sup>,这组参数对稳定核以及远离  $\beta$  稳定线核的基态性质都能给出很好的描述.

为了构造碎片,使用了同位旋相关的改进的并合模型<sup>[8,10,11]</sup>.在这个模型中,把相对距离小于  $R_0$ ,同时相对动量小于  $P_0$  的粒子并合到一个碎片之中(这里  $R_0 = 3.5\text{fm}$ ,  $P_0 = 300\text{MeV}/c$ ),同时考虑了同位旋约束以及碎片的重构.

在本文的计算中除  $LMT$  和  $E_{rat}$  外都已扣除了前平衡发射的轻粒子 ( $Z \leq 2$  的碎片). 前平衡粒子定义为同时满足下列条件的碎片; 与其它碎片之间的相对距离大于  $3.5\text{fm}$ ; 在质心系中碎片平均每核子动能大于  $8\text{MeV}$ ; 在质心系中, 碎片做远离质心的运动; 碎片距离质心的距离大于系统的均方根半径. 同时, 在本文的计算中, 所选的事件数与碰撞参数成正比.

### 3 结果和讨论

对于碰撞系统  $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$  和  $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ , 计算表明,  $b = 10\text{fm}$  时, 多重碎裂机制已基本消失, 平均中等质量碎片多重性非常小. 中等质量碎片定义为  $3 \leq Z \leq 33$  的碎片, 其中  $Z$  为碎片的电荷数. 计算表明,  $200\text{fm}/c$  以后电荷分布已基本达到稳定, 于是可以采用时间平均技术<sup>[10]</sup>, 即以下的计算结果是对所有事件  $200\text{fm}/c$  以后的不同时间点进行平均的结果.

一般来说, 人们应该选择灵敏依赖于碰撞参数  $b$  的物理量来度量碰撞参数  $b$ . 图 1 (a—f) 分别给出了  $E_{rat}$ ,  $LMT$ ,  $N_c$ ,  $N_k$ ,  $N_n$  和  $Z_{bound}$  随碰撞参数  $b$  的变化规律. 从图 1 可以清楚地看到各个物理量是否具有同位旋相关性及它们在较低和较高能量下的适应性.

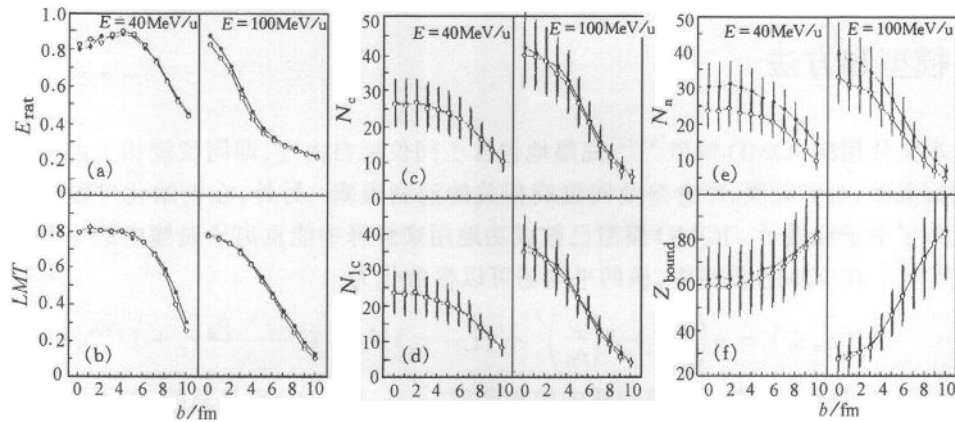


图 1  $E_{rat}$ ,  $LMT$ ,  $N_c$ ,  $N_k$ ,  $N_n$  和  $Z_{bound}$  随碰撞参数  $b$  的变化规律

左边和右边分别代表  $E = 40$  和  $100\text{MeV}/u$  时的计算结果.

●  $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ , ○  $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$ .

$E_{rat}$  在较低能量时没有同位旋相关性, 在小的或中等碰撞参数时对  $b$  不灵敏, 而只在大碰撞参数时灵敏地依赖于  $b$ , 这样它可用来挑选较低能量时的周边碰撞事件.  $E_{rat}$  在较高能量时具有较明显的同位旋相关性, 在小的或中等碰撞参数时灵敏地依赖于  $b$ , 而在大碰撞参数时对  $b$  不灵敏, 这样它特别适合用来挑选较高能量时的中心或半周边碰撞事件.

在能量较低时,  $LMT$  与  $E_{rat}$  非常类似, 只在大碰撞参数时  $LMT$  对  $b$  的依赖具有明显的同位旋相关性. 对于重的碰撞系统, 非完全熔合是一种重要的反应机制, 实验上常通过测量两个大碎片的折叠角来计算  $LMT$ . 在能量较高时, 多重碎裂成为重要的反应机

制,实验上可以通过测量类弹碎片的线性动量来估算  $LMT$ ,此时,除了在非常小碰撞参数时对  $b$  的依赖不大灵敏外, $LMT$  对所有碰撞参数都比较灵敏.在能量较高时  $LMT$  对  $b$  的依赖只是在大碰撞参数时才具有较明显的同位旋相关性.

$N_c$  和  $N_k$  对  $b$  的依赖几乎是一样的.在较低能量时,它们对所有碰撞参数都不是很灵敏(相对于较高能量时来说),这可能是由于在较低能量时,非完全熔合仍然是一种重要的反应机制.在能量较高时,它们对所有碰撞参数都比较灵敏. $N_c$  和  $N_k$  对  $b$  没有明显的同位旋相关性.

$N_n$  的一个显著特点是不管在较低能量还是在能量较高时,都具有非常明显的同位旋相关性.于是用  $N_n$  对物理量进行标度时,将是同位旋相关的,这一点应该值得注意.在较低能量时, $N_n$  在小的或中等碰撞参数时对  $b$  不大灵敏,而只在大碰撞参数时较灵敏地依赖于  $b$ ,这样它适合用来挑选较低能量时的周边碰撞事件.在能量较高时, $N_n$  在所有碰撞参数时都对  $b$  比较灵敏.

$Z_{bound}$  在能量较低时对所有碰撞参数的依赖都不是很灵敏(相对于较高能量时来说),并且还具有较强的同位旋相关性.在能量较高时,除了在非常小的碰撞参数时对  $b$  的依赖不大灵敏外, $Z_{bound}$  对所有碰撞参数的依赖都很灵敏,并且对  $b$  的依赖没有同位旋相关性,因此它特别适用来挑选较高能量时不同碰撞参数的碰撞事件.

当然,用以上物理量来挑选不同碰撞参数下的事件时,还得结合探测设备的实际情况,如探测器的接收效率等因素来综合考虑.另外还和所研究的物理内容有关.例如,如果想通过具有不同  $N/Z$  的反应系统来研究同位旋效应,用  $N_n$  来挑选某一碰撞参数下的事件时,就得特别注意.

为了更清楚地比较  $N_c, N_k, N_n$  和  $Z_{bound}$  等物理量之间的差别以及各自的优越性,图 2(a—c) 分别给出了  $N_k, N_n$  和  $Z_{bound}$  与  $N_c$  之间的关联.从图中可以清楚地看到  $N_k$  与  $N_c$  之间能够非常好地满足线性关系,并且两者之间的关联几乎没有

同位旋相关性,于是  $N_k$  和  $N_c$  在确定反应事件的碰撞参数时具有同等的地位. $N_n$  与  $N_c$  之间的关联具有明显的同位旋相关性,在能量比较低时关联比较复杂,在能量比较高时基本满足线性关系. $Z_{bound}$  与  $N_c$  之间的关联能较好地满足线性关系,在能量比较低时具有

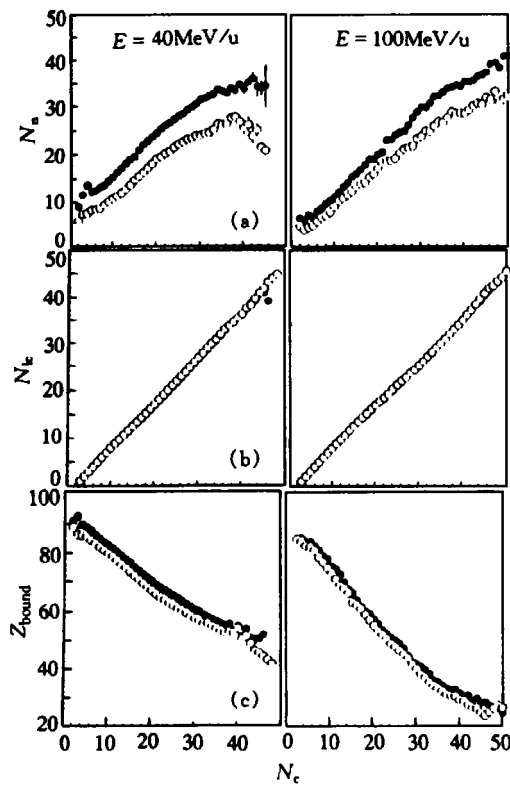


图 2  $N_k, N_n$  和  $Z_{bound}$  与  $N_c$  之间的关联  
 左边和右边分别代表  $E = 40$  和  $100 \text{ MeV/u}$  时的计算结果.

●  $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ , ○  $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$ .

同位旋相关性,在能量比较高时这种相关性基本消失.

表1给出了提取碰撞参数的物理量是否具有同位旋相关性以及它们在较低和较高能量下对 $b$ 依赖的灵敏程度.通过表1可以非常清楚地看到 $E_{\text{rat}}$ ,  $LMT$ ,  $N_c$ ,  $N_k$ ,  $N_n$ 和 $Z_{\text{bound}}$ 等物理量用来挑选碰撞参数时是否具有同位旋相关性以及它们在较低和较高能量下的适应性.

表1  $E_{\text{rat}}$ ,  $LMT$ ,  $N_c$ ,  $N_k$ ,  $N_n$ 和 $Z_{\text{bound}}$ 对碰撞参数 $b$ 依赖的灵敏程度

物理量	较低能量时( $E = 40\text{MeV/u}$ )			较高能量时( $E = 100\text{MeV/u}$ )		
	中心碰撞	半周边碰撞	周边碰撞	中心碰撞	半周边碰撞	周边碰撞
$E_{\text{rat}}$	差	差	好	很好 <sup>a)</sup>	好 <sup>a)</sup>	差
$LMT$	差	差	好 <sup>b)</sup>	好	好	好 <sup>a)</sup>
$N_c$	较好	较好	较好	好	好	好
$N_k$	较好	较好	较好	好	好	好
$N_n$	较好 <sup>b)</sup>	较好 <sup>b)</sup>	较好 <sup>b)</sup>	好 <sup>b)</sup>	好 <sup>b)</sup>	好 <sup>b)</sup>
$Z_{\text{bound}}$	较好 <sup>b)</sup>	较好 <sup>b)</sup>	较好 <sup>b)</sup>	好	很好	很好

a)表示有较明显的同位旋相关性;b)表示有很明显的同位旋相关性.

## 4 总结

在不同碰撞参数下,利用IQMD模型系统研究了入射能量 $E$ 为40和100MeV/u时, $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$ 和 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 两个反应中阻塞率 $E_{\text{rat}}$ 、线性动量转移 $LMT$ 、荷电粒子多重性 $N_c$ 、轻荷电粒子多重性 $N_k$ 、中子多重性 $N_n$ 以及束缚核总电荷 $Z_{\text{bound}}$ 随碰撞参数的变化规律.结果表明,中子多重性在两个能量下都存在着明显的同位旋效应, $Z_{\text{bound}}$ 在 $E$ 为40MeV/u时以及在 $E = 40\text{MeV/u}$ 时 $LMT$ 在大的碰撞参数下都存在明显的同位旋效应,因此,研究重离子反应中的同位旋效应时,如果用 $N_n$ 来确定反应事件的碰撞参数,就须特别注意.同样,如在能量较低时使用 $Z_{\text{bound}}$ 或 $LMT$ 也须特别注意.同时,本文对 $E_{\text{rat}}$ ,  $LMT$ ,  $N_c$ ,  $N_k$ ,  $N_n$ 和 $Z_{\text{bound}}$ 在较低和较高能量下对碰撞参数 $b$ 依赖的灵敏程度进行了总结,并讨论了在较低和较高能量时如何利用以上物理量合理挑选不同碰撞参数下的事件.

本文利用IQMD模型对当前实验上确定反应事件碰撞参数的方法进行了分析、讨论和总结,希望能为实验提供一些参考.当然,使用哪些物理量来确定反应事件的碰撞参数,还要结合实验探测设备的实际情况,如探测器的接收效率以及所研究的物理内容等因素来综合考虑.

## 参考文献(References)

- 1 ZHANG F S, GE L X. Nuclear Multi-fragmentation (in Chinese), Beijing: Science Press, 1998 (张丰收、葛凌霄. 原子核多重碎裂. 北京:科学出版社,1998)
- 2 Hubele J et al. Z. Phys., 1991, A340(3):263—270
- 3 Gobbi A et al. Nucl. Inst. Meth., 1993, A324(1,2):156—176
- 4 De Souza R T et al. Nucl. Inst. Meth., 1990, A295(1,2):156

- 5 Pouthas J et al. Nucl. Inst. Meth., 1995, **A357**(2,3):418—442
- 6 Aiello S, Anzalone A, Baldo M et al. Nucl. Phys., 1995, **A583**:461c—464c
- 7 Kunde G J, Gaff S J, Gelbke C K et al. Phys. Rev. Lett., 1996, **77**(14):2897—2900
- 8 ZHANG FengShou, CHEN LieWen, MING ZhaoYu et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 2000, **24**(3):238  
(张丰收, 陈列文, 明照宇等. 高能物理与核物理, 2000, **24**(3):238)
- 9 CHEN L W, GE L X, ZHANG X D et al. J. Phys., 1997, **G23**:211—218
- 10 CHEN L W, ZHANG F S, JIN G M. Phys. Rev., 1998, **C58**(4):2283—2291
- 11 CHEN LieWen, ZHANG FengShou, JIN GenMing et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 2000, **24**(2):153  
(陈列文, 张丰收, 靳根明等. 高能物理与核物理, 2000, **24**(2):153)
- 12 CHEN LieWen, ZHANG XiaoDong, GE LingXiao. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1996, **20**(12):1091—1096  
(陈列文, 张晓东, 葛凌霄. 高能物理与核物理, 1996, **20**(12):1091—1096)
- 13 ZHU Z Y, SHEN W Q, CAI Y H et al. Phys. Lett., 1994, **B328**:1—4
- 14 Lalazissis G A, Konig J, Ring P. Phys. Rev., 1997, **C55**(1):540—543

## Determination of Impact Parameter at Intermediate Energy Heavy Ion Collision

ZHANG FengShou<sup>1,2,3</sup> CHEN LieWen<sup>1,2</sup> MING ZhaoYu<sup>1,2</sup> ZHU ZhiYuan<sup>1,4</sup>

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, China)

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

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

**Abstract** Within the framework of an IQMD model, the stopping rate  $E_{\text{ret}}$ , linear momentum transfer  $LMT$ , charged-particle multiplicities  $N_c$ , light charged-particle multiplicities  $N_{lc}$ , neutron multiplicities  $N_n$ , and  $Z_{\text{bound}}$  are investigated as a function of the impact parameter  $b$  in reactions of  $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$  and  $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$  at 40 and 100 MeV/u. The results indicate that  $N_n$  is isospin-dependent as a function of  $b$  at both 40 and 100 MeV/u, and  $Z_{\text{bound}}$  is also isospin-dependent at 40 MeV/u but not at 100 MeV/u. Meanwhile, we also discuss how to determine impact parameter of an event at lower and higher incident energies.

**Key words** impact parameter, isospin effect, isospin-dependent QMD model

Received 1 February 1999

\* Supported by the National Natural Science Foundation of China (19609033, 19875068, 19847002), Science Foundation of The Chinese Academy of Sciences and Science Foundation of The Chinese Educational Commission