

中高能重离子碰撞中的集体流性质*

葛凌霄 张建明 张丰收

(中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

卓益忠

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘 要

本文研究了在静态时不同势场下, 标示核物质性质的核物质内部压强和束缚能对核物质密度的依赖关系。在同时考虑势场的动量相关和介质效应的情况下, 通过BUU动力学计算, 系统地研究了核物质流对碰撞参数和入射能量的依赖关系。通过对不同状态下的计算结果与实验值的比较, 加深了对核物质状态方程的了解。

一、引 言

在流体力学模型^[1]中, 当一个流元被阻止和压缩时, 将会与入射束方向形成一定的夹角逃跑和膨胀。这就是实验上观测到的集体旁流现象^[2]。旁流的出现, 意味着高压核物质的形成。由于理论上微观模型的发展还未能超出平均场近似, 唯象的核物质状态方程仍然不可避免, 而模型依赖的这种唯象方程所预言的压缩效应恰好可由重离子碰撞中所产生的这种集体流束标志^[3]。所以, 研究集体流的性质对核物质状态方程的探讨具有重要意义。1975年在 Schopper 等首先观察到这一现象^[4]后, 理论上已经做了大量的工作, 应用流体力学模型、统计模型、经典模型、ETDHF模型和核内级联(INC)模型等进行了研究, 但相对成功的只有BUU微观模型。在BUU模型中, 重离子碰撞动力学由平均场和核子-核子碰撞决定, 我们取文献[5]中的扩展形式:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\mathbf{p}}{m^*} \nabla_{\mathbf{r}} - \nabla_{\mathbf{r}} U \nabla_{\mathbf{p}}\right) f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) = - \int \frac{d^3 p_2 d^3 p_2' d^3 p_2'}{(2\pi)^9} \sigma_{nn} \cdot V_{12} \cdot [ff_2(1-f_1')(1-f_2') - f_1'f_2'(1-f)(1-f_2)](2\pi)^3 \delta_{(\mathbf{p}+\mathbf{p}_2-\mathbf{p}_1'-\mathbf{p}_2')}, \quad (1)$$

其中
$$m^*/m = \frac{1}{1 + \frac{m}{\mathbf{p}} \nabla_{\mathbf{p}} U}, \quad (2)$$

σ_{nn} 为核子-核子碰撞截面, v_{12} 为相碰两核子的相对速度, m^* 为动量有效质量, 代表势场

本文1991年1月9日收到。

* 国家自然科学基金和中国科学院兰州分院专项基金资助。

的动量相关的性质。

至今,用BUU研究集体流,还局限于只考虑势场动量和密度相关的不同平均场^[6,7]或不同核子-核子碰撞截面的大小,即介质效应^[8,9]单方面对集体流性质的影响。本文试图同时考虑这两个方面来研究集体流的性质,为了既能体现集体流的特征,又便于实验上的测量,文献[10,11]引进了两个可观测量:流角和横动量。在反应平面内,流角和横动量的大小既依赖于碰撞参数 b 和入射能量 E ,又由于核子间的粘滞、碰撞,而依赖于核反应系统的质量数 A ^[13]。流角和横动量随碰撞参数与入射能量的变化在不同模型下给出的结果不同^[14,15],即使在同一模型下计算结果也有较大的差异^[16,17],因此,我们将在文中第三部分系统地讨论集体流对入射能和碰撞参数的依赖关系。

二、核物质状态方程和介质效应

1. 状态方程

与核物质状态方程紧密相联的是平均场,平均场是密度依赖的,在早期的BUU计算中,一般取为较简单的参数化形式^[12]:

$$U(\rho) = A(\rho/\rho_0) + B(\rho/\rho_0)^\sigma, \quad (3)$$

A, B, σ 三参数的选取应满足核物质基态性质。典型的两组参数为: ①软势: $A = -356$ MeV, $B = 303$ MeV, $\sigma = 7/6$, 压缩系数 $K = 200$ MeV; ②硬势: $A = -124$ MeV, $B = 70.5$ MeV, $\sigma = 2$, $K = 380$ MeV。只有 K 较大的硬势才能解释集体流实验数据,而硬势的 K 比其它许多有关核物质的计算结果^[8,9]都来得大。事实上,由于核相互作用有较强的交换效应,平均场应该是动量依赖的。文献[7]将 Yukawa 势中自然出现的动量相关交换项取简单平均后首先引进了动量相关的平均场 GBD 势 ($K = 215$ MeV)。最近又由 Sebillle 等人用 Gongy 势做了BUU计算,Gongy 势无明显的动量依赖,但通过有限区域内交换项产生动量依赖的后果。我们在文献[5]中引进了包含明显的动量和密度依赖的扩展的 Skyrme 力,对于对称核物质,在势场非局域近似下,其平均场的形式为:

$$U_{(\rho, \mathbf{p})} = \frac{1}{4} \left(3t_0 + \frac{t_3}{2} \rho^\alpha \right) \rho + \left(\frac{m}{m^*} - 1 \right) \frac{p^2}{2m} + \frac{1}{4} [(3t_1 + 3t_4 \rho^\alpha) + (5 + 4x_2)t_2 + (5 + 4x_5)t_5 \rho^\alpha] \frac{1}{(2x)^3} \int p^2 f(\mathbf{r}, \mathbf{p}) d\mathbf{p}, \quad (4)$$

其中

$$m^*/m = \left\{ 1 + \frac{1}{16} \frac{2m}{\hbar^2} [3t_1 + 3t_4 \rho^\alpha + (5 + 4x_2)t_2 + (5 + 4x_5)t_5 \rho^\alpha] \right\}^{-1}, \quad (5)$$

其满足基态性质的 SKM 参数为: $t_0 = -2645$ MeV·fm³, $t_1 = 385$ MeV·fm⁵, $t_2 = -120$ MeV·fm⁵, $t_3 = 15595$ MeV·fm^{7/2}, $\alpha = \frac{1}{6}$, $t_4 = t_5 = x_2 = x_5 = 0$, 基态的 $\frac{m^*}{m} = 0.79$,

$K = 215.5$ MeV。包含势场的动量相关后,通过BUU计算,发现由于动量相关势场会产生较强的排斥,与单纯密度依赖势(5)相比会增大流角和横动量^[5,7],从而由较软的动量依赖状态方程(K 小)产生了单纯密度依赖的硬的状态方程(K 大)^[5,20]。图1为软势,硬势和

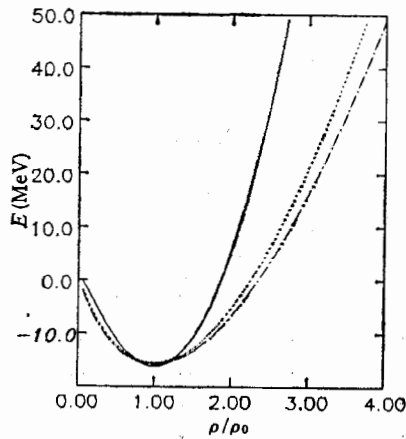


图 1 零温时,每核子束缚能随核物质密度 ρ/ρ_0 的变化
——硬势, - - -软势,SKM 参数势

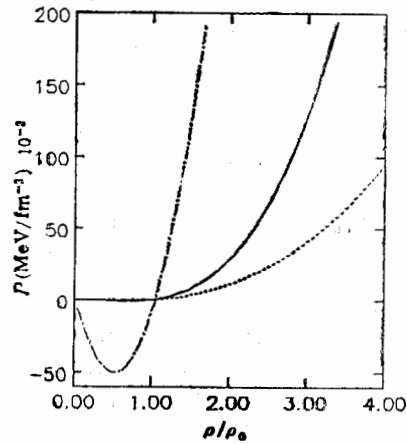


图 2 零温时,核物质内部压强 P 随核物质密度的变化
——硬势, - - -SKM 参数势,软势

SKM 参数化势在零温时束缚能随核物质密度的变化,图 2 为在图 1 中的三种势场下核物质内压强随密度的变化。从图中可见,考虑势场的动量相关,当核物质被压缩时,内部压强在 ρ/ρ_0 达到一定值后将会比在软、硬势下剧烈增加,这表明排斥加大;而当 $\rho/\rho_0 < 1$ 时,压强为负值且较大,说明这时吸引占了统治地位,从而表明与软、硬势相比,动量相关势场的考虑会加快核反应速度;在核物质基态 $\rho/\rho_0 = 1$ 时,三种势场下压强均消失。从图 1 不难发现,每核子束缚能随密度变化的陡峭程度主要取决于核物质的压缩系数 K 。 K 越大,随着 ρ/ρ_0 的增加,束缚能增加越快。基态时,束缚能即为结合能 $E = -16\text{MeV/u}$ 。

2. 介质效应

在重离子碰撞中,由于每个核子处于核物质中,周围存在着和该碰撞核子相互作用的核子所产生的多体效应,即介质效应,它的存在影响着相空间的相互作用和碰撞核子的相对速度,对集体动量流的影响也十分灵敏^[9]。在核介质中,核子-核子碰撞的弹性截面由文献 [16] 知是密度和动量依赖的,很自然,对非弹性截面根据 Gale 等的建议^[22]对应于 π 介子产生截面也应该是介质依赖的。对核子-核子碰撞自由截面,根据 Bertsch 等的参数化公式^[23]随能量的变化我们取图 3 所示的形式。考虑介质效应后,对非弹性碰撞截面也取 Bertsch 和 Brown 等人推导的形式^[24]:

$$\sigma_{NN \rightarrow N\Delta}^{\text{in}} = \sigma_{NN \rightarrow N\Delta}^{\text{free}} [1 + 0.24(\rho/\rho_0)^2]$$

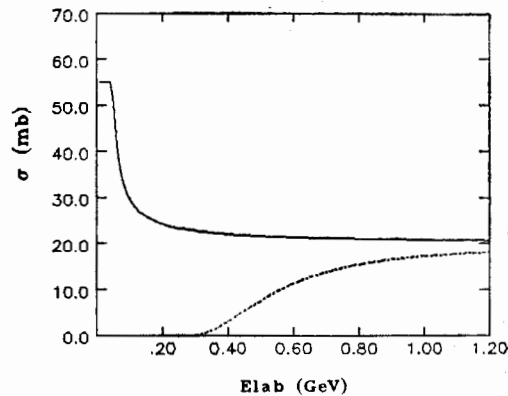


图 3 自由核子-核子碰撞弹性和非弹性截面随入射能量的变化关系
——弹性截面,非弹性截面

$$-0.07(\rho/\rho_0)], \quad (6)$$

对弹性碰撞截面根据文献[21],我们取表1中的值。

表 1

$\rho(\text{GeV}/c)$ σ_{nn} ρ/ρ_0	ρ/ρ_0						
	0.45	0.65	0.85	1.05	1.25	1.45	1.65
$m^*/m = 0.768, \rho/\rho_0 = 0.5$	37.0	20.9	18.7	17.7	17.5	17.7	18.5
$m^*/m = 0.645, \rho/\rho_0 = 1.0$	24.7	17.7	18.0	17.7	18.5	19.2	20.3
$m^*/m = 0.456, \rho/\rho_0 = 2.0$	20.8	20.0	21.6	21.2	22.2	23.0	24.0
$m^*/m = 0.330, \rho/\rho_0 = 3.0$	25.2	23.3	24.7	24.8	25.7	26.7	27.7

三、计算结果与讨论

首先,我们改变核物质系统的两个外部参量:碰撞参数 $b(\text{fm})$ 和入射能 $E(\text{MeV})$,来探讨与核物质状态方程直接相联的平均场及介质效应对集体流性质的影响,然后将不同状态下的 BUU 计算值与实验值做比较。

1. 集体流的碰撞参数依赖

对 $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$, 入射能 $E = 600\text{MeV}/u$ 对称核物质系统,在硬势+自由核子碰撞截面 $\sigma_{nn}^{\text{free}}$, 硬势+核子在介质中的碰撞截面 $\sigma_{nn}^{\text{medium}}$ 、SKM + $\sigma_{nn}^{\text{free}}$ 及 SKM + $\sigma_{nn}^{\text{medium}}$ 四种状态下,所产生的饱和流角 θ_F 和每核子横动量随碰撞参数 $b(\text{fm})$ 的变化结果如表2。从中不难发现,在 $600\text{MeV}/u$ 时,(1)横动量 $\langle p_x \rangle/A$ 随 b 的变化在硬势和 SKM 参数势下均是中心碰撞 $\langle p_x \rangle/A$ 较小,当 b 达到一定值 $b/R \approx 0.85 (R = 1.12A^{1/3})$ 左右时, $\langle p_x \rangle/A$ 达到最大,然后随 b 的增加而减小,直至为零,介质效应的考虑在两种不同势场和各种碰撞参数下均使横动量增加。(2)流角随碰撞参数的变化,大体趋势是,中心碰撞流角最大,随 b 的增加而减小,硬势下流角减小的幅度快于动量相关的 SKM 参数势下减小的幅度,介质效应也会使流角增加。但由于核势动量相关的考虑,不同核中核子的相交互

表2 $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O} (E = 600\text{MeV}/u)$

	Hard		Hard + Medium		SKM		SKM + Medium	
	θ_F	$\langle P_x \rangle/A$	θ_F	$\langle P_x \rangle/A$	θ_F	$\langle P_x \rangle/A$	θ_F	$\langle P_x \rangle/A$
$b = 0$	21.8	3.7	23.4	10.8	14.0	6.3	15.4	13.9
$b = 1$	16.6	24.4	17.3	32.1	16.3	27.8	15.0	34.2
$b = 2$	10.3	31.4	13.9	38.0	13.3	48.3	14.2	57.3
$b = 3$	6.2	26.4	10.4	33.4	12.7	41.8	13.3	46.8
$b = 4$	3.1	6.8	7.6	14.4	10.8	25.2	11.1	35.6
$b = 5$	2.2	4.2	6.3	8.9	8.9	11.1	9.0	19.3

用受其速度的影响,使之与硬势相比,流角随 b 的变化要缓慢一些。

2. 集体流的能量依赖

表 3 为 $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$, $b = 2\text{fm}$ 对称核物质系统, 饱和流角 θ_F 与每核子横动量在四种不同状态下随入射能量 $E(\text{MeV})$ 的变化。可以发现,硬势下随入射能的增加,流角和横动量首先增大,达到一定能量 (800MeV/u 左右)后,又开始减小,而且,流角对入射能似乎不是十分灵敏。而在 SKM 参数势下,流角和横动量随入射能的增加而增大,当入射能

表 3 $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$ ($b = 2\text{fm}$)

Energy MeV	Hard		Hard + Medium		SKM		SKM + Medium	
	$\langle P_x \rangle / A$	θ_F	$\langle P_x \rangle / A$	θ_F	$\langle P_x \rangle / A$	θ_F	$\langle P_x \rangle / A$	θ_F
150	-6.0	8.5	-8.2	7.8	-2.7	6.1	-7.6	5.9
200	4.8	9.2	-0.9	9.0	11.7	6.4	6.4	6.1
400	20.2	9.6	19.4	9.6	24.4	10.8	22.2	12.0
500	26.4	9.9	28.1	10.3	36.5	12.0	37.1	12.3
600	31.4	10.3	36.5	11.1	48.3	13.3	53.1	14.2
800	35.6	10.7	42.4	11.8	64.1	15.9	65.4	16.3
1000	30.2	10.4	38.3	11.0	72.5	18.3	74.7	18.7
1200	21.4	9.3	29.1	10.1	73.2	18.5	75.9	19.0

达到 1000MeV/u 左右后,增加变得缓慢而趋于平稳。这是因为,动量相关势场的考虑,使核物质被压缩时,内部排斥势随入射能量的增加而很快增大,而横动量主要是由势场中的排斥位产生^[25],从而使两种势场下,随入射能的增加,横动量和流角的差距越来越大。但当能量增加到一定程度后,势场的动量相关使两核接触之前就具有较强的排斥^[9],从而使核物质的可压缩性降低。而势场中排斥位的大小是随核物质密度的增加而增大的,核物质可压缩性的降低就限制了排斥位的增加,从而使流角和横动量趋于平稳。图 4 为硬势

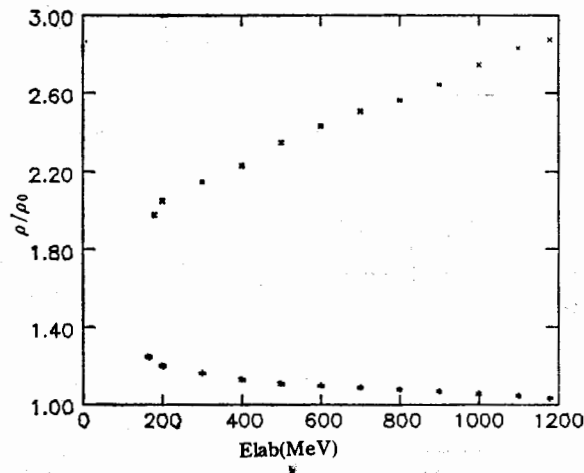


图 4 $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$, $b = 2\text{fm}$ 系统,重叠区最大密度随入射能量的变化
*SKM × 硬势。

和SKM参数势下, $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$ 系统 $b = 2\text{fm}$ 时,重叠区最大密度随入射能量的变化.随入射能的增加,重叠区最大密度在硬势下也增大,而在SKM参数势下,正是因上面分析的势场排斥加大的缘由,使重叠最大密度变小.当入射能较低时,对硬势约为 460MeV/u ,对SKM势约为 480MeV/u 以下,介质效应会使流角和横动量变小,能量越低,减小幅度越大;而当入射能量较高时,则恰好相反,只是能量越高,对硬势增加幅度越多,而对SKM势增加幅度要小一些.这是因我们处理碰撞时,自由核子碰撞截面随能量的变化取的是图3中的形式,介质中核子弹性碰撞按表1取值.能量低时,自由核子弹性碰撞截面很大,能量增加,截面下降;而介质中的核子弹性碰撞截面却随能量变化较小.随着能量的增加,自由和介质近似下核子弹性碰撞截面越来越接近,而对核子非弹性碰撞截面由公式(6)知,介质效应总使之增大.能量愈高,对硬势增加幅度越大,而对SKM参数势却要小一些.所以,能量较低时,自由核子碰撞有效截面大于介质中核子碰撞有效截面,从而介质效应的考虑使流角和横动量减小,能量较高时,则恰好相反.而且介质效应在硬势下对流角和横动量的影响要明显些,对重叠区密度的影响,两种势场下都较小(我们在图4中未作出)这似乎进一步揭示出核物质的可压缩性主要是由势场确定.从表3中还不难发现,在四种状态下,入射能为一定值以下,横动量消失且变负.横动量消失的具体机制我们在文献[25]中已作了简要分析.这时流角因受深部非弹等其它机制的影响可能增大.

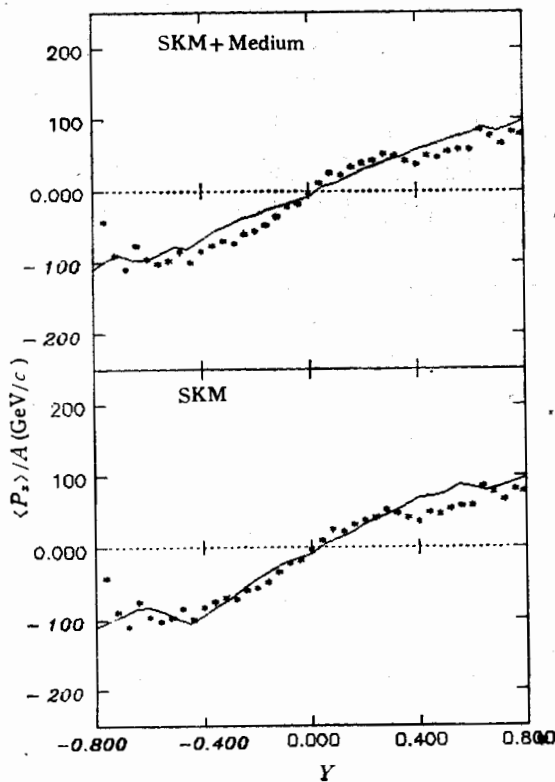


图5 见文中,* 实验值

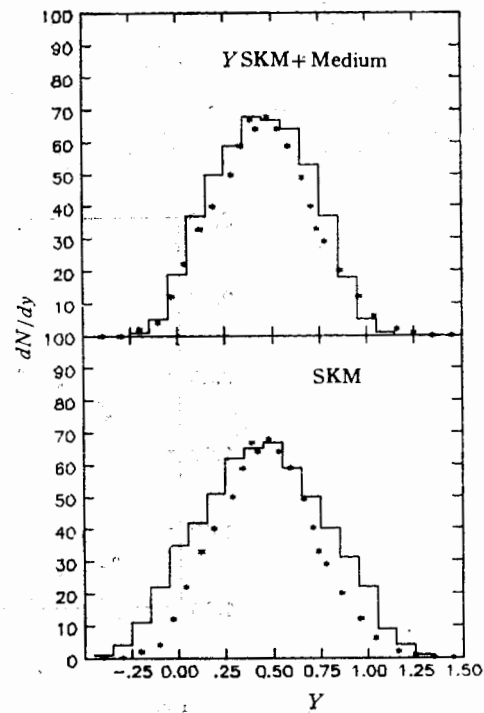


图6 见文中,* 实验值

3. 计算结果与实验值的比较

图 5 为 $^{93}\text{Nb} + ^{93}\text{Nb}$, $E = 400\text{MeV/u}$ 对称核物质系统, 在 $\text{SKM} + \sigma_{\text{nn}}^{\text{free}}$ 和 $\text{SKM} + \sigma_{\text{nn}}^{\text{medium}}$ 两种状态下, 用 BUU 动力学计算出的每核子饱和横动量随质心快度 Y 的分布与实验值的比较, 图 6 则为横向粒子随实验室系中快度的多重性分布的计算值与实验值的比较。入射能量为 400MeV/u 时, 对于对称核物质系统质心快度 $Y = 0.45$ 。图 5 和图 6 中实验数据分别取自文献 [15] 和 [20]。各快度小区上的计算值是对不同的碰撞参数求平均的结果, 而对碰撞参数 b 求平均, 取怎样的分布很复杂。我们计算时采用简单权重平均的办法, 即:

$$\left[\frac{\langle p_x \rangle}{A} \right]_Y = \frac{\sum_{i=1}^N \rho_{\text{max}}(i) \left[\frac{\langle p_x \rangle}{A} \right]_i}{\sum_{i=1}^N \rho_{\text{max}}(i)}, \quad (7)$$

其中 N 为不同碰撞参数下的计算次数, ρ_{max} 为重叠最大密度。从图中可见, 尽管计算结果与实验值符合不是太好, 但大体上能模拟出实验值。说明考虑了势场的动量相关后, 尽管势场的压缩系数较小, 却能获取相近于实验的结果。这使我们进一步觉得研究核物质的性质沿这个方向考虑是正确的, 而介质效应的考虑则能完善计算结果。

四、小 结

总之, 通过对能反映核物质性质的核物质内部压强和束缚能对密度的依赖关系的研究, 我们得到了在不同势场下核物质的静态性质, 并发现核物质内部压强对势场是否动量相关十分灵敏, 而对压缩系数的依赖却相对要小, 束缚能则恰好相反。我们基于非相对论近似下的 BUU 理论模型, 首次在同时考虑势场的动量相关和介质效应的情况下系统地研究了集体流对碰撞参数 b 和入射能量的依赖关系, 发现在不同核物质状态方程下, 横动量随 b 和 E 的变化具有较好的规律性能很好地体现集体流的特征。横动量随 b 和 E 的变化强烈依赖于有无动量相关的势场。随入射能增加, 动量相关的势场排斥位增大, 从而与硬势相比产生的流角和横动量差距越来越大, 介质效应对集体流的影响, 主要取决于核子碰撞有效截面的大小。当介质中核子碰撞有效截面大于自由核子有效截面, 介质效应就会增大流角和横动量, 反之, 则减小。这似乎意味着单纯改变核子碰撞截面来研究集体流的变化, 不是研究核物质状态方程最有效的探针, 如果把核子碰撞有效截面与势场自洽起来考虑, 可能会更有效。

参 考 文 献

- [1] H. Stoecker and W. Greiner, *Phys. Repts.*, **137**(1986), 279.
- [2] H. A. Gustafsson et al., *Phys. Rev. Lett.*, **52**(1984), 1590.
- [3] H. Stoecker et al., *Phys. Rev. Lett.*, **44**(1980), 725.
- [4] H. G. Banngardt et al., *Z. Phys.*, **A273**(1975), 359.
- [5] 张建明, 葛凌霄, 卓益忠, 张丰收, 高能物理与核物理, **15**(1991)457.
- [6] G. F. Bertsch et al., *Phys. Rev.*, **C29**(1984), 673.

- [7] C. Gale et al., *Phys. Rev.*, **C35**(1987), 1666.
 [8] J. Q. Wu et al., *Nucl. Phys.*, **A499**(1989), 810.
 [9] 刘建业, 葛愉成, 葛凌霄, 高能物理与核物理, **15**(1991), 66.
 [10] M. Gyulassy et al., *Phys. Lett.*, **110B**(1982), 185.
 [11] P. Danielewicz et al., *Phys. Lett.*, **157B**(1985), 146.
 [12] H. Kruse et al., *Phys. Rev. Lett.*, **54**(1985), 289.
 [13] K. G. R. Doss et al., *Phys. Rev. Lett.*, **57**(1986), 302.
 [14] H. Stocker et al., *Phys. Rev.*, **C25**(1982), 1873.
 [15] H. G. Ritter et al., *Nucl. Phys.*, **A447**(1985), 3c.
 [16] B. Schurmann et al., *Phys. Rev. Lett.*, **59**(1987), 2848.
 [17] J. J. Molitoris et al., *Phys. Lett.*, **162B**(1985), 47.
 [18] C. Horowitz and B. Serot, *Nucl. Phys.*, **A464**(1987), 613.
 [19] B. Ter Haar and R. Malfilet, *Phys. Rev. Lett.*, **56**(1986), 1237.
 [20] F. Sebille et al., *Nucl. Phys.*, **A501**(1989), 137.
 [21] B. Ter Haar et al., *Phys. Rev.*, **C36**(1987), 1611.
 [22] C. Gale et al., *Phys. Rev.*, **C35**(1987), 2107.
 [23] G. F. Bertsch et al., *Phys. Repts.*, **160**(1988), 139.
 [24] G. F. Bertsch et al., *Nucl. Phys.*, **A490**(1988), 145.
 [25] 张建明, 葛凌霄, 卓益忠, 张丰收, 高能物理与核物理, **15**(1991), 844.
 [26] H. H. Gutbrod et al., GSI Scientific Report, 1989.

The Properties of Nuclear Collective Flow in the Intermediate and High Energy Heavy-ion Collisions

GE LINGXIAO ZHANG JIANMING ZHANG FENGSHOU

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

ZHUO YIZHONG

(Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

ABSTRACT

In this paper the static characteristic of the nuclear matter characterized by the interior pressure and the binding energy as a function of density is studied with different interactions. By taking into account both the momentum dependence potential and the nuclear medium effect, the dependence of the nuclear collective flow on the impact parameters and the bombarding energies is investigated systematically with BUU dynamical calculations. The nuclear equation of state is better understood by comparing the calculation results with the experiments.