



动量相关势对直接流和椭圆流的影响

刘洋阳 王永佳 崔莹 李祝霞 陈永静 李庆峰 张英逊

The Influence of the Momentum Dependence Potential on the Directed Flow and Elliptic Flow

LIU Yangyang, WANG Yongjia, CUI Ying, LI Zhuxia, CHEN Yongjing, LI Qingfeng, ZHANG Yingxun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.39.2021071>

引用格式:

刘洋阳, 王永佳, 崔莹, 李祝霞, 陈永静, 李庆峰, 张英逊. 动量相关势对直接流和椭圆流的影响[J]. *原子核物理评论*, 2022, 39(1):16–22. doi: 10.11804/NuclPhysRev.39.2021071

LIU Yangyang, WANG Yongjia, CUI Ying, LI Zhuxia, CHEN Yongjing, LI Qingfeng, ZHANG Yingxun. The Influence of the Momentum Dependence Potential on the Directed Flow and Elliptic Flow[J]. *Nuclear Physics Review*, 2022, 39(1):16–22. doi: 10.11804/NuclPhysRev.39.2021071

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

GeV能区碰撞中正反质子椭圆流劈裂的研究

Investigation of the Splitting in Elliptic Flow Between Protons and Anti-protons in + Collisions at
原子核物理评论. 2020, 37(3): 660–667 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC04>

RHIC-STAR重离子碰撞实验中可鉴别粒子的集体流研究

Collective Flow of Identified Particles in Heavy Ion Collisions at RHIC-STAR
原子核物理评论. 2020, 37(3): 668–673 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC72>

中能重离子碰撞中横向流电荷依赖的形状以及实验条件对横向流的影响(英文)

Z-dependence Flow Pattern and Experimental Filter Effect on Transverse Flow Extraction in Intermediate-energy Heavy Ion Collisions
原子核物理评论. 2018, 35(1): 18–22 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.35.01.018>

相对论重离子对撞机上重味衰变电子的测量数据中粲和底成分的分

Charm and Beauty Separation from Heavy Flavor Electron Measurements at RHIC
原子核物理评论. 2020, 37(3): 684–689 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC13>

密集斜槽流颗粒靶的流动性

Flowability of Inclined Dense Granular-flow Target
原子核物理评论. 2020, 37(2): 240–248 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2020010>

无中微子双 β 衰变相关的中微子势(英文)

Neutrino Potential for Neutrinoless Double Beta Decay
原子核物理评论. 2017, 34(1): 82–86 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.01.082>

文章编号: 1007-4627(2022)01-0016-07

动量相关势对直接流和椭圆流的影响

刘洋阳¹, 王永佳², 崔莹³, 李祝霞³, 陈永静¹, 李庆峰^{2,4,†}, 张英逊^{3,5,†}

(1. 中国原子能科学研究院中国核数据中心, 北京 104203;

2. 湖州师范学院理学院, 浙江 湖州 313000;

3. 中国原子能科学研究院核物理研究所, 北京 104203;

4. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

5. 广西师范大学广西核物理与核技术重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 利用极端相对论量子分子动力学 (UrQMD) 模型, 研究了两种不同强度的动量相关势对 neutron、proton、hydrogen isotopes 和 charged particles 等四种粒子直接流和椭圆流的影响。计算结果表明, 在不可压缩系数 K_0 一定的情况下, 直接流几乎不敏感于动量相关势的变化, 而高动量粒子的椭圆流 v_2 则敏感于高动量处动量相关势强度的大小及其动量依赖。考虑高能区强度较强的 Hama 动量相关势后, 上述四种粒子椭圆流的幅度均会增强。与 ASY-EOS 实验室提供的 neutron 和 charged particles 椭圆流数据比较后发现, 较强动量相关势可以较好地再现实验数据。

关键词: 动量相关势; 直接流; 椭圆流

中图分类号: O571.53

文献标志码: A

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.39.2021071

1 引言

动量相关势来源于核子-核子相互作用的交换项, 其对于合理地描写重离子碰撞的集体流十分重要^[1-4]。目前, 重离子碰撞相关运输模型中常用的动量相关势可以分为三种形式^[5]。第一种是平方形式的动量相关势, 其来源于 Skyrme 相互作用, 能够用来研究 Skyrme 能量密度泛函与核子有效质量劈裂等问题, 该形式适用范围为 300 A MeV 以内的重离子碰撞^[6]。第二种是对数形式的唯象动量相关势, 这种动量相关势是通过符合 1983 年 Arnold 等^[7]给出的核子与核反应的光学势实验数据得到的。通过极端相对论量子分子动力学 (UrQMD) 模型分析和研究中子、质子和氢同位素集体流时采用了第二种形式的动量相关势^[8]。第三种是 Lorentz 形式的动量相关势。此形式的动量相关势是根据 1991 年 Hama 等^[9]的光学势实验数据计算得到的。由于 Hama 等提供的实验数据更为丰富, 能量范围更宽, 因此被很多模型采用, 如 Tübingen QMD 模型, IBUU 模型, χ BUU 模型等^[10-12]。需要注意的是在粒子动能大于 155 MeV 条件下第三种

形式的动量相关势对于动量的依赖比第二种形式的动量相关势要强。近年来基于第二种和第三种动量相关势, 也发展出相应的同位旋依赖的动量相关势^[13-17], 并研究了其对于对称能约束的影响。考虑到不同运输模型所采用的动量相关势存在差异, 理解这些差异对于重离子碰撞观测量的描写、状态方程的约束等的影响是非常重要的。

本文将在 UrQMD 模型的框架下, 研究两种动量相关势对于 0.4 A GeV Au+Au 碰撞中发射的中子、质子、氢同位素和带电粒子的直接流 v_1 和椭圆流 v_2 的影响。在研究中, 我们仔细分析碰撞参数的影响, 并采用与实验相同的中心度处理方式来计算集体流。全文安排如下: 第二节, 对 UrQMD 模型及两种不同强度的动量相关势进行介绍; 第三节, 分析集体流形成机制和动量相关势对集体流造成的影响; 最后一节是总结。

2 UrQMD 运输模型及动量相关势

在 UrQMD 模型框架下, 核子用具有一定宽度的高

收稿日期: 2021-10-06; 修改日期: 2021-11-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11875323, 11790325, 11875125, 11947410, 11705163, 11790320, 11790323, 11961141003); 国家重点研发计划项目 (2018 YFA0404404); 稳定基础研究项目 (WDJC-2019-13); 中国原子能科学研究院基金资助项目; 浙江省“万人计划”项目

作者简介: 刘洋阳 (1991-), 女, 辽宁阜新人, 助理研究员, 博士, 从事粒子物理与原子核物理研究; E-mail: liuyangyang@ciae.ac.cn

† 通信作者: 李庆峰, E-mail: liqf@zjhu.edu.cn; 张英逊, E-mail: zhyx@ciae.ac.cn.

斯波包来表示，其时间演化由平均场和碰撞项共同决定[2, 5]。

平均场作用下，粒子的波包中心坐标 r_i 及动量 p_i 的时间演化遵循哈密顿运动方程：

$$\dot{r}_i = \frac{\partial H}{\partial p_i}, \quad \dot{p}_i = -\frac{\partial H}{\partial r_i}, \quad (1)$$

其中： H 是体系哈密顿量，由动能 T 和有效相互作用势能 U 组成。其中，动能 $T = \sum_i(\sqrt{m_i^2 + p_i^2} - m_i)$ ， m_i 为粒子质量，势能 U 可根据能量密度泛函计算[18]。势能能量密度泛函可表示为如下形式：

$$u = \frac{\alpha \rho^2}{2\rho_0} + \frac{\beta}{\gamma+1} \frac{\rho^{\gamma+1}}{\rho_0^\gamma} + \frac{g_{\text{sur}}}{2\rho_0} (\nabla\rho)^2 + \frac{g_{\text{sur,iso}}}{\rho_0} [\nabla(\rho_n - \rho_p)]^2 + u_{\text{md}} + u_{\text{sym}}, \quad (2)$$

其中：第一项为两体项；第二项为三体项；第三和第四项分别为表面项和表面对称项。两体项和三体项相关参数 α ， β ， γ 由饱和点密度处核物质状态方程基本性质决定，具体数值见表1。表面项系数 $g_{\text{sur}} = 19.5 \text{ MeV} \cdot \text{fm}^{-2}$ ，表面项同位旋系数 $g_{\text{sur,iso}} = -11.3 \text{ MeV} \cdot \text{fm}^{-2}$ 。 ρ_0 为饱和密度， ρ 为核子密度， $\rho = \rho_n + \rho_p$ 。 u_{md} 为动量相关势能密度， u_{sym} 为对称势能密度。

表 1 UrQMD 模型中各参数、不可压缩系数 K_0 和有效质量 m^*/m 数值

V_{md}	α	β	γ	t_4	t_5	c	K_0	m^*/m
$V_{\text{md}}^{\text{Arnold}}$	-221	153	1.312	1.570	5×10^{-4}	-54	231	0.77
$V_{\text{md}}^{\text{Hama}}$	-335	253	1.16	3.058	5×10^{-4}	-86	231	0.64

α ， β ， t_4 和 c 单位为 MeV， t_5 单位为 MeV^{-2} ，不可压缩系数 K_0 单位为 MeV，其余无量纲。Au+Au 碰撞中高斯波包宽度为 1.44 fm，饱和点密度为 0.16 fm^{-3} 。

首先来看动量相关势能密度 u_{md} ，其可由动量相关相互作用 v_{md} 根据如下积分给出[19]：

$$u_{\text{md}} = \int v_{\text{md}}(|p-p'|) f_1(r, p) f_2(r, p') dp dp'. \quad (3)$$

其中 $f_1(r, p)$ 和 $f_2(r, p')$ 分别指代 1 粒子和 2 粒子的相空间分布函数。假设动量相关相互作用 v_{md} 表示为 $v_{\text{md}}(|\Delta p|) = t_4 \ln^2(1 + t_5(|p-p'|)^2) + c$ 。根据下式

$$V_{\text{md}}(p) = \int_{p' < p_F} v_{\text{md}}(|p-p'|) d^3 p' / \int_{p' < p_F} d^3 p' \quad (4)$$

可以计算光学势 $V_{\text{md}}(p)$ ，式中分母归一化因子代表粒子数，其物理来源为单粒子势的计算方法。 p_F 为费米动量，可表示为 $p_F = \hbar(3\pi^2\rho)$ 。通过(4)式拟合 Arnold 或 Hama 的光学势实验数据[20]，可以给出参数 t_4 ， t_5 和 c

的数值，具体数值见表1。

在图1中我们展示了动量相关相互作用及光学势实验数据。绿色方块表示 Arnold 的光学势实验数据 $V_{\text{md}}^{\text{Arnold}}$ ，绿色虚线表示动量相关相互作用 $v_{\text{md}}^{\text{Arnold}}$ 随动能的变化情况[7]。红色圆形表示 Hama 光学势实验数据 $V_{\text{md}}^{\text{Hama}}$ ，红色实线为动量相关相互作用 $v_{\text{md}}^{\text{Hama}}$ 的变化情况[9]。计算结果显示动量相关相互作用的数值与动量相关势的数值十分接近，这与文献[20]的结论一致。在动能 E_{kin} 大于 155 MeV 情况下， $V_{\text{md}}^{\text{Hama}}$ 高于 $V_{\text{md}}^{\text{Arnold}}$ ，这意味着 $V_{\text{md}}^{\text{Hama}}$ 可以提供更强的排斥作用。

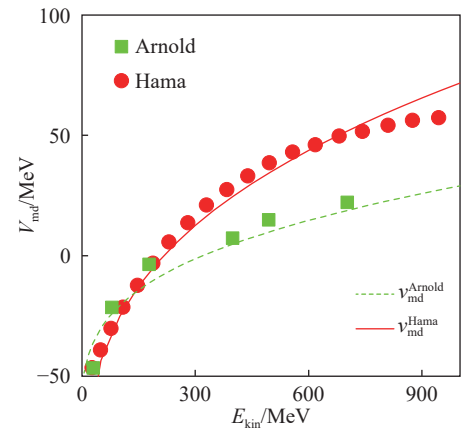


图 1 (在线彩图) 不同强度的动量相关势及动量相关相互作用

绿色虚线表示动量相关相互作用 $v_{\text{md}}^{\text{Arnold}}$ ，红色实线表示动量相关相互作用 $v_{\text{md}}^{\text{Hama}}$ 。绿色方块和红色圆形分别表示 Arnold 和 Hama 动量相关势实验数据[7, 9]。

对于核物质而言，动量相关势能能对每核子能量的贡献可以表示为[20]

$$\frac{E_{\text{md}}}{A} \left(\frac{\rho}{\rho_0}, T=0 \right) = \frac{1}{2} \frac{\int_{p' < p_F} d^3 p' \int_{p < p_F} d^3 p v_{\text{md}}(|p-p'|) \rho}{\int_{p' < p_F} d^3 p' \int_{p < p_F} d^3 p} \frac{\rho}{\rho_0}. \quad (5)$$

零温时对称核物质每核子能量可表示为

$$\frac{E}{A} \left(\frac{\rho}{\rho_0}, T=0 \right) = \frac{3}{5} \frac{p_F^2(\rho)}{2m} + \frac{\alpha}{2} \frac{\rho}{\rho_0} + \frac{\beta}{\gamma+1} \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma + \frac{E_{\text{md}}}{A}. \quad (6)$$

在本文的计算中，不可压缩系数 K_0 调整为 231 MeV，此值在巨共振与椭圆流等观测量约束出的不可压缩系数合理范围内[5, 21-22]。式中相关参数数值见表1。

其次是对称势能密度部分，其可表示为 $u_{\text{sym}} = S_{\text{sym}}^{\text{pot}}(\rho) \rho \delta^2$ 。式中 $S_{\text{sym}}^{\text{pot}}(\rho)$ 为对称能的密度依赖形式，可表示为 $S_{\text{sym}}^{\text{pot}}(\rho) = \frac{C_{\text{sym}}}{2} \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{\gamma_{\text{sym}}}$ ，其中 $C_{\text{sym}} = 40 \text{ MeV}$ ， $\gamma_{\text{sym}} = 0.5$ 。该形式下饱和点密度处对称能大小为 32.5 MeV，

对称能斜率为 54 MeV。

在 QMD 类模型中，两粒子动量相关势能则要根据粒子的相空间分布函数来计算，比如：

$$\begin{aligned} U_{ij}^{\text{md}} &= \iiint v_{\text{md}}(|\mathbf{p}-\mathbf{p}'|)\delta(\mathbf{r}-\mathbf{r}')f_i(\mathbf{r},\mathbf{p})f_j(\mathbf{r}',\mathbf{p}')d\mathbf{r}d\mathbf{p}d\mathbf{r}'d\mathbf{p}' \\ &= \iiint v_{\text{md}}(|\mathbf{p}-\mathbf{p}'|)f_i(\mathbf{r},\mathbf{p})f_j(\mathbf{r},\mathbf{p}')d\mathbf{r}d\mathbf{p}d\mathbf{p}' \\ &= \iint v_{\text{md}}(|\mathbf{p}-\mathbf{p}'|)g_i(\mathbf{p})g_j(\mathbf{p}')d\mathbf{p}d\mathbf{p}'\rho_{ij}, \end{aligned} \quad (7)$$

其中： $g_i(\mathbf{p})$ 为第 i 个粒子的动量分布，可表示为 $g_i(\mathbf{p}) = \frac{1}{(2\pi\sigma_p^2)^{3/2}} e^{-\frac{(\mathbf{p}-\mathbf{p}_i)^2}{2\sigma_p^2}}$ ； ρ_{ij} 为 i, j 两粒子的相互作用密度分布，可表示为 $\rho_{ij} = \frac{1}{(2\pi\sigma_r^2)^{3/2}} e^{-\frac{(\mathbf{r}-\mathbf{r}_{ij})^2}{2\sigma_r^2}}$ ； σ_r 和 σ_p 分别为粒子在坐标空间和动量空间的波包宽度，二者满足最小测不准关系 $\sigma_r\sigma_p = \frac{\hbar}{2}$ 。积分后两粒子动量相关势能无法得到解析式，只能通过数值求解来实现。

3 结果与讨论

集体流是指中高能重离子碰撞过程中出射粒子的集体运动，这种集体运动表现为出射粒子各个发射方向分布的各向异性。实验中通常利用出射粒子方位角分布的傅里叶展开系数来描述各种集体流的强度 [23–25]

$$\frac{dN}{d\phi} = \frac{N_0}{2\pi} [1 + 2v_1 \cos(\phi) + 2v_2 \cos(2\phi) + \dots]. \quad (8)$$

式中 N_0 为发射粒子数； ϕ 表示发射粒子方位角； v_1 和 v_2 分别为直接流参数和椭圆流参数，二者可分别表示为如下形式：

$$v_1 \equiv \langle \cos \phi \rangle = \left\langle \frac{p_x}{p_t} \right\rangle, \quad (9)$$

$$v_2 \equiv \langle \cos 2\phi \rangle = \left\langle \frac{p_x^2 - p_y^2}{p_t^2} \right\rangle, \quad (10)$$

其中， $p_t = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$ 为粒子横向动量。可以看出，同样 p_t 条件下，直接流 v_1 可以反映粒子横动量转移的大小。椭圆流 v_2 更多地体现粒子出射方向各向异性。

为了更直观地理解集体流的形成过程，图 2 给出了入射能量为 0.4 AGeV 的 $^{197}\text{Au} + ^{197}\text{Au}$ 半擦边碰撞 ($b = 8 \text{ fm}$) 中不同时刻粒子坐标和动量的变化情况 (两核质心系)。以碰撞参数所在方向为 x 轴，束流方向为 z 轴，构建的 xz 平面为反应平面， xy 平面垂直于反应平面并被称为出平面。如图 2 (a1) 和 (b1) 所示，在初始阶段弹核及靶核内粒子的动量主要沿束流 z 方向。初始时刻每个粒子的动量方向和 z 轴并不完全平行，这是由核子的费米动量造成的。随着时间演化，两原子核发生碰撞，重叠区域内核物质被压缩，密度快速增大并形成高温高密核物质。压缩区域的核物质和旁观者区域 (未参与碰撞粒子所在区域) 的核物质存在密度差，因此会产生一个从高密到低密的力，使得粒子的动量方向发生改变。另外，原子核碰撞过程中核子-核子之间发生碰撞，同样也使得粒子动量方向快速变化。在上述机制下，反应体系逐渐膨胀，粒子向外非均匀发射，动力学末态结果如图 2(a5) 和 (b5) 所示。

从集体流形成机制可以看出，集体流计算结果与参与者的尺寸形状有关，这意味碰撞参数的大小会影响集

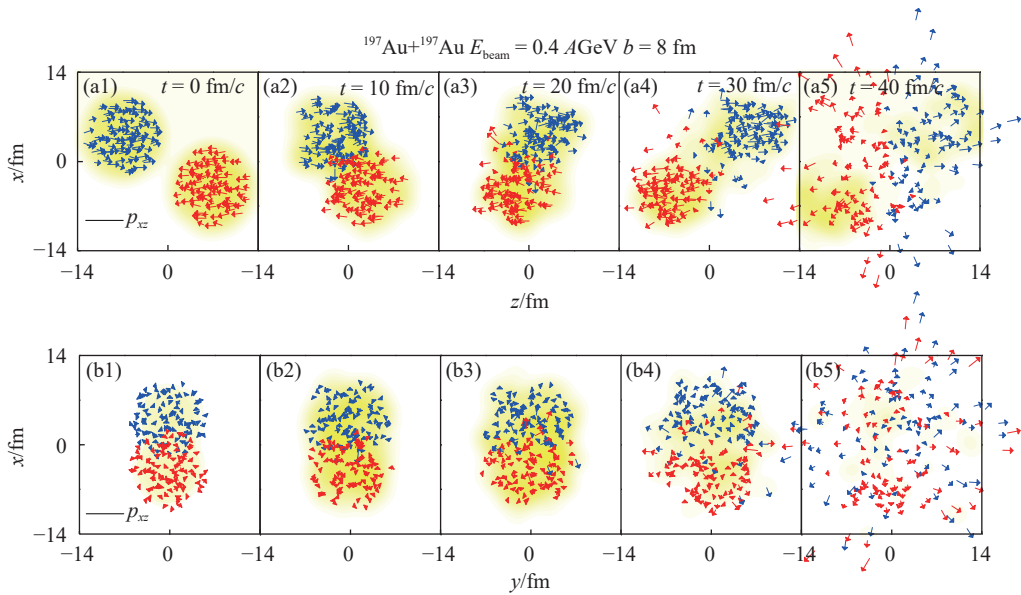


图 2 (在线彩图) Au+Au 擦边碰撞体系中集体流形成过程示意图

入射能量为 0.4 AGeV，碰撞参数为 8 fm。

体流计算结果^[26]。然而，实验上所选取的中心度对应的事件，其相应的碰撞参数存在一定的分布(碰撞参数的弥散效应)^[27-28]。处理好碰撞参数的弥散效应有利于更可靠地分析动量相关势的变化带来的对集体流的影响。图 3 给出了碰撞参数分别为 2, 4, 6, 8 和 10 fm 的 $^{197}\text{Au}+^{197}\text{Au}$ 碰撞中发射的中子和带电荷粒子直接流与椭圆流的横动量分布。快度范围为 $-0.5 < y_0 < 0.5$ ，极角范围为 $37^\circ < \theta < 53^\circ$ ，动量相关势形式为 $V_{\text{md}}^{\text{Hama}}$ 。

图 3(a) 和 (b) 展示了直接流 v_1 随 p_t/A 变化的曲线。图 3(a) 为中子的计算结果，图 3(b) 为带电荷粒子的计算结果，其中带电荷粒子由核子之间的距离和动量差值来判断。可以看到， v_1 随 p_t/A 增加而增加。当 $p_t/A < 0.48$ GeV/c 时， v_1 为负值；而 $p_t/A > 0.48$ GeV/c 时， v_1 增加为正值。这是因为小横动量的粒子主要受势场的吸引；而对于横动量足够高的粒子，来源主要是核子-核子剧烈碰撞所提供的排斥。这种变化规律，随着碰撞参数的

增加而变得更为明显，并在 $b = 10$ fm 附近时达到最大。如果碰撞参数继续增大，由于粒子碰撞的剧烈性会减小，导致直接流 v_1 数值变小。根据图 3(a) 和 (b) 可以看出，中子和带电荷粒子直接流表现出同样的碰撞参数依赖行为。对于带电荷粒子而言，由于包括了轻粒子的贡献，其直接流 v_1^{ch} 在低横动量区有一个小幅度的下降。

图 3(c) 和 (d) 中展示了不同碰撞参数对应的椭圆流计算结果。椭圆流 v_2 的大小反映了初始坐标空间各向异性向动量空间各向异性转化的能力^[29]。对于擦边碰撞而言，弹核与靶核重叠区域在空间上呈现一种杏仁型，随着时间演化，这种坐标空间分布上的不均匀转化成为动量空间的不均匀。然而在我们所研究的能区，旁观者的遮挡效应依然存在，使得在平面方向发射的粒子数目变少，从而导致在整个横动量区间内 v_2 都小于 0。当碰撞参数小于 10 fm 时，碰撞参数越大，重叠区域的空间分布各向异性越高，导致 v_2 减小(绝对值增大)。

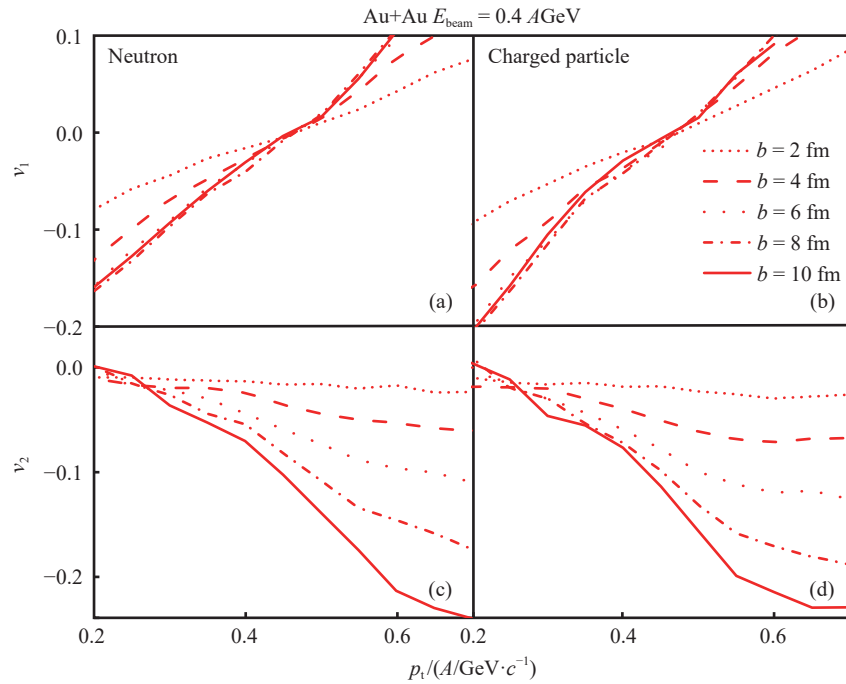


图 3 (在线彩图) 入射能量为 0.4 AGeV 的 $^{197}\text{Au}+^{197}\text{Au}$ 碰撞中发射的中子和带电荷粒子直接流 [(a) 和 (b)] 与椭圆流 [(c) 和 (d)] 的横动量分布

上述计算结果表明考虑碰撞参数的弥散效应对于可靠计算粒子集体流来说非常重要。ASY-EOS 实验采用了初始旁观者体系电荷数 (Z_{bound}) 和横向与纵向电荷比值 (ZRAT) 的方法来划分碰撞事件的中心度^[30]。基于 Z_{bound} 对中心度的区分，文献^[30] 给出了通过 UrQMD 模型计算集体流时所需的碰撞参数分布范围 ($b = 2 \sim 10$ fm) 以及相应的权重，其具体数值如表 2 所列。为与实验条件一致，本文基于文献^[30] 中给出的碰撞参数分布

情况及其相应的碰撞参数的权重，计算了各粒子 v_1 和 v_2 ，计算方式如下

$$\langle v_1 \rangle = \sum_{b=2 \text{ fm}}^{10 \text{ fm}} w_b \times v_{1,b}$$

$$\langle v_2 \rangle = \sum_{b=2 \text{ fm}}^{10 \text{ fm}} w_b \times v_{2,b}$$

其中： b 表示碰撞参数大小； w_b 是指碰撞参数为 b 时

表 2 碰撞参数权重因子

b/fm	2	3	4	5	6	7	8	9	10
w_b	0.021	0.059	0.111	0.170	0.199	0.201	0.139	0.074	0.025

应的权重因子, 由碰撞参数分布决定。在此基础上, 我们分析了动量相关势对 neutron、质子、氢同位素和带电荷粒子等四种粒子直接流与椭圆流的影响。

图 4(a~d) 分别给出了两种不同强度动量相关势条件下 neutron、质子、氢同位素和带电荷粒子等四种粒子直接

流 v_1 的横动量分布情况。绿色虚线和红色实线分别对应 $V_{\text{md}}^{\text{Arnold}}$ 和 $V_{\text{md}}^{\text{Hama}}$ 理论计算结果, 黑色圆点和三角形为 ASY-EOS 实验数据 [30]。可以看出, 动量相关势的变化并未明显改变粒子直接流 v_1 的计算结果。原因是在同样的 p_t 条件下, p_x 反映了粒子在平面方向的动量转移程度。但是由于旁观者遮挡效应的存在, 不同动量相关势导致的在平面动量转移差异被抹平。总的来看, 两种动量相关势给出的理论计算结果都比较接近实验数据。

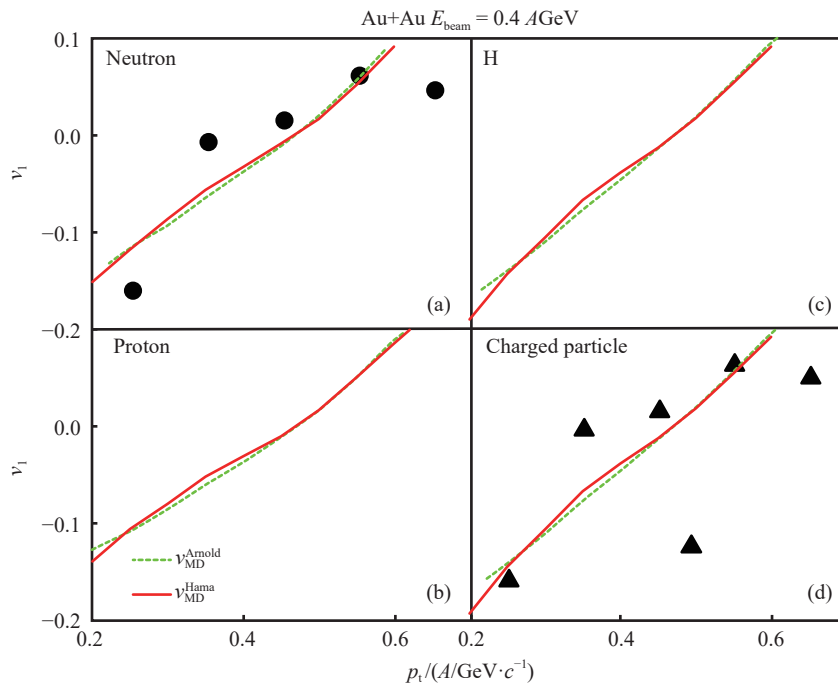


图 4 (在线彩图) 入射能量为 0.4 AGeV 的 $^{197}\text{Au}+^{197}\text{Au}$ 碰撞中发射的 neutron (a)、质子 (b)、氢同位素 (c) 和带电荷粒子 (d) 等四种粒子直接流的横动量分布

快度范围为 $-0.5 < y_0 < 0.5$, 极角范围为 $37^\circ < \theta < 53^\circ$, 绿色虚线和红色实线分别对应 $V_{\text{md}}^{\text{Arnold}}$ 和 $V_{\text{md}}^{\text{Hama}}$ 理论计算结果, 黑色圆点和三角形为实验数据, 取自文献 [30]。

图 5(a~d) 分别展示了 neutron、质子、氢同位素和带电荷粒子的椭圆流 v_2 随出射粒子横动量的变化曲线。绿色虚线代表 $V_{\text{md}}^{\text{Arnold}}$ 计算结果, 红色实线代表 $V_{\text{md}}^{\text{Hama}}$ 计算结果, 黑色圆形和三角形代表实验数据。可以看到, 椭圆流 $v_2 < 0$, 且其绝对值随 p_t 增大而增大。 v_2 小于零的原因主要是由于旁观者的遮挡, 势场和核子-核子碰撞导致出射粒子的在平面动量小于出平面的动量。另外, 高 p_t 的核子更易受碰撞早期核子-核子的剧烈碰撞以及高密势场提供的强排斥影响, 导致 v_2 随 p_t 增加而减小。由于出平面出射粒子不受遮挡, 所以出射粒子的出平面动量对于势场的敏感度得以保留, 也使得椭圆流敏感于动量相关势的动量依赖及其强度。在高横动量区域, 动量相关势 $V_{\text{md}}^{\text{Arnold}}$ 和 $V_{\text{md}}^{\text{Hama}}$ 所导致的 v_2 之间差异增大。通

过与实验数据的比较可以看出, $V_{\text{md}}^{\text{Hama}}$ 对应的椭圆流理论计算结果更加接近实验数据, 如图 5(a) 和 (d) 所示。

4 总结

基于极端相对论量子分子动力学 (UrQMD) 模型, 本文分析了不同强度的动量相关势对 neutron、质子、氢同位素和带电荷粒子等四种粒子直接流 v_1 和椭圆流 v_2 的影响, 旨在厘清动量相关势的差异所引起的理论模型的不确定性。考虑到实验所用到的中心度由多重数确定, 其对应的碰撞参数有一定的分布, 因此在与实验数据进行可靠的比较时不能简单地用一个碰撞参数来代替。因此, 我们在计算中详细分析了各个碰撞参数对于 v_1 和 v_2 的影响, 并在计算中详细地考虑了碰撞参数的弥散效应。进

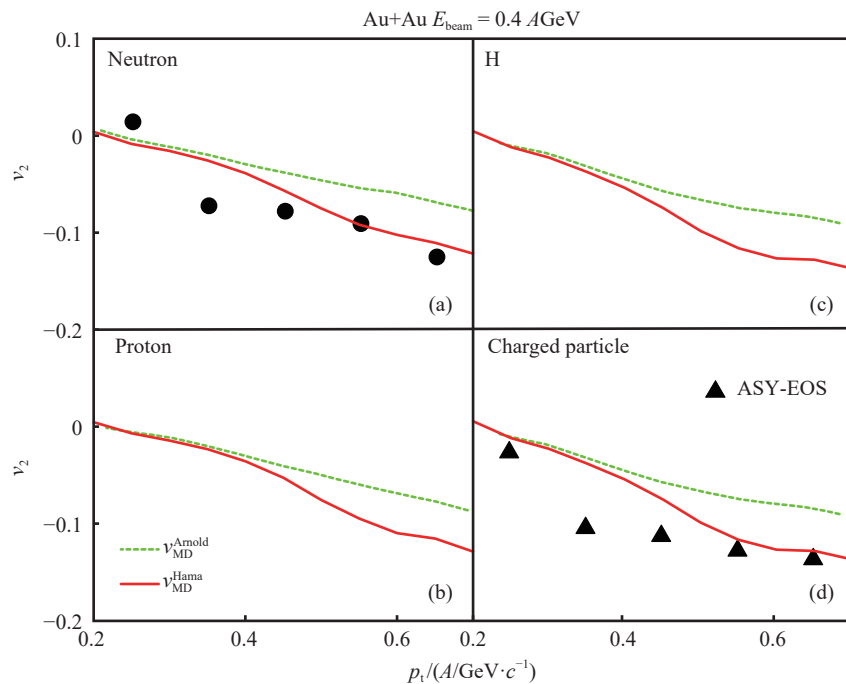


图 5 (在线彩图)入射能量为 $0.4 A\text{GeV}$ 的 $^{197}\text{Au} + ^{197}\text{Au}$ 碰撞中发射的中子 (a)、质子 (b)、氢同位素 (c) 和带电荷粒子 (d) 等四种粒子椭圆流的横动量分布 (条件与图 4 相同)

一步, 我们分析了两种不同的动量相关势对 v_1 和 v_2 的影响。结果显示在不可压缩系数一定的情况下, 直接流 v_1 几乎不敏感于动量相关势强度的变化。而椭圆流 v_2 则敏感于动量相关势的动量依赖及其强度, 在高动量区域尤为如此。考虑较硬动量相关势 $V_{\text{md}}^{\text{Hama}}$ 后, 椭圆流明显增强, 更加接近 ASY-EOS 实验数据。

致谢 本工作的计算部分是在湖州师范学院 C3S2 服务器上完成的, 感谢其大力支持。

参考文献:

- [1] AICHELIN J, ROSENHAUER A, PEILERT G, et al. *Phys Rev Lett*, 1987, 58: 1926.
- [2] AICHELIN J. *Phys Rept*, 1991, 202: 233.
- [3] DANIELEWICZ P, LACEY R, LYNCH W G. *Science*, 2002, 298: 1592.
- [4] CHEN L W, KO C M, LI B A, et al. *Eur Phys J A*, 2014, 50: 29.
- [5] ZHANG Y X, WANG N, LI Q F, et al. *Front Phys (Beijing)*, 2020, 15: 54301.
- [6] ZHANG Y X, TSANG M B, LI Z X. *Phys Lett B*, 2015, 749: 262.
- [7] ARNOLD L G, CLARK B C, COOPER E D, et al. *Phys Rev C*, 1982, 25: 936.
- [8] WANG Y J, GUO C C, LI Q F, et al. *Phys Rev C*, 2014, 89: 044603.
- [9] HAMA S, CLARK B C, COOPER E D, et al. *Phys Rev C*, 1990, 41: 2737.
- [10] COZMA M D. *Eur Phys J A*, 2018, 54: 40.
- [11] LI B A, CHEN L W, KO C M. *Phys Rept*, 2008, 464: 113.
- [12] ESTEE J, LYNCH W G, TSANG C Y, et al. *Phys Rev Lett*, 2021, 126: 162701.
- [13] GIORDANO V, COLONNA M, DI TORO M, et al. *Phys Rev C*, 2010, 81: 044611.
- [14] FENG Z Q. *Nucl Phys A*, 2012, 878: 3.
- [15] ZHANG L, GAO Y, DU Y, et al. *Eur Phys J A*, 2012, 48: 30.
- [16] XIE W J, ZHANG F S. *Chin Phys C*, 2018, 42: 104103.
- [17] TONG L Y, LI P C, LI F P, et al. *Chin Phys C*, 2020, 44: 074101.
- [18] DUTRA M, LOURENCO O, SÁ MARTINS J S, et al. *Phys Rev C*, 2012, 85: 035201.
- [19] ZHANG Y X, DANIELEWICZ P, LI Z X, et al. *Phys Rev C*, 2012, 85: 024602.
- [20] HARTNACK C, AICHELIN J. *Phys Rev C*, 1994, 49: 2801.
- [21] SHLOMO S, KOLOMIETZ V, GOLO G. *Eur Phys J A*, 2006, 30: 23.
- [22] WANG Y J, GUO C C, LI Q F, et al. *Phys Lett B*, 2018, 778: 207.
- [23] ANDRONIC A, LUKASIK J, REISDORF W, et al. *Eur Phys J A*, 2006, 30: 31.
- [24] ZHANG Y X, LI Z X. *Phys Rev C*, 2006, 74: 014602.
- [25] LI Q F, WANG Y J, GUO C C, et al. *Nucl Phys Rev*, 2014, 31: 291.
- [26] GOYAL S. *Eur Phys J A*, 2013, 49: 153.
- [27] LI L, ZHANG Y X, LI Z X, et al. *Phys Rev C*, 2018, 97: 044606.
- [28] LI L, YING-XUN Z, YING C, et al. *Nucl Phys Rev*, 2019, 36: 400.
- [29] ZHANG Y, LU X, ZHAO K, et al. *Nucl Phys Rev*, 2011: 3.
- [30] RUSSOTTO P, GANNON S, KUPNY S, et al. *Phys Rev C*, 2016, 94: 034608.

The Influence of the Momentum Dependence Potential on the Directed Flow and Elliptic Flow

LIU Yangyang¹, WANG Yongjia², CUI Ying³, LI Zhuxia³, CHEN Yongjing¹, LI Qingfeng^{2,4,†}, ZHANG Yingxun^{3,5,†}

(1. China Nuclear Data Center, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;

2. School of Science, Huzhou University, Huzhou 313000, Zhejiang, China;

3. Department of Nuclear Physics, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;

4. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

5. Guangxi Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Guangxi Normal University, Guilin 541004, Guangxi, China)

Abstract: The effect of the two forms of momentum-dependence potential on the directed flow and elliptic flow of neutron, proton, hydrogen isotopes, and charged particles are explored with the ultrarelativistic quantum molecular dynamics(UrQMD) model. The results show that the directed flow is almost insensitive to the momentum-dependence potential for the given incompressibility K_0 . But the elliptic flow of the above four particle species are sensitive to the strength and momentum dependence of the momentum-dependence potential, especially at high transverse momentum. The stronger momentum-dependence potential leads to a stronger elliptic flow. By comparing with the ASY-EOS experimental data, the calculation with a stronger momentum-dependence potential is favored.

Key words: momentum-dependence potential; directed flow; elliptic flow

Received date: 06 Oct. 2021; **Revised date:** 30 Nov. 2021

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11875323, 11790325, 11875125, 11947410, 11705163, 11790320, 11790323, 11961141003); National Key R&D Program of China(2018 YFA0404404); Continuous Basic Scientific Research Project (WDJC-2019-13); Funding of China Institute of Atomic Energy; “Ten-Thousand Talent Program” of Zhejiang Province

† **Corresponding author:** LI Qingfeng, E-mail: liqf@zjhu.edu.cn; ZHANG Yingxun, E-mail: zhyx@ciae.ac.cn.