



论文

KN 势对重离子碰撞中 K 介子产生的影响

李淼^{1,2}, 郭琛琛³, 邹丽艳^{1,2}, 王永佳^{2*}, 李庆峰^{2,4}, 刘玲^{1*}

1. 沈阳师范大学物理科学与技术学院, 沈阳 110034;

2. 湖州师范学院理学院, 湖州 313000;

3. 中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800;

4. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000

* 联系人, 王永佳, E-mail: wangyongjia@zjhu.edu.cn; 刘玲, E-mail: liuling@synu.edu.cn

收稿日期: 2016-10-16; 接受日期: 2016-11-09; 网络出版日期: 2017-03-10

国家自然科学基金(编号: 11375062, 11505057, 11647306, 11547312, 11605270)、浙江省教育厅一般科研项目(编号: Y201533176)和中国博士后科学基金(编号: 2016M591730)资助

摘要 重离子碰撞中产生的 K 介子是核反应中形成的高密核物质的一个有效探针, 结合输运模型模拟可以提取出高密核物质状态方程的信息. 在最近更新的极端相对论量子分子动力学 (UrQMD) 模型基础上, 引入了 K 介子与核子相互作用势 (KN 势), 以中能区 (入射能量为 0.6–2.0 GeV/nucleon) Au+Au 碰撞为例, 研究了 KN 势对 K 介子产额和直接流、椭圆流的影响. 当考虑 KN 势后, 能够更好地再现 K 介子集体流的实验数据. 还发现 K^0/K^+ 产额比依赖于对称能的“软硬”. 发现“软”的对称能给出的 K^0/K^+ 产额比高于“硬”的对称能给出的结果; 入射能量越低, K^0/K^+ 产额比对对称能的敏感性就越强. 入射能量为 0.8 GeV/nucleon 时 K^0/K^+ 产额比对对称能的敏感性要高于 π^-/π^+ 产额比.

关键词 重离子碰撞, 对称能, 集体流, KN 势**PACS:** 24.10.-i, 21.65.Ef, 25.75.Ld

1 引言

一直以来, 核物质状态方程 (EOS) 都是核物理领域一个十分重要的课题. 目前人们对同位旋对称 (中子、质子数目相同) 核物质的状态方程已经有一定的了解, 它具有“软”的性质 (不可压缩系数 K_∞ 在 (230 ± 30) MeV 左右)^[1–3]. 近年来随着研究的不断深入, 同位旋非对称核物质的 EOS 受到广泛关注, 其

中最大的不确定部分来自密度依赖的对称能 $E_{\text{sym}}(\rho)$ 部分. $E_{\text{sym}}(\rho)$ 的信息对我们研究滴线附近原子核的结构性质、宇宙中中子星的质量与大小关系等都十分重要^[4–7]. 目前人们借助于地球上实验获取的核结构性质、核反应过程, 及宇宙观测中的中子星等开展了许多对称能随密度变化情况的探究, 但仍然没有完整的掌握 $E_{\text{sym}}(\rho)$ 的信息, 尤其是在高密度 (大于饱和密度) 区, 不同研究方法给出的结果有很大差

引用格式: 李淼, 郭琛琛, 邹丽艳, 等. KN 势对重离子碰撞中 K 介子产生的影响. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47: 062002

Li M, Guo C C, Zou L Y, et al. The influence of KN potential on the production of kaon mesons in heavy-ion collisions at intermediate energies (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2017, 47: 062002, doi: 10.1360/SSPMA2016-00433

异^[8-14]. 重离子碰撞是在地球上形成高密核物质唯一的途径, 但碰撞过程中产生的高密核物质存在的时间非常短 (仅有几个到十几个 fm/c), 实验上还无法对其特性进行直接测量. 要想探究它的性质必须结合实验测量与输运模型模拟. 基于合理适当的输运理论, 输运模型可以模拟重离子碰撞的整个过程, 结合实验测量的数据及模型模拟的结果, 来反推提取高密核物质的信息. 例如: 同位旋对称核物质不可压缩系数 K_∞ 的确定就曾经是利用重离子碰撞中产生的 K 介子结合输运模型模拟而获取的^[1,2]. 可见, 输运模型的准确程度直接关系着提取的对称能信息的可靠性. 目前被广泛应用于描述重离子碰撞过程的输运模型分为两大类, 一类是以 Boltzmann-Uehling-Uehlenbeck (BUU) 模型为代表的单体输运模型 (基于玻尔兹曼方程)^[15], 另一类是以量子分子动力学 (QMD) 模型为代表的多体输运模型 (由分子动力学模型发展而来)^[16]. 这两类模型都起源于 20 世纪 80 年代, 经过多年的发展, 目前在这两个模型基础上发展而来的输运模型有 20 余个. 但是, 最近一次模型比较的研究显示, 即便考虑相同的模型输入量 (平均场势参数和两体碰撞截面), 这 20 多个模型给出的结果仍然有较大差异^[17].

从 20 世纪 90 年代开始, 人们发现在阈值附近的重离子碰撞产生的 K 介子可以作为高密核物质性质的探针. K 介子主要产生于碰撞的早期 (压缩阶段), 此时的核物质处于一种高温高密的状态, 由于 K 介子具有奇异守恒性质, 它不会在随后的反应过程中被周围的核物质吸收掉, 因此 K 介子带有丰富的高温高密核物质的信息. 在文献 [18] 中, 利用自洽的相对论 BUU 模型, 通过 K 介子的集体流给出核物质不可压缩系数 K_∞ 在 200–300 MeV 之间. 此外, 人们还利用重离子碰撞中核子的集体流排除了状态方程为很“软”或很“硬”的情况^[19]. 近十年来, 人们通过结合实验上测量的 C+C, Au+Au 碰撞中产生的 K^+ 介子数目和输运模型模拟的结果, 提出对称核物质状态方程具有“软”的性质^[1-3,20]. 随着高密区的对称能成为热点话题, 自然想到利用 K^0 和 K^+ 介子来探究同位旋效应. 文献 [21] 中利用极端相对论量子分子动力学 (UrQMD) 模型, 研究了 K^0/K^+ 产额比受对称能影响的情况, 发现利用“软”($E_{\text{sym}}(\rho)$ 随密度的增

大而缓慢增加或者减小) 的对称能给出 K^0/K^+ 产额比高于“硬”($E_{\text{sym}}(\rho)$ 随密度的增大而快速增加) 的对称能给出的结果. 当时的研究中还没有考虑 K 介子与核子间的相互作用势 (KN 势). 最近, 在兰州量子分子动力学 (LQMD) 模型中, 考虑 KN 势后, 发现“硬”的对称能给出的 K^0/K^+ 产额比更高^[22]. 近年来, 随着实验测量方法的不断改进, 越来越多的阈值附近的 K 介子的数据被测量到, K 介子与核子间的相互作用势的研究也有一定的进展^[23]. 因此, 有必要在输运模型中考虑 KN 势, 进一步研究 K^0/K^+ 产额比是否可以用来探究高密对称能.

最近, 我们在 UrQMD 模型中引入 Skyrme 能量密度泛函, 由它给出模型中的平均场势参数, 这样可以涵盖对称能更大的不确定范围. 此外还改进了模型的两体碰撞部分及末态碎片处理部分, 改进后的模型可以很好地解释 FOPI 合作组发布的 SIS 能区 (0.09–1.5 GeV/nucleon) 重离子碰撞的实验数据^[24,25]. 在改进的 UrQMD 模型的基础上, 考虑 K 介子与核子间相互作用势, 探究 K^0/K^+ 产额比对对称能的敏感性就十分必要. 而且, 我国将在广东惠州建造强流重离子加速器装置 (HIAF), 该项目是我国十二五国家重大科技基础设施建设项目之一^[26]. HIAF 装置可以把重离子加速到 1–2 GeV/nucleon, 正是 K 介子近阈产生的能量, 因此研究这一能区 K 介子相关的物理现象也能为将来在 HIAF 开展实验提供最新理论依据.

本论文将分为如下几个部分: 所使用的 UrQMD 模型及 KN 势将在第 2 部分中作介绍; 第 3 部分是相关的计算结果与讨论, 包括引入 KN 势后对 K 介子产额和集体流的影响, K^0/K^+ 产额比受对称能的影响情况等; 最后是总结与展望.

2 极端相对论量子分子动力学模型

近年来, 我们对 UrQMD 模型的初始化、平均场、碰撞项、末态碎片处理等部分进行了细致优化, 使其能够较好描述最新的实验数据, 适用于研究中能区的重离子碰撞, 相关内容见文献 [24]. 在现有的版本中, 模型的平均场势能部分由 Skyrme 能量密度函数

积分给出:

$$U = \int \left[\frac{\alpha \rho^2}{2 \rho_0} + \frac{\beta}{\eta+1} \frac{\rho^{\eta+1}}{\rho_0^\eta} + \frac{g_{\text{sur}}}{2\rho_0} (\nabla\rho)^2 + \frac{g_{\text{sur,iso}}}{2\rho_0} [\nabla(\rho_n - \rho_p)]^2 + g_{\rho\tau} \frac{\rho^{8/3}}{\rho_0^{5/3}} (A_{\text{sym}}\rho^2 + B_{\text{sym}}\rho^{\eta+1} + C_{\text{sym}}\rho^{8/3})\delta^2 \right] d\mathbf{r}, \quad (1)$$

其中 ρ_0 为核物质饱和点密度, $\alpha, \beta, \eta, g_{\text{sur}}, g_{\text{sur,iso}}, g_{\rho\tau}, A_{\text{sym}}, B_{\text{sym}}, C_{\text{sym}}$ 是模型参数, 可以由 Skyrme 的参数计算得到 [24]. $\delta = (\rho_n - \rho_p)/\rho$ 是同位旋不对称度. 在此次工作中, 为了探究 K^0/K^+ 产额比受不同密度依赖的对称能的影响情况, 考虑了 Skz4, SV-mas08, SV-sym34, SkI5 及 SkI1 这 5 组参数, 它们给出的同位旋对称核物质不可压缩系数 K_∞ 十分接近, 但对称能的斜率参数 L (表示对称能随密度变化情况, L 越大表示对称能越“硬”) 的差异很大, 从 5.8 MeV 变化到 161.1 MeV, 相关核物质饱和点的性质显示在表 1 中.

在核介质中 K 介子的哈密顿量有如下形式:

$$H_K = \sum_{i=1}^{N_K} [U_i^{\text{Coul}} + \omega(\mathbf{p}_i, \rho_i)]. \quad (2)$$

其中 U_i^{Coul} 为库仑相互作用, 在模型中这部分的计算与核子间的库仑势计算方法相同, 具体形式可参见文献 [16]. ω 为自能项, 基于手征拉氏量方法, 可以得到 [20]

$$\omega(\mathbf{p}, \rho) = [m_K^2 + \mathbf{p}^2 - a_K \rho_S + (b_K \rho)^2]^{1/2} + b_K \rho, \quad (3)$$

其中, $b_K = 3/(8f_\pi^2) \approx 0.32 \text{ GeV fm}^3$, a_K 的值为 $0.18 \text{ GeV}^2 \text{ fm}^3$. 式中的标量密度 ρ_S (Scalar Density) 可以通过如下公式:

$$\rho_S = \frac{2}{(2\pi)^3} \int_0^{k_F} \frac{m^* dk}{\sqrt{k^2 + (m^*)^2}} \quad (4)$$

计算得到 [27]. 其中 k_F 是费米动量, m^* 是核子有效质量. 在本次研究中主要考虑的 K 介子的两个同位旋态为 K^0 和 K^+ , 它们在模型中的 KN 势是相同的. 我们注意到最近在文献 [28] 中, 虽然考虑了 KN 势的同位旋效应 (区分 K^0 和 K^+ 介子), 但相比于标量部分是个小量, 因此在目前研究中我们暂不作考虑. 在核介质中 KN 势可以表示为

$$U_K(\mathbf{p}, \rho) = \omega(\mathbf{p}, \rho) - \sqrt{\mathbf{p}^2 + m_K^2}, \quad (5)$$

表 1 5 组 Skyrme 参数给出的核物质饱和点的性质

Table 1 Saturation properties of the five selected Skyrme forces used in this work

Skyrme	ρ_0 (fm $^{-3}$)	E_0 (MeV)	K_∞ (MeV)	L (MeV)
Skz4	0.160	-16.01	230	5.8
SV-mas08	0.160	-15.90	233	40.2
SV-sym34	0.159	-15.97	234	81.0
SkI5	0.156	-15.85	256	129.3
SkI1	0.160	-15.95	243	161.1

式中, ρ 为核介质密度, m_K 为 K 介子的质量. 利用上式就可以得到 K 介子在任意密度核介质中的自能 ω_K 和势 U_K . 如图 1 所示, 给出了不同动量下 KN 势随密度变化情况以及不同密度下 KN 势随动量变化情况. 从图 1 中可以看出, KN 势为正值, 说明 K 介子与核子之间存在排斥作用. KN 势的强度随着密度和动量的增大逐渐增大, 当动量为 0 GeV/c 时, KN 势随密度的变化情况与文献 [23] 中指出的 $30 \text{ MeV} \cdot \rho/\rho_0$ 结果十分相似. 当动量为 0 GeV/c, $\rho = \rho_0$ 时, KN 势的值为 25 MeV, 这与文献 [29] 中通过测量 K^+ 介子产额提取出的 $U_K(0, \rho_0) \approx 20 \text{ MeV}$ 也很接近.

K 介子的坐标和动量随时间的演化遵循如下关系:

$$\frac{d\mathbf{r}}{dt} = \frac{\partial \omega}{\partial \mathbf{p}} = \frac{\mathbf{p}}{\sqrt{m_K^2 + \mathbf{p}^2 - a_K \rho_S + (b_K \rho)^2}}, \quad (6)$$

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = -\frac{\partial \omega}{\partial \mathbf{r}} = -\frac{(-a_K \frac{\partial \rho_S}{\partial \mathbf{r}} + 2b_K^2 \rho \frac{\partial \rho}{\partial \mathbf{r}})}{2\sqrt{m_K^2 + \mathbf{p}^2 - a_K \rho_S + (b_K \rho)^2}} - b_K \frac{\partial \rho}{\partial \mathbf{r}}. \quad (7)$$

从手征拉氏量出发导出的 Klein-Gordon 方程中还应包括矢量场部分, 再基于准粒子近似, 可以得到描述 K 介子的运动方程中有 Lorentz 力 (核介质中 K 介子势还与周围核子的运动情况有关) [30]. 文献 [31, 32] 中指出若不考虑 Lorentz 修正给出的 K 介子的直接流为较强的负向, 当考虑这一修正后, 能更好地与实验数据符合. 为了与先前大量 K 介子相关研究 [18, 20, 22, 23] 进行比较, 公式 (7) 中暂时没有考虑 Lorentz 修正.

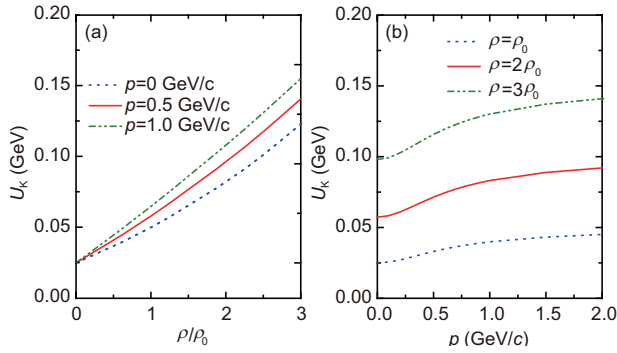


图1 (网络版彩图) 不同动量下 KN 势随密度变化情况 (a) 和不同密度下 KN 势随动量变化情况 (b)

Figure 1 (Color online) Density dependence of the KN potential at different momenta (a) and momentum dependence of the KN potential at different densities (b).

3 结果与讨论

本文将以 Au+Au 碰撞为例研究 KN 势对 K 介子的两个同位旋态 K^0 与 K^+ 产额和集体流的影响. 为了减小模型模拟计算的统计误差, 得到更清晰的图像, 对于入射能量高于 1.0 GeV/nucleon 时, 模拟了 100 万次事件, 低于 1.0 GeV/nucleon 时, 模拟了 200 万次事件.

图 2^[33] 中显示的是 Au+Au 中心碰撞 (约化碰撞参数 $b_0 < 0.15$) 时, K^+ 和 K^0 介子的产额随入射能量的变化情况, 相应的 KaoS 实验组给出的 K^+ 介子产额的数据也显示在图中. 约化碰撞参数的定义为: $b_0 = b/b_{\max}$, 其中 $b_{\max} = 1.15(A_p^{1/3} + A_T^{1/3})$. 可以看出, 我们计算的 K^+ 的产额能很好地再现实验数据. 此外还可以发现, 考虑与不考虑 KN 势对 K^+ 和 K^0 的产额基本没有影响, 这与文献 [22, 23] 利用其他模型计算的结果不同. 我们注意到文献 [22, 23] 中, 考虑 KN 势后, 根据 K 介子和超子的有效质量对其产生阈值进行修正, 因为 K^+ 和 K^0 介子有效质量大于静止质量, 所以 K 介子产额降低. 本次研究的目的是在平均场层面探究引入 KN 势后对观测量的影响, 没有像其他模型研究一样改变 K 介子的产生阈值, 因此 K 介子的产额没有大的变化. 我们认为, 如果考虑 K 介子产生阈值的介质效应, 其产生过程中参与粒子 (如 Δ 共振态以及超子等) 产生阈值的介质效应也应同时进行考虑, 相应的碰撞截面也要自洽地处理, 而目

前相关的理论研究仍然十分缺乏, 所以本次研究中暂不对 K 介子产生阈值进行修正.

在图 3 中显示了 K^+ 介子的直接流 v_1 和椭圆流 v_2 随约化快度 $y_0 = y_z/y_{\text{pro}}$ 的变化情况. 直接流 v_1 和椭圆流 v_2 表达式为^[34]

$$v_1 \equiv \langle \cos(\phi) \rangle = \left\langle \frac{p_x}{p_t} \right\rangle; v_2 \equiv \langle \cos(2\phi) \rangle = \left\langle \frac{p_x^2 - p_y^2}{p_t^2} \right\rangle. \quad (8)$$

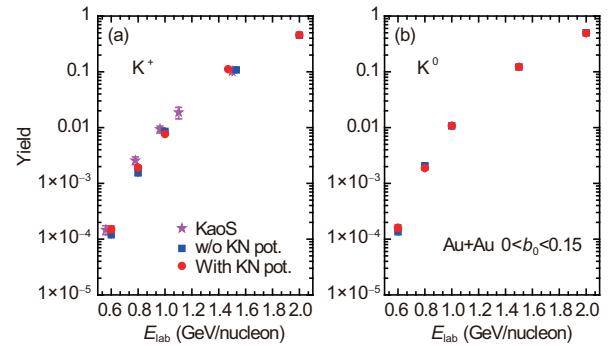


图2 (网络版彩图) Au+Au 系统中心碰撞 ($b_0 < 0.15$) 产生的 K^+ (a) 和 K^0 (b) 的产额随入射能量的变化. KaoS 实验合作组测量的数据^[33] 也显示在图中

Figure 2 (Color online) The yield of K^+ (a) and K^0 (b) from central ($b_0 < 0.15$) Au+Au collisions as a function of beam energy. The KaoS experimental data are taken from ref. [33].

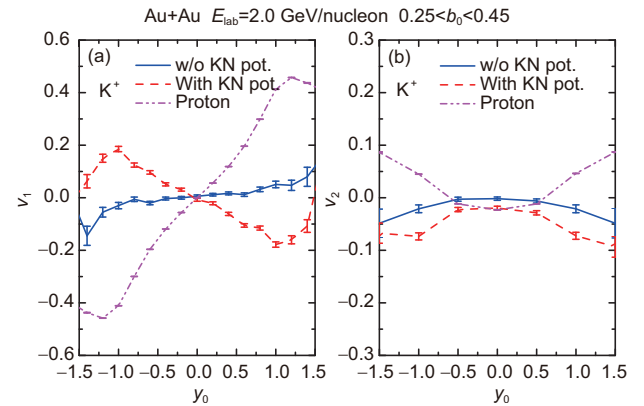


图3 (网络版彩图) Au+Au 系统在入射能量为 2.0 GeV/nucleon, 约化碰撞参数 b_0 为 0.25–0.45 时, K^+ 介子的直接流 v_1 (a) 和椭圆流 v_2 (b) 随约化快度 y_0 的变化, 相应的自由质子的 v_1 和 v_2 也显示在图中

Figure 3 (Color online) The rapidity distribution of the directed flow v_1 (a) and elliptic flow v_2 (b) of K^+ mesons produced from Au+Au collisions at 2.0 GeV/nucleon with centrality $0.25 < b_0 < 0.45$, the corresponding directed and elliptic flows of free protons are also shown.

其中 ϕ 为方位角, $p_t = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$ 为横向动量, 尖括号表示对所有事件中产生粒子的平均. 为了便于分析理解, 相同条件下自由质子的 v_1 和 v_2 也显示在相应的图中. 从图 3(a) 中可以看到, 在不考虑 KN 势时, K^+ 介子的直接流 v_1 呈现为正向 (v_1 随 y_0 的增加而增大); 而当考虑了 KN 势后, 直接流变为负向 (v_1 随 y_0 的增加而减小). 这是由于 K 介子与核子之间相互排斥作用导致 K 介子有与核子相反的运动趋势, 在此入射能量下核子有很强的正向直接流, 故 K 介子的直接流变为负向. 图 3(b) 中显示的 K 介子的椭圆流 v_2 也表现出与直接流 v_1 相似的规律, 即考虑排斥的 KN 势后, K 介子的挤出效应会变大, 椭圆流 v_2 就更负向 (更小于 0), 这与文献 [23, 31, 35] 中采用其他模型考虑 KN 势给出的规律相一致. 另外, 目前实验上给出的 Ni+Ni 系统中 K^+ 介子的 v_1 和 v_2 的实验数据也显示出, K^+ 介子的直接流和椭圆流均为负向 [36]. 此外, 我们还检查了 K^0 介子的直接流和椭圆流, 发现 KN 势对其的影响与 K^+ 介子十分类似, 这里就不再显示了.

为了检查 UrQMD 模型计算结果与实验数据的符合程度, 图 4 [37] 中显示了入射能量为 1.5 GeV/nucleon 时, Au+Au 碰撞产生的 K^+ 介子的椭圆

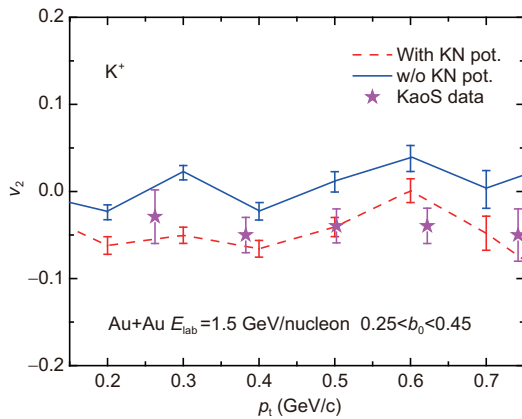


图 4 (网络版彩图) Au+Au 系统在入射能量为 1.5 GeV/nucleon 的半中心碰撞 ($0.25 < b_0 < 0.45$) 时 K^+ 介子的椭圆流 v_2 随横动量 p_t 的变化. 文献 [37] 中 KaoS 实验组给出的数据也显示在图中

Figure 4 (Color online) The transverse momentum distribution of the elliptic flow of K^+ meson produced from Au+Au collisions at 1.5 GeV/nucleon with centrality $0.25 < b_0 < 0.45$. The KaoS experimental data, taken from ref. [37], are shown by stars.

流 v_2 随横动量 p_t 的变化情况. 同样可以看到, 考虑 KN 势后, K^+ 介子的 v_2 降低, 挤出效应增强, 这与文献 [23] 中的结果相类似. 其次, 考虑 KN 势后, 计算的结果能与实验数据更好的符合, 某种程度上也体现了我们引入的 KN 势的合理性.

图 5 中显示了 Au+Au 中心碰撞产生的 K^0/K^+ 产额比随着入射能量的变化情况. 计算时采用的两组参数分别为 SV-mas08 和 SkI1, 它们给出的不可压缩系数 K_∞ 十分接近, 但给出的对称能斜率参数 L 却差异很大 (见表 1). 采用 SV-mas08 ($L=40$ MeV, “软”的对称能) 给出的 K^0/K^+ 产额比大于由 SkI1 ($L=161$ MeV, “硬”的对称能) 给出的结果, 这与对称能对 π^-/π^+ 产额比的影响情况一致 [21]. 在本文所研究的能区, K 介子主要产生于反应早期的高密区域, 其主要产生道为重子-重子 \rightarrow 重子-超子-K 介子和重子- π 介子 \rightarrow 超子-K 介子. 当选择“软”的对称能时, 由于在丰中子核环境下, 更多的中子聚集在高密区, 就会产生更多的 K^0 介子, 从而使 K^0/K^+ 的值变大. 这一规律与文献 [21] 中给出的结果一致, 而与文献 [22, 38] 给出的结论相反. 造成这一差异的原因可能是不同模型中考虑的 K 介子产生阈值和碰撞过程不同导致的. 另外, 可以看到, 随着入射能量的降低, K^0/K^+ 产额比对对称能的敏感性逐渐增强, 这与上述研究给

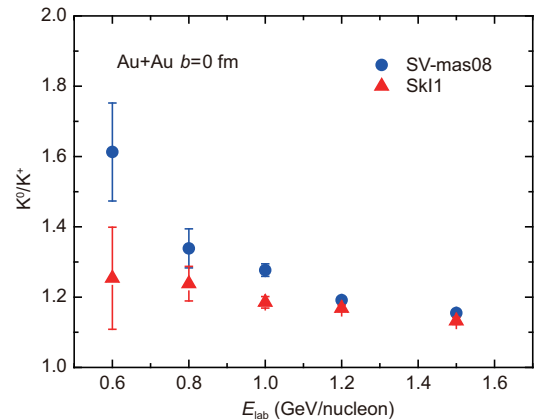


图 5 (网络版彩图) Au+Au 系统中心碰撞产生的 K^0 和 K^+ 产额比随入射能量的变化. 计算时使用了 SV-mas08 和 SkI1 两组 Skyrme 势参数

Figure 5 (Color online) The yield ratios of K^0 and K^+ from central Au+Au collisions as a function of the beam energy. Calculations with SV-mas08 and SkI1 are shown.

出的结论一致 [21, 22, 38].

图 6 中显示了 Au+Au 中心碰撞 ($b=0$ fm) 在入射能量为 0.8 GeV/nucleon 时产生的 π^-/π^+ 和 K^0/K^+ 产额比随着选取不同的 Skyrme 势所代表的对称能斜率参数 L 的变化情况. 计算中采用了 Skz4, SV-mas08, SV-sym34, SkI5 及 SkI1 这 5 组参数, 它们对应的性质可见表 1. 容易看出, L 越大给出的 π^-/π^+ 和 K^0/K^+ 产额比就越小. 其比值随斜率参数 L 近似成线性关系, 说明它们都依赖于对称能, 而与其他参数相关性较小. 当 L 值从 5.8 MeV 增大到 161.1 MeV, π^-/π^+ 产额比从 2.28 降低至 2.24 左右, 而 K^0/K^+ 产额比从 1.40 降低至 1.25 左右. 由 FOPI 实验组给出在此能

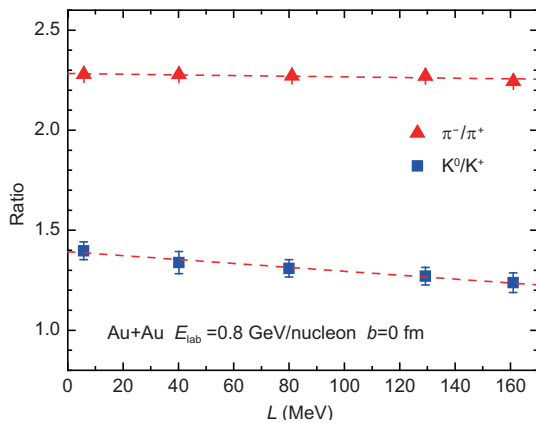


图 6 (网络版彩图) Au+Au 系统在中心碰撞, 入射能量为 0.8 GeV/nucleon 时产生的 π^-/π^+ 和 K^0/K^+ 产额比随着对称能斜率参数 L 的变化情况. 采用的五组 Skyrme 参数分别为 Skz4, SV-mas08, SV-sym34, SkI5 及 SkI1. 图中的虚线是通过直线拟合给出的

Figure 6 (Color online) The yield ratios of π^-/π^+ and K^0/K^+ produced from central Au+Au collisions at 0.8 GeV/nucleon are shown as a function of the slope parameter L . Full triangles and squares denote UrQMD calculations with Skz4, SV-mas08, SV-sym34, SkI5 and SkI1, while the lines represent linear fits to the calculations.

致谢 感谢湖州师范学院 C3S2 计算中心的大力支持.

参考文献

- 1 Sturm C, Böttcher I, Debowski M, et al. Evidence for a soft nuclear equation-of-state from kaon production in heavy-ion collisions. Phys Rev Lett, 2001, 86: 39–42
- 2 Fuchs C, Faessler A, Zabrodin E, et al. Probing the nuclear equation of state by K^+ production in heavy-ion collisions. Phys Rev Lett, 2001, 86: 1974

量下的 Au+Au 中心碰撞 (但是碰撞参数有差别, 实验采用的是 $b_0 < 0.15$) 的 π^-/π^+ 产额比的值为 1.93–2.15 [39], 我们的计算结果略高于这一实验结果. 一方面是选取的碰撞参数有差异造成的; 另一方面可能是目前研究中没有核子-核子非弹性碰撞道的介质修正所引起的 [40], 这一问题我们将在今后做更细致研究. 基于目前的计算可以看出, 在此能量下 K^0/K^+ 产额比对对称能的敏感程度要高于 π^-/π^+ 产额比, 这主要由于该入射能量已远高于 π 介子的产生阈.

4 总结与展望

通过在极端相对论量子分子动力学 (UrQMD) 模型中引入 K 介子与核子间相互作用势 (KN 势), 研究了其对近阈及阈下 K^+ 和 K^0 介子的产额、直接流和椭圆流的影响. 发现在仅考虑 KN 势修正后, K 介子产额不会产生大的影响. 但是, 由于 KN 势的排斥效应, K 介子的直接流会变成负向; 与此同时, 椭圆流 v_2 值会变小. 我们还进一步研究了 K^0/K^+ 产额比受对称能影响的情况. 通过计算 Au+Au 中心碰撞产生的 K^0/K^+ 产额比随着入射能量的变化, 发现“软”的对称能给出的 K^0/K^+ 产额比高于“硬”的对称能给出的结果; 入射能量降低, K^0/K^+ 产额比对对称能的敏感性增强. 基于本次研究我们发现, 当入射能量为 0.8 GeV/nucleon 时 Au+Au 中心碰撞产生的 K^0/K^+ 产额比对对称能的敏感性要高于同样情况下的 π^-/π^+ 产额比.

在接下来的工作中, 我们将会对与 K 介子产生相关的各参与粒子的阈值, 以及相应碰撞截面的介质效应做进一步考虑, 从而对 K 介子的产生进行更系统的描述.

- 3 Hartnack C, Oeschler H, Aichelin J. Hadronic matter is soft. *Phys Rev Lett*, 2006, 96: 012302
- 4 Li B A, Chen L W, Ko C M. Recent progress and new challenges in isospin physics with heavy-ion reactions. *Phys Rept*, 2008, 464: 113–281
- 5 Tsang M B, Stone J R, Camera F, et al. Constraints on the symmetry energy and neutron skins from experiments and theory. *Phys Rev C*, 2012, 86: 015803
- 6 Sun B Y. Symmetry energy of nuclear matter in relativistic Hartree-Fock theory (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2016, 46: 012018 [孙保元. 相对论 Hartree-Fock 理论中的核物质对称能. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2016, 46: 012018]
- 7 Dong J M, Zong Y Y. Neutron skin thickness in ^{208}Pb and symmetry energy of nuclear matter (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2016, 46: 012019 [董建敏, 宗瑶瑶. ^{208}Pb 中子皮厚度与核物质对称能. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2016, 46: 012019]
- 8 Xiao Z, Li B A, Chen L W, et al. Circumstantial evidence for a soft nuclear symmetry energy at suprasaturation densities. *Phys Rev Lett*, 2009, 102: 062502
- 9 Feng Z Q, Jin G M. Probing high-density behavior of symmetry energy from pion emission in heavy-ion collisions. *Phys Lett B*, 2010, 683: 140–144
- 10 Xiao Z G, Zhang M, Yan W H, et al. Isospin fractionation, isospin relaxation and asymmetric nuclear equation of state (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2011, 41: 439–445 [肖志刚, 张明, 闫威华, 等. 同位旋分馏、同位旋弛豫与非对称核物质状态方程. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2011, 41: 439–445]
- 11 Li Q F, Guo C C, Wang Y J. Systematic studies on transport process of heavy-ion collisions at INDRA energies and detection of symmetry energy (in Chinese). *Nucl Phys Rev*, 2013, 30: 331–338 [李庆峰, 郭琛琛, 王永佳. INDRA 能区重离子运输过程的系统研究及对称能探测. *原子核物理评论*, 2013, 30: 331–338]
- 12 Zheng Y X, Lu X H, Zhao K, et al. Extracting the symmetry energy information with heavy ion collisions (in Chinese). *Nucl Phys Rev*, 2011, 28: 377–395 [张英逊, 卢晓华, 赵凯, 等. 利用重离子碰撞确定对称能的密度依赖形式. *原子核物理评论*, 2011, 28: 377–395]
- 13 Xie W J, Su J, Zhu L, et al. Symmetry energy and pion production in the Boltzmann-Langevin approach. *Phys Lett B*, 2013, 718: 1510–1514
- 14 Wang Y J, Guo C C, Li Q F, et al. Constraining the high-density nuclear symmetry energy with the transverse-momentum-dependent elliptic flow. *Phys Rev C*, 2014, 89: 044603
- 15 Bertsch G F, Gupta S D. A guide to microscopic models for intermediate energy heavy ion collisions. *Phys Rept*, 1988, 160: 189–233
- 16 Aichelin J. “Quantum” molecular dynamics—a dynamical microscopic n-body approach to investigate fragment formation and the nuclear equation of state in heavy ion collisions. *Phys Rept*, 1991, 202: 233–360
- 17 Xu J, Chen L W, Tsang M Y B, et al. Understanding transport simulations of heavy-ion collisions at 100 and 400 A MeV: Comparison of heavy ion transport codes under controlled conditions. *Phys Rev C*, 2016, 93: 044609
- 18 Li Q F, Li Z X. Kaon production and flow in relativistic heavy-ion collisions (in Chinese). *High Energy Phys Nucl Phys*, 1998, 12: 1119–1127 [李庆峰, 李祝霞. 相对论重离子碰撞中的 K^+ 产生及集体流. *高能物理与核物理*, 1998, 12: 1119–1127]
- 19 Danielewicz P, Lacey R, Lynch W G. Determination of the equation of state of dense matter. *Science*, 2002, 298: 1592–1596
- 20 Feng Z Q. Constraining the high-density behavior of the nuclear equation of state from strangeness production in heavy-ion collisions. *Phys Rev C*, 2011, 83: 067604
- 21 Li Q F, Li Z X, Soff S, et al. Probing the density dependence of the symmetry potential in intermediate-energy heavy ion collisions. *J Phys G*, 2005, 31: 1359–1374
- 22 Feng Z Q. Nuclear in-medium and isospin effects on subthreshold kaon production in heavy-ion collisions. *Phys Rev C*, 2013, 87: 064605
- 23 Hartnack C, Oeschler H, Leifels Y, et al. Strangeness production close to threshold in proton-nucleus and heavy-ion collisions. *Phys Rept*, 2012, 510: 119–200
- 24 Wang Y J, Guo C C, Li Q F, et al. Collective flows of light particles in the Au+Au collision at intermediate energies. *Phys Rev C*, 2014, 89: 034606
- 25 Wang Y J, Guo C C, Li Q F, et al. $^3\text{H}/^3\text{He}$ ratio as a probe of the nuclear symmetry energy at sub-saturation densities. *Euro Phys J A*, 2015, 51: 37
- 26 Yang J C, Xia J W, Xiao G Q, et al. High intensity heavy ion accelerator facility (HIAF) in China. *Nucl Instrum Meth Phys Res*, 2013, 317: 263–265
- 27 Chen L W, Ko C M, Li B A. Isospin-dependent properties of asymmetric nuclear matter in relativistic mean field models. *Phys Rev C*, 2007, 76: 054316
- 28 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. *Phys Rev C*, 2015, 92: 044604
- 29 Nekipelov M, Büscher M, Cassing W, et al. Evidence of kaon nuclear and Coulomb potential effects on soft K^+ production from nuclei. *Phys Lett B*, 2002, 540: 207–212
- 30 Fuchs C, Kosov D S, Faessler A, et al. Consequences of covariant kaon dynamics in heavy ion collisions. *Phys Lett B*, 1998, 434: 245–250

- 31 Zheng Y M, Fuchs C, Faessler A, et al. Covariant kaon dynamics and kaon flow in heavy ion collisions. *Phys Rev C*, 2004, 69: 034907
- 32 Feng Z Q. Dynamics of strangeness and collective flows in heavy-ion collisions near threshold energies. *Nucl Phys A*, 2013, 919: 32–45
- 33 Föerster A, Uhlig F, Böttcher I, et al. Production of K^+ and of K^- mesons in heavy-ion collisions from 0.6 A to 2.0 A GeV incident energy. *Phys Rev C*, 2007, 75: 024906
- 34 Reisdorf W, Leifels Y, Andronic A, et al. Systematics of azimuthal asymmetries in heavy ion collisions in the 1 A GeV regime. *Nucl Phys A*, 2011, 876: 1–60
- 35 Xing Y Z, Qin D Y. Collective flow of K^+ mesons in heavy-ion collisions predicted by the covariant kaon dynamics. *Chin Phys C*, 2015, 11: 114104
- 36 Herrmann N, Leifels Y. Strangeness production in AA collisions at SIS18. *Hyperfine Interact*, 2012, 210: 65–69
- 37 Ploskon M. Azimuthal emission pattern of K^+ and K^- at SIS energies. *Nucl Phys A*, 2005, 749: 170–173
- 38 Ferini G, Gaitanos T, Colonna M, et al. Isospin effects on subthreshold kaon production at intermediate energies. *Phys Rev Lett*, 2006, 97: 202301
- 39 Reisdorf W, Stockmeier M, Andronic A, et al. Systematics of pion emission in heavy ion collisions in the 1 A GeV regime. *Nucl Phys A*, 2007, 781: 459
- 40 Li Q F, Li Z X. The isospin dependent nucleon-nucleon inelastic cross section in the nuclear medium. arXiv: 1610.00827

The influence of KN potential on the production of kaon mesons in heavy-ion collisions at intermediate energies

LI Miao^{1,2}, GUO ChenChen³, ZOU LiYan^{1,2}, WANG YongJia^{2*},
LI QingFeng^{2,4} & LIU Ling^{1*}

¹ College of Physics Science and Technology, Shenyang Normal University, Shenyang 110034, China;

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

³ Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

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

The kaon meson produced in heavy ion collisions can be taken as a useful probe for investigating the properties of dense nuclear matter. With the help of transport model simulations, it can be used to extract the information of the equation of state of nuclear matter. Within the newly updated version of the ultrarelativistic quantum molecular dynamics (UrQMD) model, the kaon-nucleon (KN) potential is further taken into account and its influence on both the yield and the directed and elliptic flows of kaon mesons produced in Au+Au collisions at intermediate energies ($E_{\text{lab}}=0.6-2.0$ GeV/nucleon) is investigated. It is found that the experimental data of flows can be better described with the consideration of the KN potential, and it is further found that the K^0/K^+ yield ratio is affected by the density dependence of the nuclear symmetry energy. The K^0/K^+ ratio calculated with a soft symmetry energy is larger than that with a stiff one, and the sensitivity to the density dependence of the nuclear symmetry energy at lower beam energy becomes larger. At the low energy such as 0.8 GeV/nucleon, the K^0/K^+ ratio is more sensitive to the stiffness of nuclear symmetry energy than the π^-/π^+ ratio is.

heavy-ion collisions, symmetry energy, collective flow, the kaon-nucleon potential

PACS: 24.10.-i, 21.65.Ef, 25.75.Ld

doi: 10.1360/SSPMA2016-00433