

Transverse Kinematical Energy Spectra of K^+ Mesons in Heavy Ion Collisions

Yongzhong Xing¹, Pornrad Srisawad², Yuming Zheng^{1,3}

¹Department of Physics, Tianshui Normal University, Tianshui

²Department of Physics, Naresuan University, Amphoe Mueany, Phitsanulok, Thailand

³China Institute of Atomic Energy, Beijing

Email: zhengymcn@163.com

Received: Apr. 21st, 2014; revised: Apr. 30th, 2014; accepted: May 13th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

We use the quantum molecular dynamics model based on the covariant kaon dynamics to investigate the transverse kinematical energy spectra of K^+ mesons from $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$ collisions at 1.93 AGeV, and discuss the influence of the K^+ in-medium potential on its transverse kinematical energy spectrum. We observe that the KaoS data can only be reasonably described by calculated results with a repulsive K^+N potential. This indicates that one can extract the information on the K^+ in-medium potential in a nuclear medium from the analysis of the transverse kinematical energy spectra of K^+ mesons. We find that the transverse kinematical energy spectrum of K^+ mesons is also a sensitive observable to probe the nuclear equation of state.

Keywords

Heavy Ion Collisions, Kaon Production, The Transverse Kinematical Energy Spectra, The K^+ In-Medium Potential, The Nuclear Equation of State, The Covariant Kaon Dynamics, The Quantum Molecular Dynamics Model

重离子碰撞中 K^+ 介子的横动能谱

邢永忠¹, 思李飒娃德·彭拉德², 郑玉明^{1,3}

¹天水师范学院物理系, 天水

²那列苏安大学物理系, 彭世洛府, 泰国

³中国原子能科学研究院, 北京

Email: zhengymcn@163.com

收稿日期: 2014年4月21日; 修回日期: 2014年4月30日; 录用日期: 2014年5月13日

摘要

本文采用基于协变的K动力学的量子分子动力学模型,研究了1.93 AGeV入射能量的⁵⁸Ni + ⁵⁸Ni碰撞中产生的K⁺介子的横动能谱,并讨论了K⁺介子在介质中的位势对其横动能谱的影响。理论计算显示,只有计入K⁺介子在核介质中的位势的效应,才能合理地描写KaoS的实验数据。这表明,我们能从K⁺介子横动能谱的分析中提取出在核介质中K⁺介子位势的信息。同时,我们发现,K⁺介子的横动能谱也是一个探测核物态方程的敏感的观测量。

关键词

重离子碰撞, K产生, 横动能谱, 在介质中的K⁺位势, 核物态方程, 协变的K动力学, 量子分子动力学模型

1. 引言

研究重离子碰撞中 K 介子的产生是核物理中的热点之一。这对于更好地理解稠密强子物质中手征对称的可能恢复和高密核物质的性质是非常重要的。

我们从手征模型[1]-[5]得知, K 平均场是相对于手征对称破缺的。在介质中的效应给出了在核介质中的一个吸引的标量势,它是在平均场近似中正比于 K⁻核子 Σ_{KN} 项的。平均场的第二部分来自于同矢量介子的相互作用。矢量势对于 K⁺介子是排斥的,而由于 G⁻宇称守恒,矢量势对于 K⁻介子是吸引的。对于 K⁻介子的一个强的吸引势也有利于在高核密度处的 K⁻凝聚,于是改变中子星的性质[6]。

K 介子是在重离子碰撞的早期阶段中产生的,此时,反应区中的核密度远高于饱和密度($\rho_0 = 0.16 \text{ fm}^{-3}$)。由于奇异数守恒, K⁺介子产生后,不会被周围的核物质吸收。同时,由于相对低的 K⁺N 散射截面(~10 毫巴),它几乎自由地从反应区中逃逸出去。因此, K⁺介子被建议做为研究高密强子物质中的核状态方程(EOS)的敏感探针之一[7]。

在本文中,我们用基于协变 K 动力学的量子分子动力学(QMD)模型[8]去模拟 1.93 GeV 的 ⁵⁸Ni + ⁵⁸Ni 碰撞,分析 K⁺介子的横动能谱,讨论在介质中的 K⁺位势对于 K⁺介子的横动能谱的影响,并将我们的计算结果同 KaoS 数据做比较。我们观测到, KaoS 数据只能被具有一个排斥的 K⁺N 势的计算结果所合理地描写。这表明,我们能从 K⁺介子的横动能谱的分析中抽取有关在核介质中 K⁺位势的信息。我们同时发现, K⁺介子的横动能谱也是探测核状态方程的一个敏感的观测量。

2. 模型

我们用量子分子动力学(QMD)模型[9]-[11]来描写核子系统。其中,每个核子由如下形状的相干态来描写(我们设 $\hbar, c = 1$)

$$\psi(\mathbf{r}, \mathbf{p}_0, t) = \frac{\exp[i\mathbf{p}_0 \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_0)]}{(2\pi L)^{3/4}} e^{-(r-r_0)^2/4L} \quad (1)$$

其中, \mathbf{r}_0 和 \mathbf{p}_0 分别为高斯(Gaussian)波包在坐标空间和动量空间中的中心。令 $L = 1.08 \text{ fm}$, 去符合核子的

均方根半径。对(1)式做魏格纳(Wigner)变换, 得到单体和 N 体魏格纳密度。再对 N 体魏格纳密度做动量积分, 就得到坐标空间中的核密度

$$\rho(\mathbf{r}, t) = \sum_i^N \frac{1}{(2\pi L)^{3/2}} \exp\left[-\frac{(\mathbf{r}-\mathbf{r}_{i0})^2}{2L}\right] \quad (2)$$

于是, 一个核子的平均场势 $U(r)$ 就能被方便地算出。 N 体分布的时间演化由高斯中心 $(\mathbf{r}_{i0}, \mathbf{p}_{i0})$ 的运动决定, 即去求解泊松(Poisson)括号 $\dot{\mathbf{p}}_{i0} = \{\mathbf{r}_{i0}, H\}$ 和 $\dot{\mathbf{r}}_{i0} = \{\mathbf{p}_{i0}, H\}$ 。这里, H 是核的哈密顿量(Hamiltonian)

$$H = \sum_i \sqrt{\mathbf{p}_{i0}^2 + m_i^2} + \frac{1}{2} \sum_{i \neq j} (U_{ij}^{str} + U_{ij}^{cou}) \quad (3)$$

其中, U_{ij}^{str} 是核的平均场, U_{ij}^{cou} 是库仑相互作用。

K 介子用协变的 K 动力学描写。从手征拉格朗日量(Lagrangian)出发, 做平均场近似处理后, 得到 K[±] 介子的场方程[12] [13]

$$\left[\partial_\mu \partial^\mu \pm \frac{3i}{8f_\pi^{*2}} j_\mu \partial^\mu + \left(m_K^2 - \frac{\Sigma_{KN}}{f_\pi^{*2}} \rho_s \right) \right] \phi_{K^\pm}(x) = 0 \quad (4)$$

式中, ρ_s 是重子标量密度, j_μ 是重子四矢量流, f_π^* 是在介质中的 π 衰变常数。引进 K 矢量势

$$V_\mu = \frac{3}{8f_\pi^{*2}} j_\mu \quad (5)$$

(4)式可写成如下形式

$$\left[(\partial_\mu \pm iV_\mu)^2 + m_K^{*2} \right] \phi_{K^\pm}(x) = 0. \quad (6)$$

K 介子的有效质量 m_K^* 为

$$m_K^* = \sqrt{m_K^2 - \frac{\Sigma_{KN}}{f_\pi^{*2}} \rho_s + V_\mu V^\mu}. \quad (7)$$

这里, $m_K = 0.496$ GeV 是 K 介子的裸质量。K[±] 单粒子能量表示为

$$\omega_{K^\pm}(\mathbf{k}, \rho) = \sqrt{\mathbf{k}^2 + m_K^{*2}} \pm V_0 \quad (8)$$

式中, $k^* = k \mp V_0$ 是 K 介子的有效动量, $k_\mu = (k_0, \mathbf{k})$, $V_\mu = (V_0, \mathbf{V})$ 。K[±] 势 $U_{K^\pm}(\mathbf{k}, \rho)$ 定义为

$$U_{K^\pm}(\mathbf{k}, \rho) = \omega_{K^\pm}(\mathbf{k}, \rho) - \omega_0(\mathbf{k}) \quad (9)$$

其中, $\omega_0(\mathbf{k}) = \sqrt{\mathbf{k}^2 + m_K^2}$ 。在本工作中, 我们采用与参考[8]相同的参数化: $\Sigma_{KN} = 450$ MeV, 对于矢量势用 $f_\pi^{*2} = 0.6f_\pi^2$, 而对于由 $-\Sigma_{KN}/f_\pi^{*2} \rho_s$ 给出的标量部分则用 $f_\pi^{*2} = f_\pi^2$ 。

在重离子碰撞中, 带正电荷的 K 介子(K⁺)由如下反应道产生: $B_1 B_2 \rightarrow B_3 Y K^+$ 和 $\pi B_1 \rightarrow Y K^+$ 。其中, $B_1, B_2, B_3 = N, \Delta$ 和 $N^*(1440)$ 共振, 超子 $Y = \Sigma, \Lambda$ 。

对于核力, 我们采用标准的动量相关的 Skyrme 相互作用, 它对应于一个软的 EOS(压缩模式 $K = 200$ MeV)和一个硬的 EOS(压缩模式 $K = 380$ MeV)。对于 K 平均场的确定, 我们采用上述非线性的 $\sigma\omega$ 模型的协变的标量 - 矢量描写, 它对应于相同的软的和硬的核 EOS。由在介质中的 K[±] 位势引起的 K 产生阈的改变也被计入[14] [15]。超子场因而用 2/3 来标度。K⁺ 产生被微扰地处理, 它一般不影响反应动力学[8]。K⁺ 介子传播中, 除了计入 K⁺ 介子的重散射效应(KRSE)外, 我们还考虑了在介质中 K⁺ 介子位势的影响。K⁺ 介子的库仑相互作用也被计入。

3. 结果和讨论

在我们的计算中，我们用了一个 $b \leq 4.5$ fm 的碰撞参数切断，它对应于实验中选择的中心性[16]。

图 1 给出了采用软的核物态方程(EOS)的，入射能量为 1.93 AGeV 和碰撞参数 $b \leq 4.5$ fm 的 $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$ 碰撞中产生的作为横动能 $(m_T - m)$ 之函数的 K⁺介子的横动能谱。横能 $m_T = \sqrt{p_T^2 + m^2}$ ，其中 p_T 和 m 分别为 K⁺介子的横动量和静止质量。这些谱(从上到下)是从如下质心快度间隔中取出的： $-0.69 < y_{c.m.} < -0.54$ ， $0.54 < y_{c.m.} < -0.39$ 和 $-0.39 < y_{c.m.} < -0.24$ 。这些从上到下的谱分别乘以标度因子 10^2 ， 10^1 和 10^0 。实心圆圈表示 KaoS 的实验数据[16]。空心向上(下)三角形表示用具有(没有)K 介子在核介质中的位势(U_K)的计算结果。联接计算点间的线是为了指导眼睛的。从这个图中我们能清楚地看出，没有 U_K ，K⁺介子的横动能谱太窄，它具有太高的小横动量部分和太低的大横动量部分。计入 U_K 之后，由于 U_K 对于 K⁺介子是正的，K⁺介子被核子推离开。换句话说，K⁺介子在它的传播中被加速。于是，具有较小动量的 K⁺介子数目减少，具有较大动量的 K⁺介子数目增加，导致了很好地与实验数据符合的结果。

上述这个特性也能从采用硬的 EOS 计算出的图 2 中的结果明显地看出。这表明，为了合理地描写实验数据，必需在重离子碰撞中 K 产生的理论模拟中计入 K 在核介质中的位势 U_K 。

在图 3 中给出的是用具有 K⁺介子在核介质中位势计算的，入射能量为 1.93 AGeV 和碰撞参数 $b \leq 4.5$

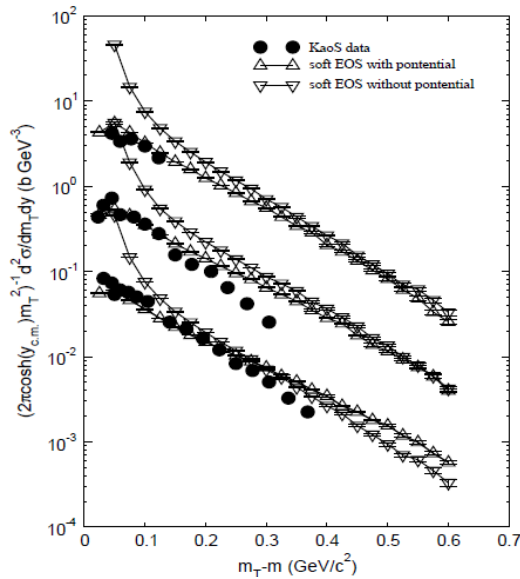


Figure 1. The transverse kinematical energy spectra of K⁺ mesons as a function of the transverse kinetic energy $(m_T - m)$ from the $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$ collisions at 1.93 AGeV by using the soft EOS with and without the in-medium kaon potential U_K for impact parameter $b \leq 4.5$ fm. The spectra are extracted in the following c.m. rapid intervals (from top to bottom): $-0.69 < y_{c.m.} < -0.54$, $0.54 < y_{c.m.} < -0.39$ and $-0.39 < y_{c.m.} < -0.24$. The scaling factors 10^2 , 10^1 and 10^0 are applied to the spectra from top to bottom. The solid circles are the KaoS data [16]. The hollow up (down) triangles denote the calculated results with (without) the in-medium K⁺ potential. The lines linking the calculated points serve to guide the eye

图 1. 采用软的核 EOS 的，入射能量为 1.93 AGeV 和碰撞参数 $b \leq 4.5$ fm 的 $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$ 碰撞中产生的作为横动能 $(m_T - m)$ 之函数的 K⁺介子的横动能谱。这些谱(从上到下)是从如下质心快度间隔中取出的： $-0.69 < y_{c.m.} < -0.54$ ， $0.54 < y_{c.m.} < -0.39$ 和 $-0.39 < y_{c.m.} < -0.24$ 。这些从上到下的谱分别乘以标度因子 10^2 、 10^1 和 10^0 。实心圆圈表示 KaoS 的实验数据[16]。空心向上(下)三角形表示具有(没有)K⁺介子在核介质中位势的计算结果。联接计算点间的线是为指导眼睛的

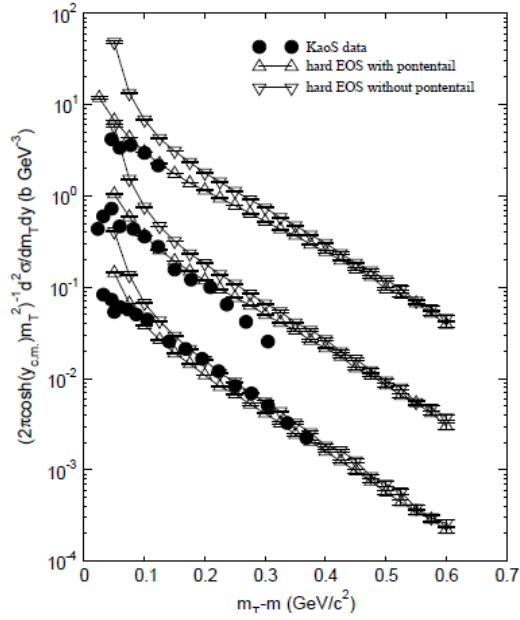


Figure 2. The same as that in Figure 1, but by using the hard EOS

图 2. 与图 1 中的相同,但是采用硬的 EOS 计算的结果

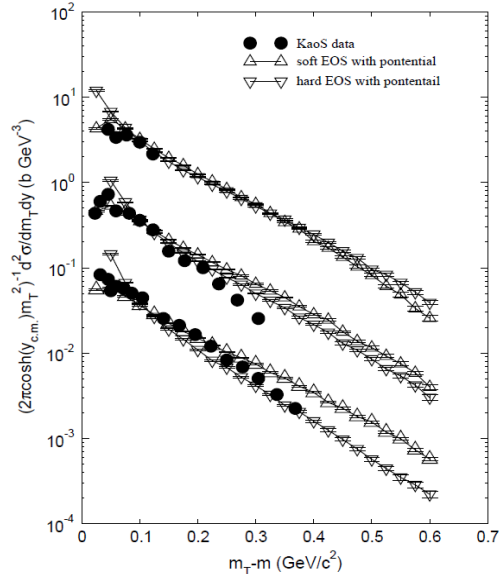


Figure 3. The transverse kinematical energy spectra of K⁺ mesons as a function of the transverse kinetic energy ($m_T - m$) from the $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$ collisions at 1.93 AGeV by using the soft EOS and the hard EOS with the in-medium kaon potential U_K for impact parameter $b \leq 4.5$ fm. The spectra are extracted in the following c.m. rapid intervals (from top to bottom): $-0.69 < y_{c.m.} < -0.54$, $0.54 < y_{c.m.} < -0.39$ and $-0.39 < y_{c.m.} < -0.24$. The scaling factors 10^2 , 10^1 and 10^0 are applied to the spectra from top to bottom. The solid circles are the KaoS data [16]. The hollow up (down) triangles denote the calculated results by using the soft (hard) EOS. The lines linking calculated points serve to guide the eye

图 3. 用具有 K⁺介子在核介质中位势计算的,入射能量为 1.93 AGeV 和碰撞参数 $b \leq 4.5$ fm 的 $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$ 碰撞中产生的作为横动能 ($m_T - m$) 之函数的 K⁺介子的横动能谱。这些谱(从上到下)是从如下的质心快速间隔中取出的: $-0.69 < y_{c.m.} < -0.54$, $0.54 < y_{c.m.} < -0.39$ 和 $-0.39 < y_{c.m.} < -0.24$ 。这些从上到下的谱分别乘以标度因子 10^2 、 10^1 和 10^0 。实心圆圈表示 KaoS 的数据[16]。空心向上(下)三角形表示采用软的 EOS(硬的 EOS)计算的结果。联接计算点间的线是为指导眼睛的

fm 的 $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$ 碰撞中产生的作为横动能 ($m_T - m$) 之函数的 K^+ 介子的横动能谱。这些谱(从上到下)是从如下质心快度间隔中取出的: $-0.69 < y_{c.m.} < -0.54$, $0.54 < y_{c.m.} < -0.39$ 和 $-0.39 < y_{c.m.} < -0.24$ 。这些从上到下的谱分别乘以标度因子 10^2 、 10^1 和 10^0 。实心圆圈表示 KaoS 的实验数据[16]。空心向上(下)三角形表示采用软的 EOS(硬的 EOS)计算的结果。联接计算点间的线是为了指导眼睛的。从这个图中我们看到,用软的 EOS 算出的理论结果较好地符合实验数据。这意味着,在这个反应中生成的致密物质具有软的 EOS 性质。

总之,在阈能区上下的中能重离子碰撞中,奇异粒子通常是在反应的早期和高密相中产生的。由于奇异性守恒, K^+ 介子不能被周围的核子吸收,它们的化学冻出发生较早。末态相互作用,即弹性散射,电荷交换反应,和在介质中 K^+ 势的影响改变了它们的动力学特性,但不改变它们的丰度。这使得 K^+ 介子能作为一个合适的探针,去研究重子在介质中的性质和重离子碰撞中形成的高密核物质中的核状态方程。我们用基于协变 K 动力学的量子分子动力学模型研究了 1.93 GeV 的 $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$ 碰撞中产生的 K^+ 介子的横动能谱。我们发现,这个观测量能被用一个软的 EOS 和计入在介质中的 K^+ 位势的计算结果所合理地描写。这表明, K^+ 介子的横动能谱是探测在介质中的 K^+ 位势和高密核物质中的核状态方程的一个敏感的观测量。

项目基金

国家自然科学基金资助项目(批准号: 11265013)。

参考文献 (References)

- [1] Kaplan, B.D. and Nelson, A.E. (1986) Strange goings on in dense nucleonic matter. *Physics Letters B*, **175**, 57-63.
- [2] Brown, G.E. and Rho, M. (1996) From chiral mean field to Walecka mean field and kaon condensation. *Nuclear Physics A*, **596**, 503-514.
- [3] Schaffner, J., Bondorf, J. and Mishustin, I.N. (1997) In-medium kaon production at the mean-field level. *Nuclear Physics A*, **625**, 325-346.
- [4] Waas, T., Rho, M. and Weise, W. (1997) Effective kaon mass in dense baryonic matter: Role of correlations. *Nuclear Physics A*, **617**, 449-463.
- [5] Lutz, M. (1998) Nuclear kaon dynamics. *Physics Letters B*, **426**, 12-20.
- [6] Li, G.Q., Lee, C.-H. and Brown, G.E. (1997) Kaons in dense matter, kaon production in heavy-ion collisions, and kaon condensation in neutron stars. *Nuclear Physics A*, **625**, 372-434.
- [7] Randrup, J. and Ko, C.M. (1980) Kaon production in relativistic nuclear collisions. *Nuclear Physics A*, **343**, 519-544.
- [8] Zheng, Y.M., Fuchs, C., Faessler, A., Shekhter, K., Yan, Y. P. and Kobdaj, C. (2004) Covariant kaon dynamics and kaon flow in heavy ion collisions. *Physical Review C*, **69**, Article ID: 034907.
- [9] Aichelin, J. (1991) "Quantum" molecular dynamics—A dynamical microscopic n-body approach to investigate fragment formation and the nuclear equation of state in heavy ion collisions. *Physics Reports*, **202**, 233-360.
- [10] Zheng, Y.M., Sa, B.H. and Zhang, X.Z. (1989) Dynamical features of medium energy heavy ion collision processes. *Chinese Physics Letters*, **6**, 117.
- [11] Fuchs, C., Kosov, D.S., Faessler, A., Wang, Z.S. and Waindzoeh, T. (1998) Consequences of covariant kaon dynamics in heavy ion collisions. *Physics Letters B*, **434**, 245-250.
- [12] Fang, X.S., Ko, C.M., Li, G.Q. and Zheng, Y.M. (1994) Medium effects on subthreshold kaon production in heavy-ion collisions. *Physical Review C*, **49**, R608-R611.
- [13] Fuchs, C. (2006) Kaon production in heavy ion reactions at intermediate energies. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, **56**, 1-103.
- [14] Fuchs, C., Faessler, A., Zabrodin, E. and Zheng, Y.M. (2001) Probing the nuclear equation of state by K^+ production in heavy-ion collisions. *Physical Review Letters*, **86**, 1974.
- [15] Zheng, Y.M., Chu, Z.L., Fuchs, C., Faessler, A., Xiao, W., Hua, D.P. and Yan, Y.P. (2002) Transverse flow of kaons in heavy-ion collisions. *Chinese Physics Letters*, **19**, 926.
- [16] Senger, P., et al. (1993) The kaon spectrometer at SIS. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **327**, 393-411.