

# 高密核物质中核子的运动对于 K 介子的等效质量和能量的影响\*

邢永忠<sup>1)2)†</sup> 王艳艳<sup>2)</sup> 朱玉兰<sup>2)</sup> 郑玉明<sup>1)3)</sup>

1) (天水师范学院物理与信息科学学院, 天水 741000)

2) (陕西师范大学物理与信息技术学院, 西安 710062)

3) (中国原子能科学研究院, 北京, 102413)

(2009年5月8日收到; 2010年3月4日收到修改稿)

本文对比分析了目前用于研究 K 介子产生与演化的不同动力学模型中, 高温高密核物质中  $K^+$  介子和  $K^-$  介子的等效质量和它所感受到的平均场. 结果显示: 在关于 K 介子的一般的平均场理论中, 所定义的  $K^+$  介子的等效质量随着核物质密度的增大而增加,  $K^-$  介子的等效质量随着核物质密度的增大而减小; 但在 K 介子演化的协变动力学模型中, 所采用的  $K^+$  介子和  $K^-$  介子等效质量是随着核物质密度的增大都是减小的;  $K^+$  介子和  $K^-$  介子在高温高密核物质中所感受到的平均场的性质, 不仅明显地依赖于  $K^+$  介子和  $K^-$  介子的准粒子模型的定义, 而且在核物质密度变化的过程中, 与周围核子的运动有着密切的关联.

**关键词:** 高密核物质, K 介子, 等效质量, 核子运动

**PACS:** 25.75.Dw, 14.40.Ag, 24.10.Lx

## 1. 引言

自 1944 年法国物理学家们从宇宙射线中发现了 K 介子以来, 这一特殊的粒子向人们展示了微观世界的丰富多彩性, 诸如 CP 守恒定律的成立与破坏<sup>[1]</sup>, 手征对称性的破缺与恢复<sup>[2-5]</sup> 等一系列涉及物理学基本问题的重要内容都与 K 介子的产生、衰变等属性有着密切的联系. 从上世纪 80 年代, LBL 实验室首次产生出 K 介子到 90 年代中期 GSI 上 KaoS 和 FOPI 两个实验装置的建成, 人们从实验室里获得了大量有关 K 介子的数据, 由此而得到了许多关于这一奇异粒子基本属性的知识.

毕竟粒子碰撞是人们在地球上产生 K 介子的唯一方法, 而且, 所产生的 K 介子总是首先处于其他粒子所构成的复杂环境中, 周围粒子对于 K 介子的性质的影响, 即所谓的介质效应, 会使其产生条件及其属性发生改变. Kaplan 与 Nelson<sup>[6,7]</sup> 从理论上探讨了 K 介子的介质效应. 经过人们多年来的探索, 目前所形成的基本共识为: 在大约 1 GeV 到 3

GeV 的入射能区内, 由于重离子的碰撞使得核物质的密度高于正常核物质密度 2—3 倍, 从而会使 K 介子在低于自由空间中的阈能值的入射能量下产生, 即 K 介子的阈下产生<sup>[8,9]</sup>, 在这样的环境中产生的 K 介子, 其等效质量和宽度与自由空间中的 K 介子的性质大不相同: 通常认为  $K^+$  介子要受到核物质的相对较弱的排斥势, 此力的作用效果使得  $K^+$  介子的质量有所增大、产额相对减少. 与此相反,  $K^-$  介子在核物质中要受到相对较强的吸引势, 因而, 与不考虑介质效应的值相对,  $K^-$  介子在核物质中其质量要减小而产额增大<sup>[10]</sup>.

中高能重离子碰撞的时间尺度仅有几十个 fm/c ( $10^{-22}$ s) 的量级, 高温高密度核物质存在于更短的时间尺度之内, 实验上难于直接对 K 介子的等效质量进行测量. 尽管如此, 等效质量仍然是一个十分重要的物理量, 因为它的大小不仅决定着 K 介子在反应末态的可观测物理量, 更重要的是它决定着 K 介子的产生以及整个反应动力学过程. 因此, 进一步明确 K 介子在高温高密核物质中的等效质量及其所感受到的相互作用是十分重要的. 实际上, 与

\* 国家自然科学基金 (批准号: 10575075) 和甘肃省教育厅科研项目资助的课题.

† E-mail: tsxyz@public.lz.gs.cn

自由 K 介子相比,介质中 K 介子的等效质量到底是增大还是减小,依赖于人们研究 K 介子时所采用的理论模型.本文中仅就两种分析 K 介子产生与演化的常用动力学模型中,  $K^+$  介子和  $K^-$  介子在高温高密核物质中的等效质量和它所感受到的平均场进行对比分析. 所得结果显示:在关于 K 介子的一般的平均场理论中,所定义的  $K^+$  介子的等效质量随着核物质密度的增大是增加的,  $K^-$  介子的等效质量随着核物质密度的增大是减小的;而在关于 K 介子演化的所谓协变动力学模型中,所采用的  $K^+$  介子和  $K^-$  介子的等效质量都是随着核物质密度的增大而减小的;K 介子在高温高密核物质中所感受到的平均场的性质,不仅明显地依赖于 K 介子的准粒子模型的定义,而且在核物质密度变化的过程中,与周围核子的运动有着密切的关联. 下面,我们首先简要介绍一下目前描述 K 介子产生的动力学理论模型,其次简要给出两种常用于研究 K 介子演化的理论方法中所定义的 K 介子等效质量和能量,然后,我们详细讨论这两种不同定义的异同及其随核子运动的变化.

## 2. 描述 K 介子产生与演化的理论模型

在强子层次上,描述重子八重态和赝标介子八重态的理论基础是 Kaplan-Nelson<sup>[6,7,11,12]</sup> 所提出的  $SU_L(3) \times SU_R(3)$  手征理论模型,其拉格朗日密度的具体形式为

$$\begin{aligned}
 L = & \frac{1}{4}f^2 \text{Tr} \partial^\mu \Sigma \partial_\mu \Sigma^\dagger \\
 & + \frac{1}{2}f^2 \Lambda [ \text{Tr} M_q (\Sigma - 1) + \text{h. c.} ] \\
 & + \text{Tr} \bar{B} (i\gamma^\mu \partial_\mu - m_B) B + i \text{Tr} \bar{B} \gamma^\mu [ V_\mu, B ] \\
 & + D \text{Tr} \bar{B} \gamma^\mu \gamma^5 \{ A_\mu, B \} + F \text{Tr} \bar{B} \gamma^\mu \gamma^5 [ A_\mu, B ] \\
 & + \alpha_1 \text{Tr} \bar{B} (\xi M_q \xi + \text{h. c.}) B \\
 & + \alpha_2 \text{Tr} \bar{B} B (\xi M_q \xi + \text{h. c.}) \\
 & + \alpha_3 [ \text{Tr} M_q \Sigma + \text{h. c.} ] \text{Tr} \bar{B} B, \quad (1)
 \end{aligned}$$

其中  $V_\mu = \frac{1}{2}(\xi^\dagger \partial_\mu \xi + \xi \partial_\mu \xi^\dagger)$  和  $A_\mu = \frac{i}{2}(\xi^\dagger \partial_\mu \xi - \xi \partial_\mu \xi^\dagger)$  分别为矢量流和轴矢量流,  $\Sigma = \exp\{2i\phi/f_\pi\}$  与  $\xi = \sqrt{\Sigma} = \exp\{i\phi/f_\pi\}$ ,  $\phi$  和  $B$  分别为赝标介子八重态和重子八重态矩阵形式的波函数. 将介子场展开后保留到  $1/f_\pi^2$  次项,直接略去包含与轴矢量的项且只保留与 K 介子  $\bar{K} = (K^-, \bar{K}^0)$  和核子  $\bar{N} = (\bar{p}, \bar{n})$

有关的项后,得<sup>[13,14]</sup>

$$\begin{aligned}
 L = & \bar{N} (i\gamma^\mu \partial_\mu - m_N) N + \partial^\mu \bar{K} \partial_\mu K - m_K^2 \bar{K} K \\
 & + \frac{\Sigma_{KN}}{f_\pi^2} \bar{N} N \bar{K} K - \frac{3i}{8f_\pi^2} \bar{N} \gamma^\mu N \bar{K} \partial_\mu K, \quad (2)
 \end{aligned}$$

这里,第一项描述的是核子的自由运动(Dirac 方程),第二项和第三项描述 K 介子的自由运动(Klein-Gold 方程),最后两项分别为 KN 相互作用的标量和矢量拉氏量密度. 从(2)式所示的拉氏密度出发,可以得到 K 介子的运动方程

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

其中  $j_\mu = \langle \bar{N} \gamma_\mu N \rangle$  和  $\rho_s = \langle \bar{N} N \rangle$  分别为核子的矢量密度和标量密度,第二项的正负分别对应于  $K^+$  和  $K^-$  介子.

## 3. K 介子在核物质中的等效质量和平均场

对于(2)式的不同处理,可以得到 K 介子在高温高密核物质中的不同等效质量及其在核物质中所感受到的平均场.

文献[15]中,对于(3)式略去第二项中的矢量部分,得到  $K^+$  介子和  $K^-$  介子在核物质中的等效质量  $m_{K^+}^*$  和  $m_{K^-}^*$ ,

$$\begin{aligned}
 m_{Li}^* \equiv m_{K^\pm}^* = & \sqrt{m_K^2 - \frac{\Sigma_{KN}}{f_\pi^2} \rho_s + \left( \frac{3\rho_B}{8f_\pi^2} \right)^2} \\
 & \pm \frac{3\rho_B}{8f_\pi^2}, \quad (4)
 \end{aligned}$$

及其在核物质中的能量

$$\begin{aligned}
 \omega_{K^\pm} \equiv \omega(\mathbf{k}, \rho_B) \\
 = & \sqrt{m_K^2 + \mathbf{k}^2 - \frac{\Sigma_{KN}}{f_\pi^2} \rho_s + \left( \frac{3\rho_B}{8f_\pi^2} \right)^2} \pm \frac{3\rho_B}{8f_\pi^2}. \quad (5)
 \end{aligned}$$

为了便于讨论,本文中用  $m_{K^\pm}^*$  和  $\omega_{K^\pm}$  表示按照文献[15]所定义的  $K^+$  介子和  $K^-$  介子的质量与能量.但是根据文献[16],  $K^+$  介子和  $K^-$  介子具有相同的等效质量(本文中以下标 Fu 来标记):

$$m_{Fu}^* \equiv m_{K^+}^* = \sqrt{m_K^2 - \frac{\Sigma_{KN}}{f_\pi^2} \rho_s + V_\mu V^\mu}, \quad (6)$$

其中  $V_\mu = \frac{3}{8f_\pi^2} j_\mu$ , 通过变换  $k_\mu^* = k_\mu \mp V_\mu$ , 可以使核物质中的  $K^+$  介子满足标准的 Klein-Gold 方程

$$[k_\mu^{*2} - m_K^{*2}] \phi_{K^\pm}(x) = 0. \quad (7)$$

若以  $\mathbf{u}$  表示  $K^+$  介子和  $K^-$  介子所在处的核子对于实验室系的运动速度, 则(6)式可以明显地写成  $\mathbf{u}$  有关的形式

$$m_{Fu}^* \equiv \sqrt{m_K^2 - \frac{\Sigma_{KN}}{f_\pi^2} \rho_s + \left(\frac{3\rho_B}{8f_\pi^2}\right)^2 (1 - u^2)}. \quad (8)$$

#### 4. 分析与讨论

显然, 与 Li 对于等效质量的定义(4)相比, Fuchs 计及了核物质的矢量密度的影响. 图 1 中给出了这两种等效质量随  $\rho_B/\rho_0$  的变化, 这里  $\rho_B$  和  $\rho_0 = 0.16 \text{ fm}^{-3}$  分别为核物质的重子密度与正常核物质密度. 图 1(b) 为核标量密度  $\rho_s/\rho_0$  随  $\rho_B/\rho_0$  的变化,  $\rho_s$  通过计算平均场近似下非线性  $\sigma$ - $\omega$  场而得到, 即由方程  $m_\sigma^2 \langle \sigma \rangle + b \langle \sigma \rangle^2 + c \langle \sigma \rangle^3 = g_\sigma \rho_s$  与核子的等效质量  $m^* = m - g_\sigma \langle \sigma \rangle \approx 0.83 m$  共同确定, 这里  $m$  为自由核子的质量. 在确定  $\rho_s$  时, 我们采用了与文献[16]中软势相对应的参数值. 图 1(a) 中实线表示协变动力学中所采用的 K 介子的准粒子模型的等效质量, 即(6)式; 其余两条线表示的是文献[15]所采用的 K 介子模型的等效质量, 即(4)式, 其中点线与虚线分别对应于  $K^+$  介子与  $K^-$  介子.

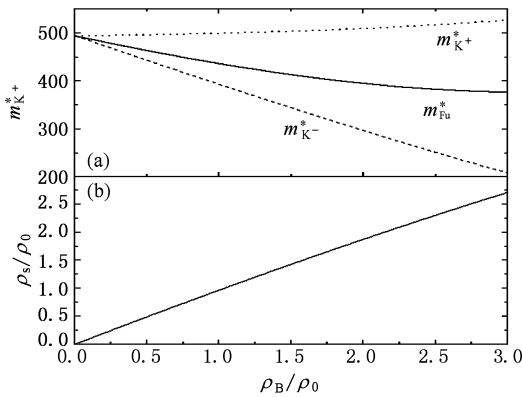


图 1 (a) K 介子的等效质量随  $\rho_B/\rho_0$  的变化; (b) 反应过程中标量密度  $\rho_s/\rho_0$  与  $\rho_B/\rho_0$  的关系

从图中可以看出: 随着  $\rho_B/\rho_0$  的增大, 不同模型下的  $K^+$  介子的等效质量在高密核物质中的变化趋势不同: 在一般的平均场理论中, 由于  $K^+$  介子受到核物质矢量势的排斥作用, 使它的等效质量随着核物质密度的增大而增加, 而对于  $K^-$  介子, 由于其受到的矢量势为吸引作用, 所以它的等效质量随着核物质密度的增大而减小. 但是在协变动力学模型中, 根据定义(6)式,  $K^+$  与  $K^-$  具有相同的等效质量  $m_{Fu}^*$ , 且其值均随着核物质密度的增加而减小.

协变动力学模型的另一个特点是, 所定义的 K 介子准粒子模型完整地包含了全部矢量势, 因而, 如(8)式所示, 准粒子模型的质量明显地依赖于核物质的运动速度. 我们在图 2 中给出了核子的运动速度分别为  $u = 0.0c$  (实线表示),  $u = 0.5c$  (虚线),  $u = 1.0c$  (点线) 时, K 介子等效质量随着核物质密度的变化. 这里  $u = 0.0c$  对应于核物质静止时 K 介子的有效质量, 而  $u = 1.0c$  相当于整个矢量场被忽略的情况 (即只计及标量场作用时的情形). 由图 2 可见, 不同的核子速度对于 K 介子的等效质量产生不同的影响, 核子的运动速度越大, K 介子的等效质量越小, 这一特征随着核物质的压缩程度的增大而增强.

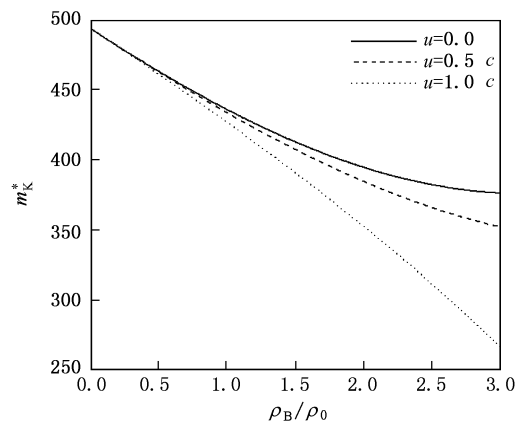


图 2 协变动力学中 K 介子的有效质量在不同核子速度下随重子密度的变化

在(6)式所示的等效质量的定义下, 同样可以得到  $K^+$  介子和  $K^-$  介子准粒子模型所具有的能量为

$$\omega_{Fu} \equiv \omega(\mathbf{k}^\pm, \rho_B) = \sqrt{m_K^2 - \frac{\Sigma_{KN}}{f_\pi^2} \rho_s + \left(\frac{3\rho_B}{8f_\pi^2}\right)^2 (1 - u^2) + \left(\mathbf{k} - \frac{3\rho_B}{8f_\pi^2} \mathbf{u}\right)^2} + V_0. \quad (9)$$

显然, 在核子的矢量密度为零 (即  $\mathbf{V} = 0$ ) 的情况下,

$K^+$  介子和  $K^-$  介子准粒子在两种情况下的能量完全

一致. 如果完全忽略标量势的影响, 则这时  $K^+$  介子和  $K^-$  介子等效质量与能量即为文献[15]所采用的表达式. 根据上述能量, 可以得到  $K^+$  介子和  $K^-$  介子在核物质中的平均场

$$U(\mathbf{k}, \rho_B) = \omega(\mathbf{k}, \rho_B) - \omega_0(\mathbf{k}),$$

$$\omega_0(\mathbf{k}) = \sqrt{\mathbf{k}^2 + m_K^2}, \quad (10)$$

$\omega_0(\mathbf{k})$  为自由  $K$  介子的能量.

图3中分别给出了  $K^+$  介子和  $K^-$  介子的动量的大小为  $|\mathbf{k}| = 200 \text{ MeV}/c$  时,  $K$  介子相对于核子的运动速度为  $u = 0.2c$  时 ( $c$  为光速),  $K^+$  介子(图3(a)) 和  $K^-$  介子(图3(b)) 的平均场随核物质密度的变化. 图中  $U_{Li}$  (虚线)、 $U_{Fu}$  (实线) 分别为按照(5)式与(9)式所计算的  $K$  介子的平均场,  $V_{Li}$  (点线) 为只考虑(5)式中的矢量势时得到的平均场.

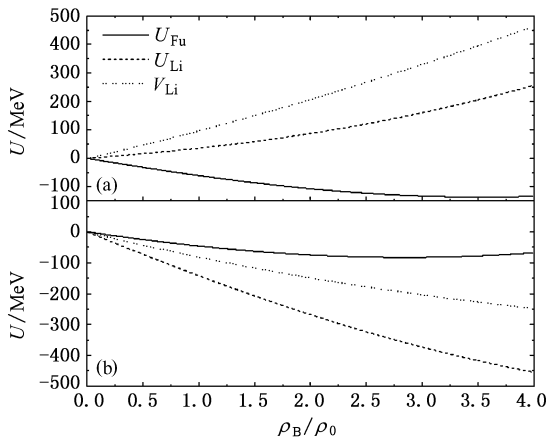


图3 在  $\Sigma_{KN} = 450 \text{ MeV}$ , 动量  $|\mathbf{k}| = 200 \text{ MeV}/c$  和  $u = 0.2c$  时,  $K$  介子准粒子模型的平均势随核物质密度的变化 (a)  $K^+$  介质; (b)  $K^-$  介质

图3清楚地显示, 在我们所考虑的  $\rho_B/\rho_0$  的范围内, 矢量势对应的平均场  $V_{Li}$  对于  $K^+$  介子来说是排斥势而对于  $K^-$  介子而言为吸引势. 在关于  $K$  介子的一般平均场理论模型中,  $K^+$  介子所受的平均场  $U_{Li}$  随核物质密度的增加而增大, 但  $K^-$  介子的平均场  $U_{Li}$  随密度的增大而减小. 然而, 在  $K$  介子的协变动力学模型中,  $K^+$  与  $K^-$  介子的平均场  $U_{Fu}$  均随密度的增大而减小, 如果仅在核物质静止的坐标系中观察, 则  $K^+$  与  $K^-$  介子的平均场完全相同, 换句话说, 在  $K$  介子的协变动力学模型中, 由于完整地计入了矢量势的作用, 使得  $K^+$  与  $K^-$  介子所感受到的势场因核物质的相对运动而有所区别. 为了进一步明确核子的运动速度对于  $K$  介子的影响, 我们在图4中给出了  $\rho_B = 2\rho_0$ ,  $K$  介子的动量为  $|\mathbf{k}| = 0.2$

$\text{GeV}/c$  时, 协变动力学模型中的  $K^+$  介子(实线) 和  $K^-$  介子(虚线) 所感受到的平均场随核子的运动速度的变化.

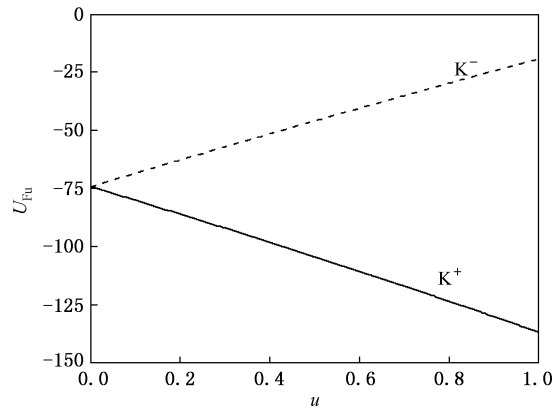


图4 协变动力学模型中的  $K^+$  介子(实线) 和  $K^-$  介子(虚线) 所感受到的平均场核子的运动速度的变化

由图4可见, 在协变动力学模型中, 当  $K$  介子的动量一定时, 若  $K$  介子周围的核物质是静止的, 则  $K^+$  介子和  $K^-$  介子感受到的平均场是相同的, 否则, 随着核物质运动速度  $u$  的增大, 两种介子所感受到的平均场的差别逐渐增大, 其中  $K^+$  介子的平均场随  $u$  增大而  $K^-$  介子的平均场却减小.

从(5)式与(9)式可以看出, 不论是在关于  $K$  介子的一般平均场模型还是在协变动力学模型中,  $K$  介子所感受到的平均场均是动量相关的, 即动量是一个决定  $K$  介子平均场的重要物理量, 我们在图5中给出了  $K^+$  介子(图5(a)) 和  $K^-$  介子(图5(b)) 所感受到的平均场随  $K$  介子动量的变化. 图中  $U_{Li}$  (虚线) 和  $U_{Fu}$  (实线) 分别为在核子的相对运动速度  $u = 0.2c$  的情况下, 按照(5)式和(9)式计算得到的  $K$  介子平均场. 比较图5(a)和(b)可知: 按照(5)式所定义的  $K^+$  介子和  $K^-$  介子的平均场相差较大, 而按照(9)式所定义的  $K$  介子准粒子模型中  $K^+$  介子和  $K^-$  介子的平均场相差很小, 然而对于两种不同的模型, 平均场随  $K$  介子动量的变化趋势基本相同, 即在动量较小时,  $U$  随动量的变化较快, 但在动量较大(约大于  $1 \text{ GeV}/c$ ) 时,  $U$  随动量的变化相对较慢. 图中的  $V_{Li}$  (点线) 是在  $U_{Li}$  的基础上完全不考虑标量势的影响时  $K^+$  介子所感受到的平均场, 点线在左右两图中的相对位置明确的显示了  $K^+$  介子的矢量势为排斥力而  $K^-$  介子的矢量势为吸引力, 但这种势随动量的变化较为缓慢.

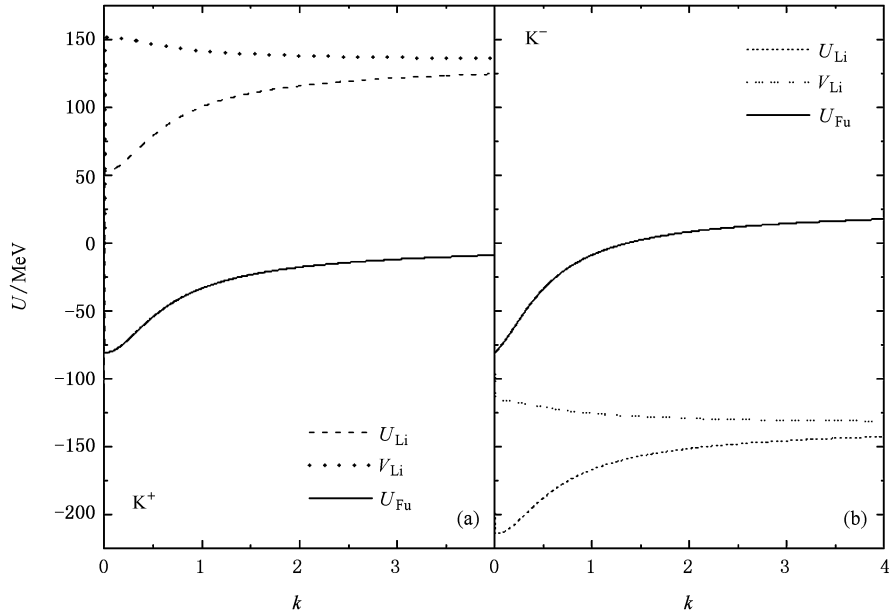


图5 在核子的运动速度  $u = 0.2c$  时,平均场对于 K 介子动量的依赖曲线 (a)  $K^+$  介子; (b)  $K^-$  介子

总之,本文中我们对比分析了目前用于研究 K 介子产生与演化的不同动力学模型中,高温高密核物质中  $K^+$  和  $K^-$  介子的等效质量和它所感受到的平均场. 所得结果显示:在关于 K 介子的一般的平均场理论中,所定义的  $K^+$  介子的等效质量随着核物质密度的增大而增加, $K^-$  介子的等效质量随着核物质密度的增大而减小;但在 K 介子的协变动力学模型中,所采用的  $K^+$  介子和  $K^-$  介子的等效质量随着核物质密度的增大都是减小的; $K^+$  和  $K^-$  介

子在高温高密核物质中所感受到的平均场的性质,不仅明显地依赖于  $K^+$  介子和  $K^-$  介子的准粒子模型的定义,而且在核物质密度变化的过程中,与周围核子的运动有着密切的关联. 在压缩阶段,核子的运动速度越大, $K$  介子的等效质量越小,而且  $K^+$  介子的平均场随核子运动速度的增大而增大,但  $K^-$  介子的平均场却随着核子运动速度的增大而减小.

[1] Buras A J, arXiv:hep-ph/0307203 v1  
 [2] Brown G E, Rho M 1996 *Phys. Rep.* **269** 333  
 [3] Klimt S, Lutz M, Weise W 1990 *Phys. Lett. B* **249** 386  
 [4] Fuchs C, Faessler A, WANG Z S, GROSS B T 1999 *Prog. Part. and Nucl. Phys.* **42** 197  
 [5] Brown G E, Rho M, arXiv:hep-ph/0103102 v4  
 [6] Kaplan D B, Nelson A E 1986 *Phys. Lett. B* **175** 57  
 [7] Nelson A E, Kaplan D B 1987 *Phys. Lett. B* **192** 193  
 [8] Aichelin J, Ko C M 1985 *Phys. Rev. Lett.* **55** 2661  
 [9] Fang X S, Ko C M, Li G Q, Zheng Y M 1994 *Nucl. Phys. A* **575** 766  
 [10] Hartnack C, arXiv:nucl-th/0507002 v1.  
 [11] Brown G E, Rho M 1996 *Phys. Rep.* **269** 333  
 [12] Brown G E, Lee C H, Rho M, Thorsson V 1994 *Nucl. Phys. A* **567** 937  
 [13] Ko C M 2001 *J. Phys. G* **27** 327  
 [14] Li G Q, Ko C M, Li B A 1995 *Phys. Rev. Lett.* **74** 235  
 [15] Li G Q, Ko C M 1995 *Nucl. Phys. A* **594** 460  
 [16] Fuchs C, Kosov D S, Faessler A, Wang Z S, Waindzoeh T 1998 *Phys. Lett. B* **434** 245  
 Fuchs C, arXiv:nucl-th/0507017 v2

# Influence of nucleon motion on the effective mass and energy of kaon in dense nuclear matter\*

Xing Yong-Zhong<sup>1)2)†</sup> Wang Yan-Yan<sup>2)</sup> Zhu Yu-Lan<sup>2)</sup> Zheng Yu-Ming<sup>1)3)</sup>

1) (*Department of Physics, Tianshui Normal University, Tianshui 741000, China*)

2) (*College of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China*)

3) (*China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China*)

(Received 8 May 2009; revised manuscript received 4 March 2010)

## Abstract

In the present paper, the effective mass and energy of kaon in dense and hot nuclear matter is studied. Our special attention is paid to the comparison of various definitions of quasi-particle model of kaons used in transport theories. The effective mass of kaon defined in popular mean field theory increases with increasing of the density of nuclear matter, while the quantity used in covariant kaon dynamics decreases with the density increasing. The properties of mean field acting on kaon by hot and dense nuclear matter depends not only on the form of quasiparticle model of kaons, but on the motion of nucleons around it.

**Keywords:** dense nuclear matter, kaon meson, effective mass, nucleon motion

**PACS:** 25.75.Dw, 14.40.Ag, 24.10.Lx

---

\* Supported by the National Nature Science Foundation of China (Grant No. 10575075) and the Projects of Gansu Provincial Department of Education.

† E-mail: tsxyz@public.lz.gs.cn