

文章编号: 1007-4627(2002)03-0301-05

CSR 能区重离子反应中的介子产生*

姜焕清

(兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心, 甘肃 兰州 730000;
中国科学院高能物理研究所, 北京 100039;
中国科学院理论物理研究所, 北京 100080)

摘要: 重离子反应中介子产生的观测对于认识重离子反应动力学和核物质性质具有重要的意义. 讨论了重离子反应阈能附近介子产生的一些特点和研究现状, 特别讨论了 π 介子产生和 K^+ 介子产生. 在我国兰州重离子冷却储存环上开展这方面的实验研究具有可能性, 可望得到很有意义的结果. 及时开展这方面实验研究和相应的理论研究是必要的.

关键词: 重离子反应; 介子产生; 状态方程

中图分类号: O572.34 **文献标识码:** A

1 引言

强作用物理是认识组成宇宙物质的性质和结构的物理学研究领域, 它是现代核科学的核心问题. 对它的研究不仅能了解物质的微观结构, 也推动着粒子物理、天体物理和宇宙学的发展.

原子核是天然的强作用物质体系, 是研究强作用物理的天然实验室. 然而, 在长期的低能物理现象的研究领域中, 人们只需要考虑原子核中的核子自由度, 在非相对论量子力学的框架内来认识. 事实上, 所有的强子都有更基本的夸克组成, 它们的运动规律是量子色动力学(QCD). 强作用物理的根本任务是从强作用的基本理论 QCD 出发, 认识强子物质的性质和强作用, 决定各种尺度上强作用现象相关自由度, 建立这些自由度与 QCD 参数和基本场之间的联系, 利用对 QCD 的认识, 定量描述大量的从核物理到早期宇宙等各种强作用现象.

强子物理研究的基本目标之一就是认识手征对称破缺的根源和动力学. 轻介子的存在表明手征对称的自发破缺. 从 QCD 出发, 认识手征对称自发破缺的动力学, 理解强子的质量, 认识产生手征凝聚的物理根源, 认识退禁闭和有限温度下手征相变的关系是强子物理的一个基本目标. 有限温度和密度的核物质为研究这样的问题提供了必要的环境.

探索极端条件下原子核和物质中夸克-胶子的作用是强作用物理的另一个基本目标. 这里要探讨极端条件下强子的夸克-胶子结构的修正, 这表现在极端条件下强子性质的变化. 重离子碰撞是在实验室研究高密核物质的唯一可能途径. 研究高密核物质的一个重要问题是它的状态方程. 核物质的状态方程不仅对于认识核物质是重要的, 它对于超新星和中子星的动力学的研究也起着重要作用. 而中心重离子碰撞是研究高密高温情况下核物质的一个理想工具, 对于碰撞中产生粒子的观测是研究的重要手段^[1-2].

兰州重离子冷却储存环(CSR)将是我国唯一一台工作中高能区的核物理实验装置, 它的物理目标之一是研究极端条件下核物质的性质. 在 CSR 上提供的重离子束可以有效地加热和压缩核物质, 这就为研究有限温度和有限密度条件下核物质的性质提供了极有利的实验条件.

CSR 能将重离子的动能加速到 600 A MeV(重核)—1 000 A MeV(轻核). 在此能量下的核-核碰撞中除了产生大量的核物质碎片外, 还要产生大量的 π 介子. 能量在 1 100 MeV 以下的单个核子-核子碰撞中不可能产生的 K 介子、 σ 介子、 η 介子和 ρ 介子等, 而在单核子具有这样能量的重离子与核的

收稿日期: 2002 - 03 - 21; 修改日期: 2002 - 07 - 08

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19975053, 10075057); 中国科学院知识创新工程重要方向性资助项目(KJCX2-SW-N02)

作者简介: 姜焕清(1939—), 男(汉族), 河南固始人, 研究员, 博士生导师, 从事强子物理和中能物理的理论研究.

碰撞中, 这些介子就有可能产生(被称为阈下产生). 由于 π 和 ρ 介子与 ΔN 的强耦合、 η 介子与 NN^* 的强耦合, 完整地认识有限温度和密度核物质时必须考虑介子, Δ 和 N^* 等自由度. 另一方面, 这些介子一旦产生, 它们处于有限温度和有限重子密度的环境中, 这些粒子的性质将与周围环境的重子密度有关. 理论研究表明, 在高温、高重子密度的环境中, 手征对称破缺会有部分恢复, 这时的介子和重子的性质将不同于它们在自由空间的性质. CSR 提供的重离子为研究极端条件下介子和重子的性质提供了极有利的条件, 这一研究还可直接提供手征对称破缺及其恢复的根源和动力学的信息.

国际上, 工作在这个能区的重离子实验装置除 CSR 外, 还有德国的 GSI 重离子加速器. 在 GSI 重离子加速器上, 对 1 A GeV 以下核-核碰撞中介子的产生已有一些研究, 取得了一些有重要意义的物理结果. 然而, 目前数据仍然很分散, 只限于少数核、少数能量. CSR 的建设为我国开展这一领域的实验研究将提供好的机遇. 因此, 及时开展这方面的理论研究也是十分必要的.

2 核-核碰撞中 π 介子产生

π 介子是最轻的强子, 是自旋 $s=0$ 的玻色子, 它可以在核内被产生和吸收. 它的同位旋 $T=1$, 有 3 种电荷状态. 带电的 π 介子质量为 139.6 MeV. 它可以通过弱作用发生衰变: $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu$, 寿命为 10^{-8} s. 众所周知, 核力的长程部分是由交换 π 介子而发生的. 因此, π 介子是研究强作用体系的最灵敏的探针. π 介子产生需要一定的能量. 在质子-质子碰撞中, 当质子在实验室系的能量大于 290 MeV 时, 可产生 π 介子, 而且产生截面随能量升高而增大, 直到 800 MeV. 在能量大于 500 MeV 的质子-质子碰撞中, π 介子产生截面可达几到几十 mb(p-p 总截面为 30—40 mb). 核子-核碰撞中, 由于运动学的理由, π 介子产生的阈能会降低. 可见, 在 CSR 能量下的核-核碰撞中会有大量的 π 介子产生.

核子-核碰撞中 π 介子产生机制有两类, 相干产生与非相干产生. 单举实验测得的 π 介子能谱大致包括两部分: 高能端的分离线谱和低能端的连续谱. 前者相应于 π 介子相干产生, 后者相应于非相干产生. 由于相空间和动量分配的原因, π 介子的非相干产生占主导地位.

类似地, 在核-核碰撞中, 当入射能量较低时, π 介子可以是相干产生, 也可以是非相干产生, 例如, $\text{He}^3 + \text{Li}^6 \rightarrow \pi^- + X$, (303 A MeV). 按照 N-N 碰撞 π 介子的最大动能可达 150 MeV, 而实验上, π 介子动能已达 760 MeV, 这样高能量的 π 介子只可能是通过相干过程产生. 1 A GeV 附近的核-核碰撞中 π 介子主要是通过非相干过程产生的. 1 A GeV 附近的核-核碰撞可以产生高密和高温物质, 反应通常发生在 10^{-23} s 的时间间隔, 在这个时间范围内, 物质的密度可有很大变化, 早期密度可达 3 倍正常核密度, 后期可以为正常核密度的 0.2 倍. 观察发射 π 介子的能谱, 可以给出形成高密和高温物质各阶段的信息.

在 π 介子动量为 200—500 MeV/c 时, 由于强的 π -N 作用, Δ 共振要形成. Δ 又要与核物质内的核子发生作用, 最后, Δ 衰变成 π 介子和核子. 这时发射的 π 介子是在后期发射的低能 π 介子. 而高能量的 π 介子与物质作用较小, 一旦产生就很快发射出去. 所以, 高能 π 介子是在反应的早期发射的, 它可以给出形成高密和高温物质阶段的信息^[3-4].

早期阶段发射的 π 介子被炮弹的旁观者屏蔽, 产生向靶快度区的 π 介子流. 后期阶段发射的 π 介子在靶快度区被靶的旁观者屏蔽, 产生向靶快度区的反流.

实验上, 对于一些碰撞体系, 在某些能量下 π 介子产生的相空间分布、出射 π 介子能谱、垂直于反应平面角分布、不同入射能量激发函数、中心度依赖和系统大小依赖等进行了一些测量. 图 1 中, 作为一个例子, 给出 1 A GeV 的 Au 与 Au 碰撞在 44° 测量的产生 π^+ 介子和 π^- 介子的能谱. 可以看出, π^+ 介子和 π^- 介子的产额比从低能端的 2.8 倍到高能端的 1.1 倍. Wagner 等^[4] 假定强作用的同位旋守恒, 而这种差别是由于产生 π 介子的源膨胀的结果. 膨胀的不同阶段产生 π 介子的区域的库仑作用就有差别. 他们认为, 高能量的 π 介子是在高温高密阶段发射的, 而低能量的 π 介子是在系统膨胀后的稀薄的重子密度中发射的.

中性 π 介子主要通过两光子衰变, 与 η 介子的衰变类似. 从这两种介子的微观结构来看, η 介子包含有奇异夸克成分, 而中性 π 介子只是由 u 和 d 夸克组成. 同时测量重离子碰撞中这两种介子的产生有助于认识它们的产生机制和反应动力学, 特别

有助于认识核-核碰撞中强子火球的形成^[5].

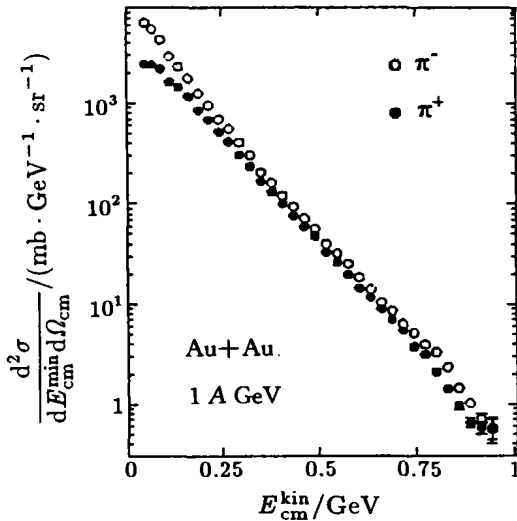
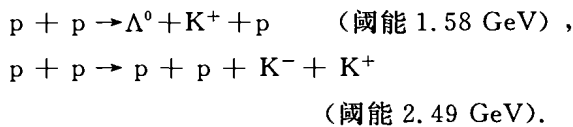


图 1 在 44°测得的 π^+ 介子和 π^- 介子的能谱^[4]

3 核-核碰撞中 K 介子产生

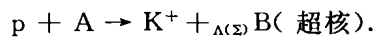
K 介子是奇异粒子, 自旋为 0, 宇称为负. 奇异介子 $s = \pm 1$, 质量为 494 MeV, 寿命为 10^{-8} s. 主要衰变道为 $K^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu$ (64%) 和 $K^\pm \rightarrow \pi^\pm + \pi^0$ (21%).

由于强作用中奇异数守恒, 核子-核子碰撞中 K 介子的产生必须伴随着另一个奇异粒子的产生. 在 1.5 GeV 以下, p-p 碰撞中不能产生 K 介子. 核子-核子碰撞中 K 介子是通过以下反应产生的,

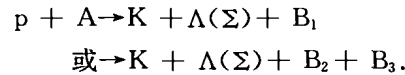


由于运动学的原因, 核子-核和核-核碰撞中 K 介子产生的阈能会降低. 在 CSR 能量下, 核子-核子碰撞中将有阈下 K 介子产生. 质子-核碰撞引起的 K 产生中, 入射粒子的动能要转换成 K 介子的质量并把一个核子变成超子, 或同时产生 K^- 和 K^+ .

核子-核碰撞中 K 介子产生反应也有两类, 相干产生与非相干产生. 例如, 如下是相干产生:



质子与原子核中的一个质子作用, 产生的 K^+ 飞出, 而产生的 Λ 或 Σ 停留在核内, 形成 Λ 或 Σ 超核. 在这种情况下, 确定方向出射的 K^+ 具有确定的能量. 另一类产生过程是非相干产生, 例如,



入射质子与原子核作用, 产生一个 K 介子, 同时把一个核子变成超子而发射出去. 单举 K 介子能谱是一个连续谱.

K^+ 介子与 K^- 介子与核子的作用很不相同. 考虑 K 介子的内部结构, K^- 介子是由 $\bar{u}s$ 夸克组成, K^+ 介子则由 $\bar{s}u$ 夸克组成. 在 K^- 介子与核子作用时, K^- 介子中的 \bar{u} 可以与核子中的 u 夸克湮灭, 形成超子激发态. 所以, K^- 介子与核子作用的结构比较复杂. K^+ 介子与核子的作用相对简单, 没有重子共振态, 作用较弱. 这样, K^+ 介子在核内就有一些独特性质. 例如, K^+ 介子与质子作用不同于 π 介子与质子作用, K^+ 介子与质子作用截面小得多; K^+ 介子在核内的平均自由程要大得多. 因此, K^+ 介子被认为是探测核物质内部行为的有用工具.

在 300 MeV/c 以下, K^+ -核子作用时, $l=1$ 的 s 波 (s_{11}) 振幅占支配地位, 其相移为 $\delta(s_{11}) = -kR$, 这里 R 大约为 0.32 fm. K^+ -核散射的研究中, 人们发现, 为解释 K^+ -核散射, 需要假定核内核子要比自由的核子胖一些. 正因为 K 介子与核作用的这些特点, 下面我们可以看到, 重离子碰撞中 K 介子的探测对于认识核状态有重要的意义.

质子-核碰撞中 K^+ 介子产生已经有了很多的研究. 产生截面与原子核的依赖关系可唯像地表示为 $\sigma \propto A^\alpha$, 在 $T_p = 1$ GeV 以下, α 接近于 1, 在 1—2.9 GeV, α 在 0.54—0.88 之间. 这似乎表明, 在 1 GeV 以下的产生截面与原子核中核子数成正比^[6].

在这样低能量的质子-核碰撞中, 实验上观察到了 K^+ 介子产生, 那么, K^+ 介子产生的物理机制是什么? 人们首先想到的是原子核中核子的费米运动. 以两等质量核-核碰撞为例, 由于核子在原子核内有费米运动, 在核-核质心系, 不同核子束流动能是核子-核子碰撞时可用的能量. 假定核子原子核中最大的费米动量为 270 MeV/c, 这样的核子-核子系统可用的能量 E 与束流动能 E_{cm}^{kin} 的关系如图 2 所示: 中间一条曲线表示两核子费米动量均为零的情况; 上面一条曲线表示能量最有利的情况, 即两核子费米动量均为最大, 而且弹核中的核子沿着束流方向运动, 靶核中的核子逆着束流方向运动; 下面一条曲线表示能量最不利的情况, 即两核子费米动量均为最大, 但弹核中的核子对着束流方向运

动, 靶核中的核子沿着束流方向运动. 图中也标出了在质心系 $NN \rightarrow N\Lambda K$ 和 $NN \rightarrow N\Delta$ 跃迁的阈能. 从图可以看出, 在最有利情况下, 产生 $NN \rightarrow N\Lambda K$ 和 $NN \rightarrow N\Delta$ 跃迁所需要的束流动能可以大大降低. 但是, 两核子费米动量均为最大的分布几率是非常小的. 因此, 由于核子的费米运动引起 K^+ 介子的阈下产生的截面是非常小的.

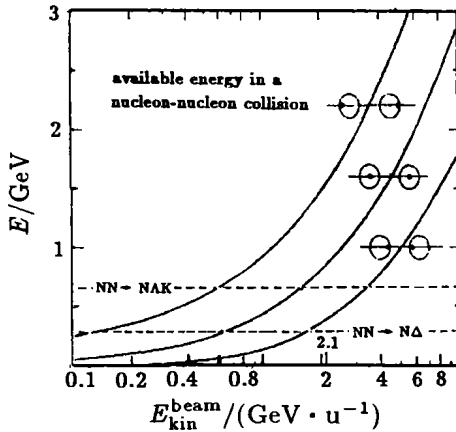


图 2 核子-核子碰撞中可用能量与束流动能的关系

如果碰撞系统中的许多核子参与了 K^+ 介子产生, 则情况就不一样了. 例如入射核子可以与靶核中的多个核子发生多次碰撞而产生 K^+ 介子. 这时, K^+ 介子产生的阈能会大大降低. 入射核子也可以与靶核中的核子碰撞而首先产生 π 介子, 产生的 π 介子再与其它核子作用产生 K^+ 介子. 总之, 这样的产生机制都需要核内多个核子的参与.

另外, 介子质量的存在表明手征对称的破坏. 研究表明, 在有限温度和密度的环境中, 手征对称可以部分恢复. 这表现在有限温度和密度的环境中的介子质量将不同于自由介子的质量. 这也会影响有限温度和密度的环境中的介子的产生过程.

因此, 可以预计 K^+ 介子产生过程将与核物质的性质密切相关. 对重离子反应中产生 K^+ 介子的观测不仅可以得到核物质状态方程的信息, 也可以研究手征对称破坏和部分恢复的机制^[8-10].

基于这些原因, 阈能附近核-核碰撞中 K^+ 介子产生的实验研究在国外已经开展了多年. 然而, 目前实验数据仍很零散. 在理论上, 对于 K^+ 介子阈下产生的物理机制仍不十分清楚. 图 3 给出了在 GSI 测量的不同能量的 C+C 和 Au+Au 碰撞时每核子所产生的 π 介子和 K^+ 介子的多重数. Au+Au

碰撞中每个核子产生 K^+ 介子的多重数是 C+C 碰撞时每核子所产生的 K^+ 介子多重数的 6 倍. 可见, 两种介子产生的介质效应是很不相同的, 它们随入射能量的依赖也是不同的. 研究表明, 这种差别不是由于相空间的差别, 不是由于集体效应, 而是与核物质的不可压缩系数相关. 量子分子动力学模型计算显示, 当核物质的不可压缩系数 $k=200$ MeV 时, 可以解释这种差别. 这显示核物质的状态方程是软的. 每核子 1 GeV 左右能量的重离子与核碰撞时要经历不同的阶段. 首先是核物质的压缩阶段, 形成高密物质, 在这个阶段由于核子-核子碰撞, 介子可能产生. 然后高密物质膨胀, 粒子发射. 同时研究不同的碰撞系统产生 π 介子和 K^+ 介子的能谱、激发函数、偏离核反应平面的分布、碰撞中心度的依赖以及系统大小的依赖等等, 将有利于我们认识介子产生的机制, 核物质的状态方程以及重离子反应动力学.

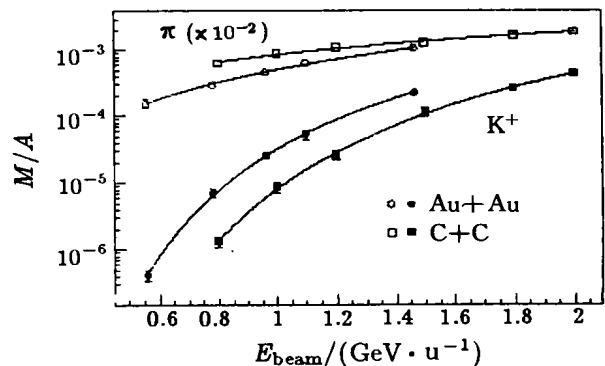


图 3 不同能量的 C+C 和 Au+Au 碰撞时每核子所产生的 π 介子和 K^+ 介子多重数^[10]

阈能附近重离子碰撞中 K 介子和反 K 介子的同时产生也有研究, 对于核物质的效应也做了讨论^[12].

总之, 能量在 1 A GeV 以下的核-核碰撞中要产生大量的 π 介子, K 介子和 η 介子也可以产生, 这已是客观存在. 由于 π 介子与 ΔN 的强耦合、 η 介子与 $N^* N$ 的强耦合, 要完整地认识高温、高密核物质性质时必须考虑介子、 Δ 和 N^* 等自由度. 1 A GeV 以下核-核碰撞中介子产生已有不少的研究, 结果表明介子的探测可以得到很有意义的信息, 但数据仍然很分散. 目前的数据主要来自 GSI, 且仅限于少数核、少数能量点. 在 CSR 上可以系统研究从阈下到阈上相干和非相干 π 介子产生的能量依

赖. 这对于认识其产生机制是有意义的. 在 CSR 上也可以系统进行阈下相干 K 介子产生和阈下相干 η 介子产生机制的研究. 这对于认识核物质的性质有重要意义.

CSR 给我们提供了很好的能量窗口, 为我们提供了良好的条件和机遇. 及时开展这方面的实验研究是有意义的和必要的. 当然, 实验具有挑战性.

参 考 文 献:

- [1] Stock R, Particle Productions in High Energy Nucleus-nucleus Collisions [J]. *Phys Rep*, 1986, **135**: 259.
- [2] 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 [J]. *Phys Rep*, 1991, **202**: 233.
- [3] Wagner A, Muentz C, Oeschler H, *et al.* Evidence for Different Freeze-out Radii of High- and Low-energy Pions Emitted in Au+Au Collisions at 1 A GeV [J]. *Phys Rev Lett*, 2001, **86**: 39.
- [4] Wagner A, Muentz C, Oeschler H, *et al.* Emission Pattern of High-energy Pions; A new probe for the early phase of heavy ion collisions [J]. *Phys Rev Lett*, 2000, **85**: 18.
- [5] Auerbeck R, Holzmann R, Metzger V, *et al.* Neutral Pions and Eta Mesons as Probes of the Hadronic Fireball in Nucleus-nucleus Collisions Around 1 A GeV, nucl-ex/0012007.
- [6] Buescher M, Loffe B L, Koptev V, *et al.* Phenomenological Analysis of K^+ Meson Production in Proton-nucleus Collisions [J]. *Phys Rev*, 2002, **C65**: 014603.
- [7] Efremov S V, Parvev E Ya. Subthreshold K^+ Meson Production in Proton-nucleus Reactions [J]. *Eur Phys J*, 1998, **A1**: 99.
- [8] Li G Q, Lee C-H, Brown G E. Kaons in Dense Matter, Kaon Production in Heavy-ion Collisions, and Kaon Condensation in Neutron Stars [J]. *Nucl Phys*, 1997, **A625**: 372.
- [9] Li G Q, Ko C M. Subthreshold Kaon Production and the Nuclear Equation of State [J]. *Phys Lett*, 1995, **B349**: 405.
- [10] Sturm C, Boettchler I, Debowski M, *et al.* Evidence for a Soft Nuclear Equation-of-state from Kaon Production in Heavy Ion Collisions [J]. *Phys Rev Lett*, 2001, **86**: 39.
- [11] Helmut Oeschler. Review of SIS Experimental Results on Strangeness [J]. *J Phys*, 2001, **G27**: 257.
- [12] Laue F, Sturm C, Boettchler I, *et al.* Medium Effects in Kaon and Antikaon Production in Nuclear Collisions at Subthreshold Beam Energies [J]. *Phys Rev Lett*, 1999, **82**: 1 640.

Meson Productions in Heavy Ion Reactions in CSR Energy Region*

JIANG Huan-qing

(Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator, Lanzhou 730000, China;
Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;
Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: It is important to measure meson productions in heavy ion collisions in order to understand the dynamics of heavy ion reactions and the properties of nuclear matter. In this paper we review the characteristic and present status of meson productions near the threshold energies in heavy ion collisions. Especially the pion and K^+ productions are discussed. We point out that it is meaningful and possible to carry out the experimental studies at the CSR. It is necessary to carry out timely the experimental and the relevant theoretical studies.

Key words: heavy ion reaction; meson production; equation of state

* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (19975053, 10075057); Chinese Academy of Sciences Knowledge Innovation Project (KJCX2-SW-N02)