

K、 π 介子产生中的量子统计效应*

陆 中 道

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

Z. Neda L. Csernai

(Department of Physics, Bergen University, Norway)

J. Sollfrank P. V. Ruuscanen

(Department of Physics, Helsinki University, Finland)

摘要 研究了200A GeV S + S和S + Ag碰撞中K、 π 介子产生的量子统计效应,并和实验结果进行了比较;理论计算再现了实验结果. 获取的freeze-out温度约为110MeV,重子密度约为 $0.05\rho_0$.

关键词 K、 π 介子产生 量子统计效应 freeze-out 温度 freeze-out 重子密度

1 引言

近几年K介子和 π 介子的产生以及它们的比率曾作为夸克-胶子等离子体(QGP)的一个可能讯号被广泛研究. 理论研究大都在强子理论框架内开展. 基于强子-强子碰撞或弦-弦碰撞,已有程序Fritiof^[1], Venus^[2], RQMD^[3]等. 加入重散射效应,它们能大致重现实验数据,大致反映出 K^+ / π^+ 比率从pp→pA→AA的增强^[4,5]. 这些模型都基于强子输运,含有很多参数,如碰撞截面、产生和吸取截面、阻止率等.

另一种方法是用量子统计理论研究高温高密度物质衰变时的粒子产生. P. Braun-Muzinger等人^[6]就用这个理论研究了相对论重离子碰撞中的粒子产生,计算得到的粒子之间的比率和实验测量结果相近,但他们得到的freeze-out温度为160—170MeV,高于QCD模拟计算的相变温度 $(150 \pm 10\text{MeV})$ ^[7],不好理解. 本文用火球模型和量子统计理论研究相对论重离子碰撞中的粒子产生. 假设在相对论重离子碰撞中形成一个极端高温和极端高密度的火球. 火球由强子气体组成. 气体物质之间相互作用,交换能量,并不断产生和吸收粒子,使气体物质处于统计热平衡和化学平衡状态下. 然后强子气体膨胀直

1997-11-3收稿

* 国家自然科学基金和核工业科学基金资助

到 freeze-out. 在膨胀过程每一步, 强子气体都处于热平衡和化学平衡状态下. 对每核子 200GeV S + S 和 S + Ag 碰撞中 K 介子和 π 介子多重数以及它们的比率进行了计算并和实验数据进行了比较. 比较表明, 计算结果能很好重现实验数据. 获取的 freeze-out 温度约为 110MeV, 远低于相变温度. freeze-out 的重子密度约为 $0.05\rho_0$.

2 公式

强子气体由重子和介子组成, 它们分别是费米子和玻色子. 某种粒子单位体积热力学势可写成

$$\Omega = \mp \frac{T}{(2\pi)^3} \int d^3q \ln(1 \pm e^{\beta(\mu - \varepsilon)}) \quad (1)$$

其中 $\beta = \frac{1}{T}$, T 为气体温度, $\varepsilon = \sqrt{q^2 + m^2}$ 为粒子能量, μ 为粒子化学势. \pm 分别相对于

费米子 (+) 和玻色子 (-). 由热力学势就可导出热力学量: 粒子密度为 $n = -\frac{\partial \Omega}{\partial \mu} \Big|_T$,

熵密度为 $\sigma = -\frac{\partial \Omega}{\partial T} \Big|_\mu$, 能量密度为 $e = n\mu + \frac{\partial(\beta\Omega)}{\partial \beta} \Big|_\mu$, 压强为 $p = -\Omega$, ... 给定

核子化学势 μ_N 和 K 介子化学势 μ_K , 其它粒子化学势可以从强子相互作用导出. 如从 $NN \rightarrow NN\pi$ 导出 $\mu_\pi = 0$, 从 $NN \rightarrow N\Lambda K$ 和 $NN \rightarrow N\Sigma K$ 导出 $\mu_\Lambda = \mu_\Sigma = \mu_N - \mu_K$, ... 图 1 表示核子化学势和 K 介子化学势随重子密度和核温度的变化. K 介子的化学势总是比核子的化学势小. 化学势是产生粒子的势垒. 因此 K 介子比核子容易产生. π 介子的化学势为

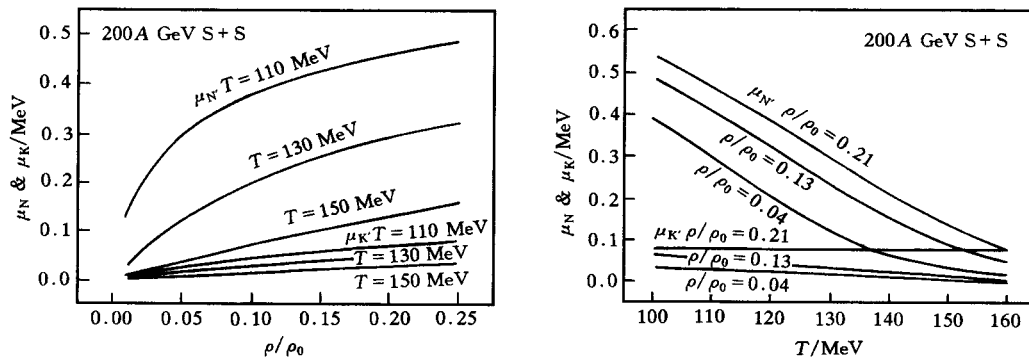


图1 核子化学势和K介子化学势随重子密度和核温度的变化

0, 最容易产生. 在相对论重离子碰撞中将有大量 π 介子产生. 重子密度增加, 化学势增加, 意味着在高密度物质中粒子产生受到压制. 随核温的增加, 化学势减少. 高温环境有利于粒子产生.

3 结果和讨论

在相对论重离子碰撞中,核子之间的激烈碰撞将产生大量的粒子、共振态以及反粒子.在计算中包含带奇异数和不带奇异数的重子和介子.重子包含核子族(奇异数 $s = 0$), Λ 超子族和 Σ 超子族 ($s = -1$), Ξ 超子族 ($s = -2$), Ω 超子 ($s = -3$).介子包含 π 介子族 ($s = 0$)和 K 介子族 ($s = \pm 1$).质量小于 2GeV 的粒子都已包括了进来.它们的反粒子亦已包含进来.计算中考虑了重子数守恒和奇异数守恒.总重子数由参加碰撞的核子数给出,由实验确定.总奇异数保持为零.

表1 每核子 $200A$ GeV S+S和S+Ag中心碰撞中K介子和 π 介子的平均多重数及它们比率.结果取自 $T \approx 110\text{MeV}$ 和 $\rho/\rho_0 \approx 0.05$

	$\langle N_{\text{part}} \rangle$	$\langle \pi^- \rangle$	$\langle K^+ \rangle$	$\langle K^+ / \pi^+ \rangle$	$\langle K^- \rangle$	$\langle K^- / \pi^- \rangle$	$\langle K^+ / K^- \rangle$
for $200A$ GeV S+S central collision							
exp.*	54 ± 6	$91 \pm 5^{**}$	12.5 ± 0.4	0.137 ± 0.08	6.9 ± 0.4	0.076 ± 0.05	1.81 ± 0.12
cal.	54	90.9	13.0	0.143	7.59	0.084	1.72
VENUS*			10.57	0.117	7.48	0.083	1.41
FRITIOF*			9.35	0.102	7.02	0.077	1.33
for $200A$ GeV S+Ag central collision							
exp.*		$158 \pm 8^{**}$	17.4 ± 0.4	0.117	9.6 ± 1.0	0.064	
cal.	92	155.8	19.8	0.127	11.1	0.071	1.78

* 取自参考文献[9], ** 取自参考文献[10].

实验测量所对应的核物质状态是 freeze-out 时的状态.此时核温已降低,核物质已变稀.表1是对每核子 $200A$ GeV S+S 和 S+Ag 中心碰撞中 k 介子和 π 介子的平均多重数及它们比率的计算结果.即使对于对称系统,中心碰撞中也不是所有粒子都参与碰撞.根据参考文献[8],S+S 碰撞中平均只有 54 个粒子参与碰撞,占粒子总数的 84.3%.计算中,用 54 个粒子组成的反应系统进行计算.至于 S+Ag 碰撞中计算所用的 94 个参加粒子,是由对心碰撞时圆柱体内的总粒子数乘 84.3% 得到.与实验结果^[9,10]相比较,我们不仅比较了 K^+ / π^+ , K^- / π^- , K^+ / K^- 三个比率,而且也比较了 π^- , K^+ , K^- 三个多重数.发现核温度在 110MeV 附近,重子密度在 $0.05\rho_0$ (ρ_0 为通常核密度)附近,这些量能同时与实验值有很好的符合.在 freeze-out 以后,所有 ρ 介子将通过 $\rho \rightarrow \pi\pi$ 和 89% 的 ω 介子将通过 $\omega \rightarrow \pi\pi\pi$ 进行衰变. π 的多重数中我们已计及它们的贡献,约占总数的 10%—15%.表中也给出由文献[9]提供的 Fritiof 和 Venus 的计算结果.我们的模型只有两个参数:温度和重子密度.总重子数和总奇异数是守恒量,由反应系统初始给定.我们的计算没有计及火球在膨胀过程中的粒子发射,它们会影响粒子多重数的精细结果以及它们的比率,但不会影响总的趋势和结果.顺便指出,表中给出的结果是 K 和 π 在同一温度和同一重子密度下的结果.仔细计算表明,如对 K 介子用略高的温度和略高的重子密度计算,则和实验值符合更好.说明 K 比 π 要略早 freeze-out.计算表明在相对论重离子碰撞的 K、 π 产生中,量子统计效应起着决定性的作用.至于这个效应对其它粒子产生所起的作用正在研究之中.

我们得到的 freeze-out 温度约为 110MeV, 重子密度约为 $0.05\rho_0$. 这个温度比 QCD 模拟计算的相变温度低很多. 这容易理解, 因为强子气体经过膨胀密度和温度都已降低. P. Braun-Munzinger 等人^[6]用量子统计理论计算了 freeze-out 时各种粒子之间的比率, 结果和实验测量符合较好, 但没有给出多重数. 得到的 freeze-out 温度为 160—170MeV, 高于相变温度, 不好理解.

4 小结

用火球模型和量子统计理论计算了 200A GeV S + S 和 S + Ag 中心碰撞中的 K、 π 多重数和它们的比率. 计算结果十分接近实验结果. 说明量子统计效应在 K、 π 产生中是十分重要的效应. 计算提取的 freeze-out 温度为 ~ 110 MeV, 重子密度为 $\sim 0.05\rho_0$.

参 考 文 献

- [1] Aderson B et al. Nucl. Phys., 1987, **281**:286
- [2] Werner K. Phys. Rev. Lett., 1989, **62**:2460
- [3] Bøggild H et al. NA44 collab., Phys. Letts., 1995, **B349**:386
- [4] Sa Benhao, Tai An, Lu Zhongdao. Phys. Rev., 1995, **C52**:2069
- [5] Sa Benhao, Tai An, Lu Zhongdao. High Energy Phys. And Nucl. Phys. (in Chinese), 1995, **19**:1019
(萨本豪, 台安, 陆中道, 高能物理与核物理, 1995, **19**:1019)
- [6] Braun-Munzinger P, Stachel J, Wessels J P, Xu N. Phys. Letts., 1996, **B365**:1
- [7] Detar C. Nucl. Phys., 1995, **B42**:73
- [8] Bächler J et al. NA35 collab., Z. Phys. Particles and Fields, 1991, **51**:157
- [9] Marek Kowalski for NA35 collab., Nucl. Phys., 1992, **A544**:609c
- [10] Alber T et al. NA35 collab., Z. Phys., 1994, **C64**:195

Quantum Statistical Effect in Production of K and π Mesons*

Lu Zhongdao

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

Z. Neda

L. Csernai

(Department of Physics, Bergen University, Norway)

J. Sollfrank

P. V. Ruuscanen

(Department of Physics, Helsinki University, Finland)

Abstract The quantum statistical effect for K and π production in 200A GeV S + S and S + Ag collisions is studied. The calculated results reproduce the experimental data well. The extracted freeze-out temperature is $\sim 110\text{MeV}$ and the baryon density is $\sim 0.05\rho_0$.

Key words K & π production, quantum statistical effect, freeze-out temperature, freeze-out baryon density

Received 3 November 1997

* Supported by the National Natural Science Foundation of China and the Science Foundation of Chinese Nuclear Industry