

S + W 中心碰撞的奇异粒子产生*

陈 志 叶云秀 阮图南

(中国科学技术大学近代物理系 合肥 230026)

萨 本 豪

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

台 安

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 用相对论核-核碰撞的事例产生器——LUCIAE产生和分析了200A GeV S + W 中心碰撞中的奇异介子 K_s^0 、奇异重子 Λ 和 $\bar{\Lambda}$ ，给出了它们的产额对横质量的分布及奇异介子对奇异重子的产生比，并与实验数据进行了比较。

关键词 事例产生器 横质量分布 产生比 QGP

1 引言

目前一般认为，实验室内使夸克解禁的唯一方法，是通过相对论性重离子碰撞。有许多文章指出，在相对论性重离子碰撞中，可能产生一种新的物质态——夸克胶子等离子体(QGP)^[1]。由于在QGP相下，产生奇异夸克的阈值($\sim 300\text{MeV}$)远小于强子物质相(HP)产生奇异夸克的阈值($\sim 600\text{MeV}$)，因此QGP相更容易产生奇异粒子，其化学平衡时间相应也远小于强子相。相对论性重离子碰撞中的奇异粒子增强已被预言为探测QGP的有力信号^[1]，也有助于人们理解相对论性重离子碰撞的动力学过程^[2]。由于QGP的形成需要很高的温度和很大的密度，而横动量 p_t (横质量 m_t) 分布与反应区达到的温度密切相关，因此研究奇异粒子横质量的分布也有很重要的意义。另外，由于对强子形成的时间常数所知甚少，特别是介子和重子可能由不同的动力学过程产生，这样它们的相对丰度就可能不符合相对化学平衡规则，因此研究奇异介子和奇异重子产额的比值也是令人感兴趣的^[3]。

自从七年前 NA35 的结果^[4]发表以来，有很多实验^[5]也报道了相对论性核-核碰撞中

1997-10-24收稿

* 国家自然科学基金资助

奇异粒子产额大于同能量核子-核子碰撞几何叠加的相应产额, 似乎表明 QGP 确实存在. 最近文献[6]用 HIJING 和 VENUS 进行模拟, 认为不需引入 QGP 就能解释奇异粒子增强的实验现象, 但是不能解释奇异粒子的横动量 p_t 分布.

本文将用 LUCIAE^[7]事例产生器来分析 WA85 组的 200A GeV 的 S+W 中心碰撞中奇异介子 K_s^0 和奇异重子 $\Lambda, \bar{\Lambda}$ 的数据^[3], 给出它们的产额对横质量的分布及奇异介子和奇异重子产额的比值, 并与实验数据进行比较.

2 LUCIAE 事例产生器概述

LUCIAE 是一个 Monte Carlo 事例产生器, 它建立在 FRITIOF^[8] 的基础上, 但作了某些改进: 用 Firecracker 模型 (FCM) 描述辐射胶子时各条弦间的集体作用^[9], 并考虑了产生粒子在核内的再散射^[10].

FRITIOF 模型认为, 两强子碰撞时发生了许多小的彼此无关的动量转移, 若一个小的动量转移含有大的横动量部分, 则视为 Rutherford 部分子散射 (RPS), 用 PYTHIA 来处理, 并且不考虑碰撞时的色交换. 在 FRITIOF 中, 两强子通过动量转移而激发, 形成色偶极子, 按软辐射模型发射韧致胶子. 退激发的强子被描述为 LUND 弦, 按 LUND 弦的碎裂机制衰变为末态产物.

FRITIOF 中的强子实际上是一条无质量的相对论性的弦, 弦间的相互作用类似于第二类超导体中涡旋线的约束色力场. 实际上, 在相对论性核-核碰撞中一般会形成许多互相靠近的弦, 它们将受到这种力的作用, FRITIOF 未考虑这一点, 但在 LUCIAE 中加上了 FCM 来描述这一作用. FCM 假定相邻的弦组成群, 群相当于相互作用的量子态, 它具有大的能量密度, 影响韧致胶子的发射和碎裂性质^[9].

LUCIAE 还增加了再散射模型^[10], 此模型假设产生粒子和参与 (受伤) 核子随机分布于一定参数下的弹核与靶核之间的几何交叠区内, 靶 (弹) 旁观者随机分布于交叠区域外, 但在靶 (弹) 球之内. 产生粒子和受伤核子的动量在 FRITIOF 中已有输出, 旁观者的初动量取为: 它们均分弹核的纵动量, 横动量模按二维高斯分布抽样:

$$f(p_i) dp_i = C p_i \exp(-p_i^2 / \langle p_i^2 \rangle) dp_i, \quad (1)$$

$\langle p_i^2 \rangle$ 取为 20—40 MeV². 方位角分布服从 $[0, 2\pi]$ 均匀分布, 最后一个旁观者的横动量由质-能关系来确定.

有了上述初动量, 就可发展再散射级联过程. 在再散射过程中, 运动中的强子被视为经典的点粒子, 在两次连续碰撞之间的轨迹为直线, 而碰撞发生与否按两粒子最近距离 d_{dim} 是否小于 $\sqrt{\sigma_{\text{tot}} / \pi}$ 确定, σ_{tot} 为总截面.

LUCIAE 考虑了弹性散射和非弹性散射, 弹性散射的发生按以下条件确定:

发生碰撞的两粒子 i 和 j , 若在它们的质心系中, $\sigma_{\text{el}} / \sigma_{\text{tot}} \geq \xi$ (ξ 为 $[0, 1]$ 随机数), 则认为是弹性碰撞. 散射都在碰撞粒子的质心系中进行.

弹性碰撞的动量转移 t 服从^[11]:

$$d\sigma / dt \approx \exp(Bt), \quad (2)$$

$$B = \frac{\varepsilon^6}{1 + \varepsilon^6} A, \quad (3)$$

$$\varepsilon = 3.65 (\sqrt{s} - m_1 - m_2), \quad (4)$$

$$A = \min[10.3, (1.12 \langle p_t \rangle)^{-2}], \quad (5)$$

这里 \sqrt{s} 是两碰撞粒子的质心能量, m_1, m_2 分别为两碰撞粒子质量, $\langle p_t \rangle$ 是再散射粒子的平均动量转移, 满足 $0.2\text{GeV} < \langle p_t \rangle < 0.4\text{GeV}$. 于是得到

$$t = \frac{1}{B} \ln[\xi + (1 - \xi) \exp(Bt_0)], \quad t_0 = -4(p_i^*)^2, \quad (6)$$

其中 ξ 为 $[0, 1]$ 随机数, p_i^* 即散射前动量. 散射后的极角 θ^* 由下式确定:

$$t = -2(p_i^*)^2 (1 - \cos\theta^*), \quad (7)$$

散射后方位角在 $[0, 2\pi]$ 内抽样. 由于是弹性碰撞, 反应前后粒子动量模不变.

对非弹性散射, LUCIAE 考虑的末态包含奇异粒子的非弹性散射道可归类如下:

$$\begin{aligned} \pi + \pi &\leftrightarrow \bar{K} + K, & \pi + \bar{N} &\leftrightarrow \bar{K} + Y, \\ \pi + N &\leftrightarrow \Delta + \pi, & \bar{K} + N &\leftrightarrow \pi + Y, \\ \pi + N &\leftrightarrow \rho + N, & K + \bar{N} &\leftrightarrow \pi + \bar{Y}, \\ N + N &\leftrightarrow \Delta + N, & K + \bar{N} &\leftrightarrow \bar{K} + \bar{E}, \\ \pi + N &\leftrightarrow K + Y, & \bar{K} + N &\leftrightarrow K + E, \\ \pi + \bar{Y} &\leftrightarrow \bar{K} + \bar{E}, & \pi + Y &\leftrightarrow K + E, \\ K + \bar{Y} &\leftrightarrow \pi + \bar{E}, & \bar{K} + Y &\leftrightarrow \pi + E, \\ \pi + \bar{E} &\leftrightarrow \bar{K} + \bar{Q}, & \pi + E &\leftrightarrow K + \bar{Q}, \\ K + \bar{E} &\leftrightarrow \pi + \bar{Q}, & \bar{K} + E &\leftrightarrow \pi + \bar{Q}, \end{aligned}$$

NN, YN 湮没,

这里 $Y = \Lambda$ 或 Σ , 其余未考虑的道 (如 $N + N \rightarrow N + Y + K$) 按弹性散射处理. 为了简化, NN, πN , KN, $\pi\pi$ 的弹性散射、非弹性散射、总截面均取为常数:

$$\sigma_{\text{tot}}^{\text{NN}} = 40\text{mb}, \quad \sigma_{\text{tot}}^{\pi N} = 25\text{mb}, \quad \sigma_{\text{tot}}^{\text{KN}} = 35\text{mb},$$

$$\sigma_{\text{tot}}^{\pi\pi} = 10\text{mb}, \quad \sigma_{\text{inel}} / \sigma_{\text{tot}} = 0.75 - 0.85,$$

$\pi\pi \rightarrow \bar{K}K$ 的截面取为 3.0mb , 对 $\pi N \rightarrow KY$ 及其它奇异夸克产生截面, 采用同位旋平均参数化公式处理^[2], 并考虑了各道阈能. 奇异夸克交换反应如 $\bar{K}N \rightarrow \pi Y$, 假设其截面为奇异夸克产生反应截面的十倍. 求逆反应截面时, 利用了细致平衡假设.

非弹性散射中, 被散射粒子末态的动量 p_i^* 、能量 E_i^* 大小由在质心系中的运动学确

定:

$$E_i^* = (s - m_j^2 + m_i^2) / 2\sqrt{s}, \quad (8)$$

$$|p_i^*| = \sqrt{(s - (m_i + m_j)^2)(s - (m_i - m_j)^2)} / 2\sqrt{s}, \quad (9)$$

动量方向按 4π 立体角抽样,但对介子和重子间的再散射,假定末态重子继续沿入射重子在二粒子质心系中的方向前进.

再散射级联过程结束后,强子均用 LUND 弦描述,它按 LUND 碎裂模型转化为末态产物,具体由 JETSET 子程序执行;这里关键的物理量是有效弦张量,它是单位长度弦具有的能量. JETSET 中与奇异粒子产生及介子、重子比有关的模型参数是:

PARJ(1): 弦色场中产生双夸克对与产生夸克对的几率比;

PARJ(2): 弦色场中产生奇异夸克对与产生 u 或 d 夸克对的几率比,亦即 s 夸克压低因子;

PARJ(3): 弦色场中产生奇异双夸克对与产生奇异夸克对的几率比,亦即 s 双夸克对的额外压低因子.

它们都与有效弦张量有关.

在 LUND 弦碎裂模型中原先认为 PARJ(2) 等是常数,后来实验事实表明:它们非但与能量有关,与相空间也有关,不难直观地想像:碰撞越剧烈,弦间集体相互作用愈强,有效弦张量越大,s 夸克压低因子也就愈大.文献[12]揭露了相对论性核-核碰撞中奇异夸克压低相对于同能量核子-核子碰撞约化的现象,它是相对论性核-核碰撞中奇异产生增强的非 QGP 解释中除(弦-弦)集体相互作用和再散射外的第三个重要因素.本文用模型参数: PARJ(1) = 0.05, PARJ(2) = 0.4 和 PARJ(3) = 0.2 来分析 WA85 的数据.

3 结果和讨论

文献[3]在实验上研究了 K_s^0 、 Λ 和 $\bar{\Lambda}$ 在中心快度区的产生,作出了 K_s^0 、 Λ 和 $\bar{\Lambda}$ 的横质量 (m_t) 谱,给出了 K_s^0 / Λ 和 $K_s^0 / \bar{\Lambda}$ 的产生比,所取的运动学区域为横动量 $p_t > 1\text{GeV}$ 和 $2.5 < y_{\text{lab}} < 3.0$,这是一个很小的窗口.本文用 LUCIAE 进行了模拟,为了与他们的结果进行比较,所取运动学区域与他们一致,并且还考虑了因 $\Xi(\bar{\Xi})$ 衰变引起的压低效应修正.应当注意,由于 WA85 组无法识别电磁衰变 $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda\gamma$,他们的 $\Lambda(\bar{\Lambda})$ 实际上指 $\Lambda + \Sigma^0(\bar{\Lambda} + \bar{\Sigma}^0)$ ^[3],本文的 $\Lambda(\bar{\Lambda})$ 也与他们有相同的含义.

利用 [13],有

$$\frac{1}{p_t} \frac{d\sigma}{dp_t} \propto \frac{1}{T} \sqrt{m_t} e^{-m_t/T}, \quad (10)$$

其中 T 为温度, σ 为产生截面. 又由 $m_t^2 = p_t^2 + m^2$ (m 为粒子质量) 推得

$$m_t dm_t = p_t dp_t, \quad (11)$$

从而 m_t 谱分布^[3]满足:

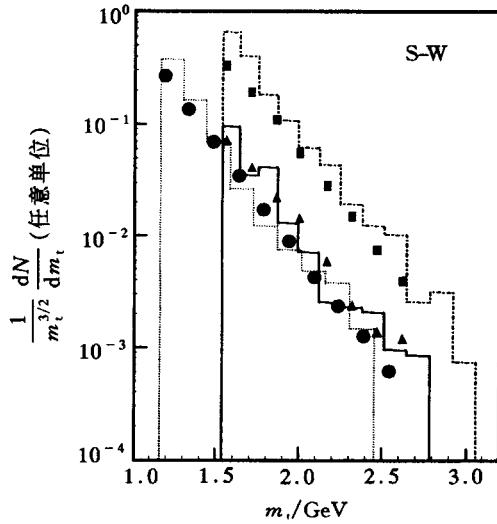


图1 $\frac{1}{m_t^{3/2}} \frac{dN}{dm_t} - m_t$ 分布图

实线、点线和虚线分别为 $\bar{\Lambda}$ 、 $K_s^0/2$ 和 Λ 的理论计算曲线；

▲、●和■分别为 $\bar{\Lambda}$ 、 $K_s^0/2$ 和 Λ 的实验点。

$$\frac{1}{m_t^{3/2}} \frac{dN}{dm_t} = A e^{-\beta m_t}, \quad (12)$$

其中 A 、 β 为常数, 并且 $1/\beta = T$.

计算所得 $\frac{1}{m_t^{3/2}} \frac{dN}{dm_t} - m_t$ 分布见图 1,

可以看到与 WA85 组的结果类似, β 是一常数, K_s^0 、 Λ 的结果与 WA85 组符合得很好, 而 $\bar{\Lambda}$ 的起伏要大一些. 根据 LUCIAE 结果, 将计算的和 WA85 实验的 $1/\beta$ 值列于表 1. 与 WA85 的结果相比, LUCIAE 的 K_s^0 的 $1/\beta$ 值与 WA85 的结果几乎处于 WA85 的误差范围内, Λ 的结果稍差, $\bar{\Lambda}$ 则明显小于 WA85 的结果, 说明 $\bar{\Lambda}$ 产额在 LUCIAE 中随 m_t 增加下降得更快些, 这可能是由于 $\bar{\Lambda}$ 的产额比 K_s^0 、 Λ 的产额低得多, 涨落对 $\bar{\Lambda}$ 的影响比对 K_s^0 、 Λ 的要大, 从而使 m_t 分布与实验值有一定的偏离.

介子对重子的产生比见表 2. 由于 LUCIAE 的 Λ 的产额偏大, 本文的 K_s^0/Λ 大约是 WA85 组结果的 60%, 但 $K_s^0/\bar{\Lambda}$ 的值,

表1 200A GeV S+W中心碰撞中各奇异粒子的 $1/\beta$ 值

$\frac{1}{\beta} / \text{MeV}$	计算	K_s^0	Λ	$\bar{\Lambda}$
	WA85		215	220
		219±3	239±3	237±4

表2 200A GeV S+W中心碰撞中介子对重子的产生比 ($2.5 < y_{\text{lab}} < 3.0$)

比 率		$p_t > 1 \text{ GeV}$	$m_t > 1.5 \text{ GeV}$	$m_t > 1.9 \text{ GeV}$
K_s^0/Λ	LUCIAE	0.771	0.146	0.159
	LUCIAE*	1.21	0.229	0.282
	WA85	1.43±0.10	0.25±0.02	0.22±0.02
$K_s^0/\bar{\Lambda}$	LUCIAE	6.11	1.12	1.49
	LUCIAE*	8.68	1.59	1.76
	WA85	6.45±0.61	1.16±0.08	0.87±0.09

LUCIAE 与 WA85 结果比较接近, 尤其是 $p_t > 1 \text{ GeV}$ 的结果. $K_s^0/\bar{\Lambda}$ 的值在大 m_t 区与实验结果的偏离同样可以认为是涨落的作用. 另外, 由于本文在计算中把所有的 Σ^0 ($\bar{\Sigma}^0$) 均认为是 Λ ($\bar{\Lambda}$), 考虑到 Σ^0 ($\bar{\Sigma}^0$) 在再散射过程后与别的粒子可能发生的非弹性碰撞, 降低了 Σ^0 ($\bar{\Sigma}^0$) 在电磁衰变中的浓度, 因此产生比结果应该偏小. 由于 Σ^0/Λ 在本文所取的相空间中大约为 0.6, 并且产生的 Λ 和 K_s^0 相差不多, 因此 K_s^0/Λ 偏小得更多一些; 而 $\bar{\Sigma}^0/\bar{\Lambda}$ 随 $p_t(m_t)$ 的增大, 逐渐从 0.4 ($p_t > 1 \text{ GeV}$) 下降到 0.2 ($m_t > 1.9 \text{ GeV}$), $\bar{\Sigma}^0$ 对 $K_s^0/\bar{\Lambda}$ 的影响, 并不是很显著 (为便于比较, 在表 2 中也列出了不包含 Σ^0 的 K_s^0/Λ 及 $K_s^0/\bar{\Lambda}$, 并以 * 号标

出). 当然, 即使考虑了以上这些影响产生比的因素, LUCIAE 中 Λ 的增强还是较明显的, 但这一增强与 s 夸克压低因子的关系不大, 选取不同的 $PARJ(i)$, $i = 1-3$ 值进行模拟, 结果 K_s^0 / Λ 均稳定在 0.7 左右, 说明弦张量并不是影响 LUCIAE 的 K_s^0 / Λ 的主要因素. 注意到由于强子化过程的不同, 介子和重子并不需要处于共同的平衡态, 而在 LUCIAE 中经过再散射后, Λ 和 K_s^0 达到了化学平衡, 如果这一平衡并未达到, 它们的比值与 LUCIAE 的预测不同也是很可能的. LUCIAE 中过多的 Λ 似乎是重子和介子未达到化学平衡态的一个信号.

综上所述, 对 200A GeV S+W 中心碰撞 ($p_t > 1\text{GeV}$ 和 $2.5 < y_{\text{lab}} < 3.0$), 没有引入 QGP 产生机制的 LUCIAE 能很好地描述奇异粒子 K_s^0 、 Λ 、 $\bar{\Lambda}$ 的横质量 m_t 分布, 产生比 $K_s^0 / \bar{\Lambda}$ 与实验结果基本一致, 但 LUCIAE 给出的 Λ 有一接近二倍的增强, 这可能给出 200A GeV S+W 中心碰撞中介子和重子没有达到共同的化学平衡态的一个信号.

感谢郑玉明教授等的有益讨论.

参 考 文 献

- [1] Jacob M, Tran Van J. Phys. Rep., 1982, **88**:321—324; Rafelski J, Phys. Rep., 1982, **88**:331—348
- [2] Rafelski J, Muller B. Phys. Rev. Lett., 1982, **48**:1066—1069
- [3] Abatzis S, Andrighetto A, Antinori F et al. WA85 coll., Phys. Lett., 1996, **B376**:251—254
- [4] Bartke J, Bialkowska H, Bock R et al. NA 35 Colla., Z. Phys., 1990, **C48**:191—200
- [5] Andersen E, Blaes R, Brom J M et al. NA36 Colla., Phys. Lett., 1993, **B316**:603—607
- [6] Topor Pop V., Gyulassy M, Wang X N et al. Phys. Rev., 1995, **C52**:1618—1629
- [7] Sa Ben-Hao, Tai An. Comp. Phys. Commu., 1995, **90**:121—140
- [8] Pi Hong. Comp. Phys. Commu., 1992, **71**:173—192; Andersson B, Gustafson G, Pi Hong. Z. Phys., 1993, **C57**: 485—494
- [9] Andersson B, Henning Peter A. Nucl. Phys., 1991, **B355**: 82—105
- [10] Sa Benhao, Wang Zhongqi, Zhang Xiaoze et al. Phys. Rev., 1993, **C48**: 2995—2998
- [11] Cugnon J, Mizutani T, Vandermeulen J. Nucl. Phys., 1981, **A352**: 505—534
- [12] Sa Benhao, Tai An. Phys. Lett., 1997, **B399**: 29—34
- [13] Hagedorn R. Riv. Nuovo Cimento, 1983, **6**(10): 1—50

Strange Particle Production in S + W Central Collisions*

Chen Zhi Ye Yunxiu Ruan Tunan

(Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Sa Benhao

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

Tai An

(Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract The event generator LUCIAE has been used to simulate relativistic nucleus-nucleus collisions. The strange meson K_s^0 and strange baryons Λ and $\bar{\Lambda}$ production in S + W central collisions at 200A GeV has been analyzed. The transverse mass spectrum for them and relative production rates of strange meson to strange baryon are obtained and compared to the data of experiments.

Key words event generator, transverse mass spectrum, relative production rate, QGP

Received 24 October 1997

* Supported by the National Natural Science Foundation of China