

相对论性核碰撞中 ϕ 介子增强*

萨本豪^{1;1)} 王晓荣² 陆中道¹
苏宗漆¹ 蔡勳²

1 (中国原子能科学研究院 北京 102413)

2 (华中师范大学粒子物理研究所 武汉 430079)

摘要 用强子和弦级联模型 LUCIAE 系统地研究了相对论性 $p+p$ 和 $Pb+Pb$ 碰撞中 ϕ 介子产生. 在模型框架内实验测得的 $158A$ GeV/c $Pb+Pb$ 碰撞中 ϕ 介子产额相对于同能量 $p+p$ 碰撞的增强现象, 依赖于弦发射胶子的集体效应和奇异夸克压低约化两机制, 在一定程度上能得到解释.

关键词 奇异增强 再散射 弦发射胶子的集体效应 奇异夸克压低的约化 LUCIAE 模型

相对论性核-核碰撞是当今粒子物理与核物理交界的热门研究课题. 在这类碰撞的初期可能发生由通常核物质到夸克-胶子等离子体(QGP)相变. QGP 是物质新形态, 估计只在宇宙大爆炸后最初几百万分之一秒内出现过. 倘若在相对论性核-核碰撞中果然看到 QGP 相变, 其意义非常重大.

迄今已建议许多诊断 QGP 相变的信号. 其中奇异增强被普遍认为是最有希望者之一. 奇异粒子指含奇异夸克(s)组份的粒子, 如 Λ , Ξ 和 Ω 粒子是分别含 1 个、2 个和 3 个 s 夸克的奇异粒子. 奇异增强则指相对论性核-核碰撞中奇异粒子与 π 介子产额比大于同能量质子-质子碰撞中该产额比.

奇异增强作为诊断手段是 80 年代初建议的^[1,2]. 奇异增强实验随之也获迅速发展^[3-5]. 特别是前不久 WA97 实验组在 $158A$ GeV/c $Pb+Pb$ 碰撞中观测到奇异增强尚随所含 s 夸克组份之增而增的事实^[6], 更引起同行普遍关注; 有关理论解释工作尚在发展中.

Λ , Ξ 和 Ω 都是重子, ϕ 则是由 s 和 \bar{s} 构成的介子. ϕ 介子增强是 80 年代初被建议为诊断 QGP 的信号^[7]. NA49 实验组最近完成的每核子 158 GeV/c $p+p$ 和 $Pb+Pb$ 碰撞中 ϕ 介子产额、快度分布和横质量分布等系统性实验数据^[8], 急待有理论解释.

我们已用相对论性核-核碰撞模型 LUCIAE, 系统地研究过奇异增强^[9-14], 特别是在^[13]中成功地解释了 WA97 的奇异增强随粒子中 s 夸克组份之增而增的事实. 除 LUCIAE

2001-05-14 收稿

* 国家自然科学基金(19975075)资助

1) 中国科学院理论物理研究所客座研究员

外尚有不少理论模型研究奇异增强取得不同程度的成功. 诸如含 QGP 假设的热模型(统计模型)^[15-17], 含奇异饱和因子的费米气体模型^[18], HIJING^[19] 和含重子联接交换机制的 HIJING^[20], 含弦重迭假设的 RQMD^[21,22] 和 SFM^[23], 含组份夸克质量降低假设的 U, QMD^[24] 和含强色场假设的 U, QMD^[25], 双夸克开启模型^[26] 和核子中奇异夸克成份模型^[27] 等. 但是 ϕ 介子增强的理论研究并不多, 特别是针对 NA49 系统实验结果的理论研究, 据我们所知, 尚未出现. 故本文用 LUCIAE 模型系统地分析 NA49 的实验结果, 又侧重于奇异增强物理机制研究.

相对论性核-核碰撞模型 LUCIAE 是建立在著名模型 FRITIOF^[28] 基础上. 在 FRITIOF 中核-核碰撞简单地描写为核子-核子碰撞的迭加, 因而解释核-核碰撞实验结果往往不理想. LUCIAE 主要在下列三方面作了发展: 1. 是考虑了参加者核子、傍观者核子和产生粒子间末态相互作用(再散射)^[29], 因为再散射一般是不容忽视的; 不过 ϕ 介子的末态相互作用很小^[2,7], 本文忽略了它的末态相互作用. 2. 是 LUCIAE 用爆竹模型 (firecracker model)^[30] 考虑了相对论性核-核碰撞早期弦密集时某些弦可能构成集体态用集体能量发射胶子的事实, 也就是考虑了弦发射胶子集体效应. 3. 是 LUCIAE 引进了奇异夸克压低的约化效应. 以弦碎裂为介子为例, 过去认为 $q\bar{q}$ 弦断开时从真空中激发出 $q_1\bar{q}_1$ 对是 u 夸克对的几率等于 d 夸克对, 但它是 s 夸克对的几率只是前者 1/3; 此即所谓奇异夸克压低. 后来实验事实表明: 在强子-强子碰撞中奇异夸克压低随入射能量之增而约化; 在质子-核和核-核碰撞中它甚至还随反应系统大小和中心度而约化^[11,18]. 我们通过引入有效弦张量将 JETSET 软件包中与弦张量及奇异产生有关的参数变成与入射能量、反应系统大小及中心度有关而达到反映上述实验事实之目的^[11]. 这里引进的额外模型参数已在拟合 $p+p$ 实验数据中确定^[11], 本文计算无自由参数. JETSET 软件包是 FRITIOF 的一部分, 它负责处理弦碎裂和粒子产生.

表 1 给出每核子 158 GeV/c $p+p$ 和 Pb+Pb 碰撞中 ϕ 介子产额及 π^+ 与 π^- 产额平均值等的理论与实验比较. 由于 $p+p$ 碰撞 π 产额实验值并非 NA49 直接测量而是引自文献 [31]. 文献 [31] 实验的触发是 100% 非弹性散射截面 (trigger on full inelastic cross section) 而不是像 NA49 那样只是 91% 非弹截面触发; 这里需作的修正指为“ π 触发修正”. 修正后 Pb+Pb 相对于 $p+p$ 的 ϕ 介子增强因子

$$E = \frac{\langle \phi \rangle / \langle \pi \rangle (\text{Pb} + \text{Pb 中心碰撞})}{\langle \phi \rangle / \langle \pi \rangle (\text{p} + \text{p 非弹})} \quad (1)$$

的实验值是 2.7 ± 0.7 而相应的 LUCIAE 结果是 2.2 (式中角括号指该量事件平均值).

表 1 158A GeV/c 碰撞中每事件平均粒子多重数

		n_{ch}	n_{π}	n_{ϕ}	n_{ϕ}/n_{π}
p + p	NA49	7.2	2.87*	0.012 ± 0.0015	0.00418 ± 0.00053
			2.61*		$0.00460 \pm 0.00053^{\circ}$
	LUCIAE	7.82	2.67	0.0141	0.00528
Pb + Pb	NA49		611	7.6 ± 1.1	0.0124 ± 0.0018
	LUCIAE		679	7.89	0.0116

* 取自 Nucl. Phys., B84(1975)269 by NA49; \circ π 触发修正后

图 1 给出 $p+p$ 和 $Pb+Pb$ 碰撞中 ϕ 介子横质量分布和快度分布. 若用高斯函数

$$f(y) = C \cdot \exp\left[-\frac{(y - y_{cm})^2}{2\sigma^2}\right] \quad (y_{cm} = 2.9) \quad (2)$$

拟合快度分布的 LUCIAE 结果得到 $\sigma = 0.967(p+p)$ 和 $1.05(Pb+Pb)$; 相应的 NA49 结果是 0.89 ± 0.06 和 1.22 ± 0.16 . 从横质量分布提取斜率倒数 T , 对所采用的拟合方法很敏感, 故用统一的指数函数

$$f(m_1) = C \cdot \exp\left(-\frac{m_1}{T}\right) \quad (3)$$

分别拟合图 1 中 $Pb+Pb$ 反应 ϕ 介子横质量分布的 NA49 测量结果和 LUCIAE 计算结果, 若都只取 m_1 大的四点作拟合则结果分别是 $T_{NA49} = 289\text{MeV}$ 和 $T_{LUCIAE} = 212\text{MeV}$. 对于图 1 中 $p+p$ 反应 ϕ 介子横质量分布, 从 NA49 数据中 m_1 大的三点提取得的温度为 189MeV , 从 LUCIAE 结果中 m_1 大的三点提取的温度几乎也是 189MeV . 从表 1 和图 1 结果看到: 依赖于弦发射胶子的集体效应和弦碎裂时奇异夸克压低的约化机制, LUCIAE 模型在一定程度上能统一描写 SPS 能量下 $p+p$ 和 $Pb+Pb$ 实验结果, 似乎无需引入 QGP 假设.

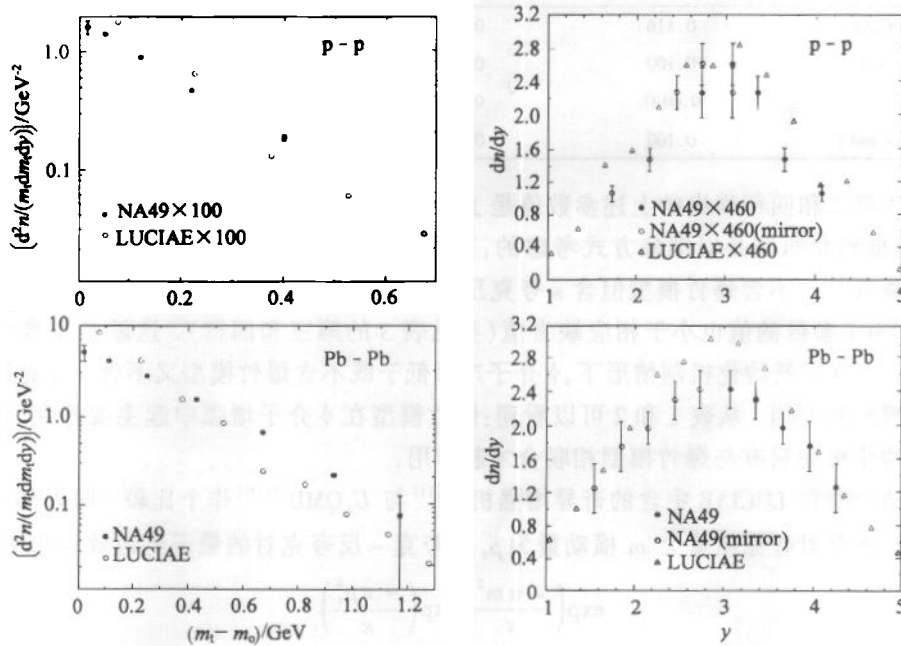


图 1 158A GeV/c $p+p$ 和 $Pb+Pb$ 碰撞 ϕ 介子横质量分布和快度分布
 $p+p: 3.0 < y < 3.8, Pb+Pb: 2.9 < y < 4.4.$

但是快度分布和横质量分布理论结果与实验符合得还不够好, 欲进一步改善符合程度, 在 LUCIAE 模型框架内也许尚须考虑弦的横向激发以及弦碎裂后粒子内禀横动量的加宽^[32]等, 这些有待进一步研究.

弦发射胶子中的集体效应以及弦碎裂时 s 夸克压低的约化两机制在 ϕ 介子增强中所

起的作用可从表 2 看出. 为了解表 2 的结果又在表 3 给出 JETSET 中与有效弦张量有关参数: $parj(1)$, $parj(2)$, $parj(3)$ 和 $parj(21)$. $parj(1)$ 是弦碎裂时产生双夸克 - 反双夸克对与产生夸克 - 反夸克对的几率比, $parj(2)$ 是产生 s 夸克对与产生 u 或 d 夸克对的几率比, $parj(3)$ 是 s 双夸克对与 s 夸克对几率比, $parj(21)$ 则是弦碎裂时产生的夸克反夸克对高斯型横动量分布的宽度.

表 2 158A GeV/c Pb + Pb 中心碰撞每事件平均粒子多重数(中心碰撞指 4% 总截面触发)

	n_{π}	n_{ϕ}	n_{ϕ}/n_{π}
LUCIAE	679	7.89	0.0116
w/o s*	687	6.28	0.00914
w/o f [®]	679	4.29	0.00632
w/o s and f	643	5.48	0.00852

* 无奇异夸克压低约化机制; [®] 无爆竹模型

表 3 158A GeV/c Pb + Pb 中心碰撞中 JETSET 参数的值

	$parj(1)$	$parj(2)$	$parj(3)$	$parj(21)$
LUCIAE	0.116	0.313	0.409	0.373
w/o s	0.100	0.300	0.400	0.320
w/o f	0.0497	0.215	0.313	0.318
w/o s and f	0.100	0.300	0.400	0.320

表 3 第二和四行列出的上述参数值是 JETSET 中它们的缺省值. 正如前面所述, 由于 s 夸克压低约化机制是以惟象方式考虑的, 其中有效弦张量主要是与弦上最硬胶子的横动量相联系^[11]. 不含爆竹模型但含 s 夸克压低约化机制时, 由于弦上胶子横动量小故而上述 JETSET 参数的值也小于相应缺省值(参见表 3 的第三和四行). 这就是不含爆竹模型但含 s 夸克压低约化机制情形下, ϕ 介子产额低于既不含爆竹模型又不含 s 夸克压低约化机制情形的原因. 从表 1 和 2 可以看到: 爆竹模型在 ϕ 介子增强中起主要作用, 而 s 夸克压低约化机制只有与爆竹模型相联合才起作用.

临结束前将 LUCIAE 中含的奇异增强机制^[11]与 U, QMD ^[24,25]作个比较. 两者都从弦张量为 κ 的弦发射夸克质量为 m 横动量为 p_i 的夸克 - 反夸克对的量子坠道效应几率^[33]

$$\exp\left(-\frac{\pi m^2}{\kappa}\right) \exp\left(-\frac{\pi p_i^2}{\kappa}\right) \quad (4)$$

出发. 于是产生 $s\bar{s}$ 对几率与产生 $u\bar{u}$ 或 $d\bar{d}$ 几率的比值(奇异压低因子)

$$parj(2) = \exp\left[\frac{-\pi(m_s^2 - m_u^2)}{\kappa}\right]. \quad (5)$$

U, QMD 作者们接着假设相对论性核 - 核碰撞弦张量应比同能量 $p + p$ 碰撞大三倍. 又将弦张量的增大归结为手征对称破缺恢复相变导致的夸克质量约化^[24]. 而我们则是通过引入有效弦张量并惟象地将其和多胶子弦(相对于纯 $q\bar{q}$ 弦)联系起来, 使得有效弦张量及其有关的上述 JETSET 参数随入射能量以及碰撞系统大小和中心度而变. 因此 LUCIAE 有可能统一描写相对论性 $p + p$, $p + A$ 和 $A + A$ 碰撞中奇异产生. 上述两途径的差别是个有

意义的问题,值得进一步研究.

参考文献 (References)

- 1 Müller B, Rafelski J. *Phys. Rev. Lett.*, 1986, **81**:1066
- 2 Koch P, Müller B, Rafelski J. *Phys. Rep.*, 1986, **142**:167
- 3 Bartke J et al (NA35 Collaboration). *Z. Phys.*, 1990, **C48**:191
- 4 Abatzis S et al (WA85 Collaboration). *Phys. Lett.*, 1990, **B244**:127
- 5 Andersen E et al (NA36 Collaboration). *Phys. Lett.*, 1993, **B316**:603
- 6 Andersen E et al (WA97 Collaboration). *Phys. Lett.*, 1998, **B433**:209
- 7 Shor A. *Phys. Rev. Lett.*, 1985, **54**:1122
- 8 Afanasiev S V et al (NA49 Collaboration). *Phys. Lett.*, 2000, **B491**:59
- 9 SA Ben-Hao, TAI An. *Phys. Rev.*, 1997, **C55**:2010
- 10 SA Ben-Hao, TAI-An. *Phys. Lett.*, 1997, **B399**:29
- 11 TAI An, SA Ben-Hao. *Phys. Lett.*, 1997, **B409**:393
- 12 TAI An, SA Ben-Hao. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.*, 1998, **22**:346(in Chinese)
(台安, 萨本豪. 高能物理与核物理, 1998, **22**:346)
- 13 SA Ben-Hao, WANG Xiao-Rong, TAI An et al. *Phys. Rev.*, 1999, **C60**:047901
- 14 WANG Xiao-Rong, SA Ben-Hao, ZHOU Dai-Cui et al. *Science in China*, 2000, **A30**:469(in Chinese)
(王晓荣, 萨本豪, 周代翠等. 中国科学, 2000, **A30**:469)
- 15 Rafelski J, Müller B. *Phys. Rev. Lett.*, 1982, **48**:1066
- 16 Braun-Munzinger P, Heppe I, Stachel J. *Phys. Lett.*, 1999, **B465**:15
- 17 Cleymans J, Redlich K. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **81**:5284
- 18 Becattini F, Gazdzicki M, Sollfrank J. *Eur. Phys. J.*, 1998, **C5**:143
- 19 Topor Pop V, Gyulassy M, Wang X N et al. *Phys. Rev.*, 1995, **C52**:1618
- 20 Vance S E, Gyulassy M. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, **83**:1735
- 21 Sorge H, Berenguer M, Stöcker H et al. *Phys. Lett.*, 1992, **B289**:6
- 22 Van Hecke H, Sorge H, Xu N. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **81**:5764
- 23 Amelin N S, Braun M A, Pajares C. *Phys. Lett.*, 1993, **B306**:312
- 24 Soff S, Bass S A, Bleicher M et al. *Phys. Lett.*, 1999, **B471**:89
- 25 Bleicher M, Greiner W, Stöcker H et al. *Phys. Rev.*, 2000, **C62**:061901
- 26 Capella A, Salgado C A. *Phys. Rev.*, 1999, **C60**:054906
- 27 LIU Keh-Fei, hep-ph/0011225
- 28 Hong Pi. *Z. Phys.*, 1993, **C57**:485
- 29 SA Ben-Hao, TAI An. *Comp. Phys. Comm.*, 1995, **90**:121; SA Ben-Hao, TAI An, LU Zhong-Dao. *Phys. Rev.*, 1995, **C52**:2069; TAI An, SA Ben-Hao. *Comp. Phys. Comm.*, 1999, **116**:353
- 30 Andersson B, TAI An. *Z. Phys.*, 1996, **C71**:155
- 31 Rossi A M et al. *Nucl. Phys.*, 1975, **B84**:269
- 32 McLerran L, Schaffner-Bielich J. hep-ph/0101133
- 33 Schwinger J. *Phys. Rev.*, 1951, **82**:664; Andersson B, Gustafson G, Ingelman G et al. *Phys. Rep.*, 1983, **97**:31

Enhancement of ϕ Mesons in Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions

SA Ben-Hao^{1,1)} WANG Xiao-Rong² LU Zhong-Dao¹
SU Zong-Di¹ CAI Xu²

¹ (China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

² (Institute of Particle Physics, Huazhong Normal University, Wuhan 430079, China)

Abstract The ϕ meson production in relativistic nucleus-nucleus collisions is investigated systematically using a hadron-string cascade model LUCIAE. Within the framework of the model and relying on the collective effects in the gluon emission of string and the reduction of the s-quark suppression, the NA49 data of ϕ meson enhancement in the 158 A GeV/c Pb + Pb collision relative to that in p + p collision at the same energy is reproduced in certain extent.

Key words strangeness enhancement, rescattering, collective effects in the gluon emission of string, reduction of the s-quark suppression, LUCIAE model

Received 14 May 2001

* Supported by National Natural Science Foundation of China (19975075)

1) Guest Research Professor of Institute of Theoretical Physics, The Chinese Academy of Sciences