

## 4.5 A GeV/c $^{24}\text{Mg}$ 与核乳胶碰撞中 簇射粒子的赝快度分布<sup>\*</sup>

孟彩荣<sup>1,2;1)</sup> 李晓琳<sup>2</sup> 段麦英<sup>2</sup>

1(忻州师范学院物理系 忻州 034000)

2(山西师范大学现代物理研究所 临汾 041004)

**摘要** 报道了 4.5 A GeV/c  $^{24}\text{Mg}$  与核乳胶碰撞中产生的簇射粒子的赝快度分布,结果表明,分布宽度和峰值位置明显依赖于靶核尺寸.用柱模型对赝快度分布进行了分析, Monte Carlo 方法计算得到的结果基本符合实验数据的走向,并重现了实验数据中的涨落现象.

**关键词**  $^{24}\text{Mg}$  与核乳胶碰撞 赝快度分布 柱模型

### 1 引言

高能核-核碰撞是现阶段粒子物理工作者和原子核物理工作者共同关心的前沿领域.一方面,人们寄希望于在射弹核和靶核相互瞄准的强烈碰撞部分形成理论上预言的夸克-胶子等离子体,并在两核相互瞄准以外的非强烈碰撞部分实现液-气相变;另一方面,人们试图用传统知识理解多粒子产生和多碎片发射的机制.从入射能量为 1 A GeV 的打靶实验,到束流能量为 100 A GeV 的对撞实验,人们积累的实验数据越来越丰富<sup>[1-7]</sup>,同时理论研究工作亦呈现出多种唯象模型并存的局面<sup>[6-14]</sup>.

就世界上曾经运行和正在运行的高能重离子加速器(含相对论性重离子对撞机 RHIC)所处的能区而言,各有特色.特别是俄罗斯 Dubna 能区(几个 A GeV)可能是核的极限碎裂现象的起始能区,显得尤为重要<sup>[15,16]</sup>.为了更好地研究这一能区的核-核碰撞过程,美国布鲁克海文的交变梯度同步加速器(AGS)的能量由超过 10 A GeV 调低至 2, 4, 6, 8 A GeV,充分显示几个 A GeV 能区的重要性.可见,对

Dubna 能区的核-核碰撞过程进行深入研究是必要的.

在唯象模型研究方面,有图像清晰计算简单的热与统计模型<sup>[14]</sup>,又有深入核子内部结构仔细跟踪碰撞过程的动力学模型<sup>[10,11]</sup>.在热与统计模型中,基于火球和弦模型的柱模型<sup>[17-20]</sup>,在快度与赝快度研究方面,不仅图像清晰计算简单,而且适合的能区很宽(从 Dubna 到 RHIC 能区<sup>[21]</sup>),还能符合正负电子对撞和正反质子对撞的实验结果<sup>[22]</sup>.对柱模型进行必要的修正完善,并扩大其应用范围,解释更多的实验结果,是一件有意义的工作.

### 2 实验方法与结果

实验所用核乳胶叠是在俄罗斯联合原子核研究所(JINR)的重离子加速器上照射的,束流为 4.5 A GeV/c 的  $^{24}\text{Mg}$  原子核,核乳胶的种类为俄制 NIKFI-BR2,核乳胶片的尺寸为 20cm × 10cm × 600 $\mu\text{m}$ .事例扫描工作是在显微镜下完成的,采用了常规的“沿径迹”扫描法.对于位于核乳胶片上下表面 20 $\mu\text{m}$  以内的事例不作测量,以免因表面畸变影

2004-04-01 收稿,2004-06-01 收修改稿

\* 国家自然科学基金(10275042), 山西省自然科学基金(20021006), 山西省留学回国人员科研基金[晋留管办(2001)15] 和山西省重点学科基金[晋教计财(2002)4]资助

1) E-mail: mcr\_mcr@163.com

响测量结果.

实验上共发现了 3 种类型的相互作用事例, 分别是电磁离解、弹性碰撞和核反应. 电磁离解是由入射核和靶核之间的电磁相互作用引起的射弹核和(或)靶核的解体现象, 这时的碰撞参数大于两核的半径之和; 弹性碰撞是入射核和核乳胶中的氢核的碰撞过程, 末态只有入射核和氢核, 这时的碰撞参数约等于两核的半径之和; 核反应是入射核和靶核由核力引起的碰撞过程, 末态伴随有射弹碎片、靶碎片和簇射粒子, 这时的碰撞参数小于两核的半径之和. 本实验关心的是核反应事例. 共扫描并测量了 1000 个无偏核反应事例, 其中 207 个事例没有或仅有 1 个靶碎片, 338 个事例有 2—8 个靶碎片, 455 个事例有 9 个或更多个靶碎片.

射弹碎片、靶碎片和簇射粒子的鉴别方法采用了常规的颗粒密度法和  $\delta$  电子密度法<sup>[23,24]</sup>. 在沿射弹方向向前的锥体内(锥角  $< 8^\circ$ ), 颗粒密度在 2cm 范围内没有明显变化的归于射弹碎片, 并且已知  $\delta$  电子密度正比于碎片电荷的平方. 设  $I_0$  是实验测得的相对论性单电荷粒子径迹的极小电离颗粒密度, 则径迹颗粒密度大于  $1.4I_0$  的归于靶碎片, 小于  $1.4I_0$  的归于簇射粒子. 在靶碎片中, 射程小于 3mm 的归于所谓的黑碎片, 大于 3mm 的归于灰碎片. 对于某类末态产物而言, 其数目叫做该类末态产物的多重数. 根据靶碎片多重数  $N_h$ , 将核反应事例分为两类:  $N_h \leq 7$  和  $N_h \geq 8$ . 前者主要由核乳胶中的 H, C, N 和 O 贡献, 也有 Ag 和 Br 的贡献, 簇射粒子总数为 4789; 后者主要由 Ag 和 Br 贡献, 也有 O 的贡献, 簇射粒子总数为 6997. 总的来说, 前者对应的靶核小, 后者对应的靶核大.

图 1 给出了  $4.5A \text{ GeV}/c^{24}\text{Mg}$  与核乳胶碰撞中簇射粒子的赝快度分布, 图 1(a)和(b)分别是  $N_h \leq 7$  和  $N_h \geq 8$  两类事例的结果. 这里赝快度定义为  $\eta = -\ln \tan(\theta/2)$ , 而  $\theta$  是簇射粒子的发射角. 图中纵坐标轴上的  $N$  是簇射粒子数. 图中空心圆圈是实验结果, 实心圆圈和曲线是柱模型的计算结果(将于下节讨论). 可以看出, 对应  $N_h \leq 7$  和  $N_h \geq 8$  两类事例的实验结果非常相似, 但前者的分布宽度小于后者, 前者的峰值对应的  $\eta$  值大于后者. 赝快度的分布宽度和峰值位置依赖于靶碎片多重数, 而靶碎片多重数粗略反映了靶核尺寸. 可以说, 图 1(a)对应入射  $^{24}\text{Mg}$  与轻靶(HCNO)碰撞的结果, 而图 1(b)对应入射  $^{24}\text{Mg}$  与重靶(AgBr)碰撞的结果. 一般认为, 由于轻靶和重靶对入射核的阻止本领不同, 其中级联碰撞

的程度也不同, 导致二者对应的赝快度分布有一定差别.

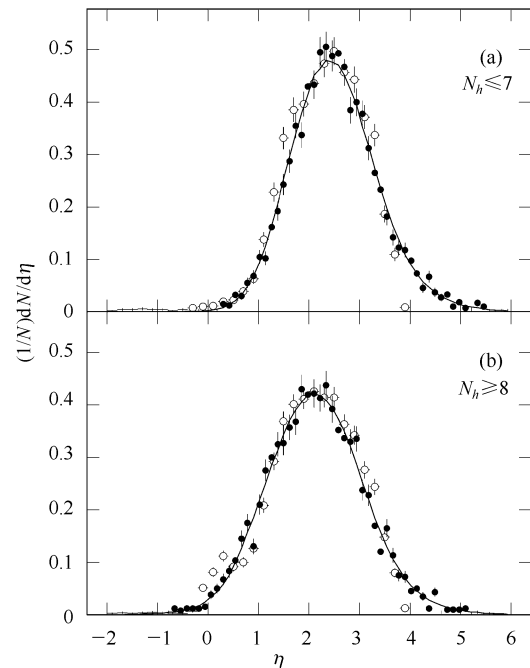


图 1  $4.5A \text{ GeV}/c^{24}\text{Mg}$  与核乳胶碰撞中簇射粒子的赝快度分布

(a)和(b)分别对应  $N_h \leq 7$  和  $N_h \geq 8$  事例的结果

图中空心圆圈是本文的实验结果, 实心圆圈和曲线是本文的计算结果.

### 3 模型计算与比较

早期的火球模型(或火条程序)和弦模型在实验数据分析方面曾发挥过重要作用<sup>[14]</sup>. 基于火球模型和弦模型, 刘福虎及其合作者提出并发展了描述高能核-核碰撞中粒子(赝)快度分布的热化柱模型<sup>[17-20]</sup>. 随着碰撞能量的提高(例如到 RHIC 能区), 热化柱模型先后被发展成为热化双柱模型<sup>[22]</sup>和重叠柱模型<sup>[21]</sup>. 在热化柱模型中, 快度和赝快度不曾区分; 在热化双柱模型和重叠柱模型中, 有时是区分快度和赝快度的. 热化柱模型应当适用于 Dubna 能区, 但该模型对快度和赝快度未加区分, 显然只是一种近似. 为了精确描述 Dubna 能区的实验结果, 本文在热化柱模型中引入温度参数, 对快度和赝快度加以区分, 以使该模型更臻完善.

根据热化柱模型, 在核-核碰撞中形成了一个沿入射方向的热化柱. 在实验室系(或在参加者质心系), 在快度空间, 该柱位于快度区间  $[\eta_{\min},$

$y_{\max}$ ], 其中心快度为  $y_c$ . 柱中具有相同快度  $y_x$  的发射点形成一个发射面(发射源). 设在发射源静止系, 粒子各向同性发射. 以入射方向为  $z$  轴正向, 以反应平面为  $yoz$  平面, 建立固定于发射源的直角坐标系. 粒子的动量分量  $p_x, p_y$  和  $p_z$  可设为具有相同宽度  $\sigma$  的高斯分布.  $\sigma$  与粒子的静止质量  $m$  和发射源的温度  $T$  之间的关系为  $\sigma^2 = mT$ , 这里事实上将发射源近似看成了 Maxwell 经典理想气体系统, 这种近似在多大程度上可以接受还有待实验的检验. 通过这种关系, 可将发射源的激发程度与粒子的动量分布联系起来.

粒子的赝快度  $\eta^*$  可表示为

$$\eta^* = -\ln \tan\left(\frac{1}{2} \arctan \frac{p_T}{p_z}\right), \quad (1)$$

式中  $p_T = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$  是粒子的横动量. 归一化的  $\eta^*$  分布为

$$f_{\eta^*}(\eta^*) = \frac{1}{2 \cosh^2 \eta^*}. \quad (2)$$

$\eta^*$  可用快度变量  $y^*$  表示为<sup>[25]</sup>

$$\eta^* = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{\sqrt{m_T^2 \cosh^2 y^* - m^2 + m_T \sinh y^*}}{\sqrt{m_T^2 \cosh^2 y^* - m^2 - m_T \sinh y^*}} \right) \equiv h(y^*), \quad (3)$$

式中  $m_T = \sqrt{p_T^2 + m^2}$  是粒子的横质量. 在实验室系(或在参加者质心系), 产生于具有快度  $y_x$  的发射源的粒子的快度分布可表示为

$$f(y, y_x) = f_{\eta^*} [h(y - y_x)] \frac{d\eta^*}{dy}. \quad (4)$$

考虑到  $y_c$  与  $y_{\min}$  和  $y_{\max}$  之间的位置关系, 引入快度移动变量  $\Delta y$ , 有

$$y_{\max} - y_c = y_c - y_{\min} \equiv \Delta y. \quad (5)$$

在实验室系(或在参加者质心系), 不考虑领头粒子的贡献时, 末态粒子的快度分布为

$$f(y) = \frac{1}{2\Delta y} \int_{y_c - \Delta y}^{y_c + \Delta y} f(y, y_x) dy_x. \quad (6)$$

$y$  可用赝快度变量  $\eta$  表示为<sup>[25]</sup>

$$y = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{\sqrt{p_T^2 \cosh^2 \eta + m^2 + p_T \sinh \eta}}{\sqrt{p_T^2 \cosh^2 \eta + m^2 - p_T \sinh \eta}} \right) \equiv H(\eta). \quad (7)$$

所以末态粒子的赝快度分布为

$$F(\eta) = f[H(\eta)] \frac{dy}{d\eta}. \quad (8)$$

在上述讨论中, 虽然对快度和赝快度作了严格区分, 但仅考虑了柱的贡献, 没有考虑产生于参加者的领头粒子的贡献, 也没有考虑产生于旁观者的领

头粒子的贡献. 若要考虑领头粒子的贡献, 可像原初热化柱模型那样, 引入新的快度移动变量即可. 公式(6)和(8)分别是对原初热化柱模型修正后得到的末态粒子的快度与赝快度分布. 为了反映实验上观测到的统计涨落, 同时为了使计算本身简单化, 下面给出用 Monte Carlo 方法处理该问题的计算过程.

设  $R_1, R_2, R_3$  和  $R_4$  均是  $[0, 1]$  间均匀分布的随机数, 在发射源静止系, 考虑到  $p_x, p_y, p_z$  服从相同宽度  $\sigma$  的高斯分布, 有

$$p_T = \sigma \sqrt{-2 \ln R_1}, \quad (9)$$

$$p_z = \sigma \sqrt{-2 \ln R_2} \cos(2\pi R_3). \quad (10)$$

把公式(9)和(10)代入公式(1), 可求出  $\eta^*$ , 而由  $\eta^*$  可把  $y^*$  表示为<sup>[25]</sup>

$$y^* = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{\sqrt{p_T^2 \cosh^2 \eta^* + m^2 + p_T \sinh \eta^*}}{\sqrt{p_T^2 \cosh^2 \eta^* + m^2 - p_T \sinh \eta^*}} \right). \quad (11)$$

在实验室系(或在参加者质心系), 快度为

$$y = y^* + y_x = y^* + y_c - \Delta y + 2\Delta y R_4. \quad (12)$$

赝快度可通过  $y$  表示为<sup>[25]</sup>

$$\eta = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{\sqrt{m_T^2 \cosh^2 y - m^2 + m_T \sinh y}}{\sqrt{m_T^2 \cosh^2 y - m^2 - m_T \sinh y}} \right). \quad (13)$$

经过多次重复计算后,  $y$  或  $\eta$  的分布可由统计方法得到.

为了和实验数据作比较, 用 Monte Carlo 方法计算得到的相应  $N_h \leq 7$  和  $N_h \geq 8$  两类事例的结果分别在图 1(a) 和 (b) 给出. 图中实心圆圈和曲线对应的模拟事例数分别为  $5 \times 10^3$  和  $5 \times 10^5$  个. 在计算中, 考虑到大部分产生粒子是  $\pi$ , 而 K, p 和其他粒子只占少数, 因此取  $m = 0.139 \text{ GeV}/c^2$ . 在自由参数选取方面, 对图 1(a), 取  $y_c = 2.15, \Delta y = 0.80, T = 0.15 \text{ GeV}$ ; 对图 1(b), 取  $y_c = 1.80, \Delta y = 1.00, T = 0.15 \text{ GeV}$ . 在参数选取时, 用到了  $\chi^2$  检验, 所给参数的允许最大相对误差为 5%. 可以看出, 在实验数据的分布范围 ( $\eta < 4$ ) 内, 计算结果基本重现了实验数据的分布趋势, 且当模拟事例数较少时, 计算结果基本重现了实验数据的涨落现象. 高能核-核碰撞中簇射粒子(赝)快度分布的涨落现象, 可能由统计性原因引起, 也可能由非统计性原因引起, 本文的结果显示, 统计性原因起主要作用<sup>[26]</sup>.

## 4 结论与讨论

本文从实验上给出了 4.5 A GeV/c<sup>24</sup>Mg 与核乳

胶碰撞中,簇射粒子的赝快度分布,及其对靶碎片多重数(靶核尺寸)的依赖.对应低多重数(轻靶)事例的赝快度分布的峰值位置,大于高多重数(重靶)事例的;而对应低多重数(轻靶)事例的赝快度分布的宽度,小于高多重数(重靶)事例的.这个现象说明,重靶的阻止本领大于轻靶,重靶内发生的内核级联碰撞过程明显于轻靶.这一结论与其他能区的实验结果类似.

在模型分析方面,对热化柱模型作了修正完善.不仅区分了速度与赝快度,而且引入了温度参数;既给出了解析表达式,又给出了 Monte Carlo 计算方法.用 Monte Carlo 方法计算的结果表明,柱模型在 Dubna 能区是适用的.当模拟事例数足够多时,计算结果基本重现了实验结果的分布趋势;当模拟事例数较少时,计算结果基本重现了实验结果中出现的涨

落现象.

值得注意的是,为了避免测量小角度引起的较大误差,本实验没有给出  $\eta > 4$  范围内的结果.这一范围正是射弹碎片出现的区域,其中夹杂的产生粒子没作测量,由此引起实验结果和计算结果的分布范围之间存在差别.在计算方面,因没有区分  $\pi, K, p$  等粒子,仅将所有的产生粒子当作  $\pi$  看待,由此也引起了实验结果和计算结果之间的一些差别.如果考虑到末态有不同种类的产生粒子,并考虑到各种粒子所占的比例不同,可以对(赝)快度分布作更精确的计算,但由此会引入更多的参数.

本工作的实验样本由埃及 Sohag 大学高能研究室提供,并得到 N.N. Abd-Allah 博士的协助,谨致谢意!

## 参考文献 (References)

- Andronic A, Stoicea G, Petrovici M et al (FOPI Collaboration). Nucl. Phys., 2001, **A679**(3-4):765—792
- Abreu M C, Alessandro B, Alexa C et al (NA50 Collaboration). Phys. Lett., 2002, **B530**(1-4):33—42
- Abreu M C, Alessandro B, Alexa C et al (NA50 Collaboration). Phys. Lett., 2002, **B530**(1-4):43—55
- Back B B, Baker M D, Barton D S et al (PHOBOS Collaboration). Phys. Rev. Lett., 2001, **87**(10): 102301
- Bearden I G, Beavis D, Besliu C et al (BRAHMS Collaboration). Phys. Rev. Lett., 2002, **88**(20): 202301
- ZHANG Jing-Bo, HUO Lei, ZHANG Wei - Ning et al. HEP & NP, 2002, **26**(4):305—308 (in Chinese)  
(张景波, 霍雷, 张卫宁等. 高能物理与核物理, 2002, **26**(4): 305—308)
- ZHANG Jing-Bo, YANG Jie, HUO Lei et al. HEP & NP, 2002, **26**(8):851—854 (in Chinese)  
(张景波, 杨杰, 霍雷等. 高能物理与核物理, 2002, **26**(8): 851—854)
- Kharzeev D, Levin E. Phys. Lett., 2001, **B523**(1-2):79—87
- Hirano T. Phys. Rev., 2002, **C65**(1):011901-1—011901-5
- WANG X N, Gyulassy M. Phys. Rev., 1991, **D44**(11):3501—3516
- PANG Y, Schlagel T J, Kahana S H. Nucl. Phys., 1992, **A544**(1-2):435—438
- Werner K. Phys. Rep., 1993, **232**(2-5):87—299
- LU Zhong-Dao, SA Ben-Hao, Faessler A et al. HEP & NP, 2002, **26**(5):501—506 (in Chinese)  
(陆中道, 萨本豪, Faessler A 等. 高能物理与核物理, 2002, **26**(5): 501—506)
- LU Zhong - Dao, SA Ben - Hao, Faessler A et al. HEP & NP, 2002, **26**(11):1166—1171 (in Chinese)  
(陆中道, 萨本豪, Faessler A 等. 高能物理与核物理, 2002, **26**(11):1166—1171)
- LIU Fu - Hu. Phys. Rev., 2000, **C62**(2), 024613-1—024613-3
- LIU Fu - Hu. Europhys. Lett., 2003, **63**(2):193—199
- LIU Fu - Hu. Acta Physica Sinica (Overseas Edition), 1998, **7**(5): 321—326
- LIU Fu - Hu, Panebratsev Y A. Nucl. Phys., 1998, **A641**(4):379—385
- LIU Fu - Hu, Panebratsev Y A. Phys. Rev., 1999, **C59**(2):1193—1195
- LIU Fu - Hu, Panebratsev Y A. Phys. Rev., 1999, **C59**(3):1798—1801
- LIU Fu - Hu. Phys. Lett., 2004, **B583**(1):68—72
- LIU Fu - Hu, YIN Xin - Yi, TIAN Jun - Long et al. Phys. Rev., 2004, **C69**(3):034905-1—034905-5
- Adamovich M I, Aggarwal M M, Alexandrov Y A et al (EMU01 Collaboration). Z. Phys., 1992, **C56**(12):509—514
- Adamovich M I, Aggarwal M M, Alexandrov Y A et al (EMU01 Collaboration). Phys. Lett., 1995, **B352**(3-4):472—478
- Wong C Y. Introduction to High - Energy Heavy - Ion Collisions. Singapore: World Scientific, 1994. 24—25
- LIU Fu - Hu. Phys. Rev., 2001, **D63**(3):032001-1—032001-4

## Pseudorapidity Distribution of Shower Particles in $^{24}\text{Mg}$ -Emulsion Collisions at $4.5 A \text{ GeV}/c$ \*

MENG Cai-Rong<sup>1,2;1)</sup> LI Xiao-Lin<sup>2</sup> DUAN Mai-Ying<sup>2</sup>

1(Department of Physics, Xinzhou Teachers University, Xinzhou 034000, China)

2(Institute of Modern Physics, Shanxi Teachers University, Linfen 041004, China)

**Abstract** The pseudorapidity distribution of shower particles produced in the  $^{24}\text{Mg}$ -emulsion collisions at  $4.5 A \text{ GeV}/c$  is reported in this paper. The dependences of the distribution width and the peak position on the target size are observed. The pseudorapidity distribution of shower particles for the events with low target multiplicity (light target) is narrower than that with high target multiplicity (heavy target). The maximum probability pseudorapidity for light target is greater than that for heavy target. The experimental data is analyzed by using the cylinder model suggested by Liu et al. The Monte Carlo results based on Liu's cylinder model are approximately in agreement with the experimental tendency and fluctuation.

**Key words**  $^{24}\text{Mg}$ -emulsion collisions, pseudorapidity distribution, cylinder model

---

Received 1 April 2004, Revised 1 June 2004

\* Supported by National Natural Science Foundation of China (10275042), Shanxi Natural Science Foundation (20021006), Shanxi Returned Overseas Scholars Foundation, and Shanxi Key Subjects Foundation

1)E-mail: mcr\_mcr@163.com