

高能核-核碰撞中产生质子的快度分布*

孟彩荣^{1,2;1)}

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 用三火球模型分析了核-核以AGS(the Alternating Gradient Synchrotron)和SPS(the Super Proton Synchrotron)能量碰撞中产生质子的快度分布. Monte Carlo方法计算的结果分别与金-金以6, 8和10.8AGeV的能量并以不同中心性碰撞、铅-铅以158AGeV/c的动量碰撞、以及硫-硫以200AGeV/c的动量碰撞的实验数据符合.

关键词 金-金碰撞 铅-铅碰撞 硫-硫碰撞 快度分布 三火球模型

1 引言

近年来,关于高能核-核碰撞的理论和实验研究引起了人们的极大兴趣,它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.这种研究最重要的物理目的是探测量子色动力学(QCD)理论预言的一种新的物质形态——夸克-胶子等离子体(QGP)的存在及性质.在实验上,美国布鲁克海汶国家实验室(BNL)的AGS成功地将氧束流加速到能量达每核子14.6GeV,而西欧核子研究中心(CERN)的SPS则将氧束流加速到能量达每核子60和200GeV,同时,硅、硫、金、铅等束流也被加速到很高能量.经过多年努力,实验工作者积累的实验数据越来越丰富,同时理论工作者亦对高能核-核碰撞过程提出了多种唯象模型^[1-5].

在核-核碰撞中,末态产生了许多粒子^[6-8],这种现象称为多粒子产生^[9, 10].在末态粒子中有许多质子^[11-13],这些质子来自靶核和射弹核^[14-16].高能核-核碰撞中产生的末态质子的快度分布能够通过实验测量出来,通过快度分布能够帮助我们理解在相互作用系统中粒子的产生过程.已经引进了许多模型来描述粒子的产生,例如:相对论量子分子动力学模型^[17],弦模型^[5],火球模型(fireball model)^[18-22],热

化柱模型^[23-29]等等.本文用到的三火球模型^[20-22],图像简单,容易理解,是早期火球模型的进一步发展.

本文用三火球模型^[20-22]分析金-金分别以6, 8和10.8AGeV的能量并以不同的中心性碰撞产生质子的快度分布,铅-铅以158AGeV/c的动量碰撞产生质子的快度分布,以及硫-硫以200AGeV/c的动量碰撞产生质子的快度分布.用Monte Carlo方法计算的结果与E917合作组^[30]、NA49合作组^[31]和NA35合作组^[32]报道的实验数据进行了比较.

2 模型计算

现在来分析高能核-核碰撞的过程.在质心参照系,一个射弹核和一个靶核相互穿透,在碎裂区形成两个产生粒子的源(射弹火球P和靶火球T),与此同时,由于胶子和海夸克的相互作用,在中心区也形成一个产生粒子的源(中心火球C)^[20-22].碰撞系统的质心在质心参照系的快度为 $y_{cm} = 0$,则中心火球的快度取为 $y_c = 0$.在选定参照系(质心系或实验室系),用 Δy 来表示射弹火球和靶火球的快度移动,用 Dy 表示领头射弹质子和领头靶质子的快度移动.在发射源静止系,假定3个动量分量 P_x, P_y, P_z 服从宽度为 $\sigma = \sqrt{m\gamma T}$ 的高斯分布,式中 m 为质子的静止质量, T

2005-09-29 收稿

*国家自然科学基金(10275042, 10475054),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],山西省重点学科基金[晋教计财(2002)4]和忻州师范学院科研基金(200304)资助

1) E-mail: mcr_mcr@163.com

为发射源的温度, $\bar{\gamma}$ 是质子洛仑兹因子的平均值. 当能量不高时, $\bar{\gamma} = \bar{E}/m \approx 1$, 当能量较高时, $\bar{\gamma} > 1$, 当能量很高时, $\bar{\gamma} \gg 1$. 在计算中, 将 $\bar{\gamma}T$ 看成一个参数. 由质壳关系知:

$$\varepsilon^2 = P^2 + m^2 = P_x^2 + P_y^2 + P_z^2 + m^2, \quad (1)$$

$$\varepsilon = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2 + m^2}. \quad (2)$$

则在发射源静止系, 质子的快度可由快度定义表示为

$$y^* = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{\varepsilon + P_z}{\varepsilon - P_z} \right). \quad (3)$$

在选定参照系(质心系或实验室系), 质子的快度 y 可表示为

$$y = y^* + y_x. \quad (4)$$

对于射弹火球 $y_x = \Delta y$, 靶火球 $y_x = -\Delta y$, 中心火球 $y_x = 0$. 对于领头射弹质子 $y_x = Dy$, 领头靶质子 $y_x = -Dy$. 对于像金-金、铅-铅、硫-硫这样的对称碰撞, 领头射弹质子的贡献和领头靶质子的贡献是相等的. 在本文涉及的能区, 假设3个火球的贡献相等^[22]. 用 k 表示领头射弹质子或领头靶质子的贡献, 则每个火球的贡献为: $(1-2k)/3$.

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 Monte Carlo 方法处理问题的计算过程.

设 $R, R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$ 均为 $[0,1]$ 间均匀分布的随机数, 考虑到 P_x, P_y, P_z 服从相同宽度 σ 的高斯分布, 有

$$P_x = \sigma(-2 \ln R_1)^{1/2} \cos(2\pi R_2), \quad (5)$$

$$P_y = \sigma(-2 \ln R_3)^{1/2} \cos(2\pi R_4), \quad (6)$$

$$P_z = \sigma(-2 \ln R_5)^{1/2} \cos(2\pi R_6), \quad (7)$$

将公式(5), (6), (7)代入公式(2), 可求出 ε , 而由 ε 和 P_z 可将 y^* 表示为

$$y^* = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{\sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2 + m^2} + P_z}{\sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2 + m^2} - P_z} \right). \quad (8)$$

在质心参照系下, 根据领头质子和火球的不同贡献分别给出 y_x .

$$\text{假如 } R \leq k \quad y_x = -Dy. \quad (9)$$

$$\text{假如 } k < R \leq 2k \quad y_x = Dy. \quad (10)$$

$$\text{假如 } 2k < R \leq [2k + (1-2k)/3] \quad y_x = -\Delta y. \quad (11)$$

$$\text{假如 } [2k + (1-2k)/3] < R \leq [2k + 2(1-2k)/3] \quad y_x = 0. \quad (12)$$

$$\text{假如 } [2k + 2(1-2k)/3] < R \leq [2k + 3(1-2k)/3] \quad y_x = \Delta y. \quad (13)$$

将 y_x 和公式(8)代入公式(4), 就可得到在质心参照系中质子的快度值, 经过足够多次重复计算后, 快度 y 的分布可由统计的方法得到.

3 与实验的比较

图1是质心参照系下, 金-金以6.4 GeV的能量并以不同的中心性碰撞产生质子的快度分布, 纵坐标表示末态质子的快度分布, 横坐标 $y-y_{cm}$ 表示质心参照系下质子的快度, 其中 y 表示实验室参照系的快度, y_{cm} 表示质心系相对于实验室系的快度. 碰撞的中心性在图中已标出, 分别为: 0%—5%, 5%—12%, 12%—23%, 23%—39%, 39%—81%. 实心圆圈(黑点)是E917合作组^[30]测量的实验数据, 空心圆圈是围绕 $y = y_{cm}$ 的反射点. 曲线表示的是对不同中心性碰撞, 用三火球模型分析并用 Monte Carlo 方法计算得到的产生质子的快度分布. 由图1可以看出: 由三火球模型分析得到的理论曲线能够很好地与E917合作组^[30]的实验数据符合. 通过计算得到的与实验数据比较符合的参数值是: $\bar{\gamma}T = 145 \text{ MeV}$, $Dy = 1.13$, $\Delta y = 0.72$. 对于不同中心性的碰撞(0%—5%到39%—81%), 领头射弹质子或领头靶质子的贡献分别为: $k = 0.010, 0.064, 0.116, 0.178, 0.232$, 相应的 χ^2/dof 分别为: 0.0251, 0.0037, 0.0051, 0.0092, 0.0618.

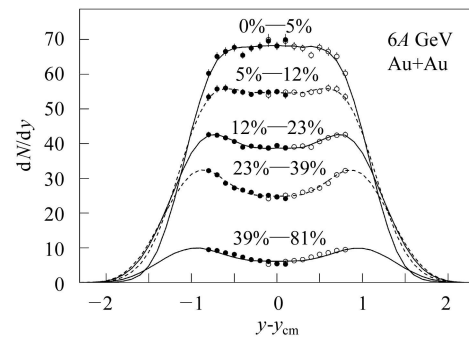


图1 金-金以6.4 GeV的能量碰撞产生质子的快度分布

实圆圈是由E917合作组^[30]测量的实验数据, 空心圆圈是实圆圈围绕 $y = y_{cm}$ 的反射点. 曲线是用 Monte Carlo 方法计算的结果.

图2与图1相似, 但入射的能量变为8.4 GeV. 符

号、实圆圈、空心圆圈和曲线所表示的意义与图1相同. 通过计算得到的与E917合作组^[30]实验数据符合的参数值是: $\bar{\gamma}T = 155\text{MeV}$, $Dy = 1.16$, $\Delta y = 0.75$. 对于不同中心性的碰撞(0%—5%到39%—81%), 领头射弹质子或领头靶质子的贡献分别为: $k=0.020, 0.075, 0.117, 0.162, 0.240$. 对应的 χ^2/dof 分别为: 0.0130, 0.0185, 0.0071, 0.0144, 0.0107.

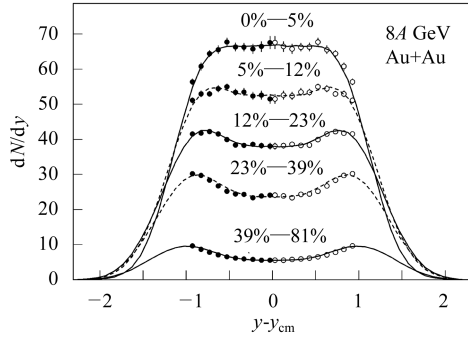


图2 金-金以8.4GeV的能量碰撞产生质子的快度分布
实圆圈是由E917合作组^[30]测量的实验数据, 空心圆圈是实圆圈围绕 $y = y_{\text{cm}}$ 的反射点. 曲线是用 Monte Carlo 方法计算的结果.

图3也与图1相似, 但入射的能量变为10.8AGeV. 符号、实圆圈、空心圆圈和曲线所表示的意义与图1相同. 通过计算得到的与E917合作组^[30]实验数据符合的参数值是: $\bar{\gamma}T = 165\text{MeV}$, $Dy = 1.42$, $\Delta y = 0.79$. 对于不同的中心性碰撞(0%—5%到39%—81%), 领头射弹质子或领头靶质子的贡献分别为: $k=0.031, 0.065, 0.124, 0.210, 0.295$. 对应的 χ^2/dof 分别为: 0.0461, 0.0587, 0.0420, 0.0171, 0.0265.

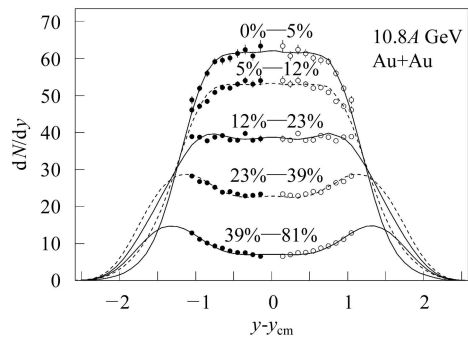


图3 金-金以10.8AGeV的能量碰撞产生质子的快度分布
实圆圈是由E917合作组^[30]测量的实验数据, 空心圆圈是实圆圈围绕 $y = y_{\text{cm}}$ 的反射点. 曲线是用 Monte Carlo 方法计算的结果.

图4是在实验室参照系下, 铅-铅以158AGeV/c的动量中心碰撞产生质子的快度分布, 纵坐标表示

末态质子的快度分布, 横坐标 y 表示该参照系下质子的快度, 实圈是由NA49合作组^[31]测量的实验数据, 空心圆圈是围绕中心快度的反射点. 曲线表示的是用三火球模型分析并用 Monte Carlo 方法计算的结果. 由图4可以看出: 三火球模型得到的理论曲线能与NA49合作组^[31]测量的实验数据基本符合. 通过计算得到的与实验数据比较符合的参数值是: $\bar{\gamma}T = 590\text{MeV}$, $Dy = 1.80$, $\Delta y = 1.06$, $k = 0.200$, $\chi^2/\text{dof} = 1.1623$.

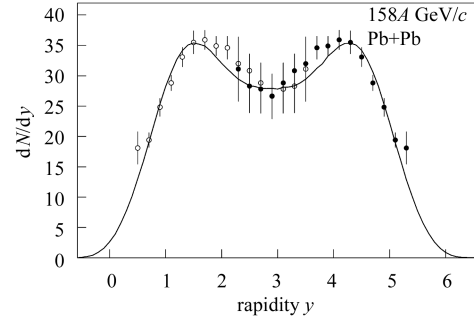


图4 铅-铅以158.4GeV/c的动量中心碰撞产生质子的快度分布
实圆圈是由NA49合作组^[31]测量的实验数据, 空心圆圈是实圆圈围绕中心快度的反射点. 曲线是用 Monte Carlo 方法计算的结果.

图5是质心参照系下, 硫-硫以200AGeV/c的动量中心碰撞产生质子的快度分布, 纵坐标表示末态质子的快度分布, 横坐标 $y-y_{\text{cm}}$ 表示质心参照系下质子的快度, 其中 y 表示实验室参照系的快度, y_{cm} 表示质心系相对于实验室系的快度. 实圈是NA35合作组^[32]测量的实验数据, 曲线表示的是用三火球模型分析并用 Monte Carlo 方法计算得到的结果. 由图5看出: 三火球模型分析得到的理论曲线能与NA35合作组^[32]测量的实验数据基本符合. 通过计算得到的与实验数据比较符合的参数值是: $\bar{\gamma}T = 598\text{MeV}$, $Dy = 2.26$, $\Delta y = 1.21$, $k = 0.230$, $\chi^2/\text{dof} = 0.0302$.

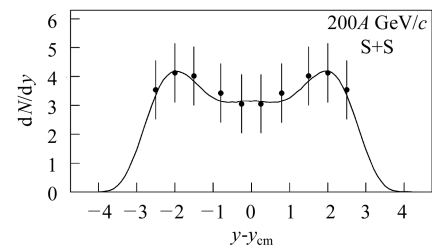


图5 硫-硫以200.0GeV/c的动量中心碰撞产生质子的快度分布
实圆圈是由NA35合作组^[32]测量的实验数据. 曲线是用 Monte Carlo 方法计算的结果.

4 讨论

为了比较得到的参数值, 表1给出了6, 8, 10.8 AGeV 3种能量下 Au-Au 碰撞中领头质子的贡献(k 值)随中心性的变化. 可以看出, 对中心碰撞(0%—5%)和边缘碰撞(39%—81%)而言, 领头质子的贡献随入射能量的增大有增大的趋势, 但对半中心碰撞(5%—12%, 12%—23%, 23%—39%)来说, k 值随入射能量的变化趋势不明显. 因为表1列出的3种能量差别太小, 由表1得出的有关 k 值随入射能量的变化规律仅是初步的.

表1 3种能量下 Au-Au 碰撞中领头质子贡献(k 值)随中心性的变化

入射能量	0%—5%	5%—12%	12%—23%	23%—39%	39%—81%
6 AGeV	0.010	0.064	0.116	0.178	0.232
8 AGeV	0.020	0.075	0.117	0.162	0.240
10.8 AGeV	0.031	0.065	0.124	0.210	0.295

表2总结了对不同类型中心碰撞拟合得到的参数值. 可以明显看出, 随着入射能量的增大, 碰撞的剧烈程度(由 $\bar{\gamma}T$ 描述)增大, 领头质子的快度移动量(Dy)、非中心火球的快度移动量(Δy)以及领头质子的贡献(由 k 值描述)也增大. 可以想象, 入射能量较低时, 3个火球很靠近; 入射能量较高时, 射弹火球和靶火球离中心火球较远. 随着入射能量的提高, 射弹和靶核中的质子更易出现在碎裂区, 表现为领头质子的贡献增大.

表2 不同类型中心碰撞拟合参数值的比较

碰撞类型	$\bar{\gamma}T/\text{MeV}$	Dy	Δy	k
6 AGeV Au-Au	145	1.13	0.72	0.010
8 AGeV Au-Au	155	1.16	0.75	0.020
10.8 AGeV Au-Au	165	1.42	0.79	0.031
158 AGeV/c Pb-Pb	590	1.80	1.06	0.200
200 AGeV/c S-S	598	2.26	1.21	0.230

在本文涉及的能区, 认为3个火球的贡献相等, 这与早先三火球模型^[20—22]的处理一致. 在更高能区, 中心火球的贡献会增大, 甚至中心火球的纵向膨胀需要考虑, 这时, 也许需要两个或多个中心火球. 事实上, 考虑非常多中心火球时, 火球模型就发展成了热化柱模型^[23—29].

在强子-强子碰撞中, 参加者强子仅有两个, 它们作为领头粒子在末态粒子中所占的比例与核-核碰撞有较大不同. 因为对强子-强子碰撞而言, 随着入射能量的增大, 末态粒子增多, 但可能的领头粒子数最多仍为两个. 而对核-核碰撞来说, 随着入射能量的增大, 核的阻止本领相对减小, 参加者质子更易成为领头粒子; 同时, 核-核碰撞中不直接参加强烈反应的所谓旁观者, 也因入射能量增大时, 激发程度增大和级联碰撞增多等原因, 贡献了更多的领头粒子. 表2中参数 k 值随入射能量增大而增大的规律, 对本文涉及能区的核-核碰撞而言是正确的. 表2中得出的 $\bar{\gamma}T$, Dy 和 Δy 值随入射能量增大而增大的规律, 与强子-强子碰撞一致.

5 结论

从图1—3和表1, 2可以看出, 用三火球模型分析金-金分别以6, 8和10.8 AGeV的能量并在同一能量下以不同的中心性碰撞产生质子的快度分布, 能够很好地与E917合作组^[30]报道的实验数据相符合. 参数 $\bar{\gamma}T$, Dy 和 Δy 的值随着入射能量的增大而增大, 但在同一能量下, 参数值与中心性无关. 在相同入射能量下, 领头质子的贡献随着中心性的减少而增大, 领头质子的不同贡献导致了质子快度的不同分布形状. 由图4知, 用三火球模型分析铅-铅以158 AGeV/c的动量碰撞产生质子的快度分布, 能与NA49合作组^[31]测量的实验数据相符合. 由图5知, 用三火球模型分析硫-硫以200 AGeV/c的动量碰撞产生质子的快度分布, 除少数点外都能与NA35合作组^[32]测量的实验数据相符合. 可见, 三火球模型能够成功地描述在核-核碰撞中产生质子的快度分布.

高能核-核碰撞过程相当复杂, 本文的分析工作还有待深入, 但本文的意义至少有3点: (1) 将描述强子碰撞过程的三火球模型^[20, 21]直接应用于核碰撞过程, 得到了与实验符合的结果, 扩展了三火球模型的适用范围. (2) 参数 $\bar{\gamma}T$, Dy , Δy 的值与碰撞的中心性无关, 反映了不同中心性事例具有的共同特征: 对产生质子而言, 反应系统的激发和扩展程度不依赖于中心性. (3) 领头质子的贡献对产生质子的快度分布起决定作用, 不同中心性事例对应的不同快度分布主要由领头质子的贡献决定.

参考文献(References)

- 1 Kharzeev D, Levin E. Phys. Lett., 2001, **B523**(1-2): 79—87
- 2 Hirano T. Phys. Rev., 2002, **C65**(1): 011901-1—011901-5
- 3 WANG X N, Gyulassy M. Phys. Rev., 1991, **D44**(11): 3501—3516
- 4 PANG Y, Schlagel T J, Kahana S H. Nucl. Phys., 1992, **A544**(1-2): 435—438
- 5 Werner K. Phys. Rep., 1993, **232**(2-5): 87—299
- 6 Abreu M C, Alessandro B, Alexa C et al. Phys. Lett., 2002, **B530**(1—4): 33—42
- 7 Singh G, Sengupta K, Jain P L. Phys. Rev. Lett., 1988, **61**(9): 1073—1076
- 8 Adamovich M I, Aggarwal M M, Arora R et al(EMU01 Collaboration). Phys. Rev. Lett., 1989, **62**(24): 2801—2804
- 9 Jain P L, Singh G, Sengupta K. Phys. Rev., 1991, **C43**(5): 2027—2030
- 10 Arsene I, Bearden I G, Beavis D et al. Phys. Rev. Lett., 2003, **91**(7): 072305
- 11 Ahle L, Akiba Y, Ashktorab K et al(E802 Collaboration). Phys. Rev., 1999, **C59**(4): 2173—2188
- 12 Ahle L, Akiba Y, Ashktorab K et al(E802 Collaboration). Phys. Rev., 1999, **C60**(6): 064901
- 13 Back B B, Betts R R, Chang J et al(E917 Collaboration). Phys. Rev. Lett., 2001, **86**(10): 1970—1973
- 14 Nystrand J L, Adamovich M I, Aggarwal M M et al. Nucl. Phys., 1994, **A566**(1-4): 419—422
- 15 Adamovich M I, Alexandrov Y A, Asimov S A et al(EMU01 Collaboration). Phys. Lett., 1988, **B201**(3): 397—402
- 16 Adamovich M I, Aggarwal M M, Andreeva N P et al(EMU01 Collaboration). Phys. Lett., 1989, **B227**(2): 285—290
- 17 Sorge H. Phys. Rev., 1995, **C52**(6): 3291—3314
- 18 LIU Fu-Hu, SUN Han-Cheng. HEP & NP, 1995, **19**(1): 21—26
- 19 Westfall G D, Gosset J, Johansen P J. Phys. Rev. Lett., 1976, **37**(18): 1202—1205
- 20 LIU Lian-Shou, Meng Ta-Chung. Phys. Rev., 1983, **D27**(11): 2640—2647
- 21 CHOU Kuang-Chao, LIU Lian-Shou, MENG Ta-Chung. Phys. Rev., 1983, **D28**(5): 1080—1085
- 22 LIU Fu-Hu, SUN Han-Cheng. HEP & NP, 1994, **18**(12): 1073—1077 (in Chinese)
(刘福虎, 孙汉城. 高能物理与核物理, 1994, **18**(12): 1073—1077)
- 23 MENG Cai-Rong, LI Xiao-Lin, DUAN Mai-Ying. HEP & NP, 2004, **28**(11): 1165—1169 (in Chinese)
(孟彩荣, 李晓琳, 段麦英. 高能物理与核物理, 2004, **28**(11): 1165—1169)
- 24 LIU Fu-Hu. Acta Physica Sinica (Overseas Edition), 1998, **7**(5): 321—326
- 25 LIU Fu-Hu, Panebratsev Y A. Nucl. Phys., 1998, **A641**(4): 379—385
- 26 LIU Fu-Hu, Panebratsev Y A. Phys. Rev., 1999, **C59**(2): 1193—1195
- 27 LIU Fu-Hu, Panebratsev Y A. Phys. Rev., 1999, **C59**(3): 1798—1801
- 28 LIU Fu-Hu. Phys. Lett., 2004, **B583**(1): 68—72
- 29 LIU Fu-Hu, YIN Xin-Yi, TIAN Jun-Long et al. Phys. Rev., 2004, **C69**(3): 034905-1—034905-5
- 30 Back B B, Betts R R, Chang J et al(E917 Collaboration). Phys. Rev., 2002, **C66**(5): 054901
- 31 Appelshäuser H, Bächler J, Bailey S J et al(NA49 Collaboration). Phys. Rev. Lett., 1999, **82**(12): 2471—2475
- 32 Bächler J, Bartke J, Bialkowska H et al(NA35 Collaboration). Phys. Rev. Lett., 1994, **72**(10): 1419—1422

Proton Rapidity Distribution in Nucleus-Nucleus Collisions at High Energy*

MENG Cai-Rong^{1,2;1)}

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

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

Abstract The rapidity distribution of protons produced in nucleus-nucleus collisions at the Alternating Gradient Synchrotron (AGS) and the Super Proton Synchrotron (SPS) energies are analyzed by the three-fireball model. The calculated results with Monte Carlo method are in agreement with the experimental data of Au-Au collisions at different centralities at 6, 8, and 10.8 AGeV, Pb-Pb collisions at 158 AGeV/c, and S-S collisions at 200 AGeV/c.

Key words Au-Au collisions, Pb-Pb collisions, S-S collisions, rapidity distribution, three-fireball model

Received 29 September 2005

*Supported by National Natural Science Foundation of China (10275042, 10475054), Shanxi Natural Science Foundation (20021006), Shanxi Returned Overseas Scholars Foundation[(2001) 15], Shanxi Key Subjects Foundation[(2002) 4] and Xinzhou Normal University Foundation(200304)

1) E-mail: mcr_mcr@163.com