

文章编号: 1007-4627(2012)01-0052-05

$\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV 的 d+Au 碰撞中末态带电粒子 赝快度分布的对心度依赖性

娄小辉, 姜志进, 李庆广

(上海理工大学理学院, 上海 200093)

摘要: 将核子-核子碰撞末态带电粒子的生成源分为二元核子-核子碰撞与带头粒子两部分, 给出了末态带电粒子的赝快度分布与入射能量间的解析关系。以此为基础, 将核-核碰撞末态带电粒子的生成源分为二元核子-核子碰撞、带头粒子与旁观者 3 部分, 建立起了以碰撞参数与束流能量为自变量的末态带电粒子的赝快度分布, 并用其分析了 BNL-RHIC-PHOBOS 合作组在 $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV 的不同 d+Au 对心度碰撞中所做的实验测量。所得结果与实验符合得很好。

关键词: 二元核子-核子碰撞; 带头粒子; 旁观者

中图分类号: O572.2 **文献标志码:** A

1 引言

近年来, 许多实验室都对高能核-核碰撞末态带电粒子的赝快度分布做了大量的实验测量^[1-7], 这些测量表明: 不同对心度碰撞中的赝快度分布在中心快度区均有一个平台结构, 各平台在 $\eta=0$ 附近有一个凹陷区, 随着对心度的增加(碰撞参数的增加), 平台将变得低而宽。为了解释所观察到的实验现象, 人们曾提出过多种理论模型, 较典型的有: 微观运输模型(Ultra-relativistic Quantum Molecular Dynamics, 简称 UrQMD)^[8-9]、流体力学模型^[10-13]、热化模型^[14-15]、几何模型^[16-18]和分子重组模型^[19]等。各种模型都在一定的条件下取得了一定的成功, 但也存在着许多困难, 核-核碰撞完善的终极理论还远远没有建立起来。

在核-核碰撞中, 由于其简单性, 人们对等核碰撞问题研究得比较多, 而对非等核碰撞问题, 如 d+Au 碰撞, 研究得则比较少。

在 $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV 的 d+Au 碰撞中, BNL-RHIC-PHOBOS 合作组的实验测量表明: 其末态带电粒子的赝快度对 $\eta=0$ 点呈不对称分布, Au 核碎裂区的峰远高于 d 核碎裂区的峰, 且随着对心度

(碰撞参数)的减小, 这种不对称性将变得愈加明显。目前, 理论上对于这样的分布特点还没有给出合理的解释。本文将建立起一种以碰撞参数与束流能量为自变量的核-核碰撞末态带电粒子赝快度分布, 并用其讨论 d+Au 碰撞的实验测量, 解释该碰撞中末态带电粒子赝快度分布的不对称性。

2 核子-核子碰撞中末态带电粒子的赝快度分布

在核子-核子碰撞中, 末态带电粒子来源于两部分: 一部分来源于二元核子-核子碰撞中的能量损失; 另一部分来源于带头粒子。

实验研究表明^[20]: 如同核-核碰撞的情况, 核子-核子碰撞末态带电粒子的赝快度分布在中心快度区也有一个平台结构, 转换成快度分布, 所观察到的分布形式可以很好地用如下经验公式描述:

$$\frac{dN_{NN}^{\text{Bin a}}(\sqrt{s_{NN}})}{dy} = \frac{C(\sqrt{s_{NN}})}{1 + \exp\left[\frac{|y| - y_0(\sqrt{s_{NN}})}{\Delta(\sqrt{s_{NN}})}\right]}, \quad (1)$$

式中, $C(\sqrt{s_{NN}})$, $y_0(\sqrt{s_{NN}})$ 和 $\Delta(\sqrt{s_{NN}})$ 为 3 个参数, 其中 $C(\sqrt{s_{NN}})$ 决定着分布的高度, $y_0(\sqrt{s_{NN}})$ 和

收稿日期: 2011-07-18; 修改日期: 2011-07-29

基金项目: 上海市重点学科资助项目(S30501)

作者简介: 娄小辉(1985-), 男, 河南原阳人, 硕士研究生, 从事重离子核物理理论研究; E-mail: louxiaohui@126.com

通讯联系人: 姜志进, E-mail: jzj265@163.com

$\Delta(\sqrt{s_{NN}})$ 决定着平台宽度与分布的范围。由于不同束流能量下快度分布的高度、平台宽度与分布范围都不同, 所以上述 3 参数都应是入射核子能量的函数, 通过与实验结果的比较, 得到其函数关系为

$$\Delta(\sqrt{s_{NN}}) = 0.0655 \ln(\sqrt{s_{NN}}) + 0.1930,$$

$$y_0(\sqrt{s_{NN}}) = 0.7487 \ln(\sqrt{s_{NN}}) - 0.6668,$$

$$C(\sqrt{s_{NN}}) = 0.3463 \ln(\sqrt{s_{NN}}) + 0.7452.$$

由于核子-核子碰撞损失的能量主要集中在质心附近, 由此所产生的末态带电粒子将主要集中在中心快度区, 所以式(1)描述的应是核子-核子碰撞中产自于能量损失的末态带电粒子的快度分布。

在核子-核子碰撞中, 只有两个带头粒子, 它们带走了入射核子大约一半的能量, 所以这些粒子将主要集中在大的快度区域。由于这些带头粒子所携带的能量或具有的快度大致相同, 所以它们的快度分布应具有高斯分布形式:

$$\frac{dN_{NN}^{\text{Lead}}(\sqrt{s_{NN}})}{dy} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \times \exp\left\{-\frac{[|y| - y_{NN}^{\text{Lead}0}(\sqrt{s_{NN}})]^2}{2\sigma^2}\right\}, \quad (2)$$

其中 $y_{NN}^{\text{Lead}0}(\sqrt{s_{NN}})$ 与 σ 分别为分布的中心位置与标

准误差, 它们的取值可由拟合实验来确定。这样, 在核子-核子碰撞中, 末态带电粒子的快度分布应具有以下形式:

$$\frac{dN_{NN}(\sqrt{s_{NN}})}{dy} = \frac{dN_{NN}^{\text{Bin a}}(\sqrt{s_{NN}})}{dy} + \frac{dN_{NN}^{\text{Lead}}(\sqrt{s_{NN}})}{dy}, \quad (3)$$

而快度与赝快度间有关系为

$$y(\mathbf{b}) = \frac{1}{2} \ln \left[\frac{\sqrt{p_T^2(\mathbf{b}) \cosh^2 \eta + m^2} + p_T(\mathbf{b}) \sinh \eta}{\sqrt{p_T^2(\mathbf{b}) \cosh^2 \eta + m^2} - p_T(\mathbf{b}) \sinh \eta} \right],$$

$$\frac{dN_{NN}(\mathbf{b})}{d\eta} = \sqrt{1 - \frac{m^2}{m_T^2(\mathbf{b}) \cosh^2 y(\mathbf{b})}} \frac{dN_{NN}(\mathbf{b})}{dy}. \quad (4)$$

图 1 给出了在 $\sqrt{s}=200, 45.2$ 及 23.6 GeV 的 p+p 碰撞中, 末态带电粒子的赝快度分布, 其中点、三角型与圈是 UA5 合作组所做的实验测量^[21], 虚点线为由式(1)计算的结果, 虚线是由式(2)计算的结果, 实线是由式(3)计算的结果。

计算中, 式(2)中的 σ 对于不同的入射能量取常数 0.60, $y_{NN}^{\text{Lead}0}$ 按能量由高到低依次取为 3.78, 2.64 和 2.26。由图 1 可以看出, 由式(3)得到的结果与实验符合得非常好。

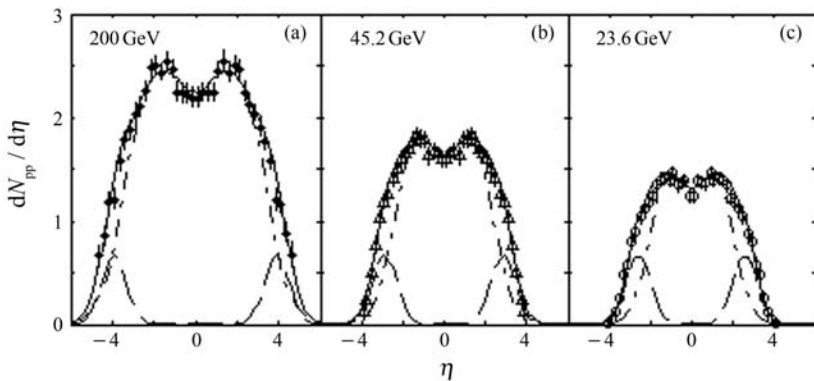


图 1 $\sqrt{s_{NN}}=200, 45.2$ 与 23.6 GeV 的 p+p 碰撞中末态带电粒子的赝快度分布
点、三角形和圈为 UA5 合作组的实验结果^[21], 不同曲线的意义见正文。

3 核-核碰撞中末态带电粒子的赝快度分布

在核-核碰撞中, 末态带电粒子来自于 3 方面:

(1) 二元核子-核子碰撞中的能量损失; (2) 带头粒子; (3) 碰撞区域内的旁观者。对于碰撞区域外的旁观者, 由于它们主要以核碎片的形式出现在末态,

所以它们对末态带电粒子的贡献可以忽略不计。

由于核-核碰撞中损失的总能量等于每次二元核子-核子碰撞中损失的能量之和, 所以在碰撞参数为 \mathbf{b} 的 A+B 核-核碰撞中, 由能量损失产生的总的带电粒子应等于每次二元核子-核子碰撞产生的带电粒子的加权叠加, 即

$$\frac{dN_{AB}^{\text{Bin } a}(\sqrt{s_{\text{NN}}}, \mathbf{b})}{dy} = \sum_{n=1}^{AB} P(n, \mathbf{b}) \sum_{i=1}^n \frac{dN_{\text{NN}}^{\text{Bin } a}(\sqrt{s_{\text{NN}}^i}, \mathbf{b})}{dy}, \quad (5)$$

其中: A 与 B 是两碰撞核的质量数; $\sqrt{s_{\text{NN}}^i}$ 为第 i 次核子-核子碰撞的质心能量; $dN_{\text{NN}}(\sqrt{s_{\text{NN}}}, \mathbf{b})/dy$ 是相应的快度分布, 其形式与式(1)的相同, 上式中的 $P(n, \mathbf{b})$ 是发生 n 次二元核子-核子碰撞的几率, 取形式^[22]

$$P(n, \mathbf{b}) = \binom{AB}{n} [T_P(\mathbf{b})\sigma_{\text{NN}}^{\text{in}}]^n \times [1 - T_P(\mathbf{b})\sigma_{\text{NN}}^{\text{in}}]^{AB-n}, \quad (6)$$

其中: $T_P(\mathbf{b})$ 是单位面积内发生一次二元核子-核子碰撞的几率^[23]; $\sigma_{\text{NN}}^{\text{in}}$ 是非弹性核子-核子碰撞截面, 对于 $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 200$ GeV 的碰撞, $\sigma_{\text{NN}}^{\text{in}} = 42$ mb^[3]。

考虑到 $\sqrt{s_{\text{NN}}^i}$ 随 i 的增加而减少, 且两者之间的函数关系目前还不清楚, 所以式(5)可以写成

$$\frac{dN_{AB}^{\text{Bin } a}(\mathbf{b})}{dy} = N_{\text{Bin } a}^{\text{eff}}(\mathbf{b}) \{1 - [1 - T_P(\mathbf{b})\sigma_{\text{NN}}^{\text{in}}]^{AB}\} \times \frac{dN_{\text{NN}}^{\text{Bin } a}(\sqrt{s_{\text{NN}}}, \mathbf{b})}{dy}, \quad (7)$$

其中

$$N_{\text{Bin } a}^{\text{eff}}(\mathbf{b}) = \frac{N_{\text{Bin } a}(\mathbf{b})}{1 + \alpha [N_{\text{Bin } a}(\mathbf{b}) - 1]^\beta} \quad (8)$$

为有效二元核子-核子碰撞数, 式中的 α 与 β 为两个与碰撞参数无关的唯象常数, $N_{\text{Bin } a}(\mathbf{b})$ 是二元核子-核子碰撞数, 其数值可以由文献[22]所介绍的理论模型求得。表 1 给出了在 $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 200$ GeV 的各不同 $d+\text{Au}$ 对心度碰撞中的碰撞参数间隔 Δb , 各核在碰撞区域内的平均核子总数 $\bar{N}_{\text{Total}}^{\text{Au}}$ 和 $\bar{N}_{\text{Total}}^{\text{d}}$, 各核在碰撞区域内的平均旁观者 $\bar{N}_{\text{Spect}}^{\text{Au}}$ 和 $\bar{N}_{\text{Spect}}^{\text{d}}$, 各核内的平均参与者 $\bar{N}_{\text{Part}}^{\text{Au}}$ 与 $\bar{N}_{\text{Part}}^{\text{d}}$, 两核内的平均二元核子-核子碰撞数 \bar{N}_{Bina} 以及两核内的平均有效二元核子-核子碰撞数 $\bar{N}_{\text{Bina}}^{\text{eff}}$ 。括号内的数值为 BNL-RHIC-PHOBOS 合作组的结果^[1], 其余数值为文献[22]中的模型计算结果。

表 1 $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 200$ GeV 的各不同 $d+\text{Au}$ 对心度碰撞中的相关参数

对心度 (%)	$\Delta b/\text{fm}$	$\bar{N}_{\text{Total}}^{\text{Au}}$	$\bar{N}_{\text{Total}}^{\text{d}}$	$\bar{N}_{\text{Part}}^{\text{Au}}$	$\bar{N}_{\text{Part}}^{\text{d}}$	$\bar{N}_{\text{Spect}}^{\text{Au}}$	$\bar{N}_{\text{Spect}}^{\text{d}}$	\bar{N}_{Bina}	$\bar{N}_{\text{Bina}}^{\text{eff}}$
0~20	0~3.7	151.3	2.0	13.8(13.5±1.0)	1.9(2.0±0.1)	137.5	0.1	15.1(14.7±0.9)	6.7
20~40	3.7~5.2	95.5	2.0	9.2(8.9±0.7)	1.8(1.9±0.1)	86.3	0.2	10.0(9.8±0.7)	4.6
40~60	5.2~6.4	50.4	2.0	5.4(5.4±0.6)	1.5(1.70±.2)	45.0	0.5	6.3(5.9±0.6)	3.4
60~80	6.4~7.3	18.4	2.0	3.4(2.9±0.5)	1.3(1.4±0.2)	15.0	0.7	3.4(3.1±0.6)	2.4
80~100	7.3~8.2	4.5	2.0	2.0(1.6±0.4)	1.0(1.1±0.2)	2.5	1.0	2.3(1.7±0.5)	1.6

如同核子-核子碰撞的情况, 核-核碰撞中的带头粒子与旁观者的快度分布也应具有高斯分布的形式:

$$\frac{dN_{AB}^{\text{Lead}}(\sqrt{s_{\text{NN}}}, \mathbf{b})}{dy} = \frac{N_{\text{Lead}}(\mathbf{b})}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\text{Lead}}(\mathbf{b})} \times \exp\left\{-\frac{[|y| - y_{AB}^{\text{Lead}0}(\sqrt{s_{\text{NN}}}, \mathbf{b})]^2}{2\sigma_{\text{Lead}}^2(\mathbf{b})}\right\}, \quad (9)$$

$$\frac{dN_{AB}^{\text{Spect}}(\sqrt{s_{\text{NN}}}, \mathbf{b})}{dy} = \frac{N_{\text{Ch-Spect}}(\mathbf{b})}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\text{Spect}}(\mathbf{b})} \times \exp\left\{-\frac{[|y| - y_{AB}^{\text{Spect}0}(\sqrt{s_{\text{NN}}}, \mathbf{b})]^2}{2\sigma_{\text{Spect}}^2(\mathbf{b})}\right\}, \quad (10)$$

其中: $N_{\text{Lead}}(\mathbf{b}) = N_{\text{Part}}(\mathbf{b})$ 是带头粒子数; $N_{\text{Ch-Spect}}(\mathbf{b}) = 40\% N_{\text{Spect}}(\mathbf{b})$ 是碰撞区域内的带电旁观者数, 可由表 1 所列数据求得; 分布的标准误差

$\sigma_{\text{Lead}}(\mathbf{b})$ 与 $\sigma_{\text{Spect}}(\mathbf{b})$ 及中心位置 $y_{AB}^{\text{Lead}0}(\sqrt{s_{\text{NN}}}, \mathbf{b})$ 与 $y_{AB}^{\text{Spect}0}(\sqrt{s_{\text{NN}}}, \mathbf{b})$ 可由拟合实验数据确定。

将表 1 中的 $N_{\text{Bina}}(\mathbf{b})$ 带入式(7), 就可以得到各不同核-核对心度碰撞中, 产自于二元核子-核子碰撞能量损失的末态带电粒子的快度分布。将表 1 中的 $N_{\text{Part}}(\mathbf{b})$ 和 $N_{\text{Spect}}(\mathbf{b})$ 分别带入(9)与(10)两式, 就可以得到各不同核-核对心度碰撞中的带头粒子与旁观者的快度分布。由这 3 式就可以得到核-核碰撞中末态带电粒子的快度分布:

$$\frac{dN_{AB}(\sqrt{s_{\text{NN}}}, \mathbf{b})}{dy} = \frac{dN_{AB}^{\text{Bin } a}(\sqrt{s_{\text{NN}}}, \mathbf{b})}{dy} + \frac{dN_{AB}^{\text{Lead}}(\sqrt{s_{\text{NN}}}, \mathbf{b})}{dy} + \frac{dN_{AB}^{\text{Spect}}(\sqrt{s_{\text{NN}}}, \mathbf{b})}{dy}. \quad (11)$$

上式是束流能量与碰撞参数的函数, 将其代入式

(4), 就可用其讨论 $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV 的 d+Au 碰撞末态带电粒子赝快度分布对对心度的依赖关系了。

图 2 给出了 $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV 不同 d+Au 对心度碰撞中, 末态带电粒子的赝快度分布, 其中圈、加号、三角形及四边形是 BNL-RHIC-PHOBOS 合

作组的实验测量值^[1], 点线是式(7)的计算结果, 虚-点线是式(9)的计算结果, 虚线是式(10)的计算结果, 实线是式(11)的计算结果。由该图可以看出, 式(11)的计算结果与实验值符合得很好。

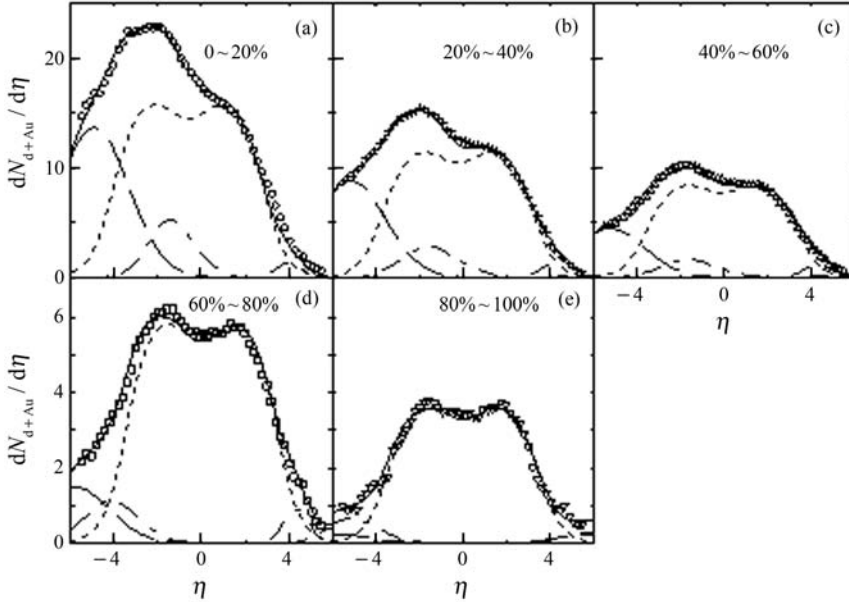


图 2 $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV 不同 d+Au 对心度碰撞中, 末态带电粒子的赝快度分布

式(8)中引入的两个唯象常数 α 与 β 由实验拟合分别确定为 0.39 与 0.48, 将两者及表 1 中的 \bar{N}_{Bina} 带回到式(8), 就可以得到各对心度中的平均有效二元核子-核子碰撞数 $\bar{N}_{\text{Bina}}^{\text{eff}}$, 其数值也列于表 1 中。由该表可以看出, 各对心度中的 $\bar{N}_{\text{Bina}}^{\text{eff}}$ 比 \bar{N}_{Bina} 要小得多, 前者大约是后者的一半, 且随着对心度(碰撞参数)的减少, $\bar{N}_{\text{Bina}}^{\text{eff}}$ 减少的程度变大。表明在假设每次二元核子-核子碰撞的能量均为其入射的束流能量时, 对末态带电粒子的产生有贡献的有效二元核子-核子碰撞数大约为实际二元核子-核子碰撞数的一半。

从图 2 可以看出, 二元核子-核子碰撞中产生的末态带电粒子主要处在中心快度区, 带头粒子与旁观者主要处在大的快度区, 且由于多重碰撞中能量的损失, 带头粒子快度分布的中心处在旁观者的内侧。另由表 1 可知, 各对心度碰撞中, Au 核中的参与者(带头粒子)与旁观者, 远大于 d 核中的参与者与旁观者, 且随着对心度的减少, 两者的差异变得越大。这种差异导致的直接结果是: Au 核碎裂区的峰将高于 d 核碎裂区的峰, 且随着对心度的减

少, 两峰高度的差异将变得愈加明显。这样, 实验上所观察到 d+Au 碰撞中不对称的赝快度分布现象, 在我们所建立的理论模型基础上可以得到合理的解释。

4 结论

基于末态粒子的生成过程, 我们将核子-核子碰撞中的末态粒子生成源分成两部分: 二元核子-核子碰撞中的能量损失和带头粒子。得到了以入射能量为自变量的末态带电粒子的赝快度分布, 该分布对于入射能量 $\sqrt{s_{NN}}=200, 45.2$ 和 23.6 GeV 的 p+p 碰撞的实验测量给出了很好的描述。在此基础上, 又将核-核碰撞中的末态带电粒子生成源成三部分: 各二元核子-核子碰撞中的能量损失、带头粒子与碰撞区域内的旁观者。建立起了以碰撞参数和入射能量为自变量的末态带电粒子的赝快度分布, 所得结果与 BNL-RHIC-PHOBOS 合作组在 $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV 的 d+Au 碰撞中所做的实验测量符合得很好, 对实验上所观察到的不对称的末态带

电粒子的赝快度分布给出了很好的描述。

参考文献 (References):

- [1] BACK B B, BAKER M D, BALLINTIJN M, *et al* (PHOBOS Collaboration). *Phys Rev*, 2005, **C72**: 031901(R).
- [2] BACK B B, BAKER M D, BARTON D S, *et al* (PHOBOS Collaboration). *Phys Rev Lett*, 2003, **91**: 052303.
- [3] BACK B B, BAKER M D, BALLINTIJN M, *et al* (PHOBOS Collaboration). *Nucl Phys*, 2005, **A757**: 28.
- [4] ABELEV B I, AGGARWAL M M, AHAMMED Z, *et al* (STAR Collaboration). *Phys Rev*, 2010, **C81**: 054907.
- [5] ALVER B, BACK B B, BAKER M D, *et al* (PHOBOS Collaboration). *Phys Rev*, 2011, **C83**: 024913.
- [6] ADARE A, AFANASIEV S, AIDALA C, *et al* (PHENIX Collaboration). *Phys Rev*, 2011, **C83**: 024909.
- [7] AAMODT K, ABRAHANTES Q A, ADAMOVÁ D, *et al* (ALICE Collaboration). *Phys Rev Lett*, 2011, **106**: 032301.
- [8] MITROVSKI M, SCHUSTER T, GRÄF G, *et al*. *Phys Rev*, 2009, **C79**: 044901.
- [9] PETERSEN H, MITROVSKI M, SCHUSTER T, *et al*. *Phys Rev*, 2009, **C80**: 054910.
- [10] WONG C Y. *Phys Rev*, 2008, **C78**: 054902.
- [11] BOŹEK P, WYSKIEL I. *Phys Rev*, 2009, **C79**: 044916.
- [12] OSADA T. *Phys Rev*, 2010, **C81**: 024907.
- [13] RENK T, HOLOPAINEN H, HEINZ U, *et al*. *Phys Rev*, 2011, **C83**: 014910.
- [14] MUNZINGER B P, STACHEL J, WESSELS J P, *et al*. 1995, **B344**: 43.
- [15] LIU F H. *Phys Rev*, 2002, **C66**: 047902.
- [16] HÜFNER J, JOERN K. *NUCL Phys*, 1997, **A290**: 460.
- [17] JEON S, KAPUSTA J I. *Phys Rev*, 1997, **C56**: 468.
- [18] HUMANIC T J. *Phys Rev*, 2009, **C79**: 044902.
- [19] SHAO C E, SONG J, SHAO F L, *et al*. *Phys Rev*, 2009, **C80**: 014909.
- [20] THOMÉ W, EGGERT K, GIBONI K, *et al*. *Nucl Phys*, 1977, **B129**: 365.
- [21] BUSZA W. *Phys Pol*, 2004, **35**: 2873.
- [22] JIANG Zhijin. SUN Yufen. *Nuclear Physics Review*, 2010, **27**(4): 421(in Chinese).
(姜志进, 孙玉芬. 原子核物理评论, 2010, **27**(4): 421.)
- [23] JIANG Zhijin. *Nuclear Physics Review*, 2011, **28**(4): 404(in Chinese).
(姜志进. 原子核物理评论, 2011, **28**(4): 404.)

Centrality Dependences of Charged-particle Pseudorapidity

Distributions in d+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV

LOU Xiao-hui, JIANG Zhi-jin, LI Qing-guang

(College of Science, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: We divide the particle generating sources in nucleon-nucleon collisions into two parts: binary collisions and leading particles, and present the analytical relation between charged-particle pseudorapidity distributions and incident energy. On the basis of this work, we classify the particle generating sources in nucleus-nucleus collisions into three parts: binary collisions, leading particles and spectators, and formulate the charged-particle pseudorapidity distributions as the function of incident energy and impact parameter. We then analyze with the model the experimental measurements in d+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV. The theoretical results are well consistent with experimental data.

Key words: binary nucleon-nucleon collision; leading particle; spectator