

文章编号: 1007-4627(2010)04-0421-05

# 高能 Cu+Cu 碰撞中末态带电粒子赝快度分布的能量与对心度依赖性\*

姜志进, 孙玉芬

(上海理工大学理学院, 上海 200093)

**摘要:** 利用 Glauber 模型, 给出了核-核碰撞中的参与者数及二元核子-核子碰撞数与碰撞参数的解析关系, 并以此为基础, 在考虑到参与者由于多重碰撞而引起的能量损失效应后, 通过有效二元核子-核子碰撞末态带电粒子赝快度分布的加权叠加, 建立起了以碰撞参数为自变量的核-核碰撞末态带电粒子的赝快度分布函数, 并用其分析了 RHIC-PHOBOS 合作组在不同能量与不同对心度的 Cu+Cu 碰撞中所做的实验测量。所得结果与实验符合得较好。

**关键词:** Glauber 模型; 参与者; 二元核子-核子碰撞

**中图分类号:** O572.2

**文献标识码:** A

## 1 引言

高能核-核碰撞末态带电粒子赝快度分布是一个可在实验上直接测得的全局量, 通过对其进行研究, 有助于了解核-核碰撞的物理机制, 获取末态粒子的产生与相互作用的信息。另外, 按照 Bjorken 理论<sup>[1]</sup>, 重离子碰撞末态产物的初始能量密度与末态带电粒子的快度密度  $dN/dy$  成正比, 并且在假设重离子碰撞末态产物在冻析为末态粒子的过程中处于热平衡时, 赝快度分布还与冻析温度有关<sup>[2, 3]</sup>。通过对其进行研究, 有助于了解重离子碰撞末态产物的初始能量密度与温度, 这对于研究相变条件<sup>[4, 5]</sup>、寻找夸克-胶子等离子体(QGP)是重要的。因此, 高能重离子碰撞末态带电粒子的赝快度分布一直是高能物理理论与实验研究的一个重要课题。

最近几年, RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider)上的合作组对重离子碰撞中末态带电粒子的赝快度分布做过许多实验测量<sup>[6-10]</sup>。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这一实验现象, 人们曾提出过多种理论模型, 典型的有: 流体力学

模型<sup>[11, 12]</sup>、三火球模型<sup>[13, 14]</sup>、热化模型<sup>[2, 3]</sup>、热化柱模型<sup>[15, 16]</sup>、部分子组合模型<sup>[17, 18]</sup>及微观输运模型<sup>[19, 20]</sup>等。在我们的前期工作中<sup>[21]</sup>, 曾对  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV 的 Au+Au 碰撞中末态带电粒子的赝快度分布做过讨论, 这里将对原模型做以推广, 使之适应于任意能量的核-核碰撞情况。

首先利用 Glauber 模型<sup>[22-24]</sup>给出了核-核碰撞中的参与者数及二元核子-核子碰撞数与碰撞参数的解析关系。然后, 以所得结果为基础, 在考虑到参与者由于多重碰撞而引起的能量损失效应后, 通过有效二元核子-核子碰撞末态带电粒子赝快度分布的加权叠加, 建立起了以碰撞参数为自变量的核-核碰撞末态带电粒子的赝快度分布函数。最后, 用所建立起来的理论模型讨论了 RHIC-PHOBOS 合作组在不同能量与不同对心度的 Cu+Cu 碰撞中对末态带电粒子的赝快度分布所做的实验测量<sup>[9, 10]</sup>。

## 2 核-核碰撞中的参与者数与二元核子-核子碰撞数

在核-核碰撞中, 两核将相互穿透, 在这相互穿透的过程中, 两核中的核子将相互碰撞。利用

\* 收稿日期: 2009-10-14; 修改日期: 2009-10-26

\* 基金项目: 上海市重点学科资助项目(S30501)

作者简介: 姜志进(1960-), 男(汉族), 山东乳山人, 从事重离子核物理理论研究; E-mail: Jzj265@163.com

Glauber 模型, 可以求得在不同对心度与不同能量下, 核-核碰撞的参与者数与二元核子-核子碰撞数。这方面内容在我们的前期工作中已有介绍<sup>[22]</sup>, 这里, 为了后面的应用, 将该工作中的主要内容进行简单的介绍。

### 2.1 核-核碰撞中的参与者数

在 A-B 核碰撞中, 一定碰撞区域内的平均参与者数由下式给定:

$$\bar{N}_{\text{Part}} = \frac{\int N_{\text{Part}}(\mathbf{b}) d^2 \mathbf{b}}{\int d^2 \mathbf{b}}, \quad (1)$$

其中  $\mathbf{b}$  为碰撞参数,

$$N_{\text{Part}}(\mathbf{b}) = \int n_{\text{Part}}(\mathbf{b}, \mathbf{s}) d^2 s$$

是碰撞参数为  $\mathbf{b}$  时的核-核碰撞中的参与者数,

$$n_{\text{Part}}(\mathbf{b}, \mathbf{s}) = T_A(\mathbf{b}) \{1 - \exp[-\sigma_{\text{NN}}^{\text{in}} T_B(\mathbf{s} - \mathbf{b})]\} + T_B(\mathbf{s} - \mathbf{b}) \{1 - \exp[-\sigma_{\text{NN}}^{\text{in}} T_A(\mathbf{b})]\}$$

为在与入射轴相垂直的碰撞截面上、相对 A 核中心位矢为  $\mathbf{s}$  处的单位面元内参与碰撞的核子数,  $\sigma_{\text{NN}}^{\text{in}}$  为非弹性核子-核子碰撞截面,  $T(s)$  为核厚度函数。

### 2.2 核-核碰撞中的二元核子-核子碰撞数

在 A-B 核碰撞中, 一定碰撞区域内的平均二元核子-核子碰撞数由下式给定:

$$\bar{N}_{\text{NN}} = \frac{\int N_{\text{NN}}(\mathbf{b}) d^2 \mathbf{b}}{\int d^2 \mathbf{b}}, \quad (2)$$

其中

$$N_{\text{NN}}(\mathbf{b}) = \frac{\sum_{n=1}^{AB} n P(n, \mathbf{b})}{\sum_{n=1}^{AB} P(n, \mathbf{b})}$$

是碰撞参数为  $\mathbf{b}$  时的核-核碰撞中的二元核子-核子碰撞数,

$$P(n, \mathbf{b}) = \binom{AB}{n} [T_P(\mathbf{b}) \sigma_{\text{NN}}^{\text{in}}]^n \times [1 - T_P(\mathbf{b}) \sigma_{\text{NN}}^{\text{in}}]^{AB-n} \quad (3)$$

为发生  $n$  次核子-核子碰撞的几率,

$$T_P(\mathbf{b}) = \int T_{\text{PA}}(\mathbf{s}) T_{\text{PB}}(\mathbf{s} - \mathbf{b}) d^2 s$$

是在碰撞参数为  $\mathbf{b}$  时的一次 A-B 核碰撞中, 单位碰撞截面内发生一次核子-核子碰撞的几率,  $T_P(s)$  为核的另一种形式的厚度函数。

表 1 给出了  $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 200, 62.4$  和  $22.4$  GeV 的 Cu+Cu 碰撞在 5 个对心度中的平均参与者数  $\bar{N}_{\text{Part}}$  与平均二元核子-核子碰撞数  $\bar{N}_{\text{NN}}$ 。计算中, 对于由大到小的入射能量, 分别取<sup>[9]</sup>  $\sigma_{\text{NN}}^{\text{in}} = 42, 36$  和  $34$

表 1  $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 200, 62.4$  和  $22.4$  GeV 的各 Cu+Cu 对心度碰撞中的平均参与者数  $\bar{N}_{\text{Part}}$  与平均二元核子-核子碰撞数  $\bar{N}_{\text{NN}}$

对心度 (%)	$b/\text{fm}$	$\bar{N}_{\text{Part}}^{200}$	$\bar{N}_{\text{NN}}^{200}$	$\bar{N}_{\text{Part}}^{62.4}$	$\bar{N}_{\text{NN}}^{62.4}$	$\bar{N}_{\text{Part}}^{22.4}$	$\bar{N}_{\text{NN}}^{22.4}$
0-6	0-2.66	104.2 (104±3)	197.9 (197±14)	101.8 (101±3)	174.3 (170±12)	100.0	160.2
6-15	2.66-4.20	81.5 (84±3)	141.1 (144±11)	79.0 (81±3)	124.3 (125±9)	77.2	114.2
15-25	4.20-5.43	58.9 (62±3)	91.0 (94±8)	56.6 (59±3)	80.2 (80±7)	55.1	73.7
25-35	5.43-6.42	40.9 (43±3)	55.8 (56±6)	39.0 (41±3)	49.2 (49±6)	37.7	45.2
35-45	6.42-7.28	(29±3)	(33±5)	26.0	29.1	25.0	26.7

mb。表中括号内的为 RHIC-PHOBOS 合作组的结果<sup>[6-8]</sup>, 其余的为(1)与(2)式的计算结果。由表 1 可以看出, 在误差范围内, 计算结果与 RHIC-PHOBOS 合作组所给出的结果符合得较好。

### 3 核-核碰撞中末态带电粒子的赝快度分布

在核-核碰撞中, 随着碰撞次数的增加, 参与者

的能量将不断减少，减少的能量积聚在质心附近一个小的区域内，最后冻析为末态可测量的粒子。由于冻析的能量来源于每次非弹性二元核子-核子碰撞损失的能量之和，因此核-核碰撞末态带电粒子的快度分布可以表示成二元核子-核子碰撞的加权叠加，即

$$\frac{dN_{AB}(\mathbf{b})}{dy} = \sum_{n=1}^{AB} P(n, \mathbf{b}) \times \sum_{i=1}^n \frac{dN_{NN}(\sqrt{s_{NN}^i}, \mathbf{b})}{dy}, \quad (4)$$

其中， $P(n, \mathbf{b})$ 由(3)式给定， $\sqrt{s_{NN}^i}$ 是第  $i$  次二元核子-核子碰撞的质心能量， $dN_{NN}(\sqrt{s_{NN}^i}, \mathbf{b})/dy$  是该次核子-核子碰撞末态带电粒子的快度分布，本文取<sup>[25]</sup>

$$\frac{dN_{NN}(\sqrt{s_{NN}}, \mathbf{b})}{dy} = \frac{C(\sqrt{s_{NN}})}{1 + \exp\left[\frac{|y(\mathbf{b})| - y_0(\sqrt{s_{NN}})}{\Delta(\sqrt{s_{NN}})}\right]}, \quad (5)$$

其中， $\Delta(\sqrt{s_{NN}})$ 影响着快度分布的宽度， $C(\sqrt{s_{NN}})$ 决定着分布的高度， $y_0(\sqrt{s_{NN}})$ 决定着分布的峰值位置，它们都是质心能量 $\sqrt{s_{NN}}$ 的函数，本文取

$$\Delta(\sqrt{s_{NN}}) = 0.034 \ln(\sqrt{s_{NN}}) + 0.472,$$

$$C(\sqrt{s_{NN}}) = 0.309 \ln(\sqrt{s_{NN}}) + 0.841,$$

$$y_0(\sqrt{s_{NN}}) = 0.706 \ln(\sqrt{s_{NN}}) + 0.009.$$

而快度与赝快度之间的关系为

$$y(\mathbf{b}) = \frac{1}{2} \ln \left[ \frac{\sqrt{p_T^2(\mathbf{b}) \cosh^2 \eta + m^2} + p_T(\mathbf{b}) \sinh \eta}{\sqrt{p_T^2(\mathbf{b}) \cosh^2 \eta + m^2} - p_T(\mathbf{b}) \sinh \eta} \right], \quad (6)$$

$$\frac{dN_{AB}(\mathbf{b})}{d\eta} = \sqrt{1 - \frac{m^2}{m_T^2(\mathbf{b}) \cosh^2 y(\mathbf{b})}} \frac{dN_{AB}(\mathbf{b})}{dy}. \quad (7)$$

实验表明<sup>[26]</sup>，核-核碰撞中末态带电粒子的横动量随碰撞参数的增加而减少，所以(5)式所示的二元核子-核子快度分布应是核-核碰撞参数的函数。

图 1 由上而下依次给出了 $\sqrt{s_{NN}} = 200, 45.2$  和  $23.6$  GeV 时的 p+p 碰撞末态带电粒子的赝快度分布。由该图可以看出，(5)式较好地描述了核子-核

子碰撞末态带电粒子的快度分布。

高能碰撞中的末态带电粒子主要是  $\pi$  介子、K 介子与质子 p，所占比例分别约为 84%，12% 和 4%<sup>[26]</sup>。在上面的计算中，(6)和(7)式中的质量  $m$  取为 3 种粒子质量的平均值，横动量  $p_T$  按质心能量由大到小依次取为 0.35, 0.25 和 0.20 GeV/c。

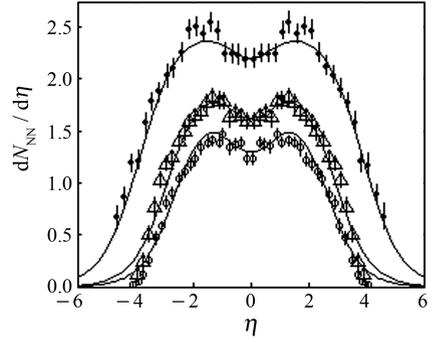


图 1  $\sqrt{s_{NN}} = 200, 45.2$  和  $23.6$  GeV (由上而下)的 p+p 碰撞中末态带电粒子的赝快度分布  
三角形和点为 UA5 合作组的实验结果<sup>[27, 28]</sup>，实线为与(5)式相应的赝快度分布。

由文献[21]知，在考虑到参与者由于多重碰撞而引起的能量损失后，(4)式将变为

$$\frac{dN_{AB}(\mathbf{b})}{dy} = N_{NN}^{\text{eff}}(\mathbf{b}) \{1 - [1 - T_P(\mathbf{b}) \sigma_{NN}^{\text{in}}]^{\text{AB}}\} \times \frac{dN_{NN}(\sqrt{s_{NN}}, \mathbf{b})}{dy}, \quad (8)$$

其中 $\sqrt{s_{NN}}$ 为入射能量，

$$N_{NN}^{\text{eff}}(\mathbf{b}) = \frac{N_{NN}(\mathbf{b})}{1 + \alpha(\mathbf{b})(N_{NN}(\mathbf{b}) - 1)}$$

为有效二元核子-核子碰撞数，其中  $\alpha(\mathbf{b})$ 为一自由参数，这是该理论模型中引入的唯一的自由参数，其具体值可通过拟合实验数据得到。对于 p+p 碰撞， $N_{NN}(\mathbf{b}) = 1$ ，则  $N_{NN}^{\text{eff}}(\mathbf{b}) = 1$ ，又  $T_P(\mathbf{b}) \sigma_{NN}^{\text{in}} = 1$ ，则上式将变为 p+p 碰撞的快度分布，这正是我们所期望的。

图 2 给出了 $\sqrt{s_{NN}} = 200, 62.4$  和  $22.4$  GeV 时 Cu+Cu 各对心度碰撞中末态带电粒子的赝快度分布。由图可以看出，所建立的理论模型在中心快度区内对不同能量与不同对心度碰撞的实验结果都给出了较好的描述，而在大快度区，理论与实验间存在着些许的差异。出现这种差异的原因在于：(8)式

给出的只是二元核子-核子碰撞末态带电粒子的快度分布,而实际上,除了二元核子-核子碰撞外,碰撞过程中的领头粒子与旁观者对快度分布亦有一定

的影响。由于旁观者与带头粒子主要处在大快度区,所以可以预期,若将两者包括其中,理论与实验的拟合情况将会得到进一步的改善。

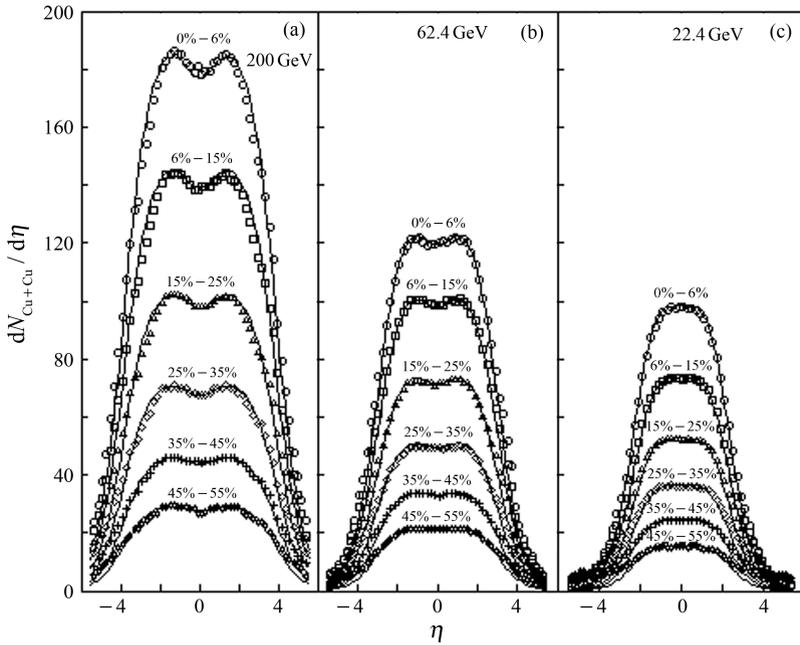


图 2  $\sqrt{s_{NN}} = 200, 62.4$  和  $22.4$  GeV 时 Cu+Cu 各对心度碰撞中末态带电粒子的赝快度分布  
菱形、加号、三角形、四方形及圆圈是 RHIC-PHOBOS 合作组给出的实验结果<sup>[9, 10]</sup>, 实线是与(8)式相应的赝快度分布。

表 2  $\sqrt{s_{NN}} = 200, 62.4$  和  $22.4$  GeV 时各 Cu+Cu 对心度碰撞中的平均有效二元核子-核子碰撞数  $\bar{N}_{NN}^{eff}$

对心度 (%)	$\bar{N}_{NN}^{eff}$ (200)	$\bar{N}_{NN}^{eff}$ (62.4)	$\bar{N}_{NN}^{eff}$ (22.4)
0—6	76	61	60
6—15	60	51	46
15—25	43	37	33
25—35	30	26	23
35—45	19	17	16
45—55	12	11	10

计算中,自由参数  $\alpha(\mathbf{b})$  由实验拟合得到,由此确定的平均有效二元核子-核子碰撞数如表 2 示。与表 1 比较可以看出,平均有效二元核子-核子碰撞数较实际的值要小得多,且随着对心度的减少,减少的程度越大。这意味着在核-核碰撞中,特别是在中心核-核碰撞中,两核中的参与者由于多重碰撞将损失大部分能量。

### 4 结论

采用 Glauber 模型给出了核-核碰撞中的参与

者数及二元核子-核子碰撞数与碰撞参数的解析关系。并用其讨论了  $\sqrt{s_{NN}} = 200, 62.4$  和  $22.4$  GeV 的 Cu+Cu 各对心度碰撞中的上述两数,所得结果与 RHIC-PHOBOS 合作组给出的结果相一致。在此基础上,给出了以碰撞参数为自变量的核-核碰撞末态带电粒子的赝快度分布。在考虑到参与者由于多重碰撞而引起的能量损失后,进一步将该分布表示成有效二元核子-核子碰撞末态带电粒子赝快度分布的加权叠加。所建立的理论模型的最大特点是自由参数少(只有  $\alpha(\mathbf{b})$  或  $N_{NN}^{eff}(\mathbf{b})$  一个)、物理图像直观和数学处理简单。数值计算表明,所建立的理论模型,对  $\sqrt{s_{NN}} = 200—22.4$  GeV 能量范围内各 Cu+Cu 对心度碰撞中末态带电粒子赝快度分布的实验测量,在整体上给出了较好的描述。

### 参考文献 (References):

[1] Bjorken J D. Phys Rev, 1983, **D27**: 140.  
[2] Munzinger B P, Stachel J, Wessels J P, et al. Phys Lett,

- 1995, **B344**: 43.
- [3] Munzinger B P, Stachel J, Wessels J P, *et al.* Phys Lett, 1995, **B365**: 1.
- [4] Li Q, Jiang Z J, Xia H F. Acta Phys Sic, 2006, **55**: 5161(in Chinese).  
(李强, 姜志进, 夏宏福. 物理学报, 2007, **55**: 5161).
- [5] Satz H. Nucl Phys, 2003, **A715**: 3c.
- [6] Back B B, Baker M D, Barton D S, *et al* (PHOBOS Collaboration). Phys Rev Lett, 2003, **91**: 052303.
- [7] Back B B, Baker M D, Ballintijn M, *et al* (PHOBOS Collaboration). Phys Rev Lett, 2005, **94**: 082304.
- [8] Alver B, Bach B B, Baker M D, *et al* (PHOBOS Collaboration). Phys Rev Lett, 2006, **96**: 212301.
- [9] Back B B, Baker M D, Ballintijn M, *et al* (PHOBOS Collaboration). Nucl Phys, 2005, **A757**: 28.
- [10] Back B B, Baker M D, Ballintijn M, *et al* (PHOBOS Collaboration). Phys Rev Lett, 2009, **102**: 142301.
- [11] Wong C Y. Phys Rev, 2008, **C78**: 054902.
- [12] Ryblewski R, Florkowski W. Phys Rev, 2008, **C77**: 064906.
- [13] Liu L S, Meng T C. Phys Rev, 1983, **D27**: 2640.
- [14] Chou K C, Liu L S, Meng T C. Phys Rev, 1983, **D28**: 1080.
- [15] Liu F H. Phys Rev, 2002, **C66**: 047902.
- [16] Liu F H. Chin Phys, 2008, **B17**: 883.
- [17] Hwa R C, Yang C B, Fries R J. Phys Rev, 2005, **C71**: 024902.
- [18] Shao F L, Yao T, Xie Q B. Phys Rev, 2007, **C75**: 034904.
- [19] Sorge H. Phys Rev, 1995, **C52**: 3291.
- [20] Sa B H, Cai X, Su Z D, *et al.* Phys Rev, 2002, **C66**: 044902.
- [21] Wang Z W, Jiang Z J. Chin Phys C, 2009, **33**: 274.
- [22] Jiang Z J. Acta Phys Sic, 2007, **56**: 5191(in Chinese).  
(姜志进. 物理学报, 2007, **56**: 5191).
- [23] Glauber R J. In Lectures in Theoretical Physics (New York), 1959, 315.
- [24] Wong C Y. Introduction to High-energy Heavy-ion Collisions. Haerbin: Harbin Institute of Technology Press, 2002, 222(in Chinese).  
(黄卓然. 高能重离子碰撞导论. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2002, 222.)
- [25] Wong C Y. Phys Rev, 1984, **D30**: 961.
- [26] Adler S S, Afanasiev S, Aidala C, *et al* (PHENIX Collaboration). arXiv: 0307022v1[nucl-ex], 2003.
- [27] Alner G J, Ansorge R E, Åsman B, *et al* (UA5 Collaboration). Z Phys, 1986, **C33**: 1.
- [28] Busza W. Acta Phys Pol, 2004, **B35**: 2873.

## Energy and Centrality Dependences of Pseudorapidity Distributions of Charged Particles in Cu+Cu Collisions at High Energies<sup>\*</sup>

JIANG Zhi-jin<sup>1)</sup>, SUN Yu-fen

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

**Abstract:** Using Glauber model, we present the impact parameter dependences of the numbers of participants and binary nucleon-nucleon collisions in nucleus-nucleus collisions. Then, on the basis of this work, after considering the effect of energy loss of participants in their multiple collisions, we get the pseudorapidity distributions of charged-particles as a function of impact parameter in nucleus-nucleus collisions through weighted superposition of the distributions in effective binary nucleon-nucleon collisions. The experimental measurements carried out by RHIC-PHOBOS Collaboration in different central Cu+Cu collisions at different energies were analyzed by using this model. The theoretical results are well consistent with the experimental observations.

**Key words:** Glauber model; spectator; binary nucleon-nucleon collision

\* Received date: 26 Oct. 2009; Revised date: 16 Oct. 2010

\* Foundation item: Key Foundation of Shanghai (S30501)

1) E-mail: jzj265@163.com