

文章编号: 1007-4627(2009)04-0300-04

对光滑粒子流体动力学模型 π 源的视像分析*

任延宇¹, 高长晨¹, 杨志韬¹, 张卫宁^{1, 2, 3, #}

(1 哈尔滨工业大学物理系, 黑龙江 哈尔滨 150006;

2 大连理工大学物理与光电工程学院, 辽宁 大连 116024;

3 兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 利用光滑粒子流体动力学模型, 研究了 $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV Au+Au 碰撞产生的 π 介子发射源的视像结果。碰撞后的演化图显示, 系统在演化过程中呈现出明显的非均匀性颗粒集团分布。这种发射源所得到的视像分析结果表明, 即使在相同的碰撞参数下, 不同事件的相对发射源函数也会存在差异。这种差异在大碰撞参数下表现得尤为明显。

关键词: 光滑粒子流体动力学模型; 非均匀颗粒源; 视像分析

中图分类号: O572.2

文献标识码: A

1 引言

近年来, 流体动力学模型在对相对论重离子碰撞(RHIC)能区核物质性质的描述上取得了很大的成功, 特别是其在低横动量区的椭圆流 v_2 与实验结果符合得非常好^[1-4]。然而, 流体动力学模型无法解释 RHIC 的强度干涉学结果, $R_{out}/R_{side} \approx 1$ (HBT 之谜)^[5-8]。文献[9]提出了一种流体动力学演化的夸克-胶子等离子体(QGP)颗粒源模型, 用以解释 RHIC 能区的 HBT 之谜。该模型在保留了普通流体动力学模型演化特性的同时, 通过令 QGP 物质以颗粒性结构存在以实现一个空间分布较广而寿命较短的发射源, 从而得到了 $R_{out}/R_{side} \approx 1$ 的结果。非均匀性粒子发射源的研究^[9-14]对了解实际碰撞中粒子发射源的结构有着重要的意义。

目前, 对非均匀粒子发射源的研究主要有两方面的问题: 其一是关于源的非均匀颗粒性结构是如何形成的, 其二是如何检测源的非均匀性。关于颗粒源的形成, 开始人们是用 Witten 的一级相变理论^[15]来解释的, 然而在重子数密度极低的 RHIC 能区, QGP 到强子气体的相变可能并非一级相变^[16]。在文献[11]中, 作者指出由于高能重离子碰

撞的系统初始能量密度分布有较大的涨落, 在随后的剧烈膨胀过程中可能会发生碎裂, 并在表面张力的作用下形成颗粒源。关于对颗粒性或非均匀性粒子发射源的检测目前已经引起人们的关注^[9-14]。

光滑粒子流体动力学模型(NeXSPheRIO)是一个可以用来描述初始条件有较大涨落的系统演化的模型, 本文将在第 2 部分中利用该模型来模拟每核子对 200 GeV Au+Au 产生的系统的演化, 并通过演化图来讨论发射源的非均匀性。在目前的高能重离子碰撞能区, 由于单个事件的全同 π 介子数目有限, 因而实验中还无法用单个事件的关联函数进行视像分析。然而, 在欧洲核子中子(CERN)的 LHC 重离子碰撞实验中, 人们有可能利用单个事件的关联函数进行视像分析。为此, 我们将在第 3 部分中利用模型产生的单个事件的 2π 关联函数进行视像分析, 得到单事件的相对发射源函数。通过将上述相对源函数与源的演化图进行比较, 讨论非均匀源的视像特征。第 4 部分对全文总结, 并给出结论。

2 NeXSPheRIO 模型

NeXSPheRIO 模型^[17-21]是对高能重离子碰撞

* 收稿日期: 2009-03-18; 修改日期: 2009-04-28

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10775024)

作者简介: 任延宇(1980-), 男(汉族), 黑龙江齐齐哈尔人, 博士研究生, 从事高能重离子碰撞研究工作;

E-mail: renyanyu@163.com

通讯联系人: 张卫宁, E-mail: wnzhang@dlut.edu.cn

系统演化进行模拟的光滑粒子流体动力学模型，它是 NeXus 模型与 SPheRIO 模型的结合，其中的初始条件由前者给出，而后者负责模拟流体动力学的演化。

NeXus 模型^[22, 23]是在 Gribov-Regge 模型基础上建立的一种弦模型，该模型可以为后续的流体力学演化提供源在初始时刻的信息。图 1 是 NeXus 模型给出的每核子对 200 GeV Au+Au 碰撞在 $z=(0 \pm 1)$ fm 区域内初始能量密度分布的情况 (z 为碰撞方向)。我们选择了不同碰撞参数下的 6 个事件作为对比，其中同行的两个事件的碰撞参数是相同的。可以看出，其分布呈现出两个特点：(1) 在各个碰撞参数下，能量密度分布都很不规则；(2) 即使在碰撞参数完全相同的情况下，不同事件的能量密度分布仍会有较大差别。下面的讨论将围绕着这两个特点来展开。

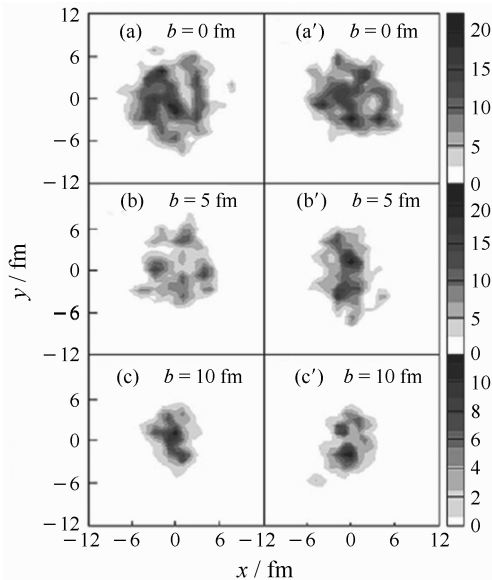


图 1 不同碰撞参数下 NeXus 模型所给出的初始横向能量密度分布 ($t=1$ fm/ c)

由于初始能量密度分布有大的涨落，用普通流体力学模型所采用的欧拉网格法来模拟随后的演化将会导致很大的误差。NeXSPheRIO 法是一种拉格朗日形式的无网格方法，它可以将系统的状态用一系列的“粒子”来描述，这些“粒子”按照确定的守恒方程的规律运动。目前，该方法已被广泛地应用于具有大变形的流体动力学问题。SPheRIO 模型 (Smoothed Particle hydrodynamical evolution of Relativistic heavy IOn collisions) 就是用该方法对

相对论重离子碰撞条件下的核物质流体力学演化过程进行的模拟。关于对 NeXSPheRIO 的详细论述及 SPheRIO 模型的具体实现过程可参考文献 [17—21]。

图 2 给出了图 1 所对应的初始条件在 $t=7$ fm/ c 时刻源的横向能量密度分布。在本文的计算中，取源的冻结温度为 $T_f=150$ MeV，系统的态方程由 QCD 格点结果给出的熵密度来确定^[24, 25]，相变温度 $T_c=160$ MeV，对应的平滑宽度为 $0.1 T_c$ ^[25]。由图 2 可以看出，源内存在明显的颗粒性集团结构，即使对碰撞参数相同的不同事件，其颗粒集团的分布也不相同。这是非均匀粒子发射源的基本特征，它是由初始时不同事件能量密度的涨落所决定的。

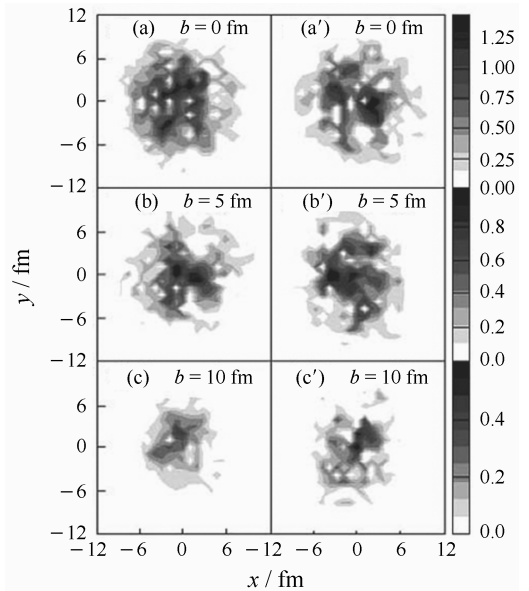


图 2 对应于图 1 的初始条件，在 $t=7$ fm/ c 时刻源的横向能量密度分布

3 视像分析

从前面的分析中可以知道，演化源内存在非均匀的颗粒性集团分布。即使在碰撞参数相同的情况下，不同事件源内的颗粒性集团分布也不同。这是非均匀性颗粒源的一个重要特征。然而，在实验上人们无法直接得到源的演化图。因此本文采用视像分析方法由实验可观测的 2π 关联函数获取相对源函数，并以此来研究非均匀颗粒源的结构特征。

视像分析方法的基本思想是从两粒子关联函数 $C_P(\mathbf{q})$ 得到发射源的相对源函数 $S_P(\mathbf{r})$ 。根据 Koon-

in-Pratt 公式, 两粒子关联函数可以写作^[26-28]

$$C_{\mathbf{P}}(q) = 1 + \int d\mathbf{r} K(\mathbf{q}, \mathbf{r}) S_{\mathbf{P}}(\mathbf{r}), \quad (1)$$

其中 $\mathbf{P} = \mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2$ 为粒子对的总动量, $K(\mathbf{q}, \mathbf{r}) = |\Phi_{\mathbf{q}}(\mathbf{r})|^2 - 1$, $\Phi_{\mathbf{q}}(\mathbf{r})$ 是两粒子质心系下相对距离为 \mathbf{r} , 动量差为 $\mathbf{q} = \mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2$ 粒子对的波函数。经过简单的运算, 对角度积分后的 Koonin-Pratt 公式为

$$R(q) = C(q) - 1 = 4\pi \int dr r^2 K_0(q, r) S(r), \quad (2)$$

其中

$$K_0(q, r) = \sin \frac{qr}{r}. \quad (3)$$

将相对源函数用 b-样条函数展开,

$$S(r) = \sum_j S_j B_j(r), \quad (4)$$

代入(2)式, 可以得到

$$R(q_i) = \sum_j K_{ij} S_j, \quad (5)$$

其中 $R(q_i)$ 是关联函数在第 q 的第 i 个小区间的值。以 Δq 表示 q 小区间的宽度, 有

$$K_{ij} = \frac{4\pi}{\Delta q} \int_{q_i - \Delta q/2}^{q_i + \Delta q/2} dq \int_0^\infty dr r^2 K(q, r) B_j(r). \quad (6)$$

这样, 在已知关联函数 $R(q)$ 的情况下, 由(4)–(6)式就可以得到相对源函数 $S(r)$ 。关于视像计算的更详细内容参见文献[27, 29, 30]。

图 3 给出了对应图 2 中 6 个事件的相对源函数, 图中(a), (b)和(c)分别代表 $b=0$ fm, $b=5$ fm 及 $b=10$ fm 的结果。可以看出, 不同碰撞参数下事件的相对源函数分布是不同的。由于源的分布范围是随碰撞参数的增大而减小的(见图 2), 故碰撞参数越大其对应的相对源函数分布也就越窄。又因为归一化的关系, 导致窄的相对源函数分布在 $r \approx 0$ 附近的值更大。图 3 中的实线对应的是图 2 中左列的事件, 点线对应的是图 2 中右列的事件。可以看出, 即使在碰撞参数相同的情况下, 不同事件的视像结果也是有差异的, 这个差异是由于前面提到的颗粒分布的不同所导致的。我们注意到, 随着碰撞参数的增加上述差异变得越来越明显。这主要是由于当碰撞参数增加时, 随着源的变小同样的差异会反映得更加明显。以 $b=10$ fm 的结果为例, 由图 2 可以看出由于源都比较小, 所以很容易看出图 2(c)

所对应的颗粒分布较(c')明显窄些, 因而(c)对应的视像结果(实线)也就比(c')的结果(点线)明显高些。总之, 虽然视像结果对发射源刻画的不像演化图那样细致, 当碰撞参数较大时, 可以明显地反映出颗粒源之间的差异(即使源的碰撞参数相同)。

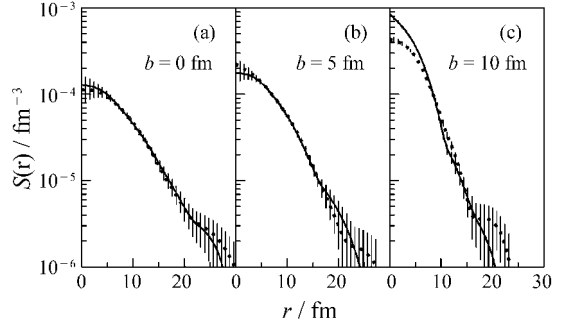


图 3 对应图 2 中事件的相对源函数

— 对应的是图 2 中左列的事件, --- 对应的是图 2 中右列的事件。

4 结论

本文首先给出了用 NeXus 模型得到发射源在初始时刻的能量分布, 它有两个特点: (1) 能量密度分布存在涨落; (2) 即使在碰撞参数完全相同的情况下, 不同事件的能量密度分布仍会有较大差别。随后, 用 NeXSPheRIO 模型, 讨论了系统的演化图。由于初始能量分布的涨落, 使得源在随后的演化中形成非均匀的颗粒集团结构, 这通过演化图可以直观地看到。又由于在碰撞参数完全相同的情况下, 不同事件的初始能量密度分布仍会有较大差别。这一差别导致了它们在随后的演化中可以形成不同的颗粒集团分布, 这是非均匀颗粒源所具有的特征。最后, 本文在第 3 部分对 NeXSPheRIO 模型产生的单个事件的 π 介子发射源进行了视像分析, 发现即使在相同碰撞参数下不同事件相对发射源函数仍会有较大的差异, 这可能会作为将来在实验上检测非均匀颗粒源的依据。

参考文献 (References):

[1] Adler C, Ahammed Z, Allgower C, *et al* (STAR Collaboration). Phys Rev Lett, 2002, **89**: 132301.
 [2] Adler C, Ahammed Z, Allgower C, *et al* (STAR Collaboration). Phys Rev Lett, 2003, **90**: 032301.
 [3] Adler S S, Afanasiev S, Aidala C, *et al* (PHENIX Collabora-

- tion). Phys Rev Lett, 2001, **91**: 182301.
- [4] Adans J, Ahammed Z, Aggarwal M M, *et al* (STAR Collaboration). Phys Rev Lett, 2004, **92**: 052302.
- [5] Adler C, Ahammed Z, Allgower C, *et al* (STAR Collaboration). Phys Rev Lett, 2001, **87**: 082301.
- [6] Adcox K, Adler S S, Ajitanand N N, *et al* (PHENIX Collaboration). Phys Rev Lett, 2002, **88**: 192302.
- [7] Adler S S, Afanasiev S, Aidala C, *et al* (PHENIX Collaboration). Phys Rev Lett, 2004, **93**: 152302.
- [8] Adams J, Aggarwal M M, Ahammed Z, *et al* (STAR Collaboration). Phys Rev, 2005, **C71**: 044906.
- [9] Zhang W N, Efaaf M J, Wong C Y. Phys Rev, 2004, **C70**: 024903.
- [10] Zhang W N, Li S X, Wong C Y, *et al*. Phys Rev, 2005, **C71**: 064908; Wong C Y, Zhang W N. Phys Rev, 2004, **C70**: 064904.
- [11] Zhang W N, Ren Y Y, Wong C Y. Phys Rev, 2006, **C74**: 024908.
- [12] Ren Y Y, Zhang W N, Liu J L. Phys Lett, 2008, **B669**: 317.
- [13] Yang Z T, Zhang W N, Huo Lei, *et al*. J Phys, 2009, **G36**: 015113.
- [14] Torrieri G, Tomasik B, Mishustin I. Phys Rev, 2008, **C77**: 034903.
- [15] Witten E. Phys Rev, 1984, **D30**: 272.
- [16] Gyulassy M, McLerran L. Nucl Phys, 2005, **A750**: 30.
- [17] Aguiar C E, Kodama T, Osada T, *et al*. J Phys, 2001, **G27**: 75.
- [18] Gazdzicki M, Gorenstein M I, Grassi F, *et al*. arXiv: hep-ph/0309192.
- [19] Sokolowski Jr O, Grassi F, Hama Y, *et al*. Phys Rev Lett, 2004, **93**: 182301.
- [20] Grassi F, Hama Y, Kodama T, *et al*. J Phys, 2005, **G31**: 1041.
- [21] Andrade R, Grassi F, Hama Y. Phys Rev Lett, 2006, **97**: 202302.
- [22] Drescher H J, Liu F M, Ostapchenko S, *et al*. Phys Rev, 2002, **C65**: 054902.
- [23] Werner K, Drescher H J, Ostapchenko S, *et al*. arXiv: hep-ph/0209198.
- [24] Blaizot J P, Ollitrault J Y. Phys Rev, 1987, **D36**: 916.
- [25] Rischke D H, Gyulassy M. Nucl Phys, 1996, **A608**: 479.
- [26] Brown D A, Danielewicz P. Phys Lett, 1997, **B398**: 252.
- [27] Brown D A, Danielewicz P. Phys Rev, 2001, **C64**: 014902.
- [28] E895 Collaboration, Panitkin S Y, *et al*. Phys Rev Lett, 2001, **87**: 112304.
- [29] Brown D A, Enokizono A, Heffner M, *et al*. Phys Rev, 2005, **C72**: 054902.
- [30] Yang Z T, Jiri M T, Zhang W N. Nuclear Physics Review, 2009, **26**(2): 117 (in Chinese).
(杨志韬, 吉日木图, 张卫宁. 原子核物理评论, 2009, **26**(2): 117.)

Imaging Analysis of Pion Sources in Smoothed Particle Hydrodynamic Model*

REN Yan-yu¹, GAO Chang-chen¹, YANG Zhi-tao¹, ZHANG Wei-ning^{1, 2, 3, #}

(¹ Department of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150006, China;

² School of Physics and Optoelectronic Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China;

³ Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Research Facility in Lanzhou, Lanzhou 730000, China)

Abstract: We investigate the imaging of pion-emitting source produced in $\sqrt{S_{NN}} = 200$ GeV Au+Au collisions with NeXSPheRIO model. The pictures of the system evolution show that there is obvious inhomogeneous structure of granular lumps. The results of imaging analysis indicate that the relative source functions for the various events of the granular sources are different even though the events are with the same impact parameter. This difference is more evident for the events with large impact parameter.

Key words: NeXSPheRIO model; inhomogeneous granular source; imaging analysis

* Received date: 18 Mar. 2009; Revised date: 28 Apr. 2009

* Foundation item: National Natural Science Foundation of China(10775024)

Corresponding author: Zhang Wei-ning, Email: wnzhang@dlut.edu.cn