

RHIC 能量多粒子产生的双源统计 模型分析*

陆中道^{1,2} 萨本豪^{1,2}

Amand Faessler³ C. Fuchs³ E. E. Zabrodin^{3,4}

1 (中国原子能科学研究院 北京 102413)

2 (中国高等科学技术中心 北京 100080)

3 (Institute for Theoretical Physics, University of Tuebingen, D-72076 Tuebingen, Germany)

4 (Institute for Nuclear Physics, Moscow State University, 119899 Moscow, Russia)

摘要 用双源统计模型分析研究了 $\sqrt{s_{NN}} = 130 \text{ GeV}$ Au + Au 反应中的多粒子产生并与单源统计模型的结果进行了比较. 研究表明, 该反应有一个高温且大体积的内源. 这个源的温度比 SPS 能量的内源至少高 15 MeV, 体积至少大 2 倍, 文中给出了分析.

关键词 双源统计模型 RHIC 能量 多粒子产生

1 引言

RHIC 的出束为相对论性重离子碰撞研究注入了新的活力. 研究相对论性重离子碰撞的目的是研究核物质在极端条件(高温高密)下强相互作用的性质以及探寻可能存在的夸克-胶子-等离子体(QGP), 也为宇宙早期演化提供理论解释. 从实验测得的粒子产额及产额比可以获得关于系统的宏观特征, 组成, 大小等信息. 其中一个重要而有趣的问题是从中可以了解系统是否达到平衡或达到平衡的程度.

理论研究的方法大致有两种. 一种是微观输运或动力学模拟方法, 用蒙特卡罗方法模拟两个核碰撞的整个演化过程, 包括演化过程中粒子之间的碰撞及粒子产生, 吸收, 衰变等. Fritiof^[1], Luciae/Jpciae^[2,3], HIJIN^[4] 和 RQMD/UrQMD^[5] 等属于这一种. 另一种是统计模型方法^[6-13]. 这种方法可以从实验测量到的粒子产额及产额比中直接获取系统温度, 体积, 粒子密度和能量密度等热力学量, 获得系统热力学性质以及有关系统是否达到平衡或达到平衡程度的信息. 通常的统计模型建立在系统只有一个火球(单源)的基础上, 认为两个核碰撞时形成一个温度, 粒子密度, 能量密度等完全均一的火球; 火球内除含

2001-12-26 收稿

* 国家自然科学基金(19975075)资助

有碰撞核子(参加者)之外,还包括大量的次级粒子,它们的共振态和反粒子;火球内粒子系统达到化学平衡和热平衡.火球膨胀时,内部粒子系统仍保持化学平衡和热平衡,并用温度,体积,能量,粒子密度等量表征.统计模型具有参数少,物理图像清晰等优点.但后来的研究发现这种简单的单源统计模型有它的不足之处,例如它不能同时描述好粒子产额和产额比,有些带奇异数的介子计算值太大.为此需要引入一些修正因子,如粒子硬心体积修正^[6,7]和奇异子压低因子^[14].引入这些修正因子后,模型对实验的符合有改进,但还是不够充分有效.在用微观输运模型研究反应趋向平衡时发现^[15],反应演化过程中反应中心区内的粒子分布始终没有达到均一.因此我们提出采用双源统计模型^[11-13].在双源统计模型中,系统由内外两个源组成,它们分别达到统计平衡,具有不同的温度,粒子密度,能量密度和体积等.特别是在单源模型下奇异子密度总是为零,这是强相互作用下奇异子守恒所要求.而在双源模型下奇异子密度是不为零的变数,只要求奇异子总数为零.另外,粒子硬心体积修正和奇异子压低因子等附加的修正可不再考虑.应用于 158 A GeV Pb + Pb 反应^[11-13]结果显示,双源统计模型比单源统计模型有很大的改进.

RHIC 已经出束,它在质心系的能量目前为每核子 130 GeV,远比 SPS 能量高.本文分别用双源统计模型和单源统计模型对它进行计算和分析比较.

下边首先介绍统计模型,包括双源统计模型,然后是 $\sqrt{S_{NN}} = 130$ GeV Au + Au 反应中多粒子产生的计算结果及分析讨论,最后是小结.

2 统计模型/双源统计模型

模型已在文献[9,11]中作了介绍,这里只交代最主要的公式.我们用巨正则系综来描述一个多粒子(强子)系统.该系统的热力学性质由热力学势描述.单位体积中标记为 i 的粒子的热力学势为

$$\Omega_i = - \frac{g_i \xi_i}{2\pi^2} \int d^3 q \ln(1 + \xi_i e^{\beta(\mu_i - \epsilon_i)}), \quad (1)$$

其中 $\epsilon_i = \sqrt{q^2 + m_i^2}$ 为粒子能量, m_i 为粒子质量, g_i 为简并度. $\beta = 1/T$, T 为系统的温度.系统的统计性质由 ξ_i 表示, $+1$ 为费米子, -1 为玻色子. μ_i 表示粒子的化学势,满足 $\mu_i = b_i \mu_B + s_i \mu_S$. 这里 μ_B 和 μ_S 分别是重子和奇异子的化学势, b_i 和 s_i 分别是粒子所含的重子和奇异子的数目.

系统的热力学势是各个粒子的热力学势之和.热力学量由热力学势导出.例如粒子密度是热力学势对化学势微商的负值,即 $n_i = - \frac{\partial \Omega}{\partial \mu_i} |_{T}$.

系统中所有重子密度和与所有反重子密度和之差即为系统的净重子密度,以 ρ_B 表示.它与体积的乘积即为系统的净重子数,等于实验测量到的参加者数目.同样净奇异子密度 ρ_S 是系统中所有奇异子密度和与所有反奇异子密度和之差.由于强相互作用下奇异子守恒,在单源统计模型中净奇异子密度总为零.

双源统计模型 双源统计模型^[11-13]认为反应系统是由内外两部分组成的双源系统.

对于弹核和靶核相同的核反应,反应系统具有很高的对称性.可以认为类弹部分和类靶部分相同,合起来设定为一个源——外源,以 S_1 表示.它们的中间部分构成另一个源——内源,以 S_2 表示.这两个源具有不同的温度,粒子密度,能量密度和体积等,特别是双源系统可以具有非零的奇异子密度,只要求系统的总奇异子数为零.

在单源统计模型中,系统有 4 个变数,由于奇异子守恒,独立变数约化为 3 个.我们选取 T, V, ρ_B 作为 3 个独立变数.化学势是 T 和 ρ_B 的函数.在双源统计模型中,独立变数增至 7 个,除两个源的温度,体积,净重子密度外,我们选取外源的奇异子密度 ρ_{S_1} 为独立变数.内源的奇异子密度由总奇异子数守恒导出.这些变数由最小二乘法从拟合实验数据得到.

3 结果和讨论

$\sqrt{S_{NN}} = 130 \text{ GeV Au} + \text{Au}$ 反应的实验数据取自文献[16]及其所引文献,列于表 1 第二列.其中 K^-/K^+ 数据取其所引 4 家数据的平均.双源模型的理论值列于表中第四列,第五列为理论与实验的相对百分误差.可以看出,除两个数据,即 K^{*0} 和 \bar{K}^{*0} 与 h^- 的比率,理论值与实验值相对偏离较大外,理论与实验的符合很好.

表 1 $\sqrt{S} = 130 \text{ A GeV Au} + \text{Au}$ 反应中强子多重产生

| | 实验值 | 理论值 | | 双源值 - 实验值 实验值 $\times 100$ | 参考文献 |
|------------------------|-------------------|--------|--------|-------------------------------|------|
| | | 单源 | 双源 | | |
| N_B | 343 ± 11 | 341 | 341 | -0.74 | [17] |
| h | 2050 ± 250 | 2250 | 2250 | 9.9 | [18] |
| \bar{p}/p | 0.60 ± 0.07 | 0.578 | 0.579 | -8.2 | [16] |
| p/π | 0.08 ± 0.01 | 0.0878 | 0.0877 | 9.7 | [16] |
| K^-/K^+ | 0.87 ± 0.08 | 0.749 | 0.749 | -14 | [16] |
| K^-/π^- | 0.149 ± 0.02 | 0.153 | 0.153 | 2.7 | [16] |
| K^{*0}/h^- | 0.060 ± 0.017 | 0.0361 | 0.0361 | -40 | [16] |
| \bar{K}^{*0}/h^- | 0.058 ± 0.017 | 0.0304 | 0.0304 | -48 | [16] |
| $\bar{\Lambda}/\Delta$ | 0.77 ± 0.07 | 0.690 | 0.690 | -10 | [16] |
| Ξ/Ξ | 0.82 ± 0.08 | 0.806 | 0.806 | -1.8 | [16] |
| χ^2 | | 9.6 | 9.6 | | |

与实验拟合获得的热力学量列于表 2 中.这两张表突出地显示出两个源的热力学量等同,而且也显示与单源模型结果(表 1 第三列和表 2 第四列)的等同,(两个源的总体积等于单源的体积).这和 SPS 能量的结果^[11-13]明显不同.在 SPS 能量下,源有一个小而热的核(内源)包围着一层大而较凉的幔(外源).RHIC 能量下源的温度明显高于 SPS 能量下内源的温度,高出约 10MeV.顺便指出,这里得到的温度为 186MeV 高于文献[16]给出的温度 174MeV.在文献[16]中没有用到 h^- 的实验数据.我们发现如果我们计算也不加入 h^- 实验数据,温度也降低到 175MeV,但计算的 h^- 值很大,为 3340.另外说明一下,表 2

中所列量无论是双源模型还是单源模型都没有加入粒子硬心体积修正和奇异子压低因子. 实际上, 由于表 1 中量都是比率, 体积修正对拟合过程无影响, 只影响表 2 中体积和与之相关的量. 另外实验数据取自于非常中心的区域(见下面解释), 对于单源模型也无需引入奇异子压低因子.

表 2 两个源中的热力学量

| | 双 源 | | 单 源 |
|-------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | 外 源 | 内 源 | |
| T/MeV | 186 | 186 | 186 |
| V/fm^{-3} | 2490(1.13 V_0) | 2560(1.13 V_0) | 5050(2.26 V_0) |
| ρ_B/fm^{-3} | 0.068 | 0.0067 | 0.0067 |
| ρ_S/fm^{-3} | 0.00002 | -0.00002 | 0.0 |
| $\epsilon/(\text{GeV}/\text{fm}^3)$ | 1.34 | 1.33 | 1.34 |
| $p/(\text{MeV}/\text{fm}^3)$ | 202 | 201 | 201 |
| N_B | 448 | 456 | 903 |
| $N_{\bar{B}}$ | 278 | 285 | 562 |
| $N_B - N_{\bar{B}}$ | 170 | 171 | 341 |
| N_S | 150 | 154 | 304 |
| $N_{\bar{S}}$ | 150 | 154 | 304 |
| $N_S - N_{\bar{S}}$ | 0.05 | -0.05 | 0.0 |
| μ_B/MeV | 52.6 | | 52.1 |
| μ_S/MeV | 16.1 | 15.8 | 16.0 |

双源模型两个源的等同性以及单源模型结果的等同性说明 RHIC 有一个大的内源(当然还有一个大的外源), 实验测量处于内源范围内. 在这个范围内, 粒子分布均匀, 可视为同一个源. 这个源的体积比 158 A GeV Pb + Pb 反应中的内源体积大得多, 是后者的 5 倍. 溯其原因, $\sqrt{S_{NN}} = 130$ GeV Au + Au 反应具有大的快度区域 $[-4.9, 4.9]$, 而实际测量只在很小的区域内 ($|\eta| < 0.5$) 进行. 在内源范围内测量, 外源效应就不显现了. 实际上, 在这个反应中, 这个内源的体积可能还要大, 这里的体积只是实验测量所限定和显示的体积. 由此可见, RHIC 能量下核核反应能提供一个高温且大体积的源. 这个源是否是 QGP 物质在强子化初期形成的强子物质? 正是这种高温大体积的强子源以及它的前身可能蕴藏着人们苦苦探索追求的物理内容.

对于一个均匀分布的粒子源, 无论双源模型还是单源模型都能很好地描写源的热力学特征. 但如果粒子分布不均匀, 内源小而实验测量处于外源范围内, 则只有双源模型才能很好地描写源的热力学特征^[11-13].

最后谈一下 Wroblewski 因子^[19], 它的定义为

$$\lambda_s = \frac{2\langle ss \rangle}{\langle u\bar{u} \rangle + \langle d\bar{d} \rangle}, \quad (2)$$

括号里的夸克都是反应中新产生的夸克, 不包括靶核和弹核中原有的夸克. $\sqrt{S_{NN}} = 130$ GeV Au + Au 反应的 Wroblewski 因子值为 0.46.

4 小结

本文用双源统计模型研究了 $\sqrt{S_{NN}} = 130 \text{ GeV}$ Au + Au 反应中多粒子产生. 结果表明, 这个反应的内外两个源等同, 而且与单源模型结果等同. 这种等同性源于该反应有一个大的快度区, 因此有一个大的内源. 实验测量的粒子处于内源范围内, 因而外源效应就不显现. RHIC 能量的核核碰撞可以提供一个热而大的内源. 它的温度要比 SPS 能量的源温高出至少 15 MeV, 体积高出至少 2 倍. 这种高温大体积的源所蕴藏的物理内容将驱使人们去探索追求. 我们建议实验在作内源区域测量的同时, 在外源区域, 如 $3 < |y| < 4$, 进行测量, 以便于作比较.

参考文献 (References)

- 1 Aderson B et al. Nucl. Phys., 1987, **281**:286
- 2 SA Ben-Hao, TAI An, LU Zhong-Dao. Phys. Rev., 1995, **C52**:2069
- 3 SA Ben-Hao, TAI An, LU Zhong-Dao. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1995, **19**:1019 (in Chinese)
(萨本豪, 台安, 陆中道. 高能物理与核物理, 1995, **19**:1019)
- 4 WANG X N, Gyulassy M. Phys. Rev., 1991, **D44**:3501; WANG X N, Gyulassy M. Comp. Phys. Comm., 1994, **83**:307
- 5 Bøggild H et al (NA44 Collab.). Phys. Letts., 1995, **B349**:386
- 6 Braun-Munzinger P, Stachel J, Wessels J P et al. Phys. Letts., 1996, **B365**:1; Braun-Munzinger P, Heppel I, Stachel J. Phys. Letts., 1999, **B465**:15
- 7 Yen G D, Gorenstein M I, Greiner W et al. Phys. Rev., 1997, **C56**:2210; Yen G D, Gorenstein M I. Phys. Rev., 1999, **C59**:2788
- 8 Cleymans J, Redlich K. Phys. Rev., 1999, **C60**:054908
- 9 LU Zhong-Dao, Neda Z, Csernai L et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1997, **22**:910 (in Chinese)
(陆中道, Neda Z, Csernai L 等. 高能物理与核物理, 1997, **22**:910)
- 10 ZHANG Z Y, YU Y W, CHING C R et al. Phys. Rev., 2000, **C61**:065204
- 11 LU Zhong-Dao, SA Ben-Hao, Amand Faessler et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2002, **26**:501 (in Chinese)
(陆中道, 萨本豪, Amand Faessler 等. 高能物理与核物理, 2002, **26**:501)
- 12 LU Zhong-Dao, Amand Faessler, Fuchs C et al. J. Phys. G: Nucl. Part. Phys., 2002, **28**:2127; Phys. Rev., C, to be published
- 13 LU Zhong-Dao, Amand Faessler, Fuchs C et al. Nonequilibrium and Nonlinear Dynamics in Nuclear and other Finite System. In: Zhuxia Li, Ke Wu, Xizhen Wu, Enguang Zhao, Fumihiko Sakata. Beijing: American Institute of Physics—Aip Conference Proceedings 597, 2001. 136
- 14 Rafelski J. Phys. Lett., 1991, **B262**:333
- 15 Bravina I V, Zabrodin E E, Gorenstein M I et al. Phys. Rev., 1999, **C60**:024904
- 16 Braun-Munzinger P, Magestro D, Redlich K et al. arXiv:hep-ph/0105229 v2 31 Aug 2001
- 17 Back B B et al. Phys. Rev. Lett., 2000, **85**:3100
- 18 Back B B et al (PHOBOS Collab.). arXiv:hep-ex/010543 16 May 2001
- 19 Wroblewski A. Acta Physica Polonica, 1985, **B16**:379

Analysis of Multi-Particle Production at RHIC by Two-Source Statistical Model *

LU Zhong-Dao^{1,2} SA Ben-Hao^{1,2}

Amand Faessler³ C. Fuchs³ E. E. Zabrodin^{3,4}

1 (China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

2 (The China Center of Advance Science and Technology (CCAST), Beijing 100080, China)

3 (Institute for Theoretical Physics, University of Tuebingen, D-72076 Tuebingen, Germany)

4 (Institute for Nuclear Physics, Moscow State University, 119899 Moscow, Russia)

Abstract The data of multi-particle production in $\sqrt{S_{NN}} = 130$ GeV Au + Au collisions are analyzed by two-source statistical model. It is found that in this reaction the two sources (inner source and outer source) are identical. They have the same temperature, volume, particle density and other thermodynamic quantities. Besides, the results of two-source model are identical with that of single-source model (the total volume of the two sources equals the volume of single source). The identities between two sources and between two models are due to the particles being measured in a limited central rapidity region. The $\sqrt{S_{NN}} = 130$ GeV Au + Au collision has large rapidity region $[-4.9, 4.9]$, while data are taken from a small pseudo-rapidity region, $|\eta| < 0.5$. In the region, the particles are uniformly distributed as a single source. Comparing to the inner source in 158 A GeV/c Pb + Pb collision, which has a small and hot inner source surrounded by a larger and cooler outer source, the temperature is at least 15MeV higher and the volume is at least two times larger. The RHIC can provide a hot and large inner source that may be formed in the early stage of hadronization from QGP and may have important physical content behind. We suggest to make synchronous measurement in the outer region, e.g. $3 < |y| < 4$, so as to make comparison.

Key words two-source statistical model, RHIC energy, multi-particle production

Received 26 December 2001

* Supported by National Natural Science Foundation of China (19975075)