

158 A GeV Pb + Pb 反应中多粒子产生的 双源统计模型分析*

陆中道^{1,2} 萨本豪^{1,2}

1 (中国原子能科学研究院 北京 102413)

2 (中国科学院兰州重离子加速器国家实验室 兰州 730000)

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

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 提出双源统计模型并用它研究了 158 A GeV Pb + Pb 反应中多粒子产生。模型很好地描述了实验,同时给出一个合理清晰的物理图像。反应系统由一个热而小的内源和一个大而较凉的外源构成。外源具有类弹和类靶特征,内源具有反应中心区特征。在 freeze-out 时系统仍处于膨胀中。

关键词 统计模型 双源 多粒子产生

1 引言

研究相对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)。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。

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碰撞核的整个碰撞过程,包括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^[6-10], 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

2001-06-17 收稿

* 国家自然科学基金(19975075)和兰州重离子加速器国家实验室核理论基金资助

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。但这种简单的单源统计模型不能同时描述粒子产额和产额比,为此需要引入一些额外的修正因子,如粒子硬心体积修正^[6,7]和奇异子压低因子^[7,11]。在引入这些修正因子后,模型就能比较好地符合实验。然而在用微观输运模型研究反应趋向平衡时发现^[12],即使反应演化到 10fm/c,反应中心区内的粒子分布也没有达到均一,其它量的分布也非均匀。由此启发本文采用双源统计模型。在双源统计模型中,系统由内外两个源组成,它们分别达到平衡,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。

下边首先介绍统计模型,包括双源统计模型,然后是 158 A GeV Pb + Pb 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

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,满足下面关系

$$\mu_i = b_i \mu_b + s_i \mu_s, \quad (2)$$

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。粒子密度是 $n_i = - \left. \frac{\partial \Omega}{\partial \mu_i} \right|_T$, 能量密度是 $\epsilon_i = n_i \mu_i + \left. \frac{\partial(\beta \Omega)}{\partial \beta} \right|_\mu$, 压强分量为 $p_i = - \Omega_i$, 熵密度 $\sigma_i = - \left. \frac{\partial \Omega}{\partial T} \right|_\mu$, 它也可以从吉布斯关系 $\sigma_i = (\epsilon_i + p_i - n_i \mu_i)/T$ 得到。

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 S1 表示。它们的中间部分构成另一个源——内源,以 S2 表示。由此反应系统成为由内外两部分组成的双源系统。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 3 个独立变数, 我们选取 T, V, ρ_B 作为 3 个独立变数, μ_B 和 μ_S 将是 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_{S1} 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. 最小二乘法为使

$$\chi^2 = \sum_i \frac{(y_{理i} - y_{实i})^2}{\sigma_i^2} \quad (3)$$

最小. 其中 $y_{实}$ 为实验数据^[13-19], $y_{理}$ 为理论值, σ 为实验误差.

3 结果和讨论

158 A GeV Pb + Pb 反应的实验数据列于表 1 第二列. 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: $(y_{理i} - y_{实i})/y_{实i} \times 100$. 可以看出, 各个数据的相对偏离都小于 8%, 理论与实验的符合是很好的. 为进行比较, 这里给出了单源模型的结果, 列于表中第三列. 显然双源模型的结果比单源模型的结果要好的多. 两种模型计算中除考虑末态衰变外都没有引入其它修正. 这里值得注意的是数据表同时含有粒子产额和产额比. 对于单源模型, 如果不加其它修正是很难同时获得合理的粒子产额和产额比的. 这里可以清楚看出, 单源模型中 ϕ 介子的理论值是实验值的两倍. 因此需要引入奇异子压低因子, 以减少它的产生. 而在双源模型下无需这样做.

表 1 158 A GeV Pb + Pb 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_H	372 ± 10	363	375	0.81	13
h^-	680 ± 50	606	638	-6.2	14
K_S^0	68 ± 10	61.6	65.0	-4.5	14
ϕ	7.6 ± 1.1	13.4	8.17	7.5	15
$p-\bar{p}$	155 ± 20	125	148	-4.4	14
K^+ / K	1.8 ± 0.1	1.99	1.71	-5.3	16
p/\bar{p}	0.07 ± 0.01	0.065	0.069	-1.1	17
$\Xi/\bar{\Xi}$	0.249 ± 0.019	0.220	0.230	-7.5	18
$\bar{\Omega}/\Omega$	0.383 ± 0.081	0.411	0.409	6.9	18
$\Lambda/\bar{\Lambda}$	0.128 ± 0.012	0.123	0.139	7.8	19
χ^2		41	4.0		

与实验拟合获得的结果列于表 2 中. 可以看出, 这两个源具有不同的热力学量, 内源的温度比外源高, 而体积比外源小得多, 只有外源体积的二十二分之一. 大部分重子处于外源, 显示出外源的类弹和类靶特征. 几乎所有的反重子处于内源, 它们都在反应中产生, 显示出内源是反应中心区的特征. 内源的能量密度比外源的高, 是外源能量密度的 12

倍. 这也是温度内高外凉的原因, 是反应中心区特征的表现. 在单源模型中奇异子密度处处为零, 而在双源模型中它具有非零的数值. 它们在两个源中符号不同, 外源中符号为正, 内源中符号为负. 带奇异数的粒子主要是 K 介子, 其次是 Λ . 另外还可以看到, 内源的压强高于外源的压强, 表明在 freeze-out 时反应系统仍在向外膨胀.

表 2 也列入了单源模型的热力学量. 可以看出, 单源的体积比较小, 而粒子密度和能量密度比较大. 单源的体积约为双源总体积的六分之一, 净重子密度为双源平均净重子密度的 6 倍, 能量密度约为双源平均能量密度的 6 倍. 为有效地降低单源模型的粒子密度和能量密度, 需引入粒子硬心体积修正, 以增加系统有效体积. 实际上, 这种修正只对粒子产额有影响, 对产额比没有多少影响. 对双源模型, 无需引入这种修正, 把粒子当作点粒子.

表 2 两个源中的热力学量

	双 源		单 源
	外 源	内 源	
T/MeV	110	166	157
V/fm^{-3}	23300(9.7 V_0)	1040(0.44 V_0)	4141
ρ_B/fm^{-3}	0.015	0.032	0.088
ρ_S/fm^{-3}	0.0004	-0.0095	0.0
$\epsilon/(\text{MeV}/\text{fm}^3)$	45.4	535	423
$\rho/(\text{MeV}/\text{fm}^3)$	7.4	84.9	65.0
N_B	341	68.6	396
$N_{\bar{B}}$	0.48	34.9	33
$N_B - N_{\bar{B}}$	341	33.7	363
N_S	70.9	35.8	112
$N_{\bar{S}}$	60.9	45.8	112
$N_S - N_{\bar{S}}$	10.0	-10.0	0.0
μ_B/MeV	374	58.7	217
μ_S/MeV	45.6	5.58	49.1

从以上结果讨论中可以看出, 双源模型下, 反应系统可以被看成是由具有不同热力学量的两个源组成. 对 158 A GeV Pb + Pb 反应研究表明, 该反应系统由一个热而小的内源和一个大而比较凉的外源构成. 外源具有类弹和类靶特征. 产生的反重子几乎都在内源, 内源具有反应中心区特征. 两个源的热力学量明显不同说明源的统计平衡是局域的, 而非整体的. 类弹和类靶源的存在说明这个源中的粒子碰撞不够充分, 仍较多地保留着它们原有的一些特征: 它们大部分是核子或核子共振态, 能量接近初始值. 可以预期, 如果采用的实验数据全取自于中心快度区, 这个源将消失. 这方面的研究正在进行之中.

这里需要指出的是双源模型虽然自由参数增至 7 个, 但它能同时解释好粒子产额和产额比. 因此双源模型的成功不能简单地看作是参数的增加, 而在于成功地描述了反应系统的物理图像. 再者单源模型也不仅仅有 3 个参数, 它需要引入额外的参数, 如粒子硬

心半径和奇异子压低因子。

最后值得指出的是参考文献[20,21]曾用多源模型或多火球模型解释高能核碰撞的快度分布,虽然和本文中“源”的内涵以及理论,方法都不同,但都基于“统计平衡”这一基本假设之上。这些模型的成功解释实验结果说明“统计平衡”在核-核碰撞中仍然存在,是核-核碰撞中的重要阶段和重要特征。可以想象,如果 QGP 得以形成,“统计平衡”将是它的重要特征。因此对碰撞过程中“统计平衡”的特征及其演化需要作深入研究。

4 小结

本文引入了双源统计模型并用它研究了 158 A GeV Pb + Pb 反应中多粒子产生。研究表明,双源模型能同时描述好粒子产额和产额比,同时能给出一个合理清晰的物理图像。在 freeze-out 时系统的源处于局域统计平衡并仍在膨胀中。它有两个具有不同热力学特征的源构成。这两个源内热外凉,内小外大。外源具有类弹和类靶特征,内源具有反应中心区特征。

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 Bggild H et al (NA44 Collab.). Phys. Lett., 1995, **B349**:386
- 6 Braun-Munzinger P, Stachel J, Wessels J P et al. Phys. Lett., 1996, **B365**:1;
Braun-Munzinger P, Heppel I, Stachel J. Phys. Lett., 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 Rafelski J. Phys. Lett., 1991, **B262**:333
- 12 Bravina L V, Zabrodin E E, Gorenstein M I et al. Phys. Rev., 1999, **C60**:024904
- 13 Huang I (NA49 Collab.). Ph. D. thesis, University of California at Davis, 1997
- 14 Afanasjev S V, Alber T, Appelshauser H et al (NA49 Collab.). Nucl. Phys., 1996, **A610**:188c
- 15 Afanasjev S V, Anticic T, Bachler J et al (NA49 Collab.). Phys. Lett., 2000, **B491**:59
- 16 Borman C et al (NA49 Collab.). J. Phys., 1997, **G23**:1817
- 17 Bearden I G et al. J. Phys., 1997, **G23**:1865
- 18 WA97 Collab. Data Presented by R. Caliendo and R. Lietava at Strangeness in Quark Matter, Padova, 1998
- 19 Aderson E et al (WA97 Collab.). Phys. Lett., 1998, **B433**:209
- 20 LIU Lian-Shou, MENG Da-Chung, PENG Hong-An. Phys. Rev., 1988, **D37**:3327; Phys. Rev., 1988, **D38**:3405
- 21 SHI Ya-Fei, ZHUANG Peng-Fei, LIU Lian-Shou. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1990, **14**:56 (in Chinese)
(石亚非,庄鹏飞,刘连寿. 高能物理与核物理,1990, **14**:56)

Analysis of Multi-Particle Production in 158 A GeV Pb + Pb Collisions by Two-Source Statistical Model*

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

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

2 (Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator of Lanzhou, Lanzhou 730000, China)

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

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 158 A GeV Pb + Pb collisions are analyzed by two-source statistical model. The model calculations fit the experimental data very well and supply a reasonable and clear physical picture. The reaction system is composed of a hot, small inner source and a big, cool outer source. The outer source characterizes the projectile-like and target-like, and the inner source characterizes the central reaction zone. At freeze-out, the system is still in expanding.

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

Received 17 June 2001

* Supported by National Natural Science Foundation of China (19975075) and Theoretical Nuclear Physics Foundation of National Laboratory of Heavy Ion Accelerator of Lanzhou