

SPS和RHIC的多粒子产生*

陆中道¹⁾

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

(中国高等科学技术中心 北京 100080)

摘要 用双源统计模型分别研究了 158 A GeV Pb+Pb 和 $\sqrt{s}=130$ A 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, 前一个反应由内外两个源组成, 内源小而热, 外源大而较凉; 后一个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 15MeV, 体积至少大 2 倍. 文中给出了分析.

关键词 双源统计模型 SPS 能量 RHIC 能量 多粒子产生

1 引言

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取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微观输运和统计模型两种. 微观输运方法就是用蒙特卡罗方法模拟两个核碰撞的整个动力学演化过程, 包括演化过程中粒子之间的碰撞, 粒子产生、吸收、衰变等. 统计模型方法^[1-8]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、能量和粒子密度等量表证. 统计模型具有参数少, 物理图像

* 国家自然科学基金(19975075)资助

1) E-mail: zdlu@iris.ciae.ac.cn

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^[1,2]和奇异子压低因子^[9]. 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^[10], 核碰撞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^[6-8]. 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, 奇异子密度总是处处为零, 这是强相互作用下奇异子守恒所要求的. 而在双源模型下, 奇异子密度可以是不为零的变数, 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.

本文应用双源统计模型分别计算研究了 158 A GeV Pb+Pb(SPS)反应和 $\sqrt{s}=130$ A GeV Au+Au(RHIC)反应中的多粒子产生, 并对两个反应的结果进行比较. 为与单源统计模型作比较, 文中给出了单源统计模型的结果.

首先介绍统计模型, 包括双源统计模型, 然后分别是 158 A GeV Pb+Pb 反应和 $\sqrt{s}=130$ A 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

我们用巨正则系综来描述一个多粒子(强子)系统^[4,6]. 强子为重子和介子, 它们分别为费米子和玻色子. 第*i*种粒子的密度为

$$\rho_i = \frac{g_i}{2\pi^2} \int \frac{q^2 dq}{\exp((\varepsilon_i - \mu)/T) \pm 1}, \quad (1)$$

其中 $\varepsilon_i = \sqrt{q^2 + m_i^2}$ 为粒子能量, m_i 为粒子质量, g_i 为简并度, T 为系统温度. \pm 表示粒子的统计性质, $+$ 为费米子, $-$ 为玻色子. μ_i 表示粒子的化学势, 满足 $\mu_i = b_i \mu_B + s_i \mu_S$. 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 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为零.

双源统计模型 双源统计模型^[6-8]认为, 反应系统近似由内外两部分组成. 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. 这两个源分别达到统计平衡, 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. 选取 T, V, ρ_B 作为 3 个独立变数. 化学势是 T 和 ρ_B 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, 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.

3 结果和讨论

表 1 是符合 158 A GeV Pb+Pb 反应实验数据得到的热力学量. 实验数据取自文献[1]及其中所引文献. 第二列和第三列分别是双源模型的外源和内源的结果. 可以看出, 内外两个源有明显的差别. 内源热而小, 外源大而较凉. 能量密度内大外小. 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. 表中第四列是单源模型的结果. 显然两个模型结果有很大的差别. 最显著的差别是奇异子密度. 单源模型中奇异子密度为零, 而在双源模型中奇异子密度不为零, 内源中为负值, 外源中为正值. 但双源模型中奇异子总数保持为零. 奇异子主要被 K 介子和 Λ 粒子所负载.

表 1 158 A GeV Pb+Pb 反应源的热力学量

	双源		单源
	外源	内源	
T/MeV	116	149	157
V/fm^{-3}	12860(5.36V ₀)	2714(1.13 V ₀)	4141
ρ_B/fm^{-3}	0.028	0.0068	0.088
ρ_S/fm^{-3}	0.0005	-0.0023	0.0
$\epsilon/(\text{MeV}/\text{fm}^3)$	74.9	232	423
N_B	357.2	53.7	396
$N_{\bar{B}}$	0.56	35.4	33
$N_B - N_{\bar{B}}$	356.6	18.4	363
N_S	52.4	61.6	112
$N_{\bar{S}}$	46.0	69.0	112
$N_S - N_{\bar{S}}$	6.4	-6.4	0
μ_B/MeV	395	31.7	217
μ_S/MeV	58.1	1.21	49.1

$\sqrt{s} = 130 \text{ A GeV Au+Au}$ 反应的热力学量列于表 2 中. 实验数据取自文献[11—13]及其所引的文献. 在这个反应中内外两个源的热力学量差不多都相等, 而且与单源模型的热力学量也差不多都相等 (两个源的总体积等于单源的体积). 这些源的温度和能量密度都比较高. 说明它们属于同一个源——内源, 而且是个大体积的内源. 实验测量处于这个大的内源范围内. 在这个范围内, 粒子分布均匀, 外源效应就无法显现. 究其原因,

表 2 $\sqrt{s}=130\text{ A GeV Au+Au}$ 反应源的热力学量

	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
$\varepsilon(\text{MeV}/\text{fm}^3)$	1.34	1.33	1.34
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	51.5	52.1
μ_S/MeV	16.1	15.8	16.0

$\sqrt{s}=130\text{ A GeV Au+Au}$ 反应具有大的快度区域 $[-4.9, 4.9]$, 而实验测量只在很小的区域 ($|\eta| < 0.5$) 内进行, 实验测量感觉不到外源的存在. 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.

与 158 A GeV Pb+Pb 反应的内源比较, $\sqrt{s}=130\text{ A GeV Au+Au}$ 反应的内源温度至少高 15 MeV , 体积至少是 2 倍. 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.

从以上两个反应的比较中还可以看出, 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述源的热力学特征.

4 小结

本文用双源统计模型研究了 158 A GeV Pb+Pb 反应和 $\sqrt{s}=130\text{ A GeV Au+Au}$ 反应中多粒子产生. 结果表明, 158 A GeV Pb+Pb 反应有一个热而小的内源和一个大而较凉的外源, 而 $\sqrt{s}=130\text{ A GeV Au+Au}$ 反应有一个高温大体积的内源. 这个高温大体积内源的温度要比 158 A GeV Pb+Pb 反应内源温度高出至少 15 MeV , 体积至少是 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 Braun-Munzinger P, Stachel J, Wessels J P et al. Phys. Letts., 1996, **B365**: 1; Braun-Munzinger P, Heppel I, Stachel I. Phys. Letts., 1999, **B465**: 15
- 2 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
- 3 Cleymans J, Redlich K. Phys. Rev., 1999, **C60**: 054908
- 4 LU Z D, Neda Z, Csernai L et al. HEP & NP, 1997, **22**: 910(in Chinese)
(陆中道, Neda Z, Csernai L 等. 高能物理与核物理, 1997, **22**: 910)
- 5 ZHANG Z Y, YU Y W, CHING C R et al. Phys. Rev., 2000, **C61**: 065204
- 6 LU Z D, SA B H, Amand Faessler et al. HEP & NP, 2002, **26**: 1166 (in Chinese)
(陆中道, 萨本豪, Amand Faessler. 高能物理与核物理, 2002, **26**: 1166)
- 7 LU Z D, Amand Faessler, Fuchs C et al. Phys. Rev. **C**, to be published
- 8 LU Z D, Amand Faessler, Fuchs C et al. Nonequilibrium and Nonlinear Dynamics in Nuclear and other Finite System, Beijing, China, CP579, 136
- 9 Rafelski J. Phys. Lett., 1991, **B262**: 333
- 10 Bravina L V, Zabrodin E E, Gorenstein M I et al. Phys. Rev., 1999, **C60**: 024904
- 11 Braun-Munzinger P, Magestro D, Redlich K et al. arXiv:hep-ph/0105229
- 12 Back B B et al. Phys. Rev. Lett., 2000, **85**: 3100
- 13 Back B B et al. PHOBOS Collab., arXiv:hep-ex/010543

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

LU Zhong-Dao¹⁾

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

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

Abstract The data of multi-particle production in 158 A GeV Pb+Pb collisions and $\sqrt{s}=130$ A GeV Au+Au collisions are analyzed by two-source statistical model. It is found that in 158 A GeV Pb+Pb collisions the source is composed of a hot, small inner part and a large, cool outer part. The outer part characterizes the projectile-like and target-like, and the inner part characterizes the central reaction zone. In $\sqrt{s}=130$ A GeV Au+Au collisions, there is a much hotter and larger inner source. The temperature is at least 15MeV higher than that in the inner source in 158 A GeV Pb+Pb collisions. The volume is at least two times of that in the later collision. The reason is that the $\sqrt{s}=130$ A GeV Au+Au collision has large rapidity region [- 4.9,4.9], while the experimental data are taken from a small pseudo-rapidity region, $|\eta|<0.5$ in which the particles are uniformly distributed as a single source. For a source formed with uniformly-distributed particles, both the single-source statistical model and the two-source statistical model are available, while for a source formed with non-uniformly-distributed particles, only the two-source statistical model is available. 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, SPS energy, RHIC energy, multi-particle production

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

1) E-mail: zdlu@iris.ciae.ac.cn