

# 相对论重离子碰撞的温度涨落与热容\*

马国亮<sup>1;1)</sup> 马余刚<sup>1;2)</sup> 萨本豪<sup>2</sup> 王鯤<sup>1</sup> 蔡翔舟<sup>1</sup> 魏义彬<sup>1</sup>  
张虎勇<sup>1</sup> 卢朝辉<sup>1</sup> 钟晨<sup>1</sup> 陈金根<sup>1</sup> 龙家丽<sup>1</sup> 贺泽君<sup>1</sup> 沈文庆<sup>1</sup>

1 (中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

2 (中国原子能科学研究院 北京 102413)

**摘要** 使用 LUCIAE3.0 模型模拟了 SPS 能区 Pb + Pb 和 C + C 在不同能量 ( $E_{\text{lab}} = 20\text{--}200\text{A GeV}$ ) 和不同中心度下的重离子碰撞. 并通过逐个事件的粒子温度涨落提取出了相应粒子的热容, 发现对于同一碰撞系统, 单位发射粒子的热容随碰撞能量的升高而下降直至饱和, 随着碰撞参数  $b$  的增大而减小, 而且发现单位发射粒子的热容具有随粒子质量的变大而变大的关系. 同时还发现不同碰撞系统中同一种粒子具有相同的单位发射粒子热容, 并给出了相应的解释.

**关键词** 重离子碰撞 夸克胶子等离子体 统计理论和涨落 热容

## 1 引言

格点 QCD (量子色动力学) 预言在物质处于高温高密的状态时, 会形成一种新的物质形态——夸克胶子等离子体 (QGP 相)<sup>[1,2]</sup>. 这种状态有可能出现于宇宙早期 (大爆炸  $10\mu\text{s}$  后), 而现实中有可能通过相对论重离子碰撞来得到它. 为了寻找这种新的相, 人们进行了大量实验, 有 CERN 的 SPS, 美国的 RHIC 等. 而在这些实验中 QGP 相究竟有没有形成, 各家众说纷纭. 因而, 找到一个判别相变的确切信号成为当务之急. 迄今已提出了很多的信号<sup>[3-5]</sup>.

热容作为表征相变的一个基本变量, 自然成为大家研究的焦点<sup>[6-8]</sup>. Landau 很早就提出通过热力学系统温度的分布提取热容的方法<sup>[9]</sup>, 但是由于过去核-核碰撞产生的粒子多重数不足, 所以使这种想法难以实现. 随着粒子对撞机碰撞能量的不断提高, 能产生足够多的粒子, 从而使这种提取热容的方法可能得以实现<sup>[10]</sup>.

我们使用 LUCIAE3.0 模型模拟了 SPS 能区

Pb + Pb 和 C + C 在不同能量和不同中心度的碰撞, 并对所有事件作统计, 得到粒子总的横向动量分布, 并用式(1)的指数分布拟合. 假设每个事件中粒子的单事件横向动量分布都满足此分布, 提取出粒子的单事件温度, 进而得到反应产生的各种粒子系统的温度分布 (涨落), 从这些温度分布中, 提取出每种粒子 (如  $\pi, K, P, \Phi, \Delta$ ) 的热容. 我们发现对于 Pb + Pb 和 C + C 这两个系统产生粒子的热容都是随着碰撞能量的升高而逐渐减小, 到  $E_{\text{lab}} = 120\text{--}140\text{A GeV}$  时接近于饱和. 但是, 这些粒子的热容随着碰撞参数的增大逐渐减小, 同时还发现各种粒子的热容随着粒子质量的增大而增大. 对于 Pb + Pb 和 C + C 两个不同大小的系统中产生的同一种粒子的热容是相同的, 即粒子的热容具有与反应系统无关性. 最后, 我们对以上的结果给出了理论解释.

## 2 LUCIAE3.0 模型

LUCIAE3.0 是一个相对论性核-核碰撞模型<sup>[11]</sup>,

2003-06-02 收稿

\* 国家自然科学基金委重点项目 (10135030), 国家重点基础研究发展规划项目 (G200077400), 国家杰出青年科学基金 (19725521) 和中国科学院后续基金资助

1) E-mail: glma@sinr.ac.cn

2) E-mail: ygma@sinr.ac.cn

它建立在著名 FRITIOF 模型<sup>[12]</sup>基础上. 在 FRITIOF 模型中核-核碰撞被简单地描写为核子-核子碰撞的迭加,因而解释核-核碰撞实验结果往往不理想. LUCIAE3.0 模型主要在下列 3 方面作了发展:1) 考虑了参加者核子、旁观者核子和产生粒子间末态相互作用(再散射)<sup>[13]</sup>,因为再散射一般是不容忽视的. 2) LUCIAE 用爆竹模型(FIRECRACKER MODEL),考虑了相对论性核-核碰撞早期弦密集时某些弦可能构成集体态用集体能量发射胶子的事实,也就是考虑了弦发射集体效应<sup>[14]</sup>;3) LUCIAE3.0 引入了奇异夸克压低的约化效应,通过引入有效弦张量将 JETSET 软件包中与弦张量及奇异产生有关的参数变成与入射能量、反应系统大小及中心度有关的参数,使之能更好地反映实验结果<sup>[15]</sup>.

### 3 提取热容的方法

为了更好地说明这种方法,以提取 160A GeV Pb + Pb 对心碰撞 ( $b = 0\text{fm}$ ) 产生的  $\pi^+$  的热容为例. 使用 LUCIAE3.0 模型模拟了 1000 个事件,并将这 1000 个事件作系综统计得到  $\pi^+$  总的横向质量 ( $m_T$ ) 分布,如图 1 所示,

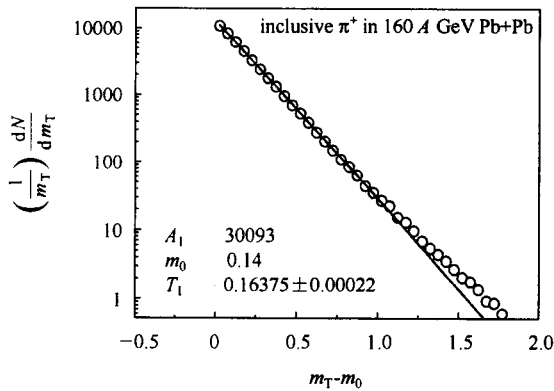


图 1 160A GeV Pb + Pb 对心碰撞 ( $b = 0\text{fm}$ ) 所有事件统计的总的  $\pi^+$  介子横向质量分布

用下式<sup>[16,17]</sup>

$$\left(\frac{1}{m_T}\right) \frac{dN}{dm_T} = A e^{-m_T/T} \quad (1)$$

来拟合上述横向质量分布,提取出归一化系数  $A = 30093$ , 温度  $T = 0.1636\text{GeV}$ . 图 2 给出  $\pi^+$  介子的单事件横向质量谱,假设它亦满足(1)式,于是将谱(图 2)中的点代入(1)式亦即由下式解出对应的温度

$$T_i = \frac{-m_T}{\ln\left(\left(\frac{1}{m_T}\right) \frac{dN}{dm_T} / A\right)} \quad (2)$$

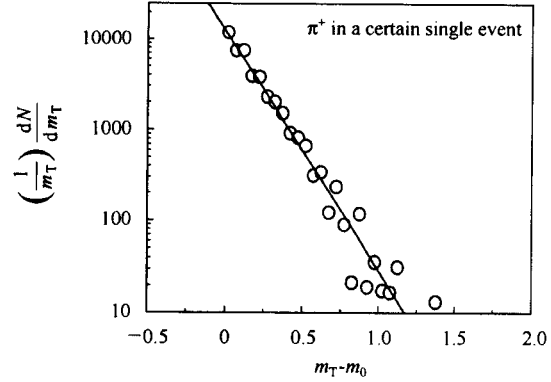


图 2 160A GeV Pb + Pb 对心碰撞 ( $b = 0\text{fm}$ ) 单事件统计的横向质量分布

对单事件中每个点  $i$  求出的温度求算术平均即得到单事件温度

$$T = \sum_{i=1}^N \frac{T_i}{N}, \quad (3)$$

式中  $N$  为单事件横向质量谱中点的个数. 由于在高横质量区的粒子数较少,单事件横向质量谱中高横质量部分的点的误差较大(从图 2 可以看出),所以我们只取了  $m_T - m_0 < 0.5\text{GeV}$  的点作计算,  $m_0$  为静止质量. 将求得的单事件的粒子温度  $T$  作统计(1000 个事件),得到  $\pi^+$  的温度分布如图 3 所示. 假设  $\pi^+$  的温度分布(涨落)具有如下的几率分布形式<sup>[9,18]</sup>:

$$P(T) \approx C^* \exp[-C_v(\Delta T/T)^2], \quad (4)$$

则可提取出系数  $C_v$ , 即为  $\pi^+$  的热容 ( $C$  为归一化系数). 由于热容是一个广延量,考虑到不同的碰撞系统、不同碰撞能量和不同碰撞中心度下产生的粒子数量不同,所以采用归一化的热容  $C_v/N$ , 即对应于单位粒子上升单位温度所需要的能量,它对于不同的强子气体和不同系统具有可比性,应该更具有物理意义,这里的  $N$  是粒子的多重数. 在 160A GeV

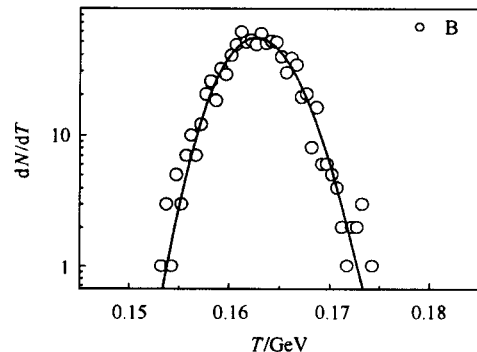


图 3 160A GeV Pb + Pb 对心碰撞 ( $b = 0\text{fm}$ ) 产生的  $\pi^+$  的温度分布

Pb + Pb 对心碰撞 ( $b = 0\text{fm}$ ) 中, 对于  $\pi^+$ , 提取出的  $C_V = 1180.6$ ,  $N = 633.848$ , 所以其对应的  $C_V/N = 1.6568$ .

#### 4 热容的一些结果

我们使用 LUCIAE3.0 模型模拟了 SPS 能区 Pb + Pb, C + C 不同碰撞能量和不同中心度的碰撞, 并使用上述的方法提取了不同粒子 ( $\pi^+$ , K, P,  $\Phi$ ,  $\Lambda$ ) 的单位粒子的热容 (以下均简称为热容). 图 4 是 Pb + Pb 对心碰撞 ( $b = 0\text{fm}$ ) 不同粒子热容对碰撞能量的依赖关系.

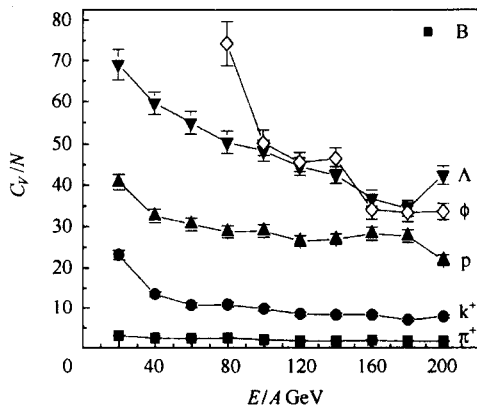


图 4 Pb + Pb 对心碰撞 ( $b = 0\text{fm}$ ) 不同粒子气体热容对碰撞能量的依赖关系

从图 4 可以看出, 随着碰撞能量的不断升高, 粒子的热容由大变小, 最后基本饱和. 而且粒子的质量越大, 热容越大. 图 5 给出了 160A GeV Pb + Pb 碰撞中, 粒子的热容和质量的依赖关系. 可以看出, 粒子的热容随粒子质量的增大而线性地增大.

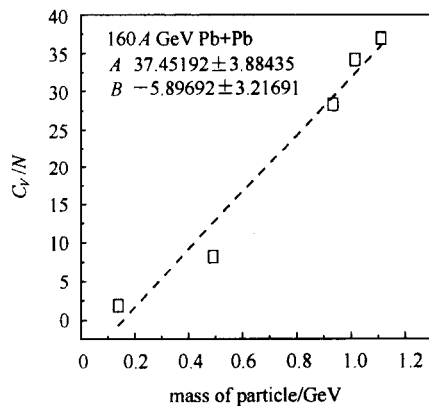


图 5 Pb + Pb 对心碰撞 ( $b = 0\text{fm}$ ) 碰撞能量为 160A GeV 不同粒子气体热容对粒子质量的依赖关系

我们还研究了 160A GeV Pb + Pb 碰撞中, 各种粒子的热容和碰撞参数  $b$  的关系. 发现随着碰撞参

数  $b$  的变大, 各粒子的热容逐渐减小, 如图 6 所示. 对于 C + C 系统, 我们得到的情况也类似, 我们还发现对于不同碰撞系统在相同的碰撞能量下产生的同一种类粒子热容是近似相同的. 图 7 给出了 Pb + Pb 和 C + C 两系统中的  $\pi^+$  的热容和碰撞能量的关系, 说明了粒子气体热容的系统无关性.

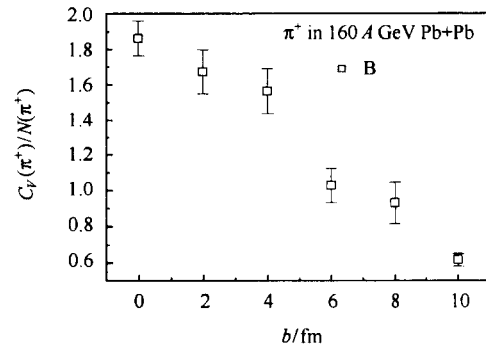


图 6 Pb + Pb 160A GeV 时  $\pi^+$  的热容和碰撞参数  $b$  的依赖关系

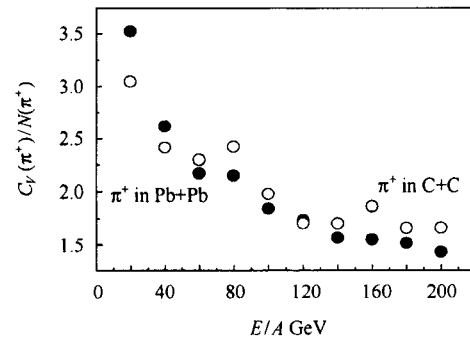


图 7 Pb + Pb 和 C + C 两系统产生的  $\pi^+$  的热容和碰撞能量的关系

#### 5 讨论

对于一种粒子, 其温度主要由粒子高横动量的大小及具有这些高横动量的粒子在粒子总数中占的比重来决定. 如图 8 所示, 随着碰撞系统碰撞能量的不断提高, 单位碰撞能量产生的各种粒子的多重数逐渐减小. 所以在高碰撞能量时, 更多的碰撞能量是用来提高粒子横向动量, 使越来越多的粒子比份具有高横动量 (使横向质量谱越来越平), 从而提高了粒子的温度. 而低碰撞能量时, 要提高粒子气体的温度, 在产生高横动量的粒子的同时, 大部分能量是用来产生大量的低横动量粒子. 所以低碰撞能量时, 要提高粒子的温度相对困难些, 这导致粒子热容随碰撞能量的增长而减小至饱和. 对于同一碰撞能量下, 不管提高低

横动量粒子的多重数,还是提高具有高横动量粒子的比份,当然是重的粒子需要的能量越多. 再者图 6 中 160A GeV Pb + Pb 碰撞  $\pi^+$  粒子热容随  $b$  的变化是因为碰撞参数  $b$  越小,需要提高的粒子的横动量越大,所以需要的能量越多,即热容也越大.

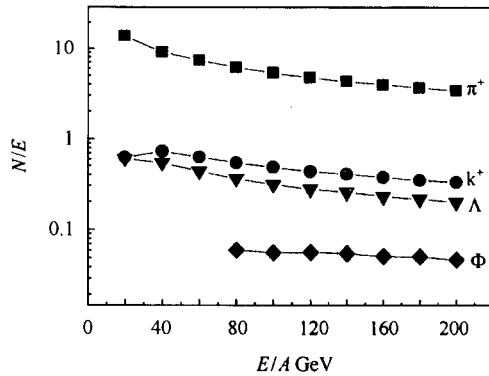


图 8 160A GeV Pb + Pb 对心碰撞 ( $b = 0$ fm) 各种粒子的单位碰撞能量产生的多重数随能量的变化

由于 LUCIAE3.0 模型中没有考虑 QGP 的信息,

如果 QGP 形成,而且图 5 表示的关系对于夸克依然成立,而且这种关系能够存活过强子化的话,那么要提高末态粒子的温度,由于四动量守恒,只要提高  $u, d, s$  夸克的高横动量比份即可,所以对于那些比较重的粒子 ( $M > M_s$ ),如  $P, \Phi, \Lambda$ ,按我们的考虑有 QGP 时其热容将会由饱和区突然下降. 这将有助于 QGP 相的探测.

总之,使用 LUCIAE3.0 模型模拟了 SPS 能区的 Pb + Pb, C + C 不同能量和不同中心度的碰撞,并通过粒子温度分布提取出了不同粒子的热容. 发现对于同一碰撞系统,粒子的热容随碰撞能量的升高而下降直至饱和,随着相互作用参数  $b$  的增大而减小,而且发现粒子的热容具有随粒子质量的变大而变大的关系. 同时还发现不同碰撞系统中同一种粒子具有相同的热容. 并对以上结果作出了初步的理论解释,并讨论了 QGP 形成对我们结果的影响. 我们也希望未来的实验能够采用我们的方法分析,以检验我们的结果.

## 参考文献 (References)

- 1 Wilson K G. Phys. Rev., 1974, **D14**: 2455
- 2 Satz H. Nucl. Phys., 1984, **A418**: 447c
- 3 Bass S A. 2000 arXiv:nucl-th/0202010
- 4 CAI X, WANG X R et al. Nucl. Phys., 1999, **B71**: 319
- 5 Reiter M, Dumitru A et al. Nucl. Phys., 1998, **A643**: 99
- 6 Stephanov M, Rajagopal K, Shuryak E. Phys. Rev., 1999, **D60**: 114028
- 7 Chui T C P et al. Phys. Rev. Lett., 1992, **69**: 3005
- 8 SA Ben-Hao, Gross D H E. Nucl. Phys., 1985, **A437**: 643
- 9 Landau L D, Lifschitz I M. Course of Theoretical Physics, Statistical Physics (Third Edition). Beijing: World Press, 1999. 338—343
- 10 Stodolsky L. Phys. Rev. Lett., 1995, **75**: 1044
- 11 TAI An, SA Ben-Hao. Comput. Phys. Comm., 1999, **116**: 355
- 12 HONG Pi. Z. Phys., 1993, **C57**: 485
- 13 SA Ben-Hao, TAI An, LU Zhong-Dao. Phys. Rev., 1995, **C52**: 2069
- 14 Andersson B, TAI An. Z. Phys., 1996, **C71**: 155
- 15 SA Ben-Hao, TAI An. Phys. Lett., 1997, **B399**: 29
- 16 Jones P G. Nucl. Phys., 1996, **A610**: 188c
- 17 Utyuzh O V, Wilk G, Wlodarczyk Z. 2001 arXiv:hep-ph/0103273
- 18 Heiselberg H. Phys. Rep., 2001, **351**: 161

## Temperature Fluctuation and Heat Capacity in Relativistic Heavy-Ion Collisions\*

MA Guo-Liang<sup>1;1)</sup> MA Yu-Gang<sup>1;2)</sup> SA Ben-Hao<sup>2</sup> WANG Kun<sup>1</sup> CAI Xiang-Zhou<sup>1</sup>  
WEI Yi-Bin<sup>1</sup> ZHANG Hu-Yong<sup>1</sup> LU Zhao-Hui<sup>1</sup> ZHONG Chen<sup>1</sup> CHEN Jin-Gen<sup>1</sup>  
LONG Jia-Li<sup>1</sup> HE Ze-Jun<sup>1</sup> SHEN Wen-Qing<sup>1</sup>

1(Shanghai Institute of Nuclear Research, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

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

**Abstract** We used LUCIAE3.0 model to simulate the Pb + Pb and C + C in SPS energy. The heat capacity was then extracted from event by event temperature fluctuation. It is found that the heat capacity per hadron multiplicity decreases with the increasing of beam energy and impact parameter for a given reaction system. While the hadron mass increases, the heat capacity per hadron multiplicity rises. In addition, we found that, for a given hadron, the heat capacity per hadron multiplicity is almost the same regardless the reaction system. Some discussions were also given.

**Key words** heavy ion collision, quark-gluon plasma, statistical theory and fluctuations, heat capacity

---

Received 2 June 2003

\* Supported by Major State Basic Research Development Program (G200077400), National Natural Science Foundation of China (10135030) and National Natural Science Foundation of China for Distinguished Young Scholars (19725521)

1) E-mail: glma@sinr.ac.cn

2) E-mail: ygma@sinr.ac.cn