

共振粒子的化学势和粒密度、能密度^{*}

胡守扬¹⁾ 傅元勇 陆中道

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 研究了相对论重离子碰撞中产生的共振物质的统计性质,讨论了共振粒子的化学势和净粒子密度的关系.计算了总粒子密度和能量密度,研究和分析了他们和净粒子密度的关系,并估算了总粒子密度相对于正常核密度(0.16fm^{-3})的倍数;在 RHIC 能量约为 5—8 倍,在 SPS 能量约为 3—6 倍.还研究了各种粒子成分随温度的变化,揭示出几个温度区间段对应 AGS,SPS 和 RHIC 3 个能区,各区间中主要粒子成分分别为重子、奇异子和介子.

关键词 共振物质 粒密度 能密度 重子化学势 奇异子化学势

1 引言

相对论重离子碰撞产生大量粒子,这些粒子包括重子、介子、奇异粒子,它们的反粒子,还有粲粒子和 γ 光子等.他们大都以共振形态存在,因此是共振粒子.从这些粒子产生的特点、份额、各种分布(空间分布、能量分布等)以及它们的相互关系中探索 QGP 信号^[1].研究大致分为两类,一类把“个体”作为研究对象,例如把 k/π 作为研究对象,研究重离子碰撞中 k^+/π^+ ^[2,3] 增加现象,探索这种增加的起因以及它和 QGP 的形成有何关联等;再例如把 J/ψ 作为研究对象,研究在重离子碰撞中 J/ψ 被压缩的现象^[4],探索它的起因以及它和 QGP 的关系等.在这类研究中,对“个体”的研究比较深入细致,研究其原因、规律、特点等,通常把它们当着 QGP 信号加以研究.另一类把反应中的粒子“整体”作为研究对象,研究它所具有的宏观性质、宏观特性以及带来的其他重要信息.我们研究的是整个强子系统,利用统计理论研究强子系统的宏观性质^[5-18].根据实验中得到的一批强子实验数据(粒子数或粒子数比率)和理论计算的相应量对比,就可以确定温度和化学势等参数值,由

此就可以得到粒子系统的温度、粒子密度和能量密度等数值.根据已提供的 AGS,SPS 和 RHIC 3 个能区的实验数据,人们已从统计理论获得了这 3 个能区的宏观量,也研究了这 3 个能区的宏观量特征^[5-11,14-18].随着反应能量的增高,粒子系统温度、粒密度和能密度也随着增大,在 RHIC 能区,温度可达 170—180MeV^[14,16-18].一般人们把 QGP 的温度定义为 QCD 界定的温度 160—200MeV,因此对强子系统的统计理论计算表明 RHIC 能区已接近 QGP 的温度条件.在寻求 QGP 形成的条件和了解接近 QGP 的程度中,统计理论起着重要的作用.

本文研究共振粒子强子系统的统计性质,一些量的相互关系以及它们之间的互变规律.共振粒子系统有别于无限核物质系统,它是有限粒子系统,反应中粒子遵守重子数守恒和奇异数守恒,因此粒子化学势和这两个守恒定律紧密关联.本文研究这些量之间以及两个守恒律的关系.

2 模型和公式

在相对论重离子碰撞中,产生了大量的粒子.对强子我们用统计理论方法处理和研究.在巨正则系

2004-09-23 收稿

* 国家自然科学基金(10275096,19975075)资助

1) E-mail: hushya@sina.com

综上,粒子的粒密度和能密度分别为(采用 $\hbar = c = 1$ 单位)

$$\rho = \frac{g}{2\pi^2} \int_0^\infty \frac{q^2 dq}{e^{\beta(\epsilon - \mu)} + \xi}, \quad (1)$$

$$e = \frac{g}{2\pi^2} \int_0^\infty \frac{\epsilon q^2 dq}{e^{\beta(\epsilon - \mu)} + \xi}, \quad (2)$$

为简单起见,这里已把第 i 种粒子标记省略.它们都是动量空间的积分,而且在动量空间具有各向同性.

对于费米子, $\xi = 1$, 当能量 $\epsilon = \sqrt{q^2 + m^2}$ 小于化学势 μ , 分布比较均匀, 而大于 μ 迅速趋于 0; 对于玻色子, $\xi = -1$, 粒子分布在能量等于化学势附近. 系统温度 $T = 1/\beta$ 越高, 粒子的分布越平坦. 从公式可以看出温度 T 和化学势 μ 是描述粒子分布的参数. 对于强子系统, 粒子由重子和介子组成, 其中介子包括奇异粒子以及 π 等轻介子, 它们的化学势可以统一写成

$$\mu = b\mu_B + s\mu_S, \quad (3)$$

μ_B, μ_S 分别为重子和奇异子的化学势, b, s 分别为粒子所含的重子和奇异子的数目. 因此对于由重子和奇异粒子组成的粒子系统, 所有粒子具有温度、重子化学势和奇异子化学势 3 个参数. 反粒子密度记为 $\bar{\rho}$, 化学势为 $-\mu$. 由化学势公式知道, 核子化学势等于重子化学势: $\mu_N = \mu_B$; K^+ 介子化学势等于奇异子化学势: $\mu_{K^+} = \mu_S$; π 介子的化学势为零, 即 $\mu_\pi = 0$.

由于相对论重离子碰撞产生的粒子系统是有限粒子系统, 碰撞必须遵守重子数守恒和奇异数守恒. 设系统所有重子构成的重子密度为 $\rho_B = \sum_{i(b=1)} \rho_i$, 所有反重子构成的反重子密度为 $\rho_{\bar{B}} = \sum_{i(b=1)} \bar{\rho}_i$, 则净重子密度为 $\tilde{\rho}_B = \rho_B - \rho_{\bar{B}}$, 它和体积的乘积就是重子数, 在反应中守恒. 同样净奇异子密度为 $\tilde{\rho}_S = \rho_S - \rho_{\bar{S}}$, $\rho_S = \sum_{i(s \neq 0)} s_i \rho_i$, $\rho_{\bar{S}} = \sum_{i(s \neq 0)} (-s_i) \bar{\rho}_i$, $\tilde{\rho}_S$ 和体积的乘积就是奇异子数, 它在反应中也守恒. 根据这两个守恒定律, 重子化学势和奇异子化学势可由 $\tilde{\rho}_B$ 和 $\tilde{\rho}_S$ 确定和计算. 文中选用它们作变量计算其他量, 并研究它们的关系.

3 结果和讨论

首先研究化学势的计算结果. 温度由 120—180MeV 变化(这里假设到 180MeV 系统仍是强子气

体), 图 1 是重子化学势和奇异子化学势作为净重子密度的函数变化. $\tilde{\rho}_B$ 由 0—0.6 取值, $\tilde{\rho}_B$ 和 $\tilde{\rho}_S$ 计算中把所有质量小于 2GeV 的强子(重子和介子)都包括了进来, 温度由 120—180MeV 变化. 首先注意到同样温度下重子化学势比奇异子化学势大, 因此奇异子产生比重子容易. 第 2 部分已经指出, K^+ 介子的化学势等于奇异子的化学势, 核子化学势等于重子化学势, 这表明 K^+ 介子的产生相对于核子产生较容易. 其次注意到系统温度增加, 化学势减小, 有利于粒子产生. 在 AGS, SPS 和 RHIC 3 个能量中, AGS 能量最低, 化学势最大, 产生粒子最少; 而 RHIC 能量最高, 化学势最小, 产生粒子最多. 最后还注意到化学势和净重子密度之间具有单调变化关系, 在低净重子密度, 特别低于 0.05fm^{-3} , 各种能量下的化学势都迅速降低且趋于零, 但这种状态不易达到, 因为核反应中必定带入核子, 净重子密度必定为一定的数值.

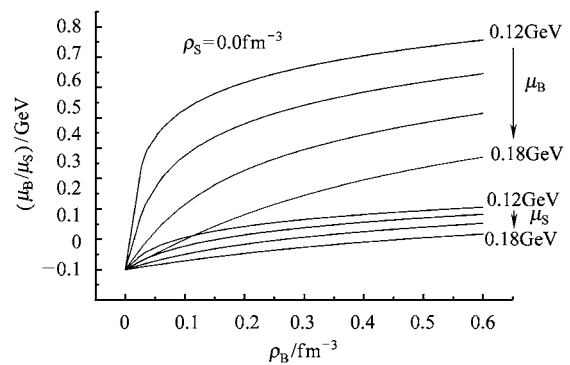


图 1 μ_B, μ_S 随 $\tilde{\rho}_B$ 的变化

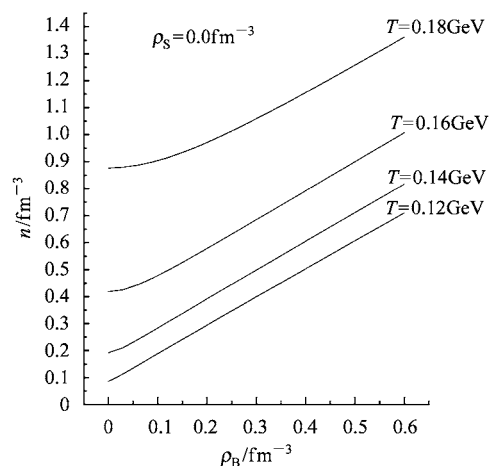
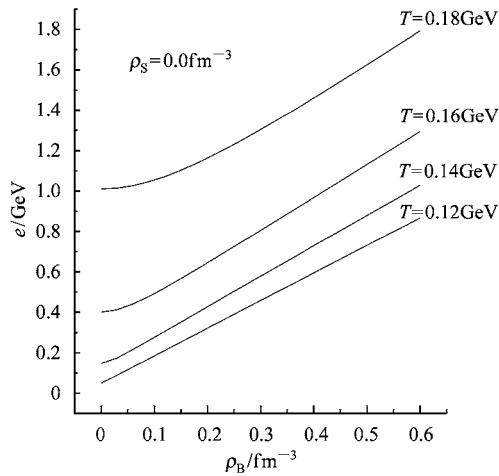


图 2 总粒子密度随 $\tilde{\rho}_B$ 的变化

图 3 能量密度随 ρ_B 的变化

总粒子密度(包括所有强子和反粒子)和能量密度是两个重要的量,图 2 和图 3 是它们分别随净重子密度的变化,基本呈线性关系.随净重子密度增大,粒密度和能密度线性增大,这证明用重的离子进行反应比用轻的离子反应较有利,因为在这样的条件下净重子密度大一些,产生的总粒密度和能密度会大一些.另外可以看到,核温度越高,产生的粒密度和能密度越大.这里估算一下核温度为 180MeV 和 160MeV 时总粒密度相对于正常粒密度 (0.16fm^{-3}) 的倍数: $T = 180\text{MeV}$ (RHIC 能区) 时, $n/n_0 = 5-8$; $T = 160\text{MeV}$ (SPS 能区) 时, $n/n_0 = 3-6$.

最后讨论一下各种粒子成分的贡献.图 4 是取净重子密度为 0.1fm^{-3} 时各种粒子成分随温度的变化.从图中可以看出各种粒子成分的密度都随温度升高而增大,但增加的速率却不同.很明显介子特别是轻介子上升的速率比重子上升快得多,另外可以看到在不同的温度下各种粒子占有比重是不同的.当核温在 132MeV (AGS 能量) 以下时主要粒子成分为重子,超过这个温度时, π, ρ 等轻介子迅速大量产生成为主要粒子成分,当温度超过 152MeV (SPS 能量) 时,奇异子的产生就超过重子的产生,其中 K 介子产生比奇异子产生上升得快,当温度超过

163MeV (SPS 能量) 时, K 介子产生超过重子.因此超过这个温度的核物质可以称为介子物质. 152MeV 和 163MeV 都是 SPS 能量的重要特征温度.可以看出,反重子虽然随温度增加而增大,但增大得非常缓慢,而且它的密度始终最小.

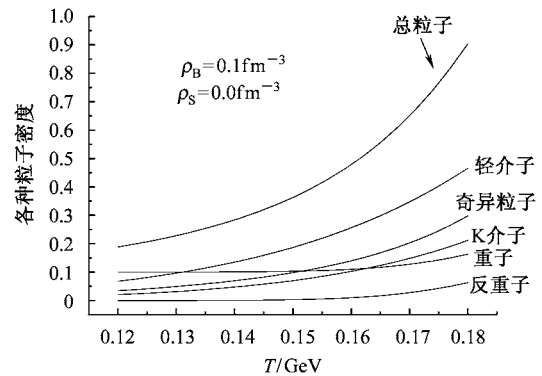


图 4 各种粒子密度随温度的变化

4 小结

研究了相对论重离子碰撞中产生的共振物质的统计性质,共振粒子强子的化学势统一用公式 $\mu = b\mu_B + s\mu_S$ 表示.计算结果表明重子化学势 μ_B 和奇异子化学势 μ_S 是净重子密度的单调变化函数.重子化学势比奇异子化学势大,在低端它们都一致趋于零.对总粒子密度和能量密度两个重要量作了计算,结果显示它们和净重子密度基本上是线性关系.估算总粒子密度相对于正常粒子密度的比值,结果为在 RHIC 区达到 $5-8$, SPS 能区达到 $3-6$.最后研究了各种粒子成分随温度的变化,结果显示温度可分成几个区域,每个区域分别对应于 AGS, SPS 和 RHIC 3 个能区,并各具特点:能量最低的为 AGS 能区,主要粒子成分为重子,能量最高的 RHIC 能区,主要粒子成分为介子;而在中间的 SPS 能区中,奇异子变得比较重要.

参考文献 (References)

- 1 Cheuk-Yin Wong. Translated by ZHANG Wei-Ning. Introduction to High-Energy Heavy-Ion Collisions. The First Edition. Harbin: Publishing Company of Harbin Institute of Technology, 2002(in Chinese)
(黄卓然著.张卫宁译.高能重离子碰撞导论.第1版.哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2002)
- 2 WANG Zhong-Qi et al. HEP & NP, 1994, **18**:567
- 3 SA Ben-Hao, TAI An, LU Zhong-Dao. HEP & NP, 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 SA Ben-Hao, LU Zhong-Dao, SU Zong-Di. HEP & NP, 2001, **25**:989—993
- 5 LU Zhong-Dao, 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)
- 6 Braun-Munzinger P, Stachel J, Wessels J P et al. Phys. Letts., 1995, **B344**:43—48
- 7 Braun-Munzinger P, Stachel J, Wessels J P et al. Phys. Letts., 1996, **B365**:1
- 8 Braun-Munzinger P, Heppel I, Stachel J. Phys. Letts., 1999, **B465**:15
- 9 YEN G D et al. Phys. Rev., 1997, **C56**:2210
- 10 YEN G D, Gorenstein M I. Phys. Rev., 1999, **C59**:2788
- 11 Cleymans J, Redlich K. Phys. Rev., 1999, **C60**:054908
- 12 ZHANG Z Y et al. Phys. Rev., 2000, **C61**:065204
- 13 Bravina L V et al. Phys. Rev., 2002, **C66**:014906
- 14 LU Zhong-Dao, Faessler A, Fuchs C et al. Phys. G: Nucl. Part. Phys., 2002, **28**: 2127—2131
- 15 LU Zhong-Dao, SA Ben-Hao, Amand Faessler et al. HEP & NP, 2002, **26**(5): 501—506
- 16 LU Zhong-Dao, Amand Faessler, Fuchs C et al. Phys. Rev., 2002, **C66**: 044905 1—7
- 17 LU Zhong-Dao, SA Ben-Hao, Amand Faessler et al. HEP & NP, 2002, **26**(11): 1166—1171
- 18 Braun-Munzinger P et al. Phys. Lett., 2001, **B518**:41

Chemical Potential of Resonance Matter and Particle Density, Energy Density*

HU Shou-Yang¹⁾ FU Yuan-Yong LU Zhong-Dao

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

Abstract The statistical property is studied for the resonance matter produced in relativistic heavy-ion collision. The relation between chemical potential of the resonant particle and net particle density is discussed. The total particle density and the energy density are calculated, and the relations between these densities and the net baryon density are analyzed. The ratio of the total particle density to the normal nuclear density(0.16fm) is estimated. It is about 5—8 in RHIC energy region and 3—6 in the SPS energy region. Finally, the character of the hadronic component at different regions is studied. It is found that in three temperature regions which correspond to the AGS, SPS and RHIC energy region, respectively, the main hadronic component is baryon, strange particle and meson, respectively.

Key words resonance matter, particle density, energy density, baryon chemical potential, strangeness chemical potential

Received 23 September 2004

* Supported by National Natural Science Foundation of China(10275096,19975075)

1)E-mail: hushya@sina.com