



# 核数据重点实验室

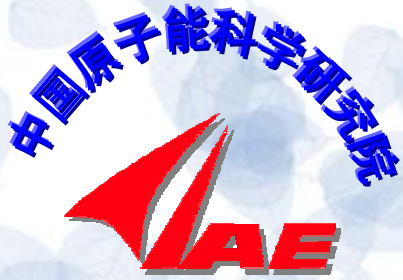


报告题目：

相对论重离子碰撞中共振物质的  
统计物理特性

胡守扬





1. 简介
2. 物理过程
3. 统计模型和研究方法
4. 体系各种密度计算和相互关系
5. RHIC实验数据拟合和结果



## 1.简介

- 研究背景及意义

高能重离子碰撞是20世纪70年代以来形成的一个新的研究领域，它所涉及的概念和范围相当广泛，是粒子物理和核物理的交叉学科，研究核物质在极端条件下（高温高密）核物质的性质——强相互作用的性质及可能存在的QGP，同时为天体演化提供一个实验平台。



## 二.物理过程

### 物理过程

研究的是相对论下重离子的碰撞,两个离子高速相撞,下面是碰撞过程图示:



两个离子高速相向对冲而来,具有很高的能量.由于相对论的影响它们由球形变成扁平

这幅图里面,猛烈的撞击使其相互穿透,离子所带的能量转为高温和新的粒子。

此时产生了大量新的粒子,质子和中子的撞击,可能释放出夸克和胶子。我们所要探讨的就是这部分粒子的性质。



## 三. 统计模型及理论研究方法

### 3.1 统计模型

我们首先给出统计模型中的热力学公式，在巨正则系综中单位体积气体中（标记为*i*）相互独立的费米子或玻色子的热力学势（我们采用  $\hbar = c = 1$  单位）：

$$\Omega = -g \frac{xT}{(2\pi)^3} \int d^3q \ln[1 + xe^{b(m-e)}]$$

这里  $b = 1/T$ ， $T$  为粒子系统的温度， $e_i = \sqrt{q^2 + m_i^2}$  为粒子能量， $m_i$  为粒子质量， $g_i$  为简并度。 $x$  表示系统的统计性质，+1为费米子，-1为玻色子， $m_i$  表示粒子的化学势，满足下面关系： $m_i = m_b b_i + m_s s_i$ ，这里  $m_b$  和  $m_s$  分别表示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。这里  $T$ ， $m_b$  和  $m_s$  是参数。



3.2 系统的热力学量由热力学势导出，粒子密度和能量密度分别为：

$$n \equiv -\left. \frac{\partial \Omega}{\partial m} \right|_T = \frac{g}{2p^2} \int_0^\infty dq \frac{q^2}{e^{\frac{e-m}{T}} + X}$$

$$e \equiv mn + \left. \frac{\partial (b\Omega)}{\partial b} \right|_T = \frac{g}{2p^2} \int_0^\infty dq \frac{q^2 e}{e^{\frac{e-m}{T}} + X}$$



## 3.3 理论研究方法

- 相对论重离子碰撞的研究方法大致有两类。一种是微观运输或动力学模拟方法,用蒙特卡洛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。
- 另一种是统计模型方法。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。本文采用的是统计模型方法。系统有物质和能量的交换,采用的是统计系统下的巨正则系综。计算碰撞瞬间体系的各种物理量,此处采用单源模型。



## 四 体系各种密度计算和相互关系

### 4.1 粒子密度和能量密度

前面已经介绍到了粒子密度和能量密度的计算公式。

为计算和校验公式程序，我们给出温度、重子化学势和奇异子化学势3个热力学参数数值：

$$T=0.142174 \text{ GeV}, \quad m_b = 0.6676719 \text{ GeV},$$

$$m_s = 0.1946377 \text{ GeV}$$





# 核数据重点实验室

粒子	$N(\text{fm}^{-3})$	$e(\text{GeV}/\text{fm}^3)$
$n+p$	0.299	0.358
$\Delta$	0.224	0.329
$\Lambda$	$1.42 \times 10^{-2}$	$1.927 \times 10^{-2}$
$\Sigma$	$2.72 \times 10^{-2}$	$3.895 \times 10^{-2}$
$\Xi$	$2.21 \times 10^{-3}$	$3.434 \times 10^{-3}$
$\Omega$	$6.29 \times 10^{-5}$	$1.199 \times 10^{-4}$
$p$	0.103	$4.707 \times 10^{-2}$
$k^+$	$3.878 \times 10^{-3}$	$2.971 \times 10^{-3}$



北京市275信箱46分箱 邮编102413 电话69357849 传真69357787

## 4.2 净重子密度和净奇异子密度

这是两个重要的物理量，定义如下：

净重子密度：在  $B=1$  下

$$r_B = \sum_{\substack{i=1 \\ B=1}}^N n_i - \sum_{\substack{i=1 \\ B=1}}^N \bar{n}_i = r_{B_+} - r_{B_-}$$

净奇异子密度：在  $S \neq 0$  下

$$r_S = \sum_{\substack{i=1 \\ S \neq 0}}^N s_i n_i - \sum_{\substack{i=1 \\ S \neq 0}}^N s_i \bar{n}_i = r_{S_+} - r_{S_-}$$

这里  $B_i$ ， $S_i$  分别是重子和奇异子数



- 给出净重子和净奇异子密度，主要是讨论他们和化学式的关系
- 以下图4.3.1、图4.3.2分别是重子化学势和奇异子化学势随净重子密度的变化。图4.3.3、图4.3.4是重子化学势和奇异子化学势随净奇异子密度的变化。



图 4.3.1

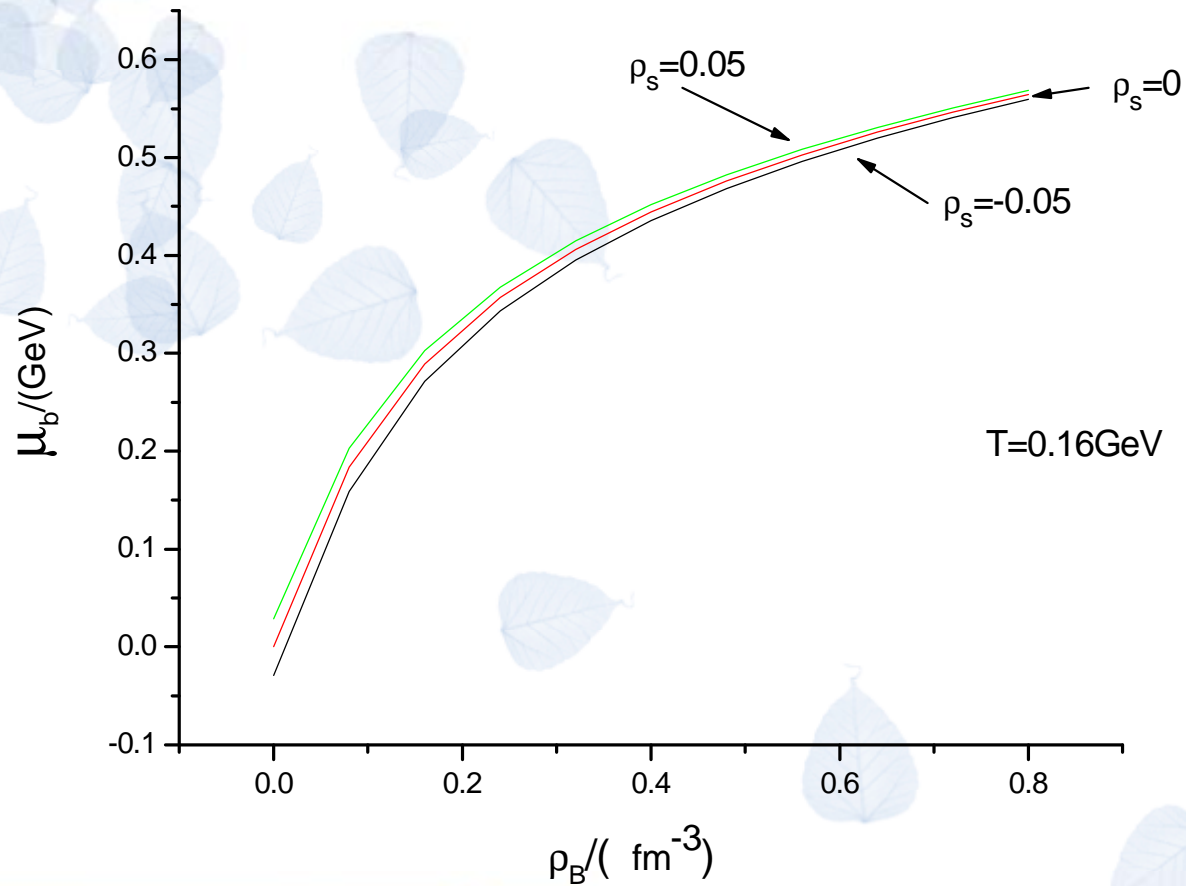
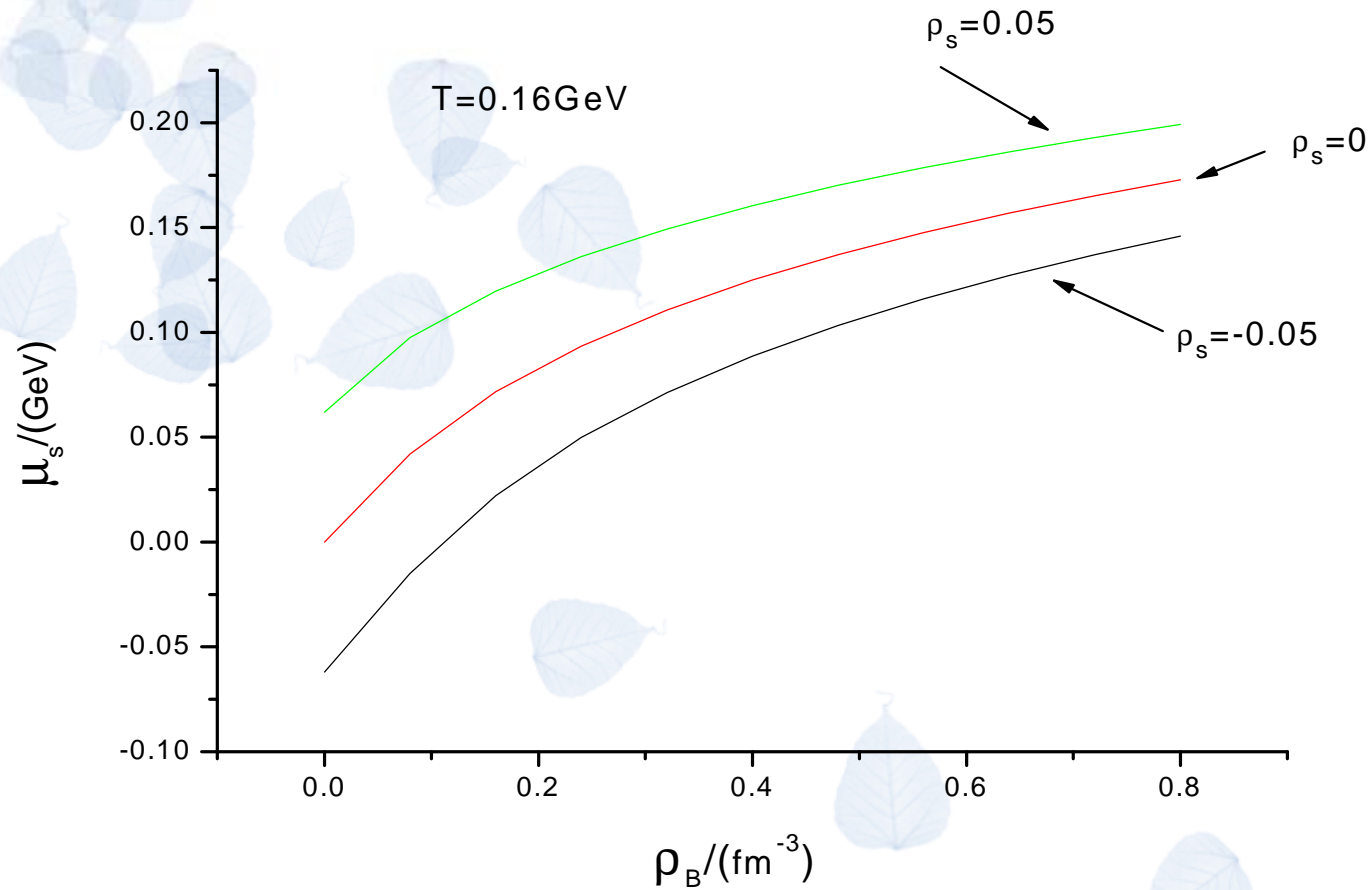


图 4.3.2



可以看出两种化学势都随净重子密度增大而增大

另外，奇异子的化学势比重子化学势小，表明奇异子产生比重子产生容易。



图4.3.5

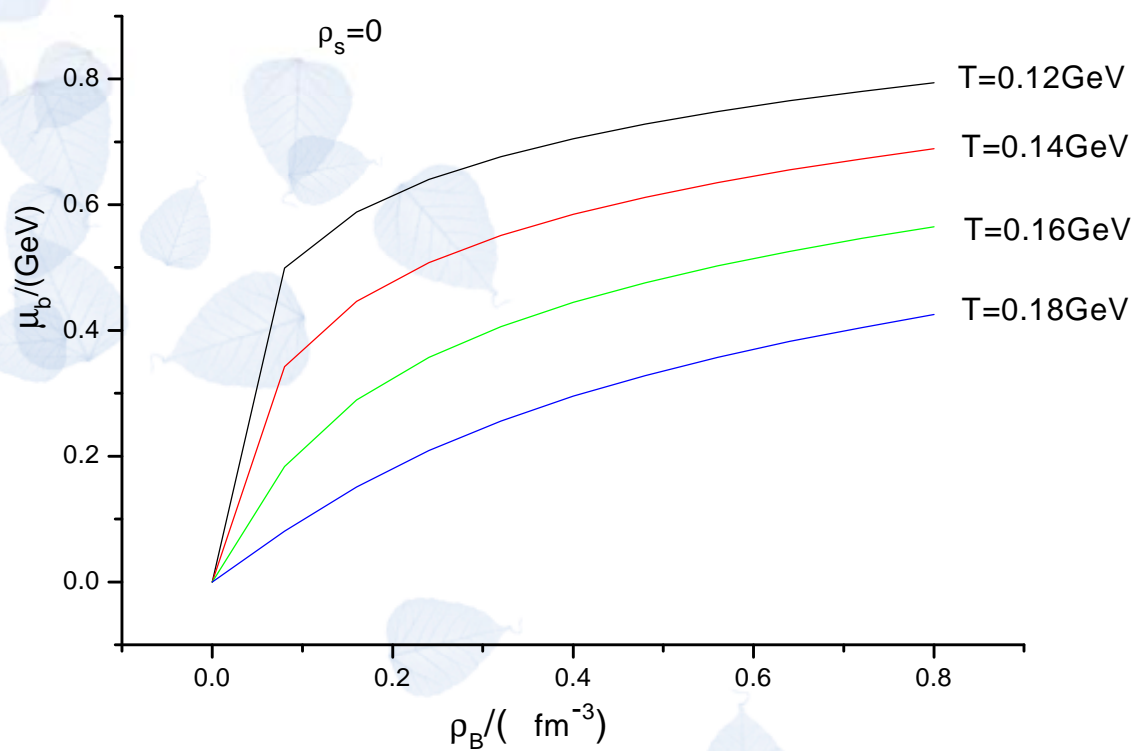
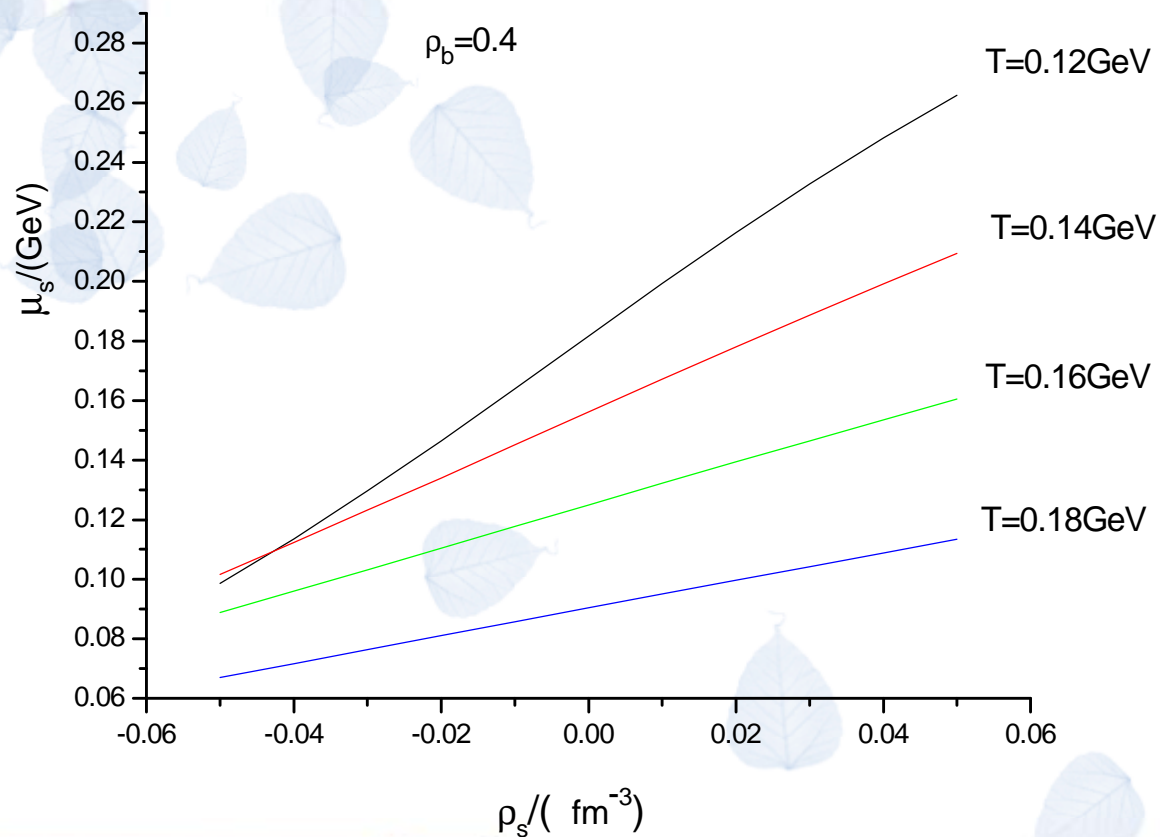


图 4.3.6





- 图4.3.5、图4.3.6表明温度越高，化学势越小，有利于粒子的产生。
- 以下图4.3.7和图4.3.8是系统的粒子密度和能量密度分别随净重子密度的变化



图4.3.7

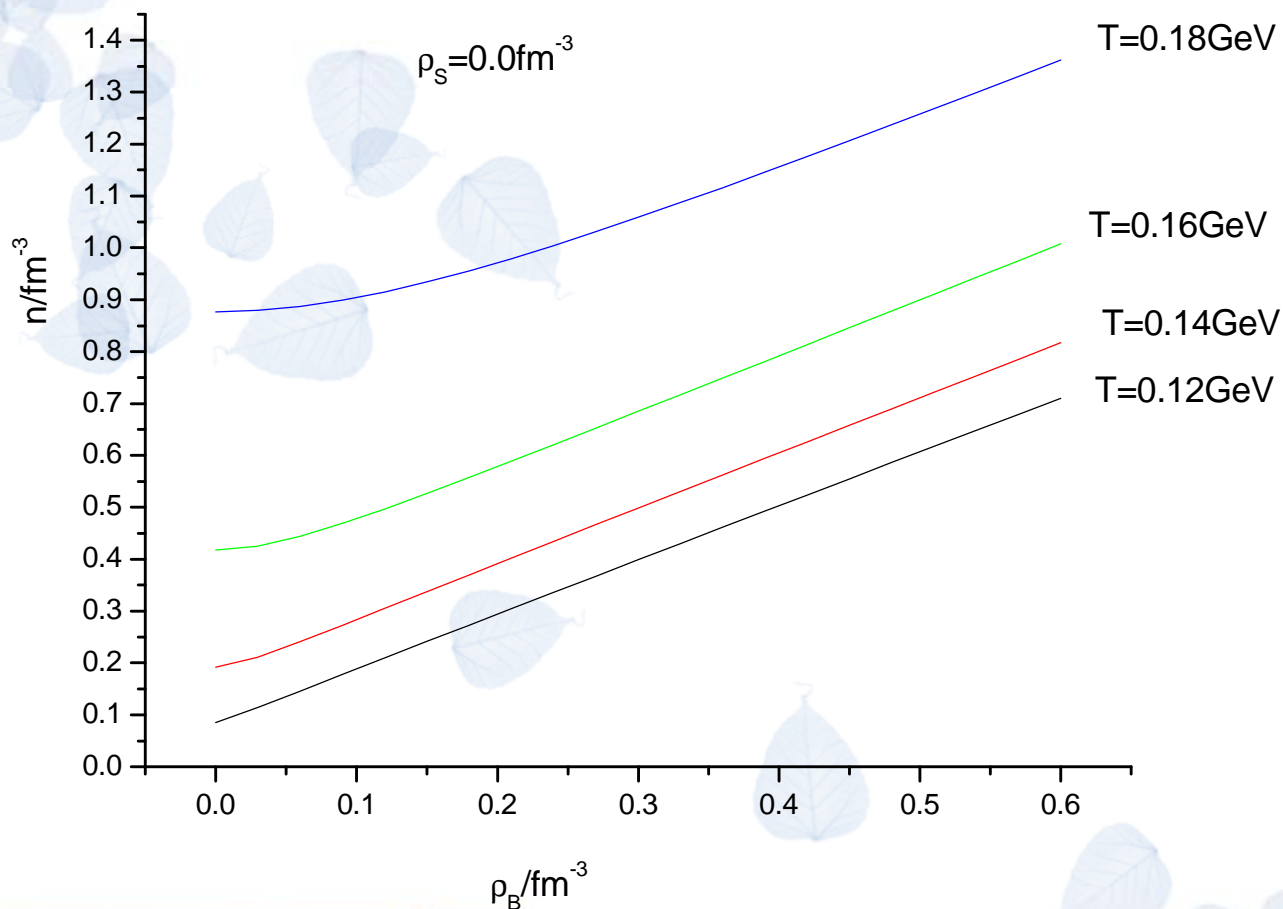
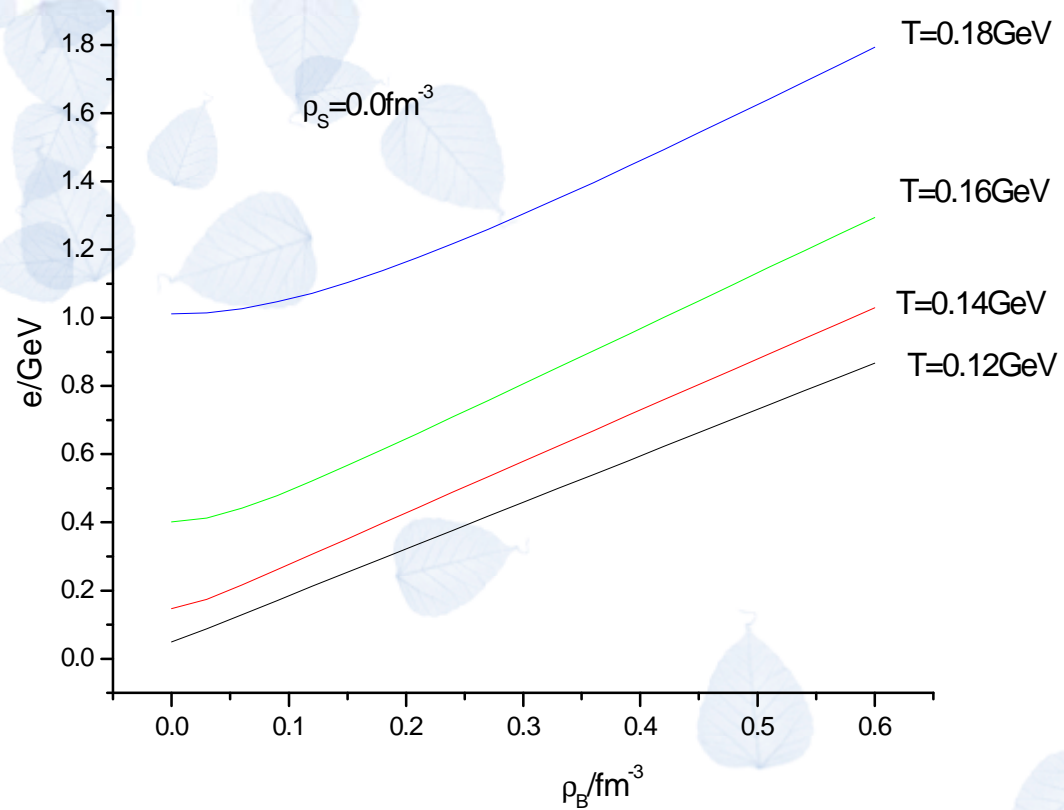


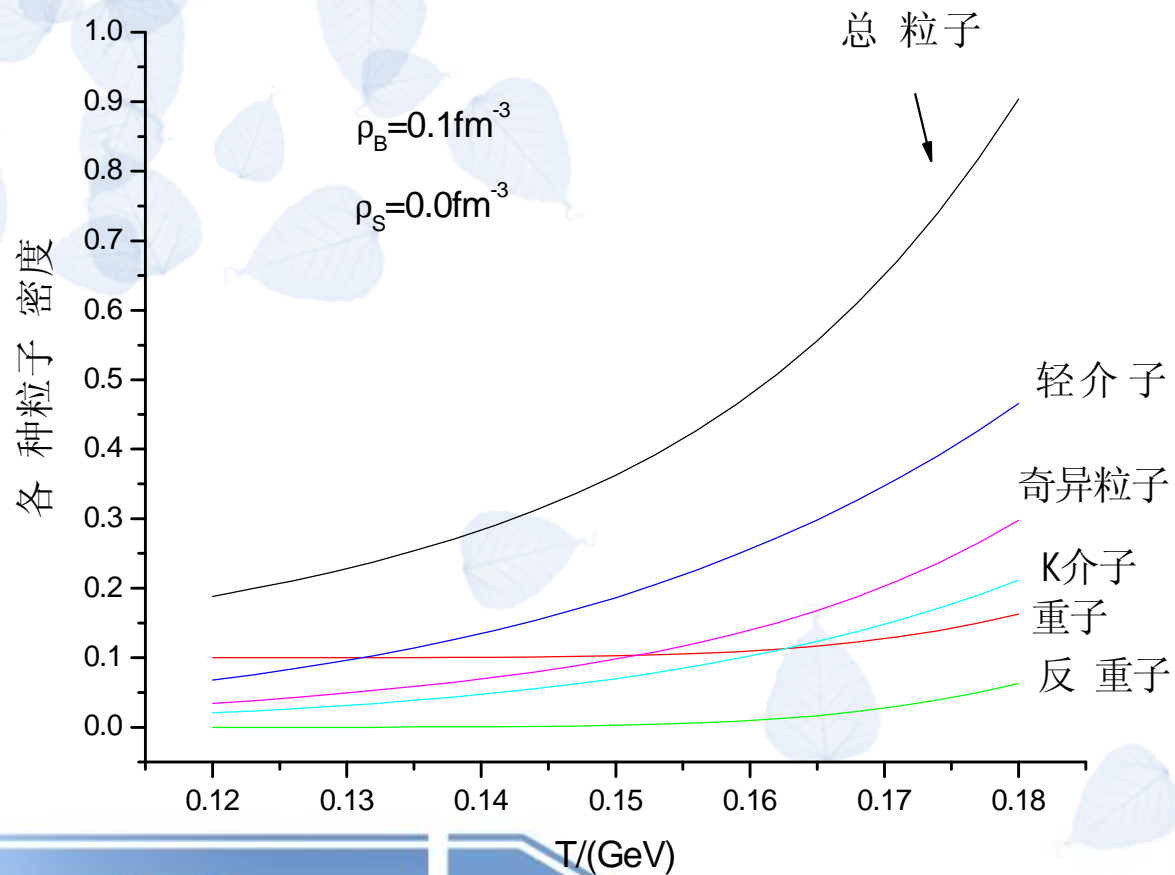
图4.3.8



- 图4.3.7和图4.3.8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 ( $0.16 \text{ fm}^{-3}$ ) 的倍数：T=180MeV (RHIC能区) 时,  $n/n_0=5\sim 8$ ; T=160MeV (SPS能区) 时,  $n/n_0=3\sim 6$ 。



图4.3.9  
系统各种粒子密度的比例



- 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。



## 五 RHIC实验数据拟合和结果

- 这一部分介绍RHIC实验数据及统计量的获取，反应是200GeV Au-Au碰撞，以2003年高等科技中心会议报告提供的数据来计算



## 4.1 最小二乘法

- 在我们的问题中，需要使用到最小二乘法，采用公式为：

$$C^2 = \sum_i \left( \frac{y_{\text{理}i} - y_{\text{实}i}}{s_i} \right)^2$$

- 其中 $y_{\text{实}}$ 为实验数据， $y_{\text{理}}$ 为理论值， $s$ 为实验误差。





## 4.2 RHIC实验数据拟合及结果

- 我们选取 $T$ ,  $V$ ,  $r_B$ 作为3个独立变数,  $m_b$ 和  $m_s$ 将是 $T$ 和 $r_B$ 的函数。这些变数由最小二乘法从拟合实验数据得到。如果实验数据只涉及粒子密度而不涉及粒子数, 则体积参数 $V$ 可以省略。
- 以下我们用两套实验数据进行拟合计算, 它们都是快度中心区数据。

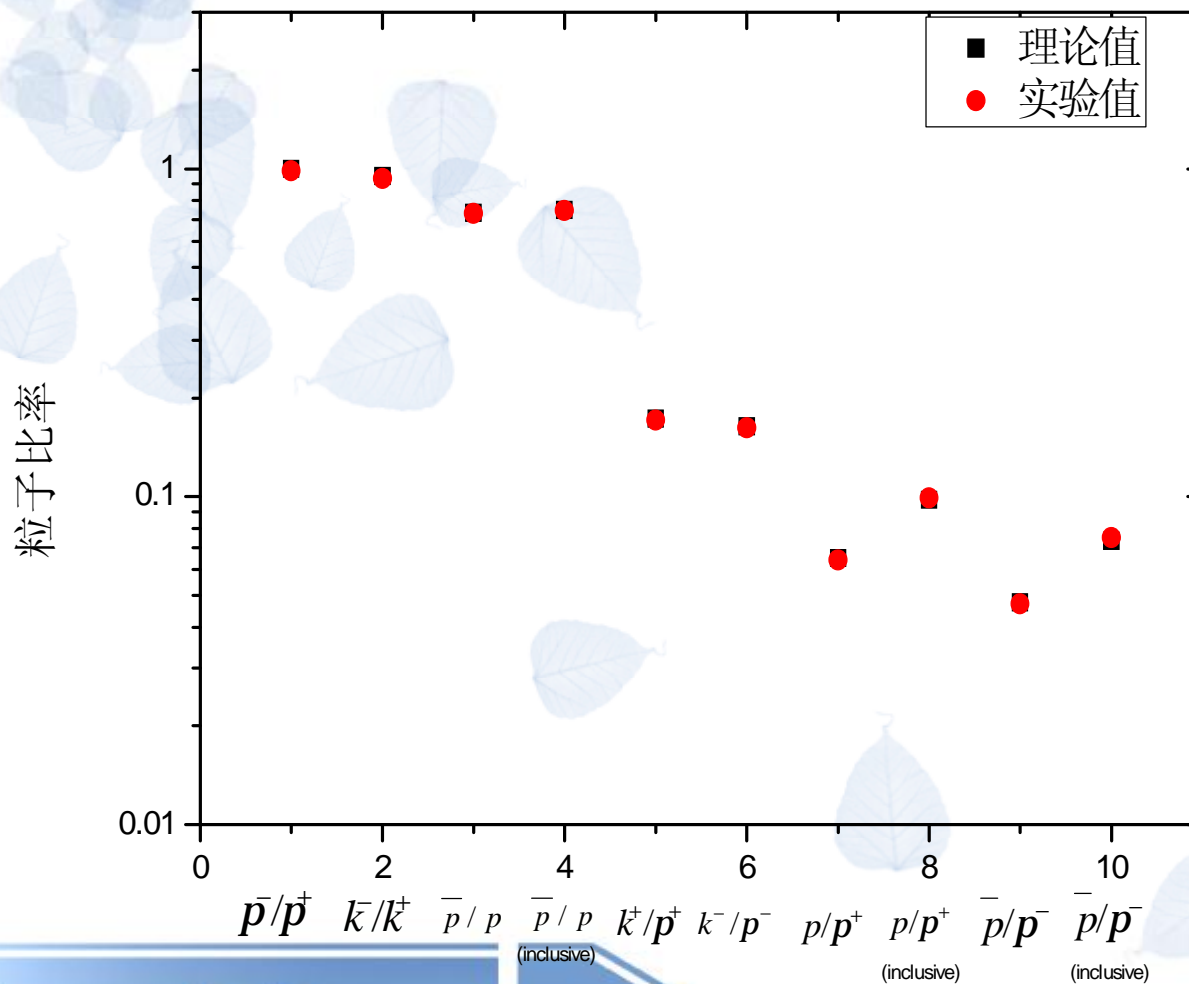


## 第一套数据

### PHENIX数据：200GeV Au-Au碰撞

序号	粒子比率	理论值	实验值	实验误差
1	$p^-/p^+$	1.000	0.984	5.700E-02
2	$k^-/k^+$	0.949	0.933	5.400E-02
3	$\bar{p}/p$	0.733	0.731	6.300E-02
4	$\bar{p}/p$ (Inclusive)	0.749	0.747	4.699E-02
5	$k^+/p^+$	0.173	0.171	9.999E-03
6	$k^-/p^-$	0.164	0.162	9.999E-03
7	$p/p^+$	6.487E-02	6.400E-02	3.000E-03
8	$p/p^+$ (Inclusive)	9.765E-02	9.899E-02	6.000E-03
9	$\bar{p}/p^-$	4.752E-02	4.699E-02	2.000E-03
10	$n/p^-$ (Inclusive)	7.322E-02	7.500E-02	4.000E-03





最小二乘法拟合后参数为：  
系统温度  $T=0.152\text{GeV}$ ,

$$c^2 = 0.638$$

净重子密度  $r_B = 0.00571\text{GeV} / \text{fm}^3$

化学势  $m_b = 23.8\text{MeV}$ ,  $m_s = 4.38\text{MeV}$



- 可以看出，各点理论值偏离实验值很小，但温度 $0.152\text{GeV}$ ，比预计的 $0.170\text{GeV}$ 相差较远。这一套数据的缺点就是粒子的种类太少，只有 $p$ 、 $K$ 、 $p$ 三种，难以拟合出好的参数。



## 第二套实验数据

## STAR数据：200GeV Au-Au碰撞

序号	粒子比率	理论值	实验值	实验误差
1	$p^- / p^+$	1.000	1.000	2.000E-02
2	$k^- / k^+$	0.947	0.950	5.000E-02
3	$\bar{p} / p$	0.779	0.750	3.999E-02
4	$k^- / p^-$	0.116	0.160	2.000E-02
5	$p / p^+$	4.922E-02	7.800E-02	1.200E-02
6	$\Lambda / p^-$	4.783E-02	5.500E-02	8.999E-03
7	$\bar{\Lambda} / p^-$	3.905E-02	3.999E-02	9.999E-03
8	$\Xi^- / p^-$	6.937E-03	8.000E-03	1.500E-03
9	$\bar{\Xi}^+ / p^-$	5.983E-03	6.800E-03	1.000E-03
10	$\Omega / p^-$	1.249E-03	1.000E-03	1.999E-04
11	$\bar{\Omega}^+ / \Omega^-$	0.914	1.000	7.999E-02
12	$\Delta / p$	1.086	0.950	0.100
13	$f / K^-$	0.224	0.130	7.999E-02
14	$K^{*0} / K^-$	0.522	0.210	0.130
15	$\Lambda^* / \Lambda$	5.998E-02	3.200E-02	1.600E-02



最小二乘法拟合后参数为：

- 系统温度  $T=0.162\text{GeV}$ ，净重子密度

$$r_B = 0.00837 \text{ GeV} / \text{fm}^3$$

化学势

$$m_b = 22.8\text{MeV}, m_s = 4.77\text{MeV}$$







- 如图可知，除了 $f/K^-$ 、 $K^{*0}/K^-$ 、 $\Lambda^*/\Lambda$ 理论值和实验值偏差较大之外，其余符合得较好。实际上 $K^{*0}$ 、 $f^-$ 、 $\Lambda^*$ 产生量少，其测量值也较小，误差较大。拟合得到的温度162MeV也比较低。原来预计RHIC温度要高于170MeV，因此需要仔细分析其中的原因。



最后，利用得到的温度和化学势数值，进一步计算粒子系统的各种粒子密度和能量密度



粒子	密度/ $fm^3$	能量密度 ( $GeV/fm^3$ )
总粒子	0.466	0.461
重子	0.0435	0.0698
反重子	0.0341	0.0549
轻介子	0.279	0.115
介子	0.109	0.115
奇异粒子	0.139	0.221



计算结果显示，轻介子所含密度最大，也最容易产生。奇异粒子能量密度最大，几乎占总能量密度的一半，因此，在整个粒子体系中，奇异粒子占有重要作用，对它的进一步研究将是重离子碰撞的一个重要分支。



本研究工作研究了RHIC实验前期的数据，新的实验数据，如RHIC在500GeV数据以及LHC上的数据将作为下一步工作来研究。



谢谢!

