

超高能诱发核反应的国际合作实验 研究进展*

蔡勖 周代梅

(华中师范大学粒子物理研究所 武汉 430079)

摘要 综述超高能诱发核反应的国际合作实验进展及相关的重离子物理研究现状. 内容包括: 1. 有关夸克物质(夸克胶子等离子体 QGP)的理论预言. 2. 超高能重离子碰撞的实验: (1) BNL/AGS 能区的固定靶实验回顾; (2) CERN/SPS 能区的固定靶实验回顾; (3) BNL/RHIC 能区的对撞实验现状; (4) CERN/LHC 能区的对撞实验现状.

关键词 超高能重离子碰撞 夸克-胶子等离子体 QCD 相变的信号

1 引言

第 15 届国际超相对论性核-核碰撞会议(2001 年夸克物质会议)于 2001 年 1 月 15—20 日在美国纽约的长岛举行^[1]. 一年前, 连续两次异乎寻常的连同 Inter 网的新闻媒体传送, 超高能重离子物理的国际学术界呈现出前所未有的激动.

第一次, 2000 年 2 月 10 日欧洲核子研究中心(CERN)声称^[2], 在其超级质子同步加速器(SPS)上已完成的束流能量为 158 AGeV 的 $^{207}\text{Pb} + ^{207}\text{Pb}$ 固定靶碰撞实验中, 发现了能量密度比通常核物质高出 20 倍的新物态. 这种新物态具有量子色动力学(QCD)理论预言的退禁闭相变中形成夸克物质(或称为夸克-胶子等离子体 QGP)的一些特征性质. CERN/SPS 的 7 个国际合作实验组, NA44^[3], NA45/CERES^[4], NA49^[5], NA50^[6], NA52/NEWMASS^[7], WA97/NA57^[8] 和 WA98^[9], 根据他们自 1994 年以来的实验数据的综合分析, 提供了有关超相对论性核-核碰撞初期的色禁闭解除和碰撞末期的火球集团爆裂的各种迹象. 图 1 是 CERN/SPS/EMU01(EMU12)国际合作实验组^[10]提供的 158 AGeV 的 $^{207}\text{Pb} + ^{207}\text{Pb}$ 相互作用显微照片(1995 年).

第二次, 2000 年 6 月 13 日美国布鲁克海文国家实验室(BNL)公布了^[11], 在其刚建成的超相对论性重离子对撞机(RHIC)上, 首次运行的质心系能量分别为 56 和 130 AGeV 的 $^{197}\text{Au} + ^{197}\text{Au}$ 对撞实验获取的首批数据. BNL/RHIC 上有 4 个国际合作实验组: STAR^[12],

2002-02-01 收稿, 2002-05-13 收修改稿

* 国家自然科学基金(10075022, 10075023)资助

PHENIX^[13], PHOBOS^[14], BRAHMS^[15]. 他们观察了 RHIC 能区的重离子碰撞中心事例, 在中心快度区域内, 消除平均反应核子数影响后的带电粒子密度 $dN_{\text{charged}}/d\eta$ 显著增加, 确凿无疑地超出了采用核几何叠加效应得到的常规理论估计. 作为整体特征量, 它是相对论性重离子碰撞中束流能量能否有效地堆积的有力判据.

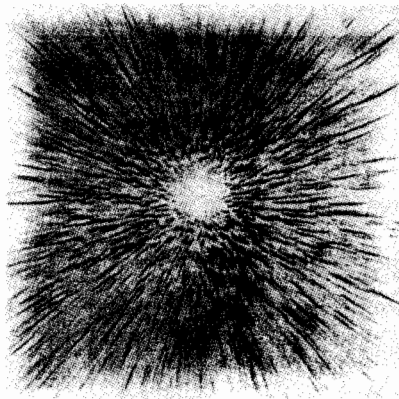


图 1 由核乳胶实验探测的
158 A GeV Pb + Pb 相互作用图像

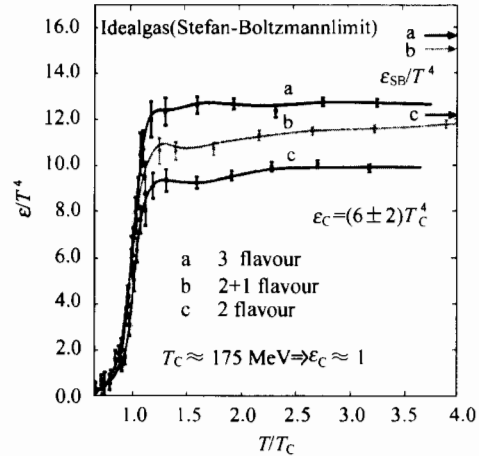


图 2 有限温度下格点 QCD 理论的相图

超相对论性重离子碰撞可能产生出一种新的物质形态^[16-18], 其能量密度比中子星内部更大, 因而关于核物质的通常概念已不再适用, 而需要揭示出一些崭新的原理. 通过这样的碰撞实验, 一方面可以研究两个重核聚变产生的新物质形态; 另一方面也可以研究两个碰撞核离开后的背景真空的性质. 虽然实验没有一个是容易的, 但如果真空行为确实像物质介质, 并且真能通过物理手段改变, 那么微观世界和宏观世界将通过无所不在的真空联系起来. 也许, 通过揭示真空的性质, 导致远比我们已经涉及到的还要激动人心的发现^[19]. 本文的目的就是综述超高能诱发重核反应的国际合作实验的进展及研究现状.

2 夸克 - 胶子等离子体的理论预言

有关强相互作用物质的 QCD 相变和 QGP 的理论综述, 建议阅读最近的文章: Helmut Satz 的“核碰撞中的色退禁闭”^[20], Jean-Paul Blaizot 的“夸克 - 胶子等离子体的理论”^[21], Berndt Mueller^[22] 和 Jean-Paul Blaizot^[23] 分别在 1999 年和 2001 年夸克物质会议上所做的关于理论的大会总结报告. 图 2 给出的是有限温度下格点 QCD 理论计算的新结果^[24] (重子化学势为零), 退禁闭相变和手征对称性恢复相变一致, 两味和三味情形下的临界温度分别为 173 ± 8 和 154 ± 8 MeV, 估计相应的临界能量密度为 $1 \text{ GeV}/\text{fm}^3$. 图 3 给出的是三味情形的相图, 讨论了相变的阶次^[25]. 图 4 的相图讨论了高温和高密的相关条件.

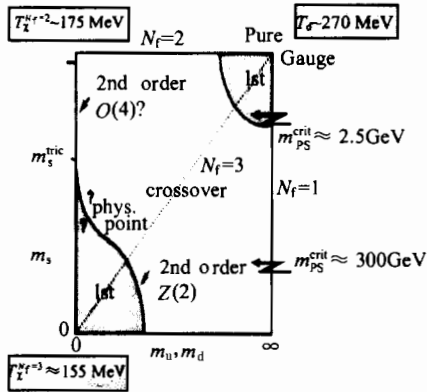


图 3 三味情形时的相图

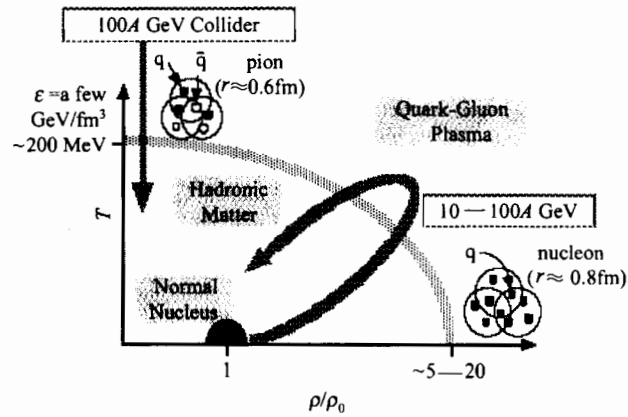


图 4 相图的高温和高密的相关条件

3 超高能重离子碰撞的实验进展

QCD 相变和 QGP 形成的理论预言导致了超高能重离子碰撞的实验^[26]. 超高能(或超相对论性)重离子碰撞主要指的是束流能量大于每核子 10GeV 的固定靶实验或者核子-核子质心系能量大于几个 GeV 的重核对撞实验. 自 20 世纪 80 年代中期以来, BNL 的交变梯度同步加速器(AGS)和 CERN 的超级质子同步加速器分别进行了固定靶实验. BNL/RHIC 和 CERN/LHC 对撞实验分别于 1990 和 1993 年开始建造, BNL/RHIC 已于 2000 年首次物理运行, CERN/LHC 则将于 2005 年投入物理运行.

3.1 BNL/AGS 能区的固定靶实验回顾

BNL/AGS 实验指的是能量为 2—18A GeV 的 p, ¹⁶O, ²⁸Si, ¹⁹⁷Au 射弹核在固定核靶上诱发的核反应^[27]. QGP 相变与核的状态方程(EOS)密切相关, 集体运动的测量对建立 EOS 中的参数至关重要; 流是集体运动的结果. 图 5 是由 E895 合作组给出的关于横向流的重要结果^[28], 其大小随束流能量增大而均匀减小. 图 6 是由 E895 合作组给出的关于椭圆流的重要信息^[29], 反映了碰撞核大小和碰撞参数的集体效应, 与核-核碰撞的几何和动力学有关. 在中心快度区, 横向粒子出射的各向异性表现为方位角的不对称性. 在低 E_{beam} 时, 方位角的不对称性位于垂直反应平面的部位; 而 E_{beam} 高时, 不对称性位于反应平面内. 这些现象与平均场理论比较符合.

奇异性产生是分析 QGP 形成信号的重要因素. 图 7 是 E866 合作组关于 10.7A GeV 的 Au + Au 的数据^[30], K^+/π^+ 比从边缘碰撞到中心碰撞逐步增加. E866 和 E917 合作组比较了 AA 和 pp 碰撞中 K^+/π^+ 的数据^[31], $(K^+/\pi^+)_{AA}/(K^+/\pi^+)_{pp}$ 在较小的 E_{beam} 时到达最大, 然后随能量增加而缓慢下降, 见图 8. 强子模型能够很好地解释此能区 K/π 比的增强现象.

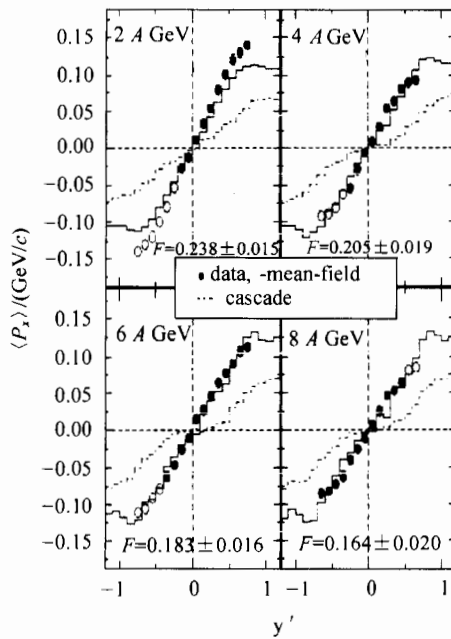
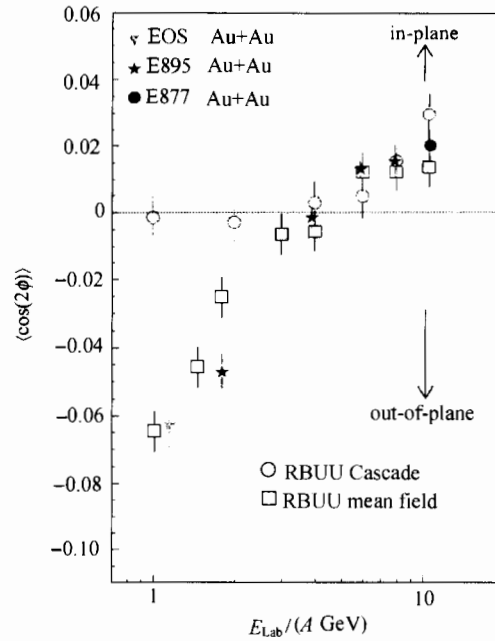
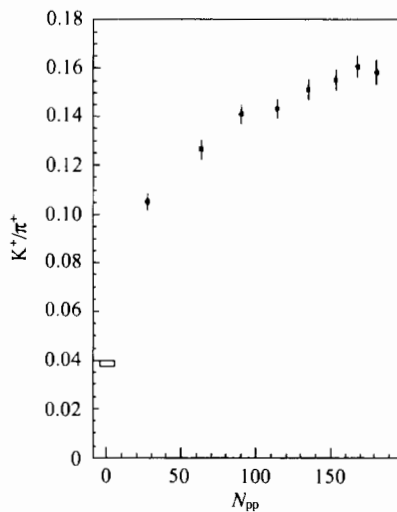
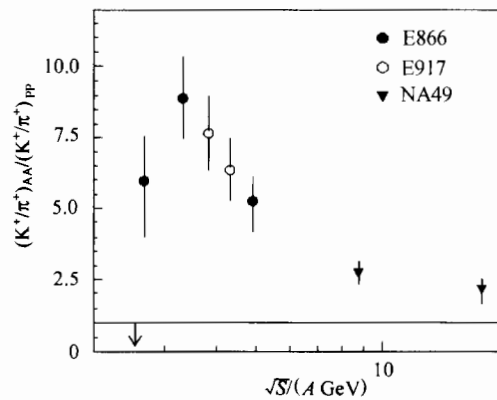
图 5 横向流参数 $\langle P_x \rangle$ 与快度之间的关系图 6 椭圆流中 $\langle \cos(2\phi) \rangle$ 与碰撞能量之间的关系图 7 K^+ / π^+ 与参加者核子数之间的关系图 8 $(K^+ / \pi^+)_{AA} / (K^+ / \pi^+)_{pp}$ 与质心系能量之间的关系

图 9 给出了在 Au + Au 碰撞中末态质子的快度分布,其形状与碰撞中心度有关^[32]. 在 3 个能量下,质子的快度分布随中心度的变化趋势一致,从边缘碰撞到中心碰撞,分布慢慢变为具有宽峰的形状,甚至显现出双峰现象,表明核阻止的程度不彻底;随着 E_{beam} 增

加,快度损失增大,密度降低,表明核的阻止本领减弱. Hanbury-Brown 和 Twiss (HBT) 分析,与 Bose-Einstein 关联有关. HBT 关联是探测高能重离子碰撞中所产生的热系统时空结构的最直接探针. 末态全同粒子对(如 $\pi\pi$, KK 或 pp)的相干强度可用来抽取时空动力学、凝结体积及反应几何;非全同粒子的关联可提供粒子出射时间的长短和先后;出射粒子时空分布的各向异性反映了关联的方向性依赖. 关联函数给出末态强子发射源的纵向和横向半径,源的寿命及流的斑图. 图 10 是 E895 合作组给出的能量为 4GeV 的 Au + Au 碰撞中 $\pi\pi$ 关联的 λ 和 6 个 HBT 半径与出射角 ϕ 之间的关系^[33]. 强子输运模型能够较好地描述源半径及 λ . BNL/AGS 的最新数据还出现与高密的冷 QGP 相关的色超导相的一些证据^[34]. BNL/AGS 能区的能量虽然较低,但已观察到集体流、HBT 关联和奇异性增强等现象,这是核的非几何迭加的效应. 该能区的末态具有丰重子数特性,但还没有 QGP 形成的直接证据.

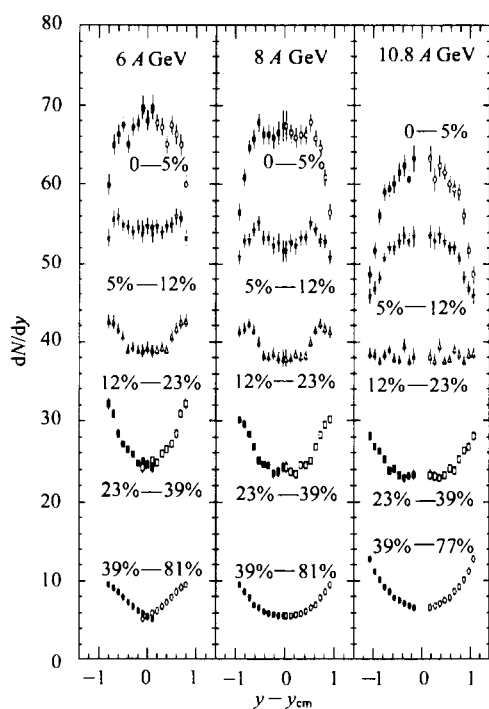


图9 质子的快度分布与能量和中心度的关系

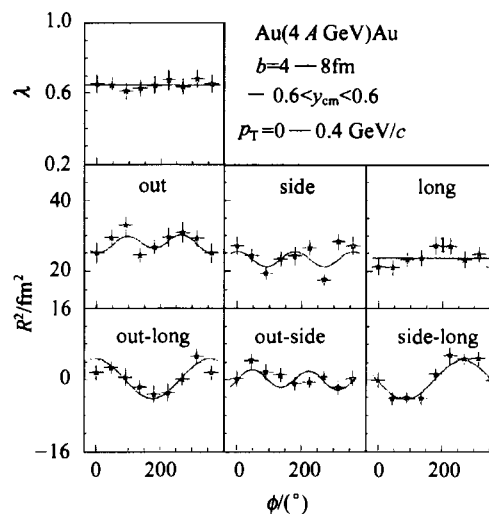


图10 $\pi\pi$ 关联的 λ 和 6 个 HBT 半径与出射角 ϕ 之间的关系

3.2 CERN/SPS 能区的固定靶实验回顾

CERN/SPS 在 1986—1987 年间运行了 60 和 200 A GeV 的 ^{16}O 离子束流,在 1987—1992 年间运行了 200 A GeV 的 ^{32}S 离子束流,尤其是在 1994—2000 年间运行了 40, 80 和 158 A GeV 的 ^{207}Pb 离子束流,已达到高温和高密的极端环境,为新物态存在的清晰图像提供了初步的证据^[35].

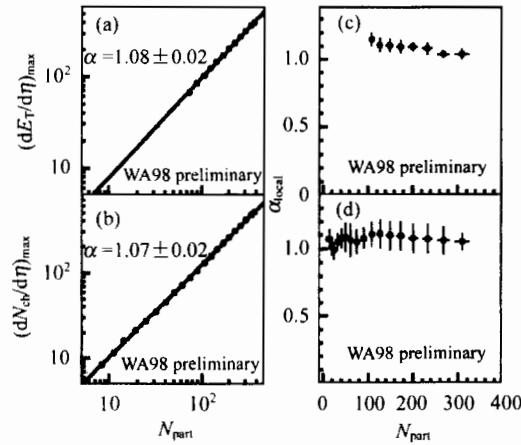


图 11 横能和带电粒子多重数的赝快度密度随参加者核子数 N_{part} 的变化关系

对于硬碰撞,利用 Glauber 模型,通过测量末态带电粒子多重数 (N_{ch}) 分布、横向能 (E_{T}) 分布和纵向能 (E_{ZDC}) 分布,估计碰撞中参加反应核子数 N_{part} . 这些观测量被用来研究分析碰撞中心度的物理信号. WA97/NA57 合作组公布了末态带电粒子多重数 N_{ch} 分布^[36]. 图 11 是 WA98 合作组^[37]测得的能量为 158 AGeV 的 Pb + Pb 碰撞中横能和带电粒子多重数的赝快度密度随参加者核子数 N_{part} 的变化关系. 这两个观测量与 N_{part} 满足指数标度律,即 $dN_{\text{ch}}/d\eta$ 和 $dE_{\text{T}}/d\eta$ 正比于 N_{part}^{α} , α 值分别为 1.08 ± 0.02 和 1.07 ± 0.02 . 局部的 α 值随 N_{part} 增加而缓慢下降. 利用 Bjorken

公式^[38],可以通过测量横向能 E_{T} 来估计能量密度. 图 12 是 NA49 合作组给出的横能 E_{T} 的分布,谱的形状可由碰撞几何来解释. 单位快度的横向能的快度依赖^[39]见图 12,在 $\eta = 3$ 附近出现一峰值,约为 405 GeV. 从图中还可以看出横能的赝快度分布是以 $\eta = y_{\text{cm}}$ ($y_{\text{cm}}^{\text{PbPb}} = 2.9$) 为中心左右对称的. 该能区的 Pb + Pb 碰撞中,能量密度已高达 $3.2 \text{ GeV}/\text{fm}^3$,这大为高出由格点 QCD 理论所预期的临界能量密度 $1 \text{ GeV}/\text{fm}^3$.

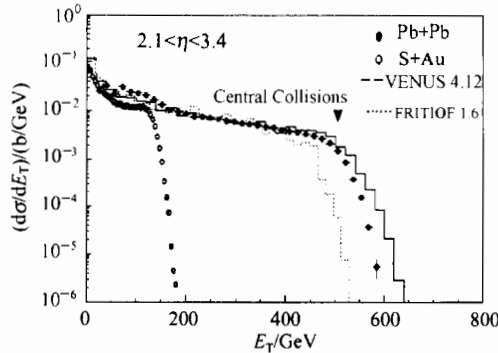


图 12 能量为 158 AGeV 的 Pb + Pb 碰撞中横向能 E_{T} 的分布

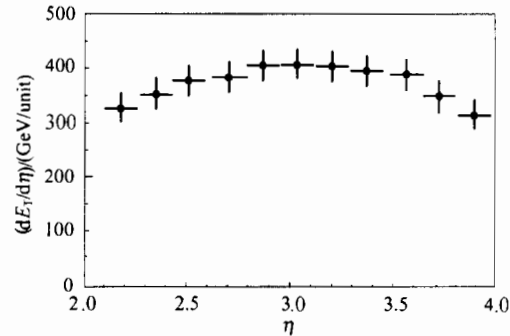


图 13 横向能的赝快度密度与赝快度的关系

反常的 J/ψ 压低现象是理论预言的 QCD 相变的重要信号之一. 由于 $c\bar{c}$ 束缚态由重夸克组成,仅在碰撞演化的早期形成;而且 J/ψ 介子这种紧束缚态不易被周围相对软的相互作用打破;由 J/ψ 介子衰变而来的双 μ 在强子化过程中不受强相互作用影响,探测到的是未失真的较早期的信息. NA38/NA50 实验组收集了质子、氧、硫等束流打到几种不同靶上的数据,发现 J/ψ 产额关于 Drell-Yan 过程所产生的双 μ 产额的压低可以用核吸收模型来解释^[40]. 但到了 Pb + Pb 碰撞时,核吸收模型就不能解释 J/ψ 的反常压低现象. 图 14 是

NA50 合作组公布的一组数据,在 $A_{\text{projectile}} B_{\text{target}}$ 足够大(a), $E_T > 40\text{GeV}$ (b), $E_{\text{ZDC}} < 24\text{TeV}$ (c)区域,都有 J/ψ 的反常压低^[41]. 图 14(b)中在 $E_T \approx 90\text{GeV}$ 时出现了二次压低现象. 图 14(b),(c)中的实线为核吸收模型的结果.

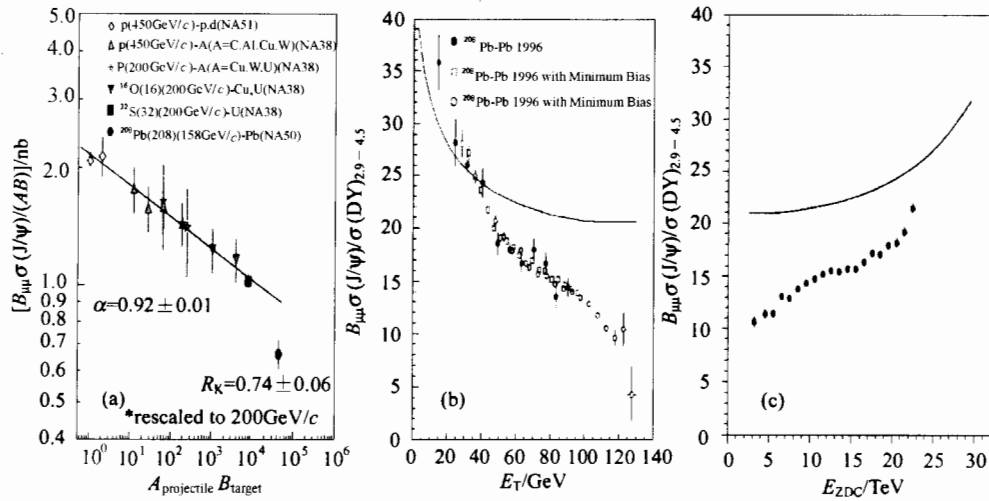


图 14 NA50 合作组的 J/ψ 的反常压低现象

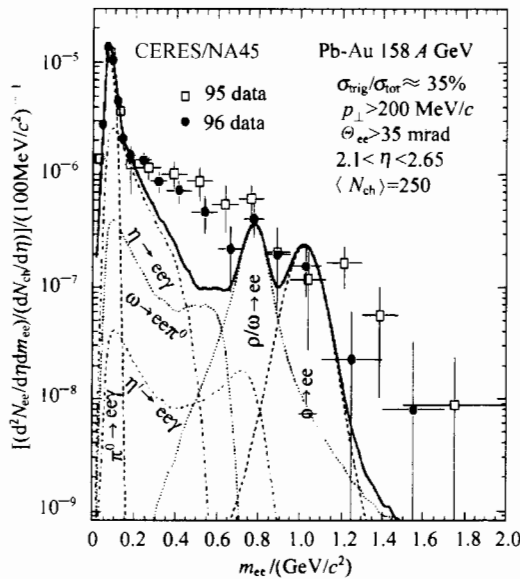


图 15 能量为 $158A\text{GeV}$ 的 $\text{Pb} + \text{Au}$ 碰撞中 $e^+ e^-$ 的不变质量谱分布

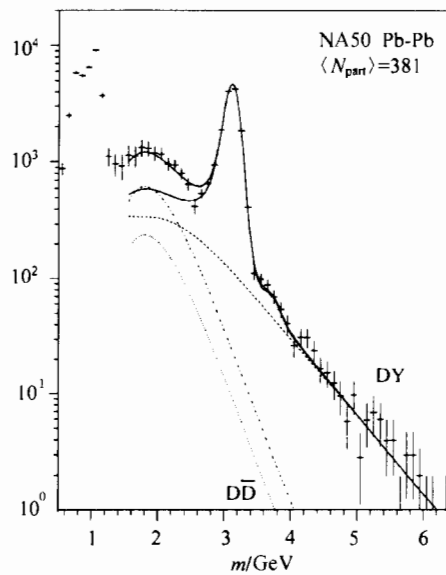


图 16 中等质量的 μ 子对的不变质量谱分布

低质量轻子对产生的增强亦是该能区给出的重离子碰撞数据的新特征. 轻子对仅参

与电磁相互作用,能够干净地离开高温高密度的反应区域,其平均自由程大于反应体积的尺度,因此能够携带碰撞最早期的信息. 轻子对可能由 QGP 直接产生,但主要的背景来自于: π 湮没、共振态衰变、 π - p 相互作用(轻子对质量较低时)和 Drell-Yan 过程(轻子对质量较高时). ρ, ω, ϕ 等共振态可被直接产生,也可由弦或更重的共振态衰变得到,再直接衰变成轻子对. 共振态也可通过 Dalitz 衰变得到轻子对. 图 15 比较了从实验上观测到的 e^+e^- 的不变质量谱的分布与从可能的强子衰变而来的结果,由 CERES/NA45 合作组分析能量为 158 A GeV 的 Pb + Au 碰撞实验而得^[42]. 从图中可以看出:从 200 MeV/ c^2 到 ρ/ω 峰这一质量窗口中有明显的轻子对产额的增强现象. 增强因子定义为: $N_{\text{measured}}^{e^+e^-} / N_{\text{hadronic-sources}}^{e^+e^-}$. 在 250—700 MeV/ c^2 质量窗口内增强因子约为 2.6. 在质量窗口为 250—700 MeV/ c^2 、低横动量区域和高的带电多重数的事例中,轻子对的增强现象最显著. 中等质量的 μ 子对的峰,与粲产生增强相比也有明显的超出,例如,图 16 给出的是 NA50 合作组的数据^[43]. 电子对和 μ 子对的数据与假设产生了热 QGP 的流体力学的计算相符合. 强子输运模型不能解释此增强现象.

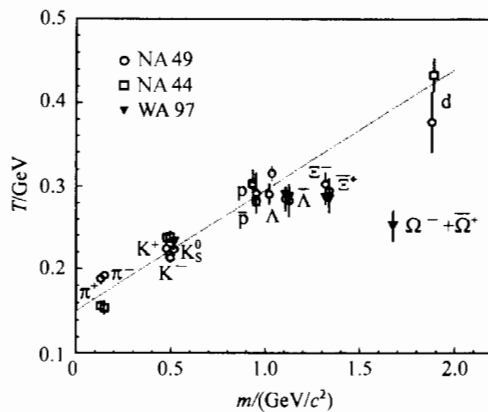


图 17 由横质量谱抽出的温度与粒子质量之间的关系

来自于 WA97, NA44 和 NA49 合作组. 从图中可以看出,多奇异超子,如 Ω 和 Ξ ,尤其是 Ω ,从其质量谱抽出的温度远低于预期的结果(图中点线),这一现象可解释为:多奇异超子在大量的横向流还未产生之前就已冷凝.

CERN/SPS 能区的 Pb + Pb 碰撞的数据有可能在 $y \approx 0$ 的区域出现丰重子系统. 根据末态强子的热力学估计有早期的平衡和早期的很高能量密度($\epsilon \approx 3 \text{ GeV}/\text{fm}^3$)形成. 而低质量的双轻对的增强有可能暗示手征对称性的恢复;超出强子源的直接光子可能来自等离子体的辐射;奇异重子增强和粲偶数粒子压低的现象,很难采用高密强子气体的模型来解释. CERN/SPS 能区的 Pb + Pb 实验的综合结果有可能给出了退禁闭相变的一些迹象,但还不能给出确定性的判据.

3.3 BNL/RHIC 能区的对撞实验现状

美国布鲁克海汶国家实验室的相对论重离子对撞机的首要任务是寻找夸克禁闭解除

末态强子产生的热力学模型能够较好地描述强子产额及其比率. 详细的讨论可阅读 Stock^[44] 和 Braun-Munzinger^[45] 的文章. K 介子占末态整个奇异性的 75%, 在 S + S 中心碰撞中,增强因子为 2^[46]. 在超相对论性核-核碰撞中,所产生的粒子的横质量谱与对撞动力学密切相关. 在 SPS 能区的 Pb + Pb 碰撞中,强子径向流的存在,给出横动量谱的斜率的倒数 T (由 Boltzmann 分布抽出)随着粒子质量的增大而线性增长这一简单的标度行为. 这是随机的热运动和系统的横向集体膨胀共同作用的结果. 图 17^[47] 给出了由横质量谱抽出的温度 T 与粒子质量关系的图像,实验数据

和手征对称性恢复的相变信号. 其 4 个实验组 (PHENIX, STAR, PHOBOS, BRAHMS) 于 2000 年 7—8 月间在 BNL/RHIC 上进行了首次物理运行, 能量为 $\sqrt{S_{NN}} = 56, 130\text{GeV}$. RHIC 最高能量 200GeV 下的物理运行也得到了一些初步结果.

PHENIX 实验的设计要求既能用来测量重离子碰撞中产生的多种信号, 又可以测激化的质子-质子碰撞中产生的多种信号. PHENIX 合作组测量了带电粒子多重数、横向能、椭圆流、识别粒子谱、HBT 关联参数、高横动量谱、单举电子谱等^[48]. 粒子的产额和产生的横向能的赝快度密度与参加者核子数之间的关系反映了粒子产生的基本反应机制. PHENIX 实验组公布了横向能和带电粒子多重数的分布^[49,50]. 图 18(a), (b) 分别给出了每参加者核子数的带电粒子和横向能的赝快度密度与参加者核子数之间的关系, 同时比较了 WA98 实验组给出的较低能量时的结果^[51]. 可以看出在 RHIC 能区带电多重数和横能都有很明显的增大.

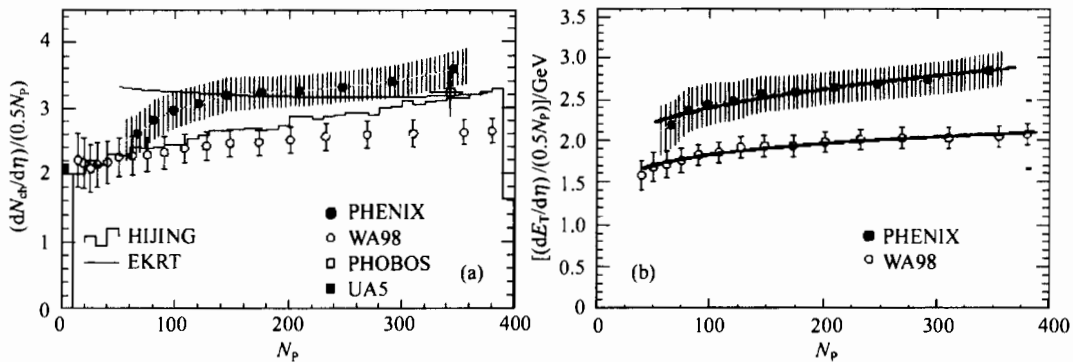


图 18 每参加者核子数的带电粒子和横向能的赝快度密度与参加者核子数之间的关系

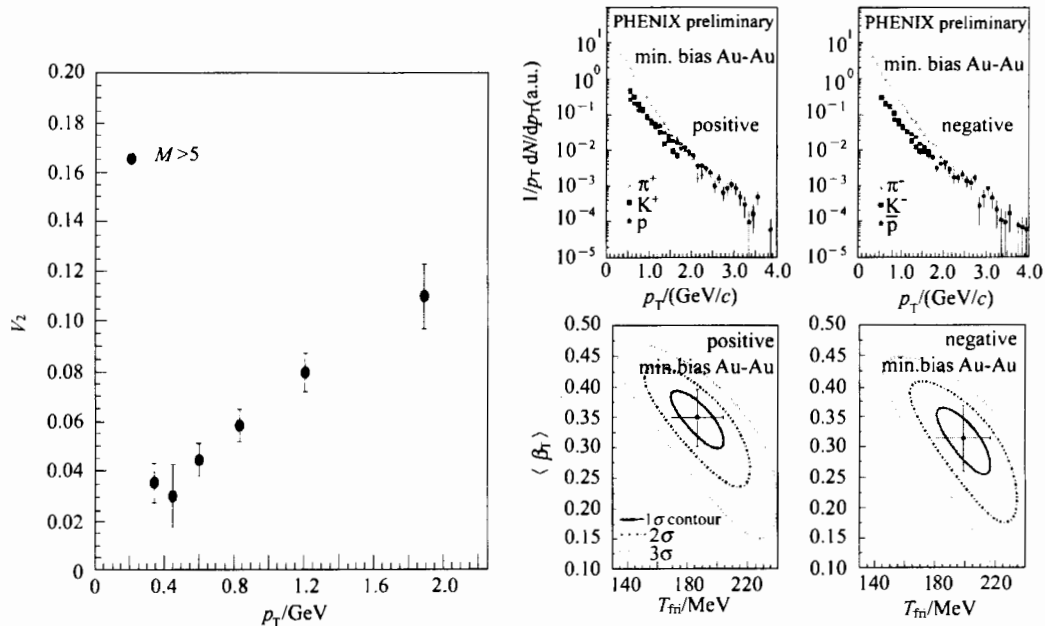


图 19 椭圆流参数 V_2 与横动量的关系

图 20 质心系能量为 130GeV 的 Au + Au 碰撞中 $\pi^{\pm}, K^{\pm}, p^{\pm}$ 的横动量谱

强子产生的另一整体性特征为粒子出射的方向性,采用椭性流的定义来参数化. 图 19 为 PHENIX 椭性流参数 V_2 , 与 STAR 和 PHOBOS 实验组给出的结果一致,表明在 RHIC 能区所产生的高密物质能够有效地把初始空间的不对称性特征转化为动量空间的不对称性.

PHENIX 的中心臂探测器能够在尽可能宽的动量区域内鉴别粒子^[52]. 图 20 给出了对于 π^\pm, K^\pm, p^\pm 的横动量谱, 谱的形状与粒子的种类有关. 从横动量谱拟合得到 $\langle \beta_T \rangle \approx 0.35$, 相应的 $T_{\text{in}} \approx 180\text{--}200\text{MeV}$ ^[53].

两粒子关联采用 HBT 分析见图 21, 关联半径和 λ 以及与粒子对的横动量之间的关系与 STAR 实验组的结果一致. 并没有系统有较大膨胀的明显证据^[54].

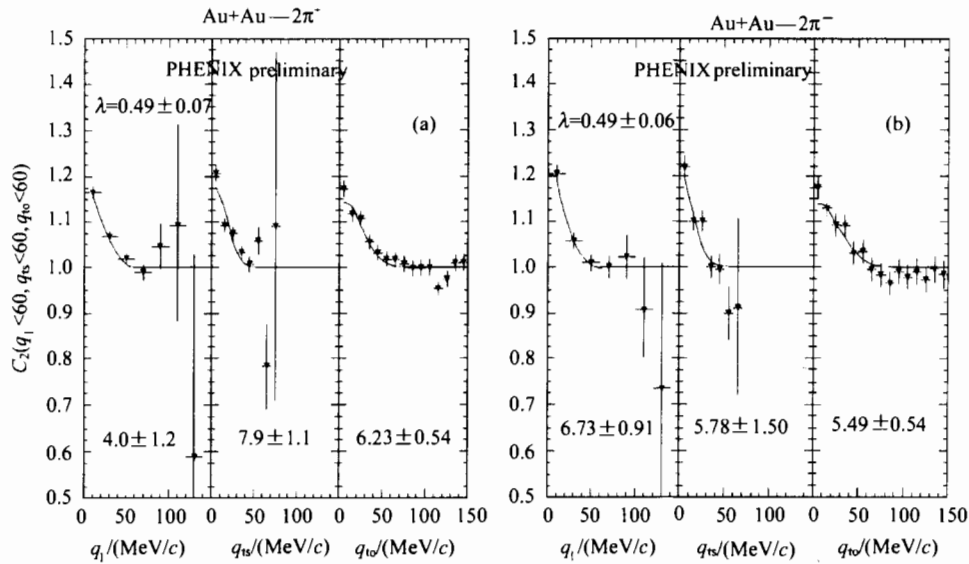


图 21 关联半径和 λ 以及与粒子对的横动量之间的关系

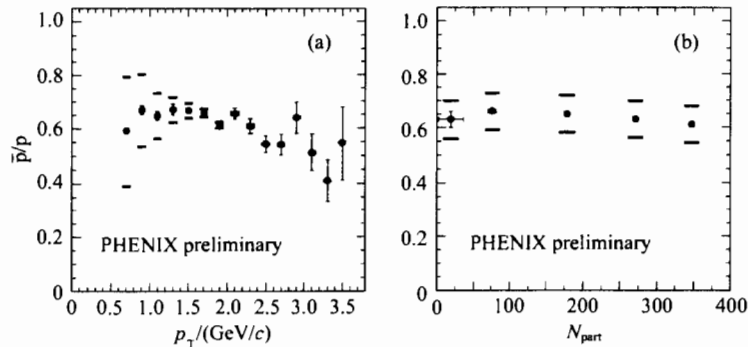


图 22 \bar{p}/p 与横动量和参加者核子数之间的关系

在中心快度区, \bar{p}/p 是一个非常意义的物理量,因为它直接与中心区域的净重子数

相关. PHENIX 实验组研究了 \bar{p}/p 与横动量和中心度的关系,发现与横动量微弱相关,与中心度无关,与 STAR 实验组的结果一致. 在中心碰撞中,当横动量间隔为 $0.8\text{--}3.0\text{GeV}/c$ 时, \bar{p}/p 为 $0.64 \pm 0.01(\text{stat.}) \pm 0.07(\text{sys.})$. 见图 22.

到 RHIC 能区,已达到很高的质心系能量,用适合于定量计算的微扰探针来探测高温核物质已成为可能. 工作的第一步就是测量横动量及其与参加者核子数之间的关系. 图 23 是对应于不同碰撞中心度的带电粒子的横动量谱^[55],中心碰撞的谱高于边缘碰撞.

STAR 合作组发表了 $\sqrt{S_{NN}} = 130\text{GeV}$ 的 Au + Au 碰撞首批数据^[56]. 图 24 给出不同碰撞中心度的末态负电荷强子的赝快度分布,研究带负电的强子是为了排除参加者核子数的影响. 在快度中心区,与 CERN/SPS 的 Pb + Pb 相比,增加了 43%. 负带电粒子的多重数分布的形状与碰撞几何有关,与较低能量时的结果一致,但在多重数较大的尾部的形状由起伏和接收度决定. 在中心快度区 ($|\eta| < 0.1$),负带电粒子的横动量分布见图 25^[57]. 图中包括了 NA49 实验组给出的 $\sqrt{S_{NN}} = 17.3\text{GeV}$ 的 Pb + Pb 碰撞及 UA1 实验组给出的 $\sqrt{S} = 200\text{GeV}$ $\bar{p}p$ 碰撞的结果. 这 3 种碰撞系统的结果可以由相同的指数函数 $A(1 + P_{\perp}/P_0)^{-n}$ 来拟合,平均横动量由拟合参数决定, $\langle p_{\perp} \rangle = 2P_0/(n - 3)$,拟合参数 $P_0 = 2.74 \pm 0.11\text{GeV}/c$, $n = 13.65 \pm 0.42$. 拟合出的平均横动量为 $\langle p_T \rangle_{\text{STAR}} = 0.514 \pm 0.012\text{GeV}/c$, $\langle p_T \rangle_{\text{NA49}} = 0.414 \pm 0.004\text{GeV}/c$ 和 $\langle p_T \rangle_{\text{UA1}} = 0.392 \pm 0.003\text{GeV}/c$,可以看出 STAR 实验组给出的平均横动量大于 NA49 和 UA1 实验组的结果. STAR 给出了负带电粒子的横动量分布及由分

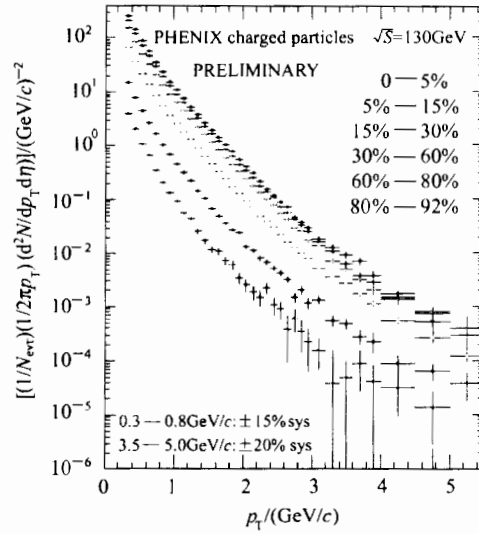


图 23 带电粒子的横动量谱与中心度的关系

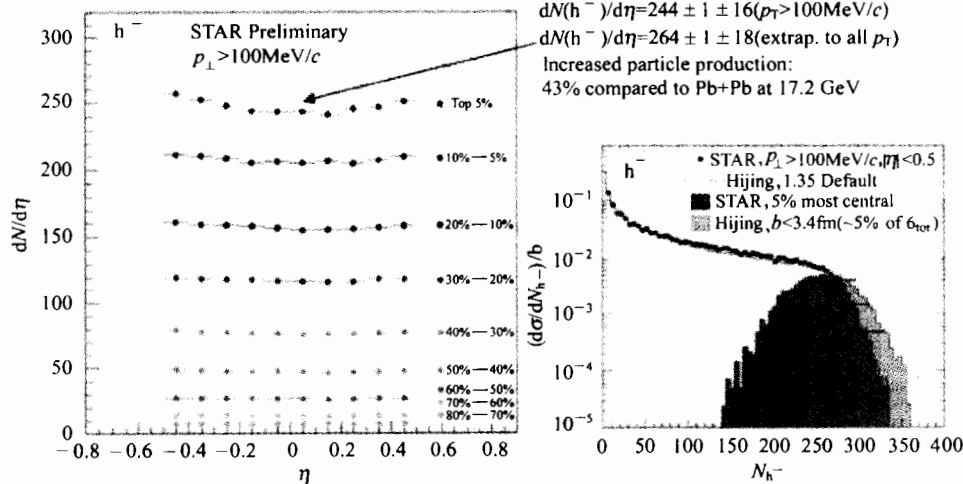


图 24 不同碰撞中心度的末态负电荷强子的赝快度分布

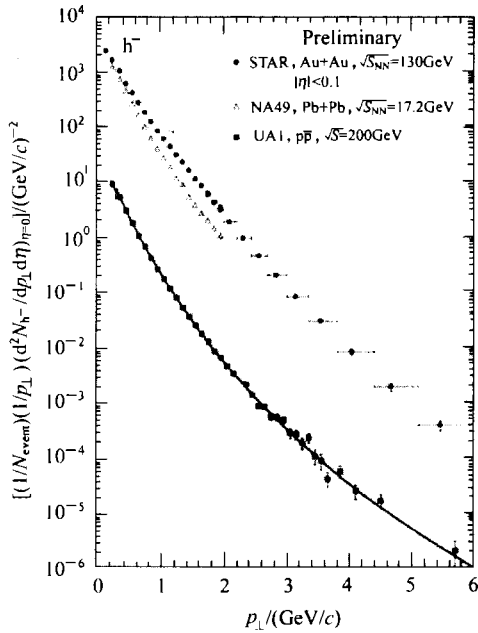


图 25 在中心快度区负带电粒子的横动量分布

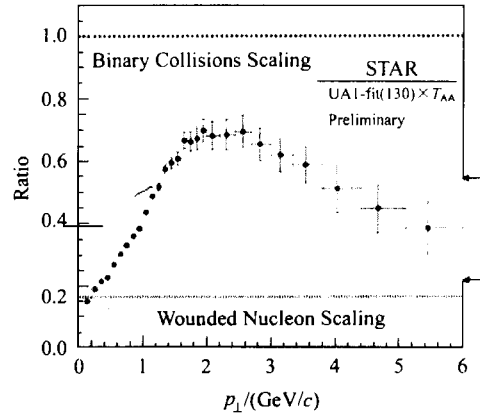


图 26 STAR 和 UA1 实验组得到的横动量分布的比值与横动量的关系

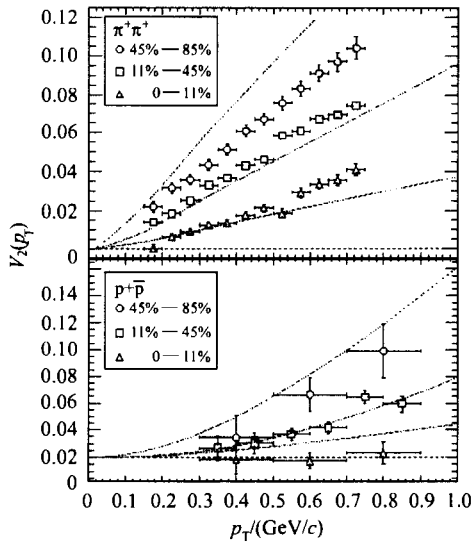


图 27 椭圆形流参数 V_2 与横动量和中心度的关系

布拟合出的平均横动量与碰撞中心度的关系, 越中心碰撞, 横动量分布越高, 平均横动量越大. 由 STAR 和 UA1 实验组得到的横动量分布的比值与横动量的关系见图 26. 对此比值有两种简单的预言: 在较低能量的强子和核的碰撞中, 由于是软过程, 则 π 的总产额由参加者核子数 (受伤核子) 来标度. 在这种情况下, 对中心度为 5% 的 Au + Au 碰撞来说比值为 0.164, 平均的两两碰撞 (binary collisions) 的次数为 1050; 如果强子的产生是由于硬过程的作用, 并且无核效应的影响, 则强子的产额将由两两核子-核子 (binary nucleon-nucleon) 相互作用的数目来标度, 比值将为 1. 核效应如: 初态的多次散射、遮蔽效应、喷注淬灭 (jet quenching) 及径向流等将改变上面两种简单预言的结果. 可以看出比值与横动量密切相关, 在横动

量较低时 (Wounded Nucleon scaling) 比值随横动量增大而增大; 高横动量时 (Binary Collision Scaling) 比值随横动量增大而降低.

STAR 还测量了给定粒子的椭性流^[58],如图 27. 对不同质量的粒子,椭性流与横动量和中心度的关系有很大的不同. 流体动力学模型能够反映实验结果. 由模型拟合实验可给出冷凝点的温度和流速的信息.

对奇异性的研究是 STAR 实验组的一个主要课题. 图 28 给出了 K^+/K^- 与中心度的关系^[59]. 可以看出从 AGS 经 SPS 到 RHIC 能区 K^+/K^- 的比值逐渐降低,到 RHIC 能区大约为 1. 比值随中心度的变化很小. 图 29^[59] 比较了 SPS 和 RHIC 能区 \bar{B}/B 与奇异组成之间的关系.

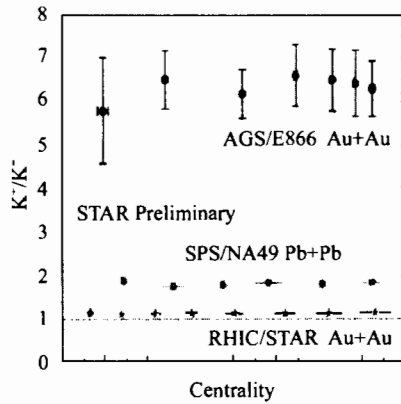


图 28 K^+/K^- 与中心度的关系

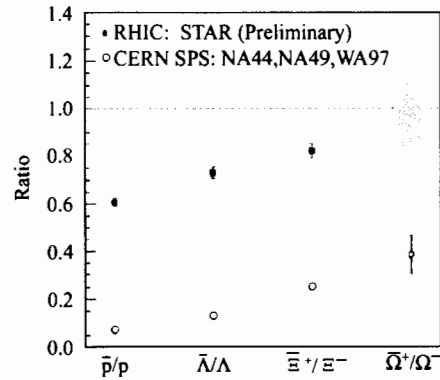


图 29 SPS 和 RHIC 能区 \bar{B}/B 与奇异组成之间的关系

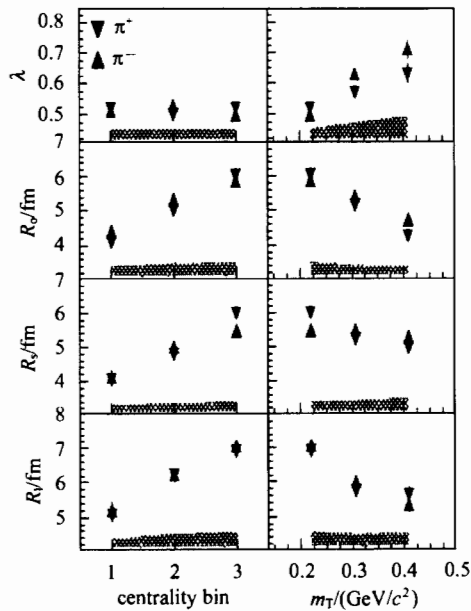


图 30 两 π 关联中,源半径和 λ 与中心度和横质量之间的关系

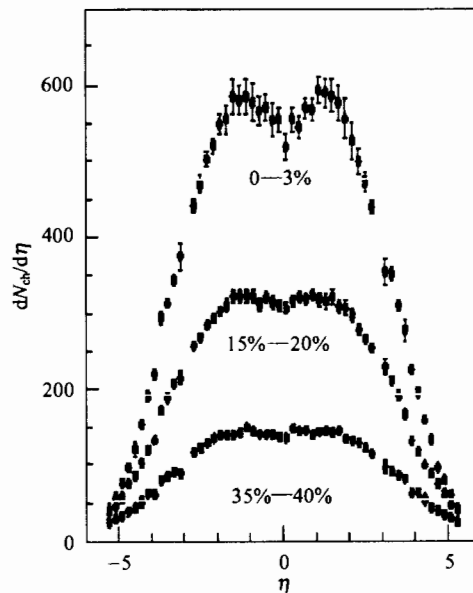


图 31 不同碰撞中心度的带电强子的赝快度分布

两 π 关联函数的测量结果见图 30^[60]. 源的大小随中心度的增高而增大, 随横能量的增大而降低. 没有观察到反常的源变大和出射时间变长 (QGP 形成的信号) 的信息. π^+ 的 HBT 关联参数与能量的依赖关系很弱^[60].

图 31 给出了 PHOBOS 合作组的不同碰撞中心度的带电强子的赝快度分布^[61]; 中心碰撞总带电粒子数达到 4200 ± 470 . 图 32 为 PHOBOS 实验组给出的每参加者核子数的带电粒子赝快度密度随能量的变化关系. 中心碰撞事例在赝快度 $\eta = 0$ 处的带电粒子密度 $dN_{ch}/d\eta = 585 \pm 18$. BNL/RHIC 的 Au + Au 碰撞的带电粒子密度比相同能量下的质子 - 反质子碰撞要高出 40%. 这个结果是核子 - 核子碰撞的简单迭加解释不了的.^[62]

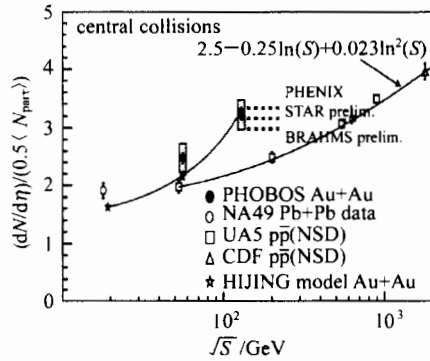


图 32 每参加者核子数的带电粒子赝快度密度随能量的变化关系

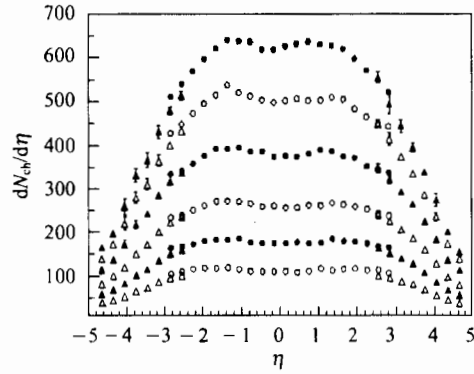


图 33 不同碰撞中心度下带电粒子的赝快度密度分布

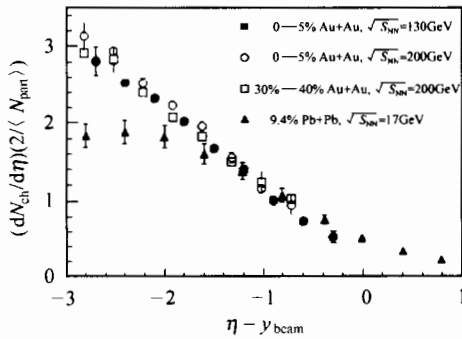


图 34 每参加者核子对的带电粒子的赝快度密度与 $\eta - y_{beam}$ 之间的关系

BRAHMS 合作组的首批结果主要结果包括: $\eta = 0, 3$ 处产生的反质子/质子比分别为 $0.61 \pm 0.06, 0.35 \pm 0.05$, 比值与横动量无关^[63]. BRAHMS 合作组最近发表了在 RHIC 最高能量下的 Au + Au 碰撞系统中带电粒子的赝快度密度分布的结果^[64]. 图 33 为带电粒子的赝快度密度分布, 从上到下中心度分别为 0—5%, 5%—10%, 10%—20%, 20%—30%, 30%—40% 和 40%—50%. 图 34 给出了中心度为 0—5%, 质心系能量为 130 GeV 和中心度分别为 0—5%, 30%—40%, 质心系能量为 200 GeV 的 Au + Au 碰撞以及中心度

为 9.4%, 质心系能量为 17 GeV 的 Pb + Pb 碰撞中每参加者核子对的带电粒子的赝快度密度与 $\eta - y_{beam}$ 之间的关系. 可以看出每参加者核子对的带电粒子的赝快度密度与碰撞中心度和能量无关, 这和与碰撞系统无关的在中等能量下碎裂重子的激发已达饱和的有限碎裂图像一致. 比较起来, 随着入射动能的增大, 在中心快度区产生的粒子就越多, 这可以从中心快度区每参加者核子对的增加看出. 质心系能量为 200 和 130 GeV 的 Au + Au 碰撞中带

电粒子的赧快度密度的比值见图 35. 对中心度为 5% 的 200GeV 事例,带电粒子的密度为 $625 \pm 1(\text{stat.}) \pm 55(\text{sys.})$, 与质心系能量为 130GeV 中心事例相比增加了 14% .

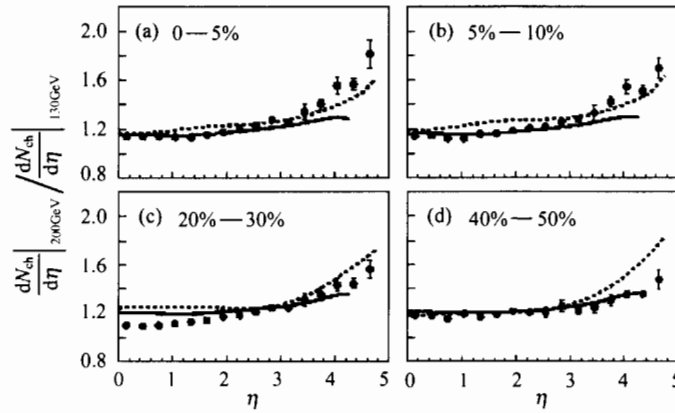


图 35 质心系能量为 200 和 130GeV 的 Au + Au 碰撞中带电粒子的赧快度密度的比值

4 个实验合作组对中心碰撞中每参加者核子对的带电粒子的赧快度密度的比较见图 36^[65]. 对在中心快度区的重子数密度的比较见图 37. 反质子、质子比值为 0.6—0.7, $\bar{\Lambda}/\Lambda$ 和 $\bar{\Xi}/\Xi$ 的比值均为 0.7.

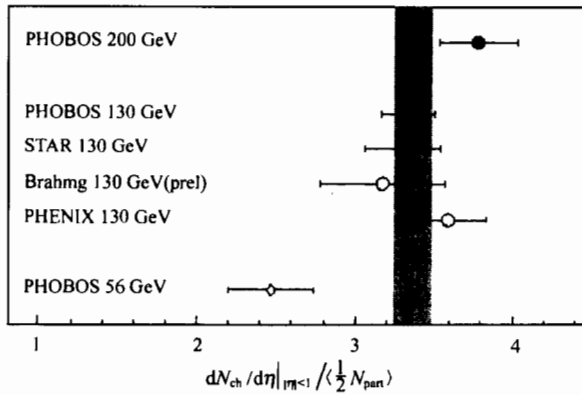


图 36 4 个实验合作组对中心碰撞中每参加者核子对的带电粒子的赧快度密度的比较

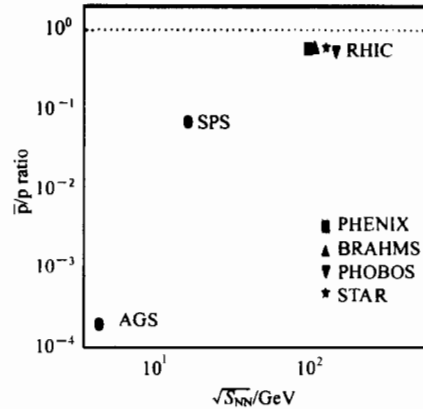


图 37 质心系能量为 200 和 130GeV 的 Au + Au 碰撞中带电粒子的赧快度密度的比值

对 BNL/RHIC 能区 $\sqrt{S_{NN}} = 58, 130, 200\text{GeV}$ 的正常运行,各实验组的结果分别给出了低横动量和高横动量的数据. 对于低 p_T 强子,在 $\eta = 0$ 处呈现较低的重子数密度;有早期平衡的明显证据;碰撞末态的早期出现高压和高能密,最佳估计为 $\epsilon \approx 4.5\text{GeV}/\text{fm}^3$. 对于高 p_T 强子,仍然有椭性流的特点. 有关高密物质的喷注淬火、能量密度的直接测量亦被广为关注.

3.4 CERN/LHC 能区的对撞实验现状

位于 CERN/LHC 上的大型重离子对撞实验 (ALICE)^[66] (图 38), 其束流能量将是 BNL/RHIC 的 30 多倍, 质心系能量可达每对核子 5.5 TeV, 对撞的重核为 Pb + Pb, 亮度为 $2 \times 10^{27} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. 这样的设计有利于 QGP 的形成和 QCD 相变信号的探测. 例如, 系统的能量密度、大小、寿命和弛豫时间将增加 5—10 倍. 由于能量密度大大超过退禁闭相变的阈值, 预期预测到从强子物质到夸克物质相变的各种性质. ALICE 自 1993 年开始筹建. 预计在 2006 年前后实现束流对撞, 开始数据采集和物理分析.

表 1 给出了 LHC 与 SPS, RHIC 在粒子密度、能量密度、体积大小、寿命和弛豫时间估计值的比较. 定性的结论是 LHC 造成的系统更热、更大、更长. 图 39, 40 和 41 分别给出 LHC 对于无重子的中心快速区域、 J/ψ 截面和 QCD 相变的温度区间的重要的定性改善.

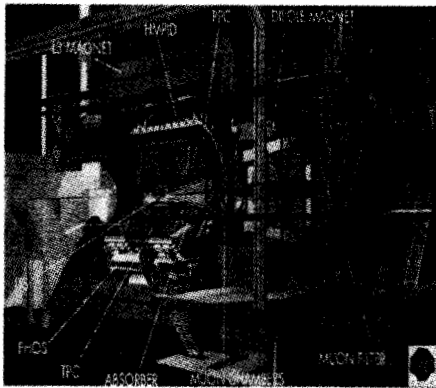


图 38 位于 CERN/LHC 上的大型重离子对撞实验 (ALICE)

表 1 LHC 与 SPS, RHIC 在粒子密度、能量密度、体积大小、寿命和弛豫时间估计值的比较

	SPS(17)	RHIC(200)	LHC(5500)
dN_{ch}/dy	500	700—1500	3000—8000
ϵ	$\ll 2.5$	3.5—7.5	15—40
V_t/fm^3	$\ll 10^3$	7×10^3	$\ll 20 \times 10^3$
$\tau_{QGP}/(\text{fm}/c)$	1	1.5—4	4—10
$\tau_0/(\text{fm}/c)$	1?	$\ll 0.5$	0.2?
τ_{QGP}/τ_0	1	6	> 30

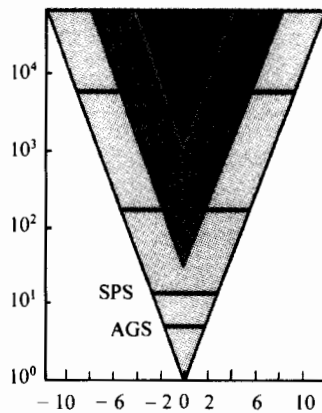


图 39 LHC 对于无重子的中心快速区域

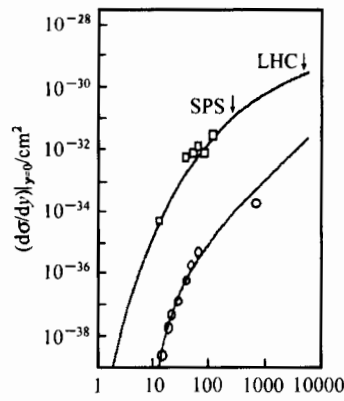


图 40 LHC 对于无重子的 J/ψ 截面

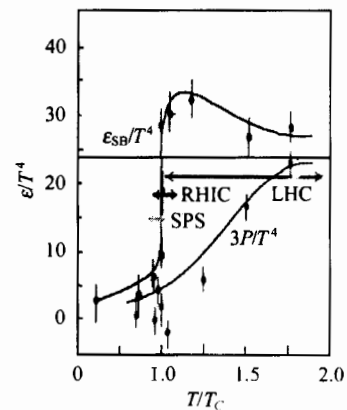


图 41 LHC 对于无重子的 QCD 相变的温度区间

4 小结与展望

CERN 理论部原负责人 L. V. Hove 教授早在 1987 年就指出^[67]:“……如果运气好的话,可能发现一些反常现象,对这些现象的郑重声明将会为 QGP 已经发现提供基本依据.……当然也非常希望有一些预料之外现象,这或许更有启发性.”

过去将近二十年在探索强相互作用的色退禁闭相变、探索新的核物态和进行相关的高能、超高能核-核碰撞的努力中,我们试图给出如下小结:

1) 关于强相互作用的 QCD 理论,特别是有限温度的格点规范场理论的研究预言,只要系统的能量密度达到 $1-3\text{GeV}/\text{fm}^3$ 以上,零重子数的强作用物质会出现色退禁闭的相变,形成夸克-胶子等离子体.

2) 超高能核-核碰撞在其碰撞末态的初期,有可能形成具有色退禁闭所需要的足够高的能量密度的体系,随之迅速地膨胀、冷却.关键的问题在于如何判断是否禁闭状态或退禁闭状态的特征现象,如何找寻相变发生的信号.

3) QGP 的高能量密度和强相互作用的短距离性质需要硬探针,这是最直接的检测.由此可以鉴别系统介质禁闭与否.其中有两种较重要的探测方案.一种方案是探测夸克偶素介子的解体.已经完全形成的物理共振态粒子,只有在退禁闭介质中才可能解体.另一种方案是探测末态强子的喷注淬灭.硬的横向强子喷注在 QGP 物质中比在强子物质中,明显地会遭受较高的能量损失.

4) 粲偶素产额的反常压低,提供了一种特别优异的研究方向.目前,从已公认的理论框架和已公布的实验数据两方面来看,有如下一些结果.粲偶素的强子化是通过部分子的复杂作用,微扰形成 $c\bar{c}$ 对.部分子的分布函数由深度非弹性散射的实验确定.考虑色蒸发机制,可以定量地描写 $c\bar{c}$ 对的色中性化.在质子-核(A)碰撞中研究禁闭介质的粲偶素产生,考虑通常核物质中预共振吸收机制,可以计算其产额的 A 相关性.由于所观察到的 J/ψ 的 60% 是直接产生的,而其余的是 $c\bar{c}$ 对的高激发态(主要为 χ_c),超高能核-核碰撞中的退禁闭发生,应能够导致一个粲偶素压低的谱系.在退禁闭的地方,粲偶素的较高激发态先被压低;然后,由于较高的能量密度,直接产生的 J/ψ 被解体.在较轻核的中心碰撞事例中产生的 J/ψ ,可以利用质子-核碰撞的预共振吸收机制来解释.然而对于超高能的重核(Pb + Pb)碰撞,虽然边缘碰撞事例的数据还可以沿用上述图像,随着碰撞中心度的增加,已有超过 30% 的反常压低的现象突现.反常的 J/ψ 压低与所有的通常的强子模型不符合,却有可能在色退禁闭发生的模型中得到解释.

5) 超高能的重核(Pb + Pb)碰撞中的末态软强子的多重数的数据也支持退禁闭相变的可能发生.在中心碰撞事例的中心快度区域,所观察到的 $3.7\text{GeV}/\text{fm}^3$ 的能量密度,实际上已达到退禁闭需要的能密区间.

6) 奇异性丰度也有可能用来检验初态的能量密度.

CERN/SPS 能区的 J/ψ 产生实验已经提供了有关夸克和胶子退禁闭的新物态的出现^[68,69].我们期待 BNL/RHIC 和 CERN/LHC 的进一步实验^[70,71],将通过粲夸克偶素、底夸克偶素和喷注的产生及各种新现象,来扩展已有的实验结果,更详细地研究更高能密的新

的核物态, 研究 QGP, 研究 QCD 相变.

参考文献 (References)

- 1 QM'2001, Proceedings of the 15th International Conference on Ultra-Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions at Long Island, New York, USA, edited by, Nucl. Phys., 2002, **A698**
- 2 CERN Press Repease, Feb. 10, 2000; <http://webcast.cern.ch/Archive/2000-02-10>; <http://cern.web.cern.ch/CERN/Announcements/2000/NewStateMatter>
- 3 NA44 Collab, Beker H et al. Phys. Rev. Lett., 1995, **74**:3340—3347; Bearden I G et al. Phys. Rev. Lett., 1997, **78**:2080—2083; Phys. Lett., 1999, **B471**:6
- 4 NA45/CERES Collab, Agakichiev G et al. Phys. Lett., 1998, **B422**:405; Lenkeit B et al. Nucl. Phys., 1999, **A654**:627c; Nucl. Phys., 1999, **A661**:23c—32c
- 5 NA49 Collab, Alber T et al. Phys. Rev. Lett., 1995, **75**:3814—3817; Appelshser et al. Euro. Phys. J., 1998, **C2**:661; Sikler F et al. Nucl. Phys., 1999, **A661**:45c—54c
- 6 NA50 Collab, Abreu M C et al. Phys. Lett., 1997, **B410**:337—343; Phys. Lett., 1999, **B450**:456—466; Phys. Lett., 2000, **B477**:28—36
- 7 NA52/NEWMASS Collab, Klingenberg R et al. Nucl. Phys., 1996, **A610**:306c; Ambrosini G et al. Phys. Lett., 1998, **B417**:202—210; New J. Phys., 1999, **1**:22.1
- 8 WA97/NA57 Collab, Andersen E et al. Phys. Lett., 1999, **B449**:401—406; Antinori F et al. Nucl. Phys., 1999, **A661**:130c—139
- 9 WA98 Collab., Albrecht R et al. Phys. Rev. Lett., 1996, **76**:3506—3509; Aggarwal M M et al. Phys. Rev. Lett., 1998, **81**:4087—4091; Phys. Rev. Lett., 1999, **83**:926—930
- 10 EMU01/EMU12 Collab, CAI X et al. Nucl. Tracks. Radiat. Meas., 1993, **22**:547; Nucl. Elect. Detec. Tech., 1996, **16**:91; Adamovich M I et al. Phys. Lett., 1997, **B390**:445—449; Phys. Lett., 1997, **B407**:92—96
- 11 BNL Press Release, June 13, 2000; <http://www.pubaf.bnl.gov/pr/bnlpr060800.html>
- 12 STAR Collab, LIN J et al. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2000, **47**:210; Ackermann K H et al. Phys. Rev. Lett., 2001, **86**:402—407; Jones et al. J. Phys., 2001, **G27**:651—658
- 13 PHENIX Collab, Steinberg P et al. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2000, **47**:304
- 14 PHOBOS Collab, Back B B et al. Phys. Rev. Lett., 2000, **85**:3100
- 15 BRAHMS Collab, Phys. Rev. Lett., 2001, **87**:112305
- 16 CAI Xu. Progress in Physics, 1988, **8**:186—212 (in Chinese)
(蔡勳. 物理学进展, 1988, **8**:186—212)
- 17 CAI Xu. Science Foundation in China, 1992, **6**(1):46 (in Chinese)
(蔡勳. 中国科学基金, 1992, **6**(1):46)
- 18 CAI Xu. Science Foundation in China, 1994, **8**(2):98; 1994, **2**(2):44 (in Chinese)
(蔡勳. 中国科学基金, 1994, **8**(2):98; 1994, **2**(2):44)
- 19 Lee T D. Nucl. Phys., **A553**:3c
- 20 Helmut Satz. Rept. Prog. Phys., 2000, **63**:1511
- 21 Jean-Paul Blaizot. Theory of the Quark-Gluon Plasma. hep-ph/0107131, July 2001
- 22 Berndt Mueller. Nucl. Phys., 1999, **A661**:272—281
- 23 Jean-Paul Blaizot. Nucl. Phys., 2002, **A689**:360—371c
- 24 F. Karsch. Nucl. Phys., 2002, **A698**:199—208
- 25 Karsch F, Laermann E, Peikeit A. Nucl. Phys., 2001, **B605**:579—599
- 26 Hans Specht. Nucl. Phys., 2002, **A698**:341—359c
- 27 Craig Ogilvie. Nucl. Phys., 2002, **A698**:3—12c

- 28 E895. Phys. Rev. Lett., 1999, **83**:1295; Sahu P K et al. Nucl. Phys., 2000, **A672**:276
- 29 E895. Phys. Rev. Lett., 2000, **84**:5488
- 30 E866. Phys. Rev., 1999, **C59**:2173—2188
- 31 E866. Phys. Lett., 2000, **B476**:1
- 32 E917. Phys. Rev. Lett., 2001, **86**:1970—1973
- 33 E895. Phys. Lett., 2000, **B495**:1
- 34 Krishna Rajagopal. hep-ph/0204079, April 2002; Nucl. Phys., 2002, **A702**:25—38
- 35 Carlos Lourenco. Nucl. Phys., 2002, **A698**:13—22c
- 36 WA97/NA57. CERN-EP-2000-002, 2000
- 37 WA98. Nucl. Phys., 1999, **A661**:191c—197c
- 38 Bjorken J D. Phys. Rev., 1983, **D27**:140—151
- 39 NA49. Phys. Rev. Lett., 1995, **75**:3814—3817
- 40 NA50. Phys. Lett., 2000, **B477**:28—36
- 41 NA38. Phys. Lett., 1999, **B466**:408—414
- 42 CERES/NA45. Nucl. Phys., 1999, **A661**:23c—32c
- 43 Abreu M C et al. Nucl. Phys., 2002, **A698**:127—134
- 44 Stock R. Nucl. Phys., 1999, **A661**:282c—299c
- 45 Braon-Munzinger P et al. Phys. Lett., 1999, **B465**:15—26
- 46 NA49. Nucl. Phys., 1999, **A661**:45c—54c
- 47 WA97. CERN-EP-2000-001, 2000
- 48 Adcox K et al. Nucl. Phys., 2002, **A698**:39—53
- 49 Bazilevsky S. First Results from the PHENIX at RHIC. nucl-ex/0105017
- 50 Milov A. Nucl. Phys., 2002, **A698**:171c; Phys. Rev. Lett., 2001, **86**:3500—3505
- 51 Lacey R. Nucl. Phys., 2002, **A698**:559—563
- 52 Hamagaki H. Nucl. Phys., 2002, **A698**:412—415
- 53 Velkovska J. Nucl. Phys., 2002, **A698**:507—510
- 54 Johnson S C. Nucl. Phys., 2002, **A698**:603—606
- 55 Messer F. Nucl. Phys., 2002, **A698**:511—514
- 56 Adler C et al. Nucl. Phys., 2002, **A698**:64—77
- 57 STAR. Phys., Rev., Lett., 2001, **87**:112303
- 58 STAR. Phys. Rev. Lett., 2001, **87**:182301
- 59 STAR. nucl-ex/0111017
- 60 STAR. Phys. Rev. Lett., 2001, **87**:082301
- 61 PHOBOS. Phys. Rev. Lett., 2001, **87**:102303
- 62 PHOBOS. Phys. Rev. Lett., 2000, **85**:3100
- 63 BRAHMS, Bearden I G et al. Nucl. Phys., 2002, **A698**:29—38
- 64 BRAHMS. Phys. Rev. Lett., 2002, **88**:202301
- 65 PHOBOS. Phys. Rev. Lett., 2002, **88**:022302
- 66 Jorgen Schukraft. Nucl. Phys., 2002, **A698**:287—295c
- 67 Hove L V. Nucl. Phys., 1987, **A461**:3c—9c
- 68 Abreu M C et al (NA50). Phys. Lett., 1997, **B410**:337—343
- 69 Abreu M C et al (NA50). Phys. Lett., 1999, **B450**:456—466
- 70 Nagle J L, Ullrich T. Heavy Ion Experiments at RHIC: The First Year. nucl-ex/0203007, March 2002
- 71 Tserruya I. Relativistic Heavy-Ion Physics: Experimental Overview. nucl-ex/0204012, April 2002

Experimental Status of Ultra-high Energy Induced Nuclear Reactions *

CAI Xu ZHOU Dai-Mei

(Institute of Particle Physics, Huazhong Normal University, Wuhan 430079, China)

Abstract An overview of experimental status of the international collaboration on ultra-high energy induced nuclear reactions and the relative heavy-ion physics is given. It includes: 1. theoretical predictions of quark matter (quark-gluon plasma), 2. the experiments of ultra-high energy heavy-ion collisions: (1) the BNL/AGS fixed target experiments, (2) the CERN/SPS fixed target experiments, (3) the BNL/RHIC colliding experiments, (4) the CERN/LHC colliding experiments.

Key words ultra-high energy heavy-ion collisions, quark-gluon plasma (QGP), signatures of QCD phase transition