

# 欧洲核子研究中心 发现新物质形态——夸克胶子等离子体存在的证据\*

庄鹏飞

(清华大学物理系 100084)

**摘要** 介绍和评述了欧洲核子研究中心(CERN)的相对论重离子碰撞的重要实验结果及其物理解释.碰撞初期形成了高温高密系统,能量密度达到了产生夸克胶子等离子体(QGP)的阈值.低质量双轻子增长、 $J/\psi$ 反常压低和奇异粒子增长等实验现象可以用形成了QGP来解释.但目前的实验还不足以证明已经产生了QGP.

**关键词** 相对论重离子碰撞,夸克胶子等离子体

## EVIDENCE FOR A NEW STATE OF MATTER—— QUARK GLUON PLASMA AT CERN

ZHUANG Peng-Fei

(Physics Department, Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract** Important experimental results from CERN heavy ion collisions and their physical interpretation are reviewed. A hot and dense system is formed in the early stages of the collisions, and the energy density reaches the threshold to create quark-gluon plasma (QGP). The experimental phenomena like low-mass dilepton enhancement,  $J/\psi$  suppression and strangeness enhancement can be explained through the formation of QGP. However, the current data are still not enough to prove the existence of QGP.

**Key words** relativistic heavy ion collisions, quark-gluon plasma

2000年2月10日,欧洲核子研究中心(CERN)举行网上学术报告会<sup>[1]</sup>,宣布在加速器SPS上进行的相对论重离子碰撞中已发现存在新物质形态——夸克胶子等离子体(QGP)的证据.这一宣布一时成为科学界的重大新闻,引起全球物理学家的广泛关注.以下简单介绍CERN SPS的研究成果.

### 1 背景

物质科学的最基本问题是物质的结构与物质的形态.前者属于微观领域,后者主要体现为集体性质.从20世纪80年代开始,由于李政道教授<sup>[2]</sup>等的倡导,国际物理学界开始研究高温高密量子色动力学(QCD)相变,讨论强作用物质的可能状态. QCD理论的重要特征是夸克禁闭.1982年,欧洲 $\mu$ 子实验组(EMC)通过 $\mu$ 子在原子核上的深度非弹性散射实验,发现原子核与自由核子的真空结构明显不

同.由此可以设想,高能核-核碰撞可能导致QCD相变.密度效应(即核子的重叠)和温度效应(即真空中夸克的产生)将使得夸克胶子可以在核的尺度这样一个范围内运动,形成QGP.

目前,关于QCD相结构和新物质形态的研究已成为物理学中最激动人心的领域之一,是高能核物理、粒子物理、场论、宇宙学和天体物理等学科共同关心的问题.美国和欧洲都投入了巨大的财力进行实验和理论的研究.目前正在运行的相对论重离子加速器有德国的GSI SIS,入射能量为每核子0.8—1.8 GeV,美国的BNL AGS,入射能量为每核子14.5 GeV,欧洲的CERN SPS,入射能量为每核子158—200 GeV. SIS和AGS的实验数据已经表明相对论重离子碰撞中的温度密度效应十分重要.但由于能量不太高,难于产生从强子气体到夸克胶子等

\* 2000-04-03收到初稿,2000-05-22修回

离子体的相变.而 SPS 的能量已达到产生新物态的估计条件.另外,美国 BNL 的相对论重离子对撞机 RHIC 将于 2000 年 5 月运行,对撞能量为每对核子  $100 + 100 \text{ GeV}$ ,比 SPS 高出一个数量级.欧洲核子研究中心的 LHC 上的重离子对撞预计将于 2005 年以后开始运行,对撞能量将达到  $\text{TeV}$  量级.

SPS 将在最近停止运行,而 RHIC 将于最近开始运行.因此,CERN 将 SPS 的实验数据作了全面综合的分析,总结寻找新物质形态的工作,宣布研究的成果.

## 2 研究结果

相对论重离子碰撞与新物质形态的研究主要涉及两个方面的问题:一是发生相变,产生新物态的条件,系统的时空演化,是否达到化学平衡与热平衡;二是新物态的信号.由于高温高密的 QGP 只可能是重离子碰撞的中间状态,末态仍然是轻子强子态,系统是否经历过 QGP 状态要由末态分布来反推.具有 QGP 特征的末态分布称为产生了 QGP 的信号.CERN SPS 在这两方面研究的主要结论为:

(1) 从实验结果估计,入射能量为每核子  $158 \text{ GeV}$  的 Pb - Pb 碰撞产生的最大能量密度已经超过产生 QGP 相变的阈值<sup>[3]</sup>.目前估计相对论重离子碰撞中最大能量密度的方法是 Bjorken 提出的标度不变流体力学.通过末态的横能分布来反推系统早期的能量密度.根据横能分布的数据,估计 Pb - Pb 碰撞中心区的能量密度  $\approx 3 \text{ GeV/fm}^3$ ,超过格点 QCD 理论计算的相变临界能量密度值  $\approx 1 \text{ GeV/fm}^3$ .

(2) SPS 的重离子碰撞在温度  $T \approx 170 \text{ MeV}$ ,重离子化学势  $\mu \approx 270 \text{ MeV}$  时达到了化学平衡<sup>[4]</sup>.计算表明,用一个简单的热平衡火球模型,只需要  $T$  和  $\mu$  两个变量就可以描述 SPS 的几乎所有的粒子数产额比.将化学平衡的温度  $T \approx 170 \text{ MeV}$  与格点 QCD 计算的相变温度  $T \approx 180 \text{ MeV}$  比较,表明体系在相变区域附近就达到了化学平衡.

(3) 当体系内相互作用停止后,末态动量分布的温度  $T \approx 120 \text{ MeV}$ ,此时的平均横向集体流速度约为光速的一半<sup>[5]</sup>.重离子碰撞系统内既有无规的热运动,又有集体运动.描述的理论一般是相对论流体力学.将实验上测得的末态单粒子横质量分布的斜率和两全同粒子的关联数据与理论描述相比较,可以反推出体系的几何尺度和持续时间,决定体系的

温度和集体流的大小.因为横向运动是由动力学产生的,实验上对平均横向流最感兴趣.

(4) 系统宏观观测量的实验结果不存在非统计涨落<sup>[6]</sup>.如果每次碰撞都达到了热平衡和化学平衡,在不同事件中观测到的末态分布之间的涨落就是热力学涨落.实验结果表明,末态横动量和粒子产额比随事件的涨落都呈典型的热力学涨落——高斯分布,说明系统确实达到了热平衡和化学平衡.

以上结果表明 SPS 的相对论重离子碰撞达到了产生 QGP 的条件,达到了化学平衡和热平衡,集体运动十分重要.在碰撞初期确实形成了高温高密物质.化学平衡与热平衡表明可以用有限温度场论作为理论工具来描述体系内的粒子动力学.

(5) 低质量双轻子谱左移<sup>[7]</sup>.由于轻子只参与弱电相互作用,自由程长,若在 QGP 中产生了,则不会与末态强子产生相互作用,是 QGP 的理想信号.理论分析表明,不同能量区间的双轻子来源不同,对应的物理也不同.在不变质量  $\leq 1 \text{ GeV}$  的低质量区,双轻子主要来自于末态中性强子的衰变.核子 - 核过程的双轻子谱可以用这些强子衰变很好地描述,而核 - 核过程的双轻子多重数明显高于强子衰变的计算值.在考虑了  $\pi - \pi$  湮灭成  $\rho$  介子产生双轻子的贡献以后,多重数得到了较好的解释,但理论与实验在双轻子质量分布的形状上有很大差别:在质量  $\approx 0.5 \text{ GeV}$  处,理论值远小于实验值.对此,有两种解释:一是认为与手征对称性的恢复有关,手征对称性恢复后, $\rho$  介子质量下降至  $0.5 \text{ GeV}$  左右,衰变的双轻子使得整个分布在  $0.5 \text{ GeV}$  左右会上升;二是认为与高密强子物质中的多次碰撞有关, $\pi - \pi$  湮灭的  $\rho$  介子在高密物质中被“熔解”了,从而导致原来在  $0.7 \text{ GeV}$  附近的峰值左移,宽度增加.由于手征对称性恢复与多次碰撞都是高温高密媒质效应,故尽管其动力学根源不同,但双轻子谱的形状表明高温高密媒质效应十分重要.

(6)  $J/\psi$  反常压低<sup>[8]</sup>. $J/\psi$  是  $c$  和  $\bar{c}$  的束缚态,可以通过末态轻子对在不变质量  $3.1 \text{ GeV}$  处的共振峰来证实它的存在.由于  $J/\psi$  粒子质量大,不能像  $\pi, K$  那样通过软过程产生,只能在碰撞初期的硬过程中产生,而一般来说,硬过程不受重离子末态的影响.因此, $J/\psi$  粒子在相对论重离子碰撞和 QGP 研究中具有重要地位.考虑到  $c\bar{c}$  对被旁观核子和产生的介子离解等核效应,会引起产额的压低.当改变碰撞核的大小和碰撞中心度,实验发现,束缚最弱的  $\psi$  在 S - U 碰撞中已出现压低, $\chi$  在中心度不太高

时的 Pb - Pb 碰撞中似乎已消失,而在中心碰撞 Pb - Pb 中  $J/\psi$  出现反常压低行为.核效应可以解释过去 O - Cu, S - U 的实验数据,但对于解释  $J/\psi$  的反常压低似乎有困难.另一方面, $J/\psi$  压低是 QGP 中色屏蔽效应的一个重要推论.零温零密时  $c$  和  $\bar{c}$  之间的线性势在高温高密时由于色屏蔽效应成为德拜势,当屏蔽长度足够小时,束缚态解除.根据计算, $J/\psi$  压低的温度应高出 QGP 相变温度的 30%,能量密度约为  $3\text{ GeV}/\text{fm}^3$ .这正好是入射能量为  $158\text{ A}\cdot\text{GeV}$  时 Pb - Pb 中心碰撞能达到的温度和能量密度.因此, $J/\psi$  反常压低被看成是在 Pb - Pb 中心碰撞产生了 QGP 的一个信号.

(7) 奇异粒子数增加<sup>[9]</sup>.与核子 - 核过程比较,在相对论核 - 核过程中观察到了奇异粒子产额增加.若取参与碰撞核子数为归一化因子,对于奇异数为 1 的粒子,增加倍数约为 2,且增加的幅度随奇异数的增加而增长.对于  $\Omega$  超子和它的反粒子,增加倍数竟达 15! 另外,根据上面所述,由单粒子的横质量谱的斜率和两粒子关联可以确定系统碎裂时的温度和横向集体流.由于系统的集体流不依赖于粒子质量,斜率随粒子质量的变化是线性的.这一线性关系对于  $K, \Lambda, \Xi$  粒子都符合较好,但对于带高奇异数的  $\Omega$  粒子,它的横质量分布的斜率远离线性关系,其斜率和  $K$  粒子的斜率差不多.这说明  $\Omega$  粒子在集体流很小时就已经形成了.以上  $\Omega$  粒子的反常增加和斜率远离线性关系,很难用强子物质中的次级碰撞来解释.因为带高奇异数的粒子质量太大,难于产生.但在色禁闭解除和手征恢复的 QGP 中,胶子的密度很大,奇异夸克的质量小,易于产生奇异夸克,因此经历了 QGP 的体系易于产生高奇异数的粒子.

以上三个信号中,低质量双轻子谱的形状只说明高温高密媒质效应的重要性,是否是手征对称性恢复的信号还有待讨论; $J/\psi$  压低作为色禁闭解除的一个信号一直是争论的一个焦点,因为用强子物质内的吸收也能解释许多实验现象.但目前  $J/\psi$  的反常压低似乎支持 QGP 信号的解释;奇异数增加,特别是高奇异数粒子的反常增加以及横质量分布的斜率远离线性关系是 SPS 产生了 QGP 的最重要的

信号.

### 3 总结和讨论

CERN 的实验数据及其物理分析说明:(1) SPS 的相对论重离子碰撞初期的能量密度远超过正常核物质的能量密度,已经达到产生新物态——QGP 的条件.(2) 许多数据对参与碰撞核子数的非线性依赖关系说明这些现象很难用核效应来解释.(3) 以强子相互作用机制为基础模型难于系统解释实验数据.(4) 实验数据显示了 QGP 理论预言的许多信号.(5) 目前的研究结果还不足以证明已经产生了 QGP.

在 CERN 寻找 QGP 信号的研究基于全面综合地考虑多个观测量.目前很难说明哪一种信号能完全排除用强子动力学来解释.另外,SPS 考虑的信号都是间接的信号,因为观测到的粒子都经历了与末态强子相互作用.更加直接的信号,例如从 QGP 中的夸克产生的电磁信号,有待于在更高能量的 RHIC 和 LHC 的研究.

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Heinz U, Jacob M. Evidence for a new state of matter: An assessment of the results from the CERN lead beam program (nucle-th/0002042), LANL e-print archive, 2000
- [ 2 ] Lee T D. Proceedings of RHIC summer study '96 (United States Department of Energy), Brookhaven National Laboratory, July 8 - 19, 1996, xiii
- [ 3 ] Appelshaeuser H *et al.* (NA49 collaboration). Nucl. Phys., 1999, A661:45c
- [ 4 ] Braur Munzinger P *et al.* Phys. Lett., 1999, B465:15
- [ 5 ] Appelshaeuser H *et al.* (NA49 collaboration). Eur. Phys. J., 1998, C2:661
- [ 6 ] Appelshaeuser H *et al.* (NA49 collaboration). Phys. Rev. Lett., 1995, 75:3814
- [ 7 ] Agakichiev G *et al.* (NA45 collaboration). Nucl. Phys., 1999, A 654:627c
- [ 8 ] Abreu M C *et al.* (NA50 collaboration). Evidence for deconfinement of quarks and gluons from the  $J/\psi$  suppression pattern measured in Pb-Pb collisions at the CERN-SPS (CERN EP-2000-013), CERN Library, 2000
- [ 9 ] Antinori F *et al.* (WA97 collaboration). Nucl. Phys., 1999, A661:130c