

# 核物质的新型态 —— 夸克物质和 相对论重离子碰撞

刘建业

(中国科学院近代物理研究所)

**摘要:** 本文简要地介绍了近年来国际上通过高能重离子(相对论重离子)碰撞,探索产生夸克胶子等离子体(QGP)的进展情况。首先从理论上简单论证利用高能重离子碰撞产生QGP的相变条件、核相图和产生QGP的时空演化过程,同时还介绍了近年来CERN和BNL两个实验室在探索产生QGP的实验进展情况。随后,着重介绍了高能重离子碰撞的末态观测测量和QGP的形成信号。

## 引 言

人们经过几个世纪的努力,对物质结构的认识日益丰富,逐步深入,从分子、原子到原子核,从电子到基本粒子,现在更进一步深入到了夸克层次。伴随着对微观世界认识的逐步深入,人类对物质结构形态的认识也在深入和发展,分子、原子是由原子核和电子组成的体系,其物质结构形态有气体、液体和固体三态。接着,发现了直接由原子核和电子组成的宏观系统——电磁等离子体。当人们认识到原子核是由粒子——质子和中子——组成的体系以后,提出一个问题:能不能由核子直接组成宏观系统?这种系统确实被发现存在于某些天体(如中子星)之中。现在人们又认识到,核子及其它强子是由夸克、反夸克和胶子所组成。那么就提出一个新问题,能不能由夸克、反夸克和胶子组成一种比粒子的线度大得多的系统,即夸克—胶子等离子体(QGP)或简称夸克物质。近年来,人们通过相对论重离子碰撞从理论上和实验上都投入了很多的人力、物力,在研究夸克物质存在的根据和性质,在探寻着夸克物质的确证方法,这已成为当代物理学的一个重要的激励人心的研究课题。

## 一、利用高能重离子碰撞产生 QGP 的相变条件<sup>[1]</sup>

理论上的有限温度规范场论预言,在高温高压下的强子物质通过退禁闭相变而转变到夸克胶子等离子体。按照QCD理论(量子色动力学),强子是由夸克构成的束缚态,其中重子是三夸克(qqq)态,而介子是正、反夸克(qq̄)态;在它们之间传递强相互作用的媒介粒子是胶子。通常情况下,夸克—夸克或夸克—反夸克之间的相互作用随着它们之间距离的增加而增大,故夸克被禁闭在线度约为1fm的强子内部。每一个核子犹如一个包含三个夸克的口袋,形成胶子对和夸克—反夸克对凝聚态,即为QCD真空态(色电常数 $k=0$ )。这种情况正好和超导中电子对的凝聚态相似,没有自由夸克出现。

正如前面所说,理论预言,当核物质的温度升高到某一临界温度 $T_c$ (参看图1的核物质相图)<sup>[2]</sup>大于200MeV以上,即有可能产生退禁闭相变。这个临界温度,也可用简单的方法进行定性估算。核子数为A的正常原子核,具有平均半径 $r_A \cong 1.2A^{1/3} \text{fm}$ 和平均能量密度 $\varepsilon_A \cong M_A / (4\pi/3)r_A^3 \cong 130 \text{MeV}/\text{fm}^3$ ;而核子半径为 $r_N \cong 0.8 \text{fm}$ ,相应的平均能量

密度为  $\varepsilon_N \cong m_N / (4\pi/3) r_N^3 \cong 440 \text{ MeV} / \text{fm}^3$ , 其临界温度为

$$T_C = 1 \text{ fm}^3 (\varepsilon_N - \varepsilon_A) \cong 300 \text{ MeV}.$$

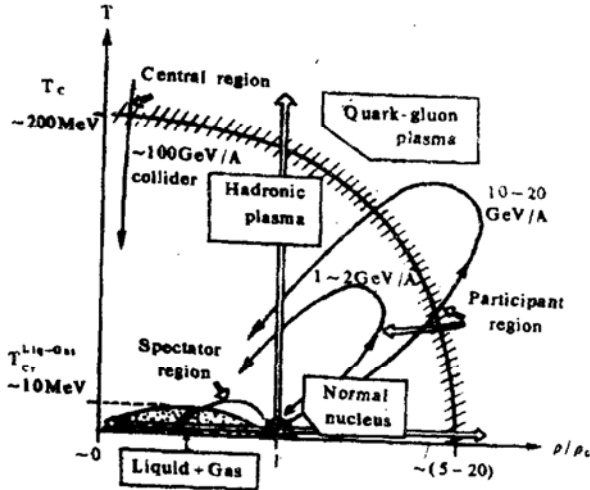


图1 理论预言的核物质相图

同时,也可考虑核系统保持强子物质形态(核子和介子)的最大临界温度  $T_C$  就是  $\pi$  介子的质量,约为  $140 \text{ MeV}$ 。这些定性的估计与有限温度规范场论的计算值  $T_C \sim 200 \text{ MeV}$  为同一数量级。此时对应的核物质能量密度约为几个  $\text{GeV}/\text{fm}^3$ 。在这种情况下,夸克之间的相互作用距离变得小于强子的作用尺度  $1 \text{ fm}$ , 夸克之间的相互作用变得小至可以忽略不计,夸克和反夸克退禁闭而变为自由夸克,即谓 QCD 真空激发。由强子物质相变到夸克胶子等离子体,相变区如图 1 中阴影线部分所示。

另一方面,如果设法压缩核物质的密度到达和超过粒子数密度,即压缩到核子之间不再有空隙,核内核子间平均距离  $D$  小于核子内两个夸克的均方距离  $D_q = 1.39 \text{ fm}$ , 核子边界全部消失。这时,就可能实现在核内相对独立的客体不再是核子,而是夸克,由于核子的边界消失,整个核变成了由  $3A$  个夸克组成的客体。原子核的半径参数  $r_0 = 1.2 \text{ fm}$ , 核子的半径  $\approx 0.8 \text{ fm}$ , 那么  $(1.2)^3 / (0.8)^3 \approx 4$ , 即核子密度  $\rho$  与正常核物质密度  $\rho_0$  之比

$\rho / \rho_0 > 4$ 。正如图 1 中当  $\rho / \rho_0 \cong 5 \sim 10$  时,就发生由强子物质到夸克胶子等离子体的退禁闭相变。即所有强子已被折散,整个原子核构成一个色单态,但夸克之间有色相互作用存在,体积内没有禁闭性,为自由夸克和胶子的等离子体。

核物质的退禁闭相变条件,除了以上所说的高温(包括高密度)和高物质密度外,一定大小的原子核体积(即原子核的大小)也是必要的相变条件。在低温条件下,核内介子很少,主要是核子,核子在核物质内运动的平均自由程为

$$L = \frac{l}{\rho_0 \sigma_{nn}} = \frac{4\pi}{3} \frac{R_l^3}{\sigma_{nn}} = 1.65 \text{ fm}$$

$\sigma_{nn} = 44 \text{ mb}$  为核子—核子碰撞截面,  $R_l = 1.2 \text{ fm}$ ,  $\rho_0$  是正常原子核内核子数密度,这时核子的运动仍能作为一个相对独立的整体。如果已经转变为夸克胶子等离子体,则核由  $3A$  个夸克组成,则夸克运动的平均自由程为

$$L_q = \frac{l}{\rho_q \sigma_{qq}} = \frac{l}{3\rho \frac{1}{9} \sigma_{nn}} = \frac{3}{4.59 \times \rho_0 \sigma_{nn}} = 1.08 \text{ fm}$$

这里  $\rho = 4.59 \rho_0$ , 是相变时的核子数密度;  $\rho_0 = 0.137 \text{ fm}^{-3}$ 。对于高密度核要形成相变条件,必须有  $RA^{1/3} \gg L_q$ , 则可以估算  $A \gg 3.35$ , 即核质量必须远大于 3.35, 一般理论估算  $A$  至少大于 30 以上。

归纳以上所述,产生退禁闭相变的条件为:

1. 核物质温度  $T > 200 \text{ MeV}$ , 这相当能量密度  $\varepsilon > 2 - 3 \text{ GeV} / \text{fm}^3$ ;
2. 核子数密度  $\rho > 4.59 \rho_0 = 0.63 \text{ fm}^{-3}$ ;
3. 碰撞系统的总核子数  $> 30$ 。

要在实验室内产生高温高密核物质达到以上的退禁闭相变条件,只有通过相对论重离子碰撞将巨大的动能转变为热能来实现。

## 二、利用高能重离子碰撞产生 夸克胶子等离子体

### 1. 高能重离子碰撞过程的核相图和时空演化图<sup>[11,13]</sup>

人们猜想在宇宙大爆炸初期曾有过这种物质,因为那时的能量密度极高,估计到大爆炸后  $10^{-6}$  s 才会因宇宙膨胀而降落到普通核物质的能量密度。在中子星的中心,能量密度为普通核物质的 10—20 倍,同样会存在 QGP。但地球上没有存在夸克物质的天然条件,只能在实验室创造条件来实现。早期高能重离子碰撞的实验数据,来源于宇宙射线实验中观测的有关事例,曾观测到单个核子能量高达 100TeV 的事例,但这种实验的明显弱点是统计性太差,同样的事例几乎不能重复。随着相对论重离子加速器的建造和运行,其情况有了很大的改变。

两个高能原子核碰撞过程如图 2,可以描述为两个核子集团的相互碰撞和穿过及其随后的多重次级核子—核子碰撞。重叠区称为参加者区域,发生激烈的核子—核子碰撞,该局部区域由于核子相继碰撞产生的次级强子会产生混乱碰撞,使次级强子系统热化,密度突然升高,能量在该区所有强子之间进行分配,并趋向热平衡,所以核物质密度和温度便急速上升,随后是系统膨胀和冷却,温度  $T$  和密度  $\rho/\rho_0$  随时间  $t$  的关系如图 2 所示。如果将图 2 的这种过程投影到图 1 的核物质相图中,正是图 1 中箭头所示过程,参加者区域在核物质相图中的扫描过程,是开始时温度和密度  $\rho/\rho_0$  ( $\rho_0$  为正常核物质密度)随时间  $t$  (同时参看图 3 中的时空演化图)而上升的画面。如果实验室的入射重离子能量达到相变临界条件(估计  $E_L/A > 30\text{GeV}$ ),则这个强子系统就相变到夸克胶子等离子体相。然后通过膨胀、冷却又转化为热密的强子物质,再进一步膨胀、冷却,最后成为观测

到的末态自由强子,图 3 ( $x$  为空间线度,  $t$  为时间)给出了这一系列过程的时空演化图象。如果热密物质的温度和密度达不到相变临界条件,则上述过程不经过夸克胶子等离子体相,而直接通过膨胀、冷却,最后碎裂为末态强子。

### 2. 高能重离子碰撞实验现况

根据以上的物理考虑,美国 Brookhaven 国家实验室 (BNL) 和西欧核子研究中心 (CERN) 建造了高能重离子加速器。从 1986 年起,在 BNL 的 AGS 上已能得到平均单核子能量为 14.5GeV 的  $^{16}\text{O}$  束流和  $^{32}\text{S}$  束流,在 CERN 的 SPS 上已经得到单核子能量为 200GeV 的  $^{16}\text{O}$  束流和  $^{32}\text{S}$  束流,并取得了一批实验结果。在这些实验中尽管还不能断言已有夸克物质生成,但它使人们看到,通过高能重离子碰撞产生夸克胶子等离子体的现实,已有期可待。

图 4a 给出了 BNL 重离子加速器的示意图。目前已运转的部分是相联结的串列式加速器 (Tandem Van de Graff) 和交变梯度同步加速器 (AGS)。离子首先在串列加速器 (Tandem) 上被加速,然后输送到 AGS 上进一步加速。用其供给的 13—15GeV/A 的束流进行固定靶实验。目前已有十多个国际实验合作组,利用  $^{16}\text{O}$  和  $^{32}\text{S}$  束流进行了实验工作。BNL 计划进一步要完成的工程,是将进入 AGS 之前的离子先在 Booster 加速器上进行预加速。随后将经过 AGS 加速的离子束注入到相对论重离子加速器 RHIC,完成一直到 Au 每核子能量高达 100GeV 重离子的对碰实验。RHIC 建造在直径约为 1.2km 的隧道中,有两个超导磁环,其任务是捕获由 AGS 注入的离子,并把它们加速到具有 100GeV/A 的能量。在两个环中,离子的运行方向相反,并有 6 个束流交叉处,在这里完成离子对碰实验。

图 4b 是 CERN 的加速器示意图,离子经直线加速器注入作为增强器的同步加速器 (PSB) 中,经预加速后再送入质子同步加速器 (CPS) 使离子加速到 14GeV/A 的能量,最

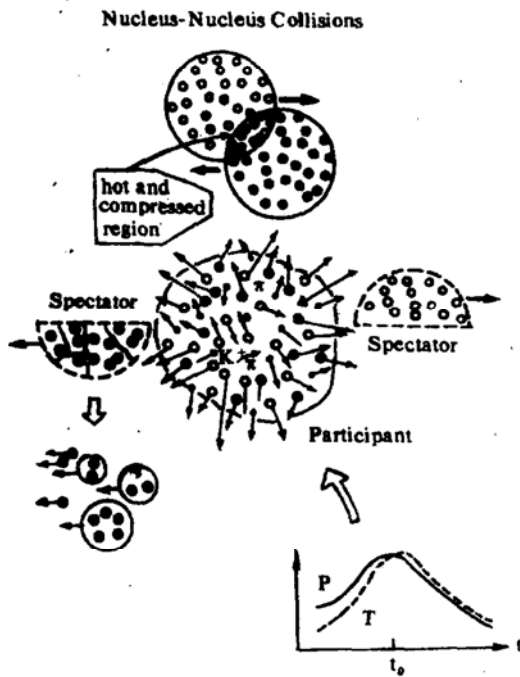


图 2

后送到超级质子同步加速器 (SPS), 得到  $60 \sim 200 \text{ GeV} / A$  的离子束, 供西部和北部两个实验区作固定靶的高能重离子碰撞实验。图中交叉储存环 (ISR) 是 CERN 的质

实验室	BNL	CERN	相变条件
入射核	$^{16}\text{O}, ^{28}\text{Si}$	$^{16}\text{O}, ^{32}\text{S}$	$> 30$
$P_L (\text{GeV} / c)$	14.5	200	
最大核子数密度 $\rho$	$0.79 / \text{fm}^3$	$2.85 / \text{fm}^3$	$> 0.64 / \text{fm}^3$
相邻核子间距离 $D$	1.21 fm	0.79 fm	$< 1.39 \text{ fm}$
最大能量密度 $\varepsilon$	$2.14 \text{ GeV} / \text{fm}^3$	$2.77 \text{ GeV} / \text{fm}^3$	$> 2 \text{ GeV} / \text{fm}^3$

可以看到以上各值与到夸克胶子等离子体的相变临界条件, 是同样数量级。但必须指出, 现在的理论计算带有相当大的不确定性, 其计算结果与真实情况会有较大的误差, 故很难从以上结果断定目前两个实验室的高能重离子碰撞, 就已经达到了相变临界条件。但不管怎么说, 从以上的粗略估计可以看出通过高能重离子碰撞达到相变临界条件的现实可能性。

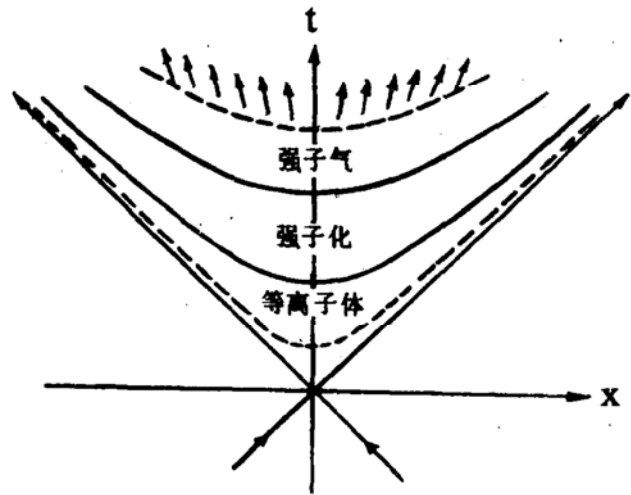


图 3

子—质子对撞机, 质子由直线加速器注入后经 PSB 和 CPS 加速, 再分成两束送到 ISR 中, 使它们沿相反方向在环中加速, 并在八个交叉处完成质子—质子对撞实验, 质心系能量可达  $65 \text{ GeV}$ 。SPS 也就是 CERN 的质子—反质子对撞, 用作  $\overline{P}P$  对撞实验时, 质心系能量可达  $900 \text{ GeV}$ 。

以上两个实验室所得到的高能重离子束, 理论估算可达到以下条件:

### 三、高能重离子碰撞的运动学变量和末态观测量

#### 1. 碰撞运动学

##### (1) 快度

在分析高能重离子碰撞过程时常用到一个运动学变量, 就是粒子快度:

$$y = \frac{1}{2} \ln \frac{E + P_{\parallel}}{E - P_{\parallel}} = \ln \frac{E + P_{\parallel}}{m_{\perp}} \quad (\hbar = c = 1)$$

这里  $P_{\parallel}$  是粒子纵向动量,  $E$  是粒子能量,  $m_{\perp} = \sqrt{P_{\perp}^2 + m^2}$  是横质量。

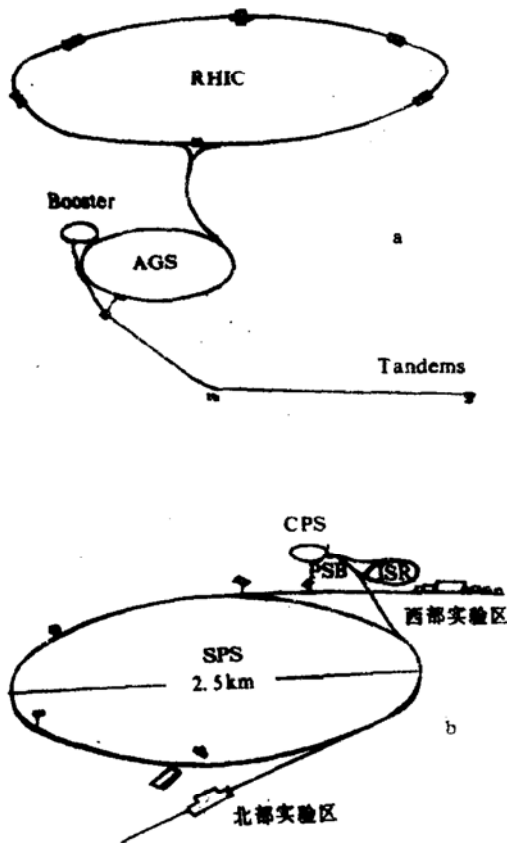


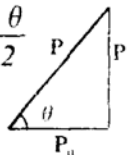
图4

在 Lorentz 变换中快度仅发生平移, 即  $y' = y + \ln(\gamma - \beta)$ ,  $\beta$  是两坐标系的相对速度,  $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$  是纵向 Lorentz 变换因子, 所以  $\ln(\gamma - \beta)$  是个常数。故利用  $y$  作为变量, 在计算中带来很大的方便。

(2) 赝快度

在 高能重离子碰撞条件下, 可取当  $m \rightarrow 0$  时,  $m_{\parallel} \rightarrow P_{\parallel}$ ,  $E \rightarrow P$

$$y = \ln \frac{P + P \cos \theta}{P \sin \theta} = \ln \cotg \frac{\theta}{2} \frac{P}{P_{\parallel}}$$

$$= -\ln \tg \frac{\theta}{2} = \eta$$


$\theta$  为粒子动量方向和入射方向之间夹角,  $\eta$  称赝快度。这样, 粒子快度  $y$  由粒子发射角  $\theta$  来确定, 在实验上是容易测量的量, 故通常除  $y \sim 0$  附近区域 (即  $V \sim 0$ ) 外, 就用  $\eta$  代替  $y$ 。

2. 末态物理观察量

高能重离子碰撞, 实际上归结为来自两

个原子核的成份粒子之间的碰撞, 因而包含大量的反应过程。若成份粒子的动量转移给少数几个末态粒子, 称为硬过程, 如高能重离子碰撞中有关双轻子、直接横光子、以及  $j/\psi$  粒子的产生过程。若成份粒子的动量转移给较多的末态强子, 为之软过程。由于硬过程是大动量转移过程, 按照 QCD 的渐近自由性质, 原则上可用微扰 QCD 来解释, 并已获得很大成功。然而软过程为小动量转移过程, 涉及到 QCD 非微扰效应, 目前研究工作更多的是唯象模型。常见的物理观察量是末态强子的多重数、快度分布和横能量、零度能分布等。

(1) 横能量、零度能和多重复数分布

这些物理观察量, 主要用来分析高能重离子碰撞动力学过程的性质及特征, 间接判断 QGP 的存在条件。

① 横能量

总的横能量对快度  $y$  的分布为

$$E_{\perp} = \sum_i E_i \sin \theta_i$$



重离子碰撞中心区能量密度  $\epsilon$ , 按照 Bjorken 的定义表示为

$$\epsilon \cong 1/\pi R_{beam}^2 dE_{\perp} / \tau dy$$

这里  $R_{beam}$  是重离子的半径, 通常取  $\tau \sim 1 \text{fm}/c$ , 在质心系  $Y \sim V_{\parallel}$ , 所以  $\tau dy$  表示在横能量  $dE_{\perp}$  被沉积期间的纵向长度, 则  $\pi R_{beam}^2 \tau dy$  表示相应的体积, 故能量密度为上式。在 CERN 的 SPS 加速器上获得  $200 \text{GeV}/A$  的高能重离子, 在中心区给出  $dE_{\perp} / dy \sim 70 \text{GeV}$ , 如  $R_{beam} \sim 3 \text{fm}$ , 则估算  $\epsilon \sim 3 \text{GeV}/\text{fm}^3$ , 和 QGP 相变条件同数量级。

② 横动量和零度能

在 X、Y 方向的动量为横动量  $P_{\perp} = P \sin \theta$ 。一般将  $\theta < 0.3^\circ$  范围的能量定义为零度  $E_F$ , 正好和横能量是反关联。

(2) 碰撞几何学

图 5 表明横能量流的分布, 数据取自于 BNL 14.5 GeV/A 的  $^{16}\text{O} + ^{197}\text{Au}$ , 角度范围为  $10^\circ < \theta_{lab} < 32^\circ$ 。可用简单模型来解释, 在

大的碰撞参数中假定只有一个从 $^{16}\text{O}$ 来的粒子参与碰撞,其相当于 $\text{P} + ^{197}\text{Au}$ 碰撞的谱形,图5中用“1”标明。当碰撞参数减小时, $^{16}\text{O}$ 中有两个核子与 $\text{Au}$ 相互作用,相应 $\text{P} + \text{Au}$ 的两重统计求值。依此类推,当 $^{16}\text{O}$ 的16个粒子与 $\text{Au}$ 重叠时,是16重求积被应用,图5中用“16”标明,从“1”到“16”的相对权重由碰撞参数的几何权重决定,即16个独立贡献的求和很好地解释了实验数据,高能尾巴主要来自“16”的贡献,高的 $E_{\perp}$ 对应小的碰撞参数。图6a给出了横能量 $E_{\perp}$ 和带电粒子多重性 $M$ 之间的关联,在BNL和CERN两个实验室都得到了 $E_{\perp}$ 和 $M$ 之间明显的线性关联。当大的 $E_{\perp}$ 对应小的碰撞参数,多重性 $M$ 也就增大。这和图6b中的横能量 $E_{\perp}$ 和向前能量 $E_F$ 之间的反关联,形成了明显对照。综合所述,从 $E_{\perp}$ 、 $E_F$ 和 $M$ 的数值可确定相应的碰撞参数,即大 $E_{\perp}$ 、大 $M$ 和小 $E_F$ ,对应小的碰撞参数和激烈的碰撞。

### 3. 原子核透明性

微分截面 $d\sigma/dE_{\perp}$ 对横能量 $E_{\perp}$ 的关系表示在图7中。图7a是取自于BNL 14.5 GeV/A的 $^{28}\text{Si}$ 对从Al到Au的靶核。对于比Ag重的靶核, $E_{\perp}$ 的最大值不再增加,达到了饱和,靶核厚度效应消失,这意味着质量大于Ag的原子核是黑的,全吸收,即入射粒子在经过几次碰撞之后完全损失了能量而在靶核内减慢下来,即称为停止,动能充分转化为热能。图7b是CERN的关于 $E_{\perp}$ 分布的实验,200GeV/A的 $^{16}\text{O}$ 对从Al到Au的靶核碰撞。情况与BNL能区完全不同,横能量的最大值随靶核质量的增加而单调地增加,没有达到饱和,故称靶核是灰的,即尽管经过多次碰撞,入射核子仍留有足够的能量穿过,谓之透明,部份停止,即动能部份地转化为热能。这意味着中心区的重子密度非常低。

以上两个实验室能区的能量密度,粗略估算为几个 $\text{GeV}/\text{fm}^3$ ,达到了夸克相变的数值。

## 四、夸克胶子等离子体形成的信号

为了证实高能重离子碰撞中有夸克胶子等离子体(QGP)产生,关键是要探测标识QGP存在的信号。对于干净可靠的信号,一方面它应是在QGP产生后很快就从QGP中逸出,而不再在其中发生进一步的相互作用,这就要求产生有关信号的截面要适当使其有大的平均自由程;另一方面它应能从背景中分辨出来,要认真分析来自强子过程产生的类似末态,以保证来自QGP的信号不受来自强子过程类似末态—背景的严重干扰。

### 1. 直接产生的横动量光子和轻子对

光子和轻子对,可以从QGP存在的整个过程中产生和飞出来,不再参与演化。故它们还可以反映QGP各个时期的特征。由于纵向有来自于实验室系和质心系 Lorentz 变

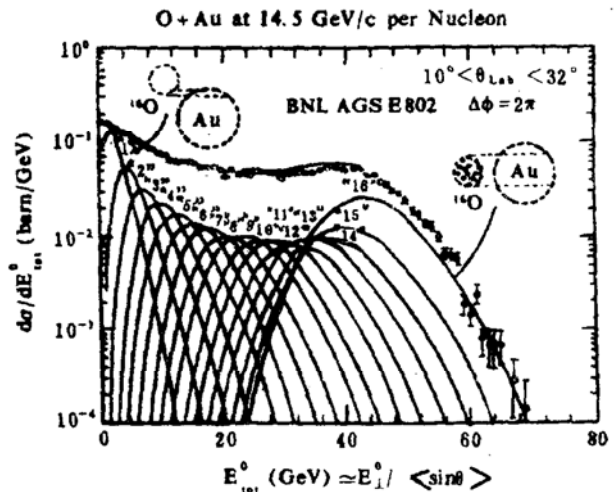


图5 大角度内的横能量流的典型例图

换的增、减,即在实验室系观测到向前能量增强和向后能量减弱。而横动量分布 $P_{\perp}$ 具有 Lorentz 不变性,故实验上要观测和分析横动量光子,以确定是否有QGP产生。同时多粒子产生过程中也会产生光子,要扣除这些本底看有无多余的直接光子。应对比和分析

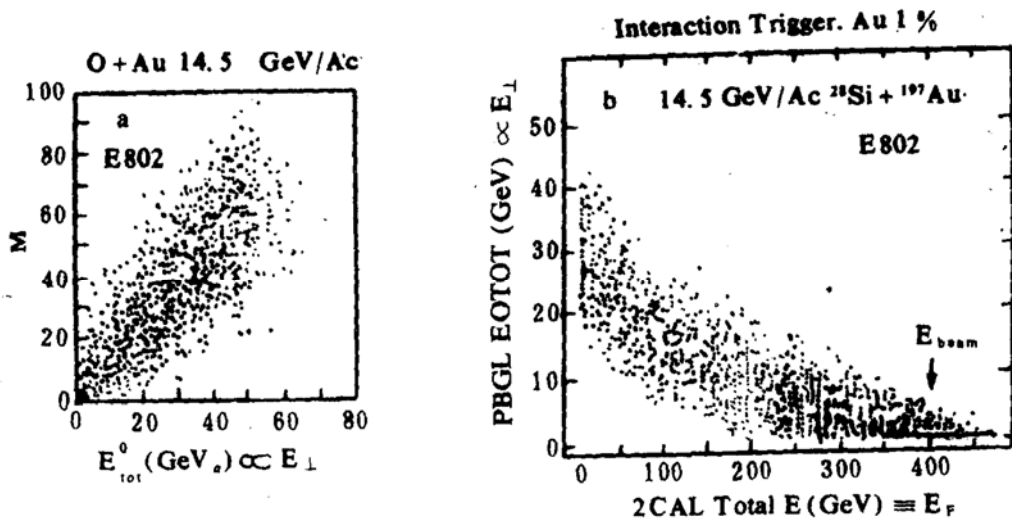


图6 a. 横能量  $E_{\perp}$  与带电粒子多重性间的关联, b. 横能  $E_{\perp}$  与向前能量的关联

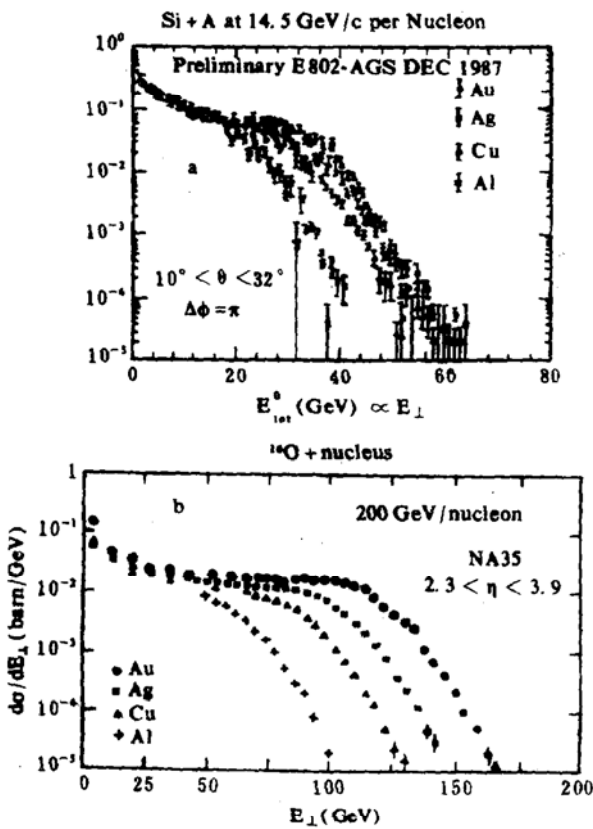


图7

P+P, P+A 及 A+A 过程中产生的光子以及观察多余的轻子对。因为轻子对的不变质

量  $M_{e^+e^-}$  和 QGP 的温度  $T$  相对应, 从轻子的横动量分布在不同横动量区域中的斜率, 可确定不同的反应和区域的温度  $T$ 。现有的实验观察到了多余的光子产生, 表明有可能产生了 QGP。但是由于产生光子的本底很复杂, 还不能判定确有 QGP 出现过。

## 2. 奇异粒子相对产额的增加

在 QGP 中由于 pauli 不相容原理, 已有大量的  $u, d$  夸克限制了新的  $u\bar{u}$  和  $d\bar{d}$  对的产生, 但对于  $s\bar{s}$  对的产生没有这种限制, 故在 QGP 中存在着大量的  $u, d$  夸克, 而  $\bar{u}, \bar{d}$  和  $s, \bar{s}$  的量较少, 故在强子化过程中, 由  $\bar{s}$  和  $u$  形成  $K^+$  介子容易, 而由  $s$  和  $\bar{u}$  形成  $K^-$  介子难, 故希望  $K^+/\pi^+$  和  $K^-/\pi^-$  与 P-P 碰撞相比有所增加, 而  $K^+/\pi^+$  则增加得更明显。BNL 关于  $K^+/\pi^+, K^-/\pi^-$  随  $P_{\perp}$  分布的实验结果表明,  $K^+/\pi^+$  和  $K^-/\pi^-$  随  $P_{\perp}$  的增加而增加, 与核子-核子碰撞明显不同, 而且  $K^+/\pi^+$  比  $K^-/\pi^-$  大。其各种比值如表 1 所示。这样, 从实验和理论上都预示了 QGP 产生的可能性, 但现在的关键是不产生 QGP 时, 核-核碰撞是否也有可能产生这种增长 (比较核子-核子碰撞); 在核-核碰撞中, 由于大量次级碰撞会提高

$K^+$  的相对产额, 目前各人由于计算中采取的近似不同, 所得结果和结论也不尽相同。关键是 QGP 的形成时间和次级碰撞次数有多大? 如何将 QGP 和强子物质产生的  $K^+/\pi^+$  的增长区分开来。

表 1

	Si+Au	N+N
$K^+/\pi^+$	(24±5)%	5-10%
$K^-/\pi^-$	4%	3-5%

### 3. J/ψ 产额的压低

在相对论重离子碰撞中, 周边碰撞区 (对应大的碰撞参数) 横能量  $E_{\perp}$  小, 由于夸克禁闭而形成  $J/\psi = c\bar{c}$  夸克的束缚态。在中心碰撞区 (对应小碰撞参数) 的横能量大, 由于夸克退禁闭  $J/\psi \approx (c\bar{c})$  的夸克分开, 不再形成  $J/\psi$ , 从而使  $J/\psi$  的产额与周边碰撞区的  $J/\psi$  产额相比有所降低; CERN 的 NA38 利用 20 GeV/A 的 C 束流进行了  $^{16}\text{O} + ^{238}\text{U}$  实验, 分别测量到了中心碰撞 ( $E_{\perp} > 50\text{GeV}$ ) 和周边碰撞 ( $E_{\perp} < 28\text{GeV}$ ) 的  $J/\psi$  产额对连续  $J/\psi$  产额之比  $N_{\phi}/N_c$ , 即:

$$N_{\phi}/N_c = \begin{cases} 9.3 \pm 0.6 & (\text{周边碰撞}) \\ 5.9 \pm 0.4 & (\text{中心碰撞}) \end{cases}$$

可以看出, 高  $E_{\perp}$  的  $J/\psi$  产额与小  $E_{\perp}$  的  $J/\psi$  产额相比, 有明显的压低,  $E_{\perp}$  大则能量密度大, 当  $\varepsilon \sim E_{\perp}/V$ , 有可能出现 QGP 相变。同时,  $J/\psi$  产额压低现象是随  $\varepsilon$  的增加而增大, 这时更有可能产生 QGP。

但是还应注意, 强子与核碰撞也同样看到了  $J/\psi$  压低, 如何区别 QGP 和强子—原子核碰撞两种过程所产生的  $J/\psi$  压低, 是正确判断产生 QGP 所要研究解决的主要问题。

### 4. 强子发射区域膨胀大于入射核的大小 ( $\pi\pi$ 关联)

观察两个动量  $P_1, P_2$  从两个相近点  $r_1, r_2$

发射的两个  $\pi$  介子, 其相应的发射时间为  $t_1$  和  $t_2$ , 由玻色统计和平面波近似又观察到相同介子的几率为

$$P = \frac{1}{2} | e^{-i\vec{P}_1 \cdot \vec{r}_1 + iE_1 t_1} e^{-i\vec{P}_2 \cdot \vec{r}_2 + iE_2 t_2} + e^{-i\vec{P}_1 \cdot \vec{r}_2 + iE_1 t_2} e^{-i\vec{P}_2 \cdot \vec{r}_1 + iE_2 t_1} |^2 = 1 + \cos(\vec{q} \cdot \vec{r} - \Delta E \tau)$$

其中  $\vec{q} = \vec{p}_2 - \vec{p}_1, \vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1, \Delta E = E_2 - E_1, \tau = t_2 - t_1$ 。实际上发射源是一个有限区域, 如果源区域呈现出 Gauss 型  $e^{-r^2/R^2}$ , 则发射几率为  $P = 1 + e^{-q^2 R^2 / 2 - (\Delta E)^2 \tau^2 / 2}$ 。把发射源的纵向和横向分布分开并考虑平均效果, 则有:  $P(q_{\perp}, q_{\parallel}) = 1 + \lambda e^{-q_{\perp}^2 R_{\perp}^2 / 2 - q_{\parallel}^2 R_{\parallel}^2 / 2}$ 。通过测量相同介子的动量关联, 可确定参数  $\lambda, R_{\perp}$  和  $R_{\parallel}$  所反映的发射源的大小。进一步更细致地把  $R_{\perp}$  再分为两个互相垂直的两个方向, 束流方向为  $R_{\perp}$ , 介子射出方向为 (X 方向)  $R_{\perp, \text{out}}$ , 与之垂直的方向为 (Y 方向)  $R_{\perp, \text{side}}$ ; CERN NA35 所作 200 GeV/A  $^{16}\text{O} + \text{Au}$  的测量结果, 见表 2。对于  $^{16}\text{O}$ ,  $R_{16} \cong 3\text{fm}$ , 在中心区膨胀特别明显,  $R_{\perp} > R_{16}, R_{\perp, \text{out}} > R_{16}$ ; 横向反映膨胀, 则横向线度放大因子  $R_{\perp, \text{side}}/R_{16} = 2.2 \pm 0.6, R_{\perp, \text{out}}/R_{16} = 3.73 \pm 0.77$ 。实验上确实观察到了  $P(q_{\perp})$  随  $q_{\perp}$  的相干现象, 横向膨胀表明  $\pi\pi$  来自于碰撞的冷的膨胀区。

表 2

快变区	$R_{\perp}$ (fm)	$R_{\parallel}$ (fm)	$\lambda$
1 < y < 2	4.3 ± 0.6	2.6 ± 0.6	0.34 <sup>+0.09</sup> <sub>-0.06</sub>
小快变区	$R_{\perp, \text{side}} = 4.0 \pm 1.0\text{fm}$ $R_{\perp, \text{out}} = 4.4 \pm 1.0\text{fm}$		
2 < y < 3	8.1 ± 1.6	5.6 <sup>+1.2</sup> <sub>-0.8</sub>	0.77 ± 0.19
大快变区 (中心区)	$R_{\perp, \text{side}} = 6.6 \pm 1.8\text{fm}$ $R_{\perp, \text{out}} = 11.2 \pm 2.3\text{fm}$		

要注意  $\pi^-$  介子末态相互作用大, 容易受次级碰撞干扰; 进一步作  $K^+K^+$  干涉 (因  $K^+$  是介子中平均自由程最长的粒子), 可以大大降低实验本底。

### 5. 大横能量密度和大量次级粒子产生 QGP 产生时会具有很高的能量密度和



强子化时具有很高多重性,反映了横能量和多重性随快度  $y$  分布  $\frac{dE_T}{dy}$  及  $\frac{dm}{dy}$  都很大,因  $m$  和  $E_T$  成正比,故关键是测量  $E_T$ 。CERN 作了  $P_T = 200 \text{ GeV}/c$  的  $^{32}\text{S} + \text{W}$  实验,用 Bjorken 公式分析(参看第三节)得出能量密度  $\varepsilon = 3 \text{ GeV}/\text{fm}^3$ ,已达到了产生 QGP 的理论估计值,但不能判断是否真正产生了 QGP。

## 6. 产生奇异态

如果夸克物质由  $u, d$  组成, $u, d$  夸克的费米动量为  $P_F(u, d) \approx 3^{1/3} (\frac{\rho}{\rho_0})^{1/3} p_0$ , 其中  $P_0$  是质子或中子在核内的费米动量,  $p_0 \approx 260 \text{ MeV}/c$ , 如夸克气体密度是正常核的 5 倍,  $P_F(u, d) \approx 640 \text{ MeV}/c$ , 由于  $m_u \approx m_d \approx 0, E_F(u, d) \approx 640 \text{ MeV} \gg m_s$ , 因此增加一个  $s$  夸克比增加一个  $u$  或  $d$  夸克更合算。多夸克体系最稳定的比例  $u:d:s = 1:1:0.8$ , 如果这样比例的多夸克系统构成色单态,就可能独立存在,并且稳定,通称它为奇异态(strangelet)。奇异态的特点是平均电荷小,奇异数的数值大和稳定度高,接近这个比例的最轻奇异态为  $H = (uuddss)$ , 如果在重离子碰撞中产生了 QGP, 则在 QGP 中有可能产生大量的奇异态  $H$ 。但这仅是理论上的预测,高能重离子碰撞实验中还未找到奇异态  $H$  的存在,有待进一步创造条件、在实验中去证实。

综合以上所述,根据理论估算,现在 BNL 和 CERN 的高能重离子束,如  $14.5 \text{ GeV}/A$  的  $^{16}\text{O}, ^{28}\text{Si}$  和  $60 - 200 \text{ GeV}/A$  的  $^{16}\text{O}, ^{32}\text{S}$ , 均已达到产生 QGP 相变的临界条件,并探测到了可能产生 QGP 的标识信号。但由于在相变条件及标识信号的理论计算中:诸如核子—核子碰撞的集体效应,能量损失和次级碰撞,对末态强子与核碰撞产生的信号本底的区分和扣除,对重离子碰撞时空演化过程的了解和判别等,都采取了各种不同程度的近似。所以,目前只能说,对于从强子到

QGP 相变及其基本特征,以及可能的标识信号,是有了一定的认识;对于夸克物质则尚处在感性认识阶段,其相变的性质和机理还不十分清楚。换言之,就是虽已探测到了产生 QGP 可能的标识信号,但仍不能判定 QGP 确实存在。

为此,进一步从理论和实验的结合上,作更为深入细致的研究工作是非常必要的。理论上要进一步完善各种计算,弄清和解决各种近似计算带来的误差。特别要对相变的机理和性质作深入研究,进而建立在夸克层次上的强相互作用物质的物态方程。为弄清这些问题,还需要引入新的研究思想和有力的计算方法。目前,对 QGP 非平衡态过程还只处在建立理论框架阶段,对其中可能发生的非平衡态物理现象了解甚少,对非平衡态相变更未触及。这些,都需要作进一步的仔细研究。随着理论研究的深入,实验上要进行退禁闭相变条件和鉴别 QGP 标识信号的更为精密的确证实验。特别是要创造条件,进行更重离子和更高能量的高能重离子碰撞实验,如 BNL 拟在 RHIC 上的  $100 \text{ GeV}/A$   $\text{Au} + \text{Au}$  和  $\text{Pb} + \text{Pb}$  的对撞实验,它是产生 QGP 的理想条件。

## 参考文献

- (1) S. Nagamiya, Nucl. Phys. A488 (1988) 3c — 30c
- (2) Proceedings of the CCAST (World Laboratory) Symposium / Workshop on Relativistic Heavy Ion Collisions (1989) Edited by C. Hwa, Chong — shou Gao and Ming — han Ye
- (3) 李家荣 夸克物质理论导论(书)(1989)