

高能重离子物理进展与展望

赵维勤

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)

摘要 介绍了高能重离子碰撞物理的基本概念, 指出这一领域的中心课题是研究实现夸克-胶子等离子体(QGP)相变的条件. 文章综述了对各种可能的 QGP 相变信号的理论分析及实验探测的最新进展, 并展望了该领域实验与理论研究发展的未来前景.

关键词 高能重离子碰撞物理, 夸克-胶子等离子体(QGP), 相变信号

1 高能重离子物理概貌

自从夸克、胶子的概念为人们所接受, 科学

家就在努力寻找自由的夸克与胶子. 但是, 迄今为止, 不论在自然界或通过实验手段都没有成功. 它们一直被牢牢地禁闭在每个强子“口袋”中, 不能自由存在.

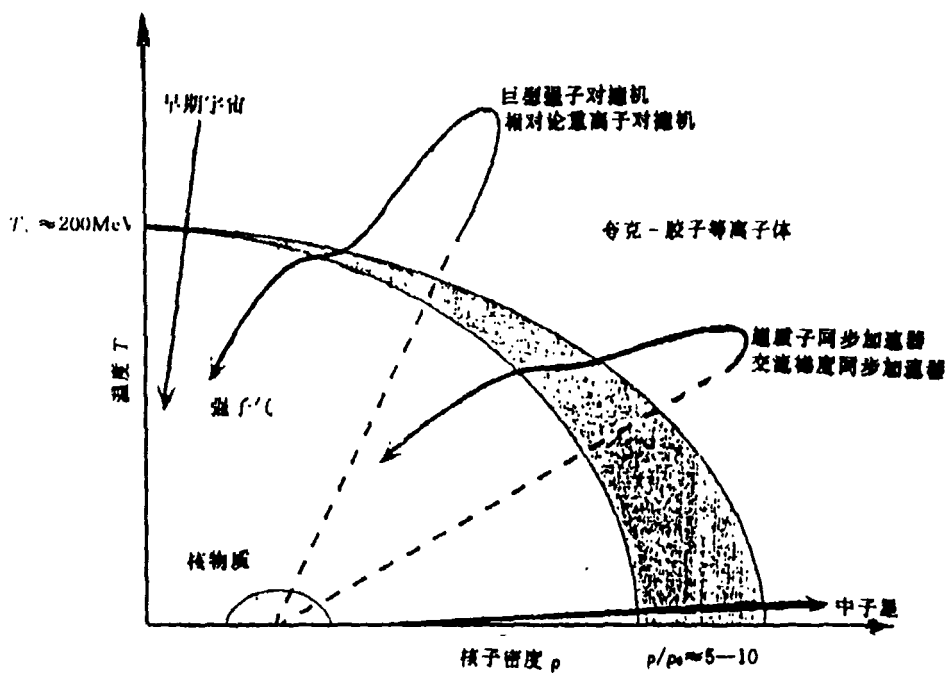


图1 相图

• 1995年6月16日收到初稿, 1995年8月21日收到修改稿.

有什么办法能让夸克冲破强子的禁闭呢?如果不能得到单个的夸克和胶子,至少设法让它们能在一个比单个强子更大的空间范围内运动.我们知道,地球上各种原子核内的核子的密度几乎是一个常数: $\rho_0 \sim 0.14$ 核子/ fm^3 ($1\text{fm} = 10^{-13}\text{cm}$).这相当于核子间的距离,约为 $d \sim 1.9\text{fm}$.由于核子的半径约为 0.8fm ,所以在原子核中的核子口袋是相互分开的,组成每个核子的夸克被禁闭在各自的核子口袋中运动.这个状态相当于图 1 中横轴上小半圆的位置.要打破强子口袋的束缚,有两个可能的途径:一种途径是,设想将强子物质压缩,增大核子密度,使强子口袋相互重叠而破裂.这样,夸克和胶子就可以在较大的空间范围内自由运动,形成一种新的、由许多自由的夸克和胶子组成的状态.这相应于在图 1 中从小半圆沿横轴向右,越过圆弧带标志的临界值,进入一种全新状态的途径.另一种方法是,设想将系统加热,从真空中产生许多正、反夸克对组成的介子.它们互相重叠、碎裂,也会形成许多夸克和胶子在较大范围内运动的状态.这相应于图 1 中沿纵轴向上越过临界值的途径.

让我们来粗略估计一下这种变化发生的条件.核子的质量大约为 930MeV .普通原子核物质由许多核子构成,密度约为 $\rho_0 \sim 0.14$ 核子/ fm^3 .因此,核物质的能量密度约为 $\epsilon = 930\text{MeV} \times 0.14/\text{fm}^3 \sim 130\text{MeV}/\text{fm}^3$;而每个核子的体积 $V_N = 4\pi/3(0.8\text{fm})^3$,因而单个核子内部的能量密度约为 $\epsilon_N = 930\text{MeV}/V_N \sim 440\text{MeV}/\text{fm}^3$.要使核物质中的核子口袋发生碎裂,至少要将它的能量密度增大到与每个核子内部的一样,因而至少要将核物质压缩 $\epsilon_N/\epsilon \sim 3-4$ 倍;或将它加热到数百 MeV 的高温 ($1\text{MeV} \sim 10^{10}$ 度).在这样的条件下,能量密度超过了某个临界值,强子物质内的夸克和胶子将摆脱个别强子的束缚,在一个较大的、能量密度很高的空间范围内运动.理论物理学家在格点规范理论的框架下,经过繁杂的计算,也预言了这样一种物质状态的突变,并称之为从强子物质到“夸克胶子等离

子体 (quark gluon plasma, 简称 QGP)”的相变.有趣的是,尽管前面所作的估算十分粗糙,但它与复杂的格点规范理论预言的实现“相变”的条件却十分接近.

自然界中是否有 QGP 存在的条件呢?宇宙学和天体物理的研究都指出了这种可能性.按照宇宙学的理论,我们的宇宙是在一次巨大的爆炸 (big bang) 后形成的.在大爆炸后的极短时间内 ($< 10^{-5}\text{s}$),温度远高于 QGP 的相变温度,完全有可能存在过 QGP 相.当宇宙不断膨胀,温度逐渐下降,经过 QGP 到强子物质的相变温度后,宇宙中的强子物质才得以形成.另一方面,天体物理的研究发现,在宇宙中存在一种完全由中子构成的星体——中子星.它的核心的密度远大于理论估算的实现 QGP 相变的物质密度,足以破坏单个的强子口袋,而可能形成 QGP 相.可惜,大爆炸发生在很久以前,距今约一百亿年,而中子星又距地球非常遥远,人们很难对它们进行细致的研究.因此,人们非常希望通过实验室手段来实现向 QGP 相转变的条件.

随着加速器技术的不断发展,人们自然想到,将重离子加速到极高能量,使之相撞,有可能在较大的空间范围内达到足够高的温度和重子数密度,以实现向 QGP 相的转变.正是这个想法推动了极高能量的相对论重离子加速器的建造,促进了高能重离子物理研究的发展.象其他粒子加速器一样,高能重离子加速器分为两类:一类是固定靶加速器,它将靶原子核在实验室系中固定,将重离子束加速后,轰击靶核,实现高能重离子碰撞;另一类是将两束重离子分别加速后,使它们对撞.对于同样能量的离子束,对撞机能达到高得多的质心系能量.但是,要实现两束重离子的对撞,技术上难度较大,束流的强度也比固定靶加速器弱得多.

高能重离子碰撞的研究始于 80 年代.80 年代初,国际上有几台相对论重离子加速器陆续投入运转.美国伯克利实验室 (Berkeley) 的 Bevalac, 法国萨克莱 (Saclay) 的 Saturne I 与

前苏联杜布纳(Dubna)的 Synchrophasotron 都能将很重的离子束加速到实验室系中每核子几个 GeV ($1\text{GeV} = 10^9\text{eV}$) 的能量, 进行固定靶的重离子碰撞. 虽然它们都能加速很重的离子, 但是入射能量不够高, 不足以提供形成 QGP 所需要的能量密度.

瑞士欧洲核子中心(CERN)的交叉储存环(ISR)能将 α 粒子加速到每核子质心系能量 15GeV , 这相当于固定靶实验中入射核子大约 450GeV 的能量. 虽然入射能量够高了, 但所加速的离子太轻, 亦不能满足研究 QGP 的需要.

宇宙线实验中的重离子碰撞事例涉及相当重的核, 能量也足够高. 可惜事例数很少, 达不到可信的统计结果. 加之入射核的能量、种类无法准确确定, 也使分析的可靠性受到限制.

1982年在德国的比勒弗尔德(Bielefeld), 1983年在美国的布鲁克海文(Brookhaven)国家实验室(BNL)分别召开了一次国际会议. 在会上, 一方面从理论上预言了在一定能量密度下实现 QGP 相变的可能性, 并提出可以用相对论重离子碰撞来实现所需要的能量密度; 另一方面, 在总结当时相对论重离子碰撞实验现况的基础上, 与会者积极呼吁建造新的极端相对论能区(每个核子几十到几百 GeV 能量)的重离子加速器. 经过数年的努力, 终于使两台新的极端相对论能量的重离子加速器于 1986 年投入运转.

这两台极端相对论能量的重离子加速器分别是瑞士 CERN 的 SPS (super proton synchrotron) 与美国 BNL 的 AGS (alternating gradient synchrotron). 1986—1987 年, BNL 的 AGS 将氧(^{16}O)与硅(^{28}Si)离子加速到实验室系每核子 14.6GeV (记为 $14.6\text{GeV}/N$ 或 $14.6A\cdot\text{GeV}$) 的能量; CERN 的 SPS 将氧(^{16}O)与硫(^{32}S)离子加速到实验室系每核子 200GeV 的能量. 这些离子与各种固定靶发生碰撞. 最近, AGS 又实现了对金(^{197}Au)离子的加速 ($\sim 10\text{GeV}/N$); SPS 也开始对铅(^{208}Pb)离子加速 ($\sim 170\text{GeV}/N$). 这两台加速器运转以来, 不

断取得实验结果. 随着实验与理论工作的进展, 目前国际上已形成一支有上千人参加的高能重离子碰撞的物理研究队伍. 他们中既有核物理学家, 也有基本粒子物理学家. 这项研究已形成了一个很有前途的粒子物理与核物理的交叉领域. 在一到两年召开一次的夸克物质(quark matter)国际会议上, 都要专门讨论这一领域的研究成果. 会议集都发表于 Nucl. Phys. 杂志上. 会议的规模和物理学家对这一会议兴趣的不断增长反映了这一领域的迅速发展和未来前景.

2 相变条件的分析

相对论重离子碰撞是否能达到实现 QGP 相变的条件呢? 关键的问题是, 要在相当大的空间范围内达到足够高的能量密度, 并且系统在冷却到相变温度之前必须有足够长的时间, 以实现平衡的状态. 下面分析几个影响系统能量密度的因素.

2.1 碰撞中心性选择

为了找到在相对论重离子碰撞中形成 QGP 的最有利条件, 人们希望选择激烈碰撞的事例, 有尽可能多的能量储存在碰撞区. 如果我们引入碰撞的几何图像, 如图 2 所示. 两个核相撞时, 定义它们的质心间垂直于束流方向的距离为碰撞参数 b . 图中阴影部分所示的两个核相撞时重叠的区域发生了激烈的相互作用. 这个区域内的核子被强烈地激发, 称为“参加者”核子; 其余部分的核子称为“旁观者”, 它们几乎不参加作用. 显然, 接近对心碰撞 ($b=0$) 时, 有较多的核子参与激烈的相互作用, 就能在较大范围内形成高温、高密度区域, 从而有利于 QGP 的形成. 有三个实验观测量经常用来确定碰撞的对心程度. 一是碰撞中产生的粒子数目 n , 称为多重数; 另一个是描述碰撞中系统在垂直于束流方向上的激发程度的量——横能 E_T . 实验结果显示, n (或 E_T) 越大, 说明参加碰撞的核子越多, 碰撞的中心性也越高. 第三个观测量

物理

是“零度能” E_{z0} ,表示在朝前方向 $\theta < 0.3^\circ$ 角内测量到的能量.它代表旁观者核子带走的能量.因此, E_{z0} 越小,则旁观者核子越少,碰撞的中心

性也越高.这样,选择大的 n (或 E_T),或小的 E_{z0} 的事例都能挑选出有利于QGP产生的中心碰撞事例.

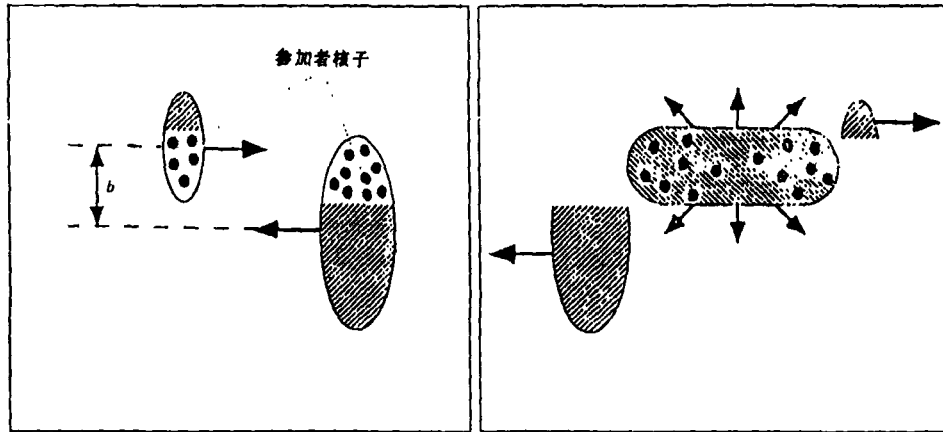


图2 碰撞的几何图象

2.2 能量损失与停止能力

为了形成高温高密度的区域,需要将参加者核子所带的能量尽可能储存在碰撞区内.如果相撞核很“透明”,每个参加碰撞的核子虽然与多个核子相撞,它所带的能量只有一小部分留在碰撞区,相当大部分仍以“带头粒子”的形式被带走.这样,即使有许多核子参加了碰撞,在碰撞区仍不可能达到足够高的能量密度.因此,除不断提高束流的能量外,还有必要研究相撞核的透明度与入射能量之间的关系.

比较BNL与CERN两处的实验结果,人们发现一个有趣的现象.在能量较低的BNL能区(14.5GeV/N),用 ^{16}O 与 ^{197}Au 对心碰撞时,由于金靶要重得多,氧的16个核子全都是受到激烈相互作用的参加者核子.在朝前方向测量零度能(E_{z0})时发现,大部分事例 $E_{z0}=0$,即经过碰撞后入射核所有核子带的全部入射能量都被停止,并储存在碰撞区内.靶核就象一个“黑”的吸收体.因此,在碰撞区形成了重子数密度很高的激发区域.如果达到的能量密度足够高,就有可能形成丰重子数的QGP相.

但是,当能量上升到 $\sim 200\text{GeV/N}$ (CERN能区)时, ^{16}O 与重靶发生对心碰撞后,尽管全

部16个核子都是参加者核子,测得的朝前的零度能却不为零.这时,靶核成了“灰”的,它不能停止住全部入射能量,因此测得的零度能不会为零.如果入射能量再升高,靶核所能停止的能量只占入射核子能量的少部分,所有的入射核子都带着相当部分的入射能量穿过碰撞区飞走,留下的则是一个高度激发的、有大量新产生的介子的碰撞区域.这个区域中没有核子,因而纯重子数为零,就象是真空受到激发.这时,可能形成的是纯重子数为零的QGP相.我们知道,真空是不是有结构,高温下它的性质会怎样变化,一直是科学家们非常关心的问题.这种重子数为零的高度激发的中心区,提供了用实验手段研究真空性质变化的可能性.

上面的分析表明,尽管提高入射能量有利于产生高的能量密度,但由于靶的透明度不同,停止能力随入射能量上升而下降,实际储存在碰撞区内的能量增长得并不快.比如,理论估算表明,CERN的重离子入射能量尽管比BNL能区上升了一个量级,由于靶透明度的不同,二者所得的能量密度都大约是几 GeV/fm^3 .幸运的是,这个数值恰与理论家预言QGP形成的能量密度相符.因此,两处都在努力寻找QGP

存在的信息.

2.3 源的大小与 π 干涉(π -interferometry) 分析

为了比较准确地估计系统所达到的能量密度,需要从实验数据中获取关于系统体积的信息.

1954年, Hanbury, Brown 和 Twiss (HBT) 基于全同玻色子间的玻色-爱因斯坦(Bose-Einstein, B-E) 关联效应, 用两个光子间的动量关联测量遥远的双星系的大小. 近年来, 人们将 HBT 方法应用于相对论重离子碰撞过程中, 用系统发射的全同 π 介子之间的动量关联, 来测量发射源的大小. 如果发射源是高斯分布, 则全同 π 介子动量关联分布的密度将反比于源的半径. 当然, 动量关联测得的是粒子间停止相互作用时(freeze out)系统的大小.

分析结果显示, 所测得的系统半径比碰撞核重叠部分的半径大得多. 这显示系统有明显的膨胀. 由于夸克-胶子相的自由度数目远高于强子相, 而系统的熵密度又正比于其自由度数目, 当系统从 QGP 相回到强子相时, 为保持其熵的增加, 就需要用突然的膨胀来补偿其熵密度(即自由度数)的减少. 因此, 系统的突然膨胀就有可能是系统从 QGP 相回到强子相的一个信号. 当然, 还需要定量的分析才能对此有最终的结论.

3 如何探测夸克-胶子等离子体的存在?

上面的分析说明, 相对论重离子碰撞有可能达到实现 QGP 相变的条件. 但是, 如何用实验手段确认 QGP 的存在呢? 在相对论重离子碰撞中, QGP 即使形成了, 也只在碰撞后存在极短的瞬间. 随着系统的膨胀与冷却, 它很快就演化为实验室观测的各种末态粒子. 最初存在的信息也在这个过程中由于各种末态相互作用而变得不清晰了. 因此, 只能从这些末态粒子的行为来寻找对 QGP 存在的记忆. 这类信息既要便于测量, 又要可靠. 即使实验上找到了可能

与 QGP 存在有关的令人兴奋的新现象, 还需要谨慎地分析, 如果不形成 QGP, 是否也会存在类似的现象, 从而排除一切非 QGP 因素的干扰, 以得到确切的结论. 这类往往提供“负”结论的工作是艰巨而繁琐的, 却又是非常必要的.

到目前为止, 理论上已经预言了各种可能的 QGP 存在的信号; 实验家也在进行细致的测量, 寻找这些可能的信号.

3.1 奇异粒子产额的增加

一个可能的 QGP 存在的信号是, 末态粒子中奇异粒子的产额增加. 我们知道, 中子、质子和许多常见的介子是由 u, d 两类夸克和相应的反夸克 \bar{u}, \bar{d} 构成的. 第三种较重的夸克是 s 夸克(奇异夸克). 含有奇异夸克的强子叫做奇异粒子. 最常见的奇异介子是 K 介子(由 $u\bar{s}, d\bar{s}$ 或 $\bar{u}s, \bar{d}s$ 构成). 最常见的奇异重子是 Λ 重子(由 uds 构成). 在强子相, 奇异粒子的产生阈能是同带奇异数的强子的质量相联系的, 至少需要约 700MeV ; 而在 QGP 相, 奇异夸克对的产生阈能则决定于一对奇异夸克的质量($2m_s \sim 300\text{MeV}$). 显然, 在 QGP 相中产生奇异夸克对比在强子相产生奇异强子容易得多.

还有一个引起奇异粒子产额增加的原因, 在理论上称为“手征(chiral)对称的恢复”. 在通常情况下, 奇异夸克比 u, d 夸克重得多($m_{u,d} \sim$ 几 MeV , $m_s \sim 200\text{MeV}$). 要生成一对正反奇异夸克对所需的能量比生成一对正反 u 或 d 夸克高得多. 这种夸克质量的差别被称为手征对称的自发破缺. 但是, 当能量密度超过某个临界值时, 理论预言可能存在一种使手征对称恢复的相变, 从而使 s 夸克的质量变得与 u, d 夸克相近. 这样, 产生正反 s 夸克对所需的能量明显降低, 从而使奇异粒子的产额进一步增加.

基于以上的理论预言, 实验家们试图寻找奇异粒子产额增加的实验证据. BNL 的一个实验组用谱仪和粒子飞行时间的测量能把动量小于 $2\text{GeV}/c$ 的各种带电粒子清晰地区分开来. 由此测得在相对论重离子中心碰撞中 K^+/π^+ 产额的比值达到 $\sim 20\%$. 这个数值比相应能量下

质子-质子(p-p)碰撞中的值($\sim 5\%$)大得多.之后,CERN的实验组更仔细测量了各种奇异粒子,如: K, Λ, Σ, Ξ 和它们的反粒子的绝对产额,也发现了在**高能重离子中心碰撞**中奇异粒子产额明显增加.这些都是对上述理论预言的支持.

在BNL的AGS能区,当两个重核对心碰撞时,由于绝大部分碰撞核子被完全停止,在碰撞中心区将形成一个高重子数密度的激发系统.如果形成了丰重子数的QGP状态,奇异夸克和反夸克的数目都会有额外的增长.这个系统强子化后,有可能形成较重的超核、反核和其他奇特状态.因此,实验家设计了专门的探测器,对这些奇特态进行探测.到目前为止,已经对各种奇异基本粒子和 \bar{p}, \bar{d} 等轻的反物质进行了初步测量.预计不久将对其他更重的超核、反物质进行探测,从而为核物理研究开辟一个新的领域.另一方面,如果体系处于退禁闭状态,则有可能形成包含较多奇异夸克的奇异物质(strangelet).理论家也正在用推广的口袋模型讨论它的性质.

总之,与奇异粒子有关的现象是相对论重离子物理的一个重要研究方面.这些研究工作不仅扩大了核物理的研究领域,而且同宇宙学、天体物理有着密切的关系.在目前运转的和将要建成的相对论重离子加速器上,这方面的研究都受到极大的重视.

3.2 QGP的电磁信号

在相对论重离子碰撞的最初阶段所发射的电磁信号,比如直接光子和双轻子对(dilepton)都携带着系统早期行为的信息.由于电磁作用比较弱,它们所带的信息较少受末态相互作用的扭曲.并且,人们对电磁作用了解清楚,因此,期望对电磁信号的分析能提供有关系统QGP相变的信息.但是,强子相中产生光子和轻子的机制很复杂,给清除实验本底带来很大困难.实验家经过大量艰苦细致的分析,才获得一些初步的结果.

在今年1月份召开的Quark Matter '95国

际会议上,报告了CERN的三个实验组(NA45,WA80,NA38)测得的双轻子产额.发现在双轻子不变质量不太高的区域($m < 2.5\text{GeV}/c^2$),这一产额明显高于用强子相各种产生机制计算的产额总和.如果假定系统在碰撞后将经历QGP相或QGP与强子的混合相,最后回到强子相,就能够得到与实验相符的双轻子产额的不变质量谱.当然,这一分析在理论与实验两方面都还有相当的不确定性.

而对直接光子产生,由于强子相产生的本底光子的干扰,实验分析很困难,目前的实验结果也很不一致.如果相信WA80实验组得到的直接光子产额有额外增长的结果,几个理论组的工作都显示有必要引入QGP相或混合相才能解释实验数据.这方面的理论和实验工作都相当困难,目前仍在继续,估计在近几年内将可能有比较确定的结果.

3.3 重夸克偶素(heavy quarkonia)产额的变化

在**高能重离子碰撞**之后所形成的高度激发的体系中,是否形成了退禁闭的高密度的夸克-胶子系统,是检验QGP是否存在的关键.为此,必须找到满足如下条件的探针:首先,在退禁闭的夸克-胶子体系中,长程的禁闭作用受到了屏蔽,因此,所选择的探针要足够的“硬”,即具有足够大的动量转移,以探测退禁闭状态中的短程作用;其次,它必须能区分被探测的夸克是处于禁闭还是退禁闭的状态;最后,它要尽量少受末态相互作用的干扰.

目前,国际上有很多理论物理学家对这一问题感兴趣,其中一部分人最近成立了一个“硬探针合作组”(hard probe collab.),准备对重夸克偶素、喷注、高能光子和双轻子等各种硬探针在重离子碰撞中的作用进行系统的分析.

对重夸克偶素产额变化的实验和理论研究已经开展了几年,并取得了一定成果.重夸克偶素是由一对正反重夸克构成的介子共振态.比如 J/ψ 由 $c\bar{c}$ 构成, Υ 由 $b\bar{b}$ 构成.由于重夸克偶素质量大($m_c \sim 1.5\text{GeV}/c^2, m_b \sim 5\text{GeV}/c^2$),产

生重夸克偶素就都与硬过程相关,另一方面,理论家预言,在 QGP 中存在大量自由的夸克与胶子,正反重夸克对之间的引力作用将受到它们的屏蔽.重夸克可能更容易与邻近的 u 或 d 夸克形成带重夸克数的介子,而不再形成 J/ψ 或 γ.因此,在 QGP 中,J/ψ 或 γ 的产额比在真空中低.

为了验证这一理论的预言,CERN 的 NA38 实验组设计了一个实验,测量重离子碰撞后产生的 $\mu^+ \mu^-$ 对的质量谱.由于 J/ψ 粒子会衰变成一对 $\mu^+ \mu^-$,这一测量能定出碰撞后 J/ψ 粒子的产额.另一方面,横能(E_T)高的事例对应于中心碰撞.这些事例中参加碰撞的核子数目大,因而会在较大空间范围内形成较高的能量密度,有利于 QGP 的形成.NA38 组比较了不同横能的事例中 J/ψ 粒子的产额,的确发现横能高的事例中 J/ψ 粒子的产额低.按照 QGP 的存在会使 J/ψ 的产额压低的理论预言,这个实验事实似乎显示高 E_T 的事例中有存在 QGP 迹象,因而 J/ψ 的产额比较低.

这个实验是在理论预言的指导下进行的,又获得了与理论预言一致的结果,的确引起了重视.但是,实验结果显示,在 高能 h-A 碰撞中,J/ψ 的产额也会被压低.这时是不会形成 QGP 相的,因而 J/ψ 产额的压低可能是由于生成的 J/ψ 粒子同其他末态强子相互作用后离解造成的.在相对论重离子碰撞中,这个机制当然也会造成 J/ψ 产额的压低.并且由于在相对论重离子碰撞中强子密度高,这一效应还会加强.

上面两种对 J/ψ 产额压低的解释要求系统处于高密度状态.但究竟是高密度的 QGP 相的屏蔽作用,还是高密度的强子物质的离解吸收作用在相对论重离子碰撞中引起了 J/ψ 产额的压低,仅从上面的说明是无法判定的.为此,必须首先在 h-A 过程中对 J/ψ 产额压低的各种机制作全面、定量的分析,再看在相对论重离子碰撞中这些机制如何起作用,并确定是否需要引入新的机制.由于相对论重离子碰撞现象的复杂性,要找到明确可信的 QGP 存在的信

息的确不是一件容易的事.关于 J/ψ 产额压低机制的争论还在继续,实验的精确度也还有待提高.只有等待进一步的理论与实验工作的结果来最终作出判决.

除了上面分析的几种现象,理论上还预言了一些其他可能的 QGP 存在的信号.尽管由于测量的困难,有些信号还没有被实验数据所证实,但所有已经观测到的结果都是与 QGP 存在的假定不矛盾的.可惜的是,由于 QGP 相只可能在碰撞后存在极短的时间,其后的许多复杂的相互作用使原来的信号被模糊、减弱,甚至扭曲.其他作用造成的假象又会导致错误的判断.因此,到目前为止,没有一种理论预言的信号能够唯一地作为是否有 QGP 相在 高能重离子碰撞中存在的确定判据.现在看来,一些不引入 QGP 相的唯象模型在调节参数后能够解释每个个别的预言的 QGP 信号;但是要同时解释所有预言的 QGP 信号却是很困难的.因此,人们正试图在同一实验中同时观测尽可能多种预言的信号,以求得出 QGP 相存在的确定的结论.同时,人们还在努力寻找新的有明确产生机制,又不受末态干扰的 QGP 存在的信息.总之,从理论和实验两方面都还要做许多工作,才可望对 QGP 存在的信息得出确定的结论.

4 相对论重离子物理的未来展望

相对论重离子物理是一个新兴的研究领域.自 80 年代以来,特别是 1987 年两台相对论重离子加速器投入运转以来,吸引了物理学界的广泛的兴趣.

从实验方面看,自 1987 年以来,CERN 和 BNL 已有两台固定靶的相对论重离子加速器投入运转,并已经获得了许多有趣的结果.为了有更多的核子参加碰撞,激发更大的空间范围,这两台加速器已经实现了用更重的离子(如金或铅离子)入射的碰撞,第一批结果已经在今年 1 月份的 Quark Matter '95 会议上首次公布.

物理

今后几年内,在这方面还会不断获得新的结果.为了大幅度提高碰撞的能量,用对撞机进行相对论重离子碰撞也已提高到了议事日程.目前,BNL正在建造一台相对论重离子对撞机(RHIC),并将于1999年建成出束,开始物理工作.这台对撞机可以将金离子加速到极高能量后注入环状的对撞机,实现金离子的对撞(Au+Au),每对核子的质心系能量可达200GeV.这比目前正在运转的CERN的相对论重离子加速器的质心能量又提高了一个数量级.CERN也已决定建造一台巨型强子对撞机(LHC).它虽不是专门用于重离子物理研究的加速器,但将分出部分时间开展这方面的研究,预计2008年它将实现把铅离子(Pb+Pb)加速到每对核子质心系能量为5.5TeV,为高能重离子物理的研究打开新的一页.

在理论研究方面,主要开展以下工作:

首先,开展相对论重离子物理研究的主要目的是研究用相对论重离子碰撞形成QGP相变的可能性.因此,围绕QGP形成的条件、存在的信号等的研究一直是这一研究领域的中心议题.事实上,正是格点规范理论预言了在高能量密度下有可能形成QGP;正是相对论重离子物理的唯象理论分析提出了用相对论重离子碰撞实现QGP的可能性,从而促成了相对论重离子加速器的建造.继续从基本理论出发讨论QGP相变形成的条件,并提出明确而可靠的QGP形成的实验信号,仍将是今后这方面理论研究的中心.

当然,相对论重离子碰撞这一极复杂的现象本身,也需要有可信的唯象理论描述.一方面,人们基于碰撞的几何图像,将描述强子-强子(h-h)碰撞的各种唯象模型推广到强子-

原子核(h-A)及核-核(A-A)碰撞过程,建立并逐步完善各个模型的蒙特卡罗(Monte Carlo)模拟,用以解释相对论重离子碰撞实验观测的普遍现象,挑选中心碰撞事例,同时逐步开展对于次级碰撞、能量损失等问题的研究.另一方面,随着更高能量重离子加速器的设计与建造,基于夸克、胶子层次的输运模型也逐步发展起来.由于QGP相只可能存在于碰撞后的极短时间内,最近,对于碰撞后最初3fm(1fm~ 10^{-23} s)内系统时空发展的研究成了人们关注的又一个中心,这时系统处于高温高密度下的部分子演化过程,一方面要看系统的能量密度是否够高;另一方面要看系统的空间范围是否够大,存在于高能量密度状态的时间是否够长,以达到实现QGP所要求的热平衡或化学平衡状态.最终,理论研究将力求对整个碰撞过程:从强子相在碰撞中压缩、升温达到QGP相,再通过膨胀、冷却回到末态强子相,有一个完整的时空发展的描述.近几年来,不少粒子物理学家将量子色动力学(QCD)理论用于这一领域,并取得了有益的进展,但仍有许多全新的问题需要进一步研究.

相对论重离子物理是一门复杂的交叉学科.它密切联系着粒子物理、核物理、流体力学、统计物理、输运理论,以及系统的Monte Carlo数学模拟等广泛的研究领域.因此,它正吸引着各个领域的物理学家,进行日益广泛的合作研究,随着实验手段的不断改进,理论分析的继续深入,这门学科将在本世纪末和21世纪得到长足的发展.人们期望能从实验中找到QGP存在的确实证据,并进而探求高温、高密度下物质的新形态.也许,这个领域能帮助我们最终解开夸克禁闭这个多年来困惑着物理学家的谜.