

相对论重离子碰撞中 会产生夸克胶子等离子体吗?

赵维勤

现在人们认为: 在我们周围物质世界中的强子-质子、中子、其他重子及介子等都是由夸克与胶子构成的。强子的夸克结构理论成功地解释了它们的各种静态性质。用高能轻子(电子、 μ 子等)轰击核子, 甚至能定出内部夸克的动量分布。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。

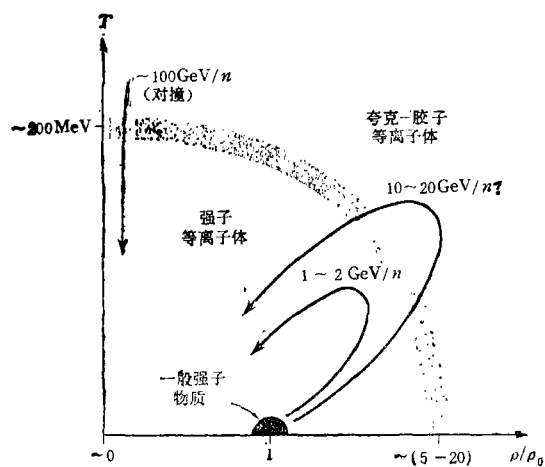


图 1

有什么办法让夸克与胶子冲破强子的禁闭呢! 理论家经过艰苦的努力, 预言了一种可能的解除禁闭的状态, 这就是夸克-胶子等离子体 (QGP)。让我们结

合图 1 所示的相图看一看这种状态是如何实现的。图 1 中靠近横轴(密度轴)的小半圆表示我们周围存在的一般强子物质。它的温度约为 0 MeV, 重子数密度约为 $\rho_0 \sim 0.15/\text{fm}^3$, 能量密度约为 $\epsilon_0 \sim 0.15 \text{ GeV}/\text{fm}^3$ 。设想将强子物质不断压缩(即沿图中横轴向右), 密度不断加大, 有一定大小的强子最终将互相重叠渗透, 将夸克与胶子禁闭在每个强子中的“口袋”已不复存在, 它们便可能在强子物质存在的空间范围内自由运动, 形成新的物质状态——QGP 夸克胶子等离子体。另一种途径是将强子物质加热(即沿图中纵轴向上), 在真空中激发产生大量的夸克对与胶子。它们在一定空间范围内自由运动, 也可能形成 QGP。为了确定这种相变产生的温度 ($\sim 200 \text{ GeV}$) 与密度 ($\sim 5 \sim 20 \rho_0$), 理论物理学家用格点规范理论的蒙特卡洛方法进行了大量的计算。按照这种相变的预言, 天体中存在的极高密度的中子星或宇宙大爆炸初期的高温状态都可能是 QGP 状态。可惜它们在时空上距我们太远了, 很难仔细研究与确定它们的存在, 人们希望寻找在实验室形成 QGP 状态的现实可能性。

八十年代初, 相信 QGP 相变的理论家们预言, 当两个重原子核以极高能量相撞时, 比如选择激烈碰撞的事例, 有尽可能多的能量贮存在碰撞区。如果我们引入碰撞的几何图象, 认为两个核以碰撞参数相碰, 相撞的区域发生激烈作用, 该区域内的核子叫作“参加者”。其余部分的核子为“旁观者”, 几乎不参与作用。显然, 接近对心碰撞 ($b = 0$) 时, 有较多的核子参与相互作用, 就能在较大范围内形成高温高密度区域, 从

4 普适费米弱相互作用将使得 μ^- 子辐射俘获的跃迁几率为零。因为在费米兹变换以后, 这里起作用的将是标量和赝标量的相互作用, 而这对辐射俘获恰好是禁戒的。朱洪元教授就又到莫斯科大学做辐射俘获的报告, 这时, 沙比罗教授当即表示现在他已完全相信了这一漂亮的意想不到的结果!

朱洪元教授还在核物理方面做过基本的贡献。这就是他在建国初期所做的核内中子跃迁时放出的电多极辐射及相应的内转换方面的工作。这些工作都是有关在这一领域内的实验工作者所不能不参考的工作。

敏锐而准确的科学批评家

除了以上这些见诸文献的理论上的贡献以外, 我们在这里不能不提到的: 朱洪元教授具有丰富的实验的知识, 他对粒子物理各有关实验新结果的“评论”, 对 BEPC 面临的实验形势的“分析”, 对国内有关实验的“讨论”, 等等, 都对实验工作者以及我们这些后学以很大的启发。如果说推动文学前进的除了那些从事文艺创作的作家以外, 还有文学批评家的贡献; 那末朱洪元教授就是有关这些领域内的优秀的科学批评家。朱洪元教授对科学工作的评审, 一向以严格而准确而著名。“一经品题, 便成定论”! 这也是朱洪元教授在推动我国科学前进的一项贡献。

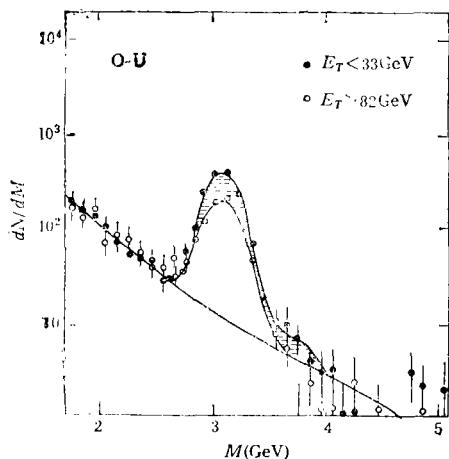


图 2

而有利于 QGP 的形成。为此，必须找到有效的确定碰撞中心性的实验手段。当两个极高能量的核相撞时，除了被撞核的碎片之外，还要产生数百个粒子。实验家用谱仪、Plastic ball 流光室及核乳胶等各种粒子探测器探测每个事例中产生粒子的数目及它们的能量、动量。另外，由许多小的量能器 cell 构成的量能装置探测产生粒子所带能量在空间各小立体角元内的分布。事例中产生的带电粒子数目 n 与事例产生的“模能” E_T 是经常使用的两个探测量。实验结果表明， $n \propto E_T$ ，即每个粒子平均具有相同的模能。并且， n （或 E_T ）越大，说明参加碰撞的核子越多，碰撞的中心性越高，碰撞也越激烈。另一个观测量“零度能” E_{ZD} 则是在朝前方向 $|\eta| < 0.3^\circ$ 角内探测到的能量，它代表入射核中旁观者核子带走的能量。因此， E_{ZD} 越小，则旁观者核子越少，说明对撞的中心性越高。这样，选择大的 n （或 E_T ）及小 E_{ZD} 的事例都能保证挑出有利于 QGP 产生的中心碰撞事例。

另一方面，为了形成高温高密度的区域，还需要将参加者核子所带的能量尽可能贮存在碰撞区内，如果靶核很“透明”，每个参加碰撞的核子虽与多个靶内的核子相碰，它所带的能量仍有相当部分以“带头粒子”的形式被带走。这样，即使有许多粒子参加碰撞，在碰撞区仍不能贮存足够的能量。因此，有必要研究靶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。以零度能的测量为例，在 BNL 能区（14.5 GeV/N） ^{16}O 与 Λu 靶对心碰撞时，测得的零度能分布在零点形成一个很尖的峰。这时，入射核内没有“旁观”粒子。结果表明，经过碰撞后参加者核子入射核内每个核子在实验室系的能量为几十到几百 GeV，就有可能在发生碰撞的空间范围内形成高温高密度的区域，达到形成 QGP 的条件。经过数十年的呼吁和实际的工作，两台

极高能量的重离子加速器终于在 1987 年投入使用，而欧中心（CERN）实现了每核子实验室系入射能量为 60 与 200 GeV/N 的 ^{16}O 及 ^{32}S 同各种靶核的碰撞。美国布鲁克海文国家实验室（BNL）也进行了每个核子 14.5 GeV/N 的 ^{16}O 、 ^{28}Si 入射的高能重离子碰撞。几个主要实验组应用不同类型的探测器，获得了首批很有趣的结果。这些实验产生的高温高密度的核物质状态使得从实验上寻找 QGP 相变的信息有了现实可能。但是，人们希望这些信息是不难测量而又准确可靠的。为此，对高能重离子碰撞复杂而又丰富的实验结果必须先用“常规”的模型进行可靠的唯象分析。只有当我们弄清楚在极高能重离子碰撞后如果没有 QGP 产生，相撞核的行为是怎样的，分析 QGP 存在的信息才有可靠的基础。

为了找到形成 QGP 的最有利条件，人们希望的全部能量都贮存在碰撞区内。这时，靶核象是一个“黑”的吸收体。但是，当能量上升到 ~ 200 GeV/N（CERN），相应对心碰撞的零度能在几百 GeV 处形成一个较宽的分布。这时，靶核变成了“灰”的，它不能停止住全部的入射能量。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，但由于二者靶的透明度不同，所得到的能量密度都是几 GeV/N。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，两处都在自己的结果中努力寻找 QGP 存在的信息。

但是，在极高能重离子碰撞中，QGP 即使形成了，也只存在极短的瞬间。随着膨胀与冷却的过程，它很快就演化为实验室观测的各种末态粒子。因此，只能从这些末态粒子的行为寻找对 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，我们还需要谨慎地排除一切非 QGP 因素的干扰。这类往往是提供“负”结论的工作是艰巨而繁琐的，却又是非常必要的。下面我们介绍两种目前讨论较多的、可能与 QGP 存在有关现象。

1986 年，理论家就预言：如果在相对论重离子碰撞中有 QGP 存在，得到的 J/ψ 粒子产额会被压低。

第二年，CERN 的相对论重离子加速器一投入运行，NA38 合作组就用 μ 子对探测器测量了 J/ψ 的相对产额，试图验证这一预言。实验测得的 μ 子对有两种来源：一对正反夸克湮灭后生成的虚光子会衰变成一对 μ 子（Drell-Yan 过程）。这类过程形成 μ 子对质量谱上的连续本底。 J/ψ 衰变成的 μ 子对相应于 J/ψ 质量的位置上形成一个明显的峰（见图 2）。NA38 组测量了峰值与连续本底的比 N_4/N_c ，并且将 $E_T > 50$ GeV 与 $E_T < 28$ GeV 两种条件下测得的比值进行了比较。他们发现，高 E_T 触发事例所得的比值比低 E_T 触发时压低 40%。这个结果引起一时的轰动。由于高

E_T 触发相应于中心碰撞,有较多的核子参与相互作用,因而提供较高的能量密度。这一结果似乎表明,高 E_T 触发的中心碰撞事例中可能产生了 QGP。

但是,在下结论之前还需要仔细地进一步分析。即使没有 QGP 形成,在高密度的强子物质中,已产生的 J/ψ 粒子也可能与其他介子发生末态相互作用而被吸收。在高 E_T 触发的中心碰撞中,这类末态相互作用的影响更强,因此 J/ψ 的产额被压低。

就在这两种解释争执不下的时候,实验结果又向理论家提出了新的挑战:对不同横向动量 P_T 的 J/ψ 的测量表明, J/ψ 产额的压低随 P_T 的增大而明显减弱。QGP 存在的支持者们立即对此找到了合理的解释: $c\bar{c}$ 对形成 J/ψ 粒子需要一定的形成时间。大 P_T 的 $c\bar{c}$ 对在这段时间内较易于穿击 QGP 区域,达到没有 QGP 存在的空间。在那里没有其他夸克造成的屏蔽效应。因此 J/ψ 产额的压低在高 P_T 时就有所减弱。另一方面,在密集**的**强子物质中, $c\bar{c}$ 对在形成 J/ψ 之前还可能经历与其他强子的动态相互作用,这也会增大 J/ψ 粒子的横向动量。这种动态相互作用造成高 P_T 的 J/ψ 产额增加,而减弱了由于末态相互作用形成的压低效应。

由于相对论重离子碰撞现象的复杂性,要找到清晰可信的 QGP 存在的信息的确不是一件容易的事。关于 J/ψ 产额压低如何解释的争论还在继续,实验的精确度也还有待提高。我们只能等待进一步的工作来最终作出判决。

另一种有趣的现象是由 BNL 的 E802 组发现

的。通过谱仪与飞行时间的测量,他们能把动量小于 $2\text{GeV}/c$ 的各种带电粒子清晰地区分开来。由此测得的 K^+/π^+ 产额比值在高能重离子中心碰撞中达到 $24 \pm 5\%$ 。这个数值比相应能量 $p-p$ 碰撞时的比值 (25%) 大得多。相比之下 K^-/π^- 产额比值则没有什么增加。这一实验事实也被认为是对 QGP 存在的支持:如果 QGP 在核-核碰撞中形成,除了大量原来构成质子和中子的 d, u 价夸克之外,还将产生一些海夸克对。当一对 $s\bar{s}$ 夸克产生后, $\bar{s}$ 很容易找到一个 u 夸克而形成 $K^+ (=u\bar{s})$, 但 s 却不容易找到一个 $\bar{u}$ 夸克而形成 $K^- (= \bar{u}s)$ 。因此 K^+ 将会增多, K^- 却增加很少。

但是,在密集**的**强子物质中,许多其他末态相互作用过程也可能造成 K^+/π^+ 比的上升。比如: π^+ 很容易与其他核子作用形成共振态而被吸收 ($\pi NN \rightarrow \Delta N \rightarrow NN$) K^+ 却很不容易被吸收。另外, π^+ 还能通过与其他强子的末态作用再产生 K^+ (如 $\pi^+ n \rightarrow K^+ \Lambda$)。究竟实验观测的 K^+/π^+ 比值增加是由什么引起的,仍是一个值得进一步探讨的问题。为此,有必要对奇异粒子的绝对产额,特别是 Λ 粒子的产额进行测量。另外,由于 $p-A$ 过程不会形成 QGP,却包含有各种末态相互作用,因此在同样条件下,对 $p-A$ 过程中 K^+/π^+ 比值的测量也可能对两种机制有所区分。

自 1987 年两台相对论重离子加速器运行以来,首批结果已经向我们展示了这一领域而激动人心的结果。但是,上面的分析也表明,要对 QGP 存在的信息得出确定的结论,理论和实验两方面都还有许多工作要做。

(上接第 15 页)

的类别、制备材料、工作温度、响应波段等有关参数。当前的红外探测器品种繁多,性能各异。显然,针对不同的红外目标,综合各种因素,为红外装置选配合适的探测器件,可取得事半功倍的功效。

当前,科学技术的进步,工业、农业以及军事方面的更大的需求,极大地刺激与扶持着红外技术的发展。新工艺、新材料与新的工作模式不断出现。红外探测器的市场价值已以亿为计算单位,其社会效益更是无可估算。在红外探测器件的发展进程中,如果说单元探测器是七十年代以前红外器件的发展主流,那么八十年代以后,数百、数万乃至上百万元以上的多元线阵与面阵红外探测器越来越成为红外探测器发展和应用的主体与方向,以适应红外目标大面积实时成像的需要。伴随微电子学发展而出现的各种具有自扫描功能的固体集成化的红外 CCD 器件,彻底摒弃了红外装置的任何机械扫描机构,从而为红外技术走向智能化的高级阶段奠定了良好基础。

红外发展的历史证明,红外探测器是整个红外技术发展的基础与先导。五十年代, PbS 光导探测器的

出现使红外制导变成现实。InSb 探测器的研制成功,使探测的目标延向中温,使得各种车辆的动力装置成为可攻击的目标。六十年代以后, HgCdTe 器件的出现,更是大幅度推动了各种具有成像功能的红外前视系统的发展。可以说,红外遥感使红外技术达到了一个新的高潮,它是红外测温、红外成像、红外分析等各种红外技术与太空科学的美妙结合。目前,各种遥感卫星穿梭太空,不分昼夜地获取来自地球与空间的大量信息,还可进行资源探查,气象监测、森林防火、军事侦察。人们为取得尽可能多的信息,往往在遥感卫星上装备 Si、PbS、InSb、HgCdTe 等多种探测器件。使探测波段一直从近红外延至长波,囊括全部大气窗口。

当前,红外技术的重要性已是举世公认,美国、西欧、日本、苏联以及我国所实施的各种高技术研究项目中,红外技术的应用与研究均被置于极为重要的位置。投入了大量的人力、资金。我国的红外研究始于六十年代初,目前仅从事红外探测器与材料的研究人员已有数百人之多。可以认为,随着改革开放的进程,我国的红外事业将有一个更为光辉的前程。