

相对论重离子碰撞与真空的性质

赵维勤

(中国科学院高能物理研究所,北京 100039)

本文介绍了相对论重离子碰撞研究的现状,指出它能在较大空间范围内达到高能量密度,提供了实现夸克胶子等离子体状态及改变与分析真空状态的可能实验手段。分析了如何挑选中心碰撞事例和碰撞中停止能力随入射能量的变化,并介绍了当前人们感兴趣的夸克胶子等离子体形成的可能实验信号。

当前高能物理研究中有两个有趣的谜。解开这两个谜或许意味着物理学的一次飞跃^[1]。

1. 丢失的对称性

当今世上存在着三种描述不同相互作用的理论:描述弱相互作用与电磁相互作用的统一模型、描述强相互作用的量子色动力学和描述万有引力的广义相对论。这些理论都用某种对称性来描述物理世界。然而,它们所引入的对称性又不是完美的,大部分与这些对称性相关的量子数都不严格守恒。这些理论中包含有近20个靠实验来确定的参数。到哪里去寻找这些失去的对称性呢?这究竟是由于自然定律本身不对称,还是由于所观察的物理世界不对称?换言之,失去的对称性是否能从具有复杂非对称结构的真空中找到呢?

2. 看不见的夸克

人们都相信,所有的强子都是由夸克组成的:重子由三个夸克组成,介子由一对正反夸克对组成;胶子则是传递夸克之间的相互作用的粒子。夸克和胶子都带有“色”量子数。它们所构成的强子都处于“色”的单态。然而,尽管人们作了各种努力,却始终不能得到独立存在的单个夸克。夸克为什么被禁闭在色单态的强子中呢?一种可能的解释是:真空就象无数正反夸克或胶子对构成的凝聚态,它将夸克间的“色”电场束缚于色单态的强子口袋中,导致色的禁闭。因此,人们无法观测到带色的单个夸克。

要解释上面的两个谜——丢失的对称性与

看不见的夸克,都需要仔细研究真空的性质。真空是否有结构,这是一个人们探讨了多年的问题。早年的以太学说认为真空充满了一种介质,称为“以太”,麦卡逊的光学实验否定了以太的存在。但是,真空中真的不存在什么结构吗?正反粒子的产生与湮灭现象发现之后,人们不断地从实验和理论两方面探索真空的结构,而现在,这两个谜似乎向我们显示:微观的基本粒子物理与宏观世界中相应的算符在物理真空中的平均值有着不可分割的联系。这些真空平均值以参数的形式出现在当前的描述基本相互作用的微观理论中。因此,对微观世界的研究似乎不可避免地要与对真空的研究联系在一起。要研究真空,就得想办法改变它的状态。迄今为止的高能物理实验手段都只能探测很小的空间范围。随着加速器能量的提高,所探测的空间范围也越小,如何在一个较大的空间范围内改变真空的性质,研究这些相干的现象呢?相对论重离子碰撞有可能在较大空间范围内形成高的能量密度,并且,当入射能量足够高时,相撞的两个核内的核子在损失了一部分能量后,穿出碰撞区。这样,在碰撞区就有可能形成重子数为零的激发区域,从而提供了一个可能的改变真空状态的实验手段。

从80年代开始,相对论重离子碰撞引起了物理学家广泛的兴趣。以后,每年一次的夸克物质国际会议不断介绍了这一领域实验与理论两方面的丰富结果^[2]。这些都起因于格点规范理论的预言:当能量密度超过某个临界值时,

强子物质内的夸克与胶子将摆脱个别强子的束缚,在强子物质存在的空间范围内自由活动,从而实现从强子物质到夸克胶子等离子体(QGP)的“相变”。提高强子物质能量密度的手段不外两种:或者把强子物质压缩,使个别的强子口袋互相重叠而破裂,正常的强子物质便被压缩成高密度的QGP。或者提高强子物质的温度,产生许多夸克与反夸克,就象开水沸腾时那样,形成许多 π 介子的“泡”。产生的这些夸克密集在一起,也可以形成QGP。我们可以避开深奥的理论,估计一下产生这种相变的条件。一个通常的核子数为 A 的原子核,其平均半径为 $r_A \approx 1.2A^{1/3}\text{fm}$,平均能量密度为

$$\epsilon_A \sim \frac{m_A}{(4\pi/3)r_A^3} \sim 130\text{MeV}/\text{fm}^3. \quad (1)$$

而核内的每个核子“口袋”中有三个夸克。它的半径为 $r_N \sim 0.8\text{fm}$,能量密度为

$$\epsilon_N \sim \frac{m_N}{(4\pi/3)r_N^3} \sim 440\text{MeV}/\text{fm}^3. \quad (2)$$

当温度上升到 $T \sim (\epsilon_N - \epsilon_A) \cdot 1\text{fm}^3 \sim 300\text{MeV}$ 或密度上升到 $\rho \sim 4\rho_A$ 时,整个强子物质的能量密度与每个核子口袋内部相同,强子口袋就不再起作用了。这样粗略估计的相变条件与迄今为止的理论计算所得的数值很相近。

那么,相对论重离子碰撞如何能实现这样的相变条件呢?为了使尽可能多的能量聚集在碰撞区内,首先必须挑选出有尽可能多个核子参加碰撞的“对心碰撞”事例^[3,4]。这时,碰撞很激烈,产生很多的粒子,有可能在较大范围内形成高温高密度的区域,有利于QGP的形成。实验上有若干挑选对心碰撞事例的手段。实验家用由许多小的量能器“cell”(单元)构成的量能装置探测产生粒子所带能量在空间各立体角元内的分布。各种粒子探测器还用来测量产生粒子的数目及它们的能量、动量等。事例中产生的横能定义为

$$E_T = \sum_i \epsilon_i \sin \theta_i, \quad (3)$$

其中 ϵ_i 与 θ_i 为空间某立体角元之内测得的能量及该立体角元的极角。事例中产生的带电

粒子的数目 n 及事例的横能 E_T 是两个常用的观测量。实验结果表明, $n \propto E_T$,即每个粒子平均具有相同的横能。并且, n (或 E_T)越大,说明参加碰撞的核子越多。这就是说,碰撞参数减小时,两个相撞核的几何重叠区增大,碰撞的“中心性”提高,碰撞也就越激烈,另一个观测量“零度能” E_{zD} 是在朝前方向 $\theta < 0.3^\circ$ 内测得的能量。它代表没有参加相互作用的核子带走的能量。 E_{zD} 越小,则没有参加作用的核子越少,说明碰撞的中心性越高。因此,选择大的 n (或 E_T)及小的 E_{zD} 的事例是通常实验上用来挑选对心碰撞事例的手段。

其次,要形成高温高密度的区域,还要将参加碰撞的核子所需的能量尽可能多地贮存在碰撞区内。人们用“停止能力”来描述碰撞中相撞核有多少能量被贮存在碰撞区内,不再被出射核子所带走^[3-5]。1987年,美国的布鲁克海文国家实验室(BNL)实现了每个核子14.5GeV/ N 在 ^{16}O , ^{28}Si 与各种靶核的相对论重离子碰撞,西欧中心(CERN)进行了每个核子60及200GeV/ N 的 ^{16}O 及 ^{32}S 入射的重离子碰撞。实验上对这两个能区的横能与零度能的测量表明,靶核的停止能力在这两个能区有明显的变化:在BNL能区,当入射核与重靶核相撞时,参加碰撞的核子所带的全部能量都停止在碰撞区内。因此,对于 ^{16}O 与重靶核(例如Au)的中心碰撞事例,测得的零度能(E_{zD})分布在零点处形成很尖的峰。这表明,全部入射能量都被靶吸收了,靶就象是“黑”色的。这相应于图1的前一种情况。中心碰撞后,全部参加碰撞的核子及全部入射能量都集中在碰撞区,形成一个高重子数密度的激发区域。而在CERN能区,入射核中的核子碰撞后只丢掉一部分能量,剩余的部分由穿过碰撞区的出射核子带走,进入零度能的测量范围($\theta < 0.3^\circ$)。因此,即使是全部入射核中的核子都参加碰撞的中心事例,零度能也不会为0,这时靶核只能停止一部分入射能量,成了“灰”色的。实验测量显示,这时零度能 $E_{zD} = 0$ 的几率为零。理论估算表明,尽管CERN的重离子入射能量比BNL

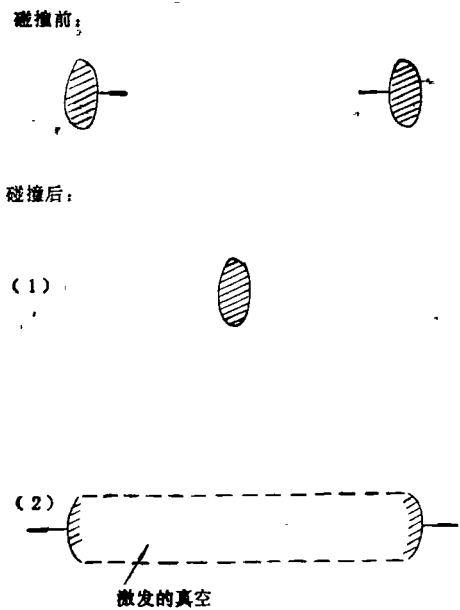


图1 相对论重离子碰撞示意图

[碰撞后: (1)相撞两核完全停止(BNL 能区); (2)相撞两核互相穿过, 碰撞中心区形成激发的真空 (RHIC 能区)]

能区提高了一个量级, 但由于靶核停止能力的明显差别, 两个能区重离子碰撞所能达到的能量密度都是几 GeV/fm^3 。幸好, 这个能量密度满足了理论预言的形成 QGP 的条件。因此, 许多实验组在这两台加速器上进行各种实验, 希望找到 QGP 存在的信号^[2]。目前, BNL 正在设计制造 $100\text{GeV}/N$ 的相对论重离子对撞机 (RHIC)^[6]。在 RHIC 能区, 相对撞的两个核中的核子肯定会穿过碰撞区, 带走相当部分的能量, 但是, 在碰撞区留下的能量将使真空高度激发, 形成重子数为 0, 而能量密度很高的状态。这正是图 1 的后一种情况。它提供了研究真空态结构及其变化所需要的条件。

那么, 目前 CERN 与 BNL 两处的相对论重离子碰撞实验结果是否已经显示了 QGP 存在的迹象呢? 下面两个实验结果是迄今为止人们议论较多的 QGP 存在的可能信号。

3. J/ψ 产额的压低

J/ψ 粒子是由粲夸克与反夸克对 ($c\bar{c}$) 构成的。1986 年, Matsui 与 Satz 两位理论物理学

家首先预言了在 QGP 相 J/ψ 粒子的产额会压低^[7]。他们提出, 在 QGP 中, 存在着大量的夸克与胶子, 因而对 $c\bar{c}$ 夸克对之间的束缚作用形成屏蔽效应, 阻止了 J/ψ 的形成。不久, CERN 的相对论重离子加速器开始运转。NA 38 实验组设计了一个实验^[8], 探测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, 考虑到高横能 (E_T) 的事例对应于中心碰撞, 会在较大空间范围内形成较高的能量密度, 因而有利于 QGP 的形成。NA38 组比较了不同横能事例的 J/ψ 粒子产额, 发现横能越高, J/ψ 的产额越低。图 2 清楚地显示了 J/ψ 的相对产额与事件横能的这种依赖关系。依照 QGP 的存在会使 J/ψ 产额压低的理论预言, 这种 J/ψ 产额随 E_T 增大而降低的现象似乎证实了高 E_T 事例中有 QGP 存在的迹象。

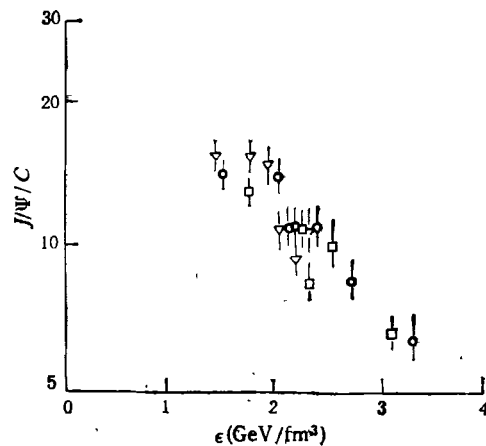


图2 J/ψ 产额相对于连续本底的比值 ($J/\psi/C$) 与能量密度 ϵ 的关系 (NA38)^[8]
(∇, \circ, \square 分别为 $^{16}\text{O} + \text{Au}$, $^{16}\text{O} + \text{Au}$ 及 $\text{S} + \text{U}$ 碰撞的结果)

在理论指导下进行的这个实验获得了与理论预言一致的结果, 当即引起了轰动。对 QGP 存在持乐观态度的人认为, 这种实验现象正是 QGP 存在的信号。然而, 许多物理学家倾向于进行更细致的分析^[9]: 除了 QGP 存在, 相对论重离子碰撞后存在的强子相中就没有其他

能使 J/ψ 产额压低的因素了吗? 人们立即想到, 生成的 J/ψ 粒子可能与其他的末态强子相互作用, 离解后形成两个带粲数的介子:

$$J/\psi + H \rightarrow D + \bar{D}. \quad (4)$$

这类过程也会压低 J/ψ 的最终产额, 高 E_T 的事例对应于中心碰撞, 产生的粒子也多, 如上的次级过程发生的几率也大, J/ψ 产额自然压低得厉害。

这两种解释都要求高密度的状态, 但究竟是高密度的 QGP 还是高密度的强子物质引起了实验观测到的 J/ψ 产额的压低, 从上面的说明中是无法确定的. 还需要寻找确定的判据, 才能得出肯定的结论. 比如, 实验测得了 J/ψ 产额与事件横能 e_T 的关系, 而 E_T 又与碰撞区的能量密度 e 直接有关. 由于 QGP 相变是在 e 大于某个临界值 e_c 时突然发生的, 基于 QGP 相变造成的 J/ψ 产额压低亦应当在 $e > e_c$ 时突然出现; 然而对于强子相, 随着 e 的增大, 强子物质的密度不断增大, 次级碰撞过程引起的 J/ψ 产额的压低也逐渐增强, 不应当存在什么突变. 因而细致分析 J/ψ 产额压低对 e 的依赖关系, 看是否存在突变, 应当可以区别引起这种产额压低的两个不同的根源. 可惜目前实验数据的精度还不足以作出最终的判断。

4. 奇异粒子产额的上升

当相撞两核在碰撞区完全停止时 (比如在 BNL 能区), 形成一个重子数很多的高能量密度区域. 如果在这个区域实现了半重子数的 QGP 状态, 那么除了原来核子所带的大量 d, u 夸克之外, 还会产生相当多的 $s\bar{s}$, $d\bar{d}$ 及 $u\bar{u}$ 夸克对. 并且, $s\bar{s}$ 夸克对的成分比在一般强子态中明显增多. 这就使末态粒子中带有奇异夸克 (s, \bar{s}) 成分的奇异粒子, 比如: $K^+(u\bar{s}), K^-(\bar{u}s), \Lambda(uds)$ 等的产额有所上升. 而且, 半重子数 QGP 中存在许多 u, d 夸克, 数量比 \bar{u}, \bar{d} 夸克多得多, 从而使包含 u, d 成分的奇异粒子 K^+, Λ 等更容易形成. 在 CERN 与 BNL 两处的实验结果的确表明, 这些粒子的产额有明显上升. 图 3^[10] 比较了 p-p、p-A 及 Si-Au

碰撞时, K^+/π^+ 产额比值的区别. Si-Au 碰撞时的 K^+/π^+ 比值显然比前两者大得多。

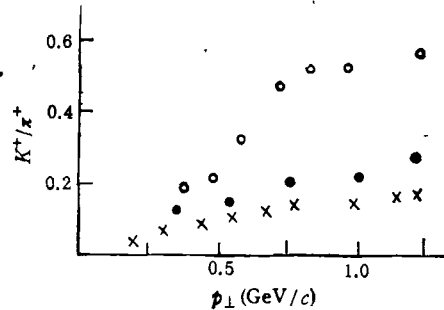


图 3 K^+/π^+ 产额比值 (K^+/π^+) 与粒子横动量 (p_{\perp}) 的关系 (E802)^[10]

(\times, \cdot, \circ 分别为 p-p, p-Pb 及 Si-Au 碰撞的结果)

尽管实验结果支持半重子数 QGP 存在的假设, 许多人仍然谨慎地做进一步的细致分析工作, 指出即使不存在 QGP, K^+/π^+ 比值也会由于产生粒子间的次级碰撞而上升, 但这样引起的上升是否足以解释实验的现象呢? 迄今为止, 不同模型唯象分析所得的结果仍然是互相矛盾的^[11]. 因此, 只有经过进一步的工作, 才能最终肯定, 是否能将 K^+/π^+ 比值上升作为 QGP 存在的确定信号。

自 1987 年 CERN 与 BNL 的两台相对论重离子加速器运转以来, 已经获得了许多激动人心的结果. 上面两个实验现象至少可以说是 QGP 存在的可能迹象. 当然, 要对这些结果作出肯定的结论, 还需要理论与实验两方面的继续共同努力. 从上面的分析已经可以看出, 产生粒子间的次级相互作用在相对论重离子碰撞中起着重要的作用, 必须认真对待. 否则, 对 QGP 信号的分析就缺乏牢固的基础. 但是, 在如此高的能量下, 碰撞过程中产生几百, 甚至上千个粒子, 认真考虑他们之间的相互作用谈何容易. 现有的几个描述相对论重离子碰撞过程的唯象模型都是非常复杂的^[12]. 要对碰撞过程进行模拟, 都离不开 Monte Carlo 方法. 目前各个唯象模型都发展了一套自己的相当完整的 Monte Carlo 程序, 提供给理论与实验工作者使用. 然而认真地将次级碰撞包含到这些模型中去, 则还只是近一两年的事, 所得的结果也还

远不够完善。

另一方面, CERN 与 BNL 在近期内都将实现以更重的重离子 (Pb 或 Au) 入射的相对论重离子碰撞, 以求在较大范围内实现高能量密度, 这更有利于 QGP 的形成。而前面提到的 RHIC 计划及 CERN 提出的 LHC 计划^[43], 则致力于进一步提高入射能量, 以求在碰撞区内获得重子数为零的真空激发态, 提供研究真空结构的实验手段。

随着实验手段的不断改进, 理论分析的继续深入, 相对论重离子碰撞的研究已经形成了连接高能核物理与基本粒子物理的一个重要领域。当前, 人们对这一领域的兴趣有增无减, 已经形成了一支包括数百人的理论与实验研究队伍。人们期望能从实验中找到 QGP 存在的确实证据, 并进而探求真空的结构。也许, 这个领域正是解开当今高能物理中的两个谜的关键所在。

- [1] T. D. Lee, "Missing Symmetry and the Physical Vacuum" A Lecture Given at CCAST Workshop on 200 TeV Physics, (1990).
- [2] Proc. of Quark Matter '88 *Z. Phys. C*, **38**(1988); '89 *Nucl. Phys. A*, 498(1989); '90 *Nucl. Phys. A*, 525(1991).

- [3] S. Nagamiya, *Nucl. Phys. A*, 488(1988), 3C. Chao Wei-Qin, Proc. of Shanghai Inter. Workshop on Quark-Gluon Structure of Hadrons and Nuclei, ed. L. S. Kisslinger, Qiu Xijun, Intern. Acad. Publ., (1991), 191.
- [4] Miao Bi-xia and Chao Wei-Qin, *Nucl. Phys. A*, 494 (1989), 620.
- [5] S. Date et al., *Phys. Rev.*, **D32**(1985), 619.
- [6] S. Ozaki, *Nucl. Phys. A*, 525(1991), 125C.
- [7] T. Matsui and H. Satz, *Phys. Lett.*, **178B**(1986), 416.
- [8] A. Bussiere et al., (NA38 Collaboration), *Z. Phys. C*, **38**(1988), 117; P. Sonderegger (NA38 Collaboration), Proc. of XXVI Inter. Conf. of High Energy Physics, (1988).
- [9] S. Gavin et al., *Phys. Lett.*, **207B**(1988), 257; **214B** (1988), 241; R. Vogt et al., *Phys. Lett.*, **207B**(1988), 263; J. Hüfner et al., *Phys. Lett.*, **238B**(1990), 103.
- [10] Y. Miske et al., (E802 Collaboration), *Z. Phys. C*, **38**(1988), 135; T. Abbott et al., (E802 Collaboration), *Phys. Rev. Lett.*, **66**(1991), 1567.
- [11] R. Mattiello et al., *Phys. Rev. Lett.*, **63**(1989), 1459; B. L. Friman, *Nucl. Phys. A*, 498(1989), 161C; C. M. Ko, L. Xia, *Nucl. Phys. A*, 498(1989), 561c; Chao Wei-Qin et al., *Nucl. Phys. A*, 514(1990), 734.
- [12] A. Capella et al., *Z. Phys. C*, **38**(1988), 177; Bo Andersson, *Nucl. Phys. A*, 461(1987), 513c; K. Werner, *Z. Phys. C*, **38**(1988), 193; H. Sorge et al., *Nucl. Phys. A*, 498(1989), 567; J. Ranft, *Z. Phys. C*, 43(1989), 439.
- [13] Review by J. Bartke, *Intern Journal of Modern Phys. A*, 4(1989), 1319.

1993年第4期《物理》内容预告

中国物理学会固体内耗与超声衰减专业委员会 庆祝学部委员葛庭燧诞辰80周年专稿

动态局域畸变引起的内耗(王业宁);
晶界力学弛豫研究的新成就(张立德、朱爱武);
位错晶界与点缺陷交互作用引起的非线性、非稳定和
非德拜型弛豫的理论方向(孙宗琦);
高温超导体中氧行为的内耗研究(陈廷国);
镍钛合金的内耗(朱劲松);
Cu-Zn-Al-Mn合金的预贝氏体相变研究(沈惠敏等);
内耗方法在研究蠕变和蠕变断裂中的应用(孔庆平);
钢铁中稀土合金化的内耗研究(耿景文);
固体内耗新模型和分形、混沌(王养璞等);
聚合物力学弛豫谱及应用(张立德、李健);
月龄对鸡肌腱内耗的影响(李广义);

固体的超声研究(胡建恺等);
高温超导体磁通钉扎内耗的研究(文亦汀)。

知识和进展

我国受控核聚变的新进展——在 HL-1 托卡马克上
用偏压电极实现 H 模运行(冉利波);
集成电路发展前景——下一步的技术进展(王家琪);
超高压绝缘—金属相变及光学测量技术(徐丽
雯);
超对称理论 20 年(江向东);
微波电磁兼容学研究的若干情况和问题(黄志洵)。

物理学和经济建设

非晶配电变压器的开发与节能(石松耀)。

实验技术

光场压缩态的实验进展(彭荃璋)。