

探索物质的极限

——CERN超相对论性核碰撞

周代翠 摘译

(华中师范大学 430079)

1. 强相互作用物质

20世纪70年代,人们发现了强相互作用的基本理论——量子色动力学(QCD)。相比于在量子电动力学(QED)中传递电磁相互作用的不带电光子,量子色动力学中传递强相互作用的胶子自身携带强相互作用色荷。量子电动力学和量子色动力学二者构成了描述基本相互作用的标准模型的一部分,电子、光子、夸克和胶子都是基本粒子。经过数十年的深入研究,已经充分确认了QED和QCD的各种预言。

本文所关注的不是基本QCD碰撞,而是由强相互作用主导的物质结构,即从部分子等离子态到质子和原子核,再到中子星。按照宇宙学标准模型,宇宙经历了连续且不同的物质形成阶段。从阿秒到最初几微秒,膨胀的宇宙由等离子体“火球”主导,并由夸克、胶子和电子等基本粒子组成。由夸克和胶子组成的QCD物质的相结构是怎样的?譬如一立方米内的夸克-胶子等离子体在早期宇宙中是怎样冷却为核子或者随之在中子星内部被压缩的?将是本文阐述的该领域研究的主要目标。

按照大爆炸宇宙学,热火球具有极高能量密度和温度,随后膨胀冷却到足够低温,自由的部分子态消失而仅存强子。QCD理论认为,在低能量密度时夸克处于色中性的强子束缚态中。宇宙存在多至 10^{78} 个质子和中子,却没有观察到自由的夸克。因此,必然存在某个特定的中间时期发生了部分子到强子物质之间的相变。

2. 研究QCD物质的早期概况

以上简述了QCD物质中的相变观点,反映了1976年左右的理论物理学状态。当时,史蒂文·温伯格(Steven Weinberg)撰写了著名的书籍《宇宙最初三分钟》(*The First Three Minutes*),认为宇宙是一个在热力学平衡下演化的热火球。自柯林斯(J. Collins)和佩里(M. Perry)提出自由部分子“气体”之后,苏雅克(E. Shuryak)、贝姆(G. Baym)和卡普斯卡(J. Kapusta)推广并发展了高温热QCD理论,并把自由的部分子气体取名为“夸克-胶子等离子体”(QGP)。他们预言在极高能量密度下强相互作用强度将减弱(该属性被称作“渐近自由”),因而无法维持受缚的强子。尽管后来发现这种观点偏离了QCD相变的真正要点。但是,根据不同的温度和密度,他们第一次绘制出了QCD物质的相图。其里程碑意义是提出了在实验室条件下研究高温高密核物质及其相结构和相变特性的一种方法:相对论能量下重核碰撞会压缩并加热核物质达到或超过QCD估算的临界能量密度。

一个至关重要的问题是:我们能否定义一个观察量清晰描述经历部分子等离子体火球后的特征性质或者演化过程、或者初始部分子集合特征及其变化?到20世纪80年代初期,Bevalac实验清楚地观测到集体过程例如强子物质的流体动力学行为。在理论上非常重要的一步是热QCD理论解决了在数学上很难解决的低能问题,即用格点方法数值地解决了非微扰QCD问题。美国格点组(lattice group)描绘的图像显示以温度为函数的QCD物质的热容量,表明了存在从强子态到部分子态的相

变。此外,同样令人振奋的是发现临界温度约为 170 MeV,这与哈格多恩(Hagedorns)之前提出的组成质子的物质上边界温度相同。

在上述背景下,科学家们开始绘制强相互作用物质的相图,如图1所示。不难发现,加热或者压缩均可达到高能量密度。这两种情形可单独或者共同促使QCD物质达到相边界,实现相变。因此,图中左侧部分显示的是大爆炸动力学和夸克-胶子等离子体(QGP),而右侧则是超新星、中子星或者可能是黑洞这些经过引力再次坍塌的冷物质。

3. CERN关于高温QCD物质的研究

理论和构想已经达到如此令人神往的高度,那

么必定要通过实验来验证! 根据 Bevalac 实验结果的推断,要求同步加速器上的固定靶实验的射弹核的每核子能量达 10~100GeV,以达到和超过所预测的QCD相界。在1982~1986年期间,欧洲核子研究中心(CERN)的质子同步加速器(PS)和超级质子同步加速器(SPS),以及美国布鲁克海文国家实验室的交变梯度同步加速器(AGS)首先提出了与此相关的研究计划。同期,还出现了具有深远影响的概念,即通过对撞机实现更高质心系能量的原子核碰撞。一方面重启布鲁克海文的超导 ISABELLE 对撞机计划,实现比 CERN SPS 能区高十倍以上的质心系碰撞能量。同时,CERN的大型强子对撞机(LHC)计划已经开始,它将使射弹核的能量在原有基础上增加 25 倍。所有这些项目均在后来的 30 年中实现。1986年,核碰撞实验开始在 CERN 的 SPS 上采集数据;1994年,在 SPS 上实现了超重核(铅²⁰⁸Pb)的入射实验;2001年,在布鲁克海文新建了相对论性重离子对撞机(RHIC);2010年,开启了 CERN LHC 上 TeV 量级的重离子对撞的新纪元。

图2列出了首批 SPS 实验中 NA35 的设计图,图3给出了 LHC 上 ALICE 实验装置简图。NA35 自 1981 年开始规划并在 1986~1992 年期间采集 SPS 数据。LHC/ALICE 实验于 1991 年开始设计,于 2009 年末启动并采集首批实验数据。这些是大科学实

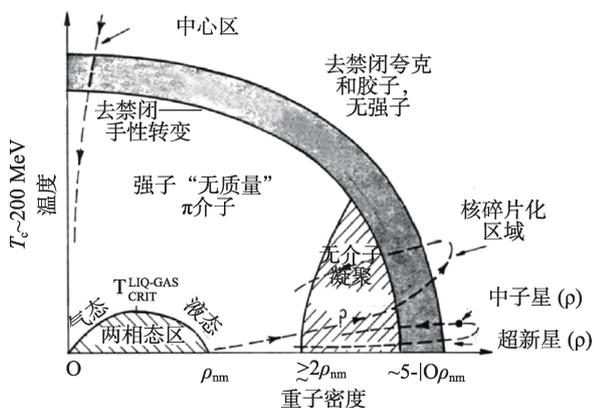


图1 QCD相图的最初草图

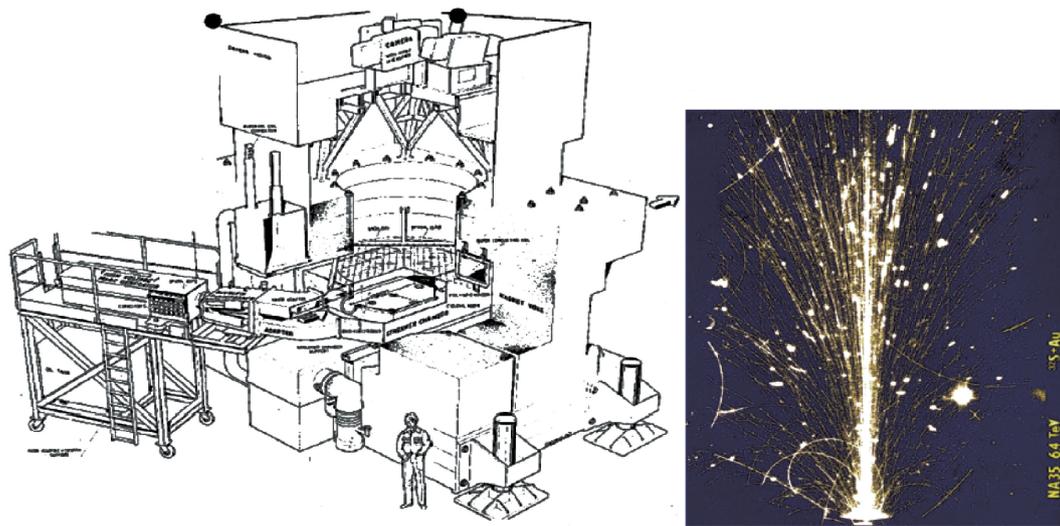


图2 NA35实验装置(左)和事件显示(右)

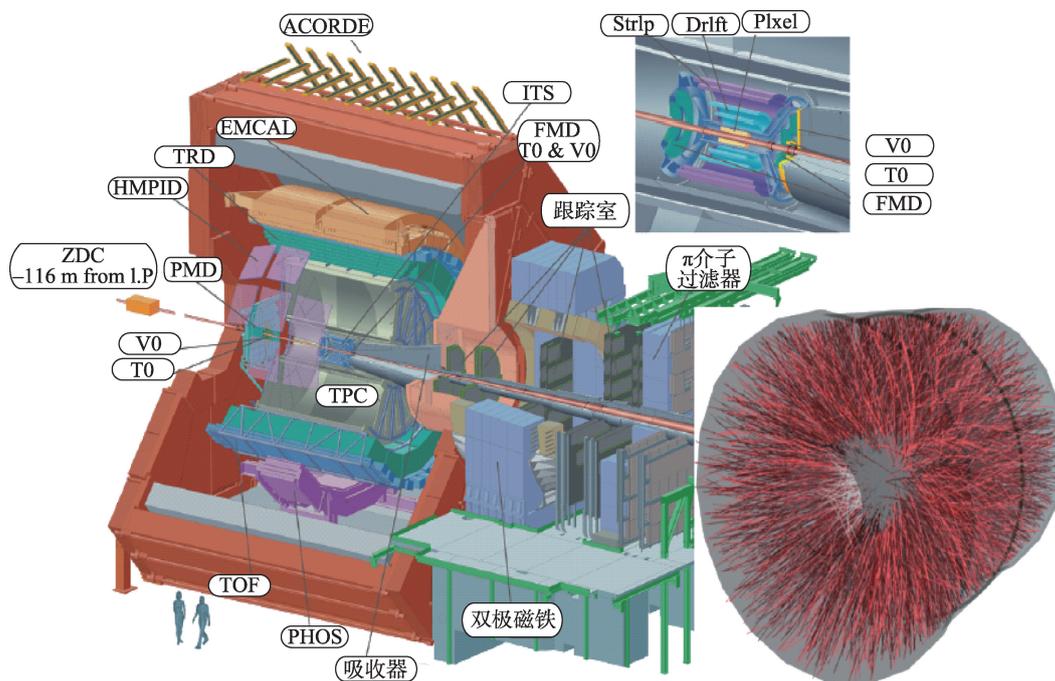


图3 ALICE实验(左)和事件显示图(右)

验的重要特征,甚至堪称是人类智慧合作的典范。

核-核(A-A)碰撞的质子质心系能量从SPS上17.3GeV已增加到LHC上5.02TeV(2014年),碰撞生成的带电粒子数目从约2000增加到20000以上。在实验探测上需要通过磁场中的径迹来跟踪这些粒子,即通过径迹曲率测量粒子动量。在SPS-NA49、RHIC-STAR和LHC-ALICE上时间投影室(TPC)成为了现代探测器的选择。利用外层探测器,通过测量每个粒子的速度,可以鉴别粒子的类型(例如 π 介子、 k 介子、质子和电子等)。铅核碰撞产生的带电粒子数是之前的十余倍,因而要求ALICE探测器具有更大的跟踪体积和更高的读出粒度。物理学已经从关注SPS转向LHC。“QCD硬过程”,如喷注产生,成为其中的焦点。由于涉及几十到上百GeV/c的高动量强子,因此ALICE实验的跟踪精度要远高于之前SPS实验中的“热”强子。图2中显示了SPS最高能量200GeV入射核子下单次 ^{32}S -Au碰撞在NA35流光室的跟踪信息。用于NA35的跟踪技术在1994被NA49实验中的时间投影室取代。图3显示了ALICE探测器在粒子径迹跟踪上远远超出以往的效果(质心系下每对核子2.76TeV碰撞能量),超过60万个电子

通道的TPC处于当今数字电子学处理能力的上限。

3.1 CERN重核加速

同步加速器通常用来加速质子、电子以及它们的反粒子。质子的荷质比 $Q=1$ 。在钙(电荷:20;质量:40)以下稳定原子核的荷质比 $Q=0.5$,在钙以上则中子数超过质子数,例如在铅(^{208}Pb)核中 $Q=0.39$ 。加速率随 Q 的变小而降低。为了减小射弹在稀薄的气体中被电离导致离子电荷态改变,要求射弹核在注入加速器时已经被完全电离(或者加速腔具有极高的真空度)。这类源应提供尽可能高的电荷状态但又有足够强度的离子流,以确保后期同步加速器中的束流稳定性和实验过程中足够高的事件率。1982~1985年,在CERN首选的离子源类型是电子回旋共振(ECR)源。在1986年产生了首个氧(Oxygen)核束流(一种轻原子核),1988年便有了硫(Sulphur)核束流。SPS采用的更加精心制作的用于铅(Lead, Pb)离子的加速方案于1994年投入运行。进一步改进后的方案至今依然用于LHC。

新的大功率ECR离子源产生的Pb离子束流被注入到直线加速器储存箱中加速到每核子能量约

5MeV,再通过剥离箔获得更宽的电荷态分布(约为50+),紧接着注入到PS同步加速器。为了最小化电荷态的改变,加速器的真空度高达 10^{-9} 托。PS在约7GeV/核子时提取Pb(50+),并剥离产生完全离子化的Pb(82+)注入到SPS。为了达到设计的最高能量,实验上应用复杂的多转注入技术,SPS需要容纳四次连续的PS提取,才能将加速共振腔完全充满精确定位的束流聚堆,然后再加速。最终SPS把铅核射弹加速到每核子能量158GeV实现碰撞。

3.2 CERN的SPS实验

1982年,GSI-LBL-海德堡-马尔堡-华沙核物理研究合作组提交了第一份建议书,该合作组也是同期的Bevalac和杜布纳质子同步加速器(Dubna Synchrotron)成员。该建议呼吁在CERN建立一个提取氧核的PS设备,具体由GSI从格勒诺布尔(R. Geller)的研究组购买ECR离子源,LBL建造RFQ微型直线加速器,然后注入CERN已有的线性加速器-1(Linac1),继之以增强器(Booster)和PS,最后达到每核子能量13GeV。基于Bevalac实验同时开展多段闪烁体塑料球和可视径迹流光室光谱仪两组并行实验的经验,提议在PS上同样开展两组并行实验,一个实验研究核物质的流体动力学,而另一个实验产生介子以观测相变信号。

由于在PS东厅开展进一步的实验遇到了较大困难,修改方案将PS束流传输到已有的SPS加速器,这一方案催生了更具前瞻性的理念,即充分拓展SPS重离子加速计划,实现束流能量高达200 GeV/A的重离子实验物理目标。从PS转向SPS真是一次聪明的选择!它汇聚了CERN既存的三个完整的实验设施、物理合作组及工程技术专家,包括大型磁强子光谱仪OMEGA、双轻子谱仪NA10,以及流光室和量能器,并包含了NA5和NA24实验的400吨超导两极磁体。

CERN/SPS项目吸引了国际上当初主流的核物理工作组和一部分粒子物理学工作组的加入。Omega光谱仪小组重组为WA85,双轻子光谱仪重组为

NA38,流光室实验转身为NA35,而大型量能器实验NA34(曾作为SPS项目的前身用于CERN的ISR氦4碰撞研究中)变身为NA34-2。来自LBL的塑料球谱仪通过改造成铅玻璃电磁量能器变成了WA80。最初,只有实验NA45是完全新建,致力于双电子谱的双切伦科夫(RICH)磁谱仪建造。该项目在1994~2002年间的运行高峰期使用铅核,并且涵盖了较低的能量,即20、30、40和80GeV/A。在2005年,该设置重新激活,采用NA60(基于之前NA38和NA50发展而来的高精度粲素和双 μ 介子谱仪)的铟(^{115}In)束流以及NA61(基于NA49的大接收度强子光谱仪)的铅束流。主要的铅束流实验项目有:

- NA44:反质子和K介子小角度聚焦磁谱仪
- NA45:双电子双切伦科夫环形成像磁谱仪
- NA49:强子大接收度TPC和量能器谱仪
- NA50:矢量介子的双 μ 介子磁谱仪和电磁量能器
- NA52:寻找奇异夸克团的“新质量”束流线谱仪
- WA97/NA57:基于硅像素技术的WA85/WA97/NA57超子和反超子谱仪
- WA98:用于直接光子的大接收度强子和光子谱仪
- 最后出现了NA60和NA61

4. 新千年的成就

火球能量密度与温度 SPS量能器实验(NA34、NA49和WA98)测量了一对铅核碰撞所产生的横向总能量,估算大约有平均190个核子对参与碰撞,利用布约肯(Bjorken)公式估算出火球能量密度约 $3.0 \pm 0.6 \text{ GeV}/\text{fm}^3$ 。与“2000年”格点量子色动力学(Lattice QCD)计算的部分子-强子临界相变结果 $1 \text{ GeV}/\text{fm}^3$ 对比,发现在该能量密度已经越过相变。WA98实验第一次测量了直接光子。发现等离子体温度在200~250MeV范围时,与格点QCD在 $3 \text{ GeV}/\text{fm}^3$ 能量密度下给出的等离子体的温度估算值 $T=210 \text{ MeV}$ 相一致。

强子谱 NA44、NA49和WA57合作组系统地

测量了强子多重数分布(图4)。用“统计强子化模型”(SHM)拟合NA49 Pb-Pb 中心碰撞强子多重数的结果,得出强子化温度 $T=158\pm 5$ MeV,与格点QCD 预测的临界温度 T_c 相一致。

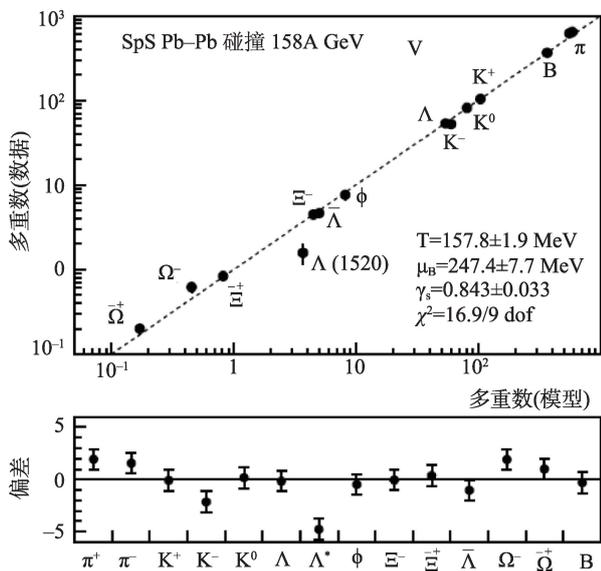


图4 强子多重数与统计模型的预测

奇异重子产生增强 NA57 观测到Pb-Pb 碰撞中带奇异数为1、2 和3 的超子(Λ 超子、 Ξ 超子和 Ω 超子及其反粒子)产生多重数随碰撞中心度的变化(对应着参与碰撞的核子数目 $N(\text{part})$)增大的结果(图5 所示)。在Pb-Pb 中心碰撞中观测到 Ω 和反 Ω 超子相对产额约10 倍增强。人们期待是在扩展的热化QCD 物质中“烹饪”效应增强了奇异强子的产生率。Pb-Pb 碰撞并非是p-A 碰撞的简单叠加,并且奇异数增强会随着火球体积的增加而增大,但是在中心碰撞时趋于饱和。正如巨正则(大体积极限)统计强子化模型(图4)所预言。

粲偶素(J/Ψ)压低(解释了QCD 等离子体形成) J/Ψ 矢量介子被称作粲偶素,是初始核碰撞中“硬”部分子相互作用所致。它穿越退禁闭的QCD 等离子体相时可能被夸克间色交换力的QCD 德拜屏蔽解散,导致末态粲偶素产额由于QCD 等离子体的形成而压低。NA38 和NA50 实验观测到了 J/Ψ 粒子产额反常压低(图6),发现该压低随着能量密度的增大而增加,即在中心碰撞中 J/Ψ 粒子产额压低最厉害这一我们想要量化的退禁闭信号。

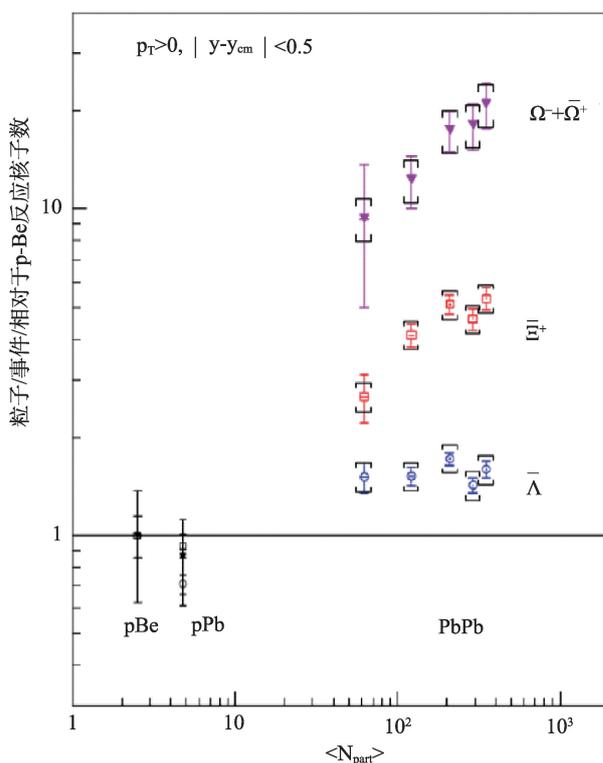


图5 Pb-Pb 碰撞中超子产额奇异数增强

QCD 手征对称性恢复(强子在接近 T_c 时融化) 当强子物质接近QCD 相边界时,大的强子质量到哪儿去了? 它们的夸克“波函数”是怎样的? 或者说,我们能在接近相变临界点 T_c 时看到强子波函数离解吗? NA45 首次应用了轻子对谱仪,并在NA60 中进

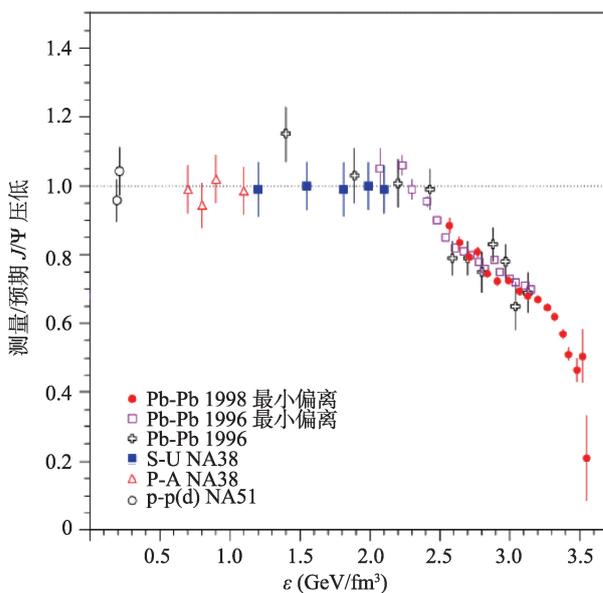


图6 SPS 上的 J/Ψ 压低随能量密度的变化

一步完善了(用于 μ 介子对)这一测量(图7)。在In+In碰撞中,观测到过剩产额一直出现到最大约为1GeV区间,可归结为来自于 T_c 紧邻区域的辐射。在此区域以热密介质过程为主导,更高物质密度有更大增强,尤其是, $\pi^+\pi^-$ 湮灭到中间态 ρ 矢量介子,然后再衰变到 $\mu^+\mu^-$ 。结果证明,在火球介质接近 T_c 时 ρ 介子质量谱产生很强的展宽,表明由于手征对称性恢复, ρ 介子质量发生改变。QCD手征对称性恢复的迹象首先是在部分子相边界发现的。

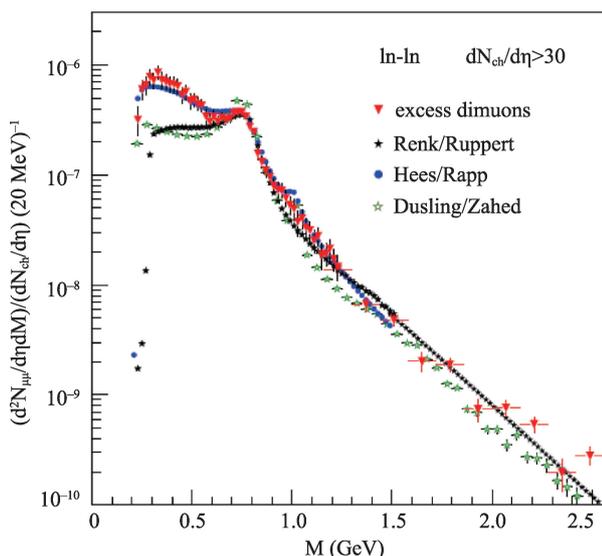


图7 In+In中双 μ 介子不变质量谱超过按比例Cocktail的产额之上部分

此外,图7中的指数尾部在大约1GeV以上的部分体现了之前产生的等离子体的夸克-反夸克湮灭到轻子对的贡献。这个类似于普朗克(Planck)光谱的不变质量谱反映了等离子体的平均温度大约是220MeV,即SPS能区第一个“直接”等离子体信号。

火球物质显示集体动力学流 一对铅核非对心碰撞,射弹会把靶核切成一个椭圆形而形成相互作用反应体,因高度挤压演变成相应形状的火球。在椭圆火球中,沿碰撞参数矢量方向(即所谓的反应平面)上的能量密度下降的速度超过与之垂直方向的下降速度。因此,反应平面上的膨胀压强大,导致反应平面上的辐射物质(热密QCD物质生成时为部分子)相对于平面外具有更高的膨胀动量。这种初始碰撞几何空间各向异性演变为动量空间各向异性并被部

分子的末态强子化过程所继承。来自椭圆形火球的信号被称作“椭圆流(对应强子谱的二次谐波系数 v_2)”。NA49中半边缘Pb-Pb碰撞中 π 介子和质子都观测到 v_2 。火球部分子物质在其膨胀过程中是集体流动的,就像液体一样,可以用QCD流体动力学描述。

SPS 结果总结 2000年恰在RHIC启动之前,根据过去近十五年的实验结果,科学家们对CERN/SPS项目进行了总结和评估,评估结论是:“一种新的物质态的存在已经得到了有力的证据,它具有夸克-胶子等离子体的众多预见特性”。该结论的主要依据是基于前文的三个实验观察结果:携带奇异夸克的强子产生增强(“奇异数增强”)、 J/Ψ 介子产生压低(“异常 J/Ψ 抑制”)、低质量轻子对的产额(“ ρ 融化”)。这三种信号与预测的QGP特征最为接近,即热化、退禁闭和手征对称性恢复。实验结果均已经受住时间的考验,多年以来得到了充分的验证和精炼。与2000年相比,2005年开始采集数据的SPS NA60实验极大地改善了低质量轻子对结果,而且下文要讨论的RHIC和LHC实验中所得到的新结果提供了更多的新见解。

RHIC 上的结果简述 2000年夏季,专门建造的相对论重离子对撞机(Relativistic Heavy Ion Collider, RHIC)开始在130GeV质心系能量下运行金核-金核(Au-Au)对撞,这时重离子活动的中心从CERN转移到BNL。RHIC在第二年达到了设计能量200GeV,并在之后的十年中一直保持在能量的前沿位置,直到LHC出现。下文将简要总结其主要亮点以描述CERN/LHC这一后来篇章所具有的基础。

2005年,根据最初几年的实验运行,对RHIC的初步结果开展了总结和评估。RHIC实验总结出“一种新的高温高密物质态”已经产生,“来自夸克和胶子...但是该物质与预言的状态有极大的不同,而且更加令人瞩目。”RHIC生成的这种高温物质表现出极强的相互作用,接近完美液体,也称作sQGP(“s”表示“强相互作用”)。该物质几乎不透明,吸收任何穿过的快速部分子的大量能量(该过程被称作“喷注淬火”),此外它对压力梯度的反应是流动几乎不受阻碍且内部摩擦力极低(即具有极低的剪切粘

滞系数)。该物质的剪切粘滞系数与熵密度之比 η/s 与推测的下限 $\eta/s \geq 1/4\pi(\hbar = k_B = 1)$ 相一致,这是一个当平均自由程接近量子极限(即Compton波长)时非常强的相互作用系统达到的极限值。

5. LHC上的重离子物理学

LHC上重离子项目的主要物理目标是利用能量前沿优势,产生更大反应截面的硬探针和具有“更高温、更大体积且存活更久”的QGP物质,研制新一代强有力的大接收度和高精度的探测器,系统地研究QGP新物质形态的性质,并探索极高碰撞能量产生的新物理现象。这些实验包含专门建造的重离子探测器ALICE、和通用目标的质子-质子(pp)碰撞实验ATLAS和CMS(两者均参与到重离子研究项目中),还有通过质子-原子核碰撞参与的LHCb实验。在重离子运行的最初两年中,LHC已经极大提升了粘滞系数和等离子体不透明性的测量精度。在LHC上大量出乎意料的发现已经为一些难题或问题的解答提供了新的契机,例如粒子产生和 J/Ψ 压低等。LHC上的第一个发现是在高多重数pp反应中出现了神秘的长程“脊”(Ridge)关联。这一现象在2012年质子-原子核运行时再次出现且更加强烈,引起了浓烈兴趣,并且可能与高温高密物质的物理属性存在较大关联。

5.1 强子产生

LHC实验对粒子谱进行了精细地分类测量,得到了与SPS和RHIC测量基本相同的热粒子比率(除了与粒子和反粒子比率相关的预期差异以外),被认为是最可靠的测量。然而某些粒子特别是质子这一物质世界的基础,与预期存在极大的差异(也和RHIC测量不一致)成为令人惊讶的事情。而对于包括多奇异超子等其他粒子均与热模型预言相一致。目前“质子谜团”仍没有最终解释,可能还需要在LHC上测量更加完整的粒子比率数据,以助于我们进一步并建立更完善的强子产生统计模型。

5.2 椭圆流

2011年初LHC首次获取了方位角流的数据,

所有三个实验的结果压倒性的显示,重离子碰撞中的集体流模式比之前观测到的更为复杂,且直到傅里叶系数展开的第六项都还非常显著(v_1, v_2, \dots, v_6)!如今,这些模式被认为产生于核子-核子碰撞的天然混乱和/或CGC初态引起的逐事件的初始几何涨落。2011年之前,人们把这些关联模式命名为“近侧脊,远侧锥”并解释为“胶子切伦科夫辐射”、“马赫锥”等等。在LHC,拥有大的接收度实验加上高粒子密度使得观察和理解更加直接和清晰。自2011年以来,粘滞系数($\eta/s < (2-3) \times 1/4\pi$)的限值已经下降2倍。目前精确度甚至足以看出对温度的依赖关系,即从RHIC到LHC有微小的增加。

初态能量密度以核半径大小级别的涨落可靠地转变成末态可观测速度的涨落,是一个最令人惊奇且很有意义的发现,对流体的分析焕发活力,从此得到了快速发展,包括利用逐事件对流进行测量和选择作为分析工具对涨落谱的直接测量,甚至在不同的谐波间发现了非线性混合模式。

5.3 喷射淬火

高能量的部分子(夸克和胶子的统称)穿越QGP物质与其发生相互作用损失能量,主要是通过介质诱发胶子辐射,弹性散射损失能量的份额相对较小。能量损失依赖介质的性质,特别是介质的不透明性和穿越路径长度。此外,还通过色荷依赖于部分子类型(夸克与胶子),通过形成时间和干涉效果依赖部分子质量(轻夸克与重夸克)。因此,高能部分子喷射淬火(例如:测量改变的碎裂函数)是一个包含非常丰富信息的观察量,是诊断QGP物质性质和研究强相互作用的强有力探针。

LHC具有高能量和相应的硬过程大截面优势,使得高能喷射很容易从中心核碰撞的背景中分离出来(图8),喷射淬火很容易鉴别和测量。实验观测到高能部分子在介质中能量损失达到几十个GeV。双喷射保持背对背的(相对于pp而言,非常小或没有角度加宽)方向,而且在极低 p_T 粒子($< 2\text{GeV}/c$)中和相对喷射的大角度方向上发现了辐射

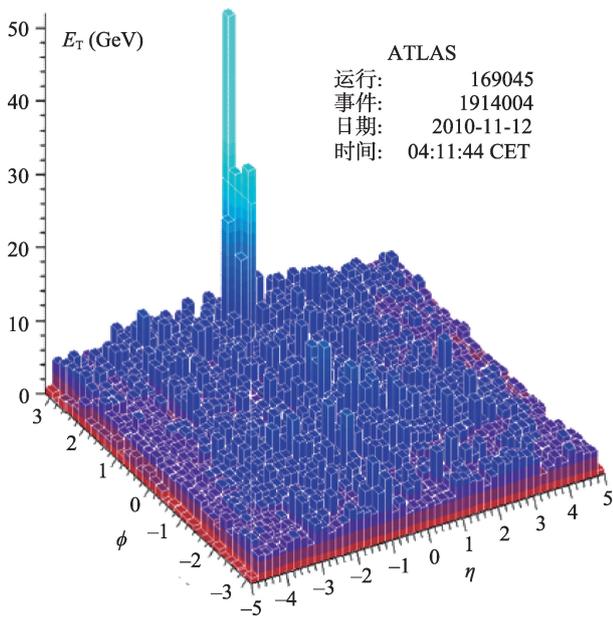


图8 非常不对称(淬火)双喷注事件的量能显示

的能量(ΔE)。后两者的发现最初令人感到惊讶,如今被理解为多重软散射造成能量损失而辐射的胶子以较大的角度分离出来而致。之后,部分子会离开热密物质并经历正常的真空碎裂,即看起来像普通的pp喷注,但能量大幅减少。

能量损失过程得到的另一见解来自重味。粲介子的压低几乎与单举带电粒子的压低相同,其结果出人意料且最初令人困惑。目前,胶子(大多数带电粒子的来源)和重夸克具有相似能量损失被理解为夸克与胶子的耦合强度(色荷)差异与它们不同的碎裂函数两者间的偶然抵消。但是,质量效应似乎与预测的相同:在中等 p_T 时,底夸克(beauty)的压低小于粲夸克,但在高 p_T 时b喷注和遍举喷注显示相似的修正。

5.4 夸克偶素压低

SPS发现的“反常” J/Ψ 压低被视作QGP最强烈的标志之一,而RHIC的结果显示在更高的能量下压低基本相同,这与不论QGP还是非QGP模型中的大多数期待和预言相反。这些初始非常令人困惑的结果使得过去十年里这一退禁闭的最直接信号一直很难理解。因此,有建议认为 J/Ψ 压低实际上随着能量一起增加(即从SPS到RHIC),但或多或少

被新的产生机制所平衡:当达到部分子-强子相变边界时,两个从等离子体独立产生的粲夸克像较轻的夸克那样通过强子化结合在一起,从而形成了 J/Ψ 。事实上,LHC的数据似乎已经解答了 J/Ψ 的谜团,倾向于这一重结合物理图像:LHC上较大的粲截面造成比RHIC更少的 J/Ψ 压低(图9)。而且压低在更容易重结合的相空间即低 p_T 时也较弱,而这一对于 p_T 的依赖明显与SPS和RHIC上发现的结果相反。

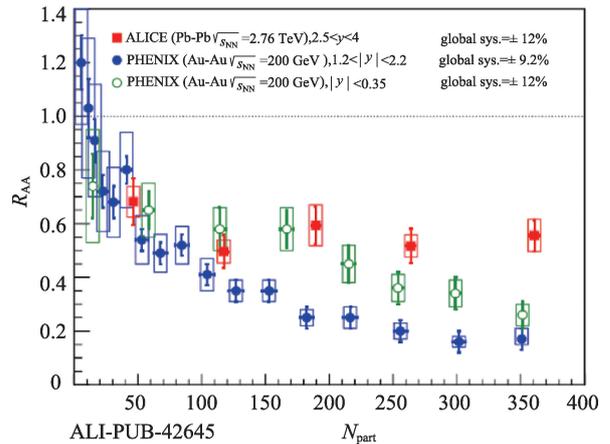


图9 RHIC和LHC能区 J/Ψ 压低的碰撞中心度依赖。 N_{part} 是对应中心度的参与反应核子数目

5.5 发现

在2010年9月,CMS实验发现了在7TeV时极高多重数pp碰撞中存在一个神秘的“长程快度关联”。图10(左侧)中显示了pp碰撞中所有中等 p_T (1~3 GeV/c)的粒子对之间的快度 $\Delta\eta$ 及方位角 $\Delta\phi$ 关联。除了单个喷注里粒子关联特征出现在(0,0)处“近侧峰”处,而两个粒子分别来自于背对背的喷注对的方位角 $\Delta\phi=\pi$ “远侧脊”处以外,关联结构在 $\Delta\phi=0$ 时显示出一个虽小却很明显的第二脊。该“近侧脊”可以视作迄今为止最令人意外的LHC发现之一,而且该发现也带来了各种不同的解释。其中最有力量的观点当属饱和物理描述,类似于色玻璃凝聚态(CGC)模型,以及集体性的流体动力学流。

在两年后首次LHC质子-原子核运行再次确认发现脊的存在(图10(右侧), $\sqrt{s_{NN}}=5\text{TeV}$ 的p-Pb),并且在相同的多重数下质子-原子核的关联强度远大

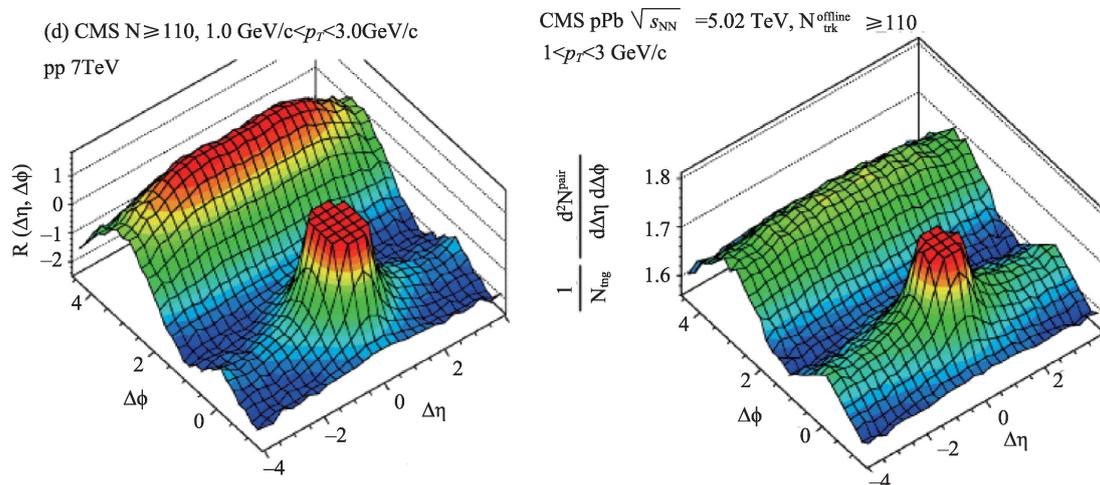


图10 高多重数pp碰撞(左侧)与p-Pb碰撞(右侧)的 η - ϕ 中双粒子关联函数

于质子-质子碰撞:该脊实际上是在同侧和异侧都存在,即显示了方位角方向既有接近粒子也有背对背向粒子之间的关联;傅里叶分析同时显示出偶数(v_2)和奇数(v_3)分量;关联强度对粒子质量的依赖关系几乎与流体动力学模型预言的结果相同;最后,采用多粒子方法测量的关联强度几乎与只使用两个粒子测量的强度相同。因而可靠地证明了该脊属于真正的集体效应。

那么,这样小的(几个 fm^3)pp系统怎样才能很短的时间内热化呢?甚至成为一个sQGP小水滴呢?在LHC上的pp和pA碰撞中发现的脊绝不仅仅是令人好奇的存在,而是可能会对重离子物理学产生深远的影响。如果sQGP(类似)态可以在比预期小得多的系统中形成并研究,我们可以对比pp、p-A和A-A以便找出有限尺度效应,得到有关关联强度和弛豫时间大小的信息,这些信息在其他地方并不容易得到。相反,如果初态效应和饱和物理学就是答案,那么在LHC上就发现另一种新的物质形态,即色玻璃凝聚态,从而为实验和理论拓展一个全新且丰富的研究领域。

6. 结语

CERN在重离子物理学的产生和发展过程中,是一个坚定不移的中坚力量。在30年如此短的时间内,核物质相的研究已经从固定靶能量下几个

GeV/核子的轻离子反应,发展到质心系下几个TeV/核子的重核反应,有效能量增加了三个量级。夸克-胶子等离子体的观点已经得到戏剧般的发展,从一个简单的弱相互作用部分子气体发展到强相互作用理想流体,并可能在所谓的“夸克态”即弦理论框架找到相应的理论描述。

如今,重离子研究计划在高能和低能两方面均非常活跃且具有竞争力,着眼于描绘相变图,定位普通物质相到sQGP相的转变,并寻找在SPS固定靶能量或更低能量区域下所推测的“三相临界”点。正在建造中的两个全新的低能设施(GSI的FAIR和JINR的NICA),用于研究压缩物质,即高重子密度但(相对)低温,从而相结构可能非常不同(一阶相变),物质更接近于中子星而不是早期宇宙。但是,LHC因其良好规划和可扩展的项目,在目前和可预见的将来仍然是高能物理学方面,同时也是核物理学方面最前沿的高能设施。LHC在牢固根植于标准模型的强相互作用物理学方面已经不断给了我们惊讶和发现,必将能在相当长的时间内确保重离子物理学的巨大吸引力和趣味性。

摘译自 60 year of CERN Experiment and Discoverise 中 Jurgen Schukraft 和 Reinhard Stock 所著的 *Toward the limits of Matter: Ultra-relativistic Nuclear Collisions at CERN*。希望了解更多细节的读者也可参考“CERN 60 年的实验与发现”中译本(将于近期由科学出版社出版)的相应章节。