

大型强子对撞机 LHC 上的 ALICE 实验

周书华

ALICE 大型离子对撞机实验 (A Large Ion Collider Experiment) 是欧洲核子中心 (CERN) 的大型强子对撞机 LHC 上的 4 个主要国际合作项目之一。合作组包括 36 个国家的 132 个研究单位的约 1200 位物理学家、工程师和技术工人。其中包括约 200 多研究生。中国原子能科学研究院、华中师范大学和华中科技大学参与了 ALICE 国际合作。

ALICE 的物理目标是研究夸克禁闭问题及质子与中子比组成它们的夸克要重 100 倍的问题。夸克禁闭问题指的是, 在通常情况下, 为什么夸克被囚禁在强子中, 实验上从未看到过自由的夸克? 是否夸克囚禁的机制与质子和中子远重于组成它们的夸克质量之和有关?

量子色动力学 (QCD) 预言, 在重子密度极高时 (如中子星内部) 或重核碰撞产生极高的温度时 ($T \sim 150 \sim 160 \text{ MeV}$ 以上), 正常的核物质将发生相变, 夸克将从强子中释放出来 (即退禁闭), 成为夸克胶子等离子体 (QGP)。自然界中, QGP 是在 140 亿年前宇宙大爆炸后几微秒内生成的弥漫在整个宇宙中的一种物质形态。此后夸克逐渐结合成质子、中子等,

并通过核反应生成各种元素, 组成我们现在看到的世界中的各种物质。力图在实验室中产生夸克胶子等离子体, 验证 QCD 的预言, 并研究 QGP 的性质, 是当前物理学的前沿领域。

在 ALICE 实验之前已有在 CERN 的 SPS (超级质子同步加速

器) 上进行的 33 TeV 的 Pb 打固定的 Pb 靶实验, 在美国布鲁克海文国家实验室的相对论性重离子对撞机 RHIC 上进行的每核子 200 GeV 的 Au-Au 对撞实验, 其质心系中的能量比 SPS 实验高 12 倍, 在 RHIC 上的实验中, 发现了 QGP 产生的证据。分析结果显示, 所形成

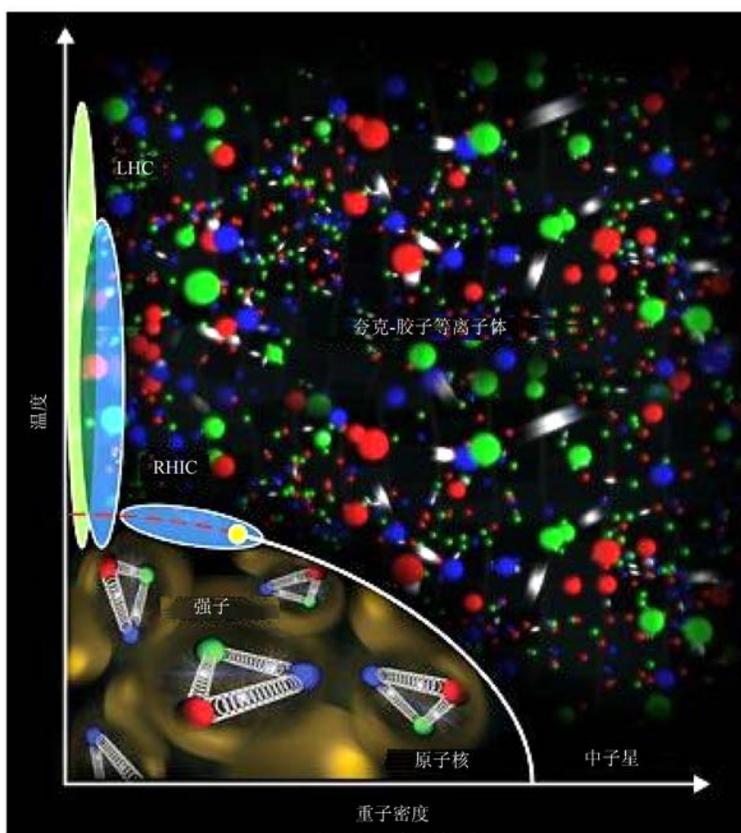


图 1 核物质相图。紧贴纵轴的浅色椭圆区域是宇宙大爆炸几微秒内的高温 QGP 状态, 靠近纵轴的灰色椭圆和曲线上的椭圆区域分别是 LHC 和 RHIC 上重离子碰撞可以达到的温度。白色曲线是强子物质与 QGP 之间相变的边界。中子星是在沿着重子密度增加的方向越过相变边界的区域

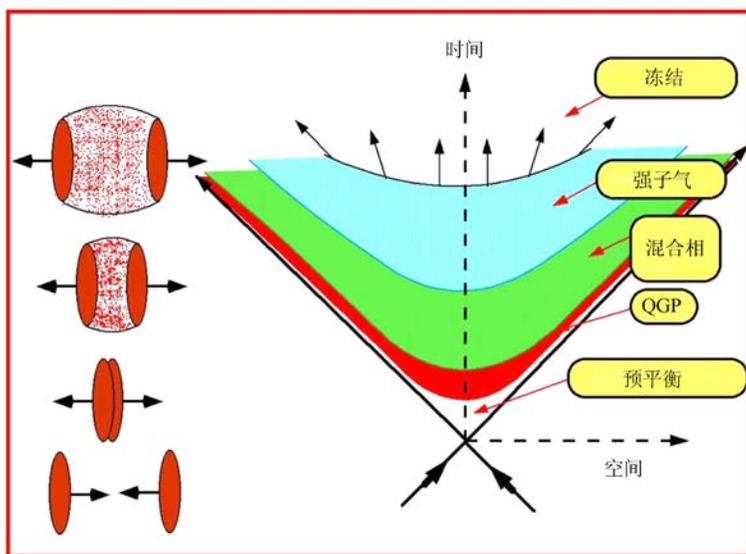


图2 高能重离子碰撞形成的系统的时空演化

的QGP性质如强相互作用的液体。

ALICE 实验利用 LHC 产生的每核子 5.5 TeV (比 RHIC 的能量高 28 倍) 的重离子 (Pb-Pb) 对撞, 产生夸克-胶子等离子体 (QGP), 研究其性质。RHIC 上的实验刚达到相变的边界, LHC 上的 ALICE 实验则更深入到 QGP 相的内部 (见图 1)。

高能重离子碰撞中所形成的系统的演化可以分成几个阶段如图 2 所示。碰撞后形成高温高密的介质 (火球), 从预平衡阶段 (Pre-equilibrium) 过渡到热平衡形成 QGP 相, 然后开始膨胀和冷却, 经过 QGP 与强子混合相 (Mixed phase) 的阶段, 再发展到强子气 (Hadron gas) 阶段, 这时的 QGP 已强子化成热密的强子气, 强子之间还发生着非弹性和弹性的相互作用, 进一步冷却后, 当温度低于化学冻结的温度时, 非弹性散射终止, 达到化学平衡, 强子的成分不再发生变化, 当强子气继续膨胀, 变得

更稀薄时, 达到动力学平衡, 弹性散射也终止, 成为强子间不再有相互作用的自由传播的冻结 (Freeze out) 状态, 可被探测器接收。在碰撞系统演化的各个阶段还有大量的光子产生。强子和光子携带着反映系统状态的信息。

为了在实验中捕获 QGP 生成及反映 QGP 性质的信息, 需要获取尽量多的可观测量, 例如: 与反应体系总体特征有关的碰撞产物的粒子多重性, 粒子横速度的分布等; 与碰撞形成的火球温度有关的强子比、强子谱、双轻子连续谱、直接光子谱等; 反映集体效应早期表现的椭圆流; 反映部分子在夸克胶子等离子体中能量损失的喷注淬灭, 粒子的高横动量谱, 开放粲素粒子, 开放底素粒子; 与夸克退禁闭有关的粲粒子与底粒子谱学, 奇异性产额, 夸克偶素的压低; 与手征对称性恢复有关的中性粒子与带电粒子的比值及衰变; 与涨落现象-临界行为有关的逐个事件粒子数统计及

粒子谱; 与辐射源的几何形状有关的 HBT 相干学, 等等。

ALICE 探测器装置如图 3 所示, 其设计考虑到覆盖上述各种观测量的探测。包括测量强子、双电子、双 μ 子、光子的探测器。

2010 年末和 2011 年末 ALICE 曾进行了每核子 2.76 TeV 的 Pb 与 Pb 的碰撞实验, 所得到的一些重要结果如下:

粒子多重性 (particle multiplicity)

在每一次碰撞中产生的粒子数与碰撞的中心度有关, 可以给出碰撞中达到的能量密度以及所形成的火球的温度。在这两轮实验中, ALICE 测到中心碰撞时带电粒子的多重性是 RHIC 测到的多重性的两倍。相当于碰撞产生的火球温度比 RHIC 高 30% 以上。

流 (flow)

对流的测量可以给出重离子碰撞所产生的物质的状态方程及输运特性。产物组分中的多重相互作用和非对心碰撞空间几何的初始非对称性导致所产生的粒子在方位角上的各向异性。将所测到的动量空间中粒子的方位角分布进行傅里叶展开时, 展开式中的第二项系数称为椭圆流。其大小与所生成的物质的摩擦力有很大关系。通常用物质的剪切粘度与熵的比值 η/s 来表示, 在 RHIC 上测到的椭圆流显示, 在重离子碰撞中产生的热物质像摩擦力很小的液体一样流动, 其 η/s 值接近完美液体的下限, 是热物质处于 QGP 状态的重要信号。在 LHC 上证实了这一发现。其椭圆流的大



图3 ALICE实验装置。包括：高横动量粒子鉴别探测器(HMPID)，跃迁辐射探测器(TRD)，时间投影室(TPC)，光子多重性探测器(PMD)，内部跟踪系统(ITS)，飞行时间探测器(TOF)，前向多重性探测器(FMD)，光子谱仪(PHOS)， μ 子谱仪(MUON SPEC)，红色的部件是磁铁。此外还有图中没有示出的电磁量能器及零度中子量能器等

小比 RHIC 上测到的高 30%。

火球 (fire ball) 的大小与寿命

利用玻色-爱因斯坦相干学技术 (或称 HBT) 可以测量重离子碰撞中产生的火球的大小和寿命。这种技术是汉伯里 (Hanbury)，布龙 (Bron) 和特威斯 (Twiss) 在天文学研究中发明的，实验中观测一对 π 介子。在强子与离子碰撞中，由于玻色-爱因斯坦统计，在相空间中彼此很靠近的玻色子数量增多。这导致在低的相对动量处有过剩的粒子对。由 ALICE 的测量结果推算，辐射源从重离子相撞到 π 介子发射达到最大值的时间为 $10 \sim 11 \text{ fm}/c$ ，比 RHIC 测到的时间要长很多。而辐射源三维半径的乘积是 RHIC 结果的两倍。这意味着 LHC 上重离子碰撞比较低能量的 RHIC 碰撞产生的火球温度更高，寿命更长，体积膨胀的更大。

部分子的能量损失，喷注淬灭 (jet quenching)

重离子碰撞产生的部分子 (夸克和胶子) 在通过火球时会通过胶子辐射或弹性散射损失能量。辐射能量与所通过的介质的密度及部分子在介质中传播的长度有关。同时还与部分子的味有关。部分子强子化后成为可观测到的强子喷注，部分子的能量损失则表现为喷注淬灭现象：重离子对撞中产生的喷注是具有相似能量的背对背发射的一对喷注。但是，实验上却观测到明显不对称的现象：一对喷注中的一束喷注几乎完全被介质吸收。喷注淬灭现象反映了碰撞中生成的介质的核效应，是判断产生 QGP 的信号之一。

直接光子 (direct photons) 和 QGP 温度的测量

热光子辐射是 QGP 产生的经典信号之一。热光子谱反映了系统

的温度。由于光子的平均自由程比核的尺度大很多，这些光子在核-核碰撞产生的反应区内不会受到散射。因此直接光子可以提供直接检验碰撞中早期的热相的手段。但是热光子在反应演化的各个阶段都有产生，即使到了 QGP 跃迁到热的强子气后也会产生。在 LHC 的 Pb-Pb 对撞中，预计热光子是低能光子 (横动量 p_t 小于 $5 \text{ GeV}/c$) 的重要来源。实验探测这些光子的困难在于来自强子衰变的大量本底，其中主要是中性 π 介子和 η 介子的双光子衰变。

直接光子，区别于强子衰变产生的光子，是指初始的硬散射中产生的光子，包括瞬发光子和喷注碎裂产生的光子。这些光子在质子-质子碰撞中已有产生。对于 p_t 大于 $4 \text{ GeV}/c$ 的光子，所测量的光子谱与领头阶 QCD 计算的初始硬散射的光子谱相符合。但是更低 p_t 的光子谱具有指数函数的形状，而且明显地高于对硬散射的预期值。ALICE 测量到的光谱逆斜率参数 $T_{\text{LHC}} = 304 \pm 51 \text{ MeV}$ ，比 RHIC 的结果 $T_{\text{RHIC}} = 221 \pm 19 \pm 19 \text{ MeV}$ 要高。在典型的流体动力学模型中，这个参数相当于对反应演化过程时间平均的有效温度。测量结果意味着初始温度远高于强子物质跃迁为 QGP 的临界温度 $150 \sim 160 \text{ MeV}$ (大约 $1.8 \times 10^{12} \text{ K}$)。而 ALICE 结果表明在 LHC 上已生成了实验室中从未产生过的最热的物质。

奇异性增强 (strangeness enhancement)

我们周围的物质是由中子和

质子组成的，而中子和质子又是由上夸克（u 夸克）和下夸克（d 夸克）组成的。下一个可以从真空中成对的夸克 - 反夸克海中释放出来的夸克是奇异夸克（s 夸克）。s 夸克比 u 夸克和 d 夸克重些，但在产生过程方面很接近。s 夸克在强相互作用中的相对丰度使得它成为研究质子 - 质子碰撞及重核碰撞中很有用的工具。奇异粒子如 K 介子（由一对奇异夸克和非奇异夸克组成）， Λ （uds）， Ξ （dss），和 Ω （sss）重子在衰变成一般物质之前有相当长的寿命。这些粒子的衰变具有特征的几何结构，根据这种结构可以有效地重构奇异粒子。在 p-p 碰撞中得到的奇异性数据对于改进描述这些碰撞的模型是非常重要的。

PYTHIA 是根据一种模型来计算高能重离子碰撞中产生的事件的软件包。该模型将基本碰撞中的低动量过程参数化，计算高能过程直到微扰 QCD 展开式中的领头阶微扰项。最新版本的 PYTHIA 可以相当好地描述真实碰撞的一般特性。但是大大低估了奇异粒子的产额。粒子中的奇异性成分越多，分歧就越大。最近的一个版本 PYTHIA Perugia-2011 对 s 夸克截面做了重大修改，结果能很好地再现具有多奇异夸克的重子的产额，尤其是在较高的横动量区再现得更好。ALICE 是 LHC 上唯一测量了 p-p 碰撞中 Ω 重子产额的实验。此外，p-p 测量是预期产生 QGP 的 Pb-Pb 测量的基础。带有奇异夸克的粒子的产额增强一直被认为是在 QGP 中额外自由度的信号。这种增强在

低能处测量到了。碰撞的体积越大，相对于基础（p-p 或 Be-Be 碰撞）来说， Λ ， Ξ 和 Ω 的数量增加得也越多。这一现象在 2.76 TeV Pb-Pb 碰撞中也观察到了。但是，需要附加说明的是，这种增强要比低能时增强的小。这可能是因为较高能量的情况下，p-p 碰撞更复杂，会产生比低能时更多的奇异性。

粲介子（charmed mesons）

ALICE 合作组在 LHC 上的 Pb-Pb 对撞中测量了粲介子 D^- 和 D^+ 。在最近进行的对头碰中，发现，相对于对大的横动量 P_t 所预计的产额来说，有很大的压低。表明，粲夸克在 LHC 上所形成的热密 QCD 物质中损失了大量能量。这是首次在核 - 核的中心碰撞中直接测量到 D 介子的压低。重味粒子是核 - 核碰撞中形成的高激发介质的有效探针，通过在介质中的能量损失机制对介质的能量密度灵敏。在研究硬的部分子与介质的相互作用时，核修正因子 R_{AA} 是一个灵敏的观测量。 R_{AA} 等于核 - 核碰撞中测量到的产额与预计的 p-p 碰撞的产额之比。由于部分子能量损失的 QCD 特性，携带一个色荷的夸克比携带 2 个色荷的胶子损失的能量要少。此外，根据所谓的死锥角（dead cone）效应及其他一些机制预计，与轻的部分子相比，重的部分子的能量损失将减少。因此当从轻味的强子（如 π 介子）到较重的 D 和 B 介子会有： $R_{AA}(\pi) < R_{AA}(D) < R_{AA}(B)$ 。这里， $R_{AA}(\pi)$ ， $R_{AA}(D)$ 和 $R_{AA}(B)$ 分别是具有轻夸克的 π 介子的核修正因

子，具有重夸克的 D 介子和 B 介子的核修正因子。核修正因子大，表示粒子在介质中的能量损失小。对这些不同探针的测量和比较可以提供关于部分子能量损失与色荷及质量的依赖关系。

在 RHIC 200 GeV 的 Au-Au 对撞中实验中，通过单举衰变电子的 R_{AA} 的测量，间接地测量了重味强子的压低。使用 LHC 上的首轮 2.76 TeV Pb-Pb 对撞数据，通过对 $D^0 K^- p^+$ 和 $D^+ K^- p^+$ 衰变道的衰变顶点的重构，测量了瞬发 D 介子的产额。结果表明，在 P_t 大于 5 GeV/c 时，有 4 ~ 5 倍的压低。这与带电的 π 介子的压低情况同样大。在较低的动量处，对 D 介子的压低比 π 介子要小。这些结果表明重夸克在介质中遭受很强的能量损失，这现象在 ALICE 合作组在对重味衰变生成的电子和 μ 的压低，以及 CMS 合作组对 B 介子衰变产生的 J/Ψ 粒子的压低测量中也显示出来。

神秘的 J/Ψ

J/Ψ 粒子是由强的色相互作用结合在一起的一对粲夸克 - 反粲夸克组成的，两个夸克在相距约 0.5 fm 的距离上做轨道运动。但是，如果这样一种状态被放置在 QGP 中，两者之间的结合就会受到 QGP 中自由运动着的大量色荷（夸克和胶子）的屏蔽。这就使得组成 J/Ψ 的夸克和反夸克之间的束缚减弱，最终使夸克对解散， J/Ψ 粒子消失，即其产额被压低。理论计算表明，夸克与反夸克对的解散与 QGP 的温度有关，所以对 J/Ψ 压

低的观测可以看作将一个温度计放在 QGP 介质中。对于色相互作用的屏蔽及所导致的 J/Ψ 粒子产额的压低，在 SPS 上的质心系能量为 17 GeV 的 Pb-Pb 相互作用，以及在 RHIC 上质心系能量为 200 GeV 的 Au-Au 对撞中曾进行过测量。实验观测到奇怪的现象，虽然 RHIC 上实验的能量比 SPS 的能量要高一个数量级以上，因而温度更高，但是 J/Ψ 粒子压低的情况大致相同。对此疑难问题还没有明确的解释。

但是在 LHC 上，预期会有新的进展。特别是由于高得多的质心系能量，在核相互作用中会产生更多的粲夸克与反粲夸克对。这样，当系统膨胀和冷却并最终越过 QGP 和强子气之间的温度边界时，会发生粲夸克与反粲夸克的统计性的结合，这种 J/Ψ 粒子再生成的过程将补偿在热的 QGP 相中 J/Ψ 粒子产额的压低。如果粲夸克对的密度足够高，那么这种再生过程甚

至会导致 J/Ψ 粒子产额的增加，至少比低能实验的情况的压低要小得多。观察在 LHC 的核碰撞过程中 J/Ψ 粒子的命运是 ALICE 实验的目的之一，也是 LHC 上 Pb-Pb 对撞优先实验之一。

ALICE 实验特别适于观测 J/Ψ 粒子再生过程。由于简单的运动学原因，对于低横动量的粲夸克可以更容易观测再生过程。ALICE 探测器的中心部分可以探测 $J/\Psi \rightarrow e^+e^-$ ，而 μ 子谱仪可以探测 $J/\Psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ ，两者都可以探测直到零横动量的 J/Ψ 粒子。

在 2010 年的实验中测量了 J/Ψ 粒子的产额与碰撞中心度之间的关系，从边缘碰撞到中心碰撞的 5 个间隔内，将每核子能量相同的 p-p 碰撞与 Pb-Pb 碰撞的 J/Ψ 粒子产额相比较，核修正因子 R_{AA} 小于 1 意味着压低，大于 1 意味着增强。

与低能时的观测相比，结果很令人惊奇。在 LHC 能量，对于边缘碰撞观测到类似的压低，当向着

更中心碰撞移动时（有更多的 Pb 中的核子参加反应），压低不再增加。因此，尽管在 LHC 能量的核碰撞中达到的温度更高，与 p-p 对撞相比，Pb-Pb 对撞中 ALICE 实验测到更多的 J/Ψ 粒子。这种效应很可能与在 QGP 和强子气的温度边界发生的再生过程有关。即在 LHC 上 Pb-Pb 碰撞中生成的退禁闭的系统（QGP）压低 J/Ψ 粒子，而在随后的强子系统中又有一部分粲夸克和反粲夸克相结合成 J/Ψ 粒子，最终给出的 J/Ψ 粒子产额比低能时观测到的要大。

为了在探测到的信号中扣除不是来自 QGP 的信号，ALICE 还需进行非对称的 p-Pb 对撞实验。因为在 p-Pb 对撞中不会生成 QGP，所测到的信号是应扣除的本底信号。

预期在 ALICE 以后的实验中会有更激动人心的发现。

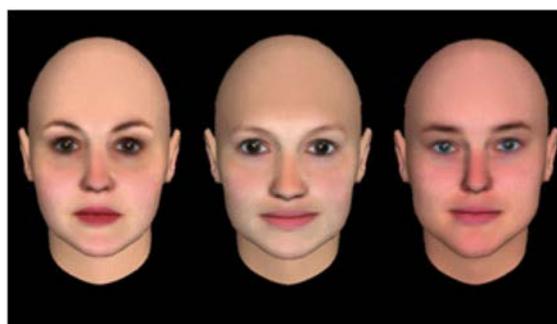
（中国原子能科学研究院 102413）

科苑快讯

“情人眼里出西施”原是脑电流使然。激情澎湃还是毫无兴趣，当你看到颇具吸引力的脸庞，激情的火花是由一个称为中脑腹侧的大脑区域点燃的，该部位与处理奖赏有关。现在，研究者已经发现 2 mA 的电流就可以点燃激情的火花。利用经颅直流电刺激（transcranial direct current stimulation, tDCS）技术，即在头皮上安放两个电极对大脑通电，研究者招集 19 名志愿者在中脑腹侧刺激前后对两组计算机产生

的白人男女中性表情的面部图像（如图）进行吸引力评估。其中一组接受的是假电流刺激，即只产生刺痛感而并无电流。结果在 8 分制的评估中，接受经颅直流电刺激的志愿者明显认为第二组面部图像更具吸引力，该论文已发表在 6 月的《转化精神病学》(Translational Psychiatry) 上。

研究者并不赞成借此蛊惑梦中情人。恰恰相反，他们希望利用



该技术以非药物和非侵入式外科手术方法操纵大脑深部区域，以治疗中脑腹侧电路紊乱所致的疾病，如帕金森氏症和精神分裂症。

（高凌云编译自 2013 年 6 月 12 日 www.sciencemag.org）