

# 大型强子对撞机上的大型重离子碰撞实验

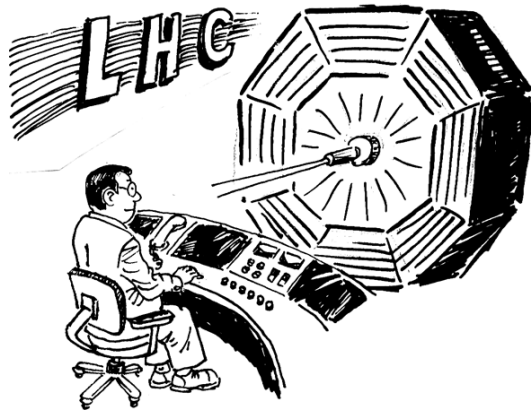
周代翠 殷中宝

探索物质微观结构和新的物质形态始终是人类认识物质世界的基本规律的一个重要组成部分。随着物理学的发展,人类对物质的微观结构的认识逐步深入,先后认识到:物质世界是由原子组成的,是原子或由原子结合在一起形成的分子组成世界万物;原子又是由原子核和核外电

子组成的。由于原子内部结构的差异,不同元素的原子(如氢、金、铅等)表现出不同的物理和化学性质;原子核是由质子和中子(统称为核子)组成的;而质子和中子又是由夸克和胶子组成,是胶子将夸克捆绑在一起的。由于夸克间的相互作用很强,夸克被牢牢地囚禁在核子之中,自身无法独立存在。

伴随着对微观世界认识的逐步深入,人类对物质形态的认识也日益丰富。人类认识到,由原子、分子组成的物质具有固、液、气三种形态,并且在一定的条件下,它们能够从一种形态转化到另一种形态。当认识到原子是由原子核和电子组成的体系后,人类发现了由原子核和电子组成的宏观系统——电磁等离子体,电子不再束缚于原子之中。当认识到原子核是由核子组成的微观体系后,人类又观测到了由核子直接组成的宏观系统,如中子星。当人类认识到核子和其他强子是由夸克和胶子组成时,不禁要问:能否存在由夸克和胶子直接组成一种比核子线度大得多的系统,即所谓的夸克-胶子等离子体(QGP)?

用来描述夸克、反夸克和胶子间的强相互作用的基本理论是量子色动力学(QCD),夸克囚禁和短距离的渐近自由行为是该理论的两大推论。此外,QCD理论计算表明,夸克间的相互作用势的强度随着温度的增加而减小。当温度增加到某一临界温度(约 $2 \times 10^{12}$ 度)时,囚禁势趋于零,强子不再作为独立身份而存在,夸克禁闭被解除而处于退禁闭状态。理论预言,当温度达到太阳中心温度的十万倍时,夸克禁闭会解除,核物质以夸克-胶子等离子



体形式存在。另一方面,在低重子数密度下,禁闭于核子内部的夸克是渐近自由的。当密度急剧增加到核子间距小于核子的半径(约0.8飞米,1飞米为 $10^{-13}$ 厘米)时,核子之间彼此不再有空隙,核子相互重叠,以至于核子的边界消失,核物质内将不再存在强子,只有趋于渐近自由状态的

夸克和胶子,即强子物质发生退禁闭相变,生成夸克-胶子等离子体。也就是说,在极端高的密度条件下,如在中子星的内核,夸克-胶子等离子体可以存在。

固体被加热到一定程度会变成液体,继续加热,液体会变成气体。这种从固态→液态→气态的相变也可以逆向进行,即随着温度的降低,物质可以由气态转变为液态和/或固态。夸克退禁闭相变与固、液、气之间的相变相类似,通过压缩和加热核物质(如图1所示)可以产生夸克-胶子等离子体。图中用小圆圈表示夸克,连接夸克的线段表示胶子。在核压缩和加热前,三夸克和胶子囚禁于原子核中的核子之中,随着压强和温度的增加,新的粒子(主要由正、反夸克组成的 $\pi$ 介子)会产生;当压强和温度达到相变临界点时,相变会发生,形成夸克-胶子等离子体态。夸克-胶子等离子体产生之后,由于体系膨胀而冷却,当温度降低到相变临界温度时,最终会发生从夸克胶子等离子体相向强子相的转变。人们猜测在宇宙大爆炸初期,由于温度和能量密度极高,物质应以夸克-胶子等离子体的形态存在,并且在大爆炸后 $10^{-5}$ 秒经历了从夸克-胶子等离子体到强子的相变。为此,人们认为对夸克-胶子等离子体的研究将有助于更好地认识宇宙的起源。图2为宇宙演化示意图。

从理论上研究夸克-胶子等离子体存在的依据和它的性质,从实验上探寻产生和发现夸克-胶子等离子体的方法及其信号,已经成为核物理、粒子物理、统计物理、天体物理和宇宙学共同关注的当

代物理学前沿的一个重大课题。研究夸克-胶子等离子体的主要目的是：确定在高温高密条件下强相互作用物质的性质，建立在夸克层次上的强相互作用物质的状态方程，确定由强子物质到夸克-胶子等离子体相变的条件、参数和性质，以加深对宇宙的原始物质形态的认识。本文将简要地介绍产生和探测夸克胶子等离子体的超相对论重离子碰撞实验的现状，以及即将运行于欧洲核子中心的大型离子对撞机实验——ALICE。

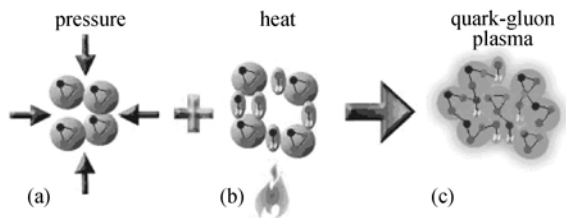


图 1 通过压缩和加热核物质实现强子相到夸克-胶子等离子体相的转变示意图。(a)压缩；(b)加热；(c)生成夸克-胶子等离子体

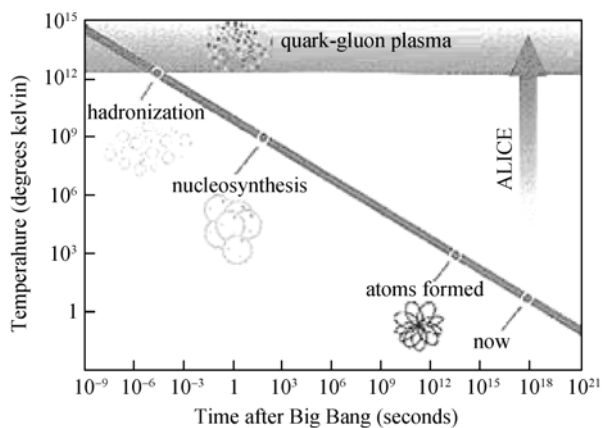


图 2 宇宙演化示意图

### 一、超相对论重离子碰撞实验现状

20 世纪 70 年代中期，李政道先生等倡导，将重离子加速到接近于光速，进行碰撞，把巨大的动能转化为热能，以创造出退禁闭的高温和/或高密度的相变条件，从而在人类可以控制的实验室环境里

观测夸克-胶子等离子体这种新物质形态。依据碰撞能量的不同，碰撞能区可以分为两个部分：阻塞能区和透明能区。在阻塞能区，相互碰撞的两个核的核子全部或部分地相互阻挡，速度减慢而停止，动能充分转化为热能，能量密度可高达 20—30 亿电子伏特每立方飞米，在碰撞中心区形成高重子丰度的夸克-胶子等离子体。在更高能量下的透明能区，接近于光速飞行的重离子由于洛伦兹收缩效应而表现为两个圆盘（如图 3(a)所示），当两个重离子剧烈的碰撞时，两重离子的核子在经历多次碰撞损失大部分动能后，依然有足够的能量继续穿过中心区（如图 3(b)所示），而在碰撞中心形成重子数密度几乎为零的高温、高能量密度的夸克-胶子等离子体（如图 3(c)所示）。在超相对论重离子碰撞中产生的夸克-胶子等离子体会快速膨胀而冷却，当温度达到相变临界温度时，发生从夸克-胶子等离子体到强子物质的相变（如图 3(d)所示），产生大量的末态强子（如 $\pi$ 介子、 $k$ 介子、质子等）。整个演化过程从碰撞开始，历经夸克-胶子等离子体，到末态强子化，仅仅历时约为  $10^{-23}$  秒。在实验上，通过观测超相对论重离子碰撞的末态产物（如光子、轻子、 $\pi$ 介子和  $K$  介子、正反重子、奇异粒子、重味粒子等）的谱分布，并与不会产生夸克-胶子等离子体的质子-质子或质子-核碰撞中的末态粒子谱相比较，得到重离子碰撞及其演化各阶段的信息。而与有关碰撞物理机制的理论模型的预言相比较，可以判断在重离子碰撞中是否生成了夸克-胶子等离子体这一新的物质形态。

自 20 世纪 80 年代中期以来，在美国布鲁克海汶国家实验室（BNL）的交变梯度同步加速器（AGS）、欧洲核子研究中心（CERN）的超级质子同步加速器（SPS）以及俄罗斯杜布纳(Dubna)联合核子研究所（JINR）的加速器上分别进行了固定靶系列实验。在 BNL 的 AGS 和 Dubna 的 JINR 上，是用每核子能量为 2—14.6 GeV（1GeV 即  $10^9$  电子

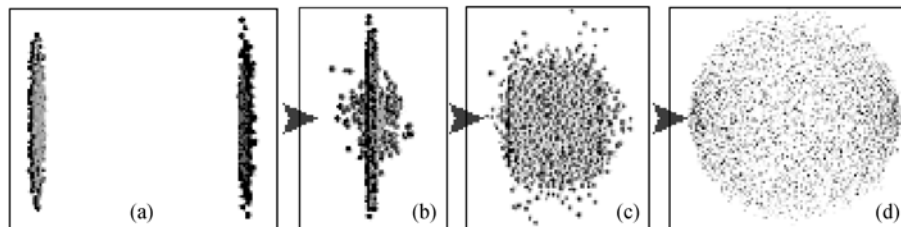


图 3 相对论重离子碰撞及其演化示意图

伏特)的质子、氧、硫、硅和金核为射弹轰击固定靶,研究重离子诱发的核反应。由于实验能量较低,因核阻塞效应较强,重离子碰撞的末态产物在碰撞中心区具有丰重子的特征,没有观测到夸克-胶子等离子体形成的直接证据,但观测到了末态强子集体运动现象和奇异粒子增强现象。

在 CERN 的 SPS 上,先后运行了每核子 60 GeV 和 200 GeV 的氧离子束流、200 GeV 的硫和金离子束流、以及 20 GeV, 30 GeV, 40 GeV、80 GeV 和 158 GeV 的铅离子束流的固定靶实验。从末态强子在中心快度区的粒子数密度,人们估计在 SPS 上的重核碰撞产生的能量密度已达到夸克-胶子等离子体相变的临界能量密度,新的物质形态可能在该能区产生了。SPS 能区的铅-铅碰撞实验结果的确向人们展示了夸克退禁闭的某些迹象,就在 2000 年 2 月, CERN 宣布在 SPS 能区观测到反应 QGP 相变的如下迹象:双轻子对的不变质量谱在低质量区出现的增强现象,直接光子产额增强现象,奇异粒子特别是多奇异夸克的奇异重子的增强和  $J/\psi$  反常压低的现象等。这些现象都被认为是夸克-胶子等离子体形成的信号,很难用高密度的强子气体模型来解释。

BNL 的相对论重离子对撞机 (RHIC) 实验于 2000 年 7 月开始运行,先后进行了每核子质心系能量为 62.4、130、200 GeV 的金-金碰撞和 200 GeV 的质子-质子、氩-金碰撞实验。RHIC 上的四个实验组 (BRAHMS、PHENIX、PHOBOS 和 STAR) 给出了一系列重要的实验结果,如:在中心快度区呈现较低的重子数密度,表明 RHIC 上的核碰撞进入了透明能区,产生的夸克物质形态应更接近宇宙大爆炸初期的夸克物质;末态强子的快度分布和横动量分布表明碰撞初期产生的物质的温度和能量密度已远高于理论预言的相变临界值,并且表现出极强的集体运动行为;对末态粒子的方位角分布的分析表明,末态强子存在大的椭圆流。理想的流体力学模型能够很好地描述各种强子椭圆流在低横动量区的分布。此外,发现椭圆流存在组分夸克数的标度行为。理论认为,椭圆流是由碰撞初期的核几何的不对称性导致的末态粒子在动量空间分布的不对称性,椭圆流主要形成于碰撞初期。理想流体力学能够很好地描述椭圆流则意味着局域热平衡在碰撞初期已达到。而椭圆流具有的组分夸克标度性则说明,椭圆流和热平衡形成于部分子阶段;金-金碰撞中的

大横动量强子的产额相对于质子-质子和氩-金碰撞压低了。这被解释为核碰撞初期产生的硬部分子在与核碰撞中产生的高温高密的夸克-胶子等离子体发生相互作用时损失了大量能量。因此,到目前为止,理论物理学家和实验物理学家认为, RHIC 实验在 高能金-金碰撞实验中观测到了一种新的核物质形态,不过该物质与预期的相互作用弱、表现为理想气体的夸克-胶子等离子体不同,且表现出液体一样的行为。也就是说, RHIC 上产生的新物质的相互作用比预期的要强很多。为此,理论物理学家将该物质命名为“作用强(强耦合)的夸克-胶子等离子体”(sQGP, strongly interacting QGP)。

## 二、大型强子对撞机上的大型重离子碰撞实验

即将在欧洲核子中心运行的大型强子对撞机 (LHC) 上,质子-质子碰撞的质心系能量为 14 TeV (即  $14 \times 10^{12}$  电子伏特),铅-铅碰撞的每核子-核子质心能量为 5.5 TeV (即铅-铅碰撞时的体系总能量 =  $208 \times 2 \times 2.75 \text{ TeV} = 1262.4 \text{ TeV}$ ) 是 RHIC 上金-金碰撞能量的 27.5 倍。理论预言,在 LHC 铅-铅碰撞中形成的局域平衡的热密夸克物质所需的时间将比 RHIC 上更短,而其温度更高,能量密度、体积大小、寿命等将是 RHIC 上产生的夸克物质的 2—3 倍,在碰撞中心区的重子数密度将接近于零。这样,作为 LHC 上唯一致力于重离子碰撞物理研究的大型重离子对撞实验 ALICE,应该能够全面探测到高温和高能量密度下夸克-胶子等离子体形成的各种信号及各种性质,特别是高密夸克物质引起穿越部分子的能量损失及禁闭解除的部分子集体运动性质,在极端高温环境检验格点量子色动力学 (LQCD) 预言;检验在 RHIC 上所观测到的作用强的夸克物质表现出的理想流体行为是否只是一个巧合。而且,物理学家期待着在 LHC 上 TeV 能区的重离子碰撞实验中会有新的发现,这主要是由于:小动量份额的部分子的分布将决定末态粒子的产物;大横动量散射的硬过程对核-核碰撞的截面的贡献显著增大,会导致大量的重夸克偶素或带粲、带底夸克的强子产生;弱相互作用硬探针的探测亦成为可能等等。此外,重子数密度更小的热密物质的演化规律将更有助于提高我们对宇宙演化规律的认识。

ALICE 是 LHC 上唯一致力于重离子碰撞物理的大型探测装置,重 1 万吨,高 16 米,长 26 米。

ALICE 合作组则是迄今为止从事科技合作研究的最大的国际合作组织之一，有来自全球 30 多个国家的 105 个科研院所的千余物理学者和工程技术人员以及大批研究生在上面从事探测器设计、建造、计算机模拟、数据采集和物理分析等工作。ALICE 实验装置是由十几个子探测器组成的复杂系统，它能够重建铅-铅对心碰撞事例产生的几万个粒子的径迹，并有效地鉴别其类别及其性质，每秒钟能够记录 8 千个碰撞事例。为此，大量的现代世界先进科学技术被运用于 ALICE 探测器中，如：高精密的粒子径迹探测系统，超微电子信号处理系统，和基于分布于全球的计算机资源的网格数据分析技术等。

图 4 和图 5 分别为 ALICE 实验装置示意图和装置安装图。重建铅-铅碰撞中产生的大量带电粒子的径迹依赖于一系列的位置分辨率在 100 微米以下的探测器，这包括围绕碰撞顶点的、被置于大型磁铁中的、形状为圆柱形的内寻迹系统 (Inner Tracking System, ITS)、时间投影室 (Time Projection Chamber, TPC) 和穿越辐射探测器 (Transition Radiation Detector, TRD)。内寻迹系统共有六层，均由半导体硅探测器组成，它覆盖中心快度区间，能够有效地重建粒子径迹、碰撞的初级顶点，并能够重建重味及中性粒子的衰变顶点，以帮助识别带重味和中性的粒子。此外，ITS 还能大大地改善时间投影室的动量分辨率。

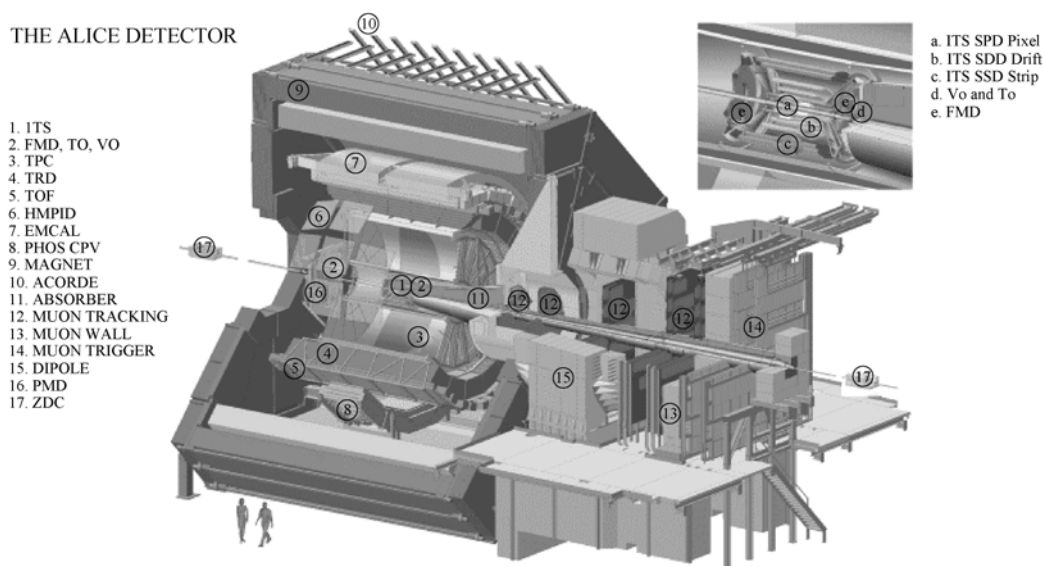


图 4 ALICE 实验装置示意图

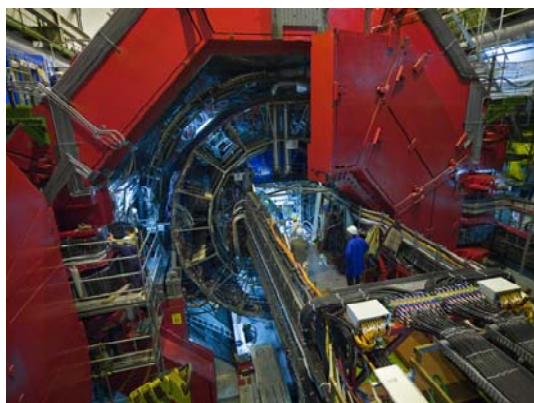


图 5 ALICE 实验装置图

ALICE 时间投影室是 ALICE 探测器的主要粒子寻迹系统，是迄今建造的最大的时间投影室，该圆柱体的直径为 5.6 米，长 5 米。带电粒子穿越 TPC

时，会使 TPC 中的气体电离，电离出的电子在电场中向 TPC 两端漂移，通过测量电子达到 TPC 两端的时间和位置，可以重建出穿越 TPC 的带电粒子的径迹。而由径迹的曲率和所加载的磁场可以确定带电粒子的动量。此外，利用带电粒子在 TPC 中的电离能损与粒子动量之间的关系，TPC 可以被用来鉴别低动量的带电粒子。

带电粒子在穿越不同介质的介面时会发生穿越辐射，利用 ALICE 的穿越辐射探测器可以有效地鉴别动量高于 1 GeV/c 的电子。此外，利用带电粒子在 TRD 中的电离能损信息，能够进一步提高 ALICE 对带电粒子的径迹重建能力。TRD 主要用于偶素共振态 ( $J/\Psi$ 、 $\gamma$ )，以及带粲和带底强子向电子衰变道的测量。



在中心区，除了可以通过测量带电粒子在寻迹探测器中能量损失来鉴别粒子外，还利用飞行时间探测器（TOF）鉴别较高动量的带电粒子。ALICE 的 TOF 也是一个圆柱形的探测器，它具有 50 皮秒的时间分辨率，能够精确地测量带电粒子达到该探测器所需的时间。对于相同动量的粒子，重的粒子飞行速度较轻的粒子慢。因此，结合寻迹探测器对粒子动量和飞行路程的测量，飞行时间探测器可以鉴别带电粒子。TOF 将为 ALICE 软强子物理数据分析提供重要保障。

当带电粒子的飞行速度大于在介质中的光速时，会发生切仑科夫辐射，辐射角与飞行速度有关。ALICE 的高动量粒子鉴别探测器（HMPID）就是通过测量高速运动的带电粒子在介质中辐射出的光子的角度来鉴别粒子的身份的。主要用于鉴别和测量粒子动量在  $1\text{GeV}/c$  以上的带电  $\pi$  介子、K 介子和质子等强子。

ALICE 研制高精度的光子谱仪（PHOS）和电磁量能器（EMCAL）测量光子在中心快度区的能动能分布。PHOS 是由 5 个探测模块组成，每个模块是由  $64 \times 56$  根钨酸铅晶体形成探测器阵列（如图 6 所示）。PHOS 距铅-铅束流碰撞顶点 460 厘米，覆盖的方位角为 100 度，覆盖极角  $13.5^\circ$ （约  $1/4$  个快度）。当高能光子打到钨酸铅晶体上时，会使钨酸铅晶体发出闪烁荧光，这些荧光被高灵敏的光-电转换装置收集，经弱信号系统采集和处理，实现对入射光子能量的高精度测量。由于闪烁光的多少与入射光子的能量成正比，因此从收集的光电信号的强弱可以确定入射光子的能量。钨酸铅晶体的密度很高，即使能量高达  $100\text{GeV}$  的光子在其内产生的电磁簇射亦无法穿透它。PHOS 具有很好的能量分辨率和位置分辨率，能够精确测量横动量从  $100\text{MeV}$ （ $1\text{MeV}$  即为  $10^6$  电子伏特）到  $100\text{GeV}$  的光子。通过分析双光子的不变质量谱，可以测量中性  $\pi$  介子和  $\eta$  介子在大的横动量范围的谱。从光子谱中减除衰变光子的贡献，可以得到来源于热密夸克物质的热化光子和初始硬过程产生的大横动量的瞬发光子的谱。热化光子的能动能分布可以被用来估算核碰撞中产生的热密物质的温度，而瞬发直接光子的谱可以用来检测硬过程存在的核子碰撞次数标度行为。对高横动量的中性  $\pi$  介子和  $\eta$  介子的测量，可以提供硬部分子与热密物质相互作用的信息。EMCAL

是由铅和塑料闪烁体组成的取样型电磁量能器，在方位角上与 PHOS 斜相对，覆盖  $110^\circ$  的方位角和  $-0.7$  到  $0.7$  个赝快度（ $52.8^\circ < \text{极角} < 127.2^\circ$ ）。EMCAL 的能量分辨率足够用以测量喷注能量，与 PHOS 和 TPC 等探测器结合可以探测光子-喷注和双喷注事例，为研究热密物质的性质提供重要的信息。

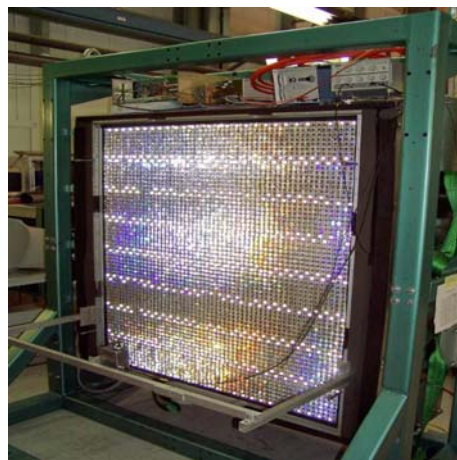


图 6 ALICE 光子谱仪(PHOS)的一个探测模块上的晶体阵列 (3584 根晶体)

$\mu$ 子由于与物质相互作用的截面很小，故难于探测。ALICE 在向前区建造了一个巨大的谱仪用来探测  $\mu$ 子对，特别是从  $J/\psi$  和  $D$  粒子以及  $\gamma$  和  $B$  粒子衰变来的  $\mu$ 子的径迹，观测偶素共振态以及带粲、底粒子的单  $\mu$ 子谱和不变质量谱，研究稠密的夸克-胶子等离子体物质对偶素共振态粒子和重味粒子的压低效应。

另外，在向前区还有用来测量向前区的带电粒子的多重数的向前多重数探测器（FMD），和一系列用来确定碰撞顶点、碰撞中心度、前向剩余能量测量等，为 ALICE 提供零级触发信号的探测器。

ALICE 的微电子学系统将处理 ALICE 探测器在每个碰撞事例中产生的 1 千 5 百万路电子信号。这些微弱的电子信号首先被预放大、整形放大、转化为数字信号、由光纤传输到 ALICE 数据获取系统和/或在线数据处理系统，经过排序、压缩和打包等预处理后，数据将被存储在磁带上。ALICE 一年存储的数据量大约 5PB（1PB 即为  $10^{15}$ Byte），相当于 4 公里高的光盘叠片的储存量。

ALICE 实验数据处理需要十分庞大的计算机资源，仅仅计算机硬件投入约需几千万瑞士法郎。为此，ALICE 最早采用当今正在蓬勃发展的计算网

格技术，利用分布于全球的数以万计的计算机进行计算机模拟、数据处理和物理分析。

中国科学家于 2003 年加入 ALICE 合作组，主要承担 ALICE 光子探测器关键部件大平面光敏二极管的样机研制，高分辨率低噪声的前端电子学系统的设计、研制、安装和调试，实验模拟、数据获取和海量数据的物理分析任务。物理兴趣瞄准在形成夸克胶子等离子体的光子信号、产生粒子谱的高横动量压低现象以及末态粒子椭圆流信号等关键物理问题上。

LHC 加速器计划于 2008 年 9 月投入束流运行，其上的 ALICE 将是本世纪头三十年内实现重离子加速能量最高，粒子探测综合能力最强的国际大型重离子实验平台，研制的 ALICE 探测器将有足够能力实时采集和处理 LHC 能区重离子碰撞中产生的数以万计的粒子和海量数据，能够在高达  $100\text{GeV}/c$  的横动量范围和极角在  $\cong 44.25^\circ \cong \theta \cong 135.75^\circ$  (即赝快度  $|\eta| \cong 0.9$ ) 的中心区域以及前向区域内全面地探测光子、轻子和强子，能够系统地探测形成夸克-胶子等离子体的各种信号。

历时 15 年的研制，大部分 ALICE 探测器现在已经完成了安装和调试，从 2008 年 9 月将投入 LHC 的质心能量为  $10\text{TeV}$  和  $14\text{TeV}$  的质子-质子束流对撞的数据采集。通过数据分析，将建立强子-强子物理数据标准，检验 ALICE 探测器能力。从 2009 年底开始，ALICE 将迎来每核子-核子质心能量为  $5.5\text{TeV}$  的铅-铅碰撞的海量实验数据采集和数据的物理分析。科学家们期待，利用 ALICE 这一大型

重离子实验探测装置，通过系统地分析在 LHC 能区探测的夸克-胶子等离子体产生的各类信号，人类将能全面地认识高能核-核碰撞中产生热密夸克物质的性质及其演化规律，科学家们亦期待在 ALICE 上会有新的重大物理发现，从根本上检验格点量子色动力学预言，丰富人类对物质微观结构及微观粒子间相互作用规律的认识。

(湖北省武汉市华中师范大学粒子物理研究所 430079)

### 作者简介

周代翠，男、博士、华中师范大学教授、博士生导师，长期从事加速器上高能重离子碰撞实验和物理研究，当前主要进行 ALICE 重离子碰撞实验国际合作研究。现任夸克与轻子物理教育部重点实验室（华中师范大学）常务副主任，高能物理湖北省重点实验室主任，教育部科技创新团队核心成员。曾先后在日本、印度、瑞典、俄罗斯、法国、挪威、意大利的有关科研单位或大学以及欧洲核子研究中心 CERN 访问和合作研究。

殷中宝，1970 年生，华中师范大学粒子物理研究所副教授。1991 年毕业于华中师范大学物理系，1996 年在华中师范大学粒子物理研究所获理学硕士学位，2004 年在挪威卑尔根大学物理科学与技术系获理学博士学位。曾先后在美国布鲁克海汶国家实验室，欧洲核子中心和美国 Los Alamos 国家实验室访问或工作。当前主要进行 ALICE 重离子碰撞实验国际合作研究。