

# LHC能区ALICE实验及其PHOS触发选判\*

王亚平<sup>1)</sup> 蔡勖<sup>2)</sup>

(华中师范大学粒子物理研究所 武汉 430079)

**摘要** 综述了CERN/LHC能区的大型重离子碰撞实验(ALICE)的现状,并对ALICE实验中的光子谱仪(PHOS)的触发选判机制进行了模拟研究.

**关键词** 超高能重离子碰撞 夸克-胶子等离子体 大型重离子碰撞实验 光子谱仪

## 1 引言

量子色动力学(QCD)的格点理论预言,当温度或能量密度超过某临界值时,核物质会经历从强子相到夸克物质相的相变并形成夸克-胶子等离子体(QGP)态物质.

QCD相变和QGP形成的理论预言导致了超高能(超相对论性)重离子碰撞的实验<sup>[1]</sup>.超高能(或超相对论性)重离子碰撞主要指的是束流能量大于每核子10GeV的固定靶实验或者核子-核子质心系能量大于几个GeV的重核碰撞实验<sup>[2]</sup>.欧洲核子研究中心(CERN)的超级质子同步加速器(SPS)实验和美国布鲁克海文国家实验室(BNL)的相对论性重离子碰撞(RHIC)实验近年来已经取得很多QGP物质态的特征信号的重要线索<sup>[3]</sup>.

第18届国际超相对论性核-核碰撞会议(2005年夸克物质会)于2005年8月4—9日在匈牙利的布达佩斯举行.本次会议主要围绕超高能重离子碰撞事件中的椭圆流、大横动量抑制、喷注、絮数和絮偶素、轻子对和光子进行了讨论<sup>[4]</sup>.CERN/SPS的NA45/CERES, NA49, NA50, NA57和NA60实验组与BNL/RHIC实验的BRAHMS, PHENIX, PHOBOS和STAR实验组报告了他们取得的具有惊人价值和令人激动的新实验数据.事实上, RHIC实验和BNL最近又宣布发现了一种具有完美流体(perfect fluid)性质的新的物质形式<sup>[3]</sup>.

CERN正在建设大型强子对撞机(LHC)实验,包括ALICE, CMS, ATLAS和LHCb四大实验组, LHC实验计划于2007年实现束流对撞,开始采集数据和物理分析.2005年夸克物质会议上CERN/LHC实验组对LHC实验的进展和现状做了报告. CERN/LHC实验的目的是研究在极高能量密度下的强相互作用物质的性质,并预期会产生QGP物质态,可以研究测量到的硬探针信号(喷注,重夸克,光子)<sup>[3]</sup>.

## 2 CERN/LHC能区的ALICE实验现状

CERN/LHC能区的ALICE致力于研究超相对论性能区下重离子碰撞中形成的热密核物质,并探究夸克退禁闭和手征对称性破缺的恢复现象.

### 2.1 ALICE实验的物理目标

LHC研究的一个主要问题是基本量子场的相变、自然界的基本对称和质量起源之间的联系. LHC重离子碰撞中的核-核质心系能量 $\sqrt{s_{NN}} = 5.5\text{TeV}$ ,比RHIC实验中的能量高出将近30倍,这将为物理研究开辟一个新的领域.如此大的能量升迁通常会导致新的发现, LHC重离子碰撞得到的将不仅仅是在高密度下数量上的不同,而且是质上的新状态,主要包括:(1)高密度部分子分布决定粒子产物;(2)硬过程对核碰撞的横截面的贡献变大;(3)弱相互作用硬探针的探测成为可能;(4)部分子动力学主导火球膨

2006-04-30 收稿

\* 国家自然科学基金(70571027)资助

1) E-mail: wangyp@iopp.ccnu.edu.cn

2) E-mail: xcai@mail.ccnu.edu.cn

胀<sup>[5]</sup>. 图 1 给出了 LHC 对于无重子的中心快速区域的重要的定性改善<sup>[2]</sup>.

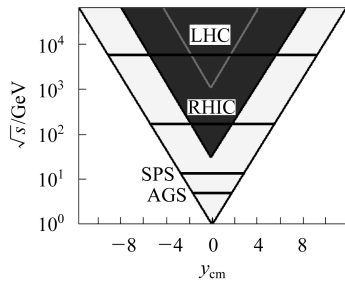


图 1 LHC 对于无重子的中心快速区域

作为 LHC 四大实验之一的 ALICE 实验致力于研究在 5.5 TeV/核子对的铅-铅碰撞中形成的热密核物质演化规律. 由于在该碰撞中形成的物质是高温高密的, 研究 QGP 的新物质态是极有可能的. ALICE 将研究手征对称性在超高能重离子碰撞过程中产生的大范围长时间的高能量密度环境下的复合粒子质量产生中的作用, 并将深入研究在能量密度  $\epsilon_c \approx 1-1000 \text{ GeV}/\text{fm}^3$  时的强相互作用物质的平衡和非平衡物理学<sup>[5]</sup>. 另外, ALICE 实验还将深入研究在部分子密度接近相空间饱和时的物理现象和在高核密环境下部分子强子化过程的集体动态演化. 同时, 也希望能够进一步认识 QCD 相图的结构和 QGP 相位的属性.

### 2.2 ALICE 实验的现状

ALICE 探测器将探测在 CERN/LHC 能区重核-重核碰撞实验中产生的强子、轻子和光子, 以研究强相互作用物质物理和 QGP 态物理. 在粒子密度极高的环境下, ALICE 实验能够跟踪和鉴别横动量范围为  $\sim 100 \text{ MeV}/c$  到  $\sim 100 \text{ GeV}/c$  的粒子, 并且能够重建像超子、D 介子和 B 介子这类短寿命的粒子<sup>[6]</sup>.

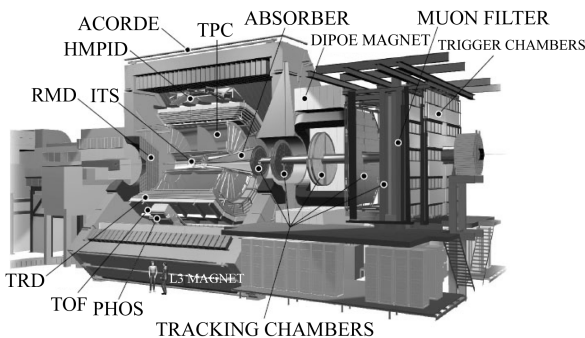


图 2 ALICE 的结构图

ALICE 探测器的构成主要包括两大部分: (1) 中央部分, 由一些主要致力于研究在赝快度区范围为  $-1 < \eta < 1$  里的强子信号和电子对的探测器组成;

(2) 前向  $\mu$  子谱仪, 测量  $\mu$  子信号, 该探测器主要致力于研究高密物质的重夸克行为. ALICE 的结构如图 2.

LHC 运行时, 将会在 ALICE 探测装置所在区碰撞质心系能量为  $\sqrt{s}=14 \text{ TeV}$  的质子流和  $\sqrt{s_{NN}}=5.5 \text{ TeV}$  的铅束流, 亮度分别为  $5 \times 10^{30} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $1 \times 10^{27} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 其束流能量是 BNL/RHIC 实验的约 30 倍<sup>[7]</sup>. 表 1 给出了 LHC 与 SPS, RHIC 在质心系能量、粒子密度、能量密度、体积大小、寿命和弛豫时间估计值的比较<sup>[2]</sup>.

表 1 LHC 与 SPS, RHIC 在质心系能量、粒子密度、能量密度、体积大小、寿命和弛豫时间估计值的比较

中心碰撞	SPS	RHIC	LHC
$\sqrt{s_{NN}}/\text{GeV}$	17	200	5500
$dN_{ch}/dy$	430	700—1500	2000—8000
$\epsilon/(\text{GeV}/\text{fm}^3)_{\tau_0=1\text{fm}}$	2.5	3.5—7.5	15—40
$V_f/\text{fm}^3$	1000	7000	20000
$\tau_{\text{QGP}}/(\text{fm}/c)$	$< 1$	1.5—4	4—10
$\tau_0/(\text{fm}/c)$	$\sim 1$	$\sim 0.5$	$< 0.2$

由表 1 可以得出的定性结论是 LHC 造成的系统更热、更大、更长. 在 ALICE 实验 Pb-Pb 碰撞中形成的系统的能量密度、大小、寿命和弛豫时间将是 RHIC 实验 Au-Au 碰撞的 5—10 倍. 由于能量密度大大超过退禁闭相变的阈值, 预期观测到从强子物质到夸克物质相变的各种性质.

因此, CERN/LHC 能区的 Pb-Pb 中心碰撞中, 人们预期会有上百的粲夸克对 (charm pair) 和一些底夸克对 (bottom pair) 出现<sup>[8]</sup>. 重离子碰撞过程中达到的能量密度能够通过迪拜屏蔽效应使  $\Upsilon$  共振态的熔化得以观测, 同时 NA50 和 SPS 已经测量到  $J/\psi$  共振态产额明显压低<sup>[9]</sup>. 这在 LHC 能区应该是很特殊的现象, 因为  $\Upsilon$  在能量密度超过一临界值时就会解体<sup>[10]</sup>, 而这临界值在 RHIC 实验中是达不到的. 因此,  $\Upsilon$  家族的谱应该能揭示一系列 QGP 特征的特有信息<sup>[11]</sup>. 图 3 和图 4 分别给出了 CERN/LHC 能区的 ALICE 实验中重夸克偶素  $J/\psi$  和  $\Upsilon$  系列的谱分布<sup>[12]</sup>.

因此, LHC 能区 ALICE 实验测量到的  $J/\psi$  产额与碰撞中心度的关系将于 SPS 和 RHIC 实验中得到的数据有很大的不同<sup>[13]</sup>.

同时, 在超高能重离子碰撞的最初阶段所发射的电磁信号, 比如直接光子和双轻子对都携带着系统早期行为的信息. QGP 形成初期温度比较高, 就由夸克反夸克直接发出光子和通过光子产生轻子, 这些直接光子和轻子具有较高的能量, 与强子衰变产生的光子和轻子有明显的不同. 直接光子包括瞬发光子和热光子, 直接光子谱在实验上是通过从光子谱中扣除衰变

光子的贡献后获取的. 瞬发光子产生于碰撞早期的硬QCD过程, 具有很大的横动量<sup>[14]</sup>. 热光子来自于碰撞中QGP相中的夸克与胶子发射的光子或热物质中强子共振态散射, 也具有足够高的能量. 而衰变光子主要来自于 $\pi^0$ 和 $\eta$ 的衰变, 它们的能量较低. 直接光子不与周围物质发生相互作用, 携带着碰撞发生早期的信息, 能够反映CERN/LHC能区重离子碰撞时初始相的信息, 是探测QGP的重要信号.

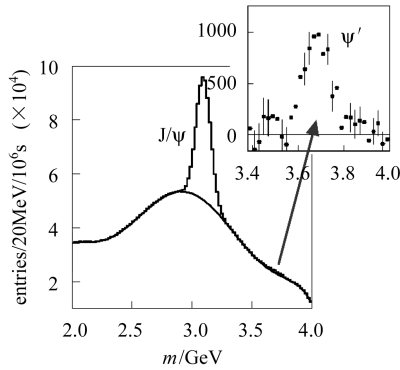


图3 ALICE实验中J/ $\psi$ 的谱分布, 事件率/月 $\sim 100\text{K}$ , 分辨率 $\sim 70\text{MeV}$

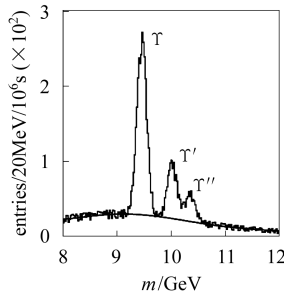


图4 ALICE实验中Y系列的谱分布, 事件率/月 $\sim 15\text{K}$ , 分辨率 $\sim 130\text{MeV}$

### 3 ALICE/PHOS触发选判机制的研究

PHOS探测器是采用钨酸铅( $\text{PbWO}_4$ )晶体阵列组成的全灵敏型电磁量能器(EMC), 由5个EMC模块组成, 每个EMC覆盖着 $20^\circ$ 的方位角 $\varphi$ , 放置于距离额定碰撞点4.6m的ALICE探测器底部, 位于ALICE探测器的时间投影室(TPC)的下方. 每个EMC的晶体阵列按 $\theta \times \varphi = 56 \times 64$ 排列, 共3584块, 即整个PHOS由17920块钨酸铅晶体构成.

ALICE/PHOS利用其高能量分辨率和高位置分辨率的特性测量光子, 并利用衰变光子对重建中性介子( $\pi^0$ 和 $\eta$ ), 并从光子谱信号中榨取出直接光子信号, 用来获取高能重离子碰撞初始相时的温度和研究退禁闭信号的喷注淬灭现象, 其触发选判系统为ALICE触发系统提供L0和L1触发信号. L0为ALICE触发系

统提供质子-质子碰撞中无偏差事件的触发, 而L1为ALICE触发系统提供铅-铅碰撞中大横动量的光子事件的触发.

PHOS的触发选判系统必须适应高事件率、多束团和短周期的束流结构要求. LHC运行时, ALICE/PHOS探测器开始探测并鉴别光子, 其触发选判系统以怎么样的机制工作, 运行时的参数如何选取等都是在LHC/ALICE运行前急需解决的问题. 基于GEANT3软件的探测器模拟<sup>[15]</sup>和高能重离子碰撞事件模拟环境AliROOT<sup>[16]</sup>, 本文对ALICE/PHOS触发选判机制的触发效率和触发频率进行了模拟研究. 图5是通过对ALICE/PHOS的触发效率做蒙特卡罗模拟得出的分布.

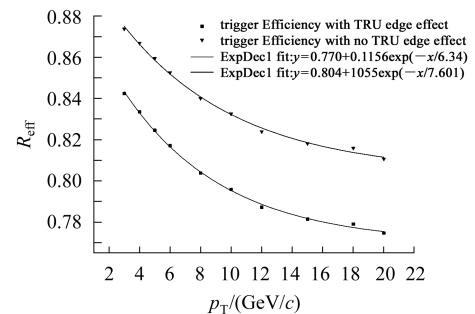


图5 ALICE/PHOS的事件触发效率分布

通过蒙特卡罗模拟, 图6和图7分别给出p-p碰撞模式和Pb-Pb碰撞模式下PHOS的事件触发频率分布.

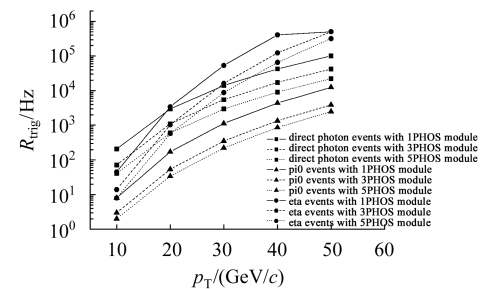


图6  $\sqrt{s}=14\text{TeV}$ 下p-p碰撞模式下PHOS的事件触发频率分布

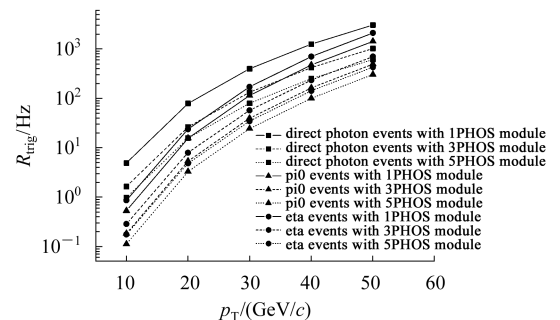


图7  $\sqrt{s}=5.5\text{TeV}$ 下Pb-Pb碰撞模式下PHOS的事件触发频率分布

ALICE/PHOS 作为一个量能器, 也同样提供了获取有关事件特征的全局观测量的途径, 像电磁横向能  $E_T$ 、中心快度区的多重数观测量等.

## 4 总结

超相对论性重离子碰撞可能产生出一种新的物质形态<sup>[17–19]</sup>, 因而关于核物质的通常概念已不再适用, 而需要揭示出一些崭新的原理. J. Zimányi 在 2005 年第 18 届夸克物质会议做的报告<sup>[20]</sup> 中说: “从开始寻找夸克物质到现在, 我们对夸克物质性质的理解发生了深刻的变化. 尽管理论模型支持先前我们对夸克物质的概念, 但是不断的实验数据一步步地迫使我们把这

些概念进行更改.”

CERN/LHC 能区的大型重离子碰撞实验 (ALICE) 必将为物理研究带来崭新的前景, ALICE 也将是下一代强有力的探测器, 可以为我们提供从超软到超硬过程的一系列物理观测量. 在 CERN/SPS 和 BNL/RHIC 实验取得巨大成果的基础上, 我们期待着 CERN/LHC 的大型重离子碰撞实验给我们在重夸克偶素、喷注的产生、轻子对和光子测量等各方面带来新的发现, 帮助我们更详尽的研究热密核物质态, 进一步研究 QCD 相变和 QGP.

作者感谢 CERN/LHC/ALICE 实验组的图片 2, 3 和 4.

## 参考文献(References)

- Hans Specht. Nucl. Phys., 2002, **A698**: 341—359C
- CAI Xu, ZHOU Dai-Mei. HEP & NP, 2002, **26**(9): 971—990 (in Chinese)  
(蔡勛, 周代梅. 高能物理与核物理, 2002, **26**(9): 971—990)
- Berndt Müller. nucl-th/0508062
- Itzhak Tserruya. <http://qm2005.kfki.hu/Talks/Globe/avg9/1100/IT-QM05-Summary.ppt>
- ALICE Collaboration. ALICE Physics Performance Report, Vol.I. CERN/LHCC/2003-049
- ALICE Collaboration. ALICE Physics Performance Report, Vol.II. CERN/LHCC/2005-0NN
- Yves Schutz, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys., 2004, **30**: S903—S909
- Bedjidian M et al. hep-ph/0311225
- Abreu M C et al. Phys. Lett., 1999, **B450**: 456; Phys. Lett., 2000, **B477**: 28
- Digal S, Petreczky P, Satz H. Phys. Rev., 2001, **D64**: 094015
- Gunion J F, Vogt R. Nucl. Phys., 1997, **B492**: 301
- Hans-Ake Gustafsson. <http://qm2005.kfki.hu/Talks/Globe/avg8/1120//1120-lhc2005.ppt>
- Dupieux P, Czech. J. Phys., 2005, **55**: B381—B388
- Arleoa F et al. hep-ph/0311131
- CERN Program Library. Geant Detector Description Tool, Version 3.21. W5103 CERN, 1994
- ALICE Collaboration. <http://aliweb.cern.ch/offline>
- CAI Xu. Progress in Physics, 1988, **8**: 186—212 (in Chinese)  
(蔡勛. 物理学进展, 1988, **8**: 186—212)
- CAI Xu. Science Foundation in China, 1992, **6**(1): 46 (in Chinese)  
(蔡勛. 中国科学基金, 1992, **6**(1): 46)
- CAI Xu. Science Foundation in China, 1994, **8**(2): 98; 1994, **2**(2): 44 (in Chinese)  
(蔡勛. 中国科学基金, 1994, **8**(2): 98; 1994, **2**(2): 44)
- Zimányi J. hep-ph/0512035

# ALICE Experiment at LHC and its Trigger Decision of PHOS\*

WANG Ya-Ping<sup>1)</sup> CAI Xu<sup>2)</sup>

(Institute of Particle Physics, CCNU, Wuhan 430079, China)

**Abstract** An overview of experimental status of A Large Heavy-Ion Collider Experiment(ALICE) in CERN/LHC program is given, and the trigger decision criterion of the Photon Spectrometer(PHOS) in ALICE experiment is studied deeply by Monte Carlo(MC) simulation.

**Key words** ultra-high energy heavy-ion collisions, quark-gluon plasma (QGP), a large heavy-ion collider experiment (ALICE), photon spectrometer (PHOS)

Received 30 April 2006

\* Supported by NSFC (70571027)

1) E-mail: wangyp@iopp.cnu.edu.cn

2) E-mail: xcai@mail.cnu.edu.cn