

文章编号: 1007-4627(2017)03-0370-04

# 相对论重离子碰撞的输运模型研究

马国亮

(中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800)

**摘要:** 美国的布鲁克海文国家实验室相对论重离子对撞机(RHIC)和欧洲核子中心的大型强子对撞机(LHC)的大量实验结果表明, 在相对论重离子碰撞中已经产生了一种近似完美流体的强耦合部分子物质。基于一个<sup>多相粒子输运模型(AMPT)</sup>理论工具, 对RHIC和LHC实验上的一些重要结果的开展了三个方面的理论研究工作(集体流、喷注淬火、手征磁效应), 研究结果揭示了初始的夸克胶子等离子体(QGP)能量密度涨落经过部分子输运演化产生末态粒子的各阶次的集体流、喷注和部分子物质的相互作用导致喷注的能量损失、末态相互作用严重影响手征磁效应的大小等物理过程作用机制。

**关键词:** 夸克胶子等离子体; 多相粒子输运模型; 集体流; 喷注淬火; 手征磁效应

中图分类号: O571.6 文献标志码: A DOI: [10.11804/NuclPhysRev.34.03.370](https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.03.370)

## 1 背景

物质世界的组成单元是什么? 它们之间是如何相互作用的? 这是人类对微观世界开展基础研究的一个最根本的问题。然而我们知道微观世界的基础研究又可以分为不同的具体学科, 主要的原因就是在于不同的学科的工作能标是不同的。相对论重离子碰撞物理的工作能标是量子色动力学(QCD)的能标, 大约200 MeV。相对论重离子碰撞的研究对象是核子以及核子内部的夸克和胶子, 它们的空间尺度是大约1 fm。相对论重离子碰撞的研究的物理问题是QCD退禁闭现象, 也就是研究核子中的夸克和胶子是如何解除禁闭, 形成所谓的夸克胶子等离子体(QGP)。

人们之所以相信QGP存在, 是由强相互作用的基本原理所决定的。2004年三位科学家(David J. Gross, H. David Politzer 和 Frank Wilczek)因为预言强相互作用存在渐进自由现象而获得诺贝尔物理奖。渐进自由理论告诉我们当两个粒子对撞能量越大, 或者距离越近的时候, 它们之间的相互作用反而越小<sup>[1,2]</sup>。基于渐进自由理论, 我们有了这样一个核物质相图的结构, 也就是当我们无限压缩核物质或者无限加热核物质的时候, 核物质会发生由强子禁闭相到夸克胶子等离子体退禁闭相的所谓QGP相变<sup>[3]</sup>。

为了在实验室中使核物质发生QGP相变, 目前唯一的手段就是通过相对论重离子对撞机实验。目前世界上运行的两个主要的重离子对撞机分别是位于美国

布鲁克海文国家实验室的相对论重离子对撞机(RHIC)和欧洲核子中心的大型强子对撞机(LHC)。它们分别可以加速金核和铅核, 以最高质心系能量200 GeV和5.02 TeV, 发生对撞<sup>[4,5]</sup>。然而相对论重离子碰撞实际上是一个动态的动力学演化过程。按照时间顺序来划分, 它可以分成初始状态、预平衡阶段、热化的QGP产生并且满足流体力学演化、强子化过程、强子相形成演化至最终的运动学冻结。每个不同的阶段发生不同的物理现象, 它们满足不同的物理规律。不幸的是实验上只能观测到末态粒子的动量信息, 所以为研究这些发生在不同演化过程中的不同物理现象所满足的物理规律, 我们不得不需要有一个完善的理论模型, 将理论结果和实验数据进行比较, 从而揭开相对论重离子碰撞中的背后秘密。

## 2 模型介绍

输运模型是研究相对论重离子碰撞的一种重要的理论方法。本文使用的输运模型主要是基于德克萨斯农工大学理论组发明的一个多相粒子输运模型AMPT模型<sup>[6]</sup>。AMPT模型有两个版本, Default默认版本和有弦融化机制的版本。这两个版本都包含有重离子碰撞四个重要的演化阶段, 分别是初始状态、部分子级联散射、强子化、强子再散射阶段。两个版本最大的区别在于, 在有弦融化机制的版本中弦和小喷注会被融化为部分子, 从而较默认的版本有更多的部分子参加部分

收稿日期: 2016-12-08; 修改日期: 2017-06-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11375251, 11522547, 11421505); 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2014CB845404)

作者简介: 马国亮(1978-), 男(回族), 河北沧州人, 研究员, 博士, 从事粒子物理与原子核物理; E-mail: [glma@sinap.ac.cn](mailto:glma@sinap.ac.cn).

子的级联散射过程。因此有弦融化机制的版本可以更好地描述具有 QGP 产生的相对论重离子碰撞过程, 比如 RHIC 和 LHC 能量下的碰撞。这个版本目前仅仅考虑了两个部分子之间的弹性碰撞过程, 强子化使用了一个较简单的夸克组合模型。

### 3 模型结果和讨论

下面主要介绍本人使用 AMPT 模型开展的三个方面的工作, 分别是关于集体流、喷注淬火、手征磁效应。

#### 3.1 初始涨落和末态集体流关联的研究

由于相对论重离子碰撞早期, 当两个核饼碰撞在一起以后, 能量密度的分布存在着剧烈的涨落, 实验上发现这些初始涨落经过碰撞过程的演化可以转变为末态的强子的动量分布的各相异性流<sup>[7]</sup>。传统理论研究认为金核+金核的碰撞中初始的能量密度分布是光滑的分布。我们研究发现, 如果你每一个事件地去看的话, 能量密度分布每个事件都是不同的, 存在着剧烈的涨落的, 有的事件分布是圆形的, 有的是椭圆形的, 有的是三角形的。而如果你把无穷多的事件加起来, 平均来看它是光滑分布。但是我们的研究揭示了这样一个事实, 就是相对论重离子碰撞的初始状态是剧烈涨落的。这些初始涨落会给相对论重离子碰撞带来什么样的物理结果呢? 图 1 是我们使用 AMPT 模型计算出的 200 GeV 的金核+金核中心碰撞中各级集体流的横向动量依赖性, 这表

明初始的涨落经过 QGP 的演化最终转变成了末态粒子的各阶次的集体流<sup>[8]</sup>。而这些集体流被认为是产生实验上“山脊”结构的主要物理原因<sup>[9]</sup>。

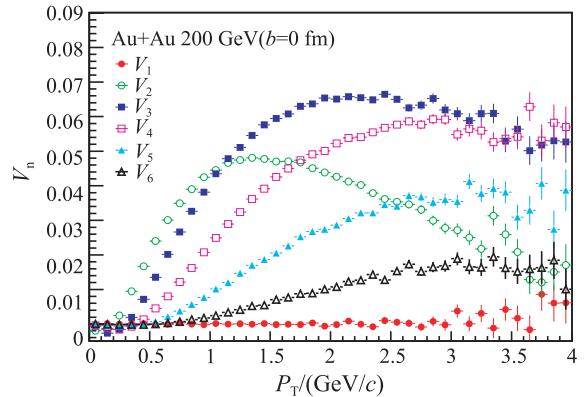


图 1 (在线彩图) 200 GeV 的金核+金核中心碰撞中各级集体流的横向动量依赖性

我们最近的研究还发现这种初始的涨落还存在于小的碰撞系统中, 比如高多重数的质子+质子碰撞和质子+铅核的碰撞。我们利用 AMPT 模型进行模拟, 并采取和 LHC 上紧凑型缪子螺线管探测器 (CMS) 实验相同的分析方法定义碰撞中心度。图 2 中我们的理论结果可以很好地解释最近 CMS 实验中的 5.02 TeV 质子+铅核和 2.76 TeV 铅核+铅核碰撞中的椭圆流和三角流的中心度依赖性<sup>[10]</sup>。我们的研究结果说明了小的碰撞系统和大的碰撞系统有着相似的集体流的产生机制。

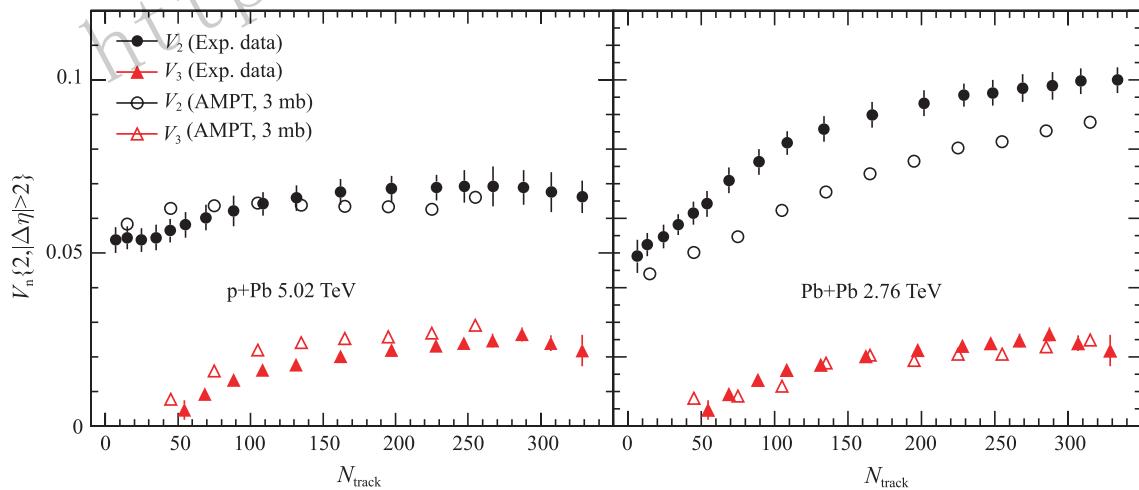


图 2 (在线彩图) 5.02 TeV 质子+铅核和 2.76 TeV 的铅核+铅核碰撞中的椭圆流和三角流的中心度依赖性

#### 3.2 喷注淬火的研究

高能的夸克对碰撞可以产生背对背的一对喷注粒子束, 这可以很清楚地在质子+质子碰撞中看到。然而在金核+金核碰撞中情况则截然不同。由于金核+金核碰撞中产生了 QGP 物质, 当喷注穿过 QGP 物质时

候, 将会和 QGP 相互作用从而能量损失, 这被称为喷注淬火现象<sup>[11]</sup>。喷注淬火早被 RHIC 实验中背对背喷注的消失的实验结果所证实, 被认为是金核+金核碰撞中 QGP 产生的一个重要的实验证据<sup>[12]</sup>。

为了使用 AMPT 模型研究喷注淬火现象, 我们

在 AMPT 模型初始状态中引入触发的双喷注或光子喷注，通过调节部分子碰撞截面来控制喷注和 QGP 物质的相互作用。图 3 分别展示了初态、部分子级联后、强子化后和强子再散射后四个不同演化阶段的双喷注不对称度分布。可以看出，从初态到部分子级联过程结束后，不对称度  $A_J$  有明显增加，而在接下来的强子化阶段直到末态强子再散射阶段，对于不对称度的影响就很弱。我们的结果表明不对称性的产生主要来自于喷注和部分子物质的相互作用<sup>[13]</sup>。

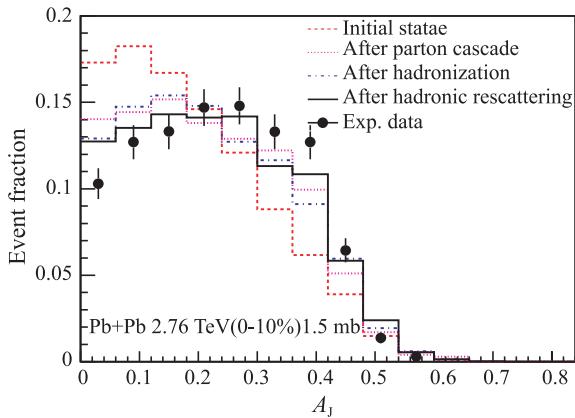


图 3 (在线彩图) 2.76 TeV 的铅核 + 铅核碰撞中重构喷注的横向动量不对称分布

### 3.3 手征磁效应的研究

由于 QCD 的基态真空存在着巨大涨落，拓扑电荷的涨落可能产生一些手征不对称的局域空间。在另一方面，两个重离子以接近光速运动可以产生非常强的磁场<sup>[14]</sup>。在两者的相互作用下，会产生一个局域的电流，也就是电荷分离现象，这就是所谓的手征磁效应<sup>[15]</sup>。RHIC-STAR 实验通过一对粒子的方位角关联因子来测量的，实验结果和手征磁效应的预期一致。然而，正如前面介绍的，相对论重离子碰撞是一个动力学演化过程，包括很多重要的演化阶段。另一方面，由于两个重离子飞快地穿过，磁场的寿命将指数衰减，所以手征磁效应是一个早期的效应。所以我们的研究动机问题由此产生，就是“早期的手征磁效应能否经历末态的相互作用而存活下来，从而被实验观测到？”。为了回答这个问题，我们把手征磁效应产生的初始的电荷分离引入到 AMPT 模型中去，从而来研究末态的各种相互作用对引入电荷分离的影响，给手征磁效应提供约束。

图 4 中我们的研究结果发现，为了拟合实验上观测到信号，我们需要 10% 的初始电荷分离的引入。这是因为如果我们放入的 10% 的初始电荷分离，经过末态的相互作用，仅有 1% 到 2% 的成份可以存活下来。我们的研究结果表明，研究手征磁效应，末态相互作用的

考虑是必不可少的<sup>[16]</sup>。由于在手征磁效应的信号中存在很多其他背景的贡献。所以未来计划进行同质异荷素的碰撞实验。我们也进行了一些理论预言，发现通过同质异荷素的碰撞可以有效地帮助我们去除背景的干扰，清楚地鉴别手征磁效应是否真的存在<sup>[17]</sup>。

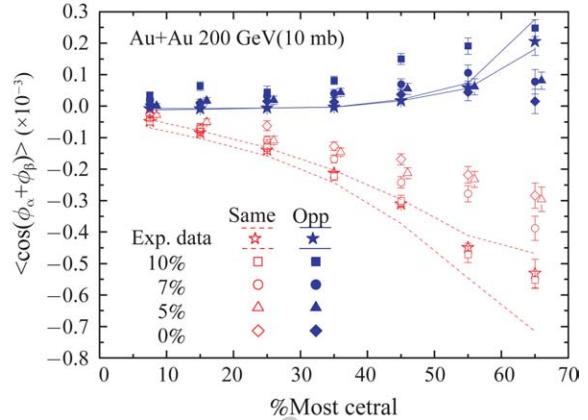


图 4 (在线彩图) 200 GeV 的金核 + 金核碰撞中手征磁效应观测量的中心度依赖性

## 4 总结和展望

本文介绍了输运模型作为研究相对论重离子碰撞的一种重要的工具，可以研究很多物理现象，比如用 AMPT 模型开展了初始涨落和末态集体流关联、喷注淬火和手征磁效应等研究，这些研究结果揭示了夸克胶子等离子体 (QGP) 初始能量密度涨落经过部分子输运演化产生末态粒子的各阶次的集体流、喷注和部分子物质的相互作用导致喷注的能量损失、末态相互作用严重影响手征磁效应的大小等重要的物理过程动力学作用机制。但是 AMPT 模型也有很多不足的地方，比如：强子散射破坏电荷守恒，如何引入胶子和三体碰撞过程，改进动力学强子化机制等。这些都是以后工作的重要研究方向，希望在不久的将来，可以有一个更完善的输运模型，从而对相对论重离子碰撞物理带给大家有一个更加深入的理解和认识。

## 参考文献：

- [1] GROSS D J, WILCZEK F. Phys Rev Lett, 1973, **30**: 1343.
- [2] DAVID P H. Phys Rev Lett, 1973, **30**: 1346.
- [3] RAJAGOPAL K. Nucl Phys A, 1999, **661**: 150.
- [4] STAR Collaboration, ADAMS J, AGGARWAL M M, et al. Nucl Phys A, 2005, **757**: 102.
- [5] PHENIX Collaboration, ADCOX K, ADLER S S, et al. Nucl Phys A, 2005, **757**: 184.
- [6] LIN Z W, KO C M, LI B A, et al. Phys Rev C, 2005, **72**: 064901.
- [7] ALVER B, ROLAND G. Phys Rev C, 2010, **81**: 054905.

- [8] MA Guoliang, WANG Xinnian. Phys Rev Lett, 2011, **106**: 162301.
- [9] AAMODT K, ABELEV B, ABRAHANTES A, *et al.* Phys Rev Lett, 2011, **107**: 032301.
- [10] BZDAK A, MA G L. Phys Rev Lett, 2014, **113**: 252301.
- [11] WANG X, GYULASSY M. Phys Rev Lett, 1992, **68**: 1480.
- [12] ADLER C, AHAMMED Z, ALLGOWER C, *et al.* Phys Rev Lett, 2003, **90**: 082302.
- [13] MA Guoliang. Phys Rev C, 2013, **87**: 064901.
- [14] DENG Weitian, HUANG Xuguang. Phys Rev C, 2012, **85**: 044907.
- [15] KHARZEEV D E, MCLERRAN L D, WARRINGA H J. Nucl Phys A, 2008, **803**: 227.
- [16] MA G L, ZHANG B. Phys Lett B, 2011, **700**: 39.
- [17] DENG Weitian, HUANG Xuguang, MA Guoliang, *et al.* Phys Rev C, 2016, **94**: 041901.

## Transport Model Studies on Relativistic Heavy-ion Collisions

MA Guoliang<sup>1)</sup>

(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract:** The experimental results from the BNL Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) and the CERN Large Hadron Collider (LHC) show that a nearly perfect fluid (*i.e.* strong-coupling Quark Gluon Plasma) has been created in relativistic heavy-ion collisions. I introduce our theoretical results based on a multi-phase transport (AMPT) model. Several important topics such as collective flow, jet quenching, chiral magnetic effect, are addressed. The simulation results indicate that the initial fluctuations of energy density of the QGP lead to all orders of harmonic flows of final particles via parton cascade, the strong interactions between jet and the QGP make jet lose much energy, and the final state interactions play an important role to affect the initial chiral magnetic effect in relativistic heavy-ion collisions.

**Key words:** quark gluon plasma; multi phase transport model; collective flow; jet quenching; chiral magnetic effect

Received date: 8 Dec. 2016; Revised date: 29 Jun. 2017

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11375251, 11522547, 11421505); Major State Basic Research Development Program in China(973 Program) (2014CB845404)

1) E-mail: glma@sinap.ac.cn.