

# 我国高能重离子碰撞物理研究

刘亦铭

(哈尔滨工业大学物理系)

**[摘要]** 相对论性重离子碰撞可以在极短的时间里在原子核尺度范围内实现极高温度和极高密度。研究这种极端条件下的核物质特性,对于认识新的物质形态——夸克胶子等离子体、认识宇宙起源有重要的意义。高能重离子碰撞物理是核物理、粒子物理和天体物理交叉的前沿研究领域。相对论重离子对撞机(RHIC),大型强子对撞机(LHC)将于90年代末期建成,它们将提供前所未有的良机去研究超高温、超高密度的核物质。

1988年,“高能重离子碰撞物理研究”列为国家自然科学基金重大项目。在项目执行期间,我们建立了高能重离子碰撞物理实验分析和理论研究的专用计算设备,形成了课题研究的队伍。我们在 $\pi$ 干涉学研究领域突破了传统的束缚,提出了新的比较不同实验结果的标准,首次建立了多 $\pi$ 关联研究的理论;在集合流研究领域首次提出了通过集体关联研究集合流的思想,提出了粒子对方位角关联和高阶集合流关联。这些进展标志着我们的研究处于国际前列。

由于高能重离子碰撞物理学研究的国际化特性,国际合作关系在我们的项目中起着十分重要的作用。基金的支持给我们创造了条件,使我们巩固和发展了良好的国际合作关系;另一方面,我们充分利用国际合作条件,以使有限的国家自然科学基金发挥更大的效益。

## 一、研究的重大意义

高能重离子碰撞物理学是当前和今后十余年内核物理研究的最前沿领域。它所研究的课题是相对论性和超相对论性核-核碰撞中产生的极端高温、高密度核物质的特性。图1是理论上推测的核物质的密度-温度相图。传统的低能核物理研究的对象是正常核所处条件下的核物质,这对应于密度-温度相图中 $\rho/\rho_0=1, T=0^\circ\text{K}$ 附近的小区域,这时的核物质类似于液态。升高温度,液体蒸发形成气体。这种气体不仅由核子组成,还包含有 $\pi$ 介子和其它更重的强子,称为强子气体。在高密度,但相对较低的温度下,核物质被“冻结”成晶体结构。人们目前还没有找到它存在的确切证据,但猜测它可能存在于中子星内部深处。进一步加热和压缩核媒质,强子本身将分解成组成它们的粒子——夸克和胶子,称为夸克-胶子等离子体。QCD(量子色动力学)点陈规范计算已经预言了这种核物质新相——夸克-胶子等离子体的存在。人们认为,在200亿年以前宇宙大爆炸时,这样的物质形态短暂地存在了大约百万分之一秒的时间。

我们从1982年起开始参加了美国劳伦兹伯克利实验室 Bevalac 流光室的实验研究,当时 Bevalac 是世界上唯一的能够加速全谱核到相对论能量的重离子加速器。图1中的虚线箭头指明在 Bevalac 能量下,核物质相图上的一条可能途径。要了解核物质相图,就要知道核物质态

本文于1993年2月23日收到。

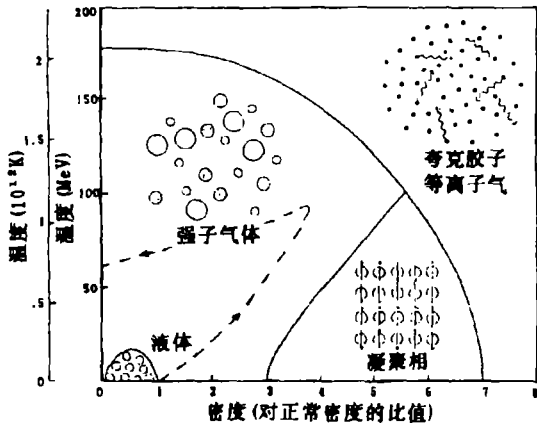


图1 理论预言的核物质相图。虚线箭头表示在相图上 Bevalac 能量下核-核碰撞的可能轨迹

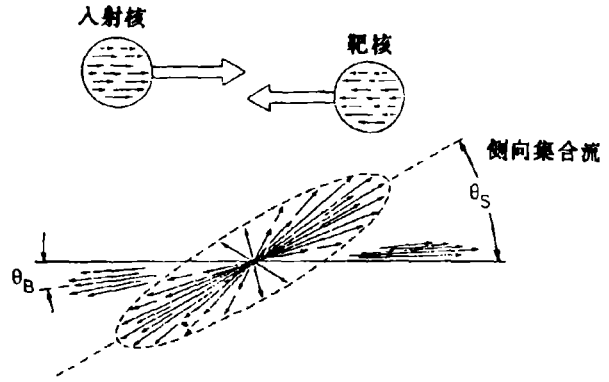


图2 高能核-核碰撞过程中,入射核动能转换为压缩势能,然后压缩势能导致末态粒子的集合侧向流

方程。图2是高能核-核碰撞过程中压缩势能导致集合侧向流的示意图。我们通过末态粒子集合流的理论预言和实验分析的比较,了解核物质的倔强系数,了解核物质的态方程。在 Bevalac 能量下, $\pi$  介子能够大量地产生,通过  $\pi$  干涉学可以研究高能核-核碰撞区域的时空演化。1986年,我们在相对论重离子碰撞的  $3\pi$  干涉学的研究上,克服了实验和理论分析上的重重困难,做出了突出的研究成果,开辟了多  $\pi$  干涉学的研究领域。

目前世界上已有的研究相对论核-核碰撞的主要实验设备有:美国劳伦兹伯克利实验室的 Bevalac 高能重离子加速器,欧洲核子研究中心(CERN)的 SPS,和美国布鲁克海汶国立实验室(BNL)的 AGS。这些设备都是用束流打静止靶,因此质心能量较低。要达到更高的质心能量,就要建造对撞机。预期90年代末期在美国将建成相对论重离子对撞机(RHIC),在欧洲将建成大型强子对撞机(LHC)。在对撞机的核-核对撞实验中,可以探索核物质相图中新的未知领域。高能重离子碰撞物理提供了研究完全新的物质形态的机会,为认识天体和宇宙学问题提供新的信息,对宇宙起源的认识有重要的意义。

本人在高能重离子碰撞物理的  $\pi$  干涉学领域和集合流研究方面已经做出一些工作,1986年末,由美国回到哈尔滨工业大学,组成了高能重离子碰撞物理研究课题组。国家自然科学基金会支持我们的高能重离子碰撞物理学研究,并于1988年和美国加州大学共同签署了双方支持合作研究的协议。“高能重离子碰撞物理研究”列为国家自然科学基金“七五”重大项目,由我主持,经费40万元。

## 二、主要成绩

在本重大项目执行期间,研究组在国内外刊物和会议上共完成55篇论文,在国际会议上作邀请报告2次,在国内会议上作邀请报告4次。具体成果有:

1. 冲破了传统的束缚,指出了权威的局限性,提出了新的比较不同干涉学实验结果的标准。 $\pi$  干涉学对相互作用区域时空特性的分析依赖于对  $\pi$  源密度分布所做的先验唯象假定。在不同的  $\pi$  源密度分布假定下,得到的源空间参数不能直接比较。由于不同实验小组使用不同的

密度分布假定,因而在 $\pi$ 干涉学中引入具有一致定义的、能够正确描述源空间线度的比较参量,这是系统地比较不同实验结果的重要前提。1960年,在 $\pi$ 干涉学的原始文献中,Goldhaber等人提出了GGLP因子作为比较因子。1984年Bartke等人提出源均方根半径作比较标准。我们通过不同源密度分布对 $\pi$ 干涉学分析结果影响的系统研究,指出了Bartke等人的比较标准有局限性,GGLP因子也不是最好的比较因子,而提出了源的平均半径是正确的比较标准。基于新的比较标准,我们首次提出了一种获取源密度细致分布的方法,检验了目前在高能重离子碰撞 $\pi$ 干涉学分析中通常使用的高斯模型的合理性,讨论了 $\pi$ 源随时间膨胀的可能模式,以及利用干涉学检测夸克-胶子等离子体相变的可能性。

2.首次建立了能够计算多粒子玻色-爱因斯坦关联效果的理论,估计了Bevalac流光室两个实验中多 $\pi$ 关联的贡献,在多 $\pi$ 干涉学研究领域开辟了新的途径。为了研究在极端高温、高密度条件下核物质的特性,高能重离子碰撞的能量不断提高,每一事件中产生的全 $\pi$ 介子数目越来越高,多 $\pi$ 关联越来越重要。目前多 $\pi$ 干涉学的分析,由于理论和计算的复杂性,仅仅应用于 $3\pi$ ,  $4\pi$ 和 $5\pi$ 。我们发展了多 $\pi$ 干涉学的研究方法,从普遍的多 $\pi$ 关联函数定义出发,提取了多 $\pi$ 关联因子。研究了多 $\pi$ 事件中多 $\pi$ 关联对 $2\pi$ 干涉学分析的影响,以及这种影响随 $\pi$ 源参量的变化情况。研究了多 $\pi$ 关联与 $\pi$ 干涉学分析背景中剩余关联之间的关系,发展了多 $\pi$ 关联事件的蒙特卡罗模拟手段,建立了能够涉及到多 $\pi$ 关联效果的 $\pi$ 干涉学分析的新方法,并首次对实验数据进行了考虑多 $\pi$ 关联效果的 $\pi$ 干涉分析。我们提出的方法将使干涉学能够应用于未来相对论重离子对撞机实验(RHIC)的高 $\pi$ 多重数事件的分析。

3.首次将干涉学的对关联研究方法推广用于研究相对论核-核碰撞中产生的集合侧向流。现在人们对集合流的分析,一般采用的方法是横向动量分析方法(1985年提出)和方位角方法(1988年提出)。我们提出的粒子对关联函数的方法,避开了传统分析方法中反应平面离散的影响,克服了在进行Bevalac流光室实验数据分析时,存在的粒子鉴别的困难,为集体运动和核媒质态方程的研究提供了新的手段,并为进一步利用多个粒子之间高阶关联的方法分析集合流奠定了基础。

4.首次指出,在重离子碰撞中以往的集合侧向流研究没有排除在每一个事件中小数目关联碎片主导集合流效果的可能性,这和多数碎片对集体运动的贡献是正巧相反的。由此进一步提出了高阶集合流关联的思想,指出“集体性”的定量描述(参与定向运动碎片的百分比)和集合流强度的度量在集体运动的描述中是互补的。

我们的研究成果具有重要的学术意义,在重离子碰撞物理 $\pi$ 干涉学的某些方面处于国际领先地位,它引起国际同行的注意和重视。1991年10月我们被邀请在美国密西根州立大学“重离子碰撞的强度干涉学”会议上做了专题邀请报告。美国同行评价我们的工作“非常有意义的研究”,“不同于人们30年来在 $\pi$ 干涉学中已有的传统观念”。近代物理国际杂志(*Int. J. Mod. Phys.*)还邀请我们撰写一篇有关这项研究的长的评论文章,没有字数限制。

### 三、体会与建议

1.我们国家现在还不能进行高能重离子碰撞物理实验研究,经费又十分有限。在这种情况下,要坚持创新的研究方向并在前沿研究领域上占有一席之地,积极主动地扩大国际合作交流,发展国际合作关系是非常重要的。我们在项目执行期间,通过国际合作除参加在美国Be-

valac 流光室和 TPC 进行的高能重离子碰撞实验外,还争取得到一些必要的研究设备,接收了赠送的 VAX11/780 计算机和外部设备,调制解调器,必要的计算机软件及一些国内难以解决的计算机配件等。通过国际合作,我们得到最新的研究信息、论文预印本和最新的会议论文集;解决国际刊物上论文发表的版面费,加速发表论文的周期。我们还和美方一同申请了美国国家自然科学基金的美中合作项目。

2. 精打细算,使有限的基金发挥更大的效益。哈尔滨工业大学校领导对于国家自然科学基金资助的项目十分重视,给予我们极大的帮助;航天部领导也十分重视基础研究工作,给予我们很多支持。国家自然科学基金虽然十分有限,但是它可诱发多渠道的资助,发挥更大的效益。

3. 计算机的国内联网和国际联网是一个发达国家的重要标志,联网的重要性再也不能够忽视了,建议基金会呼吁有关部门予以重视。

4. 现在通过公司购买一些国外仪器设备,需要付出很高的代价。建议国家能够给自然科学基金项目一些优惠政策,对基金项目的关键性设备能够解决外汇指标,有进口审批权和免税渠道。

## ON THE STUDIES OF HIGH ENERGY HEAVY ION COLLISIONS IN CHINA

Liu Yiming

*(Department of Physics, Harbin Institute of Technology)*

### Abstract

Very high temperatures and nuclear densities can be generated in the interaction region within a very short period during the collision of nuclei at very high energy. The study of the properties of nuclear matter at extreme conditions of temperature and density is crucial to explore the new form of matter, called quark-gluon plasma, and to understand the origin of the universe. The physics of high energy heavy ion collisions is now recognized as an exciting frontier of fundamental research, embracing fields like nuclear physics, particle physics and astrophysics. The construction of the Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) and the Large Hadron Collider (LHC) will be completed in the late nineties, which will provide an unprecedentedly great opportunity to study the nuclear matter up to very high temperatures and densities.

Since the study of high energy heavy ion collisions became one of the key projects of the NSFC in 1988, we have set up computer facilities for the exclusive use of high energy heavy ion physics and established the heavy ion research group. We proposed a new criterion, which is contrary to some conventional thinking, to compare the analysed results for pion interferometry from different experimental groups, and established for the first time the theory of multi-pion correlations; we developed a new approach for the study of collective flow through collective correlations, and established the new methodology for azimuthal correlations of particle pair and high-order collective flow correlations. The progress mentioned above indicates that our program has been vigorously pursued in the forefront in the study of high energy heavy ion collisions.