

# 相对论性核-核碰撞的理论与核乳胶实验研究

蔡 勛

(华中师范大学粒子物理研究所高能物理实验室)

**【摘要】** 相对论性核-核碰撞是 90 年代物理学的重要的学科前沿领域。它的目的是在高能量的大型加速器实验和宇宙线实验中,研究相对论性重离子诱发的核聚变反应,探讨在高温和高密的极端环境中出现的新现象、新粒子和新物质形态。它是涉及粒子物理、核物理、统计物理、宇宙线物理和宇宙物理等多种学科领域的新生长点。

“相对论性核-核碰撞的理论与核乳胶实验研究”属于国家自然科学基金委员会的重点基金项目。它的研究内容和目标包括:相对论性重核的聚变反应动力学;核碎裂和粒子产生的性质及检测分析;强子物质与夸克物质(夸克胶子等离子体)间的相变与新物质形态;在国际合作中利用国外大型实验设备,进行相对论性核-核碰撞实验。

## 一、相对论性核-核碰撞物理的意义

“相对论性核-核碰撞的理论与核乳胶实验研究”是国家自然科学基金重点项目。相对论性核-核碰撞(又称高能重离子碰撞)是现代物理学的新生长点,是 80 年代兴起的 90 年代物理学的重要的学科前沿领域<sup>[1]</sup>。它的目的是在高能量的大型加速器实验和宇宙线实验中,研究相对论性重离子诱发的核聚变反应,探讨在高温和高密的极端环境中出现的新现象、新粒子和新物质形态。它对于传统的核结构模型、核反应动力学和强作用理论,有可能作出决定性的检验,并涉及粒子物理、核物理、统计物理、宇宙线物理和宇宙物理等多种学科领域。作为基础性的研究,它的重要成果和突破性进展,将对认识物质微观结构及运动规律、认识宇宙形成及演化过程,有着重要的指导意义。

在本世纪中,20 年代量子力学的出现是人类探索微观世界的里程碑。40 年代核结构模型的确立,核反应的研究及核能的应用,使核物理得到重大发展。60 年代强子的夸克模型建立,强作用理论的研究及各类大型加速器的实验,又使粒子物理得到了重大发展。但是,多年以来,核物理学家们主要是沿着质量轴来推进实验,即加重碰撞核的质量,采用束流的能量很低;而粒子物理学家们主要是沿着能量轴来推进实验,即加大束流的能量,采用的碰撞粒子是轻子、强子或质量很轻的核。因此,高能量下的重离子碰撞是留下来尚未研究的一大块空白领域。

人们现在知道,核是由质子和中子这类强子组成的,而强子是由夸克和胶子组成的。构成核的核力和构成强子的色力都是强作用力,具有渐近自由和夸克禁闭两大特性。目前,关于强作用力的一种比较有希望的动力学理论——量子色动力学(QCD),已于 70 年代建立,它在与渐近自由现象有关的微扰理论方面已取得了相当的成功,然而在夸克禁闭现象有关的非微扰理论方面,实验和理论上都存在着大量问题,有许多物理要做。强子是强作用复杂真空中的

集体激发态。当质子和中子构成原子核时,强作用的剩余力以核力形式出现,蕴藏了巨大的核能。而作为强作用原始力的更强大的色力,则把夸克和胶子完全禁闭在强子内部。只有采用实验手段,使夸克和胶子解除(或部分解除)禁闭,成为夸克-胶子等离子体(夸克物质)这种新物质形态,才有可能真正了解真空和色力(以及核力)的性质。80年代以来,宇宙线实验中关于高多重数和类环事例的发现;加速器实验中关于 EMC 效应和反常核碎片的观测;格点规范理论中关于核物质到夸克物质相变的预言;高能碰撞模型关于高温高密条件的估计;这些使高能区域重离子诱发的核聚变反应成为物理学科的新动向和研究前沿,成为可能出现重大突破的高水平的新生增长点。通过高能重离子碰撞,将巨大的动能转化为热能,有可能制造出高温高密的物质相变极端条件,产生夸克物质。

李政道教授指出<sup>[2]</sup>,通过相对论性重离子碰撞,一方面可以研究两个核聚变产生的新物质形态;另一方面,也能帮助我们研究两个碰撞核离开后背景真空的性质。这种新物质形态的能量密度将比中子星内部更大,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。这些实验没有一个是容易的。但是,如果由此得出的真空的行为确实象一个物理介质,并且通过物理手段真的能改变真空的性质,那么微观世界和宏观世界将通过无所不在的真空紧密地联系起来。也许,通过揭示真空的性质,可能会导致远比我们已经涉及到的还要激动人心的发现。

## 二、国外的研究现状

相对论性核-核碰撞,已引起世界各国的粒子物理学家和核物理学家的广泛注意。近年来,美国、西欧、日本、苏联和印度等都开始投入巨额的经费和大量的人力物力来进行实验和理论上的研究。在西欧核子研究中心(CERN)、美国布鲁克海汶国家实验室(BNL)、苏联杜布纳联合核子研究所(JINR)等,都相继成立了许多国际合作组,采用大型加速器进行实验。例如,自1986年下半年以来,CERN至少有13个国际实验合作组,包括400多位物理学家进行了实验。其中,有WA80合作组(6个研究所),NA34/2合作组(16个研究所),NA35合作组(12个研究所),NA36合作组(10个研究所),EMU-01(16个研究所)。在BNL,至少有12个国际实验合作组,包括近200位物理学家。CERN的超级质子同步加速器(SPS)于1986年9月加速了氧离子束流,1987年10月和1990年8月加速了硫离子束流,能量已高达每核子2000亿电子伏特(200A GeV)。在BNL,一台耗资巨大的相对论性重离子对撞机(RHIC)开始建造,预计在1997年运行投入实验。

从70年代末以来,已举行了9次大规模的系列性国际超相对论性核-核碰撞会议(又称夸克物质会议),发表了大量的理论研究论文,在有限温度下的规范场论、格点规范理论及蒙特卡罗模拟、退禁闭相变和恢复手征对称性相变、热场动力学、相对论性流体动力学、分子液体动力学等方面,进行了广泛的工作。

## 三、本项目研究内容和目标

目前国际上关于这一研究领域存在的主要问题是实验数据的类型和统计量极为不足,定

量的理论预言严重缺发,难以得出关于新规律、新物质形态的结论。在国家自然科学基金委员会的重点基金项目的支持下,本项目的研究将大为拓宽射弹核与靶核的种类,显著增加数据的统计量。通过我国自主研究和国际合作,有可能在相对论性核-核碰撞实验研究中,在关于原子核特性、原子核反应动力学以及夸克物质的信号探测方面,做出有重大意义的成果。

本课题包括实验研究和唯象理论研究两方面工作:

原子核乳胶技术在物理学发展中有过很重要的贡献,近年来由于大型加速器的进步,可以加速能量高达每核子二千亿电子伏特的重离子束流,原子核乳胶已成为探测相对论性核-核碰撞的有力工具,与其它探测器相比,具有作用图象完整,空间分辨本领强,无向前方向死角等优点。特别是垂直照射的乳胶室结构以及三像吻合的程控测量和重建技术,完全脱颖于老一代的乳胶测量手段,为本项目的创新之处。

在实验上,通过国际合作,利用国外大型加速器(CERN-SPS, BNL-AGS, DUBNA),以氦、氮、氧、硫、金、铅重离子为射弹核,以原子核乳胶、Au箔、Ag箔、Pb箔为靶核,探测高能重离子束流诱发核反应的核碎裂和多粒子产生。通过研究碰撞末态的核碎片和产生粒子的多重数分布、角分布(赝快度分布、横动量分布),分析各种关联和起伏,发现反常核现象和新粒子,采集最新的实验数据。在数据积累基础上,系统地研究各种射弹核和靶核在不同入射能量下相互作用的核碎裂与多粒子产生的特点,总结实验规律。利用本项目组实验数据以及本项目合作单位——CERN/EMU01国际协作组的数据库,对高能重离子碰撞领域国际上广为关注的课题,例如核几何效应及其多重数的依赖性、核阻止本领、高粒子数密度的涨落现象及其产生机制(间歇与分形等),玻色-爱因斯坦关联及其发射源半径,多粒子产生的标度性、熵依赖、反常子等开展细致的研究工作,总结相对论性核-核碰撞的唯象规律。也利用欧洲核子研究中心CERN(瑞士日内瓦)的SPS大型加速器进行了一些实验。(见图1)

在唯象理论分析方面,发展深化本项目组已有的工作成果,建立新模型,利用本实验最新数据,对高能碰撞多粒子产生的特点与规律作系统分析,寻找核-核碰撞与强子-强子,强子-核相互作用的联系,进而系统研究重核聚变反应的动力学机制及其时空演化图象,探寻新现象、新粒子和新物质形态,特别是夸克物质形成的信号。

本课题特色有两条:一是国内研究与国际合作密切结合,二是实验研究与理论研究密切结合。既立足于国内的实验室研究基础(高水平的学术带头人,精干的中青年研究队伍和先进的测量设备),充分发挥国内现有研究人员和研究设备的能力,作出独立的研究成果;又加强和开拓国际研究合作和学术交流,充分利用国外大型加速器,参与“大科学”研究,提高研究工作的起点和水平。本项目在实施中坚持实验研究与唯象理论研究相结合,使实验可以随时得到理论模型的指导,深化对实验结果的认识,又使理论可以及早得到最新实验数据的比较,及早做出国际前沿的研究成果。

#### 四、我国的研究进展

我国关于相对论性核-核碰撞的理论研究起步于80年代初。当时,国际上关于这个研究领域的工作也才刚刚开始。1982年5月在西德举行第二次国际超相对论核-核碰撞会议(夸克物质会议)之前两个月,我国刘连寿教授等就已在全国粒子物理讨论会上作了题为“超高能

重离子碰撞”的报告<sup>[3]</sup>。一年后他与孟大中、周光召、赵维勤、蔡勳等合作的高能强子碰撞的三火球模型,引起国际同行的广泛注意和引用,1985年获国家教委的科技进步二等奖。以后,他们又将其发展成为高能核-核碰撞的多源模型。1989年李家荣教授专著的《夸克物理理论导论》一书出版,这本书在国内是第一本,在国际上也不多见。1990年,刘连寿、李家荣、蔡勳等的研究工作“高能重离子碰撞的唯象研究”,被国家科委登记为重大科研成果。

参与国际“大科学”的研究,利用国外大型加速器,采用电子学探测器,所需经费一般都相当巨大,唯有原子核乳胶及测量设备所需经费较低,比较适合于我国目前的经济能力。本项目既可做出国际前沿的实验研究成果,又适合国情,从而保持并发展我国在物理科学研究上的繁荣局面。

1983年,在唐孝威研究员和刘连寿教授的倡导和组织下,由中科院高能所、华中师大、山西师大和中科院管理干部学院等单位成立了中国高能核乳胶实验协作组,开始了我国的相对论性核-核碰撞的实验研究。在国家自然科学基金委员会的基金项目“高能核乳胶中的重核作用研究”的支持下,从1984年起,开展了对我国人造卫星回收核乳胶中高能重核作用的研究。华中师大的高能物理实验室率先发现了一个宇宙线诱发的高多重数事例,在1986年国际宇宙线超高能作用讨论会上报告后,引起国内外专家的注意,被认为是引头在国内恢复了核乳胶的应用,并走向国际。他们于1985年加入CERN/EMU01国际协作组。同年,又介绍了

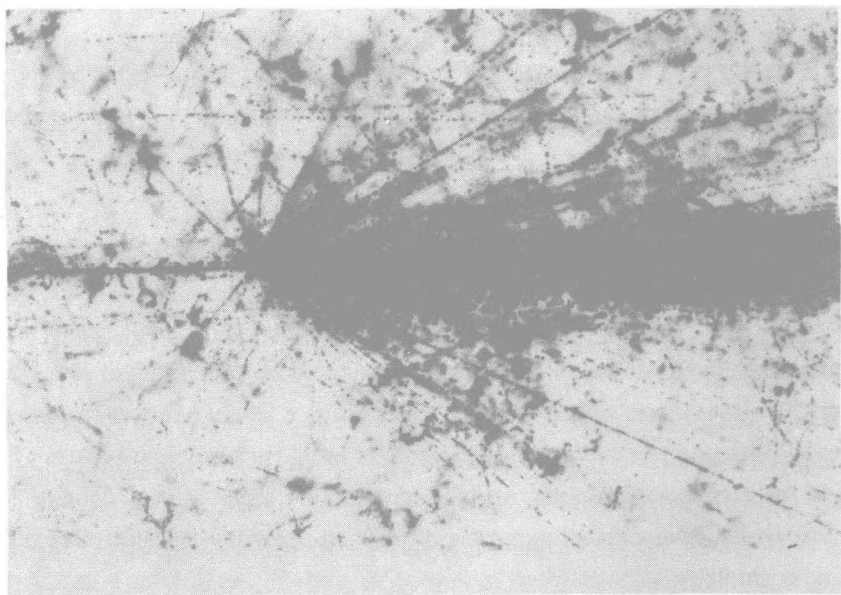


图1 这是华中师范大学粒子物理研究所参加的国际EMU—01实验合作组于1989年在欧洲核子研究中心CERN(瑞士日内瓦)的SPS大型加速器进行的实验。是目前世界上加速器最高能量(200A GeV)在离子诱发核反应的显微照片(核乳胶探测器)。

中科院高能所和山西师大等国内协作的实验室参加了这个国际协作组。在国家自然科学基金会和国家教委的支持下,华中师大粒子物理研究所与瑞典隆德大学宇宙线与亚原子物理研究所于1987年又建立了双边国际合作关系,共同开展“超高能重离子碰撞多粒子产生和原子核碎裂”的项目研究。通过国际协作,从1985年到1990年,已先后获取了在美国劳伦斯-伯克

利实验室、布鲁克海汶实验室、西欧核子研究中心以及苏联杜布纳联合核子研究所的大型加速器上的大批最新宝贵实验资料,使我国在相对论性核-核碰撞的实验研究方面,进入了国际前沿行列。除了能对氦(1.4A GeV)、氦(12A GeV)、氧(3.6, 14.6, 60, 200A GeV)和硫(14.6, 60, 200A GeV)离子束流水平照射的常规核乳胶叠中的诱发核作用,进行测量和分析外,还开展了具有80年代国际最先进技术的200A GeV氧、硫离子束流垂直照射的特制核乳胶室的中心事例的研究,获得了高能重离子碰撞的一大批重要的实验研究成果。这些成果汇入CERN/EMU01的实验数据库,五年来已以国际协作组成果共享的方式在国际第一流的学术杂志上发表了近30篇论文,提高了我国在国际高能核物理领域中的地位。

国家自然科学基金委员会对“多粒子产生与夸克物质”、“夸克物质的产生与探测”和“200A GeV氧、硫离子诱导核反应的核乳胶研究”等项目给予了连续支持,为我国在相对论性核-核碰撞理论和高能核乳胶实验研究上取得突出成果创造了条件。

### 参 考 文 献

- [1] 李政道, *Relativistic Heavy-Ion Collisions and Future Physics*, *Symmetries in Particle Physics*, eds. I. Bars, A. Chodos and C. H. Tze, (NY, Plenum Press, 1984), P. 93.
- [2] 蔡勳, 夸克物质研究现状, *物理学进展*, 1988年第8卷186页。
- [3] 李政道, *Relativistic Ion Collisions and 200 TeV Physics*, Columbia University Preprint, Cu-TO-477, 1990.
- [4] 刘连寿, 蔡勳, “超高能重离子碰撞”, 1982年武汉粒子物理讨论文集, 77页。

## THE INVESTIGATION OF THEORY AND NUCLEAR EMULSION EXPERIMENT ON RELATIVISTIC NUCLEUS-NUCLEUS COLLISIONS

Cai Xu

(High Energy Physics Laboratory, Institute of Particle physics, Hua-Zhong Normal University)

### Abstract

Relativistic nucleus-nucleus collision represents an important field of research in physics through the 1990s. Its subjects of research are to investigate nuclear fusion reactions induced by relativistic heavy-ions and to search new phenomena, new particles and new states of nuclear matter appeared in the extreme environment of high temperature and/or high density. It is a fast developing activity which covers broadly particle physics, nuclear physics, statistical physics, cosmic ray physics and cosmology.

The present priority project on “the investigation of theory and nuclear emulsion experiment on relativistic nucleus-nucleus collision” contains following contents of research: reaction dynamics of nuclear fusion of relativistic heavy nuclei, properties of nuclear fragmentation and multi-particle production and their detection and analysis, phase transition between hadron matter and quark matter (quark-gluon plasma) and new states of matter, experiments of relativistic nucleus-nucleus collisions by using the international experimental equipments (large accelerators) in the international collaboration.