

# 李政道与重离子碰撞物理

马余刚

(复旦大学 200433)

2021年11月24日是李政道先生九十五华诞,我谨代表国内重离子碰撞同行撰文向李先生祝寿。感谢李先生大力促进了相对论重离子碰撞物理这一研究领域的发展和推动了在美国布鲁克海文实验室(BNL)建造的相对论重离子对撞机(Relativistic Heavy-Ion Collider, RHIC)的上马,他是国际上最早建议用重离子碰撞来探索极端高温高密条件下的新物质形态的科学家之一。其核心思想是通过加速重离子(如金原子核)到接近光速进行对撞,此时形成的物质具有极端高的能量密度,有可能经历从普通强子物质到退禁闭的夸克胶子等离子体的新物质形态。李政道先生基于这个思想,特地邀请了画家李可染先生于1986年创作了一幅国画“核子重如牛,对撞生新态”(图1)。

## 一、“核子重如牛,对撞生新态”

物质科学的基本问题是物质的结构和形态。20世纪物理学在探索物质的深层次结构上取得了

很大的成功。例如,发现强子内部存在更基本的结构,通常称为夸克。夸克和电子一样,也是一种费米子,具有两个自旋自由度。除此之外,夸克还有一种称为“味道”的自由度。目前发现的夸克共有6种味道,分别为上(u)、下(d)、奇异(s)、粲(c)、底(b)和顶(t)夸克。夸克带“色”,不同夸克间的相互作用力就是色相互作用,而传递这个相互作用的媒介粒子就是胶子,正如传递电磁力的媒介粒子是光子一样。描述夸克和胶子之间的色相互作用的量子色动力学(quantum chromodynamics, QCD)是非阿贝尔规范场论。“非阿贝尔”意味着不可对易性,即描述夸克色荷的矩阵间的乘法是不可对易的。这种性质使得QCD具有不同于量子电动力学(quantum electrodynamics, QED)的性质,比如,传递色相互作用的胶子本身也是带色荷的,因而胶子之间也有相互作用;而在QED中,传递电磁相互作用的光子是电中性的,光子之间没有直接相互作用。QCD的这种非阿贝尔性质导致了色相互作用的两个重要的



图1 李政道先生邀请李可染创作的“核子重如牛,对撞生新态”

特征:高能区的渐近自由和低能区的色禁闭。

渐近自由是指,当两个色荷距离很近时色相互作用变弱,其根源是胶子带色荷:带色的胶子对色荷具有反屏蔽效应,而这反屏蔽效应要强于夸克-反夸克造成的屏蔽效应,从而使得距离色荷越远感受到的有效色荷越多,即相互作用越强;越近感受到的有效色荷越少,即相互作用越弱。QCD的渐近自由告诉我们,在足够高的能量下,色相互作用会变得很弱以至于无法将夸克和胶子束缚在强子中,从而有可能形成一种新的由夸克和胶子作为基本自由度的物质形态,即夸克-胶子等离子体(quark-gluon plasma, QGP)。与此相反,色禁闭是指在大距离或者低能量时,夸克和胶子束缚在色中性的强子中。这导致孤立的夸克和胶子是无法被观测到的。事实上,人类确实未曾在自然界中观测到孤立的夸克和胶子。尽管大多数人都相信色禁闭是可以从QCD推导出来的,而且大量的基于格点QCD的计算也支持色禁闭,但迄今为止还没有人能够严格地证明这一点。

宇宙大爆炸理论认为在宇宙诞生之后约微秒量级的时间或更早期整个宇宙充满了夸克-胶子等离子体“汤”。今天整个宇宙已经冷却到很低的温度,但物理学家们可以利用相对论重离子碰撞来实现局域瞬时的极端高温从而在实验室中重现早期宇宙的物质形态。在20世纪70年代,李政道先生就建议通过相对论重离子碰撞,使用大型加速器将重核加速到接近光速并发生对心碰撞来产生并研究QGP<sup>①</sup>。1973年,李政道和威克(G. C. Wick)在量子场论框架下,理论上研究了通过改变其真空态来恢复对称性的可能性,提出 $\sigma$ 模型可以用来作为恢复对称性破缺的一条模型途径<sup>②</sup>。模型含有一个自旋为零的中性标量粒子 $\sigma$ ,它与核子耦合从而提供核子质量。如果足够多的核子被挤压在一起,标量场将趋于零,从而使核子的质量为零。这将改变能量密度随核子密度变化曲线的形状,从而有可能产生另一个能量密度的低谷。也就是说,可能存在另一种尚未被观测过的物理系统。

李先生在1975年发表的论文中进一步指出,迄今为止,高能物理实验一直努力将越来越高的能量集中于越来越小的范围。为了研究真空,必须转向另一个方向,将很高的能量集中于一个相当大的尺度内,论文进一步指出,在很高的粒子密度下(比如在原子核内),一些标量场的期待值有可能明显偏离其通常的真空值,从而改变与其耦合的费米子的质量(比如改变核子本身的质量)。这种质量的改变会表现为一种从通常的核物质向具有较高密度和结合能的核物质的新形态的相变。李先生还进一步讨论了探测这种“反常”核态的可能方法,指出它在相对论重离子碰撞中产生的可能性,并为以后关于真空性质和相对论重离子碰撞物理方面的工作奠定了基础<sup>③</sup>。

李先生指出,要了解微观物质的性质,必须研究物质的整体性质。现代物理存在两个谜团,即对称性的破缺和夸克禁闭<sup>④</sup>。他多次在各种国际会议上强调,要解开这两个谜,需要改变真空的性质,而利用相对论重离子碰撞产生高温高密度的物质,有可能在一定空间范围内改变真空,实现对称性恢复和解禁闭的相变。这个新观念不但对于核物理学家,而且对于从事强相互作用研究的粒子物理学家而言,指出了一条全新的基础性的研究道路,开辟了相对论重离子碰撞物理学的研究。

正是通过这一观点,开拓了相对论重离子碰撞的新领域。20世纪70年代中期以后,这一新的领域吸引了粒子物理与核物理领域理论和实验物理学家的广泛关注。从改装已有的高能重离子加速器(Bevalac, Bevatron/Hilac),交变磁场梯度同步加速器(Alternating Gradient Synchrotron, AGS)和超级质子同步加速器(Super Proton Synchrotron, SPS)等加速装置,训练人才,积累经验,到建造新的相对论重离子加速器。“夸克物质(quark matter)”,“核-核碰撞”,“多粒子动力学”等系列国际会议记录了几十年RHIC物理学界理论和实验学家的不懈努力和取得的成果。

我们知道,温度的一个直接表征是体系的能量

密度,那么获取高温的一个途径就是将某种极高的能量“压缩”到一个极小的时空范围内释放出来。在重离子碰撞实验中,人们先用电磁场将一些剥离了电子的重离子(比如金和铅等大质量原子核)加速到极高的、非常接近光速的运动速度,并运行在大型的离子对撞环以内。目前国际运行的最高能重离子对撞装置有位于欧洲核子中心(CERN)的大型强子对撞机(LHC)和位于美国布鲁克海文国家实验室(BNL)的相对论重离子对撞机(RHIC)。在获得了高能量的重离子束流以后,人们通过让运动方向相反的束流迎面相撞,使得重离子所携带的巨大运动能量在对撞所发生的极小区域(即原子核的尺度,约为1厘米的万亿分之一)内释放出来。准确而言,两个原子核在相碰的过程中会通过相互作用把相当一部分的初始动能留在对撞中心区从而激发真空产生大量的夸克和胶子。

重离子碰撞中产生的夸克胶子等离子体并不处于静态,而是剧烈地向外膨胀,其温度伴随着膨胀过程而迅速降低。当温度降到相变温度时,夸克和胶子将被重新束缚为各种强子然后四散飞出。最终这数以千计的强子将进入到对撞点周围的大型粒子探测器中并被逐个记录下来。这种强相互作用物质组成的火球的膨胀是一个非常激烈快速的过程,整个对撞持续的时间极短,这使得直接探测火球内的热密物质变得不可能实现。我们只能从最终测到的大量强子来反推早先在对撞中产生的火球状态及其演化。经过近50年的不懈努力,高能核物理学科方向在研究新物质形态上取得了重要进展,一系列支持QGP新物质形态形成的实验信号陆续被发现<sup>⑤⑥</sup>,例如:高能重离子对撞中喷注淬灭现象的发现;不同夸克味道组分的强子较强的集体流及其组分夸克标度行为;对心重核碰撞中奇异性产额增强等。

## 二、李先生推动重离子碰撞物理研究与RHIC-STAR中美合作

李先生一直关心布鲁克海文国家实验室的相

对论重离子对撞机的建造,多次在RIKEN/BNL研究中心的研讨会上作报告,与RHIC实验物理学家密切联系,一直关注其实验结果。例如近十年重离子碰撞研究中的热点科学问题之一,关于手征磁效应的研究:在2008年末,Warringa和Kharzeev等人发表了手征磁效应(CME)的文章后,李先生特意请他们到办公室给他讲述他们的手征磁效应的工作,李先生表现出很大的兴趣,并提出很多敏锐的见解。随后近十年关于CME的火热研究场景再次体现了李先生对重要问题敏锐的洞察力,CME已经成为重离子碰撞领域一个重要的研究课题,例如Warringa和Kharzeev在2008年完成的关于CME的两篇理论文章至今引用超过3000次<sup>⑦⑧</sup>,并成为RHIC-STAR和LHC-ALICE实验的一个重要研究方向。2010年,欧洲核子中心也实现了在大型强子对撞机上开展重离子对撞实验。21世纪初,相对论重离子碰撞的实验结果证实,在重离子对撞过程中产生了强耦合的夸克-胶子等离子体(sQGP)<sup>⑤⑥</sup>。李先生高度评价这一结果(图2),指出这很可能是一个新物理时期的开始。美国物理学会将RHIC的最新实验结果列为2005年的最重要的16项物理成就的第一项。中国科学院和中国工程院两院院士评选的2005年最重要的十大科技进展也选入了这一项。

李先生致力于推动国内的RHIC物理研究的发展,他也是中美STAR国际合作的发起者和推动

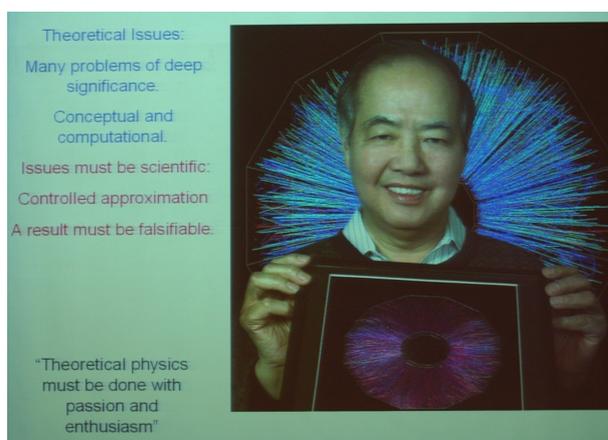


图2 李先生在夸克物质2006国际大会时的一张片子。李先生身后的是STAR时间投影室(TPC)的一个碰撞事件的粒子径迹图,胸前的是李先生请苏州刺绣工艺师做的双面绣

者。1989年他专门在他担任主任的中国高等科学技术中心(CCAST)召开有关RHIC物理的讲习班,亲自邀请国际知名的理论和实验物理学家做系列报告。还在CCAST研讨会中专门建立RHIC物理系列,先后组织了数十次相关的研讨会。聘请国际上活跃在这一领域前沿的年轻物理学家,作为CCAST的青年归国学者(Young returning scientist, YRS),在研讨会作系列演讲,系统介绍这方面的基础理论和实验进展,并且和与会者深入交流。不少YRS应邀来讲学后,与国内学者建立了密切的合作关系。例如,美籍华人学者王新年、许怒、黄焕中、许长补、王福强等都先后与国内多家合作单位建立长期的合作关系,并在国内建立了各自的研究团队,极大促进了国内这方面研究的发展。目前,华中师范大学、中国科学技术大学、山东大学、清华大学、北京大学、复旦大学、湖州师范学院、中国科学院大学、中国科学院上海应用物理研究所、中国科学院近代物理研究所、中国原子能研究院等都建立了活跃的理论或实验研究组。通过参加大型国际合作实验,取得了一系列突出的成果。

RHIC正式运行不久,在2001年由中国科学院上海应用物理研究所、中国科学技术大学、清华大学、华中师范大学、中国科学院近代物理研究所和山东大学等构成的STAR中国组从RHIC运行早期开始就参与了STAR探测器的升级与实验分析。STAR中国组的起源是在1999年,当时STAR合作

组副发言人T. Hallman访问武汉;2000年2月,由时任国家自然科学基金委员会副主任王乃彦院士率队访美,表示中国愿意组织队伍、投入经费,参加“RHIC-STAR物理及其飞行时间谱仪(TOF)”的研究工作。期间,王乃彦先生等还在BNL拜访了李政道先生。美方对此很重视,于当年4月份指派加州大学UCLA的黄焕中教授作为联系人,代表美方协调该合作项目的具体事宜。华中师范大学和中科院高能物理研究所作为国内首批单位加入STAR-国际合作组,当时提出中国组可以为STAR探测器的升级研发基于塑料闪烁体的飞行时间探测器。2001年,由沈文庆院士作为召集人组织中国其他四家单位(中科院上海应用物理所,中国科大,清华大学,中科院近代物理所)正式加入合作组。2002年5月STAR合作组的国际发言人Tim Hallman博士和STAR合作组理事会主席J. Max博士访问基金委,与陈佳洱主任、数学学部汲培文常务副主任等会谈,并参观了清华大学和中国科技大学的有关实验室。会见后,Hallman博士和Max博士在CCAST专门拜访李政道先生,得到李先生的热情接待。

在国家基金委主任基金资助下,STAR中国组开始了基于多气隙电阻板室(MRPC)技术飞行时间探测器的样机研制,美国STAR合作组也给予了资金和技术上的支持。同年,在李政道先生提议和中科院的支持下,RHIC-STAR合作项目从2002年开始也列入了年度中美高能物理合作会议会谈内容



图3 在李政道的大力推动下,RHIC-STAR实验正式成为中美高能物理合作项目。这是李先生在中科院高能物理研究所出席2002年度中美高能物理合作会谈签字仪式



图4 2002年2月,时任基金委副主任王乃彦院士、国际合作局主任常青研究员、数理学部常务副主任汲培文研究员等在BNL拜访李政道先生

(图3)。2003年开始,由马余刚研究员作为STAR中国组负责人、陈宏芳、程建平为副负责人,启动组织申请国家自然科学基金委重大国际合作项目“STAR相对论核-核碰撞物理研究和飞行时间探测器研制”。2005年,沈文庆先生向李先生汇报了STAR大型飞行时间探测器作为中美国际合作的方向与途径,得到了李先生的积极回应与支持,大大促进了该合作的后续发展。通过近三年的努力,在2006年2月得到了国家自然科学基金委、中国科学院、科技部联合资助的项目经费1300余万。2009年,STAR中国合作组以清华大学与中国科大为主完成了基于4032块MRPC组成的大型飞行时间探测器,由美国RICE大学组装集成并配备电子学,安装在STAR探测器上并在RHIC-STAR上成功运行,这是国际上首次在高能重离子对撞机上运行的基于MRPC技术的飞行时间谱仪。该国际合作项目完成后,2009年1月,BNL副所长Vigdor、物理系主任Ludlam、STAR发言人Hallman联名写信给基金委、科学院、科技部相关领导与STAR中国组负责人,赞誉“该中美STAR合作堪称为未来的中美科技合作树立了典范。STAR-TOF的研制在科学和技术

的每一个层面取得了圆满的成功,衷心祝贺STAR中国组”。

大型飞行时间探测器研制和安装成功后,STAR中国组为主观测到迄今为止最重的反物质原子核-反氦4,这对理解宇宙早期物质具有重要意义;他们还利用飞行时间谱仪,开展了粲夸克产生截面测量,发展了鉴别高动量区间粒子的新技术并实现实验测量。值得指出的是,STAR中国组在反物质原子核的实验研究上独树一帜,除了反氦4,还先后发现首个反物质超核、首次实现反物质间相互作用力的测量、完成了正反超氘核质量的精确测量等,这些结果分别入选2010和2015年度“中国科学十大进展”、改革开放四十年中科院40项具有代表性的标志性的重大成果等。以STAR中国组为主完成的《重离子碰撞中的反物质探测与夸克物质的强子谱学与集体性质研究》获得2016年度国家自然科学基金二等奖。另外,也要特别指出的是通过RHIC-STAR国际合作,为我国的高能核物理事业培养了一大批具有国际视野的青年人才,并为国内相关的实验装置积累了很多经验。同时,一些留在美国的华人科学家多次担任大型合作组STAR的发言人或

理事长等重要岗位,比如许怒、许长补、阮丽娟等先后担任 STAR 合作组发言人或共同发言人,黄焕中担任理事会主席等。另外,美方的前任发言人 T. Hallman 离任后,也一直在美国能源部核科学办公室担任常务主任。

国内重离子碰撞理论研究也在李先生的鼓励下,取得了长足的发展。年长一辈的如刘连寿先生、谢去病先生、高崇寿先生、萨本豪先生、赵维勤先生等率先在国内开展并推动相对论重离子物理的理论研究。张宗焯先生、王凡先生等从奇特强子态的角度也对重离子研究输入了新的想法。后期,华中师范大学王恩科教授、王新年教授主导的研究小组在喷注淬灭研究上取得突出成绩,其建立的“王-王公式”得到领域的广泛认可;山东大学梁作堂教授和王新年教授首次提出的夸克物质整体极化的物理图像也在 2017 年被 RHIC- STAR 实验组证实,现在已经发展成研究夸克物质性质的一个新视野;清华大学庄鹏飞教授和许怒教授等在重味夸克物理上的研究成果也对重离子碰撞物理实验领域产生了重要的国际影响,多次发表在《物理评论快报》上。

2006 年 11 月,由中科院上海应用物理研究所和华中师范大学共同承办,在上海举行了“夸克物质”国际会议。该系列会议是国际高能核物理界影响力最大的国际会议,此次会议是该系列会议在中



图5 2006年11月,李政道先生在夸克物质国际大会上做《甲子60年》大会开场报告并致辞

国第一次举办。李政道先生作为大会荣誉主席,八十岁高龄的李先生应邀专程回国,并做了主题为《甲子60年》大会开场报告(图5),他高度概括了国际重离子物理探索的核心科学问题,并表示目前对于夸克物质的研究已成为物理学甚至整个物质科学的一个令人激动的研究方向。寄望国内高校、科研院所积极参与到重离子物理的研究中。会议组织者也在上海大剧院专门为李先生祝贺八十华诞,时任中科院副院长的江绵恒先生、复旦大学校长的杨福家先生、美国德州大学达拉斯分校校长冯达旋先生等出席并致辞,与会的500余位国际专家共同祝福李先生健康长寿,并感谢他为推动高能重离子物理的发展做出的突出贡献。

在“夸克物质”国际会议前夕,STAR 中国组还在中国科大承办了 STAR 国际合作组年度大会,这也是 STAR 合作组会议首次在中国举行。李政道先生还为这次合作组会议发来贺信并鼓励,李先生指出,“发现核物质新形态及其新性质以探索量子色动力学的不同相,是物理的前沿领域之一……毋庸置疑,相对论重离子碰撞物理已经处于挑战核与粒子物理传统边界的前沿……这次 STAR 合作组会议(合肥)以及紧接着的夸克物质国际大会(上海)的举办,标注着中国新一代物理学家积极参与这个很激动人心的研究领域并正在做出贡献新时代已经到来。”

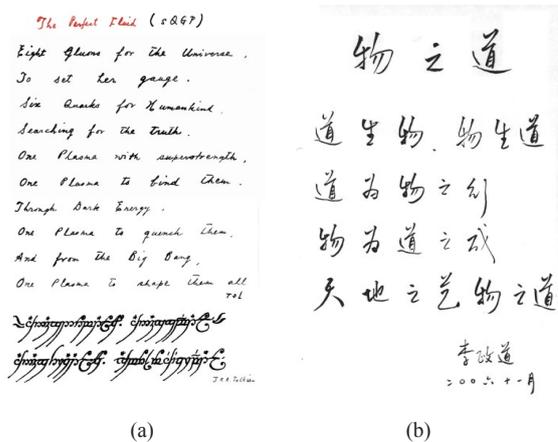


图6 (a)李政道先生为“强耦合夸克-胶子等离子体(sQGP)”赋诗,(b)在“夸克物质2006”大会作《甲子60年》大会开场报告的结束语

### 三、重离子碰撞的远景

在李先生等的推动下,重离子碰撞学科取得突出进展。目前主要的研究方向是描述夸克物质的性质,研究QCD物质的相结构并寻找可能存在的相变临界点。前者主要依靠大型强子对撞机的实验研究,经过2年半的维护,LHC计划于今年开始新一轮的实验,在加速器性能提高和探测器升级支持下,LHC实验有望取得重大成果;同时,国内以复旦大学为主参与的电磁量能器探测器建造的BNL-sPHENIX实验也即将在美国相对论重离子对撞机上采数,预期在喷注淬火和Upsilon的实验研究上取得重大进展。另外,近期美国决定在BNL建设大型电子-离子对撞机(EIC),必将进一步推动核物理领域向更深的物质结构研究。相应地,中国电子-离子对撞机合作组也适时发布了中国版EicC白皮书<sup>⑩</sup>。

近期RHIC-STAR的一个主要研究方面是束流能量扫描和固定靶实验。在RHIC第一阶段束流能量扫描的金核-金核对心碰撞中,STAR实验观测到了净质子数分布的四阶矩的非单调能量依赖,在20GeV附近出现了一个极小值,可能暗示了碰撞产生的热密系统穿过了临界区,并受到临界涨落的影响。但是由于数据精度限制,还不能给出确定信号的结论。所以第二期的束流能量扫描实验紧锣密鼓地开展,目前虽然疫情影响严重,STAR实验组还是顺利完成了两年束流能量扫描二期实验的数据采集,相信在接下来的数据分析中将取得重要成果。而这方面的物理研究,也是德国即将建成的反质子-离子研究装置(FAIR),俄罗斯重离子超导同步加速器(NICA)的主要科学目标之一。在开展国际合作的同时,我国的科研团队也计划将QCD相结构物理研究延伸到正在惠州建设中的强流重离子加速器上(HIAF)大科学装置上。相信在不久的将来,我国也将成为国际重离子碰撞物理研究的中心。

致谢:特别感谢沈文庆院士、张闯研究员、庄鹏

飞教授、赵维勤研究员、陈金辉研究员、黄旭光教授、黄焕中教授、罗晓峰教授、许怒研究员、许长补研究员等提供相关材料,感谢RHIC-STAR国际合作组,感谢许多同行的讨论。

#### 参考文献

- ① T. D. Lee, A Possible New Form of Matter, in Report of the Workshop on BeV/Nucleon Collisions of Heavy Ions-How and Why, Bear Mountain 1974 (BNL No. 50445).
- ② T. D. Lee and G.C. Wick, Vacuum stability and vacuum excitation in a spin-0 field theory, Phys. Rev. D, 2291 (1974).
- ③ T. D. Lee, Abnormal nuclear states and vacuum excitation, Rev. Mod. Phys. 47, 267-275 (1975); 10.1103/RevModPhys.47.267.
- ④ T. D. Lee, RHIC and QCD: an overview, Nucl. Phys. A 590, 11c (1995).
- ⑤ J. Adams et al. (STAR Collaboration), Experimental and theoretical challenges in the search for the quark-gluon plasma: The STAR Collaboration's critical assessment of the evidence from RHIC collisions, Nucl. Phys. A 757, 102-183 (2005); 10.1016/j.nuclphysa.2005.03.085.
- ⑥ K. Adcox et al. (PHENIX Collaboration), Formation of dense partonic matter in relativistic nucleus-nucleus collisions at RHIC: Experimental evaluation, Nucl. Phys. A 757, 184-283 (2005); 10.1016/j.nuclphysa.2005.03.086.
- ⑦ D. E. Kharzeev, L. D. McLerran, H. J. Warringa, The effects of topological charge change in heavy ion collisions: "Event by event P and CP violation", Nucl. Phys. A 803, 227-253 (2008); 10.1016/j.nuclphysa.2008.02.298.
- ⑧ K. Fukushima, D. E. Kharzeev, H. J. Warringa, Chiral magnetic effect, Phys. Rev. D78, 074033 (2008); 10.1103/PhysRevD.78.074033
- ⑨ 曹须,常雷,畅宁波等,中国极化电子离子对撞机计划,核技术 43, 020001 (2020).
- ⑩ Daniele P. Anderle, Valerio Bertone, Xu Cao et al., Electron-ion collider in China, Frontiers of Physics 16, 64701 (2021) (<https://doi.org/10.1007/s11467-021-1062-0>).

作者简介:马余刚,复旦大学特聘教授,中科院院士,美国物理学会会士。2001年开始参与RHIC-STAR国际合作,作为项目主持人完成国家自然科学基金委重大国际合作项目“STAR相对论核-核碰撞物理研究和飞行时间探测器研制”。