

1. 项目名称

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

2. 推荐单位意见

该项目通过广泛的国内外合作，实验和理论研究相配合，通过重离子碰撞探测到两个新的反物质原子核，并研究了夸克-胶子新物质形态的强子谱学特征与集体运动性质。其主要成果有：(1)在国内率先开展了多气隙电阻板室(MRPC)的研制。基于此，研制成功了大型飞行时间探测器(TOF)并在RHIC-STAR上成功运行，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。(2)观测到首个反物质超核-反超氦，对核素图的扩展和理解超子-核子相互作用具有重要意义，成果入选了2010年度中国科学十大进展。(3)利用TOF，观测到了迄今最重的反物质原子核-反氦4，对理解宇宙早期物质的演化具有重要的意义。(4)利用TOF探测器等，测量了粲夸克产生截面；发展了鉴别高动量区粒子的新技术并实现实验测量。(5)首次测量了RHIC能区下phi介子的椭圆流等参数，并由此发夸克物质的部分子集体性；首次利用李杨零点方法得到了奇异强子椭圆流。

以上成果发表在Nature, Science和PRL等刊物上，受到国内外广泛关注，20篇主要论文被SCI他引1437次，国际报告100余次。项目研究成果对人们认识极端状态下的物质形态与性质，理解宇宙早期物质形态的演化等具有十分重要的意义。项目培养的一大批优秀青年人才已在国际舞台上崭露头角。项目负责人入选美国物理学会会士，两位完成人获得了国际性奖励。项目获得了2014年度上海市自然科学一等奖。

鉴于项目在国内外核物理界做出的突出贡献，特推荐申报2016年度国家自然科学基金二等奖。

3. 项目简介

“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”属核物理学科内重离子核反应领域。研究的重点是探测新的反物质原子核，研究高温高密的夸克物质的强子谱学特征与集体运动性质，是目前国际上核物理研究的重要前沿和热点课题。主要内容包括发现了首例反物质超核（反超氦）、观测到迄今最重的反物质原子核（反氦4）、研究了夸克-胶子等离子体（QGP）新物质的相变以及若干信号等，并为了实现以上物理目标开展了多气隙电阻板室的大型飞行时间探测器的研发等研究。该项目在相关的重离子碰撞的实验和理论上都作了深入、系统的研究。

项目通过广泛的国内外合作，实验和理论研究紧密配合，在以上几个方获得了一批具有重要科学价值的研究成果，对目前国际核物理研究的前沿领域：相对论重离子碰撞物理和反物质探测的发展具有十分重要的意义。其关键科技发现分两个方面。

在探测器技术的重要发展上：在国内率先开展了研制精确测定时间的多气隙电阻板室（MRPC），其时间分辨率达到了国际先进水平；为RHIC-STAR实验组探测器的升

级，高质量地完成了MRPC模块的大批量制作，严格的质量控制与规模化研制达到国际先进水平；利用MRPC技术研制成功的大型飞行时间探测器（TOF）成功安装在RHIC-STAR大型探测器上，是国际上首次在高能重离子对撞机实验上运行成功的基于MRPC技术的大型飞行时间谱仪。

在物理研究方面：1) 发现了首个反物质超核-反超氦核：通过复杂的数据分析，在上亿次金核对撞的海量数据中通过重构反氦3和 π 介子的不变质量谱，探测到首个反超核粒子，论文发表在Science上。反超核发现打开了三维核素图的大门，该成果入选“2010年中国科学十大进展”。2) 反氦4核的发现：通过我们研发的TOF和STAR-TPC探测到氦4核的反物质粒子，这是迄今所能探测到的最重的反物质原子核，成果发表在Nature上。3) 夸克物质的强子谱学和集体性质研究：借助于我们研制的TOF等探测器，我们测量了粲夸克产生截面，并发展了在实验上鉴别高横向动量粒子的方法，系统地测量了强子的微分截面分布函数。这些成果深化了人们对于高能核-核碰撞中粒子产生机制和喷注经过QGP淬火机制的认识。通过对奇异强子集体性质的系统研究，发现了RHIC产生的物质已经建立起了奇异夸克自由度。以我们为主的一系列实验成果多次发表在PRL，该系列研究从多方面支持RHIC上已经形成了新物质形态—QGP。

该项目所发表的20篇文章的他引1438次。相关工作在重要国际会议上报告100余次。培养出的一大批优秀的毕业生，其中三人获中科院优秀博士学位论文奖，十一人次获中科院院长奖学金，两人获中科院卢嘉锡青年人才奖、一人获中科院青年科学家奖、一人获美国物理学会G. E. Valley奖。项目负责人由于成功领导研制了本项目的大型飞行时间谱仪，并在反物质探测等做出的先驱性工作，入选美国物理学会会士（APS Fellow）。他还获得了由全球华人物理与天文学会颁发的亚洲成就奖（Robert T. Poe Prize）。

该项目获得2014年度上海市自然科学奖一等奖。

4. 客观评价

(1) 2011年《中国基础科学》第一期特稿：“2010年度中国科学十大进展简介”中“相对论重离子对撞机上发现首个反超核粒子-反超氦核”排位第二。介绍的内容如下“国际螺旋管径迹探测器(STAR)协作组为探寻宇宙起源的早期物质状态，在布鲁克海文实验室的相对论重离子对撞机(RHIC)上开展了实验研究。中国科学院上海应用物理研究所陈金辉、马余刚等与STAR协作组其他中外科学家合作，对上亿次高能金原子核碰撞的海量数据进行了分析以寻找反物质超核的证据...”

(2) 反超核的首次观测。文章发表后，在全球主要媒体迅速报道该重要结果。评价摘选如下：Nature (doi:10.1038/news.2010.108)刊发的新闻稿“Heavy antimatter created in gold collisions”提到“To find the new antihydrogen, Jinhui Chen of the Shanghai Institute of Applied Physics... developed sophisticated software that could pick out the new antinucleons”；德国亥姆霍兹国家研究中心联合会副主席、德国GSI研究所所长Stoecker教授评价说：“This experimental discovery may have

unprecedented consequence for our view of the world. Anti-hypertriton pushes open the door to new dimensions in the nuclear chart: from the normal matter to the antimatter world and to the world of anti-hyper-matter – just a few years ago this would have been viewed as impossible.”

(<http://www.bnl.gov/rhic/news2/news.asp?a=1075&t=pr>)

我们宣布找到了首个反超核后，LHC的ALICE合作组也利用他们的2.7TeV的铅+铅的数据宣布找到了反超氦的信号(arXiv:1506.08453)。我们在反超氦文章还提出了超氦核的寿命测量结果。这方面的工作推动了其他国际合作组(HypHI和ALICE)对超核寿命的进一步测量以及一批理论上的计算。

(3) 反氦4的首次观测。文章发表后，在全球主要媒体迅速报道该重要结果。评价摘选如下：美国能源部科学办公室主任William F. Brinkman说“**This discovery highlights the extraordinary capabilities of RHIC to investigate fundamental questions about the nature of matter, antimatter, and the early universe**”

(<http://www.bnl.gov/rhic/news2/news.asp?a=1259&t=pr>) 。

时任国家自然科学基金委副主任沈文庆院士评价说：在人类寻找反物质的艰辛历程中，老一辈的中国科学家在这个领域做出了许多杰出的工作。这次STAR合作组的反氦4重要发现是STAR合作组继去年发现反物质超氦核后的又一重要里程碑的突破性进展，而在这两个重要的科学发现中中国的核物理学家队伍都起到了极为关键的作用，突显了大科学基础研究的国际合作的重要性。

(http://www.lssf.cas.cn/gjhzxm/201110/t20111020_3379247.html)

我们在报道反氦4发现之后，LHC-ALICE合作组也迅速在他们的2.7TeV的铅+铅的数据中找到了几个事例(J.Phys.G,2011,38:124189)。同时也推动了对国际上反物质原子核的理论方面的计算。该工作的数据分析者薛亮是马余刚的学生，其博士论文“反物质氦4原子核的实验观测及其产生机制研究”获得中科院优秀博士论文，并得到中德基金委的全额资助受邀出席2012年德国林岛诺贝尔奖大会。

(4) 关于STAR-TOF项目：TOF项目启动后，RICE大学报道：“U.S., China Cooperate on High-Energy Physics Experiment” “Without our Chinese partners, this new system wouldn't have been feasible. Their detectors are superior in quality to any of the prototypes we created, and their support and enthusiasm for the project are unparalleled.” said lab director Billy Bonner, a co-principal investigator on the new DOE grant. (<http://www.bnl.gov/rhic/news2/news.asp?a=477&t=pr>)

TOF研制完成后，美方BNL副所长、物理部主任和STAR发言人联名给基金委、中科院、科技部、STAR中方组负责人等相关领导发来的祝贺信。摘取部分内容：... This constitutes a scientific legacy that will impact nuclear science in China and in

theworld for decades...The close cooperation between US and Chinese scientists that wasrequired for this success now serves as a model for future joint U.S.-China scientificventures...The STAR construction effort in China has been a completescientific and technical success at every level, and the Chinese TOF team is to behighly congratulated.

(5) 反超氦核的数据分析主要由本项目完成人陈金辉执行，他获得了2012年度的美国物理学会**George E. Valley Jr.奖**。此项奖励是35岁以下为物理学做出重要贡献的青年学者。他的颁奖词"In recognition of his discovery of the first antimatter hypernucleus and his seminal contributions to the study of partonic matter using ϕ mesons produced in relativistic nuclear collisions."

(6) 本项目负责人马余刚由于成功领导了**STAR-TOF**项目，并在随后的反物质原子核的探测等开展的先驱性工作，入选2015年度美国物理学会会士(**APS Fellow**)。迄今，从大陆当选的**APS Fellow**仅三十余人。**APS Fellow**的颁奖词(citation)是“**For a leadership role in the construction of the MRPC Time-of-Flight detector for STAR collaboration, the subsequent discoveries of anti-helium 4 and anti-hypertriton at RHIC, and significant contributions to studies of nuclear liquid-gas phase transition in intermediate energy heavy-ion collisions.**”

(<http://www.aps.org/units/dnp/fellowship/index.cfm>);同年，全球华人物理与天文学会授予马余刚2015年度**亚洲成就奖** (<http://ocpaweb.org/home/2015-achievement-in-asia-award/>)。该奖在全球华人物理与天文界有重要影响。1993年以来至今，共授予亚洲成就奖29位。其中，从大陆获得亚洲成就奖的仅16人，包括欧阳钟灿、朱清时、侯建国、杨学明、王恩哥、张杰、高鸿钧等获此荣誉。

(7) 本项目在前期获得了2014年度**上海市自然科学一等奖**，题目“相对论重离子碰撞中的反物质探测和夸克物质的强子谱学与集体性质研究”(20142010-1-D01)，完成人：马余刚，陈宏芳，程建平，陈金辉，刘峰。

(8)我们在反超氦、反氦4探测的基础上，进一步开展了反物质物理的后续研究。2015年完成了反质子-反质子作用的首次测量，论文发表在**Nature** 527,345 (2015)上，项目负责人与他的研究生又一次起到了主导的作用。
(<http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2015/11/331093.shtml?id=331093>)
(http://www.xinhuatone.com/detail.jsp?con_id=682078&class_id=53)

5. 代表性论文专著目录

编号: 2015695b 附件二

20 篇重要论文 (1—8 篇为代表性论文) 引用、收录情况统计:

序号	论文专著 名称/刊名 /作者	影响因子	年卷页码 (xx 年 xx 卷 xx 页)	SCI 他引次数	他引总 次数
1	Observation of the antimatter helium-4 nucleus/ NATURE/The STAR Collaboration	38.6	2011年473卷 7347期353- 356 页	35	35
2	Observation of an antimatter hypernucleus/ SCIENCE/The STAR Collaboration	31.03	2010年328卷 5974 期 58- 62 页	67	67
3	Identified baryon and meson distributions at large transverse momenta from Au plus Au collisions at root(S)(NN)=200 GeV/ PHYSICAL REVIEW LETTERS/The STAR Collaboration	7.94	2006年97卷 15期	120	120
4	Pion, kaon, proton and anti-proton transverse momentum distributions from p+p and d+Au collisions at root(NN)=200GeV/ PHYSICS LETTERS B/The STAR Collaboration	3.96	2005年616卷 1-2 期 8-16 页	72	72
5	Open charm yields in d+Au collisions at root s(NN)=200 GeV/ PHYSICAL REVIEW LETTERS/The STAR Collaboration	7.94	2005年94卷6 期	152	152
6	Identified particle distributions in pp and Au+Au collisions at root s(NN)=200GeV/ PHYSICAL REVIEW LETTERS/The STAR Collaboration	7.94	2004年92卷 11 期	237	237
7	Centrality dependence of charged hadron and strange hadron elliptic flow from root s(NN)=200 GeVAu+Au collisions/ PHYSICAL REVIEW C/The STAR Collaboration	3.69	2008年77卷5 期	122	122
8	Partonic flow and phi-meson production in Au+Au collisions at root s(NN)=200GeV/ PHYSICAL REVIEW LETTERS/The STAR Collaboration	7.94	2007年99卷 11期	92	92
8篇代表性论文专著引用情况合计				897	897

编号: 2015695b 附件二

9	Higher Moments of Net Proton Multiplicity Distributions at RHIC/ PHYSICAL REVIEW LETTERS/The STAR Collaboration	7.94	2010 年 105 卷 2 期	104	104
10	Identified particle production, azimuthal anisotropy, and interferometry measurements in Au plus Au collisions at $\sqrt{s(NN)}=9.2$ GeV/ PHYSICAL REVIEW C/The STAR Collaboration	3.69	2010 年 81 卷 2 期	58	58
11	J/psi production at high transverse momenta in p plus p and Cu plus Cu collisions at $\sqrt{s(NN)}=200$ GeV/ PHYSICAL REVIEW C/The STAR Collaboration	3.69	2009 年 80 卷 4 期	49	49
12	Measurements of phi meson production in relativistic heavy-ion collisions at the BNL Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) /PHYSICAL REVIEW C/The STAR Collaboration	3.69	2009 年 79 卷 6 期	43	43
13	System-Size Independence of Directed Flow Measured at the BNL Relativistic Heavy-Ion Collider/ PHYSICAL REVIEW LETTERS/The STAR Collaboration	7.94	2008年101卷 25期	40	40
14	Mass, quark-number, and $\sqrt{s(NN)}$ dependence of the second and fourth flow harmonics in ultrarelativistic nucleus-nucleus collisions/ PHYSICAL REVIEW C/The STAR Collaboration	3.69	2007 年 75 卷 5 期	59	59
15	Beam test results of two kinds of multi-gap resistive plate chambers/ Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A/M. Shao, H.Chen et al.,		2002年492卷 3期344-350页	35	35
16	一种新型时间测量探测器—多气隙电阻板室/高能物理与核物理/ 陈宏芳等		2002 年 26 卷 3 期	19	19
17	Searching for onset of deconfinement via hypernuclei and baryonstrangeness correlations/ PHYSICS LETTERS B/ S. Zhang et al.		2010年684卷 224-227	19	19
18	Parton distributions at hadronization from bulk dense matter produced in Au+Au collisions at $\sqrt{sNN} = 200$ GeV/ PHYSICAL REVIEW C/ J. H. Chen et al.	3.69	2008 年 78 卷 3 期	14	14
19	Elliptic flow of phi mesons and strange quark collectivity/ PHYSICAL REVIEW C/ Chen, J. H. et al.,	3.69	2006 年 74 卷 6 期	56	56

编号: 2015695b 附件二

20	Di-hadron azimuthal correlation and Mach-like cone structure in a parton/hadron transport model/ PHYSICS LETTERS B/ Ma, G. L. et al.,		2006年641卷 5期 36	45	45
合计				1438	1438

6. 主要完成人情况

姓名：马余刚

排名：第一

行政职务：研究所副所长

技术职称：研究员

工作单位：中国科学院上海应用物理研究所

完成单位：中国科学院上海应用物理研究所

本项目科学与技术创造性贡献：作为 RHIC-STAR 合作的中方负责人，并协调主持由基金委、科技部、中科院联合资助的“STAR 相对论核-核碰撞物理研究和飞行时间探测器的研制”，并成功地组织实施。作为物理课题组负责人，指导学生发现了反超氘核、反氦 4，文章分别发表在 SCIENCE 和 NATURE 上。对主要科学发现点 1, 2, 3, 4.3, 4.4, 5.1 的发现作出了创造性贡献。是除了第 15, 16 篇外的其他所有重要论文的主要作者。

姓名：陈宏芳

排名：第二

行政职务：无

技术职称：教授

工作单位：中国科学技术大学

完成单位：中国科学技术大学

对本项目科学与技术创造性贡献：作为 RHIC-STAR 合作组的资深专家，共同主持“STAR 相对论核-核碰撞物理研究和飞行时间探测器的研制”，并成功地组织实施。作为课题组负责人，高效地完成了飞行时间探测器模块的性能检测和质量控制等，同时，带领课题组学生和年轻职工开展 STAR 实验数据的分析，对主要科学发现点 1, 2, 3, 4.1, 4.2 的发现作出了创造性贡献。是本项目 1-16 篇重要论文的主要作者。

姓名：程建平

排名：第三

行政职务：常务副校长

技术职称：教授

工作单位：清华大学

完成单位：清华大学

对本项目科学与技术创造性贡献：作为 RHIC-STAR 合作的中方共同负责人，组织实施“STAR 相对论核-核碰撞物理研究和飞行时间探测器的研制”。共同承担 RHIC-STAR 探测器的大型飞行时间探测器升级，高质量地完成了 MRPC 模块的大

批量制作、严格的质量控制与规模化研制达到国际先进水平。研制成功的大型飞行时间探测器成功安装在 RHIC-STAR 大型探测器上，这是国际上首次在重离子对撞机实验的运行成功的基于 MRPC 技术的飞行时间谱仪。对主要科学发现点 1, 2, 3 的发现作出了创造性贡献。是 1-14 篇重要论文的主要作者。

姓名：陈金辉

排名：第四

行政职务：无

技术职称：研究员

工作单位：中国科学院上海应用物理研究所

完成单位：中国科学院上海应用物理研究所

对本项目科学与技术创造性贡献：承担数据分析，发现了反超氦核。作为主要作者，参与发现反氦 4。发展了通过多奇异性强子 ϕ 和 Ω 的横动量分布提取了强子化时刻的奇异夸克的横向动量分布的新方法。提出了奇异性布居因子作为探索 QGP 相变的新探针。承担数据分析，测量了 RHIC 能区下 ϕ 介子的椭圆流和核修正因子等，发现在 RHIC 能区下产生的热密物质已达到了部分子层次集体性。对主要科学发现点 2, 3, 4.3, 4.4, 5.1 的发现作出了创造性贡献。是除了第 15, 16 篇外的其他所有重要论文的主要作者。

姓名：刘峰

排名：第五

行政职务：教育部重点实验室副主任

技术职称：教授

工作单位：华中师范大学

完成单位：华中师范大学

对本项目科学与技术创造性贡献：首次利用“李-杨零点”方法得到了 K_0, Λ 的椭圆流与横动量的关系。提出了在较中心碰撞中椭圆流较强，热化有可能在中心碰撞中已经达到的观点。首次发现 STAR 实验中直接流的系统尺寸不相关性。参与完成反超氦核、反氦 4 的实验观测等。对主要科学发现点 2, 3, 5.2, 5.3 的发现作出了创造性贡献。是本项目 1-14 篇重要论文的主要作者。

7. 完成人合作关系说明

本项目通过广泛的国内外合作，实验和理论研究紧密配合开展工作。项目负责人马余刚研究员是“RHIC-STAR 合作组中国组”召集人，统筹规划 STAR 中国组的发展与合作，是“STAR 相对论核-核碰撞物理研究与飞行时间探测器研制”国

际重大合作项目（基金委、科技部、中科院联合资助）的总协调人和物理课题负责人；项目主要完成人陈宏芳教授具体负责指导“STAR相对论核-核碰撞物理研究与飞行时间探测器研制”课题二“MRPC物理性能检测质量控制与STAR-TOF刻度”，负责TOF探测器研制、刻度和相应的物理研究工作；项目主要完成人程建平教授负责指导“STAR相对论核核碰撞物理研究与飞行时间探测器研制”课题三“STAR-TOF单元MRPC模块室的设计、制作”，负责TOF探测器的模块设计、批量生产以及部分物理研究；陈金辉研究员和刘峰教授是“STAR相对论核-核碰撞物理研究与飞行时间探测器研制”项目的主要骨干，在项目的执行期间对相关物理研究做出突出贡献。项目组成员在马余刚研究员的组织领导下，精诚合作，在探测器的研制及其相关物理研究上取得了成功。