

2016 年度国家科技奖励公示材料-国家自然科学奖

一、 项目名称：重夸克偶素与夸克物质的理论研究

二、 推荐单位意见：

夸克物质是最深层次的强相互作用物质状态，相对论重离子碰撞是在实验室实现这一新物质形态的唯一可能手段。庄鹏飞课题组的项目《重夸克偶素与夸克物质的理论研究》在以下三个方面做出了关键的学术贡献。

1) 用重夸克偶素的横动量分布探测夸克物质的理论预言被多个实验组验证并宣布。预言的集体流和平均横动量被美国 RHIC/STAR 和欧洲 LHC/ALICE 国际合作实验组验证，对于确定夸克物质的形成和性质起到了关键的作用。庄鹏飞研究组已经成为该领域国际领先的研究组之一。

2) 提出了超出平均场研究强相互作用相变的理论方法。通过夸克圈求和，首次计算了量子涨落的热力学贡献。国际同行认为，是庄鹏飞等人首先超出平均场计算了夸克-介子系统的热力学。

3) 提出了无能隙色超导态。发现色超导态中激发的准粒子能量可以为零，提出了无能隙色超导态和高密度夸克物质中色磁不稳定的特征。项目组于 2003 年开启了这一新的研究方向，并推广到其它相对论费米气体。

8 篇代表性论文被 SCI 他引 522 次，20 篇核心论文被 SCI 他引 964 次。项目组以庄鹏飞为学术带头人，其他 3 位主要完成人黄梅、朱相雷、何联毅是庄鹏飞当时的博士研究生。庄鹏飞 1999 年获国家杰出青年基金，黄梅 2008 年获科学院百人计划资助，朱相雷 2009 年获全国百篇优秀博士论文，何联毅 2016 年获青年千人计划资助。

鉴于该项目的学术成就和国际影响，中国物理学会郑重推荐该项目申报国家自然科学二等奖。

三、 项目简介：

夸克物质是最深层次的强相互作用物质状态，相对论重离子碰撞是在实验室实现这一新物质形态的唯一可能手段。项目组预言了在重离子碰撞中探测夸克物质的敏感信号，提出了研究强耦合夸克物质相结构的有效方法，发现了一个新的高密度夸克物质相。具体科学发现点在以下三个方面：

1) 用重夸克偶素的横动量分布探测夸克物质的理论预言被多个实验组验证并宣布。长期以来，重离子碰撞中是否产生了夸克物质缺少敏感的探针。课题组用输运方程组描述重夸克偶素在夸克物质中的非平衡运动，用相对论流体力学方程描述夸克物质的时空演化，预言的重夸克偶素椭圆流和平均横动量核修正因子被大型国际合作实验组 RHIC/STAR 和 LHC/ALICE 验证和宣布。理论结果被几

乎所有相关实验组引用近 100 次。实验组在发表新的实验数据之前往往征求庄鹏飞课题组的理论预言。

2) 发展了超出平均场研究强相互作用相变的理论方法。由于强相互作用的非微扰困难,一般考虑相变采取平均场近似,忽略量子涨落的贡献。课题组在有限温度密度对夸克圈进行求和,在夸克模型中构造了介子,保证了 Goldstone 定理。发现手征恢复相由夸克自由度决定,而手征破缺相由涨落产生的介子控制。国际同行指出“这方面的大部分工作是在经典(平均场)框架内,但庄等人给出了超出平均场计算手征热力学的方法”,“是庄等人首先在夸克模型中发展了超出平均场计算热力学势的方法”。

3) 提出了无能隙色超导态。高密度夸克物质处于各种超导超流态。项目组发现色超导态中激发的准粒子能量可以为零,由此提出了无能隙色超导态,指出了高密度夸克物质中色磁不稳定的特征。在项目组这一新的突破以后,无能隙色超导态迅速成为强相互作用相变研究的一个热点,并被推广到其它相对论费米气体。最近发表在 *Rev. Mod. Phys.* 的综述文章有 17 处正面引用项目组的工作。

项目组的 8 篇代表性论文被 SCI 他引 522 次,20 篇核心论文被 SCI 他引 964 次。根据核物理与粒子物理权威网站美国 INSPIRE 的统计,上述他引次数分别为 734 和 1353。项目组 3 次受邀请单独为国际期刊撰写夸克物质和重夸克偶素的综述文章,3 次在大型国际会议做大会邀请报告。项目组以庄鹏飞为学术带头人,其他 3 位主要完成人黄梅、朱相雷、何联毅是庄鹏飞当时的博士研究生。庄鹏飞 1999 年获国家杰出青年基金,黄梅 2008 年获科学院百人计划资助,朱相雷 2009 年获全国百篇优秀博士论文,何联毅 2015 年获国际量子多体物理界 Kümmel 奖、并于 2016 年获青年千人计划资助。

四、 客观评价

一、科学发现点 1 (用重夸克偶素的横动量分布探测夸克物质的理论预言被多个实验组验证并宣布) 的客观评价

1) 理论预言被大型国际合作实验组正面引用 98 次,实验组包括: PHENEX Collaboration、STAR Collaboration、ALICE Collaboration、CMS Collaboration、NA50/NA60 Collaboration 等,几乎涵盖所有进行高能重离子碰撞的国际合作实验组。这些引用将项目组代表性论文 1、2、3 中的理论预言和实验组数据进行比较,说明理论预言的正确性。具体引用清单见附件 7: 其他证明。

2) 在综述文章 Heavy flavor in heavy-ion collisions at RHIC and RHIC II, A.Frawley, T.Ullrich, R.Vogt, *Phys. Rep.*, 462, 125(2008), 项目组代表性论文 1 被正面引用 12 处。特别是在第 164 页的图 41 和图 42 引用项目组关于 J/psi 核修正因子的理论计算曲线,与实验结果比较;在第 166 页的图 44 “显示了严、

庄、许的计算对 J/ψ 平均横动量的中心度依赖性的影响”；在第 169 页的图 48 引用项目组预言的 J/ψ 椭圆流并与实验结果比较。所有这些引用和比较都表明项目组的理论计算成功预言了重离子碰撞中的 J/ψ 产生。具体引用见代表性引文 1。

3) 在大型国际合作实验组 STAR 的论文 *Measurement of J/ψ Azimuthal Anisotropy in Au+Au Collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV*, *Phys. Rev. Lett.* 111, 052301 (2013), 项目组代表性论文 1 和后续论文被引用 7 处。特别是在表 2 和图 3 中引用项目组关于 J/ψ 椭圆流的预言, 包括计算数据和理论曲线。指出“由初始微扰 QCD 产生的 J/ψ 椭圆流 V_2 被预言近似为零”, “包含 J/ψ 初始产生和合成的输运模型预言很小的 V_2 , 与我们的测量结果相符”。具体引用见代表性引文 2。

4) 在大型国际合作实验组 ALICE 的论文 *J/ψ Suppression at Forward Rapidity in Pb-Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV*, *Phys. Rev. Lett.* 109, 072301 (2012) 的图 4 中, 项目组代表性论文 3 关于 J/ψ 核修正因子的中心度依赖性的理论预言与实验数据进行了比较, 表明理论预言与实验结果相符。实验组还指出, 项目组输运模型与其它模型的差别是“由于控制 J/ψ 离解和合成的方程不同”。具体引用见代表性引文 3。

5) 在大型国际合作实验组 ALICE 的论文 *J/ψ Elliptic Flow in Pb-Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV*, *Phys. Rev. Lett.* 111, 162301 (2013), 项目组代表性论文 3 和后续论文被引用 3 处。这是 ALICE 第一次观测到 J/ψ 椭圆流, 证实了项目组的理论预言。理论预言与实验结果的比较见图 4。实验组还沿用项目组论文的思想解释了为什么 J/ψ 椭圆流在 LHC 不等于零的物理原因。具体引用见代表性引文 4。

二、科学发现点 2 (发展了超出平均场研究强相互作用相变的理论方法) 的客观评价

1) 在《QCD 手册卷 3: 粒子物理前沿》中的综述文章 *2-D model field theories at finite temperature and density*, Verena Schon, *At the frontier of particle physics, Handbook of QCD, vol. 3, p1945 (edited by M. Shifman), World Scientific*, 对项目组代表性论文 4 中超出平均场的理论计算评价: “庄、Klevansky 和 Huefner 等人已经发展了在 $1/N$ 展开中到次领头阶计算热力学势的方法。他们考虑了平均场的涨落, 图形上对应圈图求和, 物理上对应介子的贡献。 $q\bar{q}$ 的束缚态和相移都考虑了。因为 NJL 模型中的介子可以衰变为夸克, 在中间温度会出现混合相, 在那里夸克和介子都有贡献”。“有必要在有效场论中考虑 $1/N$ 修正 (介子修正), 在领头阶近似中必须计算 RPA 真空, 这显然对应庄等人的圈图求和”。具体引用见代表性引文 5。

2) 在论文 *Phase transition and thermodynamics of a hot and dense system in a*

scaled NJL model, J. Cugnon, M. Jaminon, B. Van den Bossche, Nucl.Phys. A598, 515(1996), 对项目组代表性论文 4 中计算量子涨落的方法评价：“大部分这方面的工作被局限在经典（平均场）计算。但我们注意到庄等人 and Blascke 等人的工作，他们计算热力学到 $1/N_c$ 阶，这里 N_c 是色的数目，这相当于近似地包含了介子自由度。后者在低温时起重要作用，但并不严重地影响相变的位置和性质（级次、不连续性等）”。具体引用见代表性引文 6。

三、科学发现点 3（提出了无能隙色超导态）的客观评价

1) 论文 Meissner masses in the gCFL phase of QCD, R.Casalbuoni, R.Gatto, M.Mannarelli, G.Nardulli, M.Ruggieri, Phys.Lett. B605, 362(2005), 推广了项目组代表性论文 7 的工作。作者指出“本文的目的是在 gCFL 相中研究迈斯纳质量对奇异夸克质量的依赖性。在两味情形, 类似的分析最近由黄和 Shovkovy 发现”, “我们发现 gCFL 相中的不稳定性, 类似于黄和 Shovkovy 对于 g2SC 相中的发现”。具体引用见代表性引文 7。

2) 在综述文章 Crystalline color superconductors, Roberto Anglani, Roberto Casalbuoni, Marco Ciminale, Nicola Ippolito, Raoul Gatto, Massimo Mannarelli, Marco Ruggieri, Rev. Mod. Phys. 86, 509(2014)中, 项目组代表性论文 7 和后续论文被大幅度正面引用和评价 17 处。如“当 $\Delta_{2sc}/\sqrt{2} < \delta\mu < \Delta_{2sc}$ 时, 2SC 相中的 4 个质量为虚数, 表明色磁不稳定性(黄和 Shovkovy)。因为在 2SC 到 g2SC 的相变点所有 5 个胶子质量全为虚数, 增加化学势差时不稳定性会变得更差”。

“有限温度的情形已经由 Kiriyama (2006) 和何、金、庄 (2007) 讨论, 发现在弱和中等温度区间, 几十 MeV 的温度使得 2SC 和 g2SC 相变得稳定”。具体引用见代表性引文 8。

五、 主要完成人情况表

第一完成人				
姓名	技术职称	工作单位	完成单位	获国家科技奖励情况
庄鹏飞	教授	清华大学	清华大学	无
对本项目科学创造性贡献				

项目负责人，总体设计者。提出学术思想，指导和设计理论研究框架，主持分析和总结研究结果。对科学发现点 1-2 做出了创造性贡献，对科学发现点 3 做出了重要贡献，是第 1-6 篇代表性论文的通讯作者或第一作者。主要学术贡献有：1) 提出用重夸克偶素的横动量分布探测夸克物质的学术思想，并进行了主要的理论计算，建立了细致输运模型；2) 提出在热密夸克物质中用平均场处理夸克和用圈图求和处理介子的思想方法，在夸克模型中超出平均场研究手征热力学，并推广了 Beth-Uhlenbek 相移方法，完成了大部分理论计算和数值计算；3) 指导中性色超导态和 Pion 超流态的理论计算，这一计算导致了无能隙色超导态的发现。

第二完成人

姓名	技术职称	工作单位	完成单位	获国家科技奖励情况
黄梅	研究员	中科院高能物理所	清华大学	无

对本项目科学创造性贡献

项目执行人。是科学发现点 3 的主要研究者，是第 6、7、8 篇代表性论文的第一作者。主要学术贡献有：对提出无能隙色超导态的物理思想、理论分析和数值计算都做出了关键贡献。具体为：1) 首次肯定了两味色超导态的存在，提出了新的色超导态—无能隙色超导态和色磁不稳定性；2) 发展了形式简洁使用广泛的传播子投影算子方法，已成为研究高温高密 QCD 相变的一个常用手段。

第三完成人

姓名	技术职称	工作单位	完成单位	获国家科技奖励情况
朱相雷	副教授	清华大学	清华大学	无

对本项目科学创造性贡献

项目执行人。对科学发现点 1 做出了直接贡献，是第 2 篇代表性论文的第一作者。主要学术贡献有：把胶子离解重夸克偶素的微分截面具体地体现在输运方程中，首次将输运方程与流体力学方程联立求解，并给出了计算末态分布的方法；数值计算了横动量分布，发现椭圆流可以区分高能核碰撞中重夸克偶素粒子的产生机制。

第四完成人

姓名	技术职称	工作单位	完成单位	获国家科技奖励情况
何联毅	助理教授	清华大学	清华大学	无

对本项目科学创造性贡献

项目执行人。对科学发现点 2 做出了直接贡献，是第 5 篇代表性论文的第一作者。主要学术贡献有：1) 将超出平均场研究夸克物质的方法非平庸地推广到 Pion 超流的研究，保证了 Goldstone 模式的存在；2) 首次在夸克模型中用 BCS-BEC 过渡来刻画高密度夸克物质的强耦合特征，并推广到其它相对论费米气体。

六、 代表性论文专著目录

序号	论文专著名称 /刊名/作者	影响因子	年卷 页码	发表 时间	通讯作者	第一作 者	国内作 者	SCI 他 引 次 数	他 引 总 次 数	知 识 产 权 是 否 归 国 内 所 有
1	J/psi production in quark gluon plasma/Phys. Rev. Lett./Li Yan, Pengfei Zhuang, Nu Xu	7.512	2006 年 97 卷 232301 页	2006 年 11 月	Pengfei Zhuang	Li Yan	严力, 庄鹏飞	51	91	是
2	J/psi transport in QGP and pt distribution at SPS and RHIC/Phys. Lett. B/ Xianglei Zhu, Pengfei Zhuang, Nu Xu	6.131	2005 年 607 卷 107 页	2005 年 2 月	Pengfei Zhuang	Xianglei Zhu	朱相雷, 庄鹏飞	22	34	是
3	J/psi Transverse Momentum Distribution in High Energy Nuclear Collisions at RHIC/Phys. Lett. B/Yunpeng Liu, Zhen Qu, Nu Xu, Pengfei Zhuang	6.131	2009 年 678 卷 72 页	2009 年 06 月	Pengfei Zhuang	Yunpeng Liu	刘云朋, 屈真, 庄鹏飞	31	103	是
4	Thermodynamics of a quark - meson plasma in the Nambu-Jona-Lasinio model/Nucl. Phys. A/Pengfei Zhuang, Joerg Hufner, Sandi Klevansky	2.202	1994 年 576 卷 525 页	1994 年 11 月	Joerg Huefner	Pengfei Zhuang	庄鹏飞	100	86	是

5	Pion superfluidity and meson properties at finite isospin density/Phys. Rev. D/Lianyi He, Meng Jin, Pengfei Zhuang	4.643	2005 年 71 卷 116001 页	2005 年 06 月	Pengfei Zhuang	Lianyi He	何联毅, 金猛, 庄鹏飞	78	100	是
6	Charge neutrality effects on 2 flavor color superconductivity/Phys. Rev. D/Mei Huang, Pengfei Zhuang, Weiqin Chao	4.643	2003 年 67 卷 065015 页	2003 年 03 月	Pengfei Zhuang	Mei Huang	黄梅, 庄鹏飞, 赵维勤	58	66	是
7	Chromomagnetic instability in dense quark matter/Phys. Rev. D/Mei Huang, Igor Shovkovy	4.643	2004 年 70 卷 051501 页	2004 年 08 月	Igor Shovkovy	Mei Huang	黄梅	111	151	是
8	Color superconductivity at moderate baryon density/Int.J.Mod.Phys. E/Mei Huang.	1.343	2005 年 14 卷 675 页	2005 年 07 月	Mei Huang	Mei Huang	黄梅	71	103	是
合 计								522	734	

*他引总次数是根据核物理与粒子物理权威网站美国 INSPIRE 的统计数据。

七、 完成人合作关系说明

本项目有 4 个主要完成人庄鹏飞, 黄梅, 朱相雷, 何联毅。其中, 黄梅, 朱相雷, 何联毅是庄鹏飞的博士研究生, 是师生关系。在项目完成过程中的具体合作如下:

- 1) 黄梅, 1994-1997 年是庄鹏飞的硕士研究生; 1997-2000 年攻读博士学位期间, 赵维勤是博士导师, 庄鹏飞是副导师; 2001-2002 年在清华大学做博士后期间, 庄鹏飞是合作导师, 在此期间共同完成代表性论文 6; 2003-2004 年在德国做洪堡学者期间, 与合作者完成代表性论文 7, 单独完成代表性论文 8, 都注明了项目基金 10135030 (庄鹏飞是该项目负责人), 而且在代表性论文 8 中清华大学是工作单位之一。
- 2) 朱相雷, 1997-2003 年为清华大学物理系博士研究生, 庄鹏飞是导师, 在此期间共同完成代表性论文 2。

3) 何联毅，2004-2009 年为清华大学物理系博士研究生，庄鹏飞是导师，在此期间共同完成代表性论文 5。

合作方式为论文合著。

在此项目中，庄鹏飞，黄梅，朱相雷，何联毅依次为第一，第二，第三，第四完成人。

合作成果为相应代表性论文。

第一完成人庄鹏飞对上述内容的真实性负责。