

· 成果简介 ·

# 数理科学部 2006—2008 年度结题的国家杰出青年科学基金资助项目成果简介

国家自然科学基金委员会数理科学部

(国家自然科学基金委员会数理科学部, 北京 100085)

[关键词] 数理科学部, 国家杰出青年科学基金, 成果简介

2008年11月数理科学部召开了数理科学部国家杰出青年科学基金学术交流会, 会议组织了2002—2006年国家杰出青年科学基金获得者到会报告工作, 对已结题的50位国家杰出青年科学基金获得者的工作进行交流、评估; 对在研的80位国家杰出青年科学基金获得者工作进行中期检查。经专家组讨论给出了等级投票, 专家们对杰出青年的工作情况表示满意, 认为国家杰出青年科学基金获得者在各领域已经成为学术骨干、学术带头人和学术领导人。数理科学部选择已结题的部分完成比较突出的研究成果做一简要介绍, 希望以此促进学术交流。

## 1 复流形上典则度量及其相关的几何分析问题

该项目由北京大学朱小华教授完成, 取得的突出进展和重要成果如下:

### 1.1 彻底解决了环(toric)流形上 Kähler-Einstein 度量的存在性问题

在研究环(toric)流形上 Kähler-Einstein 度量的存在性问题是朱小华教授课题组发现了一种新的, 与过去截然不同的有关对应的解(欧氏空间全空间中一类凸函数)的先验估计。它完全依赖于一种平衡条件, 而其又完全取决于朱小华教授和田刚教授先前研究和定义的一类新的几何不变量的消灭。据此, 证明了在环流形上通过适当的全纯向量场的选取这种新的几何不变量总是可以消灭, 从而通过解微分方程方法构造出 Ricci 孤立子。进一步证明了 Ricci 孤立子是 Einstein 的充要条件是 Futaki 不变量的消灭, 从而彻底解决了环流形上 Kähler-Einstein 度量的存在性问题。该成果发表在国际一

类数学杂志 *Advances in Mathematics* (2004年)上, 至今已被 SCI 论文引用 12 次。

### 1.2 解决了有关 Kähler-Ricci 流收敛性的 Hamilton-田刚猜测

在 2007 年, 朱小华教授与田刚教授合作解决了一个有关 Kähler-Ricci 流收敛性的 Hamilton-田刚猜测, 并且证明了猜测在具有 Kähler-Ricci 孤立子的流形情形下也是正确的。特别是, 他们的结果推广了田刚和陈秀雄先前的两个工作(见 *Invent. Math.*, 2004 年和 *Duke Math. J.*, 2006 年)。他们在证明中应用了 Perelman(Poincaré 猜测解决者)有关 Kähler-Ricci 流的一个深刻结果。该研究成果发表在 *Journal of American Mathematical Society* (2007 年)上。

### 1.3 系统地研究了环(toric)流形上的 Calabi 极值度量

在 2006—2007 年期间, 朱小华教授与学生周宾合作, 系统地研究了环(toric)流形上的 Calabi 极值度量, 回答了著名的丘成桐-田刚-Donaldson 猜测的一个方面, 即存在极值度量的必要条件是 K-稳定。他们的结果改进了 Donaldson (Fields 奖获得者)先前的有关 K-半稳定的工作, 并发现了用环流形相对应的多面体的信息来判别环流形的几何稳定性。

### 1.4 发表论文与人才培养情况

在基金资助期间, 发表 SCI 论文 7 篇。还获得意大利 2005 年 ICTP 青年科学奖; 获 2008 年度高等学校科学研究优秀成果一等奖(单独)。

## 2 非线性波动方程

该项目由复旦大学周忆教授负责, 取得的突出

本文于 2009 年 5 月 15 日收到。

进展和重要成果如下:

### 2.1 研究了非线性 Schrodinger 方程在 Sobolev 空间 $W^{s,p}$ ( $p < 2$ ) 中的可解性

审稿人认为该工作对非线性 Schrodinger 方程低正则性解理论做出了原创性的、有趣的贡献。

### 2.2 研究了 3 维空间中拟线性波动方程柯西问题的低正则性解

在径向对称的假设下,当初始值属于索伯列夫空间  $H^2$  且其  $H^2$  模充分小时,周教授等证明了 3 维空间中拟线性波动方程柯西问题存在唯一的整体  $H^2$  解,是首次研究了拟线性波动方程的低正则性解的整体存在唯一性。

### 2.3 研究了 Minkowski 时空中两维时向极值曲面方程

发现了方程的许多重要性质,并得到一般初值的柯西问题存在整体经典解的充要条件。

### 2.4 研究了可对角化拟线性双曲型方程组的柯西问题

在方程具有常重特征且线性退化、在对初值的合理假设下,得到了解当时间趋于无穷大时的渐近行为。该结果应用到 Minkowski 时空中两维时向极值曲面方程的柯西问题,证明了当时间趋于无穷大时解趋于一个右传播波解和一个左传播波解的线性叠加。

### 2.5 研究了 Minkowski 时空中两维时向极值曲面方程的初边值问题

首先考虑了第一象限里的第一类和第二类初边值问题。在对初值和边值的合理假设下,证明了解的整体存在性并证明了当时间趋于无穷大时解趋于一个右传播波解。此外,还考虑了有界区间上的初边值问题,在边值小而衰减的假设下,得到了解的整体存在性。

### 2.6 发表论文与人才培养情况

共发表 SCI 论文 28 篇。出站博士后 1 名,已毕业博士 2 名,在读博士 6 名。其中雷震博士获 2008 年全国百篇优秀博士学位论文奖。

## 3 计算科学研究与群有关的一些组合数论问题及其进展

该项目由北京大学张平文教授负责,取得的突出进展和重要成果如下:

### 3.1 复杂流体的多尺度建模、分析与计算

在上世纪 50 年代高分子学家就认为 Doi-Onsager 方程所有解都具有轴对称性,但一直没有从数学上得到严格证明。该项目不仅严格证明了 Doi-

Onsager 方程解的轴对称性,而且找到了所有解的表达式和稳定区域,以及相变的关键点。

最基本的粘弹性数学模型是哑铃和棒状模型,这些模型可以用确定型偏微分方程描述,也可以用随机微分方程描述,不同的描述方法在数学理论上可能是等价的,但计算方法和效果区别很大。该项目证明了高维经典 FENE 模型的局部存在唯一性。

自洽平均场理论是研究嵌段共聚物的基本方法,该项目利用 String 方法研究嵌段共聚物的自洽平均场成核问题,得到了嵌段共聚物相变成核的势垒高度,核的大小和各向异性几何形状。

### 3.2 基于调和映射的移动网格方法及其应用

利用调和映射构造逻辑区域和物理区域之间的坐标变换并采用一个迭代的过程来实现网格的移动,彻底解决了已有的高维移动网格方法中网格可能发生缠绕或折叠问题;也考虑了调和映射的推广和改进使其自然地完成区域边界上和内部的网格相互耦合的移动方式,根本地避免了过去的移动网格方法中边界和内部网格必须分开处理的问题,使得产生的网格的质量更高,有效地提高计算的精度。基于移动网格逼近空间(在时间方向)连续变化的特殊特点,设计了满足控制方程和解所具有的性质(如守恒,无散度等)的新网格和旧网格之间的解重映算法。结果表明这样的重映算法比传统的多项式插值具有更好的性质,它可以自然地保持所求的解的一些固有物理性质。发展了在一般网格上的偏微分方程的一些保持物理性质的计算方法;将其与网格迭代重分布和解重映结合,发展了求解微分方程的一类基于调和映射的分裂型移动网格方法。网格的重分布和偏微分方程的求解相对独立,极大地提高了程序编制的效率,有利于算法的应用。

### 3.3 发表论文与人才培养情况

该项目执行以来发表了 SCI 论文 42 篇,其中一篇发表在数学学科公认最好的 4 个杂志之一 JAMS 上。培养了 16 名博士,其中 1 人获得全国优秀博士学位论文奖,还有 1 人获得钟家庆数学奖。

## 4 多孔多相材料的非线性与失效分析

该项目由大连理工大学张洪武教授负责,取得的突出进展和重要成果如下:

### 4.1 含液多孔材料的应变局部化塑性分叉与解的不惟一性分析的基本理论

完善了前期工作中所建立的含液多孔材料应变局部化塑性分叉与解的不惟一性分析基本理论框

架。采用各向异性材料本构模型,对轴对称压缩试验中的含液多孔材料骨架的各向异性力学行为进行分析,基于不连续分叉理论推导出了静态非渗流条件下处于轴对称应力状态的含液多孔材料应变局部化发生时的临界模量、剪切带方向以及不连续速度矢量的显式表达式,以此为基础研究并给出了材料参数变化和孔隙液体存在对各向异性多孔材料应变局部化特征的影响。

#### 4.2 渗流作用下多孔材料的内禀尺度特征

发现并指出多相多孔材料应变局部化分析的尺度参数对载荷动力学特征的依赖关系。推导出压缩与剪切波作用下含液体多孔材料应变局部化分析的动力稳定性判定公式,指出在特定情况下渗透系数具有材料内尺度律参数的特征,与固体力学应变局部化分析中的粘性参数之间具有“对偶”关系,从数学上阐述了两者之间的共同点与不同点。

#### 4.3 梯度塑性/率相关模型条件下含液多孔材料双重内尺度律特征及相互作用

建立了多重尺度参数相互作用条件下多相多孔材料尺度参数预测的基本理论与方法。给出了不同条件下材料中实波速存在的条件以及对于给定的渗透系数实波速存在的波数区间,推导出了强不稳定条件下材料内尺度律预测的上下限判定公式,建立了多重内尺度律参数相互作用的基本研究方法,进一步揭示了率相关与梯度塑性模型各自所具有的内尺度律参数的物理机制。

#### 4.4 多相多孔材料动力应变局部化分析的数值求解方法

建立多相多孔材料应变局部化分析的高效求解算法。建立了耦合问题弹塑性分析的参变量变分原理,并在此基础上建立了非线性问题求解的参数二次规划算法,以及精细积分格式下的参数二次规划算法,算法具有良好的收敛性,只要问题有解,算法就可以获得解。

#### 4.5 多相材料非线性多尺度分析方法

发展了基于数值本构模型的多相材料非线性多级(多层次)计算方法。基本思想是在宏观本构模型的建立过程中考虑组成材料的颗粒体微结构分布形式、变形行为以及颗粒体之间的粘着-脱离-滑动等的相互作用关系,这种粘着效应考虑了颗粒体之间的原始粘着强度,当这种粘着被破坏后材料将发生破坏。

#### 4.6 多相材料时空多尺度分析方法

发展了多相材料物理力学行为的时间-空间多

尺度渐进均匀化分析方法。以极端热动力载荷条件下微尺度多相周期性材料中的热动力响应问题为对象,基于高阶均匀化理论在空间和时间上进行均匀化,获得了由高阶非局部函数所表征的波动方程,进一步用连续条件对该波动方程进行修正,使问题的求解避免了对有限元离散的高阶连续性要求。与经典的空间均匀化方法相比较,指出了经典空间均匀化方法的局限性。

#### 4.7 颗粒材料微力学分析方法

发展了非均质颗粒材料力学性能的微观模拟与宏观计算力学方法。给出了细观尺度上局部织构(孔隙比、胞元原子价、配位数等)的变化过程,并将离散系统中的变形与连续体中的相应变形联系起来,进行颗粒离散体的平均应力计算,再现了试样的加卸载过程。在宏观层次,发展了颗粒材料分析的Cosserat模型单元,进一步应用于Cosserat连续体的接触非线性问题分析,基于参数变分原理,发展了Cosserat连续体接触分析的参数二次规划有限元算法,由于Cosserat的转角变量特征,对接触本构关系进行了进一步的修正和发展,在算法中消除了接触分析引入的惩罚因子。

#### 4.8 计算微纳米力学方法研究探索

针对纳米管材料的曲面构型特点,利用指数映射关系,并通过在模型中引入高阶变形梯度,有效地克服了经典Cauchy-Born准则在描述纳米管变形几何关系时的不足。利用原子间相互作用势以及能量等效原理,得到了单壁碳纳米管的超弹性本构关系。如此得到的本构关系不仅与一阶变形梯度有关,还与高阶变形梯度相关,因此是一种广义连续介质模型。以此本构模型为基础,对单壁碳纳米管的物理力学性能进行了预测。已在纳米尺度结构稳定性、多相材料生长、异质材料界面断裂、流动传输等纳米力学问题的计算方面进行展开。

#### 4.9 发表论文与人才培养情况

2006年课题结题时统计,出版专著1部,发表国际刊物论文27篇,国内核心刊物论文43篇;国际会议特邀报告6篇,分组报告12篇;论文被SCI收录33篇次,EI收录60篇次。在人才培养方面,1人受聘教育部长江学者特聘教授,3人入选教育部新世纪优秀人才计划,1人入选新世纪百千万人才工程国家级人选,1人获得中国力学学会青年科技奖。

### 5 细观力学理论及其应用

该项目由北京理工大学胡更开教授负责,取得

的突出进展和重要成果如下:

### 5.1 高阶介质细观力学

建立了该尺度关系下预测复合材料有效弹塑性性质的一套系统的理论方法。该方法能够以解析的方式考虑非局部效应和界面效应对复合材料宏观性能的影响,成功地预测夹杂尺度对复合材料有效弹塑性性能的影响,并且传统的弹塑性细观力学方法为所发展方法的特例。给出了微极介质和微膨胀介质中椭球 Eshelby 张量的解析表达式。

### 5.2 电磁/声波超材料及对波传播控制

在波动载荷(电磁和声波)作用下,可以通过微结构设计使复合材料在宏观上具有特殊的性质(称之为超材料),并利用这些材料对波传播进行控制。设计并制备了颗粒型电磁左手材料;实现了具有微观结构的一维波动超材料的等效负质量系统并揭示了零等效质量系统的特性;提出了电/声小尺寸下设计电磁波、声波和弹性波透明的“中性夹杂方法”,并通过高介电材料包裹金属柱进行了实验验证;提出了基于 Laplace 方程设计任意电磁和声波隐身斗篷的一种普适方法,并从变形的角度进一步提出了消除材料参数奇异性的设计理论。

### 5.3 发表论文与人才培养情况

培养博士研究生 11 人(毕业 6 人),硕士研究生 12 人(毕业 8 人)。被 SCI 收录论文 32 篇。

## 6 复杂流动的多尺度模型和数值模拟多孔

该项目由中国科学院何国威教授负责,取得的突出进展和重要成果如下:

### 6.1 湍流的时空关联理论及其对气动噪声的应用

利用直接数值模拟和大涡模拟计算了均匀各向同性湍流的时空关联,发现所有这些模型都高估了时空关联的去关联时间尺度而低估了时空关联的幅值,并应用了时空关联的下扫模型,解释了现有的亚格子模型方法不能准确地预测时空关联的原因。因此,现有的大涡模拟方法不能准确地预测湍流噪声。

提出了剪切湍流的时空关联的椭圆模型,并用槽道湍流直接数值模拟的结果验证了该模型,在此基础上,发现大涡模拟高估了时空关联的去关联时间尺度,低估了时空关联的幅值,这与均匀各向同性湍流的结果一致,但其原因并不相同。根据椭圆模型,为了正确预测时空关联,大涡模拟必须能正确预测传播和下扫特征速度。为此,我们发展了 Kinematic 亚格子模型,并应用于气动噪声的数值预测。

### 6.2 湍流混合和化学反应流的映射封闭逼近(MCA)方法

在 2004 年提出了 MCA 方法,此方法不仅能预测分子扩散条件矩的形状变化,而且能够预测它的变化速率。在此基础上,在 2005 年进一步发展了 MCA 方法,解析导出了对流和反应的模型,得到了反应-扩散-对流系统的完全封闭的模型方程。在 2006 年具体地推导了以守恒标量为条件变量的条件滤波大涡模拟的控制方程,引入了混合模型,并对该模型做了数值验证,检验了模型的合理性。在 2007 年将 MCA 用于条件滤波的大涡模拟,发展了守恒标量耗散率模型,该模型与 DNS 结果符合较好。

### 6.3 发表论文与人才培养情况

发表 SCI 等论文 21 篇,包括 *Phys Fluids*, *Phys Rev E* 和 *Int J Multiphase Flow* 等重要流体力学刊物。培养博士后 1 名,博士 2 名,硕士 9 名。

## 7 太阳日冕磁场与太阳射电观测

该项目由中国科学院国家天文台颜毅华研究员负责,取得的突出进展和重要成果如下:

### 7.1 关于非线性无力磁场新模型的系列研究

辟蹊径提出的具有有限能量的一般(非常  $\alpha$ )无力磁场问题的边界积分方程并对其应用进行了评述,曾首次根据观测数据重建得到悬浮于太阳日冕大气中的磁绳结构,进一步研究外插的磁绳结构与 Yohkoh 卫星硬 X 射线爆发像的相互关系,发现在低能段磁绳部分表现出热过程,而在高能段,磁绳边缘和足点处有非热源。进一步反映了磁绳在该耀斑事件中的作用(Yan & Huang 2003)。并将一个具有闭型解的有限能量无力场带入到边界积分方程中去,发现确实存在这样的局部参数——伪无力因子  $\lambda$ ,它不同于总体无力参数  $\alpha$ ,会影响全局分布。在原边界积分方程和现在的直接边界积分格式中,求伪无力因子  $\lambda$  的策略是利用它的局部特性,摆脱体积分的计算,能够保证结果具有满意的无力性和无散性(Yan & Li 2006)。此文已得到国际同行 SCI 他引 10 余次,并被 *Astrophysics* 2007 所评述。

### 7.2 关于日冕磁场与射电观测结合分析的系列研究

对 2003 年 10—11 月重要爆发事件进行射电观测多波段分析(Tan et al. 2004)对于 1998 年 11 月 5 日事件的研究,则发现米波射电源位于尖角型磁场结构中,从而解释了米波射电爆发源从高频到低频的定向与硬 X 射线几乎垂直的原因。

对2003年3月17日的CME(LASCO/C2-3)进行了多波段研究(Yan et al. 2006)。主要结论为:(1) 164 MHz的射电源,在0956—0958 UT,向东北方向运动,几乎到达日面边缘;运动速度约1000 km/s;其余频率的源也有同向运动。对应的白光CME:C2观测到有向东的CME。(2) 164 MHz的射电源,在1014—1017 UT,向南运动并超出日面边缘;运动速度约1100 km/s;其余频率源有同向运动,但并未超出日面。在高于164 M的频率没有Type III,表明在低层日冕磁已经呈封闭位形。而在164 M所对应的高层日冕,磁场呈开放形态。对应的白光CME:1034 UT, C2观测到向南抛出的CME,速度约700 km/s。几乎垂直于CME的方向有一个增强的白光特征,可能对应于激波。(3) 发现在高于164 Mhz频段上密度增加近10倍,而在164 MHz上则为4倍。这个密度增强与白光观测到的机播特征相吻合。

对于2002年4月21日事件,怀柔的太阳射电观测展示了在1.2GHz的窄频率范围内和约3分钟的短时间内的爆发情况呈现出“斑马纹”频谱结构,含有许多频率漂移结构。根据观测频率我们知道这些辐射源正好位于耀斑活动区的致密核心区。对于2001年9月21日事件,提出了建设具有高指标的射电频谱日像仪的建议(Yan et al. 2004)。

### 7.3 发表论文与人才培养情况

发表和合作发表SCI/EI论文23篇,受邀在包括IAU学术讨论会在内的国际会议上做了7次邀请报告。培养和联合培养15名研究生,1名联合培养博士生毕业,3名联合培养硕士生毕业。

## 8 气体星云天体物理学:来自深度分光观测的新成果

该项目由北京大学刘晓为教授负责,取得的突出进展和重要成果如下:

### 8.1 通过欧洲红外空间天文台ISO,获得了远红外精细结构谱线如[O III] 52 $\mu\text{m}$ , 88 $\mu\text{m}$ 以及[N III] 57 $\mu\text{m}$ 的高精度测量

分析表明,远红外谱线导出的离子丰度与光学和紫外CELs给出的值相当,同样低于ORLs测得的值。

为了解释从紫外到远红外丰富的多波段观测数据,推测星云中存在另一过去不为人知的贫氢冷等离子体成分,以富金属(即贫氢)团块的形式隐藏在“正常丰度”的星云弥散热气体中。

对Abell 30和Abell 58中富金属团块的深度光谱观测分析结果显示,来自团块的重元素ORLs的确形成于温度只有数百度的低温区域,发现这些贫氢团块是富氧的,并非如Iben等人提出的“再生”行星状星云理论所预言的那样是富碳的。

### 8.2 发表论文与人才培养情况

发表SCI论文19篇。培养博士2名,硕士1名。

## 9 超大质量黑洞演化研究

该项目由中国科学院王建民教授负责,取得的突出进展和重要成果如下:

### 9.1 研究了两种吸积反馈机制对种子黑洞增长的影响

辐射加热(Compton加热)和高速吸积外流的动能加热,使得种子黑洞的Bondi吸积(因为气体比角动量很小)实际维持在 $10^{-3}$  Eddington极限的量级上。然而当吸积产生的辐射压不足以平衡下落气体时,塌缩难于避免。因此形成一个周期式的吸积过程,这种增长模式对形成高红移超大质量黑洞是不可取的方式。另一方面,超Eddington吸积已经破坏了Bondi吸积条件,即黑洞质量保持不变。太高的吸积率会导致黑洞的质量增长时标短于气体的动力学时标,这是不可能实现的,除非有另外的机制使下落的气体超声速下落。

### 9.2 提出了估计巨型黑洞自转角动量的新方法

近年来对射电星系甚高能辐射(TeV)的观测为测量黑洞视界附近的辐射场提供了一个有效途径。鉴于TeV光子与吸积盘辐射光子间的相互作用,产生正负电子对,而辐射场能量密度的空间分布依赖与黑洞自旋,我们提出TeV光子可以作为黑洞视界附近辐射场的有效探针。将这个新方法应用于M87,我们发现其中的巨型黑洞旋转很快。

### 9.3 巨型黑洞的间歇式活动

基于间歇式吸积模型,严格证明了黑洞duty cycle(DC)可以等价表示为活动黑洞质量密度与总黑洞质量密度之比计算。将其应用于Sloan巡天数据,得到了红移小于2的巨型黑洞DC。结果表明它不仅有着强烈的演化,还表现为与宇宙恒星形成密度历史一致,强烈显示了黑洞演化与恒星形成之间的相互调节,为黑洞与星系共同演化提供了观测证据。

### 9.4 AGN反馈

首次论证了辐射压反馈的高能辐射效应。由于类星体辐射压的强烈作用,使得含尘埃的气体以超声速膨胀,Fermi加速电子将不可避免,从而产生非

热辐射,特别是 $> \text{GeV}$ 的辐射。因此在射电宁静的类星体中,会存在显著弥漫的R-射线辐射。还发现了 Seyfert 星系中 AGN 反馈新证据,表明它强烈压抑了星系核周的恒星形成。

### 9.5 提出了描述黑洞与星系共同演化的 $\eta$ -方程

在间歇式吸积的基础上,建立了描述共同演化的  $\eta$ -方程。这个方程包括,黑洞辐射效率、类星体黑洞质量密度和 duty cycle 等观测量。将它应用于现有类星体和星系数据,得到巨型黑洞的辐射效率在红移为  $z=2$  时高达 0.3,此后出现强烈演化行为,到  $z=0$  时,辐射效率只有 0.03 左右。这个宇宙学演化表明,黑洞的增长方式为随即吸积。

### 9.6 建立了活动星系核演化统一模型

建立了包括黑洞质量、尘埃环演化在内的演化统一模型。它可以解释目前观测到的大多数现象,特别是窄线 Seyfert 1 的高倾角对应体,它们与非偏振宽线 Seyfert 2 的统一,给出了吸积率的演化序列。将铁 K 窄线成分起源与类型 2 活动星系核演化联系在一起,证明了 X 射线 Baldwin 效应是活动星系核的演化结果。

### 9.7 发表论文与人才培养情况

发表与黑洞演化有关的重要论文 12 篇(*The Astrophysical Journal*);培养博士 6 人,硕士 2 人。

## 10 活动星系核的高能辐射和中央黑洞演化

该项目由中国科学院上海天文台曹新伍教授负责,取得的突出进展和重要成果如下:

### 10.1 FRI 和 FR II 射电星系之间的关系研究

该项目结合喷流形成机制,通过对喷流功率及窄发射线辐射的研究,发现不能仅用吸积率的不同来解释 FRI 和 FR II 的差异,它们之间不是简单的演化关系,指向效应对研究 FR 星系的演化行为是重要的;研究了 BL Lac 天体的宽发射线的轮廓,发现 BL Lac 天体的宽发射线区的几何位形是各向异性的(很可能是盘状的),研究指出这些活动星系核的喷流很可能是在吸积盘的冕区形成的;对 ADAF 和 ADIOS 的辐射谱的计算结果表明喷流(outflow)的贡献是不可忽略的(Cao & Wu 2005);指出类星体中 torus 的几何位形与其中中央黑洞质量有关。

### 10.2 双峰发射线的形成研究

基于低辐射效率吸积流模型(radiatively inefficient accretion flow, RIAF),指出离子压厚盘的 X 射线辐射不足以解决“energy budget”问题。提出了

一个物理模型,成功地解决现有吸积盘模型中存在的主要困难,计算得到发射线发射系数正比于,与拟合双峰轮廓要求的指数约为 2—3 是符合的,与双峰发射线活动星系核样本比较,计算表明当喷流的洛伦兹因子小于  $\sim 2-3$  时,吸积盘外区足以产生观测到的双峰发射线光度。

### 10.3 高能伽玛射线的研究

从平谱射电类星体的光度函数导出了其母族(parent population)光度函数,并基于 Compton 模型预言了 Fermi 能观测到的类星体数目及红移分布,并指出 Fermi 观测到的大部分类星体是平谱射电类星体,通过研究计算表明射电类星体大约贡献了 30% 的河外伽玛射线背景辐射;发现 Compton 散射的软光子来自喷流以外的区域(即外光子模型),软光子很可能是来自宽发射线区。

### 10.4 星系中央巨型黑洞的形成与生长历史研究

通过对 X 射线背景辐射研究发现活动星系核的吸积率存在一迅速下降的过程,表明活动星系核中央巨型黑洞的质量主要来源于其早期明亮阶段的黑洞吸积过程,而活动星系核晚期中央巨型黑洞生长则极为缓慢(Cao 2005)。由黑洞吸积盘理论,从一低光度活动星系核样本,导出了活动星系核吸积率随时间变化规律,证实了活动星系核的吸积率在临界吸积率附近存在一迅速下降的过程,这表明活动星系核的辐射对周围气体的反馈作用是重要的(Cao & Xu 2007)。进一步研究暗活动星系核/正常星系中黑洞吸积盘辐射对 X 射线背景辐射的贡献,定量地指出近邻星系中黑洞质量只有不到 5% 是来自低吸积效率吸积阶段(Cao 2007)。

### 10.5 发表论文与人才培养情况

培养了 7 名研究生(其中 5 名博士生、2 名硕士生,至今已毕业 3 名博士生和 2 名硕士生),2 名博士后(1 名已出站)。发表 20 篇 SCI 论文。

## 11 复杂量子材料微观机理的实验揭示

该项目由复旦大学封东来教授负责,取得的突出进展和重要成果如下:

### 11.1 电荷密度波相关机理的实验研究

通过利用角分辨光电子能谱对材料电子结构的精确测量能力,在 2H 型二硫族过渡金属化合物  $\text{NaxTaS}_2$ ,一种存在着很强的电声子相互作用的体系中,发现了一种新的 CDW 形成机理,并且证明了在这个体系中,其电荷密度波的发生和费米面无关,而与遍布整个布里渊区的所谓“费米域”直接相关;

在 CDW 能隙打开时,体系的光电子谱线只有费米能量附近的部分谱重被移开。

在 CDW 材料 2H-NbSe<sub>2</sub> 中发现了其中真正和 CDW 转变紧密相关的动量区域,发现了长期隐藏着的引起 2H-NbSe<sub>2</sub> 中 CDW 转变的嵌套(nesting)条件,解决了一个长期以来困扰理解 2H-NbSe<sub>2</sub> 中 CDW 转变的难题。利用角分辨光电子能谱对 Cu 插层 1T-TiSe<sub>2</sub> 的电子结构进行研究,证明了 1T-TiSe<sub>2</sub> 体系一方面为能带意义上的半导体,而另一方面是关联意义上的半金属,从而解决了缠绕此领域几十年的一个争论焦点。

### 11.2 铜氧化物和铁基高温超导相关问题的实验研究

首次获得了这个区域的能带结构,发现了 1.6 eV 能量范围的巨大色散,并且其在 300 meV 处存在有一明显转折(kink),并指出这个能量尺度是由于体系中强相互作用引起的非相干电子态重新按裸带(bare band)分布所造成的;获得超导能隙最大区域中电子是和磁子相互作用的证据;第一次在最佳掺杂的 Bi2201 单层高温超导体中发现了处在 d 波能隙最大的反节点区域的超导相干峰;首次发现了 BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> 等体系中自旋密度波是由于能带的交换劈裂现象造成的,并在 Sr<sub>0.8</sub>K<sub>0.2</sub>Fe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> 发现了超导和自旋密度波共存现象。

### 11.3 原子分子中的关联现象的实验研究

建立了一整套利用这种凝聚态物理中的新兴同步辐射谱学方法来研究小分子体系和一维有机链体系激子的空间分布的实验方法,首次获得对有机分子晶体应用尤为重要的动量分辨的激子谱、和激子迁移的相关信息,并证明了最低能量的激子可以是局域的,从而推翻了过去结论,并把该技术推广到其他的原子分子体系的研究中,开辟了非弹性 X 光散射研究激子微观性质的这一崭新领域。

### 11.4 发表论文与人才培养情况

发表了 8 篇第一作者/第一单位的 *Phys Rev Lett* 论文。项目总计发表 SCI 论文 20 篇,另有 1 篇国内核心期刊综述文章,以及专著 1 章。

培养博士研究生 8 名,硕士研究生 3 名。

## 12 激光系统和激光与物质相互作用——基于强激光与等离子体作用的新型粒子加速和新型辐射源

该项目由中国科学院盛政明教授负责,取得的突出进展和重要成果如下:

### 12.1 提出了产生超强太赫兹辐射的理论

通过理论研究和数值模拟,发现强激光与稀薄气体或等离子体作用可以通过以下三种机制产生高功率太赫兹辐射:在不均匀等离子体中可以线性模式转换方式产生超宽带太赫兹辐射;采用与太赫兹波长量级的薄层等离子体或气体,通过瞬态表面净电流激发可以产生单周期太赫兹辐射;采用啁啾激光脉冲在等离子体中产生横向剩余电流,其产生的太赫兹辐射强度在很宽的入射激光强度范围正比于后者。上述三种方案都可以产生峰值功率达到 MW-GW 量级的超强太赫兹辐射,可以用于强场太赫兹物理研究。

### 12.2 提出了用等离子体密度光栅来控制激光脉冲的理论

发现通过两束中等强度的激光脉冲在等离子体中交叉作用可以诱导生成一个周期性准中性的等离子体密度调制,称为等离子体布拉格光栅,其寿命在皮秒至纳秒量级。除了用两束激光,用空间光调制器作用于气体通过光电离过程也可以产生等离子体密度调制。研究发现等离子光栅与光纤布拉格光栅类似,也存在一个光子带隙,在带隙附近有强烈的光栅色散出现,而且等离子光栅的带隙宽度比一般的光纤光栅宽三个数量级。此外,它具有比一般介质光栅更高的破坏阈值,可以用来操纵高能量、高强度飞秒脉冲的传输。它与目前广泛采用的等离子体反射镜一样,具有重要潜在应用前景。

### 12.3 研究了激光固体靶作用中的高能电子发射

开展强激光与固体靶作用产生高能电子发射实验和理论研究。实验发现沿着靶面方向存在一束定向性很好的高能电子。该电子束份额随着激光入射角的增大而增大。对于 70 度入射角,沿着表面发射的超热电子的最大强度约为反射方向的 5 倍。为了理解表面电子发射的物理过程,采用二维相对论粒子模拟程序进行了数值模拟。模拟中发现大量的电子以振荡形式沿着靶面运动,这一现象起因于表面自生磁场和电场对靶面电子的约束作用,由此产生一种类似逆自由电子激光加速的加速机制。

### 12.4 在 Fokker-Planck 编程以及应用上取得进展

发展了二维速度空间的 Fokker-Planck 程序的编写,采用了全新的有限元方法,这个方案不必严格限制计算格点的步长和时间的步长,就可以确保分布函数的非负性和粒子数的守恒。该程序考虑了完整的电子-电子碰撞和电子-离子碰撞。利用该程序系统研究了不同的电场强度下的等离子体电流与电场的关系。发现在中等强度以及高强度的电场中,

电流与电场不再满足线性的 Spitzer-Harm 模型,即不再存在固定的电导率。给出了利用电场强度、等离子体密度、横向温度和纵向温度来表达的等离子体电场的表达式。这个电导率的一般表达可以应用于“快点火”激光聚变方案中混合粒子-流体模拟等问题。

### 12.5 研究了激光与固体靶作用中的新型离子加速机制

提出了泡沫靶中离子加速的“体加速”机制。与通常的激光与固体靶作用产生离子加速的表面加速相比,“体加速”产生的高能离子的数量远大于表面加速产生的高能离子数,因而可用来进行快点火聚变研究;研究了超短超强激光与固体薄膜靶相互作用中形成的孤波和无碰撞静电冲击波结构及其对离子的加速行为,并提出了利用对撞冲击波对高荷质比离子进行多次反射加速的理论等。

### 12.6 发表论文与人才培养情况

项目执行期间发表在国际重要学术刊物上论文有 56 篇,包括 7 篇发表在 *Phys Rev Lett* 上。期间有 6 名研究生获得博士学位。

## 13 凝聚态物质奇异物性的第一原理计算研究

该项目由中国科学院物理研究所方忠研究员负责,取得的突出进展和重要成果如下:

### 13.1 计算方法与核心软件的发展

完成了 BSTATE (Beijing Simulative Tool for Atom Technology) 核心软件包的编写、调试。该软件包的基本框架是基于平面波赝势的第一原理计算方法,其中多种计算方法(例如, LDA + Gutzwiller 方法等)是国际上首次实现,并具有完全的自主知识产权。

### 13.2 反常 Hall 效应和自旋 Hall 效应的物理本质的研究

深入研究了反常 Hall 效应的内禀机理,并通过第一原理的计算方法讨论了其与动量空间磁单极的关系,为反常 Hall 效应这样一个具有 100 多年历史的量子现象提出了新的物理解释。在国际上首次定量计算了实际材料(GaAs 和 Si)中的自旋 Hall 效应,不仅研究了自旋 Hall 流的许多基本性质,而且还预言了一些可能的实验。

### 13.3 关联电子系统的物性计算

通过量子调控手段人为地对体系的光、电、磁、热和输运等方面的特性进行有意识的调控,从而实现我们需要的一些重要功能;给出了 LaOMAs(M=V-Cu)的相图,指出了磁不稳定性对该超导材料的

重要作用;与王楠林小组合作最早预言了母体材料中的条纹自旋密度波相及其与超导态的竞争,随后被美国两个科研小组的中子散射实验证实,是目前该系统研究中最重要物理结果之一。

### 13.4 发表论文情况

本项研究共发表 SCI 文章 20 篇,其中包括 *Phys Rev Lett* 文章 7 篇, *Science* 文章 1 篇。

## 14 强流高电荷态离子的产生、约束及其引出和传输研究

该项目由中国科学院物理研究所赵红卫研究员负责,取得的突出进展和重要成果如下:

### 14.1 超导高电荷态 ECR 离子源 SECRAL 及高电荷态离子的产生和优化研究

在国际上首次研制成功一台具有原创结构的超导高电荷态 ECR 离子源(简称 SECRAL),突破国际上已沿用二十多年的传统 ECR 离子源磁体结构,独创了一种把产生轴向磁镜场的螺线管包置于径向六极铁内部的“冷铁”超导磁体结构,在高电荷态离子产生方面具有国际上其他超导 ECR 离子源无法比拟的优势,从而解决了国际 ECR 离子源领域多年来一直没有解决的问题,产生了许多高电荷态离子束流强度的世界纪录。SECRAL 超导 ECR 离子源项目获 2008 年国家科技进步奖二等奖,2007 年获甘肃省科技进步奖一等奖。

### 14.2 研制成功国际上磁场最强、性能最好的全永磁高电荷态 ECR 离子源 LAPECR2

建造成功目前国际上磁场最强、源体体积最大、技术难度最高、高电荷态离子束流强度最大的全永磁高电荷态 ECR 离子源 LAPECR2。项目组成员因该离子源获得首届“Richard Geller Prize”国际奖。

### 14.3 强流高电荷态离子束引出、传输和束流品质的理论和实验研究

首次提出了高电荷态 ECR 离子源中,提高微波频率、微波功率和轴向磁镜场将有可能大幅度地增加束流发射度,同时,实验发现不同的 ECR 等离子体状态,可能会使高电荷态离子束发射度增加 2—3 倍;首次利用负电性气体尝试对强流高电荷态离子传输过程中的空间电荷效应进行补偿;设计并实验了适合高电荷态离子引出,且具有部分中和引出束空间电荷效应的三电极引出系统。

### 14.4 通过韧致辐射谱测量对 ECR 等离子体的诊断和研究

首次从电子加热的角度诠释了在 ECR 离子源



领域得到普遍认可的有关约束磁场的 Scaling laws; 首次实验观察到在磁场分量  $B_{\text{last}} \approx B_{\text{ext}}$  时, 离子源的约束和引出之间的关系达到最佳, 而当  $B_{\text{ext}}$  小于  $B_{\text{last}}$  较多时, 等离子体的约束将遭到较严重的破坏; 实验观察到热电子能量随共振区磁场梯度的减弱而提高, 并分别从单粒子轨道模型和电磁波在等离子体中的传播两个角度对这一现象进行了分析; 基于实验现象, 从抑制等离子体不稳定性的角度出发对掺气效应做出了新的解释。

#### 14.5 发表论文与人才培养情况

发表 SCI 文章 25 篇, 国际会议特邀报告 3 个。培养博士生 3 名, 硕士生 2 名。

### 15 正负电子对撞与中微子物理

该项目由中国科学院物理研究所王贻芳负责, 取得的突出进展和重要成果如下:

#### 15.1 北京正负电子对撞机重大改造工程建设与 tau-charm 物理研究

领导完成了国家大科学工程——北京谱仪 (BESIII) 的设计与建造, 各项指标均达到了国际先进水平。BESIII 探测器于 2008 年 3 月开始试运行, 经历了宇宙线实验和对撞机束流的考验, 各项性能指标达到设计要求。作为 BESIII 国际合作组发言人, 领导了 BESIII 的软件与物理研究工作, 组织国内外几十位物理学家, 编纂完成了 BESIII 黄皮书 *Physics at BESIII*, 为 BESIII 未来的物理研究设定了目标。BESIII 实验的物理取数已开始, 各项物理分析工作正在进行中。

#### 15.2 中微子物理研究

提出了具有重大国际影响的大亚湾中微子实验, 来搜寻一种新的中微子振荡模式, 并测量此振荡参数至 1% 精度。完成了一个独特的实验方案和探测器设计, 其精度比过去提高近一个量级, 是目前国际最好水平。领导了探测器的工程设计与建造, 作为大亚湾国际合作组发言人, 全面领导该实验的物理研究工作。在国际上首次提出水基契伦柯夫量能器的概念并完成了模型试验, 结果符合预期。

#### 15.3 发表论文与人才培养情况

发表了 SCI 文章 30 多篇, 已培养博士 8 名, 在读 10 名。

### 16 强相互作用系统中的对称性及其破缺 (相变) 的理论研究

该项目由北京大学刘玉鑫教授负责, 取得的突

出进展和重要成果如下:

#### 16.1 原子核的形状相变与形状共存研究方面

(1) 利用角动量投影的相干态方法, 提出描述角动量驱动的偶-偶核形状相变的方法; 给出了该相变由角动量和相互作用参数及角动量和形变参数表示的相图, 说明这类相变的物理机制和条件; 并且预言由于角动量驱动, 具有  $O(6)$  对称性的原子核可能具有不定轴转动到三轴转动再到振动的形状相变。

(2) 系统分析了一些特征量随相互作用玻色子模型中的控制参量 (结构参量、玻色子数等) 演化的行为, 提出一个可以准确区分原子核形状相变级次 (一级或二级) 的可观测量。

(3) 系统分析了  $E(5)$  和  $X(5)$  两种临界点对称性的能谱和电磁跃迁的统计规律, 说明具有这些临界点对称性的状态都是规则的; 在二次量子化的框架下, 建立了统一描述偶偶核和奇质量数核的形状相变临界点附近状态的性质及其演化的代数模型, 为建立在几何模型基础上的临界点对称性模型提供了代数模型基础。

(4) 利用玻色影射方法, 在 SD 对近似下讨论了原子核的形状相结构和相变, 说明核子间的对关联强度、4 极对关联强度及 4 极-4 极作用强度对原子核形状相结构及其相变影响的行为。

(5) 系统分析了  $U(4)$  振子模型中的相变和相结构, 说明其中  $U(3)$  对称到  $O(4)$  对称间的相变为二级相变; 建立了描述该相变的临界点附近低激发状态的性质的  $E(3)$  对称性模型。

#### 16.2 强相互作用物质的 QCD 相变研究方面

(1) 发展改进了 Dyson-Schwinger (DS) 方程框架下的重子的孤立子模型, 较好地给出了核子的质量, 提出一个对非定域孤立子进行集体量子化的方案。并利用这一模型研究了强子物质中核子的质量、半径和袋常数, 说明在足够高密度下可以发生手征对称性恢复相变和夸克退禁闭相变。

(2) 在四维协变的 Bethe-Salpeter (BS) 方程框架下, 利用 DS 方程确定的相互作用核, 在具有很好 QCD 基础的情况下求解了一些赝标介子和矢量介子的 BS 方程, 给出一个确定电中性赝标介子质量的公式, 很好地描述了这些介子的质量等性质, 并说明了夸克味对称性破缺和味混合对这些介子的质量等性质影响的行为。

(3) 研究了 DS 方程的彩虹近似和梯子近似的自治性; 利用 QCD 的 DS 方程方法, 首次定量给出一定有限流夸克质量之下和一定耦合强度之上的夸

克传播子存在多重解,提出一个区分自发破缺效应和流夸克质量引起的硬破缺效应的方案,为研究非手征极限下的手征相变提供了基础,引发了国际上相关研究的开展;首次讨论了具有有限同位旋化学势的两味夸克(味对称性)系统的真空结构;给出了QCD真空的标量、矢量和轴矢量磁化率。

(4) 提出在DS方程方法框架下确定强相互作用物质中夸克的传播子的新方法,提出一个化学势依赖的有效胶子传播子模型,计算了手征夸克凝聚等随化学势演化的行为,说明夸克化学势对胶子的反作用可以减小发生手征相变的临界密度;建立了有限化学势情况下满足Ward-Takahashi恒等式的类Ball-Chiu顶角,从解析和数值计算两方面讨论了手征凝聚、夸克数密度等随化学势演化的行为。研究了手征恢复相变与出现色超导相的关系,说明在比发生手征对称性恢复相变的临界化学势大很多的化学势情况下才出现两味色超导相。系统分析了真空中和核物质中的 $\pi$ 核子 $\sigma$ 项,很好再现了新近实验给出的较大的 $\pi$ 核子 $\sigma$ 项,并说明核物质中的 $\pi$ 核子 $\sigma$ 项随核物质密度增大而减小。

(5) 率先建立了2+1味的Polyakov-Nambu-Jona-Lasinio (PNJL)模型,首先在考虑夸克禁闭效应的NJL模型(点接触作用下DS方程的近似)框架下研究了包含三味夸克的强相互作用物质在有限温度以及非零化学势情况下的手征相变和退禁闭相变,给出系统的相图和临界终点,并说明味混合作用和流夸克质量对相图和临界终点影响的行为。

(6) 利用NJL模型,系统研究了强相互作用物质的手征相变的特征,说明手征磁化率可以作为一个标志该相变的特征量。利用考虑夸克禁闭效应的NJL(PNJL)模型讨论了具有有限同位旋化学势和有限温度的两味夸克系统中出现 $\pi$ 凝聚的可能性及其与夸克凝聚等之间的关联;研究了有限温度下轻介子的激发和s-波 $\pi$ - $\pi$ 散射的散射长度,给出 $\pi$ 介

子和 $\sigma$ 介子的质量、 $\pi$ 介子的衰变常数和s-波 $\pi$ - $\pi$ 散射的各散射道的散射长度等随温度演化的行为,并将一些描述零温零密情况下强相互作用规律的重要关系推广到有限温度情况。

### 16.3 致密天体的组分和其中的一些过程及QCD相变的天文观测研究方面

(1) 利用相对论平均场方法及手征强子模型研究了中子星物质中K介子和反K介子的产生及出现反K介子凝聚和 $\Delta$ 共振态等的可能性及其效应;较系统地讨论了中子星内强子物质到奇异夸克物质的相变,说明夸克相的出现能够显著地影响中子星的整体性质,强子-夸克相变以及夸克相中的色味锁定色超导相都软化中子星的状态方程,使得中子星的最大质量降低;还系统讨论了一些新认识到的相互作用道对中子星物质的组分及中子星的结构等影响的行为。

(2) 系统研究了致密星体物质中的电子俘获、贝塔衰变、中微子散射、中微子吸收等反应的反应率随系统温度、密度、组分等变化的行为,说明温度升高和密度增大可以大幅度增大核心塌缩型超新星爆发过程中对反弹激波再加热的中微子的通量和吸收率,为探讨核心塌缩型超新星爆发的机制及其模拟计算提供了重要信息。

(3) 系统研究了新生奇异夸克星(SQSs)和新生中子星(NSs)中引力(g-)模式振动的本征频率,说明新生SQSs的g-模式振动的本征频率比新生NSs的g-模式振动的本征频率小约一个数量级,通过探测超新星核心的g-模式振动的本征频率可以分辨在超新星铁核塌缩之后形成的星体是传统的中子星还是奇异夸克星,从而提出了一个表征致密强相互作用物质中发生退禁闭等QCD相变的观测信号。

### 16.4 发表论文与人才培养情况

在国际国内重要学术刊物发表论文50多篇,还有一些工作即将在国际重要学术刊物发表,已毕业并获得博士学位4位,已毕业并获得硕士学位3位。

## THE ACHIEVEMENT INTRODUCTION OF PROJECTS FUNDED BY NATIONAL SCIENCE FOUNDATION FOR DISTINGUISHED YOUNG SCHOLARS IN DEPARTMENT OF MATHEMATICAL AND PHYSICAL SCIENCES DURING 2006—2008

Department of Mathematical and Physical Sciences

(Department of Mathematical and Physical Sciences, NSFC, Beijing 100085)

**Key words** Department of Mathematical and Physical Sciences, National Science Foundation for Distinguished Young Scholars, achievement introduction