

# 中国科学院 2002 年基础科学研究 重大成果(进展)\*

中国科学院基础科学局

(北京 100864)

关键词 中国科学院,基础科学研究,重大成果(进展)

## 纳米结构/薄膜生长及表面

### 动力学问题研究

完成单位:物理研究所

主要完成人:薛其坤,王恩哥,贾金锋,刘邦贵

随着微/光电子器件性能的多样化程度增加和其尺寸不断减小的发展趋势,具有零维、一维和二维尺度的表面纳米结构/薄膜已成为开拓新一代功能器件的研究前沿。在原子水平上研究生长过程中的表面动力学问题,对于生长初期纳米结构的形成和控制直至应用都是极端重要的。然而,尽管人们在理论和实验方面都进行了长期探索,但仍有很多基本问题没有解决。如,在薄膜外延生长中,常常引入表面活性剂来提高薄膜质量,已建立了 20 多年的经典扩散限制集聚理论则不能解释这一现象;纳米结构一旦制备之后,其稳定性如何?如不稳定,其退化的规律是什么?能否控制?这一系列的表面动力学问题一直是多年来凝聚态物理和纳米科学中的前沿问题和研究焦点。针对这些问题,该所研究人员进行了系统的理论和实验探索,并给出圆满的答案。

针对如何理解和控制量子点或原子岛形状与大小分布的问题,他们证明,在外延生长中利用入射粒子潜能的转化和原子表面扩散的各向异性可以对原子岛形态进行有效的控制。从而对国际上已争论近 10 年的 Pt/Pt(111)系统原子岛形状的翻转现象,给出一个圆满的答案。

纳米结构的稳定性问题与原子在岛内的热激活过程以及离开岛的扩散通道密切相关。他们提出

了一个扩散通道决定退化过程模型,揭示了制约原子岛稳定性的微观机理。该模型可以解释目前的实验现象,为纳米结构的器件应用奠定了基础。

在表面生长动力学的理论研究中,在 *Phys. Rev. Lett.*上发表论文 4 篇,并在许多有广泛影响的国际会议,如美国材料学会年会、国际材料学会、美国物理学会年会上做邀请报告。

在实验上,发明了在原子上控制纳米结构生长的“幻数团簇+模板”方法,实现了全同纳米团簇周期点阵(详见本刊 2002 年第 6 期 433 页)。在理论上,提出了描述原子形核的新的壳层屏蔽效应,澄清了表面活性剂对薄膜生长过程的影响;建立了描述量子点退化过程的多扩散通道模型,揭示了三维原子岛稳定和退化的微观机理,为纳米结构的器件研究提供了基础。所有这些研究结果都处于国际领先地位。

## 2—5GeV 能区 R 值精确测量

完成单位:高能物理研究所

主要完成人:实验物理中心,加速器中心

R 值测量是正负电子湮灭产生强子总截面的绝对测量,直接反映夸克味与色量子数的基本的物理特征。2—5GeV 的 R 值高精度测量对精确检验标准模型和探索新物理的全局具有重大意义。该所充分把握国际高能物理的最新动态,在加速器和物理实验方面实现了一系列重要的创新,将 2—5GeV 能区 R 值测量精度比此前的国际平均值提高了 2—3 倍,对精确检验标准模型这一国际前沿做出重要贡献。

\* 收稿日期:2003 年 2 月 20 日

其实验技术和加速器技术也都处于世界领先地位。

R 值的精确测量要求北京正负电子对撞机(BEPC)和加速器 BES 长时间在束流能量 1—2.5GeV 区域,包括低于设计最低能量 1.6GeV 的能区稳定运行,提供尽可能高的亮度,对加速器是严峻的挑战。BEPC 加速器采用了一系列措施,高效稳定运行,能量点转换的调试时间短,使原定取数计划提前超额完成。BES 实现了在大能区的性能一致性和长期运行的稳定性,确保数据质量。发展了 2—5GeV 能区强子化模型,保证了模拟探测效率的可靠性。利用单束运行和双束分离运行研究本底,有效减低束流相关的复杂本底,大大降低了系统误差。

经过两轮 R 值测量,测其量结果的平均误差为 6.6%,比原有实验的精度提高了 2—3 倍。采用 BEPC/BES 的 R 值测量结果后,标准模型若干基本参数的精度大幅度提高:

(1)电磁跑动耦合常数:  $\alpha^{-1}(M_z^2)$  从  $128.902 \pm 0.090$  改变成  $128.945 \pm 0.060$ 。

(2) $\mu$  反常磁矩:  $\alpha_\mu^{\text{had}}$  ( $696.7 \pm 15.6$ ) $\times 10^{-10}$  改变成  $(697 \pm 10.5) \times 10^{-10}$ , 确认实验测量值与标准模型预言存在  $(42.6 \pm 16.5) \times 10^{-15}$ , 即  $2.6\sigma$  的偏离。

(3)标准模型 Higgs 质量预言: 质量上限由 165GeV 变为 210GeV, 中心值由 62GeV 变为 88GeV, 与直接寻找的结果一致。

2002 年的国际粒子数据手册,将多年不变的 R 值图做了重大改动,增加了 BES 的测量结果,国际粒子物理数据库收录了 BES 的全部 R 值实验结果。该成果先后应邀在国际会议上做报告 25 次,其中重大国际会议特邀报告 12 次。据 SPIRES-HEP 的不完全检索,迄今已被引用 118 次。

## HT-7 超导托卡马克实验获重大进展

完成单位:等离子体物理研究所

主要完成人:李建刚,匡光力,万宝年,罗家融,赵燕平,张晓东,赵君煜,刘小宁,白红宇,傅鹏等

HT-7 超导托卡马克实验,在 2002 年初又获重

大进展:实现了在低杂波驱动下,电子温度超过 500 万度、中心密度大于  $1.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、长达 20 秒可重复的高温等离子体放电;实现了大于 10 秒、电子温度超过 1 000 万度、中心密度大于  $1.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$  的高参数等离子体放电,这是世界上第二个放电长度达到 1 000 倍能量约束时间高参数准稳态等离子体。在离子伯恩斯波和低杂波协同作用下,实现放电脉冲长度大于 100 倍能量约束时间、电子温度 2 000 万度的高约束稳态运行;最高电子温度超过 3 000 万度。这些结果表明,HT-7 超导托卡马克已成为世界上为数不多的可进行高参数稳态条件下等离子体物理研究的实验装置。

在本轮实验中,HT-7 实验组的科研人员围绕稳态高约束等离子体运行这一当今世界磁约束聚变最具挑战性的前沿课题,展开全面深入的研究。对 HT-7 实验系统做了系列改进,在工程上向高参数稳态运行迈出一大步:实现极向场的稳态供电及控制;利用钒钢实现稳态条件下纵场波纹度的大幅度改善;建成 1MW 稳态低杂波电流驱动系统、高性能水冷石墨限制器及粒子排除系统、新型射频天馈系统、数据实时与连续采集系统以及数项先进等离子体诊断系统。实验中围绕约束改善、电流驱动、等离子体辅助加热、边界湍流及输运、等离子体参数精细分布控制、先进壁处理、稳态运行及控制等诸多深层次的物理方面深入研究,取得了重大的突破性进展。在离子伯恩斯波改善约束、抑制磁流体不稳定性及湍流;利用低杂波控制边界输运垒及改善约束、利用射频波进行高效壁处理以及双波协同效应等方面,做出对未来托卡马克反应堆具有较大应用前景的原创性研究成果。这些成果再次充分反映出中国科学家及工程技术人员的聪明才智,也是我院实施知识创新工程试点工作以来的又一丰硕成果。

HT-7 超导托卡马克已成为对国内外全面开放的国际上稳态高参数等离子体两大实验平台之一。在本轮为期三个月的 HT-7 实验期间,该所科研人员与来自美国、日本 14 所大学和科研机构的 18 位科学家及国内 11 所大学和科研单位的 14 位专家就共同关心的一些问题进行探讨并制定了详细的联合实验计划,也获得令人满意的实验结果。

HT-7 超导托卡马克装置自投入运行以来,在每

年长达 100 多天、每天 24 小时连续运行的艰苦条件下,多个子系统上的 100 多位工作人员相互帮助、相互理解、协同作战。所有实验人员,几乎每天昼夜工作在实验室。在取得科研成果的同时,造就了一支被我院领导赞为特别能战斗的、具有极强凝聚力的优秀科研团队。

目前,磁约束聚变研究主要集中在尚未彻底解决的两大难题上:燃烧等离子体和先进稳态运行。特别是稳态运行对建堆意义十分重大。由于世界上大多数托卡马克都是数秒的放电,一些与高参数稳态运行相关的重大工程技术和物理问题不能深入进行。世界上实现千万度放电最长的是法国 TORE-SUPRA 超导托卡马克,最长放电长度大于 200 秒,为能量约束时间的 2 000 倍。该装置的体积比 HT-7 大 17.5 倍,200 秒放电的温度为 2 000 万度,中心密度  $1.5 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ 。HT-7 是世界上第二个放电长度超过 1 000 倍能量约束时间、温度为 1 000 万度以上、能对稳态先进运行模式展开深入物理和相关工程技术研究的超导装置。从总体宏观参数上比较,HT-7 已经超过体积大于 HT-7 3 倍的俄国 T10 托卡马克。在稳态高约束运行方面已具世界领先水平。

HT-7 的实验结果受到国内外受控届人士的高度评价,分别在 2002 年 15 届等离子体与壁相互作用大会、18 届国际聚变能大会和 44 届美国等离子体物理大会做特邀报告。

### 分子纳米结构与纳米材料的构筑 与性能研究

完成单位:化学研究所

主要完成人:郭玉国,万立骏,白春礼等

铁磁性纳米粒子因处于单磁畴尺寸范围而常具有相对与本体块材高的矫顽力。但要把这一特性用于磁记录器件方面,需要把它们排成有序的纳米粒子阵列。传统的方法常需要特殊的条件以及专门的仪器,因此开发新的制备方法或构筑新的纳米结构具有重要的理论和实际意义。

该研究利用脉冲电沉积技术,在多孔阳极氧化

铝模板中成功制备了有序的 Ni-Cu 交替的复合纳米线阵列。磁性质测试表明,这些纳米线中的 Ni 层保持了 Ni 纳米粒子的单磁畴结构,且磁矩呈平行排列;纳米线阵列在室温下具有 490 Oe 的高矫顽力,比 Ni 块材的矫顽力(0.7 Oe)提高了约 700 倍。该研究中构筑的铁磁性金属和非磁性金属交替的有序纳米线阵列,可以克服单一铁磁性纳米线阵列单磁畴结构丧失的限制,既保持单磁畴结构(对应于高矫顽力特性)又高度有序,是有序磁性纳米粒子阵列的一种替代结构。而且该法又具有简单易行和普遍适用的优点。多孔阳极氧化铝模板的制备已相当成熟,且孔间距至少在 50—420 nm 范围内可自由调控,对应于孔密度  $6 \times 10^8$ — $5 \times 10^{10}$  孔/cm<sup>2</sup>。如果一个信息位对应于一根复合纳米线,则制备的磁性复合纳米线阵列可达 4—300 Gbits/in<sup>2</sup> 的存储密度。如,在孔间距为 100 nm 的多孔阳极氧化铝模板中可制备出阵列密度为  $1.2 \times 10^{10}$  的 Ni-Cu 复合纳米线阵列,对应于 70 Gbits/in<sup>2</sup> 的存储密度。该纳米结构阵列在超高密度磁存储方面有潜在的应用前景。相关工作发表在 *Chem. Mater.* 上。

### 核心数学前沿研究的若干成果

完成单位:数学与系统科学研究院

主要完成人:张立群,席南华,张平,葛力明

近两年,数学与系统科学研究院在核心数学研究中的多个方面取得了具有相当国际影响的突破性进展。

(1)百年历史的 Prandtl 系统整体解的存在性公开问题的解决。

Prandtl 方程整体解的存在性问题,是 1904 年 Prandtl 研究流体在边界附近形态这一重要问题时提出的。张立群与辛周平于 2002 年在必要的条件下,证明了 Prandtl 系统整体解的存在性、惟一性和光滑性,取得了重大突破性进展,受到审稿人极高的评价。辛周平在国际数学家大会(ICM2002)的 45 分钟报告中介绍了这项工作。

(2)Lusztig 猜想的突破性进展。

美国著名数学家 Lusztig,于上世纪 80 年代提

出了在代数群方面关于基环结构的一个重要猜想。席南华对于最主要的一类仿射 Weyl 群证明了著名的 Lusztig 猜想,该工作以专著形式发表在著名刊物 *Mem. of AMS*. 157(2002), No.749 上,获得高度评价,并因此获得在第二届华人数学家大会上颁发的“晨兴数学银奖”。

(3)关于量子力学中非线性 Schrodinger 方程半经典极限研究。

关于非线性 Schrodinger 方程的半经典极限,是量子力学中一个十分重要的问题。Fields 奖获得者 P. L. Lions 及其学生解决了线性(或磨光位势) Schrodinger 方程的半经典极限问题。张平在一维情形,彻底地解决此问题;在高维情形,局部解决了此问题。该工作于 2002 年发表在顶级数学期刊 *Comm. on Pure and Appl. Math.* 上。受到同行一流专家的高度评价。

(4)算子代数中 von Neumann 代数与自由维数关系的研究。

由 von Neumann 在 1930 年代提出的生成元问题是算子代数的最重要的问题。为研究这一问题,自由概率论的创始人 Voiculescu 引进了自由维数并猜测自由维数和生成元个数有内在联系。葛力明及其学生得到了该领域中近几年来最好结果,于 2002 年发表在综合类的顶级杂志 *Proc. Nat. Acad. Sci. (USA)* 和 *Geom. and Funct. Anal.* 上,并因此应邀在 ICM2002 上做 45 分钟邀请报告。

### DNA 单分子弹性力学研究

#### 及其在 P53 蛋白抑制肿瘤机理研究

完成单位:理论物理研究所

主要完成人:周海军、张阳、欧阳钟灿

该成果的主要完成人于 1999 年提出双链 DNA 聚合物弹性力学模型,计算结果与国际上若干实验室 DNA 单分子拉伸实验符合很好,单篇论文(*PRL* 82 (1999) 4 560)两年多被引用 30 余次,其中 2002 年达 12 次。在此基础上,在单链 DNA 弹性理论及双链 DNA 弹性变形与 P53 蛋白抑癌机理关系研究中又取得了创新性成果:

P53 蛋白是 *Science* 1993 年的年度分子,能识别并捆扎 DNA 致癌序列。根据美国亚利桑那州立大学两研究组寄来这类序列(Walfl)微环的 AFM 观察数据进行弹性分析,发现 Walfl 弹性模量只有通常序列的 1/3,其柔软性是 P53 可以识别并捆扎变异位点,阻止癌变染色体分裂的物理机理,合作论文以该所为第一单位发表在 *J. Mol. Biol.* 上。

双链 DNA 在基因复制时,要发生发夹(hairpin)一单链(coil)相变。他们根据杂化高分子统计理论,计算外力引起相变的阈值,与国外实验符合;把溶液离子浓度 Debye-Hückel 静电势引入 DNA 弹性自由能,计算了上述相变依赖离子浓度的关系,结果发表在 *PRL*, *Biophys. J.* 及 *J. Chem. Phys.* 上。2002 年,被著名综述杂志 *Curr. Opin. Struct. Biol.* 及 *Compt. Rend. Phys.* 引用。其模型已被法、美两国实验小组用于分析实验数据 (*PRL* 89 (2002) 248 102)。多次被邀在国际会议上做综述报告,如 2001 年在墨西哥举行的第 21 届国际 IUPAP 统计物理大会做 30 分钟大会报告,2002 年在印度 Raman 研究所举行的液晶与其它软物质国际会议上做 30 分钟邀请报告。主要完成人周海军博士论文被评为 2002 年全国百篇优秀博士论文,欧阳钟灿被选为 2003 年 1 月在美国创刊的《国际液晶电子杂志》([www.e-ic.org](http://www.e-ic.org)) 的编委,并被邀请将在 2004 年由 American Scientific 出版的《计算纳米技术手册》写一章综述“DNA 分子的理论及计算处理”,该书是《纳米技术百科全书》的第一部。

### 星系形成的高精度数值模拟

完成单位:上海天文台

主要完成人:景益鹏等

近两年来,以景益鹏研究员为首的研究小组在宇宙学模型和星系形成的高精度数值模拟领域取得了一系列引起国际广泛重视的创新性研究成果。

该小组利用在上海天文台建立的高级计算系统,对原有的星系形成 N 体模拟程序进行了优化,提出了一种新的平行计算配分方法,有效解决了该类模拟程序所普遍遇到的负载平衡问题,成功地在

宇宙学意义的体积(106立方兆秒差距)内克服了“过度并合”(overmerging)的困难,并完成了一组粒子数为5 123的高质量宇宙学N体数值模拟样本,其质量甚至超过由Simon White等著名科学家领导、英、德和加拿大等国家资深研究人员组成的Virgo Consortium国际数值模拟小组的工作,成为迄今为止国际上质量最好、样本最全的宇宙学N体模拟样本。

该小组进一步利用这一数值模拟结果在暗物质和星系物理领域开展了一系列国际一流的研究工作。

他们在国际上首次提出了描述暗晕内部物质分布的三轴椭球密度分布模型,该模型对引力透镜效应、星系团的S-Z效应、星系团的X射线分布,以及暗物质分布等宇宙学热门课题都将具有重要的应用价值。论文投稿到国际著名的*ApJ*后,立即得到国际同行的热切关注。*ApJ*的审稿人对该工作做出了高度评价;发表在*Physics Reports*的有关暗物质晕模型的综述性文章“Cooray & Sheth 2002”,也以很大的篇幅强调了景益鹏等提出的三轴椭球密度分布模型的重要性,并提出:“以前的晕模型有待

改进,其中,首要的工作是引入晕的非球对称性……而最近,Jing and Suto (2002)的工作使得引入非球对称性成为可能了。”

他们还从数值模拟出发,对星系形状取向的内禀关联性进行了深入研究,严格修正了数值计算精度对暗晕的取向相关性的影响,并得到了暗晕取向相关函数公式(Jing 2002)。研究表明,星系之间的内禀取向相关性很可能在弱引力透镜的观测实验中有相当显著的效应,所以必须在观测暗物质分布时加以考虑。论文于2002年6月投稿后,立即引起国际同行的普遍关注,Heynams & Heavens(2002)的文中直接采用了这一暗晕取向公式,并将其称为“景取向模型”(Jing intrinsic alignment model),文中大量篇幅的讨论都是基于景益鹏的理论工作。

此外,国际著名的Sloan巡天小组已把这组模拟数据用于产生模拟星系表,研究星系的分布。中国科技大学的研究小组也在利用其中的几个模拟样本,为大科学工程“Lamost”项目的科学研究做准备。

(相关图片请见彩插一)