

表面科学中的单分子研究*

万立骏¹⁾ 王琛 白春礼

(中国科学院化学研究所 北京 100080)

摘要 简要介绍了表面科学中单分子研究的主要技术手段、研究现状及其发展趋势,特别介绍了扫描隧道显微术(scanning tunneling microscopy, STM)在此研究领域的重要作用以及所获成果等.内容涉及 STM 技术的特点、材料的表面结构、表面吸附分子的观察、基底对吸附分子成像的影响以及分子操纵和分子器件的构筑等.

关键词 表面科学,单分子研究,扫描隧道显微术(STM),纳米科学

SINGLE MOLECULES IN SURFACE SCIENCE

WAN Li-Jun WANG Chen BAI Chun-Li

(Institute of Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract The study of single molecules in surface science is reviewed including the main techniques, latest results and future topics. The application of scanning tunneling microscopy in these studies is reported in detail.

Key words surface science, single molecule study, scanning tunneling microscopy(STM), Nano-science

1 引言

19 世纪初,英国科学家道尔顿在前人研究的基础上,把古代原子假说发展为科学的原子理论.这一理论的建立,使人类对物质的认识产生了质的飞跃.原子是保持原物质性质的最小微粒,各种原子依据一定的方式,通过化学键连接构成分子.分子是物质化学反应中的最小单位.现今已知,自然界中稳定存在的元素有 100 余种,这些元素构成了我们周围色彩斑斓、气象万千的物质世界.不同物质具有不同性质,其根源在于组成该物质的原子种类和由原子构成的分子的不同.

探索微观世界的奥秘,揭示不同物质的原子分子结构,直接看到原子或分子是最理想的途径.为实现这一梦想,进而操纵、加工单个的原子或分子,几百年来,从简单的光学显微方法到电子显微方法,从谱学方法到衍射方法,从倒空间到实空间,科学家们一直进行着不懈的努力,取得了丰硕的成果.这些研究成果,极大地丰富了原子分子理论,推动了这一科学的发展.尤其随着现代科学技术的进步,在人们愈发认识到认清单个原子或分子性质的重要性的同时,接近原子级分辨率的现代分析手段也不断出现.近年来,作为这种主观努力与客观发展的产物,一门

新的科学——单分子科学便应运而生^[1].单分子科学是以单个分子为研究对象,研究单个分子的物理、化学行为,分子间的相互作用、转化,以及进行单个分子的操纵、加工等的一门科学(这里所说的单分子实际上也包括单个原子,为叙述方便起见,以下统称为单分子).这一科学的诞生必将极大地推进现代科学的发展,人们往日的科学幻想与梦想有望变成现实.

单分子科学研究的重要工具现在首推为扫描隧道显微术.1982 年,国际商业机器公司(IBM)瑞士苏黎世实验室的两位科学家 G. Binnig 和 H. Rohrer 共同研制成功了世界第一台新型的表面分析仪器,此仪器及与其相关的技术称之为扫描隧道显微术(scanning tunneling microscopy,以下简称 STM)^[2].它的出现,使人类第一次能够在三维实空间下观察单个原子在物质表面的排列状态和与表面电子行为有关的物理、化学性质.在表面科学、材料科学、生命科学等研究领域中立即引人注目,被国际科学界公认为 80 年代世界十大科技成就之一,为表彰 STM 发明者们对人类科学研究作出的杰出贡献,1986 年 Binnig 和 Rohrer 荣获诺贝尔物理学奖.

* 中国科学院“百人计划”A 类基金资助项目
2000-03-31 收到初稿,2000-06-05 修回

1) E-mail: ljun-wan@yahoo.com

与其他显微仪器相比,STM具有高分辨率,能够获得表面三维图像,可工作在大气、真空、溶液环境下,工作温度可以改变,以及配合其他分析技术,可以获得有关表面电子结构及成分信息等特点^[3]。因此,STM自然成为研究单原子分子的理想技术。时至今日,STM对单分子科学的研究已是功勋卓著。可以毫不夸张地说,STM的出现促进了单分子科学研究的快速发展。STM的工作原理是基于量子力学的隧道效应^[3]。简单说来,它是将原子尺度的探针和被研究物质表面(即样品,通常为导体或半导体)作为两个电极,当探针与样品之间的距离非常接近时(通常小于1nm),在外加电场的作用下,电子会穿过两个电极之间的绝缘层从一极流向另一极,产生隧道电流。将其隧道电流检出,经过一系列的信息处理变换,样品的表面形貌将显示在计算机的荧光屏上。样品表面的电子结构不同,其反映出来的表面特征亦不同。自STM技术问世以来,科学家们已经成功地观察并研究了许金金属以及半导体的表面结构,例如,直接证实了研究多年而未获答案的Si(111)-(7×7)的表面重构结构(7×7)菱形单胞网格中12个Si原子清晰可辨^[3]。事实已经证明,STM是进行单分子科学研究的重要工具,也是现今已知的几个为数不多的最好研究手段之一。它不仅可以进行表面原子,还可以进行原子操作,进而实现人们对分子进行操纵的梦想。这一研究手段现在得到了极其广泛的应用。当然,仅仅一项技术都有其局限性,对STM来说也是如此。首先,它不能工作在绝缘体表面。其次,现今对STM的成像理论,尤其对分子的成像理论有不同解释。因其图像反映的是电子结构或者说是电子云的密度,所以成像的结果,究竟产生于原子或分子的何种电子轨道,以及分子与基底间的相互作用等细节尚有待于进一步揭示。即便如此,STM仍是目前不可替代的强有力的单分子研究工具。有理由相信,随着科学技术的发展,一些现今未知的现象,将会逐渐得到阐明,以更加充分地发挥STM的威力。

用STM进行单分子研究,在具体实验操作时,一是要获取原子级平整的基体表面,二是要制备原子级尖锐的探针。目前,各种技术已能够解决这些问题。用于物理研究时,STM要工作在真空或大气中,被研究的分子要被蒸附在基体表面,或者将溶液滴注在基体表面,待蒸发干燥后再进行观察研究;用于化学研究时,STM可以工作在溶液中,有关细节可参阅文献[4,5]。

在这篇文章中,将简要介绍目前物理研究领域的表面科学中单分子研究的现状及发展趋势等内容。

2 单分子的观察

单分子科学的研究是从单个原子分子的观察开始的。初期的大量研究工作主要集中在金属或半导体表面的观察上。因为这些金属或半导体往往被用作表面科学研究的对象或吸附物质的基体,所以,弄清楚其表面结构尤其重要。这种用STM进行的表面观察可以直接回答许多科学家们一直关心的问题。例如,从理论上讲,金属或半导体的表面结构可以根据其晶体结构推断,但实际上表面的结构有时变得非常复杂,许多金属表面为了达到能量最低状态以保持稳定存在,往往发生重构。对重构的研究无论从理论研究还是从实际应用上都有着极其重要的意义。

图1是一幅Pt(111)表面的STM图像。由图可见,Pt(111)表面处于原子级清洁状态,无任何杂质及污染存在,晶体表面平坦无波浪状起伏。图中的每一个亮点对应着一个Pt原子。原子间距离均一,间距约在0.28nm左右,与Pt(111)晶体结构吻合,同时原子列以60°或120°相交,体现了(111)面的晶体对称特点,由此可以断定Pt(111)的表面上具有(1×1)结构,无重构发生。与Pt(111)表面不同,STM观察发现Au(111)表面有重构现象。发生表面重构的Au(111)晶体,虽然表面仍然清洁无杂质原子存



图1 Pt(111)表面原子的STM图像

在,但表面形貌明显不同于 $P(111)$,表面呈规则的波浪状起伏.这是由于产生重构的表面 Au 原子,位置偏离平衡位置,因而产生高低起伏.这些成果为进一步研究材料表面的能量状态及其与吸附物质的位向关系等奠定了坚实的基础.

由于吸附而引起的表面重构也被 STM 观察并陆续证实(例如,由于氧的吸附, $Cu(110)$ 所发生的从 (2×1) 到 (6×1) 的一系列重构^[6]),从而使原来的 X 射线衍射及理论计算等结果得到直接证实.

晶体中的分子排列研究,是单分子科学的又一个重要组成部分,STM 在此研究中也发挥了重要作用.一个典型的应用范例是用 STM 观察 TCNQ-TTF 有机晶体的分子结构^[7].TCNQ-TTF 是一种结构比较复杂的有机导电化合物,受到理论研究和实际应用的多方重视.用 STM 在大气中观察了 TCNQ-TTF 晶体表面,其高分辨 STM 像如图 2(a)所示,晶体表面呈规则的周期性排列,其单胞尺寸为 $0.4nm \times 1.2nm$,与该晶体的晶体结构一致.用量子化学的扩展休杰尔分子轨道方法计算得到了该晶体的理论图像,如图 2(b)所示.对比图 2(a)和 2(b)可以发现,计算结果与观察结果十分类似,图中的箭头所示为一 TCNQ 分子,其间为 TTF 分子.此结果证实了晶体中 TCNQ 与 TTF 分子的排列结构,对进一步研究该化合物的性质与电子传递提供了直接实验数据.

单层有机分子膜中的分子观察,对研究分子与分子之间的相互作用,分子之间的键接关系,以及分子器件的设计等等,都具有重要意义.选用热裂解石墨(HOPG)作为基底,在其上形成 Cu 酞菁分子的单分子膜,用 STM 观察到了膜中每个分子的精细结构^[8].图 3(a)和 3(b)分别是带有烷烃链的 Cu 酞菁分子的结构示意图和 STM 图像.烷烃链的加入使 Cu 酞菁分子形成稳定的有序的单分子膜.从 STM 图



图 2

- (a) TCNQ-TTF 晶体表面的 STM 图像;
- (b) TCNQ-TTF 晶体表面的理论计算图像

像可以看出每个分子的细节,酞菁与烷烃链等清晰可辨.据此,研究了分子膜的微观结构及分子间的相互作用等基本物理化学问题.STM 观察的结果与计算模拟结果十分吻合.这一结果表明,选定合适的烷烃链,可以稳定平面有机分子在表面的吸附,这种方法也是获得二维有序分子膜进而进行分子器件设计的又一途径.



图 3

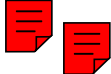
- (a) Cu 酞菁的分子结构示意图;
- (b) Cu 酞菁的分子结构的 STM 图像

3 吸附分子的结构及其与基底的关系

虽然最理想的单分子研究是将分子悬浮起来,而不依附于任何基体,以排除基体的影响,但是目前尚无有效手段可以观察这种状态的分子,现今的单分子研究大多是将研究的分子吸附(或“固定”)在一定的基体表面.在表面科学研究中,吸附物与基体的键接位置,影响吸附能量的变化,是研究的热点,又是表面科学的基本问题之一.吸附在一定基底表面的分子,尽管由于其热运动本身也在不断地变化位置,但 STM 可以跟踪这种变化,而不影响分子观

察. STM 问世以来,这方面的研究已有不少成果^[9,10].

苯分子是人们熟悉的有机分子.近代物理方法证明,苯分子的6个碳原子和6个氢原子都在同一平面上,其中6个碳原子单双键相间联接成平面六边形.直接看到苯分子的结构一直是科学家们的愿望.1993年,美国科学家 Weiss 等人在超低温下用 STM 观察了单个苯分子在 Pt(111)上的吸附,并研究了苯分子的形貌与基底 Pt(111)面上不同位置的关系^[9].图4是他们的研究结果.他们发现,由于吸附能量的影响,苯分子的 STM 图像与基体位置有关.当苯分子吸附在 Pt(111)的3次对称(three-fold)位置时,即分子中心位于三个 Pt 原子的中心空洞处,分子呈现出三个亮点,如图4(a)所示.这三个亮点以对称的三角形排列.进一步研究表明,这三个亮点恰好是苯分子中的碳键所在,而这三个碳键均处于 Pt 原子的2次对称(two-fold)位置,即位于 Pt 原子之上的碳键起伏高度低于位于 Pt-Pt 原子之间的起伏高度,因而造成了连续的三个亮点.当苯分子吸附在 Pt 原子的原子顶部位置时,分子呈一均匀的圆环,如图4(b)所示.而当分子吸附在两个 Pt



原子之间,即2次对称位置时,其 STM 图像如图4(c)所示,呈一均匀隆起的山包状.近来的高分辨 STM 图像又进一步揭示,当苯分子吸附在2次对称位置时,分子呈一亚铃形状.上述研究揭示了分子吸附与基底之间的关系,也为研究分子之间的相互作用奠定了基础.

研究发现,在超高真空和室温下,苯分子吸附在 Rh(111)表面时,并不形成有序的结构,但当苯分子与 CO 分子同时吸附时,才能形成长程有序的 $C_6H_6 + CO$ 吸附层,其 STM 图像如图5所示^[11].苯分子呈三次对称整齐排列在 Rh(111)表面,其间有 CO 的吸附.每个苯分子呈一组由三个亮点组成的集团,其形状与图4(a)的 STM 图像非常相似,因此,图5中的每个苯分子是吸附在 Rh(111)表面的3次对称位置,苯分子形成 (3×3) 结构.在苯分子的中间,有 CO 分子的共吸附.这一研究证实(1)在室温条件下,有机分子可以被成像,且不会因为针尖的扫描而损伤分子或破坏吸附层,即使吸附层由两种分子构成,也同样可以被清晰成像(2)一个稳定有序分子吸附层的形成,既取决于分子与基底间的相互作用,又与分子间甚至是不同分子间的相互作用有关.在超高真空状态下苯分子与 CO 分子的共吸附,才能形成 (3×3) 的有序结构.

同种分子在(111)表面,因吸附于基底的位置不同而有不同的 STM 图像.同种分子在不同基底表面的吸附也会产生不同的 STM 图像.这是因为



图4 苯分子的 STM 图像与 Pt(111)基底原子位置的关系

图5 Rh(111)上 $C_6H_6 + CO$ 吸附层的 STM 图像

STM 图像的形状受分子与基底表面相互作用的影响。图 6 是其中的两个例证: Cu-TBPP 分子在 Cu(100)表面和 Ag(110)表面的 STM 成像^[12]。Cu-TBPP 分子为了减少其与基底之间的相互作用能, 将调整吸附位置, 以使分子本身尽量吸附于基底晶格的相同位置。这种调整产生了图 6 的结果。电子散射量子化学计算与 STM 图像一致。这一结果也为识别单分子层中的不同种类分子提供了实验依据。



图 6 Cu-TBPP 分子在 Cu(100)面上[(a)和(b)]、Ag(110)面上[(c)和(d)]的 STM 图像与示意图

4 分子操纵与分子器件的构筑

近年来, 人们在用 STM 成功地进行了分子的实空间观察之后, 在利用 STM 进行人工操纵单个原子、分子, 进而制造分子器件, 构筑纳米级表面结构方面也取得了很大进展。如前所述, STM 在工作时, 是利用针尖与样品间的隧道电流进行成像的。针尖与样品间总是存在着一定的作用力。该作用力由范德瓦耳斯力和静电力两部分组成。调节针尖与样品之间的位置及所加偏压, 可以改变这一作用力的大小和方向。沿着样品表面移动单个原子所需的力值远小于使原子离开样品表面所需的力, 因此, 通过调节针尖的位置或偏压就有可能使吸附在表面上的原子或分子产生移动, 并按人们的意志进行操纵, 进行新的排列组合。同时, 调节这一作用力的大小, 例

如施加一瞬间高电压脉冲(1—10V)于针尖之上, 可以引发局部高场强、高电流的产生, 从而造成针尖部位以及与之相关的基体部位发生结构甚至成分变化, 实现对表面原子的“拔出”或局部操作等的纳米加工。

人工操纵原子的一个著名例子是移动氙(Xe)原子^[13], 由美国的两位科学家 Eigler 和 Schweizer 完成了这项极有创造性的工作。此结果于 1990 年在英国的《自然》杂志上发表。他们所研究的体系为吸附在金属 Ni(110)面上的 Xe 原子。选择了 Ni(110)面的原因是由于该面的表面势起伏适宜, Xe 原子易于在表面移动, 而不至于脱离 Ni(110)表面。实验是在超高真空和低温环境(4K)下进行的。这样可以确保残余气体在表面产生的吸附污染足够小, 从而可以使实验长时间进行。他们首先释放一定量的 Xe 气进入超高真空室, 使 Xe 原子吸附在 Ni(110)表面, 这时的 Xe 原子是杂乱无序地存在于 Ni(110)表面。然后, 通过改变隧道电流(1—6 × 10⁻⁸A), 成功地移动了吸附在 Ni 表面上的单个 Xe 原子。在此基础上, 他们在世界上首次用 35 个单个 Xe 原子成功地排列出了 IBM 这三个英文字母组成的图案。

在室温下进行分子操纵比在超低温下操纵的难度要大很多, 这是因为室温下分子存在着热漂移及由此造成的不稳定性。例如在室温的超高真空环境下, Cu-Phth 分子很难被操纵。为了实现室温下的分子操纵, 科学家们巧妙地将此分子进行改造, 合成了 Cu-TBP-Porphyrin 分子, 从而达到了室温下操纵分子的目的^[14]。图 7(a)(b)分别是用 STM 针尖对 Cu-TBP-Porphyrin(Cu-TBPP)分子在 Cu(100)表面进行操作前和后的 STM 图像。这一分子与 Cu-Phth 的明显不同之处在于它多出了四对 DTP 脚, 这四对脚, 增加了分子在室温下的稳定性及可操纵性。科学家们将这些分子吸附在 Cu(100)的表面, 改变针尖距离及隧道电流, 成功地将杂乱无序的分子随意移动, 并排列出设计中的圆环形图案。

在室温下对单个原子进行 STM 操纵, 由于其不稳定性, 比上述的大尺寸 Cu-TBPP 分子操纵更为困难。但是, 最近在超高真空环境和室温下, 科学家们将吸附在 Cu(100)表面的溴(Br)原子作为移动对象, 通过改变隧道电流, 使原子操纵获得成功^[15]。现在, 科学家们不仅对吸附物的操纵获得成功, 而且对材料本体表面的原子(尤其是半导体材料)也能进行操纵^[16]。现代科学技术实现了人们由来已久的梦想。



图 8 双探针 STM 示意图

基于 STM 的基本原理,现在还发展起来了一系列扫描探针显微技术^[19],如原子力显微术(AFM)、磁力显微术(MFM)、弹道电子发射显微术(BEEM)、光子扫描隧道显微术(PSTM)、扫描近场光学显微术(SNOM)、扫描电化学显微术(SECM)等等.这些显微技术各有特色,互相补充,利用探针与样品的不同相互作用,来探测表面或界面在纳米尺度上表现出来的物理和化学性质,从实验技术到理论研究,推动了单分子科学研究的发展.目前,科学家们正在以下几个方面继续努力:(1)从理论上深入研究单个分子之间、分子与基底之间以及不同分子之间的相互作用、键接关系、反应顺序等;(2)识别原子分子的种类以及分子中的不同基团;(3)精确控制原子或分子的排列,得到稳定可用的分子器件;(4)研究高效可行的操纵原子分子的方法;(5)对分子进行任意剪裁和重新组装,实现对单个分子的人为的分解与合成.总之,单分子科学研究向我们展示了充满魅力的未来和十分广阔的发展前景,以此为基础,人们将真正有可能进入建立在单个原子分子之上的微观世界.



图 7 用 STM 针尖对 Cu-TBPP 分子进行操作前(a)和操作后(b)的 STM 图像

在原子及分子操纵基础之上,科学家们从理论和实用两方面在纳米尺度的表面加工以及构筑纳米结构方面均取得了不小的进步^[17].例如,理论方面,如上所述,在表面吸附结构,吸附分子与分子,分子与基底之间相互作用等的研究上取得了进展;在实用方面,分子开关、分子马达、纳米晶体、单根 DNA 分子的剪切以及单根纳米碳管的剪切,则是成功的范例.

对构筑或操纵后的原子分子进行性能测试,是科学家们在单分子科学研究方面的又一贡献.这一工作是利用具有双探针的 STM 来完成的.图 8 是一双探针的 STM 示意图.两根探针可以独立工作或同时协调动作.这种机构既加大了表面加工的效率,又能对其表面构筑的纳米结构,甚至分子之间的机械、力学、电力等性能进行测试.例如,将两探针分别置于分子导线的两端,可以测量该导线的电阻、电导率以及力学性能等.将两探针分别置于两分子之上,则可测量两分子之间的相互作用.现在,科学家已经研制成功了三探针以上的多探针 STM,用于表面原子分子操纵、纳米加工以及有关性能测试等^[18].这些实验的成功,进一步发挥了 STM 的威力,也进一步推进了单分子科学的研究.

参 考 文 献

- [1] Science 2000 283 :1667—1695
- [2] Biannig G ,Rohrer H ,Gerber Ch *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1982 , 49 :57
- [3] 白春礼.扫描隧道显微术及其应用.上海:上海科学技术出版社,1994. 9—34 [BAI Chun-Li. Scanning Tunneling Microscopy and Its Application. Shanghai :Shanghai Scientific and Technical Publishers ,1994. 9—34(in Chinese)]
- [4] Itaya K. Prog. Surf. Sci. ,1998 58 :121
- [5] Wan L J ,Shundo S ,Inukai J *et al.* Langmuir 2000 ,16 :2164
- [6] Besenbacher F ,Norskov J K. Prog. Surf. Sci. ,1993 44 :5
- [7] Sleator T ,Tycko R. Phys. Rev. Lett. ,1988 60 :1418
- [8] Qiu X H ,Wang C ,Yin S X *et al.* J. Phys. Chem. B ,2000 , 104 :3570
- [9] Weiss P S ,Eigler D M. Phys. Rev. Lett. ,1993 71 :3139
- [10] Hou J G ,Yang J L ,Wang H Q *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1999 , 83 :3001

- [11] Ohtani H ,Wilson R J ,Chiang S *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1988 ,
60 2398
- [12] Jung T A ,Schlittler R R ,Gimzewski J K. Nature ,1997 ,386 :
696
- [13] Eigler D M ,Schweizer E K. Nature ,1990 ,344 524
- [14] Jung T A ,Schlittler R R ,Gimzewski J K *et al.* Science ,1996 ,
271 :181
- [15] Fishlock T W ,Oral A ,Egdell R G *et al.* Nature ,2000 ,404 :
743
- [16] 杨威生 ,盖峥. 物理 ,1996 ,25 :513[YANG Wei-Sheng ,GE
Zheng. Wu(Physics) ,1996 ,25 :513(in Chinese)]
- [17] Gimzewski J K ,Joachim C. Science ,1999 ,283 :1683
- [18] Aono M ,Jiang C S ,Nagayama T *et al.* Surf. Sci.(Japanese) ,
1998 ,19 698
- [19] 白春礼. 原子和分子的观察与操纵. 长沙 湖南教育出版社 ,
1996. 119—138[BAI Chun-Li. Observation and Manipulation
of Atoms and Molecules. Changsha :Hunan Educational Press ,
1996. 119—138(in Chinese)]



作者简介

万立骏,男,辽宁省大连人。1982年1月毕业于大连理工大学。1996年于日本东北大学获博士学位,后工作于日本。曾任日本科学技术振兴事业团(ERATO/JST)研究员、主任研究员,日本东北大学及北海道大学助理教授、客座教授等。1999年入选中国科学院“百人计划”后回国,现任中国科学院化学研究所研究员,博士生导师,中国科学院纳米科技青年实验室副主任。长期从事固液界面超微结构、性能及纳米化学的研究。系统参加过新一代电化学SPM技术的研制,取得了一批世界领先水平的成果。获日本科学技术发明专利两项,日本科学技术振兴事业团重大成果三项,发表论文80多篇。目前正从事固液界面结构以及单分子物理化学方面的研究。

评述文章扫描

- 1 **A top ten for science and society**(Robert P Crease. Phys. World 2000 ,No. 11)
- 2 **Rock blasts in from the past**(Sara Russell. Phys. World 2000 ,No. 11)
- 3 **The many states of americium**(Börje Johansson. Phys. World 2000 ,No. 11)
- 4 **Tin clusters foil high temperatures** (Hellmut Haberland. Phys. World 2000 ,No. 11)
- 5 **Electron waves under the microscope** (Andry Geim. Phys. World 2000 ,No. 11)
- 6 **Max Planck :the reluctant revolutionary**(Helge Kragh. Phys. World 2000 ,No. 11)
- 7 **CERN split over collider closure** (Edwin Cartlidge. Phys. World 2000 ,No. 11)
- 8 **Quantum mechanics with single atoms and photons**(Gerhard Rempe. Phys. World 2000 ,No. 11)
- 9 **The statistical theory of quantum dots** (Y. Alhassid. Rev. Mod. Phys. 2000 ,72 :895)
- 10 **Pairing symmetry in cuprate superconductors**(C. C. Tsuei ,J. R. Kirtley. Rev. Mod. Phys. ,2000 ,
72 :969)
- 11 **Nematic liquid crystals as a new challenge for radiative transfer** (Bart van Tiggelen ,Holger Stark. Rev. Mod. Phys. 2000 ,72 :1017)
- 12 **Real-space mesh techniques in density-functional theory**(Thomas L. Beck. Rev. Mod. Phys. ,2000 ,
72 :1041)
- 13 **Geodynamo theory and simulations** (Paul H. Roberts ,Gary A. Glatzmaier. Rev. Mod. Phys. ,
2000 ,72 :1081)
- 14 **Review of speculative “ disaster scenarios ” at RHIC**(R. L. Jaffe ,W. Busza ,F. Wiczek ,J. Sandweiss. Rev. Mod. Phys. 2000 ,72 :1125)
- 15 **Why the universe is just so**(Craig J. Hogan. Rev. Mod. Phys. 2000 ,72 :1149)
- 16 **Studying the top quark**(S. Willenbrock. Rev. Mod. Phys. 2000 ,72 :1141)