

设计合成分子性铁磁体的亚铁磁方法¹⁾

——一维 $Mn^{II}-Cu^{II}$ 双金属链状配合物

廖明明 廖代正 王耕霖

(南开大学化学系,天津 300071)

摘要 分子性铁磁体的设计及合成是自然界向物理学家化学家的挑战,一维 $Mn^{II}-Cu^{II}$ 双金属链是用于组装分子性铁磁体的一类重要元件。本文论述一维双金属链的磁行为以及用此元件设计分子性铁磁体的一般原则,最后介绍一维 $Mn^{II}-Cu^{II}$ 双金属链体系的最新研究进展。

关键词 一维双金属链, $Mn^{II}-Cu^{II}$, 分子性铁磁体

Abstract The design and synthesis of molecular-based ferromagnets is a natural challenge to chemists. One-dimensional $Mn^{II}-Cu^{II}$ bimetallic chains are one of the important compounds that may be assembled into molecular-based ferromagnets. We discuss their magnetic behavior, the general principles of designing and synthesizing molecular-based ferromagnets from them and recent research developments of these systems.

Key words one-dimensional bimetallic chain, $Mn^{(II)}-Cu^{(II)}$, molecular-based ferromagnets

1 前言

自从1986年前苏联科学家 Ovichinnikov^[1]、美国科学家 Torrance^[2]以及 Miller^[3]等人几乎同时报道了几种具有铁磁性的分子化合物以来,对分子性铁磁体的研究有了迅速的发展。尤其是近几年,分子性铁磁体的设计及合成已经成为当今物理学界和化学界的热门前沿课题。国际上已经举行了多次跨学科的专题学术讨论会议。如1989年在美国召开了“Ferromagnetic and High Spin Molecular Based Material”(铁磁性的高自旋分子基材料)会议;1990年在意大利召开了“Magnetic Molecular Materials”(磁分子材料)会议;1991年在美国召开了“Electron, Optical and Magnetic Properties of Organic Solid State Materials”(有

机固态材料的电子、光学和磁学性质)会议;1992年在日本召开了“Chemistry and Physics of Molecular Based Magnetic Materials”(分子基磁性材料的化学及物理)会议。象这种每年对同一专题召开一次国际性会议,在物理及化学史上尚属罕见。

所谓分子性铁磁体是指使用制备分子化合物的方法来合成出具有铁磁性的化合物,使其在临界温度 T_c 下具有自发磁化强度。这一结构和合成方法上的特点使我们有可能通过选择适当分子的自组装来获得具有特殊电性、磁性和光学性质的分子性铁磁体。目前,设计及组装分子性铁磁体主要有三种途径^[4-6]。

1) 有机途径: 未成对电子完全来自于 P

1) 国家自然科学基金重点资助项目。

1994年10月10日收到初稿,1994年11月21日收到修改稿。

原子轨道。如 β 相的对硝基苯氮氧自由基, $T_c = 0.6\text{K}$ 。双氮氧自由基, $T_c = 1.48\text{K}$ 。C₆O (TDAE), T_c 约为 16K。

2) 有机-无机途径: 未成对电子分别来自于 p 原子轨道和 d 原子轨道。若金属-有机自由基分子磁单元仅通过空间发生相互作用, 则 $T_c < 8\text{K}$; 若金属与自由基形成分子链, 则 $T_c < 20\text{K}$; 若金属自旋载体与自由基连接成三维网络, T_c 可能非常高, 如 $V(\text{TCNE})_2 \cdot x\text{CH}_2\text{Cl}_2$, 虽然结构不明, 但文献报道 $T_c > 300\text{K}$ 。

3) 无机途径: 未成对电子完全来自于 d 原子轨道。若分子磁单元仅仅通过空间相互作用, 则 $T_c < 1\text{K}$; 若分子链相隔较远, $T_c < 10\text{K}$; 通过温和的热处理来缩短链间距, 可使 T_c 达到 30K。较高维数的草酸根桥联化合物, 结构至今不明, T_c 在 5—15K 范围内。

当前, 分子性铁磁体设计及合成的主要目标之一就是要提高临界温度 T_c 。若不考虑自旋载体的本性, 临界温度 T_c 的高低将完全取决于化合物铁磁性的维数。因此, 要提高 T_c 。就必须设法增加铁磁相互作用的维数。然而, 当增加化合物结构上的维数, 使之成为 T_c 。较高的铁磁三维聚合物时, 分子化学的一些特性(如可溶性、可塑性、透光性等)就有可能完全丧失, 而它的其他性质未必能超过传统的磁性材料。显然, 这种通过单纯增加化学结构维数, 从而使 T_c 增加的方法是有一定局限性的。

为了既增加化合物的铁磁性维数, 同时又保持分子特性, 法国科学家 Kahn^[7]指出分子性铁磁体的设计及合成可分为二步: (1) 分子磁工程: 合成出具有高自旋基态的分子单元或一维分子链; (2) 晶体磁工程: 将分子单元或一维分子链以铁磁相互作用的方式组装在晶体晶格上。因此, 研究具有高自旋基态体系是获得真正分子性铁磁体的第一步。近年来研究最多的具有高自旋基态的体系为一维 $\text{Mn}^{II}\text{Cu}^{II}$ 链状配合物, 本文将介绍这个专题。为此, 我们首先介绍一些相关的基本概念; 然后论述一维双金属链的磁行为以及用其设计分子性铁磁体的一般原则; 最后综述一维 $\text{Mn}^{II}\text{Cu}^{II}$ 双金属链状配

合物的最新研究成果。

2 基本概念

2.1 一维双金属链

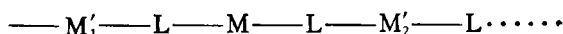
由桥联配体 L 连接着的两个不同金属离子 M 和 M', 沿着某一确定方向有规则地交错排列而形成的分子链。

2.2 交换作用系数 J

在一维双金属链中, 在一定条件下, 相邻金属间可以通过桥联配体发生交换相互作用, 其大小可用交换作用系数 J 值来描述。当 $J < 0$ 时, $\text{M} \cdots \text{M}'$ 间的相互作用是反铁磁性的; 且 J 值越负, 反铁磁相互作用越大。当 $J > 0$ 时, $\text{M} \cdots \text{M}'$ 间的相互作用是铁磁性的; 且 J 值越正, 铁磁相互作用越大。

2.3 一维双金属链的分类

一维双金属链的形式如下 ($\text{M}'_1 = \text{M}'_2, \text{L} =$ 配体):



根据链中任一顺磁离子与相邻两顺磁离子间的相互作用和间距上的异同, 一维双金属链可以分为两类:

(1) 一维有序双金属链: $\text{M}'_1 \cdots \text{M}$ 间的相互作用大小 (J 值) 和间距等于 $\text{M} \cdots \text{M}'_2$ 间的相互作用大小 (J 值) 和间距。

(2) 一维交替双金属链: $\text{M}'_1 \cdots \text{M}$ 间的相互作用大小 (J_1 值) 和间距不等于 $\text{M} \cdots \text{M}'_2$ 间的相互作用大小 (J_2 值) 和间距。

2.4 亚铁磁性

在具有自旋的二种顺磁原子或离子 (M, M') 组成的体系中, 由于 M 自旋与 M' 自旋间的反铁磁相互作用, 使其自旋分别有相反的取向, 但因两者绝对值不同而呈现出自发磁化强度。

3 一维双金属链的亚铁磁行为

1981 年, 法国科学家 Gleize 和 Verdaguer 首先用二硫代草酸根 (dto) 作为桥联配体, 合成出第一个结构上被完全表征的有序双金属链

配合物: $\text{MnCu}(\text{dto})_2(\text{H}_2\text{O})_3 \cdot 4.5\text{H}_2\text{O}$ (图 1). 其磁行为可用 $\chi_{\text{M}}T-T$ 图表示(图 2), 其中 χ_{M} 为每个 $\text{Mn}^{\text{II}}\text{Cu}^{\text{II}}$ 单元的摩尔磁化率, T 为温度. 由图可见, 在 300K 时, $\chi_{\text{M}}T = 3.90\text{cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}$; 当体系温度从室温降低时, $\chi_{\text{M}}T$ 缓慢减小; 在 130K 处出现最小值 $\chi_{\text{M}}T = 3.64\text{cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}$. 在 130K 以下, $\chi_{\text{M}}T$ 随温度进一步降低而迅速增加, 在 7.5K 处出现最大值 $\chi_{\text{M}}T = 11.3\text{cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}$. 最后, 在 7.5K 以下, $\chi_{\text{M}}T$ 迅速随温度降低而降低. 在 7.5—300K 内的磁性数据最佳拟合给出 $\text{Mn} \cdots \text{Cu}$ 间的相互作用系数 $J = -30.3\text{cm}^{-1}$, 表明为反铁磁性相互作用.

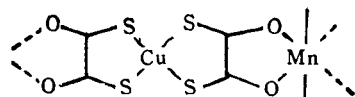


图 1 $\text{MnCu}(\text{dto})_2(\text{H}_2\text{O})_3 \cdot 4.5\text{H}_2\text{O}$

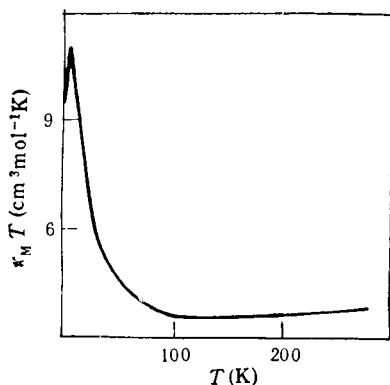


图 2 $\text{MnCu}(\text{dto})_2(\text{H}_2\text{O})_3 \cdot 4.5\text{H}_2\text{O}$ 的 $\chi_{\text{M}}T-T$ 图

为了解释一维双金属链的这种磁行为, 本文简要介绍一种定性理论处理模型, 它是由法国科学家 Kahn 等人^[9]于 1983 年提出的, 其方法要点^[10]如下:

(1) 当 $\chi_{\text{M}}T$ 向高温外延时, $\chi_{\text{M}}T$ 趋向于顺磁极限, 它是未耦合的 Mn^{II} , Cu^{II} 离子的 $\chi_{\text{M}}T$ 总和. 当温度从高温逐渐降低时, 首先布居数减小的状态是具有最高自旋多重度的状态, 结果使 $\chi_{\text{M}}T$ 随温度降低而减小.

(2) 当温度降低到某一温度时, $\chi_{\text{M}}T$ 呈现出最小值, 它对应于短程有序排列状态, 即相邻离子的自旋 Mn^{II} 和 Cu^{II} 是反平行排列, 而在相邻的 $\text{Mn}^{\text{II}}\text{Cu}^{\text{II}}$ 单元之间没有任何关联. 显然, 桥联配体传递电子效应的能力越强, 将越有利于 Mn^{II} 和 Cu^{II} 离子自旋的反平行排列, 这将导致 $\chi_{\text{M}}T$ 最小值移向高温区.

(3) 当温度进一步降低时, 在链内 $\text{Mn}^{\text{II}}-\text{Cu}^{\text{II}}$ 单元间的相互关联的长度逐渐增加, 当温度趋近于零度时, 唯一有布居的状态为基态, 表现为一维亚铁磁性. 因此, 在 $\chi_{\text{M}}T$ 最小值所对应的温度以下, $\chi_{\text{M}}T$ 将随着温度的降低而增加. 值得一提的是一维 $\text{Mn}^{\text{II}}\text{Cu}^{\text{II}}$ 亚铁磁性也可表述为自旋等于 $|S_{\text{Mn}} - S_{\text{Cu}}| = 2$ 的顺磁中心在链中发生铁磁相互作用所表现出的磁性.

(4) 在低温区, 出现最大值是由于链间反铁磁相互作用超过了链内的 $|S_{\text{Mn}} - S_{\text{Cu}}| = 2$ 自旋间的铁磁相互作用, 从而阻止了 $\chi_{\text{M}}T$ 的进一步增大. 单晶结构测定表明, 在 $\text{MnCu}(\text{dto})_2(\text{H}_2\text{O})_3 \cdot 4.5\text{H}_2\text{O}$ 中相邻链间最短的金属……金属间距是 $\text{Mn}^{\text{II}} \cdots \text{Mn}^{\text{II}}$ 和 $\text{Cu}^{\text{II}} \cdots \text{Cu}^{\text{II}}$. 若金属……金属间相互作用是反铁磁性的 (绝大多数情况如此), 自旋态结构如图 3(a) 所示. 它在晶体晶格规模上使自旋完全抵消, 呈现出三维反铁磁性排列. 在 $\chi_{\text{M}}T$ 最大值所对应的温度以下, 链间反铁磁性相互作用将随温度的降

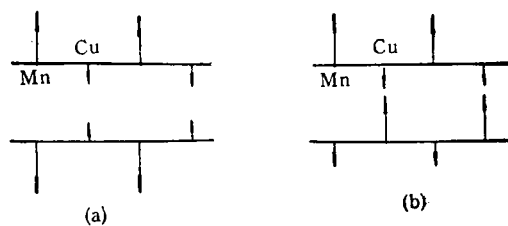


图 3 自旋态结构与磁性

低而增加. 因此, $\chi_{\text{M}}T$ 将随温度降低而迅速减小. 显然, 若能采用某种化学方法来隔离相邻的分子链, 这将减弱这种链间的反铁磁性相互作用, $\chi_{\text{M}}T$ 最大值将移向更低的温度区. 一种极限情况就是相邻链间没有相互作用, 可以

预期 $\chi_M T$ 将在绝对零度出现最大值,该体系将表现为纯粹的一维亚铁磁性。

可以设想,另一种情况是链间相互作用主要发生在 $Mn^{II} \cdots Cu^{II}$ 之间,且相互作用是反铁磁性的,其自旋态结构如图 3(b) 所示。它在晶格规模上表现为所有的同种金属离子的自旋都沿着相同的方向排列。可以预期 $\chi_M T$ 在低温区将随温度的降低而迅速增加,不会出现 $\chi_M T$ 最大值。这种体系将在某一临界温度 T_c 下呈现出一个三维铁磁性(或亚铁磁性)排列。显然,这种通过空间发生的链间相互作用将随着不同金属离子间距的缩短而增加。采用某种方法来缩短其间距,将有可能使临界温度 T_c 移向高温。

4 一维亚铁磁链的自组装——三维分子性铁磁体的设计原则

欲想由一维亚铁磁链自组装成三维分子性铁磁体,应遵循以下四个原则:

(1) 构成一维 MM' 亚铁磁链的顺磁离子的自旋应不相等,即 $S_M \neq S_{M'}$,且 $|S_M - S_{M'}|$ 的差值越大越好,以确保有大的净自旋。

(2) 联接 M, M' 两顺磁金属离子的桥联配体应具有有效传递电子效应的能力,以便确保 M', M' 间有强的反铁磁相互作用,使 $\chi_M T$ 最小值尽量移向高温区。

(3) 链间相互作用应是不同种金属离子间的反铁磁相互作用占主导地位,以便使体系呈现出三维铁磁性。

(4) 链间不同种金属离子间的反铁磁性相互作用应尽量地大,即链间不同种金属离子间的间距应尽量地短,以便获得较高的临界温度 T_c 。

其中前两条设计原则属于分子磁工程,后两条属于晶体磁工程。目前,在分子磁工程方面,尽管难度很大,仍取得了显著的进展,然而,在晶体磁工程方面,人们还无法控制晶体晶格中分子的堆砌方式,解决这一难题的方法还处在探索阶段中。因此说:“若分子磁工程的设计

及合成难度是巨大的话,晶体磁工程的设计及合成就是自然界对化学家的挑战”。^[11]

尽管如此,科学家们根据上述原则合成出了一系列一维亚铁磁双金属链。其中报道最多的是以草酰氨根类配体桥联的 $Mn^{II} \cdots Cu^{II}$ 一维双金属链。这是因为草酰氨根类能有效地传递电子效应^[12]、 $|S_{Mn} - S_{Cu}|$ 差值大的缘故。

5 一维 $Mn^{II}-Cu^{II}$ 双金属链的研究近况

根据上述设计原则,Kahn 等人于 1986 年以来,用以下两类含 $Cu(II)$ 阴离子断片(图 4)与 $Mn(II)$ 离子反应,合成了一系列 $Mn^{II}-Cu^{II}$ 一维双金属链。前者给出一维有序 $Mn^{II}-Cu^{II}$ 双金属链,后者导致一维交替 $Mn^{II}-Cu^{II}$ 双金属链。其中最有趣的是 1986 年 Kahn 等人首次报道了以 1,3-亚丙基双(草氨酸根)类作为桥联配体的一维 $Mn^{II}-Cu^{II}$ 金属链: $MnCu(pba)(H_2O)_3 \cdot 2H_2O$ ^[13] (图 5)。

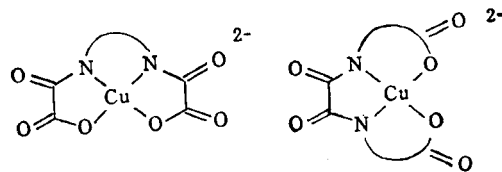


图 4 含 $Cu(II)$ 阴离子断片

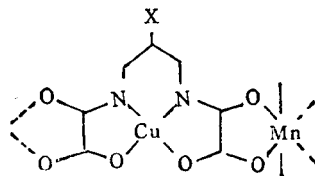


图 5 $X = H, MnCu(Pba)(H_2O)_3 \cdot 2H_2O; X = OH, MnCu(PbaOH) \cdot 3H_2O$

在 $\chi_M T-T$ 图中,在 115K 附近, $\chi_M T$ 有一最小值;低于 115K, $\chi_M T$ 随温度增加而增大;在 2.5K 处达到最大值,表明为反铁磁体。4.2K 以上的磁性数据拟合给出 $J = -23.4 cm^{-1}$ ^[14]。

同年, Kahn 等人用 $pbaOH$ 代替 pba 合成了另一个 $Mn^{II}Cu^{II}$ 金属链: $MnCu(pbaOH) \cdot 3H_2O$ ^[15]。在 60K 以上, $MnCu(pbaOH) \cdot$

表1 一维 Mn^{II}-Cu^{II} 双金属链状配合物^{*1}

| 分类 | 年代 | 配合物 | J 值或 T _c | 文献 |
|----------------------|------|--|---|---------|
| 一维有序链 | 1981 | MnCu(dto) ₂ (H ₂ O) ₃ · 4.5H ₂ O | J = -30.3cm ⁻¹ | [8] |
| | 1986 | MnCu(pba)(H ₂ O) ₃ · 2H ₂ O | J = -23.4cm ⁻¹ | [13,14] |
| | | MnCu(pbaOH) · 3H ₂ O | T _c = 4.6K | [15] |
| | 1991 | MnCu(pbaOH) · 2H ₂ O | T _c = 30K | [16] |
| | 1993 | MnCu(opba)(DMSO) ₃ | J = -31.3cm ⁻¹ | [6] |
| MnCu(opba) · 0.7DMSO | | T _c = 6.5K | | |
| 一 ^{*2} 维交替链 | 1988 | MnCu(obp)(H ₂ O) ₃ · H ₂ O | J ₁ = -32.0cm ⁻¹ J ₂ = -6.8cm ⁻² | [17] |
| | 1989 | MnCu(obbz) · 5H ₂ O | J ₁ = -29cm ⁻¹ J ₂ = -5cm ⁻¹ | [18,19] |
| | | MnCu(obbz) · H ₂ O | T _c = 14K | |
| | 1993 | MnCu(obbz)(H ₂ O) ₃ · DMF | J ₁ = -14cm ⁻¹ J ₂ = -1.7cm ⁻¹ | [20] |

*1 其中 dto = 二硫代草酸根, pba = 1, 3-亚丙基双(草氨酸根), pbaOH = 2-羟基-1, 3-亚丙基双(草氨酸根), opba = 邻苯基双(草氨酸根), DMSO = 二甲亚砜, obp = 草酰胺基双(丙酸根), obbz = 草酰胺基双(邻苯甲酸根), DMF = 二甲基甲酰胺。

*2 J₁ 为草氨酸根桥联的 Mn^{II}...Cu^{II} 相互作用系数, J₂ 为羧酸根桥联的 Mn^{II}...Cu^{II} 相互作用系数。

3H₂O 与 MnCu(pba)(H₂O)₃ · 2H₂O 的磁行为完全一样;但在 60K 以下, MnCu(pbaOH) · 3H₂O 的 $\chi_M T$ 增加的程度更大,在 4.2K 处达到特别高的值。在极低磁场($H = 3.0 \times 10^{-6} T$)中的磁化强度研究表明该化合物在 4.6K 处出现铁磁性有序排列。MnCu(pbaOH) · 3H₂O 被认为是第一个 Mn^{II}Cu^{II} 分子铁磁体。

上述两个类似化合物在磁性上的差异与两个分子链在晶格上的堆积方式有关。单晶结构测定表明,在 MnCu(pba)(H₂O)₃ · 2H₂O 中,相邻链的相对位置是最短的链间金属...金属间隔为 Cu^{II}...Cu^{II} 和 Mn^{II}...Mn^{II};而在 MnCu(pbaOH) · 3H₂O 中,最短的链间金属...金属间隔为 Mn^{II}...Cu^{II}。

1991 年, Kahn 等人为了提高临界温度 T_c, 想知道是否可能通过处理链状化合物 MnCu(pbaOH)(H₂O)₃ 来提高 T_c。T_c 的高低由链内相互作用系数 J_{intra} 和链间相互作用系数 J_{inter} 决定。J_{intra} 基本上由桥联配体的本性所决定,而 J_{inter} 应与链间距离有关。沿着这个思路,可以通过移去占据在 Cu(II) 顶角位置上的弱配位水分子来缩短链间距离,从而提高临界温度 T_c。在 100℃ 的真空下,加热 MnCu(pbaOH)(H₂O)₃, 生成 MnCu(pbaOH)

(H₂O)₂^[16]。光谱数据表明,移去的水分子属于 Cu(II) 发色团。在 300—80K 温度范围内, MnCu(pbaOH)(H₂O)₃ 和 MnCu(pbaOH)(H₂O)₂ 的 $\chi_M T-T$ 曲线基本相同,尤其是一维铁磁性的最小值特征出现在相同的温度点上。随着温度进一步降低, MnCu(pbaOH)(H₂O)₂ 的 $\chi_M T$ 值增大的速度远大于 MnCu(pbaOH)(H₂O)₃。变温磁化强度测定表明,在 30K 有一铁磁相变,即 T_c = 30K。这种通过热处理来提高临界温度 T_c 的方法在分子性铁磁体领域尚属首创,这一开拓性工作为获得高 T_c 的分子性铁磁体开辟了一条新途径。

此外, Kahn 等人又合成并报道了一系列一维 Mn^{II}Cu^{II} 双金属链状配合物,虽然磁性研究表明 T_c 均未超过 30K,但是这些研究成果为最终获得高 T_c 的分子性铁磁体提供了极为有用的信息。表 1 归纳了迄今为止在设计及合成一维 Mn^{II}Cu^{II} 双金属链状配合物方面的最新研究成果。

6 结束语

分子性铁磁体的设计及合成是一个跨学科的前沿课题,其研究成果不仅具有重要的理论

意义,而且具有极其广阔的应用前景。目前,分子性铁磁体的研究还处在初始阶段,主要的目标是:

(1) 提高临界温度 T_c 。

(2) 设计及合成一个稳定体系,它易加工,能给出轮廓分明的、具有大的剩余磁化强度和矫顽场的磁滞回线。

(3) 制得在 T_c 下有铁磁性的透明薄膜。

沿着这个目标,世界上好几个科研组正在通过各种途径进行广泛的探索,他们之间的竞争、交流与合作将促使该领域迅速发展。我们坚信在不久的将来,对分子性铁磁体的研究必将会有激动人心的突破。

参 考 文 献

[1] Y. V. Korshak, T. V. Medvedeva, A. A. Ovic-hinnikov, et al., *Nature*, **326**(1987), 370.
 [2] J. Torrance, S. Costra, A. Nazzal, *Synth.Met.*, **19**(1986), 709.
 [3] J. S. Miller J. C. Calabrese H. Rommelmann, et al., *J. Am. Chem. Soc.*, **109**(1987), 769.
 [4] A. Caneschi, D. Gatteschi, R. Sessoli, et al., *Acc. Chem. Res.*, **22**(1989), 392.
 [5] J. S. Miller A. Epstein, *Angew. Chem. Int.Ed.*

Engl., **33**(1994), 385.
 [6] H. O. Stumpf Y. Pei, O. Kahn, et al., *J. Am. Chem. Soc.*, **115**(1993), 6738.
 [7] Y. Pei, Y. Journaux, O. Kahn, *Inorg. Chem.*, **27**(1988), 399.
 [8] A. Gleizes, M. Verdaguer, *J. Am. Chem. Soc.*, **106**(1984), 3727.
 [9] M. Verdaguer, M. Julve, O. Kahn, et al., *Inorg. Chem.*, **22**(1983), 2624.
 [10] O. Kahn, *Struct. Bonding (Berlin)*, **68**(1987), 89.
 [11] O. Kahn, Y. Pei, M. Verdaguer, et al., *J. Am. Chem. Soc.*, **110**(1988), 782.
 [12] O. Kah, *Angew. Chem. Int. Ed.Engl.*, **24**(1985), 834.
 [13] Y. Pei, J. Sletten O. Kahn, *J. Am. Chem.Soc.*, **108**(1986), 3143.
 [14] Y. Pei, M. Verdaguer, Kahn O., et al., *Inorg. Chem.*, **26**(1987), 138.
 [15] Y. Pei, M. Verdaguer, O. Kahn et, al., *J. Am. Chem. Soc.*, **108**(1986), 7428.
 [16] K. Nakatani, P. Bergerat, E. Codjovi, et al., *Inorg. Chem.*, **30**(1991), 3977.
 [17] Y. Pei, O. Kahn, J. Sletten, *Inorg. Chem.*, **27**(1988), 47.
 [18] K. Nakatani, J. Carriat, O. Kahn, et al., *J. Am. Chem. Soc.*, **111** (1989), 3170.
 [19] O. Kahn, Y. Pei, K. Nakatani, et al., *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **176** (1989), 481.
 [20] F. Lloret, M. Julve, R. Ruiz, et al., *Inorg. Chem.*, **32**(1993), 27.

1996 年第 1 期《物理》内容预告

中国物理学会第六届全国代表大会文集 (III)

自由电子辐射与北京自由电子激光(谢家麟);
 迈向21世纪的磁学和磁性材料(赵见高);
 原子分子物理进展(全晓明等);
 高能重离子物理进展与展望(赵维勤);
 核结构的新挑战(陈永寿)。

知识和进展

激光冷却与囚禁原子技术及应用(吉望西等);
 纳米复合材料发展趋势(牟季美等);
 磁化强度的宏观量子效应(钟文定);

物理学和经济建设

现代生物工程中的物理学方法(习 岗等);
 激光在农业中的若干应用(吴孔宝)。

讲 座

薄膜物理及其应用讲座第九讲 LB 膜的物理性能
 与应用(崔大付)。

前沿和动态

物理学家产生新的物态——玻色-爱因斯坦凝聚
 (赵理曾);
 汽-液-固相法生长 GaAs/InAs 量子点(吴自勤)。