

# 生命体中的磁性纳米颗粒\*

钱霞 赵见高

(中国科学院物理研究所 磁学国家重点实验室 北京 100080)

**摘要** 主要介绍了国内外对生命体中的磁性纳米粒子的研究工作.70年代发现的分布在趋磁细菌体内的磁性纳米颗粒,将生物与磁的关系确切地联系起来.文章简要介绍了趋磁细菌内部的磁性颗粒的晶体形貌、排列方式等等.同时还介绍了石鳖齿舌中的磁性纳米颗粒的形成过程,及蜜蜂腹部的超顺磁磁性颗粒的分布与神经系统的联系,介绍了“磁接受器”的概念与理论模型.最后提到人类大脑中也具有磁性纳米颗粒,并且探讨了它们可能具有的功能.

**关键词** 磁性纳米颗粒,晶貌,超顺磁,磁接受器

## MAGNETIC NANO PARTICLES IN THE LIVING BODY

QIAN Xia ZHAO Jian Gao

(State Key Laboratory of Magnetism, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

**Abstract** An overview is given of the research on magnetic nano particle in the living body. Magnetic nano particles found in the body of magnetic bacteria in the 1970's provide definite proof of the relationship between magnetite and biology. We briefly describe the configuration and arrangement of magnetic nano particles in magnetic bacteria, and the mineralization process of magnetic nano particles in the radula teeth of chiton, as well as the relationship between supermagnetic particles and the neural system in the abdomen of honeybees, on which the concept and model of “magnetic acceptors” has been built. Finally, magnetic nano particles in the human cerebrum and their possible functions are discussed.

**Key words** magnetic nano particle, configuration, supermagnetic, magnetic acceptor

自从有生命的物质诞生在地球这颗美丽的星球上以来,在绵延的进化过程中,各种生物无疑要适应环境,进行优胜劣汰的竞争.地磁场的广泛存在必然会影响生物的进化及生存.在地球发展进程中,每当地磁场发生巨大变化时,总会有大量的低等生物死亡<sup>[1]</sup>.现代研究发现,生物在其生命活动中对外表现有微弱的磁场,甚至有少量生物体内还具有强磁性物质.那么这些生物磁性的来源究竟是什么?是否仅是生物体中电子原子的运动而导致电磁感应所产生的磁场?强磁性物质是否是生物从外界环境中直接吸收到体内,然后通过新陈代谢而在体内沉积下来?另外,在现代生活中,人类周围存在着的相当大量的高频或低频电磁场,对人类究竟有什么样的影响?这些磁与生物之间的关系都是当前科学家们所关心研究的问题.

在研究生物与磁的关系时,科学家们发现了一些有趣的生物,它们的生存形态及行为明显地受到磁场的影响.这些生物涵盖了从水生动物到陆生动物,从低级渺小的微生物到高等进化的脊椎动物,哺

乳动物的整个范围.其中受到磁场作用后反应极为明显的生物有趋磁细菌、水藻、蜜蜂、海龟、家鸽、鲨鱼等<sup>[2]</sup>.蜜蜂和家鸽甚至可以感觉到地磁场强度十万分之一的极微小的变化<sup>[3]</sup>.即使在人类中也发现了因磁场干扰而出现异常反应的现象.它们所受磁场的影响随磁场的大小、方向、变化趋势的不同而不同,也随生物本身物种的不同而不同.磁场对这些生物影响的作用机理还不是特别清楚,但是磁场确实对一些生物具有导航作用.其中明显的是趋磁细菌、蜜蜂、家鸽等.

趋磁细菌是70年代由美国的一位博士研究生发现的.当这种细菌处于北半球时,看上去它们向地磁南极(S)游动;当位于南半球时,它们则向地磁北极(N)游动;在赤道附近时,向各个方向游动的细菌都有;当在细菌培养皿周围中存在较强的外加磁场

\* 国家自然科学基金资助项目

1999-10-11 收到初稿,1999-11-18 修回

时,它们受外磁场的影响而打破原有的运动规律<sup>[4,5]</sup>.

蜜蜂的行为与磁场的关系可以通过各种实验证实.蜜蜂之间互相交流的语言——“摇摆舞”,在受到外加磁场干扰时会发生改变.“摇摆舞”的改变取决于磁场变化的强度、方向及频率,分辨率在 $10^{-9}$  T.一般情况下,蜜蜂修建的蜂巢的方向和它们的父母所修建的方向一致,而在外加磁场的干扰下,蜂巢的方向就发生了改变.

家鸽对磁场的反应比蜜蜂对磁场的反应还强.通常家鸽利用太阳的方位来辨别飞行方向,但家鸽的体内似乎还存在一个“磁地图”.在太阳被遮盖,无法辨别方位时,家鸽根据地磁场信号来辨别方向;当太阳信号与磁场信号发生矛盾时,家鸽表现得不知所措;当磁场提供的信息很强时,家鸽就不再考虑太阳所指示的方向,而是根据磁场所提供的信息判定航向.

从上面的例子中可以明显看出磁场的导航作用.对应任一种生物功能,生物体中必然有一种结构与此相对应.这些生物中也许含有一些被称为“磁接受器”的组织,能够探测到外磁场信号.这种“磁接受器”必然会和某一个专门的感觉器官及神经系统相连.针对这个问题,研究人员曾提出很多设想,最终发现了对应于这种功能的物质基础——存在于这些生物中的磁小体磁性化合物 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,即这些生命体中存在有磁性纳米颗粒.由此可以理解这些生物所具有的磁场探测功能.

趋磁细菌的种类及形状有多种,其中有球状、杆状、弧状、螺旋状等.但不管是何种形状,在这些细菌中均存在着粒状的磁微颗粒,如图1所示.每个趋磁细菌中大约含有10—20个大小为50—100nm的磁微颗粒,排列整齐,大小均匀,有的呈立方形状,有的呈平行六面体形状.趋磁细菌种类不同,其磁微颗粒的个数、大小和形状都不同,但都是磁单畴晶体.这些磁性颗粒的外面由生物膜包围,组成小胞.在细菌

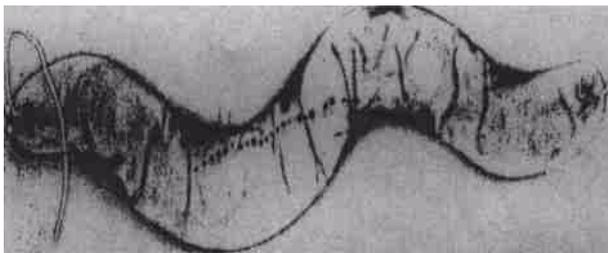


图1 趋磁细菌及内部磁性颗粒

的内部长轴方向成链状排列.这些磁微颗粒的磁矩比普通的顺磁性大得多,具有超顺磁性的性质.能谱分析及X射线衍射分析研究结果都表明其主要成分为 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .人们不仅从趋磁细菌中分离出磁性颗粒,从其他生物中也发现了磁性颗粒的存在.

虽然从很多动物的组织中分离出单畴的磁性颗粒,但对这些磁性颗粒的确切的存在位置、它们如何与神经系统联系(如果它们就是“磁接受器”),以及所获得的磁场信号怎样通过神经系统反馈成操纵细菌的运动等问题一直没有获得满意的解答,仅仅从蜜蜂腹部的磁小体与神经系统的分布上得到过初步的信息.

通过行为和生化的研究可以确认蜜蜂中确实存在“磁接受器”.用超导量子干涉磁强计证实工蜂具有磁性,并且在死亡蜜蜂的腹部提取出磁性颗粒.在蜜蜂腹部存在一种滋养细胞,在细胞膜内发现了微小的含Fe颗粒,并且发现它是唯一包有含铁粒子的细胞.铁从蜜蜂孵化出的第二天就开始沉积在滋养细胞中,由直径约7.5nm的高密度小颗粒在小囊泡中逐渐沉积、聚合,形成含铁的磁性微粒.为了研究这些小颗粒的存在、结构及特性,采用了高分辨透射电子显微镜(HRTEM)方法.所用试样是孵化大约15—30天的成年工蜂.结果从5个蜜蜂中发现了约40个平均直径约为600nm的含铁颗粒.并在颗粒的中心部位发现了晶体,占整个体积的30%.最大的晶体直径大约是10nm.邻近晶体晶格取向是任意的.从X射线衍射图中计算得到晶体的晶面间距与磁铁矿 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 的 $[1\bar{2}1]$ 带轴一致.所有这些磁粒显示了排列完好的晶面,并且没有观察到其他的晶相,如 $\gamma\text{-FeOOH}$ <sup>[6]</sup>.

从磁铁颗粒的尺寸可以计算出超顺磁性颗粒的个数.直径为600nm的磁性微粒的体积约为 $1.13 \times 10^{-19} \text{m}^3$ .超顺磁颗粒占整个微粒中心部位约30%的体积,体积大约是 $4.4 \times 10^{-21} \text{m}^3$ .最大的超顺磁颗粒的直径应为10nm,其体积为 $5.2 \times 10^{-25} \text{m}^3$ .因而每个磁性微粒中含有大约 $8.5 \times 10^3$ 个超顺磁性颗粒.

为了研究这些磁性颗粒与神经系统的关系,也就是神经系统是怎样获得外界磁场信号的,同样对孵化25—35天的工蜂进行了观察.对工蜂的腹部作仔细的切割,尽可能不使腹部的原貌受到损害.采用高分辨率的扫描电镜进行观察,可以看到:工蜂腹部的神经沿着长轴方向延伸,它包含有一系列的集结中心,成束的神经细胞轴突横向地从集结中心出发,

分布在成团的滋养细胞处,神经元树突就埋藏在滋养细胞中.蜜蜂腹部的磁性颗粒及神经系统在滋养细胞处的分布见图2.

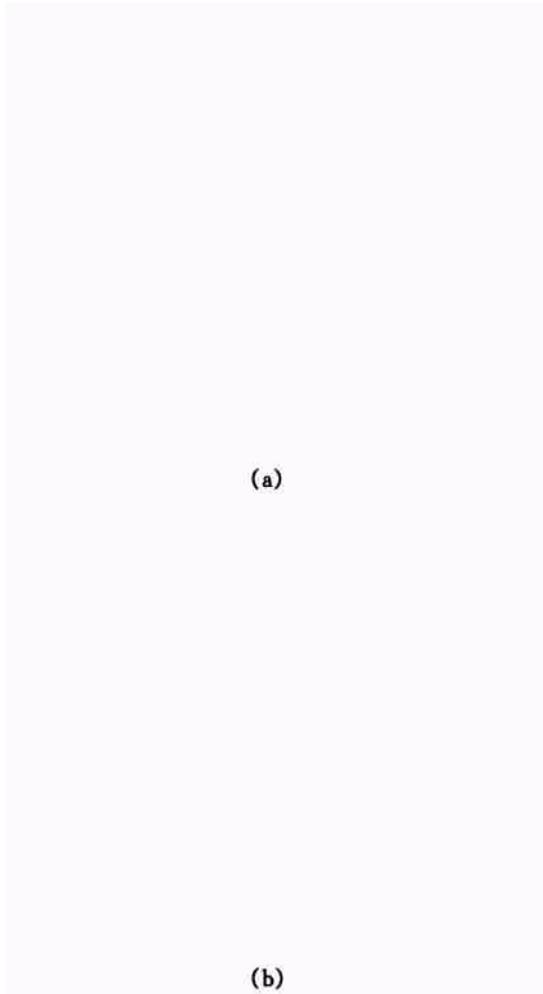


图2 蜜蜂腹部的磁性颗粒及滋养细胞处神经分布  
(a)蜜蜂腹部的磁性颗粒,其中G代表磁性颗粒;  
(b)滋养细胞处神经分布

可以认为包含有磁性颗粒的滋养细胞以及分布其中并起支配作用的神经系统也许就是前面所提到的“磁接受器”.但是这种结构究竟是怎样工作的,依然不得而知.一种模型认为(如图3所示),随着这些超顺磁颗粒取向的不同,外磁场变化可以引起磁性颗粒的收缩或扩张.譬如当超顺磁颗粒处于肩并肩的位置时,在外磁场作用下磁矩发生旋转,转向首尾相接排列,从而导致磁性颗粒的扩张.当超顺磁颗粒处于首尾相接的位置时,在外磁场作用下转向平行排列,从而导致磁性颗粒的收缩.这种机械收缩或扩张的信号就可能会经过神经末梢的信号放大作用最终转换成神经信号传递出去.

显然还有另外一个值得研究的问题,即这些磁性微粒是生物体直接由外界环境中吸收的,还是由

生物体组织内部自己合成的.迄今为止,从生物体中所能观察到的磁性颗粒绝大多数是铁的各种氧化物,且这些磁性颗粒的形状、大小基本上是均匀的;从一些生物体中发现了一些特殊的蛋白质,这些蛋白质与磁性颗粒紧密地联系在一起.因而,目前普遍认为这些磁性颗粒是由生物组织自己形成的,并且很多生物组织中都可以合成磁体物质.至于生物体所吸收进来的铁元素是怎样一步步经过生化过程转化为磁性物质的,仍然没有确切的答案.

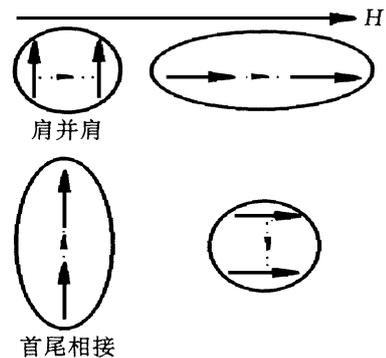


图3 蜜蜂腹部磁接受机理假设模型

迄今对磁化过程认识较为清楚的是一类称为石鳖的海洋生物<sup>[7-9]</sup>.在它长长的“舌头”两侧边缘排列着大约70列横向生长的磁性牙齿,被称为磁性齿舌,齿舌的形状见图4.从舌根到舌尖,牙齿的年龄逐步增大,磁体的成分与结构也在不断地发生变化.在舌根部的初生成牙齿是透明的,它含有一种透明的类似蛋白质一样的物质.随着向前迁移,牙齿就逐步在尖部覆盖上一层红棕色的磁性物质.在成熟的牙齿上,尖部所覆盖的物质由红棕色变成略微黑色.

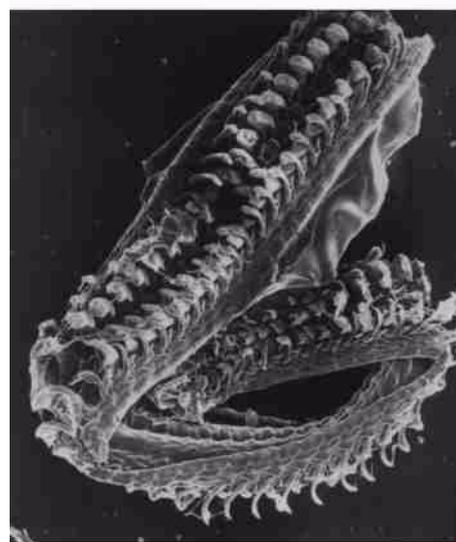
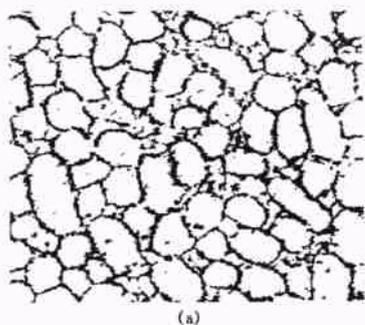


图4 石鳖齿舌的形状

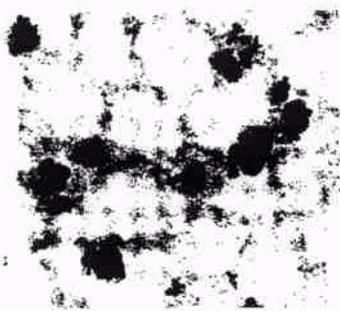
采用透射电子显微镜观察未被磁化的含有透明蛋白质的新生牙时,发现在牙齿中存在由纤维构成的三维网状结构.在纤维网状结构中不存在磁性物质.在红棕色的牙齿中则发现,网状结构中开始出现磁沉积.用电子显微镜观察这些颗粒,发现它们的形状是一样的,沿横向切割,其方向也是一样的.用低倍显微镜观察,这些早期形成的晶粒的平均直径大约为  $0.1\mu\text{m}$ .用高倍显微镜观察,这些颗粒又是由更小的颗粒组成,直径大约为  $2\text{nm}$ .化学成分研究表明,铁在牙齿中的分布主要是以三价铁的形式存在,没有发现二价铁的存在.齿舌中存在的网状结构以及磁性物质的逐步填充过程如图 5 所示.

对于成熟的牙齿,在纵横交错的纤维网状结构中,密集地充满了黑色的磁性物质.X 射线衍射及电

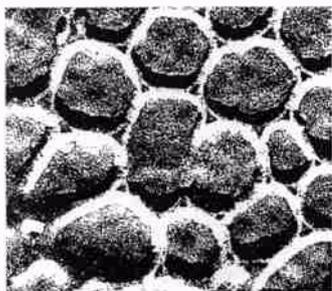
子显微镜分析表明,这些黑色物质的结构是磁铁矿 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO}$ ),即有一部分铁由三价变成二价. $\text{Fe}_3\text{O}_4$  几乎占全部矿物质的  $60\%$ .所有的磁性微粒均为长方形片状晶体,宽约  $100\text{nm}$ ,长约  $1-2\mu\text{m}$ (如图 6 所示).微粒内部长边取向为  $(111)$ ,短边为  $(022)$ 取向,是很好的单晶.在片状晶的边缘区域有更小的  $5\text{nm}$  左右的单晶,取向大体与内部一致,均以  $(111)$ 取向至片状晶的长边.而齿舌的长方形片状晶又是由尺寸  $20-50\text{nm}$  的许多小尺寸片状晶堆砌溶合而成的.在石鳖中同样发现存在一种专门存储铁蛋白的蛋白质.也可以证明  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  不是由外界直接吸收而又沉积在体内的.



(a)



(b)



(c)

图 5 齿舌内部生物网状组织及磁性微粒填充过程

- (a) 透明牙齿内生物网状组织;
- (b) 红棕色牙齿内生物网状组织;
- (c) 黑色牙齿内生物网状组织

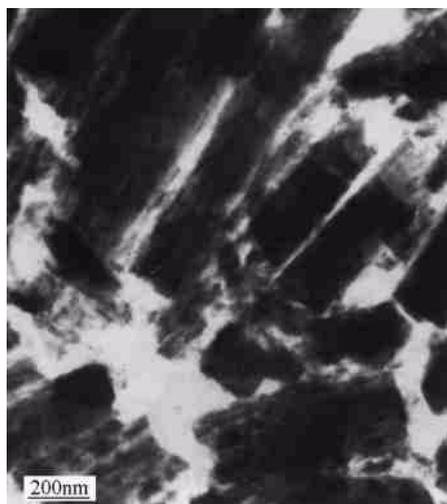


图 6 齿舌内  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  片晶的形貌

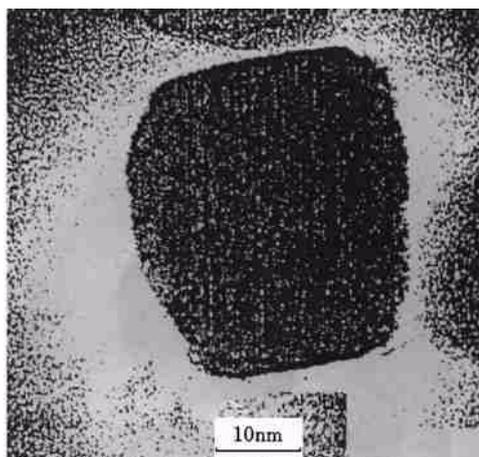


图 7 人类大脑中发现的磁性颗粒

在这里我们再提一下我们人类.有些科学家在实验中发现,人类同样存在依靠磁的作用来识别方向的现象<sup>[10]</sup>,并且美国的 Kirschvink 在人的大脑中发现有磁性纳米颗粒的存在<sup>[11]</sup>,如图 7 所示.这也许会给脑科学研究带来一些启发.

总之,从很多生物中发现了磁性纳米颗粒的存在.虽然这些磁性颗粒的形状、大小不太一致,但是所有这些磁性颗粒均处于单畴颗粒的范围,也就是在 20—100nm 范围内.

随着生物体中磁性纳米颗粒的发现,又给人类带来很多的研究课题:这些磁性纳米颗粒与神经系统之间的联系究竟是怎样的?作为一个“磁接受器”系统,它的工作机理是什么?磁性颗粒的生物功能除通过外磁场信息确定航向,还会有取食、记忆以及其他功能吗?这一切都期待更深入的研究与发现.

### 参 考 文 献

- [ 1 ] 李国栋.磁的世界.长沙:湖南教育出版社,1995[ LI Guo Dong. The world of magnet. Changsha: Hunan Educational Press. 1995(in Chinese) ]
- [ 2 ] Kirschvink J L *et al.* Biosystems, 1981, 13:181—201
- [ 3 ] Webb J. Westbrook P, De Jong E W eds. Biomineralization and biological metal accumulation. Dordrecht: Reidel Publishing Company. 1983, 413—422
- [ 4 ] 范国昌等.科学通报,1996, 41: 349—352 [ FAN Guo Chang *et al.* Chinese Science Bulletin, 1996, 41: 349—352(in Chinese) ]
- [ 5 ] 刘信.微生物学通报,1991, 18:188—190 [ LIU Xin. Microbiology Bulletin, 1991, 18:188—190(in Chinese) ]
- [ 6 ] Hsu Chir Yuan, Li Chir Wei. Science, 1994, 265:95—96
- [ 7 ] Towe K M, Lowenstam H A. J. Ultrastructure Research, 1967, 17:1—13
- [ 8 ] 赵见高等.物理学报,1999, 48:973—976 [ ZHAO Jiar Gao *et al.* Acta Physica Sinica, 1999, 48:973—976(in Chinese) ]
- [ 9 ] Kim Kyung Suk *et al.* J. Inorganic Biochemistry, 1986, 28: 337—345
- [ 10 ] Robin Baker R. Science, 1980, 210:555—557
- [ 11 ] Kirschvink J L *et al.* Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 1992, 89: 7683—7687

## 兼有热释电性及内光电效应的压电陶瓷的探索\*

李全禄

(陕西师范大学陕西省物理研究所 西安 710062)

**摘 要** 讨论了热释电效应与热电效应、外光电效应与内光电效应的基本概念,对兼有热释电性及内光电效应的压电陶瓷进行了研究;对用该压电陶瓷本身制成的陶瓷变压器与太阳能电池的集成器件进行了设计和实验.同时,也指出了此种器件广阔的应用前景.

**关键词** 热释电性,内光电效应,压电陶瓷,陶瓷变压器,太阳能电池,集成器件

### AN INVESTIGATION INTO THE PYROELECTRICITY AND INTERNAL PHOTOEFFECT OF PIEZOELECTRIC CERAMICS

LI Quan Lu

(Shaanxi Institute of Physics, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062)

**Abstract** The basic concepts of the pyroelectric and thermoelectric effects, as well as the internal photoeffect and external photoeffect are discussed. An investigation into piezoelectric ceramics which exhibit both pyroelectricity and the internal photoeffect has been made. Various integrated devices containing ceramic transformers and solar cells have been fabricated with this piezoelectric ceramic. The broad application prospects of these devices are pointed out.

**Key words** pyroelectricity, internal photoeffect, piezoelectric ceramic, ceramic transformer, solar cell, integrated device

\* 陕西省自然科学基金、陕西省教委专项科学研究基金资助项目  
1999-06-10 收到初稿,1999-11-08 修回