

# 单畴磁铁矿磁接收器磁学模型

钱霞

(聊城大学物理科学与信息工程学院山东省光通信科学与技术重点实验室, 聊城 252059)

**摘要:** 很多生物可以利用地磁场辨别方向和方位,而生物磁铁矿被广泛发现存在于这些生物体中,研究者认为,生物磁铁矿与周围组织(包括神经组织)构成磁接收器,它在与外界磁场的相互作用中,将外界磁场信息转化成神经信息促使生物作出相应的反应;生物磁铁矿磁接收器理论包括单畴磁铁矿磁接收器模型和超顺磁磁铁矿磁接收器模型;趋磁细菌体内存在典型的单畴磁铁矿颗粒,本文中,以趋磁细菌为例,从磁学理论角度出发,定性的探讨了单畴磁铁矿磁接收器的磁学模型和工作机制:在外磁场中,外面包围着生物膜的单畴晶体会受到力的作用,单畴晶体把力转加给生物膜,再被生物膜中的机械感受器接收到,再转变为刺激信号,引起细胞相应的运动行为;或者是,磁铁矿粒子通过与生物膜的结合,把受到的力转变为打开或关闭离子通道,影响离子的流入,跨膜电势发生改变,从而产生刺激信号;多个单畴晶体及膜的存在会导致信号的增加与放大。

**关键词:** 生物磁铁矿; 磁接收器; 单畴磁铁矿磁接收器; 磁学模型

**中图分类号:** Q64      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0490-6756(2017)03-0600-05

## The magnetic model of the single-domain magnetite magnetoreception

QIAN Xia

(School of Physics Science and Information Engineering, Liaocheng University,

Key Laboratory of Optical Communication Science and Technology of Shandong Province, Liaocheng 252059, China)

**Abstract:** Many living beings can distinguish direction and position by using geomagnetic field, while biomagnetites can be found in these living beings, so scholars think that there are magnetoreceptions existing in these living beings which are formed by the biomagnetites and outer organic tissues (including the nerve). The magnetoreceptions interact with outer magnetic field and can transform the magnetic information into neural information, so these living beings can have response to it. The theories of biomagnetite magnetoreceptions include the model of single-domain magnetite magnetoreception and the model of superparamagnetic magnetite magnetoreception. In magnetotactic bacteria, there are many typical single-domain magnetites, so in this paper, the magnetic model and working mechanism of the single-domain magnetite magnetoreception are discussed qualitatively from the point of view of theory of magnetism taking the example of magnetotactic bacteria. In the outer magnetic field, each single-domain magnetite which is surround by biomembrane can be forced, and the single-domain magnetite transmits the force to the outer biomembrane and can be accepted by mechanical receptor in the biomembrane, then the force can be transformed into a stimulus signal which can cause the behavior of the bacteria. Another case may also exist, the single-domain magnetites combine with the biomembrane tightly, the force can open or close the ion passageway thereby influencing the inflow of ions and influencing the transmembrane potential, so stimulus signal can be produced. The signals can be magnified because many single-domain magnetites and biomembrane exist.

收稿日期: 2016-05-03

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2015AL019); 国家自然科学基金(11375081)

作者简介: 钱霞(1974-), 女, 山东聊城人, 博士, 副教授, 主要研究方向是生物磁学. E-mail: qianxia@lcu.edu.cn

**Keywords:** Biomagnetite; Magnetoreception; Single-domain magnetite magnetoreception; Magnetic model

## 1 引言

自然界中很多生物,可以进行定向迁移或飞行,如趋磁细菌可以沿着磁力线运动、鸽子可以进行定向迁徙等等<sup>[1-2]</sup>。这种现象背后潜在的生物学机制引起科学家的广泛关注,科学家们认为,生物可以借助外界的光、电、磁等信息实现对方向的辨别,包括利用地磁信息。研究发现,许多生物物种都有感知地球磁场的能力,能感知磁场的方向、强度或者倾斜度,把此类信息作为导航线索,但是作用机理仍然处于不肯定的状态,存在多种假设理论。比如早前存在的“自由基对理论”模型:磁受体很有可能来自一种名为 Cryptochrome(Cry)的蓝光受体蛋白,过程涉及电子在磁场下的量子化学反应,且需要视觉系统的参与<sup>[3-4]</sup>。北京大学谢灿教授及其研究团队进一步在多个动物物种中发现了一种磁感应蛋白(MagR)与光敏隐花色素蛋白组成的含铁元素的复合体(MagR/Cry),可以在磁场中定位方向<sup>[5]</sup>。

在从原生生物到哺乳动物的广泛分布的生物体中存在着纳米磁铁矿粒子,这些生物磁铁矿粒子具有独特的、规则的晶体结构、外形和分布形态,在严格的生物控制下形成,大多数是超顺磁颗粒或单畴颗粒,且与神经组织有着密切联系,研究者认为生物磁铁矿与周围组织(包括神经组织)构成磁接收器,在与外界磁场的相互作用中,将外界磁场信息转化成神经信息促使生物作出相应的反应<sup>[6-8]</sup>。

对于以磁铁矿为基础的磁接收器机制的提出,即有理论上的考虑,在事实上又有实验结果的支持,可以从感觉神经元中被探测到。比如:外加磁

场可以引起蜜蜂体内的超顺磁磁铁矿粒子尺寸的变化;在鸟和鱼中,含有磁铁矿粒子的解剖点都是被三叉神经的视神经所支配;在虹鳟鱼中,外加磁场可以引起它的鼻子上的三叉神经的分支——视神经(ros V 神经)(神经细胞中存在单畴磁铁矿粒子)的反应;鸟类中,三叉神经中心处的细胞在磁场改变时表现出活动电压增加的现象,视神经对小到地磁场强度 0.5% 的垂直场强度变化有反应;食米鸟中,当阻止三叉神经中的视神经工作时,外界磁场的作用会消失;把相当于一个趋磁细菌量的磁铁矿连接在一个高级动物的感觉神经元上,可以提供给这个动物(比如:蚂蚁、蜜蜂、鲑鱼甚至鲸)格外好的磁罗盘感觉;短而强的磁脉冲实验生物物理分析表明成千万的包含磁铁矿的细胞排列能够对超过 0.1% 的磁场强度的变化发生反应<sup>[9-10]</sup>。谢灿教授在文章中也未完全否认磁铁矿磁接收器,蛋白质在磁铁矿的形成过程中起重要作用,且有些磁铁矿位于视觉神经上,在生物体中或许几种磁接收器机制共同配合完成对磁场信息的转换。

生物磁铁矿磁接收器模型首先被美国科学家 Kirschvink 提出,然后迅速得到其他研究者的认同,并被不断进一步细化,生物磁铁矿磁接收器模型包括单畴磁铁矿磁接收器模型和超顺磁磁铁矿磁接收器模型。对于单畴磁铁矿磁接收器模型,大多认为,单畴晶体(与有机组织紧密结合)在没有外界磁场的情况下有永久磁矩,与外磁场相互作用,打开膜离子通道,影响离子的流入,跨膜电势会发生改变,把磁信息转换成神经信息,生物对磁信息在行为上做出相应的反应。

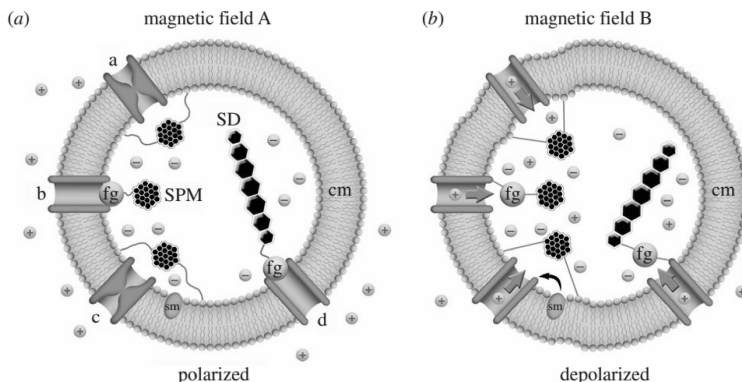


图 1 一种假设的单畴磁铁矿磁接收器模型和超顺磁磁铁矿磁接收器模型<sup>[11]</sup>

Fig. 1 One hypothetical model of single-domain magnetite magnetoreception and superparamagnetic magnetite magnetoreception<sup>[11]</sup>

生物磁铁矿磁接收器机制自从被提出后,在理论上,迅速被其他研究者接受并被进一步细化,但很多细节未涉及到,未建立起严格的理论分析模型,很多论点处于假设阶段,未得到实验的认证,尤其是磁铁矿作为一种自然界中非常重要的亚铁磁材料,有关生物体中自然存在着的磁铁矿磁学特性的实验和理论研究并不被多涉及。趋磁细菌中的链状排列的磁小体为典型的单畴生物磁铁矿粒子,且在趋磁细菌的定向迁移中起着极重要的作用,因此,在本文章中,我们拟从磁学理论角度出发,以趋磁细菌中的链状排列的磁小体为例,定性的探讨单畴磁铁矿磁接收器磁学模型,讨论它与外磁场的相互作用及磁信息传递过程。

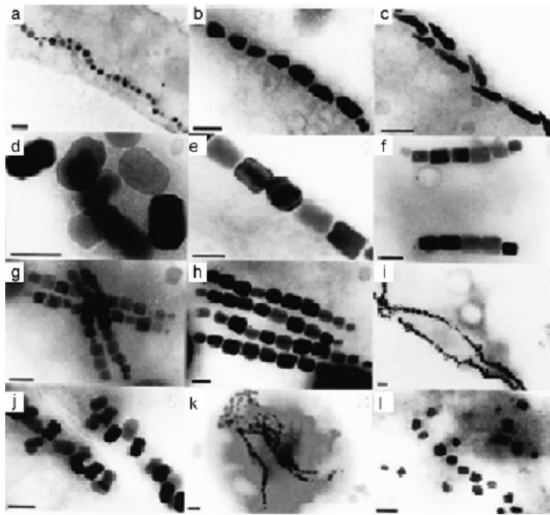


图 2 形态各异的磁小体电镜照片

Fig. 2 Electronmicrographs of magnetosomes

## 2 趋磁细菌磁小体链

趋磁细菌在外磁场作用下可以沿着磁力线做定向运动,多个菌体头尾相连,连成链状,长达  $2 \sim 10 \mu\text{m}$ ;当菌体死亡停止运动后,其取向也随外磁场的转向而变化;当改变磁场大小,细菌在磁场方向的游动速度随之变化。

趋磁细菌体内存在着纳米磁性颗粒(磁小体, magnetosome, MS),外面包裹着脂质双分子囊泡生物膜,晶形独特、粒度细而均一,有近似立方体形、平行八面体形,平行六面体形、六棱柱体形、子弹状、泪滴状、薄片状及球状等,其成分主要是磁铁矿( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ),少数磁小体的成分含有铁硫化物( $\text{Fe}_7\text{S}_8$ );磁小体在  $25 \text{ nm}$  到  $120 \text{ nm}$  之间,在周围温度下表现为具有永久磁性的稳定单畴晶体,拥有最大磁偶极矩;在大多数趋磁细菌胞内,磁小体

沿着细胞长轴方向靠近细胞内膜紧密排列成链,呈单链、双链或是多链排列,当菌体细胞的培养时间延长时,胞内非平行排列的若干短链也会组装形成一条长的片断化的直链,从破碎的细胞中分离和纯化得到的磁小体也有强烈的成链趋势;链状磁铁矿晶体显现单畴特征,磁化曲线表现出明显的磁各向异性特征,链断裂时磁小体不显示单方向磁化特性;磁小体沿链方向产生很强的正静磁相互作用,颗粒间有强的静磁相互作用,磁小体链可以近似于一个单轴形状各向异性的 SD 颗粒;各个链间或平行、或相交、或呈折线状排列,而细胞质的隔离作用减弱了细胞(磁小体链)之间的静磁相互作用,具有弱的短链间和细胞间的静磁相互作用,以使趋磁能量最小化。磁小体具有严格的各向异性宽度/长度比,具有延伸取向。

磁小体外面包裹着的生物膜在磁小体形成过程中起着控制晶体尺寸和形状、固定磁铁矿颗粒的作用,膜的厚度大约是  $10 \text{ nm}$ 。在磁小体合成过程中,短链内相邻磁小体之间的中心距几乎不变,磁小体的磁学性质不同与化学合成的单畴磁铁矿颗粒(无有机膜包被)<sup>[12-14]</sup>。

## 3 单畴磁铁矿磁接收器磁学模型

趋磁细菌全细胞样品可以近似看成为天然的具有单轴各向异性单畴生物磁铁矿,具有永磁矩,其中,磁小体只有排成一条直链,且磁小体的磁矩方向相同(沿着晶体易磁化方向),链中总磁矩是各个磁小体的磁矩之和,这样整个链结构静磁能最低,产生最大的趋磁性。

对于单畴颗粒,由于磁性原子或离子之间的交换作用很强,具有永磁矩,且磁矩取向在由磁晶各向异性所决定的易磁化方向上;单畴颗粒内不存在畴壁,在磁化时不含有壁移过程,只有转动磁化过程,这样的材料,磁化和退磁都不容易,具有低磁导率和高矫顽力。从能量和磁化的角度,我们认为,磁小体链的磁矩结构如图 3。

趋磁细菌可以沿着磁力线运动,磁场的方向和强度变化都可以影响到趋磁细菌的运动和排列,这是由于体内的磁铁矿晶体对地磁场产生反应的结果。

假定单畴粒子具有相同的磁矩  $\mu$ , 考虑到单畴粒子处于外界磁场中以及偶极子之间的相互作用,则单畴粒子的势能可以表现为<sup>[15]</sup>:

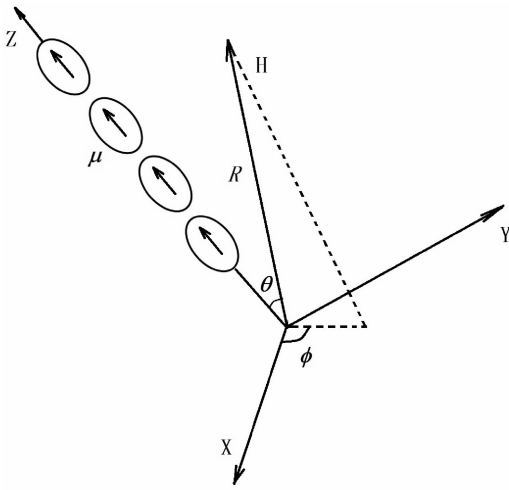


图 3 单畴磁铁矿链与外磁场

Fig. 3 Single-domain magnetite chain and outer magnetic field

$$E = E_H + E_{int} = -\vec{\mu}_i \cdot \vec{H} + \sum_{i \neq j} \frac{\vec{\mu}_i \vec{\mu}_j - 3(\vec{\mu}_i \cdot \vec{r}_{ij}) \cdot (\vec{\mu}_j \cdot \vec{r}_{ij})}{2r_{ij}^3} \quad (1)$$

其中，第一项为单畴粒子在外磁场中的赛曼能，第二项为粒子链中其他粒子对单畴粒子的作用能。在这里，我们假定每一个单畴粒子具有相同的磁矩  $\mu$ ，则第二项能量为常量。定义正 Z 方向沿着单畴粒子的磁矩方向(长轴方向)， $\vec{H} = \vec{H}(R, \theta, \varphi)$ ，其中， $R$  反映了外磁场的大小， $(\theta, \varphi)$  反映了外磁场的方位。

则每一个单畴粒子受到的力为：

$$\vec{F} = -\nabla E = -\nabla(E_H + E_{int}) = -\nabla E_H = \nabla_{\vec{\mu}} \cdot \vec{H}(R, \theta, \varphi) \quad (2)$$

当外磁场为地磁场时，它的势能标量的球谐函数表达式为：

$$U(r, \theta', \lambda, t) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n U_n^m(r, \theta', \lambda, t) = a \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} [g_n^m(t) \cos m\lambda + h_n^m(t) \sin m\lambda] P_n^m(\cos \theta') \quad (3)$$

在这里， $a$  是地球平均半径， $r, \lambda, \theta'$  分别是地心坐标系的地心距、经度和余纬； $g_n^m, h_n^m$  分别是磁位的高斯系数； $p_n^m(\cos \theta)$  是  $n$  阶  $m$  次 Schmidt 准归一化缔合勒让德函数， $N$  是球谐级数的截断水平。

所以有：

$$\text{地磁场强度 } H = -\nabla U(r, \theta', \lambda, t) \quad (4)$$

$$\text{所以有：} \vec{F} = \nabla_{\vec{\mu}} \cdot \vec{H}(R, \theta, \varphi) = -\nabla_{\vec{\mu}} \cdot \nabla U(r, \theta', \lambda, t) = -\mu \cos \theta \nabla U(r, \theta', \lambda, t) \quad (5)$$

可以得到，单畴粒子在外磁场的作用下会受到力的作用，而这个力的作用不仅与外磁场的大小有关，还与外磁场的方位(倾角)有关系。关于地磁场的计算是庞大的工作，在这里，我们就不再做进一步的推导，仅做定性的解释。

## 4 结 论

由前面得知，每个单畴粒子的外面包围着有机生物膜，它在磁小体形成过程中起着控制晶体尺寸和形状、固定磁铁矿颗粒的作用，在磁小体合成过程中，短链内相邻磁小体之间的中心距几乎不变。前面提到，磁小体的磁学性质不同与化学合成的单畴磁铁矿颗粒(无有机膜包被)，比如有较高的矫顽力( $B_c$ ) 剩磁矫顽力( $B_{cr}$ ) 和  $M_{rs}/M_s$  比值( $M_{rs}$  为饱和剩磁强度， $M_s$  为饱和磁化强度)，明显高于人工合成的磁性  $Fe_3O_4$  颗粒，所以可以认为，磁小体与外面的有机膜在结构上必然存在密切关系，磁小体与有机膜之间应该有力的相互作用。

考虑到单畴粒子具有永久磁矩以及在外场中的作用，且每一个单畴晶体外面包围着生物膜，单畴晶体和有机组织的极好结合刚好帮助生物体完成与地磁场之间的相互作用，帮助完成磁导航功能。我们认为单畴磁铁矿磁接收器的工作机制或许存在两种情况：第一种，当单畴晶体在外磁场的作用下，会把受到的力或力矩的作用，这个力转加给生物膜，再被生物膜中的次级力感受器，比如拉力感受器、绒毛细胞机械感受器等接收到，再转变为刺激信号引起细胞的相应的运动行为；第二种，磁铁矿粒子通过与生物膜的结合，把受到的力转变为打开或关闭离子通道，影响离子的流入，跨膜电势发生改变，单畴晶体受力的方向与大小会影响离子通道的开关程度，导致产生不同的信号。

无论是哪种情况，神经信号与外界磁场的信息(方向、大小、倾角)都有密切关系，同时，由于每个单畴晶体的外面都有膜的包围，则多个膜的存在会导致信号的增加与放大。

当然，关于磁铁矿磁接收器的具体工作机制及量化分析需要进一步实验及理论研究。

## 参考文献：

[1] Roswitha W, Ingo S, Patrick F, et al. The role of the magnetite-based receptors in the beak in pigeon homing [J]. *Curr Biol*, 2010, 20: 1534.  
 [2] Wilschko R, Ingo S, Wolfgang W. A strong mag-

- netic anomaly affects pigeon navigation [J]. *J Exp Biol*, 2009, 212: 2983.
- [3] Solov'yov I A, Mouritsen H, Schulten K. Acuity of a cryptochrome and vision-based magnetoreception system in birds [J]. *Biophys J*, 2010, 99: 40.
- [4] Cordula V M, Michael D, Wild J M, *et al*. Magnetoreception and its trigeminal mediation in the homing pigeon [J]. *Nature*, 2004, 432: 508.
- [5] Qin S Y, Tin H, Yang C L, *et al*. A magnetic protein biocompass [J]. *Nature mater*, 2015, 16: 1.
- [6] Hsu C Y, Ko F Y, Li C W, *et al*. Magnetoreception system in honeybees (*apis mellifera*) [J]. *Plos one*, 2007, 2: e395. 1.
- [7] Fleissner G, Stahl B, Thalau P, *et al*. A novel concept of Fe-mineral-based magnetoreception: histological and physicochemical data from the upper beak of homing pigeons [J]. *Sci Nat*, 2007, 94: 631.
- [8] 钱霞,王明红,阮树仁,等. 生物磁铁矿与磁接收器 [J]. *四川大学学报:自然科学版*, 2015, 52: 595.
- [9] Johnsen S K, Lohmann K J. The physics and neurobiology of magnetoreception [J]. *Nat Rev Neurosci*, 2005, 6: 703.
- [10] Kirschvink J L. Homing in on vertebrates [J]. *Nature*, 1997, 390: 339.
- [11] Jeremy S, Alastair B, Michael H, *et al*. Magnetic particle-mediated magnetoreception [J]. *J R Soc Interface*, 2015, 12: 1.
- [12] 李金华,潘永信,刘青松,等. 趋磁细菌 *Magnetospirillum magneticum* AMB-1 全细胞和纯化磁小体的磁学比较研究 [J]. *科学通报*, 2009, 54: 3345.
- [13] 潘永信,邓成龙,刘青松,等. 趋磁细菌磁小体的生物矿化作用和磁学性质研究进展 [J]. *科学通报*, 2004, 49: 2505.
- [14] Matsunaga T, Suzuki T, Tanaka M, *et al*. Molecular analysis of magnetotactic bacteria and development of functional bacterial magnetic particles for nano-biotechnology [J]. *Trends Biotechnol*, 2007, 25: 182.
- [15] 冯慈璋. 极化与磁化 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1986.