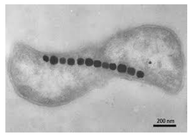
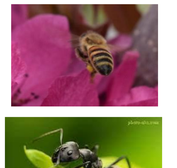
دینامیک دورانی بروانی سامانه‌ای متشکل از دوقطبی‌های مغناطیسی

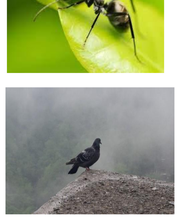
بوالحسنی فر، فاطمه؛ دهقان نیری، محمد
دانشکده فیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی زنجان

مقدمه

حیوانات مهاجر چطور دقیق مسیر خود را پیدا می‌کنند؟ با گذشت دهه‌ها، نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد برخی موجودات زنده حس مغناطیسی دارند، یعنی می‌توانند از میدان مغناطیسی زمین برای مسیریابی استفاده کنند. در سال 1992 مشاهده نانوذرات مغناطیسی در بافت مغز انسان، به کاندیدی برای حس مغناطیسی او تبدیل شد، هرچند بیان قطعی این موضوع هنوز امکان‌پذیر نیست. در زنبور عسل، کبوتر خانگی، باکتری مگنتوتاکتیک، این ذرات‌نماینده حسگر مغناطیسی هستند.







روش

- برای سادگی، دوقطبی‌های مغناطیسی در شبکه مثلثی ساده در مکان‌های ثابت و با شرط مرزی دوره‌ای قرار دارند.
- برهم‌کنش‌ها دوقطبی با دینامیک دورانی بروانی هستند:

$$\dot{\boldsymbol{\mu}}_i = \boldsymbol{\omega}_i \times \boldsymbol{\mu}_i ,$$

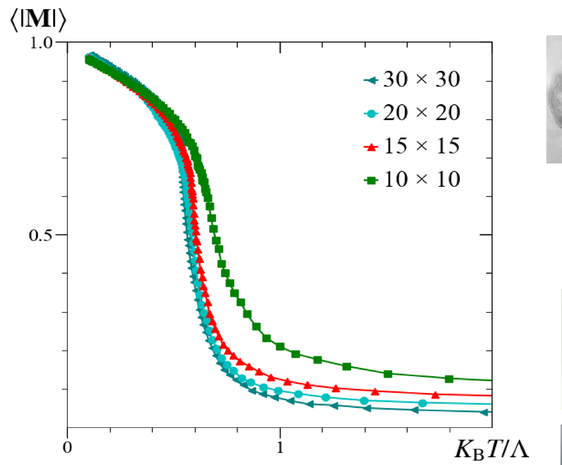
$$\dot{\boldsymbol{\mu}}_i = \mathbf{W}_i \times \boldsymbol{\mu}_i + \frac{1}{2}(\boldsymbol{\mu}_i \times \mathbf{B}_{\text{tot}}) \times \boldsymbol{\mu}_i .$$

- در رژیم اعداد رینولدز کوچک:

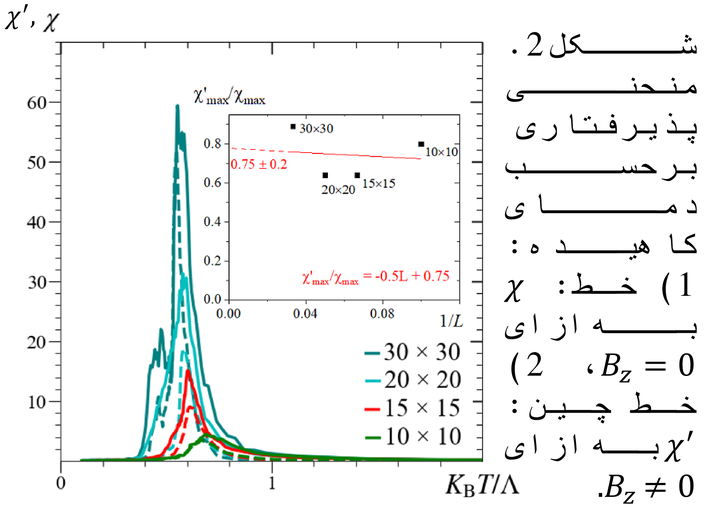
$$\dot{\boldsymbol{\mu}}_i = \mathbf{W}_i \times \boldsymbol{\mu}_i + \frac{1}{2}(\boldsymbol{\mu}_i \times \mathbf{B}_{\text{tot}}) \times \boldsymbol{\mu}_i ,$$

$$\mathbf{B}_{\text{tot}} = \mathbf{B}_{\text{ext}} + \lambda \sum_{j \neq i} \frac{3\hat{\mathbf{r}}_{ij}(\hat{\boldsymbol{\mu}}_j \cdot \hat{\mathbf{r}}_{ij}) - \hat{\boldsymbol{\mu}}_j}{|\mathbf{r}_{ij}|^3} .$$

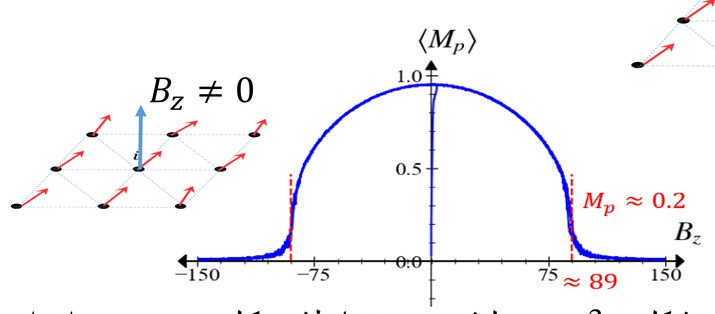
- پارامتر کنترلی بی‌بعد $\lambda = \Lambda / K_B T$ نسبت برهم‌کنش مغناطیسی (Λ) به افتوخیز گرمایی است. در مسأله زیستی، اندازه دوقطبی‌ها و فواصل آنها، λ را مشخص می‌کند و $1/\lambda = k_B T/\Lambda$ همان دمای کاهیده است.
- گسسته‌سازی معادلات با روش اویلر انجام شده است.



شکل 1. میانگین قدر مطلق مغناطش کل برحسب دمای کاهیده.



شکل 2. منحنی پذیرفتاری برحسب دمای کاهیده: χ خط: (1 به ازای $B_z = 0$، (2 خط چین: χ' به ازای $B_z \neq 0$.



شکل 3. مؤلفه مغناطش کل به موازات صفحه برحسب B_z برای شبکه 20×20.

نتایج

در سامانه‌ای از دوقطبی‌های مغناطیسی با گذار فاز پیوسته مواجه می‌شویم. نقطه بحرانی از نمودار پذیرفتاری مشهود است. با وجود میدان $B_z = 0.15\,\mu T$، گذار فاز پیوسته می‌ماند (نمودار خط چین در شکل 2). نمودار داخلی شکل 2 نشان می‌دهد که در حد ترمودینامیک کماکان قله پذیرفتاری واگرا می‌شود. در شکل 3 مقدار میدان آستانه $B_z = 2.8\,\mu T$ را برای از بین رفتن گذار فاز پیوسته برای یک شبکه 20×20 تخمین زده‌ایم.

تحلیل نتایج

معمولا مدل‌های زیستی از برهم‌کنش بین دوقطبی‌ها صرف نظر می‌کنند. حال آنکه برهم‌کنش مغناطیسی سبب گذار فاز پیوسته و واگرایی پذیرفتاری می‌شود. این واگرایی به معنی حساسیت فراوان سامانه به تغییر عامل خارجی است. در مدل آیزینگ میدان خارجی گذار فاز پیوسته را از بین می‌برد اما اینجا با وجود میدان خارجی گذار پیوسته می‌ماند. هرچند این تاب‌آوری در مقابل میدان بسیار کوچکتر از میدان مغناطیسی زمین است.

مراجع

[1] S. Johnsen et al.; "The physics and neurobiology of magnetoreception"; Nat Rev Neuroscience 6, (2005)703-712.

[2] S. Johnsen, et al; "Magnetoreception in animals"; Physics Today 61, (2008) 29.

[3] J. L. Kirshvink, et al; "Magnetite biomineralization in the human brain"; PNAS 89, (1992) 7683-7687.