

(Short Paper) 4細胞緑藻類テトラバエナにおける超細胞間同期と強光適応 : 4 連 QPU アレイによる空間拡張型量子演算モデル

Author: kotoan.gg

Name: Bio-QPU Research Group

Affiliation: Independent Researcher

Publication Date: 2026-09-05

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.22313212>

摘要

4 つの単細胞が四角形に結合して極小のコロニーを形成する緑藻類テトラバエナ (*Tetrabaena socialis*) は、各細胞が独立した鞭毛を持ちながらも流体的に完璧に同期した泳動を見せる。さらに、強光ストレスに対して走光性による退避（逃避）行動をとる近縁種とは異なり、その場に留まりながら細胞内の光保護・防御代謝系を同期作動させる独自の生存戦略を持つ。本稿では、テトラバエナの 4 細胞構造を「4 つのローカル QPU が空間的に結合した最小の多ビット量子アレイ」として定式化する。ポズナー分子内の ^{31}P 核スピンメモリと細胞接着面を介した量子相関により、古典的な分子拡散や膜電位伝導の遅延に依存せず、4 細胞が「単一の量子系」として非局所的に同相同期および代謝最適化を実行している物理メカニズムを明らかにする。

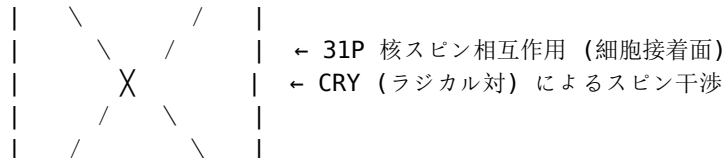
1. 序論：多細胞化の黎明期における「同期遅延のパラドックス」

単細胞から多細胞生物への進化の初期段階に位置するテトラバエナは、最も単純な多細胞体制を持つ。各細胞はそれぞれ独立した代謝系と運動器官（鞭毛）を保有するが、水中で個々の細胞がランダムに動くことはなく、ミリ秒以下の遅延もなく統合された推進力を生み出す。

また、強光ストレス環境下において、単細胞緑藻クラミドモナスや大型コロニーを形成するボルボックス等の近縁種が光から逃れる走光性運動をとるのに対し、テトラバエナは回避行動をとらず、全細胞が一斉に光保護物質の合成や抗酸化応答を同時起動させてその場に留まる。水流のゆらぎや分子拡散に依存する古典的シグナル伝達では、4 つの独立した細胞が環境変化に対して寸分の狂いもなく全体最適解（逃避か防御か）を選択し、運動を同期させる即時性を説明することができない。

2.4 連 QPU アレイモデルの物理機構

【細胞1】(QPU1) — 【細胞2】(QPU2)



【細胞3】(QPU3) — 【細胞4】(QPU4)

▼ (非局所的状態の同時決定)

【4本の鞭毛のコヒーレント同期 & 光保護代謝の同時発現】

1. 細胞接着面における核スピン相関 (QPU のアレイ化) :

4つの細胞が接する中央の結合面には、高密度の膜リン酸基およびポズナー分子群が集積している。各細胞内の³¹P核スピンメモリは個別に閉じず、接着面を介してスピン相互作用を起こし、4細胞全体で1つの「重ね合わせ状態 (4-qubit アレイ)」を形成する。

2. 強光適応の量子アニーリング的評価 (防御戦略の決定) :

受光蛋白クリプトクロム (CRY) が過剰な光エネルギーを感知した際、生じる電子スピン (ラジカル対) が4連QPUアレイ全体で相関演算を実行する。「移動・逃避による運動エネルギー消費」と「その場での光保護機構の作動」のコスト評価を量子重ね合わせ状態で並列評価し、即座に「防御代謝の作動」へと状態を収縮 (射出) させる。

3. 鞭毛運動の非局所的同相同期:

演算結果はQPC (量子パルス通信) を通じて4本の鞭毛基部へ同時に伝達される。古典的な化学的受容・電位伝達のタイムラグを排除することで、流体抵抗の絶え間ない変化に対抗し、「列を乱さず一直線に泳ぐ」パーフェクトな物理的位相同期が達成される。

3. 結論

テトラバエナにおける高度な運動同期と適応戦略は、多細胞化の質的本質が単なる「細胞の物理的集合」ではなく、「個々のQPUがもつれ状態を共有し【多ビットQPUアレイ】へとスケールアップした物理的現象」であることを示す実証例である。本仮説は、LUCAから高等多細胞生物へ至る量子コヒーレンスの空間的拡張プロセスを証明する新たな進化モデルを提供する。

References

1. Kirk, D. L. (1998). *Volvox: Molecular-Genetic Origins of Multicellularity and Cellular Differentiation*. Cambridge University Press.
2. Arakaki, Y., Kawai-Toyooka, H., Hamamura, Y., Higashiyama, T., Namba, K., & Nozaki, H. (2013). The simplest integrated multicellular organism unveiled. *PLoS ONE*, 8(12), e81641.
3. Brumley, D. R., Wan, K. Y., Polin, M., & Goldstein, R. E. (2014). Flagellar synchronization through direct hydrodynamic interactions. *eLife*, 3, e02750.
4. Fisher, M. P. A. (2015). Quantum cognition: The possibility of processing with nuclear spins in the brain. *Annals of Physics*, 362, 593–602.
5. Swift, M. W., Van de Walle, C. G., & Fisher, M. P. A. (2018). Posner molecules: From atomic structure to nuclear spins. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 20(18), 12373–12385.
6. Ritz, T., Adem, S., & Schulten, K. (2000). A model for photoreceptor-based magnetoreception in birds. *Biophysical Journal*, 78(2), 707–718.
7. Kadowaki, T., & Nishimori, H. (1998). Quantum annealing in the transverse Ising model. *Physical Review E*, 58(5), 5355–5363.
8. Lambert, N., Chen, Y. N., Cheng, Y. C., Li, C. M., Chen, G. Y., & Nori, F. (2013). Quantum biology. *Nature Physics*, 9(1), 10–18.
9. Frohlich, H. (1968). Long-range coherence and energy storage in biological systems. *International Journal of Quantum Chemistry*, 2(5), 641–649.
10. Nielsen, M. A., & Chuang, I. L. (2010). *Quantum Computation and Quantum Information* (10th Anniversary ed.). Cambridge University Press.