

文章编号: 1007-4627(2005)04-0310-05

脑科学与量子理论

邱锡钧

(上海大学理学院物理系, 上海 200444)

摘要: 简要回顾了生物学与物理学之间的紧密关系, 其中包括人工神经网络的经典物理模型和脑的某些量子理论; 概要综述了细胞骨架微管的结构和生物功能及有关近期理论研究。注意到微管是细胞和神经元中重要的组成和功能单元, 进而以较大篇幅介绍了近期关于微管的理论研究工作, 特别是基于量子场论中两能级系统的赝自旋模型, 对微管管壁上电子的动力学行为作了较深入的探讨; 此外, 基于量子场论, 对微管中的水分子系统可能存在微波受激辐射也作了阐述。

关键词: 脑科学; 细胞骨架微管; 量子理论; 赝自旋模型; 电磁集体辐射

中图分类号: Q616 **文献标识码:** A

1 引言

1.1 生物学与物理学关系源远流长

法国著名科学家 Descartes (1596. 3—1650. 2) 曾经把人体当作一种机器, 试图用力学来解释血液循环的机制。物理学中一个基本定理——能量守恒定律是在 19 世纪由研究生理学和医学的 Mayer (1814. 11—1878. 3, 德国物理学家和生理学家) 和 Helmholtz (1821. 8—1894. 9, 德国生理学家和物理学家) 首先发现的。美籍匈牙利生物化学家 A. Szent-Gyorgyi (1893. 9—1986. 10) 在 20 世纪 30 年代因人体组织内氧化反应和维生素 C 的研究获得诺贝尔奖。他著述很多, 其中特别有《生命的本质》(1947) 和《癌的电子生物学——癌的新理论》(1976) 等。他总结几十年的经验认为: 要真正了解生命过程, 只到达分子水平还不够, 必需再深入研究电子的行为。换句话说, 只能从量子水平才有可能了解生物体内各种过程的机理。

著名理论物理学家, 量子力学的奠基人 E. Schrodinger (1887—1961) 在《生命是什么? 活细胞的物理学观》一书中用热力学和量子力学理论来解释生命的本质, 开拓了研究生命现象的新途径, 是生命现象的研究进入微观领域的开端。与生命的基本过程有关的性质或生物功能, 都跟物质的分子

结构, 尤其是组成分子的原子外层电子的运动有关。

此外, 量子论奠基人 N. Bohr 以及 Mayer (光合作用)、Delbruck (发现生物突变的物理本质)、Gamov (提出了遗传密码的问题)、Crick (分子生物学)、Bekesy (听觉)、Cooper (视觉)、Hopfield (人工神经网络)、Cormack (X 射线断层摄影)、Neher (膜离子通道) 等物理学家也对生物学做出了贡献。

1.2 量子化、对称性和相位因子——20 世纪物理学的主旋律

著名理论物理学家杨振宁在 1999 年中国科学院建院 50 周年的一次学术会议上, 以“量子化、对称性和相位因子——20 世纪物理学的主旋律”为题, 对 20 世纪物理学的发展道路和辉煌成就做了精辟总结。他认为, 科学上推动 20 世纪革命性发展的最基本动力, 是科学家们对自然界一些基本原理的深入探索和重大发现, 这也是 20 世纪物理学真正的最重要的精神。

过去的一个世纪, 物理学家们曾以“量子化、对称性和相位因子——20 世纪物理学的主旋律”是主要对无生命物质进行了深入的探讨。当今, 在新的世纪, 对生命物质、生命现象的本质的探讨已激起人们的广泛关注。

收稿日期: 2005-10-20

作者简介: 邱锡钧(1936—), 男(汉族), 福建人, 研究员(教授), 博士生导师, 从事中高能核理论、多体量子场论研究工作;
E-mail: xjiu@mail.shu.edu.cn

2 脑功能机理的早期研究

2.1 动作电位势和神经信号的传导

1963年, 诺贝尔生理学和医学奖被授予给澳大利亚国立大学的 Eccles(关于传递神经之间的信息传递机制的研究), 剑桥大学的 Hodgkin 和伦敦大学的 Huxley(关于神经兴奋和传导机制的研究)。他们的贡献在于揭示了钠、钾离子在神经细胞膜的兴奋与抑制中的作用和机制。

Hodgkin 和 Huxley 在神经信号传导研究中发现了动作电位并给出了神经传导的运动方程。他们在 20 世纪 50 年代的卓越研究, 揭示了钠、钾离子在跨膜流动引起神经细胞兴奋过程中膜电位的特征性变化(动作电位)中的作用。根据实验观测神经细胞膜电位变化的结果, 他们用微分方程式准确地表达了动作电位发生的动力学过程(Hodgkin-Huxley 模型), 长期以来它成为研究神经网络数理模型的理论基础。Hodgkin-Huxley 模型的本质是一个积分发火的过程。所谓积分过程是指钠离子缓慢地向细胞内流入的过程, 用数学表达就是一个积分过程(integrate)。当积分的钠离子达到某一个临界点(threshold)的时候, 神经细胞就会突然地开始发火(fire), 也就是动作电位势(action potential)的产生。所以, Hodgkin-Huxley 模型也可以形象地称为积分发火(integrate-and-fire)模型。

2.2 神经传导中的单离子通道

1980年, 德国细胞生理学家 E. Neher 和 B. Sakmann 发明和应用膜片钳技术, 发现了细胞膜存在单离子通道。他们研究基本细胞功能并发现微区-钳定技术。这一技术成果对于研究神经传导中的单离子通道及细胞功能的调控机制至关重要, 并可揭示神经系统、肌肉系统和心血管系统等多种疾病的发病机理。由于这一重大贡献, E. Neher 和 B. Sakmann 共同获得 1991 年诺贝尔奖。

3 人工神经网络模型

基于神经信号传导中发现的动作电位以及神经元之间通过与突触的联结而耦合, 神经生理学家和数学及物理学家模拟大脑神经的功能, 已发展出多种人工神经网络模型。按照对生物神经系统的不同组织层次, 可分为如下数类: 神经元层次模型、组

合式模型、网络层次模型、神经系统层次模型和智能型模型。

按照学习也可分为有导师学习和无导师学习。

Hopfield 自旋网络模型与 Boltzmann 随机网络模型: 属于有导师学习网络模型。每个人工神经元具有两个状态, 神经元之间的关联用突触的连接强度表示, 具有双向性。状态转移机制由自旋-自旋耦合决定, 算法和问题的解具有确定性。后者则具有概率状态转移机制。

自组织网络模型: 属于无师自学网络, 自动向环境学习, 并进行自组织、自稳定和并行处理。主要用于模式识别, 多种信号识别以及信号处理和优化设计等。例如, Kohonen 映射学习网络。

为克服人工神经网络的固有缺陷, 人工神经网络模型研究中的一个重要的新进展, 是把人工神经网络与模糊逻辑相结合。

4 脑的某些量子理论

Umezawa 等在 1967—1979 年之间, 基于量子场论研究大脑的单细胞和多细胞, 提出在脑细胞里, 存在着具有完整排序的量子动力学自由度的空间分布。对于多个脑细胞的系统, 他提出了一个关于量子动力学自由度空间分布改进的物理模型。

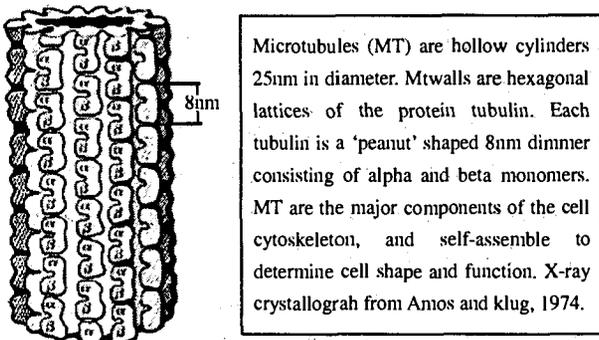
Roger Penrose 于 1989 年在《The Emperor's New Mind》一书中用某些章节探讨了脑的信息处理过程中存在量子规律的可能性。

5 关于细胞骨架微管(MT)的研究

5.1 MT 的结构和生物功能

MT 外径约为 25 nm, 内径约为 15 nm, 长度约为 10^2 — 10^4 nm, 在神经轴突中可长达几个厘米。MT 蛋白以 $\alpha\beta$ 二聚体形式(长度约为 8 nm)头尾相连的方式聚合而组成原丝纤维(protofilament)。MT 就是由 13 根这样的 MT 蛋白原丝纤维螺旋盘绕而成的中空桶状管。MT 蛋白 $\alpha\beta$ 二聚体存在两种构型: α 构型、 β 构型。MT 中空体积内充满了液体水^[1-4](见图 1)。

MT 是细胞骨架中的重要组成成分, 在神经细胞内含量丰富, 是细胞组织和信息处理的中心, 调节和控制细胞活动, 同时维持细胞结构的稳定性并向靶细胞器提供运输通道(见图 2)。



Microtubules (MT) are hollow cylinders 25nm in diameter. Mtwalls are hexagonal lattices of the protein tubulin. Each tubulin is a 'peanut' shaped 8nm dimer consisting of alpha and beta monomers. MT are the major components of the cell cytoskeleton, and self-assemble to determine cell shape and function. X-ray crystallograph from Amos and klug, 1974.

图 1 MT 结构的示意图

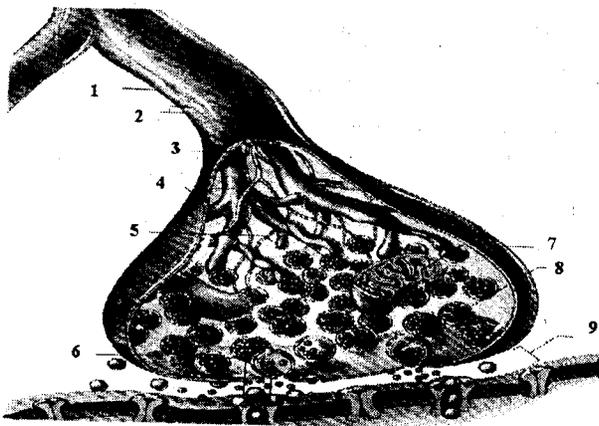


图 2 神经元细胞中的 MT

1 轴突末纤维, 2 神经细丝, 3 细胞膜, 4 MT, 5 突触囊泡, 6 受体部位, 7 线粒体, 8 神经递质分子, 9 突触间。

5.2 MT 的近期理论研究及某些量子理论

Del Giudice 等^[5] 考虑到水分子系统存在电偶极子, 运用真空自发破缺的量子规范场论, 得到 MT 的理论半径 $\sim 15 \text{ nm}$, 该值与经验值一致。Jibu 等^[6] (日本国际研究小组) 基于腔 QED 理论, 提出 MT 中水分子系统可产生超辐射。Sataric 等^[7] 研究了 MT 管壁电偶极子链和管内水分子电偶极场相互耦合。Mavromatos 等^[8] 由 MT 管壁电偶极子链和腔 QED, 探讨了 MT 管中可能存在的量子计算和信息处理。Penrose-Hameroff^[9] 提出了“Orch-OR”模型, 即目标收缩——管乐队模型。认为在脑神经元中的微管系统起着量子计算机的功能。

6 我们关于 MT 的工作

6.1 MT 中水分子的电磁集体辐射^[10]

系统的总哈密顿量(假设水分子为刚性转子):

$$H = \sum_{j=1}^N H_j + H_{e.m.},$$

$$H_j = \frac{\eta^2}{2I} L_j^2 - \mathbf{E} \cdot \boldsymbol{\mu}_j.$$

用 Feynman 路径积分来描述该系统:

$$Z = \int [d\psi d\psi^*] [da, da^*] \cdot \exp(iW[\psi, \psi^*, a, a^*]),$$

系统的拉格朗日函数 (采用自然单位, 取 $\eta = c = 1$):

$$L(u, t) = \frac{i}{4\pi} \sum_{r,k} a_r^*(k, t) \dot{a}_r^*(k, t) + \psi^*(u, t) i \frac{\partial \psi}{\partial t}(u, t) - \psi^*(u, t) \frac{L^2}{4m r_H^2} \psi(u, t) + \frac{2ed_e}{V^{1/2}} i \sum_{r,k} \left[\frac{k}{2} \right]^{1/2} (\boldsymbol{\epsilon}_r \cdot \mathbf{u}) \psi^*(u, t) \psi(u, t) \cdot \{a_r(k, t) e^{-ik \cdot t} - a_r^*(k, t) e^{ik \cdot t}\}.$$

设体积 V 内水分子总数为 N 。引入尺度变换:

$$\psi(u, t) = N^{1/2} \xi(u, t),$$

$$a_r(k, t) = N^{1/2} b_r(k, t);$$

由 Schwinger 量子作用量原理, 则有欧拉-拉格朗日运动方程组:

$$\left\{ \begin{aligned} i \frac{\partial \xi(u, t)}{\partial t} &= \frac{L^2}{4m r_H^2} \xi(u, t) - i2ed_e \left[\frac{N}{V} \right]^{1/2} \cdot \sum_{k,r} (\boldsymbol{\epsilon}_r \cdot \mathbf{u}) \left[\frac{k}{2} \right]^{1/2} \{b_r(k, t) e^{-ik \cdot t} - b_r^*(k, t) e^{ik \cdot t}\} \xi(u, t) \\ i \frac{\partial b_r(k, t)}{\partial t} &= ie^{ik \cdot t} \left[\frac{Nk}{2V} \right]^{1/2} 2ed_e \boldsymbol{\epsilon}_r \cdot \mathbf{u} \cdot \xi(u, t) \\ &\int d\Omega_u \mathbf{u} \xi^*(u, t) \xi(u, t) \end{aligned} \right.$$

在两能级分子系统近似条件下, 经适当的代数运算, 可以得到: MT 中量子辐射场空间尺度 $\lambda = 2\pi/k = 2\pi c/\omega_0 \approx 480 \mu\text{m}$; MT 中量子辐射场时间尺度 10^{-14} s 。

总之, 基于量子场论, MT 中的水分子系统可能存在自由电偶极子激光一类的电磁集体辐射, 其波长约 $480 \mu\text{m}$, 特征时间约 10^{-14} s 。

此外, 基于腔 QED, MT 中的水分子系统可能按量子力学的演化(运算)规律建立起有关量子的逻辑

辑门，从而做出适当的量子计算^[11]。

6.2 MT 管壁的赝自旋模型^[12]

MT 管壁的赝自旋模型物理图像如图 3 所示。

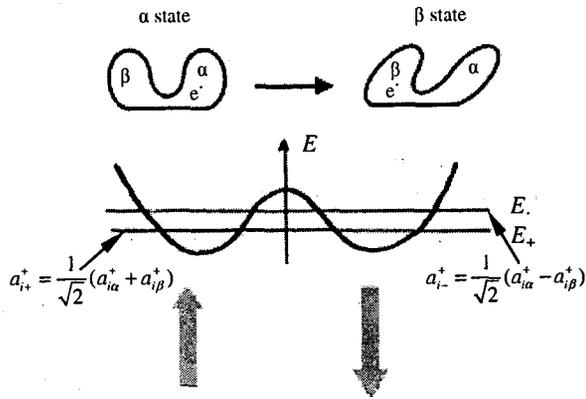


图 3 MT 管壁的赝自旋模型示意图

系统的 Hamiltonian:

$$\hat{H} = \sum_i H_0(i) + \frac{1}{2} \sum_{i \neq j} H_{int}(i, j),$$

$$H_0(i) = \sum_{\lambda} E_{\lambda} a_{i\lambda}^{\dagger} a_{i\lambda},$$

$$H_{int}(i, j) = \sum_{\lambda, \nu, \gamma, \delta} v_{\lambda, \nu, \gamma, \delta}(i, j) a_{i\lambda}^{\dagger} a_{i\nu} a_{j\gamma}^{\dagger} a_{j\delta}.$$

系统的 Pseudo-spin:

$$S_x = \frac{1}{2}(a_{\alpha}^{\dagger} a_{\beta} + a_{\beta}^{\dagger} a_{\alpha}),$$

$$S_y = \frac{1}{2i}(a_{\alpha}^{\dagger} a_{+} - a_{+}^{\dagger} a_{\alpha});$$

$$S_z = \frac{1}{2}(a_{\alpha}^{\dagger} a_{\alpha} - a_{\beta}^{\dagger} a_{\beta}),$$

$$S_x = \frac{1}{2i}(a_{+}^{\dagger} a_{+} - a_{+}^{\dagger} a_{-});$$

$$S_z = \frac{1}{2}(a_{\alpha}^{\dagger} a_{\alpha} - a_{\beta}^{\dagger} a_{\beta}),$$

$$S_z = \frac{1}{2}(a_{+}^{\dagger} a_{+} + a_{-}^{\dagger} a_{-}).$$

在赝自旋系统中的 Hamiltonian:

$$\hat{H} = - \sum_i \Omega S_x(i) - \sum_i A_i S_z(i) - \frac{1}{2} \sum_{i \neq j} J_{ij} S_z(i) S_z(j) - \frac{1}{2} \sum_{i \neq j} B_{ij} S_x(i) S_x(j),$$

$$\Omega \cong E_- - E_+.$$

平均场近似下的结果:

顺电相

$$\langle S_x(i) \rangle = \frac{1}{2} \text{th}\left(\frac{1}{2} \beta \Omega\right), \langle S_y(i) \rangle = 0,$$

$$\langle S_z(i) \rangle = 0, \beta = \frac{1}{kT};$$

铁电相

$$\langle S_x(i) \rangle = \frac{1}{2} w^{-1} \Omega \text{th}\left(\frac{1}{2} \beta w\right),$$

$$\langle S_y(i) \rangle = 0, \langle S_z(i) \rangle \neq 0,$$

$$2w = J_0 \text{th}\left(\frac{1}{2} \beta w\right), J_0 = \sum_j J_{ij}.$$

从而得到相变公式为

$$\frac{2\Omega}{J_0} = \text{th}\left(\frac{\Omega}{2kT_c}\right).$$

取介电常数 $\epsilon=10$ ，管长 $L=1 \mu\text{m}$ ，可得 $J_0 \approx 0.11 \text{ eV}$ ，相变温度 $T_c \approx 312 \text{ K}$ 。

当外场 $E_i(t)$ 存在时，修正的总 Hamiltonian^[13]:

$$\hat{H}' = \hat{H} + \hat{H}_{el} = - \sum_i \Omega S_x(i) - \frac{1}{2} \sum_{i \neq j} J_{ij} S_z(i) S_z(j) + 2\mu \sum_i E_i(t) S_z(i).$$

Heisenberg 图景中的运动方程:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{S}(i, t) = \frac{i}{\hbar} [\hat{H}', \mathbf{S}(i, t)],$$

无规位相近似:

$$\langle S^{\xi}(i) S^{\xi}(j) \rangle_t = \langle S^{\xi}(i) \rangle_t \langle S^{\xi}(j) \rangle_t,$$

利用 Fourier 变换，可以得到内秉激发频率:

$$\omega_{in}^2(q) = (J_0 \langle S_z \rangle)^2 + \Omega(\Omega - J_q \langle S_x \rangle),$$

$$T > T_c, \langle S_z(i) \rangle = 0, J_q = 0,$$

$$\omega_{in} = \Omega : 1.4 \times 10^{-3} \text{ eV} : 2 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}.$$

$$T < T_c, \langle S_x \rangle = \Omega / J_0,$$

$$\omega_{in} = J_0 \langle S_z \rangle \leq 0.11/2 \text{ eV} : 8 \times 10^{13} \text{ s}^{-1}.$$

在外场作用下，基于 Heisenberg 图景的运动方程，采用无规位相近似，我们可以得到表征系统的赝自旋运动方程，并求得系统的内秉激发频率。这对于神经信息处理的机制具有一定的启示。

7 结束语

我们现今对于世界的图景的认识是由经典和量子理论的法则所制约、控制的。基于这些法则的图

像,足以描述头脑和精神吗?

在脑功能的某些方面,乃至基本方面量子理论可能是必不可少的。有关学科的学术界正在从理论和实验上开始深入的研究,并正在不断取得进展!他们的进展必将相互促进,特别是与量子计算、量

子信息科学相互促进。

致谢 感谢中国科学院上海光机所李儒新研究员的宝贵支持和合作,并感谢张启仁教授的关心和有益讨论。

参 考 文 献:

- [1] Amos L, Klug A. *J Cell Sci*, 1974, **14**: 523.
- [2] Nogales E, Wolf S G, Downing K H. *Nature*, 1998, **391**: 199.
- [3] Engelborghs Y. *Nanobiology*, 1992, **1**: 97.
- [4] Dustin P. *Microtubules*. Berlin: Springer, 1984.
- [5] Del Giudice E, Doglia S, Milani M, *et al.* *Nucl Phys*, 1986, **B275**: 185.
- [6] Jibu M, Hagan S, Hameroff S R, *et al.* *Biosystems*, 1994, **32**: 195.
- [7] Sataric M V, Tuszyński J A, Zakula R B. *Phys Rev*, 1993, **E48**: 589.
- [8] Mavromatos N E, Mershin A, Nanopoulos D V. *Int J Mod Phys*, 2002, **B16**: 3 623.
- [9] Penrose R, Hameroff S R. *J Conscious Stud*, 1995, **2**: 98.
- [10] Chen Y, Qiu X J. *Acta Phys Sinica*, 2003, **52**: 1 554 (in Chinese).
- [11] Jiang Y, Qiu X J. *Acta Laser Biology Sinica*, 2004, **13**: 406 (in Chinese).
- [12] Chen Y, Qiu X J, Li R X. *Chin Phys Lett*, 2004, **21**: 2 313; *Chin Phys*, 2005, **14**: 427.
- [13] Chen Y, Qiu X J, Dong X L. A Theory for Cell Microtubule Wall in External Field and Pseudo-spin Wave Excitation. *Physica A* (accepted).

Brain Science and Quantum Theory

QIU Xi-jun

(*Department of Physics, Shanghai University, Shanghai 200444, China*)

Abstract: The present paper briefly reviews the relationship between biology and physics, especially including the classical physics models for the artificial neuron networks, some quantum theories for brains, and simply describes the structures and functions of cytoskeletal microtubules (MTs) in cells and some recent theoretical studies on MTs.

Noting MTs are the important components and function units in cells and neurons, furthermore, the paper lays emphasis on our recent theoretical work on MTs. Particularly, based on the pseudo-spin quantum theory, the dynamic behavior of electrons on the MT wall has been discussed in some detail. Based on the quantum field theory, it has been described that the maser radiation might exist in the water molecular system within the MT.

Key words: brain science; cytoskeletal microtubule; quantum theory; pseudo-spin model; electromagnetic collective radiation