文章编号：1007－4627(2009)04－0343－05

低频电磁辐射与脑神经细胞微管的相互作用*

高 峰[1,2]，肖德涛[1]，张登玉[2]，周 熠[1,2]

(1 南华大学核科学技术学院，湖南 衡阳 421001；
2 衡阳师范学院物理与电子信息科学系，湖南 衡阳 421008)

摘 要：研究了低频电磁辐射场与脑神经系统的相互作用规律及其机理。电磁辐射为非电离低频电磁场，将脑神经细胞骨架微管(MT)中的两态物理系统进行量子化，用密度矩阵描述脑神经系统中信息位的状态，建立并求解脑神经系统中信息位的动力学方程。结果表明：当非电离低频电磁辐射射向大脑时，脑神经系统中信息位的密度矩阵非对角元在任意时刻都不为零，能够保持较好的量子相干性，脑神经系统的功能不会受到破坏。

关 键 词：电磁辐射；神经细胞；非热效应；信息位

中图分类号：Q684 **文献标识码**：A

1 引言

电磁辐射可以分为两大类：电离辐射和非电离辐射。电离辐射是能够引起物质电离的电磁辐射，它主要有 α 射线、β 射线、γ 射线、X 射线、中子、质子和原子核等。而非电离辐射是指不能导致物质电离的电磁辐射，如极低频(3—3000 Hz)、甚低频(3000—30000 Hz)、射频(30000—300000 Hz)电磁波、红外线和激光等。

电磁辐射对生物体的影响和破坏作用是众所周知的，研究表明，中枢神经系统是电磁辐射损伤最敏感的部位，电磁辐射可以引起学习和记忆能力下降及脑组织结构的破坏[1,2]。电磁辐射对机体的生物学作用取决于其波长或频率、作用时间、波的性质、场强以及个体差异。一般说来，其生物学活性随波长的减小或频率的增高而递增[3]。生物体吸收了电磁辐射能后，体内可以产生两种生物学效应：热效应和非热效应。热效应是指机体组织吸收了电磁辐射能后，使体内组织器官的温度升高，引起的生理或病理效应；非热效应是指不能用热效应来解释的使生物体状态发生改变的异常现象。对辐射与生物体相互作用的热效应的机理已基本探明，生物体内的极性大分子在辐射产生的电磁场力作用下发生振动产生热量，引起组织温度升高，导致血管扩张、体内酶的失活、蛋白质变性，从而引起循环障碍、代谢失调，造成组织破坏或死亡。而对非热效应的机理，人们主要是从生物学和化学方面去进行研究。目前认为是机体内的分子、离子在外界电磁场的感应下发生振动，引起细胞膜流动性、膜电位及膜通透性的变化，进而通过细胞内第二信使，导致一系列蛋白激酶及其介导的信号通路的改变，最终影响基因转录或导致 DNA 突变，造成细胞凋亡或坏死[4,5]。

大脑是人的最精巧、最复杂的器官，人的感觉、运动、技巧、语言、思维乃至情感、个性等一切心理活动和认识功能都是大脑的功能。大脑是自然界中最复杂的系统，思维是自然界中最复杂的物质运动形式。揭示大脑的工作原理是当代自然科学的重大任务。长期以来，人们从细胞、分子和核团等各个水平上对大脑进行了系统研究，但是直到今天，人们对大脑的认识仍然还处于非常初级的阶段，对于心理活动和认知功能的脑机制无法给出满意的解释。本文从量子物理学角度出发，依据量子信息和量子计算的基本理论研究非电离辐射与脑神经系统的相互作用规律。

* **收稿日期**：2009－03－11；**修改日期**：2009－05－31
* **基金项目**：湖南省自然科学基金资助项目(06JJ5118)
作者简介：高峰(1960－)，男(汉族)，湖南衡阳人，教授，从事核技术及应用、量子信息与量子计算研究；
E-mail：hygfeng@163.com

2 相互作用模型

1963 年，Hodgkin 和 Huxley 在神经信号传导研究中发现了动作电位，他们根据实验观测神经细胞膜电位变化的结果，并用微分方程准确地表达了动作电位发生的动力学过程——神经信号传导方程。1980 年，Neher 和 Sakmann 发明和应用膜片钳技术，发现了细胞膜中存在单粒子通道，这一成果对于研究神经细胞功能的调控机制是非常重要的，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。基于这些发现，人们为了模拟大脑神经的功能，提出了多种神经网络模型[6]，如神经元层次模型、神经系统层次模型、网络层次模型、组合式模型及智能型模型等，认为大脑的绝大多数功能是通过神经元群体的网络行为来实现的[7, 8]。1974 年，Amos 等根据 X 射线晶体衍射实验指出在神经细胞内含有丰富的微管(MT)，它是细胞骨架的重要组成部分，MT 外径约为 25 nm，内径约为 14 nm，它是微管蛋白(tubulin)的聚合物，约占微管总蛋白的 80%左右，微管蛋白以 α 和 β 二聚体形式头尾相连聚合而组成原丝纤维(Protofilament)[9]。1982 年，Hameroff 等指出 MT 是细胞组织和信息处理的中心，调节和控制细胞活动，维持细胞结构的稳定性[10]。

根据 Amos 和 Hameroff 等的工作，我们有理由认为在神经细胞中，微管蛋白的两种构型(α 构型和 β 构型)是天然的两态物理系统，它们可以用来充当信息的载体——信息位(bit)，由这些信息位可以组合出许许多多的逻辑门，承担神经信号的存储、传递和处理任务。近年来，国内外部分学者在这方面做了许多卓有成效的工作，如 Mavromatos 等认为细胞 MT 系统中的水分子与量子计算中的腔量子电动力学(QED)方案极为相似，因此将 MT 系统中的水分子当作腔 QED 模型来处理，并且研究了 MT 中的能量传递和量子相干特性[11, 12]；蒋懿和邱锡钧等人基于腔 QED 模型及有关的量子幺正变换将量子逻辑门引入到 MT 中的水分子系统，给出了细胞 MT 中一种可能出现的量子计算[13]；陈莹等人指出，在 MT 中由于水分子系统与电磁场的相互作用，可能存在着极为微弱的自由电偶极子激光辐射[14]等。

现将微管蛋白的两种构型简化为一个理想的具有高低两个非简并能级 E_+ 和 E_- 的二能级原子系统，与之发生相互作用的电磁辐射场由下式描述：

$$E = E_0(\cos\omega t) = \frac{E_0}{2}(e^{i\omega t} + e^{-i\omega t}) , \tag{1}$$

式中 E_0 是电场强度，ω 为场的谐振频率。在(1)式中，我们没有考虑电磁辐射场的磁分量，是因为相对电分量来说它较少，且磁分量对神经细胞的动作电位不会产生影响。考虑电磁辐射场的波长在宏观尺度范围内，则神经细胞 MT 与电磁辐射场的相互作用哈密顿算符为[15]

$$\hat{H} = \hbar\omega_0 S_z + \lambda E_0(e^{i\omega t} + e^{-i\omega t})S^+ + \lambda E_0(e^{i\omega t} + e^{-i\omega t})S^- , \tag{2}$$

式中 ω_0 为玻尔频率，即

$$\omega_0 = \frac{E_+ - E_-}{\hbar} , \tag{3}$$

λ 为辐射场与脑神经细胞 MT 中信息位的耦合常数，$S^{\pm}$ 和 S_Z 为赝自旋算符。

3 神经细胞信息位的状态演化规律

为了方便起见，我们采用相互作用表象。在此表象中，系统的哈密顿算符可写为

$$\hat{H}_I(t) = \lambda E_0[e^{i(\omega-\omega_0)t} + e^{-i(\omega+\omega_0)t}]S^+ + \lambda E_0[e^{i(\omega+\omega_0)t} + e^{-i(\omega-\omega_0)t}]S^- 。 \tag{4}$$

在(4)式中，$e^{\pm i(\omega+\omega_0)t}$描述原子与电场相互作用过程的能量不守恒过程，它是快速振荡的非旋波项。我们采用旋波近似法[16]，可以在(4)式中略去含有 $e^{\pm i(\omega+\omega_0)t}$因子的项，故有：

$$\hat{H}_I(t) = \lambda E_0 e^{i(\omega-\omega_0)t}S^+ + \lambda E_0 e^{-i(\omega-\omega_0)t}S^- 。 \tag{5}$$

根据量子力学原理，系统密度算符满足如下方程：

$$i\hbar\frac{\partial\rho_I(t)}{\partial t} = [\hat{H}_I(t), \rho_I(t)] 。 \tag{6}$$

设在 $t=0$ 时刻开始，信息位与场发生相互作用，因此 $\hat{H}_I(t)$与 $\rho_I(0)$互相对易，即有：

$$[\hat{H}_I(t), \rho_I(t)] = 0 。 \tag{7}$$

我们采用迭代法求解(6)式，并利用(7)式，可以得到：

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} = -\frac{1}{\hbar^2}\int_0^t \left\{\hat{H}_I(t), [\hat{H}_I(t'), \rho_I(t')]\right\} dt' 。 \tag{8}$$

在上述积分中，取马尔可夫(Markov)近似[16, 17]

$$\rho_I(t') \approx \rho_I(t) \ , \tag{9}$$

则(8)式变为

$$\dot{\rho} = \frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{1}{\hbar^2}\int_0^t \{\hat{H}_I(t), [\hat{H}_I(t'), \rho_I(t)]\}\, \mathrm{d}t' \ 。 \tag{10}$$

(10)式中的被积函数为

$$\begin{aligned}\left\{\hat{H}_I(t),\ [\hat{H}_I(t'),\ \rho_I(t)]\right\} = \\ &\hat{H}_I(t)\hat{H}_I(t')\rho_I(t) - \hat{H}_I(t)\rho_I(t)\hat{H}_I(t') - \\ &\hat{H}_I(t')\rho_I(t)\hat{H}_I(t) + \rho_I(t)\hat{H}_I(t')\hat{H}_I(t) \ 。\end{aligned} \tag{11}$$

再利用(5)式，上式右边的第 1 项化为

$$\begin{aligned}\hat{H}_I(t)\hat{H}_I(t')\rho_I(t) = \\ &\lambda E_0 \mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega-\omega_0)t} S^+ \hat{H}_I(t')\rho_I(t) + \\ &\lambda E_0 \mathrm{e}^{-\mathrm{i}(\omega-\omega_0)t} S^- \hat{H}_I(t')\rho_I(t) \\ &= \lambda^2 E_0^2 \mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega-\omega_0)(t+t')} S^+ S^+ \rho_I(t) + \\ &\lambda^2 E_0^2 \mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega-\omega_0)(t-t')} S^+ S^- \rho_I(t) + \\ &\lambda^2 E_0^2 \mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega-\omega_0)(t'-t)} S^- S^+ \rho_I(t) + \\ &\lambda^2 E_0^2 \mathrm{e}^{-\mathrm{i}(\omega-\omega_0)(t+t')} S^- S^- \rho_I(t) \ 。\end{aligned} \tag{12}$$

同理可得

$$\begin{aligned}\hat{H}_I(t)\rho_I(t)\hat{H}_I(t') = \\ &\lambda^2 E_0^2 \mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega-\omega_0)(t+t')} S^+ \rho_I(t) S^+ + \\ &\lambda^2 E_0^2 \mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega-\omega_0)(t-t')} S^+ \rho_I(t) S^- + \\ &\lambda^2 E_0^2 \mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega-\omega_0)(t'-t)} S^- \rho_I(t) S^+ + \\ &\lambda^2 E_0^2 \mathrm{e}^{-\mathrm{i}(\omega-\omega_0)(t+t')} S^- \rho_I(t) S^- ,\end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned}\hat{H}_I(t')\rho_I(t)\hat{H}_I(t) = \\ &\lambda^2 E_0^2 \mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega-\omega_0)(t'+t)} S^+ \rho_I(t) S^+ + \\ &\lambda^2 E_0^2 \mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega-\omega_0)(t'-t)} S^+ \rho_I(t) S^- + \\ &\lambda^2 E_0^2 \mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega-\omega_0)(t-t')} S^- \rho_I(t) S^+ + \\ &\lambda^2 E_0^2 \mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega-\omega_0)(t'+t)} S^- \rho_I(t) S^- ,\end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned}\rho_I(t)\hat{H}_I(t')\hat{H}_I(t) = \\ &\lambda^2 E_0^2 \mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega-\omega_0)(t'+t)} \rho_I(t) S^+ S^+ + \\ &\lambda^2 E_0^2 \mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega-\omega_0)(t'-t)} \rho_I(t) S^+ S^- + \\ &\lambda^2 E_0^2 \mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega-\omega_0)(t-t')} \rho_I(t) S^- S^+ + \\ &\lambda^2 E_0^2 \mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega-\omega_0)(t'+t)} \rho_I(t) S^- S^- \ 。\end{aligned} \tag{15}$$

若设 $|1\rangle$ 和 $|0\rangle$ 分别为脑神经系统 MT 中高、低两个能级所对应的状态，则有：

$$\begin{aligned}\dot{\rho}_{10} = \langle 1|\dot{\rho}|0\rangle = \\ &-\frac{1}{\hbar^2}\int_0^t \langle 1|\left\{\hat{H}_I(t),\ [\hat{H}_I(t'),\ \rho_I(t)]\right\}|0\rangle \mathrm{d}t' \ ,\end{aligned} \tag{16}$$

而

$$\begin{aligned}\langle 1|\hat{H}_I(t)\hat{H}_I(t')\rho_I(t)|0\rangle = \\ &\langle 1|\lambda^2 E_0^2 \mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega-\omega_0)(t+t')} S^+ S^+ \rho_I(t)|0\rangle + \\ &\langle 1|\lambda^2 E_0^2 \mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega-\omega_0)(t-t')} S^+ S^- \rho_I(t)|0\rangle + \\ &\langle 1|\lambda^2 E_0^2 \mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega-\omega_0)(t-t')} S^- S^+ \rho_I(t)|0\rangle + \\ &\langle 1|\lambda^2 E_0^2 \mathrm{e}^{-\mathrm{i}(\omega-\omega_0)(t+t')} S^- S^- \rho_I(t)|0\rangle ,\end{aligned} \tag{17}$$

上式中右边的第 1，4 项为快速振荡项，可以忽略，同时忽略对密度矩阵非对角元的值为零的项，则(17)式变为

$$\langle 1|[\hat{H}_I(t)\rho_I(t)\hat{H}_I(t')]|0\rangle = \lambda^2 E_0^2 \mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega-\omega_0)(t-t')}\rho_{10} \tag{18}$$

同理可以得到

$$\begin{aligned}\langle 1|[\hat{H}_I(t)\rho_I(t)\hat{H}_I(t')]|0\rangle = \\ &\langle 1|\lambda^2 E_0^2 \mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega-\omega_0)(t+t')} S^+ \rho_I(t) S^+|0\rangle + \\ &\langle 1|\lambda^2 E_0^2 \mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega-\omega_0)(t-t')} S^+ \rho_I(t) S^-|0\rangle + \\ &\langle 1|\lambda^2 E_0^2 \mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega-\omega_0)(t'-t)} S^- \rho_I(t) S^+|0\rangle + \\ &\langle 1|\lambda^2 E_0^2 \mathrm{e}^{-\mathrm{i}(\omega-\omega_0)(t+t')} S^- \rho_I(t) S^-|0\rangle ,\end{aligned} \tag{19}$$

忽略密度矩阵对角元的项，于是得

$$\begin{aligned}\langle 1|\hat{H}_I(t)\rho_I(t)\hat{H}_I(t')|0\rangle = \\ &\langle 1|\lambda^2 E_0^2 \mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega-\omega_0)(t-t')} S^+ \rho_I(t) S^-|0\rangle + \\ &\langle 1|\lambda^2 E_0^2 \mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega-\omega_0)(t-t')} S^- \rho_I(t) S^+|0\rangle = 0,\end{aligned} \tag{20}$$

$$\begin{aligned}\langle 1|\hat{H}_I(t')\rho_I(t)\hat{H}_I(t)|0\rangle = \\ &\langle 1|\lambda^2 E_0^2 \mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega-\omega_0)(t+t')} S^+ \rho_I(t) S^+|0\rangle + \\ &\langle 1|\lambda^2 E_0^2 \mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega-\omega_0)(t'-t)} S^+ \rho_I(t) S^-|0\rangle + \\ &\langle 1|\lambda^2 E_0^2 \mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega-\omega_0)(t-t')} S^- \rho_I(t) S^+|0\rangle + \\ &\langle 1|\lambda^2 E_0^2 \mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega-\omega_0)(t'+t)} S^- \rho_I(t) S^-|0\rangle = 0 \ ,\end{aligned} \tag{21}$$

$$\begin{aligned}\langle 1|\rho_I(t)\hat{H}_I(t')\hat{H}_I(t)|0\rangle = \\ &\langle 1|\lambda^2 E_0^2 \mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega-\omega_0)(t'+t)} \rho_I(t) S^+ S^+|0\rangle + \\ &\langle 1|\lambda^2 E_0^2 \mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega-\omega_0)(t'-t)} \rho_I(t) S^+ S^-|0\rangle + \\ &\langle 1|\lambda^2 E_0^2 \mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega-\omega_0)(t-t')} \rho_I(t) S^- S^+|0\rangle + \\ &\langle 1|\lambda^2 E_0^2 \mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega-\omega_0)(t'+t)} \rho_I(t) S^- S^-|0\rangle \\ &= \lambda^2 E_0^2 \mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega-\omega_0)(t-t')}\rho_{10} ,\end{aligned} \tag{22}$$

则(16)式变为

$$\dot{\rho}_{10} = -\frac{1}{\hbar^2}\int_0^t 2\lambda^2 E_0^2 \mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega-\omega_0)(t-t')}\rho_{10}\, \mathrm{d}t' \ 。 \tag{23}$$

我们可以用同样的方法得出

$$\dot{\rho}_{01}=-\frac{1}{\hbar^2}\int_0^t 2\lambda^2 E_0^2 \mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega-\omega_0)(t'-t)}\rho_{01}\mathrm{d}t' 。\quad (24)$$

现在求解(23)式与(24)式。由于 ρ_{10} 与 ρ_{01} 中不含 $\mathrm{d}t'$，故(23)式为

$$\dot{\rho}_{10}=-\frac{1}{\hbar^2}\int_0^t 2\lambda^2 E_0^2 \mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega-\omega_0)(t-t')}\rho_{10}\mathrm{d}t' = \frac{2\lambda^2 E_0^2\rho_{10}}{\mathrm{i}\hbar^2(\omega-\omega_0)}\left[1-\mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega-\omega_0)t}\right] 。\quad (25)$$

在上式中，由于 $(2\lambda^2 E_0^2)/[\mathrm{i}\hbar^2(\omega-\omega_0)]$ 为一常量，则可以解出 ρ_{10}，有：

$$\frac{\mathrm{d}\rho_{10}}{\rho_{10}}=\frac{2\lambda^2 E_0^2}{\mathrm{i}\hbar^2(\omega-\omega_0)}\left[1-\mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega-\omega_0)t}\right]\mathrm{d}t ,\quad (26)$$

所以

$$\rho_{10}=\rho_{10}(0)\exp\left\{\frac{2\lambda^2 E_0^2 t}{\mathrm{i}\hbar^2(\omega-\omega_0)}+\frac{2\lambda^2 E_0^2}{\hbar^2(\omega-\omega_0)^2}\exp[\mathrm{i}(\omega-\omega_0)t]\right\} 。\quad (27)$$

同样，(24)式也可以化为

$$\dot{\rho}_{01}=-\frac{1}{\hbar^2}\int_0^t 2\lambda^2 E_0^2 \mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega-\omega_0)(t'-t)}\rho_{01}\mathrm{d}t' = -\frac{2\lambda^2 E_0^2\rho_{01}}{\mathrm{i}\hbar^2(\omega-\omega_0)}\left[1-\mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega-\omega_0)t}\right] ,\quad (28)$$

即

$$\frac{\mathrm{d}\rho_{01}}{\rho_{01}}=-\frac{2\lambda^2 E_0^2}{\mathrm{i}\hbar^2(\omega-\omega_0)}\left[1-\mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega-\omega_0)t}\right]\mathrm{d}t ,$$

所以

$$\rho_{01}=\rho_{01}(0)\exp\left\{-\frac{2\lambda^2 E_0^2 t}{\mathrm{i}\hbar^2(\omega-\omega_0)}+\frac{2\lambda^2 E_0^2}{\hbar^2(\omega-\omega_0)^2}\exp[\mathrm{i}(\omega-\omega_0)t]\right\} 。\quad (29)$$

4 结果分析与讨论

相对于宏观世界来说，量子体系是非常脆弱的，它对周围环境特别敏感。但是，在神经细胞MT中若要实现量子计算，就必须保证信息位的状态具有量子相干性，而且它随时间的演化过程必须是幺正演化。否则，将改变量子计算的编码信息，从而破坏量子计算，使量子计算出现差错。量子干涉与经典干涉虽然在形式上有些相似，但它们有着本质的区别。量子相干性能够简单地通过密度矩阵非对角元素反映出来，若密度矩阵的非对角元素为零，表示不具有量子相干性；若密度矩阵的非对角元素不等于零，则表示系统具有量子相干性。

由(27)式与(29)式可以看出，神经细胞中的信息位与低频电磁辐射场相互作用时，其密度矩阵的非对角元素是与时间有关的函数，并且在任意时刻都不等于零。(27)和(29)式表明：密度矩阵非对角元素都是时间的指数函数，它们不仅与时间有关，而且还与辐射场的电场强度 E_0、谐振频率 ω 等因素有关。在指数因子中，虚数部分代表位相，只需要考虑实数部分就可以了，所以有

$$\rho_{10}=\rho_{01}\Rightarrow\rho(0)\times\exp\left[\frac{2\lambda^2 E_0^2}{\hbar^2(\omega-\omega_0)^2}\cos(\omega-\omega_0)t\right] ,\quad (30)$$

即密度矩阵非对角元素在任何时刻都不等于零，这说明时间对体系的量子相干性影响不大。由此可以得出：在低频(非量子化的)电磁辐射场作用下，如果不是因为高强度引起热效应而损伤神经系统，将不会造成神经系统功能紊乱。不过，对于频率特别高的电磁辐射情况就不同了，因为波长很短，此时必须将辐射场进行量子化。

必须指出，以上研究分析没有考虑环境温度的影响，整个讨论都是假设了脑神经系统及辐射场处于正常温度下。对于动物体而言，不仅是神经系统，其他组织系统也同样会因为环境温度的变化而出现各种各样的生物学表现或病理变化。在辐射场作用下，有可能引起脑部组织温度变化而导致神经系统产生功能性变化，这是值得探讨的问题。

参考文献(References)：

[1] Zuo Hongyan, Wang Dewen, Peng Ruiyun, *et al*. Acta Biophysica Sinica, 2007, **23**(1): 47(in Chinese).
(左红艳，王德文，彭瑞云等. 生物物理学报，2007，**23**(1)：47.)

[2] Johansen C. Epidemiolog, 2000, **11**: 539.

[3] Xu Wulin, Lü Hang. Environmental Pollution Control, 1995, **17**(3): 31(in Chinese).
(许武林，吕航. 环境污染与防治，1995，**17**(3)：31.)

[4] Wang Dewen, Peng Ruiyun. Chin J Ind Hyg Occup Dis, 2003, **21**(5): 321(in Chinese).
(王德文，彭瑞云. 中华劳动卫生职业病杂志，2003，**21**(5)：321.)

[5] Banjk S, Bandyopadhyay S, Ganguly S. Biores Tech, 2003, **87**: 155.

[6] Qiu Xijun. Nuclear Physics Review，2005，**22**(4)：310(in Chinese).
(邱锡鈞.原子核物理评论，2005，**22**(4)：310.)
[7] Zhou Wei，Liu Xiuli，Lü Xiaohua，*et al*. Chinese Science Bulletin，2008，**53**(1)：49(in Chinese).
(周炜，刘秀丽，吕晓华等.科学通报，2008，**53**(1)：49.)
[8] Nagayama S，Zeng S，Xiong W，*et al*. Neuron，2007，**53**(6)：789.
[9] Amos L A，Klug A. J Cell Sci，1974，**14**：523.
[10] Hameroff S R，Watt R C. J Theor Biol，1982，**98**：549.
[11] Mavromatos N E，Nanopoulos D V. Int J Mod Phys，1998，**B12**：517.
[12] Mavromatos N E，Mershin A. Int J Mod Phys，2002，**B16**(24)：3623.
[13] Jiang Yi，Qiu Xijun，Li Ruxin. Acta Laser Biology Sinica，2004，**13**(6)：406(in Chinese).
(蒋懿，邱锡钧，李儒新.激光生物学报，2004，**13**(6)：406.)
[14] Chen Ying，Qiu Xijun. Acta Physica Sinica，2003，**52**(6)：1554(in Chinese).
(陈莹，邱锡钧.物理学报，2003，**52**(6)：1554.)
[15] Gao Feng，Zhou Yi，Zhang Dengyu. Chinese Journal of Atomic and Molecular Physics，2006，**4**(5)：13(in Chinese).
(高峰，周熠，张登玉.原子与分子物理学报，2006，**4**(5)：13.)
[16] Peng J S，Li G X，Introduction of Modern Quantum Optics. Beijing：Science Press，1996，26，83(in Chinese).
(彭金生，李高祥.近代量子光学导论.北京：科学出版社，1996，26，83.)
[17] Gao Feng，Xiao Detao，Zhang Dengyu. Chinese Journal of Quantum Electronics，2008，**25**(6)：692(in Chinese).
(高峰，肖德涛，张登玉.量子电子学报，2008，**25**(6)：692.)

Low-frequency Electromagnetic Radiation Field Interaction with Cerebral Nervous MT*

GAO Feng[1,2,1)]，XIAO De-tao[2]，ZHANG Den-yu[2]，ZHOU Yi[1,2]
(1 *College of Nuclear Science and Technology*，*Nanhua University*，*Hengyang* 421001，*Hunan*，*China*；
2 *Department of Physics and Electronic Information Science*，*Hengyang Normal University*，*Hengyang* 421008，*Hunan*，*China*)

Abstract：We investigate the interaction characteristics and mechanism of electromagnetic radiation field and cerebral nervous system. When the electromagnetic radiation is non-ionization low-frequency electromagnetic field，the two-state physical system in the cytoskeletal microtubule (MT) can be quantized. The state of information bits in cerebral neurous system is described by density matrix，and the system dynamics equation is established and solved. It indicates that when the brain is exposed to non-ionization low-frequency electromagnetic field，the density matrix non-opposite angle element of cerebral nervous qubit will never be zero，its quantum coherence characteristic can keep well，and the brain function will also be not damaged.

Key words：electromagnetic radiation；nervous cell；non-thermal effect；bit

* **Received date**：11 Mar. 2009；**Revised date**：31 May 2009
* **Foundation item**：Natural Science Foundation of Hunan Province，China(06JJ5118)
1) E-mail：hygfeng@163.com