

生命科学中的物理问题讲座

第九讲 生物光子的相干性

沈 恂

(中国科学院生物物理研究所, 北京 100101)

摘要 所有活的生物都有自发的微弱发光, 它与生命运动的许多基本过程和生物的许多重要功能有着内在联系, 以 Popp 为首的生物物理学家认为, 这种发光全部或部分来自生物体内存在的高度相干的电磁场, 并把这样来源的光子叫做“生物光子”。文章介绍了支持生物光子相干性的主要实验事实, 即生物体内远离热平衡态的激发态能级分布、生物群体发光的非线性效应和“延迟发光”的双曲线衰减动力学, 还介绍了实验验证生物光子相干性的光子计数统计。

关键词 生物光子, 相干性, 生物的超弱发光

Abstract All living organisms spontaneously emit low-intensity luminescence. Such photonic emission is inherently associated with many fundamental processes in biological systems and closely connected with many important biological functions. The biophysicists headed by F. A. Popp hypothesize that these photons come from a fully coherent electromagnetic field within living organisms and may be called “Biophotons”. We describe some important evidence which supports the coherence of biophotons, such as excited states distributed far away from thermal equilibrium in biological systems, the nonlinear dependence of the emission intensity on the density of the organisms, and the hyperbolic decay of delayed luminescence from living cells. The photon count statistics are also discussed in relation to the coherence of biophotons.

Key words biophoton, coherence, ultraweak biological luminescence

1 引言

对大多数人来说, 提起生物的发光现象往往只会想到萤火虫的闪光或是在波涛起伏的海面上出现的“磷光”, 后者主要指的是海洋里原生动植物如软体珊瑚虫、海蜇、水母和双鞭甲藻的发光, 还有与许多鱼类共生的发光细菌。这类生物发光的一个共同特点是发光强度高, 例如, 每个发光细菌可以发射 10^2-10^3 光子/s, 每个双鞭水藻在受到刺激时可以发出 10^8 光子的闪光, 因此它们的发光都是肉眼可见的。现在知

道, 这种称之为生物发光的光都是生物体内的一种称为萤光素或黄素单核苷酸的物质在一种叫萤光素酶的蛋白质的催化下氧化时发出的。本文所要讨论的是另一类也许是更为普遍存在的生物的发光现象, 只要是活的生物, 小至细菌微生物, 大到植物、动物甚至人, 都有自发的光子辐射, 这种光发射一般来说极其微弱, 大约在 $1-10^2$ 光子/ $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ 的量级, 相当于一支蜡烛在 10km 外产生的照度, 显然已经低于人眼的感光灵敏度, 这种发光常称为生物的超微弱发光。

对生物超微弱发光的研究最早可以追溯到本世纪的 20 年代初, 俄罗斯的细胞生物学家

A. G. Gurwitsch^[1] 宣称: 分裂的细胞发出一种辐射, 当它射到其他细胞上时, 可以触发受照细胞的有丝分裂(即细胞分裂)。他用洋葱根做了如下实验(见图 1): 水平放置一个洋葱, 使其根尖对准另一个垂直放置的洋葱的一条根的中部的一小块分生组织, 两条洋葱根各自放进两根玻璃毛细管内, 垂直的根外面再套一个金属管加以屏蔽, 受照点处有一孔, 既无金属又无玻璃。由于根尖的细胞分裂旺盛, 而根中段分生组织的细胞分裂缓慢, 如果分裂的根尖细胞确实发出一种能刺激分生组织细胞分裂的辐射, 就应该在面向根尖的一侧分生组织中观察到比背向根尖一侧更多的分裂的细胞。实验确实证明了这一点, 并引起国际范围的反响, Gurwitsch 把这种辐射叫做有丝分裂辐射。由于缺少现代化的技术手段, 当时不可能对这种辐射的强度和波长范围进行测定, 只知道用一块不透紫外线的玻璃就可以挡住这种辐射, 从而断定它是一种短于 350nm 的紫外光。50 年代, 光灵敏度极高的光电倍增管的问世, 使研究生物系统的自发超微弱发光成为可能。1956 年, 意大利人 L. Coli 的研究小组^[2]首先用光电倍增管探测到高等植物发芽种子发射的蓝绿光, 以后在各种各样的生物, 其中包括绿藻、细菌、真菌、微管植物、昆虫、脊椎动物和各种分离的细胞中, 都观察到这种“低水平的”或“黑暗的”发光现象。笔者曾发现: 从大豆根瘤中分离出的根瘤菌类菌体比离体培养根瘤菌有强得多的自

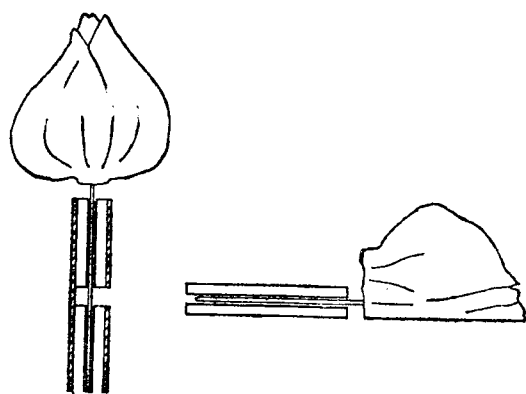


图 1 有丝分裂辐射的实验示意图

发发光^[3], 经过 30 年的研究, 人们终于发现, 生物的超微弱发光与生物系统的氧化代谢、细胞的分裂和死亡、光合作用、致癌以及生长的调控等许多基本的生命过程有着内在的联系, 而且正是由于它与活的生物体内的生化过程以及生物机体的生理和病理状态有着密切联系, 才使这种超弱光子辐射在医学、农业和其他生命科学方面具有重要的诊断价值。

生物系统的这种强度如此低的光子辐射造成了一种较为流行的看法, 认为它只是由生物机体内自发的、随机出现的化学发光反应引起的, 没有特别的生物学意义, 这种观点是以通常的光生物化学为基础的, 把引起超弱光子辐射的激发态与生命机体内的“代谢缺陷”联系起来, 例如代谢过程中由酶促或非酶促化学反应产生的一些自由基(即具有不配对电子的高化学活性的分子、离子或基团)及其进一步反应生成的激发态, 这些激发态在返回到热平衡态时就以光子的形式释放出多余的激发能, 通常把这种观点叫做超微弱发光的“混沌理论”。但是, 一些生物物理学家和理论物理学家, 从研究生物系统超微弱发光的物理本质出发, 在观察了它与生理和病理过程的相关性、光谱、对生物体温度的依赖关系、光学透射性、受外部因素和物质的影响、光子计数统计和光照诱导的延迟发光的衰减动力学以后, 得出了与上述混沌理论截然不同的看法, 他们提出如下假说: 一部分生物系统自发发射或光诱导发射的光子起源于生物系统内的一个完全相干的电磁场, 这种由生物体内相干电磁场释放的光子叫做“生物光子”, 而且, 这种相干的电磁场很可能是活组织内通讯联络的基础。提出这一假说的代表人物是德国生物物理学家 F. A. Popp^[4], 他在理论物理学家 H. Froehlich^[5] 提出的活组织里存在着构成生物系统空间和时间有序性基础的相干的长程相互作用的概念的基础上, 提出和建立了生物光子的“相干理论”。这个理论可以解释某些借助生物化学无法解释的重要的实验现象, 开辟了人们对生物系统超微弱发光现象认识的新的新的一页。

2 支持生物光子相干性的主要实验事实

2.1 生物系统内存在着受激光辐射的条件

生物系统的超弱发光一般都是连续光谱,从紫外延续到红外,强度虽有变化,但不超过4—5个数量级。图2给出根据黄瓜苗自发发光的光谱和强度计算出的相应激发态的布居几率 f_1 ,图中还同时给出了热平衡态下相应激发态的布居几率 f 。由玻耳兹曼分布计算,可得到

$$f = e^{-hc/kT \cdot \lambda}, \quad (1)$$

式中 k 为玻耳兹曼常数, T 为生物系统的生理温度, λ 为相应激发态对应的发光波长。从图2可以看到,活的生物系统是远离热平衡态的,激发态能级的布居数可比热平衡态下高30—40个数量级。从图中还可以看到,与热平衡态相比,可以近似认为生物系统的光子辐射几乎与波长无关,即

$$f_1(\lambda) \approx \text{常数}. \quad (2)$$

因此,我们可以认为,活的生物系统中存在着高

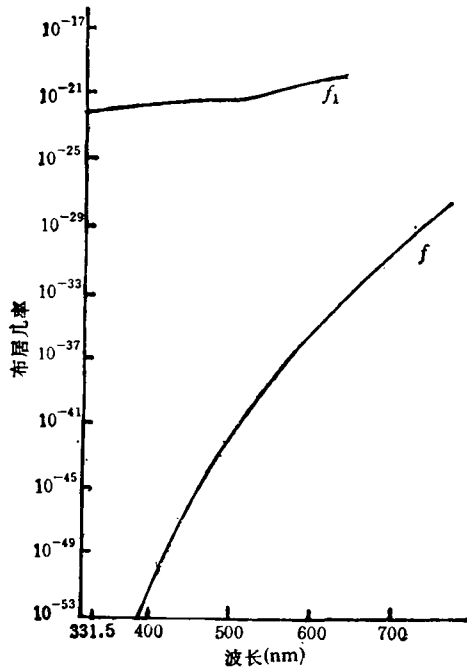


图2 根据实验测量计算的黄瓜苗内相应于能量为 hc/λ 的激发态的布居几率 $f_1(\lambda)$
(f 为按玻耳兹曼分布计算的热平衡态下相应激发态的布居几率)

度的能级反转状态,具备受激辐射的条件。李克学从理论上预言^[6],DNA碱基对之间形成的激发复合物(exciplex)很可能是生物系统内能级反转的物质基础,还可以从理论上证明, $f_1(\lambda) \approx \text{常数}$ 正是一个开放的激发态复合物系统保持准稳定态的必要条件。

2.2 生物系统自发发光的非线性效应

非线性效应反映了一个系统内部各个组成单元之间的相互作用和偶联关系,这一特征在生物系统的自发发光上也充分体现了出来。

Popp领导的研究小组进行了一个十分有趣的实验^[7],他们把一些雌性的水蚤放在盛水的石英比色杯内,令其自由游动,避光测量它们的微弱发光,水蚤的数量从1变到90,观察光电倍增管探测到的光子计数率与水蚤数量的关系,如果比色杯里的每一个水蚤都是独立于其他水蚤,且每个水蚤的发光强度都是 i_0 ,考虑到水蚤彼此之间的屏蔽效应,我们可以按下式计算出发光强度与水蚤数量 n 之间的函数关系:

$$I(n) = n \cdot i_0(1 - e^{-n \cdot f/F}), \quad (3)$$

式中 F 是比色杯面对光电倍增管的前表面的盛水区面积, f 是水蚤的最可几截面积

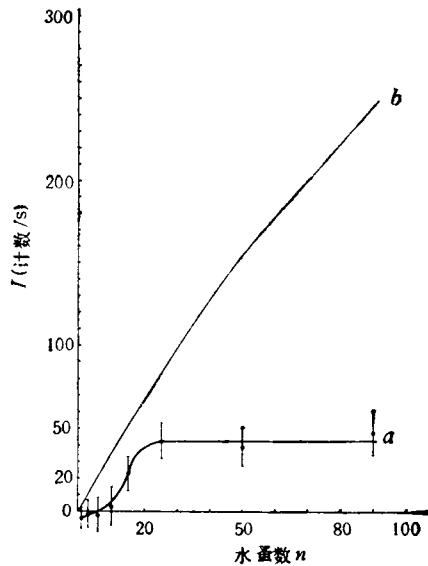


图3 群体的发光强度(每秒计数)与水蚤数量($n = 1, 2, \dots, 90$)之间的关系
(水蚤放在盛水的石英比色杯里,实验测量的发光曲线 a 并不遵从按线性规律预期的理论曲线 b)

(约 0.04cm^2)。图 3 给出了按(3)式理论预期的发光强度与这些浮游生物数量的关系, 但实际的测量结果却是一条完全不同的曲线, 即在开始时, 发光强度随水蚤数量的增加而增加, 水蚤数量超过 20 以后, 发光几乎不随水蚤数量的增加而增加。我们只能认为, 比色杯里的水蚤不是互相独立的, 它们之间存在相互作用, 每一个水蚤的发光都受到其他水蚤的影响 (或者叫做调节控制), 而这正是相干系统的重要特征。

2.3 光照后生物系统的延迟发光不遵从指数衰减规律

50 年代初, Strehler 和 Arnold 第一次发现绿色植物受光照后有发光的现象^[9], 这种光诱导的发光现在叫做“延迟发光”。目前它已被广泛用于研究植物进行光合作用的光系统 II 和光系统 I, 随着光探测灵敏度的不断提高, 人们发现, 延迟发光也是所有活的生物都具有的共性。由于它比生物的自发发光在强度上高很多, 便于探测, 已经成为研究许多生命过程 (如癌变、植物种子的衰老) 的重要手段。生物系统受到光照后系统内形成了许多激发态, 如果任何一个激发态与其他激发态之间没有相互作用的话, 激发态的弛豫速率 dn/dt 应与激发态的数量 n 成正比, 即

$$\frac{dn}{dt} = -k \cdot n. \quad (4)$$

显然, 延迟发光应服从指数衰减规律, 即发光强度 $I(t) = dn(t)/dt = kn_0e^{-kt} = I_0e^{-kt}$ 衰减。如果激发态之间存在着相互作用, 最简单的情况下可以写成

$$\frac{dn}{dt} = -A_1 \cdot n^2, \quad (5)$$

式中的 A_1 与(3)式中的衰变常数 k 一样, 是一个常数, 由(5)式我们得到一个服从双曲线规律的延迟发光衰变动力学方程, 即

$$I(t) = A_1^2 / (t - t_0)^2. \quad (6)$$

图 4 表示的是一种苔藓植物 (*bryophyllum daigremontanum*) 的叶片经红光 (676nm) 照射后的延迟发光, 显然, 其衰变不服从指数规律而是一条双曲线。

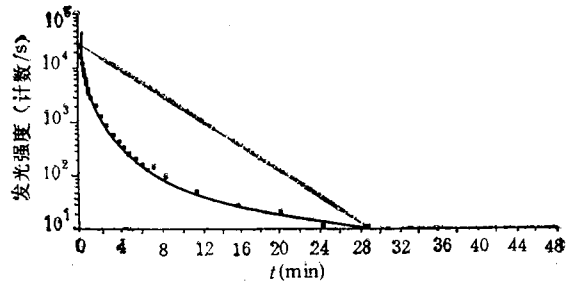


图 4 苔藓植物 (*bryophyllum daigremontanum*) 叶片经 676nm 红光照射后的延迟发光^[9]

对体外培养的细胞 (包括人和小鼠的正常细胞和肿瘤细胞), 各种植物叶片的实验表明, 生物系统的延迟发光一般遵从(7)式代表的双曲线衰减规律:

$$I = A(t - t_0)^{-1/p}. \quad (7)$$

显而易见, 若参数 $p = 1/2$, (7)式就变成(6)式所代表的最简单的情形。人们发现, 衰变参数 p 依赖于细胞的浓度, 而且它对浓度的依赖关系与细胞的癌变有关。图 5 给出了人的胎儿衣包上的羊膜细胞的实验结果, 可以看到, 正常羊膜细胞的延迟发光衰变参数 $1/p$ 随细胞浓度的增加而减小, 而恶性羊膜细胞的衰变参数则随细胞浓度的增加而增大, 这种明显相反的浓度依赖性不仅表明延迟发光用于医学诊断的潜在价值, 而且说明细胞之间的相互作用与细胞本

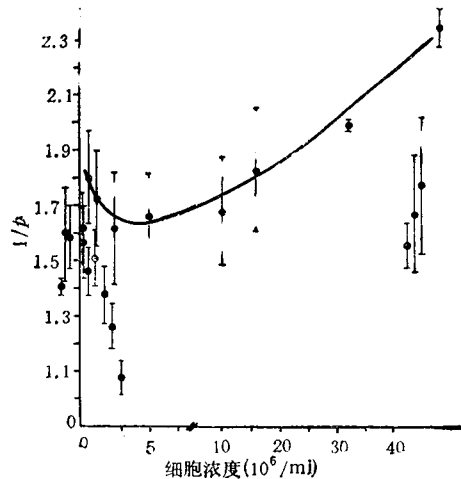


图 5 对白光曝光后不同细胞延迟发光的衰变参数 $1/p$ 与细胞浓度的关系 (左下方的数据点是正常羊膜细胞的结果, 上方的曲线是恶性羊膜细胞的结果)

身的特性有关。生物延迟发光的双曲线衰减规律充分说明了生物系统内各个激发态分子之间是相互偶联的，它们很可能通过在生物系统内存在的电磁场相互联系，而这正是相干场的重要特征。

3 生物系统超微弱发光的光子计数统计

以上谈到的 $f_1(\lambda) \approx$ 常数，非线性和延迟发光的双曲线衰减规律都只是生物光子相干性的间接证明，只有从光学上直接观察生物超微弱发光的相干性才能提供直接的证据。由于生物的自发发光太弱，光谱又宽，直接用迈克耳孙干涉仪或法布里-珀罗干涉仪进行测量是不可能的，唯一可用的方法是借助量子光学中的光子计数统计 (photon counts statistics) 方法。光子计数统计是用一个可以记录单一光子的高灵敏光电探测器(通常为光电倍增管)，测量在一个固定的时间间隔 Δt 内探测器记录到 n 个光子计数的几率 $p(n, \Delta t)$ ，量子理论证明^[10]，对一个完全相干的稳定的光子场，光子计数统计服从泊松分布，即

$$p(n, \Delta t) = \frac{\langle n \rangle^n}{n!} e^{-\langle n \rangle}, \quad (8)$$

$$\sigma^2 = \langle n \rangle, \quad (9)$$

式中 $\langle n \rangle$ 是记录的平均光子计数， σ^2 是分布的均方差。对一个单模的混沌场，光子计数统计服从几何分布，即

$$p(n, \Delta t) = \frac{\langle n \rangle^n}{(1 + \langle n \rangle)^{n+1}}, \quad (10)$$

$$\sigma^2 = \langle n \rangle(1 + \langle n \rangle). \quad (11)$$

对一个多模混沌场，也就是 $\Delta t \gg \tau$ (τ 是该场的相干时间)的混沌场，光子计数统计则服从下列广义的几何分布：

$$p(n, \Delta t) = \frac{(n + M - 1)!}{n!(M - 1)!} \left(1 + \frac{M}{\langle n \rangle}\right)^{-n} \cdot \left(1 + \frac{\langle n \rangle}{M}\right)^{-M}, \quad (12)$$

$$\sigma^2 = \langle n \rangle \left(1 + \frac{\langle n \rangle}{M}\right), \quad (13)$$

式中模数 $M = \Delta t/\tau$ ，是混沌场自由度的一种度量，根据上述理论，先是 Popp^[7] 后是笔者^[11] 对一些生物系统的超弱发光，用实验测定了它们的光子计数统计分布。图 6 给出了笔者实验小组测量的三个不同时间间隔内大豆根瘤类菌体自发发光的光子计数统计分布。作为比较，我们还测量了鲁米诺在碱性水溶液中自氧化所产生的化学发光的相应光子计数统计分布。从图上可以定性地看到，类菌体发光的光子计数统计比鲁米诺化学发光更接近于泊松分布(图中用实线表示)。

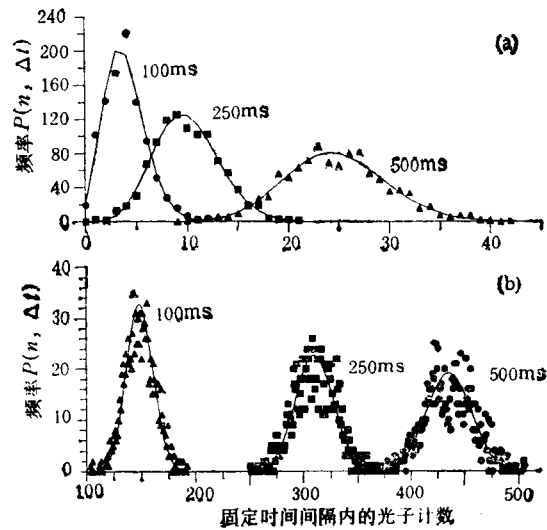


图 6

(a) 三个不同时间间隔内的大豆根瘤类菌体自发发光的光子计数统计分布；

(b) 三个不同时间间隔内的鲁米诺碱性水溶液自氧化的化学发光的光子计数统计分布

为了较定量地度量与泊松分布符合的程度，我们用

$$\delta = \frac{\sigma^2 - \langle n \rangle}{\langle n \rangle}$$

来表示每一次实验(由 1000 次抽样组成)得到的光子计数分布与泊松分布的偏差。 $\delta = 0$ ，说明与泊松分布完全吻合； $\delta > 0$ ，表示有聚束效应，偏离泊松分布； $\delta < 0$ ，代表超泊松分布。实际上，对一个符合泊松分布的光子辐射场，每次实验的 δ 值应在 $\delta = 0$ 的上下涨落。图 7 给出了我们对黄瓜苗、氩-氟激光器(作为完全相

干场)、光束经高速旋转的毛玻璃随机散射的氩-氟激光束(从而成为一个准单模混沌场)和光电倍增管噪声的各 10 次实验得到的 δ 值。可以清楚地看到, 黄瓜苗的发光和激光比较符合泊松分布, 完全不相干的仪器噪声对泊松分布的偏离最大。

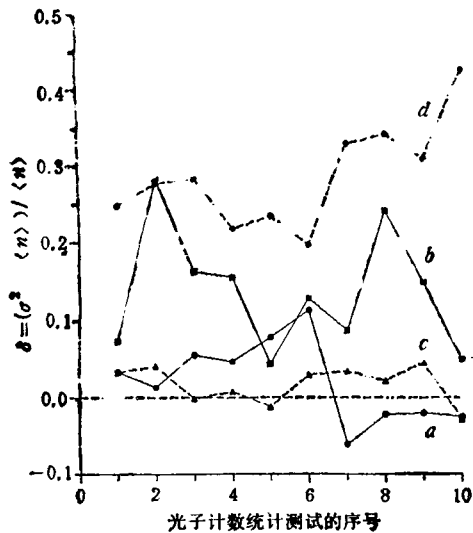


图 7 不同情况下的光子计数统计的测量
 曲线 a——氩-氟激光; 曲线 b——随机散射的氩-氟激光束; 曲线 c——黄瓜苗; 曲线 d——冷却至 -18°C 的光电倍增管的噪声
 (每一数据点是根据对 100ms 时间间隔的 1000 次记录得到的统计分布计算的 δ 值)

对我们研究的所有三个生物系统——黄瓜幼苗、绿豆芽和大豆根瘤菌类菌体, 它们的自发光都接近于泊松分布, 而纯粹属于随机事件的鲁米诺的化学发光则偏离泊松分布很远, 这说明生物系统的发光至少不完全是由纯化学激发造成的偶然事件, 它们发射的光子彼此间存在着一定的位相关系。必须指出, 服从泊松分布只是相干场的一个必要条件, 而非必要充分条件。当模很大时, 多模混沌场的光子计数统计也趋向于泊松分布, 我们还需要新的实验思想和验证方法。

4 结束语

生命是一个极其复杂的运动形式, 那怕是像细菌这样最简单的生物, 也都具有高度有序和复杂的结构。生物的功能更是多姿多彩。生物的自发的微弱发光是生物众多物理特性中的一个, 它既与生物的有序性相联系, 又与生物的重要功能相联系, 反映了生物的电磁特性。Popp 的功绩在于把生物系统高度有序的结构与生物体内一个高度相干的电磁场联系起来, 并大胆地设想这种电磁场有可能是生物系统内部或生物系统之间通讯联络的途径之一。尽管他的理论还不是尽善尽美, 还需要更有力的实验支持, 也许生物的超微弱发光只是一部分相干, 还有相当比例的发光不能用他的理论来解释, 但他毕竟为人们打开了一个新的视野, 从生物光子的角度探索生命过程的物理本质。

参 考 文 献

- [1] A. G. Gurwitsch, *Arch. Entw. Mech. Org.*, **100** (1923), 11.
- [2] L. Coli, V. Facchini, G. Guidotti et al., *Experientia*, **11**(1955), 479.
- [3] X. Shen, X. Han, J. Tian et al., *FEMS Microbiology Letters*, **81**(1991), 335.
- [4] F. A. Popp, *Electromagnetic Bioinformation* (eds. by F. A. Popp, G. Becker, H. Koenig et al.), Urban & Schwarzenberg, Muenchen, (1979), 123.
- [5] H. Froehlich, *Int. J. Quant. Chem.*, **2**(1968), 641.
- [6] K. H. Li, *Laser Elektro-Optik*, **3**(1981), 32.
- [7] F. A. Popp, K. H. Li, W. P. Wei et al., *Experientia*, **44**(1988), 576.
- [8] B. L. Strehler and W. Arnold, *J. Gen. Physiol.*, **34**(1951), 809.
- [9] W. Scholz, U. Staszkievicz, F. A. Popp et al., *Cell Biophys.*, **13**(1988), 55.
- [10] J. Perina, *Coherence of Light*, D. Reidel Pub. Co., Dordrecht/Boston/Lancaster, (1985).
- [11] X. Shen, F. Liu and X. Y. Li, *Experientia*, **49**(1993), 291.