

生命现象与激光器的类似性*

顾 樵

(西北大学物理系, 陕西, 西安)

摘要——从协同现象和相干辐射两个方面论述了生命现象与激光器的类似性。表明生命系统是一个非线性的有序的开放系统, 并具有产生相干辐射的“激活介质”、“泵浦源”及“谐振腔”。

关键词——协同学, 相干辐射, 生命现象, 激光器。

1. 引 言

在许多研究领域中, 常常要处理由大量同类子系统构成的集合系统, 例如, 由许多自旋构成的强磁体、由许多电偶极子形成的激光器、由许多分子组成的化学聚合物、由许多细胞组成的生命体、由许多树木聚成的森林以及由许多人组成的社会等。大部分情况下, 子系统之间存在着相互作用, 因此集合系统的宏观性质很难用子系统微观性质的简单相加来说明。在这里, 各子系统由于某种关联而结合在一起, 使集合系统表现出某种宏观的有序性, 这就是所谓协同现象^[1]。

协同现象的一个典型例子是多原子系统的集体自发辐射, 即超辐射^[2~6]。它的协同行为表现在系统的辐射强度不是与原子数 N 成正比, 而是与 N^2 成正比。

生命现象与激光器看上去截然不同, 但是, 两者都是偏离热平衡状态很远的集合系统, 在显示宏观有序性这一点上有惊人的类似性。本文试图从协同现象和相干辐射两个方面对这种类似性进行研讨。

2. 非线性的有序的开放系统

从协同学研究的观点看, 生命现象与激光器的类似性表现在两者都是非线性的有序的开放系统。

2.1 非线性

生命现象与激光器都具有高度的非线性, 它们的宏观性质都不能用子系统微观性质的

本文 1988 年 7 月 1 日收到。

*本文为参加第四届国际激光科学会议(美国, 亚特兰大, 1988)的论文。

简单相加来说明。而非线性的突出表现是存在饱和效应。在生命现象中，饱和效应比比皆是，例如，酶反应的基本方程为

$$V = \frac{V_0}{1 + \frac{S_0}{S}}; \quad (1)$$

式中， V 表示酶反应速率； S 是衬底浓度； V_0 和 S_0 是常数。当 S 很小时， V 随 S 准线性地变化。当 S 很大时， V 趋于饱和值 V_0 ，如图 1 所示。

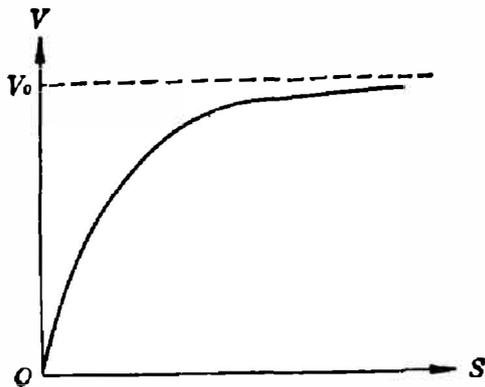


图 1. 酶反应速率 V 与衬底浓度 S 的关系

Fig. 1 Relation between enzyme reaction rate V and substrate density S .

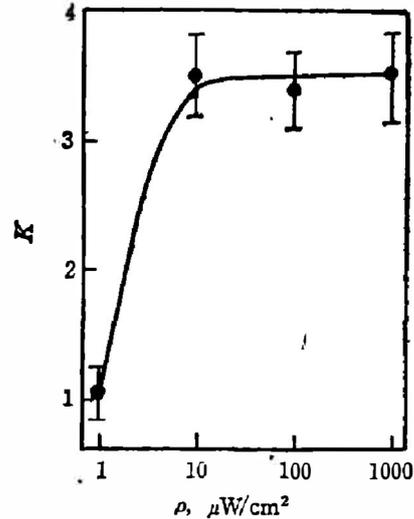


图 2 微波照射使大肠杆菌增加

Fig. 2 Increase in escherichia coli exposed to the microwave illumination.

当外界因素对生命现象发生作用时，饱和效应依然存在。图 2 显示了用 6.50 mm 的微波辐射照射大肠杆菌时，其个体数目随入射光功率密度 ρ 的变化。其中 K 表示照射一小时后大肠杆菌的个体数目与未照射情况下的比值。可以看出，当入射光功率密度大于 $10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 时， K 趋于饱和值(约为 3.5)。

在激光器中也有许多类似的饱和效应，增益饱和就是一例。在均匀加宽工作物质中增益系数可以表为。

$$G = \frac{G_0}{1 + \frac{I_0}{I}}; \quad (2)$$

式中， I_0 是入射光强； I 是饱和光强； G_0 是小信号增益系数。 G 随 I 的变化呈现与式(1)类似的特性。

2.2 有序性

在热平衡条件下，激光各能级上的布居数服从玻尔兹曼分布，这样，上能级的粒子数总是少于下能级的粒子数。在足够强的外界泵浦之下，可以出现粒子数反转，而处于反转分布的系统受到自发辐射光子的激励，则产生瀑布般的光子发射，这就是所谓受激辐射。受激辐射的建立与外界泵浦密切相关，当泵浦低于阈值时，第 i 个粒子产生的光场可表为

$$A_i(\mathbf{r}, t) \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \phi_i), \quad (3)$$

因而激光系统的宏观光场为

$$A(\mathbf{r}, t) = \sum_i A_i(\mathbf{r}, t) \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \phi_i). \quad (4)$$

这时, 由于各粒子发光的相位关系是随机的, 即各个 ϕ_i 在 $0 \sim 2\pi$ 之间均匀地分布着, 显然, 式(4)为零. 当泵浦超过阈值时, 真空场的量子起伏作用于粒子系统, 使各个粒子发光的位相发生对称性破缺, ϕ_i 趋于固定值 ϕ (ϕ 的大小取决于真空场的起伏强弱). 另外, 由于谐振腔反射镜滤掉了那些非轴向传输的模式, 于是, 式(4)变为

$$A(\mathbf{r}, t) = E(\mathbf{r}, t) \cos(\omega t - Kz + \phi). \quad (5)$$

式中, 总振幅 $E(\mathbf{r}, t) = \sum_i A_i(\mathbf{r}, t)$, 这时的激光输出呈现一种谱线宽度极窄、方向性极好的有序光束. 因此, 激光器建立运转的过程实际上是各个粒子发光位相有序化的过程.

生命的本质, 归根结底也在于有序化. 波动力学的创始人薛定谔在四十年代就把生命现象归为物理学的研究对象^[7]. 他断言, 活体中最本质的应是“非周期性结晶”那一部分. 其含义是, 尽管活体物质不具有周期性结构, 但也并非杂乱无章, 而是具有一定的有序结构.

生命系统的有序性被许多实验所证实. 特别, 是生物学家们在荧光实验中已经发现^[8], DNA 分子的碱基由于堆垒相互作用能够形成只存在于激发态上的物质, 它们在基态上分解成单体. 这种现象已由二核苷酸荧光谱相对于单体荧光谱产生一无结构的红移而得到证实^[9].

2.3 开放性

连续泵浦的激光系统之所以能够处于稳定的反转分布是因为不断地从外界泵浦中获得能量; 换言之, 它是一个开放系统. 从热力学的观点来看, 工作物质由最初的玻尔兹曼平衡态分布变成粒子数反转的非平衡态分布, 辐射光由最初的各向同性的普通荧光变成谱线极窄、方向性极好的有序光, 这种对称性的破缺必然导致熵的减少. 这一现象并不违反热力学第二定律, 因为激光器不是一个孤立系统. 从外界泵浦中不断吸收能量的结果, 不但抵销了系统在自身演化中熵的增加, 而且使净熵减少, 以维持其连续运转的状态.

生命体不仅能保持高度的有序性, 而且一个受精卵还可以长大, 构成新的生命体. 这种过程同样不违反热力学第二定律, 因为生命体作为一个开放系统, 不仅与外界有能量交换, 而且有物质交换. 如若排出的熵远大于吸收的熵, 即使制造了有序性, 也不会违反热力学第二定律. 薛定谔的名言“活体食负熵为生”就讲是生命体的开放性.

维持生命体有序性的能量和物质, 最终来源于太阳. 生命体从 6000 K 的太阳那里获得热量, 在向 300 K 的周围空间释放部分热量的同时, 构成高度的有序结构, 这很象一台做功的热机, 由此可以明显地看出它与激光器的类似性. 生物进化是从简单向复杂过渡, 亦即向偏离平衡态的方向演化. 如果要寻找使之成为可能的根源, 其根本原因大概就在于地球本身就象一个在 6000 K 的太阳与 3 K 的宇宙空间做功的“热机”; 因而地球上可以形成包含生命在内的众多的有序性, 而生命和人类正是这种有序性的最好体现.

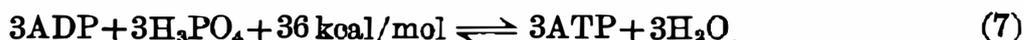
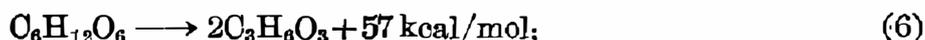
3. 相干辐射源

激光器是一个典型的相干辐射源, 其运转的基本条件是具有激活介质、泵浦源和谐振腔. 大量的实验研究表明: 生命系统也可以产生高度相干性的光辐射, 即所谓“生命系统的

超弱光子辐射”(简称 PE)^[10], 而且在生命系统中可以找到产生相干辐射的“激活介质”、“泵浦源”和“谐振腔”。

3.1 PE 的“泵浦源”

生命系统超弱光子辐射的能量, 我们认为是来自肌糖元的酵解。众所周知, 葡萄糖酵解时放出 57 kcal/mol 的能量, 其中 36 kcal/mol 能量储存在 ATP 的高能磷酸键上, 而其余 21 kcal/mol 能量以热能形式释放。具体反应式为



式(7)反应是可逆的; 这就是说, 二磷酸腺苷分子 ADP 吸收能量后变为 ATP 分子; 而三磷酸腺苷分子 ATP 释放能量后变为 ADP 分子。ATP 与 ADP 的相互转换, 用激光的语言讲, 就是 ATP 处在高能态, 释放能量后跃迁到低能态 ADP; 而 ADP 处在低能态, 吸收能量后跃迁到高能态 ATP, 如图 3 所示。生命系统超弱光子辐射的能量来源就是 ATP 到 ADP 的“跃迁”。

3.2 PE 的“激活介质”

生命系统超弱光子辐射的物质之一是 DNA。由光或代谢过程激发的 DNA 分子的碱基所形成的激发态物质具有良好的激光介质的特性。根据最大熵原理, 这个开放系统的稳定态恰好处于“激光阈值”的状态, 它要求系统是透光的。实验表明, 植物组织确实具有几乎无损耗的“光导性”, 而植物体某处致伤可以引起远离致伤点区域 PE 的自发增强。Rattmeyer 根据 EB 对生命系统超弱光子辐射的影响, 证明了 DNA 确实是一个发光源^[11]。

3.3 PE 的“谐振腔”

从激光器实验物理角度来看, 生命系统的相干辐射最费解的问题是谐振腔的形成。对于实际的激光器来说, 谐振腔的主要部件是腔两侧的反射镜, 它的位置是否调准对激光的输出特性影响很大^[12]。似乎难以想象, 在伸缩性、卷曲性很大的生命体内, 那种精密光学仪器所要求的苛刻条件能够得到满足, 然而我们认为: 生命系统相干辐射的腔的形成可能与在实验室中情况不同的。事实上实验室中常用的两端反射镜结构也不是唯一的方法, 例如用球状谐振腔也可以产生相干辐射。

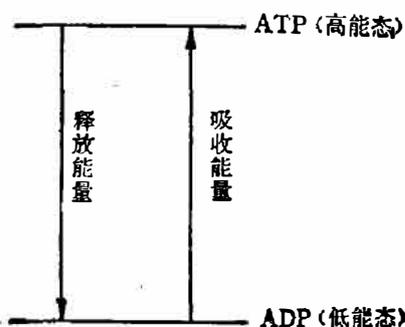


图 3 PE 的能级跃迁示意图

Fig. 3 Schematic diagram for energy-level transition of PE.

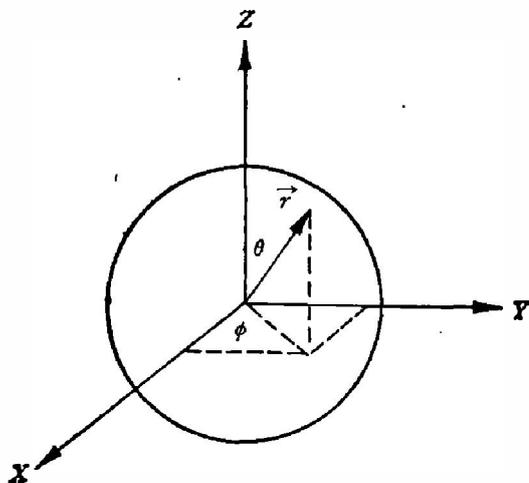


图 4 作为球状谐振腔的细胞

Fig. 4 Cell as a spherical resonant cavity.

我们认为一个细胞就是一个小小的谐振腔,它周围的细胞膜相当于一个封闭的反射镜。文献[10]和[13]把理想的球状细胞视为一个球状谐振腔,如图4所示,然后通过求解矢量波动方程,得到球内的本征模式,它们呈现如下的矢量球谐函数的形式^[14]:

$$\mathbf{M}_{emn} = -\frac{m}{\sin\theta} \sin m\phi P_n^m(\cos\theta) Z_n(\rho) \mathbf{e}_\theta - \cos m\phi \frac{dP_n^m(\cos\theta)}{d\theta} Z_n(\rho) \mathbf{e}_\phi;$$

$$\mathbf{M}_{0mn} = \frac{m}{\sin\theta} \cos m\phi P_n^m(\cos\theta) Z_n(\rho) \mathbf{e}_\theta - \sin m\phi \frac{dP_n^m(\cos\theta)}{d\theta} Z_n(\rho) \mathbf{e}_\phi;$$

$$\mathbf{N}_{emn} = \frac{Z_n(\rho)}{\rho} \cos m\phi n(n+1) P_n^m(\cos\theta) \mathbf{e}_r + \cos m\phi \frac{dP_n^m(\cos\theta)}{d\theta} \frac{1}{\rho} \frac{d}{d\rho} \times [\rho Z_n(\rho)] \mathbf{e}_\theta - m \sin m\phi \frac{P_n^m(\cos\theta)}{\sin\theta} \frac{1}{\rho} \frac{d}{d\rho} [\rho Z_n(\rho)] \mathbf{e}_\phi;$$

$$\mathbf{N}_{0mn} = \frac{Z_n(\rho)}{\rho} \sin m\phi n(n+1) P_n^m(\cos\theta) \mathbf{e}_r + \sin m\phi \frac{dP_n^m(\cos\theta)}{d\theta} \frac{1}{\rho} \frac{d}{d\rho} \times [\rho Z_n(\rho)] \mathbf{e}_\theta + m \cos m\phi \frac{P_n^m(\cos\theta)}{\sin\theta} \frac{1}{\rho} \frac{d}{d\rho} [\rho Z_n(\rho)] \mathbf{e}_\phi;$$

式中, \mathbf{M} 和 \mathbf{N} 是两种相互正交的矢量球谐函数; 下标 e 及 0 用来区分具有不同的 ϕ 坐标对称性的函数; n 及 m 表示缔合勒让德函数 $P_n^m(\cos\theta)$ 的序号; 变量 $\rho = kr$, 其中 k 为球状谐振腔内的波数; $Z_n(\rho)$ 是几种球贝塞耳函数(即 $j_n, y_n, h_n^{(1)}, h_n^{(2)}$)中的一种。

文献[13]还计算了来自别的细胞的光辐射对上述本征模式的影响,并得到如下结论。

(1) 球状细胞作为一个小小的谐振腔具有大量的本征模式,这些模式具有极高的 Q 值。这与 Popp 的估计 $Q \approx 10^{18}$ 是一致的^[15]。

(2) 该球状谐振腔的尺寸很小,光子在腔内的回转时间(即光子在球体的大圆上运行一周的时间)很短。例如,对于半径为 $15 \mu\text{m}$ 的球状腔,回转时间只有 0.3PS ,这个时间远小于一般自发辐射的寿命。这样一来,各种自发辐射(例如普通的荧光辐射、自发喇曼散射、集体自发辐射即超辐射)都可能在这样的腔内形成一定的模式结构。

(3) 该球状谐振腔内的光场极强,有利于引发各种非线性光学效应(例如受激喇曼散射、二阶谐波及高阶谐波等)。可见细胞内的相干辐射现象是极其丰富的。

总之,生命系统与激光器一样都具有产生相干辐射的基本条件。不同的是,激光是实验室的相干辐射,比较简单;而 PE 是一种自然界的相干辐射(如同天体中存在的多种受激辐射现象一样^[16]),非常复杂。

4. 结 语

协同学的创始人 Haken 认为,正象生物化学沟通了生物学与化学一样,激光的物理机制沟通了生物学与物理学。本文的论述表明,生命现象与激光器确实有惊人的类似性:从协同现象的角度讲,它们都是非线性的有序的开放系统;从相干辐射的角度讲,它们都具有“激活介质”、“泵浦源”及“谐振腔”这些产生相干辐射的基本条件。以激光器为模型去理解生命现象实在是一件有趣的事情。但是应该看到生物体是一种最复杂的系统,生命现象是一种最复杂的运动,生物学的许多具体问题并不可能从上述类似性分析中直接得到现成的答案,

需要作更深入更实际的探讨。然而,从上述类似性分析中毕竟可以展示生命现象的一些本质特征,因此生命现象的激光器模型不失为一种直观而有效的模型。

参 考 文 献

- [1] Haken. H, *Synergetics, An Introduction, Third Revised and Enlarged Edition*, Springer-Verlag, Berlin, Hdeidelberg, New York, Tokyo, 1983.
- [2] Gu, Q, in *Second International Conference on Trends in Quantum Electronics*, ed. S. m. Bochum, European Physical Society, 1985, p. 359.
- [3] Gu, Q, Bull., *Am. Phys. Soc.*, **30** (1985), 1830.
- [4] 顾樵, *Chin. Phys. Lasers(USA)*, **13**(1986), 855.
- [5] 顾樵, *中国激光*, **14**(1987), 594.
- [6] 顾樵, *中国激光*, **15**(1988), 166.
- [7] E. 薛定谔, *生命是什么?活细胞的物理学观*, 上海:上海人民出版社, 1973.
- [8] Eisinger J. et al., *Science*, **161**(1968), 1311.
- [9] Morgan J. P. et al., *Photochemistry and Photonbiology*, **31**(1980), 207.
- [10] 顾樵, *量子电子学*, **5**(1988), 97.
- [11] Rattemeyer M. et al., *Naturwissenschaften*, **68**(1981), 572.
- [12] 顾樵等, *中国激光*, **13**(1986), 588.
- [13] 顾樵, 第二届国际激光科学会议(美国·西雅图, 1986), 见 *Optics News*, **12**(1986), 209.
- [14] Bohren C. F. et al., *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*, Wiley, new york, (1983).
- [15] Popp F. A., *Umschau in W. U. T.*, **79**(1979), 235.
- [16] Bettwieser. E., *Umschau in W. U. T.*, **78** (1978), 659.

ANALOGY BETWEEN LIFE PHENOMENON AND LASER

GU QIAO

(Department of Physics, Northwest University, Xi' an, Shaansi, China)

ABSTRACT

Analogy between life phenomenon and laser is demonstrated in terms of both cooperative phenomena and coherent radiation. It is revealed that a living system is a nonlinear, order and open one, with both the "active medium", "pump source" and "resonant cavity" to induce a coherent radiation.