




生命科学交叉研究丛书

〔德〕顾樵 (Qiao Gu) 著

生物光子学

Biophotonics

 科学出版社
www.sciencep.com

生命科学交叉研究丛书

生物光子学

Biophotonics

〔德〕 顾樵(Qiao Gu) 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

生物光子辐射是一个普遍的生命现象,存在于各种动物、植物、藻类及微生物系统中。生物光子学是一门新兴的交叉学科,涉及分子生物学、生物化学、量子光学、统计物理学及光电探测理论等。本书系统阐述了生物光子辐射的相干性理论、量子理论、半经典理论及生物光子统计理论,并全面介绍了生物光子检测技术在食品安全与质量检验、水质分析与环境监测、医疗科技、药物性能及效力的研究和农业科学等领域的应用。

本书可用作相关专业的教师、研究生等的教学参考书,也可作为相关技术人员的参考材料。

图书在版编目(CIP)数据

生物光子学/(德)顾樵著. —北京:科学出版社,2007
(生命科学交叉研究丛书)
ISBN 978-7-03-017800-8

I. 生… II. 顾… III. 生物-光子-理论研究 IV. Q61

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 092896 号

责任编辑:庞在堂 彭克里 刘 晶 夏 梁/责任校对:赵燕珍
责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007年2月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2007年2月第一次印刷 印张:21 1/4 插页:1

印数:1—3 000 字数:404 000

定价:55.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)



物理学教授 顾焘博士

《生命科学交叉研究丛书》

编委会

编委会主任

吴家睿

编委会副主任(按姓氏笔画排列)

丁建东 马学海 李逸平 胡 钧 贺 林

编委会委员(按姓氏笔画排列)

丁建东 复旦大学高分子科学系

马大为 中国科学院上海有机化学研究所

马红孺 上海交通大学物理系、Bio-X 生命科学研究中心

马学海 科学出版社

王 炜 南京大学物理系

古宏晨 上海交通大学纳米中心

刘曾荣 上海大学非线性研究中心

江晓原 上海交通大学科学技术史与科学哲学系

李逸平 上海市科学技术委员会,中国科学院上海生命科学研究院

吴家睿 中国科学院上海生命科学研究院

何建华 上海原子核所应用物理研究所

陈宜张 第二军医大学

胡 钧 上海交通大学 Bio-X 生命科学研究中心

赵国屏 中国科学院国家基因研究中心,中国科学院上海生命科学研究院

赵建龙 中国科学院上海微系统与信息研究所

贺 林 上海交通大学 Bio-X 生命科学研究中心

徐宇虹 上海交通大学药学院、Bio-X 生命科学研究中心

徐学敏 上海交大学生命科学技术学院、Bio-X 生命科学研究中心

韩 斌 中国科学院植物生理生态研究所,中国科学院国家基因研究中心

傅继梁 第二军医大学,同济大学医学与生命科学部

臧敬五 第二医科大学,中国科学院上海生命科学研究院,上海交通大学医学院健康科学中心研究所

丛 书 序

20 世纪初叶,生命科学研究领域涌入了一批物理学家、化学家和数学家等非生物学者,兴起了第一次数理化与生命科学交叉研究的潮流。这次学科交叉的结果使得生命科学出现了质的飞跃,从对生物个体的形态描述和分类等传统生物学研究进入到以物理和化学手段研究生物分子为核心的实验生物科学阶段。

在这个现代生物科学的形成期中,许多重要的生物学观点、理论和研究方法都是源于非生物学的研究者。例如,美国理论化学家鲍林利用量子力学方法,揭示了氢键和离子键等“弱键”的本质,提出了弱键在蛋白质空间结构中起着重要的作用,并由此发现了蛋白质的基本结构单元—— α 螺旋和 β 折叠结构。此外,鲍林还通过研究镰状贫血首次提出了“分子病”的概念,这一概念随后成为生物医学领域的基石。最值得一提的是奥地利物理学家薛定谔,这位量子力学理论的重要人物在 20 世纪 40 年代写下了《生命是什么》一书,从物理学的角度对生命现象进行了阐述,提出了“遗传密码”这一分子生物学的基本概念。随后,英国物理学家克里克和美国生物学家沃森一起揭示了遗传物质的基本物理结构——DNA 双螺旋,并提出了分子生物学的核心理论——遗传信息流动的“中心法则”。《生命是什么》一书不仅吸引了众多的物理学和化学研究者进入生命科学领域,而且使生物学家意识到生命与非生命没有本质上的不同,它们都遵循着统一的物理和化学规律,可以通过物理或化学的方法进行研究,从而为分子生物学奠定了理论基础。

在 21 世纪之交,随着人类基因组计划的实施和各门学科的发展,生命科学领域又一次迎来了生命科学与数理化、计算机科学、信息科学等多学科交叉的潮流。当前,在生命科学的研究领域,正涌现出许多新兴的交叉学科,如生物信息学、计算生物学、化学生物学和系统生物学等。这些新兴的交叉学科为深入和完整地认识复杂生物系统和生命现象提供了更为有力的研究工具,开辟了更为广阔的研究领域。

在这风起云涌之际,科学出版社联合了国内一批有志于推进生命科学交叉研究的学者和专家,计划在近几年内系统地推出一系列有关生命科学交叉研究方面的论著,有介绍新兴交叉学科的高级科普读物、有探索新方法和新技术的专著、有在多学科交叉领域自成一家之言的文章。该丛书的内容和体裁不拘一格,但求有助于传播和促进国内生命科学领域的多学科交叉研究。

吴家睿

中国科学院上海生命科学研究院

2005 年 11 月 21 日

前 言

如何借助于物理技术获得生命信息一直是生命科学发展中的重要研究课题。光学显微镜的出现揭示了关于细胞的信息,使古老的生物学发展到细胞研究的水平。X射线技术在生物系统中的应用显示了分子层次的信息,为分子生物学的建立奠定了实验基础。分子生物学创立半个世纪以来,大量的现代物理技术已经被引入生命科学研究,以展示不同生命层次的信息。其中,一项与“生物光子”有关的技术,能够基于生物光辐射的探测,获得微观量子层次的生命信息。

萤火虫发光是一个众所周知的生物辐射现象。它作为一种“生物发光”,具有相当高的强度,肉眼都可以看见。实际上自然界存在着一种更普遍的生物辐射现象,称为“生物光子辐射”。这是一种超微弱的电磁辐射,典型强度只有 100 个光子/(s·cm²),相当于能流密度 10⁻¹⁷ W/cm²,远低于生物发光的水平。利用光电倍增管首次探测到生物光子辐射是在 1955 年,所用的样品为谷物种子。伴随着探测技术的不断改进,至今已经在各种生物系统中观察到了生物光子辐射现象,包括动物及其器官、组织、细胞,甚至处于生命状态的分子,植物及其根、茎、叶、花、果,以及不同的藻类和多种微生物系统。测量发现生物光子辐射的光谱分布在 200~800nm 范围内,基本上是连续的,这个范围相应于通常探测器的光谱响应。研究认为,生物光子辐射作为生命新陈代谢过程的一个产物,来自生物分子从高能态向低能态的跃迁。实际上,生物系统的激发态具有相当高的分子布居,因为生物系统本质上是一个开放系统,不断地从外界吸收能量。因此,生物光子辐射携带着生物系统的微观信息。研究发现,生物光子辐射与许多生命活动密切相关,例如,DNA 构象的变化,细胞的分裂与分化以及有机物的受损、病变、死亡等。另一方面,生物光子辐射对外界影响(诸如环境温度的变化、环境中污染物的出现、化学和生物试剂的注入、外界电磁场的施加等)有敏感的反应。

生物光子辐射是一个复杂的生命现象,对它的全面描述涉及多类学科,包括分子生物学、微生物学、生物化学、量子光学、热力学、非平衡统计物理学、信息论以及现代光电探测理论等。作为当代生物光子辐射研究的一个重要领导者,Popp 教授在 20 世纪 70 年代初完成了这一领域最早的理论研究。之后,随着各种新兴学科的不断出现,许多科学家从不同的角度研究生物光子辐射现象,完成了一系列重要的基础理论工作。所有这些研究已经构成了一门崭新的交叉学科,我们称之为“生物光子学”。它不仅具有重要的学术意义,而且具有广泛的应用价值。那些理论结果用来描述各种生物光子现象时,或者能提供原理上的认识,或者能进行定性的解

释,甚至能做出定量的分析。这为实验工作提供了许多指导性建议,例如,探测系统中零部件的最佳设计及安置,观察生物光子辐射的最佳条件,对测量数据进行处理的最佳方法等。一些理论研究甚至预言了新的探测方法,从而导致了更先进的探测装置的发明。

伴随着生物光子学的发展,“生物光子检测技术”作为一个新的分析工具已经逐渐投入使用。生物光子检测技术与传统分析方法的区别在于,前者可以给出样品的整体信息,是一个刻画样品性质的综合因子。实际上,生物光子检测技术和分析方法已经开展了许多应用,例如:

- (1) 食品安全与质量检验,包括食品新鲜度的测量。
- (2) 水质量和水污染的分析,水处理工具及水处理技术作用效果的检验。
- (3) 各种饮料性质的检测,烈性酒的特征识别。
- (4) 液体中细菌浓度的快速测量,饮料生产线上的细菌污染监测。
- (5) 植物生理特性的研究,如植物最佳生长条件的选择。
- (6) 种子质量的研究,如发芽率、含油量、转基因的测定等。
- (7) 药物性能及效力的研究,特别是癌症患者最佳药物的选择。
- (8) 在生物制药中的应用,借助生物样品或标准生物指示剂的生物光子特征值研制新药。
- (9) 不同疾病的诊断及医学处理,如免疫性疾病及癌症。
- (10) 人体健康状态的指示,“生理年龄”的测量与估算。

本书的主要目的是系统阐述生物光子辐射的各种理论描述及其应用。为此,我们首先在第1章介绍了生物光子辐射的基本特征、基本概念以及生物光子探测的技术问题,更详细的内容可以参考所列出的各种原始文献。第2章介绍了 Popp 提出的关于生物光子辐射的相干性理论,它在整个生物光子辐射的相干性理论体系中具有奠基性的作用。正是基于相干性概念,我们在第3章建立了生物光子辐射的量子理论,系统地研究了生物光子辐射的稳态及动力学行为,并将理论结果与各种实际样品的实验观察相比较。作为上述量子理论的推广,我们在第4、5章利用生物光子的图样特征显示生物系统的非平衡统计性质。相关的理论结果解释了种子发芽过程中的宏观序增长动力学以及特殊生物光子图样中的非平衡相变现象,包括分岔和滞后。第6章综述了辐射与物质相互作用的半经典理论,相关的结果定量地描述了水蚤群体的光子辐射中的干涉现象。第7、8章对于相关态之间的量子干涉进行了一般性表述,相关的结论预言了一种表征光的相干性的新方法——光子统计熵方法。基于这种方法,我们从实验上显示了生物光子辐射的高度相干性,并用于植物种子转基因的特征识别。第9章研究声致发光,它可以被理解为光子模与声子模相互作用的一个产物。我们建立了声致发光的量子理论,它描述了发光过程中的光、声子动力学。得到的结果不仅能刻画一个气体系统的同

步皮秒声致发光的实验观察,而且解释了具有特殊动力学过程的生物延迟发光的温度效应。在第 10、11 两章我们特别地研究了液态电化学系统的发光,尤其是包含微生物的复杂液体系统。我们建立了一种非线性理论来描述系统动力学的全过程,包括激发和弛豫。实验结果表明,这种方法在液体测量中具有广泛的应用,特别是液体中细菌污染的快速测量。第 12 章全面介绍生物光子检测技术在食品安全与质量检验、水质分析与环境监测、医疗科技、药物性能和效力的研究以及农业科学等领域的应用。

感谢 Fritz A. Popp 教授,与他的有益讨论以及在德国国际生物物理研究所多年的学术合作使我受益匪浅。妻子张爱华在 30 年的科学生涯中给予我全力的支持和悉心的关照,在此表示由衷的谢意。

顾樵(Qiao Gu)

qiao.gu@biophotontech.com

www.biophotontech.com

德国, Kaiserslautern

2006 年 10 月

目 录

丛书序

前言

1 生物光子学概论	1
1.1 什么是生物光子?	2
1.2 生物光子学研究进展	3
1.3 生物光子辐射的探测	5
1.4 生物光子辐射的基本特征	7
1.5 生物光子分析技术的应用	9
参考文献	12
2 生物光子辐射的相干性理论	19
2.1 引言	20
2.2 相干性理论的物理基础	20
2.2.1 非线性系统	20
2.2.2 非平衡系统	21
2.2.3 开放系统	21
2.3 Popp 的 $f_\nu = \text{constant}$ 规律	22
2.4 延迟发光的双曲性弛豫	25
2.5 生物光子辐射的合作性	26
2.6 生命态的有序性分析	29
参考文献	32
3 生物光子辐射的量子理论	34
3.1 引言:合作效应与合作辐射	35
3.2 三能级系统的 exciplex 模型	36
3.2.1 理论建立的实验基础	36
3.2.2 系统的哈密顿和主方程	38
3.2.3 系统的耦合运动方程	40
3.2.4 密度算子的稳态解	43
3.3 生物分子的激发态	46
3.4 发射强度	51
3.5 强度关联	53

3.6	量子熵	56
3.7	谱分布	59
3.8	系统的无反转运行	62
3.9	系统的动力学	65
3.9.1	激发态动力学方程	66
3.9.2	合作辐射:超辐射	69
3.9.3	合作辐射:超荧光	71
3.10	理论与实验结果的比较	76
3.11	应用举例	83
3.12	结论	85
	参考文献	86
4	生物光子辐射与组织序	89
4.1	引言	90
4.2	系统的序参量	90
4.3	序增长的确定性动力学	91
4.4	序增长的统计学处理	94
4.5	序增长的信息论描述	99
4.6	生物光子辐射作为组织序的度量	102
4.7	结论	104
	参考文献	104
5	生物光子辐射与相变	106
5.1	引言	107
5.2	动力学方程及其稳态解	107
5.3	福克-普朗克方程及其稳态分布	108
5.4	噪声诱导的相变	110
5.4.1	范德华方程	110
5.4.2	分布函数	111
5.4.3	势函数	117
5.5	生物光子辐射中的相变迹象	123
5.6	结论	126
	参考文献	126
6	生物光子辐射的半经典理论	127
6.1	麦克斯韦-布洛赫方程	128
6.2	超荧光	130
6.2.1	单脉冲超荧光	131

6.2.2	压缩效应	132
6.2.3	横向效应	133
6.3	光学孤立子	134
6.3.1	孤立子的特征	134
6.3.2	生物光子辐射的“透明性”	135
6.4	干涉效应	136
6.4.1	Sine-Gordon 方程的线性近似	136
6.4.2	生物光子辐射的“干涉”现象	138
6.4.3	生物群体干涉现象的理论描述	139
6.5	绝热辐射场	141
6.5.1	场方程	141
6.5.2	含时解与稳态解	142
6.5.3	噪声诱导的稳态漂移	143
6.6	相变现象	146
6.6.1	“驱动场”与“压强”	146
6.6.2	光学双稳性	147
6.6.3	辐射场的熵	150
6.7	洛伦兹模型	150
6.8	结论	151
	参考文献	152
7	生物光子辐射与量子干涉现象	153
7.1	引言:杨氏干涉的量子对应现象	154
7.2	N 个相干态叠加的一般性表述	155
7.3	宏观可区分的相干态的量子干涉	158
7.4	非经典生物光子辐射的迹象	166
7.5	结论	167
	参考文献	168
8	非经典光与生物光子统计	169
8.1	引言:非经典光的基本特征	170
8.2	生物光子场与 DNA 声子库的相互作用	172
8.3	“薛定谔猫”态的动力学	173
8.3.1	密度算子的含时解	173
8.3.2	辐射场的一般性质	174
8.3.3	量子熵	175
8.3.4	Wehrl 熵	178

8.3.5	光子统计熵	180
8.4	实验:生物光子统计性质的测量	184
8.4.1	仪器、样品、测量	184
8.4.2	数据分析	185
8.4.3	结果与讨论	186
8.5	光子统计熵方法的优点	189
8.6	转基因种子的光子统计性质	191
8.7	结论	192
	参考文献	193
9	声致发光的量子理论	194
9.1	引言	195
9.2	同步皮秒声致发光的实验研究综述	195
9.3	光子与声子相互作用的量子理论:斯托克斯模式	197
9.4	光子与声子相互作用的量子理论:反斯托克斯模式	204
9.5	实验现象的解释与描述	210
9.5.1	液体泡的声致发光	210
9.5.2	水藻 <i>Chlorella</i> 的异常延迟发光	211
9.6	结论	213
	参考文献	214
10	电化学发光:理论、实验、应用	216
10.1	引言	217
10.2	电化学发光的机制与理论描述	217
10.2.1	电化学发光的机制	217
10.2.2	电化学发光的非线性理论	219
10.2.3	理论结果与实验观察的比较	223
10.3	实验装置与测量程序	226
10.4	电化学发光的原理性实验	227
10.4.1	各种因素对发光的影响	227
10.4.2	瞬态弛豫与瞬态激发	229
10.4.3	多次激发与单次激发	232
10.5	电化学发光技术的优点	233
10.6	电化学发光技术的应用举例	237
10.6.1	各种水的测量与分析	238
10.6.2	饮料性质的测量	241
10.6.3	酒的特征值测量	242

10.6.4	药剂性能和效力的测量	243
10.6.5	在医疗科技领域的应用	244
10.6.6	有机物污染的测量	244
10.7	结论	246
	参考文献	247
11	微生物系统的电化学发光	249
11.1	引言	250
11.2	微生物系统电化学发光的理论描述	250
11.2.1	开放电化学系统的动力学	250
11.2.2	发光参数对微生物浓度的依赖性	252
11.3	实验:细菌计数与光子计数	255
11.4	测量和结果	257
11.4.1	自来水中的细菌测量	257
11.4.2	细菌自发繁殖的测量	259
11.4.3	低浓度细菌系统的测量	260
11.5	电化学发光技术在微生物学中的应用	266
11.5.1	细菌增长率的测量	266
11.5.2	细菌活性的显示	268
11.5.3	细菌形状因子的估算	269
11.5.4	其他可能的应用	270
11.6	结论	271
	参考文献	271
12	生物光子检测技术的应用	272
12.1	引言	273
12.2	食品安全及质量检验	274
12.2.1	食品的安全检验	275
12.2.2	食品质量的快速灵敏检测	276
12.2.3	食品新鲜度的测量	277
12.2.4	食品质量的“预报”	280
12.2.5	食品生产的质量控制	281
12.3	水质量的生物指示剂检测法	282
12.3.1	原理和操作	282
12.3.2	应用举例	283
12.4	种子质量的测量与分析	286
12.4.1	发芽率的快速测定	286

12.4.2	含油量的快速测定	290
12.4.3	转基因种子的识别	291
12.5	植物生理特性的检测	293
12.6	药品性能的检测及药物“筛选”	298
12.6.1	药品对有机体作用的生物光子显示	298
12.6.2	癌症患者最佳药物的选择	300
12.6.3	生物药品的测量	302
12.6.4	毒品的检测与识别	303
12.7	化妆品原料及化妆品的检测	305
12.8	临床应用与人体健康状态的指示	308
12.8.1	临床应用	309
12.8.2	人体健康状态的指示	310
12.9	结论	314
	参考文献	314
	索引	315

生物光子学概论

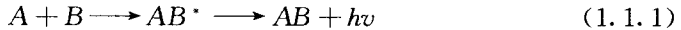
摘 要:生物光子辐射是一个普遍的生命现象,存在于各种动物、植物、藻类及微生物系统之中。它的典型强度为 $100 \text{ 光子}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$, 光谱分布至少在 $200 \sim 800 \text{ nm}$ 范围内是连续的。生物光子辐射作为生命新陈代谢过程的一个产物,来自生物分子从高能态向低能态的跃迁。大量的实验结果表明,生物光子辐射对生物系统内部的变化及外界环境的影响有高度的敏感性,因此通过对生物光子辐射的探测和分析能够获得生物系统内部的微观信息,了解外界环境的微弱变化。本章简要介绍生物光子学研究的背景资料、基本概念、探测手段以及生物光子分析技术的主要应用。

关键词:生物光子辐射,生物分子的跃迁,生物光子辐射的敏感性,生物光子分析技术

1.1 什么是生物光子?

萤火虫发光是自然界一个常见的生命现象,它属于高强度的生物发光^[1.1],肉眼可以看见。生物发光是一种酶催化的氧化作用^[1.2],存在于细菌、真菌、昆虫、鱼类等许多有机体中,但是在高等的动植物中没有发现生物发光^[1.3]。

生物组织在某些化学物质的作用下,还可以诱发化学发光,这样的作用通常被表示为



式中, A 是一种化学物质,如过氧化氢; B 是一个确定的细胞组分,如类脂^[1.3]; $h\nu$ 是一个光子的能量。化学发光作为一个探索化学反应过程及产物的工具,已经被使用了许多年^[1.4,1.5]。

与生物发光、化学发光不同,所有被测量的生物系统都存在着超弱的光辐射,它们涉及的范围极为广泛,包括:动物及其器官、组织、细胞、亚细胞,甚至生物大分子;植物及其根、茎、叶、花、果;各种水藻;各种微生物,如细菌、酵母菌等。这种普遍存在于生物系统中的超弱光辐射被称为生物光子辐射(biophoton emission)^[1.6~1.18]。生物光子辐射的强度定义为被测样品每秒每平方厘米表面发射的光子数,它的数量级为几个到几千个光子。换言之,典型的生物光子流约为 10^{-16} W/cm²(取波长 $\lambda=500\text{nm}$)。这样的强度远低于通常生物发光、化学发光的强度。生物光子辐射探测器的光谱响应通常为光频范围 200~800nm。在此区间,生物光子辐射的谱线是基本上连续的。

什么是生物光子的“源”?这是一个经常遇到的问题。从分子物理学的观点来看,生物光子可以被理解为生物分子从高能态向低能态的跃迁。这样的理解是基于一个众所周知的事实,即生物系统具有新陈代谢的功能。换言之,生物系统是一个典型的开放系统,与外界环境存在着永恒的物质、能量、信息的交换。外界不间断地泵浦(pump)耗散的生物系统,使之处于一种远离热平衡的状态。事实上,生命物质的高能态具有相当多的分子布居数(与热平衡状态相比较)。处于高能态的分子是不稳定的,它们必须向低能态跃迁,在此过程中释放能量,这就是生物光子(图 1.1)。而回到低能态的分子在外界作用下又跃迁到高能态,再次辐射光子。外界泵浦和光子辐射相伴发生,达到一个动态平衡。因此生物光子可以理解为生命活动的一种“损耗”,就像激光器的输出光束一样。这样,有理由相信生物光子携带着生命系统的微观信息。从量子理论的观点来看,生命系统的任何内部变化,无论是组分上的还是结构上的,都会引起系统微观能级的改变,从而导致生物光子辐射的改变。事实上,生物光子辐射已经被发现关联到许多基本的生命过程,如细胞分裂、受精卵发育、光合作用、有机体的病变和死亡等。另一方面,生物系统所处