

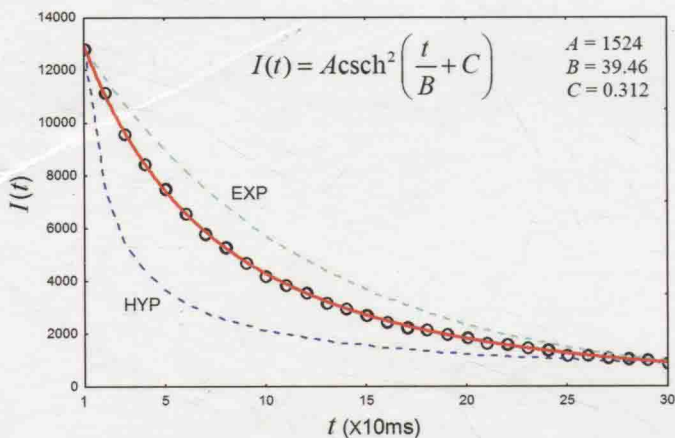
“十二五”国家重点图书出版规划项目

光学与光子学丛书

生物光子学

(第三版)

[德] 顾樵 (Qiao GU) 著



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目

光学与光子学丛书

生物光子学

(第三版)

Biophotonics

(Third Edition)

[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、藻类及微生物系统之中。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、非平衡统计物理学、信息论以及光电探测理论等。本书在介绍生物光子辐射基本概念的基础上,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、药物性能和效力的研究及农业科学等领域的应用。本书还进一步讨论了声致发光和电化学发光的理论、实验及应用。

本书可用作生物物理学、量子生物学、食品化学、环境科学、医学、药理学、农业科学及其他有关生命科学交叉研究领域的教师、研究生的教学与科研参考书,也可作为相关工程技术人员的参考资料,还可供在国外相关专业学习、研究和工作的本科生、研究生及访问学者参考。

图书在版编目(CIP)数据

生物光子学/(德)顾樵著.—3版.—北京:科学出版社,2016.6

(光学与光子学丛书)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-048500-7

I. ①生… II. ①顾… III. ①生物光学-研究 IV. ①Q63

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第123285号

责任编辑:刘凤娟/责任校对:张凤琴

责任印制:肖兴/封面设计:耕者设计

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>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007年2月第一版 开本:720×1000 1/16

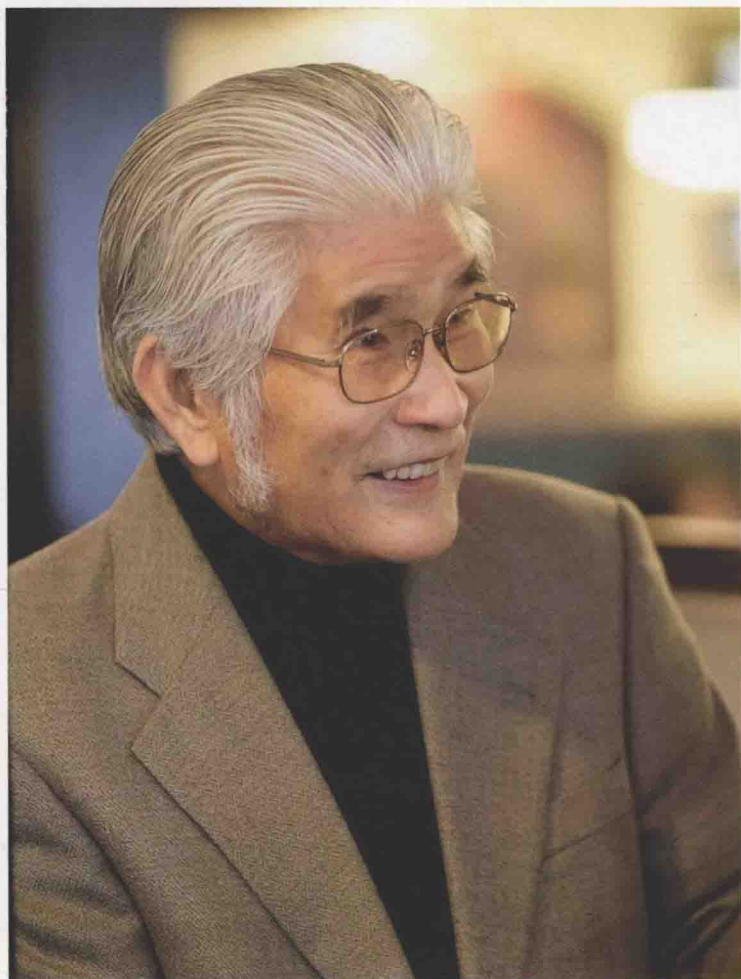
2012年9月第二版 印张:21 1/2

2016年6月第三版 字数:413 000

2016年6月第一次印刷

定价:129.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



物理学教授 顾樵博士

本丛书名由中国科学院院士母国光先生题写

光学与光子学丛书

《光学与光子学丛书》编委会

主 编 周炳琨

副主编 郭光灿 龚旗煌 朱健强

编 委 (按姓氏拼音排序)

陈家璧	高志山	贺安之	姜会林	李淳飞
廖宁放	刘 旭	刘智深	陆 卫	吕乃光
吕志伟	梅 霆	倪国强	饶瑞中	宋菲君
苏显渝	孙雨南	魏志义	相里斌	徐 雷
宣 丽	杨怀江	杨坤涛	郁道银	袁小聪
张存林	张书练	张卫平	张雨东	赵建林
赵 卫	朱晓农			

第二版前言

自 2007 年《生物光子学》出版以来，作者收到大量读者来信，表示对这一新兴研究领域很感兴趣。许多人提出了有意义的科学与技术问题；不少专家、教授邀请作者进行学术讲座，并建立相关的合作项目；有些实业家甚至提出在中国实施生物光子技术产业化的宝贵建议。总之，这本书收到了始料未及的良好效果。据悉，本书在出版 3~4 年后即售罄。

5 年来，生物光子学的研究、应用和产业化在国际上又取得了可喜的进展。在基础研究领域，生物光子检测技术为众多的生物工程与生物技术开辟了应用前景，特别是关于干细胞的生物光子检测已经取得了重要的突破。在医疗科技方面，基于生物光子技术的肿瘤治疗方法更加商业化。生物光子学的相干性思想被期待为系统性疾病（如糖尿病）提供新的认识理念和治疗手段。利用人体的生物光子辐射研究经络实质的项目正在深入展开。判断人体健康状态的生物光子检测方法已经进入临床应用阶段。各类中药性能与疗效的生物光子数据库的构建已经引起人们极大的关注。在生物光子技术的传统项目——食品检验方面，经过长期细致的研究，已经发现“走地鸡”鸡蛋的优质性，逐步关闭工业化养鸡场已经被西方发达国家提到议事日程。另外，生物光子技术及电化学发光技术在液体检测中的应用更加广泛。在国际上，越来越多的医疗与卫生单位、食品与饮料质检机构、环境治理与保护部门、大学、研究所和相关的公司与企业开始使用快速、灵敏、可靠的生物光子探测仪。相信生物光子学与生物光子技术在未来几年内将会被进一步推广和发展。

生物光子辐射的典型强度是 100 个光子/ $(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$ ，这比通常的生物荧光和化学反应动力学所诱导的发光现象至少低 5 个数量级，因此生物光子辐射作为一个典型的量子效应，携带着生物系统和生命运动的微观信息。《生物光子学》（第二版）在叙述传统的生物光子学理论与应用的同时，特别加强了以辐射场的量子熵理论为基础的生物光子统计熵的论述（第 8 章）。生物光子统计熵的测量程序不涉及激发过程，因此消除了一个可能的误差来源，这对于超微弱的生物光子辐射探测来说，具有非常重要的实际意义。而且，生物光子统计熵的数据处理，不是基于通常的平均值、标准方差等，而是注重具有最大概率的测量值，因此其可靠性和精确度都极大地提高了。

作者自 1985 年在中国攻读理学博士以来，长期从事量子光学与生物光子学

的研究。在德国的 20 多年间，更是一直专注于生物光子学和生物光子技术的研究、开发与应用。如果本书能对中国的相关研究、应用和产业化有所推进，作为一名定居海外多年的学者，将不胜荣幸、颇感欣慰。

作者感谢深圳大学电子科学与技术学院、科学技术部及深圳市微纳光子信息技术重点实验室对本书出版的支持。

本书不妥之处，恳请读者批评指正。

顾 樵

Prof. Dr. Qiao GU (Chief Scientist)

gu-qiao@gmx.de

International Institute of Quantum Biology

Haßloch, Germany

2012 年 2 月 15 日

第一版前言

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射线技术对生物系统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。自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，各种不同的藻类以及多种微生物系统。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所用探测器的光谱响应。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，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有敏感的反应，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。

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，德国的 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,称为“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。当用这些理论结果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,甚至能作出定量的分析。这为实验工作提出了许多指导性建议,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辟了许多应用,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,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类原始文献。第2章介绍了Popp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,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,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在光子辐射中的干涉现象。第7、8章对于相干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 两章特别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。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、药物性能及效力的研究及农业科学等领域的应用。

感谢 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。作者自 1977 年进入大学以来，在 30 年的科学生涯中一直受到妻子张爱华的全力支持和悉心关照，谨此表示由衷的谢意。

顾 樵

2006 年 10 月

目 录

第 1 章 生物光子学概论	1
1.1 什么是生物光子?	1
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	6
1.5 生物光子分析技术应用简介	9
参考文献	11
第 2 章 生物光子辐射的相干性理论	19
2.1 引言	19
2.2 相干性理论的物理基础	19
2.3 Popp 的 $f_\nu = \text{constant}$ 规律	21
2.4 延迟发光的双曲性弛豫	24
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
第 3 章 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	34
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	37
3.2.3 系统的耦合运动方程	39
3.2.4 密度算子的稳态解	43
3.3 生物分子的激发态	47
3.4 发射强度	52
3.5 强度关联	54
3.6 量子熵	57
3.7 谱分布	60
3.8 系统的无反转运行	65
3.9 系统的动力学	67

3.9.1	激发态动力学方程	68
3.9.2	合作辐射: 超辐射	71
3.9.3	合作辐射: 超荧光	73
3.10	理论与实验结果的比较	78
3.11	应用举例	85
3.12	结论	86
	参考文献	87
第4章	生物光子辐射与组织序	91
4.1	引言	91
4.2	系统的序参量	91
4.3	序增长的确定性动力学	93
4.4	序增长的统计学处理	96
4.5	序增长的信息论描述	101
4.6	生物光子辐射作为组织序的度量	104
4.7	结论	106
	参考文献	107
第5章	生物光子辐射与相变	108
5.1	引言	108
5.2	动力学方程及其稳态解	109
5.3	福克-普朗克方程及其稳态分布	110
5.4	噪声诱导的相变	111
5.4.1	范德瓦耳斯方程	111
5.4.2	分布函数	113
5.4.3	势函数	120
5.5	生物光子辐射中的相变迹象	126
5.6	结论	128
	参考文献	129
第6章	生物光子辐射的半经典理论	130
6.1	麦克斯韦-布洛赫方程	130
6.2	超荧光	133
6.2.1	单脉冲超荧光	134
6.2.2	压缩效应	135
6.2.3	横向效应	135
6.3	光学孤立子	136
6.3.1	孤立子的特征	136

6.3.2 生物光子辐射的“透明性”	138
6.4 干涉效应	140
6.4.1 Sine-Gordon 方程的线性近似	140
6.4.2 生物光子辐射的“干涉”现象	141
6.4.3 生物群体干涉现象的理论描述	141
6.5 绝热辐射场	144
6.5.1 场方程	144
6.5.2 含时解与稳态解	145
6.5.3 噪声诱导的稳态漂移	146
6.6 相变现象	149
6.6.1 “驱动场”与“压强”	149
6.6.2 光学双稳性	150
6.6.3 辐射场的熵	152
6.7 洛伦兹模型	153
6.8 结论	154
参考文献	155
第 7 章 生物光子辐射与量子干涉现象	156
7.1 引言: 杨氏干涉的量子对应现象	156
7.2 N 个相干态叠加的一般性表述	158
7.3 宏观可区分的相干态的量子干涉	160
7.4 非经典生物光子辐射的迹象	168
7.5 结论	169
参考文献	169
第 8 章 非经典光与生物光子统计	171
8.1 引言: 非经典光的基本特征	171
8.2 生物光子场与 DNA 声子库的相互作用	173
8.3 “薛定谔猫”态的动力学	175
8.3.1 密度算子的含时解	175
8.3.2 辐射场的一般性质	176
8.3.3 量子熵	178
8.3.4 Wehrl 熵	180
8.3.5 光子统计熵	182
8.4 实验: 生物光子统计性质的测量	186
8.4.1 仪器、样品、测量	186

8.4.2	数据分析	187
8.4.3	结果与讨论	188
8.5	光子统计熵方法的优点	191
8.6	转基因种子的光子统计性质	194
8.7	结论	195
	参考文献	196
第9章	声致发光的量子理论	198
9.1	引言	198
9.2	同步皮秒声致发光的实验研究综述	198
9.3	光子与声子相互作用的量子理论: 斯托克斯模式	201
9.4	光子与声子相互作用的量子理论: 反斯托克斯模式	208
9.5	实验现象的解释与描述	213
9.5.1	气泡的声致发光	213
9.5.2	水藻 <i>Chlorella</i> 的异常延迟发光	214
9.6	结论	217
	参考文献	217
第10章	电化学发光: 理论、实验、应用	219
10.1	引言	219
10.2	电化学发光的机制与理论描述	220
10.2.1	电化学发光的机制	220
10.2.2	电化学发光的非线性理论	221
10.2.3	理论结果与实验观察的比较	226
10.3	实验装置与测量程序	231
10.4	电化学发光的原理性实验	231
10.4.1	各种因素对发光的影响	231
10.4.2	瞬态弛豫与瞬态激发	234
10.4.3	多次激发与单次激发	234
10.5	电化学发光技术的优点	237
10.6	电化学发光技术的应用举例	241
10.6.1	各种水的测量与分析	242
10.6.2	饮料性质的测量	245
10.6.3	酒的特征值测量	246
10.6.4	药剂性能和效力的测量	247
10.6.5	在医疗科技领域的应用	248

10.6.6 有机物污染的测量	249
10.7 结论	250
参考文献	251
第 11 章 微生物系统的电化学发光	253
11.1 引言	253
11.2 微生物系统电化学发光的理论描述	254
11.2.1 开放电化学系统的动力学	254
11.2.2 发光参数对微生物浓度的依赖性	256
11.3 实验: 细菌计数与光子计数	259
11.4 测量和结果	261
11.4.1 自来水中的细菌测量	261
11.4.2 细菌自发繁殖的测量	263
11.4.3 低浓度细菌系统的测量	264
11.5 电化学发光技术在微生物学中的应用	270
11.5.1 细菌增长率的测量	270
11.5.2 细菌活性的显示	272
11.5.3 细菌形状因子的估算	272
11.5.4 其他可能的应用	274
11.6 结论	274
参考文献	275
第 12 章 生物光子检测技术的应用	276
12.1 引言	276
12.2 食品安全及质量检验	277
12.2.1 食品的安全检验	278
12.2.2 食品质量的快速灵敏检测	279
12.2.3 食品新鲜度的测量	281
12.2.4 食品质量的“预报”	281
12.2.5 应用举例: 食用油的检测	284
12.3 水质量的生物指示剂检测法	289
12.3.1 原理和操作	289
12.3.2 应用举例	290
12.4 种子质量的测量与分析	292
12.4.1 发芽率的快速测定	292
12.4.2 含油量的快速测定	295

12.4.3 转基因种子的识别	297
12.5 植物生理特性的检测	298
12.6 药品性能的检测及药物“筛选”	303
12.6.1 药品对有机体作用的生物光子显示	303
12.6.2 癌症患者最佳药物的选择	305
12.6.3 生物药品的测量	307
12.6.4 毒品的检测与识别	308
12.7 化妆品原料及化妆品的检测	310
12.8 临床应用与人体健康状态的指示	313
12.8.1 临床应用	313
12.8.2 人体健康状态的指示	314
12.9 结论	319
参考文献	319
索引	320

第 1 章 生物光子学概论

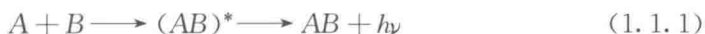
摘要：生物光子辐射是一个普遍的生命现象，存在于各种动物、植物、藻类及微生物系统之中。它的典型强度为 100 个光子/ $(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$ ，光谱分布至少在 $200 \sim 800\text{nm}$ 范围内是连续的。生物光子辐射作为生命新陈代谢过程的一个产物，来自生物分子从高能态向低能态的跃迁。大量的实验结果表明，生物光子辐射对生物系统内部的变化及外界环境的影响有高度的敏感性，因此通过对生物光子辐射的探测和分析能够获得生物系统内部的微观信息，了解外界环境的微弱变化。本章简要介绍生物光子学研究的背景知识、基本概念、探测手段以及生物光子分析技术的主要应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

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



其中， 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，已经被使用了很多年^[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存在着超弱的光辐射，它们涉及的范围极为广泛：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 $10^{-16} \text{W}/\text{cm}^2$ （取波长 $\lambda = 500\text{nm}$ ）。这样的强度远低于通常的生物发光和化学