




物理学教授 顾樵博士

 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))

《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

马红儒 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 $100 \text{ 光子}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$,相当于能流密度 $10^{-17} \text{ W}/\text{cm}^2$,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 $200 \sim 800 \text{ nm}$ 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 $f_v = \text{constant}$ 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

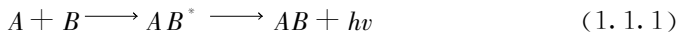
摘 要:生物光子辐射是一个普遍的生命现象,存在于各种动物、植物、藻类及微生物系统之中。它的典型强度为 $100 \text{ 光子}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$, 光谱分布至少在 $200 \sim 800 \text{ nm}$ 范围内是连续的。生物光子辐射作为生命新陈代谢过程的一个产物,来自生物分子从高能态向低能态的跃迁。大量的实验结果表明,生物光子辐射对生物系统内部的变化及外界环境的影响有高度的敏感性,因此通过对生物光子辐射的探测和分析能够获得生物系统内部的微观信息,了解外界环境的微弱变化。本章简要介绍生物光子学研究的背景资料、基本概念、探测手段以及生物光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

环境的变化也会影响到系统的物质、功能、状态等方面的改变,并表现为生物光子辐射的改变。

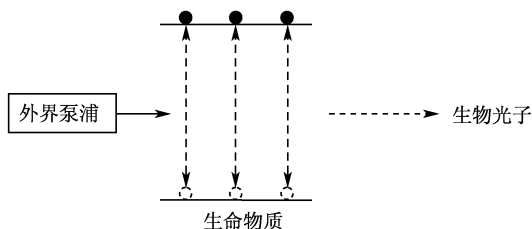


图 1.1 生物光子辐射产生的微观机制

在外界泵浦作用下,生物分子从低能态跃迁到高能态。处于高能态的分子不稳定,在跃迁回低能态的过程中辐射生物光子

用光子的特征(强度、光谱、光子空间分布、光子统计性质等)来反映生物系统内部性质的变化和外界环境的影响,这是一个由量子测量到宏观分析的过程,它的灵敏度是毋庸置疑的。事实上,大量的研究表明,生物光子的探测和分析能够揭示生物系统内部的细节变化,展示外界环境的微弱影响。

1.2 生物光子学研究进展

关于生物光子辐射的研究,可以追溯到 20 世纪 20 年代^[1.19~1.21]。1923 年,俄罗斯生物学家格威奇(Gurwitsch)借助于生物探测器完成了一个十分精彩的实验(图 1.2)。他把两个洋葱头的根丝垂直放置,两者靠得很近,但确实没有接触。然后使一个洋葱头的根(作为感应器)发生快速的细胞分裂。过了几个小时,发现另一个洋葱头的根(作为探测器)也跟着发生快速的细胞分裂。最后,探测器上正对着感应器的地方长出一个“小包”来!两者无接触,没有物质转移,后者怎么会长出小包呢?格威奇认为,感应器在细胞快速分裂时辐射微弱的紫外光,这种紫外光刺激了探测器的细胞,使之跟着快速分裂。由此,他把这个实验称为“孳生辐射”(mitogenetic radiation)。尽管格威奇实验的可靠性已经被证实^[1.22],但他的工作在当时却没有引起科学界的重视,其原因是:①生物探测器在当时没有受到足够的重视,而其他更灵敏的探测手段还没有问世;②这个领域的实验重复工作有相当的难度;③生物化学的快速发展,对细胞生长的解释取得了一定的成功。因而关于孳生辐射实验的评价,在以后 30 多年里一直没有定论。

光电倍增管的诞生证实了生物光子辐射的存在。1955 年,以科利(Colli)为首的意大利物理小组将一些植物幼芽(如小麦、谷子、菜豆、扁豆等)放置在装有光电倍增管的探测器上进行测量,他们确实观察到了超弱发光的现象^[1.23]。强度为几

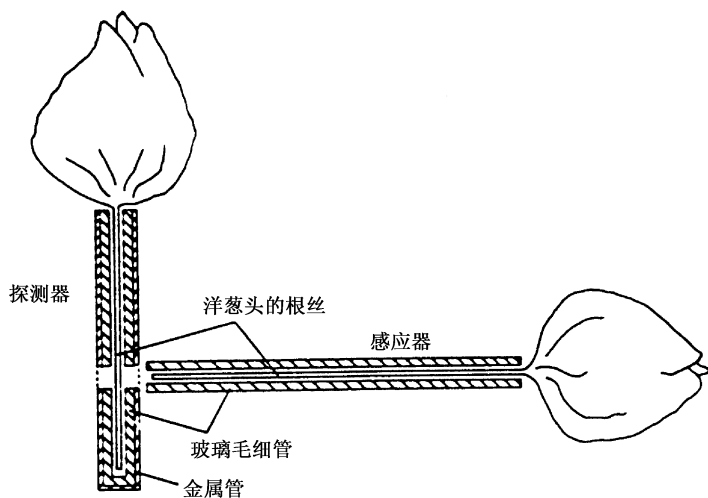


图 1.2 格威奇(Gurwitsch)的孳生辐射实验

一个洋葱头(作为探测器)的一支根插入一个玻璃管,再外套一个金属管。双管的某个部位有一个孔,通过这个孔洋葱根的相应部位暴露于空气。正对着这个孔的是装有另一个洋葱头(作为感应器)根的玻璃管的端部,玻璃管是开口的。感应器的根尖正好处在第二个管的端部,与探测器非常靠近,但确实没有接触。用生物手段使感应器的根发生快速细胞分裂,结果导致探测器开口部位跟着发生快速细胞分裂。这就是所谓的“孳生辐射”

百个光子/($s \cdot cm^2$),波长为 390~690nm,峰值大约在 550nm。

这一发现唤起了俄罗斯科学家的研究热情。在 20 世纪 60 年代,他们对生物光子辐射进行了全面的研究^[1.6,1.24~1.26]。除了植物之外,还涉及许多动物组织,如青蛙的神经和肌肉、白鼠的肝脏、水牛的心脏,甚至包括酵母细胞这类微生物样品。在对 90 余种生物样品研究的基础上,得到一个重要的结论,即生物光子辐射是一种普遍的现象,而且生物等级越高,辐射强度越大。

20 世纪 70 年代以后,以波普(Popp)为首的德国研究小组从实验和理论两个方面对生物光子辐射进行了系统的研究。波普最先使用了“biophoton”这一比较准确的提法。研究表明,生物光子具有高度的相干性,DNA 是生物光子的一个辐射源。这两点是生物光子学研究中的重大突破。

近 20 年来,生物光子辐射的研究取得了巨大的进展,这是基于:①弱光探测技术的改进^[1.23,1.25,1.6];②生物系统中信息传递问题的研究更加深入^[1.27,1.4~1.7];③辐射与物质相互作用的量子理论(量子光学)的研究取得丰硕成果^[1.28],特别是辐射场的相干态、合作辐射、非经典光辐射的研究。生物光子辐射的众多研究成果已经构成了一门崭新的交叉学科——生物光子学^[5.17,5.28]。它涉及分子生物学、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、现代光电探测理论等

许多领域。由此,生物光子学的研究和应用在世界范围内受到普遍的关注和重视。

生物光子学的研究成果主要涉及以下课题:生物光子辐射对 DNA 空间构象的依赖性^[1.29~1.31],生物光子辐射与生物学、生物物理学以及生物化学过程的关联^[1.6,1.13,1.32~1.39],生物光子辐射的温度依赖性^[1.40~1.45,1.7],光谱分布^[1.6,1.7,1.46~1.49],光学透明性^[1.7,1.27,1.50~1.51],外界因素的影响^[1.40,1.52,1.53],光子计数统计^[1.7,1.54~1.56],光照激发后的弛豫动力学^[1.7,1.57~1.65],群体相干性^[1.66~1.68],生物光子辐射的非经典特征^[1.28]等。生物光子学研究和应用的重要成果和最新进展综述于有关的文章^[1.7,1.11,1.13]及专著之中^[1.14,1.17,1.28]。

大量的实验观察表明,生物光子来自生命物质内的非局域相干电磁场^[1.13]。生命物质的能级分布服从开放系统的 $f_\nu = \text{constant}$ 规律^[1.60],它意味着:在理想的情况下(外界环境提供足够的泵浦能量),生命物质所有的相关激发态具有基本相同的布居数,与能级的高低无关。 $f_\nu = \text{constant}$ 规律支配了生命物质中“混沌态”与“有序态”之间的一个非平衡相变。围绕着相变的临界点,由生物分子合作诱导的多模生物光子场能变得相当稳定。在稳定运转的过程中,生物光子辐射的相干性来源于生物光子场的位相锁定和模式锁定。在光激发后的弛豫动力学过程中,生物光子辐射的相干性表现为辐射强度的非指数衰变,即所谓的“延迟发光”(delayed luminescence)^[1.59]。非指数衰变起因于生命物质中集体分子的相干非线性耦合^[1.62]。水蚤 *Daphnia* 的群体相干性表现为生物光子辐射的图样形成^[1.66,1.67],它能被理解为众多水蚤个体的生物光子场之间的干涉效应^[1.68,1.28]。生物光子被认为在细胞通信中扮演了传递生物信息的作用,生物系统在新陈代谢过程中所显示出的极高效率,很可能是生物光子场高度相干性的结果^[1.69,1.70]。有迹象表明,生物光子甚至可以工作在非经典态,具有极高的信噪比^[1.71,1.28]。

1.3 生物光子辐射的探测

生物光子辐射强度极弱,它的探测通常采用光子计数系统^[1.6,1.7],图 1.3 显示了其测量原理。探测系统的核心部件是光电倍增管,其灵敏度约为 10^{-15} W。光电阴极的直径为 4.4cm,光谱响应范围是 200~800nm。在测量过程中,样品发射的光子抵达光电阴极,产生电脉冲。电脉冲继而输入一个电子线路系统,在那里经过放大、甄别、计数等处理,最终的测量信号被计算机显示并储存。

图 1.4 显示了一个典型的测量结果,包括样品的生物光子信号及探测器的本底噪声^[1.71]。对于所使用的样品,信噪比为 25。噪声主要来自光电倍增管的暗电流,噪声随环境温度的升高而增加。为了降低噪声,提高信噪比,必须冷却光电倍增管。在我们的测量系统中,光电倍增管被冷却至 -30°C 。关于生物光子探测器

的技术细节,在相关的文献中有详细的介绍^[1.72,1.73]。

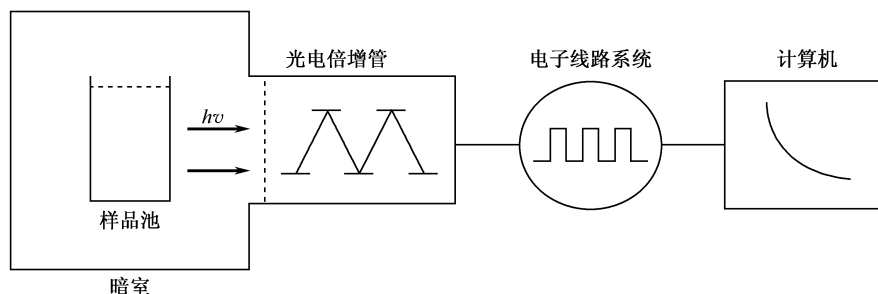


图 1.3 生物光子探测器原理

装有样品的石英玻璃池被放入暗室,置于光电倍增管之前。光电倍增管记录入射的光子,并将光信号转变为电信号。电信号继而被输入一个电子线路系统进行处理。计算机用来记录和显示测量数据,并通过软件控制整个测量过程

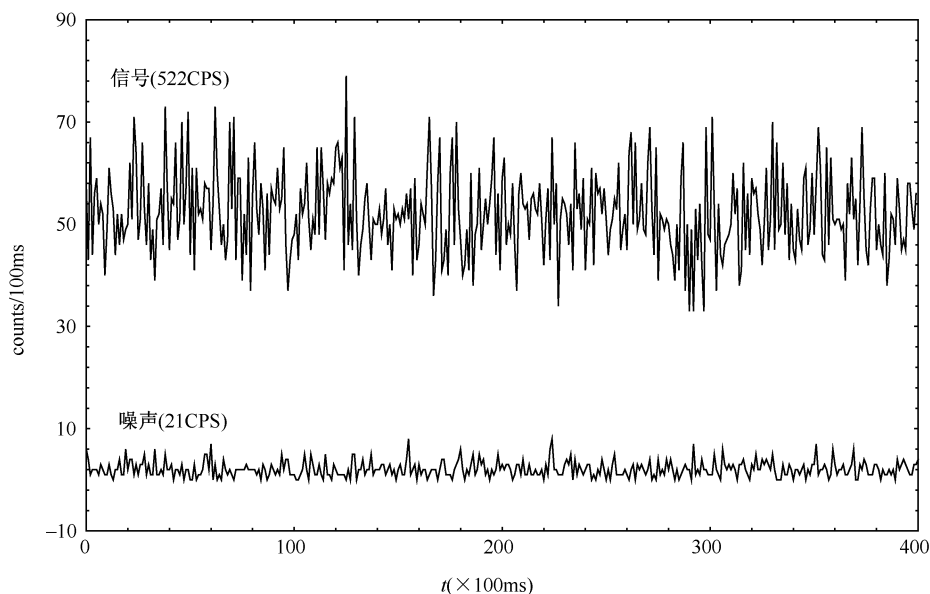


图 1.4 一个典型的测量结果:一片新鲜树叶的自发光子辐射与系统的本底噪声
树叶来自橡胶树(被测面积为 28cm^2)。测量在室温下完成。光子计数的间隔为 $\Delta t=100\text{ms}$,观察点总数为 400。树叶自发光子辐射的平均值为 522 CPS(counts per second),本底噪声的平均值为 21 CPS,信噪比为 25

1.4 生物光子辐射的基本特征

大量实验结果表明,生物光子辐射具有下列基本特征:

(1) 生物光子辐射的强度极低,其数量级为 $10 \sim 1000$ 光子/ $(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$ 。因而乘积 $I \times \Delta t$ 一般情况下小于 100,这里 I 是总的光子计数率, Δt 是计数间隔(典型值 $\Delta t = 100 \text{ ms}$)。这样被测的生物光子场中约有 100 个光子。这意味着生物光子辐射绝不是一个经典效应,而是一个典型的量子现象。

(2) 在所有被测量的样品中,生物光子辐射的谱线决不呈现在某个频率处的尖峰,而是相当平坦的谱分布(测量范围 $200 \sim 800 \text{ nm}$)。这是因为生命物质的能级不服从封闭系统的玻耳兹曼(Boltzmann)分布,而是与 $f_\nu = \text{constant}$ 规律相吻合。按此规律,生命物质所有的相关激发态具有基本相同的布居,与能级的高低无关。

(3) 对于所有被测量的生物样品,其光照后(白光或单色光)的生物光子辐射动力学均显示长时间的弛豫行为。这样一种延迟发光不服从指数衰变,意味着延迟发光决不属于线性而是非线性动力学。它起因于集体生物分子之间的相干非线性相互作用。图 1.5 显示了一个典型的延迟发光例子。

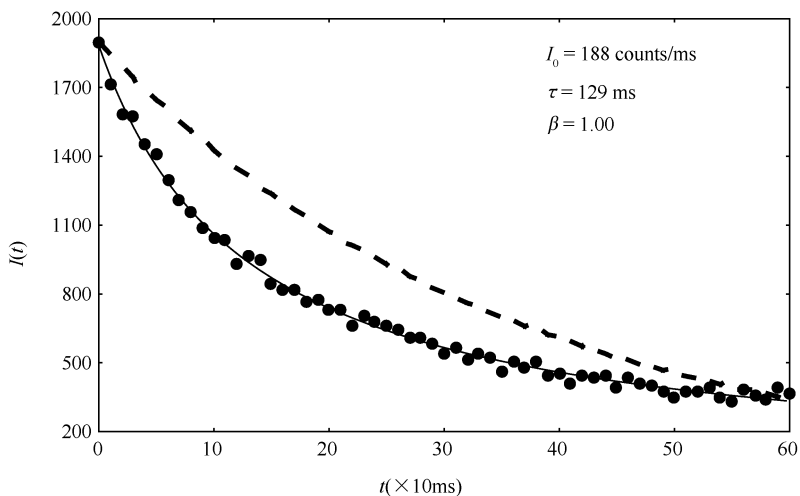


图 1.5 绿色单细胞水藻 *Acetabularia* 的延迟发光

一株水藻被放入蒸馏水,它被白光照射后的弛豫动力学不服从指数衰变(虚线),而是很好地被双曲函数 $I(t) = I_0 / (1 + t/\tau)^\beta$ 所描述,关联度 $r = 0.998$ 。观察值与期待值的最佳拟合给

出参数 I_0 、 τ 、 β 的值

(4) 生物光子被发现关联到许多生物过程和生物功能。实验观察表明,不同的 DNA 空间构象相应于不同强度的生物光子辐射^[1.29]。实验中采用特殊的物质 EB(ethidium bromide, 溴化乙锭),它作为一种试剂被嵌入 DNA 的碱基对。由于 EB 的惰性,它只作用于 DNA,而不与其他的生物分子发生作用。不断增加 EB 的浓度,可以连续改变 DNA 的空间构象。在这一过程中,同时测量 DNA 样品的生物光子辐射。结果显示(图 1.6),在 DNA 空间构象变化的过程中,样品的生物光子辐射也发生相应的改变,二者之间有很强的关联。另外,图 1.7 作为一个例子,显示了生物光子辐射与细胞分裂过程的关联^[1.25]。

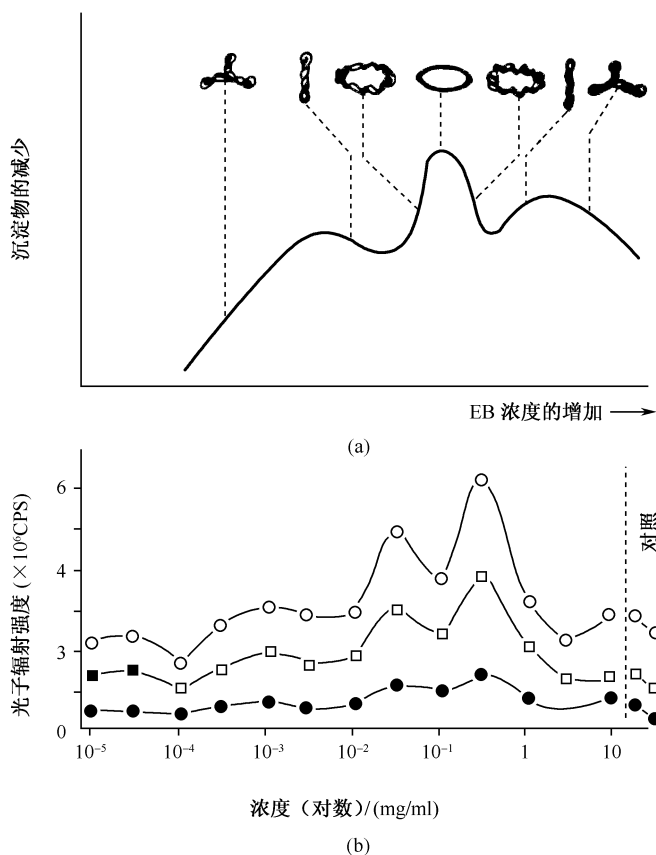


图 1.6 生物光子辐射对 DNA 空间构象的依赖性

(a) 黄瓜芽样品的 DNA 的沉降。将惰性试剂 EB 嵌入 DNA 的碱基对。随着 EB 浓度的增加, DNA 的超螺旋结构被解开;继续增加 EB 的浓度, DNA 的超螺旋结构又在相反的方向被卷曲。DNA 沉降的变化反映了 DNA 空间构象的变化。(b) 在 DNA 空间构象的变化过程中,样品的生物光子辐射强度随之变化,二者之间存在着很强的关联。图中的三条曲线显示了在 1h、2h、5h 观察后生物光子辐射强度的增加

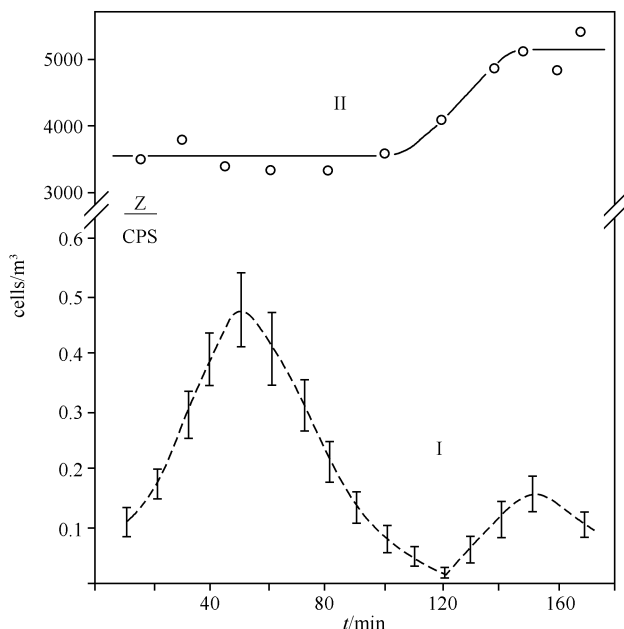


图 1.7 细胞样品的生物光子辐射对细胞密度的依赖性

采用同步化的酵母细胞 *Torula utilis* 作为样品。实验中,首先剥夺其培养液中一种特定的养料,使细胞分裂过程停顿,细胞密度(II)在 100min 内维持在相对稳定的水平。然后在培养液中加入一定剂量的该种养料,于是酵母细胞同步地吸收该养料,同步地分裂,细胞密度在大约 50min 内持续增加。当该种养料被用尽后,细胞分裂再次停顿,细胞密度维持在一个较高的相对稳定的水平。在上述整个过程中,酵母细胞的生物光子辐射(I)被测量。生物光子辐射的极大值出现在细胞密度维持稳定的状态(较低的细胞密度相应于较高的生物光子辐射强度),而细胞快速分裂的状态相应于生物光子辐射的极小值

(5) 生物系统处于逆境(stress),如病变、受伤、外界环境突然变化等时,其生物光子辐射行为一般会发生显著变化。但变化的方式因情况而异,没有一个固定的模式。例如,在许多情况下,细胞癌变后的生物光子辐射强度增大;水藻在污染水中的生物光子辐射强度减小。大量实验观察的结果显示,多种溶剂即使在浓度很低、剂量很小的情况下也可以显著地改变诸多生物系统的光子辐射。一个典型的例子显示于图 1.8。不过也存在另类情况:即使有很高浓度的毒剂注入,某些生物样品的光子辐射也可以在一定时间内保持相当稳定的水平。

1.5 生物光子分析技术的应用

伴随着生物光子辐射的实验和理论研究的发展,出现了一个新的分析技术,即所谓的“生物光子分析技术”(biophoton analytical technology, BPAT)。与传统的

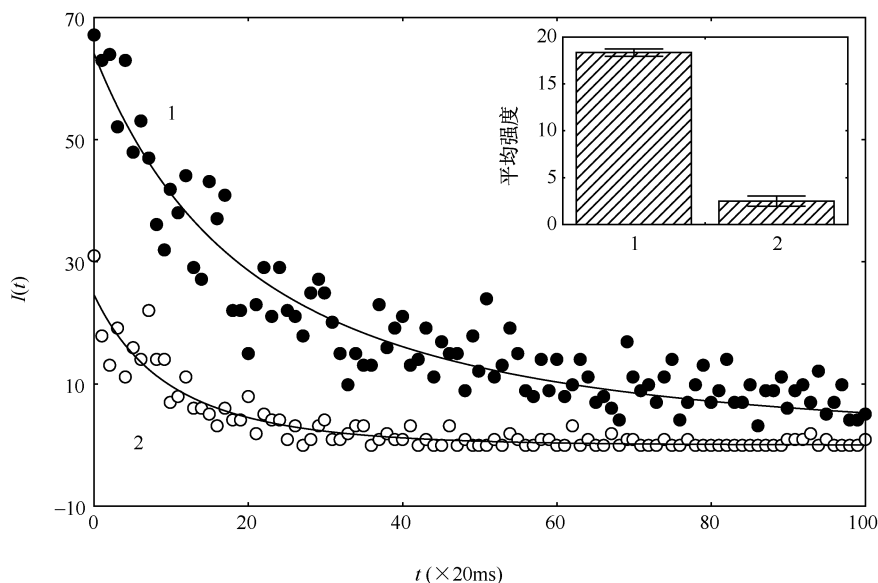


图 1.8 绿色水藻的延迟发光(水环境对生物光子辐射的影响)

样品 1:20ml 自来水+水藻样品;样品 2:在样品 1 中添加 1ml 醋溶液(食用醋稀释到 0.1%)。图中的光滑曲线是实验数据的理论拟合[式(3.10.2)]。右上方的插图显示,两种情况下的平均强度之比为 18:3,这里平均值及标准方差来自对每个样品的 3 次测量

分析方法不同,BPAT 给出被测样品由内部变化及环境影响所引起的生物学效应的整体信息(holistic information),提供了一个关于生物系统基本特性的综合指标^[1.74]。这个指标的具体生物学含义,关联到被测样品本身的种类、状态以及外界环境的因素等。生物光子检测技术的优点在于快速、灵敏、可靠、无损。基于生物光子辐射对内部变化及环境影响的敏感依赖性,BPAT 已经广泛应用于许多领域,本节对其主要内容予以简单介绍。

1. 食品、饮料、水的质量检验

借助于这些样品的自身发光以及诱导发光的测量和分析,能对它们的质量进行检验和对照,包括新鲜度的测量。液体方面的检测涉及饮用水与各种白酒、啤酒、葡萄酒以及各种饮料的检测,包括白酒的特征识别。BPAT 还能用于液体中细菌浓度的快速测量,如啤酒生产线上的细菌污染监测。诱导生物样品发光的途径涉及生物发光、化学发光、延迟发光、电致发光^[1.28],被测量的样品包括植物^[1.75~1.77]、水果^[1.76]、食品^[1.78,1.79]、食油^[1.78,1.80]、奶粉^[1.80]、鸡蛋^[1.81]、发酵食品^[1.82,1.83]、酒类^[5.10]、饮料和水^[5.28],以及其他的生物制品^[1.84,1.85]。在水质检测方

面,除了饮用水之外,还涉及环保产业的水质量和水污染的定量检测与分析,并包括水处理技术与水处理设备的作用效果的检验。

2. 农业和种子质量的分析

农业方面的应用涉及植物生理特性的研究,包括最佳生长条件的探索、基因处理效果的检验等。种子质量的研究包括发芽率测定、含油量测定、转基因种子的识别等。借助于生物光子辐射的测量和分析,各类种子(如黄豆、大麦、葵花子、油菜子、各种花籽等)的质量检验和性能分析已经深入展开^[1.86~1.89]。这样的研究还涉及种子的年龄与其延迟发光的强度之间的关系。实验结果还表明,种子的活力与其延迟发光的信号存在着一种负关联。在用种子的有效组成部分(如粉状的蛋白质、淀粉、糖、氨基酸等)分别作为样品进行测量时,也得到了类似的结果。种子自发光(spontaneous luminescence, SL)的信号也携带着关于种子质量的丰富信息^[1.40,1.41],这种方法曾被用来测量某些谷物种子的耐热性及耐寒性,以确定其较高及较低的温度临界点,即种子被热死或冻死的临界温度值。在后来的研究中,其他种子的较高临界温度值也用同样的方法被测定,如小麦、玉米、棉花等^[1.10]。Slawinski 小组也研究了许多类型的种子的自发光,如小麦、大麦、豌豆等^[1.90,1.91]。黄瓜的种子已经通过自发光^[1.6]和延迟发光^[1.7]两种方法被研究;水芹种子质量的研究分别被 Neurohr^[1.92]和 Triglia^[1.93]完成。用生物光子分析技术研究种子的质量,已经取得了丰硕的成果,它们能被广泛用于农业和食品工业^[1.90]。

3. 人体健康状态的指示、疾病诊断、药物研究

许多研究小组已经得到有意义的结果:Inaba 小组的研究表明,某些疾病患者(如癌症、糖尿病、黄疸等),其血液的生物光子辐射强度远高于健康人^[1.80]。而抽烟者血液的生物光子辐射强度是不抽烟者的 2 倍,抽烟者停止抽烟一天后,其血液的生物光子辐射恢复到正常水平^[1.94]。尽管这些现象的机制还不能完全确定,但应该包括由活性氧和自由基引起的类脂的过氧化作用。过氧化类脂的作用被确信存在于糖尿病、肝病、肺病等病变之中。生物光子分析技术在疾病诊断及临床处理中被认为有广阔的应用前景^[1.72,1.95]。事实上,人体血清的自发光及电致发光的测量和分析已经为医疗科技提供了一个新的非常敏感的检测手段,涉及癌症与炎症的甄别、药物的过敏反应检测、心血管疾病的诊断等^[1.10]。另外,一个专门用于人体全身测量的生物光子探测仪已经在 Popp 的小组成功组建,它提供了一个探测人体(包括手指、脚趾)体表发光的新型的、高灵敏度和高稳定性的测量系统^[1.96,1.97]。药物性质的研究涉及药品性能及效力的分析,包括癌症患者最佳药物的选择。根据患者血液在不同药品作用下所呈现的不同生物光子信号为寻找最佳

治疗药品(它使血液的光子辐射趋于正常)提供了一个灵敏可靠的途径。另外,该技术还可能涉及中药性能的定量测试、现代中药数据库的建立等。

4. 肿瘤的生物光子辐射特征

生物光子分析技术的一个重要应用在于肿瘤诊断。大量研究表明,肿瘤(包括组织和细胞)的生物光子辐射与正常情况有很大的偏离^[1.98~1.101]。Wijk 等人对肿瘤的生物光子辐射进行了长期的研究,一个重要的研究结果是基于肿瘤细胞和相应的正常细胞的延迟发光的积分强度的测量。实验显示,在细胞浓度极低的情况下,肿瘤细胞和正常细胞的积分强度没有明显的区别。随着细胞浓度的增加,正常细胞的积分强度下降而肿瘤细胞的积分强度上升^[1.102~1.104]。这个现象已经被 Popp 用生物光子储存理论进行了深刻的解释^[1.13,1.105],最新的研究结果提供了一个相变理论上的定量描述^[1.28]。研究发现,不同种类的肿瘤有不同的生物光子辐射行为,而一个共同点在于肿瘤细胞快速分裂期间,其生物光子辐射与正常情况有更大的偏离^[1.10]。Musumeci 小组^[1.106]和 Inaba 小组^[1.107]在肿瘤生物光子辐射的研究中也取得了重要的成果。

参 考 文 献

- [1.1] Harvey E N. Bioluminescence. New York: Academic Press, Inc. 1952
- [1.2] Seliger H H, McElroy W D. Spectral emission and quantum yield of firefly bioluminescence. Arch Biochem Biophys, 1960, **88**: 136~141
- [1.3] Barenboim G M, Domanskii A N, Turoverov K K. Luminescence of biopolymers and cells. New York, London: Plenum Press. 1969
- [1.4] Cormier M J, Hercules D M, Lee J. Chemiluminescence and Bioluminescence. New York: Plenum Press. 1973
- [1.5] Schölmerich J, Andreesen R, Kapp A et al. Bioluminescence and Chemiluminescence. New York: John & Wiley. 1986
- [1.6] Ruth B. Experimental investigations on ultraweak photon emission. In: Popp F A, Bekker G, König H L et al. Electromagnetic Bio-Information. München, Wien, Baltimore: Urban & Schwarzenberg. 1979. 107~122
- [1.7] Popp F A, Ruth B, Bahr W et al. Emission of visible and ultraviolet radiation by active biological systems. Collective Phenomena **3**(Proceedings of an International Workshop). 1981. 187~214
- [1.8] Govindjee J et al. Light Emission by Plants and Bacteria. New York: Academic Press. 1986
- [1.9] Jezowska-Trebiatowska B, Kochel B, Slawinski J et al. Photon Emission from Biological Systems. Singapore: World Scientific. 1987
- [1.10] Gu Q. Interactions of laser radiation with a biological cell. Optics News, 1986, **12**: 209
- [1.11] 顾樵. 生物系统的超弱光子辐射. 量子电子学, 1988, **5**: 97~108; 生命系统的超弱光子辐射(综述). 科学, 1989, **41**: 35~40; 生命系统的超弱光子辐射(生物物理讲座). 物理, 1989, **18**: 235~240
- [1.12] Gu Q. Photon statistics in ultraweak photon emission from living systems. Bull Am Phys Soc,

- 1988,**33**;1636
- [1.13] Popp F A. Coherent photon storage of biological systems. In: Popp F A, Warnke U, König H L et al. Electromagnetic Bio-Information. München-Wien-Baltimore; Urban & Schwarzenberg. 1989. 144~167
 - [1.14] Popp F A, Li K H, Gu Q. Recent advances in biophoton research and its applications. Singapore, New Jersey, London, Hong Kong; World Scientific. 1992
 - [1.15] Gu Q, Popp F A. Nonlinear response of biophoton emission to external perturbations. *Experientia*, 1992,**48**;1069~1082
 - [1.16] Popp F A, Gu Q, Li K H. Biophoton emission; experimental background and theoretical approaches(review). *Modern Phys Lett*, 1994,**B8**;1269~1296
 - [1.17] Belousov L V, Popp F A. Biophotonics. Moscow; Bioinform Services Co. 1995
 - [1.18] Chang J J, Fisch J, Popp F A. Biophotons. Dordrecht, Boston, London; Kluwer Academic Publishers. 1998
 - [1.19] Gurwitsch A G. Die natur des spezifischen erregers der zellteilung. *Arch Entw Mech Org*, 1923, **100**;11~40; Gurvich A G. Mitogenetic Radiation (in Russian). Moscow; Medgiz. 1945
 - [1.20] Gurwitsch A A. A historical review of the problem of mitogenetic radiation. *Experientia*, 1988,**44**; 545~550
 - [1.21] Gurwitsch A A. Mitogenetic radiation as an evidence of nonequilibrium properties of living matter. In: Popp F A, Li K H, Gu Q. Recent advances in biophoton research and its applications. Singapore, New Jersey, London, Hong Kong; World Scientific. 1992. 457~468
 - [1.22] Reiter T, Gabor D. Ultraviolette Strahlung und Zellteilung. Berlin; Wissenschaftliche Veröffentlichung aus dem Siemenskonzern. 1928
 - [1.23] Colli L, Facchini U, Guidotti G et al. Further measurements on the bioluminescence of the seedlings. *Experientia*, 1955,**11**;479~481
 - [1.24] Popov G A, Tarusov B N. Nature of spontaneous luminescence of animal tissues. *Biophysics*, 1963, **8**;372~376
 - [1.25] Konev S V, Lyskova T I, Nisenbaum G D. Very weak bio luminescence of cells in the ultraviolet region of the spectrum and its biological role. *Biophysics*, 1966,**11**;410~413
 - [1.26] Mamedov T G, Popov G A, Konev V V. Ultraweak luminescence of various organisms. *Biophysics*, 1969,**14**;1102~1107
 - [1.27] Popp F A. Photon-storage in biological systems. In: Popp F A, Bekker G, König H L et al. Electromagnetic Bio-Information. München, Wien, Baltimore; Urban & Schwarzenberg. 1979. 123~149
 - [1.28] Gu Q. Radiation and Bioinformation. Beijing; New York Science Press. 2003
 - [1.29] Rattemeyer M, Popp F A, Nagl W. Evidence of photon emission from DNA in living systems. *Naturwissenschaften*, 1981,**68**;572~573
 - [1.30] Popp F A, Nagl W, Li K H et al. Biophoton emission; new evidence for coherence and DNA as source. *Cell Biophys*, 1984,**6**;33~52
 - [1.31] Chwirot W B. New indications of possible role of DNA in ultraweak photon emission from biological systems. *J Pl Physiol*, 1986,**122**;81~86
 - [1.32] Quickenden T I, Tilbury R N. Growth dependent luminescence from cultures of normal and respiratory deficient *Saccharomyces cerevisiae*. *Photochem Photobiol*, 1983,**37**;337~344; Tilbury R N.

- The effect of stress factors on the spontaneous photon emission from microorganisms. *Experientia*, 1992, **48**:1030~1041
- [1.33] Slawinska D, Slawinski J. Biological chemiluminescence. *Photochem Photobiol*, 1983, **37**:709~715
- [1.34] Zevenboom W, Mur L C. Growth and photosynthetic response of the cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* in relation to photoperiodicity and irradiance. *Archs Microbiol Photobiol*, 1984, **139**: 232~239
- [1.35] Koga K, Sato T, Ootaki T. Negative phototropism in the piloboloid mutants of *Phycomyces blakeslecanus*. *Planta*, 1984, **162**:97~103
- [1.36] Slawinska D, Slawinski J. Low-level luminescence from biological objects. In: Burr J G. *Chemiluminescence and Bioluminescence*. New York, Basel: Marcel Dekker, Inc. 1985. 495~531
- [1.37] Sweeney B M. The loss of the circadian rhythm in photosynthesis in an old strain of *Gonyaulax polyedra*. *Pl Physiol*, 1986, **80**:978~981
- [1.38] Johnson R G, Haynes R H. Evidence from photoreaction kinetics for multiple DNA photolyases in yeast (*Saccharomyces cerevisiae*). *Photochem Photobiol*. 1986, **43**:423~428
- [1.39] Popp F A, Cilento G, Chwirot W B et al. Biophoton emission. *Experientia*, 1988, **44**:543~600
- [1.40] Veselovskii V A, Sekamova Y N, Tarusov V N. Mechanism of ultraweak spontaneous luminescence of organisms. *Biophysics*, 1963, **8**:147~150
- [1.41] Agaverdiyev A Sh, Doskoch Y Y, Tarusov B N. Effect of low temperature on the ultraweak luminescence of plants. *Biophysics*, 1965, **10**:920~924
- [1.42] Agaverdiyev A Sh, Tarusov B N. Ultraweak chemiluminescence of the stems of wheat in relation to temperature. *Biophysics*, 1965, **10**:387~389
- [1.43] Tarusov B M. Autoregulatory role of anti-oxidants on adaptation of organisms to the conditions of the environment. *Biophysics*, 1970, **15**:345~354
- [1.44] Shlyakhtina L S, Gurvich A A. Radiations from the mouse liver at normal temperature and on cooling. *Biophysics*, 1972, **17**:1146~1150
- [1.45] Slawinski J, Popp F A. Temperature hysteresis of low level luminescence from plants and its thermodynamical analysis. *J Pl Physiol*, 1987, **130**:111~123
- [1.46] Quickenden T E, Hee S Q. The spectral distribution of the luminescence emitted during growth of the yeast *Saccharomyces cerevisiae* and its relationship to mitogenetic radiation. *Photochem Photobiol*, 1976, **23**:201~204
- [1.47] Inaba H, Shimizu Y, Tsuji Y et al. Photon counting spectral analyzing system of extra-weak chemiluminescence for biomedical applications. *Photochem Photobiol*, 1979, **30**:169~175
- [1.48] Slawinski J, Grabikowski E, Ciesla L. Spectral distribution of ultraweak luminescence from germinating plants. *J Luminesc*. 1981, **24/25**:791~794
- [1.49] Slawinska D, Polewski K. Spectral analysis of plant chemiluminescence: participation of polyphenols and aldehydes in light-producing relation. In: Jezowska-Trebatowska B, Kochel B, Slawinski J et al. *Photon Emission from Biological Systems*. Singapore: World Scientific. 1987. 226~247
- [1.50] Mandoli D F, Briggs W H. Optical properties of etiolated plant tissues. *Proc Natl Acad Sci (USA)*, 1982, **79**:2902~2906
- [1.51] Chwirot W B, Dygdala R S. Light transmission of scales covering male in fluorescence and leaf buds in larch during microsporogenesis. *J Pl Physiol*, 1986, **125**:79~86

- [1.52] Dobrowolski J W, Borkowski J, Szymczyk S. Preliminary investigation of the influence of laser light on the bioluminescence of blood cells; Laser stimulation of cumulation of selenium in tomato fruit. In: Jezowska-Trebiatowska B, Kochel B, Slawinski J et al. Photon Emission from Biological Systems. Singapore; World Scientific. 1987. 211~218
- [1.53] Tryka S, Koper R. Luminescence of cereal grain subjected to the effect of mechanical loads. In: Jezowska-Trebiatowska B, Kochel B, Slawinski J et al. Photon Emission from Biological Systems. Singapore; World Scientific. 1987. 248~254
- [1.54] Popp F A, Li K H, Mei W P et al. Physical aspects of biophotons. *Experientia*, 1988, **44**: 576~585
- [1.55] Shen X, Liu F, Li X Y. Experimental study on photocount statistics of the ultraweak photon emission from some living organisms. *Experientia*, 1993, **49**: 291~295
- [1.56] Gu Q. Journal of the Society of Chinese Physicists in Germany. Biophoton Statistics, 1998, **4**: 11~16
- [1.57] Gerhardt V, Krause H, Raba G et al. Delayed fluorescence from photosynthetic active phytoplankton in the time-range from 1 to 55 seconds. *J Luminesc*, 1981, **24/25**: 799~802
- [1.58] Li K H, Popp F A. Non-exponential decay law of radiation system with coherent rescattering. *Phys Lett*, 1983, **A93**: 262~266
- [1.59] Jursinic P A. Delayed Fluorescence; current concepts and status. In: Govindjee J et al. Light Emission by Plants and Bacteria. Orlando; Academic Press, Inc. 1986. 291~328
- [1.60] Popp F A. Some essential questions of biophoton research and probable answers. In: Popp F A, Li K H, Gu Q. Recent advances in biophoton research and its applications. Singapore, New Jersey, London, Hong Kong; World Scientific. 1992. 1~46
- [1.61] Popp F A, Li K H. Hyperbolic relaxation as a sufficient condition of a fully coherent ergodic field. In: Popp F A, Li K H, Gu Q. Recent advances in biophoton research and its applications. Singapore, New Jersey, London, Hong Kong; World Scientific. 1992. 47~58
- [1.62] Gu Q. Quantum theory of biophoton emission. In: Popp F A, Li K H, Gu Q. Recent advances in biophoton research and its applications. Singapore, New Jersey, London, Hong Kong; World Scientific. 1992. 59~114
- [1.63] Chwirot W B. Ultraweak luminescence studies of microsporogenesis in larch. In: Popp F A, Li K H, Gu Q. Recent advances in biophoton research and its applications. Singapore, New Jersey, London, Hong Kong; World Scientific. 1992. 259~285
- [1.64] Musumeci F, Godlewski M, Popp F A et al. Time behaviour of delayed luminescence in *Acetabularia acetabulum*. In: Popp F A, Li K H, Gu Q. Recent advances in biophoton research and its applications. Singapore, New Jersey, London, Hong Kong; World Scientific. 1992. 327~344
- [1.65] Niggli H J. Biophoton re-emission studies in carcinogenic mouse melanoma cells. In: Popp F A, Li K H, Gu Q. Recent advances in biophoton research and its applications. Singapore, New Jersey, London, Hong Kong; World Scientific. 1992. 231~242
- [1.66] Galle M, Neurohr R, Altmann G et al. Biophoton emission from *Daphnia magna*: A possible factor in the self-regulation of swarming. *Experientia*, 1991, **47**: 457~460
- [1.67] Galle M. Population density-dependence of biophoton emission from *Daphnia*. In: Popp F A, Li K H, Gu Q. Recent advances in biophoton research and its applications. Singapore, New Jersey, London, Hong Kong; World Scientific. 1992. 345~356

- [1.68] Popp F A. Some remarks on biological consequences of a coherent biophoton field. In: Popp F A, Li K H, Gu Q. Recent advances in biophoton research and its applications. Singapore, New Jersey, London, Hong Kong: World Scientific. 1992. 357~373
- [1.69] Gu Q, Popp F A. Biophoton physics: A potential measure of organizational order. In: Jung E G, Holick M F. Biologic effects of light. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 1994. 425~443
- [1.70] Gu Q, Popp F A. Biophoton emission as a potential measure of organizational order. Science in China, 1994, **B37**: 1099~1112
- [1.71] Gu Q. Biophotons and nonclassical light. In: Chang J J, Fisch J, Popp F A. Biophotons. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers. 1998. 299~321
- [1.72] Inaba H. Super-high sensitivity system for detection and spectral analysis of ultraweak photon emission from biological cells and tissues. Experientia, 1988, **44**: 550~559
- [1.73] Mieg C, Mei W P, Popp F A. Technical notes to biophoton emission. In: Popp F A, Li K H, Gu Q. Recent advances in biophoton research and its applications. Singapore, New Jersey, London, Hong Kong: World Scientific. 1992. 197~205
- [1.74] Slawinski J, Ezzahir A, Godlewski M et al. Stress-induced photon emission from perturbed organisms. Experientia, 1992, **48**: 1041~1058
- [1.75] Lavorel J. In: Govindjee. Bioenergetics of Photosynthesis. New York: Academic Press, 1975. 223~317
- [1.76] Malkin S. In: Barber J. Primary Processes of Photosynthesis. Amsterdam: Elsevier, North-Holland Biomedical Press. 1977. 349~432
- [1.77] Teubner R, Rattemeyer M, Mehlhardt W. Eine neue Methode zur Untersuchung der Qualität von Pflanzen und Früchten. Aerztezeitschrift für Naturheilverfahren, 1981, **4**: 204~205; R. Teubner. Zur qualitätsbestimmung von nutzpflanzen, insbesondere medizinpflanzen, mit hilfe der ultraschwachen photonenemission. Dissertation, Fachbereich Agrarwissenschaften, Göttingen, 1985
- [1.78] Usuki K, Kaneda T, Yamagishi A et al. Estimation of oxidative deterioration of oils and foods by measurement of ultraweak chemiluminescence. J Food Sci, 1979, **44**: 1573~1576
- [1.79] Löfliger J. Food oxidation as measured by chemiluminescence. J Luminescence, 1984, **31 & 32**: 908~910
- [1.80] Swinbanks D. Body light points to health. Nature, 1986, **324**: 203
- [1.81] Woodward S A, Janky D M, Harms R H. The influence of light on egg yolk. Pigmentation. Poultry Science, 1986, **65**: 508~510
- [1.82] Stauff J, Reske G. Lumineszenz von Hefe. Naturwissenschaften, 1964, **51**: 39
- [1.83] Mei W P. Ultraweak photon emission from synchronized yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) as a function of the cell division cycle. In: Popp F A, Li K H, Gu Q. Recent advances in biophoton research and its applications. Singapore, New Jersey, London, Hong Kong: World Scientific. 1992. 243~258
- [1.84] Köhler B, Lambing K, Neurohr R et al. Photonenemission-Eine neue methode zur erfassung der "Qualität" von lebensmitteln. Deutsche Lebensmittel-Rundschau, 1991, **3**: 78~83
- [1.85] Lambing K. Biophoton measurement as a supplement to the conventional consideration of food quality. In: Popp F A, Li K H, Gu Q. Recent advances in biophoton research and its applications. Singapore, New Jersey, London, Hong Kong: World Scientific. 1992. 393~413