

[美] A. 圣-乔其 著

电子生物学与癌

— 癌的一种新理论

RT30.7/500

0	H1								
1e2	Li3								
		Be4							
10	Na11		B5						
		Mg12		C6					
			Al13		N7				
				Si14	P15	O8		F9	Ne10
						S16		Cl17	Ar18

科学出版社

电子生物学与癌

——癌的一种新理论

〔美〕A. 圣-乔其 著

迟翰林 译

林克椿 校

科学出版社

1979

内 容 简 介

A. 圣-乔其是一位著名的生物物理、生物化学家。本书实际上是他多年来的科学思想结晶。他把设想的两种生命状态(α , β)和电子传递链与癌变联系在一起,认为癌是生命的调节机构发生故障从而使细胞停留在无限制增殖的原始 α 态(去分化)。他又再次强调癌的研究必须在电子水平上深入了解生命现象的本质,不要去研究“癌为什么会生长?”的问题,而要着重探索“维持正常细胞生长的是什么?”。

思想清新、活跃、大胆是圣-乔其著作的特点。本书涉及生物学基础理论,对于从事生命科学研究的广大科技工作者,特别是对生物物理学、生物化学及肿瘤研究工作者都会有启发意义。

A. Szent-Györgyi

ELECTRONIC BIOLOGY AND CANCER

A New Theory of Cancer

Marcel Dekker, Inc. 1976

电 子 生 物 学 与 癌

——癌的一种新理论

[美] A. 圣-乔其 著

迟 翰 林 译

林 克 椿 校

*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街137号

中 国 科 学 院 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1979年7月第一版 开本:787×1092 1/32

1979年7月第一次印刷 印张:2 3/8

印数:0001—25,680 字数:52,000

统一书号:13031·1059

本社书号:1488·13—10

定价: 0.27 元

目 录

第一部分 基本概念与调节作用

1. 引言	1
2. 稳定性	6
3. 化学能	8
4. 颜色与电子的活动性	10
5. 氧与二羰基	13
6. 氧化作用与电荷转移	15
7. 羰基、细胞分裂与乙二醛酶	18
8. 巯基的分布与反应活性	22
9. 胺与羰基	28
10. 乙二胺、甲基乙二醛与SH-谷胱甘肽	33
11. 二羰基与生物胺	35
12. 电子转移链	40
13. 氧的生物学功能	43
14. 防御与调节	45
15. 提要	49

第二部分 论 癌

16. 引言	52
17. 病因、治疗与预防	56
18. 关于二羰基	58
19. 零星的观察	61
20. 历史的回顾	63

第一部分 基本概念与调节作用

1. 引言

目前,生物学已成为一门分子科学。我们的身体是由以蛋白质大分子为主的许多分子所构成的,这就很自然地会认为一切生物学反应必然是分子反应,使生命成为一种分子现象。生物学的魅力,就在于它的各种反应都极为精巧,所以我不相信这些反应会是由那些笨拙的大分子所引起的,而没有某种更小的、活动性更大和更敏感的单位参与,这些单位只能是非定域的、具有高度反应活性的电子。另外,由于对癌和其他一些退化性疾病的本质研究已停滞不前,也促使我提出这样的观点:我们的基础知识有很大的空白,我们的整个生命观可能是有缺陷的。我们过去可能是“网外捕鱼”,生物大分子在生命之剧中更象是舞台而不是演员。看来解决“癌症问题”的第一步必然是填补这个空白。正如 Bernal 所说,只有了解它才谈得上控制它。

这些思想一部分是跟我年轻的朋友、学生 K. Laki 共同讨论后产生的,在发表之后 (A. Szent-Györgyi, 1941) 受到普遍地反对,他们对我说,高度活性和非定域的电子应该能够与光子起反应,使蛋白质带有颜色或不透明,但是已分离出的、并经过仔细研究的大量蛋白质却是无色透明。这确实是很有力的论据,使人哑口无言;对我来说它构成一个难题,而且这个难题必须加以解决。我发现这个问题的解答既简单又有趣。概括说来,实际上蛋白质可分为两大类:一类是在体内以分

子分散形式存在的可溶性蛋白，另一类蛋白质相互连接成为“结构”，根据定义“结构”是不溶性的。可溶蛋白只完成简单的植物性功能，例如发酵，这类功能不需要有特殊活性的或特别活动的电子就可以完成各种分子反应。与此相反，所有比较复杂的动物性功能都是由结构来完成的，就是说，这些分子连结成为各种复杂的体系，并将化学能转变为某种功，这种功可以是机械性的（肌肉）、渗透性的（分泌）或电性的（神经活性）。正是这类结构才需要活动的和高度反应活性的电子。

一个化学家需要有晶体，同样，蛋白质化学家就需要有蛋白质晶体，而为了产生这种晶体，就需要有蛋白质溶液。因此

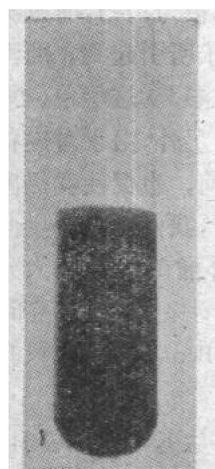


图1 牛肝结构蛋白的悬液。

此他的工作往往是从生物系统中把可溶性蛋白挤压或抽提出来，被提取过的物质称为“残渣”，倒入下水道，而这样就把具有高度活性、可活动的电子也随着残渣丢掉了。

因此，在我与 Jane McLaughlin 合作进行这种研究时采取相反的途径：提取组织（肝），而把提取液丢掉，然后用去垢剂*溶解“残渣”，看看是否真的无色透明。结果它具有一定的透明度和瑞士巧克力样的颜色（图1）。结构蛋白质的颜色说明有高度活性的电子和固态现象存在。

分子的概念对于澄清我们的思想作出了巨大的贡献，为生物学建立了牢固的基础，这是毫无疑问的。但是，在某个时

* 将器官组织放在 20 倍体积的蒸馏水中捣碎。这种处理造成溶血和洗出血红蛋白。调悬液 pH 至 4.6，然后离心。“洗”沉淀物（重新悬浮在水中）并离心。将“洗”过的沉淀物再悬浮于 20% 的月桂硫酸钠中。

期起推动作用的尔后也可能变成障碍。我们的分子观念可能就是这种情况。分子概念的成功令人眩目,使人们忽视了生物学上一个最基本的原理——组织。“组织”意味着事物可由两种不同的方式构成,即随机地和有意义地构成。随机构成的事物形成所谓“堆积”,而和意义地构成的事物,可以产生某种完全新的事物。这就是希腊教堂与建造教堂的石堆和瓦块不同之处。对于所有复杂的事物也都是如此。如果核与电子有意义地放在一起,就会产生原子。如果某些原子有意义地放在一起,可能产生氨基酸。若氨基酸再有意义地连结在一起,会形成蛋白质分子,它就不再是一组氨基酸而是肽键的链。这种肽链有意义地折叠,会使某些原子基团相互靠近,使所形成的球体具有成键和键裂的催化能力。在此过程中是以其他分子作为食物的,把它们的部分自由能和负熵释放出来以重排它们的结构,而蛋白质分子却能利用这一能量来维持自身的结构。S. W. Fox 和 K. Dose (1972)曾指出,类似于蛋白质这样复杂而又具有某些与它相同生物活性的大分子,是可以自发形成的。

作为食物分子的这种结构重排过程称为“发酵”,这是一种简单的、效率很低的过程,它把绝大部分能量都留给了发酵产物。正如 E. Buchner (1897) 曾指出过的那样,在可溶性分子的体系中就可以进行这种过程。

当单个的蛋白质分子连在一起成为功能愈益复杂的结构时会产生什么样的新属性,生物学还没有提出过这个问题。所谓“结构”就不是“堆积”,而且根据定义,“结构”是不溶性的。“结构”是每个人的个性的基础,而且也是所有“较高级的”生物功能(例如思维、运动、分泌和反射等)的基础。假如把我放进水压机,它会压出我所有的液汁,这样,我就被分成两部分,即含有全部可溶性分子的“液汁”部分和含有全部结

构的“残渣”部分。如果真有可能把两部分重新放到一起,那么,把我的液汁跟某个女孩的液汁交换一下,不会有什么不同;但是,如果交换两人的残渣,我将会变成一个小姑娘,而她却成为老头了。看来个性是跟“结构”有联系的。

我的想法就是必须把两种蛋白质大分子加以区别,一种是可溶性分子,它以分子分散的形式存在,而且完成简单的“植物性”功能,如发酵作用;另一种是构成结构的分子,这些结构完成全部“较高级”的功能,而使我们成为现在这样。因此会很自然地问道,大自然把一些分子放在一起构成结构时会产生什么样的新属性?又是什么把结构的分子连接起来的?它们的整合作用的器械又是什么样的?显然这必定是些比笨拙的蛋白质大分子小得多、活动性更大的东西,它们的反应依赖于较高的活化能。我在三本小册子中[生物能力学(1957)¹⁾,亚分子生物学导论(1960)²⁾,活态(1972 a)]曾试图引起人们注意的就是关于“组织”这决定性的一步。

大约三十亿年前生命刚开始起源的时候,我们的地球一定是个非常不舒服的地方,炽热、一片漆黑,四周围绕着很厚的水蒸气层。没有光也没有氧。我们只能这样推想,在这样的条件下只能建成最简单的生命形式,为了使生命能延续下来,必须在条件允许的情况下尽快增殖。已形成的蛋白质分子应该比较稳定,没有松散的末端或不平衡的力。它们必然是些电子配对的“闭壳层”分子。大气层一定是强还原性的,主要含有电子供体而没有电子受体。在供电子基团中,强还原性的巯基(SH)必将在增殖的过程中发挥重要的作用。可以想象,在这样的条件下,电子的能带是饱和的、不导电的,蛋白质是一种电介质。我把生物学上的组织的这个阶段称为

1) “生物能力学”,林克椿等译,科学出版社出版(1962年)。——译者注

2) “亚分子生物学导论”,林克椿译,科学出版社出版(1965年)。——译者注

“ α 态”。在这个阶段中，活体系的主要功能应该是发酵和增殖。发酵和增殖就不需要有“结构”或特异的电子属性。缺乏结构和设计简单一定会更有利于增殖。

当地球变冷时，外围的水蒸汽凝结，长波的红光终于能达到地球表面，于是生命发育成可捕获红光光子的绿色物质，而且直到如今我们的大草原还是绿色的。活体系用捕获光子的能量使水的元素分解，把H固定在碳上生成食物，而把氧以 O_2 的形式释放到大气层。氧是一种氧化剂，是电子受体，它可以使蛋白质的性质发生深刻的变化，它把蛋白质的电子对折开，从闭壳层分子变成具有高度活性的自由基。它还能使电子的能带不饱和，由电介质变成半导体，同时也产生了不平衡的力，使蛋白质分子联接起来变成越来越复杂的结构，这些结构将完成越来越复杂和精巧的反应，从而导致“分化”和进入一个新状态。活体系的这个新状态我称为“ β ”态，以便区别于氧出现之前的“ α ”态。

在进一步探讨之前，我曾寻找过实验上的证据，它能说明电子受体确实可以改变蛋白质的性质，也能使得结构蛋白带颜色。对于蛋白质，我选择酪蛋白，以巴豆油醛作为受体，它是一种能接受单个电子的单价电子受体。

把 0.1 M 巴豆油醛加到 50% 的酪蛋白溶液中，调 pH 为 7.4，放在我的实验台上。第二天早晨发现纯酪蛋白溶液没有什么变化，而含有巴豆油醛的酪蛋白却呈现出肝样的棕色，H. Kon 用电子自旋共振 (ESR) 波谱仪还测出了信号，说明它是一种自由基，或者是一种蛋白质与烯醛基 (enal) 所生成的双自由基 (biradical)。看来，整个电子在基态从蛋白质被转移到烯醛基，从而形成稳定的自由基。这个简单的实验说明，单价受体可以使蛋白质变成有色的自由基，使蛋白质的性质发生深刻的改变，在光和氧出现之后所发生的进化性改变，也

许就是这样产生的。

“ α 期”的无限制增殖与复杂的结构的发育是不相适应的。为了保持整体的协调,必须对这种增殖进行阻断和调节。即使没有调节作用,半固态的结构也要影响细胞分裂,细胞分裂包含细胞内部完全重排,需要更多的液态。为了能够进行分裂,细胞必须最大限度地拆卸自身的结构,首先拆卸体积最大的结构——核,溶解核膜,染色质浓缩成少量的、能活动的染色体。起氧化作用的线粒体也要拆开,使细胞更加依靠发酵来提供能量。这一切意味着分裂中的细胞必须去分化,并在一定程度上回复到“ α 态”。在完全分裂之后,细胞必须找到返回有氧化的静止 β 态的途径,以便再一次建造自己的结构和电子传递链。假如细胞发现它返回 β 态的道路被扰乱,或者由于某种外界因素使 β 态不稳定,那末细胞将会继续处在增殖的 α 态,肿瘤将会发生。

大自然在建成新的机构时,并不是把旧的完全抛弃,而是在原有基础上建立新的机构。因此,在 β 期建立固态的结构,并不意味着可溶性分子体系被丢弃了。它变成代谢的基础,并作为包埋不溶的新结构的基质;并继续发挥其简单的“植物性功能”,如发酵作用,为已埋入的结构烹调食物,释放食物的全部能量,打开通往分化与进化的道路,其最终产物就是我们——人。了解这些关系必须通过电子这一尺度。在进入生物学的这一领域时,我必将要踏上 B. Pullman 和 A. Pullman 的工作所开辟的道路。

2. 稳 定 性

一切物理学体系都倾向于最大的稳定性。可以反过来说,稳定性最大的状态是物理体系倾向于达到的一种状态,这

种状态自由能最小而熵最大。物质与能量趋向随机化。在每一种化学反应中，体系的能量中总有有限的一部分将转变为随机的热骚动。能逃脱这种命运的另一部分能量可以自由做功，这部分能量称为“自由能”。正是由于这种倾向，使得熵增加并减少驱动化学反应的自由能。体系一旦到达自由能最小而熵最大时，一切变化都将停顿。熵是一种随机性的，而负熵，却意味着有结构的“图相”(pattern)。

有生命的(活的)体系由于建成了特定的结构图相就获得一种依靠环境来增加自由能和减少熵的能力。活体在使环境的自由能和负熵减少的同时，使自己的自由能与负熵增加。自由能或负熵越大，则活体做的功越多，活体继续增加这些量的能力也越强。自由能与负熵最大时生物学稳定性最大。在某种意义上生物学稳定性与物理学稳定性相反。一个活体离物理学稳定性愈远就愈有活力，而且也愈稳定。所谓死亡，就意味着生物学稳定性让位于物理学稳定性。

物理学稳定性与生物学稳定性彼此正好相反。这就有点使活的体系陷入进退维谷的地步了，因为纯粹的生命是不存在的。谁也没有看到过这种生命。我们所看到的，是具有活力这种奇妙性质的物质体系。活力倾向于增强其生物学稳定性，而与活力结合的物质体系则倾向于物理学稳定性。生命是与经常倾向于破坏的物质结构图相联系在一起。这就使我们的生命依赖于纠正对我们的结构产生损伤的能力。由于我们的这种纠正能力是有限的，我们的寿命也是有限的，所以我们的纠正能力也总是不完善的。

如果大自然不能通过经常产生新的而又完善的个体的办法，来间断性地造成新起点，那末缺陷逐渐积累，终将使生命完结。大自然是用使两个个体融合的办法做到这一点的。如果两个个体的损伤部分不相叠加而相抵消，就会产生出完善

的新个体。如果两个个体的缺陷相重合,那么,就会出现其中带着某种“退化性疾病”种子的不完善的个体。

通过融合来产生新的个体就是所谓“增殖”。因此增殖的倾向性是生命的一种属性,是生命的强大动力。每个细胞都必然具备这种性质。为了保持整体协调,单个细胞的这种倾向都要受到抑制和调节作用的制约。但是,每个细胞又必定具有极力摆脱这种限制的倾向而进行增殖,进而产生癌,最终杀死整个个体。生长与繁殖的倾向是生命的最基本的性质之一。因此癌研究的首要问题并不是“癌为什么会生长”,而应该是“增殖的天然倾向如何才能经常受到抑制”的问题。由于我们老是在探索“癌为什么会生长”的问题,而不是探索“保持正常细胞生长的是什么”,癌研究已受到很大的阻碍。我们纠正缺陷的能力依赖于我们对调节系统的了解,本书就是专门谈这个问题。我希望在我的下一本书里,能够说明这方面的知识怎样才能用于癌症的治疗或预防。

3. 化 学 能

我们这个世界是由大约100多种不同的元素所构成。Mendeleef 将它们排列在周期表里而形成一个相关的体系。图2列出周期表的前几行。每一横行都以惰性气结束并另起一行。这些气体被称为“惰性”是因为它们什么也不干——不起化学反应。

H 1									
He 2	Li 3	Be 4	B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10	
Na 11	Mg 12	Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18		

图2 元素周期表的前几行。

人具有希望成为高贵者的这种弱点,原子也同样,或者至少很相像¹⁾。只要原子所具有的电子数与最邻近的惰性气相同,就会成为这种状态。表左边元素的电子多一些,而右边则少了一些。因此左边的元素倾向于给出电子,而右边的元素则倾向于获取电子。如果这两种原子相互作用,则前者将把一个电子传递给后者。易给出的电子具有高的能量水平(能级),而倾向获得电子的轨道则应该具有低能级。于是,被传递的电子就从高能级进到低能级,并且释放出相当于两能级差的能量。驱动生命的就是这种能量。图2的倾斜度表示能量的这种下降。如图所示,氢自己单蚀一行,与其相应的惰性气应该是中子气(以阿拉伯数字0表示),它没有电子。H只有一个很容易给出的不平衡的电子,因而位于特别高的能量水平上。这个电子的能量就是生命的“燃料”。氢原子供出电子成为 H^+ 质子,然后沉入生命的溶媒——水的质子池中。

生物学的电子受体要在图2表中右边去寻找。很自然的一个候选者是F,但是由于这个元素具有多变的特性而使它不能胜任这个角色。所以最优的选择应该是F的邻居——氧,它具有全部所需要的性质。因此,生命的全部能力学就是围绕着电子从H向O的转移而转移,H和O是水的元素,使生命在能力学上变成水的游戏。电子由H向O转移所释放的能量在图上用一个长箭头的斜线来表示。

离惰性气越近的元素,获得或给出电子的倾向就越强。因此同一横行的元素之间也可以发生电子转移,例如从N或P向O转移。这些反应的能量在图2用一些小箭头来表示。这些能量对于维持生命来说太小,但足够用于在调节中发挥重要作用或在能力学上用于“小变化”。原子愈大外层电子离

1) “惰性”原文: nobility, 原意: 贵族、高贵者等。作者这句话的真实含意是“原子倾向于惰性”。——译者注

核愈远,核的吸引力也愈小。所以电子从第二行进入第一行也可以获得能量,例如从S向O转移。由于氢和氧之间的相互作用是能力学的关键,那么调节作用与癌的关键就应该到N、O、S之间的相互关系中去寻找。所以调节作用的主角应该是蛋白质中的N、S和P,它们扮演供体的角色,而O则扮演着电子受体的角色。

4. 颜色与电子的活动性

颜色似乎是一种表面的、偶然的性质。女孩子的脸颊和嘴唇上的颜色也许是这样,可是,颜色产生于光子与电子的相互作用,它往往会给予我们有关电子的基本信息。即使没有颜色也能给我们重要的启示。可溶性蛋白质就是无色的,而不溶的结构蛋白却显示出颜色,这表示两者之间有着重要的差别,使人联想到前者所产生的生物学反应是分子的反应,而后的反应则有些是电子性的。

电子受核力吸引越强,它与光子的相互作用就越弱。电子被束缚得愈松就愈倾向于成为非定域的电子,且易于跟光子相互作用。含有共轭双键的分子会由于自身的 π 电子的活动性而呈现黄色。共轭体系的范围越广,则分子的颜色越深、越暗。B. Pullman 和 A. Pullman 强调过电子活动性在生物学上的重要意义,辅酶在很大程度上是由这种共轭体系所构成的。平衡的闭壳层分子里的电子都成对排列,每对电子都占据同一轨道,以相反的方向自旋,且磁矩相互平衡。若把电子对拆开,就会出现高度不平衡的状态。因为磁力很小,大多数的扰动不会是由于磁力的不平衡所引起的,而是由于轨道的部分填充。

占据整个轨道的单个电子会吸引新的伙伴,这些单个电

子很容易被激发和强烈地吸收光。吸收作用通常发生在光谱中很窄的范围内,使得吸收峰很窄、很强而且没有结构。肉眼看去呈现出很纯、很强的色彩。含有这种不配对电子的分子称为自由基,这种分子非常活泼,具有 ESR 信号。

活动性,亦即电子的非定域性,由于可能产生快速相互作用而具有重要的生物学意义。除了共轭双键的 π 电子具有活动性之外,产生电子的非定域化还有多种可能性。30 多年前我就提出过蛋白质可能是半导体。

L. Brillouin (1962, 1966) 曾经指出过电子活动的另外一种可能性,他认为由重复单元有序排列所建成的结构之中,单能级都分裂成一束能级而形成能带,而能带之间又被所谓“禁区”所隔开(禁区又可称为 Brillouin 区)。

这种能带的导电性依赖于它所含有的电子数。不相容原理只允许每个单元贡献给能带两个电子。假如基本单元的数目为 n ,而能带上的电子数是 $2n$,那么每个现有的位置都被填满,跟满员的车库一样就没有活动性了。如果从中取出些电子,则这种能带就能导电。半导体之所以具有导电性,主要是因为最高的满带与在它上面的最低空带很靠近,以致于热骚动的能量就足以把电子激发到空带,使得两个能带都能导电。对蛋白质中隔开两个能带的禁区宽度,已做过测量和计算(M. G. Evans 和 J. Gergely, 1949; D. D. Eley 等人, 1962; A. Pullman, 1965; J. Ladik, 1964),发现这种宽度有几个电子伏特,而在活系统中却没有这种能通过这么宽的禁区把电子提升上去的能量。

L. Brillouin 曾指出从饱和能带中取出电子使之电导的另一种可能性。用掺受主杂质的办法即可做到这一点,受主杂质是一种能获得电子的物质。D. D. Eley, K. M. C. Davis, R. S. Snart 和 D. I. Spivey 都实际观察到氯醌基 (Chloranyl) 之

类电子受体来处理蛋白质可以增强其电导性。J. B. Birks 和 M. A. Slifkin (1963) 也报道过类似的结果。

图 3 中 A 是按化学速记法写成的肽键,但正如 L. Pauling

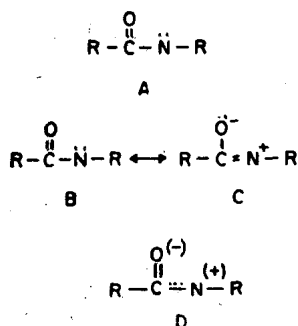


图 3

A: 肽键的经典符号; B 与 C: 共振形式; D: B 型与 C 型结合。

(1959, 1968) 所指出的那样, 肽键实际上是两种共振型 (图 3 中的 B 与 C) 的混合物。更确切地说, 肽键还都不是这两种形式, 而是只能用波动方程描写的、介乎两者之间的某种形式 (这些波动方程还不能求解)。为此采用化学速记法将肽键写成 D 型, 使所有的键都成为具有活动电子的部分双键, 这样能最接近于真实情况。

蛋白质骨架上的肽键是由组成氨基酸的 β 碳原子以两种方式连接起来的。按照 A. Pullman (1965) 提出的第一种方式, 氨基酸的 β 碳原子是饱和的, 而且对电子束缚得太紧以致不能导电。最近 S. Suhai (1974) 又重新考虑了这个问题, 可能还没有完全解决。

按照 L. Pauling (1959, 1968) 提出的第二种方式, 蛋白质中的肽链还要通过氢键相连。M. G. Evens 和我的同事 J. Gergely (1949) 曾研究过氢键的导电性问题, 得出的结论是氢原子的 p 轨道可能存在一定程度的共轭作用。他们的见解或多或少被普遍接受, 但氢键只能造成窄的能带, 只具有程度较低电子活动性, 所以总起来可以说, α 态的闭壳层分子可以看作是电介质。

5. 氧与二羰基

活的体系借助于光能生成氧，而氧又促使它们发育和分化。这就产生一个问题，氧怎样才能引起这些变化的？据 O. Warburg (1966, 1967) 的看法，引起这些变化的是氧化代谢所产生的能量而不是氧。我难于接受这种意见，因为能量可以驱动机构但不能创建机构。假如引起变化的不是能量，那就必然是氧本身，问题是如何引起变化的？

氧 (O_2)，由于它的氧化能力，即从其他分子获取电子的能力而在生物学中起核心作用。氧从蛋白质取出电子而使它们变成半导体和自由基，难道在活体系里不能产生这种变化吗？虽然这种假设很吸引人，但有两方面的理由使人不能接受：首先，蛋白质不能把电子直接给氧。那样做倒是很简单。如果真是如此，我们就会被烧掉了。第二，氧是两价受体，它成双地获取电子，因而会很简单地氧化掉一个整电子对，使得分子变小，但不能使分子变成活泼的自由基。能够做到这一点的只有接受单电子的单价受体。Michaelis (1935, 1946a, b) 曾说过电子也可以一个一个地转移到两价受体上，但这并不能使情况有所改变，因为最终结果还是两个电子的转移。

氧分子 (O_2) 是两个氧原子用 $O=O$ 双键联结在一起的，双键可以打开成为 O^--O^- 的两价受体，可以再分成两个 $O^=$ ，每个 $O^=$ 也是两价受体。

如果 O 不是跟另一个 O 相连而是与 C 相连形成 $C=O$ ，情况就不同了。羰基是只能获取单个电子的单价受体。但 $C=O$ 是种弱的受体。它的电子系统太小，以致不容易收容附加的全部电子。但如果把两个 $C=O$ 连在一起，那么两个 π 电子体系就会融合成一个较大的 π 体系，而它却是一个强的