

细胞与能

R. A. 戈德斯比 著

科学出版社

内 容 简 介

细胞如何产生和利用能量是生命化学中的重大课题,涉及到代谢调控、遗传信息的保持和表达、酶学、蛋白质的结构与合成,甚至生命起源等重要方面。本书从概括地介绍生命的化学起源、细胞的分子结构和功能开始,结合近十年来分子生物学和化学的新进展,对这一问题作了简要阐述,是一本入门书。可供生物学初级研究人员和大专院校生物系各专业师生阅读。

Richard A. Goldsby
CELL AND ENERGY
Macmillan Publishing Co., 1977
2nd ed.

细 胞 与 能

R. A. 戈德斯比 著

张镜宇 译

汪开治 校

责任编辑 姜梦兰

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院开封印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1984年9月第一版 开本: 787×1092 1/32

1984年9月第一次印刷 印张: 5 5/8

印数: 0001—9,100 字数: 125,000

统一书号: 13031·2669

本社书号: 3673·13—10

定价: 0.90元

序

自从《细胞与能》一书第一版问世以来的十年中，生物化学作为一门动态的学科领域，正如人们所期望的那样，涌现出大量新资料 and 许多新概念。这个修订版所增补的新材料有不少内容，虽然不是全部，就是属于过去十年中分子生物学和化学的新进展。

这一版的大部分新材料，将在“细胞的本质”和“生命的起源”等章节中看到。我相信，关于细胞及生命之细胞基础的讨论，将是论述细胞如何产生和利用能量的有用开端。我还认为，概括地阐述一下人们所知的和设想的关于生命的化学起源，将会有助于搞清生物化学与遗传系统的基本过程——进化之间的关系。

这本小册子的其余部分是围绕着能量的产生和利用这些概念而编写的。这些概念给有关代谢调控、遗传信息的保持和表达、酶学，以及蛋白质结构与合成等的讨论，提供了一个统一的蓝图。显然，著者无法把详尽的生物化学教科书中的每一个课题都收入这本简略的小册子之中。我的目的是要介绍生物化学的一些概念，并指出生物化学工作者最关心的一些问题。我希望这本入门性质的书籍将激励本书的主题——生命之化学的读者去进行深入一步的研究。

R.A. 戈德斯比

目 录

第一章 生命的起源.....	(1)
自然发生论及其演变史.....	(1)
几种相互竞争的理论.....	(5)
化学进化.....	(8)
别的世界有生命吗?.....	(13)
恒星和行星的起源.....	(13)
太阳系之外的其它星体世界.....	(16)
智慧生命的展望.....	(17)
第二章 化学语言.....	(22)
原子与分子.....	(22)
化学符号语言.....	(27)
分子结构简介.....	(29)
一些有生物学意义的化学物质.....	(33)
由少成多.....	(41)
一些生物学上重要的功能基团.....	(42)
酸-碱关系.....	(44)
第三章 细胞的本质.....	(49)
真核细胞与原核细胞.....	(53)
细胞器的结构和功能.....	(55)
真核细胞的起源.....	(67)
第四章 生物能学.....	(77)
能量的守恒和转换.....	(77)
生物能与ATP.....	(79)
ATP的作用和合成.....	(82)
氧化还原作用与能的产生.....	(83)
人体系统中能的利用.....	(85)
第五章 生物催化作用.....	(88)

催化作用和催化 剂·····	(89)
蛋白质的性 质·····	(91)
蛋白质的 作用·····	(96)
酶的性质和专一 性·····	(99)
影响酶活性的因 素·····	(101)
酶活性的控 制·····	(105)
第六章 发酵与呼吸·····	(108)
乙醇发 酵·····	(108)
糖原 酵解·····	(112)
呼吸与氧化 磷酸化·····	(114)
分室 化·····	(121)
作为能源的 其它分子·····	(123)
第七章 光合作用·····	(129)
光合作用过 程·····	(129)
光的本 质·····	(131)
光能的捕获和 转换·····	(132)
电子流与光合 作用·····	(136)
波长与光合电子 传递·····	(139)
光合作用中碳周转的途 径·····	(140)
第八章 能与生物合成·····	(145)
DNA的功能与生物 合 成·····	(145)
RNA与蛋白质 合 成·····	(151)
多糖的合 成·····	(158)
脂肪的合 成·····	(159)
小 结·····	(160)
第九章 代谢调控·····	(161)
指令水平上的 调控·····	(161)
代谢水平上的调 控·····	(166)
小 结·····	(171)
推荐 读 物·····	(172)

第一章 生命的起源

生命是从何处以及如何来到世上的？历史上记录了许多企图回答这个最古老的问题的答案，世界上几大宗教也都对这个问题作出了富有诗意的回答。印度传说中有一位永恒的不朽的神Vishnu，是他搅动了原始的海，海的翻腾产生了来去匆匆的生老病死的生命类型——植物和动物。《创世纪》第一章告诉我们，是上帝先创造了天和地，又创造了草木果树、虫鱼鸟兽，最后创造了人*。

印度传说和基督教的这些叙述，都确认生命的起源是大自然中一种超自然意志的体现。它们告诉了我们生命有起源，但未告诉我们生命如何起源。因此，关于生命如何起源问题的详细答案必须到印度教吠陀经和基督教圣经之外去寻找。

自然发生论及其演变史

历史上记载了一些有关生命起源的解释，对于这种解释我们现在确实感到奇怪。伟大的希腊哲学家亚里士多德（Aristotle，公元前384—322年）观察到土壤、麦杆或废弃物等似乎并不存在有生命的东西，假如任其自行放置一段时间，常常孳生出活跃的和繁多的虫子群。他相信，如果条件合适，这些造物就会自然地产生出来。他认为，不但昆虫，

* 此处原文是一段圣经，译文只译出其大意，未全部照译。——译者注

而且高等类型的生命，如鱼类、爬行动物以及小鼠等也能够从适宜的潮湿土块或合适的污物堆中自然地产生出来。他甚至认为，人类自己也是从低等的原始物起源的，最初是在一滩淤泥里出现的蠕虫样的生物，然后才发展成人类。

亚里士多德关于复杂的生命类型从无生命物质自然产生的观点，持续存在于整个中世纪。事实上，Van Helmont（1577—1644），一位以其关于光合作用的卓绝和定量的实验而著称于世的荷兰科学家，在他的著作中还有着关于小鼠自然发生的秘方呢！Van Helmont的一种原生汤的处方指出，取一些小麦、麦秆和旧布，最好还有一两件肮脏的内衣，加一点水，然后把它们整个儿放在僻静的地方，历时几天就会产生出小鼠来。Van Helmont还进一步骇人听闻地指出：他深信这些小鼠是从他的谷物和脏衣服的奇特的混合物中自然产生的。而且这些从培养器皿中生长出来的小东西，没有一星半点的畸形，也不是行尸走肉，它们的躯体是完整的，行动是活泼的。

认为大而复杂的生命类型是从无生命的物质形成的观念是一种幼稚的观念。很明显，采用最起码的科学方法，就能够很容易地证明这种观念是不真实的。事实上，在Van Helmont死后不久，自然发生的观点就受到了来自意大利医生 Francesco Redi（1626—1697）的实验的第一次沉重的打击。在Redi那个时代，关于煮过的肉能够自然地生出蛆来的信念是被普遍承认的。这种看法来源于根据不严格的“日常感性认识”所取得的经验。曾被人们广泛见到的是，如果取一点显然没有蛆虫的肉，并将它们在温暖的地方放置几天，往往在肉里会有蛆虫出现。因为它们在肉里原先并没有，而且也没有谁把它们放进肉里去，所以用眼光短浅的逻辑推理，就引出它们是自然发生出来的结论。Redi却用出

色而简单的实验证明了，肉里的蛆虫是由苍蝇所生的卵长出来的。如果盖上盛肉的容器以隔绝苍蝇，则不管肉块腐烂到何等地步，也不会有蛆虫长出来。反之，如果使肉块原样不动地暴露在开放的容器中，则必然受到许多意大利蝇群的光顾。几天之内，这些蝇所产生的卵就孵化了，由此生出了密密麻麻的一大群蠕动着 的蛆虫。诸如此类的种种实验，瓦解了那种认为象小鼠、苍蝇和蛇之类复杂的生命类型是通过自然发生而起源于无生命物质的观念。因此，自然发生的观念，在那些了解Redi的著名实验的人们中间，偃旗息鼓了几年之久。

然而，在十七世纪后期，自然发生论这种观念又因一个被誉为发展了显微镜的荷兰科学家Anton van Leeuwenhoek (1632—1723) 的工作而复活了。在1683年，他的仪器已经改进得足以使他能够观察到巨大数量和种类的微生物，这些生物非常小，以致肉眼检视不出。因为这些微生物似乎是突然地大量出现在预备进行发酵以酿造啤酒或果酒的果汁和植物汁液中的，于是有人就抬出自然发生论，来解释这些微生物的出现。

在那些极力主张用自然发生论来解释肉汤中出现微生物的人们当中，有著名的威尔士牧师John Needham (1713—1781)。Needham做了些实验，在这些实验中他证明了：甚至煮沸过的羊肉汤仍然能有微生物繁茂地生长。他说，观察到的这些现象，只能解释为自然发生。一位意大利牧师Lazzaro Spallanzani (1729—1799)，对于Needham的结果则有另外的解释，说这是技术不严密的结果。在他的实验中，肉汤煮得时间更长，往往有几个小时，并且按排除空气污染的方法处理，结果从不会有微生物产生。在Needham和Spallanzani的争论中，不但肉汤在沸腾，而且矛盾

也白热化起来，两位研究家还互相写了许多愤怒及诃斥的信件。只是由于Spallanzani在意大利，而Needham在英格兰，距离把他们分隔开，使得决斗不方便，才得以在他们的长时间的、尖刻的、有时又常常是相互挖苦的激烈争论中，仅仅有墨水的泼溅，而未出现鲜血的喷射。在对Spallanzani的一次特别挖苦的攻击中，Needham甚至提出，Spallanzani之所以在其煮过的肉汤中找不到微生物，是因为他愚蠢地将肉汤加热过了头，从而“损伤”了其中的生命要素的结果。Needham指责道，Spallanzani仔细封闭了他的瓶子来防止空气中污物的进入，同时也就阻止了他认为必不可少的生命之赐与者——空气的进入。直到十九世纪中叶还在进行着论战。

可以同查理士·达尔文（Charles Darwin）争夺“空前伟大的生物学家”称号的法国科学家路易·巴斯德（Louis Pasteur, 1822—1895）解决了有关微生物短期内自然发生这一问题。巴斯德首先证明了空气确实是一个微生物悬浮体，这些微生物能够感染灭过菌的肉汤，随后繁殖起来。以后他又证明，如果把灭菌的空气引入灭过菌的肉汤，是长不出什么来的。然而，这同样的肉汤，若与未灭菌的肉汤接触之后，则会发育出微生物群来。

巴斯德以卓绝而明晰的实验证明，像细菌、酵母及其它霉菌这样的微生物是不能由无生命物质形成的。正象Redi的实验否定了那种认为复杂生命类型起源于无生命物质的观念一样，巴斯德的这些实验摧毁了关于微生物自然起源于无生命物质的观念。巴斯德本人给自己实验的重要性的评价是：“自然发生学说经过这些简单实验的致命打击以后，永远不会复活了。”

自然发生观念表明是一具顽强的和保有生机的僵尸。它

躺在被巴斯德将其葬入的那个墓穴中，经过了半个多世纪以后，在廿世纪二十年代，又像圣经中的Lazarus*一样爬了起来，并且还比以前更强壮了。已经死亡过一次的自然发生假说之复活，是分别由两位人物独立地完成的，他们是有才华的俄国化学家A.E.Oparin和英国天才的J.B.S.Haldane，（1892—1964）。这两位科学工作者并不是恢复短时期（几天、几个月或几年）的自然发生论的早期概念的原状；相反，他们设想了一个漫长的化学进化过程，这个过程延续了几千万年甚至几十亿年，最后导致简单生命的出现。

几种相互竞争的理论

作为对生命起源的一种解释，自然发生观念顽强地以这种或那种形式继续坚持下来，这委实毫不奇怪。事实上，它是使生命起源问题得以进行科学研究的唯一观点。解释地球上生命起源可能情况的代表性理论有三种：

1. 特创论；
2. 迁居论；
3. 自然发生论。

第一种解释特创论是把生命起源归因于超自然力量的干预。圣经的《创世纪》篇中关于创造世界的叙述就是特创论的一个例子。显然，科学是没有办法依仗超自然神物的作用而建立或反驳一种生命起源理论的。科学的推理是以称为自然定律所支配的假设为基础的。自然定律乃是对自然界中一直可观察到的范型或关系所做的正式表述。例如，重力定律就是关于任何两个具有质量的物体互相吸引这一事实的正式

* 《约翰福音》第十一章中的一个死而复生的人。——译者注

表述；因此，可以确切无疑地估计到，苹果向地面降落而不会飞上云端。可是，顾名思义，超自然的力量是逍遥于自然定律的约束之外的，因此不能期望它的作用永远适合于一贯服从自然定律的推理的规范。

关于生命存在于地球的第二种解释是迁居论。迁居假说认为，我们今天在地球看到的生命起源于从宇宙中的另外地方来的生命类型。提出这种观点的第一个人是杰出的瑞典化学家Svante Arrhenius (1859—1927)，他在接近十九世纪末期时，提出了泛生论 (panspermia)。Arrhenius认识到，在地球上看到的许多类型的细菌和霉菌都可以产生称为孢子的小体，它们只有在显微镜下才能看到，而且重量极轻。这些孢子很容易到处传播，并且在适宜的环境中萌发形成新的细菌菌落或霉菌菌落。Arrhenius认为，由宇宙的其它部分里的生物所产生的孢子或类孢子小体，可凭借光的压力从一个行星传到另一个行星——实际上确实可以从一个恒星的行星系统传到另一个恒星的行星系统。他进行了精心的计算，指出由光束产生的压力，尽管非常小，经过长期的时间过程，仍足以推动孢子样的小体通过太空。Arrhenius提出，我们今天在地球上看到的生命类型的祖先，并不是通过自然发生过程在地球上产生的，而是从宇宙的某一别的部分或某些别的部分穿过太空迁居于地球的天外来客——孢子样小体。自Arrhenius那个时代起，地球上生命起源的迁居学说便以戏剧性的形式而风行一时。有些人提出，智慧生物从距离地球若干光年¹⁾远的另一个世界定期地造访地球。

在多年以前引起争论的畅销书《上帝的马车》中，Eric

1) 当然，一个光年是指一束光以每秒186,000英里的速度行进一年所走的距离，代表 5.88×10^{12} 英里的距离。

von Daniken提出，许多古代文明的民间传说和神话，以印象主义的形式记载了想象的太空旅行家最近的来访。他甚至提出，古代建筑的巨大工程，例如埃及金字塔和墨西哥托尔泰克（Toltec）文明中的巨大的和精致的石方工程*，实际上是天外来客建造的。假如这样的访问真的发生过，这就可以推想，生命在地球上已被谨慎地繁殖，这情况就象人们在园地中播种或在池塘里养鱼那样。在这样一幕戏剧性的事件中，甚至并不需要有任何一位星际的Johnny Appleseed**来谨慎地给贫瘠不毛的行星播种生命。我们今天在地球上看到的生命，可能代表被漫不经心地丢弃在垃圾里的细菌的后裔，这垃圾则是几十亿年以前从别的世界来的旅游者，在我们称之为太阳的恒星外数第三的行星***上停留期间进行野餐时遗留下来的。

迁居学说在科学工作者中间拥有虽为数很少，却十分愿意为之献身的虔诚信徒。这种学说，不论其是否合乎真实情况，问题在于它并没有真正说明生命起源的问题。把地球上的生命说成是从来自宇宙别的地方的生命类型演化而成的，只不过是把生命的起源问题向后推了一步而已。生命是在地球上出现的，还是在100,000光年距离以外的另一个星系中

-
- 托尔泰克人以及中美洲各古老民族所创造的历时两千年之久的文明，也是以巨大的石方工程金字塔建筑艺术为标志的。这就是墨西哥和中美洲的金字塔。——译者注
 - Johnny Appleseed，即约翰·查普曼(John Chapman, 1774—1845)，是一个有民族感和事业心的果树培育家。自1801年起从Allegheny地区到Ohio州中北部，在该地开拓之前，他就建立了一系列苹果树园，在Ohio州中北部花了大约25个年头。由此成为将苹果种子带入美国并在美国大量繁殖果树的传奇式人物。“Johnny Appleseed”是人民赠给他的美称。“Johnny”是“John”的爱称，而“Appleseed”意思是“苹果种子”或“播种苹果（的人）”。——译者注
 - 即指地球。——译者注

出现的，这只是一个在何处起源的问题，并不是一个如何起源的问题。于是，我们所面临的又是自然发生论的观点。有关这种观点的最有科学价值的阐述，当推Oparin-Haldane假说。现将这一假说详细介绍于下。

化 学 进 化

回顾Oparin关于化学进化论的陈述，我们就可以认识到化学进化论的精髓。1924年Oparin写道：

在活的有机体与无生命的物质之间，没有根本性的差别……生命所特有的表现和性质的复杂组合，必然是在物质的进化过程中形成的……首先，有了有机物质的简单溶液，其行为决定于其成分——原子的性质，以及这些原子在分子结构内的排布情况。但是逐渐地，由于分子的发展和复杂性增加，新的特性出现了，从而有一种新的……规范被施加于较简单的有机化学关系之上。这些新的特质是由……分子所决定的……在这一过程中，生物规范明显地表现出来。竞争性的生长速度、生存竞争，以及最后是自然选择，决定了现代生物所特有的这样一种物质组织结构形式。

从这段化学进化假说的叙述中，可以清楚地看出，生命确是起源于无生命物质。然而，生命的起源并不是一个能够追踪到特定的顷刻时间的突然事件，而是发生于地球上的一个经历了难以想像的漫长时间的逐渐的演变过程。在化学进化论的系统阐述中，Oparin和Haldane（他们各自完全独立地提出了这种观点）认为，原始地球所处的环境与我们今天的世界各处存在的环境相差甚远。

原始地球是一个炽热的，狂暴的世界。没有当今世界例如山峦和海洋这些习见的地球特征。大气也不是我们今天能够怡然呼吸于其间的那种习见的大气，而是一种由甲烷、氨、

氢（它们已不是地球大气的主要成分了）和水蒸汽的混合气体。构成今日大气之大部分的氮气和维持生命的氧气，只是原始地球大气的次要成分。

原始地球大气中的大量水蒸汽以及多变的温度结合起来构成蒸发和冷凝聚的极快循环。这就意味着经常有暴风骤雨席卷着地球表面的大部分地区。在这种暴风雨当中形成的，或是由于象陨石这样的物体穿过大气（这在那一时期的地球史上是经常发生的）而形成的静电性，会使剧烈的电暴成为常事。火山的活动，除了对于地壳的重新定形很重要，以及促使熔融岩浆常规地而不是偶尔地流动以外，还提供了若干局部化的强烈的热能源。原始存在的相当大量的放射性同位素通过衰变提供了另外的能量。最后，行星表面沐浴在强烈的紫外光照射之中。照射在原始地球表面的紫外辐射剂量，足以杀死现今地球表面和上空存在的一切生命。今天照射在地球表面的紫外光已少得多了，这不是因为太阳减少了它的紫外光放射，而是因为我们的含氧量高的大气已经形成了一个能滤掉太阳的大部分紫外辐射的臭氧保护层。因此，原始地球是一个不毛之地的世界，它具有与现在截然不同的大气，具有丰富的热能来源，它沐浴在紫外光之中，而且经受着当今世界所无法匹敌的巨大电暴。

鉴于原始地球的环境，Oparin和Haldane的结论都认为，从大气和地面得到的能量足以引起大气中的各种气体发生反应，从而形成有机化合物。同时，这些有机化合物随着浓度的升高，它们彼此之间就会相互反应，从而产生了更复杂的有机化合物。在简单的有机化合物中，有许多是生命体系所特有的物质，例如氨基酸（蛋白质的构成成分）和糖等。蛋白质分子在细胞中发挥着各种各样的功能，重要的有催化作用，这种作用可以加速或控制生物体系中的反应速

度，从而使生命活动得以实现。糖是重要的有机化合物，因为它们今天的生命类型的能量来源，也是生物体系基本结构单位的组成部分。由简单的有机分子聚合而成的复杂有机化合物有核酸，即RNA和DNA。它们是生命体系的携带信息的分子和基因的原料，亦即携带着决定有机体基本形态和行为的信 息，并把这些信息通过遗传机制从一个世代向下一个世代传递的载体。

Oparin和Haldane的化学进化假说所依据的设想是：在适宜环境的影响下，所有这些重要的有机分子是可以形成的，并且随着时间的推移，这些分子就会发生一系列的相互作用，最后形成生命体系。这种自然发生假说，当其在二十世纪二十年代被提出来的时候，未被科学界马上接受。科学家们是有怀疑的。因为按Oparin和Haldane的见解，象氨基酸和糖这样的有机化合物分子的形成都会在任何干预之下自然地发生，而这在当时所能掌握的实验室条件下，即使是一个技艺高超的化学家也是极难做到或不可能做到的。

直至1953年，才由Stanley Miller,一位在诺贝尔奖金获得者、化学家Harold Urey领导下工作的大学研究生，完成了一项卓越的实验，来验证Oparin和Haldane假说的基本设想——有生物意义的分子能够在假定的条件下，从简单的原始物质形成。Miller在如图1.1所示的器皿中重建了含有甲烷、氨和水的原始地球大气，并加热到121℃（水在100℃时煮沸）24小时灭菌。这一步骤是必需的，因为只有这样才能确切无疑地肯定，这种大气中的气体转变成有机化合物并不是由于在实验装置中可能存在的污染的微生物的作用所致。灭菌之后，通过实验装置上部钟罩内包含的大气进行火花放电。经过七天之后，停止放电，并分析实验装置中的内含物，以确定是否有有机化合物产生。此实验对Oparin-

Haldane假说的基本设想给予了巨大的和明确的支持。七天后，在烧瓶内发现了许多象征生命系统特征的分子。这些分子包括不只一种而是四种不同的氨基酸，另外还有尿素——一种在许多生物系统中都能找到的化合物。Miller的著名实验的意义是很清楚的：如果给予特定的混合气体、充分供应的能量和足够的时间，那些构成生物系统的典型的有机化合物就会自然地产生出来。

在Miller的先驱性实验工作之后的年代中，别的实验工作在模拟原始地球的条件下，完成了不仅是简单的有机化合物，而且是更加复杂分子的形成。其中有些复杂分子与生命系统中发现的蛋白质和核酸颇为相似。例如，Sidney Fox*及其合作者已证明，氨基酸的混合物当加热时能进行反应，在这种反应中，这些分子可以相互连接起来形成类似蛋白质的分子。

在历时十多年的一系列实验中，Cyril Ponnampereu-

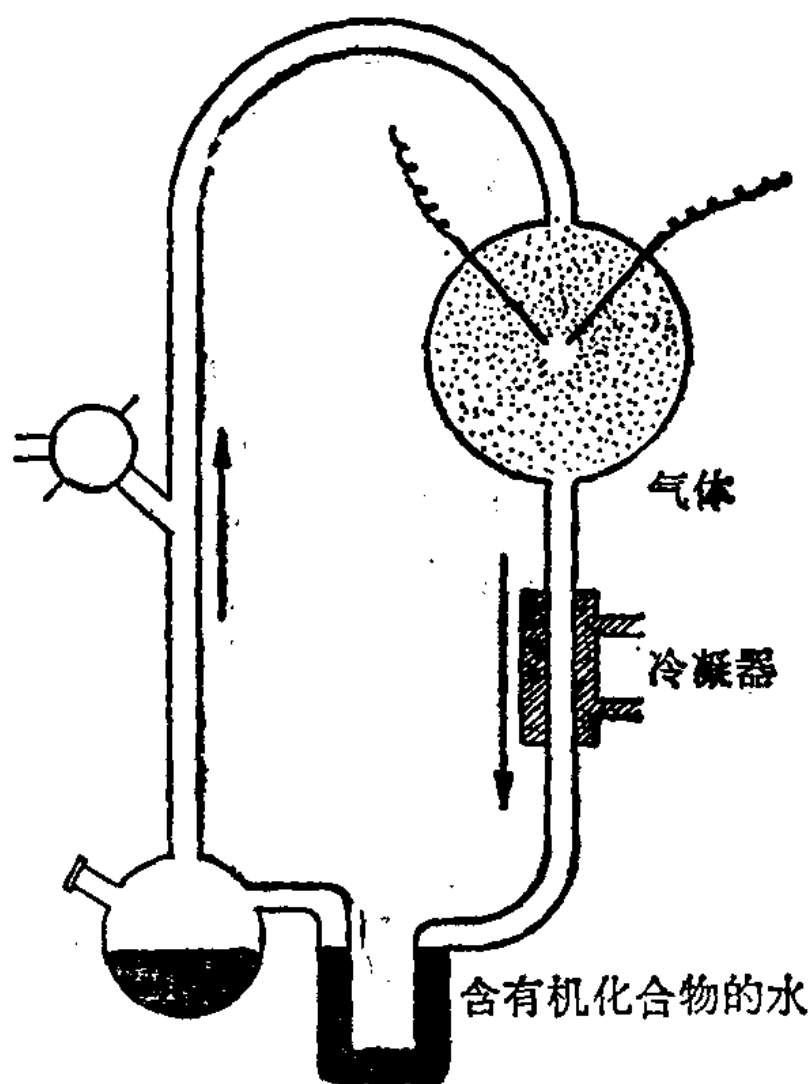


图1.1 用于有机化合物无生源合成实验的 Stanley Miller装置

- * Sidney Fox, 美国迈阿密大学的化学家。他是在十分灼热、干燥条件下（认为这种条件就是原始地球火山爆发时熔岩浆喷流过后情况的可能模拟），把氨基酸连接成链的。他把这些链形成的微小颗粒称之为“生命的原型”或“细胞的前身”。——译者注

ma*及其同事们证明,几种能源(包括紫外光和火花放电)的结合使用,在模拟原始地球的条件下,不但能形成氨基酸,而且能形成糖以及由糖组成的更复杂的分子。其中特别令人感兴趣的是报告了核苷酸的形成,因为核苷酸是构成核酸的单位。不仅如此,Pannamperuma实验室的工作者们还能将三个或四个核苷酸装配成小的多核苷酸(高达6个核苷酸的一条链)。这种成就是一个重要的开端,但是这种多核苷酸远比从生命体系中发现者短得多。生物系统中的核酸是成千上万个核苷酸互相连接成的链。然而,从最近的迅速发展来看,我们或许可以乐观地预料:在今后的几年之内,我们可以目睹在非生源(即没有生物系统参与的)条件下大分子核酸的产生。

过去十二年来对简单的和复杂的有机分子非生源性生成的证实,已迫使人们对Oparin-Haldane的生命起源假说予以认真的考虑。他们的观点是把地球上生命的发展看作是持续达亿万年之久的化学进化过程的结果,这种观点是对生命起源的最合理的解释。不过,Oparin-Haldane的观点,以及化学进化论领域中其后的研究工作者们给这种观点所做的修改,都还不能看作是最后的证实。今天确实还没有一种实验手段能够验证所假设的化学进化顺序中的最终步骤和大多数关键性步骤。这里所说的最终步骤就是指产生生命类型的那一步。现在还没有人知道如何设计出一种合适的条件,这种条件能够自然地导致被认为是有生命的自我复制系统的产生。倘若有另一个太阳系的行星,其化学进化恰好是处在产生生物种类的过程之中,那么直接观察这个行星,便可得到

* Cyril Ponnampneruma, 美国马里兰大学的化学家。他于1978年在格陵兰发现了三十八亿年前的分子化石,同活细胞极为相似。——译者注