

· 四川大学精品立项教材 ·

现代材料分析技术

XIANDAI CAILIAO FENXI JISHU

主 编 黎 兵 曾广根

四川大学出版社

· 四川大学精品立项教材 ·

现代材料分析技术

X IANDAI CAILIAO FENXI JISHU

主 编 黎 兵 曾广根



四川大学出版社

责任编辑:唐 飞
责任校对:蒋 琦
封面设计:墨创文化
责任印制:王 炜

图书在版编目(CIP)数据

现代材料分析技术 / 黎兵, 曾广根主编. —成都:
四川大学出版社, 2017.9

ISBN 978-7-5690-1211-8

I. ①现… II. ①黎… ②曾… III. ①工程材料—分
析方法 IV. ①TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 245486 号

书名 现代材料分析技术

主 编 黎 兵 曾广根
出 版 四川大学出版社
地 址 成都市一环路南一段 24 号 (610065)
发 行 四川大学出版社
书 号 ISBN 978-7-5690-1211-8
印 刷 郫县犀浦印刷厂
成品尺寸 185 mm×260 mm
印 张 20.25
字 数 486 千字
版 次 2017 年 10 月第 1 版
印 次 2017 年 10 月第 1 次印刷
定 价 49.00 元



◆读者邮购本书,请与本社发行科联系。

电话:(028)85408408/(028)85401670/
(028)85408023 邮政编码:610065

◆本社图书如有印装质量问题,请
寄回出版社调换。

◆网址:<http://www.scupress.net>

版权所有◆侵权必究

前 言

从我们对文明发展阶段的划分（石器时代、青铜时代和铁器时代）就可以看出材料对人类而言是多么重要。可以说，人类社会每一个新时代都是因为一种新材料的出现而促成的。材料之间的差异往往深藏在表面之下，人们唯有依靠先进的科学仪器才能略窥一二。为了了解材料的性质，我们必须跳出人类的经验尺度，钻进物质里面去，进入微观，甚至超微观世界中去。

遥想在地球之外的宇宙天体世界，那里存在着什么样的物质？曾经发生过什么样的变迁？它们的光谱或能把这些秘密告诉我们。虽然，今天人类的飞船可以到月球、金星、火星上去，从那里采样回来进行各种测试分析，然而，这些星球只是茫茫宇宙天体世界之一粟。就太阳这样的星球，其成分就不能靠飞船去采样，更何况还有离开我们几光年，甚至几十、几百光年的星球，就现在的宇航技术而言，我们就更加无能为力了。实际上，远在宇宙飞船出现前一百多年，人类依靠光谱技术，就已经知道太阳以及银河系中各个星体的组成成分了。

一提到材料分析，就会令人联想到精密仪器分析。诚然，市面上关于仪器分析的书籍已不算少，不过大多以介绍化学分析类的测试仪器为主；且其读者对象是以化学专业类的本科生、研究生为主。

本书由四川大学材料科学与工程学院黎兵（教授）、曾广根（副教授）主编。编者长期担任材料物理、材料化学、新能源材料与器件专业必修课“现代材料分析技术”的主讲教师，深感缺少专门针对材料科学与工程类的高等学校教材以及与材料物理、材料化学等专业密切相关的参考书。有感于此，编者集十余年的教学所得，汇编本书，试图弥补。

由于功能材料的性质分析主要针对材料的组分、结构及微观形貌进行测试表征，因此，本书主要从这三个方向出发来选择现代精密仪器，并进行原理性介绍。鉴于 X 射线衍射技术在新能源专业未专门开设本科课程，故本书将其内容收录在最后，使本书更加完整和系统。另外，其他材料分析类书籍中很少涉及的核磁共振波谱法，也在本书中进行了较全面的介绍。这样，分子结构的四大分析工具（紫外可见光谱法、红外光谱法、质谱法、核磁共振波谱法）在本书收录齐全。

本书内容共 11 章，第 1、2 章介绍原子光谱技术，它是专门测试材料组分的技术方法；第 3、4 章介绍分子光谱技术；第 5 章介绍散射光谱法；第 6 章介绍质谱法；第 7 章介绍核磁共振波谱法；第 8、9、10 章介绍电子显微技术及原子力显微技术，这是测试材料的超微观形貌的技术手段；第 11 章介绍 X 射线衍射技术。第 3~6 章介绍的内容是测试材料组分及分子结构的主要技术手段。

本书每一章均由“历史背景”“方法原理”“技术原理”“分析测试”“知识链接”“技术应用”“例题习题”七大板块组成，既强调了技术方法的前后关联、逻辑性，又突出了读者的参与性和能动性。其有鲜明的时代特色，符合教育改革的方向。

“历史背景”——介绍本章所涉及技术的发展简史，目的是让读者对测试方法及仪器原理等有广泛的、历史性的了解。

“方法原理”——介绍本章所涉及技术的方法原理，包括该测试技术的立足点、有关公式及定律的推导等。

“技术原理”——介绍本章所涉及仪器的工作原理，包括该仪器的设计框图、设备示意图，突出关键设备部件的工作原理。

“分析测试”——介绍本章所涉及的样品种类和制备，以及得到的结果（谱图或照片），并根据基本原理，做出定性、定量的分析。

“知识链接”——这是本书区别于其他教材及参考书的一大创新。出发点是基于教育的需要。具体来说，根据前面的内容讲授，提出一些发散性的问题或方向，引导学生进行深入的思考。形式上以思想实验或理论推导为主，力求另辟蹊径、化繁为简地解决问题。编者已经在专业课堂上应用此方式，收到了很好的教学效果。学生的学习积极性、能动性有了大幅提高，并逐渐养成求索的科学精神。尤其当教师授课时，建议灵活穿插知识互动的内容，由浅入深。在丰富学生的知识面的同时，也引导学生进行深度的思考。

“技术应用”——介绍本章所涉及技术的应用及发展前景，目的是让读者对测试技术及仪器有应用性、前瞻性的了解。

“例题习题”——每章均设置例题和思考题，目的是让读者对了解的内容加深印象，并能消化吸收。

本书编写及内容安排力图实现本课程的教学目的：使学生对材料的各种现代分析技术有一个初步的、较全面的认识，掌握相应的基本原理、方法及理论推导；培养有一定材料分析、材料设计能力的高等人才。

本书的导言以及第1~3章，由四川大学材料科学与工程学院黎兵（教授）主编；第4~11章由曾广根（副教授）主编，其独立编写逾25万字。杨科、卢红婷、何思颖、刘吉洋、刘晓兰、唐萍等研究生参与了前3章的部分校对工作。

本书适用于材料科学与工程一级学科专业或二级学科专业的公共/专业课，本/专科教学使用，同样可作为物理、化学类的本科教学参考书，建议48~64学时。本书也可供研究生及相关技术人员参考使用。

本书的出版得到家人及单位同仁的支持和鼓励，获得2015年度四川大学立项建设教材的资助。对为本书的出版提供帮助的四川大学出版社，以及书中被引用的研究成果及资料的作者，一并表示感谢。

本书采用了崭新的编排思路，试图从逻辑上对每一个分析方法进行梳理。但限于编者水平，疏漏和不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

主编 黎兵、曾广根

二〇一七年五月

科学十诫

——摘自《爱因斯坦的圣经》

你应遵守自然的诫命：

1. 你只可信仰一个且唯一一个自然之律、宇宙之律。甚至在它们处于支离的状态下，你也应遵守它的原理。
2. 你应服从引力。因为你应在时空的自然构造中沿着一定的曲率移动。此种弯曲运动将构成引力。
3. 你应服从电磁力。如果你是一个电荷，你将被与自己相同的电荷排斥，被与自己相反的电荷所吸引。磁力将是电力与电荷运动的结果。
4. 你不可杀死电荷。
5. 你应服从弱力和强力。它们统治核世界和亚核世界。
6. 你不可偷窃能量、动量或角动量。它们既不能创造也不能毁灭，所以你应该使它们守恒。
7. 你不能以超光速旅行。无论你是运动还是静止，光速都是不变的。
8. 你可将物质变成能量，能量变成物质。所以你可将能量看作物质，将物质看作能量。
9. 你应服从量子力学的原理。你不会知道微观状态是粒子还是波，因为微观状态有时像粒子，有时像波。这样的状态将由量子波等式来测定。你不会同时无限精确地知道物体的位置和动量，所以你将凭不确定性和或然性前行。
10. 如果你是半整数自旋，你就是费米子，服从泡利不相容原理，你不会占据你兄弟的状态；如果你是整数自旋，你就是玻色子，你将与你的同行形成完美的对称。

这知识的十诫，
将是文化与科学的财富。
科学的黄金律，
将服从宇宙的规律，
它将包含十诫，
及其自身。

目 录

科学十诫	
——摘自《爱因斯坦的圣经》	(1)
导 言	(1)
第 1 章 原子发射光谱法	(9)
第 1 节 历史背景	(9)
第 2 节 方法原理	(12)
第 3 节 技术原理	(19)
第 4 节 分析测试	(24)
第 5 节 知识链接	(32)
第 6 节 技术应用	(35)
第 7 节 例题习题	(38)
第 2 章 原子吸收光谱法	(44)
第 1 节 历史背景	(44)
第 2 节 方法原理	(46)
第 3 节 技术原理	(52)
第 4 节 分析测试	(57)
第 5 节 知识链接	(61)
第 6 节 应用前景	(65)
第 7 节 例题习题	(67)
第 3 章 紫外-可见光谱法	(68)
第 1 节 历史背景	(68)
第 2 节 方法原理	(71)
第 3 节 技术原理	(75)
第 4 节 分析测试	(77)
第 5 节 知识链接	(78)
第 6 节 应用前景	(79)
第 7 节 例题习题	(81)

第4章 红外光谱法	(82)
第1节 历史背景	(82)
第2节 方法原理	(83)
第3节 技术原理	(95)
第4节 测试分析	(98)
第5节 知识链接	(102)
第6节 应用前景	(104)
第7节 例题习题	(104)
第5章 激光拉曼光谱法	(108)
第1节 历史背景	(108)
第2节 方法原理	(111)
第3节 技术原理	(120)
第4节 分析测试	(122)
第5节 知识链接	(124)
第6节 技术应用	(127)
第7节 例题习题	(129)
第6章 质谱法	(131)
第1节 历史背景	(131)
第2节 方法原理	(133)
第3节 技术原理	(135)
第4节 分析测试	(142)
第5节 知识链接	(147)
第6节 技术应用	(148)
第7节 例题习题	(150)
第7章 核磁共振波谱法	(153)
第1节 历史背景	(153)
第2节 方法原理	(154)
第3节 技术原理	(167)
第4节 分析测试	(170)
第5节 知识链接	(173)
第6节 技术应用	(174)
第7节 例题习题	(178)
第8章 透射电子显微术	(181)
第1节 历史背景	(181)
第2节 方法原理	(182)
第3节 技术原理	(192)
第4节 分析测试	(204)

第 5 节 知识链接	(212)
第 6 节 技术应用	(215)
第 7 节 例题习题	(222)
第 9 章 扫描电子显微术	(225)
第 1 节 历史背景	(225)
第 2 节 方法原理	(231)
第 3 节 技术原理	(237)
第 4 节 分析测试	(246)
第 5 节 知识链接	(252)
第 6 节 技术应用	(254)
第 7 节 例题习题	(260)
第 10 章 原子力显微镜	(262)
第 1 节 历史背景	(262)
第 2 节 方法原理	(264)
第 3 节 技术原理	(269)
第 4 节 分析测试	(272)
第 5 节 知识链接	(273)
第 6 节 技术应用	(276)
第 7 节 例题习题	(279)
第 11 章 X 射线衍射技术	(281)
第 1 节 历史背景	(281)
第 2 节 方法原理	(283)
第 3 节 技术原理	(292)
第 4 节 分析测试	(297)
第 5 节 知识链接	(300)
第 6 节 技术应用	(303)
第 7 节 例题习题	(307)
参考文献	(310)

导 言

一、引子



二、你的亿万年时空之旅

欢迎你，疲惫的旅行者。你已经经历了或许连自己都不知晓的漫长旅程。因为，你和你周围的世界都是物质和能量，是经过亿万年的时空之旅临时组装而成的。例如，你身体内许多原子，都是在古老的恒星内核中锻造出来的；你体内的一些水，还曾在恐龙的身体内流淌过。而在未来，你的旅途仍会继续……

下面，我将讲述几个跨越时空的旅行故事。你估计忘了，类似这样的故事，你或许早已经历过。

1. 从星尘到星尘

旅行者：一个钙原子。

出发地：第一批恒星。

目的地：你的身体，以及其他。

旅行时长：超过 135 亿年。

你骨骼中的钙原子，就像你身体中其他重原子一样，是在大质量恒星的核心中锻造出来的，这样的恒星的质量可能是太阳质量的 10 多倍、100 多倍甚至 1000 多倍。它们是宇宙中的第一批恒星，诞生于宇宙大爆炸之后的 5.5 亿年左右。第一批恒星中的大

质量恒星，在演化接近末期时会发生剧烈爆炸，变为超新星。一个钙原子在这个过程中诞生了，它像电影中一个动作明星逃离汽车爆炸一样，远离超新星。在星际空间飘荡几千年之后，它会加入一个由气体和尘埃构成的星云之中，这片星云最终会坍塌成一个新的恒星，然后会再次变为超新星。

这个钙原子会经历很多次这样的循环，直到距今大约 50 亿年前，它进入了一片将会变为太阳系的星云之中。在这里，气体和尘埃不断旋转着，在核心处，物质开始坍塌，发出的光芒会穿过周围的物质照耀出来，如同一颗夺目的宝石闪耀在沙漠神殿里。慢慢地，这些物质在引力的作用下挤压到足够热时会发生聚变，于是，太阳就诞生了。在新生的太阳周围，环绕着一个巨大的物质盘，而那个钙原子就在这个物质盘中。

之后，经过了几亿年，地球以及其他行星和卫星从这个物质盘中诞生，钙原子就被困在了地球上。它在地球上开始了长达 45 亿年的旅行：它从地壳深处跑到海洋中，然后停留在石灰石悬崖，再到软体动物的贝壳上，贝壳最终破碎，成为海洋沉积物，甚至成为远古人类石器时代进步的奠基石，或者可能经过亿万年的演化，变成一块有画面或象形的奇石，被后人发掘出来把玩欣赏。



历经沧海桑田，这个钙原子终会成为土壤的一部分。之后，它被一颗西兰花吸收，最终被你吃掉。对于钙原子而言，它只会在你的骨骼里停留很短的时间。中年之后，人体每年会有近 1% 的钙质流失。总有一天，这个钙原子会从你的骨骼中流失，进入你的血液，最终通过尿液排出体外。之后，这个钙原子还会被其他生物吸收走。

离现在大约 50 亿年后，这个钙原子将会目睹到太阳逐渐变为了一颗巨大、蓬松，但表面温度略低的恒星，即变为红巨星。随着时间的推移，其核心将变为了一颗致密天体，即白矮星。整个太阳的质量将会坍塌为一个地球大小的天体，而外面的大气会完全抛散到太空中。

如果地球能在这个过程中存活下来，那么这个钙原子会长期停留在一个无聊的、毫无生机的岩石世界里。最终，地球可能会下落并撞到白矮星上。那时，如果外星天文学家正好观测到这颗白矮星，那么他们会从白矮星的光谱之中找到钙原子存在的痕迹（因为特定的元素会在光谱中留下特定的光谱线）。事实上，我们的天文学家就已经发现了银河系中的一些白矮星上存在着类似的重元素。但是，如果太阳在变为红巨星的过程中

就把地球气化了，那么那个曾经在你骨骼里待过的钙原子最终会变为宇宙的尘埃，并成为下一代恒星的原材料。

2. 你体内的水，曾在恐龙的身体内流淌过

旅行者：水。

出发地：撞到地球上的彗星。

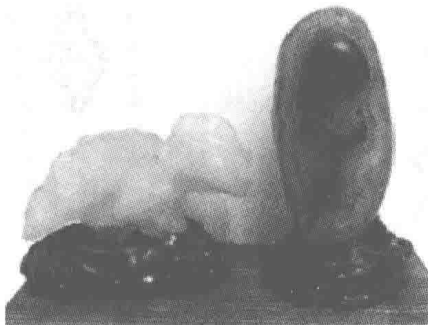
目的地：一页纸。

旅行时长：约 40 亿年。

水的旅程始于约 40 亿年前。那时的地球如同地狱一般，表面处处岩浆流淌，彗星和小行星还不断撞击到地球表面。水分子被一颗彗星带到了地球上。大约 7 亿年之后，地球干燥炽热的地表逐渐变为温和的由海洋覆盖着的世界。

之后，水分子随着其他亿万个伙伴一起形成洋流，缓慢地从地球的一方漂到另一方。在数百万年里，它曾触摸过大陆边缘，轻轻推动海底沉淀物，帮助岩石溶解以及传输气体。它可能穿过赤道成千上万次。某一天，它受到阳光的烘烤后上升到大气中，然后与其他水分子形成雨滴降至地表上。它会通过裂缝渗入地下，并困在地下含水层中几个世纪。随着地壳不断地运动，这个水分子会再次开始新的旅程，并重新回到海洋之中。

而距今大约 38 亿年前，一个新的旅行线路出现了——水分子可以在生命体之间进行旅行，同时还能使生命体存活。大约在 1.5 亿年前，水分子发现自己被困在北美大草原的一片湖水中。迷惑龙把自己如同起重机一样的脖子伸到湖面上，喝了一口水。这样，这个水分子以及其他水分子就顺着迷惑龙的消化系统，进入其血液之中。于是，这个水分子开始扮演地球上最为重要的角色——行使生命的基本化学反应。



与其他水分子一起，它会使 DNA、蛋白质和细胞膜等细胞物质形成正确的形状，发挥正常的作用。它还可以协助把氧气传输到迷惑龙的大脑中，或者改变心脏细胞的电流传输等。一个星期之内，它就能在迷惑龙的身体中溜达一圈，当它最终抵达迷惑龙的肾脏，这一段在恐龙体内的旅行就要结束了。这个水分子会成为尿液的一部分，被迷惑龙“驱逐”到体外。它会通过地表渗入地下，像以前很多次经历的那样，最终找到一条路线回到海洋中。

在之后的 1 亿多年里，这个水分子会出现在地球的各个地方。例如，它曾停留在鲸鱼的大脑里，也曾出现在南极一个冰盖上。之后，在某一天，它出现在一杯水里，然后

被人喝掉后进入其体内。再之后，它被排出人体外，并被一棵松树吸收。它在几十年里一直停留在树的木质纤维之中，直到这棵树被砍倒，并变成纸浆。纸浆虽经过多次操作，这个水分子仍能保留，最终它发现自己被锁定到一张纸上。这张纸被印上图片和文字，然后被切割和装订。最终，这个水分子停留在你眼前这本书的这张纸里，一动不动。它，正等待着下一次旅行。

3. 往返于地球深处

旅行者：锆石。

出发地：地球内部。

目的地：亚洲某地。

旅行时长：约 40 亿年。

大约 40 亿年前，地球大部分地方都遍布着火山熔岩。距地表以下几百公里，锆离子在缓慢流动的岩浆中飘荡，地幔的流动使得锆离子都聚集到一起。之后，岩浆被抬升并发生了冷却，开始有晶体生长——无数个原子构成完美的晶格。其中，锆离子也会形成一种晶体，叫作锆石。锆石虽然只有几立方毫米大小，但它晶莹剔透，而且十分坚固，可以永久地保存下去——至少在地球上。而对于铀原子来说，锆石还是一个避风港。铀原子被包裹在锆石中，会衰变为铅，而这个衰变过程可持续几十亿年。这样，铀原子会随着锆石周游世界。

锆石没有时间休息。岩浆不断地涌动着并被推上一个火山口。锆石随着一堆炽热的气体和熔岩喷出火山口，并落到不远处的火山灰上。之后，更多的火山灰堆积在上面。而这个火山最终会走向死亡。

经过数百万年风雨的侵蚀，这个锆石最终暴露在一片死气沉沉、布满碎石的荒地上，而此时的大气大部分还是由二氧化碳和甲烷构成的。这是一个危险的地方，陨石不断撞击着这个星球，附近一个撞击还使得锆石的部分晶格发生了错位。几千年又过去了，风雨的侵蚀最终使得这个锆石脱离荒地，掉进河流，然后随着河水流进大海。借助海洋的流动，它在海底比以前更快地移动着。不过随着时间的流逝，海洋中的沙子越堆越多，最终锆石第二次进入地壳深处。

这也是古老的奇石的真实写照，比如下面这块象形梨皮石。



十几亿年之后，地质运动再次把这个锆石带到地表上，而此时陆地和海洋都发生了

巨大的变化。一些漂浮在海洋中的细胞已经进化出直接从阳光中获取能量的能力，并将氧气排到空气中，这使得大陆上的任何不稳定的矿物开始生锈。锆石周围的含铁矿物逐渐变为棕色或红色。之后，锆石再次被冲进海里，逐渐被包含微生物的淤泥覆盖，然后它第三次进入地壳深处。在之后的 20 亿年里，全球板块不断地漂移和撞击，锆石饱受蹂躏，它身上的疤痕，会在某一天告诉世人它所经历的非凡之旅。

第三次来到地表后，伤痕累累的锆石躺在一处温暖潮湿的热带地区。天空有鸟类在飞翔，附近的森林中，一个新进化出的物种加入森林合唱团，它们就是灵长类动物。而在一个雨季，锆石又被冲进河水中，流进新的海洋并再次被淹埋。又过了大约 6500 万年，锆石在亚洲某地重见天日，但此时的情况已非常不同。锤子和凿子在岩石上叮当作响，锆石被挖出来后，人类对它进行了各种测试。人类用金刚石砂轮切开它，读取铀原子的衰变情况，并分析它身上的伤疤，了解它所保留下来的历史和知识。尽管被切掉一大块，锆石仍然十分坚硬，它将再次踏上旅程，直到地球的灭亡之日。

4. 从遥远的星系团到生物基因

旅行者：宇宙射线。

出发地：遥远的星系团。

目的地：大气。

旅行时长：十几亿年。

在遥远的室女座星系团中，一颗年老的大质量恒星即将变为超新星，它的内核约有 1 亿摄氏度。在这里，原子核还不断碰撞，发生着聚变，继续产生更多的热量。在内核的边缘，则是我们的旅行者：一个聚变的产物——铁原子核。

恒星的内核在过去的几十万年里不断增长，直到无法继续稳定存在，最终发生坍缩，然后反弹发生爆炸，变为一颗超新星，其产生的辐射会撕裂整个星体。在这一爆炸过程中，铁原子核在多次产生的冲击波和强电磁场中，获得越来越多的能量，直到它冲出爆炸的火球，自由地飞向太空。

铁原子核高速地飞行在太空中，其身后留下的是恒星死亡后产生的星云。铁原子核正前往一个星系的中心，而那里有一个怪物正等待着它——一个巨大的黑洞，其质量是太阳质量的十几亿倍。铁原子核抵达后，与周围的气体一起高速绕着黑洞旋转，它越来越靠近黑洞的事件视界，即黑洞的表面。一旦越过事件视界，那么它再也无法从黑洞里逃逸出来。然而在最后时刻，它被黑洞产生的强烈的磁场风暴卷走了，成为等离子体喷流的一部分，以超过 90% 光速的速度被喷射出去。

黑洞喷流的冲击力比超新星更具威力。远离黑洞后的铁原子核，大约具有 8 J 的能量，是地球上大型强子对撞机产生的粒子的最高能量的数百万倍。铁原子核在星系之间游荡，运动状态不断被宇宙各处的磁场改变。鉴于铁原子核运动的速度过快，相对论效应将显现出来。跨越漫长的星际之旅，对于铁原子核来说，只需不长的时间。在星际空间旅行的最后一天，我们的旅行者终于接近了银河系的一条旋臂，它的前方正是太阳系。当它抵达地球时，我们把它称为一个超高能宇宙射线。



对于铁原子核来说，高层大气的稀薄气体远比它之前遇到的任何障碍都更具挑战性。一个氮原子核会与这个铁原子核相撞，撞击出的超高能量不仅会破坏这两个原子核，而且还会制造出一堆介子与其他亚原子粒子，产生的每一个粒子都有足够的能量与其他原子核再次发生剧烈碰撞，最终产生大量的辐射，穿过大气倾泻下来。

这些粒子会稍微增加飞机里乘客和机组人员所受到的辐射剂量。一些粒子可能会触发雨滴的形成，甚至可能会触发闪电的形成。一些粒子还会闯进生物细胞中，可能会改变人以及其他生物的基因，并影响生命的进化。但许多人没有意识到，这些粒子其实是一个曾与黑洞亲密接触的原子核的灰烬。

5. 从沧龙的一次呼吸到火电站

旅行者：碳原子。

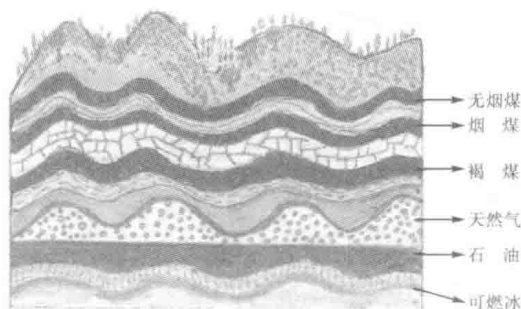
出发地：沧龙的一次呼吸。

目的地：火电站。

旅行时长：约 6600 万年。

6600 万年前，一个巨大的浅海覆盖着北美洲，这个浅海被称为西部内陆海道。在这里，一个二氧化碳分子被水里的一只长约 18 m 的沧龙吐进水域中。于是，二氧化碳分子开始进行环游世界之旅，在空气和海洋之间穿梭。

地质运动最终把西部内陆海道抬升了起来，海底被亚热带湖泊和沼泽所替代。二氧化碳经历了多次环球旅行之后，被沼泽中的树所吸收。当这棵树死掉后，二氧化碳中的碳原子被困住。在几百万年里，许多腐烂的植物和河流污泥不断堆积在这棵树的遗体上。不断上升的温度和压力使它们变硬和变黑，最终在 6000 万年前形成了煤炭。几千万年过去了，越来越多的沉积物堆积在煤炭上，使得煤炭深埋于地下数千米。但在 1000 万年前，地质运动使得这里的地壳开始抬升，碳原子所受的压力开始减少。



到了 20 世纪 70 年代，这个巨大的煤层得以开采，碳原子经历了 6600 万年的旅程终于重见天日。它将经历一个与之前完全不同的旅程。煤炭在火电站的锅炉中燃烧起来，快速释放的能量一部分变为电能，供周围居民使用。而碳原子将与两个氧原子结合，形成二氧化碳，通过烟囱进入大气之中。之后，它可能需要再经历数百万年，才会返回大地，并藏匿起来。

6. 你眼睛里的星光

旅行者：星光。

出发地：天津四。

目的地：你的眼睛。

旅行时长：1500 年以上。

位于天鹅座的一颗名为天津四的恒星外部，一个光子诞生了。它是一个古老家族的后裔，这个古老家族是在数万年前由天津四内核聚变所创造出来的一堆光子。祖先们在恒星中心与电子相撞，被离子吸收。在这个过程中，又有能量更低的光子逐渐诞生，并从恒星核心向外运动。而这个光子十分幸运：它是在恒星大气最低的一层即光球中诞生的。它可以轻易地穿过稀薄的外层大气逃到太空中。于是，它开始了一次超长的旅行。不过，如果从量子的角度来看，它经历的是无穷多次的旅行。从诞生到消亡，一个光子的路径不是确定的。事实上，光子可以同时走在所有可能的路径上。这些路径可以分布在空间中，但是光子所走的最短路径，则是天津四和地球之间的直线路径。

当你在晴朗的夜晚仰望天空时，光子无穷多次的旅行最终结束在你的眼睛中：光子会撞击到你的视网膜中的一个蓝敏细胞上，其最后的作用是激发了你的视神经反应，使你能看到天鹅座有一个明亮的蓝白色光点，然后就消失了。

7. 你将何去何从

组成你的各种粒子，经过亿万年的时空旅途，塑造了人类、塑造了你。



人类的未来，需要每一位的努力。你的未来，取决于你的能力、性格、机遇，以及你对每件事情做出的决定和选择。

就本书内容而言，对材料的组分、结构及微观形貌进行测试分析，也需要面对现代分析技术及精密设备方法的选择。希望本书能为你提供帮助。

三、推荐书目

通过前述内容，我们对组成世界的物质和能量以及能源有了一个形象的认识，其中涉及光谱、材料、分析等。

本书的每一章都涉及专门的精密设备仪器以及专业文献。本科生应力图掌握重要的基本原理和方法，为之后的学习工作奠定基础。所以，编者除了在本书参考文献中列出了本书编写中主要参考的资料外，还推荐几本科普类图书供学生参考：《费恩曼物理学讲义》（三卷本）《物理学的进化》《爱因斯坦的圣经》《从一到无穷大——科学中的事实和臆测》《牧羊少年奇幻之旅》《围城》《伯爵家书》《丑陋的中国人》。