

第 一 章

各种各样的物质

任何患过牙痛病的人都不会怀疑感觉和感受是真实存在的现象。这些现象可能成为科学的一部分吗？如图科学所研究的原子，分子等等。人们很快就会问“为什么不呢？”或“这怎么可能？”之类的问题。

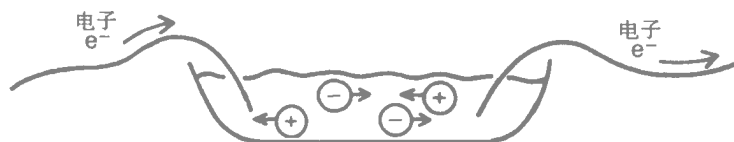
我这里先讲物质，即通常意义上的物质概念是如何进化的。这一章主要涉及物理和化学，它们提供的信息或提示对理解后面我们要讲到的细胞和大脑中的分子机件非常有用。我必须警告你本章的目的就是要煽动你，使你开始怀疑是不是真正存在一个由原子和分子构成的世界，我们对此有了透彻的了解

在我大约八岁时父亲就告诉我说没有人知道电是什么。我记得在第二天我上学时就把这话跟我的朋友们讲了。这并没有引起我所预想的轰动效应，但确实引起了一个同学的注意。他的父亲在附近的一个电厂工作。他就是制造电的，当然会知道电是什么。我的朋友答应回家去问并告诉我结果。后来他真地那样做了，可我并没觉得这个结果有什么稀奇。电是“细小的像沙一样的东西”，他边说边摩擦着拇指与食指以示强调。再

深一步他就不会解释了。

直到许多年以后我才理解我朋友所讲的话。“细小的像沙一样的东西”描述的是电子。我可以想象当时他父亲是如何费力地向他讲解尽管电是导线里流动的东西，它却是某种微粒，这些微粒并不是可以无限分割的，流动的微粒存在着一个最小量。

严格地讲，组成电的最小单位不是电子而是电荷，因为电也可以是他种带电粒子的流动。例如电流在水中通过时并不像电流通过金属时仅仅是带负电的电子运动，而是体积更大的带电离子的运动。这些离子既有带正电的，也有带负电的。下图是电流通过澡水时的情形。



纯净水很难导电，因为水分子容易裂变成带相反电极的离子。



反向箭头表明离子更容易重新组合成水分子，其结果是在任何时刻只有极少量的水分子裂变成离子。水越是纯净，就越难导电。只需在水中加入极少量已溶解的盐类物质（例如在自来水里）即可大大增强水的导电能力，因为盐类物质是由离子构成。

举例说明：氯化钠在水中为单离子形态，即钠离子 Na^+ 和氯离子 Cl^- 。硝酸银在水中呈现为银离子 Ag^+ 和硝酸根离子 NO_3^- 。稍有不同的是一个硝酸根离子包含好几个原子。硫酸铜溶液有带两个正电的铜离子 Cu^{2+} 和带两个负电的硫酸根离子 SO_4^{2-} ，而在氯化铜溶液中每个铜离子 Cu^{2+} 则需有其二倍数量的氯离子 Cl^- 相对应。

这些离子的体积要比在金属线中流动的负电子大得多，因为这些导电的离子在溶液中与水分子不同程度地紧密结合在一起。

对于电我们已经有了比我的朋友更为完善的描述，即电流是电荷的流动。不管以什么为导体，从正极流向负极的电量总是与从负极流向正极的电量相等。

其原理就是带相同电极的微粒互相排斥，带相反电极的微粒相互吸引。电荷何以表现出在空间中如此相斥相吸的特性暂不必深究，人们只是把它当做是电荷的一个基本特性。也就是说你我都不过是一种猜测。而且由此看来，我父亲对电的态度并没有什么不对。现在有一种理论，叫做量子电动力学——可以想见它有多么神秘、深邃。容后详述。现在我们还是回头看看历史吧。

“ 电的发现 ”

电，或说电荷，确实是物质最根本的特性之一（后面我们还要谈到，在某些方面电甚至比质量更为根本）。然而电通常是看不见的。电荷通常保持一种平衡状态，所以并不显现明显的作用。事实上人们发现电的功用只是相当浅近的事。

静电 从远古以来人们就熟知两物体摩擦会产生奇特的吸引和排斥的现象。常见的例子如在袖口上摩擦过的钢笔会吸起碎纸屑，又如如有霜的夜晚脱下羊毛外套时会发现头发立了起来。但是诸如此类的现象直到 18 世纪才引起人们充分的重视。

1730 年法国的 C.F. 迪费 (1698—1739) 提出了一种静电效应的双液理论。迪费解释说摩擦有使两种液体分离的作用，而这两种液体又有自然汇聚的趋势，直到彼此中和。1747 年美国政治家及科学家本杰明·富兰克林 (1706—1790) 提出了一种单液理论，他认为“电火”是物质的一个组成部分。他断定一个物体带电不外乎两种原因：物体中充溢（记做“+”）或缺少（记做“-”）这种“燃烧着的液体”。同时宇宙空间有一种强大的力量不断使这种不平衡趋于平衡。电并不比万有引力更难理解。人们已经证明电是一种力，可以作用于非常遥远的物体。不管怎样，富兰克林的理论与事实基本符合。说到这里你也许觉得奇怪：富兰克林既然懂得电的原理却怎么会在雷雨天几次放飞风筝来验证闪电实际上是一种电。结果他是对的，然而他太幸运了。

英国化学家及社会改革家约瑟夫·普里斯特利 (1733—1804) 确曾指出电与引力之间存在某些相似性。但是通过实验证明其间至少在一个方面存在量的相似性却是法国的工程师夏尔·奥古斯特·库仑 (1736—1806)，时间是 1785 年，当时他巧妙地借助了扭力天平。库仑证明：电荷间的力随着距离的增大而呈平方形式递减。也就是说，距离增大一倍，电荷减至原来的四分之一。普里斯特利曾推导出此结论。

电流 故事的第二部分要从意大利北部两所古老的大学讲起。波伦亚的解剖学教授路易吉·加尔瓦尼 (1737—1798) 对动物

生电现象及其效应尤其是电鳗发生了浓厚的兴趣。这些实验后来发展成为一门新学科，即流电学。1786 年加尔瓦尼对一条青蛙腿的神经和肌肉进行了研究。他发现当把挂住青蛙腿的铜钩放到铁架上去时，青蛙腿上的肌肉抽搐了一下。加尔瓦尼认定抽搐的原因在于青蛙腿上的神经或肌肉产生了电，恐怕这与电鳗放电的现象不无相似之处。

帕维亚的物理学教授亚历山德罗·伏打（1745—1827）则认为放电是因为与青蛙腿神经或肌肉接触的金属不同而致，而肌肉的抽搐只不过是一个放电的显示。后来他进一步证明这类放电现象不只局限于动物，事实上放电并不需要借助生物材料。

于是伏打把一组成对的银锌碟片放到浸泡大量纸屑的盐水中，这样就大大提高了放电效果。他发明了电池，即伏打电堆，能够不断释放可控电流。这是人类历史上一项伟大的发明。

1800 年革命

1800 年伏打在《皇家学会学报》上发表了上述成果。现在我们把目光转向英国。同一年尼科尔森与卡莱尔用伏打电堆证明了水可以被电解成氢和氧。接着伦敦皇家研究所的汉弗莱·戴维（1778—1829）电解了多种盐类溶液。通过熔化盐类物质他首次成功分离出了非常活跃的钠离子和钾离子。后来他用这种方法发现了许多新的元素。迈克尔·法拉第（1791—1867）是戴维在皇家研究所教的学生，但他却主要得益于自学成材。他对戴维的实验过程做了清晰的描述。1833 年法拉第

公布了他的两个电解定律。其一指出：电解时析出物质的重量与通过电极的电量成正比。

要想理解这一点我们还是暂时回到现在。我们把一块金属设想成由带正电的金属离子和带负电的电子组成。电子既不是微略可忽也不是飘忽不定（后面还要详论）。在形象上可以把金属离子设想成盒子里装满的桔子，其周围是游在空中的电子。

现在设想：在电解时，当硝酸银溶液中的银离子与有源源不断的电子供应的金属线接触时会怎样呢？溶液中带正电的银离子会由于相反电极的吸引而游向金属线，一旦到达，它们会与多余的电子结合而沉淀成金属银，镀在金属线表面。这时要称出析出的银的质量的确是件容易的事了。

现在让我们并排放置两个电解槽，同时保证每个槽内通过的电量相等。在一个槽内装入氯化铜，另一个槽内装入硝酸银。按照法拉第的第一定律，析出的铜和银将与通过电解槽的电量成正比。但是析出物的质量并不相同。事实上在一个槽中每析出 1 克铜，在另一个槽中析出 3.4 克银。总之，这就是法拉第第二定律，即不同物质在电解时析出物质的质量与这些物质的化学当量成正比。在此实验中，当量即指铜银原子质量分别除以各自所携带的电荷量。当然这样会引导我们走入一个新的研究领域。现在我们还是回到历史。

三条线索

19 世纪带来了人类对自然认识上的一场革命，这场革命在 18 世纪后期已经开始酝酿。电解的发现为人类认识自然提

供了第一条重要线索。在法拉第公布他的电解定律之前，人们就开始认识到物质的构成似乎是借助于电力的作用。比如，人们可以使用电将水分解成基本的元素，其原因就在于水和其他所有物质一样是靠电力的聚缚作用才呈现它通常的状态的。

我要讲的第二条线索源于很久以前的一个观点，也可以说是物理对化学的一种馈赠，即质量是衡量物质的手段。由此还将引出第三条线索，即现代的原子理论。后者于 1803 年问世。

19 世纪末 20 世纪初发生的认识革命有多条线索。人们对物质的认识更加清晰和深入，但再也不是靠传统意义上的原子、电荷、质量等等可以解释通的了。有迹象表明在下一个世纪之交我们将处于另一场认识革命的边缘，也许我们终将为我们意识现象找到一席之地……你看我又往前跑了。现在我们回到第一次认识革命，我还是要谈一谈三条线索中的第二条。

以质量衡量物质？

现代科学的奠基者伽利略（1564—1642）和笛卡尔（1596—1650）都从未认识到质量是物质最重要的属性。对他们而言，物质的本质在于它具有体积并占据空间。

笛卡尔认识到物体具有惯性，即物体会保持匀速直线运动状态或静止不动。后来牛顿将其发展成他的第一运动定律。笛卡尔从未设想过远距离的物体亦可相互作用。他在解释星体运动，自由落体等现象时总是把它们设想成许多微小的不可见的相互碰撞的颗粒状物，只有在相互接触时才能相互作用。

伽利略创立了现代力学。他既注重理论研究又热衷于实验研究。但是他对于物体惯性的认识却有一个严重的误区。如同

笛卡尔一样，伽利略也认识到亚里士多德（公元前 384—322）犯了一个错误，后者认为要使物体保持运动就必须对其施以外力。伽利略解决了令亚氏困惑不解的地球自转问题（事实上我们每天都要平静地“周游世界”一圈）。但伽利略的答案与牛顿有所不同。伽利略认为圆周运动是一种自然现象。他的这一观点来自创立太阳中心说的哥白尼（1473—1543），而后者得自亚里士多德。伽利略对于宣传哥白尼的太阳中心说可谓不遗余力。牛顿（1642—1727）在解释星球运动时不仅运用了惯性定律，还应用了他发现的万有引力。

质量有两个方面：重力和惯性。物体的重力来自地球引力。事实上宇宙中的所有物体都彼此相互吸引。而物体的惯性使静止的物体难以启动，或运动的物体难以停止和转向。没有特别的理由认为物体的这两个特性密切相关，它们在量上也不相等。伽利略在著名的比萨斜塔落体实验中已经充分证实了这一点（尽管故事有可能是杜撰的），即在没有空气阻力的情况下，不同重量的物体落地的速度相等。（你可以自己试一试。我一直对此感到奇怪，同时落下的一枚硬币和一本重重的书近乎同时落在地板上。）其原因在于虽然更重的物体不易于启动，但它相应的地球引力却要大得多。

对此你可能有两种反应。你也许会说质量就是那么一回事，它强调了质量在物理中的重要性，也许质量是物体最重要的属性，甚至还可能说质量可用来衡量物质。这大概就是 18 世纪的观点，也就是上文中我所说过的物理对化学的馈赠。

另一种反应就是要为此找到理由。阿尔伯特·爱因斯坦（1879—1955）即持此态度。他在 1915 年发表的广义相对论证明了质量中重力和惯性不可避免的一致性，而不仅仅就是那么一回事。这一结论与他 1905 年发表的狭义相对论相吻合。简

言之，质量并非如过去所说的是自然界中最基本的要素。原则上质量与能量可以相互转化。而且一个物体的质量会随着相对于你的运动方式的不同发生变化。总之爱因斯坦继承了恩斯特·马赫（1838—1916）的观点，认为一物体的质量取决于宇宙中的全部物质。这里再次暗示了质量可能并非衡量物质的根本尺度。

尽管如此，对 18、19 世纪化学的发展来说把质量等同于物质这一观念还是成果颇丰的，这一点是毫无疑问的。苏格兰的内科医生、化学及物理学家约瑟夫·布莱克（1728—1799）^① 特别重视参加化学反应的物质的重量。1754 年，他在爱丁堡大学攻读医学博士，对我们现在称之为碳酸盐的物质发生了兴趣。他研究了对白镁氧（一种基本的碳酸镁）进行加热的结果。他发现在对白镁氧加热时会释放一种他称做“固定气体”（二氧化碳）的东西并形成“盐基”（氧化镁）。同样将白镁氧在酸溶液中溶解时会释放出相同比例的气体。布莱克断定这种气体并非虚无而是一种实实在在的物质，和其他物质一样。他通过实验证明，不管气体与盐基结合成白镁氧还是独立存在，其总体重量不变。

名气很大的法国律师及化学家安托瓦尼·拉瓦锡（1743—1794）在 18 世纪 70 年代同样对物质进行了量的研究，他做了很多实验证明当时的化学理论存在一些错误。拉瓦锡经过反复实验证明：物质的质量在化学反应中是守恒的。不管对物体进行加热还是光、热分离出物体，如果能够收集到所有生成物，结果将与实验前物质总量相等。

质量守恒原理对 18 世纪末和 19 世纪的化学家而言是不容

^① Kent (1950) 关于约瑟夫·布莱克和他的时代。

置疑的信条。这一原理对于现代原子理论的建立尤其重要。

原子理论

接下来的是对纯净物质的组成做详细研究，尤其是在德国和法国。不久人们就发现，至少对于多数简单物质来说，其组成元素的比例总是相同的。就拿碳酸铜来说，不论其是自然形成的矿物质还是人工合成^①，其中铜的比例都是相同的。这一发现导致了定量原子理论的提出。首次提出这一理论的是爱尔兰化学家威廉·希金斯（1766—1825）^②，时间是 1789 年，只是他的理论并未引起人们的注意；其次是英国的中学教员约翰·道耳顿（1766—1844）。这一理论假定不同元素都有各自相当质量的原子，而化合物只是这些原子按照一定的比例结合到一起。比如，道耳顿曾指出水可能是由氢原子和氧原子组合而成，其图示如下：



由此人们推测：既然同一种元素可以组成不同的化合物，那么在组成每种化合物的元素之间肯定存在某种固定的比例。举例来说，假如 A 元素可以组成两种化合物 AB 及 AB_2 ，则后者中 B 元素的质量是前者中 B

① Proust (1799)。

② Atkinson (1940); Leicester (1956, 1971), 第 153 页。

二氧化碳也是如此。类似的情况还有许多。

古代原子论 现代的原子理论并非首创。公元前五世纪希腊哲学家留基伯和德谟克利特就曾阐发并教授他们基于原子的一整套的宇宙理论。他们认为原子在太空中处于不断运动的状态，物质具有连续性是因为原子具有不变的特性，而物质的变化是由于原子的排列发生了变化。

罗马诗人及哲学家卢克莱修写过一首长诗，即《物性论》（发表于公元前 55 年，现存仅一本）。诗中依据原子论对宇宙万物进行了精彩的推断。他还大言不惭地将意念纳入其物质观当中：

高高的一堆罌粟籽也会被轻风所扰，顺着顶端似流水般向下倾倒；而石头堆或玉米垛却能毫不动摇。物体越小越光滑其可动性就越大，越是沉重粗糙就越是坚固不可摧垮。既然意念是如此超常地游移多变，组成意念的物质一定是小小、滑滑、圆圆的微粒^①。

卢克莱修这一名篇直到 1473 年才以印刷的形式出现^②。亚历山大的工程师希罗（大约公元 62—150）发明了许多机械和气动器具。他坚持认为气体是由细小的微粒构成，而这些微粒只是部分地填充在真空中。这观点倒有几分现代味道。希罗的《气体力学》译本于 1575 年问世。

① Latham (1951)。

② Stones (1928)。

原子论作为一种理论 16 世纪，现代自然科学的奠基者们重又抬起了原子理论。他们是：伽利略、笛卡尔、弗朗西斯·培根（1561—1626）、罗伯特·玻意耳（1627—1691）、牛顿……牛顿是这样描述他的信念的：

总而言之，上帝似乎是依照他本身的意图采取最为适当的方式在太初用固体的、厚重的、坚硬的、不可穿透的、可动的微粒做成了物质，使其有形有度、且富有特性并在空间上比例协调；这些原初微粒坚实无比，而其所构成之物却疏松渗透；它们如此坚硬，决不会磨损或破裂；凡间之力根本无法割断上帝最初所创的粒子。既然这些粒子以完整的形态存在并延续，由其所构成物质的性质和质地亦将永世不变。不然一旦其会磨损或出现破裂，由其所构之物亦随之改变。由破损粒子或粒子片段构成的水与土地的性质和质地将截然不同于太初由完整粒子构成的水和土地的性质和质地^①。

多么恢宏壮观！但是与卢克莱修相比并没有进步多少，后者同样思路清晰，言辞优美。的确在那个时代很难找出有什么人不信服牛顿的原子理论。那么晚到多时的希金斯和道耳顿的观点有何新意呢？

此前的原子论好像只是人们对小到无法看到的微粒的推测

节自牛顿著《光学——论反射、折射、曲射与光的颜色》（第 4 更正版，伦敦，1730），第三卷，第 31 问。Thayer（1953）引述，第 175 页；Crossland（1971）引述，第 76 页。

而已。科学的方法，或称牛顿的方法，就是要用实验去代替推测。所以在关于原子的推测得到实验证实之前怎能谈得上有新的进展呢？然而既然原子是看不见的又怎能进行实验呢？

原子的相对质量 道耳顿理论的贡献在于它至少使人们探求原子的相对质量（如果还不是原子的真实质量）成为可能。这在当时来说也就足够了。

就是对现在来说依然如此。如果你请教化学家的话，他们会告诉你碳原子（大约是 0.00000000000000000002 克）或其他原子的绝对质量；但是在告诉你之前他们都要在信封的背面迅速地计算一番。化学家头脑中记忆的是相对的原子质量或元素的原子当量，也就是说由原子组成的各种物质中原子的相对质量。举例来说，氯原子的相对质量是 35.5，即是说氯原子平均是氢原子质量的 35.5 倍。如果要生成氯化氢（包含氢、氯原子各一个），则每用一克氢需同时加入 35.5 克氯。反过来说，如果知道了组成物质的原子的相对质量，就可以通过弄清组成物质所需要的原子质量来确定物质中各类原子的相对数量。

现在的高中学生都懂得这个原理，也明白我为什么会说氯原子平均是氢原子质量的 35.5 倍。氯原子有两个同位素，其当量分别是 35 和 37。但是同位素直到 20 世纪才被发现。对 19 世纪的化学而言，幸亏大多数元素的同位素比率基本恒定，所以计算出的平均原子当量才不会有过大的偏差。

走向分子模型 道耳顿的图示虽有几个方面的不足（这部分由于当时的实验数据不够精确），但他的观点总的来说还是对的。事实上一些重要的细节人们经过很长时间才认识清楚，比如说

水应是 H_2O 而不是 HO ，这说明氧原子的质量经常被人们弄错。实事求是地说 19 世纪 50 年代末期以前的科学，尤其是有有机化学中还存在许多含混不清的地方。

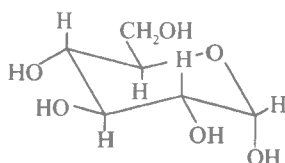
人类经过很长时间才认识到分子作为一个独特的空间结构是由原子以某些固定的方式（共价键）组合而形成的；而只有认识了这一点有机化学才能够真正地起步。著名化学家赫尔曼·科尔贝（1818—1884）拒绝相信分子是一种三维构架的物体。而他在本领域颇有建树。他写道：

如果你觉得这一切都过于夸张，那我劝你读一读范托夫先生的著述，里面充满了令人啼笑皆非的想象力。要不是因为著名的化学家维斯利策努斯是其保护人的缘故，我对此人肯定不屑一顾。这位受雇于乌得勒支一所兽医学校的范托夫博士似乎对精确的化学研究并没有什么兴趣。他更喜欢骑上兽医的珀伽索斯飞马疯狂地穿越化学的帕那萨斯殿堂，然后宣布说在他看来原子就散落在空中^①。

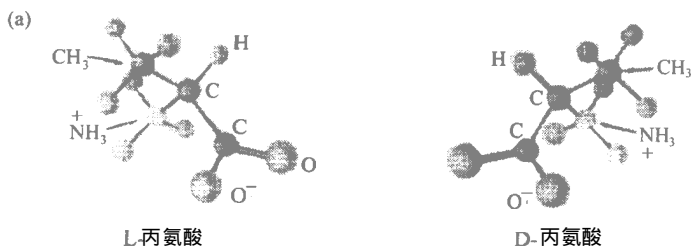
他紧接着就指责可怜的维斯利策努斯“不与严肃的科学家为伍”。可是说来雅各布斯·亨德里克斯·范托夫（1852—1911）是再精确不过的化学家了。他于 1874 年就阐述了有机物的分子常以镜中相互对应的两种形式存在这一观点（见图 1.1a、b），从而从原则上解决了许多生物材料的“旋光性”这一难题。在此之前人们不能解释光波何以在通过有机溶液时发生扭曲的现象。1874 年，约瑟夫·阿希尔·勒贝尔（1847—1930）

^① Kolbe (1877)。Crossland (1971) 引述，第 268 页。

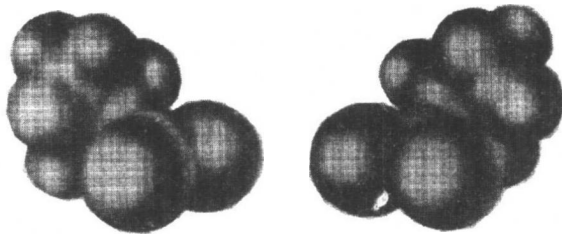
也曾独立发现此规律。没有这一结构上的洞见，就不可能理解生物分子，更谈不上理解生命的基本过程了。图 1.1 (a、b) 所示的是蛋白质赖以形成的 20 种氨基酸之一的“左旋”与“右旋”形式（只有“左旋”的氨基酸分子参与蛋白质的合成）。图 1.1c 所示是葡萄糖构架模型（只有普通的“右旋”一种）。可简单图示如下。



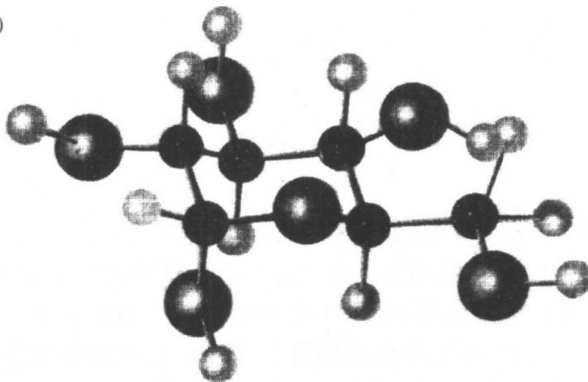
仔细观察，你会发现尽管视角和图示方式有所不同，葡萄糖的结构是完全相同的。图 1.1d 是葡萄糖结构的填充图示，葡萄糖当然是这里两个分子中较小的一个。即使这样一个葡萄糖分子也需 24 条共价键正确连结而成，其结构非常复杂。现在看一下图 1.1d 中的另一分子——蛋白分子——努力想象一下它的结构该有多少复杂：其共价键要数以千计，且要正确连接。像这样的蛋白分子是极其复杂的分子机器部件，它们在生



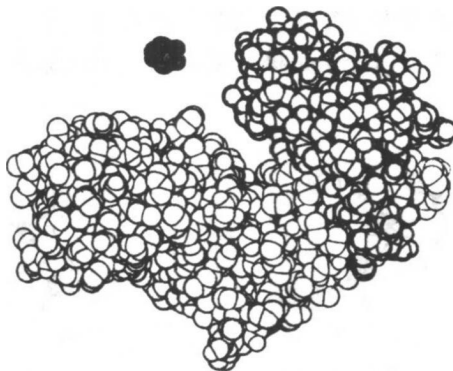
(b)



(c)



(d)



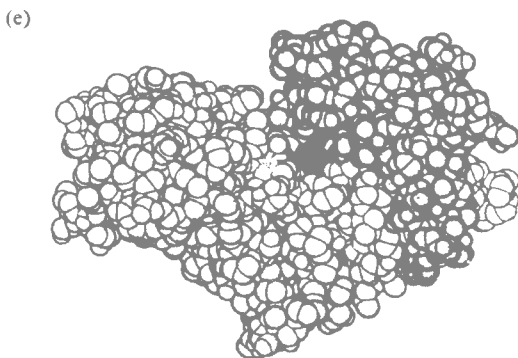


图 1.1 分子模型

(a) 图示氨基酸丙氨酸的左、右旋形式（只有 L-丙氨酸参加普通蛋白质的合成）。

(b) 与上图相应的填充了空间的模型。这种模型不容易看清原子构架方式但却突出了分子晶体的整体形象（与图 d 和 e 相似）。

(c) 葡萄糖图示，即右旋糖 α -D-葡萄糖。

(d) 填充图示葡萄糖分子及一肽分子，即己糖激酶。这一酶分子将一磷酸盐组附着到葡萄糖分子上。

(e) 这里葡萄糖分子与酶结合在一起，其形状随之发生了变化。当酶被释放后，葡萄糖分子将与一组磷酸酯结合。

图 a、b 选自 Pauling & Pauling (Linus Pauling 和 Peter Pauling) 所著《化学》(1975)。图 c 也选自 Pauling & Pauling 的著作 (1975)。图 d、e 选自 Bennett & Steitz 的著作 (1980)。