

KE XUE WEN CONG

科学文丛

物质结构漫话



广州出版社

科学文丛

物质结构漫话

(87)

广州出版社出版

图书在版编目 (CIP) 数据

科学文丛. 何静华 主编. 广州出版社. 2003.
形继祖

书号 ISBN7-83638-837-5

I. 科学... II. III. 文丛

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 082275 号

科学文丛

主 编: 何静华
形继祖

广州出版社

广东省新宜市人民印刷厂

开本: 787×1092 1/32 印张: 482.725

版次: 2003 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

印数: 1-5000 套

书号 ISBN 7-83638-873-5

定价: (全套 104 本) 968.80 元

目 录

一、物质的组成	(1)
二、物质结构的层次	(3)
1. 奇妙的微观世界	(3)
2. 浩瀚的宏观世界	(5)
3. 物质状态的多样性	(6)
三、神秘的原子结构	(10)
1. 从道尔顿原子论说起	(10)
2. 原子的组成	(12)
3. 原子结构模型	(14)
4. 电子云——核外电子运动的形象描绘	(18)
5. 核外电子怎样排布?	(23)
6. 原子结构与元素周期表	(26)
四、形形色色的分子结构	(30)
1. 原子的“牵手”——化学键	(31)

2. 水分子缔合现象——氢键的作用	(35)
3. 水为什么能溶解很多物质? ——话说分子的极性	(40)
4. 碳有四只“手”——谈现代价键理论与轨道杂化	(44)
5. 分子中的孪生兄弟——同分异构体	(50)
6. 生物体中的配合物——配价键的形成	(56)
7. 氧分子中不是双键——介绍分子轨道理论	(62)
8. “咬住自己尾巴的蛇”——苯分子结构的由来与离域 π 键的形成	(68)
9. 氢有两价吗? ——三中心桥键与硼烷结构	(73)
10 分子“三明治”——金属夹心化合物	(77)
11. 分子中的螺旋体——蛋白质和核酸的结构	(79)
12. 金属酶与金属原子簇化合物——金属—金属键的形成	(84)

五、规则有序的晶体结构 (88)

1. 晶体的特性与类型	(88)
2. 璀璨的离子晶体	(93)
3. 坚硬的原子晶体	(96)
4. 石墨与云母——过渡型晶体	(99)
5. 有趣的分子晶体	(100)
6. 异彩纷呈的金属晶体	(104)

六、探测物质结构的奥秘 (108)

一、物质的组成

人类所处的自然界是琳琅满目、绚丽灿烂的物质世界。大自然创造的山石、溶岩、冰川、矿物、森林,人们居住的房屋、吃的食品、穿的衣服,以及人和动植物赖以生存的阳光、空气、水等等,无一不是物质。

物质世界拥有无限的空间,充满整个宇宙。我们周围有成千上万种物质,形态各异,大小不同。大者如恒星、银河系,大得使人望而兴叹;小的如分子、原子,人的肉眼看不见它们。尽管如此,但物质都是由化学元素组成的。例如,碳、氢、氧、氮、硅、铁、铝、铜等,都是化学元素,分别用元素符号 C、H、O、N、Si、Fe、Al、Cu 等表示。目前,人们已经发现 109 种化学元素,其中稳定存在的天然元素只有 90 种,其余为不稳定的或人工制造的放射性元素。因此,从本质上讲,物质世界的所有物质都是由已发现的或尚未发现的某些化学元素所组成;自然界中存在的天然物质,也只不过是由 90 种天然元素中的元素构成的,这些化学元素,在一定条件下,通过不同的化学反应,可以组成千千万万种化合物。有的化合物由两种元素组成,例如水是由氢元素和氧元素组成的,食盐中则含有氯和钠两种元素;有的化合物可由三种元素组成,例如硝酸是由氢元素、氮元素和氧元

素三种不同的化学元素组成的;还有的化合物由三种以上的元素所组成,例如,小苏打(碳酸氢钠 NaHCO_3)是由钠元素、氢元素、碳元素和氧元素组成的,明矾(十二水合硫酸铝钾 $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$)中含有钾、铝、硫、氧和氢 5 种元素,一些复杂的化合物还会含有更多的元素。据报导,现在已发现天然存在和人工合成的化合物,大约有 300 多万种,都是由不同元素构成的物质。而由相同元素组成的物质,称为单质,单质中只含有一种元素。例如,氢气、氧气、金、银和纯的金刚石等都是单质,分别含有氢(H)、氧(O)、金(Au)、银(Ag)和碳(C)元素。

自然界中的物质,以纯净的单质和化合物形式存在是不多的。绝大多数物质是由许多种单质或化合物混合组成的,这些由不同单质或化合物混合组成的物质,称为混和物。例如,空气就是由氧气、氮气以及少量的二氧化碳、水蒸气、惰性气体等组成的混和物。再如,海水也是混和物,其主要成分是水,占 96%,还含有 3%左右的食盐(氯化钠),以及小量的氯化镁、硫酸镁、硫酸钾、碳酸氢钙、溴化镁和微量的铁、铝、锌、金、碘、硅的化合物等。

混和物和纯净的单质及化合物的重要区别在于混和物的组成是不定的,而纯净的单质与化合物不仅组成一定,并有确定的结构。举一个简单例子说,同在北京,东郊炼焦厂与西北郊清华园上空的空气,其组成就略有差异,前者因受炼焦排放废气的污染,空气中所含二氧化硫(SO_2)、二氧化碳(CO_2)等酸性气体的含量就高,而清华园上空未受污染,空气清新。但就氧气而言,不论在何处,其组成总是一定的,即氧分子系由两个氧原子结合而成。同样,中国南海和地中海的海水成分会有变化,但水分子总是由两个氢原子和一个氧原子构成的,遵守纯净物(单质或化合物)的定组成原理。

二、物质结构的层次

自然界是由物质构成的,一切物质都在不停地运动着。世界上各种事物千姿百态,千变万化,反映了物质运动形式的多样性。各种事物之间又存在着统一性,是相互联系的,整个物质世界按照一定的结构层次组织成一个体系。物质世界的多样性与统一性,使大自然绚丽多姿,异彩纷呈。

物质结构的层次沿着两个方向展开:一方面是向小的微观方向,另一方面是大的宏观方向。

1. 奇妙的微观世界

从微观讲,构成物质的微粒有多种,如分子、原子、离子等。有些物质是由分子构成的,如氧气是由氧分子 O_2 构成;有些物质是由原子直接构成的,如金刚石系由碳(C)原子按一定构型构成;还有些物质是由离子构成,如食盐则是由许多带一个负电荷的氯离子和带一个正电荷的钠离子按照特定的构型构成的。

分子是物质结构的一个层次。分子是能够独立存在、并保持物质化学性质的一种微粒。它总是在不停地运动着。打开一瓶香水,很快整个房间便充满香气,这是由于香水挥发了,无

数个不停地运动着的香料分子扩散到空气中,而使房间馨香扑鼻。

分子有大有小,大小相差得很远。一般地说,无机物的小分子很小。例如,水分子又小又轻,据书刊介绍,一个水分子大约只有 3×10^{-23} 克重,也就是说,在小数点后要挂上 22 个“0”。而在普通的一滴水中,含有的水分子个数非常惊人,即使全世界的人都来数,一辈子也数不清。

往下分,分子是由原子构成的。原子是化学变化中的最小微粒。原子比分子更小,它也在不停地运动着。不同的原子虽然大小不尽相同,但是相差不大。通常,原子的直径只有亿分之一厘米,若将 50 万到 100 万个原子,一个紧挨着一个排长队,其长度大约只有一根头发直径那么小的一点儿。

再往下分,原子是由带正电荷的原子核和绕核运动的电子所组成。原子核更小,其直径只有原子的十万分之一,即只有十万亿分之一厘米。

继续往下分,便是更微小的基本粒子层次。现代科学实验已经证明,原子核是由一些基本粒子组成的。目前已经发现的基本粒子有电子、质子、中子、介子、超子、变子、光子等 30 余种,连同共振态共 300 多种。

基本粒子能否再分? 它们又是由什么组成的? 近几十年来,科学家提出了各种假说,外国科学家提出了夸克模型等假说;我国科学家提出了层子模型,认为基本粒子是由更小更基本的层子组成的,胶子把层子胶粘在一起构成基本粒子,这一假说已得到部分证实。从辩证唯物主义观点来看,物质是无限可分的。如果层子进一步得到证实,仍然可以再分为更小的微粒,物质结构的层次是没有穷尽的。

2. 浩瀚的宏观世界

从宏观来看,物质的小分子还可以分为两条路线再向高一层次发展。一条沿着无机物的方向发展为凝聚态的各种物质,进而组成宇宙中的行星、恒星、星系、总星系等更高的结构层次。

从哲学角度讲,宇宙在时间上无始无终、在空间上是无边无际的;而天文学上的宇宙,则是指我们人类对无限宇宙的目前认识能力所及的部分。今天,我们已经认识到的宇宙,包含10亿个星系,称为总星系。像人们所熟悉的地球,乃是太阳系中的一个行星。而太阳又只是银河系中一颗不大不小的普通恒星,其直径约为139万公里,体积比地球大130万倍;太阳的质量是2000亿亿吨,为地球的33.3万倍,占整个太阳系质量的99.86%,这就决定了它能主宰我们这个行星世界。银河系中约有1500亿颗大大小小的恒星,彼此之间相距很远,茫茫银河系的直径约为10万光年,即100亿亿公里(1光年约为10万亿公里),大约是太阳系直径(118亿公里)的9000万倍。总星系也漫无边际,这么庞大的银河系在总星系中,也不过是沧海一粟,只能算是微乎其微了。宇宙中各种天体的化学成分都大致相同,通过光谱分析,现在我们已知道太阳的化学元素约有70种,主要是氢,占太阳质量的78%,其次是氦、氧、氮、碳等。宇宙中各种天体也始终是不停地运动着,遵循天体运动规律,具有特定的运动轨道。以太阳系为例,已知的九大行星:水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星、冥王星(与太阳的距离依次由近到远),都是沿着各自的轨道按从西向东的同一方向环绕太阳旋转(从北极星上俯看为逆时针方向)。

物质小分子发展的另一条路线,就是沿着生命物质的方向发展为生物大分子,进而组成细胞、组织、器官、生物、人类社会等更高的层次。生物的各种细胞都是由蛋白质、核酸等生物大分子组成。蛋白质分子很大,属于高分子化合物,是分子世界的巨人。一个高分子化合物分子常常由成千上万个原子组成。蛋白质、核酸等生命物质的化学成分是碳、氢、氧、氮、磷等。在人体所需要的元素中,碳、氢、氧、氮、氯、硫、磷、钾、钠、钙、镁等 11 种元素占人体总重量的 99%,构成人的主体,称为“主体生命元素”。而铁、铜、锌、锰、钴、钼、碘、氟等 50 余种元素,总重量不到人体的 1%,称为“微量生命元素”。微量金属离子是维持生命活动所不可缺少的。一个人的生命体,就是几十种化学元素,经过长期的化学进化与生物进化而来的。

3. 物质状态的多样性

众所周知,在通常条件下,物质的状态一般分为三种:气态、液态、固态。一般说,物质的状态是由物质的物理性质,如熔点、沸点的高低决定的。位于元素周期表右上角的非金属单质和稀有气体(也称惰性气体),由于它们的熔点、沸点都很低(见表 1),所以在室温下均呈气态。

表 1 某些非金属单质的熔沸点

	H ₂	O ₂	N ₂	F ₂	Cl ₂	He	Ne
熔点 (℃)	-259.18	-218.4	-209.86	-219.62	-100.98	-272.2	-248.67
沸点 (℃)	-252.8	-182.96	-195.8	-188.14	-34.6	-268.9	-245.9

周期表中的绝大多数元素是金属元素,金属单质的熔点一般较高,室温下呈固态,而汞 Hg(俗称水银)的熔点低(-39.3℃),是唯一的液态金属。

物质的三态可以相互变化,这种变化实质上就是改变物质中分子间距离的结果。通常,气态的物质的分子间距离最大,液态次之,固态物质分子间距离最小。

若想使气态物质转变为液态或固态,需降低温度或加大压力。实际上,有的气体比较容易获得液态或固态,如氨气和氯气;而有的气体却较难,如氢气、氧气等。这是因为任何一种气体都存在一个特定温度,当气体本身的温度高于这特定温度时,无论施加多么大的压力,气体都不会变为液体,只有当气体本身的温度低于特定温度时,加压气体才会液化。这一特定温度称为临界温度。因此,气体的临界温度愈低,愈不容易液化。以氢气为例,它的临界温度很低,为-239.91℃,是最难液化的一种气体。但是,利用现代液化技术,氢气还是能被液化的,而且还能制得固态氢。

自然界中物质,除了气、液、固三态外,还有没有其他状态呢?回答是肯定的:有!

当物质受到很高能量的激发时,能产生第四种状态——等

离子态。从炽热的火焰、耀眼的闪电、绚丽的极光到遥远的日月星辰、太空苍穹,都有等离子体存在,宇宙中有 99% 以上的物质处于等离子态。

所谓等离子体,其实就是一种处于电离状态的“气体”,它是由分子、原子以及数量相等的带正电的阳离子和带负电的阴离子(电子)组成的混合体。这种“气体”同一般气体不一样,它不服从气体的经典法则。1879 年,物理学家克鲁克斯在深入研究电离气体性质时,发现了等离子体。

仍以氢气为例,当氢气受到光或电等高能形式的激发时,氢原子核外的一个电子就摆脱原子核的引力而逃逸,于是氢原子分离为带正电的原子核和带负电的电子,出现了一种正、负电荷数相等的原子核(或阳离子)和电子(或阴离子)混和在在一起的状态,即等离子态,称为等离子体。

当物质处于等离子体状态时,含有大量的原子、离子和游离基基团,这些基团由于吸收了外界能量而呈激发状态,极不稳定,很容易与其他物质结合发生化学反应,从而引起人们的极大兴趣。

等离子体可提供良好的高温热源,来完成在一般加热条件下难以进行的高温反应。利用等离子体技术,由于放电方式不同,所获得的等离子体的能量状态也不同。气体在火花放电下,能得到整个体系都处于均一的高能状态的高温等离子体,其温度高达几千度以上,能用来合成许多熔点很高的金属氮化物和金属碳化物,也可用来从难熔的金属氧化物(如氧化钛 TiO_2 、氧化铝 Al_2O_3 等)中冶炼高纯金属(如钛 Ti 、铝 Al)。

等离子体也可提供大量高活性基团,实现在通常条件下不能进行的化学反应。过去,一般认为惰性气体不参加化学反

应。但是,当惰性气体氙与四氟化烷通过微波放电呈现等离子体状态时,却能发生反应生成氟化氙。在有机化学反应中,利用等离子体还能引起环构化反应,发生环收缩、环扩大、环开裂和使环状化合物重排,这些反应在普通反应条件下是很难实现的。

此外,利用辉光放电下的低温等离子体进行有机合成、无机物制备和单体聚合,可获得许多纯度高并有一定特殊性能的新材料。

而且,几乎所有的有机物和无机物都可进行等离子体聚合,这是等离子体化学的一大优点,使其应用范围有可能广泛延伸。

随着科学技术的进步,人们不仅发现了物质存在的第四种状态,而且日益认识到它所蕴藏的巨大的应用潜力。

三、神秘的原子结构

原子是化学变化中的最小微粒,是物质的最基本、最重要的结构层次之一。

1. 从道尔顿原子论说起

物质是由什么构成的?

很久以前,人们就猜测物质是由不连续的微粒组成的。古希腊的留基伯和德谟克利特提出最早的原子概念,认为原子永恒存在,永不毁灭,原子在虚空中运动,类似的原子结合在一起,组成元素,形成万物。

19世纪初,英国化学家和物理学家道尔顿(John Dalton)在研究空气的组成和性质,以及有关蒸汽压、混合气体分压、气体扩散等问题的基础上,引入原子概念,通过逻辑推理和化学实验,建立了近代原子学说,为近代化学奠定了基础。

1801年,道尔顿为了解释气体的扩散和溶解现象,提出了物质是由原子组成的基本观点。他假定各种不同的原子,彼此重量不同,并把这个假定应用到化学中,1803年他发现了化学上的倍比定律,引进了原子量的概念。1808年出版了他的名著《化学哲学新体系》,系统阐述了他的原子学说。道尔顿原子论

的基本内容是：

(1)一切物质乃是由非常微小的、不可再分的粒子——原子所组成，原子在一切化学变化中均保持其本性。

(2)同一元素的所有原子的性质，特别是质量，完全相同；不同元素原子的性质及质量不同。原子质量是元素的基本特征。

(3)不同元素的原子以简单数目的比例相结合，形成化合物，其质量为所含各种元素原子质量之总和。化合物原子称为复杂原子，同种化合物的复杂原子，其性质和质量也必然相同。

道尔顿原子论的建立，标志着人类对物质结构的认识前进了一大步。它为以后的物理、化学、生物学的发展奠定了理论基础。并且由于引进了原子量的概念，合理地解释了化学上的定比定律和倍比定律，为当时的化学发展提供了一个中心的理论，促进了化学的迅速发展。因此，恩格斯在《自然辩证法》中写道：“化学中的新时代是随着原子论开始的”（所以，近代化学之父不是拉瓦锡，而是道尔顿）。

道尔顿的原子论在化学上虽然有很大贡献，但由于受机械论和形而上学观点的限制，仍有明显的缺点和错误。主要表现在：他认为原子是不可再分的最后质点，因而否认了物质的无限性及其不可穷尽性。另外，他认为复杂原子是简单原子的机械集合体，否认分子的存在，抹杀了分子与原子有质的差别，因而也就否认了物质不同存在形式的多样性，无法说明物质是可分割性与连续性的统一。这样，致使它在化学发展中，碰到了许多越来越难以解决的矛盾。如果不加以修正、补充和发展，就不能发挥它的应有作用。

后来，人们在新的科学事实和道尔顿原子论基础上，提出

了分子假说,引入“分子”新概念,并将它与原子概念既加以区别,又联系起来。意大利化学家阿佛加德罗(Amedeo Avogadro)为此做出了重要贡献,他提出:原子是参加化学反应的最小质点,而分子则是游离状态下单质或化合物能独立存在并保持物质化学性质的最小质点;分子由原子组成,单质分子由相同元素的原子组成,化合物分子则由不同元素的若干原子组成;在化学变化中是由不同物质的分子间各原子的重新结合。阿佛加德罗的分子假说成功地克服了道尔顿原子论与某些化学事实的矛盾,进而发展为分子论。它同原子论结合在一起,构成了近代原子——分子学说,排除了化学发展的障碍。

2. 原子的组成

从道尔顿到门捷列夫,化学家都相信“原子不可分”的古老、陈旧观点,认为原子是“最后质点”、“莫破质点”,是化学大厦的基石。但是,这种信念被 19 世纪末一个接一个的科学发现打破了。这些科学发现主要有 X 射线、放射性和电子。电子发现以后,人们很自然地提出,既然电子是带负电的微粒,而原子又是电中性的,这样,原子中就必然有带正电的部分。这个带正电的部分被称之为原子核。因此,原子是由原子核和核外电子所组成。

后来,发现原子核是由质子和中子构成的,质子带一个单位正电荷,中子呈电中性,原子核的电荷数(简称核电荷数)是由质子数决定的,核外电子数目与核中质子数目相等,因此,整个原子呈电中性。

按核电荷数由小到大的顺序给化学元素编号,这个序号叫做元素的原子序数,以符号 Z 表示。由此可知,元素实质是具