

高等学校交流讲义

普通物理学

PUTONG WULIXUE

分子物理学部分

顾建中编

人民教育出版社

B.3/102

0143613

高等学校交流讲义



普通物理学

PUTONG WULIXUE

分子物理学部分

顧建中編



21113000835051



YD29/10

人民教育出版社

本书是编者根据他在云南大学物理系讲授“普通物理学”课程中分子物理学部分的讲义修改、补充而成的。内容包括緒論和理想气体定律及气体分子动力論的基本方程、分子运动的統計規律、平均自由程与气体輸运过程、热力学定律及其应用、实在气体和气液互变、液体和固体等六章。

本书可作为綜合大学及高等師范院校物理各专业“普通物理学”課程中分子物理学部分的教材；也可供高等工业学校的相近专业选用。

普通物理学

分子物理学部分

顧建中編

北京市書刊出版業營業許可証出字第2号

人民教育出版社出版(北京景山东街)

京華印書局印裝

新华书店北京发行所发行

各地新华书店經售

統一書号 18010·969 开本 850×1168¹/₃₂ 印张 5¹/₁₆

字数 128,000 印数 18,001—28,000 定价(6) 0.55

1961年7月第1版 1961年11月北京第2次印刷

結 論

分子物理学研究的对象、問題和方法

(一)物质結構,原子和分子 約在 2300 年前,古希腊哲学家,已提出物质結構的原子假說,认为各种物质都是由最小的质点——原子构成的,但这只是哲学概念,沒有实验根据。科学的原子分子論,直到十八世紀才开始形成,罗蒙諾索夫首先提出了近代分子动力論的根本观点,即实体物质由分子組成,分子不断运动的概念(加实体二字,为了和另一类称叫場的物质相区别,以下簡称物质)。原子分子論,首先在化学方面发展,根据定比定律,倍比定律等化学規律,这一假說得到充分的实验依据。按此說,一切物质,無論其为固体、液体或气体,均由一百种左右称叫元素的单纯物质所构成,而每一元素,則由大量相同的粒子所构成(暫不考虑同位素),这些粒子,称叫該元素的原子,不同元素的原子并不相同。少数原子結合成稳定結構乃成分子,为一切复杂物质之最小組成单位。換言之,一切物质,無論是固体、液体或气体,均由大量相同的分子組成,实体物质的結構是不連續的。例如水的最小单位是水分子,說它是最小,因为作为水來說,它已不能再分,再分就不是水了。每一个水分子由二氢原子及一氧原子构成,在这意义上說,分子还可再分。原子是构成物质的最小单位,作为該元素說,它的原子已不能再分,再分就不是該元素了。当然,原子內部还有构造,它由原子核和电子构成,而原子核由质子、中子……等粒子所构成,这就使得我們相信“电子和原子的不可穷尽性”是完全正确的。以上結論,在近代化学和物理学中,有极为坚实的实验基础。

(二)描述物质由分子组成的几个基本物理量

(i) 原子量 A 由倍比定律可确定原子的相对质量(或称重量),即一原子的质量比另一元素的一个原子的质量大或小多少倍,取某一元素的原子量作为标准,可以表出其他原子的相对质量。以氧原子的质量作为 16 計得之其他原子的相对质量,称曰該原子(或元素)的原子量。如氢的原子量为 1.0078,说明氢原子的质量,是氧原子质量的 $1/16$ 的 1.0078 倍。

(ii) 分子量 μ 以氧原子质量的 $1/16$ 作为质量单位計得之分子之相对质量,称曰該分子(或該物质)之分子量,以 μ 表之。因几个原子构成分子时,质量基本上沒有改变,单位也相同,所以分子量等于构成該分子的諸原子的原子量之总和。如水之分子量为 $16 + 2 \times 1.0078 = 18.0156$, 氢之分子量为 2.0156。

(iii) 克原子量和克分子量 一定质量之某元素,以克为质量单位,若其数值恰等于該元素之原子量,則称曰一克原子量,可用为度量該元素的质量的一个单位。如 16 克之氧,称曰一克原子之氧,1.0078 克之氢,称曰一克原子之氢。同理,一定质量之某物质,以克为单位計得其质量之数值,恰等于該物质之分子量,則称曰一克分子。如 18.0156 克之水,即为一克分子之水。

(iv) 阿伏伽德罗常数和一分子的质量 設有二元素,其原子量各为 A_1, A_2 , 各取一原子而比較其质量,比值应为 $\frac{A_1}{A_2}$; 若各取 n 个原子而比較其质量,比值仍为 $\frac{A_1}{A_2}$ 。設 m_1, m_2 表二元素 n 个原子之质量,則 $\frac{m_1}{m_2} = \frac{A_1}{A_2}$, 由此知:取各种不同元素,使其质量之比等于原子量之比,則这些质量的各种元素中,将含有同数的原子。

二元素的克原子量之比,正好等于原子量之比,所以任何元素的一克原子中都含有同数的原子。这个数目,称叫阿伏伽德罗常数,以 N 表之,由实验测得:

$$N = 6.023 \times 10^{23} [\text{克原子}]^{-1}$$

一克分子水(18.0156 克)中,有 16 克氧和 2.0156 克氫,其中有 N 个氧原子, $2N$ 个原氫子,两个氫原子和一个氧原子构成一个水分子,那么 $2N$ 个氫原子和 N 个氧原子构成 N 个水分子,所以一克分子水中,有 N 个水分子。把这个方法推广到一切物质,可以得到一个結論,即 1 克分子之任何物质,其中所含之分子数,仍等于阿伏伽德罗常数。不言而喻,一克分子之任何物质,都含有同数分子。所以 N 的单位也可以写成 [克分子] $^{-1}$ 。

由阿伏伽德罗常数,可計一分子之绝对质量(简称质量)。若某物质之分子量为 μ , 則 N 个分子之质量为 μ 克,一个分子之质量 m 应为:

$$m = \frac{\mu}{N} (\text{克})。$$

以 A 代 μ , 則 m 表一原子之质量, 由此計得氧原子之质量为 $\frac{16}{6.023 \times 10^{23}}$ 克, 其 $\frac{1}{16}$ 表原子量为 1 之假想元素的一个原子的绝对质量, 其值为 $\frac{1}{6.023 \times 10^{23}} = 1.662 \times 10^{-24}$ 克, 故原子量为 A 的原子的绝对质量为

$$m = 1.662 \times 10^{-24} A (\text{克})。$$

(三)分子运动——分子动力論的第二个根本观点 一系列的实验証明, 組成物质的分子是在不断地运动着, 这种运动是杂乱的、內在的、永不停止的。茲举二例說明如下:

(i) 如图 0.1 之 A 容器中盛氫, B 中盛二氧化碳, 开启活門 C 后若干时间, 二容器中的两种气体均匀混合, 这个现象称叫气体扩散, 氫比二氧化碳輕 22 倍, 在重力作用下不可能向下流, 这个现象只有假定分子运动, 才能得到解釋。反过来, 这个现象証明了分子运动的存在。

(ii) 1827 年 布朗发现在显微镜下观察悬浮在液体中的非常小的微粒(花粉或藤黄乳状液, 微粒大小約 1 微米), 它們是处在杂

乱的运动状态中，粒子愈小，运动愈烈；这种运动永不停止，也不依赖任何外因，是物质内在运动的表现，称曰布朗运动。对于液体中的较大物体，从各方面撞击它的液体分子为数极多，在任一瞬間，

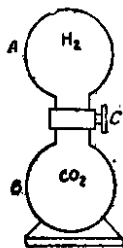


图 0.1

这些撞击互相抵消，物体不会运动。但对很小的微粒，任一瞬間和它撞击的分子数为数较少，某方向的碰击，可能较其它方向为多，因而给微粒以净动量，乃生运动。在另一时刻可能又是另一方向碰击占优势，所以布朗运动是在分子的杂乱撞击下发生的，虽然它并不是分子运动本身，但它是分子运动引起的最直接的结果，从而证明分子运动的存在，和分子运动的杂乱性、永恒性、内在性。

(四)分子物理学研究的对象和问题及研究方法 分子物理学研究大量分子组成之系统(如气体,液体,固体)的性质,和它的宏观运动所遵循的客观规律,而且大部分是研究最简单的物质聚合状态即气体所遵循的规律。每一个分子的运动,遵循力学运动定律,称曰微观运动;大量分子组成的系统所遵循的规律,就不再是力学规律,而是分子物理学的规律,这种运动,称曰宏观运动。综上所述,分子物理学研究的对象是大量分子组成的系统;分子物理学研究的问题是这个系统的性质和它的宏观运动的规律。

研究分子物理学的方法有二:一种是通过分子的微观运动和宏观运动的联系,来深入认识这些宏观运动的规律,用这种方法研究的部分,称曰分子运动论,或分子动力论。在最初三章中,将分别以理想气体定律、分子速度分布定律和动能均分定律、气体输运过程为中心进行研究,主要采用分子动力论的方法。另一种方法,是根据直接由实验总结得到的热力学定律,不考虑分子的微观运动,从能量观点直接研究系统的宏观运动,这种方法称叫热力学方

法；第四章將以熱力學第一定律及第二定律為中心，進行研究。關於這兩個研究部分，也不是互相孤立、截然分開的，往往同一問題要從兩個角度去分析它，它們是相輔相成、互補不足的。因此前三章中也會涉及一些熱力學概念，第四章中也會用到分子動力論的概念。最後二章討論實在氣體、液體和固體的性質和運動規律，兩種方法都要用到，這只是為了討論方便作的劃分，物質三態是互相區別又互相聯系的，不應孤立看待。

目 录

緒論	1
第一章 理想气体定律及气体分子动力論的基本方程	6
§ 1.1. 玻意耳—馬略特定律、盖呂薩克定律、查理定律	6
§ 1.2. 理想气体与绝对温标	9
§ 1.3. 理想气体状态方程式	10
§ 1.4. 理想气体动力論的基本公式	13
§ 1.5. 分子的平均移动能和温度的关系	17
§ 1.6. 基本方程式的一些推論	19
第二章 分子运动的統計規律	22
§ 2.1. 統計概念	22
§ 2.2. 分子射線实验及气体分子速率測定法	23
§ 2.3. 麦克斯韦分子按速率分布定律	24
§ 2.4. 麦克斯韦分子按速度分布定律	31
§ 2.5. 玻尔茲曼分子按能量分布定律及微粒按高度的分布	33
§ 2.6. 布朗运动及阿伏加德罗常数之測定	36
§ 2.7. 气体之内能、热量及自由度數	38
§ 2.8. 动能按自由度均匀分布定律, 理想气体的内能	40
§ 2.9. 气体热容量的經典理論	42
§ 2.10. 动能按自由度均分定律应用的限度	45
第三章 平均自由程与气体輸运过程	47
§ 3.1. 气体分子的平均自由程 λ	47
§ 3.2. 关于輸运过程的宏观規律	49
§ 3.3. 輸运过程的分子动力論之一——扩散	52
§ 3.4. 内摩擦和热传导	56
§ 3.5. 低压气体的性质	60
§ 3.6. 低压气体的获得及測定	65
第四章 热力学定律及其应用	71
§ 4.1. 热量和系統的内能	71
§ 4.2. 热力学第一定律	73
§ 4.3. 热力学系統的状态和过程	75
§ 4.4. 热力学第一定律对理想气体的应用	78
§ 4.5. 循环过程及一循环中系統所作之功, 热机之效率	83

§ 4.6. 热机	89
§ 4.7. 热力学第二定律	95
§ 4.8. 可逆过程与不可逆过程	96
§ 4.9. 卡诺循环及其效率	98
§ 4.10. 卡诺定理—热力学第二定律对热机的应用	101
§ 4.11. 提高热机效率的方法	106
§ 4.12. 热力学温标	108
§ 4.13. 克拉珀龙—克劳修斯公式及其应用	109
§ 4.14. 可逆过程与不可逆过程的分析	113
§ 4.15. 热力学第二定律的统计意义	115
第五章 实在气体和气体互变	121
§ 5.1. 实在气体的等温线	121
§ 5.2. 范德瓦耳斯方程式	124
§ 5.3. 物质的临界状态	131
§ 5.4. 实在气体的内能, 焦耳-汤姆孙效应	134
§ 5.5. 液体汽化、气体液化和低温的获得	138
第六章 液体和固体	143
§ 6.1. 表面张力现象和表面张力	144
§ 6.2. 液体之分子结构、分子力和表面张力之实质	146
§ 6.3. 弯曲液面下之附加压强	150
§ 6.4. 液体和固体、气体接触处的现象, 毛细现象	153
§ 6.5. 晶体与非晶体	158
§ 6.6. 空间点阵	161
§ 6.7. 固体热容量	164
§ 6.8. 固体的熔解和升华	167

結 論

分子物理学研究的对象、問題和方法

(一)物质結構,原子和分子 約在 2300 年前,古希腊哲学家,已提出物质結構的原子假說,认为各种物质都是由最小的质点——原子构成的,但这只是哲学概念,沒有实验根据。科学的原子分子論,直到十八世紀才开始形成,罗蒙諾索夫首先提出了近代分子动力論的根本观点,即实体物质由分子組成,分子不断运动的概念(加实体二字,为了和另一类称叫場的物质相区别,以下簡称物质)。原子分子論,首先在化学方面发展,根据定比定律,倍比定律等化学規律,这一假說得到充分的实验依据。按此說,一切物质,無論其为固体、液体或气体,均由一百种左右称叫元素的单純物质所构成,而每一元素,則由大量相同的粒子所构成(暫不考虑同位素),这些粒子,称叫該元素的原子,不同元素的原子并不相同。少数原子結合成稳定結構乃成分子,为一切复杂物质之最小組成单位。換言之,一切物质,無論是固体、液体或气体,均由大量相同的分子組成,实体物质的結構是不連續的。例如水的最小单位是水分子,說它是最小,因为作为水來說,它已不能再分,再分就不是水了。每一个水分子由二氢原子及一氧原子构成,在这意义上說,分子还可再分。原子是构成物质的最小单位,作为該元素說,它的原子已不能再分,再分就不是該元素了。当然,原子內部还有构造,它由原子核和电子构成,而原子核由质子、中子……等粒子所构成,这就使得我們相信“电子和原子的不可穷尽性”是完全正确的。以上結論,在近代化学和物理学中,有极为坚实的实验基础。

(二)描述物质由分子組成的几个基本物理量

(i) 原子量 A 由倍比定律可确定原子的相对质量(或称重量),即一原子的质量比另一元素的一个原子的质量大或小多少倍,取某一元素的原子量作为标准,可以表出其他原子的相对质量。以氧原子的质量作为 16 計得之其他原子的相对质量,称曰該原子(或元素)的原子量。如氢的原子量为 1.0078,說明氢原子的质量,是氧原子质量的 $1/16$ 的 1.0078 倍。

(ii) 分子量 μ 以氧原子质量的 $1/16$ 作为质量单位計得之分子之相对质量,称曰該分子(或該物质)之分子量,以 μ 表之。因几个原子构成分子时,质量基本上沒有改变,单位也相同,所以分子量等于构成該分子的諸原子的原子量之总和。如水之分子量为 $16 + 2 \times 1.0078 = 18.0156$, 氢之分子量为 2.0156。

(iii) 克原子量和克分子量 一定质量之某元素,以克为质量单位,若其数值恰等于該元素之原子量,則称曰一克原子量,可用为度量該元素的质量的一个单位。如 16 克之氧,称曰一克原子之氧,1.0078 克之氢,称曰一克原子之氢。同理,一定质量之某物质,以克为单位計得其质量之数值,恰等于該物质之分子量,則称曰一克分子。如 18.0156 克之水,即为一克分子之水。

(iv) 阿伏伽德罗常数和一分子的质量 設有二元素,其原子量各为 A_1, A_2 , 各取一原子而比較其质量,比值应为 $\frac{A_1}{A_2}$; 若各取 n 个原子而比較其质量,比值仍为 $\frac{A_1}{A_2}$ 。設 m_1, m_2 表二元素 n 个原子之质量,則 $\frac{m_1}{m_2} = \frac{A_1}{A_2}$, 由此知:取各种不同元素,使其质量之比等于原子量之比,則这些质量的各种元素中,将含有同数的原子。

二元素的克原子量之比,正好等于原子量之比,所以任何元素的一克原子中都含有同数的原子。这个数目,称叫阿伏伽德罗常数,以 N 表之,由实验测得:

$$N = 6.023 \times 10^{23} [\text{克原子}]^{-1}$$

一克分子水(18.0156 克)中,有 16 克氧和 2.0156 克氫,其中有 N 个氧原子, $2N$ 个原氫子,两个氫原子和一个氧原子构成一个水分子,那么 $2N$ 个氫原子和 N 个氧原子构成 N 个水分子,所以一克分子水中,有 N 个水分子。把这个方法推广到一切物质,可以得到一个結論,即 1 克分子之任何物质,其中所含之分子数,仍等于阿伏伽德罗常数。不言而喻,一克分子之任何物质,都含有同数分子。所以 N 的单位也可以写成 [克分子] $^{-1}$ 。

由阿伏伽德罗常数,可計一分子之绝对质量(简称质量)。若某物质之分子量为 μ , 則 N 个分子之质量为 μ 克,一个分子之质量 m 应为:

$$m = \frac{\mu}{N} (\text{克})。$$

以 A 代 μ , 則 m 表一原子之质量, 由此計得氧原子之质量为 $\frac{16}{6.023 \times 10^{23}}$ 克, 其 $\frac{1}{16}$ 表原子量为 1 之假想元素的一个原子的绝对质量, 其值为 $\frac{1}{6.023 \times 10^{23}} = 1.662 \times 10^{-24}$ 克, 故原子量为 A 的原子的绝对质量为

$$m = 1.662 \times 10^{-24} A (\text{克})。$$

(三)分子运动——分子动力論的第二个根本观点 一系列的实验証明, 組成物质的分子是在不断地运动着, 这种运动是杂乱的、內在的、永不停止的。茲举二例說明如下:

(i) 如图 0.1 之 A 容器中盛氫, B 中盛二氧化碳, 开启活門 C 后若干时间, 二容器中的两种气体均匀混合, 这个现象称叫气体扩散, 氫比二氧化碳輕 22 倍, 在重力作用下不可能向下流, 这个现象只有假定分子运动, 才能得到解釋。反过来, 这个现象証明了分子运动的存在。

(ii) 1827 年 布朗发现在显微镜下观察悬浮在液体中的非常小的微粒(花粉或藤黄乳状液, 微粒大小約 1 微米), 它們是处在杂

乱的运动状态中，粒子愈小，运动愈烈；这种运动永不停止，也不依赖任何外因，是物质内在运动的表现，称曰布朗运动。对于液体中的较大物体，从各方面撞击它的液体分子为数极多，在任一瞬間，

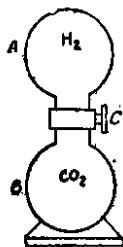


图 0.1

这些撞击互相抵消，物体不会运动。但对很小的微粒，任一瞬間和它撞击的分子数为数较少，某方向的碰击，可能较其它方向为多，因而给微粒以净动量，乃生运动。在另一时刻可能又是另一方向碰击占优势，所以布朗运动是在分子的杂乱撞击下发生的，虽然它并不是分子运动本身，但它是分子运动引起的最直接的结果，从而证明分子运动的存在，和分子运动的杂乱性、永恒性、内在性。

(四)分子物理学研究的对象和问题及研究方法 分子物理学研究大量分子组成之系统(如气体,液体,固体)的性质,和它的宏观运动所遵循的客观规律,而且大部分是研究最简单的物质聚合状态即气体所遵循的规律。每一个分子的运动,遵循力学运动定律,称曰微观运动;大量分子组成的系统所遵循的规律,就不再是力学规律,而是分子物理学的规律,这种运动,称曰宏观运动。综上所述,分子物理学研究的对象是大量分子组成的系统;分子物理学研究的问题是这个系统的性质和它的宏观运动的规律。

研究分子物理学的方法有二:一种是通过分子的微观运动和宏观运动的联系,来深入认识这些宏观运动的规律,用这种方法研究的部分,称曰分子运动论,或分子动力论。在最初三章中,将分别以理想气体定律、分子速度分布定律和动能均分定律、气体输运过程为中心进行研究,主要采用分子动力论的方法。另一种方法,是根据直接由实验总结得到的热力学定律,不考虑分子的微观运动,从能量观点直接研究系统的宏观运动,这种方法称叫热力学方

法；第四章將以熱力學第一定律及第二定律為中心，進行研究。關於這兩個研究部分，也不是互相孤立、截然分開的，往往同一問題要從兩個角度去分析它，它們是相輔相成、互補不足的。因此前三章中也會涉及一些熱力學概念，第四章中也會用到分子動力論的概念。最後二章討論實在氣體、液體和固體的性質和運動規律，兩種方法都要用到，這只是為了討論方便作的劃分，物質三態是互相區別又互相聯系的，不應孤立看待。

第一章 理想气体定律及气体分子 动力論的基本方程

我們从最简单也是最基本的理想气体談起。首先由实验总结
出它的宏观規律,然后根据实践提出理論的基本观点,从微观角度
来研究气体分子运动,通过統計方法求平均,得出动力論的基本方
程。最后把基本方程和宏观規律联系起来,这样便深入認識了宏
观規律的实质,同时也更具体地了解分子的微观运动。现在就
从实验定律开始。

§ 1.1. 玻意耳—馬略特定律、盖呂薩克定律、查理定律

我們先从关于气体的几个实验定律开始

(一)压强 气体有充滿容器,并垂直施力于器壁的性质,作用
于受力面单位面积上的力,称曰压强;为描述气体状态之一重要参
量,其性质和单位与液体中之压强基本相同,但气体密度很小,所
以高差不大之二点之压强可看为相等。

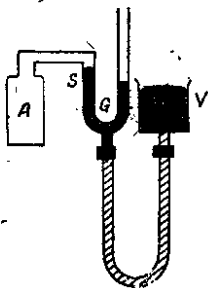


图 1.1

(二)温度 温度为一基本概念,表
引起冷暖感觉的物质的客观屬性。物质
温度高,引起暖的感觉,温度低引起冷的
感觉。温度改变时,物质的諸多性质随
之改变,如膨胀,电阻变化,产生热电动
势等,利用任一性质均可度量温度,遂有
各种温度计出現。最普通者为水銀温度
計,它是利用水銀对玻璃的視膨胀与温
度之升高成正比之假定(在一定实践的
基础上提出的)制成。其构造,定点,分

度, 中学教本已詳加論列, 不再重复。若換用另一物质(测温质), 或其他特性(测温特性), 則对同一对象量得之溫度, 一般并不完全一致。因此有确定标准之必要。1887年, 国际度量衡委员会, 确定以定容氫溫度計为标准, 所利用之测温质为氫, 测温特性为“一定量之氫占有一定量容积时, 其压强变化与溫度变化成正比, 与冰点时之压强成正比”, 这是以实验为基础作出的假定, 定容氫溫度計之结构示意图如图 1.1, A 为儲氫的容器, 与压强計 G 相通联, 压强計通过橡皮管联于容器 V , 其中充以水銀; 升降 V 可調節 G 之左枝中之水銀面达刻痕 S , 以保証氫之定容; G 之左右二枝中水銀面之高差, 可用以量氫之压强。設 A 之溫度为 0°C 时, 氫之压强为 p_0 , 溫度升至 $t^{\circ}\text{C}$ 时, 压强增为 p_t , 按上假定:

$$p_t - p_0 = \alpha p_0 t,$$

$$\text{或} \quad p_t = p_0(1 + \alpha t). \quad (1)$$

α 曰氫之压强系数, 其值为 $\frac{1}{273.13} = 0.0036613 \text{ 度}^{-1}$ 。(1)式可作為攝氏溫度之定义。

(三)玻意耳-馬略特定律 1660年玻意耳, 1676年馬略特先后分別进行实验, 归納得一条定律, 即“一定量之气体, 若保持溫度不变, 則其压强与体积成反比”。

这个定律中有四个量, 即气体质量 m , 溫度 t , 压强 p , 和体积 V 。质量为 m 之气体, 是我們研究的系統, p, V, t , 是描述这一系統状态的参量。这个定律說明 t 一定时, p, V 成反比, 以式表之为:

$$pV = \text{常数}. \quad (2)$$

这个常数随气体之性质、质量和溫度而定。以图表之, 得如图 1.2 中之曲线, 曲线上任一点, 表气体之一状态, 曲线所示之諸状态, 溫度均相同, 故此线称

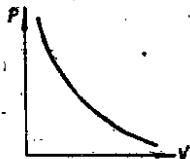


图 1.2