

经全国中小学教材审定委员会
2004 年初审通过

普通高中课程标准实验教科书

物理

选修 1-2

人民教育出版社 课程教材研究所 编著
物理课程教材研究开发中心



人民教育出版社

普通高中课程标准实验教科书

物理

选修 1-2

人民教育出版社 课程教材研究所 编著
物理课程教材研究开发中心



人民教育出版社

普通高中课程标准实验教科书

物 理

选修 1-2

人民教育出版社 课程教材研究所 编著
物理课程教材研究开发中心

*

人民教育出版社 出版发行

网址: <http://www.pep.com.cn>

中青印刷厂印装 全国新华书店经销

*

开本: 890 毫米×1 240 毫米 1/16 印张: 7.25 字数: 140 000

2004 年 12 月第 1 版 2006 年 1 月第 5 次印刷

ISBN 7-107-18448-2 定价: 9.55 元
G·11537 (课)

如发现印、装质量问题, 影响阅读, 请与出版科联系调换。

(联系地址: 北京市海淀区中关村南大街 17 号院 1 号楼 邮编: 100081)

总 主 编：张大昌

副总主编：彭前程

主 编：申先甲

副 主 编：杜 敏

编写人员：谷雅慧 刘树勇 申先甲 王士平

绘 图：王凌波 张 良

责任编辑：谷雅慧 苗元秀

版式设计：张万红

审 读：王存志

致同学们

同学们！在学完共同必修模块后，你们已经领略了物理学冰山的一角。选修1系列的两个模块将继续向你们展示物理学的其他有趣的内容。在这个系列里我们将侧重物理学与社会科学和人文学科的融合，强调物理学对人类文明的影响。希望你们在本书的学习中，能主动地、生动活泼和富有个性地学习物理知识与技能，提高科学思维能力，发扬创新精神，为你们的终身发展及科学世界观、科学价值观的形成打下基础。

结合本教材的特点，先和同学们谈几个有关的话题。

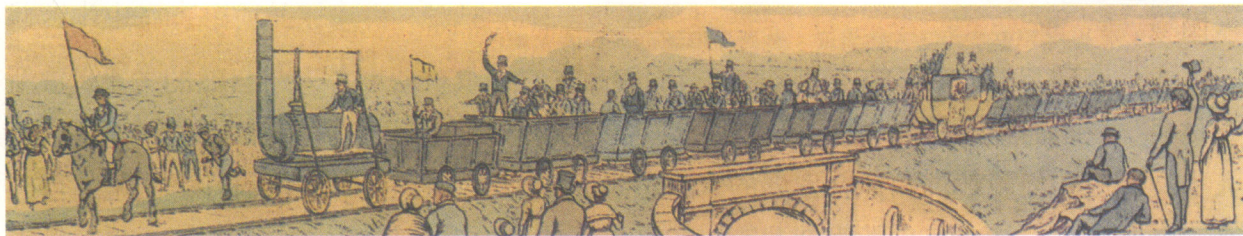
物理学与人类文明

几千年的历史表明，物理学是人类文明的重要源泉。从茹毛饮血的原始社会到高度文明的现代社会，人类是伴随着包括物理学在内的科学技术的一次次突破，一步步地走过来的。在远古蛮荒的文明之初，投掷、尖劈、杠杆等知识帮助原始人群度过了漫长的旧石器时代。由于能力的低下，人类创造了听命于自然的图腾文化。弓箭、钻木取火的发明，是最早的技术革命，它催生了畜牧业以及制陶和冶金技术。金属农具的普遍使用，使人类进入到农业社会，产生了具有田园意趣、以自然启示人格和艺术的人文文化。

从近代欧洲的文艺复兴开始，科学实验开辟了科学革命的道路，理性精神深深地渗透到文化当中，把人类推进到科学文化的时代。17世纪的牛顿力学和18世纪中叶的量热学，导致了蒸汽动力的普遍应用，推动了近代第一次工业革命，人类进入到“蒸汽时代”，产生了资本主义的工业文明。19世纪40~60年代，能量转化和守恒定律的建立及电磁场理论的发展促进了“蒸汽时代”向“电气化时代”的转变。



元代耕织图



铁路通车典礼

20 世纪以来，以相对论和量子力学为理论支柱的微观物理学的发展，引发了现代科学革命，推动了今日高科技社会的诞生。科学技术的高速发展，使人类改造自然的能力空前增强。

在古典神话小说《封神演义》中，作者幻想了许多超人的能力：雷震子肋生双翅翱翔长空，土行孙缩身入地日行千里，哼哈二将怒射白光杀敌制胜，千里眼顺风耳探事千里之



实现飞行的梦想



全球定位系统接收器能够显示经度、纬度和海拔高度，能够引导飞机和船只辨别它们的确切位置。

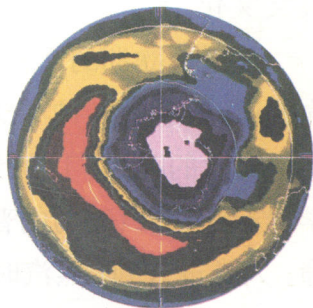
外。今天，飞机、地铁、激光、电视、互联网等技术已经使这些幻想变为现实。上天入地、腾空泛海、生光驭电、变幻万物，人类几乎达到了无所不能的地步。而这一切成就，都是基于科学技术的进展，可以说，物理学与其他学科一起创造了现代文明。

但是，一切技术应用，既可以成为打开自然宝库的钥匙，也可以成为对自然肆意施虐和毁灭人类文明的魔剑。今天，人们在惊叹高科技的辉煌成就的同时，似乎又听到了英国作家狄更斯（Charles Dickens, 1812—1870）在《双城记》中发出的警世哲言：

这是最好的时候，这是最坏的时候；
这是智慧的年代，这是愚蠢的年代；
这是信仰的新纪元，这是怀疑的新纪元；
这是光明的季节，这是黑暗的季节；
这是希望之春，这是失望之冬；
我们将拥有一切，我们将一无所有；
.....

今天，环境污染，生态破坏，新疾病不断发生，自然资源匮乏，人口爆炸……如果这些问题得不到控制，人类的前途就会陷入困境。

人是有理智、有感情的。在这种危机面前，我们必须重新思考人与自然的关系，重新评估科学技术的社会功能，重新规划科技发展的路线图，更多地考虑自然与人的关系，从人类文明史的经验教训和社会发展的未来出发，把自然文化、人文文化和科学文化整合起来，创造出人、社会与自然生态共荣，和谐发展的新的文化模式。



环境污染造成大气上层的臭氧空洞

物理学之美

在一些人的心目中，物理学是那样枯燥，那样难懂，哪有什么“美”可言？事实并非如此。



大自然——美的源泉

美的源泉是大自然。美为什么会在物理学中泄露芳容呢？那是因为物理学之美源于自然美。

大自然拥有丰富多彩、十分绚丽的环境，有色彩之美、风格之美、对称之美、音韵之美、奇特之美、奥秘之美。物理学研究的对象，正是这样一个自然界。自然界所拥有的各种美的品格，当然会在物理学的内容和理论形式中反映出来。

简单、普适、和谐、统一是物理学之美的最普遍特征。尽管自然万物五彩缤纷、斑驳陆离、瞬息万变，然而它们的存在状态和变化却遵从一定的规律。为数不多的规律支配着自然界的一切，体现了自然界质朴的统一与和谐之美，赋予了科学理论的审美价值。爱因斯坦说：“从那些看来同直接真理十分不同的各种复杂现象中认识到它们的统一性，那是一种壮丽的感觉。”牛顿定律、万有引力定律、库仑定律、熵增加原理等，都以其简洁性、普适性与和谐性给人以美的震撼。它们既向人们展示出一个个未知王国如何在杂乱中包含有序、在繁杂中包含简单、在对立中包含统一，又给人们一种美的冲动，启迪人们的灵感和智慧，去创造更为壮丽的科学杰作。

自然界存在多种多样的对称美。对称性不仅体现在绘画、建筑、园林、城市规划中，物理学中同样反映出大自然的这种对称性。很多物理学理论都有一种赏心悦目的对称美，本书中，我们可以通过电与磁的规律领略一二，而在微观领域，还将看到更多、更深刻的对称性。

物理学中美的特点，在绘画、音乐，甚至诗歌、舞蹈等各种艺术中都有相似的对应物。物理学中那种看不见、摸不着、充满智慧的理性之美，正是艺术中那种见得着、听得到的感性之美的相似物；物理学家和艺术家通过不同途径追求的正是相同的目标。



京剧脸谱中的对称美

物理学与科学文化素养

有一个看法：如果一个人没有读过唐诗宋词、《红楼梦》和莎士比亚的作品，会被认为文化素养不高；但是一个人不知道牛顿、爱因斯坦的理论，却不被看做缺少文化。20世纪下半叶波澜壮阔的现代科技革命，极大地冲击了这种偏见。物理学家拉比（I. I. Rabi, 1898—1988）指出：“只有把科学和人文学科融为一体，我们才能期望达到与我们时代相称的智慧的顶点。”

或许你将来从事与物理学没有直接关系的工作，但是也应该对物理学有一定的认识。这不是要求你死记硬背物理定律和公式，而是要求你了解一些重要概念和规律的科学实质，经历一些物理学的探索过程，体会一些物理学的思维方式和研究方法，知道一些与物理学相关的基本知识。这对你分析和处理问题能力的提高，甚至你的日常生活，都是十分重要的。今天，物理学已经深入到社会生活的各个方面，无论你从事何种职业，都离不开与物理学相关的技术和产品。汽车、飞机、电视、空调、电脑、网络、手机、磁卡……不具备基本的物理学知识和技能，如何能更好地适应这种现代生活呢？



当代物理学发展的特点之一，是它与社会科学之间的沟通与渗透。人类生活在大自然中，人类社会的发展不能不受制于自然的法则，因而社会领域的许多问题，也可以借用物理学的概念、规律、思想和方法来研究和处理。近年来，在社会科学中广泛采用了自然科学的研究方法，我们必须造就具有较高自然科学素养的一代公民。

致 同 学 们	1
---------------	---

第一章 分子动理论 内能



一、分子及其热运动	2
二、物体的内能	7
三、固体和液体	11
四、气体	18

第二章 能量的守恒与耗散



一、能量守恒定律	24
二、热力学第一定律	28
三、热机的工作原理	31
四、热力学第二定律	36
五、有序、无序和熵	39
六、课题研究：家庭中的热机	44

第三章 核能



一、放射性的发现	49
二、原子核的结构	54
三、放射性衰变	58
四、裂变和聚变	62
五、核能的利用	67

第四章 能源的开发与利用



一、热机的发展和应用	74
二、电力和电信的发展与应用	80
三、新能源的开发	88
四、能源与可持续发展	94
五、课题研究：太阳能综合利用的研究	101

假如在一次浩劫中所有的科学知识都被摧毁，只剩下一句话留给后代，什么语句包含最多的信息？我相信，这是原子假说，即万物由原子（微小粒子）组成，它们永恒地运动着，并在一定距离以外互相吸引，而被挤压在一起时则互相排斥。在这句话里包含了有关这世界巨大数量的信息。

——费恩曼^①

第一章 分子动理论 内能



正在融化的浮冰

春天到来，冰雪消融，大地复苏。残雪、浮冰、春水，还有看不见的弥漫在空中的水汽，形成一幅美丽的画卷。

水，为什么会以如此不同的形式存在？壮丽的大自然背后隐藏着什么秘密呢？

^① 费恩曼 (Richard Phillips Feynman, 1918—1988)，美国物理学家，杰出的物理教育家，由于在量子电动力学方面的贡献而获 1965 年诺贝尔物理学奖。

一、分子及其热运动



虽然古希腊人不可能直接观察到原子，但是德谟克利特有他的思考。他认为人可以闻到花香，那是因为花的原子飘到人的鼻子上的缘故。

自古以来，人们就不断地探索物质组成的秘密。两千多年以前，古希腊的著名思想家德谟克利特 (Democritus，约前460—前370) 认为，万物都是由极小的不可分的微粒构成的，并把这种微粒叫做原子^①。在古希腊学者提出古原子论观点的同时期，我国古代的墨家学派也曾提出原子的观点，认为对物质进行分割时，分割到“端”就不能再分割下去了。这些古代的学说虽然没有实验根据，却包含着原子理论的萌芽。

科学技术发展到今天，人们逐渐揭开了物质组成的秘密。现在，原子的存在早已得到实验的证实。科学研究还表明，一方面，原子也不是不可再分的；另一方面，原子还能够结合成分子，

分子是具有一定化学性质的最小物质微粒。

实际上，构成物质的单元是多种多样的：或是原子（如金属），或是离子（如盐类），或是分子（如有机物）。在热学中，由于这些微粒做热运动时遵从相同的规律，所以在这里把它们统称为分子 (molecule)。

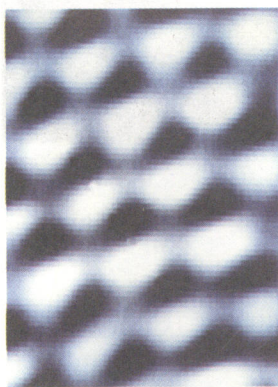


图 1.1-1 扫描隧道显微镜拍摄的石墨表面的原子

分子的大小 分子是很小的，不但用肉眼不能直接看到它们，就是在光学显微镜下也看不到。现在有了能放大几亿倍的扫描隧道显微镜，我们已经能用它观察到物质表面的分子。图 1.1-1 是我国科学家用扫描隧道显微镜拍摄的石墨表面原子的照片，图中每个亮斑都是一个碳原子。

怎样才能知道分子的大小呢？下面介绍一种粗略测定分子大小的方法。

^① 古代学者所说的原子与现代物理学中的原子不同，现代物理学中的原子是有结构的。

实验

用油膜法估测分子的大小

1. 选择油酸分子为估测对象

把很小体积的油酸滴在水面上时，水面上会形成一个油酸薄膜，薄膜是由单层油酸分子组成的^①，其示意图如图 1.1-2 所示。粗略地把油酸分子看做球状，测出油膜的厚度 d ，就是油酸分子的直径。

油膜的厚度等于水面上这一小滴油酸的体积跟它在水面上摊开的面积之比，因此，要估测油酸分子的直径，就要解决两个问题：一是获得极小的一滴油酸并测量其体积，二是测量这滴油酸在水面上形成的油膜面积。

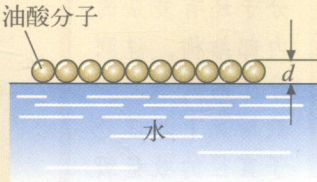


图 1.1-2 水面上单分子油膜的示意图

2. 如何获得极小的一滴油酸并测量它的体积

配制好一定浓度的油酸酒精溶液（例如 1 mL 油酸加酒精至 200 mL）。用注射器吸入一定体积的这种溶液，把它一滴一滴地滴入小量筒中，计下液滴的总滴数，便知道每 1 滴溶液的体积。由此，便可以计算出每 1 滴这种溶液中所含纯油酸的体积。

如果把 1 滴这样的溶液滴入水面，溶液中的酒精将很快挥发，水面上的油膜便是这滴溶液中的纯油酸所形成的。

3. 如何测量油膜的面积

先往边长 30 ~ 40 cm 的浅盘里倒入约 2 cm 深的水，然后将痱子粉或石膏粉均匀地撒在水面上。用注射器向水面滴入 1 滴油酸酒精溶液，油酸立即在水面散开，形成一块薄膜（图 1.1-3）。待薄膜形状稳定后，在浅盘上放一块玻璃板，将油酸膜的形状用彩笔描在玻璃板上。

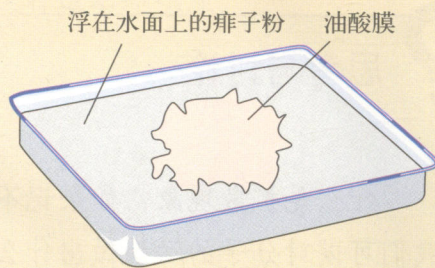


图 1.1-3 水面上形成一块油膜

将画有油酸薄膜轮廓的玻璃板放在坐标纸上，计算轮廓范围内正方形的个数（不足半个的舍去，多于半个的算一个）。这个数目乘以单个正方形的面积就得到油膜的面积，这样，根据 1 滴油酸的体积 V 和油膜面积 S ，就可以算出油膜的厚度 $d = \frac{V}{S}$ ，即油酸分子的直径。

物理学中测定分子大小的方法有许多种。用不同方法测出的分子大小并不完全相同，但数量级是一致的。测定结果表明，除了一些有机物质的大分子外，一般物质分子的直

^① 油酸的分子式为 $C_{17}H_{33}COOH$ ，它的一部分是羧基— $COOH$ ，对水有很强的亲合力而被水吸收，另一部分 $C_{17}H_{33}$ —对水没有亲合力，要冒出水面，因此油酸分子就一个个直立在水面上形成单分子厚度的油膜。



把分子看做小球，是对分子做出的简化模型。实际上，分子并不真的都是小球，分子还有复杂的内部结构。说到分子的大小，一般情况下知道分子直径的数量级就可以了。分子直径的数量级可以使我们了解分子是多么微小。

径的数量级为 10^{-10} m。例如水分子的直径约为 4×10^{-10} m，氢分子的直径约为 2.3×10^{-10} m。

阿伏加德罗常数 我们在化学课中已经学过，1 mol 的任何物质都含有相同的粒子数，这个数目用**阿伏加德罗常数** (Avogadro constant) N_A 来表示。1986 年用 X 射线法测得的阿伏加德罗常数是

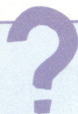
$$N_A = 6.022\ 136\ 7 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

通常可取

$$N_A = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

分子很小很小，所以常见物体中所含的分子数很多很多。1 cm³ 水中含有的分子数约为 3.3×10^{22} 个，假如全世界 60 亿人不分男女老少都来数这些分子，每人每秒数 1 个，也需要 17 万年左右的时间才能数完。把 1 g 酒精倒入贮存 100 亿立方米水的水库中，酒精分子均匀分布在水中以后，每 1 cm³ 水中的酒精分子仍然在 100 万个以上！

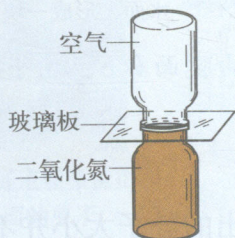
分子的热运动 我们在初中已经学过，一切物质的分子都在不停地做无规则的运动。随处可见的扩散现象，就是物质分子永不停息地做无规则运动的证明。



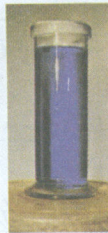
思考与讨论

扩散现象

什么是扩散现象？如果记不清楚了可以看看初中的物理课本。通过扩散现象，我们可以对分子的运动做出什么猜测？



甲 把空的广口瓶扣在装有棕色二氧化氮的瓶子上的玻璃板上，抽去玻璃板，过一会儿上面的瓶中也出现了棕色气体。



乙 蓝色的硫酸铜溶液逐渐扩散到无色的清水中

图 1.1-4 这些现象说明了什么？

温度越高,扩散进行得越快。这表示温度越高,分子的无规则运动就越剧烈。正因为分子的无规则运动跟温度有关系,所以通常把分子的这种运动叫做**热运动 (thermal motion)**。制造晶体管和集成电路时,要在某些纯净物质中掺入其他元素,这样的工艺就是在高温条件下通过扩散完成的。

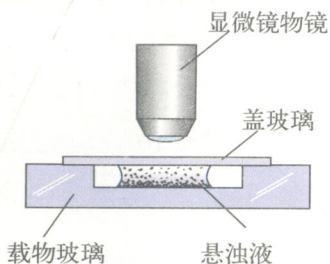
布朗运动

1827年英国植物学家布朗(R. Brown, 1773—1858)在研究植物授粉的过程中,无意间在显微镜下发现,悬浮在水中的花粉在不停地做无规则的运动。这是不是因为植物有生命而造成的?布朗用当时保存了上百年的植物标本,取其微粒进行实验,并另取一些没有生命的无机物粉末进行实验。布朗发现,不管什么微粒,只要足够小,就会发生这种运动,而且微粒越小,运动就越明显。这说明这种运动不是生命现象。为了纪念布朗的这个发现,人们把液体或气体中悬浮微粒的无规则运动叫做**布朗运动 (Brown motion)**。

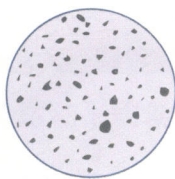
实验

观察布朗运动

把墨汁用水稀释后取出一滴放在显微镜下观察(图1.1-5),可以看到悬浮在液体中的小炭粒在不停地做无规则运动,炭粒越小,这种运动越明显。



甲 实验装置示意图



乙 显微镜下看到的微粒

图 1.1-5 观察布朗运动

在显微镜下追踪一个小炭粒的运动,每隔 30 s 记录一次炭粒的位置,然后用直线把这些位置依次连接起来,就得到类似图 1.1-6 所示的炭粒位置的连线。可以看出,炭粒的运动是无规则的。实际上,就是在短短的 30 s 内,做布朗运动的微粒的运动也是极不规则的。

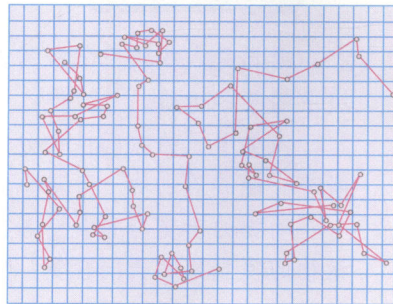
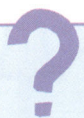


图 1.1-6 显微镜下看到的三颗微粒运动位置的连线



思考与讨论

布朗运动的原因

图 1.1-6 中所示的几个小颗粒的运动的情况并不相同。想想看, 布朗运动产生的原因可能是什么?

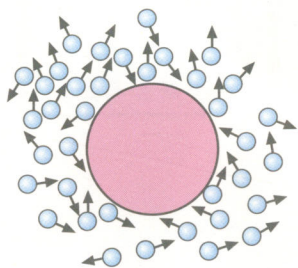


图 1.1-7 液体分子对微粒撞击的不平衡性引起了布朗运动

起初, 人们认为布朗运动是由外界影响, 如振动、液体的对流等引起的。但实验表明, 在尽量排除外界影响的情况下, 布朗运动仍然存在, 只要微粒足够小, 在任何悬浊液中都可以观察到布朗运动, 而且可以连续观察许多天甚至几个月, 这种运动也不会停下来。可见布朗运动的原因不在外界, 而在液体内部。

液体(或气体)是由许许多多分子组成的。分子不停地做无规则的运动, 不断地撞击悬浮于其中的微粒。图 1.1-7 描绘了一颗微粒受到分子撞击的情景。微粒足够小时, 来自各个方向的液体分子的撞击作用是不平衡的。在某一瞬间, 微粒在某个方向受到的撞击作用较强, 致使微粒开始沿这个方向运动; 在下一瞬间, 微粒在另一方向受到的撞击作用较强, 致使微粒又开始向其他方向运动。这样, 就引起了微粒的布朗运动。

可见, 液体(或气体)分子永不停息的无规则运动是产生布朗运动的原因。做布朗运动的微粒不是单个分子, 它是由成千上万个分子组成的。微粒的布朗运动并不是单个分子的运动。但是, 微粒的布朗运动的无规则性, 却反映了液体内部分子运动的无规则性。



科学漫步

嗅 觉

嗅觉是人体感受气味的器官在接触气体分子后产生的感觉。我们依靠嗅觉可以随时感知环境中的某些物质。

人类嗅觉的敏感性和分辨能力都相当高。一般人可以嗅出每升空气中 4×10^{-5} mg 的人造麝香, 能够辨别约一万种不同物质的气味。某些疾病, 如感冒, 会降低嗅觉的敏感性。

动物的嗅觉与觅食行为、性行为、攻击行为、定向活动以及各种通讯行为关系密切。许多动物的嗅觉感受器同视觉、听觉感受器一样, 属于远程感受器。如狼根据气味捕食, 被捕食者也常通过辨认气味而躲避捕食者。哺乳动物母子间的辨认也依靠嗅觉, 母畜凭借特殊的气味辨认、照料幼畜, 幼畜也借助气味将其生母与其他雌畜相区别。实验表明, 切除某些雌性动物的

嗅觉器官会导致它们残害自己的后代，而把雌狗的尿液涂在刚出生的虎仔身上时，雌狗便会给它们喂奶。由此可知，嗅觉器官在许多动物的生活中具有重要的作用。

关于嗅觉，你还知道哪些事情？

问题和练习

1. 如果能够把分子一个挨一个地排列起来，大约需要多少个分子才能排到 1 m 的长度？
2. 在 8 g 氧气中有多少个氧分子？
3. 为什么悬浮在液体中的颗粒越小，它的布朗运动越明显？
4. 为什么说布朗运动的无规则性反映了液体内部分子运动的无规则性？设想液体分子的运动是有规则的，例如在任何时刻所有分子都向某个方向运动，下一时刻又一起向另一个方向运动，这样还会产生布朗运动吗？

二、物体的内能

分子的动能 温度

像一切运动着的物体一样，做热运动的分子也具有动能。组成物体的分子是大量的，在同一温度下，物体里各个分子运动的速率是不同的，有的大，有的小，即使相同物质中的分子，它们的动能也不相同。由于分子在不停地做无规则的运动，它们会相互碰撞。发生碰撞的分子，它们的动能还会变化。因此，在热现象的研究中，我们所关心的不是每个分子的动能，而是物体里所有分子的动能的平均值。这个平均值叫做分子热运动的平均动能。

温度升高，物体分子的热运动加剧，分子热运动的平均动能也增加。温度越高，分子热运动的平均动能越大。温度越低，分子热运动的平均动能越小。**温度是物体分子热运动平均动能的标志。**

分子间的相互作用

扩散现象和布朗运动不但说明分子在不停地做无规则的运动，同时也说明分子间是有空隙的，否则分子便不能运动了。气体容易被压缩，水和酒精混合后的体积小于两者原来体积之和（图 1.2-1），说明各种物质的分子之间都有空隙。

分子间虽然有空隙，大量分子却能聚集在一

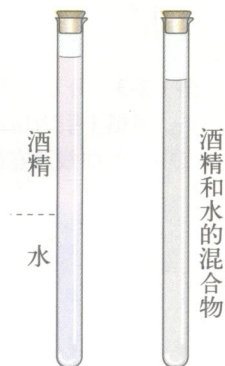


图 1.2-1 水和酒精混合后的体积变小

我们在前面讲述分子的大小时，认为固体分子和液体分子是一个挨一个地排列的，那只是为估算分子大小的数量级而做的设想。



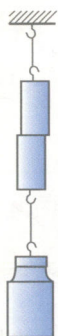


图 1.2-2 分子之间有引力

起形成固体或液体,说明分子之间存在着引力。用力拉伸物体,物体内要产生反抗拉伸的弹力,就是因为分子间存在着引力。把两块纯净的铅压紧,由于分子间的引力,两块铅就合在一起,甚至下面吊一个重物也不能把它们拉开。将两块光学玻璃的表面磨得非常光滑,施加一定的压力它们就可以黏合在一起,这也是利用了分子间的引力。

分子间有引力,而分子间又有空隙,这说明分子间还存在着斥力,正是这种斥力使相邻的分子不会直接“接触”。分子间斥力的作用距离很小,只有当分子十分靠近时才表现出来。用力压缩物体,物体内要产生反抗压缩的弹力,这种弹力就是物体内大量分子间的斥力的宏观表现。

研究表明,分子间同时存在着引力和斥力,它们的大小都跟分子间的距离有关。图 1.2-4 的两条虚线分别表示两个分子间的引力和斥力随距离变化的情形。实线表示引力和斥力的合力,即实际表现出来的分子间的作用力随距离变化的情形。

我们看到,分子间的引力和斥力都随着分子间距离的增大而减小。当两分子间的距离等于某值 r_0 时,分子间的引力与斥力相互平衡,分子间的作用力为 0。 r_0 的数量级约为 10^{-10} m。某分子

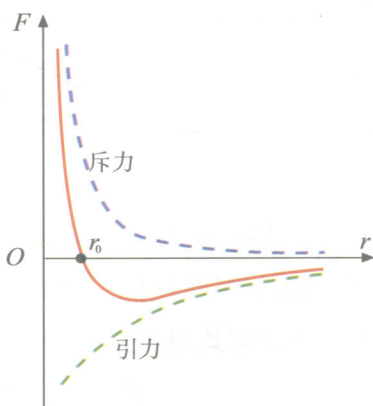


图 1.2-3 分子间作用力跟距离的关系。习惯上引力用负值表示,所以代表引力的曲线画在横轴的下方。

子与相邻分子的距离为 r_0 时,它所处的位置叫做平衡位置。当分子间的距离小于 r_0 时,引力和斥力虽然都随着距离的减小而增大,但是斥力增大得更快,因而分子间的作用力表现为斥力。当分子间的距离大于 r_0 时,引力和斥力虽然都随着距离的增大而减小,但是斥力减小得更快,因而分子间的作用力表现为引力。当分子间距离的数量级大于 10^{-9} m 时,引力和斥力都变得很小,分子力已经可以忽略。