

通过理想气体模型认识温度是分子平均动能的标志*

何春生

(北京市第八十中学 北京 100102)

(收稿日期:2019-05-29)

摘要:温度越高,分子运动越剧烈,同种物质的分子平均动能越大.为什么温度相同时不同种类的分子平均动能也相等呢?笔者引导学生运用分子动理论知识,结合理想气体模型和弹性碰撞模型,从微观和统计角度,经过推导和分析认识到了温度相同的理想气体分子平均动能相等.

关键词:理想气体模型 温度 分子平均动能

高中阶段的物理模型只考虑分子的平动,也就是说分子动能即为分子的平动动能,本文亦同.

1 问题的提出

温度是分子平均动能的标志(人教版用词)或量度(教科版用词).对同种物质,温度越高,分子运动越剧烈,分子的平均动能越大.但对不同种物质,如何比较分子的平均动能呢?既然说温度是分子平均动能的标志,那就是说温度相同时不同种类的分子平均动能也相等.这个结论是如何得到的呢?高中学生受认知水平的限制,很难在这个学段把这个问题研究清楚.

笔者在教学过程中,通过建构理想气体模型,结合高中学生已经掌握的弹性碰撞模型,使用动量和能量的相关知识,让学生认识到,分子质量不同的理想气体温度相同时分子的平均动能也相等.

2 建构理想气体模型

从学生对实际气体的微观认识入手,抓住主要因素,忽略次要因素,建构理想气体模型.

(1) 理想气体微观结构

气体很容易被压缩,实验表明,气体的体积约为同种分子组成的相同质量的液体体积的1 000倍.可见气体分子间距离比分子本身的线度大得多.据此可将常温常压下的气体分子理想化,忽略分子的

形状和大小,将气体分子视为质点.

(2) 理想气体分子之间的相互作用

分子间存在相互作用的引力和斥力.引力和斥力都随分子间距离的增加而减小,但斥力减小得更快.当 $r < r_0$ 时,分子间表现为斥力,当 $r > r_0$ 时,分子间表现为引力.但当分子间距离 $r \gg r_0$ 时,分子间相互作用力可以忽略,如图1所示.又因为分子在永不停息地做无规则运动,气体分子之间在不停地发生碰撞.据统计,在标准状况下,一个气体分子在1 s内与其他分子碰撞可达65亿次之多.碰撞时分子运动状态瞬间发生改变,分子间作用力较大.据此可将分子间的相互作用理想化,除碰撞外,分子间相互作用不计.

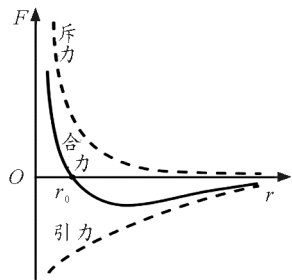


图1 分子之间相互作用力随距离的变化

(3) 理想气体分子与分子之间的碰撞过程

气体分子碰撞前后,分子间距离都比较远.从分子势能随距离变化的图像上(图2),我们不难看出,气体分子碰撞前后,分子势能都可以视为零.因此碰

* 北京市朝阳区何春生特级教师工作室的研究成果.

撞前后,发生碰撞的分子的总动能不变.这和发生弹性碰撞的情况相同.因此我们可以将气体分子间碰撞视为弹性碰撞.

这样就将常温常压下的气体做了理想化处理,建立了理想化模型.这就是理想气体模型.

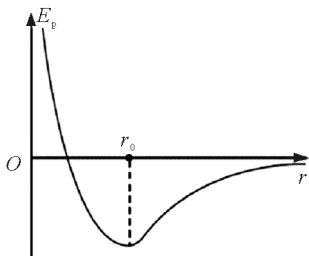


图2 分子势能随距离的变化

3 温度是理想气体分子平均动能的标志

理想气体分子之间的能量转移是通过分子间频繁的碰撞来实现的.直接研究三维碰撞对高中学生来说,难度较大.先简化模型,假设分子只能在一条直线上运动.探究分子在一维直线发生正碰时,能量转移和哪些因素有关.

3.1 两分子追碰

如图3所示,设A和B两类理想气体分子的分子质量分别为 m_A 和 m_B ,A类分子中 A_1 和B类分子中的 B_1 在一条直线上运动,它们的速度分别为 v_{A11} 和 v_{B11} , A_1 追上 B_1 发生正碰,碰撞后它们的速度分别为 v_{A12} 和 v_{B12} .因 A_1 和 B_1 间发生的碰撞是弹性碰撞,所以有

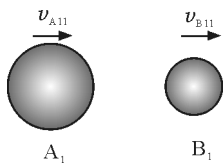


图3 两分子追碰

$$m_A v_{A11} + m_B v_{B11} = m_A v_{A12} + m_B v_{B12} \quad (1)$$

$$\frac{1}{2} m_A v_{A11}^2 + \frac{1}{2} m_B v_{B11}^2 = \frac{1}{2} m_A v_{A12}^2 + \frac{1}{2} m_B v_{B12}^2 \quad (2)$$

碰撞过程中 A_1 分子损失的动能 ΔE_{A1} 等于 A_1 碰撞前动能减去 A_1 碰撞后动能,即

$$\Delta E_{A1} = \frac{1}{2} m_A v_{A11}^2 - \frac{1}{2} m_A v_{A12}^2 \quad (3)$$

联立式(1)~(3)解得

$$\Delta E_{A1} = \frac{4m_A m_B}{(m_A + m_B)^2}$$

$$\left[\frac{1}{2} m_A v_{A11}^2 - \frac{1}{2} m_B v_{B11}^2 + \frac{1}{2} (m_A - m_B) v_{A11} v_{B11} \right] \quad (4)$$

3.2 两分子对碰

如图4所示,设另一速度大小、方向均与 A_1 相同的分子 A_2 ,与另一速度大小与 B_1 相同但速度方向与 B_1 相反的分子 B_2 发生正碰(对碰),将 A_2 分子的速度记为 v_{A21} , B_2 分子的速度记为 v_{B21} .

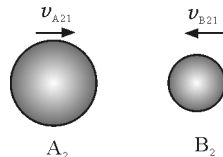


图4 两分子对碰

类比 A_1 和 B_1 的碰撞,易解得 A_2 与 B_2 分子碰撞前后, A_2 损失的动能为

$$\Delta E_{A2} = \frac{4m_A m_B}{(m_A + m_B)^2} \left[\frac{1}{2} m_A v_{A21}^2 - \frac{1}{2} m_B v_{B21}^2 + \frac{1}{2} (m_A - m_B) v_{A21} v_{B21} \right] \quad (5)$$

3.3 上述两对追碰和对碰的两个A类分子损失的动能之和

3.1追碰和3.2对碰过程中,两个A类分子损失的动能之和应为 $\Delta E_{A1} + \Delta E_{A2}$.又因为 v_{A11} 与 v_{A21} 大小和方向都相同, v_{B11} 与 v_{B21} 大小相等,方向相反,所以 ΔE_{A1} 中的中括号里的第三项和 ΔE_{A2} 中的中括号里的第三项满足

$$\frac{1}{2} (m_A - m_B) v_{A11} v_{B11} = -\frac{1}{2} (m_A - m_B) v_{A21} v_{B21}$$

所以

$$\Delta E_{A1} + \Delta E_{A2} = \frac{4m_A m_B}{(m_A + m_B)^2}$$

$$\left[\left(\frac{1}{2} m_A v_{A11}^2 + \frac{1}{2} m_A v_{A21}^2 \right) - \left(\frac{1}{2} m_B v_{B11}^2 + \frac{1}{2} m_B v_{B21}^2 \right) \right] \quad (6)$$

令 $k = \frac{4m_A m_B}{(m_A + m_B)^2}$,则

$$\Delta E_{A1} + \Delta E_{A2} =$$

$$k \left[\left(\frac{1}{2} m_A v_{A11}^2 + \frac{1}{2} m_A v_{A21}^2 \right) - \left(\frac{1}{2} m_B v_{B11}^2 + \frac{1}{2} m_B v_{B21}^2 \right) \right] \quad (7)$$

可见在这样速率分别相等的一对追碰和对碰

中, A类两分子损失的动能之和, 等于 k 倍的 A 分子碰撞前的总动能减去 B 分子碰撞之前的总动能。

3.4 大量的 A 类分子和 B 类分子发生碰撞

(1) 对大量分子而言, 速度大小为 v_{A11} 的 A 类分子和速度大小为 v_{B11} 分子发生追碰和对碰的几率相等. 所以具有这两个速率的分子发生碰撞, A 类分子损失的动能等于 k 倍的发生碰撞的 A 分子的总初动能减去 B 类分子的总初动能。

(2) 因为 v_{B11} 可以为任意值, 所以速度大小为 v_{A11} 的 A 类分子与任意速率的 B 类分子发生碰撞, A 类分子损失的动能之和等于 k 倍的所有参与碰撞的 A 分子动能之和减去参与碰撞的 B 类分子动能之和。

(3) 再因为 v_{A11} 也是任意的, 所以任意速率的 A 分子与 B 分子发生碰撞, A 类分子损失的动能之和等于所有参与碰撞的 A 类分子的动能总和减去 B 类分子的动能总和. 所以只要参与碰撞的分子数量足够多, 就可以认为在所有 A 类分子和 B 类分子的碰撞中, A 类分子损失的动能等于 k 倍的参与碰撞的所有 A 类分子总动能减去参与碰撞的 B 类分子的动能之和。

3.5 若只考虑一维运动 对理想气体温度是分子平均动能的标志

由上面的分析不难看出, 如果只考虑一维碰撞, 若 v_{A1} 和 v_{B1} 分别表示 A 和 B 分子碰撞前的速率, 则 A 和 B 两类气体分子碰撞中 A 分子损失的动能可以表示为

$$\sum \Delta E_A = k \left(\sum \frac{1}{2} m_A v_{A1}^2 - \sum \frac{1}{2} m_B v_{B1}^2 \right) \quad (8)$$

等式两边同时除以碰撞的次数, 则有

$$\overline{\Delta E_A} = k(\overline{E_{kA1}} - \overline{E_{kB1}}) \quad (9)$$

式中 $\overline{E_{kA1}}$ 和 $\overline{E_{kB1}}$ 分别表示 A 和 B 分子只参与一维运动时的平均初动能。

可见, 如果 A 分子的平均动能和 B 分子的平均动能相等, 则在 A 和 B 分子发生碰撞时, A 类分子损失动能的平均值为零. 即 A 和 B 两类理想分子热交换的总量是零. 而在宏观现象中, 只有两个物体温度相等, 它们之间的热交换才满足这个规律. 所以宏观表现为温度相同的两类理想气体, 它们分子的平均动能相等. 所以温度可以看做分子平均动能的标志。

3.6 三维运动下的理想气体温度也是分子平均动能的标志

上述结论是只考虑理想气体分子只参与一维运动和碰撞得出的. 实际上理想气体分子参与的是三维的运动和碰撞. 一维碰撞中的速度可以看做理想气体的速度在这个维度上的速度分量. 利用速度的合成与分解, 通过更复杂的统计运算, 也可以得到

$$\overline{\Delta E_A} \propto (\overline{E_{kA0}} - \overline{E_{kB0}}) \quad (10)$$

式中 $\overline{E_{kA0}}$ 和 $\overline{E_{kB0}}$ 分别表示 A 和 B 分子的平均初动能. 即对理想气体, 温度相同时不同类型的气体分子平均动能相等。

4 总结与反思

(1) 学生对问题的认识是不断发展的, 随着学生认知水平逐步提升, 学生对问题的认识也会逐渐深入, 这也就是学习的进阶. 在阶段性的教学中, 教学也应该是开放式的, 即既要提供适合学生认知的教学手段和教学层级, 也要提供开放式的接口, 告诉学生有些内容和环节, 目前我们还不能进行深入研究, 等条件成熟了, 我们再逐步学习和探究。

(2) 通过物理模型研究物理问题是物理学的重要方法和手段. 模型建构是科学思维的重要组成部分. 培养学生建构和应用模型的能力, 也是学生学习物理课程的重要目标之一. 教学中应该让学生多一些体验和感受。

(3) 运动和相互作用观、能量观是重要的物理观念. 教学中应该注意促进学生物理观念的形成. 虽然在热学的研究和教学中, 研究大量分子行为使用的是统计规律, 但研究单个分子的运动时, 仍然使用力和运动与能量等经典物理知识. 使用碰撞探讨温度和分子平均动能的关系, 既在宏观和微观物理量之间示范性搭建了一座桥, 也有利于学生相关物理观念的形成。

参考文献

- 1 赵凯华, 罗蔚茵. 新概念物理教程热学(第2版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998
- 2 张静, 郭玉英, 姚建欣. 论模型与建模在高中物理课程中的重要价值[J]. 物理教师, 2014(6): 4 ~ 5
- 3 何春生, 翟小铭. “万有引力定律的应用”建模教学的课堂实践[J]. 中学物理教学参考, 2016(1): 13 ~ 16