

大学物理(下)

华中科技大学

张智

zzhang@hust.edu.cn

参考书

物理学 (美) D. 哈里德 R. 瑞斯尼克

大学物理同步辅导 范淑华等 (华中科技大学)

普通物理学(第六版) 程守洙 江之永 (上海交大)

大学物理学(第二版) 张三慧 (清华大学)

定性与半定量物理学 赵凯华 (北京大学)

素质教育在美国 黄全愈

hyperphysics网站:

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>



- 普通高等教育“十一五”规划教材
- 普通高等院校物理精品教材

大学物理

范淑华 项林川 主编

(上)

华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>



- 普通高等教育“十一五”规划教材
- 普通高等院校物理精品教材

大学物理

杨晓雪 主编

(下)

华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

大学物理习题册

华中科技大学大学物理教学中心 编

DAXUE WULI XITICE

华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>



- 普通高等教育“十一五”规划教材
- 普通高等院校物理精品教材



大学物理同步辅导

范淑华 朱佑新 主编

华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

2018-2019(1)

第一学期

明

德

厚

学

日 星期 周次	一	二	三	四	五	六	日
					31注册	1注册	2注册
1	9.3 开学	4	5	6	7	8	9
2	10	11	12	13	14	15	16
3	17	18	19	20	21	22	23
4	24中秋	25	26	27	28	29	30
5	10.1 国庆	2国庆	3国庆	4	5	6	7
6	8	9	10	11	12	13	14
7	15	16	17	18	19	20	21
8	22	23	24	25	26	27	28
9	29	30	31	11.1	2	3	4
10	5	6	7	8	9	10	11
11	12	13	14	15	16	17	18
12	19	20	21	22	23	24	25
13	26	27	28	29	30	12.1	2
14	3	4	5	6	7	8	9
15	10	11	12	13	14	15	16
16	17	18	19	20	21	22	23
17	24	25	26	27	28	29	30
18	31	1.1 元旦	2	3	4	5	6
19	7	8	9	10	11	12	13
20	14	15	16	17放假			

考试

有关事项

作业:

- 1) 做作业用习题册
- 2) 每周四交作业
- 3) 作业缺1/3及以上者无考试资格,
综合成绩一律按零分计。 (校教[2009]93号)
(校教[2010]52号)
- 4) 每个班的课代表和班长留联系方式

**2017级《大学物理(下)》课代表、班长联系电话
(2018-2019学年度第1学期)**

班号		姓名	电话	Email	QQ
自实 1701	班长				
	课代表				
信卓 1701	班长				
	课代表				

请发电子版到phys109@126.com

有关事项

答疑时间、地点：

单周一、三 } 晚 7 : 30 — 9 : 30
双周二、四 }

西五楼116

东九楼A210

有关事项

成绩：

平时——30% （作业等20分，网上测验10分）

考试——70% （期末，卷面为100分，闭卷）

公共邮箱：

网址：www.126.com

邮箱：phys109@126.com (109109)

◆网上测验：

热学、振动与波动： 5分 （第9-10周）

波动光学： 5分 (第14-15周)

每部分均只能考一次。用上学期的密码登陆。

本学期教学内容、教材及习题册

- 第三~六篇：热学、振动与波动、波动光学、量子理论、激光和半导体、核物理
- 作业采用习题册。

大学物理(二)学时分配

内容	总学时（64）
第 9章 气体运动论	6学时
第10章 热力学基础	8学时
第11章 振动与波动	16学时
第12章 几何光学简介	0
第13章 波动光学	16学时
第14、15章 量子力学	14学时
第16章 激光和半导体	2学时
第17章 原子核物理简介	2学时

本学期必做演示实验

- ◇伽尔顿板
- ◇麦克斯韦速率分布
- ◇弹簧纵波演示
- ◇音叉演示拍现象
- ◇激光垂直振动合成
- ◇弦驻波
- ◇电磁波演示
- ◇单缝衍射
- ◇双缝干涉
- ◇光栅色散
- ◇起偏与检偏
- ◇方解石的双折射
- ◇偏振光的干涉

须在课堂上完成《必做演示实验目录》中所列的演示实验。期末卷面占6分，2个小题。

第三篇 热学

(Heat)



引言:

研究内容:

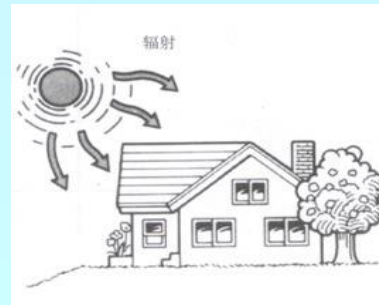
热学是研究物体热运动的性质和规律的学科。

热运动——物体中分子或原子的无规则运动。

研究对象:

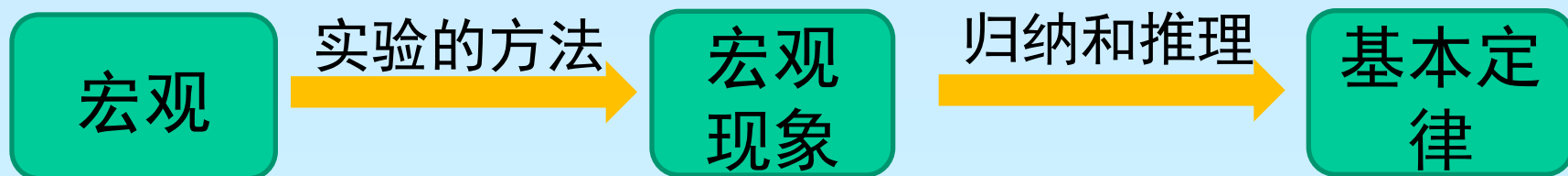
由大量**微观**粒子组成的**宏观**物体，

有固体，液体，**气体**，等离子体，辐射场……



研究方法：

宏观理论（热力学）：实验的方法，通过归纳和推理。



微观理论（统计物理）：统计的方法，集体效应。



初级形式称为气体动理论

本篇以研究理想气体的热运动为主。

第9章 气体动理论

Kinetic Theory of Gases

第1节 热力学系统和平衡态

第2节 理想气体状态方程与微观模型

第3节 理想气体的压强与温度

第4节 能均分定理 理想气体的内能

第5节 气体分子的速度和能量分布

第6节 范德瓦尔斯方程

第7节 分子的平均碰撞次数 平均自由程

第8节 偏离平衡态

几个基本概念

a. 系统与外界

1) 热力学系统（简称**系统**）

由大量微观粒子所组成的宏观物体。

2) 系统的外界（简称**外界**）

能够与所研究的系统发生相互作用的其它物体。



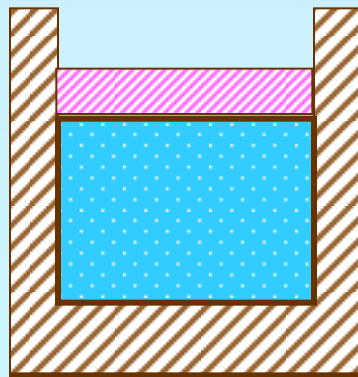
b. 系统分类

与外界**没有**任何
相互作用



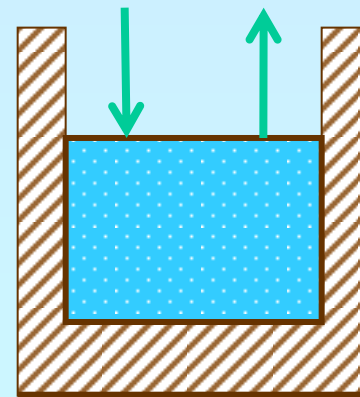
孤立系统

与外界**有**能量交换
但**没有**物质交换



封闭系统

与外界既**有**能量交换
又**有**物质交换

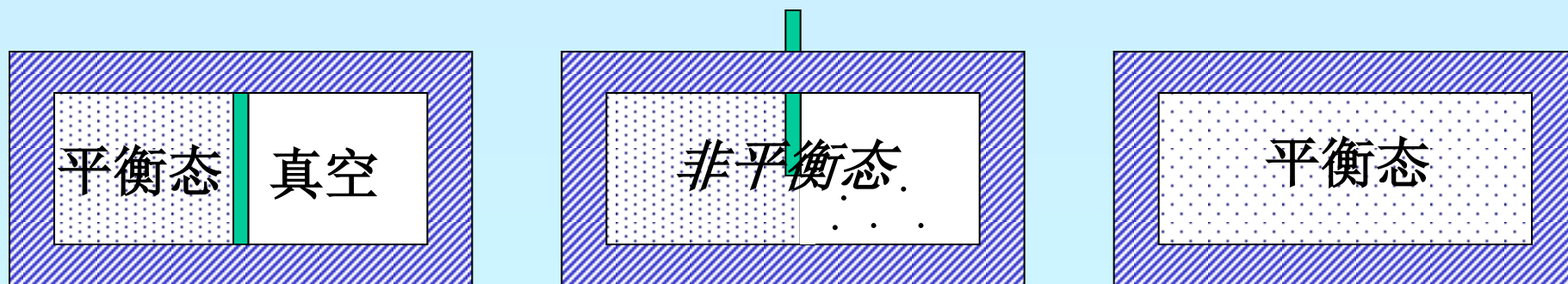


开放系统

c. 热力学平衡态 —— 理想状态

一个系统在**不受外界影响**的条件下，若其宏观性质不再随时间变化，则此系统处于**热力学平衡态**。

例：平衡态与非平衡态(气体自由膨胀过程的初态、末态及中间状态)。



注意：平衡态实质上是一种热动平衡。

是宏观上的寂静状态，组成系统的微观粒子仍处于不停的无规运动之中，只是它们的统计平均效果不随时间变化，因此热力学平衡态是一种动态平衡，称之为**热动平衡**。

d. 准静态过程

系统： 状态A

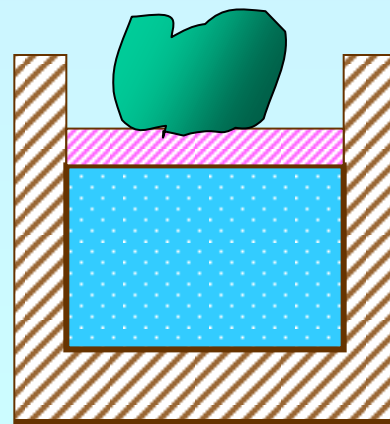
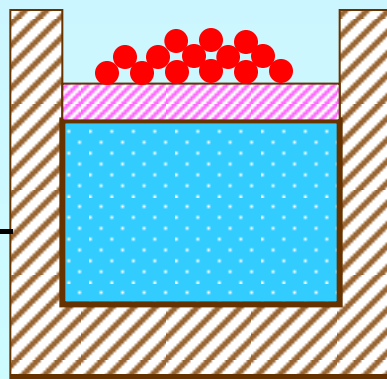
（系统经历了一个热力学过程（简称过程）

状态B

若系统在变化过程中经历的每一状态都无限接近于平衡态，则此过程称为准静态过程。否则，非准静态过程。

例：考虑汽缸中气体的压缩过程。当活塞运动压缩气体时，系统在整个压缩过程中经历了一系列的非准静态过程。

准静态过程



当然，实际的热力学过程中任一状态都不是严格意义上的平衡态。

e. 状态参量、状态方程、状态图 ——平衡态的描述

状态参量 —— 确定平衡态的宏观性质的物理量。

常用的状态参量有五类：

几何参量（如：气体体积 V ）

力学参量（如：气体压强 P ）

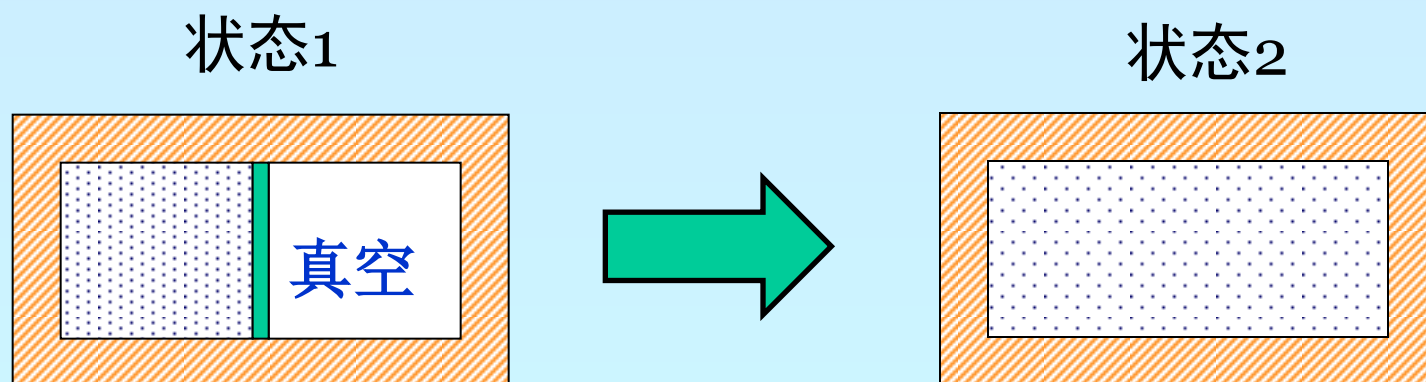
热学参量（如：气体温度 T ）

化学参量（如：混合气体各化学组
分的质量 m 和摩尔数 μ 等）

电磁参量（如：电场和磁场强度等）

状态方程

当系统处在平衡态时，其状态参量满足一定的关系，
状态参量满足的关系式称为状态方程。



质量为 m ，分子数为 N 的某种
气体处于平衡态时的状态参量：

压强： p

体积： V

温度： T

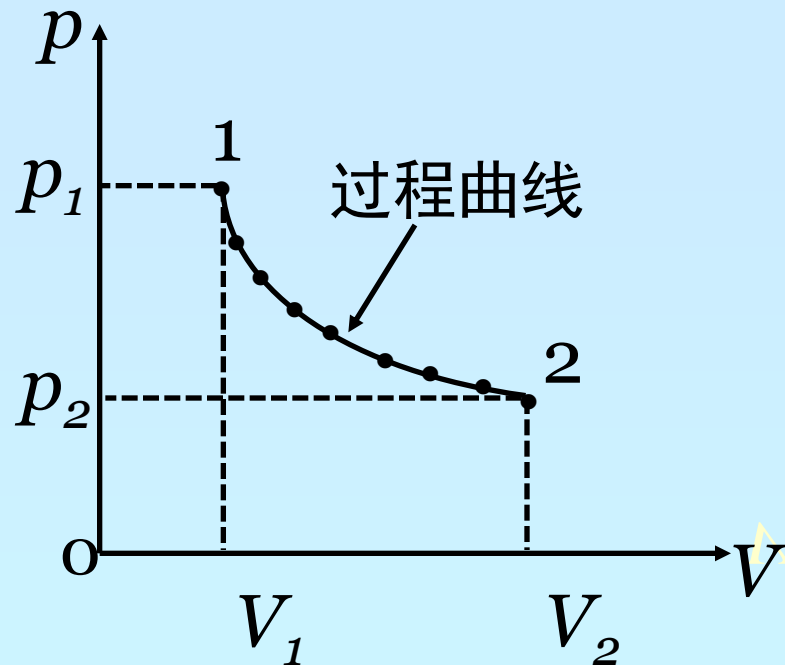
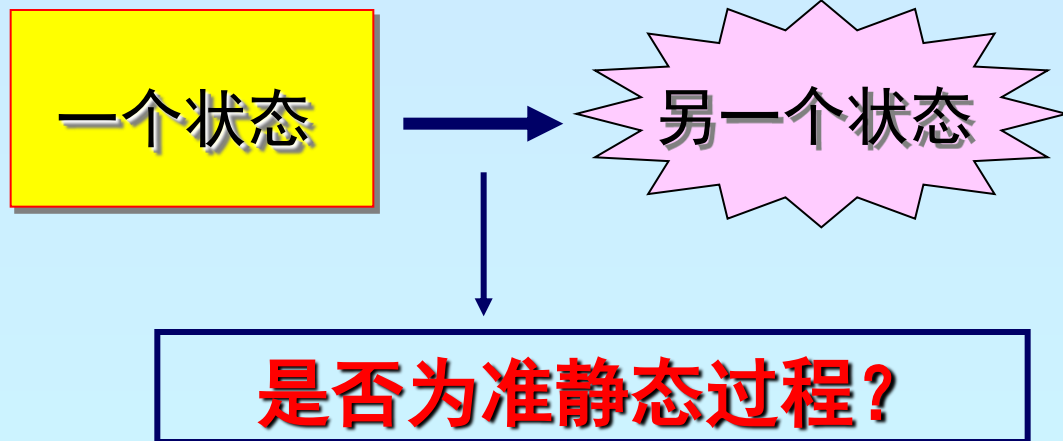
平衡状态下：

$$f(p, V, T) = 0$$

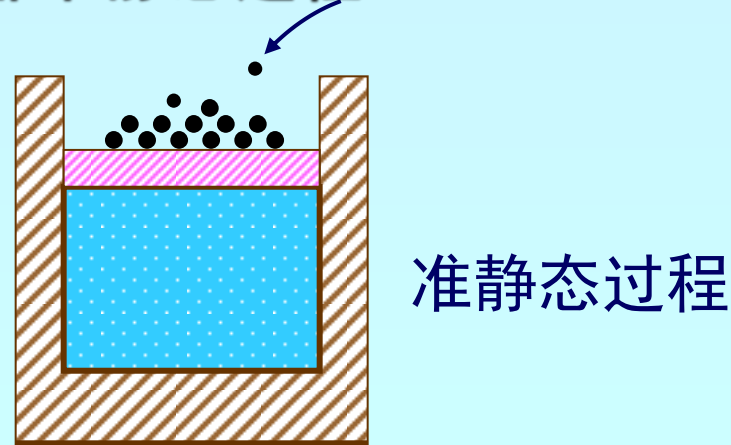
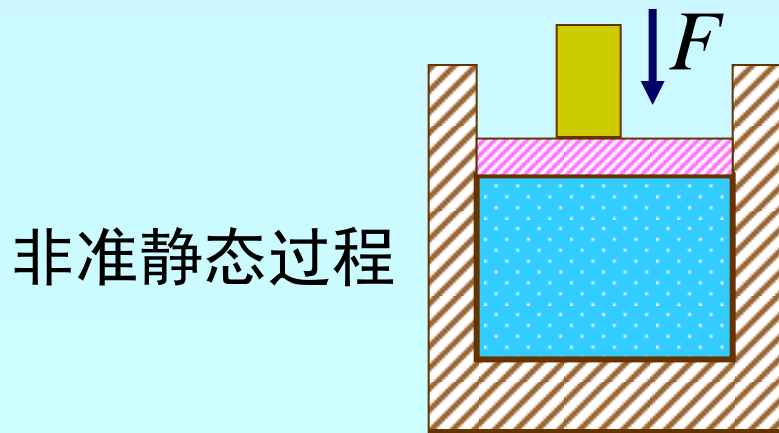
状态方程

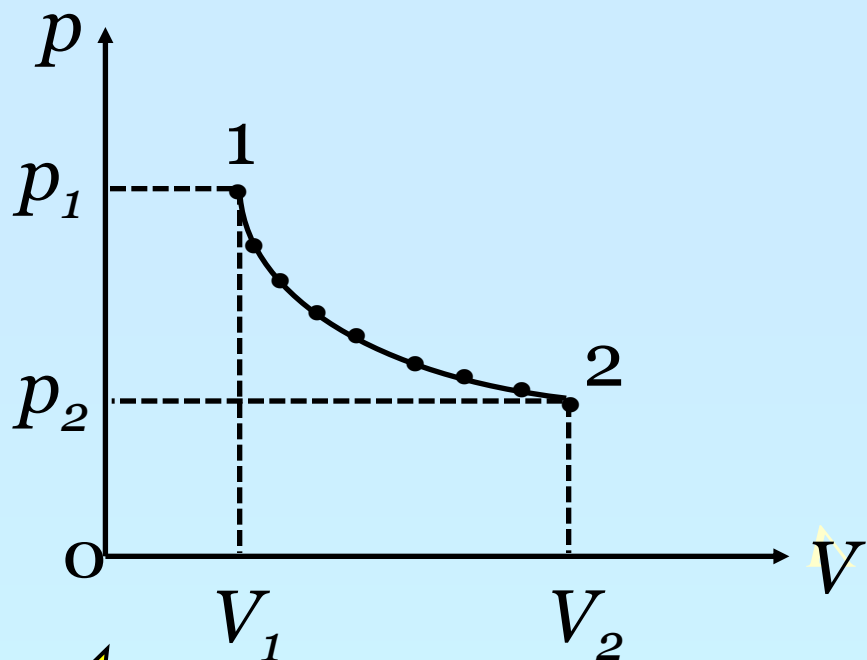
状态图 —— 独立的状态参量为坐标构成的空间

常用状态图有 P — V 图, P — T 图, V — T 图。

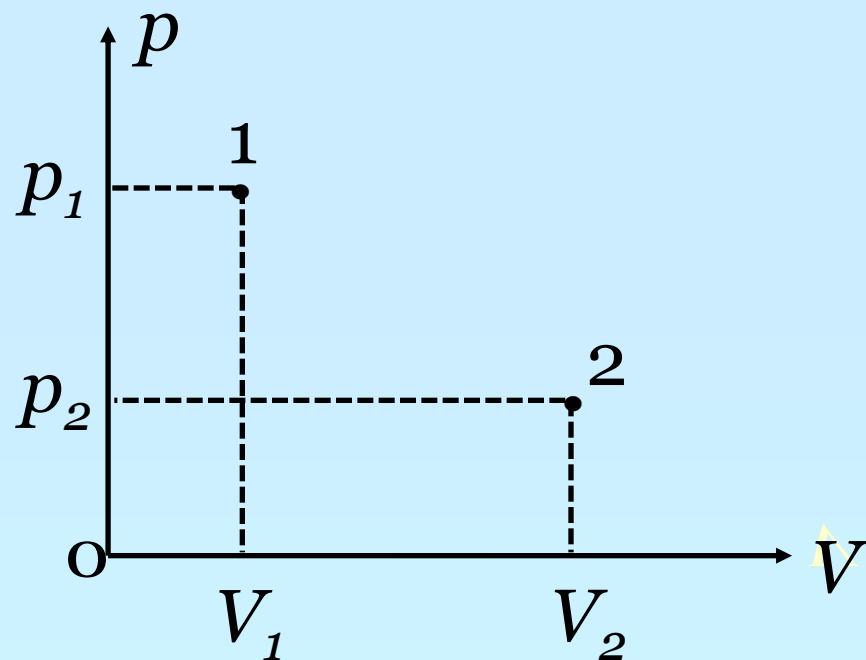


若系统在变化过程中经历的每一状态都无限接近于平衡态, 则此过程称为**准静态过程**; 否则为**非准静态过程**。





准静态过程曲线



非准静态过程

注意:

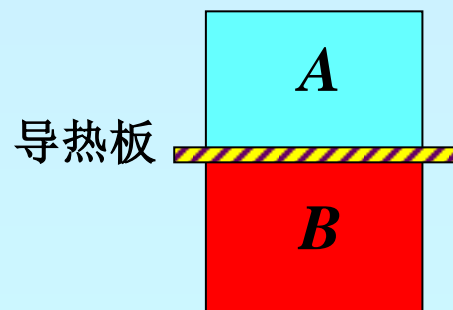
- 1⁰ 实际的热力学过程中任一状态都不是平衡态。
- 2⁰ 一些极缓慢进行的过程可近似视为准静态过程。
- 3⁰ 非平衡态不能用状态参量描述。
- 4⁰ 非平衡过程也不能用状态曲线描述。

f. 温度与热力学第零定律

热接触：有热量交换的两个系统间的相互作用。

系统A和B处在各自的平衡态 $\xrightarrow{\text{热接触}}$ 状态都变化
 $\xrightarrow[\text{最终}]{\text{热交换}}$ **热平衡** (都到达新的平衡态, 且不再变化)

标志：两系统之间的热交换停止



实验证明：

如果两个热学系统中的每一个都与第三个系统的某一平衡态处于热平衡，则此两系统必定也处于热平衡。这个结论称为热力学第零定律。

热力学第零定律：如果两个热学系统中的每一个都与第三个系统的某一平衡态处于热平衡，则此两系统必定也处于热平衡。

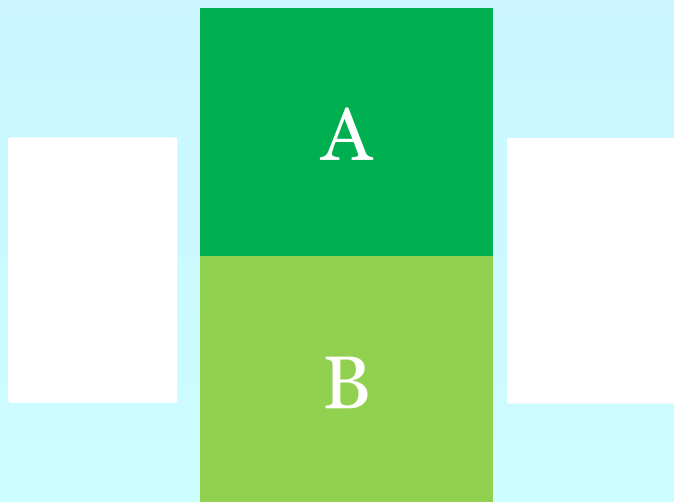


处于热平衡的两系统具有共同的**宏观状态参量**



温度(T)

一切互为热平衡的系统，都具有相同的温度。



A、B两系统发生热接触时：

- 热量由A传给B $T_A > T_B$
- 热量由B传给A $T_A < T_B$
- 无热量传递(**热平衡**) $T_A = T_B$

说明：

- (1) 温度是**热学**中特有的物理量，它决定一系统是否与其它系统处于**热平衡**。
- (2) 温度的概念与人们日常对温度的理解（温度——冷热程度）是一致的。

热力学第零定律还是制造温度计的依据。

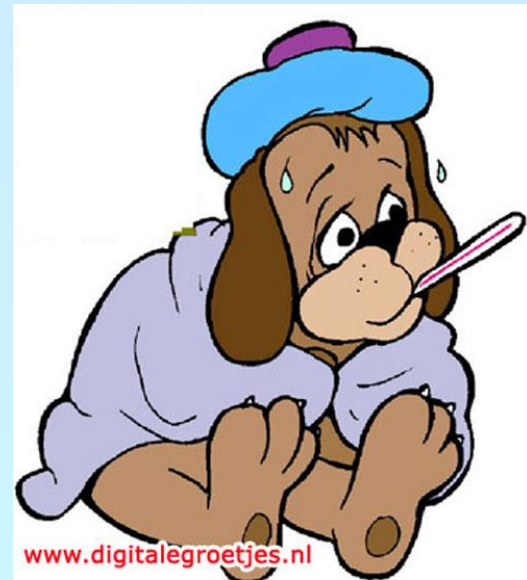
温标 —— 温度的数字表示法

常用的两种温标：

摄氏温标：水的三相点 $t = 0^{\circ}$

热力学温标：与任何物质的性质无关

$$T = t + 273.15\text{K}$$



SI
单位制

气体动理论

第9章的主要研究对象：理想气体

1. 理想气体状态方程

一定质量的气体在温度不变时, 压强与体积的乘积为常量。

-----玻意耳定律

$$pV = C$$



温度去哪儿?

对于不同的温度, C 的值不同。

严格遵守玻意耳定律的气体称为理想气体。

理想气体状态方程

$$pV = \nu RT$$

$$R = \frac{p_0 V_m}{T_0} = 8.31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

--普适气体常数

$$\nu = \frac{N}{N_A}$$

N : 气体分子数
 N_A : 阿伏加德罗常量
 $6.022 \times 10^{23} / \text{mol}$

$$V_m = 22.41 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / \text{mol}$$

--摩尔体积

$$p_0 = 1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$$

--大气压强

$$T_0 = 273.15 \text{ K}$$

--温度

$$pV = \frac{N}{N_A} RT$$

$$k = \frac{R}{N_A} = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/mol}$$

--玻尔兹曼常数

1 mol 理想气体的状态方程

$$pV_m = RT$$

$$pV = NkT$$

$$n = N/V$$

$$p = nkT$$

n ----单位体积内
分子密度

例.一篮球在温度 T_0 为 0°C 时打入空气，知道球内压强 p_0 为 1.5atm 。

(1)在球赛结束时，篮球的温度升到了 30°C ，这时球内的压强为多少？

(2)在球赛过程中，球被刺破了一个小洞而漏气，当比赛结束后，篮球的温度恢复到 0°C 时，漏掉的气体是原有空气的百分之几？



$$pV = \nu RT$$

解： (1) 设球体的体积为 V_0 ，则

$$\frac{p_0 V_0}{T_0} = \frac{p V_0}{T_0 + 30} \Rightarrow p = \frac{273 + 30}{273} p_0 = 1.66\text{atm}$$

(2) 当篮球温度恢复时， $p=1\text{atm}$

$$pV = \frac{N}{N_A} RT$$

$$\text{恢复后: } N' = \frac{N_A p V_0}{RT_0} \quad \text{漏气前: } N = \frac{N_A p_0 V_0}{RT_0}$$

$$\frac{N - N'}{N} = \frac{p_0 - p}{p_0} = \frac{1.5 - 1}{1.5} = 33.3\%$$

例.设想太阳是一个由氢原子组成的密度均匀的理想气体系统,若已知太阳中心的压强为 $p=1.35\times 10^{14}\text{Pa}$,试估计太阳中心的温度(已知太阳质量为 $m =1.99\times 10^{30}\text{kg}$; 太阳半径为 $R=6.96\times 10^8\text{m}$; 氢原子质量为 $m_H=1.67\times 10^{-27}\text{kg}$)

解: 分子数密度为
$$n = \frac{N}{V} = \frac{m / m_H}{4\pi R^3 / 3} = \frac{3m}{4\pi m_H R^3}$$

$$p = nkT$$

$$\begin{aligned}\therefore T &= \frac{p}{nk} = \frac{4\pi m_H R^3 p}{3mk} \\ &= \frac{4 \times 3.14 \times 1.67 \times 10^{-27} \times (6.96 \times 10^8)^3 \times 1.35 \times 10^{14}}{3 \times 1.99 \times 10^{30} \times 1.38 \times 10^{-23}} \\ &= 1.15 \times 10^7 \text{ K}\end{aligned}$$

2. 理想气体的微观模型

- 1) 分子本身大小忽略不计
- 2) 除碰撞外，分子间相互作用忽略不计
- 3) 分子所受重力忽略不计
- 4) 分子间、分子与器壁间的碰撞是弹性碰撞
- 5) 分子运动遵从经典力学规律

这是由气体的共性抽象出来的一个理想模型。

在什么条件下，此模型与实际情况符合得很好？（ D ）

- A. 压强很大、温度很低
- B. 压强很小、温度很低
- C. 压强很大、温度很高
- D. 压强不太大、温度不太低

3. 宏观描述与微观描述

宏观： 对系统的状态从整体上加以描述。

反映整个系统宏观性质的物理量——**宏观量**

如： 体积 V 、压强 P 、温度 T 、热容量 C 等

微观： 通过对微观粒子运动状态的说明，而对系统的状态加以描述。

表征单个分子特征的物理量——**微观量**

如： 分子的大小 d 、位矢 \vec{r} 、速度 \vec{v} 、能量 E 等

宏观、微观描述是描述同一物理对象的两种不同方法。

宏观描述 $\xleftrightarrow{\text{统计规律}}$ 微观描述

本章的主要任务:

用统计的方法, 求大量分子的微观量的统计平均值来解释实验中所测得的宏观性质。

4. 统计规律及其特点

1) 是对大量偶然事件的整体起作用的规律

单个事件无规可循, 具有极大的偶然性, 但就大量事件的整体来看, 却存在着一定的规律。

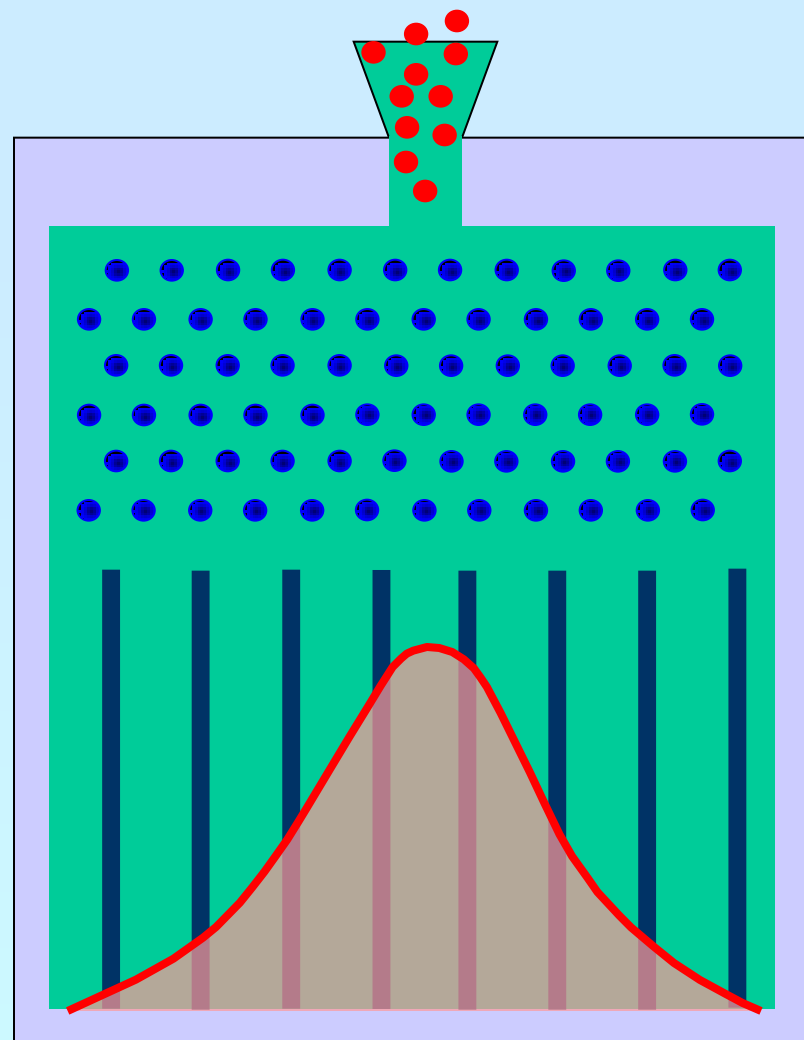
2) 统计规律永远伴随着涨落现象

例如：伽尔顿板实验

英国科学家Sir Francis Galton在他的著作《自然遗传》（Natural Inheritance. New York: Macmillan, 1894）中介绍了一种结构简单而又形象直观的统计实验装置，即伽尔顿板。

这种对大量偶然事件的整体起作用的规律称为
统计规律。

统计规律伴随着涨落现象。



(Galton Board)
(Quincunx)
(Bean Machine)

5. 理想气体的压强

压强是如何产生的？



大量气体分子对单位面积器壁持续不断的碰撞产生集体效应



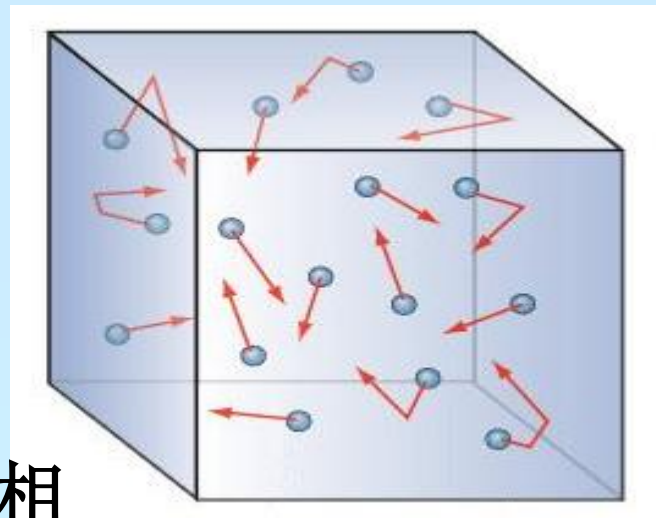
密集雨点对雨伞的冲击力

理想气体的压强公式推导

设长方体 V 中有 N 个理想气体分子，

单位体积有 $n = N/V$ 个分子

每个分子质量为 m ，



每个分子速度的大小、方向各不相同，热平衡下，分子与6个壁都要碰撞，各个面所受的压强相等。

将所有分子分成若干组，每组内分子的速度大小和方向都相同：

第 i 组的分子数密度： n_i ，

第 i 组的分子速度： \vec{v}_i ， $\vec{v}_i = (v_{ix}, v_{iy}, v_{iz})$

任取面积为 dA ,垂直 X 轴处的器壁(光滑), 计算 dA 上的压强:

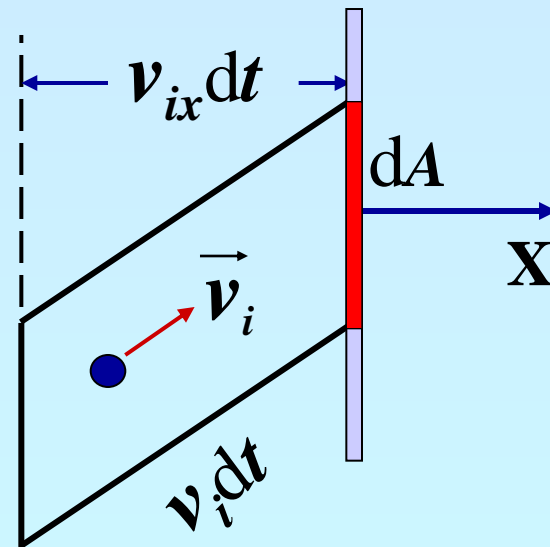
1) 速度为 \vec{v}_i 的单个分子在一次碰撞中对器壁的作用

碰撞前速度: (v_{ix}, v_{iy}, v_{iz})

碰撞后速度: $(-v_{ix}, v_{iy}, v_{iz})$

碰撞前后动量改变: $\Delta P_i = -2mv_{ix}$

分子施于 dA 的冲量: $\Delta I_i = 2mv_{ix}$



2) dt 时间内第 i 组分子施于 dA 的冲量

取 $v_i dt$ 为斜高、 dA 为底的斜柱体

体积为: $v_{ix} dt dA$; 分子数为: $n_i v_{ix} dt dA$

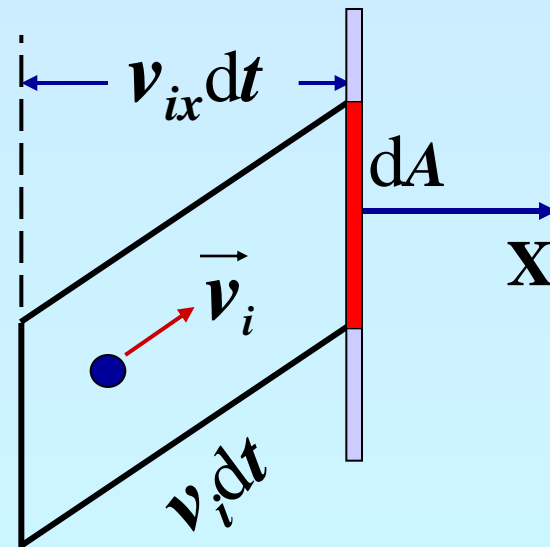
dt 内第 i 组分子施于 dA 的冲量:

$$dI_i = 2mv_{ix} n_i v_{ix} dt dA = 2mn_i v_{ix}^2 dt dA$$

任取面积为 dA ,垂直 X 轴处的器壁(光滑), 计算 dA 上的压强:

所有分子施于 dA 的冲量:

$$\begin{aligned} dI &= \sum_i dI_i \\ &= \sum_i 2m n_i v_{ix}^2 dt dA \end{aligned}$$



2) dt 时间内第 i 组分子施于 dA 的冲量

取 $v_{ix}dt$ 为斜高、 dA 为底的斜柱体

体积为: $v_{ix}dt dA$;

分子数为: $n_i v_{ix} dt dA$

dt 内第 i 组分子施于 dA 的冲量:

$$dI_i = 2m v_{ix} n_i v_{ix} dt dA = 2m n_i v_{ix}^2 dt dA$$

任取面积为 dA ,垂直 X 轴处的器壁(光滑), 计算 dA 上的压强:

所有分子施于 dA 的冲量:

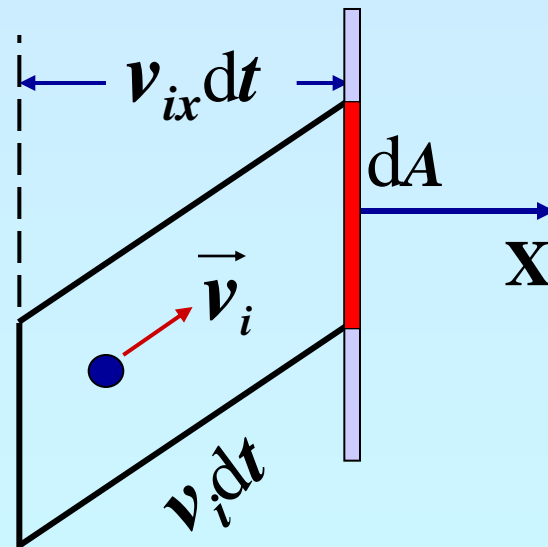
$$\begin{aligned} dI &= \sum_i dI_i \\ &= \sum_i 2m n_i v_{ix}^2 dt dA \end{aligned}$$

上式中对 i 求和应理解为:

$$dI = \sum_{v_{ix} > 0} 2m n_i v_{ix}^2 dt dA$$

按几率分布 $v_{ix} > 0$, $v_{ix} < 0$ 的分子数各占一半, 故

$$dI = \frac{1}{2} \sum_i 2m n_i v_{ix}^2 dt dA = \sum_i m n_i v_{ix}^2 dt dA$$



任取面积为 dA ,垂直 X 轴处的器壁(光滑), 计算 dA 上的压强:

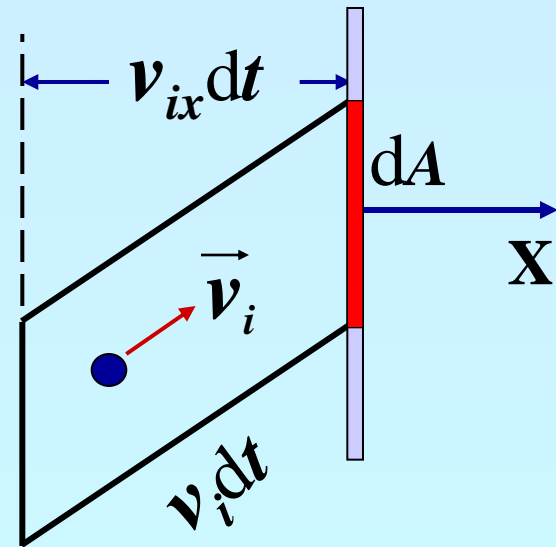
根据冲量的定义: $dI = F dt \quad \therefore F = \frac{dI}{dt}$ dA 上的压强: $P = \frac{F}{dA}$

$$\therefore P = \frac{dI}{dt dA} = \sum_i m n_i v_{ix}^2 = m \left[\sum_i n_i v_{ix}^2 \right] \cdot \frac{nV}{nV}$$

$$= \frac{nm \sum_i n_i V v_{ix}^2}{nV}$$

$$\therefore P = nm \overline{v_x^2}$$

$$\overline{v_x^2} = \frac{\sum_i n_i V v_{ix}^2}{nV}$$



按几率分布 $v_{ix} > 0$, $v_{ix} < 0$ 的分子数各占一半, 故

$$dI = \frac{1}{2} \sum_i 2m n_i v_{ix}^2 dt dA = \sum_i m n_i v_{ix}^2 dt dA$$