热学研究的对象——大量做无规则运动的粒子
宏观量：表示系统宏观性质的量，可以直接测量。例如：P，T，V。分为**强度量**（无累加性）：如 P、T …
广延量（有累加性，和 N 成正比）：如 M、V、E …
平衡态定义：在不受外界影响的条件下，对一个孤立系统，经过足够长的时间后，系统达到一个宏观性质不随时间变化的状态。用一组统一的宏观量描述状态。注意区分平衡态与稳定态
准静态过程：每一时刻系统都处于平衡态
实际过程的理想化——无限缓慢(准)
“无限缓慢”：系统变化的过程时间>>驰豫时间
热力学第三定律热力学零度（绝对零度）不可达到

理想气体宏观定义：严格遵守气体三定律。实际气体理想化：P 不太高 T 不太低，即假定微观粒子为刚性小球，因此理想气体的能量完全由微观粒子的运动能决定，没有势能
两系统在热接触情况下，有分子热运动能量的传递，相当长时间后达到的共同平衡态称为**热平衡**态—热平衡定律（**热力学第零定律**）：“分别与第三个系统处于同一热平衡态 的两个系统必然也处于热平衡。”

理想气体温标
玻意耳定律：PV=const 水的三相点：273.16K **热力学温标**也规定水的三相点 273.16K，但适用范围广
国际温标以热力学温标参考制定
摄氏温标水的三相点 273.15 度
华氏温标 32+1.8T（摄氏温标）
理想气体状态方程以及常用形式
$PV=(M/\mu)RT$ $P=nkT$ $n=N/V$
$R=8.31\text{J/Kmol}$ $k=1.38\times10^{-23}\text{J/K}$
$N_A=6.023\times10^{23}/\text{mol}$

标准状况
T=273K,P=1atm=1.013E5Pa
n=P/kT=2.69E25/m^3
PV 图上一个点代表一个平衡态
一条线代表一个准静态过程
恒温气压公式
$p=p_0\exp(-Mgh/RT)$
变温气压公式
$p=p_0\exp[(Mg/\alpha R)\ln(1-\alpha y/T_0)]$

气体动理论
因为宏观量是某些微观量的平均值，平衡态时各处宏观量相同，所以用系统中任何部分气体计算出的微观量的平均值必须相同。必须假设平衡态时微观量分布等几率
速度取向各方向等几率，分子数密度处处相同
压强：大量分子碰单位面积器壁的平均作用力
系统：理想气体 平衡态 忽略重力，得到**压强公式**
$P=(1/3)mn\overline{\upsilon^2}$ $P=(2/3)n\bar{\varepsilon}_t$。**温度公式**
分子运动平均动能 $\bar{\varepsilon}_t=(3/2)kT$ 方均根速率 $\sqrt{\overline{\upsilon^2}}=\sqrt{3RT/\mu}$
数量级的概念(第二章)n~25,d~-10,v~2,z~9,\lamda~-8

自由度定义：描述位置所需的最少坐标数
能量均分原理在温度为 T 的平衡态下物质分子每一自由度有相同的平均动能 $(1/2)kT$
平均总动能 $\bar{\varepsilon}_t=(i/2)kT$ 平均平动动能 $\bar{\varepsilon}_t=(3/2)kT$ 理想气体内能 $E=(i/2)\nu RT$
一般温度下振动自由度冻结-**刚性分子**，低温下转动自由度冻结

麦克斯韦速率分布律
$$f(\upsilon)=4\pi\left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2}\upsilon^2 e^{-\frac{m\upsilon^2}{2kT}}$$

速度分布函数的意义：
$f(\upsilon)=\frac{dN_\upsilon}{N d\upsilon}$ $f(\upsilon)d\upsilon=\frac{dN_\upsilon}{N}$
最概然速率速率最大值
$\upsilon_p=\sqrt{\frac{2kT}{m}}=\sqrt{\frac{2RT}{\mu}}$
平均速率 vf(v)积分/f(v)积分
$\bar{\upsilon}=\sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$ $\upsilon_{\text{rms}}=\sqrt{\overline{\upsilon^2}}=\sqrt{\frac{3RT}{\mu}}$
方均根速率 v^2f(v)积分
关系：$\upsilon_p<\bar{\upsilon}<\upsilon_{\text{rms}}$

麦克斯韦速度分布律
$$\frac{dN_{\vec{v}}}{N}=\left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2}\exp\left(-\frac{m\left(v_x^2+v_y^2+v_z^2\right)}{2kT}\right)dv_x\,dv_y\,dv_z$$
沿某一方向的速度分布 $\frac{dN_{\vec{v}_x}}{N}=\sqrt{\frac{m}{2\pi kT}}\exp\left(-\frac{mv_x^2}{2kT}\right)dv_x$
单位时间、单位面积上的分子碰壁数 $\Gamma=(1/4)n\bar{v}$
玻尔兹曼分布函数
平衡态下某状态区间(粒子能量为 E)能量数正比于 exp(-E/kT)
$f(\vec{r},\vec{\upsilon})=dN_{\vec{r}\vec{\upsilon}}/Ndxyz\upsilon_x\upsilon_y\upsilon_z=c_{\vec{r}}c_{\vec{\upsilon}}\exp(-(\varepsilon_k+\varepsilon_p)/kT)$
势能场中粒子按势能分布 $n=n_0\exp(-\varepsilon_p/kT)$ (重力场 $\varepsilon_p=mgh$)

气体分子的平均碰撞频率平均自由程
$\bar{Z}=\pi d^2\bar{u}n$ $\bar{u}=\sqrt{2}\bar{v}$ $\bar{\lambda}=\bar{\upsilon}/\bar{Z}=1/\sqrt{2}\pi d^2 n$
理论公式表明 P 下降的时候平均自由程上升，但是不会超过容器的线度。
范德瓦耳斯气体方程
$\left(P+\nu^2a/\upsilon^2\right)\left(\upsilon-\nu b\right)=RT$
输运过程：内摩擦，热传导，扩散
$df=-\eta\left(du/dz\right)_{z_0}dS$ $dQ=-\kappa\left(dT/dx\right)_{x_0}dS\,dt$
$dM=-D\left(d\rho/dx\right)_{x_0}dS\,dt$
粘滞系数导热系数扩散系数
$\eta=1/3nm\bar{v}\bar{\lambda}$ $\kappa=1/3nm\bar{v}\bar{\lambda}C_v$ $D=1/3\bar{v}\bar{\lambda}$

热力学第一定律
系统从一个热力学状态变化到另一个状态，称为热力学过程
准静态过程
系统的每一状态都无限接近于平衡态的过程。准静态过程可以用过程曲线(PV 曲线)来表示。
改变系统状态的方法：作功/传热
气体对外界作功-功是过程量。dA 只表示微量功，不是数学上的全微分；因为其积分不仅与始末状态有关，还与经历什么过程有关
准静态过程系统对外做**体积功** $A=\int_{V_1}^{V_2}P\,dV$

微观上热力学系统的内能是指什么？
内能是状态量;对于一定质量的气体,内能一般有 $E=E(T,V)$或 $E=E(T,P)$对于一定质量的理想气体 $E=E(T)$对于刚性理想气体 $E=\nu(i/2)RT$
(ν:摩尔数 i:自由度 3、5、6)
宏观上定义系统的一个状态量——**内能** E,令内能 E 的增量满足关系 $E_2-E_1=A_{\text{绝热}1\to2(\text{外界})}$
定义**热量** $Q=(E_2-E_1)_{\text{不作功}}$ 传热也可以改变系统的热力学状态,热量也是过程量

热库或**热源**(热容量无限大、温度不变)
准静态传热过程系统 $T1$ 直接与热源 $T2$ 有限温差传热的热传导为非准静态过程。若传热过程“无限缓慢”，或保持系统与外界无穷小温差，可看成准静态传热过程。
热力学第一定律 $Q=\Delta E+A$ $dQ=dE+dA$
符号规定 $Q>0$ 系统吸热 $\Delta E>0$ 系统内能增加 $A>0$ 系统对外界作功
定义系统温度升高 1 度所吸收的热量为系统的**热容量** $C=dQ/dT$ **定体热容量** $C_V=(dQ/dT)_V$

定压热容量 $C_p=(dQ/dT)_p$ **热容量为广延量**
一摩尔物质温度升高 1 度所吸收的热量叫**摩尔热容量/定体摩尔热容量/定压摩尔热容量**
$C_m=\frac{1}{\nu}(\frac{dQ}{dT})$ $C_{V,m}=\frac{1}{\nu}(\frac{dQ}{dT})_V$ $C_{p,m}=\frac{1}{\nu}(\frac{dQ}{dT})_p$
理想气体等温变化过程吸热
$Q=A=\nu RT\ln(V_2/V_1)$
理想气体内能公式(对于理想气体恒成立)
$\Delta E=\nu C_{V,m}\Delta T$
迈耶公式 $C_{p,m}-C_{V,m}=R$

比热容比（比热比、泊松比） $\gamma=C_{p,m}/C_{V,m}$
$$\frac{i+2}{i}=\gamma\equiv\frac{C_{P,m}}{C_{V,m}}=\frac{C_{V,m}+R}{C_{V,m}}=1+\frac{R}{C_{V,m}}>1$$
单原子分子，i=3——1.67 刚性双原子分子，i=5——1.40 刚性多原子分子，i=6——1.33
在较大温度范围，热容与温度有关，因为常温下不易发生振动能级的跃迁，分子可视为刚性
绝热过程系统和外界没有热量交换的过程特点：$dQ=0$ $dE=-dA$
定义：$H=E+pV$ 称为**焓**,节流过程是等焓过程

理想气体绝热过程公式
$p_1V_1^\gamma=p_2V_2^\gamma$ $TV^{\gamma-1}=\text{const}.$ $p^{\gamma-1}T^{-\gamma}=\text{const}$
能量转换关系 $Q=0$, $\Delta E=\nu C(V,m)\Delta T$, $A=-\Delta E$
$A=(P_1V_1-P_2V_2)/(\gamma-1)$
理想气体热容 C 为常数的过程统称**多方过程**过程方程为 $PV^n=\text{const}$,n 称为多方指数它包括等温、等体、等压、绝热等等过程
绝热自由膨胀理想气体 $T1=T2$,非等温过程，真实气体内能不变，分子力以引力为主时 $T2<T1$ 分子力以斥力为主时 $T2>T1$
节流过程气体通过小孔向压强较低区域膨胀

循环过程
系统（如热机中的工质）经一系列变化后又回到初态的整个过程叫循环过程。
在 P-V 图上曲线所包围的面积等于做功的大小
正循环（顺时针）吸热，对外作功 --热机循环
逆循环（逆时针）放热，对系统作功--致冷循环
热机系统(工质)吸热、对外作功的机器热机必须进行循环过程。系统在一正循环中，从高温热源吸热 Q1，向低温热源放热|Q2|内能增量 0 净功 A=Q1-|Q2|效率 $\eta=A/Q1=(Q1-|Q2|)/Q1=1-Q2||/Q1$
制冷循环通过外界作功从低温热源吸热

制冷循环效率
$w=\frac{Q_{\text{吸}}}{A_{\text{外净}}}=\frac{Q_2}{|Q_1|-Q_2}$
在热机制冷机部分,由于实际中的需要或说是习惯,无论是吸热还是放热一律取正值,无绝对值
卡诺循环工质只和两个恒温热库交换热量的准静态无摩擦循环,等温-绝热-等温-绝热
卡诺热机循环的效率 $\eta_c=1-T_2/T_1$
逆循环制冷系数 $w_c=T_2/(T_1-T_2)$

热力学第二定律一切与热现象有关的自然过程都是不可逆的都存在一定的方向性
克劳修斯表述热量不能自动地从低温物体传向高温物体**开尔文表述**其唯一效果为热全部转变为功的过程是不可能的**微观意义**自然过程总沿着使分子运动更加无序的方向进行
热力学概率某一宏观态所对应的微观状态数目，叫该宏观态的热力学概率，用 Ω 表示
热二律的统计意义一个孤立系统其内部自发进行的过程，总是由热力学概率小的宏观态向热力学概率大的宏观态过渡

可逆过程是这样一种过程,它的每一步都可以沿相反的方向进行,而当系统沿相反的方向回到原状态时,外界也恢复到原状态。(即系统和外界都复原)如不可能使系统和外界都完全复原，则此过程叫做**不可逆过程**
无摩擦+准静态:可逆过程是比准静态过程更加理想化的过程
卡诺定理 1、工作在相同温度的高、低温热库之间的一切可逆机的效率都相等，与工作物质无关 2、工作在相同温度高、低温热库之间的一切不可逆机的效率都不可能大于可逆机的效率

热力学温标根据卡诺定理来定义
卡诺定理给出,任意可逆循环的效率不大于工作在其最高与最低温度热库之间的卡诺热机。
可逆循环的**克劳修斯等式**
$\oint_R\frac{dQ}{T}=0$ $S_2-S_1=\int_1^2\frac{dQ}{T}$
热温比的积分和过程的具体情况无关(注意:必须是可逆过程。定义：当系统由平衡态 1 过渡到平衡态 2 时,其**熵的增量**等于系统沿任何可逆过程由状态 1 到状态 2 的热温比 dQ/T 的积分,

只要是可逆过程，就可用克劳修斯式计算熵的增量。积分只和始、末态有关,和过程的具体情况无关。对**可逆元过程** $dS=dQ/T$ 可逆过程的热一表达式 $TdS=dE+dA$
计算熵变的步骤:1 选定系统 2 确定状态(始末态及其参量)3 拟定可逆过程连接始末态
对于**理想气体**有公式
$\Delta S=\nu C_{V,m}\ln(T_2/T_1)+\nu R\ln(V_2/V_1)$
推得 $S_{(T,V)}=\nu C_{V,m}\ln T+\nu R\ln V+S_0$
前者为速度熵正相关 T，后者为位形熵正相关 V

熵增加原理孤立系统内的一切过程熵不会减少
孤立系统由非平衡态向平衡态过渡时 $S\uparrow$,最终的平衡态一定是 $S=S\text{max}$ 的状态
克劳修斯不等式
$\oint_{IR}\frac{dQ}{T}<0$
不可逆绝热过程熵增为正，可逆绝热熵增为 0
温熵图：热量和面积相当，卡诺循环为矩形
能量的数量不变，但是能量越来越多地不能用来做功了！这称为**能量退降**在热力学当中用**自由能**来表示能量中可以利用的部分

玻耳兹曼熵公式 $S=k\ln\Omega$ 熵可加
热力学第三定律可能通过有限的循环过程，使物体冷到绝对零度
简谐振动定义式 $x=A\cos(\omega t+\varphi)$
判据 1 受力 $F=-kx$ 2 微分方程 $d^2x/dt^2+\omega^2x=0$
3 能量特征总能量 E 为常量，势能 $Ep=1/2kx^2$
以上三条任意一条满足即可。
振幅 A $=\sqrt{2E/k}$，角频率 $\omega=\sqrt{k/m}$
$\nu=\omega/2\pi$，相位 $\varphi=\text{tg}^{-1}(-v_0/\omega x_0)$

SHM 的合成
1.同方向合成 同频率:相量加法
不同频率:频率接近形成拍,频率为原频率之差
2 互相垂直同频率合成椭圆
不同频率对象的合成，频率为整数比有稳定轨
$$\frac{\omega_x}{\omega_y}=\frac{\nu_x}{\nu_y}=\frac{x\text{达到最大的次数}}{y\text{达到最大的次数}}$$
阻尼振动公式 $m\frac{d^2x}{dt^2}=-kx-\gamma\frac{dx}{dt}$ **固有频率**
$\omega_0=\sqrt{k/m}$ **阻尼系数** $\beta=\gamma/2m$

欠阻尼
$x=A_0e^{-\beta t}\cos(\omega t+\phi_0)$ $\omega=\sqrt{\omega_0^2-\beta^2}$
$A=A_0e^{-\beta t}$ $E=E_0e^{-2\beta t}$
能量减小到起始能量的 1/e 所经历的时间称为**鸣响时间** $\tau=1/2\beta$
工程技术上定义**品质因素** $Q=2\pi\tau/T=\omega\tau$
$x=C_1\exp(-\left(\beta-\sqrt{\beta^2-\omega_0^2}\right)t)+C_2\exp(-\left(\beta+\sqrt{\beta^2-\omega_0^2}\right)t)$
过阻尼/临界阻尼 $x=e^{-\beta t}\left(C_1-C_2t\right)$

受迫振动若系统受弹性力,阻力外,还受周期性策动力 $m\dfrac{\mathrm{d}^2 x}{\mathrm{d}t^2}=-kx-\gamma\dfrac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}+H\cos\omega t$ $h=H/m$

其稳定振动解 $x=A\cos(\omega t+\phi)$

$A=h/\sqrt{\left(\omega_0{}^2-\omega^2\right)^2+4\beta^2\omega^2}$ $\tan\varphi=\dfrac{-2\beta\omega}{\omega_0{}^2-\omega^2}$

共振现象，能量输入最大。

波动是振动状态的传播，不是媒质的传播

几何描述：波线波面(同相面)波前

分类机械波/电磁波///横波/纵波///连续波/脉冲波

水表面的波既非横波又非纵波

特征量

波速 u 一般地说,它由媒质的性质和波的类型决定,色散媒质中还与频率有关

周期 T 一个完整的波通过波线上的某点所需的时间,由波源决定

波长 λ 波线上相邻的振动状态相同的两质元间的距离,由波源和媒质共同决定

某种物理量的扰动的传播称为**行波**

波函数 $\xi(x,t)=f(t-x/u)$ 波传播时，任意点媒质质元的运动函数,任意时刻的波形函数

如果波传播的扰动是简谐振动的话这样的波称为**简谐波**(余弦波，单色波)波函数(平面波沿 x 方向以速度 u 传播媒质均匀无限大无吸收，原点 $y(0,t)=A\cos\omega t$) $y(x,t)=A\cos\omega(t-x/u)$

简谐波的传播也是媒质振动相位的传播

波的**相位** $\omega(t-x/u)$ 简谐波的波速就是相速

沿波传播方向每增加 λ 的距离，相位落后 2π

$y(x,t)=A\cos(\omega t-2\pi x/\lambda)$

物体的弹性变形**长变** $F/S=E\Delta l/l_0$

长变应力=E*长变应变,E 为杨氏模量.**切边/容变**

波动方程与**波速**一维波动方程 $\dfrac{\partial^2 y}{\partial t^2}=u^2\dfrac{\partial^2 y}{\partial x^2}$

弹性绳上的横波 $u=\sqrt{F/\rho_l}$ **固体中的纵波** $u=\sqrt{E/\rho}$ **固体中的横波** $u=\sqrt{G/\rho}$ **流体中的纵波** $u=\sqrt{K/\rho_0}$ 杨氏/容变/切边弹性模量理想气体中的声速 $u_1=\sqrt{\gamma p/\rho}=\sqrt{\gamma RT/M}$

波的能量-能量密度

$w=\Delta W/\Delta V=\rho\omega^2A^2\sin^2\omega(t-x/u)$

振动系统与外界无能量交换**波动质元**与周围媒质交换能量，每一时刻动能等于势能

平均能量 $\bar{w}=(1/2)\rho\omega^2A^2$ 适用于各种弹性波

能流密度 S 单位时间内通过垂直于波线方向单位面积波的能量

波的强度 I 平均能流密度 $(1/2)z\omega^2A^2$ 其中 $z=\rho u$ **媒质"特性阻抗"**

对无吸收媒质平面波 A 不变球面波 Ar 不变**柱面波** Ar^(1/2)不变

惠更斯原理媒质中任意波面上的各点都可看作是发射子波（次级波）的波源（点源），其后的任一时刻，这些子波面的包络面（包迹）就是波在该时刻的新的波面。

波的衍射相对于波长而言，障碍物的线度越大衍射现象越不明显，障碍物的线度越小衍射现象越明显。

惠更斯原理可以很好的解释**波的反射定律**

折射定律光 u1=c/n1,u2=c/n2,得 n1sin(i)=n2sin(r)

波的叠加原理几列波可以保持各自的特点方向、振幅、波长、频率）同时通过同一媒质。在它们相遇处，质元的位移为各波单独在该处产生位移的矢量和，亦称波传播的独立性

波的叠加原理于波动方程的"线性"是一致的,当波强度过大时媒质形变与弹力的关系不再呈线性,叠加原理也就不再成立了。

波叠加时在空间出现稳定的振动加强和减弱的分布叫**波的干涉。**

相干条件:同频，同振动方向，固定相位差

两列相干的行波沿相反方向传播而叠加时就形成**驻波** $y=2A\cos(x/\lambda)2\pi\cdot\cos\omega t$

驻波的特点振幅各处不等大，出现了波腹和波节。波腹在 *kλ/2* 处,波节在*(2k+1)λ/4* 处**相位**驻波是分段的振动同一段振动相位相同相邻段振动相位相反.平均说来**没有能量的传播**但各质元间仍有能量的交换

波在界面的反射和透射

z 大波密媒质,*z* 小波疏媒质

入射波 $y_1=A_1\cos(\omega t-2\pi x/\lambda_1+\varphi_1)$

反射波 $y_1'=A_1'\cos(\omega t+2\pi x/\lambda_1+\varphi_1')$

透射波 $y_2=A_2\cos(\omega t-2\pi x/\lambda_2+\varphi_2)$

机械波⊥入射时，有界面关系:界面两侧质元位移相同,界面两侧应力相等

波密→波疏，反射波和入射波同相

波疏→波密，反射波有相位突变 π,**半波损失**

透射波总是与入射波同相

反射比 $R=\dfrac{I_1'}{I_1}=(\dfrac{A_1'}{A_1})^2=\left(\dfrac{z_1-z_2}{z_1+z_2}\right)^2$

透射比 $T=\dfrac{I_2}{I_1}=\dfrac{z_2A_2^2}{z_1A_1^2}=\dfrac{4z_1z_2}{(z_1+z_2)^2}$

R+T=1。全反射、全透射

简正模式波在一定边界内传播时，就会形成各种驻波。如两端固定的弦形成驻波必须满足以下条件 $n\lambda_n/2=L$，$n=1,2,3\cdots$

系统的固有频率 $\nu_n=u/\lambda_n=nu/(2L)$ 每种可能的稳定振动方式(每一个频率)称作系统的一个简正模式。

[例]一频率为 248.5Hz 的音叉放在盛水的细管口连续调节水面高度当空气柱的高度相继为 $L1$ = 0.34 m 和 $L2$ = 1.03 m 时发生共鸣。求：声波在空气中的声速 u

解：发生共鸣时形成驻波，管口为波腹水面为波节。空气柱长满足条件： $L=(2n+1)\lambda/4$

$u=\lambda\nu=1.38\times248.5=343\,\mathrm{m/s}$

多普勒效应：由于波源和观察者的运动，而使观测的频率不同于波源频率的现象。

设 运动在波源 S 和观测者 R 的连线方向上，以二者相向运动的方向为速度的正方向。

$\nu_{\mathbf{R}}=\dfrac{u+\mathbf{v_R}}{u-\mathbf{v_S}}\nu_{\mathrm{S}}$

若 S 和 R 的运动不在二者连线上

$\nu_{\mathbf{R}}=\dfrac{u+|\mathbf{v_R}|\cos\theta_{\mathbf{R}}}{u-|\mathbf{v_S}|\cos\theta_{\mathrm{S}}}\nu_{\mathrm{S}}$

电磁波不同于机械波，不需要媒质

$\nu_{\mathrm{R}}=\dfrac{\sqrt{c^2-\mathrm{v}^2}}{c-\mathrm{v}\cos\varphi}\nu_{\mathrm{S}}$ 横向多普勒效应

激波 $\mathrm{v_S}>u$ 时后发出的波面将超越先发出的波面形成锥形波阵面。马赫数 vs/n

[例]已知当汽车 C 经过 O 时，B 处监测到电视信号(ν = 6×108Hz) 有每秒 20 次的强度起伏。汽车 C 经过 O 时的车速 v=?

(BO 垂直 x 轴，电视信号沿 150° 方向入射)

解:C 作为接收者在动使它接收的频率 $\nu\to\nu'$,反射亦为 ν' 在 B 处反射波和直接入射波叠加形成"拍"。拍频 $\Delta\nu=\nu'-\nu=20\,\mathrm{Hz}$

公式计算汽车接收和反射(发射)电磁波的频率，最终 $\mathrm{v}=\dfrac{2}{\sqrt{3}}\cdot\dfrac{\Delta\nu}{\nu}\cdot c$