

# 胡晓东

---

办公室: 物理大楼北442房间



62767621



18901292138

Email: *huxd@pku.edu.cn*

个人主页

*<http://www.phy.pku.edu.cn/personnel/icmp/huxiaodong.xml>*

# 助教

---

常恒心

电话: 13683251257

邮箱: [hxch@pku.edu.cn](mailto:hxch@pku.edu.cn)

办公室: 工学院一号楼517

第一组

学号: 1300010601-681

电教125

冯清松

电话: 13263447112

邮箱: [qingsong\\_feng@pku.edu.cn](mailto:qingsong_feng@pku.edu.cn) 学号: 1300010682-739

办公室: 工学院一号楼434

第二组

电教239

严通行

电话: 15120034302

邮箱: [thyanlong@pku.edu.cn](mailto:thyanlong@pku.edu.cn)

办公室: 物理大楼北443

第三组

学号: 1300010740-, 其它

三教203

# 教学信息和交流平台

---

## 1. 北大主页/网络教学:

<http://www.ontoedu.pku.edu.cn/>

- 通知
- 作业
- 课件下载
- 成绩查询
- 信息交流

Username & Passwords: math13

## 2. 物理学院网络课堂:

<http://physics.pku.edu.cn/>

# 课时安排

---

**Chap I:** 平衡态与状态方程, **3** 课时

**Chap II:** 平衡态的统计分布, **5** 课时

**Chap III:** 近平衡态中的输运过程, **3** 课时

**Chap IV:** 热力学第一定律, **5** 课时

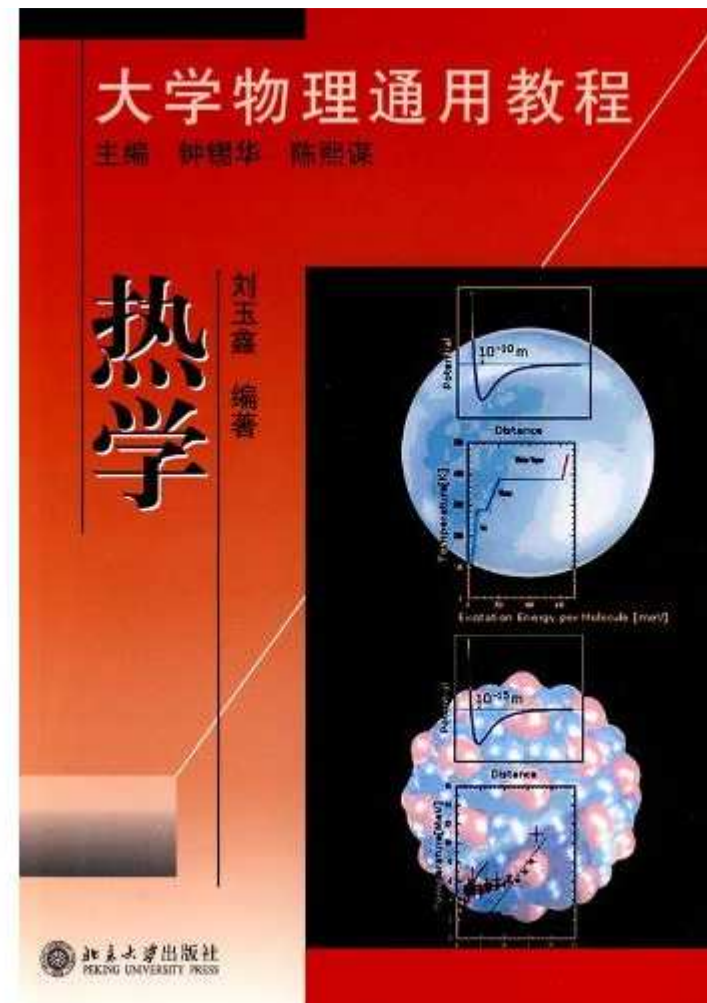
**Chap V:** 热力学第二定律, **4** 课时

**Chap VI:** 单元系的相变, **2** 课时

**总22课时**

# 教材

- 大学物理通用教程  
《热学》  
刘玉鑫 编著  
(北京大学出版社, 2002年)



# 主要参考书

---

- 新概念物理教程 《热学》  
赵凯华 罗蔚因  
(高等教育出版社, 1998)

培养物理直觉能力

采用定性半定量的方法

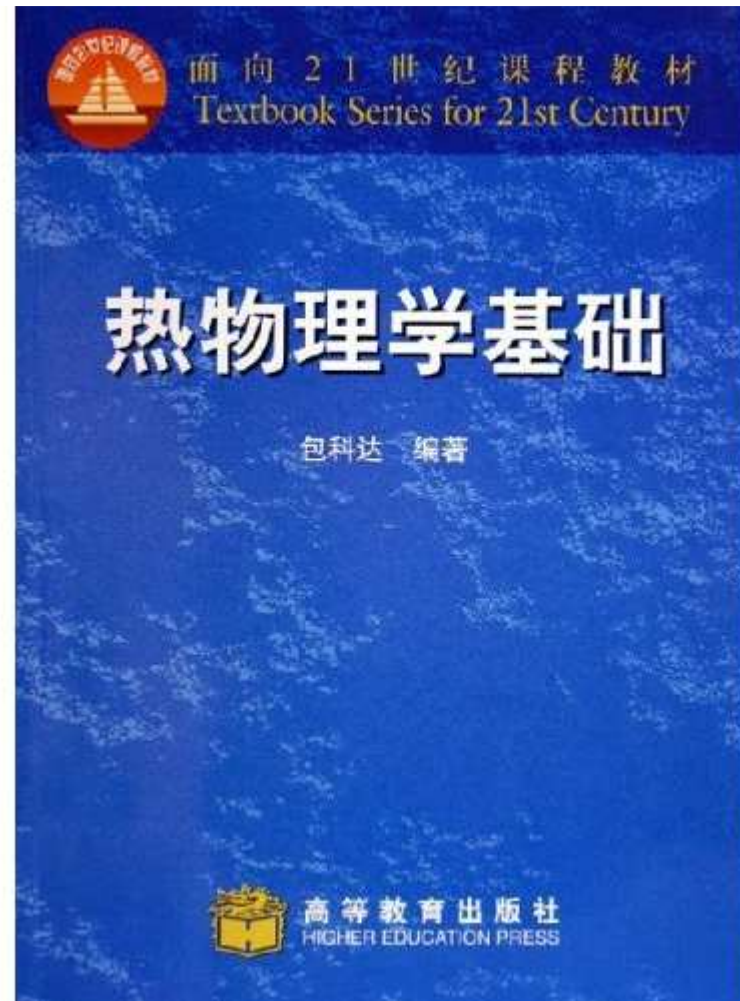
突出物理图像



# 主要参考书

---

- 《热物理学基础》  
包科达 编著  
(高等教育出版社, 2001)



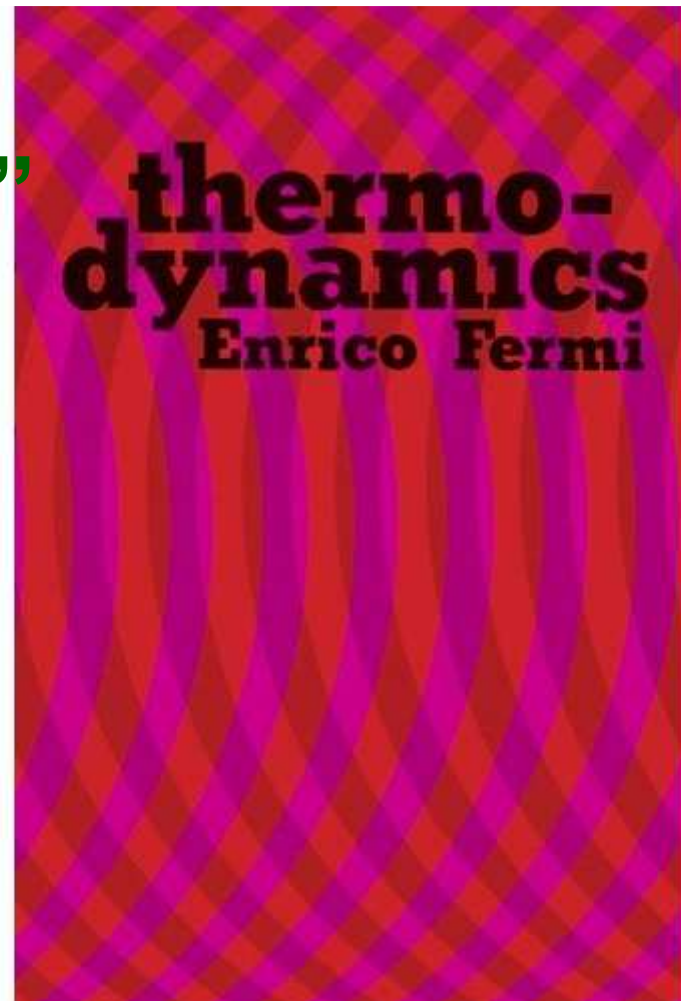
# 参考书

---

## Enrico Fermi, “**Thermodynamics**”

In this classic of modern science, the Nobel Laureate presents a clear treatment of systems, the First and Second Laws of Thermodynamics, entropy, thermodynamic potentials, and much more.

Calculus required.



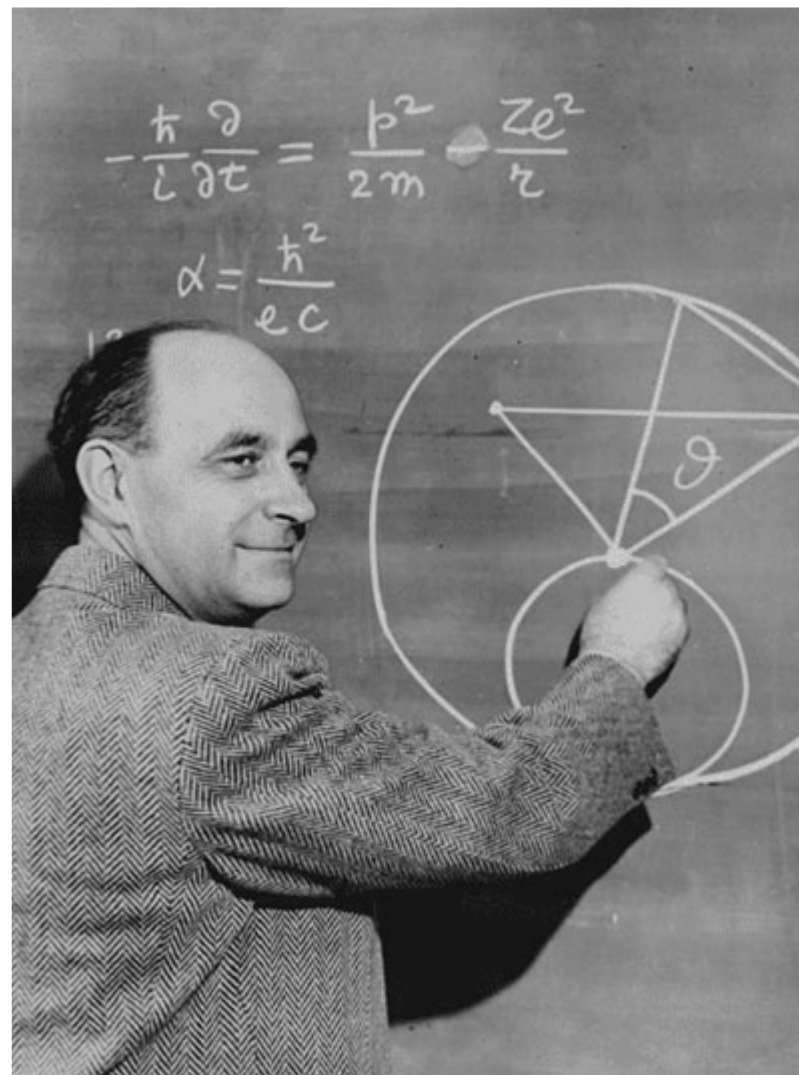


# Enrico Fermi

## 恩里科·费米

美籍意大利裔物理学家，1938年诺贝尔物理学奖获得者。对理论物理学和实验物理学方面均有重大贡献，首创 $\beta$ 衰变的定量理论，负责设计建造了世界首座自持续链式裂变核反应堆，发展了量子理论。

1928年与狄拉克各自独立提出新的统计定律(费米-狄拉克统计)。该统计适用于所有遵循泡利不相容原理的粒子，这些具有半整数自旋的粒子被称为费米子。费米-狄拉克统计和玻色子所遵循的玻色-爱因斯坦统计是量子世界的基本统计规律。



Enrico Fermi

1901.9.29—1954.11.28

# 考试成绩

---

平时作业：10%

期中考试：40%

期末考试：50%

物理竞赛获奖者可以在总成绩上加

特等奖加10分

一、二、三等奖分别加5、3、2分

成功参赛者加1分

# 热学

---

## 热学--研究与热有关的现象

- 物态变化
- 化学反应
- 生物的生长发育.....

热现象涉及面广, 系统复杂、宏观、微观.....

热学--研究热现象中物质的热运动的性质, 它对物体宏观性质的影响, 以及物质热运动形式与物质的其它运动形式之间的转化规律。

# 热学的研究对象

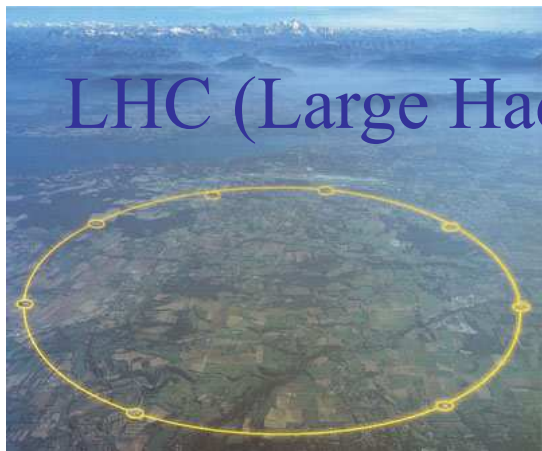
---

- 力学

研究对象是质点、质点组、刚体、流体，它们机械运动的变化。

- 热学

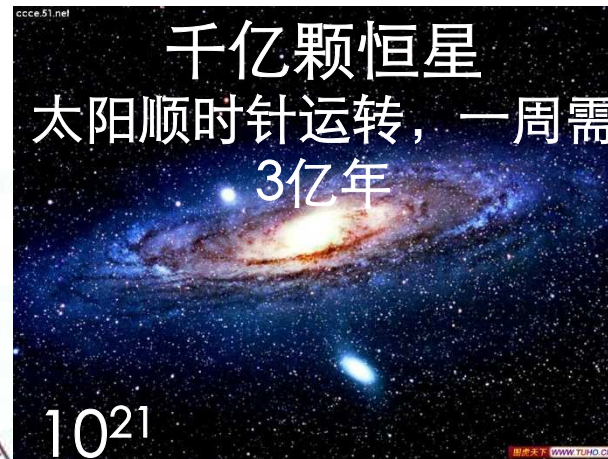
研究对象是大量原子、分子组成的物质系统，它的热运动状态的变化，与环境的关系，以及热运动的状态与热学性质的种种关系。



LHC (Large Hadron Collider)

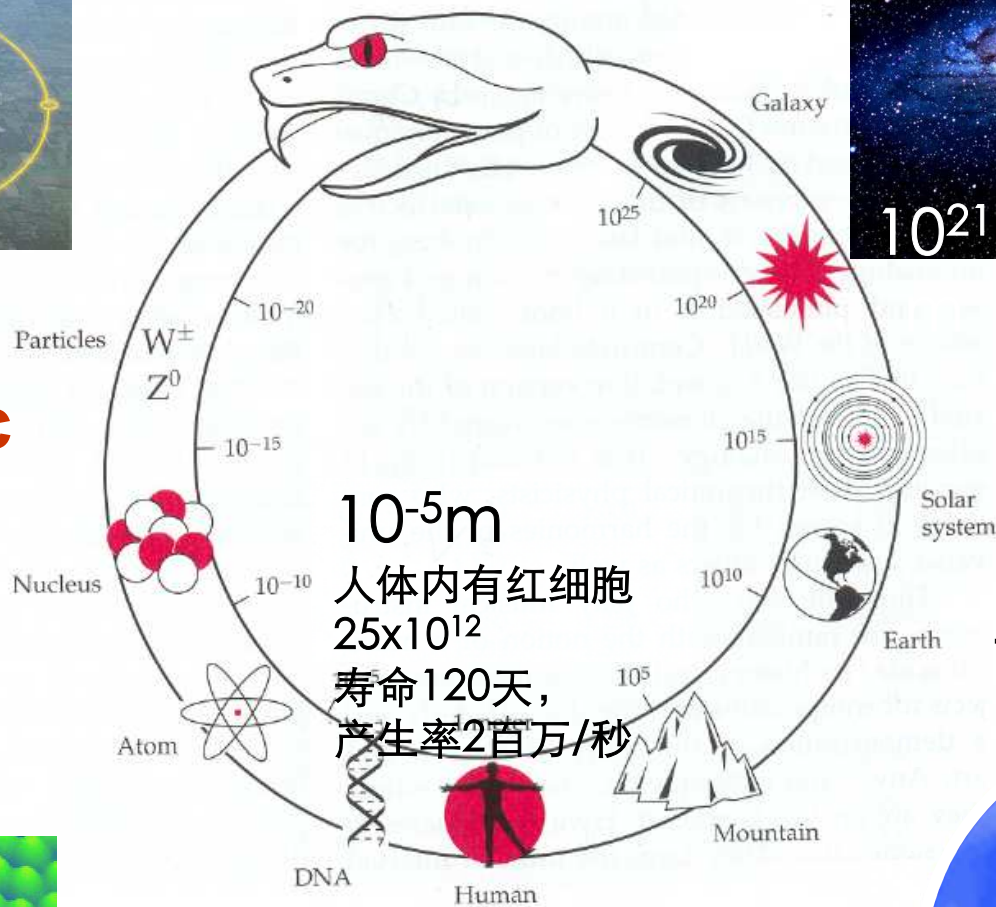
微观

Microcosmic



宏观

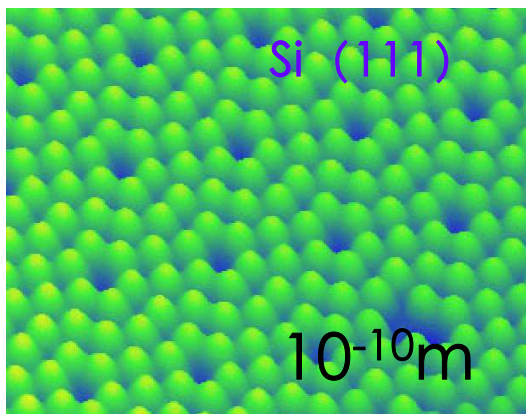
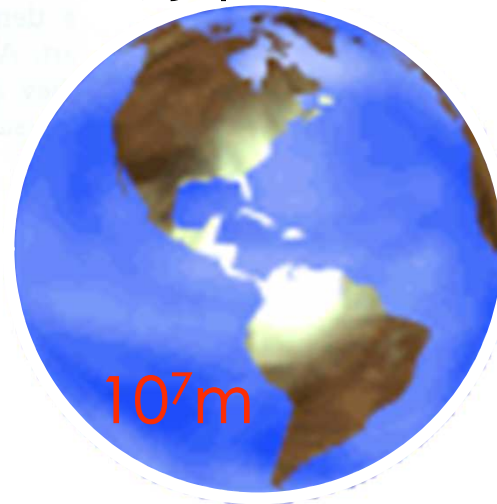
Macroscopic



介观 Mesoscopic

物理学研究领域

平均海拔1km  
海深4km





# 自然界中长度和时间的量级

---

- 成人身高 1~2m
- 珠峰海拔高度 9km
- 地球半径 6371km
- 月球半径 1738km
- 太阳半径  $6.96 \times 10^5 \text{km}$
- 日地距离  $1.5 \times 10^8 \text{km}$
- 1光年约  $9.5 \times 10^{12} \text{km}$
- 现代宇宙视界 150亿光年

- 人眼瞳孔直径 2~6mm
- 可见光波长 0.4~0.6 $\mu\text{m}$
- 原子半径 1Å
- 原子核半径 1fm

- 人体心律周期 0.8s
- 太阳光传到地球的时间约  $5 \times 10^2 \text{s}$
- 猿人出现的时间距今约  $4 \times 10^2$ 万年
- 侏罗纪距今约 0.5 ~ 1.5亿年
- 地球年龄约 46亿年
- 太阳年龄约 50亿年
- 宇宙年龄约 150亿年
- 电子寿命大于  $10^{22}$ 年

- 人眼视觉的弛豫时间约 0.1s
- 人体感觉神经脉冲间隔约 1ms
- 原子发光持续时间约 1ns
- 顶夸克寿命约  $10^{-24} \text{s}$

# 热学的研究方法

---

## 宏观方法

### 热力学方法 (Thermodynamics)

根据观测和实验事实，从热力学定律出发，通过逻辑推理和演绎，研究热力学系统的热学性质。

## 微观方法

### 统计物理方法 (Statistical Physics)

从物质结构的一定的微观模型出发，采用统计平均的方法，找出物体的宏观量与微观量的平均值之间的关系。

两种研究方法角度不同, 相辅相成

# 第一章：热力学系统的平衡态与状态方程

---

## 1.1、物质结构的基本图象

物质是由什么组成的？从古到今，人们一直在探寻答案。

- 四元素说

四元素说是古希腊关于世界的物质组成的学说。这四种元素是土、气、水、火。这种观点曾长时间影响着人类科学的发展。在中世纪，四元素说是炼金术的理论依据。四元素说承认了世界的物质性，是其进步的一面。但是却使化学的发展长期受到了阻碍。

- 五行说

五行指：金、木、水、火、土，是中国古代的一种物质观。多用于哲学、中医学和占卜。认为宇宙万物都由这五种要素的运行（运动）和变化所构成，随着这五个要素的盛衰，而使得大自然产生变化，不但影响到人的命运，同时也使宇宙万物循环不已。它强调整体概念，描绘了事物的结构关系和运动形式。如果说阴阳是一种古代的对立统一学说，则五行可以说是一种原始的普通系统论。





Demokrit

古希腊哲学家  
**德谟克利特**  
公元前460-371

德谟克利特一生勤奋，知识渊博，在哲学、逻辑学、物理、数学、天文、动植物、医学、心理学、伦理学、教育学、修辞学、军事、艺术等方面都有所建树。

在第欧根尼·拉尔修的记载中，他通晓哲学的每一个分支，同时，他还是一个出色的音乐家、画家、雕塑家和诗人。他是**古希腊杰出的全才**，在古希腊思想史上占有很重要的地位。

他认为，万物的本原是原子和虚空。原子是不可再分的物质微粒，虚空是原子运动的场所。人们的认识是从事物中流射出来的原子形成的“影像”作用于人们的感官与心灵而产生的。在伦理观上，他强调幸福论，主张道德的标准就是快乐和幸福。著有《小宇宙秩序》、《论自然》、《论人生》等，但仅有残篇传世。



## 德谟克利特

古希腊伟大的唯物主义  
哲学家，原子唯物论学  
说的创始人之一。

率先提出 原子论  
(万物由原子构成)

原子---Atom

“不可分割的意思”

# 物质结构的基本图象

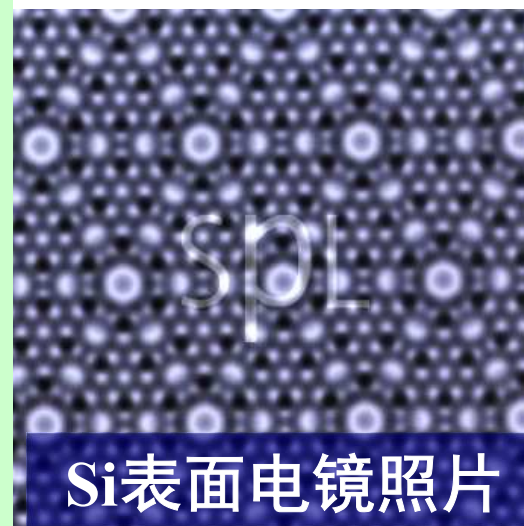
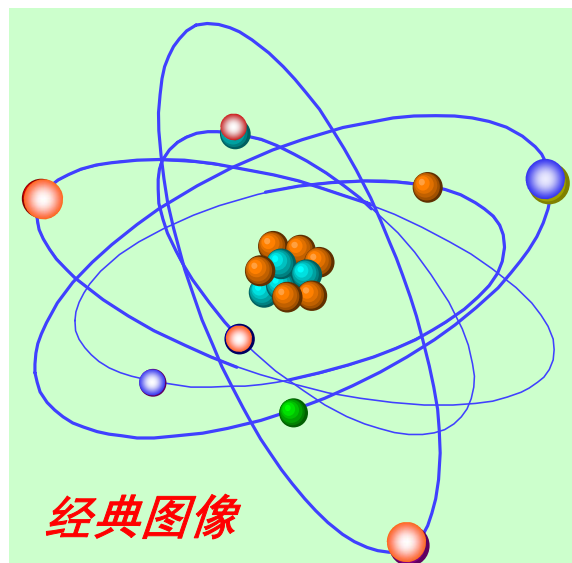
---

- 物质由分子、原子组成，物质结构是分层次的
- 分子处于不停顿的无规则运动状态 布朗运动
- 分子间存在相互作用力 势能曲线

- 物质由分子原子组成，物质结构是分层次的

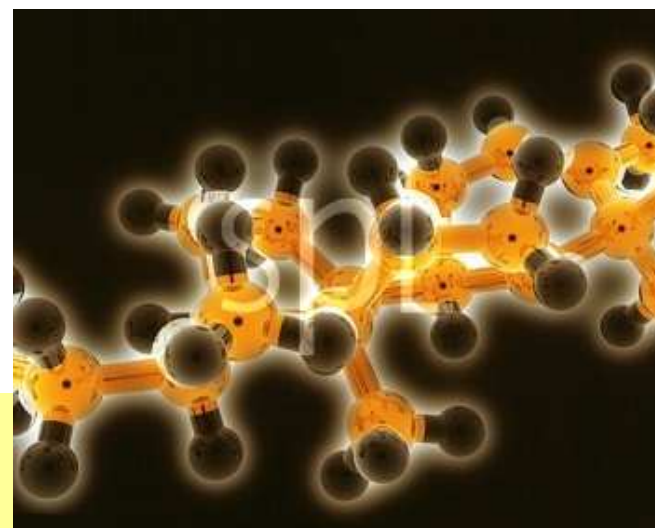
原子：

是组成单质和化合物的基本单元，它由原子核和电子组成。



分子：

是组成物质的保持物质化学性质的最小单元。 如：  
 $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$ , ...

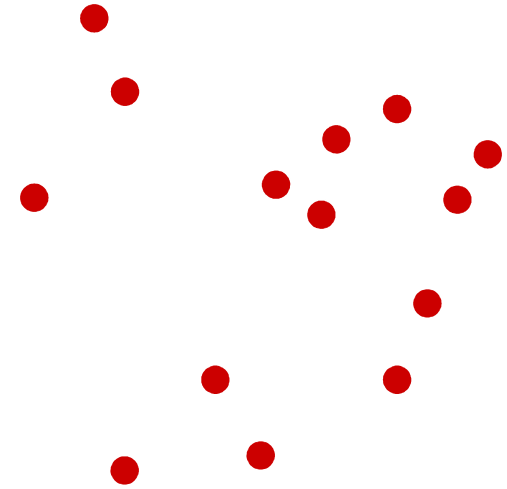


分子、原子的线性尺度 $\sim 0.1\text{nm}$

- 分子处于不停顿的无规则运动状态

不停顿: 分子动量不为0;

无规则: 整体质心动量为0。



**热运动(Thermal Motion) :**

组成宏观物体的大量微观粒子(分子、原子)的一种永不停息的无规则的运动。是比机械运动更复杂, 更高级的运动。

**实验证据: 布朗运动 (Brownian Motion)。**

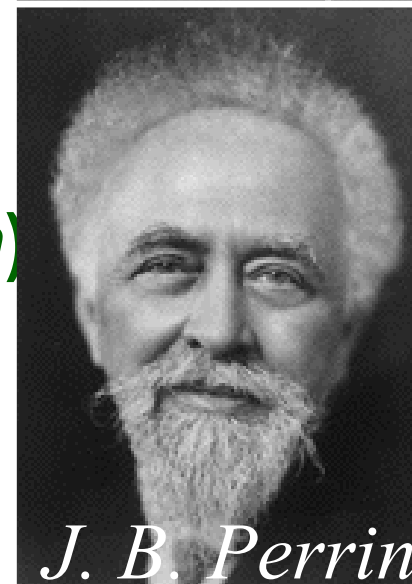
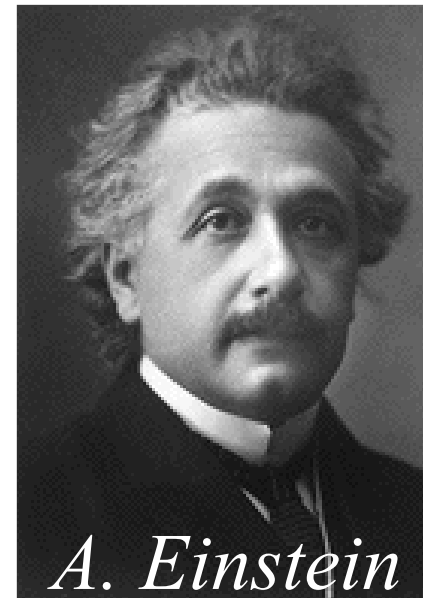
- **1827 [英]**植物学家布朗  
(*R. Brown*)发现布朗运动

- **1877 德尔索 (*J. Delsau*)**  
指出布朗运动产生的原因

- **1905 爱因斯坦 (*A. Einstein*)**

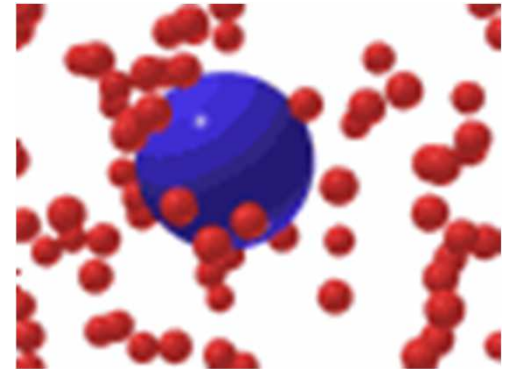
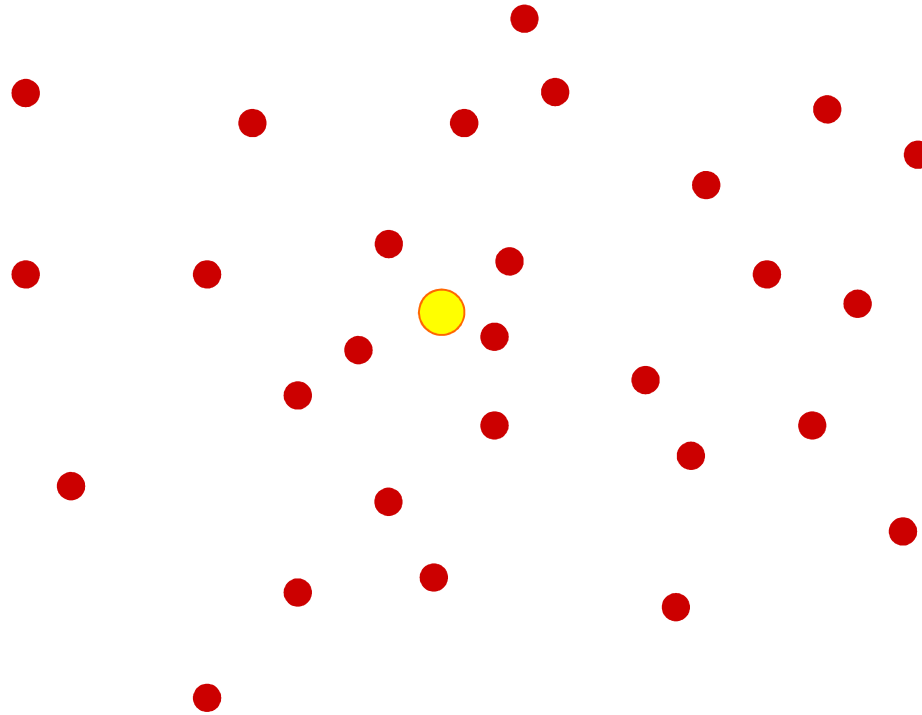
提出布朗运动的定量理论  
 $x^2 \propto t$  ,  $X$ --粒子位移

- **1908 [法]佩兰 (*J. B. Perrin*)**  
实验证实了爱因斯坦理论,  
获**1926**年诺贝尔物理奖。





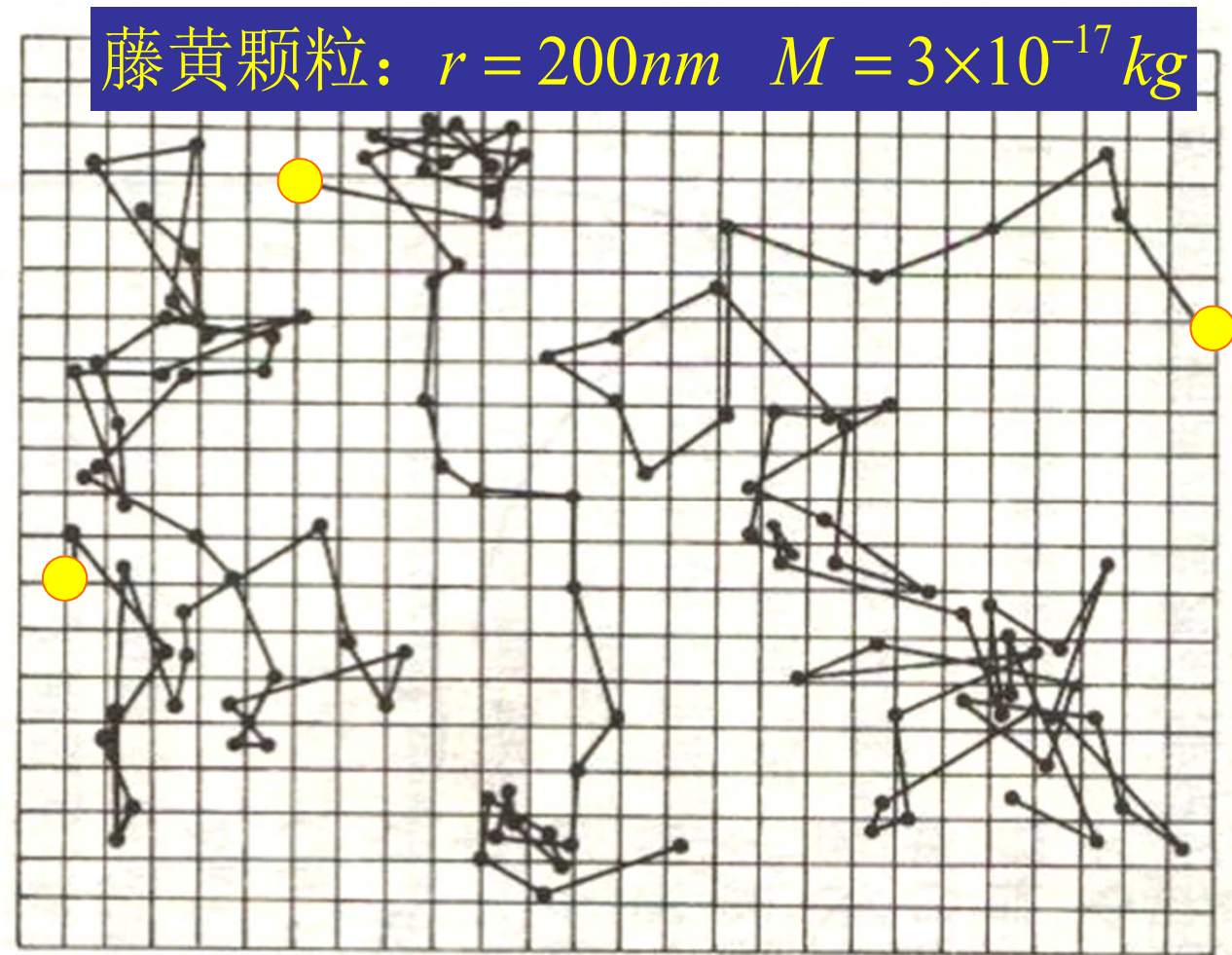
## Brownian Motion (视频)



# 布朗运动实验

佩兰(Perrin)  
1908年做的  
布朗运动实验

布朗运动:  
布朗粒子  
在其周围分子  
无规则撞击下  
所作的无规则  
跳动。



藤黄粉末悬浮在水中, 在显微镜下记录粒子每30秒的位置。



- 分子（原子）间存在相互作用力，称作分子力；
- 分子力是保守力，

$$dU(r) = -fdr \quad \text{保守力做功} = \text{势能减少}$$

$$f = -\frac{dU(r)}{dr}$$

$f$  - 大小正比于势能斜率  
- 指向势能下降方向

- 分子力可以用势能曲线表示； 林纳德-琼斯势

$$U(r) = -\int_{-\infty}^{\infty} fdr = \frac{a}{r^{\alpha}} - \frac{b}{r^{\beta}}$$

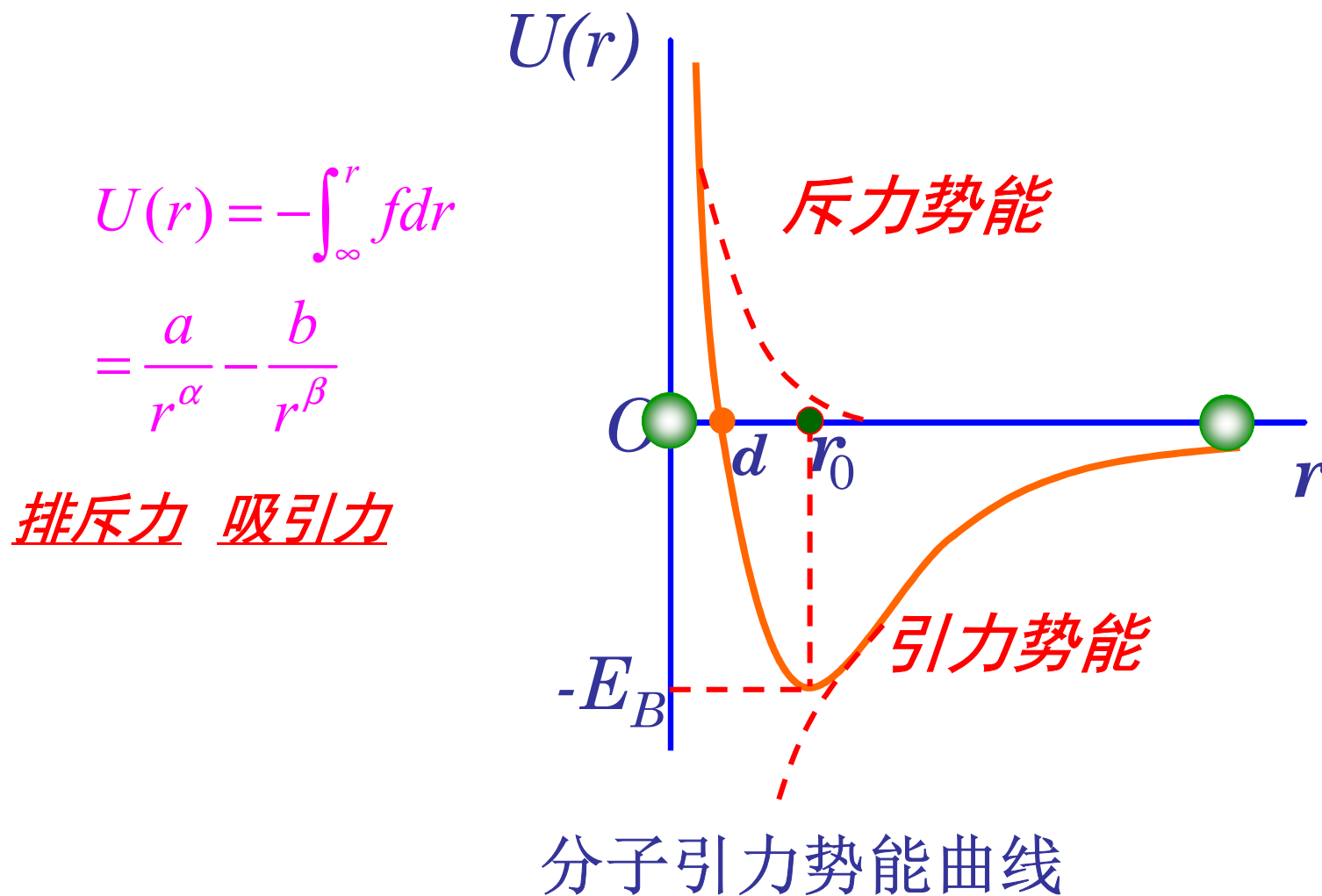
排斥力   吸引力

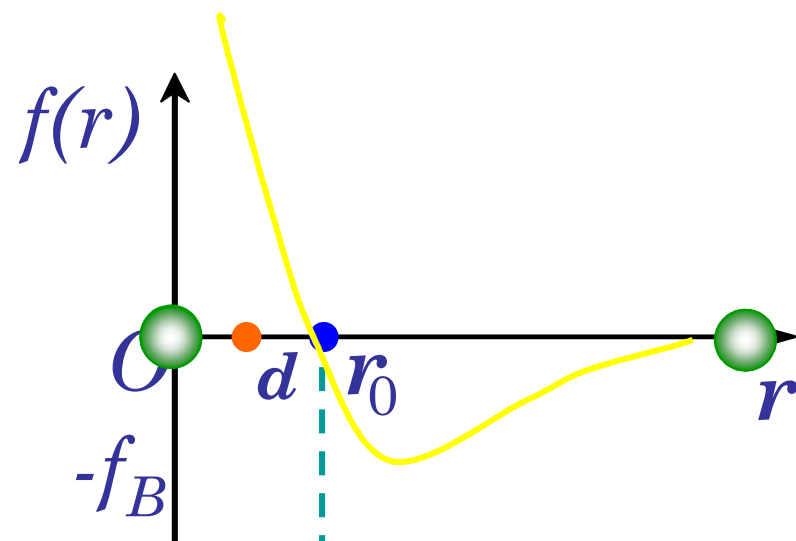
$\alpha: 8 \sim 14$   
 $\beta: 3 \sim 6$

势能：重力势能、弹性势能

弹性势能是分子间相互作用的宏观表现。

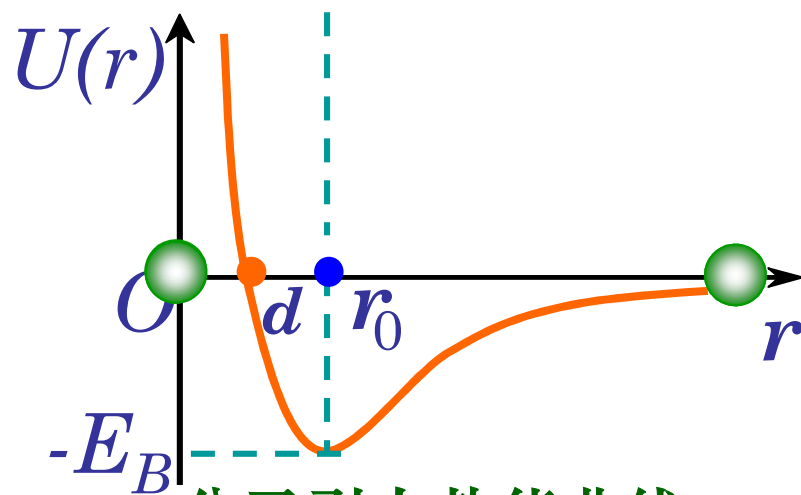
- 分子间存在相互作用力 势能曲线





分子间引力曲线

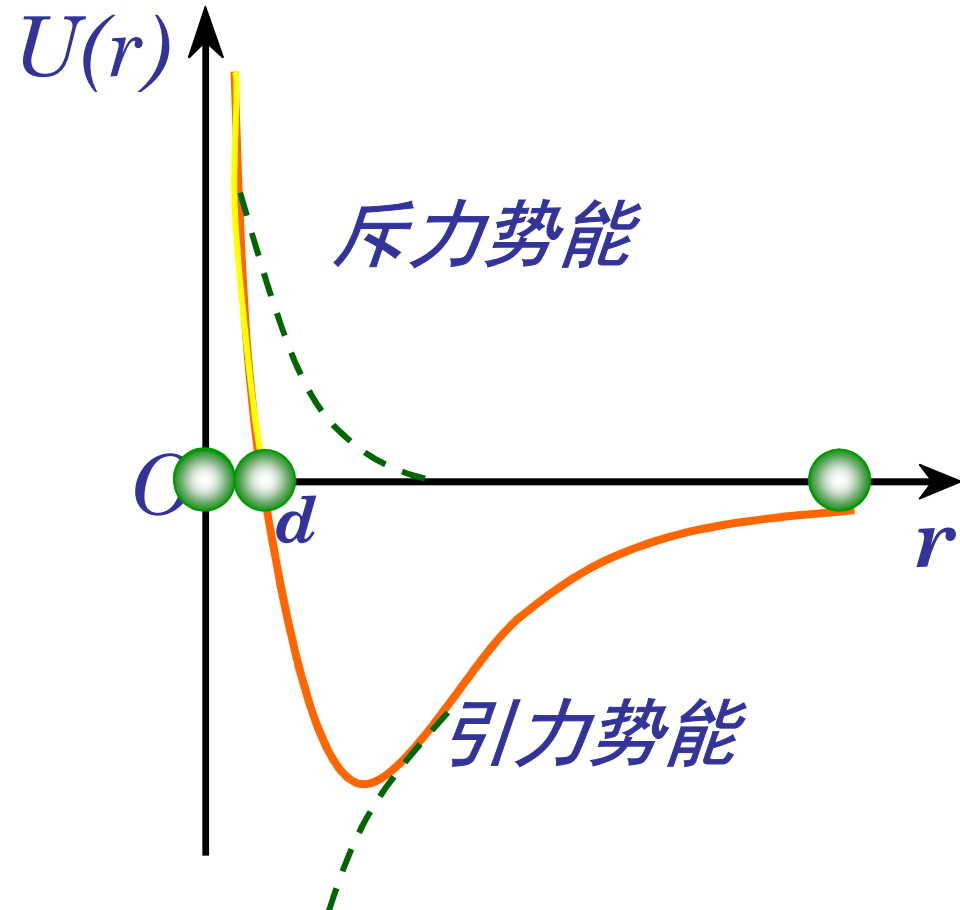
$$f = -\frac{dU(r)}{dr}$$



分子引力势能曲线

# 势能曲线

1.  $r < d$ ,  $U$  急剧增加;
2.  $d = 2a$ ;  
(原子半径  $a$ ,  $0.1\text{nm}$  量级)
3. 取  $r = \infty$  处势能为 0,  
(即相互作用力为 0)  
则  $r > d$  时, 势能  $< 0$ ;



分子引力势能曲线

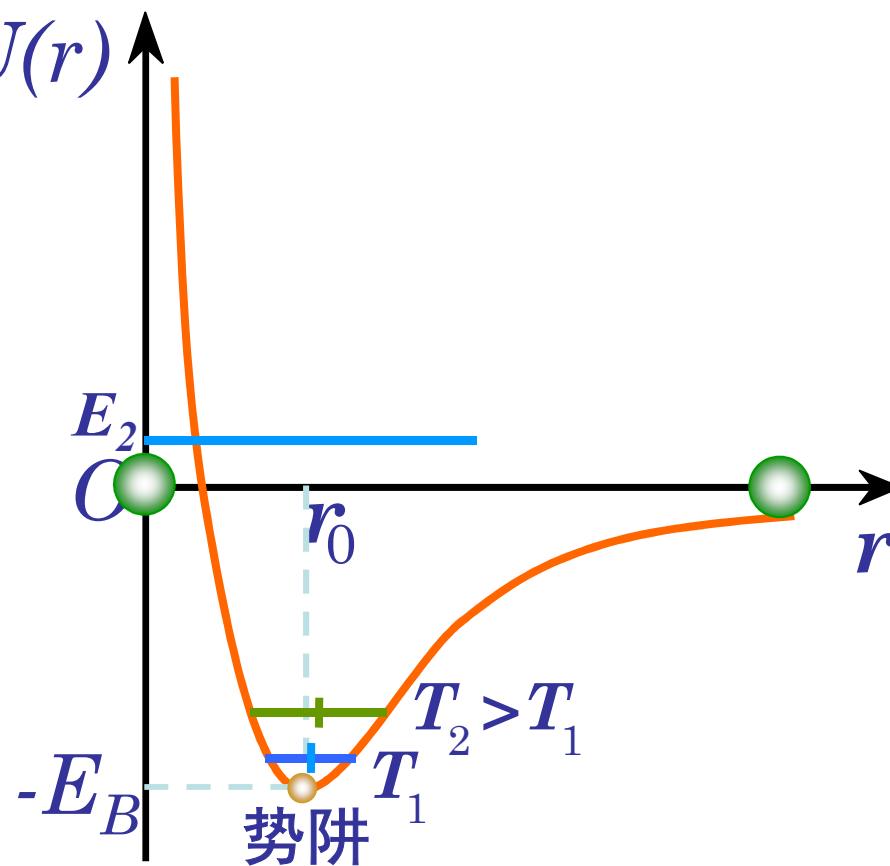
4.  $r = r_0$  是稳定态;  
 $r_0$ : 分子结合的平均距离;  
当原子动能不大时, 相当于固体情形。

5.  $r_0$  附近  $U$  为抛物线  
—— 胡克定理特征

6.  $E_B$  —— 结合能

7.  $r_0$  附近  $U$  不对称  
—— 热膨胀起源

8.  $E = E_2 > 0$  —— 气体



分子引力势能曲线

进一步讨论:

### 1. 分子总能量 $E_1$

a点处: 势能=总能量 $E_1$   
动能为0, 分子受力向右;

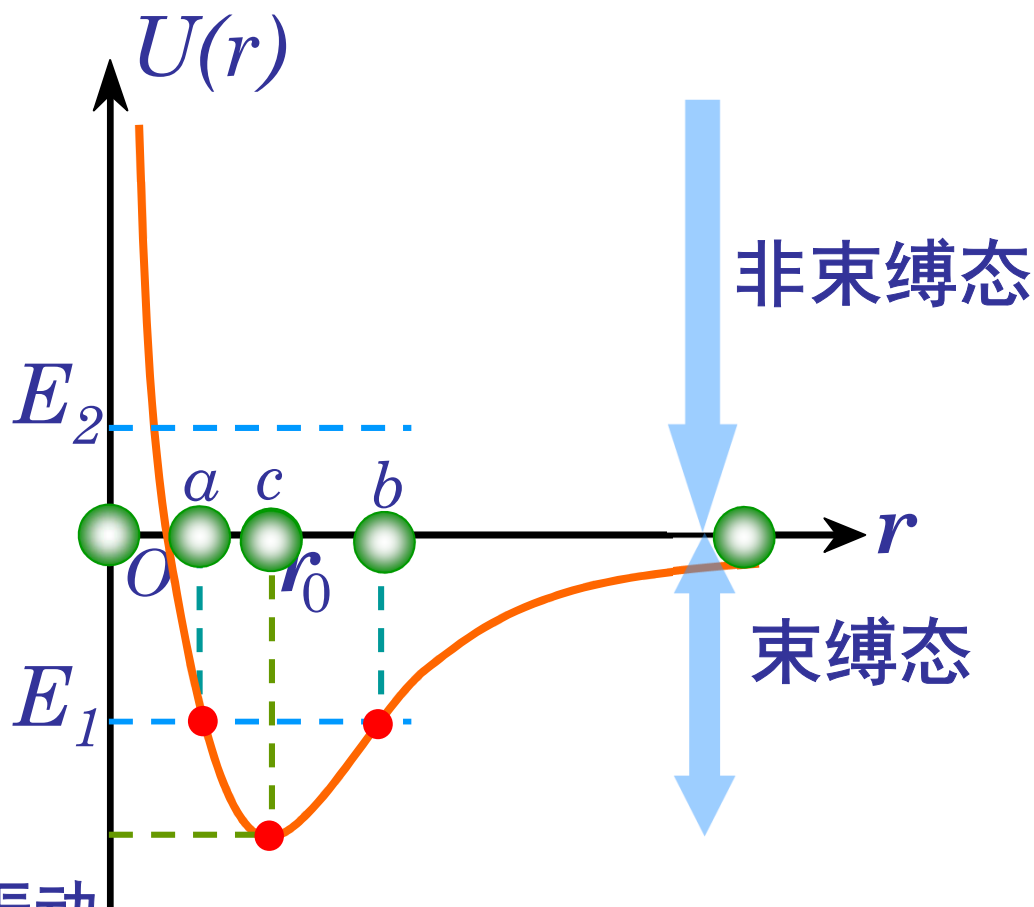
c点处: 势能最小, 动能最大, 分子不受力, 速度向右;

b点处: 势能=总能量 $E_1$   
动能为0, 分子受力向左.

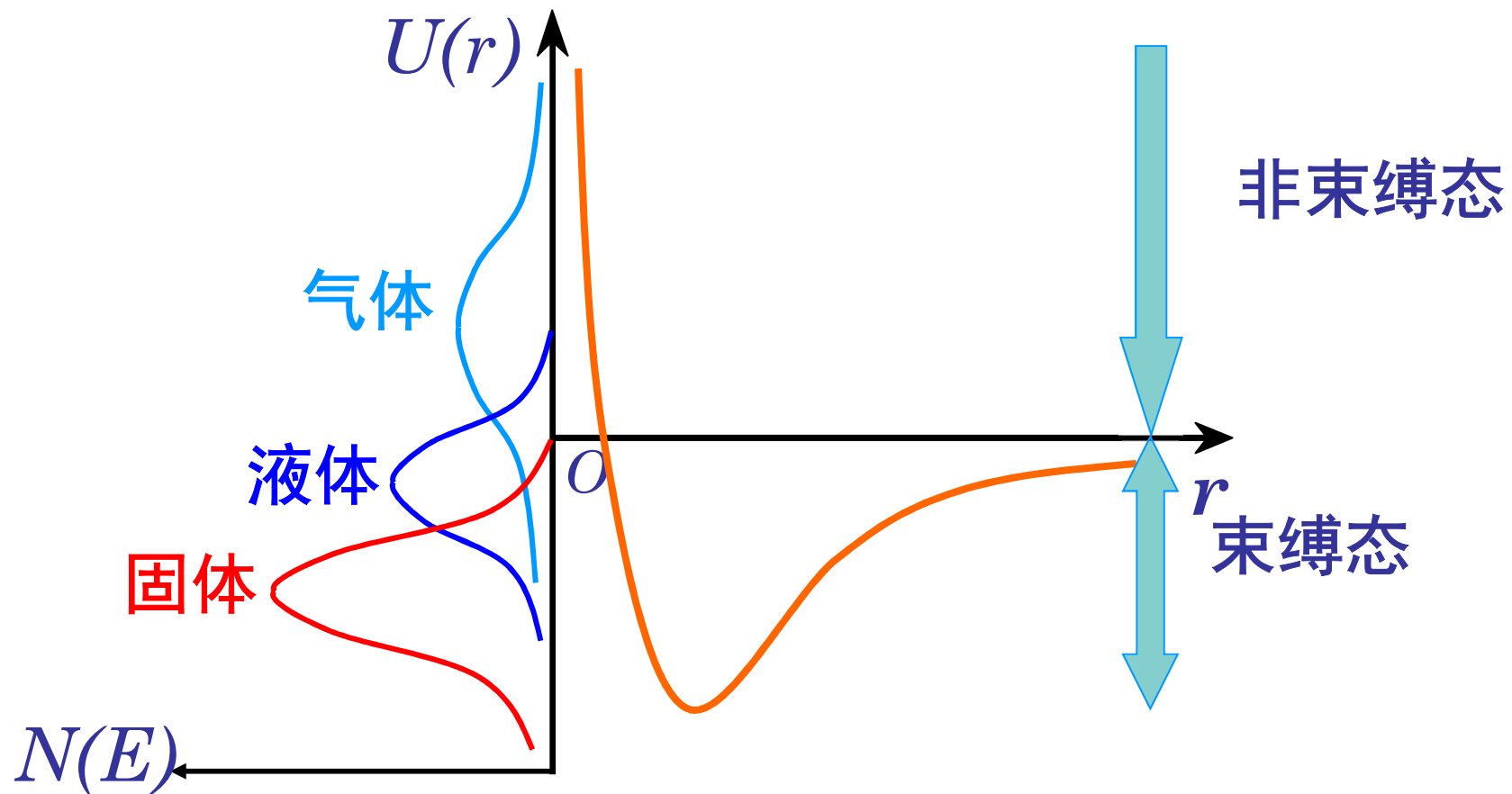
即: 分子在平衡点 $c$ 附近振动

### 2. 分子总能量 $E_2$

分子处于非束缚态



# 固体、液体和气体的能量分布



## 1.2、热力学系统及其状态参量

---

热力学系统：由大量微观粒子组成的宏观物体

### 热力学系统的分类

- 系统与外界的关系

外界(环境)：与热力学系统发生相互作用的其它物体

{	孤立系：	无物质交换，也无能量交换
	绝热系：	无热量交换
	封闭系：	无物质交换
	开放系：	有物质交换和能量交换



# 热力学系统的分类

---

- 系统的组成成分

单元系

多元系

CO<sub>2</sub>气体是单元系还是多元系?  
举出一个多元系的例子

- 系统的组成的均匀性

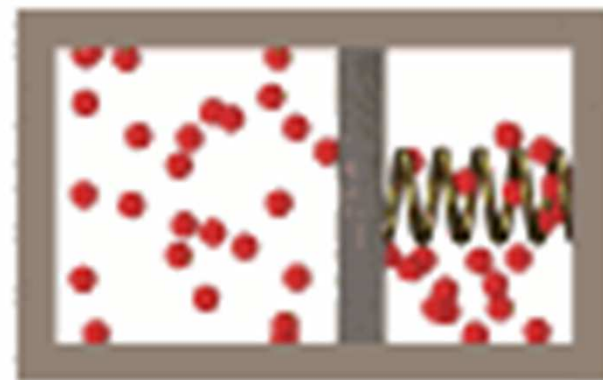
单相系（均匀系）

复相系（非均匀系）

# 热力学系统的状态参量(State Variable)

---

- 体积 几何(数学) 参量
- 压强 力学参量
- 气体成分 化学参量
- 电磁现象 电磁参量
- 物体的冷热程度 温度



温度是热学所特有的状态参量

## 1.3 平衡态的概念

---

- 平衡态(Equilibrium State)

在没有外界影响的条件下，系统各个部分的宏观性质长时间里不发生变化的状态。

- 稳定态(Stable State)

在外界影响下，宏观性质长期不变的状态。

# 平衡态(Equilibrium State)

---

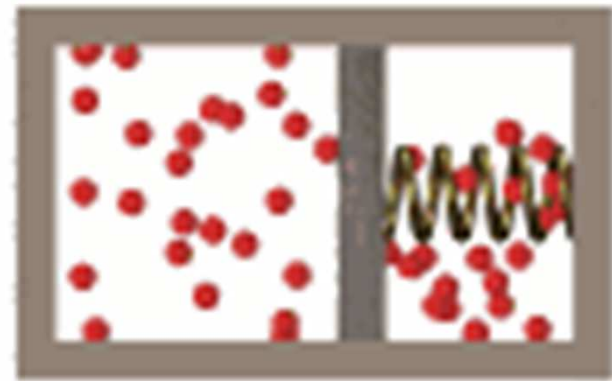
- 没有外界影响, 宏观性质长时间里不发生变化,  
**是两条必要条件, 缺一不可, 区别于稳定态**
- 平衡态要求各状态参量不变, 系统各部分达到**力学平衡, 化学平衡和热学平衡**。但是, 微观量随时间迅速变化, 其统计平均值保持不变。  
**化学平衡** 浓度相同 化学成分不变 无相变  
**热力学平衡是“热动平衡” 有“涨落”**
- 平衡态是一个理想概念。

# 弛豫时间 (Relaxation Time)

---

非平衡态达到平衡态所需要的时间。

如果弛豫时间远小于  
外界变化的时间尺度，  
近似为平衡态。



例：活塞运动：< 10m/s,

气体运动速率：~ 500m/s,

压强传播速度：~ 声速 几百m/s

## 1.4 温度与温标

---

- 温度概念与热力学第零定律

直观定义:

标记物体冷热程度的物理量称为温度。两个处于热平衡的物体冷热程度是相同的，它们的温度也是相同的。

- 特点:
- 温度是热物理学中特有的物理量;
  - 温度是**状态参量**;
  - 温度的高低表示热的程度, 不是热的数量。

本质: 温度是组成物体的大量分子无规则运动剧烈程度的表现。

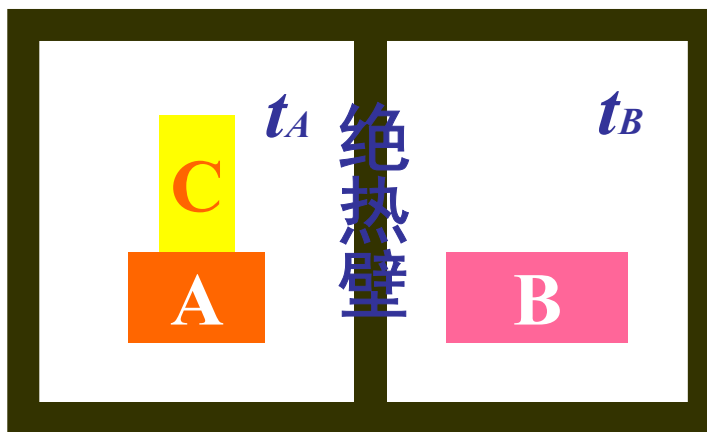
# 温度相同的判定原则—热力学第零定律

- 两个物体**A**、**B**的温度相同



两个相互处于热平衡的物体温度相同。

- 判别两个物体**A**、**B**的温度 需要第三者作标准



物体**A**、**B**达到热平衡，  
C分别与**A**、**B**达到热平衡，

$$t_A = t_B ?$$

- 理论无法证明
- 通过实验证明



## 热平衡定律----热力学第零定律(1939年):

在不受外界影响的条件下, 如果两个热力学系统中的每一个都与第三个热力学系统处于**热平衡**, 则它们彼此也必定处于**热平衡**

处于热平衡态的所有系统都具有一个共同的宏观性质(物理量), 即**温度**

或 一切互为热平衡的系统都具有相同的温度



# 热力学第零定律的意义

---



热力学第零定律确立了处于平衡态系统  
温度和状态方程的存在性。

The "zeroth law" states that if two systems are at the same time in thermal equilibrium with a third system, they are in **thermal equilibrium** with each other.

## • 温标 —— 温度高低的数值标定（定量化）

---

### 温标三要素：

1. 测温物质：选定作为标准的第三个物体。

如：气体、固体。

2. 测温属性：选定测温物质的某物理量作为标记温度的属性。

例如：气体的体积、压强，固体的电阻、发光强度。

要求：与温度有单值的显著的函数关系的物理量，  
并包括测温曲线。测温曲线一般是直线。

3. 固定标准点：规定标准点的状态及其温度值。

热力学温标：水的三相点为标准点，定位273.16K。

三相点(**Triple point**):

冰、水和水蒸气三相共存并达到平衡态。

# 四类温标

- 经验温标： 华氏 摄氏

$$t_F(^{\circ}F) = 32 + \frac{9}{5}t(^{\circ}C)$$

- 理想气体温标：

定体  $T_V(p) = 273.16 \lim_{p_{tr} \rightarrow 0} \frac{p}{p_{tr}}$

p.16 图 1-4  
p.17 (1.7)  $p_{tr} \rightarrow 0$

定压  $T_p(V) = 273.16 \lim_{p \rightarrow 0} \frac{V}{V_{tr}}$

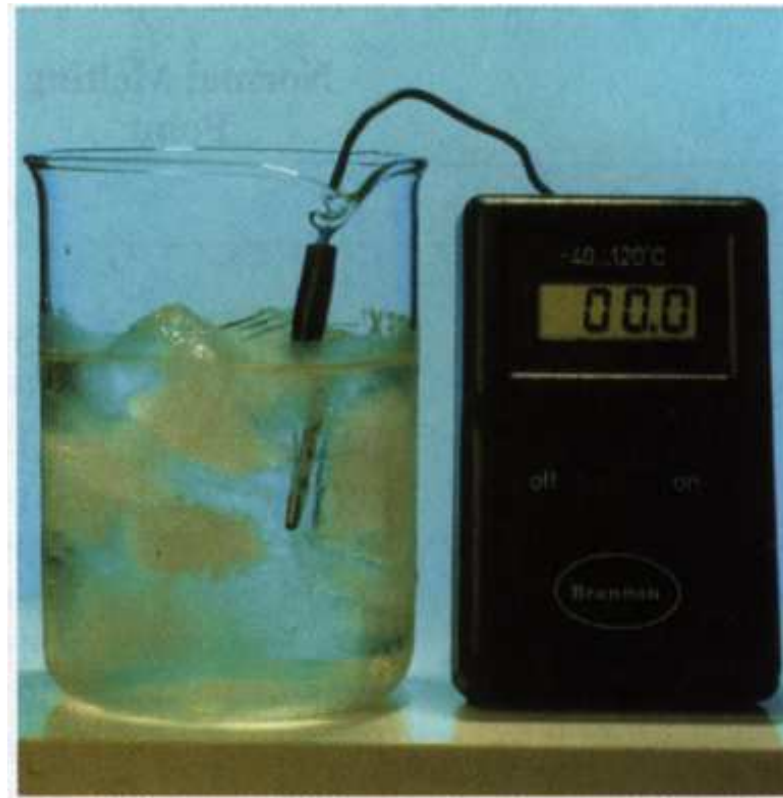
$$T(K) = 273.15 + t(^{\circ}C)$$

- 热力学温标
- 国际实用温标 **ITS** (International Temperature Scale)

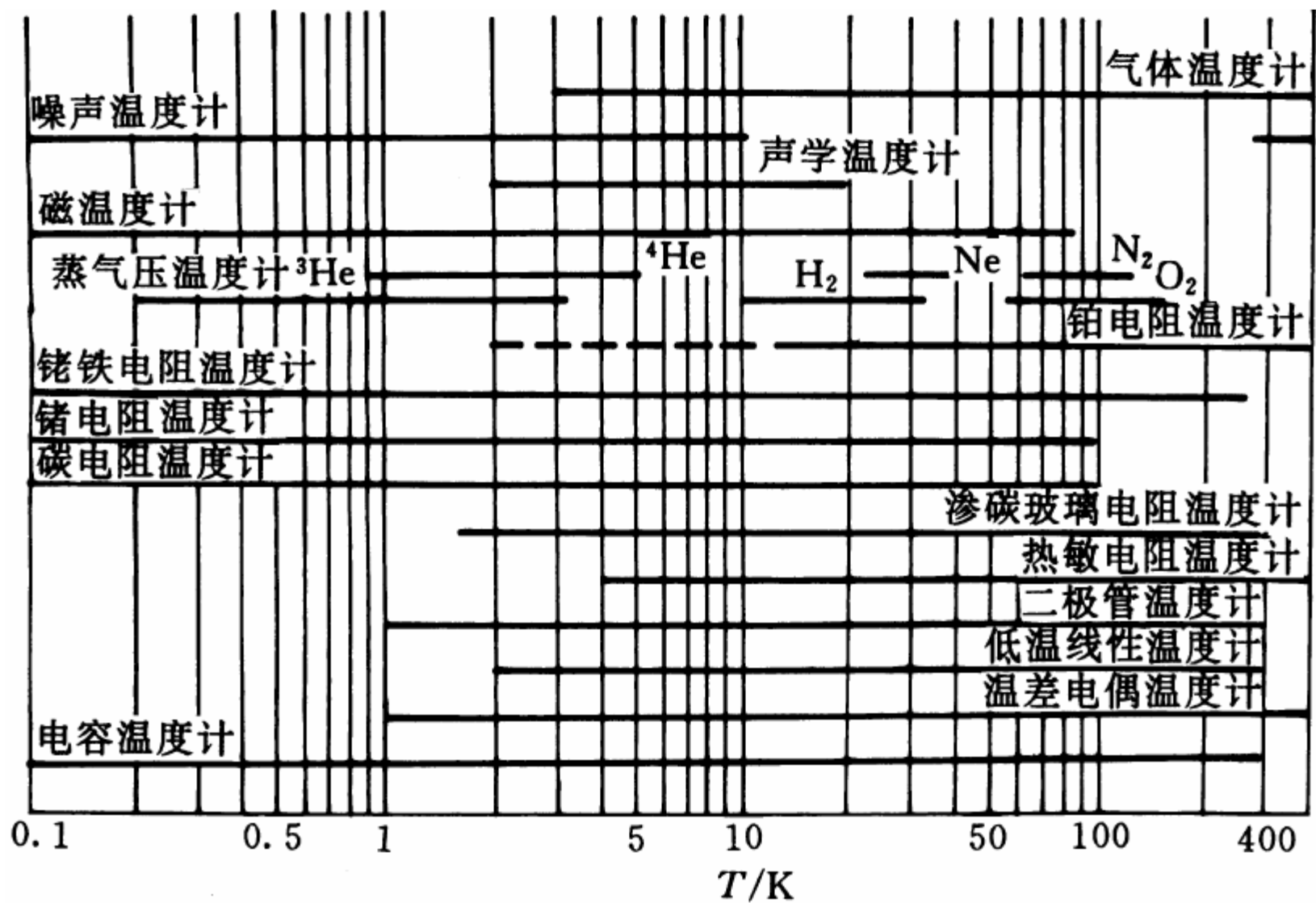
# 三相点(Triple point)

---

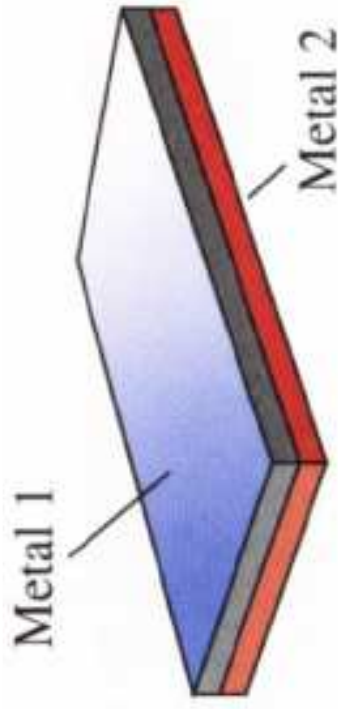
冰、水和水蒸气  
三相共存，并达  
到平衡态。



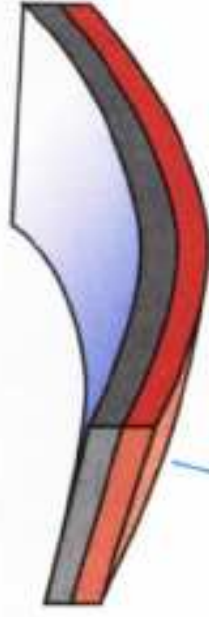
The surrounding air is at room temperature, but this ice-water mixture remains at 0 °C until all of the ice has melted and the phase change is complete.



适用于各种温度范围的温度计



(a)



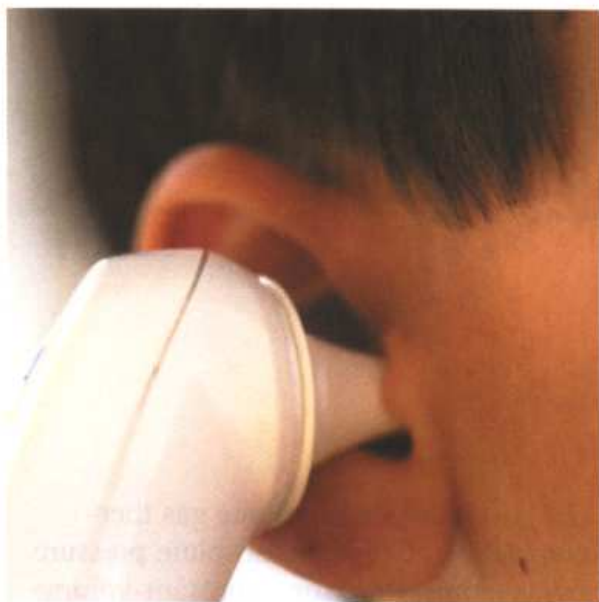
When heated  
metal 2  
expands  
more than  
metal 1

(b)



(c)

(a) A bimetallic strip. (b) The strip bends when its temperature is raised. (c) A bimetallic strip used in a thermometer.



An ear thermometer measures infrared radiation from the ear drum, which is located far enough inside the head that it gives an excellent indication of the body's internal temperature



The element gallium has a heat of fusion of only 80kJ/kg and a melting temperature of  $29.8^{\circ}\text{C}$  ( $85.6^{\circ}\text{F}$ ) — it melts in the hand.





**Lord Kelvin**  
**1824-1907**

开尔文，19世纪英国卓越的物理学家。原名W.汤姆孙 *William Thomson*，1824年6月26日出生于爱尔兰的贝尔法斯特，1907年12月17日在苏格兰的内瑟霍尔逝世。由于装设大西洋海底电缆有功，英国政府于1866年封他为爵士，后又于1892年封为男爵，称为开尔文男爵，此后改名为开尔文。

开尔文研究范围广泛，在热学、电磁学、流体力学、光学、地球物理、数学、工程应用等方面都做出了贡献，一生发表论文多达600余篇，取得70种发明专利。

为了纪念这位伟大的物理学家，将开尔文定为热力学温度的单位，是现在国际单位制中七个基本单位之一。





• 温度测量

• 绝对温度

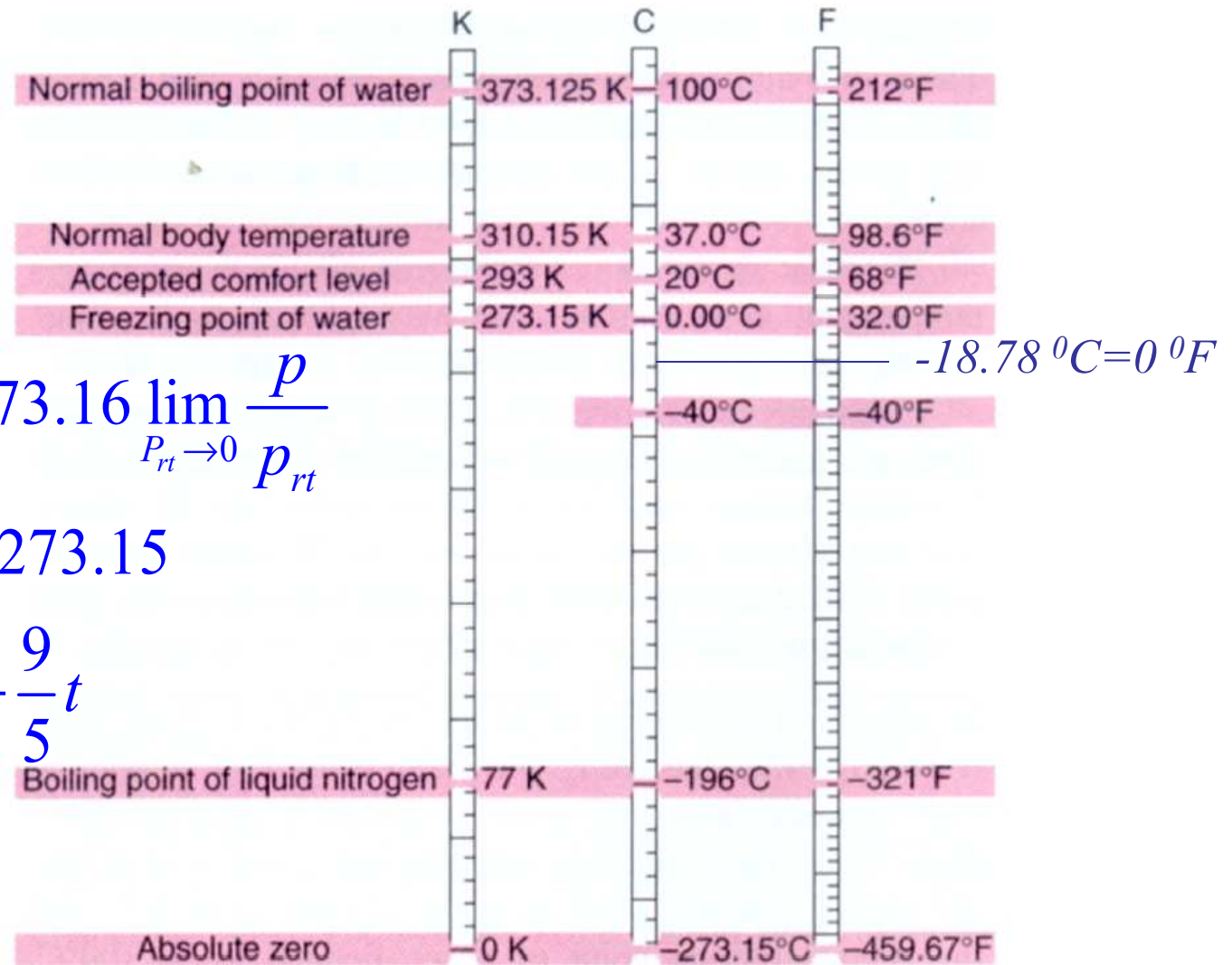


## 温度测量

$$T_V(p) = 273.16 \lim_{P_{rt} \rightarrow 0} \frac{p}{p_{rt}}$$

$$t = T - 273.15$$

$$t_F = 32 + \frac{9}{5}t$$



The Kelvin, Celsius, and Fahrenheit temperature scale compared.

*Note that the latter two scales coincide at -40°*

# 第1章 作业

第2, 5, 6, 7, 9, 11, 13, 14题

第22, 23, 26, 27, 29题

1.3 ; 1.10 ; 1.12 ; 1.13 ;  
1.17; 1.21; 1.23; 1.25; 1.28