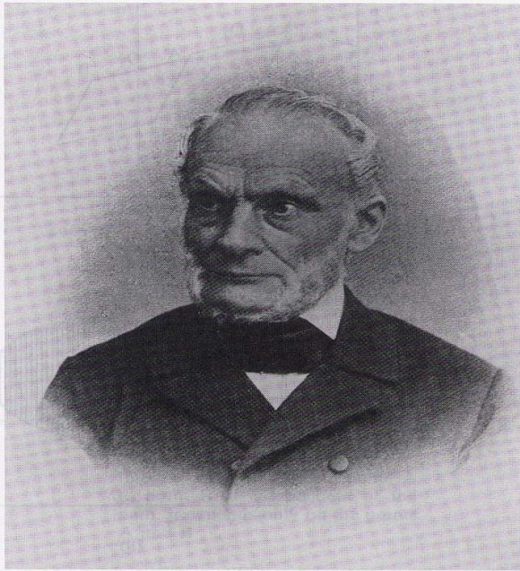


现代物理学概论

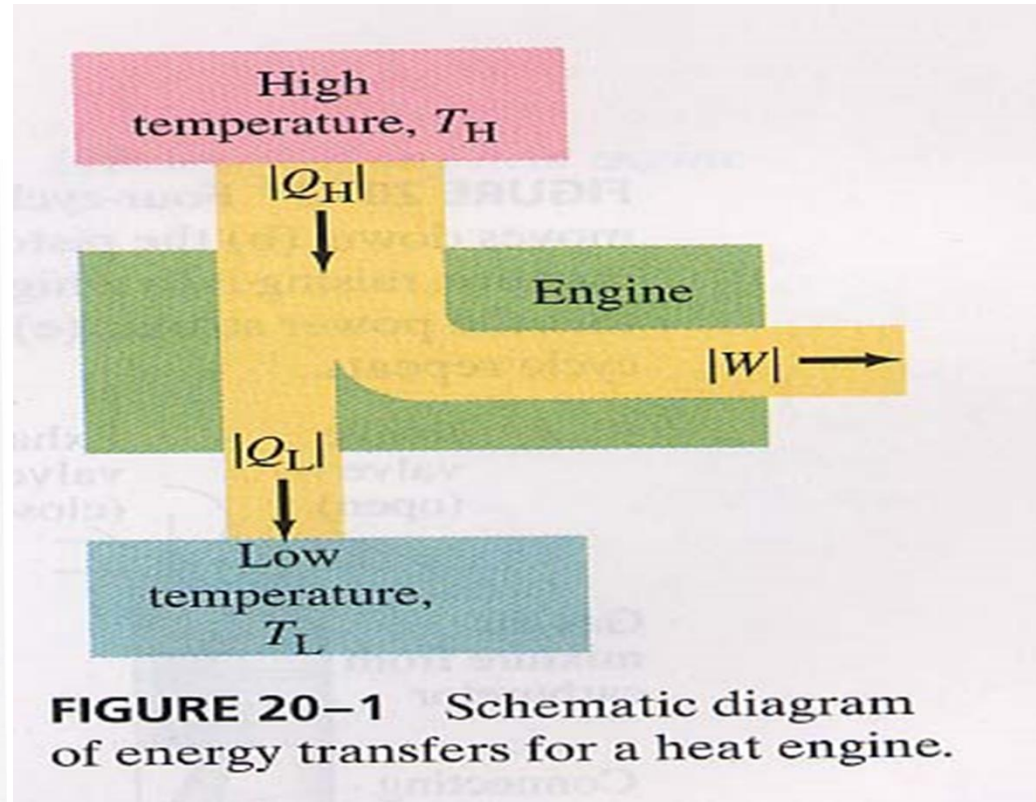
演生现象与热力学相变

克劳修斯 R. Clausius

“熵”



Rudolf Clausius (1822–1888) (Courtesy the E. F. Smith Collection, Van Pelt-Dietrich Library, University of Pennsylvania)



“The energy of the universe is a constant. The entropy of the universe approaches a maximum.”

Maxwell (1870)

The 2nd law of thermodynamics has the same degree of truth as the statement that if you throw a tumblerful of water into the sea, you cannot get the same tumblerful out of the water again.

宏观物理过程的不可逆性！

熵的Boltzmann原理



The fundamental Postulate

All microstates of an isolated system are equally likely.

Entropy is a measure of the probability of a (macro)state and that the Second law reduces to stating that natural evolution is from improbable to more probable (macro)states.

$$S = k_B \ln W$$

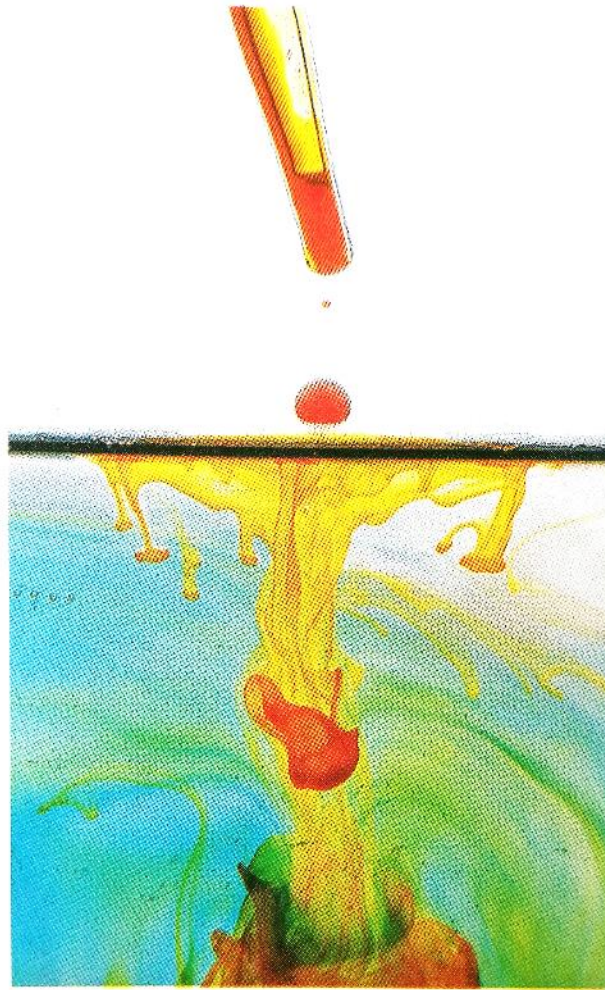
等几率假定

Macrostate	Possible microstates (H = heads, T = tails)	Number of microstates
4 heads	HHHH	1
3 heads, 1 tail	HHHT, HHTH, HTHH, THHH	4
2 heads, 2 tails	HHTT, HTHT, THHT, HTTH, THTH, TTHH	6
1 head, 3 tails	TTTH, TTHT, THTT, HTTT	4
4 tails	TTTT	1

$$S = k_B \ln W$$

TABLE 20–1 Probabilities of various macrostates for 100 coin tosses

Macrostate		Number of microstates W
Heads	Tails	
100	0	1
99	1	1.0×10^2
90	10	1.7×10^{13}
80	20	5.4×10^{20}
60	40	1.4×10^{28}
55	45	6.1×10^{28}
50	50	1.0×10^{29}
45	55	6.1×10^{28}
40	60	1.4×10^{28}
20	80	5.4×10^{20}
10	90	1.7×10^{13}
1	99	1.0×10^2
0	100	1



演化现象的不可逆！

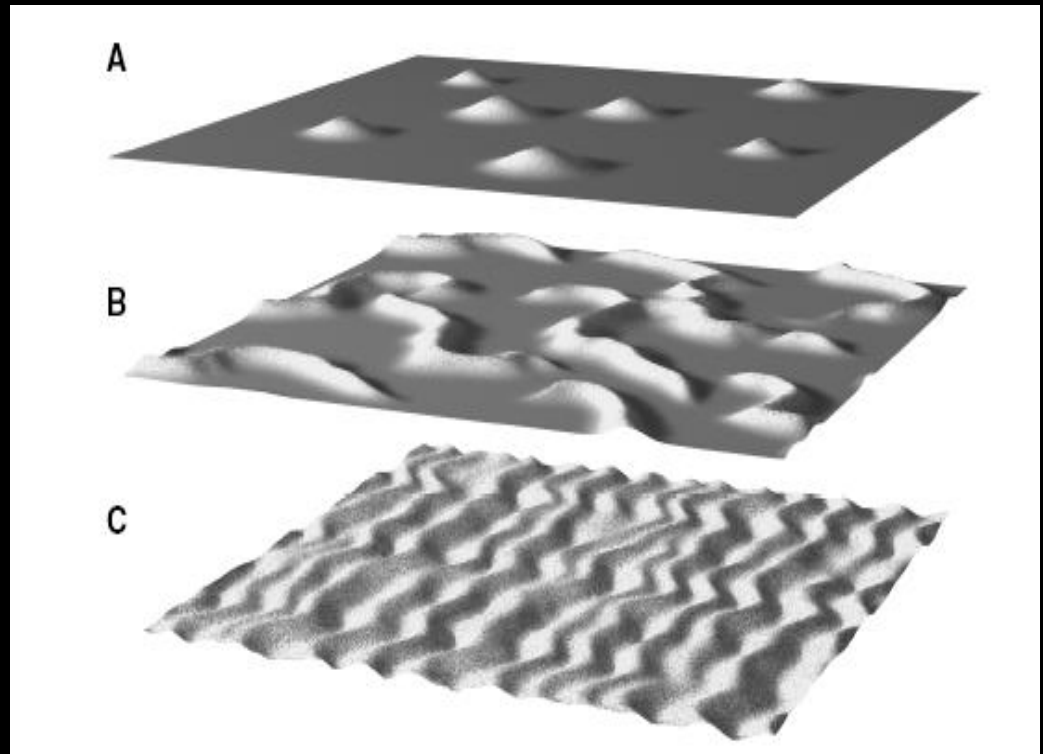
20.17 The mixing of colored ink and water starts from a state of relative order (low entropy) in which each fluid is separate and distinct from the other. The final state after mixing is more disordered (has greater entropy). Spontaneous unmixing of the ink and water, a process in which there would be a net decrease in entropy, is never observed.

How to gain a deeper understanding of our world?



大量的简单基元构成的复杂体系会 “演生”全新的特性—普遍现象

万有引力和风
(海浪) 共同作用
下形成沙堆图案



引力和转动的共同影响下 形成星系的螺旋结构

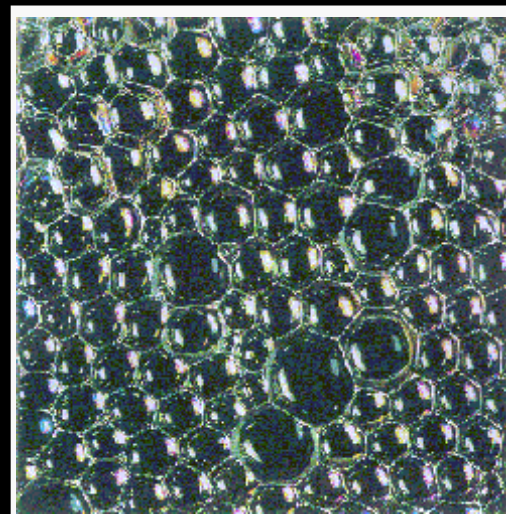


“演生现象” (Emergent phenomena)?

Emergence 的通常含义：人影从暗处闪出，
潜艇从水中涌出，(影片、小说) 故事情节显露...

这里的含义：大量基元 (agent) 构成的体系
呈现预想不到的复杂现象—自组织、自组装

最简单的例子：肥皂(洗衣粉)
溶于水—全透明—小泡—薄膜
—能反光的肥皂泡



平衡物态与相变

如无粒子间的相互作用，则系统处于无序态，即理想气体。

如无规热运动，则系统处于能量最低态，即有序的理想晶体。

系统平衡状态的最终判定由自由能 ($F = U - TS$) 极小确定，

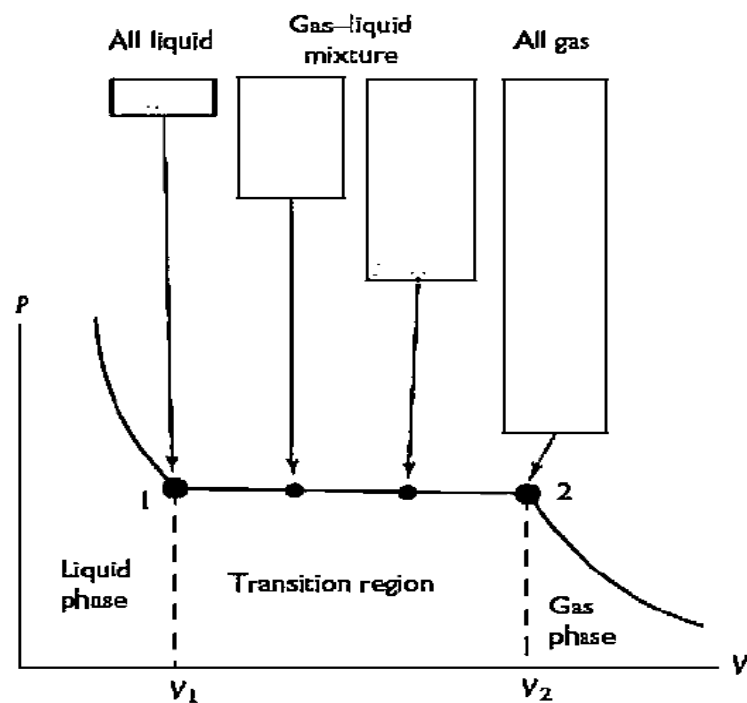
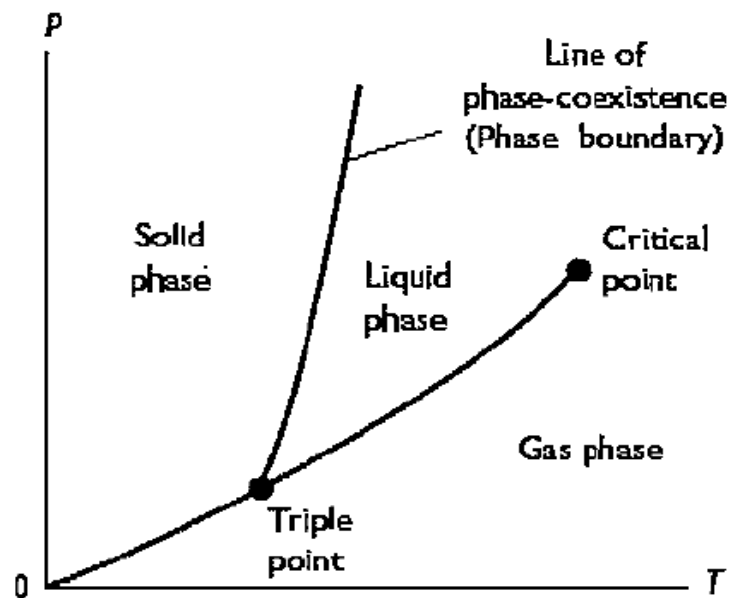
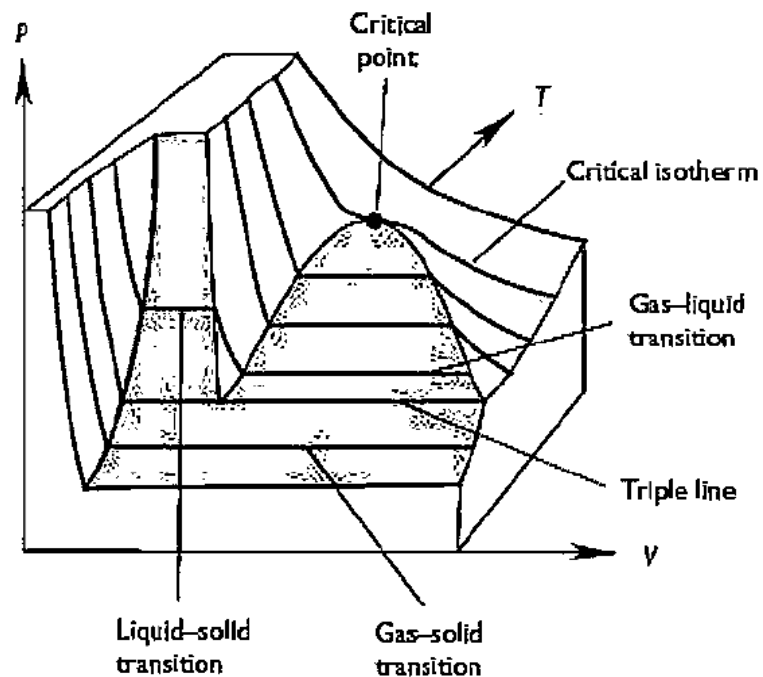
即内能极小(系统趋于有序)而熵达到极大(系统趋于无序)。

平衡状态则是系统有序和系统无序相互竞争(平衡)的结果。

相变机制：

微观粒子间的相互作用与粒子自身的热运动二者相互竞争的结果；而温度则是调节两者强弱程度的宏观外参量。

水的相图



气相-液相的一级相变

在相变点有：

$$V_{\text{I}} \neq V_{\text{II}}, \quad \Delta V = V_{\text{I}} - V_{\text{II}}$$
$$S_{\text{I}} \neq S_{\text{II}}, \quad \Delta S = S_{\text{I}} - S_{\text{II}}$$

潜热 (latent heat): $\Delta Q = T \Delta S$.

一级相变：在相变点，化学势连续，但化学势的一阶导数不连续。

一级相变特征：相变时有潜热和体积的变化；体系的宏观状态发生突变；
有过冷和过热的亚稳态存在，相变点为两相共存；
两相均为自由能极小的状态，相变点即自由能曲线的交点。

热力学熵 S ：描述系统中的微观粒子无序热运动程度的热力学量。

二级（连续）相变特征

- (a) 无潜热，无体积变化；
- (b) 宏观看，相变前后体系宏观状态无任何突变；微观看，对称性产生突变。

单轴各向异性铁磁体中的顺磁-铁磁相变：

$T > T_c$ 磁矩取向杂乱，

无序态（顺磁性）

↑↓↓↑↑↓
↑↑↓↓↑↓

$M=0$

$T < T_c$ 磁矩取向有序，

有序态（铁磁性）

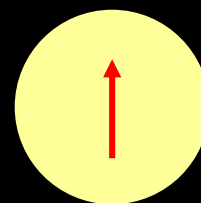
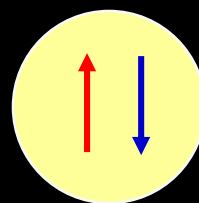
↑↑↓↑↑
↑↓↑↑↑

$M \neq 0$

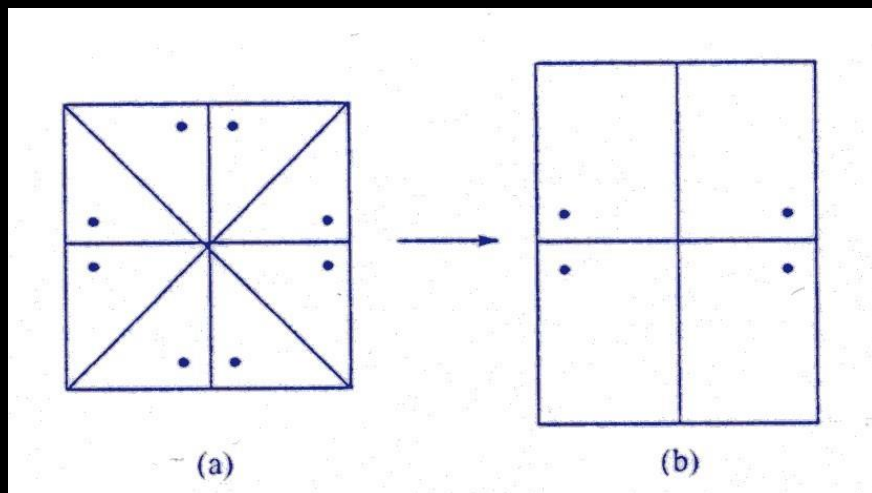
- (c) 没有亚稳态，在相变点两相不能共存；
- (d) 相变点为临界点，热力学量表现出很强的涨落和关联。
由于系统的关联长度趋于无穷大，有些物理量有发散行为，称为临界现象或合作现象。

对称破缺

离散对称 — 从自旋可以向上
或向下变成确定向上（向下）



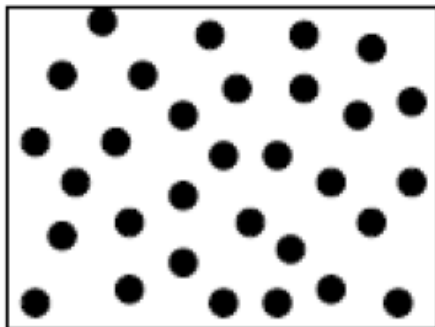
对称“破缺” — 对称元素的减少



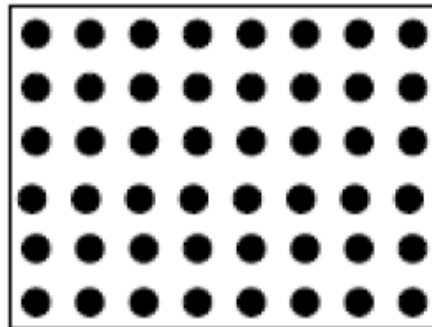
通常情形下，高温高对
称、低温低对称。

As the temperature is lowed, a phase transition always occurs from disorder to order !

气体 (无序)

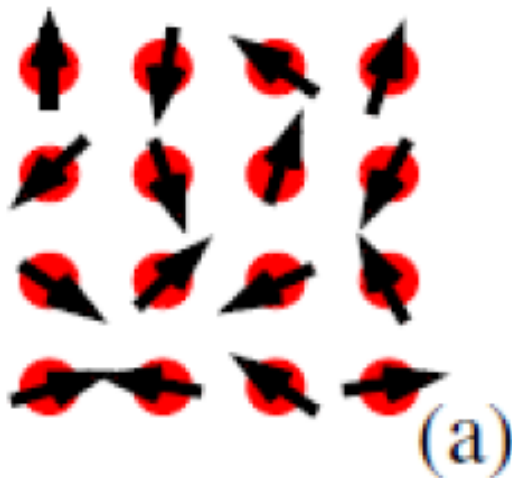


固体 (有序)

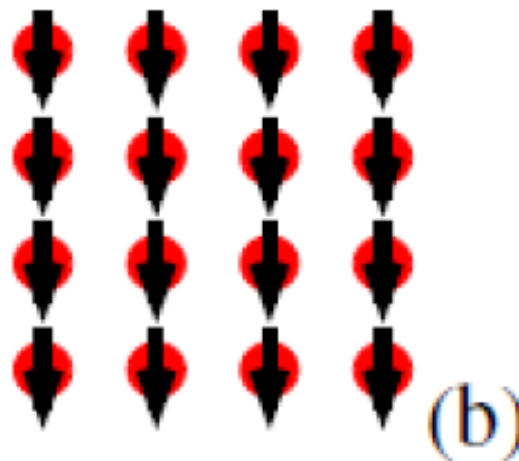


空间平移对称降低

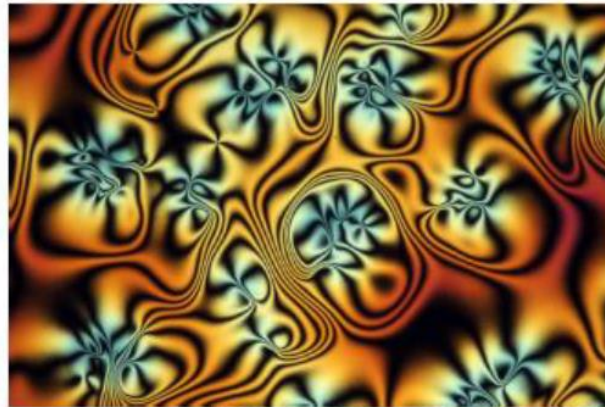
顺磁 (磁无序)



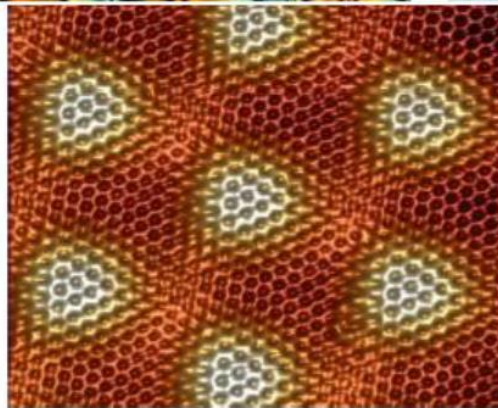
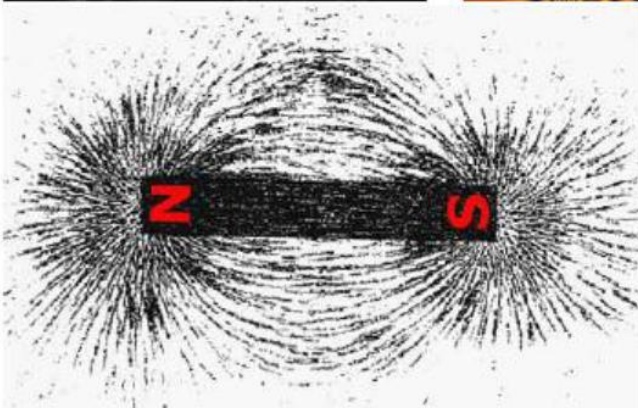
铁磁 (磁有序)



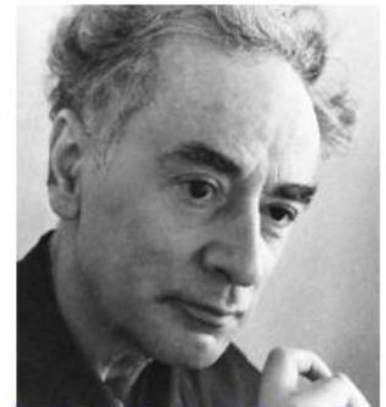
原子磁矩旋转对称降低



SCIENCEPHOTOLIBRARY

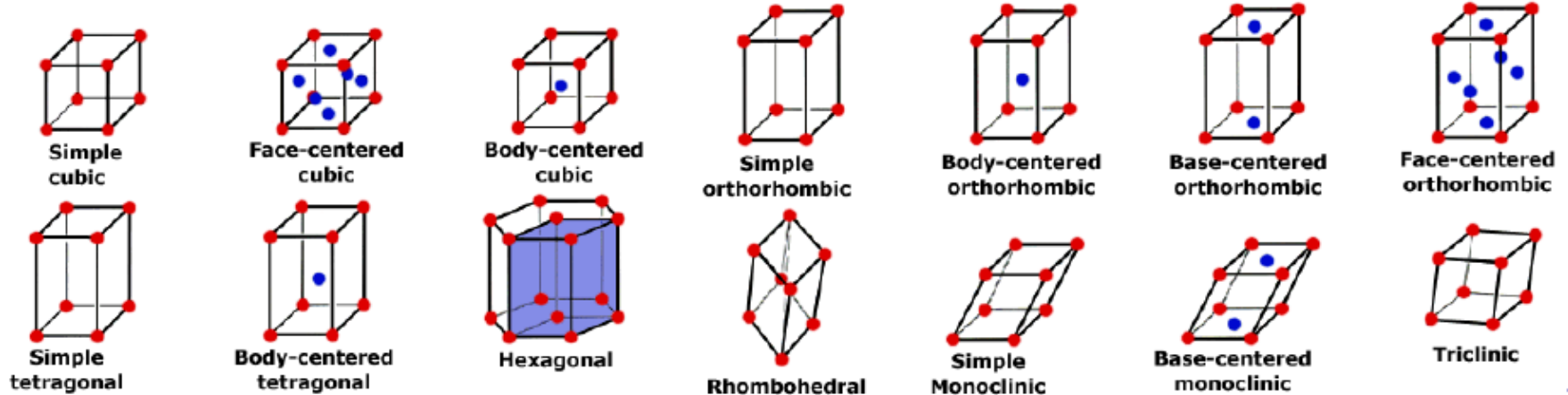


- Rich forms of matter \leftarrow rich types of orders
- A deep insight from Landau: **different orders come from different symmetry breaking.**
 - \rightarrow Symmetry breaking theory of orders
 - \rightarrow A corner stone of condensed matter physics



Solid State Crystals

From 230 ways of translation symmetry breaking, we obtain the 230 crystal orders in 3D. **The math foundation is group theory**



一级相变点不是热力学函数奇异点；
二级相变点（临界点）是热力学函数奇异点。

连续相变（二级及以上）

伴随着相变过程，系统发生自发对称性破缺：由高温的高对称相（无序态）转变到低温的低对称性相（有序态）。

序参量 — 描述相变发生的特征量也是描述有序态的物理量

连续相变的最本质的特征：自发对称性破缺，即系统自发地由具有较高对称性的状态变为具有较低对称性的状态。

序参量是反映系统在发生相变时对称性变化的物理量，同时也是描述有序态的物理量。

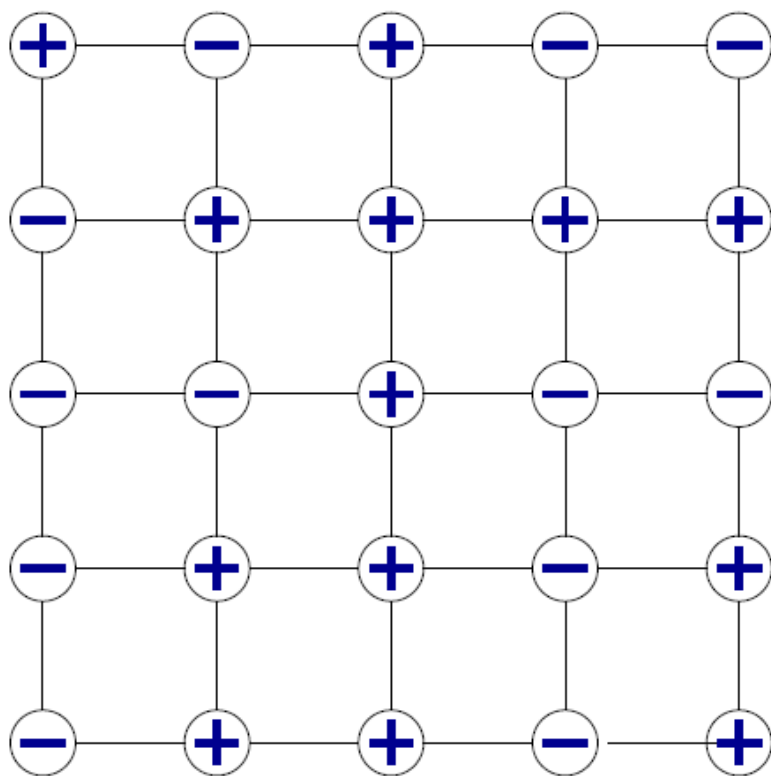
序参量的结构和含义随相变系统的不同而有所不同，

具体地说，它可以是标量，也可以是矢量；可以是实函数，也可以是复函数。

所有序参量均有一个共同点，它们在临界点都应为零，而低于临界点不为零。

经典相变

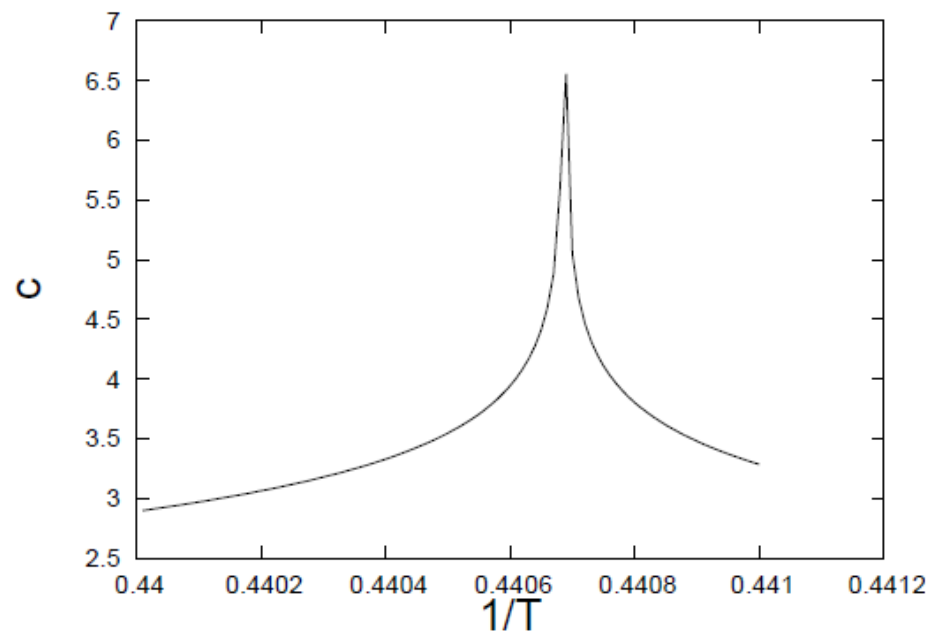
描写单轴铁磁体的Ising模型:



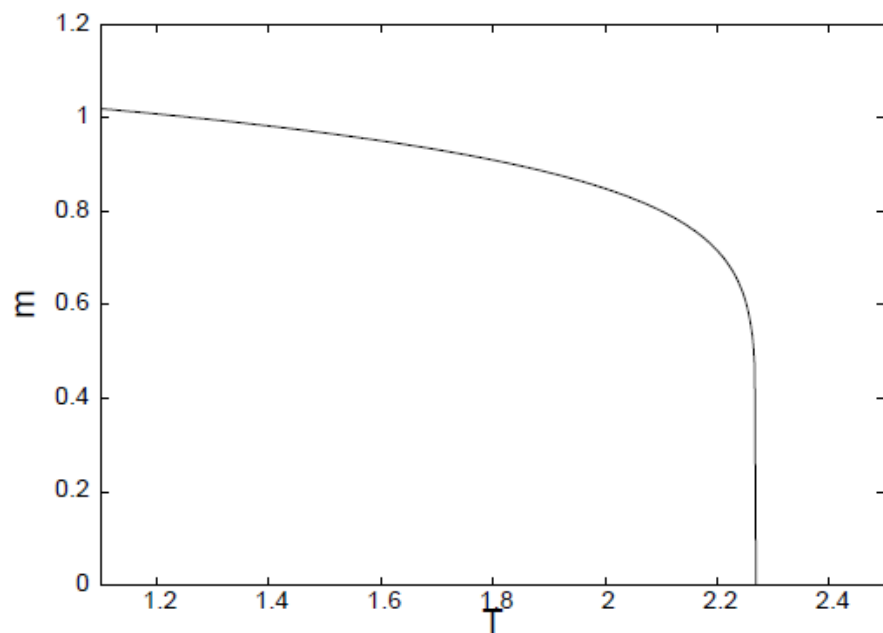
$$H = \sum_{\langle i,j \rangle} -J s_i s_j, \quad s_k = \pm 1, J > 0,$$

看似简单的Ising模型，求解异常困难。

对二维Ising模型的求解是统计物理理解相变问题的里程碑！



$$c \propto k_B \ln |(T - T_c)/T_c|$$



$$m \propto (|(T - T_c)/T_c|)^{1/8}$$

Two-dimensional Ising model:

The benchmark of phase transition



Lars Onsager

(Nobel in Chemistry, 1968)

$$H = -J \sum_{\langle ij \rangle} S_i S_j$$

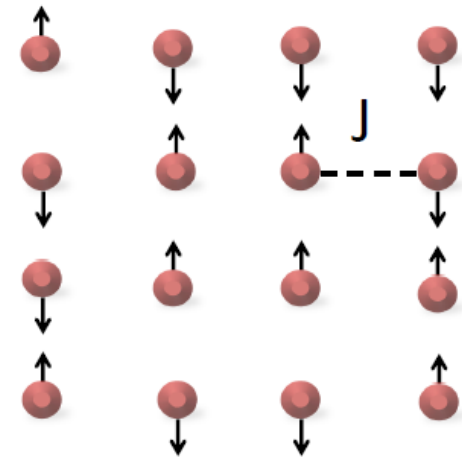
$$S_i = +1, -1$$

- Prove the existence of phase transition
- Prove basic hypotheses of phase transition (Broken symmetry, order parameters...)
- Prove universality near critical points

Universality class: $\alpha=0, \beta=1/8, \gamma=7/4, \delta=15, \nu=1, \eta=1/4$

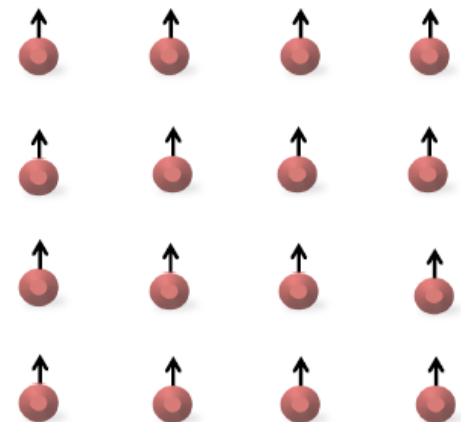
$$T > T_c$$

$$\langle S_i \rangle = 0$$

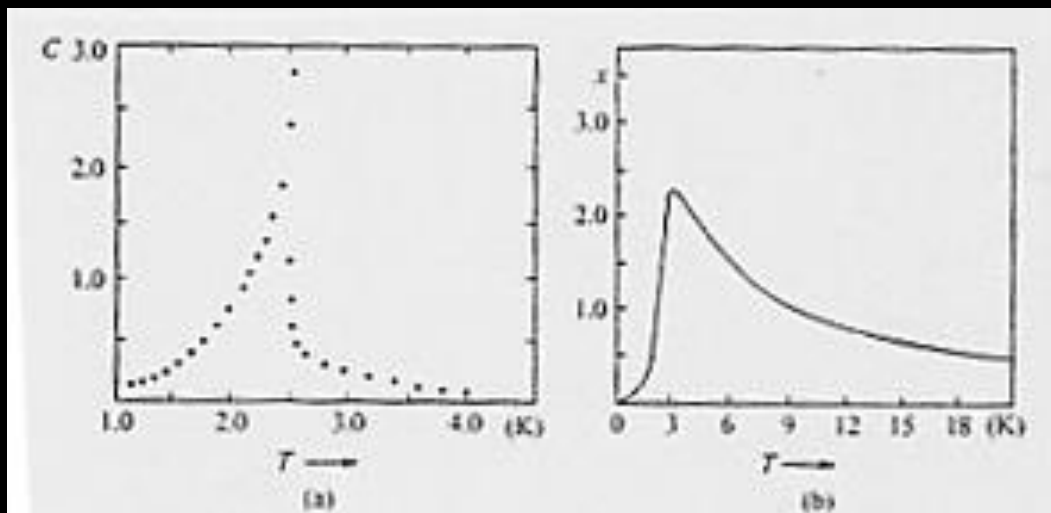
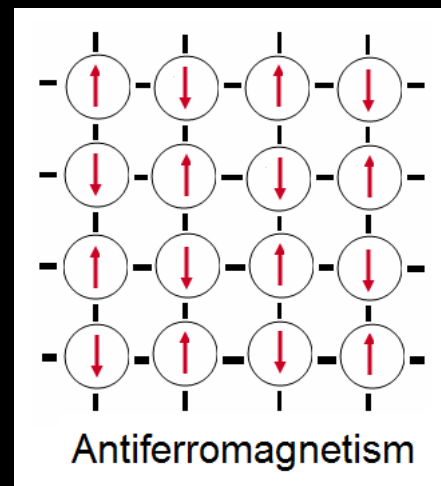
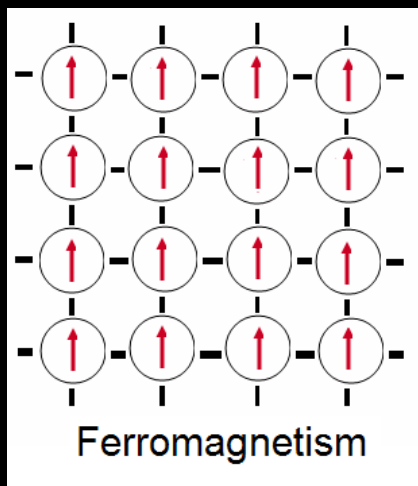


$$T < T_c$$

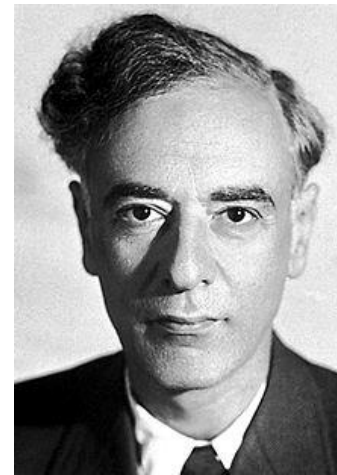
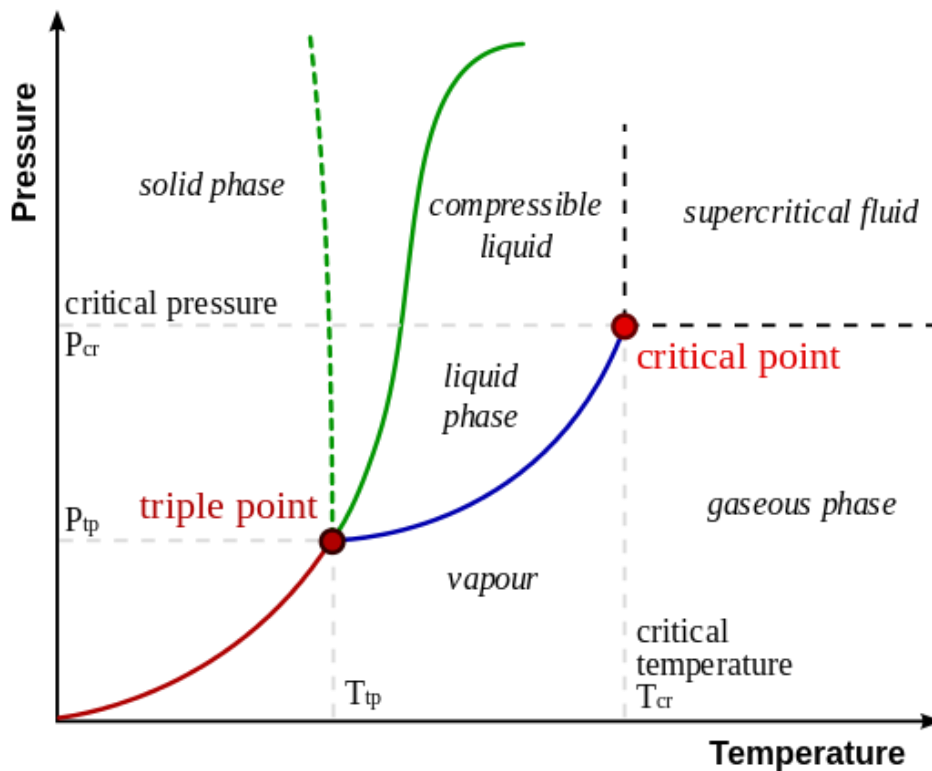
$$\langle S_i \rangle \neq 0$$



铁磁和反铁磁相变



Thermal phase transition



Lev Landau



K G Wilson

- First order transition, second order transition...
- Local order parameters
- Spontaneous broken symmetries
- Universality near critical points (renormalization group)

Universal Critical Phenomena

	exponent	definition	conditions
specific heat	α	$C \propto t ^{-\alpha}$	$t \rightarrow 0, B = 0$
order parameter	β	$m \propto (-t)^\beta$	$t \rightarrow 0$ from below, $B = 0$
susceptibility	γ	$\chi \propto t ^{-\gamma}$	$t \rightarrow 0, B = 0$
critical isotherm	δ	$B \propto m ^\delta \text{sign}(m)$	$B \rightarrow 0, t = 0$
correlation length	ν	$\xi \propto t ^{-\nu}$	$t \rightarrow 0, B = 0$
correlation function	η	$G(r) \propto r ^{-d+2-\eta}$	$t = 0, B = 0$
dynamic	z	$\tau_c \propto \xi^z$	$t \rightarrow 0, B = 0$

Scaling Laws:

Fisher	$\nu(2 - \eta) = \gamma$
Rushbrooke	$\alpha + 2\beta + \gamma = 2$
Widom	$\beta(\delta - 1) = \gamma$
Josephson	$2 - \alpha = \nu d$

$$t = (T - T_c) / T_c$$



K G Wilson

Universality class is uniquely determined by the spatial dimension d and the order parameter dimension n (K.G. Wilson).

(d, n) characterizing the global properties of the systems.

表 1 具有对称破缺现象的特征凝聚态物质系统

物理现象	破缺对称性	有序相	序参量	元激发
铁电性	空间反演	铁电体	电极化强度	光学声子
铁磁性	时间反演	铁磁体	磁化强度	磁振子
超导电性	规范不变性	超导体	宏观量子波函数	库珀对
超流性	规范不变性	超流体	宏观量子波函数	声子、旋子
结晶	平移和旋转	晶体	动量空间粒子密度	声子
电荷有序	平移	电荷密度波	动量空间电荷密度	相位子
自旋有序	平移	自旋密度波	动量空间自旋密度	自旋波

对自然界(宇宙)的基本看法/研究方法:

还原论:

把一切物质形态归结为由最基本的组成单元和决定基本单元行为的最基本规律所确定。

我们能按古希腊人的理想把一切复杂的系统分解成最基本的单元，了解这些单元的行为，但对于复杂系统本身却一无所知！！

更不要说预言蛋白质的功能，人脑的行为。

对自然界(宇宙)的另一种看法/研究方法:

演生论

客观世界是分层次的，每个层次都有自己的基本规律，重要的是承认客观现实，以它为依据，找出它的基本规律，理解这些现象是如何“演生”出来的。

人们将万事万物还原成简单的基本规律，并不蕴含着从这些规律出发重建宇宙的能力……

面对尺度与复杂性的双重困难，重建论的假定就崩溃了。不能依据少数粒子的性质作简单外推来解释由大量粒子构成的复杂集聚体的行为。正好相反，在复杂性的每一个层次会呈现全新的性质，为理解这些新行为所需要作的研究，就其基础性而言，与其他研究相比毫不逊色。

-- P. W. Anderson (1972)

演生现象是自然界的普遍规律吗？

研究微观和宇观的学者承认对称破缺，多重真空，对演生论有保留，但研究引力的理论学家同意空间维数是“演生”的，时间“看来也是”，所以有人认为宇宙本身就是“演生”出来的。

生命物质，生命现象看来是“演生”的！

GENESIS: The Scientific Quest for Life's Origin

Robert M. Hazen

Joseph Henry Press, 2005

中心议题： 生命起源是演生现象

大约40亿年前，从基本的“原料”——空气、水和岩石，按物理、化学的普遍规律，逐步形成绚丽多彩、千变万化的生物世界。

两种不同的研究方法：Top-down 和 Bottom-up
还原论 呈展论

- 如何形成含碳的有机分子
- 如何形成生物大分子：蛋白质、遗传分子
- 这些生物分子如何形成能自我复制的体系
- 不同的自我复制体系如何竞争、生物进化

认知和记忆的起源及后果

- 神经元之间电信号的传递如何导致认知和思维？
- 记忆是如何形成的，信息是如何存储和提取的？
- 能把脑中的信息“传”给计算机吗？
- 老年痴呆症的神经学原因是什么？
- 心理活动如何与神经活动、环境关联？
- 心理活动如何与群体、社会行为相关？

- 探索物质运动集体行为的演生现象是一个新的学科前沿，与粒子物理、宇宙学有密切关系，并与之相互补充。
- 研究演生现象的科学观和方法论对认识生命现象、认知过程，乃至社会现象都有重要的意义。

课后阅读：

张广铭、于渌，物理学中的演生现象，
物理 39卷，543 (2010).