

大学物理 B(1)

期末考试

6月14日（周三） 9:00 ~ 11:00

热学 (Heat)

热现象：是物质中大量分子无规则运动的宏观表现。

大量分子的无规则运动称为热运动。

热学的研究方法：

1.宏观法.

最基本的实验规律→逻辑推理(运用数学)

-----称为热力学。

2.微观法.

物质的微观结构 + 统计方法 -----称为统计力学

其初级理论称为气体分子运动论(气体动理论)

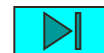
宏观法与微观法相辅相成。

第九章 温度和气体动理论

§ 9.1 宏观和微观



§ 9.2 温度



§ 9.3 理想气体温标与理想气体状态方程



§ 9.4 气体分子的无规运动



§ 9.5 理想气体的压强与温度



§ 9.6 能量均分定理



§ 9.7 麦克斯韦速率分布律



§ 9.8 麦克斯韦速率分布律的实验验证



§ 9.9 玻耳兹曼分布律



§ 9.10 实际气体等温线



§ 9.11 范德瓦尔斯方程

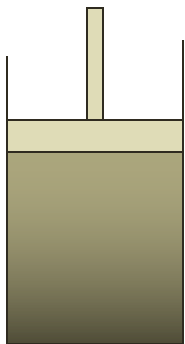


§ 9.12 输运过程



§ 9.1 宏观和微观 (Macroscopic and Microscopic)

- 热力学系统与外界
- 热力学研究的对象----热力学系统.
- 它包含极大量的分子、原子。阿佛伽德罗常数
 $N_A = 6.022 \times 10^{23}$
- 热力学系统以外的物体称为外界。



例：若汽缸内气体为系统，其它为外界

阿伏伽德罗常数 $N_A = 6.022 \times 10^{23}$

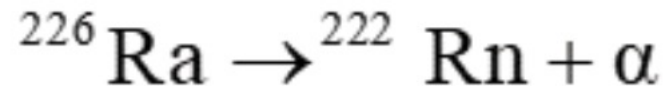
1摩尔物质所含的基本单元（如分子或原子）之数量，
0.012千克¹²C所含的原子数

- 5g大米 ~300 粒
- 100kg $3 \times 10^2 \times 20000 = 6 \times 10^6$
- 10t/辆 6×10^8 （6亿）
- 4×10^6 辆 （地球周长 4×10^4 km） 2×10^{15}
-

阿伏伽德罗常数 $N_A = 6.022 \times 10^{23}$

1. 卢瑟福发现1kg镭衰变发射 11.6×10^{20} 个 α 粒子,
标准状态下变成 $43 \times 10^{-6} \text{m}^3$ 氦气

1mol 气体 $22.4 \times 10^{-3} \text{m}^3$: 包含 6×10^{23} 原子



2. 电解1g氢(1mol)用 1 Faraday = 96500 Coulombs

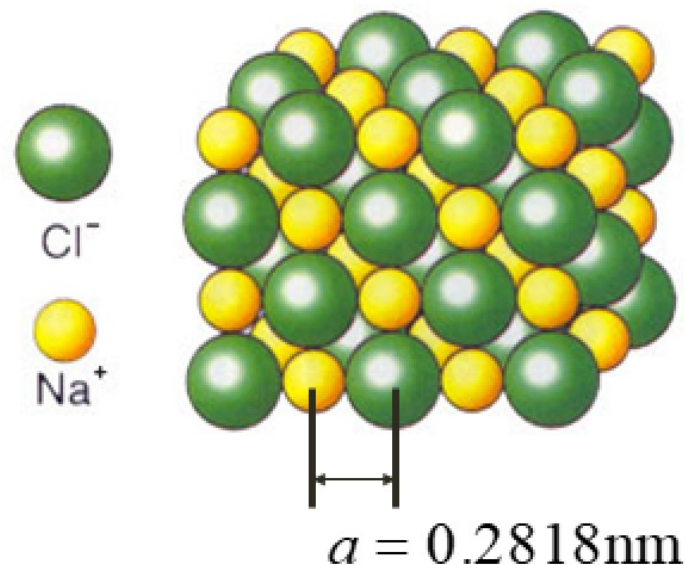
$$96500 = N_A e$$

密立根油滴实验测量 $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$

$$N_A = 6.03 \times 10^{23}$$

3. 劳厄晶体X射线衍射，利用布拉格公式测量晶格常数。NaCl立方晶体 a^3 包含 $1/2$ NaCl分子

$$N_A = M / 2a^3 \rho = 6.02 \times 10^{23}$$



分子大小

瑞利发现油酸在水面铺开后（若是单分子层），水表面张力迅速下降，此时，体积=分子大小×面积

首次估算出分子大小为1nm

• 宏观量与微观量

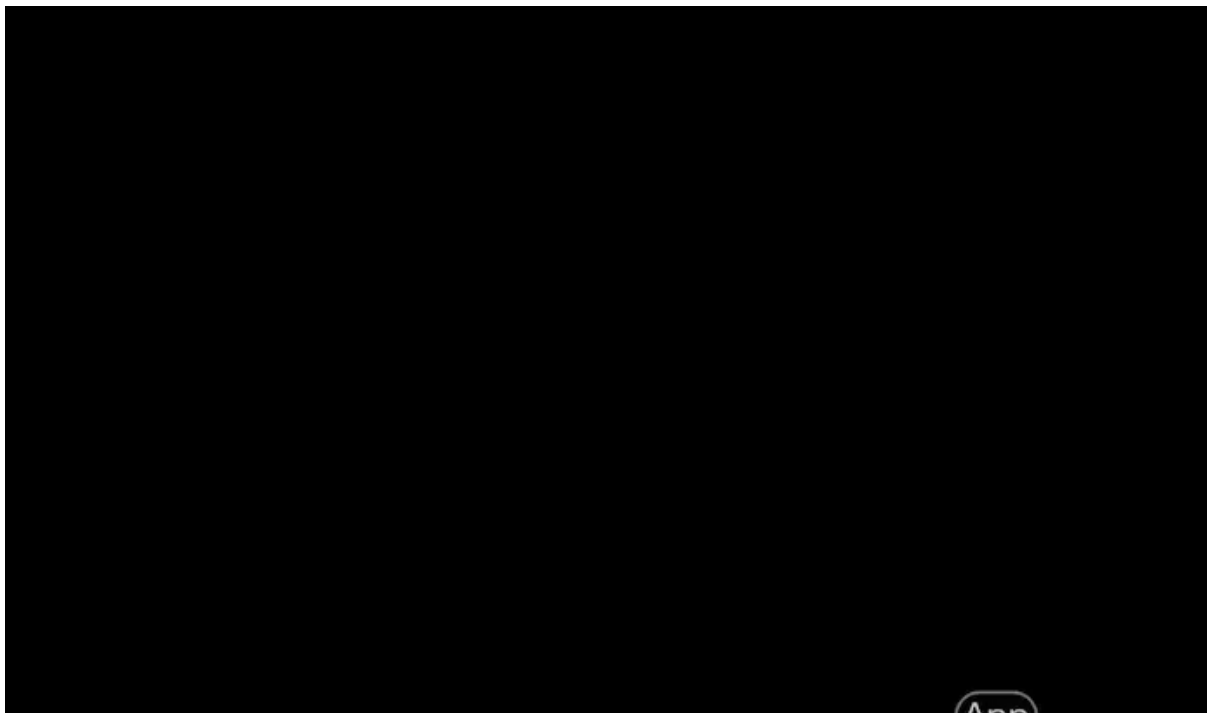
对热力学系统的两种描述方法：

1. 宏观量

从整体上描述系统的状态量，一般可以直接测量。

如 M 、 V 、 E 等---可以累加，称为**广延量**。

P 、 T 等---不可累加，称为**强度量**。



• 宏观量与微观量

对热力学系统的两种描述方法：

1. 宏观量

从整体上描述系统的状态量，一般可以直接测量。

如 M 、 V 、 E 等---可以累加，称为**广延量**。

P 、 T 等---不可累加，称为**强度量**。

2. 微观量

描述系统内微观粒子的物理量。如分子的质量 m 、直径 d 、速度 v 、动量 p 、能量 ε 等。

微观量与宏观量有一定的内在联系。

例如，气体的压强是大量分子撞击器壁的平均效果，它与大量分子对器壁的冲力的平均值有关。

- 平衡态

在不受外界影响的条件下，系统的宏观性质不随时间改变的状态，称为平衡态。

气缸中的气体？

不受外界影响：

1. 孤立
2. 热、力、化学平衡

温度不变、相对静止、无粒子流

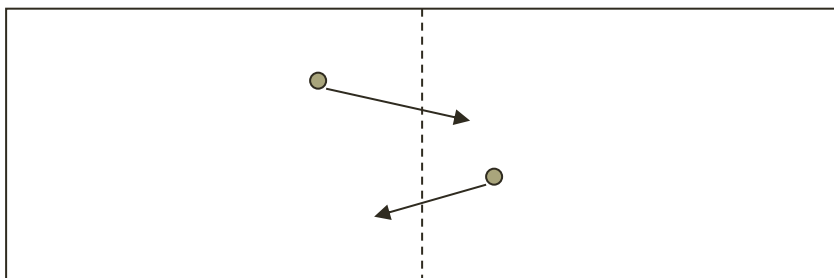
平衡态是一个理想化模型，
主要研究平衡态的热学规律。

说明两个概念：

动态平衡

处在平衡态的大量分子仍在作热运动，而且因为碰撞，每个分子的速度经常在变，但是系统的宏观量不随时间改变。这称为动态平衡。

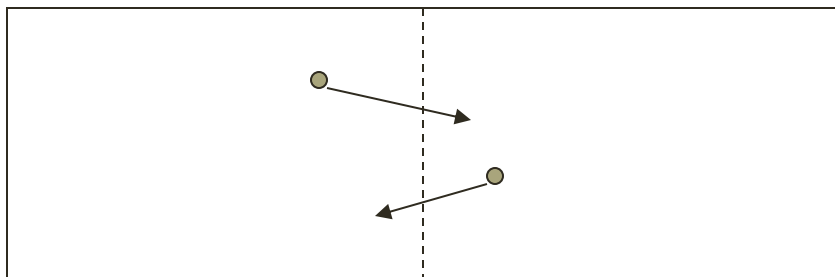
例如：粒子数是宏观量



箱子假想分成两相同体积的部分，达到平衡时，两侧粒子有的穿越界线，但两侧粒子数相同。

涨落

处在平衡态的系统的宏观量，如压强 P ，不随时间改变，但不能保证任何时刻大量分子撞击器壁的情况完全一样，这称为涨落现象，分子数越多，涨落就越小。



上例中两侧粒子数不可能严格相同，这里的偏差也就是涨落。

$$\sqrt{N}$$

$$\frac{\sqrt{N}}{N}$$

布朗运动是可观测的涨落现象之一。



§ 9.2 温度

我们可以感知温度变化

物态因温度高低发生转变

物性因温度高低发生变化



抖音

抖音号: 1056212636

§ 9.2 温度

我们可以感知温度变化

物态因温度高低发生转变

物性因温度高低发生变化

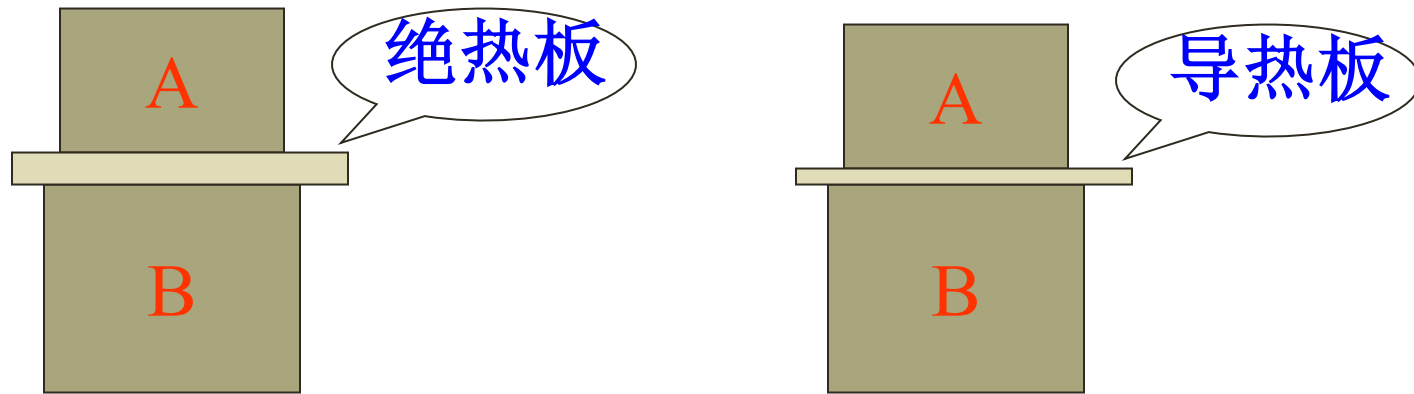
挑战者航天飞机失事原因：低温使O圈功能失效

低温使人神智不清，肌肉功能下降

日常生活用语：温度与热混用

温度？ 热学课程将给出温度的准确概念

温度的宏观定义

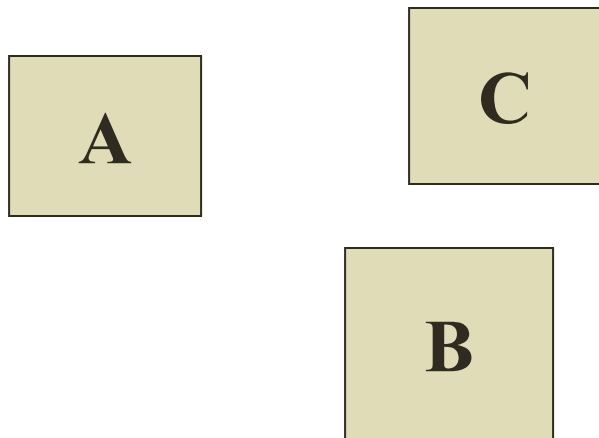


A、B 两体系互不影响各自达到平衡态

A、B 两体系的平衡态有联系达到共同的热平衡状态（**热平衡**），A、B 两体系有共同的宏观性质，称为系统的**温度**。

处于热平衡的多个系统具有相同的温度

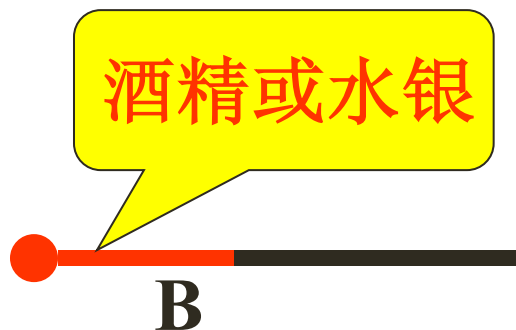
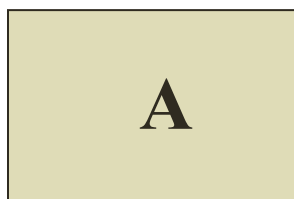
温度是不是可以刻画平衡态特性的一个物理量？



设 A 和 B、B 和 C 分别热平衡，则 A 和 C 一定热平衡。
（热力学第零定律）

温度是可以量化的一个物理量

温度测量



A 和 B 热平衡， $T_A = T_B$ ；

$B \ll A$ ，A 改变很小， T_A 基本是原来体系 A 的温度



热胀冷缩特性

$$l = l_0(1 + \alpha\Delta t) \quad \text{近似线性}$$

各向同性物体

$$V = V_0(1 + 3\alpha\Delta t)$$

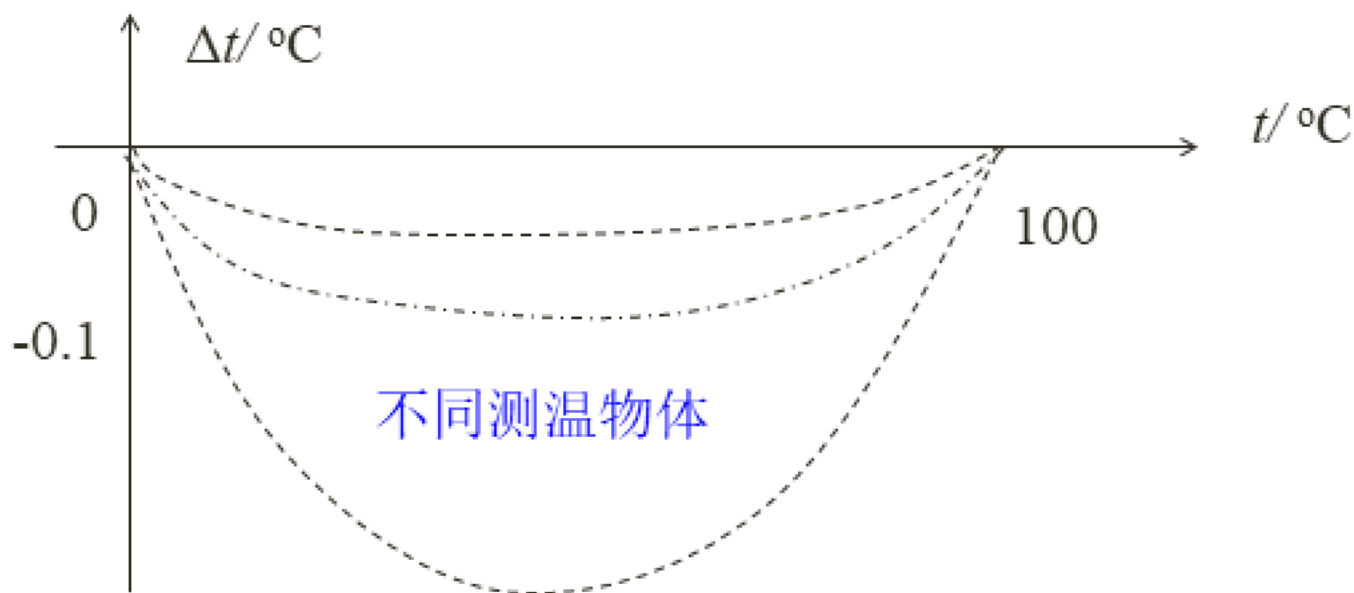


标准状态下，冰水混合，**B** 上留一刻痕，
水沸腾，又一刻痕，之间百等份，
就是**摄氏温标**（**C°**）。

假设线膨胀系数不随温度变化

检测线性假设的合理性？

比较各种不同的测温物质



线性关系是近似

温标与测温物质有关 -> 可以有微小区别

§ 9.3 理想气体温标与气体状态方程

用水银或酒精的热胀冷缩特性，温标不准确

$$l = l_0(1 + \alpha\Delta t) \quad \alpha \text{ 实际是随温度变化的}$$

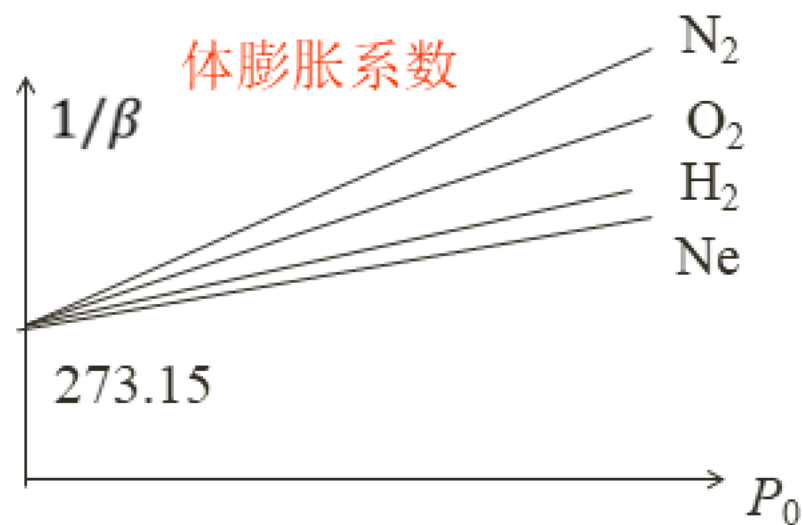
给定压强（盖-吕萨克定律）

$$V = V_0(1 + \beta t)$$

t度时体积 0度时体积

不同气体的 β 值不同，
但气体压强趋于0时
极限相同

$$\frac{V}{V_0} = \frac{273.15 + t}{273.15}$$



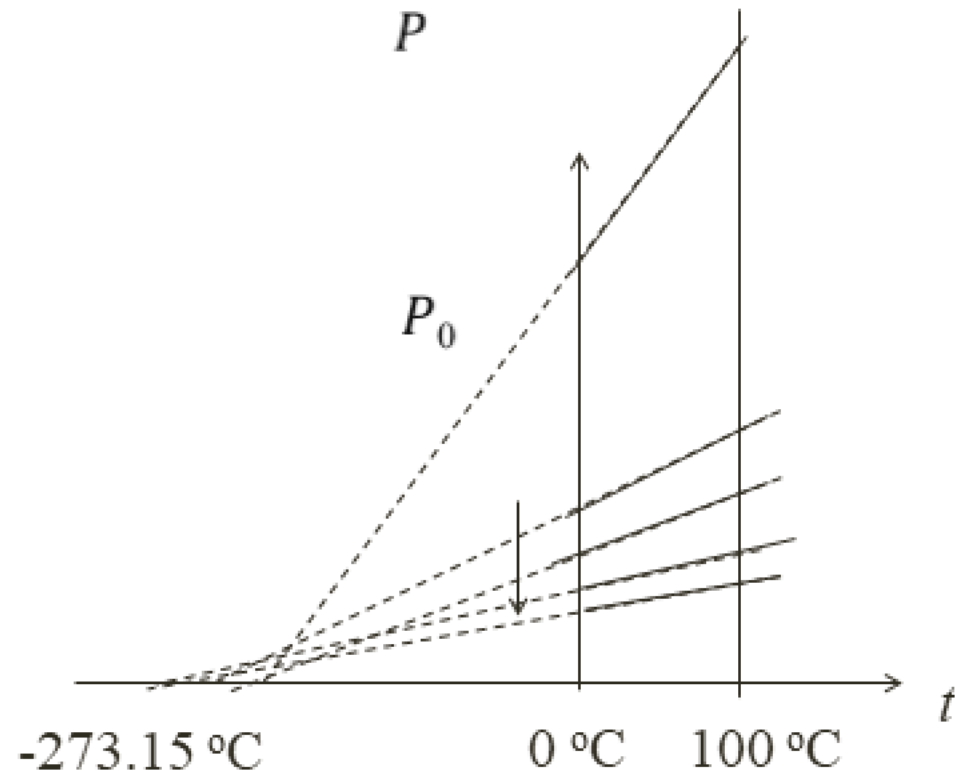
给定体积（查理定律）

$$P = P_0(1 + \alpha_v t)$$

不同气体结果不同，
但气体压强趋于0时
有相同的极限温度

$$\frac{P}{P_0} = \frac{273.15 + t}{273.15}$$

气体稀薄时接近理
想气体



波义耳-马里奥特定律 (人类历史上第一个定律)

$$PV = \text{const.} \quad (\text{温度不变})$$

稀薄气体很好地遵守波义耳-马里奥特定律

理想气体

用波义耳-马里奥特定律，可以给出理想气体温标

定义理想气体温标 T ，使 $PV \propto T$

摄氏温度 t 与理想气体温度 T 的关系 $t = T - 273.15$

标准状态下（273.15K，1大气压） 1摩尔气体体积 22.4升

$$\frac{PV}{T} = \frac{P_0 V_0}{T_0} = 8.31 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K}) = R = N_A k$$

气体常数(量)

体积和摩尔数都是广延量，温度和压强是强度量

$$\frac{PV}{T} = \nu R$$

理想气体状态方程

混合理想气体

$$PV = (\nu_1 + \nu_2 + \cdots + \nu_n)RT$$

道尔顿分压定律

$$P = p_1 + p_2 + \cdots + p_n$$

理想气体（压强趋于零的极限状态）物态方程

把处于平衡态的某种物质的热力学参量（如压强、体积、温度）之间所满足的函数关系称为该物质的**物态方程**或称**状态方程**。

$$\frac{PV}{T} = \nu \frac{P_0 V_0}{T_0} = \nu \textcircled{R} \longrightarrow \text{气体常数（量）}$$

$$k = \frac{R}{N_A}$$

玻耳兹曼常量

$$PV = NkT$$

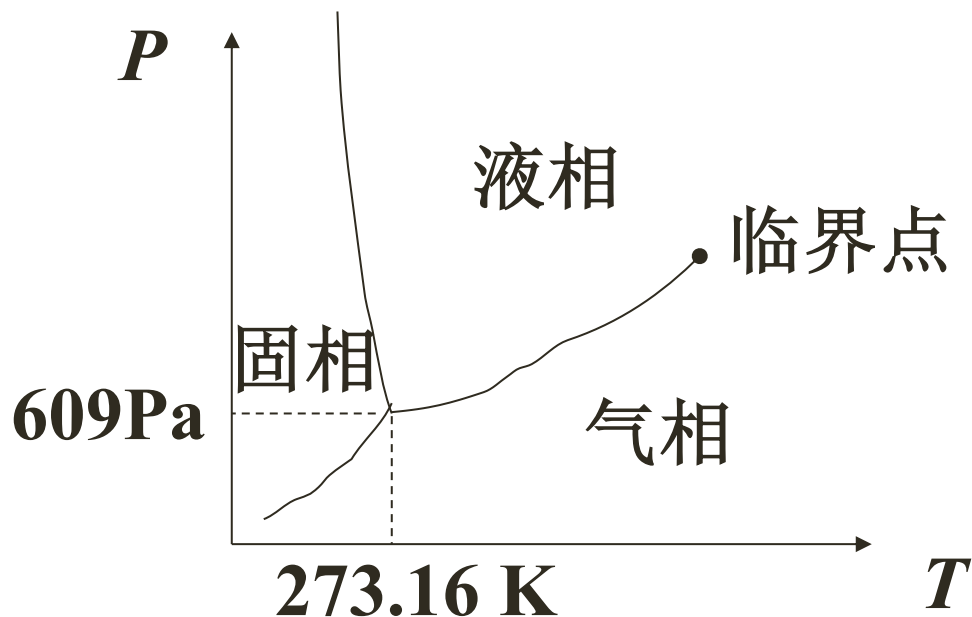
$$P = nkT$$

粒子数密度



水的相图

三相点只有一个



$$PV \propto T$$

$$P_3 V_3 \propto T_3$$

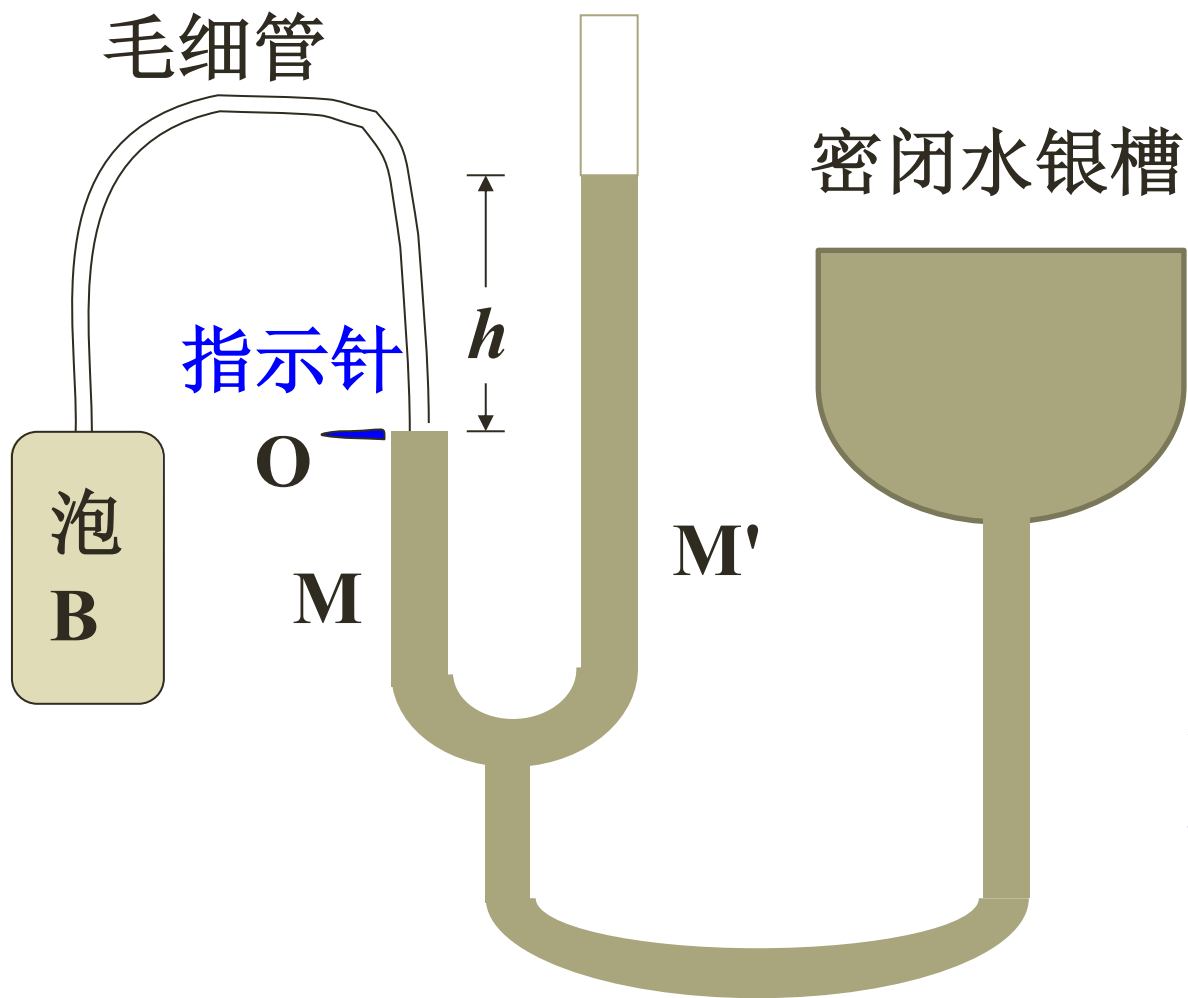
$$T = 273.16 K \frac{PV}{P_3 V_3}$$

理想气体温标与热力学温标等价，
热力学温标与任何物质特性无关

理想气体温标（理想气体作为测温物质）的温度1度与摄氏温标的温度1度

- ☐ A 只能相同
- ☒ B 可以相同，也可以不相同
- ☒ C 当规定标准状态的温度为273.15度时相同
- ☒ D 当规定水的三相点温度为273.16度时相同

提交



体积保持不变

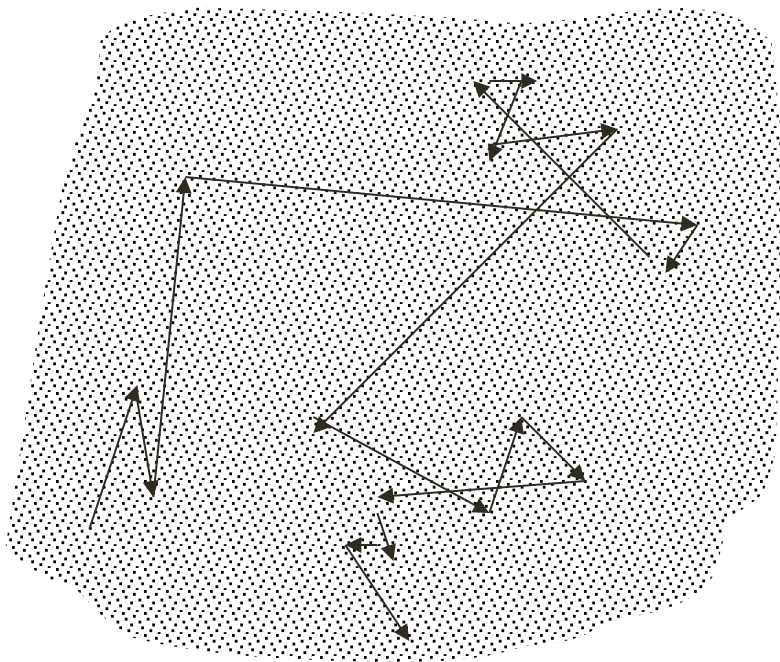
$$T = 273.16K \frac{P}{P_3}$$

稀薄的实际气体接近理想气体，温度很低时气体液化，气体温度计失效。

对于真实气体（非理想气体），下面正确的是

- ☐ A 由 $pV = \nu RT$ 可知，在等温条件下，逐渐增大压强，当 $p \rightarrow \infty$ 时， $V \rightarrow 0$
- ☒ B 由 $pV = \nu RT$ 可知，在等温条件下，逐渐增大体积，当 $V \rightarrow \infty$ 时， $p \rightarrow 0$
- ☐ C 由 $pV = \nu RT$ 可知，在不减小压强的条件下，逐渐降低温度，当 $T \rightarrow 0$ 时， $V \rightarrow 0$

§ 9.4 气体分子的无规运动



气体分子自由程

单位时间内分子经历的平均距离 \bar{v} ，
平均碰撞 \bar{Z} 次

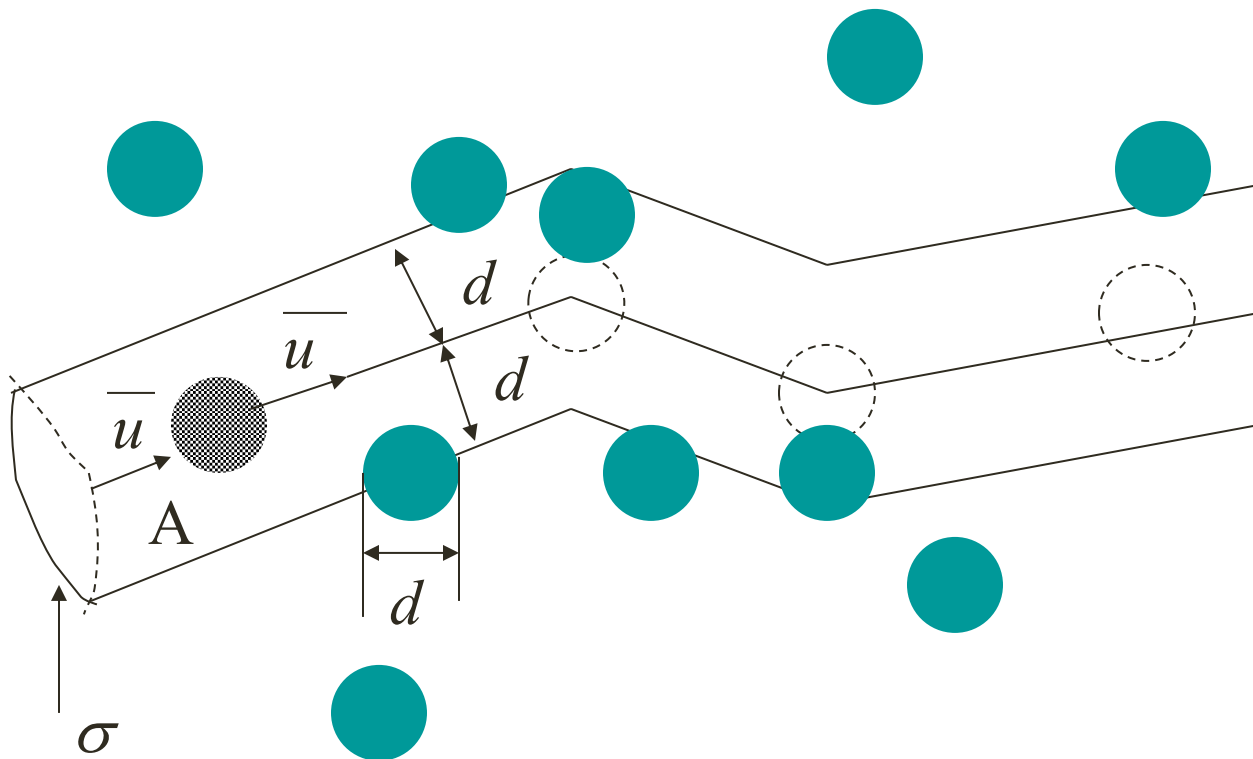
一个分子连续两次碰撞之
间经历的平均自由路程叫
平均自由程 $\bar{\lambda}$

线度 $\sim 10^{-8}\text{m}$

一个分子单位时间里
受到平均碰撞次数叫
平均碰撞频率 \bar{Z}

$$\bar{\lambda} = \frac{\bar{v}}{\bar{Z}}$$

平均碰撞频率 \bar{Z}



设分子 A 以相对平均速率 \bar{u} 运动，其它分子可设为静止
运动方向上，以 d 为半径的圆柱体内的分子都将与分子 A 碰撞

该圆柱体的面积 σ 就叫 **碰撞截面** $\sigma = \pi d^2$

单位时间内分子 A 走 \bar{u} ，相应的圆柱体体积为 $\bar{u} \sigma$ ，则

$$\bar{Z} = n \bar{u} \sigma$$

统计理论可计算 $\bar{u} = \sqrt{2} \bar{v}$

$$\bar{Z} = \sqrt{2} \pi d^2 \bar{v} n$$

平均自由程 $\bar{\lambda}$

$$\bar{\lambda} = \frac{\bar{v}}{\bar{Z}} = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d^2 n} = \frac{kT}{\sqrt{2} \pi d^2 P}$$

对空气分子 $d \sim 3.5 \times 10^{-10} \text{ m}$

标准状态下 $\bar{Z} \sim 6.5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ ， $\bar{\lambda} \sim 6.9 \times 10^{-8} \text{ m}$

气体容器线度小于平均自由程计算值时，
实际平均自由程就是容器线度的大小。



$$\vec{u} = \vec{v} - \vec{v}' \xrightarrow{\text{平方}} \vec{u}^2 = \vec{v}^2 + \vec{v}'^2 - 2 \vec{v} \cdot \vec{v}'$$

各个方向随机运动，故为零

取平均

$$\overline{u^2} = \overline{v^2} + \overline{v'^2} - 2 \overline{\vec{v} \cdot \vec{v}'}$$

$$\overline{u^2} = \overline{v^2} + \overline{v'^2}$$

$$\overline{u^2} = 2 \overline{v^2}$$

相等

$$\sqrt{\overline{u^2}} = \sqrt{2} \sqrt{\overline{v^2}}$$

可以证明均方根速率与平均速率的规律相似，由上式

$$\overline{u} = \sqrt{2} \overline{v}$$

§ 9.5 理想气体的压强与温度

• 本节是典型的微观研究方法。

一般气体分子热运动的概念：

分子的密度 3×10^{19} 个分子/cm³ = 3千亿亿/cm³；

分子之间有一定的间隙，有一定的作用力；

分子热运动的平均速度约 $\bar{v} = 500\text{m/s}$ ；

分子的平均碰撞次数约 $\bar{Z} = 10^{10}$ 次/秒。

一. 微观模型



二. 理想气体压强公式的推导



三. 理想气体的温度和分子平均平动动能



一. 微观模型

1. 对单个分子的力学性质的假设 (理想气体的微观假设)

- 分子当作质点，不占体积；
(因为分子的线度 \ll 分子间的平均距离)
- 分子之间除碰撞的瞬间外，无相互作用力
(忽略重力)
- 弹性碰撞 (动能不变)
- 服从牛顿力学

分子数目太多，无法解这么多的联立方程。即使能解也无用，因为碰撞太频繁，运动情况瞬息万变，必须用统计的方法来研究。

2. 对分子集体的统计假设

什么是统计规律性?

大量偶然事件从整体上反映出来的一种规律性,是以**概率**的形式表现出来的。

定义: 某一事件 i 发生的概率为 P_i

N_i ---- 事件 i 发生的 次数

N ---- 各种事件发生的 总次数

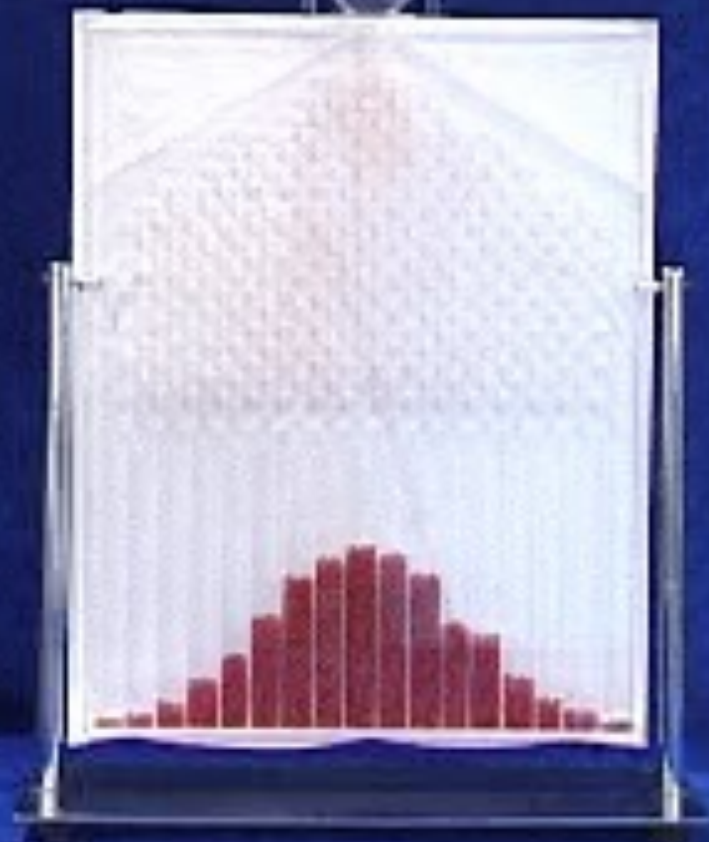
$$P_i = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_i}{N}$$

例. 扔硬币

伽尔顿板

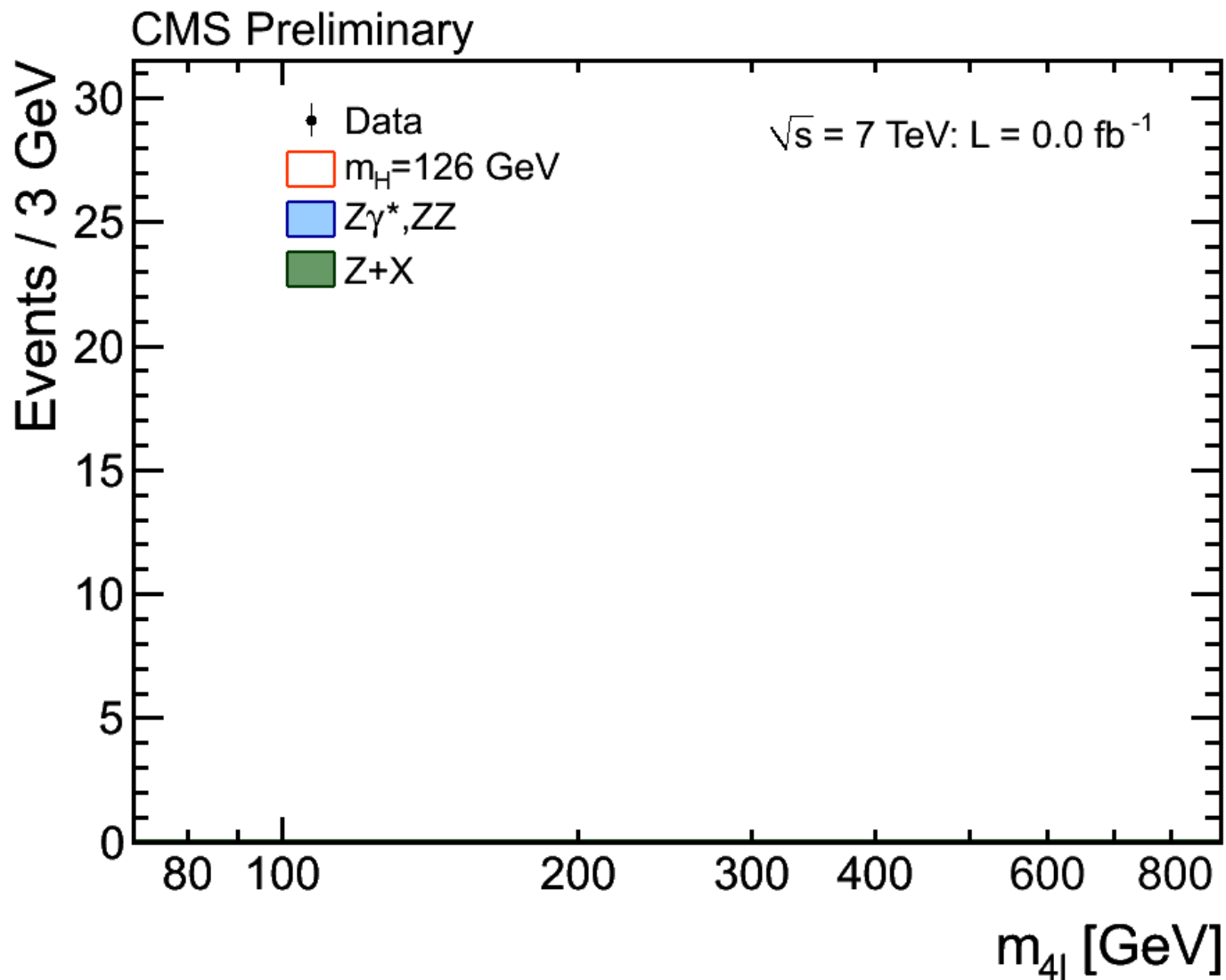


伽尔顿板



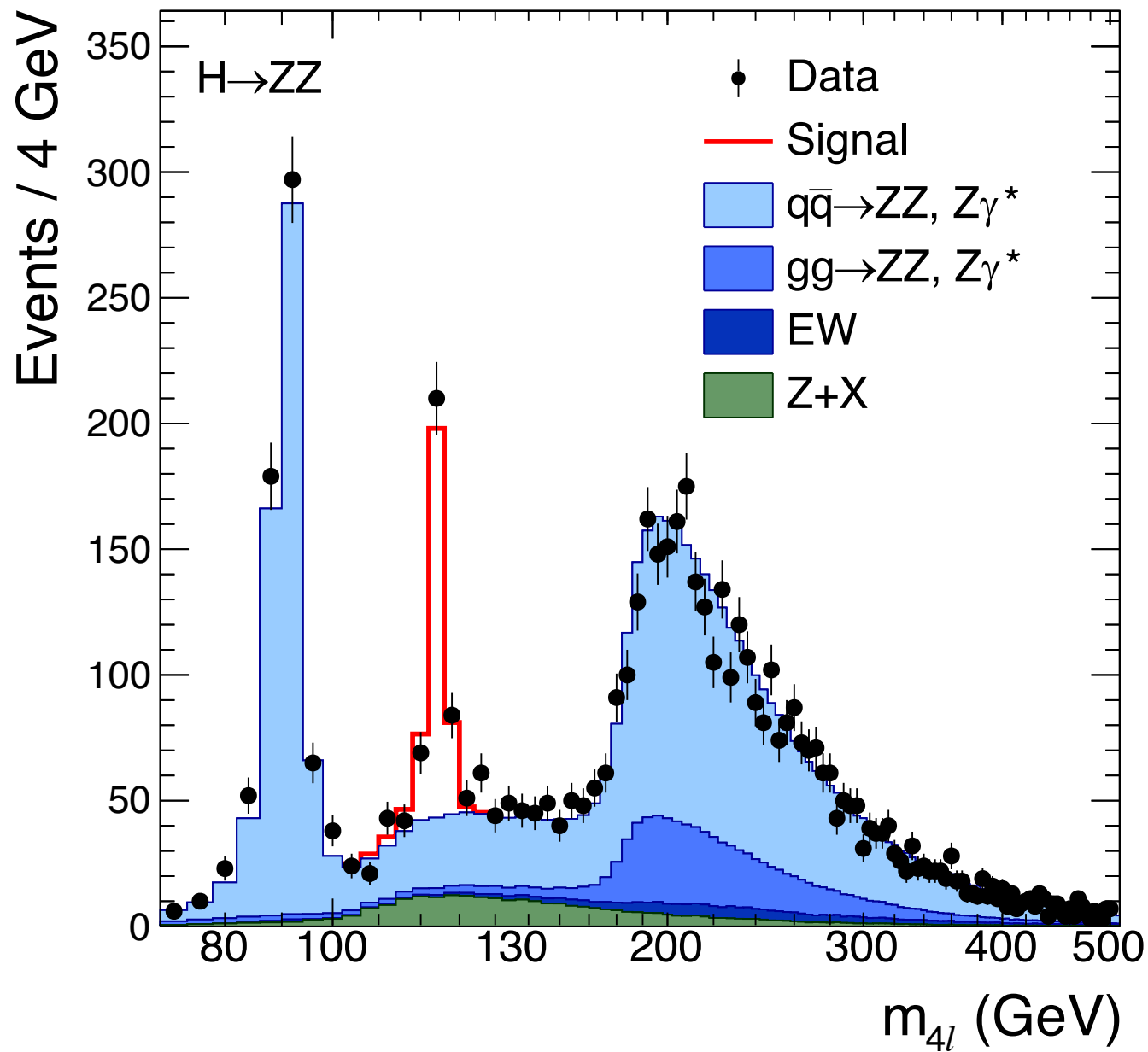
清华大学出版社

发现上帝粒子



CMS

138 fb⁻¹ (13 TeV)



•统计规律有以下几个特点:

- (1) 只对大量偶然（随机）事件才有意义.
- (2) 它是不同于个体规律的整体规律(量变到质变).
- (3) 总是伴随着涨落.

玻尔兹曼和马赫等人的争论

本身并非偶然事件，力学规律支配，但粒子多，碰撞太频繁，无法跟踪因果律的结果，等同于偶然的无关联事件

•对大量分子组成的气体系统的统计假设:

- (1) 分子的速度各不相同, 而且通过碰撞不断变化着;
- (2) 平衡态时分子按位置的分布是均匀的,
即分子数密度到处一样 (忽略重力影响);

$$n = \frac{dN}{dV} = \frac{N}{V} \quad dV \text{---体积元 (宏观小, 微观大)}$$

- (3) 平衡态时分子的速度按方向的分布是各向均匀的

$$\overline{v_x} = \overline{v_y} = \overline{v_z} = 0 \qquad \overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} = \frac{\overline{v^2}}{3}$$

$$\overline{v_x} = \frac{\sum_i n_i v_{xi}}{\sum_i n_i} \qquad \overline{v_x^2} = \frac{\sum_i n_i v_{xi}^2}{\sum_i n_i}$$



二. 理想气体压强公式的推导

一定量的理想气体处于平衡态。把分子按速度分组，在每一组内的分子速度大小、方向都差不多。

设第 i 组分子的速度在 $\vec{v}_i \sim \vec{v}_i + d\vec{v}_i$ 区间内。

以 n_i 表示第 i 组分子的分子数密度

总的分子数密度为 $n = \sum_i n_i$

设 dA 法向为 x 轴

一次碰撞单分子动量变化

$$2m v_{ix}$$

在 dt 时间内与 dA 碰撞的分子数

$$n_i v_{ix} dt dA$$

斜柱体体积

