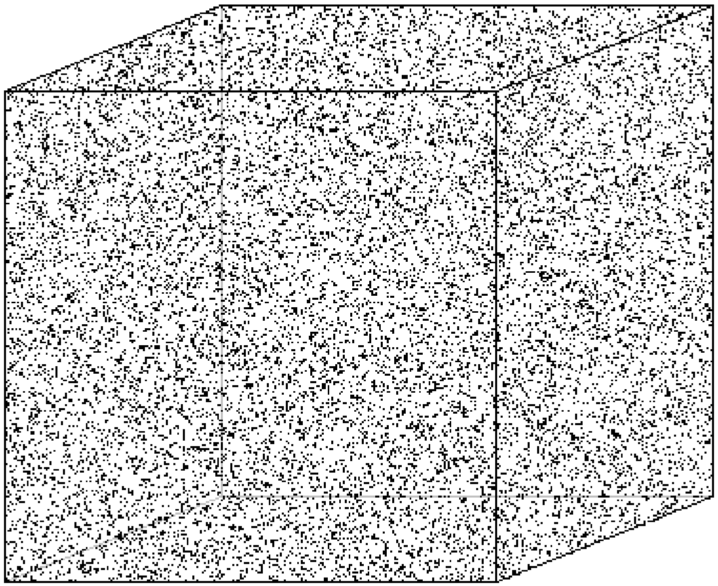
第一章　真空技术基础

本章主要内容：

1. 真空的基本知识
2. 真空的获得
3. 真空的测量
4. 稀薄气体的基本性质
5. 真空配件、检测

§1-1 气体与真空

atmosphere at the Earth's surface



H = 0, p = 101,300 Pa
A person can breathe normally

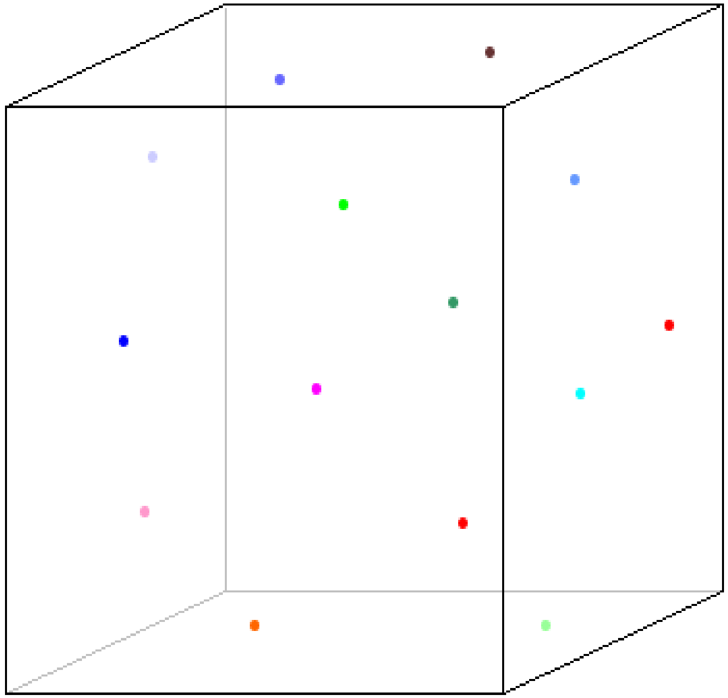
Air, as a gas, is composed of molecules that you can imagine as round elastic balls. Molecules move in straight lines until they collide with neighboring molecules or the container wall.

THE ATMOSPHERE IS A MIXTURE OF GASES

PARTIAL PRESSURES OF GASES CORRESPOND TO THEIR RELATIVE VOLUMES

GAS	SYMBOL	PERCENT BY VOLUME	PARTIAL PRESSURE TORR	PARTIAL PRESSURE PASCAL
Nitrogen	N_2	78	593	79,000
Oxygen	O_2	21	158	21,000
Argon	Ar	0.93	7.1	940
Carbon Dioxide	CO_2	0.03	0.25	33
Neon	Ne	0.0018	1.4×10^{-2}	1.8
Helium	He	0.0005	4.0×10^{-3}	5.3×10^{-1}
Krypton	Kr	0.0001	8.7×10^{-4}	1.1×10^{-1}
Hydrogen	H_2	0.00005	4.0×10^{-4}	5.1×10^{-2}
Xenon	Xe	0.0000087	6.6×10^{-5}	8.7×10^{-3}
Water	H_2O	Variable	5 to 50	665 to 6650

2. Pressure

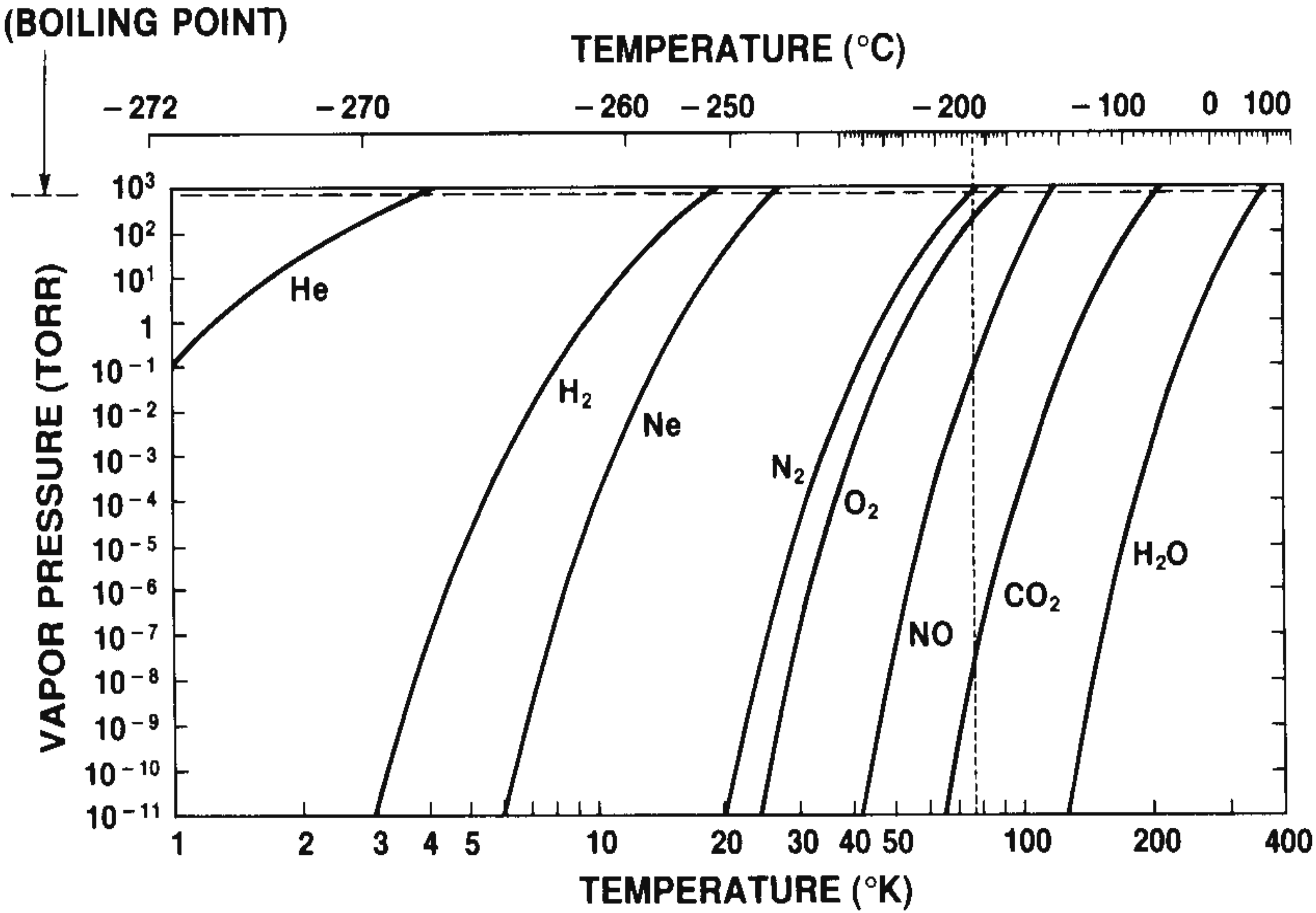


- **$P = F / A = nMv_{rms}^2/3N_A$**
- It comes from the striking of gas molecules on the walls.
- **Partial Pressure**

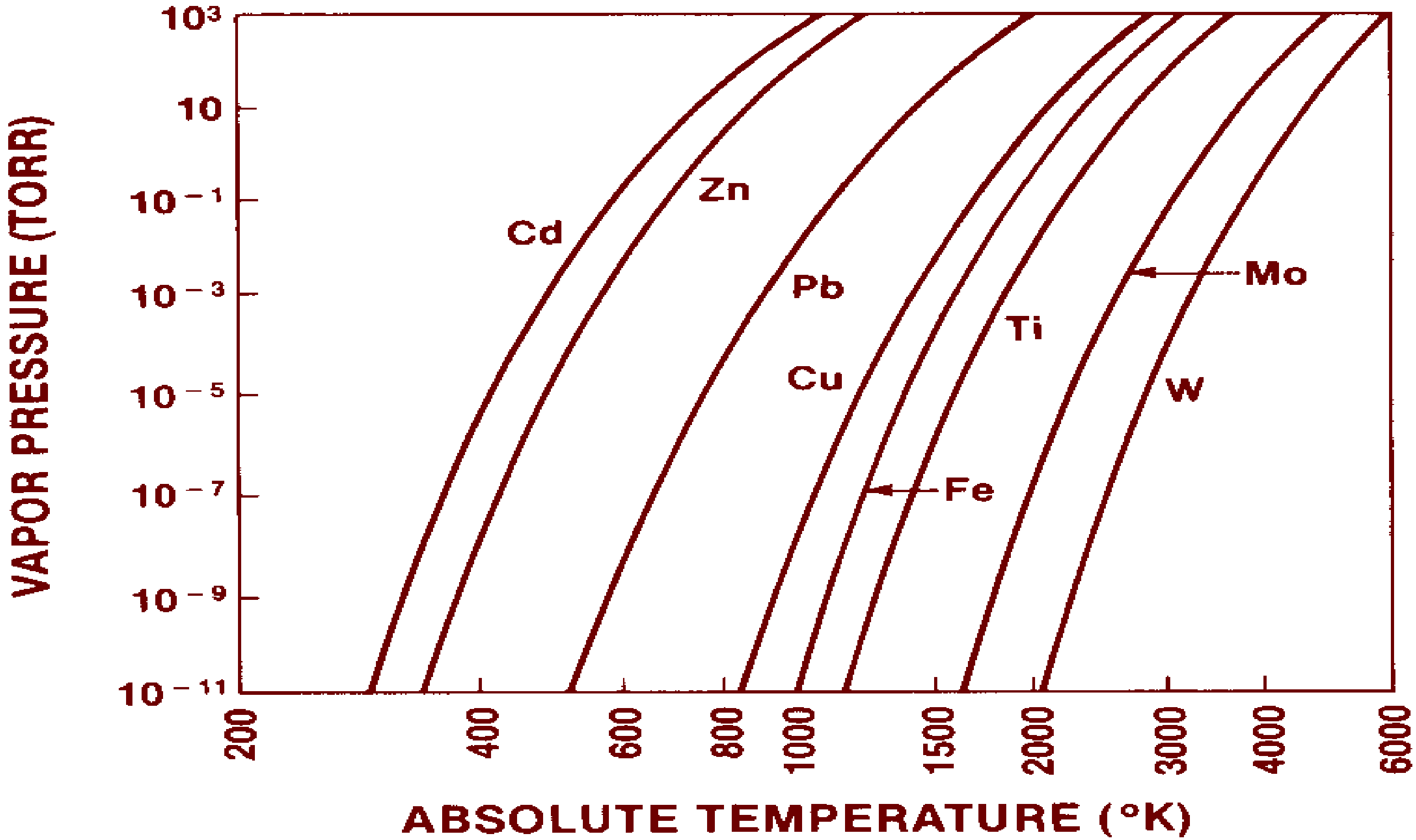
VAPOR PRESSURE OF WATER

T (^{O} C)		P (mbar)
100	(BOILING)	1013
25		32
0	(FREEZING)	6.4
-40		0.13
-78.5	(DRY ICE)	6.6×10^{-4}
-196	(LIQUID NITROGEN)	10^{-24}

Pressures of gases



Vapor Pressure of some Solids



VAPOR PRESSURES OF SOME COMMON MATERIALS NORMALLY CONSIDERED SOLID

3. THE VACUUM

- **定义**

真空：低于一个大气压的气体状态。

“相对真空”，“绝对真空”?

特点：压强**(Pressure)**低，分子稀薄，
分子的平均自由程长。

电学特性

输运特性

真空的性质可由压强、单位体积分子个数、
气体的密度等表示

Relative Pressure

Absolute Pressure

用"真空度"及"压强"两个参量来衡量真空的程度。

帕斯卡（**pascal**）**=1**牛**/**米^{2}，国际单位制

托（**Torr**）**=133.322Pa=1/760atm**单位，描述真空的独特单位

此外，**mmHg**、**atm**、**bar**等。

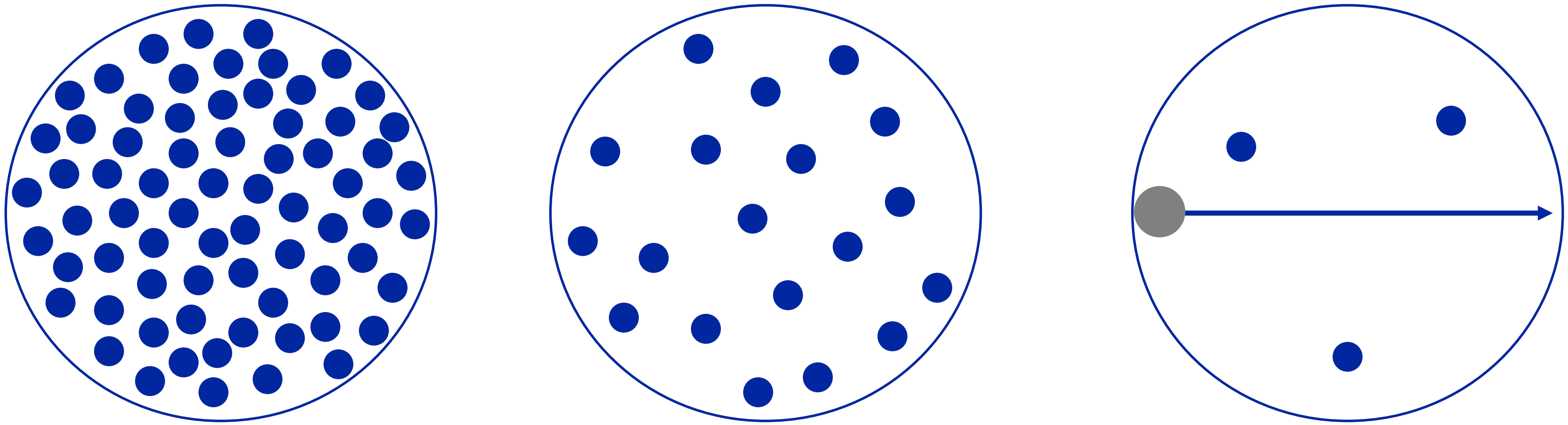
The only one which is legal

4. Pressure unit

Pressure unit	*Pa*	*Bar*	*Atm*	*Torr*
Pa	1	0.00001	9.869×10^{-6}	7.501×10^{-3}
Bar	100000	1	9.869×10^{-1}	7.501×10^{2}
Atm	101325	1.01325	1	760
Torr	133.32	0.001333	1.316×10^{-3}	1

5. Why is a Vacuum Needed?

1. To move a particle in a (straight) line over a large distance



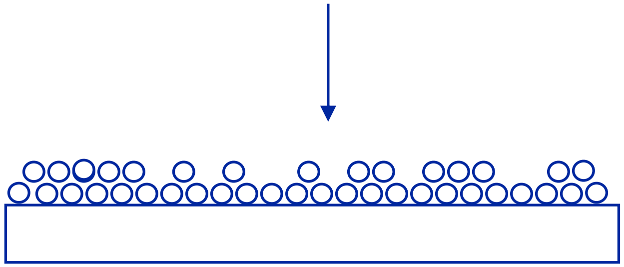
5. Why is a Vacuum Needed?

1. 颗粒可以做直线运动

2. 为薄膜生长提供洁净表面

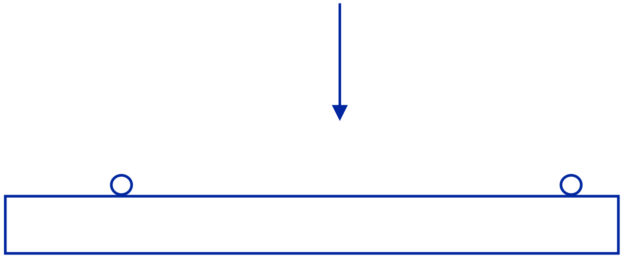
Atmosphere

Contamination (usually water)



(High)Vacuum

Clean surface



6. 真空的划分

粗真空 **10^5—10^2Pa :** 目的是获得压差

vacuum cleaner, vacuum-filter，CVD

低真空 **10^2—10^{-1}Pa:**气体分子运动特征改变，电场下具有导电特征 **vacuum-bottle, vacuum-desiccator, vacuum-impregnation，Sputtering, LPCVD**

高真空 **10^{-1}—10^{-6}Pa :Evaperation, Ion source**

超高真空 **＜10^{-6}Pa：** Surface analysis，
Particle Physics

§1-2 稀薄气体的基本性质

1. Ideal gas equation

低压状态下，可用理想气体的状态方程（波义尔定律、盖·吕萨克定律、查理定律）来描述，遵守麦克斯韦——玻尔兹曼分布。

$$PV = n_{mol}RT = n_{molecular}kT = nMv_{rms}^2/3N_A$$

$$n_{mol} = m/M$$

$$n_{molecular} = 7.2*10^{22}P/T$$

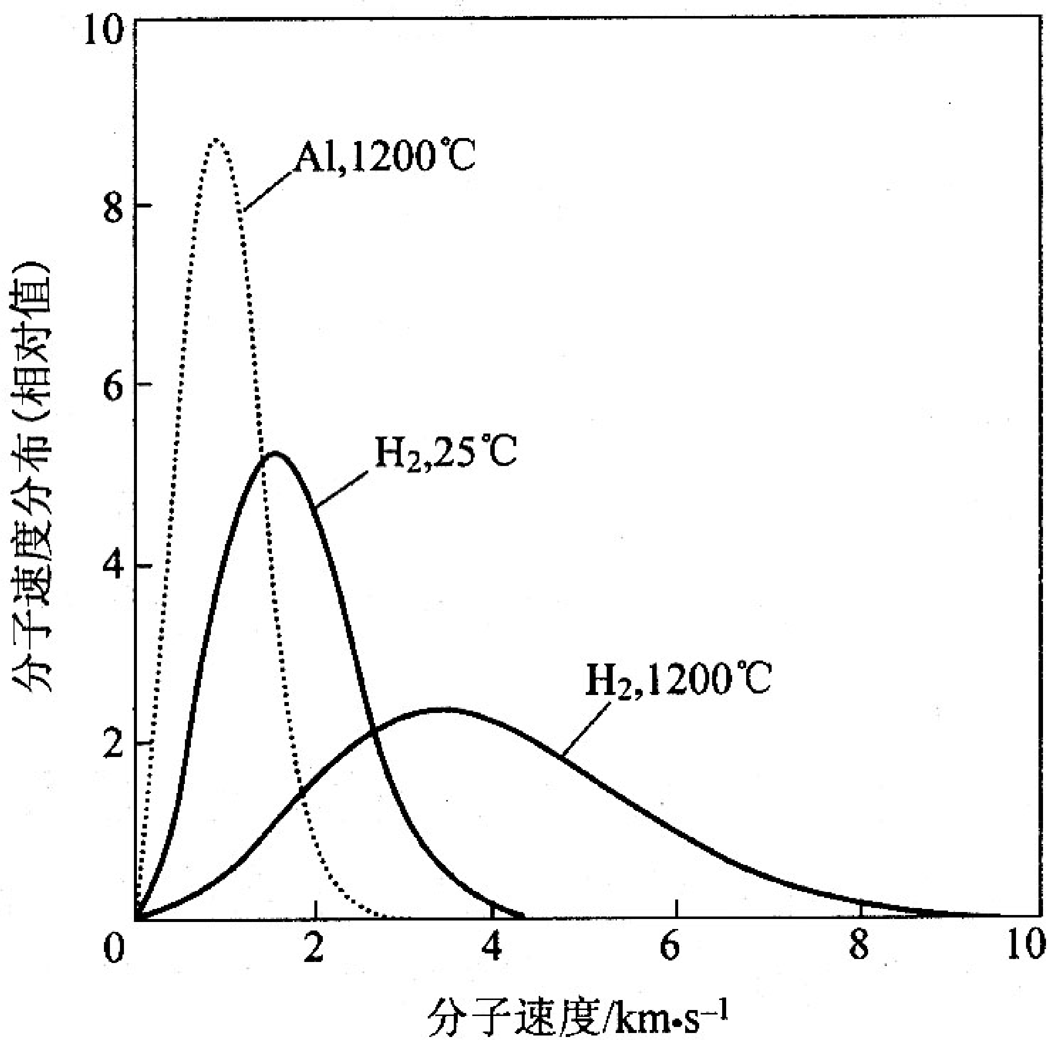
2. 气体分子的速度分布

- 麦克斯韦速度分布函数

$$f(v)=4\pi\left[\frac{M}{2\pi RT}\right]^{\frac{3}{2}}v^2\exp\left[\frac{-Mv^2}{2RT}\right]$$

***f*（*v*）**表示分布在速度**v**附近单位速度间隔内的分子数占总分子数的比率

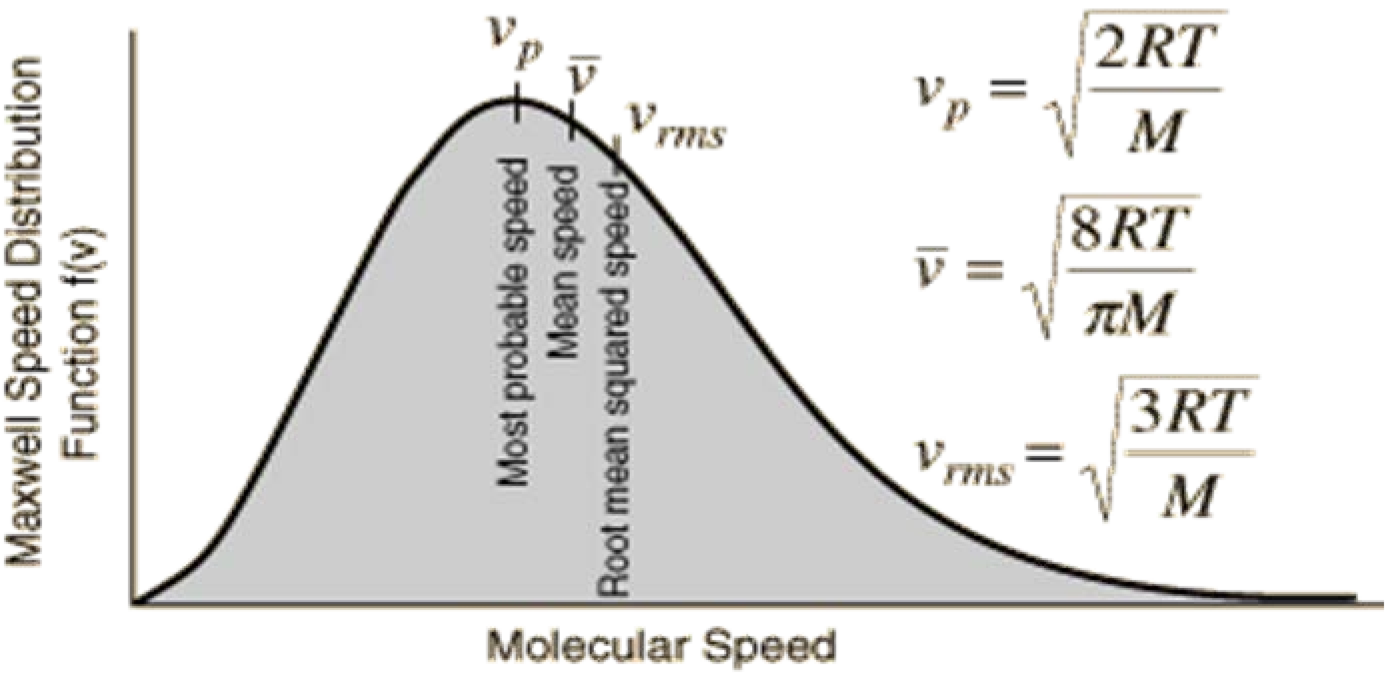
v＝f(T,M)



3. 三个重要速度表示

- 最可几速度V_p：f(v)最大时的速度
- 平均速度V_a
- 均方根速度V_{rms}

$$f(v) = 4\pi\left[\frac{M}{2\pi RT}\right]^{\frac{3}{2}} v^2 \exp\left[\frac{-Mv^2}{2RT}\right]$$



$$v_p = \sqrt{\frac{2RT}{M}}$$

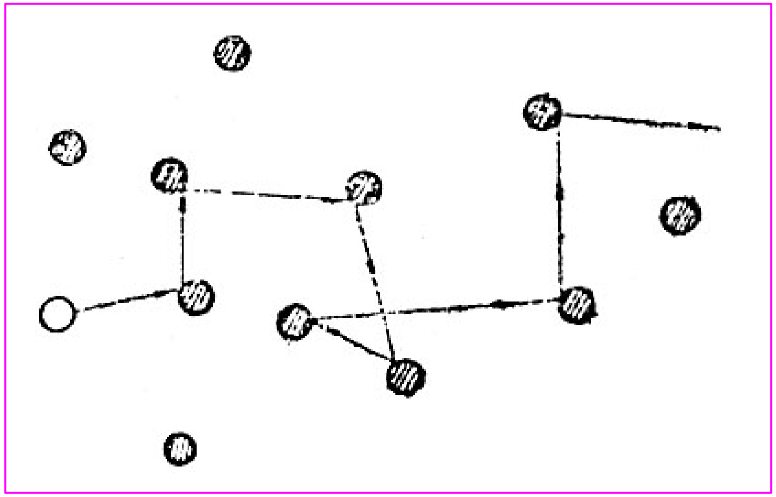
$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}$$

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

4.平均自由程 MEAN FREE PATH

定义：每个分子在连续两次碰撞之间所运动的平均路程

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}\pi\delta^2 n}$$



其中:n——气体分子密度，标准状态，

$n \approx 3*10^{19}$

δ —分子直径, **several angstrom**

$$Pv = n' RT \Rightarrow P = nKT$$

- 代入理想气体状态方程

得：

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi\delta^2 P}$$

对于**25**℃空气

Is λ propotional to T?

$$\lambda = \frac{0.667}{P(pa)} \quad \text{cm}$$

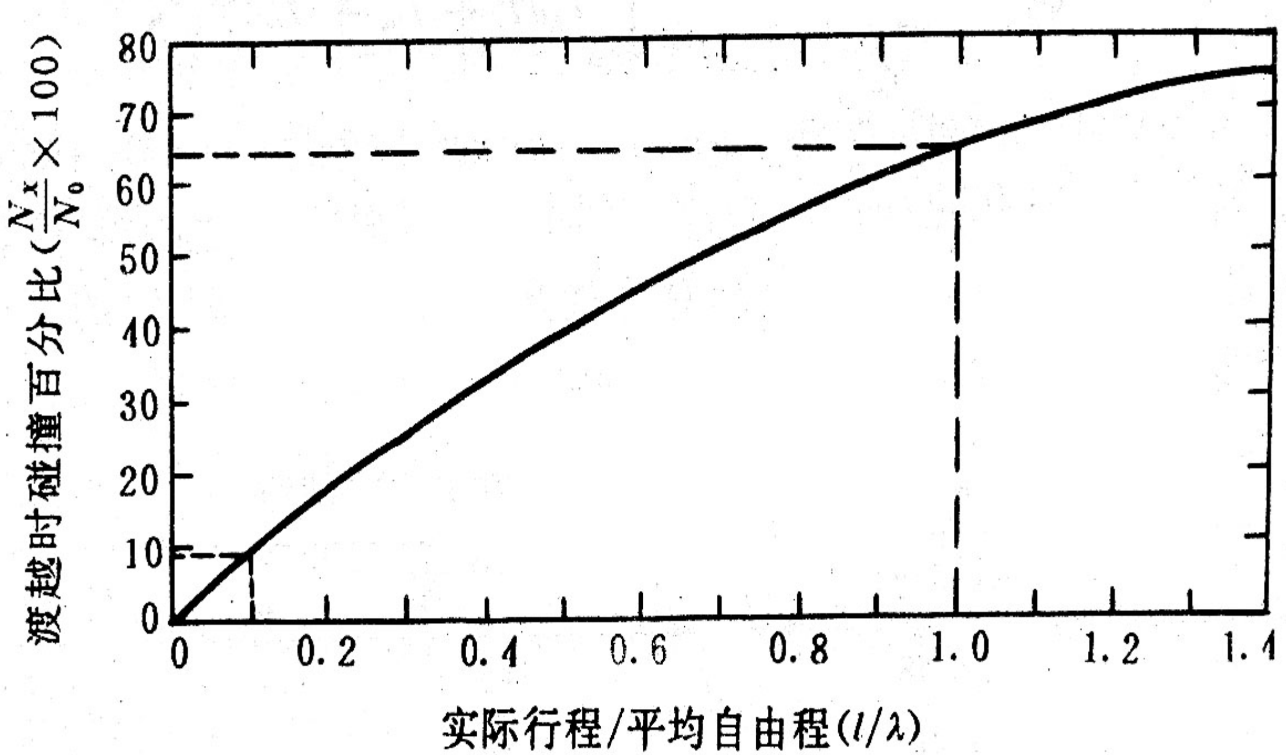
气体分子的密度与平均自由程

	101325 Pa(atm)	0.1 Pa	1 x 10^{-7} Pa
# /cm^3	3 x 10^{19} (30 million trillion)	4 x 10^{13} (40 trillion)	4 x 10^{7} (40 million)
MFP	2.5 x 10^{-6} in 6.4 x 10^{-5} mm	2 inches 5.1 cm	31 miles 50 km

碰撞几率

气体分子运动 X 的距离以后，彼此间碰撞的几率。

$$f = 1 - e^{-x/\lambda}$$



★误区：

f 与 λ 成反比。

x= λ ,f=63%

x= 0.1 λ ,f=9%

5. 分子通量与余弦散射律

（1）分子通量Φ（入射频率ν）：单位时间单位面积的器壁上碰撞的气体分子数

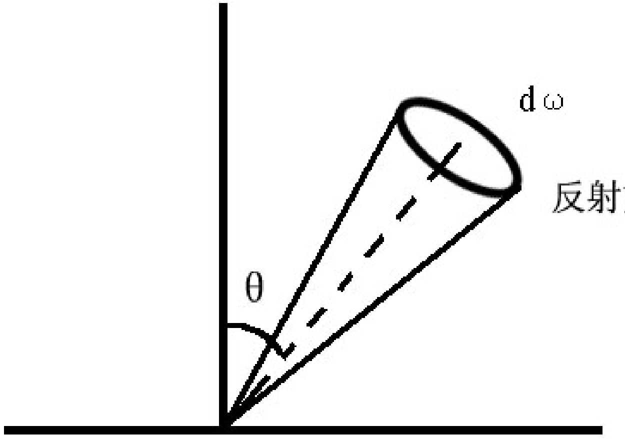
$$\Phi = \nu = \frac{1}{4} n v_a = \frac{P}{\sqrt{2\pi mKT}}$$ （克努森方程）

$= 3.513 \times 10^{22} P/(MT)^{0.5}$（molecules/cm²s）
When P is in torr.

$= 2.64 \times 10^{20} P/(MT)^{0.5}$（molecules/cm²s）
When P is in pascal.

（2）气体分子从固体表面的反射几率

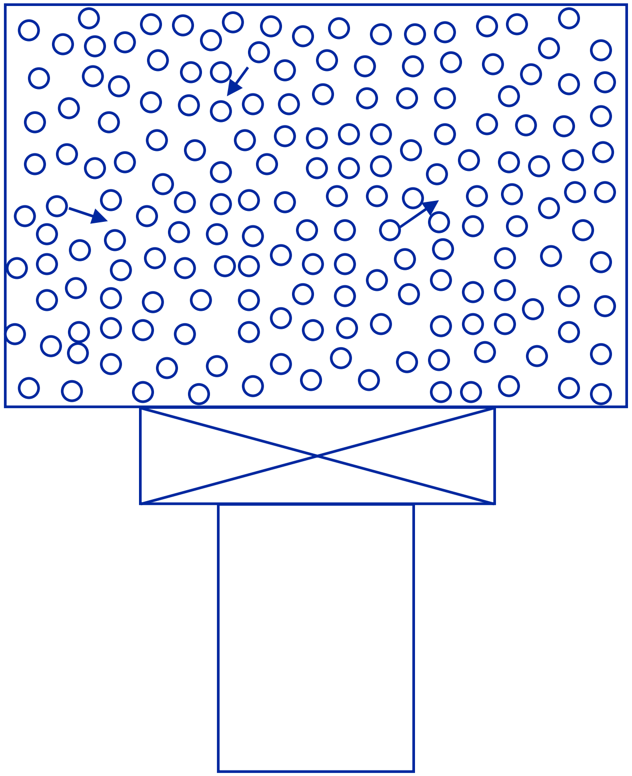
$$dP = \frac{dw}{\pi} \cdot \cos\theta$$



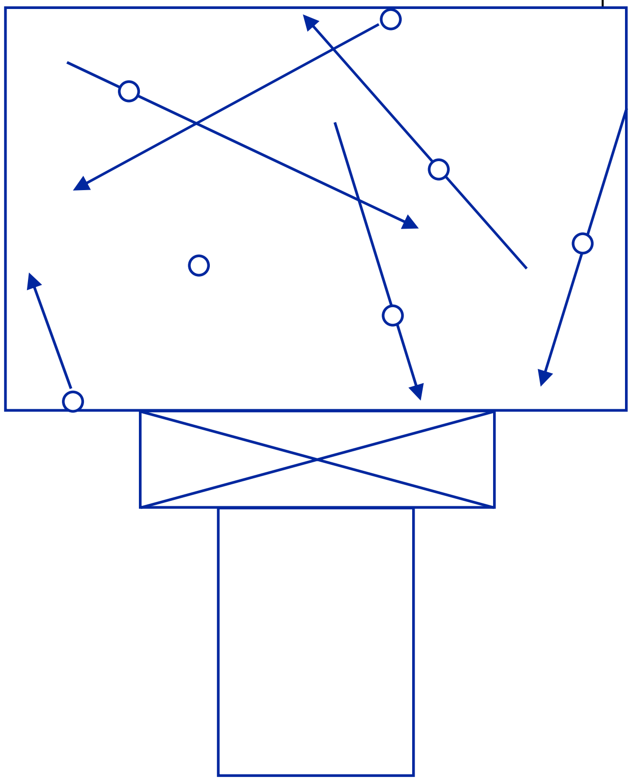
A.反射几率与入射方向无关，仅按余弦定律散射

B.揭示散射的本质是个再发射过程，即气体将停留在固体表面一小段时间以交换能量（吸附）。

6. 气体的流动



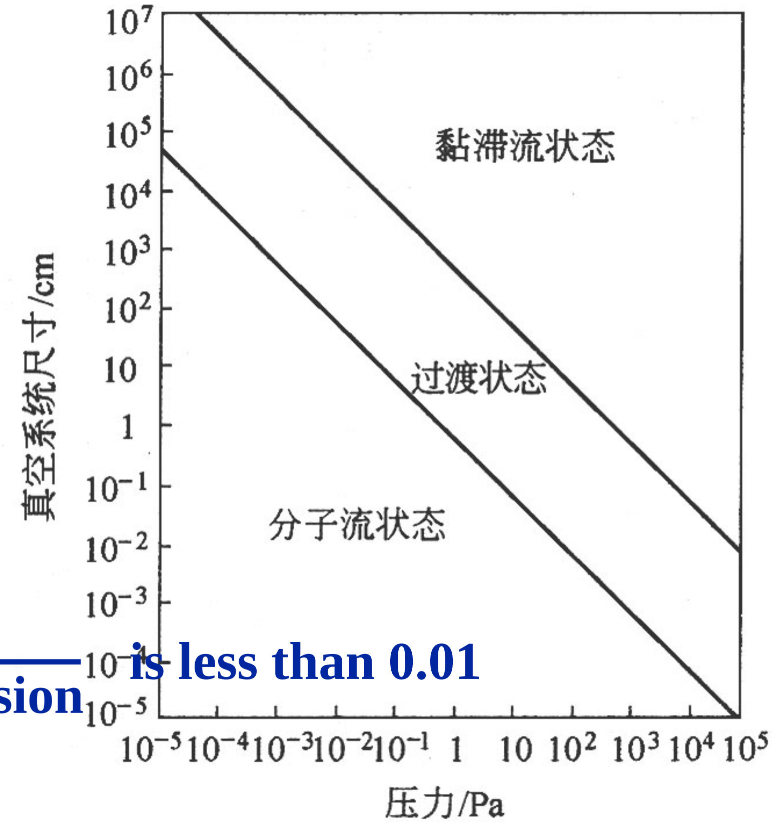
粘滞流状态
(momentum transfer between molecules)



分子流状态
(molecules move independently)

气流状态

Knudsen number



粘滞流状态: $\frac{\text{Mean Free Path}}{\text{Characteristic Dimension}}$ **is less than 0.01**

过渡状态: $\frac{\text{Mean Free Path}}{\text{Characteristic Dimension}}$ **is between 0.01 and 1**

分子流状态: $\frac{\text{Mean Free Path}}{\text{Characteristic Dimension}}$ **is greater than 1**

气源

1. 空间气体：很容易被抽走

2. 吸附气体：
- 物理吸附
- 化学吸附

放气量在中真空阶段与空间气源相当，高真空、超高真空阶段为主要放气源。

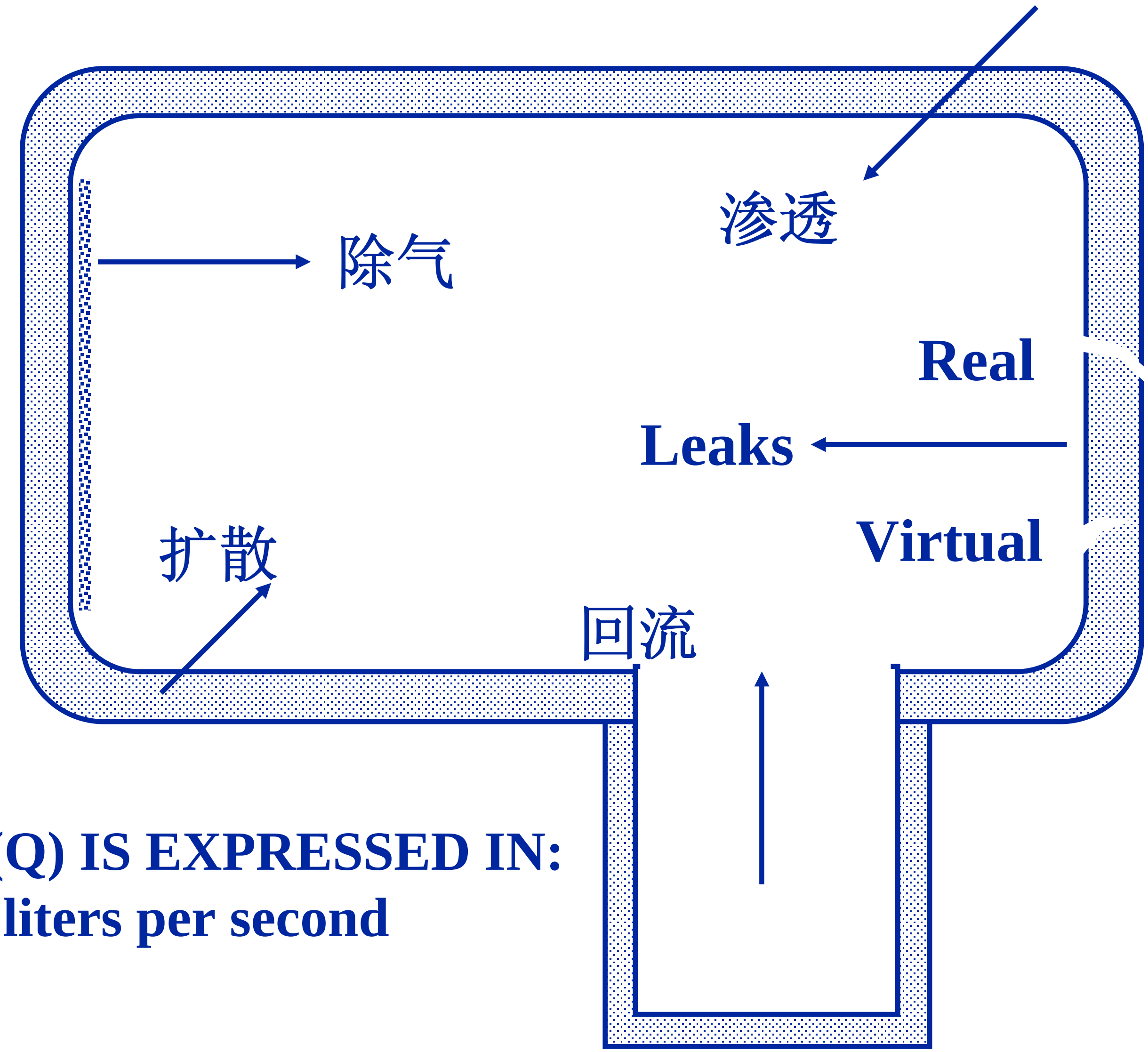
真空材料：不锈钢等，忌用陶瓷

除气手段：烘烤、离子轰击

3. 系统漏气：

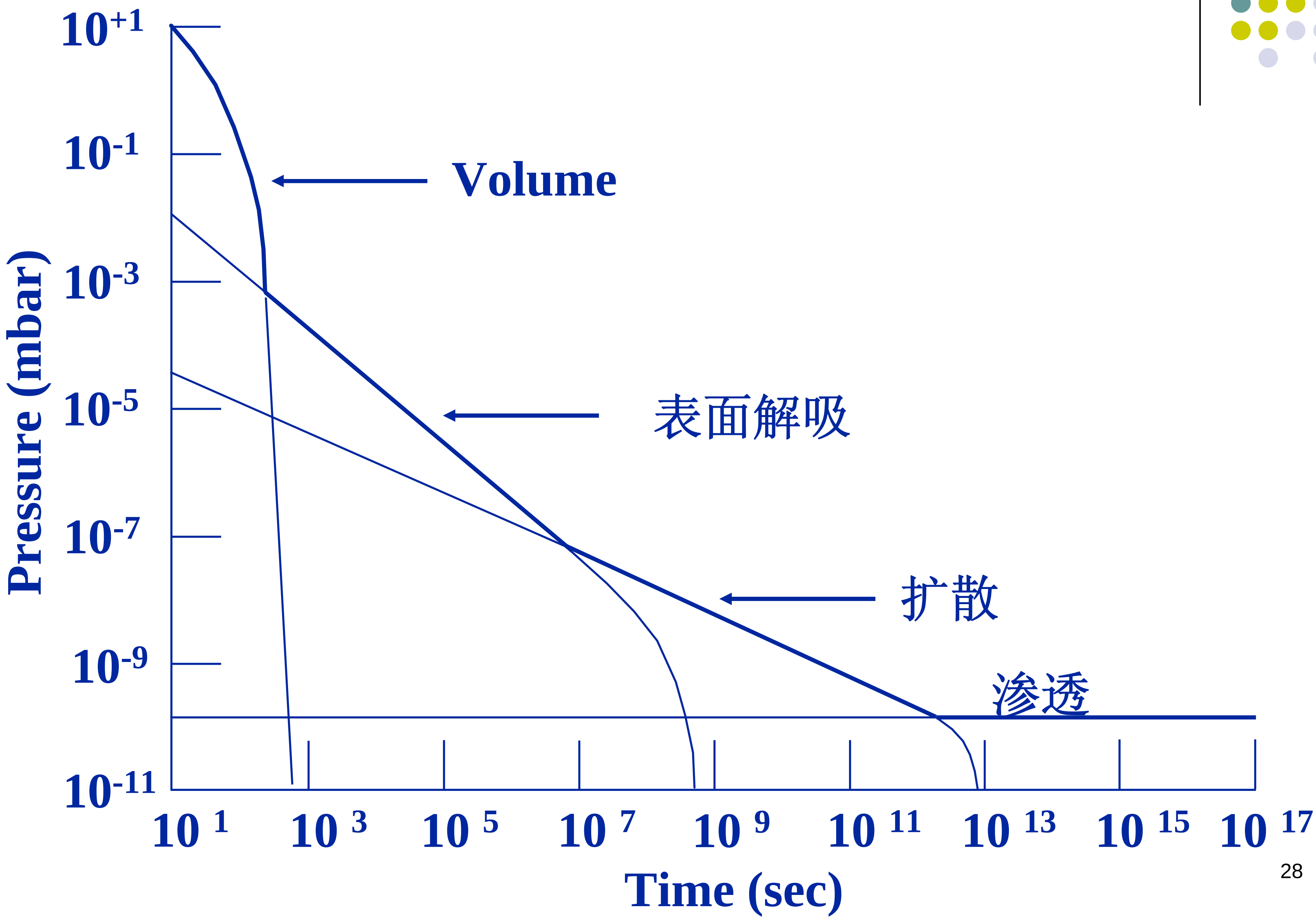
密封：
- O形橡胶圈：高真空
- 金属密封圈：超高真空

GAS LOAD



GAS LOAD (Q) IS EXPRESSED IN:
mbar liters per second

泵压抽气曲线



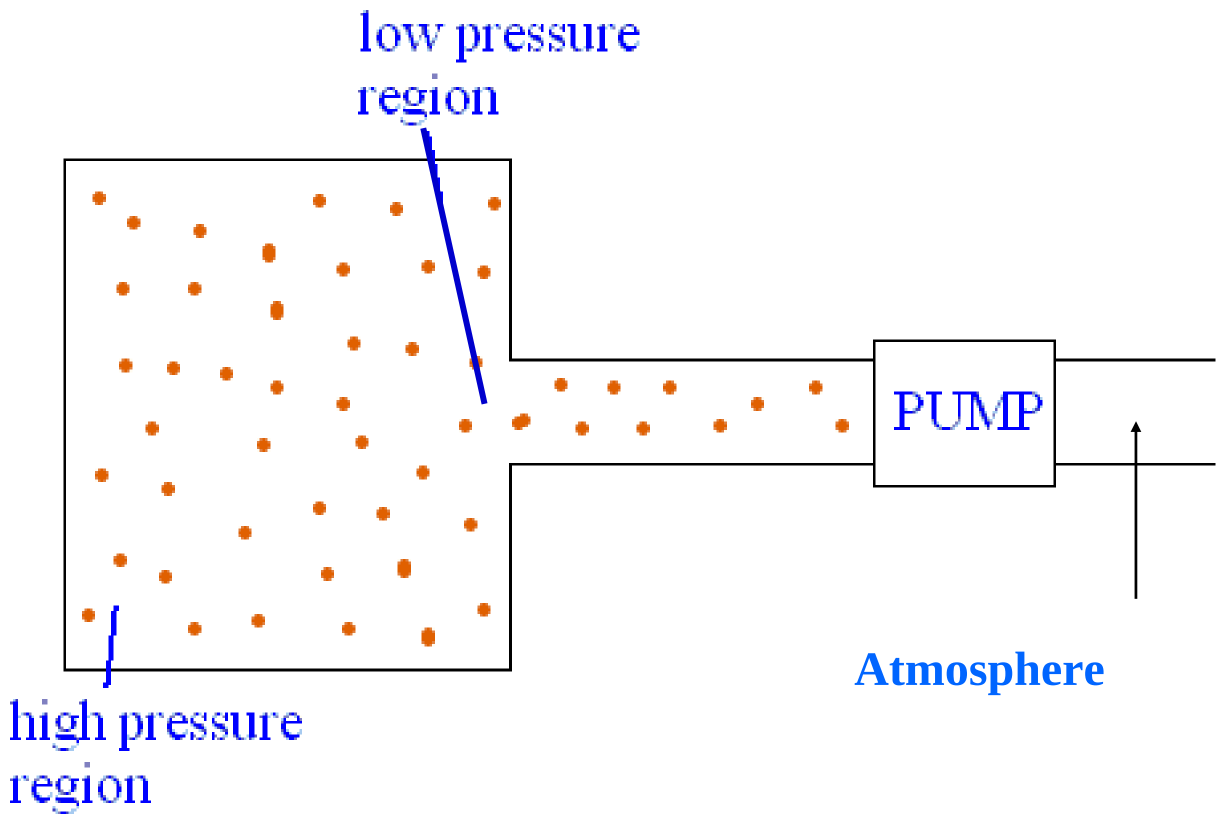
10+1
10-1
10-3
10-5
10-7
10-9
10-11
Pressure (mbar)
Volume
表面解吸
扩散
渗透
10 1
10 3
10 5
10 7
10 9
10 11
10 13
10 15
10 17
Time (sec)

§1-3 真空的获得

- 典型的真空系统包括：真空室(Chamber)，真空泵(Vacuum Pump), 控制系统(Control system)，真空计(Vacuum Gag)

- 真空系统的两个重要参数：极限真空（本底真空，Base pressure or Ultimate pressure），抽气速率(Pumping speed)

真空泵的工作原理



主要的真空泵

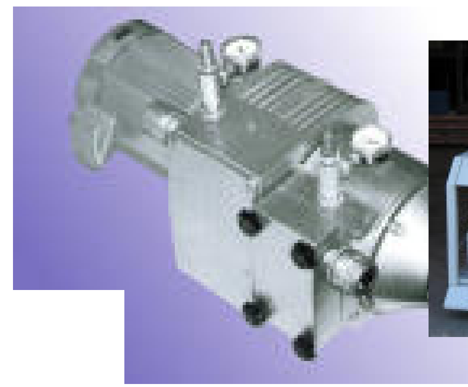
- 油封机械泵、分子泵、罗茨泵

  原理：利用机械力压缩
- 油扩散泵

  原理：油蒸汽喷射形成压差
- 溅射离子泵、钛升华泵

  原理：溅射形成吸气、升华形成吸气
- 冷凝泵

  原理：将气体冷凝成液态/冷凝吸附



1. 机械泵（旋片式机械泵）

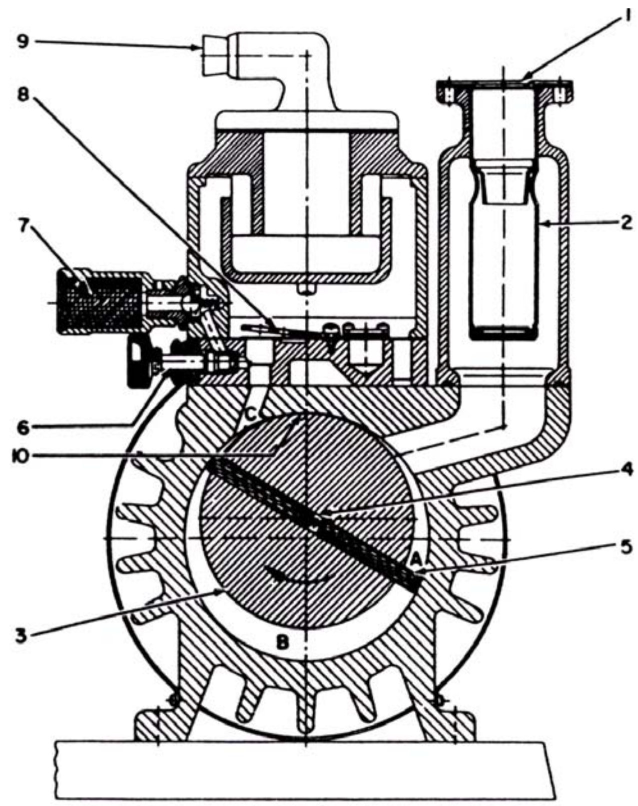
转子偏心地置于定子内，旋片上有弹簧，整个部件浸于机械泵油中，油起润滑和密封作用。

旋片转动一周后

$$P_1 = P_0 \frac{v}{v + \Delta v}$$

经**n**个循环后

$$Pn = P_0 \left(\frac{v}{v + \Delta v} \right)^n$$

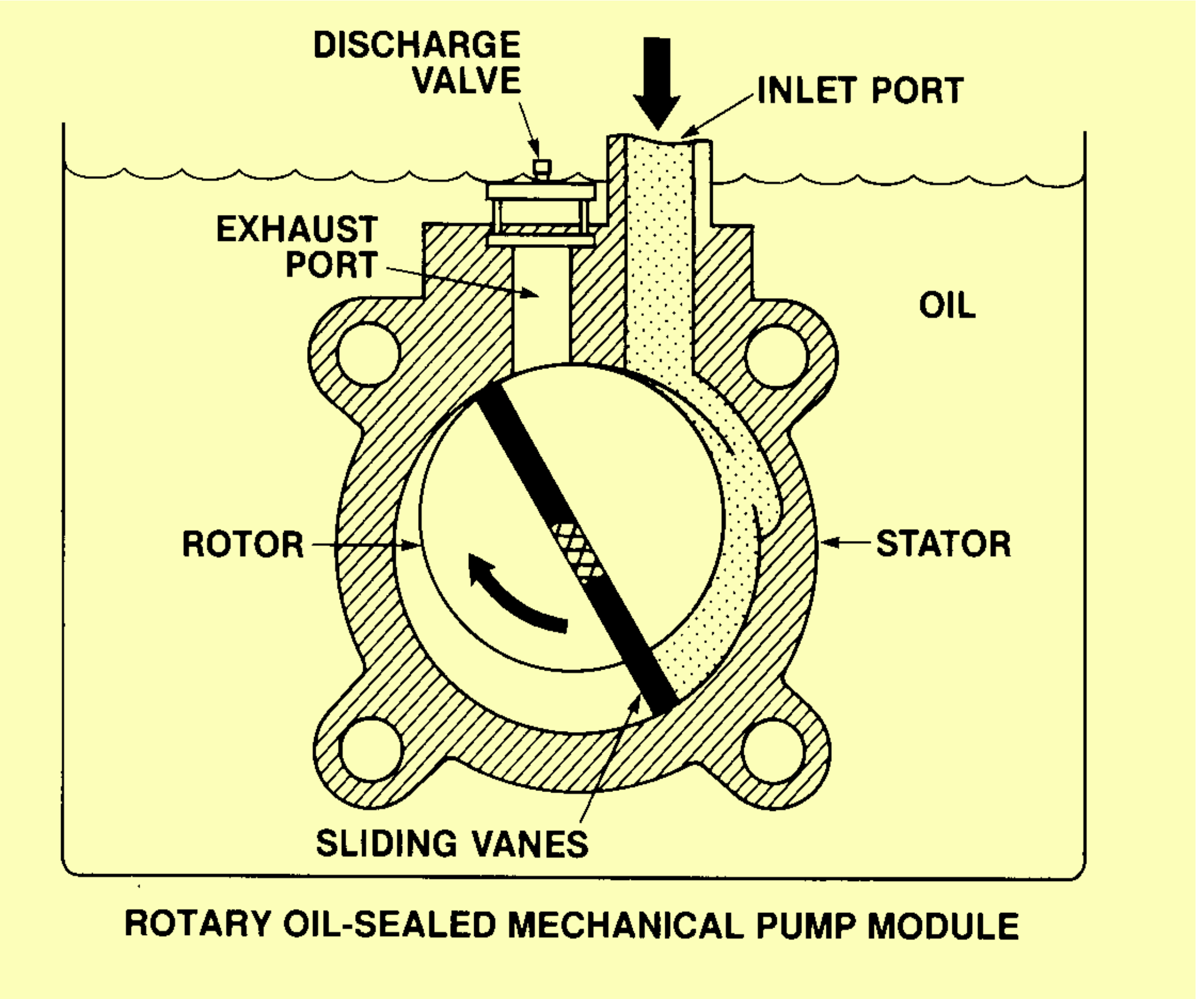


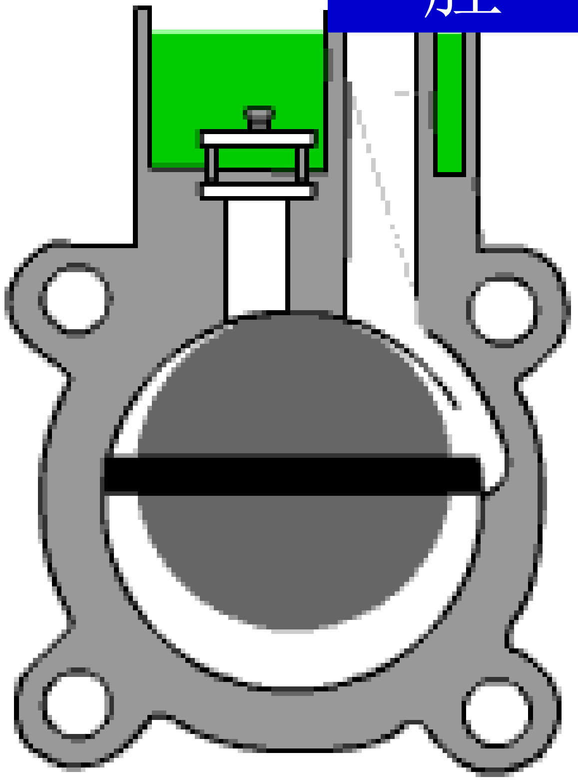
Pump Mechanism

真

空

腔





Pn不可能趋于零，因为：

A.在出气与转子密封点之间存在着“有害空间”。

B.单等级泵时进气口与排气口压力差大。

C.泵油在高温摩擦下，裂解形成轻馏成份。

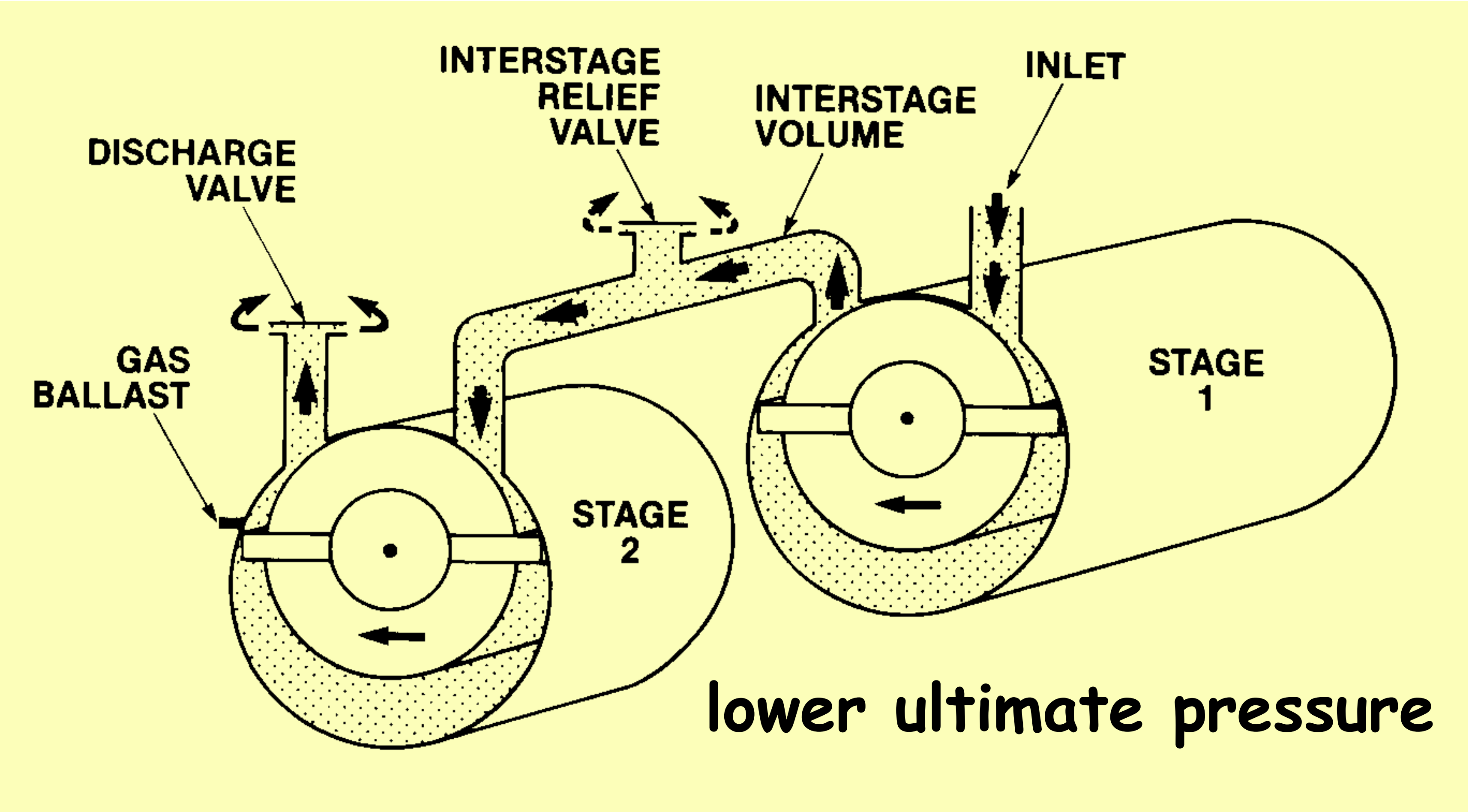
D.水蒸汽凝结，形成悬浊液

气镇阀

采用高温泵油

解决办法是采用双级泵，以一个转子空间的出气口作为另一转子空间的进气口，可使极限真空从**1Pa→10^{-2}Pa**

How Two stage rotary pump Works

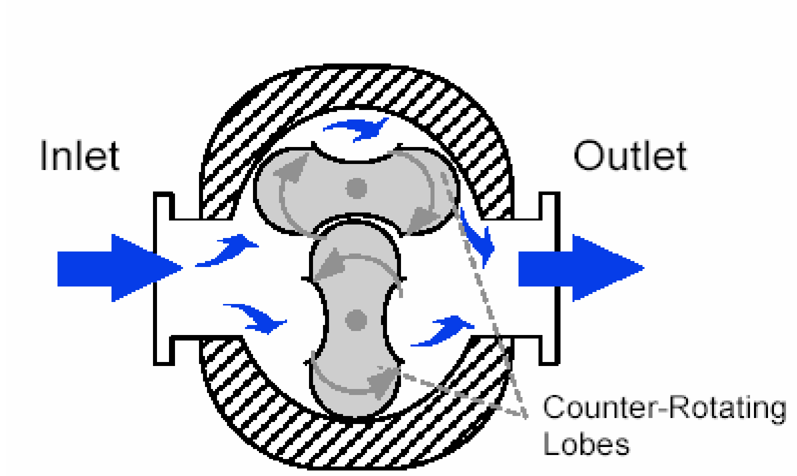


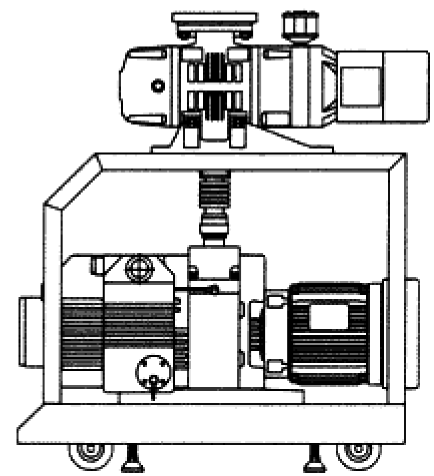
Rotary Pump Disadvantages

- Vibration!
- Oil vapor gets into vacuum system
  - Not UHV compatible
- Subject to wear (mechanical)
- Does not pump condensable gasses well
- Warm
- Exhaust oil

2. Roots--罗茨泵

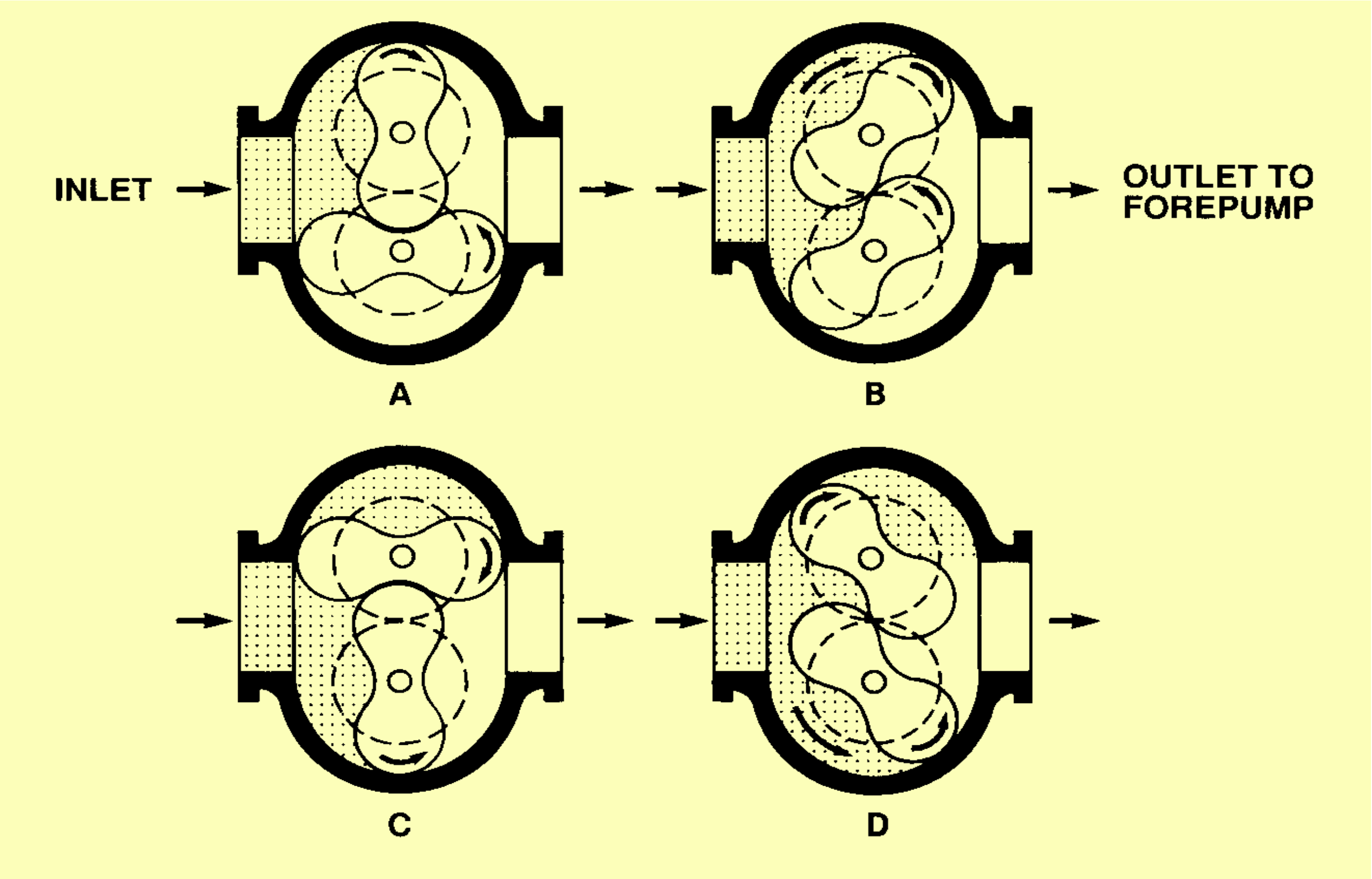
- 两个**8**字形共轭的转子，转子之间、转子与泵壁之间无油，间隙**0.1mm**高速转动：可达**3000**转/分，抽气时无压缩，工作原理：容积泵**+**分子泵。
- 机械增压泵





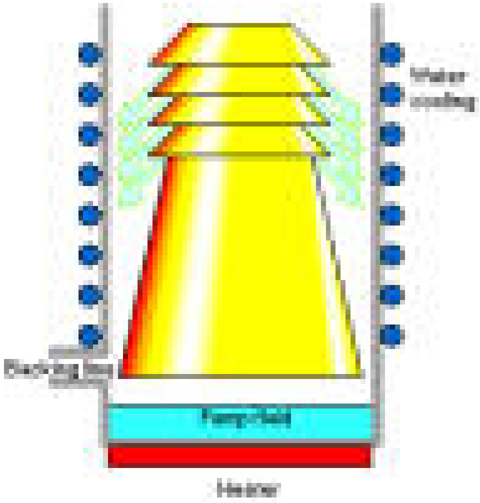
Pump/Blower Packages

Blower/Booster Pump

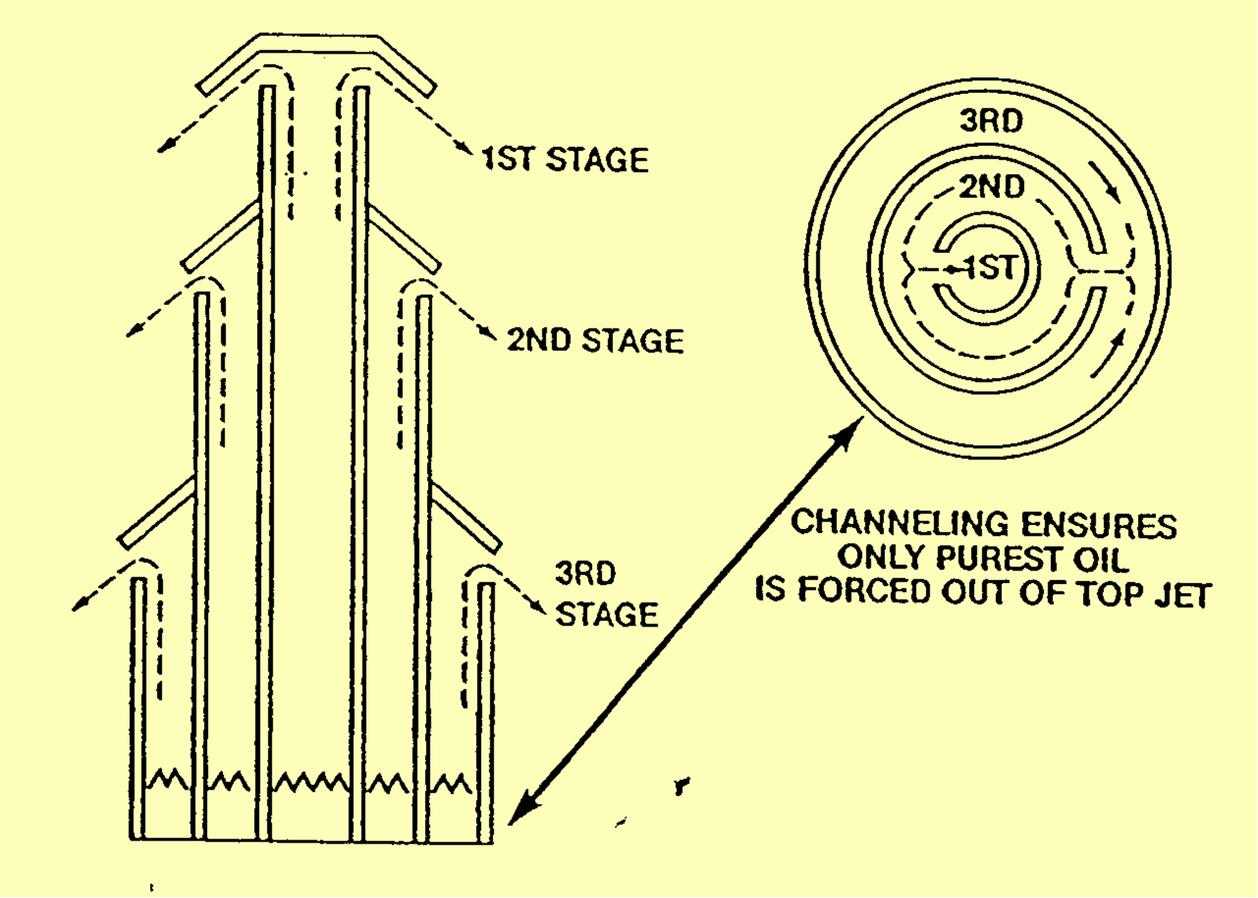


3. 扩散泵

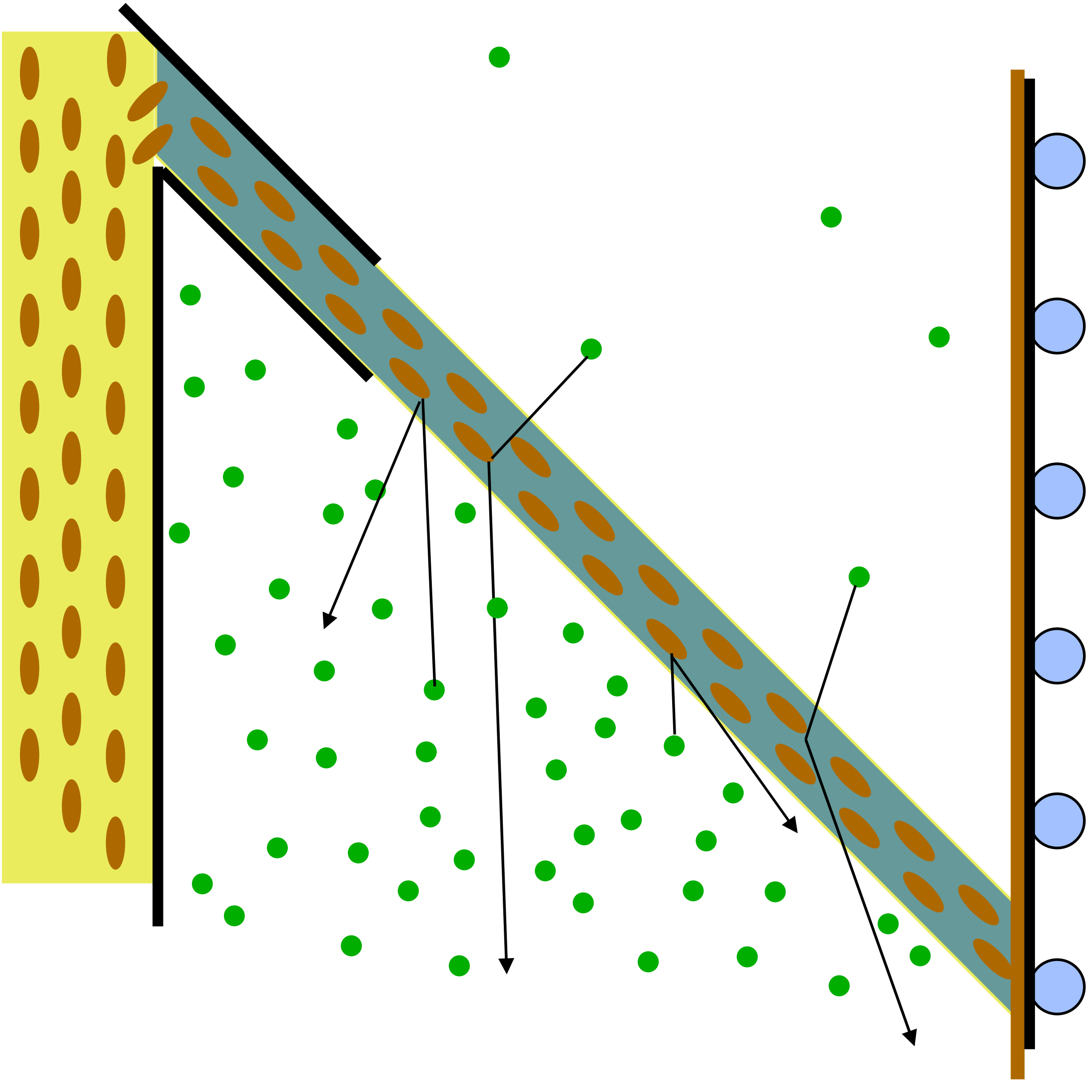
扩散泵油被加热后沿喷嘴向下喷射，速度可达**200m/s**，由空气动力学原理与进气口形成压力差，使气体向下扩散而被抽走，油蒸汽水冷后重新利用。



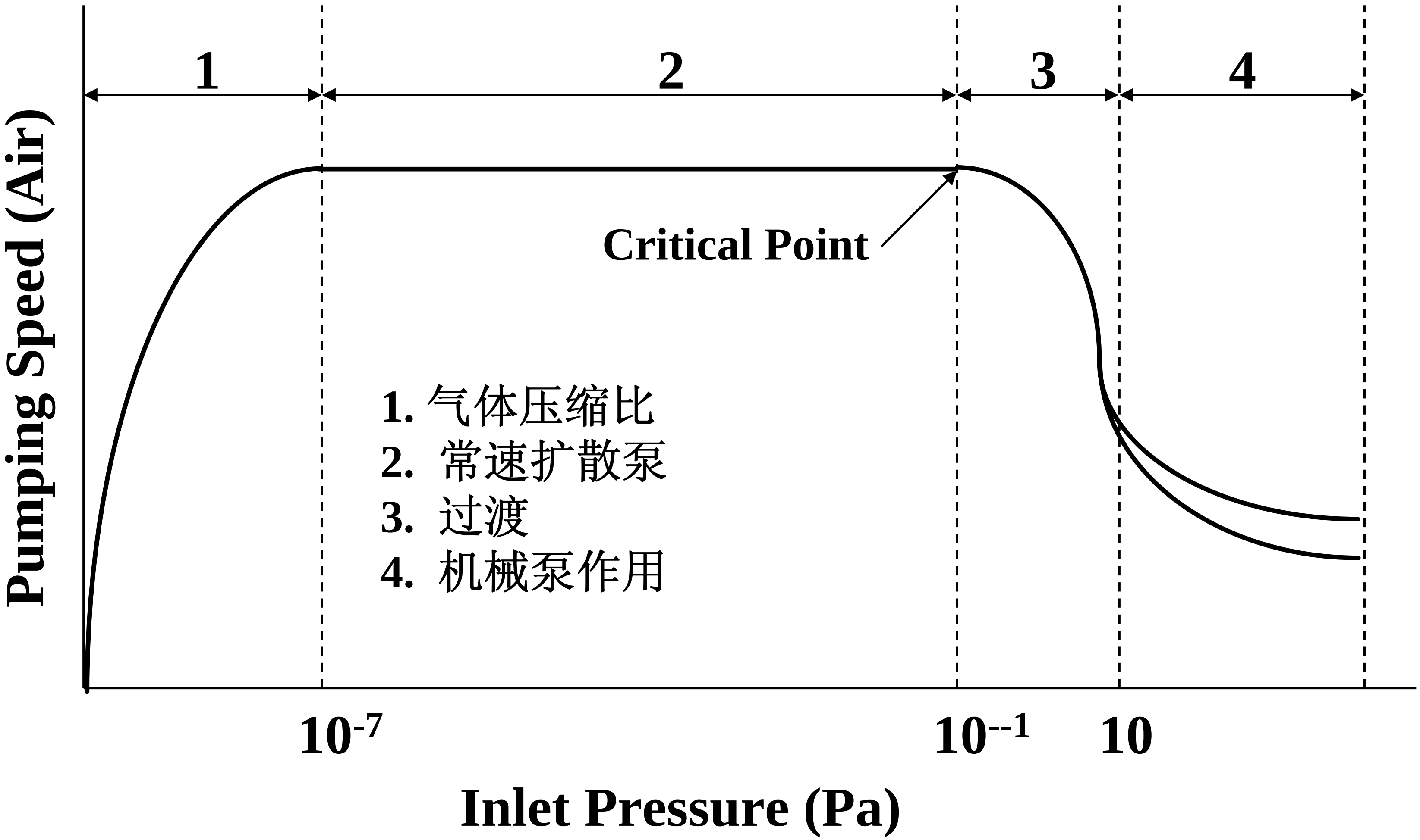
扩散泵工作原理


1ST STAGE
2ND STAGE
3RD
STAGE
3RD
2ND
1ST
CHANNELING ENSURES
ONLY PUREST OIL
IS FORCED OUT OF TOP JET

How the Pump Works



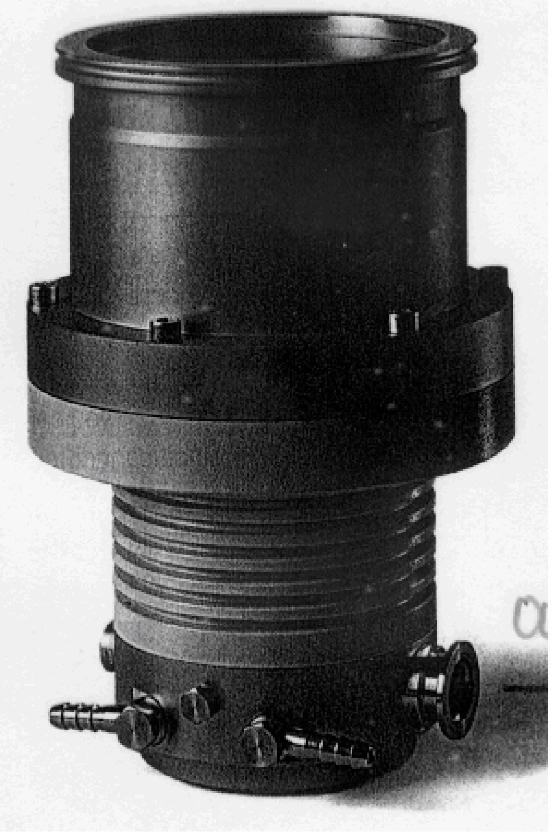
抽气速率



1
2
3
4
Critical Point
1. 气体压缩比
2. 常速扩散泵
3. 过渡
4. 机械泵作用
Pumping Speed (Air)
10-7
10--1
10
Inlet Pressure (Pa)

4. 分子泵

“Clean, Lean Vacuum Machine”

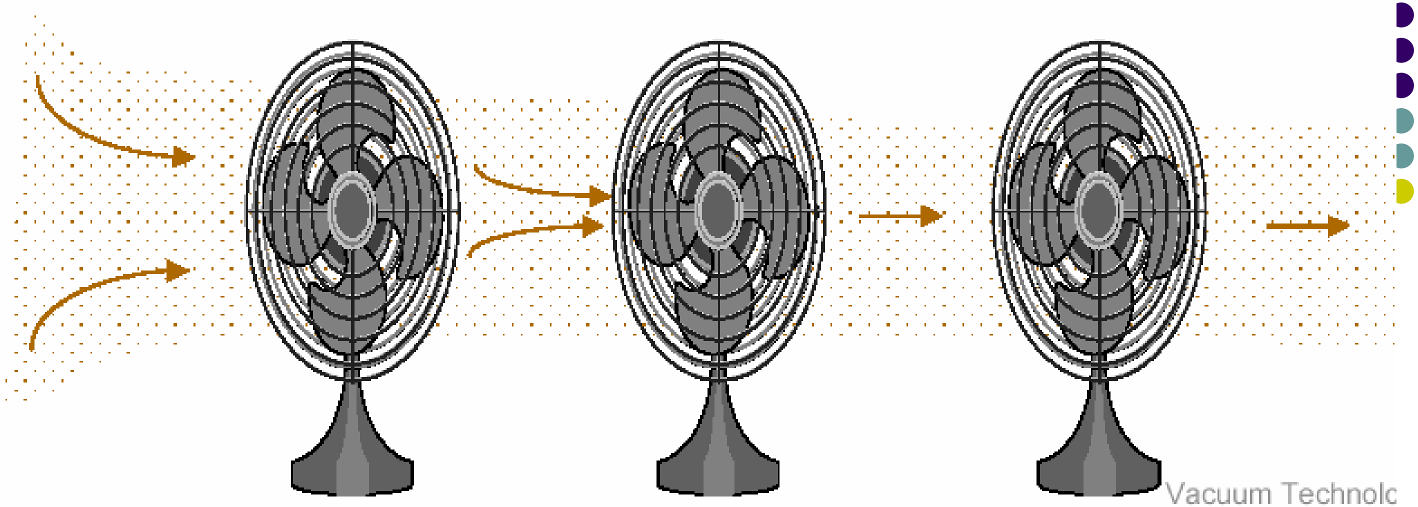


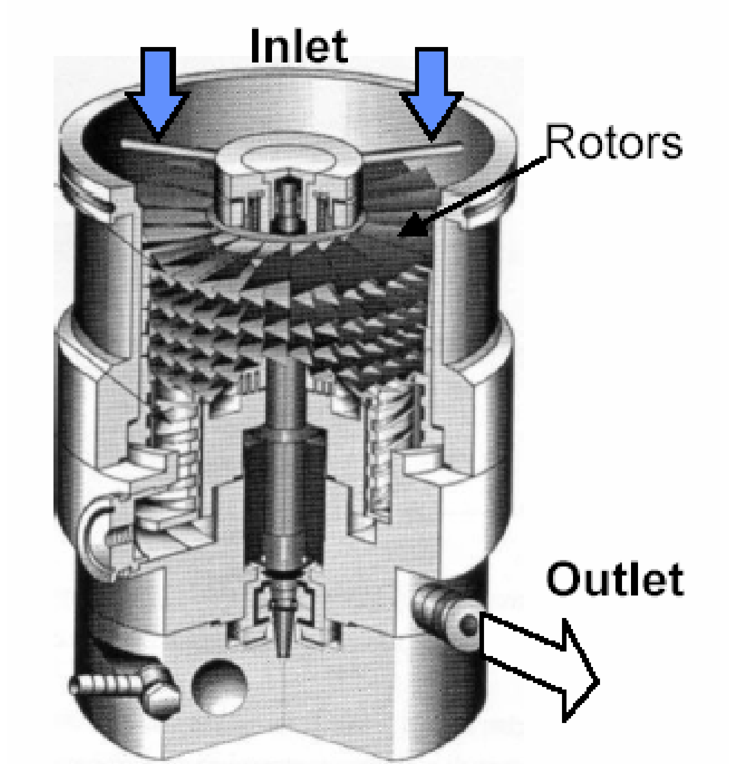
Balzers, 1992

Leybold M2000, 1999

External picture & size.

Turbo’s


Vacuum Technolc

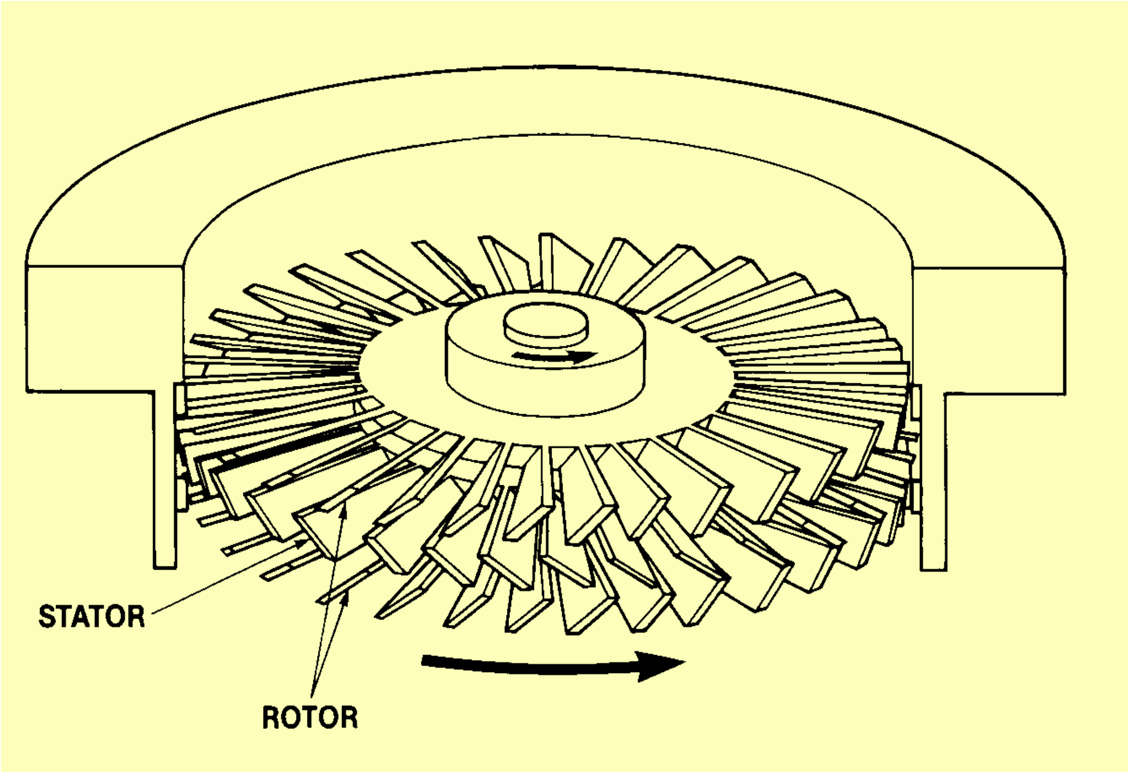

Inlet
Rotors
Outlet

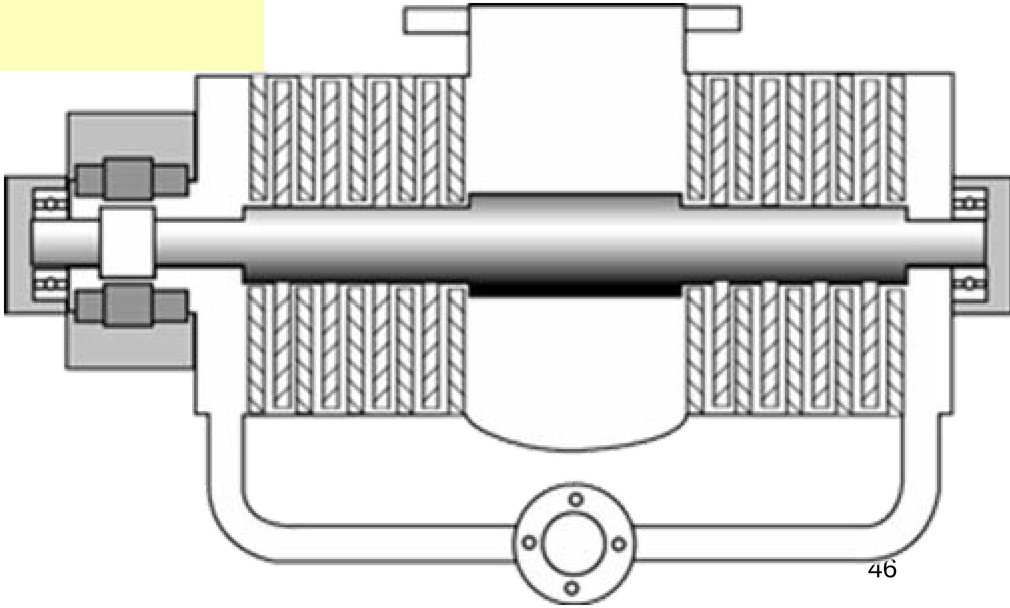
- 气体随转子作圆周运动，获得离心力，与转子上页碰撞，按余弦定律散射，获得速度，后与定子下交碰撞，再获向下速度分量。

条件：（**1**）起始工作气压小，入大。

常压下，空气λ**=0.06**μ**m**，**1.3Pa**，λ**=4.4mm**要求λ大于叶片间距。

（**2**）转子叶片线速度与气体分子速度相近分子量大、气体易抽，H_2难抽H_2最可几速率**1557m/s**，极限真空残余气体中。**85%**为H_2。


STATOR
ROTOR



Turbomolecular Pumps

Advantages

- Clean
  - No oil vapor
- Don't need to warm up/cool down
- High vacuum
- High pumping speed
  - N_2 170 l/s
  - He 130 l/s
  - H_2 110 l/s

Disadvantages

- Relatively expensive
- Can't have particles
- Can fail catastrophically (and expensively!)
- Pumping speed varies with gas

5. 钛升华泵

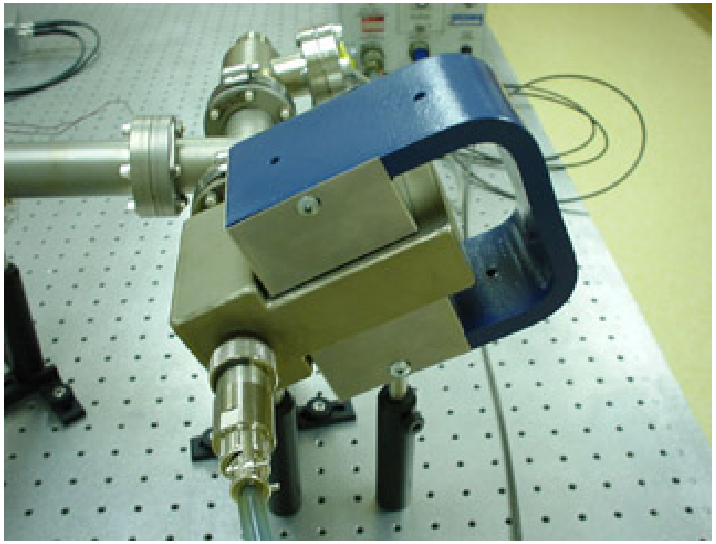
- 加热热丝至足够高温（**1100**℃），钛直接升华，钛沉积在器壁内腔上，形成新鲜钛膜层，在升华和沉积过程中，钛与活性气体结合形成稳定化合物（**TiO**，**TiN**），达到抽气的目的：吸附作用，物理**+**化学（为主）。

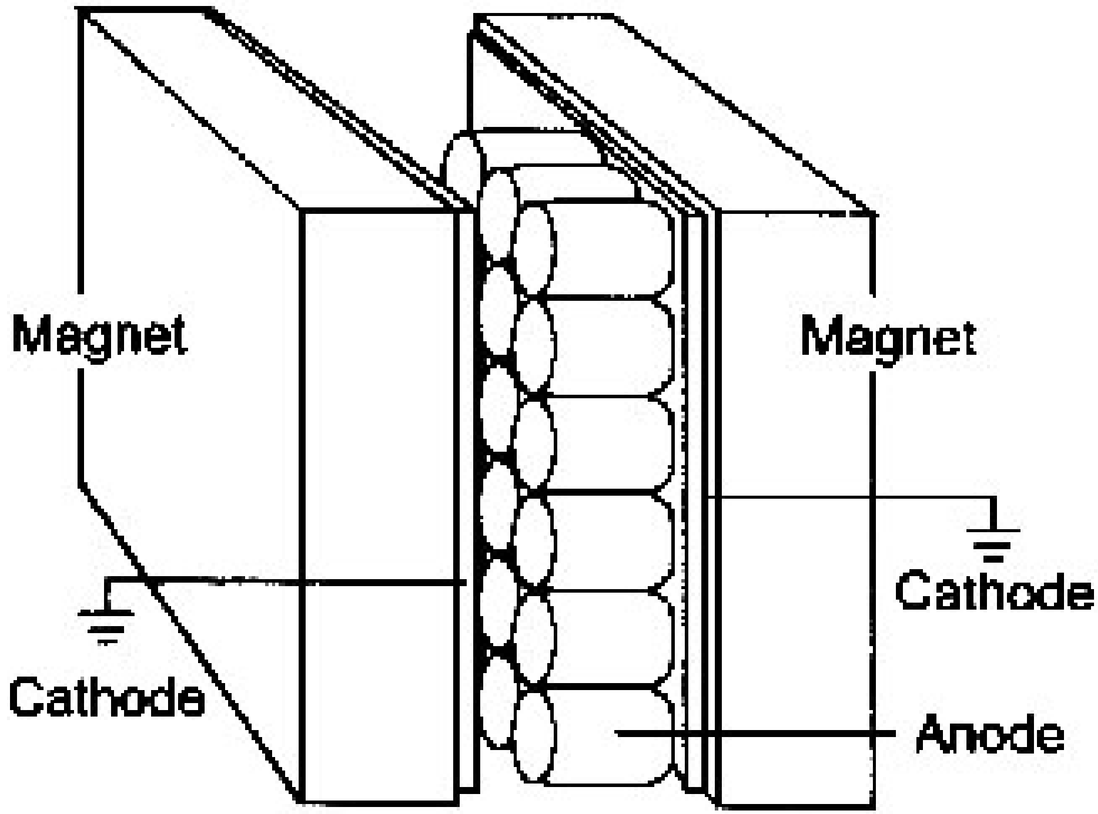
极限真空：**10^{-10}Pa**

注意：（**1**）控制升华速率，使钛充分反应，否则无效；（**2**）吸气面大，抽速高。

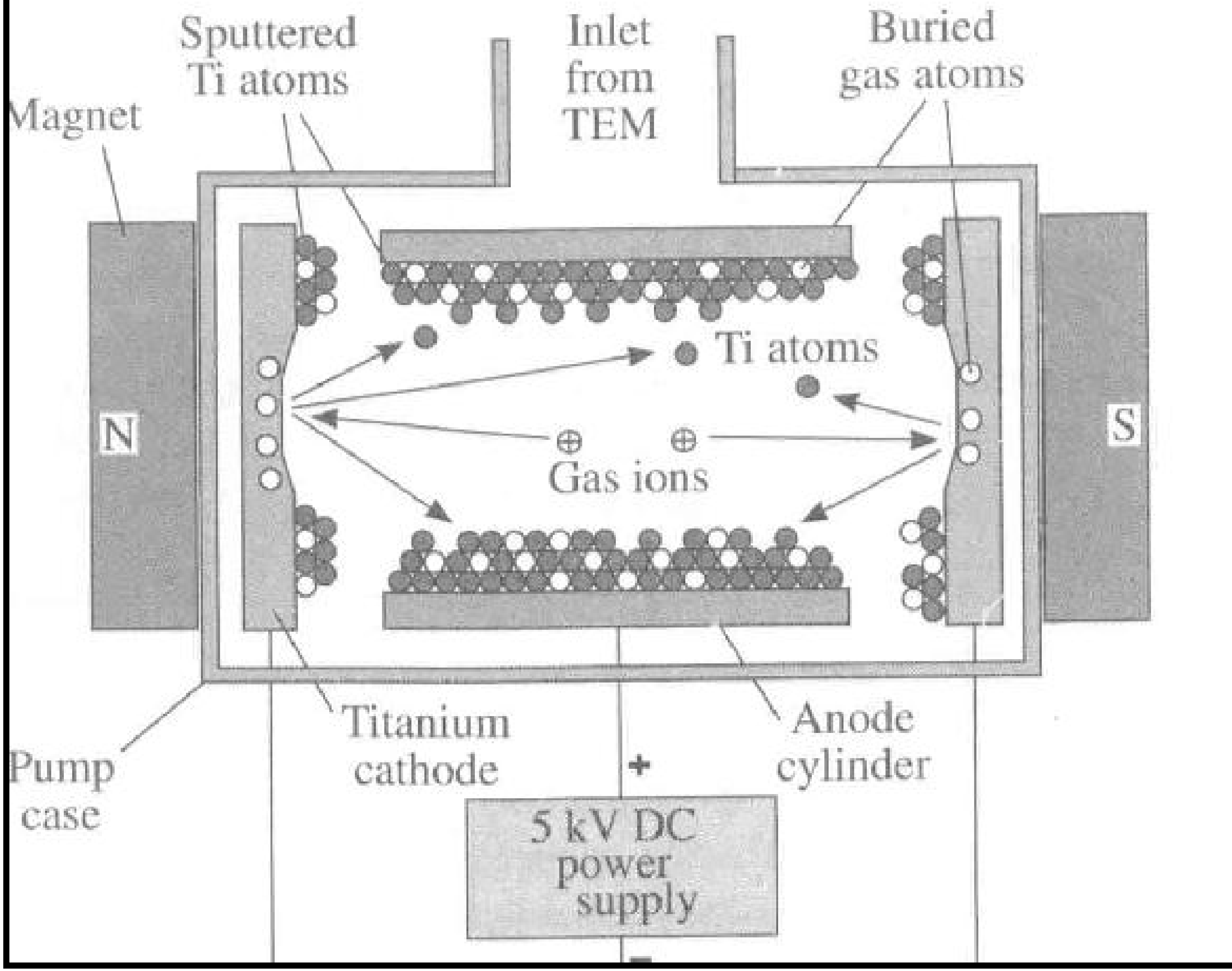
6. 溅射离子泵

- 阳极为多个不锈钢圆筒或四方格、六方格组成,阴、阳极之间加有高压,在阳极小室里产生放电。
- 特点：极限真空10^{-10}Pa，对油污染敏感





溅射离子泵的工作前提：先采用抽气泵抽至 10^{-3} Torr。


Sputtered Ti atoms
Inlet from TEM
Buried gas atoms
Magnet
N
S
Ti atoms
Gas ions
Pump case
Titanium cathode
Anode cylinder
+
5 kV DC power supply
−

Ion Pump

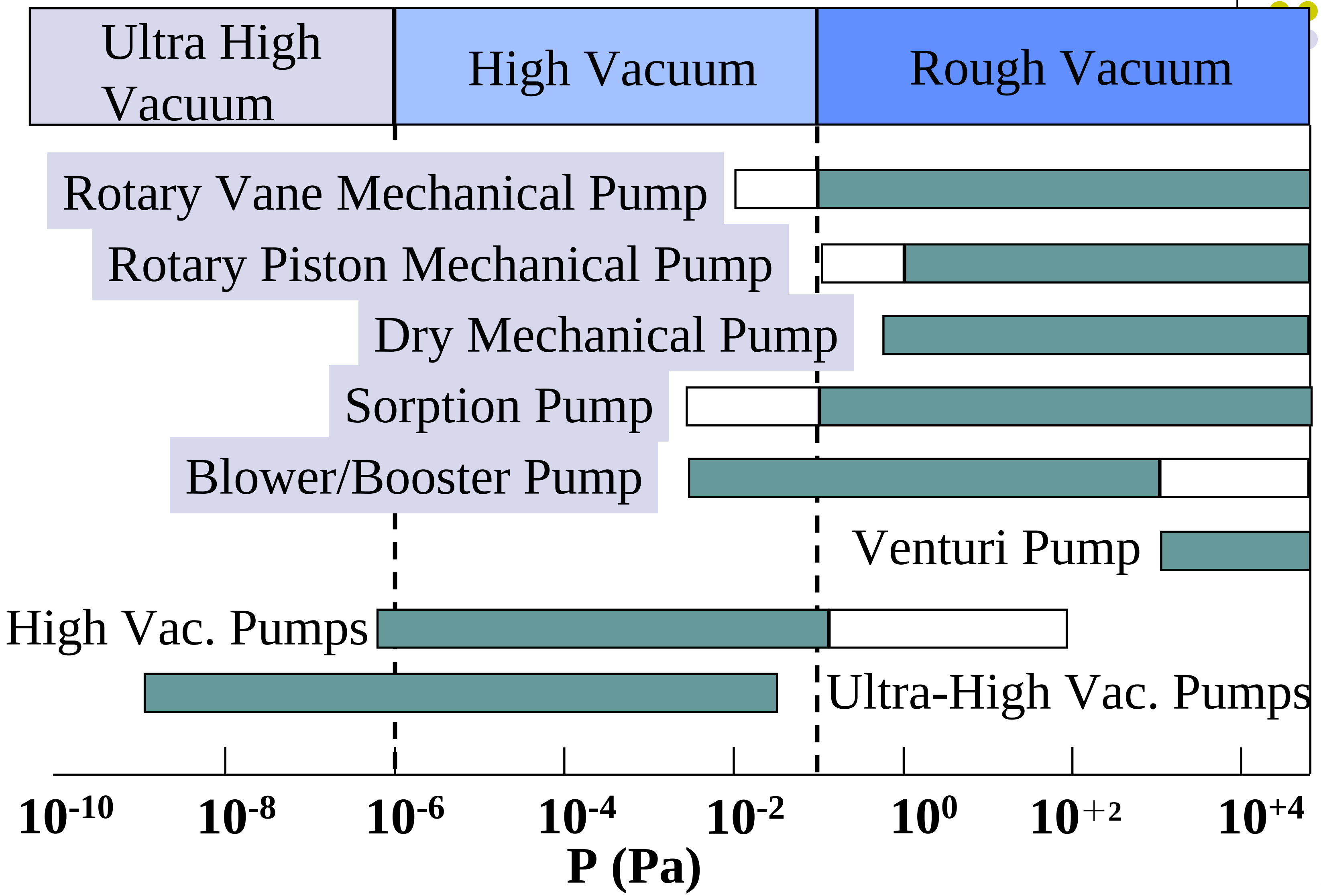
Advantages

- Clean
  - Oil Free
- No moving parts
- Can easily measure pressure from current

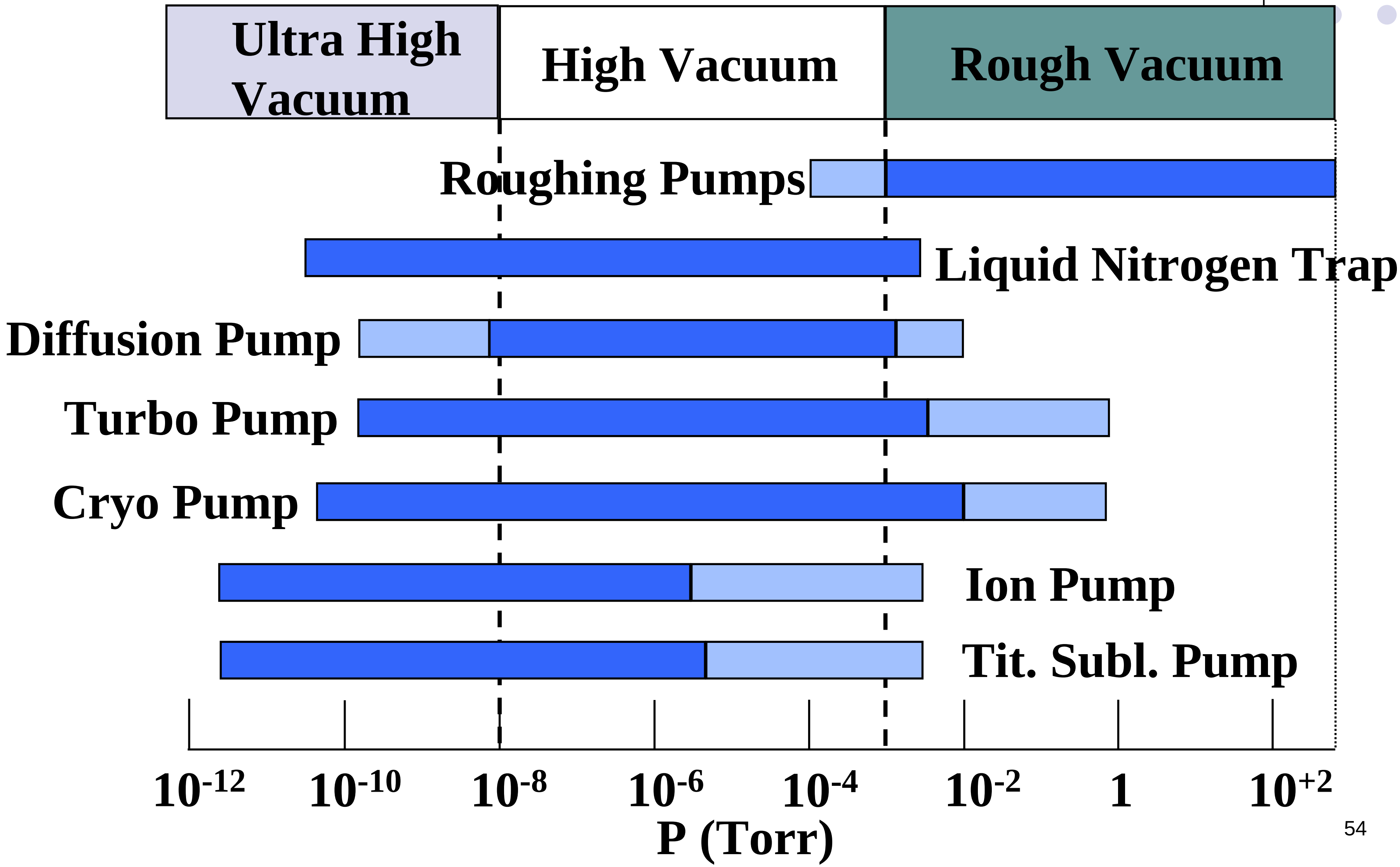
Disadvantages

- "Finicky"
  - Hard to start
    - Low pumping speed at high pressures
  - Need to bake out
- Not very efficient for water
- Low capacity
- Gasses not permanently removed

PUMP OPERATING RANGES



PUMP OPERATING RANGES



§1-4 真空的测量

几种真空计的工作原理与测量范围

- **U**形管压力计

  利用大气压与真空压差

  测量范围（**Pa**） 10^5—10^2

- 电阻真空计、热偶真空计

  利用气体分子热传导

  测量范围（**Pa**） 10^4—10^{-2}

- 热阴极电离真空计、B-A型真空计

  利用气体电离与压强的关系

  测量范围（Pa）10^{-1}—10^{-6}、10^{-1}—10^{-10}
- 潘宁磁控电离计

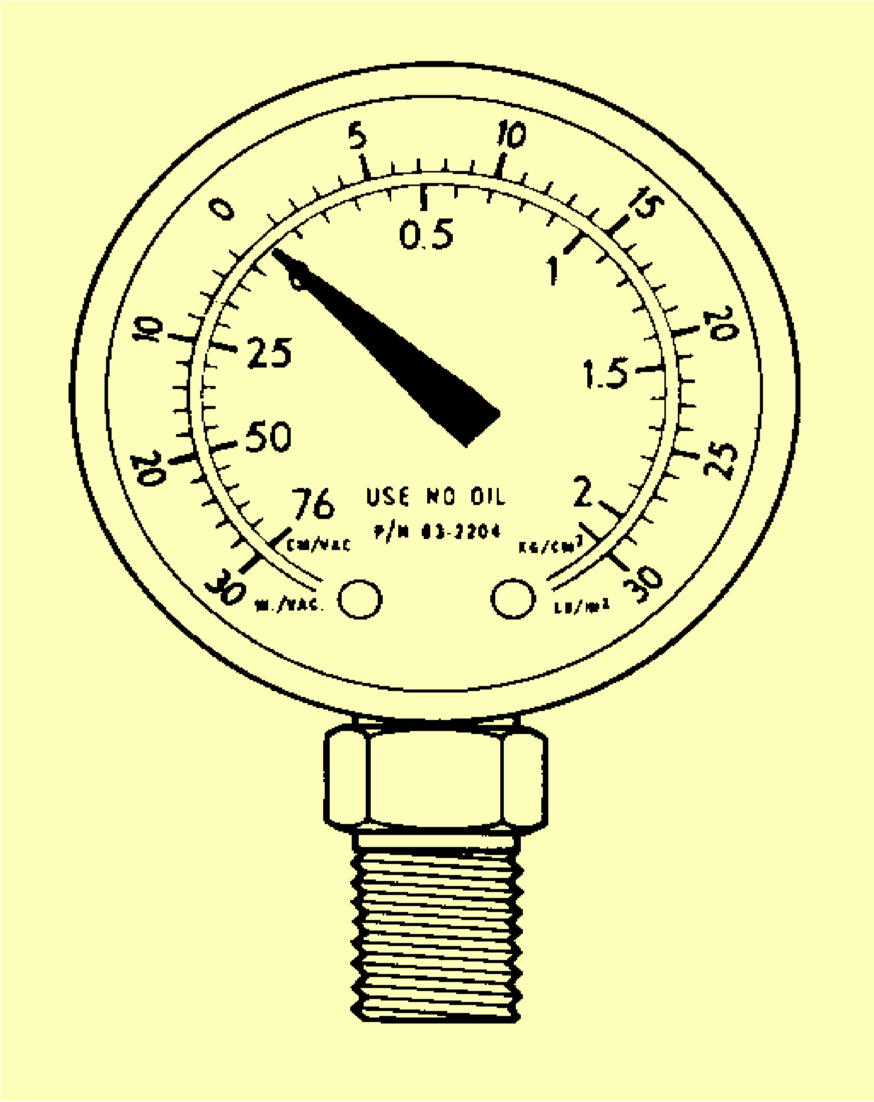
  利用磁场中电离与压强的关系

  测量范围（Pa）1—10^{-5}
- 气体放电管

  利用气体放电与压强的关系

  测量范围（Pa）10^{3}—1

1. Bourdon Gauge



2. Heat Transfer Gauges

Thermocouple gauge

and

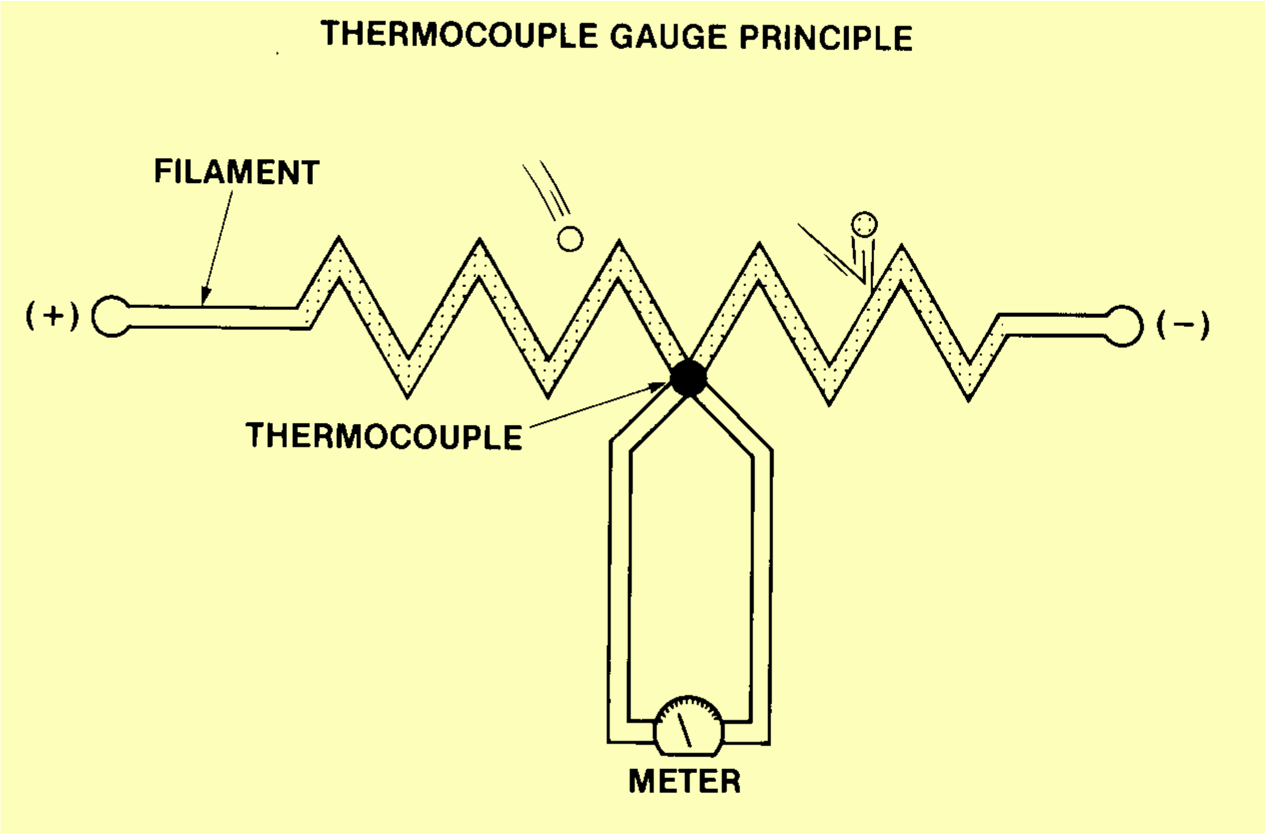
Pirani Gauge

热偶真空计

在低气压下，气体传导的热量与压强成正比，对一热丝进行加热，在平衡时其温度应恒定，用热电偶测量热线温度的变化，即可知压强的变化，若测量热丝电阻值的变化，即为热阻真空计。

$Q=Q_1$辐射$+Q_2$传导$+Q_3$气体分子带走热量

How the gauge works



热导规对不同气体的灵敏度

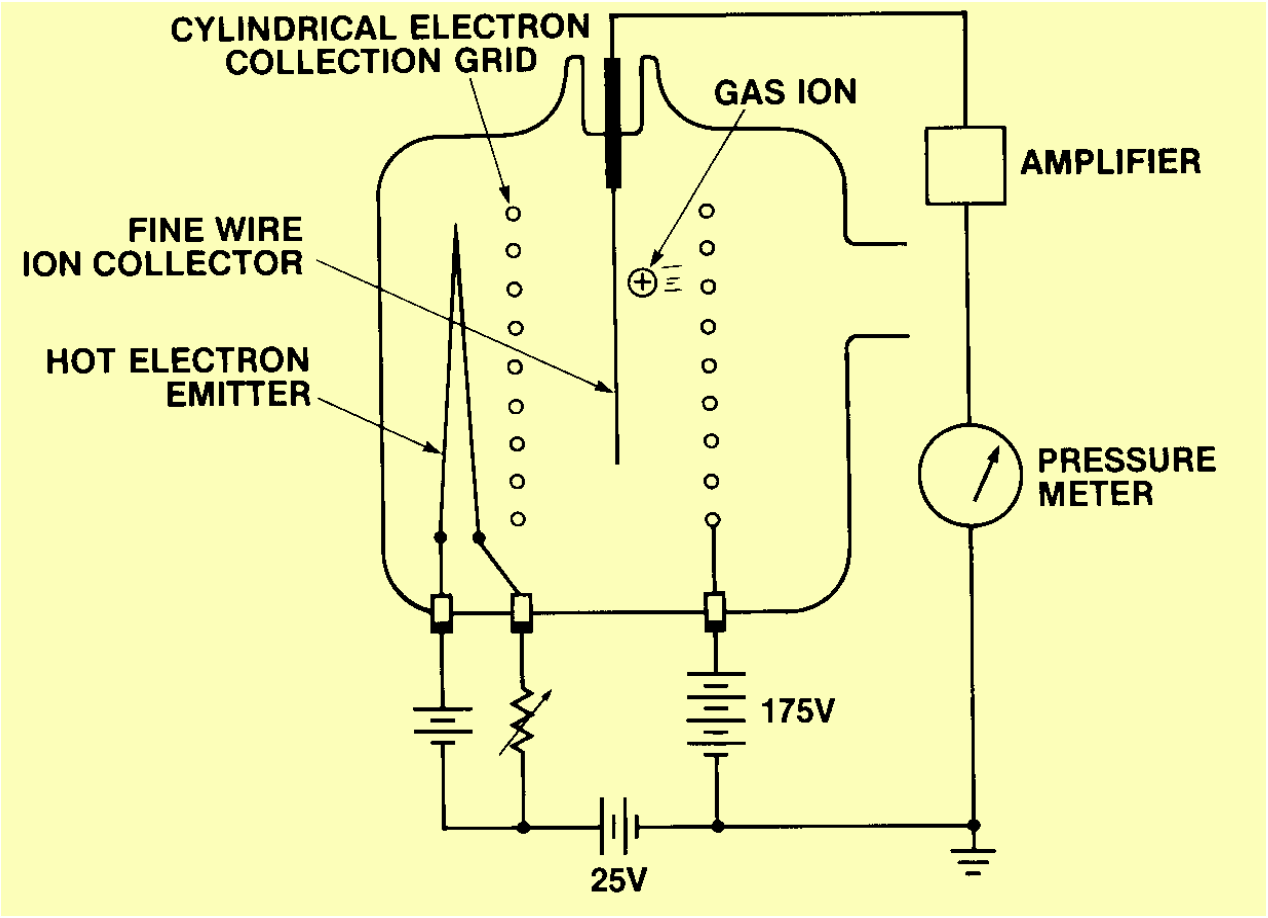
气体或蒸气	S_r	气体或蒸气	S_r
空　气	1	一氧化碳	0.97
氢	0.67	二氧化碳	0.94
氦	1.12	二氧化硫	0.77
氖	1.31	甲　烷	0.61
氩	1.56	乙　烯	0.86
氪	2.30	乙　炔	0.60

4. 电离真空计

类似于一真空三极管，灯丝发射电子使气体电离，气体分子电离的多少与气体分子密度成正比，即与压强成正比，收集极收集离子数的多少，即可知压强**P**的大小。

注意：不可在高气压下使用，此时离子电流过大，将烧毁真空计。

Ionization current is the measure of vacuum

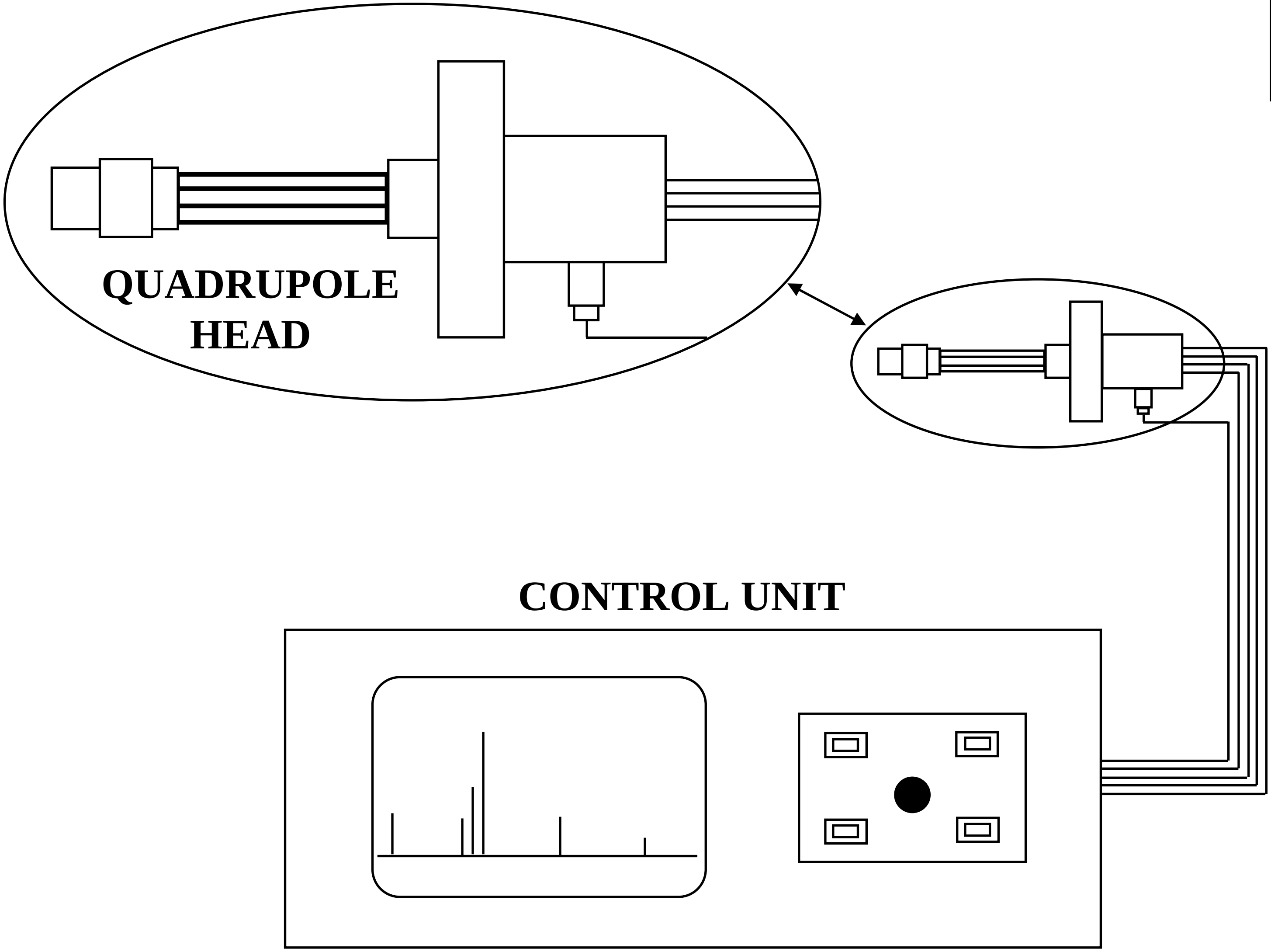


电离规对不同气体的相对灵敏度

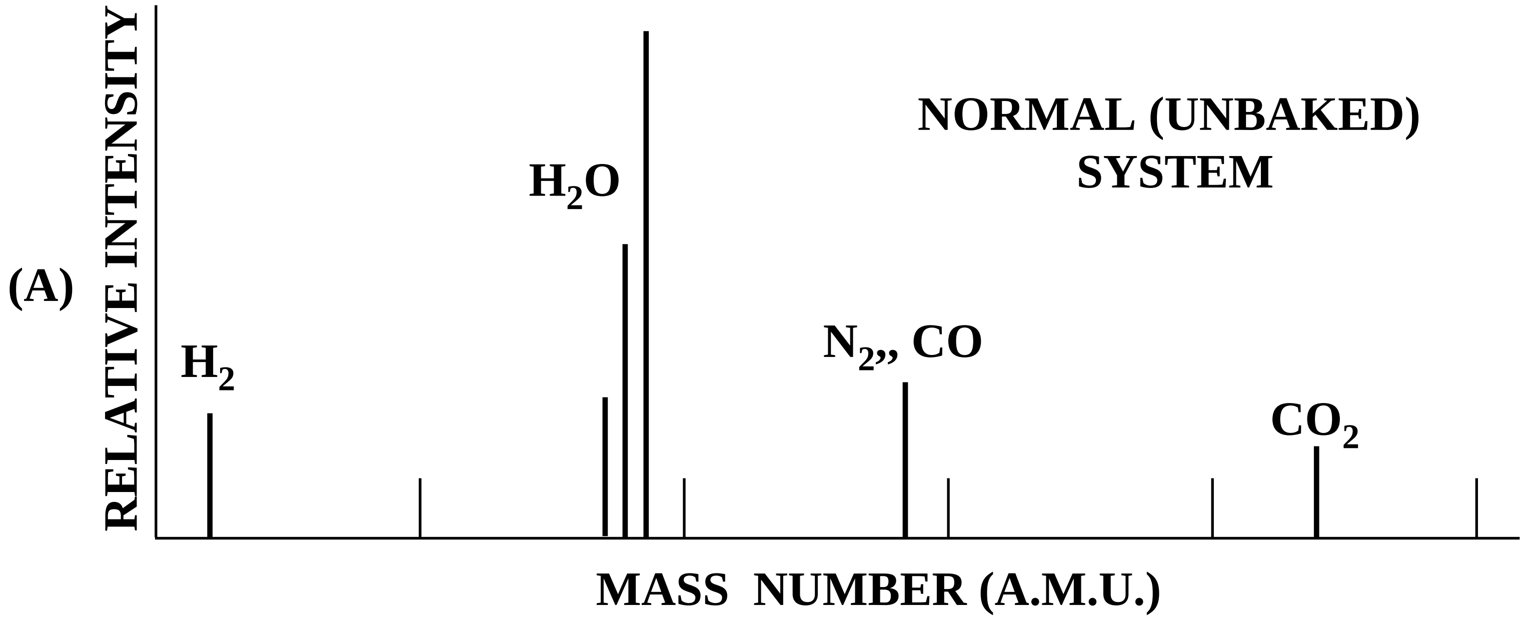
气体	对N_2相对灵敏度S_r
H_2	0.46
He	0.17
Ne	0.25
Ar	1.31
Kr	1.98
Xe	2.71
N_2	1.0
O_2	0.95
CO	1.11

气体	对N_2相对灵敏度S_r
CO_2	1.53
干燥空气	1.0
H_2O	0.9
Hg	3.4
扩散泵油气	9-13
HCl	0.38
CH_4	l.26
CCl4	0.70

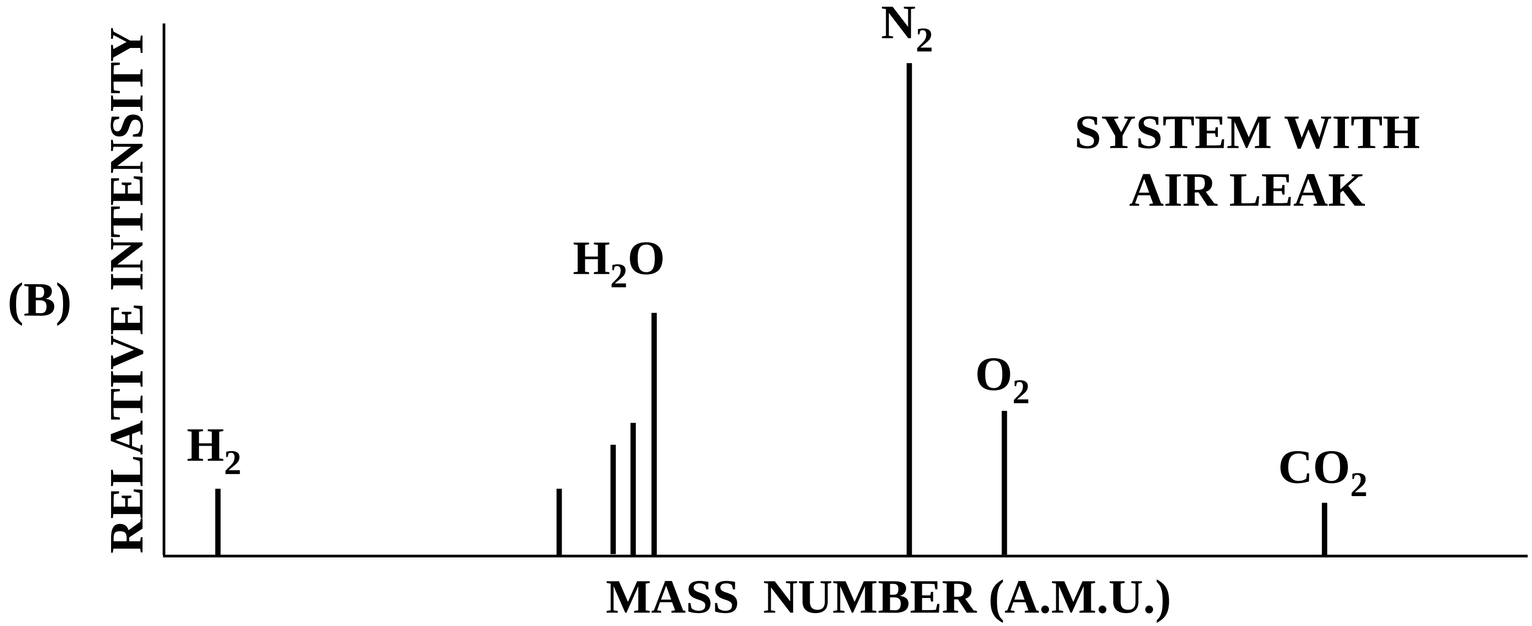
4. 残气分析器



RGA SPECTRUM



RGA SPECTRUM



5. 温度对压力测试准确性的影响

两连通容器的压力：

1. 低真空：粘滞流情况，平衡条件是压力相等

$P_1=P_2$,

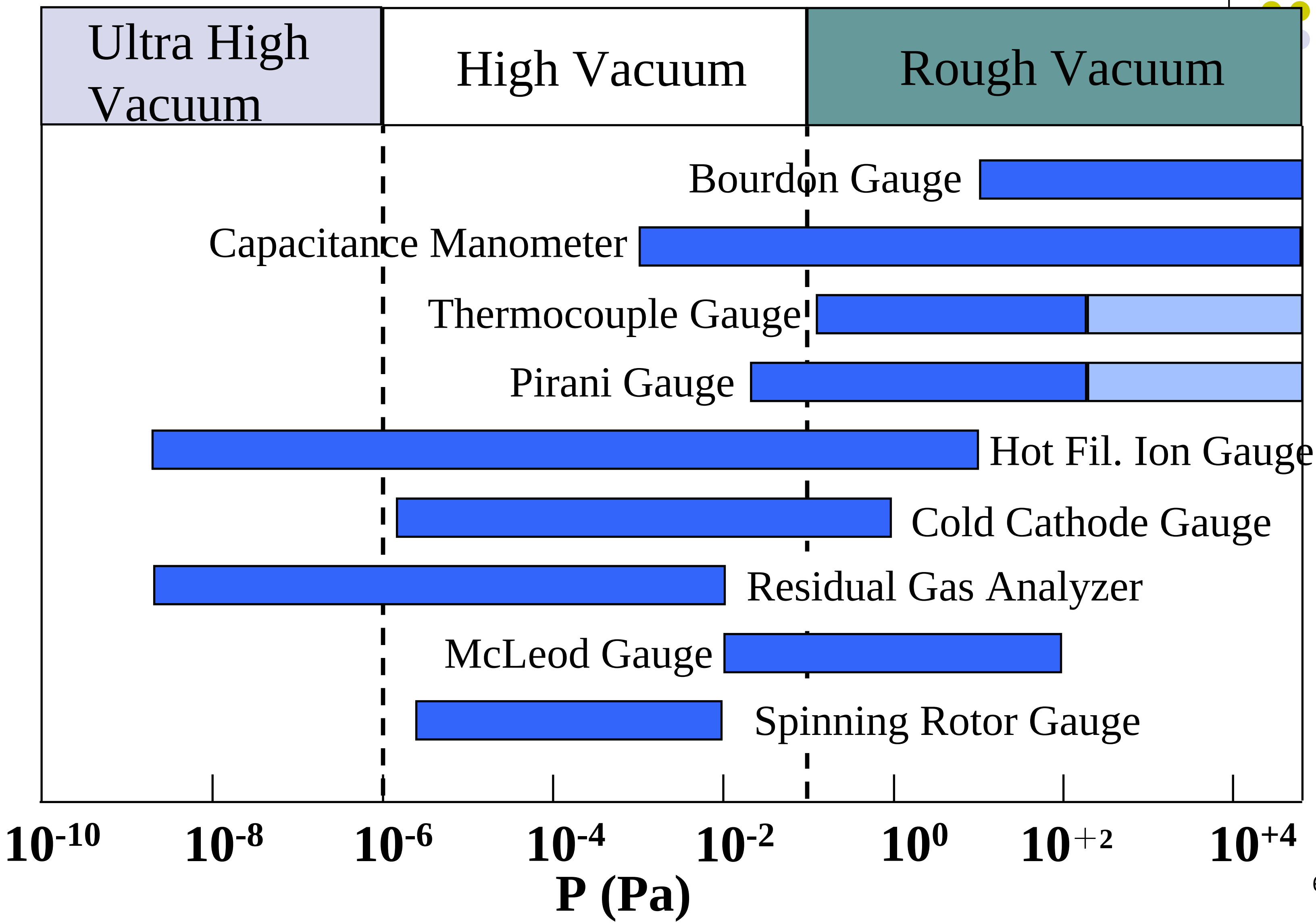
2. 高真空：分子层流情况，平衡条件是流导相等

$$V=\frac{1}{4}nVa=\frac{P}{\sqrt{2\pi mKT}} \qquad \frac{P_1}{P_2}=\sqrt{\frac{T_1}{T_2}}$$

例：真空室温度**600**℃，规管温度**25**℃，

测量压力只有真实压力的**58**%。

Gauge Operating Ranges



第一章 作业

1、制备薄膜为什么需要真空环境?

2、真空区域的划分?

3、如何达到超高真空（**10**–**6 pa**）?

4、各种真空计的工作原理和测量范围?

5、气体分子的三种速度及其物理意义?