大学物理

1. c 为一切可作为参考系的物体的极限速率，

即两个物体之间的相对速度只能小于c 。

2. $u \ll c$时，洛仑兹变换过渡到伽里略变换。

$$\begin{cases} x' = \dfrac{x - ut}{\sqrt{1 - \dfrac{u^2}{c^2}}} \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \dfrac{t - \dfrac{u}{c^2}x}{\sqrt{1 - \dfrac{u^2}{c^2}}} \end{cases}$$

$$\left\{ \begin{aligned} x' &= x - ut \\ y' &= y \\ z' &= z \\ t' &= t \end{aligned} \right\}$$

伽利略变换

令 $\beta = \frac{u}{c}$, $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$ ， 则有：

正变换

$$\begin{cases} x' = \gamma(x - ut) \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \gamma(t - \frac{\beta}{c}x) \end{cases}$$

逆变换

$$\begin{cases} x = \gamma(x' + ut') \\ y = y' \\ z = z' \\ t = \gamma(t' + \frac{\beta}{c}x) \end{cases}$$

§ 6.4 相对论时空观

1 同时性的相对性

$$\boxed{t' = \gamma\left(t - \frac{\beta}{c}x\right)} \Rightarrow \boxed{\Delta t' = \gamma\left(\Delta t - \frac{\beta}{c}\Delta x\right)}$$

当Δt=0时 $$\boxed{\Delta t' = -\gamma\left(\frac{\beta}{c}\Delta x\right)}$$

$$\begin{cases} \text{当}\Delta x=0\text{时} & \Delta t'=0 \\ \text{当}\Delta x\neq 0\text{时} & \Delta t'\neq 0 \end{cases}$$

时间的测量是相对的

2 时间膨胀（时间延缓）

在某一参考系中，同一地点先后发生的两个事件的时间间隔 -------固有时 $x_2 = x_1$ $\Delta t = t_2 - t_1$

$$\boxed{\Delta t' = \gamma(\Delta t - \frac{\beta}{c}\Delta x)}$$

$$\boxed{\Delta x = 0}$$

$$\Rightarrow \boxed{\Delta t' = \gamma \Delta t}$$

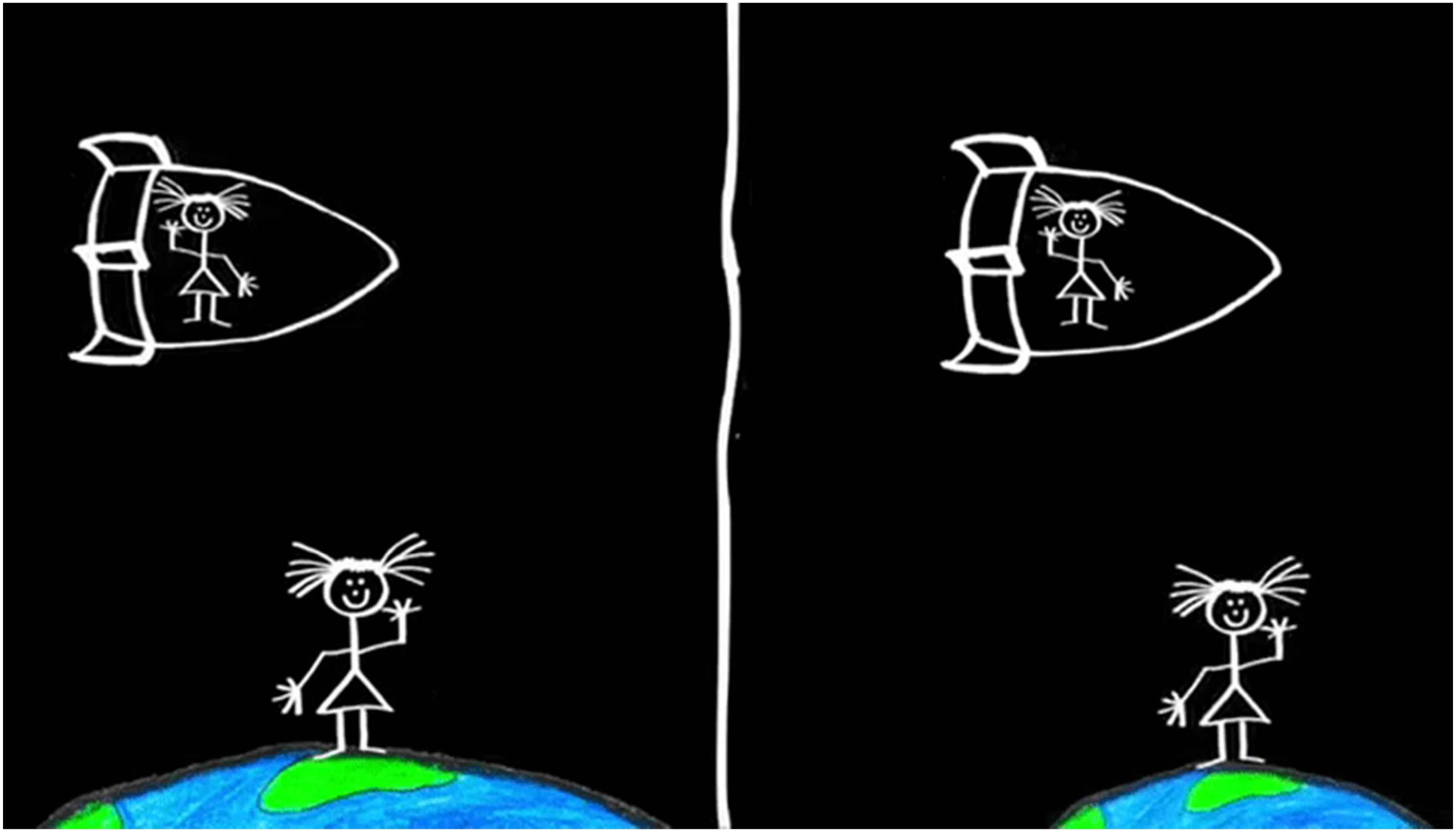
$$\boxed{\Delta t = \gamma(\Delta t' + \frac{\beta}{c}\Delta x')}$$

$$\boxed{\Delta x' = 0}$$

$$\Rightarrow \boxed{\Delta t = \gamma \Delta t'}$$

时间间隔增加 ⇒ 时间膨胀 时间延缓 固有时最短！！

在物理中，无绝对静止的概念！！！！



3 长度收缩

$L' = x_2' - x_1'$　　$L = x_2 - x_1$

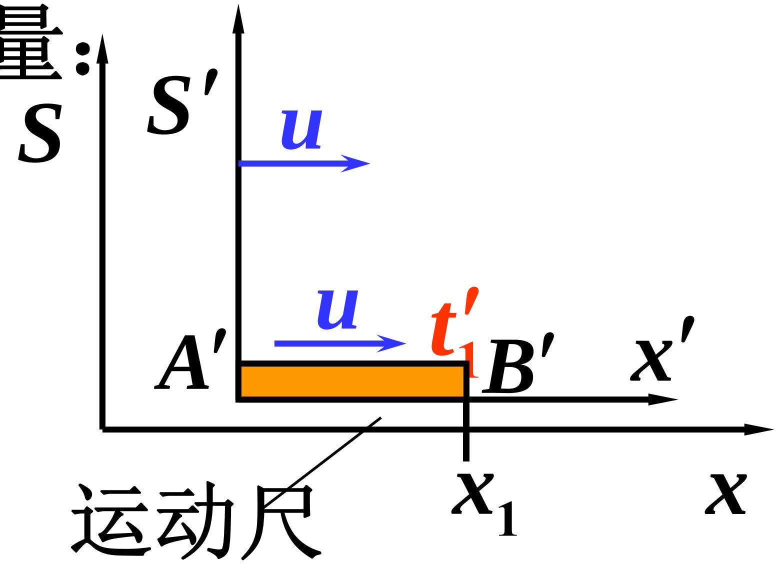
$L' = \gamma(x_2 - ut_2) - \gamma(x_1 - ut_1)$

$L' = \gamma(x_2 - x_1 - u(t_2 - t_1))$

$L' = \gamma(L - u(0)) = \gamma L$

$$L = L'\sqrt{1 - \frac{u^2}{c}}$$

运动尺长度的测量:



$u = 0.001c$	$\gamma = 1.0000005$	$L = L'$
$u = 0.7c$	$\gamma = 1.4$	$L = 0.7L'$
$u = 0.99c$	$\gamma = 7.1$	$L = 0.14L'$

固有长度：当静止时测得的长度

固有长度最长

$$\boxed{\text{动长} = \text{原长} \times \sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$

固有长度最长

运动尺的缩短是相对论的效应，并不是运动尺的结构发生了改变。

与尺一起运动的观测者感受不到尺的变短。

在任何惯性系中**1**米都定义为**1/ 299792458**秒内光在真空中所通过的距离。由于时间延缓效应，同一个尺在不同惯性系中所测量的长度也不同。

$u << c$ 时 $l = l'$，这又回到了牛顿的绝对空间。

4 四维时空

伽利略变换

$$\begin{cases} x' = x - ut \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = t \end{cases}$$

绝对时空观

洛仑兹变换

$$\begin{cases} x' = \gamma(x - ut) \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \gamma(t - \dfrac{\beta}{c}x) \end{cases}$$

相对时空观

四维空间（**x, y, z, t**）

§ 6.5 相对论速度变换

（relativistic velocity transformation）

设同一质点在 S 和 S' 中速度分别为 $\vec{v}$ 和 $\vec{v}\,'$。

由洛仑兹坐标变换

$$\frac{\mathrm{d}x'}{\mathrm{d}t}=\frac{v_x-u}{\sqrt{1-\dfrac{u^2}{c^2}}}\quad 和 \quad \frac{\mathrm{d}t'}{\mathrm{d}t}=\frac{1-\dfrac{u}{c^2}v_x}{\sqrt{1-\dfrac{u^2}{c^2}}}$$

上面两式之比

$$\boxed{v'_x=\frac{dx'}{dt'}=\frac{v_x-u}{1-\dfrac{u}{c^2}v_x}}$$

由洛仑兹变换

$$\frac{\mathrm{d}y'}{\mathrm{d}t'} = \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t'} = \frac{\dfrac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}}{\dfrac{\mathrm{d}t'}{\mathrm{d}t}}$$

和

$$\frac{\mathrm{d}t'}{\mathrm{d}t} = \frac{1-\dfrac{u}{c^2}v_x}{\sqrt{1-\dfrac{u^2}{c^2}}}$$

由上面两式得

$$\boxed{v'_y = \frac{v_y}{1-\dfrac{u}{c^2}v_x}\sqrt{1-\dfrac{u^2}{c^2}}}$$

同样得

$$\boxed{v'_z = \frac{v_z}{1-\dfrac{u}{c^2}v_x}\sqrt{1-\dfrac{u^2}{c^2}}}$$

洛仑兹速度变换式

正变换

$$v'_x = \frac{v_x - u}{1 - \frac{u}{c^2} v_x}$$

$$v'_y = \frac{v_y}{1 - \frac{u}{c^2} v_x} \sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}$$

$$v'_z = \frac{v_z}{1 - \frac{u}{c^2} v_x} \sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}$$

逆变换

$$v_x = \frac{v'_x + u}{1 + \frac{u}{c^2} v'_x}$$

$$v_y = \frac{v'_y}{1 + \frac{u}{c^2} v'_x} \sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}$$

$$v_z = \frac{v'_z}{1 + \frac{u}{c^2} v'_x} \sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}$$

3. 一维运动情况：

令 $\boldsymbol{v}_y=\boldsymbol{v}_z=0$， $\boldsymbol{v}_x=\boldsymbol{v}$ （代数量）

则 $\boldsymbol{v}'_y=\boldsymbol{v}'_z=0$， $\boldsymbol{v}'_x=\boldsymbol{v}'$（代数量）

有

$$\boxed{\boldsymbol{v}'=\frac{\boldsymbol{v}-\boldsymbol{u}}{1-\frac{\boldsymbol{u}\boldsymbol{v}}{c^2}}}$$

$$\boxed{\mathrm{v}=\frac{\mathrm{v}'+u}{1+\frac{u\mathrm{v}'}{c^2}}}$$

几点讨论：

1.若$u \ll c$，则洛仑兹速度变换过渡到伽里略速度变换：$\vec{v}' = \vec{v} - \vec{u}$

2. 不可能通过参考系变换达到超光速。

由速度变换可得到：

$$v'^2 = {v'_x}^2 + {v'_y}^2 + {v'_z}^2 = c^2\left[1 - \frac{(1-\frac{u^2}{c^2})(1-\frac{v^2}{c^2})}{(1-\frac{uv_x}{c^2})^2}\right]$$

若 $v = c$，则 $v' = c$。若 $v < c$，则 $v' < c$。

3. 一维运动情况：

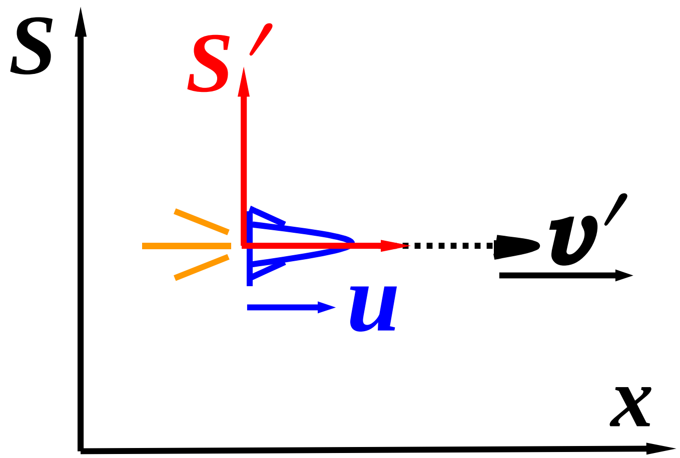
令 $\boldsymbol{v}_y = \boldsymbol{v}_z = 0$， $\boldsymbol{v}_x = \boldsymbol{v}$ （代数量）

则 $\boldsymbol{v}'_y = \boldsymbol{v}'_z = 0$， $\boldsymbol{v}'_x = \boldsymbol{v}'$（代数量）

有
$$\begin{cases} \boxed{\boldsymbol{v}' = \dfrac{\boldsymbol{v} - \boldsymbol{u}}{1 - \dfrac{\boldsymbol{u}\boldsymbol{v}}{c^2}}} \\ \boxed{\mathrm{v} = \dfrac{\mathrm{v}' + u}{1 + \dfrac{u\mathrm{v}'}{c^2}}} \end{cases}$$

[例]已知：火箭（S'系）对地（S 系）速度为

$u = 0.6c$，炮弹相对火箭速度 $v' = 0.9c$ 。



求：地面上看炮弹速度

$v = ?$

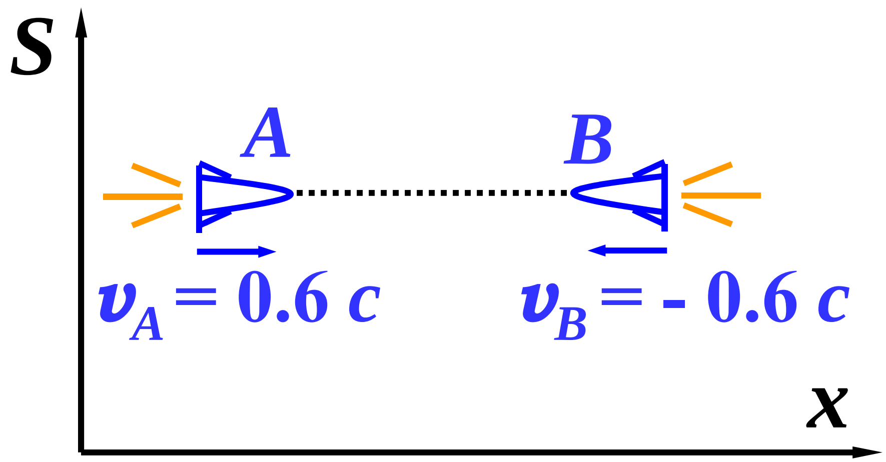
解：由速度变换，在S 系中有

$$v = \frac{v' + u}{1 + \dfrac{uv'}{c^2}} = \frac{0.9c + 0.6c}{1 + 0.6 \times 0.9} = \frac{1.5\,c}{1.54} \approx 0.97c$$

若按伽里略变换计算，则 $v = 1.5\,c$ 。

4.不可将速度的合成分解与速度的变换相混淆。

在同一个惯性系中，速度合成法则是由速度的矢量性来决定的，这与速度的快慢毫无关系。



左图在 S 系中看，A 和 B 相互接近的速率是 $1.2\,c$，这并不违反相对论。但是在 A 系中看，B 的速率是 $0.882\,c$，绝不可能大于 c。

*5. 由洛仑兹速度变换，将速度对时间求导，

可进一步得到加速度变换：

$$
\begin{cases}
a'_x = \dfrac{(1-u^2/c^2)^{3/2}}{(1-u\boldsymbol{v}_x/c^2)^3} a_x \\[2ex]
a'_y = \dfrac{(1-u^2/c^2)}{(1-u\boldsymbol{v}_x/c^2)^3}\left[a_y + \dfrac{u}{c^2}(a_x\boldsymbol{v}_y - a_y\boldsymbol{v}_x)\right] \\[2ex]
a'_z = \dfrac{(1-u^2/c^2)}{(1-u\boldsymbol{v}_x/c^2)^3}\left[a_z + \dfrac{u}{c^2}(a_x\boldsymbol{v}_z - a_z\boldsymbol{v}_x)\right]
\end{cases}
$$

这里我们看到，非但 $\vec{a}' \neq \vec{a}$，而且 $\vec{a}'$ 除了与 $\vec{a}$ 有关外，还与 $\vec{v}$ 有关，这在牛顿力学中是没有的。

牛顿第二定律对洛仑兹变换不能保持不变。

§6.6 相对论质量和相对论动量

$\vec{F}=m\vec{a}$，$m=\text{const}.$ ，与相对论矛盾：

1.导致超光速；

2.对洛仑兹变换，不满足相对性原理。

修正原则：

1.使动力学方程满足洛仑兹变换下的不变性；

2.在$v<<c$时，要能够过渡到牛顿力学。

物理学家坚信基本的守恒定律，这是定义物理量的依据。相对论力学就是在保留动量、能量、质量等守恒定律的基础上建立起来的。

为使动量守恒定律成立，保留关系：

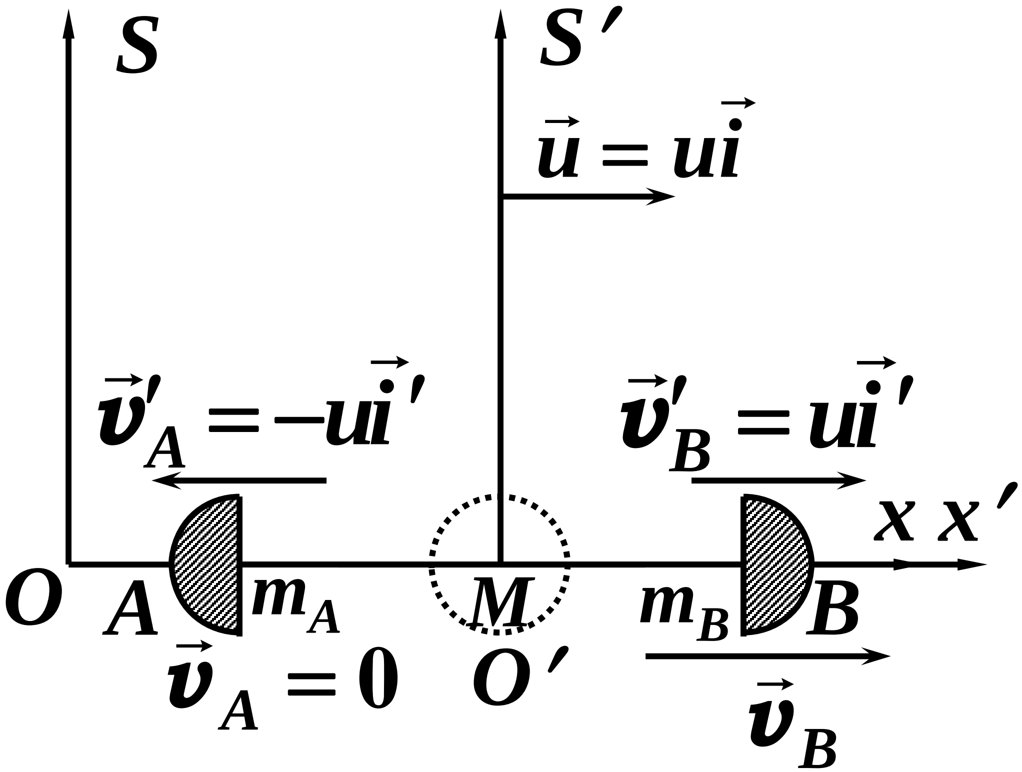
$$\boxed{\vec{F} = \frac{\mathrm{d}\,\vec{p}}{\mathrm{d}t}}$$

同时还保留动量定义：

$$\boxed{\vec{p} = m\vec{v}}$$

这表明为使动量守恒对洛仑兹变换保持不变，必须认为质量与速度有关，即$m = m(v)$。

下面由动量守恒导出 m 与 v 的关系：



设粒子在 S' 中静止，后分裂为相同的两块 A、B，它们分别沿 $+x'$ 和 $-x'$ 方向运动。

S 系中：$\vec{v}_A=0$ ，

$$v_B=\frac{v'_B+u}{1+\dfrac{uv'_B}{c^2}}=\frac{u+u}{1+\dfrac{u^2}{c^2}} \qquad (1)$$

动量守恒：$$Mu = m_A \cdot 0 + m_B v_B \qquad (2)$$

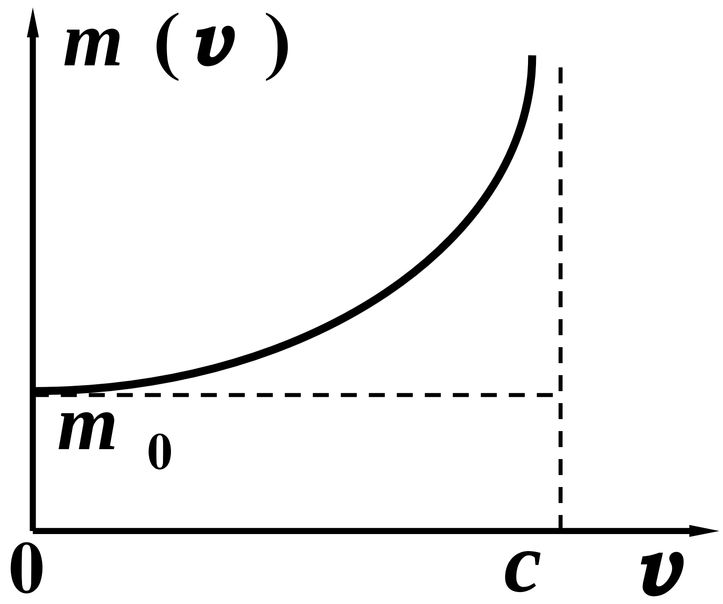
质量守恒：$$M = m_A + m_B \qquad (3)$$

(1)、(2)、(3)消去 u 得：$$m_B = \frac{m_A}{\sqrt{1 - \frac{v_B^2}{c^2}}}$$

令 $v_B = v$，$m_A = m_0$ 称 静止质量（rest mass）

$m_B = m$ 称相对论质量（relativistic mass）

则有：$$\boxed{m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}} \qquad (4)$$



$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}}$$

电子能量(MeV)	v/c	m/m_0
5	0.995	9.8
25	0.9998	49
2.8×10^{3}	0.99999998	5490

$v \ll c$ 时，$m = m_0 \rightarrow$ 牛顿力学情形 。

§ 6.8 相对论动能

（relativistic kinetic energy）

相对论中仍然保留动能定理。对质点：

$$\mathrm{d}E_k = \vec{F}\cdot\mathrm{d}\vec{r} = \frac{\mathrm{d}(m\vec{v})}{\mathrm{d}t}\cdot\mathrm{d}\vec{r}$$

$$= \mathrm{d}(m\vec{v})\cdot\vec{v} \quad = (m\,\mathrm{d}\vec{v} + \vec{v}\,\mathrm{d}m)\cdot\vec{v}$$

$$= m\vec{v}\cdot\mathrm{d}\vec{v} + v^2\,\mathrm{d}m \quad = mv\,\mathrm{d}v + v^2\,\mathrm{d}m$$

如果质量不变化：

$$dE_K = mv\,\mathrm{d}v + v^2\,\mathrm{d}m = mv\,\mathrm{d}v = d(\frac{1}{2}mv^2)$$

由 $m=\dfrac{m_0}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}}$, $\Rightarrow$ $m^2c^2-m^2v^2=m_0^2c^2$

$\Rightarrow$ $2mc^2dm-2mv^2dm-2m^2vdv=0$

$$\begin{cases} mv\,\mathrm{d}v=c^2\,\mathrm{d}m-v^2\,\mathrm{d}m \\ dE_K=mv\,\mathrm{d}v+v^2\,\mathrm{d}m \end{cases}$$

$$\therefore \qquad \mathrm{d}E_k=c^2\,\mathrm{d}m$$

$$E_k=\int_{m_0}^{m}c^2\,\mathrm{d}m=mc^2-m_0c^2$$

$$=m_0c^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-\upsilon^2/c^2}}-1\right)$$

$\upsilon \ll c$ 时： $E_k \ll m_0c^2$

$$\frac{1}{\sqrt{1-\upsilon^2/c^2}}\approx 1+\frac{1}{2}\cdot\frac{\upsilon^2}{c^2}, \quad \rightarrow \quad E_k \approx \frac{1}{2}m_0\upsilon^2$$

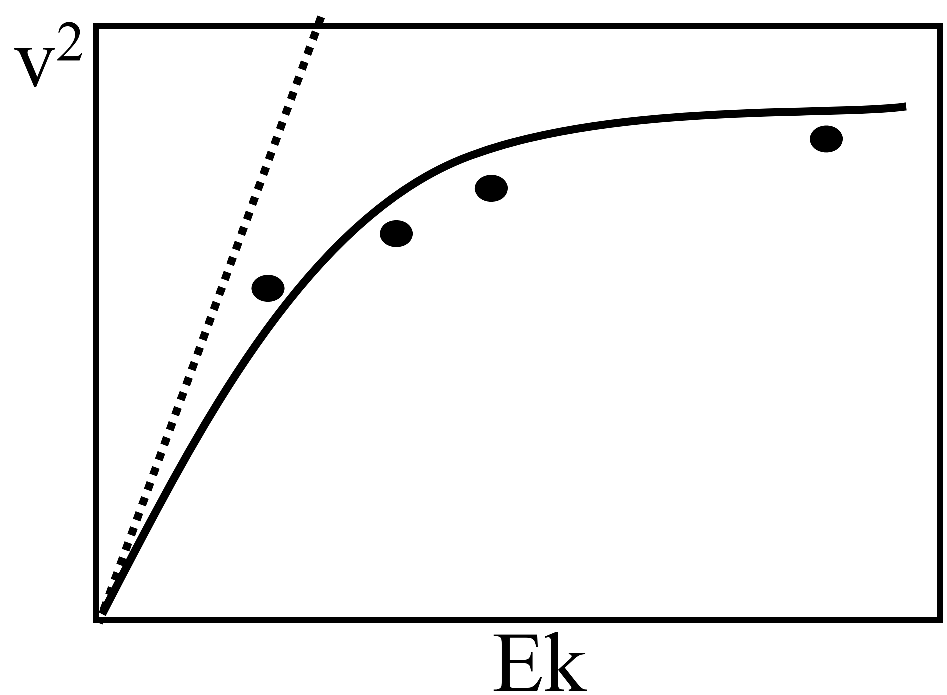
注意： $\frac{1}{2}m_{(\upsilon)}\upsilon^2$ 并不是相对论的动能 ，

$$E_k = mc^2 - m_0c^2$$

这与相对论动量 $\vec{p}=m_{(\upsilon)}\vec{\upsilon}$ 不同。

$$E_k = mc^2 - m_0c^2 \qquad E_K = m_0c^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-\mathrm{v}^2/c^2}} - 1\right)$$

$$\begin{cases} v^2 = c^2\left(1 - \left(1 + \dfrac{E_K}{m_0c^2}\right)^{-2}\right) \\ E_k = \dfrac{1}{2}m_0\mathrm{v}^2 \end{cases} \Rightarrow \mathrm{v}^2 = \frac{2E_K}{m_0}$$



§ 6.9 相对论能量（relativistic energy）

一. 质能关系（equivalence of mass and energy）

对 $$E_k = mc^2 - m_0c^2$$

爱因斯坦认为：

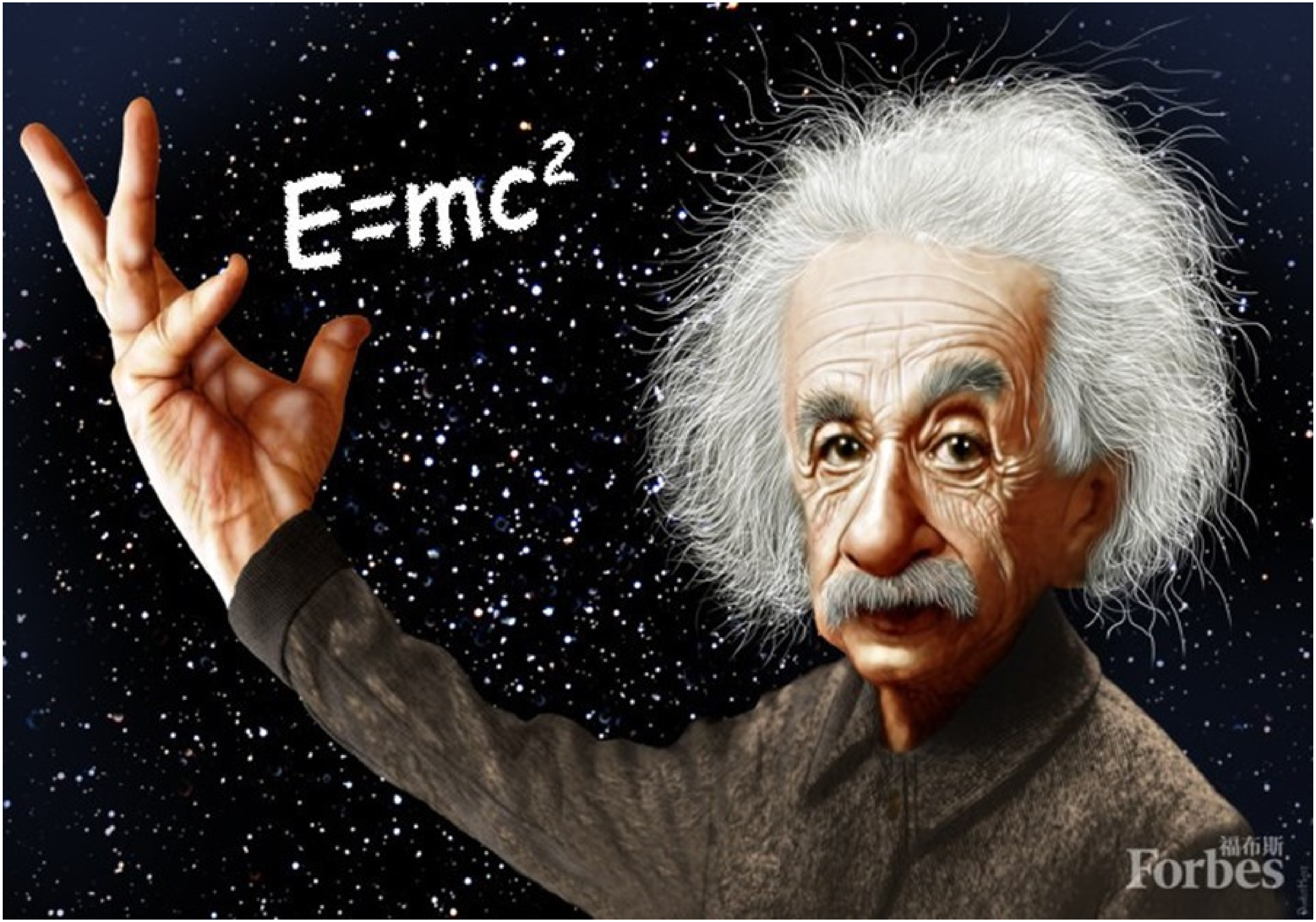
$E_0 = m_0 c^2$ 为 静止能量（rest energy）。

$mc^2 = E_k + m_0 c^2$ 为总能（total energy）。

记作： $$\boxed{E = mc^2}$$ —— 质能关系

相对论统一了质量和能量守恒。

这里的质量是相对论质量，而非静止质量。


E=mc²
福布斯
Forbes

孤立系统： $\Delta E = \Delta E_k + \Delta(m_0 c^2) = 0$

$$\Delta E_k = (-\Delta m_0)c^2$$

$-(\Delta m_0)$ 称（静）质量亏损（**mass defect**），

为简便起见将质量亏损就用 Δm_0 表示。

当过程前后系统可看成由一些独立质点组成时，

质量亏损 $$\boxed{\Delta m_0 = \sum m_{0i初} - \sum m_{0i末}}$$

［例］ 热核反应： ${}_1^2\mathrm{H}+{}_1^3\mathrm{H}\rightarrow{}_2^4\mathrm{He}+{}_0^1\mathrm{n}$

$$\Delta m_0=(m_{\mathrm{D}}+m_{\mathrm{T}})-(m_{\mathrm{He}}+m_{\mathrm{n}})=0.0311\times10^{-27}\ \mathrm{kg}$$

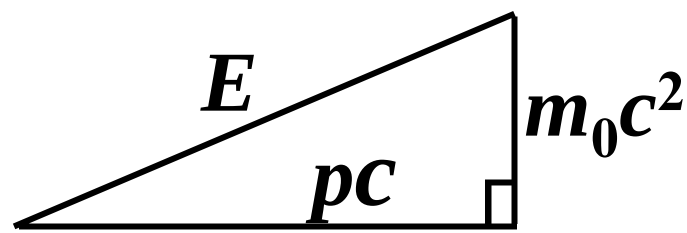
释放能量： $\Delta E=\Delta m_0 c^2=2.799\times10^{-12}\ \mathrm{J}$

1kg核燃料释放能量约为3.35×10^{14} J，这相当于1kg优质煤燃烧热（2.93×10^{7}J）的 1千万倍！

质能关系 $E = mc^2$ 的提出，具有划时代的意义，它开创了原子能时代。

§ 6.10 相对论动量和能量关系

$$\left.\begin{aligned} E &= mc^2 \\ m &= \frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \\ p &= mv \end{aligned}\right\} \qquad \boxed{E^2 = p^2c^2 + m_0^2c^4}$$



若粒子动能为 E_k，则

$$E = E_k + m_0c^2 \qquad (2)$$

(2)代入(1)得：$\boxed{E_k^2 + 2E_k \cdot m_0c^2 = p^2c^2}$

前面已指出，当 $\upsilon << c$ 时，$E_k << m_0c^2$，

$$\therefore \qquad 2E_km_0c^2 \approx p^2c^2 \longrightarrow$$

$E_k \approx \dfrac{p^2}{2m_0}$（牛顿力学的动能、动量关系）

本章总结

伽利略变换
绝对时空观

洛仑兹变换

相对论时空观

一切力学规律在不同的惯性系中应有相同的形式。

物理规律对所有惯性系都是一样的。

r, t=Const.

c=Const.

牛顿力学

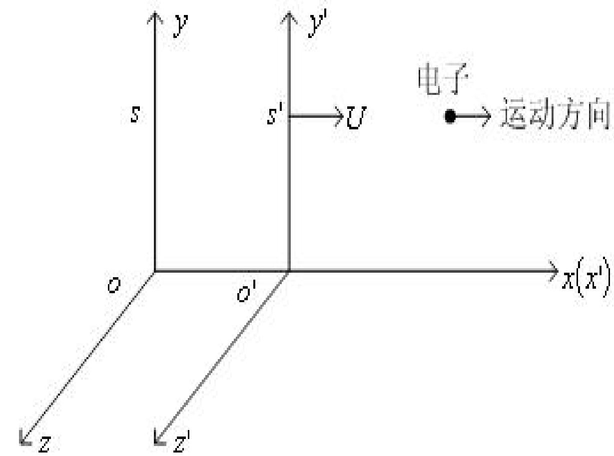
- 低速运动 (s, t, v, a)
- 动力学 (F=ma)
- 动量 (p=mv)
- 能量 ($E=mv^2/2$)

相对论力学

- 高速运动 (s, t, v, a)
- 动力学 (F=dp/dt)
- 动量 (p=mv)
- 能量 ($E=mc^2$)

一原子核相对于实验室以**0.6 c**运动，在运动方向上向前发射一电子，电子相对于核得速率为**0.8c**，当实验室中测量时，电子速率？电子质量？电子动能？电子的动量大小？

解：**S**系固连在实验室上，**S’**固连在原子核上，**S**、**S’**相应坐标轴平行。**X**轴正向取为沿原子核运动方向上。



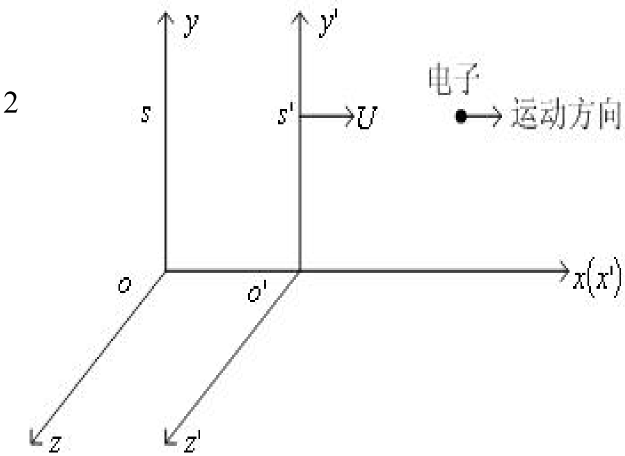
（1） $$\begin{cases} \mathrm{u} = 0.6c \\ v_x^{'} = 0.8c \end{cases}$$

$$v_x = \frac{v_x^{'} + \mathrm{u}}{1 + \mathrm{u}v_x^{'}/c} = \frac{0.6c + 0.8c}{1 + \frac{0.6c \times 0.8c}{c^2}} = \frac{35}{37}c \approx 0.946c$$

（2） $$m=\frac{m_0}{\sqrt{1-v_x^2/c^2}}=\frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{35^2}{37^2}\frac{c^2}{c^2}}}=\frac{37}{12}m_0$$

（3）

$$E_k=E-E_0=mc^2-m_0c^2=\frac{37}{12}m_0c^2-m_0c^2=\frac{25}{12}m_0c^2$$



（4）

$$p=mv=\frac{37}{12}m_0v_x=\frac{37}{12}m_0\frac{35}{37}c=\frac{35}{12}m_0c$$

作业

6.3 & 6.5 & 6.10 & 6.12

热　学

热学是研究与热现象有关的规律的科学。
热现象是物质中大量分子无规则运动的集体表现。
大量分子的无规则运动称为热运动。

前　言

一. 热学的研究对象及内容

▲对象：宏观物体（大量分子原子系统）

或物体系 — 热力学系统

牛顿力学（质点） ⟷ 热　学（系统）

▲内容：与热现象有关的性质和规律。

热现象 $\begin{cases} \text{宏观上说是与温度 } \boldsymbol{T} \text{ 有关；} \\ \text{微观上说是与热运动有关。} \end{cases}$

框　　架

冷热现象 → 温度（温标）

如何标定？

摄氏温标

理想气体温标

热力学温标

华氏温标

冷热本质

宏观描述（定性）

热量是能量传递的一种量度

热力学第一定律（能量守恒）

热力学第二定律（能量退降）

熵：系统分子无序性的量度（熵增）

微观描述（本质）

统计物理或统计力学

二. 热学的研究方法　宏观 + 微观

▲热力学（**thermodynamics**）

宏观基本实验规律 $\xrightarrow{\text{逻辑推理}}$ 热现象规律

特点：普遍性、可靠性。

▲统计力学（**statistical mechanics**）

对微观结构提出模型、假设 $\xrightarrow{\text{统计方法}}$ 热现象规律

特点：可揭示本质，但受模型局限。

第一部分　　温度（**Temperature**）

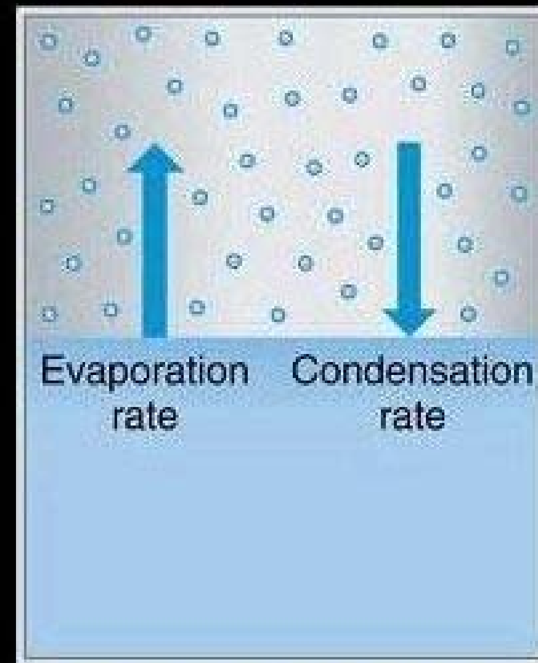
一. 几个概念

1. 平衡态（equilibrium state）：

在不受外界影响的条件下（与外界无任何形式的物质与能量交换），系统的宏观性质不随时间变化的状态（动平衡）。

Running up = moving down

Water in = Water out



Evaporation = Condensation

All are examples of ***dynamic equilibrium***

2. 宏观量（macroscopic quantity）：

表征系统宏观性质的物理量（可直接测量）。

宏观量 $\begin{cases} \text{广延量（有累加性）：如} M\text{、} V \ldots \\ \text{强度量（无累加性）：如} p\text{、} T \ldots \end{cases}$

3. 微观量（microscopic quantity）：

描写单个微观粒子运动状态的物理量 （一般只能间接测量）。 如分子的 m， $\vec{v}$, $d\cdots$

微观量与宏观量有一定的内在联系

宏观量总是相应微观量的统计平均值

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。

4. 态参量（state parameter）：

描写平衡态的宏观物理量。

如：气体的 p、V、T

$$\text{一组态参量} \underset{\text{对应}}{\overset{\text{描述}}{\rightleftharpoons}} \text{一个平衡态}$$

5. 物态方程（equation of state）：

态参量之间的函数关系： $f(p,V,T)$

理想气体物态方程： $\boxed{pV = \dfrac{m}{M}RT}$

谢谢！