请交作业01：$P_{1\sim2}$共一页（1-T1~T5）

第2章　牛顿运动定律

第1节　牛顿运动定律

一、牛顿第一定律

任何物体都保持静止或沿一直线作匀速运动的状态，除非有力加于其上迫使它改变这种状态。

数学表达式：　$\vec{F}=0,\ \vec{v}=$常量

阐明了两个重要物理概念 $\begin{cases}\text{惯性} & \text{——惯性定律} \\ \text{力} & \end{cases}$

反映力和运动的定性关系。

二、牛顿第二定律

运动的改变与所加的动力成正比，并且发生在这力所沿直线的方向上。

数学表达式：$\vec{F}=\dfrac{\mathrm{d}(m\vec{v})}{\mathrm{d}t}$ 反映力和运动的定量关系。

若$v<<c$，m=常量， 则有：$\vec{F}=m\vec{a}$

$$\frac{m_1}{m_2}=\frac{a_2}{a_1}$$

提供了科学地量度力和质量的理论基础。

质量是物体惯性大小的度量。

关于惯性质量和引力质量：

实验证明，对同一物体，两种质量相等。

如计算地面附近的重力加速度：

$$mg=G\frac{Mm}{(R+h)^2}\approx G\frac{Mm}{R^2},\quad g\approx\frac{GM}{R^2}$$

三、几点注意：

1. 只适用于质点；

2. 力与加速度是瞬时关系。它们同时产生，同时变化，同时消失。力是改变运动的原因，不是维持运动的原因。

3. 物体同时受几个力作用时：

力的叠加原理：（实验证明）几个力的作用效果与它们矢量和的力的作用效果一样。合力：

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \cdots$$

4. 直角坐标系分量式:

$$F_x = ma_x,\quad F_y = ma_y,\quad F_z = ma_z$$

5. 平面曲线运动:　　取**自然坐标系**

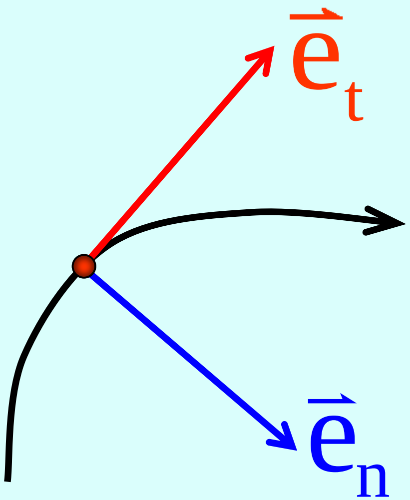
$$\vec{a} = \vec{a}_t + \vec{a}_n \qquad \vec{F} = m\frac{dv}{dt}\vec{e}_t + m\frac{v^2}{\rho}\vec{e}_n$$

切向力 F_t：合外力的切向分力

法向力 F_n：合外力的法向分力

切向分量式: $F_t = ma_t$

法向分量式: $F_n = ma_n$



四、牛顿第三定律 每一个作用总有一个相等的反作用与它对抗；或者说，两个物体之间的相互作用永远相等，并且指向对方。

数学表达式： $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$

说明力具有物体间相互作用的性质。

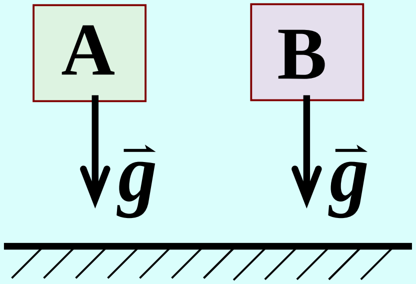
注意：

1. 作用力与反作用力互以对方为存在条件，它们同时存在，同时消失；

2. 作用力与反作用力是作用在不同物体上的同一性质的力，其作用不能抵消。

牛顿三定律是一个整体，它们互相联系，互相补充，构成了经典力学的理论基础。

五、惯性参考系（惯性系）



牛顿定律并非在一切参考系中都成立。

定义牛顿第一定律成立的参考系为**惯性系**，否则为**非惯性系**。

在应用牛顿定律研究动力学问题时，**应首选惯性系**。

说明： 1. 判断惯性系的主要依据是实验；

太阳参考系是惯性系。

2. 凡是相对于惯性系作匀速直线运动的参考系是惯性系。相对于惯性系作变速运动的参考系不是惯性系。

$\boxed{6\times10^{-3}\,\mathrm{m/s^2}}$ $\boxed{3.4\times10^{-2}\,\mathrm{m/s^2}}$

地心参考系，地面参考系是足够精确的惯性系。

第2节　基本力简介

应用牛顿定律解题时，应对物体作受力分析。近代科学已经证明，自然界中只存在四种基本力：万有引力、电磁力、强力和弱力，其它力都可归结为这四种力的不同表现。

一、万有引力

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2} \qquad G = 6.67\times 10^{-11}\ \mathrm{N\cdot m^2\cdot kg^{-2}}$$

二、电磁力　带电物体间的相互作用力。

弹性力、摩擦力、分子力、浮力、流体压力等本质上都属于电磁力。

三、强力　存在于核子、介子和超子间的一种力。

四、弱力（弱相互作用）　存在于许多粒子之间，但仅在某些反应（如 β 衰变）中才显得重要。

古往今来，**自然界的和谐与统一**一直是哲学家和物理学家所持有的信念。

★已做和待做的工作:

- 20世纪20年代，爱因斯坦最早着手这一工作。最初是想统一电磁力和引力，但未成功。
- **弱、电统一：** 1967年温伯格等提出理论，1983年实验证实理论预言。
- **大统一：** 弱、电、强 统一已提出一些理论，因目前加速器能量不够而无法实验证实。(需要10^{15} GeV，现10^{3} GeV)
- **超统一：** 四种力的统一。

第3节　应用牛顿定律解题

步骤大致如下：

一、认物体，看运动。看清题意，画示意图，确定研究对象，分析所认定物体的运动状态。

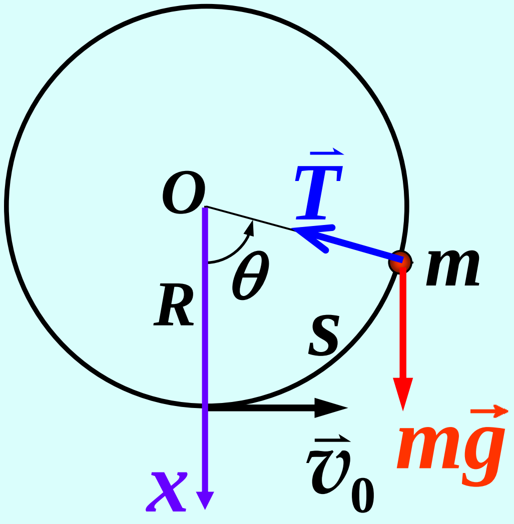
二、查受力。仔细分析每个物体的受力情况，隔离物体，画表示每个物体受力情况的示力图。

三、列方程。选参考系，建坐标系，按牛顿定律列方程（分量式）。分量的指向与坐标轴方向相同者为正，相反者为负。未知矢量的分量暂以符号表示。

四、解方程。

五、由结果确定未知矢量的实际方向。对结果进行讨论，进一步认识问题的物理本质。

例2—2. **解：** 小球受力：重力和绳的拉力。



法向：$T - mg\cos\theta = \dfrac{mv^2}{R}$ (1)

切向：$-mg\sin\theta = m\dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}$ (2)

$$\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}\theta}\cdot\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}\theta}\cdot\omega = \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}\theta}\cdot\frac{v}{R}$$

代入(2)式得积分：$\displaystyle\int_{v_0}^{v} v\,\mathrm{d}v = -gR\int_0^{\theta}\sin\theta\,\mathrm{d}\theta$

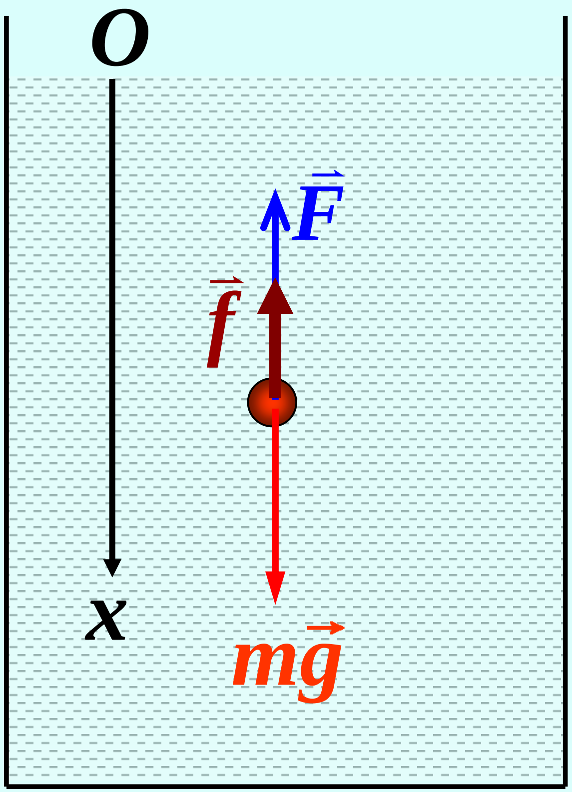
$$v = \sqrt{v_0^2 - 2gR(1-\cos\theta)}$$

由(1)得 $T = 3mg\cos\theta - 2mg + \dfrac{mv_0^2}{R}$

小球恰可通过最高点时：$\theta = \pi, T = 0$ 得：$v_0 = \sqrt{5gR}$

例2－4.

解： 取坐标系，作示力图。



根据牛二律：

$$mg - \gamma v - F = ma = m\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}$$

分离变量后积分：

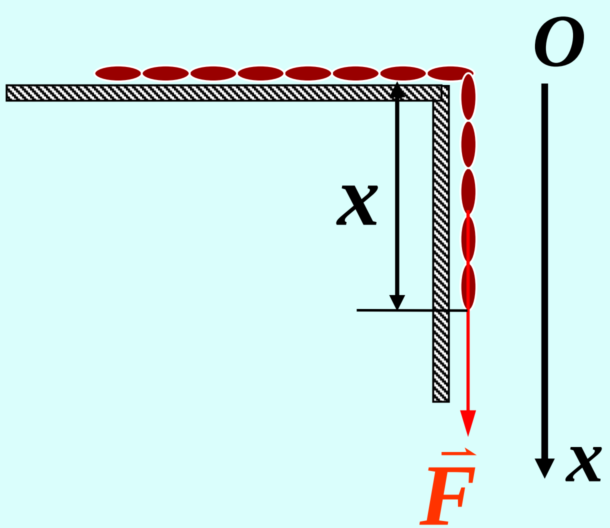
$$\int_0^v \frac{\mathrm{d}v}{(mg - \gamma v - F)/m} = \int_0^t \mathrm{d}t$$

$$v = \frac{mg - F}{\gamma}\left(1 - \mathrm{e}^{-\frac{\gamma t}{m}}\right)$$

令 $t \to \infty$ 得： $v_f = \dfrac{mg - F}{\gamma}$

三力平衡、物体匀速下落时，物体的速度称为**终极速度**或**收尾速度**。

例3. 一条质量为 M 长为 L 的均匀直线链条，放在一光滑的水平桌面上，链条的一端有一段长度L_0被推出桌子的边缘,在重力作用下开始下落，试求链条刚刚离开桌面时的速度。



解： 研究对象：**整条链条**

建立坐标系，如图：

受力分析：$\vec{F}\left(=\frac{M}{L}x\vec{g}\right)$

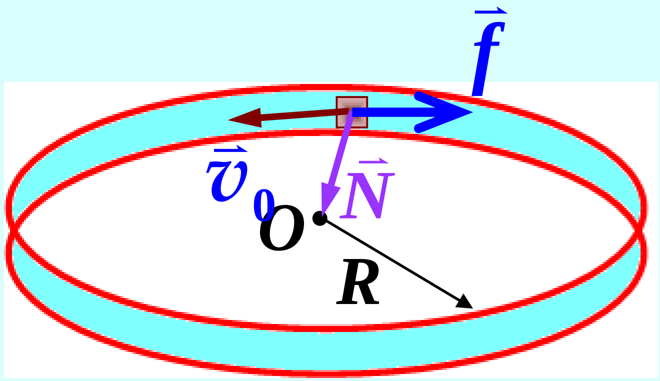
动力学方程：$\frac{\cancel{M}}{L}xg=\cancel{M}\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}$

$$\frac{g}{L}x=\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}x}\cdot\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\qquad \int_{L_0}^{L}\frac{g}{L}x\mathrm{d}x=\int_0^v v\mathrm{d}v$$

$$\boxed{v=\sqrt{g\left(\frac{L^2-L_0^2}{L}\right)}}$$

$$\boxed{\frac{1}{2}Mv^2=-\frac{L_0}{L}Mg\times\frac{L_0}{2}-\left(-Mg\times\frac{L}{2}\right)}$$

课堂练习：光滑桌面上有一个固定的半径为R的圆环带，一个物体贴着环带内侧运动，物体与环带间的滑动摩擦因数为μ，在某一时刻物体经过某定点的速率为v_0，则t时刻物体的速率v =________________。



$$N = \frac{mv^2}{R}$$

$$-f = m\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} \qquad f = \mu N$$

$$\mu m\frac{v^2}{R} = -m\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} \qquad \int_{v_0}^{v} -\frac{\mathrm{d}v}{v^2} = \int_0^t \frac{\mu \mathrm{d}t}{R} \qquad v = \frac{v_0}{1+\frac{\mu v_0 t}{R}}$$

第4节 惯性力

非惯性系中力和运动的关系？

一、加速平动参照系

物体在惯性系 S 中： $\vec{F} = m\vec{a}$

非惯性系 S' 相对 S 以加速度 $\vec{a}_0$ 作平动，物体在 S' 中的加速度为 $\vec{a}'$： $\vec{a} = \vec{a}' + \vec{a}_0$

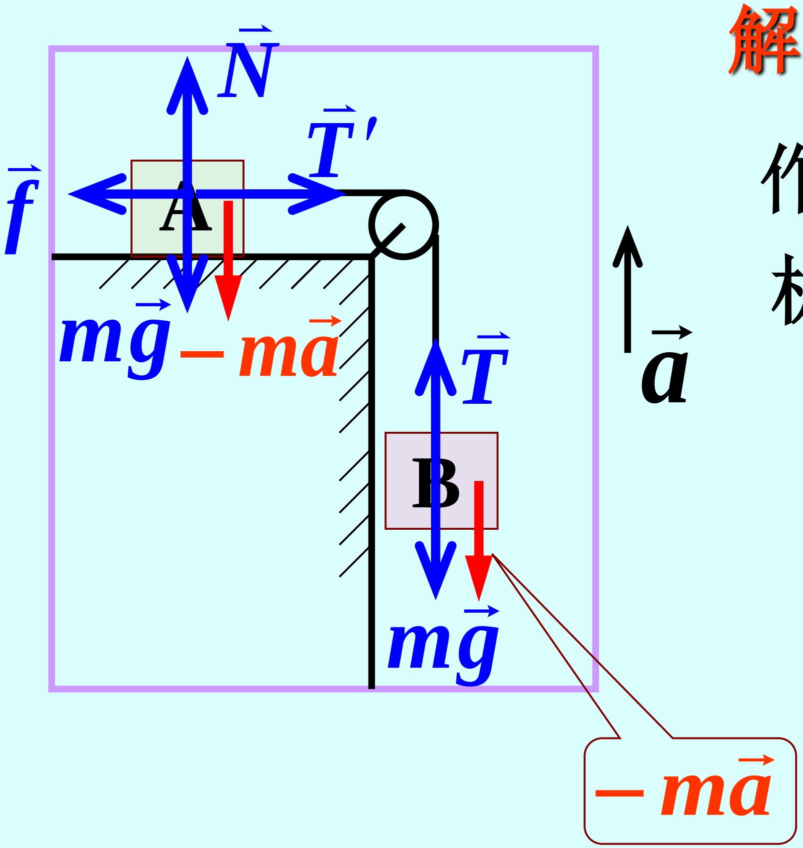
$\vec{F} = m\vec{a}' + m\vec{a}_0$ 即： $\boxed{\vec{F} + (-m\vec{a}_0)} = m\vec{a}'$ 合力?!

惯性力： $\boxed{\vec{f}_i = -m\vec{a}_0}$ 牛顿定律在 S' 中不成立！

1. 在非惯性系中牛顿定律形式上成立。 $\boxed{\vec{F} + \vec{f}_i = m\vec{a}'}$

2. 只有在非惯性系中，惯性力才有意义。

例4. 图中系统置于以 $a=\dfrac{1}{2}g$ 的加速度上升的升降机内，两 A、B 物体质量相等，A 与桌面摩擦系数为 μ，求A 在桌面上加速滑动时绳中的张力。



解： 取升降机参考系（非惯性系）

作示力图。 设两物体相对升降机的加速度大小为 a'

$$T-(mg+ma)\mu=ma'$$

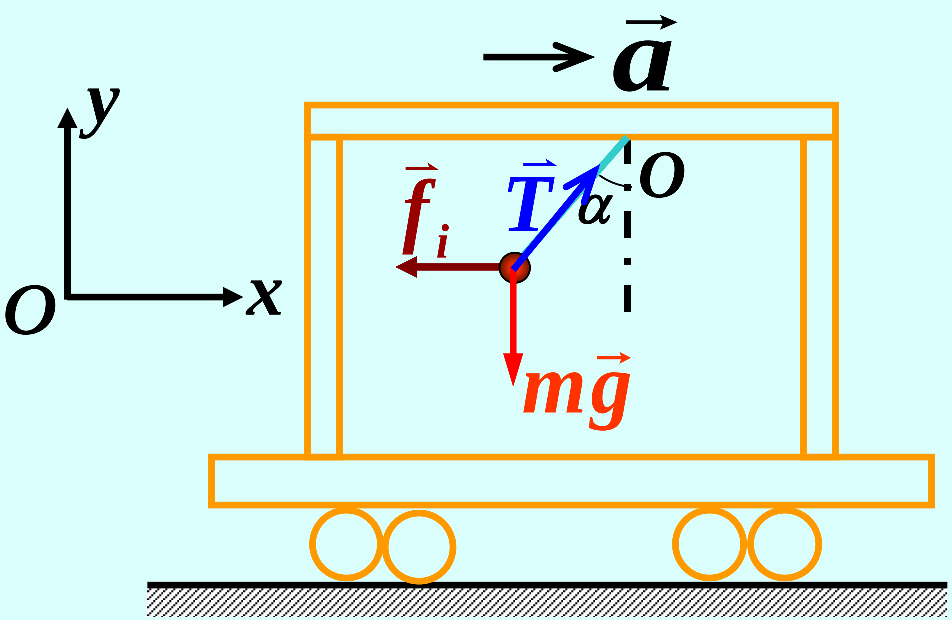
$$(mg+ma)-T=ma'$$

$$T=\frac{1}{2}(1+\mu)(g+a)m$$

例5. 动力摆可用来测定车辆的加速度。轻质细棒，一端固定在车厢顶部，另一端系一小球，当列车以加速度 a 行驶时，细棒偏移 α 角，求 a 。

解： 以车厢为参考系： （非惯性系）

对小球作受力分析。 小球处于平衡状态，有：



$$m\vec{g} + \vec{T} - m\vec{a} = 0$$

在两坐标轴上的分量式为：

$$T\cos\alpha - mg = 0$$

$$T\sin\alpha - ma = 0$$

解得： $a = g\tan\alpha$

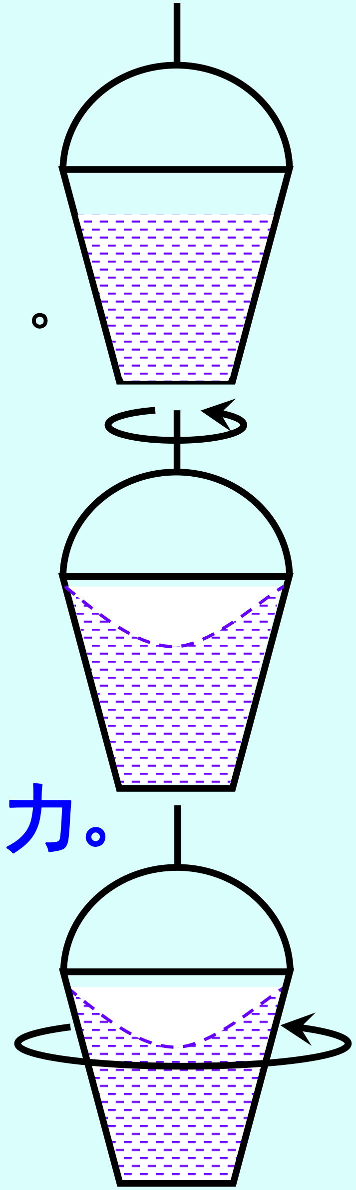
一般车辆的加速度不是很大， $a \approx g\alpha$

问题： 惯性力是真实的力还是虚拟的力？

*惯性力是从哪里来的？

惯性力既无施力者也无反作用 ——“假想力”。

*惯性力究竟是不是虚假的力？



力的定义
- 力是物体间的相互作用。（狭义）
- 力使物体运动状态发生变化。（广义）

按力的广义概念，牛顿力和惯性力都是真实力。

爱因斯坦建立广义相对论基础之一：

等效原理： **惯性力作用与引力作用等效。**

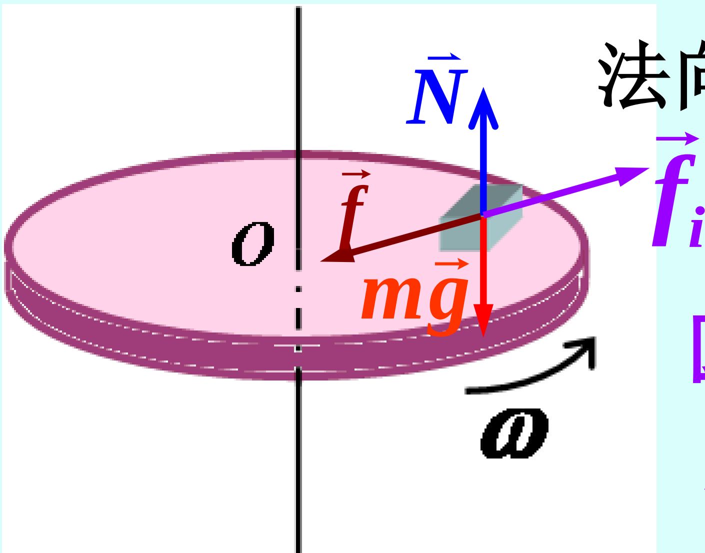
惯性力虽不是某个具体物体的作用，却是整个宇宙恒星系统的总作用。

二、转动参考系

1. 物体相对于参考系静止

小物块静止于匀角速转动的水平圆盘上。

地面参考系：小物块作匀速率圆周运动。



法向(向心力)：$\vec{f} = m\vec{a}_n = -m\omega^2\vec{r}$

为圆盘对物块的静摩擦力。

圆盘参考系——非惯性系

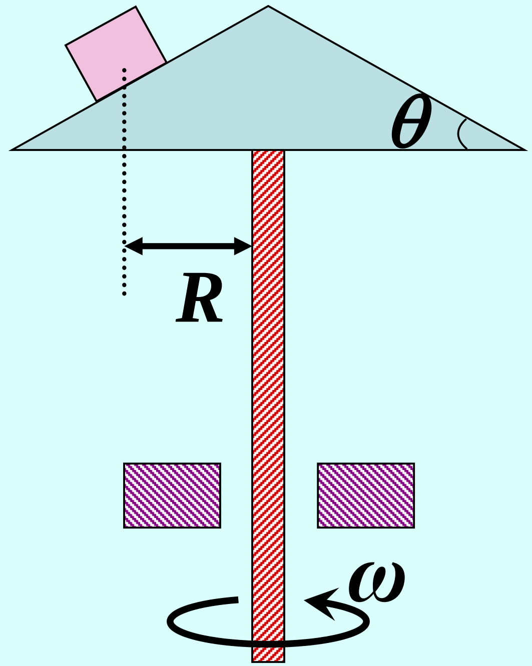
物块静止。物块应该受到一个和静摩擦力平衡的力：

其方向沿径向，称为**惯性离心力。**

$$\vec{f}_i = -\vec{f} = m\omega^2\vec{r}$$

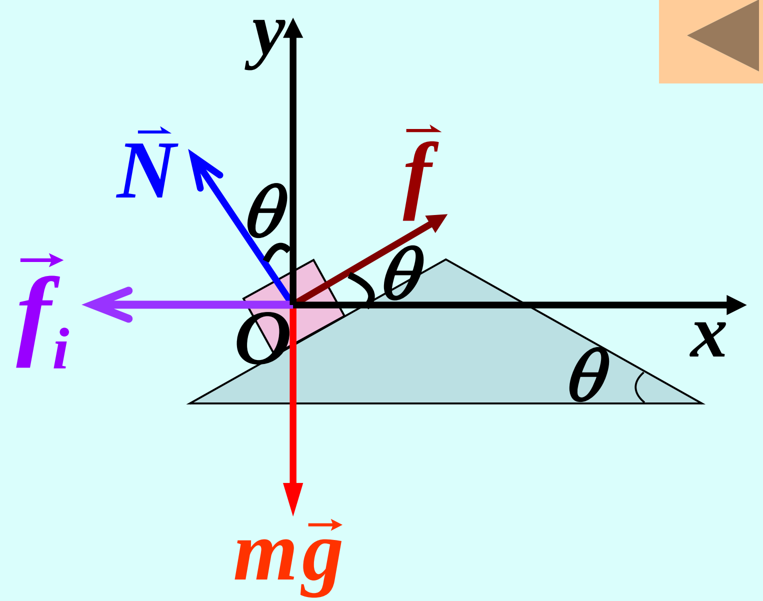
惯性离心力也是真实力。

例6. 在倾角为θ 的圆锥体的侧面放一质量为m的小物体，圆锥体以角速度ω 绕竖直轴匀速转动。轴与物体间的距离为R，为了使物体能在锥面保持静止不动，物体与锥面间的静摩擦系数至少为多少？并讨论所得到的结果。



解： 选圆锥参考系

作受力图， 建坐标系。

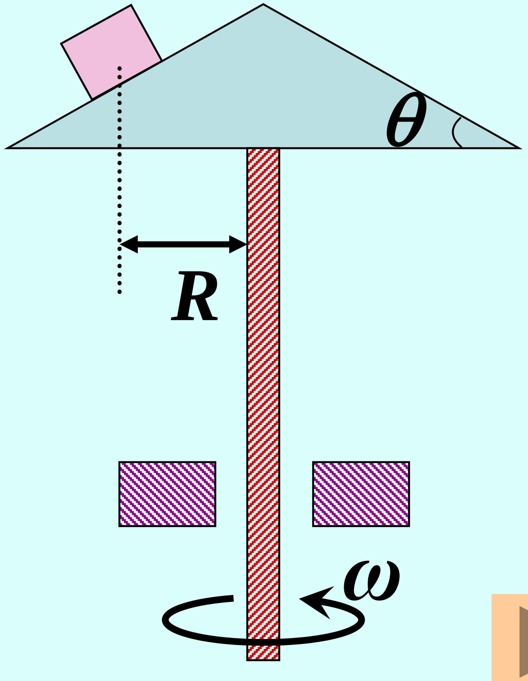


$$x:\ \mu N\cos\theta - N\sin\theta - m\omega^2 R = 0$$

$$y:\ \mu N\sin\theta + N\cos\theta - mg = 0$$

$$\frac{\mu\cos\theta-\sin\theta}{\mu\sin\theta+\cos\theta}=\frac{\omega^2 R}{g} \qquad \therefore \mu=\frac{g\sin\theta+\omega^2 R\cos\theta}{g\cos\theta-\omega^2 R\sin\theta}$$

对给定的ω、R 和θ，μ不能小于此值，否则最大静摩擦力不足以维持m 在斜面上不动。



讨论： 由 $\mu>0$，可得：

$$g\cos\theta-\omega^2 R\sin\theta>0$$

所以： $\tan\theta<\dfrac{g}{\omega^2 R}$

当 $\tan\theta\geq\dfrac{g}{\omega^2 R}$ 时，

物体不可能在锥面上静止不动。

2. 物体相对于参考系运动 ——科里奥利力(1835)

设有一绕与盘面垂直的轴线O、以角速度ω 转动的圆盘

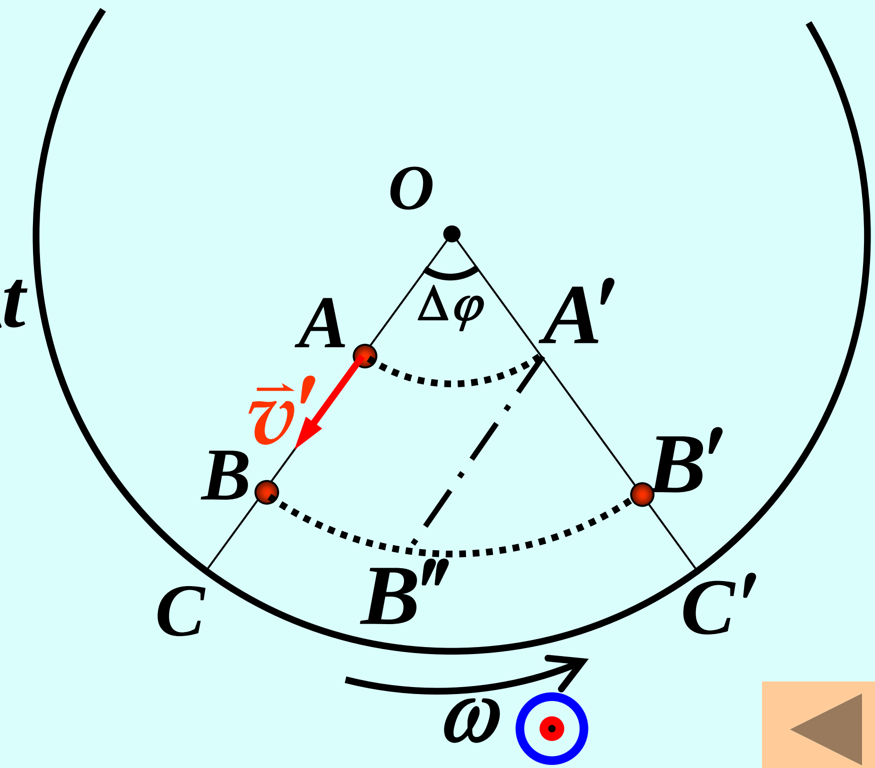
一物体相对于圆盘以速度 $\vec{v}'$沿半径OC匀速运动

Δt 内：

物体相对于圆盘：$A \rightarrow B$

圆盘相对于惯性系：$\Delta\varphi = \omega\Delta t$

物体处于 B' 处。



惯性系：

物体同时参与两个分运动：
$$\begin{cases} A \rightarrow A' \\ A \rightarrow B \end{cases}$$

Δt 末：物体似乎处于 B''， 但实际处于 B'。 Why?

惯性系： 物体横向速度 $v_t = (R + v't)\omega$ 不断增大。

对应 v_t 变化的加速度可由附加路程 $\Delta s = \overset{\frown}{B'B''}$ 求出：

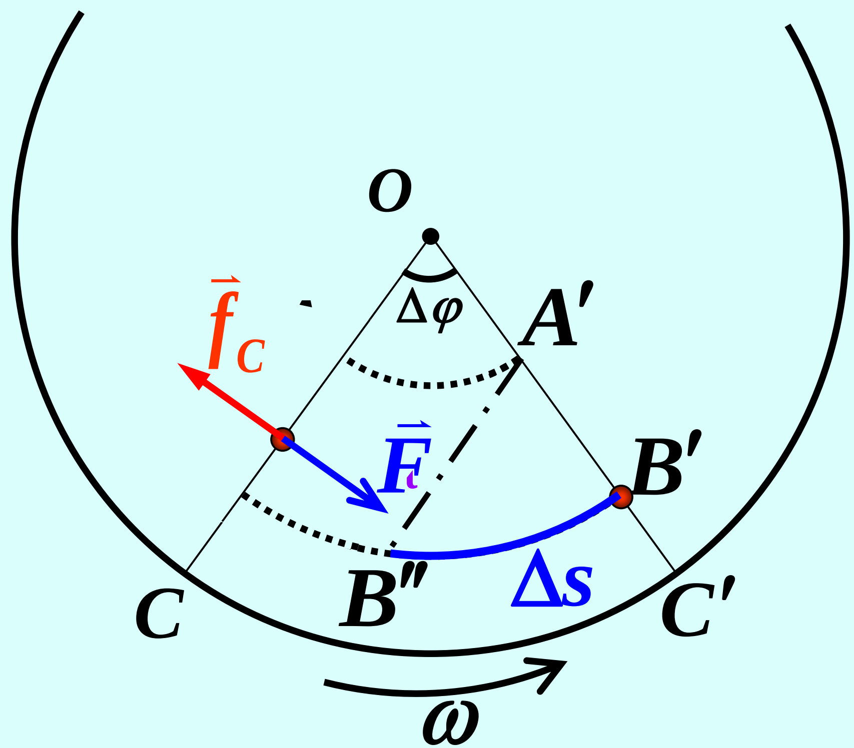
$$\Delta s = v'\Delta t \cdot \omega\Delta t = v'\omega(\Delta t)^2 = \frac{1}{2}a(\Delta t)^2$$

$a = 2v'\omega$ 方向与 $\vec{v}'$ 垂直

$$\vec{a} = 2\vec{\omega}\times\vec{v}'$$

说明还须给物体施力（向左）：

$$\vec{F} = m\vec{a} = 2m\vec{\omega}\times\vec{v}'$$



圆盘参考系：

物体仅沿半径作匀速直线运动

物体还受一个与 $\vec{F}$ 相消的力： $\vec{f}_C = 2m\vec{v}'\times\vec{\omega}$ 科里奥利力

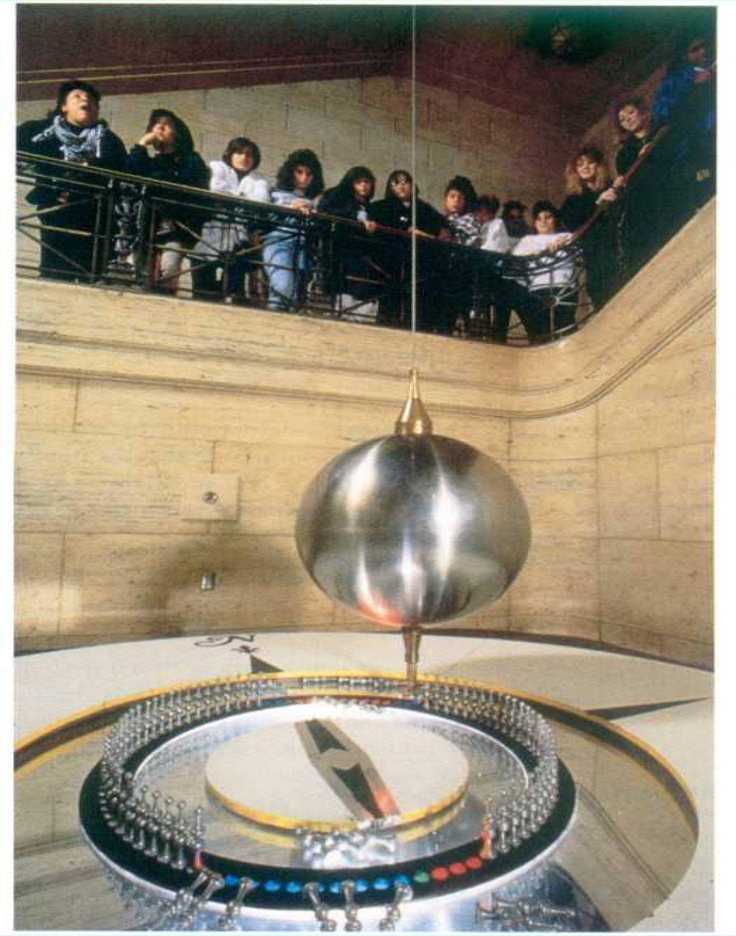
当物体相对于转动参考系运动时，在此转动参考系内观察，物体所受到的惯性力包括**惯性离心力**和**科里奥利力**。

$$\vec{f}_i = m\omega^2\vec{r}$$

$$\vec{f}_C = 2m\vec{v}'\times\vec{\omega}$$

3. 科里奥利力在地球上的表现

1) 傅科摆(1851)



巴黎伟人祠屋顶上悬挂的一个摆长约67米、摆锤重 28千克的大单摆。随着每一次摆动，地上巨大的沙盘便留下摆锤运动的痕迹 。

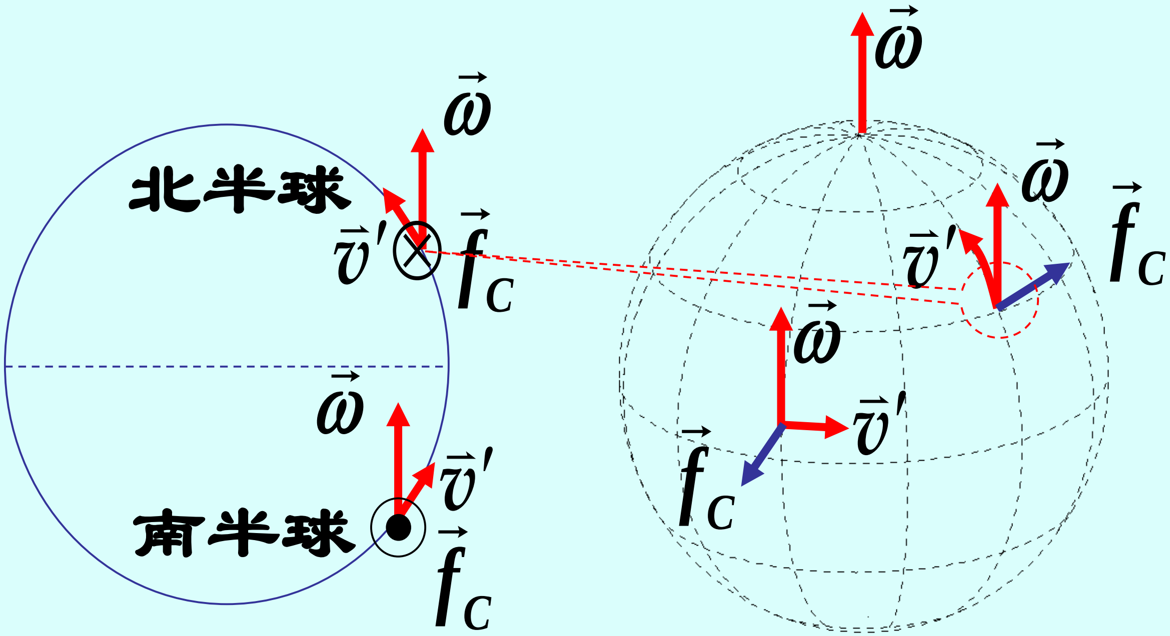
发现摆平面发生了转动！

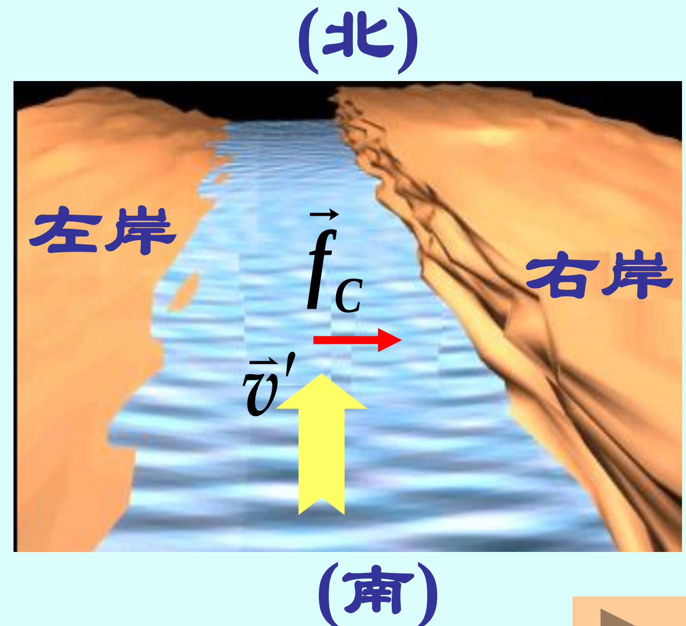
这是在地球上验证地球自转的著名实验。

2) 贝尔定律

$$\boxed{\vec{f}_C = 2m\vec{v}' \times \vec{\omega}}$$

北半球河流右岸比较陡峭，
南半球则左岸比较陡峭。





北半球铁路右侧铁轨磨损得厉害些?

南半球的情况相反

对北半球其它流向的河流有相同的结论。

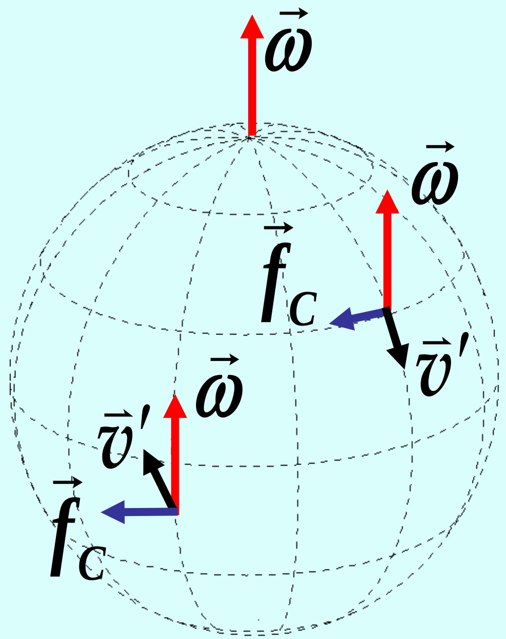
如: 汉口---- 左岸(平缓的江滩)
武昌---- 右岸(陡峭的江岸)

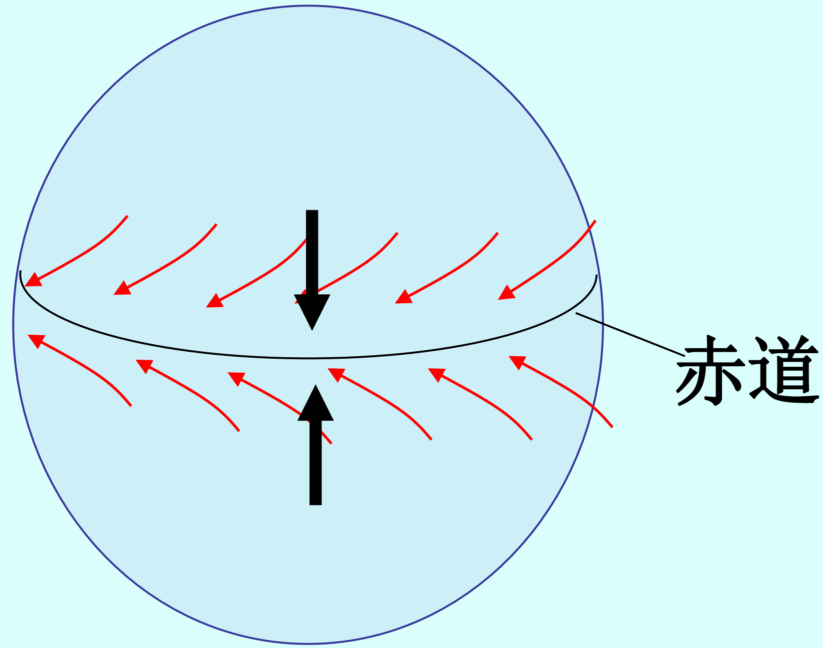
3) 信风的形成

$$\boxed{\vec{f}_C = 2m\vec{v}' \times \vec{\omega}}$$

赤道附近日照强烈，空气受热上升，引起赤道两边的空气向赤道流动。

但受科里奥利力而偏离南北方向。

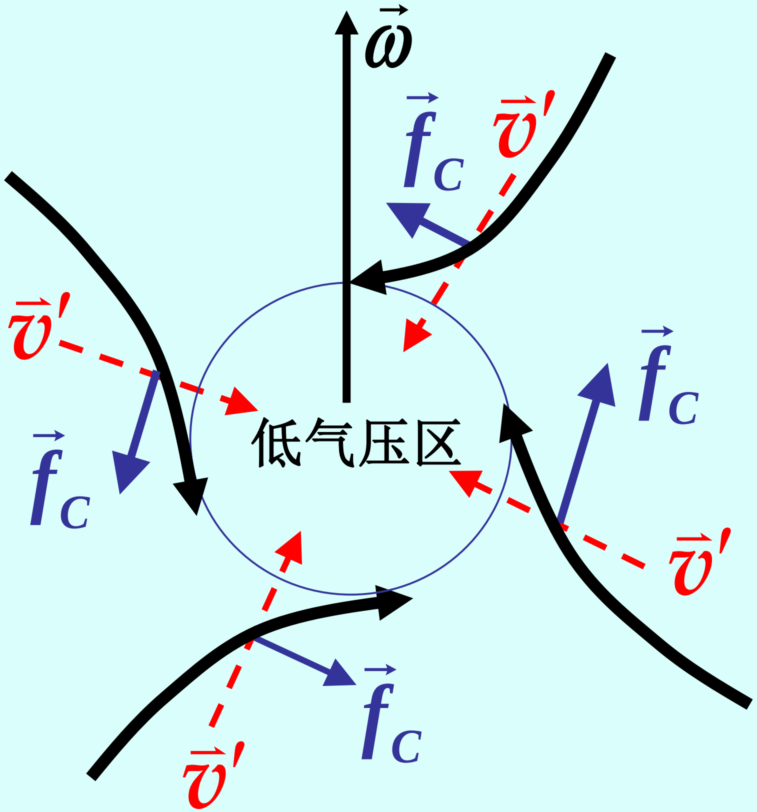




赤道附近的信风在北半球是东北方向(风，南偏西)，
在南半球是东南方向(风，北偏西)。

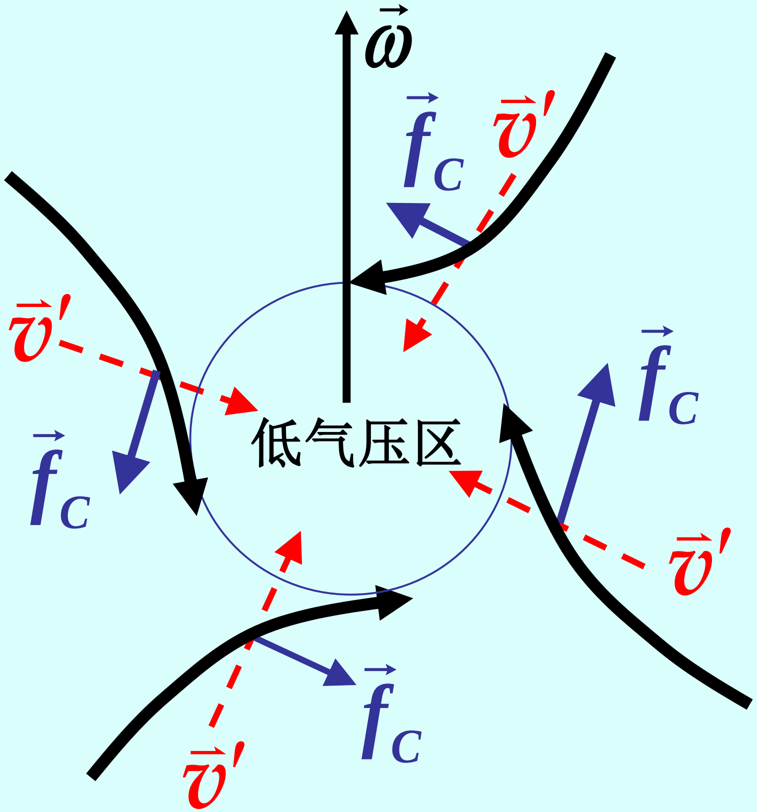
4) 北半球的强热带风暴

$$\vec{f}_C = 2m\vec{v}' \times \vec{\omega}$$



北半球的强热带风暴是在热带低气压中心附近形成的，当外面的高气压空气向低气压中心涌入时，由于科氏力的作用，气流的方向将偏向气流速度的右方，从高空看是沿逆时针方向旋转的涡旋。在南半球则是顺时针方向

$$\vec{f}_C = 2m\vec{v}' \times \vec{\omega}$$



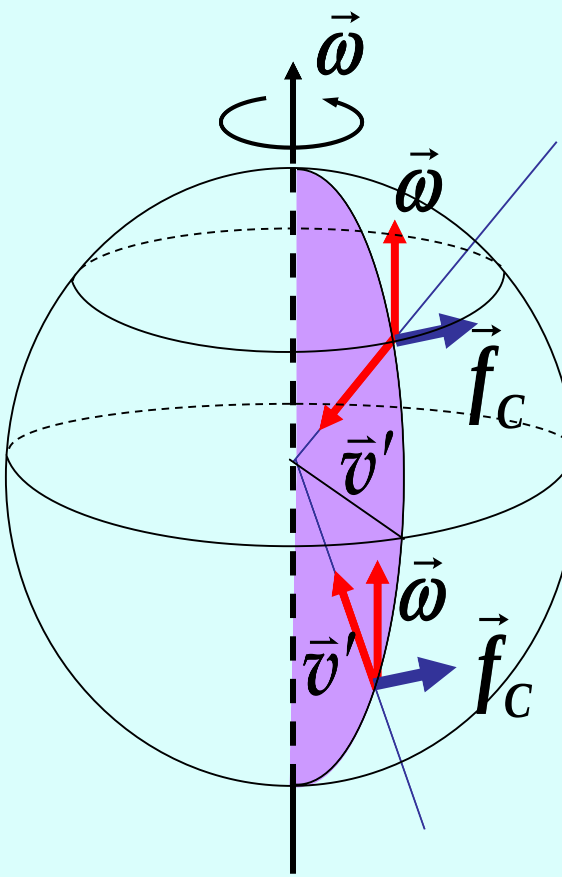
由于相同的原因，在北半球，水池放水时形成的涡旋，也是沿逆时针方向旋转的。若在南半球，则为顺时针方向。

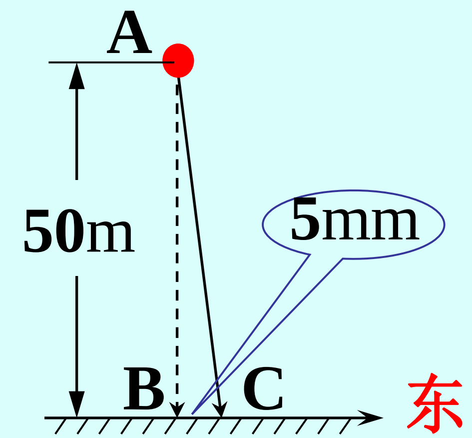
$$\vec{f}_C = 2m\vec{v}' \times \vec{\omega}$$

5) 落体偏东

物体从高处自由下落，所受科里奥利力的方向不论在南北半球均向东，因此使落点偏东。

赤道上这一效应最大，两极没有此效应。





A物体并不垂直下落到地面B点，而是稍稍偏向东方的C点。

科里奥利力作业题

1. 当水通过水槽底部的孔泻出时，在孔的上方会形成漩涡，这是由于________力的作用导致的。在北半球，形成的漩涡是_______方向旋转的；在南半球，漩涡是_______方向旋转的。

2. 汉口有平缓的江滩，而一江之隔的武昌却是江岸陡峭。这是千万年以来江水在________力的作用下不断冲刷_____的江岸所造成的。

3. 由于________力的作用，在北半球，自由下落的物体的落点会偏___；由于同样的原因，南半球自由下落的物体的落点会偏____。

4. 赤道附近温度较高，会产生对流，使赤道两侧较冷的空气向赤道流动而形成贸易风，即信风。由于______力的作用，北半球的贸易风总是_____风；而南半球的贸易风总是___风。