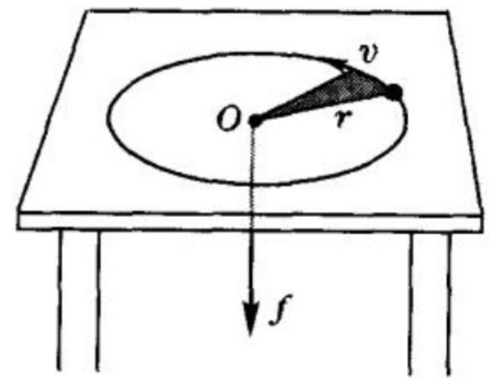
基础物理学 A1
2025年春季学期

谢柯盼
kpxie@buaa.edu.cn
物理学院

第五章 角动量变化定理与角动量守恒

§5-0 引子

例：轻绳一端系着小球m，另一端穿过水平光滑桌面中央的小洞O由竖直向下的力f拉着。起初小球作半径r_0、速度为v_0的匀速圆周运动，现缓慢向下拉绳子，求半径为r时f的大小。



试用第二章的方法求解

解：缓慢拉绳的含义是每一瞬间小球均可视为匀速圆周运动

$$f = mr\omega^2 = m\,v^2/r$$

绳子做功导致质点动能改变，

$$-f\,\mathrm{d}r = \mathrm{d}\left(\frac{1}{2}mv^2\right) = mv\,\mathrm{d}v$$

联立得$-v^2\,\mathrm{d}r/r = v\,\mathrm{d}v$

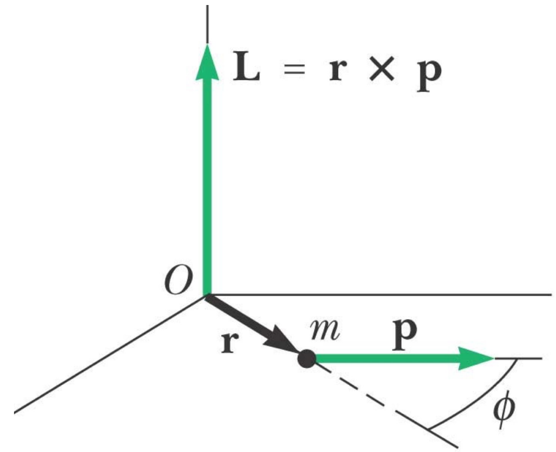
可分离变量求出$v = v_0 r_0/r$

最终给出

$$f = \frac{mv_0^2 r_0^2}{r^3}$$

有没有更简便的方法？

§ 5-1 角动量与力矩



角动量：选一固定参考点O，运动质点位矢为$\vec{r}$，动量为$\vec{p}$，则质点对O点的角动量为

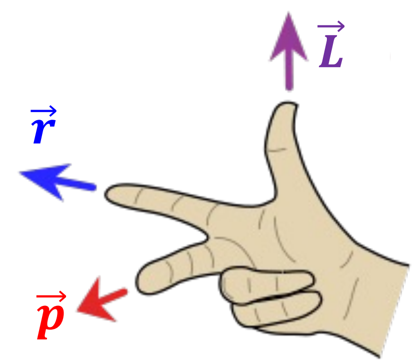
$$\vec{L} = \vec{r}\times\vec{p} = \vec{r}\times m\vec{v}$$

又称为动量矩

角动量是矢量，是状态量，且必须指明参考点

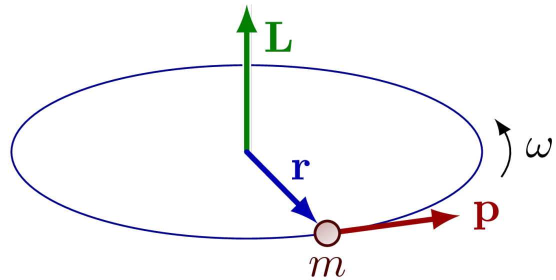
- 大小：$L = rp\sin\phi = rp_{\perp}$，单位为$\mathrm{kg\cdot m^2/s}$
- 方向垂直于$\vec{r}$和$\vec{p}$构成的平面，由右手螺旋法则确定

角动量描述质点绕O转动的状态



- 运动过程中，$\vec{r}$和$\vec{p}$时刻变化，$\vec{L}$的大小和方向也时刻变化
- 径向运动$\phi = 0$或π，则$L = 0$

例：质点做半径为r的匀速圆周运动，角速度大小为ω，求其相对圆心的角动量$\vec{L}$。



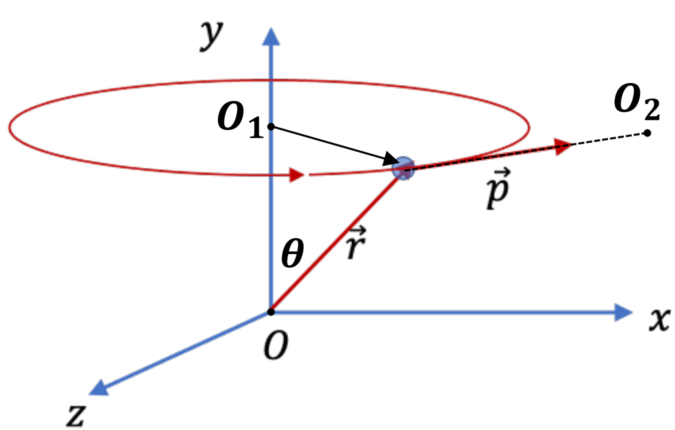
解：圆周运动$\vec{r} \perp \vec{p}$，故

$$L = rp = rmv = mr^2\omega$$

方向垂直运动平面向上

匀速圆周运动的质点，位置、动量时刻在变化，但对圆心的角动量是常矢量，且与角速度同向：$\vec{L} = mr^2\vec{\omega}$

特别注意：讨论角动量时一定要指明参考点在哪里！



1. 对O_1的角动量沿y轴方向，大小$L_1 = rp\sin\theta$
2. 对O_2的角动量为零矢量
3. 对O的角动量与y轴夹角为$(\pi/2 - \theta)$，大小$L = rp$

若质点作平面运动，以参考点为极点建立平面极坐标系，则坐标$\vec{r} = r\vec{e}_r$

- 动量$\vec{p} = m(v_r\vec{e}_r + v_\theta\vec{e}_\theta) = m\left(\dot{r}\vec{e}_r + r\dot{\theta}\vec{e}_\theta\right)$

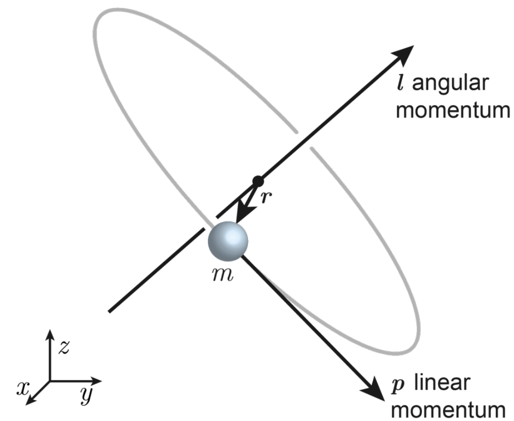
直接计算给出角动量

$\vec{L} = mr^2\dot{\theta}(\vec{e}_r\times\vec{e}_\theta) = mr^2\dot{\theta}\vec{e}_k$，垂直于运动平面

若质点作一般空间运动，直角坐标下

- 坐标$\vec{r} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}$
- 动量$\vec{p} = p_x\vec{i} + p_y\vec{j} + p_z\vec{k}$

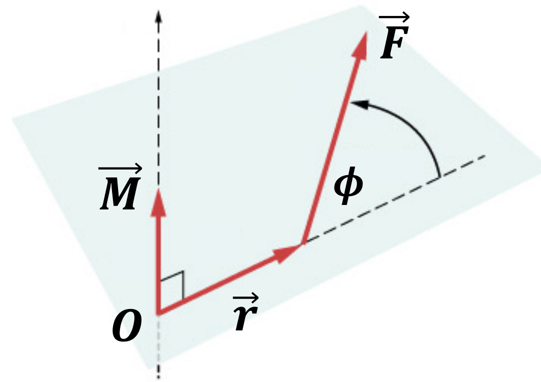
则角动量（注意叉乘的顺序）



$$\vec{L} = \vec{r}\times\vec{p} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ x & y & z \\ p_x & p_y & p_z \end{vmatrix} \Rightarrow \begin{cases} L_x = yp_z - zp_y \\ L_y = zp_x - xp_z \\ L_z = xp_y - yp_x \end{cases}$$

力矩：选一固定参考点O，力$\vec{F}$作用于位矢$\vec{r}$处，则该力**对O点的力矩**为

$$\vec{M} = \vec{r}\times\vec{F}$$

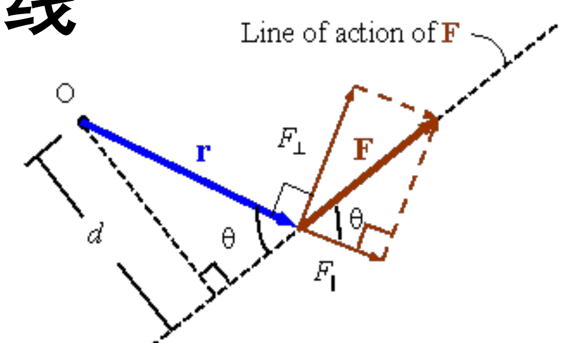


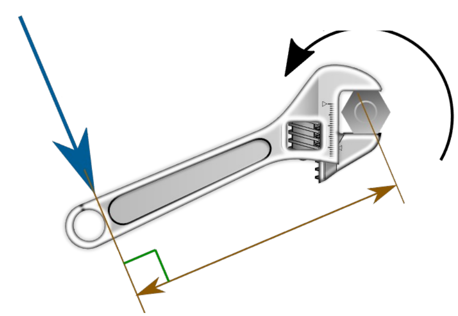
力矩是矢量，是状态量，且必须指明**参考点**

- 大小：$M = rF\sin\phi$，单位为$\mathrm{N\cdot m}$
- 方向垂直于$\vec{r}$和$\vec{F}$构成的平面，由**右手螺旋法则**确定

过O点向$\vec{F}$所在直线作垂线，得力臂

$$d = r\sin\theta$$





力矩描述$\vec{F}$作用的**转动效应**

则$M = Fd$，即力矩等于力臂乘以力

同一参考点的力矩具有可加性

$$\vec{M} = \vec{r}\times(\vec{F}_1 + \vec{F}_2) = \vec{r}\times\vec{F}_1 + \vec{r}\times\vec{F}_2 = \vec{M}_1 + \vec{M}_2$$

- 若力与位矢平行，且力矩为零
- 一般而言，位矢$\vec{r}$、动量$\vec{p}$、受力$\vec{F}$并不共面

若质点作一般空间运动，在直角坐标下

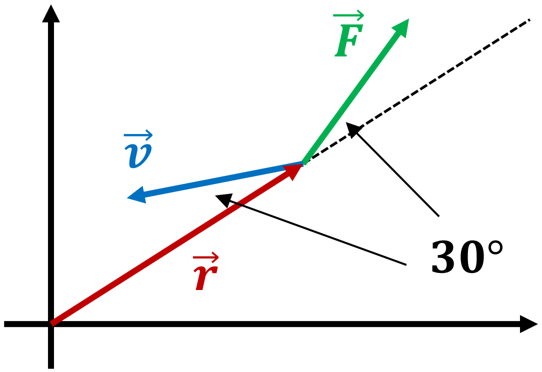
- 坐标$\vec{r} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}$
- 受力$\vec{F} = F_x\vec{i} + F_y\vec{j} + F_z\vec{k}$

则力矩（注意叉乘的顺序）

$$\vec{M} = \vec{r}\times\vec{F} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ x & y & z \\ F_x & F_y & F_z \end{vmatrix} \Rightarrow \begin{cases} M_x = yF_z - zF_y \\ M_y = zF_x - xF_z \\ M_z = xF_y - yF_x \end{cases}$$

若质点的受力和运动都局限于某一平面内，则力矩及角动量都垂直于该平面

例：质量为$m = 2\ \mathrm{kg}$的质点，其位矢$\vec{r}$、速度$\vec{v}$、所受外力$\vec{F}$均在同一平面内，且大小为$r = 3\ \mathrm{m}$，$v = 4\ \mathrm{m/s}$，$F = 2\ \mathrm{N}$。求该质点对原点的角动量以及该力相对于原点的力矩。



解：角动量大小为

$$L = rmv\sin 150° = 12\ \mathrm{kg\cdot m^2/s}$$

方向垂直纸面向外；

力矩大小为

$$M = rF\sin 30° = 3\ \mathrm{N\cdot m}$$

方向垂直纸面向外。

若题目问的是“角动量/力矩”而不是“角动量/力矩大小”，别忘记描述方向

§ 5-2 质点的角动量定理与角动量守恒

将质点的角动量对时间求导

$$\frac{\mathrm{d}\vec{L}}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(\vec{r}\times\vec{p})=\frac{\mathrm{d}\vec{r}}{\mathrm{d}t}\times\vec{p}+\vec{r}\times\frac{\mathrm{d}\vec{p}}{\mathrm{d}t}$$

考虑到$\mathrm{d}\vec{r}/\mathrm{d}t=\vec{v}$，而$\vec{p}=m\vec{v}$，可知

$$\frac{\mathrm{d}\vec{r}}{\mathrm{d}t}\times\vec{p}\propto\vec{v}\times\vec{v}=\vec{0}$$

故得到

$$\frac{\mathrm{d}\vec{L}}{\mathrm{d}t}=\vec{r}\times\frac{\mathrm{d}\vec{p}}{\mathrm{d}t}=\vec{r}\times\vec{F}=\vec{M}$$

用到了牛顿第二定律$\mathrm{d}\vec{p}/\mathrm{d}t=\vec{F}$

上述推导中，$\vec{L}$与$\vec{M}$必须为惯性系中的同一固定参考点计算得到的值

角动量定理（微分形式）：

$$\vec{M} = \frac{\mathrm{d}\vec{L}}{\mathrm{d}t}$$

质点所受合外力矩等于其角动量对时间的变化率

对比牛顿第二定律：质点所受合外力等于动量变化率

角动量定理（积分形式）：

$$\text{角冲量} \quad \int_{t_1}^{t_2} \vec{M}\mathrm{d}t = \vec{L}\Big|_{t_1}^{t_2} = \Delta\vec{L}$$

质点角动量的增量等于其所受角冲量

对比动量定理：质点动量的增量等于其所受冲量

定理适用条件：

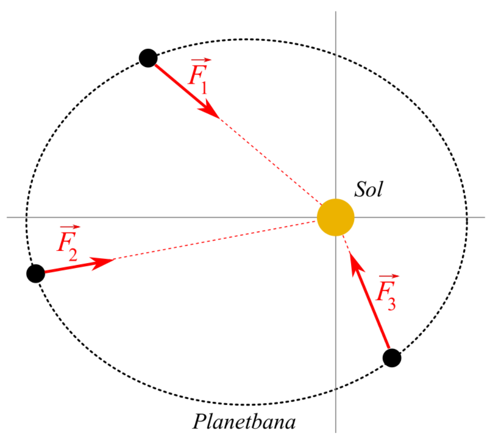
- 角动量和力矩的参考点必须为同一固定点
- 惯性系（因为用到了牛顿第二定律）
- 如果要在非惯性系中应用，则需要加入惯性力

若$\vec{M}=\vec{0}$，则$\mathrm{d}\vec{L}/\mathrm{dt}=\vec{0}$，故$\vec{L}$为常矢量

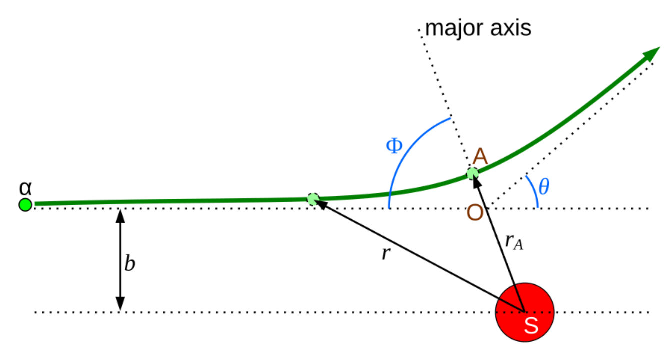
如果质点所受的力矩为零，则其角动量不随时间改变，或称角动量守恒

由于$|\vec{M}|=rF\sin\theta$，故$\vec{M}=\vec{0}$有三种可能

1. 质点静止于原点，$r=0$
2. 质点不受外力，$F=0$
3. 质点所受外力为有心力，$\theta=0$或π，$\sin\theta=0$

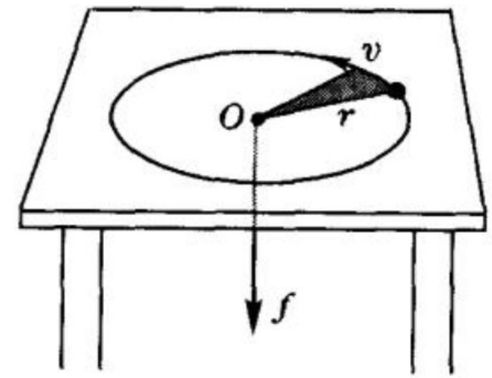


太阳近似视为静止于原点，万有引力$\theta\equiv\pi$



原子核近似视为静止于原点，库仑斥力$\theta=0$

例：轻绳一端系着小球m，另一端穿过水平光滑桌面中央的小洞O由竖直向下的力f拉着。起初小球作半径r_0、速度为v_0的匀速圆周运动，现缓慢向下拉绳子，求半径为r时f的大小。



解：缓慢拉绳的含义是**每一瞬间**小球均可视为匀速圆周运动

$$f = mr\omega^2 = mv^2/r$$

绳子拉力为有心力，故小球对力心的角动量守恒

$$mvr = mv_0 r_0$$

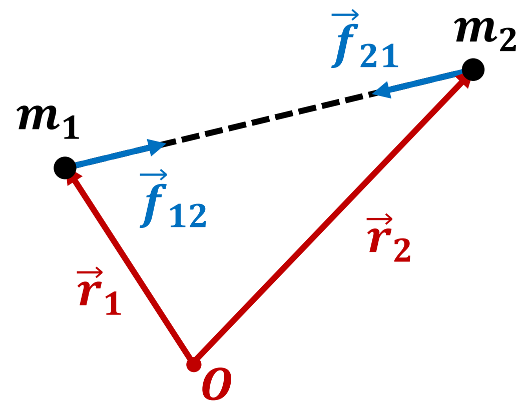
代入给出$v = v_0 r_0/r$，解得

$$f = \frac{mv_0^2 r_0^2}{r^3}$$

无需求解微分方程

§ 5-3 质点组的角动量

考虑一对质点构成的体系，其内力的力矩之和



$$\vec{M}_1+\vec{M}_2=\vec{r}_1\times\vec{f}_{12}+\vec{r}_2\times\vec{f}_{21}$$

牛顿第三定律$\vec{f}_{12}=-\vec{f}_{21}$，得

$$\vec{M}_1+\vec{M}_2=(\vec{r}_2-\vec{r}_1)\times\vec{f}_{21}$$

若两质点相互接触，如摩擦力、刚体内力、正压力，则$(\vec{r}_2-\vec{r}_1)=\vec{0}$

若两质点有远程作用，如绳子拉力、万有引力、静电力，但作用力沿其连线方向，则$(\vec{r}_2-\vec{r}_1)\parallel\vec{f}_{21}$

两种情况均给出$\vec{M}_1+\vec{M}_2=\vec{0}$

换句话说，一对内力的力矩之和为零

该结论易于推广到多质点体系

定义质点组的总角动量为$\vec{L}=\sum_i \vec{L}_i$（对同一点）

$$\frac{\mathrm{d}\vec{L}}{\mathrm{d}t}=\sum_i \frac{\mathrm{d}\vec{L}_i}{\mathrm{d}t}=\sum_i \vec{M}_i$$

任一质点i所受力矩均可分解为外力、内力贡献

$$\vec{M}_i=\vec{M}_{i,\mathrm{ext}}+\vec{M}_{i,\mathrm{int}}$$

内力力矩两两抵消，最终给出

$$\frac{\mathrm{d}\vec{L}}{\mathrm{d}t}=\sum_i \vec{M}_{i,\mathrm{ext}}=\vec{M}_{\mathrm{ext}}$$

质点组角动量定理（微分形式）：质点组角动量变化率等于所受合外力矩

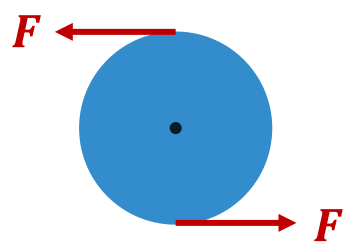
对时间积分，可得定理的积分形式 $\Delta\vec{L}=\int_{t_1}^{t_2}\vec{M}_{\mathrm{ext}}\mathrm{d}t$

合外力矩的断句是合·外力矩，而不是合外力·矩

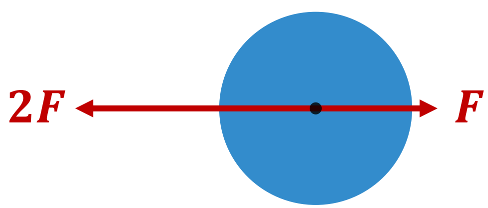
$$\vec{M}_{\text{ext}} = \sum_i \vec{r}_i \times \vec{F}_i$$

外力$\vec{F}_i$作用于质点i所在位置$\vec{r}_i$，即诸外力的作用点并不一样

- 合外力矩$\sum_i \vec{r}_i \times \vec{F}_i$与合外力$\sum_i \vec{F}_i$无直接关联



合外力为零，但对圆心的合外力矩不为零



对圆心的合外力矩为零，但合外力不为零

若合外力为零，则合外力矩与参考点无关，自行证明

若$\vec{M}_{\mathrm{ext}} = \vec{0}$，则$\mathrm{d}\vec{L}/\mathrm{d}t = \vec{0}$，故$\vec{L}$为常矢量

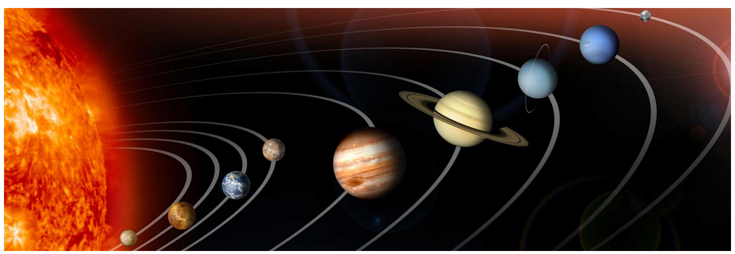
即质点组所受的合外力矩为零时，角动量守恒

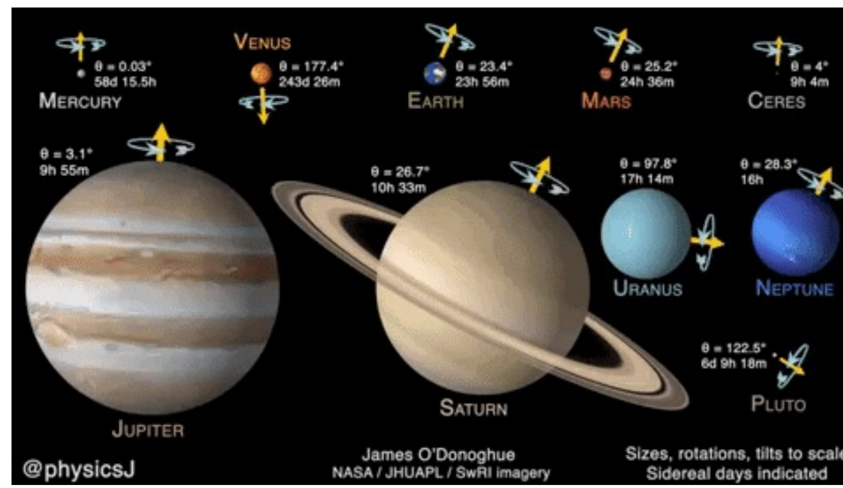
- 孤立体系角动量必守恒

若体系在旋转，则$L \sim mvr$，当r缩小时，为使L不变，v必增加，即旋转会加速

此为天体旋转的普遍成因

例：太阳系起源于同一片星尘





行星绕太阳自西向东公转

行星自转方向与公转一致

- 仅金星和天王星例外（碰撞改变原自转轴）

例：牛顿力学中，下列物理量：质量、动量、冲量、动能、势能的变化量、功、角动量、力矩，与参考系的选取有关的物理量是____________________________。

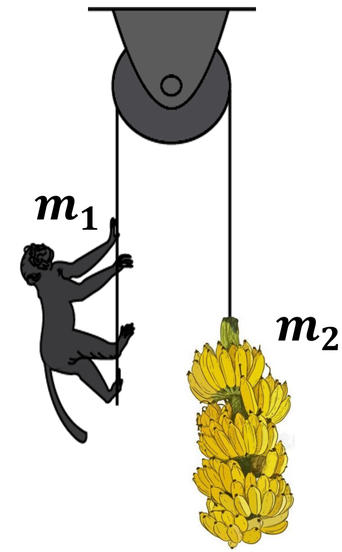
解：动量、动能、功、角动量、力矩。

例：考虑双质点体系，若内力只有万有引力，且系统所受外力的矢量和为零，则此系统

A. 动量、机械能以及某一方向的角动量守恒
B. 动量和机械能守恒，但角动量是否守恒未知
C. 动量守恒，但机械能和角动量是否守恒未知
D. 动量和角动量守恒，但机械能是否守恒未知

解：外合力为零则动量必守恒。
但并不知道外力的做功情况以及力矩，故其他量不能判断守恒性。故选**C**

例：轻绳跨过无摩擦定滑轮，一端趴着质量m_1的猴子，另一端绑着质量m_2的香蕉。从$t=0$时刻开始，猴子相对于绳子以恒定速度v_1'向上爬，问猴子能否成功把香蕉拉到自己的一侧。



解：设滑轮半径为R，以轮轴为参考点，垂直纸面向外为正，系统受合外力矩

$$M=(m_1-m_2)gR$$

设香蕉上升的速度为V，

猴子对地速度$v_1=v_1'-V$

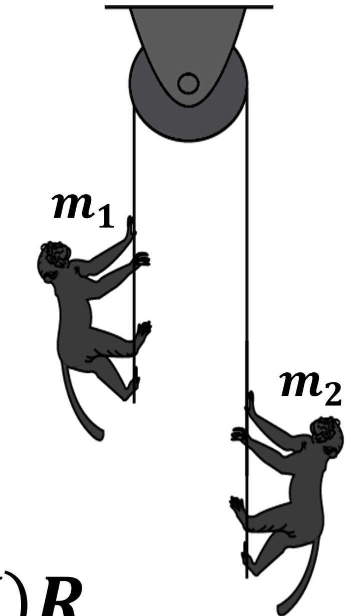
体系角动量$L=-m_1(v_1'-V)R+m_2VR$

$M=\mathrm{d}L/\mathrm{d}t$，给出$(m_2+m_1)\,\mathrm{d}V/\mathrm{d}t=(m_1-m_2)g$

$$V=\frac{m_1-m_2}{m_1+m_2}gt$$

若$m_1>m_2$则香蕉会上升，最终到达左侧

例：两猴m_1和m_2于$t=0$时刻开始沿轻绳和无摩擦定滑轮构成的系统向上爬，相对于绳子的速度恒定为v_1'和v_2'，求其对地速度v_1和v_2。



解：设滑轮半径为R，系统受合外力矩

$$M=(m_1-m_2)gR$$

设右端绳子速度为V（以向上为正）

两猴相对地面的速度分别为

$$v_1=v_1'-V \text{和} v_2=v_2'+V$$

体系角动量$L=-m_1(v_1'-V)R+m_2(v_2'+V)R$

$M=\mathrm{d}L/\mathrm{dt}$，给出$(m_2+m_1)\,\mathrm{d}V/\mathrm{dt}=(m_1-m_2)g$

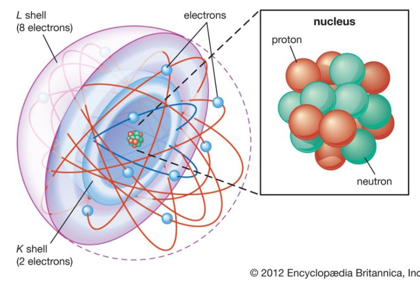
积分得$V(t)$，最终给出

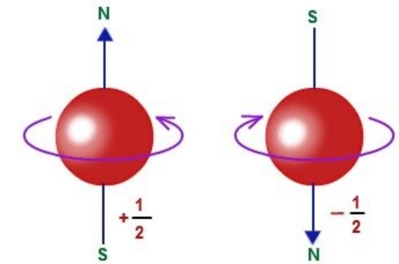
$$v_1=v_1'-\frac{m_1-m_2}{m_1+m_2}gt, \qquad v_2=v_2'+\frac{m_1-m_2}{m_1+m_2}gt$$

在足够长的时间后，更重的猴最终会下坠

角动量概念的应用范围远远超出牛顿力学

例：电子具有绕核的轨道角动量以及自旋角动量

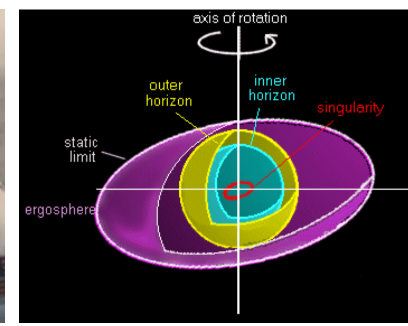




电子自旋导致其具有磁矩，当前的量子场论理论计算与实验测量结果在十亿分之一的精度内相符（2010）

这是科学对自然界最精确的预测

例：黑洞也可以拥有自旋，从而具有角动量



霍金等人利用广义相对论证明（1973），黑洞只有质量、电荷、角动量三个物理量

为什么角动量及角动量守恒的概念如此普适？

诺特定理（1915）：

物理的每一个可微的对称性，都对应着一个守恒量。

如果物理定律在空间转动下不变，则角动量守恒

角动量是空间各向同性的推论，是空间本身的性质体现，因此适用性远超出牛顿定律和经典物理学

小结对称性与守恒律：

- 时间的平移不变性（均匀性）导致能量守恒；
- 空间的平移不变性（均匀性）导致动量守恒；
- 空间的转动不变性（各向同性）导致角动量守恒

在经典力学的框架里，这些物理量守恒是由牛顿三定律推导出来的定理

但它们实际上是更普遍的定律，反映了时空的性质

§ 5-4 有心运动

有心力：方向始终指向或者背向固定中心的力

有心力场：有心力所存在的空间

中心对称有心力：其大小仅与质点到力心O的距离r有关，即$\vec{F}(\vec{r}) = F(r)\vec{e}_r$，这里$F(r)$可正可负

此种力必为**保守力**，其对应的势能为

$$E_p(r) = -\int_{r_0}^{r} F(r')\mathrm{d}r'$$

由$\nabla r = \nabla\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = \vec{r}/r = \vec{e}_r$，结合链式法则可得$-\nabla E_p = -\left(\mathrm{d}E_p/\mathrm{d}r\right)\nabla r = F(r)\vec{e}_r = \vec{F}$

- 万有引力$F = -GMm/r^2$，得$E_p = -GMm/r$
- 静电力$F = ke_1e_2/r^2$，得$E_p = ke_1e_2/r$

很多问题可以归结为有心力场中的单体运动问题

- 太阳质量占整个太阳系的99.86%以上，可视为静止于原点提供引力场，行星在其中运动
- α粒子和金原子核分别由4和197个核子构成，在卢瑟福散射实验中可视金核为静止于原点，提供静电场，α粒子在其中运动

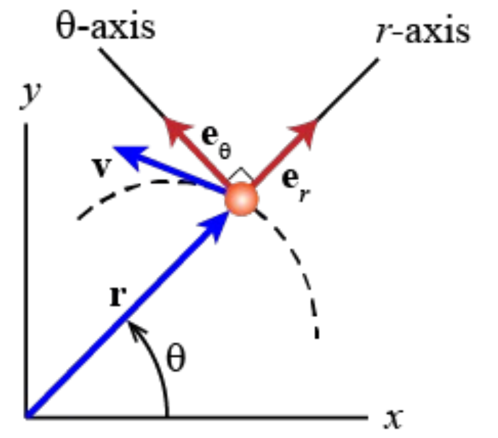
两体问题（双质点体系不受外力）均可通过惯性力的概念约化为单体问题，将于第六章证明

有心力场单体问题的普遍方程$m\ddot{\vec{r}} = F(r)\vec{e}_r$

形式上是三维方程，但实际上质点只在由初位矢$\vec{r}_0$和初速度$\vec{v}_0$所确定的平面内运动，是二维问题

- 质点所受力是保守力，故机械能守恒
- 质点相对于力心的角动量守恒
- 注意，质点动量不守恒，因为体系不具备平移不变

在**平面极坐标**下描述有心运动，取力心作为极点



质点坐标$\vec{r}=r\vec{e}_r$

求导得（参考第一章PPT）

速度$\vec{v}=\dot{r}\vec{e}_r+r\dot{\theta}\vec{e}_\theta$

加速度$\vec{a}=\left(\ddot{r}-r\dot{\theta}^2\right)\vec{e}_r+\left(r\ddot{\theta}+2\dot{r}\dot{\theta}\right)\vec{e}_\theta$

受力$\vec{F}=F\vec{e}_r$，牛顿第二定律立即给出

$F=m\left(\ddot{r}-r\dot{\theta}^2\right)$和$r\ddot{\theta}+2\dot{r}\dot{\theta}=0$

后者可以**凑微分**给出

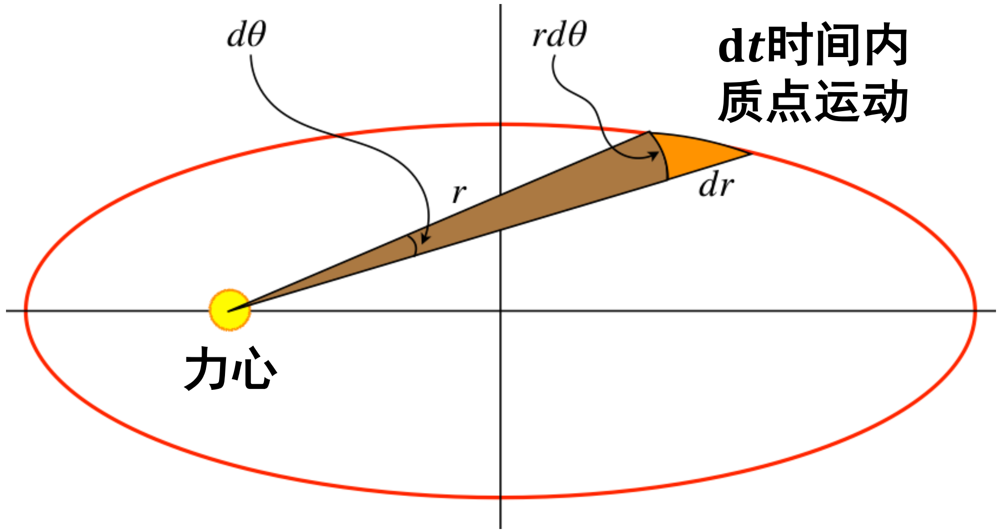
$$0=r\left(r\ddot{\theta}+2\dot{r}\dot{\theta}\right)=r^2\ddot{\theta}+2r\dot{r}\dot{\theta}=\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(r^2\dot{\theta}\right)$$

$r^2\dot{\theta}$为常量；由于$\vec{L}=mr^2\dot{\theta}\vec{e}_k$（本PPT第5页），

这意味着质点**对极点的角动量**守恒

符合预期，因为有心力对极点的力矩为零

$r^2\dot{\theta}$ =常量有另一层几何含义



质点位矢扫过的面积约为$r^2\mathrm{d}\theta/2 = r^2\dot{\theta}\mathrm{d}t/2$

故$r^2\dot{\theta}/2$为单位时间扫过的面积

——开普勒第二定律：面积律

行星与太阳的连线在相同时间扫过相同面积（1609）

隐含着角动量守恒，以及行星受力指向太阳

构成了牛顿提出万有引力的重要实验基础

角动量$L=mr^2\dot{\theta}$ =常量，可消去$\dot{\theta}$得径向运动方程

$$F(r)=\ddot{r}-r\dot{\theta}^2=\ddot{r}-\frac{L^2}{m^2r^3}$$

若不关心时间，只求轨迹形状$r(\theta)$，则可以利用

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}=\dot{\theta}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\theta}=\frac{L}{mr^2}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\theta}$$

本页内容理解即可

消去时间导数，最终给出轨迹方程

$$F(r)=\frac{L^2}{m^2r^5}\left[rr''-2(r')^2-r^2\right]$$

其中$r'=\mathrm{d}r/\mathrm{d}\theta$，$r''=\mathrm{d}^2r/\mathrm{d}\theta^2$。

只要给定有心力的公式$F(r)$，轨迹形状即可求解

对万有引力$F=-GMm/r^2$，可证明

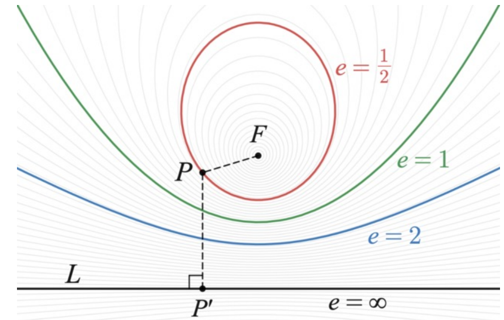
典型的圆锥曲线方程

$$r=\frac{C}{1+e\cos\theta}$$

C和e由初始条件决定

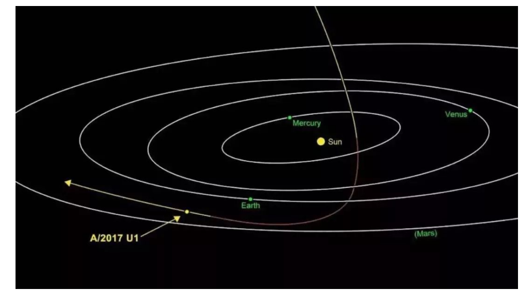
极坐标方程$r = C/(1 + e\cos\theta)$对应着圆锥曲线，偏心率e由质点的初始机械能E_m确定

- $E_m < 0$对应$0 \le e < 1$，椭圆
- $E_m = 0$对应$e = 1$，抛物线
- $E_m > 0$对应$e > 1$，双曲线



即平方反比力必然导致圆锥曲线轨迹

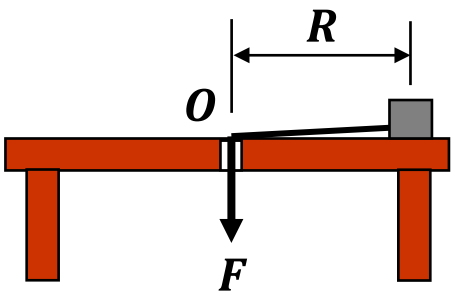
太阳系里的“长期居民”轨迹为椭圆，而“过客”轨迹为抛物线或双曲线



此性质在17世纪后半叶逐渐为人所知，包括胡克、哈雷等人均掌握此知识

- 牛顿首先证明了只有平方反比力才能导致椭圆轨迹（回忆第一章利用轨迹反推加速度的计算）
- 牛顿首先清晰明确地提出了力与运动的关系、引力的平方反比性和普适性（《原理》1687）

例：物体与光滑水平桌面的轻绳一端相连结，绳的另一端穿过桌面中心的小孔O。物体原本在绕O圆周运动，现将绳缓慢往下拉，则物体会



A. 角动量改变，动能改变，动量改变

B. 角动量不变，动能、动量都不变

C. 角动量不变，动能、动量都改变

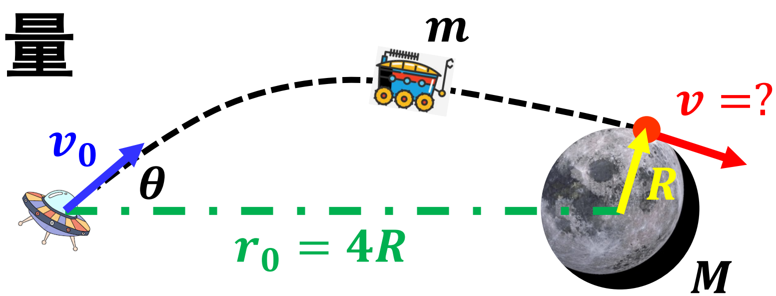
D. 角动量不变，动能不变，动量改变

解：中心对称有心力场，质点对力心的角动量守恒

缓慢向下拉的过程中F做功，动能会增加。选**C**

例：宇宙飞船去考察一质量M、半径R的行星，当飞船静止于距行星中心$r_0 = 4R$处时，以速度v_0发射一质量为m的探测器。要使这探测器恰好掠着行星的表面着陆，θ角应是多少？其着陆滑行初速度v多大？

解：探测器对星球中心的角动量守恒给出



$$mv_0r_0\sin\theta = mvR$$

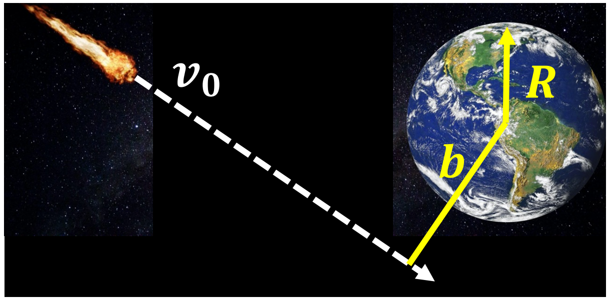
机械能守恒给出

$$\frac{1}{2}mv_0^2 - \frac{GMm}{r_0} = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{GMm}{R}$$

代入$r_0 = 4R$，解出

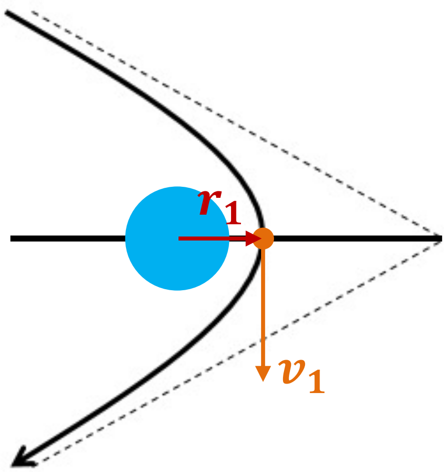
$$\sin\theta = \frac{1}{4}\sqrt{1 + \frac{3GM}{2Rv_0^2}}, \qquad v = v_0\sqrt{1 + \frac{3GM}{2Rv_0^2}}$$

例：小行星自无穷远处以初速度v_0飞向地球，问瞄准参数为b为多大时才不撞上地表？假定地球质量为M，半径为R。



解：小行星自无穷远飞来，机械能大于零，故其轨迹为双曲线

记其近地点到地心距离为r_1



近地点时径向速度必为零，此时速度垂直于地心与小行星连线

角动量守恒$mr_1v_1 = mv_0b$

机械能守恒

$$\frac{1}{2}mv_1^2 - \frac{GMm}{r_1} = \frac{1}{2}mv_0^2$$

令$r_1 > R$，得到不相撞条件为$b > R\sqrt{1 + 2GM/\left(Rv_0^2\right)}$

本节课小结

角动量和力矩的定义

- 叉乘的计算，注意相乘因子的顺序
- 注意参考点的选取

角动量定理

- 微分形式类比牛顿第二定律
- 积分形式类比冲量定理
- 质点系的角动量定理，角动量守恒

中心对称有心力场

- 必为二维运动，可用平面极坐标求解
- 灵活运用各个守恒律

第五章作业

5.1, 5.4, 5.6, 5.9

作业扫描提交至spoc.buaa.edu.cn，助教线上批改

提交时间段：3月21日0:00至4月4日00:00
以系统时间戳为准，原则上不接受其他解释

时间节点：3月25日（下周二）讲第六章