

力 Force



© 2012 Pearson Education, Inc.

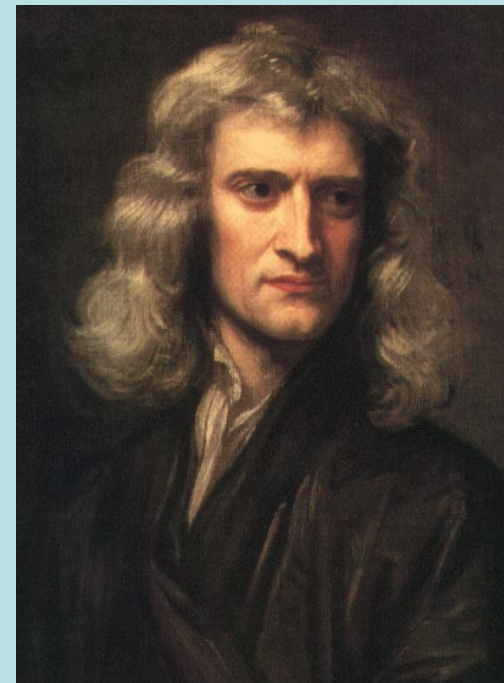


力是一個很熟悉的觀念





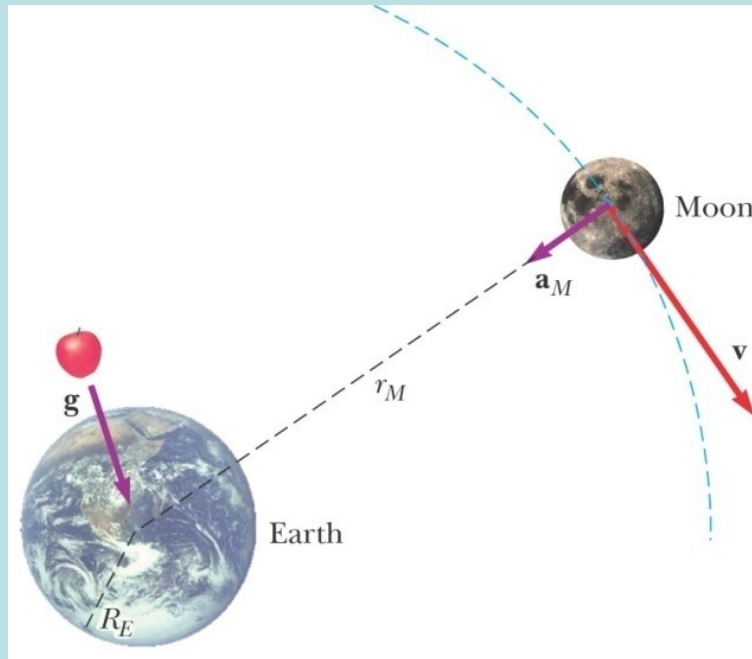
Is. Newton



Isaac Newton
(1642-1727)

月球的運動與蘋果的運動都是加速度運動！

兩者的加速度都同樣指向地心！

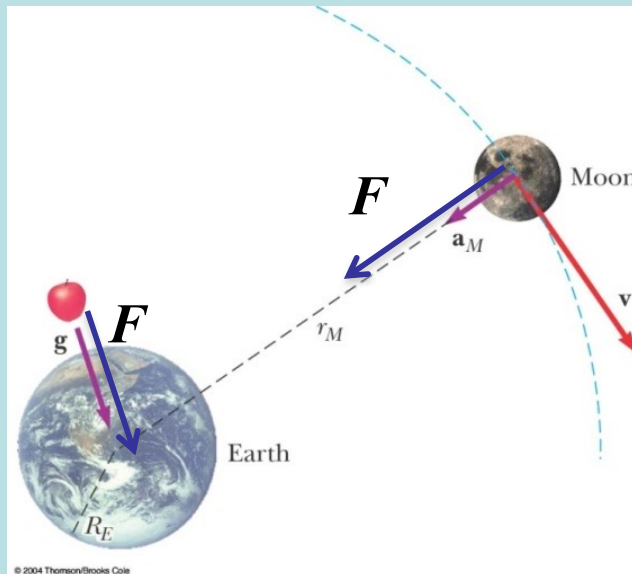


合理猜測：月球與蘋果同樣都在地球**影響**下運動！地球影響是運動的因！

同樣的因，必然造成同樣的果！

而月球與蘋果的運動軌跡相同之特質就是加速度！因此加速度是果！

因 果
地球影響 ↔ 蘋果加速度



$F \propto a$ 將一物體對另一物體的影響，稱為力 Force
經驗顯示：質量越大越難推動！需要越大的力。

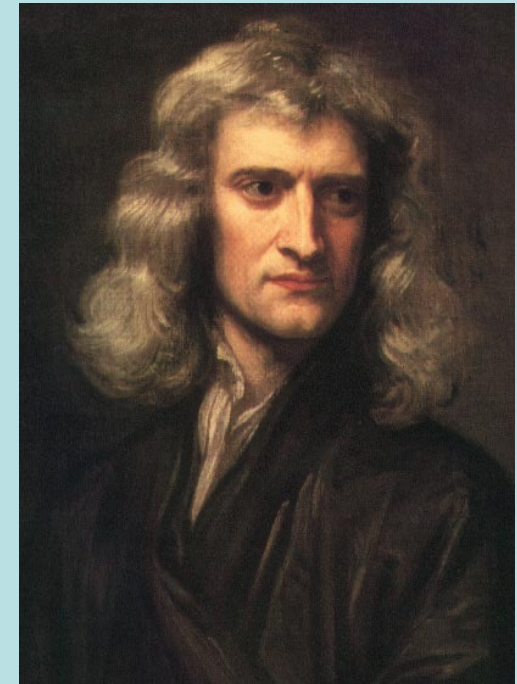
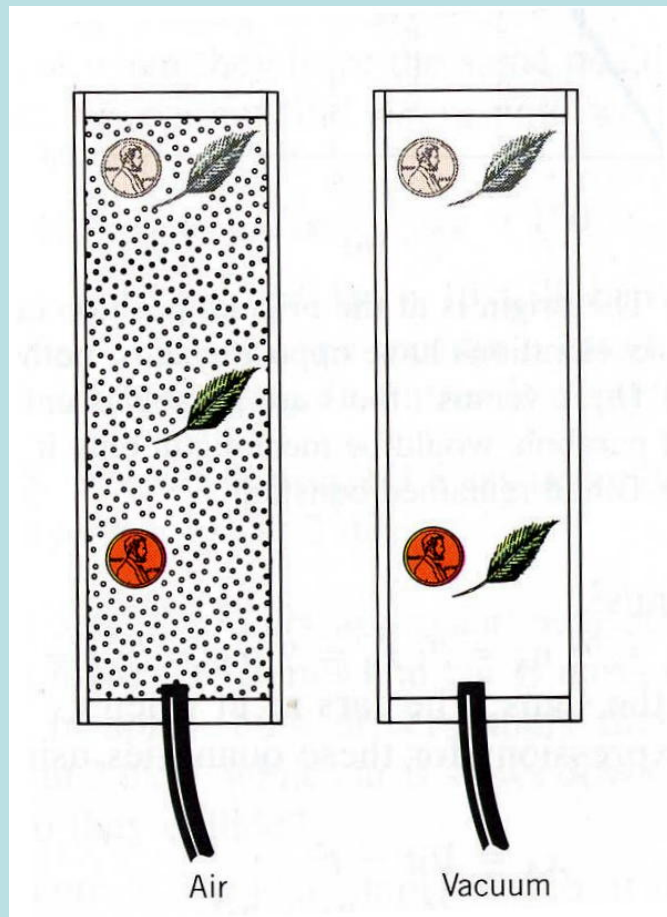
$$F = ma$$

加速度是指向地心，因此力與加速度都有方向性。

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

牛頓運動定律

物體的運動狀態的改變，完全由其所受的力來決定！



過去會說物體在密的、與稀疏的環境運動方式不同！

牛頓就會說，密與疏的環境的影響，一樣可以分析為黏滯力。

物體的運動狀態的改變，**完全**由其所受的力來決定！



如果我們知道力與位置等物理量的關係： $\vec{F}(\vec{r}, \vec{v}, \dots)$

例如萬有引力： $\vec{F} = -G \frac{mM}{r^2} \hat{r}$

將力的公式代入牛頓定律 $\vec{F} = m\vec{a}$ ，就得到位置 $\vec{r}$ 必須滿足的方程式：

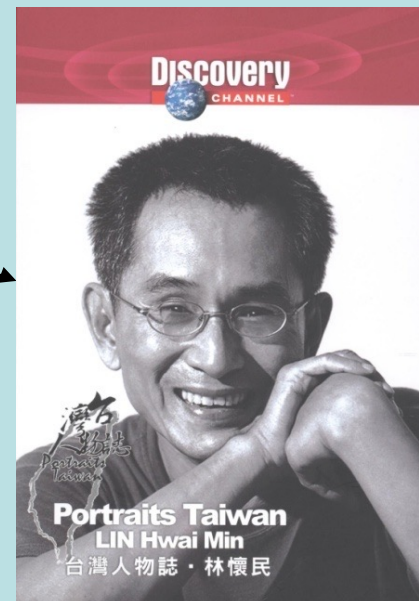
$$\vec{F}\left(\vec{r}, \frac{d\vec{r}}{dt}, \dots\right) = m\vec{a} = m \frac{d^2\vec{r}}{dt^2}$$

Equation of Motion 運動方程式



運動方程式是一個微分方程式，若能求解，就可預測物體運動的位置。

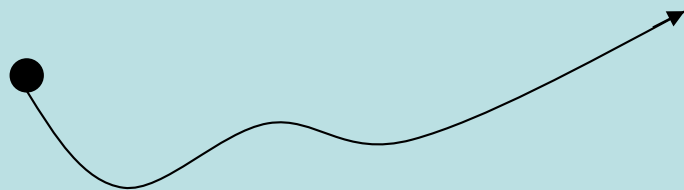
牛頓定律能預測物體的整個運動軌跡。



牛頓定律加上對力的描述，給定運動方程式Equation of Motion，
此系統未來任一時間的位置 $\vec{r}(t)$ ，必須滿足這個方程式！

$$\vec{F}\left(\vec{r}, \frac{d\vec{r}}{dt}, \dots\right) = m \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} \quad \text{若是一維：} \quad F(x) = m \frac{d^2x}{dt^2} \quad F(v) = m \frac{dv}{dt}$$

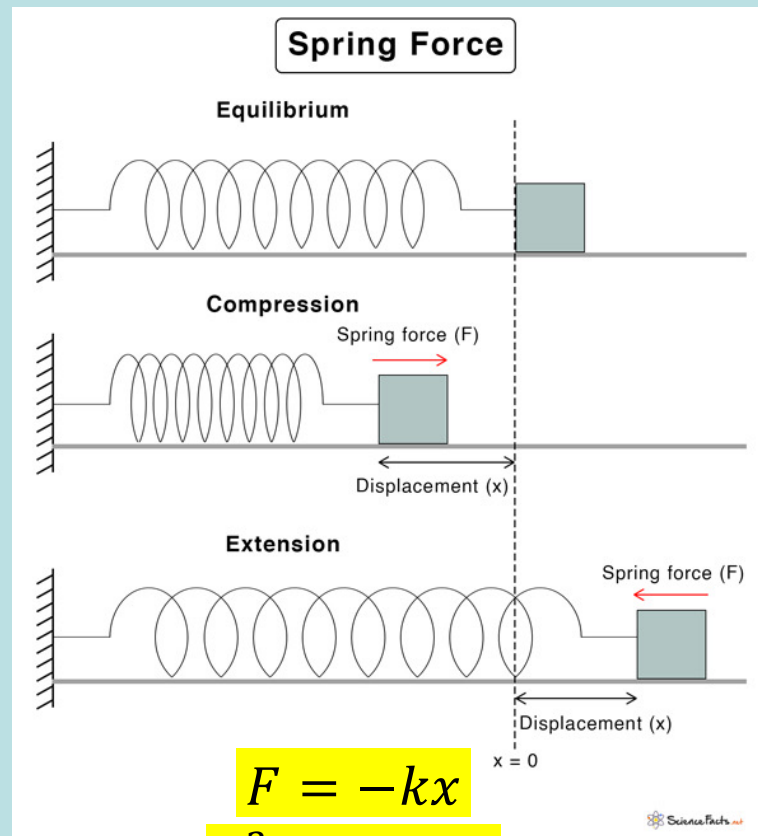
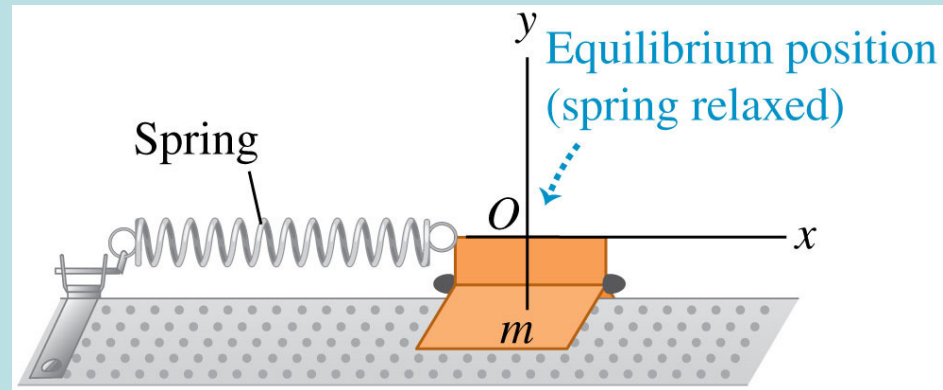
運動方程式Equation of Motion使我們可以預測 $\vec{r}(t)$ ，也就是此系統未來狀態！



這是力學最重要的原則！



彈力

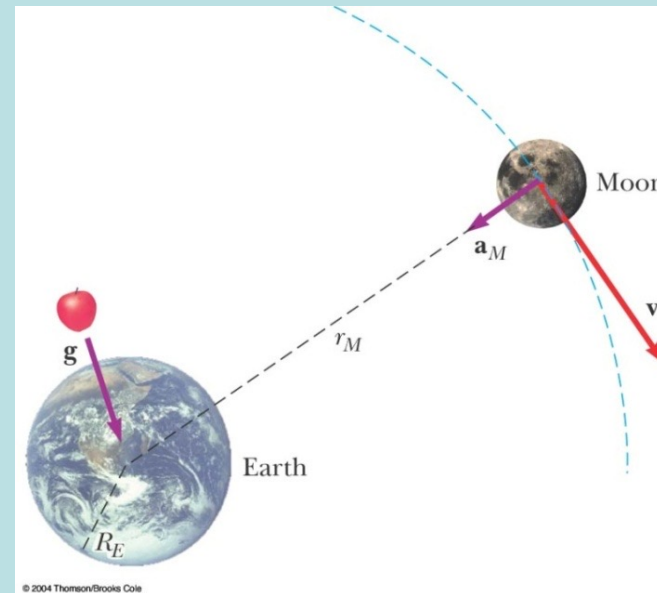
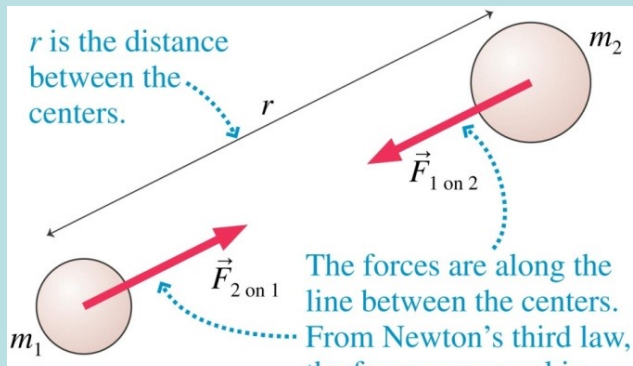


簡諧運動的運動方程式

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{k}{m}x$$

$$\vec{F} = -G \frac{mM}{r^2} \hat{r}$$

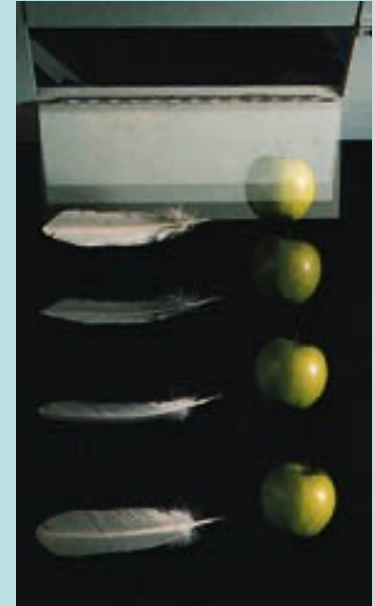
這是由許多的觀察，讓牛頓歸納（拼湊、猜測）出萬有引力的描述。



由加速度的方向可以推論出萬有引力是由受力者指向施力者的中心。

物體下落運動以同樣的加速度進行

a 與質量無關 $F = ma$



所以地球對地表物體的萬有引力與該物體的質量成正比！

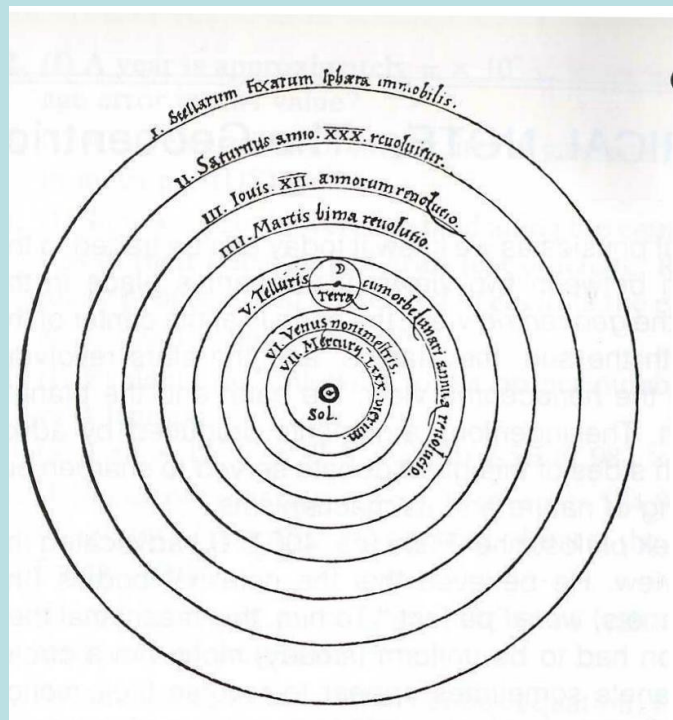
$$F \propto mM$$

引力與距離的關係如何？

我們必須對不同位置的引力作測量！

行星繞太陽也是由於太陽對行星的萬有引力：

九大行星系統等於對萬有引力在九個不同距離做了九次觀察與測量。



在九個不同位置，圓周軌道滿足：

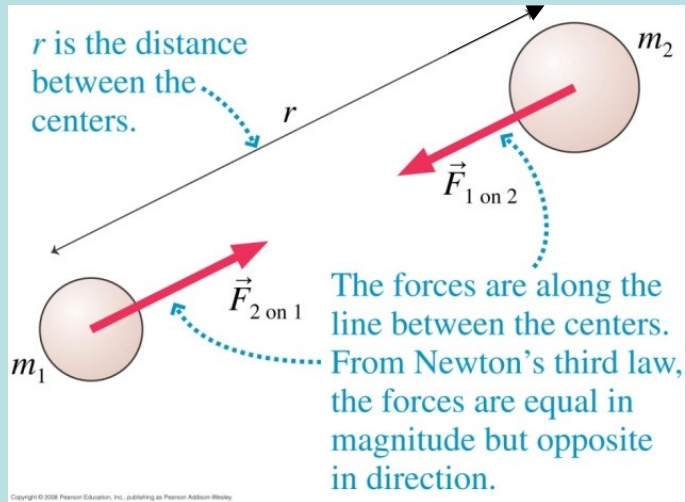
Kepler's Third Law $T^2 \propto r^3$

萬有引力提供了圓周運動的向心力。

$$F \propto \frac{v^2}{r} \propto \frac{r}{T^2} \propto \frac{1}{r^2}$$

引力必須與距離平方成反比，才能解釋數據。

萬有引力



$$\vec{F} = -G \frac{mM}{r^2} \hat{r}$$

代入運動定律

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

運動方程式

牛頓將此猜想運用於月球軌道的計算！

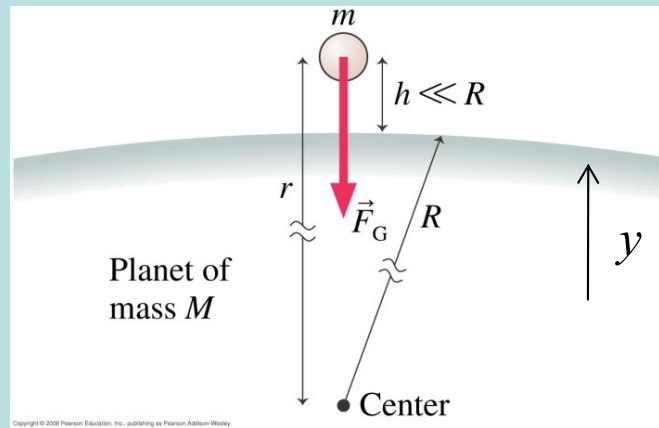
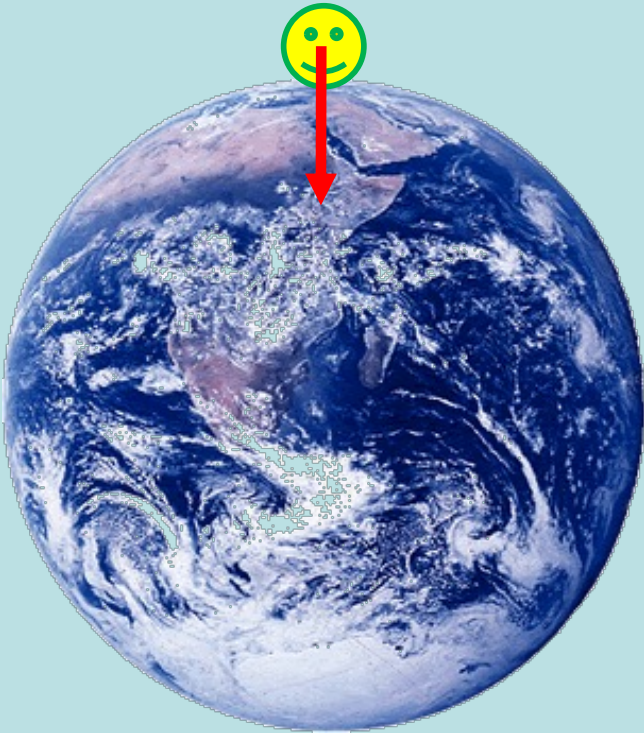


地表附近的運動：

地球對地表上物體的萬有引力，與地心距離平方成反比。

物體高度遠小於地球半徑，與地心距離是一個常數。

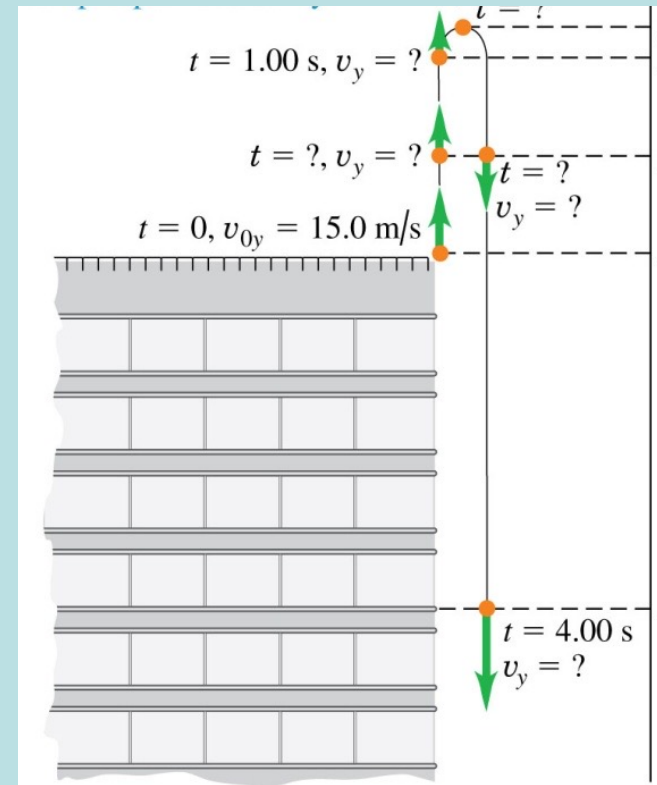
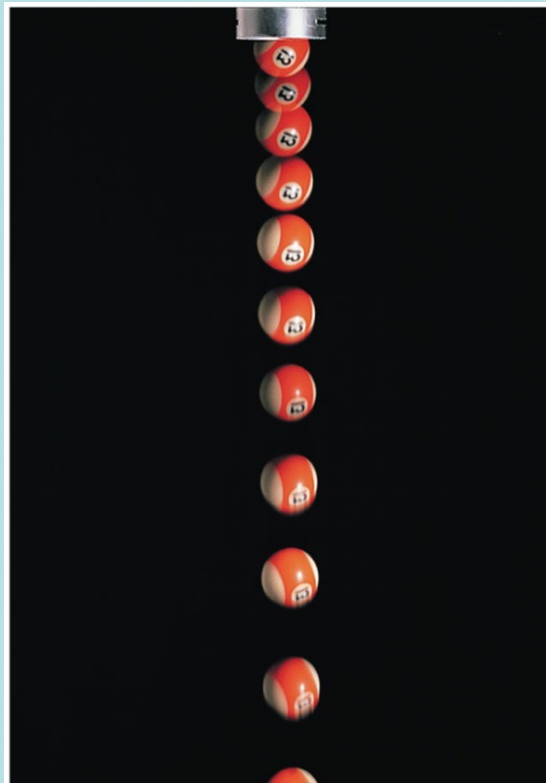
$$\vec{F} = -G \frac{mM}{R^2} \hat{r} = -mg\hat{y} \quad \text{選向上方向為 } y \text{ 方向。}$$



地表上重力大致上與位置無關。

地表附近，物體的加速度是一個常數。

地表附近的自由落體或拋體



$$\vec{F} = -mg\hat{j}$$

$$m\vec{a} = -mg\hat{j}$$

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = -mg$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = -g$$

地表附近自由落體的運動方程式！這是微分方程式！

解微分方程式

$$\frac{d^2y}{dt^2} = -g$$

$$\frac{dv}{dt} = -g$$

$$v = -gt + c_1$$

$$\frac{dy}{dt} = -gt + c_1$$

$$y = -\frac{1}{2}gt^2 + c_1t + c_0$$

$$v = \int_{t_0}^t dt'(-g) = -gt + gt_0 = -gt + c_1$$

$$\frac{dy}{dt} = v$$
 引入速度，使微分少一次。

速度的微分是一個多項式，
因此速度也是一個多項式！
多項式的微分幂次會降一次，
因此速度是時間的線性函數。

這裡有一個常數，如果沒有這個常數，
起始速度只能為零。

位置的微分是一個多項式，
因此位置也是一個多項式！

多項式的微分幂次會降一次，
因此位置是時間的二次函數。

如果沒有這個常數，
起始位置只能為零。

這裡有兩個未知的常數，顯示單靠微分方程式無法決定唯一解！

$$y = -\frac{1}{2}gt^2 + c_1t + c_0$$

$$v = -gt + c_1$$

微分方程式無法決定唯一解

但我們還未輸入起始的位置與速度，稱為起始條件！

$$y(0) = y_0$$

$$v(0) = v_0$$

無疑地，起始條件會影響運動的軌跡！

解的表示式中的兩個未定常數 c_0, c_1 ，正好由兩個起始條件來決定：

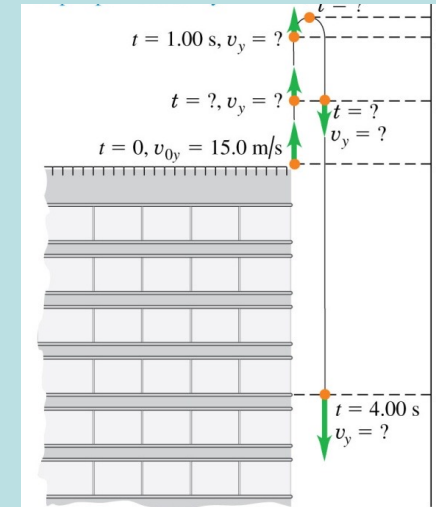
$$y(0) = c_0 = y_0$$

$$v(0) = c_1 = v_0$$

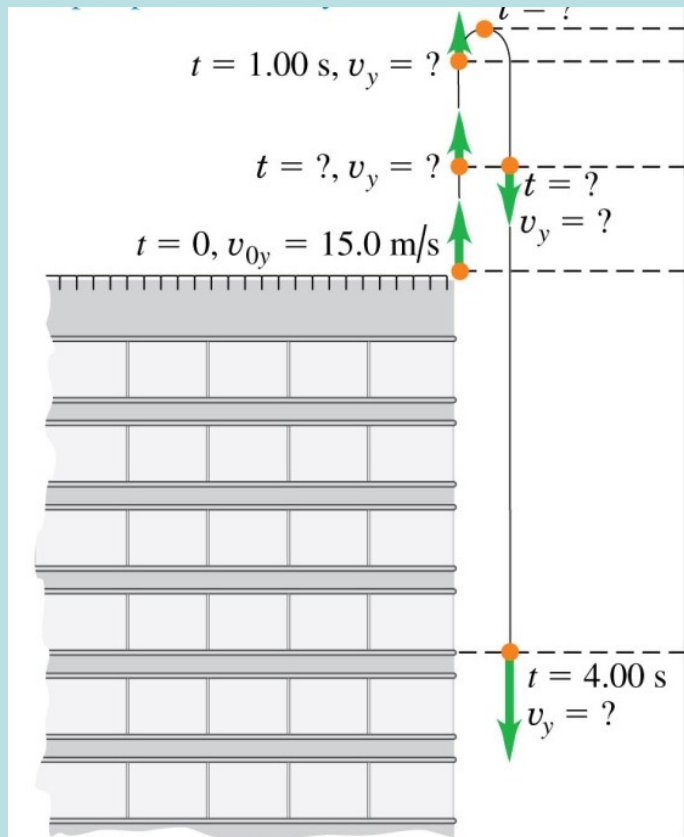
運動方程式加上兩個起始條件就決定唯一的一個解！

$$y = -\frac{1}{2}gt^2 + v_0t + y_0$$

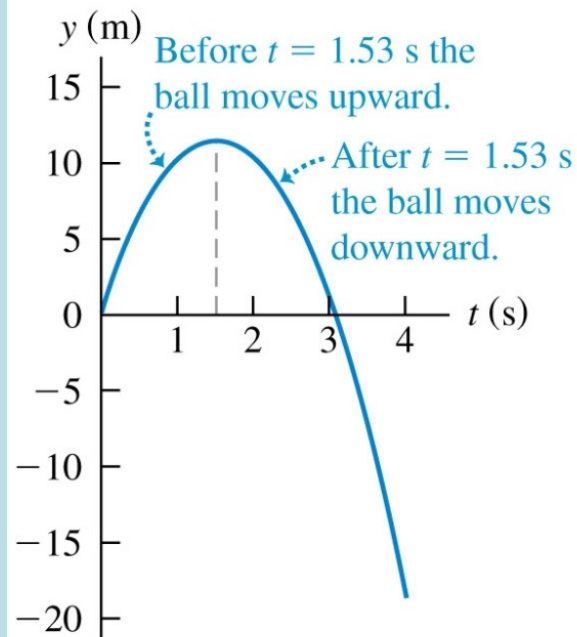
要求出物體運動路徑，必須加上初位置初速度兩個起始條件



垂直拋體

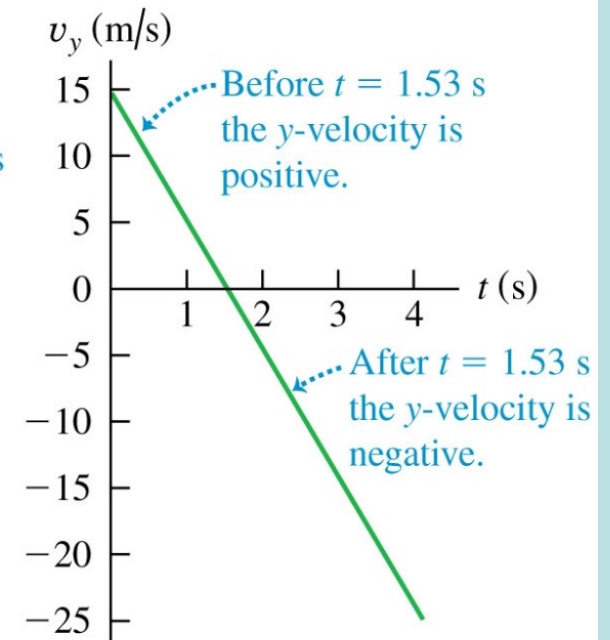


(a) y - t graph (curvature is downward because $a_y = -g$ is negative)



© 2012 Pearson Education, Inc.

(b) v_y - t graph (straight line with negative slope because $a_y = -g$ is constant and negative)



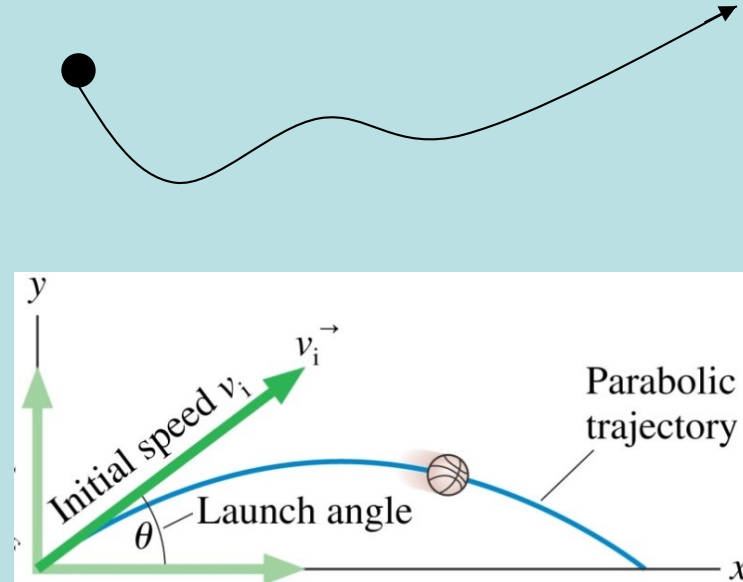
$$y(t) = -\frac{1}{2}gt^2 + v_0t + y_0$$

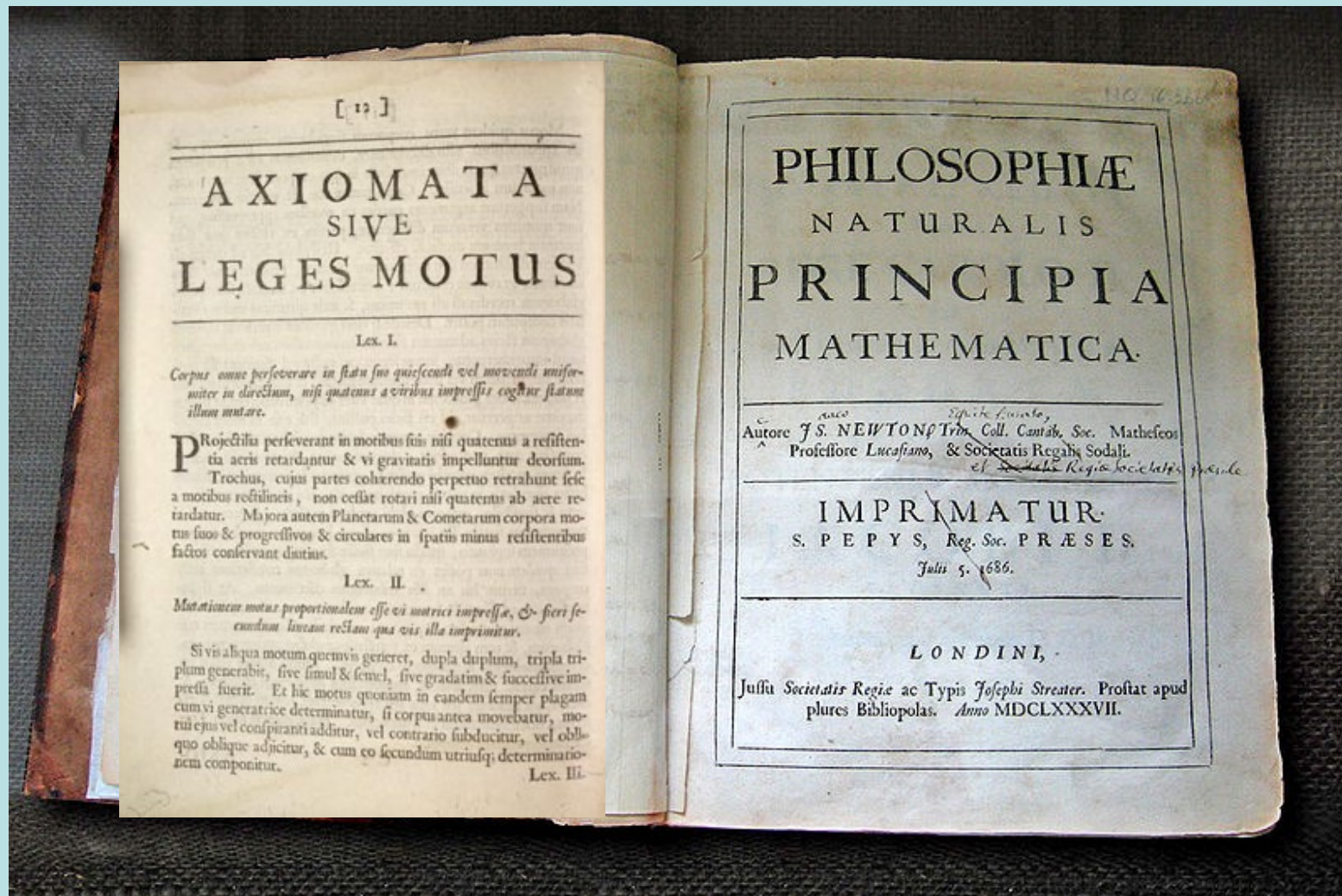
牛頓定律加上力的描述給定運動方程式，再加上起使條件
(起始位置與速度)，便能決定此系統未來任一時間的狀態！

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

起始條件 $\vec{r}(0), \vec{v}(0)$

$\vec{r}(t)$ 函數可唯一解出



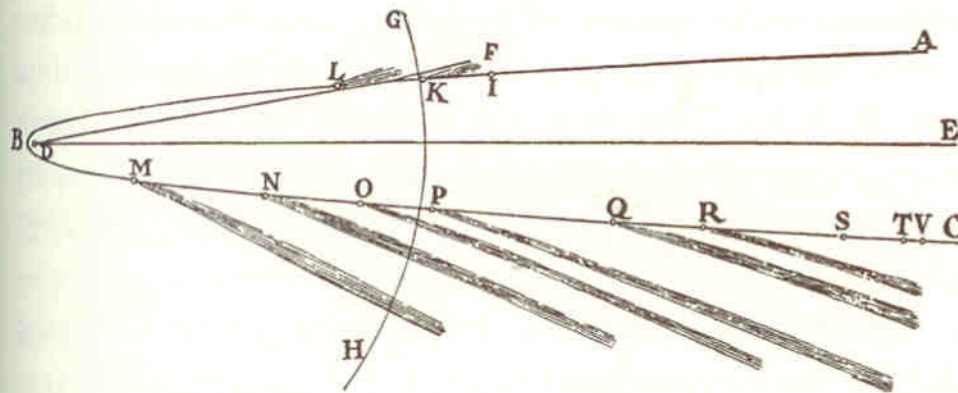


Newton's own copy of his *Principia*, with hand-written corrections

“ a Mathematical demonstration of Copernican hypothesis”

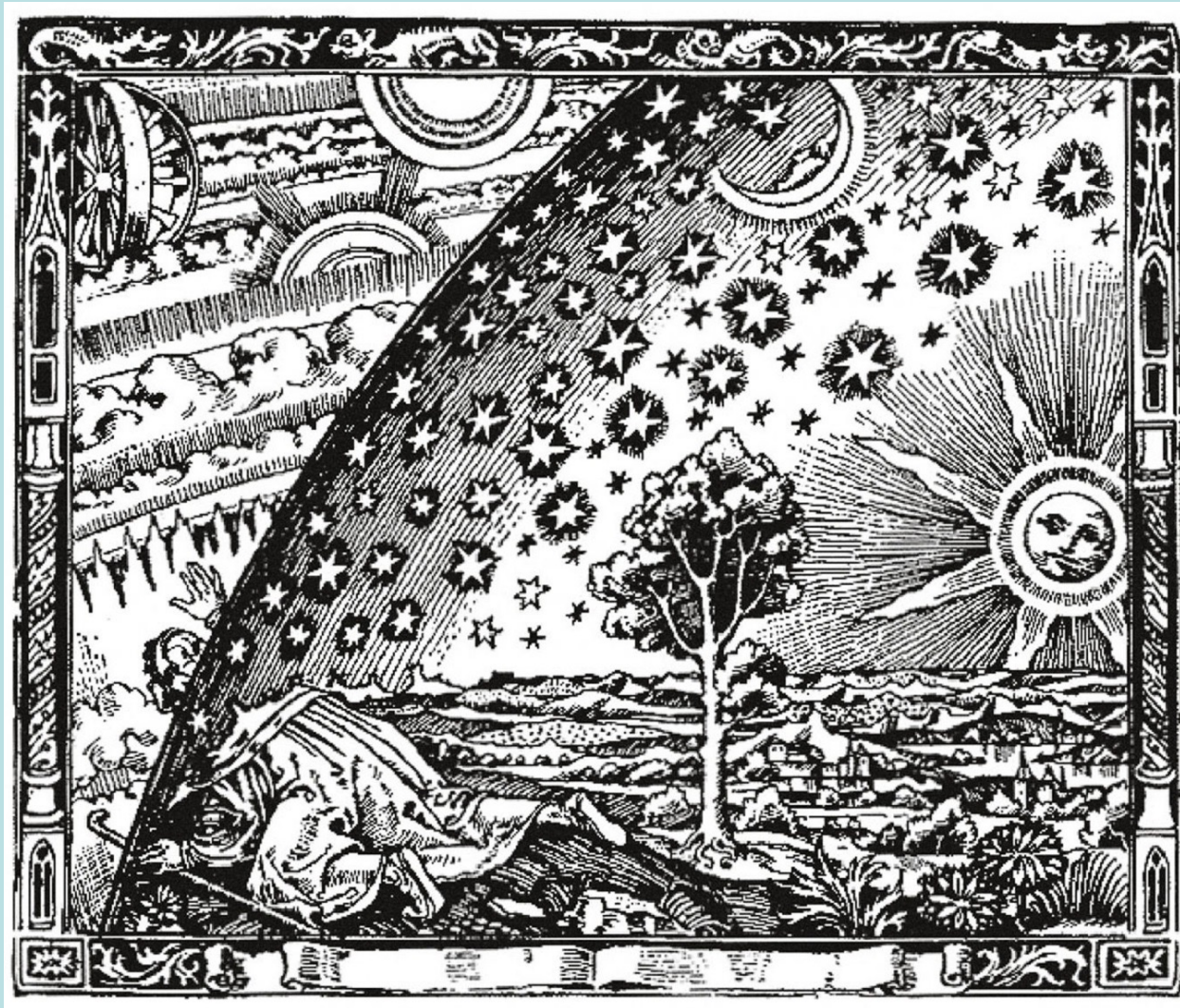
Makes out all the phenomena of the celestial motions by the only supposition of a gravitation towards he center of sun, decreasing as the squares of the distances.

EVERY BODY PERSEVERES



The comet of 1680—"as observed by Flamsteed" and "corrected by Dr. Halley." Newton also collated sightings by Ponthio in Rome, Gallet in Avignon, Ango at La Fleche, "a young man" at Cambridge, and Mr. Arthur Storer near Hunting Creek, in Maryland, in the confines of Virginia. "Thinking it would not be improper, I have given . . . a true representation of the orbit which this comet described, and of the tail which it emitted in several places." He concludes that the tails of comets always rise away from the sun and "must be derived from some reflecting matter"—smoke, or vapor.

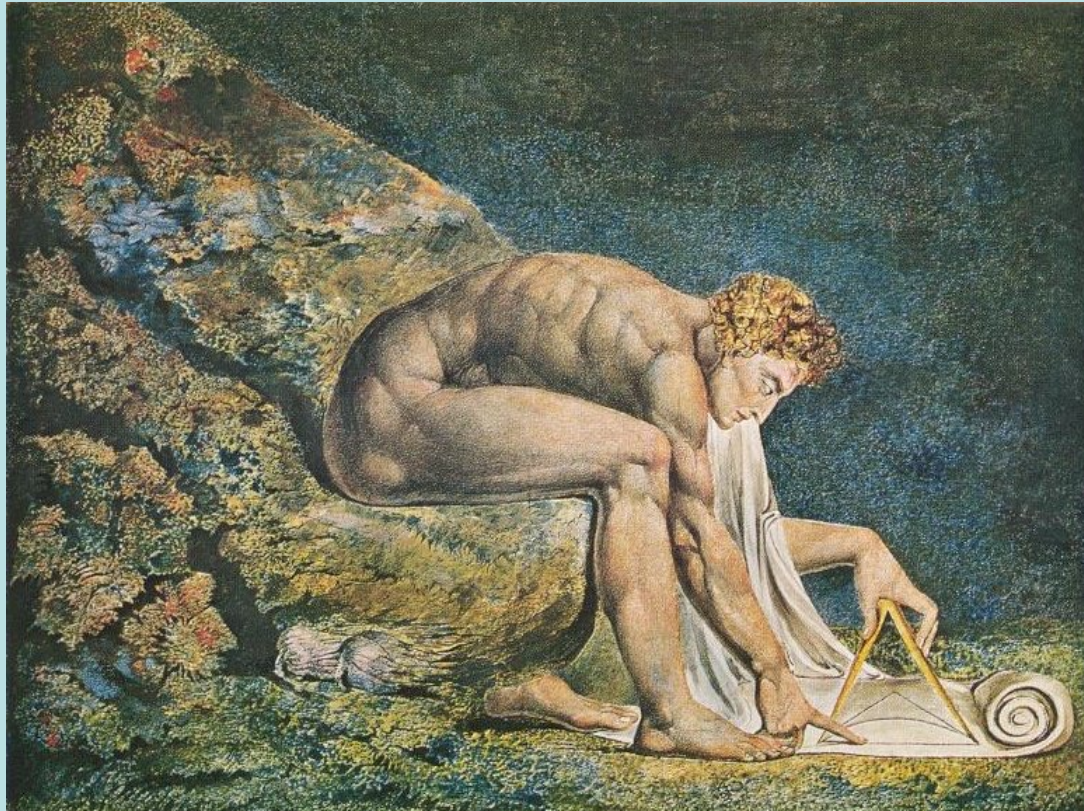




人類探頭進入自然現象的內在，了解帶動自然運轉背後零件與規則！

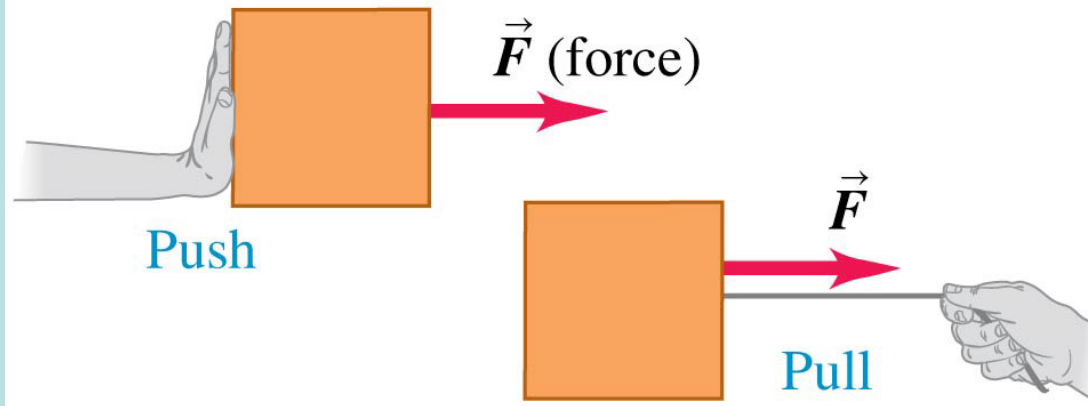
Engraving around 1530 (from Hemleben: "Galilei")

牛頓成為人類對自然的控制能力的象徵！

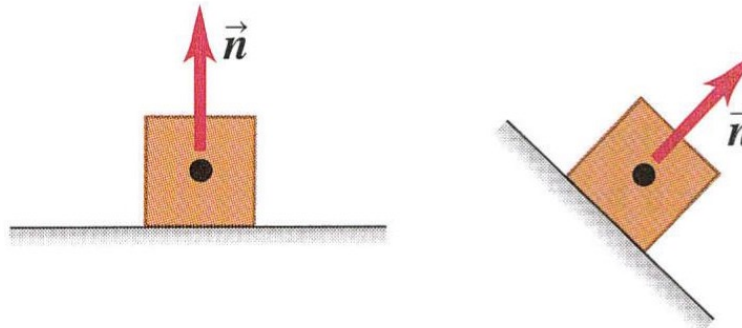


Newton, by William Blake; here, Newton is depicted critically as a "divine geometer"

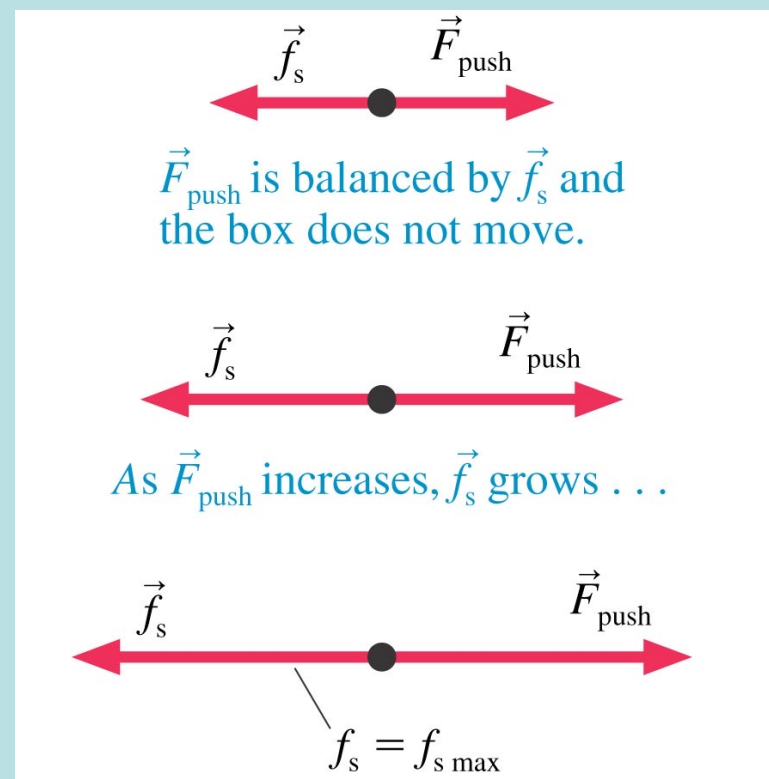
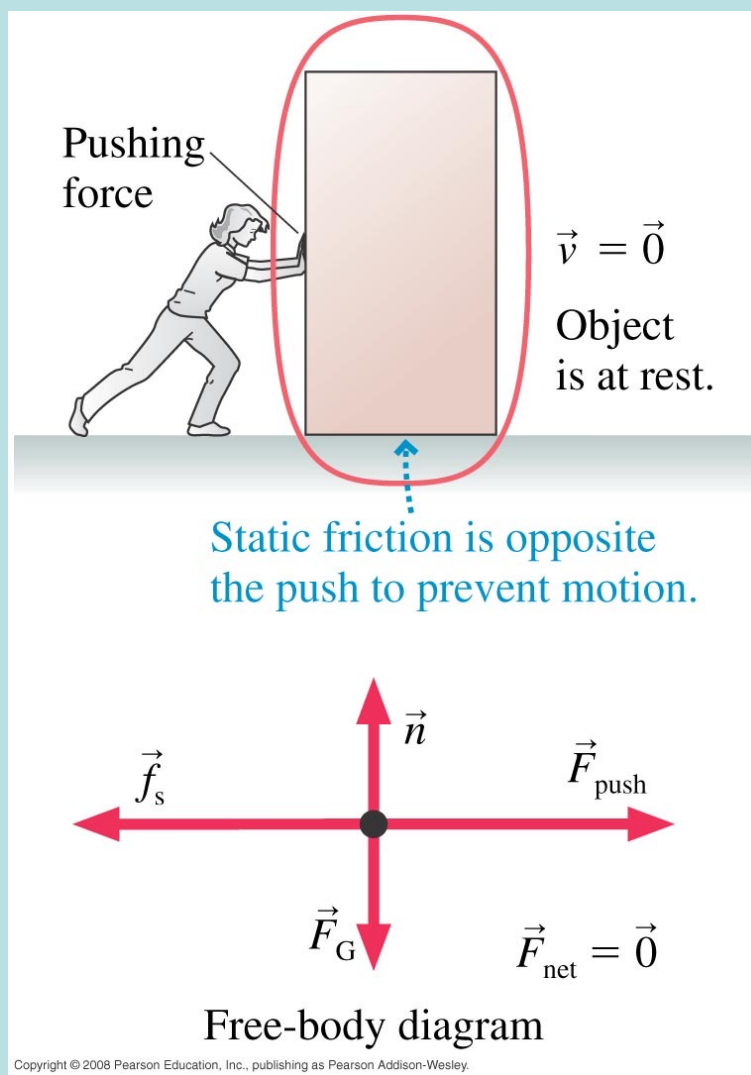
- A force is a push or a pull.
- A force is an interaction between two objects or between an object and its environment.
- A force is a vector quantity, with magnitude and direction.



(a) **Normal force $\vec{n}$:** When an object rests or pushes on a surface, the surface exerts a push on it that is directed perpendicular to the surface.

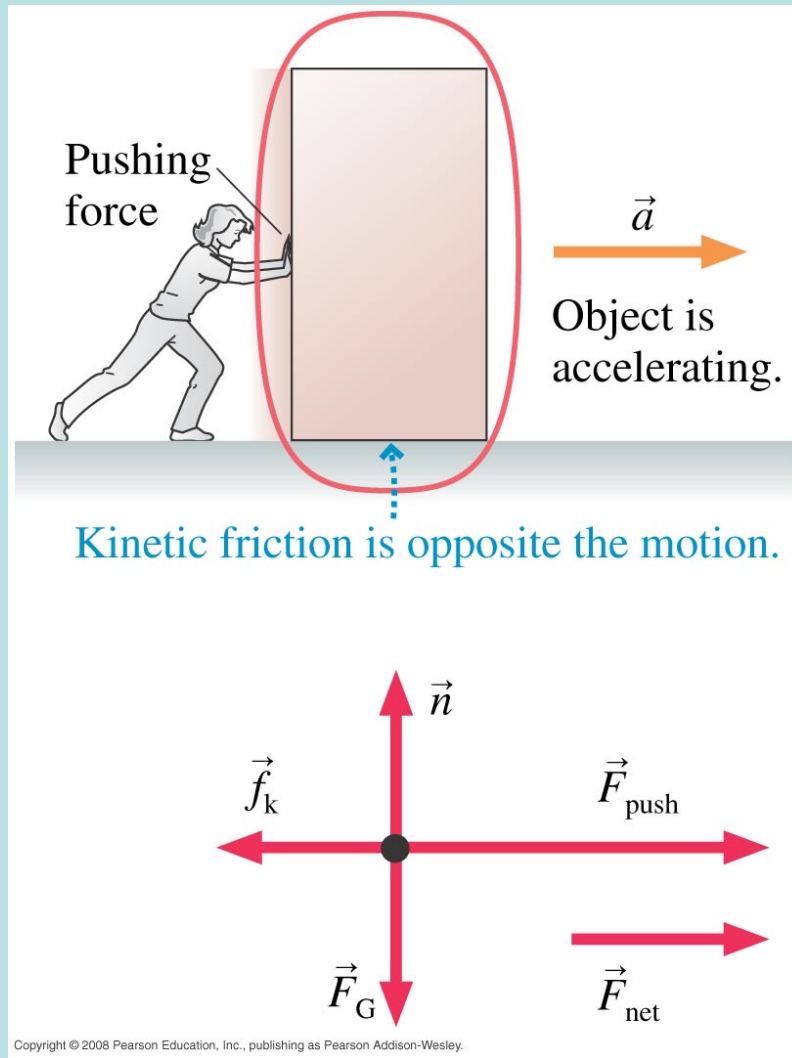


另一個日常生活中的力的描述：摩擦力 Friction Force

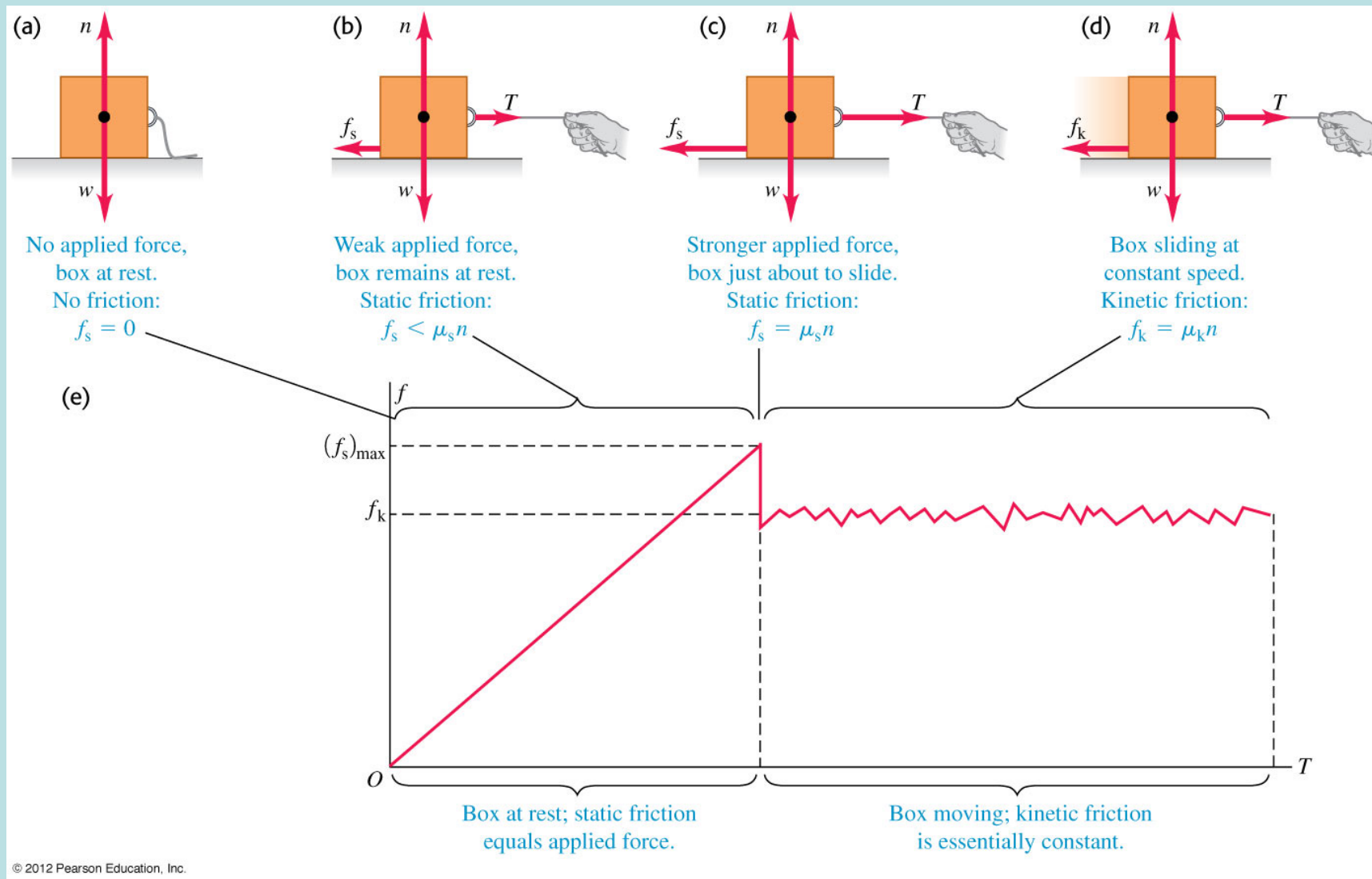


物體不動時的摩擦力稱靜摩擦力，力的大小隨情況而定。

動摩擦



物體開始移動後的摩擦力稱動摩擦力。

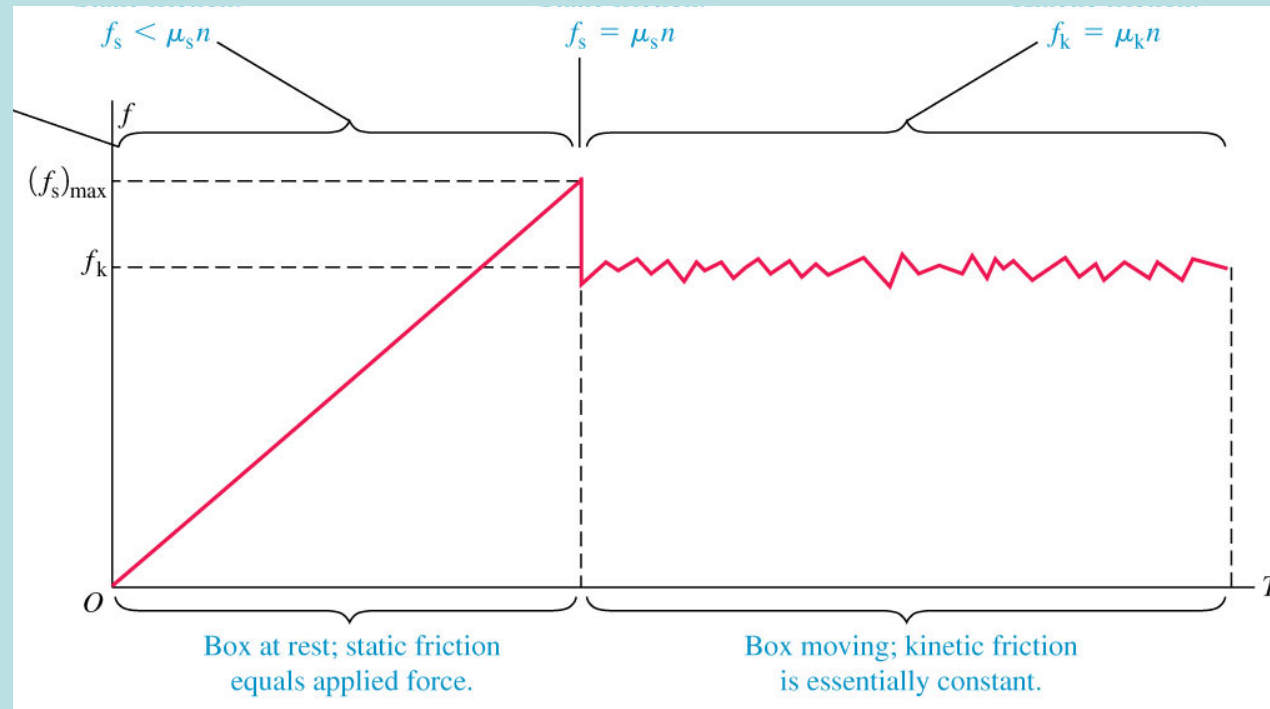


動摩擦力近似是一個常數！與運動快慢無關。

實驗發現，動摩擦力與垂直的正向力 n 成正比：

$$f_k = n\mu_k$$

μ_k :動摩擦係數



靜摩擦力大小由物體維持靜止這個條件來決定，
但最大值經測量發現一般都與垂直的正向力成正比。

$$f_s < n\mu_s$$

μ_s :最大靜摩擦係數

同時，動摩擦力一般來說是一定值，與垂直的正向力成正比：

$$f_k = n\mu_k$$

μ_k :動摩擦係數

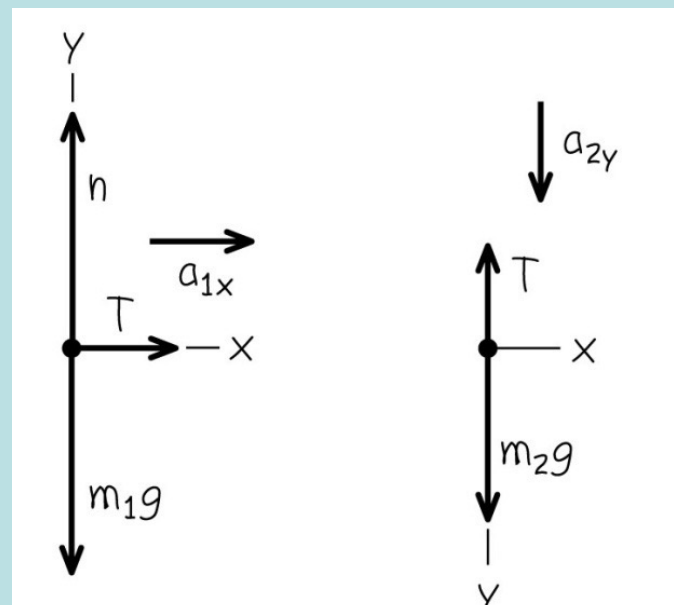
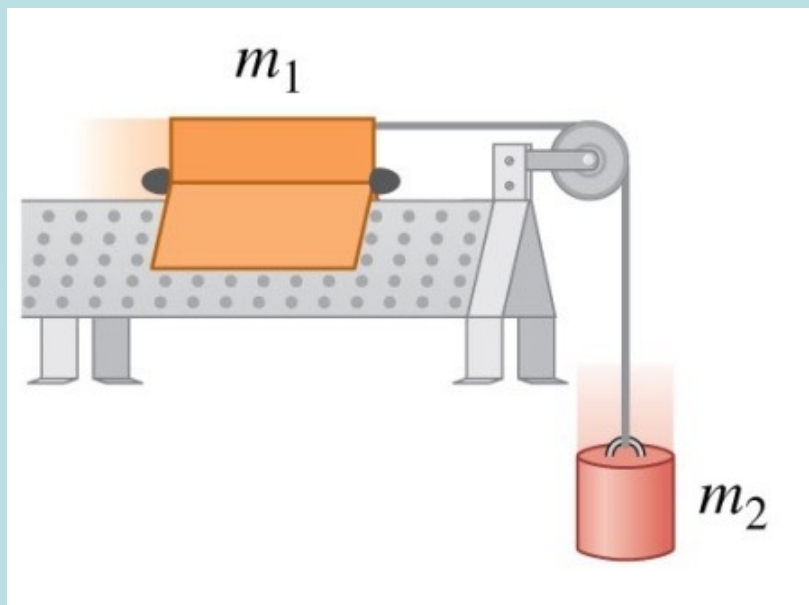
TABLE 6.1 Coefficients of friction

Materials	Static μ_s	Kinetic μ_k
Rubber on concrete	1.00	0.80
Steel on steel (dry)	0.80	0.60
Steel on steel (lubricated)	0.10	0.05
Wood on wood	0.50	0.20
Wood on snow	0.12	0.06
Ice on ice	0.10	0.03

先從與時間無關的常數力開始討論：

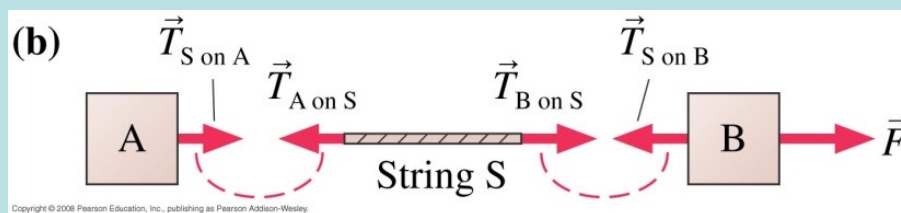
每一個質點都滿足一個牛頓第二定律。 $\vec{F} = m\vec{a}$

例 1: 因此解運動問題，首要分析每一個質點的受力！

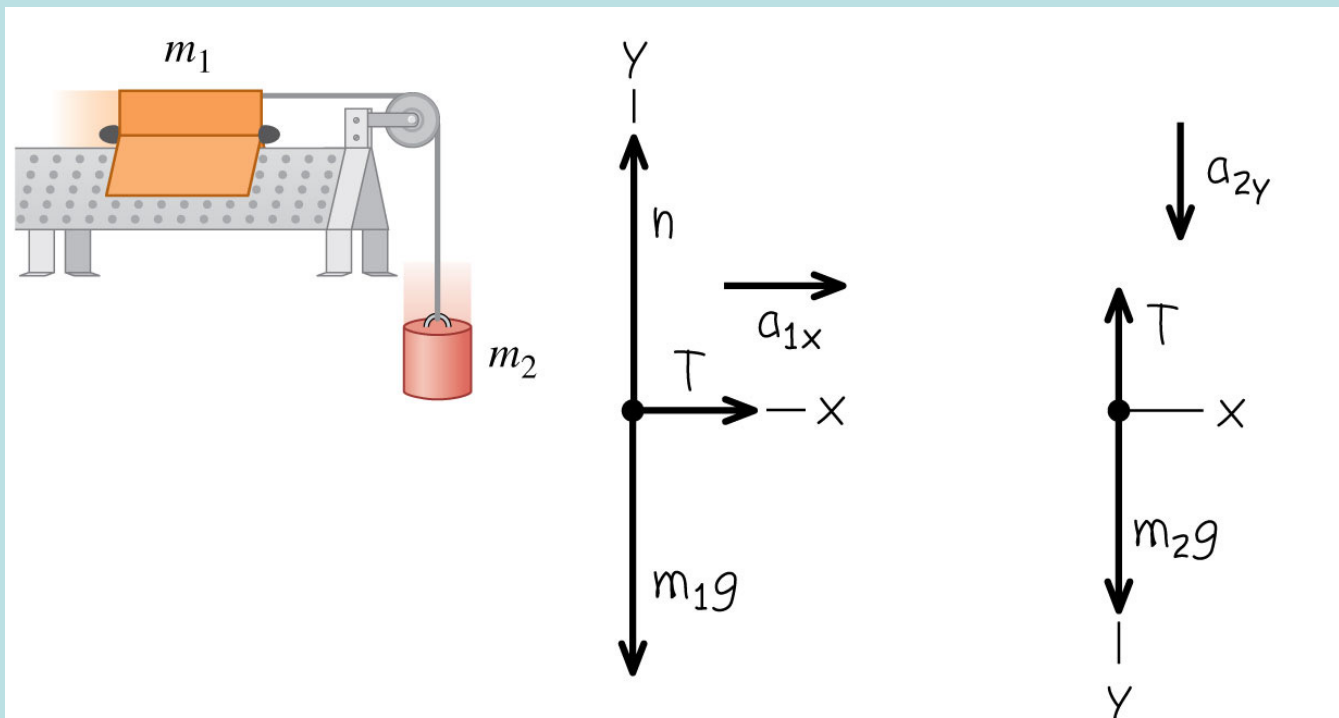


繩的張力Tension T 一定沿著繩的方向。

如果忽略繩的質量，因為繩的 $ma = 0$ ，因此繩兩端張力必須相等。



Copyright © 2008 Pearson Education, Inc., publishing as Pearson Addison-Wesley.



繩兩端的張力 T 相等。

這還有一個條件：兩個物體的加速度 a 相等。

每一個質點都滿足一個牛頓第二定律。

$$T = m_1 a$$

$$m_2 g - T = m_2 a$$

未知量 a, T 就可以解出。

$$a = \frac{m_2 g}{m_1 + m_2}$$

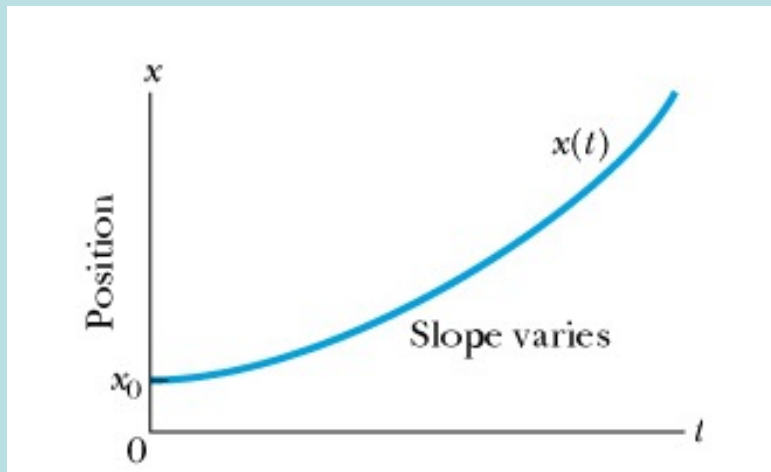
$$T = \frac{m_1 m_2 g}{m_1 + m_2}$$

以上這個例子是等加速度運動，加速度不變：

$$a = \frac{m_2 g}{m_1 + m_2}$$

找到加速度後，代入等加速度運動公式，物體運動的軌跡就可以全部得到。

任何時間 t ，物體運動的位置 $x(t)$ 與速度 $v(t)$ 都可以知道了。



例如，對方塊一：

$$x(t) = \frac{1}{2} \frac{m_2 g}{m_1 + m_2} t^2 + v_0 t + x_0$$

$$v(t) = \frac{dx}{dt} = \frac{m_2 g}{m_1 + m_2} t + v_0$$

$$a(t) = \frac{dv}{dt} = \frac{m_2 g}{m_1 + m_2}$$

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

力與加速度都是向量！

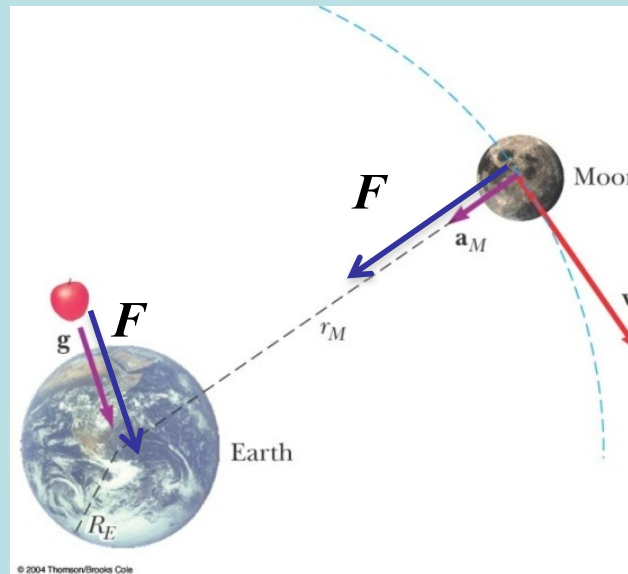
以分量來表示，向量的牛頓運動定律其實是三個方程式：

每一個方向都有一個牛頓運動定律！

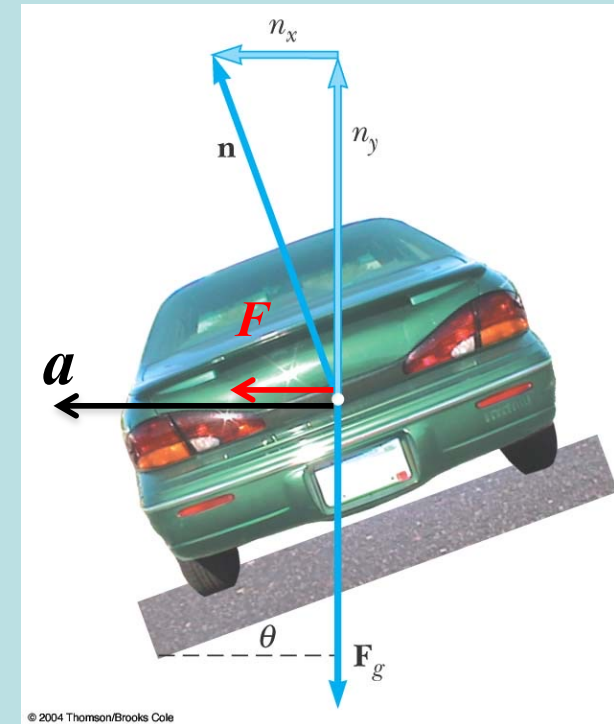
$$F_x = m \frac{d^2x}{dt^2}$$

$$F_y = m \frac{d^2y}{dt^2}$$

$$F_z = m \frac{d^2z}{dt^2}$$



例 2:

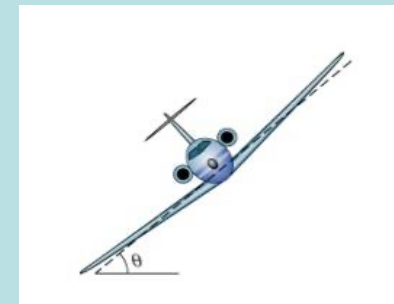


車輛受重力及地面施力：

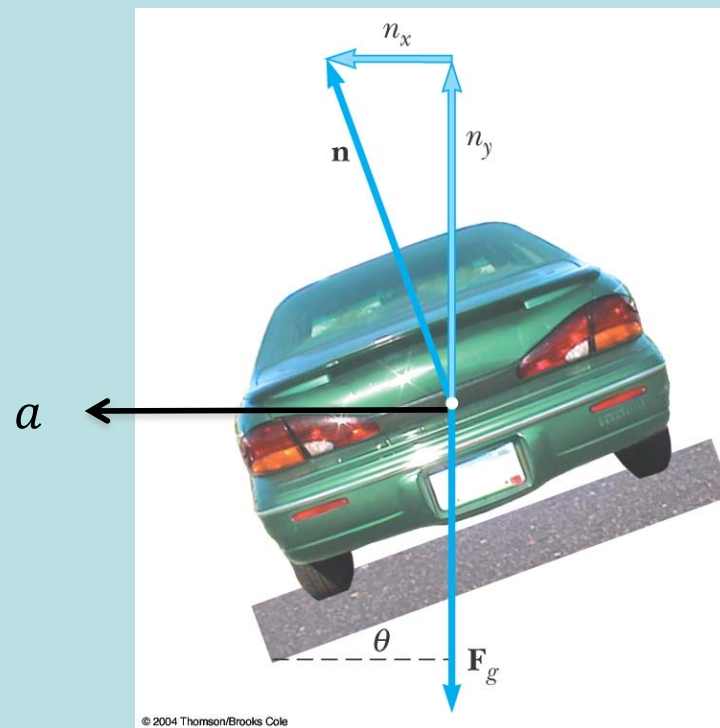
地面施力一定垂直於地面：正向力 (Normal Force) $\vec{n}$ 。

車輛的加速度是指向圓形軌道的圓心，因此是水平方向。

所以可以確定：合力是指向水平方向。



用分量來討論向量問題是最容易的！



每一個方向都有一個牛頓運動定律！

$$F_x = ma_x$$

$$n \sin \theta = m \frac{v^2}{r}$$

$$n = \frac{mg}{\cos \theta}$$

$$F_y = ma_y$$

$$n \cos \theta - mg = 0$$

$$v = \sqrt{rg \tan \theta}$$

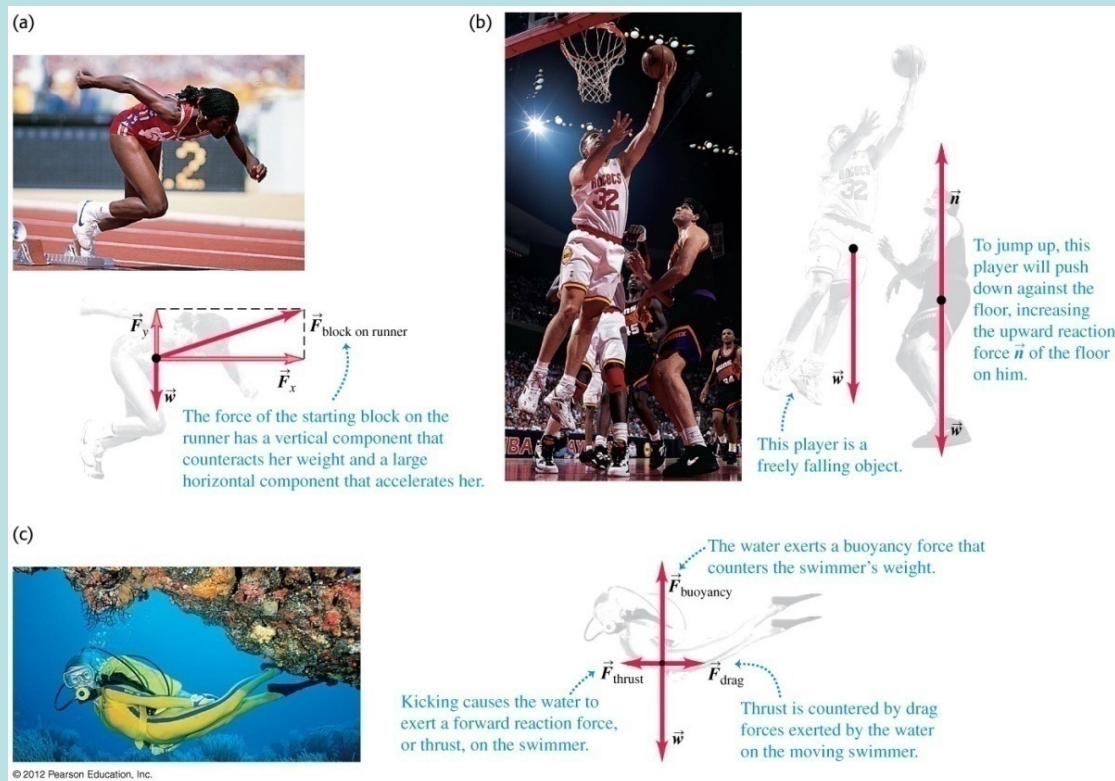
解題訣竅：

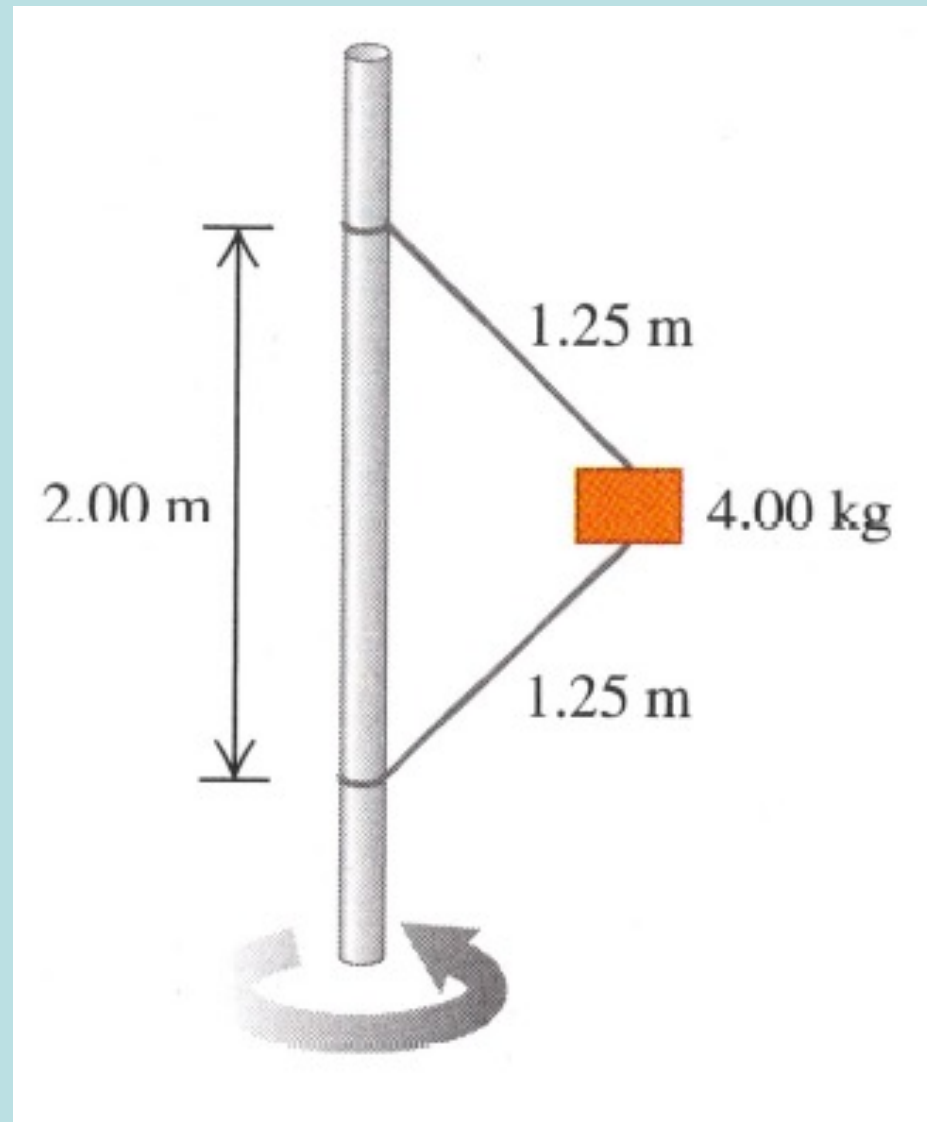
將未知的力與加速度以符號代表。

要求每一個有質量的物體，每一個方向都滿足一個牛頓第二定律！

無質量或質量可以忽略者，要求其所受合力必須為零。

聯立方程式，解出未知量。

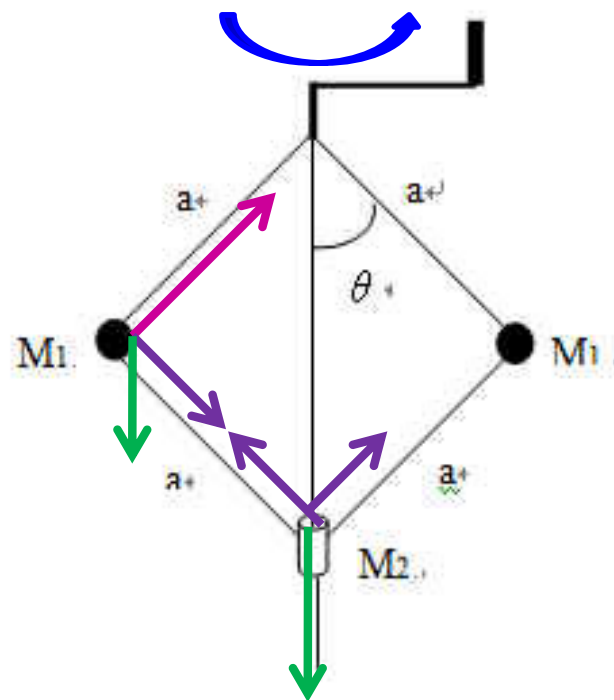




計算旋轉速度！

考慮一轉動裝置(如圖)，裝置啟動時對曲柄施力轉動軸承，再透過支架帶動整個裝置繞 Z 軸旋轉。在裝置內，質點 M_2 只能沿轉動軸上下運動，而質點 M_1 及長度 a 固定的支架，可在垂直平面上移動。假設 $M_2=2M_1$ ，而支架、曲柄及軸承很輕，質量都可以忽略，同時亦忽略所有軸承的摩擦力。

當旋轉愈來愈快，支架張開的角度 θ 會愈來愈大，當 $\theta=45^\circ$ 時，我們讓轉動速度維持不再增加，使 θ 維持在 45° ，請問此時裝置中 M_1 的旋轉速度為何。



考慮兩個質點的受力，請注意因支架可在垂直平面移動，支架對質點的施力只能沿支架的方向。 M_2 沒有加速度，故其總受力必需為零，在垂直方向總力為零：

$$2 \frac{1}{\sqrt{2}} F_1 - M_2 g = 0$$

對質點 M_1 的受力作分析，在垂直方向 M_1 沒有加速度：

$$M_1 g + \frac{1}{\sqrt{2}} F_1 - \frac{1}{\sqrt{2}} F_2 = 0$$

作用於質點 M_1 水平方向總力必須等於 M_1 的向心加速度乘上 M_1 ，

$$\frac{1}{\sqrt{2}} F_1 + \frac{1}{\sqrt{2}} F_2 = M_1 \frac{a}{\sqrt{2}} \omega^2$$

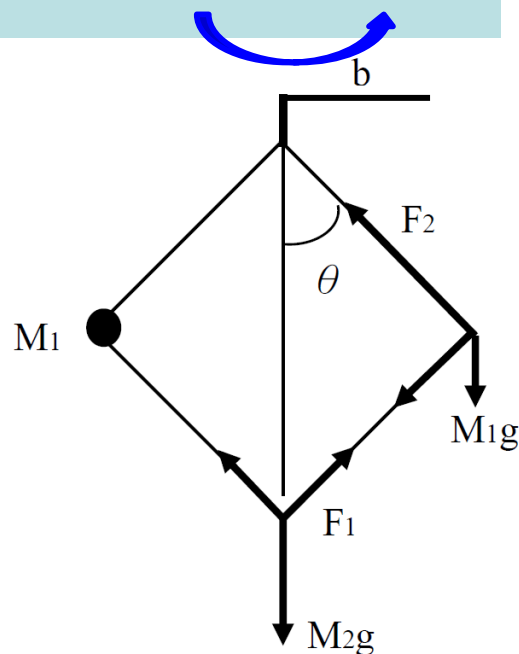
三個未知數正好有三個方程式，因此可以全部解出：

$$F_1 = \sqrt{2} M_1 g$$

$$F_2 = 2\sqrt{2} M_1 g$$

$$M_1 \frac{a}{\sqrt{2}} \omega^2 = 3M_1 g$$

$$\omega^2 = 3\sqrt{2} \frac{g}{a}$$



支架張力與重力的合力等於質量乘向心加速度！
合力提供了質量作等速圓周運動所需的向心力！

3. 有A,B兩個方塊，方塊A質量為 M_A （尚未知），方塊B質量為 $M_B = 1.0\text{kg}$ 。O點固定於垂直的 z 軸上，而方塊A以一支架連接於O點，方塊B又以一同樣支架連接於方塊A（如圖所示）。支架與方塊及O點的連接無摩擦，所以支架可以自由改變方向，但兩支架的長度 l （尚未知）相等且保持固定，質量可以忽略。使A,B兩方塊及支架以相同角速度繞 z 軸旋轉，週期為 0.5π 秒，即角速度 $\omega = 4.0\text{ s}^{-1}$ 。旋轉時O,A,B三點及支架一直保持在通過 z 軸的鉛直平面上。此時觀察到OA間支架與垂直線的夾角為 $\theta = 30^\circ$ ，AB間支架與垂直線的夾角為 $\phi = 45^\circ$ 。向心加速度公式為： $a = r\omega^2$ 。

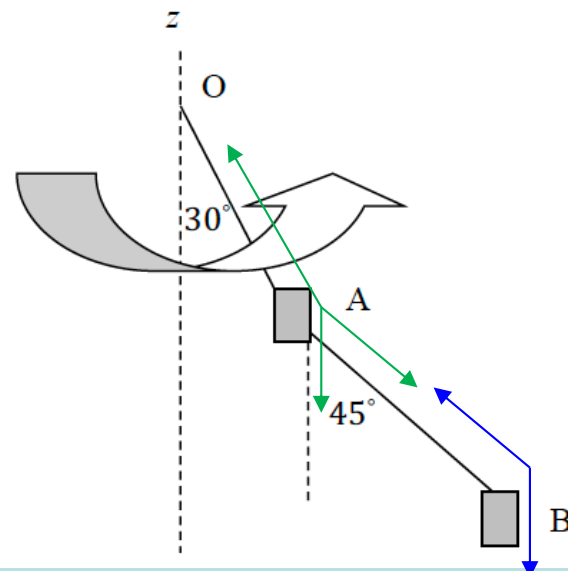
A. 分析方塊B的受力，求支架AB對方塊B的張力 T 是多少N。(8)

B. 由方塊B向心加速度，計算支架的長度 l 是多少m。

提示：別忘了支架OA對旋轉半徑的貢獻。(7)

C. 設OA支架對A的施力為 S ，分析方塊A的受力，求 M_A 是多少kg。(10)

$\sqrt{3} \sim 1.7, \sqrt{2} \sim 1.4$ 。



解答：

A. 拉力 T 在垂直方向的投影必須正好抵消B所受的重力： $T \frac{\sqrt{2}}{2} = M_B g$ ， $T = \sqrt{2} M_B g =$

13.9 N。

B. 重力無水平分量，因此拉力 T 在水平方向的分量，必須等於向心加速度乘上質量，

$$T \frac{\sqrt{2}}{2} = M_B \left(\frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{1}{2} \right) l \omega^2 = 19.36l$$
$$l = 0.5 \text{ m}$$

A. 設OA支架對A的施力為 S ，A垂直方向的總受力為零：

$$S \frac{\sqrt{3}}{2} = M_A g + T \frac{\sqrt{2}}{2} = M_A g + M_B g$$

水平方向的總受力必須正好等於向心加速度乘上質量：

$$S \frac{1}{2} - T \frac{\sqrt{2}}{2} = M_A \frac{l}{2} \omega^2$$

$$S \frac{1}{2} = M_A \frac{l}{2} \omega^2 + M_B g$$

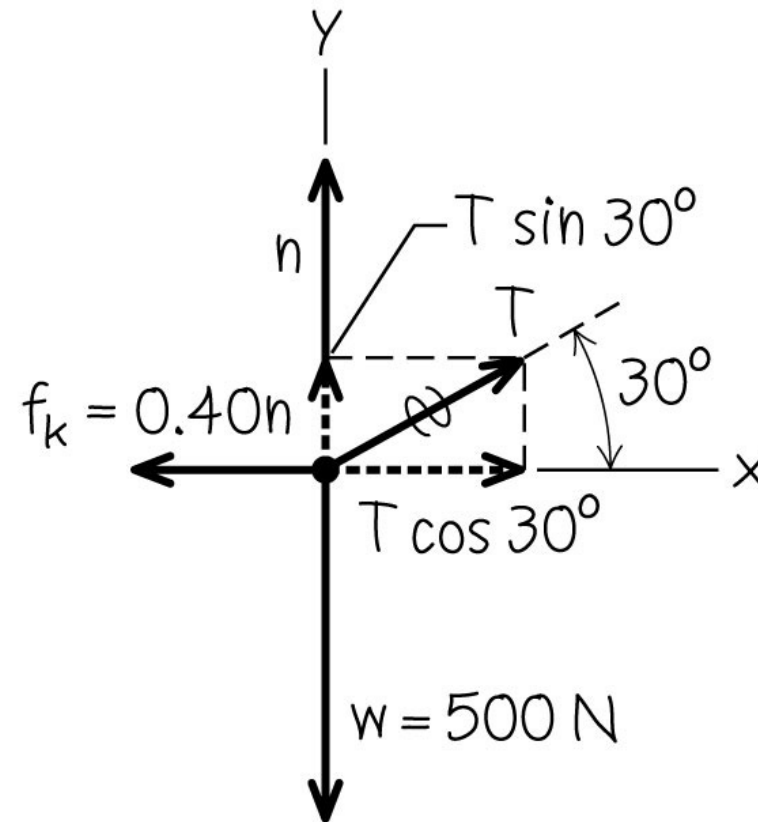
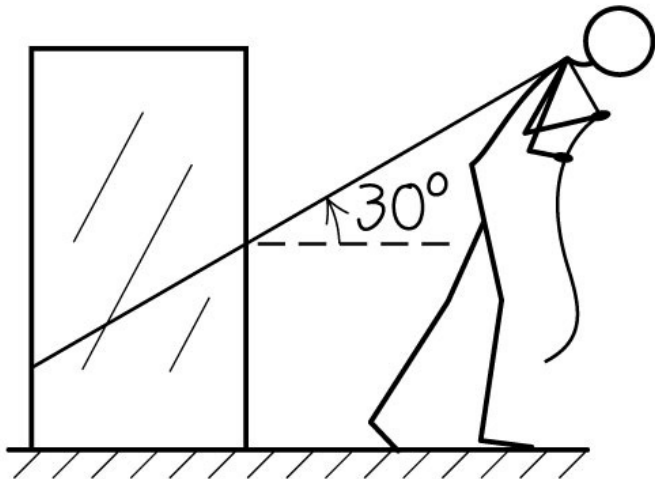
由此二式削去 S 可得：

$$M_A g + M_B g = M_A \frac{l\sqrt{3}}{2} \omega^2 + \sqrt{3} M_B g$$

$$9.8 M_A + 9.8 = 6.9 M_A + 17.0$$

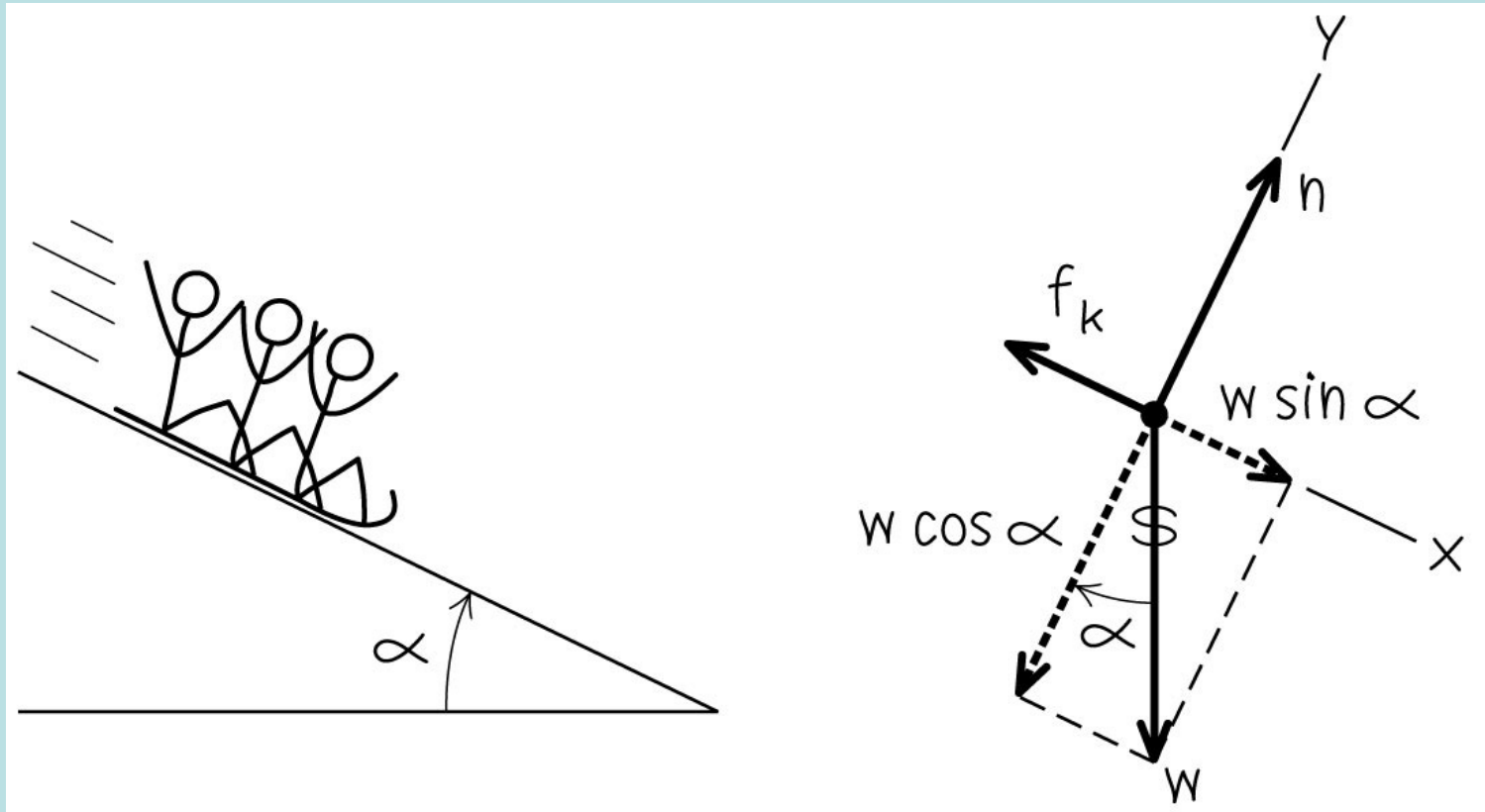
$$M_A = 2.5 \text{ kg}$$

(a) Pulling a crate at an angle



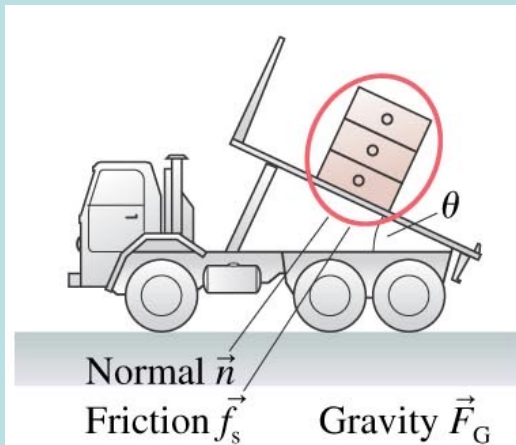
$$n + T \sin 30^\circ - Mg = 0$$

$$T \cos 30^\circ - n \cdot \mu_k = Ma$$



$$n - Mg \cos \alpha = 0$$

$$Mg \sin \alpha - n \cdot \mu_k = Ma$$



Known

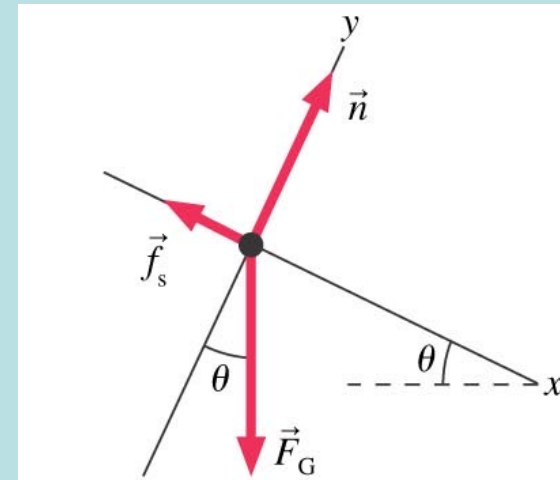
$$\mu_s = 0.80 \quad m = 50 \text{ kg}$$

$$\mu_k = 0.60$$

Find

$$f_s \text{ where } \theta = 20^\circ$$

$$\theta \text{ where cabinet slips}$$



開始下滑的角度？

$$n - Mg \cos \theta = 0$$

$$Mg \sin \theta - f_s = 0$$

$$f_s \leq n \cdot \mu_s$$

開始下滑的角度 θ_c

$$f_s = n \cdot \mu_s$$

$$Mg \sin \theta_c = Mg \cos \theta_c \cdot \mu_s$$

在一個桌面上有兩個質量相等的方塊，中間以很輕的繩連接，繩的質量可以忽略。方塊的質量 M 為 3.0 kg ，如圖所示。對下圖中左方方塊施以一個斜向下方的推力，此力的方向與水平線的夾角為 $\theta = 30^\circ$ ，同時對右方方塊亦施以一個斜向上方的拉力，此力的方向與水平線的夾角亦為 $\theta = 30^\circ$ ，使整個系統在桌面上開始向右運動，兩個力的大小都為 10 N 。已知在運動時繩是張緊的，因此兩個方塊是一起運動的。兩個方塊與地面之間的動摩擦係數都是 $\mu_k \approx 0.25$ 。問連接兩方塊的繩上的張力大小是多少 N ?(20)



解答：設繩的張力大小為 T 。左方方塊滿足的第二運動定律：

$$F \times \cos 30^\circ - (F \times \sin 30^\circ + Mg) \times \mu_k + T = Ma。$$

右方方塊滿足的第二運動定律：

$$F \times \cos 30^\circ - (-F \times \sin 30^\circ + Mg) \times \mu_k - T = Ma$$

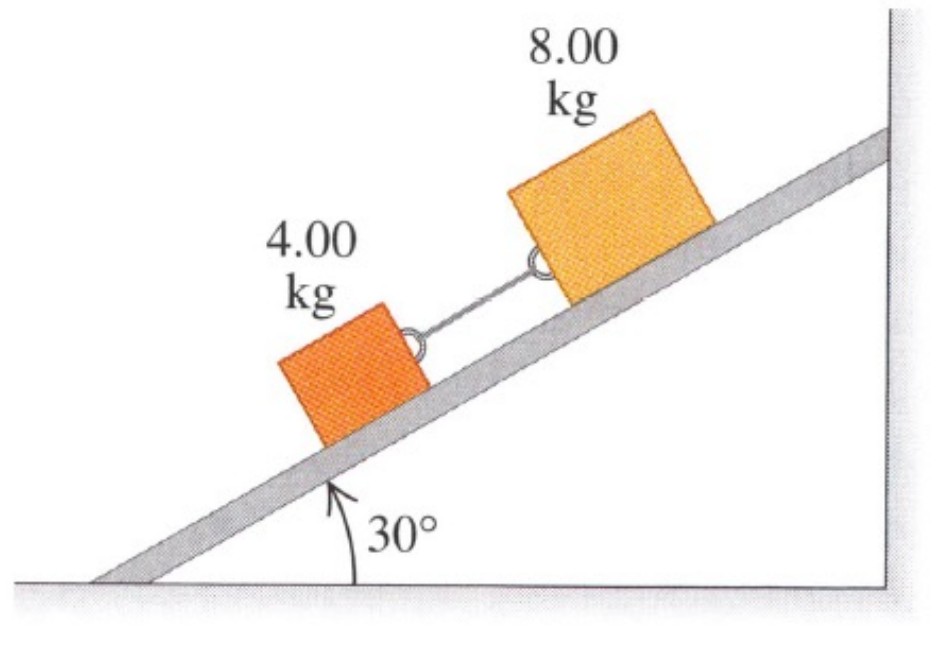
兩式相減即消去未知的加速度：

$$(2 \times F \times \sin 30^\circ) \times \mu_k = 2T$$

$$T = F \times \sin 30^\circ \times \mu_k = 1.25\text{ N}。$$

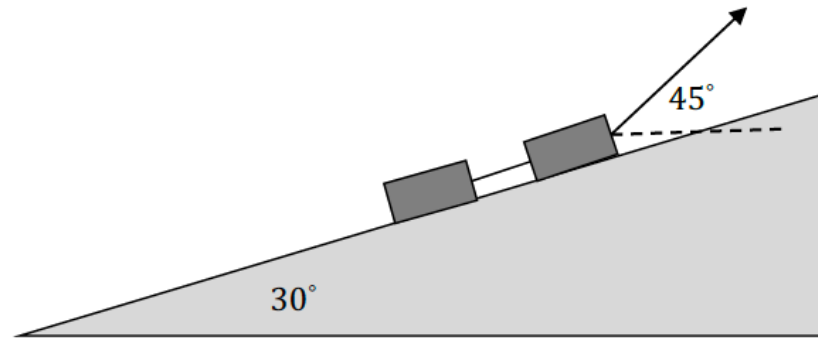
behavior of the block?

5.98 ... Two blocks with masses 4.00 kg and 8.00 kg are connected by a string and slide down a 30.0° inclined plane (Fig. P5.98). The coefficient of kinetic friction between the



4.00-kg block and the plane is 0.25; that between the 8.00-kg block and the plane is 0.35. (a) Calculate the acceleration of each block. (b) Calculate the tension in the string. (c) What happens if the positions of the blocks are reversed, so the 4.00-kg block is above the 8.00-kg block?

3. 有一固定斜面，斜角為 30° ，在斜面上有兩個相同的方塊，質量各為 1.0kg ，中間以一無質量的弦連接，對上方的方塊施以一向上的力，該力方向與水平方向間的夾角為 60° ，大小為 30N 。方塊與斜面間的動摩擦係數為 $\mu_k = 0.3$ 。已知方塊組會沿斜面向上移動，且方塊不會翻滾或旋轉，計算方塊間弦上的張力，以及方塊的加速度。 $\sin 15^\circ \sim 0.26, \cos 15^\circ \sim 0.97$ 。



解答：以沿斜面方向及垂直斜面方向的分量來討論，垂直斜面方向方塊都沒有運動，因此合力為零。下方方塊的正向力為 $mg \cos 30^\circ = 8.49\text{N}$ ，動摩擦力為 $mg \cos 30^\circ \mu_k = 2.55$ ，上方方塊的正向力為 $mg \cos 30^\circ - F \sin 15^\circ = 0.1\text{N}$ ，動摩擦力為 $(mg \cos 30^\circ - F \sin 15^\circ) \mu_k = 0.03$ 。下方方塊沿斜面方向：

$$T - mg \sin 30^\circ - mg \cos 30^\circ \mu_k = ma,$$

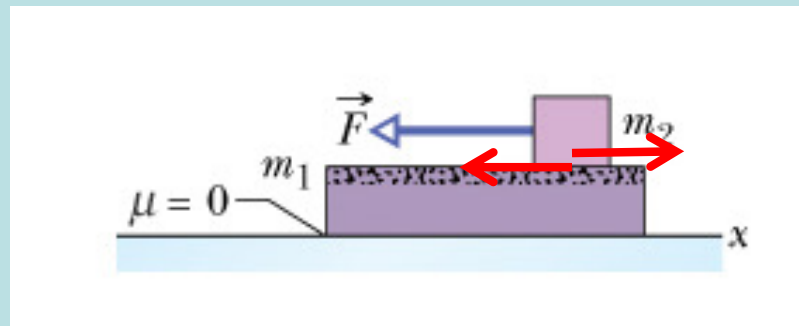
$$T - 4.9 - 2.55 = ma$$

上方方塊沿斜面方向：

$$F \cos 15^\circ - mg \sin 30^\circ - (mg \cos 30^\circ - F \sin 15^\circ) \mu_k - T = ma$$

$$29.0 - 4.9 - 0.03 - T = ma$$

$$T = 15.8\text{N}, a = 8.3\text{m/s}^2$$

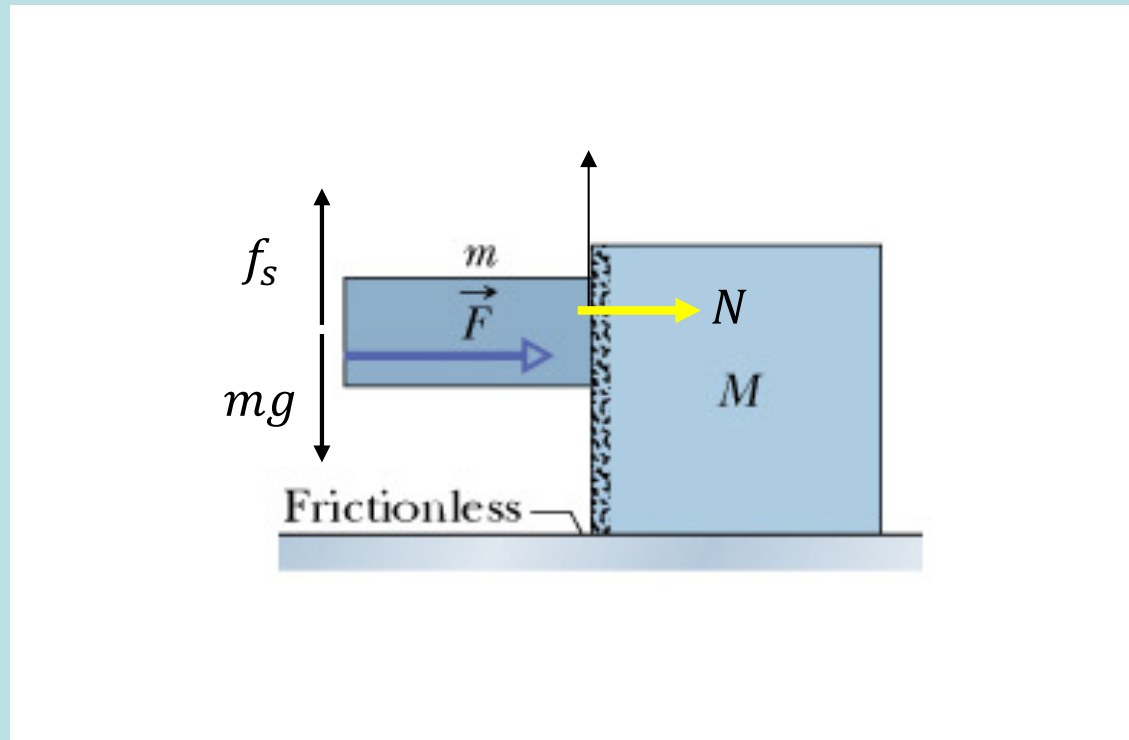


上方小方塊在下方方塊上滑行

$$m_1 a_1 = m_2 g \cdot \mu_k$$

$$m_2 a_2 = F - m_2 g \cdot \mu_k$$

施力 $\vec{F}$ 使方塊組向右移動，在何條件下，左方的方塊會維持不向下滑動？



$$a = \frac{F}{M + m}$$

$$N = Ma = \frac{FM}{M + m}$$

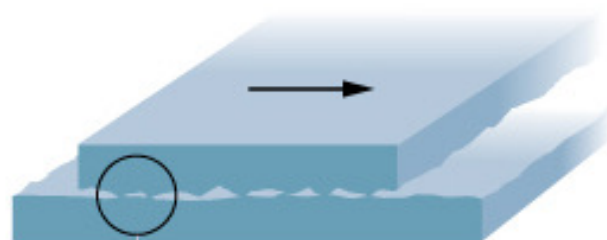
左方的方塊會維持不向下滑動

$$f_s = mg$$

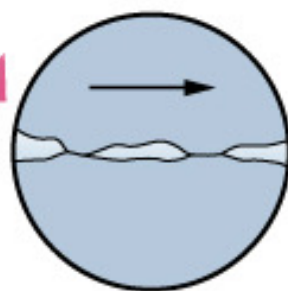
最大靜摩擦力： $N\mu_s$

不滑動條件 $f_s < N\mu_s$

$$mg < \frac{FM}{M + m} \mu_s$$



(a)



(b)

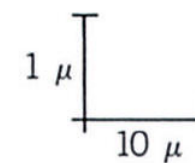
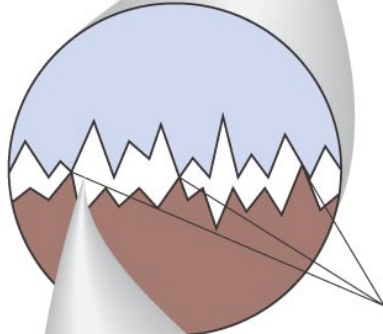


圖 6.1

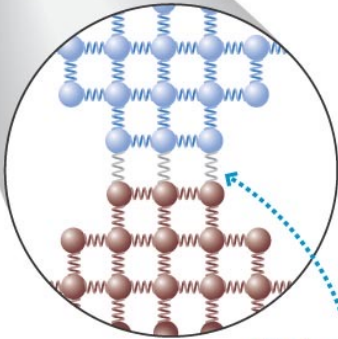
即使拋光的表面，在微觀的尺度下也並不平坦。



Two surfaces
in contact

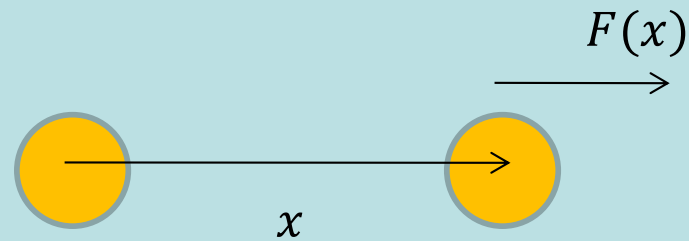


Very few points
are actually
in contact.



Molecular bonds form
between the two mate
These bonds have to b
broken as the object s

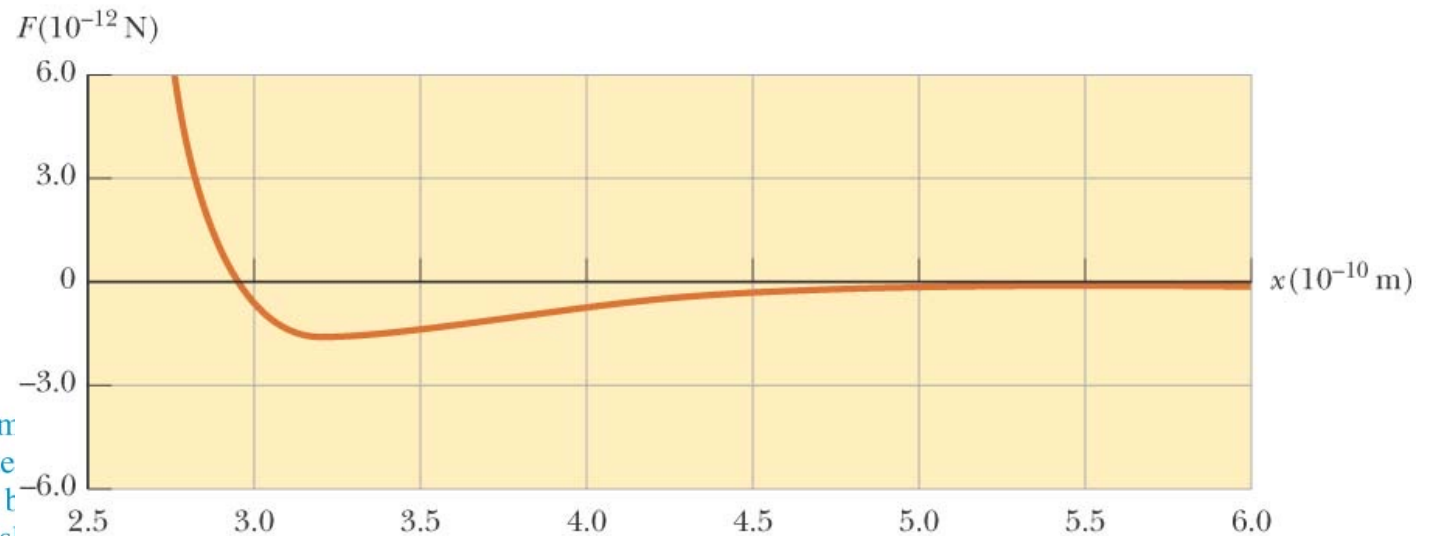
摩擦力的根源是原子力或分子力。



正力為排斥力，力為負則為吸引力

實際接觸的介面處的原子分子彼此互相吸引。

相對運動時必須施力以克服此吸引力，這即摩擦力！



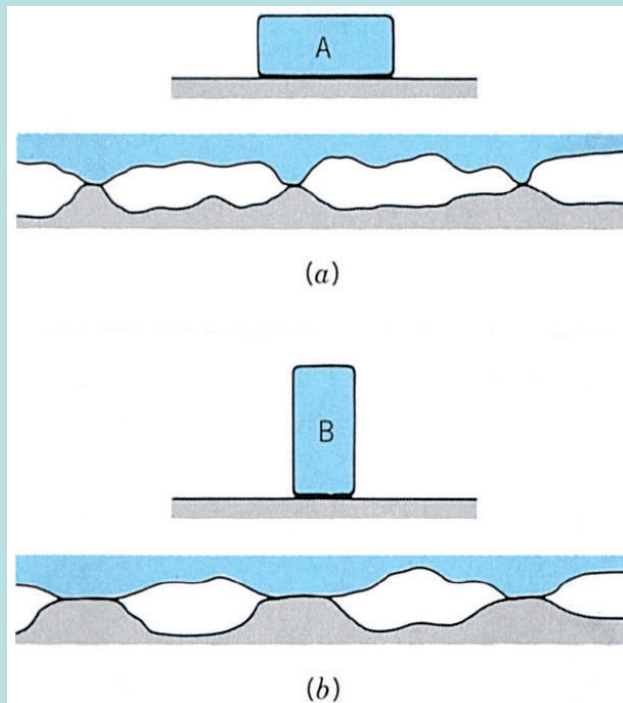


圖 6.2

兩個表面的實際接觸面積遠小於其視接觸面積。A 的放置方式比起方式 B 接觸點較多，但實際接觸面積是相同的。

巨觀的接觸面積與實際的接觸面積不同！

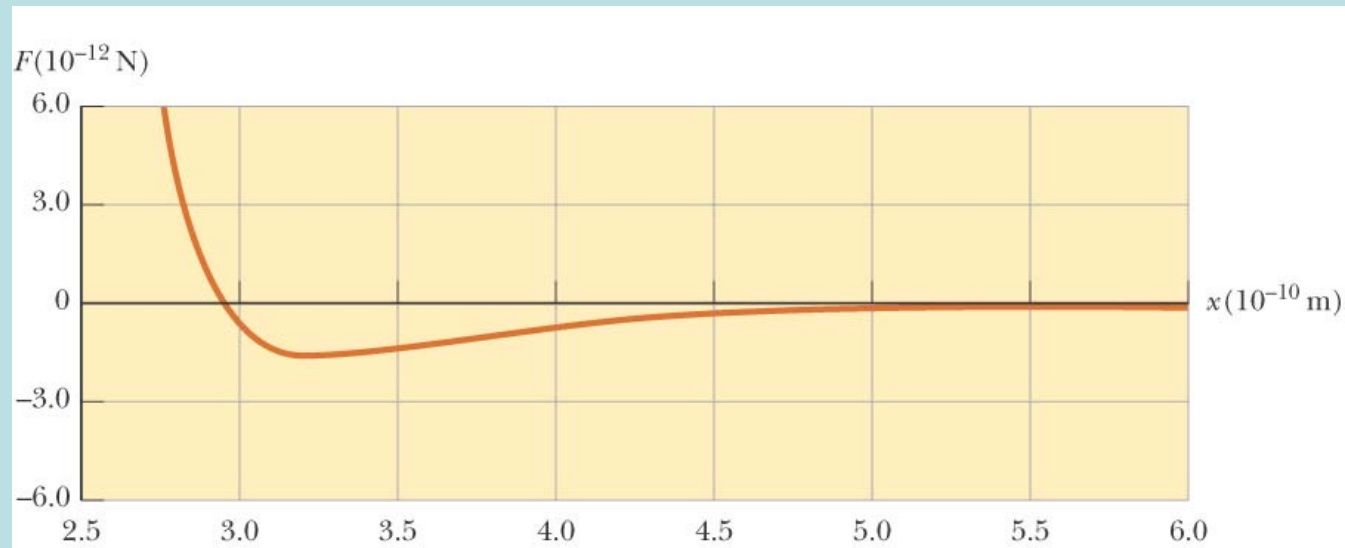
動摩擦力大致由微觀實際的接觸面積決定，

較大的正向力會增加實際接觸面積。

故正向力越大動摩擦力也越大。

$$f_k = n\mu_k$$

原子力 Lennard-Jones



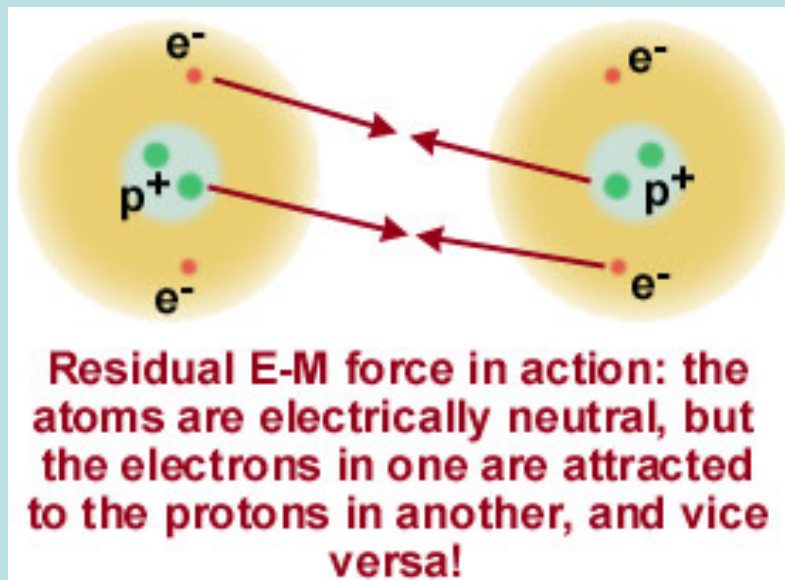
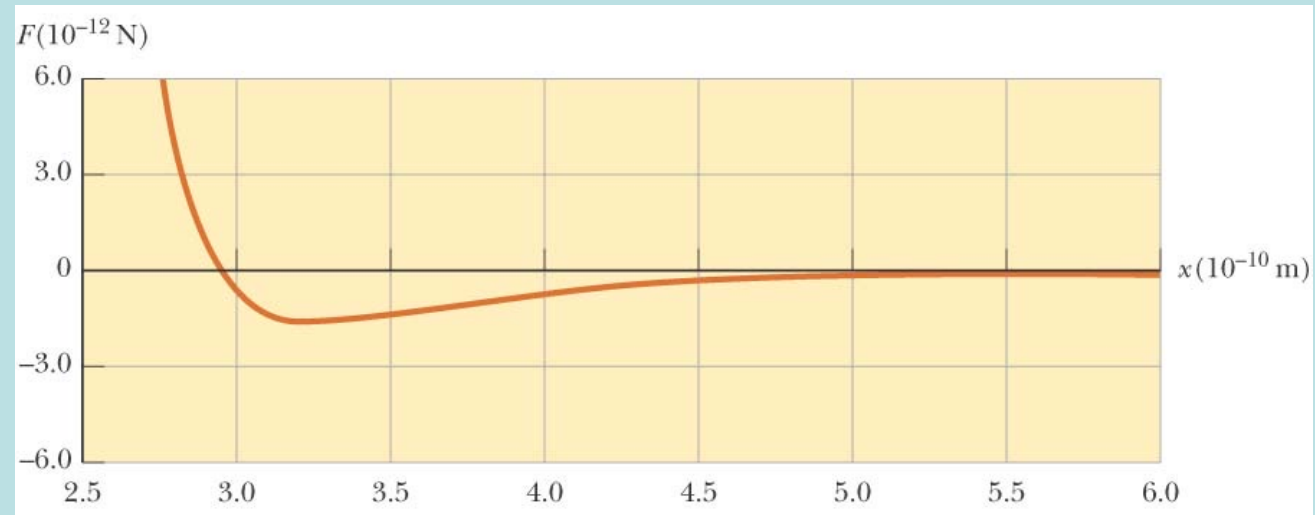
$$F(x) = 4 \frac{\varepsilon}{\sigma} \left[12 \left(\frac{\sigma}{x} \right)^{13} - 6 \left(\frac{\sigma}{x} \right)^7 \right]$$

$$\sigma = 0.263 \text{ nm}$$

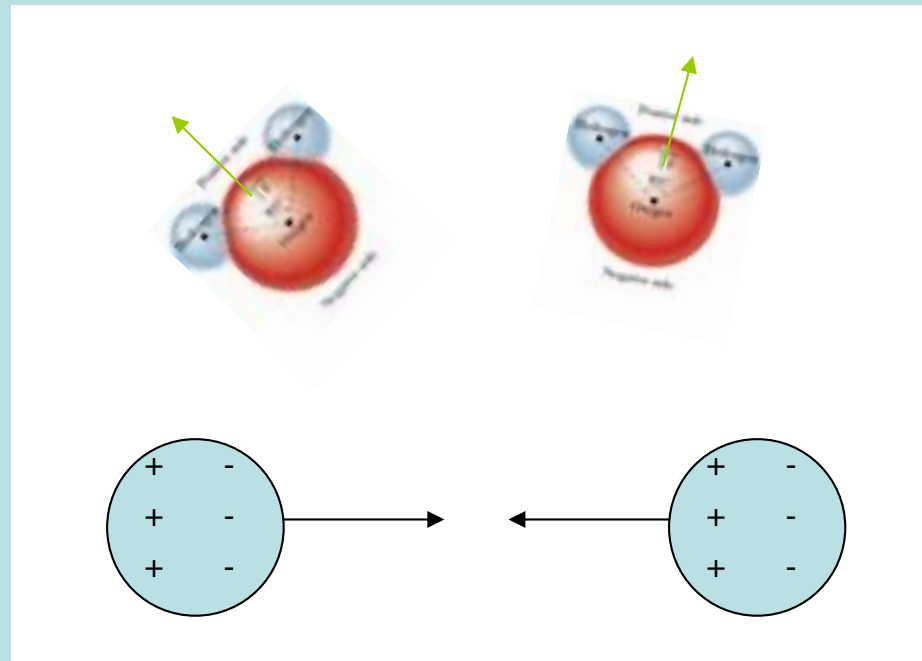
$$\varepsilon = 1.51 \times 10^{-22} \text{ J}$$

與萬有引力定律不同，此式只是一個近似，但很好用！

原子力是由電磁力產生



原子力來自原子內電荷分布不均，所形成的電偶極之間的力



永久電偶極

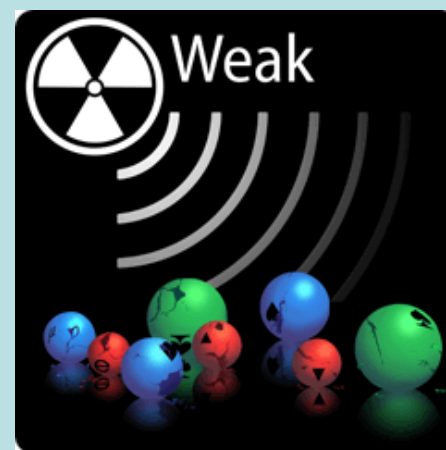
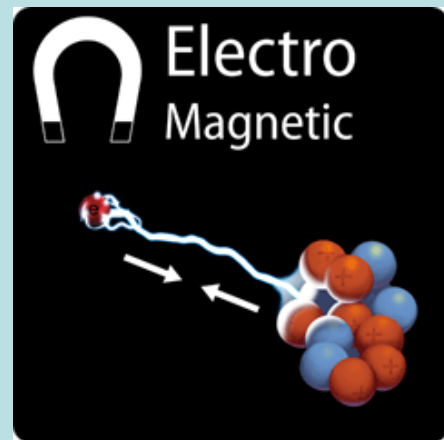
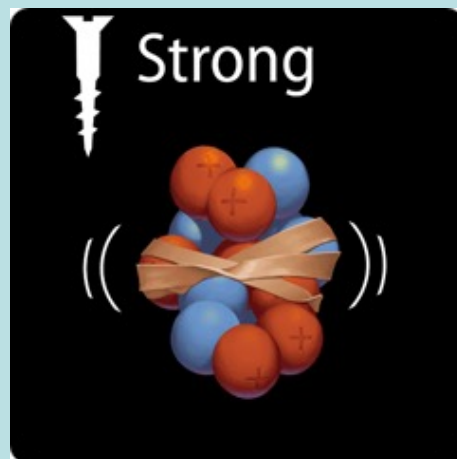
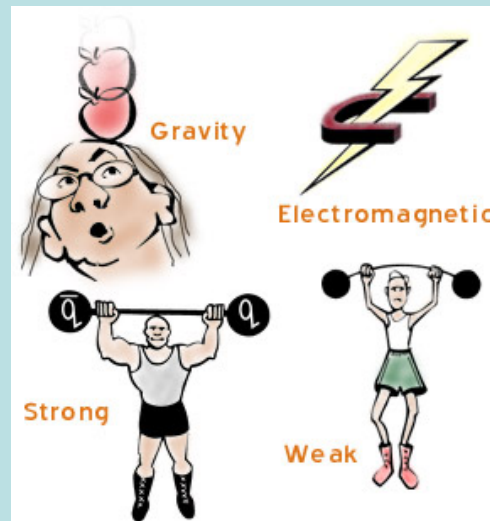
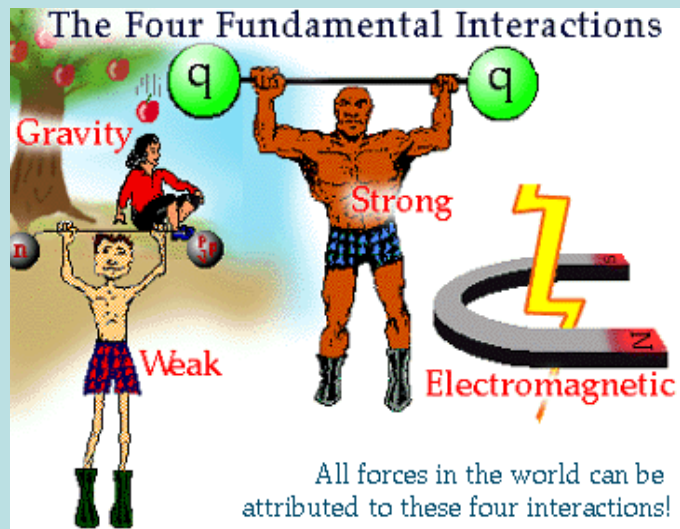
感應形成電偶極

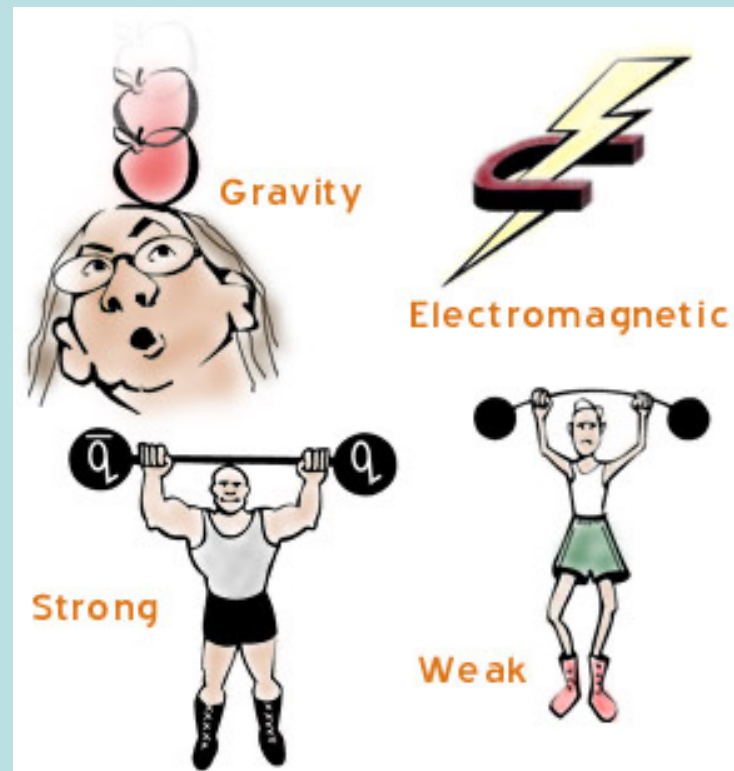
摩擦力可以分解為原子力，原子力又可以分解為電磁力。

宇宙間的所有力都可以分解為四個基本力！

在現代物理中，力的概念被交互作用取代。

宇宙間有四個基本交互作用：電磁、重力、強、弱交互作用。

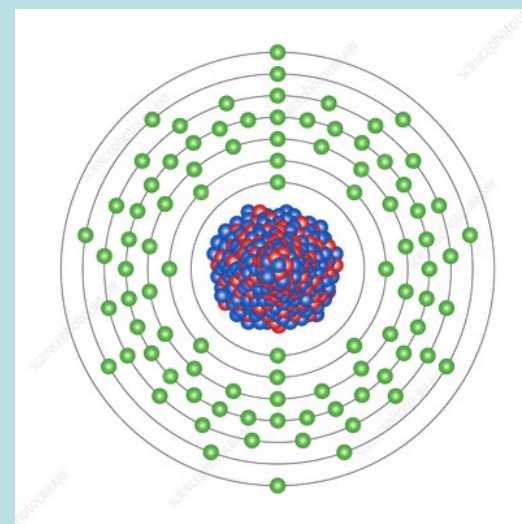
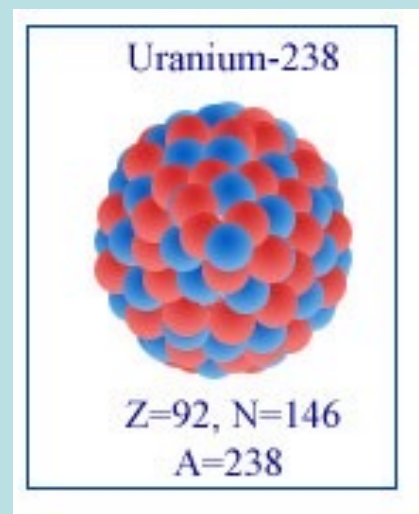
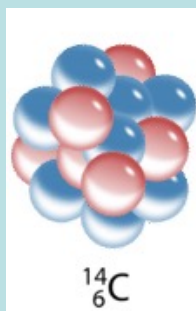
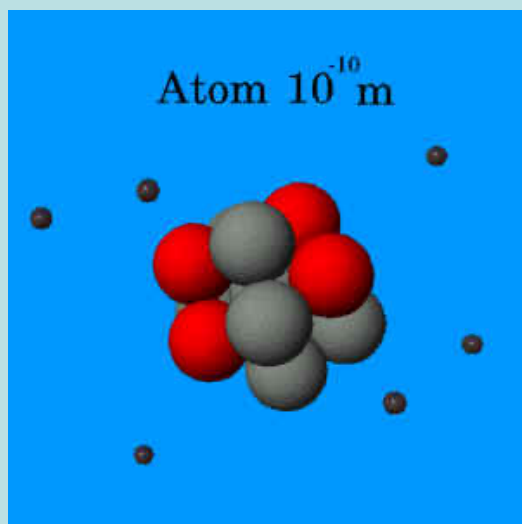




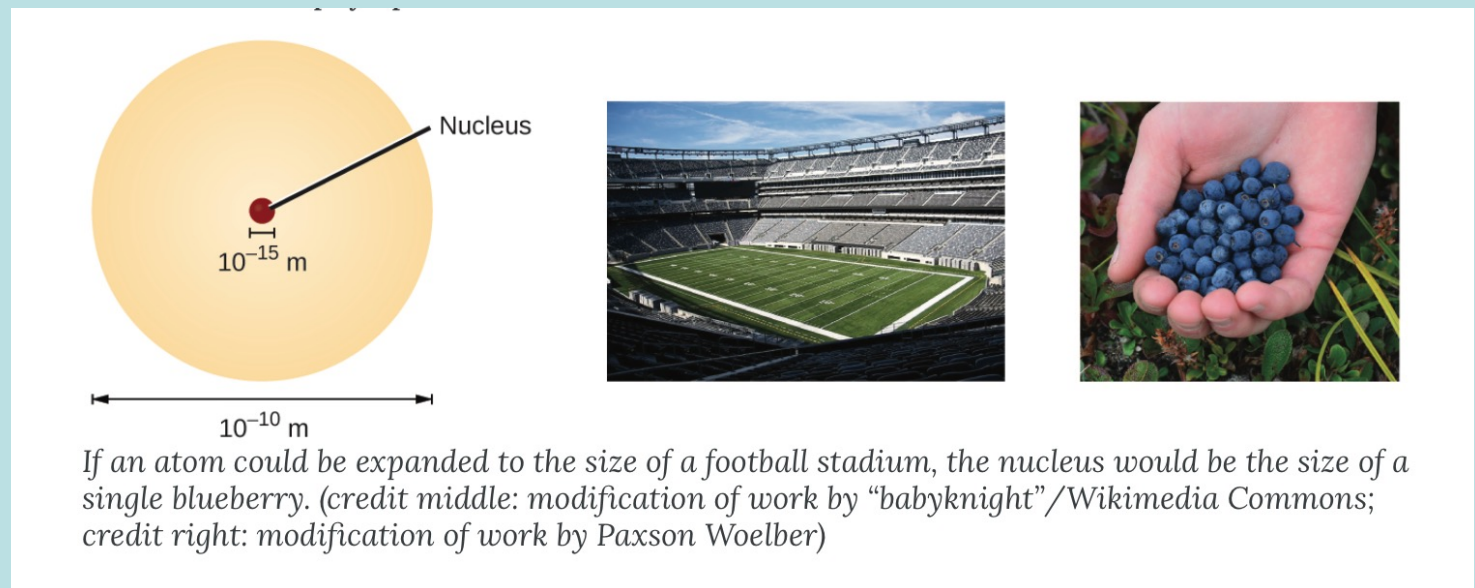
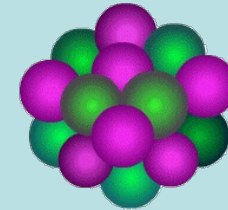
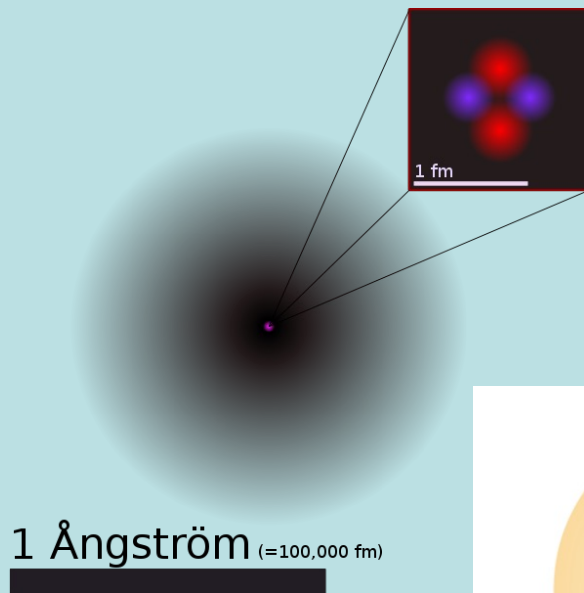
強力與弱力都有很小的範圍，因此只在微觀世界才能觀察的到！
重力太過微弱，在日常生活也只扮演有限角色！
可以說，日常自然就是電磁作用的個人秀！

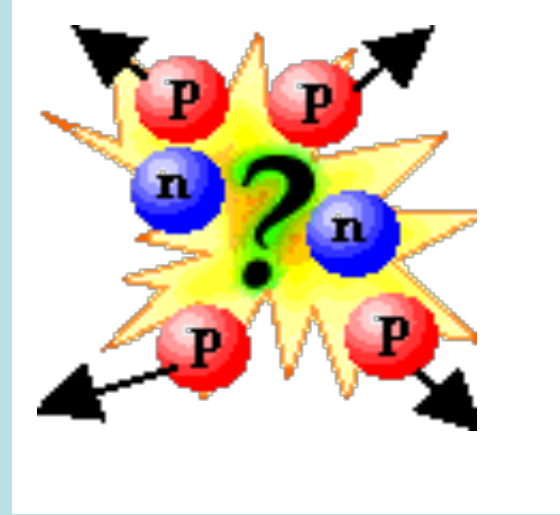
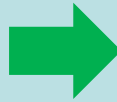
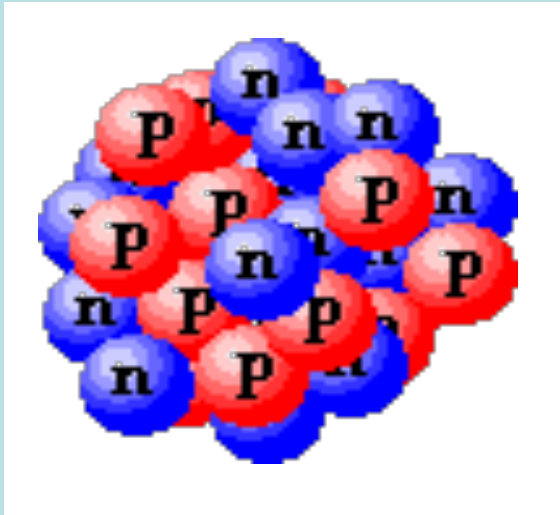
核力或強作用力

原子核由兩種核子：質子與中子組成



原子內的正電與大部分的質量集中於極小的**原子核 Nucleus**





原子核是由束縛很緊的質子與中子所組成。

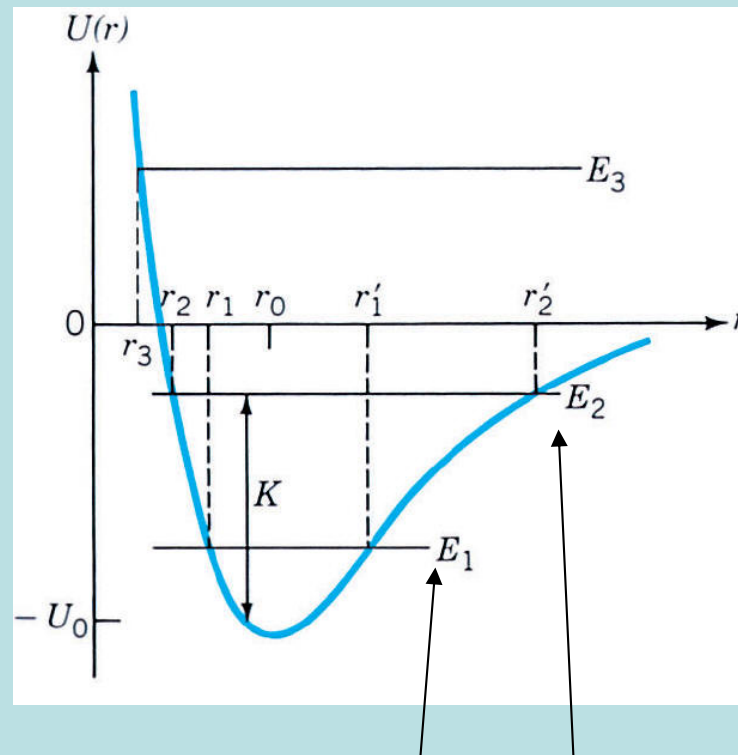
What holds them together?

將核子束縛於原子核內的力稱為核力或強作用。

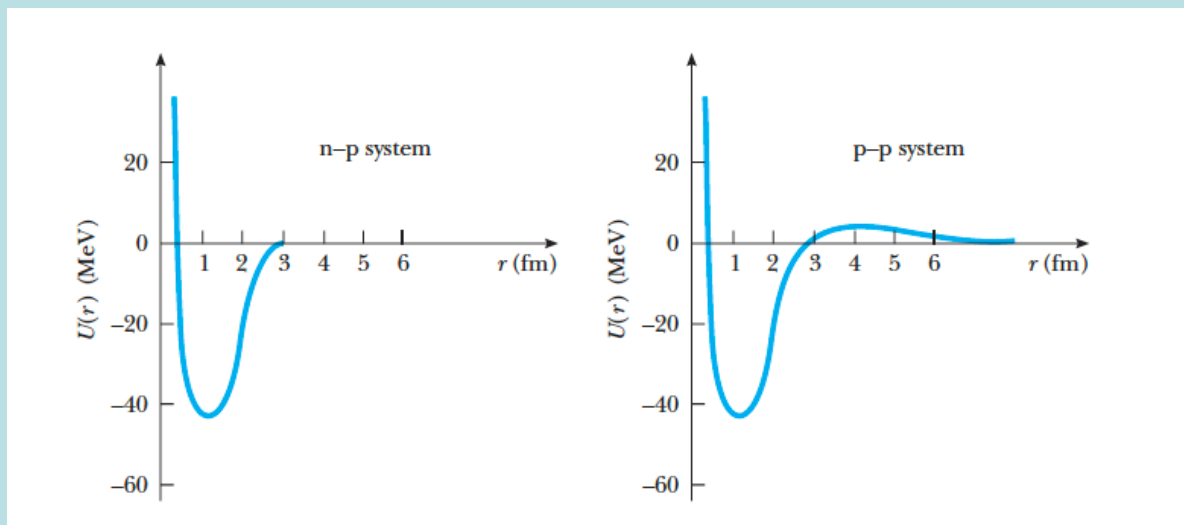
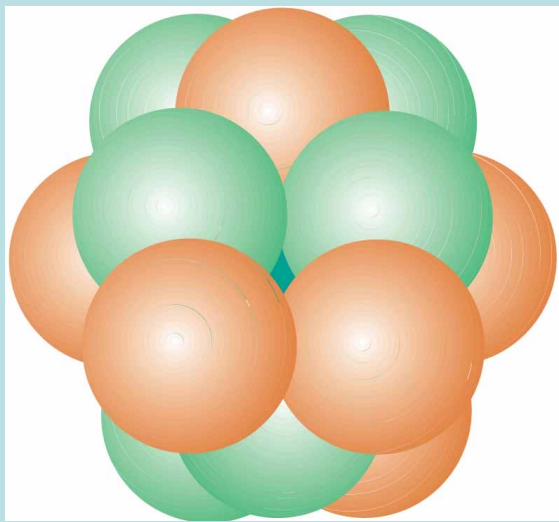
將核子束縛於原子核的核力，必須克服距離很近的質子彼此的電磁排斥力，
是四個力中最強的，所以也稱強作用。



吸引力形成的束縛態：分子、原子、運動範圍被限制於一個區域內，這種情況，位能一般如下圖，機械能必須小於無限遠處的位能
兩端都有 turning point，所以只能拘限在這兩點之間運動。



束縛能：拆散束縛態所需的能量，平衡點位能與無限遠處位能的差！
位能陷得越深，束縛能越大。



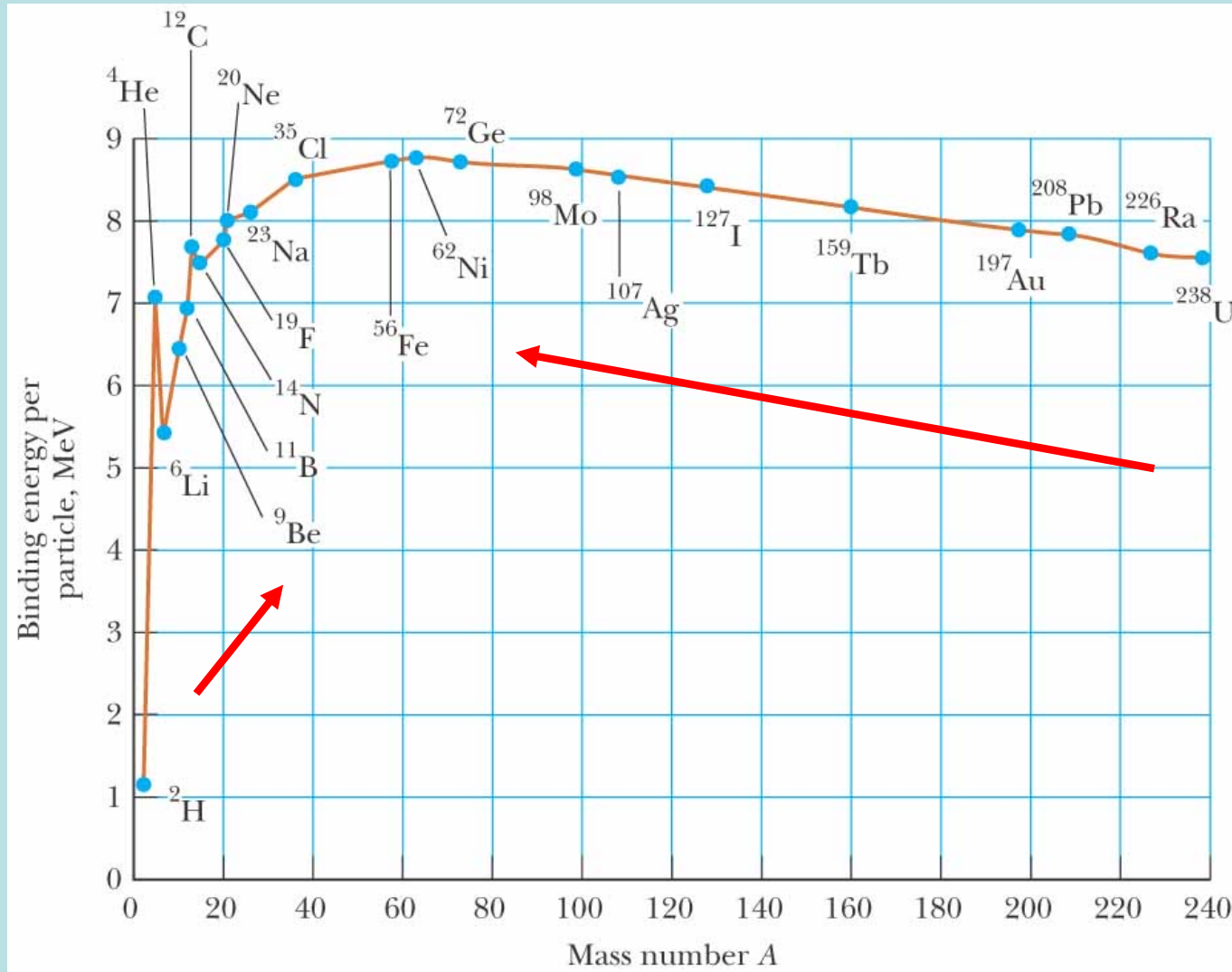
核子在很靠近時，彼此間出現很強核力吸引力，
若核子可以接近到 10^{-15} m，就會放出束縛能而束縛在一起！

$E = mc^2$ ，核力強到束縛能極大，對質量影響不能忽略！

原子核質量 = 質子中子總質量 - 總束縛能/ c^2

束縛能越大，質量越小。

原子核的平均束縛能竟然大致可以由質子數決定：



圖的中段每個核子平均束縛能最大，
位於兩端的原子核會傾向變化為中段的核子，增加束縛能，放出能量。