

Κεφάλαιο 5

Ενέργεια συστήματος

Έργο δύναμης

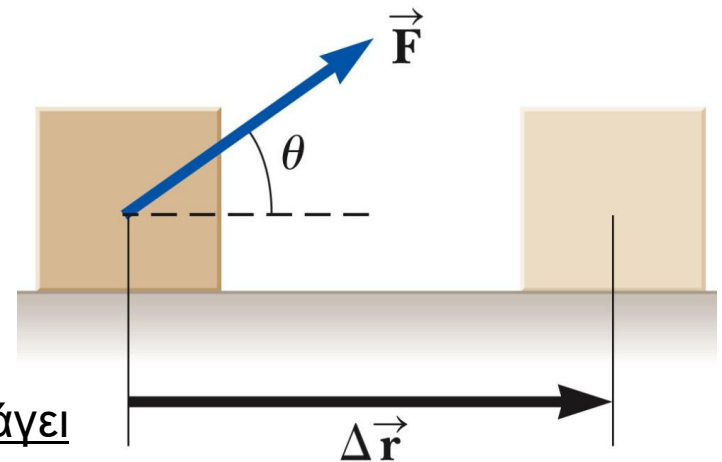
Το **έργο** W το οποίο παράγει μια σταθερή δύναμη $\vec{F}$ σε ένα σώμα είναι το γινόμενο του μέτρου της δύναμης επί τη μετατόπιση του σώματος επί το συνημίτονο της μεταξύ τους γωνίας.

$$W = F \Delta r \cos \theta$$

ή, σε διανυσματική μορφή,

$$W = \vec{F} \cdot \Delta \vec{r}$$

- Η δύναμη που ασκείται σε ένα σώμα δεν παράγει έργο αν το σώμα δεν μετατοπιστεί $\Delta r = 0$.
- Το έργο που παράγει μια δύναμη που ασκείται σε ένα κινούμενο σώμα είναι μηδενικό, όταν η δύναμη που εφαρμόζεται είναι κάθετη προς τη μετατόπιση του σημείου εφαρμογής της.

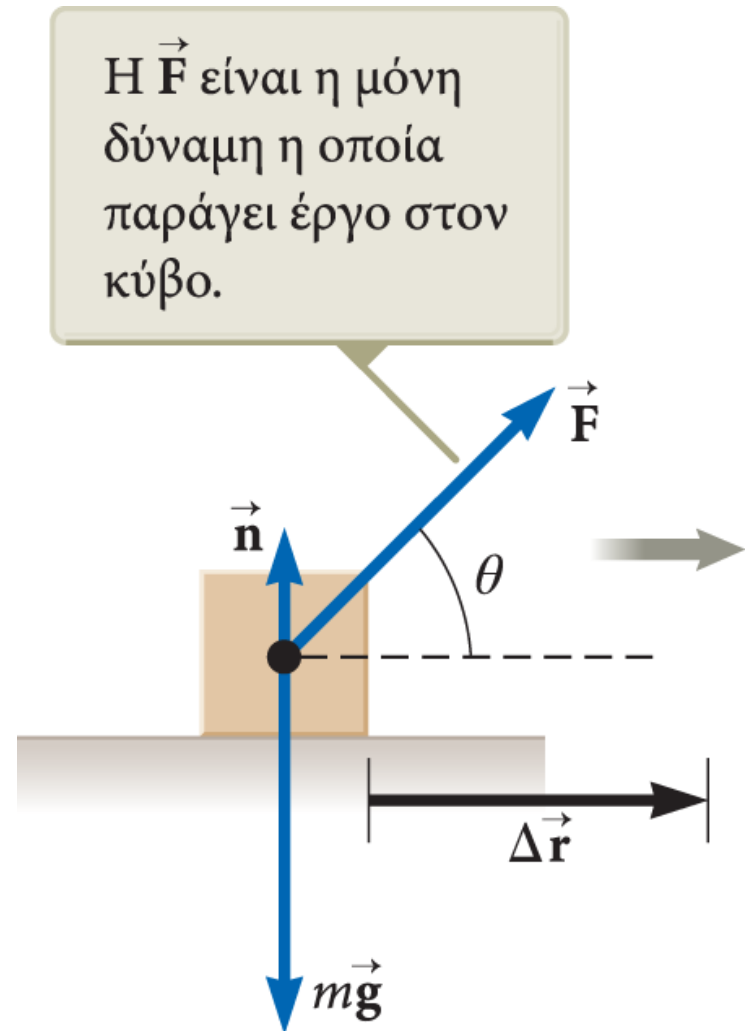


$$\cos \theta = \cos 90^\circ = 0$$

Παράδειγμα έργου

Η κάθετη δύναμη ($\vec{n}$) και η βαρυτική δύναμη ($\vec{F}_g = m\vec{g}$) δεν παράγουν έργο στο σώμα.

Η δύναμη $\vec{F}$ είναι η μοναδική δύναμη που παράγει έργο στο σώμα.



Περισσότερα για το έργο

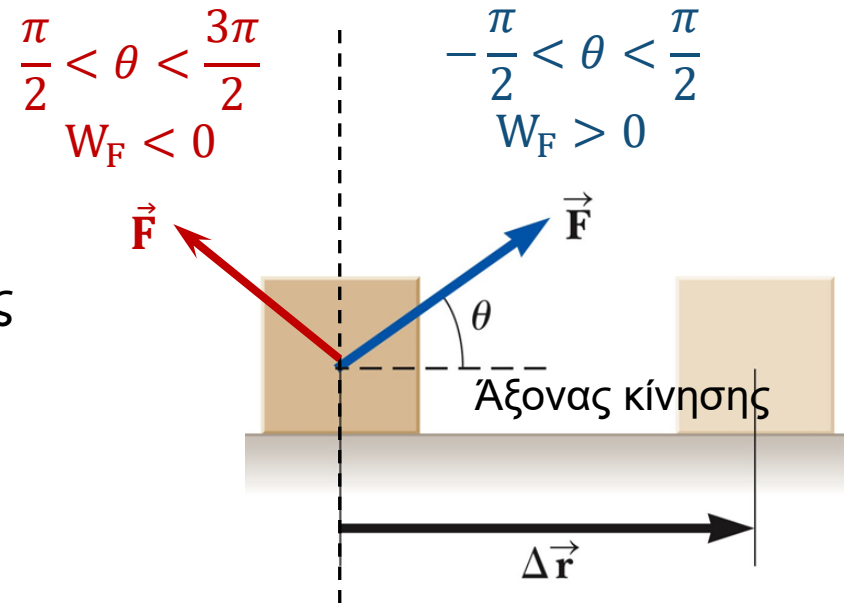
Το πρόσημο του έργου εξαρτάται από την κατεύθυνση της δύναμης σε σχέση με τη μετατόπιση.

- Το έργο είναι θετικό όταν η προβολή της $\vec{F}$ στον άξονα κίνησης έχει ίδια κατεύθυνση με τη μετατόπιση $\Delta\vec{r}$.
- Το έργο είναι αρνητικό όταν η προβολή έχει κατεύθυνση αντίθετη από αυτή της μετατόπισης.

Το έργο είναι βαθμωτό μέγεθος.

Η μονάδα μέτρησης του έργου είναι το joule (J).

- $1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot 1 \text{ m} = \text{kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^2$



Έργο μεταβαλλόμενης δύναμης

Αν η δύναμη F_x είναι μεταβαλλόμενη, χωρίζουμε τη μετατόπιση του σώματος (από x_i ως x_f) σε μικρά διαστήματα dx .

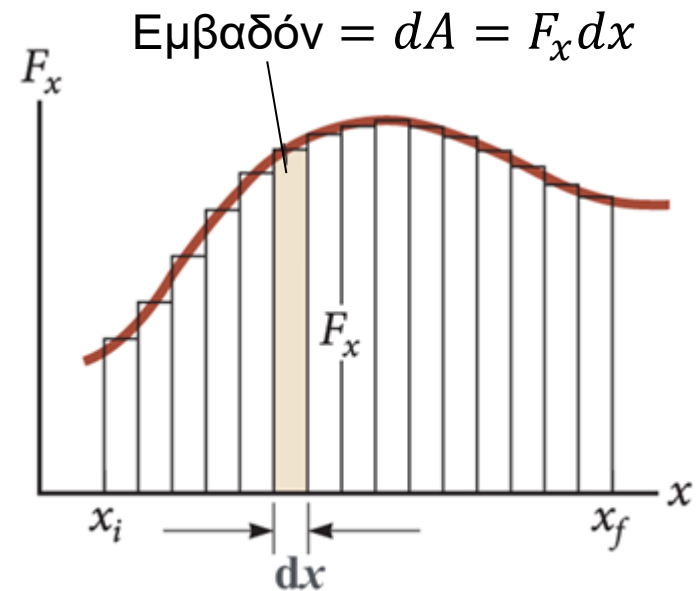
Σε κάθε μικρό διάστημα dx , η δύναμη F_x μπορεί να θεωρηθεί σταθερή, άρα το έργο της είναι $dW = F_x dx$

και ισούται με το εμβαδόν dA

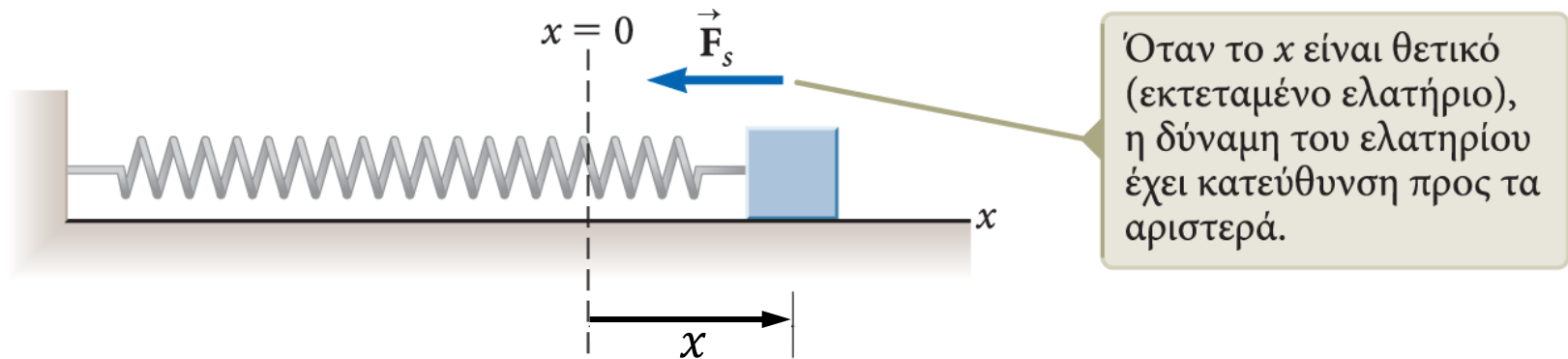
Για όλο το διάστημα από x_i ως x_f το συνολικό έργο W της δύναμης είναι το άθροισμα (ολοκλήρωμα)

$$W = \int_{x_i}^{x_f} F_x dx$$

Το συνολικό έργο που παράγεται κατά τη μετατόπιση από το x_i στο x_f είναι κατά προσέγγιση ίσο με το άθροισμα των εμβαδών όλων των ορθογωνίων.



Δύναμη ελατηρίου (νόμος του Hooke)



Η δύναμη που ασκεί το ελατήριο είναι

$$\vec{F}_s = -kx$$

- Το x είναι η θέση του κύβου σε σχέση με τη θέση ισορροπίας ($x = 0$).
- Το k ονομάζεται σταθερά του ελατηρίου.
- Το k μετράει τη *σκληρότητα* του ελατηρίου.

Ο νόμος αυτός είναι γνωστός ως **νόμος του Hooke**.

Νόμος του Hooke (συνέχεια)

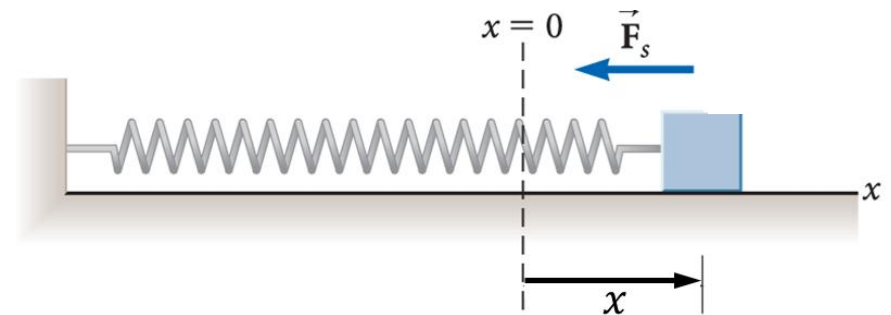
Η διανυσματική μορφή του νόμου του Hooke είναι

$$\vec{\mathbf{F}}_s = -k\vec{\mathbf{x}}$$

Όταν το x είναι θετικό (το ελατήριο έχει εκταθεί), η F_s είναι αρνητική.

Όταν το x είναι ίσο με 0 (στη θέση ισορροπίας), η F_s είναι ίση με 0.

Όταν το x είναι αρνητικό (το ελατήριο έχει συμπιεστεί), η F_s είναι θετική.



Έργο που παράγεται από ελατήριο

Ας υποθέσουμε ότι ο κύβος υφίσταται τυχαία μετατόπιση από το $x = x_i$ στο $x = x_f$.

Το έργο που παράγει η δύναμη του ελατηρίου για να μετατοπίσει τον κύβο είναι

$$W = \int_{x_i}^{x_f} (-kx) dx = -k \int_{x_i}^{x_f} x dx = -k \left[\frac{x^2}{2} \right]_{x_i}^{x_f} = \frac{1}{2} k (x_f^2 - x_i^2)$$

Επομένως, αν η κίνηση τελειώνει στο σημείο από το οποίο άρχισε ($x_f = x_i$), τότε $W = 0$.

Κινητική ενέργεια

Μια πιθανή επίπτωση της παραγωγής έργου σε ένα σώμα είναι η μεταβολή της ταχύτητάς του.

Ορίζουμε σαν **κινητική ενέργεια** ενός σώματος την ενέργεια που σχετίζεται με την κίνηση και την ταχύτητά του.

$$K = \frac{1}{2}mv^2$$

- K είναι η κινητική ενέργεια.
- m είναι η μάζα του σώματος.
- v είναι το μέτρο της ταχύτητας του σώματος.

Θεώρημα έργου-κινητικής ενέργειας

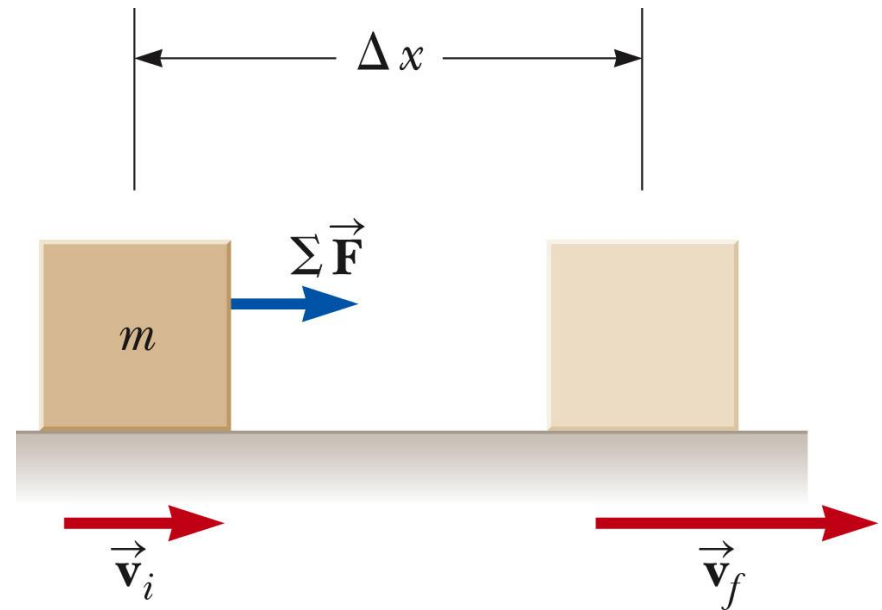
Σύμφωνα με το **θεώρημα έργου-κινητικής ενέργειας**, το συνολικό έργο που παράγει η (συνισταμένη) δύναμη σε ένα σώμα (ή σύστημα σωμάτων) ισούται με τη μεταβολή της κινητικής του ενέργειας.

Το συνολικό έργο: $W = (\sum F)\Delta x$

Η μεταβολή της κινητικής ενέργειας:

$$\Delta K = K_f - K_i = \frac{1}{2}mv_f^2 - \frac{1}{2}mv_i^2$$

Επομένως: $W = \Delta K = K_f - K_i$ (Θεώρημα Έργου - Κινητικής Ενέργειας)



Θεώρημα έργου-κινητικής ενέργειας – Παράδειγμα

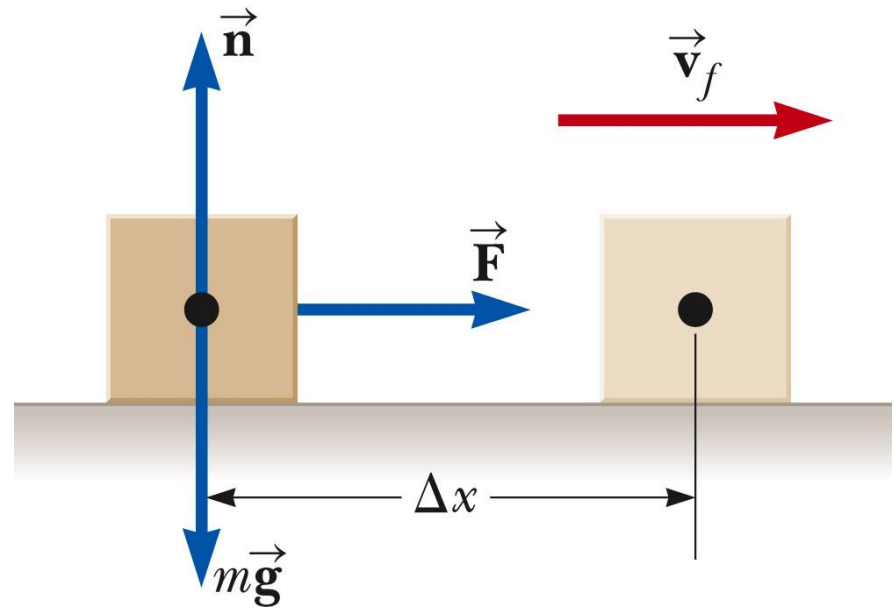
Το σύστημα είναι ο κύβος, αρχικά ακίνητος, στον οποίο ασκούνται τρεις εξωτερικές δυνάμεις.

Η κάθετη δύναμη ($\vec{n}$) και η βαρυτική δύναμη ($m\vec{g}$) δεν παράγουν έργο επειδή έχουν κατεύθυνση κάθετη προς την κατεύθυνση της μετατόπισης.

Έργο παράγει μόνο η $\vec{F}$, $W_F = F\Delta x$

Σύμφωνα με το ΘΕΚΕ, $W_F = \Delta K = \frac{1}{2}mv_f^2$.

Μπορείτε να ελέγξετε την απάντηση χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις της κινηματικής;



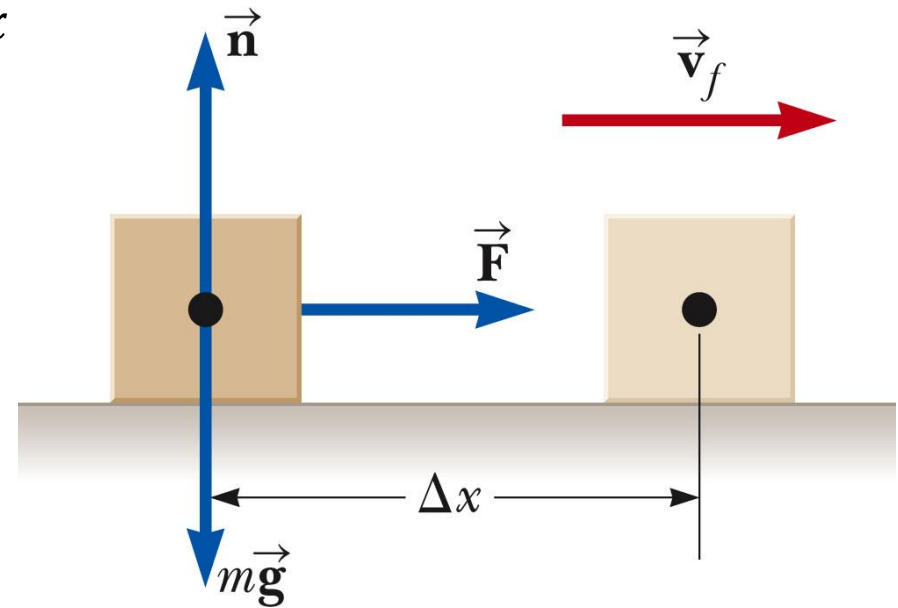
Θεώρημα έργου-κινητικής ενέργειας – Παράδειγμα (... συνέχεια)

Το έργο που παράγει η $\vec{F}$ είναι $W_F = F\Delta x$

Σύμφωνα με τις εξισώσεις της κινηματικής, στην κίνηση με σταθερή επιτάχυνση (γιατί είναι σταθερή;),

$$v_f^2 = v_i^2 + 2\alpha\Delta x$$

Επειδή $v_i = 0$ και $\alpha = F/m$



$$v_f^2 = 2 \frac{F}{m} \Delta x \Rightarrow v_f^2 = 2 \frac{F\Delta x}{m} \Rightarrow v_f^2 = 2 \frac{W_F}{m} \Rightarrow W_F = \frac{1}{2} m v_f^2 = \Delta K$$

Δυναμική ενέργεια

Η Κινητική Ενέργεια είναι η ενέργεια που έχει ένα σώμα λόγω της κίνησής του (ταχύτητάς του).

Όταν ένα σώμα (ή σύστημα σωμάτων) αλληλεπιδρά με άλλα σώματα και ασκούνται δυνάμεις πάνω του, λέμε ότι έχει **δυναμική ενέργεια**. Η δυναμική ενέργεια είναι ενέργεια της θέσης ή της κατάστασης του σώματος.

- Για κάθε τύπο δύναμης μπορεί να οριστεί αντίστοιχη έκφραση για τη δυναμική ενέργεια.
- Οι μόνοι τύποι δυνάμεων για τις οποίες δεν μπορεί να οριστεί δυναμική ενέργεια είναι κάθε είδους δυνάμεις τριβής.

Βαρυτική δυναμική ενέργεια

Έστω ότι ανυψώνουμε ένα βιβλίο κατακόρυφα

$$\Delta r = y_f - y_i$$

με σταθερή ταχύτητα ασκώντας κατακόρυφη δύναμη $\vec{F}_{\alpha\sigma\kappa}$.

Το έργο που παράγει η $\vec{F}_{\alpha\sigma\kappa}$ είναι

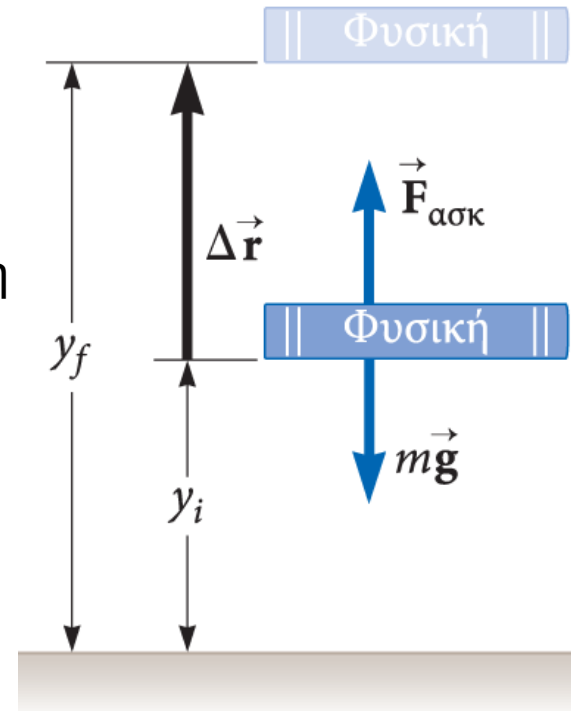
$$W_{F_{\alpha\sigma\kappa}} = F_{\alpha\sigma\kappa} \Delta r = -mg \Delta r = mgy_i - mgy_f$$

και εκδηλώνεται ως αύξηση της ποσότητας mgy του σώματος.

Την ποσότητα

$$U_g = mgy$$

ονομάζουμε **βαρυτική δυναμική ενέργεια** και είναι η ενέργεια που έχει ένα σώμα σε μια δεδομένη θέση y πάνω από την επιφάνεια της γης.



Βαρυτική δυναμική ενέργεια (συνέχεια)

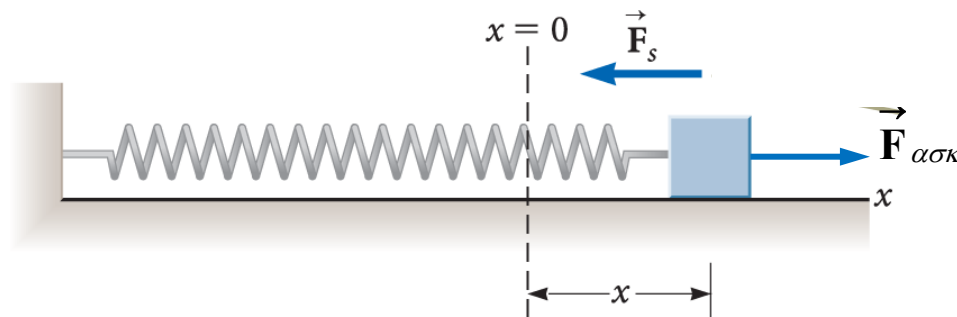
Οι μονάδες μέτρησής της ενέργειας (Κινητική ή Δυναμικής) είναι **joule (J)**.

Η βαρυτική δυναμική ενέργεια, όπως κάθε ενέργεια, είναι βαθμωτό μέγεθος.

Η δυναμική ενέργεια σχετίζεται πάντα με μια δύναμη (εδώ, είναι η δύναμη της βαρύτητας)

Ελαστική δυναμική ενέργεια

Η δύναμη που ασκεί το ελατήριο (σε έναν κύβο, για παράδειγμα) είναι $F_s = -kx$.



Το έργο που παράγεται από μια εξωτερικά ασκούμενη δύναμη $\vec{F}_{\alpha\sigma\kappa}$ σε ένα σύστημα ελατηρίου-κύβου για να το τεντώσει με σταθερή ταχύτητα κατά x είναι

$$W_{\vec{F}_{\alpha\sigma\kappa}} = \int_0^x F_{\alpha\sigma\kappa} dx = \int_0^x -F_s dx = \int_0^x -(-kx) dx = k \int_0^x x dx = \frac{1}{2} kx^2$$

Ελαστική δυναμική ενέργεια (...συνέχεια)

Το έργο είναι ίσο με τη ποσότητα $\frac{1}{2} kx^2$ που σχετίζεται με την κατάσταση (την παραμόρφωση x) του ελατηρίου.

Την ποσότητα

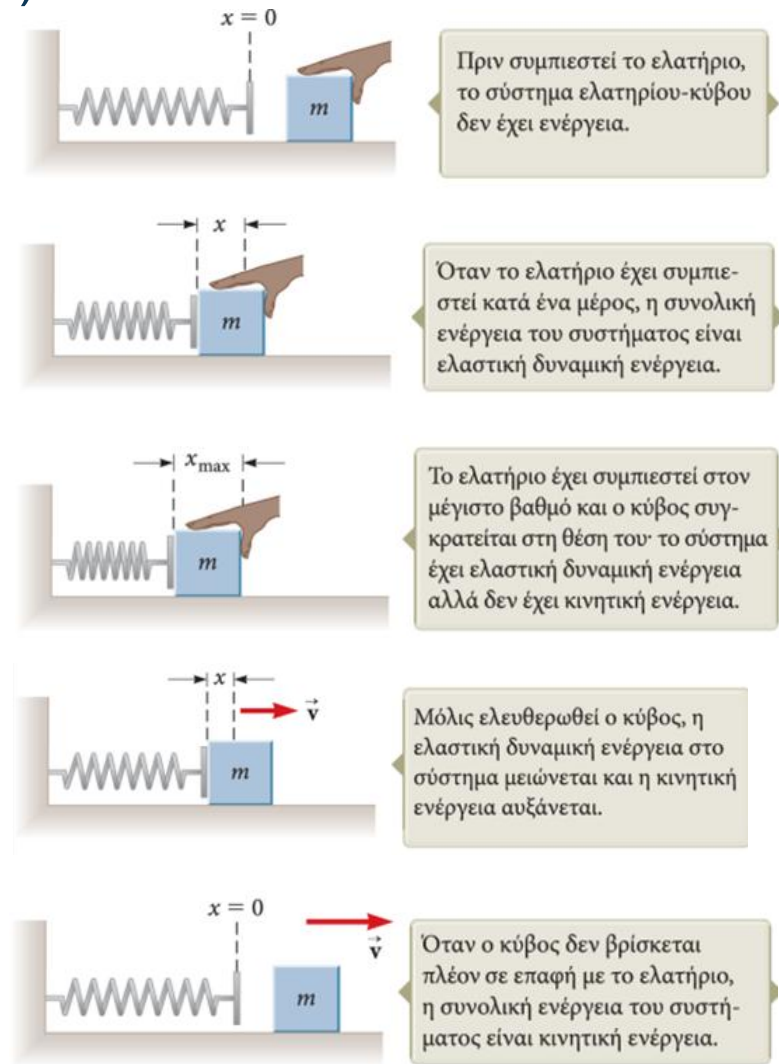
$$U_s = \frac{1}{2} kx^2$$

ορίζουμε σαν **ελαστική δυναμική ενέργεια**

Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η ελαστική δυναμική ενέργεια είναι η αποθηκευμένη ενέργεια στο παραμορφωμένο ελατήριο.

Η αποθηκευμένη δυναμική ενέργεια μπορεί να μετατραπεί σε κινητική ενέργεια.

Παρατηρήστε τι συμβαίνει όταν το ελατήριο συμπιέζεται κατά διάφορες αποστάσεις.



Συντηρητικές δυνάμεις

Μπορούμε να συσχετίσουμε το έργο που παράγουν ορισμένα είδη δυνάμεων σε ένα σώμα με τη μεταβολή της δυναμικής ενέργειας του σώματος.

$$W = -\Delta U = U_i - U_f$$

Το είδος αυτό των δυνάμων ονομάζονται **συντηρητικές** δυνάμεις.

Παραδείγματα συντηρητικών δυνάμεων στη Μηχανική

- Βαρύτητα
- Δύναμη ελατηρίου

Το έργο που παράγει μια συντηρητική δύναμη σε ένα σωματίδιο, το οποίο κινείται μεταξύ δύο οποιωνδήποτε σημείων, είναι ανεξάρτητο από την τροχιά που ακολουθεί το σωματίδιο.

Το έργο που παράγει μια συντηρητική δύναμη σε ένα σωματίδιο, το οποίο ακολουθεί οποιαδήποτε κλειστή τροχιά, είναι μηδενικό.

Συντηρητικές δυνάμεις (συνέχεια)

Προσέξτε το αρνητικό πρόσημο στη σχέση $W = -\Delta U = U_i - U_f$

- Το έργο που παράγει μια συντηρητική δύναμη (όπως η δύναμη του ελατηρίου $F_s = -kx$ ή η δύναμη βαρύτητας mg σε ένα σώμα) μειώνει τη δυναμική ενέργεια του συστήματος
- Το θετικό έργο που παράγει στο σύστημα μια εξωτερική δύναμη (π.χ., η δύναμη που τεντώνει το ελατήριο ή η δύναμη που ανεβάζει ένα σώμα σε κάποιο ύψος πάνω από το έδαφος) αυξάνει τη δυναμική ενέργεια του συστήματος.

Αλλά τι «συντηρούν» οι συντηρητικές δυνάμεις;

Και στα δύο παραδείγματα συντηρητικών δυνάμεων, δηλαδή,

I. Βαρυτική δύναμη

II. Ελαστική δύναμη

είδαμε ότι το έργο που παράγουν σχετίζεται με τη μεταβολή της δυναμικής ενέργειας του σώματος στο οποίο ασκούνται

$$W = -\Delta U = U_i - U_f \quad (1)$$

Από την άλλη μεριά, σύμφωνα με το Θεώρημα Έργου - Κινητικής Ενέργειας, που ισχύει για κάθε είδος δύναμης, το έργο αυτό σχετίζεται και με τη μεταβολή της κινητικής ενέργειας του σώματος

$$W = \Delta K = K_f - K_i \quad (2)$$

Από (1) και (2) προκύπτει $U_i - U_f = K_f - K_i \Rightarrow K_i + U_i = K_f + U_f$

Αν ορίσουμε, $E_{\mu\eta\chi} = K + U$ την **ολική μηχανική ενέργεια**, έχουμε

$$E_{\mu\eta\chi,i} = E_{\mu\eta\chi,f}$$

δηλαδή, **υπό την επίδραση διατηρητικών δυνάμεων αυτό που διατηρείται είναι η συνολική ενέργεια του συστήματος.**

Παράδειγμα μη συντηρητικής δύναμης: Η τριβή

Το έργο που παράγεται κατά τη μετατόπιση του ενός βιβλίου από τη θέση A στη θέση B είναι μεγαλύτερο στην καφέ από ό,τι στην μπλε διαδρομή.

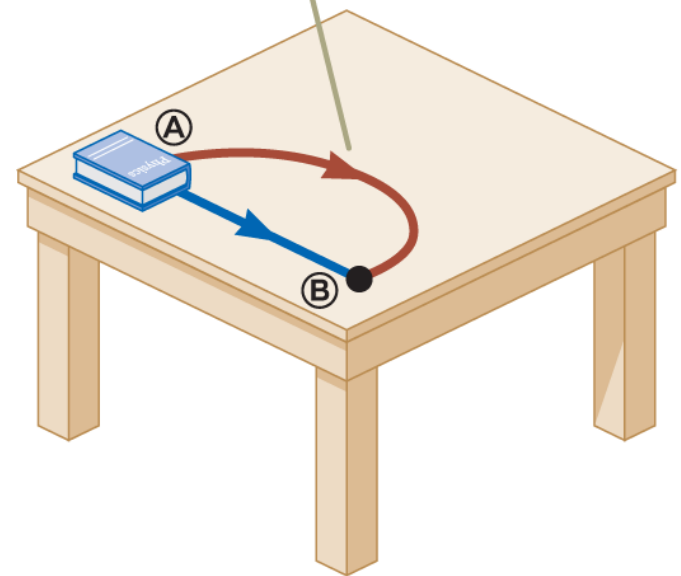
Επειδή το έργο που παράγεται στο βιβλίο εξαρτάται από τη διαδρομή, **η τριβή είναι μια μη συντηρητική δύναμη**.

Αν στο σύστημα δρουν μη συντηρητικές δυνάμεις (π.χ., τριβή), κάποια ποσότητα μηχανικής ενέργειας μετατρέπεται σε εσωτερική ενέργεια (θερμότητα). Τότε

$$\Delta E_{\text{μηχ}} = W_T$$

- όπου, W_T είναι το έργο της τριβής (πάντα αρνητικό. Γιατί;)

Το έργο που παράγεται κατά τη μετατόπιση του βιβλίου είναι μεγαλύτερο στην καφέ διαδρομή από ό,τι στην μπλε διαδρομή.



ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 10.1 Εκτοξεύοντας ένα βότσαλο

Ένα παιδί χρησιμοποιεί μια σφεντόντα για να εκτοξεύσει ένα βότσαλο μάζας $m = 20 \text{ g}$ από μια θέση y_0 προς τα πάνω με ταχύτητα $v_0 = 25 \text{ m/s}$. Πόσο ψηλά θα φτάσει το βότσαλο;

ΛΥΣΗ

Αν αγνοήσουμε την αντίσταση του αέρα (τριβή), η μόνη δύναμη που δρα στο βότσαλο είναι η συντηρητική δύναμη της βαρύτητας.

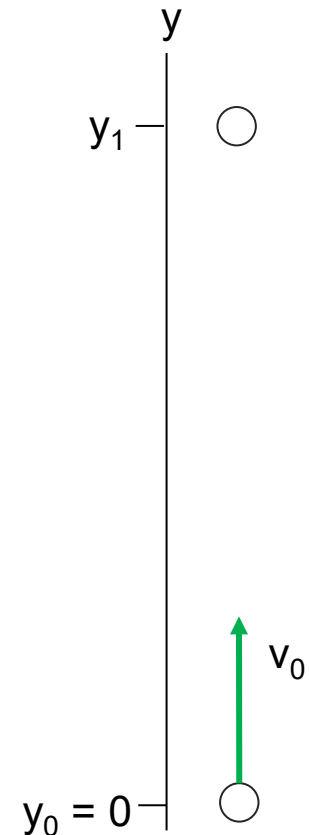
Επομένως, ισχύει η αρχή διατήρησης της μηχανικής ενέργειας.

$$K_1 + U_1 = K_0 + U_0$$

$$\frac{1}{2}mv_1^2 + mgy_1 = \frac{1}{2}mv_0^2 + mgy_0$$

$$\frac{1}{2}v_1^2 + gy_1 = \frac{1}{2}v_0^2 + gy_0 \Rightarrow 0 + gy_1 = \frac{1}{2}v_0^2 + 0$$

$$y_1 = \frac{v_0^2}{2g} = \frac{(25\text{m/s})^2}{2(9.8\text{m/s}^2)} = 32\text{m}$$



ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 10.2 Η ταχύτητα μιας μπάλας που πέφτει ελεύθερα

Η μπάλα που απεικονίζεται στο σχήμα δίπλα, αφήνεται από την ηρεμία να πέσει από ύψος h . Υπολογίστε το μέτρο της ταχύτητάς της σε ένα τυχαίο ύψος y και ακριβώς πριν ακουμπήσει στο έδαφος ($y = 0$)

ΛΥΣΗ

Αν αγνοήσουμε την αντίσταση του αέρα (τριβή), η μόνη δύναμη στη μπάλα είναι η συντηρητική δύναμη της βαρύτητας

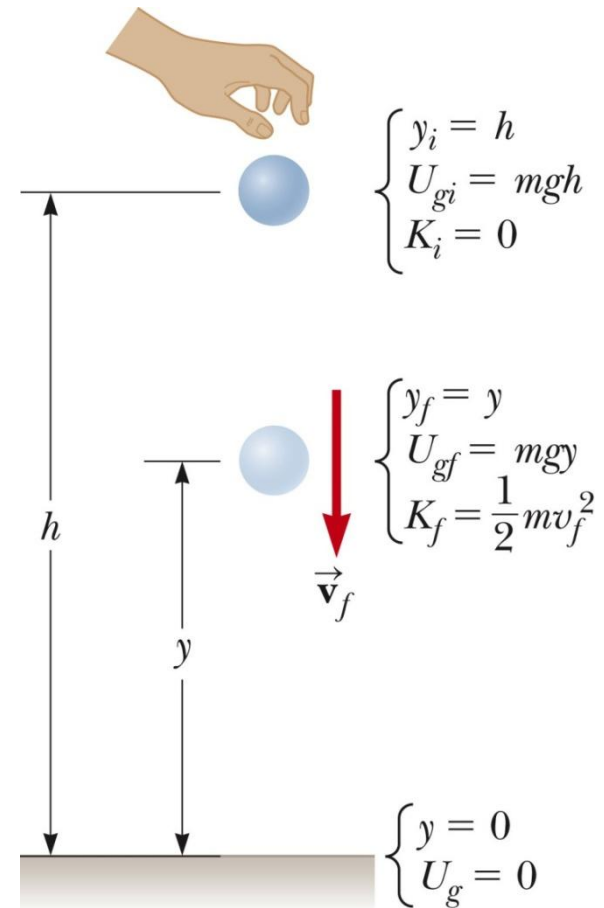
Επομένως, ισχύει η αρχή διατήρησης της μηχανικής ενέργειας.

$$K_i + U_{gi} = K_f + U_{gf}$$

$$0 + mgh = \frac{1}{2}mv_f^2 + mgy$$

$$gh = \frac{1}{2}v_f^2 + gy$$

$$gh - gy = \frac{1}{2}v_f^2$$



ΛΥΣΗ (συνέχεια)

$$gh - gy = \frac{1}{2} v_f^2$$

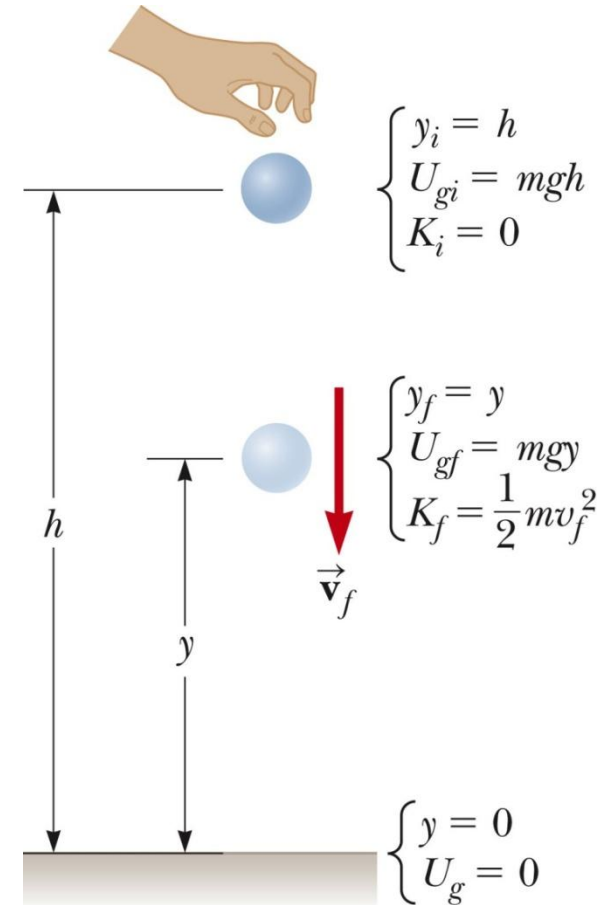
$$g(h - y) = \frac{1}{2} v_f^2$$

$$2g(h - y) = v_f^2$$

$$v_f = \sqrt{2g(h - y)}$$

Ακριβώς πριν ακουμπήσει στο έδαφος ($y = 0$),
το μέτρο της ταχύτητας της μπάλας είναι

$$v_f = \sqrt{2gh}$$



ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 10.3 Η ταχύτητα ενός κιβωτίου που ολισθαίνει σε ράμπα

Ένα κιβώτιο σπρώχνεται με δύναμη από την καρότσα ενός αυτοκινήτου με αρχική ταχύτητα $v_i = 2 \text{ m/s}$ να ολισθήσει σε μια λεία ράμπα ύψους 5.0 m . Ποιά είναι η ταχύτητα v_f του κιβωτίου στη βάση της ράμπας;

ΛΥΣΗ

Εφόσον η ράμπα είναι λεία, δηλαδή δεν υπάρχουν τριβές στο κιβώτιο, μπορούμε να γράψουμε την αρχή διατήρησης της μηχανικής ενέργειας.

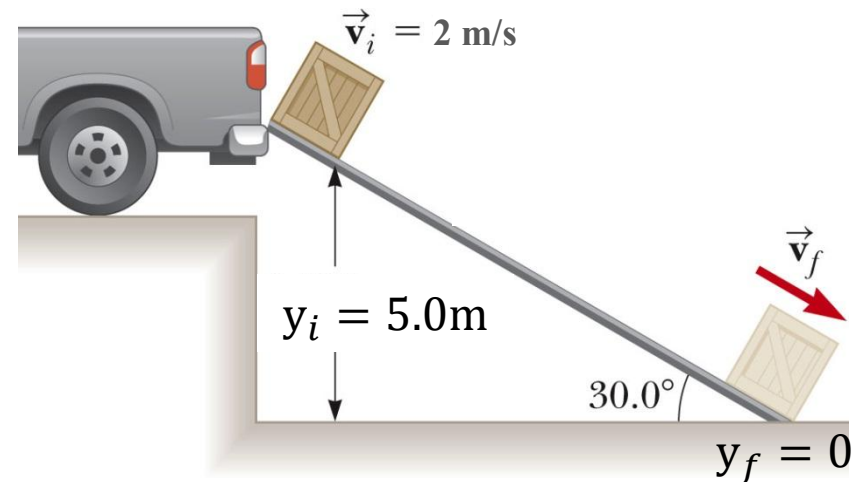
$$K_i + U_{gi} = K_f + U_{gf}$$

$$\frac{1}{2}mv_i^2 + mgy_i = \frac{1}{2}mv_f^2 + mgy_f$$

$$\frac{1}{2}v_i^2 + gy_i = \frac{1}{2}v_f^2 + gy_f \Rightarrow v_i^2 + 2gy_i = v_f^2 + 2gy_f$$

$$(2\text{m/s})^2 + 2(9.8\text{m/s}^2)(5.0\text{m}) = v_f^2 + 0$$

$$100 \text{ m}^2/\text{s}^2 = v_f^2 \Rightarrow v_f = \sqrt{100\text{m}^2/\text{s}^2} = 10\text{m/s}$$



ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 10.6 Ένας σώμα που εκτοξεύεται με ελατήριο

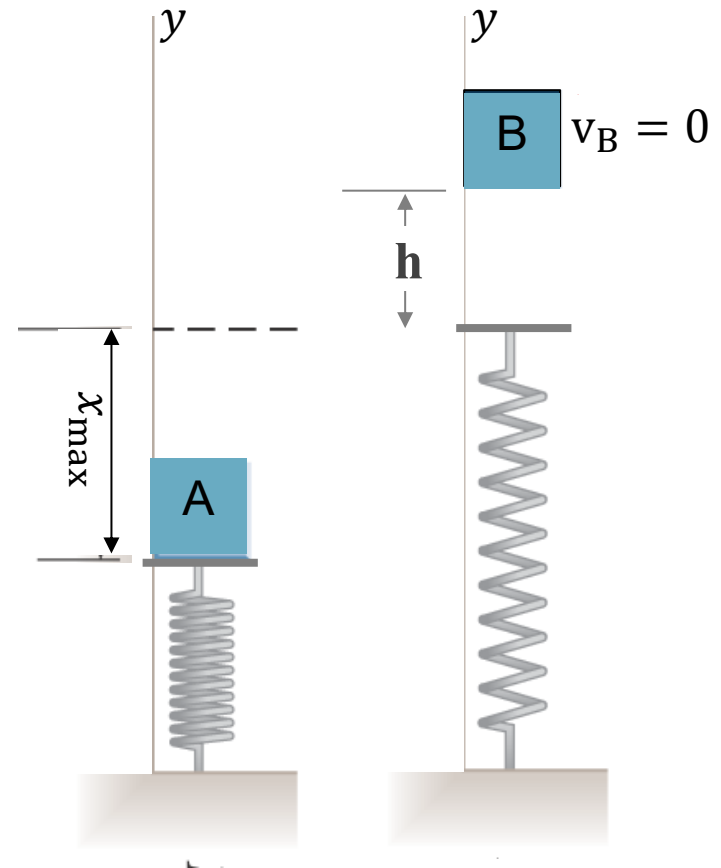
Τοποθετούμε ένα φορτίο μάζας $m = 2.0 \text{ kg}$ στην κορυφή ενός πολύ ισχυρού ελατηρίου μήκους 2.0 m το οποίο έχει σταθερά $k = 5.0 \times 10^4 \text{ N/m}$. Στη συνέχεια συμπιέζουμε το ελατήριο προς τα κάτω κατά $x_{\max} = 1.20 \text{ m}$ (θέση Α). Να υπολογίσετε το ύψος στο οποίο θα φτάσει το φορτίο όταν αφήσουμε το ελατήριο ελεύθερο.

ΛΥΣΗ

Αν κατά την κίνηση του φορτίου αγνοήσουμε την αντίσταση του αέρα (τριβή), οι μόνες δυνάμεις που δέχεται είναι η δύναμη της βαρύτητας και η δύναμη από το ελατήριο.

Στη θέση Α, που το σώμα είναι ακίνητο και το ελατήριο έχει τη μέγιστη συμπίεσή του $x_{\max}$, όλη η μηχανική ενέργεια του συστήματος είναι δυναμική ενέργεια του ελατηρίου

$$E_{\mu\eta\chi}^A = \frac{1}{2} k x_{\max}^2$$



ΛΥΣΗ (συνέχεια)

Στη θέση Β, όπου το ελατήριο έχει το φυσικό του μήκος και το φορτίο είναι στιγμιαία ακίνητο στο ψηλότερο σημείο, όλη η μηχανική ενέργεια του συστήματος είναι βαρυτική δυναμική ενέργεια του σώματος

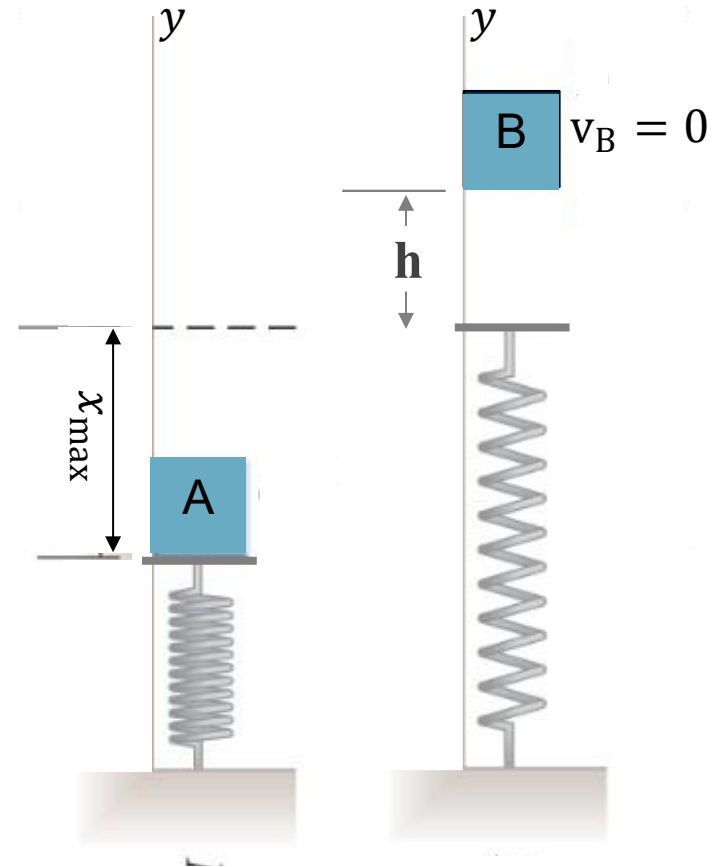
$$E_{\mu\eta\chi}^B = mg(h + x_{\max})$$

Εφόσον, καθ'όλη την κίνηση του συστήματος φορτίο-ελατήριο, οι δυνάμεις είναι διατηρητικές μπορούμε να γράψουμε την αρχή διατήρησης της μηχανικής ενέργειας

$$E_{\mu\eta\chi}^A = E_{\mu\eta\chi}^B \Rightarrow \frac{1}{2} kx_{\max}^2 = mg(h + x_{\max})$$

$$\frac{1}{2} (5.0 \times 10^4 \text{ N/m})(1.20 \text{ m})^2 = (2.0 \text{ kg})(9.80 \text{ m/s}^2)(h + 1.20 \text{ m})$$

$$h = 4130 \text{ m}$$

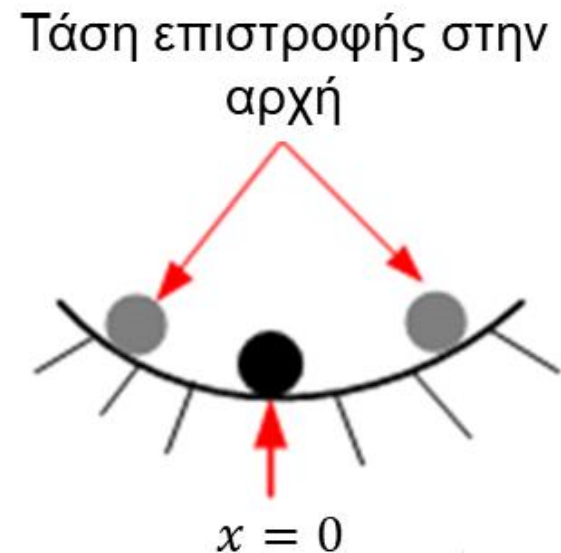


Διαγράμματα ενέργειας και ευσταθής ισορροπία

Η θέση $x = 0$ είναι θέση **ευσταθούς ισορροπίας** (stable equilibrium)

- Οποιαδήποτε μετατόπιση μακριά από τη συγκεκριμένη θέση προκαλεί μια δύναμη επαναφοράς.

Οι διατάξεις ευσταθούς ισορροπίας αντιστοιχούν στις θέσεις εκείνες για τις οποίες **η δυναμική ενέργεια U έχει ελάχιστη τιμή.**



Διαγράμματα ενέργειας και ασταθής ισορροπία

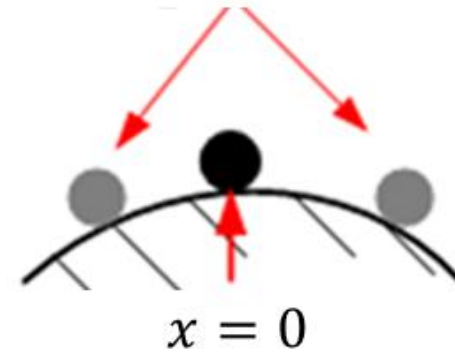
Στη θέση $x = 0$, η δύναμη $F_x = 0$, άρα το σωματίδιο βρίσκεται σε ισορροπία.

Για οποιαδήποτε άλλη τιμή του x , το σωματίδιο απομακρύνεται από τη θέση ισορροπίας.

Αυτό είναι ένα παράδειγμα **ασταθούς ισορροπίας** (unstable equilibrium)

Οι διατάξεις ασταθούς ισορροπίας αντιστοιχούν σε εκείνες τις θέσεις για τις οποίες η **δυναμική ενέργεια U** έχει **μέγιστη τιμή**.

Αδύνατον να επιστρέψει στην αρχή

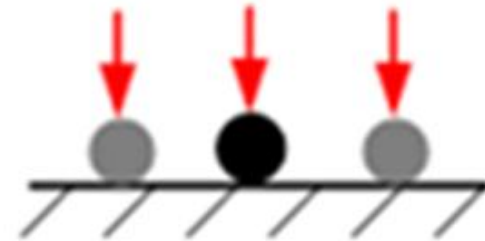


Ουδέτερη ισορροπία

Όταν η δυναμική ενέργεια U είναι σταθερή σε κάποια περιοχή, προκύπτει μια διάταξη που ονομάζεται **ουδέτερη ισορροπία** (neutral equilibrium).

Οι μικρές μετατοπίσεις ενός σώματος από κάποια θέση στην περιοχή αυτή δεν παράγουν καθόλου δυνάμεις.

Ισορροπία σε
οποιαδήποτε θέση



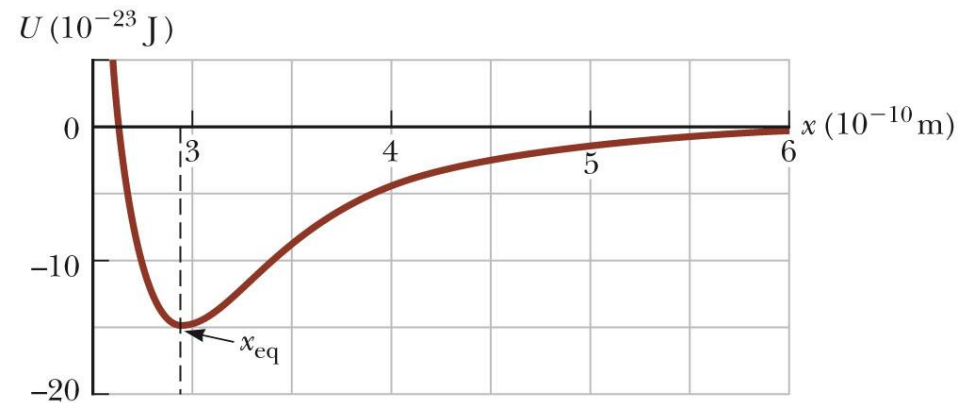
Δυναμική ενέργεια στα μόρια

Η δυναμική ενέργεια που σχετίζεται με τη δύναμη μεταξύ δύο ατόμων σε ένα μόριο μπορεί να μοντελοποιηθεί από τη συνάρτηση δυναμικής ενέργειας των Lennard-Jones.

$$U(x) = 4 \epsilon \left[\left(\frac{\sigma}{x} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{x} \right)^6 \right]$$

Βρείτε την ελάχιστη τιμή της συνάρτησης (υπολογίζοντας την παράγωγο και εξισώνοντάς την με 0) για να βρείτε την απόσταση ευσταθούς ισορροπίας.

Στο γράφημα της συνάρτησης των Lennard-Jones φαίνεται η πιο πιθανή απόσταση μεταξύ των ατόμων στο μόριο (ελάχιστη ενέργεια).



ΤΕΛΟΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ