ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΕΙΑ I

Ενότητα 1
Εισαγωγή στη Φυσικοχημεία

Δημήτρης Κονταρίδης

Αναπληρωτής Καθηγητής

Πολυτεχνική Σχολή
Τμήμα Χημικών Μηχανικών

Ύλη μαθήματος

Μέρος 1ο. Αδυναμίες της Κλασικής Μηχανικής

Μέρος 2ο. Κβαντική Θεωρία

Μέρος 3ο. Ατομική Δομή και Ατομικά Φάσματα

Μέρος 4ο. Μοριακή Δομή και Μοριακά Φάσματα

Ενδεικτική βιβλιογραφία

1. **ATKINS, ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΕΙΑ**
   P.W. Atkins, J. De Paula
   (Atkins' Physical Chemistry, 9th Edition, 2010)
   Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, 2014

2. **ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΗΣ ΚΒΑΝΤΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ**
   Στέφανος Τραχανάς
   Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, 2012

3. **PHYSICAL CHEMISTRY: A Molecular Approach**
   D.A. McQuarrie, J.D. Simon
   University Science Books, Sausalito, California, 1997

4. **PRINCIPLES OF PHYSICAL CHEMISTRY, 2nd Edition**
   H. Kuhn, H.-D. Forsterling, D.H. Waldeck
   John Wiley & Sons, Inc., 2000

ΜΕΡΟΣ 1ο

ΑΔΥΝΑΜΙΕΣ ΤΗΣ ΚΛΑΣΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

Εισαγωγή

Στα τέλη του 19ου αιώνα υπήρχε η διάχυτη αίσθηση πως είχαν ολοκληρωθεί όλες οι θεμελιώδεις επιστημονικές ανακαλύψεις και απέμενε μόνο η αποσαφήνιση κάποιων λεπτομερειών και η βελτίωση των πειραματικών μεθόδων.

Σε αυτό συντέλεσε η μεγάλη πρόοδος που είχε επιτευχθεί μέχρι την εποχή εκείνη σε πολλές επιστήμες. Για παράδειγμα, στην περιοχή της Χημείας:

- Είχε λυθεί το φαινομενικά ανυπέρβλητο πρόβλημα της απόδοσης ενός αυτο-συνεπούς συνόλου ατομικών μαζών στα στοιχεία.
- Η εργασία του Dimitri Mendeleev είχε οδηγήσει στον Περιοδικό Πίνακα των στοιχείων, αν και οι λόγοι της περιοδικότητας δεν είχαν κατανοηθεί πλήρως.
- Η κατά Cannizzaro έννοια του μορίου, αν και είχε αμφισβητηθεί αρχικά, έγινε ευρέως αποδεκτή.
- Οι βασικές αρχές των χημικών αντιδράσεων είχαν διαλευκανθεί από τον Svante Arrhenius, και η εναπομένουσα εργασία φαινόταν αν περιορίζεται στην κατηγοριοποίηση των διαφόρων τύπων τους.

Svante Arrhenius
(1859-1927)

Εισαγωγή

Στην περιοχή της Φυσικής:

- **Η Νευτώνεια μηχανική, η οποία είχε επεκταθεί από τους J. Lagrange και W. Hamilton, μπορούσε να εφαρμοστεί στην κίνηση των ουρανίων σωμάτων και να εξηγήσει περίπλοκα φυσικά φαινόμενα σχετικά, π.χ. με την ελαστικότητα και την υδροδυναμική.**

- **Η εργασία του S. Carnot είχε οδηγήσει στη διατύπωση της έννοιας της εντροπίας και η ακόλουθη δουλειά του J. Gibbs στην πλήρη ανάπτυξη της Θερμοδυναμικής ως επιστήμης.**

- **Η εξαιρετική εργασία του J.C. Maxwell είχε επιτρέψει την ενοποίηση της οπτικής με τον ηλεκτρισμό και το μαγνητισμό και είχε αναδείξει τις κυματικές ιδιότητες του φωτός.**

James Clerk Maxwell (1831-1879)

Μεταξύ άλλων, οι φυσικοί πίστευαν πως η κίνηση των μικροσκοπικών σωματιδίων μπορούσε να περιγραφεί με χρήση των νόμων της κίνησης που εισήχθησαν το 17^{o} αιώνα από τον Isaac Newton.

Εισαγωγή

Πειραματικά αποτελέσματα που συσσωρεύτηκαν στα τέλη του 19ου αιώνα έδειξαν ότι η κλασική μηχανική δεν μπορούσε να εφαρμοστεί σε σωματίδια τόσο μικρά όσο τα ηλεκτρόνια.

Στη δεκαετία του 1920 ανακαλύφθηκαν έννοιες και εξισώσεις, οι οποίες μπορούσαν να περιγράψουν τα φαινόμενα αυτά. Ο νέος κλάδος της φυσικής που προέκυψε ονομάστηκε Κβαντική Μηχανική.

Στην κβαντική μηχανική, όλες οι ιδιότητες ενός συστήματος εκφράζονται με όρους μιας κυματοσυνάρτησης, η οποία προκύπτει από την επίλυση της εξίσωσης Schrödinger.

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t}\psi(\mathrm{r},t) = \left[-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + V(\mathrm{r},t)\right]\psi(\mathrm{r},t)$$

Η χρονοεξαρτημένη εξίσωση Schrödinger

Erwin Schrödinger
(1887-1961)

Εισαγωγή

Στις επόμενες ενότητες θα μελετηθούν ορισμένες από τις βασικές αρχές της Κβαντικής Μηχανικής.

Αρχικά, θα γίνει περιληπτική αναφορά σε πειραματικά αποτελέσματα, τα οποία οδήγησαν στο συμπέρασμα πως:

- **τα σωματίδια μπορούν να λάβουν μόνο ορισμένες διακριτές τιμές ενέργειας**
- **οι έννοιες του σωματιδίου και του κύματος μπορούν να συγχωνευτούν.**

Θα μελετηθούν ορισμένες από τις τεχνικές της κβαντικής μηχανικής με χρήση τελεστών, και θα δούμε πως αυτές οδηγούν, μεταξύ άλλων:

- **στην ανάδυση της ιδιότητας του spin, το οποίο δεν έχει κλασικό ανάλογο, και**
- **στην αρχή της αβεβαιότητας (του Heisenberg), η οποία αποτελεί μια από τις μεγαλύτερες ανακαλύψεις του $20^{ου}$ αιώνα.**

Werner Heisenberg
(1901-1976)

Βασικές Έννοιες της Φυσικής

Ενέργεια

Η βασική έννοια που χρησιμοποιείται για την εξήγηση των φαινομένων με τα οποία πραγματεύεται η Φυσικοχημεία, είναι αυτή της ενέργειας, δηλαδή της δυνατότητας παραγωγής έργου.

Η ενέργεια μπορεί να αλλάξει μορφή ή να μεταφερθεί από μια θέση σε μια άλλη, αλλά η ολική ενέργεια είναι σταθερή.

Η ολική ενέργεια είναι το άθροισμα της κινητικής και της δυναμικής ενέργειας του σωματιδίου.

$$E = E_{\mathrm{K}} + E_{\mathrm{P}}$$

Κινητική ενέργεια, E_{K}, είναι η ενέργεια που έχει ένα σώμα ως αποτέλεσμα της κίνησής του.

Για σώμα μάζας m το οποία κινείται με ταχύτητα u, είναι:

$$E_{\mathrm{K}} = \frac{1}{2} m u^2$$

Δυναμική ενέργεια, E_{P} ή V, είναι η ενέργεια που έχει ένα σώμα ως αποτέλεσμα της θέσης του.

$$V = mgh$$

Το σημείο μηδενικής δυναμικής ενέργειας είναι αυθαίρετο. Για παράδειγμα, η βαρυτική ενέργεια ενός σώματος συνήθως λαμβάνεται ίση με μηδέν στην επιφάνεια της Γης.

$$V = 0 \text{ για } h = 0$$

Κλασική Μηχανική

Η κατανόηση της συμπεριφοράς των ατόμων και των μορίων, όπως και των ηλεκτρονίων και των πυρήνων που τα συνιστούν, προϋποθέτει τη γνώση του τρόπου με τον οποίο τα σωματίδια αυτά κινούνται κατω από την επίδραση των δυνάμεων που επενεργούν σε αυτά.

Η Κλασική Μηχανική περιγράφει τη συμπεριφορά των υλικών σωμάτων με χρήση δύο εξισώσεων.

- **Η πρώτη εκφράζει το γεγονός ότι η ολική ενέργεια διατηρείται σταθερή απουσία εξωτερικών δυνάμεων.**
- **Η δεύτερη εκφράζει την απόκριση των σωμάτων στις δυνάμεις που επενεργούν πάνω τους.**

- **Προσδιορισμός της τροχιάς με όρους ενέργειας**

- **2ος Νόμος του Newton**

Η τροχιά συναρτήσει της ενέργειας

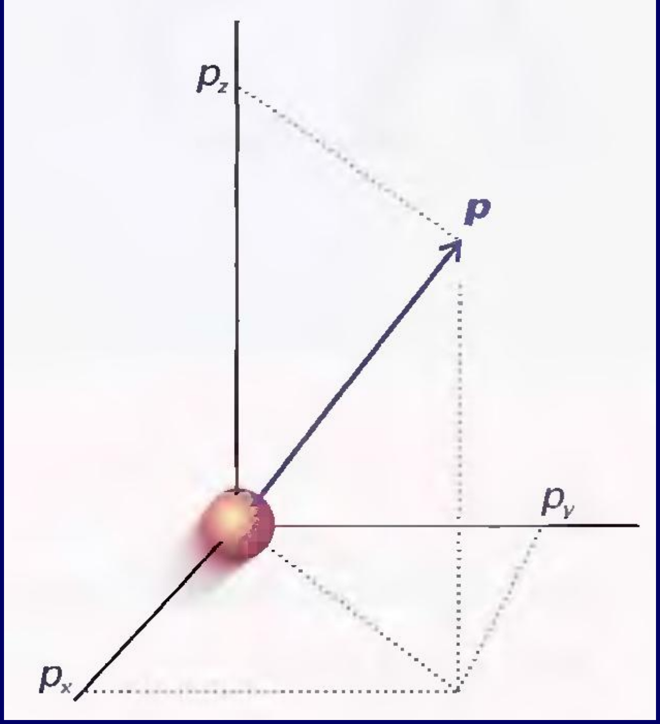
Η **ταχύτητα**, u, ενός σωματιδίου ορίζεται ως ο ρυθμός μεταβολής της θέσης του.

Η ταχύτητα είναι διάνυσμα με διεύθυνση και μέτρο.

$$u = \frac{dr}{dt}$$

Η γραμμική **ορμή**, p, ενός σωματιδίου μάζας m σχετίζεται με την ταχύτητα u μέσω της σχέσης:

$$p = mu$$



Το **διάνυσμα** της ορμής, όπως και αυτό της ταχύτητας, δείχνει προς την κατεύθυνση προς την οποία κινείται το σωματίδιο.

Η κινητική ενέργεια μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση της ορμής.

Το ίδιο ισχύει για την ολική ενέργεια.

$$E_K = \frac{1}{2}mu^2 = \frac{p^2}{2m}$$

$$E = \frac{p^2}{2m} + V(x)$$

Η τροχιά συναρτήσει της ενέργειας

Η εξίσωση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δειχθεί πως ένα σωματίδιο θα έχει μια **καθορισμένη τροχιά**, δηλαδή ορισμένη θέση και ορμή σε κάθε χρονική στιγμή.

$$E = \frac{1}{2}mu^2 + V(x)$$

Για παράδειγμα, μπορεί να γραφεί σα διαφορική εξίσωση για το x ως συνάρτηση του t.

$$u = \frac{dx}{dt} = \sqrt{\frac{2(E-V)}{m}}$$

Η λύση της εξίσωσης αυτής για δεδομένη ολική ενέργεια δίνει τη θέση του σωματιδίου, x, ως συνάρτηση του χρόνου, t.

Αντικαθιστώντας την τιμή του x στην κατάλληλη σχέση της δυναμικής ενέργειας, V, μπορούμε να υπολογίσουμε την ταχύτητα του σωματιδίου.

Για παράδειγμα, έστω σωματίδιο που κινείται σε μια διάσταση σε ομοιόμορφο, σταθερό δυναμικό (το V δεν εξαρτάται από τα x και t).

Για απλότητα, θέτουμε $V=0$, οπότε η εξίσωση γίνεται:

$$\frac{dx}{dt} = \left(\frac{2E_K}{m}\right)^{1/2}$$

Η τροχιά συναρτήσει της ενέργειας

Μια λύση της εξίσωσης είναι η:

$$x(t) = x(0) + \left(\frac{2E_K}{m}\right)^{1/2} t$$

Η σταθερή ενέργεια *E* σχετίζεται με την αρχική ορμή *p*(0) μέσω της εξίσωσης:

$$E_K = \frac{p(0)^2}{2m}$$

Άρα, η τροχιά του σωματιδίου δίνεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\boxed{\begin{aligned} x(t) &= x(0) + \frac{p(0)t}{m} \\ p(t) &= m\frac{dx}{dt} = p(0) \end{aligned}}$$

Επομένως, σύμφωνα με την Κλασική Μηχανική, εάν γνωρίζουμε την αρχική θέση και την ορμή του σωματιδίου, μπορούμε να προβλέψουμε την τροχιά του (μελλοντική θέση και ορμή) επακριβώς.

$$\frac{dx}{dt} = \left(\frac{2E_K}{m}\right)^{1/2}$$

Ο 2ος νόμος του Newton

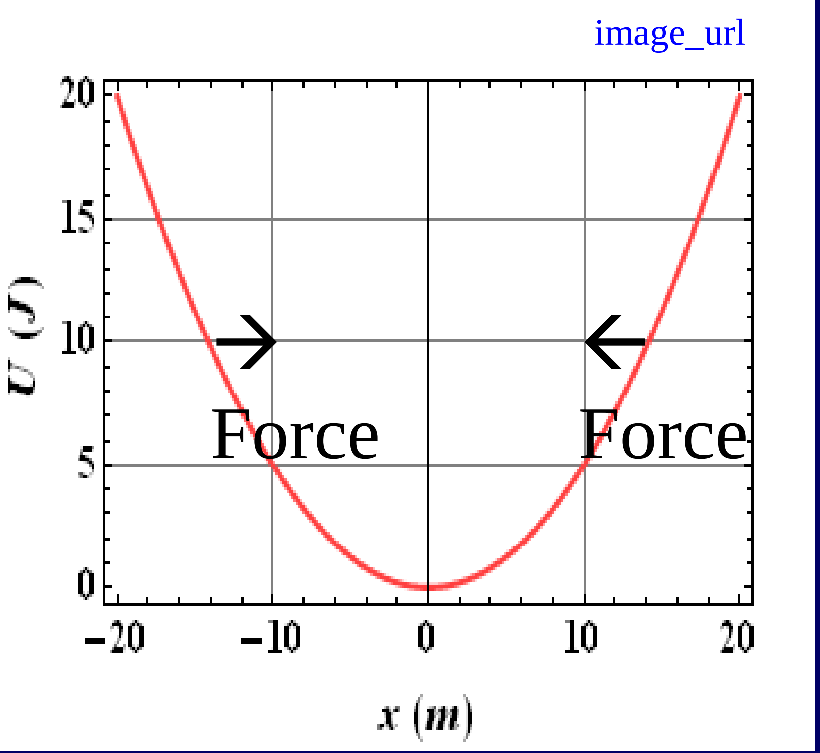
Η δεύτερη βασική εξίσωση της Κλασικής Μηχανικής είναι ο Νόμος του Newton για την κίνηση.

Η δύναμη, F, στην οποία υπόκειται ένα σωματίδιο το οποίο κινείται ελεύθερα σε μια διάσταση, σχετίζεται με τη δυναμική του ενέργεια, V :

$$F = -\frac{dV}{dx}$$

Η σχέση αυτή υποδεικνύει πως η φορά της δύναμης είναι προς την κατεύθυνση της μειούμενης δυναμικής ενέργειας.

Η δύναμη που επενεργεί σε ένα σωματίδιο προσδιορίζεται από την κλίση της δυναμικής ενέργειας σε κάθε σημείο.



Στις τρεις διαστάσεις: $F = -\nabla V$

$$\nabla = \mathrm{i}\frac{\partial}{\partial x} + \mathrm{j}\frac{\partial}{\partial y} + \mathrm{k}\frac{\partial}{\partial z}$$

Ο 2ος νόμος του Newton

Η δεύτερη βασική εξίσωση της Κλασικής Μηχανικής είναι ο Νόμος του Newton για την κίνηση.

Σύμφωνα με αυτόν, ο ρυθμός μεταβολής της ορμής ισούται με την δύναμη, F, η οποία επενεργεί στο σωματίδιο.

$$\frac{dp}{dt} = F \Rightarrow m\boxed{\frac{d^2x}{dt^2}} = F$$

$$p = m\frac{dx}{dt}$$

επιτάχυνση

Επομένως, εάν γνωρίζουμε την δύναμη που επενεργεί σε κάθε σημείο και σε κάθε χρονική στιγμή, η εξίσωση μας δίνει την τροχιά του σωματιδίου.

Η σχέση είναι ισοδύναμη με αυτή που προέκυψε για την ενέργεια.

Για παράδειγμα, έστω σωματίδιο μάζας m, στο οποίο επενεργεί σταθερή δύναμη F για χρονικό διάστημα τ, και στη συνέχεια κινείται ελεύθερα.

Τότε: $$\frac{dp}{dt} = F \quad \text{για} \quad 0 < t < \tau$$

και: $$\frac{dp}{dt} = 0 \quad \text{για} \quad t > \tau$$

Ο 2ος νόμος του Newton

Η λύση της πρώτης εξίσωσης είναι:

$$p(t) = p(0) + Ft \quad \text{για} \quad 0 < \tau < t$$

Στο τέλος της περιόδου τ:

$$p(\tau) = p(0) + F\tau$$

Η λύση της δεύτερης εξίσωσης είναι:

$$p = \text{constant}$$

Για λόγους απλότητας, υποθέτουμε ότι το σωματίδιο βρίσκεται αρχικά σε κατάσταση ηρεμίας.

$$\frac{dp}{dt} = F \quad \text{για} \quad 0 < t < \tau$$

$$\frac{dp}{dt} = 0 \quad \text{για} \quad t > \tau$$

Ο 2ος νόμος του Newton

Η λύση της πρώτης εξίσωσης είναι: $p(t) = p(0) + Ft \quad \text{για} \quad 0 < \tau < t$

Στο τέλος της περιόδου τ: $\boxed{p(\tau) = p(0) + F\tau}$

Η λύση της δεύτερης εξίσωσης είναι: $p = \text{constant}$

Για λόγους απλότητας, υποθέτουμε ότι το σωματίδιο βρίσκεται αρχικά σε **κατάσταση ηρεμίας**.

Τότε: $p(0) = 0 \;\Rightarrow p(\tau) = F\tau$

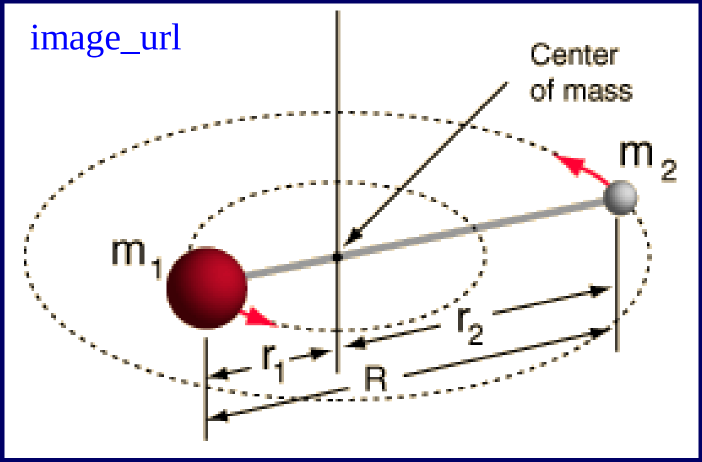
$$E_K = \frac{p^2}{2m} \Rightarrow \boxed{E = \frac{F^2\tau^2}{2m}}$$

Αυτή είναι η τιμή της ολικής ενέργειας του συστήματος σε κάθε χρονική στιγμή μετά την παύση της εφαρμογής της δύναμης F.

Παρατηρούμε πως, εφόσον οι τιμές των τ και F μπορούν να λάβουν οποιαδήποτε τιμή, το ίδιο ισχύει και για το E.

Περιστροφική κίνηση

Η ίδια ανάλυση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την περιγραφή της περιστροφικής κίνησης, η οποία θα μας απασχολήσει όταν θα συζητηθεί η κίνηση των μορίων στην αέρια φάση.



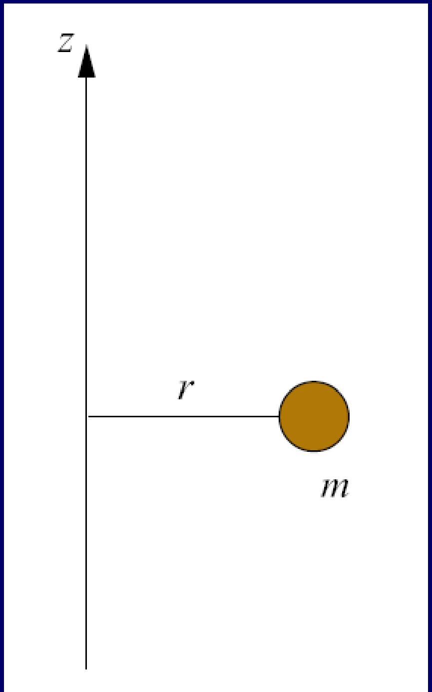
Για ένα σωματίδιο που περιστρέφεται γύρω από άξονα z, η στροφορμή, J, ορίζεται ως:

$$J = I\omega$$

Γωνιακή ταχύτητα

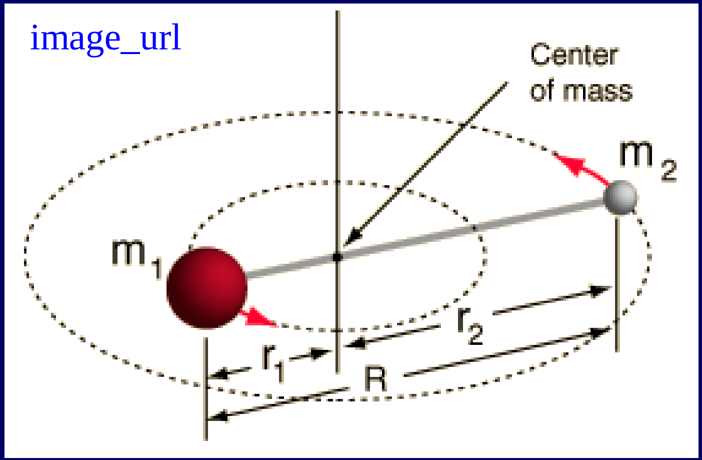
Ροπή αδράνειας

$$I = mr^2$$



Περιστροφική κίνηση

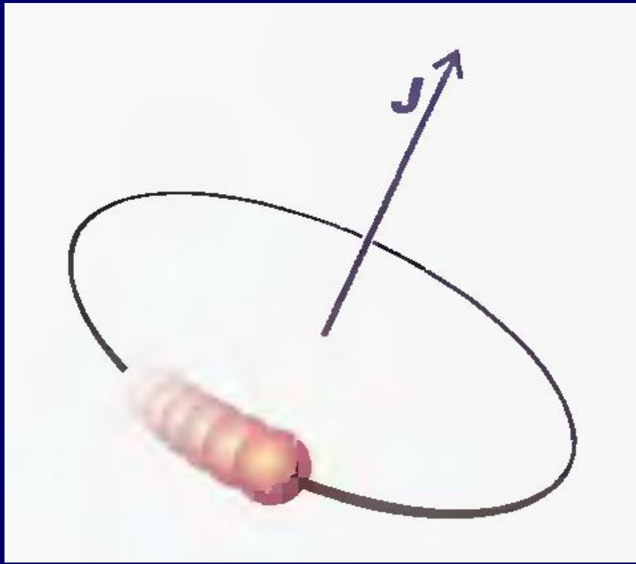
Η ίδια ανάλυση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την περιγραφή της περιστροφικής κίνησης, η οποία θα μας απασχολήσει όταν θα συζητηθεί η κίνηση των μορίων στην αέρια φάση.



Για ένα σωματίδιο που περιστρέφεται γύρω από άξονα z, η στροφορμή, J, ορίζεται ως:

$$J = I\omega \qquad I = mr^2$$

$$p = mu$$



Η στροφορμή είναι άνυσμα: Το μέτρο του σχετίζεται με την ταχύτητα περιστροφής, και η διεύθυνσή του δείχνει τον άξονα περιστροφής.

Είναι προφανής η αναλογία μεταξύ των m και I, των υ και ω, και των p και J για τη μεταφορική και την περιστροφική κίνηση, αντίστοιχα.

Περιστροφική κίνηση

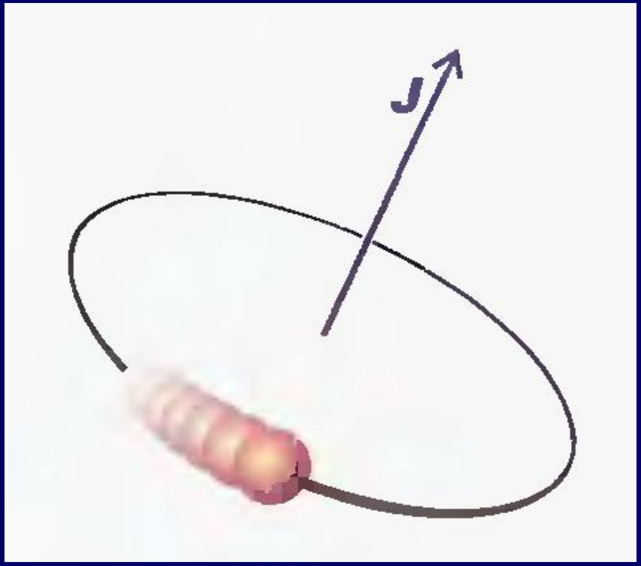
Η περιστροφή μπορεί να **επιταχυνθεί** με εφαρμογή μιας δύναμης στρέψης, T, οπότε η εξίσωση του Newton είναι:

$$\frac{dJ}{dt} = T$$

Όταν εφαρμοστεί μια σταθερή ροπή στρέψης T για χρονικό διάστημα τ, η περιστροφική ενέργεια ενός αρχικά ακίνητου σώματος γίνεται:

$$E = \frac{T^2 \tau^2}{2I}$$

Σύμφωνα με την εξίσωση αυτή, η εφαρμογή κατάλληλης ροπής για τον απαραίτητο χρόνο μπορεί να διεγείρει την περιστροφή σε **οποιαδήποτε** ενέργεια.



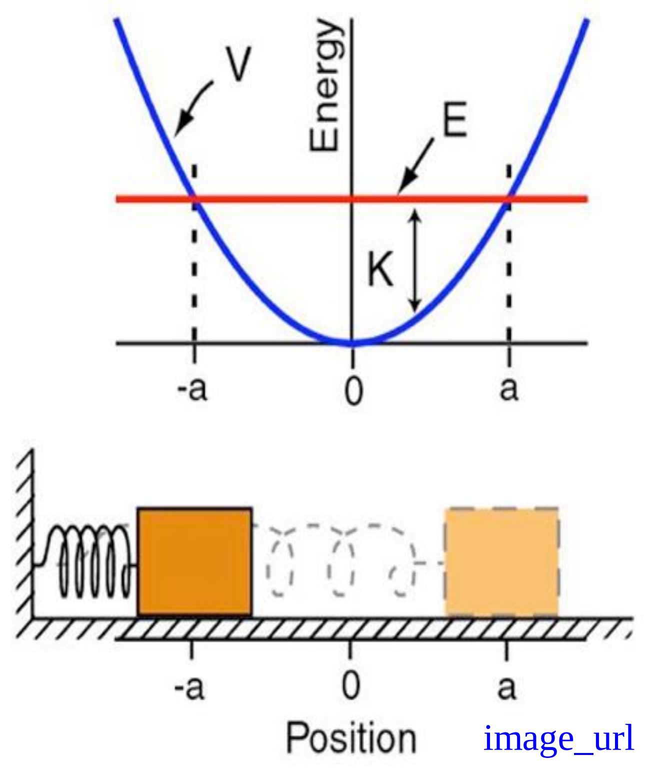
Εξισώσεις μεταφορικής-περιστροφικής κίνησης

Μεταφορική κίνηση	**Περιστροφική κίνηση**
m	$I = mr^2$
u	ω
$p = mu$	$J = I\omega$
$F = \dfrac{dp}{dt}$	$T = \dfrac{dJ}{dt}$
$E = \dfrac{F^2\tau^2}{2m}$	$E = \dfrac{T^2\tau^2}{2I}$

Αρμονικός ταλαντωτής

Ο τρίτος θεμελιώδης τύπος κίνησης είναι η ταλαντωτική κίνηση, όπως η δόνηση των ατόμων σε ένα δεσμό.

Ο αρμονικός ταλαντωτής αποτελείται από ένα σωματίδιο το οποίο υπόκειται σε μια δύναμη επαναφοράς που είναι ανάλογη της μετατόπισής του.



Διάγραμμα δυναμικής ενέργειας αρμονικού ταλαντωτή

Τυπικό παράδειγμα αρμονικού ταλαντωτή είναι ένα σώμα μάζας m, το οποίο κρέμεται με ελατήριο από ένα σταθερό σημείο.

$$F = -kx$$

Το αρνητικό πρόσημο σημαίνει πως η φορά της δύναμης είναι αντίθετη με αυτή της μετατόπισης.

Η σταθερά k (σταθερά δύναμης) είναι μεγαλύτερη όταν το ελατήριο είναι «σκληρό» .

Αρμονικός ταλαντωτής

$$F = -kx$$

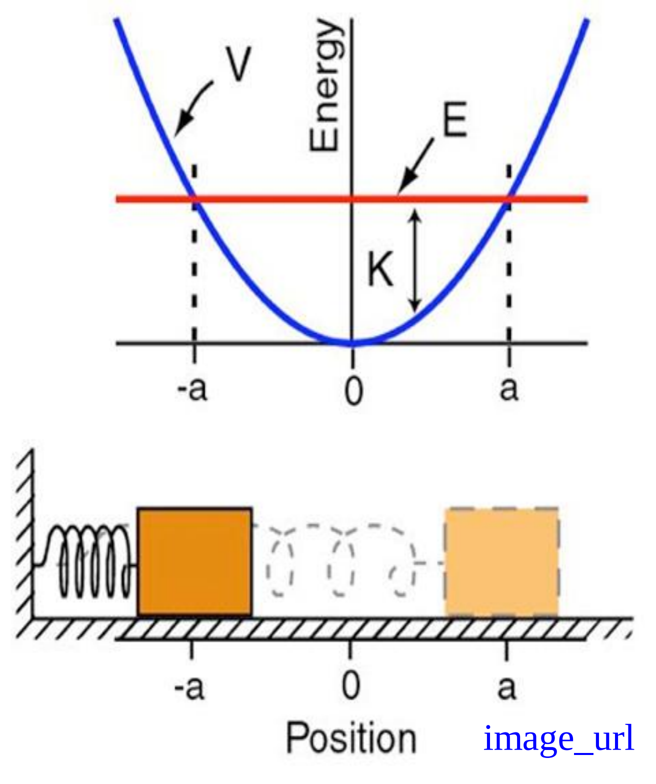
$$F = \frac{dp}{dt} = \boxed{m\frac{d^2x}{dt^2} = -kx}$$

Μια λύση της εξίσωσης είναι η:

$$x = A\sin\omega t$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$p = m\omega A\cos\omega t$$



Διάγραμμα δυναμικής ενέργειας αρμονικού ταλαντωτή

Βλέπουμε πως η **θέση** του σωματιδίου μεταβάλλεται **αρμονικά** με συχνότητα $\nu=\omega/2\pi$.

Το σωματίδιο είναι **ακίνητο** όταν η μετατόπιση x παίρνει τη μέγιστη τιμή της, A, η οποία ονομάζεται πλάτος της κίνησης.

Αρμονικός ταλαντωτής

$$F = -kx$$

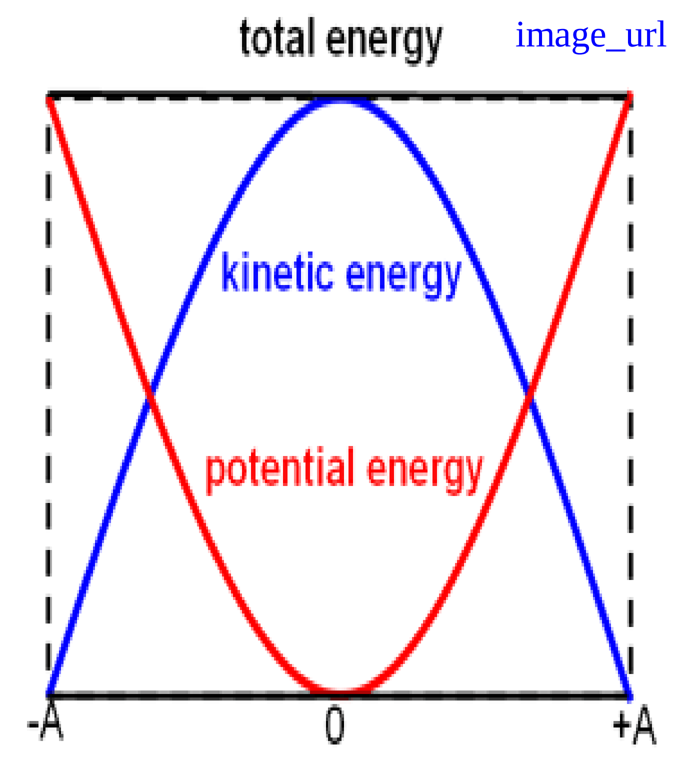
$$F = \frac{dp}{dt} \quad = \boxed{m\frac{d^2x}{dt^2} \quad = -kx}$$

Μια λύση της εξίσωσης είναι η:

$$x = A\sin\omega t$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$p = m\omega A\cos\omega t$$



Βλέπουμε πως η θέση του σωματιδίου μεταβάλλεται αρμονικά με συχνότητα $\nu=\omega/2\pi$.

Το σωματίδιο είναι ακίνητο όταν η μετατόπιση x παίρνει τη μέγιστη τιμή της, A, η οποία ονομάζεται πλάτος της κίνησης.

Η δύναμη που επενεργεί στο σωματίδιο εκτελεί επίσης αρμονική κίνηση. Η δύναμη έχει φορά προς το σημείο μηδενικής μετατόπισης.

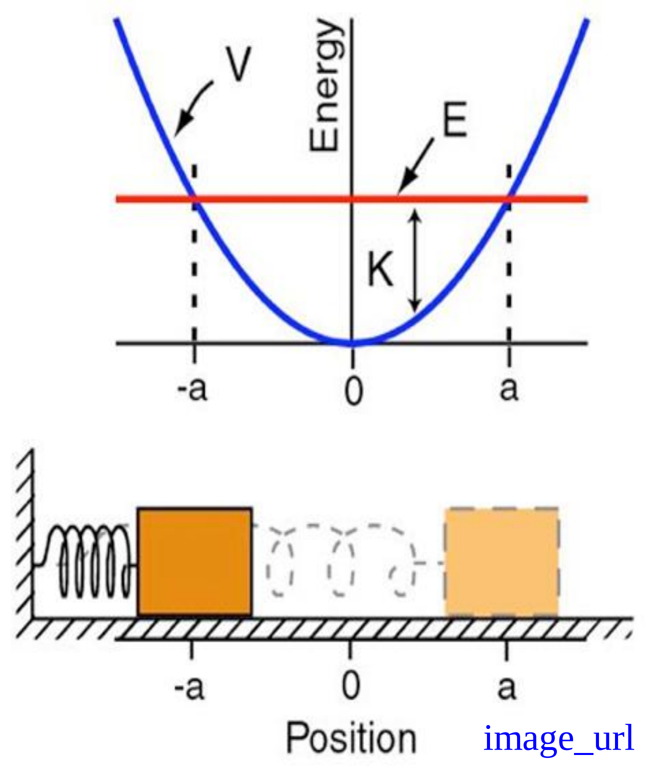
Η δυναμική ενέργεια του σωματιδίου είναι ανάλογη του x^2 (παραβολή).

Άσκηση 1

Να εξαχθεί η σχέση μεταξύ της ολικής ενέργειας ενός αρμονικού ταλαντωτή και του πλάτους της κίνησής του.

Ο ολική ενέργεια είναι το άθροισμα της κινητικής και της δυναμικής ενέργειας.

Η δυναμική ενέργεια συσχετίζεται με τη δύναμη μέσω της εξίσωσης:



Διάγραμμα δυναμικής ενέργειας αρμονικού ταλαντωτή

$$E = E_k + V$$

$$\left. \begin{aligned} F &= -\frac{dV}{dx} \\ F &= -kx \end{aligned} \right\} \quad V = \frac{1}{2}kx^2$$

Αν στη θέση $x = 0$ είναι $V = 0$, τότε:

$$E = \frac{p^2}{2m} + V \Rightarrow \boxed{E = \frac{p^2}{2m} + \frac{1}{2}kx^2}$$

Άσκηση 1

Να εξαχθεί η σχέση μεταξύ της ολικής ενέργειας ενός αρμονικού ταλαντωτή και του πλάτους της κίνησής του.

$$E = \frac{p^2}{2m} + \frac{1}{2}kx^2 \Rightarrow \boxed{E = \frac{1}{2}kA^2}$$

$$\frac{p^2}{2m} = \frac{m\omega^2 A^2 \cos^2 \omega t}{2} = \frac{kA^2}{2}\cos^2 \omega t$$

$$\frac{1}{2}kx^2 = \frac{kA^2}{2}\sin^2 \omega t$$

$$\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t = 1$$

$$x = A\sin\omega t$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \Rightarrow k = m\omega^2$$

$$p = m\omega A\cos\omega t$$

Άσκηση 1

Να εξαχθεί η σχέση μεταξύ της ολικής ενέργειας ενός αρμονικού ταλαντωτή και του πλάτους της κίνησής του.

$$E = \frac{p^2}{2m} + \frac{1}{2}kx^2 \Rightarrow \boxed{E = \frac{1}{2}kA^2}$$

Σύμφωνα με την εξίσωση αυτή, η ενέργεια του ταλαντούμενου σωματιδίου μπορεί να λάβει οποιαδήποτε τιμή, με κατάλληλη επιλογή του A.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η συχνότητα της κίνησης εξαρτάται μόνο από τις εγγενείς ιδιότητες του ταλαντωτή, όπως αυτή εκφράζεται μέσω των k και m, και είναι ανεξάρτητη της ενέργειας.

Το πλάτος, A, καθορίζει την ενέργεια και είναι ανεξάρτητο της συχνότητας.

Αυτό σημαίνει πως το σωματίδιο θα ταλαντώνεται με την ίδια συχνότητα ανεξάρτητα από το πλάτος της κίνησής του

Κλασική Μηχανική

Συνοψίζοντας, σύμφωνα με την Κλασική Μηχανική:

(α) Η ενέργεια ενός συστήματος μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή.

(β) Αν γνωρίζουμε τις δυνάμεις που δρουν σε ένα σωματίδιο μπορεί να υπολογιστεί η ορμή και η θέση του στο χώρο και στο χρόνο τόσο στο μέλλον όσο και στο παρελθόν.

Θα δούμε στα επόμενα μαθήματα πως τα παραπάνω δεν ισχύουν σε μικροσκοπικό επίπεδο, οπότε και πρέπει να χρησιμοποιηθεί η κβαντομηχανική προσέγγιση.

Αναφορές

Σε όσες εικόνες δεν αναφέρεται η προέλευσή τους προέρχονται από το βιβλίο

ATKINS, ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΕΙΑ
P.W. Atkins, J. De Paula
(Atkins' Physical Chemistry, 9th Edition, 2010)
Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, 2014

Τέλος Ενότητας

Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.

Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ
επένδυση στην κοινωνία της γνώσης
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ
ΕΣΠΑ 2007-2013
πρόγραμμα για την ανάπτυξη
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ
Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

Σημείωμα Ιστορικού εκδόσεων έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση 1.0.0.

Σημείωμα αναφοράς

Copyright Πανεπιστήμιο Πατρών. Αναπληρωτής Καθηγητής, Δημήτρης Κονταρίδης. «Φυσικοχημεία Ι». Έκδοση: 1.0. Πάτρα 2015.

Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση:

https://eclass.upatras.gr/courses/CMNG2172/

Σημείωμα αδειοδότησης