

Κεφάλαιο 1

Οριζόντια βολή –Ομαλή κυκλική κίνηση-Θεωρία Β' Λυκείου



SCHOOLDOCTOR

Αρχή της ανεξαρτησίας των κινήσεων- Οριζόντια βολή

1 Εισαγωγικές Έννοιες - Α Λυκείου

Στην Φυσική της Α Λυκείου "κυριάρχησαν" οι **Νόμοι του Νεύτωνα**, και οι **Εξισώσεις Κίνησης**. Όλα αυτά είναι από τα βασικά εργαλεία για την μελέτη των κινήσεων ενός υλικού σώματος. Εργαλεία που θα μας συνοδέψουν και στην Φυσική της Β Λυκείου τόσο στο μάθημα της Γενικής Παιδείας, όσο και στο μάθημα της Κατεύθυνσης. Για να τα θυμηθούμε παρακάτω:

1.1 Δυναμική και Κινήσεις

Θεωρούμε ένα σώμα (αμελητέων διαστάσεων) το οποίο μπορεί να κινηθεί υπό την επίδραση δυνάμεων με συνισταμένη $\Sigma \vec{F}$ σε ευθύγραμμη τροχιά. Σύμφωνα με τον 2ο Νόμο του Νεύτωνα το είδος της κίνησης θα καθοριστεί από την $\Sigma \vec{F}$.

- Αν $\Sigma \vec{F} = 0$ τότε το σώμα εφόσον δεν ισορροπεί θα εκτελεί **Ευθύγραμμη Ομαλή Κίνηση**

$$v = \text{σταθερή} \quad \text{και} \quad x = vt$$

- Αν $\Sigma \vec{F} = \text{σταθερή}$, τότε το σώμα θα εκτελεί **Ευθύγραμμη Ομαλά Μεταβαλλόμενη Κίνηση**

$$\vec{a} = \frac{\Sigma \vec{F}}{m} = \text{σταθερή} \Rightarrow v = v_0 \pm at \quad \text{και} \quad x = v_0 t \pm \frac{1}{2}at^2$$

Όπου βέβαια v_0 είναι η αρχική ταχύτητα του σώματος (εφόσον υπάρχει) και το $\pm$ αντιστοιχεί στην επιταχυνόμενη ή επιβραδυνόμενη κίνηση.

1.2 Κατακόρυφες Κινήσεις

Όταν ένα σώμα μάζας m κινείται στο κατακόρυφο άξονα με την επίδραση μόνο της δύναμης του βάρους ($\vec{w} = m\vec{g}$) η επιτάχυνση (επιβράδυνση) του είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας $\vec{g}$.

Η επιτάχυνση της βαρύτητας έχει πάντα κατεύθυνση προς το κέντρο της γης και η τιμή της εξαρτάται από το ύψος πάνω από την επιφάνεια της γης και από το γεωγραφικό πλάτος. Όταν απομακρυνόμαστε από το κέντρο της γης η τιμή της ελαττώνεται. Για παράδειγμα η επιτάχυνση της βαρύτητας είναι μεγαλύτερη στο ισημερινό από ότι στους πόλους (θυμήσου το σχήμα της γης!)

- Αν το σώμα αφεθεί ελεύθερο ($v_0 = 0$) από ένα ύψος h τότε θα εκτελεί **Ελεύθερη Πτώση**.

$$v = gt \quad \text{και} \quad y = \frac{1}{2}gt^2$$

- Αν το σώμα εκτοξευτεί κατακόρυφα προς τα κάτω ($v_0 \neq 0$) από ένα ύψος h τότε θα εκτελεί **Κατακόρυφη βολή προς τα κάτω**.

$$v = v_0 + gt \quad \text{και} \quad y = v_0 t + \frac{1}{2}gt^2$$

- Αν το σώμα εκτοξευτεί κατακόρυφα προς τα πάνω ($v_0 \neq 0$) από το έδαφος τότε θα εκτελεί **Κατακόρυφη βολή προς τα πάνω**.

$$v = v_0 - gt \quad \text{και} \quad y = v_0 t - \frac{1}{2}gt^2$$

Με την χρήση των παραπάνω εξισώσεων μπορούμε να υπολογίσουμε σε κάθε χρονική στιγμή t την θέση και την ταχύτητα του σώματος. Άρα έχουμε μια πλήρη περιγραφή της κίνησης του. Η μεταβλητή $\vec{x}$ αντιστοιχεί στην **οριζόντια θέση** και η μεταβλητή $\vec{y}$ στην **κατακόρυφη θέση** και προφανώς θεωρούμε την αρχή των αξόνων ως αρχή μέτρησης των αποστάσεων.

2 Σύνθετες Κινήσεις - Οριζόντια Βολή

Στην φύση οι κινήσεις δεν γίνονται πάντα πάνω σε μια οριζόντια ή κατακόρυφη γραμμή, στις περισσότερες περιπτώσεις τα σώματα κινούνται στο επίπεδο και στον χώρο. Η μελέτη αυτών των "πραγματικών" κινήσεων μπορεί να γίνει με όλες τις παραπάνω γνώσεις αρκεί να σκεφτούμε "έξυπνα". Μπορούμε να μελετήσουμε τις "σύνθετες κινήσεις" απλά αν τις αναλύσουμε σε απλούστερες κινήσεις όπως οι παραπάνω.

2.1 Αρχή Ανεξαρτησίας των Κινήσεων

Όταν ένα σώμα εκτελεί ταυτόχρονα δύο ή περισσότερες κινήσεις και σε χρόνο t_1 πάει από την θέση Α στην θέση Γ, τότε στην ίδια θέση φτάνει εάν κάνει ξεχωριστά και διαδοχικά την ίδια κίνηση για χρόνο t_1 όμως την καθεμία.

Η αρχή της ανεξαρτησίας των κινήσεων χρησιμοποιείται για την μελέτη μιας σύνθετης κίνησης. Σε μια σύνθετη κίνηση για την ταχύτητα $\vec{v}$ και την μετατόπιση $\vec{x}$ ισχύουν αντίστοιχα οι σχέσεις:

$$\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2 \quad \vec{x} = \vec{x}_1 + \vec{x}_2$$

όπου βέβαια $\vec{v}_1, \vec{v}_2$ οι ταχύτητες και $\vec{x}_1, \vec{x}_2$, οι μετατοπίσεις λόγω της κάθε κίνησης ξεχωριστά.

2.2 Οριζόντια Βολή

Όταν ένα σώμα το ρίχνουμε με οριζόντια ταχύτητα $\vec{v}_0$ μέσα στο πεδίο βαρύτητας αγνοώντας κάθε είδους αντιστάσεις, το σώμα θα κάνει **Οριζόντια Βολή**. **Η οριζόντια βολή είναι μια σύνθετη κίνηση, η οποία αποτελείται από τις δύο πιο κάτω κινήσεις:**

- **Την ευθύγραμμη ομαλή**, λόγω της $\vec{v}_0$. Αν δηλαδή δεν υπήρχε βαρύτητα, το σώμα θα έκανε ευθύγραμμη ομαλή κίνηση με ταχύτητα $\vec{v}_0$
- **Την ελεύθερη πτώση** λόγω της βαρύτητας. Αν δηλαδή αφήναμε το σώμα (δεν υπήρχε η $\vec{v}_0$, τότε λόγω της βαρύτητας θα έκανε ελεύθερη πτώση.

Οι εξισώσεις που περιγράφουν την οριζόντια βολή είναι:

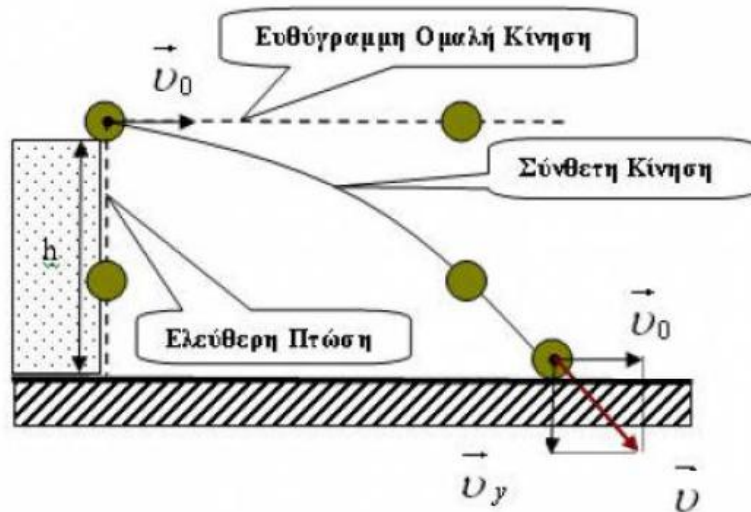
Στην οριζόντια διεύθυνση: $\Sigma F_x = 0 \Rightarrow \text{Ε.Ο.Κ.}$

$$v_x = v_0 = \text{σταθερή} \quad \text{και} \quad x = v_0 t$$

Στην κατακόρυφη διεύθυνση: $\Sigma F_y = mg \Rightarrow \text{Ελεύθερη πτώση}$

$$v_y = gt \quad \text{και} \quad y = \frac{1}{2}gt^2$$

- **Η θέση του σώματος σε κάθε χρονική στιγμή** καθορίζεται από τις συντεταγμένες του (x, y) τις οποίες έχουμε εκφράσει ως συναρτήσεις του χρόνου παραπάνω.
- **Η ταχύτητα του σώματος σε κάθε χρονική στιγμή** είναι η συνισταμένη των ταχυτήτων των επιμέρους κινήσεων ($\vec{v} = \vec{v}_x + \vec{v}_y$). Δηλαδή:



$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad \epsilon\phi\phi = \frac{v_y}{v_x}$$

Για να απαντήσουμε τώρα σε κάποιες ερωτήσεις...

1. Σε πόσο χρόνο το σώμα φτάνει στο έδαφος ;

Αν το σώμα την χρονική στιγμή $t = 0$ βρίσκονταν σε ύψος h για να βρούμε τον χρόνο που φτάνει στο έδαφος αρκεί να αξιοποιήσουμε την κίνηση στην κατακόρυφη διεύθυνση θέτοντας $y = h$ για την κατακόρυφη μετατόπιση.

$$y = \frac{1}{2}gt^2 = h \Rightarrow t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$$

2. Ποια θα είναι η μέγιστη οριζόντια μετατόπιση (S) του σώματος ;

Η μέγιστη οριζόντια μετατόπιση είναι αυτό που ονομάζουμε **Βεληνεκές** στην οριζόντια βοήθη. Για τον υπολογισμό θα αξιοποιήσουμε το προηγούμενο αποτέλεσμα μας σε συνδυασμό με την κίνηση στην οριζόντια

διεύθυνση, αφού αναφερόμαστε στην οριζόντια μετατόπιση την στιγμή που το σώμα φτάνει στο έδαφος

$$S = x = v_0 t = v_0 \sqrt{\frac{2h}{g}}$$

3. Με τι ταχύτητα φτάνει το σώμα στο έδαφος;

Η τιμή της ταχύτητας θα υπολογιστεί με την βοήθεια και των δυο κινήσεων υπολογίζοντας τις ταχύτητες v_x και v_y την χρονική στιγμή που το σώμα φτάνει στο έδαφος και βρίσκοντας την συνισταμένη τους.

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad \mu\epsilon \quad v_x = v_0 \quad \kappa\alpha\iota \quad v_y = gt = g\sqrt{\frac{2h}{g}}$$

3. Ποια είναι η εξίσωση της τροχιάς του σώματος;

Η σχέση που συνδέει τις συντεταγμένες (x, y) του σώματος σε κάθε χρονική στιγμή, αποτυπώνει δηλαδή την καμπύλη της κίνησης ονομάζεται **Εξίσωση της Τροχιάς**. Μπορούμε να την εξαγάγουμε αρκεί να "διώξουμε" τον χρόνο από τις εξισώσεις των x και y .

$$x = v_0 t \Rightarrow t = \frac{x}{v_0}, y = \frac{1}{2}gt^2 = \frac{1}{2}g\left(\frac{x}{v_0}\right)^2 \Rightarrow y = \frac{g}{2v_0^2}x^2$$

Η εξίσωση της τροχιάς $y = \frac{g}{2v_0^2}x^2$ είναι η εξίσωση της παραβολής στα μαθηματικά ($y = \alpha x^2, \alpha > 0$) για αυτό και η τροχιά του σώματος είναι μια **παραβολή**.

**** Παρόμοια κίνηση με αυτή που περιγράψαμε παραπάνω εκτελεί ένα ηλεκτρικά φορτισμένο σωματίδιο μάζας m και φορτίου q όταν εισέλθει με μια ταχύτητα $\vec{v}_0$ κάθετη στις δυναμικές γραμμές ενός ομογενούς Ηλεκτρικού πεδίου $\vec{E}$. Στην περίπτωση αυτή η δύναμη που αναγκάζει το σωματίδιο να κινηθεί "παραβολικά" είναι η ηλεκτρική δύναμη ($\vec{F} = q\vec{E}$ και όχι το βάρος. (Φυσική Β Λυκείου Θετικής & Τεχνολογικής Κατεύθυνσης, σχολικό σελ. 96-100)**

ΟΜΑΛΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΚΙΝΗΣΗ

Οι έννοιες που σχετίζονται με την μελέτη της κυκλικής κίνησης είναι βασικές για την μελέτη σύνθετων κινήσεων σωμάτων. Στην Γ Λυκείου θα αναπτυχθούν αναλυτικά οι μέθοδοι για την μελέτη αυτών των κινήσεων. Παρακάτω παραθέτω βασικές έννοιες για την μελέτη της Ομαλής Κυκλικής κίνησης που θα μας είναι χρήσιμες και αργότερα.

1 Περιοδικά Φαινόμενα

Ονομάζονται τα φαινόμενα που επαναλαμβάνονται κατά τον ίδιο τρόπο σε ίσα χρονικά διαστήματα. Τέτοια φαινόμενα είναι η κυκλική ομαλή κίνηση, η κίνηση του εκκρεμούς κ.ά. Κάθε περιοδικό φαινόμενο χαρακτηρίζεται από την **Περίοδο** (T) και τη **Συχνότητα** (f) του.

- **Περίοδος (T)** ενός περιοδικού φαινομένου είναι ο χρόνος που απαιτείται για μια πλήρη επανάληψη του φαινομένου. Αν σε χρόνο t γίνονται N επαναλήψεις του φαινομένου, τότε η περίοδος είναι ίση με το πηλίκο:

$$T = \frac{t}{N} \quad (1)$$

Μονάδα μέτρησης της περιόδου είναι το 1 s .

- **Συχνότητα (f)** ενός περιοδικού φαινομένου είναι το πηλίκο του αριθμού N των επαναλήψεων του φαινομένου σε ορισμένο χρόνο t , προς το χρόνο t . Δηλαδή:

$$f = \frac{N}{t} \quad (2)$$

Μονάδα μέτρησης της συχνότητας είναι το 1 Hz ή 1 s^{-1}

Από τον ορισμό τους, τα μεγέθη περίοδος και συχνότητα είναι αντίστροφα και συνδέονται με την σχέση:

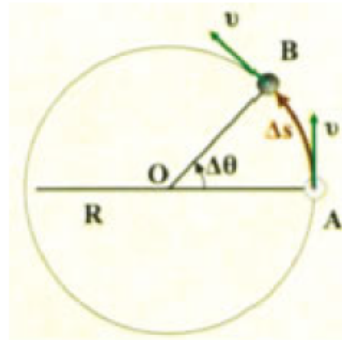
$$f = \frac{1}{T} \quad (3)$$

Η παραπάνω σχέση προκύπτει εύκολα από τον ορισμό της συχνότητας, γιατί σε χρόνο μιας περιόδου έχει εκτελεστεί μια επανάληψη του φαινομένου.

2 Η κινηματική της ομαλής κυκλικής κίνησης

Η κυκλική κίνηση είναι γενικά η κίνηση που εκτελεί ένα σώμα όταν το σχήμα της τροχιάς του είναι ένας κύκλος. Ιδιαίτερο βέβαια ενδιαφέρον έχει η μελέτη της **Ομαλής Κυκλικής Κίνησης**, στην οποία το μέτρο της ταχύτητας του σώματος θα παραμένει σταθερή. Τέτοια κίνηση είναι η κίνηση της Γης γύρω από τον ήλιο, η κίνηση ενός σημείου του γνωστού μας cd κλπ. Στην ομαλή κυκλική κίνηση το σώμα σε ίσα διαστήματα διανύει ίδια τμήματα κύκλου. Τα βασικά μεγέθη για την περιγραφή μιας τέτοιας κίνησης είναι η γραμμική και η γωνιακή ταχύτητα.

Γραμμική Ταχύτητα



Σχήμα 1: Το διάνυσμα της γραμμικής ταχύτητας

Θεωρούμε ένα σώμα μάζας m και υποθέτουμε ότι σε χρονικό διάστημα Δt διαγράφει μήκος τόξου Δs που αντιστοιχεί σε επίκεντρη γωνία $\Delta \theta$.

Από τον ορισμό τους, τα μεγέθη περίοδος και συχνότητα είναι αντίστροφα και συνδέονται με την σχέση:

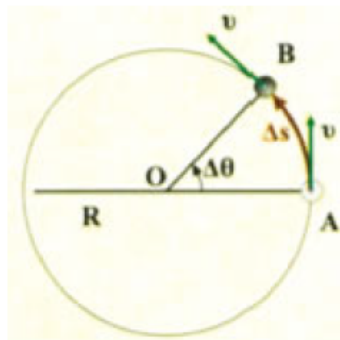
$$f = \frac{1}{T} \quad (3)$$

Η παραπάνω σχέση προκύπτει εύκολα από τον ορισμό της συχνότητας, γιατί σε χρόνο μιας περιόδου έχει εκτελεστεί μια επανάληψη του φαινομένου.

2 Η κινηματική της ομαλής κυκλικής κίνησης

Η κυκλική κίνηση είναι γενικά η κίνηση που εκτελεί ένα σώμα όταν το σχήμα της τροχιάς του είναι ένας κύκλος. Ιδιαίτερο βέβαια ενδιαφέρον έχει η μελέτη της **Ομαλής Κυκλικής Κίνησης**, στην οποία το μέτρο της ταχύτητας του σώματος θα παραμένει σταθερή. Τέτοια κίνηση είναι η κίνηση της Γης γύρω από τον ήλιο, η κίνηση ενός σημείου του γνωστού μας cd κλπ. Στην ομαλή κυκλική κίνηση το σώμα σε ίσα διαστήματα διανύει ίδια τμήματα κύκλου. Τα βασικά μεγέθη για την περιγραφή μιας τέτοιας κίνησης είναι η γραμμική και η γωνιακή ταχύτητα.

Γραμμική Ταχύτητα



Σχήμα 1: Το διάνυσμα της γραμμικής ταχύτητας

Θεωρούμε ένα σώμα μάζας m και υποθέτουμε ότι σε χρονικό διάστημα Δt διαγράφει μήκος τόξου Δs που αντιστοιχεί σε επίκεντρη γωνία $\Delta \theta$.

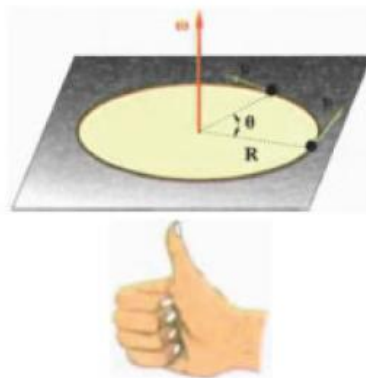
Ονομάζουμε γραμμική ταχύτητα $\vec{v}$ του υλικού σημείου, ένα διάνυσμα, το οποίο έχει μέτρο ίσο με το πηλίκο του τόξου Δs προς τον αντίστοιχο χρόνο Δt .

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (4)$$

Η γραμμική ταχύτητα εφάπτεται της κυκλικής τροχιάς στη θέση που βρίσκεται κάθε φορά το υλικό σημείο και έχει τη φορά της κίνησης του. Η μονάδα μέτρησης είναι το $1m/s$. Είναι προφανές ότι το διάνυσμα της γραμμικής ταχύτητας δεν έχει σταθερή κατεύθυνση κατά την διάρκεια της κυκλικής κίνησης, καθώς αλλάζει συνεχώς προσανατολισμό.

Γωνιακή Ταχύτητα

Ονομάζουμε γωνιακή ταχύτητα $\vec{\omega}$ του υλικού σημείου ένα διάνυσμα, το οποίο έχει διεύθυνση κάθετη στο επίπεδο της κυκλικής τροχιάς του και μέτρο ίσο με το πηλίκο της επίκεντρης γωνιάς $\Delta\theta$ προς τον αντίστοιχο χρόνο Δt .



Σχήμα 2: Το διάνυσμα της γωνιακής ταχύτητας

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \quad (5)$$

Η κατεύθυνση της γωνιακής ταχύτητας $\vec{\omega}$ καθορίζεται με τον κανόνα του δεξιού χεριού. Η μονάδα μέτρησης της γωνιακής ταχύτητας είναι το $1rad/s$.

Προσοχή η επίκεντρη γωνιά θ έχει ως μονάδα μέτρησης το **1 ακτίνιο** (1 rad) το οποίο ορίζεται ως η επίκεντρη γωνιά που αντιστοιχεί σε μήκος τόξου ίσο με το μήκος της ακτίνας

Σχέση γραμμικής και γωνιακής ταχύτητας

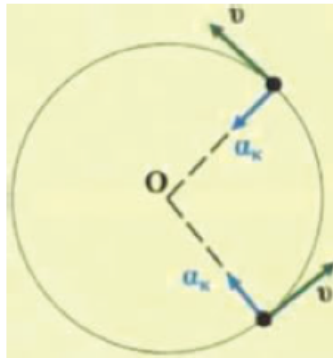
Η επίκεντρη γωνιά θ που αντιστοιχεί σε μήκος τόξου S μας είναι γνωστό ότι ορίζεται από την σχέση $\theta = \frac{s}{R}$. Εύκολα προκύπτει από τον ορισμό της γωνίας έχουμε:

$$\Delta\theta = \frac{\Delta s}{R} \Rightarrow \Delta s = R \cdot \Delta\theta \Rightarrow v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = R \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \Rightarrow v = \omega \cdot R \quad (6)$$

Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση είναι σαφές ότι η γραμμική ταχύτητα είναι ανάλογη της απόστασης του σώματος από το κέντρο της κυκλικής τροχιάς. Αν για παράδειγμα μελετήσουμε την κυκλική κίνηση ενός δίσκου, όλα τα σημεία του έχουν την ίδια γωνιακή ταχύτητα, αλλά τα σημεία που βρίσκονται στην περιφέρεια του δίσκου έχουν την μέγιστη γραμμική ταχύτητα.

Κεντρομόλος επιτάχυνση

Στην κυκλική κίνηση **λόγω της μεταβολής της διεύθυνσης της γραμμικής ταχύτητας του**, το σώμα έχει κεντρομόλο επιτάχυνση, της οποίας το



Σχήμα 3: Το διάνυσμα της a_k

μέτρο δίνεται από την σχέση :

$$\alpha_{\kappa} = \frac{v^2}{R} = \omega^2 \cdot R \quad (7)$$

Η κεντρομόλος επιτάχυνση είναι υπεύθυνη για την μεταβολή της διεύθυνσης της γραμμικής ταχύτητας. Η διεύθυνση της είναι πάντα κάθετη στην γραμμική ταχύτητα.

Ομαλή κυκλική κίνηση

Όταν το μέτρο της γραμμικής ταχύτητας παραμένει σταθερό, τότε η κίνηση του υλικού σημείου χαρακτηρίζεται ως **Ομαλή Κυκλική Κίνηση**.

Στην κίνηση αυτή παραμένει επίσης σταθερό και το μέτρο της γωνιακής ταχύτητας, οπότε προκύπτει :

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{s - 0}{t - 0} \Rightarrow s = v \cdot t \quad (8)$$

$$\omega = \frac{\Delta \theta}{\Delta t} = \frac{\theta - 0}{t - 0} \Rightarrow \theta = \omega \cdot t \quad (9)$$

Στην ομαλή κυκλική κίνηση το υλικό σημείο σε ίσους χρόνους διανύει ίσα τόξα και ίσες γωνίες.

Σχέση γραμμικής ταχύτητας (γωνιακής ταχύτητας)- περιόδου

Σε χρονικό διάστημα μιας περιόδου ($\Delta t = T$) το σώμα που εκτελεί ομαλή κυκλική κίνηση έχει κάνει μια πλήρη περιστροφή, επομένως η έχει διαγράψει μήκος ίσο με την περιφέρεια του κύκλου ($\Delta s = 2\pi R$) και επίκεντρη γωνία ίση με $\Delta \theta = 2\pi$. Άρα για την Ομαλή κυκλική κίνηση η γραμμική και η γωνιακή ταχύτητα μπορούν να γραφτούν :

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad v = \frac{2\pi R}{T} \quad (10)$$

που αν λάβουμε υπόψη μας την σχέση περιόδου - συχνότητας προκύπτει ότι :

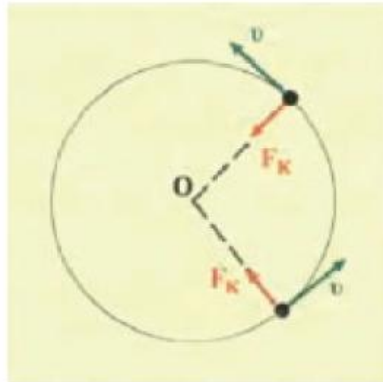
$$\omega = 2\pi f \quad v = 2\pi Rf \quad (11)$$

Η κεντρομόλος δύναμη

Σύμφωνα με τους Νόμους του Νεύτωνα η αιτία για το είδος μιας κίνησης είναι μια δύναμη. Η κεντρομόλος δύναμη είναι εκείνη που "ευθύνεται" για την κυκλική κίνηση, καθώς "αναγκάζει" το σώμα να στρίβει συνεχώς ακολουθώντας μια κυκλική τροχιά. Η κεντρομόλος δύναμη είναι συνεχώς κάθετη στην γραμμική ταχύτητα και έχει φορά προς το κέντρο της κυκλικής τροχιάς. Σύμφωνα με τον 2ο Νόμο του Νεύτωνα:

$$\Sigma F = m \cdot \alpha \Rightarrow \Sigma F = m \cdot \alpha_{\kappa} = \frac{m \cdot v^2}{R} \Rightarrow F_{\kappa} = \frac{m \cdot v^2}{R} \quad (12)$$

Η παραπάνω σχέση είναι η ικανή και αναγκαία συνθήκη" για να εκτελεί ένα σώμα Κυκλική Κίνηση. Άρα αν ένα σώμα εκτελεί Κυκλική Κίνηση, θα πρέπει η συνισταμένη των δυνάμεων που είναι κάθετες στην ταχύτητα του να έχουν μέτρο ίσο με την F_{κ} . Για παράδειγμα αν υποθέσουμε



Σχήμα 4: Το διάνυσμα της F_{κ}

ότι η κίνηση της Γης γύρω από τον Ήλιο είναι μια κυκλική κίνηση η αιτία είναι η βαρυτική έλξη του ήλιου στην γη που λόγω της κατεύθυνσης της θα παίζει τον ρόλο της κεντρομόλου δύναμης. Αντίστοιχο παράδειγμα είναι η κίνηση του ηλεκτρονίου γύρω από τον πυρήνα του ατόμου σύμφωνα με την κλασσική ερμηνεία του ατόμου. Εκεί η ηλεκτρική δύναμη Coulomb θα παίζει τον ρόλο της κεντρομόλου δύναμης.