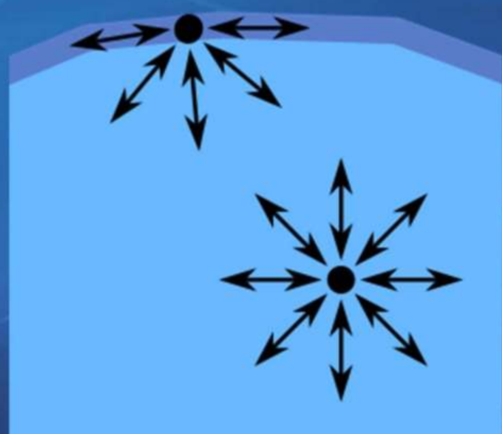
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΤΑΣΗ

ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΣΥΝΟΧΗΣ: Οι ελκτικές δυνάμεις μεταξύ των μορίων του υγρού [επιφανειακή τάση]
ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ: Οι δυνάμεις μεταξύ των μορίων του υγρού και των μορίων του τοιχώματος του δοχείου [τριχοειδή φαινόμενα]

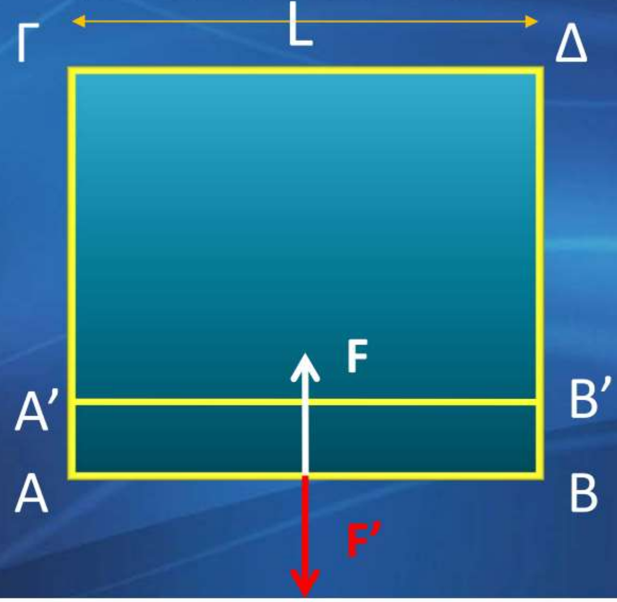


Γενικά όλα τα φυσικά συστήματα τείνουν να ελαχιστοποιήσουν την ενέργειά τους. Όταν τα μόρια ενός υγρού αλληλεπιδρούν η δυναμική ενέργεια του συστήματος ελάττώνεται (γι’ αυτό και σχηματίζεται το υγρό). Ένα μόριο στο εσωτερικό του υγρού αλληλεπιδρά με περισσότερους γείτονες ενώ τα μόρια της επιφανείας με λιγότερους. Άμεση συνέπεια τα δεύτερα να συνεισφέρουν λιγότερο στη μείωση της ενέργειας του συστήματος. Το σύστημα τείνει να σχηματίσει τη μικρότερη δυνατή διεπιφάνεια με τον αέρα.

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΤΑΣΗ

Εάν σε ένα υγρό σε ισορροπία προσπαθήσουμε να αυξήσουμε την διεπιφάνειά του με τον αέρα κατά ΔΑ, θα καταβάλουμε έργο ίσο με γΔΑ όπου γ ορίζεται σαν ο **συντελεστής επιφανειακής τάσης** και είναι χαρακτηριστικό κάθε υλικού. Το έργο αυτό αποθηκεύεται ως δυναμική ενέργεια. Το γ έχει διαστάσεις F/l [N/m]

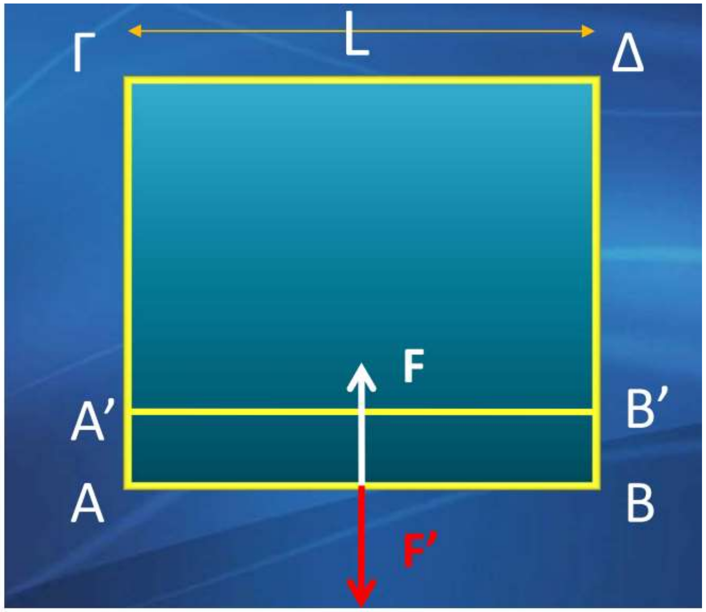
Αφού όλα τα υγρά τείνουν να διαθέσουν τη μικρότερη διεπιφάνεια με τον αέρα το σχήμα τους θα πρέπει να είναι εκείνο το οποίο για συγκεκριμένο όγκο θα έχει τη μικρότερη επιφάνεια δηλ. η σφαίρα



Εναλλακτικός ορισμός του συντελεστή επιφανειακής τασής. Σε πλαίσιο ΑΒΓΔ εάν δημιουργήσουμε υμένα από π.χ. Σαπουνόνερο το κινητό μέλος ΑΒ θα έρθει στη θέση Α’Β’. Η δύναμη F’, την οποία πρέπει να ασκήσουμε για να επανέλθει η κινητή πλευρά στα σημεία ΑΒ βρίσκεται πως είναι ανάλογη του μήκους L δηλαδή F=2γL

Ο συντελεστής επιφανειακής τάσης είναι χαρακτηριστικός για κάθε υλικό και εξαρτάται από τη θερμοκρασία (αυξανομένης της θερμοκρασίας ο γ ελαττώνεται)

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΤΑΣΗ



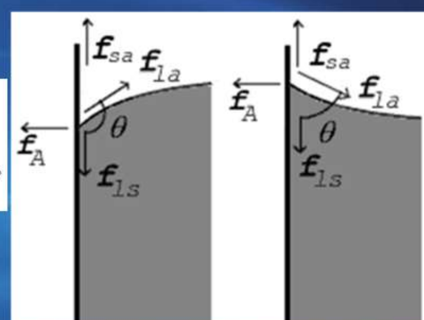
Επιφανειακή τάση ενός υγρού είναι οι δυνάμεις που αναγκάζουν τα υγρά να πάρουν τη μικρότερη δυνατή επιφάνεια για δεδομένο όγκο.
Έτσι η επιφάνειά τους αποκτά ιδιότητες «ελαστικής μεμβράνης» και μπορεί να συγκρατήσει αντικείμενα μεγαλύτερης πυκνότητας.
Ως επιφανειακή τάση ορίζεται το ποσόν της ενέργειας που απαιτείται για να αυξήσουμε το εμβαδόν της επιφάνειας ενός υγρού κατά μία μονάδα ή τη δύναμη ανά μονάδα μήκους η οποία ενεργεί κάθετα σε μια τυχαία τομή (γραμμή) πάνω στην επιφάνεια. Η επιφανειακή τάση μπορεί να εκδηλωθεί τόσο σε μορφές επιφανειακής ενέργειας όσο και σε επιφανειακή δύναμη.

ΤΡΙΧΟΕΙΔΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ

ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ: Οι δυνάμεις μεταξύ των μορίων του υγρού και των μορίων του τοιχώματος του δοχείου [τριχοειδή φαινόμενα]

Εαν η ελεύθερη επιφάνεια ενός υγρού που ισορροπεί πλησίον ενός στερεού είναι κοίλη (οξεία γωνία της επιφάνειας του υγρού με την επιφάνεια του στερεού) τότε λέμε πως το υγρό διαβρέχει το στερεό. Εάν είναι κυρτή (αμβλεία γωνία) λέμε πως δεν το διαβρέχει

- γ_{ls} is the liquid–solid surface tension,
- γ_{la} is the liquid–air surface tension,
- γ_{sa} is the solid–air surface tension,
- θ is the contact angle, where a concave meniscus has contact angle less than 90° and a convex meniscus has contact angle of greater than 90°.[8]



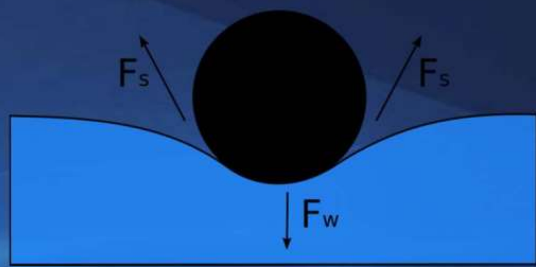
θ – γωνία συνεπαφής

$$f_A = f_{la} \sin\theta$$

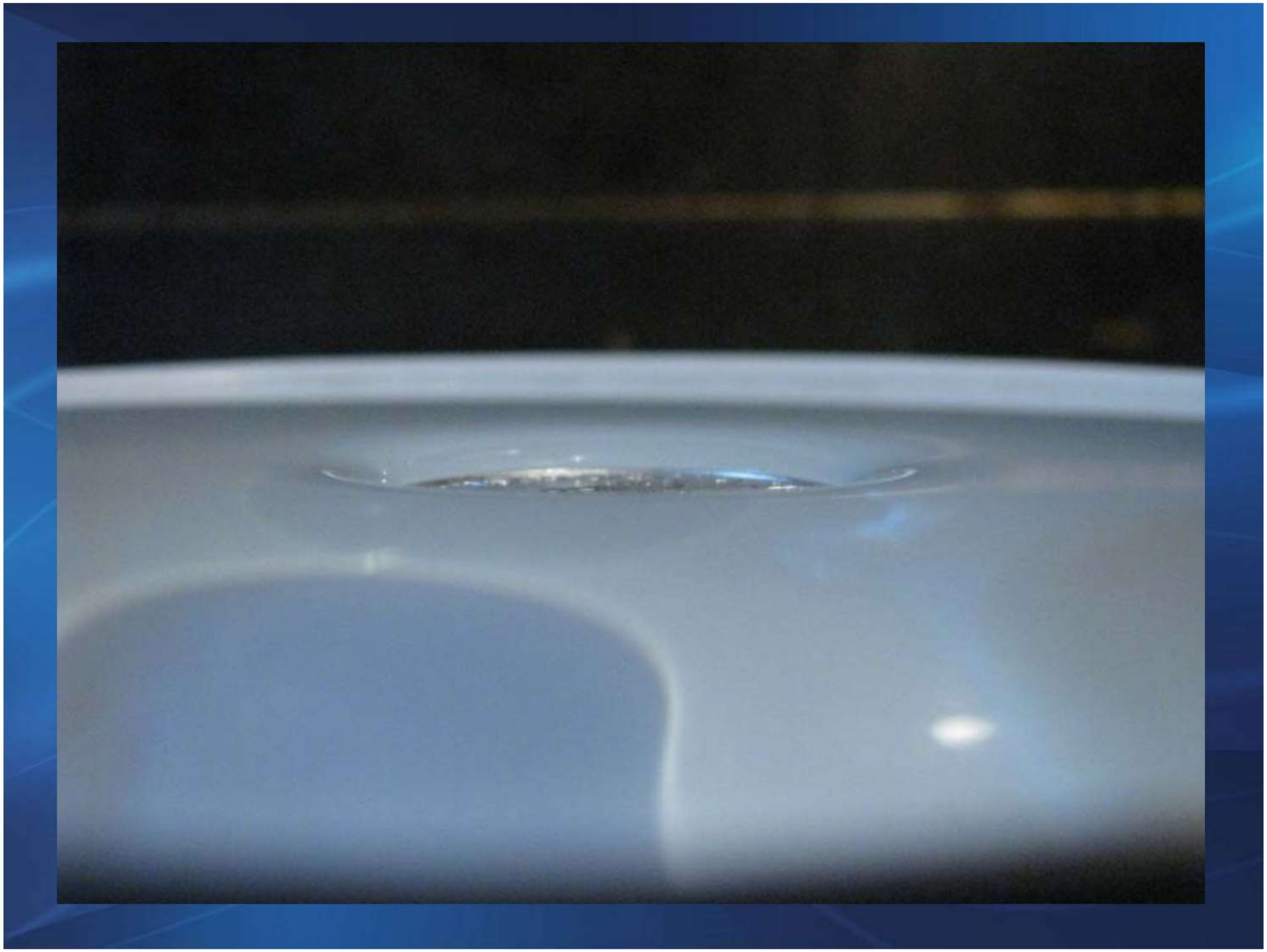
$$f_{ls} - f_{sa} = -f_{la}\cos\theta \quad \rightarrow \quad \gamma_{ls} - \gamma_{sa} = -\gamma_{la}\cos\theta$$

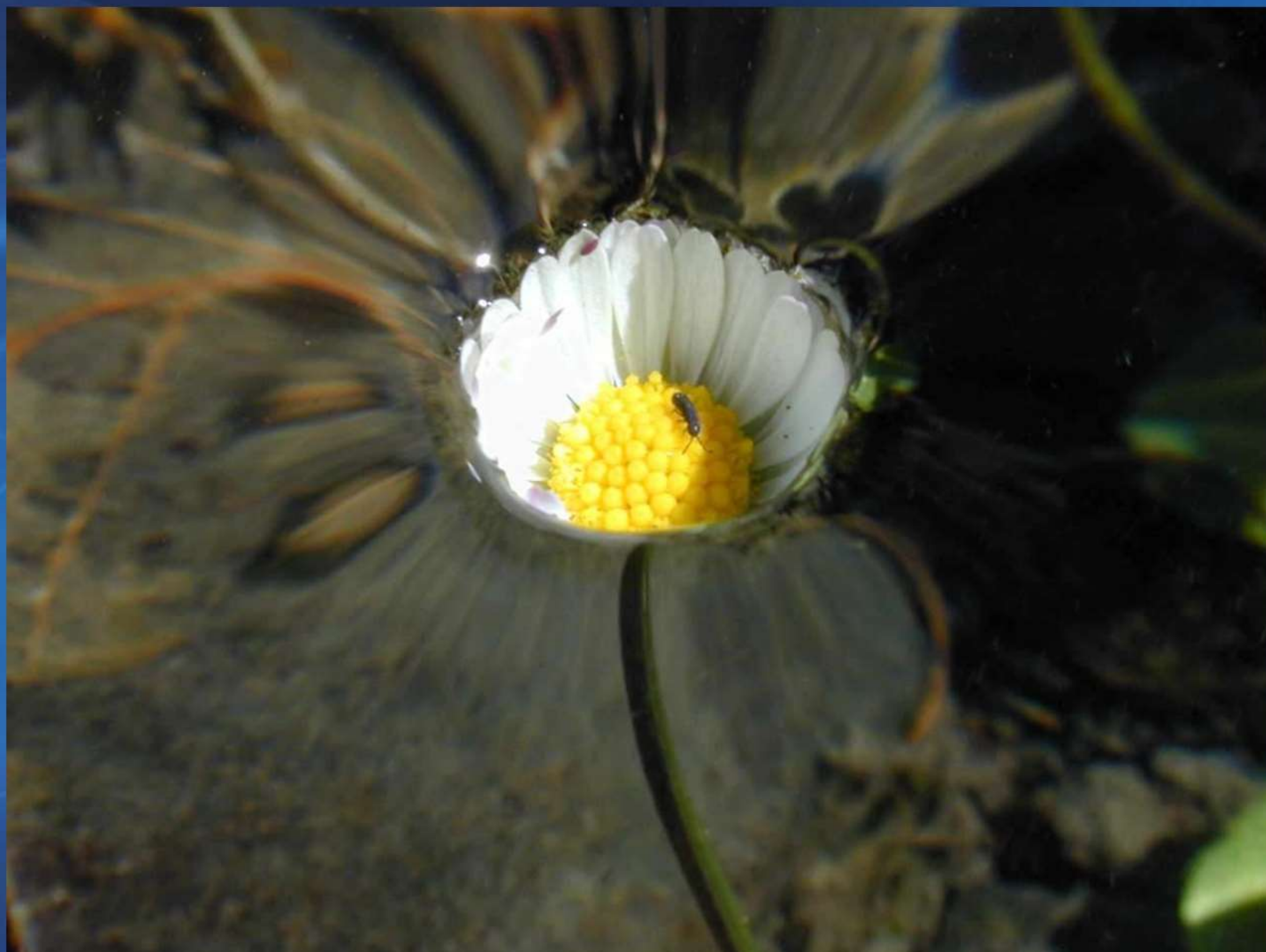
Liquid	Solid	Contact angle
water	soda-lime glass lead glass fused quartz	0°
ethanol		
diethyl ether		
carbon tetrachloride		
glycerol		
acetic acid		
water	paraffin wax	107°
	silver	90°
methyl iodide	soda-lime glass	29°
	lead glass	30°
	fused quartz	33°
mercury	soda-lime glass	140°

Some liquid-solid contact angles

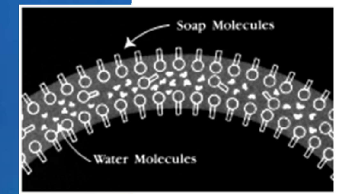


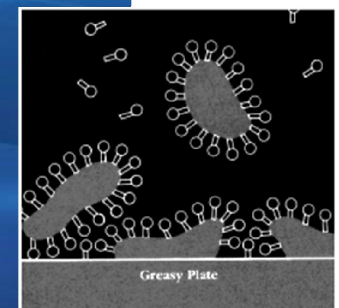
$$F_{\mathrm{w}} = 2F_{\mathrm{s}} \sin\theta \quad \Leftrightarrow \quad \rho_{\mathrm{w}} A_{\mathrm{w}} L g = 2\gamma L \sin\theta$$





Marangoni_effect_experimental_demonstration.ogv.360p.vp9.webm

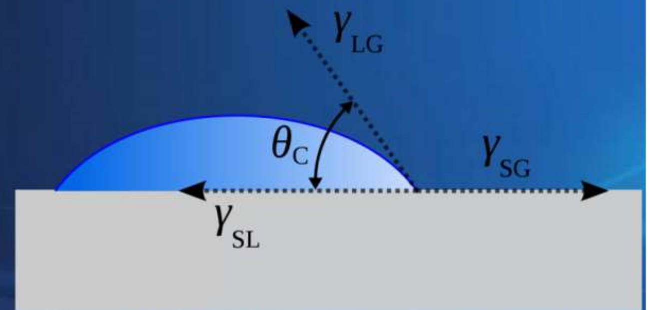




https://www.exploratorium.edu/ronh/bubbles/soap.html

Marangoni effect

ΓΩΝΙΑ *συν*ΕΠΑΦΗΣ



Μεγάλη γωνία επαφής

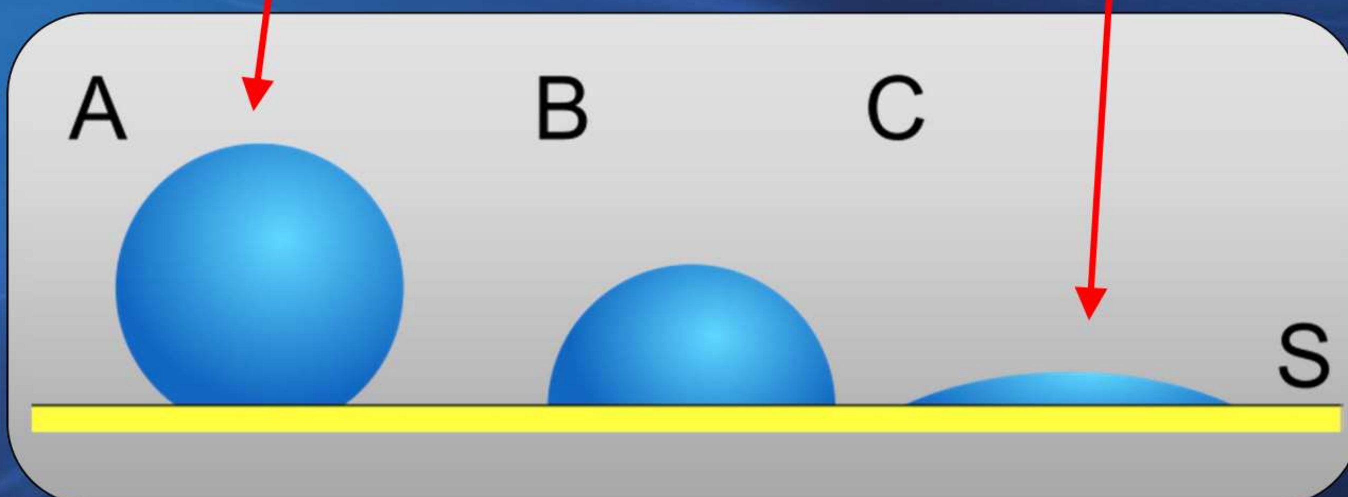
Το υγρό δε διαβρέχει το στερεό

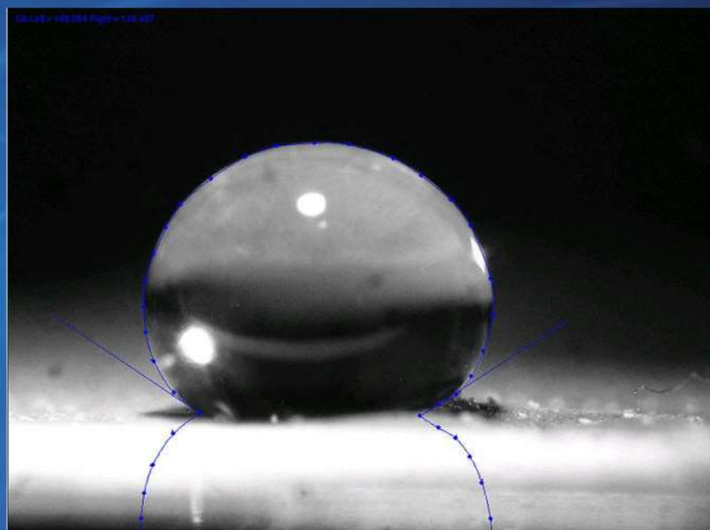
Δύναμη συνοχής>Δύναμη συνάφειας

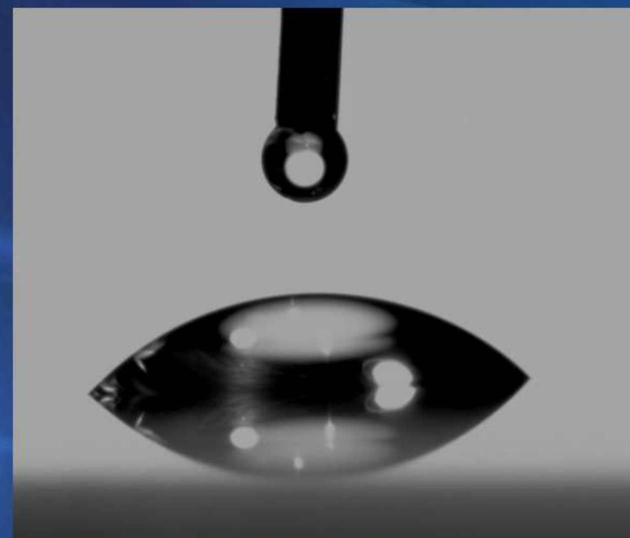
Μικρή γωνία επαφής

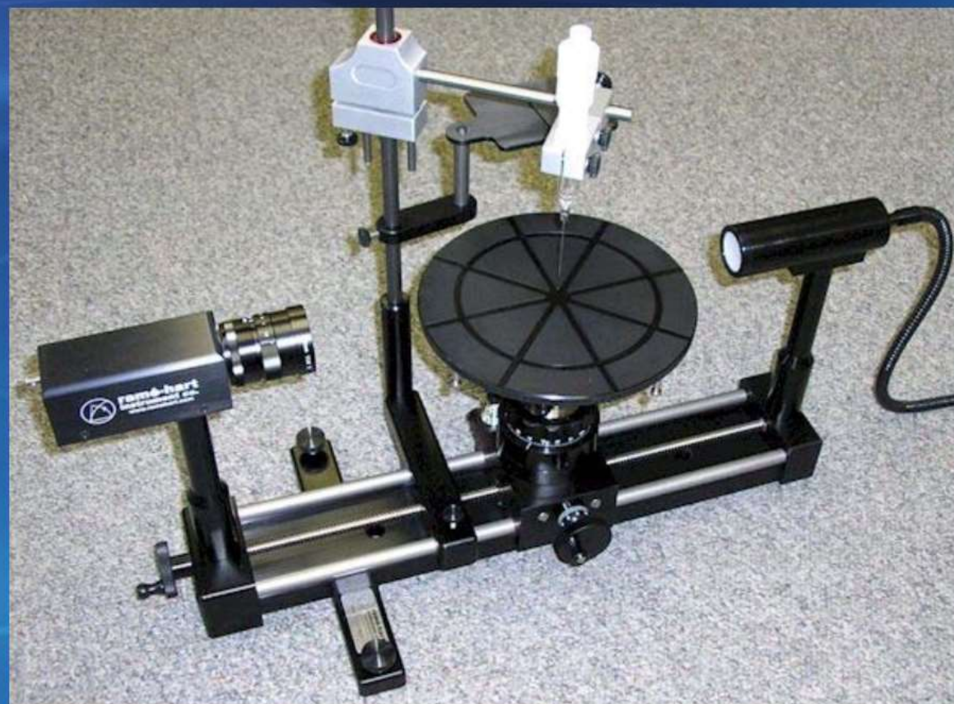
Το υγρό διαβρέχει το στερεό

Δύναμη συνάφειας>Δύναμη συνοχής

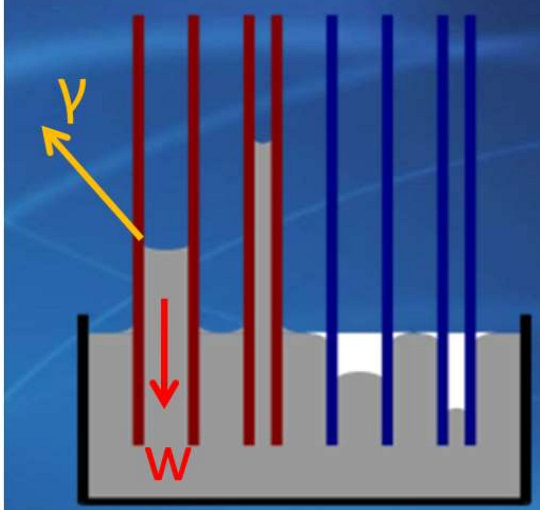







ramé-hart

ΤΡΙΧΟΕΙΔΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ – ΤΡΙΧΟΕΙΔΕΙΣ ΣΩΛΗΝΕΣ



Βάρος του υγρού πάνω από την επιφάνεια

Στους κόκκινους σωλήνες το υγρό διαβρέχει το σωλήνα. Παρατηρείται ανύψωση της στάθμης του υγρού στο σωλήνα (νερό/γυαλί)

Στους μπλε σωλήνες το υγρό δε διαβρέχει το σωλήνα. Παρατηρείται βύθιση της στάθμης του υγρού στο σωλήνα (Hg/γυαλί)

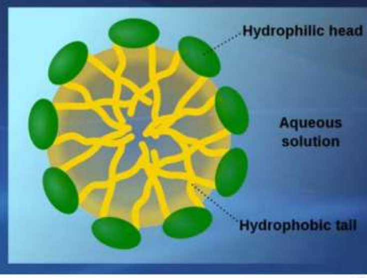
θ γωνία συνεπαφής

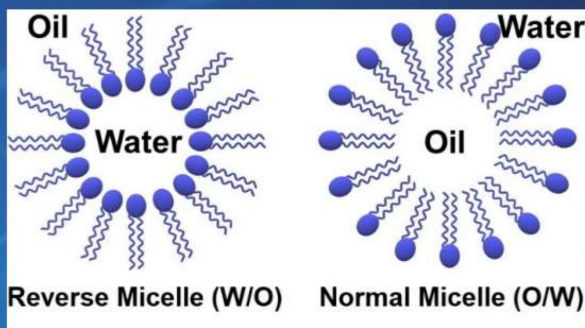
$$w = \pi r^2 h \rho g$$

$$F = \gamma 2\pi r \cos\theta$$

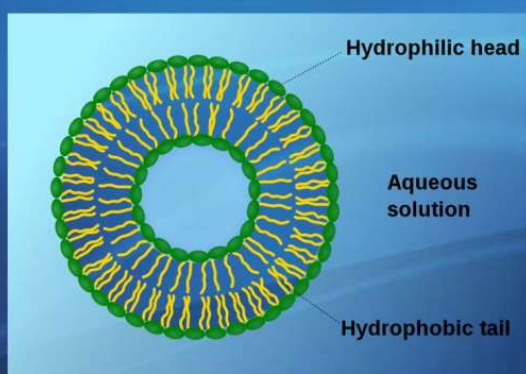
$$F = w \Rightarrow h = \frac{2\gamma\cos\theta}{\rho g r}$$

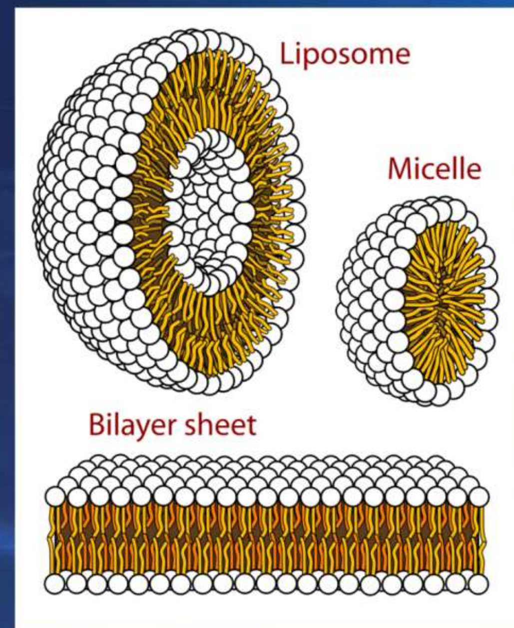
Μικκύλια

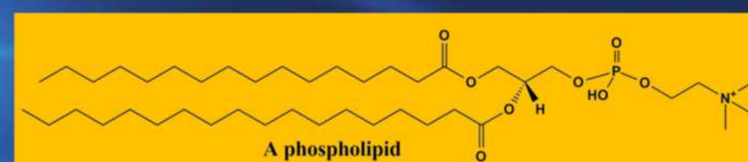


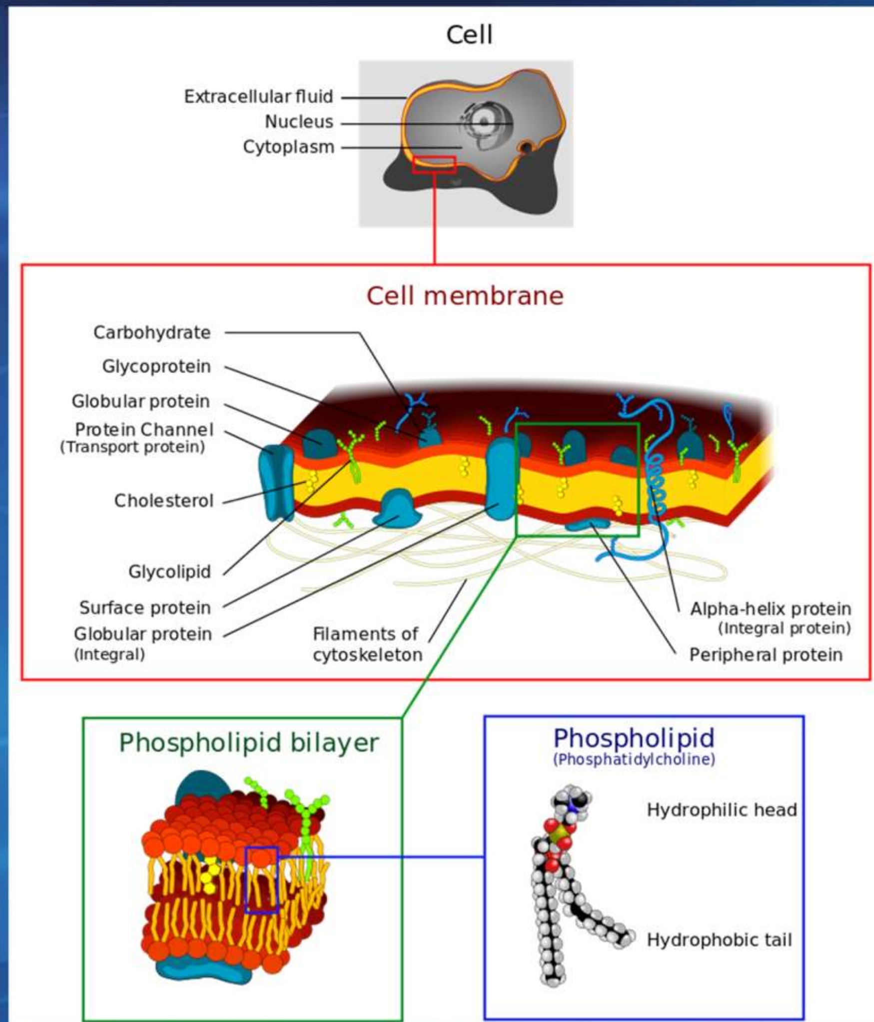


Κυστίδια









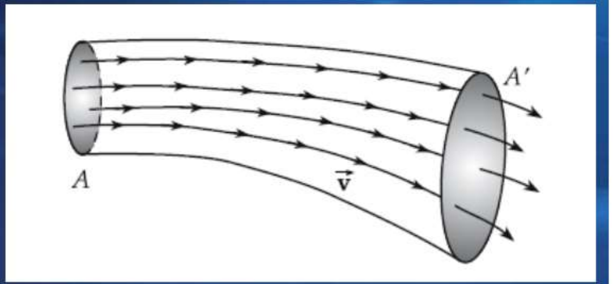
Cell
Extracellular fluid
Nucleus
Cytoplasm
Cell membrane
Carbohydrate
Glycoprotein
Globular protein
Protein Channel
(Transport protein)
Cholesterol
Glycolipid
Surface protein
Globular protein
(Integral)
Filaments of
cytoskeleton
Alpha-helix protein
(Integral protein)
Peripheral protein
Phospholipid bilayer
Phospholipid
(Phosphatidylcholine)
Hydrophilic head
Hydrophobic tail

ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ

Η επιστήμη που μελετά τη ροή των ρευστών

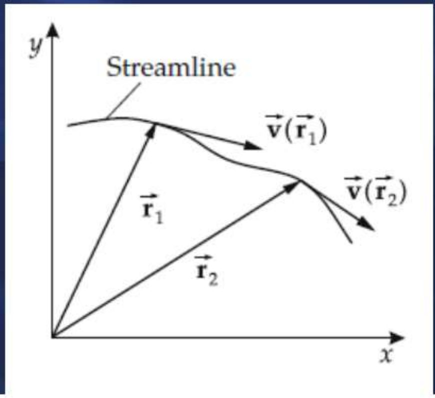
ΟΡΙΣΜΟΙ

ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ είναι πεδίο ταχυτήτων και ορίζεται μέσα στο χώρο στον οποίο ρέει ένα ρευστό.



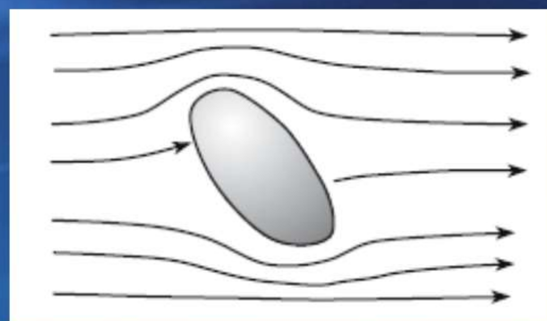
ΜΟΝΙΜΟ/ΣΤΡΩΤΟ πεδίο → **ΜΟΝΙΜΗ/ΣΤΡΩΤΗ ροή** όταν η ταχύτητα του ρευστού σε κάθε σημείο του πεδίου είναι χρονικά σταθερή. Σε διαφορετική περίπτωση λέμε πως έχουμε μη μόνιμη/τυρβώδη ροή.

ΡΕΥΜΑΤΙΚΗ ΓΡΑΜΜΗ/ΓΡΑΜΜΗ ΡΟΗΣ:
η τροχιά που ακολουθεί ένα μόριο ρευστού κατά την κίνησή του. Σε κάθε σημείο της ρευματικής γραμμής η ταχύτητα είναι εφαπτόμενη στη γραμμή

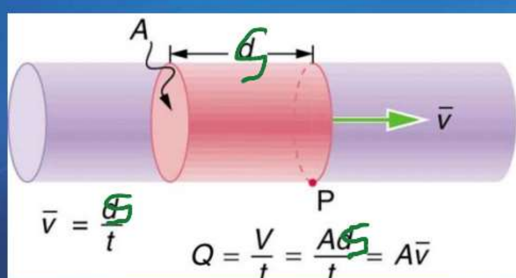


ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ

ΦΛΕΒΑ: Σύνολο ρευματικών γραμμών στο πεδίο ροής του ρευστού



ΠΑΡΟΧΗ Q: ο όγκος του ρευστού dV που περνά από μια κάθετη διατομή Α μέσα σε χρόνο dt δια το χρόνο αυτό



$$Q = \frac{dV}{dt} = \frac{Ads}{dt} = Au$$

[m^3/s]

ΙΔΑΝΙΚΑ ΡΕΥΣΤΑ

1. Είναι τελείως ασυμπίεστα
2. Δεν έχουν εσωτερική τριβή
3. Δεν παρουσιάζουν συνάφεια με τα τοιχώματα
4. Η πυκνότητα είναι ανεξάρτητη του βάθους

ΝΟΜΟΙ

- ✓ Συνέχειας
- ✓ Bernoulli

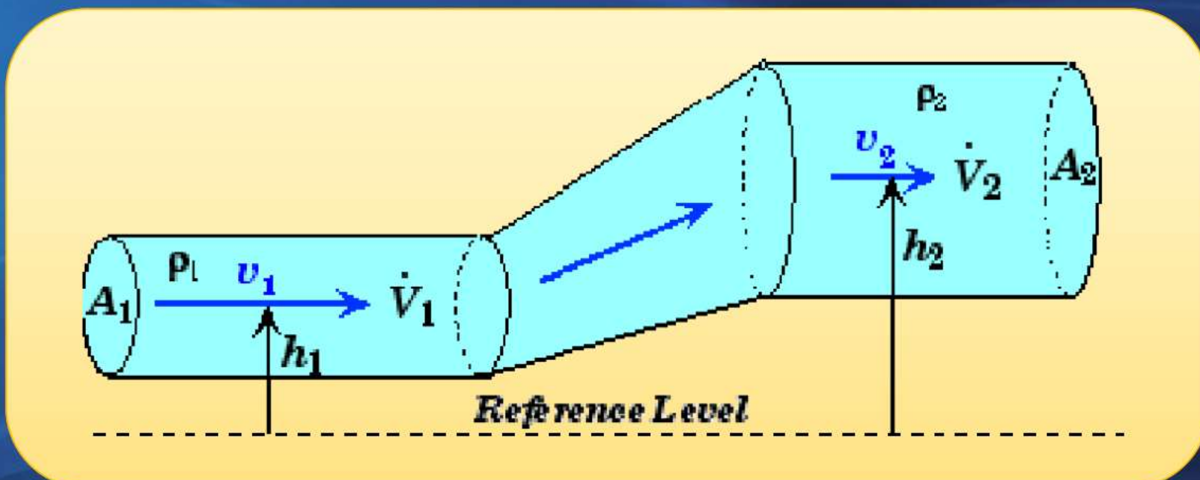
ΙΔΑΝΙΚΑ ΡΕΥΣΤΑ

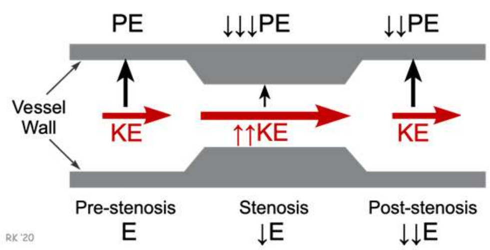
<u>ΝΟΜΟΣ Συνέχειας</u>

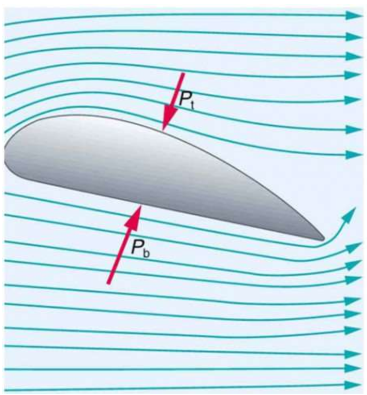
Η παροχή μιας φλέβας σε οποιαδήποτε διατομή κατά μήκος της είναι σταθερή

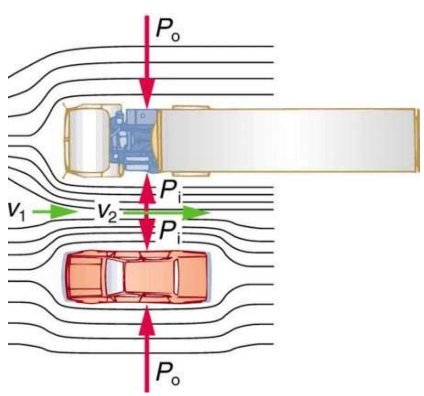
$$A_1 u_1 = A_2 u_2$$

continuity equation in differential form			LT^{-1}
$\mathrm{div}\,\vec{v} = 0$	Symbol	Unit	Quantity
	$\vec{v}$	m/s	velocity field









ΙΔΑΝΙΚΑ ΡΕΥΣΤΑ

ΝΟΜΟΣ Bernoulli

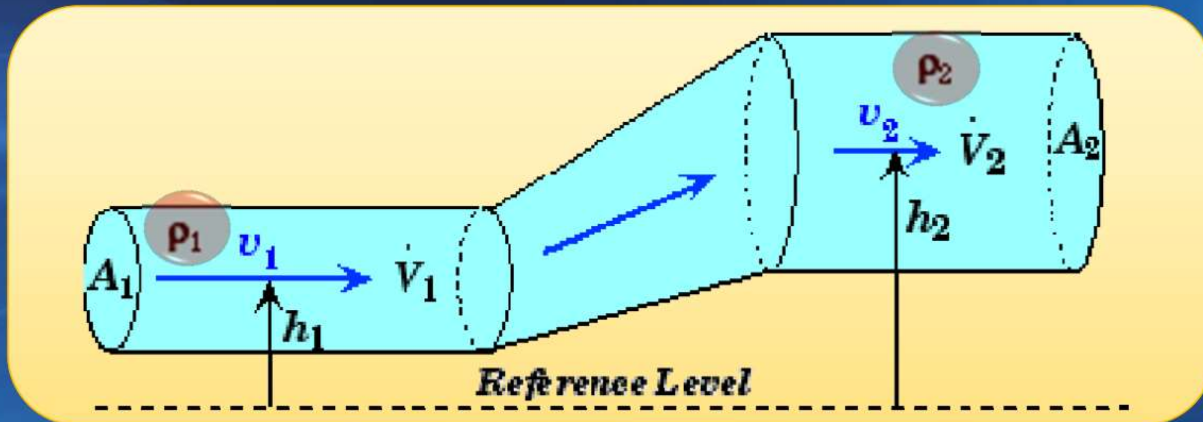
Κατά μήκος μιας φλέβας το άθροισμα της στατικής *P*, της υψομετρικής *ρgh* και της δυναμικής πίεσης $\rho u^2/2$ είναι σταθερό

$$P + \rho g h + \frac{1}{2}\rho u^2 = \sigma\tau\alpha\theta.$$

Bernoulli's equation			$\mathrm{ML^{-1}T^{-2}}$
	Symbol	Unit	Quantity
$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g h = \text{const.}$	p	Pa	static pressure
	ρ	$\mathrm{kg/m^3}$	density
	v	m/s	flow velocity
	g	$\mathrm{m/s^2}$	gravitational acceleration
	h	m	height

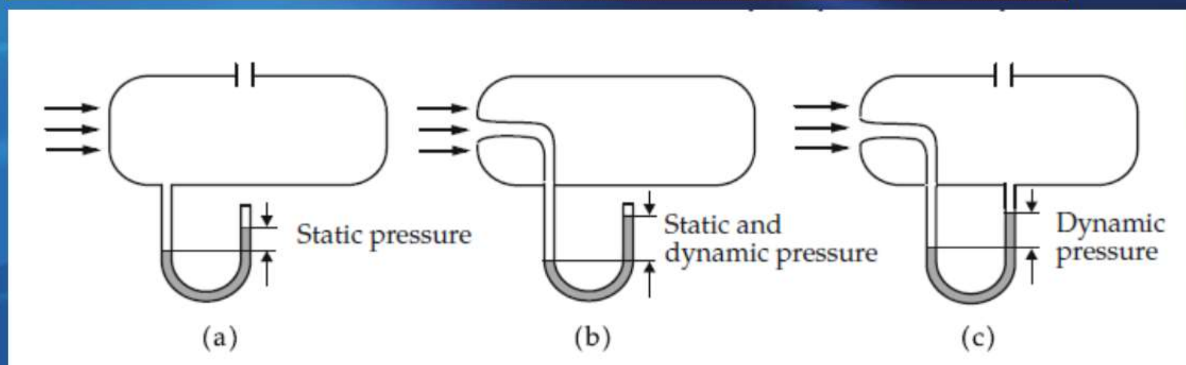
ΝΟΜΟΣ Bernoulli

Ιδανικό ρευστό $\rho_1=\rho_2$



$$P_1 + \rho g h_1 + \frac{1}{2}\rho u_1^2 = P_2 + \rho g h_2 + \frac{1}{2}\rho u_2^2$$

Πώς μετράμε τη δυναμική και στατική πίεση



Παράδειγμα 8.4 Ας υποθέσουμε ότι ένας καθετήρας εισέρχεται στην αορτή, τη μεγαλύτερη αρτηρία του σώματος, για να μετρήσουμε την τοπική πίεση και ταχύτητα του αίματος (οι φυσιολογικές τους τιμές έχουν βρεθεί να είναι $1.4\ 10^4$ Pa και 0.4 m/s αντίστοιχα) και να εποπτεύσουμε το εσωτερικό της αρτηρίας. Εάν η φυσιολογική εσωτερική διάμετρος της αορτής έχει βρεθεί να είναι 2 cm ενώ παρατηρείται ότι σε μια περιοχή της στενεύει κατά 30% λόγω εναπόθεσης αθηρωματικής πλάκας, βρείτε την ταχύτητα και τη μεταβολή της πίεσης του αίματος στη στενή αυτή περιοχή. Υποθέστε ότι το αίμα είναι ιδανικό ρευστό και χρησιμοποιήστε την τιμή για την πυκνότητα $1.06\ g/cm^3$.
[νόμος συνέχειας 0.82 m/s, Bernoulli ΔP=270 Pa]

Παράδειγμα 8.6 Μια πισίνα κολύμβησης, που στη μια της πλευρά ο πυθμένας της βρίσκεται σε βάθος 1 m, βαθαίνει γραμμικά μέχρι τα 5 m στο μέσο της και διατηρεί από εκεί και πέρα αυτό το βάθος έως και την απέναντι πλευρά της. Βρείτε την πίεση που ασκείται σε ένα μικρό σφαιρικό μπαλόνι διαμέτρου 2 cm που το κρατάμε στον πυθμένα της πισίνας σε κάθε μια (ρηχή-βαθιά) από τις πλευρές της. Επίσης βρείτε τη συνολική δύναμη συμπίεσης που ασκείται εξαιτίας του νερού στο μπαλόνι, όταν αυτό συγκρατείται στον πυθμένα στη ρηχή και στη βαθιά περιοχή της πισίνας αντίστοιχα.

[$1.1\ 10^5$ Pa, $1.5\ 10^5$ Pa] και [138 N, 188 N]

Παράδειγμα 8.7 Η πίεση του αίματος μεταβάλλεται, όχι μόνο περιοδικά ως προς τον χρόνο σύμφωνα με τους παλμούς της καρδιάς, αλλά, όπως θα δούμε και στο επόμενο κεφάλαιο, και χωρικά για διαφορετικά ύψη στο σώμα. Η χωρική αυτή μεταβολή εξαρτάται από το ύψος που εξετάζουμε την πίεση του αίματος στο ανθρώπινο σώμα, αφού οφείλεται στη διαφορά βάρους της ενεργούς στήλης αίματος του αιμοφόρου αγγείου πάνω από την εξεταζόμενη θέση. Αν υποθέσουμε ότι η μέση πίεση του αίματος στην καρδιά είναι 13,2 kPa (τιμή που αντιστοιχεί στη μέση τιμή μεγάλης/μικρής πίεσης, 120/80, όπως αναφέρεται συνήθως, και είναι ίση με 100 mm Hg – σε επόμενη ενότητα ορίζονται αυτές οι μονάδες), βρείτε την πίεση του αίματος στο επίπεδο των ποδιών (1,3 m κάτω από την καρδιά) και στο επίπεδο της κεφαλής (0,5 m πάνω από την καρδιά). Αν κάποιος δεχτεί επιτάχυνση προς τα πάνω, όπως για παράδειγμα κατά την απογείωση ενός αεροπλάνου ή ακόμα και σε έναν ταχύ ανελκυστήρα ψηλού κτιρίου, η αυξημένη πίεση μπορεί να αποστραγγίσει το αίμα από το κεφάλι του. Ποιά είναι η ελάχιστη επιτάχυνση για την οποία θα συνέβαινε κάτι τέτοιο; (Θεωρήστε ότι το κεφάλι βρίσκεται σε ύψος 25 cm από την καρδιά).

[~27 kPa, ~8 kPa, ~4g]

ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ ΡΕΥΣΤΑ

Είναι συμπιεστά
Έχουν εσωτερική τριβή
Παρουσιάζουν συνάφεια με τα τοιχώματα

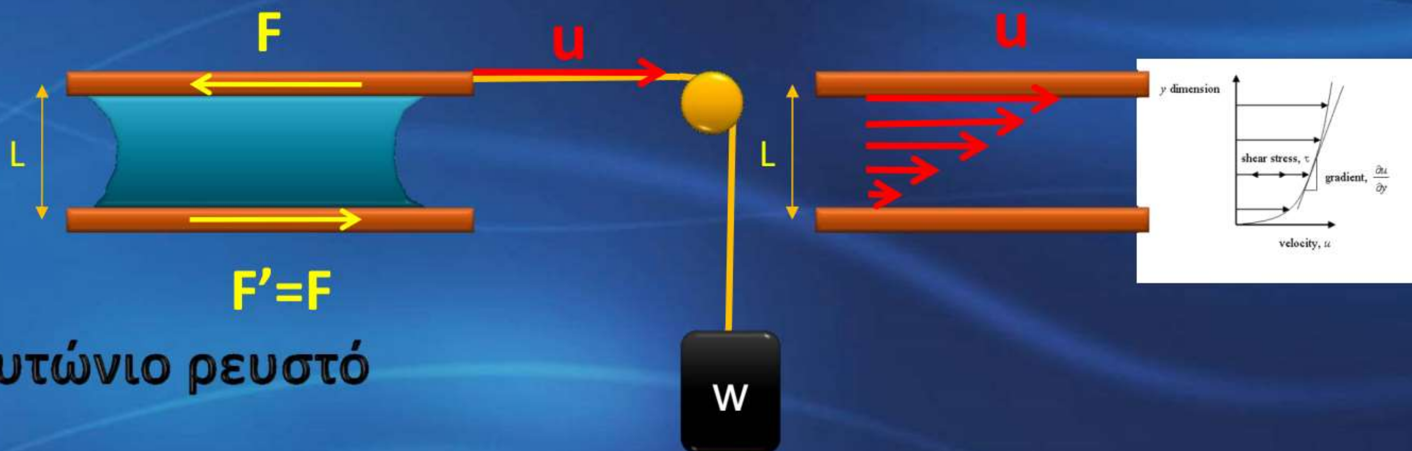
Στα πραγματικά ρευστά σε μια οποιαδήποτε εγκάρσια διατομή μιας φλέβας οι ταχύτητες στις διάφορες ρευματικές γραμμές δεν είναι ίσες όπως συμβαίνει στα ιδανικά ρευστά

Ο νόμος της συνέχειας ΙΣΧΥΕΙ εάν το πραγματικό ρευστό είναι ασυμπίεστο
Ο νόμος Bernoulli ΙΣΧΥΕΙ και για πραγματικά ρευστά εφόσον:
1) Το ρευστό είναι ασυμπίεστο
2) Το ρευστό δεν παρουσιάζει σημαντική εσωτερική τριβή
3) Η ροή είναι στρωτή
4) Η ταχύτητα σε κάθε σημείο του ρευστού δε μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της παρατήρησης

ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΤΡΙΒΗ

Η εσωτερική τριβή στα ρευστά ονομάζεται ιξώδες
Λόγω του ιξώδους:
Ένα σώμα που βρίσκεται σε ροή ρευστού τείνει να παρασυρθεί από αυτό
Παρουσιάζει αντίσταση στη ροή του ρευστού
Στην τυρβώδη ροή παρουσιάζονται στρόβιλοι

$$\frac{F}{A} = \eta \frac{\Delta \mathrm{u}}{\Delta \mathrm{L}}$$



Νευτώνιο ρευστό

$$F = \eta A \frac{\mathrm{du}}{\mathrm{dL}}$$

n: Συντελεστής ιξώδους ή ιξώδες [Ns/m^2]
Στο CGS → poise $1p=10^{-1}$ Ns/m^2 $cp=10^{-2}p$, $\mu p=10^{-6}p$
Το n εξαρτάται από την θερμοκρασία
u/L: βαθμίδα ταχύτητας

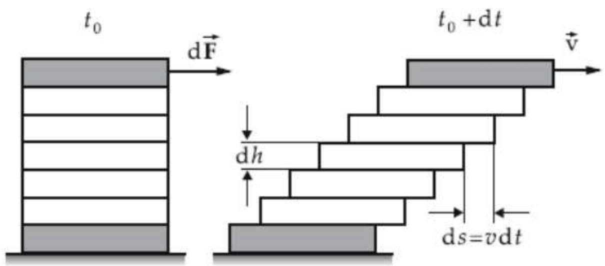


Figure 5.49: Layers of liquid in laminar flow between two plates moving with respect to each other.

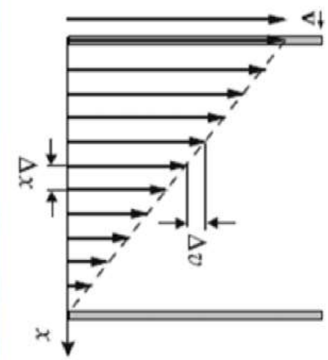


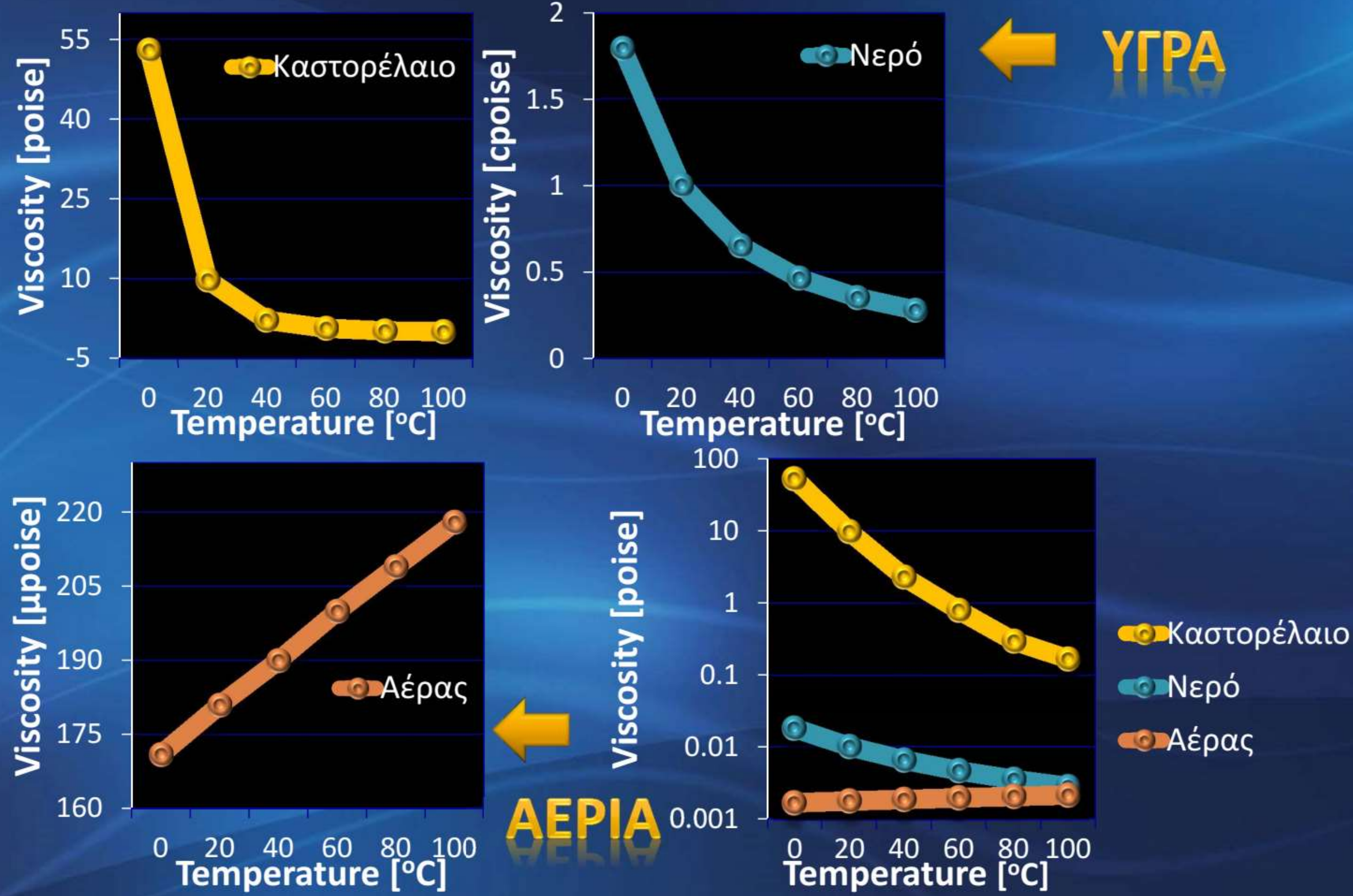
Figure 5.50: Velocity profile in laminar flow between two parallel plates moving with respect to each other.

Newtonian viscosity			**MLT^{-2}**
	Symbol	Unit	Quantity
$F_R = \eta A \dfrac{dv}{dx}$	F_R	N	frictional force
	η	$Pa \cdot s = N \cdot s/m^2$	dynamic viscosity
	A	m^2	area of layer
	dv/dx	1/s	velocity gradient

The proportionality constant η is called **dynamic viscosity**, or simply **viscosity**. The unit of viscosity is **Pascal second** ($Pa \cdot s$). The higher the viscosity of a liquid, the greater the force required to move the layers against each other. A typical order of magnitude for η is 10^{-5} $Pa \cdot s$ for gases, 10^{-3} $Pa \cdot s$ for water and between 0.1 and 0.01 $Pa \cdot s$ (depending on temperature) for lubricating oils.

Non-Newtonian materials, materials for which the Newtonian viscosity is not valid and/or the deformation of which is not plastic. Such materials are polymeric materials (**liquid plastics**) and **dispersions** (liquids containing solids or other liquids suspended as small spheres; also denoted **suspension** or **colloid**, depending on their dimension).

Εξάρτηση του ιξώδους από τη θερμοκρασία



ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ Poiseuille

ΠΑΡΟΧΗ ΣΕ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟ ΣΩΛΗΝΑ ΠΟΥ ΔΙΑΡΡΕΑΙΤΑΙ ΑΠΟ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΥΓΡΟ

Στην περίπτωση που έχουμε οριζόντιο σωλήνα κυκλικής διατομής μήκους L στα άκρα του οποίου υπάρχει διαφορά πίεσης $\Delta p = p_1 - p_2$ ισχύει

για στρωτή ροή πραγματικού υγρού μέσα στο σωλήνα πως, η παροχή Q του σωλήνα είναι ανάλογη της βαθμίδας πίεσης $(p_1 - p_2)/L$, ανάλογη της τέταρτης δύναμης της ακτίνας r του σωλήνα και αντιστρόφως ανάλογη του συντελεστή ιξώδους

$$Q = \frac{\pi}{8n} \frac{p_1 - p_2}{L} r^4$$

$$\Delta P = \left(\frac{8\eta L}{\pi r^4}\right) Q$$

Για δεδομένη ΔP η παροχή εξαρτάται από τον όρο στην παρένθεση
(μικρό r → μικρή παροχή. Τι γίνεται σε περίπτωση μερικώς φραγμένης αρτηρίας;)

ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ Stokes

ΣΦΑΙΡΑ ΠΟΥ ΚΙΝΕΙΤΑΙ ΜΕΣΑ ΣΕ ΡΕΥΣΤΟ

Το είδος της ροής ενός πραγματικού ρευστού γύρω από μια σφαίρα εξαρτάται από το μέγεθος της ταχύτητας του ρευστού ως προς τη σφαίρα. Για μικρές ταχύτητες η ροή είναι στρωτή ενώ για μεγάλες τυρβώδης.

Για την πρώτη περίπτωση ισχύει ο νόμος του Stokes

Κκατά την κίνηση μιας σφαίρας σε πραγματικό υγρό η αντίσταση R, η οποία αναπτύσσεται από το υγρό στη σφαίρα είναι ανάλογη της ακτίνας της σφαίρας r, του συντελεστή ιξώδους n και της ταχύτητας u.

$$R = 6\pi n r u$$

Σε μεγάλες ταχύτητες η αντίσταση είναι ανάλογη της δεύτερης δύναμης της ταχύτητας

$$F_R = 6\pi\eta r v = F_G - F_A = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho_K - \rho_{Fl})g$$

(ρ_K density of sphere, ρ_{Fl} density of liquid). The sinking velocity is

$$v = \frac{2gr^2(\rho_K - \rho_{Fl})}{9\eta},$$

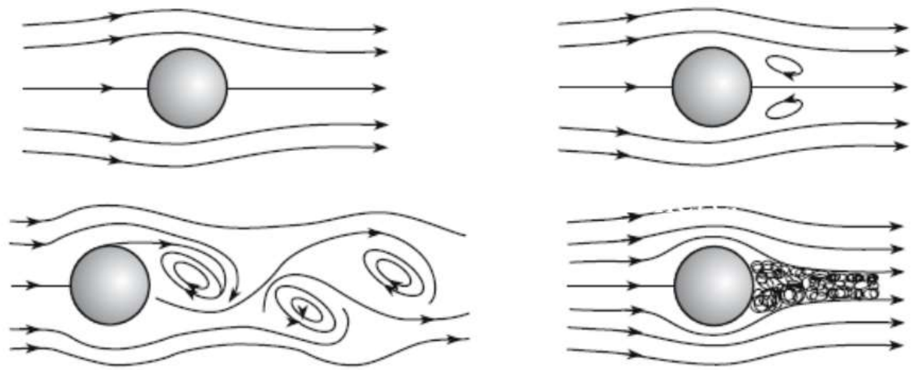


Figure 5.54: Formation of vortices and transition to turbulent flow for increasing Reynolds number.

$$\mathfrak{R} = \frac{L\rho u}{\eta}$$

ΑΡΙΘΜΟΣ του Reynolds

Όταν η ταχύτητα ενός πραγματικού ρευστού υπερβεί μια ορισμένη τιμή τότε η ροή του από στρωτή γίνεται τυρβώδης. Η ταχύτητα αυτή ονομάζεται κρίσιμη ταχύτητα και εξαρτάται από τη μορφή και τις διαστάσεις του σωλήνα και τη φύση του ρευστού. Η τιμή αυτή $u=u_{κρ}$ αποτελεί όριο της ευστάθιας της στρωτής ροής. Εάν ξεπεραστεί η ροή μετασταθώς ενδέχεται να παραμείνει στρωτή όμως με την παραμικρή διαταραχή γίνεται τυρβώδης.

Για σύγκριση των ροών ενδιαφέρον παρουσιάζει ο λόγος

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho u^2}{F / A} = \frac{u \rho r}{n}$$

ο οποίος ονομάζεται αριθμός Reynolds και είναι αδιάστατο μέγεθος. Για την κρίσιμη ταχύτητα λαμβάνουμε τον αντίστοιχο κρίσιμο αριθμό Reynolds.

ΥΛΗ που θα καλυφθεί στη διάρκεια του εξαμήνου

Φυσική και Βιολογία.
Μεγέθη και συστήματα μονάδων.
Γραφικές παραστάσεις φαινομένων.
Δυνάμεις. Ροπές.
Κλασσική φυσική, Νόμοι του Νεύτωνα.
Ενέργεια.
Θερμότητα, ειδική θερμότητα, θερμοκρασία. Μετατροπές φάσεων.
Πίεση σε ρευστά, άνωση. Κίνηση σε ρευστό, ρευστοδυναμική (νόμοι συνεχείας και Bernoulli).
Ελαστικότητα.
Επιφανειακή τάση.
Αρμονική ταλάντωση. Κύματα.
Η φύση του φωτός. Διάθλαση. Φακοί και Είδωλα. Κυματικά φαινόμενα (περίθλαση, συμβολή πόλωση).
Ηλεκτροστατική. Ηλεκτρικά πεδία. Πυκνωτές.
Ηλεκτρικό ρεύμα. Νόμος του Ohm. Αντίσταση. Το ποτενσιόμετρο.
Ηλεκτρικό ρεύμα και μαγνητικό πεδίο.
Εναλλασσόμενο ρεύμα.
Ανορθωτές και δίοδοι.
Μετρητές ηλεκτρικών ποσοτήτων.
Εκπομπή ηλεκτρονίων.
Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.
Κίνηση φορτίων σε μαγνητικό πεδίο. Κύκλοτρο. Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο.
Ατομικό υπόδειγμα του Bohr. Στοιχεία μοντέρνας (κβαντικής) φυσικής.
Ραδιενεργοί πυρήνες, ραδιενέργεια.

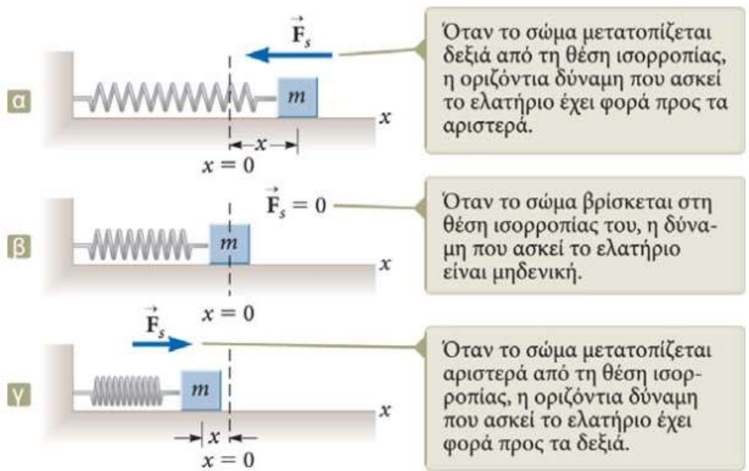
Περιοδική κίνηση

▶Η ***περιοδική κίνηση*** είναι η κίνηση που εκτελεί ένα σώμα όταν επιστρέφει ανά τακτά χρονικά διαστήματα σε μια συγκεκριμένη θέση.

▶Στα μηχανικά συστήματα, όταν η δύναμη που ασκείται σε ένα σώμα είναι ανάλογη της θέσης του σώματος ως προς τη θέση ισορροπίας του, παρατηρείται μια ειδική μορφή περιοδικής κίνησης.

▶Αν η δύναμη αυτή έχει κατεύθυνση πάντα προς τη θέση ισορροπίας, τότε η κίνηση ονομάζεται ***απλή αρμονική κίνηση***.

- Ένας κύβος μάζας *m* είναι συνδεδεμένος στο άκρο ενός ελατηρίου και μπορεί και κινείται ελεύθερα επάνω σε μια οριζόντια επιφάνεια χωρίς τριβές.
- Όταν το ελατήριο δεν είναι ούτε εκτεταμένο ούτε συμπιεσμένο, ο κύβος βρίσκεται στη ***θέση ισορροπίας*** ($x = 0$).
- Αν ένα τέτοιο σύστημα απομακρυνθεί από τη θέση ισορροπίας του, θα αρχίσει να ταλαντώνεται.
- Ο νόμος του Hooke ορίζει ότι $F_s = -kx$
  - F_s είναι η δύναμη επαναφοράς, κατεύθυνση πάντα προς τη θέση ισορροπίας, αντίθετη με τη μετατόπιση του σώματος από τη θέση ισορροπίας.
  - k η σταθερά ελατηρίου.
  - x η μετατόπιση.



Κίνηση συστήματος σώματος-ελατηρίου

▶(α): $x > 0$, δύναμη επαναφοράς με κατεύθυνση προς τα αριστερά.

▶(β): $x = 0$, το ελατήριο δεν είναι ούτε εκτεταμένο ούτε συμπιεσμένο, δύναμη είναι ίση με 0.

▶(γ): $x < 0$, δύναμη επαναφοράς με κατεύθυνση προς τα δεξιά.

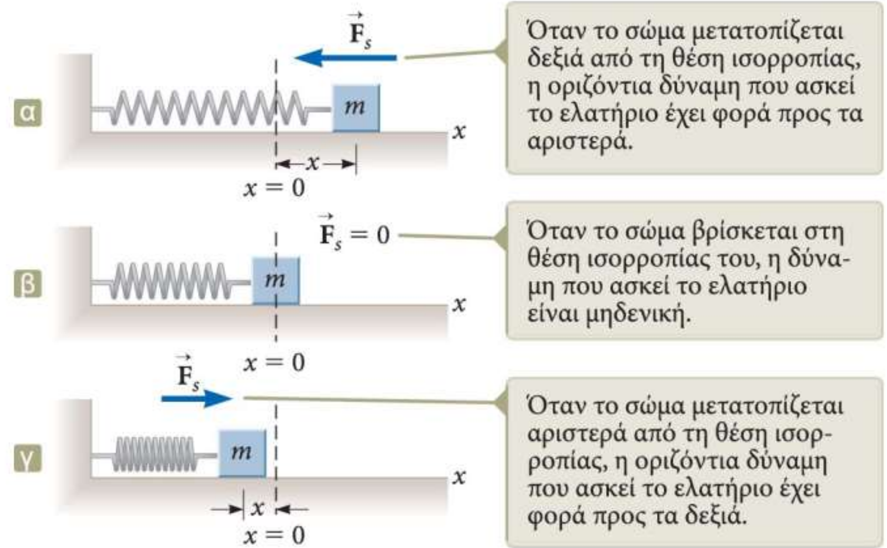
▶Η δύναμη που περιγράφει ο νόμος του Hooke είναι η συνισταμένη δύναμη.

$$-kx = ma_x \rightarrow a_x = -\frac{k}{m}x$$

▶Η επιτάχυνση του κύβου είναι ανάλογη της μετατόπισής του.

▶Η κατεύθυνση της επιτάχυνσης είναι αντίθετη από την κατεύθυνση της μετατόπισης του κύβου από τη θέση ισορροπίας του.

▶***Ένα σώμα εκτελεί απλή αρμονική κίνηση όταν η επιτάχυνσή του είναι ανάλογη της θέσης του και έχει κατεύθυνση αντίθετη από αυτή της μετατόπισης από τη θέση ισορροπίας.***



*Η επιτάχυνση **δεν** είναι σταθερή.*

Στη θέση x = A, επιτάχυνσή-kA/m.

Στη θέση ισορροπίας, a = 0.

Στη θέση x = -A, επιτάχυνσή +kA/m.

Σωματίδιο που εκτελεί απλή αρμονική κίνηση

- **Μοντέλο του σωματιδίου που εκτελεί απλή αρμονική κίνηση**

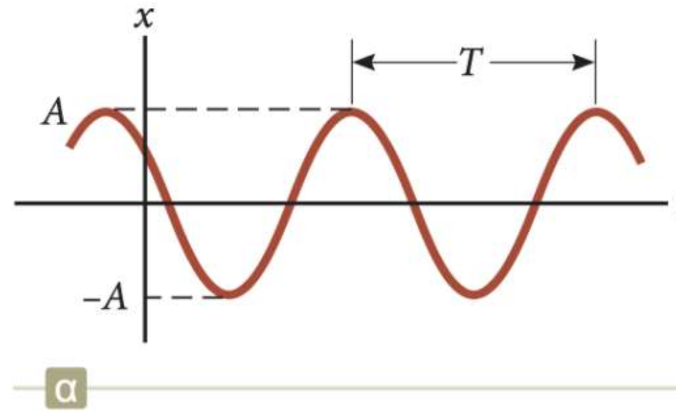
- Θεωρούμε ότι η ταλάντωση γίνεται στον άξονα x.
- Επιτάχυνση

$$a = \boxed{\frac{d^2x}{dt^2}} = -\frac{k}{m}x \quad \boxed{-\omega^2 x}$$

- Θέτουμε

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

- οπότε $a = -\omega^2 x$



Μία λύση είναι η $x(t) = A\cos(\omega t + \phi)$.
Τα A, ω, ϕ είναι σταθερές.

Πρέπει να βρούμε μια συνάρτηση που να ικανοποιεί την εξίσωση.
Δηλαδή μια συνάρτηση $x(t)$ η οποία θα έχει δεύτερη παράγωγο ίδια με την αρχική συνάρτηση, αλλά με αρνητικό πρόσημο και πολλαπλασιασμένη με ω^2.
Οι τριγωνομετρικές συναρτήσεις του ημιτόνου (sine) και του συνημιτόνου (cosine) πληρούν αυτές τις προϋποθέσεις.

Απλή αρμονική κίνηση

$$x(t) = A\cos(\omega t + \phi)$$

$$v = \frac{dx}{dt} = -\omega A \sin(\omega t + \phi) \qquad v_{\max} = \omega A = \sqrt{\frac{k}{m}}\,A$$

$$\alpha = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 A \cos(\omega t + \phi) \qquad \alpha_{\max} = \omega^2 A = \frac{k}{m}\,A$$

Τα A, ω, ϕ είναι σταθερές

A: πλάτος, η μέγιστη τιμή της θέσης του σωματιδίου είτε προς τη θετική είτε προς την αρνητική κατεύθυνση του άξονα *x*.

ω: κυκλική συχνότητα ή γωνιακή συχνότητα.

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

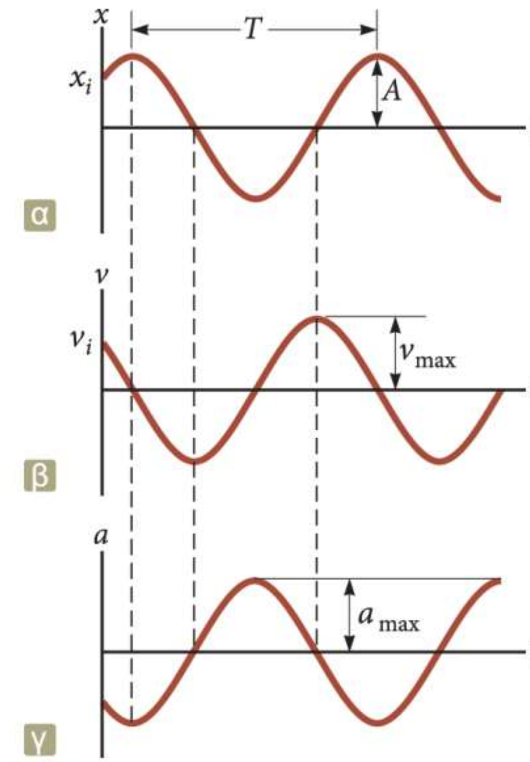
ϕ: σταθερά φάσης ή αρχική γωνία φάσης.

($\omega t + \phi$): φάση της κίνησης

T: *περίοδος* της κίνησης
f: *συχνότητα*

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \qquad T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \qquad f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$$

Η συχνότητα και η περίοδος εξαρτώνται μόνο από τη μάζα του σωματιδίου και τη σταθερά του ελατηρίου.
Η συχνότητα είναι μεγάλη όταν το ελατήριο είναι σκληρό (έχει μεγάλη σταθερά *k*) και μειώνεται όσο αυξάνεται η μάζα του σωματιδίου.



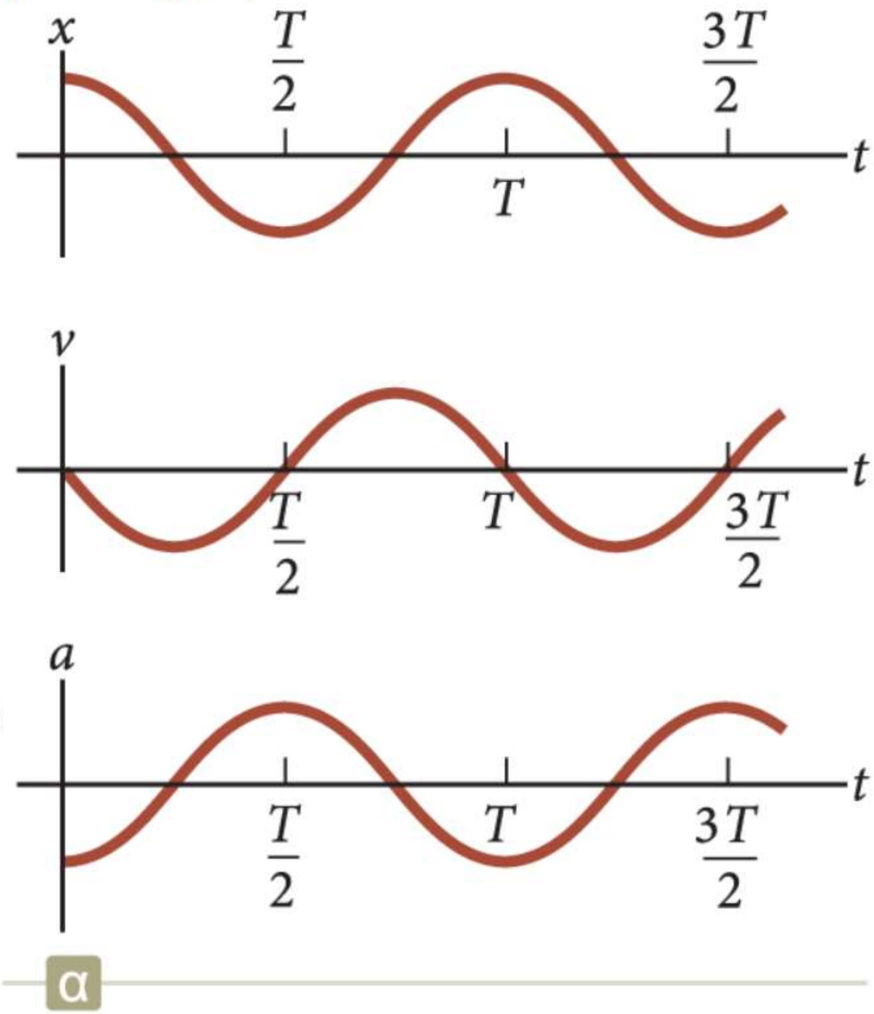
Η ταχύτητα και η επιτάχυνση είναι εκτός φάσης από τη θέση κατά 90° και 180°, αντίστοιχα.

Απλή αρμονική κίνηση

$$x(t) = A\cos(\omega t + \phi)$$

$$v = \frac{dx}{dt} = -\omega A \sin(\omega t + \phi)$$

$$\alpha = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 A \cos(\omega t + \phi)$$



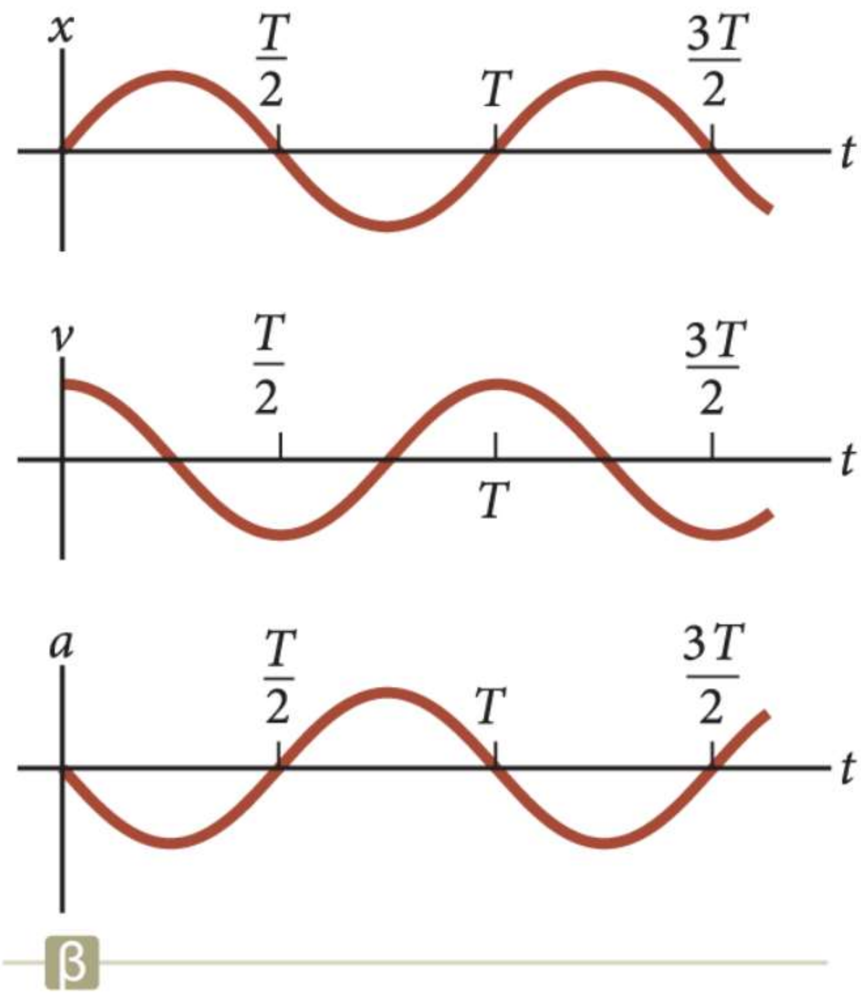
- Αρχικές συνθήκες τη χρονική στιγμή $t = 0$ είναι
  - $x(0) = A$
  - $v(0) = 0$
- Αυτό σημαίνει ότι $\phi = 0$.
- Οι ακραίες τιμές της επιτάχυνσης είναι $\pm\omega^2 A$ και προκύπτουν στις θέσεις $\pm A$.
- Οι ακραίες τιμές της ταχύτητας είναι $\pm\omega A$ και προκύπτουν στη θέση $x = 0$.

$$x(t) = A\cos(\omega t + \phi)$$

Απλή αρμονική κίνηση

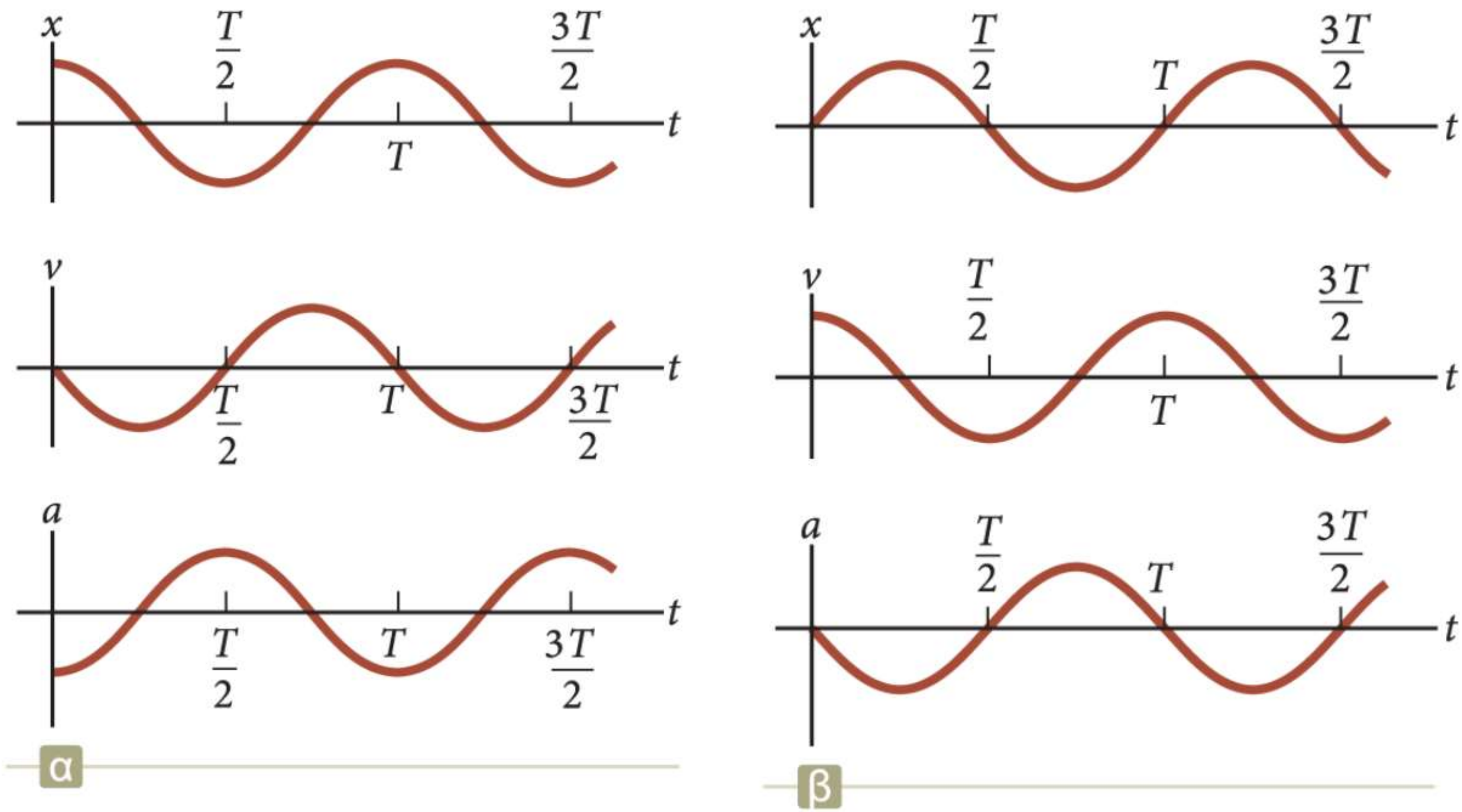
$$v = \frac{dx}{dt} = -\omega A\sin(\omega t + \phi)$$

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 A\cos(\omega t + \phi)$$

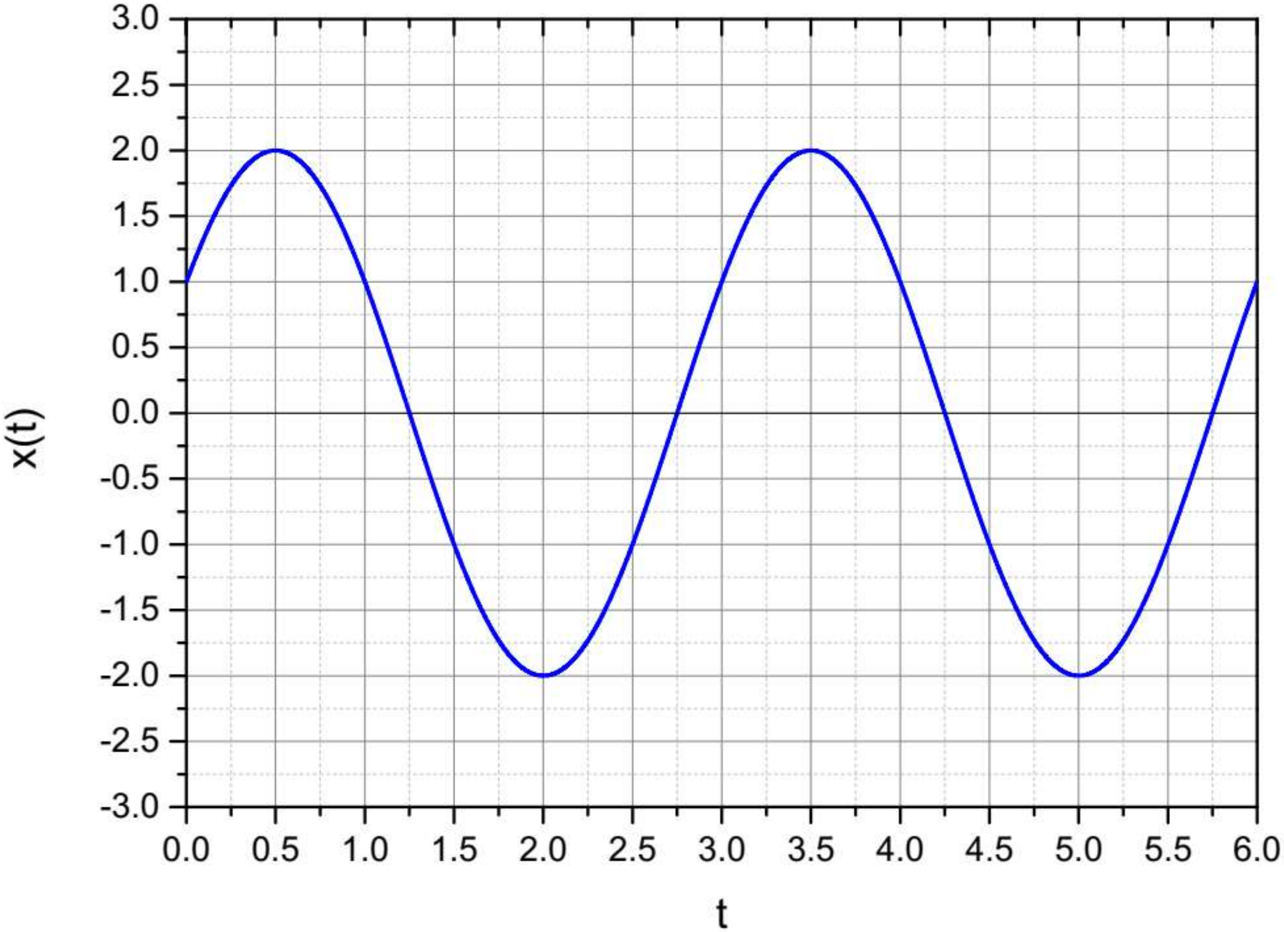


- Οι αρχικές συνθήκες τη χρονική στιγμή $t = 0$ είναι
  - $x(0) = 0$
  - $v(0) = v_i$
- Αυτό σημαίνει ότι $\phi = -\pi/2$.
- Το γράφημα έχει μετατεθεί προς τα δεξιά κατά ένα τέταρτο του κύκλου ταλάντωσης ως προς το γράφημα $x(0) = A$.

Το γράφημα έχει μετατεθεί προς τα δεξιά κατά ένα τέταρτο του κύκλου ταλάντωσης ως προς το γράφημα $x\ (0) = A$.



Απλή αρμονική κίνηση



Ενέργεια του απλού αρμονικού ταλαντωτή

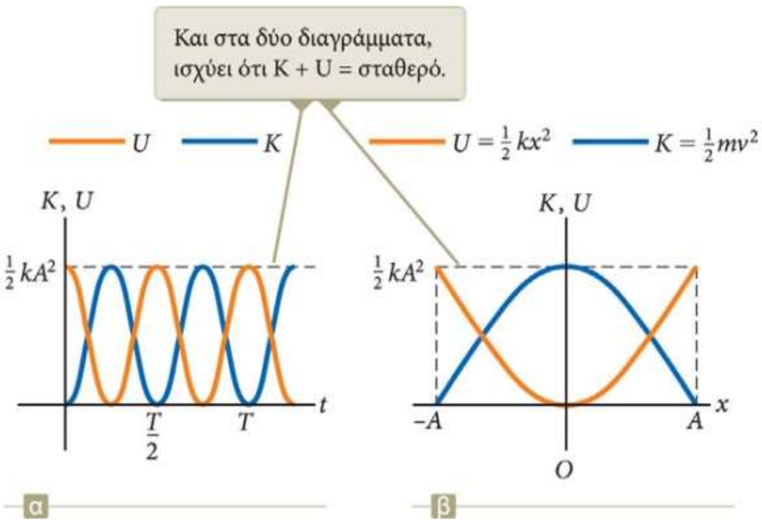
Κινητική ενέργειά: $K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m\omega^2A^2 \sin^2(\omega t + \phi)$

Υποθέτουμε ότι το ελατήριο δεν έχει μάζα, οπότε η μάζα του συστήματος είναι η μάζα του σώματος.

Ελαστική δυναμική ενέργεια: $U = \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}kA^2 \cos^2(\omega t + \phi)$

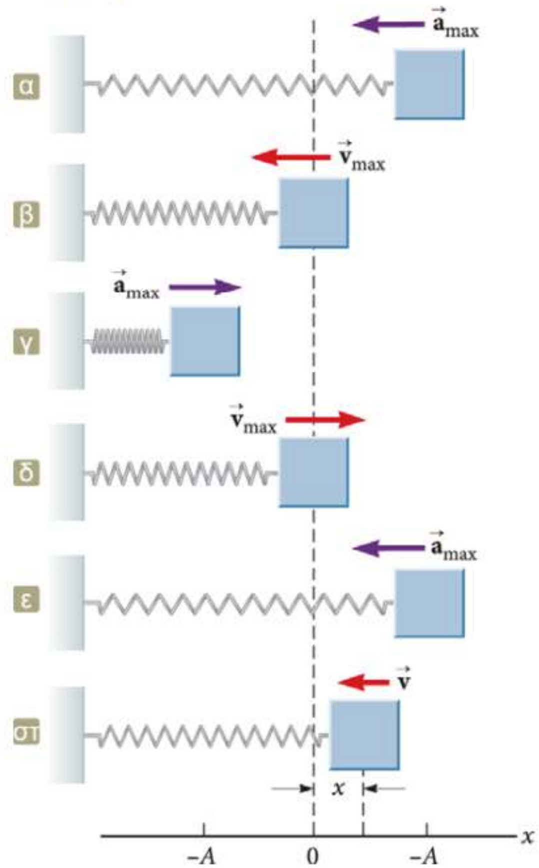
Συνολική ενέργεια: $E = K + U = \frac{1}{2}kA^2$

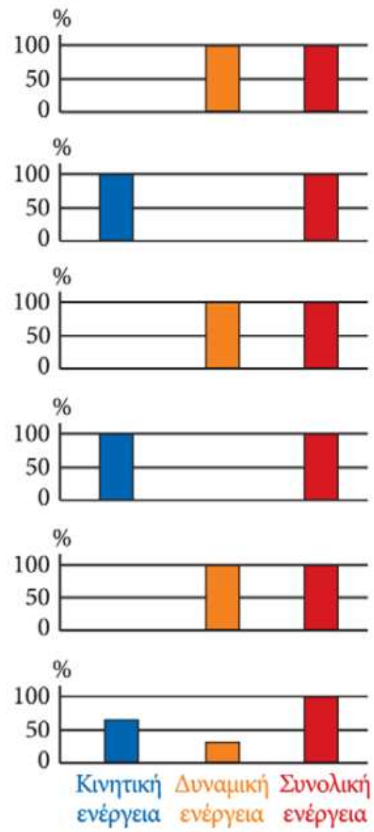
Εφόσον η επιφάνεια δεν έχει τριβές, το σύστημα είναι απομονωμένο η συνολική ενέργειά του είναι σταθερή



- Η συνολική μηχανική ενέργεια είναι σταθερή.
  - Σε κάθε χρονική στιγμή, η συνολική ενέργεια είναι $\frac{1}{2}kA^2$
- Η συνολική μηχανική ενέργεια είναι ανάλογη του τετραγώνου του πλάτους.
- Η αποθηκευμένη δυναμική ενέργεια του ελατηρίου μετατρέπεται συνεχώς σε κινητική ενέργεια του σώματος και αντιστρόφως.
- Στο διάγραμμα, $\varphi = 0$.

Ενέργεια του απλού αρμονικού ταλαντωτή - Σύνοψη





t	x	v	a	K	U
0	A	0	$-\omega^2 A$	0	$\frac{1}{2}kA^2$
$\frac{T}{4}$	0	$-\omega A$	0	$\frac{1}{2}kA^2$	0
$\frac{T}{2}$	$-A$	0	$\omega^2 A$	0	$\frac{1}{2}kA^2$
$\frac{3T}{4}$	0	ωA	0	$\frac{1}{2}kA^2$	0
T	A	0	$-\omega^2 A$	0	$\frac{1}{2}kA^2$
t	x	v	$-\omega^2 x$	$\frac{1}{2}mv^2$	$\frac{1}{2}kx^2$

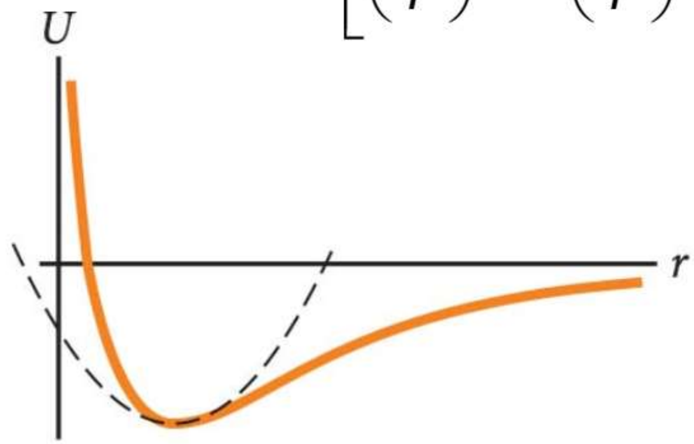
Ταχύτητα σε μια συγκεκριμένη θέση: $E = K + U = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}kA^2 \rightarrow v = \pm\sqrt{\frac{k}{m}\left(A^2 - x^2\right)} = \pm\omega\sqrt{A^2 - x^2}$

Απλός αρμονικός ταλαντωτής και δια-ατομικό δυναμικό

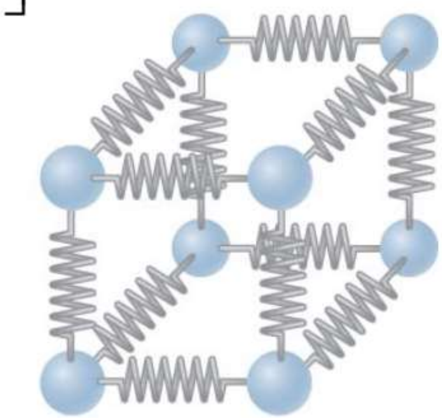
Δυναμικό αλληλεπίδρασης μεταξύ δύο ατόμων στο μόριο (Lennard-Jones)

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

- Αν τα άτομα μέσα στα μόρια δεν απομακρύνονται πολύ μεταξύ τους, μπορούμε να μοντελοποιήσουμε τις δυνάμεις συνοχής τους ως δυνάμεις που προκαλούνται από μικροσκοπικά ελατήρια.
- Η δυναμική ενέργεια συμπεριφέρεται όπως στην περίπτωση του απλού αρμονικού ταλαντωτή.

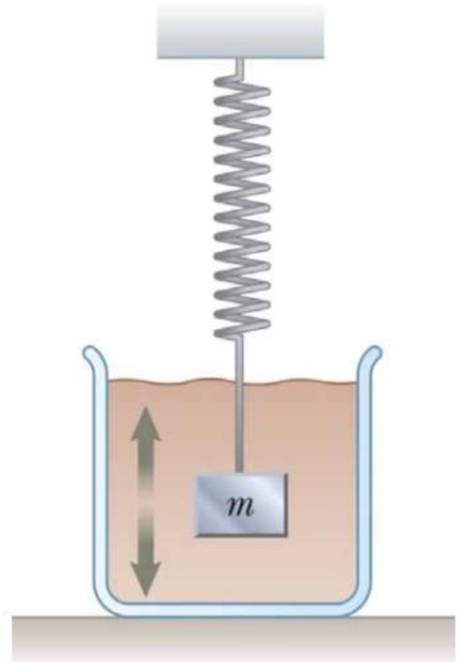


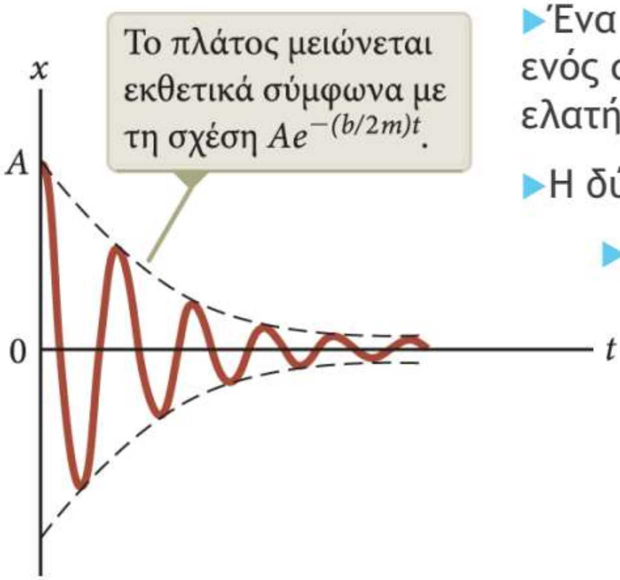
α


β

Φθίνουσες ταλαντώσεις

- Σε πολλά πραγματικά συστήματα, δρουν μη συντηρητικές δυνάμεις.
  - Αυτά τα συστήματα δεν είναι ιδανικά (όπως τα συστήματα που μελετήσαμε μέχρι τώρα).
  - Η τριβή και η αντίσταση του αέρα είναι μη συντηρητικές δυνάμεις.
- Σε αυτή την περίπτωση, η μηχανική ενέργεια του συστήματος μειώνεται συναρτήσει του χρόνου και η κίνηση είναι ***φθίνουσα ή υφίσταται απόσβεση***.





- Ένα παράδειγμα φθίνουσας κίνησης είναι η κίνηση ενός σώματος το οποίο είναι προσαρτημένο σε ένα ελατήριο και βυθισμένο σε ένα παχύρρευστο υγρό.
- Η δύναμη επιβράδυνσης εκφράζεται ως $\vec{\mathbf{R}} = -b\vec{\mathbf{v}}$
  - Η σταθερά *b* ονομάζεται ***συντελεστής απόσβεσης***.
  - Το πλάτος μειώνεται ως προς τον χρόνο.
  - Οι διακεκομμένες γραμμές ορίζουν την ***περιβάλλουσα*** της καμπύλης της κίνησης.
  - Η δύναμη επαναφοράς ισούται με -*kx*.

Φθίνουσες ταλαντώσεις

- Από τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα παίρνουμε

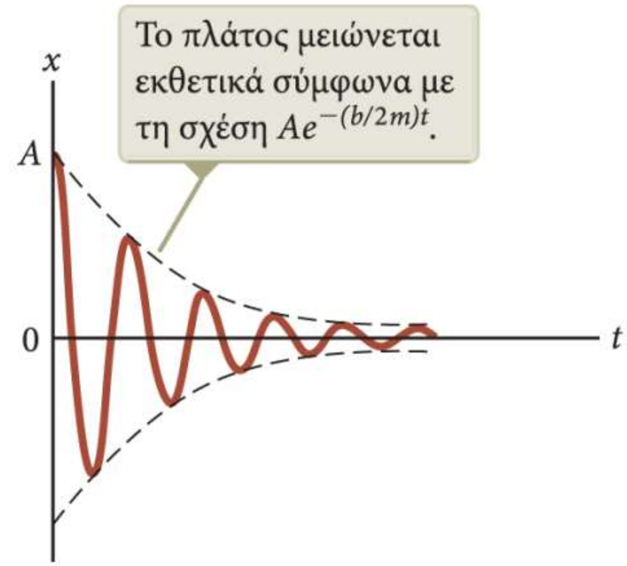
  $\Sigma F_x = -kx - bv_x = ma_x \rightarrow -kx-b(dx/dt)=m(d^2x/dt^2)$

- Όταν η δύναμη τριβής είναι μικρή συγκριτικά με τη μέγιστη δύναμη επαναφοράς, μπορούμε να βρούμε τη συνάρτηση που δίνει το *x*.
  - Αυτό συμβαίνει όταν ο συντελεστής *b* είναι μικρός.
- Η θέση περιγράφεται από τη σχέση

$$x = Ae^{-\left(b/2m\right)t}\cos(\omega t+\phi)$$

- Η κυκλική συχνότητα είναι

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}-\left(\frac{b}{2m}\right)^2}$$



- Όταν η δύναμη τριβής είναι μικρή, η κίνηση εξακολουθεί να είναι ταλάντωση, αλλά το πλάτος μειώνεται εκθετικά με τον χρόνο.
- Τελικά η κίνηση σταματά.
- Η κυκλική συχνότητα μπορεί να εκφραστεί και στη μορφή: $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \left(\frac{b}{2m}\right)^2}$, όπου $\omega_o = \sqrt{k/m}$

ιδιοσυχνότητα (ή **φυσική συχνότητα**) του συστήματος.

Για σταθερά k, m η ταλάντωση φθίνει πιο γρήγορα όσο αυξάνεται η δύναμη επιβράδυνσης.

Είδη απόσβεσης

▶Όταν η δύναμη επαναφοράς είναι τέτοια ώστε $b/2m < \omega_0$, τότε λέμε ότι το σύστημα παρουσιάζει ***υποαπόσβεση***.

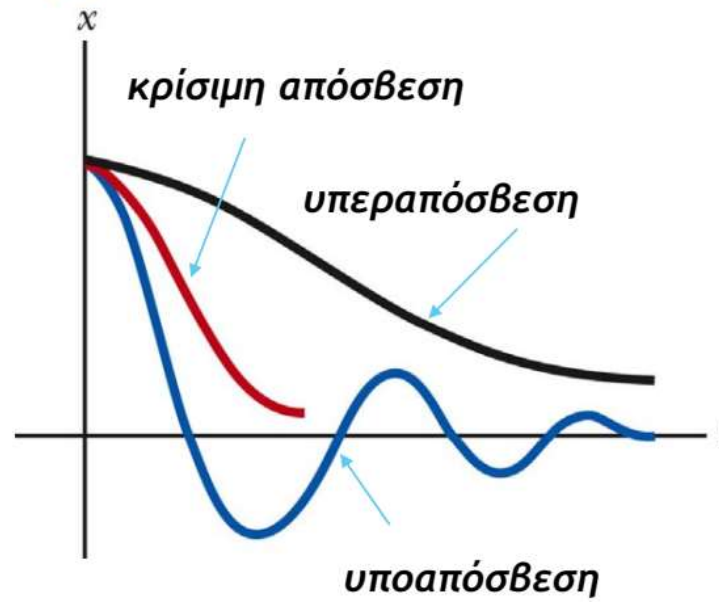
▶Όταν ο συντελεστής b πάρει μια οριακή τιμή b_c τέτοια ώστε $b_c/2m = \omega_0$, το σύστημα δεν ταλαντώνεται.

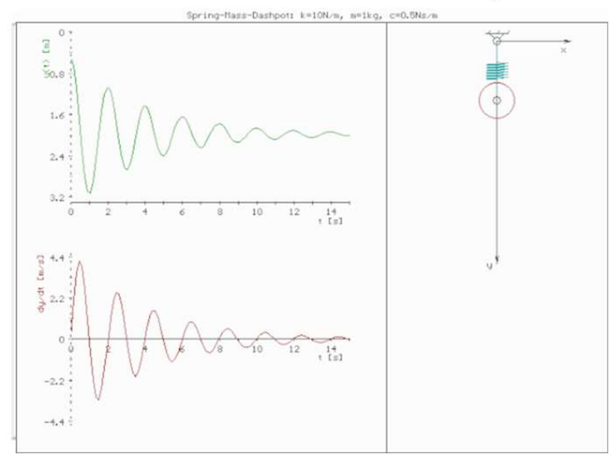
- Τότε λέμε ότι έχουμε ***κρίσιμη απόσβεση*** *(το σύστημα δεν ταλαντώνεται)- Το σύστημα αφήνεται ελεύθερο και πλησιάζει προς τη θέση ισορροπίας, αλλά δεν περνά από αυτή.*

▶Αν η δύναμη επαναφοράς είναι τέτοια ώστε $b/2m > \omega_0$, τότε λέμε ότι το σύστημα παρουσιάζει ***υπεραπόσβεση*** *(το σύστημα δεν ταλαντώνεται)- Το σύστημα αφήνεται ελεύθερο και επιστρέφει προς τη θέση ισορροπίας, αλλά δεν περνά από αυτή.*

▶ Όσο αυξάνεται το το b τόσο αυξάνεται ο χρόνος που χρειάζεται το σύστημα για να φτάσει στη θέση ισορροπίας.

▶Τα συστήματα στα οποία έχουμε κρίσιμη απόσβεση και υπεραπόσβεση, δεν έχουν κυκλική συχνότητα (δεν ορίζεται) και η $x=Ae^{-(b/2m)t}\cos(\omega t+\varphi)$ δεν ισχύει.





Εξαναγκασμένες ταλαντώσεις

- Μπορούμε να αντισταθμίσουμε την απώλεια ενέργειας σε μια φθίνουσα ταλάντωση ασκώντας μια περιοδική εξωτερική δύναμη.
- Στο σύστημα μεταφέρεται ενέργεια μέσω μιας δύναμης που έχει την κατεύθυνση της κίνησης.
- Το πλάτος της κίνησης διατηρείται σταθερό αν η ενέργεια που παρέχεται σε κάθε κύκλο ταλάντωσης ισούται με τη μείωση της μηχανικής ενέργειας που προκαλούν οι δυνάμεις αντίστασης σε κάθε κύκλο.
- Έστω το προηγούμενο σύστημα στο οποίο ασκείται περιοδική δύναμη διέγερσης $F=F_0 \sin\omega t$
- Προσοχή: Η συχνότητα ω της διεγείρουσας μπορεί να μεταβάλλεται, ενώ η ω_0 του συστήματος εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του (k,m).
- Από τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα παίρνουμε

$$\Sigma F_x = F_0 \sin\omega t - kx - bv_x = ma_x \rightarrow F_0 \sin\omega t - kx - b(dx/dt) = m(d^2x/dt^2)$$

- Όταν σε ένα αρχικά ακίνητο σώμα αρχίσει να ασκείται μια δύναμη διέγερσης, το σώμα θα αρχίσει να ταλαντώνεται με ολοένα μεγαλύτερο πλάτος ταλάντωσης.
- Μετά από κάποιο χρονικό διάστημα όταν η ενέργεια που παρέχεται στο σύστημα από την εξωτερική δύναμη εξισωθεί με την ενέργεια που χάνεται ανα κύκλο, το σύστημα θα φτάσει σε σταθερή κατάσταση και θα ταλαντώνεται με σταθερό πλάτος.

Εξαναγκασμένες ταλαντώσεις

- Όταν σε ένα αρχικά ακίνητο σώμα αρχίσει να ασκείται μια δύναμη διέγερσης, το σώμα θα αρχίσει να ταλαντώνεται με ολοένα μεγαλύτερο πλάτος ταλάντωσης.

- Έπειτα από αρκετό χρονικό διάστημα,

Ενέργεια δύναμης διέγερσης = Ενέργεια που μετατρέπεται σε εσωτερική

    - Το σύστημα φτάνει σε μια σταθερή κατάσταση.
    - Οι ταλαντώσεις συνεχίζονται με σταθερό πλάτος.
    - Η λύση της εξίσωσης γίνεται x=A cos (ωt+φ)

- όπου το πλάτος μιας εξαναγκασμένης ταλάντωσης είναι

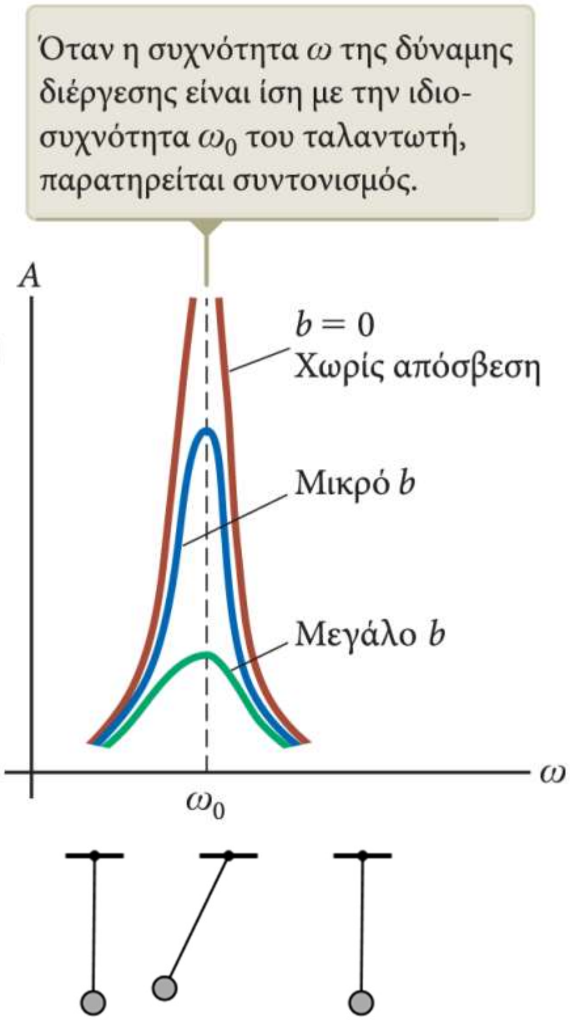
$$A = \frac{F_0/m}{\sqrt{\left(\omega^2 - \omega_0^2\right)^2 + \left(\frac{b\omega}{m}\right)^2}}$$

- Το ω_0 είναι η ιδιοσυχνότητα του ταλαντωτή χωρίς απόσβεση.

Ο εξαναγκασμένος ταλαντωτής ταλαντώνεται με τη συχνότητα της εξωτερικής δύναμης αφού οδηγείται σε σταθερή κατάσταση

Συντονισμός

$$A = \frac{F_0/m}{\sqrt{\left(\omega^2-\omega_0^2\right)^2+\left(\frac{b\omega}{m}\right)^2}}$$ ***πλάτος εξαναγκασμένης ταλάντωσης***



▶Όταν η συχνότητα της δύναμης διέγερσης πλησιάζει την ιδιοσυχνότητα της ταλάντωσης ($\omega \approx \omega_0$), παρατηρείται αύξηση του πλάτους (για μικρές τιμές του b).

▶Αυτή η θεαματική αύξηση του πλάτους ονομάζεται ***συντονισμός***.

▶Η ιδιοσυχνότητα ω_0 είναι γνωστή και ως συχνότητα συντονισμού του συστήματος.

▶Κατά τον συντονισμό, η δύναμη διέγερσης βρίσκεται σε φάση με την ταχύτητα και η ισχύς που μεταφέρεται στον ταλαντωτή παίρνει τη μέγιστη τιμή της (v=dx/dt, συνάρτηση ημιτόνου όπως η δύναμη).

▶Συντονισμός παρατηρείται (κορυφή του γραφήματος *A*-*ω*) όταν η συχνότητα της δύναμης διέγερσης είναι ίδια με την ιδιοσυχνότητα.

▶Όταν η απόσβεση μειώνεται, το πλάτος *A* της ταλάντωσης αυξάνεται.

▶Όταν η απόσβεση αυξάνεται, το πλάτος της καμπύλης αυξάνεται.

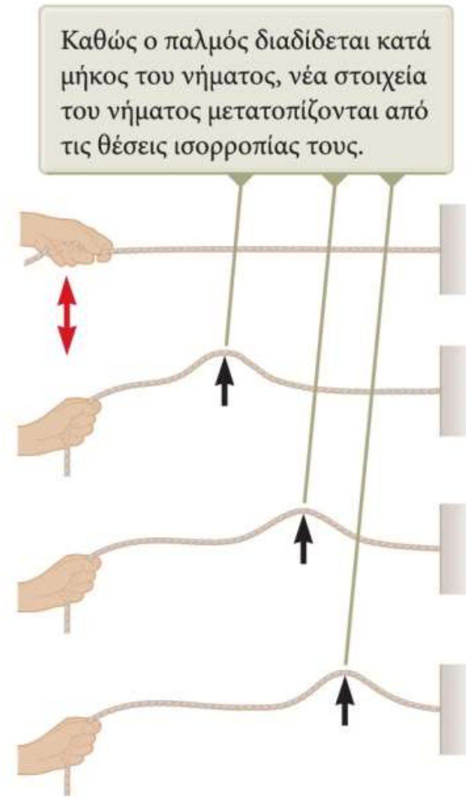
▶Το σχήμα της καμπύλης συντονισμού εξαρτάται από τον συντελεστή *b*.

Κύματα

- Κατά τη διάδοση ενός κύματος, μεταφέρεται ενέργεια σε κάποια απόσταση, ενώ δε μεταφέρεται ύλη.
- ***Υπάρχουν δύο βασικά είδη κυμάτων***.
  - ***Μηχανικά κύματα***
    - Σε κάποιο φυσικό μέσο προκαλείται μια διαταραχή.
    - Το κύμα είναι η διάδοση της διαταραχής μέσα στο μέσο.
  - ***Ηλεκτρομαγνητικά κύματα***
    - Δεν απαιτείται κάποιο μέσο για τη διάδοσή τους.
    - Παραδείγματα τέτοιων κυμάτων είναι το φως, τα ραδιοκύματα, και οι ακτίνες Χ.
- ***Προϋποθέσεις για τη δημιουργία μηχανικών κυμάτων***
    - Μια πηγή διαταραχής.
    - Ένα μέσο το οποίο περιέχει στοιχεία που μπορούν να διαταραχθούν.
    - Ένας φυσικός μηχανισμός που επιτρέπει στα στοιχεία του μέσου να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους.

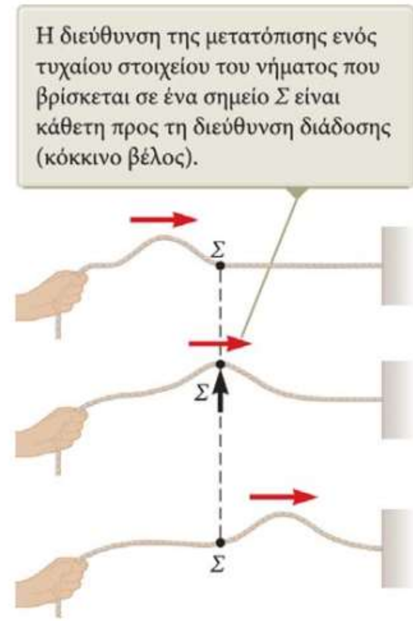
Διάδοση παλμού σε νήμα

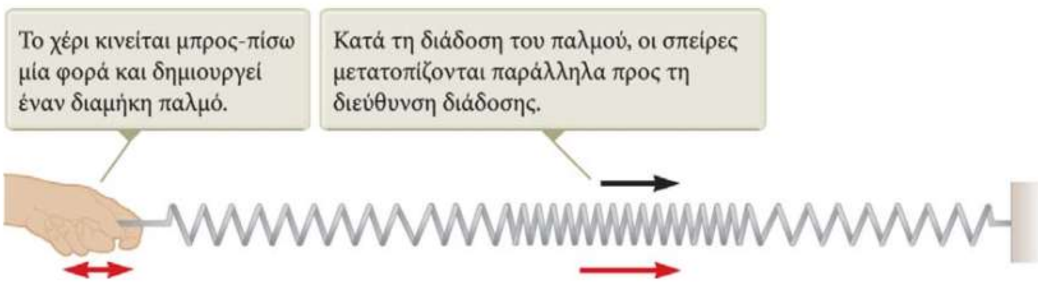
- Δημιουργούμε ένα κύμα, τινάζοντας ελαφρά το ένα άκρο του νήματος.
- Στο νήμα ασκείται τάση.
- Σχηματίζεται μια διαταραχή η οποία διαδίδεται κατά μήκος του νήματος.
  - Η διαταραχή ονομάζεται **παλμός**.
- Στην εικόνα φαίνονται 4 «στιγμιότυπα» από τη δημιουργία και τη διάδοση του κινούμενου παλμού.
- Το χέρι είναι η πηγή της διαταραχής.
- Το νήμα είναι το μέσο διάδοσης του παλμού.
  - Τα στοιχεία του νήματος διαταράσσονται από τη θέση ισορροπίας τους.
  - Τα στοιχεία συνδέονται μεταξύ τους, οπότε επηρεάζουν το ένα το άλλο.
- Ο παλμός έχει συγκεκριμένο ύψος.
- Ο παλμός έχει συγκεκριμένη ταχύτητα διάδοσης στο μέσο.



Εγκάρσια και διαμήκη κύμα

- Το κύμα είναι μια περιοδική διαταραχή, η οποία διαδίδεται σε ένα μέσο.
- Το οδεύον κύμα, ή ο παλμός, που αναγκάζει τα στοιχεία του διαταρασσόμενου μέσου να κινούνται κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης της διαταραχής ονομάζεται **εγκάρσιο κύμα**.
  - Για να δημιουργήσουμε το κύμα, πρέπει να κουνήσουμε επανειλημμένα το άκρο του νήματος πάνω-κάτω.
- Η κίνηση του σωματιδίου υποδεικνύεται με το μαύρο βέλος.
- Η διεύθυνση διάδοσης του κύματος υποδεικνύεται με το κόκκινο βέλος.





- Το οδεύον κύμα, ή ο παλμός, που αναγκάζει τα στοιχεία του διαταρασσόμενου μέσου να κινούνται παράλληλα στη διεύθυνση διάδοσης της διαταραχής ονομάζεται **διάμηκες κύμα**.
  - Τα ηχητικά κύματα είναι διαμήκη κύματα.
- Η διεύθυνση μετατόπισης των σπειρών είναι παράλληλη προς τη διεύθυνση διάδοσης.

Σύνθετα κύματα-Παράδειγμα: Σεισμικά κύματα

- Κύματα P ή πρωτεύοντα κύματα
  - Το «P» είναι το αρχικό γράμμα της αγγλικής λέξης primary (πρωτεύων).
  - Κινούνται πιο γρήγορα από τα κύματα S, με 7-8 km/s.
  - Είναι διαμήκη κύματα
- Κύματα S ή δευτερεύοντα κύματα
  - Το «S» είναι το αρχικό γράμμα της αγγλικής λέξης secondary (δευτερεύων).
  - Κινούνται πιο αργά από τα κύματα P, με 4-5 km/s.
  - Είναι εγκάρσια κύματα

Ο σεισμογράφος καταγράφει τα κύματα αυτά, από τα οποία μπορούμε να εξαγάγουμε πληροφορίες σχετικά με το επίκεντρο του σεισμού.

ΟΡΙΣΜΟΙ

ΚΥΜΑ

Κάθε διαταραχή η οποία διαδίδεται με πεπερασμένη ταχύτητα από σημείο σε σημείο στον υπόλοιπο χώρο χωρίς τη μεταφορά ύλης

ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΔΙΑΔΟΣΗΣ

Η ταχύτητα μετάδοσης της διαταραχής

ΑΡΜΟΝΙΚΟ ΚΥΜΑ

Εάν η αρχική διαταραχή, η οποία μεταδίδεται, είναι απλή αρμονική ταλάντωση [τα μη αρμονικά κύματα μπορούν να αναλυθούν σε σειρές όροι των οποίων αποτελούν αρμονικά κύματα]

ΩΚΥΤΗΤΑ

Η ταχύτητα των «μορίων» όταν εκτελούν αρμονική κίνηση [ΝΑ ΜΗ ΣΥΓΧΕΕΤΑΙ ΜΕ την ταχύτητα του κύματος]

ΕΓΚΑΡΣΙΑ & ΔΙΑΜΗΚΗ

Η ταλάντωση πραγματοποιείται κάθετα/παράλληλα στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος

ΟΡΙΣΜΟΙ

ΜΗΧΑΝΙΚΑ Η' ΕΛΑΣΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ

Περιλαμβάνουν κίνηση σωμάτων, μεταφέρουν μηχανική ενέργεια. Π.χ. Ηχητικά, κύμα στην επιφάνεια μιας λίμνης

ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ

Κύματα που περιλαμβάνουν ταλαντώσεις ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου που πραγματοποιούνται κάθετα η μια στην άλλη και κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος το οποίο ταξιδεύει πάντα με την ταχύτητα του φωτός (στο κενό 300000Km/s). Δεν απαιτούν την ύπαρξη ύλης για τη διάδοση του κύματος (το φως του ήλιου φθάνει στη γη...)

Μια απλή ταλάντωση (όχι κύμα) περιγράφει την αρμονική κίνηση ενός σώματος γύρω από μια θέση «ισορροπίας» οπότε μαθηματικά περιγράφεται από την «απομάκρυνση» του σώματος σα συνάρτηση του χρόνου.

Ένα κύμα περιγράφει τη διάδοση μιας ταλάντωσης στο χώρο οπότε θα πρέπει μαθηματικά να περιγράφει την «απομάκρυνση» του σώματος σα συνάρτηση όχι μόνο του χρόνου αλλά και της θέσης στο χώρο.

ΕΞΙΣΩΣΗ ΚΥΜΑΤΟΣ

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = \frac{1}{u^2}\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2}$$

Κυματική εξίσωση

ψ το μέγεθος που περιγράφει τη διαταραχή που διαδίδεται

$$\psi(x,t) = f(x - ut)$$

Λύση της κυματικής εξίσωσης [συνάρτηση του x-ut !!!!]

Χωρική μεταβολή του κύματος: μπορούμε να τη “δούμε” αν φωτογραφίσουμε το κύμα για μια χρονική στιγμή π.χ. t=0

$$\psi(x,0) = f(x)$$

$$f(x - ut)$$

Περιγράφει τη διάδοση της f(x) με ταχύτητα u στο +x άξονα

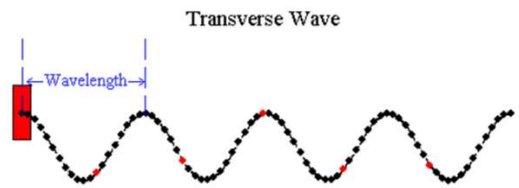
Χρονική μεταβολή του κύματος: Παρακολουθούμε πώς κινείται ένα σημείο (ένα x) σα συνάρτηση του χρόνου → Απλή αρμονική ταλάντωση.

$$\psi(x_o, t) = g(t)$$

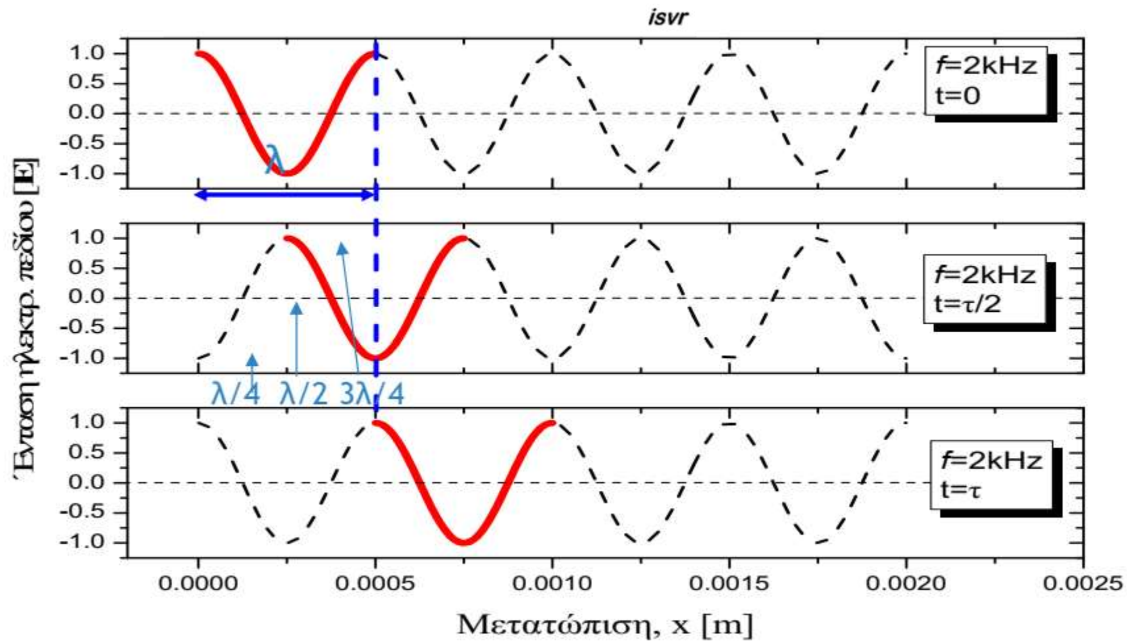
ΚΥΜΑΤΑ

E(x, t)=**E$_o$** συν[k(**x** ± u **t**)]
E_o πλάτος → μέγιστη τιμή της συνάρτησης
u ταχύτητα κύματος (ταχύτητα φάσης)
u= ± ω/k, ω=2πf, f=1/T
k κυματαριθμός, k = 2π/λ (λ μήκος κύματος)
x χωρική μεταβλητή
t χρονική μεταβλητή

$$\psi(x,t) = \psi_o \sin\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)\right]$$

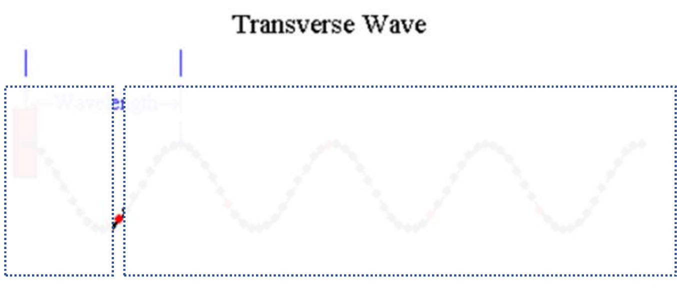


ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ
Το διάστημα στο οποίο διαδίδεται η αρχική διαταραχή σε χρόνο μιας περιόδου



ΘΕΜΕΛΙΩΔΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ

u=λ/T=λf



ΕΞΙΣΩΣΗ ΚΥΜΑΤΟΣ

$\mathbf{E}(x, t)=\mathbf{E_o}$ συν$[k(\mathbf{x} \pm u\, \mathbf{t})]$

E_o πλάτος → μέγιστη τιμή της συνάρτησης

u ταχύτητα κύματος (ταχύτητα φάσης) $u= \pm\, \omega/k$

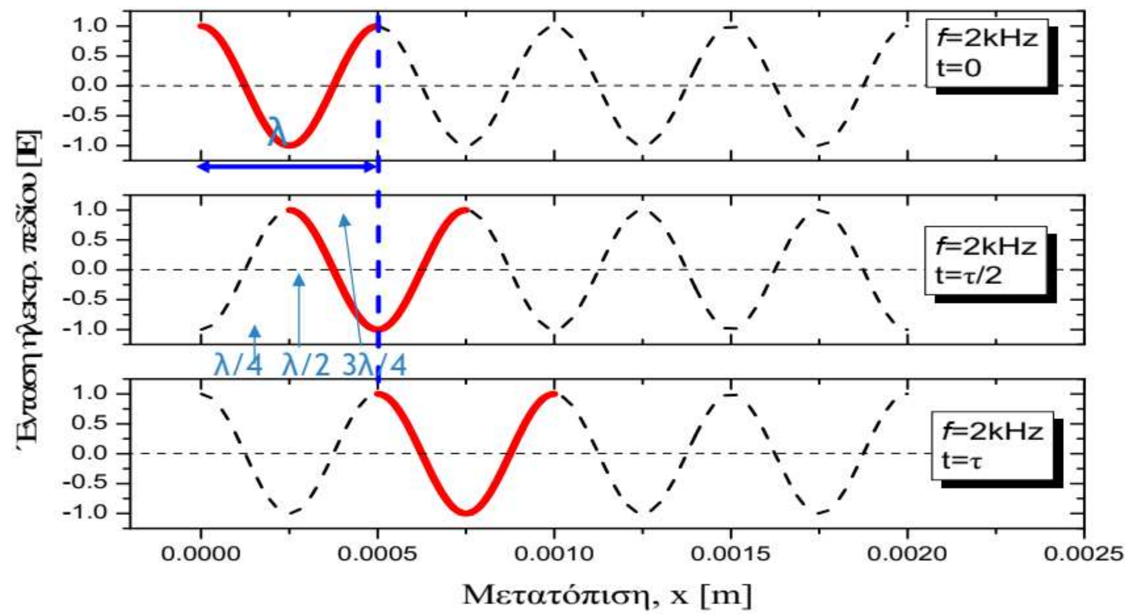
k κυματαριθμός, $k = 2\pi/\lambda$ (λ μήκος κύματος)

x χωρική μεταβλητή

t χρονική μεταβλητή

ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΣΗΜΕΙΟ ΤΟΥ ΧΩΡΟΥ ΜΠΟΡΕΙ ΝΑ ΜΑΣ ΔΩΣΕΙ ΤΗΝ ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ «ΑΠΟΜΑΚΡΥΣΝΗΣ» ΣΑ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ

ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΧΡΟΝΙΚΗ ΣΤΙΓΜΗ (στιγμιότυπο) ΜΠΟΡΕΙ ΝΑ ΜΑΣ ΔΩΣΕΙ ΤΗ ΘΕΣΗ ΟΛΩΝ ΤΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ ΤΟΥ ΧΩΡΟΥ ΣΤΑ ΟΠΟΙΑ ΔΙΑΔΙΔΕΤΑΙ ΤΟ ΚΥΜΑ



ΜΕΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Υπακούουν στην <u>αρχή του Fermat</u> [κατά τη διάδοσή του ακολουθούν πάντα το συντομότερο δρόμο]

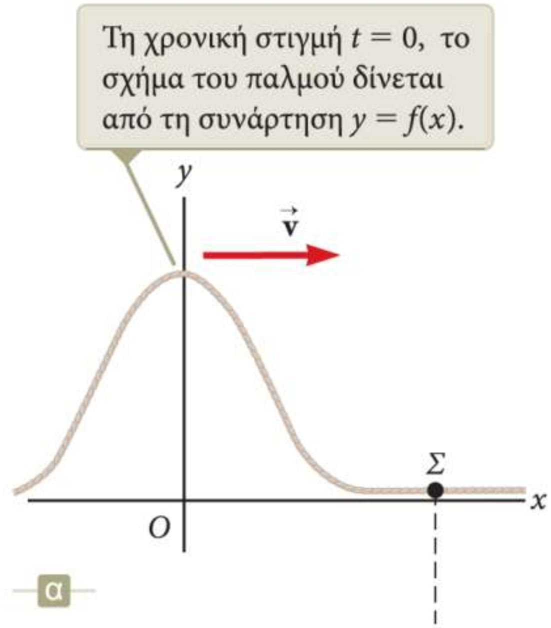
Διαθέτουν <u>πόλωση</u>

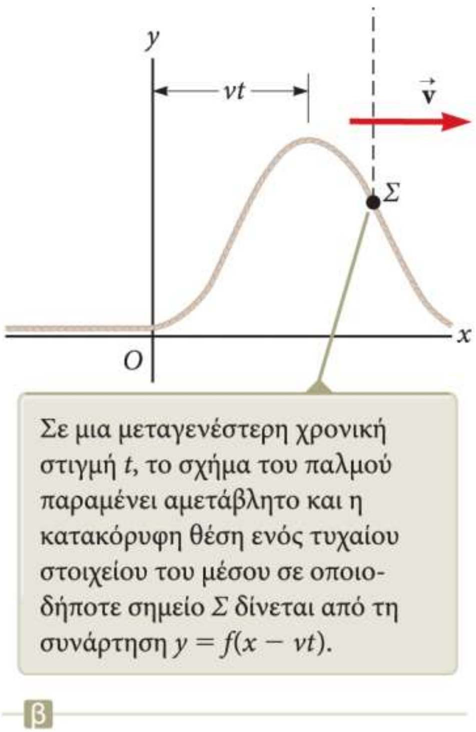
Υφίστανται <u>περίθλαση</u>, <u>συμβολή</u>, <u>ανάκλαση</u> και <u>διάθλαση</u>

Εμφανίζουν το φαινόμενο Doppler

Οδεύων παλμός

- Στην εικόνα βλέπουμε το σχήμα του παλμού τη χρονική στιγμή $t = 0$.
- Το σχήμα της καμπύλης μπορεί να αναπαρασταθεί από μια μαθηματική συνάρτηση της μορφής $y(x,0) = f(x)$.
  - Η συνάρτηση αυτή περιγράφει την εγκάρσια θέση y του στοιχείου του νήματος σε κάθε θέση x τη χρονική στιγμή $t = 0$.





- Το μέτρο της ταχύτητας του παλμού είναι v.
- Τη χρονική στιγμή t, ο παλμός έχει διανύσει απόσταση vt.
- Το σχήμα του παλμού δεν μεταβάλλεται συναρτήσει του χρόνου. Το στοιχείο του νήματος που βρίσκεται στη θέση x έχει την ίδια θέση y με το στοιχείο που βρισκόταν στο σημείο x-vt τη στιγμή t=0.
- Η κατακόρυφη θέση του είναι τώρα $y(x,t) = y(x-vt,0)$ ή γενικά $y(x,t)=f(x - vt)$.

Οδεύων παλμός

- Για έναν παλμό ο οποίος διαδίδεται προς τα δεξιά
  - $y(x, t) = f(x - vt)$
- Για έναν παλμό ο οποίος διαδίδεται προς τα αριστερά
  - $y(x, t) = f(x + vt)$
- Η συνάρτηση y είναι γνωστή και ως **κυματοσυνάρτηση** $y(x, t)$.
- Η κυματοσυνάρτηση δίνει την τεταγμένη y κάθε στοιχείου που βρίσκεται στο σημείο x σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή t.
  - Η τεταγμένη y είναι η εγκάρσια θέση.
- Αν το t είναι σταθερό, η κυματοσυνάρτηση ονομάζεται **κυματομορφή (στιγμιότυπο)**.
  - Ορίζει μια καμπύλη που παριστάνει το γεωμετρικό σχήμα του παλμού τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή.

Ημιτονοειδή κύματα

▶Το κύμα που παριστάνει η καμπύλη, η οποία φαίνεται στην εικόνα, είναι ένα **ημιτονοειδές** ή **αρμονικό κύμα**.

▶Πρόκειται για την καμπύλη του γραφήματος της τριγωνομετρικής συνάρτησης sin θ ως προς τη γωνία θ.

▶Αυτό είναι το πιο απλό παράδειγμα ενός περιοδικού συνεχούς κύματος.

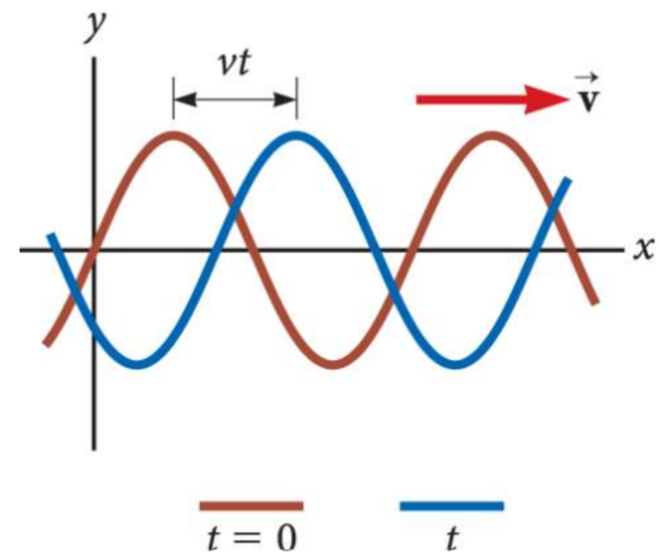
▶Το κύμα κινείται προς τα δεξιά.

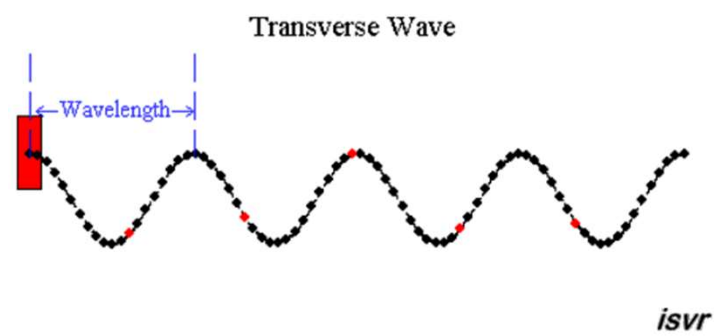
- Η καφέ καμπύλη περιγράφει την αρχική θέση.
- Καθώς το κύμα κινείται προς τα δεξιά, η καφέ καμπύλη θα φτάσει τελικά στη θέση της μπλε καμπύλης.

▶Κάθε στοιχείο κινείται πάνω-κάτω εκτελώντας απλή αρμονική κίνηση.

- Αυτή η κίνηση είναι η κίνηση που εκτελούν τα στοιχεία του μέσου.

▶Είναι σημαντικό να διαχωρίσουμε την κίνηση του κύματος από την κίνηση των στοιχείων του μέσου.





ΣΥΝΟΨΗ: Πλάτος, μήκος κύματος, περίοδος και συχνότητα

•Η μέγιστη μετατόπιση ονομάζεται **πλάτος** *A*.

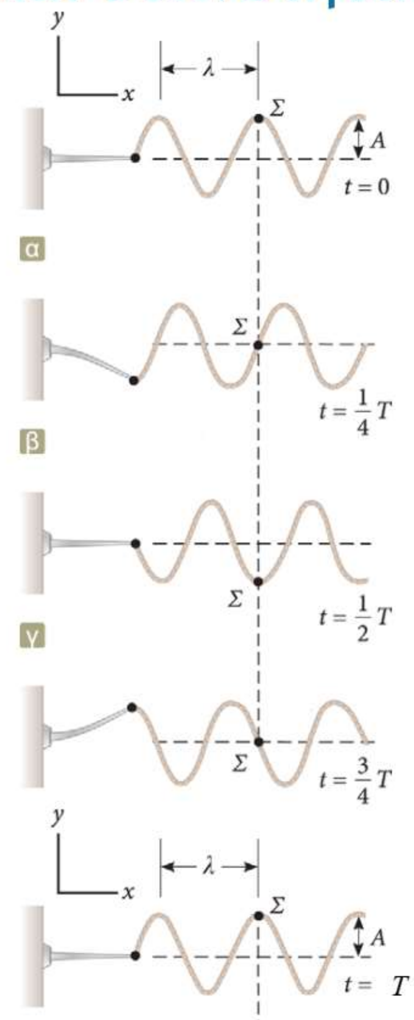
•Το **μήκος κύματος** λ είναι η απόσταση μίας κορυφής από την επόμενη

•Η περίοδος, *T*, είναι το χρονικό διάστημα που απαιτείται ώστε δύο αντίστοιχα σημεία διαδοχικών κυμάνσεων να περάσουν από το ίδιο σημείο. Π.χ ο χρόνος των αφίξεων δυο διαδοχικών κορυφών σε δεδομένο σημείο του χώρου.

Η περίοδος του κύματος είναι ίδια με την περίοδο της απλής αρμονικής ταλάντωσης ενός στοιχείου του μέσου.

•Η **συχνότητα** *f* είναι ο αριθμός των κορυφών (ή οποιουδήποτε άλλου σημείου που ανήκει στο κύμα) που διέρχονται από ένα δεδομένο σημείο στη μονάδα του χρόνου.

Η συχνότητα του κύματος είναι ίδια με τη συχνότητα της απλής αρμονικής ταλάντωσης ενός στοιχείου του μέσου.



Κυματοσυνάρτηση

$$y(x,t) = A\sin\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x - vt)\right] \xrightarrow{v = \lambda/T} y(x,t) = A\sin\left[2\pi\left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T}\right)\right]$$

$$\xrightarrow[k = 2\pi/\lambda]{\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f}$$

$$\boxed{y = A\sin(kx - \omega t)}$$

Ημιτονοειδή κύματα σε νήματα

$f = 1/T$

$y = A\sin(kx - \omega t)$

$v = f\lambda$

▶Κάθε στοιχείο του νήματος ταλαντώνεται κατακόρυφα και εκτελεί απλή αρμονική κίνηση.

▶Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι κάθε στοιχείο του νήματος είναι ένας απλός αρμονικός ταλαντωτής που ταλαντώνεται με συχνότητα ίση με εκείνη της ταλάντωσης του ελάσματος.

▶Ενώ κάθε στοιχείο ταλαντώνεται στον άξονα y, το κύμα διαδίδεται κατά μήκος του άξονα x με ταχύτητα μέτρου v.

▶Τη χρονική στιγμή $t = 0$, $y = A\sin(kx - \omega t)$.

▶Το μέτρο της εγκάρσιας ταχύτητας του στοιχείου είναι: $v_y = \left.\dfrac{dy}{dt}\right]_{x=\text{σταθερό}}$

▶ή $v_y = -\omega A\cos(kx - \omega t)$

▶Είναι διαφορετικό από το μέτρο της ταχύτητας του ίδιου του κύματος.

▶Η εγκάρσια επιτάχυνση του στοιχείου είναι: $a_y = \left.\dfrac{dv_y}{dt}\right]_{x=\text{σταθερό}}$

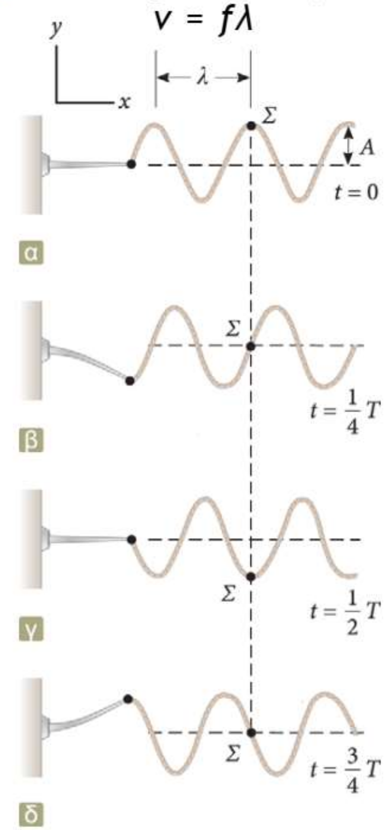
▶ή $a_y = -\omega^2 A\sin(kx - \omega t)$

▶Η ταχύτητα v γίνεται μέγιστη στο σημείο $y = 0$.

▶Η επιτάχυνση a γίνεται μέγιστη στο σημείο $y = \pm A$.

▶Η ταχύτητα του κύματος εξαρτάται από τα φυσικά χαρακτηριστικά του νήματος και την τάση που ασκείται στο νήμα.

$$v = \sqrt{\frac{\text{τάση}}{\text{μάζα/μήκος}}} = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$



Η γραμμική εξίσωση κύματος

- Οι κυματοσυναρτήσεις *y* (*x*, *t*) είναι λύσεις της **γραμμικής εξίσωσης κύματος**.
- Η εξίσωση περιγράφει πλήρως την κίνηση του κύματος.
- Από αυτήν μπορούμε να πάρουμε την εξίσωση της ταχύτητας του κύματος.
- Η γραμμική εξίσωση κύματος είναι θεμελιώδης για πολλές μορφές κίνησης των κυμάτων.

Γενική έκφραση $$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$ ***Κύμα κατά μήκος νήματος*** $$\frac{\mu}{T}\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$$

- Το *y* παριστάνει διάφορες θέσεις.
- Για ένα νήμα, το *y* είναι η κατακόρυφη μετατόπιση των στοιχείων του.
- Για ένα ηχητικό κύμα που διαδίδεται σε ένα αέριο, το *y* είναι η διαμήκης μετατόπιση των στοιχείων του αερίου από τη θέση ισορροπίας τους.
- Για ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα, το *y* είναι μια συνιστώσα του ηλεκτρικού ή του μαγνητικού πεδίου.

Υπέρθεση και συμβολή

Αρχή της υπέρθεσης

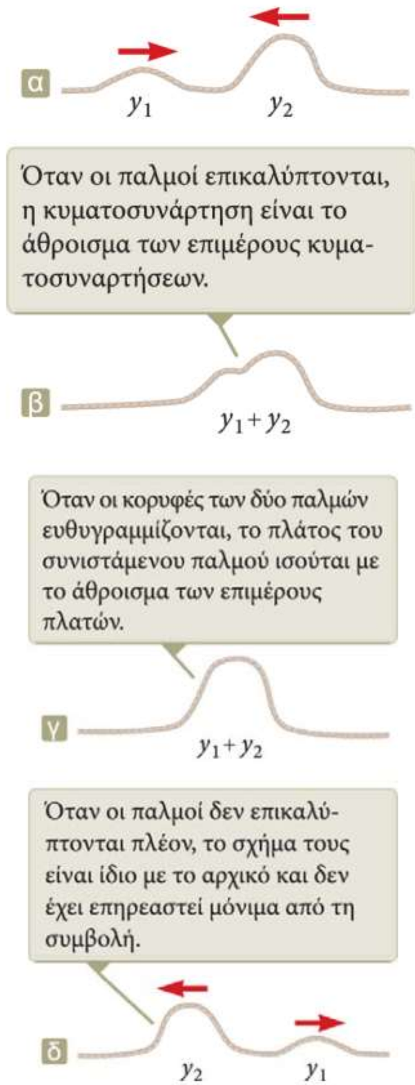
- Τα κύματα μπορούν να συνδυαστούν στην ίδια θέση του χώρου.
- Μπορούμε να αναλύουμε τέτοιους συνδυασμούς κυμάτων χρησιμοποιώντας την **αρχή της υπέρθεσης** (ή **αρχή της επαλληλίας**):
- *Αν σε ένα μέσο διαδίδονται δύο ή περισσότερα κύματα, η συνισταμένη τιμή της κυματοσυνάρτησης σε οποιοδήποτε σημείο είναι το αλγεβρικό άθροισμα των τιμών των κυματοσυναρτήσεων των επιμέρους κυμάτων.*
- Τα κύματα που ακολουθούν αυτή την αρχή ονομάζονται γραμμικά.
  - Στην περίπτωση των μηχανικών κυμάτων, τα γραμμικά κύματα συχνά έχουν πλάτος πολύ μικρότερο από το μήκος τους.

Υπέρθεση και συμβολή

- Δύο οδεύοντα κύματα μπορούν να περάσουν το ένα μέσα από το άλλο χωρίς να αλλοιωθούν.
  - Αυτή είναι μία από τις συνέπειες της αρχής της υπέρθεσης.
- **Όταν στην ίδια περιοχή του χώρου συνδυάζονται δύο διαφορετικά κύματα και παράγουν ένα συνιστάμενο κύμα, το φαινόμενο ονομάζεται συμβολή.**

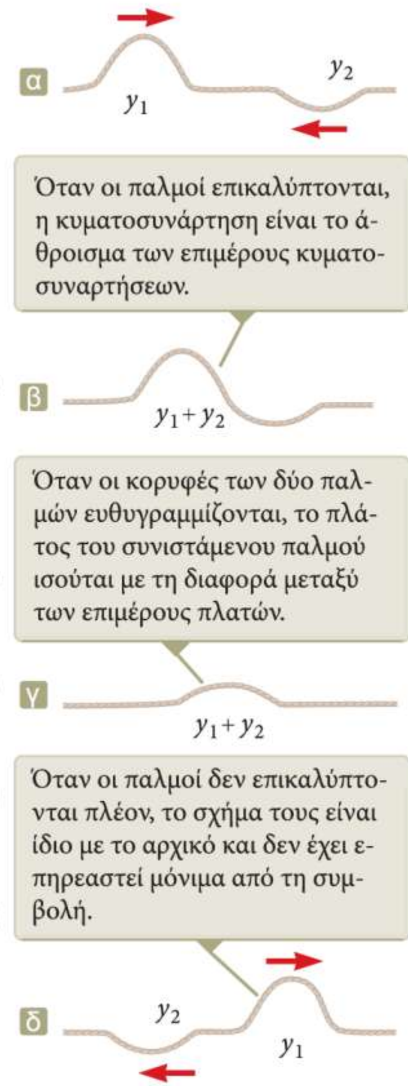
Παραδείγματα υπέρθεσης

- Δύο παλμοί διαδίδονται προς αντίθετες κατευθύνσεις (α).
  - Η κυματοσυνάρτηση του παλμού που κινείται προς τα δεξιά είναι η y_1 και η κυματοσυνάρτηση του παλμού που κινείται προς τα αριστερά είναι η y_2.
- Οι παλμοί έχουν ίδιο μέτρο ταχύτητας, αλλά διαφορετικά σχήματα.
- Η μετατόπιση των στοιχείων του μέσου είναι θετική και για τους δύο παλμούς.
- Όταν οι παλμοί αρχίζουν να επικαλύπτονται (β), η συνισταμένη κυματοσυνάρτηση είναι $y_1 + y_2$.
- Όταν συναντώνται οι κορυφές των παλμών (γ), ο συνιστάμενος παλμός έχει μεγαλύτερο πλάτος από εκείνο των αρχικών παλμών.
- Οι δύο παλμοί χωρίζονται (δ).
  - Συνεχίζουν να κινούνται προς την αρχική τους κατεύθυνση.
  - Το σχήμα τους παραμένει αμετάβλητο.
- Αυτό το είδος υπέρθεσης ονομάζεται **ενισχυτική συμβολή**.



Παράδειγματα υπέρθεσης

- Δύο παλμοί διαδίδονται προς αντίθετες κατευθύνσεις.
- Ο ένας παλμός είναι ανεστραμμένος σε σχέση με τον άλλο.
- Όταν οι παλμοί επικαλύπτονται, η συνισταμένη κυματοσυνάρτηση είναι $y_1 + y_2$.
- Αυτό το είδος υπέρθεσης ονομάζεται **καταστρεπτική συμβολή.**
- **Ενισχυτική συμβολή** συμβαίνει όταν οι μετατοπίσεις που προκαλούν οι δύο παλμοί έχουν την ίδια κατεύθυνση.
  - Το πλάτος του συνιστάμενου παλμού είναι μεγαλύτερο από το πλάτος των επιμέρους παλμών.
- **Καταστρεπτική συμβολή** συμβαίνει όταν οι μετατοπίσεις που προκαλούν οι δύο παλμοί έχουν αντίθετες κατευθύνσεις.
  - Το πλάτος του συνιστάμενου παλμού είναι μικρότερο από το πλάτος των επιμέρους παλμών.



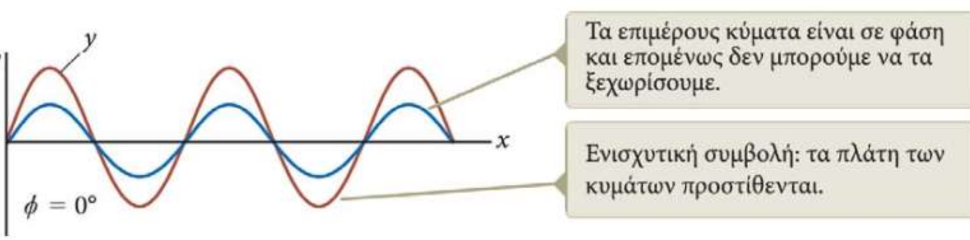
Υπέρθεση ημιτονοειδών κυμάτων

- Υποθέτουμε ότι δύο κύματα διαδίδονται προς την ίδια κατεύθυνση σε ένα γραμμικό μέσο, και έχουν ίδια συχνότητα, μήκος, και πλάτος.
- Μόνο η φάση τους είναι διαφορετική:
  - $y_1 = A \sin(kx - \omega t)$
  - $y_2 = A \sin(kx - \omega t + \phi)$
  - $y = y_1 + y_2 = 2A \cos(\phi/2) \sin(kx - \omega t + \phi/2)$
- Η συνισταμένη κυματοσυνάρτηση y είναι επίσης ημιτονοειδής.
- Το συνιστάμενο κύμα έχει ίδια συχνότητα και μήκος κύματος με τα αρχικά κύματα.
- Το πλάτος του συνισταμένου κύματος είναι $2A \cos(\phi/2)$.
- Η φάση του συνισταμένου κύματος είναι $\phi/2$.

Ενισχυτική και καταστρεπτική συμβολή ημιτονοειδών κυμάτων

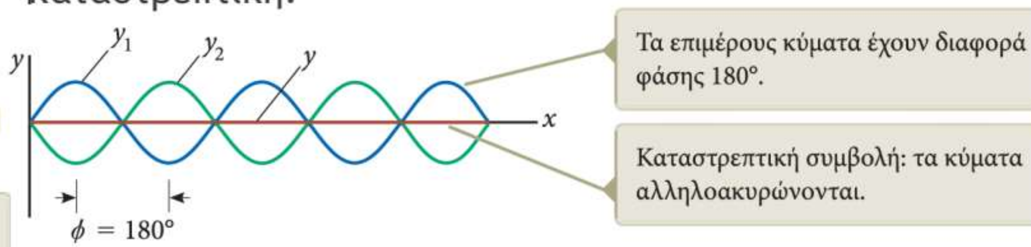
- Όταν $\phi = 0$, τότε $\cos(\phi/2) = 1$.
- Το πλάτος του συνισταμένου κύματος είναι $2A$.
  - Οι κορυφές των δύο κυμάτων αντιστοιχούν στα ίδια σημεία του χώρου.
- Τα κύματα βρίσκονται παντού σε φάση.
- Τα κύματα συμβάλλουν ενισχυτικά.
- Γενικά, ενισχυτική συμβολή παρατηρείται όταν $\cos(\phi/2) = \pm 1$.
  - Δηλαδή, όταν $\phi = 0, 2\pi, \ldots$ rad.
    - Η γωνία ϕ είναι άρτιο πολλαπλάσιο του π.

α

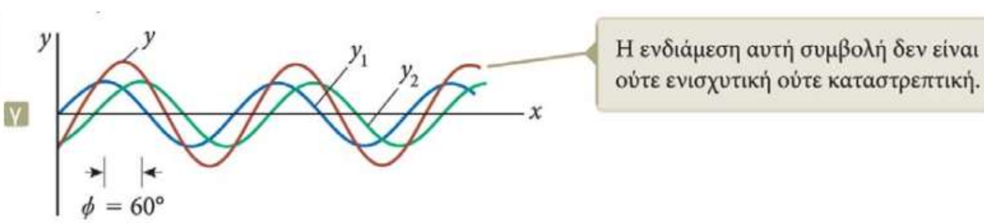


- Όταν $\phi = \pi$, τότε $\cos(\phi/2) = 0$.
  - Το ίδιο ισχύει όταν η γωνία ισούται με οποιοδήποτε περιττό πολλαπλάσιο του π.
- Το συνιστάμενο κύμα έχει μηδενικό πλάτος.
- Τα κύματα συμβάλλουν καταστρεπτικά.
- Όταν η γωνία ϕ δεν είναι μηδενική ή ισούται με κάποιο ακέραιο πολλαπλάσιο του π, το συνιστάμενο κύμα έχει πλάτος μεταξύ 0 και $2A$.
- Και σε αυτή την περίπτωση, οι κυματοσυναρτήσεις αθροίζονται.
- Η συμβολή δεν είναι ούτε ενισχυτική ούτε καταστρεπτική.

β



γ



Συμβολή ημιτονοειδών κυμάτων – Σύνοψη

ίδιο πλάτος

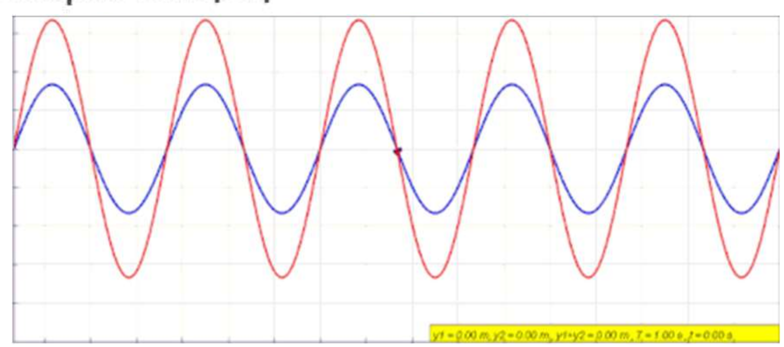
- Ενισχυτική συμβολή παρατηρείται όταν $\phi = n\pi$, όπου το n είναι άρτιος ακέραιος (συμπεριλαμβανομένου του 0).
    - Το πλάτος του συνισταμένου κύματος είναι $2A$.
- Καταστρεπτική συμβολή παρατηρείται όταν $\phi = n\pi$, όπου το n είναι περιττός ακέραιος.
    - Το πλάτος είναι 0.
- Η γενική συμβολή παρατηρείται όταν $0 < \phi < n\pi$.
    - Για το πλάτος του συνισταμένου κύματος ισχύει $0 < A_{συν.} < 2A$

διαφορετικό πλάτος

- Ενισχυτική συμβολή παρατηρείται όταν $\phi = n\pi$, όπου το n είναι άρτιος ακέραιος (συμπεριλαμβανομένου του 0).
    - Το πλάτος του συνισταμένου κύματος είναι ίσο με το άθροισμα του πλάτους των κυμάτων.
- Η καταστρεπτική συμβολή παρατηρείται όταν $\phi = n\pi$, όπου το n είναι περιττός ακέραιος.
    - Το πλάτος του συνισταμένου κύματος είναι μικρότερο, αλλά τα κύματα δεν αλληλοαναιρούνται πλήρως.

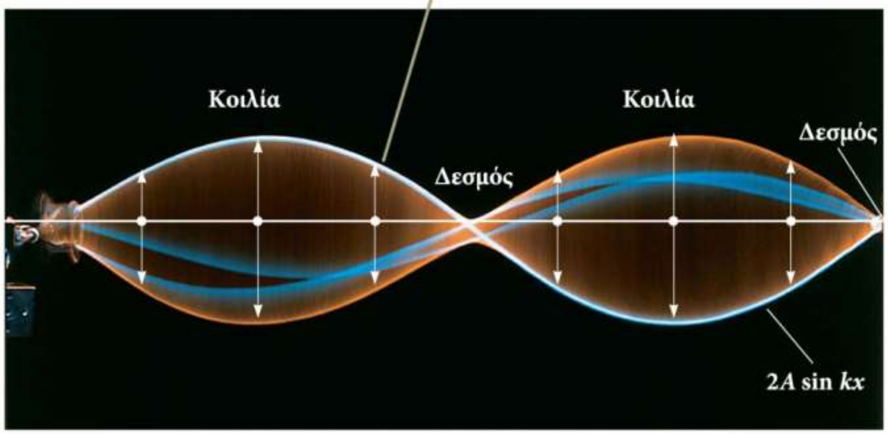
Στάσιμα κύματα

- Υποθέτουμε ότι δύο κύματα με ίδιο πλάτος, συχνότητα, και μήκος διαδίδονται στο ίδιο μέσο προς αντίθετες κατευθύνσεις.
- Τα κύματα συνδυάζονται σύμφωνα με το *μοντέλο της συμβολής κυμάτων*.
- $y_1 = A \sin(kx - \omega t)$ και
- $y_2 = A \sin(kx + \omega t)$
- Συμβάλλουν σύμφωνα με την αρχή της υπέρθεσης.
- Το συνιστάμενο κύμα είναι $y = (2A \sin kx) \cos \omega t$.
- Αυτή η εξίσωση είναι η κυματοσυνάρτηση ενός στάσιμου κύματος.
  - Δεν περιέχει κάποιον όρο $kx - \omega t$, οπότε δεν περιγράφει οδεύον κύμα.
- Όταν παρατηρούμε ένα στάσιμο κύμα, δεν αντιλαμβανόμαστε καμία κίνηση στην κατεύθυνση διάδοσης κάποιου από τα αρχικά κύματα.



Παράδειγμα στάσιμου κύματος

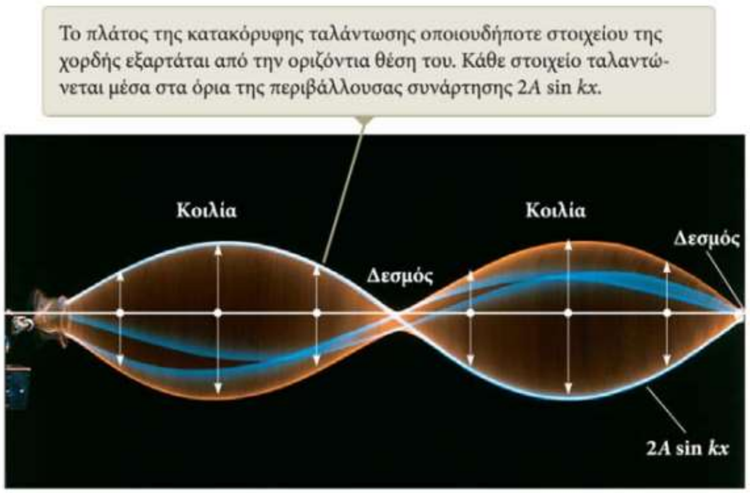
Το πλάτος της κατακόρυφης ταλάντωσης οποιουδήποτε στοιχείου της χορδής εξαρτάται από την οριζόντια θέση του. Κάθε στοιχείο ταλαντώνεται μέσα στα όρια της περιβάλλουσας συνάρτησης $2A \sin kx$.



- Στάσιμο περίγραμμα που προκύπτει από την υπέρθεση δύο πανομοιότυπων κυμάτων που διαδίδονται προς αντίθετες κατευθύνσεις.
- Το πλάτος της απλής αρμονικής κίνησης κάθε στοιχείου είναι $2A \sin kx$.
- Εξαρτάται από τη θέση x του στοιχείου στο μέσο.
- Κάθε στοιχείο εκτελεί ταλάντωση με κυκλική συχνότητα ω.

- Για να περιγράψουμε τα κύματα, χρησιμοποιούμε τρία είδη πλάτους.
  - Το πλάτος των επιμέρους κυμάτων, A.
  - Το πλάτος της απλής αρμονικής κίνησης των στοιχείων του μέσου διάδοσης: $2A \sin kx$ (Κάθε στοιχείο του στάσιμου κύματος ταλαντώνεται στο πλαίσιο της περιβάλλουσας συνάρτησης 2A sin kx)
  - Το πλάτος του στάσιμου κύματος, $2A$

Στάσιμα κύματα, ορισμοί



- Τα σημεία μηδενικού πλάτους ονομάζονται **δεσμοί** ή **κόμβοι**.
  - Αντιστοιχούν σε τιμές του x που ικανοποιούν τη σχέση

$$x = \frac{n\lambda}{2} \qquad n = 0, 1, 2, 3, \ldots$$

- Τα σημεία του μέσου στα οποία παρατηρείται μέγιστη μετατόπιση 2A ονομάζονται **κοιλίες** ή **αντιδεσμοί**.
  - Αντιστοιχούν σε τιμές του x που ικανοποιούν τη σχέση

$$x = \frac{n\lambda}{4} \qquad n = 1, 3, 5, \ldots$$

- Η απόσταση μεταξύ διαδοχικών κοιλιών είναι ίση με $\lambda/2$.
- Η απόσταση μεταξύ διαδοχικών δεσμών είναι ίση με $\lambda/2$.
- Η απόσταση μεταξύ ενός δεσμού και της επόμενης κοιλίας είναι ίση με $\lambda/4$.