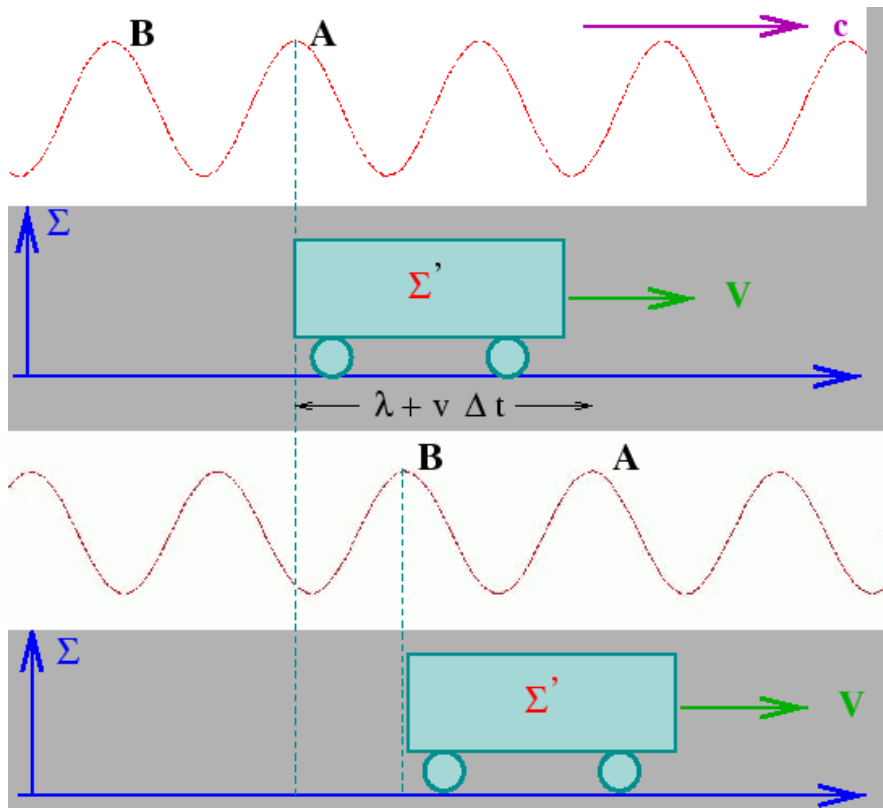


Τεχνική laser Doppler

- Ο όρος "Doppler" χρησιμοποιείται προς τιμή του Christian Johann Doppler, ενός αυστριακού φυσικού και μαθηματικού που διατύπωσε πρώτος την αρχή του φαινομένου Doppler το 1842.
- Με τον όρο φαινόμενο Doppler αναφερόμαστε στην αλλαγή που υφίσταται η συχνότητα (ή το μήκος κύματος αντίστοιχα) ενός κύματος όταν ο πομπός ή ο δέκτης κινούνται, η οποία είναι ανάλογη του μέτρου και της φοράς της ταχύτητας.
- Είναι γνωστή η εμπειρία του φαινομένου Doppler σε κάποιον αυτοκινητόδρομο όπου ο ήχος της μηχανής ενός αυτοκινήτου είναι οξύτερος όταν αυτό μας πλησιάζει και γίνεται πιο βαθύς όταν απομακρύνεται.

- Από την μετακίνηση της συχνότητας που παρατηρούμε σε μια πηγή, μπορούμε να υπολογίσουμε την ταχύτητά της.
- Το φαινόμενο Doppler έχει μεγάλη πρακτική σημασία σε εφαρμογές που σχετίζονται με την καταγραφή και την μέτρηση κίνησης από απόσταση.
- Μπορούμε να υπολογίσουμε την ταχύτητα κάποιου απομακρυσμένου γαλαξία ή την ταχύτητα ενός αεροπλάνου ή ενός αυτοκινήτου.
- Οι κλασσικές διατάξεις βασίζονταν σε ακουστικά κύματα (π.χ. ιατρική διαγνωστική) είτε σε ΗΜ κύματα σε μικρές σχετικά συχνότητες (cm-m).
- Οι διατάξεις Laser Doppler αναμένεται να παρουσιάζουν πολύ καλύτερη διακριτική ικανότητα (της τάξης μm) λόγω του μήκους κύματος της χρησιμοποιούμενης ακτινοβολίας.
- Αντίστοιχα, η μικρή απόκλιση που παρουσιάζει μία δέσμη Laser αναμένεται να δίνει και πολύ μεγαλύτερο βεληνεκές.
- Σαν αποτέλεσμα, εκτός από την άριστη απόδοση σε κλασσικές εφαρμογές μέτρησης ταχύτητας, η διακριτική ικανότητα τους μπορεί να προσφέρει τεράστιες δυνατότητες στην ανεμομετρία, την ροομετρία και άλλες εφαρμογές όπου οι κλασσικές διατάξεις Doppler δεν μπορούσαν να λειτουργήσουν.



(α) πηγή και παρατηρητής απομακρύνονται → μεγαλύτερο T άρα μικρότερο f

(β) πηγή και παρατηρητής πλησιάζουν → μικρότερο T άρα μεγαλύτερο f

• Έστω δύο παρατηρητές, ένα ακίνητος στο σύστημα συντεταγμένων Σ , όπου βρίσκεται και η πηγή, και ένας στο Σ' που απομακρύνεται με σταθερή ταχύτητα V .

• Η περίοδος κύματος είναι ο χρόνος Δt που περνάει ανάμεσα στις αφίξεις δύο διαδοχικών μεγίστων του κύματος.

• Αν η περίοδος στο ακίνητο σύστημα είναι $T = \Delta t$, στο κινούμενο θα είναι μεγαλύτερη $T' > T$ καθώς $\Delta t' > \Delta t$.

• Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι ο παρατηρητής κινείται προς την διεύθυνση που κινείται το κύμα, άρα συναντά το δεύτερο μέγιστο αργότερα

• Αν ο κινούμενος παρατηρητής πλησίαζε την πηγή, θα συναντούσε το δεύτερο μέγιστο νωρίτερα, άρα θα έβλεπε μικρότερη περίοδο.

- Έστω $\Delta t'$ και Δt ο χρόνος μεταξύ δύο μεγίστων στο κύμα όπως την βλέπει παρατηρητής (που απομακρύνεται με ταχύτητα V από την πηγή) στο κινούμενο Σ' και το ακίνητο Σ σύστημα συντεταγμένων.
- Σύμφωνα με τον τύπο της διαστολής του χρόνου (αρχή σχετικότητας) θα ισχύει:

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

- Όμως, κατά το διάστημα Δt , η αρχή των αξόνων του Σ' κινήθηκε κατά $V\Delta t$. Άρα, κατά τον χρόνο Δt , το κύμα διανύει συνολική απόσταση $\Delta s = \lambda + V\Delta t$ (παρατηρητής και κύμα πάνε προς την ίδια διεύθυνση). Άρα θα ισχύει:

$$\Delta t = \frac{\Delta s}{c} = \frac{\lambda + V\Delta t}{c} \Rightarrow \Delta t = \frac{1}{f \left(1 - \frac{V}{c}\right)}$$

- Με αναδιάταξη των προηγούμενων σχέσεων έχουμε (με $\Delta t' = 1/f'$):

$$f \left(1 - \frac{V}{c}\right) = f' \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}} \Rightarrow f = f' \sqrt{\frac{1 + \frac{V}{c}}{1 - \frac{V}{c}}}$$

- Άρα, αν ο παρατηρητής απομακρύνεται, η συχνότητα ελαττώνεται

- Αν ο παρατηρητής πλησιάζει, η αντίστοιχη εξίσωση είναι:

$$f\left(1 - \frac{V}{c}\right) = f' \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}} \Rightarrow f = f' \sqrt{\frac{1 - V/c}{1 + V/c}}$$

- Άρα, αν ο παρατηρητής πλησιάζει, η συχνότητα αυξάνεται
- Στην περίπτωση που η ταχύτητα του παρατηρητή είναι πολύ μικρότερη από την ταχύτητα του κύματος ($V \ll c$) τότε έχουμε:

$$\lambda' \cong \lambda \left(1 + \frac{V}{c}\right) \quad f' \cong f \left(1 - \frac{V}{c}\right) \quad \text{και} \quad \lambda' \cong \lambda \left(1 - \frac{V}{c}\right) \quad f' \cong f \left(1 + \frac{V}{c}\right)$$

- Στην πράξη, αυτό που μετράμε είναι η μετατόπιση Doppler που στην γενική περίπτωση δίνεται από την σχέση:

$$\Delta f = \frac{fV \cos \theta}{c}$$

με θ τη γωνία μεταξύ της διεύθυνσης διάδοσης του κύματος και της ταχύτητας V .

Εφαρμογές διατάξεων Laser Doppler

- Ακτινοβολία συχνότητας f που προσπίπτει σε αντικείμενο που κινείται με ταχύτητα V υπό γωνία θ υφίσταται αλλαγή στη συχνότητα κατά Δf .
- Αν επομένως μετρηθεί η μετατόπιση συχνότητας, μπορεί να υπολογιστεί η ταχύτητα με την οποία κινείται το αντικείμενο.
- Η μετατόπιση είναι μέγιστη αν η δέσμη laser διαδίδεται παράλληλα στην διεύθυνση κίνησης του αντικειμένου ενώ είναι μηδενική για αντικείμενα που κινούνται κάθετα στη δέσμη.
- Επειδή έχουμε φως, αν το αντικείμενο απομακρύνεται από την διάταξη θα έχουμε μετατόπιση προς μεγαλύτερα μήκη κύματος, ιδιότητα που αναφέρεται ως μετατόπιση προς το κόκκινο.
- Αντίστοιχα, αν το αντικείμενο πλησιάζει, θα παρατηρείται μετατόπιση προς μικρότερα μήκη κύματος (μετατόπιση προς τα μπλε).
- Μία διάταξη laser Doppler παρουσιάζει πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες καθώς το μήκος κύματος της ακτινοβολίας οδηγεί σε αλληλεπίδραση και με πολύ μικρά αντικείμενα ενώ η πολύ μικρή απόκλιση της δέσμης laser δίνει μεγαλύτερη εμβέλεια

Οι εφαρμογές της τεχνικής laser Doppler αφορούν:

- **Μέτρηση γραμμικής και γωνιακής ταχύτητας σε κανονικές διαστάσεις, διαστημικές διαστάσεις και μικροδιαστάσεις, ροομετρία, ανεμομετρία, μέτρηση δονήσεων, μέτρηση διαστάσεων σωματιδίων κλπ**
- **Αυτοκινητοβιομηχανία, αεροδιαστημική, διαγνωστική καύσεων, υδραυλικά, υδροδυναμική, χημική μηχανική, φαρμακοβιομηχανία και βιομηχανικά καλλυντικών, ιατρική, μετεωρολογία, ωκεανολογία, θαλάσσια βιολογία, ηλεκτρονική, μεταλλουργία κλπ**

Σημεία προσοχής: απαιτούνται οπτική πρόσβαση, μικρές ανομοιογένειες, διαστάσεις σωματιδίων από μm έως cm , όχι πολύ μεγάλες συγκεντρώσεις σωματιδίων

Πρακτικά θέματα

- Η απευθείας μέθοδος μέτρησης ταχύτητα αφορά τον προσδιορισμό της αρχικής συχνότητας f και της μετατοπισμένης κατά Doppler f_D , από τις οποίες προκύπτει η μετατόπιση Δf , άρα και η ταχύτητα V .
- Όμως, η μετατόπιση Doppler είναι πολύ μικρό ποσοστό της αρχικής συχνότητας, άρα πρέπει να μετρηθούν δύο μεγάλες συχνότητες με ελάχιστη διαφορά μεταξύ τους, κάτι δύσκολο και με μεγάλη αβεβαιότητα.
- Για παράδειγμα, αν έχω αυτοκίνητο που κινείται με $V=100 \text{ km/h}$, η μετατόπιση Doppler που προκαλεί στα 532 nm ($f=5,64 \times 10^{14} \text{ Hz}$) είναι $\Delta f=52 \times 10^6 \text{ Hz}$.
- Έχουν αναπτυχθεί τεχνικές με τις οποίες μπορεί η μέτρηση να γίνει απλούστερα και με καλή ακρίβεια: η **ετερόδυνη ανίχνευση** και η **μέτρηση με δύο δέσμες**.

Οπτική ετερόδυνη ανίχνευση

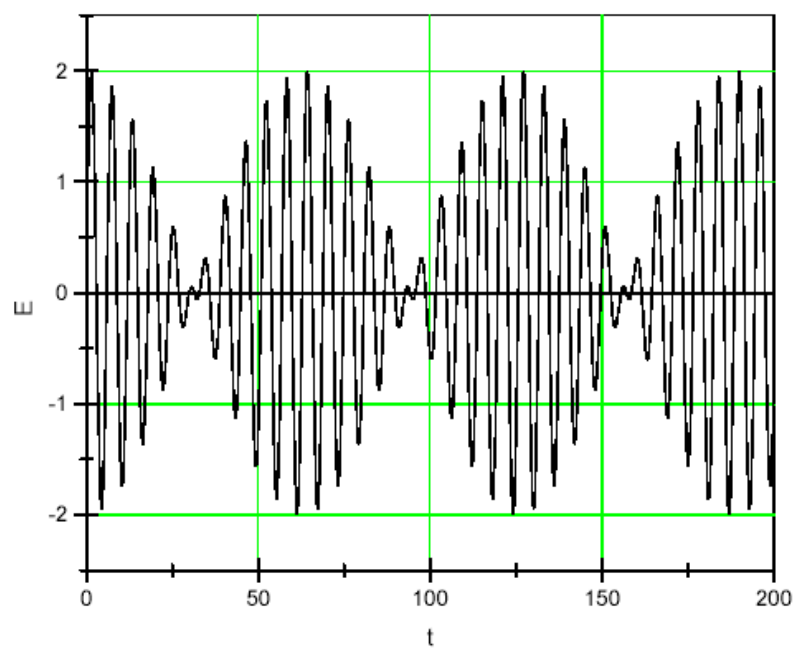
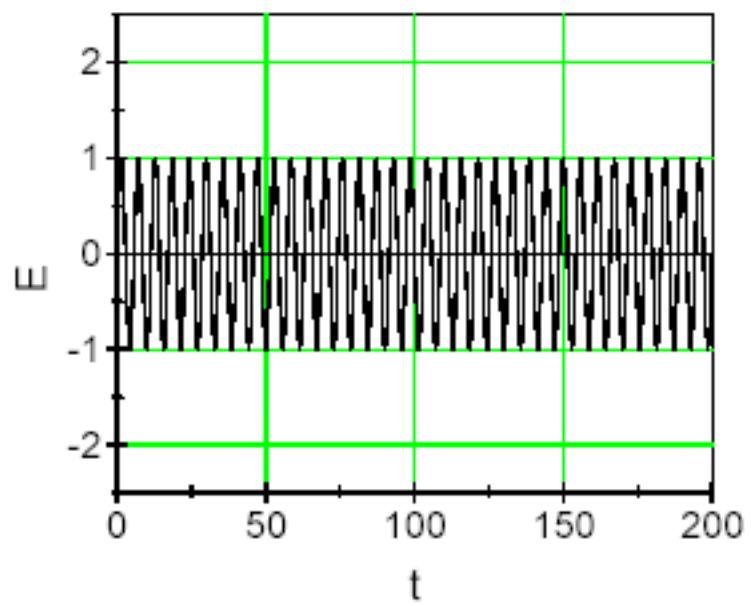
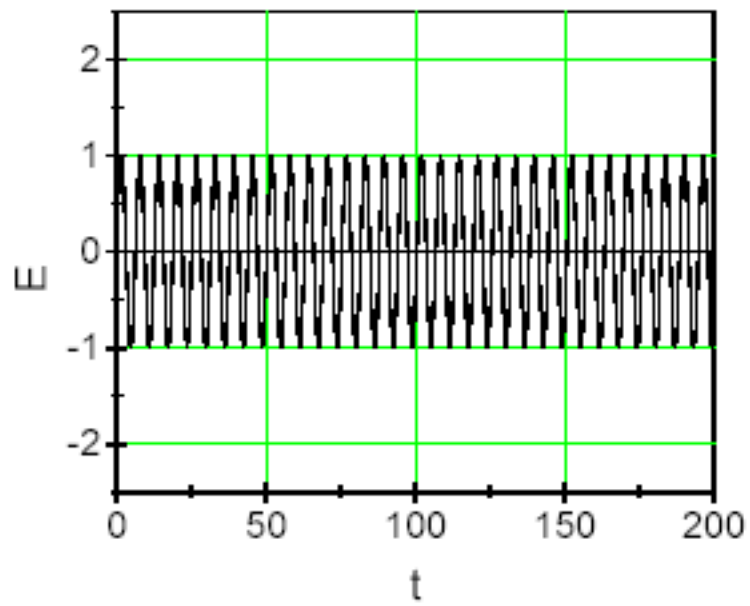
- Σε ένα ανιχνευτή προστίθενται δύο ακτινοβολίες διαφορετικής συχνότητας f και f_D . Η f προέρχεται κατ' ευθεία από την πηγή ενώ η f_D από την σκεδαζόμενη από το κινητό ακτινοβολία
- Αν υποθέσουμε ότι έχουμε στον ανιχνευτή δύο πεδία:

$$E_1 = E_{01}\sin(\omega t) \text{ και } E_2 = E_{02}\sin(\omega_D t + \varphi)$$

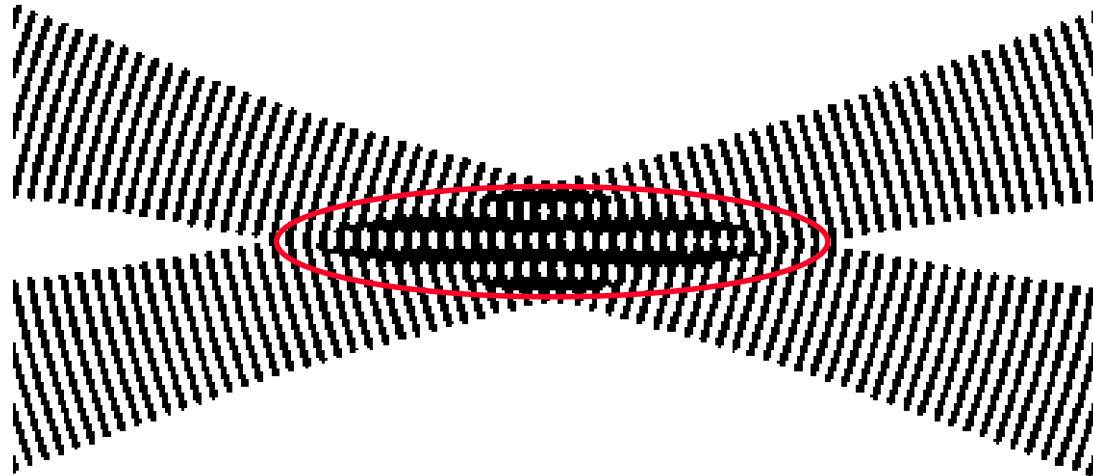
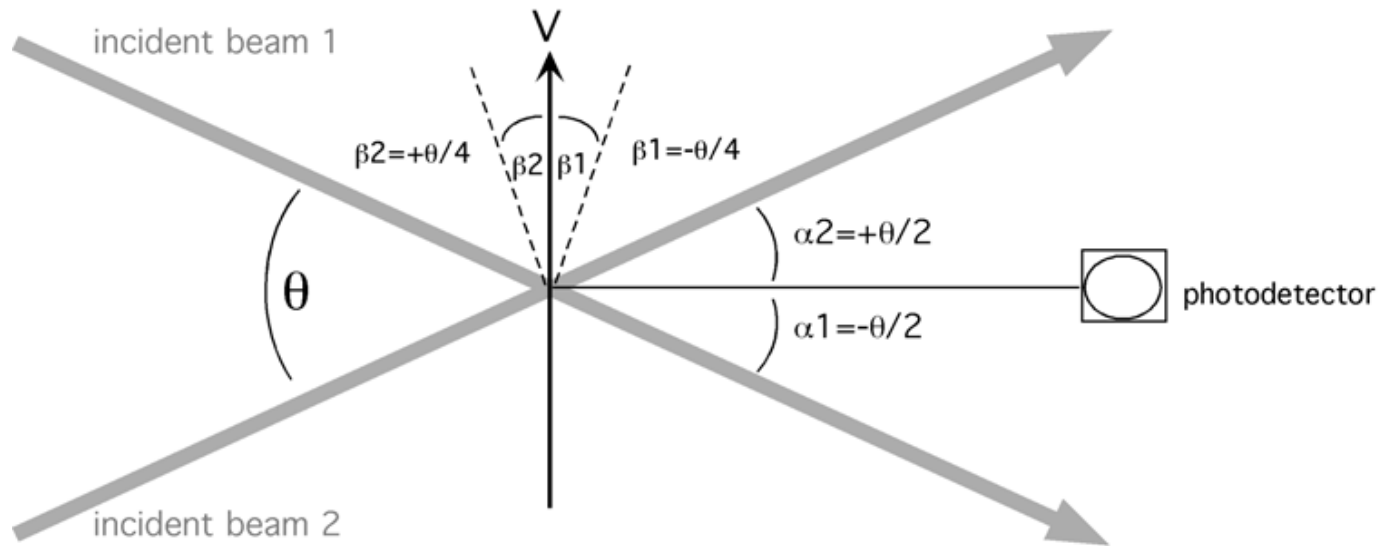
- Το σήμα στον ανιχνευτή υπολογίζεται ότι περιέχει όρους:

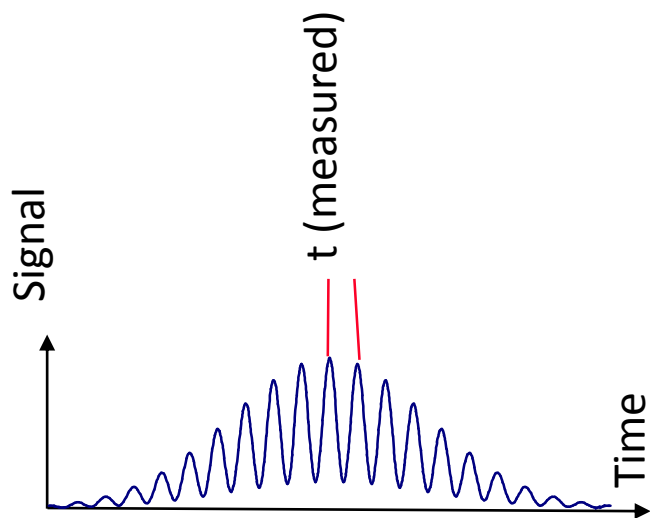
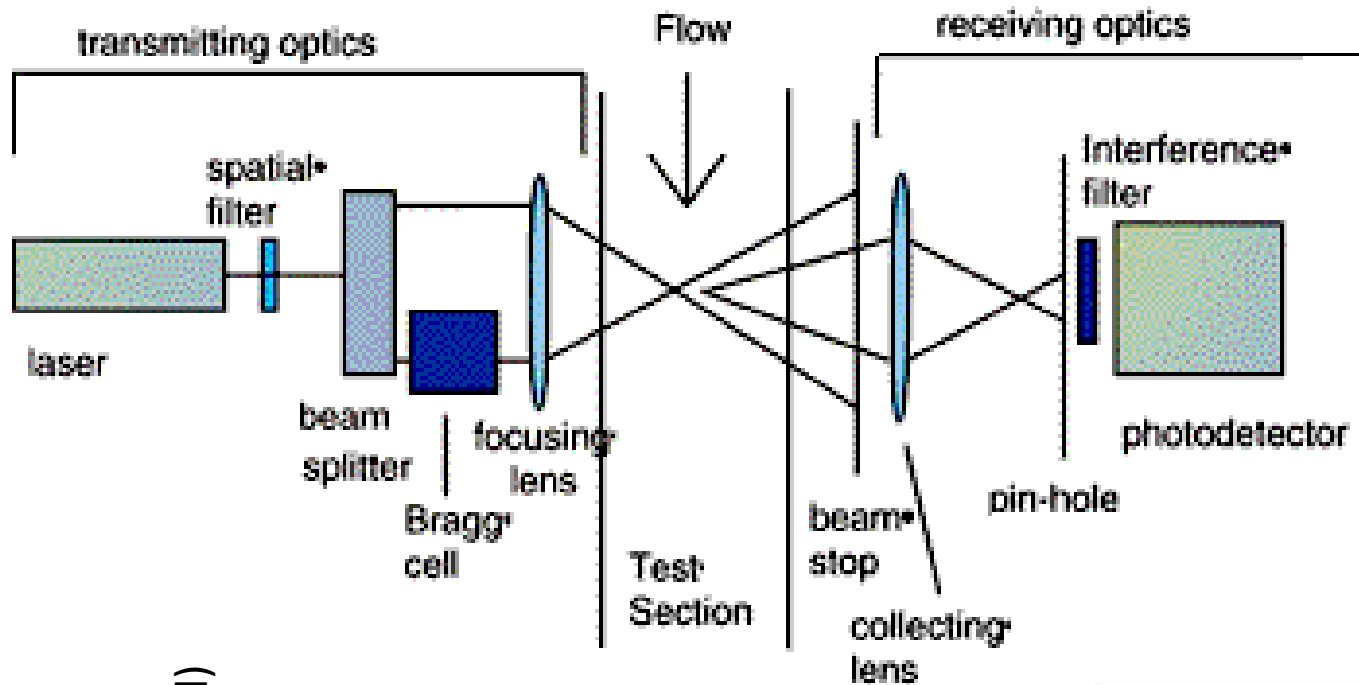
$$I = I_0 + I_1\sin[(\omega - \omega_D)t + \varphi] + I_2[\sin(2\omega t) + \sin(2\omega_D t) + \sin(\omega + \omega_D)]$$

- Ο πρώτος όρος αφορά ένα DC σήμα, ο τρίτος πολύ μεγάλη συχνότητα, οπότε, πρακτικά θα δούμε ένα εναλλασσόμενο σήμα συχνότητας $\omega - \omega_D$.
- Η συχνότητα αυτή είναι συνήθως μικρή και μετριέται εύκολα.



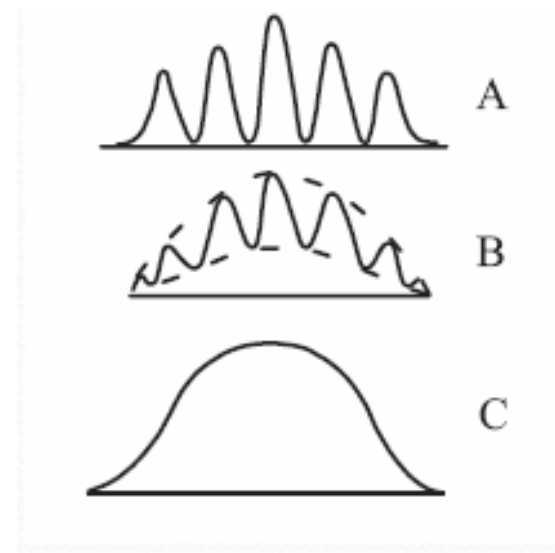
Μέτρηση με δύο δέσμες

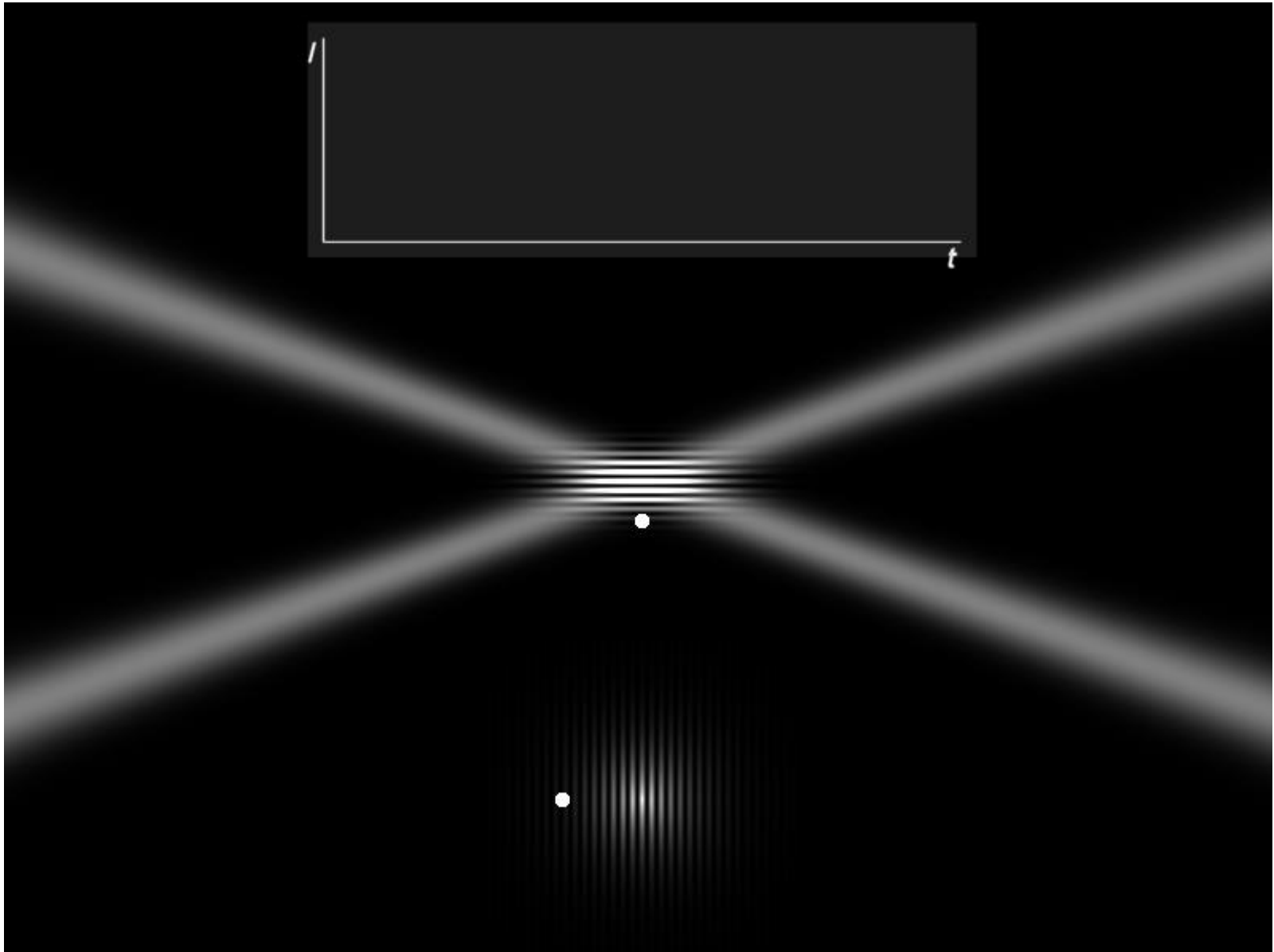




$$\delta = \frac{\lambda}{2\eta\mu(\theta/2)}$$

$$V = \delta/t$$







**Μελέτη της ροής μεταξύ
των περιστρεφόμενων
λεπίδων σε αντλία**

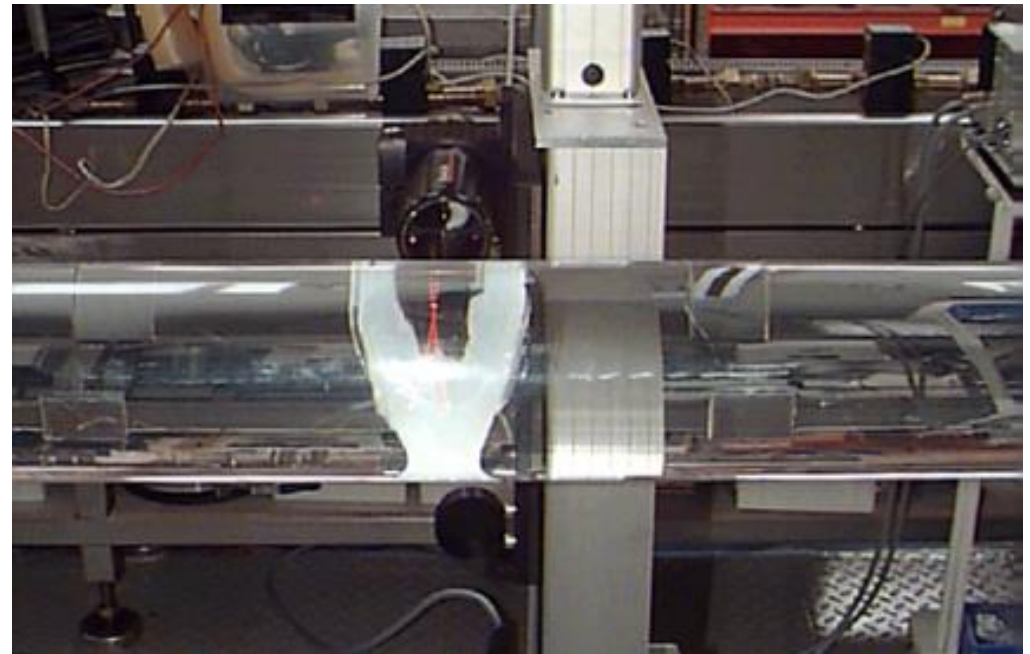
**Μελέτη της τρισδιάστατης
ροής αέρα γύρω από
αυτοκίνητο Mercedes-Benz
μοντέλο E-class (σε τούνελ)**

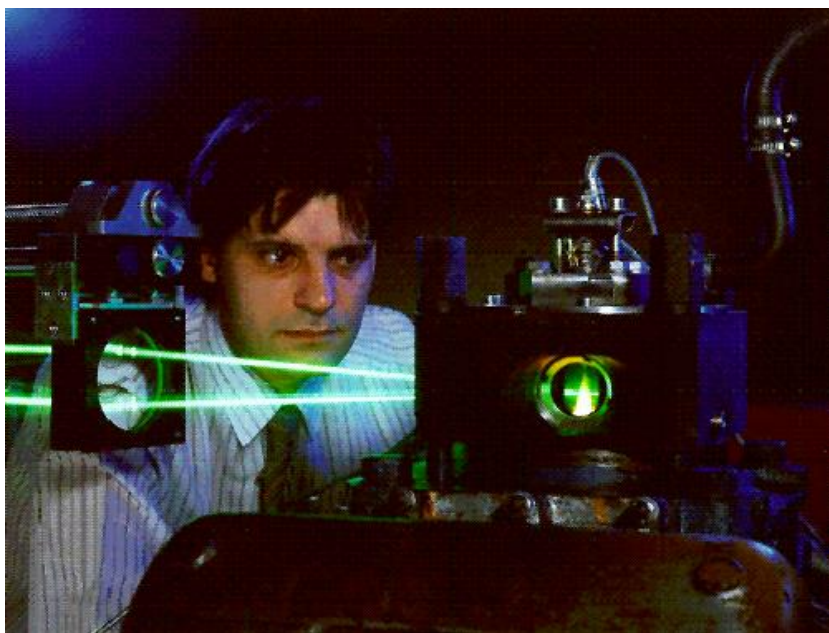




**Μέτρηση της ροής
γύρω από προπέλα
πλοίου σε δεξαμενή**

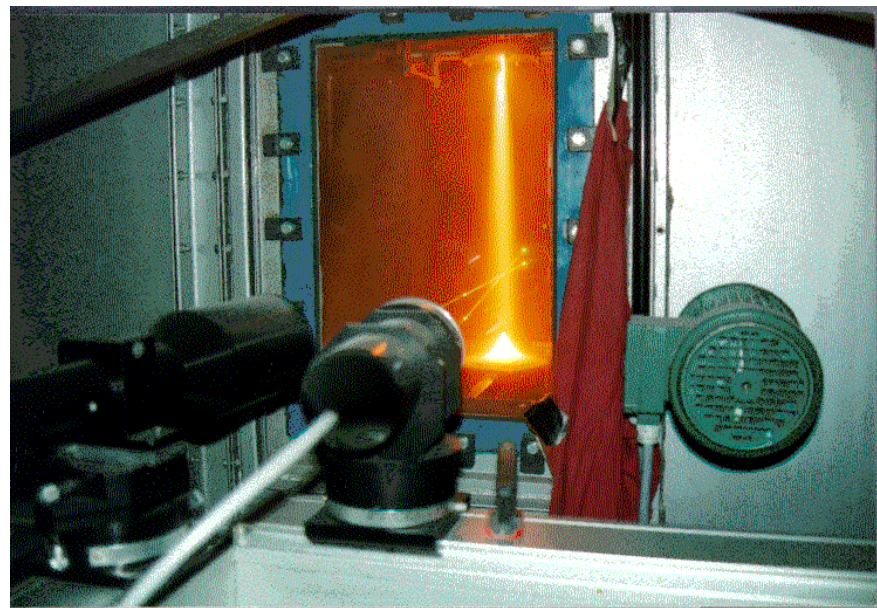
**Καταγραφή της
κατανομής ταχυτήτων
σε σωλήνα νερού**

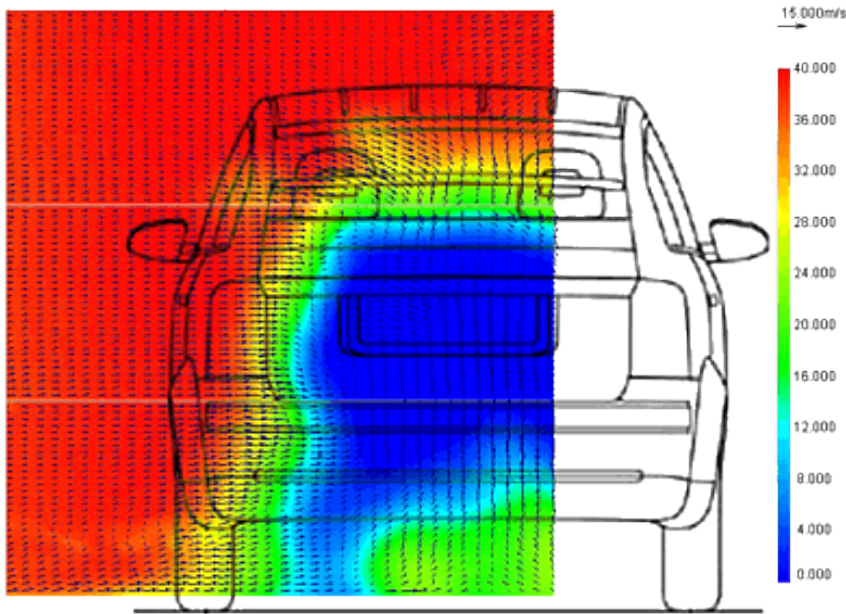




**Μελέτη της διαδικασίας
ψεκασμού κηροζίνης σε
μπεκ ψεκασμού
καυσίμου**

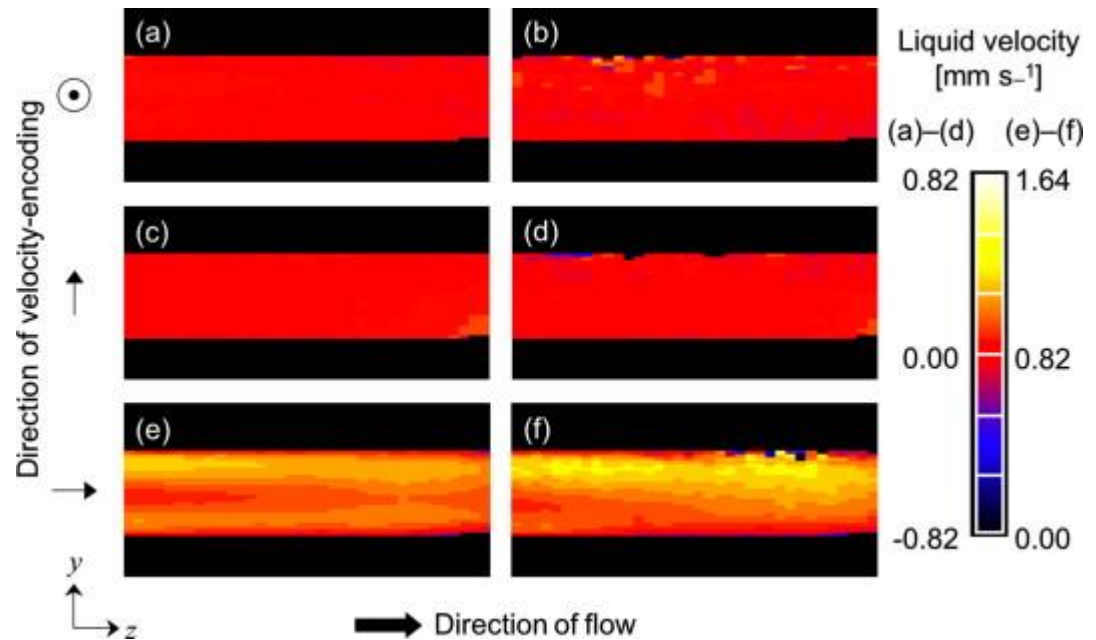
**Μετρήσεις διαστάσεων
και ταχύτητας
σταγόνας σε ροή
ψεκασμού από λιωμένο
μέταλλο**

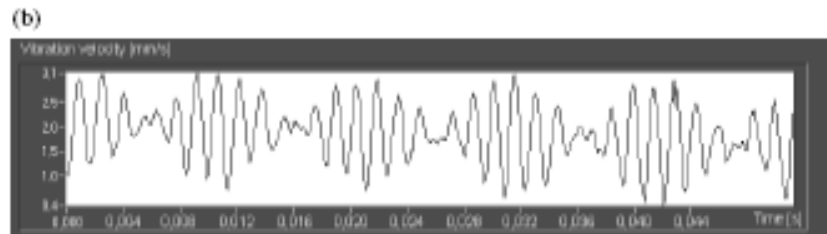
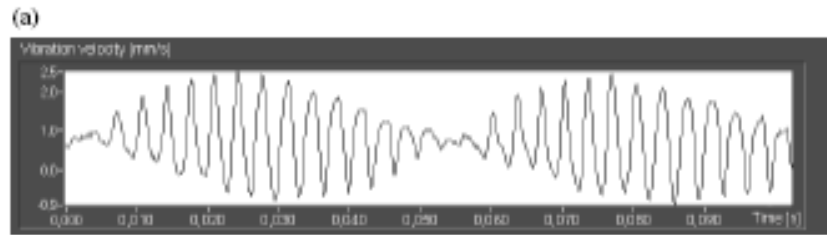
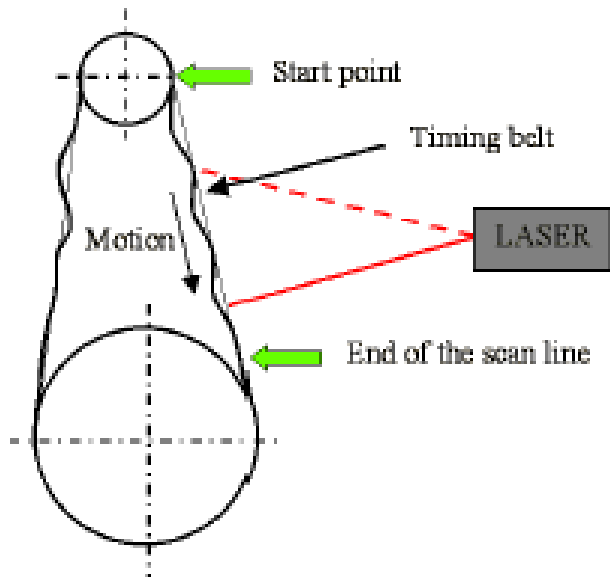




Καταγραφή της ροής αέρα γύρω από αυτοκίνητο

Καταγραφή της ροής νερού μέσα από διάφορους σωλήνες





Διάταξη μέτρησης δόνησης σε λουρί αυτοκινήτου με σάρωση και αποτελέσματα για κίνηση στα 335 και 770 rpm

