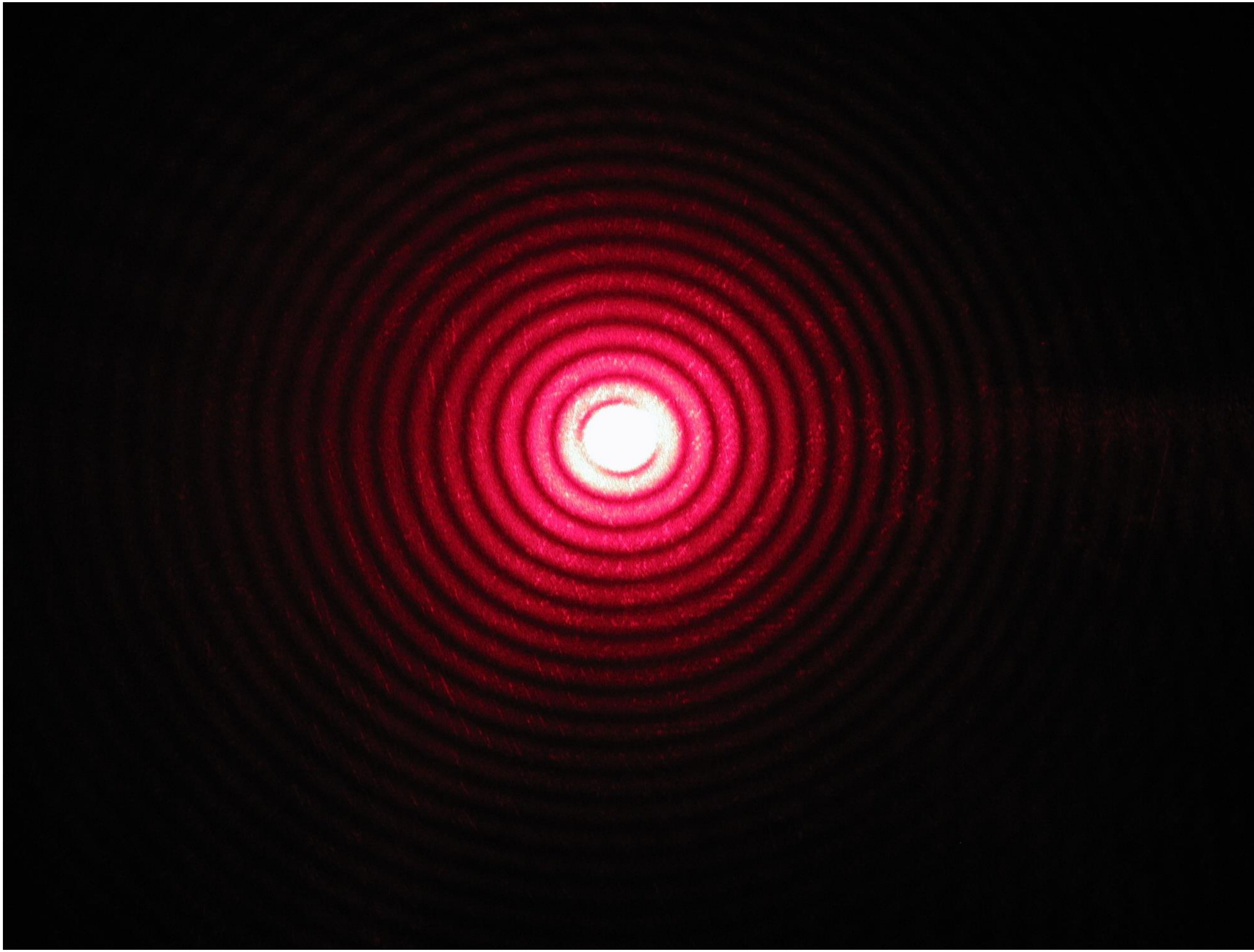
Συμβολομετρικές διατάξεις

- **Τα φαινόμενα συμβολής είναι γνωστά εδώ και πολλά χρόνια και ουσιατικά σχετίζονται με κάθε φύσης κυματικά φαινόμενα. Δύο ή περισσότερα κύματα που συνυπάρχουν στο ίδιο σημείο του χώρου μπορούν να συμβάλλουν και να έχουμε αποτέλεσμα διαφορετικό από αυτό του απλού αθροίσματος των εντάσεων των αρχικών κυμάτων.**
- **Βασική προϋπόθεση για την «καθαρή» εμφάνιση φαινομένων συμβολής είναι η χρήση σύμφωνων κυμάτων καθώς σε αντίθετη περίπτωση, η τυχαιότητα στην φάση συνήθως προκαλεί αλληλο-εξουδετέρωση των πεδίων.**

- **Τα οπτικά συστήματα που δίνουν φαινόμενα συμβολής τα χωρίζουμε σε δύο κατηγορίες: αυτά που διαχωρίζουν το πλάτος του ΗΜ κύματος και αυτά που επιδρούν στην φάση του.**
- **Στη πρώτη περίπτωση, ένα μέρος του αρχικού μετώπου κύματος χρησιμοποιείται σαν πηγή για δευτερεύοντα μέτωπα, με γνωστότερη διάταξη αυτή του πειράματος Young.**
- **Αντίστοιχα, στη δεύτερη περίπτωση το αρχικό κύμα χωρίζεται σε δύο μέρη τα οποία στη συνέχεια συμβάλλουν, διαδικασία που ακολουθούν τα διαφόρων τύπων συμβολόμετρα όπως αυτά του Michelson, Mach-Zehnder, Fabry-Perot, Sagnac κλπ.**



- **Ας εξετάσουμε την υπέρθεση δύο ή περισσοτέρων ΗΜ κυμάτων. Το ΗΜ κύμα είναι μια διανυσματική ποσότητα και επομένως η υπέρθεση κυμάτων θα πρέπει να μελετηθεί σε αυτή τη βάση.**
- **Το πλάτος του ηλεκτρικού πεδίου $E_{ολ}$ σε οποιοδήποτε σημείο στο χώρο λόγω των πεδίων E_1, E_2, E_3… θα δίνεται από το διανυσματικό άθροισμα των επιμέρους πεδίων:**

$$E_{ολ}=E_1+E_2+E_3\ldots$$

- **Ας θεωρήσουμε δύο κύματα φωτός που διαδίδονται στο z, οπότε τα ηλεκτρικά πεδία περιγράφονται από τις εξισώσεις:**

$$E_1 = E_{01}\sigma\upsilon\nu(\omega t - kz)$$
$$E_2 = E_{02}\sigma\upsilon\nu(\omega t - kz + \varphi)$$

E_{01}, E_{02} τα μέγιστα πλάτη των πεδίων, ω η γωνιακή συχνότητα, k το κυματάνυσμα και φ η αρχική διαφορά φάσης των πεδίων.

- **Το αποτέλεσμα της υπέρθεσης των δύο πεδίων μπορεί πολύ εύκολα να παρατηρηθεί μέσω της έντασης ακτινοβολίας I η οποία είναι ανάλογη του τετραγώνου του ηλεκτρικού πεδίου .**

- **Ισχύει για την ένταση ακτινοβολίας:**

$$\mathrm{I} = \varepsilon c \left\langle \mathrm{E}^2 \right\rangle_{\mathrm{T}}$$

όπου ε η διηλεκτρική σταθερά του μέσου, c η ταχύτητα φωτός και ο τελευταίος όρος ορίζει την μέση τιμή του τετραγώνου του ηλεκτρικού πεδίου μέσα σε μία περίοδο Τ.

- **Για το συνολικό ηλεκτρικό πεδίο θα έχουμε:**

$$\mathrm{E}_{\mathrm{o}\lambda}^2 = \mathrm{E} \cdot \mathrm{E} = (\mathrm{E}_1 + \mathrm{E}_2) \cdot (\mathrm{E}_1 + \mathrm{E}_2) = \mathrm{E}_1^2 + \mathrm{E}_2^2 + 2\mathrm{E}_1 \cdot \mathrm{E}_2$$

- Επομένως, η ένταση ακτινοβολίας θα δίνεται από:

$$I_{ο\lambda} = \varepsilon c\left[\left\langle E_1^2 \right\rangle_T + \left\langle E_2^2 \right\rangle_T + 2\left\langle E_1 \cdot E_2 \right\rangle_T\right] = I_1 + I_2 + I_{12}$$

- Βλέπουμε επομένως ότι η ολική ένταση ακτινοβολίας είναι το άθροισμα των επιμέρους εντάσεων συν ένα επιπλέον όρο τον I_{12}, ο οποίος είναι ο όρος συμβολής. Αν θεωρήσουμε τα ηλεκτρικά πεδία όπως ορίστηκαν πριν, ο όρος συμβολής αποδεικνύεται ότι ισούται με:

$$I_{12} = 2\sqrt{I_1 \cdot I_2}\,\sigma\upsilon\nu\delta$$

- **Στην προηγούμενη εξίσωση, το δ αντιστοιχεί στην συνολική διαφορά φάσης των δύο πεδίων στο σημείο συμβολής.**
- **Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι η εξίσωση ισχύει με την προϋπόθεση ότι τα δύο πεδία έχουν την ίδια συχνότητα και πόλωση, ή στην χειρότερη περίπτωση, έχουν παράλληλες συνιστώσες πεδίου, οπότε στο τελικό αποτέλεσμα συμμετέχουν μόνο αυτές (στην περίπτωση κάθετων πολώσεων, I_{12}=0).**
- **Αντικαθιστώντας στις προηγούμενες εξισώσεις θα έχουμε:**

$$I_{ο\lambda} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\,συν\delta$$

- **Βλέπουμε επομένως ότι κατά την συμβολή δύο κυμάτων, το τελικό αποτέλεσμα καθορίζεται από την διαφορά φάσης δ των κυμάτων στο σημείο συμβολής. Υπάρχουν μάλιστα δύο ακραίες περιπτώσεις (όπου n ακέραιος):**

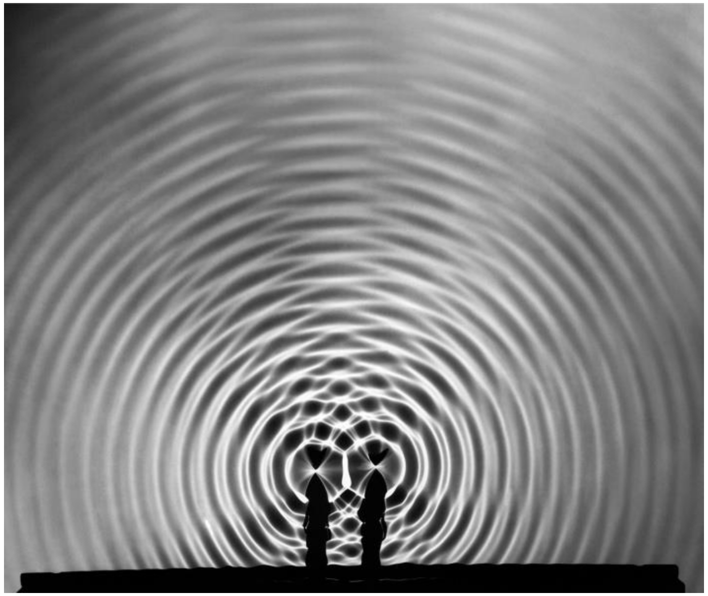
$$I_{max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \qquad \text{αν} \qquad \delta = 2n\pi$$

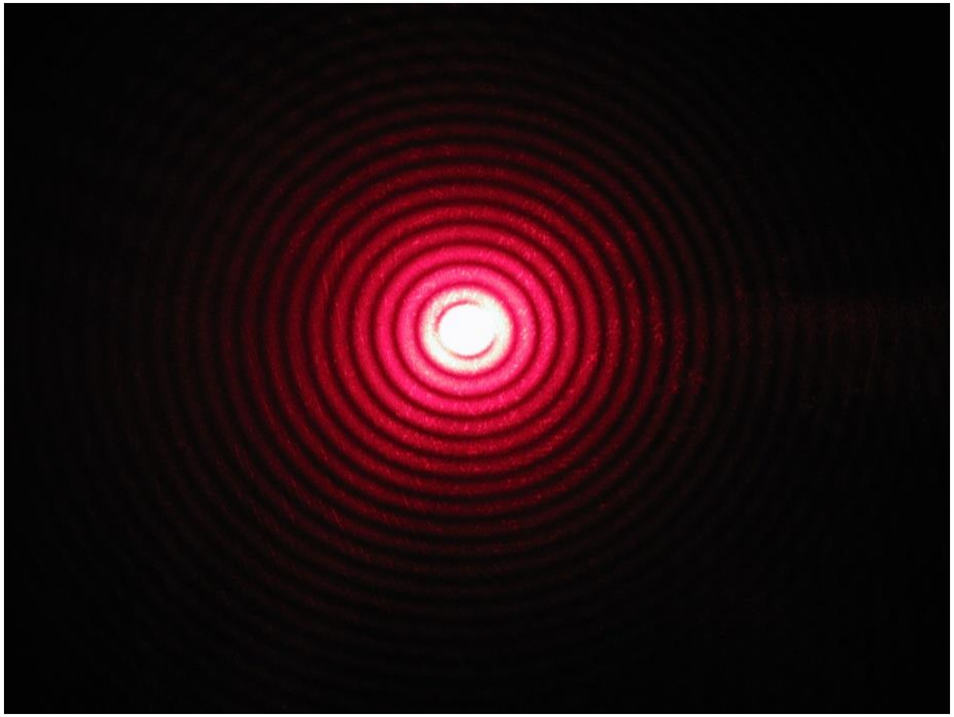
$$I_{min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \qquad \text{αν} \qquad \delta = (2n+1)\pi$$

- **Δηλαδή, αν η διαφορά φάσης είναι άρτιο πολλαπλάσιο του π, τότε το άθροισμα έχει μέγιστη τιμή, σε αντίθεση με την ελάχιστη τιμή που έχουμε αν η διαφορά φάσης είναι περιττό πολλαπλάσιο του π.**

- **Επομένως, στην πρώτη περίπτωση έχουμε ενισχυτική συμβολή, ενώ στην δεύτερη καταστρεπτική (ή αποσβετική) συμβολή. Αν μάλιστα οι εντάσεις των δύο πεδίων είναι ίσες, τότε $I_{max}=4I$ και $I_{min}=0$.**

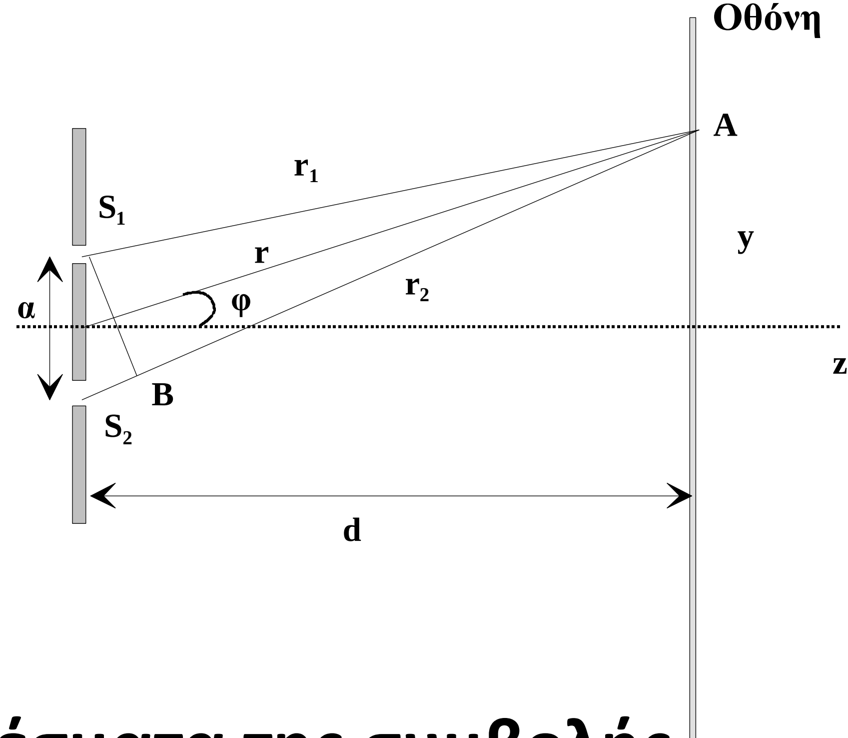
- **Στο σημείο αυτό μάλιστα φαίνεται και το παράδοξο αποτέλεσμα της συμβολής σύμφωνων κυμάτων όπου ισχύει το 1+1=4.**





Πείραμα Young

Η πρώτη παρατήρηση της συμβολής υπό την μορφή των κροσσών συμβολής πραγματοποιήθηκε από τον Young. Ένα κύμα φωτός που διαδίδεται προς μία διεύθυνση (π.χ. z), προσπίπτει σε δύο σχισμές (S_1 και S_2) που βρισκόταν σε απόσταση α (με α>>λ).



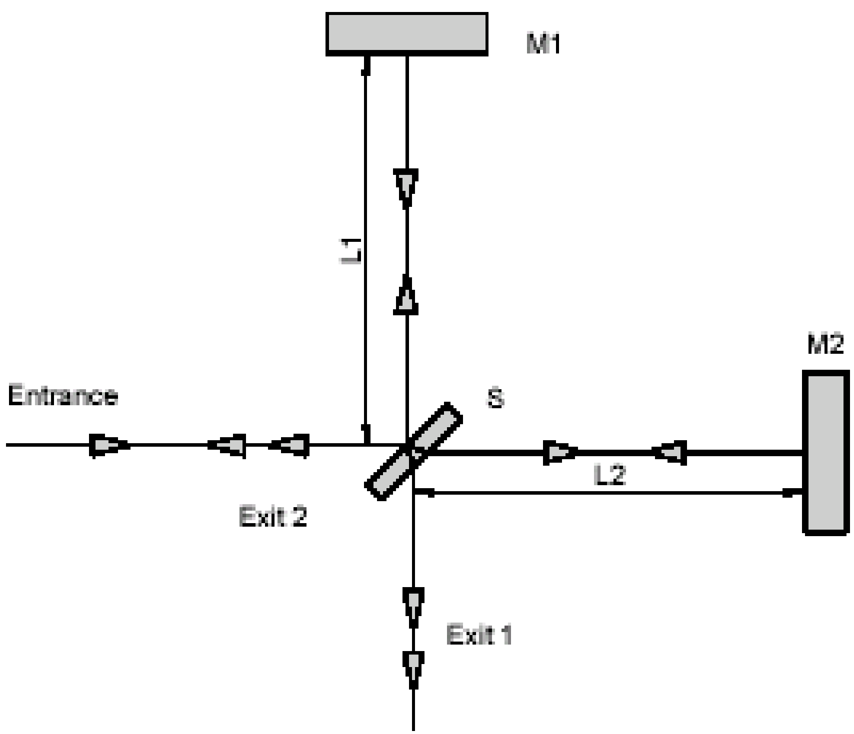
- **Οι δύο σχισμές λειτουργούν σαν δευτερογενείς πηγές και προκαλούν την εκπομπή 2 σύμφωνων κυμάτων, που συμβάλλουν σε οθόνη που βρίσκεται σε απόσταση d.**

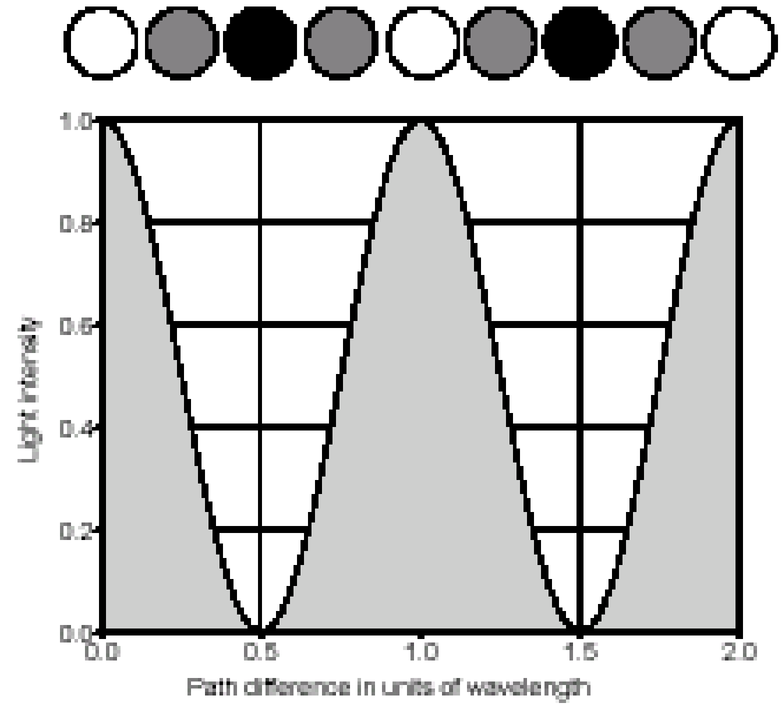
- **Ας εξετάσουμε τώρα τα αποτελέσματα της συμβολής σε σημείο A που απέχει y από τον άξονα διάδοσης z.**

- **Το αποτέλεσμα της συμβολής στο σημείο Α θα εξαρτάται από την διαφορά φάσης των δύο κυμάτων που συμβάλλουν.**
- **Αν τα δύο κύματα εκπέμπονται σε φάση, η διαφορά φάσης στο σημείο Α θα εξαρτάται από το δρόμο ΔL που κινήθηκαν τα δύο κύματα μέσω της σχέσης $\Delta\phi=(2\pi n/\lambda)\Delta L$, όπου λ το μήκος κύματος και n ο δείκτης διάθλασης στο μέσο διάδοσης.**
- **Θεωρώντας τη γωνία φ πολύ μικρή, καταλήγουμε ότι $\Delta L=\alpha y/d$, δηλαδή, η διαφορά δρόμου των δύο κυμάτων είναι ανάλογη της θέσης παρατήρησης της συμβολής Α επάνω στην οθόνη. Οπότε, για να έχουμε ενισχυτική συμβολή πρέπει $\Delta\phi=2n\pi$, ενώ για αποσβετική $\Delta L=(2n+1)\lambda/2$ όπου n ακέραιος.**

- **Ενισχυτική συμβολή παρουσιάζεται στα σημεία όπου η διαφορά δρόμου είναι άρτιο πολλαπλάσιο του $\lambda/2$, $\Delta L=2n(\lambda/2)$, και η απόσταση μεταξύ σημείων ενισχυτικής συμβολής είναι $\Delta y=d\lambda/\alpha$.**
- **Αντίστοιχα, στα σημεία όπου $\Delta L=(2n+1)\lambda/2$ η συμβολή θα είναι αποσβετική, με την απόσταση των σημείων αποσβετικής συμβολής να είναι επίσης $\Delta y=d\lambda/\alpha$.**
- **Επομένως, κατά μήκος της οθόνης θα υπάρχουν σημεία ενισχυτικής συμβολής (ισχυρό φως) και ενδιάμεσα θα παρεμβάλλονται σημεία αποσβετικής συμβολής (σκοτάδι). Η δομή αυτή ονομάζεται «κροσσοί συμβολής» και η εμφάνιση της εξαρτάται από παραμέτρους όπως η απόσταση των σχισμών, η απόσταση παρατήρησης, το μήκος κύματος, η πόλωση κλπ.**

Συμβολόμετρο Michelson





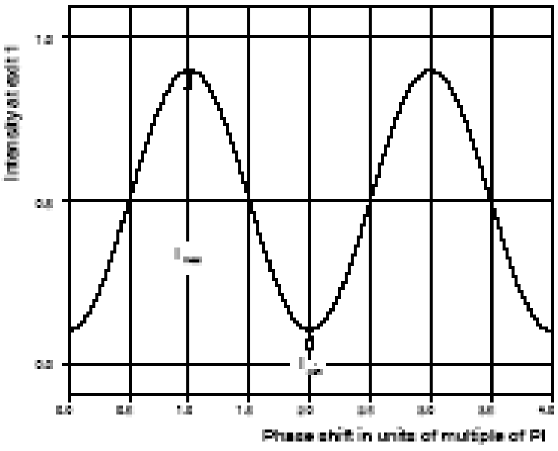
Η βασικότερη συμβολομετρική διάταξη είναι το συμβολόμετρο Michelson. Είναι μία διάταξη η οποία μπορεί προσφέρει τεράστια ακρίβεια και προσαρμοστικότητα στην μέτρηση μικρών μετατοπίσεων αλλά και άλλων παραμέτρων όπως δείκτης διάθλασης, θερμοκρασία, υγρασία, πίεση, μηχανική τάση, δόνηση κλπ.

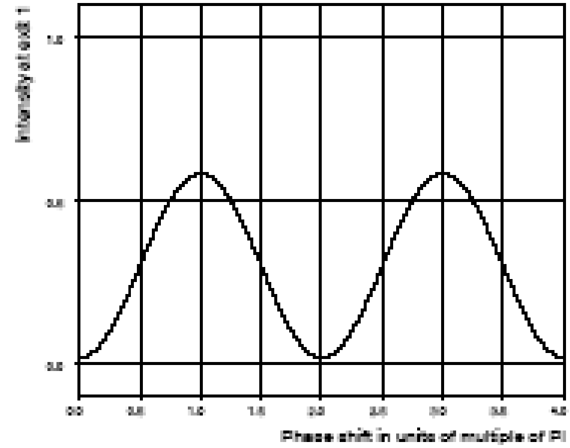
- **Σε μία απλή διάταξη συμβολόμετρου, η δέσμη που εισέρχεται από αριστερά (laser με καλή ποιότητα δέσμης) χωρίζεται με κατάλληλο διαιρέτη S σε δύο ίσα μέρη. Το ένα ακολουθεί διαδρομή προς τον καθρέφτη M_1 όπου ανακλάται για να επιστρέψει στον διαιρέτη S αφού διανύσει απόσταση $2L_1$ ενώ το άλλο συναντά την πρώτη δέσμη αφού διανύσει απόσταση $2L_2$.**
- **Οι δύο δέσμες ταξιδεύουν μαζί μέχρι κάποιο δέκτη (ή οθόνη) όπου και προστίθενται. Αν τα ηλεκτρικά πεδία ήταν αρχικά σε φάση, μετά τις διαδρομές $2L_1$ και $2L_2$ οι δύο δέσμες θα παρουσιάζουν μία διαφορά φάσης $\Delta\phi=(2\pi/\lambda)(2n_1L_1-2n_2L_2)$ όπου n_1 και n_2 οι δείκτες διάθλασης στις διαδρομές L_1 και L_2 αντίστοιχα και ο όρος 2nL είναι ο επονομαζόμενος οπτικός δρόμος (το 2 προέρχεται από τη διπλή κάλυψη της απόστασης).**
- **Το αποτέλεσμα της πρόσθεσης των δύο πεδίων εξαρτάται από την διαφορά φάσης: αν η διαφορά δρόμου είναι άρτιο πολλαπλάσιο του λ/2 τότε τα μέτρα των δύο πεδίων θα προστίθενται και θα έχουμε ενίσχυση. Αντίθετα, αν η διαφορά δρόμου είναι περιττό πολλαπλάσιο του λ/2 τότε τα μέτρα των πεδίων θα αφαιρούνται και θα έχουμε καταστροφική συμβολή.**

Διάταξη

- **Τα αποτελέσματα της συμβολής των δύο δεσμών τα παρακολουθούμε με τους κροσσούς συμβολής, δηλαδή την εναλλαγή από σκοτεινές και φωτεινές περιοχές.**
- **Αν τώρα έχουμε μία καθορισμένη αρχική κατάσταση η οποία στην συνέχεια μεταβληθεί είτε λόγω αλλαγής της μιας φυσικής διαδρομής (π.χ. λόγω μετακίνησης ενός από τους καθρέφτες M_1 ή M_2) ή ενός δείκτη διάθλασης, τότε θα αλλάξει η διαφορά φάσης και η μορφή των κροσσών συμβολής.**
- **Επομένως με την αλλαγή των κροσσών συμβολής είτε γενικότερα με την μέτρηση της αλλαγής της φάσης μπορούμε να ανιχνεύσουμε ποιοτικά και ποσοτικά τον εξωτερικό παράγοντα που προκάλεσε την μεταβολή της φάσης.**
- **Σχετικά με την λειτουργικότητα ενός συμβολόμετρου Michelson, είναι εμφανές ότι όταν αλλάξει ο οπτικός δρόμος κατά λ/2 (ή ακέραιο πολλαπλάσιο του) τότε ένα σκοτεινός κροσσός γίνεται φωτεινός και αντίστροφα. Άρα έχουμε ακρίβεια τουλάχιστον λ/4. Δηλαδή αν έχουμε λέιζερ 0,5 μm, η ακρίβεια είναι 125 nm.**

- **Μία οπτική διάταξη μέτρησης απόστασης που βασίζεται σε συμβολόμετρο Michelson, μπορεί να έχει αρκετά μεγαλύτερη ακρίβεια καθώς υπάρχει δυνατότητα συσχέτισης της φωτεινής έντασης του κροσσού με την διαφορά φάσης των δύο δεσμών άρα και την διαφορά δρόμου.**
- **Σε αυτή την περίπτωση όμως, σημαντικό ρόλο στην ακρίβεια μέτρησης θα παίζει η διαφορά στην ένταση μεταξύ φωτεινού και σκοτεινού κροσσού, ιδιότητα την οποία θα εξετάσουμε παρακάτω.**
- **Μία συμβολομετρική διάταξη με μεγάλη ακρίβεια και σωστή λειτουργία θα έχει επίσης και μεγάλες απαιτήσεις, κυρίως ως προς την ποιότητα της πηγής laser που χρησιμοποιείται.**
- **Μία πηγή laser με μεγάλο μήκος χωρικής συμφωνίας (άρα και πολύ καλή μονοχρωματικότητα) επιτρέπει την καλύτερη ποιότητα κροσσών, άρα και καλύτερη διακριτική ικανότητα.**
- **Επίσης, η καλή πόλωση της δέσμης βοηθά την καλή ποιότητα των κροσσών καθώς προστίθενται μόνο οι παράλληλες συνιστώσες του ηλεκτρικού πεδίου.**





- Σε μία ιδανική συμβολομετρική διάταξη, που χρησιμοποιεί πηγή laser με άπειρο μήκος συμφωνίας και τέλεια οπτικά (π.χ. διαίρεση φωτός στο S κατά 50%-50%) που συνοδεύεται από τέλεια ευθυγράμμιση, η αποσβετική συμβολή δίνει ένταση ακτινοβολίας μηδέν και υπάρχει τέλεια αντίθεση (contrast) μεταξύ φωτεινού και σκοτεινού κροσσού.
- Στην πράξη αυτό δεν είναι πάντα εφικτό και η αντίθεση V ορίζεται ορίζεται με την σχέση:

$$V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$$

- **Σύμφωνα με την προηγούμενη εξίσωση, η ιδανική εμφάνιση κροσσών αντιστοιχεί σε V=1, οπότε η συμβολομετρική διάταξη προσφέρει και την καλύτερη ακρίβεια.**
- **Γενικότερα, αν λάβουμε υπόψη τις εξισώσεις που δίνουν την μέγιστη (φωτεινός κροσσός) και την ελάχιστη (σκοτεινός κροσσός) ένταση, η αντίθεση θα δίνεται από εξίσωση της μορφής:**

$$V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} = \frac{2\sqrt{I_{01}I_{02}}}{I_{01} + I_{02}} = \frac{2\sqrt{I_{01}I_{02}}}{I_0}$$

- **Από την εξίσωση αυτή φαίνονται άμεσα δύο σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα των κροσσών συμβολής:**

  α) το ποσοστό διαχωρισμού της έντασης ακτινοβολίας στο διαιρέτη S. Το V έχει τιμή 1 μόνο αν $I_{01}=I_{02}$, διαφορετικά η τιμή του είναι μικρότερη. Σαν παράδειγμα, αν $I_{01}=0.2I_0$ και $I_{02}=0.8I_0$, τότε V=0.8

  β) η καλή αλληλοεπικάλυψη των δύο δεσμών στο επίπεδο συμβολής, καθώς σε διαφορετική περίπτωση, $I_{01}+I_{02}<I_0$ και V<1.

- **Τέλος, σχετικά με τις μεταβολές που προκαλούν αλλαγή στον οπτικό δρόμο, εκτός από την μετατόπιση του καθρέφτη υπάρχει όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, η αλλαγή του δείκτη διάθλασης.**
- **Σαν παράδειγμα, ο δέικτης διάθλασης έχει υπολογιστεί για τον αέρα και δίνεται από μία σχέση της μορφής:**

$$(n-1)_{T,P} = 2.8775\times10^{-7}\times P\frac{1+10^{-6}\times P\times\left(0.613-0.00997\times T\right)}{1+0.003661\times T}$$

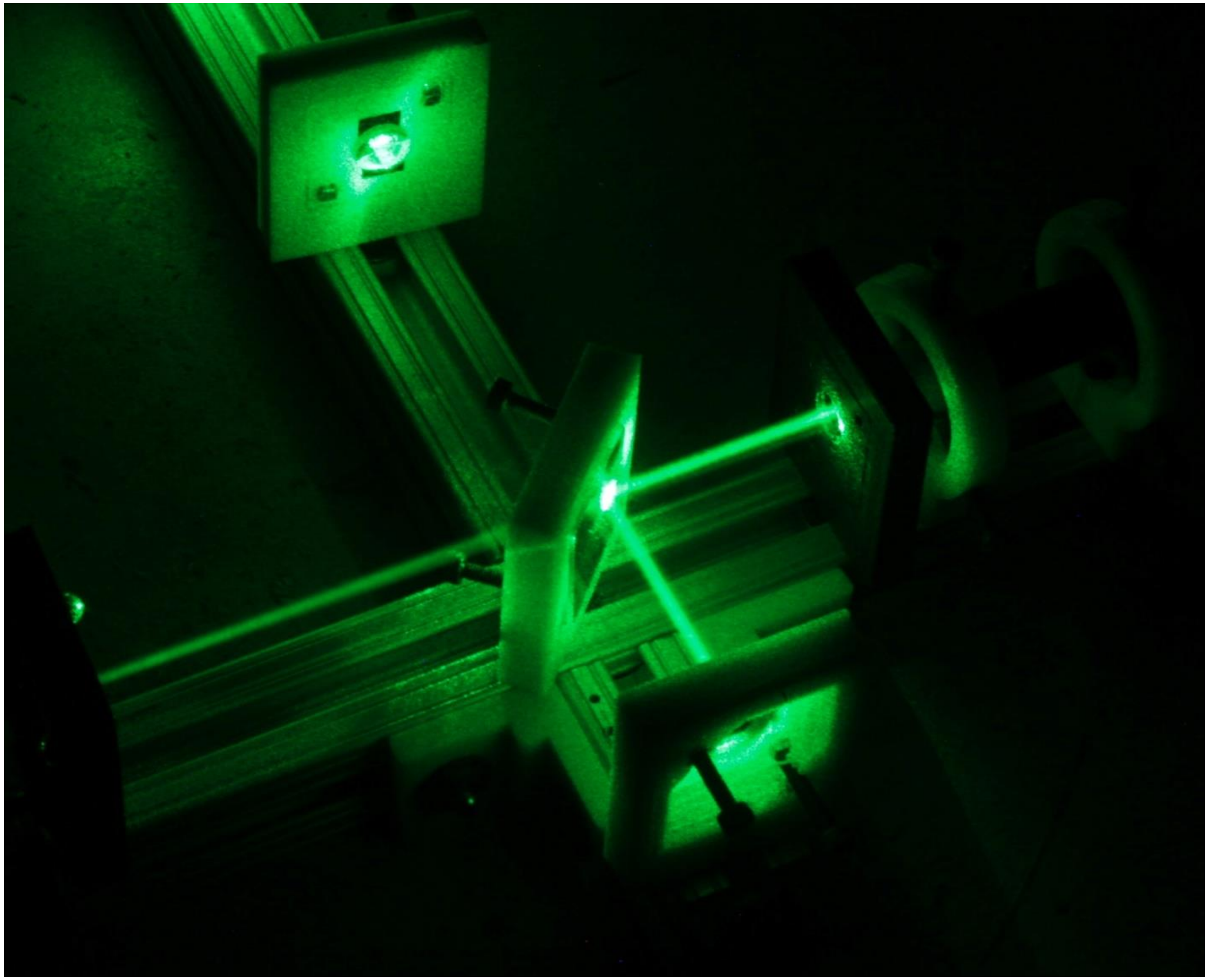
όπου T η θερμοκρασία σε °C και P η πίεση του αέρα σε mmHg.
- **Επομένως, μεταβολή του δείκτη διάθλασης μπορεί να προκληθεί από μεταβολές της θερμοκρασίας και της πίεσης με βάση τις σχέσεις:**

$$\frac{dn}{dT}\approx-10^{-6}K^{-1} \qquad \frac{dn}{dP}=10^{-6}\,mmHg^{-1}$$

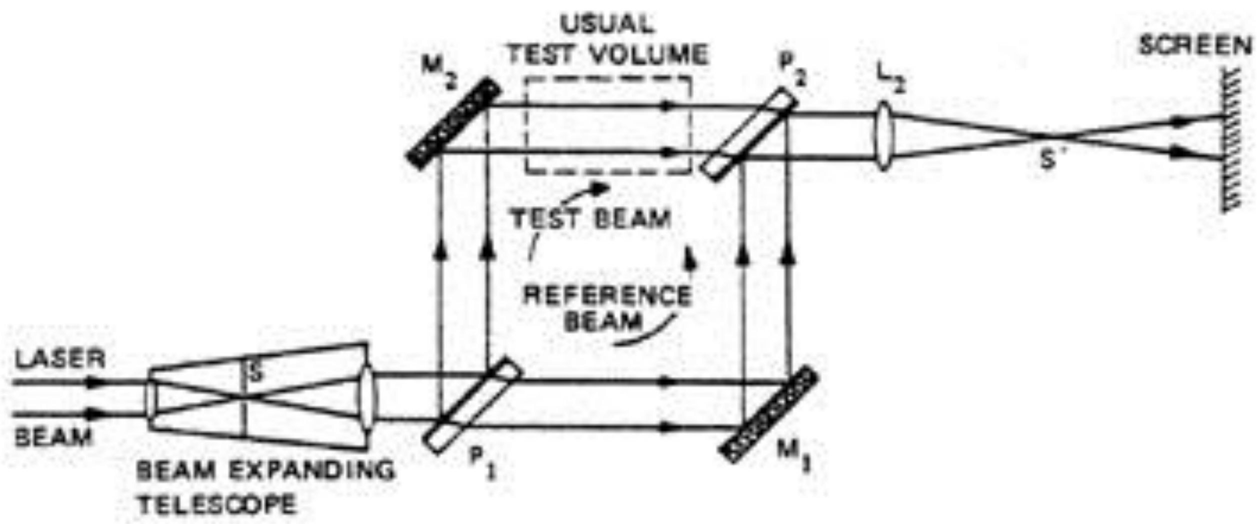
- **Αντίστοιχη μεταβολή μπορεί να προκληθεί από μεταβολές της σχετικής υγρασίας (RH, Relative Humidity) με βάση την σχέση:**

$$\frac{dn}{dRH}\approx-10^{-8}\%^{-1}$$

- **Είναι φανερό επομένως ότι μία συμβολομετρική διάταξη είναι σε θέση να μετρά μεταβολές της πίεσης, της θερμοκρασίας και της υγρασίας. Ταυτόχρονα όμως πρέπει κατά τις μετρήσεις να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στις συνθήκες του περιβάλλοντος.**

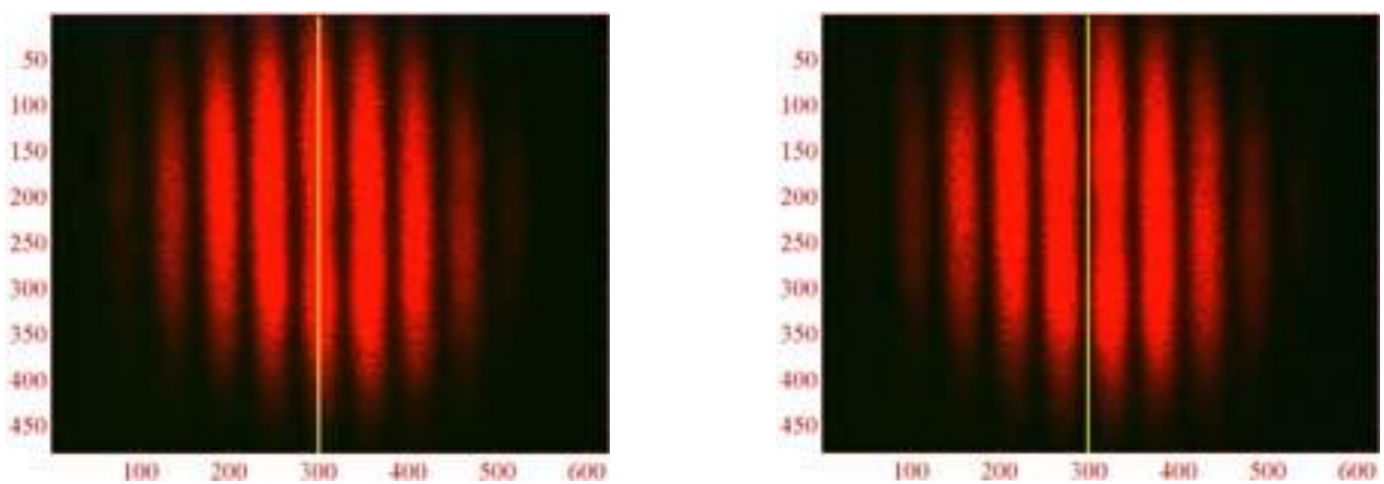


Συμβολόμετρα Mach-Zehnder και Fabry-Perot

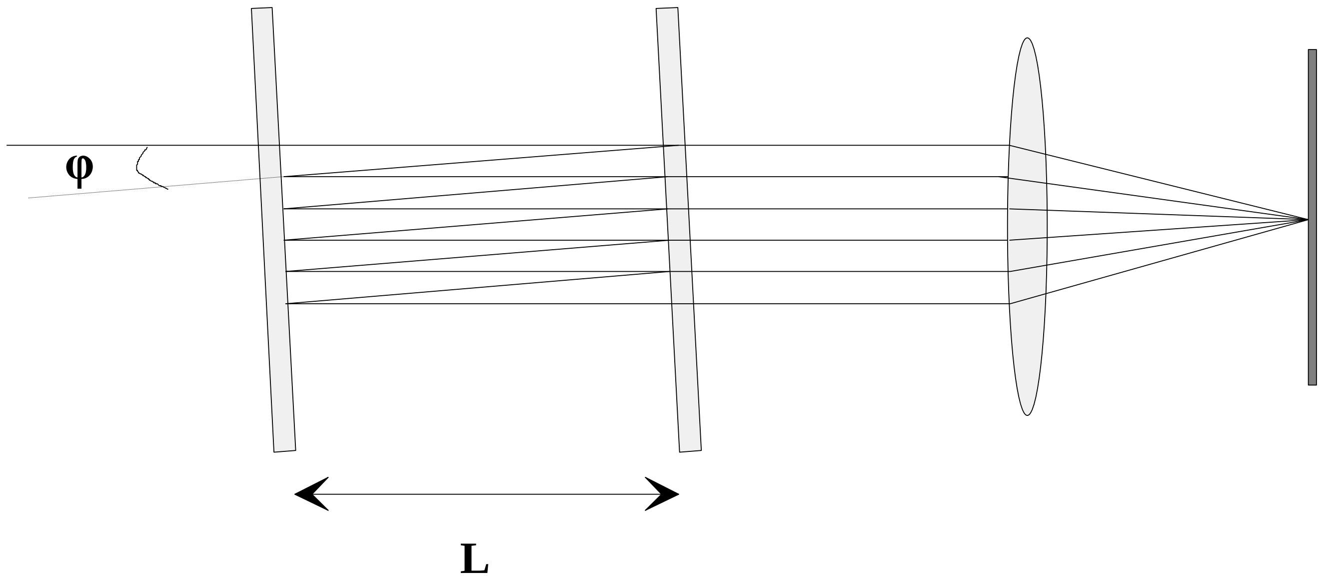


Μία άλλη συμβολομετρική διάταξη με διαίρεση φάσης είναι η επονομαζόμενη Mach-Zehnder, η οποία είναι επίσης ένα σπουδαίο διαγνωστικό εργαλείο για εφαρμογές αεροδυναμικής και μεταφοράς θερμότητας καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση διαφόρων μεγεθών (αλλά και των μεταβολών τους) στην αέρια φάση όπως πυκνότητα, πίεση και θερμοκρασία.

- **Είναι μία σχετικά απλή διάταξη που χρησιμοποιεί σαν πηγή ένα laser He-Ne, η δέσμη του οποίου έχει παραλληλιστεί με κατάλληλο τηλεσκόπιο.**
- **Η δέσμη αυτή χωρίζεται στα δύο μέρη με κατάλληλο διαιρέτη (P_1), τα οποία στην συνέχεια ακολουθούν μία διαφορετική διαδρομή ($P_1M_1P_2$ και $P_1M_2P_2$ αντίστοιχα) προτού επανενωθούν (στο P_2) και οδηγηθούν εστιασμένες σε οθόνη όπου συμβάλλουν.**
- **Αν συμβεί οποιαδήποτε μεταβολή στην μία οπτική διαδρομή λόγω κάποιας εξωτερικής επίδρασης, οι κροσσοί συμβολής στην οθόνη θα μεταβληθούν, με την μεταβολή να είναι ανάλογη του μέτρου της εξωτερικής επίδρασης.**



Detected interferograms of glucose concentrations 1,4 mg/ml (left) and 2,1 mg/ml (right).



- Μία άλλη συμβολομετρική διάταξη είναι το συμβολόμετρο Fabry-Perot, όπου όμως έχουμε συμβολή πολλαπλών δεσμών.
- Είναι μία διάταξη μεγάλης αναλυτικότητας με εφαρμογές σε μέτρηση μετατόπισης, μηχανικής τάσης, πίεσης, θερμοκρασίας κλπ.
- Αποτελείται από δύο διαφανή πλακίδια με κατάλληλα στρώματα μερικής ανακλαστικότητας που βρίσκονται σε απόσταση L και παρουσιάζουν μία ελαφριά κλίσης (γωνία φ) ως προς τον άξονα διάδοσης του οπτικού κύματος (με στόχο τις πολλές ανακλάσεις), μεταξύ των οποίων βρίσκεται ένα διηλεκτρικό με δείκτη διάθλαση n, συνήθως αέρας.

- Η εξερχόμενη ένταση περιλαμβάνει το άθροισμα μεγάλου αριθμού (N) δεσμών, καθεμία με διαφορετική ένταση και διαφορετική φάση. Αν I_0 η εισερχόμενη ένταση και I_t η εξερχόμενη, τότε ισχύει:

$$\frac{I_t}{I_0} = \frac{T^2}{(1-R)^2} \frac{1}{1+\left[4R\eta\mu^2\left(\delta/2\right)/(1-R)^2\right]}$$

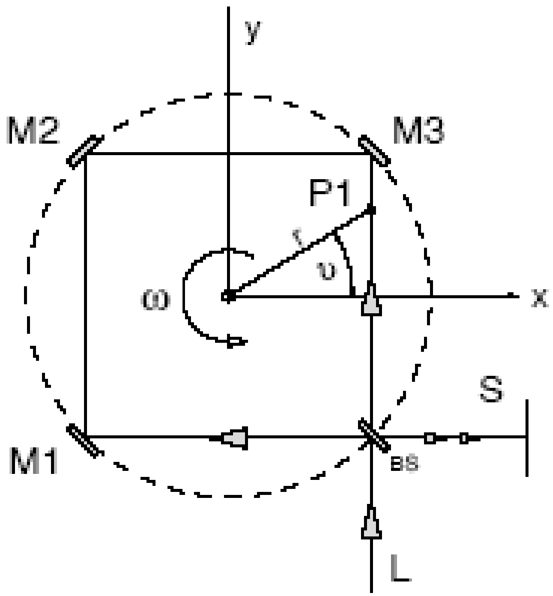
- όπου R, και T είναι το ποσοστό ανάκλασης και διαπέρασης κάθε πλακιδίου, και το δ δίνεται από την σχέση:

$$\delta = \frac{2\pi nL\sigma\upsilon\nu\phi}{\lambda}$$

- Οι κροσσοί συμβολής που δημιουργούνται με το συμβολόμετρο είναι κυκλικοί και η αντίθεση τους εξαρτάται από την ανάκλαση R των πλακιδίων (καλή αντίθεση απαιτεί μεγάλα R).
- Αν η απόσταση αυτή μεταβληθεί εξ αιτίας ενός εξωτερικού παράγοντα, μπορεί να γίνει μέτρηση αυτού του παράγοντα από την αλλαγή των κροσσών συμβολής.

Συμβολόμετρο Sagnac

- **Το συμβολόμετρο Sagnac μπορεί να παρακολουθεί γωνιακές μετατοπίσεις. Οι δύο δέσμες ακολουθούν κυκλικές πορείες με αντίθετη φορά, διαδικασία που οδηγεί στην μοναδική ικανότητα μέτρησης απ’ ευθείας γωνιακών ταχυτήτων με πολύ μεγάλη ακρίβεια (γυροσκόπιο).**



- **Ας θεωρήσουμε την κυκλική οπτική κοιλότητα του σχήματος, η οποία αποτελείται από τους καθρέφτες M_1, M_2, M_3 και τον διαιρέτη δέσμης BS.**
- **Η δέσμη από πηγή L διαχωρίζεται στα δύο, με το ένα μέρος να διαγράφει την κοιλότητα δεξιόστροφα ($BS \rightarrow M_1 \rightarrow M_2 \rightarrow M_3 \rightarrow BS$) ενώ το άλλο αριστερόστροφα ($BS \rightarrow M_3 \rightarrow M_2 \rightarrow M_1 \rightarrow BS$).**

- **Αν η κυκλική οπτική κοιλότητα είναι ακίνητη, ο οπτικός δρόμος που διαγράφουν οι δύο δέσμες είναι ο ίδιος και τα εξερχόμενα πεδία δίνουν κροσσό συμβολής μέγιστης έντασης στην οθόνη M.**
- **Αν υποθέσουμε στην συνέχεια ότι η κυκλική κοιλότητα αρχίζει να περιστρέφεται αριστερόστροφα με γωνιακή ταχύτητα ω, οι κροσσοί συμβολής θα αρχίσουν να αλλάζουν, μετατρεπόμενοι από φωτεινούς σε σκοτεινούς ή αντίθετα.**
- **Άρα, οι δύο δέσμες κατά την έξοδο τους παρουσιάζουν κάποια διαφορά φάσης λόγω της περιστροφής. Η δέσμη που κινείται αντίθετα από την φορά περιστροφής θα βγαίνει από την κοιλότητα νωρίτερα από την δέσμη που κινείται αριστερόστροφα.**
- **Έτσι, οι δύο εξερχόμενες δέσμες θα παρουσιάζουν μία διαφορά φάσης λόγω του διαφορετικού οπτικού δρόμου και οι μεταπτώσεις σκοτεινού-φωτεινού κροσσού N θα δίνονται από την σχέση: ,**

$$N = \frac{4F}{c\lambda}\omega$$

λ το μήκος κύματος και F την επιφάνεια της διάταξης.

- **Η εναλλαγή σκοτεινού-φωτεινού κροσσού είναι ανάλογη της γωνιακής ταχύτητας. Υπάρχει ακρίβεια εκατοστά της μοίρας ανά ώρα.**