Σύγχρονη Φυσική–1, Διάλεξη–3, Τμήμα Φυσικής, Παν/μιο Ιωαννίνων
Η θεωρία του αιθέρα καταρρίπτεται από το πείραμα των Michelson και Morley

20.10.2011

Σκοποί της τρίτης διάλεξης:

- Να κατανοηθεί η ιδιαιτερότητα των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (π. χ. φως) σε σχέση με άλλα κύματα (π. χ. Ήχος), η οποία βρίσκεται στο γεγονός ότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα και μόνο διαδίδονται με την ταχύτητα του φωτός σε οποιοδήποτε αδρανειακό σύστημα αναφοράς ανεξάρτητα από την ταχύτητα του αδρανειακού συστήματος αναφοράς.

- Να κατανοηθούν οι πιο πάνω ιδέες μέσω της περιγραφής του πειράματος των Michelson και Morley και της κατανόησης του αντίκτυπου που είχαν τα αποτελέσματα του.

Η Θεωρία του αιθέρα:

Όπως είδαμε, εάν εφαρμόσουμε τους μετασχηματισμούς του Γαλιλαίου για να υπολογίσουμε την ταχύτητα του φωτός στη διεύθυνση $\hat{V} = \vec{V} / |\vec{V}|$ σε δύο διαφορετικά αδρανειακά συστήματα O και O', τα οποία κινούνται το ένα σε σχέση με το άλλο με ταχύτητα $\vec{V}$ τότε το αποτέλεσμα θα είναι:

$$c' = c \pm |\vec{V}| \qquad (1)$$

Συνεπώς θα έπρεπε να υπάρχει ένα αδρανειακό σύστημα που το φως να είχε ταχύτητα c και άλλα που θα είχε $c \pm |\vec{V}|$. Αυτό φαινόταν λογικό κατά το δέκατο ένατο αιώνα καθότι το ίδιο ίσχυε για όλα τα άλλα κύματα. Παραδείγματος χάριν τα ηχητικά κύματα υπακούν την σχέση (1). Αυτό συμβαίνει γιατί ο ήχος είναι κύμα πίεσης του αέρα και συνεπώς χρειάζεται τον αέρα για να διαδοθεί. Αν κάποιος κινείται σε σχέση με τον αέρα, τότε η ταχύτητα του ήχου ως προς αυτόν αλλάζει σύμφωνα με την (1). Έτσι οι Φυσικοί της εποχής υπέθεταν ότι και το φως θα έπρεπε να υπακούσει την (1) και μάλιστα, όπως και ο ήχος για να διαδοθεί χρειάζεται τον αέρα, υπέθεταν ότι και το φως για να διαδοθεί χρειάζεται ένα μέσον το οποίο το ονόμασαν αιθέρα. Συνεπώς το αδρανειακό σύστημα, όπου το φως είχε ταχύτητα c, ήταν το σύστημα του αιθέρα, στο οποίο επίσης θα ίσχυαν και οι εξισώσεις του Maxwell. Προφανώς αν όλα αυτά συνέβαιναν στην πραγματικότητα, θα έπρεπε η ταχύτητα του φωτός να είναι διαφορετική σε διαφορετικά αδρανειακά συστήματα αναφοράς που κινούνται με διαφορετικές ταχύτητες σε σχέση με το αιθέρα. Αυτή ήταν η κατάσταση στη φυσική στα τέλη του 19^{ου} αιώνα.

Σύγχρονη Φυσική–1, Διάλεξη–3, Τμήμα Φυσικής, Παν/μιο Ιωαννίνων

Το Πείραμα των Michelson και Morley

Το 1887 οι Michelson και Morley (σχήμα 1, αριστερά) δημοσίευσαν τα αποτελέσματα του πειράματος τους που ήταν σχεδιασμένο για να μετρήσει την ταχύτητα της γης σε σχέση με τον αιθέρα αλλά τελικά έδωσε απάντηση στο ερώτημα για το αν η ταχύτητα του φωτός είναι όντως διαφορετική στα διάφορα αδρανειακά συστήματα.

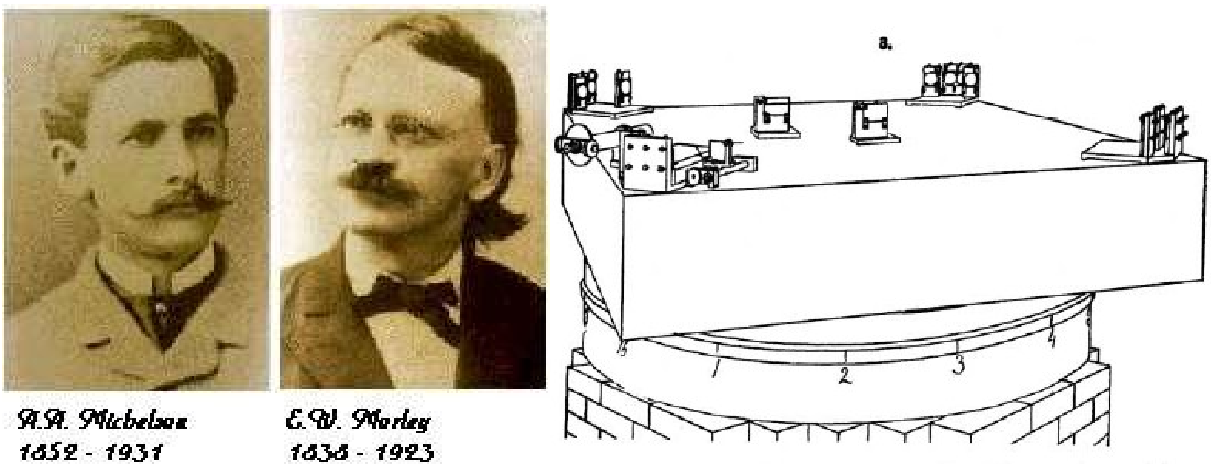

Figure 1: Οι Michelson και Morley (αριστερά). Το πείραμα των Michelson και Morley (δεξιά) . Το σχήμα είναι παρμένο από την δημοσίευση τους στο *Am. J. Sci.,* 34:333 το 1887.

Η ιδέα του πειράματος ήταν η εξής: Ας υποθέσουμε ότι το φως κινείται με ταχύτητα $c = 1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_o} \approx 3\times10^8 m/s$ στο αδρανειακό σύστημα του αιθέρα, όχι όμως στο σύστημα της γης, όπου βρίσκεται το πείραμα, το οποίο κινείται με ταχύτητα V σε σχέση με τον αιθέρα. Αν στείλει κανείς μία δέσμη φωτός κατά τη διεύθυνση της κίνησης της γης ως προς τον αιθέρα, η οποία ανακλάται σε απόσταση **D** για να επιστρέψει στην πηγή, τ**ότε ο χρόνος που απαιτείται για αυτό δεν είναι $\Delta t = 2D/c$, αλλά εξαρτάται από την ταχύτητα της γης στον αιθέρα και μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:**

$$\Delta t = \frac{D}{c-V} + \frac{D}{c+V} = \frac{2D}{c} \times \frac{1}{1-\frac{V^2}{c^2}}$$

Συνεπώς, αν μετρήσει κανείς τον χρόνο αυτό για μια απόσταση πχ. $D=3m$, μπορεί να υπολογίσει την ταχύτητα της γης που υποτίθεται ότι κινείται μέσα στον αιθέρα.

Σύγχρονη Φυσική–1, Διάλεξη–3, Τμήμα Φυσικής, Παν/μιο Ιωαννίνων

Δυστυχώς όμως

$$\frac{2\mathrm{D}}{c} = \frac{2\times 3\,m}{3\times 10^{8}\,\dfrac{m}{sec}} = 2\,10^{-8}\,sec = 20\,nsec$$

που για την εποχή ήταν πολύ μικρός χρόνος για να μετρηθεί στο εργαστήριο και σαν να μην έφτανε αυτό, η διόρθωση λόγω της κίνησης της γης κινείται είναι απίστευτα μικρή, διότι

$$\frac{V}{c} = 10^{-4} \;\Rightarrow\; \frac{V^2}{c^2} = 10^{-8}$$

Έτσι έπρεπε να βρεθεί ένας έξυπνος τρόπος να μετρηθούν μικροί χρόνοι ή μικρές αποστάσεις στο εργαστήριο. Γι' αυτό και χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος με τους κροσσούς συμβολής που θα περιγράψουμε στη συνέχεια.

Η διάταξη του αρχικού πειράματος Michelson και Morley φαίνεται στο σχήμα 1 (δεξιά) και το διάγραμμα στο σχήμα 2 δείχνει τη λειτουργία του πειράματος.

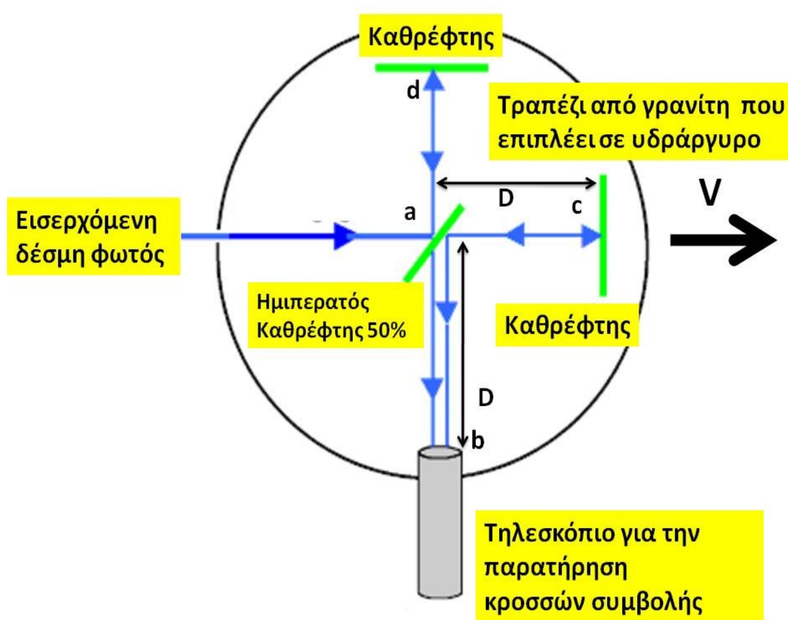

Figure 2: Το διάγραμμα του πειράματος Michelson και Morley. Στο συγκεκριμένο σχήμα η γη κινείται σε σχέση με τον αιθέρα με τα ταχύτητα **V**.

Σύγχρονη Φυσική–1, Διάλεξη–3, Τμήμα Φυσικής, Παν/μιο Ιωαννίνων

Όπως φαίνεται στο σχήμα 2 υποθέτουμε αρχικά ότι η γη κινείται με ταχύτητα $\vec{V}$ (προς τα δεξιά) σε σχέση με τον αιθέρα. Η πηγή φωτός στα αριστερά παράγει δέσμη φωτός, η οποία χτυπάει το ημιπερατό πλακίδιο στη θέση **a.** 50% της δέσμης ανακλάται στη διεύθυνση του **d** και το υπόλοιπο 50% διαδίδεται στη διεύθυνση του **c**. Στα σημεία **d** και **c** έχουν τοποθετηθεί κάτοπτρα, τα οποία ανακλούν τη δέσμη πίσω στο **a** και στη συνέχεια οι δύο δέσμες οδηγούνται στο σημείο **b,** στο οποίο υπάρχει τηλεσκόπιο παρατήρησης κροσσών συμβολής. **Το πείραμα είναι σχεδιασμένο για να μετρά τη διαφορά δρόμου του φωτός στον αιθέρα όταν το φως ταξιδεύει σε δυο διαφορετικούς δρόμους: (a) a → c → a → b και (b) a → d → a → b.**

Για να διανύσει το δρόμο $L(a \to c \to a)$ (στον αιθέρα) το φως χρειάζεται ένα χρονικό διάστημα ίσο με:

$$T(a \to c \to a) = \frac{D}{c-V} + \frac{D}{c+V} = \frac{2\mathrm{D}c}{c^2 - V^2} = \frac{2\mathrm{D}}{c}\frac{1}{1-\frac{V^2}{c^2}} = \frac{2\mathrm{D}}{c} \times \left(1-\frac{V^2}{c^2}\right)^{-1}$$

Το οποίο στο σύστημα αναφοράς του αιθέρα αντιστοιχεί σε διαδρομή μήκους:

$$L(a \to c \to a) = 2\mathrm{D} \times \left(1-\frac{V^2}{c^2}\right)^{-1} \qquad (1)$$

Η πραγματική διαδρομή $L(a \to d \to a)$ στον αιθέρα φαίνεται στο σχήμα 3 και επειδή:

$$l^2 = D^2 + \left(V \cdot \frac{l}{c}\right)^2 \quad \Rightarrow \quad l = D\left(1-\frac{V^2}{c^2}\right)^{-1/2} \quad \Rightarrow$$

είναι:

$$L(a \to d \to a) = 2\mathrm{l} = 2\mathrm{D}\left(1-\frac{V^2}{c^2}\right)^{-1/2} \qquad (2)$$

Σύγχρονη Φυσική–1, Διάλεξη–3, Τμήμα Φυσικής, Παν/μιο Ιωαννίνων

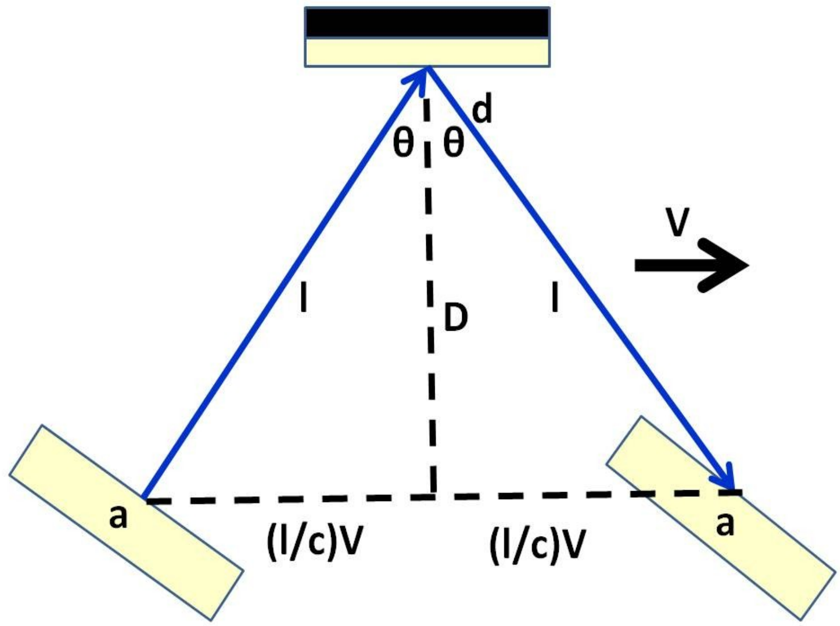

Figure 3: Διαδρομή της δέσμης που ανακλάται από ημιπερατό πλακίδιο και το πάνω κάτοπτρο.

Για να λογαριάσουμε τη διαφορά των δρόμων (1) και (2) θα χρειαστούμε την εξίσωση:

$$(1+x)^N = \sum_{i=0} \frac{N!}{i!(N-i)!} x^i = 1+Nx+\frac{N(N-1)}{2}x^2+\dots \quad (3)$$

Η εξίσωση (3) είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στην περίπτωση που το x είναι πολύ μικρότερο της μονάδας ($x<<1$). Σ' αυτή την περίπτωση μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει την προσέγγιση :

$$(1+x)^N \approx 1+Nx \quad (4)$$

στην περίπτωση που χρειάζεται ακρίβεια της τάξης του x και την προσέγγιση:

$$(1+x)^N \approx 1+Nx+\frac{N(N-1)}{2}x^2$$

στην περίπτωση που χρειάζεται ακρίβεια της τάξης του x^2.

Έτσι οι (1) και (2) μέσω της (4) μπορούν να γραφτούν:

$$L(a \to c \to a) = 2D \times \left(1 - \frac{V^2}{c^2}\right)^{-1} \approx 2D\left(1-(-1)\frac{V^2}{c^2}\right) = 2D\left(1+\frac{V^2}{c^2}\right) \quad (5)$$

$$L(a \to d \to a) = 2l = 2D\left(1 - \frac{V^2}{c^2}\right)^{-1/2} \approx 2D\left(1-\left(\frac{-1}{2}\right)\frac{V^2}{c^2}\right) = 2D\left(1+\frac{1}{2}\frac{V^2}{c^2}\right) \quad (6)$$

Προφανώς λόγω του ότι $V^2/c^2 \sim 10^{-8}$ δεν χρειάζεται να χρησιμοποιήσουμε όρους της τάξης του $(V^2/c^2)^2 \sim 10^{-16}$.

Έτσι χρησιμοποιώντας τις (5) και (6) υπολογίζουμε τη συνολική διαφορά δρόμου η οποία είναι :

$$\Delta x = 2D\left(1+\frac{V^2}{c^2}\right) - 2D\left(1+\frac{1}{2}\frac{V^2}{c^2}\right) = D\frac{V^2}{c^2}$$

Όπως θα περίμενε κανείς η δέσμη κατά την διεύθυνση της κίνησης της γης σε σχέση με τον αιθέρα (a $\to$ c $\to$ a) έχει μεγαλύτερη καθυστέρηση από την δέσμη που ακολουθεί το δρόμο a $\to$ d $\to$ a (κάθετα στην διεύθυνση της κίνησης της γης σε σχέση με τον αιθέρα). Αν κάποιος στρέψει την πειραματική διάταξη κατά 90°, τότε προφανώς η διαδρομή (a $\to$ c $\to$ a) θα είναι κάθετη στην διεύθυνση της υποτιθέμενης κίνησης της γης ως προς τον αιθέρα και η διαδρομή a $\to$ d $\to$ a παράλληλη οπότε η διαφορά δρόμου θα είναι :

$$\Delta x(90^o) = -D\frac{V^2}{c^2}$$

και συνεπώς η ολική διαφορά δρόμου μεταξύ της αρχικής θέσης της διάταξης και αυτής στις 90° θα είναι:

$$\Delta x - \Delta x(90^o) = D\frac{V^2}{c^2} - \left(-D\frac{V^2}{c^2}\right) = 2D\frac{V^2}{c^2}$$

Σύγχρονη Φυσική–1, Διάλεξη–3, Τμήμα Φυσικής, Παν/μιο Ιωαννίνων

Παρ' όλα αυτά η διαφορά δρόμου αυτή εξακολουθεί να είναι απογοητευτικά μικρή. Εάν πχ. Η απόσταση $D=3\,m$ τότε η διαφορά δρόμου είναι:

$$\Delta x-\Delta x(90^o) \;=\; 2\mathrm{D}\frac{V^2}{c^2} \;=\; 6\times10^{-8}\,m \;=\; 60\,nm \quad\rightarrow\quad 10^{-16}\,sec$$

και μεταφράζεται σε ένα αφάνταστα μικρό χρονικό διάστημα (αν πχ. κανείς προσπαθούσε να το μετρήσει μέσω του χρόνου άφιξης των παλμών του φωτός). **Εδώ έρχεται να βοηθήσει η οπτική και συγκεκριμένα το φαινόμενο της συμβολής.**

Οι κροσσοί συμβολής είναι μια εναλλαγή φωτεινών και σκοτεινών γραμμών (όπως στο σχήμα 4) οι οποίες είναι αποτέλεσμα ενισχυτικής και αποσβεστικής συμβολής της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας του φωτός. **Η θέση τους στο σημείο συμβολής εξαρτάται από τη διαφορά δρόμου των δύο δεσμών** και οι μεταξύ τους αποστάσεις είναι ανάλογες του μήκους κύματος του φωτός. Η μετατόπιση των κροσσών συμβολής σαν συνάρτηση της διαφοράς δρόμου του μήκους κύματος λ δίδεται από της εξίσωση:

$$\Delta N \;=\; \frac{[\Delta x-\Delta x(90^o)]}{\lambda} \;=\; 2\mathrm{D}\frac{V^2}{\lambda c^2}$$

Επειδή λοιπόν το μήκος κύματος του λευκού φωτός είναι επίσης πολύ μικρό και βρίσκεται στον παρονομαστή,

$$\lambda \;\approx\; 6000\times10^{-10}\,m$$

η μετατόπιση αυτή των κροσσών είναι ποσότητα που μπορεί να μετρηθεί

$$\Delta N \;=\; \frac{[\Delta x-\Delta x(90^o)]}{\lambda} \;=\; 2\mathrm{D}\frac{V^2}{\lambda c^2} \;=\; \frac{6\times10^{-8}\,m}{6000\,10^{-10}\,m} \;=\; 0.1$$

Δηλαδή αν ανακατασκευάσει κάποιος το πείραμα των Michelson και Morley με μήκος $D \;=\; 3\mathrm{m}$ και χρησιμοποιήσει λευκό φως τότε, **<u>αν υπάρχει αιθέρας</u>**, θα πρέπει να δει τους κροσσούς να μετατοπίζονται κατά $\leqslant\ \pm10\,\%$ (0.1) όταν στρέφει το πείραμα σε διαφορετικές γωνίες και να είναι στο μέγιστο όταν το ο άξονας $a\rightarrow c$ δείχνει στην διεύθυνση της κίνησης της γης σε σχέση με τον αιθέρα και ελάχιστο, όταν σχηματίζει γωνία 45^0. Στην πραγματικότητα οι Michelson και Morley πέρασαν τη δέσμη πολλές φορές στης διαδρομές (a) και (b) έτσι ώστε να αυξήσουν όσο το δυνατόν περισσότερο την διαφορά δρόμου και κατ επέκταση την μετατόπιση των κροσσών συμβολής. Για αυτό στο σχήμα 1 (δεξιά) σ στις θέσεις (c) και (d), φαίνονται πολλαπλοί καθρέφτες. Επιπλέον για σταθερότητα το πείραμα έγινε πάνω σε γρανιτένιο τραπέζι το οποίο επέπλεε σε υδράργυρο.

Παρ' όλες της προσπάθειες τους οι Michelson και Morley δεν παρατήρησαν καμία μετατόπιση των κροσσών σε οποιαδήποτε διεύθυνση και αν έστρεψαν την πειραματική τους διάταξη (κάθε φορά που αλλάζει η διεύθυνσή της επιλέγεται και διαφορετικό αδρανειακό σύστημα αναφοράς) και συμπέραναν από αυτό ότι η αρχική υπόθεση για την ύπαρξη του αιθέρα ήταν λάθος.

Συνεπώς το φως διαδίδεται με την ίδια ταχύτητα $c = 1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_o} \approx 3\times 10^8 m/s$ σε όλα τα αδρανειακά συστήματα και ως εκ τούτου δεν υπάρχει προτιμητέο αδρανειακό σύστημα και οι εξισώσεις του Maxwell ισχύουν σε όλα τα αδρανειακά συστήματα.

Το πείραμα των Michelson και Morley είναι κλασσική περίπτωση πειράματος που, παρόλο που δε μέτρησε αυτό για το οποίο σχεδιάστηκε, μπόρεσε όμως να ανοίξει το δρόμο για νέες θεωρίες, οι οποίες άλλαξαν τον τρόπο σκέψης μας και τη φυσική επιστήμη για πάντα.

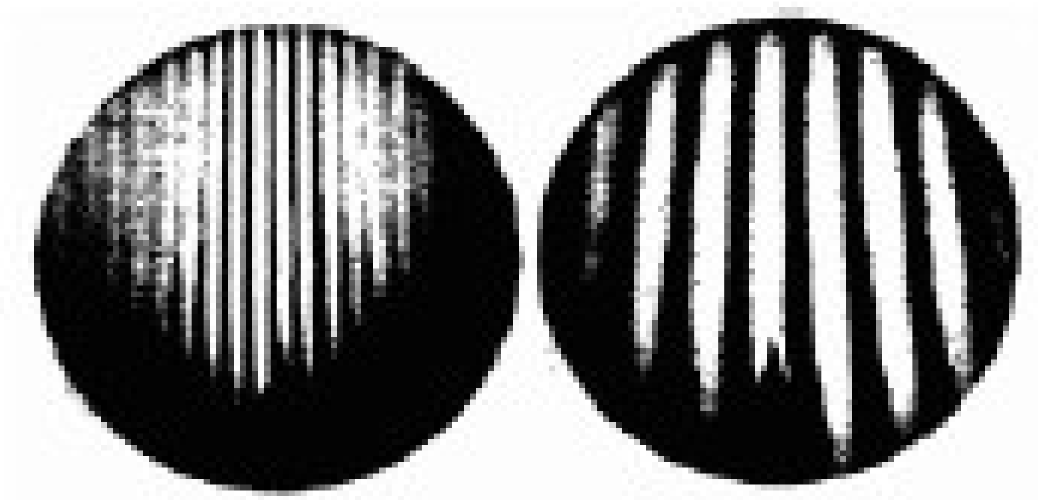

Figure 4: Κροσσοί συμβολής σαν αυτούς που παρατήρησαν οι Michelson και Morley

Figure 5: Σημερινή ανακατασκευή του πειράματος των Michelson και Morley.