אבנר סופר

אוניברסיטת תל אביב

מבוא לפיזיקה מודרנית

תורת היחסות הפרטית

ניסוי מייקלסון מורלי

ב-1887 ערכו מייקלסון ומורלי (Albert Michelson, Edward Morley) חיפוש רגיש מספיק אחרי מערכת האתר, באמצעות אינטרפרומטר מייקלסון.

הרעיון הבסיסי: כדוה"א נע דרך האתר במהירות $V = 30$ km/s, מהירות תנועתו סביב השמש (לשם פשטות, נניח כי השמש במנוחה באתר, אבל הנחה זו לא משפיעה על רגישות המדידה).

האינטרפרומטר מודד הפרש פאזה בין שתי קרני אור:

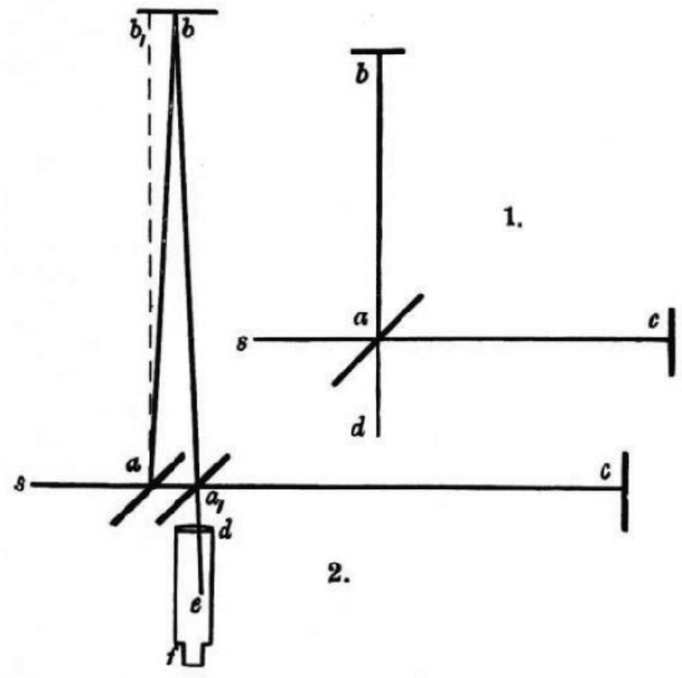
קרן 1 בכוון תנועת כדוה"א (בכוון "רוח האתר") וקרן 2 בניצב לתנועת כדוה"א.

הקרניים נסחפות ע"י האתר במהירויות שונות, ולכן נוצר הפרש פאזה ביניהן.

מבצעים את הניסוי פעם אחת, מסובבים את המערכת כך שכווני הקרניים מתחלפים, ובודקים את הפרש הפאזה בין שני הניסויים.

בציור 1 למטה, מתוך המאמר המקורי, אור יוצא מהמקור s משמאל, ופוגע במראה חצי מחזירה ב-a. חציו עובר את המראה (קרן 1) וממשיך ל-c, וחציו (קרן 2) מוסט ל-b. הקרניים מוחזרות מהמראות c ו-b, עוברות שוב ב-a, שם הן מופנות אל המשקפת ב-d.

שימו לב: הקרניים המפוצלות ב-a הן קוהרנטיות, משום שהם נוצרו מאותו הגל ולכן הן בעלי אותה תדירות ובהפרש פאזה קבוע – ההגדרה של קוהרנטיות.



בציור 2 רואים את מהלך הקרניים במערכת האתר, שבה האינטרפרומטר נע ימינה במהירות V. ניתן לראות שבמערכת האתר, קרן 2 נעה לא רק בכוון y, אלא גם מעט בכוון x, כוון תנועת כדוה"א.

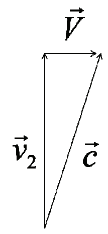
נראה מהן מהירויות הקרניים לאורך דרכיהן השונות **במערכת המעבדה**.

נתחיל מכך שמהירות האור **במערכת האתר** היא תמיד c.

מהירות המעבדה במערכת האתר היא (לפי הציור) $\vec{V} = V\hat{x}$.

אז מהירות הקרן במערכת המעבדה מתקבלת ע"י החיסור הוקטורי של מהירותה במערכת האתר ומהירות המעבדה ביחס לאתר, כלומר $\vec{v} = \vec{c} - \vec{V}$. אז:

1. קרן 1:
   a. במהלכה ימינה, עם כוון תנועת המעבדה: $v_1^R = \left|c\hat{x} - \vec{V}\hat{x}\right| = c - V$
   b. במהלכה שמאלה, נגד כוון תנועת המעבדה: $v_1^L = \left|-c\hat{x} - \vec{V}\hat{x}\right| = c + V$
2. קרן 2:
   a. אמרנו, שמאחר שהקרן צריכה לפגוע במראה a באותו מקום ממנו יצאה לעבר המראה b, במערכת האתר היא אלכסונית, כלומר עם רכיבים ב-x וב-y.



במקום לכתוב את הרכיבים הללו עם תלות בזוית כלשהי שיש לחשבה, פשוט יותר להשתמש בכך ש-**V** ו-**v**$_2$ ניצבות, ולכן ביחד עם **c** הן יוצרות משולש ישר זוית, שאורך **v**$_2$ בו נתון (לפי משפט פיתגורס) ע"י $v_2 = \left|\vec{c} - \vec{V}\right| = \sqrt{c^2 - V^2}$

כמה זמן עובר עד שכל קרן חוזרת שוב ל-a?

לשם פשטות, נניח ש-ab = ac = D, כלומר, המרחקים שעוברות שתי הקרניים שווים במערכת המעבדה. אז

1. קרן 1:

a. במהלכה ימינה, $T_1^R = \frac{D}{v_1^R} = \frac{D}{c-V}$ (טעות נפוצה היא לחשוב שבזמן זה המראה c נעה ימינה, כך שהקרן עוברת מרחק גדול מ-*D*. אבל שימו לב שזהו הזמן במערכת המעבדה, בה המראה נייחת.)

b. במהלכה שמאלה, $T_1^L = \frac{D}{v_1^L} = \frac{D}{c+V}$

c. אז סך כל הזמן הוא

$$T_1^R + T_1^L = \frac{D}{c+V} + \frac{D}{c-V} = D\frac{2c}{c^2-V^2} = \frac{2D}{c}\frac{1}{1-\frac{V^2}{c^2}} \approx \frac{2D}{c}\left(1+\frac{V^2}{c^2}\right),$$

כאשר בקירוב האחרון השתמשנו בכך ש- V << c.

2. קרן 2:

a. בכל אחד משני מהלכיה,

$$T_2 = \frac{D}{v_2} = \frac{D}{\sqrt{c^2-V^2}} = \frac{D}{c\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}} \approx \frac{D}{c\left(1-\frac{V^2}{2c^2}\right)} \approx \frac{D}{c}\left(1+\frac{V^2}{2c^2}\right)$$

אז ההפרש בין הזמן שלוקח לקרן 1 ולקרן 2 לחזור ל-a הוא

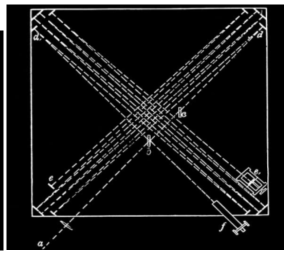
$$\Delta T = T_1^R + T_1^L - 2T_2 \approx \frac{D}{c}\left(\frac{V}{c}\right)^2$$

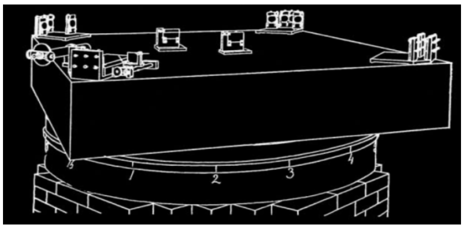
אם כך, לקרן 1 לוקח יותר זמן מאשר לקרן 2 לבצע את הדרך, ולכן יש הפרש פאזה בין שתי

הקרניים בגודל $$\Delta\phi = 2\pi\frac{\Delta T}{T_{wave}} \approx 2\pi\frac{D}{\lambda}\left(\frac{V}{c}\right)^2,$$

כאשר $T_{wave} = \lambda/c$ הוא זמן המחזור של הגל ו-λ הוא אורך הגל.

- הפרש הפאזה שקיבלנו תלוי בהנחה שאורך הדרך שעברה כל קרן זהה במערכת המעבדה. אם משנים את אורך אחת הזרועות של האינטרפרומטר, מקבלים ערך אחר עבור $\Delta\phi$.
- אבל הערך של $\Delta\phi$ אינו חשוב. מה שחשוב הוא בכמה משתנה $\Delta\phi$ כאשר מסובבים את המכשיר ב-$90°$ כך שתפקידי הזרועות משתנים, ואז הפרש הפאזה הופך ל-$-\Delta\phi$.
- גילוי מערכת האתר כרוך בזיהוי שינוי התאורה בעיינית של האינטרפרומטר בין שני המצבים, שינוי שמעיד על בשינוי בהפרש הפאזה.





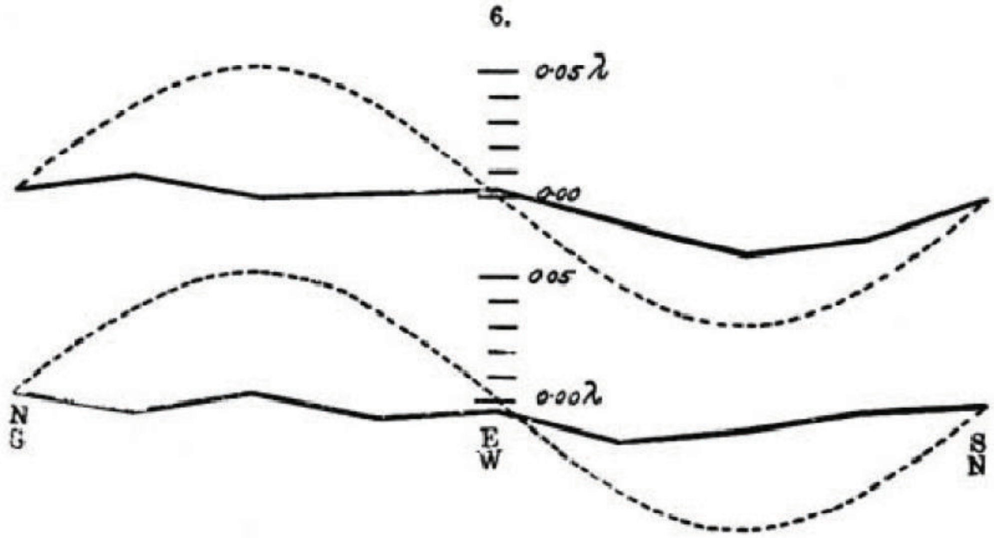
בניסוי (ראו ציור למעלה), אורך הדרך D היה כ-11 מטר (המכשיר היה קטן יותר, אך באמצעות מראות הקרן הלכה הלוך ושוב 8 פעמים), או 2×10^7 פעמים אורך הגל.

עבור $V=30$ km/s, $(V/c)^2 \sim 10^{-8}$.

כלומר, מצפים ל-$\Delta\phi \sim 0.4\,\pi$.

ע"י סיבוב המכשיר סביב צירו (הוא צף על אמבט כספית) שונה כוונו ביחס לכוון רוח האתר, וההסטה של פסי ההתאבכות נמדדה. בסיבוב של $90°$ מצפים להסטה יחסית של $2\Delta\phi$, כלומר, כ-0.4 פסי התאבכות.

הנה ההסטה שנמדדה עבור תשע זויות סיבוב שונות, במדידה בצהרים (למעלה) ובמדידה בערב (למטה). הקו המלא מתאר את הממוצע של שש מדידות בכל זווית סיבוב. הקו השבור מציין <u>שמינית</u> בלבד מההסטה המצופה:



מייקלסון ומורלי העריכו שרגישות הניסוי שלהם היתה $\sigma_{\Delta\phi} = \pi \times 0.06$ או פחות (ניתן לראות מהציור שזוהי הערכה שמרנית), כך שיכלו לשים חסם על מהירות רוח האתר ביחס לכדוה"א:

$V < 30 \text{ km/s} \times (0.06/0.4)^{1/2} = 9 \text{ km/s}$.

ניסויים מאוחרים יותר, חלקם בשיטות מתוחכמות יותר, נתנו גבולות משופרים עד כדי $V < 5 \text{ cm/s}$.

שאלה לבית: מהו השינוי בהפרש הזמן בין הקרניים אם זרועות האינטרפרומטר אינן שוות באורכן?

נסיונות להסביר את תוצאות ניסוי מייקלסון מורלי

התחזית של תוצאות ניסוי MM התבססה על כלל חיבור המהירויות של טרנספורמצית גליליי.

ראינו שהתחזית לא התאימה לתוצאות הניסוי.

אם ניסוי לא מסכים עם תיאוריה, לא רצים לזרוק את התיאוריה על כל הצלחותיה לפח.

מאוד ייתכן שההסבר הדרוש הוא תיקון קטן, שקל יותר לחשוב עליו מאשר על שינוי פרדיגמה מרחיק לכת.

למשל, מדעני ימי הביניים, שהאמינו בתיאוריה של אריסטו בדבר סיבוב גרמי השמים סביב הארץ, פיתחו רעיונות מסובכים להסביר את תנועת הכוכבים הבלתי קבועה, שקופרניקוס הסבירה בפשטות באמצעות התיאוריה ההליוצנטרית.

לכן נעשו נסיונות שונים להסביר את תוצאות מייקלסון-מורלי ללא שינוי תפיסה קיצוני:

- מייקלסון עצמו דגל ברעיון שגוף כבד כמו כדוה"א גורר איתו את האתר שסביבו בתנועתו סביב השמש, כך שבסביבות כדוה"א, $V = 0$.

  שאלת בית: הוכיחו שאם קיימת גרירת אתר בסביבות כדוה"א, אז לא היתה מתקיימת האברציה של אור הכוכבים.

  בנוסף, סיבוב כדור הארץ סביב צירו צריך גם הוא לגרור את האתר. אך טענה זו הופרכה ע"י מייקלסון וגייל (Gale) ב-1925, כאשר מדדו את סיבוב כדוה"א באמצעות השפעתו על אור.

- התורה "הבליסטית" הציעה שמהירות האור אינה קבועה במערכת האתר, אלא במערכת של מקור האור.

  מאחר שבניסוי מייקלסון-מורלי היה מקור אור אחד, לא יהיה הפרש בזמני הגעתו כאשר מסובבים את המכשיר.

  אבל במקרה זה, תנועתיהם של כוכבים בינריים – זוג כוכבים הסובבים זה סביב זה – תראה בלתי סדירה, משום שכאשר הכוכב מתרחק מאיתנו, לאור שלו לוקח יותר זמן להגיע אלינו מאשר כאשר הוא נע בכוון כדוה"א.

  (ראו שאלת בית\כיתה בנושא)

- George Francis **Fitzgerald** and Hendrik Antoon **Lorentz** הציעו שכאשר

גוף נע דרך האתר במהירות V, הוא מתקצר ב- $\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}$ בכוון תנועתו. אז מקבלים מיד

$$T_1^R + T_1^L = \frac{2D}{c}\frac{1}{\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}} = 2T_2$$

והפרש הפאזה של ניסוי מייקלסון-מורלי נעלם.

אך ב-1932 ערכו Kennedy and Thorndike ניסוי עם אינטרפרומטר בעל זרועות עם אורכים שונים. במקרה זה **(למצוא בשיעורי הבית)**, קיים הפרש פאזה בין הזרועות שאינו תלוי בסיבוב הזרועות, אך תלוי במהירות V, ולכן גודלו משתנה כאשר V משתנה.

לכן ניתן להבחין בהבדלים בהפרש הפאזה במהלך היום והשנה.

בניסוי של קנדי ות'ורנדייק ובניסויים דומים מדויקים יותר לא נצפה השינוי בהפרש הפאזה.

בקיצור, כל הפתרונות שהוצעו לא עמדו במבחן הנסיון.