

על הוראת תורת היחסות הפרטית בגישה "ההיסטורית"

מאת: יורם קידש ומאיר מידב,
האוניברסיטה הפתוחה זאנזיברסיטת תל-אביב.

במשך שנים היה מקובל להתחיל את הוראת תורת היחסות הפרטית בתיאור ניסוי מייכלסון-מורלי וכניתוח המסקנות הנובעות ממנו. כשנים האחרונות נשמעו קולות כנגד גישה זו, והוצעו שיטות אלטרנטיביות המבוססות על הצגת ניסויים מודרניים מתחום הפיסיקה של הגרעין והחלקיקים היסודיים. במאמר קודם⁽¹⁾ הכענו את דעתנו כי להקדמה ההסטורית יש חשיבות דידקטית ולכן אין לוותר עליה. מטרת המאמר הנוכחי היא להעלות מספר הערות והצעות לשיפור הגישה ההסטורית המקובלת, כדי לענות על הבקורת שהוסחה כלפיה, מבלי לוותר על היתרונות הטמונים בה. לפני שנפרט את ההצעות הללו, נדון בקצרה בשאלה, האם אנו חוטאים לאמת ההסטורית כאשר אנו מציגים את ניסוי מייכלסון-מורלי כביסוס הניסויי לתורת היחסות הפרטית.

ניסוי מייכלסון-מורלי ותורת היחסות הפרטית

"הצגת ניסוי מייכלסון-מורלי כמוטיבציה הישירה לתורת היחסות הפרטית, מטעה. לניסוי היתה השפעה מועטת, אם בכלל, על עבודתו של איינשטיין, ויתכן שהוא כלל לא היה מודע לו בעת שניסח את תורת היחסות הפרטית". זהו אחד הנימוקים ששוללי הגישה ההסטורית מעלים כנגד גישה זו. השערה זו (המוצגת, למשל, במאמרו של Holton (2,3) מסתמכת על העובדה שניסוי מייכלסון-מורלי לא נזכר במפורש במאמר של איינשטיין משנת 1905 ("על האלקטרודינמיקה של גופים נעים") שהציג את תורת היחסות הפרטית. היא גם נתמכת ככמה התבטאויות של איינשטיין כשנים שלאחר מכן, בקשר להשפעת הניסוי על עבודתו.

אברהם פייס, בכיורגפיה המדעית המונומנטלית שלו על איינשטיין⁽⁴⁾ מציג דעה שונה. "התשובה לשתי השאלות - האם איינשטיין ידע על עבודתו של מייכלסון לפני 1905? האם היא השפיעה עליו כשיצר את תורת היחסות הפרטית? - היא, בלי ספק, כן" כותב פייס (עמוד 116).

איינשטיין עצמו התבטא בעניין זה באופן ברור בהרצאה שנשא בקיוטו, יפן,

ב-1922: "כסטודנט, הכרתי את החוצאה המסתורית של ניסוי מייכלסון, והכנתי באופן אינטואיטיבי שאם אנו מקבלים את תוצאת הניסוי כעובדה, זו עשויה להיות חשיבה לא נכונה, לחשוב על תנועת הארץ ביחס לאתר. למעשה, זה היה הצעד הראשון שתוביל אותי למה שהיום נקרא עקרונות היחסות הפרטית".

בהרצאה שנשא במכון הטכנולוגי של קליפורניה (קלטק) ב-1931, הפנה איינשטיין את דבריו אל מייכלסון הישיש שנבח בקהל ואמר: "אתה הוא שהובלת את הפיסיקאים אל שבילים חדשים ובאמצעות עבודתך הניסויית הנהדרת סללת את הדרך להתפתחות תורת היחסות. אתה חשפת את הסתירה בתיאוריית האתר של האור שהיתה קימת אז, ועוררת את רעיונותיהם של לורנץ ופיצ'ג'רלד שמתוכם התפתחה תורת היחסות הפרטית".

הצהרות דומות נשא איינשטיין גם בכמה מקרים אחרים. היו אמנם הזדמנויות שבהן התבטא איינשטיין בצורה פחות חד-משמעית בעניין השפעת ניסוי מייכלסון-מורלי על עבודתו, אך המסקנה העולה מניתוח כל העדויות היא, שאיינשטיין הכיר את הניסוי הזה וניסויים אחרים על מהירות האור במערכות יחוס שונות (בעיקר ניסוי פיזו). איינשטיין העדיף לא להתיחס לניסויים אלה במפורש במאמרו, אולי משום שברגע שהגיע למסקנה כי אין ממש כמושג האתר, שוב לא ראה צורך לדון בניסוי זה או אחר שנועד למדוד תנועה ביחס לאתר.

יש לציין כי בפתח המאמר משנת 1905 מזכיר איינשטיין שתי סיבות לעבודתו.

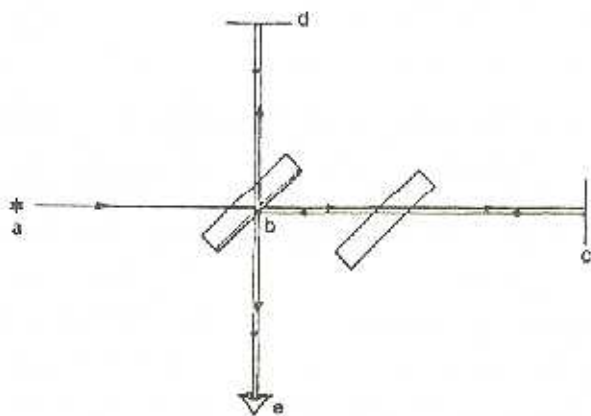
1. חוסר סימטריה בהפעלת האלקטרודינמיקה של מכסורל על גופים נעים.
2. כשלון הנסיונות לגלות תנועה כלשהי של הארץ ביחס לאתר.

כאמור, אף אחד מהניסויים הללו אינו מוזכר במפורש, אך יש לזכור כי איינשטיין לא פעל בחלל הריק. הוא הכיר עבודות של פיסיקאים אחרים שטפלו בבעיית האתר ומהירות האור, ובמיוחד את עבודתו של לורנץ. במאמר גדול של לורנץ משנת 1895, שהיה מוכר לאיינשטיין, מנותחים בהרחבה הן ניסוי מייכלסון-מורלי משנת 1887, והן הניסוי הקודם של מייכלסון משנת 1881. (מעניין לציין כי מאמר אחר של לורנץ, משנת 1904, שבו הוא מפתח את "טרנספורמצית לורנץ", לא היה מוכר לאיינשטיין, ובמאמרו מ-1905 הוא מפתח את נוסחאות הטרנספורמציה באופן עצמאי.)

נציין כי בעיני הפיסיקאים הגדולים של אותה תקופה היה לניסוי מייכלסון-מורלי מעמד מיוחד בין הניסויים שנועדו למדוד תנועה ביחס לאתר, בגלל המוניטין של מייכלסון כנסיין זהיר. אין אנו צריכים על כן לחשוש לאמת ההסטורית, כשאנו משתמשים בניסוי זה כהקדמה לתורת היחסות הפרטית, אם נעשה זאת בזהירות הדרושה.

הצגת ניסוי מייכלסון-מורלי

המערכת הניסויית פשוטה למדי (ראה תרשים 1) אך הכנת פרטי הניסוי דורשת הכרת האופי הגלי של האור ותופעת ההתאבכות. אם התלמידים אינם בקיאים באופטיקה פיסיקלית, די להסביר להם כי אלומת האור היוצאת מ-a מפוצלת במראה החצי-מחזירה b לשתי אלומות, שהאחת נעה במסלול $e+b+c+b$, והשניה במסלול $e+b+d+b$. כתוצאה מכך נוצרת ב-e תבנית התאבכות של פסים כהים ובהירים. (אפשר להסביר את תופעת ההתאבכות בעזרת אנלוגיה: שתי אבנים הנזרקות לבריכה יוצרות שתי סדרות גלים קובצנטריים. במפגש בין הגלים יש נקודות בעלות משרעת כפולה, ויש נקודות שאינן נעות כלל.) שינוי בהפרש בין הדרכים של שתי האלומות, יגרום לשינוי בחבניה ההתאבכות. רגישותו של המכשיר נובעת מכך שבעקבות



תרשים 1: ניסוי מייכלסון-מורלי - תאור סכימטי.

שינוי זעיר השווה לחצי אורך-גל של האור, תבנית ההתאבכות תזוז, כך שפס כהה יתפוס את מקומו של פס בהיר, ולהיפך.

מייכלסון ומורלי התכוננו בתבנית ההתאככות שנוצרה, ואחר-כך סובבו את המכשיר ב- 90° . אם כתחילה היה ac בכיוון תנועת כדור הארץ דרך האתר, לאחר הסיבוב, de יהיה בכיוון תנועה זו. לפי טרנספורמציות גלילי, אם כדור הארץ נע דרך האתר במהירות v , בכיוון האלומה, מהירות האלומה ביחס לכדור הארץ היא $c-v$, והרי זה כאילו שהמסלול שלה בין המראות התארך פי $\frac{c}{c-v}$. בכיוון ההפוך, לעומת זאת, יתקצר מסלולה של האלומה פי $\frac{c}{c+v}$. באשר לאלומה הנעה בניצב לתנועת כדור הארץ, מסלולה של זו יתארך פי $\frac{c}{\sqrt{c^2-v^2}}$ (לפי משפט פתגורס). אם נסמן את המרחק bc ב- ℓ_1 ואת המרחק bd ב- ℓ_2 , נקבל כי ההפרש בין הדרכים של שתי האלומות לפני הסיבוב יהיה:

$$\frac{\ell_1 c}{c-v} + \frac{\ell_1 c}{c+v} - \frac{2\ell_2 c}{\sqrt{c^2-v^2}} = \frac{2\ell_1}{1-v^2/c^2} - \frac{2\ell_2}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$$

ולאחר הסיבוב:

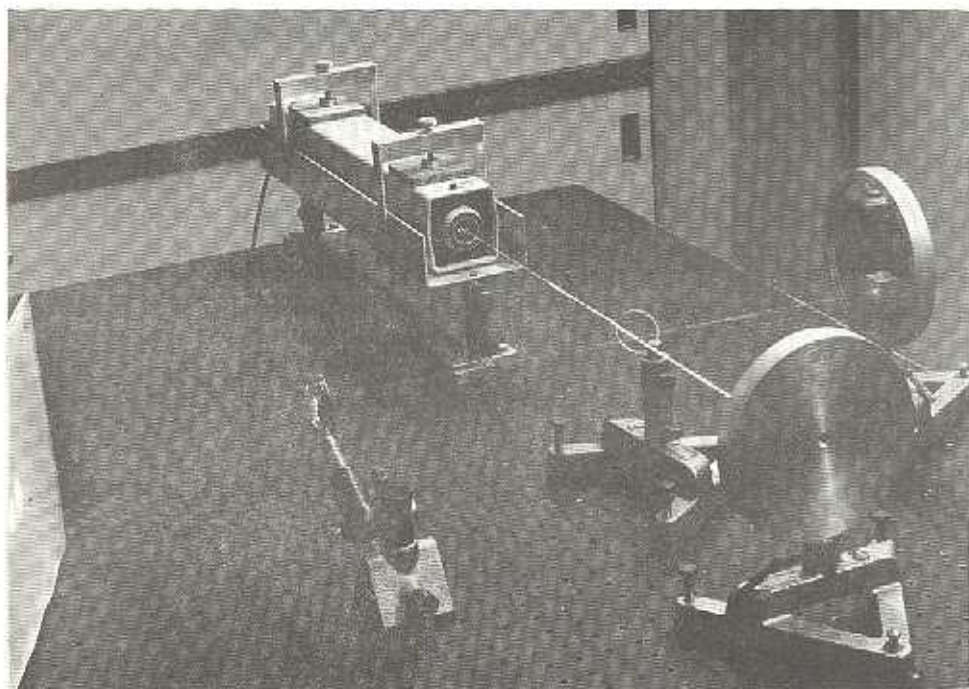
$$\frac{2\ell_1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} - \frac{2\ell_2}{1-v^2/c^2}$$

כדי לחשב בכמה השתנה הפרש הדרכים, נוח לפתח את הביטויים שלמעלה לטור ב- v^2/c^2 , ולהזניח איברים מסדר גורל v^4/c^4 . עבור $\ell_1 = \ell_2 = D$ מקבלים כי השינוי הוא $2D(v^2/c^2)$. לחילופין, אפשר להציב בביטויים שלמעלה מטפרים, ולקבל תשובה מספרית. בניסוי מייכלסון-מורלי המקורי היה $\ell_1 = \ell_2 = 11m$. (לוח הזכוכית בין b ל- c נועד להבטיח ששתי האלומות יעברו דרך זכוכית, כך שמסלוליהן יהיו זהים לחלוטין.) v , מהירות כדור-הארץ בתנועתו סביב השמש, היא 30 ק"מ לשניה בקירוב. בנתונים אלה מקבלים שינוי של 2.2×10^{-7} מ', או 0.4 של אורך גל צהוב ($\lambda = 5.5 \times 10^{-7} m$). נזכור כי שינוי בחצי אורך-גל פירושו שפס כהה תופס את מקומו של פס בהיר ולהיפך. למעשה, המכשיר היה רגיש דיו כדי לקבוע שהתזוזה בפועל הייתה פחות מ-1/40 מהמצופה לפי החישוב!

אפשר להמחיש לתלמידים את הניסוי בעזרת בניית המכשיר (אינטרפרומטר מייכלסון) במעבדה. קל לעשות זאת עם לייזר הליום-נאון כמקור אור, שתי מראות רגילות, מראה חצי-מחזירה ועדשה מפזרת להרחבת האלומה ב- e . את תבנית ההתאככות מקבלים על מסך או על קיר. מערכת כזו, המשמשת במעבדות סטודנטים (שנה ב') בבי"ס לפיסיקה באוניברסיטת תל-אביב, מוצגת בתמונה. (תודתנו נתונה לביה"ס לפיסיקה ולמנהל המעבדה, מר שלמה

שיברון, על הצגת הניסוי). הבעיה העיקרית בניסוי היא להבטיח כי המשטח עליו מוצב המכשיר יהיה יציב ומוגן מזעזועים. למעשה זו היתה גם בעייתו של מייכלסון, עליה התקשה להתגבר בניסוי הראשון ב-1881. לצרכיו, אפשר לפתור את הבעיה על-ידי שימוש בלוח עץ כבד המונח על צמיגים מנופחים או על שקי חול. (בניסוי מייכלסון-מורלי השתמשו לצורך זה בלוח אבן שצף בכספית).

שחזור הניסוי המקורי אינו משימה קלה, בגלל הקושי לסוכב את המערכת ב- 90° מבלי להרוס את תבנית העקיפה, אך אפשר להדגים את פעולת המכשיר ואת רגישותו הרבה, באופן הבא. במסלול של אחת האלומות (למשל בין b ו-c) מציבים כלל זכוכית (או צינור מתכת שכשבי קצותיו חלונות זכוכית)



אינטרפרומטר מייכלסון-מורלי

שבו ברז המאפשר דחיטה אויר פנימה או שאיכתו החוצה. מראים כיצד שינוי קטן בלחץ האויר בכלי גורם לתזוזה נכרת של תבנית העקיפה, וזאת כמוכן בגלל התלות של מהירות האור בלחץ האויר. אם מוסיפים למכשיר מד-לחץ אפשר לתת לתלמידים לחשב מתוצאות הניסוי את מהירות האור באויר (מסתמכים על כך ש- $c=1$ פרופורציוני בקירוב ללחץ האויר, כאשר n הוא גורם השכירה של האויר).

נזכיר לבסוף כי על המורה להיות מוכן לשאלה, מדוע מופיעים ב-e פסי התאבכות ולא הארה אחידה של המשטח (משטח מואר אם האלומות הן כפאזה, ומשטח לא מואר אם הן באנטי-פאזה). התשובה נעוצה כמובן בכך שהקרניים באלומה לא לגמרי מקבילות, ויש הבדלים קטנים באורך המסלול שלהן. בדרך-כלל אין לנו שליטה על כך, ואם נחזור על הניסוי פעמים אחדות, נקבל ככל פעם תבנית התאבכות שונה (פסים בעובי שונה, כיוון אחר וכו').

המסקנות מן הניסוי

זו נקודה הדורשת זהירות. בפסים לא מעטים מופיעה הטענה כי המסקנה מניסוי מייכלסון-מורלי היא, שמהירות האור כריק אינה תלויה בתנועת המקור או הצופה; כלומר - קפיצה מיידית לפוסטולט השני של תורת היחסות הפרטית. ואולם טענה זו בטעות יסודה. יש לזכור כי הניסוי בוצע עם מקור אור ארצי, ובמהלכו מקור האור היה כל הזמן במנוחה ביחס לצופה! הניסוי הוכיח על כך רק זאת - שמהירות האור קבועה כאשר המקור והצופה גם יחד נעים ביחס לאחד, באופן שמיקומם זה ביחס לזה אינו משתנה. ניסוח מדויק של תוצאת הניסוי, בלשון הפיסיקאים של המאה ה-19, הוא שנכשל הנסיון לגלות את תנועת הארץ ביחס לאתר. (זה אמנם הנוסח שבו נוקט איינשטיין במאמר משנת 1905, כאמור, מבלי להתייחס במפורש לניסוי זה או אחר.) בניסוח מודרני יותר נאמר, כי הניסוי הוכיח את האיזוטרופיות של המרחב ביחס למהירות האור, כלומר - את העובדה שמהירות האור אינה תלויה בכיוון האלומה במרחב.

כדי שהתלמידים יבינו את הקשר בין תוצאות הניסוי להנחות היסוד של תורת היחסות הפרטית, יש להקדים ולדון אתם בטרנספורמציות גלילי של גופים חומריים ושל גלים. (דרך אגב, המונח טרנספורמציות גלילי נטבע רק בשנת 1909, על-ידי פיליפ פרנק.) במאה ה-19 הניחו, שאם גוף נע ביחס למערכת צירים א' במהירות \vec{v} , ואם מערכת צירים א' נעה ביחס למערכת צירים ב' במהירות \vec{v} , אזי מהירות הגוף ביחס למערכת צירים ב' תהיה $\vec{v} + \vec{v}$. אותה טרנספורמציה תקפה ביחס לגלים קלסיים, בתנאי שמערכת א' היא המערכת שבה התווך הנושא את הגל נמצא במנוחה. לפיסיקאים של המאה ה-19 היה ידוע שלתנועת מקור הגל אין השפעה על מהירות התפשטות הגל בתווך (אם כי יש לה השפעה על אורך הגל - זהו אפקט דופלר). על כן הניחו שמהירות האור ביחס לאתר היא c, בלי קשר לתנועת מקור האור ביחס לאתר, ושמהירות האור ביחס לצופה היא c-v, כאשר v הוא רכיב מהירות הצופה ביחס לאתר, בכיוון האלומה. התוצאה השלילית של ניסוי

מייכלסון-מורלי היתה בסתירה להנחות הללו, וכשהתפרסמה תוצאה זו עמדו בפני הפיסיקאים מספר אפשרויות לפתור את הסתירה. האפשרות הפשוטה ביותר היתה להניח שהאתר נגזר עם כדור הארץ, או שכמות של האתר "נלכדה" במרתף שבו נערך הניסוי. אפשרות אחרת היתה להניח שמשו קרה למכשיר המדידה בגלל התנועה ביחס לאתר ("התכווצות לורנץ-פיצג'רלד"), ושחזרנית זו מקזזת את השינוי במהירות האור הנובע מהתנועה.

מעניין לציין כי אפשר היה גם לנסות ולהסביר את תוצאת ניסוי מייכלסון-מורלי בעזרת ההנחה שהאור מתנהג ביחס לטרנספורמציות גליליזי כזרם של חלקיקים ולא כגל ("התורה הכליסטית של האור") משום, שכאמור, בניסוי זה המקור והצופה היו במנוחה זה ביחס לזה, וטרנספורמציות גליליזי של גופים חוזים כי במקרה זה המהירות אינה משתנה. למרות ההוכחות המוצקות לאופיו הגלי של האור, היו לפתרון זה תומכים, אלא שתצפיות בכוכבים כפולים (ראה להלן) הזימו אותו. (אם חלמידים מזכירים את מודל הפוטונים בהקשר זה, יש להדגיש שהתנהגות האור כזרם של פוטונים מתגלית באינטראקציה עם חומר ולא בעת התקדמות האור כחלל הריק.)

איינשטיין בחר בפתרון רדיקלי יותר מכל הפתרונות שהוזכרו לעיל, והניח שמהירות האור קבועה חמיד, בלי קשר לתנועת המקור או הצופה, ושהאור המתפשט בריק אינו נע בתווך כלשהו. ההנחה הזו מסבירה כמובן את תוצאת ניסוי מייכלסון-מורלי, אך כאמור אינה נובעת ממנה ישירות. למעשה, מסקנה כה מרחיקת לכת לא היתה יכולה לנבוע מניסוי זה בלבד. כדי להגיע אליה היה צורך בהכרת ניסויים נוספים כגון ניסוי פיזו, במודעות לבעיית טרנספורמציות גליליזי של משואות מכסול, וכמובן - בגאונות של אדם כאיינשטיין. יש לציין עוד כי ניסויים מודרניים הבודקים באופן ישיר את ההנחה שמהירות האור לא חלוייה בתנועת המקור והצופה, מאשרים הנחה זו ביחס לכל הספקטרום האלקטרומגנטי.

ניסויים נוספים

ניסוי מייכלסון-מורלי הוא איפוא רק אחד ממכלול הניסויים, אשר המסקנה הכוללת מהם היא שמהירות התפשטות הגלים האלקטרומגנטיים בריק היא קבוע של הטבע, ואין היא תלוייה לא בתנועה של הצופה או המקור, לא בתדירות הגל, לא בכיוון ההתפשטות, לא בזמן הניסוי, ולא בשום גורם אחר. הקדמה הסטורית מלאה יותר לנושא של קביעות מהירות האור, יכולה לדון בנושאים הבאים:

א. האברציה של אור הכוכבים. תופעה זו, שנתגלתה והוסברה על-ידי ג'יימס בראדלי (Bradley) מכריטניה בשנת 1725, הוותה הוכחה תצפיתית ראשונה לכך שהשמש (או, ליתר דיוק, מערכת כוכבי השבת) עדיפה על כדור-הארץ כמערכת אינרציאלית (או, לפי השקפת הימים ההם, כמערכת שביחס אליה נמצא האתר במנוחה). חשיבותה להתפתחות תורת היחסות נעוצה בכך שהיא הוסברה כנובעת מחנועת הארץ ביחס לאתר (הנמצא במנוחה ביחס לכוכבי השבת) בעוד שניסוי מיכלסון-מורלי הראה, כ-160 שנה מאוחר יותר, שתנועה זו אינה קיימת. הסתירה בין מסקנות שני הניסויים הצביעה בבירור על ליקוי במודל האתר, ועל הצורך כתורה חדשה.

ב. ניסוי פיזו (Fizeau). בשנת 1851 מדד הפיסיקאי הצרפתי פיזו את מהירות האור במים שזרמו (בכיוון האלומה) במהירות v , ומצא כי היא בקירוב:

$$c' = \frac{c}{n} + v\left(1 - \frac{1}{n^2}\right)$$

כאשר n הוא גורם השבירה של האור במים. מכיון ש- n שווה ליחס בין מהירות האור בריק ובמים, ציפו לקבל $c' = c/n$ אילו תנועת הנוזל לא היתה משפיעה כלל על התפשטות האור, או $c' = c/n + v$ אילו מהירות הזרימה היתה מתווספת למהירות האור (לפי טרנספורמציות גלילי). תוצאת הניסוי הוסברה כך: האור נמשך קדימה על-ידי זרם המים, אך תנועתו זו מעוכבת במקצת על-ידי האתר שאינו נע ביחד עם המים, לכן מתקבל ערך ביניים בין c/n לבין $c/n + v$. מעניין לציין כי פרנל (Fresnel), מורו של פיזו, חזה תוצאה זו בדיוק משיקולים עיוניים (יותר משלושים שנה לפני ביצוע הניסוי). חשיבותו ההסטורית של הניסוי נובעת מכך שהוא התישב עם ההנחה שהאתר נמצא במנוחה בתוך המים הזורמים ואינו נסחף אהם. זה הקשה על הנסיונות להסביר את תוצאת ניסוי מיכלסון-מורלי כנובעת מגרירת האתר עם כדור-הארץ. בתורת היחסות הפרטית נובעת התוצאה של ניסוי פיזו מחוק חיבור המהירויות (לאחר פיתוח לטור והזנחת איברים מסדר גבוה).

ג. ניסוי מיכלסון-מורלי, שהראה כי מהירות אלומת אור אינה משתנה כאשר משנים את כיוונה ביחס ל"רוח האתר".

ד. ניסויים נוספים במתכונת ניסוי מייכלסון-מורלי. מייכלסון עצמו חזר על הניסוי פעמים אחדות (בפעם האחרונה ב-1929). אחרים ביצעו ניסויים דומים בוואריאציות שונות, מתחת האדמה ובגובה רב, תוך שימוש באורכי-גל שונים ובמקורות אור מגוונים, מאוד כוכבים ועד לאור מונוכרומטי של לייזר. נזכיר למשל את קנדי ותורנדייק⁽⁵⁾ שבשנת 1932 בצעו את ניסוי מייכלסון עם אינטרפרומטר שכו $\lambda = 2.1 \mu$. המערכת שלהם גם הצטיינה ביציבות מכנית יוצאת מן הכלל, ואיפשרה מדידות שבהן חלפו מספר חודשים בין שני המצבים של האינטרפרומטר (על משמעות שני השינויים הללו, ראה⁽⁶⁾ עמ' 21 ו-27).

ה. כוכבים כפולים. בשנת 1913 הצביע האסטרופיסיקאי ההולנדי דה-סיטר (Willem de Sitter) על העובדה כי תצפיות בכוכבים כפולים (בינריים) מוכיחות שמהירות האור אינה מושפעת מתנועת המקור. כוכבים אלה חגים סביב מרכז מסה משותף. הן מדידות של מחזור הסיבוב והן של אפקט דופלר מראות שמהירות האור המגיע אלינו מן הכוכב, אינה משתנה כאשר הכוכב נע לקראתנו או מאתנו והלאה. תופעה זו היא הוכחה ניצחת נגד התורה הבליסטית של האור.

ו. ניסויים כמאיצי חלקיקים. ניסויים כמאיצי חלקיקים מודרניים גילו, כי כאשר חלקיק הנע במהירות קרובה למהירות האור פולט קרינה אלקטרומגנטית, מהירות הקרינה הזו היא c בין אם היא נפלטת בכיוון התנועה של החלקיק הפולט או בכיוון ההפוך. נזכיר למשל את הניסויים בהתפרקות של חלקיק π^0 לשני פוטונים^(8,7). סרטון מצוייר שהופק בארץ על ניסויים אלה, מתואר על-ידי מרטין קגן⁽⁹⁾.

נדגיש כי אין אנו סבורים שהקדמה סטנדרטית לתורת היחסות הפרטית בבי"ס התיכון או באוניברסיטה, חייבת לדון בכל הניסויים שנזכרו לעיל (שהם עצמם רק חלק מהמכלול העצום של ניסויים הבודקים את קביעות מהירות האור). סעיפים ג, ה, ו, למשל, מטפיקים לצורך זה בהחלט. עם זאת, רצוי שהמורה יהיה בקי באספקטים רחבים יותר של הנושא, הן כדי לענות על שאלות תלמידים, והן כדי להפנות תלמידים המתעניינים בכך למקורות נוספים לצורך לימוד עצמי.

נציין מספר מקורות העוסקים בנושא. הספר של French⁽¹⁰⁾ על יחסות פרטית מכיל תאור מצויין של אברציית אור הכוכבים, ניסוי פיזו וניסוי מייכלסון-מורלי. בספר "מכניקה" של Berkeley⁽¹¹⁾ יש דיון טכני טוב בניסוי

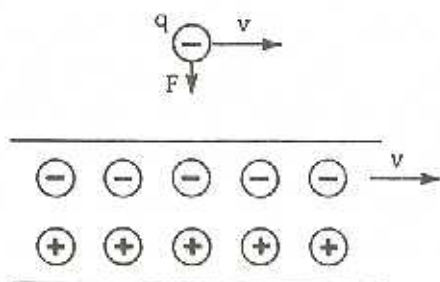
מייכלסון-מורלי ותאוד מקיף של תופעת האברציה. תרגום עברי של הספר, מותאם ללימוד עצמי, יצא לאור בהוצאת האוניברסיטה הפתוחה⁽¹²⁾. בספרו של שדמי⁽¹³⁾ מופיע ניתוח יסודי של ניסוי מייכלסון, דיון בתורה הכליסטית ובסתירות, ותאוד קצר של ניסוי פיזו (עמ' 91). בספרו של פליס⁽⁴⁾ יש תאוד מצויין של הרקע לניסוי מייכלסון-מורלי (עמ' 111 והלאה) ושל ניסוי פיזו ומשמעותו (עמ' 118). הספר גם מכיל מידע רב ומעניין על צדדים אחרים של תורת היחסות. במאמר של א. כשר⁽¹⁴⁾ יש הצעה מענינת להקדמה הסטורית ליחסות פרטית בצורה דיון בארבעה ניסויים (של בראדלי, פיזו, מייכלסון ודה-סיטר). בקורס של האוניברסיטה הפתוחה באנגליה⁽⁶⁾ מוקדשת יחידה להקדמה ליחסות פרטית, ובה דיון מקיף בניסוי מייכלסון-מורלי ובניסויים מאחרים באותה מחלונת וכן בתצפיות בכוכבים כפולים. עוד נזכיר מאמר של Shankland⁽¹⁵⁾ המחאר בפירוט רב את ניסוי מייכלסון-מורלי ואת הרקע לו ואת המאמרים של Holton^(3,2). הדנים כשאלה עד כמה השפיע הניסוי על איינשטיין.

תופעות אלקטרומגנטיות במערכות יחס שונות

הזכרנו כי איינשטיין מציין שתי מוטיבציות לפיתוח תורת היחסות הפרטית. שתיהן קשורות בתופעות שהטרידו את הפיזיקאים במאה ה-19 ובראשית המאה ה-20. עד כה דנו רק באחת מהן - מהירות האור ותנועה ביחס לאתר. הדיון בתופעה השנייה - הקושי הקשור בשימוש במשוואות התורה האלקטרומגנטית של מקסוול כאשר עוזרים ממערכת יחס אחת לשנייה - נחשב בדרך כלל למסובך מדי ונוטים לפטוח עליו בתוכניות הלימודים. לדעתנו אין לכך הצדקה. יש מספר דוגמאות שבעזרתן אפשר להדגים תופעה זו בצורה ברורה ופשוטה לתלמידים שלמדו את יסודות החשמל והמגנטיות. להלן נתאר שתי דוגמאות כאלה. (גישה שונה, המשלבת את הוראת היחסות הפרטית בהוראת האלקטרו-מגנטיות מתאר ניסוי במאמר בגליונות⁽¹⁶⁾).

חרישם 2 מתאר חלקיק, q, טעון כמטען שלילי (למשל אלקטרון) הנע במקביל לתיל הנושא זרם חשמלי. נוכל לתאר לעצמנו מודל מפושט שבו הזרם בתיל נגרם על-ידי תנועת של אלקטרונים המצויים כמרחקים שוים זה מזה, והנעים כולם במהירות v. נניח שגם q נע באותה מהירות באותו כיוון. בתיל יש גם יונים חיוביים שלכל אחד מהם מטען +1 (ביחידות מטען האלקטרון) בצפיפות זהה לזו של האלקטרונים. המטען החשמלי הכולל של התיל הוא על כן אפס, והכוח האלקטרוסטטי שכינו לבין החלקיק הטעון q הוא גם כן אפס.

ואולם לפי חוקי תורת החשמל, הזרם יוצר סביב התיל שדה מגנטי, ושדה מגנטי זה מפעיל על q כוח F בכיוון התיל, כמתואר בתרשים.



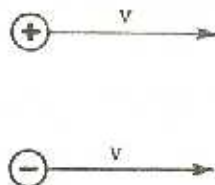
תרשים 2

זהו התאור מנקודת המבט של מערכת המעבדה שנסמנה S . נשאל עתה: מהו הכוח הפועל על q , מנקודת המבט של מערכת יחוס S' , הנעה ימינה במהירות v ביחס למערכת המעבדה? במערכת S' המטען q נמצא במנוחה, וכן האלקטרונים שבתיל, בעוד שהיונים החיוביים נעים עתה שמאלה במהירות $-v$. לפי טרנספורמציות גליליי אלו הם ההבדלים היחידים בין שתי מערכות הייחוס. ואולם, אם הצופה ב- S' ישתמש במשוואות האלקטרומגנטיות בצורתן המקורית, הוא ימצא כי על החלקיק q לא פועל שום כוח משום שבמערכת S' , q נמצא במנוחה! צופת ב- S וצופה ב- S' יראו לכאורה שתי תופעות שונות - הראשון יראה את המטען q הולך ומתקרב לתיל, בעוד שהשני יראה אותו במנוחה, וזה מצב בלתי אפשרי. דוגמא זו מראה בעליל שהפעלת טרנספורמציות גליליי על מערכות שבהן פועלים כוחות חשמליים ומגנטיים, עשויה להניב מצבים בלתי אפשריים.

לאחר שהתלמידים יתרגלו את טרנספורמציות לורנץ, אפשר לחזור לדוגמא זו ולהראות כיצד נפתרת הבעיה בעזרת תופעת התכווצות האורך היחסותית.

במערכת S' גדל המרחק בין אלקטרונים עוקבים בתיל, וקטן המרחק בין יונים עוקבים (לעומת מערכת S) באופן שנוצר בתיל עודף של מטען חיובי. לכן, במערכת S' פועל על q כוח אלקטרוסטטי בכיוון התיל, במקום הכוח המגנטי שפועל עליו במערכת S . (המטען הכולל נשמר, משום שהמעגל החשמלי חייב לכלול תיל נוסף הנושא זרם בכיוון ההפוך, ובתיל זה יש, לפי צופה ב- S' , עודף של מטען שלילי. הצופים ב- S וב- S' יספרו מספר שונה של אלקטרונים בכל אחד מהתילים, בגלל השוני בהשקפותיהם על הסימולציה של המאורעות. הם לא יוכלו להסכים על הרגע שבו אלקטרון עובר מתיל אחד

לשני). חישוב מפורט של דוגמא זו יכול הקורא המעוניין למצוא כרפרנס (6) (יחידות 5 ו-6). ואולם די לדעתנו בתיאור האיכותי הניתן כאן כדי להאיר את הסתירה שבין משוואות מכסוול וטרנספורמציות גליליי.



תרשים 3

במקום בדוגמא זו, אפשר לדון בדוגמא חילופית של שני מטענים (שני סימן, לדוגמא) הנעים באותה מהירות בכיוונים מקבילים (ראה תרשים 3). לפי צופה במערכת המעבדה, פועל ביניהם כוח אלקטרוסטטי (מושך) וכוח מגנטי (דוחה). לגבי צופה במערכת S' הנעה ביחד עם המטענים, שני המטענים נמצאים במנוחה ופועל ביניהם רק כוח אלקטרוסטטי, הזהה בגודלו לכוח האלקטרוסטטי שרואה הצופה הראשון. כלומר, לפי הצופה ב- S' יפעל בין המטענים כוח מושך יותר גדול. הפתרון לסתירה הוא, שבגלל תופעת התארכות הזמן (או "האטת השעונים") הכוח המושך במערכת S , והכוח המושך הגדול יותר במערכת S' , יגרמו לאותה תנועה נצפית של המטענים.

סיכום

שני סוגי התופעות ששמשו מוטיבציה לפיתוח תורת היחסות הפרטית, מתאימות לדעתנו כהקדמה להוראת תורה זו גם בימינו. בשני סוגי התופעות מצביעים על סתירה המופיעה כשמפעילים את טרנספורמציות גליליי על תופעות אלקטרו-מגנטיות מסוימות. התופעה האחת קשורה בהתפשטות האור בריק, והשניה קשורה בכוחות הפועלים בין מטענים חשמליים. אנו סבורים כי דיון בתופעות הללו מהווה רקע טוב ומועיל מבחינה דידקטית ולכן אין לוותר עליו. בתופעות ניסויות אחרות, כגון גידול המסה של אלקטרונים עם גידול המהירות והתארכות זמן החיים של פיונים בקרינה קוסמית, אנו מציעים לדון מאוחר יותר, אחרי פיתוח הנוסחאות המתאימות.

1. מ. מידב, י. קירש וח. מוסט, "גישות להוראת תורת היחסות הפרטית" גליונות, כרך 11, מס' 1, תשמ"ד.
2. G. Holton, "On the Origins of the Special Theory of Relativity" Am.J.Phys. 28, 627 (1960).
3. G. Holton, "Einstein and the "Crucial" Experiment", Am.J.Phys. 37, 968 (1969).
4. A. Pais, "Subtle is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein". Oxford University Press (1982).
5. R.J. Kennedy and E.M. Thorndike, Phys.Rev., 42, 400 (1932).
6. "Understanding Space and Time, Unit 5", The Open University, Milton Keynes, England (1979).
7. T.A. Fillipas and J.C. Fox, "Velocity of Gamma Rays from a Moving Source", Phys.Rev., 135B, 1071 (1969).
8. T. Alvager et al., Arkiv für Physik, 31, 145 (1965).
9. מרטין כגן, "תכנית חדשה להוראת תורת היחסות הפרטית", גליונות, כרך 5, מס' 2, תשל"ו.
10. A.P. French, "Special Relativity", Nelson, N.Y. (1968).
11. "Mechanics", Berkeley Physics Course, Vol. 1, 2nd ed., McGraw Hill (1973).
12. "מכניקה" הוצאת האוניברסיטה הפתוחה, ת"א (1979).
13. יהודה שדמי, "תורת היחסות הפרטית", המרכז הישראלי להוראת המדעים, ירושלים, תשל"ו.
14. א. כשר, "תורת היחסות כדוגמה לדרכה של הפיסיקה", מתוריקה, כרך ז, (פיסיקה), ארנ' ת"א, ביה"ס לחינוך, תשל"ד.
15. R.S. Shankland, "Michelson-Morely Experiment", Am.J.Phys. 32, 16 (1964).
16. נח ניסני, "הוראת האלקטרומגנטיות בביה"ס התיכון כמבוא לתורת היחסות", גליונות, כרך 1, מס' 2, תשל"ב.