

עוד על "כא"מ מושרה הנוצר במוט הנמצא בשדות מגנטיים שהשקול שלהם אפס" – הסבר לתוצאות מפתיעות של ניסוי

צ'בי גלר ועדי רוזן, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע

ב. הכוח \vec{F} שדה אלקטרומגנטי מפעיל על מטען q הוא "כוח לורנץ":

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

ג. הנוסחה המקשרת בין שדות חשמליים הנמדדים על ידי צופים הנמצאים במערכות אינרציאליות הנעות במהירות

\vec{v} האחת ביחס לשנייה, היא:

$$\vec{E}' = \vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}$$

ד. הנוסחה המקשרת בין שדות מגנטיים הנמדדים על ידי צופים הנמצאים במערכות אינרציאליות הנעות במהירות

\vec{v} האחת ביחס לשנייה, היא:

$$\vec{B}' = \vec{B} - \frac{\vec{v} \times \vec{E}}{c^2}$$

ה. כאשר המהירות היחסית v בין שתי מערכות הייחוס האינרציאליות קטנה מאוד בהשוואה למהירות האור (כלומר כאשר $v \ll c$), אפשר לרשום את הקשר בין השדות המגנטיים באופן הבא:

$$\vec{B}' \approx \vec{B}$$

והכוחות הנמדדים על ידי צופים אלה (כוחות הכוללים כמובן גם כוחות אלקטרומגנטיים, כלומר את "כוחות לורנץ") הם אינווריאנטיים ביחס לצופה ומתקיים:

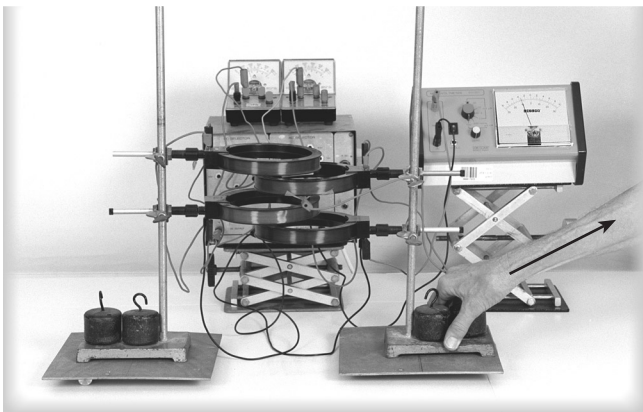
$$\vec{F}' \approx \vec{F}$$

בחוברת הקודמת של "תהודה" פירסמנו מאמר המתאר ניסוי לא שגרתי שתוצאותיו מפתיעות⁽¹⁾ וביקשנו מקוראי המאמר להסביר תוצאות אלה ולחוות דעה על חשיבות הניסוי ועל האפשרויות לשלב אותו במסגרת לימודי הפיזיקה בבית הספר התיכון. לצערנו, עד מועד כתיבת שורות אלה לא קיבלנו תגובות כלשהן מקוראי "תהודה", ואיננו יודעים אם משמעות הדבר שאף אחד מהם לא קרא את מאמרנו, או שהשאלות ששאלנו והבקשות שהעלינו היו קשות או בלתי מענינות עד כדי כך שלא נמצא להן משיב.

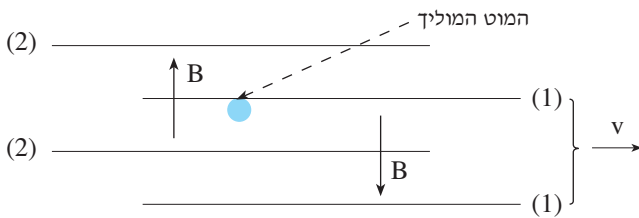
לשמחתנו, לעומת זאת, התבשרנו כי בחוברת זו מתפרסם מאמר מקיף של יגאל גלילי ודב קפלן⁽²⁾ הדן בהרחבה בשדות חשמליים ומגנטיים ובכוחות שהם מפעילים על מטענים חשמליים - כפי שגדלים אלה נקבעים על ידי צופים הנמצאים במערכות ייחוס אינרציאליות שונות. מסתבר שעל סמך מאמר זה אפשר למצוא ללא קושי גם את התשובות לשאלות שהעלינו במאמרנו; על כן נסתמך עליו בהסברים לתוצאות של ניסוינו, שאותם נביא להלן.

הטיעונים הפיזיקליים העיקריים המובאים במאמר של גלילי וקפלן הם:

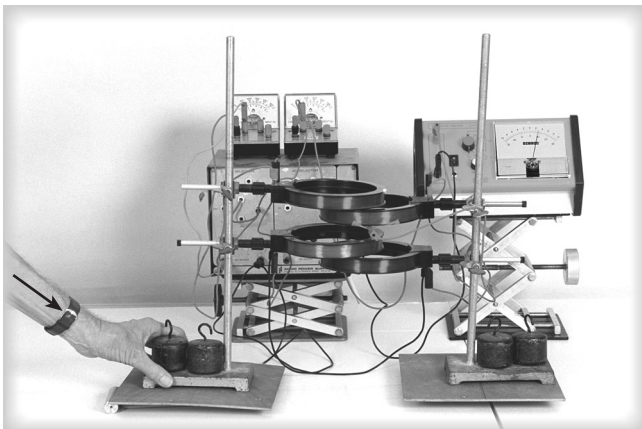
א. השדות החשמלי והמגנטי אינם קיימים כישויות נפרדות, אלא הם מהווים פנים שונים של ישות פיזיקלית אחת - "שדה אלקטרומגנטי".



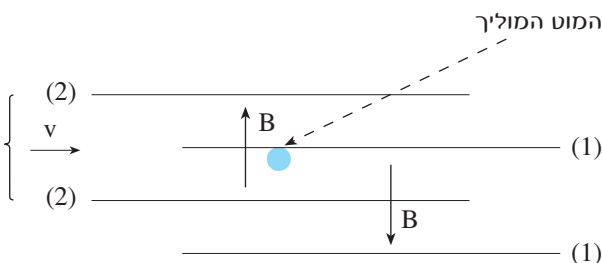
תרשים 9: הזזת זוג הסלילים הימני (עם המוט המודבק אליו) ימינה - המחוג סוטה שמאלה.



תרשים 9א: תרשים סכמטי של חלק מהמערכת, מבט מלפנים



תרשים 10: הזזת זוג הסלילים השמאלי ימינה (המוט מודבק לזוג הסלילים הימני הנמצא במנוחה), המחוג סוטה ימינה.



תרשים 10א: תרשים סכמטי של חלק מהמערכת, מבט מלפנים

תהודה

נחזור עתה בקצרה לתאור הניסויים שביצענו וננסה להסביר את תוצאותיהם מנקודות הראות של שני צופים המצויים במערכות ייחוס אינרציאליות שונות, כאשר אנו מסתמכים על הטיעונים המובאים במאמרם של גלילי וקפלן. לשם הבהרת ההסבר, נביא שוב את התצלומים (תרשימים 9 ו-10) ממאמרנו ומתחתם תאור סכמטי של המערכות במבט מלפנים. זוגות הסלילים צוינו במספרים 1 ו-2 בהתאמה. נניח שצופה אחד נמצא במנוחה במערכת המעבדה, בעוד שהצופה השני צמוד למוט המוליך ונע יחד איתו בתנועה קצובה במהירות v , ונתייחס לאותם שלבים בניסוינו שתוצאותיהם הפתיעו. בשלב השלישי של הניסוי הצמדנו את המוט המוליך לסליל של אחד משני זוגות הסלילים והנענו זוג סלילים זה כך שהמוט נע יחד איתו.

אף על פי שתנועת המוט המוליך התקיימה באזור שבו השדה המגנטי הכולל היה שווה לאפס, נוכחנו לדעת שבמוט נוצר כא"מ מושרה. (תרשימים 9 ו-9א).

ברור שהן מנקודת הראות של הצופה הנח במעבדה, והן מנקודת הראות של הצופה הצמוד למוט המוליך והנע יחד איתו - כוחות מגנטיים אינם פועלים על המטענים החופשיים במוט (כי מטענים אלה נמצאים בשדה מגנטי השווה לאפס). מתחייב אפוא שהכא"מ המושרה במוט נובע מפעולתו של שדה חשמלי על המטענים החופשיים אשר בו, ושדה חשמלי זה נוצר עקב תנועת מקור השדה המגנטי (סלילי הלמהולץ) יחסית לצופה. לגבי הצופה הנח במעבדה, השדה החשמלי נוצר עקב תנועת זוג סלילי הלמהולץ (1) שהמוט המוליך צמוד אל אחד מהם (לגבי צופה זה הזוג האחר (2) של סלילי הלמהולץ נמצא במנוחה), ולגבי הצופה השני, הצמוד למוט המוליך, הזוג השני של סלילי הלמהולץ (2) נמצא בתנועה ומהווה את מקור השדה החשמלי, בעוד שהזוג הראשון של סלילי הלמהולץ (1) נשאר במנוחה.

באופן דומה אפשר להסביר גם את תוצאות השלב הרביעי של ניסוינו (תרשים 10), שבו הנענו את זוג סלילי הלמהולץ (2) אשר המוט המוליך לא היה קשור אליו. אנו עדיין מצפים לחוות דעת של המורים לגבי חשיבות הניסוי ומיקומו האפשרי בתוכנית הלימודים.

מראי מקום

1. גלר, צ., רוזן, ע., כא"מ מושרה הנוצר במוט הנמצא בשדות מגנטיים שהשקול שלהם אפס. תהודה (1) 21, תש"ס.
2. גלילי, ג., קפלן, ד., מהי המשמעות של המהירות בכוח המגנטי. תהודה (2) 21. תשס"א.