

מה חדש במעבדה

מדידת התנגדות חשמלית בעזרת מצפן

מרק גלר - ישיבת בני עקיבא, נתניה, אסתי מן - תיכון היוכל, הרצליה, אלכס רובשטיין - ישיבת בני עקיבא, נתניה

תקציר: במאמר זה מתוארת שיטה למדידת ההתנגדות החשמלית של נגד בעזרת מצפן. המערכת כוללת סליל בעל כ-3000 ליפופים, נגד בעל התנגדות קבועה של כמה קילואום ($k\Omega$), מצפן ומקור מתח. בעזרת חוקי קירכהוף ניתן לפתח נוסחה למדידת התנגדות בלתי ידועה בעזרת מדידת זווית הסטייה של מצפן, המכיל כמד זרם.

רקע תיאורטי

מטרת הניסוי היא מדידת התנגדות בלתי ידועה בעזרת מצפן. נקדים אתהרגע התיאורטי. עוד בכיתה ט', במסגרת לימודי החשמל, התלמידים לומדים שתייל נושא זרם יוצר סביבו שדה מגנטי, שאותו ניתן לגלות בעזרת מצפן. המצפן משמש בשלב זה של הלימודים גלאי זרם איכותי. מאוחר יותר, במסגרת לימודי החשמל בכיתה י"ב, מבצע התלמיד את הניסוי "גלונומטר טנגנטי", בו משתמש התלמיד במצפן, ובונה קשר בין זווית הסטייה של מחט המצפן לבין עוצמת הזרם במעגל.

עבור זוויות קטנות הקשר בין הזרם לזווית הסטייה של המצפן הוא ליניארי. לכן, יש צורך לבנות ניסוי מקדים בו נמדוד את זווית הסטייה כתלות בזרם. זהו בעצם ניסוי לכיול המצפן וכמובן שיש להשתמש במצפן כמד זרם רק בתחום בו הגרף של זווית הסטייה כתלות בזרם הוא ליניארי.

שלב א' - כיול המצפן

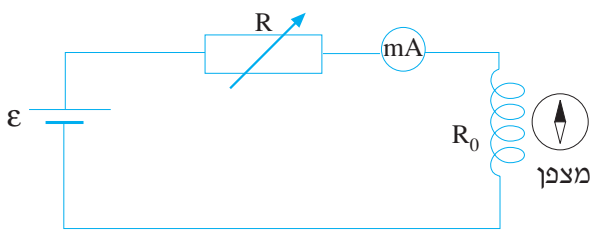
כדי לכייל את המצפן יש לבנות את המעגל הבא (תרשים 1):

R - נגד משתנה

R_0 - התנגדות הסליל

ϵ - מקור מתח

A - אמפרמטר



תרשים 1: המעגל לכיול המצפן

אין להזיז את מיקומו של המצפן במשך כל הניסוי.

משנים את התנגדות הנגד המשתנה R, וכתוצאה מכך משתנה הזרם במעגל ובסליל.

מחט המצפן יוצרת בכל פעם זווית סטייה α אחרת עם כיוונה המקורי.

ניתן למצוא קשר בין זווית הסטייה α והזרם במעגל. אם הקשר הזה הוא ליניארי אז הוא מקיים:

$$\alpha = k \cdot I$$

המקדם k הוא שיפוע הגרף, בתחום הליניארי, המתאר את זווית הסטייה α כתלות בזרם I.

שלב ב' - מדידת התנגדות בלתי ידועה

נפתח את הנוסחה בעזרתה ניתן לחשב את התנגדות בלתי ידועה. מתוך תוצאות המדידה המעגל בו ביצענו את המדידה

מתואר בתרשים 2:

R_0 - התנגדות הסליל

R_x - התנגדות לא ידועה

R - התנגדות קבועה

ϵ - מקור מתח

המערכת מוצבת באופן שהמצפן מונח **בפתח הסליל**, וכיוונו צפון - דרום מאונך לציר הסליל. מוודאים שמחט המצפן מאונכת לציר הסליל באופן הבא: בודקים את סטיית מחט המצפן בשני הכיוונים, כאשר הופכים את כיוון הזרם דרך הסליל. משנים את אופן הצבת המערכת עד אשר מתקבלת אותה סטיית מחט משני צדי האפס. (כמו בניסוי גלונומטר טנגנטי).

כל פיתוח הנוסחאות נעשה על סמך ההנחה שהזרם I_1 הוא קבוע. נבדוק באילו תנאים הזרם I_1 נשאר קבוע. נחשב את ההתנגדות השקולה של המעגל ללא ההתנגדות R_x .

$$R_{T,1} = R + R_0$$

במקרה השני, בו מחברים את ההתנגדות הלא ידועה R_x ההתנגדות השקולה היא:

$$R_{T,2} = R + (R_0 \cdot R_x) / (R_0 + R_x)$$

מתוך המשוואה האחרונה נובע שההתנגדות הקבועה R צריכה להיות גדולה מאוד ביחס להתנגדות הסליל כדי שהשינוי בזרם I_1 יהיה קטן ביותר, כלומר:

$$R \gg R_0$$

היחס בין R ל- R_0 צריך להיות לפחות 10. ההתנגדות R_x חייבת להיות לפחות 20Ω . ככל ש- R_x יקטן, כן יגדל הזרם דרך R_x ויפחת הזרם דרך הסליל. בשל כך, השינויים בזווית הסטייה של מחט המצפן יהיו קטנים יותר ושגיאת המדידה של הנגד R_x תגדל.

נמחיש זאת בדוגמה הבאה.

נתון:

$$\begin{aligned} R_0 &= 125\Omega \\ R &= 1500\Omega \\ R_x &= 220\Omega \\ \varepsilon &= 2.8V \end{aligned}$$

הזרם I_1 במעגל לפני חיבור הנגד הלא ידוע R_x יהיה:

$$I_1 = \varepsilon / (R_0 + R) = 2.8V / 1625\Omega = 1.73 \cdot 10^{-3} A$$

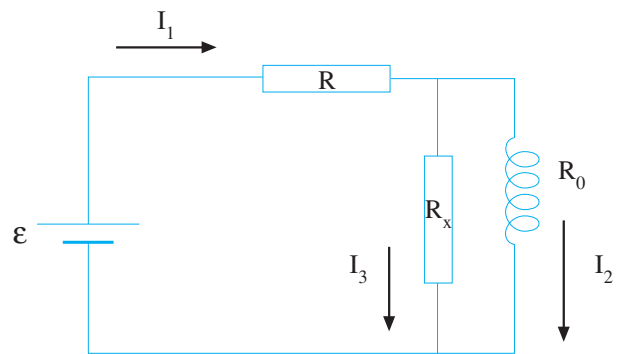
אם נחבר למעגל את הנגד R_x ההתנגדות השקולה הפעם תהיה:

$$R_T = R + R_x \cdot R_0 / (R_x + R_0) = 1500 + 220 \cdot 125 / 345 = 1580\Omega$$

והזרם I_1 הפעם יהיה:

$$I_1 = 2.8V / 1580\Omega = 1.77 \cdot 10^{-3} A$$

ההבדל בין שני הזרמים הוא 3% כי $R \gg R_0$, $(1500\Omega \gg 125\Omega)$.



תרשים 2: המעגל למציאת התנגדות לא ידועה

על פי חוקי קירכהוף (חוק הצומת) ניתן לרשום:

$$(1) \quad I_1 = I_2 + I_3$$

$$(2) \quad I_3 \cdot R_x = I_2 \cdot R_0$$

אם נבנה מעגל ללא R_x , נשים מצפן ליד הסליל ונמדוד את סטיית מחט המצפן, נוכל לכתוב:

$$(3) \quad I_1 = k \cdot \alpha_1$$

ואם נבנה מעגל עם R_x הזרם דרך הסליל ישתנה ל- I_2 ונוכל לכתוב:

$$(4) \quad I_2 = k \cdot \alpha_2$$

אם נדאג שבשני המעגלים, בלי התנגדות R_x ועם התנגדות R_x , הזרם I_1 ישמור על ערך קבוע, נקבל:

$$(5) \quad I_1 = I_2 + I_2 \cdot R_0 / R_x$$

אם נציב במקום I_1 ו- I_2 את הביטויים מתוך (3) ו- (4) נקבל את הביטוי הבא:

$$(6) \quad \alpha_1 = \alpha_2 (1 + R_0 / R_x)$$

ומכאן בקלות ניתן למצוא את R_x .

$$(7) \quad R_x = (\alpha_2 \cdot R_0) / (\alpha_1 - \alpha_2)$$

מכאן שעל סמך המדידה של α_1 ו- α_2 וידיעת R_0 אפשר לחשב את R_x מקבלים:

$$R_x = \frac{\alpha_2 R_0}{\alpha_1 - \alpha_2}$$

הניסוי: מדידת התנגדות לא ידועה

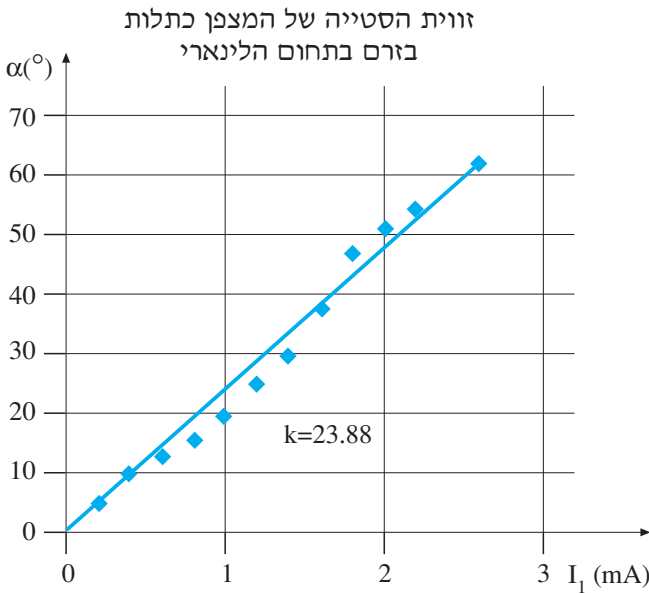
ציוד: סליל בעל 3000 ליפופים והתנגדות חשמלית של $R_0 = 125\Omega$, התנגדות קבועה $R = 1500\Omega$, סוללה של 9V, מצפן מכויל בדיוק של 2° , תיבת נגדים, מיליאמפרמטר.

ביצוע הניסוי

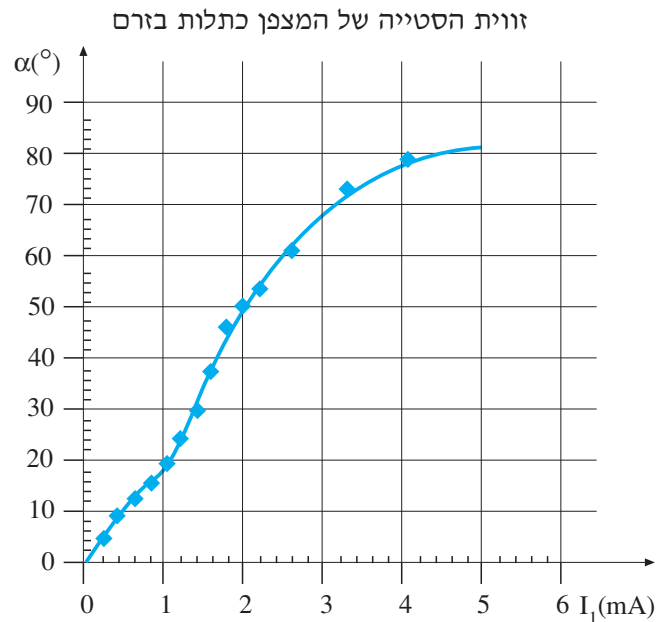
שלב א': כיול המצפן

בונים את המעגל המתואר בתרשים 1. לפני סגירת המעגל מכוונים את מחט המצפן כך שתהיה בניצב לציר הסליל בפתח הסליל. סוגרים את המעגל ומודדים את הזרם I_1 בעזרת המיליאמפרמטר ואת הזווית α_1 בעזרת המצפן. את הזרם במעגל משנים בעזרת שינוי ההתנגדות של הנגד המשתנה. תוצאות הניסוי שערכנו, לדוגמה, הן:

5	4.1	3.3	2.6	2.2	2	1.8	1.6	1.4	1.2	1	0.8	0.6	0.4	0.2	0	I_1 (mA)
82	80	74	62	54	51	47	38	30	25	20	16	13	10	5	0	α ($^\circ$)



תרשים 3ב': החלק הליניארי של הגרף המתואר בתרשים 3א'



תרשים 3א': הגרף המתאר את זווית הסטייה של המצפן כפונקציה של הזרם

להלן חלק מהתוצאות:

אם נתון $\alpha_2 = 30^\circ$, $\alpha_1 = 45^\circ$, $R_0 = 125\Omega$

נקבל: את R_x על פי הנוסחה:

$$R_x = \frac{30 \cdot 125}{45 - 30} = 250\Omega$$

בונים עתה את המעגל המתואר בתרשים 2. מציבים את מחט המצפן בניצב למישור הסליל. מודדים את סטיית המחט α_1 לפני חיבור הנגד R_x ואת הזווית α_2 לאחר חיבור הנגד R_x , ומציבים בנוסחה שפיתחנו:

$$R_x = \frac{\alpha_2 \cdot R_0}{\alpha_1 - \alpha_2}$$

במדידה ישירה של R_x קיבלנו שערכו הוא 240Ω , הווה אומר - שגיאה יחסית של כ-4%.

אם נתון $\alpha_2 = 50^\circ$, $\alpha_1 = 62^\circ$, $R_0 = 125\Omega$
 נקבל: $R_x = 520\Omega$ על פי הנוסחה:

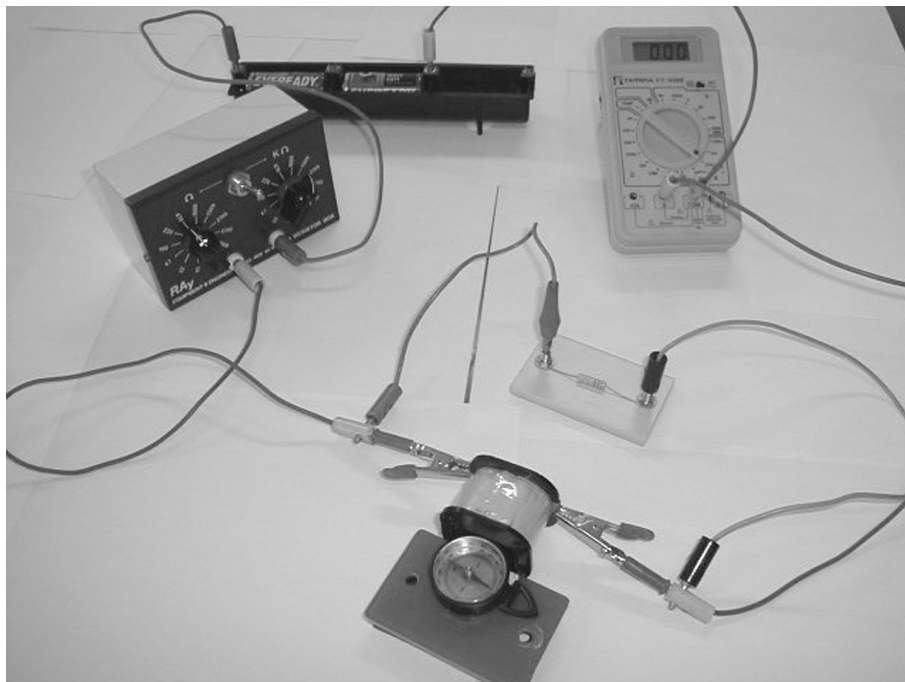
$$R_x = \frac{50 \cdot 125}{62 - 50}$$

הנגד R_x שבחרנו היה של 500Ω , ומכאן ששגיאת המדידה היא של כ-4%.

הארות והערות דידקטיות

- ניסוי המשלב זרם ישיר ומגנטיות יכול לעמוד כניסוי עצמאי ברצף המעבדות בכיתה יב', ולדעתנו הוא מתאים גם לבחינת הברגות במעבדה.
- השלב הראשון בניסוי הוא כיוול מכשיר המדידה - המצפן. בבית הספר התיכון אנחנו מבצעים מספר מצומצם מאוד של ניסויים, אם בכלל, בהם יש צורך לכייל את מכשיר המדידה ומציאת התחום בו התנהגות המשתנים היא לינארית. שלב זה הוא שלב חשוב מאוד בעבודתו של מדען.
- הניסוי מבוסס על הנחה שאם לוקחים נגדים ביחס המתאים, השינוי בזרם הראשי זניח - כ-3%. בהצגת

- תיאוריית הניסוי מפתחים את נוסחאות הקירוב. יפה להראות לתלמידים כיצד הקירוב הזה נותן תוצאות טובות במדידת התנגדות לא ידועה, הלכה למעשה, בניסוי.
4. ניסוי זה יכול לשמש כחלק מפרויקט חקר במעבדה או תלקוט בהערכה חלופית. הפרויקט יכול להכיל ניסויים:
- בזרם ישיר, הקשורים לסוגי חיבור של נגדים במעגל החשמלי, לחוקי קירכהוף, למצפן כמד זרם.
 - במגנטיות, הקשורים לשדה מגנטי סביב תיל נושא זרם סביב כריכה מעגלית נושאת זרם, ניסוי הגליונומטר הטנגנטי, שהוא ניסוי קלסי בברגות במעבדה.
 - ניסוי מדידת התנגדות לא ידועה של נגד בעזרת מצפן, ניסוי המשלב את נושאים המוזכרים בסעיפים א' ו- ב'.
 - הניסוי פשוט לביצוע ואינו דורש ציוד מיוחד שאינו מצוי במעבדה ממוצעת. הניסוי כולל נושאים רבים בפיזיקה שניתן לדון בהם עם התלמידים.
 - ניתן להקטין את שגיאת המדידה אם הפרש הזוויות α_2 ו- α_1 גדול, כמובן בתחום הלינאריות של כיוול המצפן. היות ששגיאת המדידה בהפרש הזוויות היא 4° הפרש של 4° הוא בתחום של 100% שגיאה; לכן הפרש בסדר גודל של כ- 15° נותן תוצאות טובות מאד במדידת ההתנגדות.



תצלום המעגל לכיוול המצפן

תהודה

מבחר ניסויי הדגמה המוצגים בעזרת מטול עילי

פול גלוק, בית הספר למדעים ולאומנויות, ירושלים

מספור התרשימים נעשה בהתאם למספר הניסוי.

1. התפשטות האור בקו ישר צלליות או האף של סירנו

דה ברג'רק

מושגים בסיסיים: צלליות - מקור אור לא נקודתי - צל חלקי - חישת העין

מה מדגימים?

ההשפעה של החפיפה בין איזורי צל חלקיים משני עצמים מוארים במקור אור רחב, ותפקידה של רגישות הסף של העין.

הציוד הנדרש

גיליון נייר A4, מטול עילי, מתנדב בעל אף קצר שמבקש "להאריכו", מסך או קיר לבן.

בניה וביצוע

המתנדב עומד בפרופיל מול המטול במרחק כמטר ממנו, כך שצללית חדה של ראשו נראית על מסך שנמצא עשרות אחדות של ס"מ מן הראש. המורה מחזיק גיליון נייר אנכית, גם הוא מול המטול, אך בין הראש לבין המטול, כך שצללית חדה של הנייר מופיעה על המסך, קרובה אך לא חופפת לצללית הראש (תרשים 1א).

עתה מקרבים לאט את הנייר אל הראש כך שהצלליות מתקרבות זו לזו. במרחק קריטי צללית הנייר נוגעת בצללית האף והצללית של האף "מתארכת" וכאילו באה לקראת זו של הנייר (תרשים 1ב). אכן ניתוח פלסטי ללא כאבים!

הסבר והערות

לצללים של האף והנייר, כאשר הם מוארים ממקור רחב כמו המטול, קיימים שלושה תחומים: צל מלא אליו אור לא מגיע, תחום מואר ללא צל, ותחום מעבר של צל חלקי.

העין מבחינה בעוצמת אור מופחתת באזור הצל כאשר זו נופלת מתחת לאחוז מסוים של ההארה המלאה, עוצמת הסף (ראיה לוגריתמית של העין). לכן אין העין מבחינה ברוחב המלא של תחום המעבר. אם עוצמת האור בתחום מסויים נופלת מתחת לסף הני"ל, הרי שהעין תפסיק להבחין בין תחום זה לבין הצל המלא, ולכן "יוגדל" התחום של הצל המלא. בניסוי הורכבו, אחד מעל השני, שני אזורים של תחום מעבר. אם עוצמת האור בתחום החפיפה נמוכה דיה, העין תכיר רק בצל מלא מוגדל. מכיוון ששאר חלקי צל הראש לא חופפים תחום אחר של צל הנייר, הרי שהם יישארו בגודל המקורי.

תרשים 1א: צללית האף

תרשים 1ב: צללית האף "התארכה"

2. מתקן להשקעה אלקטרוסטטית חיסול "בני ארובה"

מושגים בסיסיים: השקעה - מתח גבוה - חלקיקי זיהום - יינון

מה מדגימים?

בונים דגם פשוט של מתקן להשקעה אלקטרוסטטית של חלקיקים מזהמים בארובות של תחנות כוח.

ציוד נדרש

בקבוק פלסטיק של שתיה קלה, נייר אלומיניום, דבק מוצק, בשפופרת, 12 נעצים צבעוניים ארוכים בעלי ידידות פלסטיק, מקור עשן, מכשיר וון דה גראף

3. פיזור אור מחלקיקים זעירים – שקיעה הדרגתית

מושגים בסיסיים: פיזור ריילי - שקיעה - תרחיף

מה מדגימים?

יוצרים תגובה כימית בכוס, בה מספר החלקיקים המפזרים, ולכן גם יעילות הפיזור, הם תלויי זמן. האפקט הדרמטי של כתם אור שנהיה כהה עם הזמן מדמה את החשיכה המתקרבת בשקיעה.

ציוד נדרש

כוס 500 מ"ל, מטול עילי, 100 סמ"ק של 0.05 חומצת HCl, 100 סמ"ק של 5% sodiumthiosulphate.

בניה וביצוע

הנח את הכוס על המטול. מזוג את החומצה ולאחר מכן את ה-sodiumthiosulphate. המתן שניות אחדות ותבחין על המסך שממול המטול כתם אור שנהיה כהה יותר ככל שחולפות השניות, עד חושך מוחלט. אכן שקיעה הדרגתית.

הסבר והערות

התגובה הכימית שמתחוללת לנגד עינינו היא:



כאשר נוצר תרחיף של חלקיקי גופרית במספר הולך וגדל. חלקיקים אלה אחראים, באמצעות פיזור ריילי, לשינוי הבהירות והצבע של כתם אור המטול עם הזמן.

4. מקדם שבירה של נוזל מוט שבור ומפוצל

מושגים בסיסיים: מיכל עגול - מוט טבול - שבירה - דמות מדומה

מה מדגימים?

תופעה וגיאוטריה מעניינת של הסטת דמות החלק הטבול של מוט במים לעומת החלק הלא טבול בכוס עגולה מאפשרת מדידת מקדם השבירה של המים.

ציוד נדרש

כוס 500 מ"ל, מוט דק כמו עפרון שקוטרו לא עולה על עשירית מקוטר הכוס.

בניה וביצוע

הגדר היטב מישור אחד של קוטר הכוס באופן הבא: הדבק נייר מילימטרי על תחתית הכוס מבחוץ ושרטט עליו קו-קוטר. קבע סרגל לאורך קוטר הכוס על שפתה העליונה ע"י

תרשים 2: בקבוק הפלסטיק עליו הודבקו שתי רצועות נייר אלומיניום

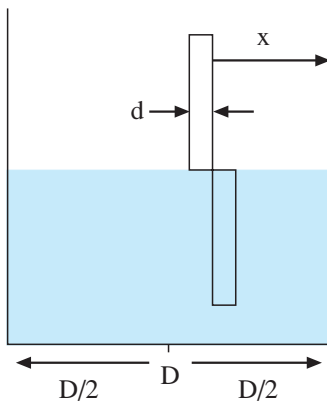
בניה וביצוע

חתוך את החלק התחתון השחור של בקבוק הפלסטיק. הכן שתי רצועות נייר אלומיניום ברוחב 2 ס"מ ואורך שהוא 4 ס"מ גדול מהיקפו החיצוני של הבקבוק. הדבק רצועה אחת מסביב לבקבוק 1 ס"מ מתחתיתו, השניה במקביל לראשונה 15 ס"מ או יותר גבוהה ממנה. מעודף אורך הרצועות צור "ידידות" שתשמשנה לחיבור הקטבים של הוון דה גראף לרצועות בעזרת תנינים. במרכז כל רצועה תחדיר נעץ אחרי נעץ אל תוך הבקבוק ע"י לחיצה, 6 מסביב לכל רצועה ברווחים שווים ביניהם

העמד את המתקן על מטול. מלא את הבקבוק בעשן וסגור אותו מלמטה ע"י פיסת נייר. חבר את המתח הגבוה לידידות והפעל. חלקיקי העשן יפלו לתחתית הבקבוק, כפי שניתן לראות מהתבהרות התמונה ומן הכתם הכהה שנוצר על הנייר.

הסבר והערות

ליד חודי הנעצים בתוך הבקבוק נוצר שדה חשמלי גבוה. זה מיינן את מולקולות האוויר וגורם לטעינת חלקיקי העשן אשר נמשכים לאלקטרודה התחתונה.



תרשים ג4: ציור סכימטי של המוט שדמותו הטבולה נפרדה מחלקו העליון אחרי הזזה

תרשים א'4

הסבר והערות

מקדם השבירה n יינתן, על ידי הנוסחה

$$n = \frac{D/2 - x}{D/2 - x - d}$$

הנוכחה של הנוסחה עבור n (תרשימים ד4-י14):

א. 1) עובי המוט במים nd (נראה זאת בהמשך)

2) לכן $r_2 = nr_1$

3) $nd = r_2 - r_1 = nr_1 - \left(\frac{D}{2} - x\right) =$

$$= (n-1)\left(\frac{D}{2} - x\right)$$

לכן: $n = \frac{D/2 - x}{D/2 - x - d}$

ב. נראה כי $EO = nd$ (ראה תרשים י14)

1) $AB \approx R\left(1 - \frac{d^2}{2R^2}\right) \rightarrow AB \approx R$

2) $AE = AB \tan(\gamma - \alpha) \approx R \sin(\gamma - \alpha) \approx$

$\approx R(\sin\gamma - \sin\alpha)$: (כי $\cos\alpha \approx \cos\gamma \approx 1$)

(לפי חוק סנל: $\sin\alpha = n \sin\gamma$) : $\approx R(n-1)\frac{d}{R} =$

$= (n-1)d$

מכאן $EA + AO = nd = EO$

תרשים ב'4

תרשים 4 א': המוט הוכנס אנכית למרכז הכוס.

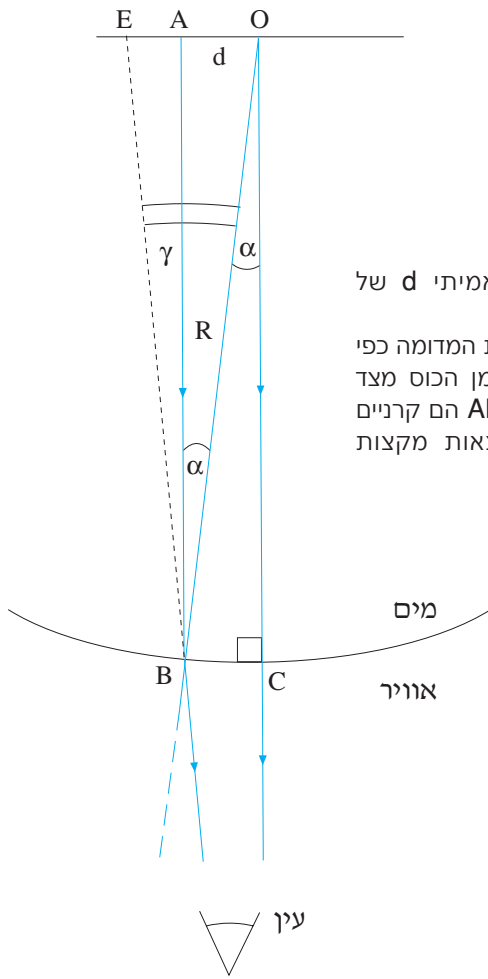
ב': דמות החלק הטבול נפרדה מן החלק הלא טבול

אחרי הזזת המוט מן המרכז.

הדבקה בנייר דבק, במקביל לקו שציירת על נייר המילימטרי. מלא את הכוס במים. הכנס את מחצית המוט אנכית במרכז הכוס. הזז את המוט באופן הדרגתי ממרכז הכוס, תמיד אנכית ובמישור שהגדרת, לכיוון דופן הכוס. תצפה במתרחש (תרשימים א'4 ו ב'4):

א) דמות המוט מתחת לפני המים עבה יותר מן החלק באוויר בפקטור של n, מקדם השבירה.

ב) דמות החלק הטבול מתחילה להפרד מן החלק הלא טבול כאשר מזיזים מן המרכז אל כיוון הדופן! הזז עד למרחק קריטי x מן הדופן, בו הדמות המדומה מוזזת לעומת המוט מחוץ למים בדיוק בשיעור קוטר המוט. מדוד את המרחק x וכן את קוטר המוט d וקוטר הכוס D (תרשים ג4).



O מרכז הכוס
 OA העובי האמיתי d של
 המוט
 EO עובי הדמות המדומה כפי
 שנצפת רחוק מן הכוס מצד
 האוויר, OC ו-AB הם קרניים
 מקבילות שיוצאות מקצות
 חתך המוט.

תרשים 14: מבט על הכלי מהצד

5. הכתם של פואסון – ניקוב באצבע בלי כאב

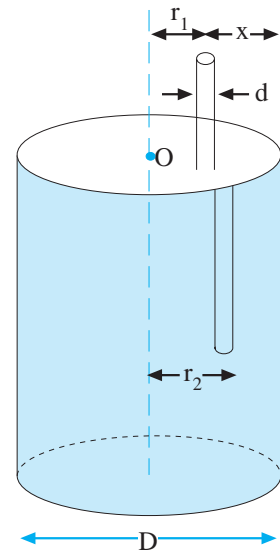
מושגים בסיסיים: התאבכות - עקיפה - גלים משניים - כתם פואסון

מה מדגימים?

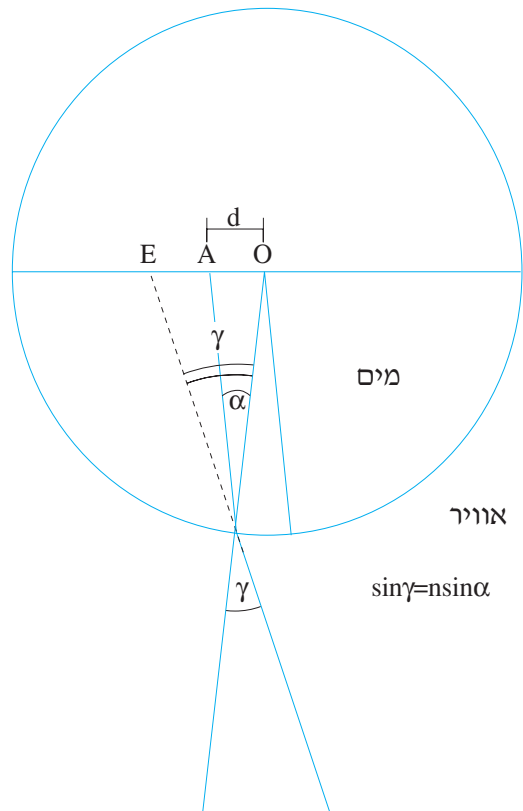
תבנית התאבכות על ידי לוח פרספקס בו נחרתו מעגלים קונצנטריים רבים בעזרת מתקן ביתי פשוט. נבנה מערכת בה יש תפקיד מפתיע ומהנה לכתם הלבן של פואסון (Poisson).

הכתם הלבן של פואסון

הסיפור האמיתי הבא מסביר מה מקור השם הכתם הבהיר של פואסון זו דוגמה משעשעת של ההסטוריה של המדע. ב-1818 הגיש אוגוסטין פרנל (Augustin Fresnel) מאמר על התיאוריה של עקיפה, במסגרת תחרות שאורגנה על ידי האקדמיה הצרפתית. התיאוריה שלו דגלה במודל הגלי של



תרשים 14:



תרשים 14: מבט על הכלי מלמעלה

קדח חור במרכז הפרספקס בגודל ראש הבורג. קבע את לוח הפרספקס על כן מקדחה אנכית. הכנס את המתקן לפוטר. ודא כי החור בפרספקס הוא בדיוק מתחת לראש הבורג במרכז המתקן המסתובב. הפעל את המקדחה בסיבובים נמוכים והורד בהדרגה את נייר הזכוכית המסתובב על הפרספקס. כך תשיג לוח שעליו שריטות קונצנטריות עדינות רבות. (תרשים ב5).

האור, בנגוד לתיאוריה של ניוטון, בה יוצג אור על ידי חלקיקים קטנים. מתקופתו של ניוטון לא פסק הויכוח בין הדוגלים בתיאוריות מנוגדות אלה. סימון פואסון (Simon Poisson) היה חבר צוות השופטים של התחרות; הוא היה בקורתי מאד ביחס למודל הגלי של האור. בהסתמך על התיאוריה של פרנל. הסיק פואסון מסקנה לכאורה אבסורדית, שיופיע כתם בהיר מאחורי מכשול מעגלי. פואסון חשב שניבוי זה סתם את הגולל על תיאורית פרנל.

אולם דומיניק ארגו (Dominique Arago), חבר נוסף בצוות השופטים, הוכיח כמעט מיידית בניסוי שהכתם הבהיר אכן קיים, פרנל זכה בתחרות, ולמרות שאולי יותר מתאים לקרוא לכתם "כתם ארגו" מקובל לקרוא לו הכתם הלבן של פואסון (Poisson's bright spot). הסיפור נלקח מן האינטרנט. <http://www.physics.ucla.edu/~dauger/fresnel/PoissonAragoStory.html>

ציוד נדרש

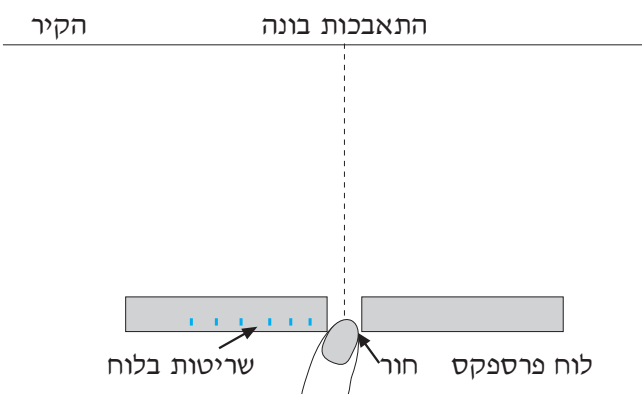
לוח פרספקס 13x13 ס"מ, לוח עץ, ספוג ונייר זכוכית באותו גודל, מטול עילי, דבק, מקדחה, בורג 10 ס"מ עם 6 אומים מתאימים, שייבות.

בניה וביצוע

הדבק את הספוג על לוח העץ, ואת נייר הזכוכית על הספוג. קדח דרכם, במרכז, חור מתאים לבורג, והעבר את הבורג דרך החור. מצד נייר הזכוכית הבורג בולט רק אורך המתאים לעובי של שנים-שלושה אומים לחיזוק, ובצד הלא דבוק של לוח העץ בולט החלק הארוך של הבורג אשר ישמש לחיזוק המתקן ב"פוטר" המקדחה. חזק את המתקן ע"י האומים והשייבות (תרשים א5).

תרשים ב5:

עתה החזק ביד את הפרספקס שהכנת בין המטול לבין קיר לבן, כך שקרני המטול נופלות בניצב ללוח. המרחק בין הלוח השרוט לבין המטול כמטר, ביו הלוח לבין הקיר בערך 30 ס"מ. במרחק זה תוכל לראות את צללית היד שמחזיקה את הלוח על הקיר ממול. עתה הזז אצבע אחת כך שהיא תכסה את החור שבמרכז הפרספקס. אם תסתכל בצללית אצבע זו על הקיר, תראה כאילו האור עשה "חור" במרכז האצבע, כי בצללית תבחין בכתם בהיר במרכז האצבע! (תרשים ג5)



תרשים ג5:

תרשים א5:

הסבר והערות

המטול הינו מקור אור רחב ופולט בקירוב טוב גלים מישוריים שעוברים עקיפה דרך העיגולים שנשרטו בפרספקס. קל לראות כי לאורך קו כלשהו שעובר דרך מרכז הלוח יש לנו סדרה של "סדקים", שנים בכל מעגל שנחתך על ידי הקו הזה. סדקים אלה מהווים, על פי עקרון הויגנס, מקורות לגלים משניים. אם כן עבור התאבכות בונה הרדיוס r של כל מעגל חייב לקיים את התנאי $r = r \cdot n \cdot \lambda$. היות שהמעגלים מרוכזים סביב החור שבפרספקס באופן סימטרי, יופיע כתם לבן על הקיר לאורך הציר המרכזי.

נשים לב כי המרחקים בין העיגולים שחרטנו בפרספקס ע"י נייר הזכוכית המסתובב אינם אחידים, וחלקם יהיו גדולים באופן משמעותי מאורך הגל של האור. מכאן שחלק מן האור לא יעבור עקיפה אלא פשוט יישבר בלוח הפרספקס. לכן תיווצר צללית של היד במרחק הנתון על הקיר. אבל אם היד תהיה רחוקה מדי מן הקיר הצל המלא של היד יתואר על ידי חלק מסוים של מקור האור המורחב (המטול) ולכן העין כבר לא תבחין בצל חד וברור.

6. תנועה מעגלית – מעשה רוקם

מושגים בסיסיים: מהירות משיקית - כוח נורמלי

מה מדגימים?

דבר לא אינטואיטיבי: עבור תנועה קצובה במעגל ברגע שהכוח הצנטריפטלי מופסק, ינוע העצם בכיוון המשיק.

ציוד נדרש

שולחן אופקי חלק, חישוק עץ או פלסטיק של ריקמה מחנויות לציווד ריקמה, תפירה וכו', מטול, כדור פלדה בקוטר אינץ'.

בניה וביצוע

הנח את החישוק השלם על המטול. גלגל את הכדור לאורך הדופן הפנימי של החישוק. רואים כי הכדור אכן מבצע תנועה מעגלית יפה, עד אשר החיכוך גורם להפחתת מהירותו מתחת לסף והוא יתנתק מן הטבעת פנימה.

עתה חתוך מן החישוק רבע ממנו במסור יד, כלומר קשת בת 90 מעלות. שוב תגלגל את הכדור לאורך הדופן. בהגיעו אל קצה החישוק במקום החיתוך ימשיך הכדור בכיוון משיקי להיקף הטבעת בקו ישר.

הסבר והערות

בקצה החישוק יפסיק הכוח הנורמלי לפעול והכדור חדל לנוע במעגל ונע בקו ישר, בכיוון המשיק, עם המהירות שהיה לו ברגע הניתוק.

7. החוק השלישי של ניוטון – פניית פרסה חוקית

מושגים בסיסיים: אינטראקציה מגנטית - החוק השלישי ללא מגע

מה מדגימים?

בעזרת שני מגנטים בצורת פרסה ניתן להראות את פעולת החוק השלישי של ניוטון על המטול בפני כל הכיתה.

ציוד נדרש

מטול, שני מגנטים זעירים בצורת פרסה, שקף שעליו צולמה רשת של נייר מילימטרי.

בניה וביצוע

הכן את השקף בעזרת פקודת הדפס באשף הגרפים של הגליון Excel. סמן במרכז הרשת ראשית צירים נוחה והנח את השקף על המטול. החזק את שתי הפרסות המגנטיות במגע זו מול זו כך שהן נוגעות כאשר פניהן בראשית הצירים במצב דחיה. שחרר בו זמנית את שתיהן. הם יחליקו על השקף החלק בכיוונים מנוגדים ולמרחק שווה מן הראשית. שיחרור טוב מוביל לתוצאות טובות, על כן כדאי לתרגל את ההדגמה מספר פעמים לפני הצגתה.

8. חוק שימור תנע זוויתי – ריקוד המאוורר

מושגים בסיסיים: מדחף זעיר - מאוורר כבד - תנע זוויתי - חיכוך נמוך

מה מדגימים?

בעזרת מאוורר יד זול ניתן להדגים שימור תנע זוויתי על מטול עילי.

ציוד נדרש

מטול, מאוורר יד מצויד בסוללה, שקף

בניה וביצוע

הנח את השקף על המטול. הנח את המאוורר כך שהוא עומד אנכית במרכז השקף. הפעל את המאוורר. המדחף הקל מסתובב מהר בכיוון אחד ואילו הגוף הכבד יותר יסתובב לאט יותר בכיוון ההפוך, כדי לשמור על סך הכל תנע זוויתי אפס במערכת.

9. מסלול במערכת מואצת והיה העקוב למישור

מושגים בסיסיים: מסלולים - מערכות צירים - תנועה יחסית

מה מדגימים?

דרך נוחה לתיאור של מסלול חלקיק בקו ישר במערכת אינרציאלית, כפי שנצפה במערכת מסתובבת לעומת הראשונה במהירות זוויתית קבועה.

ציוד נדרש

מושגים בסיסיים: מטול, שני שקפים, נעץ עם ראש שטוח

בניה וביצוע

הנח שקף אחד על המטול. סרטט מערכת צירים קרטזית במרכזו. במקביל לציר ה-x כארבעה ס"מ מעליו סרטט קו ישר שיוצא מציר ה-y בערך 12 ס"מ, ימינה. על הקו שרטט 6 נקודות עבות במרחק 2 ס"מ אחד מן השני. אלו הן מיקום גוף הנע במהירות קבועה, בפרקי זמן קצובים (תרשים 9). נעץ נעץ דרך ראשית הצירים כך שראשו מונח על המטול מתחת לשקף. עתה תכין שקף שני שייצג את המערכת המסתובבת באופן הבא: במרכזו מערכת צירים זהה לזו שעל הראשון. העבר, בעזרת מד זווית, קו דרך ראשית הצירים כל 60 מעלות, כאשר הקו הראשון הוא ציר ה-x, השני 60 מעליו, וכו'. אנחנו מניחים שבאותו פרק זמן שחולף בין כל שתי נקודות על הקו הישר בשקף (מערכת צירים) הראשון, מסתובבת המערכת השניה 60 מעלות.

תרשים 9: מיקום הגוף הנע במהירות קבועה, בפרקי זמן קצובים

הנח את השקף השני על הראשון, נעץ את חוד הנעץ דרך הראשית של השקף השני כך "שבזמן 0" מתלכדים הצירים של שתי המערכות. סמן עם הטוש את הנקודה הראשונה (השמאלית ביותר) גם על השקף העליון בזמן הזה. תסובב את השקף העליון 60 מעלות. סמן עתה את הנקודה השניה גם על השקף העליון. המשך בסיבוב השקף כל פעם 60 מעלות ובסימון הנקודות הבאות עד שתגמור את כל השש. הראה את המסלול על השקף העליון בלבד על המטול: אכן מסלול ספירלי נהדר אשר מדגים את עיוות המסלול במערכת מואצת.

תהודה

מכשירים להגדרת "מישור אופקי" וכיוונים "מטה" - "מעלה"

ינקלוביץ מיכאל, בית ספר אורט "יד שפירא", תל-אביב ותיכון מקיף ה' ראשל"צ

תקציר: במאמר זה מתוארים מכשירים, המדגימים את הגדרת הכיוונים "מטה", "מעלה" ו"אופקי" במערכת ייחוס מואצת ביחס למערכת כדור הארץ. במאמר של י. גלילי, ע. רוזן וי. זיק: "שילוב עקרון השקילות בהוראת המכניקה הקלאסית", שהופיע ב"תהודה" (1)20, מתואר ניסוי המשתמש במכשירים אלה, המתאימים להצגה במעבדת בית הספר.

מילות מפתח: אנך בנאים, מד "מטה", מד "מעלה", כיוון אופקי.

מבוא

במערכת נייחת משמש אנך בנאים להוראת כיוון האנך ובועת הפלס מראה את הכיוון האופקי. לא ניתן להמחיש, בעזרת אנך בנאים, את הכיוון מטה במערכת ייחוס של עגלה המואצת במורד מדרון כי אנך בנאים, שהוא חוט התפוס שבקצהו האחד ובקצהו החופשי משקולת, מתנוודד כמטוטלת תוך כדי התנועה.

נתאר כאן בפרוטרוט את המכשירים, שנבנו והמתוארים

בעיתון "תהודה" (1)20, התפרסם מאמרם של י. גלילי, ע. רוזן וי. זיק: "שילוב עקרון השקילות בהוראת המכניקה הקלאסית". המאמר מטפל באופן תיאורטי במושגים "מטה", "מעלה" ו"מישור אופקי" כאשר הגוף נע בתאוצה ביחס לכדור הארץ. להמחשת הדיון התיאורטי, מוצגת מערכת הצמודה לעגלה הנעה במורד מדרון.

במאמר המוזכר, הממלאים את מקום אנך הבנאים ומדגימים את הכיוונים "מטה", "מעלה" ו"אופקי" במערכת מואצת.

מד "מטה"

מיקרואמפרמטר אלקטרומגנטי, שצורתו מלבנית, יכול לשמש כמכשיר למדידת כיוון "מטה" במערכת מואצת. בתוך המיקרואמפרמטר קיים מנגנון לריסון תנודות המחוג בזמן המדידה. פותחים בזהירות את המכשיר ומסובבים את המחוג לאמצע הסקלה, בעזרת בורג הזזה. מסירים את הסקלה של המכשיר. כדי להפוך את המחוג ל"אנך בנאים" צריך להצמיד אליו משקולת. כמשקולת שימשה פרוסה של מחק עיפרון (במידות: 7x7x5 מ"מ). כדי להצמיד היטב את המחוג לפרוסת המחק, עושים חתך שעומקו מחצית עובי הפרוסה, לאורך אמצע שטחה הגדול; משקיעים את המחוג לתוך החתך ומדביקים אותו בעזרת דבק. מצלמים את הסקלה המקורית. התצלום משמש כסקלה החדשה. גוזרים את החלק התחתון של הסקלה החדשה כדי לאפשר למחוג סיבוב חופשי. מדביקים את הסקלה החדשה למכשיר וסוגרים אותו. מקצרים את שני הדקי המכשיר בעזרת מוליך כדי להגדיל את הריסון. מתקינים את המכשיר החדש על עגלה כך שקצה המחוג יהיה בכיוון מטה. המכשיר שלפנינו מוגן מהשפעת זרמי אוויר. (תרשים 1).

המקורית של המכשיר ומצלמים אותה על שקף. סוגרים את המכשיר ועוברים על כל מקומות החיבור עם דבק אפוקסי, על מנת לעשות את קופסת המכשיר אטומה למים. קודחים חור קטן בדופן האחורי ודרכו ממלאים את המכשיר במים **מזוקקים**. סותמים את החור בפקק. מדביקים על זוכית המכשיר את השקף עם צילום הסקלה. מחברים את המכשיר לעגלה. הפעם פונה המחוג כלפי מעלה. (תרשים 2)

תרשים 2: מד "מעלה"

מישור "אופקי"

המכשיר הבא (תרשים 3) מורכב מלוחית אופקית, מוט מלבני המורכב אנכית ובקצהו התחתון משקולת. כמשקולת משמשות דסקיות שקוטרן גדול מחתך המוט ומסתן בערך 50 גרם. לשמירה על יציבות המערכת, יש שני מנגנונים לוויסות ריסון התנודות בזמן התנועה. הוויסות נעשה על ידי שליטה במידת החיכוך. בתחתית המוט המלבני, מעל למשקולת, יש בורג המחליק על גומיה בזמן התנועה. (ראה תרשים 4) המוט המלבני מחובר ללוח האופקי בעזרת שני ברגים קוניים, אחד מלפנים ואחד מאחור. הריסון העליון מתבצע על ידי שינוי החיכוך של שני הברגים הקוניים הניתנים להכוונה.

תרשים 1: מד "מטה"

מד "מעלה"

גם כאן נשתמש במד זרם אלקטרומגנטי. פותחים את המכשיר ומסובבים את המחוג, כמו במכשיר הקודם, לאמצע הסקלה. כמשקולת למחוג נשתמש הפעם בלוחית מעץ בלזה בעלת אותן המידות כמו של פרוסת המחק. מורידים את הסקלה

תרשים 3: מרכיבי המכשיר המפורק להגדרת מישור אופקי



בחיוך...

אנריקו פרמי

הפיזיקאי הדגול, י. רוברט אופנהיימר, ממפתחי הפצצה האטומית, היה בין הראשונים שהביאו את תורת הקוואנטים לארצות הברית; שם הקים אסכולה מצליחה לפיזיקה תיאורטית, שבין בוגריה נמנו אחדים מן הפיזיקאים המובילים בארצות הברית. אופנהיימר הציג לעיתים את הפיזיקה במונחים מופשטים למדי, דבר שהיווה ניגוד בולט לדרכו הפשוטה, הישירה של פרמי.

פעם שמע פרמי הרצאה מפי אחד מתלמידיו של אופנהיימר; נושא ההרצאה היה "התיאוריה של התפרקות ביתה של פרמי". אחרי ההרצאה אמר פרמי לאחד מידידיו הפיזיקאים: אני כנראה הזדקנתי והעליתי חלודה, אינני מסוגל יותר לעקוב אחר התיאוריה המסובכת שפותחה על ידי תלמידיו של אופנהיימר. הלכתי לסמינר של אחד מהם, ושקעתי ממש בדיכאון בגלל שלא יכולתי להבין אותו. רק המשפט האחרון עודד אותי: "זאת הייתה התיאוריה של התפרקות ביתה של פרמי".

בהקשר זה, מעניין להביא את הקטע הבא על משה רבנו מן התלמוד-מסכת מנחות:

.....אמר רב יהודה אמר רב: בשעה שעלה משה למרום, מצאו להקדוש ברוך הוא שיושב וקושר כתרים לאותיות. אמר לפניו: רבונו של עולם, מי מעכב על ידיך? אמר לו: אדם אחד יש, שעתיד להיות בסוף כמה דורות, ועקיבא בן יוסף שמו, שעתיד לדרוש על כל קוץ וקוץ תלי תלים של הלכות. אמר לפניו: רבונו של עולם, הראהו לי. אמר לו: חזור לאחורידך. הלך וישב בסוף שמונה שורות, ולא היה יודע מה הם אומרים. תשש כחו. כיון שהגיע לדבר אחד, אמרו לו תלמידיו: רבי, מנין לך? אמר להם: הלכה למשה מסיני - נתישבה דעתו.

(ספר האגדה, בעריכת ח.ג. ביאליק וי. רבניצקי, עמ' קע"ח, הוצאת דביר, תל-אביב, תש"ח).