

ניסויים חדשים באלקטרוסטטיקה

לגבי אלר, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע

מבוא

כידוע, הדגמת ניסויים על ידי המורה וביצוע ניסויים על ידי התלמיד הן פעילויות התופשות מקום מרכזי מאד בהוראת הפיסיקה בביה"ס התיכון. פעילויות אלה חשובות כל כך לא רק מכיוון שהן מציגות בפני התלמיד את דרך עבודתו של הפיסיקאי החוקר, אלא גם, ואולי בעיקר, מכיוון שהן עוזרות לו לקלוט, להבין ולהפנים מושגים ונושאים פיסיקליים מופשטים וקשים, ועל ידי כך מגדילות באופן משמעותי את המוטיבציה שלו ללימודי פיסיקה.

בבתי הספר בארץ מתחילים ללמוד את הנושאים חשמל ומגנטיות בשלב מוקדם יחסית: פרקי המבוא לכימיה הנלמדים בכיתות ח' (תחת הכותרת "כימיה וחשמל") כוללים זרם חשמלי, החשמל והאטום, ומוליכות בתמיסות¹.

הנושא המרכזי של תוכנית הפיסיקה לכיתות ט' הוא חוק שימור האנרגיה. מכיוון שתופעות היסוד של זרם חשמלי מאפשרות פיתוח נוח ומעמיק של חוק שימור האנרגיה, בנויה התוכנית כולה על מבוא מקיף למדי לחשמל, כשהדגש על מעגלי זרם ישר פשוטים².

במסגרת לימודים זו, של פרקי מבוא לכימיה בכיתות ח', ושל פרקי חשמל ומגנטיות בכיתות ט', כלולים גם כמה סעיפים קצרים העוסקים באלקטרוסטטיקה, וזאת בעיקר כדי לבסס את מושג המטען החשמלי ותכונותיו. הלימוד של סעיפים אלה מלווה במספר קטן של הדגמות וביצוע כמה ניסויים פשוטים על ידי התלמידים^{1,2}.

לגבי לימודי חשמל ומגנטיות בחטיבה העליונה, ברמות של 3 יח"ל ושל 5 יח"ל, קיימות שתי גישות עיקריות: לפי האחת

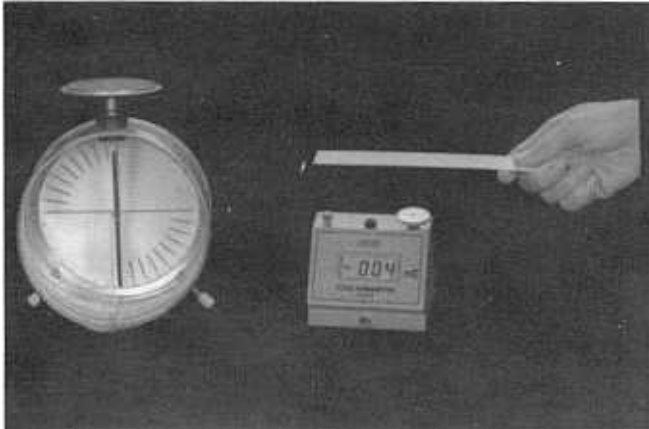
מתחילים את לימודי החשמל במעגלים חשמליים, ורק אחר כך עוברים לדיון ולטיפול במטענים חשמליים, בשדות חשמליים וכו' - זאת אומרת באלקטרוסטטיקה^{3,4}. לפי הגישה השניה מתחילים את לימודי החשמל באלקטרוסטטיקה (זהו המשך טבעי ללימודי המכניקה המסתיימים בפרק גרביטציה), ורק לאחר עיסוק מעמיק באלקטרוסטטיקה, עוברים לזרם חשמלי ולמעגלים חשמליים. עד כמה שידוע לי, בשתי הגישות אין מרבית לערוך ניסויים פשוטים באלקטרוסטטיקה; פרט לניסוי "חוק קולון" ולמספר ניסויים בקבלים, מסתפקים במקרה הטוב בחזרה על הניסויים המעטים אשר אמורים היו להתבצע במסגרת הלימודים של כיתות ח' ו-ט' (אלה הם בעיקר ניסויים על כוחות בין מטענים חשמליים ועל השראה אלקטרוסטטית). לפעמים מבצעים גם מיפוי של שדה חשמלי בעזרת קווים שווי פוטנציאל⁴.

כל זה למרות העובדה, הידועה בודאי לרבים מקוראי שורות אלה, שמספר הניסויים הפשוטים, היפים והמאלפים שאפשר לערוך באלקטרוסטטיקה גדול ביותר.

למעשה, ניסויים אלה הם ברובם "ניסויים קלסיים" - ניסויים שהיו מוכרים ומקובלים כבר לפני זמן רב, אלא שמסיבות שונות לא נכללו בתוכניות הלימודים החדשות, ולכן איבדו את מקומם במגוון ניסויי הפיסיקה בו משתמשים רוב המורים.

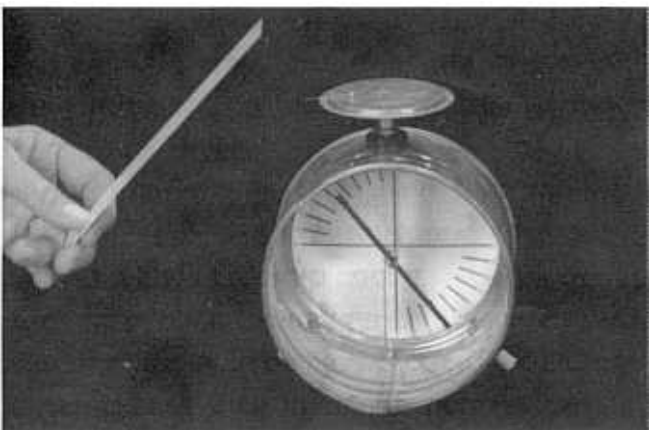
במאמר זה אנסה לתאר בקצרה כמה מניסויים אלה, בתקווה שהדבר יסייע למורים לגוון ולהעשיר את דרכי הוראת האלקטרוסטטיקה בחטיבה העליונה של ביה"ס התיכון. כמו כן אתייחס לכמה פרטי ציוד חדשים (קולונמטר, מולטימטר דיגיטלי) העשויים להקל על ביצוע הניסויים ולשפר את תוצאותיהם.

ב. מבצעים פעולות דומות לאלה שתוארו בסעיף (א), אלא שבמקום באלקטרוסקופ משתמשים בקולונמטר שלהדק החיובי שלו מחוברת דיסקה קטנה (תרשים 1 ב'). לפני ביצוע הפעולות יש לאפס את הקולונמטר.



תרשים 1 ב'

ג. שמים סיכה על הדיסקה של האלקטרוסקופ באופן שחודה בולט מחוץ לשטח הדיסקה; מקרבים לוחית PVC ששופשה בפיסת בד צמר עד למרחק של כ-3 ס"מ מחוד הסיכה. (תרשים 2 א')



תרשים 2 א'

רשימת הניסויים המובאת להלן מהווה רק חלק קטן ממיגוון גדול ועשיר של ניסויים שאפשר לבצע באלקטרוסטטיקה. רובם ניסויים פשוטים שקל לבצעם, לכן יהיה תאורם קצר ותמציתי. אלה מבין הקוראים שיהיה להם ענין בניסויים נוספים שלא תוארו במאמר זה, או שיהיו מעוניינים בתאור מפורט יותר של אחד או יותר מהניסויים המתוארים להלן, יוכלו לפנות אל כותב שורות אלה לפי הכתובת: המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, רחובות, וייענו ברצון.

הניסויים

מטרת הניסויים להכיר את הקולונמטר וללמוד את אפשרויות השימוש בו, בלי להסביר את מבנהו ואת אופן פעולתו. אף על פי שבשלב זה של לימוד האלקטרוסטטיקה מכשיר זה הוא בעיני התלמידים "קופסה שחורה", אפשר ואף רצוי להתיחס ליתרונותיו (וכן גם לחסרונותיו) בהשוואה עם האלקטרוסקופ.

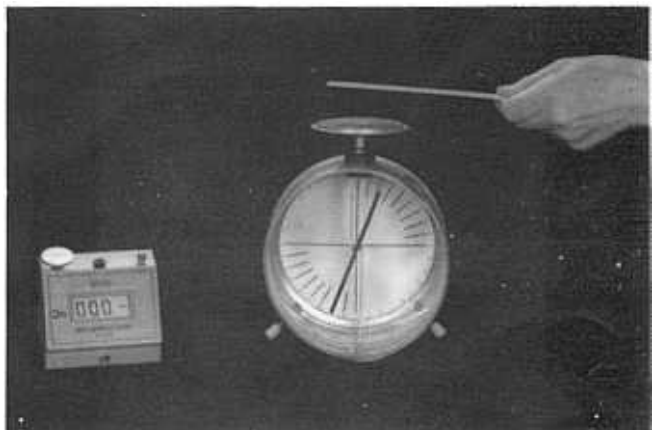
1. קולונמטר ואלקטרוסקופ - הכרה והשוואה

הציוד:

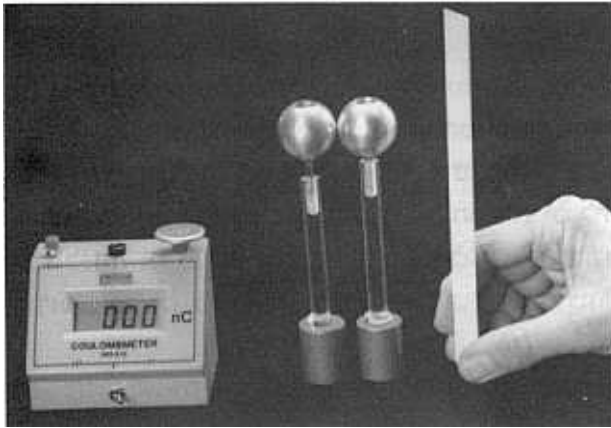
קולונמטר, אלקטרוסקופ, לוחית PVC, לוחית צלולואיד, פיסת בד צמר, גליון כפול של נייר כתיבה.

הביצוע:

א. טוענים לוחית PVC על-ידי שפופה בפיסת בד-צמר ומקרבים אותה באיטיות עד למרחק של לא פחות מ-3 ס"מ מדיסקת האלקטרוסקופ. לאחר מכן חוזרים ומרחיקים את הלוחית מהדיסקה (תרשים 1 א').



תרשים 1 א'

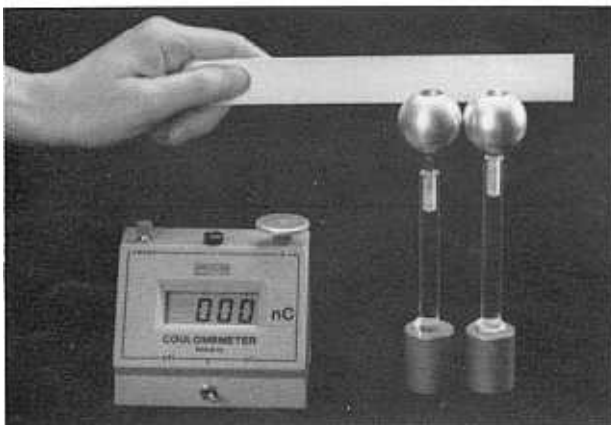


תרשים 3

אותו מהכדור השני ומביאים אותו במגע עם הדיסקה של הקולונמטר. לאחר מכן אוחזים בכך המבודד של הכדור השני ומביאים גם אותו במגע עם הדיסקה של הקולונמטר (לוחית ה-PVC נשארת כל הזמן במקומה). תוצאות הניסוי מראות כי היתה הפרדת מטענים בשיטת ההשראה האלקטרוסטטית וכי מתקיים שימור המטען החשמלי.

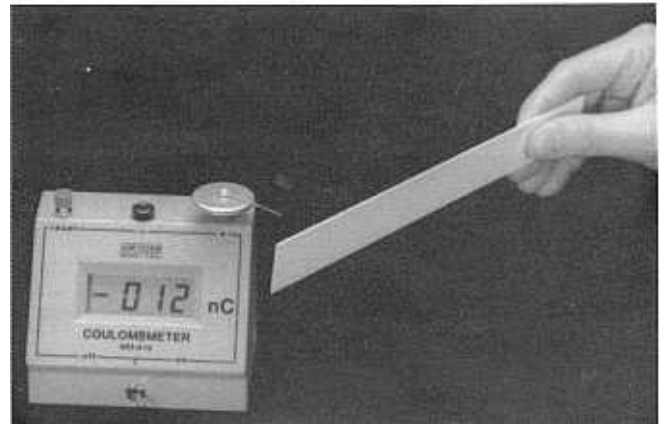
ג. מבצעים ניסוי דומה לזה המתואר בסעיף ב., אלא ששני הכדורים הנמצאים במגע זה עם זה הם שני כדורים בעלי רדיוסים שונים.

ד. בקירבת שני כדורים מוליכים שווים רדיוסים ובלתי טעונים הנוגעים זה בזה, שמים לוחית PVC ששופשה בבד צמר, כך שהיא אופקית ומקבילה לקו העובר דרך מרכזי שני הכדורים (תרשים 4). מרחיקים כדור אחד (על-ידי אחיזה בכך המבודד) ומביאים אותו במגע עם דיסקת הקולונמטר; אחר כך מביאים את הכדור השני במגע עם הדיסקה. דנים בתוצאות הניסוי בהשוואה עם תוצאות הניסוי המתואר בסעיף ב.



תרשים 4

ד. במקום באלקטרוסקופ משתמשים בקולונמטר: שמים סיכה על דיסקת הקולונמטר כך שחודה בולט מחוץ לשטח הדיסקה, ומבצעים פעולות דומות לאלה שתוארו בסעיף ג (תרשים 2ב').



תרשים 2 ב'

ה. חוזרים ומבצעים ניסויים דומים לאלה שתוארו בסעיפים (א) עד (ד), אולם במקום בלוחית ה-PVC משתמשים בלוחית צלולואיד שהועברה בין שני גליונות נייר שהוצמדו בלחץ.

2. מדידת מטענים בקולונמטר

הציוד:

קולונמטר, 3 כדורים מוליכים בעלי רדיוסים שווים על כנים מבודדים, 1 כדור מוליך על כן מבודד בעל רדיוס גדול מרדיוסי שלשת הכדורים, לוחית PVC, פיסת בד צמר, ספק מתח גבוה.

הביצוע:

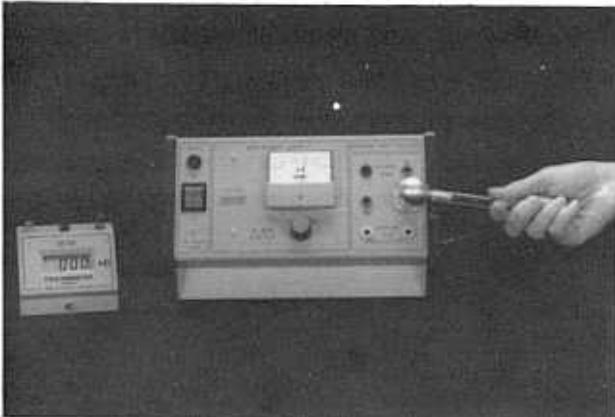
א. לאחר שטוענים את אחד הכדורים המוליכים בשיטת ההשראה האלקטרוסטטית על ידי לוחית PVC ששופשה בבד צמר מביאים אותו במגע עם דיסקת הקולונמטר המאופס.

חוזרים ומבצעים את פעולת הטעינה של הכדור ואת הבאתו במגע עם דיסקת הקולונמטר מספר פעמים; רושמים תוצאות ומסיקים מסקנות.

ב. מעמידים בצורה זקופה לוחית PVC ששופשה בצמר, ובמרחק קטן ממנה מציבים שני כדורים מוליכים בלתי טעונים באופן שיגעו זה בזה. שני הכדורים ניצבים על כנים מבודדים. (תרשים 3).

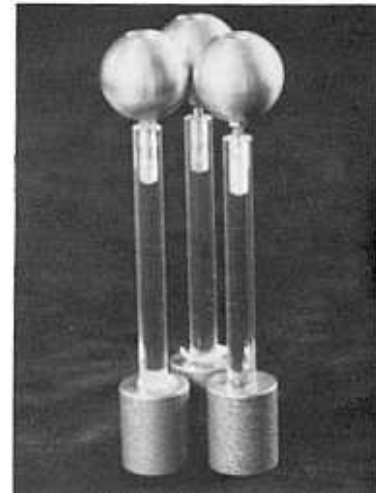
על ידי אחיזה בכך המבודד של אחד הכדורים מרחיקים

ג. טוענים כדור מוליך על ידי הבאתו במגע עם דיסקה המחוברת להדק החיובי של ספק מתח גבוה (תרשים 6) ומודדים את מטענו ע"י הקולונמטר. חוזרים על הפעולה מספר פעמים, בכל פעם במתח אחר של הספק. מתארים גרף של מטען הכדור כפונקציה של המתח ומראים כי $q \propto V$. אם מצויים כמה כדורים מוליכים בעלי רדיוסים שונים, ניתן להראות גם כן, כי עבור מתח מסוים וקבוע, $q \propto R$.



תרשים 6

ה. לאחר שטוענים את אחד משלושת הכדורים בעלי הרדיוסים השווים בהשראה על ידי לוחית PVC משופשפת, מביאים אותו במגע עם שני הכדורים האחרים, הבלתי טעונים. לאחר מכן מודדים בעזרת הקולונמטר את המטען המצוי על כל אחד משלושת הכדורים. פעם אחת מבצעים את המדידה לאחר ששלושת הכדורים היו במגע במבנה סימטרי (זאת אומרת שמרכזיהם היו משולש שווה צלעות, תרשים 5 א'), ופעם שניה מבצעים את המדידה לאחר שמרכזי הכדורים שנגעו זה בזה נמצאו על קו ישר (תרשים 5 ב'). משווים את התוצאות ומסבירים את ההבדל.



תרשים 5 א'

3. זרמים חולפים (transients) באלקטרוסטטיקה

כדי לעזור לתלמידים לקשר בין התופעות הנלמדות במסגרת האלקטרוסטטיקה ובין אלה הנלמדות בפרקים על זרם חשמלי ועל מעגלים חשמליים, חשוב ביותר לבצע ניסויים בהם מתיחסים ל"זרמים החשמליים החולפים" הקיימים במרבית הניסויים הנקראים "אלקטרוסטטיים".

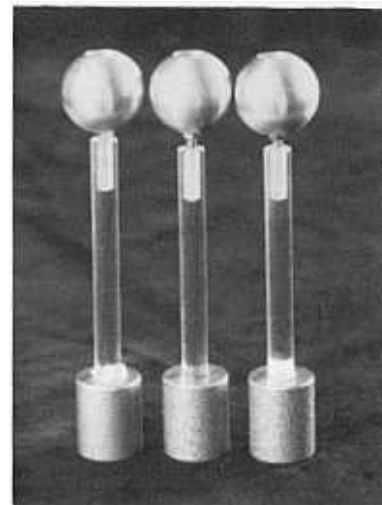
להלן כמה דוגמאות של ניסויים המדגימים עובדה זו:

הציוד:

לוחית PVC, בד-צמר, נורית ניאון, 2 כדורים מוליכים בעלי רדיוסים שווים על כנים מבודדים, מולטימטר דיגיטלי עם נגד של $100k\Omega$ המשמש כמד זרם רגיש (או, לחילופין, מד זרם רגיש עם מגבר DC), שקף פלסטי, דיסקה מתכתית עגולה (רצוי מאלומיניום) עם ידית מבודדת, שפופרת בה גז Ne בלחץ נמוך.

הביצוע:

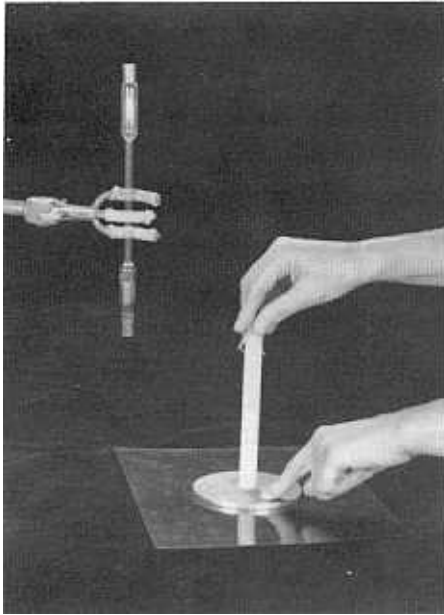
א. לאחר שמשפשפים לוחית PVC בבד צמר, מעבירים על פני הלוחית את אחד התיילים היוצאים מנורית ניאון



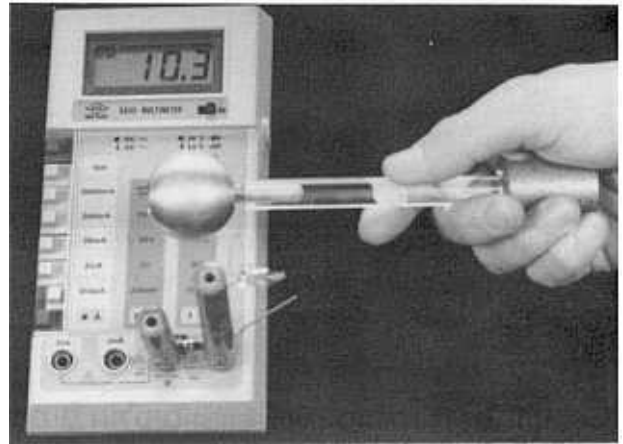
תרשים 5 ב'

קטנה, כשהתייל השני שלה מוחזק ביד. אם הניסוי נערך בחדר מואפל במידת מה, רואים סידרה שלמה של הבזקי אור בנורית הניאון.

ב. טוענים שני כדורים מוליכים במטענים הפוכים (+q, -q) בשיטה המתוארת בניסוי 2ב, ואחר כך מביאים כדור אחד ואחר כך את הכדור השני במגע עם התייל החופשי של נורית ניאון אשר התייל השני שלה מחובר למולטימטר דיגיטלי המופעל כמד זרם רגיש* (תרשים 7). מהבזקי האור בנורית ומקריאת המולטימטר אנו למדים כי זרמו זרמים חולפים במעגל הפתוח. מהסימנים (+, -) על הצג של המולטימטר אפשר ללמוד על כיווני הזרמים החולפים ועל סימני המטענים שהיו על כל אחד מהכדורים.

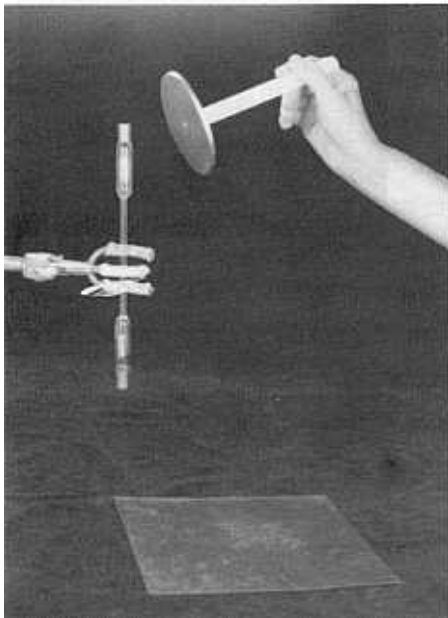


תרשים 8 א'



תרשים 7

ג. לאחר שמשפשפים היטב בבד-צמר שקף המונח על השולחן, מניחים על השקף דיסקת אלומיניום המוחזקת בידית מבודדת. לאחר שנוגעים באצבע בדיסקה (פעולת הארקה, ראה תרשים 8א'), מרימים את הדיסקה ומקרבים אותה לאחד הקצוות המוליכים של שפופרת גז ניאון בלחץ נמוך (ראה תרשים 8ב). הבזק האור בשפופרת הגז מוכיח כי זרם חשמלי עבר דרכה. מניחים מחדש את דיסקת האלומיניום על השקף, מאריקים אותה וחוזרים ומביאים אותה במגע עם הקצה המוליך של שפופרת הניאון; שוב מופיע הבזק אור. אם הניסוי נערך כשהאוויר יבש יחסית, אפשר לחזור עליו מספר רב של פעמים.



תרשים 8 ב'

המערכת המורכבת משקף משופשף בבד-צמר ומדיסקת אלומיניום עם ידית מבודדת מהווה אלקטרופור, מכשיר חשוב שהיו לו שמושים רבים בתולדות האלקטרוסטטיקה.

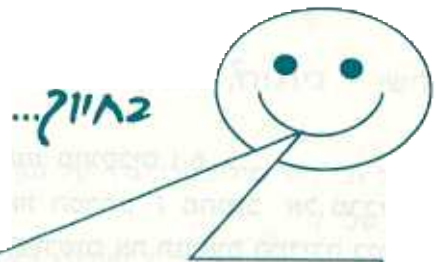
* מולטימטר דיגיטלי המופעל כוולטמטר בתחום של 200mV עם נד של 100kΩ מחובר בין הדקין, יכול לשמש כמד זרם רגיש המסוגל למדוד זרמים מסדר גודל של 10^{-8} ואף 10^{-9} אמפר, כפי שמתואר במאמרו של רפי כהן⁵.

חשמליים, בבניית גנרטור AC שפעולתו מבוססת על השראה אלקטרוסטטית ועוד.
אם יתברר שהנושא מעניין אתכם נשמח לספר לכם על כך במאמר נוסף.

תיארנו כמה ניסויים פשוטים שתוצאותיהם יכולות לדעתנו לתרום רבות להבנה מעמיקה יותר של יסודות תורת החשמל. בעזרת ציוד מועט נוסף אפשר להרחיב בהרבה את הידיעה, ולעסוק גם בכלוב פארדי (Faraday) ובסיכוך אלקטרוסטטי, בדיפולים חשמליים, במיפוי של שדות

מראי מקום

1. מהיסודות אל התרכובות - פרקי כימיה ופיסיקה, בעריכת חנה ארזי, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, תשי"מ - 1980, פרקים א-ג.
- 1א. כניל, עמ' 49-51.
2. חשמל, אנרגיה וחוקי הגוים, מדריך למורה, מרדכי בן צוק וחנה גולדרינג, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, תשנ"א, 1991.
- 2א. כניל, עמ' 45-50.
3. חשמל ומגנטיות, דוד זינגר, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, תשמ"ז, 1987.
4. פרקים באלקטרומגנטיות, צ. גלר, ד. זינגר, ר. כהן, המחלקה להוראת המדעים, תשמ"ט, 1989.
5. כהן, ר. המהפכה הסיפרתית, תהודה, כרך 13, מס 1 עמ' 29-33, תשמ"ט.



סיפורה של מדידה - סיפור עממי

עובדי קרס, החח' להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע

בכפר קטן. (בכל הסיפורים מופיע כפר קטן. אך הכפר הזה היה באמת קטן) היה לעובדים בדיה: כיצד לכוון את שעותיהם. לפי כך היו את ארבע העובדים. עבדיו היה אדוארד בל יום הראש החדש שבחריב הכפר ואיכור היה בדיוק בשעה 11 בדרכו, ולא היה יכולו את שעותיהם. כך התנהלו העובדים לפי כמה שנים. עד שיום אחד הוצע להם אופטיקה המורה, לאמר ששאל את הסיפורי. (אם והמורה על השעות ושאל: "כיצד אהיה יודע למה השעה היא בדיוק 11 בדרכו? צנה או האיש?") פשוט לאור. בכפר יש שני זקן, ובאלון הראה של אנוני יש כרונומטר לדיוק מאוד. כל דרכו, בשעה 5.55 אני עובד דרכו. לכוון את שעותי ועל זה אבדה לבד את עבדיו.
האך המורה אל השען הזקן: "שמעתי שיש לך כרונומטר לדיוק מאוד".
"אמת ויציב" צנה הזקן.
"וכיצד אהיה יודע שהוא לדיוק? הקשה המורה.
"פשוט מאוד" צנה השען. "בכל יום בשעה 11 בדיוק, נורית יורה, ולא היה אני לכוון את הכרונומטר!!"