

חקירה ומדידות של שדות אלקטרוסטטיים

צבי אר, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע

במאמר זה מתוארת סידרת ניסויים בהם באמצעות מתקן פשוט חוקרים ומודדים את השדה החשמלי הנוצר ע"י: כדור מוליך טעון, מוליך גילי ארוך טעון, לוחות טעונים והשדה שבין לוחות קבל. כמו כן מראים ששדות חשמליים מקיימים את עקרון הסופרפוזיציה.

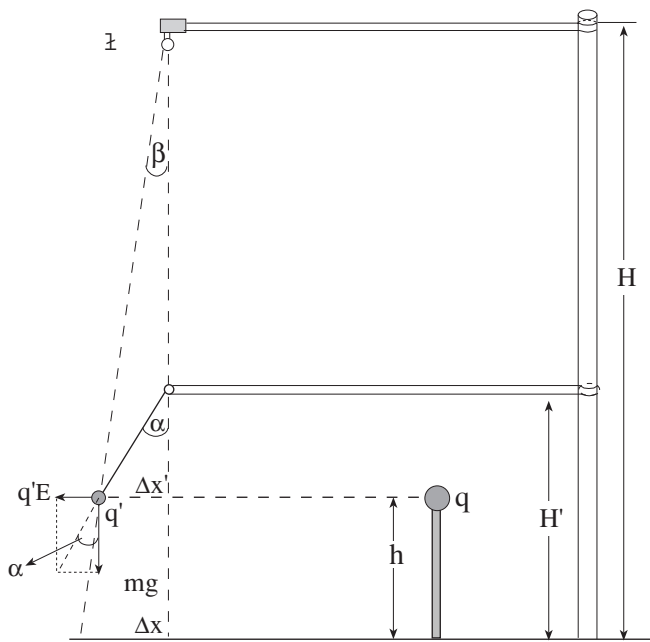
מילות מפתח:

שדות אלקטרוסטטיים, כדור בוכן.

הניסויים המעטים הקשורים בשדות חשמליים המבוצעים בבית הספר התיכון הם בדרך כלל הדגמות של קיום שדות אלה בעזרת עלי אלומיניום דקים וטעונים הקשורים למוטות פלסטיים, או בעזרת כדורים מוליכים קטנים וטעונים התלויים בקצות חוטים מבודדים; ההדגמות מתיחסות כמעט אך ורק לקיומו של שדה חשמלי אחיד (בקירוב) בין הלוחות המקבילים של קבל, ולא לשדות

הכרת שדות חשמליים וחקירתם הוא אחד הנושאים המרכזיים החשובים ביותר בתורת החשמל. נושא זה זוכה לטיפול תאורטי רחב ומעמיק למדי גם במסגרת לימודי הפיסיקה בבית הספר התיכון (מדובר ברמה הגבוהה של הלימודים - הרמה של 5 יחידות לימוד), אולם ההתייחסות לצד הניסוי של הנושא מצומצמת ושולית, ולדעתי איננה מספקת.

לביצוע סידרת הניסויים דרוש הציוד הבא:



תרשים 1: מיתקן "כדור בוחן"

מיתקן "כדור בוחן"

- "מיתקן כדור בוחן": כן בעל שתי זרועות עם מקור אור נקודתי (נורה של פנס כיס), כדור מוליך קטן התלוי בקצה חוט מבודד (כדור הבוחן), בית סוללות עם שלוש סוללות של 1.5 וולט כל אחת ותיילי חיבור להדלקת מקור האור (תרשים 1).
- 3 כדורים מוליכים על כנים מבודדים.
- גליל מתכתי ארוך מוצב על בסיס מבודד.
- 2 לוחות אלומיניום ו-4 גלילי PVC עם חריצים המשמשים להצבת הלוחות במצב אנכי (קבל לוחות).
- שקף נקי מודבק בסרטי נייר דביק על מגש מפלסטיק (או על לוח פרספקס).
- פיסת בד צמר.
- דפי נייר פולרי ודפי נייר מילימטרי (או דפי נייר עם רשת קווים ישרים המאונכים זה לזה).
- מקור (ספק) של מתח גבוה (עד 5kV) ו-2 תיילים, כל אחד עם "בננה" בקצה האחד ו"תנין" בקצה השני.
- קולונמטר.
- סרגל ארוך (1 מטר).

חשמליים אחרים "מסובכים יותר". לפעמים נוהגים גם "להמחיש" את קיומם של שדות חשמליים על ידי זרעונים הצפים על פני נוזל מתאים, והמסתדרים לפי קווי השדה (ראה, לדוגמה, "פיסיקה - פרקים באלקטרומגנטיות", עמודים 77 ו-78)¹.

בניסויים אלה אין כמעט עריכה של מדידות כמותיות, כמו למשל, קביעה של עוצמת השדה החשמלי בנקודות שונות של השדה. הניסויים מבוצעים במהירות כניסויי הדגמה בלבד, על כן הרושם שהם משאירים על התלמידים הוא בדרך כלל קטן ולא משמעותי.

הניסוי הכמותי הכמעט יחיד הקשור לשדות חשמליים והמבוצע על ידי תלמידים הוא הניסוי של מיפוי שדות חשמליים בעזרת קווים שווים פוטנציאל. בניסוי זה משתמשים בדרך כלל במגש עם מי ברז או בנייר מוליך². אלקטרודות מתאימות (מישוריות, גליליות, או אחרות) הטובלות במים אשר במגש, או הנמצאות במגע הדוק עם הנייר המוליך, מחוברות למקור מתח D.C, כך שנוצר ביניהן שדה חשמלי. באמצעות וולטמטר שאחד מהדקיו מחובר לאחת האלקטרודות, בעוד שההדק השני שלו מחובר למוט מוליך דק הטובל במים שבמגש, או הנוגע בנייר המוליך, על התלמיד למצוא ולסמן נקודות שוות פוטנציאל בשדה החשמלי אשר בין האלקטרודות. בדרך זו הוא יכול לצייר את הקווים שווים הפוטנציאל, ואלה מאפשרים לו אחר כך לצייר את קווי השדה, המאונכים לקווים שווים הפוטנציאל.

מסתבר כי גם בניסוי כמותי זה, המבוצע על ידי תלמידים, אין מדידה ישירה של שדה חשמלי. סרטוט מפת קווי השדה החשמלי נעשית בעקיפין: תחילה יש לסרטט את מפת הקווים שווים הפוטנציאל, שנקבעו על סמך התוצאות של מדידות, ורק על פי מפה זו מסרטטים אחר כך גם קווי שדה. ההיקף המצומצם והבלתי מְסֻפָּק של הפעילות הניסויית הקשורה עם לימוד הפרקים על שדות חשמליים בולט עוד יותר אם משווים אותו להיקף הרחב בהרבה של פעילות ניסויית המלווה את הפרקים העוסקים בשדות מגנטיים.

מכיוון שלדעתי מצב זה אינו הכרחי ואף איננו רצוי, אני מציע להעשיר את הבדיקות והמדידות בשדות חשמליים בסידרת ניסויים המבוססת על השימוש במכשיר פשוט שאפשר לכנותו בשם "מיתקן כדור בוחן", ושאת מבנהו ואופן פעולתו אתאר בהמשך.

הכרת מיתקן כדור הבוחן והכנתו לפעולה

במיתקן שתי זרועות ארוכות מקבילות המחוברות לכן; בקצה הזרוע התחתונה חרוז דרכו עובר חוט פלסטיק שבקצהו כדור מוליך קטן; זהו כדור הבוחן. בקצה הזרוע העליונה נורה קטנה אותה ניתן לחבר בתיילים מוליכים למקור המתח (סוללות בבית סוללות) - ראה תרשים 1. את שתי הזרועות הארוכות אפשר להעלות, להוריד ולסובב לפי הצורך.

(א) מעלים או מורידים את הזרוע התחתונה עד שכדור הבוחן נמצא בגובה המרכז של אחד הכדורים המוליכים הניצב על כן מבודד. במצב זה מהדקים את הזרוע אל הכן.

(ב) מחברים את הזרוע השניה, עם הנורה הקטנה, לחלק העליון של הכן.

(ג) מדליקים את הנורה על-ידי חיבורה לסוללות ומכוונים את הזרוע הנושאת אותה כך שהיא תימצא **בדיוק** מעל החור שבחרוז (צללית כדור הבוחן צריכה ליפול במרכז צללית החרוז על גבי השולחן).

(ד) משפשפים היטב את השקף המוצמד למגש הפלסטיק בפיסת בד הצמר, ומשתמשים בו כאלקטרופור המאפשר טעינת מוליכים שונים על ידי השראה אלקטרוסטטית.

ביצוע הניסויים

הערה: יש לבצע את הניסויים בחדר מואפל בו לחות האוויר נמוכה. כדי להקטין את לחות האוויר רצוי להפעיל מזגן במשך זמן מה לפני התחלת העבודה; גם בשעת העבודה אפשר ורצוי להפעיל את המזגן - אולם אך ורק אם כתוצאה מכך לא ייווצרו בחדר זרמי אוויר חזקים, שישבשו את תוצאות הניסויים.

שלב ראשון: חקירת השדה החשמלי של כדור מוליך טעון.

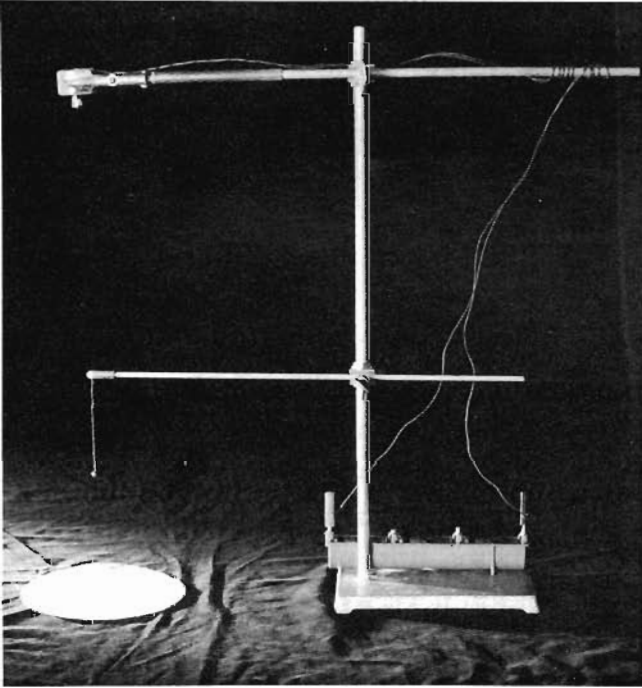
(א) משתמשים בשקף המשופשף המודבק על המגש מפלסטיק כדי לטעון את אחד הכדורים המוליכים המוצבים על כן מבודד.

(ב) מקרבים את הכדור הטעון (כשמחזיקים ביד את הכן המבודד הנושא אותו) אל כדור הבוחן עד שנוצר מגע ביניהם, ועוקבים אחרי כדור הבוחן ואחרי הצללית שלו על גבי השולחן.

(ג) מעבירים את הכדור הטעון ממקום למקום בקרבתו של כדור הבוחן ועוקבים אחרי צללית כדור הבוחן על גבי השולחן.

(בכל פעם יש להקפיד על כך שגובה מרכז הכדור הטעון מעל השולחן יהיה כגובה כדור הבוחן מעליו).

מכיוון שהסטייה Δx של צללית כדור הבוחן על גבי השולחן פרופורציונית בקירוב לעוצמת השדה החשמלי $|\vec{E}|$ במקום בו נמצא כדור הבוחן, וכיוונה ככיוון וקטור השדה \vec{E} , ניתן להסיק מתוצאות הניסוי שהשדה החשמלי של הכדור הטעון הוא שדה רדיאלי שעוצמתו קטנה עם המרחק (ראה תרשים 2).



תרשים 2: השדה החשמלי של הכדור הטעון

(ד) כדי לחקור בצורה מעמיקה יותר את השדה החשמלי \vec{E} של הכדור הטעון, מציבים את הכן הנושא אותו בדיוק במרכז של גליון נייר פולרי ומשתמשים במיתקן כדור הבוחן כדי לסרטט מפה וקטורית של השדה. **(הערה:** מתברר שבמקום להזיז את המיתקן המסורבל של כדור הבוחן, נוח יותר להציבו במקום קבוע ולהזיז את הנייר הפולרי כשהכן הנושא את הכדור הטעון ניצב במרכזו - ראה תרשים 3). אם הניסוי מתבצע בתנאים אקלימיים טובים (זאת אומרת, בתנאים של לחות אוויר נמוכה), התוצאות המתקבלות מראות בצורה משכנעת שעוצמת השדה החשמלי של הכדור הטעון נמצאת ביחס הפוך לריבוע המרחק ממנו.

בקירוב טוב מתקיים הקשר:

$$|\vec{E}| \propto \frac{1}{r}$$

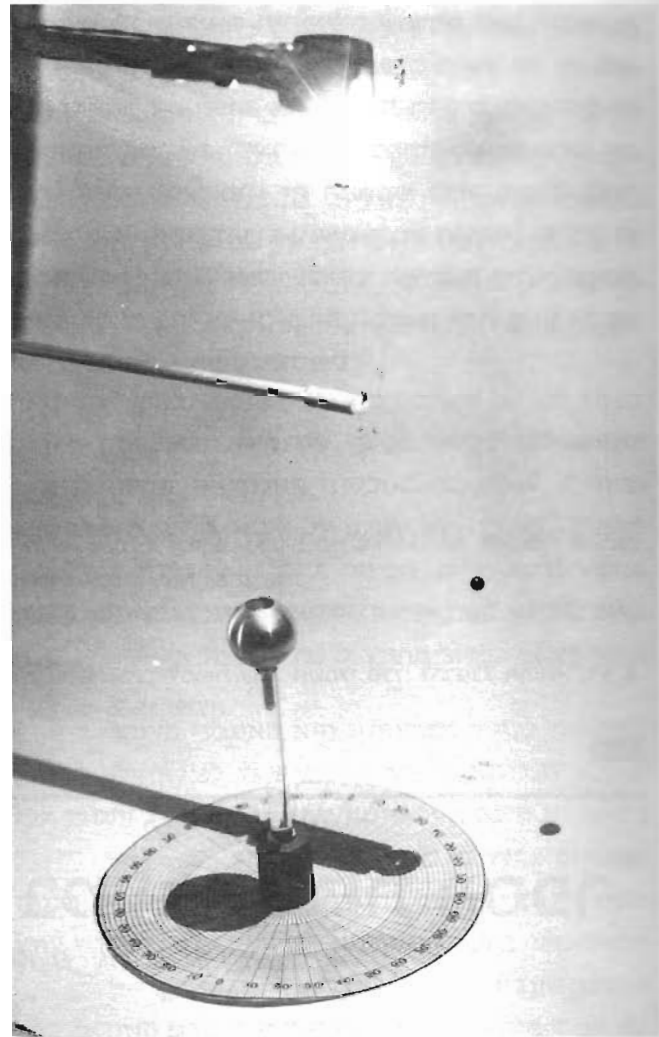
שלב שלישי: עקרון הסופרפוזיציה לגבי שדות חשמליים
משתמשים במיתקן כדור הבוחן, בשניים או בשלושה כדורים מוליכים טעונים, בשקף המשופשף ובניירות מילימטריים (או בניירות עם רשתות קווים ישרים המאונכים זה לזה) כדי להראות ששדות חשמליים מקיימים את עקרון הסופרפוזיציה.

שלב רביעי: השדות החשמליים של לוחות טעונים

(א) מניחים לוח מתכתי גדול (לוח אלומיניום עם שתי רגליות מבודדות) על גבי שקף משופשף ונוגעים בו באצבע. כתוצאה מפעולות אלה הלוח נטען במטען חשמלי שסימנו הפוך מסימן המטען של השקף. לאחר מכן, כשאוחזים בזהירות ברגליות המבודדות, מרימים את הלוח מעל השקף ומציבים אותו בצורה אנכית על גבי נייר מילימטרי (או על גבי נייר עם רשת של קווים ישרים המאונכים זה לזה). עתה, בעזרת מתקן כדור הבוחן, עורכים מיפוי של השדה החשמלי של הלוח הטעון.

(ב) משתמשים בשקף המשופשף כדי לטעון בהשראה אלקטרוסטטית שני לוחות אלומיניום בגודל של כ-20 x 20 ס"מ (עם רגליות מבודדות) במטענים שווים בגודלם אך הפוכים בסימנם. ביצוע הניסוי הוא על-ידי הצמדת שני לוחות אלומיניום בלתי טעונים האחד לשני. אל הלוחות מקרבים שקף טעון (לאחר ששופו בבד צמר) כך שהשקף מקביל ללוחות וקרוב אליהם עד כמה שאפשר. מרחיקים לוח אלומיניום אחד מהשני כאשר מקפידים לשמור על מקבילות בין הלוחות. כלוחות אלומיניום יכולים לשמש ריבועי קרטון מצופים בנייר אלומיניום. אל כל אחד מהלוחות מדביקים לוחות PVC (כגון אלו המצויים במערכת הניסויים באלקטרוסטטיקה). לוחית ה-PVC משמשת כידית החזקה מבודדת. משתמשים בקולונמטר כדי לבדוק את תוצאות הפעולה.

(ג) אם מצליחים, בעזרת השקף המשופשף, לטעון את שני הלוחות במטענים שווים בגודלם (לפחות בקירוב) והפוכים בסימנם, אפשר להשתמש בלוחות אלה כדי



תרשים 3: תצלום המערכת עם נייר פולרי

שלב שני:

חקירת השדה החשמלי של מוליך גלילי ארוך טעון

(א) בעזרת השקף המשופשף טעונים את המוט הגלילי הארוך (פקק הגומי מהווה בסיס מבודד למוט המתכת); בסיס זה מאפשר להחזיק את המוט הטעון ביד ולהציב אותו על השולחן מבלי לפרוק את מטענו).
(ב) מציבים את המוט הגלילי הטעון במרכז של דף נייר פולרי ובעזרת מתקן כדור הבוחן מסרטטים את "המפה הווקטורית" של השדה החשמלי שלו.

מתוצאות הניסוי ניתן ללמוד כי גם השדה הרדיאלי של המוט הארוך הטעון קטן עם המרחק, אולם התלות במרחק של השדה חריפה פחות מאשר התלות במרחק לגבי כדור מוליך טעון. שוב - אם הלוחות נמוכה, אפשר להראות כי

לבדוק בעזרת מיתקן כדור הבוחן את השדה החשמלי שהם יוצרים כשהם ניצבים מקבילים, במרחק d זה מזה.

שלב חמישי:

חקירת השדה החשמלי בין הלוחות של קבל

חקירה מקיפה ומדוייקת יותר של השדה החשמלי בין לוחות קבל מתאפשרת, כמובן, כאשר הלוחות מחוברים למקור מתח D.C. גבוה. בעזרת מיתקן כדור הבוחן ניתן לבדוק בקלות את התלות של \vec{E} במתח V ובמרחק d אשר בין הלוחות.

לבסוף ברצוני להעיר כי גם את הניסויים של מיפוי הקווים שווי הפוטנציאל, אותם הזכרתי בראשית דברי, אפשר ורצוי לשפר ולשכלל, ולהופכם לניסויים של מדידה ישירה של עוצמות שדה חשמלי. כל מה שדרוש לשם כך הוא לחבר לשני ההדקים של וולטמטר, בתיילי הולכה ארוכים, שני

מוטות מוליכים דקים ומקבילים שמרחק קטן וקבוע Δx מפריד ביניהם. אם בניסוי משתמשים במגש עם מי ברז, טובלים בהם את קצות שני המוטות הדקים, מקפידים על כך שאחד המוטות ישאר קבוע במקומו, ומסובבים את המוט השני סביב מוט זה המשמש כציר סיבוב. ברור שכאשר שתי הנקודות בהן נוגעים קצות המוטות הדקים הן על קו שדה, המתח הנמדד (בערכו המוחלט) מירבי; וכאשר שתי הנקודות בהן נוגעים קצות המוטות הדקים הן על קו שווה פוטנציאל - המתח מתאפס.

מראה מקום

1. גלר צ., זינגר, ד. וכהן ר., פרקים באלקטרומגנטיות, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, (1986).
 2. שוורץ, ר., מדריך לניסויי מעבדה בפיסיקה, עמ' 77-80, דפוס מולטיליט, (1988).
- כך, אשר, כיצד למפות שדה חשמלי מבלי להרטב? תהודה, כרך 8, (1), עמ' 35-36 (1979).