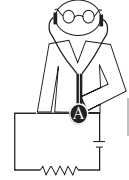


מה חדש במעבדה



האם סיכוך אלקטרוסטטי פועל בשני הכיוונים?*

צבי אלר ואסתר כסנן, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, רחובות

תקציר

במאמר זה מתוארים שני ניסויים; הראשון מראה שמטען אלקטרוסטטי מחוץ למשטח מוליך סגור אינו יוצר שדה חשמלי בחלקו הפנימי של המשטח, ואילו השני מראה שמטען אלקטרוסטטי המוקף במשטח מוליך סגור אכן יוצר שדה מחוץ למשטח זה.

מלות מפתח:

חוק גאוס, סיכוך אלקטרוסטטי

פועל בשני הכיוונים! על אף העובדה

שההוכחה התיאורטית של טיעון זה היא ישירה ופשוטה, החלטנו לאשש אותה באמצעות ניסוי מתאים. בתחילה לא הוכתרו מאמצינו בהצלחה, היות שהקליפות הסגורות המוליכות (כלובי Faraday) בהן השתמשנו לא היו מבודדות במידה מספקת. ברור שבמקרה של מוליכים מוארקים אפקט הסיכוך אכן פועל בשני הכיוונים. אחרי ששכללנו את הציוד בו השתמשנו, הניסויים השתפרו והתוצאות שהתקבלו היו ברורות וחד משמעויות.

עבור $r < a$ קיים:

$$(1) \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = E \cdot 4\pi r^2 = \sum \frac{q}{\epsilon_0} = \frac{q}{\epsilon_0}$$

לכן:

$$(2) E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$$

אם $a < r < b$ אנו נמצאים בחלל המוקף במוליך, מקום שם $E = 0$.
אם $r > b$ המטען הכולל המוקף על ידי המשטח הגאומטרי הוא המטען הנקודתי q . המוליך החלול נשאר בלתי טעון, כפי שהיה מלכתחילה. ברור אפוא שצריך להיות מטען על פניו החיצוניים, השווה בגודלו והפוך בסימנו למטען שעל פניו הפנימיים, אשר מצידו שווה בגודלו והפוך בסימנו למטען q . לכן:

$$(3) \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q}{\epsilon_0}$$

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$$

לכן:

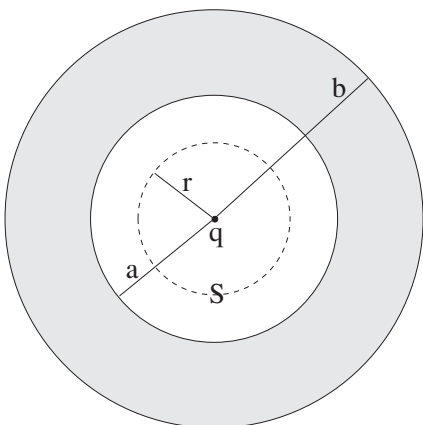
כלומר, בניגוד למשפט מתוך ספרו של פיינמן המצוטט לעיל, מטען נקודתי המוקף על-ידי קליפה מוליכה אכן גורם ליצירת שדה מחוץ לקליפה זאת, שדה שהוא תוצאה של הפרדת מטענים כפי שהסברנו. **הסיכוך בכל זאת אינו**

...הראינו שאם חלל מוקף כולו בקליפה מוליכה, שום התפלגות אלקטרוסטטית של מטענים מחוץ לקליפה אינה יכולה ליצור שדות חשמליים בתוכה. דבר זה מסביר את העיקרון של "סיכוך" מכשור חשמלי באמצעות הכנסתו אל תוך קופסה העשויה מתכת. אפשר להשתמש באותם הטיעונים עצמם כדי להראות ששום התפלגות מטענים המוקפים בקליפה מוליכה אינה יכולה לגרום לשדות חשמליים מחוצה לה. הסיכוך פועל בשני הכיוונים..."

מתוך:

The Feynman Lectures on Physics¹

בעוד שחלקו הראשון של הטיעון הנייל הוא עובדה פיסיקלית ידועה היטב, החלק השני של ציטוט זה הוא בניגוד גמור לאחד החוקים היסודיים באלקטרוסטטיקה: חוק גאוס. נניח שניישם את חוק גאוס לקליפה כדורית מוליכה בלתי טעונה, שרדיוסה הפנימי a ורדיוסה החיצוני b , כאשר במרכז הקליפה נמצא מטען נקודתי q (תרשים 1). נבנה משטח כדורי (משטח גאוס) S שרדיוסו r אשר במרכזו נמצא המטען q .

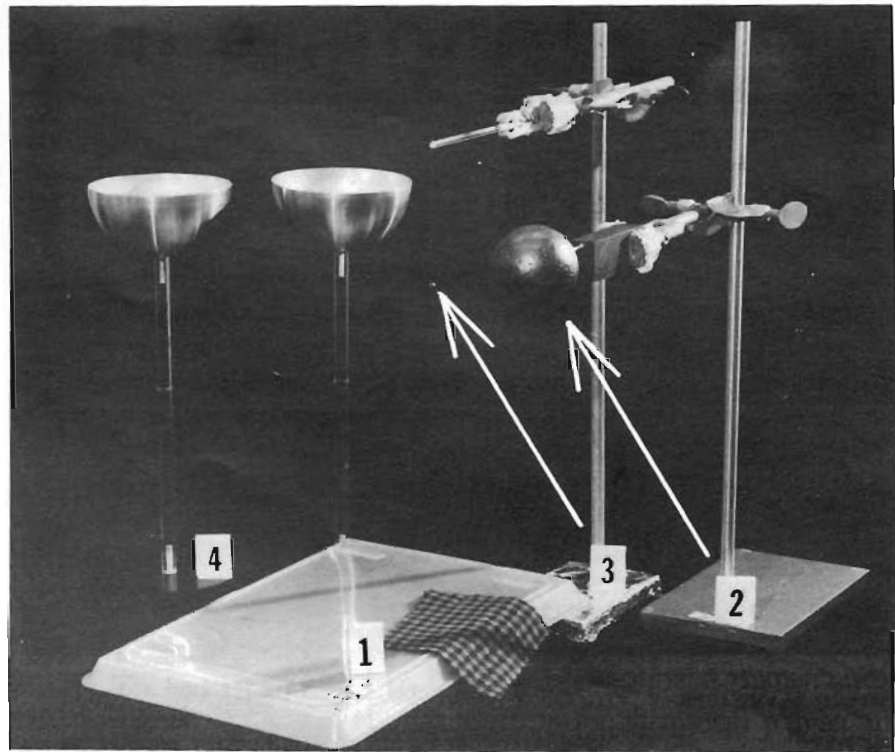


תרשים 1: מטען נקודתי הנמצא במרכז קליפה כדורית מוליכה בלתי טעונה

הניסוי הראשון

הצבנו את הכדור הטעון הקטן ה"תלוי", המשמש כמטען בוחן לשדה חשמלי, במרחק של כ-12 ס"מ ממרכז הכדור הטעון הגדול יותר. את שני חצאי הכדור המתכתיים הבלתי טעונים הצבנו משני צידי הכדור התלוי, באופן שהיו זה מול זה, ובמרחק סנטימטרים ספורים מהכדור ה"תלוי". הסחה ברורה של החוט הנושא את הכדור הקטן (ה"בוחן") העידה על קיום שדה אלקטרוסטטי שנוצר על-ידי הכדור הגדול הטעון (תרשים 3).

קרבתו בעדינות את שני חצאי הכדור האחד אל השני, עד שהם הקיפו את הכדור התלוי הקטן מבלי שנגעו בו. כתוצאה מפעולה זו, חזר כדור הבוחן המוסח למצבו ההתחלתי, המאוּנָך (תרשים 4), ובכך הראינו שהשדה החשמלי שנוצר על-ידי הכדור הטעון הגדול לא חדר אל החלל המוקף על-ידי הכדור המוליך.



תרשים 2: הציוד בו השתמשנו בניסויים (פרטים בנספח)

רגעית שני חצאי הכדור (פריט 4 בתרשים 2), על מנת לוודא שלא יהיו טעונים.

בתרשים 2 רואים את המכשור בו השתמשנו בניסויים שלנו; תיאור מפורט יותר של מכשור זה יינתן בנספח למאמר זה.

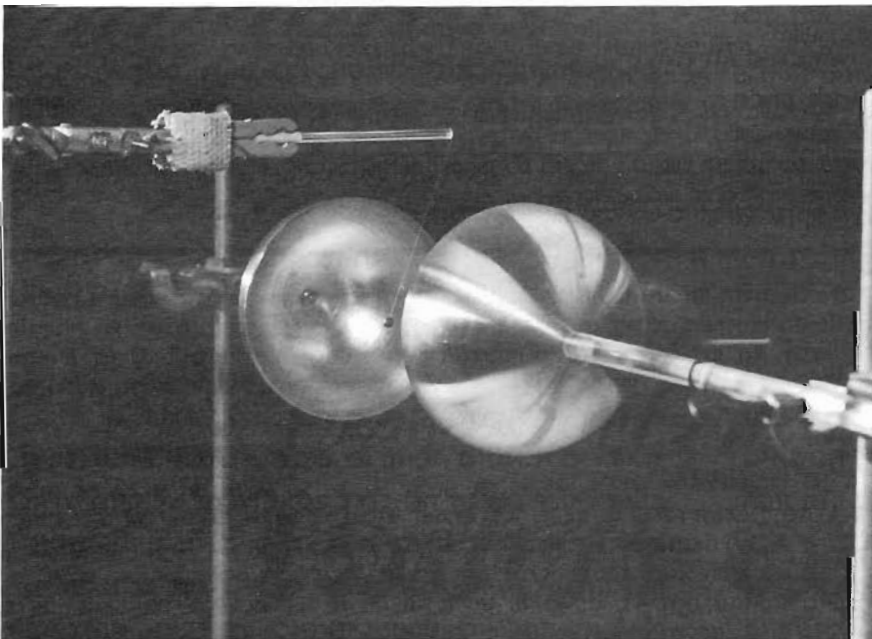
הכנות

(1) השקף שעל מגש הפלסטיק (פריט 1 בתרשים 2) הוטען במטען שלילי על-ידי שפשופו עם מטלית צמר.

(2) החזקנו את השקף המשוּפָּשֵׁף קרוב לפנינו המוליכים של כדור הקל-קר (פריט 2 בתרשים 2), ואז הארְקנו את המוליך על-ידי נגיעת אצבע; באופן זה הכדור נטען במטען חיובי על-ידי **השראה אלקטרוסטטית**.

(3) הכדור המוליך הקטן ה"תלוי" (פריט 3 בתרשים 2) נטען על-ידי הבאתו במגע עם הכדור הגדול יותר, השתמשנו בו אחר כך כ**מטען בוחן** לשדות אלקטרוסטטיים.

(4) לפני כל אחד מהניסויים, הוארקו



תרשים 3: מטען בוחן המראה על קיומו של שדה חשמלי בנקודה בקרבת כדור טעון. שני חצאי כדור בלתי טעונים נמצאים זה מול זה במרחק מה ממטען הבוחן, הנמצא ביניהם.

של המשטח הסגור (סיכוך אלקטרוסטטי), הניסוי השני מוכיח שמטען סטטי המוקף במשטח מוליך סגור אכן יוצר שדה מחוץ למשטח זה. נשאר לנו רק לתהות למה התכוון ריצ'רד פינמן במשפט המצוטט בתחילת המאמר.

נספח

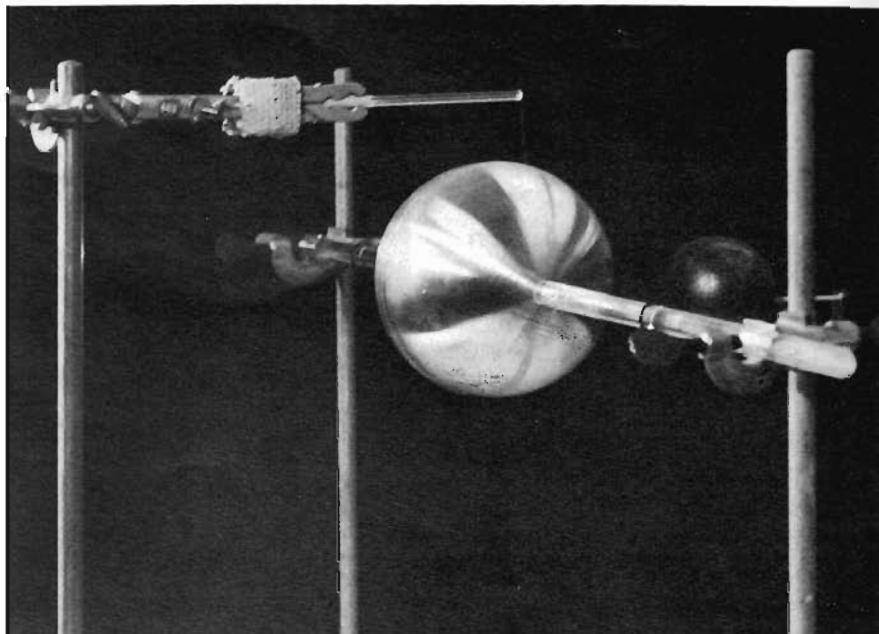
תיאור הציוד בו השתמשנו (תרשים 2):

פריט 1. שקף פלסטיק הדבוק למגש פלסטיק, ומטלית צמר.

פריט 2. כדור קל-קר מצופה בשכבה מוליכה מגרפיט. הכדור בעל קוטר של כ-6 ס"מ הוחזק על-ידי ידית מבודדת המחוברת לכן.

פריט 3. כדור קל-קר קטן המצופה בשכבה מוליכה מגרפיט, ותלוי על כן באמצעות חוט פלסטיק דק; כדור זה משמש כמטען בוחן לגילוי שדות אלקטרוסטטיים.

פריט 4. שני חצאי כדור מתכתיים המחוברים למוטות מבודדים ארוכים.



תרשים 4: אותו מטען הבוחן כבתרשים 3, המראה שהשדה החשמלי מתאפס בחלק הפנימי של קליפה כדורית מוליכה אפילו בקרבת כדור טעון

מסקנות

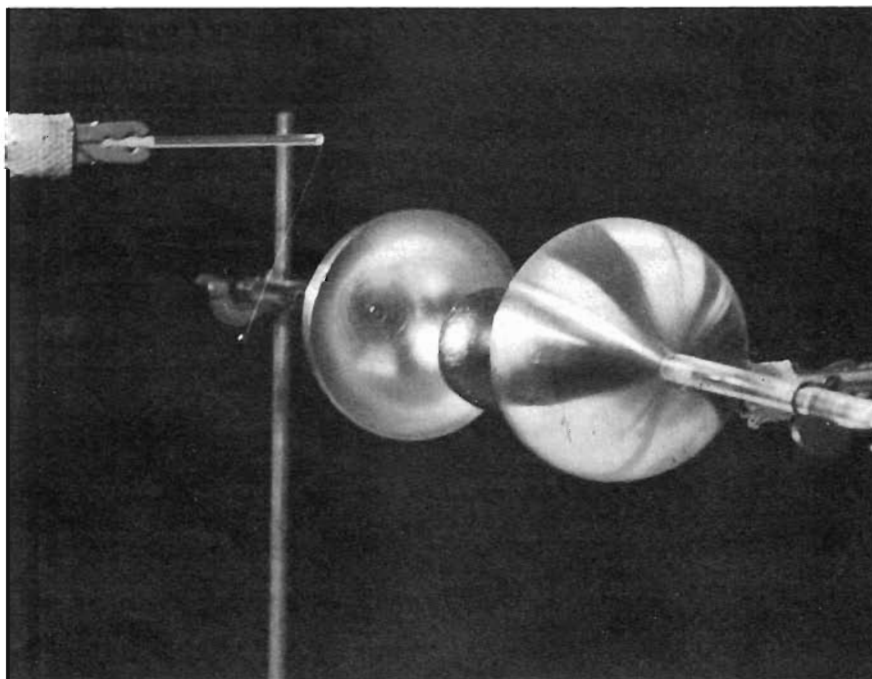
בעוד שהניסוי הראשון מוכיח שמטען אלקטרוסטטי מחוץ למשטח מוליך אינו יוצר שדה חשמלי בחלק הפנימי

הניסוי השני

ניסוי זה דומה לראשון. ההבדל היחידי בין שני הניסויים הוא מיקומם של שני חצאי הכדור. בניסוי זה הצבנו את חצאי הכדור זה מול זה משני צידי הכדור הטעון הגדול. הכדור הטעון הקטן שוב שימש כמטען בוחן לשדה האלקטרוסטטי (תרשים 5).

המרווח בין שני חצאי הכדור הבלתי טעונים נסגר מבלי שנגעו בכדור הטעון הגדול. למרות שכדור זה הוקף עתה כמעט לגמרי על-ידי משטח מוליך, לא היה כמעט שינוי בזווית ההסחה של כדור הבוחן (תרשים 6).

הגדלנו בהדרגה את המרחק בין שני חצאי הכדור, עד שסילקנו אותם לגמרי. העובדה שפעולה זאת לא שינתה את זווית ההסחה של כדור הבוחן מוכיחה, שלא היתה העברת מטען מן הכדור הגדול אל שני חצאי הכדור. תוצאות אלה מוכיחות בעליל שהכדור הטעון המוקף במשטח המוליך יוצר שדה חשמלי בחוץ.



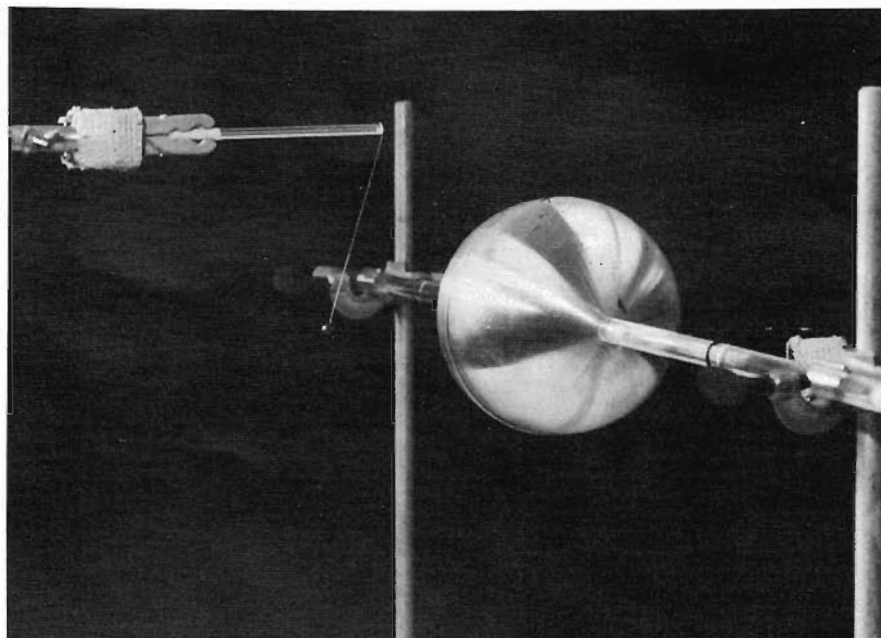
תרשים 5: מטען בוחן המראה את קיומו של שדה חשמלי בקירבת כדור טעון. שני חצאי כדור מוליכים בלתי טעונים נמצאים זה מול זה במרחק מה מן הכדור הטעון הנמצא ביניהם.

חצאי הכדור היו החצאים העליונים של שני כדורי PASCO שקוטרם 13 ס"מ (PASCO ES9059). אחרי שהורדנו את המחצית התחתונה של כל כדור, הפכנו את המחצית העליונה וחיברנו אותה לקצה המוט המבודד. אחר כך חיברנו את המוטות בצורה אופקית לשני כנים.

שלמי תודה
אנו מודים לראש המחלקה להוראת המדעים, פרופ' אורי גניאל, ולחברינו רפי כהן ושלמה רוזנפלד, על עזרתם ועל דיון פורה. כמו כן אנו מודים לגב' נורית ארד על עזרתה הרבה ושיתוף הפעולה.

מראי מקום

1. Feynman, R. P., Leighton, R.B & Sands, M., The Feynman Lectures on Physics, Vol. 2, pp 5-9, Addison-Wesley, Reading MA, 1964



תרשים 6: אותו מטען בוחן כבתרשים 5, המראה את קיומו של שדה חשמלי מחוץ לקליפה כדורית מוליכה המקיפה את הכדור הטעון

* מאמר זה הופיע לראשונה ב "The Physics Teacher" Vol 32, (1), pp. 20-22 (1994). התרגום מופיע כאן ברשות המערכת והמחברים.