יין ישן בקנקן חדש

מבין כ-250 מורים שהגישו תלמידים לבחינת הבגרות במעבדה בשנת הלימודים תשנ"ב (במסגרת 15 הניסויים במתכונת ה'רגילה'), רק 7 מורים בחרו בניסוי אלקטרוליזה. ניסוי זה משלב מושגים מלימודי החשמל וממבנה החומר, והוא הניסוי היחיד (ברשימת הניסויים המומלצים לבית הספר התיכון), שבאמצעותו ניתן לחשב את מטען האלקטרון. אחת הסיבות לחוסר הפופולריות של ניסוי זה נובעת לדעתי מהעדר תיעוד זמין של הניסוי. (נוסח של הניסוי מתואר בספר "ניסויים לבית הספר התיכון", וכן ב"חשמל וחוקי שימור" שהדפסתם הופסקה לפני שנים אחדות). סיבה נוספת היא הנטייה שלנו כמורים לבחור בניסויים העשויים לעזור לתלמידים בבחינת הבגרות בכתב. ניסוי האלקטרוליזה דורש הכרה והבנה של המושגים: צפיפות, מול, מסה מולרית ומספר אבוגדרו, אשר רובם אינם נדרשים בבחינה בכתב.

במאמר זה אציג גירסה חדשה של הניסוי, אשר קלה יחסית לביצוע. מטען האלקטרון המתקבל מתוצאות ניסוי זה הוא בעל דיוק משביע רצון. הניסוי יכול להשתלב בהוראה בלימודי 'חשמל' או 'פיסיקה מודרנית' (ראה למשל "נושאים בפיסיקה של המאה העשרים" - כהן, גניאל וקירש, 1992, עמ' 72). אחר מציאת מטען האלקטרון באמצעות ניסוי זה מומלץ למדוד את היחס e/m של אלקטרון, (באמצעות שפופרת טלטרון למשל), ומתוצאות שני הניסויים לחשב גם את מסת האלקטרון.

עדי רוזן

מציאת המטען היסודי באמצעות אלקטרוליזה

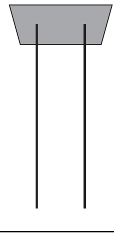
עדי רוזן, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, רחובות,
ומשרד החינוך והתרבות

מטרת הניסוי

מציאת המטען החשמלי היסודי מתוך התוצאות של ניסוי אלקטרוליזה.

הציוד הדרוש:

★ כוס שתכולתה כ- $400\ cm^3$.
★ כוס שתכולתה כ- $100\ cm^3$.
★ משורה שתכולתה $100\ cm^3$.
★ שתי אלקטרודות ספירליות (עשויות נירוסטה).
★ 2 לוחיות נחושת נקיות[1] נעוצות בשני חתכים בפקק גומי (ראה תרשים).



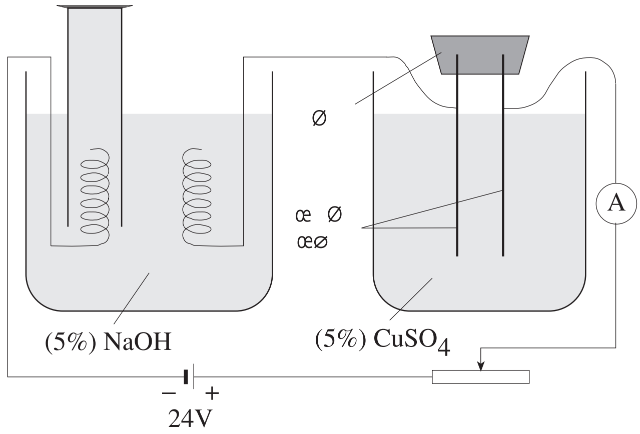
★ כ- $450\ cm^3$ תמיסה של בסיס NaOH שריכוזה כ- 5%.
★ כ- $80\ cm^3$ תמיסה של מלח $CuSO_4$ שריכוזה כ- 5%.
★ מקור מתח ישר של 24V.
★ אמפרמטר בתחום של 0 - 5A (רצוי אנלוגי).
★ נגד משתנה שהתנגדותו כ- 20Ω.
★ חמישה תיילים מוליכים - תיל אחד עם שני מצבטי "תנין" בקצוות, שני תיילים עם מצבט "תנין" אחד לכל תיל, ובקצוות התיילים האחרים מצבטי "בננה".
★ מאזניים שרגישותן 0.01 g.
★ שני כנים (סטטיבים) ; כל אחד עם מצמד ואוחז.
★ שעון עצר (תחום דיוק של שניות).
★ שני אטבי כביסה.
★ נייר פאראפילם (Parafilm) שממדיו כ- $5cm \times 5cm$.
★ פינצטה ארוכה.

(1) כדי לנקות את לוחיות הנחושת טבול אותן בתמיסה הכוללת: 1/3 חומצת חומץ, 1/3 חומצה חנקתית, 1/3 חומצה זרחתית. יש להקפיד על אמצעי זהירות בביצוע פעולה זו: הוצא בזריזות את לוחית הנחושת מתערובת החומצות בעזרת פינצטה, שטוף אותה במים ונגב במגבת נייר. הקפד להרכיב משקפי מגן. כל התהליך <u>חייב</u> להתבצע במנדף.

הרכבת המערכת הניסויית

בנה את המערכת הניסויית המתוארת בתרשים 1, **ללא המשורה**; מזוג לכוס הגדולה תמיסה של NaOH, ולכוס הקטנה תמיסה של $CuSO_4$, כך שבכל אחת משתי הכוסות יגיעו הנוזלים לגובה של כ-2 ס"מ מתחת לשפת הכוס (אל תשתמש במשורה לצורך מזיגת תמיסה של מלח $CuSO_4$ לכוס).

את שתי האלקטרודות הספירליות הדק לכוס הגדולה באמצעות אטבים. את הפקק (עם שתי לוחיות הנחושת) הדק באמצעות אוחז המחובר לכן באופן ששתי הלוחיות תהיינה טבולות בתמיסה של $CuSO_4$. בנה את המעגל החשמלי כשמצבטי "התנין" משמשים לחיבור התיילים לאלקטרודות וללוחיות הנחושת. כוון את מקור המתח ל- 24V .



תרשים 1

ביצוע הניסוי

הפעל את מקור המתח, וקבע באמצעות הנגד המשתנה את עוצמת הזרם לערך בין 1A ל- 2A. רשום את עוצמת הזרם; I = ____ A, והפסק את פעולת מקור המתח.

הסר את לוחית הנחושת המחוברת להדק החיובי של מקור המתח, ויבש אותה (ניתן לנגב את הלוחית באמצעות נייר).

מדוד ורשום את מסתה: m_1 = ____ g

החזר את אלקטרודת הנחושת לתוך החתך בפקק. מלא את המשורה בתמיסה של NaOH, וסגור אותה באמצעות נייר פאראפילם. אם נשאר אוויר במשורה, רשום את נפחו: V_0 = _____ cm^3. הפוך את המשורה והכנס אותה לכוס הגדולה כך שהיא תימצא בדיוק מעל הספירלה של האלקטרודה המחוברת להדק השלילי של הספק. הדק את המשורה לכן באמצעות אוחז, והסר את נייר הפאראפילם באמצעות פינצטה. הורד את המשורה כך שהספירלה תהיה בתוך המשורה.

הפעל בו-זמנית את שעון העצר ואת מקור המתח.

וודא שעוצמת הזרם במהלך הניסוי נשארת קבועה (כפי שרשמת לעיל). אם עוצמת הזרם משתנה - ייצב אותה באמצעות הנגד המשתנה.

לאחר שרוב המשורה התמלאה במימן, הפסק בו זמנית את פעולת שעון העצר ואת פעולת מקור המתח.

מדוד ורשום את:

משך הניסוי: t = ____ s.

נפח המימן במשורה: V = ____ cm^3. (אל תשכח לקחת בחשבון את נפח האוויר V_0 שהיה במשורה בתחילת הניסוי)

מסת לוחית הנחושת (זו שאת מסתה מדדת בשלב המקדים) לאחר ייבושה: m_2 =____ g .

ניתוח תוצאות הניסוי

א. חשב את כמות המטען שעברה במעגל החשמלי במהלך הניסוי.

ב. על-פי תוצאות הניסוי שהתקבלו לגבי המימן:

1. חשב את מספר אטומי המימן שהופרשו למשורה. המימן במשורה הוא דו-אטומי. מספר אבוגדרו (מספר מולקולות במול) הוא כ- 6×10^{23}. נפח מול גז בתנאי המעבדה הוא כ- 24,500 cm^3 (בתנאים תקניים נפחו 22,400 cm^3).
2. חשב את המטען היסודי.

ג. על-פי תוצאות הניסוי שהתקבלו לגבי אלקטרודת הנחושת:

1. חשב את הפחת במסת לוחית הנחושת.
2. חשב את מספר אטומי הנחושת שהופרשו מלוחית הנחושת לתמיסה. המסה המולרית של הנחושת היא כ- 63.5 g.
3. חשב את מספר אטומי המימן שהופרשו לכל אטום נחושת. מהו לפיכךהמטען של יון נחושת?

שאלה

1. אילו למעגל החשמלי היה מחובר בטור אמבט שלישי ובו תמיסה של מלח אלומיניום, מה היה פחת המסה של אנודה זו אם במעגל היתה עוברת אותה כמות מטען? (המסה האטומית של אלומיניום היא 27 g, וערכיותו 3).

דוגמה של תוצאות ניסוי וניתוחם

להלן מובאות תוצאות שהתקבלו באחד הניסויים:

$m_1 = 6.32$ g ; $I = 2$ A ; $t = 270$ s ; $V = 70$ cm^3 ;

$m_2 = 6.13$ g

א. כמות המטען Q שעברה במעגל במהלך הניסוי:

$$Q = It = 2 \cdot 270 = 540\,\mathrm{C}$$

ב. 1. מספר אטומי מימן (דו-אטומי) N_{H} שהופרשו:

$$N_{\mathrm{H}} = \frac{2\cdot(6\cdot 10^{23})\cdot 70}{24500} = 3.43\times 10^{21}$$

2. המטען האלמנטרי e:

$$e = \frac{Q}{N_{\mathrm{H}}} = \frac{540}{3.43\times 10^{21}} = 1.57\times 10^{-19}\,\mathrm{C}$$

ג. 1. הפחת Δm במסת לוחית הנחושת:

$$\Delta m = 6.32 - 6.13 = 0.19 \text{ g}$$

2. מספר אטומי הנחושת N_{Cu} שהופרשו לתמיסה:

$$N_{\mathrm{Cu}} = \frac{(6\cdot 10^{23})\cdot 0.19}{63.5} = 18\times 10^{20}$$

3. המטען q של יון נחושת:

$$q = \frac{Q}{N_{\mathrm{Cu}}} = \frac{540}{18\times 10^{20}} = 3\times 10^{-19}\,\mathrm{C}$$

$$\Rightarrow \frac{q}{e} = \frac{3\times 10^{-19}}{1.57\times 10^{-19}} \approx 2$$

מראי מקום

ניסויים בפיסיקה לבית הספר התיכון, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, תשל"ה.

חשמל וחוקי שימור, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, תש"ל.

כהן, ר., גניאל, א. וקירש, י. (1992), נושאים בפיסיקה של המאה העשרים, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, תשנ"ג.

חוק שימור התנע – ניסוי חדש

רפי שוורץ, ביה"ס התיכון עירוני ה' חיפה

התנע הוא אחד הגדלים היסודיים בפיסיקה בגלל התכונה החשובה שלו להישמר במערכת סגורה (או קרוב מאוד לסגורה). מעטים הם הגדלים שנהנים מתכונה כזאת, ובבית הספר התיכון התלמידים מכירים רק גודל אחד נוסף כזה, הוא האנרגיה.

בשני הגדלים הנ"ל - תנע ואנרגיה קינטית - מופיעים המסה m והמהירות v.

אם חוקרים את הקשר בין שינוי התנע והאנרגיה הקינטית כתוצאה מהפעלת כוח מגיעים למסקנה כי:

$$\vec{F}\cdot\vec{\Delta x} = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}$$

$$\vec{F}\cdot\Delta t = m\vec{v}_2 - m\vec{v}_1$$

בולט הדמיון הרב בין הצורה המתימטית של שני הביטויים, והדבר נובע מהתפקיד שממלא הכוח בשני התהליכים הנ"ל:

- *שינוי האנרגיה* הקינטית מאפיין את פעולת הכוח השקול על מסת הגוף לאורך דרך מסויימת.
- *שינוי התנע* של גוף מתאר את פעולת הכוח בפרק זמן מסויים. עובדה חשובה נוספת: למתקף יש אופי ווקטורי שמחייב להתחשב בכל השיקולים המתימטיים הקשורים בכך. הניסוי שמבצעים היום בבתי הספר[1] לאימות שימור התנע הוצע בסביבות שנות ה-60 בתוכנית PSSC, ומבוסס על האופי הווקטורי של גודל זה. עקרון הניסוי יפה ופשוט ומוכר לכולנו מהעבודה היום יומית. אך מאותה התנסות שוטפת למדנו שיישום העיקרון הנ"ל נתקל בקשיים הנובעים מהמערכת הניסויית בה אנו משתמשים ואשר לא שונתה מאז. אפרט כמה מהם:

---

fi6 §æ Ø æØ fi ª Ø ° ‹ Ø ª œ Ł ‹Ł Ø

- קושי להבטיח את אופקיות מסלול השיגור בגלל חוסר באמצעי ויסות.
- וויסות גובה כדור המטרה אינו מדוייק, ולרוב התלמידים מתעלמים מפעולה זו.
- זוויות פגיעה מסוימות אינן שמישות בגלל קצות הכן המחזיק את מסילת השיגור, והדבר הופך את המערכת לפתוחה.
- אי יכולת להשתמש בכדורים בעלי קוטר שונה כדי לשנות רק את המסה ללא שינוי סוג החומר (אופי ההתנגשות).
- בדיקת שימור האנרגיה נעשית אך ורק בעזרת המרחקים הנימדדים על הנייר (x), ותוך כדי כך השגיאה בתוצאה גדלה (v^2 דורש x^2).
- קביעת מהירות הכדור הפוגע על פי שיקולים אנרגטיים הקשורים במסילת השיגור איננה מדוייקת בגלל גילגול הכדור והחיכוך עם המסילה.
- המערכת הנוכחית אינה מאפשרת חקירת ההתנגשות המתחוללת כאשר שני הכדורים נמצאים בתנועה לפני הפגישה וההתנגשות אינה התנגשות מצח (חד - מימדית).
- אופן הישענות כדור המטרה מכניס חיכוך נוסף.
- לכל הנ״ל מתווספת אי-נעימות הנובעת מרעש הכדורים הנופלים מן השולחן ומתפזרים על הריצפה.

לאור ניסיוני האישי וניסיונם של מורים רבים אחרים הגעתי למסקנה שיש מקום להחליף את המערכת הניסויית הנוכחית באחרת שתאפשר מרחב תימרון גדול יותר מחד גיסא ותוצאות טובות יותר מאידך גיסא.

תאור מערך הניסוי

המערכת המוצעת מתוארת בתרשים 1.

החלק העיקרי הוא זוג מטוטלות שמשקולותיהן שני כדורים מאותה מתכת (יכולים להיות בעלי קוטר שונה).

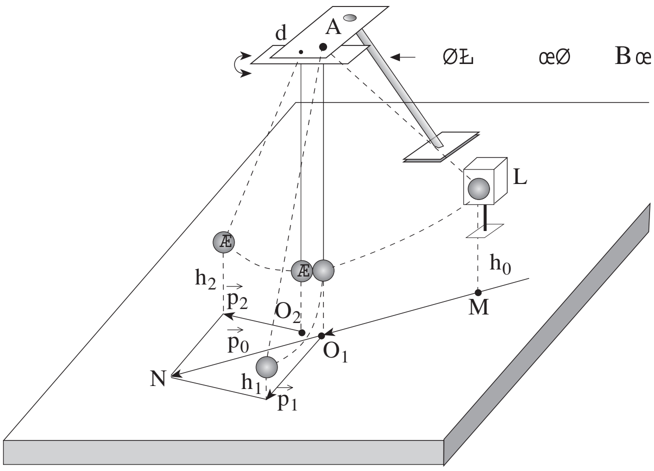
מטוטלת אחת, א׳ - בסרטוט, תלויה באמצעות חוט ניילון בנקודה A שמהווה ציר קבוע, והמטוטלת השניה ב׳ - תלוייה על לוחית אלומיניום - d - המאפשרת סיבוב מטוטלת זו סביב הראשונה. המוט B שמחזיק את המטוטלות ניתן להטיה.

הפריט המסומן ב-L הוא סליל שתפקידו להחזיק את הכדור באמצעות חוט התלייה, בזווית רצויה לפני ההתנגשות.

מתחת למטוטלת מונח דף נייר בגודל המתאים למערכת.

מנגנון פשוט מאפשר התאמת הגובה של שתי המטוטלות.

- כאשר שתי המטוטלות במנוחה, מסמנים על הנייר את היטלי מקומותיהם של שני הכדורים תוך הסתכלות מלמעלה: מסמנים אותם ב O_1 וב-O_2. בעזרת הלוחית d קובעים את הזווית הרצויה, ולאחר מכן מרימים את המטוטלת א׳ עד לנקודה שרירותית שהיטלה על הנייר הוא M, ומקבעים אותה במצב זה בעזרת המשיכה המגנטית של הסליל L.



תרשים 1

משיקולים אנרגטיים, ובלי לשחרר את הכדור א׳, מסמנים על הנייר את הקטע O_1N שווה ל - MO_1, ובהמשכו. הקטע O_1N מיצג את התנע ההתחלתי של כדור א׳, לפני שהתנגש בכדור ב׳ (נוכיח טיעון זה בהמשך). בעזרת לוחית האלומיניום מסיטים את המטוטלת ב׳ בזווית שרירותית כלשהי.

תאור ביצוע הניסוי

בניסוי זה חייבים לשתף פעולה שני תלמידים, כאשר כל אחד מהם עוקב אחרי תנועתו של אחד משני הכדורים.

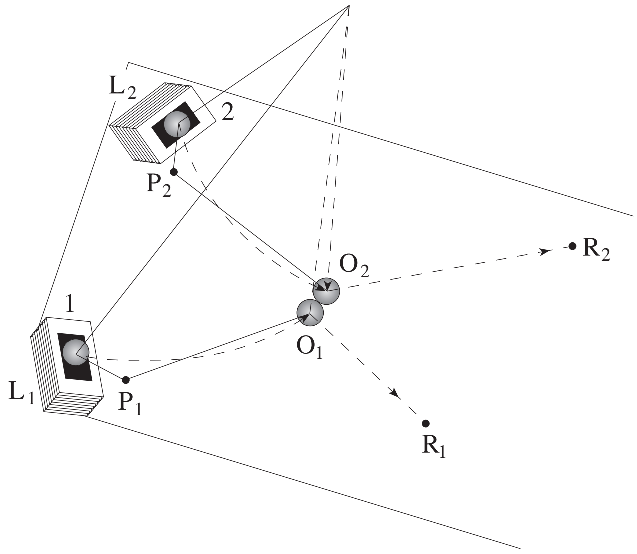
משחררים את המטוטלת א׳ (תוך ניתוק הזרם בסליל). הכדורים יתנגשו ויתפזרו: כאשר הכדור א׳ מגיע לשיא תנועתו ונעצר רגעית, התלמיד - כשהוא מסתכל אנכית - מסמן היטל נקודה זו על הנייר, וכך הוא עושה לגבי כדור ב׳.

חוזרים על ניסוי זה מספר פעמים עד שמקבלים מקבץ סביר ומסרטטים את שני הווקטורים $\vec{p}_1$ ו-$\vec{p}_2$ (תרשים 1).

בהמשך, ניתן להראות כי הסכום הווקטורי של התנעים הסופיים שווה לתנע ההתחלתי.

כדי לקבל תוצאות נוספות מחזירים את הכדור א׳ למקומו ההתחלתי ומשחררים אותו מחדש. הפעם משנים את זווית הפגיעה בכדור ב׳ בעזרת לוחית האלומיניום עליה תלויה המטוטלת. ניתן לחזור על הפעולה הנ״ל לקבלת תוצאות נוספות.

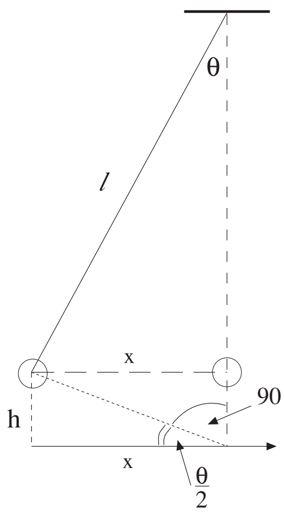
בתרשים 2, מתוארים שני סלילים L_1 ו L_2, כאשר עם שתי המטוטלות במצב מנוחה לפני ההתנגשות. (המערכת מאפשרת שימוש בסליל אחד כאשר המטוטלת ב' תלויה חופשי, או בשני סליליים במקרה ששתי המטוטלות מוסטות לפני ההתנגשות).



תרשים 2

הנמקה מתימטית

בתרשים 3 מתואר מצבה של מטוטלת כלשהי במצב התחלתי לפני ההתנגשות.
על התלמיד לסמן את הנקודה N שהיא ההיטל של מיקום הכדור באותו רגע. בהמשך הוא יעבוד עם הקטע x.
תנועות שני הכדורים הן בעלות מהירות משתנה, ועלינו להוכיח כי בתנאים מסויימים, הקטעים - x פרופורציוניים למהירויות שני הכדורים לפני ההתנגשות ואחריה.



תרשים 3

מהסירטוט, עבור זוויות קטנות:

$$(1)\quad v = \sqrt{2gh} \quad ; \quad \tan\frac{\theta}{2} = \frac{h}{x} \cong \frac{\theta}{2}$$

$$\sin\theta = \frac{x}{l} \cong \theta \quad , \quad h = x\cdot\frac{\theta}{2} = x\cdot\frac{x}{2l}$$

$$v = \sqrt{2\cdot g\cdot x\cdot\frac{\theta}{2}} = \sqrt{2gx\cdot\frac{x}{2l}}$$

קיבלנו כי:

$$(2)\quad v = x\sqrt{\frac{g}{l}}$$

ואם נגדיר $k = \sqrt{\frac{g}{l}}$ נקבל:

$$\boxed{v = k\cdot x}$$

הערכה שתוארה כאן נותנת דיוק סביר עבור זוויות הסחה עד 20°, והיא מאפשרת לנו להתיחס לקטעים x כמיצגים את המהירויות המעניינות אותנו בשימור התנע.
כדי להבטיח תנאי עבודה נכונים כדאי לקחת את אורך המטוטלת $l >> h$ כך שהזוויות θ תהיינה קטנות.

לדוגמה, אם אורך המטוטלת (מנקודת התלייה עד למרכז המסה של הכדור) הוא: $l = 50$ cm, והמרחק x הוא: $x = 15$ cm, מקבלים:

$$\sin\theta = \frac{x}{l} = \frac{15}{50} = 0.3 \quad \Rightarrow \quad \theta = 17^\circ$$

והמהירות v:

Ø ª $v = \sqrt{2gl(1-\cos\theta)} = 0.66$ m/s

Æ± $v = x\sqrt{\frac{g}{l}} = 0.67$ m/s

לאחר ההתנגשות, הזוויות של שתי המטוטלות קטנות עוד יותר, ולכן תנאי העבודה בדוגמה זאת סבירים בהחלט.
שימור התנע יתן, אם כן:

$$m_1\vec{v}_0 = m_1\vec{u}_1 + m_2\vec{u}_2$$

או:

$$m_1\vec{x}_0\sqrt{\frac{g}{l}} = m_1\vec{s}_1\sqrt{\frac{g}{l}} + m_2\vec{s}_2\sqrt{\frac{g}{l}}$$

כאשר s_1 ו- s_2 מייצגים את הווקטורים הנמדדים על הנייר לאחר ההתנגשות (תרשים 6).
עבור מסות שוות:

$$\vec{x}_0 = \vec{s}_1 + \vec{s}_2$$

אם מסמנים את כיוון התנע ההתחלתי כציר X ואת הכיוון המאונך לו כציר Y נקבל עבור מסות שונות (תרשים 6):
על ציר x:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{x_2}{x_0 - x_1}$$

ועל ציר y:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{|y_2|}{|y_1|}$$

לגבי שימור האנרגיה, עלינו להשוות את האנרגיה הקינטית ההתחלתית:

$$E_{k0} = \frac{m_1 v_1^2}{2} = m_1 g h_0$$

לאנרגיה הקינטית הסופית:

$$E_{k1} = \frac{m_1 u_1^2}{2} + \frac{m_2 u_2^2}{2} = m_1 g h_1 + m_2 g h_2$$

h_1 ו-h_2 הם הגבהים אליהם עולים שני הכדורים לאחר ההתנגשות.

נסמן אנרגיה פנימית ב- ΔE; מחוק שימור האנרגיה:

$$E_{k0} = E_{k1} + \Delta E$$

$$\Downarrow$$

$$m_1 g h_0 = m_1 g_1 h_1 + m_2 g h_2 + \Delta E$$

כדי לראות את מידת האלסטיות של ההתנגשות מתוך השיקולים האנרגטיים הנ"ל, מספיק לחשב:

.

$$\frac{E_{k1}}{E_{k0}} = \frac{\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2}}{\frac{m_1 v_0^2}{2}}$$

כאשר המסות שוות:

$$\frac{E_{k1}}{E_{k0}} = \frac{v_1^2 + v_2^2}{v_0^2} \qquad (3)$$

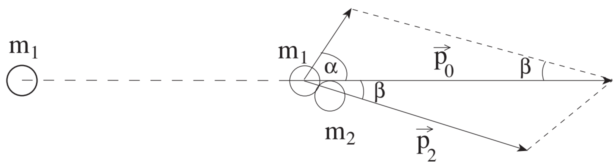
או בעזרת הקירוב (2):

$$\boxed{\frac{E_{k1}}{E_{k0}} = \frac{x_1^2 + x_2^2}{x_0^2}} \qquad (\text{א}3)$$

ראינו במעבר מ (1) ל (2) כי v פרופורציוני ל x וכן ל $\sqrt{h}$, ולכן:

$$\boxed{\frac{E_{k1}}{E_{k0}} = \frac{h_1 + h_2}{h_0}} \qquad (4)$$

בהתנגשות בשני ממדים, איבוד האנרגיה המיכנית, כלומר מידת האלסטיות של ההתנגשות, תלוי בזווית ההתנגשות, כפי שניתן להסיק מתרשים 4 :



תרשים 4

אם משתמשים במשפט הסינוסים:

$$\frac{p_1}{\sin\beta} = \frac{p_2}{\sin\alpha} = \frac{p_0}{\sin[180 - (\alpha+\beta)]}$$

כאשר המסות שוות מציבים בביטוי3א מקבלים:

$$\boxed{\frac{E_{k1}}{E_{k0}} = \frac{\sin^2\alpha + \sin^2\beta}{\sin^2(\alpha+\beta)}} \qquad (5)$$

בהתנגשות אלסטית בין מסות שוות, $\alpha + \beta = 90°$, כלומר: $\sin\alpha = \cos\beta$, ונקבל:

$$\frac{E_{k1}}{E_{k0}} = 1$$

האנרגיה הקינטית בהתנגשות אלסטית נשמרת.

מהלך הניסוי

- מרכיבים את המערכת המתוארת בתרשים 1 כאשר שני הכדורים יכולים להיות גם בעלי קוטר שונה ועשויים מחומרים שונים (מתכת, עץ, פלסטיק וכו')
- מסמנים את הנקודות O_1 ו-O_2, שהן היטלי מיקומם של שני הכדורים במצב מנוחה חופשית של שתי המטוטלות.
- בוחרים נקודה M שרירותית, כך שהקטע MO_1 יהיה באורך של 20-15 ס"מ (ראה תרשים מס' 1).
- מסיטים את המטוטלת שמחזיקה את הכדור א' - כך שהכדור יגיע מעל הנקודה M, ומצמידים אותו לסליל L .

מסובבים את לוחית האלומיניום בזווית כלשהיא.

- מסמנים ב N את היטל הנקודה אליה יגיע הכדור אם ישוחרר לפני ההתנגשות, אך אין צורך לבצע פעולה זו (משיקולים אנרגטיים נוכל להיות בטוחים כי אכן כך יהיה).
- מפסיקים את הזרם בסליל ושני תלמידים, בעת ובעונה אחת, עוקבים אחרי תנועתו של כל אחד מהכדורים ומסמנים על הנייר את ההיטלים של נקודות השיא אליהן הכדורים מגיעים.

השימוש בסליל כמחזיק את הכדור לפני שחרורו, מבטיח דיוק כאשר חוזרים על אותו ניסוי, ומשחרר את התלמידים למשימה העיקרית של הניסוי: ***מעקב וסימון נקודות השיא בתנועת הכדורים לאחר ההתנגשות.***

הצלחת הניסוי תלויה במידת הדיוק בה התלמידים מצליחים לסמן את נקודות השיא בתנועת הכדורים, והדבר דורש אימון בפעולה זו. מומלץ לשם כך, שהתלמידים יתרגלו לתנועת המטוטלת וסימון נקודת השיא בלי לבצע מדידות של ממש, ורק כאשר הם מיומנים יש להתחיל בניסוי הכמותי.

מניסיון אישי, כדאי לייעץ לתלמידים לעקוב אחר תנועת הכדורים, לחזור על פעולה זו באותם התנאים, ולחכות לכדור באזור אליו הוא יגיע פחות או יותר, ורק אז לסמן את המיקום.

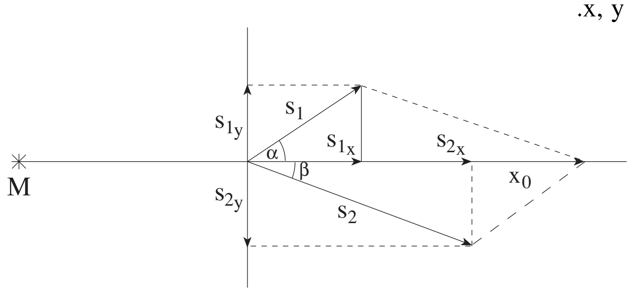
דרך נוספת: עוקבים אחרי תנועת הכדור "ומסמנים" עם האצבע על הנייר, לאחר מכן מבצעים סימון של ממש. ***בכל הפעולות הנ"ל הסתכלות התלמיד צריכה להיות אנכית ככל שניתן, כדי להימנע מטעות הנגרמת על-ידי פראלקסה.***

בתרשים 5 מיוצגים הווקטורים שאת אורכיהם עלינו למדוד בניסוי מסוים:

$\vec{x}_0$ התנע ההתחלתי

$\vec{s}_1$, $\vec{s}_2$ ווקטורי המהירות של ***שני*** הכדורים לאחר ההתנגשות.

s_{1x} , s_{1y} ו-s_{2x} , s_{2y} היטלי הווקטורים - $\vec{s}_1$ ו-$\vec{s}_2$ על הצירים x, y.



תרשים 5

להלן מובאות תוצאות שני ניסויים:

ניסוי מס' 1:

- התנגשות בין שני כדורי פלדה (כדורי מיסב) בעלי קטרים שווים ומסות שוות: $m_1=m_2= 131g$.

כדור מס' 2 נמצא במנוחה לפני ההתנגשות.

נערכו 4 ניסויים עבור זוויות שונות של הלוחית d, כאשר הנקודה M נשארה קבועה (תרשים 1).

בתרשים 6, שהוא תצלום מוקטן של דף הניסוי כפי שהתקבל במציאות, ניתן לראות את התוצאות הגראפיות של ארבעת הניסויים הנ"ל. בטבלה 1 מופיעות תוצאות כמותיות של הניסויים שסומנו בתרשים 6 ב-A , B ו-C. (מספיקות כדי להסיק מסקנות).

חוק שימור התנע דורש שיתקיים:

לאורך ציר x : $\vec{x}_0 = \vec{s}_{1x} + \vec{s}_{2x}$

לאורך ציר y : $\vec{s}_{1y} = -\vec{s}_{2y}$

מסקנות

חוק שימור התנע מתקיים בדיוק רב. בניסוי כמו C, בו קיים אי-דיוק גדול יותר, ניתן להמשיך ולשפר אותו!

בתרשים 6 ניתן לראות בבירור כי הזווית בין ווקטורי התנע היא כמעט - 90° (β+α בטבלה 1), ובהתאם לכך להסיק מסקנות לגבי סוג ההתנגשות שארעה. על אותה מסקנה מצביעים קצות הווקטורים s_1 ו-s_2 הפרוסים על העקומה שצורתה כמעט מעגל.

	1 ƚ ª º							2 ƚ ª º								
	§ œ Ø		œ ø œ ƚ					œ ø œ ƚ					m_1	m_2	$\frac{m_1}{m_2}$	$\frac{m_1}{m_2}$
	h_0	x_0	h_1	s_1	s_{1x}	s_{1y}	α (x_0,s_1)	h_2	s_2	s_{2x}	s_{2y}	β (x_0,s_2)			Æ øØ	Ø æØ
A	3.7	19.3	0.5	6	2.7	5.5	62°	2.7	17.5	16.5	5.3	20°	131	131	1	1.02
B	3.7	19.3	1.4	9.3	5.5	7.7	56°	2	1.5	13.7	7.4	30°	131	131	1	1
C	3.7	19.3	2	12.3	9	8.3	44°	1.3	12.5	8.7	8.7	46°	131	131	1	1.2

טבלה 1

א. לגבי שימור האנרגיה

עלינו לחשב את היחס: $\frac{E_{k1}}{E_{k0}}$ (œØ æ Ø ± / œØœ œ Ø) ±

אפשר לעשות זאת בשלושה אופנים שווי-ערך, תוך שימוש בביטויים (3), (4) או (5).

עם הנתונים שבטבלה קל להשתמש באחת משלוש הדרכים. מומלץ להשוות את התוצאות לפי שתיים מהן לפחות. נישם זאת לגבי הניסוי A שבטבלה 1:

$$\frac{E_{k1}}{E_{k0}} = \frac{s_1^2 + s_2^2}{x_0^2} = \frac{6^2 + 17.5^2}{19.3^2} \approx 0.92 \qquad (א)$$

$$\frac{E_{k1}}{E_{k0}} = \frac{h_1 + h_2}{h_0} = \frac{0.5 + 2.7}{3.7} \approx 0.86 \qquad (ב)$$

$$\frac{E_{k1}}{E_{k0}} = \frac{\sin^2\alpha + \sin^2\beta}{\sin^2(\alpha+\beta)} = \frac{\sin^2 62^\circ + \sin^2 20^\circ}{\sin^2 82^\circ} \approx 0.92 \qquad (ג)$$

במבט ראשון, הרושם הוא שדרך ב׳ - לפי נוסחה (4), היא העדיפה להערכת ההפסדים באנרגיה מיכנית. האמת היא כי בגלל הגבהים h הקטנים והקושי היחסי לקבוע בדייקנות את מרכז הכובד של הכדור, טמונה בדרך זו האפשרות לטעות יחסית גדולה יותר. בכל מקרה כדאי לערוך חישוב לפי שלוש הדרכים ולקיים דיון על התוצאות עם התלמידים.

ב. מציאת מקדם התקומה K

בהתאם לביטוי הידוע:

$$K = \frac{|\vec{u}_2 - \vec{u}_1|}{|\vec{v}_2 - \vec{v}_1|}$$

ההפרשים הווקטוריים במונה ובמכנה מייצגים את האלכסון השני בכל מקבילית שבתרשים 6, שנתקבלה בניסוי. לאחר מדידת הווקטוריים הנ״ל, התוצאות הן:

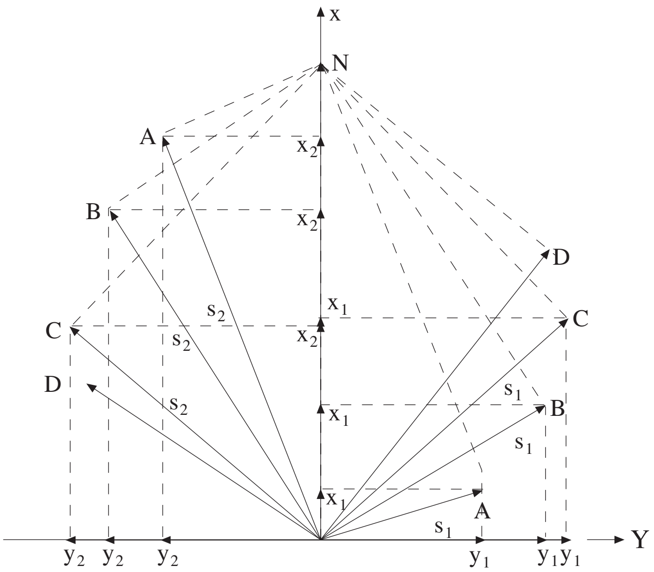
עבור ניסוי A: $K_A = \frac{|\vec{s}_{2A} - \vec{s}_{1A}|}{x_0} = \frac{17.5}{19.3} = 0.906$

עבור ניסוי B: $K_B = \frac{17.4}{19.3} \approx 0.91$

עבור ניסוי C: $K_C = \frac{17.3}{19.3} \approx 0.91$

עבור ניסוי D: $K_D = \frac{17.2}{19.3} \approx 0.9$

התוצאות מאמתות שוב את המסקנה הקודמת כי ההתנגשות היתה קרובה מאד לאלסטית לחלוטין.



תרשים 6

ניסוי מס׳ 2

ניסוי זה עוסק בהתנגשות בין שני כדורים בעלי מסות שונות, וקטרים (d) שונים העשויים מאותו חומר (פלדת מיסב).

כאשר שניהם נמצאים בתנועה לפני ההתנגשות:

$m_1 = 226g$	$m_2 = 131g$	
$d_1 \cong 38$ mm	$d_2 \cong 32$ mm	(קוטר)

התוצאות הגראפיות מוצגות בתרשים 7 שהוא תצלום מוקטן של דף הניסוי.

המצב ההתחלתי מתואר בתרשים 2: הכדורים (1) ו-(2) צמודים לליבות הסליליים - L_1 ו-L_2 המחוברים למתח ישר (6-4 וולט).

יש לסמן בדייקנות את הנקודות P_1 ו-P_2 שהן היטלי מיקום הכדורים במצב זה, וכמו כן את הנקודות O_1 ו-O_2 המייצגות את מיקום ההתנגשות (החוטים אנכיים). כפי שהוסבר בניסוי (1) בזמן התנועה לאחר ההתנגשות, יש לסמן גם את הנקודות R_1 ו-R_2 (ראה תרשים 2).

להלן מובאות תוצאות ניסוי טיפוסי:

בהתאם לנוסחה (2), אורכי הווקטורים v_1 ו-v_2 מיוצגים על-ידי אורך ההיטלים x_1 ו-x_2, מכיוון שהם פרופורציוניים זה לזה. (נכון יותר יהיה לכתוב $v_1 = k \cdot x_1$ ו-$v_2 = k \cdot x_2$, אך בהצבה בחוק שימור התנע, הקבוע K יורד).

אם כן:

v_2 , v_1 - המהירויות לפני ההתנגשות

u_2 , u_1 - המהירויות לאחר ההתנגשות

גם בניסוי זה המטרה היא לאמת:

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_1\vec{u}_1 + m_2\vec{u}_2$$

ניתן לעשות זאת בדרך הגראפית המקובלת, אך נראה לי כי הדרך הבאה מעניינת יותר מבחינה פיסיקאלית:

$$m_1(\vec{v}_1 - \vec{u}_1) = m_2(\vec{u}_2 - \vec{v}_2)$$

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{\vec{u}_2 - \vec{v}_2}{\vec{v}_1 - \vec{u}_1}$$

או

$$\boxed{\frac{m_1}{m_2} = -\frac{\vec{u}_2 - \vec{v}_2}{\vec{u}_1 - \vec{v}_1}}$$

נשים לב: הפרשי הווקטורים במונה ובמכנה מהווים ***שני ווקטורים שצריכים להיות מקבילים, וכיווניהם הפוכים זה לזה!***

הניסוי צריך לאמת ביטוי זה!

בתרשים 7 ניתן לראות כי המסקנה הנ"ל מתאמתת בדיוק רב: הווקטורים Δv_1^* ו-Δv_2^*, אכן מקבילים וכיווניהם מנוגדים.

תוצאות כמותיות:

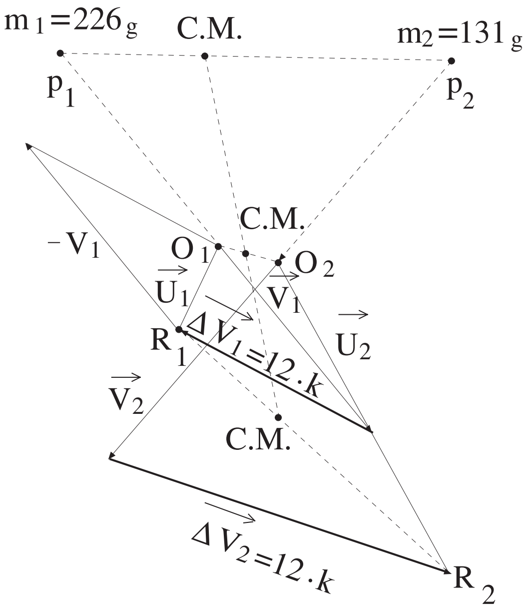
$$f_1 = \frac{m_1}{m_2} = \frac{226\ g}{131\ g} = 1.73$$

$$f_2 = \frac{\left|\vec{u}_2 - \vec{v}_2\right|}{\left|\vec{u}_1 - \vec{v}_1\right|} = \frac{\Delta v_2^*}{\Delta v_1^*} = \frac{19.7\ cm}{12\ cm} = 1.64$$

הסטייה: $$\frac{\Delta f}{f} = \frac{f_1 - f_2}{f_1} = \frac{1.73 - 1.64}{1.73} = 5.2\%$$

מאותו תרשים של הניסוי ניתן עוד להסיק מסקנה יפה לגבי תנועתו של מרכז המסה:

ההתנגשות כלל לא שינתה את תנועת מרכז המסה של מערכת שני הכדורים כפי שהדבר בא לידי ביטוי על-ידי הקו המחבר את הנקודות - .C.M.



תרשים 7

<u>סיכום:</u>

הניסוי המוצע מבוסס על מערכת פשוטה וקלה מאד להפעלה. בהשוואה לניסוי של PSSC המערכת המוצגת כאן טומנת בחובה מספר רב ומגוון של אפשרויות לגבי סוגי ההתנגשות, גודל הכדורים וכו׳. עיקר יתרונה של המערכת המוצעת הוא שהיא מאפשרת הסקת מסקנות מקיפות ביותר לגבי היבטים שונים של חוק שימור התנע וחוק שימור האנרגיה.

לכל אלה יש להוסיף את דיוק התוצאות שניתן להשיג עם המערכת החדשה, דיוק העולה לעין ערוך על זה המתקבל במערכת בה אנו משתמשים כיום.

בעבודתי בבית הספר, התחלתי השנה לעבוד עם קבוצות תלמידים שהשתמשו במערכת הרגילה (רחובות), וקבוצות אחרות שעבדו עם המערכת החדשה: ניתן היה להבחין בקצב העבודה השוטף ובדיוק התוצאות שהתקבלו על-ידי התלמידים שעבדו במערכת החדשה. כמו כן, אופן ניתוח התוצאות הגראפיות הגביר מאד את עניין התלמידים בקבלת התוצאות הסופיות.

אני מקווה שהניסוי המוצע במאמר זה יתרום לשיפור אחד הניסויים הבסיסיים שתלמיד מבצע בבית-הספר התיכון, לשביעות רצונם של המורים והתלמידים כאחד.