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:

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

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

בולט הדימיון 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:

---

1. ראה לדוגמה: לקט ניסויים, דוד זינגר, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע. ניסוי מס. 6.

- קושי להבטיח את אופקיות מסלול השיגור בגלל חוסר באמצעי וויסות.
- 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).

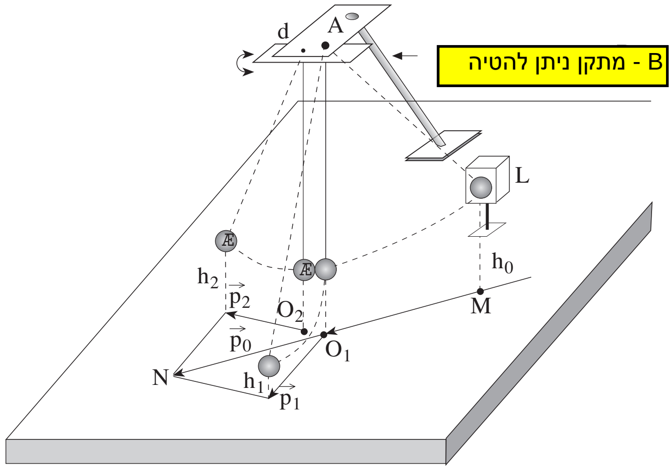
מטוטלת אחת, א׳ - בסרטוט, תלויה באמצעות חוט ניילון בנקודה A שמהווה ציר קבוע, והמטוטלת השניה ב׳ - תלוייה על לוחית אלומיניום - d - המאפשרת סיבוב מטוטלת זו סביב הראשונה. המוט B שמחזיק את המטוטלות ניתן להטיה.

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.

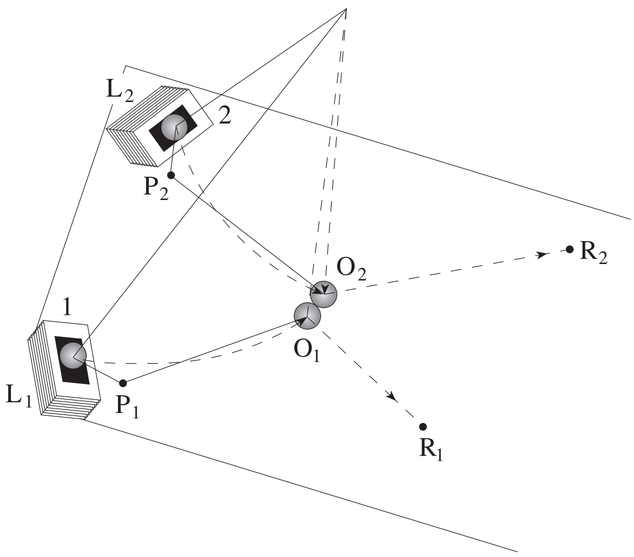
משחררים את המטוטלת א׳ (תוך ניתוק הזרם בסליל). הכדורים יתנגשו ויתפזרו: כאשר הכדור א׳ מגיע לשיא תנועתו ונעצר רגעית, התלמיד - כשהוא מסתכל אנכית - מסמן היטל נקודה זו על הנייר, וכך הוא עושה לגבי כדור ב׳.

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.

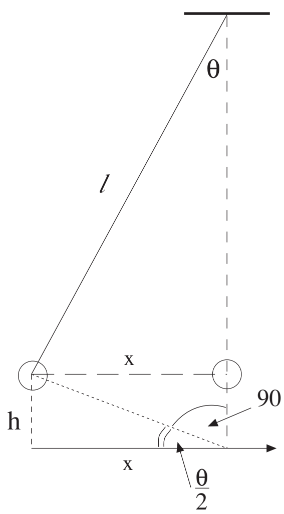
בתרשים 2, מתוארים שני סלילים L_1 ו L_2, כאשר עם שתי המטוטלות במצב מנוחה לפני ההתנגשות. (המערכת מאפשרת שימוש בסליל אחד כאשר המטוטלת ב׳ תלויה חופשי, או בשני סלילים במקרה ששתי המטוטלות מוסטות לפני ההתנגשות).



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:

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

והמהירות v:

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

מקורב $v = x\sqrt{\frac{g}{l}} = 0.67$ 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:

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

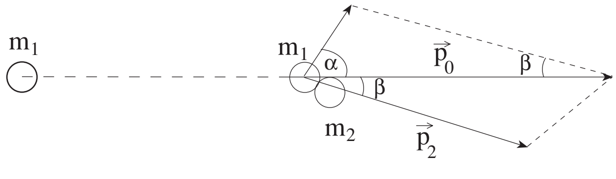
או בעזרת הקירוב (2):

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

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.

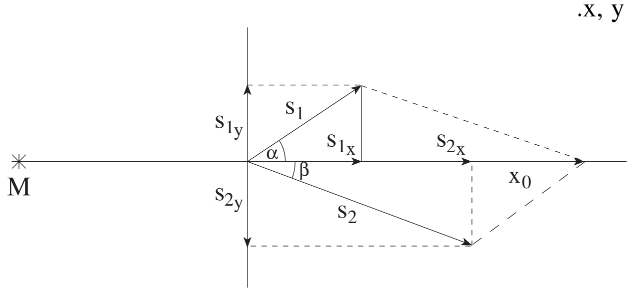
דרך נוספת: עוקבים אחרי תנועת הכדור "ומסמנים" עם האצבע על הנייר, לאחר מכן מבצעים סימון של ממש. *בכל הפעולות הנ"ל הסתכלות התלמיד צריכה להיות אנכית ככל שניתן, כדי להימנע מטעות הנגרמת על-ידי פראלקסה.*

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° (α+β 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.

	כדור 1							כדור 2								
			לאחר ההתנגשות					לאחר ההתנגשות					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. נניישם זאת לגבי הניסוי A שבטבלה 1:

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

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

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

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:

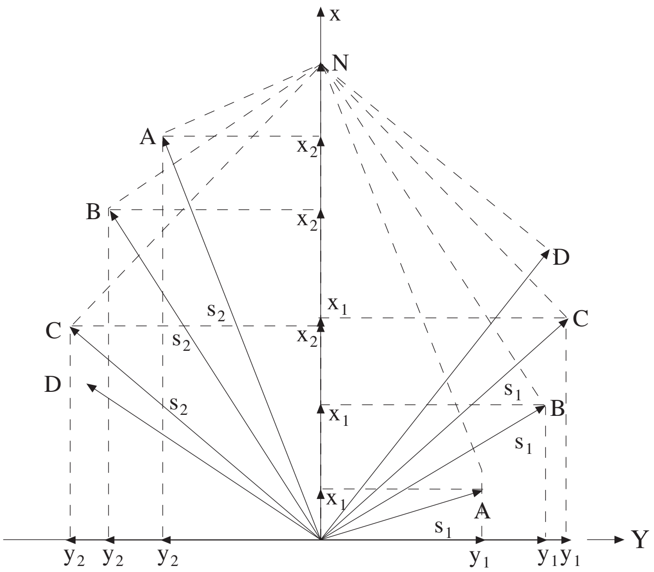
עבור ניסוי A: $K_A = \frac{|\vec{s}_{2A} - \vec{s}_{1A}|}{x_0} = \frac{17.5}{19.3} = 0.906$

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:

$m_1 = 226g$ $\qquad$ $m_2 = 131g$

(קוטר) $\qquad$ $d_1 \cong 38$ mm $\qquad$ $d_2 \cong 32$ mm

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 (4-6 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_1 , v_2 - המהירויות לפני ההתנגשות

u_1 , u_2 - 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:

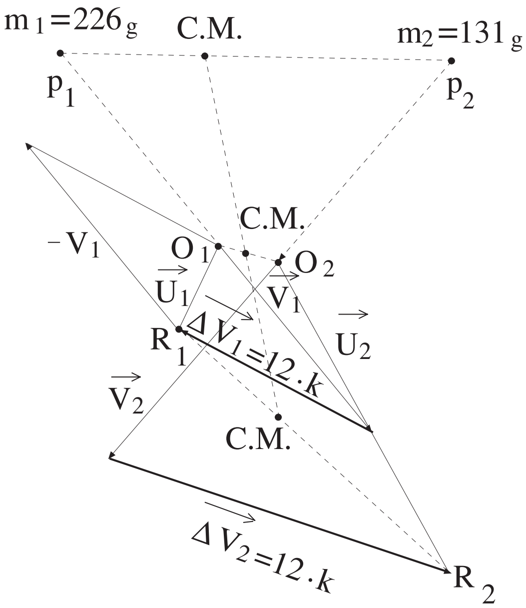
$$f_1 = \frac{m_1}{m_2} = \frac{226 \text{ g}}{131 \text{ g}} = 1.73$$

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

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.