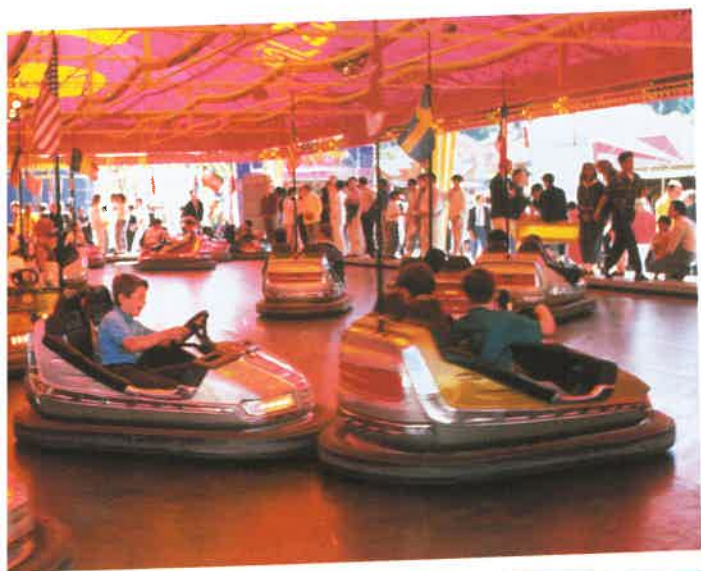


תנע



בפרק 2 הצגנו את תכונת ההתמדה שגילה גלילאו ובפרק 4 הראינו כיצד תכונה זו נכללת בחוקי התנועה של ניוטון. דנו בתכונת ההתמדה בקשר לגופים במנוחה ובקשר לגופים בתנועה. פרק זה נקדיש לתכונת ההתמדה של גופים השרויים בתנועה. שילוב רעיונות ההתמדה והתנועה מוביל אותנו אל מושג התנע. תנע הוא תכונה של גופים בתנועה.

כולנו יודעים שקשה יותר לעצור משאית כבדה ממכונית קטנה הנעה באותה מהירות. ניתן לקבוע, אם כן, כי למשאית יש יותר תנע מאשר למכונית הקטנה. בהשתמשנו במונח **תנע** כוונתנו להתמדה בתנועה. ביתר פירוט, התנע מוגדר כמכפלת המסה של גוף במהירותו, כלומר:

$$\text{תנע} = \text{מסה} \times \text{מהירות}$$

או בקיצור:

$$\text{תנע} = m \times v$$

כאשר לכיוון אין חשיבות ניתן לומר:

$$\text{תנע} = \text{מסה} \times \text{גודל המהירות}$$

תנע



איור 5.1

מדוע מדמימים את מנועיה של אוניית מכל ענקית במרחק 25 ק"מ מהנמל?

מן ההגדרה עולה כי התנע של גוף יכול להיות גדול אם אחד משני הגורמים גדול - מסתו של הגוף או מהירותו, או אם הן המסה והן המהירות שלו גדולות: התנע של המשאית גדול יותר מזה של המכונית הפרטית שנועה באותה מהירות מפני שהמסה של המשאית גדולה יותר. מכאן מובן כי לספינת ענק שנועה במהירות נמוכה יכול להיות תנע גדול. תנע גדול יש גם לקליע קטן של רובה, הנע במהירות גדולה. וכמובן, לגוף ענק, הנע במהירות גבוהה, כמו למשל משאית גדולה המתגלגלת ללא בלמים במדרון תלול, יש תנע עצום, ולעומת זאת, לאותה משאית במנוחה אין תנע כלל.

שינויים בתנע של גוף יחולו אם יהיה שינוי במסתו של הגוף, במהירותו או בשתייהן. אם התנע משתנה כשהמסה נשארת קבועה, וכך אמנם קורה לעיתים קרובות, הרי זה משום שהמהירות משתנה, כלומר - מתרחשת תאוצה. ומה גורם לתאוצה? התשובה היא כוח. ככל שהכוח הפועל על גוף גדול יותר, כן יגדל קצב השינוי במהירותו, ולפיכך גם השינוי בתנע שלו.

אך יש גורם נוסף המשפיע על השינוי בתנע, והוא הזמן - משך פעולתו של הכוח. הפעילו כוח למשך זמן קצר בלבד על מכונית שמתקשים להתניעה, ותגרמו לשינוי קל בלבד בתנע שלה. הפעילו אותו כוח למשך זמן ארוך יותר, והשינוי בתנע יהיה גדול יותר. כוח המופעל זמן ממושך גורם לשינוי גדול יותר בתנע מאותו כוח המופעל זמן קצר בלבד. שינוי התנע של גוף מושפע, אם כן, הן מגודל הכוח והן ממשך הזמן שבו הכוח פועל. המכפלה של הכוח במשך הזמן שבו הוא פועל נקראת **מתקף**.

$$\text{מתקף} = \text{כוח} \times \text{משך הזמן}$$

כל אימת שמפעילים כוח על גוף, מפעילים עליו גם מתקף. מידת התאוצה תלויה בכוח, ואילו השינוי בתנע תלוי הן בכוח והן במשך הזמן שבו הכוח פועל.

שאלות

1. האם לגוף נע יש מתקף?
2. האם לגוף נע יש תנע?

מתקף משנה תנע

הקשר בין מתקף לתנע נובע מהחוק השני של ניוטון ($a = F/m$). מרווח הזמן של המתקף "מסתתר" באיבר התאוצה (השינוי במהירות חלקי מרווח הזמן). דרך אחרת להציג את החוק השני של ניוטון היא בנוסחה*

$$\text{כוח} \times \text{מרווח זמן} = \text{השינוי ב- (מסה} \times \text{מהירות)}$$

ובמילים אחרות:

$$\text{המתקף המופעל על גוף} = \text{השינוי בתנע של הגוף}$$

ניתן לבטא את כל האיברים במשוואה זו בדרך מקוצרת, על ידי שימוש בסימני Δ (האות היוונית דלתא) שבאמצעותו מסמנים "שינוי ב-" (או "הפרש של"):

$$F \times t = \Delta(m \times v)$$

או במילים: הכוח כפול משך-הזמן-שבו-הוא-פועל = השינוי בתנע.

הקשר מתקף-תנע מסייע לנו בניתוח של מגוון מצבים שבהם חל שינוי בתנע. נתבונן במקרים מוכרים שבהם מתקף גורם (1) הגדלת התנע, (2) הקטנת התנע בפרק זמן ממושך וכן (3) הקטנת התנע בפרק זמן קצר.

מקרה 1: הגדלת התנע

אם רצונכם להגדיל את התנע של גוף כלשהו במידה רבה ככל האפשר, עליכם להפעיל לא רק את הכוח הגדול ביותר שאתם מסוגלים, עליכם גם להאריך את משך זמן הפעלתו של הכוח ככל שניתן. מכאן ההבדל בתוצאות בין דחיפה קצרה של מכונית שמתקשים להתניעה לבין דחיפה ממושכת.

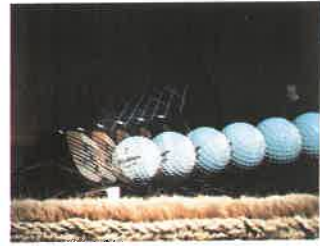
לתותחים ארוכי-טווח יש קנים ארוכים. ככל שהקנה ארוך יותר, מהירותו של הקליע (הפגז) הנורה ממנו גדולה יותר. מדוע? כוחו של חומר ההדף בקנה ארוך פועל על קליע התותח במשך זמן ארוך יותר. הגדלה זו במתקף גורמת לתנע גדול יותר. הכוח הפועל על קליע התותח אינו קבוע, כמובן - הוא גדול בתחילה והולך ונחלש עם התפשטות הגזים. במקרה זה, כמו במקרים אחרים,

תשובות:

1. לא, מתקף אינו משהו שיש לגוף, כדוגמת תנע. מתקף הוא משהו שגוף יכול להפעיל כשמתרחשת פעולת גומלין בינו לבין גוף אחר כלשהו. לגוף כשלעצמו לא יכול להיות מתקף, ממש כפי שלא יכול להיות לו כוח.
2. כן, אך בדומה למהירות, במובן יחסי - כלומר, ביחס למערכת ייחוס, שלרוב תהיה פני כדור הארץ. התנע שיש לגוף נע ביחס לנקודה נייחת על פני כדור הארץ שונה מן התנע שיש לו ביחס לגוף נע אחר.

* בדרך הצגה מחודשת זו של החוק השני של ניוטון גורם הזמן נראה בצורה ברורה יותר. אם נשווה את הביטוי לתאוצה ($F/m = a$) להגדרתה (תאוצה = השינוי ב-v חלקי t) נקבל: $F/m = \Delta v/t$. לאחר סידור האיברים מחדש מתקבלת הנוסחה: $Ft = \Delta(mv)$ - המתקף שווה לשינוי בתנע.

הכוחות היוצרים את המתקף משתנים במשך הזמן. הכוח הפועל על כדור הגולף באיור 5.2, למשל, גדל במהירות רבה בזמן שהכדור מתעוות, ואחר כך קטן ומתאפס כשהכדור צובר מהירות וחוזר לצורתו המקורית. בפרק זה, כשאנו מדברים על כוחות חבטה, כוונתנו תמיד לכוח החבטה הממוצע*.

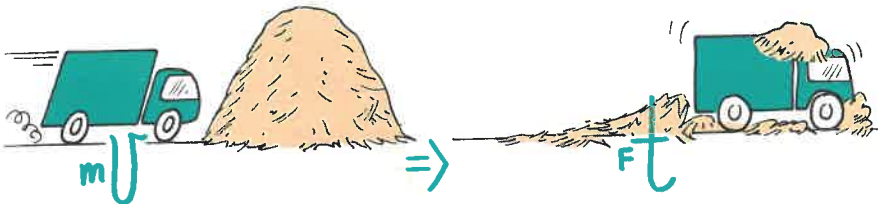


איור 5.2

כוח החבטה על כדור גולף.

מקרה 2: הקטנת התנע בפרק זמן ממושך

תארו לעצמכם שאתם במכונית שיצאה מכלל שליטה ועומדת בפניכם הברירה לפגוע בקיר בטון או בערמת חציר גדולה. לא דרוש ידע רב בפיסיקה כדי להחליט בתבונה, אך ידע מסוים בפיסיקה יסייע להבין מדוע תוצאות הפגיעה בגוף רך שונות לחלוטין מן הפגיעה בגוף קשה. בדוגמת הפגיעה בקיר או בערמת החציר, התנע יקטן באמצעות אותו מתקף. אותו מתקף אין פירושו אותו כוח או אותו זמן, אלא אותה מכפלה של כוח בזמן. בידכם הברירה: אם תבחרו לפגוע בערמת החציר ולא בקיר, תאריכו את משך זמן הפגיעה, כלומר, תאריכו את משך הזמן שבו התנע יורד לאפס. הארכת משך הזמן מביאה להקטנת הכוח. אם תגדילו את משך החבטה פי 100, תקטינו את כוח החבטה פי 100. ובכן, כל אימת שרצונכם להקטין את כוח המכה, האריכו את משך הפגיעה!

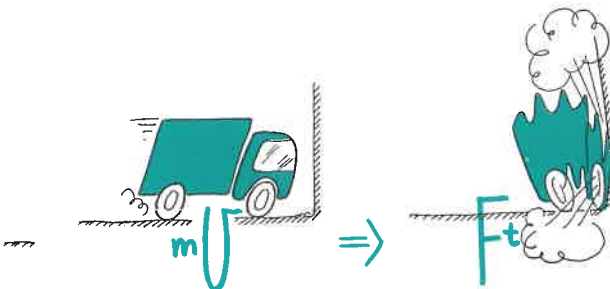


איור 5.3

שינוי גדול בתנע במשך זמן ארוך דורש כוח קטן.

מתאבק המושלך אל הקרקע מנסה להאריך את משך פגיעתו ברצפה על ידי הרפיית שריריו וחלוקת הפגיעה לכמה התנגשויות שבהן הרגל, הברך, המותן, הצלעות והכתף פוגעות בזו אחר זו ברצפה. משך הפגיעה המתאריך גורם להקטנת עוצמת הכוח של הפגיעה, או כוח החבטה.

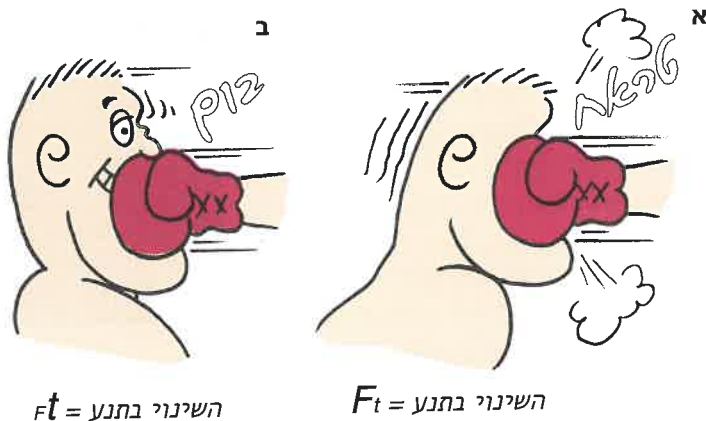
אדם הקופץ ממקום גבוה אל הרצפה שמתחתיו מכופף את ברכיו עם יצירת המגע, ובכך מאריך את משך הזמן שבו התנע שלו מוקטן פי 10 עד פי 20 ביחס לקופץ שרגליו מתוחות, הנוחת נחיתה קשיחה. כפיפת הברכיים מקטינה את



איור 5.4

שינוי גדול בתנע במשך זמן קצר דורש כוח גדול.

* לעיתים הם מכונים כוחות הולם - במלעיל. כמו חושך, חודש (המתרי)



5.5 איור

בשני המקרים המתקף של
לסת המתאגרף מקטין את תנע
האגרוף הפוגע. (א) המתאגרף
נע לעבר הכפפה ומקטין בכך
את משך זמן הפגיעה. המתקף
נובע במידה רבה מהכוח הגדול.
(ב) המתאגרף מתרחק עם
פגיעת הכפפה ובכך מאריך
את משך המגע. המתקף
הגדול נובע איפוא במידה
רבה ממשך הזמן הארוך.

הכוח המופעל על העצמות פי 10 עד פי 20. עדיף, כמובן, ליפול על מזרן מאשר
ליפול על הרצפה הקשה, שכן גם כך גדל משך זמן החבטה.

כולנו יודעים שעדיף ליפול על רצפת עץ מאשר על רצפת בטון. הסיבה לכך
היא שרצפת העץ מתעוותת בעת הפגיעה יותר מרצפת הבטון ובכך מתארך משך
הפגיעה וקטן כוח החבטה. השימוש ברשת בטיחות ללוליינים בקרקס מדגים
בברור מצב שבו כוח חבטה קטן מתחלק על פני משך זמן ארוך, וכך נוצר
המתקף הדרוש להקטנת תנע הנפילה.

אם מושיטים את היד קדימה כאשר תופסים כדור מהיר, מותירים לה
מרחב רב לנוע אחורה לאחר יצירת המגע עם הכדור. כך מאריכים את משך זמן
העצירה ובכך מקטינים את כוח החבטה. בדומה לכך, מתאגרף מאפשר לגופו
לנוע עם המהלומה שהוא סופג כדי להקטין את כוח החבטה (איור 5.5).

שאלות

1. אם המתאגרף שבאיור 5.5 מצליח להאריך את משך הפגיעה פי 3 בכך שהוא נע עם המכה, באיזה שיעור יקטן כוח החבטה?
2. אם המתאגרף נע לעבר המכה ובכך מקטין את משך זמן החבטה לכדי מחצית, באיזה שיעור יגדל כוח החבטה?
3. מתאגרף הסופג חבטת אגרוף מנסה, לטובתו, להאריך את משך זמן הפגיעה, ואילו מומחה לקראטה מנסה להכות במשך זמן קצר ככל האפשר כדי להשיג את התוצאה הטובה ביותר. האין כאן סתירה?

תשובות:

1. כוח החבטה יקטן פי שלושה מכפי שהיה אילו לא היה המתאגרף נרתע לאחור.
2. הכוח יהיה גדול כפליים משיעורו אילו היה המתאגרף נשאר במנוחה. כמו כן, הכוח גדל עוד יותר בשל המתקף הנוסף שנוצר עקב תוספת התנע הנובעת מתנועתו של הנחבט, תנע שגם אותו צריך המתקף לבלוט. המתקף המוגדל ומשך החבטה הקצר גורמים לכוחות שבמקרים רבים מביאים ל"נוק אאוט".
3. אין כל סתירה מכיוון שהתוצאה המיטבית שונה בכל מקרה. התוצאה הטובה ביותר למתאגרף המוכה היא כוח מוקטן, המתקבל בהארכת משך הזמן ככל האפשר, ואילו התוצאה הרצויה למומחה לקראטה המכה היא כוח מוגדל, המתקבל במשך זמן מזערי.

מקרה 3: הקטנת התנע בפרק זמן קצר

נסו לנוע אל אגרוף המוטח לעברכם בשעת תחרות איגרוף במקום לנוע ממנו והלאה, ותהיו בצרה. כך גם אם תתפסו כדור מהיר תוך שאתם מניעים את ידכם לעבר הכדור הפוגע ברגע יצירת המגע, במקום ממנו והלאה. ואם תהיו במכונית שיצאה מכלל שליטה ותכוונו אותה אל קיר בטון במקום אל ערמת חציר, תהיו בצרה אמיתית. במקרים אלו של זמני חבטה (פגיעה) קצרים, כוחות החבטה גדולים.

הרעיון של זמני מגע קצרים מסביר כיצד יכול מומחה לקראטה לשבור ערמת לבנים במכת ידו החשופה (איור 5.6). הזרוע והיד מונפות בתנע גדול לעבר הלבנים. התנע הזה קטן במהירות כשהוא מפעיל מתקף על הלבנים. המתקף הזה הוא הכוח שמפעילה היד כפול משך הזמן שבו היא נמצאת במגע עם הלבנים. ביצוע זריז של התרגיל מקצר מאוד את משך המגע ובהתאם לכך כוח החבטה גדל מאוד. אם גורמים ליד להירתע לאחר בעת ההתנגשות, הכוח גדל עוד יותר.

איור 5.6

הוא מפעיל מתקף גדול על הלבנים במשך זמן קצר ויוצר כוח רב.

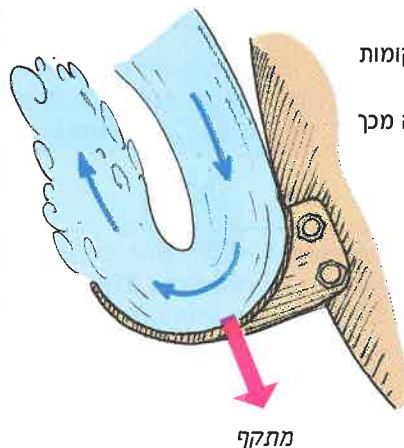


ניתור

לכולנו ידוע שאם עציץ ייפול ממדף גבוה על ראשנו, אנחנו עלולים להיות בצרה. ובין שאתם יודעים זאת ובין שאינכם יודעים זאת, אם העציץ יחזור וינתר מהראש לאחר הפגיעה, נהיה בצרה גדולה עוד יותר. המתקפים גדולים יותר אם בעקבות הפגיעה מתרחש ניתור. הסיבה לכך היא שהמתקף הדרוש כדי לגרום לגוף לעצור ואחר כך, למעשה, "לשוב ולזרוק אותו" גדול יותר מהמתקף הדרוש כדי לעצור את הגוף בלבד. נניח, למשל, שאתם תופסים את העציץ הנופל בידיכם. אתם מפעילים מתקף כדי לתפוס את העציץ ולהקטין את התנע שלו לאפס. אם אחר כך תרצו לשוב ולזרוק את העציץ מעלה, יהיה עליכם להפעיל מתקף נוסף. כלומר, דרוש מתקף גדול יותר כדי לתפוס את העציץ ולשוב ולזרוק אותו, מזה הדרוש כדי לתפוס אותו בלבד. אותו מתקף גדול יותר מפעיל גם הראש אם העציץ מנתר ממנו חזרה.

איור 5.7

גלגל פלטון. הכפות העקומות גורמות למים לנתר מהן בתנועת פרסה וכתוצאה מכך מופעל מתקף גדול יותר לסיבוב הגלגל.



יישום מעניין למתקף הגדול יותר המופעל כשמתרחש ניתור הומצא בקליפורניה בתקופת הבהלה לזהב. גלגלי המים ששימשו להנעת מכונות בפעולות כריית הזהב לא היו יעילים. אדם בשם לסטר אי פלטון (Pelton) הבין שמקור הבעיה הוא בכפות השטוחות של הגלגלים. הוא בנה כפות עקומות, שגרמו למים הפוגעים בהן לשוב בפניית פרסה בעת הפגיעה, או במילים אחרות - לנתר חזרה. באופן הזה גדל מאוד המתקף שהמים מפעילים על הגלגל (איור 5.7). פלטון רשם את המצאתו - גלגל פלטון - כפטנט, והרוויח בזכותה יותר משהרוויח מישהו ממחפשי הזהב.

שאלות

1. בהתייחס לאיור 5.6, מה הקשר בין הכוח שהאדם מפעיל בידו על הלבנים לבין הכוח שפועל על היד?
2. כיצד ישתנה המתקף בפגיעה אם היד תנתר מן הלבנים בעקבות החבטה?

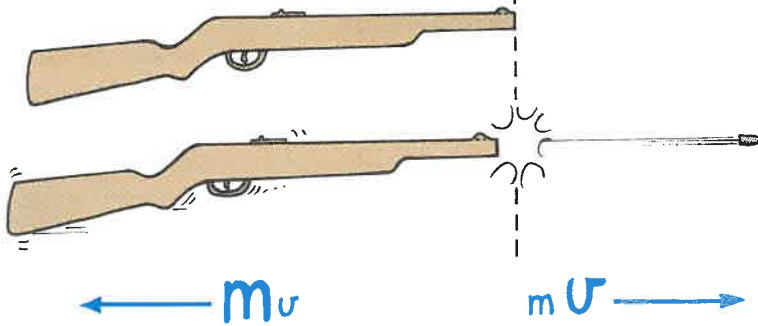
שימור התנע

אנו זוכרים מפרק 4 כי לפי החוק השני של ניוטון, אם רוצים להאיץ גוף, יש להפעיל עליו כוח. במידה רבה אנו אומרים אותו דבר בפרק זה בטענה שכדי לשנות את התנע של גוף עלינו להפעיל עליו מתקף. בכל מקרה, את הכוח או המתקף חייב להפעיל על הגוף גורם חיצוני. כוחות פנימיים אינם נחשבים. כך למשל, לכוחות הפנימיים הפועלים בתוך כדור טניס אין כל השפעה על התנע של הכדור, ממש כפי שלאדם היושב במכונית ודוחף את לוח המחוונים קדימה אין כל השפעה על שינוי התנע של המכונית. הסיבה לכך היא שהכוחות הם כוחות פנימיים, כלומר, כוחות פעולה וכוחות תגובה הפועלים בתוך הגופים עצמם. דרוש כוח חיצוני, כוח הפועל מבחוץ על כדור הטניס או על המכונית, כדי לגרום לשינוי בתנע. אם אין כוח חיצוני, לא ייתכן שינוי בתנע.

כאשר קליע נורה מרובה, הכוחות הפועלים הם כוחות פנימיים במערכת קליע-רובה. לכן, התנע הכולל של המערכת המורכבת מן הרובה והקליע אינו משתנה (איור 5.8). לפי החוק השלישי של ניוטון, חוק הפעולה והתגובה, הכוח הפועל על הקליע שווה בגודלו ומנוגד בכיוונו לכוח הפועל על הרובה. הכוחות הפועלים על הקליע ועל הרובה פועלים באותו זמן, והתוצאה היא תנעים שווים ומנוגדים. הרובה הנרתע רוכש תנע שווה בגודלו לזה של הכדור הנורה. אף שכל אחד מהשניים - הכדור והרובה - רכש תנע ניכר, במערכת המורכבת מן הרובה ומן הכדור גם יחד לא חל כל שינוי בתנע. לפני הירייה התנע היה אפס; אחרי הירייה, התנע הכולל עדיין שווה לאפס. כל תנע לא נוסף למערכת וכל תנע לא נגרע ממנה.

תשובות:

1. לפי החוק השלישי של ניוטון, הכוחות יהיו שווים. רק הגמישות וכוסר ההתאוששות של יד הקראטיסט והאימונים שהוא עבר כדי לחזק את ידו מאפשרים לו לבצע את התרגיל ללא שבירת עצמות.
2. המתקף גדול יותר אם היד מנתרת מהלבנים בעקבות החבטה. אם משך זמן הפגיעה אינו מוגדל באותה מידה, הכוח שיפעל על הלבנים (ועל היד!) יהיה גדול יותר.



איור 5.8

התנע לפני הירייה הוא אפס. אחרי הירייה התנע הכולל עדיין שווה לאפס, מפני שהתנע של הרובה שווה בגודלו ומנוגד בכיוונו לתנע של הקליע.

שני עניינים חשובים עלינו ללמוד מדוגמת הרובה והקליע. הראשון הוא שהתנע, כדוגמת המהירות, הוא גודל המתואר הן על ידי שיעורו והן על ידי כיוונו. עלינו למדוד הן "כמה" והן "באיזה כיוון". התנע הוא גודל וקטורי. לפיכך, כשלפנינו שני תנעים שכיוונם שווה, כל שעלינו לעשות כדי לקבל את התנע הכולל הוא לחברם, ואילו אם כיווניהם מנוגדים, יש לחסרם זה מזה. עניין חשוב אחר שאפשר ללמוד מדוגמת הרובה והקליע הוא רעיון השימור. התנע לפני הירייה והתנע אחריה שווים. למערכת הרובה והקליע לא נוסף תנע, תנע גם לא נגרע ממנה. כאשר גודל פיסיקלי כלשהו נשאר ללא שינוי במהלך תהליך מסוים, אומרים שהגודל הזה נשמר או משתמר. אנו אומרים שהתנע נשמר.

שאלות

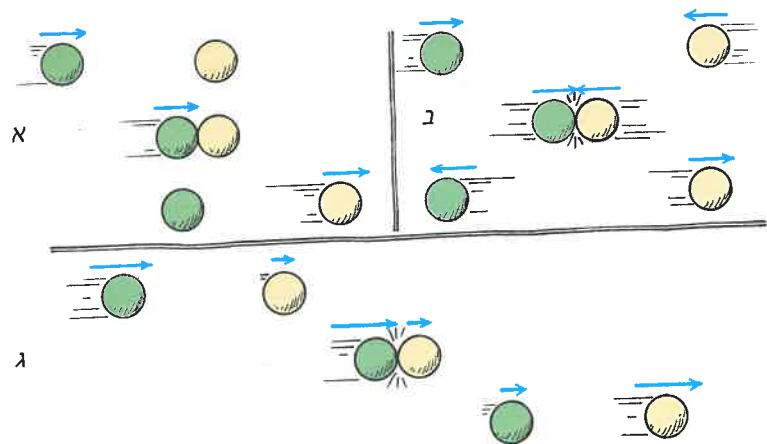
1. אוטובוס מהיר וחרק תמים מתנגשים התנגשות חזיתית. השינוי הפתאומי בתנע של החרק גורם לו להינתז על פני שמשת האוטובוס. בהשוואה לשינוי בתנע של החרק האומלל, האם השינוי בתנע של האוטובוס יהיה גדול יותר, קטן יותר או שווה?
2. מה קורה למהירותו של מטוס קרב הרודף אחרי מטוס אחר ופותח עליו באש? מה קורה למהירותו של המטוס הנרדף כשהוא משיב אש?

התנגשויות

התנע נשמר בזמן התנגשויות. במילים אחרות, התנע הכולל של מערכת עצמים מתנגשים לפני ההתנגשות, במהלכה ולאחריה אינו משתנה. הסיבה לכך היא שהכוחות הפועלים במהלך ההתנגשות הם כוחות פנימיים במערכת - כוחות שהם, וכן כוחות התגובה עליהם, פועלים בין העצמים של המערכת לבין עצמם. חלה רק חלוקה מחדש של אותו התנע הקיים לפני ההתנגשות.

תשובות:

1. התנעים של החרק ושל האוטובוס משתנים באותה מידה מפני שגודל הכוח בכל רגע, ולכן גם המתקף, על כל אחד מהם שווה. אמנם השינוי בתנעים של כל אחד משניהם שווה, אך לא כן השינוי במהירותיהם. בשל המסה הענקית של האוטובוס, ההפחתה במהירותו היא זעירה ביותר - קטנה מכדי שהנוסעים יבחינו בה.
2. התנע של המטוס הרודף מופחת בשיעור שווה לתנע של הקליעים שהוא יורה קדימה, ולפיכך, גם מהירותו מופחתת. לעומת זאת, מהירותו של המטוס הנרדף גדלה, מפני שהתנע שלו גדל בשיעורו של התנע שהוא מעניק לקליעים שהוא יורה לאחור. התוצאה הכוללת היא הגדלת המרחק שבין שני המטוסים.



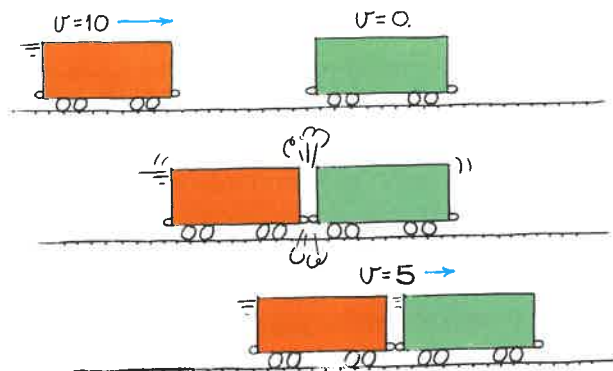
איור 5.9

התנגשות אלסטית. (א) כדור ירוק פוגע בכדור צהוב נייח. (ב) התנגשות חזיתית. (ג) התנגשות של כדורים הנעים באותו כיוון. בכל אחד מהמקרים מועבר תנע מכדור אחד למשנהו.

כאשר כדור ביליארד נע ומתנגש התנגשות חזיתית בכדור ביליארד השרוי במנוחה, הכדור הנע נעצר והכדור האחר מתחיל לנוע במהירות שהיתה לכדור הפוגע. מכנים זאת בשם **התנגשות אלסטית** (גמישה) - העצמים המתנגשים נרתעים לאחור מבלי שיחול בהם עיוות-קבע ומבלי שייווצר חום. יהיו התנועות התחיליות של הגופים המתנגשים אשר יהיו, תנועות הגופים לאחר הרתיעה הן כאלה שהתנע הכולל שלהם נשמר (איור 5.9).
בכל התנגשות ניתן לומר:

התנע הכולל לפני ההתנגשות = התנע הכולל אחרי ההתנגשות

הדבר נכון גם אם העצמים המתנגשים מסתבכים זה בזה במהלך ההתנגשות. זוהי התנגשות **אי-אלסטית** (בלתי גמישה), שמאפיינים אותה עיוותים בעצמים המתנגשים או היווצרות חום, או שני הדברים גם יחד. הבה נבחן, למשל, מקרה שבו קרון משא מתגלגל על המסילה ומתנגש בקרון משא אחר העומד במנוחה (איור 5.10). אם המסות של שני קרונות המשא שוות ובעקבות ההתנגשות הם נצמדים זה לזה, האם נוכל לחזות את מהירותם של הקרונות הצמודים לאחר ההתנגשות?



איור 5.10

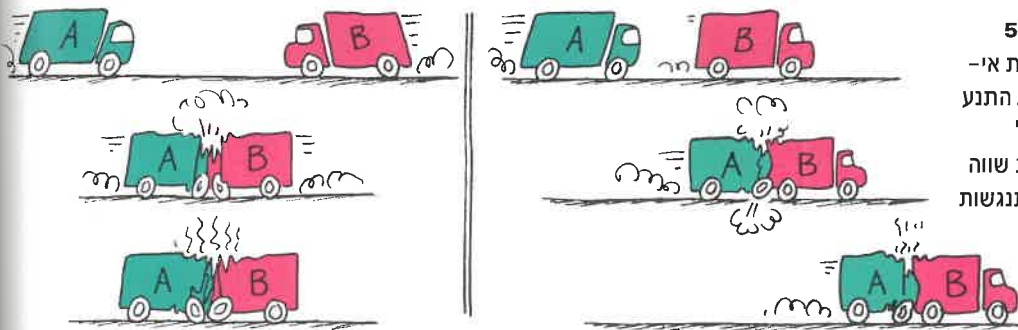
התנגשות אי-אלסטית. אחרי ההתנגשות, התנע של קרון המשא שמשמאל מתחלק בינו לבין קרון המשא שמימין.

נניח שהקרון היחיד נע במהירות של 10 מטרים בשנייה, ונניח שמסתו של כל אחד מן הקרונות היא m . מעקרון שימור התנע נובע אם כך,

$$(mv)_{\text{אחרי}} = (mv)_{\text{לפני}} \quad (\text{כולל})$$

$$(m \times 10)_{\text{לפני}} = (2m \times V)_{\text{אחרי}}$$

בעזרת אלגברה פשוטה מקבלים: $5 \text{ מ"ש} = V$. התוצאה מתקבלת על הדעת, שכן מאחר שהמסה הנעה אחרי ההתנגשות כפולה בגודלה, המהירות תהיה קטנה במחצית מכפי שהיתה לפני ההתנגשות. במצב זה שווים שני אגפי המשוואה. שימו לב לחשיבותם של הכיוונים במקרים אלו. התנע, כמו המהירות, הוא גודל וקטורי. גם במקרה זה מחברים תנעים כפי שמחברים מהירויות. תנעים שכיוונם זהה יש פשוט לחבר. אם שני גופים נעים זה לעומת זה, אחד מן התנעים נחשב שלילי, והתנע השקול שלהם מתקבל על ידי חיסורם זה מזה. נתבונן בהתנגשויות האי-אלסטיות המתוארות באיור 5.11. אם המשאיות A ו-B נעות זו לעבר זו בתנעים שווים בגודלם ומנוגדים בכיוונם (A ו-B מתנגשות התנגשות חזיתית), אחד משני התנעים נחשב שלילי, ותוצאת החיבור האלגברי ביניהם תהיה אפס. לאחר ההתנגשות, שתי הגרוטאות הצמודות נותרות בנקודת ההתנגשות בתנע אפס. אם A ו-B נעות בכיוון אחד (A משיגה את B), התנע הכולל שווה פשוט לסכום התנעים של שתיהן.



איור 5.11
התנגשויות אי-אלסטיות. התנע הכולל של המשאיות שווה לפני ההתנגשות ואחריה.

לעומת זאת, אם משאית A נעה מזרחה ולה, נאמר, 10 יחידות תנע יותר מלמשאית B שנעה מערבה (מצב זה אינו מתואר באיור), אחרי ההתנגשות ינוע צמד הגרוטאות מזרחה בתנע של 10 יחידות. בסופו של דבר הן תיעצרנה, כמובן, בגלל הכוח החיצוני של החיכוך בקרקע. ואולם, משך זמן ההתנגשות הוא קצר; כוח החבטה של ההתנגשות גדול בהרבה מכוח החיכוך החיצוני, כך שהתנע רגע לפני ההתנגשות ומיד לאחריה נשמר למעשה. התנע הכולל רגע לפני התנגשות המשאיות (10 יחידות) שווה לתנע המצורף של המשאיות "המקומטות" מיד לאחר ההתנגשות. בהעדר כוח חיצוני - למשל כששתי חלליות נצמדות בחלל - 10 יחידות התנע יישמרו למשך פרק זמן בלתי מוגבל.

שאלה

התבוננו במסילת האוויר שבאיור 5.12. נניח שגלשן מחליק ומתנגש בגלשן נייח, שמסתו גדולה פי שלושה, ונצמד אליו. מה תהיה מהירותם של הגלשנים הצמודים אחרי ההתנגשות בהשוואה למהירותו של הגלשן הנע לפני ההתנגשות?

הרי דוגמה מספרית לחוק שימור התנע. נתבונן בדג השט לעבר דג קטן ממנו השרוי במנוחה ובולע אותו (איור 5.13). אם מסתו של הדג הגדול היא 5 ק"ג והוא שט במהירות 1 מלשי לעבר דג שמסתו 1 ק"ג, מהי מהירותו של הדג הגדול מיד אחרי הארוחה? נתעלם מההשפעה של התנגדות המים.

התנע אחרי הארוחה = התנע לפני הארוחה

$$(1 \text{ ק"ג} + 5 \text{ ק"ג}) = (0 \text{ מלשי}) + (1 \text{ ק"ג}) + (5 \text{ ק"ג})$$

$$6 \times V = 5 \text{ ק"ג מלשי}$$

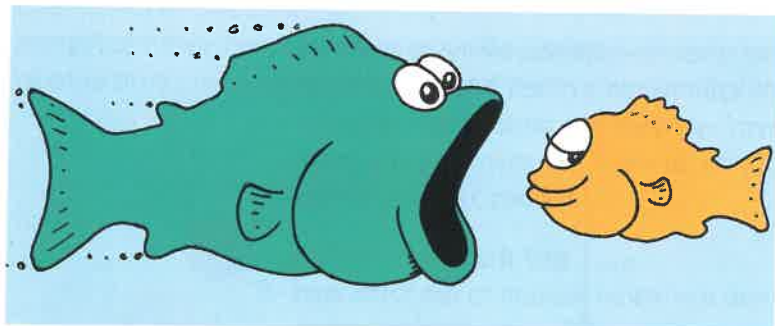
$$V = \frac{5}{6} \text{ מלשי}$$

במקרה זה לדג הקטן אין תנע לפני הארוחה מפני שמהירותו שווה לאפס. אחרי הארוחה המסה המצורפת של שני הדגים נעה במהירות V , שבעזרת אלגברה פשוטה קל לראות שהיא שווה ל- $\frac{5}{6}$ מלשי. אנו רואים גם שכיוונה של מהירות זאת הוא ככיוון מהירותו של הדג הגדול.



איור 5.12

מסילת אוויר. סילוני אוויר הפורצים מנקבים זעירים יוצרים משטח חסר חיכוך שעליו מחליקים גלשנים.



איור 5.13

שני דגים מהווים מערכת; למערכת זו תנע שווה לפני הארוחה ואחריה.

תשובה:

לפי עקרון שימור התנע, התנע של גלשן בעל מסה m ומהירות v לפני = התנע של שני הגלשנים הצמודים אחרי.

$$mv_{\text{לפני}} = (m + 3m)V_{\text{אחרי}}$$

$$mv = 4mV$$

$$V = (mv)/(4m) = v/4$$

התוצאה מתקבלת על הדעת, שכן אחרי ההתנגשות המסה הנעה גדולה פי ארבעה, ולכן הגלשנים הצמודים ינועו ביתר איטיות. המסה הגדולה פי ארבעה מחליקה ב- $1/4$ המהירות, ובכך נשמר התנע בלא שינוי.

נניח שהדג הקטן בדוגמה הקודמת אינו שרוי במנוחה, אלא שט שמאלה, בכיוון המנוגד לכיוון הדג הגדול, במהירות 4 מלש'. אם נבחר את כיוון התנועה של הדג הגדול ככיוון החיובי, הרי שתנועת הדג הקטן היא בכיוון השלילי. במקרה זה

התנע אחרי הארוחה = התנע לפני הארוחה

$$V(1 \text{ ק"ג} + 5 \text{ ק"ג}) = (-4 \text{ מלש'}) (1 \text{ ק"ג}) + (5 \text{ מלש'}) (5 \text{ ק"ג})$$

$$V(6 \text{ ק"ג}) = (4 \text{ ק"ג מלש'}) - (5 \text{ ק"ג מלש'})$$

$$V(6 \text{ ק"ג}) = 1 \text{ ק"ג מלש'}$$

$$V = \frac{1}{6} \text{ מלש'}$$

שימו לב: לעובדה שהתנע של הדג הקטן לפני הארוחה הוא שלילי, כלומר בכיוון נגדי, יש השפעה גדולה יותר בהאטת מהירותו של הדג הגדול אחרי הארוחה. אילו היה הדג הקטן שט במהירות כפולה, אזי

התנע אחרי הארוחה = התנע לפני הארוחה

$$V(1 \text{ ק"ג} + 5 \text{ ק"ג}) = (-8 \text{ מלש'}) (1 \text{ ק"ג}) + (5 \text{ מלש'}) (5 \text{ ק"ג})$$

$$V(6 \text{ ק"ג}) = (8 \text{ ק"ג מלש'}) - (5 \text{ ק"ג מלש'})$$

$$V(6 \text{ ק"ג}) = 3 \text{ ק"ג מלש'}$$

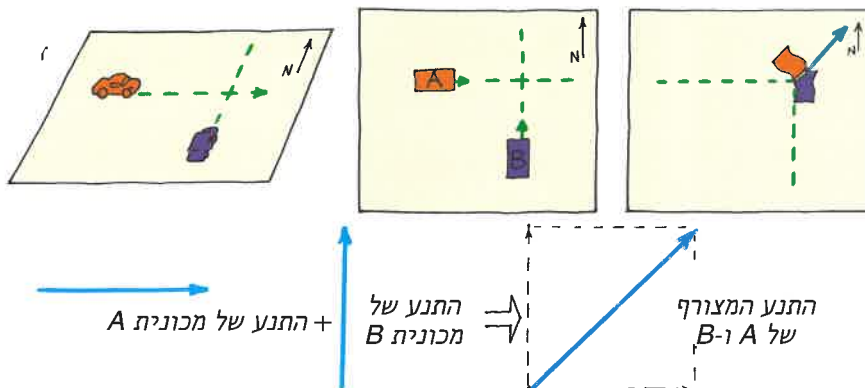
$$V = \frac{1}{2} \text{ מלש'}$$

אנו רואים שהמהירות הסופית היא $\frac{1}{2}$ - מלש'. מהי משמעותו של סימן המינוס? התשובה היא שכיוון המהירות הסופית מנוגד לכיוון המהירות ההתחלתית של הדג הגדול. אחרי הארוחה תנוע מערכת שני הדגים שמאלה. כתרגיל בסופו של הפרק תתבקשו למצוא מהי המהירות ההתחלתית של הדג הקטן שתביא לעצירת הדג הגדול במסלולו.

התנגשויות מסובכות יותר

התנע הכולל לפני כל התנגשות ואחריה אינו משתנה, גם אם יש זווית בין כיווני התנועה של הגופים המתנגשים. כשמדובר בכיוונים שונים, אפשר למצוא את התנע הכולל באמצעות כלל המקבילית של חיבור וקטורים. כאן לא נעסוק בפירוט רב במקרים מסובכים כאלה, אך נדגים מקרים פשוטים אחדים כדי להבהיר את העניין.

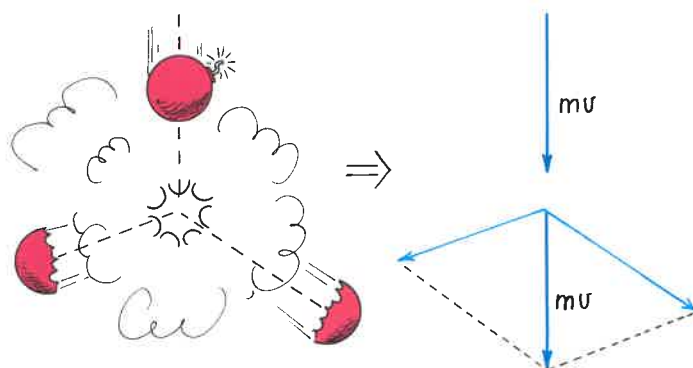
באיור 5.14 מתוארת התנגשות בין שתי מכוניות הנעות כך שנוצרת ביניהן זווית ישרה. למכונית A יש תנע שכיוונו מזרחה ולמכונית B תנע שכיוונו צפונה. אם שני התנעים שווים בגודלם, כיוונו של התנע המצורף שלהם הוא צפון-מזרח. זה יהיה כיוון תנועתן של המכוניות הצמודות אחרי ההתנגשות. אנו רואים שממש כפי שהאלכסון בריבוע אינו שווה לסכום שתי צלעותיו, גודלו של התנע המתקבל (התנע השקול) לא יהיה שווה פשוט לסכום שני התנעים לפני ההתנגשות. ניזכר בקשר בין אורך האלכסון בריבוע לבין אורך כל אחת מצלעותיו, כמתואר באיור 3.5 בפרק 3 - האלכסון שווה ל- $\sqrt{2}$ (≈ 1.41). פעמים



איור 5.14
התנע הוא
גודל וקטורי

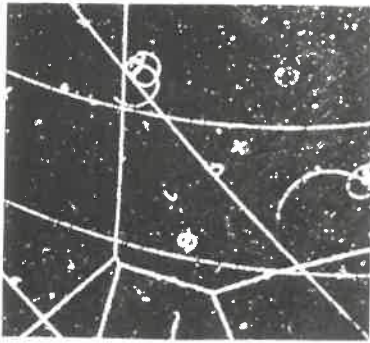
אורך הצלע של הריבוע. בדומה לכך, גודלו של התנע השקול יהיה שווה ל- $\sqrt{2}$ פעמים התנע של כל אחד מכלי הרכב*.

באיור 5.15 נראית פצצה נופלת המתבקעת באוויר לשני רסיסים. אם מחברים את התנעים של רסיסי הפצצה מיד אחרי ההתפוצצות בשיטת החיבור הווקטורי, מוצאים שהסכום שווה לתנע המקורי של הפצצה הנופלת. באיור 5.16 מודגמת תופעה זו כפי שהיא באה לידי ביטוי בעולם המיקרוסקופי. כאן מתגלים מסלוליהם של חלקיקים תת-אטומיים בתא בועות של מימן נוזלי. יהיו אופיה של ההתנגשות ומידת מורכבותה אשר יהיו, התנע הכולל לפני ההתנגשות, במהלכה ואחריה אינו משתנה. בעובדה זו ניתן לעשות שימוש חשוב: היא מאפשרת לנו ללמוד רבות על התנגשויות מבלי להתייחס לצורת הכוחות הפועלים במהלכן. בפרק הבא נראה שמלבד התנע נשמרת גם האנרגיה. בזמן התנגשויות בין חלקיקים תת-אטומיים, כפי שהן נצפות בסוגים שונים של

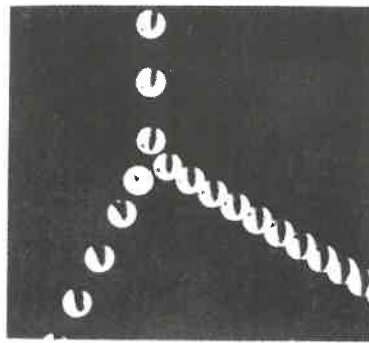


איור 5.15
לאחר ההתפוצצות, סכום
התנעים (הווקטורי) של רסיסי
הפצצה שווה לתנע של
הפצצה רגע לפני
ההתפוצצות.

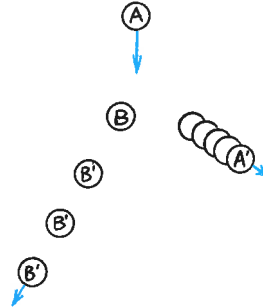
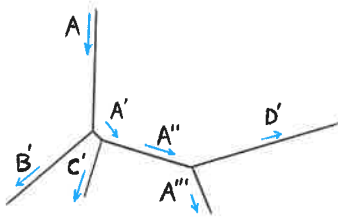
* את אורך האלכסון של ריבוע או מלבן אפשר לחשב על פי משפט פיתגורס: ריבוע האלכסון שווה לסכום ריבועי הצלעות. מיצאו את השורש הריבועי של גודל זה ותקבלו את אורך האלכסון. בריבוע, אורך האלכסון הוא פי $\sqrt{2}$ מאורך הצלע.



א



ב



5.16 איור

התנע נשמר הן בזמן התנגשות בין כדורי ביליארד והן בזמן התנגשות בין חלקיקים של גרעין האטום בתא בועות של מימן נוזלי. ב-(א) כדור ביליארד A פוגע בכדור ביליארד B שהיה בתחילה במנוחה. ב-(ב) פרוטון A מתנגש בפרוטונים C, B, ו-D. הפרוטונים הנעים משאירים בעקבותיהם נתיבים של בועות זעירות.

גלאים, אפשר להיעזר בעקרונות שימור התנע והאנרגיה כדי לחשב את המסות של חלקיקים זעירים אלה. את המידע הזה מסיקים ממדידה של התנעים והאנרגיות לפני ההתנגשויות ואחריהן. הכוחות הפועלים בתהליכי ההתנגשויות, מסובכים ככל שיהיו, אינם מענייננו.

התנגשות אלסטית (גמישה) התנגשות שבה הגופים המתנגשים נרתעים מבלי שייוותר בהם עיוות ומבלי שייווצר חום.

התנגשות אי-אלסטית (בלתי גמישה) התנגשות שבעקבותיה נותר עיוות בגופים המתנגשים או שבמהלכה נוצר חום.

תקציר מונחים

תנע מכפלת המסה של גוף במהירותו.

מתקף מכפלת הכוח הפועל על גוף במשך הזמן שבו הוא פועל.

בין מתקף לתנע המתקף שווה לשינוי בתנע של הגוף שהמתקף פועל עליו. בנוסחה:

$$F \times t = \Delta(m \times v)$$

שימור התנע כשכל כוח חיצוני אינו פועל על גוף או על מערכת גופים (או כאשר סך כל הכוחות הפועלים שווה לאפס) לא יחול שינוי בתנע. מכאן שהתנע לפני אירוע שמעורבים בו רק כוחות פנימיים שווה לתנע לאחר האירוע:

$$(mv)_{\text{לפני האירוע}} = (mv)_{\text{אחרי האירוע}}$$

שאלות חזרה

תנע

1. למי מן השניים תנע גדול יותר, למשאית כבדה במנוחה או ללוח גלגליות (סקייט-בורד) נע?

מתקף

2. מה ההבדל בין מתקף לכוח?

בתוכה ולוחצים על לוח המחוונים? האם יכולים הכוחות הפנימיים בתוך כדור הטניס להפעיל עליו מתקף שיטנה את התנע שלו?

17. האם נכון לומר כי אם שום מתקף אינו מופעל על גוף, לא יחול כל שינוי בתנע שלו?

18. למה הכוונה כשאומרים שגודל מסוים משתמר?

19. כשיורים קליע, התנע שלו בהחלט משתנה! גם התנע של הרובה הנרתע משתנה. כלומר, התנע של הקליע אינו נשמר, וגם התנע של הרובה אינו נשמר. באיזה מובן ניתן לטעון איפוא שהתנע אמנם נשמר?

20. האם היה התנע נשמר במערכת הרובה והקליע אלמלא היה גודל וקטורי? הסבירו.

התנגשויות

21. מה ההבדל בין התנגשות אלסטית (גמישה) להתנגשות אי-אלסטית (בלתי גמישה)? מדוע נשמר התנע בשני סוגי ההתנגשויות?

22. קרונית א' נעה על גבי מסילה במהירות מסוימת ופוגעת בקרונית ב' בעלת מסה שווה הנמצאת במנוחה. השוו את תנועותיהן של הקרוניות לפני ההתנגשות לתנועותיהן אחרי ההתנגשות, אם זו היתה אלסטית לחלוטין.

23. בשאלה הקודמת, השוו בין תנועותיהן של הקרוניות לפני ההתנגשות לתנועותיהן אחריה אם ההתנגשות היא אי-אלסטית.

התנגשויות מורכבות יותר

24. נניח שחלקיק הנע אופקית ולו תנע בן יחידה אחת מתנגש בחלקיק זהה לו הנע אנכית בתנע של יחידה אחת גם הוא, ונצמד אליו. מדוע אין התנע המצורף שלהם שווה פשוט לסכום החשבוני של שתי יחידות?

25. בשאלה הקודמת, מהו התנע הכולל לפני ההתנגשות ואחריה?

3. מהן שתי הדרכים שבהן אפשר להגדיל או להקטין את המתקף המופעל על משהו?

מתקף ותנע

4. מה הקשר בין מתקף-תנע ובין החוק השני של ניוטון?

5. מדוע אין זה נכון לומר כי מתקף שווה תנע?

מקרה 1: הגדלת התנע

6. כדי להעניק תנע מרבי לגוף, יש להפעיל עליו את הכוח הגדול ביותר האפשרי במשך הזמן הארוך ביותר שניתן. הסבירו!

7. בהנחה שהכוח שמפעילים שני תותחים שווה, איזה תותח יעניק מהירות גדולה יותר לקליע הנורה ממנו - התותח בעל הקנה הארוך או התותח בעל הקנה הקצר? הסבירו!

מקרה 2: הקטנת התנע במשך זמן ארוך

8. אם אתם נמצאים בדרכו של גוף נע והתנגשות היא בלתי נמנעת, האם יהיה מצבכם טוב יותר אם תקטינו את התנע שלו במשך זמן קצר או במשך זמן ארוך? הסבירו!

9. גביע זכוכית עשוי להינצל אם ייפול על שטיח אך לא אם ייפול על רצפת בטון. מדוע?

10. מדוע כדאי להושיט את הזרוע קדימה כשתופסים כדור טניס מהיר ביד חשופה?

מקרה 3: הקטנת התנע במשך זמן קצר

11. מדוע אין זה רעיון טוב להצמיד את היד לקיר בשעה שתופסים כדור טניס מהיר?

12. למי מן השניים תנע גדול יותר כשהם נעים במהירות שווה - למשאית כבדה או ללוח גלגיליות? באיזה מקרה דרוש כוח גדול יותר לעצירה?

13. בתשובה לשאלה הקודמת טענתם, אולי, שדרוש כוח גדול יותר לעצירת משאית. הייתכן מצב שבו ללוח הגלגיליות יידרש כוח עצירה גדול יותר? (שימו לב לזמנים).

ניתור

14. באיזה מן המקרים הבאים השינוי בתנע הוא הגדול ביותר: (1) עוצרים גוף נע, (2) מביאים את אותו גוף, המצוי במנוחה, לנוע במהירות שהיתה לו מקודם, (3) עוצרים את אותו גוף ומיד מחזירים אותו לאחור במהירות השווה בגודלה למהירות המקורית?

15. בשאלה הקודמת, באיזה מן המקרים נדרש המתקף הגדול ביותר?

שימור התנע

16. התוכלו להפעיל מתקף על מכונית כשאתם יושבים

מטלת בית

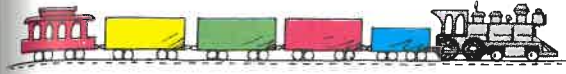


נסו לארגן סיור לימודי באחד ממועדוני הבייליארד שבסביבתכם כדי לחקור את חוק שימור התנע. שימו לב שאין זה משנה עד כמה מסובכת התנגשות הכדורים,

התנע לאורך קו הפעולה של הכדור הפוגע לפני ההתנגשות

מפעיל את המתקף לעצירת המהלומות שהוחטאו?

10. קרונות רכבת מחוברים זה לזה באופן רופף כך שחולף זמן ניכר מהרגע שבו הקטר מניע את הקרון הראשון ועד לרגע שבו הקרונות האחרונים מתחילים לנוע. דונו בשאלה האם צורת חיבור רופפת זו בין הקרונות כדאית משיקולי מתקף ותנע.



11. אם רק כוח חיצוני יכול לשנות את מצב תנועתו של גוף, כיצד יכול בלם המכונית להביא אותה לידי עצירה?

12. אדם הלבוש בכל בגדיו נמצא במנוחה על גבי קרח חסר חיכוך לחלוטין במרכזה של בריכה קפואה, וצריך להגיע לקצה הבריכה. כיצד יוכל לעשות זאת?

13. אם תזרקו כדור בכיוון אופקי בשעה שהינכם עומדים על גבי גלגליות (סקטים), תתגלגלו לאחור בתנע השווה לזה של הכדור. האם תתגלגלו אחורה גם אם תבצעו את כל התנועה של זריקת הכדור אך לא תרפו ממנו בסופו של דבר? הסבירו!

14. הביאו דוגמאות המוכיחות שמצבים שאפשר להסבירם בעזרת החוק השלישי של ניוטון, ניתן להסבירם גם באמצעות עקרון שימור התנע.

15. חיזרו לתרגיל 33 בפרק 4 והשיבו עליו במונחים של עקרון שימור התנע.

16. חבר אומר שחוק שימור התנע מופר כשכדור מתגלגל במדרון וצובר תנע. מהי תשובתכם?

17. מדוע מתקשה כבאי להחזיק בורנוק (צינור) כיבוי המזרים כמויות גדולות של מים במהירות גבוהה?

18. התרצו לירות ברובה שמסת הקליע שלו גדולה פי עשרה ממסת הרובה עצמו? הסבירו.

19. התנע של של הרובה והקליע באיור 5.8 נשמר. מדוע אין אומרים שהמהירויות נשמרות? מה היה המצב אילו היתה מסת הקליע שווה למסת הרובה?

20. בתקופה שבה חלליות עדיין לא היו נפוצות טעו רבים לחשוב שרקטה זקוקה לאוויר כדי להדוף את עצמה כנגדו. הדבר אינו נכון, כמובן, וזאת מוכיחות החלליות שהגיעו לירח, למשל. כיצד מתקדמת רקטה באזור שבו אין כל אטמוספירה?

שווה לתנע הכולל של כל הכדורים הנעים בכיוון זה לאחר ההתנגשות, וסכום רכיבי התנעים המאונכים לקו פעולה זה אחרי ההתנגשות שווה לאפס, כפי שהיה ערכו של התנע בכיוון זה לפני ההתנגשות. תוכלו להבחין ביתר בהירות באופיו הווקטורי של התנע ובשימורו אם לא תיווצר תנועת סחרור בכדור הפוגע, אם גורמים לתנועת סחרור בכדור זה על ידי פגיעה לא-מרכזית בו, התנע הזוויתי, שאף הוא נשמר, מסבך את הניתוח. אך בלא כל קשר לאופן שבו מכים בכדור, בהעדר כוח חיצוני, הן התנע הקווי והן התנע הזוויתי נשמרים תמיד. הביליארד הוא הצגה מעולה של עקרון שימור התנע בפעולתו.

תרגילים

1. כדי להביא אוניית מכל ענקית לידי עצירה נוהגים להדמים את מנועיה במרחק של כ-25 ק"מ מהנמל. מדוע כה קשה לעצור אוניית מכל או לשנות את כיוונה?

2. במונחים של תנע ומתקף, מדוע לוחות מחוונים מרופדים במכוניות בטוחים יותר?

3. במונחים של תנע ומתקף, מדוע מטפסי הרים מעדיפים חבלי ניילון, שבהשפעת מאמץ נמתחים ביתר קלות?

4. במונחים של תנע ומתקף, מדוע חשוב שכנפי מטוסים יסיטו את האוויר הפוגע בהן כלפי מטה?

5. בדרך כלל קשה הרבה יותר לעצור משאית כבדה מלעצור לוח גלגליות (סקייט-בורד) כשהם נעים באותה מהירות. נסו להצביע על מקרה שבו יידרש כוח גדול יותר לעצירת לוח הגלגליות. (שימו לב לזמנים היחסיים.)

6. אם גוף נזרק מן הקרקע כלפי מעלה בתנע של 10 יחידות, מהו תנע הרתע של כדור הארץ? מדוע איננו חשים בכך?

7. כשתפוח נופל מעץ ופוגע בקרקע מבלי לנתר, מה קרה לתנע שלו?

8. מדוע עזה יותר מכת אגרוף ביד חשופה ממכת אגרוף ביד שעליה כפפת איגרוף?

9. מתאגרף מסוגל לחבוט במשך למעלה משעה בשק איגרוף כבד מבלי לחוש עייפות, אך יתעייף במהירות כשיתאגרף עם יריב במשך דקות אחדות. מדוע? (רמז: כשהאגרופים מכוונים אל השק, מה מפעיל את המתקף לעצירתם? כשהמהלומות מכוונות אל היריב, מה או מי

28. האם עליכם להפעיל מתקף על כדור כדי לזרוק אותו? האם יש להפעיל מתקף כדי לתפוס אותו כשהוא נע באותה מהירות? בהשוואה למקרים הקודמים, מהו בקירוב, המתקף שיש להפעיל, אם תופסים את הכדור ומיד שבים וזורקים אותו? (תארו לעצמכם שאתם עומדים על לוח גלגיליות - סקייט-בורד).

29. בהתייחס לאיור 5.6, כיצד ישתנה המתקף בפגיעה אם ידו של האדם מנתרת לאחר בעקבות המכה בלבנים?



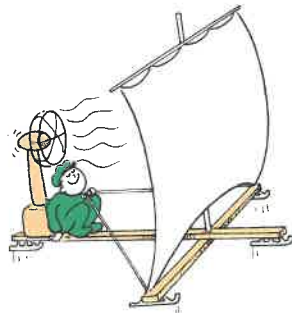
30. האור מורכב מ"גופיפים" זעירים הקרויים פוטונים, שהם בעלי תנע. ניתן להדגים זאת בעזרת רדיומטר, המתואר באיור. כנפי מתכת דקיקות הצבועות בשחור מצד אחד ובלבן מן הצד האחר חופשיות לנוע סביב חוד של מחט הניצבת בתוך תא זכוכית ריק מאוויר. כשפוגעים פוטונים במשטח השחור, הם נבלעים בו;

כשפוגעים פוטונים במשטח הלבן, הם מוחזרים ממנו. על איזה מהמשטחים האור הפוגע מפעיל מתקף גדול יותר ובאיזה כיוון תסתובבנה הכנפיים? (הן תסתובבנה בכיוון המנוגד ברדיומטרים השכיחים יותר, שבהם תא הזכוכית מכיל אוויר; המורה יוכל אולי להסביר לכם מדוע.)

31. הדיטרון הוא חלקיק תת-אטומי המורכב מפרוטון אחד ונייטרון אחד. נניח שדיטרון מואץ למהירות גבוהה במאיץ ציקלוטרון ומופנה לתא גלאי, שם הוא מתנגש בחלקיק אחר, השרוי בתחילה במנוחה, נצמד אליו, ואז נעים שניהם יחד בדיוק בחצי המהירות שהייתה לדיטרון הפוגע. מדוע יחליטו החוקרים שחלקיק המטרה במקרה זה היה גם הוא דיטרון?

32. כדור ביליארד ייעצר במקום אם יתנגש התנגשות חזיתית בכדור אחר השרוי במנוחה. עם זאת, הכדור אינו יכול לעצור אם ההתנגשות אינה התנגשות חזיתית מדויקת - כלומר, אם הכדור השני נע בזווית למסלולו של הכדור הראשון. האם תוכלו להסביר מדוע? (רמז: שימו לב לתנע לפני ההתנגשות ולאחריה בכיוון תנועתו המקורי של הכדור הראשון וכן בכיוון הניצב לכיוון זה.)

21. מזחלת קרח בעלת מפרש תקועה על אגם קפוא ביים שאין בו רוח. הנהג מתקין עליה מאוורר כמתואר באיור. אם כל האוויר מנתר חזרה מן המפרש, האם תתחיל המזחלת לנוע? אם כן, באיזה כיוון?



22. האם תשתנה התשובה לשאלה הקודמת אם האוויר נעצר במפרש ולא נרתע ממנו?

23. בתרגילים הקודמים, האם עדיף היה פשוט להסיר את המפרש? נמקו.

24. כשאתם נוסעים במכונית בכביש מהיר, התנע של חרק קטן ה"נמרח" על השמשה הקדמית משתנה לפתע. בהשוואה לשינוי בתנע של החרק, בכמה משתנה התנע של המכונית?

25. משאית כבדה ומכונית "חיפושית" מתנגשות התנגשות חזיתית. על איזה משני כלי הרכב יפעל כוח חבטה גדול יותר? מתקף גדול יותר? באיזה משני כלי הרכב יחול שינוי גדול יותר בתנע? תאוצתו של איזה מהם תהיה גדולה יותר?

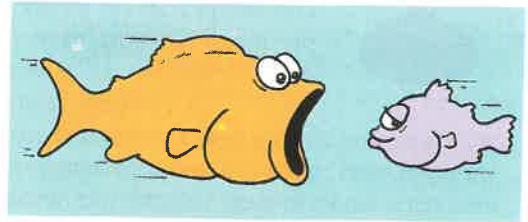
26. באיזה מקרה התנגשות חזיתית בין שתי מכוניות היא הרסנית יותר - כאשר המכוניות נצמדות זו לזו, או כאשר הן נרתעות לאחר בעקבות הפגיעה?

27. שלושה אסטרונאוטים שוהים מחוץ לחללית ושניים מהם מחליטים לשחק "מסירות" בשלישי. לכל האסטרונאוטים משקל שווה על פני כדור הארץ, והם חזקים במידה שווה. אסטרונאוט אחד זורק את השני לעבר השלישי, והמשחק מתחיל. תארו את תנועתם של האסטרונאוטים במהלך המשחק. כמה זמן ימשך המשחק?



בעיות

1. מכונית שמסתה 1000 ק"ג נעה במהירות 20 מ"ש.
חשבו את כוח הבלימה הדרוש כדי להביא את המכונית לעצירה ב-10 שניות.
2. קטר דיזל של רכבת שוקל פי ארבעה מקרון משא. אם קטר, שנע כשמועו כבוי, פוגע בקרון נייח במהירות של 5 ק"מ לשעה, חשבו את מהירותם המשותפת של הקטר והקרון לאחר היצמדותם.
3. דג שמסתו 5 ק"ג שט במהירות של 1 מ"ש, ובולע דג לא זהיר שמסתו 1 ק"ג, השט לעברו במהירות הגורמת לכך ששני הדגים ייעצרו מיד בתום הארוחה. חשבו את המהירות של הדג הקטן לפני הארוחה.
4. עוגת קצפת שמסתה 1 ק"ג נעה במהירות 10 מ"ש, פוגעת בפניו של מוקיון ונעצרת בתוך 0.5 ש". חשבו את הכוח הממוצע שפני המוקיון מפעילים על העוגה.
5. בסרטים ובספרי קומיקס נראה לעיתים סופרמן (מסה 100 ק"ג) כשהוא מזיז גופים ענקיים כדוגמת אסטרואידים, ואפילו כוכבי לכת. תארו לעצמכם שאיש הפלדה מאיץ אסטרואיד צנוע ביותר (מסה בת 1 מיליארד ק"ג = 1,000,000,000 ק"ג) למהירות של 1 מ"ש, בכך שהוא דוחף אותו דחיפה עזה. חשבו את מהירות הרתיחה שלו בכיוון ההפוך.



אנרגיה



אנרגיה היא כנראה המושג המרכזי ביותר במדעי הטבע. היקום הוא שילוב של חומר ואנרגיה. את מהות החומר ניתן להבין בנקל, שכן חומר אפשר לראות, להריח ולמשש. לחומר יש מסה ונפח. לעומת זאת, האנרגיה היא מושג מופשט. את רוב צורות האנרגיה לא ניתן לראות, להריח או למשש. אולי תופתעו לדעת שמושג האנרגיה לא היה מוכר לאיזק ניוטון, ועוד במחצית המאה ה-19 היה עצם קיומו שנוי במחלוקת. אף על פי שאנרגיה היא מילה המוכרת לכולנו, קשה להגדירה, כי אנרגיה אינה רק "דבר", אלא דבר ופעולה בעת ובעונה אחת - כאילו היתה בו-זמנית שם עצם ופועל. לאנשים ולחפצים יש אנרגיה, אך אנו מבחינים בה בתהליכים בלבד - רק כשחלים בה שינויי צורה. את האנרגיה המגיעה בגלים אלקטרומגנטיים מהשמש לכדור הארץ אנו חשים כחום; היא נבלעת בצמחים ומאפשרת התרחשותם של תהליכים כימיים שונים בהם. אנרגיה זו מצויה במזון שאנו אוכלים ומועברת לגופנו בתהליך העיכול. את לימוד האנרגיה נפתח בהכרת מושג הקשור בה: עבודה.

בפרק הקודם ראינו שהשינויים החלים בתנועתו של גוף נקבעים הן על ידי הכוח הפועל עליו והן על ידי משך פעולתו של הכוח. לגודל "כוח $\times$ זמן" קראנו מתקף. אך ניתן להתייחס גם למרחק שהכוח פעל לאורכו. כאשר אנו דנים בגודל כוח $\times$ דרך אנו עוסקים בגודל השונה לחלוטין ממתקף, גודל הנקרא - **עבודה**.

עבודה