

חוקי התנועה של ניוטון



בשנת 1642, חודשים אחדים לאחר מותו של גלילאו, נולד איזק (יצחק) ניוטון. בהיותו בן 23 פיתח ניוטון את חוקי התנועה המפורסמים הקרויים על שמו, חוקים שהסירו סופית מעל בימת הפיסיקה את רעיונותיו של אריסטו, שהנחו את מיטב הוגיה של האנושות במשך כ-2000 שנה. בפרק זה נתאר את חוקי התנועה של ניוטון. החוק הראשון הוא בבחינת הצגה מחדש של רעיון ההתמדה שהוצע קודם לכן על-ידי גלילאו. החוק השני קושר תאוצה לגורם היוצר אותה - כוח. השלישי הוא החוק הידוע בדבר הפעולה והתגובה. שלושה חוקים חשובים אלה פורסמו לראשונה באחד הספרים החשובים ביותר שיצרה האנושות בכל הזמנים: ספרו של ניוטון "פרינקיפיה" (Principia, ספר העקרונות).

גלילאו הזים לחלוטין את הרעיון של אריסטו לפיו גוף, כדי שינוע, חייב לפעול עליו כוח. נהפוך הוא, טען גלילאו, דווקא בהעדר כל כוח ידבק גוף נע במצב תנועתו הקודם. לנטייתם של גופים להתנגד לשינוי בתנועתם קרא גלילאו בשם התמדה. ניוטון גיבש רעיון זה וקבע אותו בתור חוק התנועה הראשון שלו, **חוק ההתמדה**. וכך מנוסח החוק על-פי ה"עקרונות":

**חוק התנועה
הראשון של ניוטון**

חוק 1: כל גוף חומרי ממשיך במצב המנוחה שלו, או במצב התנועה האחידה שלו לאורך קו ישר, אלא אם כן הוא נאלץ לשנות ממצבו זה עקב כוח חיצוני הפועל עליו.



מדוע ייפול המטבע
לתוך הכוס כשכוח יאיץ
את פיסת הקרטון?

העצירה הפתאומית של
התנועה כלפי מטה מקבעת את
הפטיש לידיית-העץ. מדוע?



משיכה בכוח הגדל בהדרגה
תגרום לקריעת החוט המחובר
את הכדור בעל המסה הניכרת
לתקרה, אך משיכה חזקה
פתאומית תגרום לקריעת החוט
התחתון. מדוע?



מילת המפתח בחוק זה היא ממשיך: אם הגוף שרוי במנוחה הוא ימשיך במצב מנוחה; אם הוא נע, הוא ימשיך לנוע מבלי לפנות או לשנות את גודל מהירותו. בקיצור, החוק טוען כי גוף אינו יכול להאיץ את עצמו; תאוצה נכפית על גוף בניגוד לנטייתו לדבוק במצב התנועה שלו. עצמים השרויים במנוחה נוטים להישאר במצב מנוחה, עצמים נעים נוטים להמשיך בתנועה ישירה קבועת מהירות. נטייה זו של עצמים להימנע משינוי בתנועתם מכונה **התמדה**.

מסה

לכל גוף חומרי יש התמדה; כמות ההתמדה תלויה בכמות החומר המצויה בגוף - ככל שרבה יותר כמות החומר, כך גדולה יותר ההתמדה. כדי לתאר את כמות החומר שיש בגוף אנו משתמשים במונח מסה. ככל שרבה יותר מסתו של גוף, כך גדולה יותר ההתמדה שלו. **מסה** היא מידת ההתמדה של גוף חומרי.

למושג המסה יש קשר מסוים למושג שאנו רגילים אליו מחיי יומיום - **המשקל**. אנו אומרים כי בגוף מסוים יש הרבה חומר אם הוא כבד. בחיי יומיום אנו רגילים למדוד את כמויות החומר שיש בעצמים שונים על-פי משיכת הכבידה שלהם אל כדור הארץ. אך מסה היא מושג בסיסי יותר מאשר משקל; זהו מושג בסיסי ביותר, שכרגיל אין מייחסים לו תשומת-לב מספקת. ואולם יש מקרים בהם מושג כמות החומר נקשר באופן לא-מודע למושג ההתמדה. למשל, כשמנסים להעריך איזה משני עצמים כבד יותר שלא בעזרת הרמה, אלא בדרך של טלטול קדימה ואחורה. כשעושים כך בודקים למעשה איזה משניהם קשה יותר להזזה, מי משניהם נוטה יותר לדבוק במצבו. למעשה מה שעושים זו השוואה של ההתמדות של הגופים. רבים נוטים לטשטש את ההבדלים שבין מסה למשקל, בעיקר מפני שהם מתכונתיים (פרופורציוניים) זה לזה. אם מסתו של גוף נכפלת, גם משקלו נכפל; אם מסתו קטנה כדי חצי, גם משקלו קטן לכדי מחצית. אך קיים שוני בין מסה לבין משקל. נוכל להגדיר כל אחד מהם כך:

איזק (יצחק) ניוטון (1642 - 1727)



איזק (יצחק) ניוטון נולד בחג-המולד הנוצרי של שנת 1642, שנת מותו של גלילאו. הוא נולד פגואך בקושי נותר בחיים. בילדותו חי באחוזה הכפרית של משפחת אימו, בוולסטרופ, אנגליה. אביו נפטר חודשים אחדים טרם הולדתו, והוא טופל בידי

אימו וסבתו. בילדותו לא גילה סימני גאונות, ובגיל 14½ הוא נדרש להפסיק את לימודיו לטובת עבודה במשק החקלאי של אימו. קשה לומר עליו שהיה חקלאי מוצלח, והוא העדיף לקרוא בספרים ששאל משכנו הרוקח. דוד מדודי עמד על סקרנותו והאיץ בו ללמוד באוניברסיטה של קיימברידג', ואכן כך עשה במשך חמש שנים, מבלי להתבלט במיוחד.

מגפת דֶּפֶר שפרצה בלונדון החזירה אותו לחוות אימו - הפעם לא כדי לעבוד, אלא כדי להמשיך ללמוד ולחקור. שם, בכפר, בהיותו בן 23, הניח ניוטון את היסודות לעבודה המדעית שהפכה את שמו לנצחי. המראה של נפילת תפוח מן העץ לקרקע עורר בו מחשבה על אודות כוח כובד המתפשט עד הירח ופועל עליו, ומתפשט אף מעבר לירח. הוא ניסח את חוק הכבידה (הגרביטציה) העולמי (רק מאוחר יותר הוכיח אותו); הוא המציא את החשבון האינפיניטסימלי (החשבון הדיפרנציאלי והאינטגרלי) - מכשיר מתמטי שאי אפשר למדע בלעדיו; הוא הרחיב את מחקריו של גלילאו וניסח את שלושת חוקי התנועה הבסיסיים; והוא ניסח תיאוריה בדבר טיבו וטבעו של האור, והוכיח בעזרת מנסרה כי האור הלבן נוצר מפיתוך (ערבוב) כל האורות הצבעוניים המתגלים בקשת שבען. ניסוי המנסרה שלו הוא שפרסם אותו לראשונה כמדען.

בחלוף המגפה חזר ניוטון לקיימברידג' ועד מהרה רכש לעצמו שם של מתמטיקאי מעולה. המרצה שלו למתמטיקה הודיע על פרישתו כדי לפנות את מקומו לניוטון, וניוטון נתמנה כפרופסור למתמטיקה, משרה שהחזיק בה 28 שנים. בשנת 1672 נבחר כחבר בחברה המלכותית האנגלית, מוסד רב-זכויות בהיסטוריה של המדע; שם, בחברה המלכותית, הציג את טלסקופ המראות הראשון. אף כיום ניתן לראותו - הוא שמור בספריית החברה המלכותית האנגלית בלונדון ולצידו כתובת-הסבר: "טלסקופ המראות הראשון, שהומצא על-ידי סר איזק ניוטון, ונעשה במו-ידייו".

רק בהגיעו לגיל 42 החל ניוטון בחיבור הספר שמקובל לתארו כספר המדעי החשוב ביותר בכל תולדות האנושות - "העקרונות" (פרינקיפיה; שמו המלא, בלטינית: "העקרונות המתמטיים של פילוסופיית הטבע"). הספר נכתב לטינית וניוטון השלים את כתיבתו במשך 18 חודשים. הספר הופיע בדפוס בשנת 1687, ותורגם לאנגלית רק בשנת 1729, שנתיים לאחר מות מחברו הגאון. כשנשאל ניוטון כיצד הצליח לגלות תגליות כה רבות וכה חשובות השיב כי אין מדובר בתגליות בן-רגע, אלא שהשקיע מחשבה רבה ומומחשת בכל אחת ואחת מתגליותיו עד שנתפעתנה לו.

בהגיעו לגיל 46 החל להקדיש מזמנו לתחומים אחרים, ונבחר לפרלמנט של אנגליה. הוא התמיד להופיע לשיבות הפרלמנט, אך במשך שנתיים לא נשא אף לא נאום אחד. יום אחד קם מכסאו. באולם הושלך הס והכל ציפו ביראת כבוד למילותיו של האיש הדגול. אבל דבריו הסתכמו בסך-הכל בבקשה לסגור חלון אחד בגלל רוח פריצים...

עוד תפנית שהוסיפה להרחיק את ניוטון מעבודתו המדעית אירעה כשהתמנה למנהל המטבעה המלכותית. הוא התפטר ממשרת הפרופסור שהחזיק בה והפנה את מאמציו לשיפורים ניכרים בעבודת המטבעה, למגינת ליבם של זייפני המטבעות ששגשו באותה תקופה. עם זאת החזיק בחברותו בחברה המלכותית ואף נבחר לנשיאה. לתפקיד זה שב ונבחר מדי שנה עד יום מותו. בגיל 62 כתב את ספרו "אופטיקה", המסכם את מחקריו באור. תשע שנים אחר כך פרסם מהדורה שנייה של ה"פרינקיפיה".

אף כי שערו של ניוטון האפיר כבר בהיותו בן 30, הוא נותר כל ימיו עובת, ארוך וגלי, ושלא כרבים מבני זמנו הוא מעולם לא חבש פיאה נוקרית. הוא היה איש צנוע, רגיש ביותר לביקורת, ומעולם לא נשא אישה. עד אחרית ימיו נשאר בריא בגופו וברוחו. בגיל 80 עדיין היו כל שיניו בפיו, ראייתו ושמיעתו נותרו חדות, ומוחו ערני. כבר בחייו נחשב בעיני בני עמו כמדען הגדול ביותר שחי אי-פעם. בשנת 1705 זכה לתואר אבירות מהמלכה אן. ניוטון מת בגיל 85 ונקבר בקתדרלת ווסטמינסטר בלונדון לצידם של מלכי אנגליה וגיבוריה.

היה זה ניוטון שהראה כי היקום מתנהל על פי חוקי-טבע שאינם נתונים לנחמות וגם אינם מרושעים - מידע שנתן תקווה והעניק השראה למדענים, סופרים, אמנים ופילוסופים ולבני אדם אחרים מכל שדרות החיים וליווה את התעוררות תקופת ההשכלה. רעיונותיו של ניוטון והתבוננות שהגיע אליהן אכן שינו את עולמנו שינוי של ממש והביאו לשיפור אמיתי במצבו של האדם.

מסה: כמות החומר של גוף כלשהו. וביתר פירוט, זוהי מידת ההתמדה שהגוף מגלה נוכח כל ניסיון להפסיק את תנועתו, לגרום לו להתחיל לנוע או לשנות באופן כלשהו את מצב תנועתו.

משקל: כוח הכובד הפועל על גוף.



איור 4.2

סדן ברזל המרחף לו בחלל, למשל - בין כדור הארץ לירח, יכול להיות חסר משקל, אך הוא בהחלט בעל מסה!

את כמות החומר שיש בגוף אנו מעריכים בחיי יומיום על-פי כוח הכבידה הפועל בינו לבין כדור הארץ, כלומר - לפי משקלו. כך אנו עושים כשאנו משתמשים במאזניים (המכונים בחיי יומיום גם בשם "משקל") שבהם מותקן קפיץ. יחידת המשקל הבסיסית המקובלת היא קילוגרם-כוח; הכוח הוא כוח משיכת כדור הארץ. ואולם ה**קילוגרם** כשלעצמו הוא יחידת מסה; יש להבחין, אם-כן, בין קילוגרם של משקל (קילוגרם-כוח) לבין קילוגרם שהוא קילוגרם-של-מסה. בשיטת היחידות המטרית יחידת הכוח איננה קילוגרם-כוח כי אם **ניוטון**, שהיא יחידה הקטנה כמעט פי 10 (ביתר דיוק: פי 9.8) מקילוגרם-כוח. לבנה בת 1 קילוגרם שוקלת 9.8 ניוטונים ובקיצור: 9.8 N.*

הרחק מפני כדור הארץ, במקום בו השפעת הכבידה של כדור הארץ קטנה יותר, לבנה שמסתה 1 קילוגרם משקלה פחות מ-1 קילוגרם-כוח. משקלה נמוך יותר גם על פני כוכב לכת שכוח הכובד שלו קטן מזה של כדור הארץ, וכך גם על הירח - כוח הכבידה שמפעיל הירח על גוף הנמצא על פניו מגיע לכדי שישית (1/6) מכוח-הכבידה שיפעיל כדור הארץ על אותו גוף אם יוצב עליו. לפיכך לבנה שמסתה 1 קילוגרם שוקלת על-פני הירח 1.6 ניוטונים לערך. בקרבתה של פלנטה שמסתה גדולה יהיה משקלה של הלבנה רב יותר מאשר משקלה על-פני כדור הארץ. אך המסה של הלבנה קבועה בכל מקום. המאמץ הנדרש כדי להתגבר על ההתמדה של הלבנה - כדי להאיץ אותה, או כדי לעוצרה מתנועתה, הוא אותו מאמץ בכל מקום, בלי קשר לשאלה האם וכמה היא נמשכת לכדור הארץ, לירח או לגרם שמימי אחר. באותו אזור בחלל הממוקם בין כדור הארץ לבין הירח שבו כוחות הכבידה שמפעילים שני גופים אלה מבטלים זה את זה, ללבנה יש מסה - המסה אינה משתנה. אם נניח אותה שם על-גבי מאזניים נגלה כי משקלה אפס, אך מידת ההתמדה שלה לא משתנה, התנגדותה לשינוי במצב תנועתה שווה לזו שעל-פני כדור הארץ. אותו כוח יידרש האסטרונאוט להפעיל כדי לטלטל את הלבנה קדימה ואחורה במקום בחלל בו כוח משיכת כדור הארץ וכוח משיכת הירח מבטלים זה את זה (ולפיכך משקל הלבנה אפס) כמו הכוח שיידרש ממנו לטלטל את הלבנה קדימה ואחורה על פני כדור הארץ. אם תרצו להניע רכב ירח על פני משטח מישורי חלק בירח, תצטרכו להפעיל אותו כוח שיידרש כדי להניע רכב זה על פני משטח דומה בכדור הארץ. ואולם הקושי הכרוך בהרמה של אותו רכב כלפי מעלה, תוך התגברות על כוח הכובד - זה כבר סיפור אחר. אכן, מסה ומשקל שונים זה מזה (איורים 4.2, 4.3).

חשוב גם שלא להחליף בין המסה של הגוף לבין גודל הגוף או, ליתר דיוק, **נפחו**. כרגיל כשאנו חושבים על גוף רב-חומר (מסיבי) אנו חושבים על גוף גדול, כלומר - על גוף בעל נפח גדול, התופס חלל גדול. אך גוף יכול להיות בעל מסה גדולה מבלי לתפוס חלל גדול - כזה הוא, למשל, מצבר של מכונית. אין לטעות



איור 4.3

אסטרונאוט המרחף בחלל יצטרך להתאמץ כדי לטלטל סדן ברזל גדול, אף אם הסדן חסר משקל. אם מסת הסדן גדולה יותר מזו של האסטרונאוט עצמו, מי יטלטל יותר בניסוי - הסדן או האסטרונאוט?

* עוד על השיטה המטרית ועל מערכות של יחידות תמצאו בנספח א'.

בכך, אף שלעיתים קרובות מסה ונפח מתכונתיים (פרופורציוניים) זה לזה, לפחות כשמדובר בחומר אחד. למשל, 2 קילוגרמים של סוכר ימלאו שקית שנפחה כפול מנפחה של שקית המתמלאת מקילוגרם אחד של סוכר. ואולם אין פירוש הדבר כי מסה היא נפח, לא ולא. כמות המתיקות הטמונה ב-2 קילוגרמים של סוכר כפולה מכוסר ההמתקה של קילוגרם אחד של סוכר, ולמרות זאת לא יעלה על הדעת לטעון כי מסה היא כוסר המתקה. שתי לחמניות יכולות להיות שוות-מסה אך שונות מאוד מבחינת נפח. שהרי אם לקחת בתיקן בבוקר שתי לחמניות שוות מסה ושוות נפח, אלא שאחת נמעכה מן הספרים במהלך היום, המסות יישארו שוות למרות ההבדל הבולט בנפחים. מסה, אם כן, איננה משקל ואף איננה נפח.

למרות שגליליאו היה הוגה מושג ההתמדה, היה זה ניוטון שירד לעומק משמעות המושג. חוק ההתמדה מגדיר תנועה טבעית מהי ובאילו סוגי תנועות נדרשת הפעלת כוח. בעוד שעל פי אריסטו יש צורך בהפעלת כוח על מנת לקיים את תנועתו של חץ באוויר, הרי שלפי חוק ההתמדה של ניוטון תנועת החץ היא תנועה טבעית; ללא חיכוך או התנגדות האוויר, תנועה במהירות קבועה על קו ישר אינה דורשת הפעלת כוח. ובעוד שאריסטו ותלמידיו סברו שתנועתם המעגלית של הגופים השמימיים היא תנועה טבעית המתקיימת ללא הפעלת כוח, חוק ההתמדה קובע בצורה חד-משמעית, שבהעדר כוחות מסוג כלשהו, כוכבי הלכת לא ינועו במעגלים המקודשים, שהיו חזות האסטרונומיה בעולם העתיק ובימי הביניים, אלא יתרחקו למרחבי החלל במסלולים ישרים. ניוטון גרס שמסלוליהם העקומים של כוכבי הלכת מעידים על קיום כוח כלשהו. בפרקים הבאים נראה שהחיפוש אחר כוח זה הוביל את ניוטון לגילוי חוק הכבידה.

שאלות

1. דיסקת הוקי הנעה על גבי קרח נעצרת. כיצד יסביר אריסטו התנהגות זו? כיצד יבאר גליליאו וניוטון את התופעה? מהו הסברך?
2. האם ללבנת ברזל בת 2 ק"ג התמדה כפולה מלבנת ברזל בת 1 ק"ג? מסה כפולה? משקל כפול? נפח כפול?
3. האם קל יותר להרים מכונית קדילק על כדור הארץ או על הירח?

תשובות:

1. אריסטו היה טוען, כנראה, שהדיסקית נעצרת כי היא שואפת להגיע למצבה הטבעי, מצב המנוחה. גליליאו וניוטון היו אומרים, כנראה, שהדיסקית הנמצאת בתנועה היתה מתמידה במצבה זה, אך הדבר נמנע בעדה, לא בשל שאיפתה למצב המנוחה הטבעי, אלא עקב כוח החיכוך הפועל בינה לבין הקרח. חיכוך זה קטן יחסית לחיכוך בין הדיסקית לרצפת עץ למשל, ולכן מרחק העצירה על הקרח גדול יותר. רק בידך לענות על השאלה האחרונה.
2. התשובות לכל סעיפי השאלה חיוביות. ללבנת ברזל בת 2 ק"ג מספר כפול של אטומים, כלומר, כמות החומר שבה כפולה ואי לכך גם מסתה כפולה, ובאותו מקום – גם משקלה כפול. הואיל והצפיפות (מסה/נפח) של הלבנים שווה, הרי שללבנה בת 2 הק"ג נפח כפול.
3. קל יותר להרים את מכונית הקדילק על הירח, כי כוח הכובד על הירח קטן יותר. כשנרים גוף, ניאבק בכוח הכובד (משקלו) בנוסף להתמדתו (מסתו). למרות שמסת גוף שווה בכדור הארץ, בירח או בכל מקום אחר, משקלו על הירח הוא $\frac{1}{6}$ מהמשקל על כדור הארץ ולכן המאמץ הנדרש להרימו שם הוא $\frac{1}{6}$ מהמאמץ על כדור הארץ. אולם, בהזזת מכונית בכיוון האופקי, איננו פועלים כנגד כוח הכובד. כאשר המסה היא הגורם הבלעדי הקובע, הפעלת כוחות שווים תגרום לאותה תאוצה בכדור הארץ ובירח.

יום-יום אנו צופים בעצמים שאינם מתמידים במצב תנועתם: גופים במנוחה מתחילים לנוע; גופים נעים על מסלולים לא ישרים; גופים בתנועה עשויים להיעצר. ברוב התנועות הנצפות חלים שינויים שהם תוצאה של פעולת כוח אחד או מספר כוחות. הכוח השקול הכולל, בין אם הוא נובע ממקור יחיד או מחיבור של מספר כוחות, גורם לתאוצה. הקשר בין התאוצה, הכוח והמסה נתון בחוק השני של ניוטון.

חוק 2: תאוצתו של גוף נמצאת ביחס ישר לכוח השקול הפועל עליו, כיוונה ככיוון הכוח השקול, וגודלה נמצא ביחס הפוך למסת הגוף.

ובקיצור,

$$\frac{\text{כוח השקול}}{\text{מסה}} \sim \text{תאוצה}$$

ובנוסחה

$$a \sim \frac{F}{m}$$

הסימון $\sim$ ("גל") משמש לציון "יחס ישר". נאמר שהתאוצה a נמצאת ביחס ישר לכוח השקול F וביחס הפוך למסה m . כלומר, אם F גדל, a גדל, אבל אם m גדל, a קטן. בבחירה מתאימה של יחידות ל- F , m ו- a , ניתן להפוך את הקשר לשוויון:

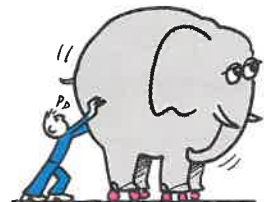
$$a = \frac{F}{m}$$

גוף מואץ בכיוון הכוח שפועל עליו. כוח הפועל בכיוון תנועתו של גוף יגדיל את מהירות הגוף. כוח הפועל בכיוון מנוגד לכיוון המהירות, יקטין את מהירות הגוף. כוח המאונך לכיוון התנועה ישנה את כיוון התנועה. כוח שיפעל בכיוון אחר יגרום לשינויים בגודל המהירות ובכיוונה. כיוון תאוצת הגוף הוא תמיד ככיוון הכוח השקול.

במובנו הפשוט, **כוח** הוא או משיכה או דחיפה. מקורו של הכוח יכול להיות כבידתי, חשמלי, מגנטי או סתם מאמץ של שרירים. בחוק השני העניק ניוטון משמעות מדויקת יותר למושג הכוח בכך שייחס אותו לתאוצה שהוא יוצר. לאמיתו של דבר, קביעתו היא כי כוח הוא כל דבר שיכול להאיץ גוף. יתר על כן, הוא קובע, שככל שהכוח גדל, התאוצה גדלה. הכפלת הכוח הפועל על גוף נתון תגרום להכפלת תאוצתו, הגדלת הכוח פי שלושה תגרום להגדלת התאוצה פי שלושה, וכן הלאה. התאוצה מתכונתית (נמצאת ביחס ישר) לכוח השקול (איור 4.5).

אנו מציינים, כוח שקול, מפני שלעיתים קרובות פועלים על גוף מספר כוחות. הבה נבחן בקפידה למה כוונתנו במילה שקול. אם את וחברך תמשכו גוף בכוחות שווים ובאותו כיוון, הכוחות יתוספו זה לזה וישוו לכפליים הכוח שכל אחד מכם הפעיל. הכוח הכולל יגרום לתאוצה כפולה מזו שהיתה מתקבלת ממשיכה של אחד מכם לבדו. אך, אם תמשכו בכוחות שווים ובכיוונים מנוגדים, הגוף לא יואץ כלל. מאחר שהכוחות פונים בכיוונים מנוגדים, הם מבטלים זה את זה. ניתן לומר שאחד הכוחות הוא הנגדי למשנהו ולכן סכומם האלגברי מתאפס. הכוח השקול שווה אפס.

חוק התנועה השני של ניוטון



איור 4.4

על מנת להאיץ בתאוצה מסוימת, יש להפעיל על גוף שמסתו גדולה יותר כוח גדול יותר.

הכוח שמפעילה היד מאיץ את הלבנה



כוח כפול גורם לתאוצה כפולה



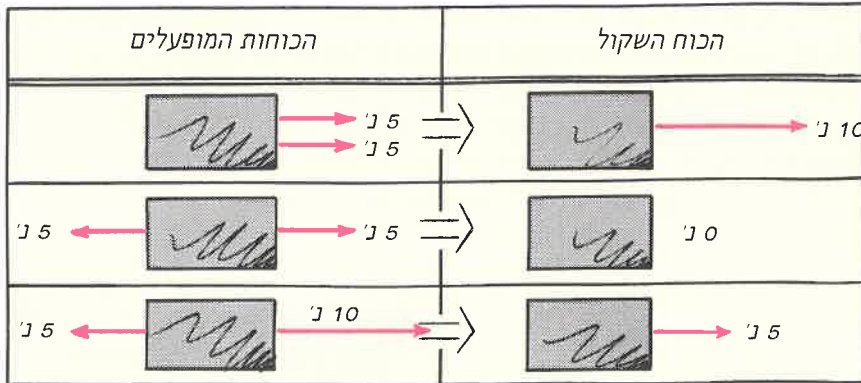
כוח כפול ומסה כפולה - התאוצה ללא שינוי



איור 4.5

התאוצה מתכונתית לכוח.

איור 4.6
הכוח השקול.



נניח שמשכת את הגוף בכוח של 20 ניוטון וחברך משך בכיוון הנגדי בכוח של 15 ניוטון. הכוח והתאוצה השקולים ישוו לכוח ולתאוצה שהיו מתקבלים אילו משכת לבדך בכוח של 5 ניוטון. 5 ניוטון הוא גודלו של הכוח השקול. אם הכוחות שוויו כיוון הם מתחברים; אם הם בכיוונים מנוגדים הם נגרעים זה מזה (איור 4.6). הכוח השקול הוא הקובע את תאוצת הגוף.

לכוח יש איפוא הן גודל והן כיוון. כוח הוא גודל וקטורי. כאשר שני כוחות או יותר פועלים על גוף, הם מתחברים לפי כללי החיבור של וקטורים. כאשר הכוחות מקבילים, באותו כיוון או בכיוונים מנוגדים, הם מתחברים אלגברית. כאשר הכוחות נטויים זה לזה בזוויות אחרות כך שאינם באותו כיוון או בכיוונים מנוגדים, יש לחברם על-פי כלל המקבילית שנלמד בפרק 3. על מנת לפשט את לימודי הפיסיקה שלנו, נדחה את הדיון בחיבור כוחות כאלה לנספח ג'.

לכוח ולמסה השפעות הפוכות על התאוצה (איור 4.7). ככל שהמסה של גוף גדולה יותר, תאוצתו קטנה יותר. אם נפעיל אותו כוח, הכפלת המסה תקטין את התאוצה למחצית; הגדלת המסה פי שלושה תקטין את התאוצה לשליש מערכה הקודם. הגדלת המסה מקטינה את התאוצה. לדוגמה, אם נתקין אותו מנוע במכונית קדילק ובחיפושית, נצפה שהתאוצות תהיינה שונות, למרות שהכוח המניע בשני המקרים שווה. למכונית הקדילק, שמסתה גדולה יותר, התנגדות גדולה יותר לשינויי מהירות מלחיפושית. לכן, לקבלת אותה תאוצה, יש להתקין בקדילק מנוע רב-עוצמה מבחיפושית. להשגת אותה תאוצה, יש להפעיל על גוף שמסתו גדולה יותר כוח גדול יותר. כלומר, התאוצה נמצאת ביחס הפוך למסה*.

הכוח שהיד מפעילה
מאיץ את הלבנה



אותו כוח מאיץ 2 לבנים
ב-1/2 התאוצה



ל-3 לבנים 1/3 התאוצה



* בפועל, ניתן להגדיר מסה כקבוע הפרופורציה בין הכוח והתאוצה בחוק השני של ניוטון, $m = F/a$. יחידת מסה אחת היא המסה שיש להפעיל עליה 1 יחידת כוח כדי להעניק לה 1 יחידת תאוצה. לכן, 1 ק"ג הוא כמות החומר שכוח של 1 ניוטון יאיץ ב-1 מ/ש². בהמשך נראה שמסה היא צורת אנרגיה מרוכזת.

איור 4.7

התאוצה היא ביחס הפוך
למסה.

שאלה

בפרק 2 הגדרנו תאוצה כקצב שינוי המהירות; כלומר תאוצה = (שינוי במהירות)/(הזמן שחלף). בפרק זה אנו טוענים שתאוצה היא היחס בין כוח למסה; כלומר, $a = F/m$? מהי אם כן הגדרת התאוצה?

תאוצה אפס - שיווי-משקל

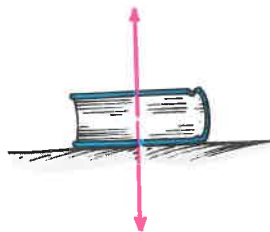
כשתאוצתו של גוף מתאפסת, נאמר שהגוף נמצא בשיווי משקל מכני. כל הכוחות הפועלים עליו מבטלים אלה את אלה. הכוח השקול על גוף השרוי בשיווי משקל מתאפס. ספר המונח על שולחן נמצא בשיווי משקל כי הוא אינו מואץ. גם אם הספר מחליק על משטח אופקי חלק במהירות קבועה הוא יהיה בשיווי משקל, כי הוא אינו מואץ. בשני המקרים הכוח השקול על הספר מתאפס. ראשית נדון במקרה הנייח. מצב זה ייקרא שיווי משקל סטטי.

נתבונן בספר המונח על שולחן. תאוצתו אפס. לכן, לפי החוק השני של ניוטון, הכוח השקול על הספר מתאפס. כוח הכובד פועל כלפי מטה, ולכן חייב להיות כוח נוסף הפועל על הספר כלפי מעלה. הכוח הנוסף הוא הכוח התומך שהשולחן מפעיל (הנקרא לעיתים הכוח הנורמלי)*.

השולחן מפעיל על הספר כוח תומך הפונה מעלה ושווה בגודלו לכוח הכובד הפועל על הספר כלפי מטה, כלומר, למשקל הספר (איור 4.8).

כאשר אנו עומדים על מאזני אמבטיה, הכוח שאנו מפעילים עליהם מכווץ קפיץ המכויל להוריית המשקל. למעשה, המד מראה את כוח התמיכה. מכיוון שאיננו מואצים, הכוח השקול מתאפס ולכן משיכת הכובד למטה ותמיכת המאזניים כלפי מעלה שווים זה לזה בגודלם. אם גוף אינו מואץ, או ששום כוח אינו פועל עליו או שהכוחות הפועלים עליו מתקזזים. לעיתים, ניתן להסיק מסקנות מהעובדה שהכוח השקול על גופים בשיווי משקל מתאפס. למשל, אם נראה שכוח פועל על גוף שאינו בתאוצה, נדע שבהכרח מופעל עליו כוח אחר - שווה בגודלו ומנוגד בכיוונו. הכוח השקול על גוף בשיווי משקל לעולם מתאפס.

נתבונן בדיסקת הוקי המחליקה על קרח במהירות קבועה. היא מחליקה ללא תאוצה מפני שהכוח השקול עליה מתאפס. כל גוף נע שאינו מואץ נמצא בשיווי משקל דינמי. כדור כדורת המתגלגל על המסלול במהירות קבועה נמצא בשיווי משקל דינמי - עד לפגיעתו ב"חיילים". בדוחפנו ארגז עץ על רצפת מפעל במהירות קבועה, הארגז נמצא בשיווי משקל דינמי. במקרה זה הכוח שאנו מפעילים מאוזן על ידי החיכוך בין הארגז והרצפה. הכוח השקול מתאפס; לכן התאוצה אפס. חשוב להדגיש שתאוצה אפס אין פירושה מהירות אפס. תאוצה



איור 4.8

השולחן דוחף את הספר למעלה בכוח השווה בגודלו לכוח הכובד המופעל על הספר כלפי מטה, ולכן הכוח השקול על הספר מתאפס.



איור 4.9

סכום כוחות המשיכה שמפעילות הסבעות למעלה שווה למשקל הילדה.

תשובה:

התאוצה היא קצב שינוי המהירות והיא נוצרת ע"י הכוח. היחס כוח/מסה (הסיבה) קובע את קצב שינוי המהירות (התוצאה). בפרק 2 הגדרה התאוצה, ובפרק זה הגדרנו את הגורמים לתאוצה.

* הכוח הזה פועל במאונך למשטח. בלועזית אנך נקרא "נורמל" ולכן הכוח הנורמלי.

אפס פירושה שמהירות הגוף תישאר קבועה - לא תגדל, לא תקטן ולא תשנה את כיוונה. על מנת להתגבר על החיכוך יש לדחוף או למשוך את רוב הגופים הנעים בסביבתנו.

שאלה

מה יראו שני מאזני אמבטיה אם תעמדו עליהם ותכבידו על שניהם במידה שווה? מה תהיה הוריייתם אם תישענו יותר על אחת הרגליים?

חיכוך

חיכוך הוא כוח הקיים כאשר משטחים מחליקים או מנסים להחליק זה על זה. הוא תלוי בחומרים שהמשטחים עשויים מהם ובגודל הכוח הלוחץ המופעל ביניהם, ומקורו במגע ההדדי בין הבליטות הזעירות שבפני המשטחים. בליטות אלה מעכבות את התנועה. גם במשטחים הנראים חלקים ביותר מתגלות בליטות מיקרוסקופיות. האטומים נצמדים זה לזה בנקודות המגע. בהחלקה, האטומים ניתקים זה מזה ואף נקרעים ממשטח אחד ומתחברים למשנהו.



איור 4.10

למעשה, התאוצה של דיסקת ההוקי, לאחר שנחבטה והחלה להחליק על הקרח, היא אפס.

כיוונו של כוח החיכוך מנוגד תמיד לכיוון התנועה. כוח החיכוך על גוף המחליק במורד פונה במעלה המדרון; כיוון החיכוך על גוף הנע ימינה הוא שמאלה. לכן, כדי שגוף יחליק במהירות קבועה, יש להפעיל עליו כוח בכיוון מנוגד לכוח החיכוך, באופן ששני הכוחות יבטלו זה את זה. כתוצאה מהתאפסות הכוח השקול התאוצה תתאפס (איור 4.11).

שום כוח חיכוך אינו פועל על ארגז עץ המונח על רצפה אופקית. אך אם ננסה לדחוף את הארגז בכיוון אופקי ייווצר כוח חיכוך. מה גודלו של החיכוך? אם הארגז שרוי עדיין במנוחה, גודל החיכוך המתנגד לתנועה ישווה לכוח הדוחף. אם נדחף אופקית בכוח של 70 ניוטון, למשל, החיכוך ישווה ל-70 ניוטון. נגדיל את הכוח הדוחף ל-100 ניוטון, למשל, ובמצב זה הארגז נמצא על סף החלקה - כוח החיכוך בין הארגז לרצפה יתנגד לדחיפה בכוח של 100 ניוטון. אם 100 ניוטון הוא הכוח המרבי שביכולתו של החיכוך לספק, אזי בעקבות דחיפה חזקה יותר תנותק ההצמדה והארגז יחל להחליק. מעניין לציין, שהחיכוך במצב של החלקה קטן במקצת מהחיכוך הנבנה בטרם תחל ההחלקה. פיסיקאים ומהנדסים מבחינים, לפיכך, בין חיכוך סטטי לחיכוך החלקה. על מנת למנוע עומס יתר של מידע לא נרחיב יותר בהבדלים בין סוגי החיכוך, פרט לדוגמה אחת חשובה - בלימת מכונית בעצירת חירום.

תשובה:

סכום הקריאות בשני מדי המשקל חייב להשתוות למשקלכם - סכום קריאות מדי המשקל שווה לסכום כוחות התמיכה של מדי המשקל, המאזנים את משקלכם מפני שהכוח הכולל עליכם מתאפס. אם תכבידו במידה שווה על שני מדי המשקל, הורייית כל אחד מהם תשווה למחצית משקלכם. אם תישענו יותר על אחד ממדי המשקל, הוא יורה יותר ממחצית משקלכם בעוד שהשני יורה פחות ממחצית המשקל, כך שסכום הקריאות ישווה למשקל הכולל. למשל, אם מד משקל אחד מורה שני שלישים ממשקלכם, יורה השני שליש המשקל.

במצב זה, חשוב לא ללחוץ על הבלמים יותר על המידה, כדי למנוע את "נעילת" הגלגלים. כשהגלגלים "ננעלים", הם מחליקים, ואז החיכוך קטן בהשוואה למצב בו הגלגלים מתגלגלים עד לעצירה. כשהגלגל מתגלגל, הוא אינו מחליק יחסית לכביש, כלומר החיכוך הוא חיכוך סטטי - וכך הוא גדול יותר מחיכוך ההחלקה. ההבדל בין חיכוך סטטי לחיכוך ההחלקה ניכר גם בשעה שנעים בסיבוב במהירות גבוהה מדי. ברגע שהגלגלים מתחילים להחליק, החיכוך קטן ואבוי לנו! נהגים מנוסים (או מערכות חדישות המונעות החלקה) שומרים שהצמיגים לא יתקרבו לסף המעבר להחלקה.

מעניין לציין, שכוח החיכוך בין גופים מוצקים אינו תלוי במהירות. החיכוך הפועל על מכונית הנעה במהירות נמוכה הוא בקירוב כחיכוך הפועל על המכונית הנעה במהירות גבוהה. אם כוח החיכוך על ארגז העץ המחליק על הרצפה במהירות נמוכה הוא 90 ניוטון, זה יהיה בערך ערכו של כוח החיכוך גם במהירויות גבוהות יותר. החיכוך עשוי להיות גדול יותר כשהארגז עומד על סף החלקה, אך מתחילת ההחלקה ערכו נותר ללא שינוי.



איור 4.11

הארגז מחליק ימינה כשמופעל עליו כוח של 75 ניוטון. מכיוון שכוח החיכוך המתנגד לתנועה הוא בן 75 ניוטון, הכוח השקול על הארגז מתאפס ולכן הארגז נע במהירות קבועה (תאוצתו אפס).

מטוס סילון משייט במהירות קבועה של 1000 ק"מ/שע' כשכוח הדחף של מנועיו קבוע ושווה ל-100,000 ניוטון. מהי תאוצת המטוס? מהו כוח ההתנגדות שמפעיל האוויר על המטוס?

שאלה

מעניינת גם העובדה שכוח החיכוך אינו תלוי בשטח המגע. אם הארגז יחליק על צידו הצר, משקלו יתחלק על-פני שטח קטן יותר אך החיכוך לא ישתנה. צמיגים רחבים אינם מספקים למכוניות חיכוך גדול יותר מצמיגים צרים. הצמיגים הרחבים מחלקים את משקל המכונית לשטח מגע גדול יותר ומקטינים את שיעור התחממותם והתבלותם (איור 4.12).

החיכוך אינו מוגבל למוצקים המחליקים זה על זה. חיכוך קיים גם בנוזלים ובגזים, הנקראים בהכללה זורמים. כשם שהחיכוך בין משטחים מוצקים תלוי בהרכב המשטחים, כך גם החיכוך בזורם תלוי בטיב הזורם: למשל, החיכוך במים גדול יותר מבאוויר. אך בניגוד לחיכוך בין משטחים מוצקים, כמו ארגז העץ והרצפה, החיכוך בזורם-תלוי במהירות ובשטח המגע. הדבר סביר, כי כמויות הזורם המוסטות על ידי סירה או מטוס תלויות בגודלם ובצורתם של כלי השיט או הטיס. ההתנגדות לתנועת סירה או מטוס איטיים קטנה מההתנגדות לתנועת סירה או מטוס מהירים. סירות או מטוסים רחבים מסיטים מדרכם כמויות גדולות של זורם משמסיטים סירות או מטוסים צרים.



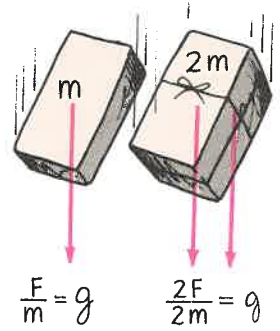
איור 4.12

החיכוך בין הגלגל לכביש שווה עבור הצמיג הצר והצמיג הרחב. יתרון הגדלת שטח המגע בהקטנת ההתחממות והבלאי.

תשובה:

התאוצה היא אפס מפני שהמהירות קבועה. הואיל והתאוצה היא אפס, הרי לפי החוק השני של ניוטון, הכוח השקול על המטוס מתאפס, ולכן כוח ההתנגדות של האוויר משתווה בגודלו לכוח הדחף. כלומר ל-100,000 ניוטון, ופועל בכיוון מנוגד לו. (שימו לב לכך שכדי לענות על השאלה, אין צורך לדעת את מהירות המטוס. די לנו בנתון שהמהירות קבועה, שהוא המפתח למסקנה שהתאוצה ולכן גם הכוח השקול מתאפסים.)

כשזרימת הנוזל חלקה יחסית, כוח החיכוך נמצא ביחס ישר בקירוב למהירות הגוף. מעל מהירות גבולית מסוימת יחס ישר זה חדל מלהתקיים, מפני שתנועת הזורם הופכת לא-סדירה והחיכוך גדל במידה ניכרת*.



נפילה חופשית - תאוצה g

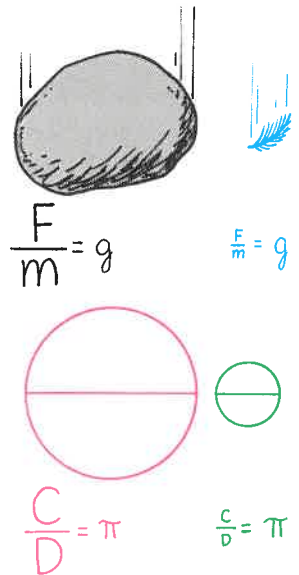
בפרק 2 סופר שגליליאו היה הראשון שמדד את תאוצתם של גופים הנופלים נפילה חופשית. מעניין לציין, כי למרות שגליליאו טבע את מושגי התאוצה וההתמדה, לא עלה בידו לגלות את הקשר בינם לבין הכוח. לכן נבצר ממנו להסביר מדוע גופים בעלי מסות שונות נופלים בתאוצות שוות. קשר זה הוא החוק השני של ניוטון ובהמשך ניווכח שהוא אכן מספק את ההסבר.

אנו יודעים שגוף נופל מואץ לעבר כדור הארץ בשל הכוח של משיכת הכובד הפועל בינו לבין כדור הארץ. אנו קוראים לכוח הכובד הפועל על גוף משקל הגוף**. כאשר זה הכוח היחיד הפועל - כלומר, כאשר החיכוך עם האוויר וגורמים דומים אחרים זניחים - נאמר שהגוף במצב של **נפילה חופשית**.

גוף כבד נמשך לכדור הארץ בכוח גדול יותר מגוף קל. צמד הלבנים באיור 4.13, למשל, נמשך בכוח כפול מהלבנה הבודדת. מדוע, אם כן, צמד הלבנים אינו מגיע פי שניים מהר יותר, כפי שסבר אריסטו? התשובה נעוצה בעובדה שתאוצת גוף אינה תלויה רק בכוח הפועל עליו - במקרה זה המשקל - אלא גם במסה. בעוד שהכוח נוטה להאיץ גופים, המסה נוטה להתנגד להאצתם. לכן, כוח כפול על מסה כפולה גורם לאותה תאוצה כמו מחצית הכוח הפועלת על מחצית המסה. תאוצת שניהם שווה. התאוצה כתוצאה מכוח הכובד היא g .

את היחס הקבוע בין משקל למסה ניתן לדמות ליחס הקבוע בין היקף מעגל לקוטרו, π . היחס בין משקל למסה שווה בגופים כבדים וקלים, כשם שהיחס בין היקף מעגל לקוטרו שווה במעגלים גדולים וקטנים (איור 4.14). תאוצת הנפילה החופשית היא g . אנו נשתמש בסימון g , במקום ב- a , לציון העובדה שהתאוצה נובעת מפעולת כוח הכובד בלבד.

תאוצת הנפילה החופשית אינה תלויה, איפוא, במשקל. גוש סלע שמסתו גדולה פי 100 מאבן חצץ נופל באותה תאוצה כמוה, כי למרות שהכוח הפועל על הסלע (משקלו) גדול פי 100 מהכוח (המשקל) הפועל על החצץ, הרי התנגדות הסלע לשינויים בתנועתו (המסה) אף היא גדולה פי 100 מזו של החצץ. השפעת הכוח הגדול יותר מתקזזת עם השפעת המסה הגדולה באותו יחס.



איור 4.14

היחס בין המשקל (F) למסה (m) של האבן הגדולה והנוצה הקטנה שווה; באותו אופן, היחס בין היקף המעגל (C) לקוטרו (D) שווה במעגל הגדול והקטן.

* אף שהדברים אולי אינם נראים כך, רוב המושגים בפיסיקה אינם מורכבים. אך החיכוך, בניגוד לרוב המושגים בפיסיקה, הוא תופעה מורכבת ביותר, הממצאים מבוססים על קשת רחבה של ניסויים והתחזיות מקורבות בלבד.

** מסה ומשקל מתכוונתיים (פרופורציוניים) זה לזה, וקבוע הפרופורציה ביניהם הוא g . אנו רואים שמשקל = mg , לכן $(9.8 \text{ מ"ש} \cdot \text{שני}^2) \cdot (1 \text{ ק"ג}) = 9.8 \text{ ניוטון}$.

בריק (ואקום), מטבע ונוצה ייפלו יחדיו, זו לצידה של זו. האם נכון לומר שבריק כוחות הכובד הפועלים על המטבע ועל הנוצה שווים?

כשהתאוצה קטנה מ- g - נפילה לא-חופשית

גופים הנופלים בריק (ואקום) הם עניין אחד, אך מה באשר למציאות שבה הגופים נופלים באוויר? אמנם בריק מטבע ונוצה ייפלו במהירויות שוות, אך באוויר תנועתם תהיה שונה. כיצד יתאימו חוקי ניוטון לנפילת גופים באוויר? התשובה היא כי חוקי ניוטון מתאימים לכל הגופים, לנופלים חופשית או לנופלים בנוכחות כוחות מעכבים! התאוצות תהיינה, כמובן, שונות בשני המקרים. העניין שחשוב לזכור הוא מושג הכוח השקול. בריק, או במקרה שבו התנגדות האוויר זניחה, הכוח השקול הוא משקל הגוף, שהרי זה הכוח היחיד הפועל על הגוף הנופל. אולם, כשמביאים בחשבון את התנגדות האוויר, הכוח השקול יהיה ההפרש בין משקל הגוף לכוח ההתנגדות של האוויר*.

כוח ההתנגדות הפועל על גוף הנופל באוויר תלוי בראש ובראשונה בשני גורמים. ראשית, הוא תלוי בממדי הגוף הנופל - כלומר, בכמות האוויר שהגוף מסיט תוך כדי פילוס דרכו. שנית, הוא תלוי במהירות הגוף הנופל; ככל שמהירותו גדלה, גדל מספר מולקולות האוויר שעימן הגוף מתנגש בכל שנייה וגדלה עוצמת ההתנגשויות. התנגדות האוויר תלויה בגודל הגוף הנופל ובמהירותו.

נוצה הניתקת באוויר מואצת מעט מאוד כלפי מטה ואז היא ממשיכה ליפול במהירות קבועה. הדבר נובע מכך שהתנגדות האוויר לתנועת הנוצה גדלה מהר עד להשתוותה למשקל הנוצה. הכוח השקול על הנוצה קטן במהירות לאפס, ומרגע זה ואילך, הנוצה אינה מואצת עוד. הנוצה קלה ביותר ובעלת שטח מגע גדול יחסית עם האוויר, ולכן כבר במהירויות נמוכות התנגדות האוויר משתווה למשקלה. ניתוח דומה תקף לכל הגופים הנופלים באוויר. ככל שמהירות הגוף הנופל גדלה, התנגדות האוויר גדלה גם היא ולבסוף היא משתווה למשקל הגוף.

תשובה:

לא ולא, אלק פעמים לא! גופים אלה מואצים בתאוצה שווה, לא משום שכוחות הכובד עליהם שווים, אלא מפני שהיחסים בין המשקלים למסות שווים. למרות שבריק כוח ההתנגדות של האוויר אינו קיים, הכובד קיים גם קיים (נוכל להבחין בו אם נדרוך על ביצה בחדר מרוקן מאוויר). אם תשובתך לשאלה היתה כן, מן הראוי שהיא תשמש לך כהתרעה להקפדת יתר בחשיבתך על פיסיקה.

* בכתוב מתמטי,

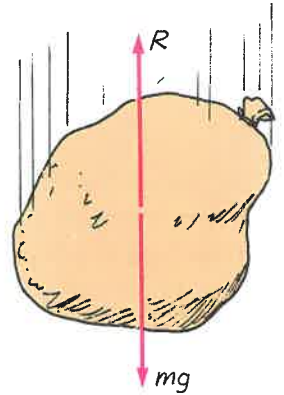
$$a = \frac{F}{m} = \frac{mg - R}{m}$$

באשר mg המשקל ו- R התנגדות האוויר. שימו לב, שכאשר $R = mg$ ו- $a = 0$; אזי, ללא תאוצה, הגוף נופל במהירות קבועה. בעזרת אלגברה בסיסית נוכל להתקדם צעד נוסף ולקבל

$$a = \frac{F}{m} = \frac{mg - R}{m} = g - \frac{R}{m}$$

אנו רואים שכשהתנגדות האוויר מעכבת את הנפילה, התאוצה תמיד קטנה מ- g . רק כאשר $R = 0$ ו- $a = g$.

כאשר מגיעים למצב זה, הכוח השקול מתאפס והגוף אינו מואץ עוד; הוא נופל במהירות קבועה. מהירות הגוף, כשנפסקת תאוצתו, נקראת **מהירות הגבולית**. מהירות הגבולית של הנוצה היא מספר סנטימטרים בשנייה, בעוד מהירות הגבולית של צנחן בצניחה חופשית לפני פתיחת המצנח היא כ-200 ק"מ/שע. הצנחן יכול לשנות את מהירותו הגבולית בשינוי תנוחתו. התנגדות האוויר פחותה כשהראש או הרגלים פונים מטה ואז ניתן להגיע למהירות גבולית מרבית. המהירות הגבולית המזערית מתקבלת כשהצנחן משתטח כסנאי מעופף.



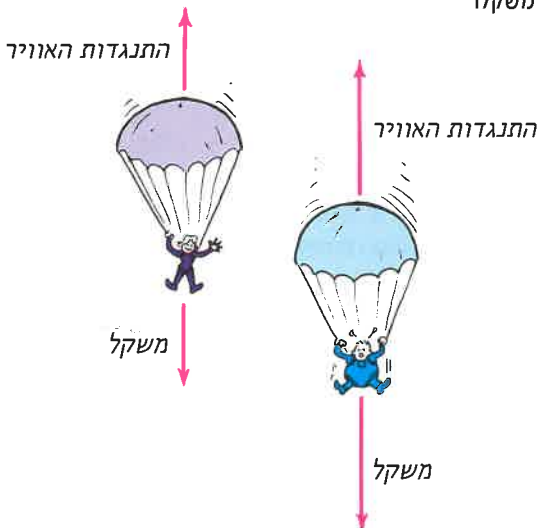
איור 4.15

כאשר המשקל mg גדול מהתנגדות האוויר R , השק הנופל מואץ. כשהמהירות גדלה, R גדל. כאשר $R = mg$, התאוצה מתאפסת והשק מגיע למהירותו הגבולית.

נתבונן בזוג צנחנים הצונחים יחד מגובה שווה (איור 4.16). נניח שהצנחן כבד כפליים מהצנחנית ושמצנחניהם שווי הגודל נפתחו בתחילת התנועה. בשל הגודל השווה של המצנחים, התנגדות האוויר לתנועתם שווה (התנגדות האוויר על גוף הצנחנים זניחה יחסית להתנגדות האוויר על המצנחים). מי יגיע ראשון לקרקע - הצנחן הכבד או הצנחנית הקלילה? התשובה היא: בעל המהירות הגבולית הגדולה יותר יגיע ראשון. במבט ראשון אנו עלולים לחשוב כי מאחר שהמצנחים שווים, המהירויות הגבוליות שוות, ולכן שניהם יגיעו לקרקע בו-זמנית. אולם לא כך הוא הדבר, מפני שהתנגדות האוויר תלויה גם במהירות. הצנחנית תגיע למהירות הגבולית כאשר התנגדות האוויר תשווה למשקלה. במצב זה, התנגדות האוויר על מצנחו של הצנחן עדיין לא תשווה למשקלו*.

איור 4.16

הצנחן, הכבד יותר, חייב לנוע מהר יותר על מנת שהתנגדות האוויר תאזן את משקלו הגדול יותר.



* המהירות הגבולית של הצנחן תהיה קטנה במעט מכפליים ממהירותה הגבולית של הצנחנית מכיוון שהתנגדות האוויר אינה בדיוק ביחס ישר למהירות.

הצנחנית תגיע ראשונה לשיווי משקל של הכוחות, בעוד הצנחן ממשיך לנוע בתאוצה למהירויות גבוהות יותר. כדי שהתנגדות האוויר תאזן את משקלו, עליו לנוע במהירות גדולה יותר. המהירות הגבולית של הצנחן הכבד יותר גדולה יותר, ולכן הוא יגיע ראשון.

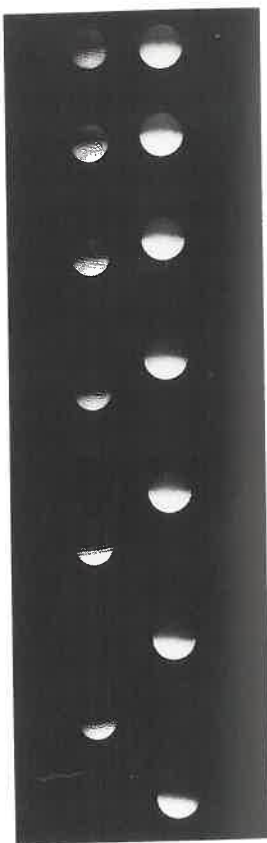
צנחנית קופצת ממסוק הטס במרומים. האם במהלך נפילתה במהירות גדלה והולכת תאוצתה גדלה, קטנה, או נותרת קבועה?

שאלה

נתבונן בשני כדורי טניס, האחד כדור רגיל חלול והאחר מלא גולות ברזל. גודל הכדורים שווה, אך הכדור המלא כבד בהרבה מן הכדור החלול. אם נחזיקם מעל לראשנו ונשחררם בו-זמנית, נראה ששניהם יפגעו בקרקע יחד. אך אם נשחררם מגובה רב יותר, למשל מגגו של בניין גבוה, נבחין בכך שהכדור הכבד פוגע בקרקע ראשון. מדוע? במקרה הראשון לא הספיקו הכדורים לצבור מהירות רבה בנפילתם הקצרה. התנגדות האוויר, גם על הכדור החלול, היתה קטנה יחסית למשקל ולא ניתן להבחין בהבדל הזעיר בזמני הפגיעה. אך כשהופלו הכדורים מגובה רב, בעת תנועתם במהירויות גדולות יותר היתה התנגדות האוויר רבה יותר. במהירות נתונה, ההתנגדות הפועלת על שני הכדורים שווה, מפני שהם שווים בגודלם. התנגדות זו יכולה להגיע לכדי חלק גדול יחסית ממשקל הכדור הקל, אך לשיעור קטן בלבד ממשקל הכדור הכבד (כבדוגמת הצנחנים, איור 4.16). לכן, גם אם התנגדויות האוויר שוות, תאוצות הכדורים שונות. מוסר ההשכל שיש ללמוד מכך הוא: בבואנו לדון בתאוצתו של גוף כלשהו, החוק השני של ניוטון חייב להנחות את חשיבתנו; התאוצה שווה ליחס בין הכוח השקול למסה. בדוגמה שתיארנו, כשהכוח השקול קטן, התאוצה קטנה. וכשהתנגדות האוויר גדלה עד השתוותה למשקל הגוף, הכוח השקול מתאפס ושלב ההאצה מסתיים.

איור 4.17

צילום סטרובוסקופי (סדרה של חשיפות מהירות בזו אחר זו) של כדור גולף (משמאל) וכדור ספוג הנופלים באוויר. התנגדות האוויר לתנועת כדור הגולף זניחה והוא מואץ, למעשה, בתאוצה g . התנגדות האוויר לתנועת כדור הספוג אינה זניחה, ולכן הוא מגיע מהר יותר למהירותו הגבולית.



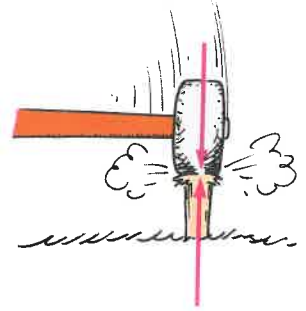
תשובה:

התאוצה קטנה, מפני שהכוח השקול הפועל עליה קטן. הכוח השקול שווה למשקלה פחות התנגדות האוויר עליה, ומכיוון שהתנגדות האוויר גדלה עם המהירות, הרי שהכוח השקול קטן ואיתו התאוצה. לפי החוק השני של ניוטון,

$$a = \frac{F}{m} = \frac{(mg - R)}{m}$$

באשר mg הוא משקל הצנחנית R התנגדות האוויר לתנועתה. כש- R גדל, a קטן. שימו לב כי אם מהירותה גדולה במידה כזאת ש- $R = mg$, $a = 0$ ואז היא תנוע ללא תאוצה – במהירות קבועה.

החוק השלישי של ניוטון



איור 4.18

בפעולת הגומלין בין הפטיש והיתד, הגופים מפעילים זה על זה כוחות השווים בגודלם.

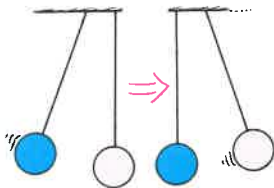
כוח, במובנו הפשוט ביותר, הוא דחיפה או משיכה. במבט בוחן יותר נראה שכוח בודד אינו עומד בפני עצמו אלא נובע מפעולת גומלין (אינטראקציה) בין גוף אחד למשנהו. נתבונן, למשל, בפעולת הגומלין בין פטיש ויתד (איור 4.18). פטיש מפעיל כוח על יתד ונועצה באדמה. אך כוח זה הוא רק מחצית הסיפור, בתהליך חייב להתקיים גם כוח העוצר את הפטיש. מי מפעיל כוח זה? היתד! ניוטון טען כי בשעה שהפטיש מפעיל כוח על היתד, היתד מפעילה כוח על הפטיש. כלומר, בפעולת הגומלין בין הפטיש והיתד קיים צמד כוחות - כוח אחד פועל על היתד וכוח שני הפועל על הפטיש. תצפיות מעין אלו הובילו את ניוטון לחוק השלישי שלו - חוק הפעולה והתגובה.

חוק 3: כאשר גוף מפעיל כוח על גוף שני, הגוף השני מפעיל על הגוף הראשון כוח השווה לו בגודלו ומנוגד בכיוונו.

לעיתים מנסחים את החוק השלישי כדלקמן: "לכל פעולה קיימת תגובה שווה ומנוגדת." בכל פעולת גומלין קיים צמד כוחות, פעולה ותגובה, השווים בגודל ומנוגדים בכיוון. אין כוח אחד קיים ללא משנהו - כוחות מופיעים בזוגות, האחד פעולה והשני תגובה. הפעולה והתגובה יחדיו מהוות את פעולת הגומלין - האינטראקציה - בין שני הגופים.

כאשר אנו צועדים אנו דוחפים את הרצפה וזו דוחפת אותנו. ההולך והרצפה דוחפים בו-זמנית זה את זה - קיימת ביניהם פעולת גומלין. באותו אופן, צמיגי המכונית דוחפים את הכביש והכביש דוחף אותם - הצמיגים והכביש דוחפים זה את זה. בשחייה, אנו דוחפים את המים אחורה, והמים דוחפים אותנו קדימה - אנו והמים דוחפים אלה את אלה. בכל מקרה כזה קיים צמד כוחות, האחד פעולה והאחר תגובה, היוצרים את פעולת הגומלין. בדוגמאות הקודמות כוחות התגובה הם הכוחות שהניעו אותנו. כוחות אלו תלויים בחיכוך; ייתכן, למשל, מצב שבו אדם או מכונית יימצאו על קרח ולא יוכלו להפעיל את כוח הפעולה הנדרש ליצירת התגובה הרצויה.

אין חשיבות לאיזה מן הכוחות נקרא פעולה ולאיזה תגובה, כל עוד נזכור שאין האחד מתקיים ללא זולתו. בדוגמה הראשונה, ניתן לקרוא לדחיפתנו את

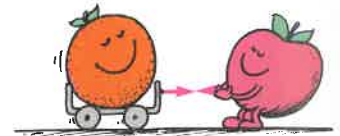
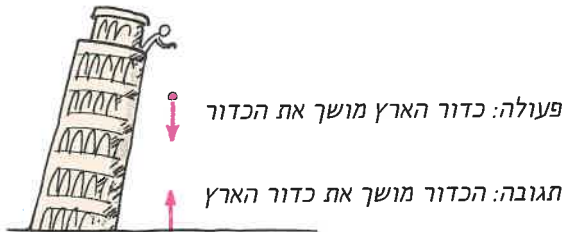
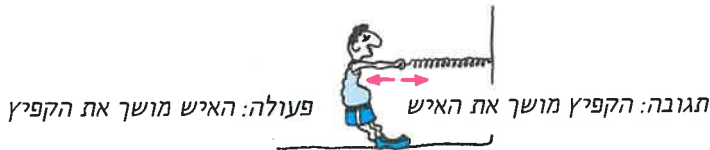
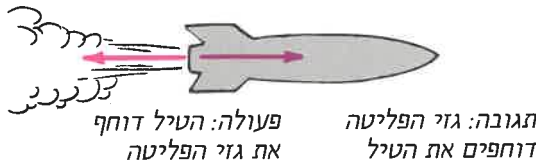


איור 4.19

כוחות ההתנגשות בין הכדור הכחול והצהוב מניעים את הכדור הצהוב ובולמים את הכחול.

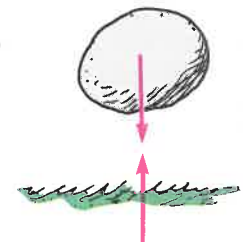
איור 4.20

כוחות פעולה ותגובה. שימו לב, שעם הפעלת כוח של גוף אחד על משנהו, קיים כוח תגובה שמפעיל הגוף השני על הראשון.



איור 4.21

כאשר תפוח מושך תפוז, התפוז מואץ - נקודה. העובדה שהתפוז מושך חזרה את התפוח משפיעה על התפוח - לא על התפוז. ניתן לקזח כוח הפועל על התפוז עם כוח הפועל על התפוח.

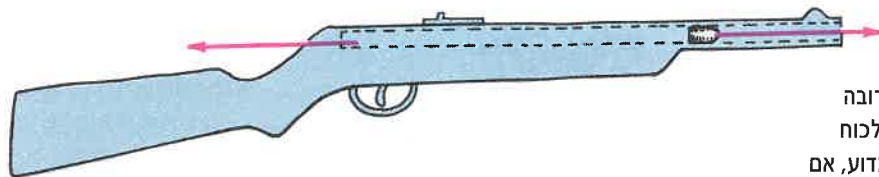


איור 4.22

כדור הארץ נמשך על ידי הסלע למעלה באותו כוח שהסלע נמשך למטה על ידי כדור הארץ.

הרצפה - פעולה ולדחיפת הרצפה אותנו - תגובה. בה במידה, נוכל לומר שהכוח שהרצפה מפעילה עלינו הוא הפעולה והכוח שאנו מפעילים עליה - התגובה. אנו יודעים שכוחות השווים בגודל ומנוגדים בכיוון הפועלים על אותו גוף מבטלים זה את זה. אך כוחות הפעולה והתגובה, השווים בגודל ומנוגדים בכיוון, אינם מתקזזים, מכיוון שהם פועלים על גופים שונים (איור 4.21). למשל, כשאנו מושכים עגלה, העגלה מושכת אותנו. מעורבים כאן שני כוחות, האחד מופעל על העגלה והאחר עלינו. יש להבחין בין הכוחות הפועלים על גוף לבין הכוחות שמפעיל הגוף. הכוח המופעל על העגלה מאיץ אותה; הכוח שמפעילה העגלה לא משפיע עליה אלא עלינו. אם נקרא לכוח הפועל על גוף כוח הפעולה, אזי התגובה תהיה הכוח שהגוף מפעיל על גוף אחר כלשהו המשתתף בפעולת הגומלין. הואיל וכוחות הפעולה והתגובה פועלים על גופים שונים הם אינם מתקזזים.

ככל שיפליא הדבר, גוף נופל מושך את כדור הארץ למעלה באותו כוח שכדור הארץ מושך אותו למטה. משיכת הגוף למטה ברורה, מפני שקל להבחין בתאוצה של 9.8 מלשני². קיים כוח בעל אותה עוצמה המושך את המסה העצומה של כדור הארץ כלפי מעלה. אך תאוצת כדור הארץ כלפי מעלה כה זעומה שלא ניתן להבחין בה או למדוד אותה. נוכל להבהיר את העניין בדוגמה קיצונית פחות. כשרובה יורה, הכוח המופעל על הקליע שווה לכוח התגובה המופעל על



4.23 איור

הכוח המופעל על הרובה הנרתע שווה בגודלו לכוח המניע את הקליע. מדוע, אם כך, תאוצת הקליע גדולה מזו של הרובה?

הרובה; לכן, הרובה נרתע. אך אם הכוחות שווים בגודלם, מדוע אין מהירות הרתיעה של הרובה שווה למהירות הקליע? כאן אנו נזכרים בחוק השני של ניוטון הקובע שבניתוח שינויי התנועה יש להתחשב גם במסות המעורבות. נסמן ב- F הן את גודלו של כוח הפעולה והן את גודל התגובה, ב- m את מסת הקליע וב- m את מסת הרובה. את תאוצות הקליע והרובה נמצא מהיחס בין הכוח למסה. תאוצת הקליע היא

$$\frac{F}{m} = a$$

בעוד תאוצת הרובה היא

$$\frac{F}{m} = a$$

שאלות

1. האם לאבן קלע מהירה יש כוח?
2. אנו יודעים שכדור הארץ מושך את הירח. האם מכך נובע שהירח מושך את כדור הארץ?
3. אם כוחות הפעולה והתגובה שווים זה לזה בגודלם ומנוגדים בכיוונם, כיצד ייתכן שקיים מצב בו הכוח השקול על גוף אינו מתאפס?
4. האם תוכל לזהות את כוחות הפעולה והתגובה במקרה של גוף הנופל בריק (ואקום)?

תשובות:

1. לא, כוח אינו דבר שיש לגוף, כמו מסה למשל, אלא הוא חלק מפעולת גומלין בין גוף אחד למשנהו. לקלע מהיר יש היכולת להפעיל כוח על גוף אחר כשתתרחש פעולת גומלין, אך אין לו כוח כדבר לעצמו. בשני הפרקים הבאים נראה שלקלע המהיר יש תנע זכ אנרגיה קינטית.
2. כן, שתי המשיכות הן צמד של פעולה-תגובה המהוות את פעולת הגומלין הכבידתית בין כדור הארץ והירח. נוכל לומר כי (1) כדור הארץ מושך את הירח; (2) כמו כן, הירח מושך את כדור הארץ; אך עדיפה ההסתכלות על כך כעל פעולת גומלין אחת - כדור הארץ והירח מושכים בו-זמנית זה את זה.
3. הכוח השקול על גוף הוא סכום הכוחות הפועלים עליו - למשל, כוחות הפעולה. את כוחות התגובה הגוף מפעיל על גופים אחרים. למשל, אם נבעט בפחית ריקה, הפחית תפעיל עלינו כוח. אך רגלנו סיפקה את הכוח היחיד שפעל על הפחית. הפחית תעוף באוויר מכיוון שהיא חשה רק בכוח הפעולה; כוח התגובה הופעל על ידי הפחית, לא על הפחית. כוח התגובה מאיט את רגלנו. כמו-כן, הקופסה "חשה" רק במה שקורה לה ולא במה שהיא גרמה לרגל. איננו יכולים לקזז את הכוח הפועל על גוף עם הכוח שהוא מפעיל, בו-זמנית, על גוף אחר.
4. כדי לזהות במצב נתון את כוחות הפעולה-תגובה יש לאתר תחילה את צמד הגופים המעורבים בפעולת הגומלין. משהו נמצא בפעולת גומלין עם משהו. במקרה שלנו, הארץ נמצאת בפעולת גומלין (גרביטציונית) עם הגוף הנופל. הארץ מושכת למטה את הגוף הנופל (נקרא לזה פעולה) בעוד הגוף מושך למעלה את הארץ (תגובה).

הבה נבין מדוע שינוי המהירות של הקליע כה גדול בהשוואה לשינוי המהירות של הרובה. מתוצאת החילוק של כוח נתון במסה קטנה מתקבלת תאוצה גדולה, בעוד שבחילוק אותו כוח במסה גדולה תתקבל תאוצה קטנה. השתמשנו בסימונים שוני-גודל לציון ההבדלים היחסיים במסות ובתאוצות המתקבלות. אם גם בדוגמת הגוף הנופל היינו משתמשים בסימונים דומים, אזי סימון המסה m של כדור הארץ היה מופיע בממדים אסטרונומיים. מתוצאת החלוקה של הכוח F במסה עצומה זו נקבל תאוצה מיקרוסקופית a שתייצג את תאוצת כדור הארץ כלפי הגוף הנופל.

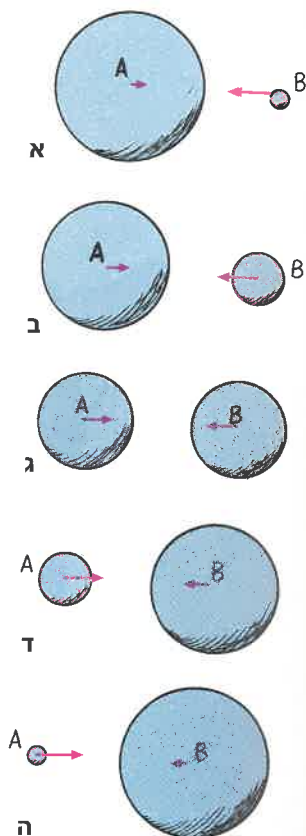
באמצעות הדוגמאות המוגזמות של שני כוכבי-לכת, המופיעות באיור 4.24, נוכל להסיק בצורה שונה שכדור הארץ מאיץ במעט לעבר הגוף הנופל. בכל המקרים, הכוחות הפועלים בין הגופים A ו-B שווים בגודל ומנוגדים בכיוון. אם תאוצת כוכב הלכת A בלתי-ניכרת ב-A', הרי שב-B', כשהבדלי המסות קיצוניים פחות, ניתן כבר להבחין בה. ב-B', כשלשני הכוכבים מסה שווה, תאוצתו של A ברורה כתאוצתו של B. בהמשך, רואים שתאוצתו של A ניכרת יותר ב-D' ועוד יותר ב-E'. ליתר דיוק, כשנרד משפת המדרכה, הכביש יתקרב בזעיר-אנפין לעברנו.

אם נרחיב את רעיון הרובה הנרתע או "הנבעט" מהקליע שנורה, נוכל להבין את עקרון הדחף של טילים. נתבונן ברובה הנרתע עם כל ירייה וירייה. אם הרובה מחובר לתיל אנכי וחופשי להחליק עליו (איור 4.25), הוא יואץ מעלה בעת שהקליעים נורים מטה. טיל מואץ באופן דומה ב"רתיעה" מתמשכת מהגזים הנפלטים. כל מולקולה של הגז הנפלט מתפקדת כקליע זעיר הנורה מהטיל (איור 4.26).

טעות נפוצה שרבים שוגים בה היא כי הטיל נדחף כתוצאה מהתנגשות של הגזים הנפלטים באטמוספירה. למעשה, לפני חמישים שנה, בטרם פותחו הטילים, מקובלת היתה סברה שלא ניתן לשגר טיל לירח בהעדר אטמוספירה שכנגדה הטיל יידחף. הדבר דומה לטענה שאם לקליע אין אוויר לדחוף, הרובה לא יירתע. טענה כוזבת כמובן! הן הרובה והן הטיל מואצים לא הודות לדחיפת האוויר, אלא בשל כוחות התגובה שמפעילים עליהם ה"קליעים" הנורים מהם - בנוכחות אוויר או בלעדיו. למעשה, פעולת הטיל יעילה יותר מעל לאטמוספירה, שבה אין התנגדות אוויר המקטינה את מהירותו.

החוק השלישי של ניוטון יסביר לנו גם כיצד מופעל הכוח המאפשר למסוק להמריא. להבי המסוק עוצבו כך שבהסתובבם ידחפו את מולקולות האוויר למטה (פעולה) והאוויר ידחוף את הלהבים מעלה (תגובה). הכוח הפועל כלפי מעלה נקרא כוח העילוי. כשכוח העילוי שווה למשקל, המסוק מרחף באוויר. כשכוח העילוי גדול יותר, המסוק נוסק.

הדברים דומים גם ביחס לציפורים ולמטוסים. הציפורים במעופן דוחפות את האוויר כלפי מטה, והאוויר דוחף את הציפור מעלה. כשציפור מגביהה עוף, צורת כנפיה מותאמת להסתת אוויר למטה. כנפי המטוס, המוטות במקצת, דוחפות את האוויר שבדרךן כלפי מטה, בתגובה הן נדחפות כלפי מעלה, וכך נוצר כוח עילוי על המטוס. לקיום העילוי, האוויר חייב להידחף מטה באופן



איור 4.24

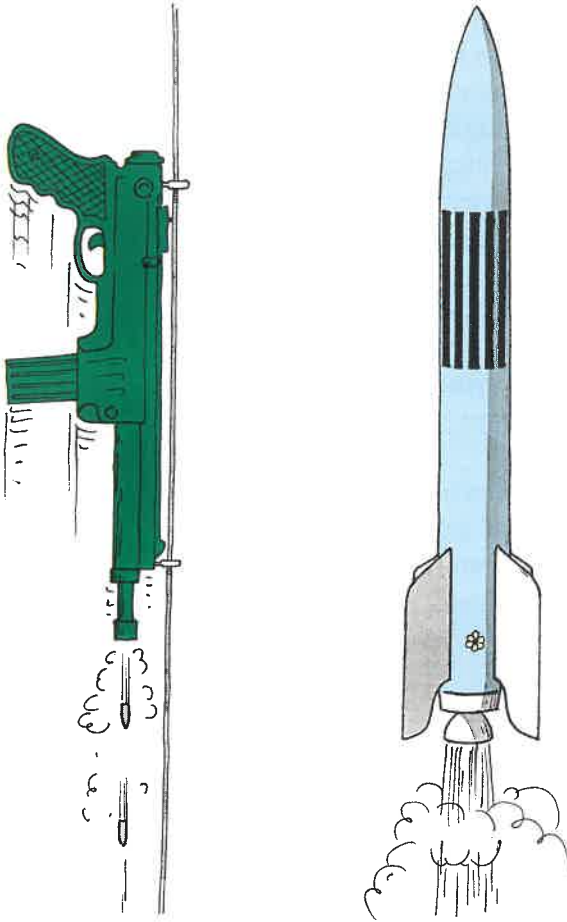
מי נופל לעבר מ', A או B?
האם יש קשר בין התאוצות
והמסות היחסיות?

איור 4.25 (שמאל)

הרובה נרתע מהקליעים
הנורים ועולה מעלה.

איור 4.26 (ימין)

הטיל נרתע מ"הקליעים"
המולקולריים" הנורים ועולה
מעלה.



מתמיד. ומה באשר להתקדמות המטוס? המדחפים דוחפים את האוויר אחורה, והאוויר, בתגובה, דוחף את המדחפים קדימה. במטוס-סילון נפלט סילון של גזים אחורה, והגזים הם הדוחפים את המטוס קדימה. (בפרק 13 נלמד שמשטחם העקמומי של הכנפיים הוא משטח אוויר, המגדיל את כוח העילוי.) החוק השלישי של ניוטון מתגלה בפעולה בכל אתר ואתר. סנפירי הדג דוחפים את המים אחורה והמים דוחפים את הדג קדימה. הילד הקופץ לוחץ ברגליו על הקרקע והקרקע דוחפת אותו כלפי מעלה. כוחות הם פעולות גומלין בין גופים שונים; אין דרך שבה גוף יכול להפעיל כוח על לא-כלום. כוחות, מן הקלילים ביותר ועד לחזקים ביותר, מתרחשים בצמדים, שבהם הכוח האחד מנוגד בכיוונו לשני. לא נוכל, איפוא, לגעת מבלי לחוש במגע בנו (איור 4.27).



איור 4.27
לכל גגיעה שותפים שני
צדדים – החוק השלישי של
ניוטון.

שאלות

1. מכונת מאיצה על כביש. קבע במדויק, מהו הכוח המניע את המכונת?
2. אוטובוס מהיר וחרק תמים מתנגשים חזיתית. מעוצמת התבטה, החרק האומלל נמער על השמשה. האם הכוח שהחרק מפעיל על השמשה גדול, קטן או שווה לכוח שהופעל עליו? האם תאוצת האוטובוס גדולה, קטנה או שווה לתאוצת הפשפש?

סיכום שלושת חוקי ניוטון

גוף השרוי במנוחה נוטה להתמיד במנוחה; גוף בתנועה נוטה להתמיד בתנועה במהירות קבועה על קו ישר. נטיית גופים להתנגד לשינויים בתנועתם נקראת התמדה. המסה היא הממד להתמדה. רק בנוכחות כוח שקול, השונה מאפס, יחולו שינויים בתנועת גוף.

כוח שקול משפיע על תנועת הגוף - הוא מאיץ אותו. התאוצה המתקבלת נמצאת ביחס ישר לכוח השקול וביחס הפוך למסת הגוף. בסימון, $a \sim F/m$. כיוון התאוצה הוא תמיד ככיוון הכוח השקול. כשעצמים נופלים בריק, הכוח השקול הפועל עליהם הוא משקלם בלבד, ותאוצתם g (מסמן את התאוצה המתקבלת מפעולת כוח הכובד בלבד). כשגופים נופלים באוויר, הכוח השקול

תשובות:

1. הכביש הוא הדוחף את המכונת. באמת! פרט להתנגדות האוויר, הכביש הוא הגוף היחיד המפעיל כוח בכיוון האופקי. כיצד? צמיגי המכונת דוחפים את הכביש אחורה (הפעולה). הכביש, בתגובה, דוחף את המכונת קדימה (התגובה). מה תאמרו על כך?!

2. שני הכוחות שווים זה לזה בגודלם, כי הם צמד הפעולה-תגובה המהווה את פעולת הגומלין בין האוטובוס והחרק. עם זאת, התאוצות שונות ביותר זו מזו כי המסות של הגופים המעורבים שונות מאוד! לחרק תאוצה ענקית וממיתה, בעוד שלאוטובוס תאוצה מזערית - כה פעוטה שנוסעי האוטובוס אינם מסוגלים לחוש בה. אך אילו החרק היה מסיבי יותר - ההאטה היתה ניכרת, וידוע על התנגשויות בין מטוסים מהירים לעופות איטיים שגרמו נזק ניכר למטוס.

הפועל עליהם שווה להפרש בין משקלם להתנגדות האוויר, ותאוצתם קטנה מ-g. כאשר כוח ההתנגדות של האוויר שווה למשקל הגוף, תאוצת הגוף מתאפסת, והוא נע במהירות קבועה.

כאשר גוף אחד מפעיל כוח על גוף שני, הגוף השני מפעיל על הגוף הראשון כוח השווה לו בגודלו ומנוגד בכיוונו. כוחות מופיעים בצמדים, האחד - פעולה ומשנהו - תגובה, ויחדיו הם מהווים את פעולת הגומלין בין הגופים. אין כוח אחד מתקיים ללא בן-זוגו. הואיל וכוחות אלו פועלים על גופים שונים, הם אינם מבטלים זה את זה.

תקציר מונחים

שאלות חזרה

התמדה

נטיית גופים להתנגד לשינויים בתנועתם.

מסה

כמות החומר בגוף. ביתר פירוט, מידת ההתמדה שגוף מציג בתגובה לניסיון להניעו, לעוצרו או לשנות בצורה כלשהי את מצב תנועתו.

משקל

כוח הכובד הפועל על גוף.

קילוגרם

היחידה הבסיסית למדידת מסה בשיטת היחידות המטרית. 1 קילוגרם (סימון: ק"ג) הוא המסה של למשל, 1 ליטר מים בטמפרטורה של 4°C צלסיוס.

ניוטון

יחידת הכוח בשיטת היחידות המטרית. 1 ניוטון הוא הכוח המעניק לגוף שמסתו 1 ק"ג תאוצה של 1 m/s^2 .

נפח

שיעור המרחב הנתפס ע"י גוף.

כוח

ההשפעה שגורמת תאוצה לגוף. נמדד בניוטונים.

שינוי-משקל מכני

מצבו של גוף או של מערכת גופים שסכום הכוחות הפועלים עליהם הוא אפס ולכן הם אינם מואצים.

חיכוך

כוח התנגדות לתנועה המופיע כשגוף נע או מנסה לנוע יחסית לגוף אחר הנוגע בו.

נפילה חופשית

תנועה בהשפעת כוח הכובד בלבד.

מהירות גבולית

המהירות הסופית הקבועה בה נע גוף נופל כאשר כוחות החיכוך מאזנים את משקלו.

החוק הראשון של ניוטון

1. האם התמדה היא הסיבה שבגללה גופים שומרים על מצב תנועתם או השם שניתן לתכונה זו של החומר?

מסה

2. הבהירו את ההבדלים בין מסה, משקל ונפח.

3. מהו המושג הבסיסי, מסה או משקל? האם לגוף בעל מסה יש משקל או לגוף בעל משקל - יש מסה?

4. האם ללבנת ברזל בת 2 ק"ג התמדה כפולה מללבנת עץ בת 1 ק"ג? נפח כפול? (מדוע שונות התשובות?)

5. מה היה מסלולם של כוכבי הלכת אילו לפתע לא פעלו עליהם כוחות?

החוק השני של ניוטון

6. למה מתכוונים כשאומרים שגודל אחד מתכונתי (פרופורציוני) לגודל אחר? האם פירושו של דבר שהם שווים זה לזה? הסבירו בקצרה, תוך שימוש בדוגמת המסה והמשקל.

7. עגלה נמשכת שמאלה בכוח של 100 ניוטון וימינה בכוח של 30 ניוטון. מהו הכוח השקול הפועל על העגלה?

8. מדוע קבענו שכוח הוא גודל וקטורי?

9. פי כמה גדלה תאוצתה של לבנה שהכוח השקול הפועל עליה גדל פי שלושה?

10. פי כמה קטנה תאוצתו של גוש חומר שמסתו גדלה פי שלושה ללא שינוי בכוח השקול הפועל עליו?

11. כיצד משתנה תאוצתו של גוש חומר, אם מגדילים את מסתו פי 3 ובו-זמנית מגדילים פי 3 גם את הכוח השקול הפועל עליו?

28. מדוע צמד הכוחות פעולה ותגובה אינם מבטלים זה את זה?
29. מדוע לקליע ולרובה שממנו הוא נורה תאוצות כה שונות למרות שהכוחות הפועלים עליהם שווים בגודלם?
30. מהו מקור כוח העילוי הפועל על מסוק?

מטלות בית



- בקשו מחבר לתקוע מסמר בפיסת עץ המונחת על ערימת ספרים הנמצאת על ראשכם. מדוע לא תיפגעו?
- הפילו בו-זמנית מאותו גובה דף נייר ומטבע. איזה מן החפצים יגיע ראשון לקרקע? מדוע? עתה מעכו את דף הנייר לכדור קטן דחוס והפילו אותו שנית יחד עם המטבע. הסבירו את ההבדלים בין שני המקרים. האם יגיעו שני הגופים יחדיו אם יורקו מחלון בקומה השנייה, השלישית או הרביעית? נסו זאת והסבירו את תצפיותיכם.
- שחררו ספר ודף נייר והבחינו שתאוצת הספר גדולה יותר (ושווה ל-g). מקמו את הדף מתחת לספר והפילו - שניהם יפלו יחדיו בתאוצה g. מה יקרה לתאוצות הגופים אם תמקמו את הנייר על הספר ותפילו? אולי תופתעו, נסו ותיווכחו. הסבירו את התוצאות.
- אם נפיל שני כדורים שוני-משקל מגובה שווה, במהירויות נמוכות תנועותיהם, למעשה, שוות. האם הם יתגלגלו יחדיו במורד מישור משופע? אם נתלה אותם בקצות חוטים שווי אורך ונשחררם באותה זווית פרישה, האם יתנדדו יחד הלך ושוב? נסו ובידקו; הסבירו בעזרת חוקי ניוטון.
- כיוון הכוח השקול הפועל על גוף וכיוון התאוצה שווים. נדגים זאת בעזרת סליל חוטים. באיזה כיוון ינוע הסליל, אם נמשוך אותו אופקית ימינה ממנוחה?



תאוצה אפס - שיווי משקל

12. מהו הכוח השקול הפועל על גוף הנמצא בשיווי משקל?
13. ספר שמשקלו 15 ניוטון מונח על שולחן אופקי. מה גודלו בניוטונים של כוח התמיכה שהשולחן מפעיל? מהו הכוח השקול הפועל על הספר?
14. אישה שמשקלה 500 ניוטון עומדת על שני מדי-משקל ומעיקה עליהם במידה שווה. מה יורה כל מד-משקל? מה יורה מד-המשקל השני, אם האישה משנה את תנוחתה כך שאחד ממדי המשקל מורה 300 ניוטון?
15. מהי תאוצתו של גוף הנע במהירות קבועה? מהו הכוח השקול הפועל עליו?
16. מדוע קשה יותר להזיז ארגז ממנוחה מלהחזיקו בתנועה?
17. מהו החיכוך שפועל על ארגז המחליק במהירות קבועה כשמפעילים עליו כוח אופקי של 50 ניוטון? האם הארגז יואץ אם יגדילו את הכוח המופעל עליו? הסבירו.
18. כיצד משפיעה מהירותו של גוף מחליק על כוח החיכוך הפועל עליו? כיצד משפיע שטח המגע על כוח החיכוך?
19. כיצד משפיעים המהירות ושטח המגע של הגוף על כוח החיכוך הפועל עליו בתנועה בתוך זורם?
- תאוצה g - נפילה חופשית**
20. למה הכוונה בביטוי נפילה חופשית?
21. מהו הכוח השקול הפועל על גוף שמשקלו 10 ניוטון הנופל חופשית?
22. שני גופים נופלים חופשית. מדוע אין תאוצתו של הכבד שבהם גדולה מזו של הקל?
- תאוצה קטנה מ-g - נפילה לא-חופשית**
23. מהו הכוח השקול הפועל על גוף שמשקלו 10 ניוטון כשהתנגדות האוויר היא 4 ניוטון? כשהתנגדות האוויר היא 10 ניוטון?
24. מהם שני הגורמים העיקריים הקובעים את גודלו של כוח החיכוך של האוויר הפועל על גוף נופל?
25. מהי תאוצתו של גוף נופל שנוע במהירות הגבולית?
26. מדוע צנחן כבד מגיע לקרקע מהר יותר מצנחן קל, למרות שלשניהם מצנח זהה?
- החוק השלישי של ניוטון**
27. חובטים במחבט בכדור בסיס (בייסבול). אם נקרא לכוח שהמחבט מפעיל על הכדור כוח הפעולה; מהו כוח התגובה?

תרגילים

אל תיבהלו ממספר התרגילים הגדול בפרק זה ובפרקים אחרים עשירי תוכן. סביר שהמורה יטיל עליכם לפתור רק מספר שאלות בכל פרק.

1. במונחי התמדה, מהו החיסרון בצילום במצלמה קלילה? מדוע רוב הצלמים מעדיפים להשתמש בחצובה בעלת מסה גדולה?

2. ידכם הריקה לא תכאב אם תכו קלות בקיר. מדוע תכאב היד אם תכו כשהינכם אווזים בה משא כבד? איזה מחוקי ניוטון הוא ההולם ביותר להסבר התופעה?

3. מדוע מקץ (גרזן טבחים) יעיל יותר בחיתוך ירקות מסכין קל יותר אך חד באותה מידה?

4. מדוע יעיל יותר לקרוע נייר מגבת או שקית פלסטיק מגליל במשיכה מהירה וחזקה מבמשיכה איטית?

5. כל אחת מהחוליות הבונות את עמוד השדרה מופרדת מרעותה בדיסקה של רקמה גמישה. מה יקרה, אם כך, כשנקפץ בחוזקה על רגלינו ממקום גבוה? התוכלו למצוא מהי הסיבה שאנו גבוהים במקצת בבוקר מבלילה? (רמז: זיכרו את הפטיש באיור 4.1.)

6. בימים שקדמו לגלילאו וניוטון, מלומדים רבים סברו, שאבן שתופל מראש התורן של אונייה נעה, תיפול אנכית מטה ותפגע בסיפון בנקודה הנמצאת מאחורי התורן, במרחק השווה לדרך שהאונייה עברה במהלך נפילת האבן. לאור הבנתכם את חוקי ניוטון, מהי דעתכם על האירוע?

7. כדור הארץ משלים הקפה סביב צירו בכ-24 שעות. לכן, הקיר המערבי בחדרכם מתקרב אליכם במהירות של 1000 ק"מ/שע' בקירוב (המהירות המדויקת תלויה בקו הרוחב שבו אתם גרים). כשפניכם מופנות לקיר אינכם חשים בהתקרבותו, כי מהירותכם כמהירות הקיר. אולם, מדוע אין הקיר הודף אתכם בחוזקה כשהינכם קופצים מעלה ורגליכם אינן עוד במגע עם הרצפה?

8. הארובה ברכבת-צעצוע היא רובה קפיץ אנכי קטן היורה כדור פלדה אנכית למעלה לגובה של מטר בקירוב. באופן שבהיות הרכבת במנוחה הכדור תמיד נופל חזרה לתוך הארובה. הניחו שהרכבת נעה במהירות קבועה על מסילה ישרה. האם לדעתכם גם במצב זה ישוב הכדור לארובה? מה יתרחש אם הרכבת תהיה בתאוצה לאורך המסילה הישרה? מה יקרה אם הרכבת תנוע במהירות קבועה בגודלה על מסילה מעגלית? מדוע שונות התשובות?

9. האם מסתה של גרוטאת מכוינת משתנה כשמועכים אותה לקוביה דחוסה? האם משתנה משקלה? הסבירו.

10. כוח הכובד על הירח הוא $1/6$ מכוח הכובד על כדור הארץ. מה יהיה משקלו של גוף בן 10 ק"ג על הירח ועל כדור הארץ? מה תהיה מסתו על הירח ועל כדור הארץ?

11. מהי מסתך בקילוגרמים? מהו משקלך בניוטונים?

12. ככל שטיל מתקדם בתנועתו, בהדרגה קל יותר להאיץ אותו. מדוע?

(רמז: הדלק מהווה 90 אחוז ממסתו של הטיל בעת שיגורו.)

13. האם ניתן להסיק שעל גוף שאינו מואץ לא פועלים כוחות? הסבירו.

14. האם גוף יכול לנוע בסיבוב בלא שיפעלו עליו כוחות?

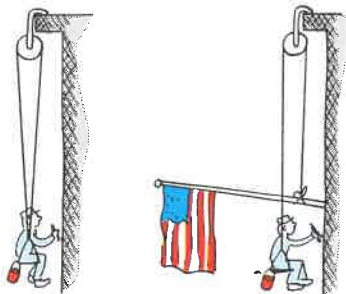
15. האם הרצפה מפעילה עליך כוח מעלה בעומד עליה? מה גודלו של כוח זה? מדוע הכוח הזה אינו מניע אותך מעלה?

16. הילדה, תלויה במנוחה, אחוזה בקצות החבל, כמתואר. השוו בין קריאת המד למשקלה.



17. צבי הצבע תלוי שנה אחר שנה בכיסא הצבעים שלו. משקלו 500 ניוטון ולא ידוע לו שסף הקריעה של החבל הוא 300 ניוטון. מדוע החבל אינו נקרע כשהוא מוחזק בצורה המתוארת באיור למטה משמאל?

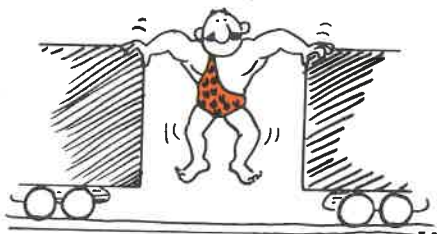
יום אחד עסק צבי בצביעה סמוך למוט הדגל, ולשם שינוי, חיבר את קצהו החופשי של החבל למוט במקום לכיסאו, (האיור מימין). מדוע נאלץ צבי להקדים את חופשתו?



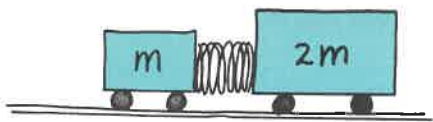
30. אם כדור הארץ מפעיל כוח של 2000 ניוטון על לווין תקשורת, מהו הכוח של לווין התקשורת מפעיל על כדור הארץ? הסבירו.

31. משקלך הוא כוח הכובד שכדור הארץ מפעיל על גופך. מהו כוח התגובה?

32. האיש החזק שבאיור ידחוף לצדדים את שני הקרונות שווי המסה, שהיו בתחילה במנוחה, לפני נופלו הישר למטה. האם ייתכן שהוא יעניק לאחד הקרונות מהירות גדולה יותר מלשני? נמקו.



33. הנח ששתי קרונות, שמסת האחת כפולה ממסת השנייה, עפות לצדדים כאשר משחררים את הקפיץ שהיה מכוץ ביניהן. מהי מהירות הקרונות הכבדה ביחס למהירות הקרונות הקלה?



34. לדחיפת ארגז עץ במהירות קבועה על רצפת בית חרושת יש להפעיל כוח אופקי של 200 ניוטון. מהו גודלו של כוח החיכוך שהרצפה מפעילה על הארגז? האם כוח החיכוך שווה בגודלו ומנוגד בכיוונו לכוח המופעל על הארגז? האם כוח החיכוך הוא כוח התגובה לכוח הדוחף? מדוע לא?

35. משאית ומכונית מתנגשות חזיתית. על איזה רכב כוח ההתנגשות גדול יותר? לאיזה רכב השינוי בתנועתו גדול יותר? הסבירו את תשובותיכם.

36. שני אנשים שווי-מסה, המתמודדים במשיכת חבל שאורכו 12 מ', מחזיקים בקצותיו, בעומדם על משטח קרח נטול חיכוך. במושכם את החבל הם מחליקים זה לעברו של זה. השוו בין תאוצותיהם וחשבו את המרחק שכל אחד מהם יחליק עד היפגשם.

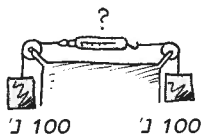
37. ביחס לשאלה הקודמת הניחו שמסת אחד האנשים כפולה ממסת חברו. בתנאים אלו, איזה מרחק ינוע כל אחד מהם עד למפגש?

18. התבוננו בשני הכוחות הפועלים על אדם העומד במנוחה, כלומר, על משיכת כוח הכובד כלפי מטה ועל כוח התמיכה של הרצפה למעלה.



האם כוחות אלו שווים בגודלם ומנוגדים בכיוונם? האם הם יוצרים צמד כוחות של פעולה-תגובה? נמקו.

19. שתי משקולות, שמשקל כל אחת מהן 100 ניוטון, מחוברות למאזני-קפיץ, כבאיור. האם קריאת המאזנים היא 0, 100 או 200 ניוטון, או קריאה אחרת?



(רמז: האם קריאת המאזנים היתה שונה לו אחד החבלים היה מחובר לקיר במקום למשקולת התלויה בת 100 הניוטון?)

20. מהי המסקנה שניתן להסיק כשנראה גוף שאינו נע למרות שידוע לנו שפועל עליו כוח?

21. כשמכונית נעה במהירות קבועה, הכוח השקול הפועל עליה הוא אפס. מדוע, אם כך, ממשיכים בהפעלת המנוע?

22. "כוכב נופל" הוא בדרך כלל גרגר חומר מהחלל החיצון הנשרף ומאיר בהיכנסו לאטמוספירה. מה גורם לשריפתו?

23. מדוע אין חשים בהתנגדות האוויר כשמרחפים בכדור פורח?

24. מהו הכוח השקול הפועל על תפוח שמשקלו 1 ניוטון המוחזק ביד במנוחה? מהו הכוח השקול כשתשחררו אותו?

25. האם נכון לומר כי אצבע דינמיט מכילה כוח?

26. האם יכול כלב לכשכש בזנבו מבלי שהזנב "יכשכש את הכלב"? הסבירו. (התייחסו לכלב בעל זנב שמסתו ניכרת.)



27. כשספורטאי מחזיק את המוט שבקצותיו משקולות מעל ראשו, כוח התגובה הפועל על ידו שווה למשקל הכולל של המוט והמשקולות. כיצד משתנה כוח זה אם המוט מואץ מעלה? מטה?

28. בהסתמך על החוק השלישי של ניוטון, הסבירו מדוע איננו יכולים להפחית את הוריית מד-משקל שאנו עומדים עליו, אם נמשוך את עצמנו למעלה בחגורתנו?

29. מדוע אפשר להפעיל כוח גדול יותר על דוושות אופניים אם מושכים את הכידון כלפי מעלה?

הזריקה. האם, בהתחשב בהתנגדות האוויר, מהירות החזרה תהיה גדולה, קטנה או שווה למהירות הזריקה? (בניסוח תשובתכם היעזרו ב"עקרון ההגזמה"; כלומר, התייחסו למקרה המוגזם של נוצה ולא כדור, שעליה התנגדות האוויר ניכרת יותר ולכן תוצאת השפעתה קלה יותר להבחנה.)

47. כדור נזרק מעלה. בהתחשב בהתנגדות האוויר, האם משך העלייה ארוך או קצר ממשך הירידה? (היעזרו ב"עקרון ההגזמה".)

48. התבוננו בקליע הנורה אופקית מכדור פורח המרחף בגבהים. כוח הכובד מטה את כיוון תנועת הקליע, הנע במסלול עקום, יותר ויותר מטה. האם ייתכן שבסופו של דבר המסלול יהיה אנכי מטה? נמקו את תשובתכם.

בעיות

1. אם גוף שמשטו 1 ק"ג מואץ בכוח של 1 ניוטון בתאוצה של 1 מ'שני², מה תהיה תאוצתו של גוף שמשטו 2 ק"ג שפועל עליו כוח של 2 ניוטון?

2. מהי תאוצתו של מטוס ג'מבו, שמשטו 30,000 ק"ג, בהמראה, כשכל אחד מארבעת מנועיו מפעיל כוח-דחף של 30,000 ניוטון?

3. מהו הכוח שיפעיל עליכם הקיר, אם תעמדו על מחליקים נטולי-חיכוך בסמוך אליו ותדחפו אותו בכוח של 30 ניוטון?

4. כבאית שמשטה 50 ק"ג מחליקה מטה על מוט בתאוצה של 5 מ'שני². מהו כוח החיכוך שהמוט מפעיל עליה?

38. סוס מושך עגלת-משא כבדה בכוח מסוים. העגלה, מצידה, מושכת את הסוס אחורה בכוח שווה-גודל. האם אין פירוש הדבר שהכוחות מבטלים זה את זה, ולכן לא ייתכן שיאיצו? נמקו. (רמז: חישבו על תפקיד הקרקע.)

39. בהזנחת החיכוך, מי יתגלגל מהר יותר במורד מדרון - מכונית קדילק או חיפושית? הסבירו.

40. מהו הקשר בין משקלו של גוף נופל לבין התנגדות האוויר מעט לפני הגיעו למהירות הגבולית? אחרי?

41. מדוע כדור טניס שישוחרר מהקומה ה-50 יפגע בקרקע במהירות שאינה עולה על מהירות הפגיעה לאחר שחרורו מהקומה ה-20?

42. האם תאוצתו של גוף שנופל באוויר, המתנגד לתנועתו, גדלה, קטנה או נותרת קבועה במהלך תנועתו?

43. אם וכאשר שחרר גליליאו שני כדורים ממרומי מגדל פיזה הנטוי, התנגדות האוויר לא היתה באמת זניחה. איזה כדור היה פוגע ראשון בקרקע, אם לשניהם אותו גודל, אך האחד מהשניים כבד בהרבה? מדוע?

44. אם נשחרר בו-זמנית שני כדורי טניס מגג בניין, הם יפגעו בקרקע יחדיו. אם נמלא את אחד הכדורים בגולות פלדה, האם הוא ייפול מהר יותר ויפגע ראשון בקרקע? על מי מהשניים התנגדות האוויר גדולה יותר? נמקו את תשובותיכם.

45. מהי תאוצתה של אבן הנזרקת למעלה בהימצאה בפסגת מסלולה? (האם תשובתך תואמת את החוק השני של ניוטון?)

46. בהזנחת התנגדות האוויר, כדור הנזרק מעלה שב לנקודת הזריקה במהירות השווה בגודלה למהירות

זיכורו, שאילו האזירה לאפסיריז אכס אבאון
אז צלמאכ ואלבזוק האס הבנגא אה היציונו
הליכציון שבפיק. (סו אפטי אה היגזליון והבזיו
שנודצו אגזליון נוסף יק אארי שהבנגא כראו
אז הפיק וצניאס אז שאילו האזירה.

