



תנועת סיבוב



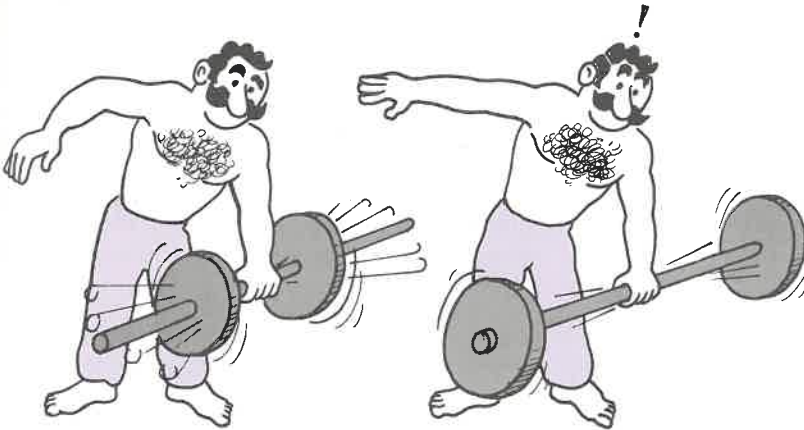
בפרק 3 דנו בתנועה מעגלית מבלי לעסוק בכוחות הגורמים לה. בפרק 4 עסקנו בחוקי התנועה של ניוטון, והסברנו כיצד מיושמים רעיונות ההתמדה, הכוח והתאוצה בתנועתם של גופים, מבלי שהתייחסנו לתנועת סיבוב. בפרק זה נרחיב את הדיון במושגים אלה גם בקשר לתנועת סיבוב של גוף סביב ציר כלשהו, ציר שיכול להיות ממוקם בתוך הגוף או מחוצה לו. נראה כיצד מומנט ההתמדה משפיע על הסיבוב, כיצד כוחות המופעלים בדרך מסוימת יוצרים מה שקרוי מומנטים של כוח, הנוטים לסובב עצמים, וכיצד כוחות המופעלים באופן אחר נוטים להניע עצמים במסלולים מעגליים. אחר כך נסביר כיצד מיושם רעיון התנע לגבי תנועת סיבוב. המושגים המעניינים הנדונים בפרק זה מקבילים לאלה שנדונו בפרקים 3 ו-4 ומבוססים עליהם.

ממש כפי שגוף נח נוטה להישאר במנוחה וכפי שגוף נע נוטה להמשיך לנוע לאורך קו ישר, כך גוף המסתובב מסביב לציר נוטה להמשיך ולהסתובב סביב אותו ציר, אלא אם כן יופרע על ידי השפעה חיצונית כלשהי. (בהמשך נראה שהפרעה חיצונית כזאת נקראת מומנט כוח.) תכונתו של גוף להתנגד לשינויים במצב תנועתו הסיבובית נקראת **מומנט התמדה** (ולעיתים - התמדה סיבובית). גופים מסתובבים נוטים להמשיך ולהסתובב ואילו גופים שאינם מסתובבים נוטים להתמיד במצבם ולא להסתובב. בהעדר השפעות חיצוניות, סביבון מסתובב משיך להסתובב ואילו סביבון נייח יישאר במנוחה.

התמדה בתנועת סיבוב

איור 7.1

מומנט ההתמדה תלוי
בהתפלגות המסה ביחס לציר
הסיבוב.



קל לסובב

קשה לסובב

בדומה להתמדה של גוף הנע על קו ישר, גם מומנט ההתמדה של גוף תלוי במסתו. אולם, שלא כבתנועה הישרה, מומנט ההתמדה תלוי בחלוקת המסה ביחס לציר הסיבוב (איור 7.1). ככל שהמרחק בין עיקר המסה של הגוף לבין ציר הסיבוב גדול יותר, מומנט ההתמדה של הגוף גדול יותר. לדוגמה, גלגלי תנופה במכונות בנויים כך שרוב המסה שלהם מרוכזת קרוב לשוליים. משהובאו לידי סיבוב, הם נוטים להתמיד בתנועת הסיבוב שלהם, יותר משהיו נוטים לכך אילו המסה היתה מרוכזת קרוב יותר לציר הסיבוב. מכאן נובע כי ככל שמומנט ההתמדה של הגוף גדול יותר, קשה יותר לשנות את מצב הסיבוב שלו. אם הוא מסתובב, קשה לעוצרו; אם הוא במנוחה, קשה לסובבו. את העובדה הזו מנצל לוליין ההולך על חבל בקרקס - הוא מחזיק בידיו מוט ארוך המסייע לו לשמור על שיווי משקלו. חלק גדול של מסת המוט מרוחק מציר הסיבוב שלו. למוט יש, לפיכך, מומנט התמדה ניכר. אם הלוליין מתחיל לאבד את שיווי משקלו, גם המוט מתחיל להסתובב איתו. אך מומנט ההתמדה הניכר של המוט מאט את התהליך ומעניק ללוליין זמן שבמהלכו הוא יכול לשפר את מצבו. ככל שהמוט ארוך יותר, כן ייטב. ואם הלוליין אינו מצויד במוט, לפחות יוכל להגדיל את מומנט ההתמדה של גופו אם פשוט יושיט את זרועותיו לצדדים למלוא אורכו, כפי שנוהגים לעשות גם ילדים כאשר הם הולכים על אבני שפה או על צינורות מים.

מומנט ההתמדה של המוט או של כל עצם אחר תלוי בציר הסיבוב שלו.* אם ציר הסיבוב עובר במרכז העצם לכל אורכו, כמו ה"עופרת" בעיפרון, המסה נמצאת קרוב מאוד לציר הסיבוב ומומנט ההתמדה קטן מאוד.

* כאשר המסה של גוף מרוכזת כולה במרחק אחד - הרדיוס r - מציר הסיבוב, כמו הגולה של מטוטלת פשוטה או כמו טבעת דקה, מומנט ההתמדה I שווה למכפלת המסה m בריבוע המרחק מהציר. במקרה מיוחד כזה, $I = mr^2$. (במקרה הכללי, הנוסחה היא $I = \int r^2 dm$, ביטוי שידעתו היא מעבר לנדרש בספר זה.)



איור 7.2
נטיית המוט להתנגד לסיבוב
מסייעת ללולין.

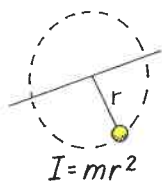
מומנט ההתמדה גדול יותר כלפי ציר סיבוב המאונך למוט באמצעו - הציר שאותו מנצל הלולין באיור 7.2. למוט יש מומנט התמדה גדול עוד יותר אם הציר המאונך למוט עובר דרך אחד מקצותיו, באופן שהמוט מתנדנד כמטוטלת. באיור 7.3 מושוים ערכי מומנטים של התמדה עבור גופים בעלי צורות שונות וביחס לצירים שונים. אינכם חייבים לזכור ערכים אלה, אך תוכלו לראות כיצד הם משתנים בהתאם לצורת הגוף ולמיקום ציר הסיבוב.

למטוטלת ארוכה יש מומנט התמדה גדול יותר מלמטוטלת קצרה ולכן היא מתנדנדת הלוך ושוב בקצב איטי יותר ממטוטלת קצרה. כאשר אנחנו הולכים או מניחים לרגלינו להתנדנד בסיוע כוח הכובד, כלומר בקצב של מטוטלת. ממש כפי שלמטוטלת ארוכה דרוש זמן ארוך להתנדנד הלוך ושוב, אדם בעל רגליים ארוכות נוטה ללכת בצעדים איטיים יותר לעומת אדם בעל רגליים קצרות. ראיה לכך ניתן למצוא גם בין בעלי החיים: גירפות, סוסים ויענים רצים בפסיעות איטיות יותר מכלבלבים, עכברים ופרעושים.

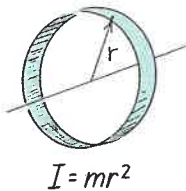
איור 7.3

ערכי מומנט ההתמדה של עצמים שונים ביחס לצירים המסומנים. כל אחד מהגופים הוא בעל מסה m .

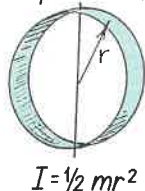
מטוטלת פשוטה



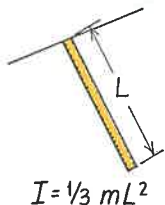
חישוק ביחס לקוטר



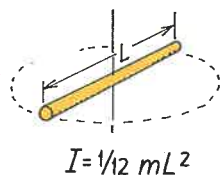
חישוק ביחס לציר מאונך



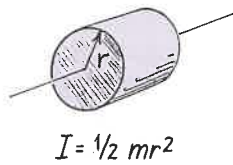
מוט ביחס לקצה



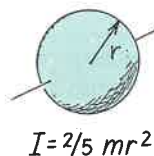
מוט ביחס למרכז הכובד



גליל מלא



כדור מלא ביחס למרכז הכובד





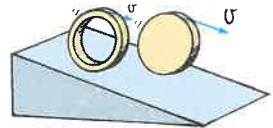
איור 7.4

אנו מכופפים את רגלינו כשאנו רצים, בין השאר כדי להקטין את מומנט ההתמדה.

איור 7.5
 לרגליים קצרות יש מומנט התמדה קטן יותר מאשר לרגליים ארוכות. לבעל חיים בעל רגליים קצרות פסיעות מהירות יותר מלבעל חיים בעל רגליים ארוכות, ממש כפי שמטוטלת קצרה מתנדנדת מהר יותר ממטוטלת ארוכה.



האם ניסיתם אי פעם לרוץ ברגליים ישרות? אין זה קל. כשאנו רצים אנו מכופפים את הרגליים כדי להקטין את מומנט ההתמדה שלהן כך שנוכל לסובב אותן קדימה ואחורה מהר יותר. מן הסתם אף פעם לא חשבתם על כך באופן הזה. בשל מומנט ההתמדה, גליל מלא המתחיל לנוע ממצב מנוחה יתגלגל במורד מדרון משופע מהר יותר מטבעת או מחישוק. מסת הטבעת מרוכזת במרחק מרבי מציר הסיבוב, ולכן הטבעת מתגלגלת לאט יותר. (במילים אחרות, לטבעת נטייה גדולה יותר להתנגד לשינוי במצב הסיבוב שלה.) כל גליל מלא ישיג כל טבעת בתחרות גלגול במורד אותו מדרון. במחשבה ראשונה נראה כי הדבר אינו מתקבל על הדעת, אך זיכרו שכל שני עצמים, תהיה מסתם אשר תהיה, ייפלו תמיד יחד אם נפיל אותם. הם גם יחליקו יחד אם נשחרר אותם במורד מדרון משופע. ואולם, כאשר מדובר בתנועת גלגול, העצם בעל מומנט ההתמדה הגדול יותר בהשוואה למסתו הוא בעל ההתנגדות הגדולה ביותר לשינוי בתנועתו. לכן, כל דיסקה תתגלגל מהר יותר מכל טבעת במורד אותו מדרון (איור 7.6). נסו ותיווכחו!

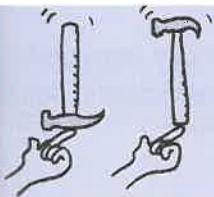


איור 7.6

גליל מלא מתגלגל במדרון מהר יותר מטבעת, בין שהמסה והקוטר החיצוני שלהם שווים ובין שאינם שווים. לטבעת יש מומנט התמדה גדול יותר ביחס למסתה מאשר לגליל.

שאלה

תארו לעצמכם שאתם מנסים להעמיד פטיש על קצה האצבע ולאזנו. אם לפטיש ראש כבד וידית ארוכה, האם יהיה קל יותר לאזן את הפטיש כשקצה הידית שלו על האצבע וראשו למעלה, או להיפך - כשראש הפטיש על האצבע והידית למעלה?



תשובה:

קל יותר להעמיד את הפטיש כשראשו למעלה. מדוע? מפני שבמצב הזה מומנט ההתמדה של הפטיש גדול יותר וכך גם התנגדותו לשינוי בתנועת סיבוב. ללוליינים בקרקס, המאזנים את חבריהם העומדים בקצהו של מוט ארוך, המשימה קלה יותר כשאלה האחרונים נמצאים בראש המוט. למוט שאין בקצהו דבר מומנט התמדה קטן יותר, וקשה יותר לאזנו!

מומנט הכוח הוא המקבילה הסיבובית לכוח. נטייתו של כוח היא לשנות את מצב תנועתם של גופים; מומנט הכוח נוטה לפתל גופים או לשנות את מצב הסיבוב שלהם. אם רוצים לגרום לגוף ניח לנוע יש להפעיל עליו כוח. אם רוצים לגרום לגוף ניח להסתובב סביב ציר, יש להפעיל מומנט כוח. מומנט הכוח שונה מן הכוח כפי שמומנט ההתמדה (ההתמדה הסיבובית) שונה מן ההתמדה הרגילה: שני המומנטים תלויים במרחק מציר הסיבוב. במקרה של מומנט הכוח, מרחק זה נקרא זרוע הכוח (ולעיתים: זרוע המנוף). אנו מגדירים את מומנט הכוח כמכפלת זרוע הכוח בכוח הנוטה לגרום לסיבוב במרחק זה:

$$\text{מומנט הכוח} = \text{זרוע הכוח} \times \text{הכוח}$$

ילדים המשתעשעים על נדנדה שיווי משקל מכירים את מומנט הכוח מן הניסיון. הם יודעים לאזן את הנדנדה גם אם משקליהם אינם שווים. המשקל לבדו אינו גורם לסיבוב. מומנט הכוח הוא הגורם, והילדים לומדים עד מהרה שהמרחק שבו הם יושבים מנקודת המשען חשוב לא פחות מהמשקל (איור 7.8). מומנט הכוח שיוצר הילד שמימין נוטה לגרום לסיבוב במגמת השעון, ואילו מומנט הכוח שיוצרת הילדה משמאל נוטה לגרום לסיבוב נגד מגמת השעון. אם המומנטים של הכוחות שווים בגודלם, מומנט הכוח הכולל שווה לאפס, ולא יתרחש כל סיבוב.

ניח שהנדנדה בנויה כך שהילדה, שמשקלה מחצית ממשקל חברה, תלויה בחבל שאורכו 4 מטרים, הקשור בקצה האחד של הנדנדה של (איור 7.9). מרחקה מנקודת המשען הוא עתה 5 מטרים, ובכל זאת הנדנדה עדיין מאוזנת. אנו רואים שאורכה של זרוע הכוח הוא עדיין 3 מ' ולא 5 מ'. זרוע הכוח ביחס לציר סיבוב כלשהו היא המרחק האנכי מן הציר לקו הפעולה של הכוח - הקו שלאורכו הכוח פועל. מרחק זה יהיה תמיד המרחק הקצר ביותר בין ציר הסיבוב לבין קו הפעולה של הכוח.

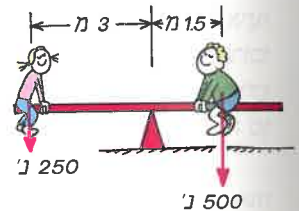
זו הסיבה לכך שהסיכויים שהבורג העקשן המתואר באיור 7.10 יסתובב, רבים יותר אם הכוח מופעל במאונך לידית, כמתואר בחלקו האמצעי של האיור, ואינו מופעל במשופע, כמתואר בחלקו הימני של האיור. באיור הימני זרוע הכוח מתוארת באמצעות הקו המקוטע, והיא קצרה יותר מן הידית של מפתח הברגים. באיור האמצעי, זרוע הכוח שווה לאורכה של ידית המפתח. באיור השמאלי הוארכה זרוע הכוח בעזרת צינור כדי להגדיל את מומנט הכוח.

מומנט הכוח



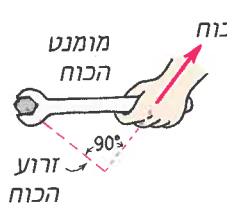
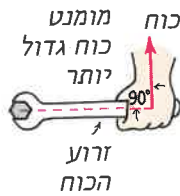
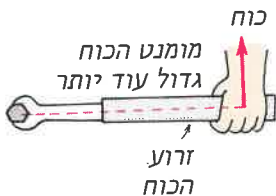
איור 7.7

מאזימי קדם נוהגים למדוד מסה באמצעות איזון מומנטים של כוח.



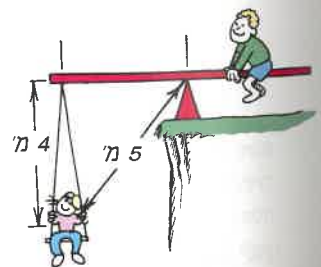
איור 7.8

אם המומנטים של הכוח מאזנים זה את זה, לא יתרחש כל סיבוב.



איור 7.10

אף על פי שגודל הכוח שווה בכל המקרים, המומנטים של הכוח שונים.



איור 7.9

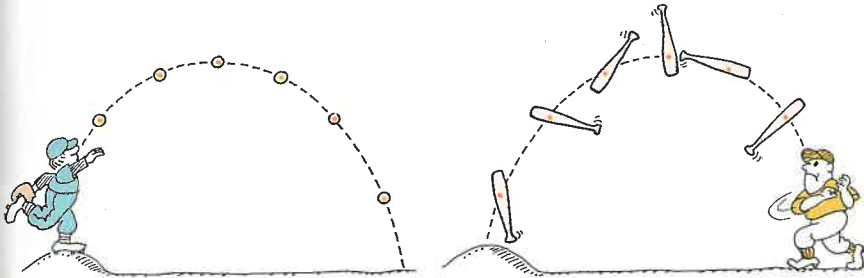
זרוע הכוח היא עדיין 3 מ'.

שאלות

1. אם מחברים צינור לידית של מפתח ברגים ובכך מגדילים את אורכה פי שלושה, באיזה שיעור יגדל מומנט הכוח אם הכוח שמפעילים אינו משתנה?
2. התבוננו בדנדנה המאוזנת שבאיור 7.8. בניח שלילדה שמשמאל נוספים לפתע 50 ניוטון, לאחר שמישהו הושיט לה סל מלא תפוחים. היכן עליה לשבת כדי לשמור על האיזון, בהנחה שהילד הכבד יותר אינו זז?

מרכז המסה ומרכז הכובד

אם נזרוק כדור לאוויר, הוא ינוע במסלול פרבולי חלק. אם, לעומת זאת, נזרוק מחבט מסתובב לאוויר, מסלולו לא יהיה חלק כלל וכלל; הוא יתנוודד בתנועתו, לכאורה ללא כל שיטה. אך למעשה המחבט מתנוודד מסביב לנקודה מאוד מסוימת, נקודה הנקראת **מרכז המסה**.



איור 7.11
מרכז הכובד של הכדור ושל המחבט נעים לאורך מסלולים פרבוליים.

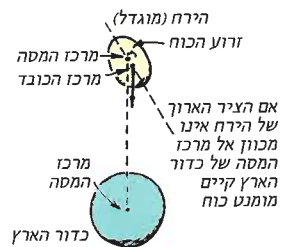
מרכז המסה של גוף נתון הוא המקום הממוצע של כל חלקיקי המסה שהגוף מורכב מהם. לדוגמה, לעצם סימטרי, כמו כדור, אפשר להתייחס, בהקשרים מסוימים, כאילו כל המסה מרוכזת במרכזו; לעומת זאת, בגוף שצורתו אינה סימטרית, כדוגמת המחבט שבאיור 7.11, חלק גדול יותר של המסה מרוכז בצידו האחד. לכן, מרכז המסה של מחבט כזה קרוב יותר לקצה העבה. מרכז המסה של קונוס (חרוט) נמצא על הציר המרכזי שלו, בדיוק ברבע הגובה מן הבסיס לקודקוד (איור 7.12).

בלשון הדיבור משתמשים לעיתים קרובות במונח **מרכז הכובד** כשלמעשה מתכוונים למרכז המסה. מרכז הכובד הוא פשוט המקום הממוצע של התפלגות המשקל. הואיל והכובד והמסה נמצאים ביחס ישר זה לזה (הם מתכונתיים זה לזה), מרכז הכובד ומרכז המסה הם בעצם אותה נקודה בגוף*. הפיסיקאים מעדיפים להשתמש במונח מרכז המסה, מפני שלגוף יש מרכז

תשובות:

1. פי שלושה. (שיטה זאת להגדלת מומנט הכוח עלולה לגרום לשבירת הבורג)
2. עליה לשבת $\frac{1}{2}$ מ' קרוב יותר למרכז. במצב זה זרוע הכוח שלה תהיה 2.5 מ'. הבדיקה: $300 = 2.5 \times 300$ מ' $= 1.5 \times 500$ מ'.

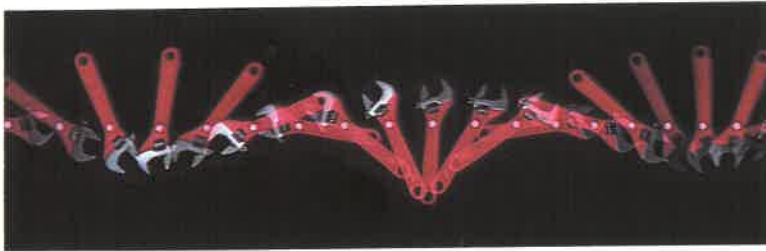
* בגופים גדולים מאוד, כמו הירח, שבו החלקים הקרובים יותר לכדור הארץ נמצאים באזור של משיכת כובד חזקה יותר אליו מהחלקים הרחוקים יותר, מרכז הכובד קרוב מעט יותר אל כדור הארץ ממרכז המסה. לירח יש צורה מוארכת מעט, דמוית ביצה, וצירו הארוך מכוון לעבר כדור הארץ. מרכז המסה ומרכז הכובד של הירח מצויים על הציר הארוך הזה. מעניין לציין כי אם ציר זה אינו פונה הישר לעבר מרכז המסה של כדור הארץ - כלומר אם שלושת המרכזים אינם מצויים על קו ישר אחד (נכמתואר באיור) - במצב זה קיים מומנט כוח הפועל ליישרם על קו אחד, בדומה למומנט הכוח הפועל על מחט של מצפן כשהיא אינה מכוונת בכיוון השדה המגנטי של כדור הארץ. זו הסיבה לכך שתמיד אותו צד של הירח פונה אלינו!



מסה בין אם הוא נתון להשפעת כוח הכובד ובין אם לאו. אולם אנו נשתמש בשני המונחים לפי הצורך, ונעדיף את המונח מרכז הכובד במקרים שבהם מעורבים שיקולים של כובד ומשקל.

התצלום רב החשיפות (איור 7.13) מתאר מבט מלמעלה על מפתח ברגים מתכוונן ("מפתח שוודי") המחליק תוך כדי סיבוב על פני משטח אופקי חלק. שימו לב לכך שמרכז הכובד של המפתח, המסומן בנקודה בהירה, נע לאורך קו ישר, בזמן שחלקיו האחרים של המפתח מתנדדים כשהם נעים על המשטח. מכיוון שאין כוח חיצוני שקול הפועל על המפתח, מרכז הכובד שלו נע מרחקים שווים בפרקי זמן שווים. תנועתו של המפתח המסתחרר היא צירוף של תנועת מרכז הכובד לאורך קו ישר ותנועת סיבוב של המפתח סביב מרכז הכובד.

אילו השליכו את המפתח לאוויר, מרכז הכובד שלו היה נע לאורך מסלול פרבולי חלק, ללא תלות בתנועת הסיבוב שלו. כך קורה גם כאשר פגז של תותח מתפוצץ באוויר (איור 7.14). הכוחות הפנימיים הפועלים בהתפוצצות אינם משנים את מרכז הכובד של הקלע. מעניין לציין כי כאשר התנגדות האוויר זניחה, מרכז הכובד של רסיסי הפגז המתפזרים בעת מעופם באוויר יימצא באותו מקום שבו היה נמצא מרכז הכובד של הפגז אילו לא היתה מתרחשת ההתפוצצות.

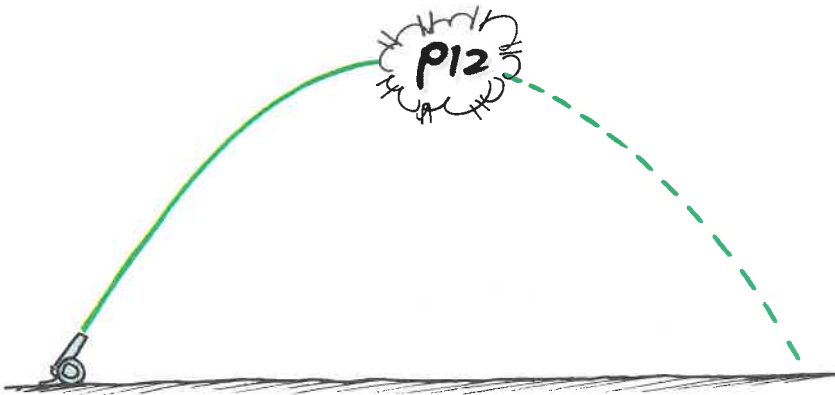


איור 7.13

מרכז המסה של המפתח המסתחרר נע לאורך קו ישר.

כיצד מאתרים את מרכז הכובד?

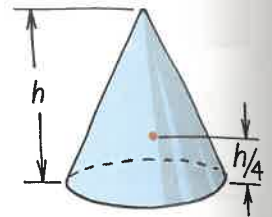
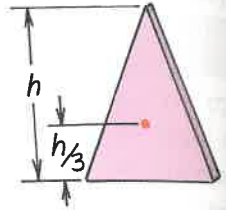
מרכז הכובד של גוף שהתפלגות החומר בו אחידה נמצא במרכזו. גוף כזה - סרגל, למשל - מתנהג כאילו כל מסתו מרוכזת שם. אם נתמוך בנקודה בודדת זו נוכל להחזיק בסרגל כולו.



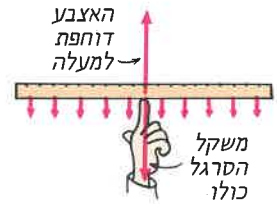
איור 7.14

מרכז הכובד של הפגז ושל רסיסיו נע לאורך אותו מסלול לפני ההתפוצצות ואחריה.

איור 7.12
מרכז הכובד של העצמים מסומן בנקודה הכתומה.

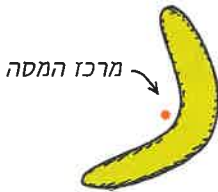


דרך פשוטה לאיתור מרכז הכובד של גוף היא, איפוא, לאזן אותו. החיצים הקטנים באיור 7.15 מייצגים את משיכת הכובד לאורך הסרגל. את כל הכוחות האלה אפשר לצרף לכוח שקול הפועל דרך מרכז הכובד. אפשר לראות את משקלו הכולל של הסרגל כאילו הוא מרוכז בנקודה בודדת זאת. לפיכך, אפשר לאזן את הסרגל כשמפעילים כוח יחיד כלפי מעלה, בכיוון העובר דרך אותה נקודה. מרכז הכובד של כל גוף התלוי באופן חופשי נמצא בדיוק מתחת לנקודת התלייה (איור 7.16) או בנקודה זאת עצמה. אם נשרטט קו אנכי דרך נקודת התלייה, מרכז הכובד יימצא במקום כלשהו לאורך קו זה. כדי לקבוע היכן בדיוק לאורך הקו הוא נמצא, כל שעלינו לעשות הוא לתלות את הגוף בנקודה אחרת כלשהי ולשרטט קו אנכי שני דרך נקודת התלייה הזאת. מרכז הכובד נמצא בנקודה שבה שני קווים אלה נחתכים.



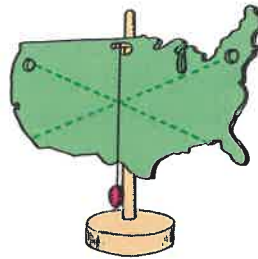
איור 7.15

הסרגל מתנהג כאילו כל משקלו היה מרוכז במרכזו.



איור 7.17

מרכז המסה יכול להימצא מחוץ למסת הגוף.



איור 7.16

מציאת מרכז הכובד של גוף בעל צורה לא-סימטרית.

מרכז המסה של גוף יכול להימצא בנקודה שבה אין כל מסה. למשל, מרכז המסה של טבעת או של כדור חלול נמצא במרכז הגיאומטרי, שבו אין כל מסה. בדומה לכך, מרכז המסה של בומרנג נמצא מחוץ לגוף עצמו, ולא בתוך החומר המהווה את הבומרנג (איור 7.17).

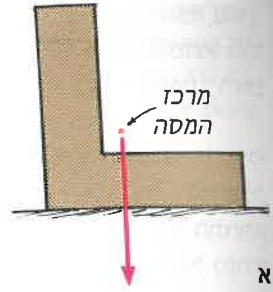
איור 7.18

האתלט מבצע "היפוך פוסבורי" כדי לעבור מעל לרף, ואילו מרכז הכובד שלו עובר כמעט מתחתיו.



יציבות

למקומו של מרכז המסה יש חשיבות רבה לגבי יציבותם של גופים (איור 7.19). אם נמתח קו אנכי הישר למטה ממרכז המסה של גוף בעל צורה כלשהי, והקו יעבור דרך בסיסו של הגוף, אזי הגוף שרוי בשיווי משקל יציב; הוא מאוזן. אם הקו יעבור מחוץ לבסיס, הגוף יהיה בלתי יציב. מדוע המגדל הנטוי המפורסם של פיזה אינו מתמוטט? כפי שניתן לראות באיור 7.20, הקו האנכי הדמיוני הנמתח ממרכז הכובד של המגדל עובר דרך בסיסו, ובצורה זאת עומד המגדל זה מאות בשנים.

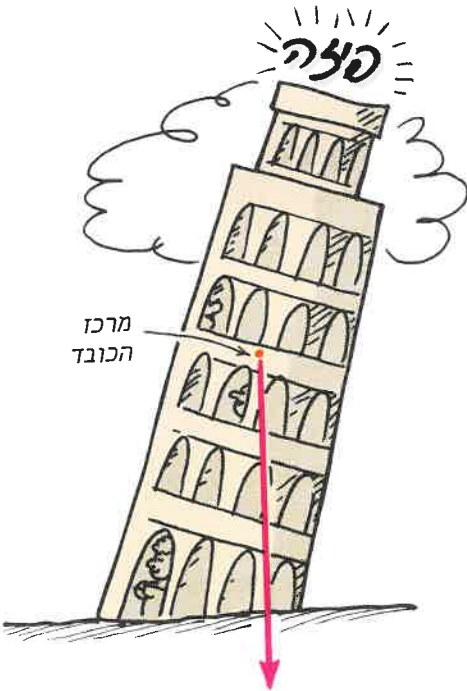


איור 7.19

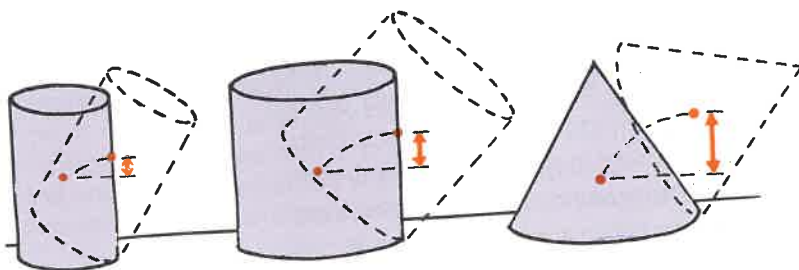
מרכז המסה של הגוף דמוי האות "ר" נמצא במקום שבו אין מסה. ב-(א) מרכז המסה נמצא מעל נקודת תמיכה, לכן הגוף יציב. ב-(ב) הוא אינו מעל נקודת תמיכה, הגוף אינו יציב, ולכן הוא ייפול.

איור 7.20

מרכז הכובד של המגדל הנטוי בפיה נמצא מעל נקודת תמיכה, כך שהמגדל נמצא בשיווי משקל יציב.

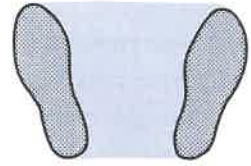


כדי למנוע סכנה של התמוטטות, מומלץ לתכנן גופים כך שיהיו בעלי בסיס רחב ומרכז כובד נמוך. ככל שבסיס הגוף רחב יותר כך צריך להרים את מרכז הכובד של הגוף לגובה רב יותר בטרם ייפול (איור 7.21).



איור 7.21

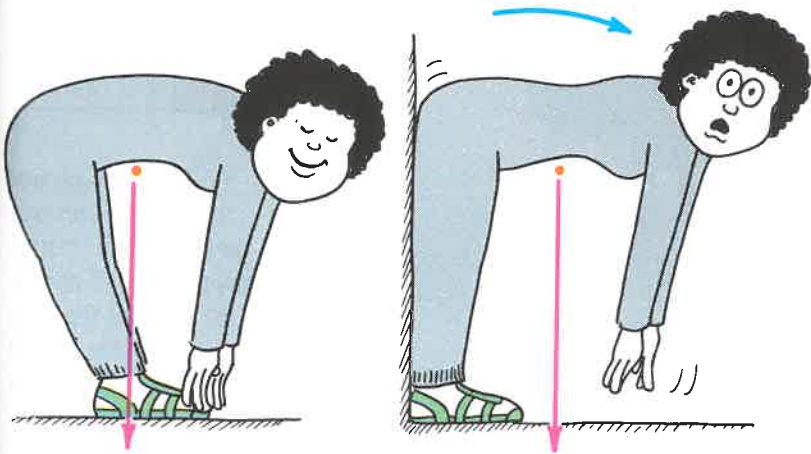
המרחק האנכי שאליו יש להגביה את מרכז הכובד של גוף כדי להפילו קובע את היציבות. גוף בעל בסיס רחב ומרכז כובד נמוך – יציב יותר.



איור 7.22

כשעומדים זקופים, מרכז הכובד של הגוף נמצא אי שם מעל לשטח התחום בין שתי הרגליים. מדוע עדיף לפשק את הרגליים כשעומדים באוטובוס הנוסע על כביש משובש?

כשאנו עומדים זקופים (או שוכבים על הגב) מרכז הכובד שלנו נמצא בתוך הגוף. מדוע נמצא מרכז הכובד באישה הממוצעת נמוך יותר מבגבר ממוצע בעל אותו גובה? האם מרכז הכובד שלנו נמצא תמיד באותה נקודה בגופנו? האם הוא נמצא תמיד בתוך הגוף? מה קורה לו כשאנו מתכופפים? אם כושרכם הגופני סביר, תוכלו להתכופף ולגעת בקצות הבהונות מבלי לכופף את הברכיים - אבל רק אם אינכם עומדים כשגבכם אל הקיר. בדרך כלל, כשמתכופפים ונוגעים בקצות הבהונות, מטים מעט את פלג הגוף התחתון אחורה - כמתואר באיור 7.23 משמאל - כך שמרכז הכובד נמצא מעל נקודת תמיכה - הרגליים. ואולם, אם תנסו לעשות זאת כשגבכם צמוד לקיר, לא תוכלו להתאזן ועד מהרה תמצאו את עצמכם כשמרכז הכובד בולט מעבר לרגליים, כבאיור 7.23 מימין. מיד תאבדו את שיווי המשקל וגופכם יתחיל להסתובב.

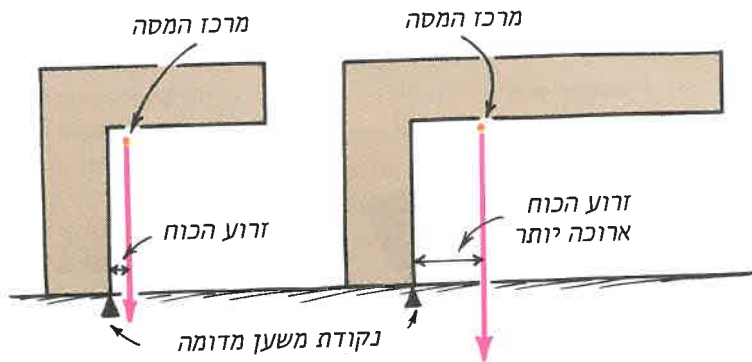


איור 7.23

אפשר להתכופף ולגעת בקצות האצבעות רק אם מרכז הכובד של הגוף נמצא מעל לשטח התחום בין שתי הרגליים.

הסיבה לתנועת הסיבוב היא פעולתו של מומנט כוח בלתי מאוזן. הדבר נראה בברור בשני הגופים דמויי האות "ר" שבאיור 7.24. שניהם אינם יציבים וייפלו אם לא נצמיד אותם אל המשטח שעליו הם עומדים. קל לראות שגם אם לשני הגופים אותו משקל בדיוק, הגוף שממין יציב פחות. הסיבה לכך היא זרוע הכוח הארוכה יותר, הגורמת למומנט כוח גדול יותר.

נסו לאזן מטאטא הפוך על כף היד. משטח התמיכה קטן מאוד, יחסית, ומצוי הרחק מתחת למרכז הכובד, ולכן אין זה פשוט. אם תתאמנו, תוכלו לעשות זאת לאחר שתלמדו להניע קלות את כף היד בתנועות שיתאימו בדיוק לשינויים שיחולו במצב האיזון, כלומר לתזוזות של מרכז הכובד. תלמדו לא להפריז ולא להפחית בתגובה הנדרשת לסטיות קלות באיזון, המתרחשות כל העת. באופן דומה מסייעים מחשבים רבי עוצמה לשמור על מצבם הזקוף של טילים בעלי מסה עצומה בעת שיגורם. חישובים מיוחדים מבחינים מיד בכל סטייה מאיזון. המחשבים מווסתים את דרגת השריפה בנחירי הפליטה הרבים המקיפים את הטיל ומבצעים התאמות מתקנות, באופן דומה למדי לזה שבו המוח מווסת את תנועות ההתאמה של היד כשמנסים לאזן מוט ארוך על כף היד. הרי לפנינו שני הישגים מעוררי התפעלות.



איור 7.24
 על הגוף הימני פועל מומנט כוח גדול יותר, וזאת משתי סיבות. מה הן?

שאלה

סרגל אחיד באורך מטר אחד הנתמך בנקודת ה-25 ס"מ נמצא במצב מאוזן כאשר תולים אבן בת 1 ק"ג בקצהו (0 ס"מ). מהי מסת הסרגל?



כל כוח הגורם לגוף לנוע במסלול מעגלי נקרא **כוח צנטריפטלי**. המילה "צנטריפטלי" פירושה "השואף אל המרכז" או "לעבר המרכז". הכוח שמפעילה צנטריפוגה בלונה פארק ("קיר המוות") על מי שבתוכה הוא כוח המכוון אל המרכז; אילו חדל כוח זה מלפעול, לא היו עוד האנשים מוחזקים במסלול מעגלי.

הכוח הצנטריפטלי

אם נסובב באוויר פחית שימורים הקשורה בחוט, נבחין שעלינו למשוך בחוט ללא הרף - ובכך להפעיל כוח צנטריפטלי (איור 7.25). החוט מעביר את הכוח הצנטריפטלי, המושך את הפחית למסלול מעגלי. כוחות כבידה וכוחות חשמליים יכולים לעבור בחלל הריק וליצור כוחות צנטריפטליים. הירח, למשל, מוחזק במסלול שהוא כמעט מעגל מדויק, באמצעות כוח כבידה המכוון לעבר מרכז כדור הארץ. האלקטרונים הסובבים באטומים במסלוליהם נתונים להשפעת כוח חשמלי המכוון לעבר הגרעינים שבמרכז.

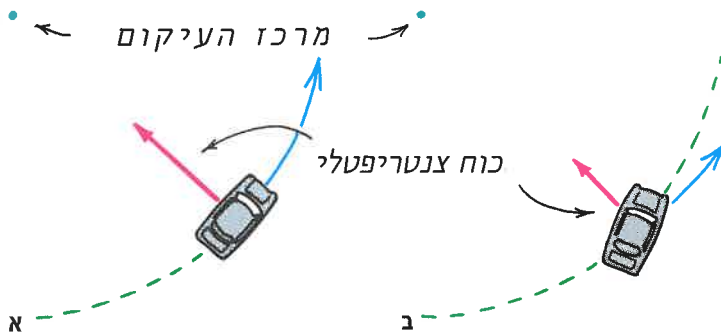


איור 7.25
 הכוח המופעל על הפחית המסתובבת מכוון אל המרכז.

הכוח הצנטריפטלי אינו סוג חדש של כוח. זהו פשוט השם שניתן לכל כוח, בין אם הוא מתיחות בחוט, כוח כבידה, כוח חשמלי, או כל כוח שהוא, המכוון בניצב למסלולו של גוף נע ויוצר תנועה מעגלית.

תשובה:

מסת הסרגל היא 1 ק"ג. מדוע? המערכת נמצאת בשיווי משקל, ומכאן שהמומנטים של הכוח מאזנים זה את זה: מומנט הכוח הנובע ממשקל האבן מאוזן על ידי מומנט כוח השווה לו בגודלו אך מנוגד במגמתו, הנובע ממשקל הסרגל ופועל במרכז הכובד שלו, בנקודת ה-50 ס"מ. כוח התמיכה בנקודת ה-25 ס"מ מופעל בדיוק באמצע, בין האבן לבין מרכז הכובד של הסרגל, ולכן שוות הזרועות של שני הכוחות האלה ביחס לנקודת התמיכה (25 ס"מ). משמעות הדבר היא שהמשקלים - ולכן גם המסות - של האבן ושל הסרגל הם בהכרח שווים. מעניין לציין שמרכז הכובד של הסרגל והאבן במצורף נמצא בנקודת ה-25 ס"מ של הסרגל - בדיוק מעל נקודת המשען. (שימו לב שאנו משוחררים מהמטלה המייגעת של עיסוק בהתפלגות המשקלים של חלקי הסרגל שמשני צדדיה של נקודת המשען, שכן מרכז הכובד של הסרגל כולו הוא אכן בנקודה אחת ויחידה - נקודת ה-50 ס"מ!)

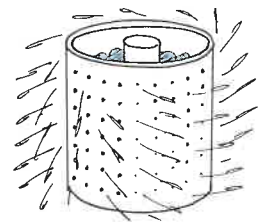


איור 7.26

(א) כשמכונית מנסה לפנות בעקומה, חייב לפעול כוח הדוחף אותה לעבר מרכז העקומה. (ב) המכונית מחליקה בעקומה כשהכוח הצנטריפטלי (החיכוך) שהכביש מפעיל על הצמיגים אינו גדול דיו.

כשמכונית מבצעת פנייה בפינת הרחוב, החיכוך שבין הצמיגים לכביש הוא הכוח הצנטריפטלי המחזיק את המכונית במסלול המעגלי (איור 7.26). אם החיכוך אינו גדול דיו, המכונית לא תצליח "לקחת את הסיבוב": הצמיגים יחליקו הצידה, ואיתם המכונית כולה.

הכוח הצנטריפטלי ממלא תפקיד עיקרי בפעולתה של הסוכת (צנטריפוגה). דוגמה המוכרת לכולנו היא פעולת הסחיטה במכונת הכביסה (איור 7.27). בשלב הסחיטה מסתובב התוף במכונת הכביסה במהירות גבוהה ומפעיל כוח צנטריפטלי על הכבסים הלחים, המאולצים לנוע במסלול מעגלי כשהם לחוצים לצידו הפנימי של התוף. התוף מפעיל כוח גדול על על הבגדים; הוא מפעיל כוח גדול גם על המים, אך המים פורצים החוצה דרך הנקבים הרבים הפזורים בכל שטח התוף - בהגיע טיפת מים לנקב, הכוח הצנטריפטלי חדל לפעול עליה והיא יוצאת. אם רוצים לדייק אפשר לומר כי התוף מאלץ את הכבסים להתרחק מן המים. חישובו על כך.

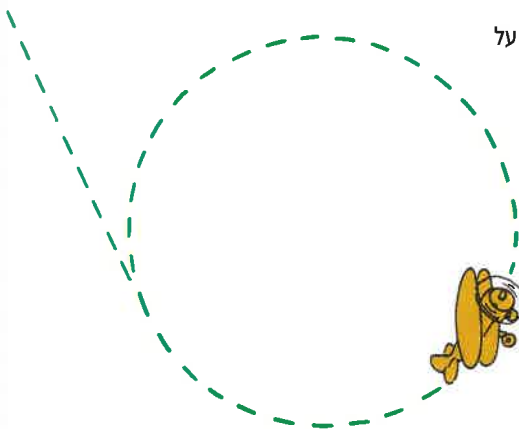


איור 7.27

המסלול המעגלי נכפה על הכבסים; המים יוצאים מבעד לנקבים.

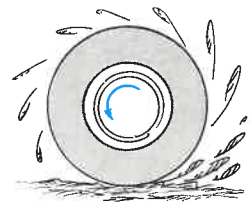
איור 7.29

כוחות צנטריפטליים גדולים על כנפי המטוס מאפשרים לו לנוע בלולאה מעגלית. התאוצה המסיטה את המטוס מן המסלול הישר, שבו היה נע בהעדר הכוחות הצנטריפטליים, גדולה, לעיתים קרובות, פי כמה וכמה מתאוצת הכובד, g . לדוגמה, אם התאוצה הצנטריפטלית היא 98 מ'ש^2 (פי עשרה מ- g , שערכה



9.8 מ'ש^2), אומרים שהמטוס נע ב-10

ג'. המושב לוחץ על הטייס בכוח נוסף, הגדול פי עשרה ממשקלו. מטוסי-קרב טיפוסיים בנויים לעמוד בתאוצות של כ-8 או 9 ג'. המטוס, כמו גם הטייס, צריכים לעמוד בתאוצות אלו. כשמטוס מבצע פנייה של 8 ג', למשל, הכוח הדרוש להחזקת הדם במוחו של הטייס צריך להיות גדול פי שמונה מן הכוח הרגיל שמפעיל הלב. בהעדרו של כוח כזה הדם עלול לזרום ממוחו של הטייס החוצה ובכך לגרום לאובדן הכרה רגעי.



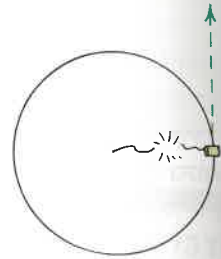
איור 7.28

הכוח הצנטריפטלי (התאחזיה של הבוץ אל הצמיג המסתחרר) אינו גדול דיו כדי להצמיד את הבוץ אל הצמיג, והוא משתחרר ונע במסלול ישר המשיק לצמיג.

בדוגמאות הקודמות תיארונו עבור תנועה מעגלית את תפקידו של הכוח המכוון אל המרכז. לעיתים מייחסים לתנועה המעגלית גם כוח הפונה כלפי חוץ. כוח זה מכונה **הכוח הצנטריפוגלי***. "צנטריפוגלי" פירושו "הבורח מן המרכז" או "הלאה מן המרכז". במקרה של הפחית המסתובבת סבורים רבים בטעות שכוח צנטריפוגלי מושך את הפחית החוצה. אם החוט שבו קשורה הפחית נקרע (איור 7.30), יש הטועים ואומרים שהכוח הצנטריפוגלי מושך את הפחית ממסלולה המעגלי. אך למעשה, עם הינתקות החוט, הפחית ממשיכה בדרכה במסלול ישר המשיק למעגל מפני שכל כוח אינו פועל עליה. נוסף ונבהיר זאת בדוגמה אחרת. נניח שאנו נוסעים במכונית הבולמת בלימת פתע. אנו מוטלים קדימה לעבר לוח המחוונים. כשקורה הדבר איננו אומרים שפעל עלינו כוח שדחף אותנו קדימה. לפי חוק ההתמדה המשכנו לנוע קדימה משום שלא היה שום כוח שפעל עלינו. כוח כזה יכולות היו להפעיל חגורות בטיחות, למשל. בדומה לכך, כאשר אנו נמצאים במכונית הפונה פנייה חדה לצד שמאל, אנו נוטים "לעוף" לעבר הדופן הימנית של הרכב - לא בהשפעת כוח צנטריפוגלי כלשהו הפועל כלפי חוץ, אלא עקב העדרו של כוח צנטריפטלי שיחזיק אותנו במסלול המעגלי (כוח שגם אותו יכולות היו להפעיל חגורות בטיחות).

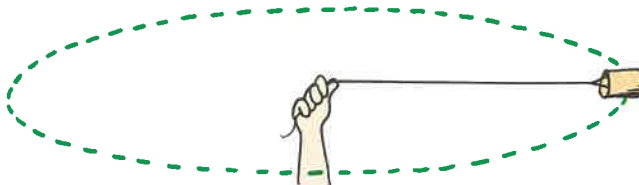
כך קורה גם כאשר מסובבים פחית הקשורה בחוט במסלול מעגלי: אין כל כוח המושך את הפחית כלפי חוץ. הכוח היחיד הפועל על הפחית הוא מתיחות החוט המושכת אותה פנימה. הכוח כלפי חוץ פועל על החוט, לא על הפחית (איור 7.31). עתה תארו לעצמכם פרת משה רבנו הנמצאת בתוך הפחית המסתובבת (איור 7.32). הפחית לוחצת על רגלי החיפושית ומפעילה עליה את הכוח המחזיק אותה במסלול המעגלי. החיפושית, מצידה, לוחצת על קרקעית הפחית, אולם (בהזנחת כוח הכובד) הכוח היחיד שפועל עליה הוא הכוח שמפעילה קרקעית הפחית על רגליה. ממערכת הייחוס החיצונית הנייחת שלנו, אנו רואים שאין כל כוח צנטריפוגלי הפועל על החיפושית, ממש כפי שלא פעל כוח צנטריפוגלי על האדם שהוטל אל דופן המכונית בזמן הפנייה. את תופעת הכוח הצנטריפוגלי מייחסים לא לכוח אמיתי כלשהו אלא להתמדה - לנטייתו של כל גוף נע להמשיך בתנועתו לאורך קו ישר. אך נסו להסביר זאת לפרת משה רבנו!

הכוח הצנטריפוגלי



איור 7.30

כאשר החוט נקרע, הפחית המסתובבת נעה בקו ישר המשיק למסלול המעגלי, ולא על קו המתרחק מן המרכז החוצה.



איור 7.31

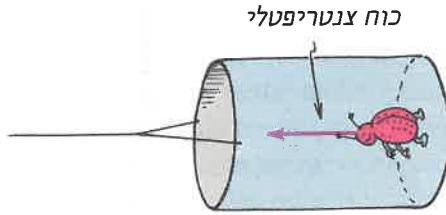
הכוח היחיד שפועל על הפחית המסתובבת (בהזנחת כוח הכובד) מכוון לעבר מרכז התנועה המעגלית. זהו כוח צנטריפטלי. אין כוח הפועל על הפחית כלפי חוץ.

* הן הכוח הצנטריפטלי והן הכוח הצנטריפוגלי תלויים במסה m של הגוף, במהירותו המשיקית v וברדיוס העיקום r של מסלולו המעגלי. אם תמשיכו בלימודי הפיסיקה תלמדו שהקשר המדויק הוא

$$F = mv^2/r$$

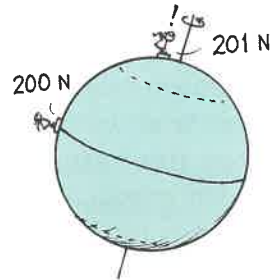
איור 7.32

הפחית מפעילה את הכוח הצנטריפטלי הדרוש להחזקת החיפושית במסלול מעגלי.



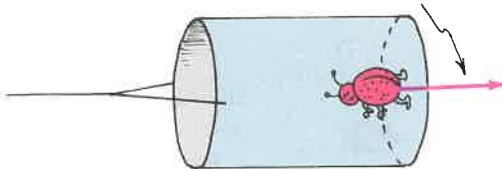
מערכת הייחוס שלנו* משפיעה במידה רבה על האופן שבו אנו רואים את הטבע. כאשר אנו יושבים על המושב ברכבת מהירה, מהירותנו היא אפס ביחס לרכבת, אך היא גבוהה מאוד ביחס למערכת הייחוס של הקרקע הנייחת שמחוץ לרכבת. זה עתה למדנו כי במערכת ייחוס שאינה מסתובבת, הכוח המחזיק גוף בתנועה מעגלית הוא כוח צנטריפטלי. קרקעית הפחית מפעילה כוח כזה על רגליה של החיפושית שבתוכה. כל כוח אחר אינו פועל עליה.

אך הטבע נראה שונה למדי מנקודת המבט של מערכת הייחוס המסתובבת. במערכת המסתובבת, נוסף על הכוח שמפעילה הפחית על רגלי החיפושית, קיים כוח צנטריפוגלי הפועל עליה. הכוח הצנטריפוגלי במערכת ייחוס מסתובבת הוא כוח בזכות עצמו, כוח ממשי באותה מידה כמו משיכת הכובד (איור 7.33). עם זאת, ישנו הבדל יסודי בין שני הכוחות. כוח הכבידה הוא פעולת גומלין (אינטראקציה) שבין מסה אחת למסה אחרת. כוח הכובד שאנו חשים בו הוא פעולת הגומלין בינינו לבין כדור הארץ. אך לכוח הצנטריפוגלי במערכת ייחוס מסתובבת אין מקור מעין זה - אין לו בן זוג שאיתו מתרחשת פעולת גומלין. הוא דומה למשיכת הכובד, מבלי שיהיה משהו שמושך. דבר אינו יוצר אותו, הוא פשוט תוצאה של הסיבוב. משום כך הפיסיקאים מסווגים אותו ככוח מדומה ולא ככוח ממשי כדוגמת כוח הכובד, הכוח האלקטרומגנטי והכוחות הגרעיניים. עם זאת, לצופים המצויים במערכת מסתובבת, הכוח הצנטריפוגלי נדמה ככוח ממשי ביותר, וכך הם מפרשים את השפעתו. ממש כפי שעל פני כדור הארץ אנו חשים תמיד בנוכחותו של כוח הכובד, כך בתוך מערכת מסתובבת חשים תמיד בנוכחותו של הכוח הצנטריפוגלי.



איור 7.33

סיבוב כדור הארץ סביב צירו גורם לכוח צנטריפוגלי המקטין במעט את משקלנו. בדומה לסוס החיצוני על הסחרחרת (קרוסלה), מהירותנו המשיקית, ואיתה נטייתנו להיות מושלכים הלאה מציר הסיבוב, היא הגדולה ביותר כאשר אנו מצויים במרחק הגדול ביותר מצירו של כדור הארץ, בקו המשווה. הכוח הצנטריפוגלי הוא איפוא מרבי עבורנו כשאנו נמצאים בקו המשווה, ושווה לאפס בקטבים, שבהם אין לנו מהירות משיקית. ניתן לומר אם כן, שאם ברצונכם להפחית ממשקלכם, מוטב שתלכו לעבר קו המשווה!



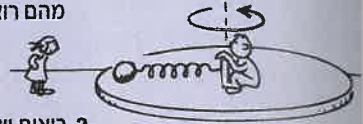
איור 7.34

במערכת הייחוס של החיפושית שבפחית המסתובבת, החיפושית מוחזקת צמודה לקרקעית הפחית על ידי כוח המכוון החוצה ממרכז התנועה המעגלית. החיפושית מכנה כוח זה בשם כוח צנטריפוגלי, ועבורה הוא ממשי ממש כמו כוח הכובד.

* מערכת ייחוס שבה גוף חופשי אינו נמצא בתאוצה נקראת מערכת ייחוס התמדית (אינרציאלית). ניתן לראות שחוקי ניוטון מתקיימים בכל מערכת ייחוס התמדית.

שאלות

1. כדור ברזל כבד מחובר באמצעות קפיץ אל המשטח המסתובב כמתואר באיור. שני צופים, האחד מצוי במערכת המסתובבת והאחרת במנוחה על הקרקע, צופים בתנועתו של הכדור. מי מהם רואה את הכדור נמשך החוצה, תוך שהוא מותח את הקפיץ? מי מהם רואה את הקפיץ מושך את הכדור למסלול מעגלי?



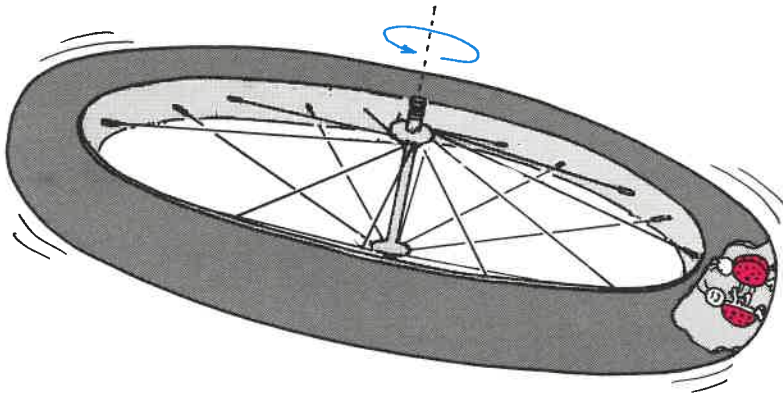
2. רואים שהקפיץ נמתח בשיעור של 5 ס"מ כאשר הכדור נמצא במחצית המרחק בין ציר הסיבוב לבין קצה המשטח העגול. אם מזיזים את נקודת האחיזה של הקפיץ כך שכדור הברזל נמצא בדיוק בקצה המשטח, כלומר למעשה במרחק כפול מן המרכז מכפי שהיה, האם יהיה הקפיץ מתוח יותר מ-5 ס"מ, פחות, או בדיוק 5 ס"מ?

תארו לעצמכם מושבה של חיפושיות החיות בתוך צמיג של אופניים - מן הסוג המתנפח, שיש בו שפע של מרחב מחיה. אם נשליך את הגלגל לאוויר או נפיל אותו ממטוס גבוה בשמים, החיפושיות יימצאו במצב של חוסר משקל. הן ירחפו באופן חופשי כל עוד הגלגל נופל נפילה חופשית. אם עתה נסובב את הגלגל, החיפושיות יחוו את עצמן נלחצות אל צידו החיצוני של פנים הגלגל, הצד הרחוק ממרכז הגלגל. אם נסובב את הגלגל - לא מהר מדי ולא לאט מדי, אלא בדיוק במהירות המתאימה - נוכל לגרום לכך שהחיפושיות יחוו כוח זהה לכוח הכבידה שלו הן מורגלות על פני כדור הארץ. ביצענו הדמיה של כוח הכובד באמצעות כוח צנטריפוגלי. עבור החרקים, הכיוון "למטה" יהיה עתה הכיוון שאותו אנו מכנים הכיוון הרדיאלי - ממרכז הגלגל החוצה (איור 7.35).

הדמיית כובד

איור 7.35

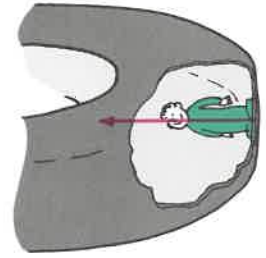
אם הגלגל המסתובב נופל נפילה חופשית, החיפושיות שבתוכו יחוו כוח צנטריפוגלי שידמה בכל לכוח הכובד, זאת אם הגלגל יסתובב בקצב המתאים. לתושבי פנים הגלגל הכיוון "למעלה" הוא הכיוון לעבר מרכז הגלגל והכיוון "למטה" - רדיאלי החוצה.



תשובות:

1. הצופה המצוי במערכת הייחוס של המשטח המסתובב טוען שכוח צנטריפוגלי מושך את הכדור ממרכז המעגל כלפי חוץ וגורם למתיחת הקפיץ. לעומתו הצופה המצוי במערכת הנייחת טוענת כי כוח צנטריפטלי שמפעיל הקפיץ המתוח מושך את הכדור למסלול מעגלי שבו הוא נע עם המשטח המסתובב. (הצופה במערכת הנייחת יכולה להוסיף ולטעון שהתגובה לכוח הצנטריפטלי הזה היא הכוח שהכדור מפעיל על הקפיץ כלפי חוץ. מעניין לציין שהצופה המסתובב אינו יכול להצביע על כוח תגובה לכוח הצנטריפוגלי.)
2. מהירותו הקווית של הכדור תהיה גדולה פי שניים כשמרחקו מציר הסיבוב מוכפל. ככל שהמהירות גדולה יותר כן יגדל הכוח הצנטריפטלי/הצנטריפוגלי (שגם הוא יגדל פי שניים ויגרום למתיחת הקפיץ בשיעור של 10 ס"מ). (בפרק 11 נראה ששיעור המתיחה של קפיץ נמצא ביחס ישר לכוח המופעל עליו.)

בני האדם חיים כיום על משטח פניו החיצוני של כוכב הלכת שלנו וכוח הכובד הוא שמחזיק אותם. כוכב הלכת הכדורי הזה היה ערש המין האנושי, אך לא נישאר בעריסה לנצח. אנו הופכים בהדרגה ליצורים המשוטטים בחלל צופים כי בעתיד אנשים רבים יחיו במושבות ענקיות שתסתובבנה בחלל בעצלתיים, כשכוחות צנטריפוגליים מצמידים אותם אל הדפנות הפנימיים של אותן מושבות חלל. מקומות המחיה הללו יספקו ליושביהם הדמיה של כוח הכובד כדי שהגוף האנושי יוכל לתפקד באורח תקין.



איור 7.36

פעולת הגומלין בין האדם לרצפה, כפי שהיא נראית לאדם השרוי במנוחה מחוץ למערכת המסתובבת. הרצפה לוחצת על רגלי האדם (פעולה) והאדם לוחץ על הרצפה (תגובה). הכוח היחיד על האדם מופעל על ידי הרצפה – כוח צנטריפטלי המכוון אל המרכז.

הנוסעים במעבורות החלל שרויים במצב של "חוסר משקל" מפני שחסר להם כוח התמיכה שהם רגילים לחוש מתחת לרגליהם. אם מצב זה נמשך זמן רב (למשל בזמן שהייה ממושכת במעבורת חלל), הדבר יכול לגרום להיחלשות השרירים ולשינויים מזיקים אחרים בגוף, כמו אובדן סידן מן העצמות. אין זה הכרחי שמתיישבי החלל לעתיד לבוא יסבלו ממצב של חוסר משקל. בדומה לגלגל האופניים המסתובב של החיפושיות, מושבת חלל מסתובבת יכולה לספק ביעילות כוח תמיכה לבני אדם תוך שהיא יוצרת הדמיה נאה של כוח הכבידה. אילו היה מדובר במושבת חלל שקוטר קטן, היה עליה להסתובב בקצב מהיר כדי ליצור הדמיה של תאוצת כבידה בת $1g$. איברים רגישים באוזן הפנימית של האדם חשים בתנועת סיבוב. אף כי דומה שאין כל בעיה בהסתגלות לקצב סיבוב של כסיבוב אחד לדקה (1 סל"ד), אנשים רבים מתקשים להסתגל לקצב סיבוב העולה על 2 או 3 סל"ד (אם כי יש המסתגלים אפילו לקצב של כ-10 סל"ד). כדי ליצור הדמיה של כוח הכובד הרגיל על פני כדור הארץ בקצב סיבוב של 1 סל"ד דרוש מבנה גדול - בעל קוטר של 2 קילומטרים. זהו מבנה ענק בהשוואה למעבורות החלל שבהן משתמשים כיום. קרוב לוודאי ששיקולים כלכליים הם שיכתיבו את גודלה של מושבת החלל הראשונה. סביר להניח שהיא תהיה קטנה ולא תסתובב כלל. תושביה ייאלצו להסתגל לחיים בסביבה של חוסר משקל. מושבות חלל גדולות יותר ומסתובבות יבואו, מן הסתם, בעקבותיה (איור 7.38).

אם המבנה מסתובב כך שהתושבים החיים בצמוד לשוליים החיצוניים, מן הצד הפנימי, חשים ב- $1g$, הרי שבחצי המרחק אל הציר הם יחושו ב- $0.5g$, ואילו על ציר הסיבוב עצמו הם יחושו תחושה של חוסר משקל, כלומר $0g$. המגוון של ערכי g חלקיים האפשריים במושבת החלל המסתובבת נושא בחובו הבטחה לסביבה שונה בתכלית מזו המוכרת לנו מכדור הארץ. נוכל לחזות בהופעת בלט ב- $0.5g$, בצלילה ובתרגילי לוליינות ב- $0.2g$, ואף במצבי g נמוכים עוד יותר. צפויים לנו משחקי כדורגל בשלושה ממדים וענפי ספורט חדשים שאיש עוד לא חשב עליהם, במצבי g נמוכים ביותר.

איור 7.37

כפי שהדברים נראים מתוך המערכת המסתובבת, נוסף על פעולת הגומלין שבין הרצפה לרגליים, ישנו כוח צנטריפוגלי הפועל על האדם במרכז המסה של גופו. הוא נדמה ממשי ככוח הכובד. עם זאת, שלא ככוח הכובד, אין כוח תגובה כנגדו - אין שום גורם שעליו האדם מפעיל כוח תגובה. הכוח הצנטריפוגלי אינו צד אחד של פעולת גומלין, אלא נובע מן הסיבוב. לכן הוא נקרא כוח מדומה.





איור 7.38

הצצה אל תוך מושבת החלל כפי שהיא מצטיירת בדמיונו של אמן. במושבה מעין זו יחיו אלפי בני אדם.

שאלה

אילו הסתובב כדור הארץ מהר יותר סביב צירו, משקלנו היה נמוך יותר. אילו חיינו במושבת חלל מסתובבת וזו היתה מגדילה את קצב הסיבוב שלה, "משקלנו" היה גדל. הסבירו מדוע הגדלת קצב הסיבוב מביאה לתוצאות הפוכות בשני המקרים.

תנע זוויתי

ממש כפי שלמסה הנעה על קו ישר יש תנע קווי, כך למסה שנעה במסלול מעגלי, או מסתובבת סביב ציר, יש תנע זוויתי. **התנע הזוויתי** הוא מדד לשיעור התנועה הסיבובית של הגוף. מושבת חלל המקיפה את השמש, אבן הקשורה לקצה חוט ומסתובבת במעגל, והאלקטרונים הזעירים הסובבים סחור-סחור סביב גרעין האטום - לכל אלה יש תנע זוויתי*.

התנע הזוויתי מוגדר כמכפלת מומנט ההתמדה במהירות הסיבוב:

$$\text{תנע זוויתי} = \text{מומנט התמדה} \times \text{מהירות הסיבוב}$$

גודל זה מקביל לתנע הקווי:

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

תשובה:

אנו נמצאים בצידו החיצוני של כדור הארץ המסתובב, אך נימצא בצידה הפנימי של מושבת החלל המסתובבת. סיבוב מהיר יותר בצידו החיצוני של כדור הארץ נוטה להשליך אותנו הלאה ממאזני שקילה שעליהם אנו עומדים, ולכן הם יורו משקל מופחת, בעוד שהגדלת קצב הסיבוב נוטה דווקא לדחוק אותנו אל המאזניים שבתוך מושבת החלל ובכך לגרום להם להורות משקל גבוה יותר. נדגיש שאין זה עניין "סכני" של המספר שיראו המאזניים - גם הלחצים הפנימיים בין איברי הגוף יגדלו בהתאם, כך שהגוף יחוש ב"משקל" הגדול.

* התנע הזוויתי הוא גודל וקטורי; יש לו גודל וכיוון. כשמייחסים כיוון למהירות הסיבוב (לעיתים קוראים לה המהירות הזוויתית) אפשר לראות גם אותה כווקטור, שגודלו הוא גודל מהירות הסיבוב (נהוג לסמנו באות היוונית ω). מוסכם שכיווניהם של וקטור התנע הזוויתי ווקטור מהירות הסיבוב שווים ומונחים על ציר הסיבוב. אם תבחרו בלימודי פיסיקה מתקדמים יותר תמצאו שמהירות סיבוב נמדדת ביחידות של רדיאן בשנייה (רדי/ש). 0.1 רדי/ש שווה בקירוב ל-1 סל"ד.

בדומה לתנע הקווי, גם התנע הזוויתי הוא גודל וקטורי שיש לו גם שיעור וגם כיוון. בספר זה לא נדון באופיו הווקטורי של התנע הזוויתי (ואף לא בזה של מומנט הכוח, שגם הוא וקטור), אלא כאשר נרצה להעריך את פעולתו המרשימה של הגירוסקופ. גלגל האופניים המסתובב באיור 7.39 מדגים מה שקורה כאשר מומנט כוח שנגרם על ידי כוח הכובד של כדור הארץ פועל במגמה לשנות את כיוונו של וקטור התנע הזוויתי של הגלגל (המכוון לאורך ציר הגלגל). משיכת הכובד הפועלת להפלת הגלגל ולשינוי ציר הסיבוב שלו גורמת לו לתנועת נקיפה (פרצסיה, תנועה הצידה) במסלול מעגלי מסביב לציר אנכי. עליכם לנסות זאת במו ידיכם כדי להאמין. קרוב לוודאי שתבינו את התופעה במלואה רק כעבור זמן מה.



איור 7.39

התנע הזוויתי שומר על מצבו המאוזן של ציר הגלגל כאשר פועל עליו מומנט כוח שמקורו בכוח הכובד של כדור הארץ. במקום להפיל את הגלגל, מומנט הכוח גורם לו לנוע בתנועת נקיפה איטית מסביב לציר אנכי.

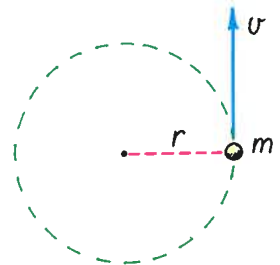
במקרה של גוף שהוא קטן ביחס למרחקו מציר הסיבוב, כדוגמת פחית מסתובבת הקשורה לחוט ארוך או כוכב לכת המסתובב סביב השמש, אפשר לבטא את התנע הזוויתי פשוט כמכפלת התנע הקווי שלו, mv , במרחקו מן הציר, r (איור 7.40). ובנוסחה:

$$\text{תנע זוויתי} = mvr$$

כשם שדרוש כוח חיצוני שקול כדי לשנות את התנע הקווי של גוף, כך דרוש מומנט כוח חיצוני שקול לשינוי התנע הזוויתי של גוף. כעת ננסה מחדש, במונחים של תנע זוויתי, את החוק הראשון של ניוטון, חוק ההתמדה, עבור גופים מסתובבים:

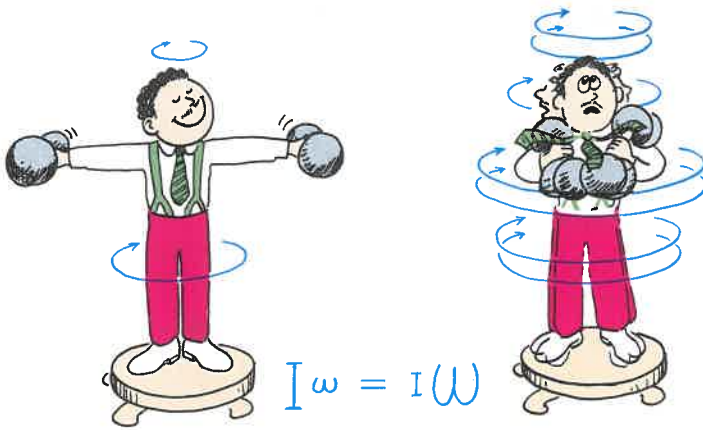
התנע הזוויתי של גוף (או קבוצה של גופים) נשמר, אלא אם כן פועל עליו (או עליהם) מומנט כוח חיצוני שקול.

כולנו יודעים שקל יותר לשמור על שיווי המשקל על אופניים השרויים בתנועה מאשר על אופניים העומדים במקום. לגלגלים המסתובבים יש תנע זוויתי. הטיית הגלגל בכיוון נפילה פירושה שינוי בתנע הזוויתי שלו, ולשם כך דרוש מומנט כוח גדול יותר מאשר להטיית גלגל השרוי במנוחה, שהוא חסר תנע זוויתי.



איור 7.40

לגוף בעל מסה מרוכזת m , המסתובב במהירות v במסלול מעגלי שרדיוסו r , יש תנע זוויתי ששיעורו mvr .



איור 7.41
 שימור התנע הזוויתי.
 כשהאיש מכנס את ידיו ואת המשקולות המסתובבות לעבר גופו, הוא מקטין את מומנט ההתמדה, ובהתאם לכך גדלה מהירות הסיבוב שלו. $I - \omega$ מומנט ההתמדה; ω - מהירות זוויתית (סיבובית).

שימור התנע הזוויתי

בדיוק כשם שהתנע הקווי של כל מערכת נשמר אם אין כוח חיצוני שקול הפועל על המערכת, כך גם התנע הזוויתי נשמר במערכות מסתובבות. אם אין מומנט כוח חיצוני שקול שפועל על המערכת המסתובבת, התנע הזוויתי של המערכת נשאר קבוע. פירוש הדבר הוא שערכה של מכפלת מומנט ההתמדה במהירות הסיבוב בזמן מסוים יישמר גם בכל זמן אחר.

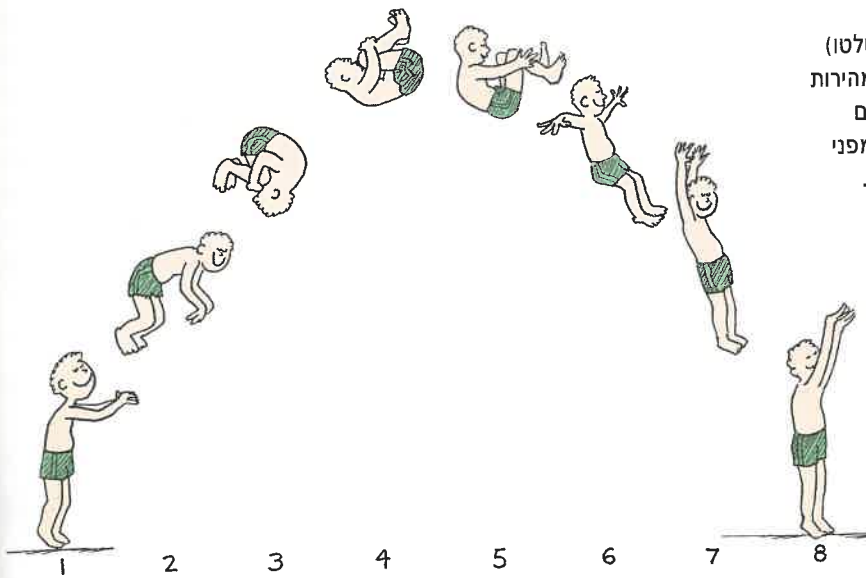
דוגמה מעניינת המדגימה את שימור התנע הזוויתי מתוארת באיור 7.41. האיש עומד על משטח מסתובב בעל חיכוך נמוך ובזרועותיו הפשוטות זוג משקולות. במצב זה מומנט ההתמדה שלו גדול יחסית, במידה רבה בשל המשקולות המרוחקות מציר הסיבוב. האיש מסתובב באיטיות, והתנע הזוויתי שלו שווה למכפלת מומנט ההתמדה (I) במהירות הסיבוב (ω). ברגע מסוים הוא מכנס את ידיו, שבהן המשקולות, אל גופו; מומנט ההתמדה של הגוף והמשקולות קטן במידה ניכרת. והתוצאה? מהירות הסיבוב שלו גדלה! האיש המסתובב חש בתופעה מוזרה לכאורה, שכן הגדלת המהירות מתרחשת כאילו באורח מסתורי. למעשה זו פיסיקה פשוטה! התופעה מנוצלת באופן מרהיב כאשר מחליקה על קרח מסתחררת במקום כשידיה ולעיתים גם אחת מרגליה פשוטות לצדדים, וברגע מסוים היא אוספת את ידיה ואת רגלה ובכך גורמת להגדלה פתאומית במהירות הסחרור. בכל מקרה שבו גוף מסתובב מתכווץ, מהירות הסיבוב שלו גדלה.

בדומה לכך, כשמתעמל מסתחרר לו בחופשיות בהעדר מומנט כוח בלתי מאוזן הפועל על גופו, התנע הזוויתי של גופו אינו משתנה (איור 7.42). עם זאת, הוא יכול לשנות את מהירות הסיבוב, פשוט בכך שהוא משנה את מומנט ההתמדה שלו. הוא עושה זאת באמצעות הזזת איבר כלשהו של גופו לעבר ציר הסיבוב או ממנו והלאה.

אם חתול נופל במהופך, הוא מסוגל להתהפך ולנחות על רגליו, גם אם בתחילה אין לו כל תנע זוויתי. הוא מסוגל להתפתל ולהסתובב בתנע זוויתי אפס תוך כדי סיבוב חלקים שונים של הגוף במגמות מנוגדות. במהלך הנפילה משנה החתול את מומנט ההתמדה באמצעות הזזת האיברים והזנב. החתול מסובב את הראש והזנב בכיוון אחד ואת הרגליים בכיוון המנוגד, באופן שהרגליים מופנות כלפי מטה ברגע הפגיעה בקרקע.

איור 7.42

במהלך תרגיל סבב (סלטו) קדמי, ניתן לכוון את מהירות הסחרור בעזרת שינויים בהתמדה הסיבובית, מפני שהתנע הזוויתי נשמר.



במהלך התמרון כולו התנע הזוויתי הכולל של החתול נותר אפס (איור 7.43). עם השלמתו, החתול שרוי במנוחה. תמרון זה מאפשר סיבוב של הגוף בזווית מבלי לגרום לתנועת סיבוב מתמשכת. היווצרות תנועה כזאת היתה מפירה את שימור התנע הזוויתי.

גם בני אדם יכולים לבצע פיתולים דומים ללא קושי מיוחד, אף כי לא בזריזות שבה עושה זאת החתול. אסטרונוטים למדו לבצע סיבובים בתנע זוויתי אפס כדי לכוון את גופם בכיוון הרצוי בעת שהם מרחפים חופשית בחלל. אפשר לראות את חוק שימור התנע הזוויתי בפעולה בתנועת כוכבי הלכת ובצורתן של הגלקסיות. חוק זה יהיה עובדת חיים יומיומית לתושבי מושבות החלל המסתובבות בדרכם אל מרחבי היקום.

עובדה מפליאה שאנו למדים מחוק שימור התנע היא שהירח הולך ומתרחק מכדור הארץ. הדבר נובע מכך שקצב הסיבוב היומי של כדור הארץ סביב צירו הולך ופוחת עקב החיכוך של מי האוקיינוסים בקרקעית הים - ממש כפי שקטנה מהירותה של מכונת כשמפעילים את הבלמים. הקטנה זאת בתנע הזוויתי של כדור הארץ מלווה בהגדלה שווה של התנע הזוויתי של הירח במסלולו סביב כדור הארץ. התוצאה של הגדלה זו בתנע הזוויתי היא הגדלת המרחק של הירח מכדור הארץ והקטנת מהירותו. שיעור ההתרחקות של הירח מכדור הארץ הוא כרבע סנטימטר בכל סיבוב. האם הבחנתם לאחרונה בכך שהירח מתרחק מאיתנו? גם אם לא, בכל פעם שחוזרים ורואים ירח מלא, הוא רחוק מאיתנו עוד ברבע סנטימטר.



איור 7.43

תצלום דולג-זמן של חתול נופל.

שאלות חזרה

1. מדוע חשוב ללמוד את הפרקים 3 ו-4 לפני קריאת פרק זה?

מומנט ההתמדה

2. ההתמדה תלויה במסה; מומנט ההתמדה תלוי במסה ובעוד גורם אחד. מהו?

3. האם שונה מומנט ההתמדה של גוף עבור צירי סיבוב שונים?

4. מדוע אנשים בעלי רגליים ארוכות צועדים לרוב בפסיעות איטיות יותר מאנשים בעלי רגליים קצרות?

5. לאיזה גוף תהיה תאוצה גדולה יותר בעת גלגול במדרון, לחישוק או לדיסקה מלאה?

מומנט כוח

6. השוו את ההשפעה של כוח המופעל על גוף לזו של מומנט כוח המופעל עליו.

7. למה הכוונה בביטוי "זרוע הכוח" של מומנט כוח?

8. באיזה כיוון יש להפעיל כוח כדי ליצור מומנט כוח מרבי?

9. מהו היחס בין מומנטי הכוח על גוף במגמת השעון לאלה שנגד מגמת השעון בעת שהגוף מצוי בשיווי משקל?

מרכז המסה ומרכז הכובד

10. אם תשליכו מקל לאוויר, הוא ייראה מיטלטל כאילו נע במסלול אקראי לחלוטין. האומנם?

11. היכן נמצא מרכז המסה של כדור טניס? היכן מרכז הכובד שלו? היכן נמצאים שני המרכזים במחבת כדור בסיס (בייסבול)?

איתור מרכז הכובד

12. אם תיתלו במנוחה כשאתם נאחזים בידים בחבל אנכי, היכן יימצא מרכז הכובד שלכם ביחס לחבל?

13. היכן נמצא מרכז המסה של קופסת נעליים ריקה?

יציבות

14. מה הקשר בין מרכז הכובד לבין בסיס התמיכה בגוף המצוי בשיווי משקל יציב?

15. עד כמה אפשר להטות גוף מבלי שייפול על צידו?

תקציר מונחים

מומנט ההתמדה (התמדה סיבובית) נטייתו של גוף להתנגד לכל שינוי בתנועתו הסיבובית. אם הוא במנוחה, הוא נוטה להישאר במצב המנוחה; אם הוא מסתובב הוא נוטה להמשיך ולהסתובב, אלא אם כן יפעל עליו מומנט כוח חיצוני שקול.

מומנט כוח המכפלה של כוח באורכה של זרוע הכוח; זהו הגודל שנוטה לגרום לתנועת סיבוב.

מרכז המסה המקום הממוצע של המסה או נקודה מסוימת בגוף שאפשר לראות כאילו כל מסתו מרוכזת בה.

מרכז הכובד המקום הממוצע של המשקל או נקודה מסוימת בגוף שאפשר לראות כאילו בה פועל כוח הכובד. לרוב זו אותה נקודה כמרכז המסה.

שיווי משקל מצבו של גוף כאשר אין כוח שקול או מומנט כוח שקול שפועלים עליו. גוף בשיווי משקל עשוי להיות במנוחה או לנוע במהירות קבועה; כלומר, הוא אינו נתון בתאוצה.

הכוח הצנטריפטלי כוח המכוון אל המרכז, הגורם לגוף לנוע במסלול מעגלי.

הכוח הצנטריפוגלי כוח הפונה כלפי חוץ, הנובע מתנועת הסיבוב. במערכת ייחוס קתמדי, זהו כוח מדומה במובן זה שאין הוא פועל על הגוף המסתובב אלא על מה שהפעיל את הכוח הצנטריפטלי; זו התגובה לכוח הצנטריפטלי. במערכת ייחוס מסתובבת פועל כוח זה על הגוף המסתובב, והוא מדומה במובן זה שהוא אינו חלק מפעולת גומלין (אינטראקציה) בין הגוף ובין עצם אחר, בעל מסה או מטען למשל, אלא הוא כוח בפני עצמו הנובע אך ורק מתנועת הסיבוב; אין כנגדו כוח תגובה.

תנע זוויתי מדד לשיעור הסיבוב של גוף ביחס לציר מסוים; ליתר דיוק, מכפלת מומנט ההתמדה של גוף במהירות הסיבוב שלו. לגבי גוף שהוא קטן ביחס למרחק מציר הסיבוב, התנע הזוויתי שווה למכפלת המסה, המהירות והמרחק מציר הסיבוב.

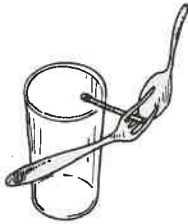
שימור התנע הזוויתי כשכל מומנט כוח חיצוני אינו פועל על גוף או מערכת גופים, לא יחול כל שינוי בתנע הזוויתי שלהם. לכן, התנע הזוויתי לפני אירוע שבו מעורבים רק מומנטי כוח פנימיים שווה לתנע הזוויתי אחרי האירוע.

שלה, בכמה יגדל התנע הזוויתי שלה? בכמה תגדל מהירות הסיבוב שלה? (מדוע אין התשובות זהות?)

16. מדוע אין המגדל הנטוי של פיזה מתמוטט?

17. השתמשו במונחים: מרכז הכובד, בסיס תמיכה ומומנט כוח כדי להסביר מדוע אי אפשר לעמוד כשהעקבים והגב צמודים לקיר ובמצב זה להתכופף, לגעת בקצות בהונות הרגליים ולחזור ולהזדקף?

מטלות בית



1. הדקו זה לזה מזלג, כף וגפרור מעץ כמתואר באיור. המתקן יתאזן בצורה נאה - על שולי כוס זכוכית למשל. הסיבה לכך היא שמרכז הכובד "תלוי" מתחת לנקודת המשען.

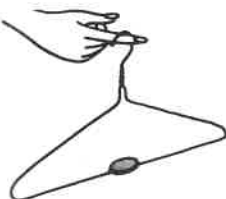
2. עימדו כשגבכם ועקביכם צמודים לקיר ונסו להתכופף ולגעת בקצות אצבעות הרגליים. תגלו שעליכם להתרחק מהקיר אם רצונכם לעשות זאת בלי ליפול קדימה. בידקו את מרחק העקבים מן הקיר שזקוקים לו גברים ואת זה שזקוקות לו נשים כדי להתכופף בלי ליפול. איזה משני המינים יכול לגעת בקצות האצבעות כשעקביו קרובים יותר אל הקיר? בממוצע, וביחס לגובה הגוף, לאיזה משני המינים מרכז כובד נמוך יותר?

3. בקשו מחבר או מחברה לעמוד כשפניהם אל הקיר וקצות אצבעות רגליהם נוגעות בו. עתה בקשו מהם להרים את העקבים ולעמוד על אצבעות הרגליים מבלי ליפול אחורה. הם לא יצליחו בכך. הסבירו מדוע.



4. הניחו סרגל ארוך למדי על שתי אצבעות מושטות כמתואר באיור. הזיזו את האצבעות באיטיות וקרבו אותן זו לזו. באיזה חלק של הסרגל ייפגשו האצבעות? התוכלו להסביר מדוע הדבר קורה תמיד, ללא תלות במקום שבו היו האצבעות בהתחלה?

5. סובבו במהירות דלי עם מים כשאתם אווזים בו בזרוע מושטת. המים לא יישפכו. מדוע?



6. תלו קולב בגדים עשוי תיל על אצבע. אזנו בזהירות מטבע על המוט התחתון של הקולב מתחת לוו התלייה. ייתכן שתצטרכו לרדד מעט

הכוח הצנטריפטלי

18. כשמסובבים פחית הקשורה לקצהו של חוט במסלול מעגלי, מהו כיוונו של הכוח המופעל על הפחית?

19. להיכן פונה הכוח המופעל על הכבסים בשעת מחזור הסחיטה של מכונת הכביסה, כלפי פנים או כלפי חוץ?

כוח צנטריפוגלי

20. נניח שאתם מסובבים פחית הקשורה לחוט במסלול מעגלי, והחוט נקרע לפתע. מה גורם לפחית לנוע לאורך קו ישר - כוח צנטריפטלי, כוח צנטריפוגלי, או שום כוח שהוא? איזה חוק פיסיקלי תומך בתשובתך?

21. אתם נוסעים במכונית ללא חגורת בטיחות, ובעת פנייתך אתם מחליקים על המושב לעבר דלת המכונית. מהו הגורם האחראי לכך - כוח צנטריפטלי, כוח צנטריפוגלי, או משהו אחר? נמקו את תשובתכם.

הכוח הצנטריפוגלי במערכת מסתובבת

22. זהו את צמד הפעולה והתגובה של הכוחות בפעולה הגומלין שבין החיפושית לבין הפחית באיורים 7.32 ו-7.34.

23. מדוע נקרא הכוח הצנטריפוגלי במערכת מסתובבת "כוח מדומה"?

הדמיית כוח הכובד

24. כיצד ניתן ליצור הדמיה של כוח הכובד בתחנת חלל המקיפה את כדור הארץ?

25. מדוע סביר להניח שתחנות חלל שבהן תבצע הדמיה של כוח הכובד תהיינה גדולות מאוד?

26. כיצד ישתנה ערכו של g במרחקים שונים מן הציר של תחנת חלל מסתובבת?

תנע זוויתי

27. מהו ההבדל בין תנע קווי לתנע זוויתי?

28. מהו חוק ההתמדה לגבי תנע זוויתי?

שימור התנע הזוויתי

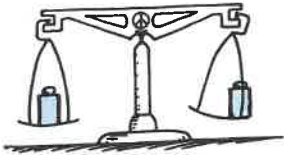
29. למה מתכוונים כשאומרים שהתנע הזוויתי נשמר?

30. אם מחליקה על קרח המסתובבת סביב צירה אוספת את זריעותיה ובכך מקטינה במחצית את מומנט ההתמדה

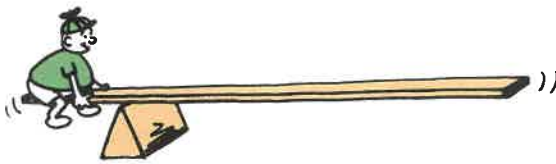
8. מדוע המושבים האמצעיים הם הנוחים ביותר באוטובוס הנוסע בכביש משובש?
9. לוליין הולך על חבל כשהוא אחוז במוט ארוך. הסבירו מדוע עדיף ללוליין שקצות המוט יהיו מכופפים כלפי מטה.



10. מדוע מרכז המסה של מערכת השמש אינו נמצא במרכז הגיאומטרי של השמש?
11. מדוע אפשר ללמוד מתנועתו הגלית של כוכב בודד על כך שלכוכב יש לוויין או מערכת לוויינים?
12. מדוע צריך להתכופף קדימה כשנושאים משא כבד על הגב?
13. מדוע קל יותר לשאת מים בשני דליים, אחד בכל יד, מאשר לשאת אותה כמות מים בדלי אחד?
14. האם צריך להציב את המשקולות באמצע הכפות במאזני זרועות לביצוע שקילה מדויקת? הסבירו!



15. אף אחד מהילדים במגרש המשחקים אינו רוצה לשחק עם הילד הכשרוני, לכן הוא בנה לעצמו נדנדה שבה הוא יכול לשחק עם עצמו. כיצד בנויה הנדנדה?



16. בעזרת המושגים מומנט כוח ומרכז הכובד, הסבירו מדוע כדור מתגלגל במורד גבעה.
17. לעיתים כשבוטעים בכדורגל הוא עף מבלי להסתובב, ובמקרים אחרים הוא מסתחרר באוויר במעופו. בכל אחד מן המקרים, כיצד בעטו בכדור ביחס למרכז המסה שלו?
18. כיצד יש לערום את שלוש הלבנים באופן שהעליונה תהיה מוסטת במידה מרבית ביחס לתחתונה? אם נערום אותן, למשל, כמוצע בקו המקוטע, יתקבל מצב לא יציב והלבנים תיפולנה. (רמז: התחילו בלבנה העליונה והמשיכו

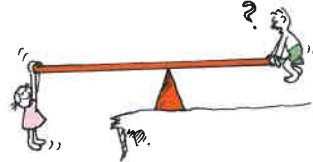
את התיל התחתון בפטיש או ליצור עליו משטח קטן בעזרת סרט דביק. תתפלאו לגלות עד כמה מעט תרגול יידרש עד שתצליחו - בתחילה לנדנד את הקולב עם המטבע המאוזן קדימה ואחורה, ואחר כך לסובב אותו סיבוב מלא. הכוח הצנטריפטלי מחזיק את המטבע במקומו.

תרגילים

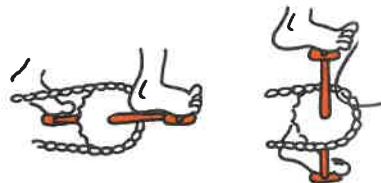
1. הגלגלים הקדמיים במכונית המרוץ ממוקמים הרחק בחזית המכונית כדי למנוע את הזדקרות החרטום בעת תאוצה. מהו העיקרון הפיסיקלי המנחה עיצוב זה?



2. מה יתגלגל מהר יותר במורד הגבעה - גליל מלא או כדור מלא? כדור חלול? נמקו את תשובותיכם.
3. מדוע יש לאוטובוסים ולמשאיות כבדות הגה גדול?
4. האם יכול גוף להסתובב מבלי שיפעל עליו מומנט כוח? נמקו את תשובתכם והביאו דוגמה.
5. האם ישתנה מומנט הכוח הכולל אם הילדה על הנדנדה תעמוד עליה או תיתלה בצידה במקום לשבת? (האם ישתנו המשקל או זרוע הכוח?)



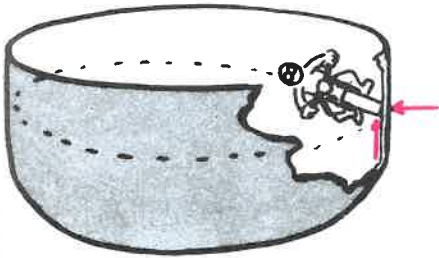
6. בעזרת איזוה מכשיר קל יותר לחלץ מכסה תקוע של פחית צבע - במברג בעל ידית עבה או במברג בעל ידית ארוכה? איזוה מברג עדיף כדי לסובב בורג תקוע? מדוע?
7. כשאתם מדושים בדוושות האופניים, מומנט הכוח המרבי נוצר כאשר זרועות הדוושות נמצאות במצב אופקי, ולמעשה כל מומנט כוח אינו נוצר כשהן במצב האנכי. הסבירו.



לזו שאליה "כיוונו אותו". מדוע? (רמז: חישבו על חיפושית הקופצת ממרכזו של תקליט מסתובב אל שוליו החיצוניים.)

26. אילו קנייתם כמות מסוימת של זהב במצרים העילית ושקלתם אותה בדיוק רב במאזני קפיץ, האם היה המשקל של אותה כמות זהב גדול יותר, קטן יותר או שווה לזה שהיה מתקבל אילו שקלתם אותה באותם מאזניים בצפון נורביגיה? נמקו!

27. רוכב האופנוע מסוגל לרכוב על "קיר המוות" המאונך שבתמונה. החיכוך שבין הקיר לצמיגים (המסומן בחץ האנכי) מאזן את משקלם של הרוכב והאופנוע. האם הכוח הפועל על האופנוע הוא כוח צנטריפטלי או כוח צנטריפוגלי? ומהו הכוח הפועל על הקיר?



28. חבר אחד טוען שלוויין הסובב סביב כדור הארץ במסלול מעגלי אינו שרוי בתאוצה מכיוון שגודל מהירותו אינו משתנה. חבר אחר טוען לעומתו שהלוויין אכן מואץ, כפי שמוכיח הכוח הצנטריפטלי שמפעילה משיכת הכובד של כדור הארץ. מה דעתך?

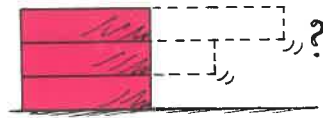
29. האם כוח צנטריפטלי שפועל על גוף המסתובב במסלול מעגלי עובד עבודה על הגוף? מהו ההסבר לכך ואיזו הוכחה אפשר להביא לתשובתכם?

30. שחקן כדורסל רוצה לאזן כדור על קצה אצבעו. האם יצליח ביתר קלות כשהכדור מסתובב או כשהכדור נייח? איזה עיקרון בפיסיקה תומך בתשובה?

31. אתם נמצאים במרכזו של משטח (קרוסלה) המסתובב באופן חופשי (ללא מנוע) בגן שעשועים, וזוחלים לעבר הקצה החיצוני של המשטח. האם יגדל קצב הסיבוב של המשטח? האם יקטן? או שמא יישאר ללא שינוי? אילו עקרונות בפיסיקה תומכים בתשובתכם?

32. כמות גדולה של אדמה וחול נסחפת במורד הנילוס

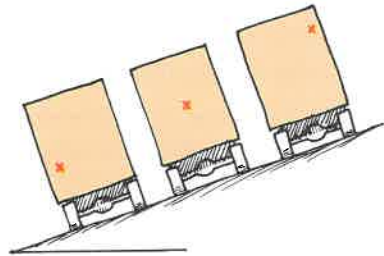
כלפי מטה. בכל משטח מגע, אסור שמרכז הכובד של הלבנים שמלמעלה יחרוג מקצה הלבנה התומכת.)



19. מדוע מסוכן לפתוח את המגירות העליונות של ארון מגירות עמוס שאינו מחובר לקרקע?

20. תארו את היציבות היחסית של שלושת העצמים שבאיור 7.21 במונחים של עבודה ואנרגיה פוטנציאלית.

21. מרכזי הכובד של שלוש המשאיות החונות במורד גבעה מסומנים באיור. איזו (אילו) מן המשאיות תתהפך (תתהפכנה)?



22. מדוע קל יותר להתרומם ממצב כריעה כשהידיים מושטות קדימה? מדוע קשה יותר לעשות זאת כשהזרועות נמצאות מאחורי העורף?

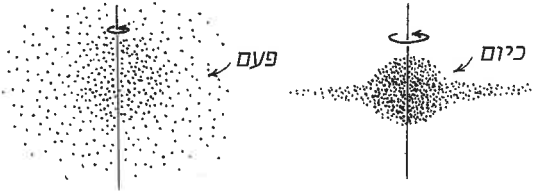
23. על גבי לוח עץ ארוך המאוזן על נקודת משען, בדומה לנדנדה, מונחים כדור גולף וכדור ביליארד, שמשתו גדולה יותר, וביניהם קפיץ מכווץ. משחררים את הקפיץ והכדורים מתרחקים זה מזה. האם ייטה הלוח במגמת השעון? נגד מגמת השעון? או שמא יישאר מאוזן בזמן תנועת הכדורים החוצה? באילו עקרונות השתמשת בתשובתך?



24. ערכו של g על פני כדור הארץ הוא $9.8 \text{ מ}^2/\text{ש}^2$ בקירוב. כיצד היה ערך זה משתנה אילו הסתובב כדור הארץ מהר יותר סביב צירו?

25. כשירורים פגז של תותח ארוך טווח מקו רוחב צפוני (אר דרומי) לכיוון קו המשווה, הוא פוגע בנקודה הנמצאת מערבת

38. החוקרים סבורים שהגלקסיה שלנו, שביל החלב, נוצרה מענן עצום של גז וחלקיקים. הענן המקורי היה גדול בהרבה מגודלה הנוכחי של הגלקסיה. באיור נראה הענן המקורי והגלקסיה כפי שהיא נראית כיום (במבט מהצד). הסבירו כיצד תורמים חוק הכבידה ושימור התנע הזוויתי לצורתה הנוכחית של הגלקסיה, ומדוע היא מסתובבת כיום מהר יותר מבזמן שבו היתה ענן כדורי גדול.



ושוקעת ביס התיכון. כיצד משפיעה עובדה זו על אורך היממה? (רמז: התייחסו לאיור 7.41).

33. אילו היתה כיפת הקרח שבקוטבי כדור הארץ ניתכת, כיצד היה הדבר משפיע על אורך היממה?

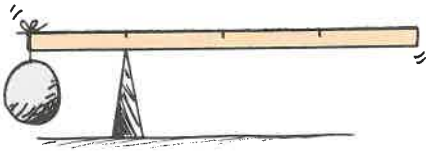
34. ככל שנבנים יותר גורדי שחקים על פני כדור הארץ, האם היממה נוטה להתארך או להתקצר? על אילו עקרונות בפיסיקה מבוססת התשובה? האם גודלה של תופעה זאת משמעותי? מדוע?

35. כיצד היה משתנה אורך היממה אילו החלו כל תושבי כדור הארץ לצעוד מזרחה ללא הפסק? מה היה קורה אילו הפסיקו לצעוד?

36. רכבת צעצוע נמצאת במנוחה על מסילה המוצמדת לגלגל אופניים החופשי להסתובב. כיצד יגיב הגלגל אם הרכבת תתחיל לנוע במגמת השעון? אם תיסע אחורה? האם ישתנה התנע הזוויתי של המערכת רכבת-גלגל במהלך תרגילים אלה? כיצד תלויות התנועות המתקבלות במסות היחסיות של הגלגל והרכבת?

בעיות

1. מסתה של האבן 1 ק"ג. מהי המסה של הסרגל אם הוא מאוזן בכוח תומך הפועל בנקודת הרבע של אורכו?



2. מושבת חלל מסתובבת בקצב המתאים המעניק לתושביה תאוצה נוחה של $1g$, התאוצה הרגילה על פני כדור הארץ. אם המושבה תתחיל להסתובב במהירות זוויתית כפולה, בכמה יגדל "המשקל" של שוכני המושבה?

3. חישוב על תחנת חלל קטנה מדי הבנויה מגליל מסתובב שהרדיוס שלו 4 מ'. אם גובהו של אדם העומד בתחנה הוא 2 מ' ורגליו נמצאות בתאוצת "כובד" של $1g$, מהו שיעורו של כוח g בגובה ראשו של האדם? (מדוע ממליצים המומחים על מושבות חלל גדולות מאוד?)

4. אם רוצים שהשינוי ב- g בין ראשו של אדם לרגליו יהיה קטן מ- $\frac{1}{100}g$, מה צריך להיות הרדיוס המזערי של מושבת החלל ביחס לגובהו של האדם?



37. במסוק טיפוסי בעל רוטור ראשי יחיד, מותקן רוטור שני קטן על הזנב. מדוע? מה יקרה אם הרוטור הקטן יחדל לפעול בשעת טיסה?

