

כבידה



ה אלפי שנים צופים בני אדם בשמי הלילה ותוהים על טבעם של הכוכבים. בזמנים שבהם העיניים היו המכשיר היחיד לביצוע תצפיות, איש לא העלה על דעתו שמספרם של הכוכבים גדול יותר ממספר גרגרי החול המצויים בכל המדבריות והחופים אשר על פני כדור הארץ. הקדמונים ראו את כדור הארץ כמרכזו של היקום וסברו כי הכוכבים קבועים בכדור בדולח גדול הסובב סביבו. הם הבחינו בהבדל שבין כוכבי הלכת לכוכבי השבת*, וסברו כי כוכבי הלכת קבועים בכדורים פנימיים, או כפי שכונו לפנינו בעברית – "גלגלים", שתנועותיהם מסובכות. היו שהאמינו כי התנועות המסובכות של גלגלי כוכבי הלכת ומיקומם משפיעים על האירועים המתרחשים בכדור הארץ. במאה ה-16 גילה קופרניקוס כי תנועות כוכבי הלכת פשוטות הרבה יותר אם מניחים שהם סובבים סביב השמש ולא סביב כדור הארץ. השקפתו של קופרניקוס היתה מהפכנית; ויכוחים גדולים התעוררו סביב השאלה האם אכן סובבים כוכבי הלכת סביב השמש.

האסטרונום הדני טיכו בראהה נקט גישה שונה בתכלית מזו שהיתה מקובלת על יתר בני זמנו. הוא סבר שבמקום להמשיך ולהעלות טיעונים פילוסופיים שונים ומשונים, עדיף למדוד בדיוק רב את מקומותיהם של כוכבי הלכת בשמים ולשרטט את תנועותיהם. היה זה רעיון נפלא - הרעיון שבעת שמנסחים תיאוריות, חשוב להשקיע את עיקר המאמץ באיסוף עובדות ובעריכת מדידות זהירות, ולא להסתפק בוויכוחים על השערות בלתי מבוססות. נאמן לרעיון שהגה, הוא בנה את מצפה הכוכבים הראשון. אמנם הטלסקופ טרם הומצא, אך בראהה בנה קוודראנט ענק (בעברית: רובע) - מכשיר דמוי מד-זווית העשוי פלז - ומדד את תנועותיהם של כוכבי הלכת בדיוק כה רב, שעד

* כיום אנו מכנים אותם, על פי טבעם, גם "שמשות".

היום עושים שימוש בתוצאות מדידותיו. הוא רשם את מצבם של כוכבי הלכת במשך 20 שנה, בדיוק של דקת קשת אחת*. זמן קצר לפני מותו הפקיד בראהה את משימת העריכה של טבלאות כוכבי הלכת שלו והוצאתן לאור בידי אחד מעוזריו-עמיתיו, יוהאנס קפלר. על יסוד הנתונים האלה גילה קפלר כמה חוקים פשוטים ויסודיים הנוגעים לתנועת כוכבי הלכת.

כיום אנו יודעים מה שבראהה וקפלר לא ידעו - שכוכבי הלכת למעשה "נופלים" ללא הרף מסביב לשמש (בדומה ללווייני כדור הארץ "הנופלים" ללא הפסק מסביב לכדור הארץ, כפי שהסברנו בקצרה בפרק 3). קפלר, שרצה לחקור את תנועתם של כוכבי הלכת, נטל על עצמו משימה עצומה - לתרגם את תצפיותיו הארציות של בראהה למסלולים, כפי שהיה רואה אותם צופה העומד מחוץ למערכת השמש. מלכתחילה היה משוכנע כי כוכבי הלכת נעים במעגלים מושלמים סביב השמש, אך ביטחונו בכך התנפץ לרסיסים בעקבות שנים של מאמצים; הוא גילה כי לכוכבי הלכת מסלולים שצורתם אליפטית.

עוד גילה קפלר כי כוכבי הלכת אינם מקיפים את השמש במהירות קבועה, אלא נעים מהר יותר כשהם קרובים לשמש ולאט יותר כשהם רחוקים ממנה. השינויים במהירות הם כאלה שאם היינו מותחים קו דמיוני בין כוכב לכת הנע במסלולו ובין השמש, היה הקו הזה חולף על פני שטחים שווים בפרקי זמן שווים. השטח דמוי הגזרה שעבר הקו במשך חודש שבו נע כוכב הלכת במרחק רב מן השמש (הגזרה ASB באיור 8.1) שווה לשטח הגזרה שכיסה הקו במשך חודש שבו נע כוכב הלכת קרוב לשמש (הגזרה CSD באיור 8.1).

כעבור עשר שנים גילה קפלר חוק שלישי. הוא בילה שנים אלו בניסיון למצוא קשר בין קוטר מסלולו של כוכב הלכת לבין זמן המחזור שלו - משך הזמן הדרוש לכוכב הלכת להשלמת הקפה שלמה מסביב לשמש (זמן זה מכונה גם "התקופה" של כוכב הלכת). על יסוד נתוניו של בראהה גילה קפלר כי החזקה השנייה של זמן המחזור של כוכב לכת נמצאת ביחס ישר (מתכונתית) לחזקה השלישית של מרחקו הממוצע מהשמש. פירוש הדבר הוא שהשבר R^3/T^2 שווה בכל כוכבי הלכת (R הוא רדיוס המסלול הממוצע של כוכב הלכת ו- T הוא זמן המחזור שלו כפי שנמדד, למשל, בימים של כדור הארץ). חוקי קפלר של תנועת כוכבי הלכת הם איפוא:

חוק 1: כל כוכב לכת נע במסלול שצורתו אליפטית שהשמש באחד ממוקדיה.**

חוק 2: הקו המקשר את השמש אל כל כוכב לכת עובר על פני שטחים שווים בחלל בפרקי זמן שווים.

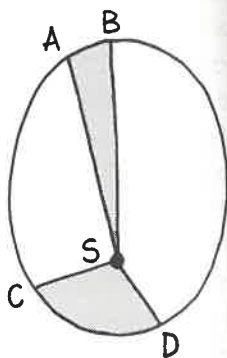
חוק 3: ריבועי זמני ההקפה (זמני המחזור) של כוכבי הלכת נמצאים ביחס ישר לחזקות השלישיות של מרחקיהם הממוצעים מן השמש. (כלומר, לכל כוכבי הלכת: T^2 מתכונת ל- R^3).

חוקי קפלר תקפים לא רק לגבי כוכבי הלכת, אלא גם לגבי ירחים או לוויינים

חוקי קפלר



יוהאנס קפלר



איור 8.1

הקו מכסה שטחים שווים בפרקי זמן שווים.

* המעגל כולו מחולק ל-360 מעלות-קשת; כל מעלת-קשת מחולקת ל-60 דקות-קשת. מדידותיו של בראהה היו, אם כן, מדויקות ביותר.

** בניגוד למעגל, שלו מרכז יחיד, לאליפטית יש שני מוקדים.

הסובבים במסלוליהם מסביב לגוף כלשהו. מלבד כוכב הלכת פלוטו (שעל קיומו לא ידע קפּלר), מסלוליהם האליפטיים של כוכבי הלכת הם כמעט מעגליים. רק מתוך מדידותיו המדויקות של בראהה נתגלו הסטיות הקלות מן הצורה המעגלית. לקפּלר לא היה כל מושג מדוע נעים כוכבי הלכת סביב השמש במסלולים אליפטיים, והוא גם לא הצליח להסביר את הקשרים המתמטיים שגילה. הוא הכיר את רעיונותיו של גלילאו על ההתמדה והתנועה המואצת, אך משום-מה לא יישם אותם בעבודתו. את מחשבתו של קפּלר העסיקו כוחות שלפי דעתו אמורים היו להיות מכוונים בכיוון מסלוליהם של כוכבי הלכת ושבבהם, כך חשב, תלויה תנועתם. הוא לא הגיע לידי הכרה אמיתית בחשיבותו של מושג ההתמדה. גלילאו, מצידו, לא ייחס חשיבות רבה לעבודותיו של קפּלר, והחזיק בדעתו שכוכבי לכת נעים במסלולים מעגליים*. נדרשה אישיות שתוכל למזג את תגליותיהם של שני מדענים דגולים אלה כדי לעשות את הצעד המכריע קדימה בפענוח תנועתם של כוכבי הלכת; במשימה זו עמד איזק ניוטון.

מאז ימיו של אריסטו נחשבה תנועתם המעגלית של גרמי השמים לתנועה טבעית. הקדמונים האמינו שכוכבי השבת (השמשות), כוכבי הלכת והירח נעים במעגלים שמיימיים, חופשיים מכל כוח המופעל עליהם. ככל שהדבר נגע לאנשי העולם העתיק, תנועה מעגלית זאת לא דרשה הסבר.

ניוטון הוא שהבחין בכך שחייב להיות כוח כלשהו הפועל על כוכבי הלכת, שאם לא כן, היו מסלוליהם קווים ישרים. מחוק ההתמדה הוא ידע שכוח זה אינו פועל בכיוון מסלוליהם של כוכבי הלכת כפי ששיער קפּלר, אלא כיוונו ככיוון ההתעקמות של המסלולים לעבר השמש. הוא ניתח את החוק השני של קפּלר, והראה שמקורו של כוח זה חייב להיות בשמש. מן החוק השלישי של קפּלר הסיק ניוטון שהכוח נחלש ביחס ישר לריבוע המרחק. כוכב לכת המרוחק פי שניים מהשמש נמשך לעברה בכוח קטן פי ארבעה; אם המרחק גדול פי שלושה, הכוח קטן פי תשעה, וכן הלאה. יחס זה הוא חוק הריבוע ההופכי, שמיד נדון בו בפרוטרוט.

איזה מין כוח יכול לפעול ממקום אחד למקום אחר בלא שיתקיים מגע? ניוטון הכיר כוח כזה. כשתפוח צונח לקרקע, הוא מואץ ממקומו על העץ. האם אותו כוח, תהה ניוטון, מגיע עד לירח ומחזיק אותו במסלול אליפטי מסביב לכדור הארץ, מסלול הדומה לזה של כוכב לכת מסביב לשמש? הבזק זה של תובנה - ההכרה בכך שכוח אחד הוא המושך הן את הירח והן את התפוח - היווה פריצת דרך מהפכנית ומהלומה לדעה שהיתה מקובלת עד אותם ימים, ולפיה קיימים שני סוגים של חוקי טבע - כאלה השולטים באירועים ארציים, ואחרים, שונים בתכלית, הנוגעים לתנועות השמיימיות.

כדי לבחון את התיאוריה שהגה, השווה ניוטון בין נפילתו של התפוח לזו של הירח. הוא הגיע למסקנה שהירח למעשה נופל במובן זה שהוא נופל מן המסלול הישר שבו היה נע אילו לא פעל עליו כל כוח. ואולם, בשל מהירותו בכיוון המשיק

חוק הכבידה העולמית של ניוטון



איור 8.2

מהירותו המשיקית של הירח ביחס לכדור הארץ מאפשרת לו ליפול מסביב לכדור הארץ במקום הישר אליו. אילו קטנה מהירות משיקית זו לאפס, מה היה גורלו של הירח?

* אין זה פשוט לראות דברים מוכרים באורה של תובנה חדשה, שאך זה מקרוב הגיעו אליה אחרים. אנו נוטים להבחין רק במה שלמדנו לראות, או במה שאנו רוצים להבחין. גלילאו סיפר שרבים מעמיתיו לא היו מסוגלים לראות את ירחי צדק או שפשוט סירבו להבחין בהם בעת שהציגו בחשדנות מבעד לטלסקופים. הטלסקופים שהתקין גלילאו פתחו עידן חדש באסטרונומיה, אך יותר משהיו חשובים כמכשיר חדש לצפייה משופרת בעצמים, חשובה היתה הדרך החדשה להבין את הנראה לעין. האם נכונים דברים אלה גם בימינו?

למסלול הוא "נופל מסביב" לכדור הארץ העגול (איור 8.2). מבחנו של ניוטון היה לבדוק האם מרחק הנפילה של הירח בכל שנייה שווה למרחק שהיה נופל תפוח, או כל עצם מרוחק באותה מידה מכדור הארץ, במשך שנייה אחת. אנו נדון בפרטי הבדיקה של ניוטון בפרק הבא, אך נאמר כאן רק זאת - שחישוביו הראשונים לא גילו התאמה. ניוטון היה מאוכזב, אך הכיר בעובדה שידן של העובדות המרות צריכה תמיד להיות על העליונה כשהן עומדות מול השערה, נאה ככל שתהיה. הוא גנז את ניירותיו במגירה, שם נשארו מונחים קרוב לעשרים שנה. בתקופה זו יסד ופיתח את תחום האופטיקה הגיאומטרית, שבזכותו התפרסם לראשונה.

התעניינותו של ניוטון במכניקה התעוררה מחדש בעת הופעתם של כוכב שביט מרהיב בשנת 1680 ושל שביט נוסף שנתיים לאחר מכן. חברו של ניוטון, אדמונד האלי, שעל שמו נקרא, מאוחר יותר, השביט השני, הוא שדרבן את ניוטון לשוב ולעסוק בבעיית הירח. ניוטון תיקן את הנתונים התצפיתיים שבהם השתמש בחישוביו הקודמים וקיבל תוצאות מעולות. רק אז פרסם ניוטון את מה שניתן לראות בו אחת ההכללות מרחיקות הלכת ביותר שהשיגה רוח האדם: **חוק הכבידה העולמית**.*

כל גוף מושך כל גוף אחר בעולם. ההיבט הכמותי מדהים בפשטותו: עוצמת המשיכה תלויה רק במסות ובמרחקים ביניהן. לפי ניוטון, כל מסה מושכת כל מסה אחרת בכוח הנמצא ביחס ישר למכפלת שתי המסות וביחס הפוך לריבוע המרחק שביניהן.

את הקביעה הזו ניתן לבטא בנוסחה הבאה:

$$F \sim \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

כאן m_1 ו- m_2 הן המסות ו- d הוא המרחק בין מרכזיהן. כלומר, ככל שהמסות גדולות יותר, כוח המשיכה ביניהן גדול יותר**. כשהמרחק d בין המסות גדל, כוח המשיכה ביניהן נחלש; כוח המשיכה נחלש כריבוע הערך ההופכי של המרחק בין מרכזי המסות.

קבוע הכבידה העולמית, G

את נוסחת חוק הכבידה שהצגנו בעזרת יחס מתכונתיות ניתן לבטא כמשוואה אם מוסיפים את קבוע המתכונתיות G , המכונה קבוע הכבידה העולמית. המשוואה המתקבלת היא:

$$F = \frac{G m_1 m_2}{d^2}$$

ובמילים: כוח הכבידה בין שני גופים מתקבל על ידי כפל המסות שלהן, חילוק התוצאה בריבוע המרחק בין מרכזיהם, ולבסוף כפל התוצאה בקבוע G . גודלו

* זאת דוגמה דרמטית לעבודת הנמלים ולמאמצי הבדיקה החוזרת ונשנית הנדרשים במהלך ניסוחה של תיאוריה מדעית. חישובו עד כמה בולט הניגוד בין גישתו של ניוטון לבין הסקת המסקנות הפזויה והעדר הבדיקה הביקורתית שכה תכופות מאפיינים את מנסחיהן של תיאוריות כמו-מדעיות.

** שימו לב לתפקידה של המסה כאן. עד כה עסקנו במסה כמידת ההתמדה של גוף, ולכן היא נקראת מסה התמדית (או מסה אינרציאלית). עתה מופיעה המסה כמידה של כוח הכבידה, ובהקשר זה היא נקראת מסה כבידתית (או מסה גרביטציונית). מניסויים רבים התברר כי שני הגדלים שווים. ובאופן עקרוני, השוויון הכמותי בין המסה ההתמדית למסה הכבידתית (המכונה: עקרון השקילות) עומד ביסוד תורת היחסות הכללית של איינשטיין.

של G מתקבל מגודל הכוח בין שתי מסות בנות 1 ק"ג כל אחת, המרוחקות זו מזו 1 מ', והוא 0.0000000000667 ניוטון. זהו כוח זעיר ביותר. באותה מידה זעיר ערכו של G . בסימון מדעי*,

$$G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ נ"מ}^2/\text{ק"ג}^2$$

G נמדד לראשונה רק זמן רב אחרי ניוטון, במאה ה-18, בידי הפיסיקאי האנגלי הנרי קוונדיש (Cavendish). הוא הצליח למדוד את הכוח הזעיר הפועל בין שתי מסות עופרת בעזרת מאזני פיתול רגישים ביותר. שיטה פשוטה יותר פותחה בידי פיליפ פון יולי (Jolly), שתלה בקבוק כספית עגול על אחת הזרועות של מאזניים רגישים (איור 8.3). אחרי שאיזנו את המאזניים, גלגלו כדור עופרת בן שישה טון אל מתחת לבקבוק הכספית. כוח הכבידה בין שתי המסות היה שווה למשקל F שצריך היה להוסיף לזרוע הנגדית של המאזניים כדי להחזירם לשיווי משקל. הגדלים m_1 , m_2 , d ו- F היו ידועים, וכך חושב היחס G :

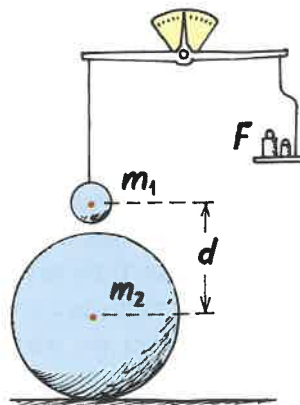
$$\frac{F}{m_1 m_2 / d^2} = 6.67 \times 10^{-11} \frac{\text{N}}{\text{kg}^2/\text{m}^2} = 6.67 \times 10^{-11} \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$$

מן הערך של G אנחנו למדים שכוח הכבידה הוא כוח חלש ביותר. הוא החלש מבין ארבעת הכוחות היסודיים המופרים לנו כיום (שלושת הכוחות האחרים הם הכוח האלקטרומגנטי ושני סוגים של כוחות גרעיניים). אנו חשים בכבידה רק כשמעורבות מסות דומות לזו של כדור הארץ. הכוח ביניכם לבין ספינת מלחמה שעליה אתם עומדים קטן מכדי שאפשר יהיה למדוד אותו באמצעים רגילים. לעומת זאת, את הכוח ביניכם לבין כדור הארץ אפשר למדוד - זהו פשוט משקלכם.

נוסף על מסת גופך, משקלך תלוי גם במרחקך ממרכז כדור הארץ. בראש הר גבוה המסה אינה שונה מבכל מקום אחר, אך משקלך שם פחות במעט ממשקלך בגובה פני הים, מפני שמרחקך ממרכז כדור הארץ גדול יותר. משנודע ערכו של G , ניתן היה לחשב בקלות את מסת כדור הארץ. הכוח שכדור הארץ מפעיל על משה בת קילוגרם אחד המונחת עליו הוא 9.8 ניוטון. המרחק שבין מסת הקילוגרם לבין מרכז המסה של כדור הארץ הוא רדיוס כדור הארץ, 6.4×10^6 מטרים. לכן, לפי הנוסחה $F = G(m_1 m_2 / d^2)$, שבה m_1 היא מסת כדור הארץ:

$$9.8 \text{ N} = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2 \frac{1 \text{ kg} \times m_1}{(6.4 \times 10^6 \text{ m})^2}$$

$$m_1 = 6 \times 10^{24} \text{ ק"ג}$$



איור 8.3

שיטת יולי למדידת G .

הכדורים m_1 ו- m_2 מושכים זה את זה בכוח F השווה למשקל המשקולות הדרושות לאיזון המאזניים.

* ערכו המספרי של G תלוי כמוכרן לחלוטין ביחידות שאנו בוחרים למדידת המסה, המרחק והזמן. בשיטה הבינלאומית נבחרו היחידות הבאות: קילוגרמים למדידת מסה, מטרים למדידת מרחק, ושניות למדידת זמן. על שיטת הסימון המדעית קיראו בנספח 1 בסוף הספר.

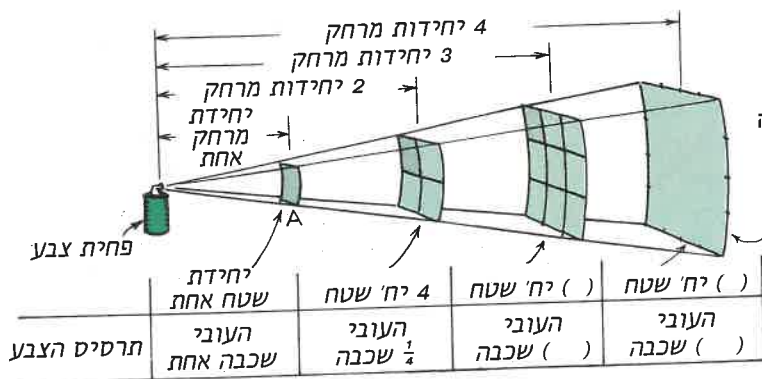
אם אכן פועל כוח משיכה בין כל הגופים, מדוע אין אנו חשים את עצמנו נמשכים לעבר בניינים גדולים שבקרבתנו?

שאלה

איור 8.4

חוק הריבוע ההופכי. תרסיס צבע מתפזר מן החריר שבראש הפחית בקווים ישרים לכל הכיוונים. בדומה לכוח הכבידה, "עוצמת" התרסיס מצייתת לחוק הריבוע ההופכי.

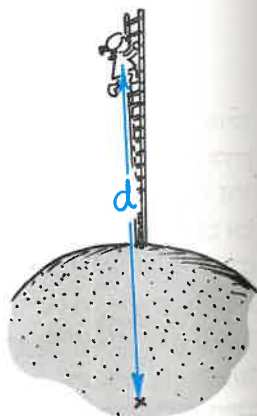
שרטטו כאן 16 ריבועים בשטח A כ"א



כבידה ומרחק: חוק הריבוע ההופכי

נוכל להבין ביתר קלות כיצד נחלשת הכבידה ככל שהמרחק גדל, אם נתבונן באופן שבו צבע המותץ באמצעות אקדח התזה מתפזר עם התרחקותו מן האקדח (איור 8.4). נניח שאנו מציבים אקדח להתזת צבע במרכזו של כדור בעל רדיוס של 1 מ', ומתז של צבע נע מרחק של מטר אחד ויוצר כתם צבע שעוביו 1 מ"מ. מה היה עובי הצבע בכתם אילו בוצע הניסוי בכדור בעל רדיוס גדול כפליים? אם כמות שווה של צבע נעה מרחק של 2 מטרים, היא תתפזר ותיצור כתם שאורכו ורוחבו גדולים פי שניים. כלומר, הצבע יתפזר וייצור כתם ששטחו גדול פי ארבעה ולכן עוביו יהיה רק $\frac{1}{4}$ מ"מ. הביטו באיור: התוכלו להבחין בכך שבכדור שרדיוסו 3 מ' עוביו של כתם הצבע יהיה רק $\frac{1}{9}$ המילימטר? התוכלו לראות שעובי הצבע קטן במידה שריבוע המרחק גדל? תופעה זו נקראת **חוק הריבוע ההופכי**. חוק הריבוע ההופכי תקף לגבי כוח הכבידה ולגבי כל מצב שבו תופעה ממקור ממוקם מתפזרת באופן אחיד למרחב שמסביבו: השדה החשמלי מסביב לאלקטרון מבודד, האור הבוקע מגפרור, הקרינה הרדיואקטיבית מפיסת אורניום, והקול הבוקע מנפץ.

חשוב להדגיש כי כאשר משתמשים בנוסחת ניוטון לכבידה, האיבר d מציין את המרחק שבין מרכזי המסות של הגופים הנמשכים זה לזה. באיור 8.6,



איור 8.5

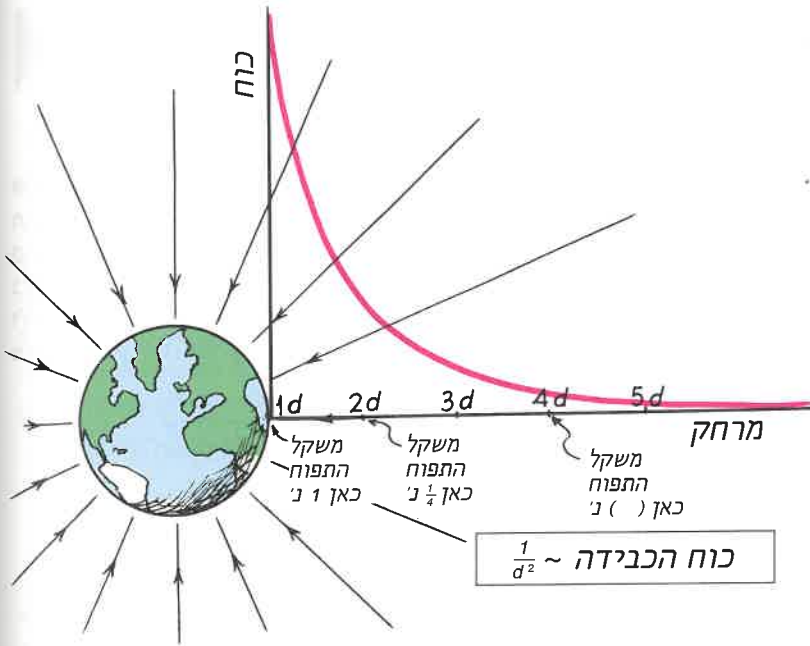
לפי החוק של ניוטון, משקלה (ולא מסתה) של הילדה קטן בהתאם למרחקה ממרכז (ולא מפני) כדור הארץ.

תשובה

הכבידה מושכת אותנו לעבר בניינים גדולים כמו לכל דבר אחר ביקום. הפיסיקאי פול דיראק, חתן פרס נובל לשנת 1933, ניסח זאת פעם באופן הבא: "אם תקטפו פרח על פני כדור הארץ תגרמו לתזוזה של המרחוק שבכוכבים!" עד כמה משפיעים עלינו הבניינים או מה גודלה של פעולת הגומלין בין פרחים, זו כבר שאלה שונה בתכלית. הכוחות הקיימים בינינו לבין בניינים הם זעירים מפני שהמסות קטנות יחסית למסת כדור הארץ. הכוחות שמפעילים עלינו הכוכבים, קטנים בגלל המרחקים הגדולים. אינו מביחין בכוחות הזעירים הללו מפני ש"מאפיל" עליהם כוח המשיכה הגדול שמפעיל עלינו כדור הארץ.

איור 8.6

אם תפוח שוקל 1 נ' על פני כדור הארץ, הוא שוקל רק $\frac{1}{4}$ נ' במרחק כפול ממרכז כדור הארץ. במרחק גדול פי שלושה, משקלו יהיה רק $\frac{1}{9}$ נ'. כמה ישקול התפוח במרחק גדול פי ארבעה? פי חמישה? עוצמתה של הכבידה כתלות במרחק משורטטת בגרף הצבעוני.



שימו לב לכך שהתפוח, שמשקלו הרגיל על פני כדור הארץ הוא 1 ניוטון, שוקל רק $\frac{1}{4}$ ממשקל זה כשמרחקו ממרכז כדור הארץ גדל כפליים. ככל שהמרחק ממרכז כדור הארץ גדול יותר, כך קטן משקלו של כל עצם. ילד שמשקלו 300 ניוטון בגובה פני הים, ישקול רק 299 ניוטון על פסגת הר האוורסט. אך גם אם המרחק גדל מאוד, כוח הכבידה של כדור הארץ אמנם מתקרב לאפס, אך לעולם לא מתאפס ממש. גם אם תגדלו לקצותיו המרוחקים של היקום, השפעת הכבידה של הבית עדיין תהיה עימכם. השפעת הכבידה של גופים קרובים יותר או כבדים יותר עלולה להאפיל עליה, אך היא עדיין שם עימכם. השפעת הכבידה של כל עצם חומרי, קטן או רחוק ככל שיהיה, מתפשטת במרחבי החלל כולו. האין זה נאה?

שאלות

1. בכמה קטן כוח הכבידה בין שני גופים כאשר המרחק ביניהם מוכפל? כאשר הוא גדל פי שלושה? פי עשרה?
2. נתבונן בתפוח התלוי בראש העץ ונמשך על ידי כבידת כדור הארץ בכוח של 1 נ'. אילו היה העץ גבוה כפליים, האם היה חוזקו של כוח הכבידה קטן לכדי $\frac{1}{4}$ משיעורו הקודם? נמקד.

תשובות:

1. הוא קטן לרבע, לתשיעית, ולמאית מעוצמתו הקודמת.
2. לא, מפני שעץ גבוה פי שניים אינו מרוחק פי שניים ממרכז כדור הארץ. העץ יצטרך לצמוח לגובה השווה לרדיוס כדור הארץ (6370 ק"מ) כדי שמשקלו של התפוח יקטן ל- $\frac{1}{4}$ נ'. כדי שמשקלו של התפוח, או של כל עצם אחר, יקטן באחוז אחד בלבד, יש להרימו לגובה של 32 ק"מ – פי ארבעה כמעט מגובהו של הר האוורסט. לכן, באופן מעשי אנו מתעלמים מהשפעת הגובה על המשקל.

מעניין לציין שהחוק הראשון והחוק השלישי של קפלר נובעים מחוק הכבידה העולמית של ניוטון. על יסוד חוק זה, ובעזרת ענף המתמטיקה שהמציא - החשבון הדיפרנציאלי והאינטגרלי - הוכיח ניוטון שמסלוליהם של כוכבי הלכת הם אליפטות. הוא הוכיח גם כי החוק השלישי של קפלר נובע מן התלות של כוח הכבידה העולמית בריבוע ההופכי של המרחק*. מפליא כיצד חוק אחד ויחיד של הכבידה העולמית מפשט כל כך את ההבנה של תנועת כוכבי הלכת - ועוד הרבה מעבר לכך.

כשאנו עומדים על מאזני קפיץ, כמו מאזני אמבטיה למשל, אנו מכווצים את הקפיץ שבתוכו. כשמחוג המאזניים נעצר, הרי זה משום שהכוחות החשמליים החזקים שבין המולקולות בחומר שהקפיץ עשוי ממנו מאזנים את משיכת הכבידה שבינינו לבין כדור הארץ - שום דבר אינו נע לאחר שהגענו יחד עם המאזניים לשיווי משקל סטטי. מחוג המאזניים מכויל להורות את משקלנו. אילו עמדנו על מאזני האמבטיה בתוך מעלית נוסעת, היינו מבחינים בשינויים במשקל. אילו היתה המעלית מואצת כלפי מעלה, הקפיץ שבתוך המאזניים היה מתכווץ יותר וקריאת המשקל היתה גדלה. אילו היתה המעלית מואצת כלפי מטה, מידת ההתכווצות של הקפיץ במאזניים היתה פוחתת וקריאת המשקל היתה פוחתת איתה. אילו נקרע כבל המעלית והמעלית החלה נופלת נפילה חופשית, הקריאה במאזניים היתה יורדת לאפס. לפי הקריאה הפכנו לחסרי משקל. האומנם הפכנו לחסרי משקל? נוכל להשיב על כך רק אם נסכים בינינו למה אנו מתכוונים במילה משקל.

אנו מגדירים את משקלו הנדמה של גוף ככוח שהוא מפעיל על הקרקע התומכת בו, או על המאזניים שעליהם הוא עומד. לפי הגדרה זו, תחושת הכובד שלנו היא הקובעת את משקלנו; וכך, במעלית המואצת כלפי מטה, כוח התמיכה של הרצפה קטן יותר, ועימו קטן משקלנו. אם המעלית נופלת נפילה חופשית, משקלנו הנדמה הוא אפס (איור 8.7).



איור 8.7

תחושת המשקל (המשקל הנדמה) שווה לכוח שבו אנחנו מעיקים על הרצפה הנושאת אותנו. אם הרצפה מואצת כלפי מעלה או כלפי מטה, משקלנו הנדמה משתנה (בעוד משקלנו mg נותר ללא שינוי).

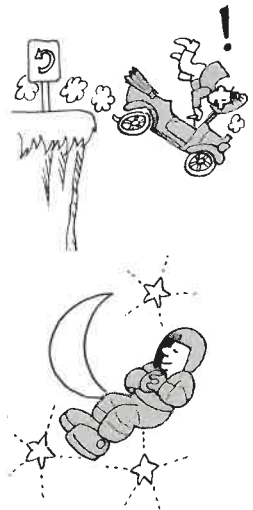
* ניתן להוכיח כי החוק השלישי של קפלר מתקבל כשמשווים את חוק הכבידה של ניוטון לכוח הצנטריפטלי, וכי R^3/T^2 שווה לקבוע התלוי אך ורק ב- G וב- M , המסה שמסביבה מתרחשת תנועת ההקפה. ההוכחה ניתנת אולי על ידי המורה בכיתה.

עם זאת, גם במצב זה של חוסר משקל, עדיין פועל עלינו אותו כוח כבידה, הגורם לתאוצתנו כלפי מטה. אך במצב זה אין אנו חשים בכבידה כמשקל, מפני שעתה אין כוח תמיכה הפועל עלינו.

נתבונן באסטרונאוט הנמצא במסלול סביב כדור הארץ. האסטרונאוט שרוי במצב של חוסר משקל נדמה. הוא חש חסר משקל מפני ששום דבר אינו תומך בו (איור 8.8). אילו הנחנו תחת רגליו מאזני אמבטיה, הקפיץ שבהם כלל לא היה מתכווץ, מפני שהמאזניים היו נופלים באותה מהירות כמוהו. כל חפץ שישוחרר ייפול יחד איתו ויישאר בקרבתו, ולא כפי שקורה על הקרקע. כל השפעות הכבידה המקומיות נעלמות. איברי הגוף מגיבים כמו לא פעלו כל כוחות כבידה, ומכאן נובעת תחושת חוסר המשקל, שהרי הם נופלים יחד ואין הגוף מעיק על הרגליים. האסטרונאוט במסלולו חש אותה תחושה שהיה חש אילו נמצא במעלית נופלת - מצב של נפילה חופשית.

יש לזכור שהאסטרונאוט עדיין נתון תחת השפעת כוח הכבידה הממשיך לשנות ללא הרף את כיוון תנועתו, כלומר - את מהירותו. במילים אחרות, כוח הכבידה גורם לתאוצה של האסטרונאוט. לכן אומרים שהוא מצוי במצב של חוסר משקל נדמה. כדי שיימצא במצב אמיתי של חוסר משקל, היה עליו להיות הרחק בחלל החיצון, הרחק מכדור הארץ, מן השמש ומכל גוף מושך אחר, במקום שבו עוצמתם של כוחות הכבידה זניחה. במצב זה של חוסר משקל אמיתי, התנועה היתה מתקיימת לאורך קו ישר ולא בנתיב עקום של מסלול סגור.

באיור 8.9 מתוארת תחנת חלל, כפי שרואה אותה אמן של סוכנות החלל האמריקאית נאס"א. היא נמצאת במצב של חוסר משקל נדמה. מעבורת החלל, מתקני התחנה והאסטרונאוטים - כולם מואצים לעבר כדור הארץ בתאוצה שווה, הקטנה במעט מ- $1g$ בשל גובהם הרב. בתאוצה זו אין חשים כלל; ביחס לתחנת החלל, האסטרונאוטים חווים אפס גי.

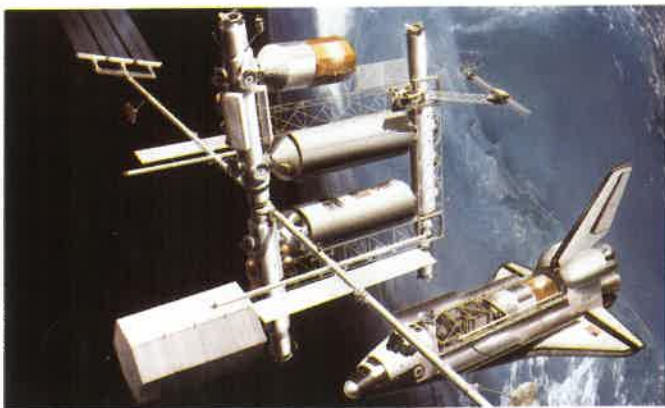


איור 8.8

שניהם במצב של "חוסר משקל".

באיזה מובן דומה הימצאות הרחק מכל גרם שמימי לפסיעה מעבר לשוליו של שולחן?

שאלה



איור 8.9

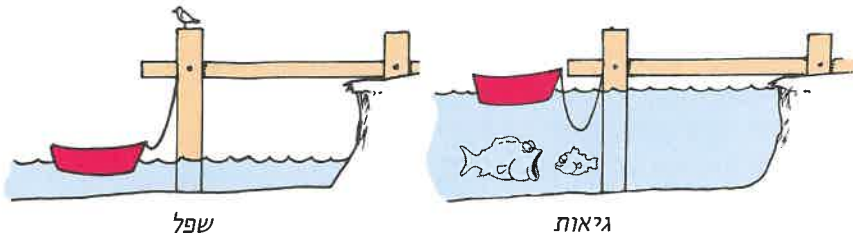
כחצי-תריסר התושבים במעבדת החלל המוצעת יהיו בתחושה מתמדת של חוסר משקל בסביבה של אפס גי.

בשני המקרים חשים חוסר משקל. הרחק מכל גרמי השמים קיים חוסר משקל במובן המדויק, הרחק מכל השפעה כבידתית; כשפוסעים מעבר לקצה השולחן נגרמת תחושה רגעית של חוסר משקל נדמה, מפני שלרגע קט אין כל כוח תמיכה.

תשובה:

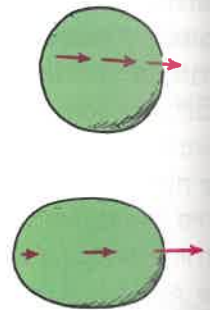
גיאאות ושפל

מאז ומעולם ידעו יורדי הים שיש קשר בין מועדי הים - הגיאאות והשפל - לבין הירח, אך איש לא היה מסוגל להציע תיאוריה שתסביר את הסיבה לכך שבכל יום יש שני מצבי גיאאות. ניוטון הוא שהראה כי גיאאות הים נגרמת בגלל הבדלים בין משיכת הכבידה של הירח ושל כדור הארץ משני צידיו של כדור הארץ. כוח הכבידה בין הירח לארץ חזק יותר בצידה של הארץ הקרוב לירח וחלש יותר בצידה של הארץ הרחוק מן הירח. הסיבה לכך היא פשוט שכוח הכבידה קטן כשהמרחק גדל.



איור 8.10
מועדי הים -
גיאאות ושפל.

כדי להבין מדוע ההבדל בין העוצמות של משיכת הכבידה בשני צידיו המנוגדים של כדור הארץ גורם לגיאאות, תארו לעצמכם כדור גדול העשוי מגומי רך במיוחד. אם יופעל כוח שווה על כל חלקי הכדור הוא ישמור על צורתו הכדורית בשעה שהוא מואץ. אך אם תמשכו בכוח גדול יותר מצידו האחד של הכדור ובכוח חלש יותר מצידו השני, ייווצר הבדל בתאוצות, וצורתו של הכדור תתארך (איור 8.11). כך בדיוק קורה לכדור הגדול שעליו אנו חיים. הצד הקרוב לירח נמשך בכוח חזק יותר, ולכן תאוצתו לעבר הירח גדולה יותר מזו של הצד הרחוק. כתוצאה מכך הופכת צורתו של כדור הארץ סגלגלה-משהו. התאוצה שדיברנו עליה היא למעשה תאוצה צנטריפטלית, מפני שכדור הארץ סובב סביב מרכז המסה של המערכת ארץ-ירח. (טעות היא לחשוב שכדור הארץ שרוי במנוחה והירח הוא המואץ בשעה שהוא מקיף את הארץ במסלולו, ממש כפי שהיתה זו טעות מצידו של תושב הירח לחשוב שהירח קבוע וכדור הארץ הוא שמואץ לעבר הירח ומקיף אותו. בפועל הירח וכדור הארץ גם יחד סובבים סביב נקודה משותפת - מרכז המסה של המערכת ארץ-ירח; אמנם הוא נמצא מתחת לשטח פניו של כדור הארץ.) הן הירח והן כדור הארץ נמצאים בתאוצה צנטריפטלית בשעה שהם מקיפים זה את זה סביב מרכז המסה של המערכת ארץ-ירח. הדבר גורם להתארכות קלה הן של הירח והן של כדור הארץ. התארכות כדור הארץ מתרחשת בעיקר באוקיינוסים, התופחים במידה שווה משני צידיו הנגדיים של הכדור.

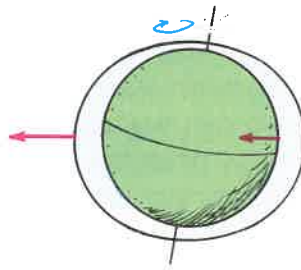


איור 8.11
כדור גומי רך שומר על צורתו הכדורית כשכל חלקיו נמשכים באותו כוח בכיוון אחד. ואולם, כשהכוח המושך צד אחד חזק יותר מזה הפועל על הצד האחר, צורתו מתארכת.

בממוצע עולמי, האוקיינוסים תופחים בשיעור של כמטר אחד מעל לגובה הממוצע של פניהם. כדור הארץ משלים סיבוב אחד סביב צירו בכל יממה, לכן נקודה קבועה על פני כדור הארץ חולפת מתחת לשתי נקודות התפיחה הללו בכל יום. זו הסיבה להיווצרותן של שתי גיאאות ים בכל יממה. בכל חלק של כדור הארץ החולף מתחת לאחת התפיחות הללו תתרחש באותו זמן גיאאות. 6 שעות לאחר מכן, לאחר שכדור הארץ ישלים רבע סיבוב סביב צירו, רמת המים באותו מקום באוקיינוס תהיה מטר אחד בקירוב מתחת לגובה פני הים הממוצע. יתרחש שפל. המים "החסרים" שם נמצאים בתפיחות המהוות את אזורי הגיאאות. תפיחת גיאאות שנייה תורגש לאחר שכדור הארץ ישלים עוד רבע

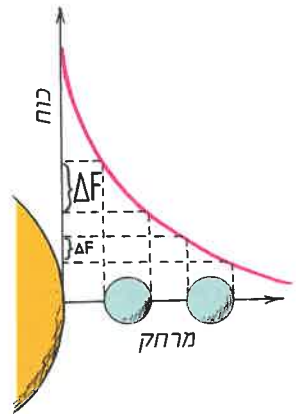
איור 8.12

שתי תפיחות הגאות
נותרות קבועות לערך
ביחס לירח, שעה שכדור
הארץ סובב תחתיהן
סביב צירו בכל יום.



סיבוב. וכך ישנם שני מחזורי גאות ושפל בכל יממה. אולם, בעוד כדור הארץ סובב סביב צירו, הירח נע במסלולו ומופיע לעינינו באותו מקום בשמים כעבור 24 שעות ו-50 דקות, וכך למעשה נמשכים שני מחזורי הגאות והשפל היומיים 24 שעות ו-50 דקות. זו הסיבה לכך שהגאות והשפל אינם מתרחשים באותה שעה בכל יום.

גם השמש תורמת את תרומתה למועדי הים, אף שיעילותה בהרמת הגאות קטנה ביותר ממחצית מזו של הירח - זאת, חרף העובדה שכוח המשיכה שהיא מפעילה על כדור הארץ גדול פי 180 מזה שמפעיל הירח. מדוע אין השמש גורמת לגיאות גבוהות פי 180 מאלו שגורם הירח? מילת המפתח בתשובה לשאלה זאת היא: הפרש. בשל מרחקה הגדול של השמש, ההפרש בין העוצמות של משיכת הכבידה שלה על צידיו הנגדיים של כדור הארץ קטן ביותר (איור 8.13). ההבדל באחוזים בין עוצמות משיכת השמש בשני צידי כדור הארץ הוא רק כ-0.017 אחוז, זאת בהשוואה להפרש של 6.7 אחוז בין עוצמות הכוח שמפעיל הירח משני צידי כדור הארץ. ואולם, מכיוון שהכוח שמפעילה השמש גדול פי 180 מזה של הירח, הגאות שהיא יוצרת מגיעה לגובה הקרוב למחצית הגאות שגורם הירח ($3 = 180 \times 0.017$), קרוב לחצי מ-6.7 אחוזי ההפרש הנגרמים עקב השפעת הירח). כשהשמש, כדור הארץ והירח מתקבצים לשורה אחת, זמני הגאות של השמש והירח מתלכדים. במצב זה מתרחשים "גאות שיא" גבוהה מן הממוצע ושפל נמוך מן הממוצע (איור 8.14). התקבצות השמש, הירח וכדור הארץ לקו ישר אחד מתרחשת בזמן מולד הירח, בראשית החודש העברי, ובזמן התמלאות הירח, באמצע החודש העברי. באמצע החודש, עם התמלאות הירח, כדור הארץ נמצא בין השמש לירח. (כאשר כל השלושה נמצאים בדיוק על קו ישר אחד, מתרחש ליקוי ירח, מכיוון שאז הירח המלא נמצא בצילו של כדור הארץ). מולד הירח חל בעת שהירח נמצא בין השמש לבין כדור הארץ, ואז חלקו האפל של הירח פונה לעברנו. (כאשר התקבצות זאת לקו ישר אחד מושלמת, הירח מסתיר את השמש ומתרחש ליקוי חמה.)

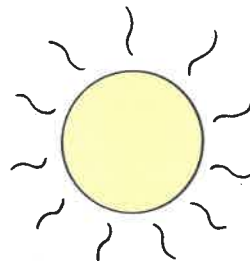


איור 8.13

גרף כוח הכבידה כנגד
המרחק. ככל שהמרחק
מהשמש גדול יותר, ההפרש
שבין עוצמות משיכת הכבידה
משני צידי של כוכב לכת קטן
יותר, ולכן הגאות נמוכה
יותר.

איור 8.14

כאשר משיכת השמש
ומשיכת הירח
מכוונות על אותו קו
ישר, מתרחשת
"גאות שיא".



לא כל גיאוויות השיא גבוהות במידה שווה, מפני שהמרחקים הן מכדור הארץ לירח והן מכדור הארץ לשמש משתנים; מסלולי ההקפה של כדור הארץ והירח אינם מעגליים ממש, אלא אליפטיים. מרחקו של הירח מכדור הארץ משתנה בכ-10 אחוזים והשפעת שינוי זה מתבטאת בכ-30 אחוז הבדל בין גובהי הגיאוויות. שיאי הגיאיות הגבוהים ביותר מתרחשים בעת שהשמש והירח מתקרבים לכדור הארץ במידה מרבית.

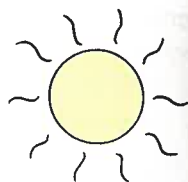
כשהירח נמצא במחצית מילואו, הן כשהוא מתמלא (בסוף השבוע הראשון לחודש העברי) והן כשהוא מתמעט (שבוע לפני סוף החודש העברי, איור 8.15), הגיאיות שגורמת השמש וזו שגורם הירח מבטלות חלקית זו את זו. במצב זה הגיאיות נמוכה מהממוצע והשפל אינו מגיע לדרגת השפל הממוצע. מצב זה מכונה "גיאיות זוטא", "גיאיות מתונה" או "גיאיות נפל".

גורם אחר המשפיע על הגיאיות והשפל הוא מידת הנטייה של ציר כדור הארץ (איור 8.16). אף ששתי התפיחות הנגדיות שוות זו לזו, נטיית כדור הארץ גורמת לכך ששתי הגיאוויות היומיות המתרחשות במרבית האוקיינוסים לרוב אינן שוות זו לזו. דנו בבעיית הגיאיות והשפל באופן פשטני במקצת. הנושא מורכב ומסובך יותר, שכן גורמים כמו גושי יבשה וחיכוך עם קרקעית הים מסבכים את תנועות הגיאיות. במקומות רבים הגיאיות מתפצלת ל"אגני זרימה מחזורית", שבהם תפיחת גיאיות נעה סחור-סחור, בדומה לגל בקערת מים שמטים אותה אנה ואנה. זו הסיבה לכך שבמקומות אלה הגיאיות עשויה להתרחש בהבדל של שעות מן הזמן שבו הירח נמצא בשיא גובהו בשמים. במרחבי האוקיינוסים, ההבדלים בין גובהי המים - טווח הגיאיות והשפל - אינם עולים לרוב על מטר אחד או שניים. הטווח משתנה באזורים שונים של העולם; הוא מגיע לשיעורו המרבי בפיורדים מסוימים באלסקה, והוא המרשים ביותר באגן מפרץ פאנדי שבין ניו-ברונסוויק ונובה סקוטיה בדרום מזרח קנדה, שם הבדלי הגיאיות והשפל עוברים לעיתים את טווח 15 המטרים. הסיבה לכך נעוצה בעיקר בצורתה של קרקעית הים, צורת משפך המנקזת את זרמי הים לעבר החוף. תכופות המים גואים שם מהר יותר משיכול אדם לרוץ. אל תחפשו צדפות על שפת המים בשעת השפל במפרץ פאנדי!

גיאיות ושפל בכדור הארץ ובאטמוספירה

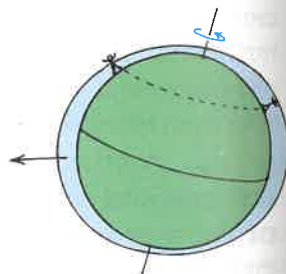
כדור הארץ אינו גוף קשיח, אלא ברובו הוא נוזל מותך המכוסה בקליפה מוצקה, דקה וגמישה. כתוצאה מכך כוחות הגיאיות של השמש והירח מחוללים גיאוויות גם ביבשות ולא רק באוקיינוסים. פעמיים בכל יום מתרוממים ויורדים פני הארץ המוצקים בשיעור שיכול להגיע לרבע המטר! זו הסיבה לכך שההסתברות לרעידת אדמה או להתפרצות הר געש גבוהה מעט יותר בזמן גיאיות השיא של היבשת - כלומר, סמוך לזמן מולד הירח או סמוך לזמן התמלאותו.

אנו חיים בקרקעיתו של אוקיינוס אוויר שגם בו חלים גיאיות ושפל. בשל מסתה הקטנה של האטמוספירה, גיאוויות האטמוספירה קטנות ביותר. בחלקה העליון של האטמוספירה נמצאת היונוספירה, הנקראת כך מכיוון שמרובים בה היונים - אטומים הטעונים במטען חשמלי, ונוצרים בשל הפצצה מרוכזת של האזור בקרניים קוסמיות. תופעות הגיאיות והשפל ביונוספירה מחוללות זרמים חשמליים המשנים את השדה המגנטי שמקיף את כדור הארץ. אלה הם הגיאיות



איור 8.15

כשכיווני המשיכה של השמש ושל הירח נבדלים זה מזה ב-90 מעלות (בשעה שהירח חצי מלא), מתרחשת גיאיות מתונה.



איור 8.16

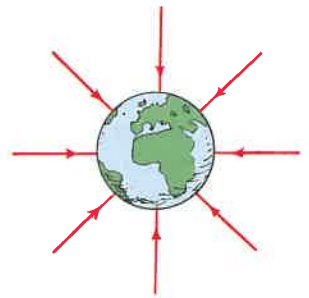
שתי הגיאוויות ביממה אחת אינן שוות. עקב נטייתו של ציר כדור הארץ, אדם בחצי הצפוני של כדור הארץ עלול לגלות שהגיאיות הקרובה ביותר לירח נמוכה (או גבוהה) בהרבה מזו שתתרחש כעבור מחצית היממה. אי השוויון של הגיאוויות משתנה עם מקומם של השמש והירח.

והשפל המגנטיים, והם משפיעים על שיעור החדירה של הקרניים הקוסמיות אל תחתית האטמוספירה. מידת החדירה של הקרניים הקוסמיות משפיעה על ההרכב היוני של האטמוספירה שלנו, והדבר בא לידי ביטוי בשינויים קלים בהתנהגותם של יצורים חיים. רמת הגיאות והשפל של האטמוספירה היא מרבית בשעה שמתרחשת גאות שיא - שוב, בקרבת זמן מולד הירח או זמן הירח המלא. האם הבחנתם שמישהו מחבריכם מתנהג בצורה מוזרה במקצת בתקופת הירח המלא?

שאלות

1. אילו היה הירח מכוסה מים, האם היו עליו תפיחות גאות? כמה? באיזו תכיפות היו מתרחשים עליו גאות ושפל?
2. מי מפעיל כוח משיכה גדול יותר על המים שעל פני כדור הארץ, השמש או הירח?

שדות כבידה



איור 8.17

קווי שדה מייצגים את שדה הכבידה מסביב לכדור הארץ. במקום שבו קווי השדה צפופים יותר, השדה חזק יותר. רחוק יותר, במקום שבו קווי השדה מתרחקים זה מזה, השדה חלש יותר.

כדור הארץ והירח מושכים זה את זה. זאת פעולה מרחוק, מפני שבין כדור הארץ ובין הירח מתרחשת השפעה הדדית או פעולת גומלין (אינטראקציה) אף שהם אינם נמצאים במגע. אפשר לראות את התופעה באופן אחר: ניתן לומר שהירח מגיב עם **שדה הכבידה** של כדור הארץ. לפי גישה זאת, תכונותיו של המרחב סביב כל מסה משתנות באופן שמה אחרת שתימצא באותו תחום תחוש בכוח הפועל עליה. שינוי זה של החלל הוא שדה כבידה. ניתן לחשוב על טילים ולוויינים המצויים הרחק בחלל כמי שמגיבים עם שדות כבידה ולא עם המסות של כדור הארץ, של כוכבי הלכת ושל כוכבים אחרים, שהם המקורות לשדות אלה. מושג השדה ממלא את תפקיד המתווך בחשיבתנו על הכוחות השוררים בין מסות שונות.

שדה כבידה הוא דוגמה של שדה כוח, מפני שכל מסה הנמצאת במרחב השדה חשה בכוח. שדה כוח אחר ואולי מוכר יותר הוא השדה המגנטי. האם ראיתם אי-פעם נסורת ברזל המסתדרת בתבניות שונות מסביב למגנט? תבנית נסורת הברזל מלמדת על עוצמת השדה המגנטי ועל כיוונו בנקודות שונות של המרחב מסביב למגנט. במקום שבו הנסורת צפופה ביותר, עוצמת השדה חזקה ביותר. כיוונו של שבבי הברזל מצביע על כיוון השדה בכל נקודה. ניתן לייצג את תבנית שדה הכבידה באמצעות קווי שדה (איור 8.17). בדומה לנסורת הברזל מסביב למגנט, קווי השדה צפופים יותר במקום שבו שדה הכבידה חזק יותר. בכל נקודה על קו השדה, כיוונו של השדה הוא לאורך הקו. החיצים מורים את כיוון השדה. חלקיק, אסטרונאוט, חללית או כל מסה אחרת בקרבת כדור הארץ יואצו בכיוון קווי השדה באותו מקום.

תשובות:

1. על הירח היו נוצרות שתי תפיחות גאות מאותה סיבה ששתי תפיחות גאות נוצרות על כדור הארץ. (יש הבדל בין כוח המשיכה שכדור הארץ מפעיל על הצד הקרוב של הירח ובין זה שהוא מפעיל על הצד הרחוק שלו. כתוצאה מכך יש שתי תפיחות על פניו המוצקים, ולפיכך פניו של הירח אליפטיים במידה מסוימת.) מכיוון שהירח משלים סיבוב שלם סביב צירו ב-27.3 ימים (ואותו זמן נדרש לו להשלמת הקפה סביב כדור הארץ), תמיד פונה אותו צד של הירח לעבר כדור הארץ. זו הסיבה לכך שתפיחות הגאות נייחות על פני הירח, ולא מתרחשים עליו מחזורי גאות ושפל.
2. השמש, אך היא כה רחוקה שהיא מפעילה כוח כמעט שווה על כל חלקי כדור הארץ. משום כך היא מחוללת גאות ביעילות פחותה מזו של הירח.

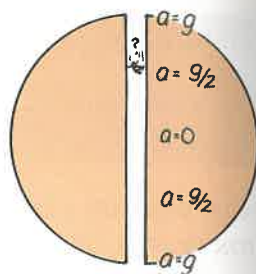
עוצמת שדה הכבידה של כדור הארץ, בדומה לחוק הכוח שהוא מפעיל על גופים שונים, מצייתת לחוק הריבוע ההופכי. השדה חזק ביותר סמוך לפני כדור הארץ ונחלש והולך עם ההתרחקות ממנו*.

שדה הכבידה בתוך כוכב לכת**

שדה הכבידה של כדור הארץ קיים גם בתוכו כמו מחוצה לו. תארו לעצמם שקדחו חור דרך כדור הארץ, הישר מן הקוטב הצפוני לקוטב הדרומי. התעלמו מן הבעיות המעשיות הכרוכות בכך, כמו לבה מותכת וטמפרטורות גבוהות, ונסו לחשוב מה היה קורה אילו נפלתם לתוך חור כזה. אילו נפלתם לחור בקצה שבקוטב הצפוני, הייתם נופלים תוך גידול במהירות כל הדרך עד למרכז כדור הארץ. אחר כך הייתה מהירותכם קטנה כל הדרך "למעלה", עד לקוטב הדרומי. בהעדר התנגדות האוויר, הדרך כולה, בכיוון אחד, הייתה נמשכת כ-45 דקות. אך אם תחמיצו את ההזדמנות להיאחזו בפתח הנגדי, תחזרו ליפול לעבר המרכז, ותחזרו לקוטב הצפוני בפרק זמן שווה.

התאוצה g שבה תימצאו תקטן בהדרגה ככל שתתקרבו למרכז כדור הארץ. מדוע? מכיוון שכל שאתם מתקרבים למרכז, אתם נמשכים גם כלפי מעלה על ידי כל המסה שנמצאת מעליכם. כשתימצאו במרכז כדור הארץ, המשיכה "למטה" תתאזן על ידי המשיכה "למעלה", והכוח השקול עליכם יתאפס ברגע שבו תטושו במהירות מרבית דרך מרכז כדור הארץ (איור 8.18). שדה הכבידה של כדור הארץ מתאפס במרכז הכדור!

הרכבו של כדור הארץ אינו אחיד. הוא דחוס ביותר בליבה שבמרכזו ודחוס במידה הפחותה ביותר על פני הכדור. ואולם, בתוך כוכב לכת שצפיפותו אחידה, עוצמת השדה גדלה באופן אחיד (באופן לינארי), מאפס במרכז עד g על פני הכוכב. אנו לא נעסוק כאן בהוכחת עובדה זאת. הדבר יוסבר, אולי, על ידי המורה. גרף המתאר את עוצמת שדה הכבידה בתוך כוכב לכת מלא בעל צפיפות אחידה ומחוצה לו מוצג באיור 8.19.

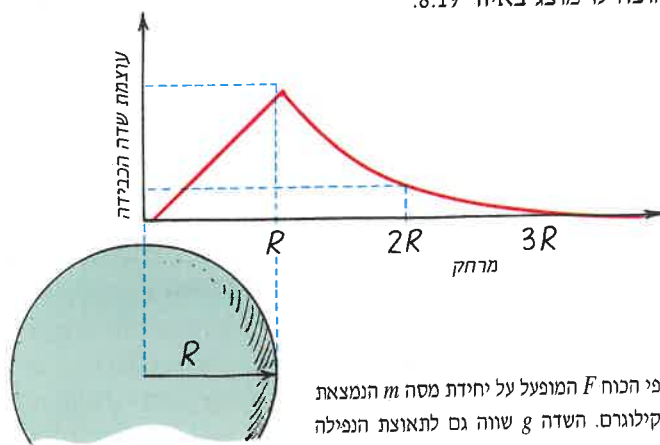


איור 8.18

בשעה שנופלים במהירות הולכת וגדלה בתוך בור שנקדח דרך כדור הארץ, התאוצה שבה נמצאים קטנה בהדרגה, מפני שחלק המסה של כדור הארץ ש"למעלה" מושך בכיוון המנוגד. במרכז הכדור המשיכות מבטלות זו את זו והתאוצה שם היא אפס. התנע שנרכש גורם להמשך התנועה מעבר למרכז תוך התגברות על תאוצה נגדית הולכת וגדלה לעבר פתח המנהרה שממול, שם התאוצה מגיעה שוב לערך g .

איור 8.19

עוצמת שדה הכבידה בתוך כוכב לכת בעל צפיפות אחידה נמצאת ביחס ישר למרחק הרדיאלי מן המרכז ומגיעה לערכה המרבי על פני הכוכב. מחוצה לו, היא נמצאת ביחס הפוך לריבוע המרחק מן המרכז.



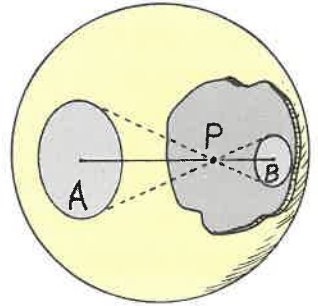
* החוק g של שדה הכבידה בנקודה כלשהי נמדד לפי הכוח F המופעל על יחידת מסה m הנמצאת שם. וכך $g = F/m$, והוא נמדד ביחידות ניוטון לקילוגרם. השדה g שווה גם לתאוצת הנפילה החופשית.

** ניתן לדלג על סעיף זה אם רוצים לקצר את הדיון בשדות כבידה.

*** מעניין לציין שבקילומטרים הראשונים מתחת לפני כדור הארץ התאוצה למעשה תגדל מכיוון שצפיפות החומר על פני הארץ נמוכה בהרבה מזו של החומר הדחוס שבמרכזו. המשיכה לאחור על ידי החומר שמעליכם, המקטינה את התאוצה, קטנה בהרבה מהגידול בתאוצה שנובע מההתקרבות אל החומר הדחוס שבליבת הכדור. משמעות הדבר היא שלאורך הקילומטרים הראשונים מתחת לפני הכדור משקלכם יגדל במעט. אחר כך, עמוק יותר, המשקל קטן, והוא מתאפס במרכז כדור הארץ.

שאלות

1. אם תיפלו לתוך מנהרה העוברת דרך מרכז כדור הארץ מקצה לקצה, ולא תנסו להיעצר באף אחד מקצות המנהרה, באיזה סוג של תנועה תנועו?
2. במחצית המרחק אל מרכז כדור הארץ, האם יהיה משקלכם גדול או קטן ממשקלכם על פני כדור הארץ?



איור 8.20

שדה הכבידה מתאפס בכל מקום בתוך קליפה כדורית בעלת צפיפות והרכב אחידים, מפני שרכיבי השדה מכל חלקיקי המסה שבקליפה מבטלים זה את זה. לדוגמה, מסה הנמצאת בנקודה P נמשכת לאזור הרחוק אך הגדול יותר A בדיוק באותה מידה שהיא נמשכת לאזור הקרוב אך הקטן יותר B.

תארו לעצמכם מערה במרכז כדור הארץ. חלל המערה הוא מקום חופשי מכוח הכובד, מפני שכוחות הכובד בכל הכיוונים מבטלים אלה את אלה. העובדה המפתיעה היא שגודל המערה אינו משנה כלל גם אם היא מהווה את רוב נפחו של כדור הארץ! בתוך כוכב לכת חלול, הדומה לכדור-סל, לא יפעל כל כוח כובד. כוחות הכובד מתבטלים באופן מלא בכל נקודה בתוך חלל הכדור. נתבונן לדוגמה בחלקיק P שמרחקו מהצד השמאלי של כוכב הלכת גדול כפליים ממרחקו מן הצד הימני. אילו כוח הכובד היה תלוי רק במרחק, היה P נמשך לצד שמאל בכוח השווה לרבע מן הכוח המושך אותו לימין (לפי חוק הריבוע ההופכי). אך כוח הכובד תלוי גם במסה. התחומים A ו-B משני הצדדים כלואים באותה זווית מרחבית, וקל לראות כי השטח A גדול פי ארבעה משטח B, ולכן גם מסתו גדולה פי ארבעה מזו של B, ללא תלות בגודל הזווית. הואיל ו- $\frac{1}{4}$ של 4 שווה 1, החלקיק P נמשך אל האזור A המרוחק יותר אך בעל המסה הגדולה יותר בדיוק באותו כוח שבו הוא נמשך אל האזור B הקרוב יותר אך בעל המסה הקטנה יותר. חל ביטול הדדי של הכוחות. אם נקדיש לכך עוד מעט מחשבה נמצא כי ביטול הדדי כזה יתרחש בכל מקום פנימה לקליפה של כוכב לכת, אם היא בעלת עובי והרכב אחידים. שדה כבידה קיים על פני כוכב הלכת ומחוצה לו, ועוצמתו והשתנותו הם כמו היתה כל מסת הכוכב מרוכזת במרכזו - מרכז המסה; אך בכל נקודה בפניו החלול, עוצמת שדה הכבידה היא אפס. כל מי שנמצא בפנים חסר משקל.

אף שכוח הכובד יכול להתבטל בתוך גוף או בין גופים, אי אפשר למסך את כוח הכבידה באותו אופן שבו ניתן למסך את הכוח החשמלי והמגנטי. אנו נראה שלחשמל ולמגנטיות יש גם כוחות דחייה ולא רק כוחות משיכה, וכך מתאפשר מיסוך, אך הכבידה מושכת בלבד לכן אי אפשר למסך בפניה. אפשר להוכיח זאת בעת ליקוי ירח. הירח נמצא בשדה הכבידה הן של השמש והן של כדור הארץ. בזמן ליקוי ירח כדור הארץ נמצא בדיוק בין השמש לירח. אילו נוצר מיסוך של כוח הכובד של השמש על הירח היה הדבר מתבטא בסטייה של הירח ממסלולו.

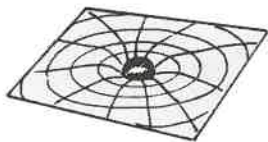
תשובות:

1. התנועה שתיווצר היא תנועה קדימה ואחורה, המכונה תנועה הרמונית פשוטה. כל תנודה הלך וחזור תימשך כ-90 דקות. מעניין לציין שלווין שיקיף את כדור הארץ במסלול מעגלי סמוך לפני הארץ ישלים גם הוא הקפה שלמה בתוך 90 דקות בקירוב. (אין זה צירוף מקרים, אם תמשיכו בלימודי הפיסיקה תלמדו שהתנועה ההרמונית הפשוטה, מעלה-מטה, היא פשוט הרכיב האנכי של התנועה המעגלית הקצובה - מעניין, הלא כן?)
2. משקלכם יהיה קטן יותר מפני שחלק המסה של כדור הארץ המושך אתכם "למטה" מתאזן בחלקו על ידי המסה שמעליכם המושכת "למעלה". אילו היתה מסת כדור הארץ מחולקת בצפיפות אחידה, משקלכם בחצי הדרך אל המרכז היה בדיוק מחצית ממשקלכם על פני הארץ. אך מכיוון שהליבה של כדור הארץ צפופה בהרבה מפניו (פי 7 לערך מצפיפות הסלעים על פני הארץ), המשקל בפועל יהיה מעט יותר ממחצית המשקל הרגיל. כמה בדיוק? הדבר תלוי באופן שבו הצפיפות משתנה עם העומק, ועל כך אין עדיין מידע.

גם אילו הירח ייטסוך קל ביותר, היתה השפעתו מצטברת במשך השנים ובאה לידי ביטוי בזמן התרחשותם של ליקויי הירח הבאים. אך שינויים כאלה אינם קיימים; ניתן לחשב את ליקויי העבר והעתיד בדיוק רב ביותר תוך שימוש בחוק הכבידה כפי שהוא. מעולם לא נתגלתה כל תופעת מיוסוך בכבידה.

לרעיון שדה הכוח יש שימוש נרחב בתורת החשמל והמגנטיות. הוא גם ממלא תפקיד מרכזי בתורת הכבידה כפי שהיא מוסברת בתורת היחסות הכללית של איינשטיין.

דגם של הכבידה שונה בתכלית מזה של ניוטון הציג איינשטיין בתורת היחסות הכללית שלו. איינשטיין תפס את שדה הכבידה כעיקום גיאומטרי של המרחב והזמן הארבעה-ממדיים; הוא הגיע למסקנה שגופים בעלי מסה גורמים לעיוות במרחב ובזמן הדומה במקצת לאופן שבו כדור כבד המונח על מזרן מים מעוות את המשטח הדו-ממדי של המזרן (איור 8.21). ככל שמסת הכדור גדולה יותר העיקום או העיוות גדול יותר. אם נגלגל גולה על פני המזרן הרחק מהכדור, היא תתגלגל במסלול המתווה קו ישר. אך אם נגלגל את הגולה קרוב לכדור, מסלולה יתעקם בעת תנועתה באזור המעוות של מזרן המים. אם התנועה תתרחש בנתיב סגור, הגולה תקיף את הכדור במסלול מעגלי או אליפסי. מנקודת הראות הניוטונית מסלול הגולה מתעקם מפני שהיא נמשכת לכדור. מנקודת ראותו של איינשטיין, מסלול הגולה אינו מתעקם עקב כוח כלשהו, אלא מפני שהמשטח שעליו היא נעה עקום*. בפרק 35 נדון בתורת הכבידה של איינשטיין ביתר פירוט.



איור 8.21

מרחב-זמן מעוות. המרחב הארבעה-ממדי מתעקם בקרבת כוכב בדומה למשטח הדו-ממדי של מזרן מים שמונח עליו כדור כבד.

תארו לעצמכם שאתם עמידים בכל מצב ושאתם יכולים לטוס בחללית אל פניו של כוכב כלשהו. משקלכם שם תלוי הן במסה שלכם, הן במסת הכוכב וכן במרחק שבין מרכז הכוכב ובין הטבור שלכם. אילו היה הכוכב משלים את בעירתו וקורס למחצית מגודלו מבלי שיחול שינוי במסתו, משקלכם על פניו, הנקבע לפי חוק הריבוע ההופכי, היה גדל פי ארבעה (איור 8.22). אילו היה הכוכב מתכווץ לעשירית מגודלו, משקלכם על פניו היה גדל פי 100. אם הכוכב ימשיך להתכווץ, שדה הכבידה על פניו יגבר וילך; חללית הנמצאת על פני הכוכב תתקשה יותר ויותר לעזוב אותו. המהירות שתידרש כדי להימלט מפניו, מהירות המילוט, תגדל ותלך. אם כוכב כדוגמת השמש שלנו יקרוס לרדיוס קטן מ-3 קילומטרים, מהירות המילוט מפניו תעלה על מהירות האור, ובמצב זה שום דבר - גם לא האור - יצליח להימלט מפניו! השמש תהפוך לבלתי נראית. היא תהיה לחור שחור.

חורים שחורים

* אל תתייאשו אם אינכם יכולים לדמות לעצמכם מרחב-זמן ארבעה-ממדי. איינשטיין עצמו אמר לעיתים קרובות לחבריו, "אל תנסו, גם אני אינני מצליח בכך". אולי איננו שונים בהרבה מגודולי ההוגים בזמנו של גלילאו, שלא יכלו להעלות בדעתם שכדור הארץ נע!

איור 8.22

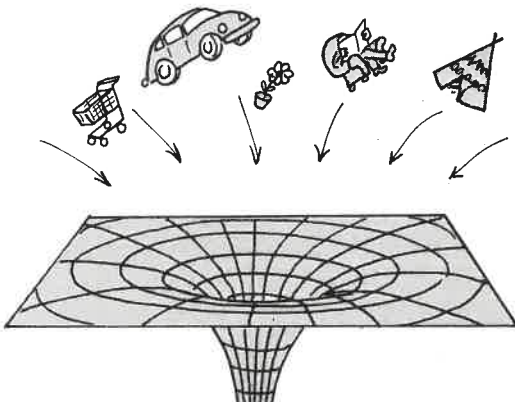
אם כוכב קורס למחצית רדיוסו המקורי ללא שינוי במסתו, הכבידה על פניו תגדל פי 4.



למעשה, מסתה של השמש קטנה מכדי שתרחש בה קריסה מעין זאת, אך בשעה שכוכבים מסוימים, שמסתם גדולה מארבע פעמים מסת השמש, ממצים את מאגר הדלק הגרעיני שלהם, הם קורסים; ואם מהירות הסיבוב שלהם אינה גדולה מדי, קריסת הכוכב תימשך עד שיגיע לצפיפות אינסופית. הכבידה על פניהם של כוכבים מכווצים אלה היא כה אדירה שהאור אינו יכול להימלט מהם. הם קרסו אל מחוץ לקיום הנראה. התוצאה היא **חורים שחורים** בלתי נראים לחלוטין.

מסתו של חור שחור אינה גדולה יותר מזו של הכוכב שממנו הוא קרס, וכך שדה הכבידה במרחק השווה לרדיוס הכוכב המקורי או עולה עליו אינו משתנה אחרי קריסת הכוכב. אך במרחקים קטנים יותר, סמוך לחור השחור, מתרחש מה שניתן להגדירו כקריסת המרחב עצמו, ומסביב כעין עיוות של המרחב, שלתוכו נמשך כל דבר שאיתרע מזלו להתקרב יתר על המידה - אור, אבק או חללית. אסטרונוטים שייקלעו לשוליו של תחום עיוות זה עשויים אולי להצליח להימלט בסיועה של חללית חזקה דיה. אך מעבר לגבול מסוים הדבר לא יתאפשר עוד, והם ייעלמו מן היקום הנראה.

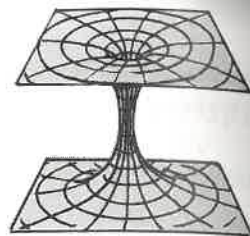
חוקרים אחדים העלו השערות כי חומר הנמשך אל תוך חור שחור עשוי לחזור ולהופיע במקום אחר דרך "חור לבן". מה שנבלע במקום אחד עשוי להיפלט במקום אחר. גם אם נכון הדבר, חורים שחורים אינם מפחידים פחות: כל מה שייפול לתוך חור שחור ייגרס לחלקיקי יסוד, ואם הוא ישוב ויופיע הרי זה בצורת חלקיקים כאלה. אם חורים שחורים הם שערים למעבר מתחום קיום אחד למשנהו, הרי אלה שערים שדבר לא יעבור בהם כמות שהוא (איור 8.24).



איור 8.23

כל מה שייפול לחור שחור יתפרק לחלקיקי יסוד.

אמנם אי אפשר לראות חור שחור, אך אפשר לגלות את קיומו לפי השפעת הכבידה שלו על כוכבים שכנים. הוא עשוי להיות, למשל, אחד מזוג כוכבים המהווים מערכת של כוכב כפול. במקרה כזה כוכב מאיר סמוך ייראה כאילו הוא מקיף במסלולו נקודה ריקה בחלל. עד כה הצטברו תצפיות המצביעות כנראה על מציאותם של חורים שחורים. המידע הנאסף כיום על גרמי השמים הוא כה רב, שיש צורך לשוב ולעדכן את ספרי הלימוד לעתים תכופות. אפשר שתוכלו להתעדכן בעזרת מוקה או מוקה המתעניינים באסטרונומיה.



איור 8.24

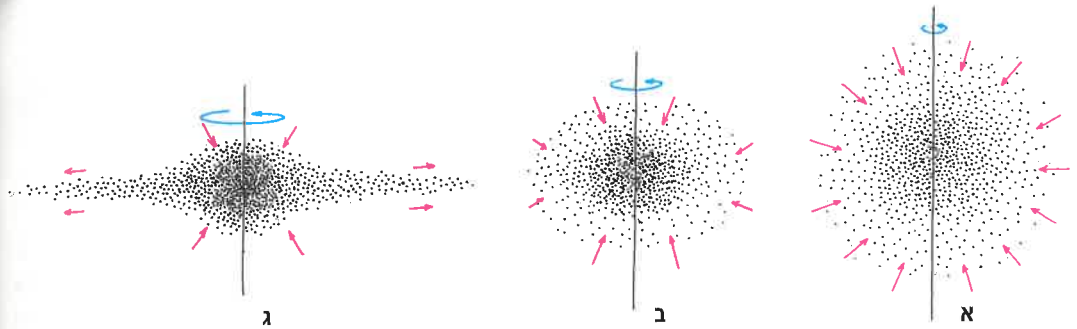
חור שחור הוא אולי השער ליקום אחר.

הכבידה העולמית

כולנו יודעים שעולמנו הוא כדור. אך מדוע כדורית הארץ? הסיבה לכך היא הכבידה. כל דבר מושך כל דבר אחר, וכך כדור הארץ משך וכיווץ את עצמו במידת האפשר! כל מה שבלט מפני הארץ כונס פנימה באופן שכל חלקי פני השטח של כדור הארץ נמצאים במרחק שווה ממרכז הכובד. כך קיבלה הארץ צורת כדור. אנו רואים איפוא שהשמש, הירח והארץ כדוריים מפני שזו הצורה שמכתיב חוק הכבידה (למעשה, השפעת הסיבוב הופכת אותם לסגלגלים במידה מסוימת; ואילו ההרים והעמקים שעל פני כדור הארץ הם פרי פעולתם של כוחות טקטוניים והשפעות האטמוספירה, ואינם אלא עיוות זעיר ביחס לצורתו הכדורית).

אם כל דבר מושך כל דבר אחר, גם כוכבי הלכת מושכים אלה את אלה. מסלולו של כוכב הלכת צדק, למשל, אינו מושפע רק מן הכוח שמפעילה עליו השמש; ישנם גם כוחות משיכה שמפעילים עליו כוכבי הלכת האחרים. כוחות אלה קטנים בהשוואה לכוח משיכתה של השמש, שמסתה גדולה פי כמה וכמה, ובכל זאת השפעתם ניכרת. כאשר כוכב הלכת שבתאי נמצא בקרבת צדק, משיכתו מסיטה מעט את צדק ממסלולו האליפטי החלק. שני כוכבי הלכת "מתנודדים" סביב מסלוליהם הצפויים. התנודדות זו מכונה הפרעה. בראשית המאה ה-19 נצפו הפרעות בלתי מוסברות במסלולו של כוכב הלכת אורנוס. ניתן היה להסביר זאת באחד משני אופנים: או שחוק הכבידה אינו תקף במרחק גדול כל כך מהשמש, או שכוכב לכת שמיני, בלתי ידוע, גורם להפרעה. שני חוקרים, האנגלי אדמס (J. C. Adams) והצרפתי לבריה (U. Leverrier), כל אחד בפני עצמו, הניחו שחוק ניוטון תקף, וכל אחד מהם חישב, באופן בלתי תלוי בחברו, היכן צריך כוכב הלכת השמיני להימצא. באותו זמן בקירוב שלחו שניהם מכתבים, כל אחד למצפה הכוכבים שלו, ובהם הוראות לחיפוש באזור מסוים של השמים. בקשתו של אדמס לא טופלה במועד עקב אי הבנה במצפה הכוכבים של גריניץ', אך פנייתו של לבריה למנהלו של מצפה הכוכבים בברלין זכתה לתשומת לב מיידית. באותו לילה ממש נתגלה כוכב הלכת נפטון!

הפרעות אחרות במסלולו של כוכב הלכת אורנוס הובילו לחיזוי ולגילוי של כוכב הלכת התשיעי, פלוטו, בשנת 1930 במצפה הכוכבים לוול (Lowell) שבאריזונה, ארה"ב. לפלוטו נדרשות 248 שנים כדי להשלים הקפה אחת סביב השמש, כך שאיש לא יזכה לראותו שוב במקום שבו הוא נתגלה עד שנת 2178. ההפרעות במסלוליהם של כוכבים כפולים וצורותיהן של גלקסיות רחוקות הן הוכחות לכך שחוק הכבידה תקף גם במרחבי היקום. למעשה, הכבידה היא העומדת ביסוד גורלו של היקום כולו. הדעה המקובלת כיום במדע היא כי תחילתו של היקום בהתפוצצות של כדור לוחט בראשית, שאירעה לפני 15-20 מיליארד שנים. זוהי תיאוריית המפץ הגדול. כל החומר התפרץ כלפי חוץ, ומאז הוא ממשיך בהתפשטות. כתוצאה מכך אנו מוצאים את עצמנו ביקום מתפשט. התפשטות זו עשויה להימשך ללא גבול, או שכוחות הכבידה המופעלים על ידי



איור 8.25

היווצרות מערכת שמש.
(א) כדור של גז בין-כוכבי המסתובב באיטיות מתכווץ בגלל כוחות הכבידה הפועלים בתוכו. (ב) בתוך כך התנע הזוויתי שלו נשמר על ידי הגדלת מהירות הסיבוב. (ג) התנע המוגדל של חלקיקים בודדים ושל צבירי חלקיקים גורם להם לנוע במסלולים רחבים יותר מסביב לציר הסיבוב, ובכך הם יוצרים צורה כללית של דיסקה. שטח הפנים הגדול יחסית של הדיסקה גורם להצטננות ולהתעבות של חומר במערבולות מסתחררות שבהן נוצרים כוכבי לכת.

כל הגלקסיות ויתר החומר שביקום עשויים להתגבר עליה ובשלב מסוים היא תיעצר. בדומה לאבן הנזרקת כלפי מעלה, שנסיקתה מסתיימת בראש המסלול ואז היא מתחילה לרדת חזרה, עשוי היקום לקרוס שנית ולהתכווץ. זה יהיה "הריסוק הגדול". אחר כך, אפשר להניח, יתרחש מפץ גדול נוסף, שבו ייווצר יקום חדש. התהליך עשוי לחזור ולהישנות וייתכן בהחלט שהוא מחזורי. אם כך הוא הדבר, אנחנו חיים ביקום מתנודד.

אין אנו יודעים האם תימשך ההתפשטות לעד וללא גבול או שמדובר בתהליך מחזורי. זאת מפני שאיננו בטוחים האם יש די מסה ביקום כדי לעצור את ההתפשטות. זמן המחזור של התנודה נאמד במעט פחות מ-100 מיליארד שנים. אם היקום אכן מתנודד, מי יוכל לומר כמה פעמים כבר חזר ונשנה תהליך זה? איננו מכירים כל דרך שבה יכול היה היקום הקודם להותיר עקבות שיצביעו על קיומו, שכן כל החומר שביקום מצטמצם לאוסף של חלקיקים תת-אטומיים במהלכו של אירוע כזה. רק אחר כך יתחולל שוב תהליך היווצרותם של יסודות, כוכבים, גלקסיות, ולבסוף חיים. כל חוקי הטבע, כדוגמת חוק הכבידה, עשויים להתגלות אז מחדש על ידי צורות חיים עילאיות שיתפתחו ביקום, ותלמידים שילמדו את החוקים יקראו על אותן תופעות שעליהן אתם קוראים עכשיו. חישבו על כך!

מעטות הן התיאוריות שהיתה להן השפעה כה רבה על המדע ועל התרבות האנושית כמו תורת הכבידה של ניוטון. הצלחת רעיונותיו של ניוטון הובילה את תקופת ההשכלה, משום שניוטון הוכיח כי באמצעות תצפיות והיקשים הגיוניים, תוך שימוש במודלים מכניים והסקת חוקים מתמטיים, מסוגלים בני האדם לחשוף את עצם מנגנון פעולתו של היקום החומרי. כמה מרחיקת לכת היא העובדה שכל הירחים וכוכבי הלכת, השמשות והגלקסיות, ככולם שולט חוק אחד כה פשוט ונפלא והוא:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

ניסוחו של כלל פשוט זה הוא אחת הסיבות העיקריות להצלחותיו של המדע שבאו לאחר מכן, שכן הוא נתן מקום לתקווה כי ניתן יהיה לתאר גם תופעות אחרות בעולמנו באמצעות חוקים פשוטים באותה מידה.

תקווה זו הזינה וטיפחה את חשיבתם של מדענים, אמנים, סופרים ופילוסופים רבים בני המאה ה-18. ביניהם היה הפילוסוף האנגלי ג'ון לוק (Locke), שטען כי התצפית והטיעון ההגיוני, כפי שהודגמו בידי ניוטון, צריכים לשמש עבורנו כמדריך וכשופט הטוב ביותר בכל פעולותינו וכי יש לבלוש בטבע כולו, ואף בחברה, אחר "חוקי הטבע" שאולי קיימים. תוך הצגת הפיסיקה של ניוטון כדגם למבנה הגיוני, הציעו לוק וההולכים בדרכו תבנית של משטר המבוסס על חוקי ההגיון.

לקריאה נוספת

איינשטיין, א', ולי אינפלד. התפתחות הפיזיקה החדשה. ספריית פועלים, 1976.

קולדר נ'. היקום על פי איינשטיין. מסדה, 1983.

שאלות חזרה

1. מי אסף את הנתונים שהראו כי כוכבי הלכת נעים במסלולים אליפטיים מסביב לשמש? מי גילה את העובדה עצמה? מי הסביר אותה?

חוקי קפלר

2. איזה קשר גילה קפלר בין מהירויותיהם של כוכבי הלכת לבין מרחקיהם מן השמש?

3. איזה קשר גילה קפלר בין זמני ההקפה של כוכבי הלכת לבין מרחקיהם מן השמש?

4. מה חשב קפלר על כיוונו של הכוח שפועל על כוכבי הלכת?

חוק הכבידה העולמית של ניוטון

5. מה חשב ניוטון על כיוונו של הכוח הפועל על כוכבי הלכת?

6. איזו תובנה גילה ניוטון אודות המשותף בין תפוח נופל לבין הירח?

7. כיצד יכול הירח "ליפול" מבלי להתקרב אל כדור הארץ?

8. כיצד תלוי כוח הכבידה בין שני גופים במסות שלהם?

9. כיצד תלוי כוח הכבידה בין שני גופים במרחק ביניהם?

קבוע הכבידה העולמית G

10. כיצד נמדד G?

11. מה גודלו של כוח הכבידה בין כדור הארץ לבין גופכם?

12. מה גודלו של כוח הכבידה בין כדור הארץ לבין מסה בת קילוגרם אחד המונחת על פניו?

כבידה ומרחק: חוק הריבוע ההופכי

13. מדוע קטן כוח הכבידה בין שני גופים לרבע ולא לחצי מערכו כאשר המרחק ביניהם גדל פי 2?

14. תפוח שמשקלו ניוטון אחד תלוי על העץ. על אותו עץ, בגובה כפול מעל פני הארץ, תלוי תפוח שני בעל אותה מסה. מדוע שווה, למעשה, משקלו של תפוח זה למשקל התפוח התחתון ואינו $\frac{1}{4}$ ניוטון?

תקציר מונחים

חוקי קפלר של תנועת כוכבי הלכת:

חוק 1: כל כוכב לכת נע במסלול שצורתו אליפסה, שהשמש נמצאת באחד ממוקדיה.

חוק 2: הקו המחבר בין השמש ובין כל כוכב לכת עובר על פני שטחים שווים בפרקי זמן שווים.

חוק 3: ריבועי זמני ההקפה (בימים, חודשים או שנים) של כוכבי הלכת מתכונתיים לחזקות השלישיות של מרחקיהם הממוצעים מהשמש (לכל כוכבי הלכת $R^3 \sim T^2$).

חוק הכבידה העולמית

מסה אחת בכוח הנמצא ביחס ישר למכפלת המסות וביחס הפוך לריבוע המרחק המפריד ביניהן:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

חוק ריבוע-ההופכי חוק המייחס את עוצמתו של גודל מסוים לאחד-חלקי-הריבוע של המרחק ממקור התופעה:

$$\text{עוצמה} \sim \frac{1}{\text{המרחק}^2}$$

כוח הכובד מצטיית לחוק ריבוע-ההופכי וכמוהו גם תופעות חשמליות ומגנטיות, האור, הקול ותופעות קרינה.

חוסר משקל מצב שבו נדמה שהמשיכה הכבידתית אינה פועלת.

גיאות שיא מצבי הגיאות (והשפל) המתרחשים בראשית החודש העברי ובסופו כאשר השמש, הירח וכדור הארץ נמצאים על קו ישר אחד, באופן שהגיאיות שגורמים השמש והירח מחזקות זו את זו. התוצאה היא גיאות גבוהה מהממוצע (ושפל נמוך מהממוצע).

גיאות מתונה (מכונה גם "גיאות זוטא", "גיאות נפל")

מצבי הגיאות (והשפל) המתרחשים בשעה שהירח נמצא באמצע התמלאותו, בין זמן מולד הירח לזמן הירח המלא, או באמצע התחזורתו, בין זמן הירח המלא לזמן המולד הבא. הגיאיות שגורמים הירח והשמש מבטלות חלקית זו את זו. התוצאה היא גיאות נמוכה מהממוצע (ושפל חלש מהממוצע).

שדה כבידה המרחב מסביב לגוף בעל מסה שבו פועל כוח משיכה על כל מסה אחרת.

חור שחור מצבו של כוכב כבד שקרס קריסה כבידתית מלאה; בחור שחור שדה הכבידה על פני השטח כה חזק, שאפילו אור הכוכב אינו יכול להימלט ממנו.

המפץ הגדול ההתפוצצות הבראשיתית שבעקבותיה, כך סבורים, נוצר היקום המתפשט.

15. מה הקשר בין חוקי קפלר לבין חוק הכבידה?

משקל וחוסר משקל

16. האם יתכווצו הקפיצים במאזני אמבטיה יותר או פחות אם תשקלו את עצמכם במעלית המואצת כלפי מעלה? כלפי מטה?

17. האם יתכווצו הקפיצים במאזני אמבטיה יותר או פחות אם תשקלו את עצמכם במעלית הנעה במהירות קבועה כלפי מעלה? כלפי מטה?

18. מה ההבדל בין חוסר משקל לבין חוסר משקל נדמה?

גיאות ושפל

19. האם הירח מקיף את כדור הארץ, האם כדור הארץ מקיף את הירח, או שמא שניהם מקיפים זה את זה? נמקו.

20. מדוע מפעילים השמש והירח כוח גדול יותר על צידו האחד של כדור הארץ מזה שהם מפעילים על צידו השני?

21. במה תלויים יותר הגיאות והשפל: בחוזקו של כוח הכבידה או בהפרשי החוזק? נמקו.

22. מהו ההבדל בין "גיאות שיא" ל"גיאות מתונה"?

גיאות ושפל בארץ ובאטמוספירה

23. השוו בין ממדי הגיאות והשפל בימים לממדיהם בכדור הארץ ה"מוצק".

24. מהם גיאות ושפל מגנטים?

25. מדוע הגיאות גבוהה ביותר בזמן מולד הירח ובזמן שהירח מלא?

שדות כבידה

26. מהו שדה כבידה, וכיצד אפשר לגלות את נוכחותו?

שדה הכבידה בתוך כוכב לכת

27. מהו גודלו של שדה הכבידה במרכז של כדור הארץ?

28. מהו גודלו של שדה הכבידה במחצית הדרך אל מרכזו של כוכב לכת בעל צפיפות אחידה?

29. מה היה גודלו של שדה הכבידה במקום כלשהו בתוך כוכב לכת חלול, אילו היה קיים כוכב כזה?

30. בפרקים הבאים נראה שניתן למסך את השדה החשמלי ואת השדה המגנטי. מדוע אי אפשר למסך את שדה הכבידה?

תורת הכבידה של איינשטיין

31. ניוטון טען שמשלולם של כוכבי הלכת מתעקם מפני שפועל עליהם כוח. מדוע מתעקם משלולם כוכבי הלכת לפי איינשטיין?

חורים שחורים

32. אילו התכווץ כדור הארץ מבלי שמסתו תשתנה, מה היה קורה למשקלכם כשהייתם עומדים על פני הארץ?

33. מה קורה לעוצמתו של שדה הכבידה על פני כוכב לכת מתכווץ?

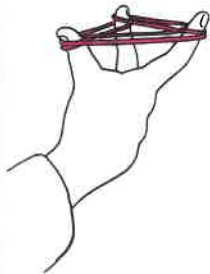
34. מדוע חורים שחורים הם בלתי נראים?

כבידה עולמית

35. מדוע כדור הארץ "עגול"? מדוע אין הוא כדור מושלם?

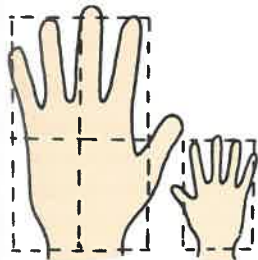
36. מה ההבדל בין המפץ הגדול לבין הריסוק הגדול?

מטלות בית



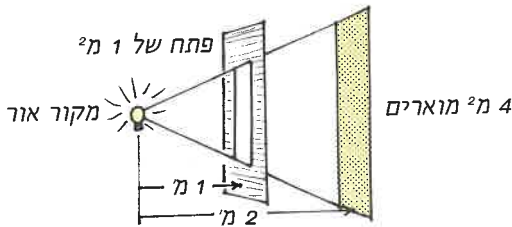
1. הרימו את האגודל, את האצבע ואת האמה כמתואר באיור. מיתחו גומייה חזקה בין האגודל לאצבע. היא מייצגת את כוח הכבידה בין השמש לכדור הארץ. מיתחו גומייה בינונית בין האגודל לאמה, שתייצג את כוח הכבידה בין השמש לירח.

לבסוף מיתחו גומייה חלשה בין האצבע לאמה, שתייצג את כוח הכבידה בין כדור הארץ לירח. שימו לב כיצד כל אצבע מפעילה כוח על כל האחרות, בדומה למה שקורה לגבי כוח הכבידה בין השמש לכדור הארץ ולירח.



2. החזיקו את הידיים מושטות קדימה מול עיניכם, היד האחת במרחק כפול מן השנייה, והעריכו הערכה שטחית איזו יד נראית גדולה יותר. לרוב בני האדם הידיים נראות באותו

גודל בקירוב, ויש לא מעטים שהיד הקרובה תיראה להם גדולה במעט. מעטים בלבד יעריכו שהיד הקרובה נראית גדולה פי ארבעה. אך לפי חוק הריבוע ההופכי, היד הקרובה אמורה להיראות ארוכה פי שניים ורחבה פי שניים, ולכן לתפוס שטח גדול פי ארבעה משדה הראייה לעומת היד הרחוקה. הידיעה שלשתי הידיים אותו גודל כל כך מושרשת בנו, שהיא דוחה את המידע הנצפה. אולם אם



תיתנו לידיים לחפוף מעט זו את זו ותצפו בהן בעין אחת סגורה, היד הקרובה תיראה בבירור גדולה יותר. כאן עולה שאלה מעניינת: אילו אשליות נוספות מטעות אותנו מבלי שנוכל לבדוק אותן בקלות רבה כל כך?

תרגילים

1. כוח הכבידה פועל על כל הגופים ביחס ישר למסותיהם. מדוע, אם כן, גוף כבד אינו נופל מהר יותר מגוף קל?
2. מה שוקל יותר, גיליון נייר אלומיניום ("נייר כסף") או אותו גיליון שכיוצו אותו לכדור קטן?
3. הירח נמשך אל השמש בכוח כבידה הגדול פי שניים ויותר מכוח הכבידה שמפעיל עליו כדור הארץ. מדוע, איפוא, מקיף הירח את כדור הארץ ואינו נופל על השמש?
4. לאילו כוכבי לכת יש זמן מחזור גדול יותר משנת ארץ אחת, לאלה הקרובים לשמש יותר מכדור הארץ או לאלה הרחוקים מהשמש יותר ממנו?
5. מה גודלו ומה כיוונו של כוח הכבידה הפועל על אדם שמשקלו 700 ניוטון, על פני כדור הארץ?
6. משקלו של תפוח סמוך לפני כדור הארץ הוא 1 ניוטון. מה משקלו של כדור הארץ בשדה הכבידה של התפוח?



- הקיר מהפתח גם הוא 1 מ' (2 מ' ממקור האור), השטח המואר יהיה בן 4 מ². כמה מטרים רבועים יהיו מוארים אם הקיר יימצא במרחק 3 מ' ממקור האור? במרחק 5 מ'! במרחק 10 מ'?
10. אם ברצונכם להרוויח בקנייה לפי משקל של חומר יקר כלשהו בגובה אחד מעל פני הים ובמכירתו בגובה אחר, באותו מחיר ליחידת משקל, האם עליכם למכור במקום הגבוה יותר או לקנות שם? (הניחו שהשקילה נעשית במאזני קפיץ.)
11. מסתו של כוכב הלכת צדק גדולה פי 300 ויותר ממסת כדור הארץ, לכן אנו עשויים לחשוב שגוף המצוי על פני צדק ישקול פי 300 ויותר מאשר על פני כדור הארץ. בפועל מתברר שגוף היה שוקל על פני צדק בקושי פי 3 ממשקלו על פני כדור הארץ. התוכלו להציע הסבר לעובדה זאת? (רמז: תנו לגורמים השונים בנוסחת כוח הכבידה להנחות אתכם.)
12. בהסתמך על הנתונים בתרגיל הקודם, נסו להעריך בכמה גדול יותר הרדיוס של צדק מרדיוס כדור הארץ.
13. מדוע הנוסעים במטוס סילון מגביה טוס חשים במשקלם, ולעומתם הנוסעים בחללית, כדוגמת מעבורת חלל המקיפה את כדור הארץ, חווים תחושת חוסר משקל?
14. אילו היה כדור הארץ משלים סיבוב אחד סביב צירו ב-90 דקות ולא ב-24 שעות, האם הייתם נלחצים אל פני כדור הארץ אילו שהייתם בקו המשווה? בקטבים? בישראל? הסבירו.
15. אילו ישתבם במכונית שנסעה בטעות מעבר לקצהו של צוק, מדוע הייתם חווים תחושת חוסר משקל? האם עדיין היה כוח הכובד פועל עליכם במצב זה?
16. אילו נמצאתם במעלית הנופלת נפילה חופשית והיה נשט מידכם עיפרון, הייתם רואים אותו מרחף בחלל המעלית. האם העיפרון נופל? הסבירו.
17. הסבירו מדוע הטיעון הבא שגוי: "השמש מושכת את כל הגופים שעל פני כדור הארץ. בחצות הלילה, כשהשמש נמצאת בדיוק מתחתינו, היא מושכת גוף מסוים באותו

7. כדור הארץ והירח נמשכים זה אל זה בכוח הכבידה. האם כדור הארץ, שמסתו גדולה יותר, מושך את הירח, בעל המסה הקטנה יותר, בכוח שהוא גדול יותר, קטן יותר או שווה לכוח שבו הירח מושך את כדור הארץ? (את מי תמשוך בכוח גדול יותר גומייה המתוחה בין האגודל לאצבע, את האגודל או את האצבע?)
8. אילו הייתה מסתו של כדור הארץ גדלה מעט בעוד שאר הגורמים נותרים ללא שינוי, האם היה משקלכם גדל גם הוא? (רמז: הסתייעו בנוסחת כוח הכבידה.)
9. מקור אור קטן המוצב במרחק של 1 מ' לפני פתח ששטחו 1 מ² מאיר את הקיר שמאחורי הפתח. אם מרחק

כיוון שאליו מושך אותו כדור הארץ; בצהריים, כשהשמש נמצאת בדיוק מעל לראש, היא מושכת את הגוף בכיוון מנוגד לזה שאליו מושך אותו כדור הארץ. לכן כל הגופים אמורים להיות כבדים מעט יותר בחצות הלילה משהם בצהריים." (רמז: התשובה קשורה לשני התרגילים הקודמים.)

18. אילו גדלה מסת כדור הארץ, משקלכם היה גדל בהתאמה. אך אילו גדלה מסת השמש, לא היה הדבר משפיע על משקלכם כלל. מדוע?

19. רוב בני האדם יודעים שגאות הים נגרמת עקב השפעת הכבידה של הירח. רוב בני האדם חושבים, לכן, שמשיכת הכבידה של הירח על כדור הארץ גדולה יותר ממשיכת הכבידה של השמש על כדור הארץ. מה דעתכם?

20. אם מישוהו ימשוך משיכה חזקה בשרוול חולצתכם, קרוב לוודאי שהשרוול ייקרע. אך אם כל חלקי החולצה יימשכו באותה מידה, שום דבר לא ייקרע. כיצד זה קשור לכוחות גאות?

21. האם היתה גאות הים מתרחשת אילו כוח המשיכה של הירח (ושל השמש) היה שווה על כל חלקי כדור הארץ? הסבירו.

22. מדוע מרווח הזמן בין שתי גאותות אינו 12 שעות בדיוק?

23. בהתייחס לגאותות שיא ולגאותות מתונה, מתי גובה הגאותות הוא מזערי?

24. בזמן שבו הגאותות גבוהה במיוחד, האם יהיה השפל שאחריה נמוך במיוחד? נמקו את תשובתכם במונחים של "שימור כמות המים". (כשדוחפים בעזרת הגוף את המים שבאמבטיה, בעת שהם עמוקים יותר בצד אחד, האם יהיו רדודים יותר בצד האחר?)

25. יחסית, מעט מאוד חול מרחף במי הים התיכון, בעיקר מפני שאין בו גאות ושפל משמעותיים. התוכלו לשער מדוע זעומה תופעת הגאות והשפל בים התיכון? ובהקשר זה, האם יש גאות ושפל בים המלח? בכנרת? בבריכת שחייה? בכוס מים? הסבירו.

26. גוף האדם מורכב מכ-80 אחוז מים. הייתכן שמשיכת הכבידה של הירח תחולל גאות ושפל ביולוגיים, כלומר, שינויים מחזוריים בהתחלקות הנוזלים בין חלקי הגוף? (מהו ההפרש בין כוחות המשיכה של הירח על חלקו הקרוב ועל חלקו הרחוק של הגוף?)

27. הואיל ו"תפיחת הגאות" עוברת על פני כדור הארץ ב-24 שעות בקירוב, האם פירושו של דבר שהגאות העולה

בחוף מתקדמת במהירות העולה על זו של מטוס סילון (שרק בקושי יכול "להשיג" את קצב הסיבוב של כדור הארץ)?

28. מדוע בדיוק מתרחשים גאות ושפל בקליפת כדור הארץ ובאטמוספירה?

29. ערכו של g על פני כדור הארץ הוא 9.8 מ/ש². בקירוב. מהו ערכו של g במרחק השווה לפעמיים רדיוס כדור הארץ?

30. אילו היה הרכבו של כדור הארץ אחיד, מה היה ערכו של g בתוך כדור הארץ בחצי הרדיוס?

31. אילו היה הרכבו של כדור הארץ אחיד, האם משקלכם בתחתית מכרה עמוק היה גדול יותר או קטן יותר? נמקו.

32. למעשה, אפילו במכרות העמוקים ביותר מוצאים שחל גידול במשקלם של גופים. מה אפשר ללמוד מכך על התפלגות הצפיפות בכדור הארץ?

33. למי דרוש דלק רב יותר, לטיל המשוגר מכדור הארץ לירח או לטיל המשוגר מהירח לכדור הארץ? מדוע?

34. אילו יכולתם לקדוח מנהרה בכוכב לכת שהרכבו אחיד ולהיכנס לתוכה פנימה, האם היה משקלכם גדל או קטן? אילו עמדתם על פני כוכב מתכווץ, האם היה משקלכם גדל או קטן? מדוע אין התשובות שוות?

35. בעזרת נוסחת חוק הכבידה הוכיחו כי אילו התכווצה השמש שלנו והפכה לחור שחור, מסלולו של כדור הארץ לא היה מושפע.

36. אילו היה כדור הארץ חלול אך בעל אותה מסה ואותו רדיוס המוכרים לנו, האם היה משקלכם, במקום שבו אתם נמצאים כרגע, גדול יותר, קטן יותר, או שווה למשקלכם הנוכחי? הסבירו.

37. בסעיף "שדה הכבידה בתוך כוכב לכת" טענו שאי אפשר למסד את כוח הכובד אך שרכיבי הכבידה בתוך קליפת מסה אחידה מבטלים זה את זה. האין כאן סתירה? מדוע?

38. אילו נחת גוף בעל מסה גדולה על פני הקליפה של כוכב לכת חלול, האם היו התולעים בתוך חלל הכוכב חשות משיכה כבידתית לעברו? נמקו את תשובתכם.

39. אם רוצים לדייק, הרי שמשקלכם כשאתם נמצאים בקומת הקרקע של גורד שחקים קטן במעט מהרגיל. מדוע?

40. אדם שייפול לחור שחור, קרוב לוודאי שיהרג בגלל פעולתם של כוחות גאות עוד בטרם יגיע לחור השחור עצמו. הסבירו מדוע.

4. נניח שכוח הכובד בין השמש לכדור הארץ נעלם ובמקומו מחזיק את הארץ במסלולה כבל פלדה שנמתח בין השמש לכדור הארץ. נסו לאמוד את העובי (הקוטר) של כבל כזה. יש לדעת שחוזקה של פלדה הוא 2×10^{11} ניוטון/מ². כלומר, כבל פלדה ששטח החתך שלו 1 מ² יכול לשאת בכוח של 2×10^{11} ניוטון.

5. מרחקו של שבתאי מן השמש גדול פי 10 בקירוב ממרחקו של כדור הארץ ממנה. בעזרת החוק השלישי של קפלר נסו לאמוד בקירוב את הזמן - ביחידות של שנת ארץ - הדרוש לשבתאי להשלים הקפה אחת סביב השמש.

1. ערכו של g על פני כדור הארץ הוא בקירוב 9.8 מ/ש². מהו ערכו של g במרחק השווה לארבע פעמים רדיוס כדור הארץ?

2. מסה בת 1 ק"ג על פני כדור הארץ נמשכת אליו בכוח של 9.8 ניוטון. חשבו את כוח הכובד שבו המסה בת 1 ק"ג, הנמצאת על פני כדור הארץ, נמשכת לירח. (מסת הירח היא 7.4×10^{22} ק"ג ומרחקו מכדור הארץ 3.8×10^8 מ').

3. חשבו את כוח משיכת הכבידה בין כדור הארץ (שסתו 6×10^{24} ק"ג) לשמש (שסתה 2×10^{30} ומרחקה 1.5×10^{11} מ').