

תורת היחסות הכללית



תורת היחסות המצומצמת נקראת בשם זה מפני שהיא דנה בהשתמרות חוקי הטבע בעיקר במערכות ייחוס הנעות במהירויות קבועות - כלומר, במערכות ייחוס שאינן מואצות. כזכור, הניח איינשטיין בשנת 1905 כי לא קיימת תצפית הנערכת בחדר סגור ומסוגלת לקבוע האם החדר נח או נע במהירות קבועה; כלומר, אין מדידה מכנית, חשמלית, אופטית או כל מדידה פיסיקלית שניתן לערוך בתוך תא סגור ברכבת הנעה תנועה חלקה על מסילה ישרה (או במטוס הטס באוויר דומם כשחלונותיו מכוסים) אשר יכולה לספק מידע כלשהו באשר לשאלה האם הרכבת נעה או נחה (או האם המטוס טס או נח על מסלול ההמראה). אך אם פסי הרכבת אינם חלקים או ישרים (או אם האוויר סוער), המצב שונה לחלוטין: התנועה לא תהיה עוד קצובה אלא תנועה מואצת, שבה ניתן להבחין בקלות. אמונתו העמוקה של איינשטיין שחוקי הטבע חייבים להתבטא בצורה שווה בכל מערכת ייחוס - מואצת או שאינה מואצת - היתה המניע העיקרי שהוביל אותו לתורת היחסות הכללית - תורת כבידה חדשה. בבסיסה של תורה זו מונח הרעיון שלא ניתן להבחין בין השפעות הכבידה והתאוצה.

איור 35.1

כל דבר הנמצא בספינת חלל שאינה בתאוצה ומרוחקת מהשפעות כבידה הוא חסר משקל.



עקרון השקילות

איינשטיין דימה לעצמו כי הוא מצוי בחללית המרוחקת מאוד מהשפעות הכבידה. בחללית כזאת, השרויה במנוחה או נעה בתנועה קצובה יחסית לכוכבים הרחוקים, הוא וכל החפצים שבספינה ירחפו חופשית; בחללית לא יהיו כיווני "מעלה" או "מטה". אך אם יופעלו מנועי החללית והספינה תואץ, המצב ישתנה; ניתן יהיה לחוש בתופעות הדומות לכבידה. הדופן הסמוכה למנועי החללית תדחף כלפי מעלה את כל מי שמצוי בחללית ותהיה לרצפה, בעוד הדופן הנגדית תהפוך לתקרה. נוסעי החללית יוכלו לעמוד על הרצפה ואף לקפוץ מעלה-מטה. אילו היתה תאוצת החללית שווה ל- g , אזי היו נוסעיה עשויים להשתכנע שהספינה אינה מואצת, אלא נחה על פני כדור הארץ (איור 35.2).

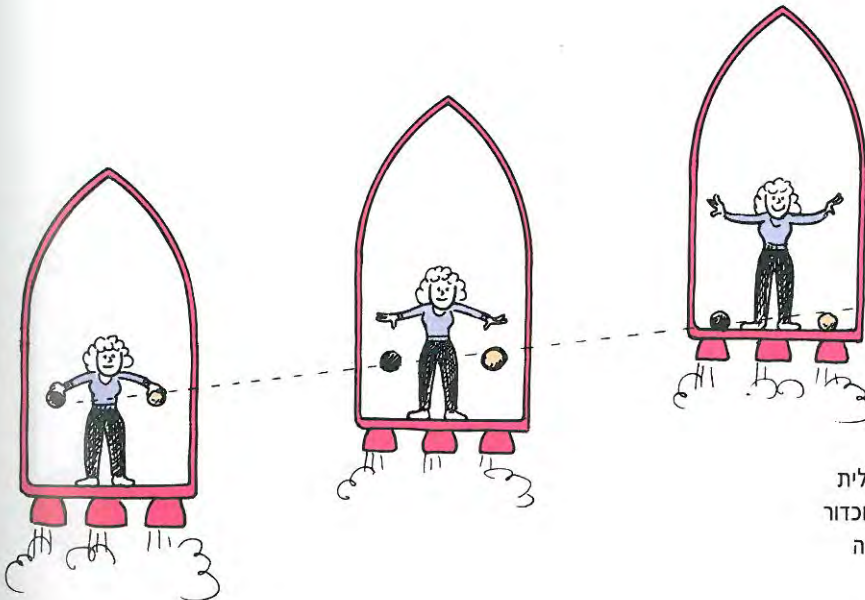
כדי לבחון את "הכבידה" החדשה הפועלת בחללית המואצת שקל איינשטיין מה יהיו תוצאות הפלתם של שני כדורים - למשל, אחד העשוי מעץ ואחר העשוי מעופרת. עם שחרור הכדורים הם יתחילו לנוע כלפי מעלה זה בצד זה במהירותה של החללית ברגע השחרור. אילו נעה החללית במהירות קבועה (תאוצה אפס), הכדורים היו נותרים תלויים במקומם, מפני שגם הם וגם החללית היו נעים במידה שווה. אך מכיוון שהחללית מואצת, רצפתה תנוע כלפי מעלה במהירות גדולה יותר מהכדורים, ולכן הם יפגעו ברצפה (איור 35.3). שני הכדורים, ללא תלות במסתם, יפגעו ברצפה בו-זמנית. יושבי החללית, בהיזכרם בניסוי שערך גלילאו מן המגדל הנטוי של פיזה, עשויים לייחס את תצפיותיהם לכוח הכבידה.

שני ההסברים לנפילת הכדורים תקפים במידה שווה, ואיינשטיין הפך את השקילות הזו - דהיינו את חוסר האפשרות להבחין בין כבידה לבין תאוצה - ליסוד תורת היחסות הכללית שלו. לפי **עקרון השקילות** לא ניתן להבחין בין מדידות מקומיות הנעשות במערכת ייחוס מואצת לבין מדידות הנערכות בשדה



איור 35.2

כאשר ספינת החלל מואצת
היושב בתוכה חש ב"כבידה".



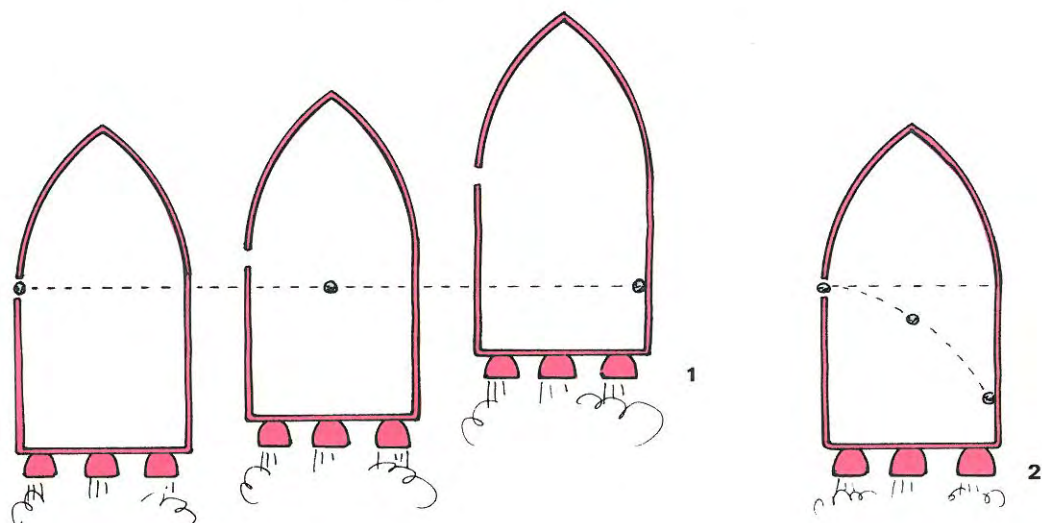
איור 35.3

בעיני צופה המצוי בחללית
מואצת, כדור העופרת וכדור
העץ המשוחררים בתוכה
נופלים יחד.

כבידה ניוטוני. חשיבותה של שקילות זו לא היתה כה גדולה אילו היתה ישימה לתופעות מכניות בלבד, אך איינשטיין הוסיף וקבע כי העיקרון תקף לכל התופעות בטבע; הוא תקף גם עבור כל התופעות האופטיות והאלקטרומגנטיות.

מסלולו של כדור הנזרק לצדדים בחללית השרויה במנוחה באזור חופשי מכוחות כבידה נראה כקו ישר הן לצופה הנמצא בתוך החללית והן לצופה נייח הנמצא מחוץ לה. אך אם הספינה מואצת, הרצפה תשיג את הכדור, בדיוק כמו בדוגמה הקודמת. לצופה שמחוץ לספינה המסלול ייראה עדיין קו ישר, אך לגבי הצופה שבחללית המואצת המסלול יהיה עקום ויקבל צורת פרבולה. אותו דבר עצמו יתרחש גם לגבי אלומת אור (איור 35.4).

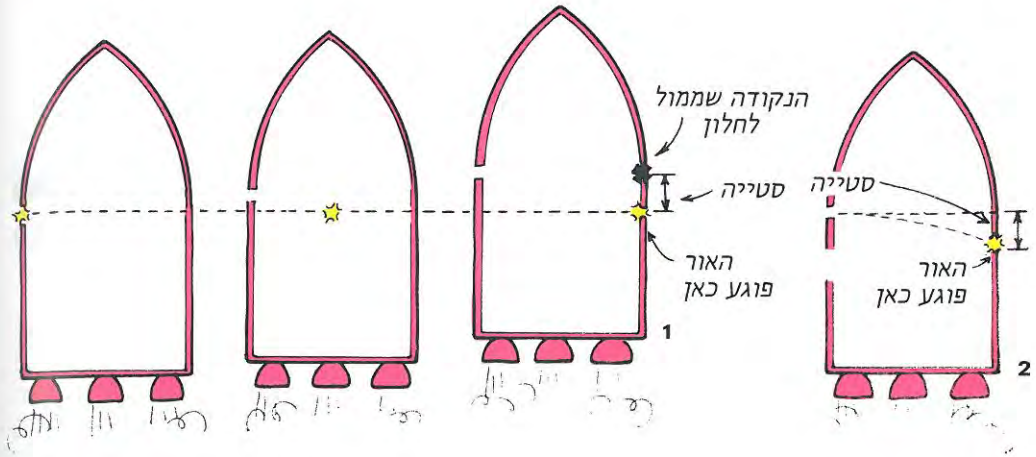
התעקמות האור



איור 35.4

(1) צופה חיצוני רואה כדור שנזרק אופקית נע על קו ישר. במהלך תנועתו האופקית של הכדור החללית נעה כלפי מעלה, לכן נראה לו שהכדור פגע בדופן הנגדית מעט מתחת לנקודה שממול לחלון. (2) צופה המצוי בחללית רואה שמסלול הכדור התעקם כבשדה כבידה.

נתאר לעצמנו קרן אור החודרת דרך חלון צדדי בכיוון אופקי ופוגעת לאחר זמן קצר בדופן הנגדית. הצופה החיצוני רואה שקרן האור נכנסה דרך החלון ונעה לעבר הדופן השנייה במהירות קבועה לאורך קו ישר אופקי. אך ספינת החלל נמצאת בתאוצה כלפי מעלה, ובמהלך הזמן שנדרש לאור להגיע לדופן הנגדית שינתה החללית את מקומה ועל-כן הקרן לא תפגע בנקודה הנמצאת במדויק ממול לחלון, אלא מעט מתחתיה. לגבי הצופה שבחללית, הקרן סטתה כלפי מטה לעבר הרצפה בדיוק כשם שמסלולו של כדור שנזרק אופקית יתעקם לעבר הרצפה (איור 35.5). עיקום מסלולו של הכדור הנע באיטיות בולט מאוד; אך אם בדרך כלשהי הוא היה נזרק אופקית דרך תא החללית במהירות השווה למהירות האור, עיקום מסלולו ועיקום קרן האור היו שווים.

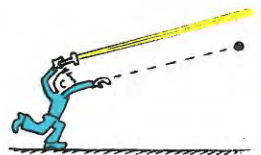


איור 35.5

(1) צופה חיצוני רואה קרן אור הנעה אופקית על קו ישר, ובדומה לכדור באיור 35.4 היא פוגעת בדופן הנגדית מעט מתחת לנקודה שממול לחלון. (2) הצופה שבחללית רואה שמסלול האור התעקם כאילו נע בשדה כבידה.

כיצד יוכל צופה הנמצא בחללית לייחס עיקום זה לכבידה? לפי הפיסיקה הניוטונית, כבידה היא פעולת גומלין בין מסות; מסלולו של כדור נע מתעקם בשל פעולת גומלין זו בין מסת הכדור למסת כדור הארץ. אך מה באשר לאור, שהוא אנרגיה טהורה וחסר מסה? כדי להבין את הטיית האור בשדה הכבידה, הצופה הניוטוני חייב לראות את האור כבעל מסה או לחשוב על האנרגיה שלו במונחים של "המסה השקולה". גם איינשטיין סבר שאור הוא זרם של פוטונים דמויי חלקיקים, הסוטים בשדה כבידה ממש כפי שהיה סוטה כל גוף חומרי אילו נע במהירות האור - אך לא בשל תכונות האור דמויות המסה. האור מוטה כשהוא נע במרחב-זמן בעל גיאומטריה עקומה. בהמשך נראה שנוכחותה של מסה גורמת לכיפוף, או עיוות, של המרחב-זמן; באותו אופן כיפוף או עיוות של המרחב-זמן בא לידי ביטוי כמסה. מסת כדור הארץ קטנה מכדי לגרום לעיוות ניכר במרחב-זמן שבסביבתה, והוא למעשה שטוח, כך שלא ניתן לגלות כל סטייה של אור בסביבתנו הקרובה. אולם בסמוך לגופים בעלי מסה הגדולה בהרבה ממסת כדור הארץ, הטיית האור גדולה למדי וניתן לגלותה.

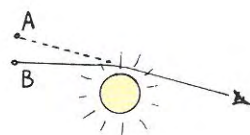
איינשטיין חזה שאור כוכבים שיעבור בקרבת השמש יסטה בזווית של 1.75 שניות-קשת - זווית גדולה למדי הניתנת למדידה. אף שלא ניתן לראות את הכוכבים בזמן שהשמש זורחת, ניתן להבחין בסטייה זו במהלך ליקוי חמה. (מאז המדידה הראשונה, שנערכה ב-1919 בזמן ליקוי חמה מלא, נערכות מדידות אלה כדבר שבשגרה בכל פעם שמתרחש ליקוי חמה מלא.) בצילומים של השמים המואפלים בסביבת השמש הלוקה מתגלה נוכחותם של כוכבים קרובים בהירים. כאשר משווים את מקומם של הכוכבים בצילומים אלה למקומם בצילומים אחרים של אותו אזור שצולמו באותו טלסקופ בזמנים שונים בלילה, מתברר שסטיית אור הכוכבים מאשרת את תחזיתו של איינשטיין (איור 35.7).



איור 35.6

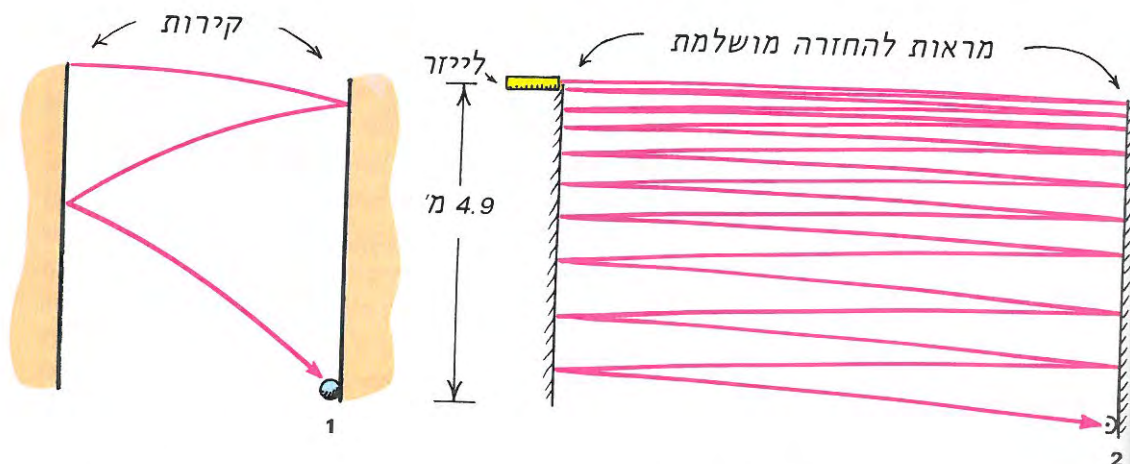
מסלולה של אלומת הפנס שווה למסלולו של כדור טניס "הנזרק" במהירות האור. בשדה כבידה אחיד שני המסלולים מוטים במידה שווה.

האור סוטה גם בשדה הכבידה של כדור הארץ - אך לא במידה כה גדולה. איננו מבחינים בסטייה זו מפני שהיא זעירה בהשוואה למרחק העצום שהאור עובר כתוצאה ממהירותו הגדולה. לדוגמה, בשדה כבידה קבוע של $1g$, אלומה המכוונת אופקית "תיפול" מרחק אנכי של 4.9 מטרים בשנייה אחת (בדיוק כמו כדור-בסיס), אך תעבור מרחק אופקי של 300,000 קילומטרים. העיקום בקושי מורגש כשנמצאים במרחק כה רב מנקודת המוצא. אך אם האור יעבור 300,000 קילומטרים בין מראות מקבילות אידיאליות ויוחזר מהן מספר רב של פעמים, אזי הסטייה תהיה ניכרת למדי (איור 35.8). (אף כי ביצוע משימה מעין זו בפועל אינו פשוט, הוא עשוי להעניק לך זכאות לקבלת תואר דוקטור.)



איור 35.7

אור הכוכב סוטה בעברו בקרבת השמש. נקודה A מציינת את המקום המדומה של הכוכב; נקודה B מראה את מקומו האמיתי.



איור 35.8

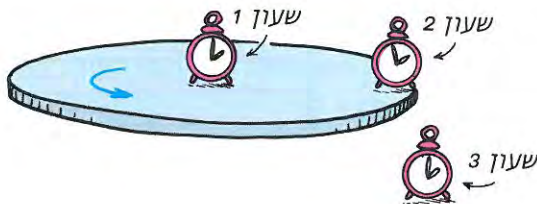
(1) אם כדור מוטל אופקית בין צמד קירות מקבילים, הוא ינוע הלך ושוב ובשנייה אחת ייפול בכיוון האנכי 4.9 מ'. (2) אם מכוונים אלומת אור אופקית בין צמד מראות אידיאליות אנכיות ומקבילות, היא תוחזר הלך ושוב ותיפול בשנייה אחת מרחק אנכי של 4.9 מ'. מספר ההחזרות בשרטוט צומצם במידה רבה; אילו היו המראות מרוחקות 300 ק"מ זו מזו, היו מתרחשות בשנייה אחת 1000 החזרות.

שאלה מדוע איננו מבחינים בהתעקמות האור בסביבתנו היומיומית?

תשובה: מסיבה אחת בלבד: האור נע מהר מדי; בדיוק כשם שאיננו מבחינים במסלולו העקום של קליע הנע במהירות גבוהה לאורך מרחק קצר, כך איננו מבחינים בהתעקמות אלומת האור.

כבידה וזמן: היסט כבידתי לאדום

לפי תורת היחסות הכללית של איינשטיין, הכבידה גורמת להאטת הזמן. ככל ששדה הכבידה חזק יותר, ההאטה בזמן גדולה יותר. ניתן להבין זאת תוך החלת עקרון השקילות והתארכות הזמן במערכת ייחוס מואצת. נבחר כמערכת ייחוס דיסקה גדולה מסתובבת. נניח שאנו מודדים את הזמן בשלושה שעונים זהים - האחד ממוקם במרכז הדיסקה, השני בהיקפה והשלישי נח על הקרקע בקרבת הדיסקה (איור 35.9). לפי חוקי תורת היחסות המצומצמת אנו יודעים שהשעון המחובר למרכז הדיסקה ואינו נע יחסית לקרקע מתקדם באותו קצב כמו השעון שעל הקרקע, אך לא בקצב של השעון המחובר להיקף הדיסקה. השעון שבהיקף נע יחסית לקרקע, לכן התקדמותו איטית יותר מזו של השעון שעל הקרקע וכן גם מזו של השעון שבמרכז הדיסקה. אף שהשעונים שעל הדיסקה צמודים לאותה מערכת ייחוס, הם אינם מתקדמים באותו קצב; השעון החיצוני נע לאט יותר מהשעון הפנימי.

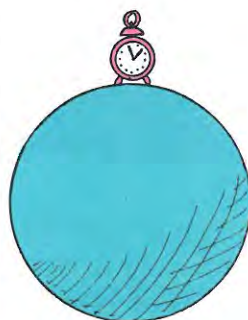


איור 35.9

שעונים 1 ו-2 מונחים על דיסקה מואצת ושעון 3 ניח. שעונים 1 ו-3 מתקדמים בקצב שווה ואילו שעון 2 מתקדם לאט יותר. מנקודת המבט של הצופה הנמצא בשעון 3, שעון 2 מתקדם לאט יותר מפני שהוא נע. מנקודת מבטו של הצופה הנמצא בשעון 1, שעון 2 מתקדם לאט יותר מפני שהוא נמצא בשדה כוח צנטריפוגלי חזק יותר.

הפרש הזמנים שימדדו הצופה שבמרכז הדיסקה המסתובבת והצופה שעל הקרקע יהיה שווה. אולם הפירוש שיתן כל אחד מהם להבדל הזמנים יהיה שונה. עבור הצופה שעל הקרקע, מקור הקצב האיטי יותר של השעון שבהיקף הדיסקה הוא בתנועתו. אך לגבי הצופה שבמרכז הדיסקה המסתובבת, השעונים שעל הדיסקה אינם נעים זה ביחס לזה; עם זאת, על השעון שבהיקף פועל כוח צנטריפוגלי בשעה שכל כוח אינו פועל על השעון שבמרכז. הצופה שבמרכז הדיסקה יאמר ששעון הנמצא בשדה כוח חזק יותר נע לאט יותר. מראיית הכוח הצנטריפוגלי ככוח כבידה ושימוש בעקרון השקילות נסיק ששעונים בשדות כבידה חזקים מתקדמים לאט יותר משעונים בשדות חלשים (איור 35.10). האטה זו משותפת לכל "השעונים" - פסיקליים, כימיים או ביולוגיים. אשת עסקים העובדת בקומת הקרקע של גורד שחקים תתבגר לאט יותר מאחותה התאומה העובדת בקומה העליונה. הואיל וההבדל בין שדה הכבידה בתחתית הבניין לזה שבראשו הוא זעיר, הפרש הזמנים זעום ביותר - מספר מיליוניות שנייה בעשור שנים. אך אם ההבדלים בין עוצמות שדה הכבידה גדולים, כמו בין פני השמש לפני כדור הארץ, הפרשי הזמנים יהיו ניכרים יותר. ניתן למדוד את הפרש הזמנים בין שעון הנמצא על פני השמש ומתקדם בקצב איטי יותר לבין שעון על פני כדור הארץ. עוד ב-1907, שנים לפני שהשלים איינשטיין את תורת היחסות הכללית, כאשר ניסח את עקרון השקילות, הוא הציע דרך למדוד הפרש זה.

כל אטום פולט אור בתדירויות מסוימות האופייניות לקצב התנודות של האלקטרונים שבאטום. לפיכך, כל אטום הוא "שעון", והאטות קצב התנודות האטומיות מעידה על האטות שעונים אלו. אטום בשמש, במקום שבו הכבידה חזקה, אמור לפלוט אור שתדירותו נמוכה (תנודתו איטית יותר) מתדירות האור הנפלט מאטום מאותו סוג על פני כדור הארץ. מכיוון שהאור האדום נמצא בצד התדירויות הנמוכות של ספקטרום האור הנראה, הקטנת התדירות מסיטה את צבע האור לכיוון האדום. תוצאה נקרא **ההיסט הכבידתי לאדום**. ניתן למדוד את ההיסט הכבידתי לאדום של אור השמש, אך השפעות שונות מפריעות למדידת שינוי זעיר זה. רק ב-1960, משהוחל השימוש בשיטה חדשה לגמרי המבוססת על פליטת קרני גמא בתדירויות גבוהות ביותר מאטומים רדיואקטיביים, התאפשרה עריכתן של מדידות מדויקות שאישרו את האטות הזמן הכבידתית בין קומת הקרקע לקומה העליונה של בניין המעבדות באחת האוניברסיטאות בארה"ב*.



איור 35.10

כל שדה הכבידה חזק יותר, השעון מתקדם לאט יותר. שעון הנמצא על פני האדמה מתקדם לאט יותר משעון המרוחק ממנה.

מדידות הזמן תלויות, איפוא, לא רק בתנועה היחסית, שעליה למדנו בפרק הקודם, אלא גם בעוצמות היחסיות של שדה הכבידה במקומות שבהם האירועים מתרחשים ונמדדים. בדיוק כשם שבתורת היחסות המצומצמת התארכות הזמן היא יחסית להפרשים בין המהירות של מערכת הייחוס הנצפית לזו של מערכת הייחוס שהתצפיות נערכות ממנה, כך בתורת היחסות הכללית ההיסט הכבידתי לאדום תלוי בהפרשים בין עוצמת שדה הכבידה במקום האירוע לעוצמתה במקומו של הצופה בו. במקום שבו עוצמת שדה הכבידה רבה יותר נבחין בקצב איטי יותר של התקדמות האירועים לעתיד. בתצפית מכדור הארץ, שעון הנמצא על פניו של כוכב מתקתק בקצב איטי יותר מאשר על פני כדור הארץ. אם הכוכב יתכווץ, הגידול שיחול בכבידה על פניו ייראה מלווה בהאטה תואמת בזמן ואנו נמדוד מרווחי זמן גדולים יותר בין תקתוקי שעון הכוכב. אך אם נערוך את המדידות של שעון הכוכב על הכוכב עצמו לא נגלה כל שינוי בתקתוקי השעון.

נניח למשל שמתנדב חסין מפגיעה עומד על פניו של כוכב ענק המתחיל לקרוס. אנו, הצופים החיצוניים, נבחין כי ככל ששדה הכבידה מתחזק חלה האטה גדלה והולכת בזמן בשעונו של המתנדב. אולם המתנדב עצמו אינו חש כל שינוי בזמנו הוא. הוא צופה באירועים בתוך מערכת הייחוס שלו ואינו מבחין בכל דבר יוצא דופן בזמנו הוא. בעוד הכוכב הולך וקורס למצב של חור שחור והזמן מנקודת מבטו של המתנדב מתקדם כרגיל, אנו, הצופים החיצוניים, קולטים את זמנו של המתנדב הולך ומואט עד לעצירתו המוחלטת; אנו רואים אותו קופא בזמן כשבין תקתוקי השעון או בין פעימות ליבו חולף זמן אינסופי. מנקודת מבטנו, זמנו עצר מלכת. ההיסט הכבידתי לאדום אינו עוד שינוי זעיר, זוהי התופעה השלטת.

* בסוף שנות החמישים, זמן קצר לאחר מותו של איינשטיין, גילה הפיסיקאי הגרמני רודולף מוסבאור תוצאה חשובה בפיסיקה הגרעינית שסיפק שיטה מדויקת של שימוש בגרעיני האטומים כשעונים אטומיים. לתוצאה מוסבאור, שעבורו זכה המגלה בפרס נובל, יישומים רבים. בסוף 1959 גילו החוקרים פֶּאונד וְבֶקָה מאוניברסיטת הרווארד יישום נוסף, ששימש מבחן לתורת היחסות הכללית, וערכו את הניסוי המאשר אותה.

חשוב לציין את טבעו היחסי של הזמן הן בתורת היחסות המצומצמת והן בתורת היחסות הכללית. בשתי התיאוריות אין דרך שבה תוכלו להאריך את משך התנסותכם. אחרים הנעים במהירויות שונות או בשדות כבידה שונים עשויים לייחס לכם משך חיים ארוך יותר, אך התארכות זו נראית ממערכת הייחוס שלהם - לעולם לא משלכם. שינויים בזמן מיוחסים תמיד "לאחר".

שאלות

1. האם אדם במרומי גורד שחקים מתבגר מהר יותר או לאט יותר מאדם בקומת הקרקע?
2. האם אדם הנמצא על פני הקרקע מתבגר יותר או פחות מאדם בתחתיתו של בור עמוק מאוד?

מתורת היחסות המצומצמת למדנו שחלים שינויים במדידות הזמן והמרחב שנערכות ממערכות נעות. כאלה הם פני הדברים גם בתורת היחסות הכללית: מדידות המרחב שונות בשדות כבידה שונים - למשל, בקרבת השמש והרחק ממנה.

כוכבי הלכת נעים סביב השמש במסלולים אליפטיים ועוברים במחזוריות באזורים שבהם שדות הכבידה חזקים וחלשים חליפות. איינשטיין בחן את שדות הכבידה המשתנים שחשים כוכבי הלכת הנעים סביב השמש וגילה שבמסלולים האליפטיים תתרחש נקיפה (פרצסיה) - סיבוב איטי של המסלול האליפטי כולו (איור 35.11) - זאת ללא תלות בהשפעה הניוטונית של כוכבי לכת אחרים. בקרבת השמש, באזור שבו שדה הכבידה חזק יותר, קצב הנקיפה יהיה הגדול ביותר; במרחק גדול מהשמש, במקום שבו שדה הכבידה חלש, לא ניתן יהיה להבחין למעשה בכל סטיות מתחזיות המכניקה הניוטונית.

כוכב-חמה הוא כוכב הלכת הקרוב ביותר לשמש. שדה הכבידה הפועל על כוכב-חמה גדול יותר מהשדה הפועל על כל כוכב לכת אחר הרחוק יותר מהשמש. אם קיים מסלול של כוכב לכת שעבורו הנקיפה ניתנת למדידה, הרי זה מסלולו של כוכב-חמה, והעובדה שבמסלולו של כוכב-חמה אכן קיימת נקיפה היתה בגדר חידה לאסטרונומים עוד מתחילת המאה ה-19! מדידות מדויקות הראו כי נקיפת המסלול של כוכב-חמה היא 573 שניות-קשת במאה שנה. הפרעות הנגרמות מכוכבי לכת אחרים מסבירות שיעור זה - למעט הפרש של 43 שניות-קשת למאה שנה הגדול מהערך המחושב. אך גם לאחר שהובאו בחשבון כל התיקונים הידועים הנובעים מהפרעות אפשריות של כוכבי לכת אחרים, לא היו הפיסיקאים והאסטרונומים מסוגלים להסביר את 43 שניות-

כבידה ומרחב: תנועת כוכב-חמה



איור 35.11
מסלול אליפטי העובר נקיפה.

תשובות:

1. מהר יותר; האדם במרומי גורד השחקים נמצא בשדה כבידה חלש במקצת מזה שבו נמצא האדם שבקומת הקרקע.
2. פחות; האדם שעל הקרקע נמצא בשדה כבידה חזק יותר מזה שבו נמצא האדם שבתחתית הבור העמוק מאוד. (זיכרו שבפרק 8 למדנו שהשדה הגרביטציוני במעמקי האדמה חלש מהשדה שעל פניה ומתאפס במרכזה).

הקשת העודפות. אחת ההשערות היתה כי אולי מסתו של כוכב הלכת נוגה גדולה מששברו, או שמא כוכב לכת אחר שטרם התגלה (וכונה וולקן) מושך את כוכב חמה. אז צץ הסברו של איינשטיין וממשוואות תורת היחסות הכללית שניסח עבור מסלולו של כוכב חמה עלתה תחזית של נקיפה בת 43 שניות-קשת למאה שנה!

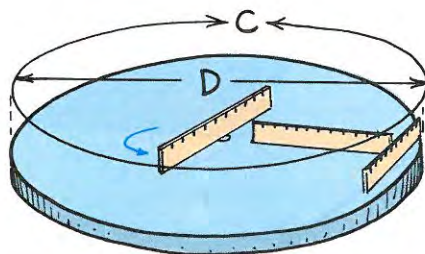
חידת כוכב-חמה נפתרה ותורת הכבידה החדשה זכתה בהכרה. חוק הכבידה של ניוטון, שהיה יסוד מוצק של המדע במשך למעלה ממאתיים שנה, התגלה כמקרה גבולי של תורת איינשטיין הכללית יותר. עבור שדות כבידה חלשים יחסית חוקי ניוטון משמשים קירוב טוב לחוקים החדשים - עד כדי כך שחוק הכבידה של ניוטון, הפשוט יותר מבחינה מתמטית, הוא החוק שהפיסיקאים משתמשים בו במרבית חישוביהם, פרט למקרים שמעורבים בהם שדות כבידה עצומים.

נוכל לנסות ולהבין את השינויים החלים במדידות המרחב בשל קיומם של שדות כבידה תוך כדי התבוננות מחודשת במערכת הייחוס המואצת של הדיסקה המסתובבת. נניח שאנו מודדים את היקף הדיסקה בסרגל מדידה. ניזכר בהתכווצות לורנץ-פיצג'רלד מתורת היחסות המצומצמת: סרגל המדידה ייראה מכווץ לכל צופה שאינו נע עם הסרגל, אך כמעט שלא יחול שינוי באורכו של סרגל זהה הנע לאט יותר בקרבת מרכז הדיסקה (איור 35.12). כל מדידות המרחקים הנערכות לאורך רדיוס הדיסקה אינן אמורות להשתנות עקב התנועה, מפני שזו מאונכת לרדיוס. מכיוון שרק מדידות המרחק לאורך ההיקף משתנות, הרי שבעת סיבוב הדיסקה היחס בין ההיקף לקוטר לא יהיה עוד שווה לקבוע π (3.14159...), אלא תלוי במהירות הסיבוב של הדיסקה ובקוטרה. לפי עקרון השקילות, הדיסקה המסתובבת שקולה לדיסקה נחה שהיקפה נמצא בשדה כבידה חזק ההולך ונחלש לעבר המרכז. לפיכך, מדידות המרחק תהיינה תלויות בעוצמתו של שדה הכבידה, גם כשהדבר אינו כרוך בתנועה כלשהי. הכבידה הופכת את המרחב ללא-איזוטרופי; חוקי הגיאומטריה האיקלידית שלמדתם בבית הספר התיכון אינם תקפים עבור גופים הנמצאים בשדות כבידה חזקים.

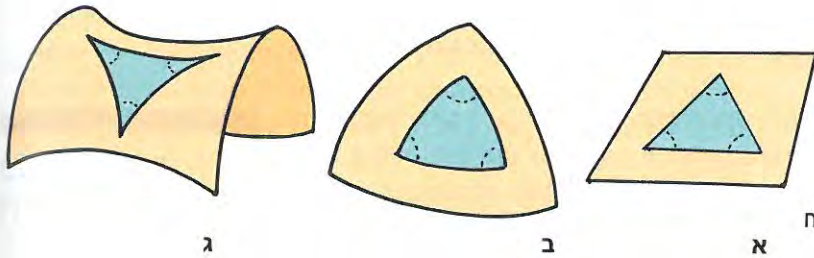
כבידה, מרחב וגיאומטריה חדשה

איור 35.12

סרגל המדידה שלאורך היקף הדיסקה המסתובבת נראה מכווץ, בעוד סרגל המדידה הפנימי יותר, הנע לאט יותר, אינו מתכווץ באותה מידה. סרגל המדידה המונח לאורך הרדיוס אינו מכווץ כלל. כאשר הדיסקה אינה מסתובבת, $C/D = \pi$; אך כשהדיסקה מסתובבת, $C/D \neq \pi$, והגיאומטריה האיקלידית אינה תקפה. כך גם בשדה כבידה.



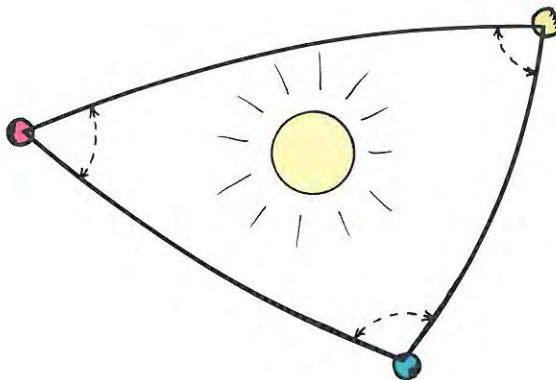
חוקי הגיאומטריה האיקלידית המוכרים מתאימים לצורות שונות שתוכלו לשרטט על משטח שטוח. היחס בין היקף המעגל לקוטרו שווה ל- π ; סכום הזוויות במשולש שווה ל- 180° ; הקו הקצר ביותר המחבר בין שתי נקודות הוא הקו הישר. חוקי הגיאומטריה האיקלידית תקפים במרחב שטוח, אך אם תשרטטו את הצורות הללו על משטח עקום דוגמת כדור או אוכף, חוקי הגיאומטריה האיקלידית לא יהיו תקפים עוד (איור 35.13). אם תמדדו את סכום הזוויות במשולש במרחב תוכלו לומר שהמרחב שטוח כשהסכום שווה ל- 180° , שהמרחב דמוי כדור או בעל עיקום חיובי אם הסכום גדול מ- 180° , וכי הוא דמוי אוכף או בעל עיקום שלילי אם הסכום קטן מ- 180° .



איור 35.13

סכום הזוויות במשולש המשרטט על משטח מישורי הוא 180° (א), במשולש המשרטט על משטח כדורי סכום הזוויות גדול מ- 180° (ב) ועל משטח דמוי-אוכף הסכום קטן מ- 180° (ג).

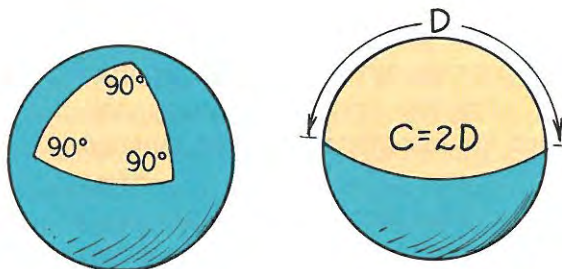
הקווים היוצרים את המשולשים שבאיור 35.13 כמובן אינם "ישרים" מנקודת מבט תלת-ממדית, אך הם "הישרים ביותר", והמרחק לאורך הקו שעל המשטח העקום המחבר בין שתי הנקודות הוא הקצר ביותר. הקווים שהמרחק לאורכם הוא הקצר ביותר נקראים קווים גיאודטיים. מסלולה של קרן אור הוא קו גיאודטי. נתאר לעצמנו שלושה חוקרים - האחד על כדור הארץ, השני על נוגה והשלישי על מאדים - אשר מודדים את זוויות המשולש הנוצר מקרני האור הנעות בין שלושת כוכבי הלכת הללו. קרני האור מתעקמות כשהן חולפות ליד השמש ולכן סכום הזוויות במשולש גדול מ- 180° (איור 35.14). המרחב בסביבת השמש הוא איפוא בעל עיקום חיובי. כוכבי הלכת הסובבים את השמש נעים על קווים גיאודטיים ארבעה-ממדיים במרחב-זמן בעל עיקום חיובי. גופים הנופלים נפילה חופשית, חלליות וקרני אור נעים לאורך קווים גיאודטיים במרחב-זמן הארבעה-ממדי.



איור 35.14

קרני האור המחברות את שלושת כוכבי הלכת יוצרות משולש. מכיוון שהאור מתעקם בקרבת השמש, סכום הזוויות של המשולש שנוצר גדול מ- 180° .

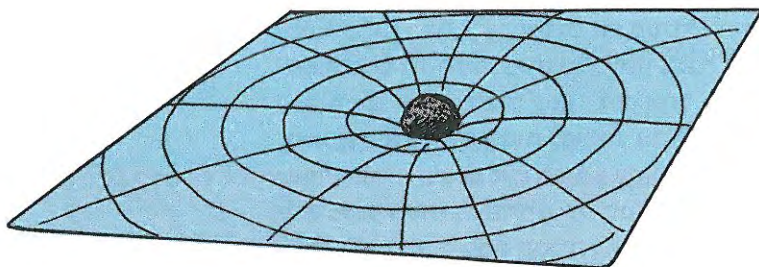
ליקום כולו יש אולי עיקום כולל. אם העיקום שלילי, המרחב פתוח וחסר גבולות; אם הוא חיובי, המרחב סוגר על עצמו. פני כדור הארץ, למשל, יוצרים מרחב עקום סגור, כך שאם תנועו על קו גיאודטי, תשובו לנקודת המוצא. בדומה לכך, אם היקום הוא בעל עיקום חיובי, הרי שהוא סגור, ומשמעות הדבר היא שאם הייתם מתבוננים לעבר האינסוף בטלסקופ אידיאלי, הייתם יכולים לראות את עורפכם (בתנאי שהייתם ממתינים זמן ארוך למדי!).



איור 35.15

הגיאומטריה על פני כדור הארץ המעוקמים שונה מהגיאומטריה האיקלידית במרחב שטוח. שימו לב שסכום הזוויות של משולש שווה-צלעות שאורכן שווה ל- $\frac{1}{4}$ ההיקף של כדור הארץ הוא בלי ספק גדול מ- 180° , וכי היקף המעגל שווה לפעמיים הקוטר בלבד ולא ל- 3.14 פעמים הקוטר. גם במרחב עקום הגיאומטריה האיקלידית אינה תקפה.

לתורת היחסות הכללית נדרשת גיאומטריה חדשה; לא רק גיאומטריה של מרחב עקום, אלא גם של זמן עקום - גיאומטריה של מרחב-זמן ארבעה-ממדי עקום. המתמטיקה של גיאומטריה זו מסובכת מכדי להציג כאן. אולם ביסודה עומדת ההנחה שכבידה היא התגלמות גיאומטרית של המרחב-זמן; שדה כבידה הוא עיוות של המרחב-זמן. נוכחותה של מסה גורמת לעיקום או לעיוות במרחב-זמן; באותה מידה, עיקום המרחב-זמן בא לידי ביטוי כמסה. במקום להתבונן בכוחות הכבידה בין מסות, אנו זונחים לחלוטין את מושג הכוח ותחת זאת חושבים על מסות שתנועותיהן נקבעות על פי העיקום או העיוות של המרחב-זמן שבו הן שרויות. הגבנונים, השקעים והעיוותים של המרחב-זמן הם תופעת הכבידה.



איור 35.16

אנלוגיה דו-ממדית של מרחב ארבעה-ממדי מעוות. המרחב-זמן בקרבתו של כוכב הינו עקום בדומה לפני מזרן מים שכדור כבד הונח עליו.

בהיותנו יצורים תלת-ממדיים איננו מסוגלים לראות גבנונים ושקעוריות במרחב-זמן. נוכל לקבל שמץ מושג על עיוותים אלו אם נתבונן באנלוגיה פשוטה בשני ממדים: כדור כבד המונח במרכזו של מזרן מים. ככל שהכדור כבד יותר הוא ייצור גומה או שקעורית גדולה יותר במשטח הדו-ממדי. גולה

שתתגלגל על המזרן במרחק רב מהכדור תנוע על קו ישר בקירוב, בעוד מסלולה של גולה שתתגלגל בקרבת הכדור יתעקס תוך כדי תנועתה על המשטח השקערוני. אם היא תתווה בתנועתה מסלול סגור, צורתו תהיה אליפטית. כוכבי הלכת הסובבים את השמש נעים באורח דומה על קווים גיאודטיים ארבעה-ממדיים במרחב-זמן המעוות שבסביבת השמש.

לכל גוף יש מסה ולכן הוא יוצר גבנון או שקערונית במרחב-זמן שסביבו. כאשר הגוף נע, עיוות המרחב והזמן שסביבו משתנה. שינויים אלו יוצרים אדוות בגיאומטריה הכוללת של המרחב-זמן. הדבר דומה להזזת הכדור המונח על מזרן המים. ההפרעה מתקדמת על פני המזרן; אם נזיז כדור כבד יותר, ההפרעה תהיה גדולה יותר ותיצור אדוות חזקות יותר. האדוות מתפשטות ממקורות הכבידה כלפי חוץ במהירות האור והן נקראות **גלי כבידה**.

כל עצם נע יוצר גל כבידה. ככלל, ככל שמסת העצם הנע גדולה יותר ותנועתו נמרצת יותר, כן יהיה גל הכבידה שייווצר חזק יותר. אך אפילו הגלים החזקים ביותר הנוצרים באירועים אסטרונומיים רגילים הם חלשים ביותר - החלשים ביותר הידועים בטבע. כך למשל, גלי הכבידה שפולט מטען חשמלי מתנווד הינם חלשים פי מיליון-מיליון-מיליון-מיליון-מיליון-מיליונים מהגלים האלקטרומגנטיים שיוצר אותו מטען. הניעו את ראשכם קדימה ואחורה: יצרתם גל כבידה. הוא אינו חזק ביותר, אך הוא קיים.

כאשר ניסח איינשטיין את תורת הכבידה החדשה הוא הכיר בכך שכדי שתורתו תהיה תקפה, יש לקבל ממשוואות השדה שלו, עבור שדות חלשים, את ממשוואות הכבידה של ניוטון. ואכן, איינשטיין הוכיח שחוק הכבידה של ניוטון הוא מקרה פרטי של תורת היחסות הרחבה יותר. חוק הכבידה של ניוטון עדיין מתאר במדויק את רוב הכוחות הפועלים בין גופים במערכת השמש ומעבר לה. על סמך חוק הכבידה של ניוטון ניתן לחשב את מסלוליהם של כוכבי שביט ואסטרואידים ואפילו לנבא את קיומם של כוכבי לכת בלתי מוכרים. גם כיום, כשמחשבים את מסלוליהן של חלליות לירח ולכוכבי הלכת, משתמשים בתורת הכבידה של ניוטון בלבד. הסיבה לכך היא ששדות הכבידה של גופים אלה חלשים מאוד ומנקודת המבט של תורת היחסות הכללית המרחב-זמן סביבם שטוח למעשה. אך באזורים שעוצמת הכבידה בהם גדולה יותר, אזורים שבהם המרחב-זמן עקום במידה משמעותית, לא ניתן לחשב את התופעות השונות במדויק על סמך תורתו של ניוטון - למשל, את נקיפת מסלולו של כוכב-חמה הקרוב לשמש, או במקרה של שדות חזקים אף יותר - את ההיסט הכבידתי לאדום ועיוותים-לכאורה במדידות המרחב-זמן. עיוותים אלו מגיעים לערכם הקיצוני במקרה של כוכב הקורס לחור שחור - מצב שבו המרחב-זמן נכרך סביב עצמו. לתחום זה מתאימה רק תורת הכבידה של איינשטיין.

גלי כבידה

הכבידה לפי ניוטון ולפי איינשטיין

בפרק 31 ראינו כי תורת ניוטון מתקשרת בגבולה האחד לתורת הקוונטים, שתחומה הוא עולם הדברים הקלים מאוד והקטנים ביותר - חלקיקים זעירים ואטומים. עתה למדנו שבגבולה האחר חוברת תורת ניוטון לתורת היחסות, שתחומה הוא הגופים הגדולים בעלי המסה העצומה.

תמונת העולם שלנו שונה מזו של המצרים הקדמונים, של היוונים או של הסינים. אין זה סביר להניח שבעתיד יראו בני האדם את העולם כפי שאנו מבינים אותו כיום. תמונת העולם שלנו אולי מוגבלת למדי ורצופה מושגים מוטעים, אך היא לבטח ברורה יותר מזו של קודמינו. תפיסתנו כיום מבוססת על תגליותיהם של קופרניקוס, גלילאו וניוטון, ועל אלה החדשות יחסית של איינשטיין; תגליות אלה עוררו לעיתים התנגדות, מפני שהפחיתו מחשיבותם של בני האדם ביקום. בעבר מנע רעיון מרכזיותו של האדם התבוננות מפוכחת בטבע. מאז, במאמצים עצומים, בתצפיות מאומצות ובתשוקה שאינה יודעת גבולות להכיר את סביבתנו, הרחבנו את תפיסת העולם שלנו. מנקודת מבטנו העכשווית על היקום אנו רואים את חשיבותנו בהיותנו חלק מהטבע ולא נפרדים ממנו. אנו הננו אותו חלק של הטבע המודע לעצמו, ומודעות זו הולכת ומתעצמת.

הוקינג, ס'י. חורים שחורים, גורם-יקומים ומסות אחרות.
ספריית מעריב, 1994.

תקציר מונחים

עקרון השקילות לא ניתן להבחין בין תצפיות מקומיות הנערכות במערכת ייחוס מואצת לבין תצפיות הנערכות בשדה כבידה ניוטוני.

היסט כבידתי לאדום ההזזה באורך הגל של אור הנפלס מפני עצם בעל מסה, לעבר הקצה האדום של הספקטרום, שחלה בהתאם לתחזיותיה של תורת היחסות הכללית.

קו גיאודטי המסלול הקצר ביותר המחבר שתי נקודות על משטח כלשהו.

גל כבידה הפרעה כבידתית שיוצרת מסה נעה המתקדמת במרחב-זמן.

שאלות חזרה

1. מהו ההבדל העיקרי בין תורת היחסות המצומצמת לבין תורת היחסות הכללית?

עקרון השקילות

2. כמה שכיבות סמיכה מסוגלת לבצע נוסעת בחללית שנעה בתאוצה g הרחק מכדור הארץ בהשוואה ליכולתה על פני כדור הארץ?

3. ציינו מה בדיוק שקול בעקרון השקילות?

התעקמות האור

4. השוו בין הסטיות במסלוליהם של כדורי טניס לבין אלה של פוטונים.

5. מדוע חייבים למדוד את הסטייה של אור הכוכבים העובר ליד השמש בשעת ליקוי חמה?

כבידה וזמן: היסט כבידתי לאדום

6. איזה שיעור מתקדם מהר יותר, שיעון בפסגת החרמון או שיעון על חופי הכנרת?

לקריאה נוספת

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

מידב, מ'י, ברוש, נ'י ונצר, ח'י. היקום - יסודות האסטרופיסיקה. אוניברסיטת תל-אביב. 1988.

הוקינג, ס'י. קיצור תולדות הזמן. ספריית מעריב, 1989.

7. מהי השפעתו של שדה כבידה חזק על תדירות האור?

8. מהי השפעתו של שדה כבידה חזק על מדידות זמן?

כבידה ומרחב: תנועת כוכב-חמה

9. מדוע עדיף לחקור את תנועתו של כוכב-חמה מאשר את תנועתם של כוכבי הלכת האחרים למציאת ההוכחה לקשר שבין כבידה ומרחב?

כבידה, מרחב וגיאומטריה חדשה

10. אם יונח סרגל מדידה על היקפה של דיסקה מסתובבת הוא ייראה מכווץ, אך לא כן אם יניחו אותו לאורך הרדיוס. הסבירו.

11. בדיסקה נייחת, היחס בין היקפי מעגלים לקוטרם שווה ל- π , אך לא כן כשהדיסקה מסתובבת. הסבירו.

12. האם חיובי או שלילי עיקומו של המשטח הדו-ממדי של פני כדור הארץ? מדוע?

גלי כבידה

13. כוכב המרוחק מאיתנו 10 שנות אור מתפוצץ ויוצר גלי כבידה. כמה זמן יחלוף בטרם יגיעו הגלים לכדור הארץ?

14. מדוע כה קשה לגלות גלי כבידה?

הכבידה לפי ניוטון ולפי איינשטיין

15. האם מבטלת תורת הכבידה של איינשטיין את תוקפה של תורת הכבידה של ניוטון? הסבירו.

תרגילים

1. אסטרונואוטים מתעוררת בתאה הסגור הנמצא למעשה על פני הירח. האם היא יכולה לקבוע אם מקורו של משקלה בכבידה או בתנועה מואצת? הסבירו.

2. כאשר מופעלים מנועיה של ספינת החלל לצורך האצת הספינה מוענקת לאסטרונואוט שבתוכה "כבידה". לשם כך נחוץ דלק. האם ניתן להאץ ולספק "כבידה" ללא שימוש בדלק? הסבירו.

3. בספרו הנודע מסע אל הירח קובע ז'ול וורן כי כאשר תחצה החללית את הנקודה שבה כוח המשיכה הכבידתי של הירח עולה על זה של כדור הארץ ישתנו הכיוונים מעלה-מטה לגבי נוסעי החללית. האומנם כך הדבר? נמקו את תשובתכם.

4. מה קורה למרחק בין שני אנשים הצועדים צפונה בקצב שווה משתי נקודות שונות על קו המשווה? ולשם בידור, היכן בעולם צעד בכל כיוון שהוא הוא צעד דרומה?

5. ניתן להבחין בקלות בהטיית האור הנובעת מהחזרה

ומשבירה, אך מדוע על פי רוב איננו מבחינים בהטיית האור שמקורה בכבידה?

6. מדוע אנו אומרים שאור נע בקווים ישרים? האם מדויק לומר שאלומת לייזר מספקת למטרות מחקר קו ישר מושלם? הסבירו.

7. כדור שנזרק אופקית בשדה כבידה של $1g$ נופל לאחר שנייה מרחק אנכי של 4.9 מ' מתחת למסלול הישר. איזה מרחק תרד אלומת אור ביחס למסלולה הישר אם היא תנוע בשדה אחיד של $1g$ במשך 1 שנייה? 2 שניות?

8. כשאור "נופל" בשדה כבידה, אנרגיית האור משתנה. אולם שינוי זה אינו בא לידי ביטוי בשינוי במהירות האור. אם כך, מהי העדות לשינוי באנרגיה?

9. האם נבחין בהאטה או בהאצה בקצבו של שעון המונח בתחתיתו של בור עמוק מאוד?

10. אם נתבונן מכדור הארץ באירועים המתרחשים על הירח, מקום שבו הכבידה חלשה יותר מזו שעל פני כדור הארץ, האם נבחין בהיסט לאדום או לכחול? הסבירו.

11. מדוע תגדל עוצמת שדה הכבידה על פני כוכב קורס?

12. האם שעון על קו המשווה יתקדם לאט יותר או מהר יותר משעון זהה המצוי באחד הקטבים?

13. לשם הפלפול, האם אדם הפוחד להתבגר צריך לגור בקומה העליונה או בקומה התחתונה של בניין רב-קומות?

14. לשם הפלפול, האם חברך הנמצא בראש מגדל גבוה יקלוט אותו צבע של אלומת האור הצבעונית ששיגרת אליו?

15. האם צבע האור הנפלט מפני כוכב בעל מסה גדולה מוסט לאדום או לכחול?

16. ממערכת הייחוס שלנו על פני כדור הארץ נראה לנו שעצמים הנופלים לחורים שחורים בחלל הולכים ומאיטים עד לעצירתם המוחלטת. האם בעזרת טלסקופים אידיאליים ניתן היה "לראות" כיצד עצמים אלה מרחפים בחורים השחורים? (האם הם יפלטו או יקלטו אור בתחום הנראה של הספקטרום?)

17. האם אסטרונואוט הנופל לתוך חור שחור רואה את היקום סביבו מוסט לאדום או לכחול?

18. מדוע משתנה כוח המשיכה הכבידתי הפועל בין השמש לכוכב-חמה?

19. האם מערכת כפולה של כוכבים (צמד כוכבים) הסובבים סביב מרכז המסה המשותף) קורנת גלי כבידה? הסבירו מדוע, או מדוע לא.

20. כיצד מקיימת תורת הכבידה של איינשטיין את עקרון ההתאמה ביחס לתורת הכבידה של ניוטון?