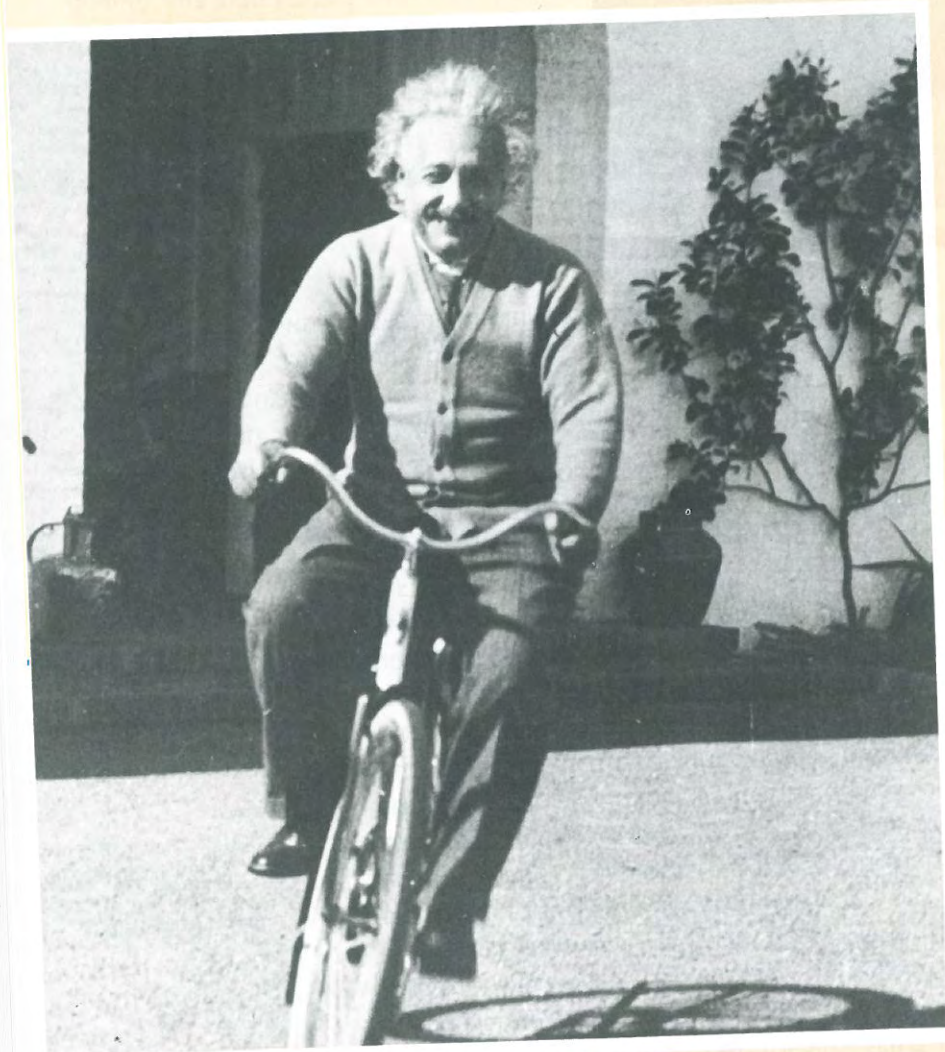


## יחסות



## תורת היחסות המצומצמת



**ב**מאמרו של איינשטיין משנת 1905 על תורת היחסות, "על האלקטרודינמיקה של גופים נעים", הוא הוכיח כי תנועה יחסית של מטענים חשמליים יוצרת כוחות מגנטיים. איינשטיין טען שקשר הגומלין בין חשמל ומגנטיות הוא תוצאה של קשר גומלין בסיסי יותר בין המרחב והזמן. בדיוק כשם שהכוחות החשמליים בין מטענים חשמליים תלויים במצב התנועה, כך גם תוצאות המדידות של המרחב והזמן תלויות בתנועה. כל מדידות המרחב והזמן תלויות בתנועה היחסית. למשל, אורכה של ספינת חלל וקצב תקתוקי השעון שבתוכה שונים כשהספינה ניצבת על כן השיגור וכאשר היא נעה במהירויות גבוהות. תמיד ידענו - וכך הכתיב גם "השכל הישר" - שתנועה גורמת לשינוי מקומו במרחב, אולם איינשטיין ביטל את התפיסה המקובלת וקבע שתנועה גורמת גם לשינוי קצב ההתקדמות לעבר העתיד - הזמן עצמו משתנה. איינשטיין אף הראה שכתוצאה מקשר הגומלין בין המרחב לזמן קיים גם קשר גומלין בין מסה ואנרגיה, הנתון בנוסחה המוכרת  $E_0 = mc^2$ .

הרעיונות של תורת היחסות המצומצמת - רעיונות הזרים מאוד לניסיונו היוםיומי, שאולי יקשה עלינו להבינם - הם במוקד פרק זה. הבה נסתפק בהכרת רעיונות אלו, ונתאזר בסבלנות אם לא נבין אותם מיד. ייתכן שעבור נכדינו הם יהיו חלק מחוויות היוםיומיים; אולי עבורם תהיה תורת היחסות המצומצמת קלה יותר להבנה.

## התנועה - עניין יחסי

בפרק 3 למדנו שבבואנו לדון בתנועה יש לקבוע מהו המקום שממנו צופים בתנועה ומוודדים אותה. כך למשל, ייתכן שמהירותו של אדם המצוי ברכבת נוסעת וצועד יחסית למושבו במהירות של 1 ק"מ/שעה תהיה 60 ק"מ/שעה יחסית לתחנת הרכבת. המקום שממנו צופים בתנועה ומוודדים אותה נקרא **מערכת הייחוס**. מהירותו של גוף עשויה להיות שונה ביחס למערכות ייחוס שונות.

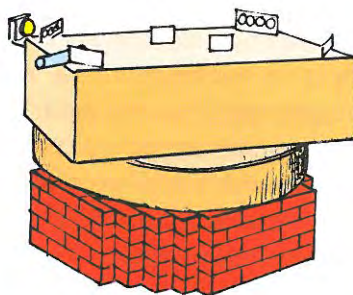
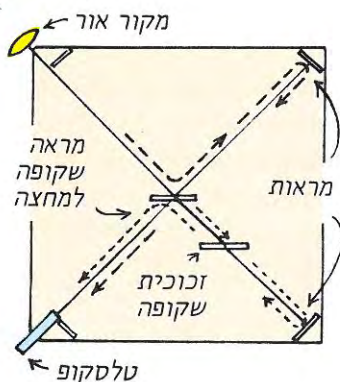
כדי למדוד את מהירותו של גוף אנו בוחרים תחילה במערכת ייחוס ומניחים כי היא שרויה במנוחה. אנו מודדים את מהירות התנועה של העצם יחסית למערכת זו. בדוגמה הקודמת, אם נניח שהרכבת נמצאת במנוחה, הרי שמהירות האדם הצועד בתוכה היא 1 ק"מ/שעה. אם נניח שהמסילה שרויה במנוחה, אזי מהירות האדם ההולך היא 60 ק"מ/שעה. אך גם המסילה אינה שרויה במנוחה - היא מסתובבת עם כדור הארץ כסביבון סביב צירו. מהירותו של האדם יחסית למערכת ייחוס הממוקמת במרכז כדור הארץ תלויה במידת קרבתו לקו המשווה ויכולה להגיע ל-1600 ק"מ/שעה. מרכז כדור הארץ נע יחסית לשמש. אם נקבע את מערכת הייחוס בשמש, מהירותו של האדם הצועד ברכבת, יחסית לשמש, תהיה מסדר גודל של 110,000 קילומטרים בשעה. גם השמש אינה שרויה במנוחה; היא נעה סביב מרכז הגלקסיה, הנעה אף היא ביחס לגלקסיות אחרות.

### ניסוי מייכלסון-מורלי

האם קיימת מערכת ייחוס כלשהי שרויה במנוחה? האין המרחב עצמו ניח, והאם אי אפשר לערוך מדידות ביחס למרחב הנח? בשנת 1887 ניסו הפיסיקאים האמריקנים א' אי' מייכלסון וא' ו' מורלי להשיב על שאלה זו בניסוי שנועד למדוד את תנועת כדור הארץ ביחס למרחב הנח. הואיל והאור מתקדם כגל, הניחו באותה עת שקיים דבר מה במרחב שמתנוודד - ישות מסתורית שכונתה אֶתֶר, האמורה למלא את המרחב ולשמש כמערכת ייחוס המחוברת למרחב עצמו. לצורך המדידות השתמשו צמד הפיסיקאים במכשיר רגיש ביותר הנקרא אינטרפרומטר (איור 34.1). במכשיר זה מפצלים אלומת אור חד-צבעית לשתי אלומות הנעות במסלולים מאונכים זה לזה; לאחר מכן שבים

#### איור 34.1

האינטרפרומטר של מייכלסון ומורלי. אלומת אור מתפצלת לשתי קרניים השבות ומצטרפות ביצרון תבנית התאבכות לאחר שנעו במסלולים שונים. המערכת מותקנת על טבלת אבן חול כבדה הצפה באמבט כספית, שניתן לסובבה. מראה שקופה למחצה היא המפצלת את אלומת האור לשתי קרניים, כמתואר בשרטוט. לוח הזכוכית השקופה נועד להבטיח ששתי הקרניים תעבורנה בזכוכית מרחק שווה. ארבע המראות שבקצוות משמשות להארכת המסלולים.



## אלברט איינשטיין (1879-1955)



**א**לברט איינשטיין נולד ב-14 במרץ 1879 בעיר אוֹלֶם שבגרמניה, כבן למשפחה יהודית מתבוללת. יש הטוענים שהתפתחותו היתה איטית וכי החל לדבר בגיל מאוחר יחסית. במשך זמן מה חששו הוריו כי הוא סובל מפיגור שכלי. אולם רישומי בית הספר היסודי במינכן שבו למד מתארים ילד מחונן במידה יוצאת דופן במתמטיקה, בפיסיקה ובנגינת כינור. הוא התקומם נגד אווירת המיליטריזם ששררה בגרמניה ונגד דרך הלימוד והשינון על-פה שהיתה נהוגה שם, ובגיל 15 הורחק מבית הספר התיכון, בדיוק כשהתכוון לעזבו ביוזמתו הוא. מסיבות עסקיות בעיקרן עקרה משפחתו לאיטליה, ואיינשטיין הצעיר ויתר על אזרחותו הגרמנית ועבר לגור אצל ידידי משפחתו בשווייץ. שם ניתן לו להיבחן בבחינות הכניסה למכון הטכנולוגי הפדרלי הידוע בעיר ציריך, למרות היותו צעיר בשנתיים מגיל הקבלה למוסד. איינשטיין לא הצליח בבחינה, בעיקר בשל קשייו בשפה הצרפתית. הוא בילה שנה במכינה בשווייץ, וסיים את לימודיו שם עם "ציון לגנאי על הישגיו בצרפתית". לאחר מכן שב ונבחן בציריך בבחינות הכניסה, והפעם הצליח להתקבל. במהלך לימודיו נעדר משיעורים רבים והעדיף את דרך הלימוד העצמי, וב-1900 עמד בבחינות בהצלחה בזכות רשימות מפורטות שקיבל מחבר. לאחר מכן אמר על כך: "במשך שנה לאחר שנבחנתי בבחינה האחרונה, כל בעיה מדעית נראתה לי

חסרת טעם." באותה שנה הוענקה לו אזרחות שווייצית; הוא קיבל משרת הוראה זמנית לקיץ והדריך שני תלמידי תיכון. לאביהם, שהיה בעצמו מורה בתיכון, הציע להוציא את בניו מבית הספר, כי שם הורסים את סקרנותם הטבעית. עבודתו של איינשטיין כמורה פרטי לא ארכה זמן רב.

חלפו שנתיים מאז סיים איינשטיין את לימודיו בטרם התקבל למשרה קבועה כבוחן פטנטים במשרד הפטנטים בבירת שווייץ, ברן. איינשטיין החזיק במשרה זו שבע שנים. הוא גילה עניין לא מבוטל בעבודתו, שלעיתים גירתה את חשיבתו המדעית, אך הפיק ממנה הנאה בעיקר מפני ששחררה אותו מדאגות פרנסה והותירה לו זמן פנוי להתעמק בבעיות המדעיות בפיסיקה שסקרנו אותו.

בלא כל קשרים בחוגי האקדמיה וכמעט בלי קשרים עם פיסיקאים אחרים, התווה איינשטיין את קווי היסוד שעל פיהם התפתחה הפיסיקה העיונית של המאה ה-20. ב-1905, בגיל 26, הוענק לו תואר דוקטור בפיסיקה והוא פרסם שלושה מאמרים בעלי חשיבות עצומה. מאמרו הראשון עסק בתורה הקוונטית של האור וכלל הסבר לתוצא הפוטואלקטרי, ובגינו הוענק לו, בשנת 1921, פרס נובל בפיסיקה. המאמר השני דן בהיבטים הסטטיסטיים של התורה המולקולרית והתנועה הבראונית, המוכיחה את קיום האטומים. במאמרו השלישי, והמפורסם מכולם, הציג את תורת

ומצרפים את האלומות זו לזו ובדקים האם היה הפרש בין מהירויות האור בשני המסלולים. את האינטרפרומטר הציבו באופן שאחד המסלולים היה מקביל לכיוון התנועה של כדור הארץ במסלולו, ואז בדק אחד החוקרים בקפדנות האם חלים שינויים במהירות האלומות תוך כדי סיבוב המכשיר עד למצב שבו המסלול האחר מקביל לכיוון התנועה של הארץ. האינטרפרומטר היה רגיש ביותר וניתן היה למדוד בו את השינויים במהירות האור - שהיא כ-300,000 ק"מ בשנייה - הנובעים מהוספתה או מהפחתתה של מהירות התנועה

אזרח ארה"ב. אך מעל לכל, הוא היה אזרח העולם.

איינשטיין האמין שהיקום אדיש למצב האנושות; הוא קבע בהחלטיות כי שאלות מוסר הן השאלות החשובות ביותר לקיום המין האנושי, וכי כדי להבטיח את המשך הקיום האנושי יש ליצור משטר מוסרי. הוא חש שמשטר כזה נחוץ במיוחד בעידן הגרעיני. פצצות האטום, כך טען איינשטיין, שינו הכול, אך לא את דרך החשיבה שלנו. הוא היה אדם עניו שדאג מאוד לאושרם של בני האדם. המדען והסופר האנגלי סנו (C. P. Snow), שהכיר, אמר:

איינשטיין היה בעל המוח המבריק ביותר במאה העשרים, ואחד המבריקים שחיו מעולם. הוא היה יותר מכך. הוא היה אדם בעל אישיות אדירה, ואולי חשוב מכול, בעל שיעור קומה נורמלי... פגשתי כמה אנשים שהעולם כינה אותם "גדולים"; מכולם, הוא היה המרשים ביותר, הרבה יותר. למרות חמימותו, אנושיותו וגישתו הקומית - הוא היה השונה ביותר מכל אדם אחר\*.

איינשטיין היה מדען דגול, אך יותר מכך - הוא היה אדם דגול.

היחסות המצומצמת. ב-1915 פרסם איינשטיין מאמר על תורת היחסות הכללית - תורה חדשה של הכבידה הכוללת את תורת הכבידה של ניוטון כמקרה פרטי. למאמרים אלו היתה השפעה עצומה על דרך התפתחותה של הפיסיקה המודרנית והם גרמו לשינוי מהותי בהבנתנו את העולם הפיסיקלי.

תחומי התעניינותו של איינשטיין חרגו מגבולות הפיסיקה. במהלך מלחמת העולם הראשונה הוא חי בברלין וגינה את המיליטריזם הגרמני בהביעו את אמונתו העמוקה כי יש לשים קץ למלחמות ולהקים ארגון בינלאומי שידון בסכסוכים בין האומות. הוא התעניין בגורל העם היהודי והתנועה הציונית והיה בין הפעילים שתמכו בהקמתה ובביסוסה של האוניברסיטה העברית בירושלים. בשנת 1933, בעת שאיינשטיין ביקר בארה"ב, עלה היטלר לשלטון בגרמניה. איינשטיין גינה את היטלר ואת מדיניותו הגזענית והתפטר ממשרתו באוניברסיטת ברלין. היטלר הגיב בקציצת פרס לפוגע באיינשטיין. איינשטיין ניאות לקבל משרת חוקר במכון ללימודים מתקדמים בפרינסטון שבמדינת ניו-ג'רסי בארה"ב, ובשנת 1940 הוענקה לו אזרחות אמריקאית. איינשטיין היה אזרח גרמניה, לאחר מכן אזרח שווייץ, אחר כך שוב אזרח גרמני ולבסוף היה

\* מתוך סקירה על מכתבי בוהר-איינשטיין, 1916-1955, בתרגום לאנגלית של אירנה בורן (הוצאת Walker: ניו-יורק, 1971).

של כדור הארץ במסלולו, השווה לכ-30 ק"מ/שנייה. ואולם, הם לא הבחינו בכל שינוי, אף לא הזעיר ביותר. דבר מה היה שגוי בתפיסה שקבעה כי מהירות האור הנמדדת ביחס לצופה נע אמורה להיות שווה לסכום של מהירות האור בריק,  $c$ , ומהירות התנועה של הפולט או הקולט, או להפרש ביניהם. חוקרים רבים ערכו ניסויים במתכונת הניסוי המקורי של מייכלסון ומורלי או בגרסאות אחרות שלו, ובכולם התקבלה אותה תוצאת אפס. בתחילת המאה הנוכחית היתה זו עובדה מתמיהה ביותר.

את אחד ההסברים לתוצאה המביכה נתן הפיסיקאי האיירי ג'י פי פיציגרלד, שהציע שאורכה של המערכת הניסויית התכווץ בדיוק בשיעור הדרוש כדי לבטל את השינוי שהיה אמור להתרחש במהירות האור. הנחת פיציגרלד אמנם הסבירה את אי ההתאמה, אך מאחר שלא התבססה על תיאוריה מתאימה שתבאר מדוע כך הדבר, לא התקבלה הצעתו בכבוד ראש.

הסברו של איינשטיין היה שונה לחלוטין. איינשטיין טען כי אם מהירות האור אינה תואמת בתכונותיה את הרעיונות המקובלים או הקלאסיים, ואם המהירות אינה אלא היחס בין המרחק במרחב לרווח הזמן המתאים לו, הרי שיש להטיל ספק ברעיונות המקובלים על מרחב וזמן. הוא דחה את הרעיון הקלאסי שזמן ומרחב הינם בלתי תלויים זה בזה ופיתח, על סמך הנחות יסוד פשוטות, קשר מעמיק ביניהם.

איינשטיין לא ראה כל צורך באָתֶר. ועם רעיון האתר הקבוע במקומו נגזר גם מושג מערכת הייחוס המוחלטת. כל תנועה היא תנועה יחסית, לא ביחס לתמרוך דרכים כלשהו הקבוע במקומו ביקום, אלא ביחס למערכות ייחוס כלשהן. את מהירותה של ספינת חלל אי אפשר למדוד ביחס למרחב הריק, אלא רק ביחס לעצמים אחרים. למשל, אם ספינת חלל א חולפת במרחב הריק על פני ספינת חלל ב, טייס החללית א וטייסת החללית ב יוכלו למדוד את מהירותם היחסית, אך ממדידה זו הם לא יוכלו לקבוע מי מהם נמצא בתנועה ומי - אם מי מהם - שרוי במנוחה.

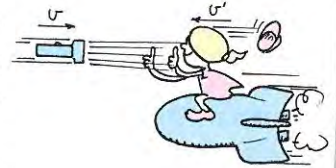
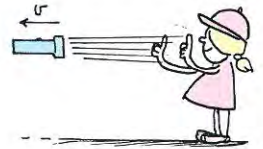
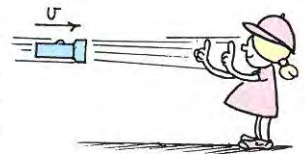
מצב זה מוכר לנוסע ברכבת המתבונן דרך החלון ורואה רכבת שנייה החולפת על פסים מקבילים. כל שיוכל לקבוע הוא שקיימת תנועה יחסית בין שתי הרכבות, אך הוא לא יוכל להחליט איזוהי הרכבת הנעה. ייתכן שהוא נח ביחס לקרקע והרכבת השנייה נעה, וייתכן שהוא נע יחסית לקרקע ואילו הרכבת השנייה נחה, אך ייתכן גם ששתיהן נעות יחסית לקרקע. הנקודה החשובה היא שמי שמצוי ברכבת ללא חלונות אינו יכול לקבוע האם הרכבת נעה במהירות קבועה או שמא היא נחה. זה העיקרון הראשון של תורת היחסות המצומצמת:

**כל חוקי הטבע שווים בכל המערכות הנעות זו ביחס לזו במהירות קבועה.**

לדוגמה, הקפה נשפך במטוס סילון הנע במהירות של 700 ק"מ/שעה בדיוק באותו אופן כמו במטוס נייח; אם נניע מטוסלת במטוס הנע, היא תתנווד בו כמו במטוס הנמצא במנוחה על מסלול ההמראה. אין ניסוי פיסיקלי המבחין בין מנוחה לבין תנועה במהירות קבועה. חוקי הפיסיקה בתא הטייס במטוס הנח זהים לחוקי הפיסיקה במעבדה הנעה במהירות קבועה.

ניתן לתכנן ניסויים רבים מאוד שיגלו תנועה מואצת, אך לפי איינשטיין, לא ניתן לתכנן כל ניסוי שיגלה תנועה מוחלטת במהירות קבועה. ניתן למדוד מהירות קבועה רק ביחס לאיזושהי מערכת ייחוס.

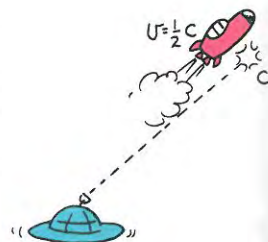
## הנחות היסוד של תורת היחסות המצומצמת



### איור 34.2

מהירות האור שווה בכל מערכות הייחוס.

אילו היו חוקי הפיסיקה שונים עבור צופים הנעים במהירויות שונות, היו לכך תוצאות מוזרות. פירוש הדבר היה, למשל, ששחקנית ביליארד על ספינת שעשועים השטה בקצב אחיד היתה צריכה להתאים את סגנון משחקה למהירות האונייה או אפילו לעונות השנה, בהתאם לשינויים במהירות התנועה של כדור הארץ במסלולו סביב השמש. ניסיונו היומיומי מלמדנו שאין כל צורך בכך. זוהי משמעות ההנחה הראשונה של תורת היחסות המצומצמת.



### איור 34.3

מהירות הבזק האור - הן זו הנמדדת מתחנת החלל והן זו הנמדדת מהחללית - היא  $c$ .

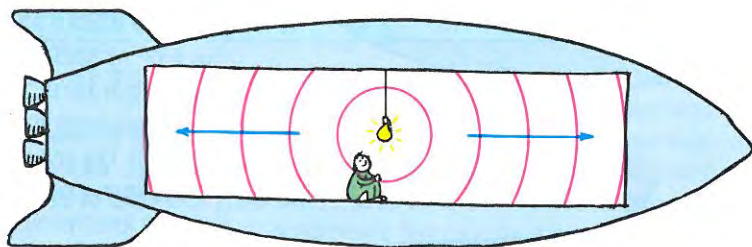
אחת השאלות ששאל איינשטיין הצעיר את מורו בבית הספר היתה, "כיצד היתה נראית אלומת אור לצופה הנע לצידה במהירות שווה?" על פי הפיסיקה הקלאסית, לצופה כזה האלומה היתה נראית שרויה במנוחה. אך ככל שהעמיק איינשטיין לחשוב על כך, יותר ויותר השתכנע כי הדבר לא ייתכן. לבסוף הגיע למסקנה שגם אילו יכול היה מקור האור לנוע במהירות האור, מהירותה של קרן האור הנפלטת עדיין היתה 300,000 קילומטרים בשנייה, הן ביחס אליו והן ביחס לכל צופה אחר. זה היה העיקרון השני שקבע איינשטיין ביסוד תורת היחסות המצומצמת:

**מהירות האור בריק אינה תלויה בתנועת המקור או הצופה; כלומר, מהירות האור קבועה ביחס לכל מערכות הייחוס.**

לשם הדגמת העיקרון, נתבונן בחללית המשוגרת מתחנת החלל המתוארת באיור 34.3. הבזק אור נפלט מתחנת החלל במהירות של 300,000 קילומטרים בשנייה, או  $c$ . צופה המצויה בחללית תראה את הבזק האור חולף לידה באותה מהירות  $c$ , ללא תלות במהירות החללית. אם יישלח הבזק אור מהחללית הנעה לתחנת החלל, צופים בתחנת החלל שימדדו את מהירות ההבזק ימצאו גם הם כי המהירות היא  $c$ . תוצאת כל המדידות של מהירות האור תהיה שווה, ללא תלות במהירות המקור או הצופה. תוצאת המדידה של כל הצופים שימדדו את מהירות האור תהיה  $c$ . בהמשך נראה שההסבר לכך קשור לקשר בין מרחב לזמן.

### בו-זמניות

מן העיקרון השני של איינשטיין מתקבלת מסקנה מעניינת בקשר למושג **בו-זמניות**. אירוע הוא דבר המתרחש במקום מסוים בזמן מסוים. אנו אומרים ששני אירועים הם בו-זמניים אם הם מתרחשים באותו זמן. נתבונן למשל במקור אור הנמצא בדיוק במרכז התא של ספינת החלל (איור 34.4). כאשר



### איור 34.4

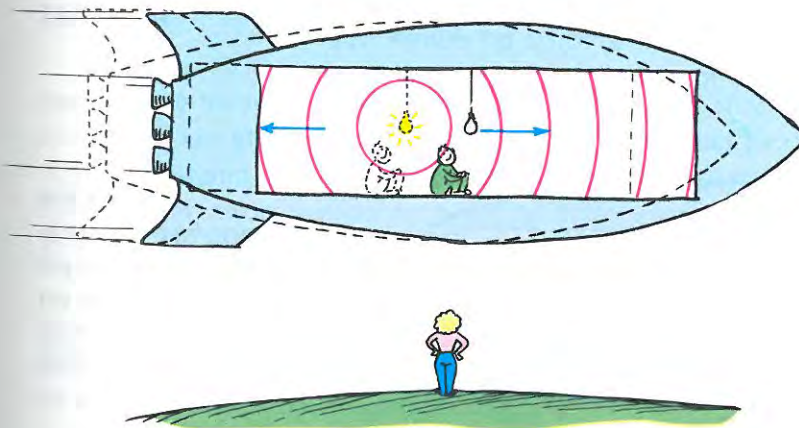
מנקודת המבט של הצופה הנע עם תא החללית, האור הנע מהמקור לעבר שני קצות התא עובר מרחקים שווים ועל כן הפגיעה בקצוות היא בו-זמנית.

מפעילים את מקור האור נפלט אור במהירות  $c$  בכל הכיוונים. כיוון שמקור האור נמצא במרחקים שווים מחלקו הקדמי של התא ומחלקו האחורי, הרי שהצופה הנמצא במרכז יגלה שהאור מגיע באותו זמן גם לחלק הקדמי וגם לחלק האחורי. כך קורה בין שהחללית שרויה במנוחה ובין שהיא נעה במהירות קבועה. אירועי הפגיעה בחלקה האחורי של החללית ובחלקה הקדמי מתרחשים בו-זמנית.

אך הזמן במערכת אחת יכול להיות שונה מהזמן במערכת אחרת. לצופה המצוי מחוץ לחללית ורואה את שני האירועים ממערכת ייחוס שונה, למשל מכוכב לכת שאינו נע עם ספינת החלל, שני האירועים אינם בו-זמניים. עבור צופה זה, הרואה את החללית נעה קדימה, במשך הזמן שבו האור נע מהמקור, חלקו האחורי של התא מתקרב אל האלומה בעוד חלקו הקדמי מתרחק ממנה. לכן, האלומה הנעה אחורה צריכה לעבור מרחק קצר יותר מהאלומה הנעה קדימה (איור 34.5). הואיל ומהירות האור בשני הכיוונים שווה, צופה זה יראה את האירוע של פגיעת האור בחלק האחורי לפני שיראה את אירוע פגיעת האור בחלק הקדמי. (אנו מניחים, כמובן, שהצופה יכול להבחין בהפרשים זעירים אלו.) במחשבה נוספת נוכל להסיק כי צופה המצוי בספינת חלל אחרת, הנעה בכיוון הנגדי, ידווח שהאור פגע קודם בחלקו הקדמי של תא החללית.

### שני אירועים בו-זמניים המתרחשים במקומות שונים במערכת ייחוס אחת אינם בו-זמניים במערכת ייחוס אחרת הנעה ביחס למערכת הראשונה.

(הדבר נכון לגבי כל התנועות, פרט לתנועה שבה הצופה נע במאונך לקו המחבר את מקום התרחשות האירועים, כך שהוא נמצא כל העת במרחק שווה ממקומות התרחשותם). העובדה שאירועים בו-זמניים במערכת אחת אינם בו-זמניים במערכת אחרת היא מסקנה יחסותית טהורה - הנובעת מהעובדה שמהירות האור שווה ביחס לכל הצופים.



#### איור 34.5

אותם שני מאורעות של פגיעה בקצה הקדמי והאחורי של התא אינם בו-זמניים מנקודת המבט של צופה המצוי במערכת ייחוס שונה. בשל תנועת החללית, האור הפוגע בקצה האחורי של התא אינו עובר מרחק כה גדול, ולכן פגיעתו בקצה האחורי של התא קודמת לפגיעתו בקצה הקדמי.

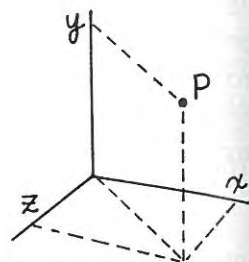
## שאלות

1. במה דומה העובדה שהרעם נשמע לאחר ראיית הברק ליחסיות הבו-זמניות?
2. הנח שהצופה בכוכב הלכת שבאיור 34.5 רואה שני ברקים הפוגעים בו-זמנית בחלקו הקדמי והאחורי של תא ספינת החלל. האם פגיעת שני הברקים תיראה בו-זמנית לצופה הנמצא במרכז התא של ספינת החלל? (אנו מניחים שהצופה יכול להבחין בהפרשי זמנים קטנים בין זמני התנועה של האור מקצות החללית למרכזה.)

כאשר אנו מתבוננים בכוכבים, אנו מגלים שלמעשה אנו צופים בעבר. כשאנו מביטים בכוכבים המרוחקים יותר אנו רואים עבר רחוק יותר. ככל שנרבה להרהר בדבר, יתברר לנו שהמרחב והזמן חייבים להיות קשורים זה בזה. המרחב שאנו חיים בו הוא תלת-ממדי; כלומר, אנו יכולים להגדיר כל מקום במרחב באמצעות שלושה ממדים. בתיאור גס, נוכל לומר שממדים אלו הם האורך, הרוחב, והגובה או העומק. למשל, אם אנו נמצאים בפינתו של חדר מלבני, נוכל לקבוע את מקומה של נקודה בחדר באמצעות שלושה מספרים. הראשון יהיה מרחק הנקודה - במטרים - מהקו המחבר את הקיר שמשמאלנו עם הרצפה, השני יהיה מספר המטרים שהם מרחק הנקודה מהקו המחבר בין הקיר שמיימנו לבין הרצפה, והשלישי - מספר המטרים המציינים את מרחק הנקודה מעל הרצפה או את מקומה לאורך הקו האנכי המחבר את הקירות בפינת החדר. פסיקאים קוראים לקווים הללו צירי הקואורדינטות של מערכת הייחוס (איור 34.6). שלושה מספרים - המרחקים לאורך ציר  $x$ , לאורך ציר  $y$  ולאורך ציר  $z$  - קובעים את מקומה של נקודה במרחב.

גם גודלם של עצמים נקבע בשלושה ממדים. תיבה, למשל, מתוארת באמצעות אורכה, רוחבה וגובהה. אך שלושת המספרים הללו אינם מספקים תיאור מלא של התיבה. קיים מימד רביעי - הזמן. לא תמיד היתה התיבה בעלת אורך, רוחב וגובה נתונים. היא החלה להתקיים כתיבה רק ברגע מסוים בזמן, ביום שבו נוצרה. היא גם לא תישאר תיבה לעד. בכל רגע היא עלולה להימחק, להישרף או להיהרס. כלומר, תיאור התיבה באמצעות שלושת ממדי המרחב

## מרחב-זמן

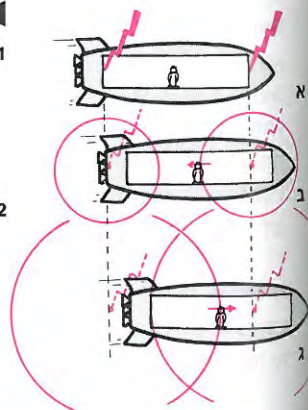


איור 34.6

ניתן לציין את הנקודה  $P$  באמצעות שלושה מספרים: ההיטלים לאורך הצירים  $x, y, z$ .

## תשובות:

1. הדברים אינם דומים! אין כל קשר בין הפרשי הזמנים בין ראיית הברק לשמיעת הרעם לבין צופים נעים או תורת היחסות. במקרה זה ההבדל נובע מההפרש בין הזמנים הנדרשים לאותות השונים (קול, אור, יונת דואר או כל אות אחר) להגיע אליך. יחסיות הבו-זמניות היא אי-התאמה אמיתית הקיימת בין תצפיות של צופים הנעים זה ביחס לזה, ולא אי-התאמה הנובעת מהפרשים בין זמני התנועה של אותות שונים, אור או קול.
2. לא; הצופה הנמצא במרכז התא יראה את פגיעת הברק בחלקה הקדמי של החללית לפני שיראה את פגיעת הברק בחלקה האחורי. הדבר מתואר במצבים (א), (ב) ו-(ג) שבאיור מימין. ב-(א) רואים את שני ההבזקים פוגעים בקצות התא בו-זמנית. במצב (ב), האור מהבזק הברק הקדמי מגיע לצופה. מעט לאחר מכן, ב-(ג), מגיע אל הצופה האור מההבזק האחורי.



שלה תקף לפרק זמן מסוים בלבד. לא ניתן לדון במרחב דיון של ממש בלא להביא בחשבון את הזמן. עצמים קיימים **במרחב-זמן**. כל עצם, כל אדם, כל כוכב לכת, כל כוכב, כל גלקסיה - קיימים במה שנקרא בפי הפיסיקאים "רצף המרחב-זמן".\*

שני צופים המצויים זה לצד זה ואינם נעים זה ביחס לזה מצויים באותה מערכת ייחוס. שניהם יקבלו אותן תוצאות במדידות של המרחב והזמן בין אירועים, ולכן נאמר ששניהם שותפים באותו תחום של המרחב-זמן. אולם אם שני הצופים נעים זה ביחס לזה, תוצאות המדידות שלהם תהיינה שונות. במהירויות נמוכות לא ניתן להבחין בהבדלים בין המדידות, אך במהירויות המתקרבות למהירות האור - מהירויות כאלה נקראות יחסותיות - ההפרשים ניכרים. כל צופה נמצא בתחום שונה של המרחב-זמן, ומדידות המרחב והזמן שלו תהיינה שונות ממדידותיו של צופה הנמצא בתחום אחר של המרחב-זמן. המדידות אינן משתנות אקראית, אלא באופן שכל צופה ימדוד תמיד אותו יחס בין המרחב לזמן עבור אור שנע במערכת הייחוס של חברו (או בכל מערכת ייחוס אחרת); ככל שיגדל המרחק הנמדד במרחב, יגדל רווח הזמן הנמדד. היחס הקבוע בין המרחב לזמן עבור האור,  $c$ , הוא הגורם המאחד בין מערכות ייחוס שונות של המרחב-זמן, והוא תמצית העיקרון השני של איינשטיין.

הזמן אינו מוחלט; הוא תלוי בתנועה היחסית בין הצופה ובין האירוע הנצפה. נדמה לעצמנו שבדרך כלשהי אנו יכולים לעקוב אחר תנועה של הבזק אור הלוך ושוב בין שתי מראות מקבילות. אם המרחק בין המראות נתון, אזי ייצור מערך זה מעין "שעון אור", מפני שהתנועות הלוך ושוב נמשכות פרקי זמן שווים (איור 34.8). נניח ששעון האור נמצא בתוך ספינת חלל שקופה הנעה במהירות גבוהה. אם נווע עם החללית ונתבונן בשעון האור (איור 34.9א), נגלה שהבזק האור

$$c = \frac{\text{מרחק}}{\text{זמן}} = \frac{\text{מרחק}}{c}$$

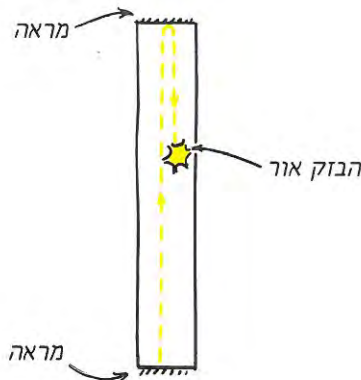
### איור 34.7

כל מדידה של היחס בין המרחק שעבר האור לזמן המעבר נותנת תוצאה אחת -  $c$ .

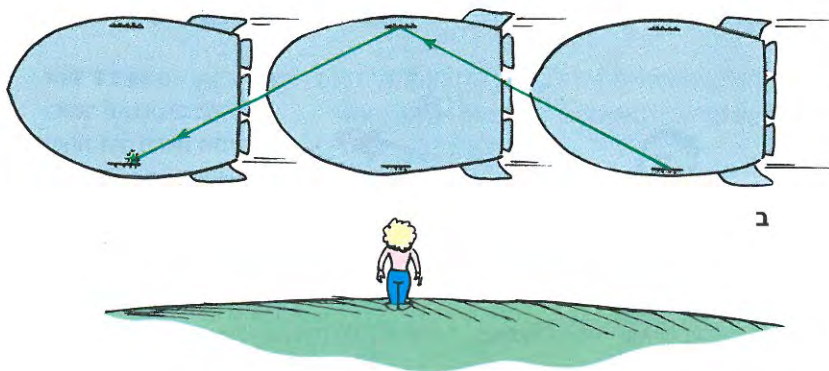
## התארכות הזמן

### איור 34.8

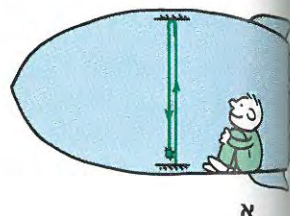
שעון אור. אור נע מעלה-מטה בין מראות מקבילות ובאופן זה "מתקתק" מרווחי זמן שווים.



\* מרחב וזמן עשויים להיות נקודות בידות (מקוונטטות) בסריג מרחב-זמן ארבע-ממדי. מגודלם של חלקיקי היסוד וממרחק ההפרדה המזערי בין חלקיקים מתנגשים מסתבר שיש כנראה יחידה בסיסית של מרחק שגודלה  $6.6 \times 10^{-16}$  מ', וגילו שזמני החיים של כל חלקיקי היסוד הם כפולה שלמה של "כרונונים", השווים לכ- $10^{-23} \times 2$  שניות.



ב



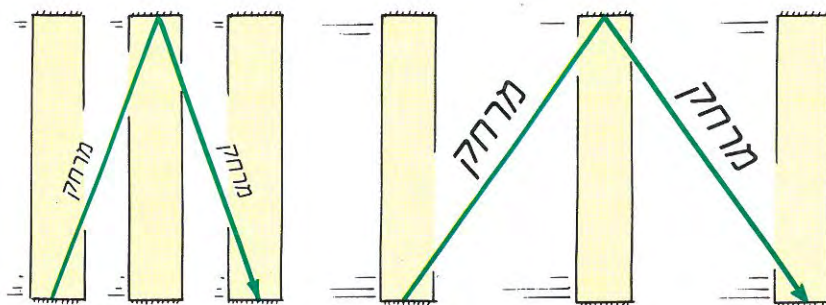
א

### איור 34.9

(א) צופה הנע עם החללית מבחין בהבזק הנע במאונך למראות של שעון האור. (ב) צופה שהחללית חולפת על פניו רואה את ההבזק נע במסלול אלכסוני.

המוחזר נע מעלה ומטה בין המראות, בדיוק כפי שהיה קורה אילו היתה ספינת החלל נייחת. במדידותינו לא תתגלנה כל השפעות יחסותיות, כי אין תנועה יחסית בינינו לבין שעון האור; אנו שותפים לאותה מערכת ייחוס במרחב-זמן.

אם לעומת זאת נעמוד במנוחה ונצפה בספינת החלל החולפת על פנינו במהירות גדולה דיה - למשל במחצית ממהירות האור - תצפיתנו תהיה שונה. כעת איננו מצויים עוד באותה מערכת ייחוס, מפני שעתה קיימת תנועה יחסית בין הצופה לנצפה. כעת לא נראה עוד אותה תנועה פשוטה של האור מעלה-מטה כמקודם. כיוון שהאור נע גם בכיוון האופקי עם שעון האור, הרי שנראה את האור נע במסלול אלכסוני (איור 34.9). שימו לב שהאור עובר עתה בתנועתו בין המראות מרחק ארוך יותר במרחב-זמן שלנו מהמרחק שעבר במערכת הייחוס של צופה הנע עם ספינת החלל. והואיל ומהירות האור שווה בכל מערכות הייחוס (העיקרון השני של איינשטיין), הבזק האור צריך לנוע במערכת שלנו במשך פרק זמן ארוך יותר מאשר במערכת הייחוס של הצופה שבחללית. הדבר נובע מהגדרת המהירות, שהיא פשוט היחס בין המרחק לזמן. יש לחלק את המרחק האלכסוני הארוך יותר בפרק זמן ארוך יותר, בהתאמה, כדי לקבל ערך שאינו משתנה למהירות האור. לכן, ממצב המנוחה היחסי שלנו אנו מודדים בין תקתוקי השעון הנע פרק זמן ארוך יותר מכפי שהיינו מודדים בשעון נייח (איור 34.10). בדוגמה זו דנו בשעון אור, אך התוצאה תקפה לכל שעון מכל סוג שהוא. קצב ההתקדמות של שעונים נעים הוא איטי יותר.



$$c = \frac{\text{מרחק}}{\text{זמן}} = \frac{\text{מרחק}}{\text{זמן}}$$

### איור 34.10

את המרחק הארוך יותר שעובר הבזק האור יש לחלק ברווח הזמן התואם, הארוך יותר, כדי לקבל את ערכה הקבוע של מהירות האור.

### איור 34.11

כאשר מתבוננים בחללית  
נייחת היא נראית מתקדמת  
בזמן בקצב המרבי: 24 שעות  
ביממה. כאשר מתבוננים  
בחללית המתקדמת בקצב  
המהיר ביותר במרחב  
(מהירות האור), היא נראית  
כשומנה קפוא.



מתיחה זו של הזמן נקראת **התארכות הזמן**, ואין דבר בינה לבין מנגנוני השעונים, אלא היא נובעת מאופיו של הזמן עצמו. התארכות הזמן תקפה בכל השעונים הפועלים כהלכה.

בעזרת גיאומטריה ואלגברה פשוטה ניתן לקבל מאיור 34.9 את הביטוי המדויק להתארכות הזמן במערכות ייחוס שונות במרחב-זמן\*. הקשר בין מרווח הזמן  $t_0$  שבין שני אירועים במערכת הייחוס שבה שני האירועים

\* באיור למטה מוצג שעון האור בשלושה מצבים עוקבים. הקווים האלכסוניים מתארים את מסלול הבזק האור המתחיל במראה התחתונה במצב 1, נע אל המראה העליונה במצב 2 וחוזר אל המראה התחתונה במצב 3. המרחקים בשרטוט מסומנים ב- $ct$ ,  $ct_0$  ו- $vt$ . על סמך העובדה שהמרחק שעובר עצם הנע במהירות קבועה שווה למכפלת המהירות במשך הזמן.

הסימן  $t_0$  מייצג את משך הזמן של תנועת האור בין המראות כפי שנמדד במערכת הייחוס הצמודה לשעון האור. זהו הזמן שאורכת התנועה מעלה-מטה. מהירות האור היא  $c$ , והאור עובר במסלול זה מרחק השווה ל- $ct_0$ . מרחק זה בין המראות, המאונך לכיוון התנועה של שעון האור, שווה בשתי מערכות הייחוס.

הסימן  $t$  מייצג את הזמן שאורכת תנועת הבזק האור ממראה אחת לשנייה כפי שנמדד ממערכת ייחוס שנועה במהירות  $v$  יחסית לשעון האור. מכיוון שמהירות האור היא  $c$  ומשך הזמן שאורכת תנועת האור ממצב 1 למצב 2 הוא  $t$ , הרי שהמרחק האלכסוני שהאור עובר שווה ל- $ct$ . במהלך פרק הזמן  $t$ , השעון (הנע אופקית במהירות  $v$ ) עובר בין מצב 1 למצב 2 מרחק אופקי  $vt$ .

שלושת המרחקים האלה יוצרים משולש ישר זווית המוצג בשרטוט, ובו  $ct$  הוא היתר ו- $ct_0$  ו- $vt$  הם הניצבים. משפט ידוע בגיאומטריה (משפט פיתגורס) קובע שריבוע היתר שווה לסכום ריבועי הניצבים. אם ניישם משפט זה לנתוני האיור נקבל:

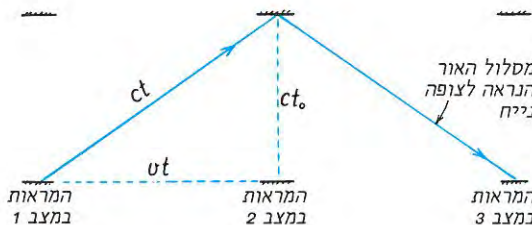
$$c^2 t^2 = c^2 t_0^2 + v^2 t^2$$

$$c^2 t^2 - v^2 t^2 = c^2 t_0^2$$

$$t^2 (1 - v^2/c^2) = t_0^2$$

$$t^2 = \frac{t_0^2}{1 - (v^2/c^2)}$$

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}}$$



מתרחשים באותו מקום לבין מרווח הזמן היחסי  $t$  הנמדד במערכת ייחוס שבה מתרחשים שני האירועים במקומות שונים הוא

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

באשר  $v$  מייצג את המהירות היחסית בין הצופה לנצפה ו- $c$  מייצג את מהירות האור. בהמשך הדברים נראה שאין גוף חומרי המסוגל לנוע במהירות האור או מהר ממנה, ולכן היחס  $v/c$  תמיד קטן מ-1; כך גם  $v^2/c^2$ . עבור  $v = 0$  היחס מתאפס, וגם עבור מהירויות שאנו צפויים להיתקל בהן בחיי היומיום - הקטנות מאוד בהשוואה ל- $c$  - היחס למעשה מתאפס. במקרה זה ערכו של  $\sqrt{1 - v^2/c^2}$  הוא 1 וכן גם ערכו של  $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ , ואז  $t = t_0$  ובשתי המערכות מרווחי הזמן שווים. עבור מהירויות גבוהות יותר  $v/c$  הוא בין אפס ל-1, ו- $\sqrt{1 - v^2/c^2}$  קטן מ-1; כמוהו גם  $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ . מחלוקת  $t_0$  במספר הקטן מ-1 נקבל ערך הגדול מ- $t_0$ , שפירושו מתיחת הזמן או התארכותו.

נבדוק דוגמאות מספריות אחדות, ונניח שהמהירות  $v$  שווה ל-50 אחוז ממהירות האור. במשוואת התארכות הזמן נציב עבור  $v$  את הערך  $0.5c$  ותוצאת החישוב תהיה  $t = 1.15t_0$ . פירוש התוצאה הוא שאם נתבונן בשעון הנמצא בספינת חלל הנעה במחצית ממהירות האור, אזי נראה שמחוג השניות משלים סיבוב אחד ב-1.15 דקות; אילו היינו שרויים במנוחה ביחס לשעון, סיבוב המחוג היה אורך דקה אחת בלבד. אם ספינת החלל היתה עוברת על פנינו במהירות השווה ל-87 אחוז ממהירות האור, אזי היה  $t = 2t_0$  - כלומר, מרווחי הזמן על ספינת החלל, על פי מדידתנו, היו נמשכים פי שניים מהרגיל. מחוגי השעון היו מסתובבים במחצית ממהירות שעוננו. בעינינו היו האירועים על הספינה מתרחשים באיטיות. אם המהירות היתה 99.5 אחוז ממהירות האור,  $t = 10t_0$ , אזי היה נראה לנו כי סיבוב מחוג השניות, שבשעוננו אורך דקה אחת, נמשך בספינת החלל 10 דקות.

במילים אחרות, במהירות של 99.5 אחוז מ- $c$  השעון ייראה לנו מתקדם בקצב השווה לעשירית מקצב השעון שלנו; בזמן שמחוג השניות שלנו יתקתק 60 שניות, מחוגיו יתקתקו רק 6 שניות. במהירות השווה ל-87 אחוז ממהירות האור, השעון יתקתק בקצב השווה למחצית הקצב של שעוננו ולכן יראה 30 שניות כששעוננו יראה 60 שניות; במהירות השווה ל-50 אחוז ממהירות האור, קצב תקתוקי השעון יהיה  $1/1.15$  מקצב שעוננו והוא יתקתק 52 שניות לכל 60 שניות שלנו. נמצאנו למדים שקצב התקדמותם של שעונים נעים הוא איטי יותר.

אין כל דבר יוצא דופן במהותו של השעון הנע; הוא פשוט מתקתק בקצב המתאים לזמן שונה. ככל שהשעון נע מהר יותר, כך נראה לצופה שאינו נע עם השעון שקצב השעון איטי יותר. אילו ניתן היה שהשעון יחלוף על פני הצופה במהירות האור, בעיני הצופה השעון לא היה נראה מתקדם כלל וכלל. לגבי הצופה, רווח הזמן בין שני תקתוקים היה אינסופי. השעון היה נטול זמן! לעומת זאת, אילו היה הצופה נע עם השעון, השעון לא היה מראה כל האטה בזמן. בהעדר כל תנועה יחסית בינו לבין השעון, לגבי הצופה הנע השעון היה פועל כרגיל. המהירות  $v$  שיש להציב במשוואת התארכות הזמן היתה מתאפסת ולכן

היה  $t = t_0$ ; הצופה והשעון היו שותפים לאותה מערכת ייחוס של המרחב-זמן. אם אדם החולף על פנינו היה בוחן שעון במערכת הייחוס שלנו, הוא היה מגלה ששעונו מתקדם בקצב איטי יותר בדיוק באותה מידה שאנו היינו רואים את שעונו נע לאט יותר. כל אחד רואה את שעונו של האחר נע לאט יותר. אין כאן כל סתירה - שני צופים הנעים במהירויות שונות אינם יכולים להשתייך לאותה מערכת של המרחב-זמן. מדידות שנעשות במערכת אחת של המרחב-זמן אינן תואמות מדידות שנערכות במערכת אחרת של המרחב-זמן. תוצאת המדידה שלגביה תהיה ביניהם הסכמה מלאה היא מהירות האור.

התארכות הזמן הוכחה פעמים אין-ספור בניסויים שנערכו במאיצי חלקיקים אטומיים. זמן מחצית החיים של חלקיקים רדיואקטיביים הנעים במהירות מתארך, ושיעור ההתארכות תואם את תחזיתיה של משוואת איינשטיין. התארכות הזמן הוכחה גם בתנועה שאינה כה מהירה. כדי לבדוק את התאמת תורת היחסות של איינשטיין לשעונים מקרוסקופיים, הוטסו בשנת 1971 ארבעה שעונים אטומיים של צזיום במטוסי סילון בטיסות מסחריות רגילות מסביב לעולם, פעם מזרחה ופעם מערבה. לאחר השלמת הסיבוב הורו השעונים זמנים שונים. הפרשי הזמנים, שנמדדו ביחס לשעון האטומי שבמצפה הימי של צבא ארה"ב, נמדדו במיליארדיות השנייה והתאימו לתחזיתה של תורת היחסות.

הדבר נראה תמוה בעינינו משום שבניסוינו היומיומי איננו עוסקים במדידות הנערכות במהירויות גבוהות או במדידות בשעונים אטומיים במהירויות רגילות. תורת היחסות המצומצמת אינה נראית תואמת את השכל הישר. אך לפי איינשטיין, השכל הישר הוא אותו רובד של דעות קדומות שהושקע במוחנו עד הגיענו לגיל 18. אילו בלינו את שנות נערונו בספינות חלל הנעות במרחבי היקום במהירויות גבוהות מאוד, או אז היו מסקנות תורת היחסות נראות לנו סבירות בהחלט.

## שאלות

1. האם תחושו כי חל שינוי בקצב פעימות הדופק שלכם אם תנועו בספינת חלל במהירות גבוהה יחסית לכדור הארץ? האם תחושו בשינוי בקצב הדופק של האנשים שנותרו על פני האדמה?
2. האם יקבלו צופים א-ו-ב אותן תוצאות במדידת זמן אם א נע יחסית ל-ב במהירות השווה למחצית ממהירות האור? אם א ו-ב נעים יחד, יחסית לכדור הארץ, במהירות השווה למחצית ממהירות האור?
3. האם פירושה של התארכות הזמן הוא שהזמן במערכות נעות אכן מתקדם לאט יותר, או שמא רק נראה לנו כאילו הוא מתקדם לאט יותר?

## תשובות:

1. אין תנועה יחסית ביניכם לבין הדופק שלכם מפני שאתם מצויים באותה מערכת ייחוס כמוהו, ולכן לא תחושו בכל השפעות יחסיות במדידת הדופק שלכם. אולם יהיו הבדלים יחסותיים ביניכם לבין האנשים שעל כדור הארץ. אתם תגלו שהדופק שלהם פועם בקצב איטי מהרגיל (והם יגלו שהדופק שלכם איטי מהרגיל). השפעות יחסיות מיוחסות תמיד לאחר.
2. כאשר א ו-ב נעים בתנועות שונות ביחס לחברו, כל אחד מהם יבחין בהאטה החלה בהתקדמות הזמן במערכת הייחוס של האחר. לא תהיה ביניהם תמימות דעים בנוגע לתוצאות מדידות הזמן. אולם כאשר הם נעים יחדיו הם שותפים למערכת ייחוס אחת ולכן יסכימו ביניהם על תוצאות מדידות הזמן. כל אחד יראה את זמנו של חברו משתנה כרגיל ושניהם כאחד יראו את האירועים על כדור הארץ מתרחשים בהילוך איטי.
3. האסת הזמן אינה רק אשליה שמקורה בתנועה. כפי שנראה בסעיף הבא, הזמן במערכת נעה אכן חולף באיטיות רבה יותר בהשוואה למערכת הנחה. המשיכו לקרוא!