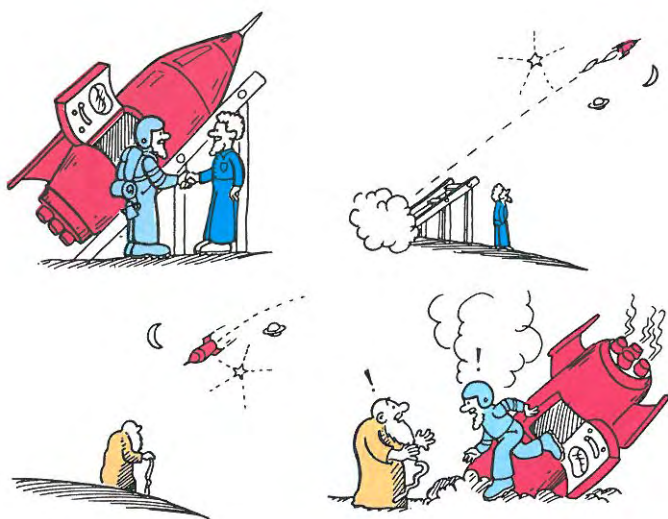


התארכות הזמן מומחשת באופן מרשים ביותר בדוגמת התאומים הזהים, האחד אסטרונאוט היוצא לחלל למסע הלוך ושוב ונע במהירות גבוהה, בעוד האחר נותר על כדור הארץ. עם שובו של התאום הנוסע ממסעו, הוא צעיר יותר מאחיו שנותר בביתו (איור 34.12). המהירות היחסית היא שקובעת בכמה יהיה האח הנוסע צעיר יותר. אם יתמיד במסעו במהירות השווה ל-50 אחוז ממהירות האור במשך שנה (בהתאם לשעונים בספינת החלל), יחלפו בכדור הארץ 1.15 שנים. אם ינוע התאום במשך שנה במהירות השווה ל-87 אחוזים ממהירות האור, יחלפו בכדור הארץ שנתיים. במהירות השווה ל-99.5 אחוזים ממהירות האור, לכל שנה בספינת החלל יחלפו 10 שנים על פני כדור הארץ.

איור 34.12

האח הנוסע אינו מזדקן כה מהר כאחיו שנשאר על כדור הארץ.



כאן עולה תכופות השאלה: מאחר שהתנועה היא יחסית, מדוע אין הדבר כך גם בכיוון ההפוך? מדוע אין האח שנסע מוצא בשובו את האח שנשאר צעיר ממנו? אנו נראה שבשתי מערכות הייחוס, הן בזו הצמודה לכדור הארץ והן בזו של האח שנסע, האח שנותר הוא שהזדקן יותר.

ראשית, נתבונן בספינת חלל המרחפת במנוחה יחסית לכוכב לכת מרוחק. נניח שהספינה משגרת לעבר כוכב הלכת הבזקי אור קצרים במרווחי זמן קבועים (איור 34.13). זמן מה יחלוף בטרם יפגעו ההבזקים בכוכב הלכת, בדיוק כשם שחולפות 8 דקות לפני שאור השמש מגיע לאדמה. הבזקי האור יגיעו אל הקולט במהירות c . מאחר שאין מהירות יחסית בין המשדר לקולט, ההבזקים העוקבים ייקלטו בקצב שבו הם משודרים. לדוגמה, אם ההבזקים נשלחים מספינת החלל בכל 6 דקות, אזי, לאחר עיכוב ראשוני כלשהו, הקולט יקלוט את ההבזקים בהפרשים של 6 דקות. אין כל פלא בדבר, כל עוד לא מתרחשת ביניהם תנועה.

איור 34.13

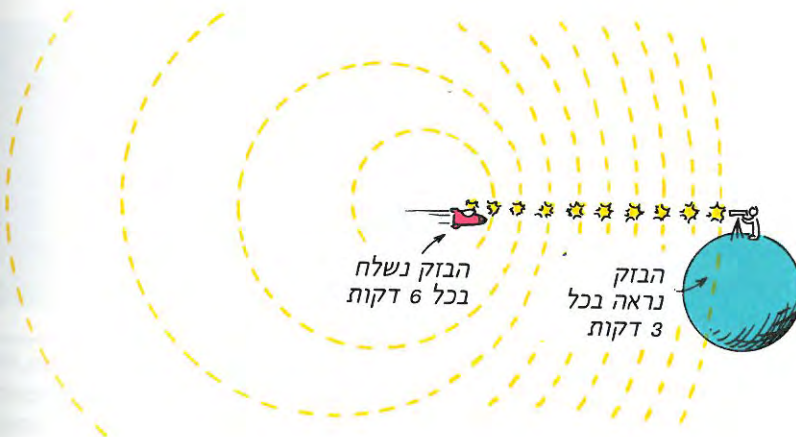
בהעדר תנועה, הבזקי האור נקלטים בתדירות שבה החללית משגרת אותם.



אולם המצב משתנה בתכלית כשקיימת תנועה יחסית. חשוב לציין שמהירות ההבזקים היא עדיין c , ללא תלות בתנועתם האפשרית של המשדר או הקולט. אך התדירות שבה ייראו ההבזקים תלויה מאוד במהירות התנועה היחסית. כאשר הספינה נעה לעבר הקולט, הקולט רואה את ההבזקים לעיתים מזומנות יותר; זאת לא רק עקב שינוי הזמן בגלל התנועה, אלא בעיקר מפני שבעקבות התקרבות הספינה לקולט, המרחק שכל הבזק עוקב צריך לעבור הולך ומתקצר. אם הספינה משדרת הבזק בכל 6 דקות, ההבזקים ייראו בהפרשי זמן קצרים מ-6 דקות. נניח שהספינה נעה במהירות גבוהה דיה כך שההבזקים נראים בתדירות כפולה, כלומר, הם נקלטים במרווחים של 3 דקות (איור 34.14).

איור 34.14

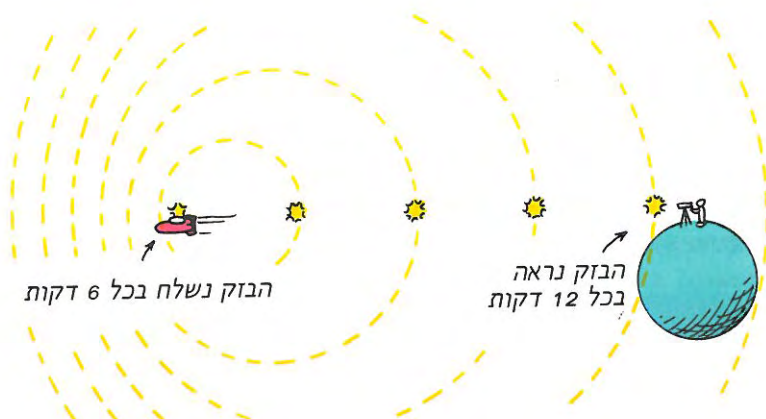
כאשר המשדר נע לעבר הקולט, ההבזקים נראים בתדירות גדולה יותר.



אם הספינה מתרחקת מהקולט במהירות זו ופולטת הבזקים במרווחי זמן של 6 דקות, ההבזקים ייקלטו במחצית התדירות המשודרת, כלומר במרווחים של 12 דקות (איור 34.15). זאת משום שככל שספינת החלל מתרחקת מהקולט, כל הבזק עוקב צריך לעבור מרחק רב יותר מקודמו.

איור 34.15

כאשר המשדר מתרחק מהקולט, רווח הזמן בין ההבזקים גדול יותר והם נראים בתדירות קטנה יותר.



הבזקים עדיין מתקבלים מהחללית המתרחקת במרווחים של 12 דקות.



החללית בדרכה חזרה עדיין משגרת הבזק בכל 6 דקות



הבזק עדיין נשלח בכל 6 דקות



ההבזקים מהחללית המתקרבת נראים בכל 3 דקות

איור 34.16

החללית משגרת הבזקים, אחד בכל 6 דקות, במהלך מסע הנמשך שתיים. בשעה הראשונה היא מתרחקת מכדור הארץ, ובשעה השנייה היא מתקרבת אליו.

השפעת ההתרחקות מהקולט הפוכה להשפעת ההתקרבות לקולט. אם ההבזקים מתקבלים בתדירות כפולה כשספינת החלל מתקרבת (הבזקים המשודרים במרווחים של 6 דקות נקלטים בכל 3 דקות), אזי כאשר הספינה מתרחקת הם נקלטים במחצית התדירות (הבזקים המשודרים במרווחים של 6 דקות נקלטים בכל 12 דקות)*.

הבזקי האור מהווים שעון אור. במערכת הייחוס של הקולט, אירועים הנמשכים 6 דקות בחללית נמשכים 12 דקות מנקודת הראות של הצופה אם היא מתרחקת, ו-3 דקות בלבד אם היא מתקרבת.

שאלות

1. כמה הבזקים ייפלטו מספינת חלל הנעה במשך שעה אחת ופולטת הבזק אחד בכל 6 דקות?
2. ספינת החלל, המתקרבת לקולט במהירות קבועה, פולטת הבזקים במרווחים שווים של 6 דקות. האם ייקלטו ההבזקים על ידי הקולט במרווחי זמן קבועים?
3. כמה זמן יחלוף בין קליטת ההבזק הראשון לקליטת ההבזק האחרון אם הקולט קולט הבזקים אלו במרווחי זמן של 3 דקות (במערכת הייחוס של הקולט)?

הבה ניישם את תופעת ההכפלה וההקטנה של מרווחי ההבזקים לדוגמת התאומים. נניח שהתאום הנע מתרחק מהתאום שעל כדור הארץ במהירות קבועה וגבוהה במשך שעה אחת, ואז מסתובב במהירות ושב על עקבותיו במשך שעה אחת. על פי כל השעונים בספינת החלל, התאום הנע השלים את

תשובות:

1. הספינה תפלוט 10 הבזקים בשעה, שכן $(60 \text{ דקות}) / (6 \text{ דקות}) = 10$.
2. כן; כל עוד הספינה נעה במהירות קבועה ייקלטו ההבזקים הנפלטים במרווחים שווים אך בתדירות גבוהה יותר. (אם הספינה מאיצה במהלך פליטת ההבזקים, הם לא ייקלטו במרווחי זמן שווים.)
3. כל ההבזקים ייקלטו בתוך 30 דקות, כי $10 \times (3 \text{ דקות}) = 30 \text{ דקות}$.

* יחס הופכי זה (הכפלת התדירות והקטנתה פי שתיים) נובע מהיות מהירות האור גודל קבוע, וניתן להמחישו בעזרת הדוגמה הבאה: נניח שמשדר על כדור הארץ פולט הבזקים לעבר צופה רחוק, הנמצא על כוכב לכת השרוי במנוחה יחסית לכדור הארץ, במרווחים של 3 דקות. הצופה רואה הבזק פעם בכל 3 דקות. נניח עתה שצופה שני נע בספינת חלל בין כדור הארץ לכוכב הלכת במהירות גבוהה, כך שההבזקים נקלטים על ידו במחצית התדירות - במרווחים של 6 דקות. מחצית התדירות תתקבל עבור מהירות התרחקות השווה ל- $0.6c$. נוכל לראות שאם הספינה תתקרב במהירות של $0.6c$ ותשדר הבזק בכל פעם שהיא קולטת הבזק מכדור הארץ - כלומר, אחת לכל 6 דקות - התדירות תוכפל. כיצד יקלט הצופה על כוכב הלכת המרוחק את ההבזקים הללו? מכיוון שההבזקים המשודרים מכדור הארץ וגם ההבזקים המשודרים מספינת החלל נעים במהירות c , הצופה יראה לא רק את ההבזקים מכדור הארץ אלא גם את ההבזקים מספינת החלל בכל 3 דקות. אם כך, אף שהאדם בספינת החלל משדר הבזקים כל 6 דקות, הצופה יקלוט אותם כל 3 דקות, כלומר בתדירות כפולה מתדירות השידור. עבור מהירות התרחקות שבה מתקבלת מחצית התדירות תתקבל בהתקרבות תדירות כפולה. אילו היתה הספינה מתרחקת במהירות כזו שעבורה התדירות הנקלטת היתה שווה ל- $\frac{1}{3}$ או ל- $\frac{1}{4}$ מהתדירות המשודרת, אזי בהתקרבות התדירות הנקלטת היתה פי שלושה או פי ארבעה בהתאמה. קשר הופכי זה אינו מתקיים עבור גלים הנעים בתווך. לגבי גלי קול למשל, עבור מהירות התקרבות הגורמת להכפלת תדירות השידור תתקבל בהתרחקות תדירות השווה ל- $\frac{2}{3}$ (ולא ל- $\frac{1}{2}$) מהתדירות המשודרת.

מסעו בשעתיים. אולם ממערכת הייחוס של כדור הארץ לא נראה שהנסיעה ארכה שעותיים. ניתן להיווכח בכך בעזרת ההבזקים משעון האור של ספינת החלל.

כאשר ספינת החלל מתרחקת מכדור הארץ, היא פולטת הבזק אחד בכל 6 דקות. הבזקים אלה נקלטים על כדור הארץ בכל 12 דקות. במהלך שעת ההתרחקות מכדור הארץ נפלטו 10 הבזקים. אם הספינה יצאה לדרך ב-12 בצהריים, אזי כאשר ייפלט ההבזק העשירי יורו השעונים בספינת החלל את השעה 1 אחה"צ. מה תהיה השעה על כדור הארץ כאשר הבזק זה ייקלט בו? התשובה היא 2 אחה"צ. מדוע? כי משך הזמן שאורכת קליטת 10 הבזקים במרווחים של 12 דקות הוא 10×12 (דקות) שהן 120 דקות (= 2 שעות).

נניח שהחללית יכולה לשנות כהרף עין את כיוון תנועתה ולשוב על עקבותיה באותה מהירות גבוהה. במהלך שעת חזרתה היא פולטת עוד 10 הבזקים במרווחים של 6 דקות. הבזקים אלה נקלטים על כדור הארץ אחת ל-3 דקות, ולכן ייקלטו עשרת ההבזקים במשך 30 דקות. שעון על כדור הארץ יורה את השעה 2:30 כאשר ספינת החלל תשלים את מסעה בן השעתיים. אנו רואים שהתאום על כדור הארץ הזדקן בחצי שעה יותר מאחיו שעל ספינת החלל!

אותה תוצאה תתקבל בכל אחת ממערכות הייחוס. נדון שנית באותו מסע, אלא שהפעם נניח כי ההבזקים נפלטו מכדור הארץ במרווחים קבועים של 6 דקות ארציות. במערכת הייחוס של הספינה המתרחקת ייקלטו הבזקים אלה במרווחים של 12 דקות (איור 34.18א). פירושו של דבר שבמשך שעת ההתרחקות ייקלטו בספינת החלל חמישה הבזקים. במהלך שעת ההתקרבות ייקלטו הבזקי האור במרווחים של 3 דקות (איור 34.18ב), ולכן במהלך שעה זו ייראו 20 הבזקים.

איור 34.17

המסע שערך שעותיים
במערכת הייחוס של החללית
ערך שעותיים וחצי במערכת
הייחוס של כדור הארץ.



מערכת הייחוס של כדור הארץ:

$$10 \text{ הבזקים} \times 12 \text{ דקות} = 120 \text{ דקות}$$

$$10 \text{ הבזקים} \times 3 \text{ דקות} = 30 \text{ דקות}$$

$$150 \text{ דקות}$$

$$2\frac{1}{2} \text{ שעות}$$

מערכת הייחוס של החללית:

$$20 \text{ הבזקים} \times 6 \text{ דקות} = 120 \text{ דקות}$$

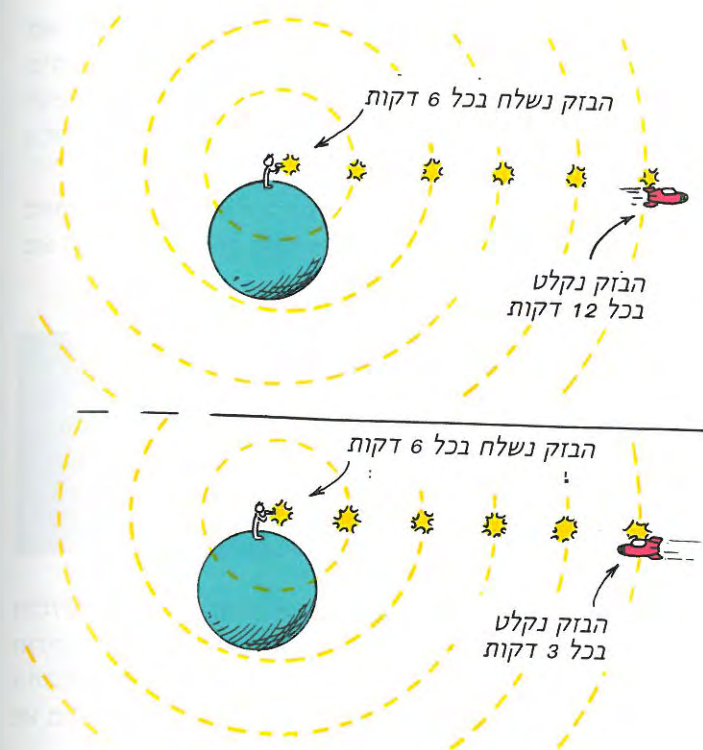
$$2 \text{ שעות}$$

איור 34.18

הבזקים הנשלחים מכדור הארץ במרווחים של 6 דקות נקלטים בחללית המתרחקת במרווחים של 12 דקות ובחללית המתקרבת במרווחים של 3 דקות.

א

ב



בספינת החלל נקלטו איפוא 25 הבזקים במהלך המסע בן השעתיים. אולם בהתאם לשעונים שעל כדור הארץ, משך הזמן שנדרש לפליטת 25 הבזקים במרווחים של 6 דקות הוא (6 דקות) $\times 25$, או 150 דקות (= 2.5 שעות). מצב זה מתואר באיור 34.19.

איור 34.19

מרווח זמן בן $2\frac{1}{2}$ שעות על כדור הארץ אורך שעתיים במערכת הייחוס של החללית.

מערכת הייחוס של החללית:

$$\begin{aligned} 5 \text{ הבזקים} \times 12 \text{ דקות} &= 60 \text{ דקות} \\ 20 \text{ הבזקים} \times 3 \text{ דקות} &= 60 \text{ דקות} \\ \hline 120 \text{ דקות} \\ \hline 2 \text{ שעות} \end{aligned}$$

מערכת הייחוס של כדור הארץ:

$$\begin{aligned} 25 \text{ הבזקים} \times 6 \text{ דקות} &= 150 \text{ דקות} \\ \hline 2\frac{1}{2} \text{ שעות} \end{aligned}$$



אם כך, אותה מסקנה מקובלת על שני האחים ואין ספק מיהו האח שהזדקן יותר. בעוד התאום שנותר על כדור הארץ שהה כל הזמן במערכת ייחוס אחת, התאום שנע שהה בשתי מערכות ייחוס שונות, המופרדות זו מזו בהאצת ספינת החלל במהלך שינוי כיוון תנועתה. ספינת החלל היתה בשני תחומים שונים של זמן, בעוד כדור הארץ היה בתחום זמן יחיד, שונה משניהם. התאומים יוכלו לשוב ולהיפגש באותו מקום במרחב רק על חשבון הזמן.

שאלה

היות שתנועה היא עניין יחסי, האם לא ניתן לומר באותה מידה שספינת החלל נחה וכדור הארץ נע והתאום שבחללית מזדקן יותר?

מסע בחלל

אחת הטענות שהועלו זה כבר נגד מסעות בין-כוכביים היתה שמשך חיינו קצר מדי - לפחות כשמדובר במסעות לכוכבים המרוחקים. נטען, למשל, שהכוכב הקרוב ביותר אלינו (לאחר השמש), הכוכב אלפא בקבוצת קנטאור, נמצא במרחק ארבע שנות-אור ולכן מסע אליו ובחזרה, אפילו במהירות האור, יימשך 8 שנים*. מרכז הגלקסיה שלנו נמצא במרחק של כ-30,000 שנות-אור, ולכן למסע לשם יידרשו, אפילו בתנועה במהירות האור, 30,000 שנה בכיוון אחד. אך שיקולים אלה מתעלמים מהתארכות הזמן. הזמן עבור אדם על כדור הארץ והזמן עבור נוסע בספינת חלל הנעה במהירות גבוהה אינם היינו הך.

איור 34.20

תנועת האור ממרכז הגלקסיה למערכת השמש אורכת במערכת הייחוס של כדור הארץ 30,000 שנה. במערכת הייחוס של חללית הנעה במהירות גבוהה משך המסע קצר יותר. במערכת הייחוס של האור עצמו המסע אינו אורך כל זמן. אין זמן במערכת ייחוס הנעה במהירות האור.



תשובה:

לא, אלא אם יחליף כדור הארץ את כיוון תנועתו וישוב על עקבותיו, בדומה לספינת החלל בדוגמה שלנו. המצב אינו סימטרי, כי תאום אחד נותר במשך המסע במערכת ייחוס יחידה במרחב-זמן בעוד אחיו עובר שינוי מובהק במערכת הייחוס, כפי שברור מהאצתו במהלך היפוך כיוון התנועה.

* שנת-אור היא יחידת אורך - המרחק שהאור עובר בשנה אחת, 9.45×10^{12} ק"מ.

לב האדם פועם בקצב של תחום הזמן שבו הוא נמצא; לגבי האדם עצמו, מערכת ייחוס אחת של זמן זהה בכל למערכת ייחוס אחרת שהוא מצוי בה, אך לא כן הדבר לגבי צופה הנמצאת מחוץ למערכת הייחוס של האדם - שכן היא מבחינה בהבדל. למשל, אסטרונוטים הנעים במהירות השווה ל-99 אחוזים ממהירות האור יוכלו לנוע אל הכוכב פרוקיון (המרוחק מאיתנו 10.4 שנות-אור) הלוך ושוב ב-21 שנים. לאור עצמו נדרשות לאותו מסע הלוך וחזור 20.8 שנים. בשל התארכות הזמן, לאסטרונוטים ידמה שחלפו רק 3 שנים. זה הזמן שיראו כל שעוניהם - וביולוגיה הם יתבגרו ב-3 שנים בלבד. אך מקבלי פניהם יזדקנו עד שובם ב-21 שנים!

במהירויות גבוהות יותר התוצאות מפתיעות עוד יותר. אם החללית נעה במהירות השווה ל-99.9 אחוזים ממהירות האור, הנוסעים יוכלו לעבור מעט למעלה מ-70 שנות-אור בזמן עצמי של שנה אחת; במהירות השווה ל-99.99 אחוזים ממהירות האור, המרחק שיעברו יעלה על 200 שנות-אור. אם יאריך מסעם 5 שנים, המרחק שיעברו יעלה על המרחק שהאור עובר ב-1000 שנים ארציות!

הטכנולוגיה העכשווית אינה מאפשרת מסעות כאלה. הקרינה היא הבעיה העיקרית. ספינת חלל שתנוע במהירויות הקרובות למהירות האור תפגע בחלקיקים בין-כוכביים כאילו עמדה על כן שיגור בזמן שזרם של חלקיקים הנורה ממאיץ חלקיקים מכוון אליה ופוגע בה. כיום לא מוכרת דרך שבה ניתן להתגונן זמן ממושך מפני הפגזות חלקיקים עצומה זו. לו ניתן היה, בדרך כלשהי, להתגבר על בעיה זו, עדיין היתה קיימת בעיית האנרגיה והדלק. לספינת חלל הנעה במהירויות יחסותיות תידרשנה אנרגיות הגדולות פי מיליארדים מהאנרגיות הנדרשות להכנסת ספינת חלל למסלול. גם סוג כלשהו של "שואב-אבק" חללי, שישאב מימן בין-כוכבי אל תוך החללית לשריפה בכור היתוך גרעיני, יצטרך להתגבר על השפעתה המעכבת העצומה של שאיבת המימן תוך כדי תנועה במהירויות גבוהות. מסעות חלל כאלה הם עדיין בגדר חלום לא מעשי.

אם תיפתרנה כל הבעיות האלה ומסע בחלל יהפוך לעניין שבשגרה, אנשים יוכלו לצאת למסע כזה ולשוב לכדור הארץ במאה שיבחרו בה. למשל, אדם יוכל לצאת מכדור הארץ בספינת חלל מהירה כזו ב-2050, לנוע בחלל במשך כ-5 שנים ולשוב בשנת 2500. הוא יוכל לחיות זמן מסוים בין עמיתיו שוכני כדור הארץ, ולאחר מכן לצאת שוב לדרך ולחזור, למשל, בשנת 3000. אנשים יוכלו להמשיך לקפוץ לעתיד במחיר מסוים של הזמן העצמי שלהם, אך הם לא יוכלו לשוב לעבר. לעולם לא יוכלו לחזור לרגע הפרידה שלהם מכדור הארץ. הזמן, כפי שאנו תופסים אותו, מתקדם בכיוון אחד בלבד - קדימה. כאן, על כדור הארץ, אנו מתקדמים לעתיד בקצב קבוע של 24 שעות ביממה. אסטרונוטית היוצאת למסע ארוך לחלל חייבת להשלים עם העובדה שעד שובה יחלוף בכדור הארץ זמן רב יותר מהזמן שהיא תחוה במסעה. ה"אני מאמין" של כל טיילי החלל, ללא תלות במצבם הגופני, יהיה פרידה לתמיד.

אנו יכולים לצפות בעבר, אך איננו יכולים לנוע לעברו. כשאנו מתבוננים בכוכבים, למשל, אנו חווים את העבר. אור הכוכבים המגיע לעינינו יצא מהם

לפני תריסרי שנים, לפני מאות ואפילו לפני מיליוני שנים. אנו צופים בכוכבים כפי שהיו מזמן. לפיכך אנו עדים להיסטוריה הקדומה שלהם, ויכולים רק לשער מה התרחש בהם בינתיים.

אם אנו צופים באורו של כוכב שנפלט ממנו לפני 100 שנה, הרי שכל יצור חי הצופה בנו מאותה מערכת שמש רואה אור שנפלט מכאן לפני 100 שנה, ואם עומדים לרשותו טלסקופי-על, הוא מסוגל לצפות באירועים שהתרחשו כאן לפני מאה שנה - למשל, ראשית ההתיישבות הציונית בארץ. יצורי אותו כוכב יראו אירועים בעברנו, אך הם יראו אותם מתקדמים בזמן; הם יראו את שעונינו נעים במגמת השעון.

אנו יכולים להרהר באפשרות של תנועת הזמן לעבר, נגד מגמת השעון, ממש כפי שהוא נע לעתיד במגמת השעון. למעשה, שאלת "היפוך הזמן" נדונה בפירוט מתמטי רב ונחקרת בידי פיסיקאים בכמה ניסויים רגישים ומסובכים בחלקיקים תת-אטומיים. ישנה השערה שאכן קיימים חלקיקים שמהירותם גבוהה ממהירות האור הנעים אחורה בזמן ונקראים טכיונים. אולם הניסויים שנערכו עד כה במטרה לגלותם אינם נראים מבטיחים ביותר. כמעט כל הפיסיקאים שותפים לדעה שלזמן כיוון אחד בלבד - קדימה. ממסקנה זו מתעלם בעליזות החמשייר "המדעי" החביב:

בחורה צעירה ושמה מור
שנעה מהר מהאור
עם שחר תצא אל הדרך
באופן איינשטייני בערך
אך הביתה אתמול תחזור.

גם אם הורגלנו כבר לחשיבה יחסותית, עדיין אנו עלולים לדבוק באורח בלתי מודע בדעה שקיים זמן מוחלט ולנסות להשוות אליו את כל התופעות היחסותיות שמנינו. אנו עשויים להכיר בעובדה כי הזמן משתנה בדרך זו או אחרת עבור מהירות זו או אחרת, ועם זאת לדבוק בתחושה הפנימית שקיים זמן בסיסי או מוחלט כלשהו. אנו עלולים להאמין כי הזמן שאנו חווים על כדור הארץ הוא הזמן היסודי וכי זמנים אחרים שונים ממנו. אין תמה בדבר; אנחנו שוכני כדור הארץ. אך רעיון זה מגביל אותנו. מנקודת מבטם של צופים במקום אחר ביקום, ייתכן שאנו נעים במהירויות יחסותיות, והם רואים את חיינו נעים בהילוך איטי. הם אף עשויים לראות אותנו חיים ארוכים מאות מונים מחייהם, בדיוק כשם שבעזרת טלסקופי-על אנו יכולנו לראות את חייהם ארוכים משלנו מאות מונים. אין זמן אוניברסלי תקני. הוא פשוט אינו קיים.

אנו חושבים על הזמן ומגיעים להרהר ביקום. אנו חושבים על היקום ותוהים מה התרחש לפני היות היקום. אנו תוהים מה יקרה אם היקום יפסיק להתקיים בזמן. אבל מושג הזמן מתאים לאירועים ולישויות בתוך היקום - ולא ליקום בשלמותו. הזמן קיים "ביקום"; היקום אינו מתקיים "בתוך" הזמן. ללא יקום, אין זמן - לא לפניו, לא אחריו. באותה מידה, המרחב קיים "ביקום"; היקום אינו "בתוך" תחום של המרחב. אין מרחב "מחוץ" ליקום. המרחב-זמן קיים בתוך היקום. חישבו על כך!

התכווצות האורך

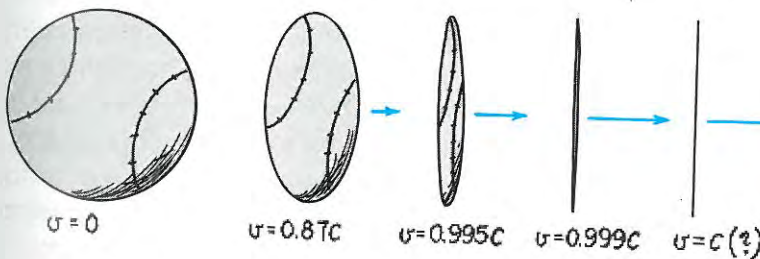
כאשר עצמים נעים במרחב-זמן, לא מדידת הזמן בלבד משתנה אלא גם מדידות מרחביות. אורכיהם של עצמים שיחלפו על פנינו במהירויות יחסותיות ייראו לנו מכווצים. את השערת קיומה של **התכווצות האורך** העלה לראשונה הפיסיקאי האירי ג'י פי פיצג'רלד, וניסח אותה מתמטית הפיסיקאי ההולנדי ה' אי' לורנץ. היא מכונה התכווצות לורנץ-פיצג'רלד. מתמטית היא מבוטאת בנוסחה:

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

באשר v היא המהירות היחסית בין העצם הנמדד לצופה, c - מהירות האור, L - אורכו של העצם הנע ו- L_0 - אורכו של העצם הנח*. נניח שעצם נמצא במנוחה, כלומר $v = 0$. אם נציב $v = 0$ במשוואה הנ"ל נקבל כצפוי $L = L_0$. במהירות השווה ל-87 אחוז ממהירות האור התוצאה שתתקבל היא שאורך העצם קטן למחצית מאורכו המקורי. במהירות של 99.5 אחוז ממהירות האור הוא ייראה מכווץ לעשירית מאורכו המקורי. אם העצם נע במהירות האור, אורכו יתאפס. זו אחת הסיבות לטענה שמהירות האור היא הגבול העליון למהירות של גוף נע כלשהו. חמשיר "מדע" אחר הוא:

לוחם מיומן, שמו שמשון
שתמיד הוא שלף הראשון
כה מהירה היתה תנועת היד
שהתכווצות לורנץ-פיצג'רלד
לדיסקה היא הפכה את חרבו.

כפי שניתן לראות באיור 34.21, ההתכווצות מתרחשת בכיוון התנועה בלבד. אם עצם נע בכיוון האופקי אין כל התכווצות בכיוון האנכי.

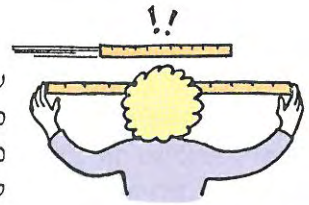


איור 34.21
התכווצות לורנץ-פיצג'רלד.
כאשר המהירות גדלה
האורך בכיוון התנועה
מתקצר. אורכים הניצבים
לכיוון התנועה אינם משתנים.

האומנם מתכווצים גופים הנעים במהירויות יחסותיות? אם ננסה לבדוק זאת (עקרונית) בכך שננוע לצד העצם הנע כשבידינו סרגל, לא נבחין בכל דבר יוצא דופן באורכו של העצם. צופה שיתבונן בנו בעת עריכת הניסוי כשהוא

* שימו לב, לא הבהרנו כיצד מתקבלת נוסחה זו (וגם המשוואות שיוזכרו בהמשך). פשוט ציטטנו אותן כ"חומר למחשבה" על רעיונות תורת היחסות הממוצמת.

שרוי במנוחה ידווח שהסיבה - הנראית לו בבירור - לכך שמדידתנו לא הראתה כל התכווצות היא שגם הסרגל שבידנו התכווץ. אך מכיוון שאנו נעים עם העצם נראה לנו שלא חלה כל התכווצות. הסיבה לכך היא שהמהירות היחסית בינינו לבין העצם הנמדד מתאפסת. המהירות v המופיעה במשוואת לורנץ-פיצג'רלד היא המהירות היחסית בין הצופה לנצפה, והיא מתאפסת, לכן $L = L_0$. חשוב להדגיש נקודה זו. העצם אינו מתכווץ. כשאנו מודדים התכווצות זו אנו פשוט מודדים את עיוות המרחב, בדיוק כשם שכשאנו מגלים שהשעונים מתקדמים לאט יותר אנו מודדים את עיוות הזמן. העיוותים אינם של העצמים והאירועים במערכת אחת של המרחב-זמן אלא עיוותים בין מרחבי-זמן שונים.

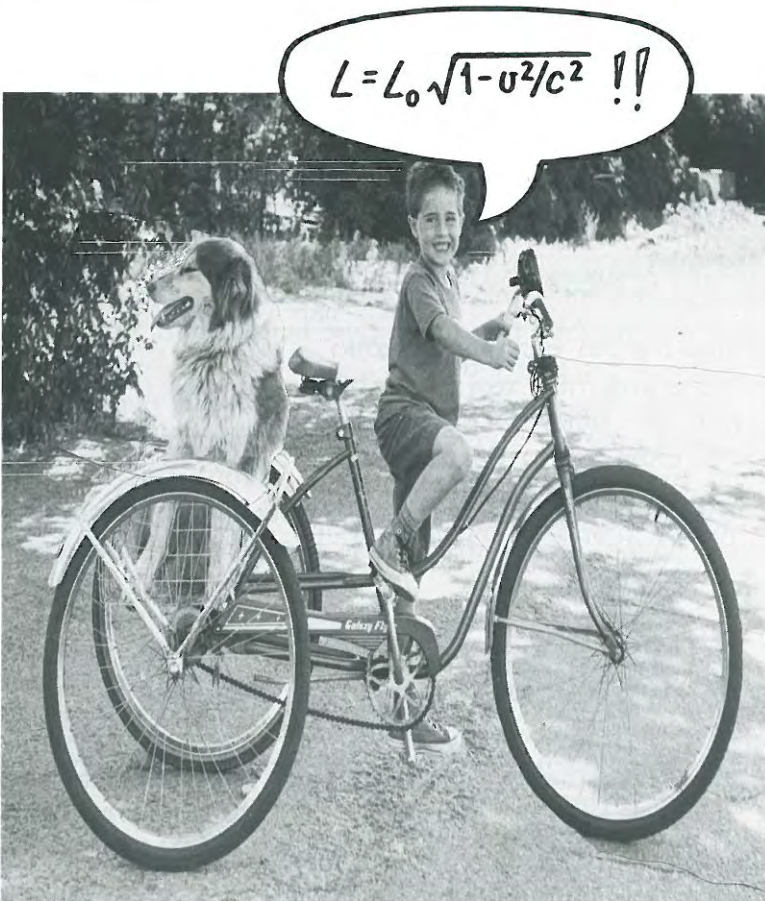


איור 34.22

אורכו של סרגל קטן למחציתו כשהסרגל נע יחסית לצופה במהירות השווה ל-87 אחוז ממהירות האור.

מידותיו של לוח מודעות מלבני הם 20 מ' $\times$ 10 מ'. באיזה כיוון ובאיזו מהירות צריך נוסע בחלל לנוע כדי שלוח המודעות יראה לו ריבועי?

שאלה



תשובה: עליו לנוע במהירות השווה ל- $0.87c$ במקביל לצלע הארוכה של הלוח.

גידול המסה

אם נדחף עצם הוא יואץ. אם נתמיד ונדחף אותו בכוח קבוע הוא יואץ
למהירויות גדלות והולכות. אם נדחף אותו בכוח גדל והולך, התאוצה תגדל
והמהירות, כך נראה לכאורה, אמורה לגדול ללא גבול. אך בעולמנו קיימת
מהירות גבולית - c . למעשה, לא ניתן להאיץ גוף חומרי למהירות האור, קל
וחומר לעבור אותה.

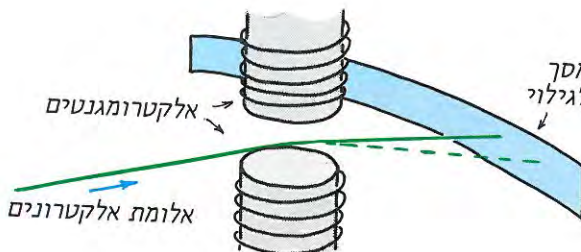
את הסיבה לכך נוכל להסיק מן החוק השני של ניוטון. זיכרו כי תאוצתו של
גוף תלויה לא רק בכוח המופעל עליו, אלא גם במסתו: $a = F/m$. איינשטיין
הסיק כי השקעת עבודה בהגדלת מהירותו של גוף גורמת גם לגידול במסתו.
לכן, ככל שמהירותו של גוף עולה, התאוצה שיוצר הכוח הקבוע שפועל עליו
קטנה והולכת. הקשר* בין מסה למהירות נתון בנוסחה:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

m היא המסה הנמדדת או המסה היחסותית של הגוף שהואץ למהירות v .
הסימון m_0 מציין את מסת המנוחה, המסה שהיתה לגוף במנוחה. גם כאן, v היא
המהירות היחסית שבין העצם הנמדד לצופה.

ככל שהחלקיק מואץ למהירויות גבוהות יותר, מסתו גדלה ולפיכך ההשפעה
שמשפיע עליו הכוח המאיץ קטנה והולכת. עיון במשוואת המסה היחסותית
מראה שכאשר v מתקרב ל- c , m גדל עד אין-סוף! מסתו של חלקיק שיואץ
למהירות האור אמורה להיות אינסופית ולדחיפתו יידרש כוח אינסופי; ברור
שהדבר בלתי אפשרי. לכן אנו אומרים שלא ניתן להאיץ חלקיק חומרי למהירות
האור.

ואולם, הצליחו להאיץ חלקיקים אטומיים למהירויות העולות על 99
אחוזים ממהירות האור. בעזרת שדות מגנטיים המטים את אלומות החלקיקים
לרוב אלקטרונים או פרוטונים - ניתן לגלות שמסותיהם גדלות אלפי מונים.
החלקיקים שמסתם גדלה אינם מוטים בקלות שבה ניתן היה להסיטם לולא
הגידול היחסותי במסתם (איור 34.23). הם פוגעים במטרה בדיוק במקום שבו
חוצה תורת היחסות את פגיעתם. במאיצים מעגליים, כמו הציקלוטרונים



איור 34.23

אלמלא היתה מסת
האלקטרונים גדלה עם
המהירות, הם היו נעים לאורך
המסלול המקווקו. בשל
הגידול בהתמדתם,
האלקטרונים המהירים אינם
סוטים במידה כה רבה.

* המדידות הנערכות במחקר הניסויי הן של תנע ולא של מסה. בספרי לימוד מתקדמים יותר דנים
במושג התנע היחסותי ולא במסה היחסותית.

והבטטרונים, שבהם רדיוס העיקום של מסלול החלקיקים תלוי במסה, יש להתחשב בגידולה. אחד היתרונות במאיצים הקווים היא העובדה שבמאיצים אלה אלומת החלקיקים נעה במסלול ישר, והשינויים במסה אינם גורמים לסטייה ממסלול ישר זה. לפיסיקאים העוסקים בחקר חלקיקים באנרגיות גבוהות, גידול המסה הנובע מגידול המהירות הוא עניין שבשגרה.

אחד ההיבטים הבולטים של תורת היחסות המצומצמת הוא חוק השקילות בין מסה לאנרגיה שגילה איינשטיין. ראינו שהשקעת האנרגיה בחלקיקים תת-אטומיים במאיצי החלקיקים מגדילה את מסתם. הסיבה לכך נעוצה בעובדה שמסה ואנרגיה שקולות זו לזו.

מקור האנרגיה המשמשת להאצת החלקיקים הוא, כידוע, תחנת כוח כלשהי. האנרגיה המופקת בתחנת הכוח מקורה בשריפה כימית או בתגובה גרעינית של דלקים מסוימים. בתהליך השריפה הכימי, מסותיהן של מולקולות הפחמימנים הנוצרים בשריפה קטנות בשיעור של אחד למיליארד בקירוב מהמסה המקורית. לעומת זאת, בתהליך של ביקוע גרעיני, מסת תוצרי הביקוע קטנה באלפית. כלומר, בביקוע בודד של אטום אוראניום, המסה הכוללת של כל התוצרים היא 0.999 ממסת אטום האוראניום לפני הביקוע. הן בתהליך הכימי והן בתהליך הגרעיני, חלק ממסת הדלק הופכת לאנרגיה קינטית של התוצרים וזו הופכת לאנרגיה חשמלית. וכאן מתעוררת השאלה המסקרנת: מהו שיעור המסה הנוספת לחלקיקים במאיץ? אם נתעלם מן האובדנים בהעברת האנרגיה, נגלה שתוצרי התהליך מאבדים מסה בדיוק בשיעור המסה הנוספת לחלקיקים במאיץ! לפיכך, כל אימת שחברת החשמל מספקת אנרגיה, היא מוסרת, למעשה, מסה. העברת אנרגיה כמוה כמסירת מסה, מפני שבמובן המעשי מסה ואנרגיה - היינו הך הן. כאשר זוכים באנרגיה, זוכים במסה; כשמאבדים אנרגיה, מאבדים מסה.

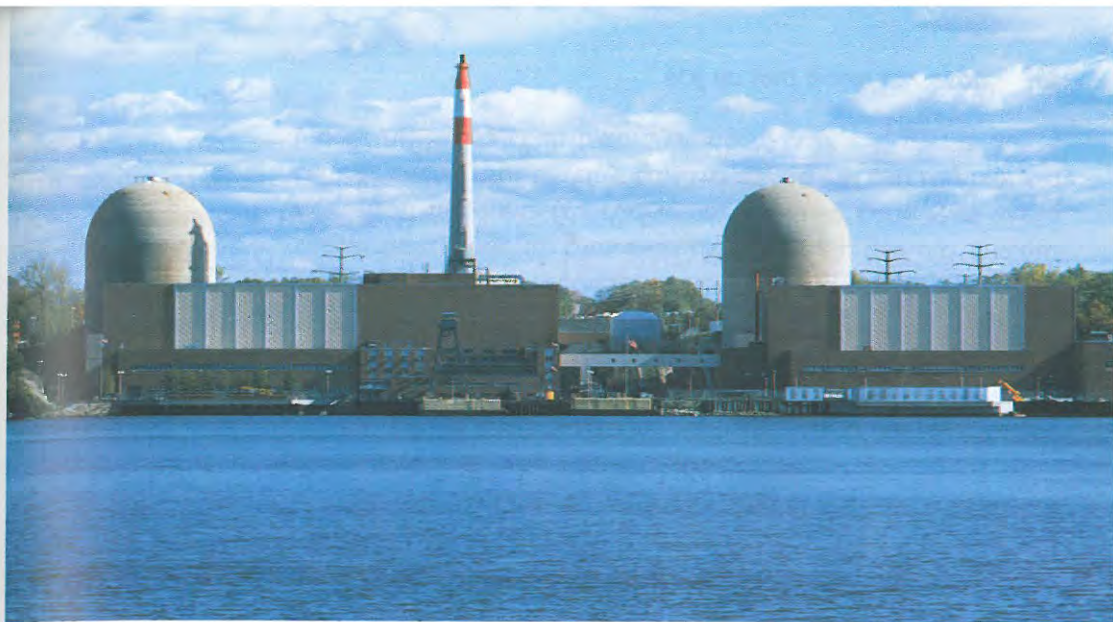
איינשטיין הכיר בכך שכל בעל מסה - אף אם אינו נע ואין לו אנרגיה פוטנציאלית - הוא בעל "אנרגיית הוויה". "אנרגיית הוויה" זו נקראת אנרגיית מנוחה וסימונה E_0 . (מבחינים בין אנרגיית המנוחה E_0 לבין האנרגיה הכוללת E , הכוללת גם את האנרגיה הקינטית והפוטנציאלית.) שיעורה של אנרגיית המנוחה E_0 קשור לגודל המסה m באמצעות המשוואה המפורסמת ביותר של המאה העשרים:

$$E = mc^2$$

הגורם c^2 הוא גורם המעבר מיחידות אנרגיה ליחידות מסה*. בשל גודלה העצום של מהירות האור, c , כמות זעירה של מסה מתאימה לכמות עצומה של אנרגיה. לדוגמה, האנרגיה השקולה לגרם אחד של חומר גדולה מכמות האנרגיה שתושבי ישראל צורכים ביום אחד.

* כאשר c נתון במטרים לשנייה ו- m בקילוגרמים, אזי E_0 נתון בג'ולים. אילו היתה השקילות בין מסה לאנרגיה נהירה לפני זמן רב, כאשר הובנו לראשונה מושגי המסה והאנרגיה, לא היו נקבעות, מן הסתם, יחידות שונות למסה ולאנרגיה. כמו כן, בבחירה מתאימה של יחידות המרחב והזמן שבה $c = 1$, הקשר $E_0 = mc^2$ הופך ל- $E_0 = m$.

השקילות מסה-אנרגיה

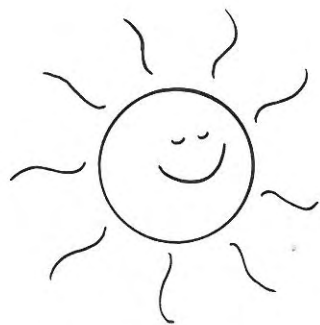


איור 34.24

הקביעה שתחנת כוח מספקת 90 מיליון מגה-ג'ול של אנרגיה לצרכניה שקולה לקביעה שהתחנה מספקת לצרכניה 1 גרם של אנרגיה. זאת מפני שמסה ואנרגיה חד הן.

שינויים רגילים באנרגיה של גוף גורמים לשינוי כה זעום במסתו שעד לאחרונה לא ניתן היה לגלותו. כאשר מציתים גפרור, למשל, מתרחשת תגובה כימית. אטומי הזרחן שבגפרור מתרכבים עם אטומי החמצן שבאוויר ויוצרים מולקולות חדשות. מסת המולקולות הנוצרות קטנה במעט ממסתם הכוללת י"ל אטומי הזרחן והחמצן. מנקודת המבט של המסה, השלם קטן במידה עומה מסכום חלקיו, אך רק במעט - במיליארדית המסה בקירוב.

לפי איינשטיין, המסה החסרה לא הושמדה. היא הפכה לאנרגיית קרינה לאנרגיה קינטית. אם E_0 הוא הפחת בגודלה של אנרגיית המנוחה, המסה החסרה היא בדיוק E_0/c^2 . בכל תגובה כימית שנפלטת בה אנרגיה, חל פחת אקול במסה. חשוב לציין כי אם זוכרים לכלול בחישובים את השקילות מסה-אנרגיה אזי המסה הכוללת שווה לפני התגובה ואחריה. בה במידה, אם מביאים חשבון גם את האנרגיה השקולה של מסת המנוחה, האנרגיה הכוללת שווה לפני התגובה ואחריה. המסה הכוללת אינה משתנה וכמות האנרגיה הכוללת אינה משתנה גם היא. שתיהן, המסה והאנרגיה, נשמרות.



איור 34.25

בכל שנייה הופכים בשמש 4.5 מיליון טונות של מסת מנוחה לאנרגיית קרינה. אולם מסת השמש כה גדולה, שבמיליון שנה תהפוך רק עשירית מיליונית ממסתה לאנרגיית קרינה.

הפחת במסת המנוחה בתגובות גרעיניות גדול במידה רבה מהפחת בתגובות הכימיות, ומגיע לשיעור של כאלפית מהמסה המקורית. בשמש ובכוכבים אחרים הופכת מסת המנוחה לחום ולאנרגיית קרינה בתהליכים תרמו-גרעיניים. הפחת במסת המנוחה הוא המציף את מערכת השמש באנרגיית הקרינה ומאפשר את קיומם של חיים על פני כדור הארץ. השלב הנוכחי של ההיתוך התרמו-גרעיני בשמש נמשך כבר כ-5 מיליארד שנים וכמות הדלק המימני אמורה להספיק לעוד 5 מיליארד שנים בקירוב. כמה טוב שיש לנו שמש שכזו!

המשוואה $E_0 = mc^2$ אינה מוגבלת לתגובות כימיות וגרעיניות בלבד. כל שינוי באנרגיה מלווה בשינוי במסה. מסתו של תיל הלהט בנורת החשמל גדולה יותר כאשר מספקים לו אנרגיה חשמלית מאשר בעת שהנורה כבויה. מסתו של ספל תה חם גדולה מזו של הספל הקר. מסתו של הקפיץ המתוח בשעון גדולה ממסתו של אותו קפיץ כאשר הוא רפוי. אך בדוגמאות אלו השינוי במסה כה קטן עד כי לא ניתן למדדו בשיטות המקובלות. התופעה ניכרת יותר כשחלים שינויים גדולים באנרגיה. אנרגיה חשמלית היא דוגמה טובה לכך. כדי לקרב זה לזה מטענים חשמליים שווי סימן יש להשקיע עבודה. בשל הדחייה החשמלית דרושה אנרגיה עצומה כדי לרכז באזור מצומצם גרם אחד בלבד של אלקטרונים. המסה של גרם אחד של אלקטרונים שהוגבלו לתחום כדורי שקוטרו 10 ס"מ היא עשרה מיליוני מיליון קילוגרמים!

מסתו של אלקטרון אחד אינה אלא האנרגיה השקולה הנדרשת לריכוז מטענו. אילו היה מטען האלקטרון מתפזר על פני תחום אינסופי, אזי כמות העבודה שהיתה נדרשת לריכוז המטען ברדיוס הקלאסי של האלקטרון, מחולקת ב- c^2 , היתה משתווה למסתו*.

המשוואה $E_0 = mc^2$ היא יותר מנוסחת מעבר ממסת מנוחה לאנרגיה ובחזרה. היא קובעת שאנרגיה ומסה הן היינו הך. מסה היא פשוט אנרגיה מוקפאת. אם רצונכם לדעת מה כמות האנרגיה במערכת, מדדו את מסתה. האנרגיה של גוף במנוחה היא התמדתו. את האנרגיה עצמה קשה לזעזע.

האם ניתן לראות את המשוואה $E_0 = mc^2$ בדרך נוספת ולומר שכאשר חומר נע במהירות האור בריבוע הוא הופך לאנרגיה טהורה?

שאלה

ההוכחה הישירה הראשונה לכך שניתן להפוך אנרגיית קרינה לחומר התגלתה ב-1932, בתחליב צילום שבו השתמשו בכדורים פורחים בגובה רב אשר נועדו ללכידת קרינה קוסמית. הפיסיקאי האמריקאי ק' ד' אנדרסון גילה שפוטון של קרינת גמא שחדר לתחליב הפך לזוג חלקיקים. אחד החלקיקים היה אלקטרון. האחר, שמסתו שווה למסת האלקטרון אך מטענו חיובי ולא

לא ולא, בשום אופן לא! כמה שגיאות בטענה זו. כאשר חומר מונע במהירות גבוהה יותר מסתו גדלה ולא קטנה. למעשה, מסתו שואפת לאין-סוף, ובה בשעה גם האנרגיה שלו שואפת לאין-סוף. מסתו גדולה יותר והאנרגיה שלו רבה יותר. חומר אינו יכול לנוע במהירות האור, לא כל שכן בריבוע מהירות האור (שאינה מהירות!). $E_0 = mc^2$ פירושו שאנרגיה ומסה הן פשוט שני צדדים של אותו מטבע.

תשובה:

* האסטרונום ג'ון דובסון מסן-פרנציסקו משער שכפי שמסתו של שעון גדלה כאשר מבצעים עליו עבודה במתיחתו, כך המסה של היקום כולו אינה אלא האנרגיה שהושקעה בכינונו נגד כוחות הכבידה ההדדיים. מנקודת מבט זו מסת היקום שקולה לעבודה הנעשית בהתפשטותו. לאלקטרונים יש איפוא מסה כתוצאה מריכוז מטענם, ולאטומים ביקום יש מסה בשל פיזורם.

שלילי, כונה פוזיטרון. הפוזיטרון הוא האנטי-חלקיק של האלקטרון. כאשר קרן גמא הופכת מאנרגיה למסה נוצר זוג חלקיקים. אחד החלקיקים הוא האנטי-חלקיק של האחר; לשניהם אותה מסה ואותו ספין אך הם בעלי מטענים מנוגדים. משך חייו של האנטי-חלקיק קצר. עד מהרה הוא פוגש בחלקיק האנטי שלו, הזוג מתחסל (החלקיקים עוברים איון - אניהילציה) ובמקומו נוצרת קרן גמא.

עקרון ההתאמה

הקשר של איינשטיין בין מסה לאנרגיה תקף רק במידה שתקפות משוואות הטרנספורמציה לזמן, לאורך ולמסה. בטרם נתקבל תיאוריה חדשה ככונה, יש לבדוק האם היא מקיימת את עקרון ההתאמה. לפי העיקרון שהזכרנו בפרק 31, כל תורה חדשה או כל תיאור חדש של הטבע חייבים להתאים לתיאור הישן בתחום שבו תוצאות התיאור הישן תקפות. אם משוואות תורת היחסות המצומצמת תקפות, הן צריכות להתאים למשוואות המכניקה הקלאסית עבור מהירויות קטנות מאוד ביחס למהירות האור.

משוואות תורת היחסות לזמן, לאורך ולמסה הן:

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

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

שימו לב שמשוואות אלו הופכות למשוואות הניוטוניות עבור מהירויות הקטנות מאוד ביחס ל- c . במצב זה היחס v^2/c^2 קטן מאוד ועבור המהירויות היומיומיות ניתן להציבו כאפס. מהמשוואות היחסיות נקבל

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1-0}} = t_0$$

$$L = L_0 \sqrt{1-0} = L_0$$

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-0}} = m_0$$

עבור מהירויות יומיומיות אין למעשה כל שינוי באורך, במסה ובזמן. משוואות תורת היחסות המצומצמת תקפות לגבי כל מהירות, אך הן משמעותיות רק במהירויות הקרובות למהירות האור.

תורת היחסות של איינשטיין עוררה שאלות פילוסופיות רבות. מהו בדיוק הזמן? האם ניתן לומר כי הטבע דואג לכך שלא הכול יתרחש בו-זמנית? מדוע נראה שהזמן מתקדם בכיוון אחד בלבד? האם תמיד נע הזמן קדימה? האם קיימים אזורים אחרים ביקום שבהם הזמן נע אחורה? הייתכן שתפיסתנו התלת-ממדית את העולם הארבעה-ממדי היא רק ההתחלה? האם קיים מימד חמישי? מימד שישי? מימד שביעי? ואם כן, מהו טיבם של ממדים אלו? ייתכן שהתשובות לשאלות אלו תינתנה בידי הפיסיקאים של המחר. אכן עניינים מלהיבים!

הוקינג, ס' וי. קיצור תולדות הזמן. ספריית מעריב, 1989.
רורליך, פ'. מפרדוקס למציאות - הרעיונות המרכזיים של הפיסיקה החדשה. הוצאת מגנס, 1995.

שאלות חזרה

התנועה - עניין יחסי

1. מהי מהירותכם יחסית לקרקע אם אתם צועדים במהירות של 1 ק"מ/שעה לאורך המעבר באוטובוס הנע במהירות של 60 ק"מ/שעה?
2. בנתוני השאלה הקודמת, מהי, בקירוב, מהירותכם ביחס לשמש?

ניסוי מייכלסון-מורלי

3. מה גילו מייכלסון ומורלי על מהירות האור?
4. איזו הנחה הניח פיזצ'רלד כדי להסביר את תוצאותיהם של מייכלסון ומורלי?
5. איזה רעיון דחה איינשטיין כדי להסביר את תוצאותיהם של מייכלסון ומורלי?

עקרונות תורת היחסות המצומצמת

6. ציינו לפחות שלוש דוגמאות לעיקרון הראשון של איינשטיין.
7. ציינו לפחות שלוש דוגמאות לעיקרון השני של איינשטיין.

בו-זמניות

8. בתוך תא החללית הנעה שבאיור 34.4 עובר האור מרחק מסוים אל הקצה הקדמי ואל הקצה האחורי של התא. השוו בין המרחקים הללו כפי שהם נראים במערכת הייחוס של החללית הנעה.
9. השוו בין המרחקים הנתונים בשאלה 8 כפי שהם נראים במערכת הייחוס של צופה המצוי על כוכב נייח.

תקציר מונחים

מערכת ייחוס נקודת מבט (בדרך כלל מערכת קואורדינטות עם צירי שיעורים) שממנה ניתן למדוד מקום ותנועה.

עקרונות תורת היחסות המצומצמת (1) כל חוקי הפיסיקה שווים בכל מערכות הייחוס הנעות זו ביחס לזו במהירות קבועה. (2) תוצאת המדידה של מהירות האור בריק תהיה שווה בכל המערכות ללא תלות בתנועת המקור או הצופה; כלומר, מהירות האור אינה תלויה במערכת הייחוס שממנה היא נמדדת.

בו-זמניות המצב שבו אירועים מתרחשים באותו זמן. שני אירועים בו-זמניים במערכת אחת אינם בו-זמניים במערכת הנעה ביחס למערכת הראשונה.

מרחב-זמן הרצף הארבעה-ממדי שבו מתקיימים כל הדברים; שלושה ממדים הם קואורדינטות המרחב, והרביעי הוא הזמן.

התארכות הזמן ההאטה הנצפית בזמן עבור גוף הנע במהירויות יחסיות.

התכווצות האורך ההתכווצות הנצפית של גוף הנע במהירויות יחסיות.

שקילות מסה-אנרגיה הקשר בין מסה לאנרגיית מנוחה הנתון במשוואה $E_0 = mc^2$.

לקריאה נוספת

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

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

10. מדוע אירועים שהם בו-זמניים במערכת ייחוס אחת אינם בו-זמניים במערכת ייחוס הנעה ביחס למערכת הראשונה?

מרחב-זמן

11. כמה צירי קואורדינטות דרושים בדרך כלל לתיאור מרחב תלת-ממדי?

12. מה מודד המימד הרביעי?

13. באילו תנאים תהיו אתם וחברכם שותפים לאותה מערכת ייחוס במרחב-זמן?

14. באילו תנאים לא תחלקו עם חברכם אותה מערכת ייחוס במרחב-זמן?

15. מה מייחד את היחס בין המרחק שעובר האור לבין משך התנועה שלו?

התארכות הזמן

16. הניחו שהמראות המקבילות של שעון אור נמצאות במרחק של 150,000 ק"מ זו מזו. כמה זמן דרוש להבזק אור להשלמת תנועת הלך ושוב בין המראות במערכת הייחוס של שעון האור?

17. הניחו שהמראות המקבילות של שעון אור נמצאות במרחק של 150 ק"מ זו מזו. כמה זמן דרוש להבזק אור להשלמת תנועת הלך ושוב בין המראות במערכת הייחוס של שעון האור?

18. האם ישתנו תשובותיכם לשתי השאלות הקודמות אם המדידות תיערכנה במערכת ייחוס הנעה יחסית לשעון האור? הסבירו.

19. לאור נדרש זמן כדי לעבור מנקודה אחת לנקודה אחרת. מה יקרה למשך הזמן הנדרש למעבר, אם בשל תנועת מערכת הייחוס המסלול ייראה ארוך יותר?

20. מהי "התארכות הזמן"?

21. כיצד משתנות מדידות הזמן של אירועים במערכת ייחוס הנעה יחסית אלינו במהירות השווה למחצית ממהירות האור?

22. כיצד משתנות מדידות הזמן של אירועים במערכת ייחוס הנעה יחסית אלינו במהירות השווה ל-99.5 אחוז ממהירות האור?

23. הניחו ששעון מסוים מראה בדייקנות זמן העובר במערכת ייחוס מסוימת בקצב השווה למחצית הקצב שבמערכת הייחוס שלנו. מהי מהירותה של מערכת זו יחסית אלינו?

24. בשל תנועה יחסית אנו רואים ששעונו של מישור

מתקדם בקצב איטי מזה של שעונינו; האם גם הוא יראה את שעונינו מתקדמים לאט יותר? או אולי יראה את שעונינו מתקדמים מהר יותר? הסבירו.

25. מהי ההוכחה להתארכות הזמן?

26. מה אמר איינשטיין על השכל הישר?

מסע התאומים

27. כשמקור הפולט הבזקי אור מתקדם לעברך, המרחק שכל הבזק עובר עד אליך קצר מקודמו. כיצד משפיעה עובדה זו על תדירות קליטת ההבזקים?

28. כאשר מקור הבזקי האור מתקרב אליך, האם מהירות האור או תדירותו - או שמה שניהם - גדלים?

29. אם מקור הבזקי האור מתקרב אליך במהירות כזו שמשך הזמן בין ההבזקים הנצפים שווה למחצית משך הזמן בין פליטת הבזק למשנהו, כיצד ייראה משך הזמן בין ההבזקים הנקלטים כשהמקור יתרחק ממך באותה מהירות?

30. בכמה מערכות ייחוס מתנסה התאום הנותר בכדור הארץ במהלך מסעו של אחיו? בכמה מערכות ייחוס מתנסה התאום היוצא למסע?

מסע בחלל

31. מהם שני המכשולים העיקריים המעכבים אותנו כיום מלצאת למסע ביקום במהירויות יחסיות?

32. במאה הנוכחית נהנים בני האדם מקפיצות סילוניות - טיסות במטוסי סילון מארץ לארץ. בעתיד יוכלו אולי ליהנות "מקפיצת מאה שנה". כיצד יתבצע הדבר?

התכווצות האורך

33. באיזה אורך ייראה מוט שאורכו מטר אם ינוע ככידון שהוטל כהלכה במהירות השווה ל-99.5 אחוז ממהירות האור?

34. מה יהיה אורכו של המוט מהשאלה הקודמת אם הוא מאונך לכיוון תנועתו? (מדוע תשובתך לשאלה זו שונה מהתשובה לשאלה הקודמת?)

35. האם הסרגלים בספינת החלל ייראו לכם מכווצים כשתנועו בה במהירות גבוהה?

גידול המסה

36. מה קורה למסתו של גוף המואץ למהירויות גדלות והולכות?

37. מהי "מסת מנוחה"? האם מסתו של גוף בעל מסת מנוחה בת 1 ק"ג תגדל, תקטן או לא תשתנה כאשר הגוף יואץ למהירויות גבוהות?

6. שני מאורעות המתרחשים באותה נקודה במרחב הם בו-זמניים במערכת ייחוס מסוימת. האם הם בו-זמניים במערכות ייחוס אחרות? הסבירו.
7. אירוע א מתרחש במערכת ייחוס מסוימת לפני אירוע ב. כיצד יוכל אירוע ב להתרחש לפני אירוע א במערכת ייחוס אחרת?
8. את מהירות האור אפשר לראות כמהירות הגבולית ביקום - לפחות לפי תפיסתנו את היקום כארבעה-ממדי. לא ניתן להאיץ שום חלקיק חומרי למהירות האור או למהירות הגבוהה ממנה גם אם נפעיל עליו כוח חזק ורצוף. מדוע?
9. האם מהעובדה שקיים גבול עליון למהירותו של חלקיק נובע כי קיים גבול עליון גם לתנע שלו?
10. נניח שהאור עובר מרחק מסוים ב-20,000 שנה. כיצד ייתכן שאסטרונוט הנע במהירות הקטנה ממהירות האור יעבור מרחק זה במסע שיימשך 20 שנה?
11. האם יוכל בן-אנוש שתוחלת חייו 70 שנה להשלים מסע הלך ושוב אל אזורים ביקום שמרחקם מאיתנו אלפי שנות-אור?
12. תאום היוצא למסע ארוך נע במהירויות יחסיות. שם צעיר יותר מאחותו התאומה שנשארה על כדור הארץ. האם יוכל לשוב לפני הולדת אחותו התאומה? נמקו את תשובתכם.
13. האם ייתכן שכן או בת יהיו מבוגרים ביולוגית מהוריהם? הסבירו.
14. מה השינויים שתחושו בדופק שלכם, במסתכם ובנפחכם אם תנועו בספינת חלל המתרחקת מכדור הארץ במהירות הקרובה למהירות האור? הסבירו.
15. אילו שינויים תגלו אם, בהיותכם על כדור הארץ, תבדקו את הדופק של נוסע בספינת חלל המתרחקת מכדור הארץ במהירות הקרובה למהירות האור? אילו שינויים תגלו במסתו? בנפחו? הסבירו.
16. נתבונן בחללית המצוידת במקור להבזקי אור. אם תדירות ההבזקים הנקלטים מהחללית גדולה פי 2 מתדירות השידור, פי כמה ישתנה זמן המחזור (רווח הזמן בין ההבזקים הנקלטים) בזמן שהיא מתקרבת? האם זמן מחזור זה קבוע עבור תנועה במהירות יחסית קבועה? עבור תנועה מואצת? נמקו את תשובתכם.
17. אתם צופים בחללית המתרחקת מכם במהירות v_1 , השווה למחצית מהירות האור. מהחללית משגרים טיל קדימה ואף הוא מתרחק מכדור הארץ. הניחו שהטיל משוגר יחסית לספינת החלל במהירות v_2 , השווה למחצית

38. מה תהיה מסתו של גוף שיואץ למהירות האור?

השקילות מסה-אנרגיה

39. מסותיהם של חלקיקים המואצים במאיצי מחקר למהירויות הקרובות למהירות האור גדלות במידה ניכרת. האם גידול המסה צורך אנרגיה רבה יותר ממקור הכוח המשרת את המאיץ? הסבירו.
40. בשאלה הקודמת מקור האנרגיה למאיץ הוא מסת הדלקים - פחם, דלק נוזלי או גרעיני אטומים. בהזנחת בזבזי האנרגיה בתחנת הכוח, בקווי הממסר ובמאיץ, מה הקשר בין גידול המסה של החלקיקים המואצים ובין הקטנת המסה של הדלקים בתחנת הכוח? הסבירו.
41. האם המשוואה $E_0 = mc^2$ מתאימה רק לתגובות הקשורות לגרעין האטום?
42. מהו מקור אנרגיית השמש?
43. אילו עדויות קיימות לשקילות בין מסה לאנרגיה?

עקרון ההתאמה

44. מה הקשר בין עקרון ההתאמה לתורת היחסות המצומצמת?
45. האם משוואות תורת היחסות המצומצמת לזמן, לאורך ולמסה תקפות גם עבור מהירויות יומיומיות? הסבירו.

תרגילים

1. אדם הנוסע על גג קרון ברכבת משא יורה ברובה המכוון קדימה. השוו בין מהירויות הקליע יחסית לקרקע כשהרכבת נחה וכשהיא מתקדמת. דונו במהירות הקליע ביחס לקרון המשא אם הירייה נורית כשהרכבת נחה ואם היא נורית כשהרכבת נעה.
2. הניחו שהאדם הנמצא על גג הקרון מאיר בפנס בכיוון הנסיעה של הרכבת. האם מהירות האור ביחס לקרקע גדולה יותר כשהרכבת נעה מאשר בעת שהיא נחה?
3. מדוע נחשב ניסוי מייכלסון-מורלי לכישלון? (האם נתקלתם בדוגמאות אחרות שבהן הכישלון אינו נובע מחוסר יכולת לבצע את המשימה אלא מכך שהמשימה בלתי אפשרית?)
4. כאשר אתם נוהגים בכביש מהיר אתם נעים במרחב. בנוסף למרחב, במה עוד אתם נעים?
5. בפרק 25 למדנו שמהירות האור בזוכית קטנה ממהירותו באוויר. האם עובדה זו סותרת את תורת היחסות המצומצמת?

מהירות האור. מהירות הטיל ביחס אליכם אינה מהירות זאור. הנוסחה היחסותית לחיבור מהירויות היא

$$v = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}}$$

הציבו עבור v_1 ו- v_2 את הערך $0.5c$ והראו שהמהירות v שווה ל- $0.8c$.

18. הניחו שהחללית הנוכרת בשאלה הקודמת מצליחה באופן כלשהו לנוע יחסית אליכם במהירות c ומשגרת את הטיל במהירות c יחסית אליה. השתמשו בנוסחה לחיבור המהירויות והראו שהמהירות הטיל יחסית אליכם אף היא c !

19. הציבו ערכים קטנים עבור v_1 ו- v_2 בנוסחת חיבור המהירויות והראו כי במהירויות יומיומיות v שווה למעשה ל- $v_1 + v_2$.

20. מה הקשר בין מדידות הצפיפות של גוף כאשר הוא נח למדידות צפיפותו כאשר הוא נע?

21. סרגל שאורכו 1 מ' ומסתו 1 ק"ג חולף על פניך ומדידותיך מראות שמסתו 2 ק"ג. באיזה כיוון פונה הסרגל אם מדידותיך מראות שאורכו 1 מ'?

22. באיזה אורך ייראה לך הסרגל מהשאלה הקודמת אם ינוע בכיוון אורכו (כמו כידון שהוטל כראוי)?

23. בכמה תשתנה מדידת המסה של ספינת חלל שנעה במהירויות גבוהות אם אורכה התכווץ למחציתו?

24. אורך המאיץ הקווי בן שלושת הקילומטרים באוניברסיטת סטנפורד בקליפורניה שבארה"ב "נראה" לאלקטרונים הנעים בתוכו כפחות ממטר. הסבירו.

25. מסתם של האלקטרונים היוצאים מהמאיץ הקווי שבסטנפורד גדולה פי כמה אלפים ממסתם בכניסה. האם הייתם חשים בגידול במסתם אילו יכולתם לנוע איתם?

26. מסתם של האלקטרונים המאירים את המסך במכשיר הטלוויזיה ונעים במהירות השווה לכרבע ממהירות האור גדלה בכ-3 אחוזים. האם תופעה יחסותית זו תורמת להגדלת חשבון החשמל שלכם או להקטנתו?

27. כיצד ניתן להשתמש בעקרון ההתאמה לבדיקת תקפותן של תיאוריות שמחוץ לתחומי הפיסיקה?

28. מה פשר המשוואה $E_0 = mc^2$?

29. מואונים הם חלקיקים אלמנטריים הנוצרים בתגובות בין הקרינה הקוסמית לגזים בחלקה העליון של האטמוספירה. המואונים אינם יציבים וזמן מחצית החיים שלהם הוא בערך שתי-מיליוניות השנייה. לפי הפיסיקה הקלאסית, הואיל והמואונים נוצרים בגובה רב, אף שהם נעים במהירויות הקרובות למהירות האור רק בודדים מהם אמורים להתגלות בגובה פני הים. אולם מדידות שנערכו במעבדה מוכיחות שכמויות גדולות של מואונים מגיעות לפני כדור הארץ. מהו ההסבר לכך?

30. כאשר אנו מתבוננים ביקום, אנו מביטים אל העבר. ג'ון דובסון, מייסד קבוצת אסטרונומי המדרכות של סן-פרנציסקו, אומר שאיננו מסוגלים לראות אפילו את גב ידנו עתה - למעשה שום דבר לא ניתן לראות עתה. האם אתם מסכימים לטענתו? הסבירו.

31. אחד משיגעונות העתיד עשוי להיות "קפיצת מאה שנה". יושבי ספינת חלל הנעה במהירות גבוהה יצאו מכדור הארץ לשנים מספר וישובו מאות שנים לאחר מכן. מהן המגבלות המונעות את ביצוע הדבר כעת?

32. האם טענתו של הפילוסוף קירקגארד, "ניתן להבין את החיים רק בעבר; אך יש לחיותם לעתיד", מתיישבת עם תורת היחסות המצומצמת?