

צירוף תנועות בממד אחד



<http://spaceplace.nasa.gov/launch-windows/>

התמונה שלפנינו צולמה זמן קצר לאחר שיגור טיל שמיועד להכניס לוויין למסלולו. במבט ראשון, המסלול מפתיע. הטיל יוצא לדרכו אנכית (כלפי מעלה), אך בהדרגה הוא משנה את המסלול לכיוון אופקי. כתוצאה מכך הטיל ינוע מרחק גדול יותר בתוך האטמוספירה ויהיה חשוף יותר לאפקט המעכב של האוויר. התוצאה תהיה בזבוז אנרגיה גדול. מדוע, אם כן, אין משגרים את הטיל אנכית עד ליציאה מן האטמוספירה? התשובה לכך קשורה בצירוף מהירויות, שהוא עיסוקנו ביחידת לימוד זו. בהמשך הפרק נגיע אל התשובה לשאלה שהוצגה כאן.

הכול יחסי?

בתחילת המאה העשרים פרסם איינשטיין את תורת היחסות, ומאז דומה כי "הכול יחסי". זה עומד בניגוד מסוים לתחילתה של המהפכה המדעית. אז הטענה הייתה כי יש מערכת מועדפת, וכי הארץ סובבת את השמש, ולא להפך. תחילת המהפכה המדעית הייתה בהחלפת המערכת המוחלטת. המהפכה של איינשטיין ביקשה לקבוע כי אין מערכת מוחלטת. מהו אם כן המסר המדעי הנכון? אכן הדברים קשים, גם לתלמידי אוניברסיטה. מדוע אנו מזכירים זאת כאן? זה מפני שאי אפשר לדבר על חיבור מהירויות מבלי לדבר על המושג "מהירות יחסית". כאשר אנו עוסקים באדם שהולך בתוך רכבת נוסעת, אנו מחברים את מהירות הרכבת למהירות הנוסע ביחס לרכבת. זה אכן מסובך בכל גיל, בפרט בחטיבת הביניים. יהיה עלינו להיות זהירים. בשלב הזה, במסגרת הכחולה הזו, למורים בלבד, נרשה לעצמנו לראות עד כמה העניינים עלולים לבלבל.

היחסי כמוחלט: מהי מהירותו של האדם שהולך בתוך הרכבת הנוסעת? מי שנמצא ברכבת מזהה מהירות אחת. מי שנמצא בחוץ מזהה מהירות אחרת. מהירות אינה, אפוא, עניין מוחלט, אלא תלוי בנקודת המבט. לעומת זאת, גם מי שנמצא ברכבת וגם מי שנמצא בחוץ מסכימים על גודלה של המהירות היחסית שבין הנוסע לבין הרכבת. מתברר, אפוא, שמהירות אינה מוחלטת והיא תלויה בנקודת הראות, אך מהירות יחסית היא דווקא מוחלטת ומוסכמת על הכול. אם כך, היחסי הוא המוחלט. גם זה מבלבל.

אנרגיה קינטית כגודל יחסי: יתר על כן, אם מהירות תלויה בנקודת הראות, הרי שגם האנרגיה הקינטית תלויה בנקודת הראות. כאשר הנוסע יושב ברכבת, נוסע אחר שיושב ברכבת חושב שאין אנרגיה קינטית שקשורה בתנועתו של הנוסע הראשון. המתבונן מן החוץ מזהה אנרגיה קינטית כזאת. אם אנרגיה תלויה בנקודת הראות, האם ייתכן שמד האנרגיה של חברת החשמל יורה תוצאות שונות מנקודת ראות שונה? אכן, העיסוק במעבר בין מערכות ייחוס הוא דיון מתקדם.

האם יש נקודות ראות מועדפות? ככל שהדבר נוגע למדידות קינטיות (מקום, מהירות תאוצה) אין נקודות ראות מועדפות (כולל נקודות ראות שנעות ביחס לאחרות). הנוסע ברכבת אינו מועדף על מי שמתבונן מן החוץ, ולהפך. לעומת זאת, כאשר מתבוננים בחוק השני של ניוטון, שהוא חוק ההתפתחות בזמן של כל מערכת פיזיקלית, מתברר שיש נקודות ראות מועדפות. מערכות הייחוס המועדפות הן אלה שבהן מתקיים החוק השני של ניוטון. אנו מכנים אותן בתואר מערכות התמדיות (אינרציאליות). מהו הגורם להבחנה הזאת בין מערכת למערכת? מבקרי ניוטון ראו בכך נקודת חולשה של התיאוריה המצליחה שלו. שאלת מערכת הייחוס התעצמה כאשר נוסחו חוקי האלקטרומגנטיות של מקסוול (שנוסחו ב-1861-2). בסופו של דבר נאלץ איינשטיין לנסח מסגרות תיאורטיות חדשות (תורת היחסות הפרטית ותורת היחסות הכללית) כדי להתגבר על הבעיות האלה.

האם יש מערכת ערכים מוחלטת? אין הכרח להבין את תורת היחסות של איינשטיין כדי לעשות בה שימוש רטורי בהקשרים אחרים, וכך אכן נעשה במהלך המאה העשרים. אם הכול יחסי, הרי שאין מערכת ערכים מוחלטת, אלא הכול תלוי בנקודת הראות. מוסר הוא עניין יחסי. אם כך, למה נחנך בבית הספר? השאלות האלה, הפיזיקליות והמוסריות, שאין ערוך לחשיבותן, חורגות

חלק א: צירוף מהירויות

איך אפשר לנוע מהר ולא להתקדם?

לעתים אנו רואים אנשים ממהרים שאינם מתקדמים. דוגמה כזאת אפשר למצוא בכתובת הבאה :

<http://www.youtube.com/watch?v=txNmh8i3AyA>

בסרטון אנו צופים באדם שמנסה לרדת במדרגות שנעות כלפי מעלה. התוצאה היא שהאדם דורך על מקומו אף שהוא יש גם כאלה שמנסים לעלות על המדרגות היורדות ונותרים¹ מנסה להתקדם. מדוע הוא מתנהג כך? זה מפני שהוא שתוי במקום, כפי שאפשר לראות בסרטון הבא :

<https://www.youtube.com/watch?v=el8KiDv3v7w>

גם ציפור עלולה להיקלע למצב כזה :

<https://www.youtube.com/watch?v=8OfWT28ADOY>

לעתים אנו רואים ילדים שמנסים להתקדם כנגד תנועת המדרגות. יש להם סיבות משלהם. ייתכן שהם רוצים למרוד. ייתכן שהם רואים בכך ספורט אתגרי. ייתכן שהם נהנים מן הסיכון (המיותר). במבט ראשון, נראה לנו שמבוגר שנמצא במלוא חושי, לא יעשה דבר הבל שכזה. מתברר שהמציאות שונה. רבים מוכנים לרוץ על משטח נע (הליכון שמשמש ל"אימוני כושר") ולהישאר במקום. מתברר שהם אינם מעוניינים להתקדם, אלא להישאר במקום מול מסך הטלוויזיה. הם מנמקים את המעשה בכך שהריצה אינה מיועדת לשינוי מקום, אלא קשורה באמונה שריצה תגרום לשינוי הכמות של החומר שממנו הם עשויים. מסה אינה נחשבת היום בהכרח כמעלה, אלא יותר כמגרעת שיש לתקן אותה. לא רק בני אדם עושים כך, כפי שאפשר לראות בכתובת הבאה :

<https://www.youtube.com/watch?v=ESM3495FiZM>

מה קרה למהירות הגדולה של הרצים האלה? היא התקזזה עם המהירות ההפוכה של המסוע שעליו הריצה (או ההליכה) התרחשה. לפנינו תופעה של **צירוף מהירויות** (שנכנה אותה בהמשך גם **חיבור מהירויות**). ביחידת לימוד זו נבחן כיצד מצרפים מהירויות (והעתקים) בממד אחד.

אתגר מיוחד הוא לקחת קליע שנורה מלוע מתקן שיגור במהירות גדולה ולהסיע את מתקן השיגור באותה מהירות בכיוון הפוך. הצופה מן הצד רואה את הקליע יוצא ללא מהירות מלוע המשגר, משם הוא נשטט אנכית ארצה. דוגמה כזאת תמצאו בכתובת הבאה :

<http://www.youtube.com/watch?v=BLul118nhzc>

תנועה יחסית

צירוף מהירויות אינו עניין פשוט מפני שהוא קשור ב**תנועה יחסית**, שהיא עניין קשה להבנה גם בחטיבה העליונה, ולכן ניזקק כאן לזהירות רבה. מי שרץ על גבי ההליכון אינו דומה למי שדורך במקום. הוא אכן מתקדם **ביחס** למשטח שעליו הוא דורך, אלא שהמשטח נע בכיוון הפוך. מדובר כאן בצירוף מקזז של שתי מהירויות, שאחת מהן היא **מהירות יחסית** בין שני גופים – האדם והמשטח הנע.

אם כך, האם האדם הזה נע או נח? התשובה תלויה בנקודת הראות. אין תנועה מוחלטת או מנוחה מוחלטת – הכול בעיני המתבונן. בעצם גם מי שעומד על רצפת החדר נמצא במנוחה ביחס לרצפת החדר, אך לא מנקודת ראות של מי שצופה בו ממרחבי החלל, ומבחין כי האדם והרצפה נעים כאשר הארץ סובבת על צירה במהירות של מאות מטרים בשנייה (מהירות של מטוס) ובמהירות גדולה בהרבה בהתחשב בכך שהארץ סובבת את השמש. המהירות היחסית של גוף א ביחס לגוף ב, היא המהירות כפי שהיא נצפית על ידי מי שצמוד לגוף ב.

¹ אין צורך להציג את כל הסרטון, ואפשר להוריד את עוצמת הקול לאפס, כדי לא לבזות את האדם. הדבר נכון גם לסרטון הבא.

תנועה על המסוע

לאחר שראינו איך אפשר ללכת על המסוע מבלי להתקדם, נבחן עתה את אפשרויות ההתקדמות על המסוע. בנמלי תעופה גדולים יש מסועים אופקיים שמסייעים לנוסעים להתקדם עם הכבודה שלהם לאורך מרחקים גדולים. הנוסע יכול ללכת על המסוע. אם המסוע נע במהירות של 1m/s והנוסע נע עליו במהירות 1.5m/s (ביחס למסוע ובאותו כיוון), הרי שהנוסע יתקדם במהירות של 2.5m/s . הנוסע יכול להחליט לא להתאמץ, ולעמוד על גבי המסוע. במקרה כזה הוא יתקדם במהירות של 1m/s . דוגמה כזאת יש בכתובת הבאה:

<https://www.youtube.com/watch?v=cbKL1bWQrVk>

יש נוסעים שמוכנים ללכת כנגד כיוון המסוע, לפחות חלק מן הזמן:

<https://www.youtube.com/watch?v=6xY6BcO0mfQ>

בקטע זה של הדרך, אם נשתמש בדוגמה המספרית שלנו, הנוסע התקדם במהירות 0.5m/s כנגד כיוון תנועת המסוע. כל החישובים כאן הם פעולות פשוטות של חיבור וחסור. אף על פי כן נראה כי אפשר להציג את הדברים גם באמצעות ציור חצים. חץ כחול קטן שייצג את מהירות המסוע, וחץ כחול ארוך ממנו ב-50% שייצג את מהירות האדם. כאשר האדם נע בכיוון תנועת המסוע, נציג זאת באופן סימבולי כך:

הצמדנו את זנב חץ המהירות השני לראש חץ המהירות הראשון. המהירות המצורפת על ידי חץ אדום שזנבו בזנב החץ הראשון, וראשו בראש החץ השני.

אותו עיקרון ישמש אותנו בצירוף מהירויות שהכיוונים שלהן הפוכים זה לזה.

כאשר האדם נע כנגד כיוון תנועת המסוע, נציג זאת באופן סימבולי כך:



חיסור מהירויות

נדון במקרה שבו אדם הולך בתוך הרכבת. מהירות האדם (ביחס לרכבת) תסומן ב- u_1 . מהירות הרכבת תסומן ב- u_2 . נניח שהרכבת נוסעת צפונה במהירות 10m/s , וכי הנוסע מתקדם בתוכה במהירות 1m/s (ביחס לרכבת) דרומה. נבחר בכיוון צפונה ככיוון החיובי. במקרה זה מתקיים כי

$$u_1 = -1\text{m/s}, \quad u_2 = 10\text{m/s}$$

מהירות הנוסע ביחס לפני הקרקע היא:

$$v = u_1 + u_2 = -1\text{m/s} + 10\text{m/s} = 9\text{m/s}$$

במקרה אחר הרכבת עדיין נוסעת באותה מהירות. אדם מן החוץ מודד את מהירות הנוסע ומוצא כי היא 8.5m/s . במקרה זה מתקיים כי

$$v = 8.5\text{m/s}, \quad u_2 = 10\text{m/s}$$

מכאן עולה כי

$$u_1 = v - u_2 = 8.5\text{m/s} - 10\text{m/s} = -1.5\text{m/s}$$

הפעם עשינו פעולה של חיסור. מתברר כי אפשר להתייחס למהירויות כמו למספרים, לצורך פעולות של חיבור וחיסור, כאשר סימן המהירות מייצג את כיוון התנועה. מהירות חיובית היא מהירות בכיוון שנבחר (באופן שרירותי) להיות הכיוון ה"חיובי". מהירות שלילית מייצגת תנועה בכיוון ההפוך.

אם יישאר זמן לאחר שהמורה יציג דוגמאות בכיתה, כדאי להציע לתלמידים להביא לדיון, בצוותים, תרחישים מציאותיים משלהם שבהם יש צירוף מהירויות משלהם.

אם יישאר זמן לאחר שהמורה יציג דוגמאות בכיתה, כדאי להציע לתלמידים להביא לדיון, בצוותים, תרחישים מציאותיים משלהם שבהם יש צירוף מהירויות משלהם.

חקירת תרחישים – תנועה על פני המים

שייטים מוצאים עצמם לעתים חותרים "נגד הזרם", כפי שלפעמים הם חותרים בכיוון זרימת המים. המים זורמים להם במהירות מסוימת (בכיוון מסוים). אם השייט יחתור כאילו המים היו במנוחה, מבלי לקחת בחשבון את מהירות המים, הוא עלול להיות מופתע. כיצד מצרפים את התנועות האלה? נתבונן בסרטונים שמייצגים אירועים של צירוף מהירויות.

ברווזים משייטים

התבוננו בסרטון שנמצא בכתובת הבאה:

<http://www.youtube.com/watch?v=LLQYvzHgyjI>

אנו צופים בברווזים שמשייטים במים. על פי תנועות הגוף שלהם הם חותרים בתוך המים. אנו מעוניינים לדעת אם הם נעים ביחס לחוף. ענו על השאלות הבאות:

א. האם המים נעים ביחס לחוף? אם כן, מה כיוון תנועת המים, ימינה או שמאלה?

ב. מה הן הראיות לכיוון התנועה של המים?

ג. האם הברווזים נעים ביחס לחוף? אם כן – באיזה כיוון?

ד. מה הן הראיות לכיוון התנועה ביחס לחוף?

ה. יש ברווזים שנראים לעתים נעים שמאלה ביחס לחוף. כיצד מזהים זאת?

ז. התייחסו למקרה שבו הברווז מצליח להתקדם ביחס לחוף. סרטטו תְּצִי מהירות שמייצגים את מהירות המים ואת מהירות הברווז ביחס למים (חצים מייצגים, אין צורך בחישובים כמותיים), והשתמשו בהם כדי לסרטט את החץ שמייצג את מהירות הברווז ביחס למים.

תזכורת: כדי לצרף את החצים שמייצגים את הווקטורים, עליכם לסרטט את החץ הראשון תחילה.



אחר כך עליכם לסרטט את החץ השני, כך שזנבו צמוד לראש החץ הראשון.



המהירות המצורפת תיוצג על ידי חץ שזנבו בזנב החץ הראשון וראשו בראש החץ השני.



ח. חזרו על סעיף ז בהנחה שהברווז נסוג אחור אף על פי שהוא חותר קדימה.

ט. חזרו על סעיף ז בהנחה שהברווז אינו מצליח להתקדם ביחס לחוף, אך גם אינו נסוג אחור.

דגי סלמון

דגי סלמון ידועים בכך שהם שוחים נגד הזרם. לעתים הזרם חזק למדי. התבוננו בסרטים הבאים ורשמו את רשמיכם בכל הנוגע לכיוון זרימת המים, כיוון התנועה של הסלמון ביחס למים ולכיוון התנועה של הסלמון ביחס לקרקע. נמקו את דבריכם.

<http://www.youtube.com/watch?v=VfCjoZbYJw8>

<http://www.youtube.com/watch?v=l0uXmmVwirw>
