

תנועה במסלולים עקומים בהעדר כוח חיצוני:

אמונות נאיביות לגבי תנועה של גופים

McCloskey, M., Caramazza A., Green., B.

פורסם ב: Science. Vol. 210. 5.12.1980

תרגום חופשי אסתי מגן

תקציר

סטודנטים התבקשו לצייר את מסלול התנועה של גופים במצבים שונים. יותר ממחצית הסטודנטים, כולל רבים שלמדו קורסים בפיזיקה, הציגו תפישות מוטעות לגבי תנועה של גופים. סטודנטים רבים מאמינים כי בהעדר כוח חיצוני, גופים ינועו במסלולים עקומים.

1. מבוא

בחיי היום יום, בני האדם צופים בגופים נעים ויוצרים עמם אינטראקציה באופן מתמיד. יכולנו לצפות, כי כתוצאה מהניסיון היום יומי הזה, יפתחו בני האדם הבנה בסיסית לגבי אחדים מן העקרונות הבסיסיים של הפיזיקה השולטים בהתנהגות גופים בתנועה. לדוגמא, יכולנו לצפות שאנשים ידעו כי גופים נעים בקו ישר בהעדר כוח חיצוני וגופים שנופלים מאיצים. כנראה שדרושה הדרכה כדי להבין עקרונות מורכבים, או להעריך את הפרטים הקשורים לחוקים הבסיסיים (כמו העובדה שגופים שנופלים נפילה חופשית על פני כדור הארץ נעים בתאוצה קבועה של 9.8m/s^2). יתרה מזו, הניסיון יכול להוביל, במובנים רבים, לתפישה מוטעית. לדוגמא, מהניסיון היום יומי ניתן להסיק כי גוף שהובא לידי תנועה ייעצר לבסוף בהעדר כוח חיצוני הנראה לעין שיופעל עליו. לכן אין זה מפתיע שאנשים רבים, ללא השכלה פורמלית בפיזיקה, אינם תופשים את עקרון ההתמדה. עם זאת, נראה כי הניסיון הרגיל צריך היה להספיק להבנה בסיסית של עקרונות מכניים פשוטים. ברם, מתוך מספר ניסויים שערכנו לאחרונה עם סטודנטים באוניברסיטה עולה כי לא כך הדבר. ניסויים אלו הם חלק מפרויקט גדול שמטרתו אפיון הייצוג הפנימי של העולם הפיזיקלי בקרב אנשים בעלי דרגות שונות של ידע וניסיון פיזיקלי.

התוצאות מראות בצורה ברורה כי סטודנטים רבים אשר סיימו קורס אחד או יותר בפיזיקה, בדומה לאלה החסרים ידע פורמלי בפיזיקה, אינם מצליחים להבין את העקרונות היסודיים ביותר של המכניקה. יתרה מזו, הנתונים מצביעים על כך שלא זו בלבד שהסטודנטים חסרים את הידע הזה, אלא שהם גם מציגים "חוקי תנועה" השונים מחוקי הפיזיקה הפורמליים.

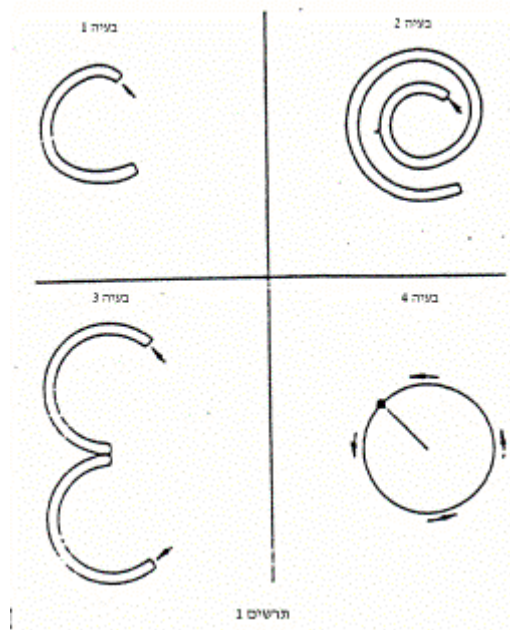
בדו"ח זה אנו מתארים את תוצאות המחקר שתוכנן כדי להעריך את מידת ההבנה של עקרון ההתמדה (גופים נעים בקו ישר בהעדר כוח חיצוני).

2. המחקר

האוכלוסיה הנחקרת היא קבוצה של 50 סטודנטים מאוניברסיטת John Hopkins. שלושה מביניהם לא הצליחו לבצע את ההוראות. מתוך 47 הנותרים, 15 לא למדו קורסים בפיזיקה בבית ספר תיכון או בקולג', 22 סיימו קורס בבית ספר תיכון, 10 סיימו לפחות קורס אחד בפיזיקה בקולג'. כל הנחקרים קיבלו 13 בעיות פשוטות. בכל בעיה יש לשרטט קו ויש הוראות המסבירות את השרטוט ואת המטלות שיש לבצע. השרטוטים עבור 4 הבעיות הראשונות מוצגים תרשים 1. בבעיות 1-3 הונחו הנשאלים כלהלן:

"בכל אחד מהעמודים הבאים מוצג צינור דק עשוי ממתכת אשר צורתו מכופפת. השרטוטים מציגים מבט מלמעלה. כדור מתכת מוצב בקצה הצינור המסומן ע"י חץ. הכדור נורה לתוך הצינור ויוצא החוצה בקצה השני של הצינור במהירות גבוהה. המטלה שלך היא לצייר את מסלול הכדור לאחר שהוא עזב את הצינור. בעת שרטוט המסלול הזנח את התנגדות האוויר. הנח שבכל המקרים הכדור את הצינור באותה מהירות." בבעיה 3 גם נאמר שהכדור נורה בכל אחד משני הצינורות והם חייבים לשרטט את מסלול הכדור עבור כל אחד משני הכדורים שנורו. בבעיה 4 נאמר:

" תאר לעצמך אדם שיש לו כדור מתכת המחובר לקפיץ והוא מסובב אותו במהירות גבוהה מעל ראשו. השרטוט מתאר מבט מלמעלה. העיגול מראה את מסלול הכדור והחץ את כיוון הסיבוב. הקו ממרכז המעגל להיקף המעגל מייצג את הקפיץ. ברגע שהכדור נמצא בנקודה המסומנת בשרטוט נשבר הקפיץ בנקודת החיבור עם הכדור. שרטט את מסלול הכדור לאחר שהקפיץ נשבר. הזנח את התנגדות האוויר."



3. תוצאות המחקר וניתוחן

רבים מבין הסטודנטים לא ידעו שבהעדר כוח חיצוני, גופים נעים בקו ישר. 36% מהמסלולים המשורטטים היו קוים עקומים. ביתר פרוט, המסלולים היו עקומים ב- 49% מהשרטוטים של הסטודנטים חסרי השכלה פורמלית בפיזיקה, ב- 34% מהסטודנטים שלמדו קורס אחד בפיזיקה בבית הספר התיכון וב- 14% מהסטודנטים שסיימו קורס אחד או יותר בקולג'.

תרשים 2 כולל את התשובות הנכונות ואת הטעויות השכיחות ביותר בכל אחת מארבע הבעיות. נתייחס קודם לבעיות הקשורות לצינור המתכת (בעיות 1-3). לגבי בעיה מספר 1 (צינור בצורת C), שליש מהנשאלים ציירו מסלולים עקומים (ציור 2B). התוצאות היו בולטות יותר במקרה של הצינור הספירלי (בעיה 2): מחצית מהנשאלים ציירו מסלולים עקומים. מעניינת במיוחד היא העובדה ש- 19 נחקרים מתוך 25 שציירו מסלולים עקומים בבעיה אחת לפחות מתוך השתיים הראשונות, ציירו את מסלול הכדור עבור הצינור הספירלי מעוגל יותר מאשר עבור צינור בצורת C (ראה תרשים 2D לעומת תרשים 2B). תוצאות אלה מעידות על כך שאנשים רבים חושבים שגוף הנע בתוך צינור מעוגל ימשיך לנוע במסלול עקום (מעגלי) גם כאשר לא יופעל על הגוף שום כוח חיצוני. יתרה מזאת, אנשים מאמינים שככל המסלול בעל עקמומיות גבוהה יותר (או אולי ככל שזמן המצאות הגוף בתוך הצינור ארוך יותר), כך מסלול הגוף לאחר יציאתו מהצינור יהיה בעל עקמומיות גבוהה יותר. התוצאות עבור בעיה 3 עם שני הצינורות מוכיחות שהשאלה הובנה כהלכה (שהשרטוט מיצג מבט מהצד) ושליש מהנשאלים ציירו שני מסלולים שונים עבור שני הכדורים (תרשים 2F).

לבסוף נדון בבעיה 4, בה מסובבים את הכדור וברגע מסוים הוא עף ממסלולו. במושגים של עקרונות פיזיקליים בעיה זו זהה לבעיות הצינור הקודמות. בבעיות אלו מופעל כוח על גוף שגורם לו לנוע במסלול מעגלי ואז מופסק הכוח.

לא מפתיעות התוצאות שהתקבלו בשאלה 4. התוצאות היו דומות מאד לתוצאות של הבעיות 1-3: 30% מהנשאלים מאמינים שהכדור ינוע במסלול עקום לאחר שהקפיץ יישבר. תשובה אופיינית מסוג זה מוצגת בתרשים 2H.

בתרשים 2I מוצגות תשובות לא נכונות נוספות עבור בעיה מספר 4, אותן ניתן להגדיר כשגיאות מתוחכמות. 3 נשאלים חושבים שהכדור ינוע בקו ישר הממשיך את הקו שיצר הקפיץ בעת שבירתו. בראיונות הוברר שהנשאלים ניסו לפתור את הבעיה בעזרת ניתוח המצב במושגים של כוח הפועל על הכדור. סטודנטים אלו חשבו כי הכוחות הצנטריפוגליים דוחפים את הכדור החוצה, אך הקפיץ מחזיק את הכדור במעגל. לכן, בעת שבירת הקפיץ, הכוח הצנטריפוגלי מושך בחוזקה את הכדור כלפי חוץ, וגורם לו לנוע במסלול הממשיך את קו הקפיץ.

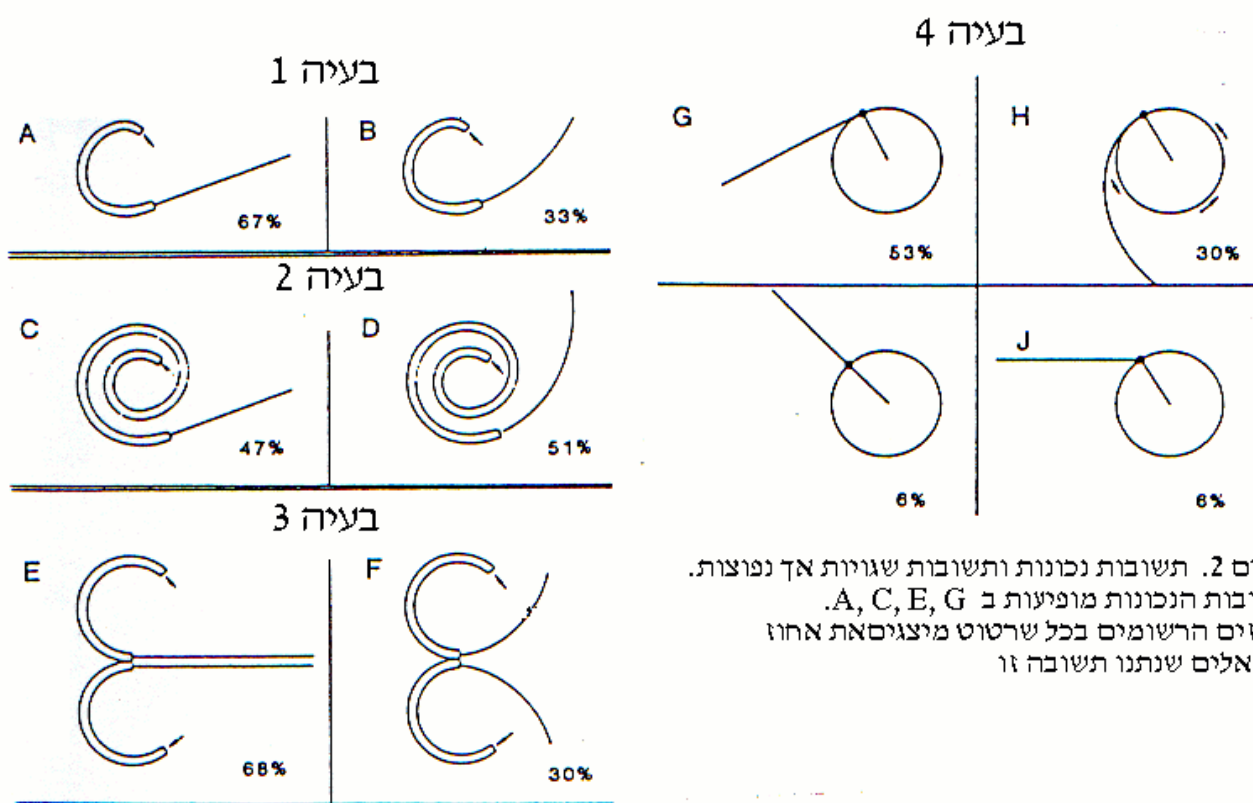
סוג שני של טעויות מתוחכמות (שנעשו על ידי שלושה סטודנטים), התבטא במחשבה שהכדור ינוע בקו ישר המכוון בערך באמצע בין הקו הנכון (שבו הכדור צריך לנוע) לבין הקו המשיך לקפיץ (תרשים 2J). מהראיונות עם החושבים כך, הסתבר שהנשאלים מצאו פשרה בין כיוון המהירות הרגעית של הכדור בנקודת שבירת הקפיץ לבין כיוון התנועה הקיימת עקב הכוח הצנטריפוגלי.

העובדה, שרוב הנשאלים ששגו נתנו אותה תשובה (מסלול עקום) בכל ארבע הבעיות, מרמזת על כך שהנשאלים לא ענו בצורה אקראית על השאלות, אלא בסוס את תשובותיהם על מערך נאיבי של חוקים לגבי התנועה. בנוסף, מאחר שהתשובות השגויות היו עקביות בין הנשאלים השונים, לא נראה שיש לכל נשאל אוסף של תפישות שגויות המיוחדות לו.

שאלה חשובה היא מה טבען של האמונות הנאיביות שהובילו את הנשאלים לצייר את המסלולים העקומים.

הרעיונות שנערכו לאחר הניסוי מובילים לכמה תשובות אפשריות לשאלה זו. רוב הנשאלים אשר ציירו מסלולים עקומים חושבים שגופים אשר נעים דרך צינורות מעוקמים מקבלים "כוח" או "מומנטום" (התמדה) אשר גורם להם להמשיך במסלול עקום לזמן מסוים לאחר עזיבת הצינור. בכל אופן ה"כוח" או ה"מומנטום" כנראה נעלמים בהדרגה לאחר מכן והגוף חוזר לנוע בקו ישר (ההתיישרות של המסלולים נראית לעין ברבים מהציורים).

נשאל אחד אשר השלים שנת לימודים אחת בפיזיקה בתיכון ושנה אחת פיזיקה בקולג' טען: "המומנטום שהגוף הוכש בזמן המעבר דרך הצינור, ובכך, הכוח המחזיק אותו מעניק לגוף תנע זוויתי, כך שכאשר הגוף עוזב את הצינור עדיין יש לגוף חלק מהתנע הזוויתי, אבל הוא מאבד את המומנטום כאשר הכוח נעלם".



4. אמונות הנשאלים ותיאוריית האימפטוס

צורת חשיבה זו מזכירה את התאוריה שהייתה קיימת בימי הביניים, תיאוריית האימפטוס. תיאוריה זו טענה שגוף הנמצא בתנועה רוכש לעצמו "אימפטוס" (גורם דחף) המשרת אותו כדי להישאר בתנועה. על פי כמה גרסאות של התיאוריה הזו, האימפטוס נעלם בהדרגה, וגורם לגוף להאט או אפילו לעצור.

מספר תאורטיקני אימפטוס התבססו על הנחת יסוד בדבר קיום אימפטוס מעגלי המשרת מטרות כגון שמירת גוף בתנועה מעגלית. Buridan ניסח את תיאוריית האימפטוס במאה ה-14 כך: "המניע (כלומר הסוכן המביא את הגוף לידי תנועה), בהניעו גוף, מטביע בו אימפטוס מסוים או סוג מסוים של כוח מניע שיש לגוף נע, בכיוון שבו הגורם המניע הניע את הגוף, למעלה למטה, לצדדים או במעגל.

(8) Clement זיהה תפישות מוטעות הקשורות לאימפטוס בפתרון בעיות על ידי סטודנטים שהן מורכבות יותר מאלו שמצאנו במחקר זה. יתר על כן, מצאנו הוכחות לקיומן של אמונות נאיביות המזכירות את תיאוריית האימפטוס בגוון רחב של מצבים פשוטים של תנועה (גוף נופל מצוק, כדור מתגלגל לאורך משטח שטוח). לפיכך נראה כי האמונה בכוח המזין את התנועה, יש בה כדי להסביר את הבנת התנועה אצל אנשים חסרי מיומנות בפיזיקה.

5. מסקנות וסיכום

פסיכולוגים הקדישו תשומת לב רבה לתפישות לא נכונות ותהליכי הנמקה בלתי תקפים. עם זאת, בפיתוח מודלים של למידה הונח בד"כ כי המידע המוצג הינו נכון. לפחות בתהליך הלמידה של האדם הבוגר, לא נלקחה בחשבון האפשרות שהידע שנרכש תוך כדי הסתכלות יכול לעמוד בסתירה לעובדות הפיזיקליות.

מדענים קוגניטיביים צריכים לחתור לאפיון "הידע" שהאנשים רוכשים על ידי אינטרקציה עם העולם הממשי, ולנסות לגלות כיצד מושג ידע זה. התוצאות שלנו ושל חוקרים אחרים מצביעות על כך שאל למורים למדעים לראות את תלמידיהם ככאלה שכל שחסר להם הוא רק מידע נכון. המורים למדעים צריכים לקחת בחשבון שלתלמידיהם יש דעות קדומות, תפישות שגויות ואסטרטגיות לפתרון בעיות השונות מאלו הנקטות בידי מומחה.

כאשר אין עוסקים באמונות נאיביות של תלמיד, הדרכה בפתרון הבעיה יכולה רק לספק לתלמיד מונחים חדשים להסבר אמונותיו השגויות (כבמקרה של התלמיד שדיבר על תנע זוויתי).

התפישה האריסטוטלית בדבר תנועת גופים, על פיה גוף ישאר בתנועה כל עוד הוא נמצא במגע עם המניע, הקדימה באופן היסטורי את תיאוריית האימפטוס. היא תוארה כדרך הטבעית ביותר להסביר תנועה. מדוע, אם כן, בטאו נחקריו אמונות המבטאות יותר את חשיבת ימי הביניים מאשר את זו האריסטוטלית?