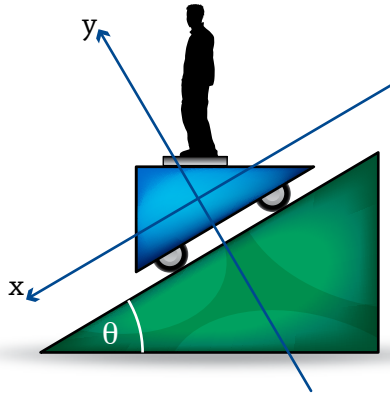


הבנה בפיזיקה אינה נרכשת בהתמודדות ראשונה

לדי לזן, המחלקה לפורמא, המדעים, מכן ויצמן למדע, רחוב, משרד החינוך והקרב, ירושלים

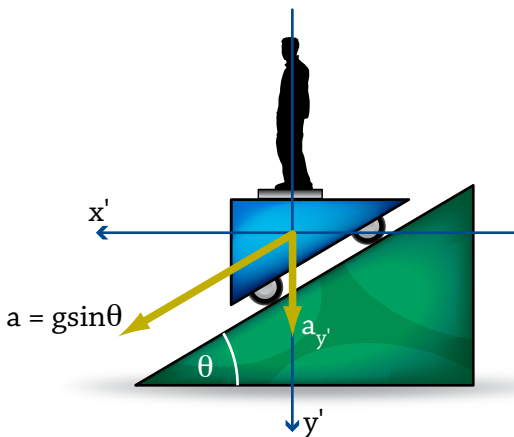


תרשים 2:

לאחר מכן רשמתי את החוק השני של ניוטון לגבי רכיבי ה-x:
 $\Sigma F_x = ma_x \Rightarrow mg \cdot \sin\theta - N \cdot \sin\theta = m(g \cdot \sin\theta)$
 ומצאתי כי: $N = 0$.

הצצה חטופה בתשובה שבסוף הספר, העמידה אותי בפני העובדה המצערת, שתשובתי שגויה. התשובה בספר הייתה:
 $mg(1 - \sin^2\theta)$

בדקתי את הפעולות האלגבריות שבצעתי, וכשלא מצאתי בהן כל פגם, החלטתי לנסות את מזלי בפתרון הבעיה ביחס למערכת צירים x' ו- y' (תרשים 3).



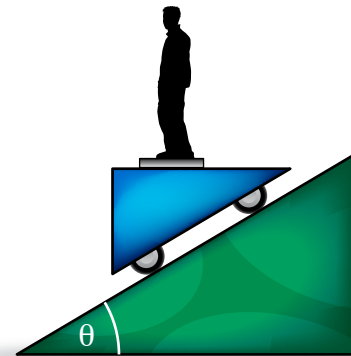
תרשים 3:

כאשר אני מרצה בהזדמנויות שונות על הנושא "הבנה בפיזיקה", אני נוהג להציג שקף שעליו כתוב באותיות של קידוש לבנה המשפט: "אי אפשר לרכוש הבנה מעמיקה בפיזיקה בהתמודדות ראשונה".

לא הוכחתי טענה זו לגבי כלל האוכלוסייה, אך היא ודאי נכונה לגבי מקרה פרטי אחד - לגבי ברצוני לשתף אתכם באחת הדוגמאות.

בהיותי תלמיד כיתה י"ב, בשעה שהתכוננתי לקראת בחינת הבגרות בפיסיקה, נתקלתי בבעיה שהופיעה באחד מספרי הלימוד, והייתה מנוסחת בערך כך:

תלמיד שמסתו m מניח מאזניים על קרונית שצורתה מנסרה משולשת (תרשים 1), ומחליק במדרון שזווית נטייתו θ . מצא את הוריית המאזניים.

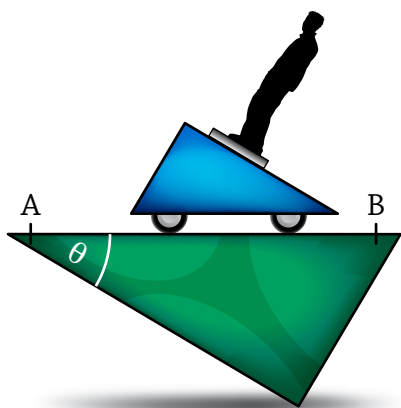


תרשים 1: תרשים הבעיה

אמרתי כך: למערכת המורכבת מן הקרונית, המאזניים והתלמיד, יש תאוצה בכיוון המורד, שגודלה $g \cdot \sin\theta$. לכן בחרתי במערכת צירים x ו- y שבה ציר x בכיוון המורד (תרשים 2), וסרטטתי את הכוחות הפועלים על התלמיד: mg ו- N .

את השאלה מחדש, על-פי מיטב הכללים הדידקטיים; סעיפי השאלה הוצגו בזה אחר זה, בצורה מדורגת, כך שהשאלה לא תאמלל תלמידים. אחד הסעיפים הראשונים: "כיצד תסיק שעל התלמיד פועל כוח חיכוך?" (רוזן וקרקובר⁽²⁾ עמ' 215). כשסיימתי לנסח את השאלה מחדש, חשתי שעשיתי צדק עם הוראת הפיסיקה.

חלפה שנה נוספת, והתחלתי להתעמק בנושא "מערכות ייחוס" ובשימוש בעיקרון האקווילנציה במסגרת המכניקה. עברתי על השאלות השונות בספר "מכניקה ניוטונית" כדי לאתר שאלות שקל לפותרן באמצעות עקרון האקווילנציה. במהלך הדפדוף, הגעתי בפעם הרביעית לשאלה שלנו. הפעם הבחנתי במה שנסתר מעיני במשך שנים רבות: שדה הכבידה השקול לשדה הכבידה של הארץ ול"שדה הכבידה" הקשור לתאוצה, **ניצב ל"משטח המשופע"**! כלומר ה"משטח המשופע" הוא אמנם משופע **ביחס לצופה על הקרקע**, אך ביחס לתלמיד שעל המאזניים, הוא **אופקי**, והכיוון "מטה" ניצב למשטח זה. מחבר השאלה המקורית, סרטט כנראה את הקרונית בצורת מנסרה כדי שהתלמיד הניצב עליה ירגיש יציב ובטוח, ולא ייפול חלילה תוך כדי התנועה המואצת. אבל מצבו של התלמיד הניצב על קרונית זו, דומה דווקא למצבו של אדם העומד על הקרקע בצורה המתוארת בתרשים 4. ורק אקרובט מדופלם ומנוסה יכול לעמוד כך.



תרשים 4:

מן הראוי לתת לתלמיד להחליק עם קרונית מתאימה, כזו המתוארת בתרשים 5. זאת יודע כל מי שהחליק על מגלשיים במורד הר מכוסה שלג.

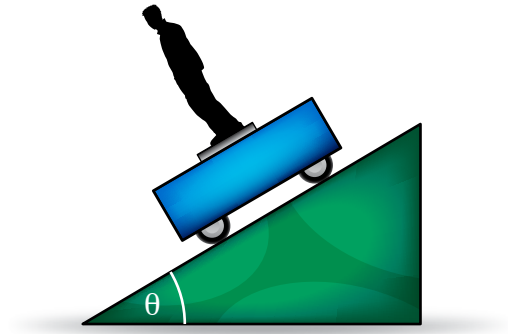
רשמתי את החוק השני של ניוטון, הפעם לגבי רכיבי y' : $\Sigma F_{y'} = ma_{y'} \Rightarrow mg - N = m(g \sin \theta) \cdot \cos(90^\circ - \theta)$ וקבלתי: $N = mg(1 - \sin^2 \theta)$. זו התשובה המבוקשת. סימנתי v ליד השאלה, כאות וכסימן לכך, שאם השאלה תופיע בבחינת הבגרות שלי - הפתרון בכיסי (לא במובן הפיסי של המילה). עברתי לשאלה הבאה, בתקווה לסמן גם לידה את הסימן v .

מדוע התשובה הנכונה לא התקבלה ביחס למערכת הייחוס x, y ? חוץ מאשר שביב של הרהור שחלף במוחי, הדבר לחלוטין לא הטריד אותי. מה שהיה חשוב - להגיע לתשובה שבסוף הספר.

חלפו עברו כמה שנים; צבא, אוניברסיטה, ומצאתי את עצמי כמורה טרי בכיתה י"א, בשנת ההוראה הראשונה. אחד התרגילים שהטלתי על תלמידי כשיעורי בית היה התרגיל הנדון. ערב לפני בדיקת שיעורי הבית - התמודדתי שנית עם התרגיל. אבל שוב - מעשה שטן - ביחס ל- x, y מתקבלת תשובה אחת, וביחס ל- x', y' - מתקבלת תשובה אחרת - התשובה הנכונה. ניסיונות חוזרים ונשנים לא שיפרו את המצב. x, y - לא טוב, x', y' - טוב. בניגוד לפעם הקודמת, הבנתי שמשוהו אינו כשורה, אך לא הצלחתי לזהות מהי הבעיה.

למחרת, עמדתי בפני הכיתה ושאלתי "האם יש בעיות עם תרגיל מס' 3?" אחרי שהחברה אמרו שהם לא הצליחו לפתור, פתרת את השאלה במשיכת גיר קלילה, כאשר אני מעלה חיוך בזווית הפה. חיוך שהיה אמור להביע "לא הצלחתם לפתור תרגיל כל-כך פשוט?". כשסיימתי להציג את הפתרון הנכון על גבי הלוח, עברתי מיד לתרגיל הבא, לפני שמישהו מתלמידי ישאל שאלות מיותרות. חולפות ועוברות השנים. מעט שיער לבן ומעצבן מכבץ בצדי הראש. השתנו גם ספרי הלימוד, והבעיה המטרידה נשכחה מראשי.

כשהתחלתי לכתוב את הספר "מכניקה ניוטונית" נזכרתי בבעיה ההיא, מימים עברו. הפעם, עם בטחון עצמי רב, התמודדתי בשלישית עם הבעיה. מסתבר שהניסיון עושה את שלו. זיהיתי מיד שהכוחות mg ו- N - הפועלים בכיוון הציר y אינם יכולים להאיץ את התלמיד בכיוון המורד. אם רק הם יפעלו על התלמיד - הוא יחליק, וייפול אפיים ארצה. **חייב לפעול על התלמיד גם כוח חיכוך**, אמרתי לעצמי. ואכן, כאשר לוקחים בחשבון כוח חיכוך הפועל על התלמיד, הפתרון מתקבל ביחס לכל מערכת צירים, אפילו כזו הנטויה בזווית 17° עם המשטח המשופע. אם "שוכחים" את כוח החיכוך - הפתרון מתקבל רק כאשר כותבים את החוק השני של ניוטון לגבי כיוון y' , כי בכיוון זה הרכיב של כוח החיכוך שווה לאפס. ניסחתי, אם כן,



תרשים 5:

ואכן, במהדורה החדשה של הספר "מכניקה ניוטונית" (מהדורה מתוקנת 1997) (רוזן וקרקובר⁽³⁾ עמ' 215) תוקנה השאלה בהתאם (וכולי תקווה, שהיא הגיעה למנוחה ולנחלה). השאלה, בגירסה הראשונית, מופיעה בכמה ספרים. רק דבר אחד מטריד מעט: כיצד יתכן, ששאלה זו מופיעה בספרים רבים, ובארצות שונות, ועם אותה שגיאה, ואיש אינו שם לב? בשקף, שבו כתוב "אי אפשר להגיע להבנה מעמיקה בפיזיקה בהתמודדות ראשונה", הוספתי לאחרונה: "וגם לא בהתמודדות שנייה".

מראי מקום:

2. רוזן, ע. וקרקובר, ז., (1995). מכניקה ניוטונית, כרך א. רחובות: מכון ויצמן למדע.
3. רוזן, ע. וקרקובר, ז., (1997). מכניקה ניוטונית, כרך א. רחובות: מכון ויצמן למדע.