

התמדה

פיתוח הפעילות¹: זאב קרקובר, המכון למצוינות בהוראה, המרכז הישראלי למצוינות בחינוך

מטרות היחידה

יחידת לימוד זו היא חלק מתכנית הלימודים בתחום "תנועה". היחידה עוסקת במושג התמדה, הן בכיוון התנועה והן בגודל המהירות. תלמידים יגלו בניסויים את התופעה, יתוודעו להמחשות שלה ויכירו את חשיבות התופעה.

מיומנויות: פענוח תצלומי הבזק.

מבנה היחידה

- התלמידים יתבקשו לשער את כיוון התנועה של גולה שנחלצת ממסלול מעגלי.
- השערת התלמידים תיבדק בניסוי.
- ניסוי הזיקוק המסתובב אמור לחזק את המסקנה.
- תלמידים יזהו התמדה בגודל המהירות ותופעות נלוות מתוך תצלומי הבזק.
- תלמידים יציעו תופעות שממחישות התמדה.
- ייערך דיון על חשיבות מושג ההתמדה.

לוח זמנים אפשרי

היחידה מיועדת לשני שיעורים כפולים.

הרקע של התלמידים

ההנחה היא כי התלמידים כבר למדו את יחידות המרחק, הזמן, המהירות והעקבות.

ציוד

מחשב (כולל תוכנת מעבדה ממוחשבת), מקרן, מסלולים מעגליים לגולות, גולות, זיקוקים, מקדחה חשמלית, סרגלים.

מפת פעילויות - בסיום היחידה (לפני ההצעות לתרגילי כיתה, משימות בית)

¹ שותפים חשובים למעשה מוזכרים בעמוד הבא.

שותפים לעשייה

קראו והעירו:

גניה חייקין, מדריכה ארצית במו"ט, תחום פיזיקה, המינהל למדע וטכנולוגיה

מיכאל סבין, הפיקוח על הוראת הפיזיקה

ד"ר אבי פולג, ראש המכון למצוינות בהוראה, המרכז הישראלי למצוינות בחינוך

ד"ר רחל קנול, מדריכה ארצית במו"ט, המינהל למדע וטכנולוגיה

יחידה זו מבוססת על יחידת הלימוד "יחידת התנועה א: התמדה" של תכנית מצוינות 2000.

תודה מיוחדת ל-The Edgerton Digital Collections project, שמאפשר ומעודד את השימוש בצילומים של הרולד אגרטון למטרות חינוך, ומזמין את הקוראים ליהנות מן האתר שלו:

<http://edgerton-digital-collections.org>

אין לעשות בחומר זה שום שימוש מסחרי. הוא מיועד לשירות המורה בלבד.

התמדה כאינרציה

התמדה נחשבת כתכונה רצויה אצל תלמידים. בנעורי נרשם בתעודה ציון על "התמדה". על פי ביאליק, המתמיד היה זה ששמר על נשמת האומה. האנלוגיה המתבקשת היא כי העובדה שגוף שומר על מהירותו מעידה על משהו אקטיבי מצדו. האם לכך התכוון ניוטון בטובעו את המושג "אינרציה"? מתברר כי כוונתו של ניוטון הייתה הפוכה. התנהגות אינרטיית מעידה על חוסר יזמה. התרגום העברי ההולם הוא "נרפות" או "עצלנות". מהירות הגוף אינה משתנה מפני שמטבעו אינו נוטה לשינויים. כדי לשנות את המהירות נדרשת התערבות של גורם חיצוני. רק אז יש סיכוי שהמהירות תשתנה. גודל השינוי תלוי במסת הגוף. ככל שיש לגוף יותר מסה, הוא מגיב פחות לכוח חיצוני – הוא אינרטי יותר (נרפה יותר). מדובר, אפוא, בהתמדה פסיבית, של מי שאינו מסוגל לשנות את מצבו בעצמו ומתנגד להשפעות חיצוניות ("כוחות מוטבעים"). ניוטון מציין במפורש שתכונתו של הגוף להתנגד לשינויים בתנועתו ראויה לשם "רב המשמעות" (Significantissimo) "כוח ההתמדה" (Vis inertiae). עקרונית, טוען ניוטון, אין הבדל בין נטייה להישאר במנוחה לנטייה לשמור על המהירות – בשני המקרים מדובר על חוסר יכולת עצמית להשתנות.²

לכאורה, התמדה אינה מעניינת, שהרי היא עוסקת במקרה גבולי בלתי מציאותי של גוף חופשי לחלוטין. כידוע, אף אחד אינו חופשי לחלוטין בעולמנו. מדוע, אם כן, עוסקים בהתמדה? מדוע ניוטון שם מונח זה ביסוד היסודות של פילוסופיית הטבע? זה מפני שהתמדה נמצאת בכל תרחיש בטבע. תנועתו של גוף בעוד רגע היא צירוף של תנועתו עכשיו (התמדה, החוק הראשון) עם השינוי בתנועה שנגרם על ידי גורם חיצוני (החוק השני). אם היינו מתחשבים רק בכוח החיצוני, הירח היה נופל על הארץ. להתמדה הפסיבית יש חלק מהותי בעיצוב תנועתו של כל גוף בכל מצב. זהו המסר שמעביר ניוטון בתשתית התיאוריה שלו.

ומניין מגיע הגורם החיצוני (הכוח) שמסוגל לשנות את התנועה? מתברר כי "לא בשמים הוא" אלא "קרוב אליך הדבר קאד" (דברים, ל, יב-יד). הכוח הזה הוא תוצר של "דיאלוג" (דו-שיח) בין גופים (אינטראקציה – החוק השלישי). מה שאין הגוף האחד מסוגל לשנות בעצמו הוא מסוגל לעשות לחברו, בפעולה הדדית, שבה משתנות המהירויות של שני הגופים, שהרי "טובים השנים מן האחד... כי אם יפלו האחד יקים את חברו ואילו האחד שפול ואין שני להקיימו" (קהלת, ד, ט-י).

אלה שלושת הרעיונות שמניח ניוטון בתשתית פילוסופיית הטבע שלו. הוא מכנה אותם "אקסיומות" או "חוקי תנועה" (AXIOMATA sive LEGES MOTUS).

לאחר סדרת יחידות שבהן התלמידים למדו לזהות תנועה, איכותית וכמותית, למדוד אותה ולייצג אותה, הגיע הזמן להיכנס לטרקלין של ניוטון. נתחיל בחוק הראשון, אך בהזדמנות זו נספק הצצה גם לחוקים הבאים.

² התייחסות נרחבת יותר תמצאו כאן: <http://my.ort.org.il/mop/physics/daily/daily620520.doc>

התמדה

גילוי, המחשה, משמעות



בתמונה שלפנינו אנו צופים בגצים שנפלטו מזיקוק שמסובב במהירות גדולה באמצעות מקדחה. בתצלום זה בולטת מציאותם של גצים רבים הממשיכים לנוע בקו ישר בכיוון שהיה להם ברגע שבו הם נתקו מן הזיקוק. זוהי המחשה להתמדה. ביחידת לימוד זו נבקש להמחיש את ההתמדה על היבטיה ועל משמעויותיה, במגוון של דרכי פעולה דידקטיות.

התמדה - רקע דידיקטי

חוקי התנועה הבסיסיים (חוקי התנועה של ניוטון) רחוקים מן האינטואיציה, ובראשם החוק הראשון הקובע כי גוף חופשי נע בקו ישר במהירות קבועה. אנשים אינם מאמינים שגופים מתמידים בתנועתם גם לאחר שהפסקנו לדחוף אותם. נסו לדחוף פסנתר, תנועתו תיפסק מיד עם תום הדחיפה. גם במקרה שהגוף המשוגר ממשיך לנוע על הרצפה, הוא מאט בהדרגה, עד לעצירה מוחלטת. תנועה אינסופית בקו ישר, ללא הפסקה, אינה מן התופעות המוכרות לנו. אפילו צעצועים עם מנגנון דריכה עוצרים בסופו של דבר. בהמשך הדיון עוד יתברר לנו שאנשים אינם מאמינים בהתמדה במקום שבו היא קיימת, ומאמינים בה דווקא במקום שבו אינה קיימת. מול דעות קדומות כאלה, התהליך החינוכי אינו פשוט. תלמידים שומעים את המורה, מהנהנים בראשם, אך אינם מפנימים. קשה לשרש דעות קדומות. קשה להשריש דעות חלופיות. תנאי הכרחי להצלחה כלשהי בתחום זה הוא ההכרה בקיומן השורשי של תפיסות מוטעות, הנטועות היטב בתודעת הלומד.

מקובל לדון תחילה בהתמדה במהירות הגוף, ורק אחר כך בהתמדה בכיוון התנועה. אנו נלך בסדר הפוך, מפני שקל להבחין אם מסלול הגוף נוטה מן הקו הישר, וקשה להבחין בשינויים במהירות. אנו מבקשים ללכת מן הקל אל הכבד. מדידות מהירות אינן פשוטות, בייחוד כשמדובר בתנועות מהירות של כדורים. כדי להתגבר על בעיה זו נשתמש בתחבולה, שתחסוך מאתנו את השימוש בשעון. אנו ננתח תצלומי הבזק שמסוגלים לבסס את ההתמדה במהירות. ניתוח תצלומי הבזק מחזיר את התלמידים לפעול כבלשים שמתחקים אחרי תכונות של התנועה ומסיקים מסקנות. לאחר התנסויות הגילוי האלה ייווכחו התלמידים כי תופעות מוכרות ממחישות התמדה, וכי להתמדה יש חשיבות רבה בהבנת תנועתם של גופים.

חלק א: התמדה בכיוון התנועה

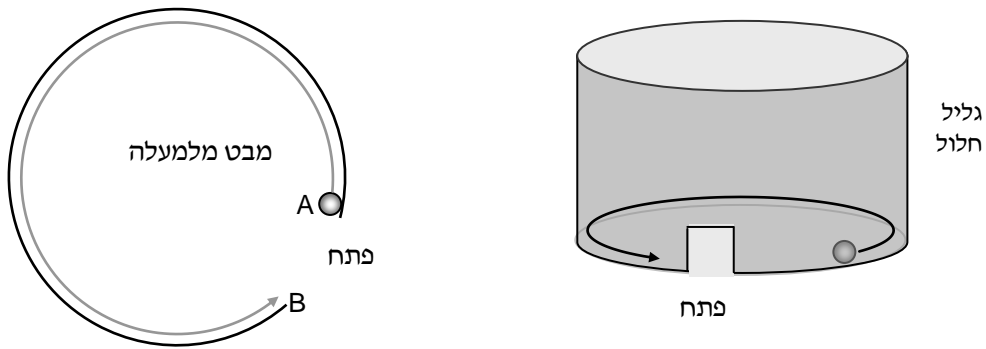
עתידה של תנועה מעגלית – לקראת שאלון ציפיות



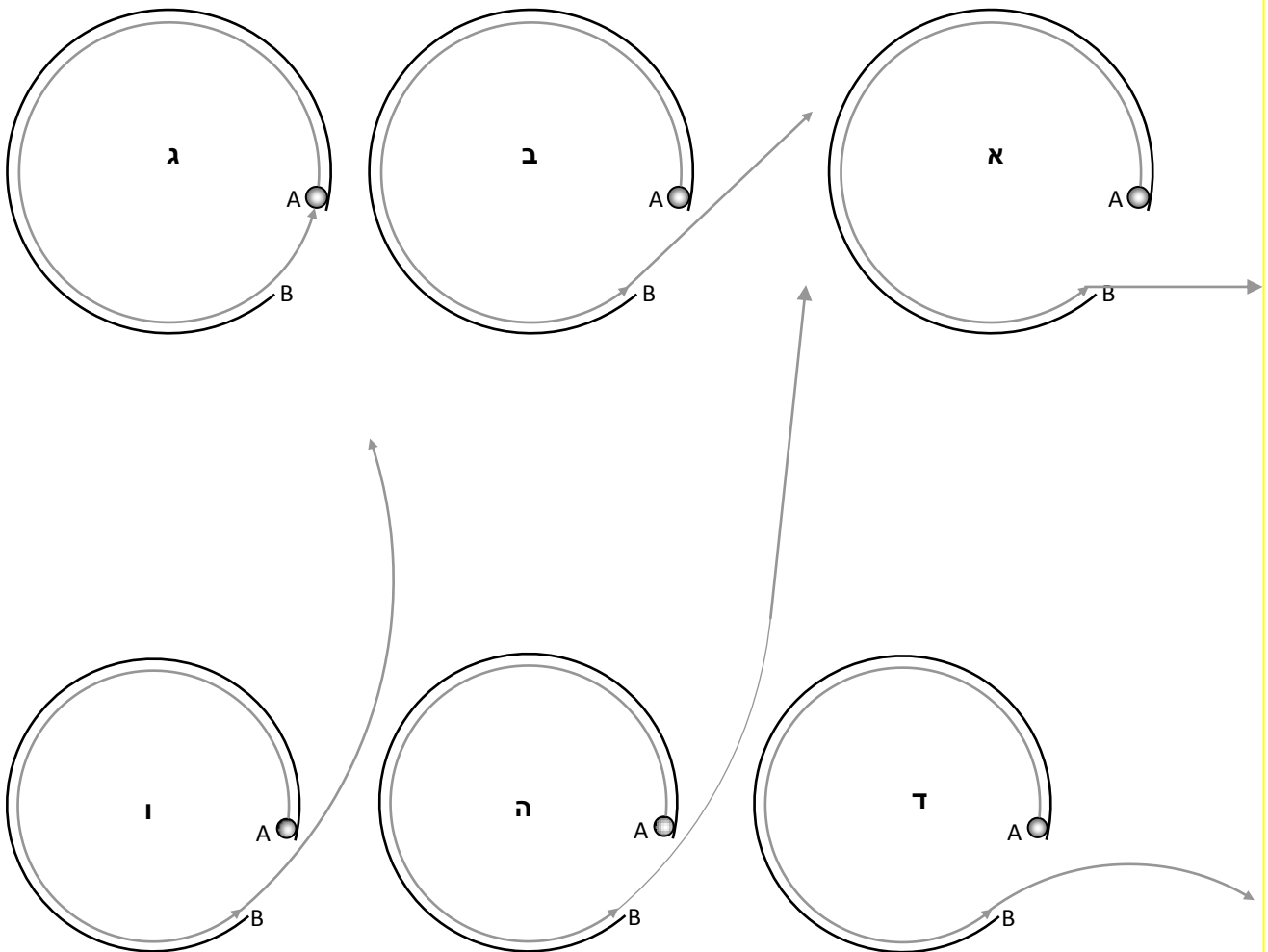
את הדיון בהתמדה נפתח בשאלון לתלמידים. הם מתבקשים לחזות את תוצאות הניסוי שאותו נערוך מיד לאחר מכן. הניסוי פשוט למדי. גולה נקלעת למסלול מעגלי. לשם כך משתמשים בגליל פלסטיק כמו בתמונה. אפשר גם להשתמש בגליל קרטון שמשמש ליבה לסרט בידוד, שגוזרים ממנו חלק מתאים. כדאי שקוטר העיגול לא יקטן מ-10 ס"מ. דוחפים את הגולה כך שהיא נעה על השולחן, על פני הדופן הפנימית של הגליל. מכינים פתח בגליל, כך שהגולה תגיע אליו בסופו של דבר. כיצד ייראה המשך המסלול? בדף החקר (בעמוד הבא) מוצעות שש אפשרויות (א-ו). על כל תלמיד לבחור את האפשרות שנראית לו, ללא דיון מוקדם וללא התייעצות עם עמיתים. כל תלמיד רושם על פתק את בחירתו. הפתקים (האנונימיים) מועברים אל המורה, והתפלגות התחזיות של התלמידים נרשמת על הלוח.

בעקבות רישום ההתפלגות יש לתת לתלמידים להתבטא ולנמק את הדעות השונות. זהו מן המקרים שבהם התשובה, לאחר הניסוי, מפתיעה את רוב המשערים. הטבע נוהג כנגד האינטואיציה שלנו, המבוססת על התנסות טבעית. ההפתעה והפליאה אמורות לחרוט את הדברים על לב התלמיד. עם זאת, יש להתכונן גם להתנגדות של תלמידים שיתחפרו בעמדותיהם. הכבוד העצמי שלהם עשוי להקשות את עורפם, והם יהיו יצירתיים בפרשנות תוצאות הניסוי או במאמץ להוציא מן הניסוי תוצאות אחרות. היו סבלנים עמם.

עתידה של תנועה מעגלית – השערה



גולה נעה במעגל, על-פני שולחן אופקי, בתוך גליל חלול, כך שהיא צמודה לדופן הפנימית של הגליל. מה יקרה כאשר הגולה תגיע למקום שבו יש פתח בדופן הגליל? כיצד ייראה המשך המסלול? לפנינו שש הצעות, מסומנות מ: א עד ו. יש לבחור לבד, ללא התייעצות עם אחרים, את המסלול הנראה לך, לרשום את האות הרלוונטית על פתק (ללא ציון שם) ולהעביר למורה לצורך רישום סטטיסטי של הציפיות.

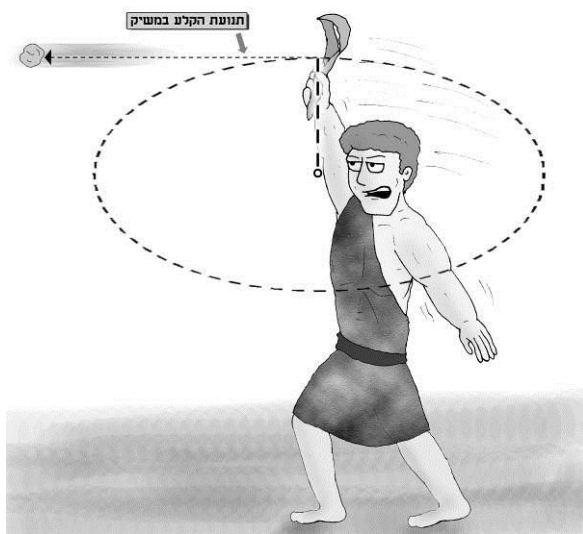


הדגמת התנועה בכיוון המשיק

עתה הגיע הזמן להכרעה ניסויית בין ההשערות השונות. בתנאים אידיאליים, כדאי מאוד לתת לתלמידים לעשות את הניסוי בצוותים. דוחק זמן עשוי להביא את המורה להדגמה. יש להקפיד שכל התלמידים יצפו בה היטב. כדאי לעשות חזרות כדי לבדוק שהכול עובד (לדוגמה: לוודא שהניסוי נעשה על שולחן אופקי). אם התלמידים עושים את הניסוי, יש להקפיד על שולחן אופקי, שימוש בדף נייר צמוד היטב לשולחן והצמדה טובה של המסלול לנייר. כמו כן יש להנחות את התלמידים להעניק מהירות משמעותית לגולה, כדי שגורמים משניים לא ישפיעו על התוצאות. התלמידים אמורים להשתכנע שמדובר בקו ישר בכיוון שבו הגולה יצאה מן המסילה ("כיוון המשיק").

האם אפשר "להרגיל" גוף למסלול מעגלי?

לכאורה התשובה ברורה: בניסוי האחרון ראינו כי עם השחרור מן הגליל המאלץ, הגוף עובר למסלול ישר ומאבד כל זכר למעגליות המסלול. מצד שני, ייתכן שלא השקענו די ב"חינוכו" של הגוף. האם ייתכן שאם נסובב את הגולה מספר רב של פעמים במסלול מעגלי, היא "תתרגל אליו" ותוסיף לנוע במסלול כזה גם לאחר השחרור?



יש הדגמה מקובלת של מערכת כזאת – אבן שנמצאת בכף הקלע. האבן מסובבת במסלול מעגלי באמצעות חוט (חֶבֶל). מסובבים את האבן במסלול מעגלי מספר רב של סיבובים עד שהיא מתנתקת מן החוט. כך אנו מדמיינים את האופן שבו שיגר דוד את חלוק האבן. ברור כי האבן לא המשיכה במסלול מעגלי, אלא חרגה ממנו.

עם זאת, המסלול אינו ישר, שהרי הארץ מושכת את האבן מטה. גם אם ננסה להתעלם מן התנועה האנכית, קשה להחליט אם יש מעבר מידי ממסלול מעגלי למסלול ישר. יתר על כן, זוהי הדגמה מסוכנת. הגוף הנקלע יכול לפגוע בתלמיד, חלון, מסך מחשב, גלית וכיוצא באלה.

ובכל זאת, גם ללא ניסוי וללא הדגמת מורה, אפשר להתבונן באיור, לדון בו, ולסכם מה אפשר ללמוד ממנו ומה לא³.

ובכל זאת, אנו זקוקים להדגמה אחרת שתהיה פטורה מן הבעיות האלה.

הערת בטיחות לקראת הדגמת מורה⁴



אנו עומדים בפני פעילות עם זיקוקי יום הולדת שמסתובבים. זיקוקי יום הולדת הוא מן הדברים השגרתיים (ימי הולדת...).

בכל זאת, יש לנקוט אמצעי בטיחות. ניסוי זה אמור להיעשות כהדגמת מורה.

המורה אמור לעמוד במרחק מן התלמידים. שימוש במשקפי מגן לתלמידים הצופים יהיה מעשה ראוי.

³ אפשר גם למצוא באינטרנט סרטי וידאו של ידווי פטיש (אתלטיקה), ולהקרין בכיתה, כגון:

<http://www.youtube.com/watch?v=rHMMgJBUWh8>

<http://www.youtube.com/watch?v=1dzdASQr01g>

⁴ משמאל מוצג הסמל של המוסד לבטיחות ולגיהות.

הדגמת הזיקוק המסתובב



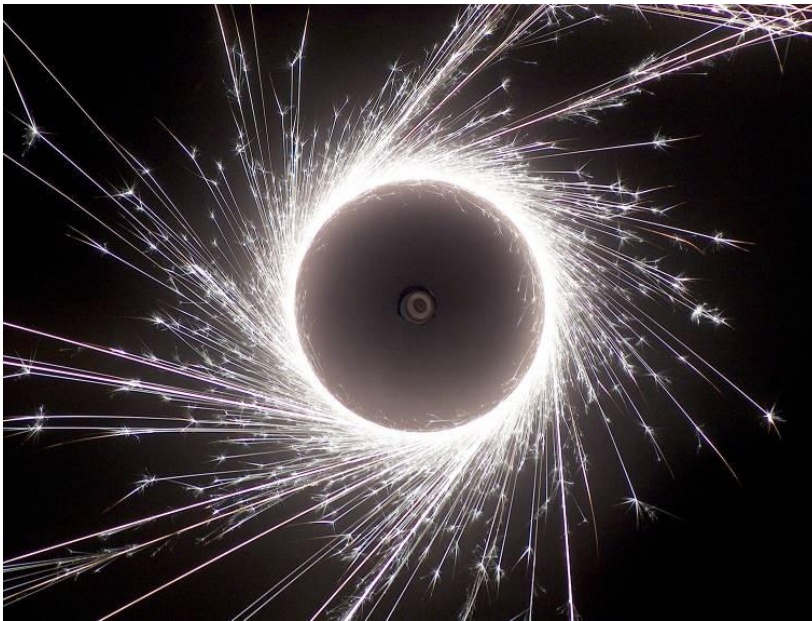
לזיקוקין די נור יש כוח עצום על בני אדם, קטנים כגדולים, תלמידים כמורים. גם השיעור הטוב ביותר יופרע על ידי זיקוקין. התלמידים המרותקים יינתקו חיש קל מן המורה המלהיבה ויעבירו את מבטם אל החלון. גם מי שראה זיקוקין מאה פעם, יחזור על תגובה זו בפעם המאה ואחת. במקום להתחרות בזיקוקין, נרתום אותם לצרכינו. ההדגמה שלפנינו עושה שימוש בזיקוק יום הולדת (Sparkler).

אנו מעוניינים לסובב במהירות זיקוק יום הולדת ולראות את הכיוון שבו יוצאים הגצים. בטרם נעשה זאת, נתבונן תחילה בתמונות של גצים שיוצאים מזיקוק שאינו נע.

הגצים יוצאים בקו ישר. הצמצם של המצלמה היה פתוח לזמן קצר וקלט את תנועת הגצים לאורך פרק זמן מסוים.

תמונה דומה תתקבל בראייה ישירה, מפני שהראייה האנושית משהה את התמונה לזמן מה.

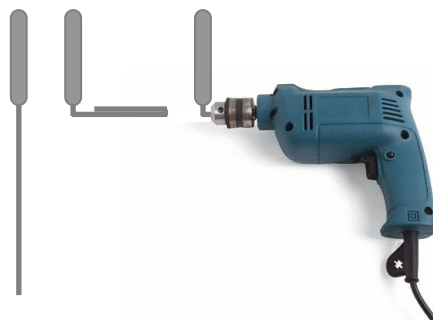
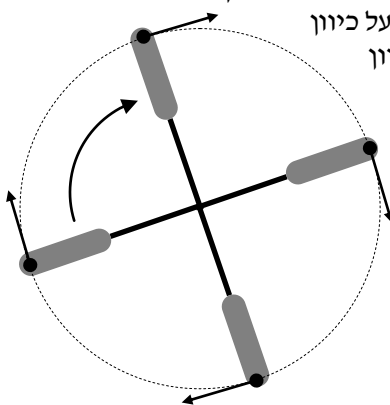
הדברים מותירים רושם, ובכל זאת אפשר לעשות שימוש מתוחכם יותר בזיקוק הזה. אם נצמיד את הזיקוק למקדחה, נוכל לסובב אותו. כאשר זיקוק דולק מסתובב, הגצים נפלטים בכיוון מוגדר מאוד – כיוון המשיק למעגל שבו הם נעו כאשר היו צמודים לזיקוק. (אין לשכוח את הוראות הבטיחות מן הסעיף הקודם. חשוב!)



צילום: יוני קלפולד ואלכס קזקוב, התיכון שליד האוניברסיטה, ירושלים.

זוהי תמונה מרהיבה, אך התצוגה הדינמית בכיתה מרהיבה ממנה. חשוב מזה, מניתוח תמונה זו אנו לומדים הרבה. נבחן את המתרחש. לפני שהגץ משתחרר מן הזיקוק, הוא חלק מן הזיקוק, ולכן הוא נע במסלול מעגלי, המתואר באיור שלפנינו על ידי קו מקוטע. בציר יש

גם חצים, המתארים את כיוון תנועת הגץ, בנקודות שונות על המסלול המעגלי. כל החצים משיקים למעגל. ברגע ההינתקות של הגץ מן הזיקוק, הוא הופך להיות חופשי. מתברר כי גוף חופשי שומר על כיוון התנועה.⁵ איזה כיוון הוא משמר? את הכיוון שהיה לו ממש ברגע הניתוק, שהוא כיוון המשיק בנקודת הניתוק. הצילום תומך בכך. צילום זה כולל גצים רבים שנעים בכיוון המשיק, ומכאן עולה תמיכה חזקה בטענה שגוף נע בקו ישר בהיעדר השפעות חיצוניות. זהו חלק מהותי מ"חוק ההתמדה", המתייחס לכיוון התנועה (חלק נוסף מתייחס למהירות, ובו נדון בהמשך).



הערה טכנית

כיצד מחברים את הזיקוק אל המקדחה? יש לקפל את הזיקוק כמתואר בציר, להכניסו אל פי המקדחה ולהדק.

⁵ מדוע איננו מזהים את השפעת הכובד? זה מפני שהגצים כבים לאחר זמן קצר מאוד. בזמן זה כוח הכובד אינו מפסיק להשפיע באופן ניכר לעין. עם זאת, בגלל המהירות הגדולה, הגצים מספיקים לעבור באותו זמן קצר מרחק ניכר לעין. מי שמעוניין לסלק לגמרי את שאלת הכובד יסובב את הזיקוק במישור אופקי ויצלם אותו מלמעלה.

האם יש התמדה בתנועה מעגלית?

מתברר כי הגץ "זוכר ושומר" את היותו בתנועה לפני ההינתקות מן הסיבוב, והוא ממשיך בכיוון התנועה שהייתה לו ברגע הניתוק. לעומת זה, הגץ "אינו זוכר" ואינו משמר את היותו בתנועה מעגלית. אף על פי שקודם לניתוק הוא נע במסלול מעגלי במשך סיבובים רבים, עם רגע הניתוק נעלמת המעגליות כהרף עין, כאילו לא הייתה מעולם; כשם שהגולה בניסוי הקודם שמרה לגמרי את כיוון התנועה האחרון שלה, אך הפסיקה מיד לשמר את מעגליות התנועה. גוף חופשי אינו מתמיד בתנועה מעגלית, אלא בתנועה ישרה בלבד. חוק ההתמדה אינו קובע רק מה נשמר, אלא גם מה אינו נשמר.

על הקסם שבלימדה

הדגמת הזיקוק מקסימה אותנו. היא גם מסייעת בידינו להתגבר על כשל תפיסתי חריף בתחום ההתמדה. לעתים אפשר ללמד פיזיקה לא אינטואיטיבית ולהקסים בעת ובעונה אחת. אנו מקווים כי ההדגמה המרהיבה תיחרת על לב התלמידים. הצירוף של ניסוי היחלצות הגולה מן המסלול המעגלי והדגמת הזיקוק אמור לקדם אותנו בתחום זה ככל שהדבר אפשרי. עם זאת, ייתכן כי יהיו תלמידים שימשיכו להתווכח. לעתים אנשים אינם מוותרים בקלות על דעה קדומה שנקלעו אליה. לטובת אלה ולטובת שאר התלמידים, כדאי להציג צילום סטילס של ההדגמה.

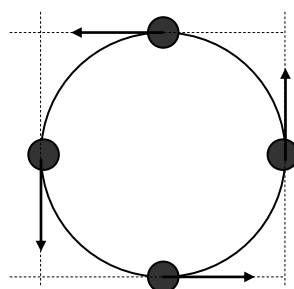
השוואה בין הניסויים

עד כה נחשפו התלמידים לשני ניסויים – ניסוי הגולה וניסוי הזיקוק. שני הניסויים אמורים, במשולב, להטות את לב התלמיד מן התפיסה השגויה. אין ספק שניסוי הזיקוק מרהיב יותר, אך גם ניסוי הגולה מותיר רושם עמוק.

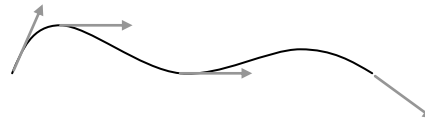
ניסוי הזיקוק מאפשר צפייה במסלול, הן בעת ההדגמה (בגלל השהיית התמונה על ידי מערכת הראייה) והן בתמונת הסטילס (בגלל פתיחת הצמצם לפרק זמן). כך קל יותר לוודא את המסלול הישר. ניסוי הזיקוק מציג עשרות קווים ישרים בתמונת סטילס אחת. גם אם יש ויכוח על מה שנראה בהדגמה, תמונת הסטילס משכנעת למדי.

ובכן, אין ספק שהגולה והגצים יוצאים מן המסלול המעגלי למסלולים ישרים, אך האם זהו מסלול משיק למעגל בנקודת ה"נטישה"? דומה שכך הדבר. האם אפשר לוודא זאת? במקרה של הגולה אפשר לבדוק את הדבר באמצעות סרגל. בהדגמת הזיקוק המסתובב קשה לראות היכן בדיוק ניתק הגץ, מפני שכל האזור מואר בגלל הזיקוק המסתובב.

ייתכן שתלמידים יטענו שמדובר בשני ניסויים שונים. הגולה הייתה עצם עצמאי מלכתחילה ונאלצה לנוע לאורך הקיר המעגלי הקבוע במקומו. הגצים היו חלק מן הזיקוק שהסתובב כולו. משני הניסויים מתברר כי הדבר אינו מעלה ואינו מוריד. גוף שניתק ממסלול מעגלי, מאבד מיד את עקמומיות המסלול וממשיך במסלול ישר, המשיק למעגל בנקודת הניתוק.



עניין המשיק מחייב הבהרה. כאשר גוף נע במסלול עקום, כיוון התנועה הוא זה "שאליו פניו מועדות", כלומר: כיוון המשיק. לכל אורך מסלול עקום, מעגלי או אחר, כיוון התנועה בכל נקודה הוא כיוון המשיק. בנקודת היציאה מן המסלול, כיוון המשיק הוא כיוון התנועה בנקודה האחרונה של המסלול העקום. מתברר כי זהו כיוון התנועה שאתו נותר הגוף לאחר מכן, לאורך זמן, אם אין גורם חיצוני שיטֵה אותו מן המסלול זה.



אין הכוונה להיכנס בשלב זה להגדרת המשיק, אלא להסביר דברים ברמה תיאורית בלבד. יש להתחשב בכך שיייתכן שתלמידים בכיתה זו עדיין אינם יודעים מהו משיק, ויש להקדיש כמה דקות להסבר על המשיק למעגל במקרה כזה, גם אם איננו מגדירים אותו באופן מלא.

חלק ב: התמדה בגודל המהירות

כיצד מתפתחת המהירות?

עד עתה עסקנו בשאלת הכיוון. הגענו למסקנה כי גוף חופשי נע בקו ישר, וכיוון תנועתו הוא זה שהיה לו ברגע ההשתחררות מן הגורמים החיצוניים. עדיין עומדת בפנינו שאלה נוספת: כיצד תתפתח מהירות הגוף בהמשך תנועתו? ניסיון החיים שלנו הוא שגופים נעצרים, במוקדם או במאוחר. לעתים הסיבה לעצירה ברורה – אנו מזהים גורם חיצוני מעכב. השאלה היא מה יתרחש אם אין גורמים מעכבים. קשה לבדוק את הדבר, מפני שהמציאות שבה אנו נתונים מלאה בגורמים חיצוניים משפיעים. כוח הכובד, חיכוך עם הרצפה והתנגדות האוויר הם דוגמאות לגורמים שמשפיעים על התנועה. קשה לסלק את הגורמים האלה. עומדת בפנינו, אפוא, משימה לא פשוטה.

גם אם נפתור את הבעיות האלה, לא נוכל להשיב על השאלה "כיצד משתנה המהירות?" אם לא תהיה בידינו דרך טובה למדוד את המהירות. לכאורה העניין פשוט – סרגל ושעון עצר יעשו מלאכה טובה, וכך גם נעשה בהמשך. ואולם בשלב זה, אי הדיוק הכרוך במדידה ידנית, לצד הבעיות שהוזכרו קודם, שולח אותנו לאמצעי מדידה אחרים, לפי שעה.



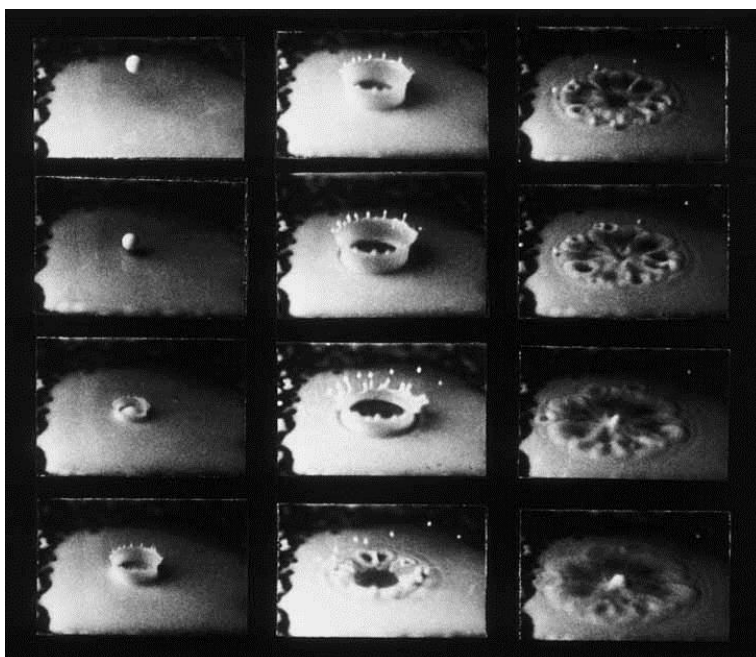
© 2010 MIT. Courtesy of MIT

טכניקות מודרניות עשויות לסייע. לדוגמה – צילום וידאו מהיר, אם אפשר דיגיטלי, יאפשר לנו מעקב מדויק למדי. ואולם, הדבר מחייב אותנו לאמצעים שעשויים להיות יקרים מדי לשיעור בבית הספר, גם אם הם זמינים ורווחים בבתיהם של רבים מן התלמידים.

לפתיחת הדיון נשתמש בתצלומי הבזק, דוגמת זה שלפנינו. אנו רואים את הכדור בסדרת מקומות שנבדלים זה מזה במרווחי זמן קבועים. ברור לנו כי במקום שבו תמונות הכדורים סמוכות זו לזו, המהירות קטנה יותר מאשר באזורים אחרים. מרווח כפול מעיד על מהירות כפולה. התלמידים יקבלו תצלומי הבזק, שכבר צולמו על ידי אחרים, וינתחו אותם.

תצלומי הבזק של Edgerton

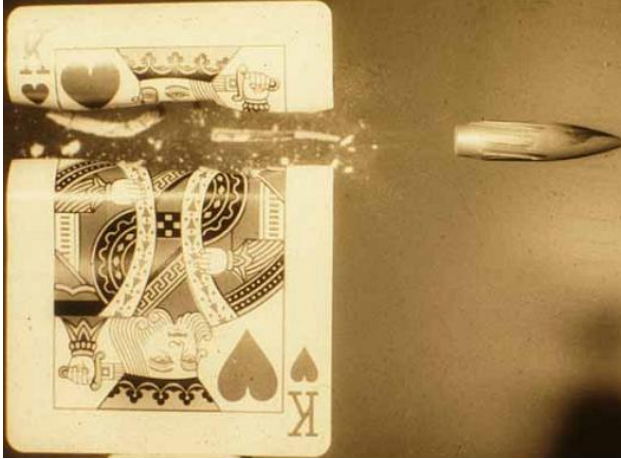
הרולד אג'רטון פיתח בשנות השלושים של המאה הקודמת את תצלומי הבזק. המצלמה נמצאת עם צמצם פתוח בחדר חשוך. הבזק אור רב-עצמה מאיר את המערכת למשך שבריר שנייה. כתוצאה מכך מתקבלת על סרט הצילום תמונה מוקפאת של אותו שבריר שנייה. כמה מן התצלומים של אג'רטון זכו לתהילה, דוגמת נפילת טיפות החלב.



© 2010 MIT. Courtesy of MIT Museum

למטה משמאל יש תמונה מפורסמת נוספת.

אם מאירים את המערכת בסדרת הבזקים, במרווחי זמן קבועים, אפשר לקבל מעקב אחר תנועה בתוך תמונה אחת, כמו בדוגמה שבה אדם מניע את ידיו.



© 2010 MIT. Courtesy of MIT Museum



מערך הפעילויות בחלק ב

בחלק זה של היחידה התלמידים מנתחים תצלומי הבזק. ייערך דיון בשישה תצלומים. חמישה מהם מלווים בדפי חקר. דפי החקר מלווים במדריכים נרחבים למורה. הטבלה שלפנינו אמורה לסייע למורה להתמצא ולתכנן.

דרגת החיוב	אופי הפעילות	התצלום
חובה ברובו – עבודה בצוותים בכיתה	חקר מונחה	שיגור של כדור גולף
חובה (דיון קצר)	דיון כיתתי	נפילה חופשית
מומלץ מאוד כעבודת בית עם דיון כיתתי קצר בשיעור הבא	חקר מונחה	כדור מקפץ
חובה – עבודה בצוותים בכיתה	חקר מונחה	חבטת הגשה מקצועית בטניס
רשות – עבודת בית – חקר פתוח לחלוטין	חקר פתוח	חבטת טניס נוספת
חקר נוסף לתלמידים מעוניינים	חקר מונחה חלקית	חבטת בייסבול

שיגור של כדור גולף

דף החקר הראשון מכניס את התלמיד לסגנון העבודה ומציג את ההתמדה בגודל המהירות. **שלושת סעיפיו הראשונים הם חובה**. כדאי גם להתמודד עם הסעיף הרביעי. הסעיפים האחרונים מיועדים לתלמידים שמסוגלים להתקדם מהר בחקר ומוכנים לאתגרים נוספים. בעקבות הפעולה יש מדריך מפורט למורה.

דף חקר – שיגור של כדור גולף

התצלום שלפנינו נעשה ב-1951 על ידי הרולד אגרטון בקצב של 1000 הבזקים בשנייה. מתברר כי כדור הגולף משוגר עם תנועה סיבובית.

מקור: <http://webmuseum.mit.edu/browser.php?m=objects&kv=88821&i=54131>



© 2010 MIT. Courtesy of MIT Museum

בדף נפרד מצורף תצלום מוגדל כדי שתוכלו למדוד היטב.

(א) עד כמה שאפשר ללמוד מתצלום זה, וללא כל ידע מוקדם אחר, האם הכדור נע בקו ישר?

(ב) יש לפנינו שבעה תצלומים של הכדור, שצולמו במרווחי זמן שווים. רק שישה מהם נעשו לאחר שהכדור נפרד מן המחבט. כיצד יודעים זאת?

(ג) האם מהירות הכדור בחמשת מרווחי הזמן האחרונים גדלה, קטנה או קבועה? יש לקבוע זאת במדידה (ולא על סמך ידע מוקדם). הסבירו היטב כיצד אפשר לדעת משהו על המהירויות באמצעות סרגל בלבד.

(ד) פי כמה מהיר הכדור מן המחבט (לאחר הפגיעה)? הסבירו כיצד אפשר להעריך זאת, מדדו וחשבו.

(ה) איזה נתון נוסף עשוי לסייע בקביעת מהירות הכדור? נסו למצוא נתון זה (לפחות באופן מקורב) ולהעריך את מהירות הכדור.

(ו) **אתגר**: מתברר כי הכדור מסתובב (על צירו) תוך כדי תנועה. כעבור כמה זמן משלים הכדור סיבוב מלא? האם ייתכנו כמה תשובות לשאלה זו?

(ז) **אתגר**: קבעו את קצב הסיבוב (מספר הסיבובים לשנייה) של הכדור והסבירו זאת.



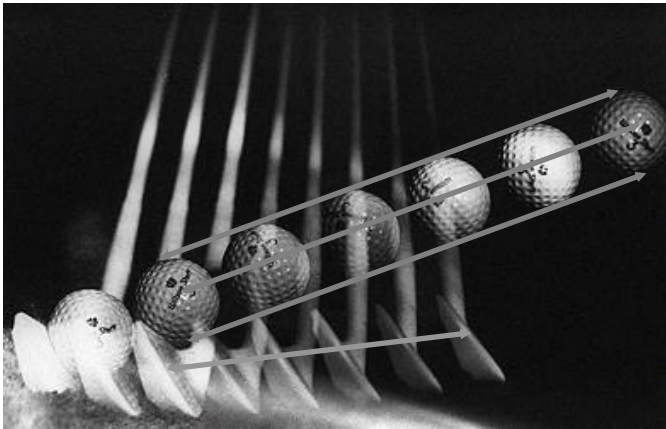
© 2010 MIT. Courtesy of MIT Museum

לסיום: שימו לב כיצד נראה הכדור ברגע החבטה, כפי שהדברים מתקבלים מתצלום הבזק.



© 2010 MIT. Courtesy of MIT Museum

שיגור של כדור גולף – הערות למורה



(א) הקווים שסומנו על התצלום מורים כי המסלול ישר. התלמידים יוכלו לעשות זאת באמצעות סרגל. כדאי לתת לכל תלמיד תצלום מוגדל כדי שיעשה זאת בעצמו, אף על פי שהתלמידים עובדים בקבוצות.

(ב) הכדור הראשון נמצא במגע עם המחבט, ואפילו נראה פחוס במקצת בנקודת המגע.

(ג) שימוש בסרגל יראה כי המרחקים קבועים, ולכן המהירות קבועה.

מתברר שאפשר לדעת כי המהירות

אינה משתנה מתוך מדידת מרחק בלבד, מפני שידוע לנו כי מרווחי הזמן קבועים.

קושי אחר שמתעורר אצל תלמידים הוא במדידת שיעור ההתקדמות של הכדור בין שתי חשיפות. במקום למדוד את המרחק בין נקודות מתאימות בשני הכדורים (לדוגמה, המרחק בין שתי הנקודות הימניות של כל אחד מן הכדורים בשתי החשיפות), הם מודדים את הרווח בין הכדורים (המרחק בין הקצה הימני של כדור לקצה השמאלי של הכדור שמימינו). כאן נדרשת התערבות של המורה, במהלך העבודה או בדיון כיתתי מוקדם.

המסקנה העולה משני הסעיפים הראשונים היא כי התצלום מעיד על תנועה בקו ישר ובמהירות קבועה. התלמידים עשויים להתנגד לכך, כי הם יודעים, מתוך ידע מוקדם, שבסופו של דבר הכדור יאבד גובה ויפגע בקרקע בגלל כוח הכובד. ואולם, חשוב להדגיש שאנו שופטים על פי התצלום בלבד, ללא ידע מוקדם, וברמת הדיוק של המדידה אי אפשר עדיין לראות סטייה מתנועה בקו ישר ובמהירות קבועה. מדוע אין רואים את השפעת הכובד? מפני שבפרק הזמן הקצר הזה ההשפעה המצטברת של כוח הכובד עדיין אינה ניכרת. הרי זה כאילו ערכנו ניסוי במעבדה שבה אין מתקיימת השפעת הכובד. במובן זה הגוף שלפנינו נראה כגוף חופשי לחלוטין, ואנו לומדים כי בפרק הזמן הזה התנועה היא בקו ישר, כפי שכבר למדנו מניסויים קודמים. עוד אנו לומדים כי בפרק הזמן הזה קשה להבחין בשינויים במהירות. התלמיד עשוי לטעון, בצדק, שזהו פרק זמן קצר מכדי שאפשר יהיה לסמוך עליו לצורך הכללות. ובכל זאת, כבר ראינו שיש דברים שמשתנים כהרף עין – גוף מאבד את עקמומיות מסלולו כהרף עין, אך לא את מהירותו. האם הוא משמר אותה גם לטווחי זמן ארוכים? לשאלה זו נשוב בהמשך. לפי שעה מתחילה להסתמן תשובה לשאלתנו.

בכך הפקנו מן הצילום הזה את מטרטנו העיקרית – ההבנה כי ייתכן שמהירותו של גוף חופשי לחלוטין אינה משתנה. עם זאת, תצלום זה מזמן לנו אתגרים נוספים, שחבל לוותר עליהם. אין שום חובה לעשות זאת בשלב הזה, אפשר לדחות את סעיפי הפעילות הנוספים להזדמנות אחרת, ואולי אף רצוי. אנו משאירים למורה את ההחלטה היכן ומתי לשלב את הסעיפים האחרים, בהתאם למהלך השיעור ולקשיי התלמידים. הסעיפים הנוספים עשויים לשמש תלמידים חזקים, שסיימו את הדיון בסעיפים הקודמים מוקדם מן האחרים.

מכל מקום, אנו נסקור כאן את התשובות לסעיפים הבאים.

(ד) נמדוד את המרחק שעובר הכדור, לאחר שהוא נפרד מן המחבט (במשך חמישה מרווחי הבוק), ואת המרחק שעבר המחבט במשך אותו זמן.

מתברר כי במשך הזמן הזה הכדור עבר מרחק גדול בכ-60% מן המרחק שעבר המחבט, ולכן מהירותו גדולה בכ-60% ממהירות המחבט.

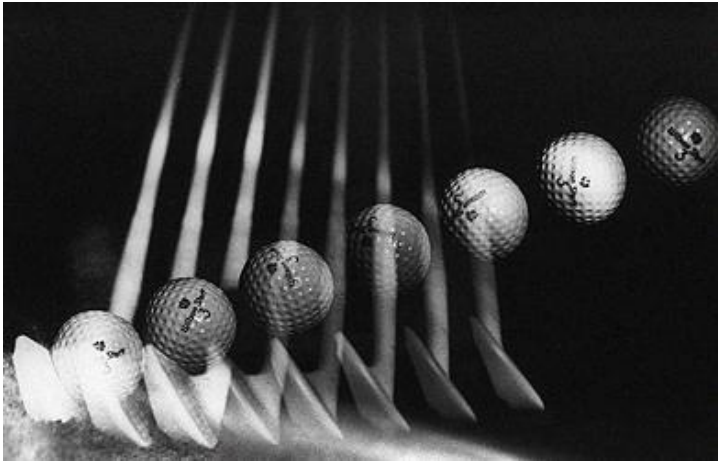
הצלחנו להשיב על השאלה עם סרגל בלבד. מתברר כי תלמידים רבים מסוגלים לעשות זאת, גם אם אינם יודעים להסביר היטב מדוע הדבר אפשרי.

(ה) איננו יודעים את קנה המידה של התצלום. אם היה נתון לנו גודלו של אחד העצמים שבתמונה, היינו יכולים למצוא את קנה המידה. גם בהעדר נתון כזה אפשר להשלימו; מדובר בכדור גולף שיש לו תקן שקל לבררו באינטרנט, שם מוצאים כי התקן לכדור גולף הוא "לא פחות מ-42.67 מ"מ". אפשר להותיר את

משימת החיפוש בידי התלמידים. לאחר שמוצאים קנה מידה (לפחות בקירוב), אפשר להעריך את מהירות הכדור. ידוע כי כדורי גולף מהירים נעים כדי 70 מטרים לשנייה.

מתברר כי משימה זו, של שימוש בקנה מידה, קשה לחלק מן התלמידים. עניין זה אינו עיקר מטרתנו בפעילות זו, אך הוא חשוב כשלעצמו.

סעיף זה והבא בעקבותיו מעניינים, אך נמצאים בעדיפות נמוכה בשלב זה, מפני שאינם קשורים למהלך העיקרי של היחידה, והם עלולים לבלבל תלמידים מתקשים. (ו)



כדי לבחון את קצב הסיבוב צויר סימון מיוחד על הכדור.

מתברר כי הכדור מסתובב בשיעור של 45° (מעט יותר מזה) נגד מחוגי השעון, בין הבזק להבזק. סיבוב מלא נמשך מעט פחות משמונה הבזקים, כלומר מעט פחות מ-0.008 שנייה.

מחד יש תלמידים שמתקשים להתמודד עם המשימה ללא רמז, מאידך יש תלמידים שטוענים כי יש יותר מפתרון אחד, ואפילו אין-סוף פתרונות לשאלה. ייתכן שהכדור אינו מסתובב שמינית

סיבוב בין חשיפה לחשיפה, אלא סיבוב ושמינית הסיבוב, או שני סיבובים ושמינית הסיבוב, וכן הלאה. תלמידים כאלה ראויים למחמאה, ולהגדרה מחודשת של המשימה: למצוא את זמן הסיבוב האפשרי הממושך ביותר (זה שחישבנו למעלה).

בכל שנייה מתרחשים 125 (1000/8) סיבובים לשנייה (זהו הפתרון האפשרי הממושך ביותר). (ז)

לכאורה תשובה פשוטה, אך מתברר כי תלמידים רבים מתקשים ונוזקים לסיוע של המורה.

לסיכום הפעילות ראוי לזכור כי מטרתנו העיקרית היא שלושת הסעיפים הראשונים, שבהם מסתמן כי גוף חופשי לחלוטין נע בקו ישר במהירות קבועה.

הנה תצלום גולף נוסף של אגרטון שמדגים התמדה.



© 2010 MIT. Courtesy of MIT

נפילה "חופשית"



© 2010 MIT. Courtesy of MIT Museum

<http://webmuseum.mit.edu/browser.php?m=objects&kv=96496&i=75500>

נתבונן בתצלום הבזק שבו נראה תפוח נופל חופשית. ברור כי מרווחי המרחק אינם קבועים, אלא הולכים וגדלים. זו אינה מהירות קבועה. בתחילת הדרך תמונות התפוחים חופפות חלקית זו את זו, ומתקבל מעין תפוח מוארך.

זו אינה התמונה הצפויה מגוף חופשי לחלוטין, ואכן, הגוף אינו חופשי לחלוטין, אלא נמשך כלפי מטה. **נפילה חופשית אינה, אפוא, תנועה חופשית לחלוטין, אלא תנועה בהשפעת הכובד בלבד.** כזכור, ראינו כי בתנועה חופשית לחלוטין המרווחים בין חשיפות עוקבות שווים זה לזה.

חדי העין ישימו לב כי יש סדר במרווחים. הם הולכים וגדלים, ודומה כי הגידול נעשה בקצב קבוע. אפשר לבדוק זאת באמצעות סרגל, אך נדחה זאת בינתיים, מפני שענייננו, לפי שעה, הוא בגופים חופשיים לחלוטין, ולא באלה שנופלים "חופשית" אך אינם חופשיים לחלוטין.

ובכל זאת, משהו מתחיל להסתמן כאן. גופים חופשיים לחלוטין נעים במהירות קבועה. שינויים במהירות הם תוצאה של השפעה חיצונית. את המסר הזה אנו מבקשים לאשש בפעילויות הבאות.

נפילה "חופשית" בשני ממדים

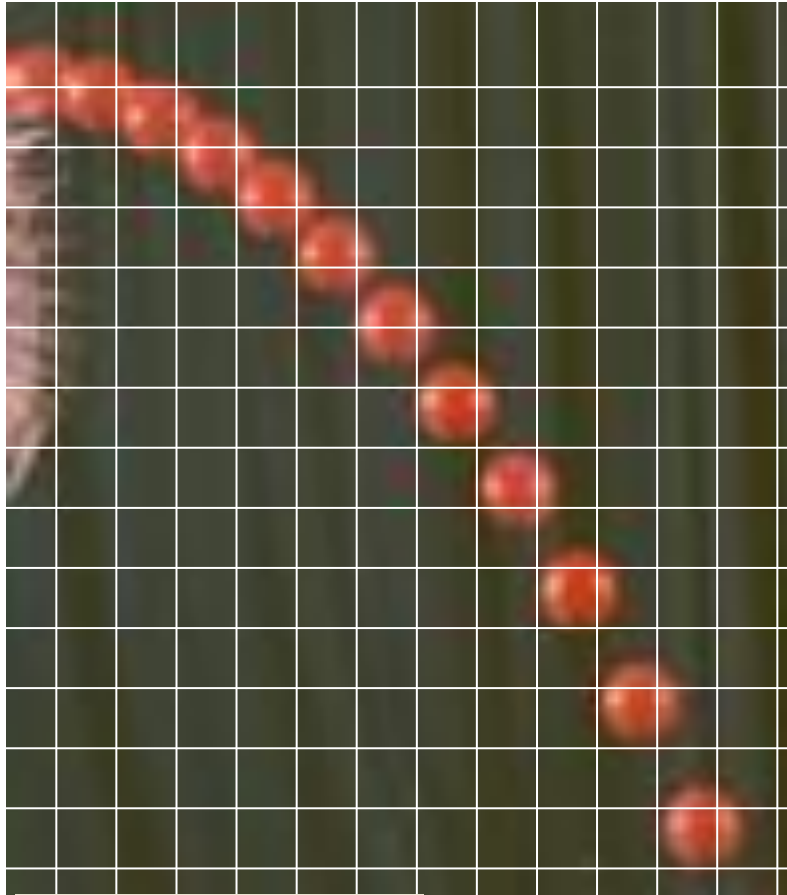
מה קורה כאשר הכדור נורק עם מהירות אופקית? הפעם הנפילה היא דו-ממדית. המשיכה של הארץ פועלת מטה, אך לא הצדה. האם התנועה הצדה היא במהירות קבועה? זוהי שאלה מעניינת שכדאי לדון בה. היא נמצאת מעט למעלה מן הדיון הבסיסי שלנו בהתמדה, אך בהחלט אפשר לדון בה בכיתות רבות. בגלל קוצר הזמן בכיתה יהיה קשה לשלב פעילות של התלמידים בעניין זה. אפשרות מומלצת היא לתת לתלמידים דף חקר ("כדור מקפץ" בעמוד הבא) שיעבדו עליו (אפשר ממסך המחשב) בבית ולערוך דיון קצר בשיעור הבא. אנא, עיינו בדף החקר ובהערות למורה שבעקבותיו. אגב, מן התמונה שלמטה אפשר להבין כי הכדור נע מימין לשמאל ולא מצד שמאל. אף על פי כן, לצורך פישוט העניין, לא נציג זאת בפעילות.



© 2010 MIT. Courtesy of MIT Museum

דף חקר – כדור מקפץ

לפנינו חלק מתצלום של אגרטון מ-1951, שעוקב אחרי תנועתו של כדור גולף שמקפץ ומתקדם ימינה.



© 2010 MIT. Courtesy of MIT Museum

הוספנו לצילום רשת קואורדינטות.

מקור: <http://webmuseum.mit.edu/browser.php?m=objects&kv=99683&i=79402>

(א) היכן הכדור מהיר יותר, בנקודת השיא של המסלול או בקרבת הקרקע? התשובה אמורה להיות מבוססת על התצלום בלבד ולא על ידע מוקדם. נמקו את תשובתכם.

(ב) עתה נתבונן בתנועה רק מנקודת ראות אופקית, עם התעלמות מן התנועה האנכית. האם התנועה האופקית היא במהירות גדלה והולכת? במהירות קטנה והולכת? במהירות קבועה? נמקו את תשובתכם.

(ג) עתה נתבונן בתנועה רק מנקודת ראות אנכית, עם התעלמות מן התנועה האופקית. האם התנועה האנכית היא במהירות קטנה והולכת? במהירות גדלה והולכת? במהירות קבועה?

(ד) כידוע, כוח הכובד מושך מטה. נסו לנסח הכללה שתקשור בין זה לבין מה שמצאתם בשני הסעיפים הקודמים.



© 2010 MIT. Courtesy of MIT Museum

כדור מקפץ – הערות למורה

(א) בתצלום יש סדרה של כדורים שמתארים את מקומו של הגוף בהפרשי זמן קבועים. מכאן שהמרחק בין שתי תמונות עוקבות של הכדור תלוי במהירות הכדור. מרחק גדול יותר משקף מהירות גדולה יותר. מרחק כפול משקף מהירות כפולה. מרחק משולש משקף מהירות משולשת. בחלקים הסמוכים לקרקע המרחקים בין "כדורים עוקבים" גדולים יותר מאשר בנקודות שיא הגובה של המסלול. מן התמונה ברור כי הכדור מאט עם עלייתו ומאיץ בירידה. איננו יודעים מה גודל המהירות, אך אנו יכולים לומר מתי היא גדלה ומתי היא קטנה. לא נוכל לומר מה הן המהירויות, אך נוכל למדוד יחסי מהירויות, על ידי מדידת יחסי מרחקים.

(ב) הרשת מסייעת לנו להסיק כי ההתקדמות האופקית נעשית במידה רבה בקצב קבוע, בכל חשיפה מתקדם הכדור ימינה משבצת אחת.

(ג) ההתקדמות האנכית הולכת וגדלה מחשיפה לחשיפה. אין צורך ברשת כדי לראות זאת. הרשת מסייעת לנו לראות זאת כמותית. המהירות של התנועה האנכית גדלה והולכת בירידה.

(ד) כאשר התנועה היא בכיוון כוח הכובד (ירידה), המשיכה מגדילה את המהירות. בכיוון האופקי אין פועלת משיכה, ולכן המהירות אינה גדלה ואינה קטנה, אלא נשארת קבועה.

המסקנה האחרונה היא רבת חשיבות. מתברר כי אפשר לזהות תנועת התמדה גם במצבים שבהם יש השפעות חיצוניות על התנועה. לדוגמה, **כאשר פועלת משיכה מטה, יש התמדה בכיוון אופקי, ואפשר לזהות אותה לאורך זמן.** מעתה, התמדה אינה עניין לחלקיקי שנייה בלבד.

מכאן יש להוליד את הדיון לשאלה מדוע לא ידענו זאת קודם. מתברר כי חיכוכים למיניהם מפריעים לנו. אם גוף נע על הקרקע, הוא ייעצר לאחר זמן מה. אך אם הוא נע על משטח חלק (קרח, לדוגמה), התנועה תימשך הרבה יותר. **ככל שהמשטח חלק יותר, התנועה תימשך מרחק רב יותר, לאורך מרחק גדול יותר.**

נחזור ונבחן את מקומה של הפעילות הזו בשרשרת הפעילויות שלנו. השאלה הראשונה בענייני התנועה היא כיצד ינוע גוף חופשי. הכול יודעים לצטט את ניוטון ולטעון כי הגוף ינוע במהירות קבועה בקו ישר. לכאורה, התנועה בקו ישר צפויה. מדוע שהגוף יפנה ימינה ולא שמאלה, אם אין שום גורם משפיע? ואולם, השאלה פחות טריוויאלית ממה שנראה במבט ראשון. רוב האנשים מאמינים שאם הגוף נע במסלול מעגלי וניתק ממנו, הוא לא יעבור מיד למסלול ישר. ניוטון טוען שהדבר יתרחש מידית. בעניין החשוב הזה עסקו שתי הפעילויות הראשונות (הגולה והזיקוק).

עניין המהירות הקבועה מורכב אף הוא. רוב בני האדם משוכנעים שגופים ייעצרו בסופו של דבר. אנו מבקשים לשכנעם שאם היה אפשר לייצר מישור חלק לחלוטין, וארוך עד אין קץ, היינו רואים שלא כך פני הדברים. אך מי יכול לייצר תנאים שכאלה? יתר על כן, מדידת מהירות מחייבת מדידת זמן. הבדיקה אם המהירות קבועה מחייבת מדידת מרווחי זמן קצרים, שאינה פשוטה כלל ועיקר. זו הסיבה שפנינו לתצלומי ההבזק. תחילה בדקנו את המקרה שבו עוקבים אחרי גוף לזמן קצר שבו אין ניכרות השפעות הכובד והתנגדות האוויר, וראינו כי מתקבלים קו ישר ומהירות קבועה. אי-אפשר למשוך את התנאים האלה לאורך זמן, ולכן עברנו אל הכדור המקפץ. בין התנגשות אחת לשנייה אין חיכוך עם הקרקע (אמנם יש חיכוך עם האוויר, אך השפעתו זניחה). בדרך זו אנו יכולים לעקוב אחרי התנועה האופקית לאורך זמן ממושך יותר. עם זאת, אי-אפשר להימנע במקרה זה מן התנועה האנכית. ניצלנו את המצב הזה לטובתנו, שהרי יש כאן כמה סוגי תנועה במקביל (את רעיון ההפרדה לרכיבים יש לייחס לגלילאו). בכיוון האופקי יש תנועה חופשית ללא חיכוך. תצלומי ההבזק מראים כי זוהי מהירות קבועה. בכיוון האנכי יש תנועה עם כיוון הכוח (בירידה) וכנגדו (בעלייה). אנו רואים כי כוח מאיץ את הגוף כאשר הוא עם כיוון התנועה, ומאט את הגוף כאשר הוא פועל כנגד כיוון התנועה. היתרון שלנו על גלילאו הוא בכך שיכולנו להשתמש בדרכי הניתוח שלו כדי ללמוד מתצלומי הבזק מודרניים.

כדי לחזק את הדברים נתבונן בהמשך בתצלומי הבזק נוספים, ולאחר מכן ניישם את הדברים לתנועת הארץ ולחלליות, בעקבות גלילאו וניוטון.

חבטות בכדור טניס

שני דפי החקר הבאים (הראשון לכיתה והשני לבית) עוסקים בפענוח של תצלומי הבזק. התלמידים מנסים להבין את השתלשלות העניינים ואגב כך לומדים. כדאי להניח להם להתמודד בעצמם. התוצאות מעניינות.

דף חקר – חבטת הגשה מקצועית בטניס



© 2010 MIT. Courtesy of MIT Museum

מקור: <http://webmuseum.mit.edu/browser.php?m=objects&kv=96343&i=75210>

לפנינו תצלום נוסף של אגרטון. החובטת היא Gussie Moran, בתמונה מ-1952. לפני החבטה הכדור נזרק אל על, והמחבט פוגע בו כאשר הוא בדרכו מטה.

(א) זהו את עקבות הכדור לפני החבטה ולאחריה. נמקו.

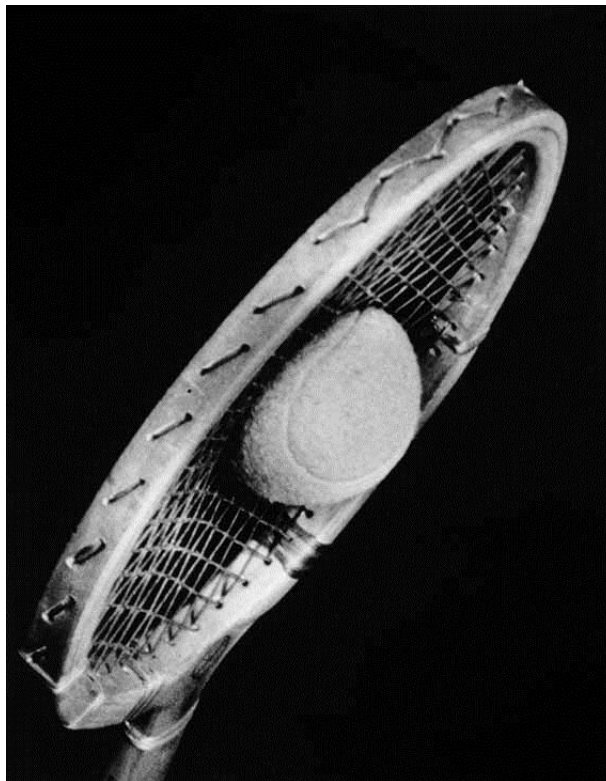
(ב) קבעו באמצעות התבוננות ובעזרת מדידות מרחק מדויקות - האם בכל אחד משני השלבים, לפני החבטה ולאחריה, מתנהג הכדור כגוף חופשי לחלוטין?

(ג) הסבירו את התוצאות שהתקבלו בסעיף הקודם.

(ד) האם גם המחבט מושפע מן ההתנגשות? אם כן, כיצד?

(ה) האם אפשר לזהות את הקטע שבו מהירות המחבט הייתה הגדולה ביותר? אם כן – היכן נמצא הקטע הזה?

לסיום: התבוננו בתמונת ההבזק שלמטה, שמלמדת אותנו עד כמה מתעוות הכדור בעת שהמחבט פוגע בו. אתם ודאי מבחינים כי גם הרשת של המחבט מתעוותת.



© 2010 MIT. Courtesy of MIT Museum

חבטת הגשה מקצועית בטניס – הערות למורה

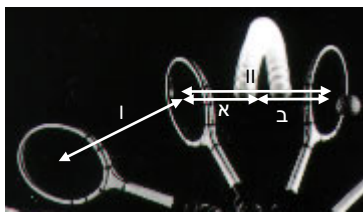
אם מצלמים את דף התלמיד, כדאי לוודא שרואים היטב את פרטי התנועה (במיוחד את הכדור אחרי החבטה).

(א) לפני החבטה הכדור עולה ויורד. סדרת החשיפות של הכדור צפופה מאוד, עד כדי חפיפה חלקית, אך אפשר לראות כי הכדורים צפופים יותר בחלק העליון. לאחר החבטה יש חמש חשיפות של הכדור, במרחקים קבועים, המעידים על מהירות גדולה.

(ב) סדרת החשיפות לפני החבטה מייצגת תמונה אופיינית של מהירות משתנה בהשפעת משיכת הכובד. סדרת החשיפות לאחר החבטה מייצגת תנועה בקו ישר במהירות קבועה, המתאימה לגוף חופשי.

(ג) מדוע יש תנועה בקו ישר, לאחר החבטה, למרות השפעת הכובד? במשך ארבעה מרווחי זמן, השפעת הכובד כמעט אינה ניכרת, וההתמדה נחשפת במלוא עוצמה.

(ד) מדידת מרחקים בין חשיפות עוקבות של המחבט (מרכז המחבט) מביאה אותנו למסקנה שמהירות המחבט קטנה משהו בעקבות החבטה. כאן אנו משתילים רמז ראשון לחוק השלישי של ניוטון. אי-אפשר שרק הכדור יגיב לחבטה. גם המחבט מגיב לה, במגמה הפוכה.



(ה) על תואר זה (הקטע המהיר ביותר) מתחרים שני קטעים - זה שלפני החבטה (I), וזה שבמהלכו נעשתה החבטה (II). כדי להשיג עוצמת חבטה מרבית, רצוי שהמהירות הגדולה ביותר תהיה ממש לפני ההתנגשות, ולכן המהירות גדלה לקראת ההתנגשות. הקטע שלפני ההתנגשות (I) מהיר מזה שלפניו. הקטע שבמהלכו אירעה ההתנגשות (II) מורכב משני חלקים - הראשון (א) הוא המהיר ביותר, לפני ההתנגשות, והשני (ב) פחות מהיר, בעקבות ההתנגשות. הקטע שלאחריו נמצא כולו לאחר ההתנגשות, והוא אטי יותר.

הערות דידיקטיות חשובות נוספות תמצאו בהערות למורה לאחר דף החקר הבא.



© 2010 MIT. Courtesy of MIT Museum

הערות על תצלומי הבזק

כיצד נעשה תצלום כזה? האירוע המצולם נעשה על רקע שחור. רק מה שאנו מעוניינים לראות אינו שחור. אתר הצילום חשוך לחלוטין. הצמצם של המצלמה פתוח במשך כל האירוע. כל זמן שאיננו מאירים את אתר הצילום, אין מתקבלת תמונה (היא נותרת שחורה). כדי לקבל תמונה חדשה של מערכת שמשתנה במהירות, יש להאיר את האתר במשך זמן קצר ככל האפשר. אם לא נעשה כך, נקבל תמונה "מרוחה". כדי לקבל תמונה חדה של כדור גולף ברגע החבטה היה צורך בהבזק אור שנמשך חצי מיקרו-שנייה. משך הזמן הקצר מחייב עצמה אדירה של אור.

צילום חבטת הטניס מצריך סדרה של הבזקים כאלה, במרווחי זמן קצובים. כאמור, עלינו לדאוג לכך שהכול יהיה שחור, חוץ ממה שאנו מעוניינים לעקוב אחריו. אגרטון היה מלביש את הספורטאים בקימונו שחור. הטניסאית שבתצלום שלנו הייתה מודעת מאוד לענייני אופנה. היא סירבה ללבוש קימונו שחור ונותרה בבגד הטניס הלבן שלה. הדבר משתקף היטב בתמונה.

בימוי של אירוע כזה אינו פשוט. הספורטאי אמור לפעול בחשכה. זה מחייב חזרות. תוכלו לצפות במשהו מזה בסרטון שתמצאו כאן: <http://edgerton-digital-collections.org/techniques/multiflash>. בהזדמנות זו כדאי לשוטט באתר כולו: <http://edgerton-digital-collections.org/>. יש כאן שפע של דברים להתענג עליהם. תמצאו כאן תמונות וסרטים נפלאים שתוכלו לשלבם בשיעורכם.

חבטת טניס נוספת

בעמוד הבא יש דף חקר נוסף. דוחק הזמן עלול למנוע מכם לממש את הפעילות הזאת בקבוצות דיון במהלך השיעור. עם זאת, זו עשויה להיות פעילות מצוינת לשיעורי בית שנעשים בקבוצות (אפילו וירטואליות או טלפונית), שבעקבותיהם יהיה דיון בכיתה בשיעור הבא. בדף חקר זה אין שאלות מפורטות. הפעם התלמידים אמורים להפיק ללא הדרכה את מרב המידע מן התמונה.

דף חקר – חבטת טניס נוספת



© 2010 MIT. Courtesy of MIT Museum

מקור : <http://webmuseum.mit.edu/browser.php?m=objects&kv=96344&i=75212>

החובט הוא Pancho Gonzales, בתמונה מ- 1949. הפעם החובט הואיל ללבוש חלוק שחור (מדוע זה חשוב?).

נתחו את התצלום. קבעו איזו מין חבטה יש כאן ומצאו את מרב המידע האפשרי. רשמו את השיקולים והמסקנות.

חבטת טניס נוספת – הערות למורה

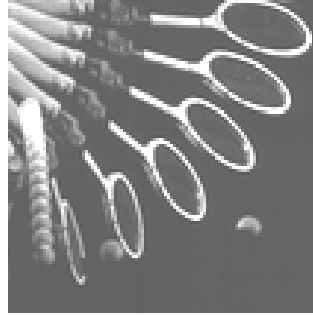
החובט לובש שחורים כדי להיבלע ברקע של התצלום. כך אנו עוקבים אחרי החלקים המעניינים – ידי החובט, המחבט, הכדור.

מלאכת הפענוח מתחילה בכדור שלפני החבטה. יש לנו סדרת חשיפות של הכדור, שבהן נראה כי הכדור נשמט מן היד וירד בתאוצה אל המחבט.



מכאן מתברר כי המחבט הגיע משמאל לימין ופגע בכדור במהלך נפילתו.

המחבט המשיך בדרכו מעלה, במעין מסלול מעגלי.



זוהי, אפוא, חבטת גב יד.

הכדור הנחבט ממשיך בדרכו. אנו רואים סדרה של שלוש חשיפות כאלה לאחר החבטה.



קל לראות כי שלוש החשיפות מונחות על קו ישר במרווחים קבועים.

אפשר לעסוק גם בהתפתחות המהירות של המחבט.

תלמידים חובבי טניס יתבקשו להסביר את חשיפות המחבט שבצדה השמאלי של התמונה (שאינן במסגרת מטרתה העיקרית של יחידת לימוד זו).

הערך הדידקטי של פענוח חבטות הטניס

לניתוח תמונות ההבזק של חבטות הטניס יש ערך כפול: מחד גיסא – הן פותחות צוהר לעקרונות העמוקים ביותר של התנועה; מאידך גיסא – הן מאפשרות לתלמידים להתדיין בפענוח המציאות. נתייחס בקצרה לשני ההיבטים.

מתוך התעמקות בתמונות הצלחנו לזהות תנועת התמדה. יתר על כן – ראינו כי הפעלת כוח מביאה לשינוי במהירות, וכי במקביל לשינוי במהירות של גוף אחד (כדור) מתרחש שינוי במגמה הפוכה במהירותו של הגוף השני (המחבט). זוהי הצצה לשלושת חוקי התנועה של ניוטון. אמנם מטרתנו הייתה צנועה – לעסוק בהתמדה (החוק הראשון), אך בהזדמנות זו הצצנו אל העתיד (כיתה ח). חוקי התנועה של ניוטון עומדים בדרך כלל בניגוד לאינטואיציה הראשונית של הלומד. העיסוק בפענוח התמונות שוחק את האינטואיציה הזאת. זה יקל עלינו להתמודד עם תפיסות שגויות בהמשך הדרך. בהדרגה אנו גורעים מעצמתן של התפיסות האלה.

בדף החקר "חבטת הגשה מקצועית בטניס" התלמידים נחשפים להיבטים המדעיים. ההמלצה היא לעשות את הפעילות בקבוצות דיון בכיתה, לפתוח את הפעילות בדיון כיתתי שמטרתו להבין את סדרת הכדורים הצפופה (לפני פגיעת המחבט) ולהותיר את ההמשך לעבודה בקבוצות.

דף החקר "חבטת הגשה מקצועית בטניס" מיועד לעבודת בית. זוהי פעילות פתוחה לחלוטין. כדאי שהיא תיעשה בצוותים. מתוך התנסות אנו יכולים להעיד כי דו-השיח (הדיאלוג) המתפתח בעת הפענוח הוא בעל ערך חינוכי שאין לו תחליף. תלמידים מעלים השערות, מנסים לשכנע זה את זה ומתכנסים להסכמה על הפענוח הנכון. הפעם אין הנחיות. התלמידים מתבקשים ללמוד כל דבר בעל ערך פיזיקלי משינוי ההבזק.

חבטת בייסבול

דף החקר הבא ("חבטת בייסבול") מיועד לעבודת בית לתלמידים שמעוניינים בפעילות נוספת מן הסוג הזה. פעילות זו מבקשת לקלוע לשתיה המטרות. בחלקה הראשון היא מונחית. בסיום התלמידים מוזמנים להמשיך בהסקת מסקנות נוספות, ללא הנחיה.

דף חקר – חבטת בייסבול



© 2010 MIT. Courtesy of MIT Museum

מקור : <http://webmuseum.mit.edu/browser.php?m=objects&kv=96489&i=75472>

הכדור מושלך לעבר האלה וניתז ממנה. צולם ב-1965 בקצב של 120 הבזקים בשנייה. ננתח את התצלום על פי ההנחיות הבאות:

(א) זהו את סדרת העקבות של האלה לפני ההתנגשות ולאחריה, ואת סדרת העקבות של הכדור לפני ההתנגשות ולאחריה. נמקו.

(ב) האם מהירות הכדור אחרי ההתנגשות היא קבועה (בתחום המעקב שלנו)?

(ג) האם מהירות הכדור לפני ההתנגשות היא קבועה (בתחום המעקב שלנו)?

(ד) מצאו, באמצעות מדידות, את היחס בין מהירות הכדור לפני החבטה לבין מהירותו לאחריה.

(ה) האם אפשר לתת הערכה, אפילו לא לגמרי מדויקת, למהירויות שבהן מדובר? ידוע כי הקוטר של כדור בייסבול ממוצע הוא כ-7.35 ס"מ.

(ו) האם יש לכם מסקנות מעניינות נוספות מניתוח תצלום ההבזק הזה?

חבטת בייסבול – הערות למורה

- (א) יש להניח שהמשימה תעורר ויכות. מצד אחד אנו מצפים שהכדור יצא מן החבטה כשהוא מהיר יותר, ומכאן שסדרת החשיפות התחוננה היא לאחר החבטה. מצד שני, אנו מצפים שהכדור ייחבט מעלה. ייתכן, כמובן, שאין מדובר כאן בחבטה מקצועית, שהרי החובט נעול בסנדלים וגורב גרביים לבנות. עדות שעשויה לסייע בהכרעה מתקבלת מספירה של החשיפות לפני החבטה. מתברר כי אפשר למצוא התאמה של תשע חשיפות מחבט אל מול תשע חשיפות כדור במסלול העליון לפני החבטה. לעתים חדות הפענוח גדולה מאשר למידת עקרונות פיזיקליים. יש תלמידים שהדבר ישמח אותם.
- (ב) באמצעות סרגל אפשר לראות כי מדובר במרווחים זהים למדי, **על קו ישר**.
- (ג) כני"ל.
- (ד) התלמידים אמורים להשתמש ביחס המרחקים כבסיס ליחס המהירויות. תשובה בסביבות 2.25 תיחשב לתשובה טובה.
- (ה) הכרת קוטר הכדור מכניסה לבעיה קנה מידה, ומאפשרת הערכה. בקירוב גס, קנה המידה של התמונה הוא 1:10. ממדידה בסרגל אנו למדים כי התקדמות הכדור בין שני הבזקים היא כ-22 ס"מ. כיוון שיש 120 הבזקים בשנייה, הרי שאם הכדור יתמיד במהירותו במשך שנייה, הוא יעבור $22 \times 120 = 2640$ ס"מ בשנייה, שהם 26.4 מטר בשנייה, שהם כ-90 ק"מ לשעה. מי שישנה את גודל התמונה יצטרך לערוך חישוב אחר.
- השימוש ביחידות ק"מ לשעה הובא כאן כדי להביא את התלמיד ליחידות מוכרות לצורכי הערכה והשוואה.

סיכום עד כאן : חוק ההתמדה

עד כה עברנו סדרה מגוונת של פעילויות והדגמות; היא מובילה אותנו למסקנה חשובה, שנתמכת על ידי עדויות רבות נוספות, ומהווה אבן פינה של חוקי הטבע:

בהעדר השפעות חיצוניות, גופים מתמידים בתנועתם.

כיוון תנועתם אינו משתנה, וכך גם גודל מהירותם. זהו חוק ההתמדה.

הדבר מפתיע את רוב האנשים. הייתכן? הרי הניסיון שלנו מראה לנו כי גופים שנעזבים לנפשם נעצרים במקדם או במאחר. כיצד הדברים מתיישבים?

מתברר כי אנו חיים בעולם צפוף שבו קשה מאוד להימלט מהשפעות חיצוניות. אנו נמשכים על ידי הארץ, נדחפים על ידי גופים אחרים, מואטים על ידי החיכוך עם הקרקע והאוויר, ועוד ועוד. המציאות המוכרת לנו אינה מעניקה לנו מעבדה פשוטה לבירור העניין. תצלומי ההבזק פתרו בעבורנו את הבעיה.

ההכרה בהתמדה הגיעה לכלל גיבוש של ממש במאה השבע-עשרה. **גלילאו גליליי** טען לקיומה. **רנה דקרט** העמיד אותה כחוק טבע ראשון. אייזיק ניוטון הציב את חוק ההתמדה כחוק יסוד – הלא הוא **החוק הראשון של ניוטון**, הראשון מתוך **שלושת חוקי התנועה** הידועים שלו.

מתברר כי גופים אינם זקוקים לתמיכה מתמדת כדי לנוע בקצב קבוע. אם לא יפעלו עליהם כוחות מאיצים, מעכבים, או מטים הצדה, הם ימשיכו לנוע בקו ישר לאורך זמן.

יש כאן דברים שמפתיעים את ההדיוטות. הם אינם מאמינים שגופים ימשיכו בתנועתם ללא הגבלה, גם אם אין מי שיעכב אותם, ולא היא. לעומת זה, הם מאמינים שגופים ימשיכו במסלול עקום, ושוב מתבדלים, כאשר מתברר כי **מיד** עם הפסקת הפעולה של הגורמים החיצוניים, גופים עוברים לתנועה ישרה.

מדוע איננו לומדים את הדברים בהתנסות היומיומית?

זוהי שאלה קשה עבור המורה. אנו שולחים את התלמידים אל הטבע כדי ללמוד אותו, ומתברר כי הטבע מסתיר מאתנו את חוקי היסוד. מי שניזון רק מהתנסות יומיומית, או מתצפית תמימה, לא יגלה את הדברים. ללא ערמה ותחכום הדברים אינם נחשפים. "שכל ישר" במונח התמים אינו מספיק. המערכת הטבעית היא מסובכת ועמוסה, וחשיפת העקרונות מצריכה תחכום ולימוד.

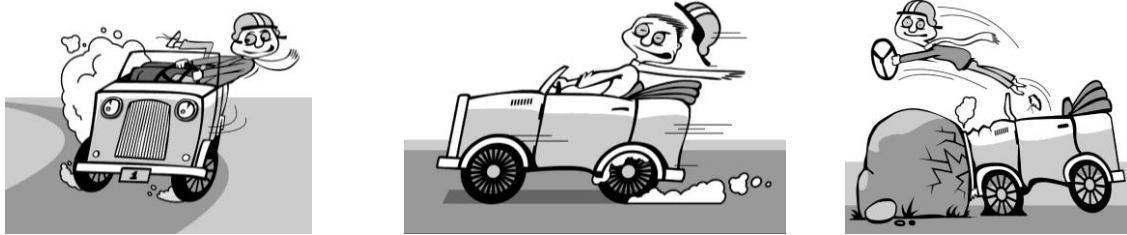
חלק ג: המחשות של התמדה

תופעות התמדה בנסיעה ברכב



התמרוך שבתמונה מספר לנו סיפור. לפנינו כביש משובש, שבו כלי הרכב (האופניים) עלול להיעצר בגלל מהמורה. "הנוסע המתמיד" ממשיך בתנועה במהירות קבועה, בתוקף חוק ההתמדה. לצורך זה עליו להיפרד מן האופניים. הנוסע יטען כי הועף קדימה, אך מנקודת ראותו של צופה שעומד בצד הדרך, הנוסע ממשיך במהירותו הקבועה, בעוד כלי הרכב הוא זה שהואט או נבלם.

חוויות מן הסוג הזה מזומנות לנו במכונית. כאשר יש בלימה חזקה (ציור ימני), הנוסעים מרגישים כאילו נזרקו קדימה. כדי למנוע מהם מלפגוש את הזכוכית, או המושב שלפניהם, עליהם לחגור חגורת בטיחות. ואולם, מנקודת ראותו של הצופה העומד בצד הדרך, המכונית היא זו שבלמה, וגוף האדם הוא המתמיד.



כך גם ברגע של האצה פתאומית (ציור אמצעי). נוסע שעומד באוטובוס ימצא עצמו "נזרק אחורה", אך הצופה בצד הדרך יראה את המכונית בתאוצה, ואת הנוסע דבק במהירותו הקודמת, הנמוכה יותר.

כאשר המכונית סוטה ימינה (ציור שמאלי), הנוסע חש שהוא נזרק שמאלה. הצופה מן הצד יאמר כי הנוסע התמיד בקו ישר, אך הדופן השמאלית של המכונית היא זו שהתקרבה אליו, בתנועתה ימינה.

מומלץ להדגים את כל המקרים האלה באמצעות תלמיד שיושב על כיסא משרדי עם גלגלים, כאשר רגליו אינן נוגעות ברצפה, ותלמיד אחר מסיע אותו ואז בולם בפתאומיות, מאיץ בפתאומיות נוסע הצדה, בולם בפתאומיות ומכוון אותו הצדה. המורה חייב להשיג כאן על בטיחות.

התמדה במנוחה

ראינו כי התמדה בתנועה עשויה להפתיע, בגלל תפיסה שגויה שגופים יתמידו במנוחה, ותנועה היא מצב זמני (בהעדר כוח מניע). הנה ההפתעה הבאה – לעתים דווקא התמדה במנוחה היא זו שמפתיעה אותנו. הנה דוגמה כזאת.

בדרך כלל משיכת המפה מביאה גם להפלת הכלים מן השולחן. אבל אם עושים זאת במיומנות ובוריזות הראויה, אפשר להדהים את הצופים. זהו מקרה שבו אנו מצפים שהכלים לא יישארו במצב מנוחה. החיכוך בין המפה לבין הכלים אמור לשאת את הכלים. סוד המשכה הנכונה הוא בכך שהדבר נעשה בעצמה ובמהירות גדולה. הכלים אינם נותרים צמודים לאותה נקודה במפה, בגלל העצמה הגדולה. הם נגררים מעט על ידי המפה, אך בשל הזמן הקצר של פעולת החיכוך, השפעתו כמעט אינה ניכרת. כדאי לעשות משהו מעין זה מול התלמידים, מבלי לקחת סיכון גדול.

זו הדגמה מוצלחת מאוד כאשר היא עובדת. מומלץ להשתמש במפה "חלקה" יחסית דוגמת מפה מסאטון, וכמובן כלי פלסטיק שאינם שבירים אך מספיק מסיביים. אפשר להניח כוס לשימוש חד-פעמי עם מעט מים על גיליון נייר (A4 לדוגמה), ולמשוך את הנייר במהירות. אנא בדקו היטב את ההדגמה הזאת לפני השיעור, כדי שלא תופתעו בשיעור. המלצה זו יפה לכל ניסוי והדגמה.

מטבעות, או דסקיות אחרות, עשויים להמחיש התמדה במנוחה. המטבע הנשלח אל עבר מגדל הדסקיות, עשוי להחליף את מקומו של המטבע התחתון, בעוד המגדל שמעליו נותר על מקומו. גם אם איננו מגיעים למיומנות גבוהה בתחום זה, אפשר להדגים את הדבר עם ערמה של שני מטבעות. אפשר לתת לתלמידים להתנסות בדבר.

אפשר להשתמש במסילה חלקה במיוחד שעליה מונחת עגלה (עם חיכוך מזערי). מסמנים את מיקום העגלה ביחס לשולחן, ואז מזיזים את המסילה קדימה או אחורה בכיוון המקביל למסילה. אפשר לראות כי העגלה תישאר באותו המיקום ביחס לשולחן, כאשר המסילה נעה מתחתיה.

סרטוני YouTube מספקים שפע של המחשות.



חלק ד: חשיבותה של התמדה

התמדה אינה קשה רק לתלמידים צעירים. התמדה הייתה קשה למדע בראשית דרכו. רק בתחילת המאה השבע-עשרה התחזק מעמדה של ההתמדה. זה נעשה ללא תמונות הבזק וללא מדידות ממוחשבות. המקדם החשוב ביותר של ההתמדה באותה העת היה גלילאו. הוא טען בשכנוע רב לטובת ההתמדה. לא נציג כאן את כל טיעוניו, אך משהו מהם אפשר להציג כאן, וכך נעשה. בהמשך נראה איזה שימוש עשה ניוטון בדברים.

לכאורה, התמדה אינה ניתנת לבחינה ניסויית. כיצד נצליח לבדוד גוף מהשפעות חיצוניות? כיצד נוכל לבדוק שבתנאים כאלה המהירות לא תקטן לעולם? זה מחייב ניסוי שנמשך לעולם! מה אם כן חשבו מלומדים בתחילת הדרך? היכן הם ראו את ההתמדה? כיצד הם תפסו אותה בתודעתם? ננסה להתייחס מעט לעניין זה.

התמדה על פי גלילאו

נציג עתה את הדרך שבה ביקש גלילאו לשכנע את קוראיו בחוק ההתמדה. הטיעון הוא כדלהלן: נתבונן בגוף שנע במורד מישור משופע, משמאל לימין. נניח כי המישור חלק לחלוטין, ואין שום גורם מעכב. ברור לנו, מן הניסיון היומיומי, שגוף כזה ירד תוך כדי שהוא מגדיל את מהירותו (המיוצגת באיור על ידי חצים גדלים והולכים). אם השיפוע יהיה קטן יותר, עדיין המהירות תגדל, אך בקצב אטי יותר. ככל שהשיפוע יהיה קטן יותר, כך המהירות תשתנה בקצב אטי יותר. אם השיפוע יקטן עד כדי היעלמות, והמישור יהיה אופקי, גם השינוי במהירות ייעלם, והיא לא תשתנה – הווה אומר, הגוף ינוע במהירות קבועה. **זוהי התמדה.**

כיוצא בזה הדברים אמורים לגבי עלייה במישור המשופע. גוף שנע במעלה מישור משופע מאט והולך. כך אנו יודעים ללא לימודי פיזיקה, ומסוגלים אפילו להסביר שהגוף מואט מפני שהוא נמשך מטה. ככל שהשיפוע קטן יותר, קצב ההאטה יקטן, עד שנגיע למצב שבו השיפוע יתאפס, המישור יהיה אופקי, ההאטה תתאפס, והגוף ימשיך במהירות קבועה. **זוהי התמדה.**

בהזדמנות זו כדאי להזכיר כי גם הדיון שעשינו בכדור המקפץ, שבו התבוננו בכיוון האופקי בפני עצמו ובכיוון האנכי בפני עצמו, לקוח מבית מדרשו של גלילאו. אלה הם התהליכים המחשבתיים שפרצו את הדרך למדע החדש בתחילת המאה השבע-עשרה.

ניסוי מחשבתי (Gedankenexperiment)

בטיעון שלמעלה, גלילאו אינו מזמין אותנו לעשות ניסוי. גלילאו מזמין אותנו לבירור. הוא מבקש מאתנו לומר מה לדעתנו יקרה בניסוי מסוים. אנו משיבים מתוך הניסיון היומיומי שלנו, ומתוך טיעונים לוגיים. גלילאו מבקש להראות לנו שגם באוצר הידע שלנו, ללא ניסוי נוסף, ההתמדה כבר קיימת, בלי ששמנו לב. הניסוי נערך במחשבתנו בלבד. זוהי טכניקת שכנוע, שמטרתה להוציא את המתנגדים ממחפורותיהם ולא לפץ אותם לשקול ברצינות את העמדה הנגדית. זוהי, אפוא, שיטה דידקטית ראויה למורים ולתלמידים, וראוי שנציג אותה לכל תלמידינו.

גלילאו – ניסוי מחשבתי – דף משימה

ההמלצה שלנו היא להציג את הטיעון של גלילאו, שהובא למעלה, בדיון שהמורה מוביל, אך משתף תלמידים בשאלותיו. כלומר: השיטה המומלצת היא דו-שיח (דיאלוג). בעצם, גלילאו כתב את דבריו בצורה של דו-שיח, בגלל כוח השכנוע הרב שיש לדו-שיח כאשר הוא נעשה במיטבו. עם זאת, אם מסיבה כלשהי המורה אינו מספיק לעשות זאת, הוא יכול להציע לתלמידים מתאימים ללמוד את הדברים באופן מונחה, באמצעות דף משימה (בעמוד הבא).

ניסוי מחשבתי – התמדה

בתחילת המאה השבע-עשרה ביקש גלילאו גליליי לשכנע את בני תקופתו בהתמדה באמצעות "הניסוי המחשבתי" הבא, שאותו נעבור בשלבים.

"ניסוי מחשבתי" איננו ניסוי חדש שאנו עורכים, אלא בירור שאנו עורכים עם עצמנו, שבו אנו משתמשים בהתנסויות קודמות שלנו ובטיעונים לוגיים, כדי להגיע למסקנות על המציאות. מהלך כזה עשוי להביא אותנו להבנה שבעצם יש בידנו כבר מספיק מידע כדי להסיק את חוקי הטבע.

(א) כאשר גוף נע במורד מישור משופע חלק לחלוטין, כיצד הוא ממשיך לנוע – האם הוא נע במהירות קבועה, או שמהירותו גדלה והולכת? השיבו לפי ניסיונכם היומיומי ולפי השכל הישר שלכם.

(ב) כיצד תשפיע על התנועה הזאת הקטנה בשיפוע של המישור?

(ג) אם השיפוע ילך ויקטן עד אשר בסופו של דבר המישור יהיה אופקי, האם במהלך התנועה על המישור האופקי הזה, המהירות תגדל? תקטן? לא תשתנה? תשובה אחרת?

(ד) נניח עתה כי הגוף נע במעלה מישור משופע (מישהו העניק לו תנועה בכיוון זה, והוא ממשיך לעלות, ללא עזרה). האם המשך התנועה בעלייה יהיה כרוך במהירות קבועה? בהקטנת המהירות? תשובה אחרת?

(ה) נניח עתה כי אנו מקטינים את השיפוע של המישור שעליו הגוף עולה, כיצד תשתנה תנועת הגוף?

(ו) נניח עתה כי אנו מקטינים את השיפוע עוד ועוד, עד אשר המישור נעשה אופקי, מה יקרה לתשובה שלנו מן הסעיף הקודם?

(ז) שני הניסויים המחשבתיים, בעלייה ובירידה, מובילים לתוצאה כללית אחת. מהי התוצאה? נסחו אותה. רשמו את הדברים במפורש.

גלילאו ותנועת הארץ

מי סובב את מי, הארץ את השמש או השמש את הארץ? במהלך ימי הביניים היה מקובל להניח שהארץ נחה והשמש נעה. ואולם, ניקולס קופרניקוס ניסה לשכנע שהתמונה ההפוכה עדיפה. הוא גם טען שהארץ סובבת על צירה, ומשלימה סיבוב בכל יממה. רבים התנגדו לכך, בטענות שונות. לדוגמה: היקף הארץ על קו המשווה הוא כ-40,000 ק"מ. אדם שעומד על קו המשווה אמור לנוע עם הארץ המסתובבת 40,000 ק"מ במשך 24 שעות. זוהי מהירות של $1667 = 40000/24$ ק"מ לשעה. זוהי מהירות עצומה! כיצד איננו מבחינים בכך?

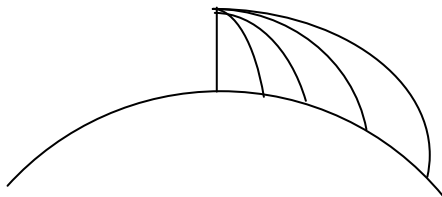
ייתכן שאנו נעים עם פני כדור הארץ מפני שאנו צמודים אליהם. ואולם, מה יקרה לחפץ שנשמט מידינו? החפץ הזה אינו צמוד לארץ. במשך מחצית השנייה שבה הוא נופל, אנו מתקדמים למעלה ממאתיים מטר, ומותירים אותו מרחק רב מאתנו! חווייה זו אינה מוכרת לנו. ואם דבר זה זר בעינינו, תנועת הארץ סביב השמש, שהיא מהירה בהרבה, תניב תמיהות גדולות פי כמה. מכאן, אמרו המבקרים, אין ספק שקופרניקוס טועה.

גלילאו טען כי אין כאן תמיהה. החפץ שעוזב את ידינו ממשיך גם בתנועתו האופקית, בתוקף ההתמדה שלו, בדיוק כפי שהכדור המקפץ ממשיך בתנועתו האופקית, לצד התנועה האנכית של הנפילה החופשית. אם ההתמדה תקפה, אין קושיה על קופרניקוס. הדיונים בכדור המנתר, והניסוי המחשבתי על המישורים המשופעים, הם מקורות בלתי תלויים לידע בדבר ההתמדה. בכך נסללה הדרך לקבלת תורת קופרניקוס.

ניוטון ותנועת לוויינים

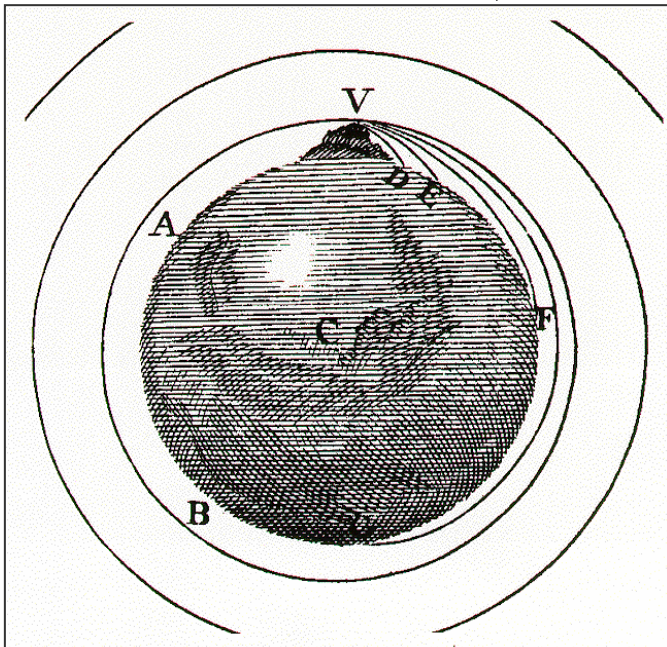


נחזור עתה אל הכדור המקפץ. נתבונן בקבוצת גופים שמושלכים מגובה מסוים. האחד מהם משוחרר ללא מהירות. האחרים מושלכים ימינה במהירויות שונות. ככל שמהירות



ההשלכה ימינה גדולה יותר, כך הכדור פוגע ברצפה רחוק יותר.

הדברים פשוטים. ואולם משהו מפתיע קורה כאשר מצליחים לשגר אופקית במהירויות כבירות. מתברר כי הגוף פוגע במרחקים כה גדולים, כך שאי-אפשר יותר להניח שהארץ שטוחה, ויש להתחשב בכדוריותה.



מתוך ספרו של אייזיק ניוטון "עקרונות מתמטיים בפילוסופיה מדעית" (Principia)

אייזיק ניוטון תיאר את הדברים בציור שלפנינו. סדרת קליעים משוגרים אופקית מראש ההר V. אלה שמשוגרים במהירויות עצומות מסוגלים להגיע למרחקים גדולים, אפילו עד צדה השני של הארץ. אמנם מסלולם מעוקם אל עבר פני הארץ, אך גם פני הארץ מתעקמים בהתאמה ו"מפנים דרך" למסלול.

יש מהירות שיגור מספיק גדולה שבעבורה המסלול מתעקם בדיוק כפי שפני הארץ מתעקמים, והגוף כלל אינו מתקרב אל פני הארץ, וסופו שיישוב את הארץ עד לנקודת המוצא, ומשם ימשיך שוב ושוב במסלול מעגלי. ניוטון טען כי אם נצליח להגיע למהירויות שיגור כאלה, נזכה לשגר לוויינים, שיקיפו את הארץ! ומה אם המהירות גדולה יותר? במקרה כזה יתקבל מסלול שצורתו אליפסה.

מדוע הירח אינו נופל על הארץ?

ראינו את חזון הלוויינים המלאכותיים של ניוטון שהתגשם קרוב לשלוש מאות שנה לאחר שנהגה. ואולם, טען ניוטון, יש כבר לוויינים טבעיים. הירח

הוא לוויין כזה. הירח נמשך אל הארץ כפי שאנו נמשכים אליה, מדוע, אפוא, אין הירח נופל עלינו? זה מפני שיש לו מהירות אופקית מספיק גדולה. תנועתו של הירח, ושל כל גוף, מורכבת מנטייתו להתמיד במצב הקודם ומהשפעות חיצוניות. אם לא הייתה התמדה, הירח היה נופל אנכית על הארץ. אם המשיכה הייתה נעלמת לפתע, והייתה נותרת התמדה בלבד, הירח היה ממשיך בקו ישר המשיק למעגל המקורי, ומתרחק מן הארץ לנצח. התנועה המעגלית שלו היא תולדה של הצירוף המיוחד של משיכה והתמדה.

התמדה – סיכום

המלומד היווני הגדול אריסטו טען כי גוף חופשי חייב לעמוד במקומו. אם אין פועלות השפעות חיצוניות, מדוע ינוע מעלה או מטה, ימינה או שמאלה, צפונה או דרומה? לדעתו, תנועתה של האבן הנזרקת מעידה על קיומה של השפעה חיצונית, שמופעלת כנראה על ידי האוויר. טעותו של מלומד גדול מעידה על קושי אמתי. בעקבות גלילאו, דקרט וניוטון, אנו טוענים כי גוף חופשי ממשיך בתנועתו. גוף משמר חלק ממאפייני התנועה הקודמים שלו – המהירות וכיוון התנועה. גוף אינו משמר את כל מאפייני התנועה שלו. הגוף אינו משמר את תאוצתו הקודמת. מן הרגע שבו הוא הופך חופשי, אין לו תאוצה. גוף אינו משמר את צורת המסלול העקום שלו (אם היה כזה). מן הרגע שבו הוא הופך חופשי, תנועתו ישרה. באיזה כיוון? בכיוון המשיק למסלול העקום בנקודת הפרידה ממנו.

אם גוף נע במסלול עקום, ברור שאינו חופשי. מעניין אותנו מה יקרה ברגע המעבר, כאשר "יצא לחפשי". מן הרגע הזה מוקפאים המהירות וכיוון התנועה, ורק הם. במהלך הלמידה הרבינו לעקוב אחרי רגעי מעבר כאלה.

התמדה אינה ניכרת רק בתנועה חופשית. דוגמת הכדור המקפץ מעידה על קיומה של התמדה אופקית, כאשר אין כוח בכיוון האופקי, אך יש כוח בכיוון האנכי. למעשה כל תנועה מורכבת מצירוף של התנועה המובטחת על ידי ההתמדה (המהירות הקודמת וכיוון התנועה הקודם) עם התנועה שנולדת מן ההשפעות החיצוניות. איך בדיק נעשה הצירוף הזה? בכך נעסוק בעתיד. עם זאת, כבר ראינו דוגמה כזאת בדיון הקצר בתנועת הלוויינים והירח.

ביחידה זו לא הצגנו הסבר לחוק הראשון של ניוטון. בעקבות ניוטון הוא מוצג כאבן פינה, שעליה נשענת התיאוריה, ולכן אין ניתן לו הסבר תיאורטי. במה אפשר, אפוא, לדון? באסמכתאות הניסיוניות ובמסקנות העולות מן החוק.

הפעילויות השונות מציגות מגוון רחב של דרכי פעולה מדעיות: ניסויים קלאסיים, שימוש במצלמה ובתצלומי הבזק, חקירה של היבטים שונים של התנועה (מהירות, סיבוב, הערכת קצבים...), פירוק בעיה לרכיביה (כדור מקפץ), "ניסוי מחשבתי", "ניבוי" (מסלול לווייני), הסבר (מדוע הירח אינו נופל?) ועוד.

התמדה – מפת פעילויות

<ul style="list-style-type: none"> • שאלון ציפיות • גולה נחלצת ממסלול מעגלי • זיקוק מסתובב 	<p>חלק א:</p> <p>התמדה בכיוון התנועה</p>
<ul style="list-style-type: none"> • שיגור של כדור גולף – עבודה בצוותים • נפילה חופשית – דיון כיתתי קצר • כדור מקפץ – מומלץ (אפשר כעבודת בית) • חבטת הגשה מקצועית בטניס – עבודה בצוותים • חבטת טניס נוספת – עבודת בית – רשות • חבטת בייסבול – חקר נוסף למעוניינים 	<p>חלק ב:</p> <p>התמדה בגודל המהירות</p>
<p>הדגמות, פעילויות תלמידים, סרטי YouTube</p>	<p>חלק ג:</p> <p>המחשות של התמדה</p>
<p>דיון כיתתי בהובלת המורה – רשות, מומלץ</p>	<p>חלק ד:</p> <p>חשיבותה של התמדה</p>

יחידה זו עשירה במשימות. אפשר להפעיל שיטות שונות של עבודה בקבוצות, כמו שיטת Jigsaw (שיטת ההרכבה) או עבודה סימולטנית של קבוצות שונות על כמה מקרי התמדה שונים עם הצגה פרונטלית של תוצאות של כל קבוצה בנפרד. כדאי להיות קשוב למתרחש בשיעור כדי לנווט את הפעלת היחידה בצורה מיטבית מבחינת רצף העניין של התלמידים וניהול הזמן.

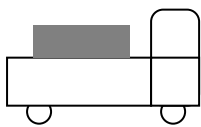
הצעות לשאלות (תרגילי כיתה, משימות בית)

מה הקשר בין חגורת בטיחות במכונית לבין התמדה?

אם המכונית נמצאת בהאטה, הנוסע שממשיך להתמיד במהירותו הקודמת עלול להיחבט במסגרת המכונית שלפניו (בחלון, בהגה, במושב שלפניו...).

מה הקשר בין משענת הראש במכונית לבין האצה?

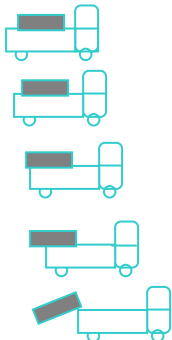
במקרה של האצה פתאומית, גופו של הנוסע מואץ יחד עם המושב. בהעדר משענת ראש, ראשו של הנוסע ימשיך במהירות הקודמת (שכעת היא נמוכה ממהירות המכונית). במקרה כזה המפרקת עלולה להישר.



משאית נמצאת בתנועה לכיוון ימין, כמתואר בסרטוט. על המשטח האחורי החלק שלה מונח מטען כבד מאוד שאינו קשור למשאית. מה עלול לקרות אם:

- הנהג ילחץ על דוושת הדלק ויגרום להאצת המשאית.
- הנהג ילחץ על דוושת הבלם ויגרום להאטת המשאית.

משאית בהאצה



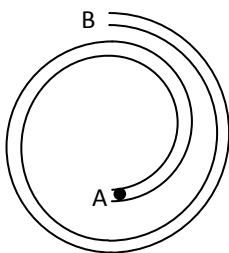
משאית בהאטה



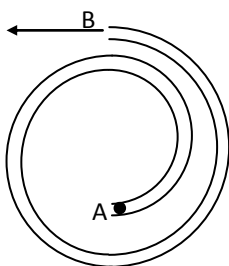
א. המטען ימשיך במהירותו הקודמת בעוד שרצפת המשאית נמצאת מתחתיו בתאוצה. בסופו של דבר המטען יישמט מן המשאית.

ב. המטען ימשיך במהירותו הקבועה בעוד המשאית נמצאת בהאטה. בסופו של דבר המטען יפגע בתא הנהג.

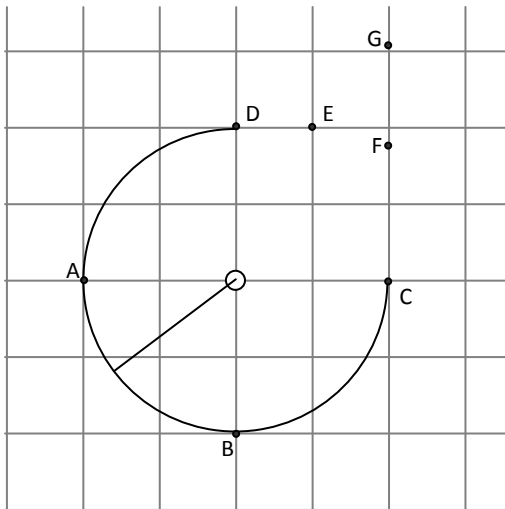
התשובות האלה נכונות בהנחה שאין כלל חיכוך, אך סכנה קיימת גם במקרים שיש חיכוך.



כדור קטן מונח בקצהו האחד (A) של צינור לוליני אופקי (שנראה במבט מלמעלה). אדם נשף בצינור, הכדור נע לאורכו ויצא מן הקצה השני (B) של הצינור. תארו את מסלולו של הכדור לאחר יציאתו מן הצינור (כפי שהוא נראה על ידי צופה שמביט מלמעלה).



הכדור נע בקו ישר בכיוון שבו הוא יצא מן הצינור.

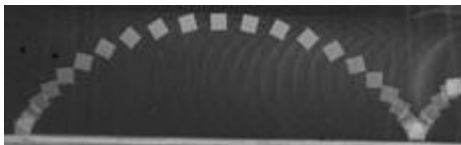


על שולחן אופקי חלק מציבים גדר מעגלית (שמתחילה בנקודה D, עוברת דרך הנקודות A, B ומסתיימת בנקודה C). גולה נקלעת למסלול המעגלי הזה ונעה לאורך הצד הפנימי של הגדר המעגלית מ-D ל-C. זמן התנועה מ-D ל-A היה שנייה אחת, וכך גם זמן התנועה מ-A ל-B ומ-B ל-C. היכן נמצאת הגולה שנייה לאחר שעברה בנקודה C?

- (א) בנקודה D.
- (ב) בנקודה E.
- (ג) בנקודה F.
- (ד) בנקודה G.

בהגיעה לנקודה C הגולה נעה בכיוון של הקווים האורכיים, ולכן היא תמשיך לנוע לכיוון של F ו-G. גודל המהירות אינו משתנה, ולכן הגולה תעבור במשך שנייה דרך שווה לרבע ההיקף של המעגל. הנקודה F קרובה מדי (המרחק בין C ל-F קטן מן הרדיוס, ובוודאי הוא קטן מרבע ההיקף). הנקודה G היא הפתרון.

משהו למורה (ואולי גם לתלמידים...)



© 2010 MIT. Courtesy of MIT Museum

השאלה הבאה כמעט אינה עוסקת בהתמדה, אלא בניתוח תצלום הבזק. בתצלום מתועדת תנועה של גוף ריבועי.

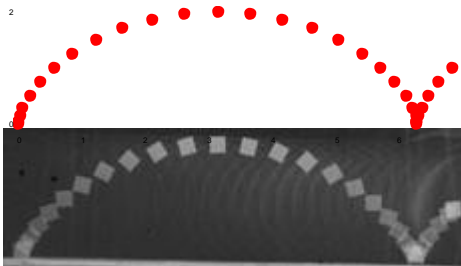
האם יש התמדה בתנועת הגוף הריבועי?

לא. אפשר לראות כי התנועה אינה על קו ישר, וכי המרחקים בין עקבות עוקבות אינם שווים. אפילו אין התמדה בתנועה האופקית (כפי שראינו בכדור המקפץ).

במהלך תנועתו, הגוף הריבועי סובב סביב מרכזו. האם קצב הסיבוב קבוע? גדל? קטן?

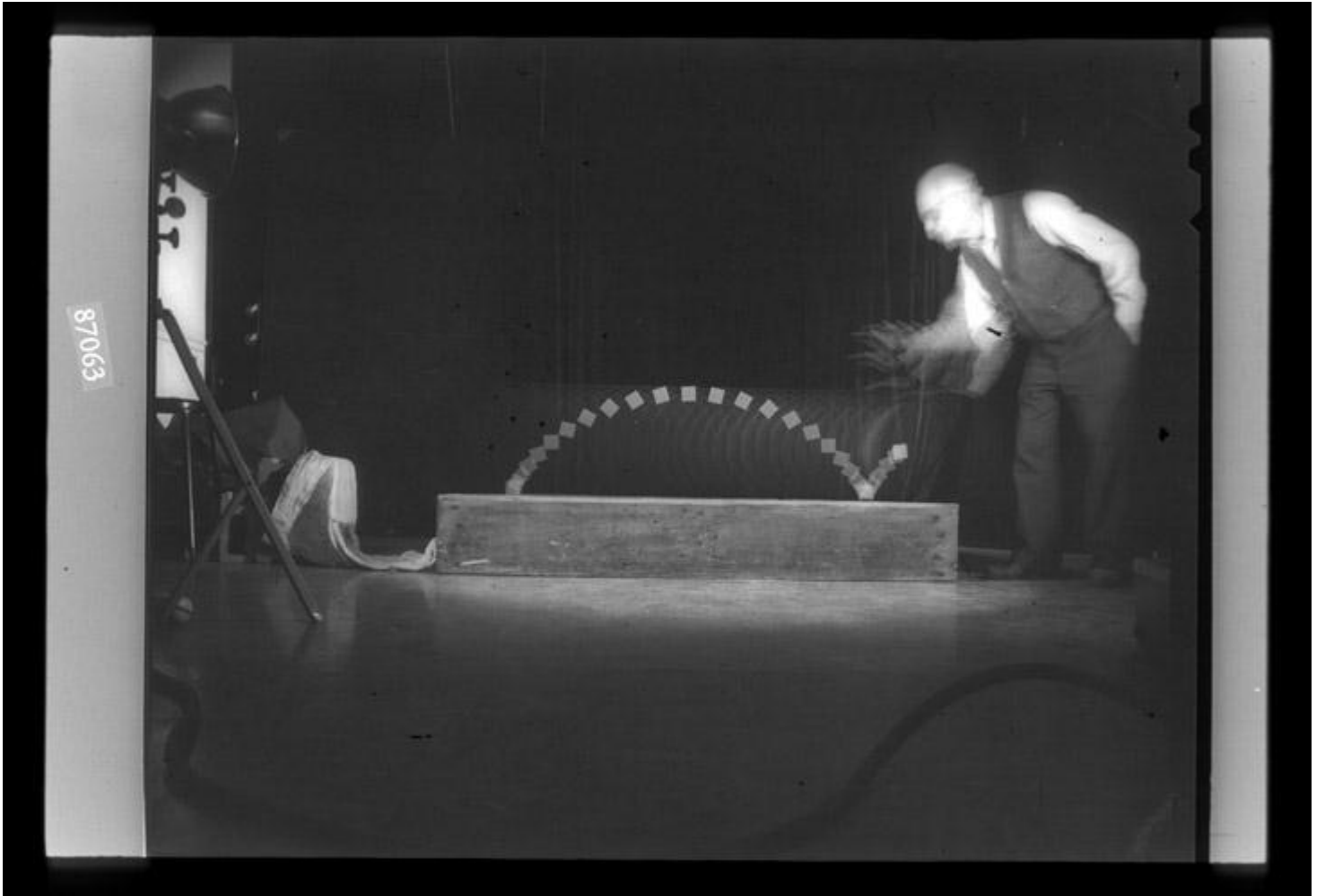
עיון בחלק המסלול שבו יש הפרדה ברורה בין הריבועים מלמד אותנו שהגוף משלים שמינית סיבוב (45°) בכל שלושה מרווחי זמן (15° כ-15 בכל מרווח זמן).

אם כך, כיצד נוצרה התנועה הזאת?



© 2010 MIT. Courtesy of MIT Museum

הגוף הריבועי הוא מחזיר-אור שהוצמד לשוליו של גלגל אופניים. זוהי תמונה של אגרטון מ-1987. למסלול הזה יש צורה של ציקלואידה. משמאל מתואר המסלול כפי שהוא חושב בגיליון אלקטרוני. בעמוד הבא תוכלו לראות את התמונה המלאה.



© 2010 MIT. Courtesy of MIT Museum