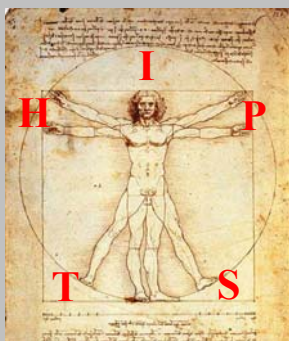


# הבנת המכניקה הקלאסית: דיאלוג עם תיאוריית התנועה של דקארט



יגאל גלילי ומיכאל צייטלין

האוניברסיטה העברית בירושלים

ירושלים

תש"ע - 2010



## הבנת המכניקה הקלאסית: דיאלוג עם תיאוריית התנועה של דקארט

יגאל גלילי ומיכאל צייטלין

האוניברסיטה העברית בירושלים

דוא"ל: igal@vms.huji.ac.il

**מילות מפתח:** שקילות מנוחה-תנועה, עיקרון היחסיות, חוקי התנועה, התנגשויות אלסטיות ולא אלסטיות, שימור התנע והאנרגיה הקינטית.

### תקציר

חקר מקרה היסטורי זה מציג את מערכת חוקי התנועה שפיתח רנה דקארט במאה ה-17, ואת חוקי ההתנגשות בין גופים חומריים שהוסקו על ידו. גוף ידע זה הקדים את חוקי המכניקה הקלאסית שפותחו על ידי ניוטון, שהושפע מתיאוריית המכניקה של דקארט. למרות שחוקי דקארט כללו רעיונות חשובים חדשים: תנועה קצובה בקו ישר כמצב טבעי ותפקידו המרכזי של התנע – כמות התנועה – ושימורו, לצורך תיאור תנועתם של כל הגופים החומריים, גם הגדרת התנע וגם ההסבר להתנגשויות היו מוטעים. הביקורת על תיאוריה זו ועל המשתמע ממנה לגבי התנגשויות עלתה במחקריהם של וואליס [Wallis], וורן [Warren], הויגנס [Huygens] וניוטון, מייד בעקבות דקארט.

מסע היסטורי זה הוכן לצורך שימוש של מורי הפיזיקה בחטיבת הביניים ובתיכון. תוך כדי הביקורת על הבנתו המוטעית של דקארט באשר לנקודות קריטיות (כמות התנועה כסקלר במקום כווקטור, הזנחתו את עיקרון היחסות של גלילאו – שקילות המנוחה-תנועה – והזנחת הניסוי לטובת שיקולים לוגיים) חקר מקרה זה מדגיש, תוך ניגוד, את הנושאים החשובים ללימוד הפיזיקה. נעביר ביקורת על חוקי התנועה של דקארט, נבחן את חקר ההתנגשויות האלסטיות והלא אלסטיות, את גילוי שימור התנע והאנרגיה הקינטית תוך כדי ההתנגשויות, ולבסוף נשווה את חוקי התנועה של דקארט עם אלו של ניוטון. נדון גם בגישתו של דקארט כלפי הידע המדעי – הפילוסופיה הרציונליסטית של המדע. לעומתה, נראה את הצורך בידע אמפירי, למרות שגם הוא לוקה בחסר אם נשפט לבדו. כך הודגם על ידי הויגנס ביישום של עיקרון היחסיות ובגילוי של שימור "הכוח החי" [vis viva]. הרעיון שגובש במהפכה המדעית היה, שמדע מתבסס על סימביוזה דיאלקטית בין הרציונליזם והאמפיריציזם. תמיכה הדדית זו היא קריטית מבחינת ההתקדמות המדעית: הצורך באימות כמותי – על מנת לתת תוקף לתיאוריה, והצורך בתיאוריה – שתנחה את החקר הניסויי.

חקר מקרה זה כולל הצעות לפעילויות מועילות המיועדות לשפר ולעשיר את תכנית הלימודים בפיזיקה, על ידי דיונים בנקודות החזקות והחלשות של חוקי התנועה של דקארט, כדרך ללמידה משמעותית של חוקי התנועה של ניוטון. דיון בחוקי ההתנגשות של דקארט יכול לשמש דרך להבנת התנגשויות במסגרת המכניקה הקלאסית, ודיון באופן בו ניתח הויגנס את ההתנגשויות יכול לאפשר לתלמידים להעריך ולהטמיע את עיקרון היחסיות של גלילאו – העיקרון הבסיסי ביותר של הפיזיקה. כל אלו חסרים בכיתת הפיזיקה. חקר מקרה זה מציין עדויות מחקריות על קשיי תלמידים, עליהם ניתן להתגבר בעזרת החומרים ההיסטוריים המופיעים כאן.

\* \* \*

## תיאור של חקר מקרה

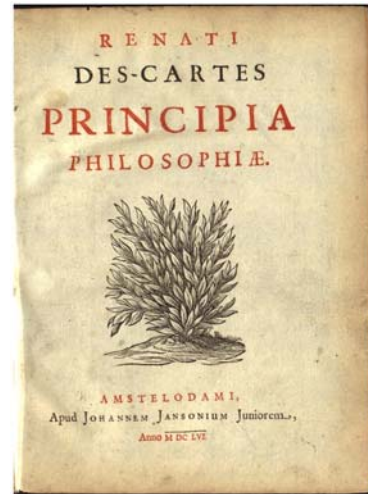
"וההוכחות הן כה ודאיות, שגם אם נראה לנו שהניסיון מצביע על ההפך, אנו מחויבים לתת את אמונו בשכלנו יותר מאשר בחושינו."

דקארט

### חוקי הטבע של דקארט



רנה דקארט



כיום זהו דבר שבשגרה לזהות את חוקי התנועה של ניוטון עם המכניקה. ואכן, חוקים אלו יוצרים את הגרעין של המכניקה הקלאסית. הם פורסמו בספרו *עקרונות* (או בשם המלא: *העקרונות המתמטיים של פילוסופיית הטבע*) בשנת 1687. למעשה, *העקרונות* של ניוטון היווה דיון עם *עקרונות* אחר (או בשמו המלא: *העקרונות של הפילוסופיה*), ספרו של דקארט<sup>1</sup> שפורסם בשנת 1644. הבנה טובה יותר

של *העקרונות* של ניוטון, ניתן להשיג מההכרות עם *העקרונות* של דקארט, לפחות ביחס לחלק המרכזי שלו (עבור המכניקה): חוקי הטבע וההשלכות שלהם – החוקים המושלים *בהתנגשויות* בין גופים חומריים קשים. נעשה זאת על ידי קיום דו-שיח עם טענותיו של דקארט מנקודת הראות של המכניקה הניוטונית.

וכך כתב דקארט<sup>2</sup>:

37. החוק הראשון של הטבע: כל גוף, הנעזב לעצמו, יתמיד כל הזמן באותו המצב; ולכן, מה שהוזהר פעם, תמיד ימשיך להיות בתנועה.

ואמנם, מתוך הנצחיות ואי ההשתנות של האל ניתן ללמוד על חוקים או כללים מסוימים של הטבע, שהם הסיבות המשניות והמסוימות למגוון התנועות הרב שאנו מוצאים בגופים. הראשון שבהם הוא, שכל גוף, כל עוד הוא לא מורכב ואינו מתחלק, נותר, כשהוא נעזב לעצמו, תמיד באותו המצב, ולעולם אינו משתנה בהעדר סיבות חיצוניות. ולכן, אם חלק מסוים של החומר הוא מרובע, נוכל בקלות לשכנע את עצמנו שהוא ימשיך להישאר מרובע לנצח; אלא אם כן משהו שישנה את צורתו יגיע מאיזשהו מקום. אם הוא היה במנוחה, איננו מאמינים שהוא יתחיל אי פעם לנוע, אלא אם כן הוא יומרץ לעשות זאת על ידי סיבה מסוימת. ואם הוא כבר נע, אין כל סיבה מדוע עלינו לחשוב שהוא אי פעם, בעצמו, יעצור את תנועתו. ולכן, ניתן להסיק שזה אשר הוזהר ונעזב לעצמו, ימשיך תמיד לנוע. אולם, הואיל ואנו עוסקים באדמה, הבנויה כך שכל התנועות המתרחשות בקרבתה פוסקות מהר מאוד, לעיתים עקב סיבות הנסותרות מחושינו, אנו סבורים כי תנועות אלו, שפסקו מסיבות שאינן ידועות לנו, פסקו מעצמן. וכך אנו נוטים להסיק מכל מה שהתנסונו במקרים רבים, שתנועות אלו פוסקות, או נוטות לעצירה מטבען. למעשה, כל זה הוא בניגוד לחוקי הטבע; משום שהמנוחה מנוגדת לתנועה, ושום דבר אינו נע מעצמו אל המצב ההפוך לזה בו הוא מצוי, ושום דבר אינו הורס את עצמו.

דקארט קובע כאן, גם אם אולי איננו שותפים לדעתו על הסיבה לכך ("נצחיותו"), אי השתנותו של האל), עיקרון מאוד חשוב – הצורך בהשפעה חיצונית על מנת לשנות את מצבו של הגוף. רעיון

<sup>1</sup> רנה דקארט [René Descartes] (1596-1650) – פילוסוף, מתמטיקאי ופיזיקאי צרפתי דגול, מייסד הפילוסופיה המודרנית של הרציונליזם.

<sup>2</sup> Descartes, R. (1644/1983). *Principles of Philosophy*, D. Reidel, Dordrecht, p. 59.

זה היה חדש במובן שדקארט התייחס לתנועה כאל מצב של הגוף (ולא כאל תהליך), ובכך הציג את רעיון התנועה ההתמדית: תנועה ללא גורם מניע – העיקרון של הפיזיקה החדשה אותה אנו מכנים מכניקה קלאסית.

עם זאת, איננו יכולים להסכים עם קביעתו של דקארט שתנועה מנוגדת למנוחה. זוהי תפיסה אריסטוטלית ישנה ואיננו מקבלים אותה יותר. הניגוד תנועה-מנוחה תואם את האינטואיציה הנאיבית (המכונה לעיתים "השכל הישר"). רעיון זה הוא שבלם את ההבנה של רעיון ההתמדה כמשהו הדורש התערבות מיוחדת – גורם מניע או תומך.

הניסיון שלנו מעיד על כך שלא ניתן להבחין בין כל שתי תנועות קצובות בקו ישר ובמהירויות קבועות כלשהן, ומצב המנוחה יכול להיות אחד מהן. תנועה ומנוחה שוכנות יחדיו בגוף אחד, וזאת בהתאם להתייחסות אל עצמים שונים. זהו העיקרון של גלילאו<sup>3</sup>. למעשה, מעובדה זו נובע *חוק ההתמדה (אינרציה בלעז)*: מצב התנועה שאינו דורש כל כוח על מנת לשמר אותו, בין אם זו מנוחה או תנועה. כפי שראינו, למרות שדקארט הסכים עם עיקרון ההתמדה (כמשמר את מצב הגוף עד התערבותו של גורם חיצוני כלשהו), הוא עדיין שמר על ההבדל בין תנועה ומנוחה, והחשיב אותם כהפכים. בנוסף, הטענה כי "שום דבר אינו נע בעצמו אל המצב ההפוך לזה בו הוא מצוי, ושום דבר אינו הורס את עצמו" גם היא דו משמעית ומיושנת. כפי שאנו יודעים כיום, אטומים עוברים באופן ספונטני ממצב אחד לאחר (למשל ממצב מעורר למצב יסוד, שבמובן מסוים הם מצבים "הפוכים"), וגרעין האטום דועך גם הוא, תוך כדי מעבר ליסוד אחר, גם זאת באופן ספונטני וללא כל התערבות חיצונית.

דקארט ממשיך, ומקשר את הנאמר מעלה אל החוק הראשון של תנועת הקלעים<sup>4</sup>:

38. מדוע גופים שנזרקו ממשכים לנוע לאחר שהופסק המגע עם היד הזורקת? אין ספק כי הניסיון היום יומי בהקשר של גופים נזרקים, מאשר במלואו את הכלל [הראשון] שלנו. משום שאין כל סיבה אחרת מדוע [גופים] נזרקים ימשיכו בתנועתם במשך זמן כל שהוא לאחר שהופרדו מהזורק, פרט לכך שברגע שהם הובאו לתנועה הם ממשיכים לנוע עד שהם מואטים על ידי גופים המתנגדים להם. וזה ברור כי בדרך כלל הם מואטים בהדרגה על ידי האוויר, או על ידי גופים גמישים אחרים בתוכם הם נעים, ומכאן תנועתם אינה יכולה להמשך זמן רב. הרי אנחנו יכולים לחוש את התנגדות האוויר לתנועה של גופים אחרים בעזרת חוש המגע שלנו, אם נכה בו בעזרת מניפה; מעופם של הצפרים גם כן מאשר את אותו הדבר. ואין שם זורם שאינו, אפילו באופן ברור יותר מהאוויר, מתנגד לתנועתם של קליעים.

מתוך החוק הראשון של הטבע אותו ניסח דקארט, הוא מסיק את התשובה לשאלה שהייתה קשה לאריסטו: מדוע אבן ממשיכה לנוע לאחר שהיא עוזבת את ידו של הזורק? אריסטו הציג מנגנון מיוחד – *antiperistasis* – ששימר את הלחץ המתמשך על הגוף הנע באמצעות מערבולות אוויר<sup>5</sup>. מנגנון זה ספג ביקורת ונדחה על ידי מלומדים רבים שהביאו דוגמאות מנוגדות, כמו סביבון או חץ המחודד בשני קצותיו, אותם קשה מאוד לדמיין כנתמכים על ידי לחץ האוויר. בניגוד לכך, העיקרון החדש של שימור מצב התנועה, אותו ניסח דקארט, מסיר את הצורך במערבולות האוויר. עם זאת, דקארט, שפעל לאחר תקופתו של גלילאו, לא נתן הסבר מספק ולא

<sup>3</sup> המושג "מצב מנוחה" מופיע ב-דיאלוג על שני מדעים חדשים שפורסם בשנת 1638 על ידי גלילאו. גלילאו החשיב את המנוחה כמצב של תנועה במהירות קטנה עד אינסופי. במצב זה המנוחה מאבדת את המעמד המיוחד שלה לעומת התנועה.

<sup>4</sup> Descartes, *op.cit.* p. 59.

<sup>5</sup> עוד על כך, ביחידה אחרת מתוך אוסף זה – "מסע היסטורי אל התיאוריה של תנועה – De Motu".

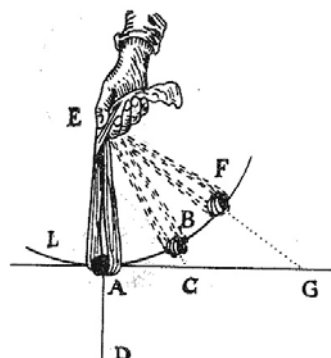
תיאור מפורט לתנועת קליעים, כפי שעשו זאת גלילאו (מסלול, שינוי מהירות, תאוצה), וניוטון אחריו (כוח הכובד). דקארט נותר ברמה הכללית ביותר של ההבנה. גישה זו היא חסרת ערך לצורך הסבר ותיאור כמותי מדויק של תנועת הקליעים, כנדרש על ידי המכניקה הקלאסית, אם כי היתה טובה על מנת להתרחק מהתיאוריה של הדחף, שהייתה מקובלת בימי הביניים.

מכאן, המשיך דקארט לחוק השני:<sup>6</sup>

39. **החוק השני של הטבע:** כל תנועה היא קווית ישרה מטבעה; ולכן מה שהונע במעגל ישאף תמיד להתרחק ממרכז המעגל אותו הוא מתאר.

החוק השני של הטבע גורס כי כל חלק של חומר, כשהוא לבדו, לעולם לא ישאף להמשיך לנוע לאורך קווים עקומים, אלא לאורך קווים ישרים, אפילו אם גופים רבים נאלצים לסטות עקב התנגשות בגופים אחרים, וכפי שנאמר לפני כן, בכל תנועה, נוצר איכשהו מעגל העשוי מכל החומר שנע באותו הזמן. הסיבה לחוק זה היא אותה הסיבה כמו לחוק הראשון, כלומר הנצחיות (אי ההשתנות) והפשטות של הפעולה באמצעותה האל משמר את התנועה בחומר. משום שהוא [האל] אינו משמר בכל דרך שאינה מדויקת את רגע הזמן אותו הוא משמר, בלא קשר למה שהיה אולי רגע לפני. למרות ששום תנועה אינה מתרחשת מיידית, ברור כי כל מה שמוזז, ברגע המדויק שניתן לציין שהוא אז, נקבע להמשיך בתנועתו לכיוון מסוים לאורך קו ישר, ולעולם לא לאורך קו עקום.

לדוגמא, אבן A, המסובבת קלע EA סביב מעגל ABF, ברגע שהיא בנקודה A היא "מחליטה" לנוע בכיוון מסוים, כלומר לאורך הישר לכיוון C, כך שהקו הישר AC משיק למעגל. אך לא ניתן לגרום שהיא תחליט לנוע תנועה עקומה כלשהי; משום, שגם אם קודם היא באה מ-L ל-A לאורך קו עקום, דבר מעקמומיות זאת לא יכול להישאר בה כשהיא בנקודה A. זה מאומת גם על ידי הניסיון, משום שאם היא תעזוב את הקלע אז, היא לא תמשיך לנוע לכיוון B אלא לכיוון C. מכאן נובע שכל מי שנע במעגל, ישאף לנצח להתרחק מהמרכז של המעגל אותו הוא מתאר. אנו חווים זאת באמצעות חוש המישוש, באבן שאנו מניעים במעגל, בעזרת קלע...



מה שונה בחוק זה בהשוואה לחוק הראשון שנוסח לעיל? כאן מעדן דקארט את הטענה של שימור מצב התנועה: לא כל תנועה משתמרת, כמו, למשל, תנועה סיבובית, אלא רק תנועה בקו ישר. עדיין חסרה לנו המילה "קצובה" שגם היא נדרשת לתיאור התנועה הנשמרת. עם זאת, לא נשכח כי אפילו גלילאו נהג לחשוב על תנועת ההתמדה כתנועה סיבובית<sup>7</sup>. דקארט דוחה באופן מפורש רעיון זה; הוא מעניק לתנועה בקו ישר מעמד מיוחד: רק תנועה זו נחשבת כהתמדית. שוב הוא מנמק זאת ברציונל העיקרי שלו – טבעו של האל. כאמור, טענה זו נשמעת לנו שרירותית, שהרי היא יכולה להצדיק כל סוג של תנועה. למעשה, הפיזיקה יכולה להסתפק בכך שהניסיון, מבוקר ומגוון, מאשר את המעמד המיוחד של התנועה בקו ישר.<sup>8</sup>

שאלה נוספת: מה שונה בחוק זה (החוק השני של דקארט), בהשוואה לחוק הראשון של המכניקה, כפי שנלמד בדרך כלל בכיתת הפיזיקה?

<sup>6</sup> Descartes, *op.cit.*, p. 60.

<sup>7</sup> Galilei, G. (1613/1957). Letters on Sunspots. In S. Drake (ed.) *Discoveries and Opinions of Galileo*. Doubleday, New York.

<sup>8</sup> אם זאת, ההבנה באשר למשמעותו של "קו ישר" השתנתה גם היא והוחלפה ב"קו גיאודזי", אך זאת רק במסגרת תורת היחסות הכללית של איינשטיין, במאה העשרים.

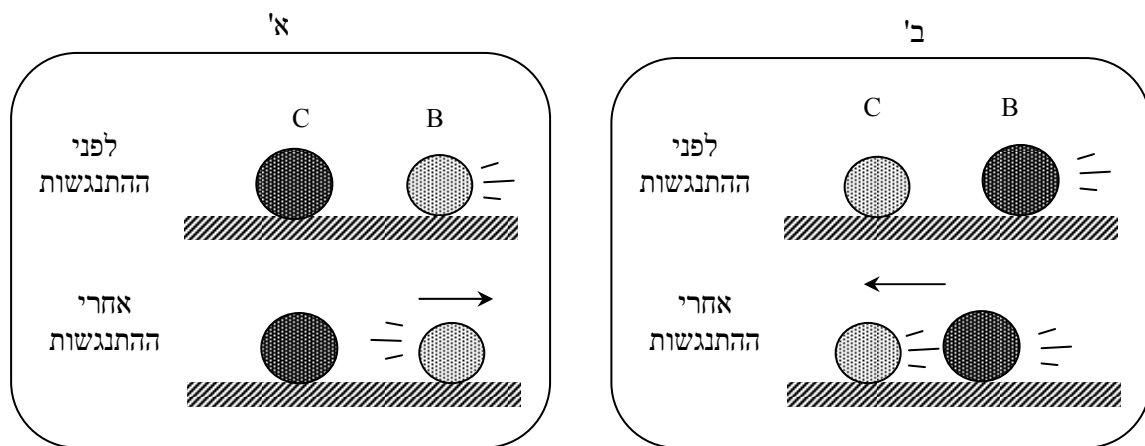
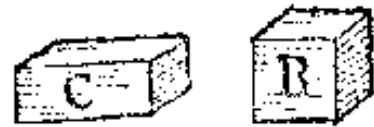
החוק של דקארט הוא אכן שונה מזה הנלמד במסגרת ההוראה הרגילה בכך שהוא אינו מתייחס למצב בו שום כוח אינו פועל על הגוף. דקארט מתייחס לנטייתו של הגוף הנאלץ לנוע במסלול מעגלי, להמשיך בכיוון משיקי. נטייה זו מתממשת ברגע שבו הגורם האוכף את המסלול המעגלי (החבל המתוח) חדל להשפיע על האבן. ניתן לראות שגישה קרטזיאנית זו – להתחשב בנטייה – אומצה גם על ידי ניוטון, אשר באותה רוח קבע בשנת 1687 בעקרונות שלו:<sup>9</sup>

כל גוף מתמיד במצב של מנוחה או תנועה קצובה בקו ישר קדימה, במידה שאינו מאולץ לשנות מצב זה על ידי כוח הפועל עליו.

כפי שאנו רואים, ניוטון אינו מדבר על מצב בו פשוט אין כוח, אלא באופן דומה לדקארט, על הנטייה לשמר את מצב המנוחה או התנועה הקצובה בקו ישר, שבא כאשר הכוח החיצוני נעלם. הדוגמאות שהביא ניוטון ליישום של חוק הראשון מחזקות טענה זו.<sup>10</sup>

מכאן המשיך דקארט לחוקיות בפעולה הדדית בין הגופים, אותה ראה כמתרחשת אך ורק באמצעות התנגשויות:<sup>11</sup>

40. חוק שלישי הוא זה: כאשר גוף [B] נע פוגש אחר [C], אם יש לו פחות כוח על מנת להמשיך בקו ישר מאשר לאחר יש כדי להתנגד לו, אז הוא יפנה לאחור, בשומרו על כמות התנועה, ומשנה רק את השאיפה שלו לנוע באותו הכיוון. אם, לעומת זאת, יש לו כוח גדול יותר, אז הוא יניע את הגוף האחר יחד איתו ויאבד כמות תנועה השווה לזו שהוא מעניק לאחר.



הייצוג הסכמטי של חוק התנועה השלישי של דקארט. מוצגים שני מקרים אפשריים (א') ו-(ב') בהתאם ליחס בין "כוחות התנועה" של הגופים המתנקשים.

חוק זה מובהר בטקסט הבא:

<sup>9</sup> Newton, I. (1687/1999). *The Principia. Mathematical Principles of Natural Philosophy*. Translated by B. Cohen & A. Whitman. University of California Press, Berkeley, CA, p. 416.

בתרגום האקדמי לרוסית (ע"י קרילוב), הופיע החוק הראשון בצורה כוללנית יותר מאשר זה שהופיע באנגלית. בתרגום לעברית הניסוח הוא:

כל גוף ממשיך להתמיד במצב של מנוחה או תנועה קצובה בקו ישר, עד אשר ובמידה שהוא לא מאולץ לשנות מצב זה על ידי כוח המופעל עליו.

<sup>10</sup> *Ibid.* p. 416. Discussed in Galili, I. & Tseitlin, M. (2003). Newton's first law: text, translations, interpretations, and physics education. *Science and Education*, 12 (1), 45-73.

<sup>11</sup> Descartes, *op.cit.* p. 61.

כך אנו לומדים מהניסיון כי כאשר גופים קשים, כשהם נזרקים כנגד עצם קשה אחר, אינם חדלים מתנועתם, אלא מוחזרים בכיוון ההפוך. בניגוד למה שקורה כשהם פוגשים בגוף רך, אליו הם יכולים בקלות להעביר את כל התנועה שלהם, והם נעצרים מייד. כל הסיבות המיוחדות לשינויים המתרחשים ב[תנועת] הגופים כלולים בחוק השלישי הזה, או לפחות אלו שהם פיזיקליים; זאת משום שאיננו חוקרים כאן אם, ובאיזה דרך, יש למחשבות אנושיות או מלאכיות את הכוח להניע גופים, אלא משאירים זאת לחיבורינו 'על האדם'.

דקארט ממשיך להסביר:<sup>12</sup>

#### 41. הוכחת החלק הראשון של חוק זה

החלק הראשון של חוק זה מתבסס על השוני הקיים בין תנועה בפני עצמה ובין השאיפה שלה לנוע בכיוון מסוים; שכן בגלל [הבדל] זה קורה שהשאיפה יכולה להשתנות, בעוד שכמות התנועה נותרת ללא שינוי. זאת משום, שכפי שנאמר קודם, כל דבר שאינו מורכב אלא פשוט, כמו התנועה, הוא ממשיך להיות [כזה] בתנאי שאינו נהרס על ידי סיבה חיצונית כלשהי. ובהתנגשות עם גוף שאינו מוותר, נראה שזו הסיבה המונעת את התנועה של הגוף הפוגע מלהישאר בשאיפה באותו הכיוון. אך זאת לא [הסיבה] שיכולה לעצור או להפחית מהתנועה עצמה, משום שתנועה אינה מנוגדת לתנועה. מכאן נובע כי התנועה שלו אינה יכולה להיות מופחתת.

כאן אנו רואים כי דקארט מגדיר את כמות התנועה באופן המפריד בין התנועה עצמה (הכמות שלה) והשאיפה שלה להמשיך בכיוון מסוים. הוא קובע כי התנגשות עם הגוף "שאינו מוותר" יכולה להשפיע על השאיפה של התנועה, אבל לא על כמות התנועה, בטיעונו המעורפל כי "תנועה אינה מנוגדת לתנועה". גם המושג "גוף שאינו מוותר" איננו מושג פיזיקלי. ניתן לנחש כי דקארט מתכוון לגוף גדול מאוד ביחס לגוף המתנגש בו, אך במציאות לא ניתן להסתפק בחוק כללי העוסק רק במקרה קיצוני, אלא תוצאות ההתנגשות חייבות להראות מעבר הדרגתי למקרה של התנגשות עם מסה גדולה מאוד, לא כמו אצל דקארט. הצגת התנועה כגודל וקטורי (תנע) מסירה את אי הבהירות סביב ההגדרות של ה"כוח התנועה", בלשונו של דקארט. עבורנו (אך לא עבור דקארט), כמות התנועה היא גודל וקטורי ונושא לחשבון מדויק הכולל התחשבות בכיוון. התנגשות אי-אלסטית של גופים מדגימה זאת במיוחד. שני גופים זהים הנעים במהירויות שוות אך מנוגדות נעצרים לאחר ההתנגשות כשהם צמודים יחדיו, אך כמות התנועה בהתנגשות נשמרת הודות להתחשבות בכיוון התנע.

דקארט ממשיך:<sup>13</sup>

#### 42. הוכחת החלק השני

יותר מכך, החלק השני מודגם באמצעות נצחיות פעולותיו של האל, הממשיך לשמר את העולם באותו אופן הפעולה כפי שהוא נברא בראשיתו. זאת, משום שלמרות שכל הדברים מלאים בגופים ובכל זאת תנועתו של כל גוף נוטה למסלול קווי ישר, ברור כי אלוהים, מלכתחילה, בבראו את העולם, לא רק שהניע את חלקיו השונים בדרכים שונות, אלא שבאותו הזמן הביא לכך שחלק מהם יניע אחרים, ויעביר אליהם את תנועתו; בסדר שהוא, עכשיו, משמר את [העולם] על ידי אותה הפעולה ועל ידי אותם החוקים אותם הוא יצר, הוא משמר את התנועה כך שהיא לא תמיד קבועה באותם החלקים של החומר אלא בכך שהם עוברים מחלקים אחדים לחלקים אחרים, בהתאם להתנגשויות ביניהם. ולכן, השינוי התמידי הזה של הדברים שנבראו על ידי האל, בעצמו מסתמך על נצחיות האל.

<sup>12</sup> *Ibid.*, p.62.

<sup>13</sup> *Ibid.*, pp. 61-62.

כאן מסביר דקארט שהוא עומד על כך שהתנועה נשמרת הואיל ועיקרון זה נגזר מהעיקרון הכללי שלו: נצחיות האל. עבור דקארט נצחיות פירושה שימור. האם זה משכנע? טענה זו של דקארט היא מטפיזית. היא מאפיינת את אמונותיו של דקארט באשר לאופיו של הידע המדעי: המדע שלו שזור בפילוסופיה הרציונליסטית – שהורחקה לאחר מכן מהמדע כמטפיזית.<sup>14</sup>

דקארט רצה לנמק את טענתו בדבר שימור כמות התנועה. ואומנם, הסיבה הפיזיקלית לכך התגלתה הרבה יותר מאוחר, רק בתחילת המאה ה-20, על ידי אמילי נוטר [Notter], שהראתה כי חוקי השימור הם תוצאה של סימטריה רציפה של המערכת פיזיקלית. במקרה של תנע, זוהי הסימטריה של העתקה במרחב. ניוטון, שלא כמו דקארט, התאמץ מאוד שלא לכלול שיקולים מטפיזיים, אפילו כאשר לא יכול היה לספק כל מנגנון חומרי למציאות אותה הוא תאר. כך, בתארו את תופעת הכבידה, נמנע ניוטון מלהסביר כיצד היא "פועלת". עם זאת, זה לא מנע ממנו את ההצלחה הגדולה במתן הסברים לתופעות טבע אחרות הנובעות מקיומה של הכבידה. בחוק השלישי קבע דקארט חוק מרכזי בפיזיקה, שמאז מקושר לשמו – שימור כמות התנועה, או במונחים שלנו, שימור התנע. כאמור, כמות התנועה נתפסה אצל דקארט כגודל סקלרי – והתברר שזו טעות. אם נרצה לייצג את החוק באופן סימבולי, נוכל לכתוב:

$$\sum_{in} mv_i = \sum_{fin} mv_f$$

אי הוודאות באינדקסים של המהירויות היא כתוצאה מההפרדה בין שני מקרים: התנגשות של גוף בעל "כוח תנועה" קטן יותר עם הגוף בעל כוח "תנועה קטן" יותר ולהפך. וכך, במקרה א' מתאר דקארט מצב בו לגוף B, המתנגש עם גוף C, פחות "כוח תנועה". ואז, טוען דקארט, גוף C מתנגד ב"כוח גדול יותר". כתוצאה, C אינו משנה את מצבו, ו-B מוחזר לאחור באתה מהירות (בגודל) שהייתה לו (וכך נשמרת כמות התנועה, כפי הגדיר דקארט). זוהי טענה שגויה לחלוטין. המציאות מתקרבת לתסריט זה כאשר גוף קטן מתנגש עם "קיר" (גוף בעל מסה גדולה במיוחד, יחסית). בהנחה מיוחדת זו, יכול חוק שימור תנע להיראות, כאילו, כמשמר את כמות התנועה "הסקלרית"  $mv$ . יתכן שתצפית זו כיוונה דקארט להכללה השגויה: גוף B, בעל תנע קטן יותר, לא יוכל לשנות מצבו של גוף C.

עתה לגבי מקרה ב', שגם הוא מוזר ושגוי. במקרה זה, לגוף B כוח תנועה גדול יותר והוא מחייב את גוף C לשנות את מצבו. דקארט טוען שבמקרה זה שני הגופים ימשיכו במהירות שווה כזאת, שכמות התנועה הכללית של שני הגופים תשמר ותהיה כמו זו של גוף B לפני ההתנגשות. כאמור, גם זו מסקנה שגויה, שאינה תואמת את המציאות.

חוק זה מתיימר להסביר את כל סוגי ההתנגשות בין גופים חומריים קשים:<sup>15</sup>

כל המקרים המיוחדים של התנגשות הגופים והסיבות לשינוי מצבם בתנועה כלולים בחוק השלישי, או לפחות אלו שהם פיזיקליים; משום שאיננו חוקרים כאן אם, ובאיזה דרך, יש

<sup>14</sup> הביקורת המפורסמת ביותר הייתה של פיזיקאי דגול מהמאה ה-19 – ארנסט מאך [Mach]. בשנת כתב מאך ספר [Mach, E. (1893/1989). *The Science of Mechanics*, Open Court, LaSalle, Ill] במטרה להסיר מהמכניקה את הטענות המטפיזיות, כלומר, את אלו שלא היו נתונות לאימות ניסויי. הייתה זו גישה פילוסופית חדשה למדע שכונתה "פוזיטיביזם לוגי".

<sup>15</sup> *Ibid.*



למחשבות אנושיות או מלאכיות את הכוח להזיז גופים, אלא משאירים טיפול בנושא זה להיבור אחר שלנו – 'על האדם'

כפי שניתן לראות, הרחיק דקארט מהדיון בהתנגשויות כל השפעה ש"אינה פיזיקלית", ושלהשקפתו כללה התערבות של "אדם או מלאך".

עם זאת, הפריד דקארט, בצדק, בין התנגשויות של גופים קשים ורכים; כשכל אחת דורשת הסבר אחר. דיכוטומיה זו של התנגשויות נשמרה בפיזיקה. למרות שהתייחס להתנגשויות בין גופים קשים, העיר דקארט הערה באשר לגופים רכים:<sup>16</sup>

... כשהם [גופים נעים] פוגשים גוף רך, שאליו הם יכולים בקלות להעביר את תנועתם, הם מייד נעצרים.

הערה זו התבררה כשגויה. התנגשות אי-אלסטית אינה מחייבת את עצירת הגופים. כפי הנראה, תיאר דקארט במחשבתו את פיזור התנועה של גוף בתוך "רך", בדומה לכדור קשה מתגלגל בחול.

### הבנה של התנגשויות

בהמשך מעדן דקארט את החוק השלישי באמצעות שבעה מקרים מיוחדים:<sup>17</sup>

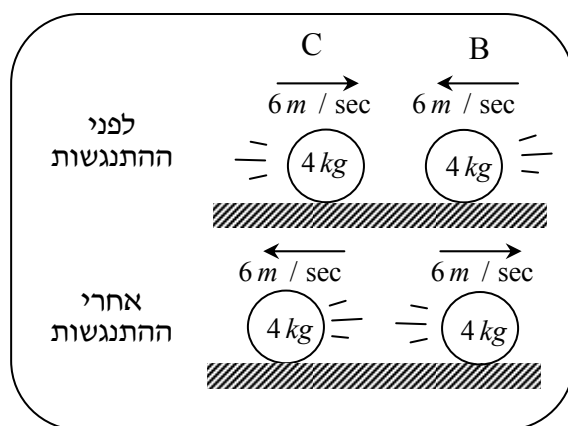
על מנת לקבוע על סמך החוקים שנקבעו, כיצד גופים בודדים עולים או יורדים בכמות התנועה, או פונים הצידה בכיוונים שונים בעקבות התנגשויות עם גופים אחרים.

### 46. הכלל הראשון.

ראשית, אם שני גופים אלו, נניח B ו-C, היו שווים לחלוטין והיו נעים באותה המהירות, B מימין לשמאל ו-C לקראת B על קו ישר משמאל לימין; כאשר הם יתנגשו זה עם זה, הם יחזרו לאחור וכך ימשיכו לנוע, B לכיוון ימין ו-C לכיוון שמאל, כששום חלק ממהירותם לא יאבד.



נציג את המתרחש בעזרת התרשים הבא:



הנתונים בתרשים הם לצורך הדגמה בלבד

<sup>16</sup> Ibid. p.64.

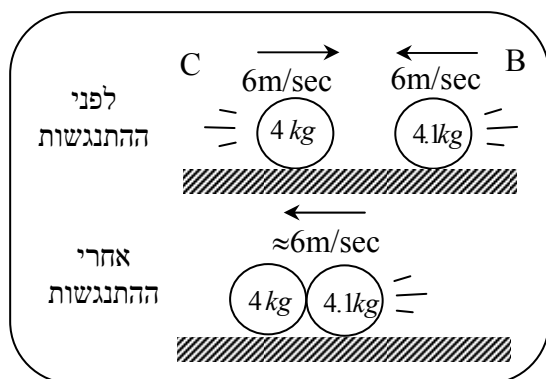
<sup>17</sup> Ibid.

חשבו על השאלה הבאה: מה יכול להיות הטיעון של דקארט התומך בכלל זה? האם כלל זה עקבי עם החוקים שנוסחו קודם? האם כלל זה תואם את הניסיון? באילו תנאים? עבור איזה גופים? ודקארט ממשיך:<sup>18</sup>

#### 47. הכלל השני.

אם B היה רק מעט גדול יותר מ-C, כשיתר הדברים נותרים כמקודם, אז רק C יוחזר, ושניהם ינועו לכיוון שמאל באותה המהירות.

נציג את המתרחש על ידי תרשים הבא:



הנתונים בתרשים הם לצורך הדגמה בלבד

דקארט צופה כי לאחר התנגשות כזו שני הגופים הקשים ינועו שמאלה, כלומר "הניצחון" של B הוא מוחלט, ולא משנה כמה תהייה זעירה תוספת המסה שלו. זה לא מה שקורה במציאות.

אמנם, במקרה של שני גופים שווים (כלל 1) דקארט קובע כי הם חוזרים בכיוונים מנוגדים ובמהירויות שוות. אך אם כלל 2 נכון, לעולם לא נצפה במקרה בו גופים נסוגים אחרי ההתנגשות, הואיל ובאופן מעשי אין גופים השווים לחלוטין (בעלי מספר שווה של אטומים): גוף אחד תמיד "מעט" גדול מהשני. זה לא מה שקורה במציאות...

כלל זה מאפשר להבין את תפיסתו של דקארט: הוא הפריד לחלוטין בין הכיוון והתנועה, וחשב במונחים של תנועה כגודל סקלרי (תמיד חיובי) של התנועה (mv). ברגע שכמות התנועה גדולה יותר ב-B הוא מתגבר על התנועה של C ושניהם ממשיכים שמאלה. הם ממשיכים כמעט באותה המהירות (ככל שהמסות קרובות בגודלן) וכך, לדעתו של דקארט, משמרים את כמות התנועה כפי שהייתה לפני ההתנגשות.

דקארט ממשיך:<sup>19</sup>

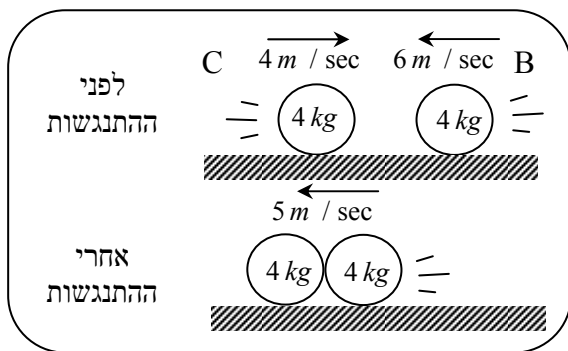
#### 48. הכלל השלישי.

אם שני הגופים היו שווים במסה, אבל B היה נע מעט מהר יותר מאשר C, לא רק ששניהם ימשיכו לנוע שמאלה, אלא גם חצי מאותו חלק המהירות בו B עולה על C, יעבור מ-B ל-C. כלומר, אם לפני כן היו 6 דרגות של מהירות ב-B ורק 4 ב-C, אחרי ההתנגשות ההדדית כל אחד מהם יטֵה לכיוון שמאל עם 5 דרגות של מהירות.

נציג את המתרחש על ידי תרשים הבא:

<sup>18</sup> Ibid. p.65.

<sup>19</sup> Ibid.



זוהי שוב קביעה שגויה, אך עקבית עם תפיסתנו השגויה של דקארט שהוצגה קודם: שימור כמות התנועה (הסקלרית) בהתנגשות. הפעם זה ברור יותר כי דקארט מספק מספרים מדויקים המדגימים את הסברו. אם כמות התנועה מוגדרת כמכפלה של המסה במהירות  $v$  (ללא כיוון), אז כמות התנועה הגבוהה יותר של B היא שהעניקה לו את הניצחון בכיוון התנועה. עתה, ללא קשר שומר דקארט על כמות התנועה, כששני הגופים ינועו לאחר התנועה: המהירות צריכה להיות 5 מטרים בשנייה (המסות שוות) על מנת לשמר את כמות התנועה:

$$4 \times 4 + 4 \times 6 = (4 + 4) \times 5$$

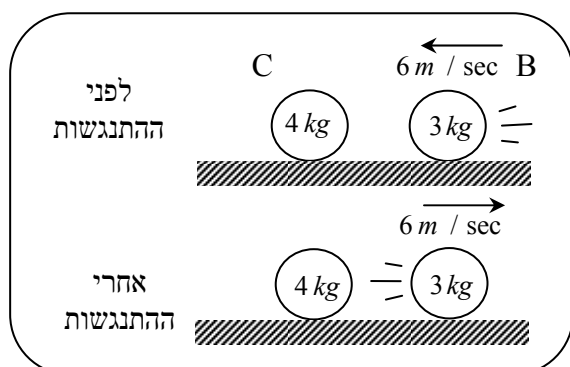
אך במציאות הרציפות מחייבת, כי לא יכול להיות הבדל קיצוני מהכלל הראשון, במקרה בו B נע רק מעט מהר יותר מ-C. אם הכלל הראשון נכון, אחרי ההתנגשות על הגופים לסגת במהירויות השונות בגודלן אך רק "במעט" (B מעט איטי יותר מ-C).

דקארט ממשיך:<sup>20</sup>

#### 49. הכלל הרביעי.

אם הגוף C היה במנוחה מוחלטת... והיה מעט גדול יותר מ-B, אין זה משנה מה הייתה המהירות של B לכיוון C, הוא לעולם לא היה מזיז את C, אלא היה נסוג ממנו בכיוון ההפוך; בגלל שגוף במנוחה מתנגד למהירות גדולה יותר, יותר מאשר הוא מתנגד למהירות קטנה יותר, וזה ביחס לעודף של אחד על פני השני. ולכן, תמיד יהיה ב-C כוח מתנגד גדול יותר, מאשר ב-B כוח דוחף.

נציג את המתרחש על ידי תרשים הבא:



הנתונים בתרשים הם לצורך הדגמה בלבד

<sup>20</sup> Ibid. p.66.

הבנה זו של דקארט זרה לחלוטין למכניקה הקלאסית, בה, אם C נותר במנוחה ו-B מוחזר, התנע הכולל לא היה נשמר, אך דקארט מחשב את כמות התנועה אחרת, ללא כיוון. מעבר לכך, קיימת כאן בעיה נוספת: דקארט מאמין כי תנועה ומנוחה אינן שוות – תפיסה שגויה של המכניקה הקדומה שהחלה באריסטו ותוקנה על ידי גלילאו.

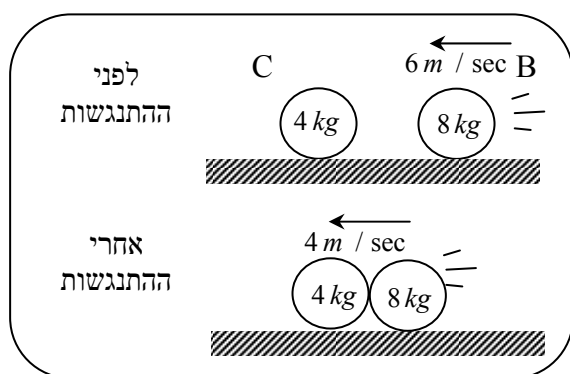
במסגרת התפיסה שלו, משער דקארט כי הכוח המתנגד לתנועה מצד גוף גדול יותר במנוחה, מנצח את "כוח התנועה" של הגוף הקטן יותר. דקארט מפר את הסימטריה פעולה-תגובה (החוק השלישי של ניוטון): גם עם כוח התנועה עולה עם עליית המהירות של B, הכוח המתנגד גדל בעוצמתו עוד יותר ושומר על מצב המנוחה של C לאחר ההתנגשות. נציין רק שעליית כוח התנועה עם המהירות תואמת לאינטואיציה: כוח חזק יותר נדרש לעצור את הגוף המהיר יותר. עם זאת, דקארט אינו יכול להציל את הטענה של החוק, שנותרת שגויה. כמות התנועה, כפי שהוגדרה על ידי דקארט, נשמרת כאשר גוף B חוזר לאחור עם אותה המהירות.

דקארט ממשיך:<sup>21</sup>

### 50. הכלל החמישי.

אם גוף C שבמנוחה קטן מ-B אז אין זה משנה עד כמה ינוע B לקראתו באיטיות, B יניע את C יחד איתו על ידי העברת חלק כזה מתנועתו ל-C כך שלאחר ההתנגשות שניהם ינועו באותה המהירות. כלומר, אם B גדול פי שניים מ-C הוא יעביר לו שליש ממהירותו, משום ששליש זה יניע את C באותה המהירות כפי ששני [החלקים] הנוותרים [יניעו את B [שהוא] גדול פי שניים. ולכן, לאחר ש-B התנגש עם C, הוא ינוע במהירות הקטנה בשליש מאשר קודם, כלומר, בכדי לנוע למרחק של שני רגל הוא יצטרך זמן השווה לזמן שנדרש קודם לכן על מנת לנוע מרחק של שלושה. באותו האופן; אם B היה גדול מ-C פי שלושה, הוא היה מעביר אליו את החלק הרביעי של תנועתו, וכן הלאה.

נציג את המתרחש על ידי תרשים הבא:



גם במקרה זה המסה הגדולה גוברת, וכופה את מצבה (במקרה זה, מצב התנועה) על המסה הקטנה שבמנוחה. דקארט ממשיך לדאוג לשימור כמות התנועה שלו ( $mv$ ), כיוון התנועה של B, אך מניח, גם כן ללא כל סיבה, את קיומה של המהירות המשותפת של שני הגופים לאחר ההתנגשות. ואכן, בעזרת המספרים שבתרשים אנו רואים ש-:

<sup>21</sup> Ibid. p.67.

לפני ההתנגשות:  $(mv)_{\text{tot}} = 8 \times 6$  ואחריה:  $(mv)_{\text{tot}} = (4+8) \times 4$ .

כלומר, כמות התנועה נשמרת.

במכניקה הקלאסית, על מנת להסביר התנגשות אלסטית, יש לדאוג לשימור התנע כמו לשימור האנרגיה הקינטית, שלא הייתה ידועה לדקארט. כתוצאה מאילוף נוסף זה, המסקנה של דקארט לגבי המהירות המשותפת של הגופים לאחר ההתנגשות הופכת להיות שגויה לחלוטין.

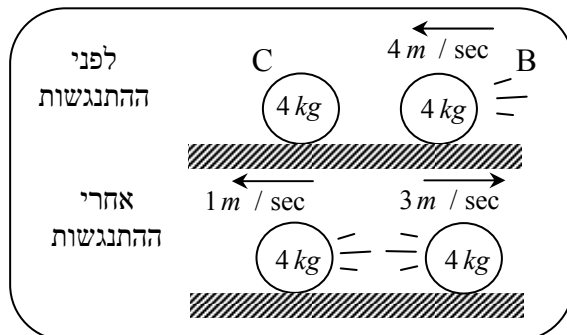
חשוב לציין שאם מיישמים את עיקרון היחסיות (שגם הוא לא התקבל על ידי דקארט, שפעל לאחר פרסומו של גלילאו) מתברר שכלל זה סותר את הכלל הרביעי. ואכן, דמינו את עצמכם יושבים על B. מבחינתכם B הוא במנוחה בעוד C מתקרב אליו. בהתאם לכלל הרביעי, גוף B יישאר במנוחה בעוד C ייסוג אחורה (ולא ינוע יחד עם C, כפי שנקבע בכלל החמישי).

דקארט ממשיך:<sup>22</sup>

### 51. הכלל השישי.

אם גוף C, המצוי במנוחה, שווה בגודלו במדויק לגוף B הנע לקראתו, הוא יידחף מעט על ידי B וגם ידחוף אותו מעט בכיוון ההפוך. כלומר, אם B יתקרב אל C במהירות של 4 דרגות, הוא יעביר ל-C דרגה אחת ועם שלוש הדרגות הנותרות יחזור בכיוון הנגדי.

נציג את המתרחש על ידי תרשים הבא:



כלל זה יכול להיראות מוזר מאוד, אך ניתן להסבירו<sup>23</sup> כשילוב של שני כללים קודמים. הואיל ו-C אינו גדול ואינו קטן מ-B, תהייה לו נטייה מסוימת להגיב כאילו היה קטן מ-B, ולשניהם יחד לנוע במהירות של שתי דרגות (הכלל החמישי). עם זאת, ל-C תהייה נטייה שווה להגיב כאילו הוא גדול יותר – ולכן לא לנוע כלל (הכלל הרביעי). הממוצע של שתי הנטיות הללו נותן את אותה

$$\frac{2+0}{2} = 1 \quad \text{ומהירות של גוף C:} \quad \frac{4+2}{2} = 3$$

תוצאה זאת של דקארט מדגימה שוב (על סמך הנתונים שניתנו) שדקארט משמר את ה"תנע" שלו – המכפלה של גודל הגוף במהירות – ולא את זה שלנו – המכפלה של המסה במהירות (גודל ווקטורי). פירוש השימור של דקארט הוא:

$$4 \times 4 = 4 \times 3 + 4 \times 1$$

<sup>22</sup> Ibid., p.67.

<sup>23</sup> Ibid., p.68, and Banham, G. (2009), Descartes' Kinematics. *Parallax*, 15(2), 69-82.

כשכיוון התנועה מוזנח.

ושבו מפר דקארט, בכלל זה, את עיקרון היחסיות: המקרה של הכלל השישי שווה ערך למקרה של הכלל הראשון, כאשר שני הגופים מתקרבים זה אל זה במהירות של 2 יחידות. כלומר התוצאה, לפי הכלל הראשון (מעבר למערכת ייחוס בה שני הגופים מתקרבים באופן סימטרי והמעבר חזרה למערכת הייחוס התחלתית) צריכה להיות:

גוף B נעצר וגוף C ינוע במהירות שהייתה ל-B



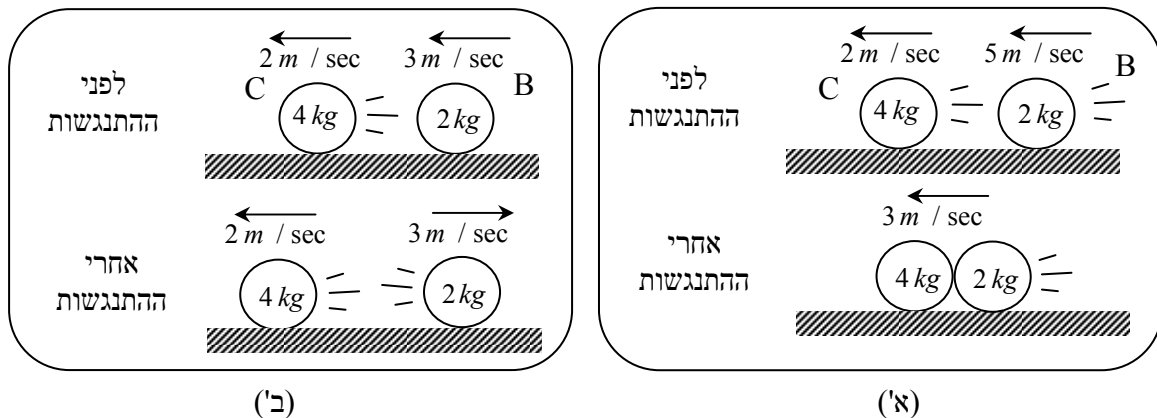
אך מעבר לכך, העובדה המפתיעה היא שהמקרה המתואר בכלל השישי, ידועה לכל מי שפעם שיחק בכדורים קשיחים (ביליארד או משחק דומה). תוצאת ההתנגשות בין שני כדורים זהים, כשאחד נע כלפי השני המצוי במנוחה, היא שהראשון נעצר והשני ממשיך באותה המהירות. למרות העדויות הכלליות כדליל לשחזור<sup>24</sup>, וכנראה אף המוכרות לו, מתמיד דקארט בתשובה הפרדוקסלית שהוא נותן: כל זאת על מנת

להמשיך ולהיות מתואם עם הכללים הקודמים והעקרונות שנתפסו אצלו כנכונים. דקארט ממשיך לכלל האחרון:<sup>25</sup>

### 52. הכלל השביעי.

לבסוף, אם B ו-C היו נעים באותו הכיוון, C לאט יותר ו-B רודף אחריו מהר יותר, כך שלבסוף הוא מגיע אליו, ואם גוף C גדול יותר מ-B אבל עודף המהירות של B היה גדול יותר מעודף הגודל של C [תרשים א], אז B היה מעביר ל-C כמות כזו מתנועתו כך ששניהם היו נעים לאחור מכן באותה המהירות ובאותו הכיוון. אך אם, בניגוד לכך, עודף המהירות של B היה קטן מעודף הגודל של C [תרשים ב], B יוחזר בכיוון ההפוך וישמור על כל מהירותו. ועודפים אלו מחושבים להלן: אם C היה גדול פי שניים מ-B ו-B לא היה נע פי שניים מ-C, B לא היה דוחף את C, אלא מוחזר בכיוון ההפוך [תרשים ב]. אך אם הוא היה נע במהירות שהיא גדולה מפי שניים, הוא היה דוחף את C [תרשים א]. כלומר אם ל-C יש שתי דרגות של מהירות ול-B יש חמש דרגות, מ-B יילקחו שתי דרגות שבעוברן אל C יהפכו לדרגה אחת בלבד, הואיל ו-C גדול פי שניים מ-B. במקרה זה שני הגופים B ו-C ינועו לאחור מכן עם שלוש דרגות של מהירות.

נציג את המתרחש על ידי תרשים הבא:



<sup>24</sup> פרופסור יאן מרצ'י מפראג ערך ניסוי מרשים, שהראה את המתרחש בהתנגשות בין שני גופים קשים זהים. תיאור הניסוי מופיע בהמשך.

<sup>25</sup> Descartes, *op. cit.* p.68.

מיד אחרי כן אנו קוראים את הטענה של דקארט שקשה להחמיץ אותה :

ובאופן זה יש לבחון מקרים אחרים. וההוכחות הן כה ודאיות, שגם אם נראה לנו שהניסיון מצביע על ההפך, אנו מחויבים לתת את אמוננו בשכלנו יותר מאשר בחושינו.

הכלל השביעי מתייחס למקרה כללי למדי של התנגשות בין שני גופים קשיחים שאינם שווים, הנעים באותו הכיוון במהירויות שונות. במקרה זה, על מנת להחליט מי "מנצח" (כלומר בעל "כוח תנועה" גדול יותר) משווה דקארט את כמויות התנועה שלהם. במקרה (א) B גובר וכופה את השינוי במצב התנועה על C ( $10 > 8$ ). דקארט משמר את הכמות הכוללת של התנועה :

$$2 \times 5 + 4 \times 2 = 4 \times 3 + 2 \times 3$$

עם זאת, במקרה (ב), C הוא בעל כוח תנועה גדול יותר ( $8 > 6$ ) ולכן הוא זה שגובר. מבחינת דקארט זה אומר ש-C אינו משנה את מצב התנועה שלו. B נאלץ לסגת לאחור, אבל לא לאבד מתנועתו (גודל מהירותו). הכמות הכוללת של התנועה שוב נשמרת :

$$4 \times 2 + 2 \times 3 = 4 \times 2 + 2 \times 3$$

מנקודת הראות של המכניקה הקלאסית, הכלל של דקארט מפר הן את עיקרון השימור של התנע והן את עיקרון השימור של האנרגיה הקינטית.

\* \* \*

בני זמנו של דקארט הבחינו מהר שמרבית הכללים שהציע דקארט על מנת להציג את החוקיות בהתנגשויות, אינם תואמים את המציאות. דקארט הבין היטב שהכללים שלו יבוקרו מסיבה זאת. אך למרות זאת, הוא לא שינה את דעתו : הוא האמין בהנמקה המסתמכת על עקרונות "הנכונות", ובהסקת מסקנות הגיוניות מהם. ואם כתוצאה מכך צריך להתעלם מעדות ניסויית, כך יהיה. בסעיף הבא, מתייחס דקארט לאי ההתאמה האפשרית בין ההתנגשויות הנצפות לכללים אותם ניסח:<sup>26</sup>

53. השימוש בכללים אלו הוא קשה, מהסיבה שכל גוף בא במגע עם גופים רבים בו זמנית. אולם, הואיל ואין שום גוף בעולם אשר ניתן להפרידו כך מכל האחרים, ואין גופים סביבנו שיהיו קשים לחלוטין, יהיה קשה לחשב ולקבוע כמה מהתנועה של כל גוף תשתנה עקב ההתנגשות עם האחרים. זאת משום שבו זמנית יש צורך בכל הידע של כל אלו שבאים במגע איתו בכל צדדיו, ולאילו יש השפעה מאוד שונה ביחס אליו [*quantum ad hoc*], בהתאם להיותם מוצקים או זורמים. ולכן, יש כאן צורך לחקור מה כולל הגיוון שלהם. למעשה, לעיתים קורה שהניסיון נראה בתחילה כסותר את הכללים שהצגתי כעת, אך הסיבה לכך היא ברורה. משום שכללים אלה מניחים מראש ששני הגופים B ו-C הם קשים באופן מושלם, ומופרדים מכל האחרים באופן שאין אף אחד סביבם שיכול לעזור או לסכל את תנועתם; אבל אין אנו רואים גופים כאלו בעולם.

כאן טוען דקארט שאי ההתאמה היא תוצאה של מורכבות הסביבה האמיתית, בניגוד למצבים האידיאליים – עולם ריק לחלוטין – ושאינו תואם למציאות כפי שהיא – עולם ללא ריק, אלא מלא בתווך חומרי. אולם המצב גרוע אף יותר : אפילו בחלל ריק אין הגופים מצייתים לכללים של דקארט, אלא לעקרונות של המכניקה כפי שהם ידועים לנו כיום, כמו עקרון היחסות, שימור

<sup>26</sup> Ibid, p. 69.

התנע הווקטורי, ושימור האנרגיה הקינטית בהתנגשויות אלסטיות. ניסויים מבוקרים מדגימים זאת. כיום ניתן לפקח על ההשפעה של התווך, לדלל אותו כרצוננו, וכך להקטין את השפעתו. ההתנהגות הנצפית של הגופים לעולם לא מתקרבת לתחזיות של דקארט.

התאוריה החלופית לזו של דקארט פותחה מהר מאוד לאחר פרסום העקרונות שלו. תהליך זה החל בקבלת החוקים האמפיריים ששולטים בהתנגשויות. העקרונות הבסיסיים של המכניקה – חוק ההתמדה ועיקרון היחסות – נבחנו תוך התקרבות אל המקרה האידיאלי, והסקת מסקנות על ידי אקסטרפולציה – האופן בו הפיזיקה חוקרת את המציאות. החוקים החדשים של התנגשות הובילו אל התיאוריה החדשה, ללא פנייה לגורמים מטפיזיים, שכל כך בלטו בפילוסופיה של דקארט.

\* \* \*

### השיח עם דקארט והפרכת תפיסותיו לגבי התנגשויות

עבודתו המקורית של דקארט מדגימה את השאיפה של מדעני המאה ה-17 לקבל תמונה מכניסטית של היקום. ההסבר להתנגשויות היה במוקד מאמצי המחקר, הואיל והוא היה המודל הכי מוחשי של הפעולה הדדית בין גופים חומריים.

שלא כמו פילוסופית הטבע של הזמן הקדום, ושלא כמו דקארט, היו כמה חוקרים שניסו לקבל קודם כל תיאורים ניסויים לחוקים הכמותיים השולטים בטבע, בין אם ניתן היה להסבירם תיאורטית, ובין אם לאו.

כזו הייתה תרומתו המפורסמת של גלילאו, שהצליח להדגים בניסוי שעצמים לא סתם נופלים, אלא שהם נופלים בתאוצה קבועה של נפילה חופשית –  $g$ , אחידה לכל הגופים. השגת ידע דומה ביכולת ההכללה לגבי התנגשויות בין גופים חומריים, הפכה למטרה עבור כמה חוקרים של המאה ה-17. בשנת 1668 פרסמה החברה המדעית, שנוסדה לא מכבר בלונדון – "החברה המלכותית הבריטית" – קריאה לתחרות בביצוע מחקר שיוכל לספק הסבר מהימן להתנגשויות בין גופים חומריים.

אולם מחקר כזה היה קשה לביצוע, והסיבה לכך הייתה שהמדענים התקשו לדעת כיצד ניתן למדוד את המהירויות לפני ואחרי ההתנגשויות. בניסויים שערך, הצליח גלילאו להסיק לגבי המהירויות רק בקושי רב, וזאת על ידי מדידת המרחקים של הגופים שנעו על גבי המישור המשופע ופרקי הזמן שעברו. מדידת הזמן היוותה קושי מיוחד ולקתה בחוסר דיוק משמעותי במיוחד בפרקי זמן קצרים (שקילת כמות המים בטפטפת...). חקר ההתנגשויות דרש דיוק גבוה יותר, ולכן גם טכניקה אחרת בביצוע של הניסוי.



אדם מריוט

על הפיתרון האלגנטי של הבעיה אנו לומדים ממחקריו של מריוט<sup>27</sup> [Mariotte], שפורסמו בפריז בשנת 1677. מריוט הציע למדוד את מהירותם של גופים מתנגשים ( $m, M$ ) על ידי הפיכתם למשקולות של מטוטלת (תרשים 1). לאחר גלילאו היה ידוע שגובה העלייה של גוף נזרק הוא פונקציה של

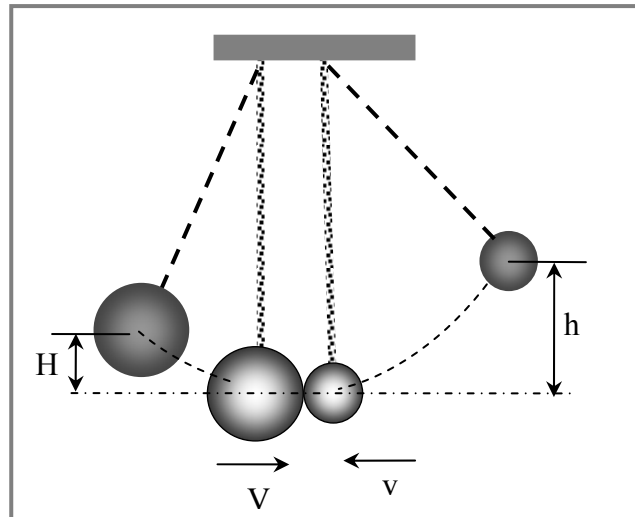
<sup>27</sup> Edme Mariotte (1620-1684) – French priest and physicist, member of the Academie des Sciences.



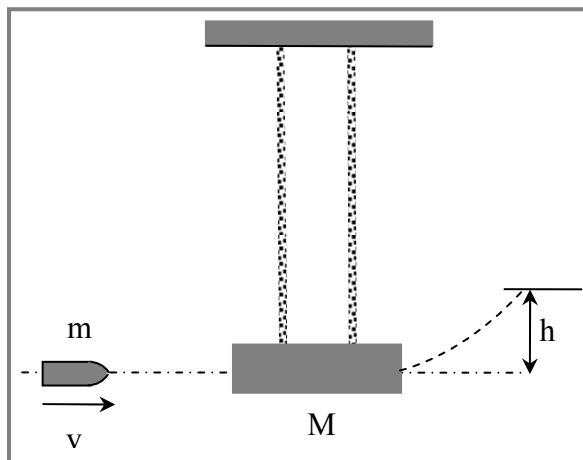
המהירות ההתחלתית בלבד, והקשר הוא ריבועי:  $h \propto v^2$ . קשר זה הושג כתוצאה אמפירית, שהרי היה זה עוד לפני פרסומו של העקרון של ניוטון, שגם הוא לא כלל עדיין את שיקולי האנרגיה המכנית. כיום אנו מצדיקים בקלות את הקשר בין גובה העלייה של המטוטלת למהירותה בנקודה הנמוכה:  $v = \sqrt{2gh}$ .

יחס זה בין המהירות והגובה אפשר לחוקרים למדוד בקלות את מהירותם של הגופים המתנגשים על ידי מדידת הגובה אליו התרוממו לאחר ההתנגשות, וזאת הייתה כבר מדידה פשוטה.

**תרשים 1.** תיאור סכמטי של המערכת הפיזיקלית (שתי מטוטלות צמודות) שהוצעה על ידי מריוט על מנת לחקור את הסדרויות בהתנגשויות בין גופים ולהסיק על המהירויות שלהם בזמן ההתנגשות.



בכך לא היה די. עבור המקרה בו לא ניתן היה להפוך את אחד הגופים למטוטלת, תאר מריוט מתקן המכונה כיום בשם "מטוטלת בליסטית" (תרשים 2).



במתקן זה, משקולת המטוטלת היא גליל כבד (M) המתנגש עם גוף קטן (קליע – m) המגיע במהירות גבוהה. שוב, הגובה (h) אליו מתרומם הגליל כתוצאה מההתנגשות מלמד על המהירות הנגרמת על ידי ההתנגשות – והוא מצוי ביחס ריבועי למהירות הקליע:

$$v = \sqrt{2 \frac{M+m}{m} gh}$$

$$h \propto v^2 \text{ עדין:}$$

**תרשים 2.** תיאור סכמטי של מטוטלת בליסטית.

**הצעד הבא: התנגשות לא אלסטית**



ג'ון וואליס

ההצלחה הראשונה בהמשך המאמצים של חקר ההתנגשויות הושגה בהסבר להתנגשות לא אלסטית לחלוטין, התנגשות מהסוג שדקארט פשוט הזניח, והותיר ללא הסבר כמותי כלשהו. המחקר בוצע בשנת 1668, והתוצאות הוצגו בפני החברה המלכותית של לונדון על ידי ג'ון וואליס

[John Wallis], מתמטיקאי ופיזיקאי אנגלי ידוע שחי בשנים 1616-1703. וואליס התייחס לשני גופים הנעים בקו ישר. בפיתוח שלו אימץ וואליס את המושג כמות התנועה. עם זאת, הפעם, שלא כמו דקארט, הציע וואליס ערכים חיוביים ושלייליים לכמות התנועה  $mV$ : שתי המהירויות היו חיוביות כששני הגופים נעו באותו הכיוון לפני ההתנגשות, ושליילית וחיובית – כשהגופים המתנגשים נעו בכיוונים הפוכים.

במחקריו, הבחין וואליס בין גופים קשים לחלוטין (שלא התעוותו בשום אופן במהלך בהתנגשות), גופים אלסטיים (אלו שצורתם התעוותה במהלך ההתנגשות אך חזרו באופן ספונטני לצורתם המקורית) וגופים רכים (אלו שהתעוותו במהלך ההתנגשות ולא חזרו לצורתם המקורית, אלא נשארו מעוותים). אלה האחרונים, במקרה הקיצוני, נצמדו יחד במהלך ההתנגשות המשיכו לנוע כגוף אחד. וואליס הצליח במיוחד בתיאור כמותי של התנגשות רק בהקשר של המקרה האחרון, וקבע את הכלל לחישוב המהירות השקולה ( $u$ ), שהיא המהירות המשותפת לשני הגופים

$M$ -ו- $m$  שנעו בתחילה במהירויות  $v$  ו- $V$

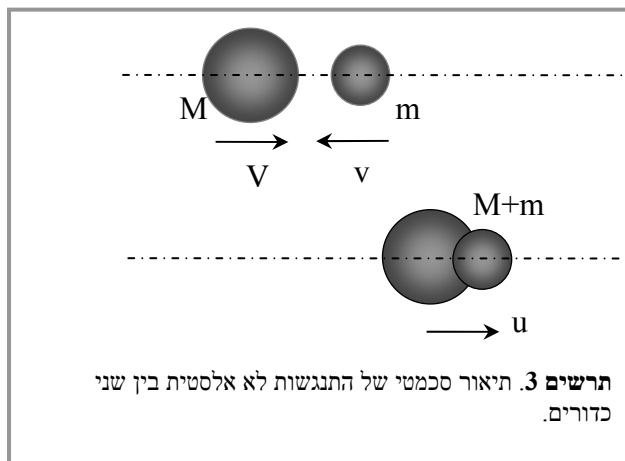
בהתאמה<sup>28</sup> (תרשים 3):

$$u = \frac{MV \pm mv}{M + m}$$

תוצאה זו נובעת באופן ישיר משימור התנע (כמות התנועה) של שני גופים, לפני ואחרי ההתנגשות<sup>29</sup>:

$$MV \pm mv = u(M + m)$$

כפי שהוזכר, הסימן  $\pm$  שימש לציון שני המקרים של המהירויות, כאלו



בעלות כיוון משותף, או כאלו בעלות כיוונים מנוגדים לפני ההתנגשות. צעד זה הביא לשיפור משמעותי בתוצאותיו של דקארט, שכאמור הפריד בין כמות התנועה (גודל סקלרי) ובין כיוונה ("השאיפה" שלה). עבור וואליס הפכה כמות התנועה להיות *גודל אלגברי* – צעד אחד לפני הגודל הווקטורי בו אנו משתמשים כיום כדי לתאר את התנועה במישור ובמרחב, כלומר כאשר הגופים המתנגשים לא נעים בקו אחד.

### עוד צעד: התנגשות אלסטית

וואליס התייחס גם להתנגשויות אלסטיות שהתרחשו כאשר גופים קשים או אלסטיים התנגשו זה בזה. עם זאת, הוא תאר רק מקרה מיוחד של התנגשות כזו: כאשר שני גופים זהים נעים במהירויות שוות בכיוונים מנוגדים (תרשים 4). במקרה זה כל גוף נסוג לאחור והגופים מחליפים מהירויות. כזכור, מקרה זה היה היחיד שטופל נכונה על ידי דקארט (הכלל הראשון שלו) והוא קיבל אישוש גם אצל וואליס.



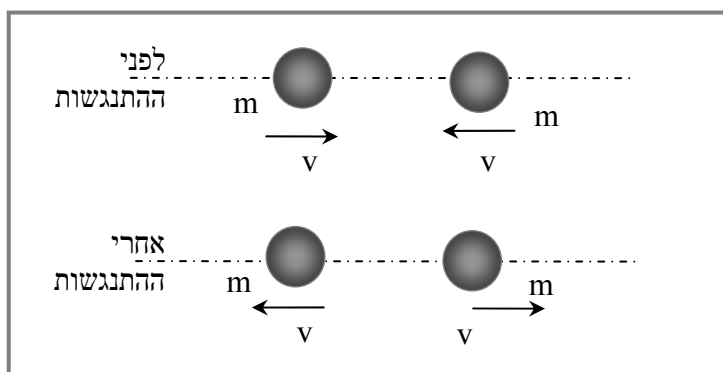
כריסטופר רן

<sup>28</sup> למעשה, ניסח וואליס את הכלל במונחים של משקלים ולא מסות... רק ניוטון, כמה שנים מאוחר יותר, הבדיל בין המסה והמשקל כמושגים שונים.

<sup>29</sup> Dugas, R. (1988). *A History of Mechanics*. Dover, New York, pp. 172-175.

המשך ההתקדמות בהסבר האמפירי של ההתנגשות האלסטית הושג בשנת 1669 על ידי כריסטופר ורן<sup>30</sup> [Christopher Wren] שחי בשנים (1632-1723). הניסויים שלו שוחזרו והורחבו על ידי מריוט בשנת 1677.

עם זאת, ההסבר הבשל ביותר להתנגשויות אלסטיות ניתן על ידי כריסטיאן הויגנס<sup>31</sup> [Christian Huygens] שהצליח ליישם את עקרון היחסות החדש שהוצג על ידי גלילאו, על מנת לנסח חוק כללי וכמותי להתנגשויות אלסטיות.



תרשים 4. תיאור סכמטי של התנגשות אלסטית בין שני גופים זהים

לצורך זה, החל הויגנס מהמקרה הברור והידוע לכל: שני גופים קשיחים שווים המתקרבים זה לקראת זה במהירויות שוות. התוצאה – נסיגתם לאחור באותה המהירות (במילים אחרות, החלפת המהירויות בהתאם לחוק הראשון של דקארט) – שימשה להויגנס הנחת הסוד (אותה הוא כינה השערה). לאחר מכן השתמש הויגנס בעיקרון הקובע שכל הטענות הנוגעות להתנגשויות, לשוויון או לאי השוויון של המהירויות, צריכות להיחשב באופן יחסי בלבד, כלומר ביחס לגופים אחרים הנחשבים כמצויים במנוחה.<sup>32</sup> זו הייתה פריצת דרך ביחס לעבודתו של דקארט.



תרשים 5. ציור מתוך חיבורו של הויגנס, *De Motu ex Percussione* משנת 1656 (יצא לאור לאחר מותו, בשנת 1703).



כריסטיאן הויגנס

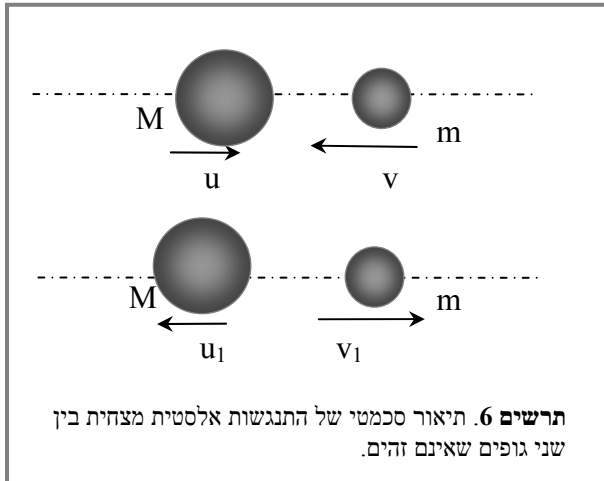
<sup>30</sup> כריסטופר ורן היה ידוע בעיקר בזכות היותו האדריכל של לונדון באותה התקופה, אך בהיותו אדם תרבותי בעל עניין אינטלקטואלי רחב, הייתה לו תרומה גם בתחום הפיזיקה.

<sup>31</sup> כריסטיאן הויגנס – פיזיקאי דגול, אחד ממייסדי המדע המודרני והמכניקה הקלאסית במאה ה-17.

<sup>32</sup> זו עשויה להיראות לנו כקביעה פשוטה ומובנת. עם זאת, היחסיות הבלתי מותנית של התנועה היא שהרחיקה מהפיזיקה את מושג הדחף (*impetus*) הימי-ביניימי, שהובן לעיתים קרובות כסוג של מאפיין מוחלט של הגוף הנע – מעין "מטען" של תנועה.

בהתבססו על עקרון זה חזר הויגנס להנחה בדבר התנגשותם של שני גופים שווים הנעים באותן המהירויות, והציע לדמיין כאילו היא מתרחשת מנקודת הראות של נוסע על ספינה (תרשים 5). הוא גם בחן כיצד תראה ההתנגשות על ידי אדם המצוי על הגדה, אם הסירה נעה באותה המהירות  $v$ . הויגנס הסיק את משפט  $I$  אשר תיקן את הטענה השגויה של דקארט (ראה הכלל השישי שלו):<sup>33</sup>

אם גוף מצוי במנוחה וגוף שווה לו מתנגש בו, לאחר ההתנגשות ימצא הגוף השני במנוחה והראשון ירכוש את המהירות שהייתה לשני לפני ההתנגשות



לאחר מכן פיתח הויגנס את המקרה ההתחלתי של התנגשות סימטרית, למקרה כללי של גופים לא שווים עם יחס מסוים בין המהירויות והמסות שלהם (משפט VIII):<sup>34</sup>

אם שני גופים נעים בכיוונים מנוגדים ובמהירויות המצויות ביחס הפוך לגודלם, מתנגשים זה בזה, כל אחד מהם נסוג לאחור במהירות שהייתה לו לפני ההתנגשות.

תוצאה כללית זאת מפריכה את חוק ההתנגשות (החוק השלישי) של דקארט ומסקנותיו. עם זאת, היא תאמה היטב את העובדות שהתקבלו בניסויים מבוקרים.

קל לראות שמשפט VIII לגבי התנגשות של הויגנס הולם גם את עקרון שימור התנע כפי שאנו משתמשים כיום. ואכן, אם  $M$  ו- $m$  הן מסות של גופים מתנגשים הנעים במהירויות  $u$  ו- $v$  בהתאמה, וכאשר יחס המסות הוא:  $\frac{M}{m} = -\frac{v}{u}$ , אזי הפתרון לגבי המהירויות  $u_1$  ו- $v_1$  אחרי ההתנגשות:  $u_1 = v$  ו- $v_1 = u$  (תרשים 6), תואם לחלוטין את הטענה הכללית של שימור התנע:

$$Mu + mv = Mu_1 + mv_1$$

כפי שרואים בהצבה ישירה.

בעקבות רן שצפה באימות ניסויי של חוק זה, כינה הויגנס את המהירויות הללו *מהירויות תואמות*.<sup>35</sup>

משפט XI של הויגנס היה, עם זאת, בעל עניין מיוחד. אנו קוראים בו:<sup>36</sup>

בהתנגשות הדדית בין שני גופים, סכום המכפלות של המסות בריבועי המהירויות המתאימות, זהה לפני ואחרי ההתנגשות.

אם נכתוב טענה זו בצורה סימבולית מודרנית נקבל:

<sup>33</sup> Dugas, R. *op.cit.*, p. 177 [Huygens, *De Motu corporum ex percussione* (1700).]

<sup>34</sup> *Ibid*, p. 178.

<sup>35</sup> האופן בו הציג הויגנס עצמו את המשפט הזה מופיע ב-Dugas, במקור שצוטט לעיל, בעמוד 179.

<sup>36</sup> Wolf (1968). *A History of Science, Technology and Philosophy in the 16<sup>th</sup> and 17<sup>th</sup> Centuries*, Peter Smith, Gloucester, Mass., p. 233.

$$Mv^2 + mu^2 = Mv_1^2 + mu_1^2$$

למעשה, הייתה זו הטענה לגבי שימור הגודל שהוגדר על ידי לייבניץ<sup>37</sup> [Leibniz] וכונה על ידו *הכוח החי* (vis viva). גודל זה נשמר בהתנגשות של גופים קשים (התנגשות אלסטית). היה זה צעד חשוב בדרכה הארוכה של הפיזיקה אל עבר עיקרון שימור האנרגיה. בהמשך נשחזר את הדרך בה התקבל חוק שימור זה.

כפי שכבר נקבע על ידי רן באופן ניסויי, התנגשות בין שני גופים יכולה להיות מאופיינת על ידי שינוי מהירותם היחסית לפני ואחרי ההתנגשות, ללא קשר למסות של הגופים המתנגשים. אם המהירויות ההתחלתיות של הגופים לפני ההתנגשות היו  $u$  ו- $v$  ונניח שהמהירויות הסופיות היו  $u_1$  ו- $v_1$ , אז עלינו לקחת בחשבון את היחס<sup>38</sup>:

$$e = \frac{v_1 - u_1}{u - v}$$

ברור, שכשהגופים מתנגשים ברכות ונצמדים זה לזה,  $v_1 = u_1$  והיחס הזה מתאפס ( $e=0$ ). הניסוי מראה ש- $e$  יכול להתקרב לכל היותר לערך 1, שזהו המקרה של *התנגשות אלסטית* (גופים קשים לחלוטין). לכן, עבור התנגשות אלסטית בין שני גופים מתקבל הכלל הניסויי הבא:

*בהתנגשות אלסטית, המהירות היחסית של שני הגופים נשמרת.*

עבור כל מקרי הביניים של ההתנגשויות, הערך של  $e$  (המכונה בהצדקה ברורה "מקדם התקומה") מצוי בתחום שבין 0 ל-1:

$$0 \leq e \leq 1$$

אם כן, במקרה של התנגשות אלסטית:

$$v_1 - u_1 = u - v \quad \text{or} \quad v + v_1 = u + u_1$$

כמו כן, שימור התנע באותה התנגשות קובע:

$$Mu + mv = Mu_1 + mv_1 \quad \text{or} \quad M(u_1 - u) = -m(v_1 - v)$$

המכפלה של שתי המשוואות האחרונות מספקת את הביטוי:

$$M(u_1^2 - u^2) = -m(v_1^2 - v^2)$$

וארגון מחדש של האיברים במשוואה זו נותן:

$$Mu^2 + mv^2 = Mu_1^2 + mv_1^2$$

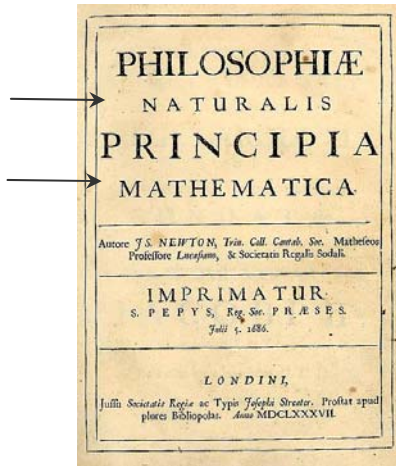
כך, היה הויגנס מסוגל להגיע לחוק ההתנגשות, שהיה למעשה הטענה בדבר שימור האנרגיה הקינטית בהתנגשות אלסטית (הניסוח המדויק צריך לכלול, כמובן, את המקדם 1/2 בכל הביטויים, שלא היה ידוע אז, אך אינו משנה את התקיפות המשוואה מבחינה כמותית).

<sup>37</sup> Leibniz, G. W. (1695/1968). *Discourse on Metaphysics*. The Open Court, La Salle, Illinois, pp. 29 - 31

<sup>38</sup> Taylor, L.W. (1941). *Physics. The Pioneer Science*. Dover, New York.

חשיבותה של תוצאה זו הייתה מעבר לטענת השימור, החשובה לכשעצמה. תוצאה זו שמה קץ לפולמוס שבין דקארט (ניוטון) ובין לייבניץ ביחס לשאלה מהו הגודל שיש לאמץ בתור המאפיין "האמיתי" של התנועה: כמות התנועה,  $mv$ , או הכוח החי הזה,  $mv^2$ . התשובה של הויגנס (ושלנו) תהיה – שניהם. באופן מסוים, שני הגדלים הללו נדרשים לאפיון התנועה והתנגשות: האנרגיה והתנע.

### הפרכה סופית – ניוטון



המילה האחרונה בפולמוס עם דקארט שמורה, כמובן, לניוטון. בהיותו סטודנט בקיימברידג', בשנות העשרה שלו, הוא למד בקפדנות כל מילה ב"עקרונות הפילוסופיה" של דקארט הקשורה לחוקי התנועה ולהתנגשות גופים, העתיק אותם למחברתו ורשם הערות. ניוטון ידע כמובן על הפרכותיהן של טענות דקארט על ידי וואליס, רן והויגנס. הגישה האיכותנית של דקארט לא יכולה הייתה להפיק את הקביעות המתמטיות המדויקות של קפלר ביחס לתנועת כוכבי הלכת. כל זאת, יחד עם השקפותיו הוא והפולמוס שלו עם הוק לגבי כוח הכבידה ותנועת הגופים התואמת לו, המריצו את ניוטון ליצור את אחת היצירות הגדולות של התרבות האנושית

– העקרונות המתמטיים של פילוסופיית הטבע – תשובתו של ניוטון לעקרונות הפילוסופיה של דקארט. ניוטון החל את הפולמוס עם דקארט כבר בכותרת: עקרונות מתמטיים, במקום עקרונות, ופילוסופיית הטבע, במקום פילוסופיה. כבר בתחילה הציג ניוטון את חוקי הטבע שלו, שהיו אמורים להחליף את אלו של דקארט. כאן הם מוצגים בהשוואה:

חוקי הטבע ב"עקרונות" של ניוטון <sup>39</sup>	חוקי הטבע ב"עקרונות" של דקארט
<p><u>חוק I.</u> כל גוף מתמיד במצב של מנוחה או תנועה קצובה בקו ישר, במידה שאינו מאולץ לשנות מצב זה על ידי הכוח המופעל עליו.</p>	<p><u>חוק התנועה הראשון של הטבע:</u> כל גוף, הנעזב לעצמו, יתמיד כל הזמן באותו המצב; ולכן, מה שהוזהר פעם, תמיד ימשיך להיות בתנועה.</p>
<p><u>חוק II.</u> שינוי בתנועה הוא פרופורציוני לכוח המופעל ומתקיים לאורך הקו הישר לאורכו כוח זה פועל.</p> $\Delta(mv) \propto F$	<p><u>החוק השני של הטבע:</u> כל תנועה היא קווית ישרה מטבעה; ולכן מה שהונע במעגל ישאף תמיד להתרחק ממרכז המעגל אותו הוא מתאר.</p>
<p><u>חוק III.</u> לכל פעולה קיימת תמיד תגובה שווה ומנוגדת; במילים אחרות, הפעולות של שני כוחות זה על זה הן תמיד מנוגדות בכיוונם.</p>	<p><u>החוק השלישי:</u> כאשר גוף נע פוגש גוף אחר, אם יש לו פחות כוח על מנת להמשיך בקו ישר מאשר לאחר יש כדי להתנגד לו, אז הוא יפנה לאחור, בשומרו על כמות התנועה, ומשנה רק את השאיפה שלו לנוע באותו הכיוון. אם, לעומת זאת, יש לו כוח גדול יותר, אז הוא יניע את הגוף האחר יחד איתו ויאבד כמות תנועה השווה לזו שהוא מעניק לאחר.</p>

מה היו השינויים העיקריים אותם הציג ניוטון בחוקים שלו? השינויים היו רבים ומהותיים:

<sup>39</sup> Newton, *op. cit.*, pp. 416-417.

1. החוקים הראשונים של שני המלומדים, דקארט וניוטון, עשויים להראות די דומים. עם זאת, מבט קרוב יותר חושף הבדלים מהותיים.<sup>40</sup> החוק של ניוטון כולל את הקשר של גוף לכוח הפועל עליו ומתאר את הנטייה של הגוף לשמר את מצבו, תנועה קצובה בקו ישר או מנוחה, בכל רגע. מצבים אלו, תנועה קצובה בקו ישר ומנוחה, מיוחסים כשווי ערך לחלוטין, שלא כמו אצל דקארט. זהו היה שינוי פרדיגמה בידע הפיזיקלי, שהפך להיות בין המאפיינים המרכזיים של הפיזיקה הקלאסית.

2. החוק השני והשלישי של דקארט הוסרו על ידי ניוטון. במידה מסוימת הם הפכו להשתמעות של החוק השני שלו. כל ה"נטייות" הוסרו לטובת השימוש בכוחות.

באשר לחוק השלישי של דקארט שקבע שימור של (כמות) התנועה, הוא שונה מיסודו. העיקרון של שימור כמות התנועה (הפעם זהו גודל הרגיש לכיוון התנועה – גודל וקטורי במושגים של היום) – נקבע במסקנה III:<sup>41</sup>

כמות התנועה, המתקבלת על ידי סיכום התנועות המכוונות אל אותם החלקים, וההפרש של אלו שמכוונות לחלקים מנוגדים, אינה עוברת כל שינוי כתוצאה מהפעולה ההדדית של הגופים ביניהם לבין עצמם.

טענה זו היא השתמעות ישירה של החוק השני של ניוטון למערכת סגורה של גופים.

3. הטעות היסודית של דקארט, שהחשיב את האינטראקציה בין גופים כתהליך לא סימטרי (במונחים של "מנצחים" ומפסידים) הוסרה על ידי ניוטון בחוק השלישי. ייתכן כי ניוטון קבע טענה זו כחוק נפרד רק בגלל הפולמוס שלו עם דקארט, למרות שלא כמו החוקים הקודמים שהוצגו כאקסיומות (כלומר ללא הוכחה), הוכח חוק זה בהתבסס על החוק הראשון שלו.<sup>42</sup> האינטראקציה בין כל שני גופים נקבעה כסימטרית: כל כוח הפועל שווה (בגודל) לכוח התגובה שלו.

שלא כמו החוקים של דקארט, התאימו חוקי ניוטון באופן כמותי לניסיון במצבים פיזיקליים רבים, ולכן העדיפו אותם המלומדים על פני אלו של דקארט. התוצאות בניסויים מבוקרים רבים והתצפיות במערכות פיזיקליות שונות ומגוונות התאימו למכניקה של ניוטון בדרגת דיוק גבוהה. ובאשר לתוצאות של הויגנס בקשר לשימור ה"כוח החי" (אנרגיה קינטית) – לכך נדרש זמן נוסף. למרות שלא הוצג על ידי ניוטון, תואם מושג זה לחלוטין לתיאוריה שלו, ונכלל מאוחר יותר בגוף הידע שנקרא מכניקה קלאסית.

### שאלות למחשבה

1. הציגו את הרציונל של דקארט באמצעותו הוא התייחס להתנגשויות בין גופים קשים.

2. העבירו ביקורת על כללי ההתנגשות של דקארט.

3. הצדיקו את שמו של הגודל מקדם התקומה:  $e = \frac{v_1 - u_1}{u - v}$ .

4. הדגימו את ההפרה של כללי ההתנגשות של דקארט על ידי עקרון היחסות.

<sup>40</sup> Galili, I. & Tseitlin, M. (2003). Newton's first law: text, translations, interpretations, and physics education. *Science and Education*, 12 (1), 45-73.

<sup>41</sup> Newton, *op.cit.*, p. 420.

<sup>42</sup> *Ibid.*, p. 428.

5. הדגימו כיצד מפריס חוקי התנגשות של דקארט את החוק השלישי של ניוטון.
6. רשמו את ההבדלים בין חוקי התנועה של ניוטון ושל דקארט ודונו בהם.
7. השוו בין כותרות עמודי הפתיחה מתוך ספרם של ניוטון (בפרק זה) ושל דקארט (בתחילת היחידה). דונו בהבדלים ביניהן והסבירו אותם.

\* \* \*

## נקודת ראות היסטורית ופילוסופית

### הידע של דקארט במכניקה - אונטולוגיה

מדע הפיזיקה כולל כמה תיאוריות יסודיות, מעטות אמנם, אך רבות עוצמה, כוללניות ושימושיות. כל אחת מהן יוצרת תמונה ייחודית של העולם. על מנת להבין את העיקר שבהן, את מהותן ואת תחומי תקפותן, יש להציץ אל ההיסטוריה של יצירתן וגיבושן המושגי. בכך, לנו, צרכני הידע של היום, יש את היתרון של מבט לאחור, משום שכיום אנו יודעים הרבה יותר מאשר אותם חלוצים – ולכן אנו יכולים להבין, לפעמים גם ביתר קלות, את המשמעות של הדברים בתחום התוכן אותם הם הציגו, הרחיבו ופיתחו, כפי שזה נראה במסגרת תפסתנו כיום.

המכניקה הקלאסית מהווה אחת מתמונות העולם האלו. בתוכה, כל הגופים משפיעים זה על זה, משנים זה את זה ואת התנועות אלו של אלו. השאלות הבסיסיות אותן שואלת המכניקה הן, מהם החוקים והעקרונות השולטים בתנועות אלו ובשינויים המתרחשים בגופים, וכיצד בדיוק גופים שונים משפיעים אלה על אלה. בהקשר זה, השתמשו המלומדים בשתי דרכי חשיבה עיקריות: פעולה מרחוק (כאשר לעצמים יוחסה יכולת להשפיע זה על זה דרך המרחב, מבלי לשאול כיצד?) ופעולה במגע (כשעצמים משפיעים זה על זה באמצעות מגע ביניהם, גם כאן בלי לשאול מה המשמעות של "מגע", כאשר הגופים נתפסים כמורכבים מאטומים ומריק ביניהם).

בחיבור זה התייחסנו בעיקר להיבטים היסטוריים של התיאוריה הפיזיקלית של התנגשויות שהיוותה מודל של פעולה הדדית (אינטראקציה) בין הגופים.<sup>43</sup> התקדמות משמעותית לקראת הידע החדש בנושא התרחשה במאה ה-17, כשחוקי ההתנגשויות נוסחו לראשונה. בימנו, משתמשים תלמידים בחוקים אלו כשהם לומדים מכניקה ופותרים בעיות הקשורות להתנגשויות. הם מתייחסים אליהן כאל תרגילים שבהם פשוט יש ליישם את חוקי המכניקה הידועים. עם זאת, ההבנה האמיתית של הפיזיקה דורשת יותר מאשר חיבור ופיתרון של משוואות, אלא הכרת התשתית המושגית היסודית. שני עקרונות אונטולוגיים עיקריים שנוסחו על ידי דקארט הודגשו במסע שלנו: (1) התנועה הקצובה בקו ישר ומצב המנוחה נקבעו כמצבים טבעיים, הנשמרים כל עוד אין גורם חיצוני המשנה אותם, ו-(2) עיקרון השימור של כמות התנועה הבא לביטוי בהתנגשות בין גופים. אלו היו שני חוקי התנועה החדשים שהקדימו את אלו של ניוטון.

<sup>43</sup> Wesfall, R.S. (1989). *The Construction of Modern Science*. Cambridge University Press, Cambridge.



על מנת להתרשם במבט כללי מטענותיו האונטולוגיות של דקארט (מרובן, כי לא כולן נדונו ביחידה זו), נציג אותן באופן גרפי המבטא את ההיררכיה שהייתה כל כך חשובה לדקארט (תרשים 7).<sup>44</sup>



#### תרשים 7. פירמידה מושגית של דקארט

אחת הטענות המרכזיות של המדע המודרני של התנועה היא הטענה בדבר שקילות של תנועה קווית ישרה וקצובה ומצב מנוחה. קביעה זו היא מאוד לא מובנת מאליה מבחינת השכל הישר: כיצד יכולים תנועה ומנוחה להיות שקולים? בכתביו של דקארט ניתן להתרשם כי הבנה זו לא הושגה על ידו. לכן, אין זה מפתיע שטענה סתמית בדבר שקילות המנוחה-תנועה הנאמרת על ידי המורה בכיתה, אינה מובילה להבנה של התלמידים. השינוי יכול לבוא אם התלמידים בכיתה מלווים את תהליך הבנייה של רעיון זה, את הצעדים הראשונים ואת ההצלחות והכישלונות כאחד, שנעשו על ידי המוחות המבריקים של העבר תוך כדי דיאלוג ביניהם, וזאת דרך הניסיונות וההסברים המקוריים בהם השתמשו.

למשל, מושג *כמות התנועה* הובן באופן שונה מזה המודרני. שלא כמו התנע, שהוא המכפלה של המסה במהירות כגודל וקטורי, הוגדרה כמות התנועה על ידי דקארט כמכפלה של גודל הגוף במהירות תנועתו כגודל סקלרי. כיוון התנועה ("השאיפה" של הגוף) נחשבה כמושג בלתי תלוי.

אחת מאי ההתאמות האחרות בין הבנת דקארט ובין הבנתנו אנו, היא בנוגע לאופי הלא סימטרי של הפעולה ההדדית בין גופים. לדעתו של דקארט, גוף אחד מתגבר על השני בעזרת "כוח גדול יותר" וכופה את השינוי בתנועה על השני. העקרונות ששימשו לקביעת ה"ניצחון" היו גם כן ייחודיים. במקרה שגוף אחד במנוחה (עובדה מוחלטת), "המנצח" מבין שני הגופים המתנגשים הוא זה בעל המסה הגדולה יותר. במקרה של שני גופים נעים, יש להשוות את כמויות התנועה של שני הגופים על מנת לקבוע מי גובר על מי ומה מתרחש. תפיסה זאת סולקה על ידי ניוטון אשר

<sup>44</sup> Losee, J. (1972). *A Historical Introduction to the Philosophy of Science*. Oxford University Press, London, p.76.

קבע סימטריה מוחלטת בין שני הגופים הפועלים הדדית, במובן של הכוחות שהם מפעילים זה על זה: כוח הפעולה נקבע כשווה בדיוק לכוח התגובה בגודלו והפוך בכיוונו.

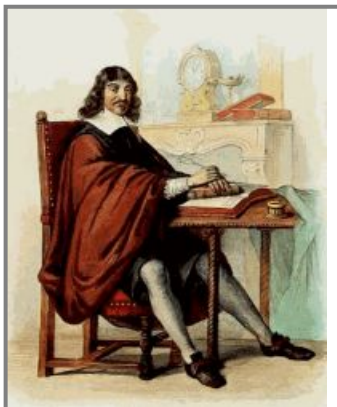
יותר מכך. השקילות מנוחה-תנועה קשורה מטבעה לרעיון אחר, לא פחות חשוב – עקרון היחסות, אחד מהעקרונות המרכזיים של הפיזיקה הקלאסית והמודרנית. ההסבר המושגי הנכון של ההתנגשויות קשור למעשה לשני העקרונות הללו. כאשר עיקרון היחסות יושם בהסבר של התנגשויות, התמוטטה התאוריה של דקארט. השינוי המושגי התרחש בדיוק במעבר מדקארט להויגנס. מצויד בעקרון היחסות הסיק הויגנס לגבי המקרים השונים של התנגשויות, ממקרה אחד בלבד של התנגשות סימטרית.

בחוק השני שלו התייחס דקארט לתנועה מעגלית כי היה לו מעמד מיוחד. במשך דורות רבים החשיבה פילוסופיית הטבע את התנועה המעגלית כתנועה טבעית, הנעלה על היתר ("אצילה", נצחית" וכדומה). זו הייתה עדיין גם השקפתו של גלילאו. דקארט היה הראשון שחדל ממסורת זו. הוא הצביע על הנטייה הטבעית של הגוף דווקא "להתרחק ממרכז המעגל" ולהמשיך את התנועה לאורך קו ישר. התנועה המעגלית חדלה מלהיות טבעית אלא ליונתה בגורם מאלץ שהוא החבל. מנקודה זו היא המתינה לניוטון שהציג את הכוח המרכזי (הצנטריפטלי) כגורם לתנועה המעגלית. כך בוטל המעמד הנעלה של התנועה המעגלית, אשר נותרה רק כמקרה פרטי (אם כי הפשוט ביותר) של תנועה שאינה בקו ישר.

ההסבר של החוקרים שבאו אחרי דקארט התמקד בהתנגשות של גופים בטווח רחב של מקרים שונים: כששני הגופים המתנגשים נצמדים יחד לאחר ההתנגשות, וכשהם נפרדים לאחריה במהירויות שונות. מדענים אלו הגיעו להבנה שבזמן ההתנגשות, הגדלים שנשמרים הם: כמות התנועה (התנע  $mv$  – ווקטור) והאנרגיה הקינטית ( $mv^2/2$  – סקלר). במאה ה-17 לא ידעו המדענים על הקשר בין השניים ועל תנאי השימור השונים שלהם.

התייחסנו לטענות אונטולוגיות מרכזיות שהוכנסו לפיזיקה במאה ה-17. אלה יוכלו לעזור להבין את היסודות המושגיים של המכניקה במאפייניהם המשמעותיים ביותר.

### שאלות למחשבה



1. דונו בנקודות בהן הידע של דקארט במכניקה היה שונה מזה של המכניקה הקלאסית.
2. הדגימו את הפרת השקילות תנועה-מנוחה על ידי דקארט (בכללי תנועה והתנגשויות שלו) בעזרת עיקרון היחסות.
3. הראו כי השקילות מנוחה-תנועה ועיקרון היחסות משולבים בתיאוריה הניוטונית של המכניקה.

### דרכו של דקארט אל הידיעה - אפיסטמולוגיה

דקארט היה אדם מיוחד בעל חשיבה מבריקה ששילב בין פילוסופיה ופיזיקה, אותם ראה במכלול אחד של ידע כולל על העולם. דרכו בניסוח חוקי התנועה שיקפה את תפיסתו, בה עקרונות פילוסופיים שולבו בטענות הפיזיקליות ואף קבעו אותם. היה לו ברור שהעקרונות הם אלה שמייסדים את הידע והחוקים הפיזיקליים יכולים להיות מוסקים מהעקרונות האלה. אך היכן

המקור לעקרונות הבסיסיים ביותר? דקארט האמין כי הם מתגלים בחשיבתו של הפילוסוף – כלומר אדם כמוהו.

גישה זו אל אופן בניית הידע מוגדרת בפילוסופיה כרציונליזם. אפלטון, הפילוסוף היווני הגדול בן המאה הרביעית לפני הספירה נחשב למייסד של הגישה. בדרך זו ניסה דקארט לייסד את הידע במכניקה ולהיות עקבי איתה גם במחיר של אי-התאמה לעדויות הניסוייות. לכאורה, ניתן לראות את הגיאומטריה האוקלידית כמודל של בניית הידע בדרך זו: הגדרות ואקסיומות (עקרונות) כבסיס, ואוסף של משפטים (טענות) המוסקים מהם ויוצרים את גוף הידע.



אפלטון

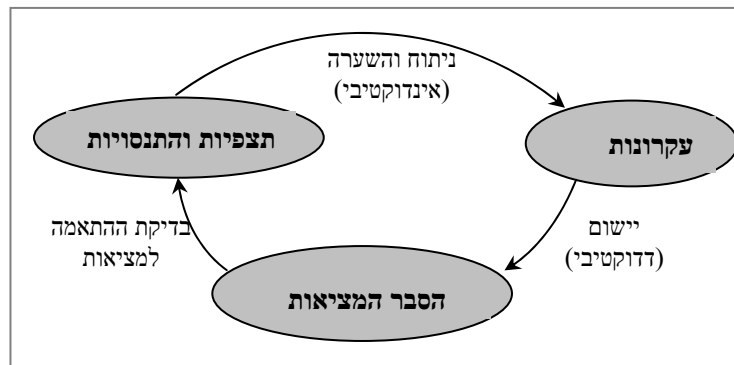
(בייצוג אמנותי של רפאל, 1509)

נראה כי דקארט צידד באפלטון, ונכנס לפולמוס חריף עם הגישה המנוגדת – אמפיריציזם, המעניקה את זכות הבכורה בבניית הידע לעדות הניסויית, ולאחר מכן את בנייתו בדרך אינדוקטיבית ודדוקטיבית גם יחד. גישה זו מזוהה באופן מסורתי עם אריסטו, הפילוסוף היווני הדגול מהמאה הרביעית לפני הספירה. את גישתו של אריסטו כלפי תהליך יצירת הידע ניתן להציג כמעגל (תרשים 8).



אריסטו

(בייצוג אמנותי של רפאל, 1509)



**תרשים 8.** המעגל האינדוקטיבי-דדוקטיבי של השיטה המדעית של אריסטו. דקארט הזניח והפך את השלב "בדיקת התאמה למציאות".

בספרו *עקרונות הפילוסופיה*, שיצא לאור בשנת 1644, פיתח דקארט את הגרסה שלו לחוקי התנועה בטבע והסיק מהם את הכללים שאמורים לשלוט בהתנגשויות של גופים חומריים. דקארט צדק בכמה מהעקרונות אותם שיער: התנועה הקצובה בקו ישר היא אכן מצב טבעי שאינו זקוק לכל סיבה תומכת. דקארט צדק גם בהשערתו שפעילות הגומלין בין הגופים אינה יכולה לשנות את כמות התנועה הכללית שלהם – עקרון "שימור כמות התנועה". עם זאת, כפי שהראנו, דקארט טעה בהיבטים האחרים. הוא כשל כאשר פסק על השוני הכמותי בין תנועה למנוחה. הוא טעה כאשר לא קיבל את עקרון היחסות של גלילאו וכאשר אימץ את כמות התנועה כגודל ללא כיוון. הוא טעה לגבי תפיסת הפעולה-תגובה בין הגופים כאי סימטרית. כאן חשוב לציין כי טעויות במדע אינן פסולות, הואיל ואל ההבנה מגיעים מתוך חוסר הבנה. עם זאת, השיטה המדעית חייבת לכלול מנגנון ביקורתי מחזורי (רפלקטיבי) על ידי ניסוי מבוקר. זה מה שהיה חסר לחלוטין אצל דקארט וזה מה שהביאו למדע גלילאו וניוטון במהפכה המדעית במאה ה-17. דבקות בעקרונות ללא קשר לעדויות מתוך המציאות, אפילו גם במחיר של חוסר התאמה בין

השניים, בלטה אצל דקארט והובילה אותו לניסוח של טענות שגויות. זאת למרות ההתקדמות שהשיג במכניקה. בכישלון היישומי של התאוריה שלו האשים דקארט את היעדר הריק בטבע, ואת השפעתם של רבבות גורמים אחרים. אך הסבר זה אינו יכול להציל את אי נכונותן של מסקנותיו. במכתבו למתרגם הצרפתי הסביר דקארט את השקפתו על בניית הידע במדע – רציונליזם:<sup>45</sup>

עלי להסביר כאן בקצרה מה כולל כל המדע שיש לנו כעת, ומהי דרגת התבונה אליה הגענו. הדרגה הראשונה כוללת רק דעות שהן ברורות מאליהן ואשר יכולות להיות מושגות ללא התעמקות; השנייה כוללת את כל הניסיון אותו מכתבים החושים; השלישית היא זאת שאנו לומדים משיחה עם אנשים; ואליה ניתן להוסיף את הרביעית, הקריאה, לא של כל הספרים, אלא במיוחד של אלו שנכתבו על ידי אנשים המסוגלים להעניק הוראה נכונה, משום שזהו סוג של שיחה אותו אנו מקיימים עם המחברים שלהם. ונראה לי שכל התבונה אותה אנו רוכשים באופן רגיל נרכשת רק בארבע הצורות האלו; הואיל ואינני כולל ביניהן התגלות אלוהית, משום שהיא אינה מובילה אותנו בהדרגה, אלא מרוממת אותנו בבת אחת אל אמונה שאין בה טעות. ואכן, היו, בכל הזמנים, מוחות גדולים שהתאמצו למצוא דרך חמישית לחוכמה, רמה ובטוחה באופן בלתי ניתן להשוואה עם ארבע האחרות. הדרך בה הם התנסו הייתה חיפוש הסיבות הראשוניות והעקרונות האמיתיים, מהם ניתן להסיק את הסיבות לכל מה שידוע לאדם; ולהם, התואר פילוסופים, הוא המתאים במיוחד....

כאן מציין דקארט את ארבע הדרכים אל הידע: (1) רעיונות הברורים מאליהם (ידע טבעי), (2) ניסיון החושים, ו-(3,4) ידע שנרכש מאנשים אחרים, מילולי או כתוב. על פני כולו מעדיף דקארט את הדרך החמישית, אותה הוא רואה כדרך העיקרית של החקר, דרך שהיא חשיפת אותם העקרונות הראשוניים (בדרך התגלות אלוהית), אשר מתוכם כל היתר יכול להיות מוסק באמצעות דדוקציה. בהתייחסו לעקרונות הללו ממשיך דקארט:<sup>46</sup>

שני שיקולים בלבד מספיקים על מנת לבסס זאת – הראשון הוא, שעקרונות אלו הם מאוד ברורים, והשני, שאנו יכולים להסיק מהם את כל האמיתות האחרות; שהרי רק שני תנאים אלו דרושים בעקרונות אמיתיים.

דקארט מדגים ומסכם, בקבעו כי הגישה שלו מספיקה לצורך צבירה של כל ידע אמיתי:<sup>47</sup>

...אלו הם כל העקרונות בהם אני נעזר כשאני נוגע בעצמים לא חומריים או מטפיזיים, מהם אני מסיק באופן ברור ביותר את העקרונות האחרים הללו הנוגעים לדברים פיזיקליים או גשמיים, כלומר שיש גופים המשתרעים לאורך, לרוחב ולעומק, שהם בעלי צורות מגוונות והנעים בדרכים שונות. ...אנו יכולים להסיק מהם [מהעקרונות] את כל הידע המצוי בעולם. ...אני סבור שהסברתי את כל אשר רציתי לעסוק בו, ולאלו שיקראו זאת בשימת לב יהיה בסיס לשכנוע שאין צורך לחפש אחר עקרונות נוספים על אלו אותם נתתי, במטרה להגיע אל הידע המורם ביותר אליו מסוגל המוח האנושי להגיע.

כפי שאנו יכולים לראות, דקארט אינו חוסך במילים (ואינו מפריז בצניעות) על מנת לשכנע שדרכו במדע היא הנכונה. וכך מתבטא הדבר בהצגה של כללי ההתנגשות:<sup>48</sup>

<sup>45</sup> Descartes, R. (1644/1983), *op.cit.* Letter from the Author to the Translator of this Book, pp. XVII-XVIII.

<sup>46</sup> *Ibid.*, p. XXI.

<sup>47</sup> *Ibid.*, p. XXII.

<sup>48</sup> Descartes (1644/1983), *op.cit.*, p. 69.

וההוכחות הן כה ודאיות, שגם אם נראה לנו שהניסיון מצביע על ההפך, אנו מחויבים לתת את אמוננו בשכלנו יותר מאשר בחושינו.

אך מה ניתן לעשות אם מתברר כי התוצאות הן שגויות...? לאור זאת ניתן להבין את כישלונן העמוק של כללי התנגשות של דקארט. האופן בו פועל חוקר במסגרת מדעית חייב לכלול תגובה והתאמה ליישום אמפירי של כל טענה וטענה. שיטת הפעולה של המדע חייבת לכלול מנגנון תיקון עצמי, בדיוק כפי שטען כבר אריסטו (תרשים 8) במעגל האינדוקטיבי-דדוקטיבי אותו הציע. השיטה המדעית המודרנית אימצה תפיסה זו, ושדרגה אותה באמצעות הניסוי המבוקר.

שנים רבות לאחר דקארט, התייחס איינשטיין לאילוץ האפיסטמולוגי הקיים, לדעתו, בפעילות המדעית, כאשר כתב בהקשר של גלילאו – אחד מהשותפים הבכירים של המהפכה המדעית במאה ה-17:<sup>49</sup>

אך לפני שהמין האנושי יכול היה להיות בשל למדע שיקיף את המציאות כולה, היה צורך באמת יסודית נוספת, שהפכה לנחלתם המשותפת של הפילוסופים רק עם הופעתם של קפלר וגלילאו. חשיבה לוגית טהורה לא יכולה להעניק לנו כל ידע על העולם ההתנסותי; כל ידע של המציאות מתחיל מהניסיון ומסתיים בו. טענות אליהן הגיעו באמצעים לוגיים טהורים הן ריקות לחלוטין ככל שנוגע הדבר למציאות. הואיל וגלילאו ראה זאת, ובמיוחד בגלל שהוא הטמיע זאת אל תוך העולם המדעי, הוא אביה של הפיזיקה המודרנית – ולמעשה של המדע המודרני כולו.

### שאלות למחשבה

1. דונו בנקודות בהן השיטה המדעית של דקארט במכניקה שונה מזו של המכניקה הקלאסית.
2. השוו את הגישה המדעית של דקארט עם הגישה של אריסטו (מעגל תצפית-השערה-ניתוח-מסקנה-תצפית). במה שונה שיטתו של דקארט?
3. דונו ביתרונות ובחסרונות של גישה אריסטו ושיפורה במסגרת הגישה המודרנית.
4. איזו מן הגישות, רציונליזם או אמפיריציזם, עדיפה? במה תלויה התשובה?
5. ישנם מורים המציגים את השיטה המדעית ככזו המחייבת להתחיל את החקר המדעי בהצבת שאלה. לאור קיומו של המעגל האינדוקטיבי-דדוקטיבי (תרשים 8) דונו בתיקון הנדרש בטענה הנזכרת.

\* \* \*

### קהל יעד, רלוונטיות לתכנית הלימודים ותועלת דידקטית

יחידת הלימוד הזו מכוונת, קודם כל, למורי הפיזיקה המצויים בתהליך הכשרתם, או המלמדים בפועל. זאת משום שתכנית הלימודים הרגילה אינה כוללת ידע שכיום נחשב למיושן ולא נכון.

<sup>49</sup> Einstein, A. (1934/1982). On the Method of Theoretical Physics. In *Ideas and Opinions*. Crown, New York.

ואמנם, חוקי התנועה שהוצגו כאן הוחלפו על ידי אלו של ניוטון – המהווים את גרעין של תכנית הלימודים במכניקה. מה אם כן יש בתיאוריית התנועה השגויה של דקארט אשר הוחלפה בתיאוריה של ניוטון, שהוא בעל ערך ללימודי הפיזיקה? נציג כאן כמה היבטים המדגימים את הערך החינוכי של מסע היסטורי זה, ואת הרלוונטיות שלו לתכנית הלימודים.

- ספרו של דקארט *עקרונות הפילוסופיה* שייך לטקסטים החשובים של התרבות האנושית. הקטעים שנבחרו כאן הם קלים יחסית להבנה, ובעזרת התיווך של המורה, יכולים ליצור מגע עם יסודות המדע בעלי האופי האונטולוגי והאפיסטמולוגי כאחד, כפי שהתגבשו במהפכה המדעית של המאה השבע עשרה. מגע זה ישמש מבוא לתרבות המדע.
- מבחינת התרבות הפנימית של הפיזיקה<sup>50</sup>, שייכת התיאוריה של דקארט לפריפריה של המכניקה הקלאסית, וככזו, באמצעות הניגוד, היא מאפשרת את הבנת הפרדיגמה הניוטונית, ובכך תומכת בלמידה המשמעותית של המכניקה הקלאסית.
- טקסט זה של דקארט מציג את הרוח האמיתית של המדע, שהיא השאיפה להבנת הטבע לכשעצמה, ללא חיפוש אחר יתרונות מעשיים. גישה זו מציגה היבט מהותי של המדע, המשלים את המגמה הפרגמטית הרווחת בתרבותנו, המגבילה את תכני ההוראה רק להיבטים התועלתניים של המדע.
- דקארט מייצג את האפיסטמולוגיה הרציונליסטית בידע של הפיזיקה. גישה זו אינה ממצה את השיטה המדעית, ובאמצעות הביקורת עליה ניתן להדגיש את חשיבותו של החלק החסר בה. חלק זה – התפיסה הפלורליסטית – בא לביטוי במדע המודרני, המשלב בין הגישה הרציונליסטית והאמפיריציסטית.
- מסע זה מדגים כיצד ומדוע דחו הפיזיקאים את כללי ההתנגשות של דקארט, ותיקנו את עיקרון שימור התנע שלו. הביקורת נעשתה באופן ניסויי על ידי וואליס ורן, ובאופן תיאורטי – על ידי הויגנס. לומדים יש הזדמנות לחוות וללמוד את שני סוגי הבחינה הללו. תוך כדי בחינת הצורך בניסויים, ניתן להבהיר את מהות הניסוי המבוקר ויתרונו על פני תצפית פשוטה.
- למרות ההיבטים השגויים שבה, מציגה התיאוריה של דקארט את ההתקדמות שנעשתה בדחיית ההבנה של ימי הביניים בנושא התנועה, ובהתייחסות לתנועה קצובה בקו ישר כמצב טבעי של החומר (ולא כתהליך). מצב התנועה הטבעית – תנועה התמדית – אינו זקוק לסיבה תומכת (גורם מניע חיצוני או דחף פנימי), כפי שהובן לפני המאה ה-17. היה זה שינוי פרדיגמה בעולם הפיזיקה.
- בין השגיאות המושגיות של דקארט הייתה הזנחתו את האופי הווקטורי של כמות התנועה (כמות התנועה כסקלר, במקום ווקטור). חשיפת השגיאה הזו בדוגמאות קונקרטיות מדגישה לתלמיד את הידע הנכון.

<sup>50</sup> Tseitlin, M. & Galili I. (2005). Teaching physics in looking for its self: from a physics-discipline to a physics-culture, *Science & Education*, 14 (3-5), 235-261.

- בעיקרה, מסתמכת גישתו של דקארט על שימור התנועה. למרות המושג השגוי, הגישה של עקרון שימור הייתה חדשה בפיזיקה, ונותרה כדרך בסיסית לטיפול בתנועה ולפתרון בעיות, במיוחד כדי לפסוח על גורמים רבים שאינם ידועים במערכת הפיזיקלית. גילוי של הויגנס את ה"כוח החי" בהתנגשויות אלסטיות (שימור האנרגיה הקינטית) מועיל גם הוא לתלמיד בהסבר של התנגשויות.
- דקארט השתמש במנגנון שגוי של "תחרות" בין הגופים, שבה אחד מפעיל כוח גדול יותר על מנת ליצור את השינוי בתנועתו של השני. זוהי דוגמה לתפיסה מוטעית המקובלת בין תלמידים, ולכן ניתן להתמודד איתה באמצעות תהודה קוגניטיבית, הנגרמת מהביקורת על תפיסתו של דקארט.
- באמצעות הניגוד עם המכניקה הקלאסית, תיאוריית ההתנגשויות של דקארט מאפשרת ליצור הבנה טובה יותר. מעבר לפיתרון של משוואות סטנדרטיות, מעודד המסע שלנו חשיבה על ההבדלים בין התנועה, הנשמר תמיד בהתנגשויות, לאנרגיה הקינטית – הנשמרת רק בהתנגשויות אלסטיות. תלמידים לומדים להבחין בין השניים בהקשר פשוט יחסית.
- הביקורת התיאורטית על דקארט על ידי הויגנס התבססה על עיקרון היחסות של גלילאו – בהמשך העיקרון המרכזי בפיזיקה המודרנית. בכך הקדים הויגנס את זמנו, ואף את ניוטון. בכיתת הפיזיקה כיום, אין, בדרך כלל, משימות או תרגילים הדורשים יישום של עיקרון היחסות. השיטה שיושמה על ידי הויגנס מספקת הזדמנות נדירה לשימוש בעיקרון זה.
- התכנים בחקר המקרה ההיסטורי הזה מדגימים את הצורך בצניעותו של החוקר בבואו לנסח טענות מדעיות: למרות העוצמה האינטלקטואלית הגדולה שלו כפילוסוף, רבים מעקרונותיו המדעיים של דקארט התבררו כשגויים. דיון בחומרים אלו יכול להיות חינוכי עבור הלומדים הצעירים, ובכך לאפשר להם את קבלת הנורמות של תרבות הפיזיקה ואת ערכיה.

\* \* \*

## פעילויות, שיטות ואמצעי הוראה

האופן העיקרי בו ניתן להציג מסע היסטורי זה יכול להיות סדרה של הרצאות אינטראקטיביות המשלבות דיון. מומלץ להקדים את הדיון בשאלון הבודק את הסבריהם של התלמידים באשר למה שיכול להתרחש בהתנגשויות מסוגים שונים (גופים קלים וכבדים, קשים ורכים).



קיימת חשיבות רבה בהבהרת התפקיד של עקרונות השימור בהסבר של אינטראקציות מורכבות ו/או בלתי ידועות, כפי שקרה במהלך ההיסטוריה (עקרונות שימור היו בשימוש הרבה לפני שנחשף טבען של האינטראקציות). נושא זה מספק הזדמנות להתייחסות אל ההיבטים האונטולוגיים והאפיסטמולוגיים של הידע הפיזיקלי השאלות אותן ניתן לשאול הוצגו בחלקן למעלה. אפשר לשאול באשר לתנאים בהם ניתן

ליישם את שימור האנרגיה בהשוואה לאלו בהם ניתן ליישם את שימור התנע.

על סמך שילובם של חומרים היסטוריים, ניתן לשנות אף את תכני ההוראה של הפיזיקה. כך ניתן להגיע למושג אנרגיה קינטית ושימורה בהתנגשויות, דרך הצגת האופן בו טיפלו בנושא הן והויגנס. תהיה זו דרך מבוססת ניסוי, בניגוד לדרך של הוראת הנושא באופן תיאורטי לחלוטין, כזה המקובל כיום, בו מתקבלת אנרגיה קינטית לראשונה באמצעות אינטגרציה של החוק השני של ניוטון.<sup>51</sup>

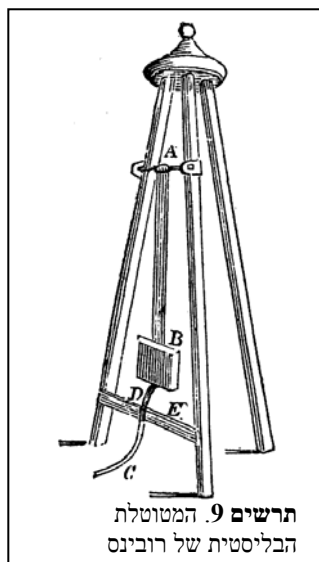
מסע זה חושף את ההיסטוריה שקדמה לביסוס המכניקה הקלאסית על ידי ניוטון. למורים מתאפשר להאיר את הרקע של החומרים אותם הם מלמדים בכתה. ניתן גם להפיץ את התכנים של חקר מקרה זה בין קבוצות של מורים במסגרת השתלמות או בין התלמידים כחומר העשרה ללימוד עצמי. הקריאה המוקדמת יכולה להיות מלווה לאחר מכן בדיון כיתתי, במהלכו מסביר המורה את הנקודות בעלות החשיבות, כפי שהוצגו בסעיפים הקודמים.

חלקים שונים מטקסט זה יכולים להינתן כנושאים נפרדים של חומר לימוד, שישמש לצורך דיווח ודיון על ידי תלמידים. הנושאים האפשריים הם: "חוקי התנועה של דקארט ושל ניוטון", "כללי ההתנגשות של דקארט והפרכתם", "כללי ההתנגשות הניסיוניים של מריוט, הן ו-וואליס", "הטיפול של הויגנס בהתנגשויות של גופים" ו"עיקרון היחסות של גלילאו".



אדם מריוט

ניתן להתייחס להיבטים אפיסטמולוגיים של טבע המדע בחיבורים כמו: "דבקות בעקרונות במחקר וביישום מדעי – האם צריך, מתי ובאיזו מידה?", "ידע רציונאלי מול ידע אמפירי בהקשר של התנגשויות גופים", או "תפקידה של המתמטיקה במהפכה המדעית של המאה ה-



17", או "המעגל האינדוקטיבי-דדוקטיבי כשיטה מדעית, כפי שמתבטא בהסבר של ההתנגשויות בפיזיקה". התלמידים יכולים לדון בנושאים הללו כשהם ממלאים את תפקידו של דקארט או את תפקידם של המתנגדים לו, החוקרים הנסיונאים (וואליס, וורן ומריוט) או התיאורטיקנים (הויגנס, ניוטון). הצגה זו אמורה לפתוח דיון בו נחשפות ונדונות התפיסות האישיות של התלמידים לגבי טבע המדע והידע המדעי. דיון כזה, המנוהל על ידי המורה, יכול לחקות את הפולמוס המדעי.

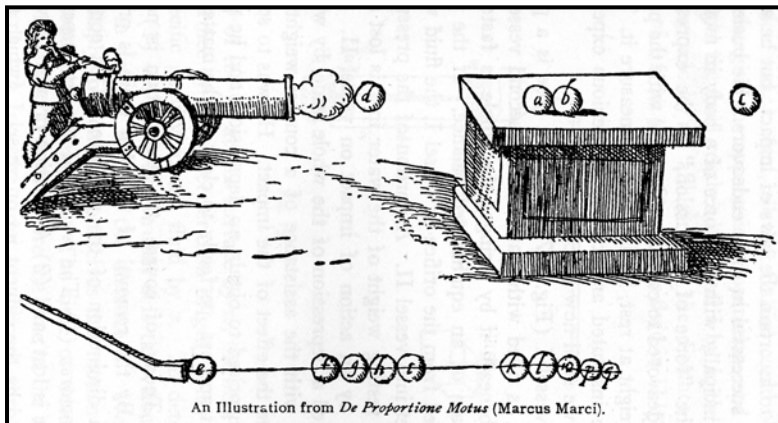
פעילויות ניסוייות אפשריות יכולות לכלול חקר של התנגשויות בין שני גופים שונים באמצעות השימוש במתקן של מריוט (שתי מטוטלות צמודות). פעילות אחרת יכולה להיות שימוש במטוטלת בליסטית, שתיבנה על ידי התלמידים כפי שהציע

מריוט ובוצע על ידי רובינס [Robins] במאה ה-17 (תרשים 9). התלמידים יכולים לדון בצורך המיוחד במטוטלת בליסטית, ולהסביר את אופן פעולתה.

<sup>51</sup> e.g. Halliday, Resnick, & Walker J. (1993). *Fundamentals of Physics*. Wiley, New York, pp. 171-172.



מעניין להזכיר סיפור נוסף בהקשר של חקר ההתנגשויות בין גופים. בין החוקרים הראשונים שניסו ללמוד על כך, היה המדען הציכי יאן מארצ'י [Jan Marci] שחי בשנים (1595-1667), פעל בפראג והקדים את וואליס ורן אשר ביצעו מחקר באותו נושא, בלונדון בשנת 1668. בניסוי אותו ביצע מארצ'י, נורה כדור תותח אל כדור אחר, זהה לראשון, שהונח על גבי שולחן אבן.

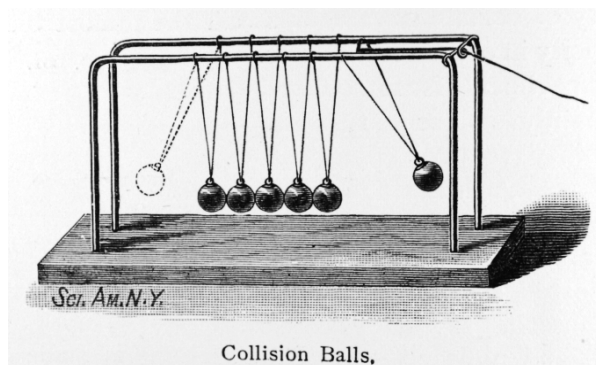


Jan Marci

**תרשים 10.** הניסוי של מארצ'י בו נעצר כדור תותח על ידי כדור זהה שניצב בדרכו.

לאחר ההתנגשות, נעצר הכדור הראשון ואילו השני החל לנוע קדימה בכיוון הירייה (תרשים 10). למרות שהדגמה זו הייתה לא יותר מאשר חזרה על התנגשות בין שני כדורי ביליארד, ההקשר של כדור תותח שנעצר לחלוטין רק על ידי כדור קטן שנמצא במנוחה, הרשים מאוד את החוקרים ובעיקר את הקהל, בהיותו כה מנוגד לאינטואיציה.

מתקן פופולרי המדגים התנגשויות בין גופים קשים ידוע בשם "העריסה של ניוטון" (תרשים 11). הוא כולל כמה מטוטלות התלויות בקו אחד והנוגעות זו בזו. מתקן זה הוא למעשה הרחבה של המתקן של מריוט שנועד למדידת מהירותם של הכדורים המתנגשים (תרשים 1), אך מאפשר מגוון רחב יותר של ניסויים. לאחר סדרה של ניסיונות, מגלים התלמידים את הכלל: אותו מספר כדורים שהורמו מצד אחד של שורת הכדורים ונעצרו על ידי שאר הכדורים, עולה מהצד השני ומגיע כמעט לאותו הגובה. תוצאה זו תואמת כמובן את עיקרון שימור התנע והאנרגיה הקינטית בהתנגשות.



**תרשים 11.** "העריסה של ניוטון".

כל התופעה נראית דומה לכדור הנופל מגובה ומתנגש בכדור אחר המצוי במנוחה: הכדור הראשון עוצר והשני ממשיך לנוע באותה המהירות בה נע הכדור הראשון. במקרה בו ישנם כמה כדורים באמצע (והנותרים במנוחה), ניתן לחשוב כי כדורים אלו אינם נוטלים חלק בהתנגשות,

ורק מעבירים את התנע. על מנת לגלות את התרחיש הנכון של התופעה הזו ניתן לקשור יחד את הכדורים שבאמצע, אלו הנראים כלא משתתפים בהתנגשות. למשל, אם ישנם שישה כדורים (כמו בתרשים 11), ואנו מרימים כדור אחד בצד שמאל, כדור אחד יתרומם בצידה הימני של שורת הכדורים, כאשר הראשון ייעצר. כעת, אם נקשור את ארבעת הכדורים שבמרכז השורה, התוצאה של ההתנגשות בין הכדור הראשון עם יתר הכדורים תהיה שונה לגמרי – כל הכדורים יתחילו לנוע לאחר ההתנגשות. תצפית קפדנית ומחשבה נוספת יכולות לגלות כי במקרה של כדורים חופשיים (שאינם קשורים יחדיו) מתרחשת סדרה של התנגשויות, בכל פעם בין כדורים שכנים. ההתנגשות "עוברת" לאורך שורת הכדורים עד אשר מתרומם הכדור האחרון בצד הימני. רצף ההתנגשויות הוא מהיר דיו כך שלא ניתן להבחין בו מבלי לדעת במה להתבונן.

\* \* \*

## מכשולים להוראה וללמידה

המסע להיסטוריה של המכניקה המוצג כאן פונה אל החיבורים המקוריים של דקארט והויגנס. די ברור שהשימוש בחומרים היסטוריים כאלו יכול לגרום לקשיים בשל השפה, הסגנון, והמושגים המיושנים שבשימוש.<sup>52</sup> זהו תפקידו של המורה לבצע את הגישור, התיווך, בין הטקסט ובין התלמידים. פעילות זו מצריכה הכנה של המורה באמצעות סדנה מיוחדת.

## כישורים פדגוגיים

היכולת הפדגוגית העיקרית הנדרשת מהמורה על מנת להציג מסע זה היא היכולת לגשר על פני הידע, כלומר לעודד את בניית הידע של התלמיד באמצעות דיאלוג המתכנס אל ההבנה של משמעות המושג המדעי האמור, באמצעות ניתוח משווה של התיאוריה החלופית (דקארט) שקדמה לתיאוריה של המכניקה הקלאסית (ניוטון), המאומצת כיום בהוראה.

בהקשר החינוכי, נדרשים שליטה ויכולת הוראה באמצעות גיוון (וריאציה) של הנושא הנלמד.<sup>53</sup> המורה אמור להיות רגיש לרעיונות אותם מחזיקים התלמידים שלו בנושא הנלמד, ולאפשר דיון על מנת לגלות אותם. בכך יוצר המורה מרחב למידה המשלב מושגים חלופיים מגוונים. במרחב זה מעודדים התלמידים להבחין ברעיונות הנכונים ולחוות תהליך של שינוי מושגי תוך כדי למידה. בעשותו כן, משמש המורה כסוכן של תרבות הפיזיקה, בהתאמה רבה לרעיונותיו של לב ויגוצקי [Vigotsky] ואחרים.<sup>54</sup>

\* \* \*

<sup>52</sup> Galili, I. & Tseitlin, M. (2003). 'Newton's first law: text, translations, interpretations, and physics education'. *Science and Education*, 12 (1), 45-73.

<sup>53</sup> e.g. Schur, Y. & Galili, I. (2009). Thinking Journey – a New Mode of Teaching Science. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 7(3), 627-646. Also see Marton, A. & Tsui (2004). *Classroom discourse and the space of learning*. Lawrence Erlbaum, Mahwah.

<sup>54</sup> Vigotsky, L. (1934/1986). *Thought and Language*. The MIT Press, Cambridge, Mass. Tseitlin, M. & Galili I. (2005). Teaching physics in looking for its self: from a physics-discipline to a physics-culture, *Science & Education*, 14 (3-5), 235-261.

## עדויות מחקריות

הידע של חוקי התנועה אצל התלמידים וההסבר להתנגשויות באמצעות חוקי שימור נבדק במחקרים רבים. למשל, חוקרים<sup>55</sup> דיווחו כי תלמידים מקשרים את תנועתם הקצובה בקו ישר של גופים, עם פעולתו של כוח "מניע". את השינוי המושגי הנדרש ניתן לעודד בדיון על חוקי התנועה של דקארט ושל ניוטון.

במחקריהם של אנשי מדע מאוניברסיטת בולוניה ומאוניברסיטת סאו-פאולו<sup>56</sup>, כמו גם מהאוניברסיטה העברית בירושלים<sup>57</sup>, נמצא כי לתלמידי פיזיקה רבים בבתי ספר תיכוניים יש קשיים ביישום חוקי השימור של התנע והאנרגיה לצורך הסבר מקרים שונים של התנגשויות. במיוחד, מבלבלים התלמידים לעיתים קרובות בין התנאים המאפשרים שימוש בעיקרון שימור התנע, לאלו המאפשרים שימוש בעיקרון שימור האנרגיה הקינטית. הוראה הנעזרת בחומרים היסטוריים רלוונטיים יכולה לשפר את תפיסת התלמידים. ההשפעה החיובית של החומרים צפויה גם בהקשר של תפיסות התלמידים לגבי טבע המדע והידע המדעי, ובמיוחד את דמותה של השיטה המדעית המשלבת גישות רציונליסטיות ואמפיריציסטיות בחקר הפיזיקלי. עדות מחקרית של השפעה כזו דווחה.<sup>58</sup>

\* \* \*

---

<sup>55</sup> Galili, I. & Bar, V. (1992), Motion implies force. Where to expect vestiges of the misconception?' *International Journal of Science Education*, 14 (1), 63-81.

<sup>56</sup> Grimellini-Tomasini, N., Pecori-Balandi, B., Pacca, J. L. A., & Villani A. (1993). Understanding Conservation Laws in Mechanics: Students' Conceptual Change in Learning about Collisions, *Science Education*, 77 (2), 169-189.

<sup>57</sup> Sasson, H. (2006). *Misconceptions and Difficulties of High School Students in Understanding the Concepts of Impulse and Momentum*, M.Sc. Thesis, The Hebrew University of Jerusalem.

<sup>58</sup> Galili, I. & Hazan, A. (2001). The Effect of a History-Based Course in Optics on Students' Views about Science, *Science & Education*, 10 (1-2), 7-32