משרד החינוך
המזכירות הפדגוגית
אגף א' מדעים
הפיקוח על הוראת הפיזיקה

הפיקוח על הוראת הפיזיקה

המחלקה להוראת המדעים

המרכז הארצי למורי הפיזיקה

הפקולטה לחינוך למדע וטכנולוגיה
הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל

מינהלת מל"מ
המרכז הישראלי לחינוך מדעי-טכנולוגי
ע"ש עמוס דה-שליט

שימוש יצירתי בהיסטוריה של המדע להוראת הפיזיקה:

מודל הוראה

כתיבה: מיכאל אלעזר ומעיין שוורצר

ליווי וייעוץ: שולמית קפון ואברהם מרזל

מי אנו...

- **ד"ר מיכאל אלעזר** – עמית מרכז מינרבה למדעי הרוח באוניברסיטת ת"א, חוקר בתחום המהפכה המדעית ומלמד קורסים בהיסטוריה של המדע בטכניון בחיפה ובמכללת סמינר הקיבוצים.
- **הגב' מעיין שוורצר** – סטודנטית לדוקטורט בפקולטה לחינוך למדע וטכנולוגיה בטכניון, במסלול הוראת הפיזיקה. חוקרת למידה משמעותית דרך פרויקטי מחקר בפיזיקה והשפעת מאפייני הנחיה של מורים על דרכי השתתפות תלמידים.
- **פרופ"מ שולמית קפון** – חברת סגל וראש מסלול הכשרת המורים לפיזיקה בפקולטה לחינוך למדע וטכנולוגיה בטכניון. חוקרת תהליכי למידה משמעותית, התפתחות חשיבה מדעית והכשרת מורים.
- **ד"ר אברהם מרזל** - מרצה בבית הספר לחינוך באוניברסיטה העברית בירושלים. תחומי ההוראה והמחקר העיקריים שלו הם: הוראת הפיזיקה, הכשרה ופיתוח של מורים לפיזיקה ומתמטיקה וגיוון דרכי הוראה בכתה.

ראש הפרויקט: פרופ"מ שולמית קפון
לפי מכרז מס' 9/7.2013
© כל הזכויות שמורות למשרד החינוך
ינואר 2018

תוכן עניינים

מבוא..3
קריאה השוואתית: מקפלר לניוטון – היבטים היסטוריים ופילוסופיים בפיתוח חוק הכבידה.............5
פעילות ג'יגסו: האור במנהרת הזמן – בחינה כרונולוגית של התפתחות התפיסה של מהות האור (גל / חלקיק)..21
מעבדה: שחזור ניסוי מקורי של גליליאו גליליאי – תנועה בליסטית 53
דיון (debate): נושאי חשמל – פעולה מרחוק ומושג השדה; מלחמת הזרמים 68
חדר בריחה: שימור אנרגיה מכאנית 91
חומרים להדפסה עבור התלמידים 110
קריאה השוואתית – מקפלר לניוטון 111
פעילות ג'יגסו – האור במנהרת הזמן 117
מעבדה – שחזור ניסוי מקורי של גליליאו גליליאי 137
שיעור דיון (debate) – נושאי חשמל 146
חדר בריחה – שימור אנרגיה מכנית 162

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

<u>מבוא</u>

חוברת זו מציגה מודל הוראה המציע דרכים לשילוב ההיסטוריה של הפיזיקה בהוראת הפיזיקה בכיתה. מודל ההוראה המוצע אינו תלוי באופן פריסת הנושאים וגישת ההוראה של ספר הלימוד המשמש את המורה. המודל מתווה דרך לשזור במהלך ההוראה פעילויות הנעזרות בתהליך ההיסטורי של התפתחות הרעיונות שהתלמידים לומדים ממילא. גישת הלמידה שהמודל מנסה לטפח היא למידה פעילה וחווייתית, ולכן שילוב ההיבטים ההיסטוריים אינו נעשה דרך הרצאה עליהם אלא באמצעות התנסויות מגוונות המשרתות את ההצגה הפורמאלית של התכנים ומעמיקות את הבנתם בקרב התלמידים. השימוש בטקסטים ההיסטוריים ייעשה לצורך תמיכה בהבנת הרעיונות המדעיים הנלמדים ולהמחשת אופן התפתחות החשיבה המדעית לאורך ההיסטוריה. המודל ידגים כיצד ניתן לשלב בהוראת הפיזיקה היבטים של ההתפתחות ההיסטורית של הרעיונות המדעיים הנלמדים תוך שימוש בטקסטים אותנטיים ובפעילויות למידה אקטיביות ומגוונות (משחק, ניסוי, פעילות טיעון וכד').

אחת ממטרות לימודי הפיזיקה התיכונית היא "להציג בפני התלמידים תמונה של דיסציפלינה מדעית, שהיא תרבות בפני עצמה, מהיבטיה השונים" (תוכנית הלימודים בפיזיקה 5 יח"ל, המזכירות הפדגוגית). למרות האמור לעיל, מרבית ספרי הלימוד ודרכי ההערכה מתמקדים בהוראת התכנים והמיומנויות של הדיסציפלינה. הדיון המפורש באופן התפתחותם של הרעיונות, המושגים והמודלים הנלמדים בכיתה לרוב אינו מהווה חלק אינטגראלי מתהליך הלמידה. מודל ההוראה המוצע נועד לטפל בלקונה זו.

הפעילויות פותחו במסגרת שני קורסים בפקולטה לחינוך למדע וטכנולוגיה בטכניון: דרכי הוראת הפיזיקה 1 ופרויקט פיתוח תכנית לימודים בפיזיקה והבשילו לכדי השתלמות מורים שהעברנו בנושא בקיץ תשע"ז, שבה ניסינו את כל הפעילויות. הטקסטים המבוססים על ההיסטוריה של המדע, שעליהם נשענות הפעילויות המופיעות בחוברת, נכתבו על-ידי היסטוריונים, מדענים ואנשי חינוך מדעי. ברוב המקרים בחרנו מובאות, לעיתים עיבדנו וקיצרנו את הטקסט. בכל המקרים הקפדנו לציין את המקורות הן בדפי הפעילויות לתלמיד והן בהסברים למורה.

החוברת מחולקת לשניים: חלקה הראשון ערוך כמדריך למורה שמכיל את הרציונאל מאחורי הפעילות, הדרכה כיצד להעביר את הפעילות בכיתה והחומרים לתלמיד, יחד עם הפתרונות המלאים לכל הפעילויות. חלקה השני של החוברת מכיל את הפעילויות לתלמיד מוכנות להדפסה ולשכפול.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

להלן תקציר הפעילויות המוצעות:

הפעילות הראשונה בחוברת, "קריאה השוואתית: מקפלר לניוטון – היבטים היסטוריים ופילוסופיים בפיתוח חוק הכבידה", עוסקת בהתפתחות ההיסטורית בפיזיקה שבין קפלר לניוטון. פעילות זו יכולה לסייע לתלמידים להבין טוב יותר את תורת הכבידה הניוטונית באמצעות הכרת הרקע ההיסטורי להופעתה.

הפעילות השנייה הינה פעילות ג'יגסו שבסופה התלמידים בונים ביחד מנהרת זמן שמציגה את התפתחות הדיון וההבנה הפיזיקלית של מהות האור.

הפעילות השלישית בחוברת מתנהלת במעבדה, ובמסגרתה משחזרים התלמידים ניסוי מקורי של גליליאו גליליאי בתנועה בליסטית. פעילות זו מזמנת לתלמידים שימוש במודלים המתמטיים לתנועה שוות-התאוצה ובעקרונות התנועה הבליסטית לצורך פיצוח של תעלומה היסטורית.

הפעילות הרביעית היא פעילות דיבייט (דיון בין תפיסות מנוגדות). בפעילות זו התלמידים מנהלים שני דיבייטים בחשמל – בדיון אחד שתי הקבוצות המתדיינות מנגידות את תפיסת השדה אל מול תפיסת פעולת כוחות ממרחק לתיאור האינטראקציה החשמלית. הדיון השני מציג מחלוקת סוערת משלהי המאה ה-19. הדיון מעמת בין מצדדי הזרם הישר ומצדדי זרם החילופין כסוג הזרם אותו יש לייצר ולספק לאזרחים.

הפעילות החמישית היא "חדר בריחה" שההימלטות ממנו כרוכה בהתחקות אחריו מקורותיו ההיסטוריים של מושג האנרגיה המכאנית.

אנו מקווים שתשתמשו בפעילויות בכיתה ותמצאו אותן מועילות.

מעיין ומיקי.

ינואר 2018

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

<u>קריאה השוואתית</u>: מקפלר לניוטון – היבטים היסטוריים ופילוסופיים בפיתוח חוק הכבידה

סיכום התכנים (פיזיקה והיסטוריה) הנלמדים בשיעור

בשיעור זה אנו מתמקדים בפיתוח חוק הכבידה של ניוטון מחוקי קפלר, כולל היבטים היסטוריים ופילוסופיים הכרוכים בפיתוח זה. יוהנס קפלר, כתוצאה מהתעקשותו למצוא היגיון פיזיקלי בבחירת המסלול המתאר את תנועת כוכבי הלכת סביב השמש, החליף לבסוף את המעגל כמסלול הבסיסי של כוכבי הלכת באליפסה. בכך שבר קפלר מסורת ארוכת שנים (שהחלה באפלטון, כ-400 לפנה"ס) של הרכבת מסלולי כוכבי הלכת ממעגלים בלבד, מסורת שראתה באסטרונומיה ענף מתמטי במהותו שמתפקידו לחזות את מיקומי גרמי השמים על סמך מודלים מתמטיים המשלבים יחדיו מעגלים (או סְפֵרות, כלומר כדורים) הנעים בתנועות קצובות. למסורת ישנה זו השתייך גם ניקולאוס קופרניקוס, שעם זאת החליף את המרכז המסורתי של המעגלים הללו, הארץ הנייחת, בשמש הנייחת, והפך בכך את כדור הארץ לכוכב לכת בעצמו. קפלר תמך באפיון הארץ ככוכב לכת ובקביעת השמש כמרכז היקום, אך בניגוד לקופרניקוס לא שמר אמונים ל"אקסיומת המעגל" וכתוצאה מגישתו החדשנית, שביקשה לראות בכל כוכב לכת גוף שמסלולו נקבע בהשפעת כוחות פיזיקליים הפועלים עליו, ויתר לבסוף על המעגל כבסיס לתנועות הפלנטריות. קפלר קבע שכל אחד מכוכבי הלכת נע באליפסה, המוכתבת על-ידי שני הכוחות הפועלים עליו שמקורם בשמש: כוח משיקי, שנגרם בשל סיבובה של השמש (קרני האור היוצאות ממנה "סוחבות" את כוכב הלכת במהלך סיבוב זה), שנחלש ביחס ישר למרחק של כוכב הלכת מהשמש; וכוח רדיאלי הנובע מכוחות מגנטיים של משיכה או דחייה בין השמש לכוכב הלכת: כך משתנה המרחק בין כוכב הלכת לשמש במהלך תנועתו האליפטית, בעוד שהמהירות משתנה בהתאם לכוח המשיקי שעוצמתו כאמור נחלשת ככל שגדל המרחק. נפרט תחילה את שלושת חוקי קפלר המפורסמים, שבעת ניסוחם התבסס קפלר על התצפיות המדויקות באופן חסר התקדים שערך ה"מנטור" שלו, האסטרונום הדני טיכו בראהה.

<u>חוקי קפלר</u> (כפי שהם מופיעים בספרו של עדי רוזן, *מכניקה ניוטונית*):

1. **חוק האליפסה:** כל כוכב לכת נע במסלול אליפטי, כאשר השמש נמצאת באחד ממוקדי האליפסה (האליפסה מקיימת את התנאי הפשוט שלכל נקודה הנמצאת עליה $r_1 + r_2 = 2a$, כאשר 2a הינו אורך הציר הראשי, ו-r_i זהו מרחק הנקודה ממוקד i).
2. **חוק השטחים**: הקו הישר המחבר את השמש עם כוכב לכת חולף על פני שטחים שווים בפרקי זמן שווים.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

3. **חוק זמני המחזור**: ריבוע זמן המחזור, T, של תנועת כוכב לכת סביב השמש פרופורציוני לחזקה השלישית של מחצית הציר הראשי, a: $T^2 = ka^3$ (המשמעות היא שלכל צמד מכוכבי הלכת של השמש מתקבל השוויון: $\frac{T_2^2}{T_1^2} = \frac{a_2^3}{a_1^3}$).

<u>מקפלר לניוטון</u>

פיתוח כוח הכבידה האוניברסלי על-ידי אייזק ניוטון היה כרוך הן בהבנה פיזיקלית חדשה, שתיקנה את גישתו הדינמית (השגויה) של קפלר, והן בשיטות מתמטיות חדשות שיכלו להתמודד עם עקומת האליפסה (הנכונה) שהגדיר קפלר, המסובכת כמובן הרבה יותר מהמעגל. כשעמל ניוטון בשנות ה-80 של המאה ה-17 על ספרו המונומנטלי, "העקרונות המתמטיים של פילוסופיית הטבע" (שראה אור ב-1687), הוא יכול היה להישען, בנוסף על שלושת חוקי קפלר, על הגילויים הבאים של קודמיו: שכוח קבוע יוצר תאוצה קבועה המניעה גוף למרחק שתלוי בריבוע הזמן (גליליאו גליליאי); שתנועה קצובה לאורך קו ישר איננה דורשת שום כוח אלא מתמידה מאליה (רנה דקארט); שתאוצתו של גוף הנע בתנועה מעגלית קצובה מכוונת למרכז מעגל הסיבוב ופרופורציונית לריבוע המהירות המשיקית חלקי רדיוס הסיבוב (כריסטיאן הויגנס); שכוח הכבידה קטֵן עם ריבוע המרחק, ושניתן כנראה לתאר (בניגוד לדינמיקה ה"דואלית" של קפלר) את מסלולו של כוכב לכת כנובע משילוב של כוח אחד בלבד הפועל תמיד לכיוון השמש ותנועה משיקית אינרציאלית (רוברט הוק). אך היה זה ניוטון שהצליח להוכיח באופן מתמטי, בעזרת שיטות חדישות המהוות את בסיס החשבון הדיפרנציאלי והאינטגרלי המוכר לנו, שניחושו של הוק היה נכון, ולהסיק (בסיוע התגליות שהוזכרו) מחוקי קפלר את "חוק היפוך הריבוע", כלומר תלות כוח הכבידה בריבוע המרחק, וכן את ההפך (כלומר להסיק את חוקי קפלר על סמך חוק היפוך הריבוע). ובזכות מושג המסה החדשני, תכונה מרכזית ומהותית לכל חומר ביקום, כמו גם ההכרה בכך שכל כוח מעצם הגדרתו גורם לתאוצה ושכל כוח כרוך בכוח נגדי שווה בגודלו (כלומר "חוקי ניוטון") הצליח ניוטון להרחיב את חוק היפוך הריבוע לחוק הכבידה האוניברסלי, השולט באופן אחיד לחלוטין על כל גרגיר של חומר בתבל, ובכך מאחד אחת ולתמיד את היקום שבתפיסה הישנה (של אריסטו ויורשיו) היה מפוצל לתחום "שמימי" ו"ארצי" נבדלים פיזיקלית.

<u>הסקת חוק הכבידה האוניברסלי</u>

לרוב מסבירים את המעבר מחוקי קפלר לחוק הכבידה האוניברסלית תוך "ניוון" האליפסה למעגל, אם כי הדרך שבה מציג זאת ניוטון מתבססת באופן מלא על חוקי קפלר ועל הנחת המסלול האליפטי (תמצית הוכחה זו מופיעה בנספח). בהנחה שמסלול כוכב הלכת סביב הוא מעגלי (קירוב שניתן להצדיקו בטענה שאקצנטריות מסלולי כוכבי הלכת סביב השמש קטנה

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

מאוד), לא קשה להסיק – על סמך ידיעת התאוצה של גוף הסובב במהירות קצובה – את "חוק היפוך הריבוע", כלומר היחלשות כוח הכבידה בהתאם לריבוע המרחק. כריסטיאן הויגנס קבע (עוד ב-1659), וניוטון עצמו הגיע לכך מבלי שידע על הוכחת הויגנס, שתאוצתו של גוף הנע בתנועה מעגלית קצובה מכוונת לעבר מרכז מעגל הסיבוב ופרופורציונלית לריבוע המהירות המשיקית חלקי רדיוס המעגל. כלומר, תאוצתו של גוף שמסתובב במהירות קצובה שגודלה v סביב מעגל שקוטרו r היא רדיאלית, כלומר מכוונת למרכז הסיבוב, ושגודלה הוא $a=\frac{v^2}{r}$. מאחר שבתנועה מעגלית קצובה $v=\frac{2\pi r}{T}$ נקבל מהחוק השלישי של קפלר $T^2=kr^3$ (במקום חצי הציר הראשי נציב את רדיוס המעגל r):

$$a=\frac{v^2}{r}=\frac{\left(\frac{2\pi r}{T}\right)^2}{r}=\frac{4\pi^2 r}{T^2}=\frac{4\pi^2 r}{kr^3}=\frac{4\pi^2}{k}\frac{1}{r^2}$$

כלומר, קיבלנו את תלות תאוצת הכבידה באחד חלקי ריבוע המהירות, דהיינו חוק היפוך הריבוע. זהו החוק שמפתח ניוטון בספר הראשון של ספרו "העקרונות" (הידוע בשמו הלועזי ה"פרינקיפיה"). בספר השלישי של ה"פרינקיפיה" מפתח ניוטון, על סמך חוק היפוך הריבוע, את חוק הכבידה האוניברסלית. ניוטון מראה תחילה ששדה הכבידה הארצי שמחזיק את הירח למעשה זהה לשדה הכבידה שמאיץ כלפי הארץ תפוח שנופל מעץ. ניוטון מראה זאת על-ידי חישוב פשוט: בהנחה שמסלול הירח מעגלי, ועל סמך זמן המחזור שלו סביב הארץ (27 ימים, 7 שעות ו-43 דקות, קובע ניוטון), היחס בין רדיוס כדור הארץ למרחק הירח מכדור הארץ (כ-60.5 לפי ניוטון) והיחס המוכר לתנועה מעגלית $a=\frac{v^2}{r}$, ניוטון מחשב שתאוצת הכבידה של הירח אילו היה ממוקם על פני הארץ קרובה מאוד לתאוצת הכבידה שחישב הויגנס לעצמים על פני הארץ, שבמינוח המקובל בימינו עומדת על $9.8m/s^2$ (ניוטון והויגנס לא השתמשו ביחידות המודרניות הללו, אלא הם ביטאו למעשה את תאוצת הכבידה במונחי המרחקים שעוברים גופים נופלים במהלך שניית נפילתם הראשונה). ניוטון מסיק שלאור שוויון התוצאות מדובר באותו כוח בדיוק; לאחר מכן מכליל ניוטון מסקנה זו ומגיע למסקנה שכוח הכבידה אחראי גם לתנועות כוכבי הלכת סביב השמש.

לאחר מכן מציין ניוטון שמשקלו של גוף, כלומר כוח הכבידה עצמו הפועל על גוף מִשני (כלומר לא הגוף המרכזי המחולל את שדה הכבידה) נמצא ביחס ישר למסה האינרציאלית של הגוף המִשני; ניוטון מציין זאת ללא שום קשר לחוק השני $F=ma$: הוא מדגיש שהיחס הישר בין משקל גוף (W) למסתו (m) ידוע מניסוי. ניוטון מדווח שהוא ביצע ניסויים קפדניים עם מטוטלות שהכילו תשעה חומרים שונים (זהב, כסף, עופרת, זכוכית, חול, מלח, עץ, מים וחיטה), וגילה שתמיד (בהזנחת התנגדות האוויר) $W\propto m$, ללא כל תלות בסוג החומר;

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

כלומר, הסיק ניוטון, כוח הכבידה הפועל על גוף (מְשני) פרופורציונלי למסתו, שהיא תכונה מהותית של חומר שנקבעת מעצם היות הגוף חומרי, ולא מטיבו, סוגו, צפיפותו, צורתו או מכל תכונה אחרת. לאחר שראינו שכוח הכבידה הפועל על גוף ספציפי המצוי בשדה כבידה, כלומר משקלו של גוף, פרופורציונלי הן לתאוצת הכבידה (שתלויה מצדה בהיפוך ריבוע המרחק) והן למסה (האינרציאלית) של אותו גוף, לא נותר לניוטון אלא לקבוע שכוח הכבידה הכולל הפועל בין שני גופים תלוי גם במסת הגוף המרכזי. לשם כך משתמש ניוטון בחוק השלישי שלו: אם הגוף המרכזי מפעיל כוח על גוף מְשני, כי אז הגוף המְשני מפעיל כוח זהה על הגוף המרכזי, ומשיקולי סימטריה (וממה שכבר נאמר לעיל, כלומר שכוח הכבידה הפועל על גוף פרופורציוני למסת הגוף שעליו הוא פועל) הכוח הזה חייב להיות פרופורציונלי גם למסת הגוף המרכזי.

כלומר, בשפתו של ניוטון, אם נגדיר את F ככוח הכבידה האבסולוטי בין שתי מסות m_1 ו-m_2 שהמרחק ביניהן עומד על r, כי אז נקבל: $F \propto \frac{m_1 m_2}{r^2}$. את הקבוע G בנוסחה המוכרת לנו $F = \frac{G m_1 m_2}{r^2}$ קבע המדען האנגלי הנרי קוונדיש רק בסביבות שנת 1800, בעקבות ניסוי מעבדה שבו מדד בפועל את כוח הכבידה בין שני גופים.

<u>רצף זמן</u>

אישים ופרסומים מרכזיים בהתפתחות האסטרונומיה בכלל והאסטרונומיה הפיזיקלית בפרט:

400 לפנה"ס	**אפלטון** – הטיל על תלמידיו לבאר את תנועת כוכבי הלכת בעזרת תנועות מעגליות קצובות בלבד; תלמידו אודוקסוס אכן יצר מערכת של ספֵרות מסתובבות המבארות (אך באופן לא מדויק) את תנועות הנסיגה של כוכבי הלכת.
150 לספירה	**תלמי** – בהסתמך על אמצעים מתמטיים שונים (כגון אקצנטר, אפיציקל, אקוואנט) הגה מודלים חדשים המתקנים שגיאות רבות במודל הספֵרות של אודוקסוס ומאפשרים ניבויים מדויקים למדי של מיקומי גרמי השמים
1543	**קופרניקוס** – החליף את כדור הארץ בשמש כמרכז הנייח של היקום והפך את כדור הארץ לכוכב לכת, אך המשיך להסתמך על תנועות מעגליות קצובות כבסיס לתנועות כל גרמי השמים (סביב השמש)
1609	**קפלר** – נוקט לראשונה שיקולים פיזיקליים במהלך קביעת מסלולי כוכבי הלכת, ובצעד מהפכני פוסל את "אקסיומת המעגל" לטובת האליפסה
1687	**ניוטון** – בהסתמך הן על עבודת קודמיו (גליליאו, דקארט, הויגנס, הוק) והן על תובנותיו החדשות מקנה משמעות דינמית לחוקי קפלר וגוזר את חוק הכבידה האוניברסלי שיוצר לראשונה פיזיקה קוהרנטית המאחדת בין שמים וארץ

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

מטרות השיעור

<u>מטרות על</u>

- הכרות (בסיסית) עם ההתפתחות ההיסטורית של האסטרונומיה הפיזיקלית;
- עמידה על ההבדלים הפילוסופים העקרוניים בין האסטרונומיה של קפלר לזו של ניוטון;
- פיתוח חוק הכבידה האוניברסלי של ניוטון מתוך החוק השלישי של קפלר.

<u>מטרות אופרטיביות</u>

1. התלמידים ייחשפו להבדלים העקרוניים בין האסטרונומיה של קפלר לזו של ניוטון;
2. התלמידים יקראו על משנתם האסטרונומית של קפלר וניוטון;
3. התלמידים ישוו בין המסגרת המדעית של קפלר לזו של ניוטון;
4. התלמידים יפתחו את חוק הכבידה האוניברסלי של ניוטון מתוך החוק השלישי של קפלר.

ידע קודם נדרש של התלמידים

כדי להבין את הדיון המעמיק בהבדלים בין התיאוריה והחוקים של קפלר וגישתו של ניוטון לפיתוח חוק הכבידה האוניברסלי על התלמידים להכיר ולהבין את הנושאים הבאים:

- שלושת חוקי קפלר;
- חוק הכבידה האוניברסלית של ניוטון;
- חוקי ניוטון (ובעיקר החוק השני);
- קינמטיקה – ובפרט שליטה במושגים: כוח, מהירות, תאוצה והמשוואות המקשרות ביניהם.

תכנון השיעור

<u>מהלך השיעור</u>

התלמידים יקבלו משימת קריאה בה יחולקו דפי מידע המציגים תיאורים של היסטוריונים לגבי עבודתם של קפלר וניוטון. בהמשך לקריאת הדפים, יתבקשו התלמידים לערוך השוואה בין קפלר לניוטון. השוואה זו תיערך בטבלה בה יופיעו הקריטריונים להשוואה (דומה/שונה) כאשר בכל טבלה ישנו קריטריון חסר אותו צריכים התלמידים למצוא בעצמם מתוך הטקסט. לאחר מילוי הטבלה בקבוצות נמלא יחד את הטבלה על הלוח תוך דיון במשמעות של כל קריטריון.

בסיום השיעור, יעבדו התלמידים עם דף עבודה המנחה אותם בפיתוח עצמאי של חוק הכבידה האוניברסלי של ניוטון מתוך החוק השלישי של קפלר.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

חלוקת זמנים

	פעילות	משך (דק')
משימת קריאה	קריאה והשוואה בדף עבודה בין גישתו של קפלר לזו של ניוטון	40
דיון בהשוואה	בצורת מליאה, כתיבת הטבלה על הלוח ומילוי יחד עם התלמידים	25
דף עבודה	פיתוח חוק הכבידה האוניברסלי של ניוטון	25
	סה"כ:	**90**

עזרי הוראה – ציוד וחומרים נדרשים

עמדת מורה:

1. לוח + טושים/

לתלמידים:

2. דפי מידע – קפלר וניוטון (נספחים 2+3);
3. 2 דפי עבודה – טבלת השוואה (נספח 4) ופיתוח חוק הכבידה (נספח 5).

רציונאל

מטרת השיעור היא לבאר את האופן שבו ניוטון פיתח את חוק הכבידה האוניברסאלי שלו על-סמך חוקי קפלר, תוך שילוב היבטים היסטוריים ופילוסופים וטיפול בקשיים. זוהי משימה תובענית שלא פשוט לדחוס אותה לשיעור של 45 דקות; לפיכך ניתן רק לקוות להעביר במהלך שיעור מצומצם זה את עיקר העיקרים במהלך ההיסטורי המורכב והחשוב הזה. מטרת הכלי הראשון שבחרנו, ההשוואה ביו הפיזיקה של קפלר לזו של ניוטון ע"י התלמידים, היא להמחיש את העובדה שלמרות נכונותה הבסיסית של הטענה (המופיעה בספרי הלימוד הסטנדרטיים) שקפלר "נכשל" בתיאור הדינמיקה השמימית ו"הצליח" רק להפיק חוקים קינמטיים נכונים, הרי שמה שאפיין את עבודתו של קפלר מלכתחילה היה דווקא שאיפתו למצוא היגיון פיזיקלי במסלולי כוכב הלכת. שאיפה זו, שגם בזכותה בסופו של דבר (בנוסף לשיקולי דיוק תצפיתי) ויתר על התנועה המעגלית הקצובה לטובת האליפסה המהפכנית, עמדה בניגוד מוחלט לגישה ה"מתמטית" שרווחה באסטרונומיה לפניו (החל באפלטון וכלה בקופרניקוס, ועד בכלל), שבהתאם לה תפקיד האסטרונומיה לספק מודל מתמטיים גרידא שיאפשרו לנבא את מיקומי גרמי השמים בכל זמן רצוי. המתודה בה בחרנו מעודדת רמת חשיבה גבוהה של התלמידים ודורשת מעורבות שלהם בשיעור. בתוך דפי המידע שיקבלו התלמידים לצורך השוואה זו מתוארות גם מספר תגליות מפתח שהתרחשו בין פרסום חוקי

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

קפלר לשנות ה-80 של המאה ה-17, כלומר הזמן שבו החל ניוטון לכתוב את יצירת המופת שלו, ה"פרינקיפיה".

הדיון בפרמטרים להשוואה שיעלו מהתלמידים יאפשר הדגשה של הנושאים המרכזיים בעיניי המורה, תוך שימוש בתוצרי התלמידים, כך שישנו ערך לעבודתם של התלמידים בשיעור. לבסוף, באמצעות עבודה עצמית, יתבקשו התלמידים לשחזר בעצמם חלק (צנוע) מהמהלך שעשה ניוטון: הם יתבקשו להגיע מהחוק השלישי של קפלר לחוק היפוך הריבוע, על סמך קירוב המסלול האליפטי של כוכב לכת למעגל.

בסיכום ניתן, אם יאפשר הזמן, להתייחס להיבט ה"אוניברסאלי" של חוק הכבידה הניוטוני. האוניברסאליות של חוק זה נובעת למעשה מהמושג החדשני שהנהיג – מושג המסה הייחודי והמהפכני. מושג המסה הניוטוני, שלא דומה לשום מושג שהוצע לפניו או על-ידי שאר בני דורו, מאפשר אוניברסאליות, או כלליות מוחלטת, משתי בחינות, האחת פיזיקלית-קונקרטית והשנייה תיאורטית. מעצם העובדה שכוח הכבידה פועל (כפי שמראה הנוסחה) בין כל שני חלקיקים ביקום, הוא שם קץ אחת ולתמיד ליקום הישן של אריסטו (המפוצל ללא תקנה בין פיזיקה "ארצית" ל"שמימית"), והופך למעשה את הירח הנע במסלולו ואת התפוח שנפל על ראשו של ניוטון לתופעה פיזיקלית אחת ויחידה. ובמישור התיאורטי: גם ה"דואליות" של מושג זה – בזכות העובדה שמסה היא גם מדד של כוח הכבידה הפועל על גוף מסוים וגם היחס בין כוח כלשהו הפועל על אותו גוף לתאוצתו (החוק השני) – תורמת רבות לכלליות ולקוהרנטיות חסרת התקדים של תורת ניוטון, גם אם לעצם ה"דואליות" הזאת לא הצליח ניוטון לספק ביאור תיאורטי (שאותו תספק רק תורת היחסות הכללית של אלברט איינשטיין, עם "עקרון השקילות").

אנו מקווים שפרישת היריעה ההיסטורית תסייע לתלמידים להתגבר על הקשיים שלמעשה עמדו גם בפני מדעני המאה ה-17 שקדמו לניוטון (או בפני אלה שהתקשו לקבל את תורתו לאחר שפורסמה): במיוחד, איך ייתכן שמסלולו של כוכב לכת יכול להיגרם מכוח אחד בלבד המכוון לעבר השמש? וכיצד ניתן ליישם את החוק השלישי, חוק הפעולה והתגובה, לשני גרמי שמים שפועל ביניהם כוח "מופשט" לחלוטין שאיננו כרוך בשום דחיפה או משיכה מכאניות?

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

דפי עבודה – גרסת המורה

יוהנס קפלר (1630-1571)

קפלר קבע שתנועות כוכבי הלכת תלויות בעוצמת קרני השמש, שבמהלך סיבובה על צירה נושאת כל אחד מהם בתנועה משיקית סביבה. לפיכך היה עליו להסביר מדוע לכל כוכב לכת יש זמן הקפה משלו סביב השמש, זמן הקפה ששונה (לגבי כל אחד מהם) מקצב סיבוב השמש על צירה. הוא קבע שתי סיבות לכך. ראשית, כוכבי הלכת, כמו כל חומר (לדעתו), מפגינים התנגדות מסוימת לתנועה, התנגדות שקפלר כינה "עצלנות החומר". כוכבי הלכת נָטוּ, כפי שהגדיר זאת קפלר עצמו, "בגלל עצם היותם עשויים מחומר, להישאר במקומם ולא לנוע". מהירות כל כוכב לכת בזמן נתון נקבעת על-ידי עוצמת הכוח עליו, תחת ההתנגדות הזאת של החומר. החומר שבכל כוכב לכת אם כן מתנגד לתנועה, ומאחר שכוכבי הלכת מכילים כמויות חומר שונות, כל אחד מהם צריך לנוע (בהנחה ששאר הגורמים קבועים) במהירות משיקית שונה. סיבה שנייה להבדלי המהירות המשיקית היא היחלשות הכוח המניע (הבוקע מהשמש) ביחס ישר למרחק. הכלל הפיזיקלי הבסיסי של קפלר גרס שכוח זה נמצא ביחס הפוך למרחק.

קפלר למעשה פירק את תנועת כוכבי הלכת לשני רכיבים: רכיב משיקי, שכאמור מונע בהשפעת סיבוב השמש על צירה, ורכיב רדיאלי, שהוכתב על-ידי כוח מגנטי בין כוכב הלכת לשמש. בגלל אופן פיזור המטען המגנטי בשמש ובכוכבי הלכת, בחלק ממסלול כוכב הלכת יש דחייה בינו לבין השמש ובחלק אחר יש משיכה. לפיכך כוכב הלכת משנה בהתמדה את מרחקו מהשמש (בגלל הכוח הרדיאלי-מגנטי), וכתוצאה מכך – בהתאם לכלל הפיזיקלי הבסיסי של קפלר (הכוח המשיקי נמצא ביחס הפוך למרחק) – משתנית בהתמדה גם מהירותו המשיקית של כוכב הלכת (ככל שכוכב הלכת מתקרב לשמש היא גְדֵלה, וככל שהוא מתרחק ממנה היא קטֵנה).

במהלך חיפושיו של קפלר אחר חוקיות מתמטית שתקיים את הכלל הפיזיקלי הזה הגיע קודם כול למה שמכונה כיום "חוק השני" (חוק השטחים). רק לאחר שלא הצליח ליישב את חוק השטחים עם התצפיות המעולות שהיו בידיו (שאותן קיבל מידי האסטרונום הדני טיכו בראהה) תוך שמירה על ההנחה המסורתית שמסלול כוכב הלכת מעגלי, הגיע לבסוף למה שאנו מכנים "החוק הראשון", כלומר חוק האליפסה. יש להדגיש שהאליפסה היתה צורה מוכרת היטב כבר למתמטיקאים של העת העתיקה, וקפלר הביע את השתוממותו על כך שעקום כה פשוט מבחינה מתמטית למעשה פותר את הבעיה הקשה כל-כך של תנועות כוכבי הלכת.

פראפראזה מתוך הספר:

Stephenson, B. (1994). *Kepler's Physical Astronomy*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

אייזק ניוטון (1727-1642)

מחשבותיו של ניוטון על דינמיקה ניעורו בסוף שנת 1679 בזכות מספר מכתבים שקיבל מרוברט הוק, שזה עתה נבחר למזכיר החברה המלכותית של לונדון והתאמץ להחיות את התעניינותו של ניוטון בפעילויות ופרסומי החברה.[1] ניוטון היה חבר האגודה עוד מ-1672, אך איים כעבור שנה להתפטר בגלל הביקורת העזה שספג חיבורו על תורת הצבעים. מכתב הפיוס של הוק, מנובמבר 1679, הציע לניוטון עלה של זית, בדמות בקשה לקבל את חוות דעתו של ניוטון על היפותזה שניסח הוק בנוגע לתנועות כוכבי הלכת. בניגוד לדעתו הקודמת של ניוטון, שגרסה שמסלול כוכב לכת מוכתב על-ידי כוח משיקי, כוח פונה כלפי חוץ (צנטריפוגלי) וכוח פנימי (צנטריפטלי) המאזן את הצנטריפוגלי, הוק הציע את ההשערה שתנועות כוכב לכת היא הרכבה דינמית של שתי תנועות בלבד: תנועה משיקית בשל אינרציה ותנועה לעבר הגוף המרכזי בהשפעת כוח משיכה הפועל לעברו.[2]

ב-1684, ניוטון שלח להאלי את פתרונו לבעיית כוכבי הלכת.[3] פתרון זה מבוטא לא בסגנון המסורתי של הגיאומטריה היוונית ולא בפורמולציה המודרנית של החשבון הדיפרנציאלי והאינטגרלי המוכר לנו. ככזה הוא מהווה אתגר הן לפיזיקאי המודרני והן למלומד החוקר את כתבי הפילוסופים והמתמטיקאים של יוון העתיקה וממשיכיהם. ניוטון התאים את הקינמטיקה הליניארית של גליליאו לדינמיקה האינרציאלית של דקארט[4] וקבע את טבעו ההכרחי של הכוח שדרוש לקיומה של תנועה פלנטרית כפי שתוארה בידי קפלר. תוך התבססות על הישגי גליליאו, דקארט וכריסטיאן הויגנס,[5] שכולם מניחים כוחות קבועים (או היעדר כוחות בכלל), וכן בזכות שלושת חוקיו הידועים (שניוטון התייחס אליהם כאקסיומות שאינן דורשות הוכחה), הצליח ניוטון לפתור את בעיית תנועות כוכבי הלכת, שכרוכה בכוח שגודלו משתנה בכל רגע ורגע. תרומתו הייחודית של ניוטון היתה הנחתו שניתן לחשוב על כוח משתנה זה כאילו הוא קבוע למשך פרק זמן קצר מאוד, והצלחתו בניסוח ביטוי גיאומטרי פשוט (יחסית) שיבטא קירוב זה. כך עלה בידי ניוטון להוכיח את חוק היפוך הריבוע, כלומר שכוח הכבידה שדרוש להחזיק כוכב לכת במסלול שתואם את חוקי קפלר חייב להימצא ביחס פרופורציונלי הפוך לריבוע מרחק כוכב הלכת מהגוף המרכזי (השמש).

פראפראזה מתוך הספר:

Brackenridge, J. B. (1996). *The Key to Newton's Dynamics*. Berkeley: University of California Press.

---

[1] הוק היה מדען אנגלי נודע, שבין השאר ניסח את חוק הקפיצים $F = -k\Delta x$ הקרוי על שמו.
[2] יש לציין שניוטון קיבל הצעה זו והיטיב ליישמה, אם כי בשום מקום לא נתן קרדיט על כך להוק. המשך מערכת היחסים בין ניוטון הלוחמני להוק – וגם בין ניוטון לעמיתים רבים אחרים – לא התאפיין בהרבה עלי זית.
[3] אדמונד האלי, אסטרונום ופיזיקאי אנגלי, שמפורסם גם הודות לשביט הקרוי על שמו אך בעיקר בזכות ניסיונותיו הבלתי-נלאים (והמוצלחים) לשכנע את ניוטון העקשן והזועף להעלות סופסוף את תורתו על הכתב.
[4] היה זה הפילוסוף הצרפתי רנה דקארט שקבע ב-1646 את מה שהפך לבסוף לחוק הראשון של ניוטון, כלומר הקביעה שבהיעדר מכשולים או כוחות גוף יתמיד בתנועה קצובה לאורך קו ישר.
[5] מדען הולנדי שידוע בעיקר בשל מודל האור הגלי שפיתח, תרומתו המשמעותית לחקר התנגשויות אלסטיות וקביעתו שבתנועה מעגלית קצובה התאוצה מכוונת למרכז ופרופורציונית לריבוע המהירות חלקי רדיוס הסיבוב.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

טבלת ההשוואה בין קפלר לניוטון

קראו את דפי המידע המתארים את עבודתם של קפלר וניוטון (בהתבסס על ספריהם של היסטוריונים חשובים) וערכו השוואה בין הגישות המדעיות לאסטרונומיה של קפלר ושל ניוטון. שימו לב – בכל טבלה (דומה/שונה) ישנם קריטריונים חסרים (שורות ריקות). מצאו לפחות קריטריון חסר אחד בכל טבלה ומלאו את הטבלה גם עבורו.

הדומה בין קפלר לניוטון:

קריטריון	קפלר וניוטון
הגישה כלפי האסטרונומיה – האם היא מדע מתמטי או פיזיקלי?	קפלר וניוטון שניהם מתייחסים לאסטרונומיה כאל ענף של הפיזיקה ומתעקשים על ניתוח פיזיקלי של תנועות כוכבי הלכת
צורת מסלול כוכבי הלכת	קבלת האליפסה תוך ויתור על תנועה מעגלית קצובה
היכן מרכז היקום	השמש כמרכז היקום (או מרכז תנועת כוכבי הלכת)
סיבוב השמש סביב צירה	קפלר דמיין זאת (והניח שזה מקור הכוח המשיקי), ניוטון ידע זאת (זוהי אחת מתגליות גליליאו)
הקפדה עקשנית על התאמה בין תיאוריה לתצפית	שיקול מרכזי מבחינת קפלר בבחירת האליפסה

השונה בין קפלר לניוטון:

קריטריון	קפלר	ניוטון
מהו האופן בו כוח גורם לתנועה?	כוח גורם למהירות	כוח גורם לתאוצה
מספר הכוחות הפועלים על כוכב לכת במסלולו	2: משיקי ורדיאלי	3 לפני המכתב של הוק, 1 אחריו (רדיאלי)
האם יש אינרציה?	אין אינרציה, יש "עצלנות החומר"	יש אינרציה (חזרה על דקארט)
כיצד תלוי כוח הכבידה במרחק מהשמש?	כוח ביחס הפוך למרחק	כוח ביחס הפוך למרחק בריבוע
חדשנות בשימוש במתמטיקה	שימוש באליפסה – עקום מוכר היטב	שימוש במה שעתיד להפוך לחדו"א, קירובים והנחה שכוח משתנה יכול להחשב כקבוע בפרקי זמן קצרים
היכולת להתבסס על עבודת קודמיך (כמה הן שונות מגישתך)	יכול להתבסס רק על עבודתם של "גיאוצנטרים" (בעיקר תלמי, וכן טיכו שסיפק לו את התצפיות ושל קופרניקוס חסיד התנועה המעגלית הקצובה	יכול להיעזר בהישגי דקארט, גליליאו, הויגנס וקפלר עצמו (וגם אחרים)

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

דף עבודה: פיתוח חוק הכבידה האוניברסלי של ניוטון מהחוק השלישי של קפלר – **למורה**

אחרי שהבנו את תנועת כוכבי הלכת הן לפי קפלר והן לפי ניוטון ואת ההבדלים בין שתי הגישות, נגיע יחד מהחוק השלישי של קפלר לחוק הכבידה האוניברסלי של ניוטון, תוך שימוש בחוקי ניוטון.

שימו לב: בתהליך הפיתוח נתייחס למסלול כוכבי הלכת כאל מעגל. קירוב זה מאפשר לנו להשתמש בנוסחאות של תנועה מעגלית וכן להמיר את "חצי הציר המרכזי של האליפסה" ברדיוס המעגל.

1) האם תוכלו להסביר מדוע מוצדק קירוב זה של המסלולים האליפטיים למעגליים?
בגלל האקסצנטריות הקטנה שלהם, כפי שידוע לנו וראינו בסימולציה

2) כתבו ביטוי עבור תאוצה רדיאלית, כתלות במהירות משיקית:

$$a_r = \frac{v^2}{r}$$

3) כתבו ביטוי עבור מהירות משיקית בתנועה מעגלית, כתלות בזמן מחזור:

$$v = \frac{2\pi r}{T}$$

4) כתבו מחדש (בהסתמך על סעיף 3) את הביטוי לתאוצה רדיאלית:

$$a_r = \frac{v^2}{r} = \frac{\left(\frac{2\pi r}{T}\right)^2}{r} = \frac{4\pi^2 r^2}{T^2 r} = \frac{4\pi^2}{T^2} r$$

5) כתבו את החוק השלישי של קפלר, עבור כוכב לכת יחיד (זכרו: הניחו מסלול מעגלי):

$$T^2 = kr^3$$

6) באמצעות הביטויים שקיבלתם בסעיפים 4-5, כתבו ביטוי לתאוצה הרדיאלית ללא תלות בזמן מחזור:

$$a_r = \frac{4\pi^2}{T^2} r = \frac{4\pi^2}{\left(kr^3\right)} r = \frac{4\pi^2}{kr^2}$$

7) קיבלנו ביטוי "חדש" לתאוצה רדיאלית אשר מתבסס על תנועה מעגלית והחוק השלישי של קפלר. מהי תלות התאוצה ברדיוס?

התאוצה תלויה ביחס הפוך ברדיוס בריבוע: $a_r \propto \frac{1}{r^2}$

הוכחת תלות זו, בהנחת מסלול אליפטי ממש (מבלי לקרבו למעגל), נחשבת להישג מרכזי מאוד של ניוטון.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

8) כתבו את החוק השני של ניוטון: $F=ma$

9) הציבו בחוק השני של ניוטון את הביטוי עבור התאוצה שקיבלתם בסעיף (6):

$$F=ma=m\frac{4\pi^2}{kr^2}$$

10) הפרידו את הפרמטרים התלויים בכוכב הלכת ובמסלולו מאלו שאינם תלויים בו (הקבועים) בביטוי עבור הכוח השקול מסעיף (9):

$$F=\frac{4\pi^2}{k}\cdot\frac{m}{r^2}$$

קיבלנו ביטוי של כוח עבור גוף הנע בתנועה מעגלית. אנו רואים את התלות במסת כוכב הלכת וברדיוס המסלול אך זהו עדיין אינו הביטוי המוכר לנו עבור כוח הכבידה האוניברסלי המיושם למערכת השמש: $F=G\frac{M\cdot m}{r^2}$ (בו m היא מסת כוכב הלכת ו M היא מסת הגוף המרכזי, השמש).

מתוך החוק השלישי שלו, חוק הפעולה והתגובה, ניוטון מסיק כי אם הגוף המרכזי מפעיל כוח על הגוף המִשני, כי אז הגוף המִשני מפעיל כוח זהה על הגוף המרכזי, ומשיקולי סימטריה הכוח הזה חייב להיות פרופורציונלי גם למסת הגוף המרכזי. את הקבוע G המופיע בנוסחה קבע המדען האנגלי הנרי קוונדיש רק בסביבות שנת 1800, בעקבות ניסוי מעבדה שבו מדד בפועל את כוח הכבידה בין שני גופים.

11) היכן בכל זאת "מסתתרת" התלות של כוח הכבידה בגוף המרכזי בביטוי שקיבלתם בסעיף (10)?

<u>התלות של כוח הכבידה במסת הגוף המרכזי נמצאת בערך k אשר משתנה עבור מערכות כוכבים שונות, אם מדובר בכוכבי לכת או כתלות במערכת אותה אנו חוקרים.</u>

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

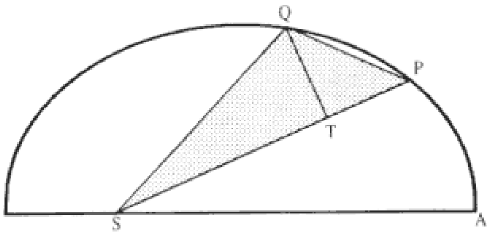
תוספת למורה - ההוכחה של ניוטון שמחוקי קפלר נובע חוק היפוך הריבוע בהנחת מסלול אליפטי

תוספת זו משמשת לצורכי העשרה בלבד. היא אינה חלק ממערך השיעור הנוכחי. ניתן לעשות בה שימוש לצרכי הרחבה והסבר של מהלך החשיבה של ניוטון.

תיאור מקוצר זה של הוכחת ניוטון חושף משהו מההבדל הגדול שבין דרך העבודה של ניוטון לזו של כל קודמיו (כלומר, את אופן השימוש שלו בשיטה שתכונה לימים חדו"א). לניוטון היו למעשה שתי שיטות להראות זאת: האחת התייחסה לניתוחו של הויגנס את התנועה המעגלית, והיא מסובכת למדי (צריך להבין מה זה מעגל עקמומיות, או "מעגל נושק", ולדבר על נגזרת ראשונה ושנייה של עקומות), אבל הדרך השנייה – שגם מופיעה במהדורה הראשונה של ספרו של ניוטון מ-1687, ה"פרינקיפיה"– פשוטה יותר ונסמכת על עבודתו של גליליאו, כמו גם על חוק השטחים של קפלר.

הוכחת ניוטון נסמכת על שלושה עקרונות:

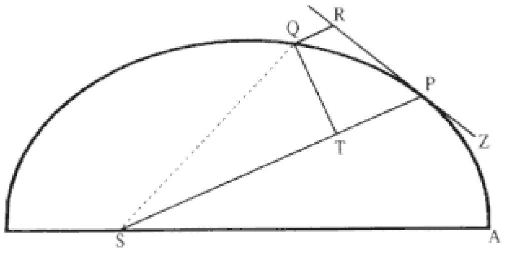
א. חוק השטחים של קפלר.



נניח שהשמש מצויה במוקד האליפסה S וכוכב הלכת עובר במהלך פרק זמן מסוים t מנקודה P לנקודה Q. במהלך אותה תנועה פועל על כוכב הלכת כוח שגודלו כמובן משתנה, אך הוא בכל רגע ורגע מכוון לשמש S (כלומר זהו כוח מרכזי). בהתאם לחוק השטחים של קפלר זמן התנועה t הדרוש למעבר מנקודה P ל-Q פרופורציונלי לשטח המקווקו (כלומר שטח המשולש SQP), ששווה בקירוב לשטח שגומא הרדיוס-וקטור SP במהלכו עד SQ (כלומר השטח המופיע בחוק השני של קפלר), כל עוד נקודה Q מספיק קרובה לנקודה P. האסטרטגיה החדשה של ניוטון היתה כרוכה בקירובים רבים כאלה, תוך כדי בדיקה מדוקדקת של ההשלכות הגיאומטריות של ההנחה שנקודת הסיום של תנועה קרובה מאוד לנקודת ההתחלה. התוצאה היא מעין "חדו"א גיאומטרית": ניוטון לא משתמש בביטויים אלגבריים לאינפיניטסימלים dx,dt,dy (שלייבניץ המציא), שמקצרים מאוד את דרך החישוב ונראים מסודרים ואלגנטיים; ניוטון השתמש בדרך הגיאומטרית הזאת שבוחנת מה קורה לגדלים הגיאומטריים הרלוואנטיים בכל קירוב וקירוב. החיסרון הוא אופן הצגה מסורבל להפליא (ב"פרינקיפיה"), אך היתרון הוא שכאשר אפשר להבין את אופן מחשבתו של ניוטון (ולפעמים אפשר...) אז מבינים גם את האינטואיציה הגיאומטרית שלו, והיא לא הולכת לאיבוד כמו בשפה האלגברית והאלגנטית של לייבניץ.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

ב. ניתוח התנועה המואצת של גליליאו.



לפי ניתוח הנפילה של גליליאו (שזוכה לשבחים רבים מפי ניוטון, בניגוד לקפלר אגב שכמעט לא מוזכר ב"פרינקיפיה"), אם פועל על גוף כוח קבוע, כי אז המרחק שיעבור פרופורציונלי לתאוצה ולריבוע הזמן.

לנו מוכרת הנוסחה $s = ½at^2$, אם כי אצל ניוטון (כמו אצל גליליאו עצמו) לא מופיעות משוואות אלגבריות אלא רק פרופורציות גיאומטריות, כלומר מבחינתם המרחק מתכונתי לתאוצה ולריבוע הזמן ($s \propto at^2$). אבל מהו המרחק שעובר כוכב הלכת במהלך תנועתו מ-P ל-Q בהשפעת הכוח המרכזי? מרחק זה, הבין ניוטון, איננו אלא **הסטייה** של כוכב לכת מהתנועה שהיתה לו אילו לא פעל שום כוח בין P ל-Q, כלומר אילו כוכב הלכת היה נע החל מנקודה P במהירות משיקית קבועה (כמו אבן שמוטלת ממקלעת) ומגיע ל-R (קו ZPR משיק לאליפסה, כלומר עקומת המסלול, בנקודה P). בציור הסטייה הזאת היא QR, כלומר זהו המרחק שלאורכו נע כוכב הלכת בהשפעת הכבידה; ככל ש-Q מתקרבת ל-P הקו QR נוטה להיות מקביל ל-SP.

כאן ניוטון שוב נוקט קירוב: כש-Q מספיק קרובה ל-P, אז ניתן להניח שגודלו של "כוח הכבידה התאוצתי" הפועל על כוכב הלכת (בשפתנו, שיעור תאוצת הכבידה הפועלת על כוכב הלכת, או שדה הכבידה הפועל עליו) **קבוע**. את שיעור תאוצת הכבידה יכול ניוטון לבטא על-פי הפרופורציה של גליליאו (שוב, בהנחת כוח קבוע, שנכונה רק קרוב מאוד לנקודה P):

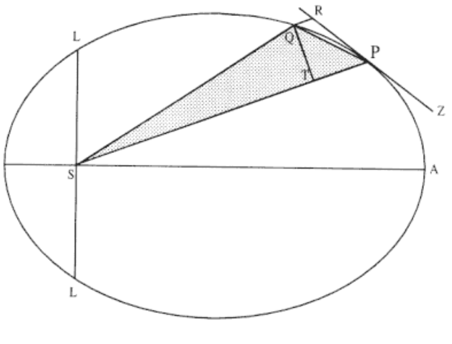
$$QR \propto at^2 \text{ ולכן } a \propto QR/t^2.$$

אבל לפי חוק השטחים של קפלר הזמן t פרופורציונלי לשטח המשולש SQP, שהוא $SP{\cdot}QT/2$, לכן:

$$a \propto QR/(SP^2{\cdot}QT^2).$$

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

ג. הישענות על גיאומטריית האליפסה, למציאת השיעור (הקבוע) שאליו שואפת המנה QR/QT^2 ככל ש-Q מתקרבת ל-P.



נתבונן באליפסה הפלנטרית APS שבציור (שוב, השמש נמצאת במוקד S). הקו LSL (שאורכו L) העובר דרך המוקד ומאונך לציר הראשי מכונה latus rectum ("פתיחה") של האליפסה. ניוטון מוכיח, באופן גיאומטרי לחלוטין (שלא נתעכב על פרטיו הסבוכים), שככל שנקודה Q קרובה יותר ל-P, המנה QR/QT^2 מתקרבת יותר ל-1/L, כלומר גודל קבוע שתלוי בצורת האליפסה.

לפיכך, ככל שנקודה Q קרובה יותר ל-P נקבל: $a \propto QR/(SP^2 \cdot QT^2) = 1/(L \cdot SP^2)$

ולפיכך (שהרי L קבוע) בסביבות נקודה כלשהי $a \propto 1/SP^2$. קיבלנו שבהנחת מסלול אליפטי כשהשמש במוקד, שדה הכבידה ("כוח תאוצתי", או פשוט התאוצה) חייב להתנהג כמו היפוך ריבוע המרחק בין כוכב הלכת למיקום הגוף המרכזי. הוכחה זו של חוק היפוך הריבוע נמצאת בספר הראשון של ה"פרינקיפיה", ואילו שאר ההסקה של כוח הכבידה האוניברסלי נמצא בספר השלישי.

כך פתר ניוטון את מה שנקרא "הבעיה הישירה" (direct problem) של כוכבי הלכת, כלומר בהינתן מסלול כוכב הלכת, כמו גם נקודה ביחס למסלול זה שאליה מכוון הכוח המרכזי, למצוא איך תלוי הכוח המרכזי במרחק שבין כוכב הלכת למיקום הגוף המרכזי עבור כל נקודה על המסלול (אם למשל המסלול מעגלי אז הכוח כמובן קבוע ופרופורציונלי לריבוע המהירות חלקי המרחק; אם לעומת זאת המסלול אליפטי והכוח המרכזי ממוקם **במרכז** האליפסה ולא במוקד שלה, כי הכוח נחלש בהתאם למרחק ולא לריבוע המרחק; ניוטון חישב עוד כמה מקרים). ניוטון גם פותר את "הבעיה ההפוכה", inverse problem, ומוכיח (בהסתמך על החוק השלישי של קפלר) שמחוק היפוך הריבוע, כלומר השתנות הכוח בהתאם להיפוך ריבוע המרחק, חייב לנבוע מסלול אליפטי, פרבולי או היפרבולי (כלומר אחד מחתכי החרוט). מכל מקום, מאז ניוטון עד היום לאסטרונומים חשובה הרבה יותר (וכמעט אך ורק) דווקא "הבעיה ההפוכה", שבעזרתה ניתן, על סמך ההנחה שהכבידה מתנהגת בהתאם לחוק היפוך הריבוע, למצוא את ההפרעות שנגרמות למסלולי כוכבי לכת ושביטים ושבגללן הם סוטים מעקומות "חרוטיות" אידיאליות (בעיית שלושת הגופים וכד').

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

מקורות

רוזן, ע. (2015). *מכניקה ניוטונית: כרך ב'*. רחובות: מכון ויצמן למדע, המחלקה להוראה המדעים.

Newton, I. (1999). *The Principia: Mathematical Principles of Natural Philosophy* (Bernard Cohen, Anne Whitman & Julia Budenz, Trans.). Berkeley: University of California Press (Original work published 1687).

Stephenson, B. (1994). *Kepler's Physical Astronomy*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press.

Brackenridge, J. B. (1996). *The Key to Newton's Dynamics*. Berkeley: University of California Press.

Smeenk, C. & Schliesser, E. (2015). Newton’s Principia. In Buchwald, J. & Fox, R. (Eds.), *Oxford Handbook for the History of Physics* (pp. 109-165). Oxford: Oxford University Press.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

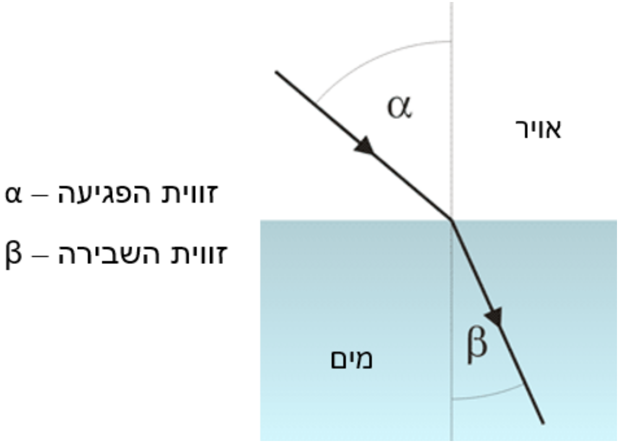
<u>פעילות ג'יגסו</u>: האור במנהרת הזמן – בחינה כרונולוגית של התפתחות התפיסה של מהות האור (גל / חלקיק)

רקע כללי והרעיונות המרכזיים בשיעור

במאה ה-17 כבר היו ברורות לפילוסופים ולמדענים באירופה (בעיקר בזכות פועלם של כמה פילוסופים ערביים במאות הקודמות) מספר עובדות בסיסיות חשובות על האור:

- האור מתפשט בקווים ישרים;
- האור איננו בוקע מהעין (כפי שחשבו רבים מהיוונים הקדמונים), אלא יוצא מגופים – בין אם הם מקורות אור ובין אם הם עצמים שמחזירים אור – ומגיע לעין, וכך אנו יכולים לראות גופים אלה;
- היה גם ידוע זה מכבר שבהחזרת אור פשוטה זווית הפגיעה שווה לזווית ההחזרה;
- בשנת 1621 הצליח ההולנדי ויליברורד סנל, על סמך ניסויים בשבירת אור, לנסח את החוק המפורסם הקרוי על שמו: היחס בין סינוס זווית הפגיעה (הזווית בין הקרן הפוגעת לאנך למשטח הגבול) לבין סינוס זווית השבירה (הזווית בין הקרן היוצאת לאנך למשטח הגבול), הוא קבוע לגבי זוג תווכים נתון (למעשה, קדם לו בניסוח יחס זה הפיזיקאי והמתמטיקאי הערבי אבן סאהל, 940-1000 לספירה).

לאחר שנודע חוק סנל ברחבי אירופה עדיין לא היתה תשובה ברורה לשאלה בדבר מהותו של האור (שאלה שהעסיקה גם את הפילוסופים הקדמונים), אך היה ברור לחלוטין שכל תיאוריה כזאת חייבת להתיישב עם כל ההנחות הללו (ובפרט עם חוק סנל הכמותי), יחד עם העובדה הידועה שאם אור נשבר מתווך דליל לצפוף (למשל מאוויר למים), כי אז קרן האור "מתקרבת לאנך", כלומר חייב להתקיים $\alpha > \beta$ (ראו איור).



שני מודלים שהוצעו בתקופה זו התיישבו עם כל העובדות הידועות הללו: המודל החלקיקי, שגרס שהאור מורכב מחלקיקים קטנים הנעים בקו ישר ובמהירות קבועה בתווך אחיד,

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

והמודל הגלי, שלפיו האור הינו הפרעה המתפשטת בתווך דקיק ביותר (המכונה "אֶתֶר") הממלא את כל היקום.

הפילוסוף הצרפתי רנה דקארט (1650-1596) תמך **בהשקפה הגלית**, כלומר הוא שיער שהאור איננו מורכב מחלקיקים אלא הוא לחץ המתפשט דרך האֶתֶר, והיה הראשון שניסה לבאר את תופעת השבירה על סמך ניתוח פיזיקלי של תופעת השבירה: הואיל ובמהלך שבירת האור העובר מאוויר למים קרן האור "מתקרבת לאנך", הסיק דקארט <u>שמהירות האור גדולה בתוך המים ממהירותו באוויר</u>. ואולם לאחר מכן הציע ההולנדי כריסטיאן הויגנס (1695-1629) מודל גלי של האור שהיה עקבי ומנומק בהרבה מהשקפת דקארט, והמודל של הויגנס חזה את ההפך. על סמך העיקרון המפורסם הקרוי על שמו (עקרון הויגנס), המתבסס על ההנחה היסודית שהאור מתפשט כגל לכל הכיוונים (בתווך אחיד) במהירות שווה, הראה הויגנס שה"התקרבות לאנך" מחייבת <u>שמהירות האור במים דווקא תהיה **קטנה** יותר ממהירותו באוויר.</u>

(*) שאלה למחשבה: לפי הידוע היום, האם מהירות האור (ליתר דיוק, מהירותו האפקטיבית של האור) בתווך צפוף (יחסית) קטנה ממהירותו בתווך דליל, גדולה ממנה או שווה לה? לאור זאת, האם לדעתך השקפת דקארט היא נכונה, או שמא נכונה המסקנה מהמודל הגלי?

מכל מקום, מובן שבחלוף הזמן, ככל שהשתפרות הטכנולוגיה אפשרה למדענים לצפות בתופעות רבות יותר (כמו עקיפה, התאבכות ועוד), הלכה והתחדדה השאלה איזה משני המודלים הללו – שהוצעו לראשונה באופן בהיר ועקבי במאה ה-17, ושניהם נשקלו ברצינות רבה מאז – קרוב יותר למציאות.

מטרות השיעור

<u>מטרות על</u>

- הכרות עם התפתחות התפיסה של מהות האור לאורך ההיסטוריה;
- פיתוח יכולת ההבנה הפיזיקלית של התלמידים מתוך קריאת טקסט היסטורי-מדעי;
- פיתוח יכולת ההצגה של נושא חדש בפני הכיתה.

<u>מטרות אופרטיביות</u>

1. התלמידים יקראו טקסט המתאר תפיסה היסטורית של מהות האור;
2. התלמידים יסיקו מתוך הטקסט מהי התפיסה של המדען;
3. התלמידים יציגו בפני הכיתה את תפיסתו של המדען והטיעונים עליהם הוא הסתמך, כולל תיאורי ניסויים אם ישנם.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

ידע קודם נדרש של התלמידים

שיעור זה מתאים כסיכום לנושא הדואליות של האור. השיעור נוגע במושגים כגון עקיפה, התאבכות, חוק סנל, גלים ותנע אך אינו מסביר אותם ולכן אינו מתאים כשיעור המלמד את הנושאים. לשם כך, נדרשת הבנה והכרה מוקדמת של מושגים אלו.
במקרה שהשיעור מועבר לתלמידים בכיתה י' אשר למדו את פרק האופטיקה, יש לשקול לבצע מספר שינויים בטקסטים (בעיקר המאוחרים יותר כרונולוגית) על מנת לפשטם הן מבחינה פיזיקלית והן בהיבט השפה בה הם כתובים.

הנושאים המוזכרים בשיעור הינם:

1. גלים (מכאניים ואלקטרומגנטיים);
2. חוק סנל;
3. התאבכות;
4. חוקי ההחזרה והשבירה של האור;
5. מהירות זוויתית;
6. זמן מחזור;
7. תנע.

תכנון השיעור

מהלך השיעור

1. הקדמה – נושא השיעור והנחיות כלליות לעבודה.
2. קריאת הטקסטים ע"י התלמידים בקבוצות השונות ותכנון דרך ההצגה שלו לכיתה.
3. סבב הצגות של הקבוצות השונות (לפי סדר כרונולוגי).
4. סיכום (מליאה): מה התפיסה העכשווית של האור? כיצד זה מסתדר עם מה שראינו במהלך השיעור?

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

חלוקת זמנים

		משך (דקות)
1.	הקדמה והסברים	10
2.	חלוקה לקבוצות	5
3.	קריאת החומר והכנת ההצגה	45
4.	הצגת הטיעונים ע"י כל קבוצה	45 (7 קבוצות, 5 דקות לקבוצה, כולל התארגנות)
5.	סיכום – התפיסה העכשווית של האור	15
	סה"כ:	**120**

עזרי הוראה – ציוד וחומרים נדרשים

עמדת מורה:

4. לוח + טושים.

לתלמידים:

5. דף הסבר והנחיות לשיעור;
6. דף מבוא;
7. דפי מידע – דף לכל קבוצה.

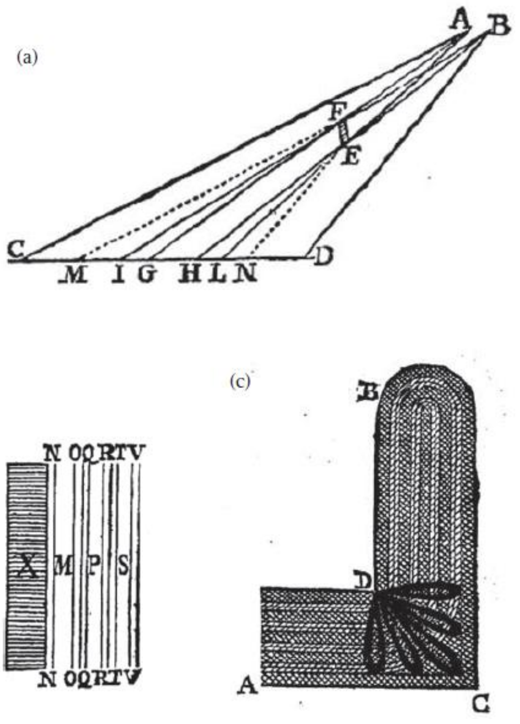
הערה חשובה: הסעיף "רקע כללי והרעיונות המרכזיים בשיעור" מהווה את דף המבוא הניתן לתלמידים כרקע היסטורי ("דף המבוא").

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

האור במנהרת הזמן – קבוצה מספר 1

טקסט ראשון: **פרנצ'סקו גרימלדי, 1665**

ב-1665 התפרסם ספרו עב-הכרס של האב הישועי, האיטלקי פרנצ'סקו גרימלדי, "פיזיקו-מתמטיקה של האור", שהכיל תיאור של תגליתו האופטית החדשה לחלוטין, שאותה כינה (בלטינית) diffractio (המונח באנגלית diffraction פירושו "עקיפה"). בסדרה של ניסויים זהירים, הוא חקר את הצל שמטיל על מסך רחוק עצם צר כאשר הוא מואר על-ידי אור שמש העובר דרך נקב קטן בתריס. הוא הבחין בכך שהצל החלקי (שנקרא "פנומברה") היה גדול מכפי שהשתמע מממדי הנקב וכָלל פסים צבעוניים הן בתוך הצל הגיאומטרי[6] והן מחוצה לו (איור 1). הוא קבע בזהירות שתופעה זו תלויה באופן חדש של התקדמות אור, הנבדל מהחזרה (על-ידי קצותיו של העצם), משבירה (על-ידי תווך הטרוגני כלשהו) ומפיזור (על-ידי האוויר). גרימלדי הסביר את הפסים הנצפים באמצעות אנלוגיה עם התנועה הגלית של פני המים של נחל מעבר למכשול, והסיק ש"האור הוא כנראה מעין נוזל מהיר ביותר, שלעתים גם מבצע תנועה גלית, ושוטף דרך תווך שקוף".



איור 1 - ניסוי העקיפה הראשון של גרימלדי. (a) מערכת הניסוי (AB - חורים בצמצם, EF - עצם, CD מסך), (b) הפרינג'ים הצבעוניים שהתקבלו בסמוך לצל הגיאומטרי של העצם,(c) פרינג'ים פנימיים בתוך הצל של עצם בצורת האות L. מתוך כתבי גרימלדי, 1665

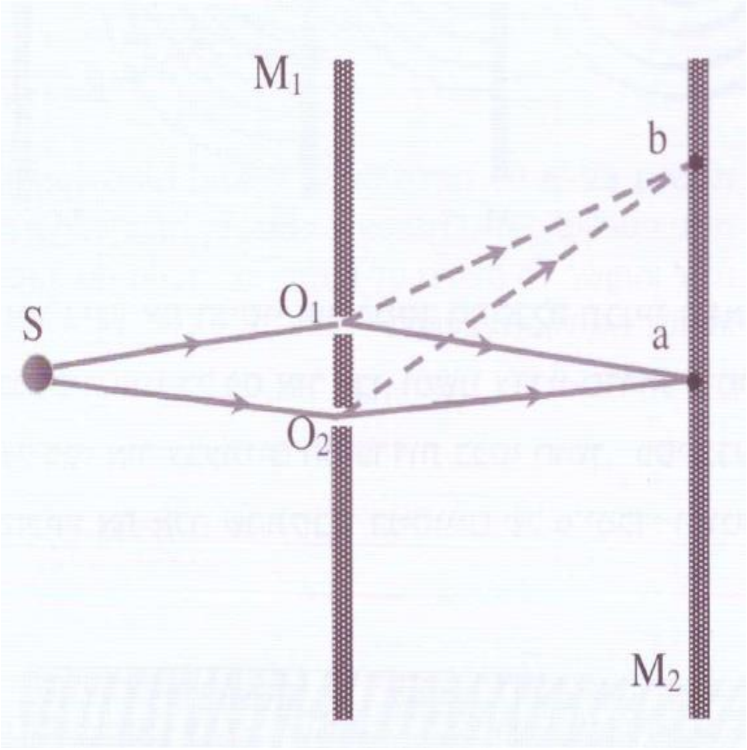
(Darrigol, *A History of Optics*, pp. 58-59)

6 הצל הנוצר בהנחה שהאור מתקדם בקווים ישרים (כלומר אינו מבצע שום עקיפה כלל).

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

<u>טקסט שני</u>: **תומס יאנג, 1801 (אופטיקה פיזיקלית, עמ 155)**

הניסוי של תומס יאנג הוא אחד מהמפורסמים בהיסטוריה של הפיזיקה ונושא את שמו. בניסוי זה יצר יאנג שתי אלומות של "אותו האור", כלשונו, והפגיש ביניהן כך שהן חפפו זו את זו (איור 2). כתוצאה מהחפיפה נוצרה התאבכות ועל המסך התקבלה תבנית של פסי אור ופסי חושך כפי שציפה יאנג.



איור 2 - תיאור ניסוי יאנג: אור הנובע מ-S מתפצל לשני מקורות בעוברו דרך שני הסדקים שבמחסום. בגלל העקיפה של האור חופפות האלומות במקומות שונים, ולכן ייתכן כי בנקודה a הן תחזקנה זו את זו ויתקבל פס אור (התאבכות בונה), ובנקודה b הן תבטלנה זו את זו וייווצר חושך (התאבכות הורסת).

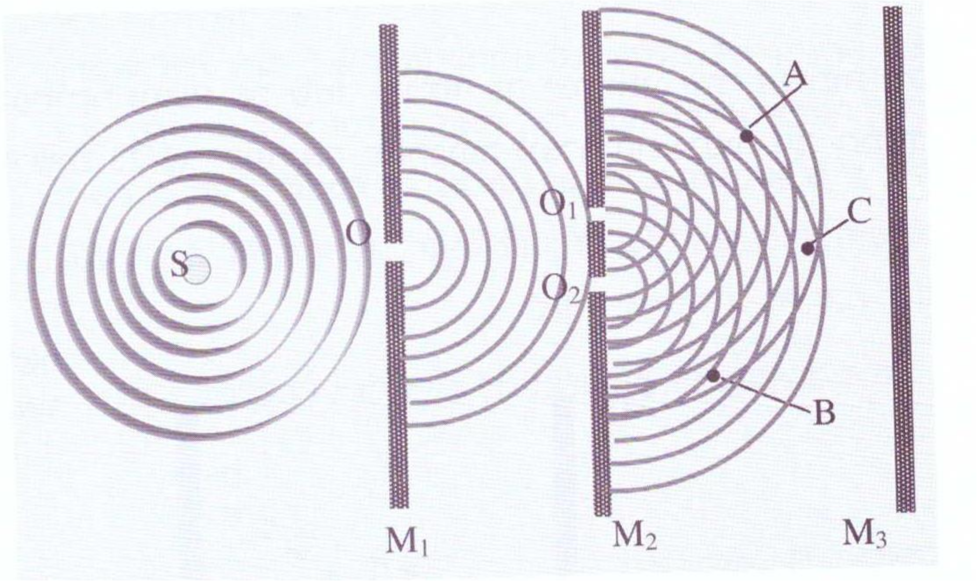
כדי שניתן יהיה להבחין בתבנית ההתאבכות על המקומות שבהם מתקבלים פסי אור ופסי חושך להיות קבועים. מצב זה נוצר כשהגלים הנפגשים הם בעלי אותה התדירות ובהפרש מופע קבוע (אלה הם גלים קוהרנטיים). אם גם המשרעת זהה, הרי שבהתאבכות ההורסת נקבל פס חשוך (או נקודה חשוכה) על המסך.

הרעיון של יאנג היה פשוט: להפגיש בין שתי אלומות אור כדי לקבל התאבכות בין גלי האור. הקושי המיוחד היה בגלל אורך הגל הקצר מאוד של האור. שלא כמו בהתאבכות גלי מים, צפייה בהתאבכות האור דורשת היווצרות פסי חושך (ביטול מוחלט של האורות הנפגשים, המצריך משרעת ותדר זהים והפרש מופע קבוע). יאנג הבין כי לא ניתן למצוא שני מקורות אור זהים ממש, ולכן השתמש במקור אחד שאת אורו פיצל. כך נוצרו שני מקורות קוהרנטיים שעוצמתם שווה, כלומר מקורות צמודים.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

יאנג העביר את אור השמש דרך פתח O זעיר ששימש כמקור אור נקודתי (איור 3). בהמשך דרכה של האלומה הציב מחיצה אטומה M_2 ובה שני סדקים. על פי עקרון הויגנס, נקודות במרחב בתוך כל אחד מהסדקים O_1 ו-O_2 שבמחיצה M_2, הפכו בעצמן למקורות אור שמהם יוצאים גלים משניים לאחר שהגל המקורי מגיע אליהן מ-S. בגלל המוצא המשותף, מהוות אלומות האור היוצאות מהסדקים מקורות קוהרנטיים: בעלי אותה המשרעת, אותו התדר והפרש מופע קבוע (כך שניתן להחשיב אותו כשווה לאפס).

שתי סדרות הגלים הקוהרנטיים יצרו תבנית של התאבכות. אם נתייחס לקשתות שבתרשים כמייצגות את שיאי הגלים, הרי שבנקודה A יש מפגש בין שני שיאים, ולכן התאבכות בונה, בנקודה B יש מפגש בין שיא לשפל (הקשת של הנקודות בהן יש שפל ברגע שבו הוקפאה התמונה אינה משורטטת. השפל הוא באמצע בין שני שיאים), ולכן התאבכות הורסת, ובנקודה C יש מפגש בין שפל לשפל, ולכן תיווצר שוב התאבכות בונה. בהתאם נקבל על המסך M_3 אזורים של אור ושל חושך.



איור 3 - שני גלי אור מתואמים היוצאים משני סדקים O1 ו-O2, יוצרים תבנית של התאבכות בונה והורסת בכל המרחב שאחרי המחסום.

(גלילי וחזן, *אופטיקה פיזיקלית*, עמ' 155)

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

קבוצה 1 - עבור המורה: תשובות לשאלות שהוצגו לתלמידים

Q1:	**האם הקטע שלפניכם הוא בעד/נגד התפיסה הגלית? בעד/נגד התפיסה החלקיקית?**
A1:	בעד התפיסה הגלית.
Q2:	**מהו הטיעון המרכזי של המדען?**
A2:	האור עושה עקיפה (טקסט ראשון) והתאבכות (טקסט שני), כמו גלי מים (אם כי אופני ההתאבכות מעט שונים באור ובמים).
Q3:	**על מה מתבסס המדען בטיעונו?**
A3:	על תצפיות ניסוייות והכרות קודמת עם התנהגות של גלי מים.
Q4:	**האם המדען מתאר ניסוי לחזק את טענתו? אם כן, תארו את הניסוי והסבירו כיצד הוא מחזק את טענת המדען.**
A4:	בשני המקרים מדובר על ניסויים ממשיים שבוצעו בפועל. טקסט ראשון: גרימלדי מתאר ניסוי בו הציב עצם ובחן את צלו על מסך מרוחק. הוא הבחין בצל חלקי גדול מכפי שציפה לפי ממדי העצם וכן בפסים צבעוניים (למרות האור הלבן של השמש) בגבולות הצל, מבפנים ומבחוץ. תצפית זו מחזקת את הטענה כי האור הוא בעל אופי גלי שכן תופעת עקיפה כזו מתאימה לנצפה בגלי מים (ובלתי אפשרית בחלקיקים קלאסיים). טקסט שני: יאנג ביצע ניסוי של התאבכות באור. לשם כך הוא היה צריך ליצור שני מקורות קוהרנטיים (הוא עשה זאת ע"י שימוש במקור אור יחיד ושני סדקים, בהתבסס על עקרון הויגנס שכל נק' בחזית הגל מהווה מקור אור חדש[7]). על גבי המסך שהציב ראה יאנג תבנית של פסי אור וחושך המתאימים להתאבכות בונה והורסת של האור. תופעה זו מתבססת על עקרון הויגנס שמתייחס לאור כגל וכן תוצאות הניסוי מראות שאור מבצע התאבכות, כמו גלי מים.
Q5:	**האם המדען מתייחס לטיעונים קודמים? האם נעשה בהם שימוש כדי לחזק את עמדת המדען? כדי לסתור עמדות סותרות?**
A5:	יאנג משתמש בעקרון הויגנס (הגלי) במערך הניסוי שלו. גרימלדי מתייחס לניסויים בשבירה, החזרה ופיזור, וטוען שהתופעה שלו **אינה** אחת מאלו.

[7] עקרון הויגנס איננו מסביר מדוע בפועל יש להביא בחשבון רק את הגלים שיוצרים מקורות האור המשניים הללו בכיוון הגל המקורי (הרי האור אמור להתפזר מהם במידה שווה לכל הכיוונים). רק הפיזיקה הקוונטית מספקת הסבר מלא לכך.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

האור במנהרת הזמן – קבוצה מספר 2

הויגנס, 1679

טקסט ראשון:

הראיתי, כיצד אפשר להבין שהאור מתפשט בהדרגתיות, באמצעות גלים כדוריים, וכיצד התפשטות זו יכולה להיעשות במהירות כה רבה כפי שדורשים הניסויים והתצפיות בשמים.[8] אבל צריך להסתכל ביתר קפדנות במקורם של גלים אלה ובאופן התפשטותם, וקודם לכול הרי נובע ממה שנאמר על יצירת אור, שכל מקום קטן שעל פני גוף מאיר, כגון השמש, נר או פחם לוהט, מפיק גלים משלו שמקום זה משמש להם מרכז. כך הדבר בשלהבת של נר (איור 4), שאם נסמן בתוכה נקודות A, B, C, הרי המעגלים הקונצנטריים שמסביב לכל אחת מנקודות אלה מייצגים את הגלים שמקורם בהן. דבר כזה צריכים לראות גם מסביב לכל נקודה אחרת שעל-פני השלהבת וגם סביב הנקודות שבתוכה.

איור 4 – גלי אור הנפלטים משלהבת של נר

בפליטת גלים אלה, קיים השיקול הנוסף שכל חלקיק של חומר שבתוכו מתפשט גל, אינו חייב להעביר את תנועתו לחלקיק הסמוך לו בלבד, הנמצא על הקו הישר היוצא מן הנקודה המאירה, אלא שבהכרח הוא מוסר חלק מתנועתו גם לכל החלקיקים האחרים הנוגעים בו והמתנגדים לתנועתו. נובע מכך שמסביב לכל חלקיק נוצר גל שחלקיק זה יושב במרכזו. למשל אם DCF (איור 5) הוא גל הנפלט מן הנקודה המאירה A והיא מרכזו, הרי החלקיק B, שהוא אחד מאלה הכלולים בכדור FCD, עתיד ליצור גל חלקי משלו LCK שייגע בגל FCD בנקודה C באותו הרגע שבו הגל הראשי המופק מן הנקודה A מגיע אל FCD; ברור שרק המקום C של הגל LCK ייגע בגל FCD, כלומר: אותו מקום הנמצא על הקו הישר העובר דרך BA. כיוצא בזה החלקיקים האחרים הכלולים בכדור FCD, כגון bb, dd וכו', יפיקו כל

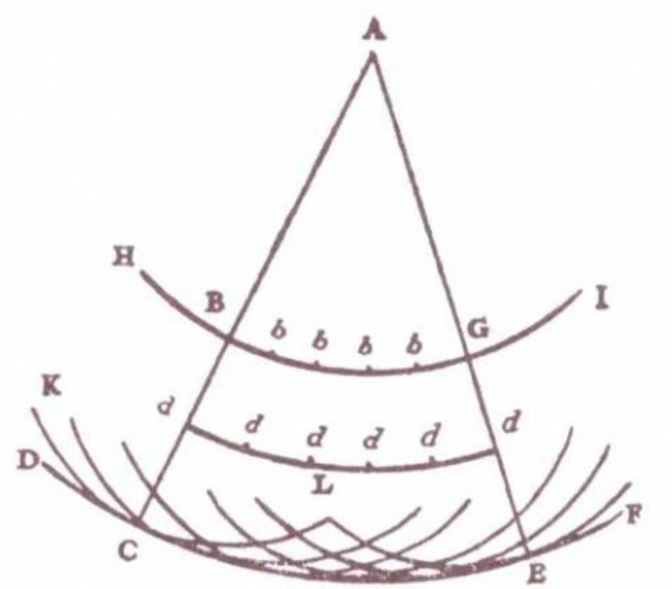
---

[8] בשנת 1676 פרסם האסטרונום הדני רימר את תוצאות מדידותיו על סמך ליקויי איו (ירחו של צדק); הוא הוכיח מעבר לכל ספק שמהירות האור גבוהה מאוד (אך סופית).

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

אחד את הגל שלו. אולם כל אחד מן הגלים הללו יכול להיות חלש לאין שיעור לעומת הגל FCD, שלהרכבתו תרמו כל הגלים האחרים על-ידי אותו החלק של משטח פניהם המרוחק ביותר מן המרכז A.

רואים אנו, יתר על כן, שהגל FCD נקבע על ידי המרחק שעברה במשך זמן מסוים התנועה שיצאה מהנקודה A; כיוון שאין כל תנועה מעבר לאותו הגל, אם כי יש תנועה בתוך המרחב שהוא סוגר, כלומר: באזורי הגלים החלקיים שאינם נוגעים בפני הכדור FCD. ואל לנו לחשוב שכל אלה פרטים קפדניים ומפורטים מעבר לדרוש, שהרי עתידים אנו להיווכח להבא שכל תכונות האור וכל הנוגע להחזרתו ושבירתו מוסברים בעיקר על-ידי אמצעי זה. [9]



איור 5 - התפשטות גלי האור

[9] הויגנס אכן מוכיח (באופן גיאומטרי) שבעזרת ה"אמצעי" שפיתח (המכונה מאז "עקרון הויגנס") ניתן להסביר הן החזרה והן שבירה. ההוכחה עצמה ארוכה ומורכבת למדי ולכן איננה מופיעה כאן.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

טקסט שני:

אי-אפשר להטיל ספק בכך, שהאור אינו אלא תנועה של חומר מסוג כלשהו. שהרי אם נסתכל בהפקת האור נמצא, שכאן על-פני האדמה האש והלהבה הם עיקרי מחולליו, ובלי ספק הללו מכילים גופים השרויים בתנועה מהירה, כיוון שהם ממיסים ומתיכים גופים רבים אחרים ואפילו מן המוצקים ביותר; ואם בפעולות האור נסתכל, נראה שכאשר האור מרוכז, כגון בעזרת מראות קעורות, יש לו כוח של שריפה כאש, כלומר: הוא מפריד בין חלקיקיהם של גופים. ודאי שזהו סימן לתנועה, לפחות בפילוסופיה האמיתית, שבה נתפסות סיבות כל התופעות הטבעיות במונחי תנועות מכאניות. לדעתי זה הדבר, שצריך לעשותו, אם לא נתייאש מכל תקווה להבין משהו בפיזיקה.

והואיל ולפי פילוסופיה זו נראה הדבר כוודאי, שתחושת הראייה אינה מתעוררת אלא על-ידי רושם תנועתו של איזה חומר, הפועל על העצבים שבתחתית עינינו, הרי גם זו סיבה להאמין, שהאור הוא תנועה של החומר הנמצא בינינו ובין הגוף המאיר.[10]

יתר על כן, אם נזכור את המהירות המופלגת, שבה מתפשט האור לכל עבר, ושאפילו הוא מגיע ממקומות שונים, ואף מאלו שכיווניהם הפוכים זה לזה, קרניו עוברות זו את זו ואינן מפריעות זו לזו, הרי נבין יפה, שכל אימת שאנו רואים גוף מאיר, לא יהיה הדבר בגלל העברתו של חומר המגיע מן הגוף הזה אלינו כקליע או כחץ המתקדם באוויר; שהרי ודאי שדבר זה אינו מתיישב בשום פנים עם שתי התכונות האמורות של האור, ובעיקר לא עם השנייה שבהן. הווי אומר, האור מתפשט באופן אחר; ומה שיכול לסייע לנו להבנת הדבר הרי זו הידיעה שאנו יודעים על התפשטותו של הקול בתוך האוויר. יודעים אנו, שבאמצעות האוויר, שהוא גוף בלתי-נראה ולא ניתן למישוש, הקול מתפשט סביב מן המקום שבו הוא נוצר על-ידי תנועה העוברת בהדרגה בחלקי האוויר מזה לזה... והנה אם רצוננו ליישם מין תנועה זו לגבי זו המולידה את האור, אין מה שיעכב בידינו מלשער שחלקיקי האתר עשויים מחומר הקרוב לקשיות המושלמת ולקפיציות המהירה בכל מידה שנחפוץ... אם אנו מניחים קפיציות בחומר האתרי, הרי תהיה לחלקיקיו התכונה לחזור לקדמותם באותה המהירות, תהא דחיפתם חזקה או חלשה, וכך יהיה הילוכו של האור נמשך תמיד במהירות קבועה.

(שני הקטעים: מתוך סמבורסקי, *המחשבה הפיסיקאלית בהתהוותה*, עמ' 292-299)

---

[10] הויגנס מתכוון כאן לאתר, החומר הדקיק שבהתאם לתורה הגלית ממלא את כל היקום (שהאור איננו אלא הפרעות בתוכו).

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

קבוצה 2 - עבור המורה: תשובות לשאלות שהוצגו לתלמידים

Q1:	**האם הקטע שלפניכם הוא בעד/נגד התפיסה הגלית? בעד/נגד התפיסה החלקיקית?**
A1:	טקסט ראשון: בעד התפיסה הגלית. טקסט שני: נגד התפיסה החלקיקית.
Q2:	**מהו הטיעון המרכזי של המדען?**
A2:	טקסט ראשון: נקודת המוצא של המודל שמציע הויגנס היא שהאור הינו גל. לפי הויגנס, כל נקודה בחזית הגל מהווה מקור אור נקודתי עצמאי (להלן "עקרון הויגנס"). על פי מודל זה טען הויגנס (בהסבר שאינו מופיע בטקסט הנ"ל) כי ניתן להסביר החזרה ושבירה על סמך התורה הגלית. טקסט שני: האור הינו תנועה של האתר, החומר הדקיק הממלא את כל המרחב, ש"קפיציותו" (כלומר האלסטיות שלו) מסבירה את התקדמותו המהירה והקבועה של האור. אילו אור היה חלקיק, קשה היה להסביר את מהירותו הגדולה כל-כך, ועוד יותר היה קשה להסביר למה שתי קרניים עוברות זו דרך זו בלי להפריע אחת לשנייה.
Q3:	**על מה מתבסס המדען בטיעונו?**
A3:	טקסט ראשון: השלב הראשון הוא תיאורטי (הסבר עקרון הויגנס). השלב השני, שאיננו מופיע בטקסט, מתבסס על ניתוח גיאומטרי המבאר החזרה ושבירה על בסיס עקרון הויגנס (שכן מופיע בטקסט, במלותיו של הויגנס עצמו). טקסט שני: על תצפיות.
Q4:	**האם המדען מתאר ניסוי לחזק את טענתו? אם כן, תארו את הניסוי והסבירו כיצד הוא מחזק את טענת המדען**
A4:	טקסט ראשון: הטענה בעיקרה תיאורטית, לא ניסויית. טקסט שני: המדען מתבסס על ניסוי מחשבתי של מה היה קורה אם האור היה חלקיק ונע במהירות גדולה כ"כ. הוא מציע להסתכל על האור כגל, בדומה להתפשטות של קול באוויר. הוא מציע גם תצפית – אלומות אור עוברות אחת דרך השנייה בלי להפריע – וזו תופעה גלית.
Q5:	**האם המדען מתייחס לטיעונים קודמים? האם משתמש בהם כדי לחזק את עמדתו? כדי לסתור עמדות סותרות?**
A5:	המדען לא מתייחס באופן ישיר לטיעונים קודמים שהוצגו (אם כי הוא מתייחס למדידות של רימר באופן עקיף בטקסט הראשון), רק נוקט אנלוגיה בין אור לקול (מבלי להוכיח את תקפותה).

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

האור במנהרת הזמן – קבוצה מספר 3

ניוטון, 1704

טקסט ראשון:

כלום אין טעות בכל ההשערות, שלפיהן האור הוא לחץ או תנועה המתפשטים בתווך נזיל? שהרי בכל ההשערות הללו נתבארו עד היום תופעותיו של האור על-ידי ההנחה, שהן באות משינויי צורה חדשים בקרניים, וזוהי הנחה מוטעית. שהרי לו היה האור לחץ בלבד, המתפשט בלי תנועה אמיתית, לא היה יכול לעורר ולחמם את הגופים השוברים או מחזירים אותו. אילו [האור] היה תנועה, המתפשטת לכל מרחק כהרף-עין, היה דרוש כוח אינסופי בכל רגע, בכל חלקיק מאיר, לחולל תנועה זו, ואילו היה לחץ או תנועה, שהתפשטותם כהרף עין או במשך זמן, היה עוקף ונכנס בצל, שהרי לחץ ותנועה אינם יכולים להתפשט בנוזל בקווים ישרים מעבר למכשול העוצר חלק מהתנועה, אלא הם עוקפים ומתפשטים בכל כיוון בתווך השקט הנמצא מעבר למכשול. הכובד מכוון כלפי מטה; אבל לחץ המים הבא מהכובד מכוון לכל עבר בכוח שווה, ומתפשט בקלות במידה שווה גם לצדדים וגם למטה, ודרך מעברים מפותלים כמו דרך מעברים ישרים. הגלים שעל פני המים השקטים, העוברים ליד צדי מכשול רחב העוצר חלק מהם, עוקפים ומתפשטים אחר כך בהדרגה לתוך המים השקטים שמעבר למכשול. הגלים, הפעימות או תנודות האוויר, שמהם עשויים הקולות, עוקפים בבירור, אף־על־פי שלא באותה מידה כמו גלי המים. שהרי פעמון או תותח אפשר לשמוע את קולו מעבר לגבעה, המעכבת את ראיית הגוף המשמיע קול, וקולות נוחים להתפשט דרך צינורות מפותלים וישרים במידה שווה. אבל לא נודע מעולם, שאור נע במעברים מפותלים, ולא שהוא עוקף ונכנס בצל. שהרי כוכבי-השבת פוסקים מלהיראות כאשר מסתיר אותם אחד מכוכבי-הלכת. וכן חלקי השמש, כאשר הם מוסתרים בידי כוכב־חמה או נוגה.

(מתוך סמבורסקי, *המחשבה הפיסיקאלית בהתהוותה*, עמ' 321)

טקסט שני:

חוק ההחזרה היה ידוע מאז העת העתיקה והיה קל יחסית להסביר אותו באמצעות תיאוריה חלקיקית, באמצעות מודל פשוט הנוקט אנלוגיה להחזרת כדור ממשטח קשה. ברשימותיו המוקדמות ביותר השתמש ניוטון בהתנגשויות בין חלקיקי אור וגופים כדי להסביר הן החזרה והן שבירה. אך עד מהרה הוא גילה שאם מניחים שלחומר יש מבנה אטומי, המודל הזה קורס. בקנה המידה של אטומים משטח הגוף המחזיר איננו חלק כמו מראה אלא הוא מחוספס מאוד, ומכיל גופיפים המופרדים זה מזה על-ידי חורים. החזרה איננה יכולה להתרחש מחלקיקי הגוף משום שהיא מחייבת סידור ממוזל ביותר של כל החלקיקים, שבמסגרתו עבור זווית פגיעה כלשהי, הקרניים יוחזרו מהגוף בזווית שווה לזווית הפגיעה

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

שלהן. מצב זה דרש שהחזרה ושבירה יתרחשו בגלל סיבה אחרת. תחילה סבר ניוטון שההסבר לתופעות הללו הוא האתר, החומר הדקיק הממלא את כל רחבי היקום, אך מאוחר יותר הסיק שמקורן בכוח כלשהו הפועל על כל חלקיקי האור המגיעים למשטח שבו מתרחשת ההחזרה או השבירה. לאחר שפיתח את מושג הכוח, נקט ניוטון את האנלוגיה בין תנועתם של גופיפים (חלקיקים) ואור כמתואר להלן.

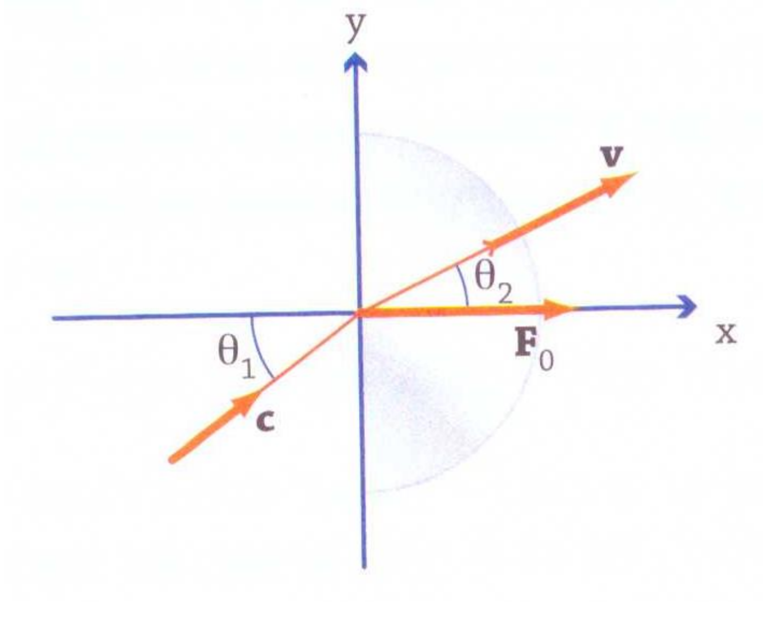
נדון לדוגמה במקרה שבו אור נע באוויר ונשבר במעברו לזכוכית. ניוטון הניח שכל עוד חלקיק אור נע באוויר בלבד או בזכוכית בלבד – לא פועל עליו כוח שקול שמקורו בתווך. לכן על-פי החוק הראשון של ניוטון, מהירותם של חלקיקי האור באוויר אינה משתנה. אולם במעבר חלקיק אור מהאוויר לזכוכית כיוון תנועתו משתנה. על פי החוק השני של ניוטון במעבר מאוויר לזכוכית חייב לפעול על חלקיקי האור כוח המכוון לעבר הזכוכית (איור 6) בכיוון הציר x כוח F_0, לכן רכיב התנע של החלקיק בכיוון זה אינו נשמר. אבל בכיוון ניצב לכוח, בכיוון הציר y, רכיב התנע נשמר:

$$m \cdot \left(c \cdot \sin \theta_1\right) = m \cdot \left(v_{glass} \cdot \sin \theta_2\right)$$

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_{glass}}{c}$$

(c = מהירות האור באוויר; v_{glass} = מהירות האור בזכוכית).

כלומר, היחס בין סינוס זווית הפגיעה וסינוס זווית השבירה הוא גודל קבוע, וזהו בעצם חוק סנל.



איור 6 - הכוח הפועל על האור במעבר מאוויר לזכוכית

(רוזן, מודלים של האור, עמ' 22-25;

(Shapiro, Newton’s optics and atomism, pp. 232-235

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

קבוצה 3 - עבור המורה: תשובות לשאלות שהוצגו לתלמידים

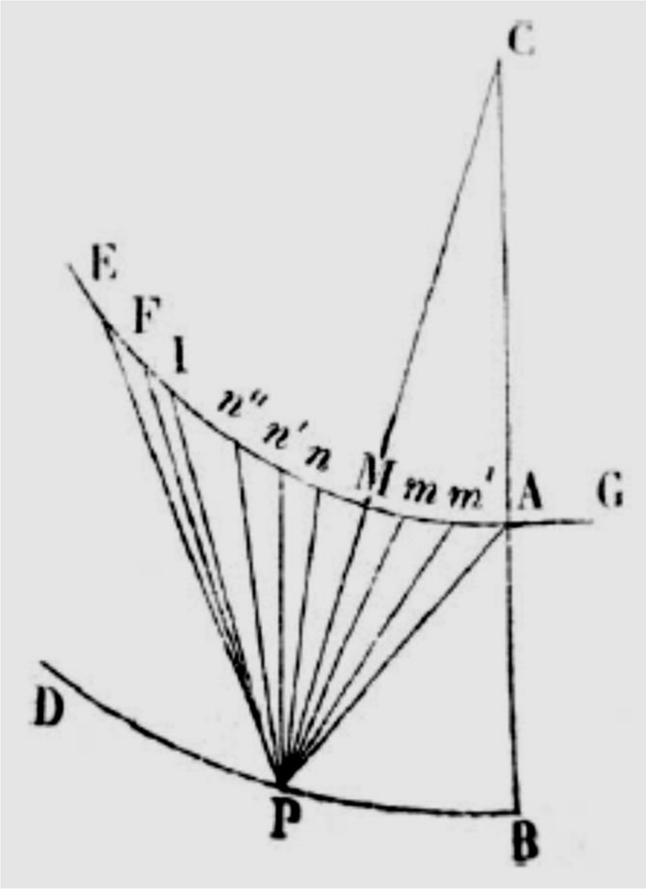
Q1:	**האם הקטע שלפניכם הוא בעד/נגד התפיסה הגלית? בעד/נגד התפיסה החלקיקית?**
A1:	טקסט ראשון: בעד התפיסה החלקיקית בהתחלה ונגד הגלית בסוף. טקסט שני: בעד התפיסה החלקיקית.
Q2:	**מהו הטיעון המרכזי של המדען?**
A2:	טקסט ראשון: אור לא מבצע עקיפה כפי שמבצעים גלי מים וגלי קול. טקסט שני: המודל החלקיקי מסביר את תופעת שבירת האור.
Q3:	**על מה מתבסס המדען בטיעונו?**
A3:	טקסט ראשון: תצפיות (אסטרונומיה). טקסט שני: חוק ידוע (סנל) וההנחות המכאניות שלו (ניוטון) עצמו .
Q4:	**האם המדען מתאר ניסוי לחזק את טענתו? אם כן, תארו את הניסוי והסבירו כיצד הוא מחזק את טענת המדען.**
A4:	טקסט ראשון: ניוטון מתייחס לתצפיות אסטרונומיות שאינן מכילות כל עדות לעקיפה (ולפיכך אינן מתיישבות עם הטענה שהאור הוא גל) כגון – כוכבי השבת המוסתרים על ידי כוכבי הלכת, חלקי השמש המוסתרים על ידי כוכב חמה או נוגה, ואור שאינו נע במעברים מפותלים ואינו נכנס לצל ומאיר אותו כולו, כפי שמים ממשיכים להתפשט לכל עבר אחרי שהם עוברים מכשול, או קול (של פעמון, של תותח) שעוקף מכשולים קרקעיים. טקסט שני: ניסוי מחשבתי שתואם תוצאות של ניסוי ידוע. בניסוי המחשבתי מניח ניוטון שבמעבר האור בין תווכים שונים פועל כוח על חלקיקי האור. מתוך טיעון של שימור תנע בציר y הוא מגיע לחוק סנל.
Q5:	**האם המדען מתייחס לטיעונים קודמים? האם משתמש בהם כדי לחזק את עמדתו? כדי לסתור עמדות סותרות?**
A5:	טקסט ראשון: מתייחס לטענה שאם האור היה לחץ בלבד, ללא תנועה, הוא לא היה יכול לעורר ולחמם גופים. טקסט שני: מראה כי חוק סנל מתקבל מהמודל החלקיקי.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

האור במנהרת הזמן – קבוצה מספר 4

אוגוסטן פרנל וסימון דניס פואסון, 1817

כאשר אוגוסטן פרנל שב לעסוק בעקיפה בחורף 1817, הוא שיער שבאופן כללי יש לנתח מתמטית את האור שעבר עקיפה באמצעות סופרפוזיציה של אדוות-גלים (wavelets) הבוקעות מנקודות שונות של חזית הגל שהופרעה (איור 7). הוא פיקפק תחילה ביכולתו לבצע את החישובים הנדרשים לניתוח מעין זה. ב-17 במארס 1817 האקדמיה הפריזאית למדעים הכריזה על תחרות נושאת פרס סביב חקר העקיפה. בחודש שלאחר מכן שלח פרנל לאקדמיה את התיאוריה המלאה שלו, במכתב במעטפה חתומה (כדי להבטיח את זכות הבכורה על רעיונותיו).



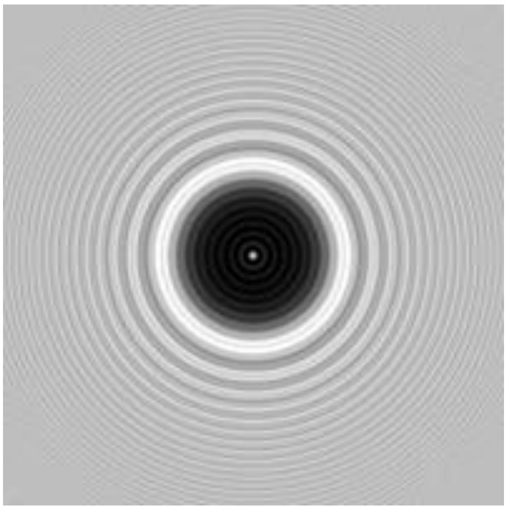
איור 7 - דיאגרמת פרנל (ששרטט פרנל בעצמו) עבור חישוב עקיפה של האור. חזית הגל מ EA (ממקור האור בנקודה C) מופרעת על-ידי מסך עקיפה AG. האלמנטים n'n'', nn', ..., mm' תורמים לסך הרעידות בנקודה P

פרנל בחן את חזית הגל AF המופרעת על-ידי מסך העקיפה AG באיור (המסך מאונך למישור הדף), והניח שכל אחד מהאלמנטים mm', nn', n'n'' וכו' הוא המקור לתנודה משנית שעוצמתה כמעט שאינה משתנית בכיוונים הקרובים לכיוון המאונך לאלמנט. בהתאם לגרסת פרנל של עקרון הויגנס, התנודה בפועל בנקודת התצפית P היא סופרפוזיציה של תנודות משניות אלה. על-סמך מספר הנחות – למשל, שכל התנודות המשניות הללו סינוסואידליות –

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

חישב פרנל את התנודה הכוללת שהתקבלה ב-P והראה שהתוצאות המתקבלות מחישוביו מתיישבות היטב עם מדידות פסי העקיפה שערך. פרנל בחן בחישוביו תצורות שונות של מסך עקיפה (AG) והראה שאם הוא גדול הרבה יותר מאורך הגל (במיוחד אם ניתן להתייחס ל-AG כמישור אינסופי-למחצה), עוצמת האור העוקף נחלשת במהירות רבה בתוך הצל הגיאומטרי[11].

בזכות שיקוליו ונימוקיו המעמיקים והמדויקים כל-כך, פרנל זכה בקלות בפרס של האקדמיה. אחד מחברי הוועדה שבחנו את התיאוריה של פרנל היה סימון דניס פואסון, מתנגד חריף ידוע של תורת הגלים. פואסון ציין שתורת פרנל מובילה לנוסחה פשוטה עבור עקיפה של דיסקה כאשר מקור האור ונקודת התצפית הם על ציר הסימטריה של הדיסקה. במקרה זה, מחישובי פרנל עולה שהעוצמה במרכז הצל שיוצרת הדיסקה זהה לעוצמה שהיתה מתקבלת אילולא היא נמצאה שם כלל וכלל (דבר שנראה לפואסון לא סביר). המדען הצרפתי פרנסואה אראגו רצה לתמוך בהסתייגותו של פואסון ולהוכיח כי המסקנה מהתיאוריה של פרנל לא מתממשת. אראגו ביצע ניסוי עקיפה בעזרת דיסקה בקוטר שני מילימטר ולמרבה הפתעתו, תוצאות הניסוי אישרו את הניבוי המשונה הזה של תורת פרנל (ראו איור 2). ועם זאת, אפיזודה זו והוכחות אחרת של תורת פרנל לא סייעו לשכנע את מתנגדי תורת הגלים של האור. שנים רבות חלפו בטרם פיתחו המדענים גישה מדויקת וקפדנית יותר לאישוש שיטת פרנל.



איור 2 – כפי שגילה אראגו בניסויו המפורסם, אור העוקף דיסקה יוצר(באמצעות עקיפה) נקודת אור עזה במרכז הצל של הדיסקה (ויקיפדיה, "Arago spot")

(Darrigol, *A History of Optics*, pp. 203-205)

---

[11] כלומר, הצל הנוצר (מימין ל-B באיור 1) בהנחה שהאור מתקדם בקווים ישרים ואינו מבצע שום עקיפה כלל.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

קבוצה 4 - עבור המורה: תשובות לשאלות שהוצגו לתלמידים

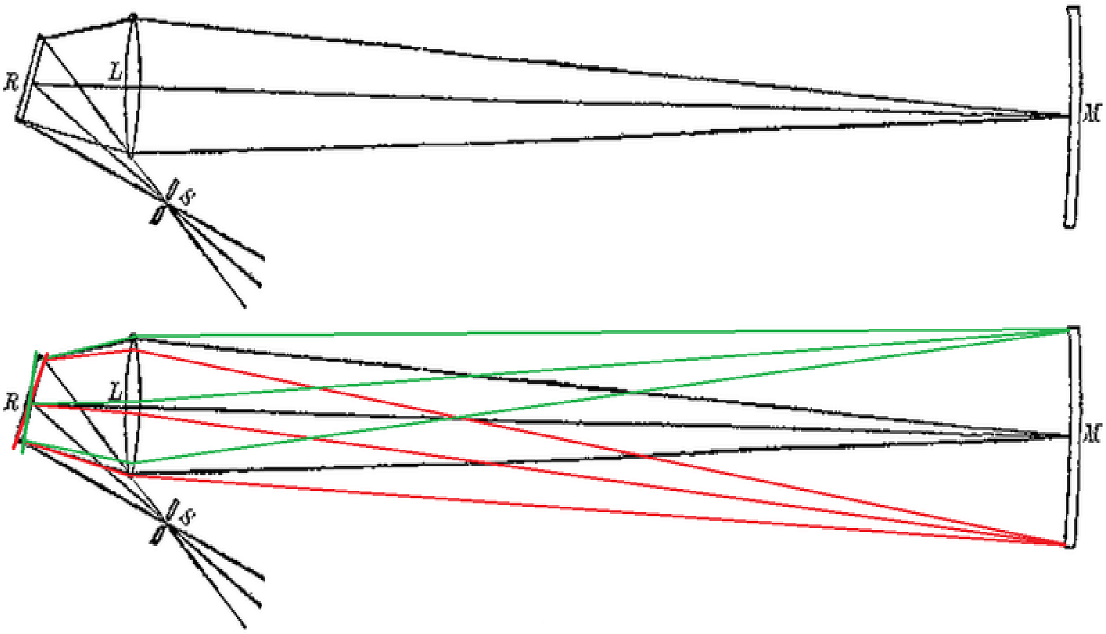
:Q1	**האם הקטע שלפניכם הוא בעד/נגד התפיסה הגלית? בעד/נגד התפיסה החלקיקית?**
:A1	בעד התפיסה הגלית.
:Q2	**מהו הטיעון המרכזי של המדען?**
:A2	אור מבצע עקיפה, לכן הוא גל.
:Q3	**על מה מתבסס המדען בטיעונו?**
:A3	על חישובים תיאורטים מתמטיים וניסוי פשוט יחסית של פסי עקיפה.
:Q4	**האם בקטע זה מתואר ניסוי המחזק את טענת המדען? אם כן, תארו את הניסוי והסבירו כיצד הוא מאשש את טענת המדען.**
:A4	פרנל מתאר חישובים שביסודם עומדים עקרון הויגנס ותורת הגלים המתמטית ומראה שהחישובים הללו עולים בקנה אחד עם תצפיות הניסויים. אראגו ביצע ניסוי בפועל כדי לסתור את טענותיו של פרנל (אם כי תוצאת ניסויו היתה הפוכה מכפי שקיווה).
:Q5	**האם המדען מתייחס לטיעונים קודמים? האם משתמש בהם כדי לחזק את עמדתו? כדי לסתור עמדות סותרות?**
:A5	פרנל משתמש בעקרון הויגנס כשמתייחס לחזית הגל. פואסון ואראגו מסתמכים על טיעוניו של פרנל כדי לסתור אותו, אך בפועל מאשרים את התיאוריה שלו.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

<u>**האור במנהרת הזמן – קבוצה מספר 5**</u>

ליאון פוקו, 1860

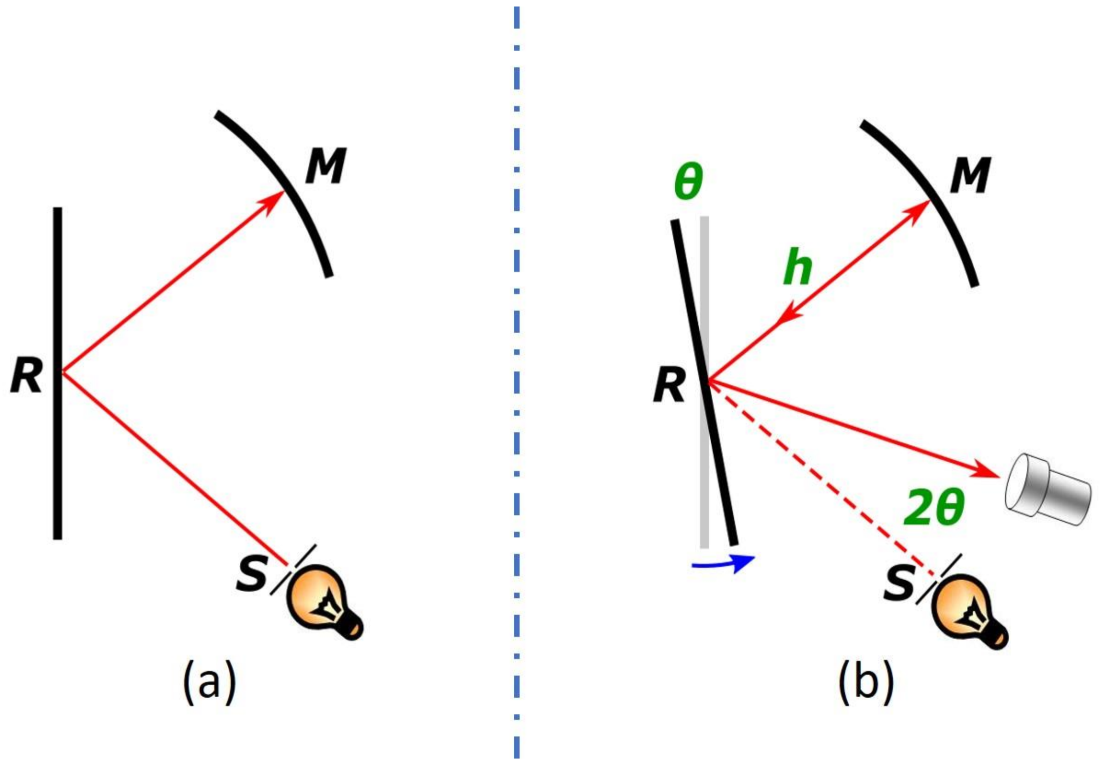
כבר ב-1838 העלה המדען הצרפתי פרנסואה אראגו את הרעיון כיצד ניתן להשוות בין מהירות האור במים למהירותו באוויר. אראגו גם בנה מכשיר כדי לבצע את המדידה הנדרשת. הניסיון לא הצליח, אך המכשיר שימש השראה לבן ארצו ליאון פוקו. פוקו המשיך בניסיונותיו של אראגו, והצליח, לראשונה, למדוד את מהירות האור גם במים. עקרון הפעולה של המערכת הניסיונית של פוקו מוצג בשני האיורים הבאים.



איור 1 – R היא מראה מסתובבת, M הינה מראה כדורית נייחת. עדשה L משמשת ליצירת דמות של הסדק S (המואר על-ידי מקור אור) על מראה M. כפי שממחיש (באופן סכמטי) הציור התחתון, כאשר המראה R נייחת, דמות הסדק המשתקפת מהמראה M נוצרת מחדש במיקום המקורי S – ללא תלות בזווית ההטיה (כלומר הן במצבה הירוק והן במצבה האדום; הקרניים האדומות והירוקות הן למעשה דו-כיווניות).

איור 1 מתאר את מערך הניסוי הבסיסי של פוקו. R היא מראה מסתובבת, ואילו M היא מראה כדורית נייחת. מערך הניסוי של פוקו גרם לכך שללא כל תלות בזווית ההטיה של מראה R (כאשר היא נייחת), הדמות של הסדק המשתקפת מהמראה הכדורית M תיווצר מחדש במיקום הסדק האמיתי S. אך פוקו הבין שאם נסובב את מראה R במהירות זוויתית (ω) גבוהה מספיק, כי אז ההשהיה הנובעת מסופיות מהירות האור – הנע מ-R ל-M ובחזרה – תגרום לדמות של הסדק המשתקפת מ-M לסטות מהמיקום המקורי S. נסמן את המרחק בין R ל-M באות h, כפי שניתן לראות באיור 2 (המתאר את סכמת המנגנון של ניסוי פוקו).

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.



איור 2 – סכמה של מנגנון הניסוי של פוקו. h הוא המרחק בין המראה הכדורית M למראה המסתובבת R.

איור 2(a) מתאר את המצב שבו המראה R נייחת: הדמות של הסדק המשתקפת מהמראה M (עדשה L אינה מופיעה באיור זה) מגיעה למיקום הסדק האמיתי S, ללא תלות בזווית של R. איור 2(b) מתאר מה קורה כש-R מסתובבת במהירות גדולה: האור המוחזר ממראה M כעת יוסט (בזווית הגדולה פי שניים מזווית הסיבוב של R, כלומר θ), והטלסקופ יאתר את דמות הסדק בזווית של 2θ ביחס למיקום הדמות המקורי.

ידיעת θ וידיעת קצב סיבוב המראה (המהירות הזוויתית ω) מאפשרות לחשב את הזמן Δt בו נעה המראה בין שני המצבים:

$$\Delta t = \frac{\theta}{\omega}$$

בזמן זה האור עבר את המרחק h בין המראות R ו-M פעמיים, הלוך ושוב, לכן מהירות האור v תהיה:

$$v = \frac{2h}{\Delta t} = \frac{2h}{\theta/\omega} = \frac{2h\omega}{\theta}$$

מגבלות טכניות שונות מנעו מפוקו מלהפריד בין המראות במרחק (h) העולה על 20 מטר, אך בכל זאת עלה בידו למדוד את הסחת דמות הסדק באופן מדויק למדי. הנתונים שמדד

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

פוקו (יחד עם מהירות סיבוב המראה) הניבו את הערך הבא למהירות האור:
.v = 311,688 km/sec

היכולת לבצע את הניסוי במרחקים קצרים אפשרה לפוקו להגשים בשנת 1860 מטרה שמדענים שאפו אליה במשך כמאתיים שנים: למדוד את מהירות האור הנע בתוך מים. לשם כך הציב גליל מלא מים בדרכו של האור, וקיבל שמהירות האור שווה לכ-3/4 ממהירותו באוויר, בהתאם לתחזית של הויגנס (המודל הגלי).

(ויקיפדיה, הערך "Fizeau–Foucault apparatus";
גלילי וחזן, *אופטיקה – תורת האור והראייה*, עמ' 358-359)

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

קבוצה 5 - עבור המורה: תשובות לשאלות שהוצגו לתלמידים

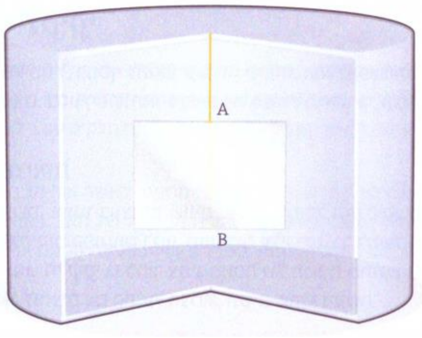
Q1:	**האם הקטע שלפניכם הוא בעד/נגד התפיסה הגלית? בעד/נגד התפיסה החלקיקית?**
A1:	בעד התפיסה הגלית.
Q2:	**מהו הטיעון המרכזי העולה מהניסוי שביצע המדען?**
A2:	מהירות האור במים (תווך צפוף) נמוכה יותר מזו שבאוויר (תווך דליל). טענה זו תואמת את התחזית של המודל הגלי של האור (בעוד המודל החלקיקי טוען כי במים מהירות האור תגדל לעומת האוויר).
Q3:	**על מה מתבסס הטיעון העולה מהטקסט הזה?**
A3:	על ניסוי בו מדד את מהירות האור בתווכים שונים.
Q4:	**האם המדען מתאר ניסוי לחזק את טענתו? אם כן, תארו את הניסוי והסבירו כיצד הוא מחזק את טענת המדען.**
A4:	ניסוי ממשי: פוקו הצליח לבנות מערכת ניסוי מתוחכמת הכוללת מראה נייחת ומראה מסתובבת. באמצעות מדידת הסטייה הזוויתית של דמות הסדק בעקבות מעבר במערכת המראות ותוך ידיעה מהי המהירות הזוויתית בה נעה המראה, הצליח פוקו לחשב את מהירות האור. העברת מערכת ניסוי זו לתוך מימי איפשרה מדידה גם של מהירות האור במים. פוקו קיבל את התוצאה שמהירות האור במים שווה לכ- ¾ ממהירותו באוויר.
Q5:	**האם המדען מתייחס לטיעונים קודמים? האם משתמש בהם כדי לחזק את עמדתו? כדי לסתור עמדות סותרות?**
A5:	פוקו מתבסס על הטיעון העקרוני העולה מעקרון הויגנס שאם האור הוא גל אזי מהירותו בתווך צפוף יותר תהיה קטנה יותר מאשר בתווך דליל. הוא לא השתמש בטיעון קודם, אלא במערך ניסוי שהציעו לפניו (אראגו). הוא משתמש במערך זה כדי לפסול את התיאוריה החלקיקית.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

האור במנהרת הזמן – קבוצה מספר 6

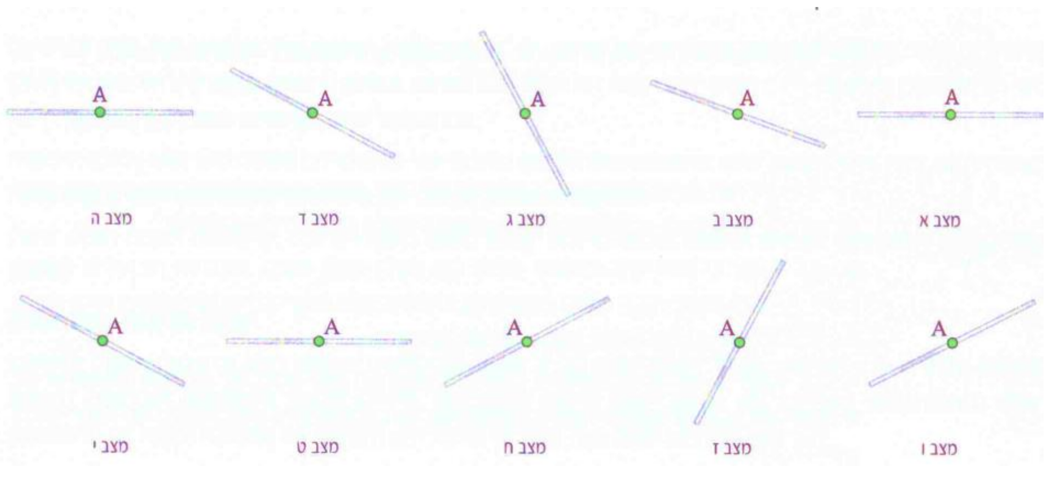
ארנסט ניקולס וגורדון האל, 1903

מאז פרסום תורתו של ג'יימס קלרק מקסוול (1864) לא היה ספק בלב המדענים שהאור, כסוג של קרינה אלקטרומגנטית, הינו גל. ואולם ממשוואות מקסוול נבעה דווקא תכונה "חלקיקית" של האור: היכולת שלו להעביר תנע לגופים ולהפעיל עליהם לחץ. לקראת סוף המאה ה-19 ניסו מדענים להוכיח בניסוי את קיומה של "לחץ הקרינה" שצפה מקסוול, אך נכשלו מסיבות טכניות. ב-1903 ערכו ארנסט ניקולס (E. F. Nichols) וגורדון האל (G. F. Hull) בארצות-הברית ניסוי, בעזרת מערכת המורכבת משפופרת זכוכית גלילית, שלבסיסה העליון קשרו שערה של זנב סוס שהשתלשלה לתוך השפופרת. על הקצה התחתון של השערה תלו לוחית מלבנית דקה מאוד ממתכת (איור 8). לאחר מכן סובבו מעט את הלוחית סביב ציר הסימטריה AB שלה (הנמצא בהמשך לשערת הסוס), ושיחררו אותה. הלוחית התנודדה בתנועה מחזורית.



איור 8 - מערכת הניסוי של ניקולס והל - גליל זכוכית עם שערה בתוכו, ובקצהה מראה

איור 9 מתאר במבט מלמעלה את הלוחית בכמה מצבים עוקבים של תנועתה. פרק הזמן שלוקח ללוחית לנוע ממצב א למצב ט הוא זמן המחזור של תנודות הלוחית.



איור 9 - מצבים עוקבים של הלוחית במבט מלמעלה

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

זמן המחזור הנדון לעיל הוא זמן המחזור **העצמי** של הלוחית. הכוונה היא לזמן מחזור של תנודות הלוחית, בתנאים שבהם התנודות אינן מושפעות על-ידי גורם חיצוני, אלא נקבעות רק על-ידי תכונות של הלוחית ושל השערה. ברור כי אדם המחזיק בלוחית יכול לסובב את הלוחית בתנועה מחזורית, ולקבוע זמן מחזור שונה לתנודות שלה, אבל אז אין מדובר בזמן מחזור עצמי.

ניקולס והאל אטמו את השפופרת, ושאבו את האוויר מתוכה. לאחר מכן הם מדדו את זמן המחזור העצמי של תנודות הלוחית. כשהלוחית היתה תלויה במנוחה בשפופרת שבה התקיים ריק בקירוב מצוין, הטילו החוקרים אור ממקור אור חזק על צדה הימני, ואחר-כך על צדה השמאלי, וכך לסירוגין על שני צדיה, כאשר מרווח הזמן בין שתי הארות עוקבות של הצד הימני של הלוחית שווה לזמן המחזור של התנודות העצמיות של הלוחית (שנמדד קודם לכן). לדוגמה אם זמן המחזור העצמי של תנודות הלוחית היה שתי שניות, אז האירו את הצד הימני של הלוחית ברגע מסוים, כעבור שנייה אחת על הצד השמאלי, כעבור שנייה נוספת על הצד הימני וכך הלאה. כלומר קצב הטלת האור על שולי הלוחית תאם את קצב התנודות העצמי של הלוחית. הניסיון לנדנד את הלוחית בתדירות השווה לתדירות העצמית שלה (יש תהודה, רזוננס, בין הלוחית לבין ההארות) הבטיח שאם אור אכן מפעיל לחץ – הסיכוי לנדנד את הלוחית הוא הרבה יותר גדול. לאחר זמן מה, אט אט, החלה הלוחית להתנודד סביב ציר הסימטריה AB, לשמחתם של החוקרים. התנודות הלכו וגברו ככל שהמשיכו לנדנד את הלוחית באמצעות "דחיפות" של הבזקי אור.

(רוזן, *מודלים של האור*, עמ' 29-27)

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

קבוצה 6 - עבור המורה: תשובות לשאלות שהוצגו לתלמידים

Q1:	**האם הקטע שלפניכם הוא בעד/נגד התפיסה הגלית? בעד/נגד התפיסה החלקיקית?**
A1:	בעד התפיסה החלקיקית.
Q2:	**מהו הטיעון המרכזי של המדען?**
A2:	האור מפעיל לחץ ממשי על הלוחית.
Q3:	**על מה מתבסס המדען בטיעונו?**
A3:	על ניסוי המוכיח כי אור לבדו יכול לגרום לתנודות של עצם.
Q4:	**האם המדען מתאר ניסוי לחזק את טענתו? אם כן, תארו את הניסוי והסבירו כיצד הוא מחזק את טענת המדען.**
A4:	מתואר ניסוי שביצעו המדענים עצמם, אשר מראה שהאור המוקרן על לוחית מסוגל לדחוף אותה – כלומר להעביר לה תנע; לפיכך האור מתנהג כאן כמו חלקיק .
Q5:	**האם המדען מתייחס לטיעונים קודמים? האם משתמש בהם כדי לחזק את עמדתו? כדי לסתור עמדות סותרות?**
A5:	לא מתייחס לטיעונים קודמים.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

האור במנהרת הזמן – קבוצה מספר 7

טקסט ראשון: **אלברט איינשטיין, 1905**

התורה הגלית הרציפה של האור הוכיחה את מלוא יכולתה בתיאור התופעות האופטיות הטהורות ואין להניח שתוחלף אי־פעם על-ידי תורה אחרת. אולם יש לזכור שהתצפיות האופטיות מתייחסות לממוצעים זמניים ולא לערכים של רגע מסוים, ולמרות אישורה השלם של תורת העקיפה, ההחזרה, השבירה, הנפיצה וכו' על-ידי הניסוי, הרי אמנם ייתכן שתורת-האור הגלית תביא לידי סתירות עם הניסיון בשעה שמפעילים אותה לגבי תופעות שונות. ואמנם נדמה לי שהתצפיות בדבר ה"קרינה השחורה" [קרינה הנפלטת מגוף חם, המכונה גם "קרינה תרמית"], התופעה הפוטו-אלקטרית [פליטת אלקטרונים ממתכת כתוצאה מפגיעת אור], יצירתן של קרני-קתודה על-ידי אור אולטרה-סגול וקבוצות אחרות של תופעות הנוגעות ליצירתו או היפוכו של האור נראות מובנות יותר, אם מניחים שהאנרגיה של האור מחולקת התחלקות לא רציפה במרחב. על פי הנחה זו הרי בהתפשט קרן אור היוצאת מנקודה, אין האנרגיה מתחלקת התחלקות רציפה בתחומים ההולכים וגדלים, אלא היא מורכבת ממספר סופי של קוונטי-אנרגיה המאותרים בנקודות מרחב, והנעים מבלי להתפצל, והם נבלעים ונוצרים כיחידות שלמות בלבד...

התפיסה הרגילה בדבר התחלקותה הרציפה של אנרגיית האור במרחב המוקרן נתקלת בקשיים הגדולים במיוחד בשעה שמנסים לבאר את התופעות הפוטו-אלקטריות... על יסוד התפיסה שהאור המעורר מורכב מקוונטי-אנרגיה בעלי האנרגיה hf אפשר לפרש את יצירתן של קרני-קתודה על-ידי אור כדלקמן: קוונטי אנרגיה חודרים לתוך שכבה שעל פני גוף-הקתודה, והאנרגיה שלהם נהפכת לפחות בחלקה לאנרגיה קינטית של אלקטרונים. הציור הפשוט ביותר הוא זה, שקוונט-אור מוסר את כל האנרגיה שלו לאלקטרון יחיד... אלקטרון בפנים גוף-הקתודה שנוספה לו אנרגיה קינטית יפסיד חלק ממנה כשיגיע אל פני הגוף. כמו כן יש להניח שכל אלקטרון צריך לעבוד עבודה P (האופיינית לגוף-הקתודה) בשעה שהוא יוצא ממנו. אותם האלקטרונים שנתעוררו על פני הגוף עצמו ובכיוון ניצב להם יעזבו אותו במהירות הניצבת הגדולה ביותר, האנרגיה הקינטית של אלקטרונים אלה היא: $E_k = hf - P$

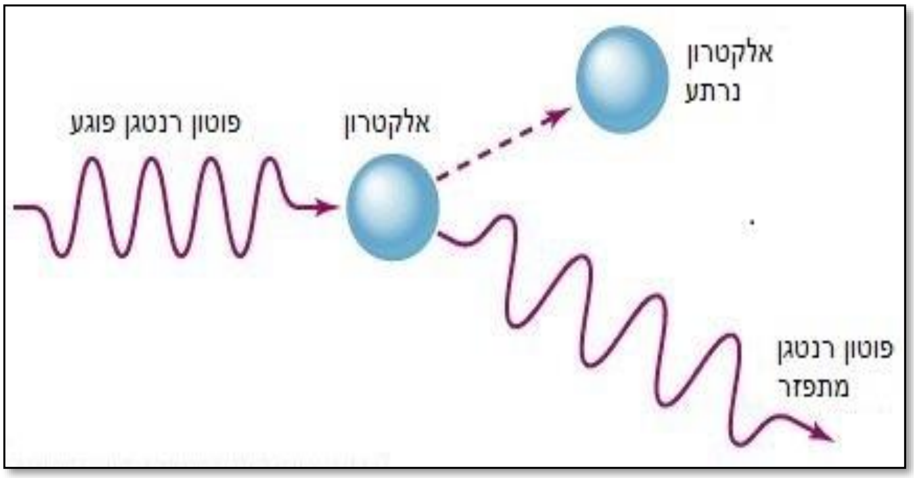
. אם כל קוונט-אנרגיה של האור המעורר יעביר את האנרגיה שלו לאלקטרונים בצורה בלתי-תלויה בשאר הקוונטים, הרי התחלקות מהירותם של האלקטרונים, כלומר איכותה של קרינת הקתודה שנוצרה, תהיה בלתי-תלויה בעוצמת האור המעורר. מצד שני מספרם של האלקטרונים הנפלטים מהגוף יהיה פרופורציונאלי לעוצמת האור המעורר, אם כל שאר הנסיבות הן שוות.

(סמבורסקי, *המחשבה הפיסיקאלית בהתהוותה*, עמ' 502-503)

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

<u>טקסט שני</u>: **ארתור קומפטון, 1926**

הצעה זו שלפיה כל קוונט של קרינת רנטגן מתפזר על-ידי אלקטרון יחיד מספקת אמצעי פשוט לביאור השינוי הנצפה באורך הגל. שכן אם נניח שהקרניים הפוגעות מתקדמות בקוונטים המכוונים בדיוק באופן זה שהם מפוזרים על-ידי אלקטרונים בודדים, כי אז לצד האנרגיה שלהם hf הם יישאו תנע של hf/c. הקוונט המתפזר, לעומת זאת, המתקדם בכיוון שונה מאשר הקוונט הפוגע, נושא עמו תנע שונה. וכך באמצעות עקרון שימור התנע, האלקטרון שמפזר את הקרן חייב להירתע עם תנע שווה להפרש הווקטורי בין התנע של הקוונט הפוגע לתנע של הקוונט המתפזר. אבל האנרגיה של האלקטרון הנרתע הזה נלקחת מזו של הקוונט הפוגע, מה שמותיר קוונט מתפזר עם פחות אנרגיה ולפיכך תדירות קטנה יותר מאשר זו של הקוונט הפוגע.



Compton, *X Rays And Electrons*, pp. 265-266.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

קבוצה 7 - עבור המורה: תשובות לשאלות שהוצגו לתלמידים

:Q1	**האם הקטע שלפניכם הוא בעד/נגד התפיסה הגלית? בעד/נגד התפיסה החלקיקית?**
:A1	בעד התפיסה החלקיקית.
:Q2	**מהו הטיעון המרכזי של המדען?**
:A2	טקסט ראשון: רק ראיית האור כאוסף של קוונטי אנרגיה – כשכקוונט אחד (עם אנרגיה hf) פועל כל פעם על אלקטרון (כלומר הקוונט הזה הוא מעין חלקיק, פוטון) – מאפשרת להסביר את האפקט הפוטואלקטרי (למשל, תלות האנרגיה בתדירות). טקסט שני: ראית קוונטי האור כחלקיקים בעלי תנע מסבירה את התדירות הקטנה של קוונט האור הנפלט לעומת זה הפוגע.
:Q3	**על מה מתבסס המדען בטיעונו?**
:A3	טקסט ראשון: על התיאוריה של קוונטי אנרגיה וניסויים של יצירתן של קרני-קתודה על-ידי אור. טקסט שני: על תיאוריית איינשטיין (יחסות + אפקט פוטואלקטרי), ניסויים שהראו תדירות קטנה של קוונט אנרגיה נפלט ועקרון שימור התנע.
:Q4	**האם המדען מתאר ניסוי לחזק את טענתו? אם כן, תארו את הניסוי והסבירו כיצד הוא מחזק את טענת המדען.**
:A4	טקסט ראשון: נוסחה תיאורטית (שנשענת על הנחה שהאור הוא מעין חלקיק, "קוונט אור", שייקרא לעתיד "פוטון") שמצליחה להסביר ניסוי ממשי ידוע: האפקט הפוטואלקטרי, כלומר קריעת אלקטרונים מקתודה מתכתית כתוצאה מהקרנתה בקרינה אלקטרומגנטית. טקסט שני: תחזית תיאורטית (המניחה שלפוטון יש תנע, כלומר הוא חלקיק) שמצליחה לבאר ניסוי ממשי ידוע, שבמהלכו קרינת רנטגן פוגעת באלקטרונים, מתפזרת (עם אנרגיה קטנה יותר ולפיכך באורך גל גדול יותר) וגורמת להירתעות של אלקטרונים.
:Q5	**האם המדען מתייחס לטיעונים קודמים? האם משתמש בהם כדי לחזק את עמדתו? כדי לסתור עמדות סותרות?**
:A5	טקסט ראשון: מתייחס לתורה הגלית, טוען שמסבירה יפה תופעות רבות אך לא את כולן. לא מנסה לסתור אלא להוסיף. טקסט שני: מתייחס להנחה (שהוכיח האפקט הפוטואלקטרי) שניתן להתייחס לאור כאוסף של "קוונטים", כלומר מעין חלקיקים.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

סיכום השיעור על אור: מכניקת הקוונטים והדואליות של האור

לסיכום שיעור האור, נחזור תחילה על הנימוקים העיקריים שהועלו (החל מאמצע המאה ה-17) לטובת התפיסה הגלית והחלקיקית של האור. להלן רשימת הנימוקים בעד התפיסה הגלית, כולל שנת גילויים או ניסוחם:

1665 – תופעת עקיפת האור, שהתגלתה בידי פרנצ'סקו גרימלדי;
1679 – תופעת השבירה וההחזרה, כפי שהוסברה בידי כריסטיאן הויגנס;
1801 – תופעת ההתאבכות שהצליח להפיק בניסוי תומס יאנג;
1817 – תיאוריית הגלים המתמטיים (על-סמך עקרון הויגנס) שניסח אוגוסטן פרנל;
1860 – מדידתו של ליאון פוקו, שהוכיחה שמהירות האור במים נמוכה ממהירותו באוויר.

ואלה הנימוקים לטובת תפיסת האור כחלקיקים:

1704 – תופעת ההחזרה והשבירה, שהוסברה בידי ניוטון במונחי חלקיקים (אך חזתה שמהירות האור במים תהיה גבוהה ממהירותו באוויר);
1903 – תגליתם של ארנסט ניקולס וגורדון האל, שהאור מפעיל לחץ (כאילו היה זרם של חלקיקים);
1905 – ביאורו של אלברט איינשטיין לתופעה הפוטואלקטרית, שעל פיו האור מורכב מ"קוונטים" בודדים (שמתנהגים כמעין חלקיקים במסגרת תופעה זו);
1926 – הניסוי של ארתור קומפטון שהוכיח שלאור יש תנע (מאפיין "חלקיקי" מובהק).

רשימת התאריכים והנימוקים משקפת התפתחות היסטורית ברורה, שבדיעבד היתה הרקע לשקיעת הפיזיקה המכונה "קלאסית" (שכללה את תורת ניוטון וענפים חדשים יותר שהתבססו עליה, כמו התורה האלקטרומגנטית של ג'יימס קלרק מקסוול ותורת התרמודינמיקה) ולצמיחת הפיזיקה המודרנית – בייחוד מכניקת הקוונטים.

אחרי שנת 1860, וביתר שאת לאחר פרסום משוואות מקסוול ב-1864 (שמהם נבע שהאור הוא קרינה אלקטרומגנטית, כלומר שדות חשמליים ומגנטיים המתנודדים ומתפשטים במרחב), לא היה כל ספק בקרב הפיזיקאים שהאור גלי במהותו. לקראת תום המאה ה-19 – כלומר, בשיאה של פריחת הפיזיקה הקלאסית" – ידעו הפיזיקאים שניתן להסביר את תופעת ההחזרה בקלות רבה בעזרת ההנחה שהאור הוא חלקיק – כפי שעשה זאת ניוטון. אך היה להם ברור שבעוד שניתן עקרונית לבאר גם את תופעת השבירה (המורכבת יותר) בעזרת הגישה החלקיקית, הרי שניסוי פוקו מ-1860 הוכיח בבירור את עדיפותה המכרעת של הגישה הגלית: בעוד שההסבר הניוטוני-חלקיקי לשבירה חזה שמהירות האור בתווך הצפוף (מים) גבוהה ממהירותו בתווך הדליל (אוויר), עלה הניסוי בקנה אחד עם הטענה (שנבעה

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

מהגישה הגלית של הויגנס) שהאור נע מהר יותר באוויר מאשר במים. הוכחה זו הצטרפה להצלחתו של יאנג בהפקת התאבכות של אור – עניין לא פשוט, מסיבות טכניות שנדונו במהלך השיעור; ולכך התווספו ההסברים הכמותיים, המפורטים והמדויקים, שניסח פרנל (על סמך תורת הויגנס) לתופעות ההתאבכות והעקיפה, שלמעשה אין כל דרך לבארן באמצעות המודל החלקיקי של האור. כלומר, בתקופה זו העדויות לטובת הגישה החלקיקית של האור הצטיירו כחלשות ביותר, וזאת בניגוד לנימוקים לטובת האור כגל שהסתמנו כאיתנים להפליא.

אך החל משנת 1900 לערך החל להתרחש שינוי דרמטי, שהחזיר לזירת המדע את הגישה החלקיקית – אם כי באופן שונה מאוד מזה שראה ניוטון לנגד עיניו, ובצורה שלמעשה גם לא תפגע בתיאור האור כגל (שלמעשה אין לו תחליף לביאור תופעות כעקיפה והתאבכות). בדיעבד, מה שנפגע ללא תקנה כתוצאה משינוי זה היה אופן התפיסה הבסיסי שלנו את הטבע, למשל ההכרח – שלפני 1900 נראה מובן מאליו – להניח שקיימות שתי אפשרויות בלבד, שכל אחת מהן למעשה שוללת את רעותה: או שהאור הוא אוסף חלקיקים (ואז הוא אינו יכול להיות גל), או שהאור הוא גל (ואז הוא אינו יכול להיות אוסף חלקיקים). נסקור בקצרה תהליך זה.

השינוי הדרמטי המדובר – שבעקבותיו חלו השינויים מרחיקי הלכת באופן תפיסתנו את המציאות – הוא התיאוריה שאנו מכנים "מכניקה קוונטית", ובבסיסה עומד רעיון פשוט אך מהפכני. בהתאם לרעיון זה האנרגיה איננה גודל רציף, כלומר כמות שניתן להקטינה עוד ועוד ככל שנרצה, אלא היא גודל בדיד (דיסקרטי) מטבעו – היא מורכבת ממספר סופי של מנות אנרגיה זעירות ("קוונטים"), שלא קיימות בטבע כמויות אנרגיות זעירות מהן. מושג הגודל הבסיסי הבדיד – הגודל שלא קיים בטבע קטן ממנו – לא היה זר כלל למדע, מאז שטענו פילוסופים יוונים בעת העתיקה (עוד לפני ימי אריסטו) שהחומר מורכב מ"אטומים", כלומר ישויות בסיסיות שאינן ניתנות לחלוקה. מבחינה כימית (אם כי לא מבחינה פיזיקלית), גם האטום של ימינו, או המולקולה, נחשבים ליחידת חומר בסיסית, וגם בתורת החשמל קיימת כמובן יחידה בסיסית של מטען שלא ניתן למצוא בטבע קטנה ממנה: מטען האלקטרון (e-).

אך הפיזיקה הקלאסית, שבמהלך המאה ה-19 הגיעה להישגים נכבדים כל-כך, מעולם לא שיערה שגם האנרגיה היא גודל "מקוונטט", כלומר גודל שבמהותו איננו רציף אלא תמיד מופיע בטבע כאוסף של מנות בדידות. האדם שהעלה השערה זו, שבעזרתה ניתן לפתור כמה מהתעלומות שהפיזיקה הקלאסית כשלה בהתמודדות עמן (למשל ביאור האפקט הפוטואלקטרי), היה המדען הגרמני מקס פלאנק: הוא הניח שאנרגיה אלקטרומגנטית תמיד נפלטת או נבלעת לא באופן רציף אלא ב"מנות" (קוונטים) בשיעור hf כל אחת; כאשר f היא תדירות הקרינה ו-h קבוע טבע יסודי, המכונה כיום קבוע פלאנק.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

ב-1905 הניח כאמור איינשטיין – כדי לבאר את התוצא הפוטואלקטרי – שהאור מורכב ממעין "חלקיקים", שכל אחד מהם עובר אינטראקציה עם אלקטרון; כך עלה בידיו לחזות באופן מדויק את המדידות שהתקבלו הלכה למעשה בניסוי. כל "חלקיק" כזה היה בעצם הקוונט הבסיסי שגילה מקס פלאנק, כאשר ההנחה שהאנרגיה של כל "חלקיק" היא בדיוק hf איפשרה לאיינשטיין לספק הסבר כמותי מדויק של המדידות המתקבלות בהתרחשות התוצא הפוטואלקטרי. אין פלא שתגלית זו – שלמעשה החזירה לבמת ההיסטוריה את ההנחה הישנה שהאור הוא חלקיק – זיכתה את איינשטיין בפרס נובל לפיזיקה (גם אם נדמה בדיעבד שהישגיו המאוחרים יותר האפילו על תגלית זו). תגליתו של ארתור קומפטון ב-1926 שלאור יש תנע (בדיוק כמו לאלקטרון או לכדור טניס) רק חיזקה את הטענה שהאור הינו חלקיק, גם אם רק רבע מאה לפני כן סברו הכול שאבד הכלח על טענה זו.

אך אם האור הוא חלקיק – כפי שהוכיחו איינשטיין וקומפטון, על בסיס ההנחה המהפכנית של פלאנק – האם פירוש הדבר שהוא איננו גל? עוד לפני התגלית של קומפטון, ב-1923, שיער הצרפתי לואי דה-ברוי שלחלקיק מובהק כמו אלקטרון יש אופי "גלי" שמתבטא בתופעות מסוימות (כמו עקיפה והתאבכות) המאפיינות אותו בתנאי מעבדה מסוימים. השערת דה-ברוי (שמאז זכתה למעמד של עובדה ידועה ומוכחת) רימזה שהתשובה לשאלה זו בנוגע לאור איננה בהכרח חיובית, כלומר אין להוציא מכלל אפשרות שכשם שאלקטרון עשוי להתנהג לעתים כחומר ולעתים כגל (כפי שצפה דה-ברוי), כך האור עשוי להתנהג לעתים כחלקיק (למשל בתוצא הפוטואלקטרי) ולעתים כגל (למשל בהתאבכות).

ואכן, ב-1927 ניסח מדען חשוב נוסף, המדען הדני הדני נילס בוהר, את עקרון הקומפלמנטריות (ההשלמתיות) המפורסם: תיאורים שונים של העולם, שהם לכאורה סותרים זה את זה, יכולים בכל זאת להיות כולם נכונים בבת-אחת. משמעות עיקרון זה מבחינת ההשקפה על טיבו של האור היא הדואליות, הכפילות, של האור: התמונה החלקיקית והתמונה הגלית של האור הם היבטים משלימים של מה שניתן לכנות "חלקיק קוונטי", שבנסיבות מסוימות מתנהג כחלקיק, ובנסיבות אחרות כגל. כפי שצפה דה-ברוי, דואליות זהה מאפיינת כמובן גם את החומר. ניתן לדמות את מצבנו, כמשקיפים מן הצד העורכים ניסויים כדי להבין את תכונותיו הבסיסיות של האור (או החומר), לקבוצה של עיוורים המנסים לעמוד על טיבו פיל באמצעות מישושו: העיוור שממשש את זנבו יצהיר שפיל הוא דמוי חבל, הממשש את חדק הפיל יטען שפיל הוא מעין צינור, הממשש אחת מרגליו יחשוב שמדובר בעמוד מוצק וכן הלאה; כמו המדען המודרני העורך ניסוי מורכב לבחינת האור, איש מהעיוורים לא יטעה, אך אף לא אחד מהם לא יוכל להבין לבדו בצורה מלאה ומושלמת מה זה בדיוק "פיל".

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

מקורות

גלילי, י., וחזן, א. (2008). *אופטיקה פיזיקלית בגישה תרבותית רחבה*. ירושלים: האוניברסיטה העברית בירושלים, המרכז להוראת המדעים.

גלילי, י, וחזן, א. (2004). *אופטיקה – תורת האור והראייה בגישה תרבותית רחבה*. ירושלים: האוניברסיטה העברית בירושלים, המרכז להוראת המדעים.

סמבורסקי, ש. (1987). *המחשבה הפיסיקאלית בהתהוותה: מן הפיסיקה הקדם-סוקראטית עד הפיסיקה של הקוונטים*. ירושלים: מוסד ביאליק.

רוזן ע. (2012). *קרינה וחומר, כרך ב', מודלים של האור*. רחובות: מכון ויצמן למדע, המחלקה להוראה המדעים.

Compton, A. H. (1928). *X-Rays and Electrons: An Outline of Recent x-ray Theory.* London: Macmillan.

Darrigol, O. (2012). *A History of Optics: From Greek Antiquity to the Nineteenth Century*. Oxford: Oxford University Press.

Fizeau–Foucault apparatus. (2017, December 2). In *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Retrieved 09:28, December 6, 2017, from https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Fizeau%E2%80%93Foucault_apparatus&oldid=813279882

Shapiro, A. (2002). Newton’s Optics and Atomism. In Cohen, B and Smith, G. E. (Eds.), *Cambridge Companion to Newton* (pp. 227-255).

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

<u>מעבדה</u>: שחזור ניסוי מקורי של גליליאו גליליאי – תנועה בליסטית

הרעיונות המרכזיים בשיעור

בשיעור זה ישחזרו התלמידים פענוח היסטורי שקשור לתעלומה חשובה האופפת את פועלו של גליליאו גליליאי (1642-1564) ומטרידה היסטוריונים עד עצם היום הזה: האם אמנם הסתמך בראש ובראשונה (או אך ורק) על תיאוריות שונות ו"ניסויי מחשבה" גרידא (כפי שטענו רוב ההיסטוריונים באמצע המאה העשרים), או שמא (כפי שטענו קודמיהם, למן ימיו של גליליאו עצמו) תפסו הניסויים בפועל, במעבדה, חלק חשוב בפועלו המדעי של גליליאו, ולפחות סייעו לו לאשש את מסקנותיו התיאורטיות?

הפענוח ההיסטורי, שהתרחש הלכה למעשה בשנות השבעים של המאה העשרים (ושהתלמידים יתבקשו לשחזר), כרוך בשחזור של ניסוי על סמך דף שנכתב על-ידי גליליאו בין השנים 1604 ו-1610, כלומר בתקופה שבה הגיע לגילוייו המהפכניים (חוק הנפילה החופשית והבנת מסלולו הפרבולי של קליע), אשר ראו אור בכתביו רק בשנות השלושים של המאה ה-17. במהלך שחזור זה יישמו התלמידים את תמצית גילויים אלה (שלמדו לפני כן), כלומר את תכונות התנועה שוות התאוצה (הפרופורציונליות בין מהירות הנפילה לזמן הנפילה, וכן בין מרחק הנפילה לריבוע הזמן) ואת תכונות המסלול הפרבולי האופקי (התמדיות הנפילה האופקית והסופרפוזיציה בין התנועה האופקית הקצובה לבין תנועת הנפילה האנכית שוות-התאוצה).

מטרות השיעור

<u>מטרות על</u>

- התמודדות עם טקסט היסטורי המתאר תופעה פיזיקלית;
- תכנון של ניסוי המשחזר את הניסוי ההיסטורי המוצג בטקסט;
- ביצוע ניסוי של תנועה בליסטית, עיבוד הנתונים והשוואתם למסקנות ההיסטוריות;
- חזרה על תכונות הנפילה החופשית (תנועה שוות-תאוצה) ומסלול הקליע האופקי הפרבולי (ההתמד של התנועה האופקית, הסופרפוזיציה של התנועה האופקית הקצובה והתנועה האנכית שוות-התאוצה).

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

מטרות אופרטיביות

- התלמידים יבחנו איור היסטורי המתאר ניסוי שבוצע ע"י גליליאו;
- התלמידים יאתרו וינסחו את מסקנתו העיקרית של גליליאו מתוך האיור;
- התלמידים יתכננו ניסוי על מנת לשחזר את הניסוי של גליליאו;
- התלמידים יעבדו את תוצאות הניסוי שלהם;
- התלמידים ישוו בין תוצאות הניסוי שלהם לאלו של גליליאו.

ידע קודם נדרש של התלמידים

על התלמידים להכיר ולהבין את הנושאים הבאים:

1. פונקציה פרבולית;
2. תכונותיה של תנועה שוות-תאוצה (נפילה חופשית) ותכונות מסלול הקליע האופקי הפרבולי (הסופרפוזיציה בין התנועה ההתמדית בציר האופקי והתנועה שוות-התאוצה בציר האנכי).
3. מושג הפרופורציה.

תכנון השיעור

מהלך השיעור

1. הגשת כתב חידה לתלמידים + דף שאלות מנחות: התלמידים ינסו להבין מה עשה גליליאו.
2. תכנון ניסוי המשחזר את הניסוי ההיסטורי.
3. ביצוע הניסוי שתוכנן וניתוח התוצאות.
4. סיכום (מליאה): מה היו מסקנותיו של גליליאו ומה שלנו? האם ישנם הבדלים? ממה הם נובעים? מה היה ידוע קודם ומה היה החידוש של גליליאו בניסוי זה?

חלוקת זמנים

		משך (דק')
1.	כתב חידה	40
2.	תכנון ניסוי	20
3.	ביצוע ניסוי	40
4.	סיכום	20
	סה"כ:	**120**

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

עזרי הוראה – ציוד וחומרים נדרשים

עמדת מורה:

1. לוח + טושים.

לתלמידים:

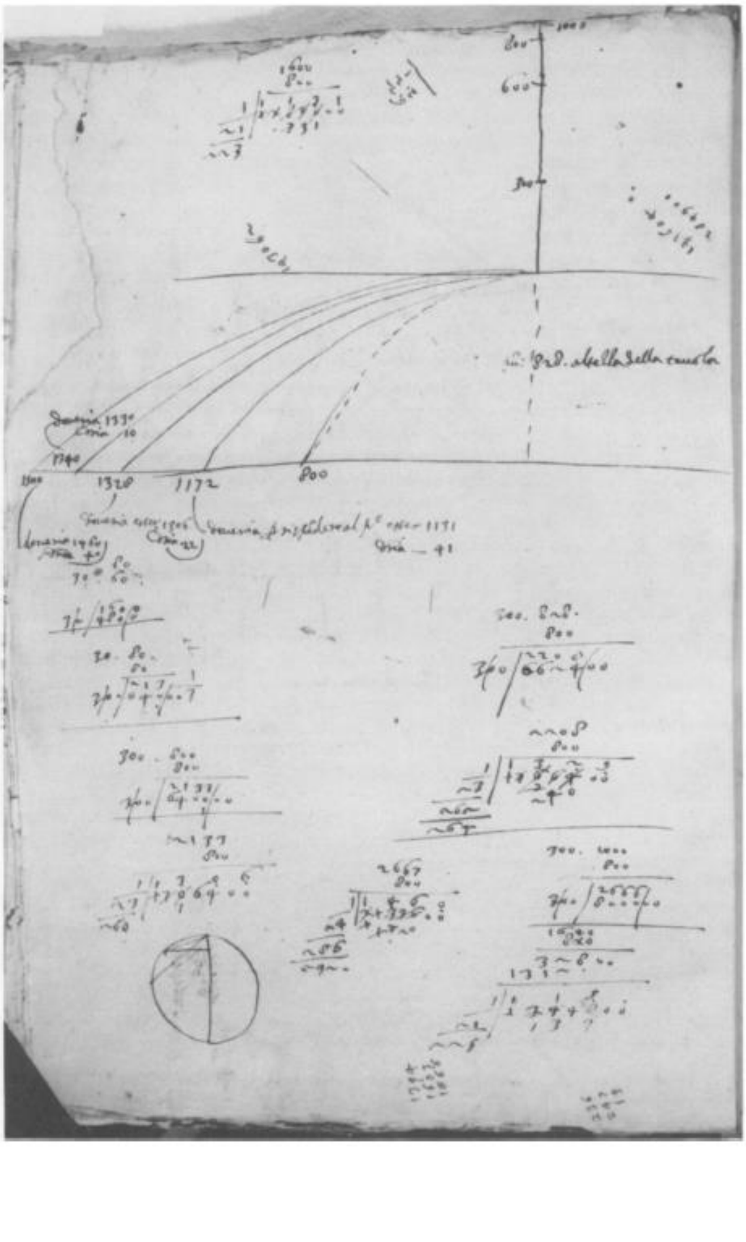
1. כתב החידה;
2. שאלות מנחות לפענוח הניסוי של גליליאו;
3. אביזרים לביצוע הניסוי, לפי תכנון, וככל הנראה יכללו:
   - שולחן עבודה;
   - סרגל ארוך למדידת גבהי שחרור הכדור ומרחקי הנפילה;
   - מסילה משופעת (ניתן להשתמש במגוון חומרים, לדוגמא תעלת חוטי חשמל);
   - כדור המתאים למסילה (עדיף ממתכת ולא זכוכית עקב תכונות הידרודינמיות);
   - נייר קופי;
   - נייר לבן;
   - נייר דבק;
   - סטנט;
   - כליבה.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

שאלות מנחות לתלמיד – דף למורה

בשיעור זה אמורים התלמידים להבין איזה ניסוי מתואר בדף הטיוטה שכתב גליליאו עצמו (מופיע בעמ' זה), לתכנן ולבצע ניסוי דומה בעצמם (ראו בעמ' 137-144 את החומר המחולק לתלמידים בתחילת השיעור). בניסוי המתועד בטיוטה גליליאו גילגל כדור במורד מישור משופע המונח על שולחן; בקצה התחתון המעוגל של המישור המשופע מקבל וקטור המהירות כיוון אופקי. לכן, מרגע שהכדור עוזב את השולחן ועד שהוא מגיע לרצפה הוא נע כקליע שנזרק בזריקה אופקית. גליליאו שיחרר את הכדור מגבהים שונים על פני המישור. גדלים אלה מסומנים על הציר האנכי בטיוטה. הטווחים האופקיים השונים בהם פגע הכדור ברצפה מופיעים על הציר האופקי. לתלמיד המשימה מוצגת כתעלומה שיש לפצח, ללא ההסבר שסיפקנו כרגע לכם (המורים). הדברים נחשפים בהדרגה במהלך הפעילות.

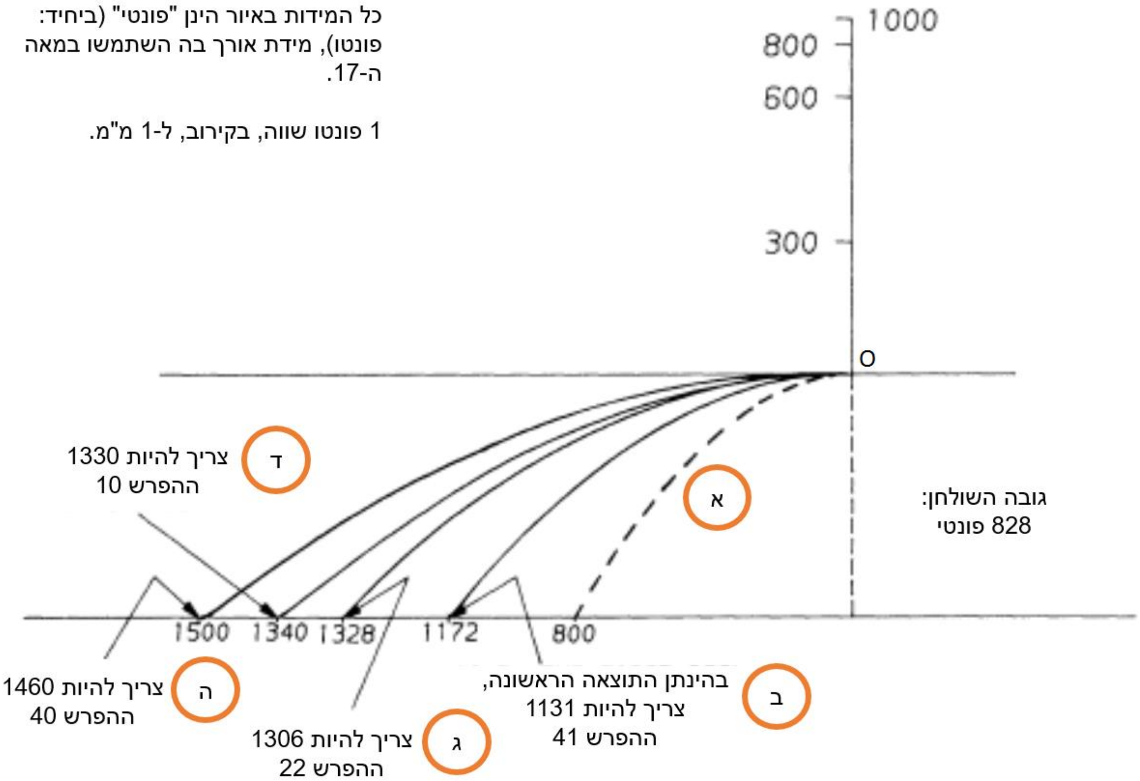
אילוסטרציה של מערכת הניסוי בה השתמש גלילאו מוצגת בעמוד 67. דוגמא למערכת ניסוי בה אנו השתמשנו נמצאת בעמוד 58.



כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

כל המידות באיור הינן "פונטי" (ביחיד: פונטו), מידת אורך בה השתמשו במאה ה-17.

1 פונטו שווה, בקירוב, ל-1 מ"מ.



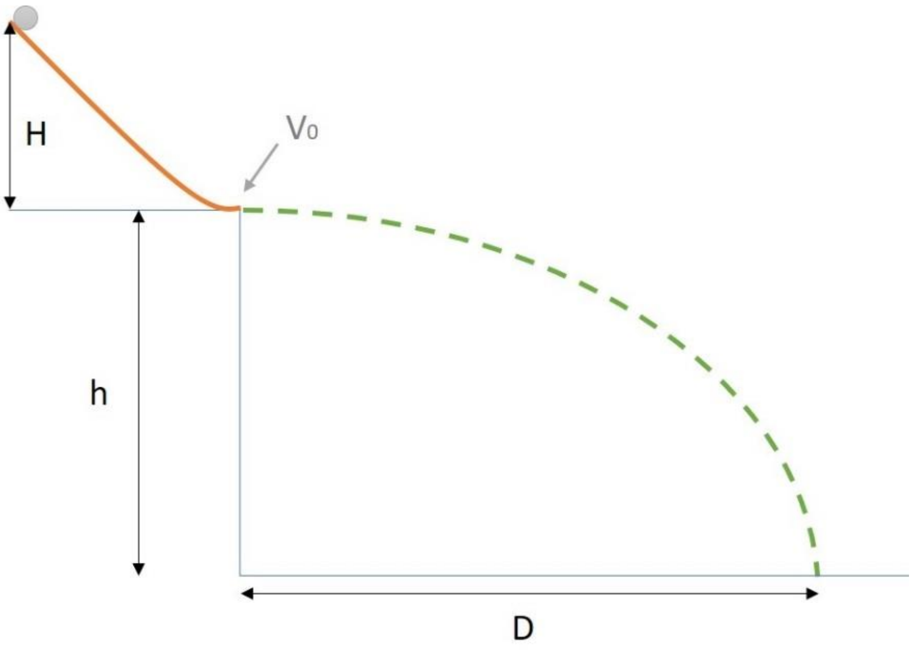
ב.	$\sqrt{600\cdot\frac{800^2}{300}}=1131$
ג.	$\sqrt{800\cdot\frac{800^2}{300}}=1306$
ד.	$\sqrt{828\cdot\frac{800^2}{300}}=1330$
ה.	$\sqrt{1000\cdot\frac{800^2}{300}}=1460$

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

1. התבוננו בציר האנכי ובציר האופקי (כולל העקומות), וכן בנתונים השונים (כולל גובה השולחן). מהו לדעתכם הנושא הכללי של הניסוי המתואר בו?

[מסלולים פרבוליים של קליע אופקי שיוצא מנקודה O במהירויות אופקיות שונות ונופל לאותו גובה (גובה השולחן).]

2. כיצד לדעתכם נראית מערכת הניסוי של גליליאו? מהו מהלך הניסוי אותו ביצע?



הערה: התמונה מציגה דרך אפשרית לבנית המערכת והיא מיועדת למורה לצורך המחשה. התלמידים נדרשים לתכנן ולבנות בעצמם את המערכת.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

[גליליאו שחרר כדור ממנוחה על גבי מישור משופע כך שהשתחרר במהירות אופקית משתנה בקצה השולחן. גובה השחרור על המישור המשופע היה שונה בין הניסויים מה שהוביל למהירות אופקית שונה בעת תחילת הנפילה החופשית. גובה הנפילה החופשית היה זהה בכולם]

3. מה מציינים המספרים בציר האנכי (נסמן אותם באות H) והמספרים בציר האופקי (נסמן אותם באות D)? התבוננו שוב בעקומות, וכן בנתון "גובה השולחן הוא 828 punti". מהו המשתנה הבלתי-תלוי ומהו המשתנה התלוי בניסוי?

[המשתנה הבלתי-תלוי H הוא גובה המסילה מעל השולחן (שגובהו 828 פונטי), כאשר המשתנה התלוי D מתאר את המרחקים האופקיים שנמדדים עבור ערכי H שונים.]

4. פתחו את הקשר בין H ל-D על ידי שימוש במשוואות התנועה של נפילה חופשית (קינמטיקה), ללא שימוש במושג האנרגיה (שלא היה ידוע בתקופת גליליאו). מהו יחס הפרופורציה בין D ל-H?

א. חלקו את התנועה לשני חלקים. מהם?

[תנועה על גבי המסילה ותנועה בליסטית בנפילה חופשית]

ב. כתבו את משוואות התנועה בחלק הראשון – מה מאפיין את התנועה?

- זכרו את הכלל הבא, שהיה ידוע היטב גם לגליליאו: גודל מהירותו של גוף בסוף נפילה מגובה קבוע H אינו תלוי בשיפוע - אין זה משנה אם הגוף נופל מגובה H או נע במורד מישור משופע כלשהו שגובהו H.
- רמז: הגדירו את t_H כזמן הנפילה לאורך המרחק האנכי H ואת t_D כזמן התנועה הפרבולית, כלומר הזמן שבו הקליע עובר מרחק אופקי D.

[תנועה שוות תאוצה]

$$(1)\ v_0 = gt_H \Rightarrow t_H = \frac{v_0}{g}$$

תנועה על-גבי מסילה: משוואת מהירות בתנועה שוות תאוצה ותוך שימוש בכלל המוזכר כי גודל מהירותו של גוף בסוף נפילה מגובה קבוע H אינו תלוי בשיפוע

$$(2)\ H = \frac{1}{2}gt_H^2$$

תנועה על-גבי מסילה: משוואת מיקום בתנועה שוות תאוצה

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

ג. כתבו את משוואות התנועה בחלק השני – מה מאפיין את התנועה?

[בציר y – תנועה שוות תאוצה, בציר x – תנועה שוות מהירות]

- המהירות האופקית של הכדור אחרי שהוא עוזב את השולחן נשארת קבועה (למה היא שווה במקרה הנוכחי?).

[היא שווה כאן למהירות המקסימלית של הגוף אחרי נפילה מגובה H. בהנחה שאין כמעט איבוד אנרגיה במעבר ממצב אנכי למצב אופקי, גודלה הסקלרי של המהירות חייב להישמר. גליליאו הבין זאת אינטואיטיבית בלי מושג האנרגיה, שלא היה קיים בתקופתו]

$$(3)\ D = v_0 t_D$$

תנועה באוויר: משוואת מהירות בתנועה שוות מהירות בציר x

$$(4)\ h = \frac{1}{2} g t_D^2$$

תנועה באוויר: משוואת מיקום בתנועה שוות תאוצה בציר y

ד. בודדו משתנים ומצאו את הקשר בין D ל H (הגיעו לקשר שאינו כולל את תאוצת הגרביטציה g)

מתוך משוואות (1) + (2): הצבת ערך t_H בביטוי (2)

$$(5)\ H = \frac{1}{2} g \left(\frac{v_0}{g} \right)^2 \Rightarrow v_0 = \sqrt{2gH}$$

הצבת הביטוי עבור המהירות ממשוואה (5) במשוואה (3)

$$(6)\ D = t_D \sqrt{2gH}$$

העלאת הביטוי ממשוואה (6) בריבוע

$$(7)\ D^2 = 2gHt_D^2$$

בידוד הביטוי עבור t_D^2 ממשוואה (4)

$$(8)\ t_D^2 = \frac{2h}{g}$$

הצבת הביטוי עבור זמן הנפילה החופשית ממשוואה (8) בביטוי ממשוואה (7)

$$(9)\ D^2 = 2gH \cdot \frac{2h}{g} = 4Hh$$

$$\Downarrow$$

$$D^2 \,\alpha\, H$$

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

[התלמידים אמורים אם כן לחשוף את הפרופורציה $H \propto D^2$. רוב ההיסטוריונים סבורים כיום כי ניסוי זה שימש את גליליאו לאישוש אחת מהפרופורציות התיאורטיות הקשורות לנפילה חופשית או תנועה פרבולית (איש אינו טוען אגב שגליליאו ממש הסיק את הפרופורציות על סמך הניסויים בלבד). כמה מהם סבורים ש-$H \propto D^2$ זהו הקשר הספציפי שגליליאו ניסה לאשש, ואחרים טוענים שבאמצעות אישוש קשר זה ובסיוע הנחות נוספות (למשל, הפרופורציונליות בין H לריבוע זמן הנפילה במורד השיפוע) גליליאו ניסה לאמת הנחה תיאורטית אחרת (למשל, הפרופורציה הישרה בין המרחק האופקי D למהירות האופקית, כלומר המהירות הסופית של הנפילה מ-H).

<u>הערה היסטורית לגבי אופן הניתוח המתמטי בתקופת גליליאו</u>: בזמנו של גליליאו האלגברה כפי שהיא מוכרת לנו כיום עדיין היתה בחיתוליה, ונהוג היה לקשור בין משתנים לא באמצעות משוואות, אלא על-ידי פרופורציות. כמו-כן, פרופורציות אלו כללו רק את המשתנים הפשוטים ביותר – כלומר, כמעט אך ורק זמנים ומרחקים – ולא משתנים מורכבים (יחסית) מתמטית, כמו תאוצות, או מהירויות שאינן קבועות. למשל, בעוד שלנו מוכרת המשוואה $s = ½at^2$ הקושרת בין הדרך שעובר גוף הנע (ממנוחה) בקו ישר ובתאוצה קבועה a במשך זמן t, הרי גליליאו ועמיתיו יסתפקו בטענה שבנפילה חופשית $s \propto t^2$ ("$\propto$" זהו הסימן ליחס ישר) כאשר הם הבינו היטב שבמהלך תנועה זו קצב שינוי-המהירות קבוע בזמן. באותה המידה, בעוד שאת מהירותו הסופי של גוף הנע בתאוצה קבועה אנו נבטא כ- $v = gt$, הרי שההצהרה הגליליאנית השקולה תהיה: $v \propto t$. ולבסוף, אם גוף נע במהירות קבועה v, כי אז אנו נבטא את המרחק הנעבר בעזרת המשוואה הפשוטה $s = vt$, ואילו בני זמנו של גליליאו יטענו שהמרחק פרופורציונלי לזמן ($s \propto t$) וכן למהירות ($s \propto v$).

בשפת הפרופורציות של גליליאו אם כן הנוסחה המודרנית $H = ½g(t_H)^2$ תבוטא כפרופורציה $H \propto t_H^2$. לעומת זאת מהירות הנפילה הסופית היא במינוח מודרני $v = gt_H$ ובמינוח גליליאני: $v \propto t_H$. ולגבי המרחק האופקי D שעובר הקליע בתנועתו הקצובה (בהתאם לעקרון הסופרפוזיציה: תנועת הקליע האופקי המשולבת היא סופרפוזיציה של תנועה אופקית קצובה ונפילה חופשית), אנו נבטא אותו בנוסחה הפשוטה $D = vt_D$ (כאשר t_D הוא הזמן עד שהקליע מגיע לרצפה), ובני זמנו של גליליאו יוכלו לבטא זאת בפרופורציה $D \propto v$. מאחר שכבר ראינו ש-$v \propto t_H$, לכן $D \propto t_H$]

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

5. הביטו שוב בגרפים, והניחו שהניסוי הראשון שערך גליליאו מתואר על-ידי העקומה בקו מקווקו (כלומר D = 800). מהו לדעתכם ה-H שמתאים לערך הזה?

[H = 300, שהרי D=800 הוא הערך האופקי הנמוך ביותר, בעוד ש-H=300 הוא הערך האנכי הנמוך ביותר]

6. הביטו במה שרשם גליליאו לצד שאר ערכי D ("צריך להיות....", "ההבדל:..."), והיזכרו בפרופורציה שמצאתם בסעיף הקודם. האם כעת תוכלו להבין את החישובים שערך גליליאו?

[כל החישובים מסתמכים על הפרופורציה $H \propto D^2$ ועל תוצאות הניסוי הראשון (H=300, D=800), כלומר על סמך תוצאה זו מנסים לחזות (בעזרת הפרופורציה) את שאר התוצאות, כלומר שאר ערכי D. לשם חישוב שאר התוצאות עלינו לחשב (בהתאם לנתוני התוצאה הראשונה) את מקדם הפרופורציה, כלומר את k המקיים $H = kD^2$. נציב ונקבל: $k = H/D^2 = 300/800^2$. נשתמש במקדם הפרופורציה שמצאנו כדי לקבל את ערכו התיאורטי הצפוי של D בתוצאה השנייה (חישוב ב'), כלומר כאשר H=600: במקרה זה $D^2 = H/k = 600/(300/800^2)$; כדי למצוא את D נצטרך להוציא שורש מהערך הנ"ל, וזה בדיוק מה שאנו רואים בחישוב ב'. ולגבי התוצאה השלישית (חישוב ג'), כלומר D=800: $D^2 = H/k = 800/(300/800^2)$; שוב, כדי למצוא את D נצטרך להוציא שורש מהערך הנ"ל, וזה מה שרואים בחישוב ג', וכו'.]

7. גליליאו קיבל את היחס 800/300 באופן אמפירי (H=300, D=800). חשבו באופן תיאורטי איזה D צפוי לנפילה מגובה H=300. נסו לחשוב מה הסיבה להבדל זה?

[לפי המשוואות שפיתחנו בשאלה 4 התקבל הקשר: $D^2 = 4Hh$. במקרה הנתון בשאלה H=300, h=828 ולכן: $D = \sqrt{4 \cdot 828 \cdot 300} = 997$. היחידות הן פונטי או מ"מ, תלוי במה נבחר לעבוד]

8. להלן אחד מהכללים שניסח גליליאו לגבי תנועה שוות-תאוצה, הידוע כ"חוק המרחק הכפול": אם גוף המתחיל לנוע ממנוחה נע בתאוצה קבועה במשך זמן t ועובר מרחק H, כי אז אם ימשיך לנוע בתנועה קצובה (במהירותו הסופית) במשך פרק זמן זהה (t), יעבור (בתנועה הקצובה) מרחק של 2H (הוכיחו לעצמכם את החוק על סמך מה שלמדתם בתנועה שוות תאוצה).

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

האם כלל זה מתיישב עם המשוואות אותם פיתחתם בשאלה 3? חשבו את המרחק האופקי (D) שיתקבל כאשר גובה השחרור מעל פני השולחן (H) יהיה שווה לגובה השולחן מעל פני הקרקע (h).

[במקרה זה h=H ולכן נקבל: $D^2 = 4Hh = 4H^2 \Rightarrow D = 2H$ *. התוצאות התיאורטיות אכן מתיישבות עם הכלל שניסח גליליאו]*

9. במהלך פענוח כתב היד, ההיסטוריונים הרבו לתהות מדוע התוצאה D = 1340 מופיעה על הציר האופקי, אך הערך המתאים של H (מהו? *[הערך הוא 828]*) איננו מופיע על הציר האנכי. ההיסטוריונים הסיקו שהסיבה להשמטה זו היא שבמקרה זה שתי התוצאות כאחד – כלומר הן תוצאת הניסוי בפועל (1340) והן התוצאה על פי חישוב הפרופורציה (1330) – הסבו מבוכה לגליליאו, ולכן הוא החליט שלא להבליט ניסוי זה, על-ידי כך שנמנע מלרשום את הערך האנכי המתאים. שימו לב למשמעותו של ערך זה ול"חוק המרחק הכפול"; האם תוכלו להסביר מדוע טענו היסטוריונים שתוצאה זו הסבה לגליליאו מבוכה?

[הערך האנכי הוא 828, בדיוק גובה השולחן: ולפי חוק המרחק הכפול גליליאו היה אמור לקבל כאן D =1656 (שהרי במקרה זה זמן הנפילה מגובה H שווה בדיוק לזמן של המסלול הפרבולי), בעוד שהן התוצאה הנצפית-בפועל והן התוצאה לפי חישוב הפרופורציה (המסתמכת על הניסוי הראשון H=300, D=800, ראו סעיף 6) נמוכות בהרבה! גליליאו לא ידע להסביר זאת, אך אנחנו כן: חלק מהאנרגיה הפוטנציאלית mgH מומרת לא לאנרגיה קינטית ליניארית, אלא לאנרגיה רוטציונית, שהרי הכדור איננו מחליק אלא מתגלגל במורד השיפוע. לכן המרחק האופקי בפועל (התלוי באנרגיה הקינטית הקווית) קטן ממה שהיינו מצפים. היסטוריונים משערים שגליליאו ייחס לחיכוך את ההבדל הזה. מה שברור: גם בכתביו המאוחרים, המתארים את ניסוי המישור המשופע המפורסם, גליליאו איננו מתייחס כלל להשפעת העובדה שהכדור היורד איננו מחליק אלא מתגלגל; את מושג האנרגיה בעצם התחילו להבין רק במאה ה-18.]

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

הנחיות למורה לביצוע הניסוי

ההנחיות הנ"ל מיועדות למורה כדי שיוכל לכוון את התלמידים לבנית מערכת שתאפשר את שחזור הניסוי המוצג להם. אנו ממליצים לא לתת לתלמידים הוראות מהלך ניסוי כתוב ומפורט אלא להתיר להם להתנסות ולהגיע למערכת בעצמם.

- בניית מישור משופע: יש לקבע את המסילה לשולחן (באמצעות כליבה, למשל). יש להקפיד שקצהו התחתון של המישור יהיה אופקי. המלצה: להשתמש במסילת חשמל בגודל 1*1 או 1.5*1.5 ס"מ. עדיף ב"מכסה".
- מדידת גובה קצהו התחתון של המישור המשופע. זהו הגובה המקביל ל-828 פונטי שציין גליליאו גליליאי ברישומיו. בהמשך מומלץ לנסות לבצע זריקת ניסוי מגובה זה (מעל השולחן).
- יש למצוא כדור המתאים למסילה בגודלו. לקחת בחשבון שיקולי חיכוך ואווירודינמיקה. המלצה: גולה ממתכת.
- על הרצפה, מול קצהו התחתון של המישור המשופע יש להדביק נייר קופי ומעליו דף נייר – כך נוכל לזהות את נקודת פגיעת הכדור ברצפה.
- זריקה ראשונה – זריקת הייחוס: יש לבחור גובה ראשוני, למדוד אותו וכן את מרחק הנפילה (מרחק אופקי מקצהו של המישור המשופע).
- בהתבסס על זריקה ראשונית זו יש לייצר טבלה של גבהים נוספים מהם נשחרר את הגולה ולחשב, <u>בעזרת הפרופורציה של גליליאו</u>, מהם המרחקים האופקיים אותם הם מצפים לקבל.
- זריקות הניסוי: ביצוע הזריקות לפי הגבהים שתכננו בסעיף הקודם.
- הצגת הנתונים ע"ג גיליון אלקטרוני – השוואה בין התוצאות החזויות לפי הפרופורציות של גליליאו גליליאי לבין התוצאות שהתקבלו בניסוי.

הערה: לרוב כאשר מבצעים ניסוי נפילה חופשית ישנם פערים גדולים בין התיאוריה לבין התוצאות האמפיריות עקב סוגיות כגון חיכוך. במקרה זה אנו משתמשים בזריקה הראשונה כנקודת ייחוס לחישוב ה"תיאורטי". מכיוון שגם בזריקה זו אלמנט החיכוך קיים, הפער המתקבל בין התוצאות החזויות לאמפיריות קטן.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

תוספת - רקע היסטורי אמיתי לכתב היד

בשנת 1909 ראתה אור באיטליה מהדורה של כל כתבי גליליאו (בעריכת המתמטיקאי וההיסטוריון אנטוניו פבארו), שכללה לא רק את חיבוריו המודפסים (למשל שני ספריו החשובים ביותר, "הדיאלוג על שתי שיטות העולם", ו"שני מדעים חדשים"), אלא גם חיבורים שלא פורסמו, כולל טיוטת שונות, מכתבים, הערות שוליים של גליליאו לספרים אחרים וכו'. ואולם מהדורה זו לא כללה מספר גדול של טיוטות עבודה של גליליאו שעסקו בתורת התנועה, שפבארו מן הסתם לא עמד על חשיבותן ולא ראה לנכון לשלבן במהדורתו. טיוטות אלה, ששכבו להן כמות שהן בספרייה הלאומית המרכזית של פירנצה (Biblioteca Nazionale Centrale di Firenze), החלו להיחקר בידי היסטוריונים רק בשנות ה-70 של המאה העשרים, ונודעה להן חשיבות מיוחדת בכל הנוגע לאופן שבו מבינים ההיסטוריונים כיצד הגיע גליליאו להישגיו הגדולים (ניסוח חוק הנפילה, כלומר ההבנה שגוף נופל נע בתאוצה קבועה וניסוח הקשרים בין המרחקים והזמנים של גוף נופל; ההכרה כי בריק כל הגופים נופלים באותו אופן בדיוק; פענוח מסלולו הפרבולי של הקליע).

ידוע לכל ההיסטוריונים שגליליאו הגיע להישגיו הכבירים בזכות שילוב מוצלח במיוחד של דרכי עבודה שונות: הישענות על הישגי קודמיו (למשל, כבר 300 שנה לפניו פותחו הפרופורציות המתמטיות של גופים הנעים בתאוצה קבועה, אם כי לא קושרו לגופים נופלים), דדוקציות גיאומטריות, "ניסויי מחשבה" (כלומר הסקת מסקנות באמצעות הנחות תיאורטיות שונות וגזירת ההשלכות הנוסעות מהן – ללא ביצוע ניסוי בפועל) וניסויים בפועל (הניסוי המפורסם ביותר: ניסוי המישור המשופע, שבו אישש גליליאו את הנחתו שגוף נופל נע בתאוצה קבועה ולכן ניתן להחיל עליו את הפרופורציות המתמטיות של תאוצה קבועה).

ואולם ההיסטוריונים תמיד התלבטו בנוגע לחשיבות היחסית של כל אחד מהמרכיבים הללו במכלול עבודתו. בהשראת גליליאו עצמו (שלא נלאה מלספר על ניסויים שערך), ובהתאם לדיווחיו של הביוגרף הראשון שלו (תלמידו וינצ'נצו ויוויאני, שחיבתו למורו כנראה העיבה על דייקנותו), השתרשה בקרב ההיסטוריונים הדעה כי הניסויים שערך גליליאו במעבדתו היו מרכיב חשוב ביותר בעבודתו. חלקם טענו (בעקבות ויוויאני) שגליליאו למעשה הגיע לאבחנותיו באמצעות ניסויים, ואחרים הסתפקו בטענה שגליליאו הקפיד לאשש בניסויים חוזרים ונשנים כל תובנה תיאורטית שניסח. במהלך תקופה ארוכה זו זכה גליליאו לכינויו "אבי הפיזיקה הניסויית".

אך קרוב לשנת 1940 חולל ההיסטוריון הצרפתי אלכסנדרה קוירה מהפכה בתחום זה, בכך שהצהיר שדיווחיו של גליליאו על ניסויים שביצע אינם אמינים, ושגם אילו ביצע אותם, לא יכול היה בשום אופן לקבל את התוצאות שדיווח עליהן בספריו (בעיקר ספרו החשוב ביותר, "שני מדעים חדשים", שבו גליליאו מתאר את ניסוי המישור המשופע הקריטי). קוירה הסיק שהמרכיב העיקרי (והמשמעותי היחיד) בעבודתו של גליליאו היה תיאורטי: ניסויי מחשבה,

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

דדוקציות מתמטיות וניתוחים פילוסופיים (קוירה הדגיש את הפן האפלטוני במחשבת גליליאו, כנגד הנטייה האריסטוטלית של הפיזיקה המקובלת ושל מתנגדיו). לפרשנותו של קוירה היתה השפעה רבה מאוד על האופן שבו ניתחו היסטוריונים את פועלו של גליליאו למן שנות ה-40'.

ואולם המטוטלת החלה את תנועתה הנגדית כבר בשנת 1961, כאשר ההיסטוריון תומס סטל שיחזר את ניסויי המישור המשופע של גליליאו – והראה שבניגוד לטענות קוירה, גליליאו **יכול היה** לבצע, בדיוק משביע רצון, את ניסויי המישור המשופע שתיאר ב"שני מדעים חדשים" (קשה לטעון זאת, אמנם, ביחס לרבים מניסויי המטוטלות-של-ממש שעליהם מדווח גליליאו). בשנות ה-70 המוקדמות עשתה המטוטלת (ההיסטוריוגרפית) צעד נוסף: ההיסטוריון סטילמן דרייק בחן לעומק את "קודקס 72" (המכונה לעתים "כרך 72"), אוסף של כ-160 דפי פוליו, שלא הופיעו במהדורת 1909 של פבארו. דרייק הבין כי דפים אלה, שעמם נמנה 116v ("v" פירושו verso, כלומר "אחורי", בעוד שהסיומת "r" פירושה recto, כלומר "קדמי"), אינם אלא תיעודים כתובים של ניסויים בתנועה שערך גליליאו, וכי הם חשובים מאוד לשחזור פועלו ולהבנה כיצד הגיע לתובנות המפורטות ב"שני מדעים חדשים" (או, למצער, כיצד עלה בידו לאשש אותן). דרייק וסטילמן הוכיחו מעבר לכל ספק כי קוירה שגה כששלל מכול וכול את חשיבותם (או אמינותם) של הניסויים שביצע גליליאו, אך הבעיה הגדולה הכרוכה בקודקס 72 – בעיה שטרם נפתרה – היא שההיסטוריונים טרם הצליחו לתארך כיאות את דפי הפוליו הכלולים בו ולסדרם באופן כרונולוגי. לפיכך, אף על פי ששום היסטוריון כיום לא יזלזל בחשיבות הניסויים-בפועל במחשבת גליליאו (או בגליליאו עצמו כנסיין), הרי שמספר האופנים שבהם משוחזרת מלוא דרכו של גליליאו לתגליותיו שווה פחות או יותר למספר ההיסטוריונים שעסקו בסוגיה קשה זו. מכל מקום, ההיסטוריונים הצליחו לקבוע בוודאות שדפי קודקס 72 נכתבו בין השנים 1604-1610, בעוד ש"שני מדעים חדשים" ראה אור רק ב-1638 (בשנים 1610-1633 היה גליליאו עסוק במשימת חייו, שהובילה אותו למשפט וגזר דין של מעצר בית עד תום חייו: התגייסותו למען תורת קופרניקוס).

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

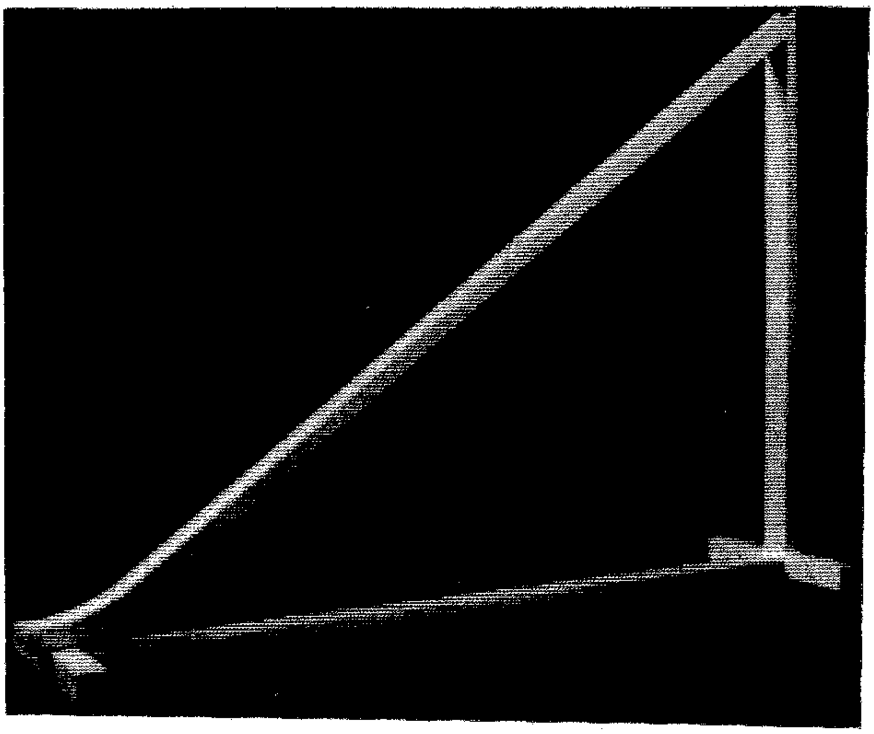


Fig. 3. Galileo's jumping-hill device (Reconstruction Deutsches Museum Munich).

מקורות

Drake, S. (1973). Galileo's Experimental Confirmation of Horizontal Inertia: Unpublished Manuscripts (Galileo Gleanings XXII). *Isis*, 64 (3), 290-305.

Heilbron, J. L. *Galileo*. (2012). Oxford: Oxford University Press.

Hill, D. K. (1986). Galileo's Work on 116v: A New Analysis. *Isis*, 77 (2), 283-291.

Naylor, H. N. (1990). Galileo's Method of Analysis and Synthesis. *Isis*, 81 (4), 695-707.

Naylor, H. N. (1976). Real Experiment and Didactic Demonstration. *Isis*, 67 (3), 298-419.

Teichmann, J. (1999). Studying Galileo at Secondary School: A Reconstruction of His ‘Jumping-Hill’ Experiment and the Process of Discovery. *Science & Education*, 8, 121-136.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

דיון (debate): נושאי חשמל – פעולה מרחוק ומושג השדה; מלחמת הזרמים

הרעיונות המרכזיים בשיעור

שיעור זה הוא במתכונת של דיון ("דיבייט") המתנהל בשני נושאים בתחום החשמל והמסתמך על שני טקסטים: האחד מתאר התפתחות היסטורית והשני מתאר מחלוקת היסטורית.

הנושא הראשון הוא המתח בין תפיסת השדה לגישת הפעולה ממרחק. גישת הפעולה ממרחק בחשמל נולדה מהגישה הניוטונית לכבידה שהניחה באופן פשטני (בניגוד לעמדתו המורכבת יותר של ניוטון עצמו) שפעולת הכבידה בין כל שתי מסות ביקום מתרחשת באופן מיידי, כשאין כל חשיבות למרחק המפריד בין המסות. בהשראת גישה זו הניחו חלוצי חקר החשמל במאה ה-18 (ובפרט שארל אוגסטן דה-קולון) שבין כל זוג מטענים חשמליים (יהיה המרחק ביניהם אשר יהיה) פועל באופן מיידי כוח חשמלי של משיכה או דחייה. על סמך הנחה זו הגיעו להישגים ניכרים, ואולם במהלך המאה ה-19, לאור שלל התופעות החדשות שנצפו, עוררה גישה זו מספר בעיות שהפתרון להן התמצה בגישה חלופית: תפיסת השדה. תפיסת השדה הניחה שההשפעה ההדדית בין מטענים אינה מתרחשת באופן מיידי ובמנותק מהמרחב שביניהם אלא באמצעות "שדה", ישות שיוצר כל מטען והממוקמת במרחב כולו הסובב אותו, כך שההשפעה מתרחשת בזמן סופי וכרוכה באינטראקציות על-פני המרחב שבין המטענים. הטקסט של הנושא הראשון מתאר בקצרה את ההתפתחות ההיסטורית (החל מהמאה ה-17) שהובילה בסופו של דבר לגישת השדה המאוחדת של ג'יימס קלרל מקסוול מ-1864, וממנו ניתן לשאוב הן טיעונים התומכים בגישת הפעולה ממרחק (בעיקר משלב ההתפתחות הראשוני) והן טיעונים התומכים בתפיסת השדה (בעיקר משלב ההתפתחות המאוחר).

הנושא השני הוא המחלוקת ההיסטורית קצרת הימים אך עמוסת הדרמה והיצרים משלהי המאה ה-19 בנוגע לסוג הזרם שבו יש להשתמש לשם אספקת חשמל לצרכני החשמל: זרם ישר (DC) או זרם חילופין (AC). צד אחד של המחלוקת, בראשות הממציא ואיש העסקים הנודע תומס אדיסון, תמך בהולכה באמצעות זרם ישר, שהיתה במובנים מסוימים פשוטה יותר – למשל, מבחינת אחסון וגיבוי במקרה של תקלות. הצד השני, לעומת זאת, בהנהגתו של היזם והמהנדס ג'ורג' וסטינגהאוז, דגל בהולכה באמצעות זרם חילופין, שהיה מבחינות רבות חסכוני יותר (למשל, איפשר שימוש בשנאים להקטנת הפסדי ארגיה בהולכה למרחקים ארוכים). הטקסט של נושא זה מתאר את המחלוקת העזה שהתגלעה בין הצדדים, וגם ממנו ניתן לחלץ טיעונים לטובת (או כנגד) כל אחד מהצדדים.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

מטרות השיעור

<u>מטרות על</u>

- הכרות עם שני נושאים בתחום החשמל הכרוכים בגישות תחליפיות שמבחינה היסטורית היו שנויות במחלוקת: גישת הפעולה ממרחק לעומת תפיסת השדה וזרם ישר לעומת זרם חילופין;
- פיתוח יכולת מציאת טיעונים מתוך קריאת טקסט היסטורי-מדעי;
- פיתוח יכולת טיעון והגנה על עמדה.

<u>מטרות אופרטיביות</u>

- התלמידים יקראו טקסט המתאר שתי עמדות של מדענים בנוגע לתופעות פיזיקליות מתחום החשמל;
- התלמידים יזהו בתוך הטקסט טיעונים בעד ונגד כל אחת מהעמדות;
- התלמידים ינסחו טיעונים בעד ונגד העמדה עליה קיבלו להגן;
- התלמידים יציגו ויטענו את טיעוניהם מול הכיתה;
- התלמידים יסתרו את טענות הצד הנגדי;
- התלמידים ישפטו את איכות הטיעונים של חבריהם לפי מחוון קיים;
- התלמידים יזהו את הטענה המרכזית בדיון לו הקשיבו כשומעים וינסחו אותה.

ידע קודם נדרש של התלמידים

על התלמידים להכיר ולהבין את הנושאים הבאים:

1. מטען חשמלי;
2. כוח חשמלי;
3. זרם חשמלי;
4. מתח חשמלי;
5. אלקטרונים;
6. חומר מוליך / מבודד;
7. שדה;
8. שנאי (מספיקה הכרה בסיסית).

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

תכנון השיעור

<u>מהלך השיעור וחלוקת זמנים</u>

	משך (דקות)
1. הקדמה – נושא השיעור והנחיות כלליות לעבודה	10
2. חלוקה לקבוצות	5
3. קריאת הטקסטים ע"י התלמידים בקבוצות השונות, מציאת הטיעונים ועריכתם	45
4. ניהול דיון ראשון	25
5. ניהול דיון שני	25
5. סיכום (מליאה): הכרזת המנצחים, דיון פתוח בנושאי הדיונים השונים	10
סה"כ:	**120**

עזרי הוראה – ציוד וחומרים נדרשים

עמדת מורה:

- לוח + טושים.

לתלמידים:

- דף הסבר והנחיות לשיעור;
- דפי מידע – לכל קבוצה בהתאם לנושא.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

שיעור דיון – הסברים והנחיות

השיעור הינו שיעור דיון. ישנם שני נושאים לדיון. בכל נושא ישנן שתי עמדות/גישות מנוגדות. לפיכך – יש לחלק את הכיתה ל 4 קבוצות. כל שתי קבוצות תקבלנה טקסט זהה לקריאה אשר מציג שתי עמדות/גישות לבעיה כלשהי. כל קבוצה תתבקש לייצג את אחת העמדות בדיון בע"פ שיתקיים בין הקבוצות. על כל קבוצה להכין טיעונים בעד העמדה אותה היא נתבקשה לייצג וטיעונים נגד העמדה המנוגדת לה.

בעת התנהלות של דיון אחד (בו לוקחות חלק שתיקבוצות), התלמידים בקבוצות האחרות ישמשו כצופים.

גודל קבוצה אידיאלי לדעתנו הוא 3-5 תלמידים. כתלות בגודל הכיתה ניתן לשקול לפצל את הכיתה ל 6 או 8 קבוצות ולנהל את אותו הדיון פעמיים.

סדר הדיון מוצג בסעיף 1 להלן.

1. <u>מבנה הדיון</u>

   הדיון יתנהל בצורה של הצגות <u>מוגבלות בזמן</u> של כל אחד מהצדדים בדיון.

   לכל קבוצה יהיו סה"כ 3 הצגות:

   - הצגה בונה – בה הקבוצה תציג את טענותיה ועמדתה בדיון (3 דקות * 2 קבוצות);
   - הצגה מפריכה – בה הקבוצה תוכל להגיב לטענות הקבוצה הנגדית ולסתור אותן (2 דקות * 2 קבוצות);
   - הצגה מסכמת – סיכום הדיון ותגובה אחרונה לטענות הקבוצה הנגדית. אין להציג טענות חדשות בעת הסיכום (2 דקות * 2 קבוצות).

על הדובר להפסיק לדבר באופן מיידי כשנגמר הזמן המוקצה לכל הצגה.

בין כל הצגה יינתן זמן להתייעצות והכנת הטיעונים להצגה הבאה (5 דקות). כל דיון יימשך סה"כ 24 דקות.

2. <u>מחוון להערכה ואופן קביעת המנצחים</u>

   בתום כל הצגה (בזמן הדיונים של הקבוצה) כל צופה ייתן ניקוד לכל קבוצה, בהתאם למחוון המצורף.

✓ **חשוב!** יש לשים לב כי ההצבעה הינה לפי <u>איכות הטיעונים וההצגה</u> ולא לפי מידת ההסכמה עם הטיעונים המוצגים.

סה"כ כל צופה יכול להעניק לקבוצה עד 8 נקודות, עבור כל הצגה. מורה/מנחה יפעל לפי אותו מחוון אך יכול להעניק פי 2 נקודות (סה"כ 16 נקודות). הקבוצה המנצחת בדיון היא זו שצברה הכי הרבה נקודות.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

3. <u>מטלה לצופים</u>

בנוסף למילוי המחוון, רשמו את הטענה/טענות המרכזיות של כל אחת מהקבוצות.

(הצופים – תלמידים שאינם משתתפים בנושא הדיון הנוכחי).

4. <u>טיפים להצלחה בדיון:</u>

- עבודת הכנה:
  - בחרו את הטיעון המרכזי שלכם. מצאו את הרקע והעובדות התומכות בו;
  - מצאו טיעונים נוספים אשר קשורים לטיעון המרכזי. בררו לעצמכם – כיצד הם קשורים? האם וכיצד הם מחזקים את הטיעון המרכזי? האם ישנו רקע נוסף אותו יש לתת לקהל כדי להשתמש בטיעונים אלו?
  - למדו את עמדתם של תלמידי הקבוצה היריבה. חשבו – מה יכול להיות הטיעון המרכזי שלהם? כיצד אתם יכולים להפריך אותו? כיצד ובמה שונה הטיעון שלכם משלהם?
- מבנה פסקת טיעון - דגם **טע"נ**: טענה – עמדה – נימוק (https://sites.google.com/site/habaabekef/5)
  - **הטענה** לרוב נתונה במטלה. מומלץ להשתמש במשפט מכליל כפתיח לדיון. בשלב זה יש לציין עובדות בלבד (ללא דעה או פרשנות) ולסדר את העובדות לפי סדר הגיוני כלשהו, לבחירתכם (הכללה ופירוט, יתרונות וחסרונות וכו');
  - הבעת **עמדה** לגבי הטענה – מסכים/לא מסכים. יש להדגיש זאת ע"י שימוש במילים מתאימות כגון "לדעתנו...";
  - יש להביא לפחות שני **נימוקים** (או אחד מפורט ומנוסח היטב) ולספק דוגמה הממחישה את הנימוק. יש להסתמך רק על העובדות שסופקו בשלב הטענה;
  - כדי לחדד את המסר השכנועי מומלץ להשתמש במשפטים מכלילים, אוצר מילים מתאים, שאלות רטוריות, חזרות על מילות מפתח, פנייה ישירה ואישית;
  - כדי לסתור ולשלול טיעונים של אחרים ניתן להשתמש בהשוואה והנגדה, הסתייגות ושימוש במילות סיבה ותוצאה.
- קראו היטב את המחוון להערכת הדיון.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

מחוון להערכת עמיתים

קריטריון	רמה גבוהה (2 נק')	רמה נאותה (1 נק')	רמה בסיסית (0 נק')	ניקוד
רקע	הקבוצה תיארה את עמדתה היטב, סקרה את הרקע המתאים באופן מקיף והזכירה את כל הפרטים החשובים לצורך הטיעונים בהמשך	הקבוצה תיארה את עמדתה, אך הסקירה היתה חלקית, השמיטה בין פרט חשוב אחד לשניים שהיה צריך או כדאי להזכיר לצורך הטיעון בהמשך	תיאור עמדת הקבוצה היה לא ממוקד מספיק, לא היתה סקירת רקע מספקת, הושמטו יותר משני פרטים החשובים לצורך הטיעון בהמשך	
איכות ההסברים	הקבוצה שולטת בתוכן, הציגה טענה, עמדה ונימוק, הנימוק כלל קְשָרים לוגיים במקומות הנכונים ("לכן" כאשר באמת יש תוצאה, "בגלל" כאשר יש סיבה וכו'), הביאה דוגמה רלוונטית והציגה סימוכין לטענותיה כאשר הסתמכה על מקורות חיצוניים. הנימוק כולל את העובדות שמחזקות את הדעה של הכותב והינו משכנע	הקבוצה שולטת בתוכן אך השימוש במודל של טענה, עמדה ונימוק, היה חלקי. הקשרים הלוגים שהוצגו אינם מתאימים ו/או לא הוצגו דוגמאות מתאימות ו/או לא ציינו מהם המקורות עליהם הסתמכו	הקבוצה אינה שולטת בתוכן וכן לא השתמשה נכון במודל של טענה, עמדה ונימוק. לא הציגה קשרים לוגיים, דוגמאות או מקורות עליהם הסתמכה	
איכות ההצגה ויצירתיות	הקבוצה דיברה באופן בהיר, הציגה את עמדותיה בצורה מובנת, משכנעת ומעניינת תוך שימוש באוצר מילים שהולם את הנושא, הנמענים והמטרה ובאמצעי שכנוע כגון: פנייה ישירה לנמען, חזרות, שאלה רטורית, נימה אישית. הקבוצה הפגינה יצירתיות מחשבתית בטיעוניה או בדרך הצגתם	הקבוצה הציגה את טיעוניה באופן נאות, עמדותיה היו ברורות ומובנות אך היא לא השתמשה באמצעי שכנוע מיוחדים או בחשיבה יצירתית בהצגת הטיעונים	הקבוצה לא הציגה את טיעוניה באופן ברור, שטף הדיבור היה קטוע והפריע למעקב אחר תוכן הטיעונים, אופן ההצגה היה מונוטוני / יבש / משעמם	
תזמון	הקבוצה עמדה בזמנים שהוקצבו לה לצורך הדיון וניצלה היטב את הזמן שעמד לרשותה	הקבוצה חרגה מעט מהזמנים שהוקצבו לה אך ניהלה היטב את הזמן שעמדה לרשותה ואת חלוקתו לצורך טיעוניה	הקבוצה חרגה מהזמנים שהוקצבו לה וסיימה מוקדם בהרבה או לא הספיקה לסיים את טיעוניה בזמן המוקצב	
			סה"כ נקודות (0-8)	

מבוסס על שילוב של מספר מחוונים מהאתר:

http://www.orianit2.edu-negev.gov.il/nitzanng/sites/homepage/nirit/mahvanim.htm

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

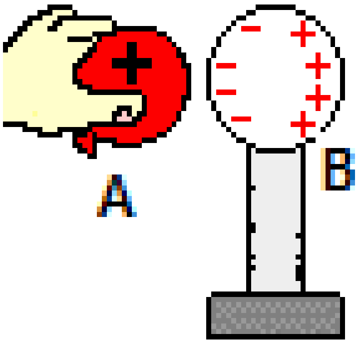
<u>טקסט בסיס לדיון: תפיסת שדה מול גישת הפעולה ממרחק בתורת החשמל</u>

ההיסטוריה של החשמל, בניגוד לענפי פיזיקה אחרים, התאפיינה בכך שעבר זמן רב מאוד בין גילוי התופעות לבין ניסוחה של תיאוריה ראויה-לשמה שמנסה לבאר אותן. כבר היוונים הקדמונים ידעו היטב שאם משפשפים ענבר בצמר, אזי הענבר מושך אליו גופים שונים – בשל מה שמוכר לנו כיום כ"חשמל סטטי". אך רק בתחילת המאה השבע-עשרה, בעקבות האנגלי ויליאם גילברט (1544-1603), הובנו ההבדלים בין תופעות חשמליות ומגנטיות והחלה אט-אט לקרום עור וגידים תיאוריה שעלה בידה להסביר מספר הולך וגדל של תופעות חשמליות. הצלחה ראשונית זו הושגה בעקבות ההכרה כי החשמל הינו סובסטאנס, כלומר חומר מסוים, שהוא הגורם לתופעות הקשורות לחשמל. במאה שלאחר מכן הבינו המדענים כי "חומר החשמל" – שאותו דימו לנוזל כלשהו, שיכול לעבור בין גופים – הוא אחיד ואוניברסלי (בדומה למסה של ניוטון), אך כדי להסביר הן משיכה והן דחייה, הניחו שקיימים שני סוגים שלו (וזאת כמובן בניגוד למסה הניוטונית).

בעקבות הצלחתה הכבירה של תורת הכבידה של ניוטון (שפורסמה ב-1687), ובעקבות ההכרה בחומר החשמלי כסובסטאנס (כלומר דבר חומרי, שאולי שקול למסה) – גברה השאיפה לנקוט אנלוגיה בין כבידה וחשמל. כיוון מחשבה זה זכה להצלחה מסחררת, והוא זה שלמעשה הפך את חקר החשמל מניסיונות איכותיים מגושמים למדי להסביר תופעות שונות לתורה מדעית כמותית של ממש שבעזרת כללים פשוטים ביארה מגוון תופעות גדול. תורה זו נשענה על שלוש הנחות פשוטות בלבד: שקיימים מטענים חיוביים ומטענים שליליים (אלה שני הסוגים שנזכרו לעיל, הדרושים לביאור משיכה ודחייה); שבין כל זוג מטענים שורר כוח חשמלי (שנחלש ככל שהמרחק ביניהם גדול יותר), שכיוון כוח זה תלוי בסוג המטענים (חיובי או שלילי); ושבחומר מוליך (בניגוד למבודד) מטענים יכולים לנוע בחופשיות.

בסיוע הנחות אלה עלה בידי מדעני המאה השמונה-עשרה להסביר תופעות שלפני כן שום תורה חשמלית לא הצליחה להסביר. למשל, הגרמני פרנץ אפינוס (1724-1802) ביאר באמצעותן כיצד גוף טעון במטען חיובי (נגדיר גוף זה כ-A) מושך אליו גוף מוליך ניטרלי (B): המטען החיובי של A מפעיל כוח דחייה על המטען החיובי של B, כך שהמטען החיובי של B מסתדר בצד המרוחק של B (ביחס ל-A), בעוד שהמטען השלילי של B מצוי בצד הקרוב ל-A (ראו איור מס' 1); מאחר שעוצמת הכוחות החשמליים נחלשת עם המרחק, כוח המשיכה שבין המטען החיובי של A למטען השלילי של B חזק מכוח הדחייה שבין המטענים החיוביים של A ו-B, כך שבסופו של דבר גופים A ו-B נמשכים זה לזה.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.



איור 1. מוליך טעון חיובית מקורב למוליך ניטראלי מבחינה חשמלית

סביב 1785 הוכיח הצרפתי שארל אוגסטן דה-קולון (1806-1736) שהכוח החשמלי בין זוג מטענים פרופורציונלי למכפלת המטענים ונחלש בהתאם לריבוע המרחק ביניהם, בדיוק כשם שכוח הכבידה הניוטוני פרופורציונלי למסות ונחלש בהתאם לריבוע המרחק בין המטענים. לרגע נראה היה אפוא שתופעות החשמל והמגנטיות ניתנות לתיאור באמצעות מודל הכוח הניוטוני, כלומר במסגרת עולם המושגים שהיה מקובל כבר קודם לכן. אולם באותן שנים נתגלתה תופעה חדשה, הזרם החשמלי, שאותו גילה במקרה פרופסור איטלקי לאנטומיה בשם לואיג'י גלוואני (1798-1737). גלוואני הבחין שכששתי מתכות שונות נוגעות הן בגופה של צפרדע מנותחת והן זו בזו, מתכווצות רגלי הצפרדע בעוצמה. בן ארצו אלסנדרו וולטה (1827-1745) שחקר את התופעה הבין שמקורה במגע בין שתי המתכות, והוא בנה אפוא (סביב 1800) מתקן שבו הוחלף גוף הצפרדע בנייר טבול בחומצה, וכדי להגביר את ההשפעה הוא הניח זו על גבי זו מספר רב של דיסקיות אבץ, נחושת ונייריות נוספים טבולים בחומצה. כך יצר וולטה את הסוללה החשמלית הראשונה, כלומר מכשיר שיצר זרם חשמלי יציב ובכך אפשר לחקור ביעילות את תופעת החשמל הזורם (שאיננו אלא תנועה של מטענים חשמליים).

זאת ועוד, עד מהרה גילו המדענים שלא זו בלבד שסידור חומרים כימיים בסדר מסוים מעניק זרם חשמלי, אלא שניתן אף להפוך את סדר הפעולות: זרם חשמלי יכול להפריד בין יסודות כימיים של תמיסה ואפילו מים. המרה הדדית זו בין כוח חשמלי לכימי איננה ניתנת לביאור במסגרת של מודל ניוטוני של פעולה ממרחק, והיה ברור למדענים שכדי להבינה נדרשת גישה שאיננה נשענת על ניתוח תופעות בודדות בניסיון להשתיתן על חוקיות מתמטיות פשוטה, אלא מנסה לנקוט ראייה כוללת יותר ולהבין אילו גדלים נשמרים בעת התרחשות תהליכים שכרוכים בהם כוחות מסוגים שונים. במהלך המאה התשע-עשרה אכן החלו המדענים לחקור גודל מעין זה – אנרגיה – ולנסות לחבר באמצעותו יחדיו את שלל הכוחות השונים הקיימים בטבע. מאמץ זה הוביל בשנת 1840 לניסוח חוק שימור האנרגיה, שמיקם

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

את תופעות האור, החום, החשמל והמגנטיות בתוך מסגרת של עקרונות כלליים. ואולם בכל הנוגע לחשמל ומגנטיות, פריצת דרך משמעותית נרשמה עשרים שנה לפני כן.

בשנת 1820 גילה הדני הנס כריסטיאן ארסטד (1777-1851) שזרם חשמלי העובר בחוט מוליך גורם לסיבובה של מחט מגנטית הנמצאת בסמוך. אך בניגוד לציפיות המוקדמות שנשענו על המודל הניוטוני המוכר, קוטבי המחט לא נמשכו אל החוט, אלא שאפו להביא את המחט לכך שתהיה מאונכת לחוט. יתר על כן, כשהמחט היתה מונחת מעל החוט המוליך היא הסתובבה בכיוון הפוך לכיוון שבו הסתובבה כאשר ניצבה מתחתיו; המסקנה היתה שהכוח המגנטי שיוצר החוט כביכול מקיף אותו במעגל. לאחר מכן חקר הצרפתי אנדרה-מארי אמפר (1775-1836) את התופעה, והסיק שאכן יש קשר יסודי בין החשמל והמגנטיות: המגנטיות איננה תופעה עצמאית, אלא היא נוצרת כתוצאה מתנועתם של מטענים חשמליים, כלומר מקיומו של זרם חשמלי. אמפר הוסיף וביאר את פעולתו של המגנט הרגיל באמצעות ההשערה שבחומר הממוגנט יש זרמים חשמליים קבועים, ובאמצעות יישום חוק קולון (בסיוע כלים מתמטיים מתוחכמים) למקרים שונים הצליח לפתח חוקים חשובים בתורת החשמל.

אמפר אף גילה שבין שני קטעים של חוט מוליך, שעוברים בהם זרמים חשמליים, נוצרים כוחות משיכה או דחייה, שמקורם במגנטיות הנוצרת סביב קטעי החוט. הוא ניסה לתאר כוחות אלו בסיוע מודל ניוטוני, אולם עד מהרה גילה שתיאור כזה תקף רק עבור כיוונים יחסיים מסוימים של קטעי החוט; המודל הניוטוני, ומודלים מתמטיים מורכבים יותר, לא סייעו לאמפר וממשיכיו לתאר בהצלחה את כל הכוחות החשמליים הנוצרים באופן זה. לבסוף נפתרה הבעיה בעזרת גישה שונה לחלוטין, שנודעה לה השפעה מכרעת על התפתחותה העתידית של הפיזיקה: הגישה החדשה התבססה על מושג השדה של הפיזיקאי האנגלי מייקל פאראדיי (1791-1867).

פאראדיי החל את דרכו כשוליית כורך, ומעולם לא רכש השכלה מדעית תיאורטית של ממש. בהיעדר יכולת לערוך את החישובים המתמטיים המורכבים הדרושים לניתוח יעיל של תופעות חשמליות (לדוגמה, כמו אלה שביצע אמפר), נאלץ פאראדיי לבסס את מחקרו על האינטואיציה הפיזיקלית שלו גרידא. ואינטואיציה זו הושפעה מהתופעה הבאה: כשמפזרים נסורת ברזל סביב מגנט, פירורי הנסורת מסתדרים בקווים מעוגלים המוליכים מקוטב אחד של המגנט אל הקוטב השני. כדי לייצג קווים אלה המציא פאראדיי את מושג "קווי הכוח" (המכונים כיום בדרך-כלל "קווי שדה") הנמצאים במרחב שסביב המגנט, ומוליכים מקוטב אחד של המגנט לקוטב השני. פאראדיי סבר שהקווים הללו שואפים להתקרב זה לזה או להתרחק זה מזה, שאיפה שגורמת לקטבים להימשך או להידחות. למערכת קווי הכוח שהקוטב המגנטי יוצר במרחב שסביבו קרא פאראדיי בשם "שדה מגנטי". בדומה לכך הסביר פאראדיי את כוחות המשיכה והדחייה של מטענים חשמליים באמצעות השערת קיומו של

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

"שדה חשמלי" אקוויוולנטי, העשוי אף הוא מ"קווי כוח" היוצאים ממטען חשמלי אחד ומגיעים לאחר (או לאינסוף).

על-סמך ניסיונותיו ותצפיותיו המרובים בחשמל ומגנטיות, הסיק פאראדיי שלמטרת ביאור התופעות הללו יש לנקוט גישה המכירה בחשיבות התווך המצוי בין מטענים (או מגנטים) ושההשפעה החשמלית או המגנטית חייבת להתרחש בהדרגה ולא בבת אחת. אלה התצפיות העיקריות ששיכנעו אותו בכך:

1. קווי השדה בין מטענים (או קטבי מגנט) אינם ישרים, אלא הם עקומים. פאראדיי התקשה להבין כיצד כוח הפועל באמצעות פעולה מיידית ממרחק יכול לפעול באמצעות קווים עקומים כאלה. הוא שיער לפיכך שהסיבה לעקמומיות זו עשויה להיות קיומו של תווך דליל מסוים (שכונה אתר) השורר בכל נקודה במרחב, כאשר ההשפעות החשמליות או המגנטיות מתחוללות תוך כדי אינטראקציה עם תווך זה.

2. כאשר פאראדיי הכניס פיסת חומר דיאלקטרי (מבודד) בין לוחותיו של קבל טעון, הוא גילה שכמות המטען על הלוחות שונה מאשר המטען שנצבר עליהם בנוכחות אוויר בלבד בין הלוחות. פאראדיי הסיק שהאינטראקציה בין המטענים (ההפוכים בסימנם) שעל שני לוחות הקבל אינה הגורם הבלעדי להתרחשויות, ושהתווך שביניהם ממלא אף הוא תפקיד משמעותי.

3. בנוגע להשראת זרם חשמלי בלולאה מוליכה, כאשר חלק ממנה מונע כך שהוא חותך קווי שדה מגנטי, טען פאראדיי: "לא ייתכן שעצם התנועה כשלעצמה היא שהפיקה את הזרם הזה: חייב להתקיים מצב מסוים מסביב למגנט, מצב שתלוי במגנט זה והוא שריר וקיים בתחום המרחב שבו מצויה הלולאה."

פאראדיי מעולם לא הסביר מהו בדיוק טיבם של "קווי הכוח" שלו, אולם ברור היה לכול שגישתו ביטלה את ההכרח להאמין שגוף יכול להשפיע ממרחק, כלומר יכול לפעול במקום שאיננו נמצא (רעיון שאפילו ניוטון עצמו התקשה לקבל). גישת השדה של פאראדיי הציעה נקודת מבט שונה לחלוטין. נתבונן, לדוגמה, בשני מטענים חשמליים הפוכים בסימנם, המושכים זה את זה. אנו יכולים לתאר את כוח המשיכה ביניהם על פי חוק קולון, כלומר להניח שהמטען הראשון מפעיל ממרחק כוח משיכה על המטען השני ולהפך. פאראדיי מציע דרך אחרת לתיאור התופעה: המטען החשמלי הראשון משרה במרחב סביבו ישות פיזיקלית חדשה, השדה החשמלי, והשדה – המצוי בכל נקודה במרחב, ככל שהשפעתו מגעת – הוא המפעיל כוח על המטען השני. כל נקודה במרחב שבו משפיע המטען מתאפיינת בעוצמה ובכיוון של השדה, וכל נקודה כזאת מצויה באינטראקציה עם כל הנקודות הסמוכות לה. בניגוד לגישת הפעולה ממרחק, המתמקדת רק בגדלי המטענים היוצרים את הכוחות

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

החשמליים ובמרחקים ביניהם, גישת השדה מביאה בחשבון גם את התווך ואת הגיאומטריה של המרחב החוצץ בין המטענים. מובן שתיאור זה נכון גם בכיוון ההפוך, כלומר המטען החשמלי השני מפעיל, באמצעות השדה שהוא יוצר במרחב סביבו, כוח על המטען הראשון (הזהה, בהתאם לחוק השלישי של ניוטון, לכוח שהמטען הראשון מפעיל על השני).

חשיבותה של הגיאומטריה של התווך – או המרחב – המשתרע בין המטענים מומחשת במה שמכונה היום "חוק גאוס", המאפשר לפתור בעיות אלקטרוסטטיות בסיוע משטחים סגורים דמיוניים (הנבחרים בקפידה) סביב מטענים, המכונים מצדם "משטחי גאוס". חוק זה נקרא על שמו של הגרמני קרל פרידריך גאוס (1855-1777), מגדולי המתמטיקאים בכל הזמנים, שלא טמן ידו בצלחת גם בענפי הפיזיקה השונים. גאוס חקר לעומק את מושג ה"שטף" של מכאניקת הזורמים, כלומר הענף החוקר נוזלים וגזים, את אופן תנועתם, החוקים הפועלים עליהם וכו'. השטף מוגדר כנפח הזורם (כלומר הנוזל או הגז) העובר דרך שטח חתך כלשהו ליחידת זמן, אך ניתן להראות בקלות כי גודל זה שווה גם למכפלת שטח החתך במהירות הזורם. בהתאם לגישה שרווחה בתקופתו, לחפש אנלוגיות בין ענפים פיזיקליים שונים (למשל מכאניקת הזורמים, אלקטרוסטטיקה ותורת החום), דימה גאוס את וקטור המהירות של נוזלים לווקטור השדה החשמלי, וכך הגיע למושג השטף החשמלי – המכפלה (הסקלרית) של וקטור השדה בווקטור השטח. גאוס הבין שאם נגדיר משטח תלת ממדי סגור – בצורה כלשהי – מסביב לאוסף מטענים קבוע, כי אז השטף החשמלי שיעבור דרך כל המשטח הזה לא יהיה תלוי כלל בממדי המשטח או בצורת המשטח, אלא יימצא ביחס ישר לכמות המטענים המצויים בתוך המשטח (בלבד). באמצעות חוק גאוס, הקושר באופן כמותי ומדויק בין מטענים, משטחים, שדות ושטפים, ניתן להסיק באופן מיידי (למשל) את המסקנה החשובה שמטען במוליך חייב להתרכז על פניו החיצוניים בלבד, וכן ניתן לפתור בעזרתו בעיות אלקטרוסטטיות שונות שמבחינה טכנית אינן ניתנות (או קשות מאוד) לפתרון באמצעות חוק קולון. יש לציין שגאוס עצמו מתח ביקורת חריפה על הנחת הפעולה ממרחק העומדת ביסוד חוק קולון (והתקבלה ללא היסוס על-ידי רבים ממפתחיו), ושאף כל ימיו לפתח תיאוריה שמבארת את תופעות האלקטרוסטטיקה באמצעות פעולות המתקדמות בהדרגה (כמו האור). הואיל ולא הצליח בכך, לא טרח מעולם לפרסם ברבים את הישגיו בתורת החשמל (כולל "חוק גאוס" עצמו).

בעקבות מושג השדה של פאראדיי ותומכיו (כמו גאוס), השאלה שמתעוררת מיד היא מה טיבו של ה"אתר", החומר הדקיק שבעיני רוחם של פאראדיי ועמיתיו ממלא את כל המרחב ומעביר את ההשפעות החשמליות והמגנטיות. אמנם, היה נהוג זה מכבר לשער שחומר מסוג דומה מעביר את גלי האור. כלומר, מי שקיבלו את רעיונותיו של פאראדיי, לא התקשו להניח שהמרחב מלא באתר של גלי האור ובקווי השדה החשמלי והמגנטי גם יחד. סביר היה לנסות

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

לאחד שני מושגים אלו לתווך יחיד, הממלא את המרחב ומוליך את כל סוגי ההשפעות הפיזיקליות. ואכן, כבר פאראדיי סבר שגלי האור הם תנודות העוברות בקווי השדה שלו, כמו תנודות של מיתרים, אך הוא לא הצליח לפתח את הרעיון הזה לתיאוריה אופטית מוצלחת. מודל תיאורטי המאחד בין מושג האתר של האור לבין קווי השדה של פאראדיי פותח מאוחר יותר על-ידי המדען הסקוטי ג'יימס קלרק מקסוול (1831-1879).

מקסוול פיתח את השדה של פאראדיי למודל מורכב מאוד מבחינה מתמטית של אתר אלקטרומגנטי, המוליך גם את ההשפעות החשמליות וגם את ההשפעות המגנטיות. כדי להעניק בסיס פיזיקלי מוצק לקווי השדה, ניסה מקסוול למצוא להם מודל מכאני, כלומר מערכת של חומר בתנועה שתחקה את פעולתם. על סמך המודל המכאני הזה, שהיה מסובך עד מאוד, הצליח מקסוול לפתח מספר משוואות עבור התנהגות השדה האלקטרומגנטי סביב זרמים חשמליים. המשוואות תיארו היטב את התופעות שהיו ידועות אז (וכללו, אגב, את חוק גאוס), אולם היו להן גם פתרונות שייצגו תופעות אלקטרומגנטיות חדשות. הפתרונות האלו הם תנודות מחזוריות המתפשטות כגלים ממקום הימצאם של זרמים חשמליים מתנודדים, וכך מעבירות אנרגיה ממקום למקום. כשחישב מקסוול את מהירות התפשטותן של התנודות האלו באתר על סמך הקבועים החשמליים והמגנטיים שהיו ידועים בזמנו, הוא הגיע לתוצאה מוכרת - כ-300,000 קילומטרים בשנייה, כלומר מהירות האור. מקסוול היה יכול אפוא להציע הסבר משכנע לטיבם של גלי האור: אלו גלים של האתר האלקטרומגנטי, שקיומם משתמע מהמשוואות שהוא מצא בחקירת המודל המכאני שלו. כך הצליח מקסוול לשלב את האופטיקה, החשמל והמגנטיות לתיאוריה יסודית אחת. כשם שההכרה בחשמל כ"סובסטאנס" סללה (במאה השבע-עשרה, ערש תורת החשמל) את הדרך לזיהוי ההבדלים שבין תופעות חשמליות ומגנטיות, כך הוביל מושג השדה את המדענים לגילוי האלקטרומגנטיות, כלומר לאישוש החשד (שכבר עלה במוחו של פאראדיי) שהחשמל והמגנטיות אינם אלא (ככלות הכול) היבטיה השונים של אינטראקציה פיזיקלית אחת.

מקסוול מצדו ידע שהמודל המכאני שלו איננו מספק מבחינה פיזיקלית, אולם במשוואות עצמן הוא לא פיקפק. לפיכך, כאשר הציג אותן ב-1864, הוא עשה זאת בלי להסתמך על המודל המכאני שכה היטיב לשרתו. היינריך הרץ אכן אימץ משוואות אלה (תוך התעלמות מוחלטת מהמודל המכאני שעמד בבסיסן), וב-1887 ניסה לבחון את תקפותן באמצעות יצירת תנודות במעגל חשמלי. ממשוואות מקסוול ניתן להסיק שתנודות כאלו יגרמו ליצירת גלים אלקטרומגנטיים הדומים במהותם לגלי האור. אולם מכיוון שהמכשירים היוצרים אותם הם גדולים יחסית (מסדר גודל של כמה דצימטרים) הרי שאורך הגלים "המלאכותיים" האלו צריך להיות גדול בהרבה מזה של האור הנראה (ששיעורו בסביבות כמה עשיריות של אלפית המילימטר). המכשירים פעלו היטב, והגלים הופיעו: התנודות במעגל של הרץ גרמו להופעת

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

ניצוצות בין קצותיו של פתח קטן בלולאת מתכת שהיתה מרוחקת כמה מטרים מהמעגל הראשון. משהו – מן הסתם הגלים של מקסוול – עבר בין שני המעגלים, ונשא את האנרגיה הדרושה ליצירת הניצוצות. כיום היינו קוראים למעגל הראשון "משדר" וללולאת המתכת "מקלט": הגלים האלקטרומגנטיים הארוכים, שמשוואות מקסוול חזו את קיומם והרץ מצאם בניסוי, הם גלי הרדיו.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

תפיסת שדה מול גישת הפעולה ממרחק בתורת החשמל - למורה

<u>טיעוני תומכי שדה:</u>

בעד שדה	**נגד פעולה ממרחק**
זרם חשמלי העובר בחוט מוליך גורם לסיבובה של מחט מגנטית הנמצאת בקרבתו. אולם בניגוד לציפיות המוקדמות שהונעו על ידי המודל הניוטוני, קוטבי המחט לא נמשכו אל החוט, אלא שאפו להגיע למצב שבו המחט מאונכת לו	לא מסביר המרה הדדית בין כוח חשמלי לכימי
כאשר מפזרים נסורת ברזל סביב מגנט, פירורי הנסורת מסתדרים בקווים מעוגלים המוליכים מקוטב אחד של המגנט אל הקוטב השני	אמפר גילה גם שבין שני קטעים של חוט מוליך, שעוברים בהם זרמים חשמליים, פועלים כוחות משיכה או דחייה, שמקורם במגנטיות הנוצרת סביב קטעי החוט. הוא ניסה לתאר כוחות אלו בעזרת מודל ניוטוני, אולם מסתבר שתיאור כזה תקף רק עבור כיוונים יחסיים מסוימים של קטעי החוט; כאשר מניחים אותם בכיוונים אחרים פעולת הכוחות היא מסובכת יותר. אמפר וממשיכיו ניסו למצוא מודלים מתמטיים מורכבים שיתארו את הכוחות האלו, אולם בלא הצלחה
קווי השדה בין מטענים (או קטבי מגנט) אינם ישרים, אלא הם עקומים	ניתן לפתור בעזרתו בעיות אלקטרוסטטיות שונות שמבחינה טכנית אינן ניתנות (או קשות מאוד) לפתרון באמצעות חוק קולון
התווך שבין לוחות קבל ממלא תפקיד משמעותי	
חשיבותה של הגיאומטריה של התווך – או המרחב – המשתרע בין המטענים מומחשת במה שמכונה היום "חוק גאוס", המאפשר לפתור בעיות אלקטרוסטטיות בסיוע משטחים סגורים דמיוניים (הנבחרים בקפידה) סביב מטענים, המכונים מצדם "משטחי גאוס"	
מעבר תופעות חשמליות מצריך "אתר" שמתאים גם לתפיסה של מעבר אור באותה התקופה	
איפשר למקסוול לפתח את המשוואות שהובילו לתורת האלקטרומגנטית הכוללת	

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

טיעוני תומכי פעולה ממרחק:

בעד פעולה ממרחק	נגד שדה
דומה לתורת הכבידה של ניוטון – אחידות בטבע	המודל המלא של השדה (מקסוול) מורכב מאוד מבחינה מתמטית
ביאור פשוט ומיידי של תופעות אלקטרוסטטיות רבות (כמו האופן שבו אפינוס הסביר מדוע גוף חיובי מושך מוליך ניטרלי)	השאלה שנשאלת (עם פיתוח רעיון השדה): מהו טיבו של ה"אתר" שמעביר את ההשפעות החשמליות והמגנטיות? (התשובה הלא פשוטה להבנה: בעצם השדות החשמליים והמגנטיים)
גישת הפעולה ממרחק (שכרוכה בראיית החשמל כ"סובסטאנס") מאפשרת להבין היטב את ההבדלים בין תופעות חשמליות ומגנטיות. זהו יתרון שרלוואנטי לתקופה שבה החל חקר החשמל המודרני (המאה ה-17); רק עם התקדמות משמעותית בהבנת החשמל והמגנטיות מאפשרת גישת השדה להבין את הזיקה ההדוקה (המורכבת) שבעצם יש בין חשמל ומגנטיות	מצריך מושג נוסף - שטף
ניתן למדידה כמותית פשוטה יחסית – הם ידעו למדוד גודל של כוח, לא ידעו למדוד עוצמת שדה	

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

טקסט בסיס לדיון: מלחמת הזרמים – זרם ישר מול זרם חילופין

"מלחמת הזרמים" היתה סדרה של אירועים שהתרחשו סביב הפיתוח החלוצי של שתי מערכות הולכת החשמל המתחרות בארה"ב, בסוף שנות השמונים ותחילת שנות התשעים של המאה התשע-עשרה. המחלוקת בין הצדדים כללה תחרות מסחרית חריפה, ויכוח על יעילות ובטיחות בהולכת חשמל, וכן קמפיין תקשורתי-תעמולתי רעשני שצמח מהם.
השחקנים הראשיים במחלוקת היו החברה "אלקטריק לייט" בראשות הממציא ואיש העסקים הידוע תומס אדיסון (1931-1847), שצידדה בהולכה באמצעות זרם ישר (DC), והחברה המתחרה למוצרי חשמל בראשות היזם והמהנדס ג'ורג' וסטינגהאוז (1914-1846) – שצידדה בהולכה באמצעות זרם חילופין (AC). המחלוקת התפתחה תוך כדי הפיתוח הראשוני וההתפשטות המהירה של הולכה המבוססת על זרם החילופין והעדפתה לבסוף על-פני הולכה באמצעות זרם ישר. "מלחמה" סוערת זו כללה שלושה היבטים: תחרות מסחרית עזה וגלויה בין שתי חברות גדולות לייצור מוצרי חשמל שכל אחת מהן שאפה לשכנע את קהל הצרכנים (פרטיים וממסדיים כאחד) בעדיפות הטכנולוגיה שלה; פחד הולך וגובר בקרב הציבור הרחב ממוות באמצעות חשמול על-ידי מתח גבוה (שמתקבל בשיטת זרם החילופין); וויכוח סוער שהיה כרוך בתככים רבים מאחורי הקלעים סביב הנהגתו הראשונה של הכיסא החשמלי כאמצעי חדיש להוצאה להורג.

החל מאמצע שנות ה-70 של המאה התשע-עשרה הוקמו לראשונה מערכות תאורת רחובות בהיקף גדול. חלק ממערכות תאורת הרחובות היה מבוסס על זרם חילופין, אך ב-1882 המציא אדיסון מערכת להולכה חשמלית המבוססת על זרם ישר שנועדה לשמש בבתים פרטיים ובמפעלים ולהחליף את מערכות התאורה הישנות המבוססת על גז או נפט. זרם ישר עבד היטב עם נורות להט, צרכני החשמל העיקריים של אותם ימים. במערכות של זרם ישר ניתן היה להשתמש בקלות בסוללות אחסון, שסייעו באספקת מתח יציב וכן גיבוי במקרה של תקלות בפעולת הגנרטורים. אדיסון המציא מונה שאיפשר לחייב צרכנים בהתאם לשיעור הצריכה שלהם, ומונה זה עבד רק עם זרם ישר.

ב-1886 החל ג'ורג' וסטינגהאוז לבנות מערכת המבוססת על זרם חילופין שהשתמשה בשנאי להגדלת המתח עבור הולכה לטווח רחוק ולהנמכתו מחדש לפני מעבר החשמל לבתים לשימוש הצרכנים. זו היתה שיטה יעילה יותר וזולה יותר שהתחרתה ישירות במערכת ההולכה שפיתח אדיסון. בעקבות הצלחת מערכת זרם החילופין של וסטינגהאוז ואימוצה על-ידי יותר ויותר חברות מתחום החשמל, החלה החברה של אדיסון לטעון (בתחילת 1888) שזרם חילופין הוא מסוכן וההולכה המבוססת עליו פחות יעילה מאשר הולכת זרם ישר.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

הסבר קצר, מהו זרם ישר: זרם חשמלי הוא כידוע תנועה של אלקטרונים. האלקטרונים במתכת, לדוגמה, הם יחסית חופשיים לנוע בתוך החומר, אבל ללא הכוונה הם נעים לכל הכיוונים באופן אקראי כך שכל זרם אלקטרונים לכיוון מסוים מתבטל על ידי זרם בכיוון ההפוך. אך אם מפעילים מתח חשמלי על המוליך, האלקטרונים ינועו לכיוון אחד באופן מסודר. כיוון התנועה תלוי בכיוון של המתח החשמלי: האלקטרונים השליליים ינועו לכיוון החלק החיובי, הפלוס, של המתח. בזרם ישר, הזרם נע תמיד לאותו כיוון.

ומהו זרם חילופין? אם בזרם ישר הזרם נע תמיד לכיוון אחד, בזרם חילופין הוא מחליף כיוון כל הזמן: פעם קדימה, פעם אחורה. שינוי הכיוון הזה מתרחש עקב שינוי המתח על הכבל: הרי תמיד האלקטרונים השליליים נמשכים למתח החיובי. הקוטב החיובי של המתח מצוי לעתים בצד אחד של הכבל, ולפרקים בצד השני.

זרם החילופין הומצא למעשה על-ידי גדול מהנדסי החשמל בכל הזמנים: ניקולה טסלה (1943-1856), אמריקאי ממוצא סרבי, שתחילה עבד אצל אדיסון אך הסתכסך עמו ועזב, ולאחר מכן שקד על פיתוח טכנולוגיית הולכת החשמל בזרם חילופין בחסות חברת וסטינגהאוז.

לזרם ישר, ידע טסלה, יש כמה חסרונות משמעותיים, בעיקר בהקשר של העברת חשמל למרחקים. הסיבה היא שהחשמל מיוצר בגנרטור ומועבר לביתנו דרך תיילים (כבלים) עשויים מנחושת (בנחושת יש הרבה אלקטרונים חופשיים באופן יחסי ולכן היא נחשבת למוליך חשמל טוב). הגנרטור, תילי ההולכה והצרכן מחוברים ביניהם בטור. לכן, חלק מהאנרגיה החשמלית המופקת בגנרטור אמנם מגיע אל הצרכן, אך חלק ממנה מתבזבז בצורת חום בתילי ההולכה. מאחר שהתילים והצרכן מחוברים ביניהם בטור, היחס בין האנרגיות המתפתחות בצרכן ובתילים שווה ליחס שבין ההתנגדויות שלהם. ההתנגדות של מוליך נמצאת ביחס ישר לאורך המוליך. כל עוד המקור קרוב לצרכן, לדוגמה הסוללה והנורה בפנס, ההתנגדות של התילים זניחה יחסית להתנגדותו של הצרכן, כך שרוב ההספק המופק במקור מגיע אל הצרכן (חלק מההספק מתבזבז גם בתוך המקור, בגלל התנגדותו הפנימית). לא כך המצב ברשת החשמלית. לעתים, מרחק הצרכן מתחנת הכוח הוא מאות ואף אלפי ק"מ. לכן ההתנגדות הכוללת של תילי ההולכה במקרים אלה גדולה מאוד. כתוצאה מכך, חלק ניכר של ההספק המופק בגנרטור מתבזבז בתילי ההולכה, וההספק המגיע לצרכן הוא קטן מאוד.

הפסד ההספק בתילים שהתנגדותם הכוללת היא R, ובהם זורם זרם שעוצמתו I, נתון על-ידי הנוסחה I^2R. ההתנגדות R של תיל נתונה על-ידי הנוסחה:

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

לכן, כדי להקטין את ההתנגדות R, ניתן לנקוט את הצעדים הבאים:

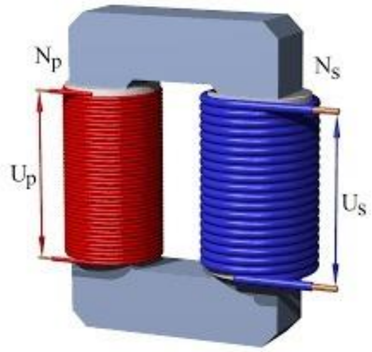
(1) נוכל להקטין את ההתנגדות הסגולית של התיל אם נייצר תילי הולכה העשויים מכסף במקום מנחושת. הבעיה היא שכסף יקר מנחושת.

(2) נוכל להגדיל את שטח החתך S של התילים המוליכים. הבעיה היא שצעד כזה ידרוש כמות חומר גדולה יותר, ומספר רב יותר של עמודי חשמל שייתמכו בתילים הכבדים.

(3) נוכל להקטין את אורך התילים המוליכים אם נבנה תחנות כוח שתהיינה קרובות לצרכנים. הבעיה היא שנצטרך לבנות הרבה מאוד תחנות כוח.

מכיוון שכל הפתרונות להקטנת ההתנגדות R של התילים המוליכים אינם כדאיים כלכלית, הפתרון המבוקש מחייב להקטין במידה ניכרת את עוצמת הזרם I בתילים. בהתאם לנוסחה של ההספק המתפתח במוליך נושא זרם $P=I^2R$, אם נקטין את הזרם פי שניים, ההספק המתבזבז על התיל יקטן פי ארבעה.

אם במקום זרם ישר הגנרטור ייצר זרם חילופין, נוכל להקטין את הזרם בעזרת רכיב שנקרא שנאי, ורק לפני החיבור לצרכן, להגדילו שוב באמצעות שנאי נוסף. שנאי הוא רכיב חשמלי המורכב משני סלילים חשמליים המלופפים על ליבת ברזל משותפת (ראו איור 1).



איור 1 . שנאי

שינויי זרם באחד הסלילים גורמים לשדות חשמליים ומגנטיים משתנים המשרים מתח על הסליל השני. על-פי חוק פאראדיי, יחס מספרי הליפופים בשני הסלילים הוא כמו יחס המתחים ביניהם והפוך ליחס הזרמים. כך ניתן לשנות כל מתח לכל מתח. בשל העובדה ששינויי הזרם בסליל הראשון הם אלה שגורמים להשראת המתח בסליל השני, אי אפשר לעבוד עם שנאי בזרם ישר, שכן זהו זרם קבוע בזמן.

זרם החילופין המיוצר בתחנת הכוח יוצר מתח חילופין נמוך, וזרם חילופין גבוה. השנאי שמחבר בין הגנרטור לתיילים המוליכים מעלה את המתח ומוריד את הזרם ולכן ההספק המתבזבז על התיילים קטן ($P=I^2R$). התילים המוליכים מחוברים לצרכן דרך שנאי נוסף שבתורו מוריד בחזרה את המתח ומעלה את הזרם.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

ההספק החשמלי, כלומר האנרגיה ליחידת זמן, הוא מכפלת הזרם במתח, ומחוק שימור האנרגיה נובע שההספק המגיע לצרכן לא יכול להיות גדול מזה שמיוצר בתחנה. מהקשר P=IV נובע שהגדלת מתח גורמת להקטנת הזרם ולהפך.

דוגמה: נוכל לקבל הספק של 4 ואט (יחידת ההספק) אם המתח הנופל על המוליך שווה ל-2 וולט (יחידת המתח) והזרם הזורם בו שווה ל- 2 אמפר (יחידת הזרם), או אם המתח הנופל על המוליך שווה ל-4 וולט והזרם הזורם בו שווה ל-1 אמפר.

כיוון שההפסדים על קו נחושת תלויים כאמור אך ורק בזרם העובר דרכו ולא במתח, ייצור חשמל בגנרטור של זרם חילופין מאפשר העברה יעילה יותר של האנרגיה, משום שבאמצעות שנאים נוכל להקטין את הזרם בתילים שמחברים בין תחנת הכוח והצרכן. העלאת המתח באמצעות שנאי לעשרות אלפי וולטים מקטינה את הזרם בתילים בצורה משמעותית ולכן מצמצמת מאוד את הפסדי האנרגיה. הזרם הנמוך מאפשר שימוש בתילי נחושת דקים וארוכים לצורך נשיאת הזרם מתחנת הכוח לבית הלקוח. בבית הלקוח, המתח הגבוה יומר חזרה למתח נמוך באמצעות שנאי נוסף. כמו כן, השימוש בשנאי ובזרם החילופין מאפשר קבלת מתחים שונים שמתאימים למכשירים שונים מתחנת כוח אחת שיוצרת מתח אחד.

כיוון שמערכות ה-AC (זרם חילופין) המשיכו להתפשט על חשבון מערכות DC (זרם ישר), מצבה של חברת אדיסון הלך והחמיר. מחיר הנחושת עלה, מה שהוסיף להוצאות שהיו כרוכות במערכות ה-DC למתח נמוך של אדיסון, שדרשו חוטי נחושת עבים הרבה יותר מאשר מערכות AC של מתח גבוה יותר. למעשה הולכת זרם ישר היתה יעילה רק בערים גדולות מרובות-אוכלוסין, שבהן כבלי נחושת באורך נתון יכלו להעביר חשמל ליותר צרכנים; במכרזים של העיירות והערים דלות האוכלוסין זכו לפיכך מערכות ה-AC ש"זללו" פחות נחושת. המכירות של אדיסון הלכו וצנחו ככל שהוא הפסיד ביותר מכרזים ביישובים שהעדיפו מערכות AC זולות יותר.

עמיתיו של אדיסון ומהנדסים מהחברה שלו עצמו ניסו לשכנעו לעבור לטכנולוגיית AC, אך הוא התנגד לכל המאמצים לשכנעו. הוא האמין שהמתחים הגבוהים המשמשים במערכות AC מסוכנים ושיעברו שנים רבות עד שניתן יהיה לפתח מערכות AC יעילות ובטוחות לשימוש. הוא דאג שמא מוות הנגרם בידי מערכת AC שהותקנה בצורה שגויה יעכב את השימוש בחשמל בכלל. אדיסון הבין היטב כיצד פועלות מערכות AC. מספר מאפיינים לא יעילים שלהן (כמו למשל הפסדי האנרגיה של השנאים, שהיו משמעותיים בשנאים של אותה תקופה), כמו גם העלות הגבוהה של בניית מפעלים גדולים לייצור חשמל, שיכנעו אותו שהחיסכון במעבר מזרם ישר לזרם חילופין לא יהיה משמעותי. אדיסון האמין שמערכות DC

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

ביסודן טובות יותר (והיה בטוח שהציבור ישתכנע בכך), ושהסיבה היחידה לשימוש ההולך וגובר בטכנולוגיות AC היתה שהן איפשרו למתחריו לעקוף את הפטנטים שהוציא על מכשירי ה-DC שלו.

בפברואר 1888 פרסמה חברת אדיסון עלון בן 84 עמודים שבו נכתב כי מתחרי החברה מפירים את זכויות הפטנטים של אדיסון והם הוזהרו מתביעות משפטיות. העלון גם הדגיש את הבטיחות והיעילות של זרם ישר, בתוספת הטענה שהוא לא גרם אפילו למקרה מוות אחד, בעוד שתאונות התחשמלות במערכות AC כבר גרמו למותם של כמה.

טסלה מצדו, בגיבויו של וסטינגהאוז העשיר, החל לדחוף את רעיון זרם החילופין. עד מהרה החלה מלחמה בין טסלה ואדיסון על הטמעת השיטה להולכת החשמל במשק האמריקאי. אדיסון החל בקרב תעמולה אכזרי מאוד, כשהוא מנסה להשפיע על הציבור לדחות את זרם החילופין ולקבל את הזרם הישר. כיוון שהציבור הכיר אותו היטב בזכות המצאות כמו נורת החשמל והפונוגרף נודעה לו השפעה לא מעטה על דעת הקהל. הטענה המרכזית שהוא ניסה לקדם היתה שזרם החילופין מסוכן בשל המתח הגבוה בתילים המחברים בין תחנת הכוח לצרכנים. כניסוחו: "זרם ישר הוא כמו נהר שקט וגדול, ואילו זרם חילופין הוא כמו נהר גועש".

באביב 1888 פרצה סערה תקשורתית בעקבות סדרת מקרי מוות שנגרמו ברחבי ארה"ב על-ידי נפילת עמודי מתח גבוה (בזרם חילופין). מקרים אלה יוחסו (בעידוד חברת אדיסון) לתאוות בצע והיעדר מוחלט של זהירות מצד חברות החשמל המקומיות שסיפקו תאורה חשמלית תוך שימוש בזרם חילופין. ביוני אותה שנה בלט מהנדס חשמל ניו-יורקי בשם הרולד בראון כמתנגד חריף של השימוש בזרם חילופין. בראון טען שחברות החשמל סיכנו את הציבור בכך שסיפקו חשמל במתח גבוה ובאמצעות מתקנים שהוקמו ברישול. החברה של אדיסון סייעה לבראון לבצע הדגמות שבמהלכן חישמל כלבים וחתולים, בקר וסוסים (ואפילו פילה) בעזרת זרם חילופין, במטרה לשכנע את הציבור שזרם חילופין מסוכן יותר מזרם ישר. שיא הציניות במלחמה זו היה המצאת הכיסא החשמלי (בידי בראון) באמצעות גנרטור של וסטינגהאוז דווקא, כדי לקשר בתודעת הציבור בין זרם חילופין לאמצעי מחריד זה להוצאה להורג.

מהי האמת, אם כן? מה מסוכן יותר, זרם ישר או זרם חילופין? התשובה היא ששני הזרמים מסוכנים. התחשמלות מזרם חילופין עשויה לגרום לפרפורים בלב, בעוד התחשמלות מזרם ישר עלולה לנעול את השרירים על המוליך.

באותה תקופה התאחדו חברות קטנות שייצרו חשמל והתמזגו לחברות גדולות, וב-1890 נותרו בשוק החשמל שלוש חברות בלבד: חברת אדיסון, חברת תומס-יוסטון וחברת

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

וסטינגהאוז. זמן קצר אחר-כך הפיקו שתי האחרונות – שהתבססו על זרם חילופין – רווחים גבוהים בהרבה מהחברה של אדיסון, שעדיין השתמשה בהולכת זרם ישר. בתקופה זו עזב אדיסון את החברה הקרויה על שמו ואף היא החלה לייצר זרם חילופין. ב-1892 התאחדה חברת אדיסון עם חברת תומס-יוסטון. החברה החדשה, ששלטה בעת הקמתה על ¾ משוק החשמל האמריקאי, נקראה ג'נרל אלקטריק (כיום זהו אחד התאגידים הגדולים בעולם).

נקודת מפנה במלחמת הזרמים התרחשה ביריד העולמי בשיקגו, 1893, תערוכה שנודעה לה השפעה רבה על עולם הטכנולוגיה. וסטינגהאוז (טסלה) וג'נרל אלקטריק (אדיסון) התחרו ביניהן במכרז על הזכות להאיר את היריד במאה אלף נורות חשמל. ג'נרל אלקטריק ניסחה הצעה של מיליון דולר, כשרוב הסכום מופנה להקמת רשת כבלי נחושת עבים. וסטינגהאוז, עם זרם חילופין, לא נזקקה לכל כך הרבה נחושת, והצעתה היתה זולה יותר בחמישים אחוזים. וסטינגהאוז זכתה כמובן, ונשיא ארה"ב בכבודו ובעצמו לחץ על כפתור ההפעלה שהאיר את כל התערוכה עם המנורות של טסלה. הגנרטורים והמנועים הקטנים והיעילים של טסלה לעומת הכבלים הגדולים והכבדים של אדיסון הכריעו את הקרב בעיני הציבור.

נקודת מפנה נוספת היתה הגשמת החלום האמריקאי הישן לניצול מפלי הניאגרה לייצור חשמל. הממשל הקים ועדה מיוחדת שבחנה דרכים לנצל את מפלי הניאגרה להפקת אנרגיה. ההצעה של אדיסון להפעיל גנרטור זרם ישר באמצעות כוח המפל התמודדה מול זו של וסטינגהאוז. הלורד קלווין, הפיזיקאי הבריטי המהולל, ישב בראש הוועדה. קלווין התנגד בתחילה לרעיון זרם החילופין, אבל אחרי היריד העולמי שינה את דעתו ותמך בזכייתו של וסטינגהאוז במכרז. העבודה נמשכה חמש שנים מפרכות, אבל בסיומה החשמל זרם בשפע, והאיר חלק ניכר מהחוף המזרחי של ארצות הברית.

הפרויקט במפלי הניאגרה סימן את סוף מלחמת הזרמים, שהוכרעה לטובת זרם החילופין. המאבק רושש את וסטינגהאוז, והחברה היתה בסכנת התמוטטות. בצר לו, ביקש וסטינגהאוז מטסלה להשתחרר מהחוזה הכלכלי ביניהם, וזה הסכים. טסלה קרע בגרנדיוזיות את ההסכם לגזרים. הוא אמנם הציל את החברה של וסטינגהאוז, אבל יצר לעצמו קשיים כלכליים עצומים, שהמשיכו ללוות אותו גם בפרויקטים הבאים. טסלה הלך לעולמו כשהוא עני ושרוי בחובות כבדים, ואדיסון, מצדו, הצטער עד סוף ימיו על הבחירה שלו בזרם ישר.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

מלחמת הזרמים: זרם ישר מול זרם חילופין - למורה

טיעוני תומכי זרם ישר:

בעד זרם ישר	**נגד זרם חילופין**
מתח יציב	מתח גבוה ומסוכן בכבלי החשמל – גורם לפרפור חדרים
כל תחנה צריכה לספק מעט חשמל	הפסדי אנרגיה בשנאים
סכנה קטנה יותר להתחשמלות	מפעל גדול לייצור חשמל הינו יקר
ניתן לארגן אחסון וגיבוי בקלות – סוללות	התקנות מרושלות של מתקנים להולכה
אם נשארים במאה ה-19: החברה של אדיסון יציבה ומבוססת, החברה של וסטינגהאוז מתנדנדת (אנלוגי לזרם שכל חברה מתיימרת לספק...)	לא מוסרי (?) – ניתן להוציא עם זה להורג באופן נורא ואיום

טיעוני תומכי זרם חילופין:

בעד זרם חילופין	**נגד זרם ישר**
מאפשר הולכה בזרם נמוך (מתח גבוה) ומקטין בזבוז באמצעות שימוש בשנאי	דורש כבלי נחושת עבים ויקרים
פחות תחנות כוח, יותר זול לייצר חשמל	בזבוז הספק רב בהולכה בטור עקב זרם גדול
לא צריך כבל נפרד לרמות מתח שונות	בהתחשמלות עלול לגרום להינעלות של השרירים על מוליך
ציוד קטן יותר פיזית	

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

מקורות

בן-דב, י. (1991). *פיסיקה: תורות ומושגים*. תל-אביב: משרד הביטחון.

זינגר, ד. (2012). *חשמל ומגנטיות*. תל-אביב: דוד רכגולד ושות'.

לוי, ר. אדיסון, טסלה ווסטינגהאוז: מלחמת הזרמים. *הידען*, 1 בנובמבר 2007.
https://www.hayadan.org.il/ran-levi-on-acdc-battle-0111077

פורת, ג. מצגת בנושא חוק גאוס. אתר מורי הפיזיקה.
http://ptc.weizmann.ac.il/?CategoryID=1439&ArticleID=3361

Arons, A. B. (1990). *A Guide to Introductory Physics Teaching*. New York: Wiley.

Darrigol, O. (2012). *A History of Optics: From Greek Antiquity to the Nineteenth Century*. Oxford: Oxford University Press.

Furio, C. & Guisasola, J. (1998). Difficulties in Learning the Concept of Electric Field. *Science Education,* 82*,* 511-526.

Furio, C., Guisasola, J. & Almudi J. M. (2010). Elementary Electrostatic Phenomena: Historical Hindrances and Students' Difficulties. *Canadian Journal of Science, Mathematics and Technology Education*, 4:3, 291-313.

War of the currents. (2017, December 2). In *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Retrieved 11:11, December 6, 2017, from https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=War_of_the_currents&oldid=813193751

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

חדר בריחה: שימור אנרגיה מכאנית

הרעיונות המרכזיים בשיעור

בשיעור זה יקראו התלמידים קטעים היסטוריים ברצף כרונולוגי המתארים את התפתחות המחשבה הפיזיקלית הקשורה באנרגיה מכאנית ושימורה. הסקירה ההיסטורית תחל באריסטו מהמאה הרביעית לפני הספירה ותוביל את התלמידים עד לגישה המקובלת כיום.

מטרות השיעור

<u>מטרות על</u>

- היכרות עם היבטים היסטוריים של שימור אנרגיה;
- קריאת טקסטים המתארים גישות היסטוריות שונות ופתרון חידות המבוססות על הטקסטים.

<u>מטרות אופרטיביות</u>

- התלמידים יתאימו בין מונחים היסטוריים ומודרניים לתיאור אנרגיה;
- התלמידים יזהו את מושג האנרגיה הפוטנציאלית הכובדית בטקסט המתאר את מסקנתו של מדען בן המאה ה-13;
- התלמידים יזהו את מושג התנע בטקסט המתאר את מחשבותיו של רנה דקארט מהמאה ה-17;
- התלמידים יענו על שאלות בנוגע לטקסט של לייבניץ (מהמאה ה-17) וויכוחיו המדעיים עם דקארט;
- התלמידים יזהו מתי נשמרת אנרגיה מכאנית ותנע.

ידע קודם נדרש של התלמידים

על התלמידים להכיר ולהבין את הנושאים הבאים:

1. אנרגיה פוטנציאלית כובדית;
2. אנרגיה קינטית;
3. תנע.

תכנון השיעור

השיעור מתוכנן כ"חדר בריחה": התלמידים ייכנסו לחדר, יקבלו את הטקסט הראשון ומשם כל חידה תוביל אותם לטקסט הבא, עד שייצאו מהכיתה.

לצורך כך יש להם 60 דקות.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

עזרי הוראה – ציוד וחומרים נדרשים

1. מחשב;
2. 2 קופסאות שניתן לנעול עם מנעול;
3. מנעול קוד 3 ספרות;
4. מנעול תליה + מפתח תואם;
5. 3 מפתחות שונים, שלא פותחים את המנעול מהסעיף הקודם;
6. שעון עצר;
7. לוח מגנטי או מתאים לסקוטשים;
8. 6 מגנטים קטנים או סקוטשים לחיבור תמונות ללוח מהסעיף הקודם;
9. מעטפה אטומה;
10. שמר-דף (ניילונית שקופה);
11. סיכות בטחון;
12. נייר דבק;
13. דבק דו-צדדי;
14. קלסר (לחומרי עזר).

הציוד המפורט כאן הינו **לקבוצה אחת** (3-5 תלמידים). יש להכפיל את כמות הציוד בהתאם למספר הקבוצות המשתתפות בשיעור. אם ישנן מספר קבוצות במקביל ניתן לסמן את כל החידות של כל קבוצה במדבקות בצבע אחיד (קבוצה ירוקה, קבוצה צהובה וכו'). לשם כך יש להצטייד גם במדבקות בצבעים שונים.

מהלך הפעילות

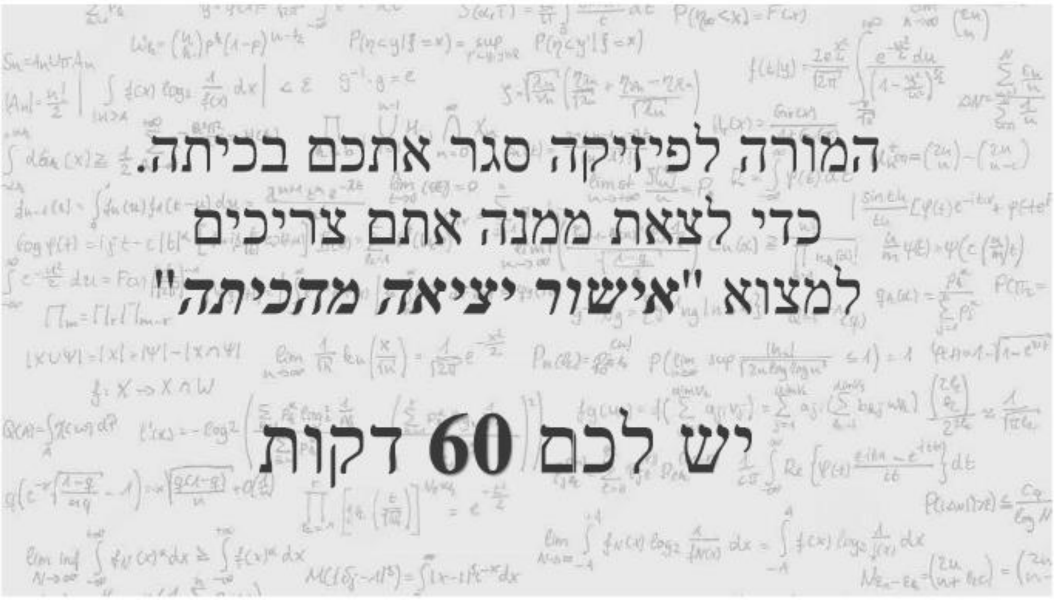
פתיחה:

- הסבר מהו חדר בריחה
  - חדר עם חידות, המטרה היא לצאת מהחדר תוך 60 דקות (ניתן לשנות את הזמן בהתאם לרמת הכיתה);
- במה אסור לגעת בחדר
  - אסור לגעת בתקעים, אין לפרק חפצים המקובעים לקיר, אסור להפעיל כוח פיזי
- במה מותר להיעזר לפתרון החידות
  - ניתן להיעזר בקלסר הטכני באופן חופשי, ניתן לבקש רמז מהמפעיל/מורה, **אין** להכניס מכשיר טלפון סלולרי,
- מצגת אווירה
  - המצגת מסבירה לתלמידים שהם נעולים בכיתה. כדי לצאת הם צריכים למצוא פתק "אישור יציאה מהכיתה" מהמורה. מי שמסיים בפחות מ-60 דקות, מקבל את הפרש הזמן כנקודות בונוס לציון (אפשר להחליף למוטיבציה אחרת, כמובן).

עם הכניסה לחדר הבריחה יש לתת לתלמידים את הטקסט הראשון ולנעול את דלת הכיתה. בהמשך מופיעות הנחיות כיצד יש להסתיר את החידות בחדר. הטקסטים והחידות מופיעים תחת "חומרי פעילות לתלמידים". את כל הטקסטים מלבד טקסט מספר 5 יש להדפיס.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

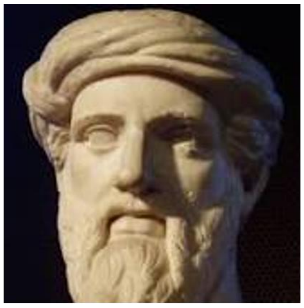
מצגת פתיחה

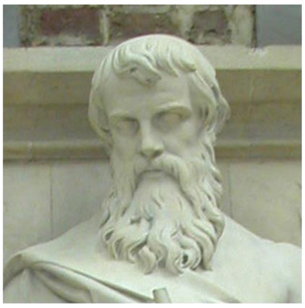


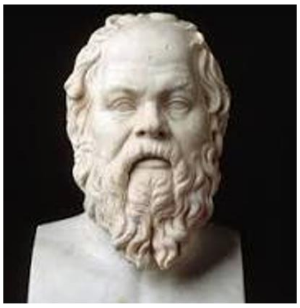
כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

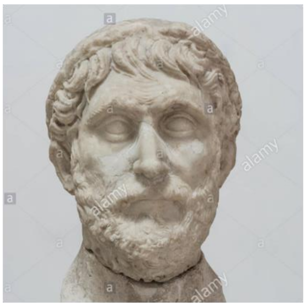
טקסט (1)

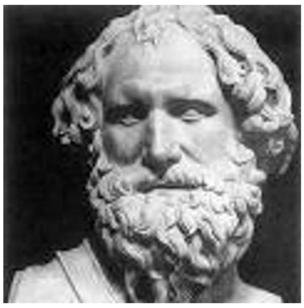
הוא היה הפילוסוף בעל ההשפעה הרבה ביותר בתרבות המערבית. למרות שהשקפותיו הפיזיקליות שונות תכלית שינוי מהפיזיקה המקובלת בימינו, כמה מרעיונותיו – כפי שנראה מיד – מהדהדים בתולדות החשיבה הפיזיקלית עד עצם היום הזה. הוא חי במאה הרביעית לפני הספירה, והיה תלמידו המפורסם ביותר של אפלטון, פילוסוף חשוב מאוד אף הוא.

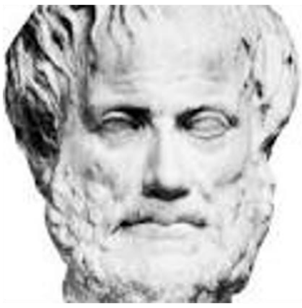

פיתגורס 582-496 לפנה"ס


אוקלידס 365-275 לפנה"ס


סוקרטס 470-399 לפנה"ס


תלמי 100-168 לספירה


ארכימדס 287-212 לפנה"ס


אריסטו 384-322 לפנה"ס

5מ	G1	5ג
A	ל	3ש

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

הסבר עבור טקסט (1)

הטקסט הנ"ל מפנה את התלמידים לאריסטו. יש לתת לתלמידים את הטקסט הנ"ל מודפס בעת הכניסה לחדר. יש למספר את השולחנות או הארונות בכיתה לפני תחילת השיעור בסימון ברור. בתוך החדר יש להציב לוח מגנטי עליו יהיו תמונות של 6 מדענים מהמאות 2-6 לפני הספירה (גרסה להדפסה מצורפת בנספח ה'). הסימון בגב התמונה של אריסטו ישלח את התלמידים למיקום בחדר בו נמצא הרמז הבא (לפי סימון השולחנות/ארונות). את החידה יש לשים במעטפה אטומה מודבקת מתחת לשולחן/בתוך הארון אליו הופנו התלמידים. כאשר ישנן מספר קבוצות מומלץ לשלוח כל אחת מהן לשולחן/מקום שונה בחדר.

טקסט (2)

כמה ממושגי היסוד של אריסטו נעשו נכסי-צאן-ברזל בדיבורנו היום-יומי. למשל: "עצם" במשמעות של דבר כלשהו – אדם, סוס, בית; "בכוח", במשמעות של יכולת או אפשרות הטמונה בדבר-מה; "בפועל", לציון מה שקיים באמת.

נשתדל להבהיר את המושגים "בכוח" ו"בפועל". בשפת יום-יום המשמעות של "בכוח" ("דינאמיס") היא: כוח פיזי, כוח צבאי, שלטון. נוסף על הוראות מקובלות אלה קיבלה המלה אצל הפילוסופים משמעות של יכולת או כושר. המשמעות העיקרית של "דינאמיס" היא התחלה או סיבה או מקור של שינוי בדבר-מה אחר, רוצה לומר: לדבר כלשהו יש כוח כאשר הוא יכול לגרום לשינוי כלשהו בדבר-מה אחר. היכולת לשנות יכולה להיות מכוונת גם כלפי הדבר עצמו, כמו הרופא המרפא את עצמו. אבל הכוח הוא לא רק יכולת לפעול על דבר מה אחר, אלא גם יכולת לקבל פעולה או להיפעל על-ידי דבר-מה אחר. וזו ההוראה הפילוסופית היסודית של "כוח".

מהוראה זו לא רחוקה הדרך להוראה נוספת של "כוח" – האפשרי, או האפשרות. מתקבל על הדעת, שההשפעה שדבר יכול להשפיע על דבר-מה אחר, וההשפעה שהוא יכול לקבל מדבר-מה אחר, אינה אלא מכלול האפשריות הטמונות בו. כאשר אדם אומר: "יש לי אפשרות כזו וכזו" הוא רוצה לומר, שהוא יכול באמצעות פעולותיו לגרום להשגתם או להתממשותם של דברים מסוימים, אך האפשרויות הטמונות בו לא מסתכמות רק במה שהוא יכול לפעול, אלא גם במה שניתן לפעול עליו, ואין עצם טבעי שלא ניתן להיפעל בצורה זו או אחרת.

למושג ה"בפועל" מוצעת ההגדרה הבאה: הימצאותו של דבר לא באופן שבו הוא נמצא בכוח. זוהי הגדרה דחוקה שאומרת לנו מה הדבר אינו, ולא מה הוא כן. ואכן אריסטו עצמו הודה שאין הגדרה טובה ל"בפועל" אך ניתן להבינו היטב על-ידי דוגמאות יום-יומיות כגון: גוש הנחושת הוא פסל בכוח; לעומתו, הפסל שנוצר מן הנחושת הוא הפסל בפועל. גרעין האלון

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

הוא עץ האלון בכוח; האלון שאנו עומדים מולו הוא האלון בפועל. הלבנים, קורות העץ, והצינורות המונחים על המגרש הם הבית בכוח; באשר לבית בפועל, אי אפשר לטעות כשם שלא היה אפשר לטעות בדוגמאות הקודמות.

דבר בפועל הוא אפוא מה שנוכח, מה שקיים, מה שנמצא, מה שממשי. מה שחשוב הוא לראות את הקשר ההדוק בין פעילות וממשות: התפיסה המונחת ביסוד המושגים "בכוח" ו"בפועל" היא שממשותו של דבר היא בפעילותו.

דמיינו לעצמכם כדור עם מסה m המצוי (במנוחה) בגובה h מעל הרצפה. כעת חִשבו על אותו כדור לאחר שנפל מגובה זה, רגע אחד לפני התנגשותו ברצפה, ותארו לעצמכם שתנועתו של אותו כדור היא ה"ממשות" שאליה מתכוון אריסטו, שיכולה להימצא בכדור זה "בכוח" או "בפועל".

לנדא, *מבוא למטפיסיקה ולפילוסופיית הטבע של אריסטו*, עמ' 47-51

א. במושגים מודרניים תנועת הכדור "בכוח" נקראת...
1. אנרגיה פוטנציאלית
2. אנרגיה קינטית
3. אנרגיה כוללת
4. כל התשובות נכונות

ב. במושגים מודרניים תנועת הכדור "בפועל" נקראת...
1. אנרגיה פוטנציאלית
2. אנרגיה כוללת
3. אנרגיה קינטית
4. כל התשובות נכונות

ג. הבלוט הינו עץ האלון:
1. בפועל ואז בכוח
2. לא בפועל ולא בכוח
3. בפועל
4. בכוח

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

הסבר עבור טקסט (2)

התשובות לשאלות יוצרות קוד 3 ספרות (במקרה זה: א-1, ב-3, ג-4). התלמידים צריכים למצוא מה בחדר ייפתח עם קוד של 3 ספרות, לזהות קופסה שעליה יש מנעול עם קוד של 3 ספרות ולפתוח אותה. בתוך הקופסה יש להטמין את טקסט מס' 3. יש לדאוג שהקוד של המנעול יתאים לפתרון החידה (1-3-4). ניתן ומומלץ לערבב את התשובות בין הקבוצות השונות.

טקסט (3)

המכאניקה מעידה יותר מכול עד כמה קשה לומר מתי נגמר המדע של ימי הביניים ומתחיל המדע הקלאסי. אם נתמקד בהיסטוריה של ענף המכאניקה היחיד שיכול היה באמת להיחשב כמדע עצמאי – הסטטיקה – כי אז נצטרך להרחיק אחורה לסביבת שנת 1200, שם ניתקל בכתבי יד ערביים ששאלו רבות ממקורות יווניים... גוף ידע זה, המכונה "מדע המשקלים" של ימי הביניים, הגיע למערב אירופה כשהוא מסולף וחלקי; אך הוא לא רק נקלט אלא פותח על-ידי האסכולה המכונה על שם המתמטיקאי מהמאה ה 13 ג'ורדאנוס נמורריוס, דמות מסתורית שידוע עליה מעט מאוד. שיטת ג'ורדאנוס מתבססת על אקסיומה חדשה ובלתי מוכחת, שגם איננה מוצגת באופן מפורש ובהיר בכתבים המיוחסים לג'ורדאנוס:

> מה שמסוגל להעלות משקל נתון L לגובה h, מסוגל להעלות משקל גדול פי n מ-L (כלומר משקל nL) לגובה קטן פי n מ-h (כלומר לגובה h/n).

Dijksterhuis, *The Mechanization of the World Picture*, pp. 248-249.

איזה גודל כימת ג'ורדאנוס באמצעות אקסיומה זו?

הסבר עבור טקסט (3)

בתוך הקופסה, יחד עם החידה, צריכים להיות מונחים 4 מפתחות כאשר לכל אחד מהם, על הטבעת שמחוברת אליו, יש להצמיד פתק עליו כתוב אחד מהגדלים הבאים:

אנרגיה קינטית / אנרגיה פוטנציאלית / אנרגיית חום / אנרגיה אלסטית

את התשובה הנכונה (אנרגיה פוטנציאלית) יש להצמיד למפתח שפותח מנעול הסוגר קופסא. בתוך הקופסא יש להחביא את טקסט 4.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

טקסט (4)

קביעה חשובה של הפילוסוף הצרפתי רנה דקארט (1650-1596) מתייחסת לניסיונו להבין איזה גודל פיזיקלי נשמר בתהליכים פיזיקליים:

לאחר שהסקנו שזה טבעה של תנועה, יש להביט בסיבתה, שהיא כפולה: כלומר קודם הכללית והראשונית, שהיא הסיבה המשותפת של התנועות שבעולם; אחר כך הפרטית, האחראית לכך שהיא מופיעה בחלק כלשהו של החומר שבו לא היתה לפני כן. ברור שאותה סיבה כללית אינה אלא אלוהים עצמו, שברא בראשית את החומר יחד עם תנועה ומנוחה, ומידת התנועה והמנוחה שהעניק אז לכל החומר כולו נשמרת בזכות השגחתו. לתנועה זו יש כמות מסוימת ומוגדרת, וקל לראות שייתכן כי היא קבועה תמיד בכל העולם כולו, אף-על-פי שהיא משתנית בכל חלק וחלק כשלעצמו. לדוגמה, אם חלק אחד של החומר נע במהירות שהיא כפליים מהמהירות של אחר, וזה האחר גדול כפליים כראשון, הרי מידת התנועה בקטן כמידתה בגדול; ואם תואט תנועתו של חלק אחד, כשיעור הזה תואץ תנועתו של חלק אחר, השקול כנגדו. לא קשה גם לראות ששלמות האלוהים לא מתבטאת רק בכך שאינו משתנה בעצמו, אלא גם בכך שאלוהים פועל תמיד בעוצמה ובמידה קבועות.. לכן מתקבל ביותר על הדעת שאלוהים נתן לחלקי החומר תנועות רבות בעת שברא אותם, וכשם שהוא משמר את כל החומר הזה באותו האופן ואותו היחס, שבהם ברא אותו מלכתחילה, כך הוא משמר בו תמיד את אותה כמות התנועה עצמה.

סמבורסקי, *המחשבה הפיסיקאלית בהתהוותה, עמ'* 252-251

דקארט מציע כאן מדד כמותי ל"כמות התנועה" שנשמרת בתהליך פיזיקלי. מדד זה דומה למושג מודרני בו אנו משתמשים כיום. שמו של גודל זה יעזור לכם להגיע אל החידה הבאה.

הסבר עבור טקסט (4)

טקסט 5 יהיה בקובץ מוגן סיסמה ע"ג המחשב שבחדר (ולכן אין צורך להדפיס אותו).

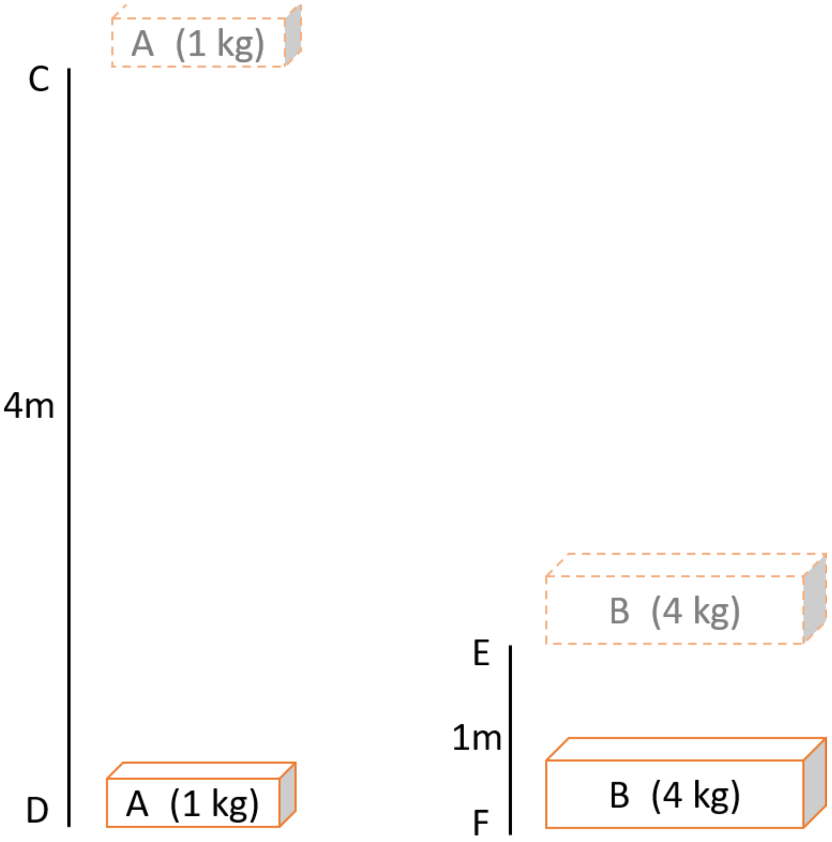
הסיסמא של הקובץ היא "תנע". יש להשתדל שה desktop של המחשב יהיה נקי והקובץ המיועד יהיה נגיש וברור.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

טקסט (5)

גוטפריד וילהלם לייבניץ (1716-1646) היה מדען ופילוסוף גרמני נודע שתרם רבות הן לפיזיקה והן למתמטיקה; למשל, יחד עם ניוטון המציא את החשבון הדיפרנציאלי והאינטגרלי. בקטע הבא, הלקוח מחיבורו "מאמר מטאפיסי", חולק לייבניץ בחריפות על "הקרטזיאנים", כלומר תומכיו של רנה דקארט, ומציע מדד משלו ל"כוח" (כלומר הגודל שנשמר בתהליכים פיזיקליים ושולט בהם. שימו לב שזהו אינו הכוח של ניוטון המוכר לנו כיום):

דקארט ואחרים מאמינים שכמות התנועה, כלומר מכפלת המהירות בגודל הגוף הנע, היא המדד לכוח המניע של אותו גוף, וזהו הכוח הנשמר תמיד ביקום. רואים אנו במכונות שלא קיימת תנועה מתמדת ("פרפטואום מובילה"), ושהכוח המפעיל אותן הולך ונחלש עקב החיכוך. כמו-כן, כוחו של גוף עשוי להיחלש עקב מעבר של חלק מכוח זה לגופים נעים אחרים. מטרתי כאן היא להראות שכמות התנועה איננה זהה לכוח מניע זה. לשם כך אניח שתי הנחות: 1. שגוף שנופל מגובה מסוים רוכש את הכוח שנדרש כדי להעלותו שוב לגובה ההתחלתי (אם זהו כיוון תנועתו ובהיעדר מכשולים כלשהם). מטוטלת, למשל, תעלה שוב בדיוק לגובה שממנו ירדה, אילו התנגדות האוויר ומכשולים נוספים לא היו מקטינים במעט את הכוח שהיא רוכשת. 2. שהכוח הנדרש להעלאת גוף A של קילוגרם אחד לגובה CD של ארבעה מטרים זהה לכוח הנדרש להעלאת גוף B של ארבעה קילוגרמים לגובה EF של מטר אחד (ראו איור).



כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

ברור אפוא שבנופלו מן הגובה CD רכש הגוף A כוח השווה בדיוק לכוח שרכש הגוף B בנופלו מן הגובה EF. שכן הגוף B, כאשר הוא מגיע ל-F, יש לו (על-פי ההנחה הראשונה) הכוח שנדרש להעלאתו מחדש ל-E, ולפיכך יש לו הכוח הדרוש להעלאת גוף בן ארבעה קילוגרמים (כלומר הוא עצמו) לגובה EF של מטר אחד; בדומה לכך הגוף A, כאשר הוא מגיע ל-D ויש לו הכוח הנדרש להעלותו מחדש ל-C, יש לו גם הכוח הדרוש להעלאת גוף של קילוגרם (הוא עצמו) לגובה CD של ארבעה מטרים. לפיכך (על סמך ההנחה השנייה) כוחותיהם של שני הגופים שווים. נבחן עתה אם כמות התנועה שווה גם היא בשני המקרים; נגלה שהתשובה שלילית. שהרי גליליאו גליליאי הוכיח שהמהירות הנרכשת על-ידי הנפילה CD כפולה מהמהירות הנרכשת על-ידי הנפילה EF, בעוד שהגובה גדול פי ארבעה. נכפיל אפוא את [מסת[12]] הגוף A (שהוא כמו 1) במהירותו (שהיא כמו 2), התוצאה או כמות התנועה תהיה כמו 2; מצד שני נכפיל את [מסת] הגוף B (שהוא כמו 4) במהירותו (שהוא כמו 1), והתוצאה (כלומר כמות התנועה) תהיה כמו 4. לפיכך כמות התנועה של הגוף A בנקודה D תהיה מחצית כמות התנועה של הגוף B בנקודה F, ובכל זאת הכוחות שלהם שווים. מצאנו אם כן שיש הבדל משמעותי בין כמות התנועה לבין הכוח.

לייבניץ, *מאמר מטפיסי* (בתרגום א. יקירה), עמ' 78-82

ענו על כל אחת מהשאלות הבאות <u>במילה אחת בלבד</u>.

1. לפי לייבניץ, מה הדבר הראשון שמונע מתנועה מכאנית להישמר?
2. לייבניץ מסתמך על אקסיומת ג'ורדאנוס כשהוא מתאר הרמת גופים בעלי גודל (מסה) שונה לגבהים שונים. מיהו המדען הנוסף אשר שילוב תגלית שלו מוביל את לייבניץ למסקנה שונה מזו של דקארט?
3. לפי המדען מתשובה 2, איזה מדד אינו שומר על פרופורציה ישרה לגובה הנפילה?
4. מהו היחס בו גדל המדד מתשובה 3 ביחס לגובה הנפילה?
5. מאחר שיחס המסות הפוך ליחס הגבהים ($m_B/m_A=CD/EF$), הרי שבהתאם לסעיף 4 יחס המסות הפוך גם ליחס ריבועי המהירויות ($m_B/m_A=v_A^2/v_b^2$).
   לאור טענתו של לייבניץ שה"כוחות" של שני הגופים שווים כאשר הם מגיעים למהירויותיהם המקסימליות (v_A, v_B), המושג המודרני המתאים לכוח של לייבניץ הינו אנרגיה ________.

[12] התוספת "מסה" נועדה להקל על הקורא המודרני, אך יש לזכור כי דקארט עצמו לא הכיר את מושג המסה (שטבע ניוטון אחריו) והגדיר "כמות תנועה" כמכפלת נפח של גוף במהירותו.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

א	ע	ר	ג	ו	נ	ע
ק	ו	ז	ל	ר	ה	ר
י	ב	ח	י	כ	ו	כ
נ	י	א	ל	ש	ו	נ
ט	ר	ה	א	מ	ד	פ
י	ב	ע	ו	ל	י	ו
ת	ו	ר	י	ה	מ	נ

הסבר עבור טקסט (5)

בתוך התפזורת מסתתרות התשובות של השאלות: חיכוך / קינטית / גליליאו / מהירות / בריבוע. כאשר מסמנים את כל המילים הללו בתפזורת האותיות שנותרות לא מסומנות יוצרות יחד את הביטוי: "ארון עזרה ראשונה מדף עליון". שם יש להחביא את הרמז הבא. מומלץ לסמן את המילים עם טוש מדגיש. כך יהיה קל יותר לזהות אותיות "לבנות".

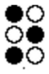
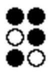
א	ע	ר	ג	ו	נ	ע
ק	ו	ז	ל	ר	ה	ר
י	ב	ח	י	כ	ו	כ
נ	י	א	ל	ש	ו	נ
ט	ר	ה	א	מ	ד	פ
י	ב	ע	ו	ל	י	ו
ת	ו	ר	י	ה	מ	נ

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

טקסט (6)

המכאניקה של ניוטון היא תורה של תנועה. בתור שכזו, היא מתארת כיצד משתנים גדלים מסוימים – מקומות ומהירויות - עם הזמן. אולם כאשר כותבים את משוואותיה באופן המתאים, אפשר למצוא שלמרות השינוי המתואר בהן, יש גדלים קבועים שאינם משתנים במשך התנועה. כבר לפני קבלת התורה של ניוטון טענו דקארט מצד אחד, ולייבניץ מצד שני, שבעת תנועתם של גופים יש גדלים שערכם איננו משתנה, כלומר גדלים משתמרים. דקארט דיבר על שימור גודל הנקרא "כמות התנועה", ומוגדר ככמות החומר שבגוף כלשהו כפול המהירות של אותו גוף. במונחים ניוטוניים, שבהם כמות החומר היא המסה, כמות התנועה של דקארט הופכת להיות מסה כפול מהירות. לייבניץ, לעומת זאת, דיבר על שימור גודל שקרא לו "כוח" (יש לשים לב שאין זה מושג הכוח הניוטוני), שיש לו שתי צורות: "כוח חי", שכיום אנו מגדירים אותו כמחצית המכפלה של המסה בריבוע המהירות, ו"כוח מת", שאנו מגדירים כיום כמכפלת המסה, הגובה שבו היא נמצאת ותאוצת הנפילה החופשית. שני מרכיבים אלו יחד נותנים את "הכוח" הכללי, שכמותו נשארת קבועה תמיד.

בן-דב, *פיסיקה: תורות ומושגים*, עמ' 36-37

1	גישתו הכללית של ניוטון	"שינוי" - חקירת תנועה ושינויים	
2	גישת שימור האנרגיה המכנית שניסח דקארט	"שימור" – חקירת מה שנשאר קבוע	
3	כוח חי (לייבניץ)	אנרגיה קינטית	
4	כוח מת (לייבניץ)	אנרגיה פוטנציאלית כובדית	
5	כמות התנועה (דקארט)	תנע	

הסבר עבור טקסט (6)

בסמוך לטקסט החידה יש להדפיס את 10 הפתקים (גרסא להדפסה מצורפת בנספח ה').
התלמידים יידרשו לייצר התאמה בין מושגים מודרניים כגון שימור, אנרגיה קינטית וכו' למושגים כפי שהתייחסו אליהם ניוטון, דקארט ולייבניץ. יש להתאים בין הזוגות, לסדר אותם

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

לפי סדר המספרים 5-1 ואז לפענח את המילה הכתובה בכתב ברייל (מפתח לכתב ברייל צריך להופיע בקלסר הטכני שנמצא בחדר). בדוגמא להלן הביטוי המתקבל הוא "וילון" ושם נמצא הרמז הבא (מומלץ להניח את הרמז בתוך שמרדף או מעטפה ולהצמידו באמצעות סיכות ביטחון לווילון).

טקסט (7)

במשך זמן מסוים היה ויכוח בין תלמידיו של דקארט לתלמידיו של לייבניץ בשאלה מהו הגודל המשתמר האמיתי – כמות התנועה או "הכוח". רק מאוחר יותר הסתבר שבמסגרת המכאניקה של ניוטון, אפשר לומר ששני הצדדים צדקו: גם כמות התנועה וגם "הכוח" הם גדלים משתמרים.

לכמות התנועה של דקארט אנו קוראים כיום "תנע" (Momentum). במסגרת המכאניקה של ניוטון (ובמובן מסוים גם בתורות החדשות שהחליפו אותה), כמות התנועה של קבוצת גופים כלשהם שאין פועלים עליה כוחות חיצוניים נשארת תמיד קבועה. דוגמה לתופעה זו היא רתיעתו של תותח: לפני שהתותח יורה, גם הוא וגם הפגז שבתוכו נייחים, וכמות התנועה הכללית היא אפס. כאשר הפגז נפלט מהלוע, יש לו מהירות מסוימת ולכן הוא נושא עמו כמות תנועה בכיוון מסוים. כדי לשמור על כמות תנועה קבועה של המערכת כולה, חייב התותח לשאת כמות זהה של תנועה לכיוון ההפוך, כך שכמות התנועה הכללית תהיה שוב אפס. אולם מכיוון שמדובר על אותה כמות תנועה ומסת התותח גדולה פי כמה ממסת הפגז, הרי שמהירות הפגז גדולה בהרבה ממהירות הרתיעה של התותח בכיוון ההפוך.

כמות התנועה היא גודל מכאני טהור, והיא אינה הופכת לשום צורה לא מכאנית, כלומר לצורה שאיננה קשורה בתנועת גופים במרחב. לפיכך, במסגרת המכאניקה של ניוטון, עקרון שימור כמות התנועה תקף תמיד. לעומת זאת, כפי שהסתבר במאה ה-19, "הכוח" של לייבניץ יכול ללבוש צורה לא מכאנית, ולכן אם אנו מסתכלים רק בצורותיו המכאניות, לפעמים נמצא שגודל זה איננו משתמר. "הכוח" של לייבניץ הוא צורה של מה שאנו קוראים כיום "אנרגיה". "הכוח החי" נקרא "אנרגיה קינטית", או אנרגיה של תנועה, ו"הכוח המת" נקרא "אנרגיה פוטנציאלית". סכומם של שני אלו הוא "אנרגיה מכאנית", שבמקרים רבים כמותה הכללית נשארת קבועה. נניח לדוגמה שיש לנו מטוטלת המתנודדת ללא חיכוך, וברגע מסוים היא נמצאת בקצה מסלולה. ברגע זה אין לה מהירות, כלומר אין לה אנרגיה קינטית; אולם מכיוון שהיא נמצאת בגובה מסוים, יש לה אנרגיה פוטנציאלית. בהמשך תנועתה מגיעה המטוטלת לנקודה הנמוכה ביותר של מסלולה, שביחס אליה אנו מודדים את האנרגיה הפוטנציאלית. כעת אין למטוטלת אנרגיה פוטנציאלית, משום שהיא איבדה את הגובה ההתחלתי שהיה לה בקצה המסלול; אולם במקומה יש לה אנרגיה קינטית הקשורה

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

במהירות תנועתה. כאשר המטוטלת מתנודדת הלוך ושוב, גם האנרגיה המכאנית שלה הופכת מפוטנציאלית לקינטית ובחזרה, אך כמותה הכללית נשארת קבועה. אולם לאנרגיה יש עוד צורות: לדוגמה, היא יכולה להפוך לחום באמצעות חיכוך. לפיכך, כאשר יש חיכוך כמות האנרגיה המכאנית הולכת ופוחתת, עד שבסופו של דבר המטוטלת נעצרת.

בן-דב, פיסיקה: תורות ומושגים, עמ' 37-38

מהו המשפט הנכון מבין המשפטים הבאים:

1. ברתיעת תותח, הכוח החי של התותח שווה לכוח החי של הפגז, למרות שמסת התותח גדולה פי כמה ממסת הפגז.
2. במערכת של גופים שלא פועלים עליה כוחות חיצוניים סכום הכוח החי והכוח המת נשמר תמיד
3. בנקודה הגבוהה ביותר של מסלול המטוטלת, הכוח החי שלה מינימלי והכוח המת שלה מקסימלי.
4. במערכת של גופים שלא פועלים עליה כוחות חיצוניים כמות התנועה איננה נשמרת בהכרח.

הסבר עבור טקסט (7)

ליד דלת החדר יש לשים ארבעה צנצנות קטנות ולמספר אותן 1-4. בתוך כל צנצנת יש לגלגל פתק. בתוך הצנצנת מס' 3 (המשפט הנכון) יש לכתוב על הפתק "אישור יציאה מהכיתה" (אותו התלמידים הונחו לחפש בתחילת השיעור). בשאר הצנצנות יהיה כתוב - "יש להמתין 3 דקות ואז לנסות שנית". יש לשים שעוני עצר (סטופרים) בסמוך לעמדה כדי למדוד 3 דקות.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

פיתגורס (496-582 לפנה"ס)

פיתגורס היה פילוסוף ומתמטיקאי יווני יליד האי סאמוס. בצעירותו הרבה במסעות באזור יוון, ולאחר מכן שאף להקים בית ספר ללימודי פילוסופיה בעיר מולדתו. מסיבות שונות נאלץ לעקור משם והיגר למושבה יוונית בדרום איטליה, שם ייסד קהילה דתית-פילוסופית הקרויה על שמו: האסכולה הפיתגוראית, הידועה בעיקר בשל אמונתה בחשיבות המספרים ובשל אורח חייה הסגפני.

סוקרטס (399-470 לפנה"ס)

הפילוסוף היווני סוקרטס נחשב לאביה, או מייסדה, של הפילוסופיה המערבית. סוקרטס הוא דמות אניגמטית למדי, ותורתו ידועה לנו בעיקר באמצעות כתבי תלמידו המפורסם ביותר, אפלטון, אם כי קשה לדעת כמה עד כמה באמת האמין סוקרטס בדעות שמייחס לו אפלטון. דעותיו האירוניות והלא מקובלות – שאותן הרבה להשמיע באוזני בני עירו – עוררו עליו את חמת האתונאים, ובהיותו כבן 70 הוצא להורג (בשתיית רעל) באשמת השחתת הנוער ואי-אמונה באלים.

אריסטו (322-384 לפנה"ס)

אריסטו היה פילוסוף יווני, הפילוסוף שהשפיע על התרבות המערבית יותר מכל הוגה אחר מאז ומעולם. הוא נולד בסטגירה שבצפון יוון, וכנער הגיע לאתונה והיה לתלמיד – ולאחר מכן למורה – באקדמיה של אפלטון. בעקבות מותו של אפלטון לא זכה אריסטו לרשת את ניהול האקדמיה, לפיכך עזב את אתונה, וכששב אליה ייסד בה מוסד למחקר והוראה משלו. התשתית המדעית שבנה אריסטו, הנפרשת על פני חיבוריו הפילוסופיים והמדעיים הרבים, השפיעה באופן עמוק ביותר תחילה על התרבות האסלאמית ולאחר מכן על תרבות המערב.

אוקלידס (275-365 לפנה"ס)

אֻוקלידס, מתמטיקאי יווני יליד אלכסנדריה שבמצרים, נחשב לאבי הגאומטריה. בספרו "היסודות" הציג באופן שיטתי ודדוקטיבי חלק ניכר מהידע המתמטי שהצטבר עד לתקופתו. ספרו נחשב לאחת היצירות המשפיעות ביותר בתולדות המתמטיקה, והיה ספר הלימוד המרכזי בגיאומטריה (לפחות) מזמן פרסומו ועד שלהי המאה ה-19.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

ארכימדס (287-212 לפנה"ס)

ארכימדס נמנה עם בכירי המדענים בעת העתיקה, והיה ללא ספק גדול המתמטיקאים של תקופה זו. מלבד זאת היה ממציא ומהנדס מחונן. הוא נמנה עם הראשונים שיישמו את המתמטיקה לחקר תופעות פיזיקליות, וייסד את מדעי ההידרוסטטיקה והסטטיקה: ניסח למשל את חוק הציפה המכונה על שמו וסיפק הוכחה חשובה לחוק המנוף. רבים מפיתוחיו המתמטיים נחשבים להטרמות של תיאוריות הנכללות בחשבון הדיפרנציאלי והאינטגרלי (חדו"א) של ימינו.

תלמי (100-168 לספירה)

תלמי (ביוונית: קלאודיוֹס פתוֹלֶמאיוֹס) היה אסטרונום וגיאוגרף יווני תושב אלכסנדריה, והיה ללא ספק גדול האסטרונומים של העת העתיקה. החשוב מבין כתביו הוא "אלמגסט" (שיבוש ערבי של השם היווני), הספר שבו הציג את תורתו האסטרונומית – מודל גיאוצנטרי מורכב, שהיה שיפור גדול מבחינת דיוקו ביחס למודל הגיאוצנטרי הפשוט יותר שהיה מקובל מאז ימי אריסטו. תורת תלמי שלטה בשדה האסטרונומיה עד אשר הצליח גליליאו גליליאי (שהאמין בתורת קופרניקוס) להפריכה בעזרת תצפיותיו מבעד לטלסקופ.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

טבלת גימטריה

1	א	21	כא
2	ב	22	כב
3	ג	23	כג
4	ד	24	כד
5	ה	25	כה
6	ו	26	כו
7	ז	27	כז
8	ח	28	כח
9	ט	29	כט
10	י	30	ל
11	יא	40	מ
12	יב	50	נ
13	יג	60	ס
14	יד	70	ע
15	טו	80	פ
16	טז	90	צ
17	יז	100	ק
18	יח	200	ר
19	יט	300	ש
20	כ	400	ת

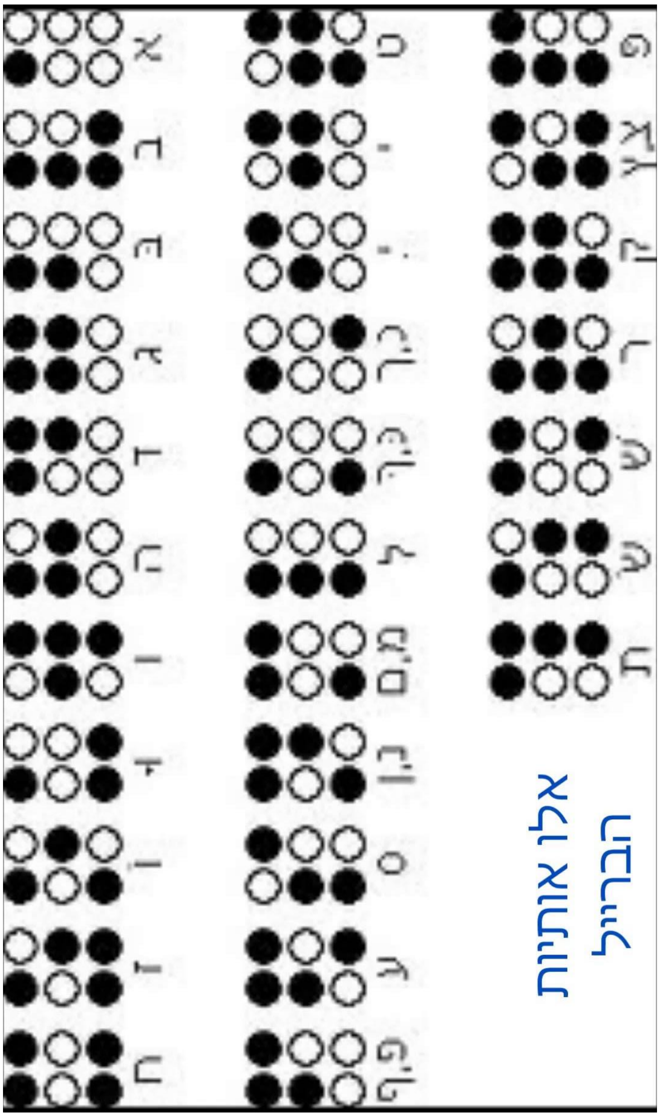
כל הזכויות שמורות – האתר למורי ישראל - http://dapey-avoda.info

מורס עברי

קוד מורס עברי נרשם **מימין לשמאל**, וזאת בניגוד לקוד הלועזי, הנרשם משמאל לימין.

אות	קוד	אות	קוד
א	–·	ל	··–·
ב	–···	מ	––
ג	·––	נ	·–
ד	··–	ס	·–·–
ה	–––	ע	–––·
ו	·	פ	·––·
ז	··––	צ	––·
ח	····	ק	–·––
ט	–··	ר	·–·
י	··	ש	···
כ	–·–	ת	–

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.



כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

מקורות

בן-דב, י. (1991). *פיסיקה: תורות ומושגים*. תל-אביב: משרד הביטחון.

לייבניץ, ג. ו. (1988). מאמר מטפיסי. בתוך *מאמר מטפיסי והתכתבות עם ארנו* (תרגם וכתב מבוא והערות: אלחנן יקירה). מפעלים אוניברסיטאיים להוצאה לאור (פורסם במקור: 1686).

לנדא, י. (1988). *מבוא למטפיסיקה ולפילוסופיית-הטבע של אריסטו*. תל-אביב: משרד הביטחון.

סמבורסקי, ש. (1987). *המחשבה הפיסיקאלית בהתהוותה: מן הפיסיקה הקדם-סוקראטית עד הפיסיקה של הקוונטים*. ירושלים: מוסד ביאליק.

Dijksterhuis, E. J. (1961). *The Mechanization of the World Picture* (tr. C. Dikshoorn). Oxford : Oxford University press.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

חומרים להדפסה עבור התלמידים

העמודים הבאים מכילים את כל הדפים אותם יש להדפיס עבור כל אחת מהפעילויות לתלמידים.

- פעילות א' (קריאה השוואתית מקפלר לניוטון): יש להדפיס לכל התלמידים את כל הדפים.
- פעילות ב' (האור במנהרת הזמן): יש לחלק את הכיתה ל 7 קבוצות. את המבוא וההנחיות יש להדפיס לכל התלמידים. את הטקסטים (ממוספרים 1-7) יש להדפיס לפי החלוקה לקבוצות.
- פעילות ג' (שחזור ניסוי תנועה בליסטית): יש להדפיס לכל התלמידים את כל הדפים.
- פעילות ד' (דיון בנושאי חשמל): יש לחלק את הכיתה ל 4 קבוצות (שני נושאים לדיון, בכל נושא שתי קבוצות המייצגות צדדים שונים בדיון). את דפי ההנחיות והמחוון יש להדפיס לכל התלמידים. את הטקסטים עליהם מתבסס הדיון יש להדפיס לפי החלוקה לקבוצות.
- פעילות ה' (חדר בריחה): יש להדפיס את טקסטים מלבד טקסט 5 כמספר הקבוצות שמשתתפות בפעילות. כל טקסט בעמוד נפרד כדי שניתן יהיה להחביא אותם. בנוסף יש להדפיס לכל קבוצה את דפי הקלסר הטכני לעזרה.
    - לצורך סידור החדר יש להכין גם:
        - חידה 1: פני המדענים היוונים (שבצידם האחורי יש לסמן את מקום החבאת הרמז הבא ורמזים מסיחים);
        - חידה 3: לחבר פתקים של שמות 4 האנרגיות למפתחות;
        - חידה 5: הדפסת התפזורת;
        - חידה 6: הכרטיסיות להתאמה.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

קריאה השוואתית – מקפלר לניוטון

<u>יוהנס קפלר (1630-1571)</u>

קפלר קבע שתנועות כוכבי הלכת תלויות בעוצמת קרני השמש, שבמהלך סיבובה על צירה נושאת כל אחד מהם בתנועה משיקית סביבה. לפיכך היה עליו להסביר מדוע לכל כוכב לכת יש זמן הקפה משלו סביב השמש, זמן הקפה ששונה (לגבי כל אחד מהם) מקצב סיבוב השמש על צירה. הוא קבע שתי סיבות לכך. ראשית, כוכבי הלכת, כמו כל חומר (לדעתו), מפגינים התנגדות מסוימת לתנועה, התנגדות שקפלר כינה "עצלנות החומר". כוכבי הלכת נָטוּ, כפי שהגדיר זאת קפלר עצמו, "בגלל עצם היותם עשויים מחומר, להישאר במקומם ולא לנוע". מהירות כל כוכב לכת בזמן נתון נקבעת על-ידי עוצמת הכוח עליו, תחת ההתנגדות הזאת של החומר. החומר שבכל כוכב לכת אם כן מתנגד לתנועה, ומאחר שכוכבי הלכת מכילים כמויות חומר שונות, כל אחד מהם צריך לנוע (בהנחה ששאר הגורמים קבועים) במהירות משיקית שונה. סיבה שנייה להבדלי המהירות המשיקית היא היחלשות הכוח המניע (הבוקע מהשמש) ביחס ישר למרחק. הכלל הפיזיקלי הבסיסי של קפלר גרס שכוח זה נמצא ביחס הפוך למרחק.

קפלר למעשה פירק את תנועת כוכבי הלכת לשני רכיבים: רכיב משיקי, שכאמור מונע בהשפעת סיבוב השמש על צירה, ורכיב רדיאלי, שהוכתב על-ידי כוח מגנטי בין כוכב הלכת לשמש. בגלל אופן פיזור המטען המגנטי בשמש ובכוכבי הלכת, בחלק ממסלול כוכב הלכת יש דחייה בינו לבין השמש ובחלק אחר יש משיכה. לפיכך כוכב הלכת משנה בהתמדה את מרחקו מהשמש (בגלל הכוח הרדיאלי-מגנטי), וכתוצאה מכך – בהתאם לכלל הפיזיקלי הבסיסי של קפלר (הכוח המשיקי נמצא ביחס הפוך למרחק) – משתנית בהתמדה גם מהירותו המשיקית של כוכב הלכת (ככל שכוכב הלכת מתקרב לשמש היא גדֵלה, וככל שהוא מתרחק ממנה היא קטֵנה).

במהלך חיפושיו של קפלר אחר חוקיות מתמטית שתקיים את הכלל הפיזיקלי הזה הגיע קודם כול למה שמכונה כיום "חוק השני" (חוק השטחים). רק לאחר שלא הצליח ליישב את חוק השטחים עם התצפיות המעולות שהיו בידיו (שאותן קיבל מידי האסטרונום הדני טיכו בראהה) תוך שמירה על ההנחה המסורתית שמסלול כוכב הלכת מעגלי, הגיע לבסוף למה שאנו מכנים "החוק הראשון", כלומר חוק האליפסה. יש להדגיש שהאליפסה היתה צורה מוכרת היטב כבר למתמטיקאים של העת העתיקה, וקפלר הביע את השתוממותו על כך שעקום כה פשוט מבחינה מתמטית למעשה פותר את הבעיה הקשה כל-כך של תנועות כוכבי הלכת.

פראפראזה מתוך הספר:

Stephenson, B. (1994). *Kepler's Physical Astronomy*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

אייזק ניוטון (1727-1642)

מחשבותיו של ניוטון על דינמיקה ניעורו בסוף שנת 1679 בזכות מספר מכתבים שקיבל מרוברט הוק, שזה עתה נבחר למזכיר החברה המלכותית של לונדון והתאמץ להחיות את התעניינותו של ניוטון בפעילויות ופרסומי החברה.[13] ניוטון היה חבר האגודה עוד מ-1672, אך איים כעבור שנה להתפטר בגלל הביקורת העזה שספג חיבורו על תורת הצבעים. מכתב הפיוס של הוק, מנובמבר 1679, הציע לניוטון עלה של זית, בדמות בקשה לקבל את חוות דעתו של ניוטון על היפותזה שניסח הוק בנוגע לתנועות כוכבי הלכת. בניגוד לדעתו הקודמת של ניוטון, שגרסה שמסלול כוכב לכת מוכתב על-ידי כוח משיקי, כוח פונה כלפי חוץ (צנטריפוגלי) וכוח פנימי (צנטריפטלי) המאזן את הצנטריפוגלי, הוק הציע את ההשערה שתנועות כוכב לכת היא הרכבה דינמית של שתי תנועות בלבד: תנועה משיקית בשל אינרציה ותנועה לעבר הגוף המרכזי בהשפעת כוח משיכה הפועל לעברו.[14]

ב-1684, ניוטון שלח להאלי את פתרונו לבעיית כוכבי הלכת.[15] פתרון זה מבוטא לא בסגנון המסורתי של הגיאומטריה היוונית ולא בפורמולציה המודרנית של החשבון הדיפרנציאלי והאינטגרלי המוכר לנו. ככזה הוא מהווה אתגר הן לפיזיקאי המודרני והן למלומד החוקר את כתבי הפילוסופים והמתמטיקאים של יוון העתיקה וממשיכיהם. ניוטון התאים את הקינמטיקה הליניארית של גליליאו לדינמיקה האינרציאלית של דקארט[16] וקבע את טבעו ההכרחי של הכוח שדרוש לקיומה של תנועה פלנטרית כפי שתוארה בידי קפלר. תוך התבססות על הישגי גליליאו, דקארט וכריסטיאן הויגנס,[17] שכולם מניחים כוחות קבועים (או היעדר כוחות בכלל), וכן בזכות שלושת חוקיו הידועים (שניוטון התייחס אליהם כאקסיומות שאינן דורשות הוכחה), הצליח ניוטון לפתור את בעיית תנועות כוכבי הלכת, שכרוכה בכוח שגודלו משתנה בכל רגע ורגע. תרומתו הייחודית של ניוטון היתה הנחתו שניתן לחשוב על כוח משתנה זה כאילו הוא קבוע למשך פרק זמן קצר מאוד, והצלחתו בניסוח ביטוי גיאומטרי פשוט (יחסית) שיבטא קירוב זה. כך עלה בידי ניוטון להוכיח את חוק היפוך הריבוע, כלומר שכוח הכבידה שדרוש להחזיק כוכב לכת במסלול שתואם את חוקי קפלר חייב להימצא ביחס פרופורציונלי הפוך לריבוע מרחק כוכב הלכת מהגוף המרכזי (השמש).

פראפראזה מתוך הספר:

Brackenridge, J. B. (1996). *The Key to Newton's Dynamics*. Berkeley: University of California Press.

---

[13] הוק היה מדען אנגלי נודע, שבין השאר ניסח את חוק הקפיצים $F = -k\Delta x$ הקרוי על שמו.

[14] יש לציין שניוטון קיבל הצעה זו והיטיב ליישמה, אם כי בשום מקום לא נתן קרדיט על כך להוק. המשך מערכת היחסים בין ניוטון הלוחמני להוק – וגם בין ניוטון לעמיתים רבים אחרים – לא התאפיין בהרבה עלי זית.

[15] אדמונד האלי, אסטרונום ופיזיקאי אנגלי, שמפורסם גם הודות לשביט הקרוי על שמו אך בעיקר בזכות ניסיונותיו הבלתי-נלאים (והמוצלחים) לשכנע את ניוטון העקשן והזועף להעלות סופסוף את תורתו על הכתב.

[16] היה זה הפילוסוף הצרפתי רנה דקארט שקבע ב-1646 את מה שהפך לבסוף לחוק הראשון של ניוטון, כלומר הקביעה שבהיעדר מכשולים או כוחות גוף יתמיד בתנועה קצובה לאורך קו ישר.

[17] מדען הולנדי שידוע בעיקר בשל מודל האור הגלי שפיתח, תרומתו המשמעותית לחקר התנגשויות אלסטיות וקביעתו שבתנועה מעגלית קצובה התאוצה מכוונת למרכז ופרופורציונית לריבוע המהירות חלקי רדיוס הסיבוב.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

טבלת ההשוואה בין קפלר לניוטון

קראו את דפי המידע המתארים את עבודתם של קפלר וניוטון (בהתבסס על ספריהם של היסטוריונים חשובים) וערכו השוואה בין הגישות המדעיות לאסטרונומיה של קפלר ושל ניוטון. שימו לב – בכל טבלה (דומה/שונה) ישנם קריטריונים חסרים (שורות ריקות). מצאו לפחות קריטריון חסר אחד בכל טבלה ומלאו את הטבלה גם עבורו.

הדומה בין קפלר לניוטון:

קריטריון	קפלר וניוטון
הגישה כלפי האסטרונומיה – האם היא מדע מתמטי או פיזיקלי?	
צורת מסלול כוכבי הלכת	
היכן מרכז היקום	השמש כמרכז היקום (או מרכז תנועת כוכבי הלכת)
הקפדה עקשנית על התאמה בין תיאוריה לתצפית	

השונה בין קפלר לניוטון:

קריטריון	קפלר	ניוטון
מהו האופן בו כוח גורם לתנועה?		
האם יש אינרציה?		
כיצד תלוי כוח הכבידה במרחק מהשמש?		
חדשנות בשימוש במתמטיקה	שימוש באליפסה – עקום מוכר היטב	שימוש במה שעתיד להפוך לחדו"א, קירובים והנחה שכוח משתנה יכול להחשב ככקבוע בפרקי זמן קצרים
היכולת להתבסס על עבודת קודמיך (כמה הן שונות מגישתך)		

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

<u>דף עבודה: פיתוח חוק הכבידה האוניברסלי של ניוטון מהחוק השלישי של קפלר</u>

אחרי שהבנו את תנועת כוכבי הלכת הן לפי קפלר והן לפי ניוטון ואת ההבדלים בין שתי הגישות, נגיע יחד מהחוק השלישי של קפלר לחוק הכבידה האוניברסלי של ניוטון, תוך שימוש בחוקי ניוטון.

<u>*שימו לב:*</u> בתהליך הפיתוח נתייחס למסלול כוכבי הלכת כאל מעגל. קירוב זה מאפשר לנו להשתמש בנוסחאות של תנועה מעגלית וכן להמיר את "חצי הציר המרכזי של האליפסה" ברדיוס המעגל.

1) האם תוכלו להסביר מדוע מוצדק קירוב זה של המסלולים האליפטיים למעגליים?

____

____

____

2) כתבו ביטוי עבור תאוצה רדיאלית, כתלות במהירות משיקית:

____

____

____

3) כתבו ביטוי עבור מהירות משיקית בתנועה מעגלית, כתלות בזמן מחזור:

____

____

____

4) כתבו מחדש (בהסתמך על סעיף 3) את הביטוי לתאוצה רדיאלית:

____

____

____

5) כתבו את החוק השלישי של קפלר, עבור כוכב לכת יחיד (זכרו: הניחו מסלול מעגלי):

____

____

____

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

6) באמצעות הביטויים שקיבלתם בסעיפים 4-5, כתבו ביטוי לתאוצה הרדיאלית ללא תלות בזמן מחזור:

7) קיבלנו ביטוי "חדש" לתאוצה רדיאלית אשר מתבסס על תנועה מעגלית והחוק השלישי של קפלר. מהי תלות התאוצה ברדיוס?

הוכחת תלות זו, בהנחת מסלול אליפטי ממש (מבלי לקרבו למעגל), נחשבת להישג מרכזי מאוד של ניוטון.

8) כתבו את החוק השני של ניוטון:

9) הציבו בחוק השני של ניוטון את הביטוי עבור התאוצה שקיבלתם בסעיף (6):

10) הפרידו את הפרמטרים התלויים בכוכב הלכת ובמסלולו מאלו שאינם תלויים בו (הקבועים) בביטוי עבור הכוח השקול מסעיף (9):

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

קיבלנו ביטוי של כוח עבור גוף הנע בתנועה מעגלית. אנו רואים את התלות במסת כוכב הלכת וברדיוס המסלול אך זהו עדיין אינו הביטוי המוכר לנו עבור כוח הכבידה האוניברסלי המיושם למערכת השמש: $F = G\frac{M \cdot m}{r^2}$ (בו m היא מסת כוכב הלכת ו M היא מסת הגוף המרכזי, השמש).

מתוך החוק השלישי שלו, חוק הפעולה והתגובה, ניוטון מסיק כי אם הגוף המרכזי מפעיל כוח על הגוף המִשני, כי אז הגוף המִשני מפעיל כוח זהה על הגוף המרכזי, ומשיקולי סימטריה הכוח הזה חייב להיות פרופורציונלי גם למסת הגוף המרכזי. את הקבוע G המופיע בנוסחה קבע המדען האנגלי הנרי קוונדיש רק בסביבות שנת 1800, בעקבות ניסוי מעבדה שבו מדד בפועל את כוח הכבידה בין שני גופים.

11) היכן בכל זאת "מסתתרת" התלות של כוח הכבידה בגוף המרכזי בביטוי שקיבלתם בסעיף (10)?

____

____

____

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

פעילות ג'יגסו – האור במנהרת הזמן

הנחיות

השיעור עוסק במהות האור - האם האור הינו חלקיק? או אולי דווקא גל? ואם חלקיק – איזה סוג של חלקיק? ואם גל – איזה סוג של גל?

מחלוקת זו, לגבי מהות האור, נמשכה מהמאה ה 17 ועד למאה ה 20 (פרטים כללים על הרקע ההיסטורי למחלוקת תמצאו בדף המבוא המצורף).

כל קבוצה קיבלה מבוא כללי על תפיסות האור וכן קטע המתאר את נקודת מבטו של מדען אחד (או שניים דומים בגישתם) לגבי מהות האור ומאפייניו. על הקבוצה ללמוד את הטקסט, להבינו לעומק ולהציגו בפני הכיתה. הצגות יצירתיות שמסבירות את הטיעון באופן שמעביר גם את רוח התקופה (למשל ע"י משחקי תפקידים במקום בהרצאה סטנדרטית) יתקבלו בברכה.

במהלך השיעור, נתקדם עם ההיסטוריה באופן כרונולוגי וכל קבוצה תציג את הטיעונים של המדען המופיעים בקטע שקיבלה. יחד נבין כיצד התעצבה התפיסה של מהות האור, מה היו טיעוני כל אחד מהצדדים (אלו התומכים באור כגל ואלו התומכים באור כחלקיק) ומה היא התפיסה המקובלת כיום.

כדי להכינכם להצגת הטיעון אותו קיבלתם ענו על השאלות הבאות:

1. האם הקטע שלפניכם הוא בעד התפיסה הגלית? בעד התפיסה החלקיקית? נגד התפיסה הגלית? נגד התפיסה החלקיקית?
2. מהו הטיעון המרכזי של המדען?
3. על מה מתבסס המדען בטיעונו?
4. האם המדען מתאר ניסוי לחזק את טענתו? אם כן, תארו את הניסוי והסבירו כיצד הוא מחזק את טענת המדען.
5. האם המדען מתייחס לטיעונים קודמים? האם משתמש בהם כדי לחזק את עמדתו? כדי לסתור עמדות סותרות?

כל קבוצה תקבל 5 דקות להצגת טיעוניה, ועוד שתי דקות לשאלות הבהרה מהקהל. יש לפתוח בציון שם המדען והשנה בה פעל/פרסם את הקטע אותו קיבלתם.

חשבו – מה הכי חשוב לכם להציג? איך ניתן להציג את הטיעון באופן מעניין? (משעשע, המחזה, מצגת, סרטון רלוונטי ברשת וכו').

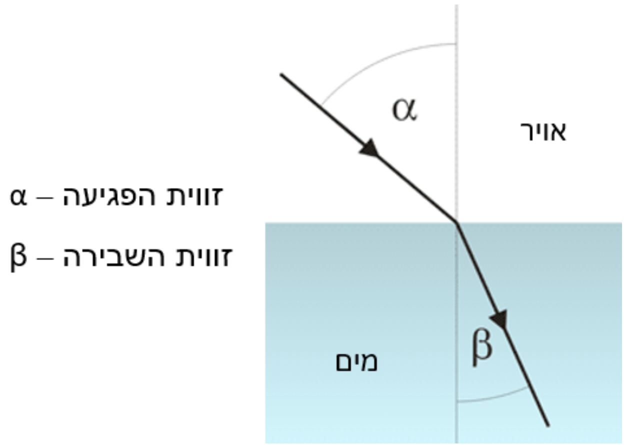
כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

מבוא

במאה ה-17 כבר היו ברורות לפילוסופים ולמדענים באירופה (בעיקר בזכות פועלם של כמה פילוסופים ערביים במאות הקודמות) מספר עובדות בסיסיות חשובות על האור:

- האור מתפשט בקווים ישרים;
- האור איננו בוקע מהעין (כפי שחשבו רבים מהיוונים הקדמונים), אלא יוצא מגופים – בין אם הם מקורות אור ובין אם הם עצמים שמחזירים אור – ומגיע לעין, וכך אנו יכולים לראות גופים אלה;
- היה גם ידוע זה מכבר שבהחזרת אור פשוטה זווית הפגיעה שווה לזווית ההחזרה;
- בשנת 1621 הצליח ההולנדי וילִיברורד סנל, על סמך ניסויים בשבירת אור, לנסח את החוק המפורסם הקרוי על שמו: היחס בין סינוס זווית הפגיעה (הזווית בין הקרן הפוגעת לאנך למשטח הגבול) לבין סינוס זווית השבירה (הזווית בין הקרן היוצאת לאנך למשטח הגבול), הוא קבוע לגבי זוג תווכים נתון (למעשה, קדם לו בניסוח יחס זה הפיזיקאי והמתמטיקאי הערבי אבן סאהל, 940-1000 לספירה).

לאחר שנודע חוק סנל ברחבי אירופה עדיין לא היתה תשובה ברורה לשאלה בדבר מהותו של האור (שאלה שהעסיקה גם את הפילוסופים הקדמונים), אך היה ברור לחלוטין שכל תיאוריה כזאת חייבת להתיישב עם כל ההנחות הללו (ובפרט עם חוק סנל הכמותי), יחד עם העובדה הידועה שאם אור נשבר מתווך דליל לצפוף (למשל מאוויר למים), כי אז קרן האור "מתקרבת לאנך", כלומר חייב להתקיים $\alpha > \beta$ (ראו איור).



שני מודלים שהוצעו בתקופה זו התיישבו עם כל העובדות הידועות הללו: המודל החלקיקי, שגרס שהאור מורכב מחלקיקים קטנים הנעים בקו ישר ובמהירות קבועה בתווך אחיד, והמודל הגלי, שלפיו האור הינו הפרעה המתפשטת בתווך דקיק ביותר (המכונה "אֶתֶר") הממלא את כל היקום.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

הפילוסוף הצרפתי רנה דקארט (1650-1596) תמך **בהשקפה הגלית**, כלומר הוא שיער שהאור איננו מורכב מחלקיקים אלא הוא לחץ המתפשט דרך האֶתֶר, והיה הראשון שניסה לבאר את תופעת השבירה על סמך ניתוח פיזיקלי של תופעת השבירה: הואיל ובמהלך שבירת האור העובר מאוויר למים קרן האור "מתקרבת לאנך", הסיק דקארט שמהירות האור גדולה בתוך המים ממהירותו באוויר. ואולם לאחר מכן הציע ההולנדי כריסטיאן הויגנס (1695-1629) מודל גלי של האור שהיה עקבי ומנומק בהרבה מהשקפת דקארט, והמודל של הויגנס חזה את ההפך. על סמך העיקרון המפורסם הקרוי על שמו (עקרון הויגנס), המתבסס על ההנחה היסודית שהאור מתפשט כגל לכל הכיוונים (בתווך אחיד) במהירות שווה, הראה הויגנס שה"התקרבות לאנך" מחייבת שמהירות האור במים דווקא תהיה **קטנה** יותר ממהירותו באוויר.

(*) שאלה למחשבה: לפי הידוע היום, האם מהירות האור (ליתר דיוק, מהירותו האפקטיבית של האור) בתווך צפוף (יחסית) קטנה ממהירותו בתווך דליל, גדולה ממנה או שווה לה? לאור זאת, האם לדעתך השקפת דקארט היא נכונה, או שמא נכונה המסקנה מהמודל הגלי?

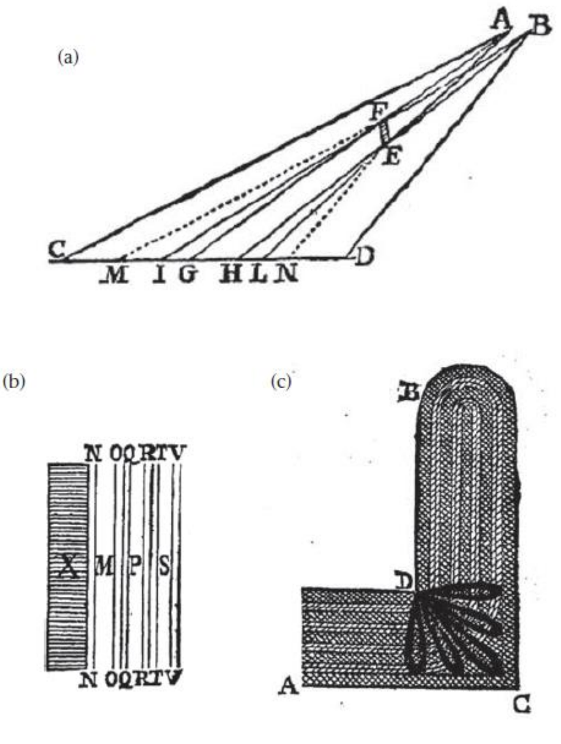
מכל מקום, מובן שבחלוף הזמן, ככל שהשתפרות הטכנולוגיה אפשרה למדענים לצפות בתופעות רבות יותר (כמו עקיפה, התאבכות ועוד), הלכה והתחדדה השאלה איזה משני המודלים הללו – שהוצעו לראשונה באופן בהיר ועקבי במאה ה-17, ושניהם נשקלו ברצינות רבה מאז – קרוב יותר למציאות.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

האור במנהרת הזמן – קבוצה מספר 1

טקסט ראשון: **פרנצ'סקו גרימלדי, 1665**

ב-1665 התפרסם ספרו עב-הכרס של האב הישועי, האיטלקי פרנצ'סקו גרימלדי, "פיזיקו-מתמטיקה של האור", שהכיל תיאור של תגליתו האופטית החדשה לחלוטין, שאותה כינה (בלטינית) diffractio (המונח באנגלית diffraction פירושו "עקיפה"). בסדרה של ניסויים זהירים, הוא חקר את הצל שמטיל על מסך רחוק עצם צר כאשר הוא מואר על-ידי אור שמש העובר דרך נקב קטן בתריס. הוא הבחין בכך שהצל החלקי (שנקרא "פנומברה") היה גדול מכפי שהשתמע מממדי הנקב וכָלל פסים צבעוניים הן בתוך הצל הגיאומטרי[18] והן מחוצה לו (איור 1). הוא קבע בזהירות שתופעה זו תלויה באופן חדש של התקדמות אור, הנבדל מהחזרה (על-ידי קצותיו של העצם), משבירה (על-ידי תווך הטרוגני כלשהו) ומפיזור (על-ידי האוויר). גרימלדי הסביר את הפסים הנצפים באמצעות אנלוגיה עם התנועה הגלית של פני המים של נחל מעבר למכשול, והסיק ש"האור הוא כנראה מעין נוזל מהיר ביותר, שלעתים גם מבצע תנועה גלית, ושוטף דרך תווך שקוף".



איור 10 - ניסוי העקיפה הראשון של גרימלדי. (a) מערכת הניסוי (AB - חורים בצמצם, EF - עצם, CD מסך), (b) הפרינג'ים הצבעוניים שהתקבלו בסמוך לצל הגיאומטרי של העצם,(c) פרינג'ים פנימיים בתוך הצל של עצם בצורת האות L. מתוך כתבי גרימלדי, 1665

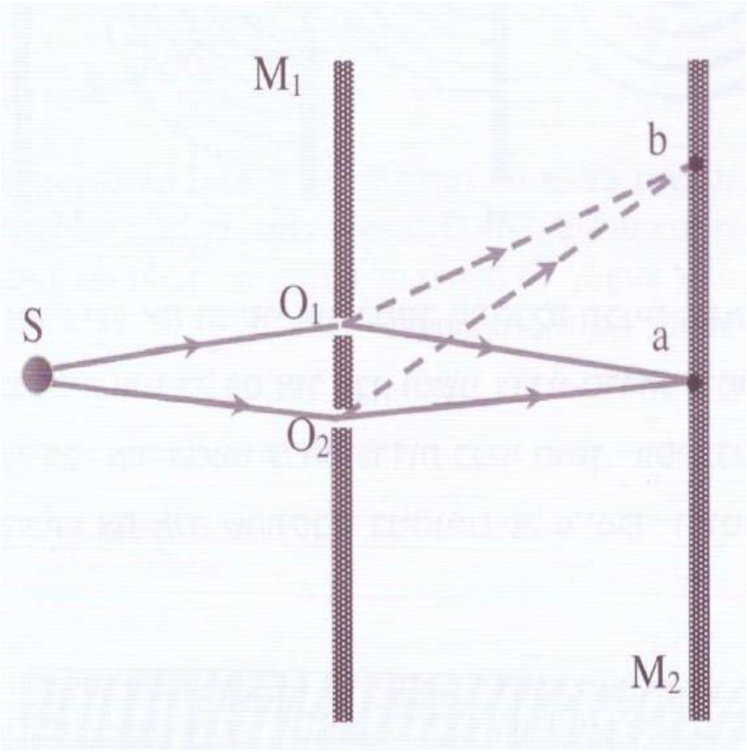
(Darrigol, *A History of Optics*, pp. 58-59)

[18] הצל הנוצר בהנחה שהאור מתקדם בקווים ישרים (כלומר אינו מבצע שום עקיפה כלל).

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

<u>טקסט שני</u>: **תומס יאנג, 1801 (אופטיקה פיזיקלית, עמ 155)**

הניסוי של תומס יאנג הוא אחד מהמפורסמים בהיסטוריה של הפיזיקה ונושא את שמו. בניסוי זה יצר יאנג שתי אלומות של "אותו האור", כלשונו, והפגיש ביניהן כך שהן חפפו זו את זו (איור 2). כתוצאה מהחפיפה נוצרה התאבכות ועל המסך התקבלה תבנית של פסי אור ופסי חושך כפי שציפה יאנג.



איור 11 - תיאור ניסוי יאנג: אור הנובע מ-S מתפצל לשני מקורות בעוברו דרך שני הסדקים שבמחסום. בגלל העקיפה של האור חופפות האלומות במקומות שונים, ולכן ייתכן כי בנקודה a הן תחזקנה זו את זו ויתקבל פס אור (התאבכות בונה), ובנקודה b הן תבטלנה זו את זו וייווצר חושך (התאבכות הורסת).

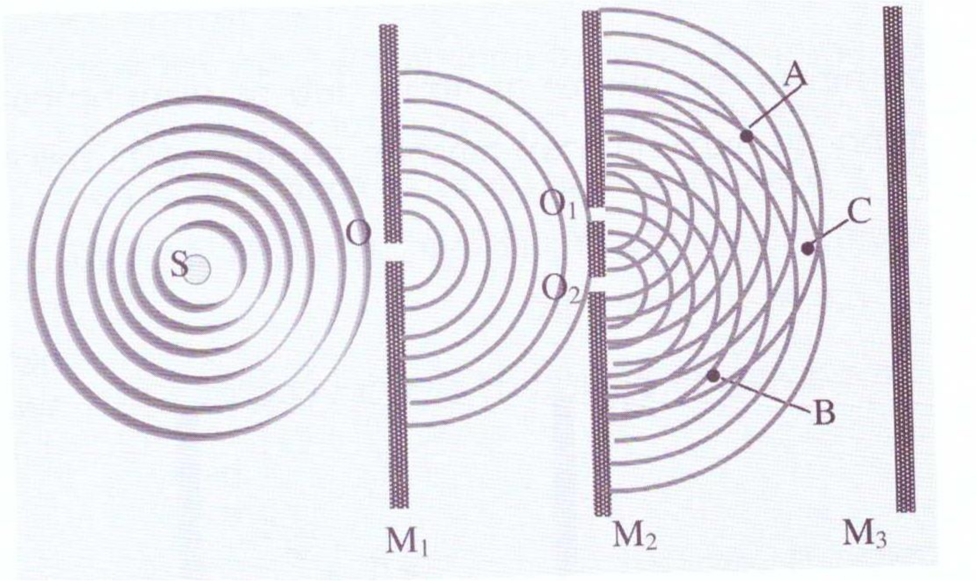
כדי שניתן יהיה להבחין בתבנית ההתאבכות על המקומות שבהם מתקבלים פסי אור ופסי חושך להיות קבועים. מצב זה נוצר כשהגלים הנפגשים הם בעלי אותה התדירות ובהפרש מופע קבוע (אלה הם גלים קוהרנטיים). אם גם המשרעת זהה, הרי שבהתאבכות ההורסת נקבל פס חשוך (או נקודה חשוכה) על המסך.

הרעיון של יאנג היה פשוט: להפגיש בין שתי אלומות אור כדי לקבל התאבכות בין גלי האור. הקושי המיוחד היה בגלל אורך הגל הקצר מאוד של האור. שלא כמו בהתאבכות גלי מים, צפייה בהתאבכות האור דורשת היווצרות פסי חושך (ביטול מוחלט של האורות הנפגשים, המצריך משרעת ותדר זהים והפרש מופע קבוע). יאנג הבין כי לא ניתן למצוא שני מקורות אור זהים ממש, ולכן השתמש במקור אחד שאת אורו פיצל. כך נוצרו שני מקורות קוהרנטיים שעוצמתם שווה, כלומר מקורות צמודים.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

יאנג העביר את אור השמש דרך פתח O זעיר ששימש כמקור אור נקודתי (איור 3). בהמשך דרכה של האלומה הציב מחיצה אטומה M_2 ובה שני סדקים. על פי עקרון הויגנס, נקודות במרחב בתוך כל אחד מהסדקים O_1 ו-O_2 שבמחיצה M_2, הפכו בעצמן למקורות אור שמהם יוצאים גלים משניים לאחר שהגל המקורי מגיע אליהן מ-S. בגלל המוצא המשותף, מהוות אלומות האור היוצאות מהסדקים מקורות קוהרנטיים: בעלי אותה המשרעת, אותו התדר והפרש מופע קבוע (כך שניתן להחשיב אותו כשווה לאפס).

שתי סדרות הגלים הקוהרנטיים יצרו תבנית של התאבכות. אם נתייחס לקשתות שבתרשים כמייצגות את שיאי הגלים, הרי שבנקודה A יש מפגש בין שני שיאים, ולכן התאבכות בונה, בנקודה B יש מפגש בין שיא לשפל (הקשת של הנקודות בהן יש שפל ברגע שבו הוקפאה התמונה אינה משורטטת. השפל הוא באמצע בין שני שיאים), ולכן התאבכות הורסת, ובנקודה C יש מפגש בין שפל לשפל, ולכן תיווצר שוב התאבכות בונה. בהתאם נקבל על המסך M_3 אזורים של אור ושל חושך.



איור 12 - שני גלי אור מתואמים היוצאים משני סדקים O1 ו-O2, יוצרים תבנית של התאבכות בונה והורסת בכל המרחב שאחרי המחסום.

(גלילי וחזן, *אופטיקה פיזיקלית*, עמ' 155)

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

האור במנהרת הזמן – קבוצה מספר 2

הויגנס, 1679

טקסט ראשון:

הראיתי, כיצד אפשר להבין שהאור מתפשט בהדרגתיות, באמצעות גלים כדוריים, וכיצד התפשטות זו יכולה להיעשות במהירות כה רבה כפי שדורשים הניסויים והתצפיות בשמים.[19] אבל צריך להסתכל ביתר קפדנות במקורם של גלים אלה ובאופן התפשטותם, וקודם לכול הרי נובע ממה שנאמר על יצירת אור, שכל מקום קטן שעל פני גוף מאיר, כגון השמש, נר או פחם לוהט, מפיק גלים משלו שמקום זה משמש להם מרכז. כך הדבר בשלהבת של נר (איור 4), שאם נסמן בתוכה נקודות A, B, C, הרי המעגלים הקונצנטריים שמסביב לכל אחת מנקודות אלה מייצגים את הגלים שמקורם בהן. דבר כזה צריכים לראות גם מסביב לכל נקודה אחרת שעל-פני השלהבת וגם סביב הנקודות שבתוכה.

איור 13 – גלי אור הנפלטים משלהבת של נר

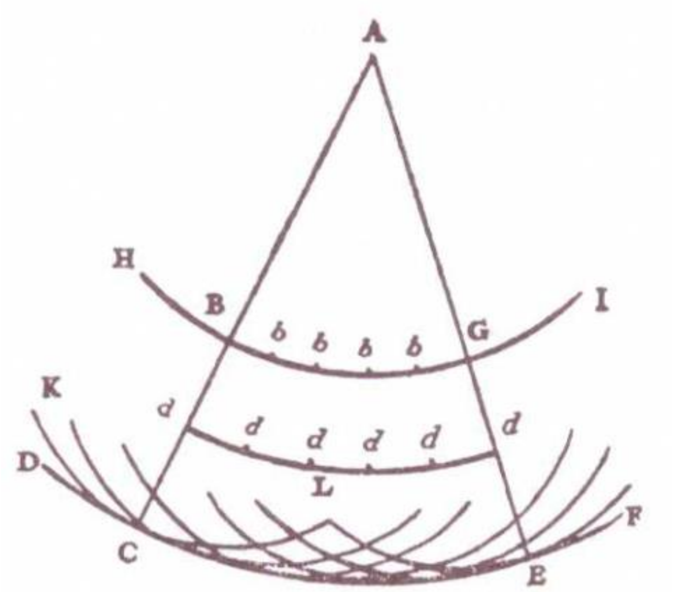
בפליטת גלים אלה, קיים השיקול הנוסף שכל חלקיק של חומר שבתוכו מתפשט גל, אינו חייב להעביר את תנועתו לחלקיק הסמוך לו בלבד, הנמצא על הקו הישר היוצא מן הנקודה המאירה, אלא שבהכרח הוא מוסר חלק מתנועתו גם לכל החלקיקים האחרים הנוגעים בו והמתנגדים לתנועתו. נובע מכך שמסביב לכל חלקיק נוצר גל שחלקיק זה יושב במרכזו. למשל אם DCF (איור 5) הוא גל הנפלט מן הנקודה המאירה A והיא מרכזו, הרי החלקיק B, שהוא אחד מאלה הכלולים בכדור FCD, עתיד ליצור גל חלקי משלו LCK שייגע בגל FCD בנקודה C באותו הרגע שבו הגל הראשי המופק מן הנקודה A מגיע אל FCD; ברור שרק המקום C של הגל LCK ייגע בגל FCD, כלומר: אותו מקום הנמצא על הקו הישר העובר דרך BA. כיוצא בזה החלקיקים האחרים הכלולים בכדור FCD, כגון bb, dd וכו', יפיקו כל

[19] בשנת 1676 פרסם האסטרונום הדני רימר את תוצאות מדידותיו על סמך ליקויי איו (ירחו של צדק); הוא הוכיח מעבר לכל ספק שמהירות האור גבוהה מאוד (אך סופית).

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

אחד את הגל שלו. אולם כל אחד מן הגלים הללו יכול להיות חלש לאין שיעור לעומת הגל FCD, שלהרכבתו תרמו כל הגלים האחרים על-ידי אותו החלק של משטח פניהם המרוחק ביותר מן המרכז A.

רואים אנו, יתר על כן, שהגל FCD נקבע על ידי המרחק שעברה במשך זמן מסוים התנועה שיצאה מהנקודה A; כיוון שאין כל תנועה מעבר לאותו הגל, אם כי יש תנועה בתוך המרחב שהוא סוגר, כלומר: באזורי הגלים החלקיים שאינם נוגעים בפני הכדור FCD. ואל לנו לחשוב שכל אלה פרטים קפדניים ומפורטים מעבר לדרוש, שהרי עתידים אנו להיווכח להבא שכל תכונות האור וכל הנוגע להחזרתו ושבירתו מוסברים בעיקר על-ידי אמצעי זה. [20]



איור 14 - התפשטות גלי האור

[20] הויגנס אכן מוכיח (באופן גיאומטרי) שבעזרת ה"אמצעי" שפיתח (המכונה מאז "עקרון הויגנס") ניתן להסביר הן החזרה והן שבירה. ההוכחה עצמה ארוכה ומורכבת למדי ולכן איננה מופיעה כאן.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

טקסט שני:

אי-אפשר להטיל ספק בכך, שהאור אינו אלא תנועה של חומר מסוג כלשהו. שהרי אם נסתכל בהפקת האור נמצא, שכאן על-פני האדמה האש והלהבה הם עיקרי מחולליו, ובלי ספק הללו מכילים גופים השרויים בתנועה מהירה, כיוון שהם ממיסים ומתיכים גופים רבים אחרים ואפילו מן המוצקים ביותר; ואם בפעולות האור נסתכל, נראה שכאשר האור מרוכז, כגון בעזרת מראות קעורות, יש לו כוח של שריפה כאש, כלומר: הוא מפריד בין חלקיקיהם של גופים. ודאי שזהו סימן לתנועה, לפחות בפילוסופיה האמיתית, שבה נתפסות סיבות כל התופעות הטבעיות במונחי תנועות מכאניות. לדעתי זה הדבר, שצריך לעשותו, אם לא נתייאש מכל תקווה להבין משהו בפיזיקה.

והואיל ולפי פילוסופיה זו נראה הדבר כוודאי, שתחושת הראייה אינה מתעוררת אלא על-ידי רושם תנועתו של איזה חומר, הפועל על העצבים שבתחתית עינינו, הרי גם זו סיבה להאמין, שהאור הוא תנועה של החומר הנמצא בינינו ובין הגוף המאיר.[21]

יתר על כן, אם נזכור את המהירות המופלגת, שבה מתפשט האור לכל עבר, ושאפילו הוא מגיע ממקומות שונים, ואף מאלו שכיווניהם הפוכים זה לזה, קרניו עוברות זו את זו ואינן מפריעות זו לזו, הרי נבין יפה, שכל אימת שאנו רואים גוף מאיר, לא יהיה הדבר בגלל העברתו של חומר המגיע מן הגוף הזה אלינו כקליע או כחץ המתקדם באוויר; שהרי ודאי שדבר זה אינו מתיישב בשום פנים עם שתי התכונות האמורות של האור, ובעיקר לא עם השנייה שבהן. הווי אומר, האור מתפשט באופן אחר; ומה שיכול לסייע לנו להבנת הדבר הרי זו הידיעה שאנו יודעים על התפשטותו של הקול בתוך האוויר. יודעים אנו, שבאמצעות האוויר, שהוא גוף בלתי-נראה ולא ניתן למישוש, הקול מתפשט סביב מן המקום שבו הוא נוצר על-ידי תנועה העוברת בהדרגה בחלקי האוויר מזה לזה... והנה אם רצוננו ליישם מין תנועה זו לגבי זו המולידה את האור, אין מה שיעכב בידינו מלשער שחלקיקי האתר עשויים מחומר הקרוב לקשיות המושלמת ולקפיציות המהירה בכל מידה שנחפוץ... אם אנו מניחים קפיציות בחומר האתרי, הרי תהיה לחלקיקיו התכונה לחזור לקדמותם באותה המהירות, תהא דחיפתם חזקה או חלשה, וכך יהיה הילוכו של האור נמשך תמיד במהירות קבועה.

(שני הקטעים: מתוך סמבורסקי, *המחשבה הפיסיקאלית בהתהוותה*, עמ' 292-299)

---

[21] הויגנס מתכוון כאן לאתר, החומר הדקיק שבהתאם לתורה הגלית ממלא את כל היקום (שהאור איננו אלא הפרעות בתוכו).

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

האור במנהרת הזמן – קבוצה מספר 3

ניוטון, 1704

טקסט ראשון:

כלום אין טעות בכל ההשערות, שלפיהן האור הוא לחץ או תנועה המתפשטים בתווך נזיל? שהרי בכל ההשערות הללו נתבארו עד היום תופעותיו של האור על-ידי ההנחה, שהן באות משינויי צורה חדשים בקרניים, וזוהי הנחה מוטעית. שהרי לו היה האור לחץ בלבד, המתפשט בלי תנועה אמיתית, לא היה יכול לעורר ולחמם את הגופים השוברים או מחזירים אותו. אילו [האור] היה תנועה, המתפשטת לכל מרחק כהרף-עין, היה דרוש כוח אינסופי בכל רגע, בכל חלקיק מאיר, לחולל תנועה זו, ואילו היה לחץ או תנועה, שהתפשטותם כהרף עין או במשך זמן, היה עוקף ונכנס בצל, שהרי לחץ ותנועה אינם יכולים להתפשט בנוזל בקווים ישרים מעבר למכשול העוצר חלק מהתנועה, אלא הם עוקפים ומתפשטים בכל כיוון בתווך השקט הנמצא מעבר למכשול. הכובד מכוון כלפי מטה; אבל לחץ המים הבא מהכובד מכוון לכל עבר בכוח שווה, ומתפשט בקלות במידה שווה גם לצדדים וגם למטה, ודרך מעברים מפותלים כמו דרך מעברים ישרים. הגלים שעל פני המים השקטים, העוברים ליד צדי מכשול רחב העוצר חלק מהם, עוקפים ומתפשטים אחר כך בהדרגה לתוך המים השקטים שמעבר למכשול. הגלים, הפעימות או תנודות האוויר, שמהם עשויים הקולות, עוקפים בבירור, אף־על־פי שלא באותה מידה כמו גלי המים. שהרי פעמון או תותח אפשר לשמוע את קולו מעבר לגבעה, המעכבת את ראיית הגוף המשמיע קול, וקולות נוחים להתפשט דרך צינורות מפותלים וישרים במידה שווה. אבל לא נודע מעולם, שאור נע במעברים מפותלים, ולא שהוא עוקף ונכנס בצל. שהרי כוכבי-השבת פוסקים מלהיראות כאשר מסתיר אותם אחד מכוכבי-הלכת. וכן חלקי השמש, כאשר הם מוסתרים בידי כוכב־חמה או נוגה.

(מתוך סמבורסקי, *המחשבה הפיסיקאלית בהתהוותה*, עמ' 321)

טקסט שני:

חוק ההחזרה היה ידוע מאז העת העתיקה והיה קל יחסית להסביר אותו באמצעות תיאוריה חלקיקית, באמצעות מודל פשוט הנוקט אנלוגיה להחזרת כדור ממשטח קשה. ברשימותיו המוקדמות ביותר השתמש ניוטון בהתנגשויות בין חלקיקי אור וגופים כדי להסביר הן החזרה והן שבירה. אך עד מהרה הוא גילה שאם מניחים שלחומר יש מבנה אטומי, המודל הזה קורס. בקנה המידה של אטומים משטח הגוף המחזיר איננו חלק כמו מראה אלא הוא מחוספס מאוד, ומכיל גופיפים המופרדים זה מזה על-ידי חורים. החזרה איננה יכולה להתרחש מחלקיקי הגוף משום שהיא מחייבת סידור ממוזל ביותר של כל החלקיקים, שבמסגרתו עבור זווית פגיעה כלשהי, הקרניים יוחזרו מהגוף בזווית שווה לזווית הפגיעה

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

שלהן. מצב זה דרש שהחזרה ושבירה יתרחשו בגלל סיבה אחרת. תחילה סבר ניוטון שההסבר לתופעות הללו הוא האתר, החומר הדקיק הממלא את כל רחבי היקום, אך מאוחר יותר הסיק שמקורן בכוח כלשהו הפועל על כל חלקיקי האור המגיעים למשטח שבו מתרחשת ההחזרה או השבירה. לאחר שפיתח את מושג הכוח, נקט ניוטון את האנלוגיה בין תנועתם של גופיפים (חלקיקים) ואור כמתואר להלן.

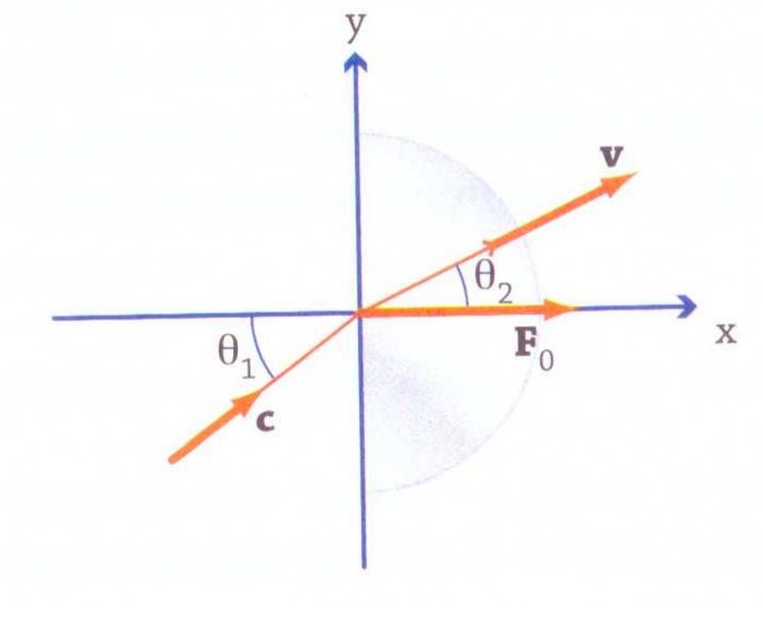
נדון לדוגמה במקרה שבו אור נע באוויר ונשבר במעברו לזכוכית. ניוטון הניח שכל עוד חלקיק אור נע באוויר בלבד או בזכוכית בלבד – לא פועל עליו כוח שקול שמקורו בתווך. לכן על-פי החוק הראשון של ניוטון, מהירותם של חלקיקי האור באוויר אינה משתנה. אולם במעבר חלקיק אור מהאוויר לזכוכית כיוון תנועתו משתנה. על פי החוק השני של ניוטון במעבר מאוויר לזכוכית חייב לפעול על חלקיקי האור כוח המכוון לעבר הזכוכית (איור 6) בכיוון הציר x כוח F_0, לכן רכיב התנע של החלקיק בכיוון זה אינו נשמר. אבל בכיוון ניצב לכוח, בכיוון הציר y, רכיב התנע נשמר:

$$m \cdot (c \cdot \sin\theta_1) = m \cdot (v_{glass} \cdot \sin\theta_2)$$

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{v_{glass}}{c}$$

(c = מהירות האור באוויר; v_{glass} = מהירות האור בזכוכית).

כלומר, היחס בין סינוס זווית הפגיעה וסינוס זווית השבירה הוא גודל קבוע, וזהו בעצם חוק סנל.



איור 15 - הכוח הפועל על האור במעבר מאוויר לזכוכית

(רוזן, מודלים של האור, עמ' 22-25;

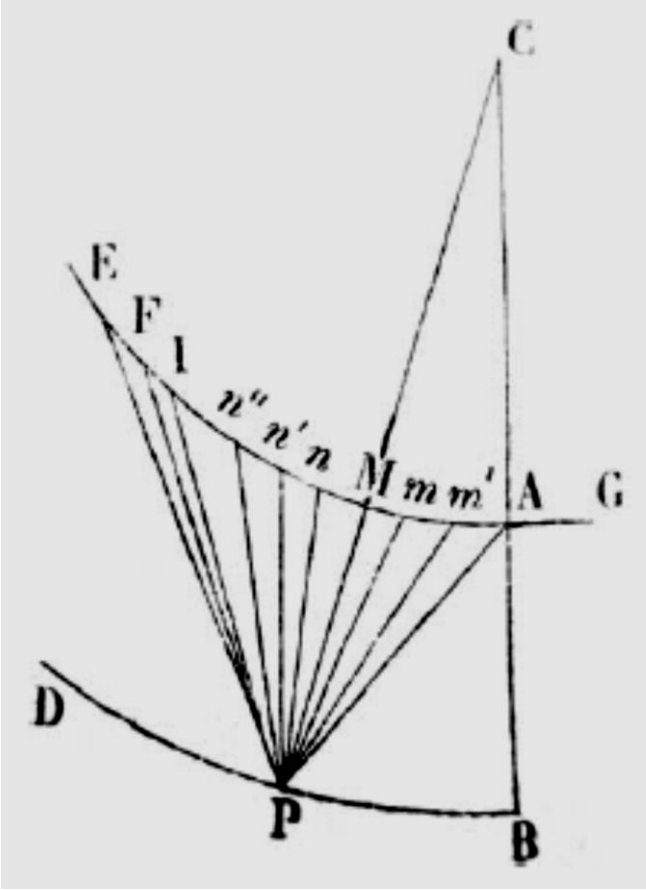
(Shapiro, Newton's optics and atomism, pp. 232-235

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

<u>האור במנהרת הזמן – קבוצה מספר 4</u>

אוגוסטן פרנל וסימון דניס פואסון, 1817

כאשר אוגוסטן פרנל שב לעסוק בעקיפה בחורף 1817, הוא שיער שבאופן כללי יש לנתח מתמטית את האור שעבר עקיפה באמצעות סופרפוזיציה של אדוות-גלים (wavelets) הבוקעות מנקודות שונות של חזית הגל שהופרעה (איור 7). הוא פיקפק תחילה ביכולתו לבצע את החישובים הנדרשים לניתוח מעין זה. ב-17 במארס 1817 האקדמיה הפריזאית למדעים הכריזה על תחרות נושאת פרס סביב חקר העקיפה. בחודש שלאחר מכן שלח פרנל לאקדמיה את התיאוריה המלאה שלו, במכתב במעטפה חתומה (כדי להבטיח את זכות הבכורה על רעיונותיו).



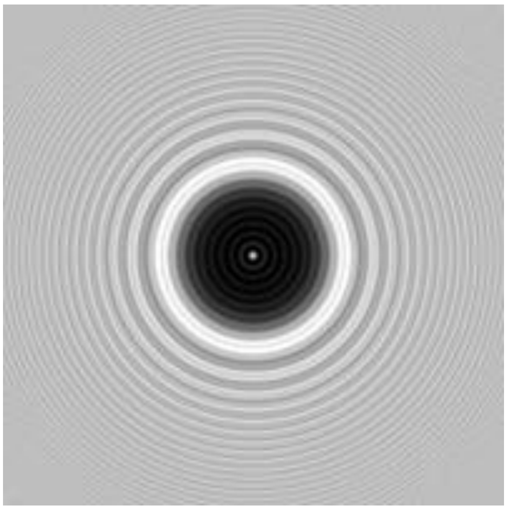
איור 16 - דיאגרמת פרנל (ששרטט פרנל בעצמו) עבור חישוב עקיפה של האור. חזית הגל מ EA (ממקור האור בנקודה C) מופרעת על-ידי מסך עקיפה AG. האלמנטים n'n'', nn', ..., mm' תורמים לסך הרעידות בנקודה P

פרנל בחן את חזית הגל AF המופרעת על-ידי מסך העקיפה AG באיור (המסך מאונך למישור הדף), והניח שכל אחד מהאלמנטים ’mm, ’nn, ’’n’n וכו' הוא המקור לתנודה משנית שעוצמתה כמעט שאינה משתנית בכיוונים הקרובים לכיוון המאונך לאלמנט. בהתאם לגרסת פרנל של עקרון הויגנס, התנודה בפועל בנקודת התצפית P היא סופרפוזיציה של תנודות משניות אלה. על-סמך מספר הנחות – למשל, שכל התנודות המשניות הללו סינוסואידליות –

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

חישב פרנל את התנודה הכוללת שהתקבלה ב-P והראה שהתוצאות המתקבלות מחישוביו מתיישבות היטב עם מדידות פסי העקיפה שערך. פרנל בחן בחישוביו תצורות שונות של מסך עקיפה (AG) והראה שאם הוא גדול הרבה יותר מאורך הגל (במיוחד אם ניתן להתייחס ל-AG כמישור אינסופי-למחצה), עוצמת האור העוקף נחלשת במהירות רבה בתוך הצל הגיאומטרי[22].

בזכות שיקוליו ונימוקיו המעמיקים והמדויקים כל-כך, פרנל זכה בקלות בפרס של האקדמיה. אחד מחברי הוועדה שבחנו את התיאוריה של פרנל היה סימון דניס פואסון, מתנגד חריף ידוע של תורת הגלים. פואסון ציין שתורת פרנל מובילה לנוסחה פשוטה עבור עקיפה של דיסקה כאשר מקור האור ונקודת התצפית הם על ציר הסימטריה של הדיסקה. במקרה זה, מחישובי פרנל עולה שהעוצמה במרכז הצל שיוצרת הדיסקה זהה לעוצמה שהיתה מתקבלת אילולא היא נמצאה שם כלל וכלל (דבר שנראה לפואסון לא סביר). המדען הצרפתי פרנסואה אראגו רצה לתמוך בהסתייגותו של פואסון ולהוכיח כי המסקנה מהתיאוריה של פרנל לא מתממשת. אראגו ביצע ניסוי עקיפה בעזרת דיסקה בקוטר שני מילימטר ולמרבה הפתעתו, תוצאות הניסוי אישרו את הניבוי המשונה הזה של תורת פרנל (ראו איור 2). ועם זאת, אפיזודה זו והוכחות אחרות של תורת פרנל לא סייעו לשכנע את מתנגדי תורת הגלים של האור. שנים רבות חלפו בטרם פיתחו המדענים גישה מדויקת וקפדנית יותר לאישוש שיטת פרנל.



איור 2 – כפי שגילה אראגו בניסויו המפורסם, אור העוקף דיסקה יוצר(באמצעות עקיפה) נקודת אור עזה במרכז הצל של הדיסקה (ויקיפדיה, "Arago spot")

(Darrigol, *A History of Optics*, pp. 203-205)

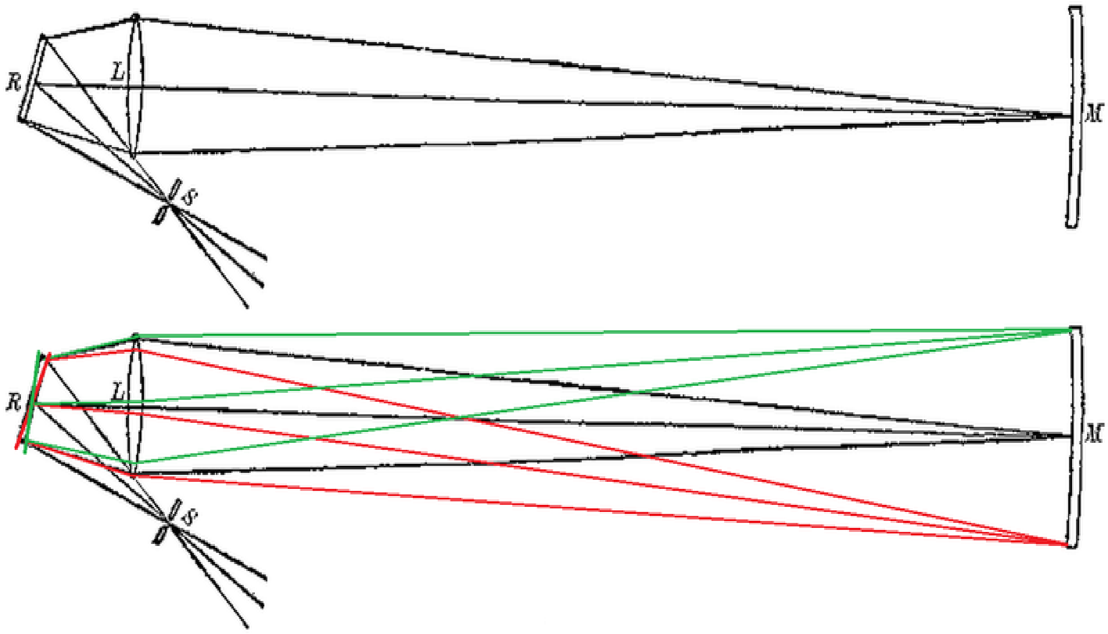
[22] כלומר, הצל הנוצר (מימין ל-B באיור 1) בהנחה שהאור מתקדם בקווים ישרים ואינו מבצע שום עקיפה כלל.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

האור במנהרת הזמן – קבוצה מספר 5

ליאון פוקו, 1860

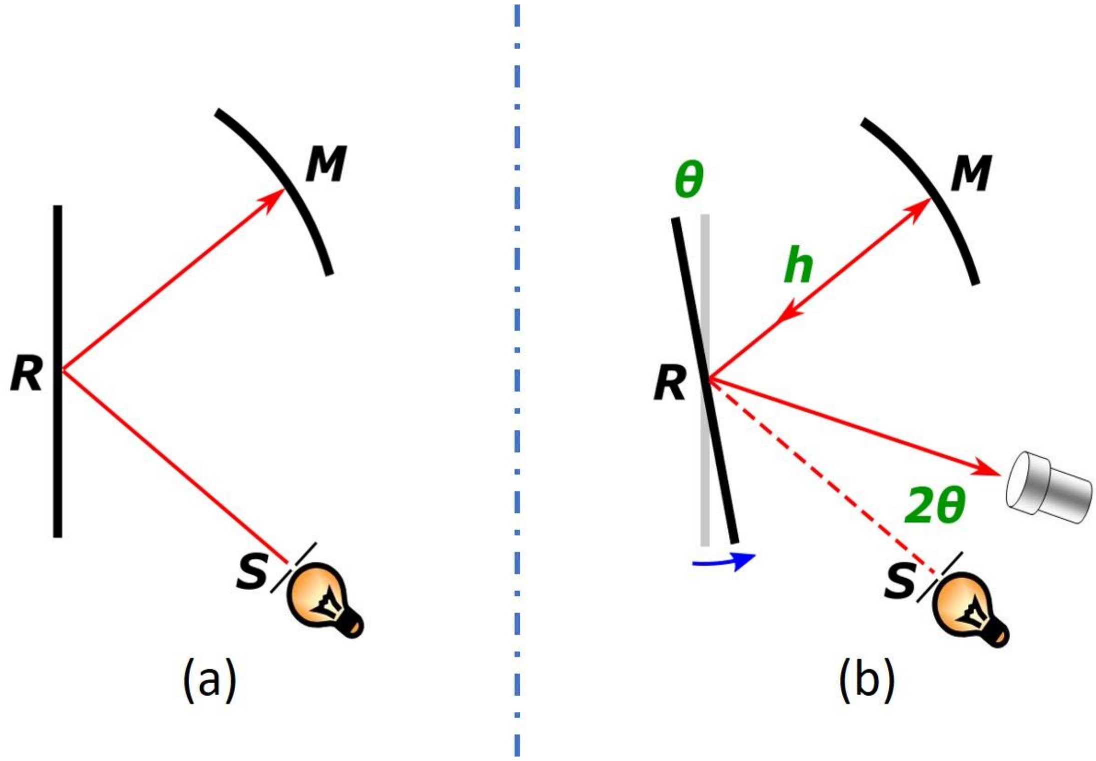
כבר ב-1838 העלה המדען הצרפתי פרנסואה אראגו את הרעיון כיצד ניתן להשוות בין מהירות האור במים למהירותו באוויר. אראגו גם בנה מכשיר כדי לבצע את המדידה הנדרשת. הניסיון לא הצליח, אך המכשיר שימש השראה לבן ארצו ליאון פוקו. פוקו המשיך בניסיונותיו של אראגו, והצליח, לראשונה, למדוד את מהירות האור גם במים. עקרון הפעולה של המערכת הניסיונית של פוקו מוצג בשני האיורים הבאים.



איור 1 – R היא מראה מסתובבת, M הינה מראה כדורית נייחת. עדשה L משמשת ליצירת דמות של הסדק S (המואר על-ידי מקור אור) על מראה M. כפי שממחיש (באופן סכמטי) הציור התחתון, כאשר המראה R נייחת, דמות הסדק המשתקפת מהמראה M נוצרת מחדש במיקום המקורי S – ללא תלות בזווית ההטיה (כלומר הן במצבה הירוק והן במצבה האדום; הקרניים האדומות והירוקות הן למעשה דו-כיווניות).

איור 1 מתאר את מערך הניסוי הבסיסי של פוקו. R היא מראה מסתובבת, ואילו M היא מראה כדורית נייחת. מערך הניסוי של פוקו גרם לכך שללא כל תלות בזווית ההטיה של מראה R (כאשר היא נייחת), הדמות של הסדק המשתקפת מהמראה הכדורית M תיווצר מחדש במיקום הסדק האמיתי S. אך פוקו הבין שאם נסובב את מראה R במהירות זוויתית (ω) גבוהה מספיק, כי אז ההשהיה הנובעת מסופיות מהירות האור – הנע מ-R ל-M ובחזרה – תגרום לדמות של הסדק המשתקפת מ-M לסטות מהמיקום המקורי S. נסמן את המרחק בין R ל-M באות h, כפי שניתן לראות באיור 2 (המתאר את סכמת המנגנון של ניסוי פוקו).

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.



איור 2 – סכמה של מנגנון הניסוי של פוקו. h הוא המרחק בין המראה הכדורית M למראה המסתובבת R.

איור 2(a) מתאר את המצב שבו המראה R נייחת: הדמות של הסדק המשתקפת מהמראה M (עדשה L אינה מופיעה באיור זה) מגיעה למיקום הסדק האמיתי S, ללא תלות בזווית של R. איור 2(b) מתאר מה קורה כש-R מסתובבת במהירות גדולה: האור המוחזר ממראה M כעת יוסט (בזווית הגדולה פי שניים מזווית הסיבוב של R, כלומר θ), והטלסקופ יאתר את דמות הסדק בזווית של 2θ ביחס למיקום הדמות המקורי.

ידיעת θ וידיעת קצב סיבוב המראה (המהירות הזוויתית ω) מאפשרות לחשב את הזמן Δt בו נעה המראה בין שני המצבים:

$$\Delta t = \frac{\theta}{\omega}$$

בזמן זה האור עבר את המרחק h בין המראות R ו-M פעמיים, הלוך ושוב, לכן מהירות האור v תהיה:

$$v = \frac{2h}{\Delta t} = \frac{2h}{\theta/\omega} = \frac{2h\omega}{\theta}$$

מגבלות טכניות שונות מנעו מפוקו מלהפריד בין המראות במרחק (h) העולה על 20 מטר, אך בכל זאת עלה בידו למדוד את הסחת דמות הסדק באופן מדויק למדי. הנתונים שמדד

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

פוקו (יחד עם מהירות סיבוב המראה) הניבו את הערך הבא למהירות האור:
.v = 311,688 km/sec

היכולת לבצע את הניסוי במרחקים קצרים אפשרה לפוקו להגשים בשנת 1860 מטרה שמדענים שאפו אליה במשך כמאתיים שנים: למדוד את מהירות האור הנע בתוך מים. לשם כך הציב גליל מלא מים בדרכו של האור, וקיבל שמהירות האור שווה לכ-3/4 ממהירותו באוויר, בהתאם לתחזית של הויגנס (המודל הגלי).

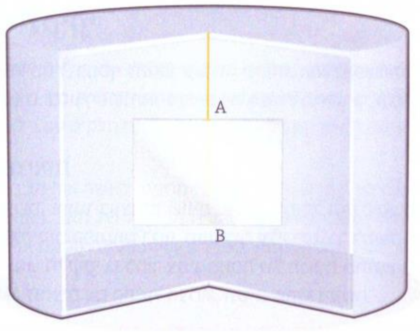
(ויקיפדיה, הערך "Fizeau–Foucault apparatus";
גלילי וחזן, *אופטיקה – תורת האור והראייה*, עמ' 358-359)

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

האור במנהרת הזמן – קבוצה מספר 6

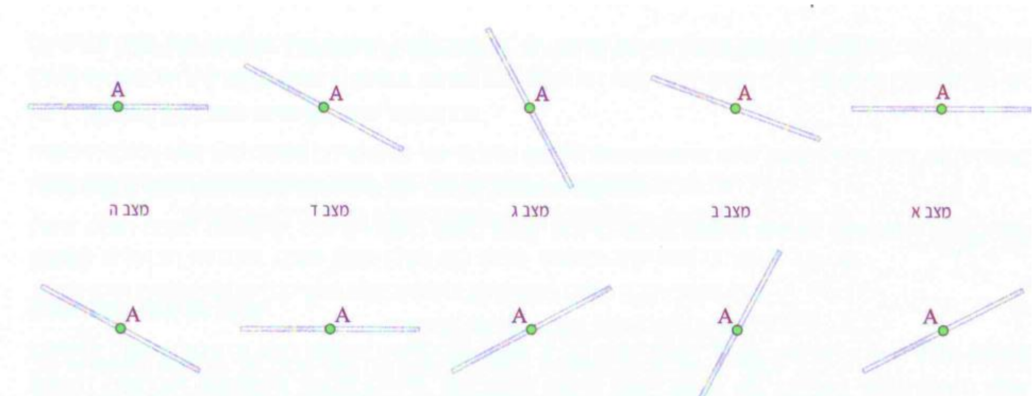
ארנסט ניקולס וגורדון האל, 1903

מאז פרסום תורתו של ג'יימס קלרק מקסוול (1864) לא היה ספק בלב המדענים שהאור, כסוג של קרינה אלקטרומגנטית, הינו גל. ואולם ממשוואות מקסוול נבעה דווקא תכונה "חלקיקית" של האור: היכולת שלו להעביר תנע לגופים ולהפעיל עליהם לחץ. לקראת סוף המאה ה-19 ניסו מדענים להוכיח בניסוי את קיומה של "לחץ הקרינה" שצפה מקסוול, אך נכשלו מסיבות טכניות. ב-1903 ערכו ארנסט ניקולס (E. F. Nichols) וגורדון האל (G. F. Hull) בארצות-הברית ניסוי, בעזרת מערכת המורכבת משפופרת זכוכית גלילית, שלבסיסה העליון קשרו שערה של זנב סוס שהשתלשלה לתוך השפופרת. על הקצה התחתון של השערה תלו לוחית מלבנית דקה מאוד ממתכת (איור 8). לאחר מכן סובבו מעט את הלוחית סביב ציר הסימטריה AB שלה (הנמצא בהמשך לשערת הסוס), ושיחררו אותה. הלוחית התנודדה בתנועה מחזורית.



איור 17 - מערכת הניסוי של ניקולס והל - גליל זכוכית עם שערה בתוכו, ובקצהה מראה

איור 9 מתאר במבט מלמעלה את הלוחית בכמה מצבים עוקבים של תנועתה. פרק הזמן שלוקח ללוחית לנוע ממצב א למצב ט הוא זמן המחזור של תנודות הלוחית.



איור 18 - מצבים עוקבים של הלוחית במבט מלמעלה

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

זמן המחזור הנדון לעיל הוא זמן המחזור **העצמי** של הלוחית. הכוונה היא לזמן מחזור של תנודות הלוחית, בתנאים שבהם התנודות אינן מושפעות על-ידי גורם חיצוני, אלא נקבעות רק על-ידי תכונות של הלוחית ושל השערה. ברור כי אדם המחזיק בלוחית יכול לסובב את הלוחית בתנועה מחזורית, ולקבוע זמן מחזור שונה לתנודות שלה, אבל אז אין מדובר בזמן מחזור עצמי.

ניקולס והאל אטמו את השפופרת, ושאבו את האוויר מתוכה. לאחר מכן הם מדדו את זמן המחזור העצמי של תנודות הלוחית. כשהלוחית היתה תלויה במנוחה בשפופרת שבה התקיים ריק בקירוב מצוין, הטילו החוקרים אור ממקור אור חזק על צדה הימני, ואחר-כך על צדה השמאלי, וכך לסירוגין על שני צדיה, כאשר מרווח הזמן בין שתי הארות עוקבות של הצד הימני של הלוחית שווה לזמן המחזור של התנודות העצמיות של הלוחית (שנמדד קודם לכן). לדוגמה אם זמן המחזור העצמי של תנודות הלוחית היה שתי שניות, אז האירו את הצד הימני של הלוחית ברגע מסוים, כעבור שנייה אחת על הצד השמאלי, כעבור שנייה נוספת על הצד הימני וכך הלאה. כלומר קצב הטלת האור על שולי הלוחית תאם את קצב התנודות העצמי של הלוחית. הניסיון לנדנד את הלוחית בתדירות השווה לתדירות העצמית שלה (יש תהודה, רזוננס, בין הלוחית לבין ההארות) הבטיח שאם אור אכן מפעיל לחץ – הסיכוי לנדנד את הלוחית הוא הרבה יותר גדול. לאחר זמן מה, אט אט, החלה הלוחית להתנודד סביב ציר הסימטריה AB, לשמחתם של החוקרים. התנודות הלכו וגברו ככל שהמשיכו לנדנד את הלוחית באמצעות "דחיפות" של הבזקי אור.

(רוזן, *מודלים של האור*, עמ' 29-27)

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

<u>האור במנהרת הזמן – קבוצה מספר 7</u>

<u>טקסט ראשון</u>: **אלברט איינשטיין, 1905**

התורה הגלית הרציפה של האור הוכיחה את מלוא יכולתה בתיאור התופעות האופטיות הטהורות ואין להניח שתוחלף אי־פעם על-ידי תורה אחרת. אולם יש לזכור שהתצפיות האופטיות מתייחסות לממוצעים זמניים ולא לערכים של רגע מסוים, ולמרות אישורה השלם של תורת העקיפה, ההחזרה, השבירה, הנפיצה וכו' על-ידי הניסוי, הרי אמנם ייתכן שתורת-האור הגלית תביא לידי סתירות עם הניסיון בשעה שמפעילים אותה לגבי תופעות שונות. ואמנם נדמה לי שהתצפיות בדבר ה"קרינה השחורה" [קרינה הנפלטת מגוף חם, המכונה גם "קרינה תרמית"], התופעה הפוטו-אלקטרית [פליטת אלקטרונים ממתכת כתוצאה מפגיעת אור], יצירתן של קרני-קתודה על-ידי אור אולטרה-סגול וקבוצות אחרות של תופעות הנוגעות ליצירתו או היפוכו של האור נראות מובנות יותר, אם מניחים שהאנרגיה של האור מחולקת התחלקות לא רציפה במרחב. על פי הנחה זו הרי בהתפשט קרן אור היוצאת מנקודה, אין האנרגיה מתחלקת התחלקות רציפה בתחומים ההולכים וגדלים, אלא היא מורכבת ממספר סופי של קוונטי-אנרגיה המאותרים בנקודות מרחב, והנעים מבלי להתפצל, והם נבלעים ונוצרים כיחידות שלמות בלבד...

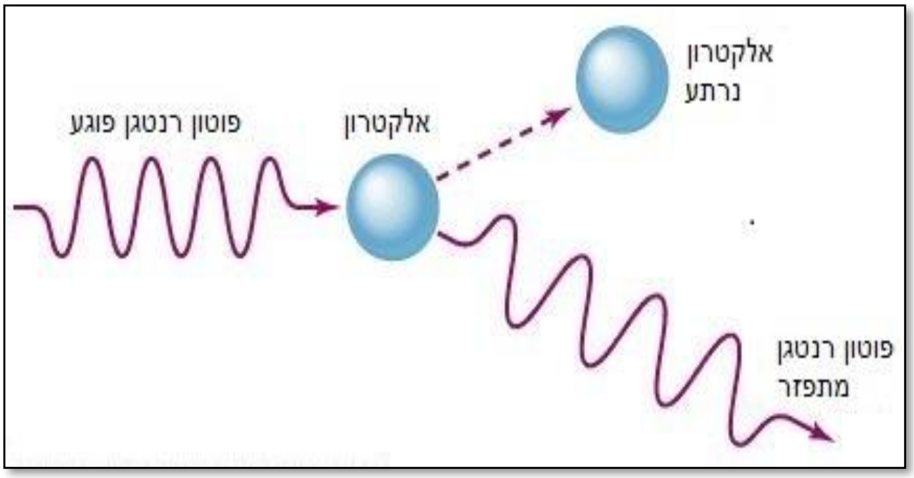
התפיסה הרגילה בדבר התחלקותה הרציפה של אנרגיית האור במרחב המוקרן נתקלת בקשיים הגדולים במיוחד בשעה שמנסים לבאר את התופעות הפוטו-אלקטריות... על יסוד התפיסה שהאור המעורר מורכב מקוונטי-אנרגיה בעלי האנרגיה hf אפשר לפרש את יצירתן של קרני-קתודה על-ידי אור כדלקמן: קוונטי אנרגיה חודרים לתוך שכבה שעל פני גוף-הקתודה, והאנרגיה שלהם נהפכת לפחות בחלקה לאנרגיה קינטית של אלקטרונים. הציור הפשוט ביותר הוא זה, שקוונט-אור מוסר את כל האנרגיה שלו לאלקטרון יחיד... אלקטרון בפנים גוף-הקתודה שנוספה לו אנרגיה קינטית יפסיד חלק ממנה כשיגיע אל פני הגוף. כמו כן יש להניח שכל אלקטרון צריך לעבוד עבודה P (האופיינית לגוף-הקתודה) בשעה שהוא יוצא ממנו. אותם האלקטרונים שנתעוררו על פני הגוף עצמו ובכיוון ניצב להם יעזבו אותו במהירות הניצבת הגדולה ביותר, האנרגיה הקינטית של אלקטרונים אלה היא: $E_k = hf - P$. אם כל קוונט-אנרגיה של האור המעורר יעביר את האנרגיה שלו לאלקטרונים בצורה בלתי-תלויה בשאר הקוונטים, הרי התחלקות מהירותם של האלקטרונים, כלומר איכותה של קרינת הקתודה שנוצרה, תהיה בלתי-תלויה בעוצמת האור המעורר. מצד שני מספרם של האלקטרונים הנפלטים מהגוף יהיה פרופורציונאלי לעוצמת האור המעורר, אם כל שאר הנסיבות הן שוות.

(סמבורסקי, *המחשבה הפיסיקאלית בהתהוותה*, עמ' 502-503)

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

<u>טקסט שני</u>: **ארתור קומפטון, 1926**

הצעה זו שלפיה כל קוונט של קרינת רנטגן מתפזר על-ידי אלקטרון יחיד מספקת אמצעי פשוט לביאור השינוי הנצפה באורך הגל. שכן אם נניח שהקרניים הפוגעות מתקדמות בקוונטים המכוונים בדיוק באופן זה שהם מפוזרים על-ידי אלקטרונים בודדים, כי אז לצד האנרגיה שלהם hf הם יישאו תנע של hf/c. הקוונט המתפזר, לעומת זאת, המתקדם בכיוון שונה מאשר הקוונט הפוגע, נושא עמו תנע שונה. וכך באמצעות עקרון שימור התנע, האלקטרון שמפזר את הקרן חייב להירתע עם תנע שווה להפרש הווקטורי בין התנע של הקוונט הפוגע לתנע של הקוונט המתפזר. אבל האנרגיה של האלקטרון הנרתע הזה נלקחת מזו של הקוונט הפוגע, מה שמותיר קוונט מתפזר עם פחות אנרגיה ולפיכך תדירות קטנה יותר מאשר זו של הקוונט הפוגע.



Compton, *X Rays And Electrons*, pp. 265-266.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

מעבדה – שחזור ניסוי מקורי של גליליאו גליליאי

הנדון: **<u>פנייה לקהילה המדעית מהספרייה הלאומית המרכזית של פירנצה</u>**

חברי הקהילה המדעית ברחבי העולם שלום רב,

שמי לואיג'י ברון ואני ההיסטוריון הראשי של הספרייה הלאומית המרכזית בפירנצה שבאיטליה. באוסף שלנו ישנם ספרים מדעיים היסטוריים רבים ועם זאת, אתמול התרחש אצלנו בספרייה אירוע מרגש ומיוחד במינו. הספרנית במשמרת הערב (הגב' מרתה אלברגו) יצאה לסיור ברחבי הספרייה, כנדרש מתפקידה. לרוב, זהו סיור חסר אירועים חריגים. אך אתמול בערב היא מצאה דף זרוק על הרצפה. כאשר חזרה לעמדתה ראתה כי הדף ישן מאוד ועליו איורים וחישובים שונים (צילום של הדף מצורף למכתב זה).

כשחשדה מרתה כי הדף הינו בעל ערך היסטורי, מיד פנתה אליי. אני בחנתי את הדף בעיון, ולהערכתי (ולאחר התייעצות עם עמיתים מאוניברסיטת פירנצה) מקורו של הדף בתחילת המאה ה-17. הדף קיבל אצלנו בספרייה את הסימון folio 116v מתוך קודקס 72 של כתבי גליליאו. למרות ניסיוננו הרב עם כתבים מדעיים היסטוריים, אנו אובדי עצות לגבי מהות האיורים ותוכן ההערות על גבי הדף שמצאנו. נראה לנו כי הדף מתאר ניסוי כלשהו אך לא ברור לנו מה מטרת הניסוי ומה התגלית שאליה הוא הוביל (או שאותה ביסס).

לכן, אנו פונים אליכם. אנא, עזרו לנו להבין את הניסוי שמתאר הדף המסתורי. לנוחיותכם, צוות המתרגמים שלנו תירגם את הדף מאיטלקית למגוון שפות.

תודה מראש,

לואיג'י ברון

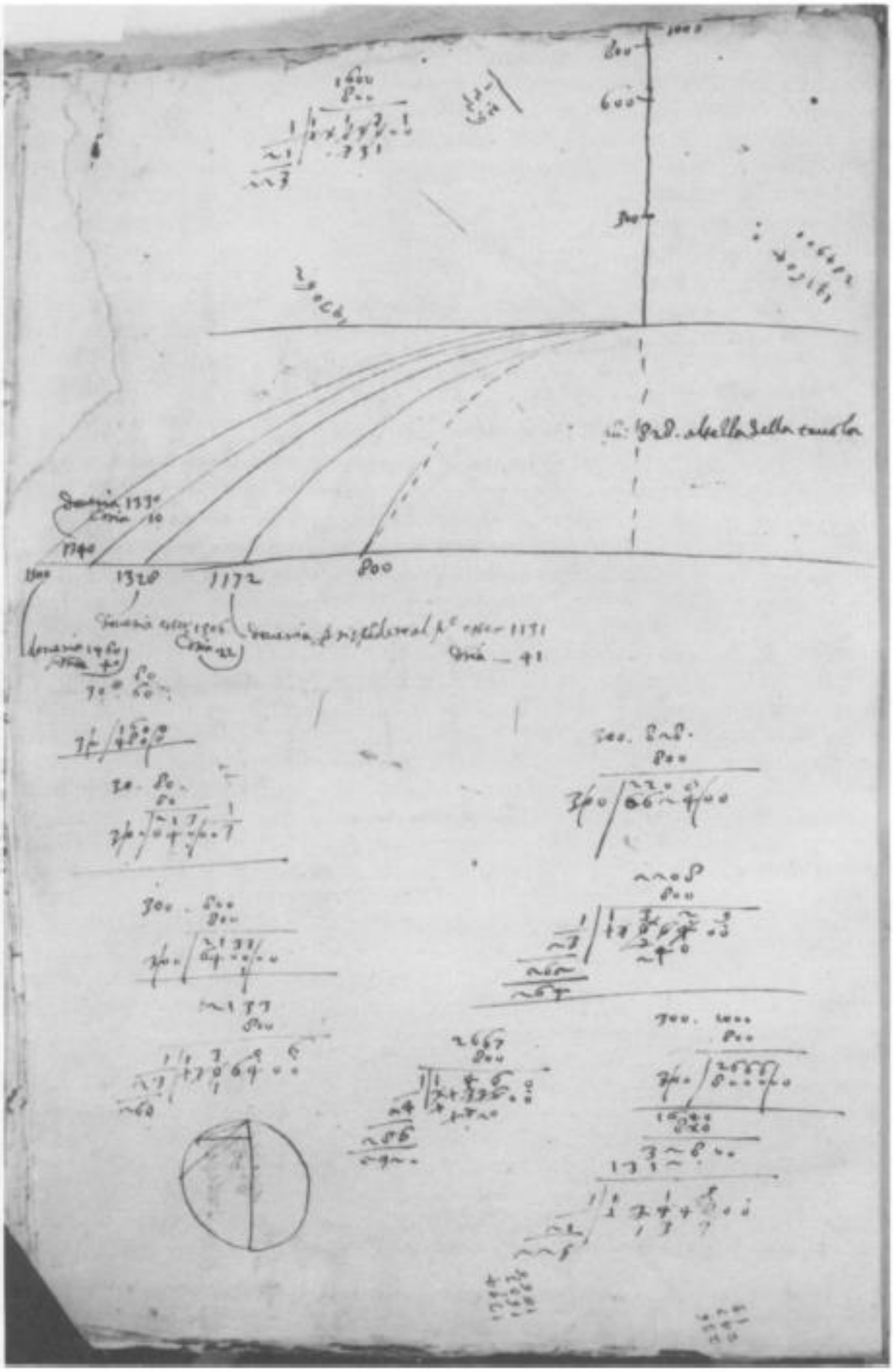
היסטוריון ראשי

הספרייה הלאומית המרכזית של פירנצה

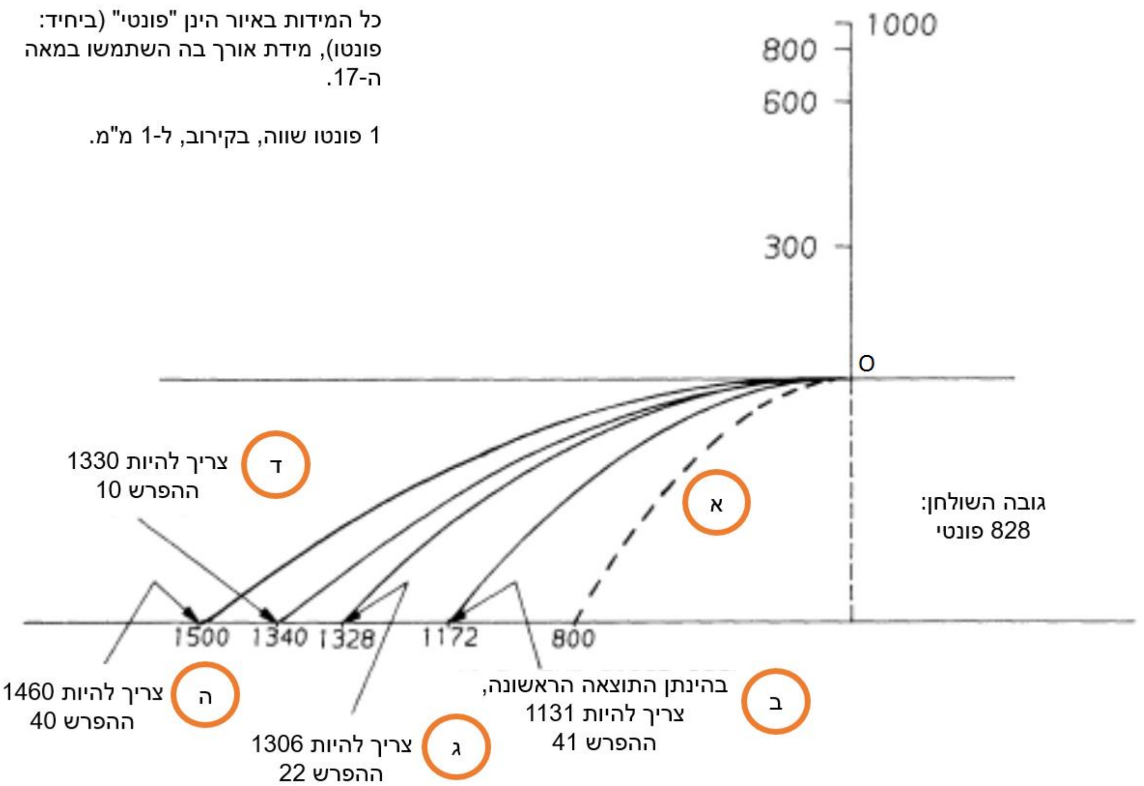
איטליה

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

צילום של הדף המקורי (תרגום לעברית בעמוד הבא):



כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.



ב.	$\sqrt{600\cdot\frac{800^2}{300}}=1131$
ג.	$\sqrt{800\cdot\frac{800^2}{300}}=1306$
ד.	$\sqrt{828\cdot\frac{800^2}{300}}=1330$
ה.	$\sqrt{1000\cdot\frac{800^2}{300}}=1460$

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

שאלות מנחות לתלמיד

הביטו באיור אשר מתעד את תוצאות הניסוי אותו ביצע גליליאו (<u>ולא</u> את מערכת הניסוי שלו). ענו על השאלות הבאות כדי להבין מהו הניסוי המתואר.

1. התבוננו בציר האנכי ובציר האופקי (כולל העקומות), וכן בנתונים השונים (כולל גובה השולחן). מהו לדעתכם הנושא הכללי של הניסוי המתואר בו?

2. כיצד לדעתכם נראית מערכת הניסוי של גליליאו? מהו מהלך הניסוי אותו ביצע?

איור המערכת:

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

3. מה מציינים המספרים בציר האנכי (נסמן אותם באות H) והמספרים בציר האופקי (נסמן אותם באות D)? התבוננו שוב בעקומות, וכן בנתון "גובה השולחן הוא 828 punti". מהו המשתנה הבלתי-תלוי ומהו המשתנה התלוי בניסוי?

4. פתחו את הקשר בין H ל-D על ידי שימוש במשוואות התנועה של נפילה חופשית (קינמטיקה), ללא שימוש במושג האנרגיה (שלא היה ידוע בתקופת גליליאו). מהו יחס הפרופורציה בין D ל-H?

א. חלקו את התנועה לשני חלקים. מהם?

ב. כתבו את משוואות התנועה בחלק הראשון – מה מאפיין את התנועה?

- זכרו את הכלל הבא, שהיה ידוע היטב גם לגליליאו: גודל מהירותו של גוף בסוף נפילה מגובה קבוע H אינו תלוי בשיפוע - אין זה משנה אם הגוף נופל מגובה H או נע במורד מישור משופע כלשהו שגובהו H.
- רמז: הגדירו את t_H כזמן הנפילה לאורך המרחק האנכי H ואת t_D כזמן התנועה הפרבולית, כלומר הזמן שבו הקליע עובר מרחק אופקי D.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

ג. כתבו את משוואות התנועה בחלק השני – מה מאפיין את התנועה?

- המהירות האופקית של הכדור אחרי שהוא עוזב את השולחן נשארת קבועה (למה היא שווה במקרה הנוכחי?).

ד. בודדו משתנים ומצאו את הקשר בין D ל H (הגיעו לקשר שאינו כולל את תאוצת הגרביטציה g)

5. הביטו שוב בגרפים, והניחו שהניסוי הראשון שערך גליליאו מתואר על-ידי העקומה בקו מקווקו (כלומר D = 800). מהו לדעתכם ה-H שמתאים לערך הזה?

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

6. הביטו במה שרשם גליליאו לצד שאר ערכי D ("צריך להיות...", "ההבדל:..."), והיזכרו בפרופורציה שמצאתם בסעיף הקודם. האם כעת תוכלו להבין את החישובים שערך גליליאו?

7. גליליאו קיבל את היחס 800/300 באופן אמפירי (H=300, D=800). חשבו באופן תיאורטי איזה D צפוי לנפילה מגובה H=300. נסו לחשוב מה הסיבה להבדל זה?

8. להלן אחד מהכללים שניסח גליליאו לגבי תנועה שוות-תאוצה, הידוע כ"חוק המרחק הכפול": אם גוף המתחיל לנוע ממנוחה נע בתאוצה קבועה במשך זמן t ועובר מרחק H, כי אז אם ימשיך לנוע בתנועה קצובה (במהירותו הסופית) במשך פרק זמן זהה (t), יעבור (בתנועה הקצובה) מרחק של 2H (הוכיחו לעצמכם את החוק על סמך מה שלמדתם בתנועה שוות תאוצה).
האם כלל זה מתיישב עם המשוואות אותם פיתחתם בשאלה 3? חשבו את המרחק האופקי (D) שיתקבל כאשר גובה השחרור מעל פני השולחן (H) יהיה שווה לגובה השולחן מעל פני הקרקע (h).

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

9. במהלך פענוח כתב היד, ההיסטוריונים הרבו לתהות מדוע התוצאה D = 1340 מופיעה על הציר האופקי, אך הערך המתאים של H (מהו?*[828]*) איננו מופיע על הציר האנכי. ההיסטוריונים הסיקו שהסיבה להשמטה זו היא שבמקרה זה שתי התוצאות כאחד – כלומר הן תוצאת הניסוי בפועל (1340) והן התוצאה על פי חישוב הפרופורציה (1330) – הסבו מבוכה לגליליאו, ולכן הוא החליט שלא להבליט ניסוי זה, על-ידי כך שנמנע מלרשום את הערך האנכי המתאים. שימו לב למשמעותו של ערך זה ול"חוק המרחק הכפול"; האם תוכלו להסביר מדוע טענו היסטוריונים שתוצאה זו הסבה לגליליאו מבוכה?

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

ביצוע הניסוי

כעת, אחרי שהבנו יחד מה עשה גליליאו ננסה לשחזר את התוצאות שלו.

1. בנו מערכת ניסוי שתאפשר לכם לבצע את הניסוי שביצע גליליאו (באופן דומה ככל שניתן).
   - מהו הציוד לו אתם זקוקים עבור מערכת הניסוי?
   - מהו הציוד לו תזדקקו כדי למדוד את תוצאות הניסוי?
   - הכינו רשימת ציוד ובקשו אותו מהמורה.
2. בצעו מדידות.
   - שימו לב – המדידה הראשונה של גליליאו הייתה מיוחדת. במה? כיצד הוא השתמש בה בהמשך?
3. השוו את תוצאות המדידות לתוצאות הצפויות לפי הפרופורציות, כפי שביצע גליליאו.
   - האם תוצאות המדידות תואמות את הצפוי לפי הפרופורציות?
   - מהו המקור להבדל?
   - האם אתם יכולים לחשוב על דרך לשפר את המרחק הצפוי על ידי הפרופורציות?

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

שיעור דיון (debate) – נושאי חשמל

שיעור דיון – הסברים והנחיות

השיעור הינו שיעור דיון. ישנם שני נושאים לדיון. בכל נושא ישנן שתי עמדות/גישות מנוגדות. לפיכך – יש לחלק את הכיתה ל 4 קבוצות. כל 2 קבוצות תקבלנה טקסט זהה לקריאה אשר מציג 2 עמדות/גישות לבעיה כלשהי. כל קבוצה תתבקש לייצג את אחת העמדות בדיון בע"פ שיתקיים בין הקבוצות. על כל קבוצה להכין טיעונים בעד העמדה אותה היא נתבקשה לייצג וטיעונים נגד העמדה המנוגדת לה.

בעת התנהלות של דיון אחד (בו לוקחות חלק 2 קבוצות), התלמידים בקבוצות האחרות ישמשו כצופים.

גודל קבוצה אידיאלי לדעתנו הוא 3-5 תלמידים. כתלות בגודל הכיתה ניתן לשקול לפצל את הכיתה ל 6 או 8 קבוצות ולנהל את אותו הדיון פעמיים.

סדר הדיון מוצג בסעיף 1 להלן.

1. <u>מבנה הדיון</u>

הדיון יתנהל בצורה של הצגות <u>מוגבלות בזמן</u> של כל אחד מהצדדים בדיון.

לכל קבוצה יהיו סה"כ 3 הצגות:

- הצגה בונה – בה הקבוצה תציג את טענותיה ועמדתה בדיון (3 דקות * 2 קבוצות);
- הצגה מפריכה – בה הקבוצה תוכל להגיב לטענות הקבוצה הנגדית ולסתור אותן (2 דקות * 2 קבוצות);
- הצגה מסכמת – סיכום הדיון ותגובה אחרונה לטענות הקבוצה הנגדית. אין להציג טענות חדשות בעת הסיכום (2 דקות * 2 קבוצות).

על הדובר להפסיק לדבר באופן מיידי כשנגמר הזמן המוקצה לכל הצגה.

בין כל הצגה יינתן זמן להתייעצות והכנת הטיעונים להצגה הבאה (5 דקות). כל דיון יימשך סה"כ 24 דקות.

2. <u>מחוון להערכה ואופן קביעת המנצחים</u>

בתום כל הצגה (בזמן הדיונים של הקבוצה) כל צופה ייתן ניקוד לכל קבוצה, בהתאם למחוון המצורף.

✓ **חשוב!** יש לשים לב כי ההצבעה הינה לפי <u>איכות הטיעונים וההצגה</u> ולא לפי מידת ההסכמה עם הטיעונים המוצגים.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

סה"כ כל צופה יכול להעניק לקבוצה עד 8 נקודות, עבור כל הצגה. מורה/מנחה יפעל לפי אותו מחוון אך יכול להעניק פי 2 נקודות (סה"כ 16 נקודות). הקבוצה המנצחת בדיון היא זו שצברה הכי הרבה נקודות.

3. <u>מטלה לצופים</u>

בנוסף למילוי המחוון, רשמו את הטענה/טענות המרכזיות של כל אחת מהקבוצות.
(הצופים – תלמידים שאינם משתתפים בנושא הדיון הנוכחי).

4. <u>טיפים להצלחה בדיון:</u>

- עבודת הכנה:
  - בחרו את הטיעון המרכזי שלכם. מצאו את הרקע והעובדות התומכות בו;
  - מצאו טיעונים נוספים אשר קשורים לטיעון המרכזי. בררו לעצמכם – כיצד הם קשורים? האם וכיצד הם מחזקים את הטיעון המרכזי? האם ישנו רקע נוסף אותו יש לתת לקהל כדי להשתמש בטיעונים אלו?
  - למדו את עמדתם של תלמידי הקבוצה היריבה. חשבו – מה יכול להיות הטיעון המרכזי שלהם? כיצד אתם יכולים להפריך אותו? כיצד ובמה שונה הטיעון שלכם משלהם?
- מבנה פסקת טיעון - דגם **טע"נ**: טענה – עמדה – נימוק (https://sites.google.com/site/habaabekef/5)
  - **הטענה** לרוב נתונה במטלה. מומלץ להשתמש במשפט מכליל כפתיח לדיון. בשלב זה יש לציין עובדות בלבד (ללא דעה או פרשנות) ולסדר את העובדות לפי סדר הגיוני כלשהו, לבחירתכם (הכללה ופירוט, יתרונות וחסרונות וכו');
  - הבעת **עמדה** לגבי הטענה – מסכים/לא מסכים. יש להדגיש זאת ע"י שימוש במילים מתאימות כגון "לדעתנו...";
  - יש להביא לפחות שני **נימוקים** (או אחד מפורט ומנוסח היטב) ולספק דוגמה הממחישה את הנימוק. יש להסתמך רק על העובדות שסופקו בשלב הטענה;
  - כדי לחדד את המסר השכנועי מומלץ להשתמש במשפטים מכלילים, אוצר מילים מתאים, שאלות רטוריות, חזרות על מילות מפתח, פנייה ישירה ואישית;
  - כדי לסתור ולשלול טיעונים של אחרים ניתן להשתמש בהשוואה והנגדה, הסתייגות ושימוש במילות סיבה ותוצאה.
- קראו היטב את המחוון להערכת הדיון.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

מחוון להערכת עמיתים

קריטריון	רמה גבוהה (2 נק')	רמה נאותה (1 נק')	רמה בסיסית (0 נק')	ניקוד
רקע	הקבוצה תיארה את עמדתה היטב, סקרה את הרקע המתאים באופן מקיף והזכירה את כל הפרטים החשובים לצורך הטיעונים בהמשך	הקבוצה תיארה את עמדתה, אך הסקירה היתה חלקית, השמיטה בין פרט חשוב אחד לשניים שהיה צריך או כדאי להזכיר לצורך הטיעון בהמשך	תיאור עמדת הקבוצה היה לא ממוקד מספיק, לא היתה סקירת רקע מספקת, הושמטו יותר משני פרטים החשובים לצורך הטיעון בהמשך	
איכות ההסברים	הקבוצה שולטת בתוכן, הציגה טענה, עמדה ונימוק, הנימוק כלל קְשָרים לוגיים במקומות הנכונים ("לכן" כאשר באמת יש תוצאה, "בגלל" כאשר יש סיבה וכו'), הביאה דוגמה רלוונטית והציגה סימוכין לטענותיה כאשר הסתמכה על מקורות חיצוניים. הנימוק כולל את העובדות שמחזקות את הדעה של הכותב והינו משכנע	הקבוצה שולטת בתוכן אך השימוש במודל של טענה, עמדה ונימוק, היה חלקי. הקשרים הלוגים שהוצגו אינם מתאימים ו/או לא הוצגו דוגמאות מתאימות ו/או לא ציינו מהם המקורות עליהם הסתמכו	הקבוצה אינה שולטת בתוכן וכן לא השתמשה נכון במודל של טענה, עמדה ונימוק. לא הציגה קשרים לוגיים, דוגמאות או מקורות עליהם הסתמכה	
איכות ההצגה ויצירתיות	הקבוצה דיברה באופן בהיר, הציגה את עמדותיה בצורה מובנת, משכנעת ומעניינת תוך שימוש באוצר מילים שהולם את הנושא, הנמענים והמטרה ובאמצעי שכנוע כגון: פנייה ישירה לנמען, חזרות, שאלה רטורית, נימה אישית. הקבוצה הפגינה יצירתיות מחשבתית בטיעוניה או בדרך הצגתם	הקבוצה הציגה את טיעוניה באופן נאות, עמדותיה היו ברורות ומובנות אך היא לא השתמשה באמצעי שכנוע מיוחדים או בחשיבה יצירתית בהצגת הטיעונים	הקבוצה לא הציגה את טיעוניה באופן ברור, שטף הדיבור היה קטוע והפריע למעקב אחר תוכן הטיעונים, אופן ההצגה היה מונוטוני / יבש / משעמם	
תזמון	הקבוצה עמדה בזמנים שהוקצבו לה לצורך הדיון וניצלה היטב את הזמן שעמד לרשותה	הקבוצה חרגה מעט מהזמנים שהוקצבו לה אך ניהלה היטב את הזמן שעמדה לרשותה ואת חלוקתו לצורך טיעוניה	הקבוצה חרגה מהזמנים שהוקצבו לה וסיימה מוקדם בהרבה או לא הספיקה לסיים את טיעוניה בזמן המוקצב	
			סה"כ נקודות (0-8)	

מבוסס על שילוב של מספר מחוונים מהאתר:

http://www.orianit2.edu-negev.gov.il/nitzanng/sites/homepage/nirit/mahvanim.htm

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

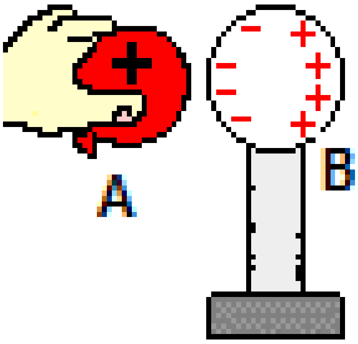
תפיסת שדה מול גישת הפעולה ממרחק בתורת החשמל

ההיסטוריה של החשמל, בניגוד לענפי פיזיקה אחרים, התאפיינה בכך שעבר זמן רב מאוד בין גילוי התופעות לבין ניסוחה של תיאוריה ראויה-לשמה שמנסה לבאר אותן. כבר היוונים הקדמונים ידעו היטב שאם משפשפים ענבר בצמר, אזי הענבר מושך אליו גופים שונים – בשל מה שמוכר לנו כיום כ"חשמל סטטי". אך רק בתחילת המאה השבע-עשרה, בעקבות האנגלי ויליאם גילברט (1603-1544), הובנו ההבדלים בין תופעות חשמליות ומגנטיות והחלה אט-אט לקרום עור וגידים תיאוריה שעלה בידה להסביר מספר הולך וגדל של תופעות חשמליות. הצלחה ראשונית זו הושגה בעקבות ההכרה כי החשמל הינו סובסטאנס, כלומר חומר מסוים, שהוא הגורם לתופעות הקשורות לחשמל. במאה שלאחר מכן הבינו המדענים כי "חומר החשמל" – שאותו דימו לנוזל כלשהו, שיכול לעבור בין גופים – הוא אחיד ואוניברסלי (בדומה למסה של ניוטון), אך כדי להסביר הן משיכה והן דחייה, הניחו שקיימים שני סוגים שלו (וזאת כמובן בניגוד למסה הניוטונית).

בעקבות הצלחתה הכבירה של תורת הכבידה של ניוטון (שפורסמה ב-1687), ובעקבות ההכרה בחומר החשמלי כסובסטאנס (כלומר דבר חומרי, שאולי שקול למסה) – גברה השאיפה לנקוט אנלוגיה בין כבידה וחשמל. כיוון מחשבה זה זכה להצלחה מסחררת, והוא זה שלמעשה הפך את חקר החשמל מניסיונות איכותיים מגושמים למדי להסביר תופעות שונות לתורה מדעית כמותית של ממש שבעזרת כללים פשוטים ביארה מגוון תופעות גדול. תורה זו נשענה על שלוש הנחות פשוטות בלבד: שקיימים מטענים חיוביים ומטענים שליליים (אלה שני הסוגים שנזכרו לעיל, הדרושים לביאור משיכה ודחייה); שבין כל זוג מטענים שורר כוח חשמלי (שנחלש ככל שהמרחק ביניהם גדול יותר), שכיוון כוח זה תלוי בסוג המטענים (חיובי או שלילי); ושבחומר מוליך (בניגוד למבודד) מטענים יכולים לנוע בחופשיות.

בסיוע הנחות אלה עלה בידי מדעני המאה השמונה-עשרה להסביר תופעות שלפני כן שום תורה חשמלית לא הצליחה להסביר. למשל, הגרמני פרנץ אפינוס (1802-1724) ביאר באמצעותן כיצד גוף טעון במטען חיובי (נגדיר גוף זה כ-A) מושך אליו גוף מוליך ניטרלי (B): המטען החיובי של A מפעיל כוח דחייה על המטען החיובי של B, כך שהמטען החיובי של B מסתדר בצד המרוחק של B (ביחס ל-A), בעוד שהמטען השלילי של B מצוי בצד הקרוב ל-A (ראו איור מס' 1); מאחר שעוצמת הכוחות החשמליים נחלשת עם המרחק, כוח המשיכה שבין המטען החיובי של A למטען השלילי של B חזק מכוח הדחייה שבין המטענים החיוביים של A ו-B, כך שבסופו של דבר גופים A ו-B נמשכים זה לזה.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.



איור 2. מוליך טעון חיובית מקורב למוליך ניטראלי מבחינה חשמלית

סביב 1785 הוכיח הצרפתי שארל אוגסטן דה-קולון (1806-1736) שהכוח החשמלי בין זוג מטענים פרופורציונלי למכפלת המטענים ונחלש בהתאם לריבוע המרחק ביניהם, בדיוק כשם שכוח הכבידה הניוטוני פרופורציונלי למסות ונחלש בהתאם לריבוע המרחק בין המטענים. לרגע נראה היה אפוא שתופעות החשמל והמגנטיות ניתנות לתיאור באמצעות מודל הכוח הניוטוני, כלומר במסגרת עולם המושגים שהיה מקובל כבר קודם לכן. אולם באותן שנים נתגלתה תופעה חדשה, הזרם החשמלי, שאותו גילה במקרה פרופסור איטלקי לאנטומיה בשם לואיג'י גלוואני (1798-1737). גלוואני הבחין שכששתי מתכות שונות נוגעות הן בגופה של צפרדע מנותחת והן זו בזו, מתכווצות רגלי הצפרדע בעוצמה. בן ארצו אלסנדרו וולטה (1827-1745) שחקר את התופעה הבין שמקורה במגע בין שתי המתכות, והוא בנה אפוא (סביב 1800) מתקן שבו הוחלף גוף הצפרדע בנייר טבול בחומצה, וכדי להגביר את ההשפעה הוא הניח זו על גבי זו מספר רב של דיסקיות אבץ, נחושת ונייירות נוספים טבולים בחומצה. כך יצר וולטה את הסוללה החשמלית הראשונה, כלומר מכשיר שיצר זרם חשמלי יציב ובכך אפשר לחקור ביעילות את תופעת החשמל הזורם (שאיננו אלא תנועה של מטענים חשמליים).

זאת ועוד, עד מהרה גילו המדענים שלא זו בלבד שסידור חומרים כימיים בסדר מסוים מעניק זרם חשמלי, אלא שניתן אף להפוך את סדר הפעולות: זרם חשמלי יכול להפריד בין יסודות כימיים של תמיסה ואפילו מים. המרה הדדית זו בין כוח חשמלי לכימי איננה ניתנת לביאור במסגרת של מודל ניוטוני של פעולה ממרחק, והיה ברור למדענים שכדי להבינה נדרשת גישה שאיננה נשענת על ניתוח תופעות בודדות בניסיון להשתיתן על חוקיות מתמטיות פשוטה, אלא מנסה לנקוט ראייה כוללת יותר ולהבין אילו גדלים נשמרים בעת התרחשות תהליכים שכרוכים בהם כוחות מסוגים שונים. במהלך המאה התשע-עשרה אכן החלו המדענים לחקור גודל מעין זה – אנרגיה – ולנסות לחבר באמצעותו יחדיו את שלל הכוחות השונים הקיימים בטבע. מאמץ זה הוביל בשנת 1840 לניסוח חוק שימור האנרגיה, שמיקם

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

את תופעות האור, החום, החשמל והמגנטיות בתוך מסגרת של עקרונות כלליים. ואולם בכל הנוגע לחשמל ומגנטיות, פריצת דרך משמעותית נרשמה עשרים שנה לפני כן.

בשנת 1820 גילה הדני הנס כריסטיאן ארסטד (1777-1851) שזרם חשמלי העובר בחוט מוליך גורם לסיבובה של מחט מגנטית הנמצאת בסמוך. אך בניגוד לציפיות המוקדמות שנשענו על המודל הניוטוני המוכר, קוטבי המחט לא נמשכו אל החוט, אלא שאפו להביא את המחט לכך שתהיה מאונכת לחוט. יתר על כן, כשהמחט היתה מונחת מעל החוט המוליך היא הסתובבה בכיוון הפוך לכיוון שבו הסתובבה כאשר ניצבה מתחתיו; המסקנה היתה שהכוח המגנטי שיוצר החוט כביכול מקיף אותו במעגל. לאחר מכן חקר הצרפתי אנדרה-מארי אמפר (1775-1836) את התופעה, והסיק שאכן יש קשר יסודי בין החשמל והמגנטיות: המגנטיות איננה תופעה עצמאית, אלא היא נוצרת כתוצאה מתנועתם של מטענים חשמליים, כלומר מקיומו של זרם חשמלי. אמפר הוסיף וביאר את פעולתו של המגנט הרגיל באמצעות ההשערה שבחומר הממוגנט יש זרמים חשמליים קבועים, ובאמצעות יישום חוק קולון (בסיוע כלים מתמטיים מתוחכמים) למקרים שונים הצליח לפתח חוקים חשובים בתורת החשמל.

אמפר אף גילה שבין שני קטעים של חוט מוליך, שעוברים בהם זרמים חשמליים, נוצרים כוחות משיכה או דחייה, שמקורם במגנטיות הנוצרת סביב קטעי החוט. הוא ניסה לתאר כוחות אלו בסיוע מודל ניוטוני, אולם עד מהרה גילה שתיאור כזה תקף רק עבור כיוונים יחסיים מסוימים של קטעי החוט; המודל הניוטוני, ומודלים מתמטיים מורכבים יותר, לא סייעו לאמפר וממשיכיו לתאר בהצלחה את כל הכוחות החשמליים הנוצרים באופן זה. לבסוף נפתרה הבעיה בעזרת גישה שונה לחלוטין, שנודעה לה השפעה מכרעת על התפתחותה העתידית של הפיזיקה: הגישה החדשה התבססה על מושג השדה של הפיזיקאי האנגלי מייקל פאראדיי (1791-1867).

פאראדיי החל את דרכו כשוליית כורך, ומעולם לא רכש השכלה מדעית תיאורטית של ממש. בהיעדר יכולת לערוך את החישובים המתמטיים המורכבים הדרושים לניתוח יעיל של תופעות חשמליות (לדוגמה, כמו אלה שביצע אמפר), נאלץ פאראדיי לבסס את מחקרו על האינטואיציה הפיזיקלית שלו גרידא. ואינטואיציה זו הושפעה מהתופעה הבאה: כשמפזרים נסורת ברזל סביב מגנט, פירורי הנסורת מסתדרים בקווים מעוגלים המוליכים מקוטב אחד של המגנט אל הקוטב השני. כדי לייצג קווים אלה המציא פאראדיי את מושג "קווי הכוח" (המכונים כיום בדרך-כלל "קווי שדה") הנמצאים במרחב שסביב המגנט, ומוליכים מקוטב אחד של המגנט לקוטב השני. פאראדיי סבר שהקווים הללו שואפים להתקרב זה לזה או להתרחק זה מזה, שאיפה שגורמת לקטבים להימשך או להידחות. למערכת קווי הכוח שהקוטב המגנטי יוצר במרחב שסביבו קרא פאראדיי בשם "שדה מגנטי". בדומה לכך הסביר פאראדיי את כוחות המשיכה והדחייה של מטענים חשמליים באמצעות השערת קיומו של

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

"שדה חשמלי" אקוויוולנטי, העשוי אף הוא מ"קווי כוח" היוצאים ממטען חשמלי אחד ומגיעים לאחר (או לאינסוף).

על-סמך ניסיונותיו ותצפיותיו המרובים בחשמל ומגנטיות, הסיק פאראדיי שלמטרת ביאור התופעות הללו יש לנקוט גישה המכירה בחשיבות התווך המצוי בין מטענים (או מגנטים) ושההשפעה החשמלית או המגנטית חייבת להתרחש בהדרגה ולא בבת אחת. אלה התצפיות העיקריות ששיכנעו אותו בכך:

1. קווי השדה בין מטענים (או קטבי מגנט) אינם ישרים, אלא הם עקומים. פאראדיי התקשה להבין כיצד כוח הפועל באמצעות פעולה מיידית ממרחק יכול לפעול באמצעות קווים עקומים כאלה. הוא שיער לפיכך שהסיבה לעקמומיות זו עשויה להיות קיומו של תווך דליל מסוים (שכונה אתר) השורר בכל נקודה במרחב, כאשר ההשפעות החשמליות או המגנטיות מתחוללות תוך כדי אינטראקציה עם תווך זה.

2. כאשר פאראדיי הכניס פיסת חומר דיאלקטרי (מבודד) בין לוחותיו של קבל טעון, הוא גילה שכמות המטען על הלוחות שונה מאשר המטען שנצבר עליהם בנוכחות אוויר בלבד בין הלוחות. פאראדיי הסיק שהאינטראקציה בין המטענים (ההפוכים בסימנם) שעל שני לוחות הקבל אינה הגורם הבלעדי להתרחשויות, ושהתווך שביניהם ממלא אף הוא תפקיד משמעותי.

3. בנוגע להשראת זרם חשמלי בלולאה מוליכה, כאשר חלק ממנה מונע כך שהוא חותך קווי שדה מגנטי, טען פאראדיי: "לא ייתכן שעצם התנועה כשלעצמה היא שהפיקה את הזרם הזה: חייב להתקיים מצב מסוים מסביב למגנט, מצב שתלוי במגנט זה והוא שריר וקיים בתחום המרחב שבו מצויה הלולאה."

פאראדיי מעולם לא הסביר מהו בדיוק טיבם של "קווי הכוח" שלו, אולם ברור היה לכול שגישתו ביטלה את ההכרח להאמין שגוף יכול להשפיע ממרחק, כלומר יכול לפעול במקום שאיננו נמצא (רעיון שאפילו ניוטון עצמו התקשה לקבל). גישת השדה של פאראדיי הציעה נקודת מבט שונה לחלוטין. נתבונן, לדוגמה, בשני מטענים חשמליים הפוכים בסימנם, המושכים זה את זה. אנו יכולים לתאר את כוח המשיכה ביניהם על פי חוק קולון, כלומר להניח שהמטען הראשון מפעיל ממרחק כוח משיכה על המטען השני ולהפך. פאראדיי מציע דרך אחרת לתיאור התופעה: המטען החשמלי הראשון משרה במרחב סביבו ישות פיזיקלית חדשה, השדה החשמלי, והשדה – המצוי בכל נקודה במרחב, ככל שהשפעתו מגעת – הוא המפעיל כוח על המטען השני. כל נקודה במרחב שבו משפיע המטען מתאפיינת בעוצמה ובכיוון של השדה, וכל נקודה כזאת מצויה באינטראקציה עם כל הנקודות הסמוכות לה. בניגוד לגישת הפעולה ממרחק, המתמקדת רק בגדלי המטענים היוצרים את הכוחות

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

החשמליים ובמרחקים ביניהם, גישת השדה מביאה בחשבון גם את התווך ואת הגיאומטריה של המרחב החוצץ בין המטענים. מובן שתיאור זה נכון גם בכיוון ההפוך, כלומר המטען החשמלי השני מפעיל, באמצעות השדה שהוא יוצר במרחב סביבו, כוח על המטען הראשון (הזהה, בהתאם לחוק השלישי של ניוטון, לכוח שהמטען הראשון מפעיל על השני).

חשיבותה של הגיאומטריה של התווך – או המרחב – המשתרע בין המטענים מומחשת במה שמכונה היום "חוק גאוס", המאפשר לפתור בעיות אלקטרוסטטיות בסיוע משטחים סגורים דמיוניים (הנבחרים בקפידה) סביב מטענים, המכונים מצדם "משטחי גאוס". חוק זה נקרא על שמו של הגרמני קרל פרידריך גאוס (1777-1855), מגדולי המתמטיקאים בכל הזמנים, שלא טמן ידו בצלחת גם בענפי הפיזיקה השונים. גאוס חקר לעומק את מושג ה"שטף" של מכאניקת הזורמים, כלומר הענף החוקר נוזלים וגזים, את אופן תנועתם, החוקים הפועלים עליהם וכו'. השטף מוגדר כנפח הזורם (כלומר הנוזל או הגז) העובר דרך שטח חתך כלשהו ליחידת זמן, אך ניתן להראות בקלות כי גודל זה שווה גם למכפלת שטח החתך במהירות הזורם. בהתאם לגישה שרווחה בתקופתו, לחפש אנלוגיות בין ענפים פיזיקליים שונים (למשל מכאניקת הזורמים, אלקטרוסטטיקה ותורת החום), דימה גאוס את וקטור המהירות של נוזלים לווקטור השדה החשמלי, וכך הגיע למושג השטף החשמלי – המכפלה (הסקלרית) של וקטור השדה בווקטור השטח. גאוס הבין שאם נגדיר משטח תלת ממדי סגור – בצורה כלשהי – מסביב לאוסף מטענים קבוע, כי אז השטף החשמלי שיעבור דרך כל המשטח הזה לא יהיה תלוי כלל בממדי המשטח או בצורת המשטח, אלא יימצא ביחס ישר לכמות המטענים המצויים בתוך המשטח (בלבד). באמצעות חוק גאוס, הקושר באופן כמותי ומדויק בין מטענים, משטחים, שדות ושטפים, ניתן להסיק באופן מיידי (למשל) את המסקנה החשובה שמטען במוליך חייב להתרכז על פניו החיצוניים בלבד, וכן ניתן לפתור בעזרתו בעיות אלקטרוסטטיות שונות שמבחינה טכנית אינן ניתנות (או קשות מאוד) לפתרון באמצעות חוק קולון. יש לציין שגאוס עצמו מתח ביקורת חריפה על הנחת הפעולה ממרחק העומדת ביסוד חוק קולון (והתקבלה ללא היסוס על-ידי רבים ממפתחיו), ושאף כל ימיו לפתח תיאוריה שמבארת את תופעות האלקטרוסטטיקה באמצעות פעולות המתקדמות בהדרגה (כמו האור). הואיל ולא הצליח בכך, לא טרח מעולם לפרסם ברבים את הישגיו בתורת החשמל (כולל "חוק גאוס" עצמו).

בעקבות מושג השדה של פאראדיי ותומכיו (כמו גאוס), השאלה שמתעוררת מיד היא מה טיבו של ה"אתר", החומר הדקיק שבעיני רוחם של פאראדיי ועמיתיו ממלא את כל המרחב ומעביר את ההשפעות החשמליות והמגנטיות. אמנם, היה נהוג זה מכבר לשער שחומר מסוג דומה מעביר את גלי האור. כלומר, מי שקיבלו את רעיונותיו של פאראדיי, לא התקשו להניח שהמרחב מלא באתר של גלי האור ובקווי השדה החשמלי והמגנטי גם יחד. סביר היה לנסות

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

לאחד שני מושגים אלו לתווך יחיד, הממלא את המרחב ומוליך את כל סוגי ההשפעות הפיזיקליות. ואכן, כבר פאראדיי סבר שגלי האור הם תנודות העוברות בקווי השדה שלו, כמו תנודות של מיתרים, אך הוא לא הצליח לפתח את הרעיון הזה לתיאוריה אופטית מוצלחת. מודל תיאורטי המאחד בין מושג האתר של האור לבין קווי השדה של פאראדיי פותח מאוחר יותר על-ידי המדען הסקוטי ג'יימס קלרק מקסוול (1879-1831).

מקסוול פיתח את השדה של פאראדיי למודל מורכב מאוד מבחינה מתמטית של אתר אלקטרומגנטי, המוליך גם את ההשפעות החשמליות וגם את ההשפעות המגנטיות. כדי להעניק בסיס פיזיקלי מוצק לקווי השדה, ניסה מקסוול למצוא להם מודל מכאני, כלומר מערכת של חומר בתנועה שתחקה את פעולתם. על סמך המודל המכאני הזה, שהיה מסובך עד מאוד, הצליח מקסוול לפתח מספר משוואות עבור התנהגות השדה האלקטרומגנטי סביב זרמים חשמליים. המשוואות תיארו היטב את התופעות שהיו ידועות אז (וכללו, אגב, את חוק גאוס), אולם היו להן גם פתרונות שייצגו תופעות אלקטרומגנטיות חדשות. הפתרונות האלו הם תנודות מחזוריות המתפשטות כגלים ממקום הימצאם של זרמים חשמליים מתנודדים, וכך מעבירות אנרגיה ממקום למקום. כשחישב מקסוול את מהירות התפשטותן של התנודות האלו באתר על סמך הקבועים החשמליים והמגנטיים שהיו ידועים בזמנו, הוא הגיע לתוצאה מוכרת - כ-300,000 קילומטרים בשנייה, כלומר מהירות האור. מקסוול היה יכול אפוא להציע הסבר משכנע לטיבם של גלי האור: אלו גלים של האתר האלקטרומגנטי, שקיומם משתמע מהמשוואות שהוא מצא בחקירת המודל המכאני שלו. כך הצליח מקסוול לשלב את האופטיקה, החשמל והמגנטיות לתיאוריה יסודית אחת. כשם שההכרה בחשמל כ"סובסטאנס" סללה (במאה השבע-עשרה, ערש תורת החשמל) את הדרך לזיהוי ההבדלים שבין תופעות חשמליות ומגנטיות, כך הוביל מושג השדה את המדענים לגילוי האלקטרומגנטיות, כלומר לאישוש החשד (שכבר עלה במוחו של פאראדיי) שהחשמל והמגנטיות אינם אלא (ככלות הכול) היבטיה השונים של אינטראקציה פיזיקלית אחת.

מקסוול מצדו ידע שהמודל המכאני שלו איננו מספק מבחינה פיזיקלית, אולם במשוואות עצמן הוא לא פיקפק. לפיכך, כאשר הציג אותן ב-1864, הוא עשה זאת בלי להסתמך על המודל המכאני שכה היטיב לשרתו. היינריך הרץ אכן אימץ משוואות אלה (תוך התעלמות מוחלטת מהמודל המכאני שעמד בבסיסן), וב-1887 ניסה לבחון את תקפותן באמצעות יצירת תנודות במעגל חשמלי. ממשוואות מקסוול ניתן להסיק שתנודות כאלו יגרמו ליצירת גלים אלקטרומגנטיים הדומים במהותם לגלי האור. אולם מכיוון שהמכשירים היוצרים אותם הם גדולים יחסית (מסדר גודל של כמה דצימטרים) הרי שאורך הגלים "המלאכותיים" האלו צריך להיות גדול בהרבה מזה של האור הנראה (ששיעורו בסביבות כמה עשיריות של אלפית המילימטר). המכשירים פעלו היטב, והגלים הופיעו: התנודות במעגל של הרץ גרמו להופעת

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

ניצוצות בין קצותיו של פתח קטן בלולאת מתכת שהיתה מרוחקת כמה מטרים מהמעגל הראשון. משהו – מן הסתם הגלים של מקסוול – עבר בין שני המעגלים, ונשא את האנרגיה הדרושה ליצירת הניצוצות. כיום היינו קוראים למעגל הראשון "משדר" וללולאת המתכת "מקלט": הגלים האלקטרומגנטיים הארוכים, שמשוואות מקסוול חזו את קיומם והרץ מצאם בניסוי, הם גלי הרדיו.

<u>מקורות</u>:

ערכי ויקיפדיה;

יואב בן-דב, *פיזיקה: תורות ומושגים*, פרק 9 ("המגנט והחשמל");

המאמר "תופעות אלמנטריות אלקטרוסטטיות" (פוריו ושות');

המאמר "קשיים בלמידת מושג השדה" (פוריו ושות');

"מצגת בנושא חוק גאוס" , מאת גילית פורת, אתר מורי הפיזיקה

http://ptc.weizmann.ac.il/?CategoryID=1439&ArticleID=3361;

הספרים של Darrigol, Dunnington;

A Guide to Introductory Physics Teaching, Arnold B. Arons (Wiley, 1990), p. 197.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

טקסט בסיס לדיון: מלחמת הזרמים – זרם ישר מול זרם חילופין

"מלחמת הזרמים" היתה סדרה של אירועים שהתרחשו סביב הפיתוח החלוצי של שתי מערכות הולכת החשמל המתחרות בארה"ב, בסוף שנות השמונים ותחילת שנות התשעים של המאה התשע-עשרה. המחלוקת בין הצדדים כללה תחרות מסחרית חריפה, ויכוח על יעילות ובטיחות בהולכת חשמל, וכן קמפיין תקשורתי-תעמולתי רעשני שצמח מהם.
השחקנים הראשיים במחלוקת היו החברה "אלקטריק לייט" בראשות הממציא ואיש העסקים הידוע תומס אדיסון (1931-1847), שצידדה בהולכה באמצעות זרם ישר (DC), והחברה המתחרה למוצרי חשמל בראשות היזם והמהנדס ג'ורג' וסטינגהאוז (1914-1846) – שצידדה בהולכה באמצעות זרם חילופין (AC). המחלוקת התפתחה תוך כדי הפיתוח הראשוני וההתפשטות המהירה של הולכה המבוססת על זרם החילופין והעדפתה לבסוף על-פני הולכה באמצעות זרם ישר. "מלחמה" סוערת זו כללה שלושה היבטים: תחרות מסחרית עזה וגלויה בין שתי חברות גדולות לייצור מוצרי חשמל שכל אחת מהן שאפה לשכנע את קהל הצרכנים (פרטיים וממסדיים כאחד) בעדיפות הטכנולוגיה שלה; פחד הולך וגובר בקרב הציבור הרחב ממוות באמצעות חשמול על-ידי מתח גבוה (שמתקבל בשיטת זרם החילופין); וויכוח סוער שהיה כרוך בתככים רבים מאחורי הקלעים סביב הנהגתו הראשונה של הכיסא החשמלי כאמצעי חדיש להוצאה להורג.

החל מאמצע שנות ה-70 של המאה התשע-עשרה הוקמו לראשונה מערכות תאורת רחובות בהיקף גדול. חלק ממערכות תאורת הרחובות היה מבוסס על זרם חילופין, אך ב-1882 המציא אדיסון מערכת להולכה חשמלית המבוססת על זרם ישר שנועדה לשמש בבתים פרטיים ובמפעלים ולהחליף את מערכות התאורה הישנות המבוססת על גז או נפט. זרם ישר עבד היטב עם נורות להט, צרכני החשמל העיקריים של אותם ימים. במערכות של זרם ישר ניתן היה להשתמש בקלות בסוללות אחסון, שסייעו באספקת מתח יציב וכן גיבוי במקרה של תקלות בפעולת הגנרטורים. אדיסון המציא מונה שאיפשר לחייב צרכנים בהתאם לשיעור הצריכה שלהם, ומונה זה עבד רק עם זרם ישר.

ב-1886 החל ג'ורג' וסטינגהאוז לבנות מערכת המבוססת על זרם חילופין שהשתמשה בשנאי להגדלת המתח עבור הולכה לטווח רחוק ולהנמכתו מחדש לפני מעבר החשמל לבתים לשימוש הצרכנים. זו היתה שיטה יעילה יותר וזולה יותר שהתחרתה ישירות במערכת ההולכה שפיתח אדיסון. בעקבות הצלחת מערכת זרם החילופין של וסטינגהאוז ואימוצה על-ידי יותר ויותר חברות מתחום החשמל, החלה החברה של אדיסון לטעון (בתחילת 1888) שזרם חילופין הוא מסוכן וההולכה המבוססת עליו פחות יעילה מאשר הולכת זרם ישר.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

הסבר קצר, מהו זרם ישר: זרם חשמלי הוא כידוע תנועה של אלקטרונים. האלקטרונים במתכת, לדוגמה, הם יחסית חופשיים לנוע בתוך החומר, אבל ללא הכוונה הם נעים לכל הכיוונים באופן אקראי כך שכל זרם אלקטרונים לכיוון מסוים מתבטל על ידי זרם בכיוון ההפוך. אך אם מפעילים מתח חשמלי על המוליך, האלקטרונים ינועו לכיוון אחד באופן מסודר. כיוון התנועה תלוי בכיוון של המתח החשמלי: האלקטרונים השליליים ינועו לכיוון החלק החיובי, הפלוס, של המתח. בזרם ישר, הזרם נע תמיד לאותו כיוון.

ומהו זרם חילופין? אם בזרם ישר הזרם נע תמיד לכיוון אחד, בזרם חילופין הוא מחליף כיוון כל הזמן: פעם קדימה, פעם אחורה. שינוי הכיוון הזה מתרחש עקב שינוי המתח על הכבל: הרי תמיד האלקטרונים השליליים נמשכים למתח החיובי. הקוטב החיובי של המתח מצוי לעתים בצד אחד של הכבל, ולפרקים בצד השני. זרם החילופין הומצא למעשה על-ידי גדול מהנדסי החשמל בכל הזמנים: ניקולה טסלה (1856-1943), אמריקאי ממוצא סרבי, שתחילה עבד אצל אדיסון אך הסתכסך עמו ועזב, ולאחר מכן שקד על פיתוח טכנולוגיית הולכת החשמל בזרם חילופין בחסות חברת וסטינגהאוז.

לזרם ישר, ידע טסלה, יש כמה חסרונות משמעותיים, בעיקר בהקשר של העברת חשמל למרחקים. הסיבה היא שהחשמל מיוצר בגנרטור ומועבר לביתנו דרך תיילים (כבלים) עשויים מנחושת (בנחושת יש הרבה אלקטרונים חופשיים באופן יחסי ולכן היא נחשבת למוליך חשמל טוב). הגנרטור, תילי ההולכה והצרכן מחוברים ביניהם בטור. לכן, חלק מהאנרגיה החשמלית המופקת בגנרטור אמנם מגיע אל הצרכן, אך חלק ממנה מתבזבז בצורת חום בתילי ההולכה. מאחר שהתילים והצרכן מחוברים ביניהם בטור, היחס בין האנרגיות המתפתחות בצרכן ובתילים שווה ליחס שבין ההתנגדויות שלהם. ההתנגדות של מוליך נמצאת ביחס ישר לאורך המוליך. כל עוד המקור קרוב לצרכן, לדוגמה הסוללה והנורה בפנס, ההתנגדות של התילים זניחה יחסית להתנגדותו של הצרכן, כך שרוב ההספק המופק במקור מגיע אל הצרכן (חלק מההספק מתבזבז גם בתוך המקור, בגלל התנגדותו הפנימית). לא כך המצב ברשת החשמלית. לעתים, מרחק הצרכן מתחנת הכוח הוא מאות ואף אלפי ק"מ. לכן ההתנגדות הכוללת של תילי ההולכה במקרים אלה גדולה מאוד. כתוצאה מכך, חלק ניכר של ההספק המופק בגנרטור מתבזבז בתילי ההולכה, וההספק המגיע לצרכן הוא קטן מאוד.

הפסד ההספק בתילים שהתנגדותם הכוללת היא R, ובהם זורם זרם שעוצמתו I, נתון על-ידי הנוסחה I^2R. ההתנגדות R של תיל נתונה על-ידי הנוסחה:

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

לכן, כדי להקטין את ההתנגדות R, ניתן לנקוט את הצעדים הבאים:

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

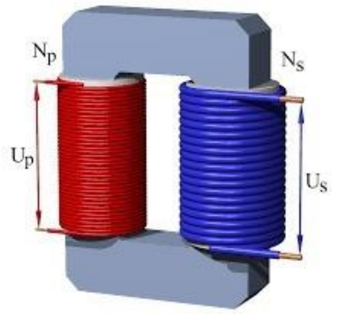
(1) נוכל להקטין את ההתנגדות הסגולית של התיל אם נייצר תילי הולכה העשויים מכסף במקום מנחושת. הבעיה היא שכסף יקר מנחושת.

(2) נוכל להגדיל את שטח החתך S של התילים המוליכים. הבעיה היא שצעד כזה ידרוש כמות חומר גדולה יותר, ומספר רב יותר של עמודי חשמל שייתמכו בתילים הכבדים.

(3) נוכל להקטין את אורך התילים המוליכים אם נבנה תחנות כוח שתהיינה קרובות לצרכנים. הבעיה היא שנצטרך לבנות הרבה מאוד תחנות כוח.

מכיוון שכל הפתרונות להקטנת ההתנגדות R של התילים המוליכים אינם כדאיים כלכלית, הפתרון המבוקש מחייב להקטין במידה ניכרת את עוצמת הזרם I בתילים. בהתאם לנוסחה של ההספק המתפתח במוליך נושא זרם $P=I^2R$, אם נקטין את הזרם פי שניים, ההספק המתבזבז על התיל יקטן פי ארבעה.

אם במקום זרם ישר הגנרטור ייצר זרם חילופין, נוכל להקטין את הזרם בעזרת רכיב שנקרא שנאי, ורק לפני החיבור לצרכן, להגדילו שוב באמצעות שנאי נוסף. שנאי הוא רכיב חשמלי המורכב משני סלילים חשמליים המלופפים על ליבת ברזל משותפת (ראו איור 1).



איור 1 . שנאי

שינויי זרם באחד הסלילים גורמים לשדות חשמליים ומגנטיים משתנים המשרים מתח על הסליל השני. על-פי חוק פאראדיי, יחס מספרי הליפופים בשני הסלילים הוא כמו יחס המתחים ביניהם והפוך ליחס הזרמים. כך ניתן לשנות כל מתח לכל מתח. בשל העובדה ששינויי הזרם בסליל הראשון הם אלה שגורמים להשראת המתח בסליל השני, אי אפשר לעבוד עם שנאי בזרם ישר, שכן זהו זרם קבוע בזמן.
זרם החילופין המיוצר בתחנת הכוח יוצר מתח חילופין נמוך, וזרם חילופין גבוה. השנאי שמחבר בין הגנרטור לתיילים המוליכים מעלה את המתח ומוריד את הזרם ולכן ההספק המתבזבז על התיילים קטן ($P=I^2R$). התילים המוליכים מחוברים לצרכן דרך שנאי נוסף שבתורו מוריד בחזרה את המתח ומעלה את הזרם.

ההספק החשמלי, כלומר האנרגיה ליחידת זמן, הוא מכפלת הזרם במתח, ומחוק שימור האנרגיה נובע שההספק המגיע לצרכן לא יכול להיות גדול מזה שמיוצר בתחנה. מהקשר

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

P=IV נובע שהגדלת מתח גורמת להקטנת הזרם ולהפך. דוגמה: נוכל לקבל הספק של 4 ואט (יחידת ההספק) אם המתח הנופל על המוליך שווה ל-2 וולט (יחידת המתח) והזרם הזורם בו שווה ל- 2 אמפר (יחידת הזרם), או אם המתח הנופל על המוליך שווה ל-4 וולט והזרם הזורם בו שווה ל-1 אמפר.

כיוון שההפסדים על קו נחושת תלויים כאמור אך ורק בזרם העובר דרכו ולא במתח, ייצור חשמל בגנרטור של זרם חילופין מאפשר העברה יעילה יותר של האנרגיה, משום שבאמצעות שנאים נוכל להקטין את הזרם בתילים שמחברים בין תחנת הכוח והצרכן. העלאת המתח באמצעות שנאי לעשרות אלפי וולטים מקטינה את הזרם בתילים בצורה משמעותית ולכן מצמצמת מאוד את הפסדי האנרגיה. הזרם הנמוך מאפשר שימוש בתילי נחושת דקים וארוכים לצורך נשיאת הזרם מתחנת הכוח לבית הלקוח. בבית הלקוח, המתח הגבוה יומר חזרה למתח נמוך באמצעות שנאי נוסף. כמו כן, השימוש בשנאי ובזרם החילופין מאפשר קבלת מתחים שונים שמתאימים למכשירים שונים מתחנת כוח אחת שיוצרת מתח אחד.

כיוון שמערכות ה-AC (זרם חילופין) המשיכו להתפשט על חשבון מערכות DC (זרם ישר), מצבה של חברת אדיסון הלך והחמיר. מחיר הנחושת עלה, מה שהוסיף להוצאות שהיו כרוכות במערכות ה-DC למתח נמוך של אדיסון, שדרשו חוטי נחושת עבים הרבה יותר מאשר מערכות AC של מתח גבוה יותר. למעשה הולכת זרם ישר היתה יעילה רק בערים גדולות מרובות-אוכלוסין, שבהן כבלי נחושת באורך נתון יכלו להעביר חשמל ליותר צרכנים; במכרזים של העיירות והערים דלות האוכלוסין זכו לפיכך מערכות ה-AC ש"זללו" פחות נחושת. המכירות של אדיסון הלכו וצנחו ככל שהוא הפסיד ביותר מכרזים ביישובים שהעדיפו מערכות AC זולות יותר.

עמיתיו של אדיסון ומהנדסים מהחברה שלו עצמו ניסו לשכנעו לעבור לטכנולוגיית AC, אך הוא התנגד לכל המאמצים לשכנעו. הוא האמין שהמתחים הגבוהים המשמשים במערכות AC מסוכנים ושיעברו שנים רבות עד שניתן יהיה לפתח מערכות AC יעילות ובטוחות לשימוש. הוא דאג שמא מוות הנגרם בידי מערכת AC שהותקנה בצורה שגויה יעכב את השימוש בחשמל בכלל. אדיסון הבין היטב כיצד פועלות מערכות AC. מספר מאפיינים לא יעילים שלהן (כמו למשל הפסדי האנרגיה של השנאים, שהיו משמעותיים בשנאים של אותה תקופה), כמו גם העלות הגבוהה של בניית מפעלים גדולים לייצור חשמל, שיכנעו אותו שהחיסכון במעבר מזרם ישר לזרם חילופין לא יהיה משמעותי. אדיסון האמין שמערכות DC ביסודן טובות יותר (והיה בטוח שהציבור ישתכנע בכך), ושהסיבה היחידה לשימוש ההולך וגובר בטכנולוגיות AC היתה שהן איפשרו למתחריו לעקוף את הפטנטים שהוציא על מכשירי ה-DC שלו.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

בפברואר 1888 פרסמה חברת אדיסון עלון בן 84 עמודים שבו נכתב כי מתחרי החברה מפירים את זכויות הפטנטים של אדיסון והם הוזהרו מתביעות משפטיות. העלון גם הדגיש את הבטיחות והיעילות של זרם ישר, בתוספת הטענה שהוא לא גרם אפילו למקרה מוות אחד, בעוד שתאונות התחשמלות במערכות AC כבר גרמו למותם של כמה.

טסלה מצדו, בגיבויו של וסטינגהאוז העשיר, החל לדחוף את רעיון זרם החילופין. עד מהרה החלה מלחמה בין טסלה ואדיסון על הטמעת השיטה להולכת החשמל במשק האמריקאי. אדיסון החל בקרב תעמולה אכזרי מאוד, כשהוא מנסה להשפיע על הציבור לדחות את זרם החילופין ולקבל את הזרם הישר. כיוון שהציבור הכיר אותו היטב בזכות המצאות כמו נורת החשמל והפונוגרף נודעה לו השפעה לא מעטה על דעת הקהל. הטענה המרכזית שהוא ניסה לקדם היתה שזרם החילופין מסוכן בשל המתח הגבוה בתילים המחברים בין תחנת הכוח לצרכנים. כניסוחו: "זרם ישר הוא כמו נהר שקט וגדול, ואילו זרם חילופין הוא כמו נהר גועש".

באביב 1888 פרצה סערה תקשורתית בעקבות סדרת מקרי מוות שנגרמו ברחבי ארה"ב על-ידי נפילת עמודי מתח גבוה (בזרם חילופין). מקרים אלה יוחסו (בעידוד חברת אדיסון) לתאוות בצע והיעדר מוחלט של זהירות מצד חברות החשמל המקומיות שסיפקו תאורה חשמלית תוך שימוש בזרם חילופין. ביוני אותה שנה בלט מהנדס חשמל ניו-יורקי בשם הרולד בראון כמתנגד חריף של השימוש בזרם חילופין. בראון טען שחברות החשמל סיכנו את הציבור בכך שסיפקו חשמל במתח גבוה ובאמצעות מתקנים שהוקמו ברישול. החברה של אדיסון סייעה לבראון לבצע הדגמות שבמהלכן חישמל כלבים וחתולים, בקר וסוסים (ואפילו פילה) בעזרת זרם חילופין, במטרה לשכנע את הציבור שזרם חילופין מסוכן יותר מזרם ישר. שיא הציניות במלחמה זו היה המצאת הכיסא החשמלי (בידי בראון) באמצעות גנרטור של וסטינגהאוז דווקא, כדי לקשר בתודעת הציבור בין זרם חילופין לאמצעי מחריד זה להוצאה להורג.

מהי האמת, אם כן? מה מסוכן יותר, זרם ישר או זרם חילופין? התשובה היא ששני הזרמים מסוכנים. התחשמלות מזרם חילופין עשויה לגרום לפרפורים בלב, בעוד התחשמלות מזרם ישר עלולה לנעול את השרירים על המוליך.

באותה תקופה התאחדו חברות קטנות שייצרו חשמל והתמזגו לחברות גדולות, וב-1890 נותרו בשוק החשמל שלוש חברות בלבד: חברת אדיסון, חברת תומס-יוסטון וחברת וסטינגהאוז. זמן קצר אחר-כך הפיקו שתי האחרונות – שהתבססו על זרם חילופין – רווחים גבוהים בהרבה מהחברה של אדיסון, שעדיין השתמשה בהולכת זרם ישר. בתקופה זו עזב אדיסון את החברה הקרויה על שמו ואף היא החלה לייצר זרם חילופין. ב-1892 התאחדה

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

חברת אדיסון עם חברת תומס-יוסטון. החברה החדשה, ששלטה בעת הקמתה על ¾ משוק החשמל האמריקאי, נקראה ג'נרל אלקטריק (כיום זהו אחד התאגידים הגדולים בעולם).

נקודת מפנה במלחמת הזרמים התרחשה ביריד העולמי בשיקגו, 1893, תערוכה שנודעה לה השפעה רבה על עולם הטכנולוגיה. וסטינגהאוז (טסלה) וג'נרל אלקטריק (אדיסון) התחרו ביניהן במכרז על הזכות להאיר את היריד במאה אלף נורות חשמל. ג'נרל אלקטריק ניסחה הצעה של מיליון דולר, כשרוב הסכום מופנה להקמת רשת כבלי נחושת עבים. וסטינגהאוז, עם זרם חילופין, לא נזקקה לכל כך הרבה נחושת, והצעתה היתה זולה יותר בחמישים אחוזים. וסטינגהאוז זכתה כמובן, ונשיא ארה"ב בכבודו ובעצמו לחץ על כפתור ההפעלה שהאיר את כל התערוכה עם המנורות של טסלה. הגנרטורים והמנועים הקטנים והיעילים של טסלה לעומת הכבלים הגדולים והכבדים של אדיסון הכריעו את הקרב בעיני הציבור.

נקודת מפנה נוספת היתה הגשמת החלום האמריקאי הישן לניצול מפלי הניאגרה לייצור חשמל. הממשל הקים ועדה מיוחדת שבחנה דרכים לנצל את מפלי הניאגרה להפקת אנרגיה. ההצעה של אדיסון להפעיל גנרטור זרם ישר באמצעות כוח המפל התמודדה מול זו של וסטינגהאוז. הלורד קלווין, הפיזיקאי הבריטי המהולל, ישב בראש הוועדה. קלווין התנגד בתחילה לרעיון זרם החילופין, אבל אחרי היריד העולמי שינה את דעתו ותמך בזכייתו של וסטינגהאוז במכרז. העבודה נמשכה חמש שנים מפרכות, אבל בסיומה החשמל זרם בשפע, והאיר חלק ניכר מהחוף המזרחי של ארצות הברית.

הפרויקט במפלי הניאגרה סימן את סוף מלחמת הזרמים, שהוכרעה לטובת זרם החילופין. המאבק רושש את וסטינגהאוז, והחברה היתה בסכנת התמוטטות. בצר לו, ביקש וסטינגהאוז מטסלה להשתחרר מהחוזה הכלכלי ביניהם, וזה הסכים. טסלה קרע בגרנדיוזיות את ההסכם לגזרים. הוא אמנם הציל את החברה של וסטינגהאוז, אבל יצר לעצמו קשיים כלכליים עצומים, שהמשיכו ללוות אותו גם בפרויקטים הבאים. טסלה הלך לעולמו כשהוא עני ושרוי בחובות כבדים, ואדיסון, מצדו, הצטער עד סוף ימיו על הבחירה שלו בזרם ישר.

<u>מקורות:</u>

ערכי ויקיפדיה (בעיקר" :מלחמת הזרמים");

רן לוי מאתר הידען (מבוסס על הפודקאסט שלו "מלחמת הזרמים"):

;http://www.hayadan.org.il/ran-levi-on-acdc-battle-0111077

דוד זינגר, *חשמל ומגנטיות*.

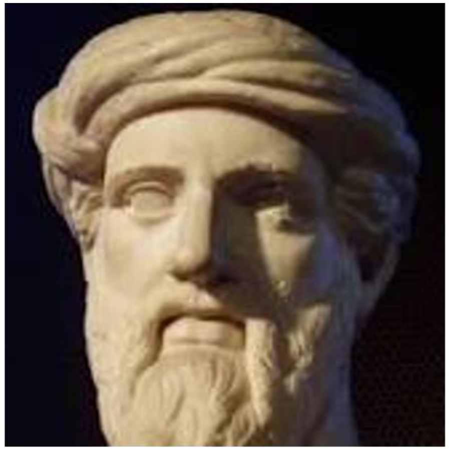
כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

חדר בריחה – שימור אנרגיה מכנית

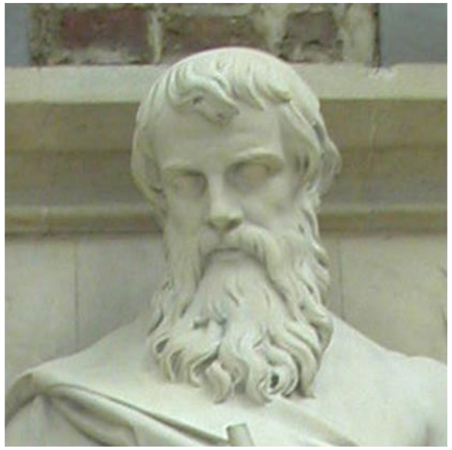
טקסט (1)

הוא היה הפילוסוף בעל ההשפעה הרבה ביותר בתרבות המערבית. למרות שהשקפותיו הפיזיקליות שונות תכלית שינוי מהפיזיקה המקובלת בימינו, כמה מרעיונותיו – כפי שנראה מיד – מהדהדים בתולדות החשיבה הפיזיקלית עד עצם היום הזה. הוא חי במאה הרביעית לפני הספירה, והיה תלמידו המפורסם ביותר של אפלטון, פילוסוף חשוב מאוד אף הוא.

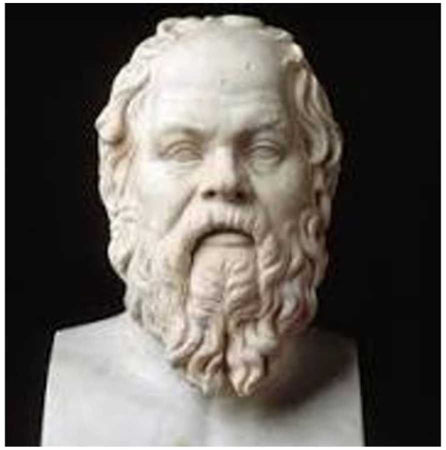
כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.



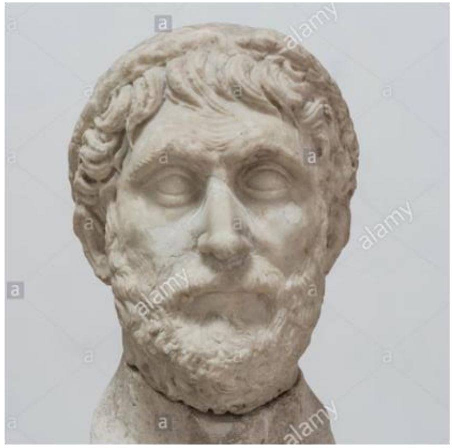
פיתגורס 496-582 לפנה"ס



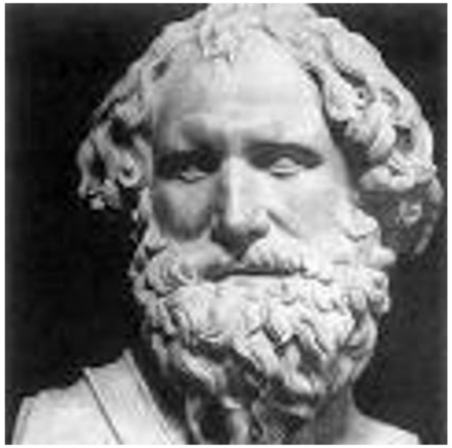
אוקלידס 275-365 לפנה"ס



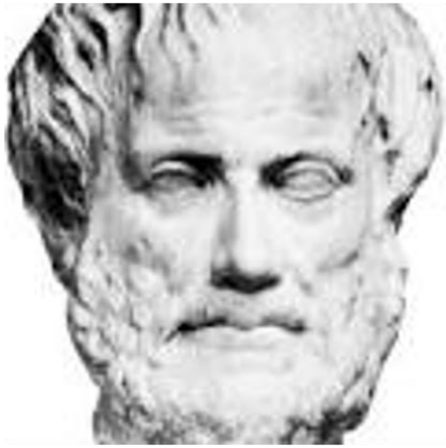
סוקרטס 399-470 לפנה"ס



תלמי 100-168 לספירה



ארכימדס 212-287 לפנה"ס



אריסטו 322-384 לפנה"ס

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

טקסט (2)

כמה ממושגי היסוד של אריסטו נעשו נכסי-צאן-ברזל בדיבורנו היום-יומי. למשל: "עצם" במשמעות של דבר כלשהו – אדם, סוס, בית; "בכוח", במשמעות של יכולת או אפשרות הטמונה בדבר-מה; "בפועל", לציון מה שקיים באמת.

נשתדל להבהיר את המושגים "בכוח" ו"בפועל". בשפת יום-יום המשמעות של "בכוח" ("דינאמיס") היא: כוח פיזי, כוח צבאי, שלטון. נוסף על הוראות מקובלות אלה קיבלה המלה אצל הפילוסופים משמעות של יכולת או כושר. המשמעות העיקרית של "דינאמיס" היא התחלה או סיבה או מקור של שינוי בדבר-מה אחר, רוצה לומר: לדבר כלשהו יש כוח כאשר הוא יכול לגרום לשינוי כלשהו בדבר-מה אחר. היכולת לשנות יכולה להיות מכוונת גם כלפי הדבר עצמו, כמו הרופא המרפא את עצמו. אבל הכוח הוא לא רק יכולת לפעול על דבר מה אחר, אלא גם יכולת לקבל פעולה או להיפעל על-ידי דבר-מה אחר. וזו ההוראה הפילוסופית היסודית של "כוח".

מהוראה זו לא רחוקה הדרך להוראה נוספת של "כוח" – האפשרי, או האפשרות. מתקבל על הדעת, שההשפעה שדבר יכול להשפיע על דבר-מה אחר, וההשפעה שהוא יכול לקבל מדבר-מה אחר, אינה אלא מכלול האפשריות הטמונות בו. כאשר אדם אומר: "יש לי אפשרות כזו וכזו" הוא רוצה לומר, שהוא יכול באמצעות פעולותיו לגרום להשגתם או להתממשותם של דברים מסוימים, אך האפשרויות הטמונות בו לא מסתכמות רק במה שהוא יכול לפעול, אלא גם במה שניתן לפעול עליו, ואין עצם טבעי שלא ניתן להיפעל בצורה זו או אחרת.

למושג ה"בפועל" מוצעת ההגדרה הבאה: הימצאותו של דבר לא באופן שבו הוא נמצא בכוח. זוהי הגדרה דחוקה שאומרת לנו מה הדבר אינו, ולא מה הוא כן. ואכן אריסטו עצמו הודה שאין הגדרה טובה ל"בפועל" אך ניתן להבינו היטב על-ידי דוגמאות יום-יומיות כגון: גוש הנחושת הוא פסל בכוח; לעומתו, הפסל שנוצר מן הנחושת הוא הפסל בפועל. גרעין האלון הוא עץ האלון בכוח; האלון שאנו עומדים מולו הוא האלון בפועל. הלבנים, קורות העץ, והצינורות המונחים על המגרש הם הבית בכוח; באשר לבית בפועל, אי אפשר לטעות כשם שלא היה אפשר לטעות בדוגמאות הקודמות.

דבר בפועל הוא אפוא מה שנוכח, מה שקיים, מה שנמצא, מה שממשי. מה שחשוב הוא לראות את הקשר ההדוק בין פעילות וממשות: התפיסה המונחת ביסוד המושגים "בכוח" ו"בפועל" היא שממשותו של דבר היא בפעילותו.

דמיינו לעצמכם כדור עם מסה m המצוי (במנוחה) בגובה h מעל הרצפה. כעת חִשבו על אותו כדור לאחר שנפל מגובה זה, רגע אחד לפני התנגשותו ברצפה, ותארו לעצמכם

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

שתנועתו של אותו כדור היא ה"ממשות" שאליה מתכוון אריסטו, שיכולה להימצא בכדור זה "בכוח" או "בפועל".

***לנדא, מבוא למטפיסיקה ולפילוסופיית הטבע של אריסטו*, עמ' 47-51**

א. במושגים מודרניים תנועת הכדור "בכוח" נקראת...

1. אנרגיה פוטנציאלית
2. אנרגיה קינטית
3. אנרגיה כוללת
4. כל התשובות נכונות

ב. במושגים מודרניים תנועת הכדור "בפועל" נקראת...

1. אנרגיה פוטנציאלית
2. אנרגיה כוללת
3. אנרגיה קינטית
4. כל התשובות נכונות

ג. הבלוט הינו עץ האלון:

1. בפועל ואז בכוח
2. לא בפועל ולא בכוח
3. בפועל
4. בכוח

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

טקסט (3)

המכאניקה מעידה יותר מכול עד כמה קשה לומר מתי נגמר המדע של ימי הביניים ומתחיל המדע הקלאסי. אם נתמקד בהיסטוריה של ענף המכאניקה היחיד שיכול היה באמת להיחשב כמדע עצמאי – הסטטיקה – כי אז נצטרך להרחיק אחורה לסביבת שנת 1200, שם ניתקל בכתבי יד ערביים ששאלו רבות ממקורות יווניים... גוף ידע זה, המכונה "מדע המשקלים" של ימי הביניים, הגיע למערב אירופה כשהוא מסולף וחלקי; אך הוא לא רק נקלט אלא פותח על-ידי האסכולה המכונה על שם המתמטיקאי מהמאה ה 13 ג'ורדאנוס נמורריוס, דמות מסתורית שידוע עליה מעט מאוד. שיטת ג'ורדאנוס מתבססת על אקסיומה חדשה ובלתי מוכחת, שגם איננה מוצגת באופן מפורש ובהיר בכתבים המיוחסים לג'ורדאנוס:

> מה שמסוגל להעלות משקל נתון L לגובה h, מסוגל להעלות משקל גדול פי n מ-L (כלומר משקל nL) לגובה קטן פי n מ-h (כלומר לגובה h/n).

Dijksterhuis, *The Mechanization of the World Picture*, pp. 248-249.

איזה גודל כימת ג'ורדאנוס באמצעות אקסיומה זו?

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

טקסט (4)

קביעה חשובה של הפילוסוף הצרפתי רנה דקארט (1596-1650) מתייחסת לניסיונו להבין איזה גודל פיזיקלי נשמר בתהליכים פיזיקליים:

לאחר שהסקנו שזה טבעה של תנועה, יש להביט בסיבתה, שהיא כפולה: כלומר קודם הכללית והראשונית, שהיא הסיבה המשותפת של התנועות שבעולם; אחר כך הפרטית, האחראית לכך שהיא מופיעה בחלק כלשהו של החומר שבו לא היתה לפני כן. ברור שאותה סיבה כללית אינה אלא אלוהים עצמו, שברא בראשית את החומר יחד עם תנועה ומנוחה, ומידת התנועה והמנוחה שהעניק אז לכל החומר כולו נשמרת בזכות השגחתו. לתנועה זו יש כמות מסוימת ומוגדרת, וקל לראות שייתכן כי היא קבועה תמיד בכל העולם כולו, אף-על-פי שהיא משתנית בכל חלק וחלק כשלעצמו. לדוגמה, אם חלק אחד של החומר נע במהירות שהיא כפליים מהמהירות של אחר, וזה האחר גדול כפליים כראשון, הרי מידת התנועה בקטן כמידתה בגדול; ואם תואט תנועתו של חלק אחד, כשיעור הזה תואץ תנועתו של חלק אחר, השקול כנגדו. לא קשה גם לראות ששלמות האלוהים לא מתבטאת רק בכך שאינו משתנה בעצמו, אלא גם בכך שאלוהים פועל תמיד בעוצמה ובמידה קבועות.. לכן מתקבל ביותר על הדעת שאלוהים נתן לחלקי החומר תנועות רבות בעת שברא אותם, וכשם שהוא משמר את כל החומר הזה באותו האופן ואותו היחס, שבהם ברא אותו מלכתחילה, כך הוא משמר בו תמיד את אותה כמות התנועה עצמה.

סמבורסקי, *המחשבה הפיסיקאלית בהתהוותה, עמ'* 251-252

דקארט מציע כאן מדד כמותי ל"כמות התנועה" שנשמרת בתהליך פיזיקלי. מדד זה דומה למושג מודרני בו אנו משתמשים כיום. שמו של גודל זה יעזור לכם להגיע אל החידה הבאה.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

א	ע	ר	ג	ו	נ	ע
ק	ו	ז	ל	ר	ה	ר
י	ב	ח	י	כ	ו	כ
נ	י	א	ל	ש	ו	נ
ט	ר	ה	א	מ	ד	פ
י	ב	ע	ו	ל	י	ו
ת	ו	ר	י	ה	מ	נ

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

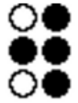
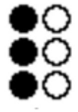
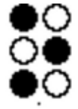
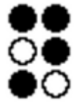
טקסט (6)

המכאניקה של ניוטון היא תורה של תנועה. בתור שכזו, היא מתארת כיצד משתנים גדלים מסוימים – מקומות ומהירויות - עם הזמן. אולם כאשר כותבים את משוואותיה באופן המתאים, אפשר למצוא שלמרות השינוי המתואר בהן, יש גדלים קבועים שאינם משתנים במשך התנועה. כבר לפני קבלת התורה של ניוטון טענו דקארט מצד אחד, ולייבניץ מצד שני, שבעת תנועתם של גופים יש גדלים שערכם איננו משתנה, כלומר גדלים משתמרים. דקארט דיבר על שימור גודל הנקרא "כמות התנועה", ומוגדר ככמות החומר שבגוף כלשהו כפול המהירות של אותו גוף. במונחים ניוטוניים, שבהם כמות החומר היא המסה, כמות התנועה של דקארט הופכת להיות מסה כפול מהירות. לייבניץ, לעומת זאת, דיבר על שימור גודל שקרא לו "כוח" (יש לשים לב שאין זה מושג הכוח הניוטוני), שיש לו שתי צורות: "כוח חי", שכיום אנו מגדירים אותו כמחצית המכפלה של המסה בריבוע המהירות, ו"כוח מת", שאנו מגדירים כיום כמכפלת המסה, הגובה שבו היא נמצאת ותאוצת הנפילה החופשית. שני מרכיבים אלו יחד נותנים את "הכוח" הכללי, שכמותו נשארת קבועה תמיד.

בן-דב, *פיסיקה: תורות ומושגים*, עמ' 36-37

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

1	גישתו הכללית של ניוטון
2	גישת שימור האנרגיה המכנית שניסח דקארט
3	כוח חי (לייבניץ)
4	כוח מת (לייבניץ)
5	כמות התנועה (דקארט)

"שינוי" - חקירת תנועה ושינויים	
"שימור "– חקירת מה שנשאר קבוע	
אנרגיה קינטית	
אנרגיה פוטנציאלית כובדית	
תנע	

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

טקסט (7)

במשך זמן מסוים היה ויכוח בין תלמידיו של דקארט לתלמידיו של לייבניץ בשאלה מהו הגודל המשתמר האמיתי – כמות התנועה או "הכוח". רק מאוחר יותר הסתבר שבמסגרת המכאניקה של ניוטון, אפשר לומר ששני הצדדים צדקו: גם כמות התנועה וגם "הכוח" הם גדלים משתמרים.

לכמות התנועה של דקארט אנו קוראים כיום "תנע" (Momentum). במסגרת המכאניקה של ניוטון (ובמובן מסוים גם בתורות החדשות שהחליפו אותה), כמות התנועה של קבוצת גופים כלשהם שאין פועלים עליה כוחות חיצוניים נשארת תמיד קבועה. דוגמה לתופעה זו היא רתיעתו של תותח: לפני שהתותח יורה, גם הוא וגם הפגז שבתוכו נייחים, וכמות התנועה הכללית היא אפס. כאשר הפגז נפלט מהלוע, יש לו מהירות מסוימת ולכן הוא נושא עמו כמות תנועה בכיוון מסוים. כדי לשמור על כמות תנועה קבועה של המערכת כולה, חייב התותח לשאת כמות זהה של תנועה לכיוון ההפוך, כך שכמות התנועה הכללית תהיה שוב אפס. אולם מכיוון שמדובר על אותה כמות תנועה ומסת התותח גדולה פי כמה ממסת הפגז, הרי שמהירות הפגז גדולה בהרבה ממהירות הרתיעה של התותח בכיוון ההפוך.

כמות התנועה היא גודל מכאני טהור, והיא אינה הופכת לשום צורה לא מכאנית, כלומר לצורה שאיננה קשורה בתנועת גופים במרחב. לפיכך, במסגרת המכאניקה של ניוטון, עקרון שימור כמות התנועה תקף תמיד. לעומת זאת, כפי שהסתבר במאה ה-19, "הכוח" של לייבניץ יכול ללבוש צורה לא מכאנית, ולכן אם אנו מסתכלים רק בצורותיו המכאניות, לפעמים נמצא שגודל זה איננו משתמר. "הכוח" של לייבניץ הוא צורה של מה שאנו קוראים כיום "אנרגיה". "הכוח החי" נקרא "אנרגיה קינטית", או אנרגיה של תנועה, ו"הכוח המת" נקרא "אנרגיה פוטנציאלית". סכומם של שני אלו הוא "אנרגיה מכאנית", שבמקרים רבים כמותה הכללית נשארת קבועה. נניח לדוגמה שיש לנו מטוטלת המתנודדת ללא חיכוך, וברגע מסוים היא נמצאת בקצה מסלולה. ברגע זה אין לה מהירות, כלומר אין לה אנרגיה קינטית; אולם מכיוון שהיא נמצאת בגובה מסוים, יש לה אנרגיה פוטנציאלית. בהמשך תנועתה מגיעה המטוטלת לנקודה הנמוכה ביותר של מסלולה, שביחס אליה אנו מודדים את האנרגיה הפוטנציאלית. כעת אין למטוטלת אנרגיה פוטנציאלית, משום שהיא איבדה את הגובה ההתחלתי שהיה לה בקצה המסלול; אולם במקומה יש לה אנרגיה קינטית הקשורה במהירות תנועתה. כאשר המטוטלת מתנודדת הלוך ושוב, גם האנרגיה המכאנית שלה הופכת מפוטנציאלית לקינטית ובחזרה, אך כמותה הכללית נשארת קבועה. אולם לאנרגיה יש עוד צורות: לדוגמה, היא יכולה להפוך לחום באמצעות חיכוך. לפיכך, כאשר יש חיכוך כמות האנרגיה המכאנית הולכת ופוחתת, עד שבסופו של דבר המטוטלת נעצרת.

בן-דב, פיסיקה: תורות ומושגים, עמ' 37-38

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

מהו המשפט הנכון מבין המשפטים הבאים:

1. ברתיעת תותח, הכוח החי של התותח שווה לכוח החי של הפגז, למרות שמסת התותח גדולה פי כמה ממסת הפגז.
2. במערכת של גופים שלא פועלים עליה כוחות חיצוניים סכום הכוח החי והכוח המת נשמר תמיד
3. בנקודה הגבוהה ביותר של מסלול המטוטלת, הכוח החי שלה מינימלי והכוח המת שלה מקסימלי.
4. במערכת של גופים שלא פועלים עליה כוחות חיצוניים כמות התנועה איננה נשמרת בהכרח.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

פיתגורס (582-496 לפנה"ס)

פיתגורס היה פילוסוף ומתמטיקאי יווני יליד האי סאמוס. בצעירותו הרבה במסעות באזור יוון, ולאחר מכן שאף להקים בית ספר ללימודי פילוסופיה בעיר מולדתו. מסיבות שונות נאלץ לעקור משם והיגר למושבה יוונית בדרום איטליה, שם ייסד קהילה דתית-פילוסופית הקרויה על שמו: האסכולה הפיתגוראית, הידועה בעיקר בשל אמונתה בחשיבות המספרים ובשל אורח חייה הסגפני.

סוקרטס (470-399 לפנה"ס)

הפילוסוף היווני סוקרטס נחשב לאביה, או מייסדה, של הפילוסופיה המערבית. סוקרטס הוא דמות אניגמטית למדי, ותורתו ידועה לנו בעיקר באמצעות כתבי תלמידו המפורסם ביותר, אפלטון, אם כי קשה לדעת כמה עד כמה באמת האמין סוקרטס בדעות שמייחס לו אפלטון. דעותיו האירוניות והלא מקובלות – שאותן הרבה להשמיע באוזני בני עירו – עוררו עליו את חמת האתונאים, ובהיותו כבן 70 הוצא להורג (בשתיית רעל) באשמת השחתת הנוער ואי-אמונה באלים.

אריסטו (384-322 לפנה"ס)

אריסטו היה פילוסוף יווני, הפילוסוף שהשפיע על התרבות המערבית יותר מכל הוגה אחר מאז ומעולם. הוא נולד בסטגירה שבצפון יוון, וכנער הגיע לאתונה והיה לתלמיד – ולאחר מכן למורה – באקדמיה של אפלטון. בעקבות מותו של אפלטון לא זכה אריסטו לרשת את ניהול האקדמיה, לפיכך עזב את אתונה, וכששב אליה ייסד בה מוסד למחקר והוראה משלו. התשתית המדעית שבנה אריסטו, הנפרשת על פני חיבוריו הפילוסופיים והמדעיים הרבים, השפיעה באופן עמוק ביותר תחילה על התרבות האסלאמית ולאחר מכן על תרבות המערב.

אוקלידס (365-275 לפנה"ס)

אֵוקלידס, מתמטיקאי יווני יליד אלכסנדריה שבמצרים, נחשב לאבי הגאומטריה. בספרו "היסודות" הציג באופן שיטתי ודדוקטיבי חלק ניכר מהידע המתמטי שהצטבר עד לתקופתו. ספרו נחשב לאחת היצירות המשפיעות ביותר בתולדות המתמטיקה, והיה ספר הלימוד המרכזי בגיאומטריה (לפחות) מזמן פרסומו ועד שלהי המאה ה-19.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

ארכימדס (287-212 לפנה"ס)

ארכימדס נמנה עם בכירי המדענים בעת העתיקה, והיה ללא ספק גדול המתמטיקאים של תקופה זו. מלבד זאת היה ממציא ומהנדס מחונן. הוא נמנה עם הראשונים שיישמו את המתמטיקה לחקר תופעות פיזיקליות, וייסד את מדעי ההידרוסטטיקה והסטטיקה: ניסח למשל את חוק הציפה המכונה על שמו וסיפק הוכחה חשובה לחוק המנוף. רבים מפיתוחיו המתמטיים נחשבים להטרמות של תיאוריות הנכללות בחשבון הדיפרנציאלי והאינטגרלי (חדו"א) של ימינו.

תלמי (100-168 לספירה)

תלמי (ביוונית: קלאודיוס פתולֶמאיוס) היה אסטרונום וגיאוגרף יווני תושב אלכסנדריה, והיה ללא ספק גדול האסטרונומים של העת העתיקה. החשוב מבין כתביו הוא "אלמגסט" (שיבוש ערבי של השם היווני), הספר שבו הציג את תורתו האסטרונומית – מודל גיאוצנטרי מורכב, שהיה שיפור גדול מבחינת דיוקו ביחס למודל הגיאוצנטרי הפשוט יותר שהיה מקובל מאז ימי אריסטו. תורת תלמי שלטה בשדה האסטרונומיה עד אשר הצליח גליליאו גליליאי (שהאמין בתורת קופרניקוס) להפריכה בעזרת תצפיותיו מבעד לטלסקופ.

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

טבלת גימטריה

1	א
2	ב
3	ג
4	ד
5	ה
6	ו
7	ז
8	ח
9	ט
10	י
11	יא
12	יב
13	יג
14	יד
15	טו
16	טז
17	יז
18	יח
19	יט
20	כ

21	כא
22	כב
23	כג
24	כד
25	כה
26	כו
27	כז
28	כח
29	כט
30	ל
40	מ
50	נ
60	ס
70	ע
80	פ
90	צ
100	ק
200	ר
300	ש
400	ת

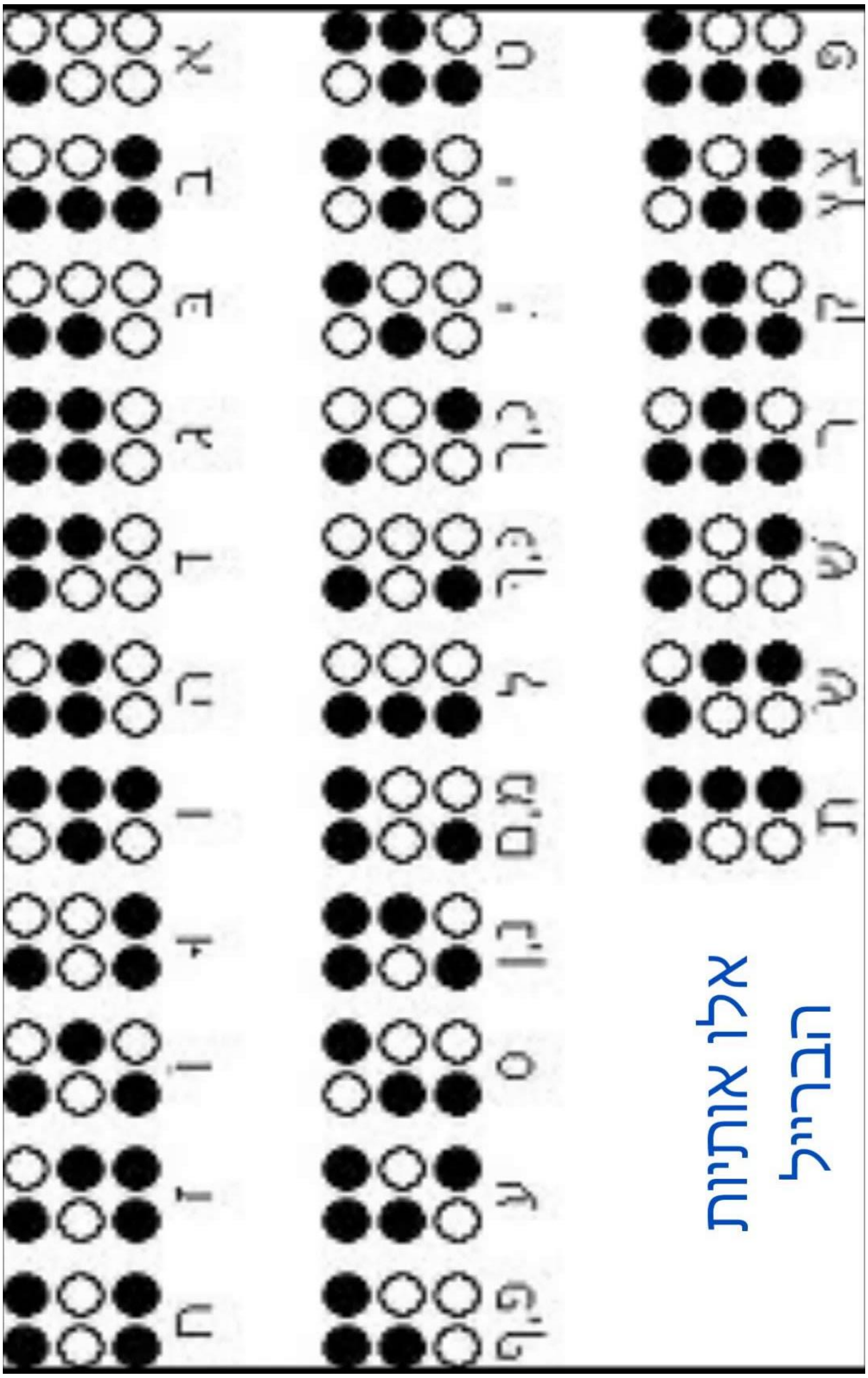
כל הזכויות שמורות – האתר לימודי ישראל - http://dapey-avoda.info

מורס עברי

קוד מורס עברי נרשם **מימין לשמאל**, וזאת בניגוד לקוד הלועזי, הנרשם משמאל לימין.

אות	קוד	אות	קוד
א	– ·	ל	· · – ·
ב	· · · –	מ	– –
ג	· – –	נ	· –
ד	· · –	ס	· – · –
ה	– – –	ע	– – – ·
ו	·	פ	· – – ·
ז	· · – –	צ	– – ·
ח	· · · ·	ק	– · – –
ט	– · ·	ר	· – ·
י	· ·	ש	· · ·
כ	– · –	ת	–

כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.



כל הזכויות שמורות © קובץ זה נועד אך ורק לשימושם האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.