

## מתודיקה

# דוקים בין מודלים "דידקטיים" למודלים "מדעיים" בהוראת הפיזיקה והמדעים

מאיר מידב, יורם קירש, יואב בן-דב, בית הספר לחינוך, אוניברסיטת תל-אביב, רמת אביב

**תקציר:** מורים לפיזיקה בפרט ולמדעים בכלל ניצבים תכופות לפני בעיה דידקטית: כיצד להורות לתלמידים את חומר הלימודים תוך התאמה לרמתם וליכולת הבנתם. הם נעזרים לשם כך במודלים, המקובלים מאוד במדעים ובהוראת המדעים. אנו שואפים בדרך-כלל לעצב – למושג מדעי, למשל – מודל שישמש מעין גשר מתווך בין התפיסה המוגבלת שלנו לבין המערכת שהמושג מייצג. המודל חייב להיות נאמן ככל האפשר למקור עצמו. ניתן לעיתים להשתמש במודל כזה, המקובל במדע, גם לצורכי הוראה; אך יש מצבים בהם המודל, שאנו קוראים לו "מדעי", קשה לתפיסת התלמידים. מקובל בהוראה לבנות מודלים פשוטים וקליטים, על-מנת להקל על התלמידים להבין ולתפוס מושג מסוים. במאמר זה אנו מגדירים את התכונות הנדרשות ממודל כדי שישמש מודל דידקטי טוב, ומביאים שלוש דוגמות למודלים דידקטיים של מושגים מורכבים בפיזיקה: האטום, התנגדות חשמלית של מוליכים מתכתיים ו"חור שחור".

מחקרים רבים על קשיי תפיסה של תלמידים בתחומים שונים של מדעי הטבע, בכללם גם פיזיקה, התפרסמו בשנים האחרונות. מחקרים אלה מאפשרים לנו היום להכיר תפישות מוטעות של תלמידים, כך שמורה יוכל לאתרן אצל תלמידיו ואולי אף לתקנן. על כן אנו עושים מאמצים רבים על-מנת שתלמידים יסיימו את לימודי המכניקה הניוטונית בתפישות נכונות. על השאלה: מהן תפישות לא-נכונות במכניקה הניוטונית? ניתן לענות תשובה ברורה. בספרות על הוראת המדעים, המושג תפישות לא-נכונות משמש בעיקר לתפישות שאינן מעוגנות בחוקי המדע (המכניקה הניוטונית). התפישות האריסטוטליות הן תפישות לא-נכונות. אולם בהמשך לימודי הפיזיקה ברמה גבוהה, כאשר התלמיד לומד את עקרונות הפיזיקה המודרנית (תורת היחסות הפרטית ומכניקת הקוונטים), הוא מוצא שתפישותיו ה**נכונות** על-פי המכניקה הניוטונית אינן מתיישבות עם עקרונות הפיזיקה המודרנית (למשל, חוקי המכניקה הניוטונית אינם נכונים לגבי גופים הנעים במהירויות גבוהות). נומר שתפישות אלה נכונות במסגרת תפיסת הזמן והמרחב של המכניקה הניוטונית, אך אינן "שלמות" במסגרת הכללית יותר של הפיזיקה המודרנית. על-כן אנו חושבים שהדרך הנכונה היא לחנך את תלמיד הפיזיקה לכך שהוא יוכל להתבסס על התפישות (והאינטואיציות) שפיתח לעצמו בפיזיקה הקלאסית בטיפול במערכות של גופים גדולים (מערכות מקרוסקופיות), אך לא

שניים מהתנאים הנדרשים ממורה בכלל וממורה לפיזיקה בפרט הם: הבנה יסודית של תחום-התוכן שהוא עוסק בו והכרת קשיי ההבנה של התלמידים בנושאים שהוא מלמד. שני התנאים הללו הם, לעיתים קרובות, שתי משוכות שעל המורה לעבור אותן בזו אחר זו. תחילה עליו ללמוד ולהפנים את הפרדיגמה המדעית העדכנית לכל עומקה, ואחר-כך עליו להורות את החומר לתלמידיו כשהוא מותאם לרמתם וליכולת הבנתם. אנו מצפים אם-כן מהמורה לא ללמד דברים שאינם "נכונים" מבחינה מדעית ולארגן "נכון" את החומר הנלמד, כך שהתלמיד יבין את החומר ויפתח לגביו תפישות נכונות. בתהליך הארגון של החומר להוראה המורה עלול לסטות במידה ניכרת מהנכונות המדעית.

הגדרות "נכון" או "לא-נכון" בהוראה אינן פשוטות. תשובה לשאלה "מהי החשיבה הנכונה על נושא או מושג במדע?" מחפשים בדרך-כלל אצל המומחים לתחום המדעי הנידון. הדרך שמומחית-תוכן (מדענים) מציגים או תופסים בה נושא מסוים נחשבת על-ידינו בדרך-כלל כדרך הנכונה. מכיוון שהמורים רוכשים את השכלתם המקצועית במוסד להשכלה גבוהה, שם הם לומדים בדרך-כלל את התיאוריות המדעיות העדכניות, המושגים "נכון מדעית" והצגה "נכונה" בהוראה עלולים להיתפס אצלם כזוהים. אולם גישה זו עלולה לעורר כמה בעיות שהודגשו בשנים האחרונות בעקבות התפתחות מחקרים על תפישות מוטעות של תלמידים במדע.

מאמר זה לקוח מהספר: תיאוריה ומעשה בהוראת מתמטיקה, מדע וטכנולוגיה בעריכת ד. תירוש ור. סתוי, הוצאת רמות 1999, ומופיע פה עם שינויים קלים, ברשות המערכת והמחברים.

להיות שבוי בתפיסות אלה בבואו ללמוד ולהבין מערכות מיקרוסקופיות, שחשוב לטפל בהן באמצעות חוקי הפיזיקה המודרנית. כך יוכל התלמיד להתמודד עם הקושי שמה שנראה כתפיסה נכונה בשלב מסוים של לימודיו ייראה כתפיסה לא-שלמה ולא-תואמת את העקרונות שהוא לומד בשלב מאוחר יותר.

מדיון קצר זה מסתבר שהשאיפה להימנע מיצירת תפיסות לא-שלמות אינה יכולה להיות מוחלטת. בכל שלב של ההוראה עלינו לשאול את עצמנו: מהן מטרות ההוראה שלנו? ורק לאחר-מכן לקבוע לעצמנו מהן התפיסות הלא-שלמות המתאימות לאותו שלב. גם אז הקביעה אינה מוחלטת, כי אם תלויה במטרת ההוראה. לכך יכולות להיות דעות שונות (לאנשים שונים יש מטרות שונות). על-כן אנו חייבים לצאת מן ההנחה שיש יותר מדרך אחת להצגת נושא-לימוד במדע במהלך ההוראה, ודרך זו תלויה גם בגילו של הלומד ובשלב התפתחותו.

### מודלים במדע ובהוראת מדעים

למודלים יש חשיבות רבה במדעים ובהוראת המדעים. הם מאפשרים לנו, בין היתר, להציג באופן פשוט (ולעיתים בצורה חזותית) מושגים מופשטים ותיאוריות מורכבות. למעשה קשה לתאר חשיבה במדע ללא מודלים, כי רבים מן המושגים המדעיים אינם ניתנים להצגה מוחשית ישירה. האטום הוא דוגמה למושג מורכב במדע: אין אנו יכולים לבחון אותו ואת חלקיקי-היסוד שבו באופן ישיר. לכן אנו מייצגים אותו על-ידי מודל כלשהו. מודל כזה מאפשר לנו לפתח בקרב התלמידים תפיסה שאינה בהכרח "נכונה" או שלמה לגבי המושג אטום. למשל, הוא מאפשר לפתח וללמד את המושג רמות אנרגיה ואת המעברים בין רמות האנרגיה, ואף לערוך חישובים של האנרגיה הנבלעת (הפוטון הנבלע) או הנפלטת (הפוטון הנפלט) במעבר בין רמות האנרגיה. מושגים אלה ימשיכו ללוות את התלמיד גם כאשר ילמד את המודלים השלמים והעדכניים יותר.

מהו מודל? נביא בקצרה שתיים מבין הגדרות רבות: מודל הינו ייצוג של עצם, מאורע או רעיון (למשל, Gilbert & Boulter 1995). ייצוג זה מאפשר לנו לתאר מושג שהוא עצמו מייצג מערכת מורכבת שאי-אפשר לתאר אותה באופן ישיר. ייצוג זה על-ידי מודל מאפשר לנו עריכת חישובים, העלאת השערות ובדיקתן, ניבוי של תופעות, עריכת מחקר והסברת תוצאותיו ועוד. ניתן למעשה לומר שמודל הינו מערכת בעלת חוקיות משל עצמה, המסוגלת לייצג את חוקי

הפעולה של מערכת אחרת – המקור. (לדוגמה, מודל האטום של בוהר מסוגל לייצג, אומנם באופן לא-שלם, את המערכת המורכבת, שהיא האטום).

ניסוח אחר למודל הציע פישיבין: מערכת B מייצגת מודל של מערכת A אם קיים איזומורפיזם מסוים בין A ל-B, באופן שתיאור או פתרון המנוסח במונחים של A ניתנים לשיקוף באופן עקבי במונחים של B, ולהיפך (Fischbein, 1987).

מפאת חשיבותם, נביא את דבריו של פישיבין במקור:

Given two systems A and B, B may be considered a model of A if, on the basis of a certain isomorphism between A and B, a description or a solution produced in terms of A may be reflected, consistently, in terms of B and vice versa.

בהגדרה זו מודגשות נקודות אחדות, ואת חלקן נביא בקצרה: א. המודל צריך להיות מסוגל להמיר, בתהליך החשיבה, את המקור. כלומר, במקום לחשוב על מערכת המקור, ניתן לחשוב על המודל.

ב. בין המודל למקור חייבת להיות התאמה במידה כזו שתיאור או פתרון במונחים של המודל יתאימו לאלה של המקור.

ג. קיים איזומורפיזם מסוים בין המודל למקור, אולם המודל אינו העתקה מדויקת של המקור. אילו היה כך, היה המודל עצמו גם המקור, והרי המודל צריך להיות נגיש וקל יותר להבנה מן המקור, כדי שיוכל למלא את תפקידו בתהליך הקוגניטיבי.

בהוראה, תפקידו העיקרי של המודל הוא לשמש אמצעי מתווך בין התפיסה האנושית ומגבלותיה, לבין מערכת שאינה ניתנת לתפיסה כפי שהיא. המודל מציג את המקור (מרכיביו, יחסים בין מרכיביו ותכונותיו), במונחים ובתבניות הניתנים לתפיסה. על-כן, תפקידו של המודל מחייב אותו לקיים כמה תנאים (Fischbein, 1987):

תנאי ראשון: המודל חייב להיות נאמן למקור על בסיס של איזומורפיזם ביניהם.

תנאי שני: צריך שיהיה למודל קיום אוטונומי.

תנאי שלישי: המודל צריך להיות מוצג בדרך המתאימה לתובנה ולתהליכי הקליטה ועיבוד המידע האופייניים לתפיסה האנושית.

נורמן (Norman, 1983 p. 7) טוען שלכל מקור (אותו מושג המייצג מערכת מורכבת שאי-אפשר לתאר באופן ישיר) מתייחסים שלושה מודלים, ונזכיר שניים מהם:

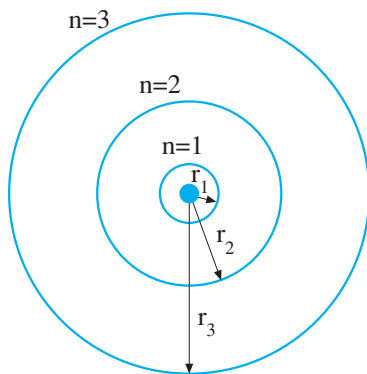
- מודל מושגי (Conceptual Model), שהומצא כדי לספק תצוגה נאותה של מערכת המקור. מודלים מושגיים מומצאים על-ידי מורים, מתכננים, מדענים ומהנדסים;

- מודל מנטלי של המשתמש (User's Mental Model), המתפתח באופן טבעי. כלומר, תוך כדי מגע עם המקור, אנשים מעצבים מודלים מנטליים של המערכת. מודלים אלה אינם חייבים להיות מדויקים (ובדרך-כלל אינם כאלה), אבל הם חייבים להיות פונקציונליים. נורמן גם מסרטט מאפיינים של המודלים המנטליים (סיכום של התבוננות בהתנהגות הקוגניטיבית של אנשים רבים). הנה חלק מהם:
- מודלים מנטליים אינם שלמים (יחסית למודלים המושגיים), ויכולתם של אנשים להשתמש במודלים שלהם מוגבלת.
- מודלים מנטליים "בלתי-מדעיים": אנשים נוהגים בהם כדרך שנוהגים באמונות טפלות, מפני שדרך זו חוסכת מאמץ פיזיקלי וצורכת מאמץ מנטלי מועט בלבד. מודלים מדעיים הינם מודלים מושגיים (על-פי ההגדרות שלעיל) עדכניים, הנסמכים על שימוש בשפה ובידע המדעיים העדכניים. מודלים כאלה יאפשרו לנו, בין היתר, להציג ולהבין את תופעות הטבע ולחזות את ההתנהגות של תהליכים בטבע על-סמך הנתונים הידועים ברגע זה. לשם הפשטות, מבחינתנו, מודל מדעי הינו מודל המקובל כיום בספרות המדעית העדכנית. אין כמובן ערבות לכך שמודל שהינו מדעי היום יהיה כזה בעתיד הקרוב או הרחוק, ובהחלט ייתכן שמודל אחר יתפוס את מקומו. לדוגמה: המודל המקובל כיום לתיאור האטום הינו גלי-הסתברותי; ניתן להסביר באמצעותו תופעות הקשורות בקשרים אטומיים, ואף לחזות התנהגות של מערכות מיקרוסקופיות (למשל קשרים וריאקציות כימיות). הוא דחק כמובן את מקומם של מודל בוהר ומודלים אחרים.
- סוג אחר של מודל מושגי, שאנו מציעים לכנותו **מודל דידקטי**, נועד לצורכי הוראה. המטרה העיקרית של מודל דידקטי היא לאפשר לנו ללמד מושגים ותופעות מורכבים במדע תוך הבאת הידע המוקדם של התלמידים ושלב התפתחותם בחשבון. דוגמה בולטת לכך היא מודל האטום. המודל הגלי-הסתברותי, שהוא המודל המדעי העדכני לאטום, הינו קשה להבנה, ולעיתים אינו ניתן לתפיסה על-ידי תלמידי חטיבת-הביניים ואף תלמידי בית-הספר התיכון. לכן מרבים בהוראה להשתמש במקומו במודל בוהר, שהיה המודל המדעי המקובל בשנים 1913-1916.

אנו רואים חשיבות דידקטית רבה במודל בוהר (מעבר לחשיבותו ההיסטורית),\* לכן נקרא לו מודל דידקטי. תלמידי חטיבות-הביניים ובית-הספר התיכון יכולים לתפוס מודל פשוט זה, אף שאינו שלם ואינו הטוב ביותר מבחינה מדעית. במילים אחרות: הם יכולים לפתח תפיסה, אף כי לא שלמה ולא הכי טובה, של המושג אטום. על היתרונות הרבים של מודל זה נעמוד בהמשך. האם כל מודל היסטורי יכול לשמש מודל דידקטי? התשובה לכך היא: בהחלט לא! כדי שמודל ישמש מודל דידקטי טוב, עליו לקיים כמה תכונות מהותיות וחשובות להמשך הלימודים. נחלק אותן לשני חלקים – אלה המתייחסות ללומד (תכונות 1–4) ואלה המתייחסות למדע העדכני (תכונות 5–6):

1. הוא צריך להיות מוחשי ולאפשר לתלמיד ליצור תמונה או אפילו תפיסה לגבי המושג או התופעה הנלמדים.
  2. רמת הפירוט של המודל צריכה להיות מותאמת לצרכים של התלמיד.
  3. הוא צריך להיות "ידידותי" למשתמש וניתן לתפיסה על-ידי רוב התלמידים. (נדגיש שמודל מדעי אינו בהכרח כזה, כי הוא מיועד בדרך-כלל לצרכים אחרים).
  4. המבנה והיחסים בין המרכיבים השונים של המודל צריכים להיות ברורים לתלמיד.
  5. המגבלות של המודל יחסית למודל המדעי חייבות להיות ברורות.
  6. הוא חייב להיות מתאים במידה רבה ככל האפשר למודל המדעי, שהלומד ייתקל בו בעתיד, ולמנוע בכך, במידת האפשר, תפיסות רבות לא-טובות ולא-שלמות. ההתאמה מתבטאת, למשל, בכך שהמודל הדידקטי מצליח להסביר מקסימום של תופעות מרכזיות ויכול לבא מקסימום של התנהגויות כפי שעושה המודל המדעי (במקרה של מודל בוהר – רמות אנרגיה ופליטה או בליעה של פוטון במעברים בין רמות אלה, למשל).
- תכונה 6 היא חשובה מאוד. היא מאפשרת לפתח בעתיד את המודל הדידקטי לעבר מודל מדעי עדכני יותר, מבלי לוותר עליו. על-כן רצוי לפעמים להדגיש באוזני התלמיד כי המודל הדידקטי שהם לומדים אינו התמונה השלמה (שהינה בדרך-כלל, הרבה יותר מורכבת), ובעתיד הוא יוכל לקבל את התמונה השלמה יותר. אנו מאמינים שמודלים דידקטיים

\* התפתחותם ההיסטורית של מושגים וחוקים חשובה מאוד בפיזיקה, אם כי לא תמיד אפשר או רצוי להציגה לפני תלמידים. אבל ישנם מקרים בהם לעצם הדיון בהתפתחות ההיסטורית יש חשיבות רבה להבנת הנושא הנלמד (ראה, למשל, Kirsch & Meidav, 1987 על החשיבות ההיסטורית של דרך ההוראה של תורת היחסות הפרטית של איינשטיין) או להכרת קשיי התפיסה של אנשי המדע בהתפתחות המושג הנלמד (למשל הדיון בהתפתחות המודלים של האטום, שהביאו להתפתחות המכניקה הקוונטית). בדיון בקשיי התפיסה המושגיים של המדענים הגדולים ייווכחו התלמידים שיש בסיס אובייקטיבי גם לקשייהם.



תרשים 1: מודל בוהר למבנה האטום

- להיות סביבו, הינו מודל מוחשי המקיים את התנאי הראשון שלנו למודל דיסקטי טוב: הוא קל לתפיסה כי הוא דומה למודל הפלנטרי (מערכת השמש), שנקלט בקלות רבה.
2. קל להבין ולזכור את מודל בוהר בצורה אינטואיטיבית. נובעת ממנו תמונה מוחשית של רמות האנרגיה של האטום, שיכולה לשמש לתלמיד מעין גשר בין הפיזיקה הקלאסית לקוואנטית. למודל בוהר יש גם חשיבות כהקדמה היסטורית המקילה על עיכול המודל הפחות אינטואיטיבי של מכניקת הקוואנטים. הוא גם יכול לשמש מכשיר טוב לטיפול בבעיה כללית של שני גופים. נוסף לספקטרום המימן, ניתן לקבל בעזרתו, בין השאר, את הספקטרום של אטומים דמויי מימן (כגון דיאטריום, הליום מיון פעם אחת, ליתיום מיון פעמיים וכדומה), אטום מואוני (גרעין חיובי שמואון במקום אלקטרון חג סביבו) ופוזיטרונים (צמד אלקטרון-פוזיטרון). כל המקרים האלה דומים בכך שיש גרעין חיובי (מטען חשמלי) שחלקיק טעון חג סביבו. ההבדל היחיד ביניהם הוא גודל המטען, הגורם לשינוי באנרגיה של הרמות, אך אינו משנה את התמונה הכוללת. מרבים להזכיר את מודל בוהר, למשל, בספרי אסטרופיזיקה העוסקים בעיקר בקווי ספקטרום של מימן ושל יונים דמויי אטום המימן (למשל, Pasachoff & Kutner, 1978). מודל בוהר הוא היחיד האפשרי בכל קורס לפיזיקה מודרנית ברמה התיכונית, כי הרמה המתמטית הנדרשת במודל הגלי-ההסתברותי הינה גבוהה מאוד (נוסף לסיבות הקשורות ליכולת התפיסה של מודל זה).
3. מודל בוהר מסביר את המעברים של אלקטרונים בין רמות האנרגיה ופליטה או בליעה של קרינה (גל אלקטרומגנטי) או פוטון. בכך ניתן גם לקשור את הפוטון לקוואנט של הקרינה האלקטרומגנטית.

טובים יכולים לעזור לתלמיד לפתח תפיסה טובה של מושגים מורכבים ואולי אף למנוע יצירה של מודל מנטלי שיהיה רחוק מהמודל שרצוי שירכוש. נדגיש גם שהמודל הדיסקטי הוא לעיתים גם המודל המדעי, וזה כמובן המצב האידיאלי. בהוראת המדעים נמצא מקרים רבים של מודלים. מורים בונים לעצמם לעיתים מודלים אד-הוק לטיפול בבעיות הבנה של מושגים תוך כדי תהליך ההוראה בשיעוריהם. הם מושפעים בדרך-כלל בעיקר מהמודלים הקיימים בספרי הלימוד שהם משתמשים בהם. על-כן חשוב שכותבי ספרי הלימוד ישימו-לב לנקודה זו וידאגו שמודלים המוצגים בספריהם יעמדו בתכונות הנדרשות ממודל דיסקטי טוב. נביא להלן שלוש דוגמות למודלים מושגיים שאינם שלמים ואינם עדכניים מבחינת המדע, אבל חשובים להוראת הפיזיקה. מודלים אלה מקיימים, כפי שנראה להלן, את התנאים שדרשנו ממודל דיסקטי טוב. אפשר כמובן להביא דוגמות רבות נוספות מתחומים שונים של הפיזיקה או מדעי הטבע והחיים.

## דוגמות

### מודל האטום לפי בוהר ומודלים פשוטים מאחריים יותר

במאה העשרים התחלפו כמה מודלים של מבנה האטום. בשנת 1911 זנחו הפיזיקאים את מודל "פשיטת הצימוקים" של תומסון, ועברו למודל הפלנטרי של רתרפורד, שגם הוא ננטש (1913) לטובת מודל בוהר.

תרשים 1 מתאר מודל (תמונה קלאסית למחצה) לאטום המימן הידוע בשם מודל בוהר. מודל זה שוכלל על-ידי זומרפלד ופאולי. בשנת 1925 הונחה התשתית לתיאוריה חדשה, הלא היא מכניקת הקוואנטים. מכניקת הקוואנטים מציגה מודל של האטום המבוסס על פתרון משוואת שרדינגר והפירוש הסטטיסטי של פונקציית הגל שהציע בורן.

כיום, המודל הגלי-ההסתברותי של האטום הוא המודל המדעי המקובל. יחד עם זאת, ספרים רבים ללימוד פיזיקה מודרנית מציגים עדיין את מודל בוהר בהרחבה, ודנים ברמות האנרגיה של האטום על בסיס מודל זה (ראו, למשל:

Tipler, 1992; Krane, 1983, Resnick & Halliday, 1985 גניאל וקירש, 1992)

הסיבות לשימוש במודל בוהר הן:

1. מודל בוהר ניתן להבנה ולתפיסה בנקל על-ידי הלומד, ויוצר תמונה שניתנת לזכירה ולשחזור. אכן, התמונה של גרעין דחוס וקטן, שאלקטרונים ברמות מוגדרות יכולים

## התנגדות החשמלית של מוליכים מתכתיים

דיון במוליכות החשמלית של חומרים צריך להתחשב בכמה ממצאים נסיוניים בולטים:

א. קיימים הבדלים של סדרי-גודל רבים בין המוליכות החשמלית של מוליכים, מוליכים למחצה ומבדדים. (המוליכות של המוליכים הטובים עולה על זו של המבדדים הטובים ביותר מ-20 סדרי-גודל!)

ב. המוליכות תלויה במידה ניכרת בטמפרטורה. (חימום של מוליך למחצה עשוי להופכו למוליך, ואילו קירורו לטמפרטורה נמוכה הופכו למבדד).

ג. יש קשר בין המוליכות החשמלית למוליכות החום. (מוליכי חום טובים הם גם מוליכי חשמל טובים.)

מודל דידקטי פשוט של המוליכות, שיכול להסביר את הממצאים הללו לפחות באופן איכותי, מבוסס על מספר האלקטרונים החופשיים בחומר (התלוי באנרגיית הקשר של האלקטרונים החיצוניים באטום) ועל תמונה מפורטת של רמות האנרגיה בגביש - רמת ההולכה, רמת הערכיות ורוחב הפס האסור שביניהן.

נעמוד דווקא על המוליכים המתכתיים, שגם הם, כשאר המוליכים, מגלים התנגדות למעבר זרם חשמלי דרכם. מה הסיבה להתנגדות זו של המוליכים המתכתיים? מדוע צפיפות הזרם החשמלי במוליכים מתכתיים היא ביחס ישר לשדה החשמלי? ומדוע התנגדות המוליכים המתכתיים גדלה עם עליית הטמפרטורה? מודל מדעי, שיוכל לתת הסבר לכל העובדות הנסיוניות הקשורות במוליכות החשמלית של מתכות, הוא מודל קוואנטי, לפיו ניתן לתאר את תנועתו של האלקטרון בגביש המתכת כגל המושפע מיוני המתכת שהוא נתקל בהם. מודל זה, המתבסס על מכניקת הקוואנטים, אי-אפשר ללמדו בבית-הספר התיכון ואף לא לרבים מתלמידי מדעי הטבע הלומדים באוניברסיטה. ומה כן ניתן ללמד?

מודל פשוט, המתבסס על חוקי המכניקה הניוטונית שתלמידי בית-הספר התיכון מכירים, הוצע על-ידי דרוֹדֶה (Drude) בשנת 1900 (למשל רז, נוימן ורוט 1994). על-פי מודל זה, האטומים במוליך מתכתי אופייני מסודרים באופן סימטרי, בצורה של סריג מסודר. חלק מהאלקטרונים המרוחקים מגרעיני האטומים אינם קשורים אליהם, אלא חופשיים לנוע בתוך הסריג. לכן, אטומי הסריג הם יונים חיוביים, ואילו האלקטרונים החופשיים נעים בתוך הסריג כל הזמן ולכל הכיוונים בתנועה אקראית (לא-מסודרת). אין לתנועה זו כיוון מועדף, ולכן אין זרם חשמלי במוליך מתכתי. אולם גם היונים החיוביים אינם קבועים במקומם, אלא מתנוודדים בתנועות

4. החישובים המתמטיים הנדרשים לפיתוח מודל בוהר פשוטים יחסית ונמצאים בהישג ידו של תלמיד תיכון. לעומת זאת אי-אפשר ללמד ולפתור את משוואת שרדינגר באמצעות מתמטיקה תיכונית.

ברמה התיכונית, מודל בוהר יכול לשמש בסיס למודל דידקטי כללי של מבנה האטום, במסגרתו יוצגו גם סידור האלקטרונים באטומים מרובי אלקטרונים ומבנה הטבלה המחזורית, וגם העקרונות של מכניקת הקוואנטים, בסדר התואם פחות או יותר את ההתפתחות ההיסטורית. סדר הנושאים המוצע הוא כדלהלן: לאחר הצגת מודל בוהר של אטום המימן ואטומים דמויי מימן, יוצג בקצרה מודל בוהר-זומרפלד לאטומים מרובי אלקטרונים, ויתואר סידור האלקטרונים בקליפות, על-פי בוהר. לאחר-מכן יוצג המודל המודרני לקונפיגורציות האלקטרוניות, המבוסס על ארבעה מספרים קוואנטיים ועל סידור האלקטרונים בקליפות, תת-קליפות ואורביטלים. בהקשר זה יוסבר גם עקרון פאולי והקשר שלו לספין של האלקטרון. עתה ניתן להציג טבלה המתארת את סידור האלקטרונים באטומים השונים, ולהסביר בקצרה את הקשר בין הקונפיגורציה של האלקטרונים באטום, מקומו של היסוד בטבלה המחזורית ותכונותיו הכימיות. בשלב זה אפשר לציין את הקשיים שמודל בוהר נתקל בהם ולהזכיר שיש מודל אחר שיוכל לתת פתרון גם לקשיים אלה. תיאור זה הופך את מודל בוהר לחוליה מקשרת בין המודל "הקלאסי" המיושן של האטום (המודל הפלנטרי של רתרפורד) למודל הקוואנטי המעודכן אותו אין התלמיד יכול להכיר במלואו. התמונה שתישאר אצלו תהיה תמונה מוחשית של המסלולים של בוהר לצד תמונה מעורפלת יותר של פונקציות גל וענני אלקטרונים. עם זאת הוא יקבל תיאור נכון של הקונפיגורציות האלקטרוניות, כולל ההגדרה המדויקת של המספרים הקוואנטיים. זה שלל נכבד, המצדיק את המאמץ.

דרשנו ממודל דידקטי טוב שיקיים כמה תנאים. מודל בוהר מקיים אותם: הוא מודל מוחשי (כבר הזכרנו קודם); רמת הפירוט בו מתאימה לצורכי התלמיד; הוא כמובן קליט לתלמידים; ומהבחינה המדעית, המבנה והיחסים בין מרכיביו (אלקטרונים ברמות אנרגיה שונות) ברורים. לבסוף – המגבלות המדעיות שלו מודגשות – אין זה מודל שלם, אך הוא נותן הסבר ופתרון לתופעות בסיסיות שגם המודל המדעי מסבירן.

שם אנו מוצאים לעיתים אנלוגיות (זרימת מים, תנועת מכוניות על כביש, למשל) שחסרונותיהן רבים מאוד. גם מודל זה מקיים את הדרישות שקבענו למודל דיסקטי טוב: בעיקרו, הוא מכני, אנו מתארים בו את האלקטרונים כחלקיקים (כדורים קטנים) הנעים ומתנגשים ביוני הסריג. לכן הוא ניתן לתפיסה, ואף ניתן ליצור ממנו סימולציית מחשב מוחשית. בהיותו מודל מכני, הוא מתבסס על חוקי המכניקה הברורים לתלמיד, ולכן המבנה והיחסים ברורים לגמרי. (הפעלת כוח, האצה, התנגשויות, איבוד אנרגיה מכנית וכולי – כל אלה מוכרים היטב מן המכניקה). כבר הדגשנו שהמגבלות ברורות, אבל גם היתרונות ברורים: הוא מאפשר להסביר תופעות בסיסיות שונות שגם המודל המדעי מסביר אותן.

### רדיוס שורצשילד של חור שחור

"חור שחור" הינו מושג ידוע השובה את דמיונם של תלמידים ושל הקהל הרחב הצופה בסדרות שונות על מדע החלל. מדוע נקלט כל כך דווקא מושג מורכב זה? ייתכן שהסיבה לכך היא האפשרות להמחישו ולהסבירו באמצעות מודל פשוט, המסתמך על מכניקה ניוטונית. לראשונה עלה מושג זה בסוף המאה השמונה-עשרה על-ידי האסטרונום ג'ון מיצ'ל. הוא טען כי לא ניתן לצפות בכוכבים גדולים מאוד, מפני שאור אינו יכול לצאת מהם. ההסבר שלו הסתמך על המודל החלקיקי של האור, שהיה מקובל באותה תקופה. לפי מודל זה, האור עשוי גופיפים קטנים מאוד, חלקיקים, הנעים במהירות האור. גופיפים אלה מושפעים מהכבידה סביב כוכב, כפי שכל מסה מושפעת ממנו. כוח הכבידה בקרבת כוכבים גדולים במיוחד הינו חזק, עד כדי כך שגם חלקיקי האור, הנעים במהירות האור, אינם יכולים "לברוח" מהם. מכאן שלא נוכל לראות את הכוכבים האלה.

בשנת 1796 העלה המתמטיקאי והפיזיקאי הגדול פִּיֶּר לֶפְלַס, באופן בלתי-תלוי, רעיון דומה. מהמכניקה הניוטונית ידוע שכדי שגוף כלשהו "יברח" מכוכב, יש להקנות לו מהירות מינימלית  $v_e$ , הידועה בשם "מהירות הבריחה". ערכה ניתן על-ידי  $v_e = (2GM/R)^{1/2}$ , כאשר:  $G$  – קבוע הכבידה העולמי,  $M$  – מסת הכוכב,  $R$  – רדיוס הכוכב. מהירות הבריחה מכדור הארץ, למשל, היא 11 ק"מ בשנייה, מהירות הבריחה השיג באמצעות טילים רק בשנות השישים של המאה העשרים. מהביטוי למהירות הבריחה נובע שככל שרדיוס הכוכב קטן יותר (המסה אינה משתנה), כן מהירות הבריחה ממנו הולכת וגדלה. לפלס טען שכאשר רדיוס הכוכב יהיה

קטנות סביב מרכז מסוים. כך הסריג מאבד את המבנה הסימטרי שלו והאלקטרונים החופשיים אינם יכולים לנוע בתנועה חופשית, מתנגשים ביוני הסריג ומאבדים חלק ממהירותם.

הפעלת שדה חשמלי בין קצוות של מוליך מתכתי גורמת ל"סחיפה" של האלקטרונים החופשיים בכיוון מסוים, ומהירותם הולכת וגדלה, אך מצד אחר, ההתנגשויות שלהם ביוני הסריג מעכבת את עליית המהירות הזאת, עד שנוצרת מהירות סחיפה קבועה, כלומר, זרם קבוע. זה המנגנון המסביר את ההתנגדות לזרם החשמלי במוליך מתכתי. (אנלוגיה פשוטה למודל זה: תנועת כדור פלדה בתוך צינור מלא נוזל צמיג, כגליצ'ין. כוח-הכובד גורם להאצת הכדור, אך התנגדות (צמיגות) הנוזל מעכבת את עליית המהירות, עד להיווצרות תנועה במהירות קבועה). מודל מכני פשוט זה מצליח להסביר מדוע ההתנגדות החשמלית גדלה עם עליית הטמפרטורה: העלאת הטמפרטורה מגדילה את התנודות של יוני הסריג, ולכן מגדילה את אי-הסימטריה של הסריג, ובכך גם את העיכוב של תנועת האלקטרונים החופשיים בסריג בגלל ההתנגשויות ביוני הסריג. לכן, ההתנגדות לתנועת האלקטרונים בהשפעת השדה גדלה, כלומר, ההתנגדות החשמלית גדלה.

על-ידי שימוש בחוקי מכניקה פשוטים ניתן לקבל, באמצעות מודל דרודה, גם את היחס הישר שבין צפיפות הזרם  $\gamma$  לבין עוצמת השדה החשמלי  $E$  בין קצוות המוליך:  $\gamma = \sigma E$ , כאשר  $\sigma$  היא המוליכות הסגולית של המוליך (האופיינית לסוג המוליך), וממנו הגדרה של התנגדות המוליך וביטוי לחוק אוהם. (המוליכות הסגולית הינה הערך ההופכי של ההתנגדות הסגולית, כשם שמוליכות הינה הערך ההופכי של התנגדות). היכן נכשל מודל זה בכל זאת בהסבר התופעות? נביא דוגמה: ממודל זה ניתן לקבל שהתנגדות המוליך גדלה עם עליית הטמפרטורה וביחס ישר לשורש הריבועי של הטמפרטורה. במציאות קיים יחס ישר בין התנגדות המוליך לטמפרטורה, כפי שניתן לקבל גם מהמודל הקוואנטי. ישנן כמובן מגבלות אחרות שלא זה המקום לעמוד עליהן. אף-על-פי-כן אנו ממליצים להשתמש במודל דרודה כמודל דיסקטי בהוראה, כי הוא מודל פשוט, קליט ועצמאי, ניתן לעשות באמצעותו חישובים פשוטים והוא מקנה תמונה פשוטה למושג התנגדות חשמלית. הוא גם מסייע לתלמיד ליצור תמונת-עולם מאוחדת של הפיזיקה, בה המכניקה הניוטונית מסבירה מושגים ותופעות מתחום החשמל. חבל שמודל זה אינו מודגש די הצורך בספרי הלימוד לפיזיקה תיכונית הנפוצים בעברית,

ומגבלותיו (אינו מורכב מחלקיקים בעלי מסה) ברורות אף הן.

### סיכום

הבאנו שלוש דוגמות למודלים הקשורים לדרך ההוראה של מושגים ותופעות בפיזיקה. מודלים אלה אינם, לעיתים, המודלים המקובלים כיום במדע, אך בעבר שימשו כמודלים מדעיים, והם מסתמכים כמובן על-חוקי פיזיקה מקובלים. על-כן אנו מציעים להשתמש בהם כדרך של הוראת התופעות המורכבות שהזכרנו.

ניתן וחשוב להביא דוגמות נוספות למודלים דידקטיים להוראת נושאים שונים בפיזיקה ובמדעים היכולים להיות לעזר למורים, ולמנוע מצב בו יהיה עליהם "להמציא" לעצמם מודלים כדי להתגבר על קשיים במהלך ההוראה.

האין חשש שמודל עלול ליצור תפיסות שגויות בקרב התלמידים? נענה על שאלה זו בשאלה אחרת: האין חשש שהתעקשות על הוראה במודלים המדעיים המדויקים וללא תלות בגיל ובשלב ההתפתחות של הלומד תגרום לכך שהלומד לא יצליח כלל לפתח לעצמו תפיסה של הנושא שנלמד? לדוגמה: האם לימוד של המודל המדעי על מבנה האטום על-ידי תלמידי בית-הספר התיכון, למשל, ייצור תמונה או תפיסה כלשהי אצל הלומדים? התשובה שלילית, לדעתנו. על-כן עדיף לעיתים ליצור אצל הלומד תפיסה לא-מדויקת, שתוחלף בעתיד, בתנאים שיאפשרו זאת, בתפיסה המדעית הנכונה, מאשר לוותר על תפיסה כלשהי.

### מקורות

1. כהן, ר', גניאל, א', קירש, י' (1992), נושאים בפיזיקה של המאה העשרים, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע.
2. מידב, מ' גלר, צ' (1987). שילוב דוגמות מתחום האסטרופיזיקה בהוראת המכניקה. תהודה, 14(2), עמ' 8-18.
3. מידב, מ' ברוש, נ', נצר, ח' (1993). היקום – יסודות האסטרופיזיקה. הוצאת "רמות".
4. רז. א' נוימן, מ' ורוט י': הזרם החשמלי וחוק אום לפי מודל Drude. תהודה, 16(2), עמ' 45-50, (1994).
5. Fischbein, E. (1987). Intuition in Science and Mathematics, An Educational Approach, Dordrecht, Holland. Mathematics Education Library, Reidel Publishing Company,
6. Gilbert, J.K., Bouleter, C.J. (1995). Stretching models

שווה לערך של  $R$  או קטן ממנו בביטוי  $c=(2GM/R)^{1/2}$ , כאשר  $c$  היא מהירות האור, גם אור לא יוכל לברוח ממנו. כוכב כזה לא ייראה לעינינו כלל, ומכאן הכינוי חור שחור. רדיוס החור השחור לגבי כוכב שמסתו  $M$  יהיה  $R_g = 2GM/c^2$ . רדיוס חור שחור שמסתו כמסת השמש הוא כ-3 ק"מ.

חישוב זה של רדיוס שורצשילד של החור השחור נעשה בהסתמכנו על מודל שאינו תקף מבחינה מדעית. ראשית, הנחנו שהאור מורכב מחלקיקים חומריים המצייטים לחוקי המכניקה הניוטונית (מה שאינו נכון). שנית, הנחנו שחוק הכבידה של ניוטון קיים וניתן ליישום גם באיזור בו שדה הכבידה הינו חזק במיוחד, כפי שהוא אכן באיזור חור שחור. שתי הנחות אלה אינן נכונות מבחינת המדע היום. נוכל אומנם להתייחס לאור העשוי חלקיקים, אך אלה חלקיקים קוואנטיים (פוטונים), ולא החלקיקים בעלי המסה הברורים כל-כך במכניקה הניוטונית. יתר על-כן באיזור ששדות כבידה חזקים בו במיוחד יש להשתמש בחוקי הכבידה של תורת היחסות הכללית של איינשטיין, שפורסמה בשנת 1915, והיא המאפשרת לנו לדון בהשפעה של שדות כבידה חזקים (של כוכבים, למשל) על תנועת האור.

בשנת 1916 השתמש האסטרופיזיקאי קארל שורצשילד בתורת היחסות הכללית של איינשטיין וחישב את הרדיוס של חור שחור בעל מסה נתונה. הוא קיבל בדיוק אותה תוצאה שהתקבלה על-סמך שיקולים המבוססים על המכניקה הניוטונית. רדיוס זה ידוע מאז כרדיוס שורצשילד של חור שחור.

חישוב רדיוס שורצשילד של חור שחור בהסתמך על המודל המדעי המקובל הינו מורכב ביותר, ורק תלמידי אוניברסיטה בקורס אסטרופיזיקה מתקדם מסוגלים להתמודד עימו. לעומתו, המודל בו השתמש לפלס, המסתמך על חוקי המכניקה הניוטונית, הינו פשוט ביותר. מבחינתנו, זה המודל הדידקטי המאפשר לנו לדון במושג חור שחור אפילו במסגרת לימודי המכניקה בבית-הספר התיכון (ראה מידב וגלר, 1989). פשטותו של מודל דידקטי זה, היא הסיבה לכך שניתן למצוא אותו אפילו בספרי אסטרופיזיקה ברמה אוניברסיטאית (למשל, Pasachoff and Kutner 1978) או ברמה נמוכה קצת יותר (מידב, ברוש ונצר, 1993). גם מודל זה מקיים את הדרישות שלנו ממודל דידקטי טוב. הוא מתבסס על מכניקה ניוטונית לפיה ברור כיצד גוף נמשך ונופל אל מסה גדולה (כוכב-לכת, כוכב או גוף אחר), ולכן הוא קל לתפיסה ויוצר תמונה מוחשית. הוא גם מותאם לצורכי התלמיד (שוב, דווקא דוגמה של מכניקה ניוטונית). מרכיבי המודל ברורים,

9. Norman, D.A. (1983). Some observations on mental models. In D. Gentner, A.L. Stevens (Eds.), *Mental Models*. Lawrence Erlbaum Associates.
10. Pasachoff, J.M., Kutner, M.L. (1978). *University Astronomy*. (p. 324). Saunders Company.
11. Resnick, R., Halliday, D. (1985). *Basic concepts in relativity and early quantum theory*. John Wiley & Sons, Inc.
12. Tipler, P. (1992). *Elementary modern physics*. New York: Worth.
7. Kirsch, Y., Meidav, M. (1987). The Michelson-Morley Experiment and the teaching of special relativity. *Phys. Educ.*, 22.
8. Krane, K. (1983). *Modern physics*. New York: John Wiley & Sons, Inc.

תהודה



## מדלית זהב לתלמיד ישראלי באולימפיאדה הבינלאומית בפיזיקה

מיוצגת על ידי חמישה מתחרים, ללא תלות בגודל האוכלוסייה של אותה ארץ; בין אם זו סין עם כמיליארד ורבע תושבים, ארה"ב עם כשלוש מאות מיליון, רוסיה עם כמאה מיליון ואירן המונה כחמישים מיליון תושבים. אולם בכל זאת מקובל לדרג את המשלחות על פי סכום הנקודות שצברו. ישראל הגיעה למקום העשרים ואחד מתוך שישים ושתיים מדינות משתתפות. על אף קשיים פנימיים שלנו, ותקציב נמוך המחייב עבודה שברובה היא התנדבותית, העפילה המשלחת שלנו למקום מכובד ונכללת בשליש העליון של המדינות המשתתפות, לפני גרמניה, פולין, קנדה, שוודיה, דנמרק, שווייץ ועוד. במקומות הראשונים היו, על פי הסדר: רוסיה, אירן, ארה"ב, סין ואוקראינה.

רוב המדינות מנסות לעודד את השתתפות התלמידים בתחרויות בפיזיקה. בכמה מהן מקבלים כל חברי המשלחת מלגות לימודים במוסדות להשכלה גבוהה. במדינות אחרות משוחררים חברי המשלחת מכל בחינות הכניסה לאוניברסיטאות. בישראל זוכים חברי המשלחת (כולל החבר השישי - "המחליף") בציון 100 בבחינת הברורות בפיזיקה. בוגרי האולימפיאדה נכללים בתוכניות המצוינות של האוניברסיטאות ונכללים לרוב ברשימת התלמידים המצטיינים באוניברסיטאות בהם הם לומדים. לאחרונה נוטלים בוגרי האולימפיאדה חלק נכבד בהדרכה והנחיה של התלמידים.

מפעל האולימפיאדה לפיזיקה נתמך על-ידי המנהל למדע-טכנולוגיה במשרד החינוך, הטכניון וחברת החשמל. המחלקה להוראת המדעים בטכניון נטלה על עצמה, בשיתוף עם הפיקוח על הוראת הפיזיקה במשרד החינוך, את ארגון התחרות הארצית והכנת הנבחרת הלאומית.

זר ברכות למשלחת ישראל לאולימפיאדה הבינלאומית לפיזיקה לנוער! התלמידים שבו עטורי מדליית זהב!!! שלוש מדליות ארד ו"ציון לשבח" והציבו את המשלחת הישראלית בשליש העליון של הארצות המשתתפות.

ברכה מיוחדת שלוחה לצוות המורים המנחים המשקיעים מיכולתם וממרחם להכנת התלמידים והבאתם להישגים המצוינים. יבואו על הברכה דר' אלי רז - ראש פרווייקט התחרויות בפיזיקה, פרופסור מנחם פיינגולד שיזם את השתתפות ישראל בתחרות הבינלאומית ועמד בראש הפרוייקט עד שנת 1995 והשנה אף יצא לחו"ל כראש המשלחת והמדריכים המאמנים את התלמידים במחנות לאורך שנת הלימודים: מר איגור ליסינקר, דר' עופר אייל ודר' אלי רז.

האולימפיאדה הבינלאומית לפיזיקה לנוער מתקיימת החל משנת 1967 ונחשבת לתחרות הנוער היוקרתית ביותר לפיזיקה. האולימפיאדה מתקיימת מידי שנה במדינה מארחת אחרת. בסוף חודש יולי חזרה נבחרת ישראל מהאולימפיאדה הבינלאומית ה-30 בפיזיקה שהתקיימה השנה בעיר פְּדוֹבָה באיטליה. ישראל השתתפה השנה זו הפעם השישית, ובכל שנה חזרה הנבחרת עטורה במדליות. אולם זו הפעם הראשונה שחבר הנבחרת שלנו זכה במדליית זהב. הזוכה הוא אריאל אמיר\*, בוגר בית הספר התיכון שלייד האוניברסיטה העברית בירושלים. במדליות ארד זכו רועי הרפז מבית הספר דה-שליט ברחובות, אייל חיטרון ואמיתי צ'רניק, שניהם מבית הספר ליאו בק בחיפה. החמישי בנבחרת, גיל ליטיצב, מבית הספר דה-שליט ברחובות, זכה ב"ציון לשבח". על פי התקנון התחרות היא אישית ולא קבוצתית, וכל מדינה

\* אריאל אמיר זכה גם במקום הראשון בשלב הגמר הארצי שהתקיים במרץ 99 במכון ויצמן למדע ברחובות.