

סדר באי-סדר: הפיזיקה הסטטיסטית

דניאל עמית ויוסף ורבין, "פיזיקה סטטיסטית", הוצאת האוניברסיטה הפתוחה, מהדורה שלישית, 2008, 579 עמודים, מחיר קטלוגי: 189 שקלים

של הפיזיקה הסטטיסטית, כאשר הפיזיקה הסטטיסטית משמשת להמחשת חוקי התרמודינמיקה המופשטים. הגישה האחרת, לעומת זאת, דוגלת בהוראת התרמודינמיקה כקורס נפרד, הנלמד לפני הקורס בפיזיקה סטטיסטית. התרמודינמיקה, שפותחה במאה ה-19 כתורה אקסיומטית ומופשטת, ישימה לכמה תחומים שונים במדעים ובתחומי ההנדסה. ואכן, היא נלמדת כמקצוע בפני עצמו בתכניות הלימוד בכימיה, בהנדסה כימית ובהנדסת חומרים (תמיסות, מעברי פאזה, תהליכים כימיים), בהנדסת מכונות (מכונות ומשאבות חום, זרימת חום ומסה), וכן בביולוגיה וברפואה (תהליכים תרמודינמיים במערכות ביולוגיות). כל זה בא לידי ביטוי במספר רב של ספרי תרמודינמיקה, שאינם משתמשים בצורה הדוקה בפיזיקה סטטיסטית.

למחלוקת זו בין שתי הגישות יש בסיס היסטורי מעניין. בסוף המאה ה-19, עמדו התרמודינמיקה והפיזיקה הסטטיסטית במרכז של מחלוקת קשה במדע. מקצת המדענים – ובראשם ג'יימס קלרק מקסוול (Maxwell) ולודוויג בולצמן (Boltzmann) – האמינו בבסיס האטומי של החומר, אך מדענים אחרים, ובהם ארנסט מאך (Mach) ווילהלם אוסטוולד (Ostwald), התנגדו לכך. רק לאחר פרסום מאמרו המפורסם של איינשטיין על התנועה הבראונית (1905), וניסיונותיו של ז'אן פרין (Perrin, 1911) לחשב את מספר אבוגדרו על פי מדידות ניסיוניות, השתכנעו כולם בתקפותה של הגישה האטומיסטית. גם כיום אפשר להבחין בשתי גישות אלו בתכניות הלימוד

הפיזיקה הסטטיסטית היא אחד מתחומי הלימוד העיקריים לתלמידי פיזיקה בתואר ראשון. באופן מעמיק פחות, לומדים אותה גם תלמידי מדעים אחרים והנדסה. תחום הפיזיקה הסטטיסטית כולל את חוקי התרמודינמיקה והמכניקה הסטטיסטית, כפי שפיתחו אותם גדולי הפיזיקאים של המאה ה-19 ותחילת המאה ה-20. התחום נקרא בספרות גם בשם פיזיקה תרמית או תרמודינמיקה סטטיסטית.

ספרם של עמית ורבין "פיזיקה סטטיסטית" (בהוצאת האוניברסיטה הפתוחה), לצד ספרו של דוד ברגמן "פיזיקה תרמית" (מהדורה שלישית, 2003, בהוצאת אוניברסיטת תל-אביב – דיונון), הם שני ספרי הלימוד היחידים בתחום זה הקיימים בעברית. ספרם של עמית ורבין אינו ספר חדש, אלא מהדורה שלישית, שעברה עריכה משמעותית ושינויים רבים, של ספר שהיה קיים באוניברסיטה הפתוחה מאז שנות השמונים, ואשר משמש את תלמידיה זה שנים רבות כספר קורס. בעקבות הוצאתו של הספר במהדורה אנגלית לפני שנים אחדות, החליטו המחברים להוציאו לאור השנה גם במהדורה מורחבת ומשופרת בעברית.

אין זה דבר של מה בכך לכתוב ספר לימוד בסיסי בפיזיקה סטטיסטית. בתחום זה ישנה מחלוקת רבת-שנים על הגישה הפדגוגית הנכונה ללמד את החומר במסגרת לימודי התואר הראשון בפיזיקה. הוויכוח הוא בין שתי גישות: הגישה האחת דוגלת באיחוד לימודי התרמודינמיקה והמכניקה הסטטיסטית לקורס אחד; על פי גישה זו, חוקי התרמודינמיקה נלמדים בצמוד ללימוד עקרונות היסוד



הופכות למורכבות יותר, עם דרגות חופש פנימיות: גז מולקולרי דו-אטומי, טיפול קוונטי בספקטרום התנודות במוצקים, ריאקציות כימיות בגזים, וטיפול מעמיק יותר בפנונים במוצק ובקרינה אלקטרומגנטית. בחלקו האחרון של הספר מוסברים גזים קוונטיים של בוזונים ופרמיונים, וההתפלגויות הקוונטיות הייחודיות שלהם. הספר מסתיים בדוגמאות אחדות לתופעות פיזיקליות חשובות: המוליכות החשמלית והתרמית של מוצקים ועיבוי בוזא-איינשטיין.

הספר ניחן בכמה יתרונות בולטים, הן בצורת הצגת החומר והן בתוכנו. היתרון הגדול למי שקורא ספר בתחום זה בפעם הראשונה הוא הצורה המוחשית שבה מוסברים מושגים מופשטים וחוקי התרמודינמיקה, לאחר הסבר עקרונות הפיזיקה הסטטיסטית ובשילוב עם דוגמאות רבות. בכך עמית וורבין נוקטים בגישה המאחדת את לימודי התרמודינמיקה והפיזיקה הסטטיסטית.

הספר בנוי בצורה מעולה ללמידה עצמית לקורא שיש לו מוטיבציה וסבלנות מספקת. אף שזהו ספר עב-כרס (כ-600 עמוד), קל לקרוא אותו. הוא כתוב בשפה רהוטה וברורה, בפורמט רחב עם שוליים רחבים, ומשולבים בו שפע איורים פשוטים ודוגמאות. הספר מחולק לחמש יחידות, וכל יחידה מחולקת לכמה פרקים ותת-פרקים. בגוף הספר מצוינים משפטי מפתח בגופן מיוחד, וכן יש סיכומי ביניים המקלים על הקורא "לא ללכת לאיבוד". עוד יתרון חשוב הוא המספר הרב של בעיות ושאלות לעבודה עצמית. הבעיות שזורות בתוך הפרקים ומעודדות את הקורא לקריאה אקטיבית. בסוף כל פרק ישנן שאלות חזרה להערכה עצמית, וכן פתרונות של כל השאלות שהופיעו בפרק. חלק זה של שאלות ופתרונות מהווה כמעט מחצית מן הספר.

הספר מתאים לתלמידים הנחשפים בפעם הראשונה לפיזיקה סטטיסטית, ומוכנים לעשות את המאמץ הכרוך בקריאת הספר כולו ובתרגולים העצמיים. גם לקוראים אלו הייתי ממליץ להיעזר בספרים נוספים (ויש מבחר עצום באנגלית ובשפות אחרות). לחוקרים ולמורים הוא יכול

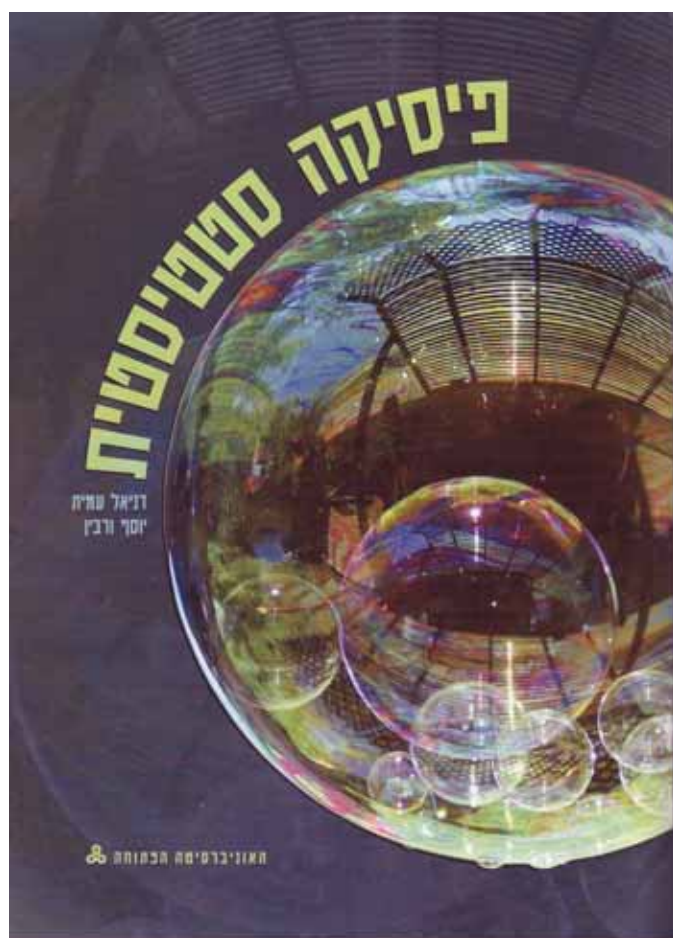
באוניברסיטאות השונות, ואפילו במעבר ביניהן באותה אוניברסיטה בשנים שונות.

עוד אתגר שהכרח להתמודד עמו בכל ספר לימוד בתחום הוא רוחב היריעה של הפיזיקה הסטטיסטית, המשתמשת במודלים מיקרוסקופיים של אטומים ומולקולות על מנת לתת תיאור מאקרוסקופי של החומר כרצף; וכן העובדה שהתרמודינמיקה היא תורה אקסיומטית, הכוללת חוקים המתייחסים לגדלים מופשטים, דוגמת אנטרופיה. הסבר תורה זו בצורה בהירה לתלמידים הנחשפים לחומר זה בפעם הראשונה הוא משימה לא-פשוטה.

בעיות אובייקטיביות אלה מלוות כל ספר לימוד בפיזיקה סטטיסטית, ויש רבים כאלו באנגלית. הגישה שבה בחרו עמית וורבין להתמודד עם בעיות אלה נשענת במידה רבה על העובדה, שהספר בנוי במקורו כספר קורס של האוניברסיטה הפתוחה. כלומר, בראש ובראשונה זהו ספר מבוא המיועד ללימוד אישי ואקטיבי, בלא שמיעה במקביל של הרצאות פרונטליות. בכך ספר זה נבדל מרוב ספרי הלימוד (Textbooks) הסטנדרטיים, המלווים קורסים אוניברסיטאיים.

הגישה שננקטה כאן היא אינדוקטיבית, ומבוססת על הליכה מהנושאים הקלים לכבדים. בחלקו הראשון של הספר מוסברת התורה הקינטית של הגזים, מקדמי הטרנספורט ומושגים כגון תנועה בראונית, דיפוזיה, מוליכות חום וצמיגות. חלק זה הוא מבוא טוב הן למערכות בשיווי משקל שעליהן בנוי המשך הספר, והן למערכות מחוץ לשיווי משקל.

לאחר מבוא קצר על שלושת חוקי התרמודינמיקה הבסיסיים, מוצגים ספינים מגנטיים. דרך הסטטיסטיקה הפשוטה-יחסית שלהם הקורא מתוודע למשתנים תרמודינמיים: טמפרטורה, מגנטיזציה ואנטרופיה. לאחר מכן, התרמודינמיקה מקושרת בצורה הדוקה יותר למכניקה הסטטיסטית. בתחילה מוצגות מערכות פשוטות: גז אידאלי, מערכות קלאסיות והחום הסגולי של מוצקים לפי מודל איינשטיין. בחלקו הרביעי של הספר, המערכות



לימוד אוניברסיטאיים בעברית. העובדה שהספר תורגם לאנגלית בהוצאת World Scientific בשנת 1999 מדגישה, שהספר מעורר עניין בקהל קוראים רחב ובינלאומי. ■

פרופ' דוד אנדלמן נמנה עם אנשי הסגל של בית-הספר לפיזיקה ואסטרונומיה באוניברסיטת תל-אביב.

לשמש כמקור לא-אכזב של שאלות ודוגמאות במגוון רמות – כולן עם פתרונות. אך הגישה האינדוקטיבית הנקטת כאן לא תתאים לכל הקוראים, משום שקשה לראות בגישה זו את המנגנונים ויחסי הגומלין המאחדים את הפיזיקה הסטטיסטית והתרמודינמיקה, ואת האלגנטיות הרבה שיש לתורה קוהרנטית הבנויה ממספר קטן של חוקי יסוד. כמו כן, הספר מתאים פחות לאלו שרוצים רק להעמיק בפרק אחד, במנותק משאר הפרקים.

הספר כולל אינדקס מפורט בעברית ובאנגלית, המקל את ההתמצאות בו, וכן הגדרות דו-לשוניות (עברית/אנגלית) של מילות מפתח ומונחים טכניים חשובים, אך חסרים בו מקורות מידע והפניות ספציפיות לספרי לימוד מתקדמים יותר, בנושאים שהספר אינו מטפל בהם או מטפל בהם באופן מקוצר.

הספר, כפי שהמחברים עצמם מסבירים, נועד לשמש כמבוא לפיזיקה סטטיסטית לתלמידי התואר הראשון. ואכן, הקורא שילמד את הספר על בוריו, יפתור את התרגילים ויעיין בתשובות, יצליח לרכוש ידע השקול ללימוד אוניברסיטאי של קורס בפיזיקה סטטיסטית. יחד עם זאת, חשוב לציין שהקשר עם התרמודינמיקה אינו נידון בצורה מפורטת דיה, ועל מנת להבין את התרמודינמיקה לעומקה, חייבים ללמוד אותה בנפרד ועדיף (אם כי אולי לא הכרחי) – לפני קריאת ספר זה.

הספר "פיזיקה סטטיסטית" של דניאל עמית ויוסף ורביץ הוא אחד הספרים היחידים בעברית העוסקים בתחום זה. הוא יכול להיות לעזר רב לתלמידי פיזיקה, הנדסה וכימיה הנחשפים בפעם הראשונה לחומר זה במסגרת לימודי התואר הראשון, וגם מהווה ספר עזר מועיל למורים, לתלמידי מחקר ולחוקרים. יש לברך על יוזמתם של המחברים, של צוות גדול של מפתחי הקורס בשלביו השונים, ושל האוניברסיטה הפתוחה שהשכילו להוציא לאור ספר בעברית בנושא חשוב זה לטובת קהל הקוראים בארץ. פרויקט בהיקף זה קשה בדרך-כלל להגשים בארץ, לאור חוסר הכדאיות הכלכלית של פרסום ספרי