



מבוא לפיסיקה מודרנית

יגאל גלילי ודני עובדיה

אלי שלו, ביה"ס התיכון ליד האוניברסיטה, ירושלים

זו רשימת ציפיות שקשה לעמוד בה בשלמות, וספר לימוד המקיים את כל אלה ראוי להחשב כפנינה של ממש. הספר שלפנינו מתקשה לעמוד בכל הסטנדרטים שמציבה הרשימה. מאחר וכך, אבקש לפרט את נקודות החוזק והחולשה שלו.

הספר מנסה, לפי הצהרת הכותבים, להתמודד עם נקודה שטרם נמצא לה פתרון. בקצרה אפשר לנסח אותה כך: כולם מודעים לחשיבות הרבה של תכני הפיסיקה של המאה העשרים, ולקושי הגדול בהוראתם בתיכון. התוצאה היא פרק קצר בזמן הוראה, אקלקטי למראה, שהזיקה בין נושאי השונים לא תמיד ברורה. יתרה מזאת, הנושאים הנלמדים לפי תוכנית הלימודים מביאים את הלומד אל פי הארץ המובטחת ולא מכניסים אותו בשעריה. רעיונות מכניקת הקוונטים ופיתוחיה נותרים לרוב מחוץ להישג ידו, וכך גם נושאים מתקדמים כקוסמולוגיה ותורות איחוד. זה מצב מצער במיוחד, משום שסביר להניח שנושאים אלו ממש גירו את סקרנות הלומד בצעירותו, והביאוהו ללימוד פיסיקה. איני מכיר אף תלמיד שביקש להתמחות בפיסיקה משום שחפץ לדעת עוד על החוק השני של ניוטון. המטרה של קירוב הפיסיקה החדשה אל הלומד שכבר שמע דבר או שניים היא מטרה חשובה וראויה, ואתגר של ממש.

קריאת תוכן העניינים מלאה אותי ציפיה. אני מאמין גדול בחשיבות של הצגת הדבר בהקשרו. אי אפשר, לטעמי, להורות את הנושא כרצף אלגוריתמים פשוט. הנושא הזה כולו היסטוריה וחשיבה חדשה ופרסי נובל בזה אחר זה, ואפשרות להציץ באמת אל מדע חדש בהתהוותו. לכן, לטעמי, חשוב וראוי להציג את הרקע. צריך לפתוח ולדבר על הבעיה של קרינת גוף שחור, ובעיית היציבות של אטומים, ושאלת הספקטרום הקווי, והתגלית הבלתי תלויה של הרדיואקטיביות ומקורותיה. צריך לפתוח באלה, ואז לגלול את סיפור הפתרון והמהפכה צעד אחר צעד. הבעיה היא, כמובן, איך לעשות זאת. איך לומר משהו משמעותי על הדברים הללו, על קשיי הפיסיקה בגבול שבין המאות - פיסיקה שכבר הייתה כל כך מפותחת, שאף היא מחוץ להישג ידו הנוכחי של תלמיד חמש היחידות. לכן קשה להסביר במשהו את התורה המוזרה החדשה, תורת הקוונטים, ותוצאותיה.

והנה, לפי תוכן העניינים והמבוא, מתברר שהכותבים חשים כמוני, ופותחים את ספרם בקרינת גוף שחור. הדיון בו מוביל אותם אל האפקט הפוטואלקטרי, אפקט קומפטון ויצירת

בשנים האחרונות אנו עדים לפריחה בשוק ספרי הלימוד בפיסיקה. אחרי תקופה ארוכה שבה היה המבחר מצומצם, עומד מורה הפיסיקה בפני שפע לא צפוי של כותרים מתחרים, בכל תחום מתחומי ההוראה. מניין השפע וההתעוררות? ייתכן משום הסילבוס החדש (ואולי מוטב לומר ה"חדש"), שהזיק זריקת מרץ ועידוד. ייתכן חוסר הנוחות ממה שהיה תפחה אצל אנשים עד שהחליטו לעשות מעשה. וייתכן גם, שההוצאה לאור הפכה להיות הרבה יותר קלה ומהירה: מה שבעבר דרש מו"ל ושירותי עיצוב, הקלדה ועריכה, הפך היום לאפשרי בד' אמות חדר העבודה הפרטי תודות למצלמה הדיגיטלית, רשת האינטרנט, מעבד התמלילים ותוכנות עיבוד התמונה והסימולציה שצמצמו עלויות וקירבו חלומות.

זו תקופה מבורכת, הקהילה הכותבת היא קהילה מעורבת, וכל ספר משמש להפרייה. בבואנו לסקור ספר מהיבול החדש, חובה לזכור גם את התנאים האובייקטיביים שליוו, מן הסתם, את הוצאתו. מספר לומדי הפיסיקה בארץ לא גדל במתאם עם מספר הספרים, ומן הסתם לא כל הכותבים יכולים לצפות למצוא פרנסה מכתביהם. משאביו של אדם המוציא ספר בהוצאה פרטית מצומצמים, ואין ביכולתו לשכור שרותים יקרים של עיצוב, גרפיקה ועריכה. ההשוואה המתבקשת לספרים אחרים (בין אם היא מפורשת או נמצאת ברקע, במובלע) צריכה להעשות בזהירות הראויה. ספרים יקרים יותר תמיד ייראו טוב יותר. תשומת הלב צריכה להיות מופנית קודם כל לתוכן ולייחודיות.

מה מצפה אדם מספר לימוד?

שיכסה את הנדרש בתוכנית הלימודים.

שיביא לידי ביטוי ידע פדגוגי וניסיון דידקטי.

שיוביל את הלומד בצעד בטוח, שיהיה לו עוגן ופיגום.

שיהיה נהיר;

נאמן לרוח תחום הדעת;

נקי מטעויות;

מוקפד ומשדר כבוד, עקבי בטרימינולוגיה;

נעים ליד ולעין;

כתוב בשפה ידידותית, מסבירת פנים, שאינה מניחה עודף הנחות על ידע קודם;

שירחיב את הדעת ובה בעת לא יטה את הלומד מן העיקר.

שיגרום לקורא לרצות עוד.

קרני-X. הפרק הראשון מוקדש כולו לבניית התפיסה הדואלית של האור. הפרק השני עוסק במבנה האטום, והשלישי בדואליות של החומר. בסופו של הפרק השלישי, כך תוכן העניינים, מספר לא מבוטל של עמודים המבקשים לבסס את התפיסות העיקריות של המכניקה החדשה, כולל התייחסות מפורשת למשוואת התנועה - משוואת שרדינגר - והכלים המשמשים אותה. הפרק הרביעי עוסק בגרעין וברדיואקטיביות, והחמישי בנושא שאינו נלמד עד כה אף פעם - הפיסיקה של המחצית השנייה של המאה העשרים: חלקיקים יסודיים ותורות איחוד. דיפדפתי בספר, ושקעתי בקריאה. התחוויר לי שאני קורא בשני כובעים. הכובע האחד היה של המורה המקצועי, מכיר הסוד וכל הטריקים. חבשתי אותו במהלך הקריאה של העמודים ה"שגרתיים" - אלו שעסקו בנושאים שאני מיומן בהוראתם: האפקט הפוטואלקטרי, מבנה האטום ורדיואקטיביות. הכובע השני היה של הסקרן, מחפש הדרך והעזרה, צייד הרעיונות. אולי כאן תמצא לי הדרך אל הדברים שאני ואחרים, מתקשים בהם. איך לתווך את בעיית קרינת הגוף השחור לתלמיד פיסיקה בוגר תיכון. איך להסביר על רגל אחת את מכניקת הקוונטים ואת התפיסות המודרניות של חלקיקים ושדות. הנושאים האלו, ה"אקסטרה" החשוב הזה, הרציונליזציה לכל המהלך הלימודי שנשמטת לרוב משום שאין יכולת לשאול עליה שאלה חישובית בבחינת הבגרות - הנושאים הללו מופיעים במספר רב של ספרי מדע פופולריים שנכתבו לקהל הרחב על ידי טובי הפיסיקאים. ואולם, התחושה שלי היא שבסיום לימודי הפיסיקה בתיכון ראוי שנהיה מסוגלים לדון בהם ברמה אחת לפחות מעל - דיון שישלב שימוש בכלים דיסציפלינריים ובידע שנרכשו במהלך הלימודים. כאן בדיוק נעוץ הקושי. הצגה מלאה של הסוגיות ופתרון דורשת כלים וידע מתקדמים מדי. הצגה ברמה של מדע פופולרי אינה ראויה מספיק כאקורד סיום (מה עוד שבלחץ הזמן הקיים תמיד יהיה הפיתוי לשלוח את הלומד לקרוא את העמודים הרלוונטיים בעצמו). החיפוש הוא אחר נתיב הביניים. איך להביא את הפיסיקה של קרינת גוף שחור, לפחות בחלקה (ולא רק לספר עליה), ואיך להראות את הקושי הנובע ממנה. איך ללכת לפחות חלק מהצעדים. איך להרגיש שהנה, בגרנו קצת, וגם אנחנו כבר יודעי חוכמה. לתחושת, כאן מצויה קבלתו של הלומד לקהילה. הופעת היכולת לא רק לחזור על סיפור שכבר שמע, אלא לעשות בו שימוש משלו. לפתור משהו. זו החוויה העוצמתית שאני מאחל לתלמידי בסוף לימודיהם. תחושה של ידע והבנה ופיענוח לצד תמיהה גדולה. אין כמו הפיסיקה המודרנית לאקורד סיום שכזה. הנה נסחפתי, ודיברתי בעצמי במקום בספר. אחזור אליו. האם עמד בתקוותי?

ובכן, נשארתי וחלק מתאוותי בידי. הקשיים המוכרים שבו ועלו. הדיון בקרינת גוף שחור לא הצליח לעקוף את המכשלה של

מושג שיווי המשקל התרמודינמי (שלא נלמד בתיכון), ונאלץ לעשות בו שימוש מבלי להסבירו. מאפייני הקרינה של גוף שחור נוסחו בתמציתיות, ולא הוצעה דרך לבנות את הבנת הקטסטרופה האולטרה-סגולה. על הרקע הזה הנחת פלנק על קוונטיזציה האנרגיה טובה ככל הנחה אחרת. היא צפה לכשעצמה, פותרת בעיה שלא ברור מהי.

הערה דומה יש לי על הדיון במשוואת שרדינגר. בסוף הפרק על דואליות החומר ראו הכותבים חובה לעצמם לומר משהו על המשוואה החדשה. ואולם, עולם המושגים המשמש אותה כל כך זר ושונה מעולם המכניקה הניוטונית אותו פגש התלמיד, שאני משוכנע שכל שיהיה לנגד עיניו הוא אוסף סימנים מוזר ומילים חסרות משמעות. קשה להעביר את המושגים האלו ישירות, כהויותם, וכנראה שגם קשה מאוד, במסגרת ספר לימוד לתיכון, להציג את הרציונל להם באורך ובמידה סבירים. מדוע מצבי החלקיק נקראים "פונקציית גל"? הספר משתמש בטרמינולוגיה, אך לא מסביר מדוע נבחרה, והרי הגליות היא לב העניין.

יחד עם זאת, הדיון המקדים את ההצגה של משוואת שרדינגר מעניין ומספק. עקרון ההשלמה ועקרון אי הודאות מקבלים מקום ראוי, והכותבים מחלצים מהם את התובנות החדשות בצורה משכנעת. מעניינת גם בחירתם לדחות את הדיון העמוק בדואליות של האור עד לרגע בו מבוססת הדואליות של החומר, ואז לדון בשתייהן יחדיו. בחירה זו יצרת קושי בסוף הפרק הראשון (הדן באופי החלקיקי של האור), אך מקבלת פיצוי נאות בסוף הפרק השלישי. אני מניח שיהיו מורים שירצו להקדים את הוראת הדפים האלה, ואולי ראוי היה שתהיה בסוף הפרק הראשון הפניה אל העמודים בהם הדיון עמוק יותר.

מעניין לקריאה היה גם הפרק על החלקיקים היסודיים. הוא כתוב ברובו בצורה פופולרית, והשכיל להיות מרחיב דעת. אולם כמו במקרה של משוואת שרדינגר, בבואם לדון בספין השתמשו הכותבים בטרמינולוגיה ובנוסחאות שמן הסתם לא יאמרו הרבה לקורא בסוף כיתה י"ב. הדיון על הניטרינו החמקמק היה קצר מדי לטעמי, ולא הצליח להסביר את הבעייתיות בלכידתו. בכלל, הכוח החלש נותר (בכל הטקסטים לתיכון שאני מכיר) בן חורג, נטול הסבר.

באשר לתכנים המחוייבים על פי הסילבוס לבחינת הבגרות - כולם נוכחים, בצורתם המקובלת וללא חידושים מפליגים. כל נושא כולל מספר דוגמאות פתורות פתרון מלא, ובסוף כל פרק שאלות חזרה ותרגול, המלוות בפתרונות סופיים, כמיטב המסורת. קל להתמצא בספר, ומבנהו דומה למבנה של ספרים אחרים המצויים בשוק.

נותר, איפה, להתייחס למאפיינים של הטקסט עצמו. כאן, לצערי, חוששני שאיני איש בשורה. במהדורה שבידי מצאתי מספר לא מבוטל של שגיאות ואי בהירויות מסוגים שונים,

וקיימת התחושה שהספר היה יוצא נשכר מהגהה נוספת ומעבודת עריכה טובה יותר.

בצד שגיאות הגהה (דוגמאות: ערעור במקום ערור, חלקיקים זהירים במקום חלקיקים זעירים, השם בוהר ליסוד בור, כתיבת 'אלקטרונים' במקום שבו צריך להיות 'פוטונים', כתיבת 'גלים קצרים' במקום שבו צריך להיות 'גלים ארוכים', נקודה עשרונית שאינה במקומה), מורגשת העריכה הלשונית הלקויה בשני תחומים נוספים – אי אחידות במינוחים, וניסוחים שהם לעיתים עמומים או עלולים ליצור ולהדהד תפיסות שגויות.

אי האחידות מתבטאת, למשל, בשמות המדענים המופיעים בטקסט: לפעמים מופיע התעתיק הלועזי של שמם ולפעמים לא. הכתיב העברי של השמות לא אחיד. מונחים מובאים בשמות שונים, כשהוראתם המילולית עלולה להטעות את הלומד. למשל: השימוש במונח הלא מקובל "מצבים אפשריים" במקום "מצבים עצמיים". ניסוחים שאינם מוקפדים דיים עלולים להוות בעיה של ממש. כך למשל, בדיון בקרינת גוף שחור כתוב "הניסיון מלמד שניתן להבחין בין שני סוגי קרינה" (עמ' 10) במקום שצריך להיות כתוב "שני סוגי גופים קורנים". דוגמא נוספת: הדיון בספקטרום בליעה (עמ' 73) עלול לעורר את הרושם שספקטרום בליעה קיים רק בגזים, ולא היא. או הטענה בדיון על התאבכות בשני סדקים, ש"תבנית ההתאבכות מתקבלת כאשר הגלים משני הסדקים נפגשים על המסך" (עמ' 111).

חלק מהקביעות של הטקסט הותירו אותי צמא לעוד. למשל, במסגרת הדיון במבנה האטום התעורר בי הרצון ללמוד כיצד נקבע יחס המסות בין אלקטרון לפרוטון. כיצד התגלה הפרוטון, וכיצד נבנתה ההנחה שהגרעין גרגרי ומורכב מפרוטונים ונייטרונים (ניסוי רתרפורד מאפשר להסיק רק שהמסה והמטען מרוכזים בגרעין, אבל לא את מבנהו). מהן העדויות הניסיוניות לכך שכל האטומים של אותו יסוד הם בעלי אותו גודל. שאלות אלו נמצאות כולן בתוך מטרת ההוראה שביקשו הכותבים, אך לא מצאתי להן תשובה בטקסט.

קושי נוסף הוא הופעה של מונחים בטקסט שלא הוגדרו בשום מקום, או שהופיעו טרם זמנם. כך, למשל, הדיון בקרינת גוף שחור לא הצליח לעקוף את השימוש במונח "שיווי משקל תרמודינמי", שנותר עמום. קווים ספקטראליים מוזכרים (עמ' 39) עוד קודם שהוצגה תופעת הספקטרום הקווי (עמ' 55). שאלה לדוגמא בפרק א', על האופי הדואלי של האור (עמ' 40), שואלת כיצד ניתן להבחין בין פוטונים לאלקטרונים בעלי אורך גל שווה, כאשר טרם דובר באופי הגלי של האלקטרונים. בדיון המרחיב על אופן פעולתו של הלייזר, בסוף הפרק על מבנה האטום, מצויין כי מעברים אפשריים אם יש

"מקום פנוי", אך בשום מקום קודם לכן לא נדונו כללי האיכלוס, ולפיכך אמירה זו, כמו גם משמעותו של ה"מקום", נותרת תלויה וחסרת משמעות. נעשה שימוש ביחידת מסה אטומית (עמ' 181, 184) למרות שזו לא הוגדרה בשום מקום. קיימות דוגמאות נוספות.

הטקסט והאיורים המלווים אותו מכילים לעיתים שגיאות של ממש, חלקן בפיסיקה וחלקן בדידקטיקה המקובלת. דוגמאות: הטענה שספקטרום הבליעה וספקטרום הפליטה של מימן זהים (עמ' 74) אינה נכונה בתנאים השכיחים של טמפרטורות נמוכות; משוואת שרדינגר לאטום רב אלקטרונים (עמ' 128) מכילה פוטנציאל שגוי; תיאורך בעזרת פחמן 14 אפשרי לכל ממצא המכיל חומר אורגני ולא רק לשרידי יונקים (עמ' 155); ממניין המשפחות הרדיואקטיביות הטבעיות נשמטה משפחת האורניום 235 (עמ' 161).

הגרף שקיבלו פרנק והרץ בניסוי המפורסם שלהם, ומובא בספר, משמש אחר-כך בשאלה לדוגמא העוסקת בניסוי דומה עם שפופרת המכילה גז מימן חד אטומי, כאשר שונו הערכים על הצירים (עמ' 71). זהו נוהג פסול. כדי להוסיף מבוכה, הערכים ששוכתבו שם – שגויים. איור המבקש להראות את הסטייה של קרינה רדיואקטיבית בשדה חשמלי מציג מסלולים שגויים מכל וכל (עמ' 142). שגיאה זו נובעת, כנראה, מתהליך "העתק" – "הדבק" שגוי, ומעריכה והגהה לא מספקות (המסלולים נראים כאילו נלקחו מאיור אחר, המציג סטיות בשדה מגנטי).

בשאלות לדוגמא, הפתרונות המספריים ניתנים בעודף גדול של ספרות ערך. אורכי גל מחושבים בדיוק של שש ספרות ערך, בעוד שהנוסחה המשמשת לחישובם ($E=12,400/\lambda$) מדויקת כדי שלוש ספרות ערך בלבד (מתעורר הרושם שהכלל הנהוג היה "שני מקומות אחרי הנקודה העשרונית"). בשאלה אחרת (עמ' 30), בה נדרש חישוב שיפועו של גרף שסורטט בעזרת אוסף נקודות מדידה, נעשה שימוש בנקודה הראשונה והאחרונה לצורך החישוב. זו פרקטיקה בעייתית, המנוגדת לחינוך שאנו מנסים להעניק לתלמידינו במעבדה.

נדמה שהספר יכול היה לצאת נשכר מצירופם של אינדקס ומילון מונחים בסופו. הסיפור של הפיסיקה בתחילת המאה העשרים הוא גם סיפורם של האישים שעשו אותה, והייתי שמח למצוא כמה שורות על כל אחד. חלק גדול מהעבודות המקוריות נמצאות היום ברשת האינטרנט, וכדאי היה לצרף הפניות אליהן.

בשורה התחתונה, מדובר בספר המקיף את כל הנדרש בתוכנית הלימודים, ומרחיב במקומות ראויים להרחבה. בחלקם הוא מצליח יותר, בחלקם פחות. לאחר שיתוקנו בו ליקויי העריכה נוכל להמליץ עליו בפה מלא.

תהודה