



מכתבים למערכת

תשובה ל"בעיות בהרחבת מודל בוהר לאלקטרון בשדה מגנטי"

יוסף ורביץ, המחלקה למדעי הטבע והחיים, האוניברסיטה הפתוחה, תל-אביב
עדי רזן, משרד החינוך, ירושלים והמחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, רחובות

והוא כי דרישה ליישום חוק מוכר במערכת לא מוכרת כבשאלה הנדונה כאן - אין מקומה בבחינת הבגרות בפיסיקה. אנו סבורים כי ההיפך הוא הנכון, וכי **ככל שירבו שאלות מסוג זה כן ייטב**. כך איננו רואים כל מניעה שבאחת מבחינות הבגרות העתידיות תופיע שאלה דומה לגבי רמות האנרגיה של חלקיק הנע בהשפעת כוח מרכזי מושך **לינארי** (כלומר אוסצילטור הרמוני דו-ממדי או תלת-ממדי) שגם לגביו אפשר להחיל את הנחות בוהר. גם במקרה זה יש אי התאמות לעומת טיפול קוואנטי מלא.

כמובן שאיננו מתכוונים לכך שמחברי הבחינה יחברו שאלה שלמה שתדרוש מן התלמיד ליישם עקרונות במערכת לא מוכרת, אלא לכל היותר הסעיף האחרון של שאלה, זה שנועד להבחין בין תלמידים טובים מאוד לבין תלמידים מצטיינים, ידרוש מיומנות זו. גם בשאלה הנדונה דרישת היישום במערכת לא מוכרת הופיע רק בסעיף האחרון (סעיף ג).

ובאשר לתשובות התלמידים לשאלה הנדונה: שאלה זו נבחרה על-ידי 1409 מבין הנבחנים האינטרנטיים, הציון הממוצע בה היה 71 (קרוב לממוצע הרב-שנתי בפרק הבחירה "פיסיקה מודרנית"). 51% מבין אלה שבחרו בשאלה קבלו ציון בין 85 לבין 100.

ממחקר קצר שערכנו בעזרת 110 מחברות של תלמידים שבחרו בשאלה עולה התמונה הבאה: הציון הממוצע בסעיף ב של השאלה, שבו נדרש שימוש במודל בוהר לגבי אלקטרון **באטום המימן** (נושא שנלמד באופן מפורש בכיתה) היה 69.3, ובסעיף ג של השאלה, שהוא נושא מכתבם של מרחבקה וגניאל, הציון הממוצע היה 68.4. מכאן עולה המסקנה, כי **רוב התלמידים שהיו מסוגלים לפתח במסגרת הבחינה ביטוי שפותח בכיתה, הצליחו להתמודד עם הדרישה ליישם את עקרונות מודל בוהר גם לגבי מערכת "לא מוכרת"** כתנועת אלקטרון בשדה מגנטי אחיד.

התהיות שמעלים מרחבקה וגניאל בשמו של תלמיד חקרן הן אכן תהיות שיש לתת עליהן תשובה; אולם הן אינן מיוחדות למערכת של אלקטרון הנע בשדה מגנטי. כל מורה

בגליון "תהודה" האחרון (כרך 21, חוברת 2) הופיע מכתב למערכת בנושא "הרחבת מודל בוהר לאלקטרון בשדה מגנטי" מאת אבי מרחבקה ואורי גניאל.

במכתבם מתייחסים הכותבים לשאלה מסי 3 בשאלון בחינת הבגרות בפיסיקה (בפרק הבחירה "פיסיקה מודרנית") קיץ תש"ס (יוני 2000) המופיע אף הוא בכרך 21(2) של תהודה. מרחבקה וגניאל טוענים כי חלק ג' של השאלה שבו נדרש שימוש במודל בוהר לתנועת אלקטרון בשדה מגנטי אינו מתאים להיות חלק מבחינת בגרות בפיסיקה. בלשונם "הרחבה כזו... אין מקומה בבחינה במסגרת הנוכחית של תכנית הלימודים".

דעתנו שונה בתכלית ואנו מבקשים להציגה להלן.

טיעוניהם של מרחבקה וגניאל הם משני סוגים:

האחד מוקדש לכך שהתוצאות המתקבלות מהחלת תנאי הקוואנטיזציה של בוהר לתנועה מעגלית של אלקטרון בשדה מגנטי אינן מדויקות ואינן עקביות עם טיפול מסודר במסגרת תורת הקוואנטיים. בכך הם כמובן צודקים. אולם, **אותן טענות ממש אפשר לטעון כנגד מודל בוהר לאטום המימן**; הדוגמה הידועה ביותר היא העובדה שממודל בוהר נובע כי לאלקטרון הנע סביב הגרעין במצב היסוד של אטום המימן יש תנע זוויתי של יחידה (כלומר \hbar) לעומת 0 המתקבל ממשוואת שרדינגר. באותה מסגרת מביאים מרחבקה וגניאל את הטענה שתנועה מעגלית של אלקטרון בשדה מגנטי אינה הכללית ביותר, וכי יש לקחת בחשבון אפשרות של תנועה בורגית. אולם גם כאן אפשר לטעון ממש טענה מקבילה כנגד הטיפול של תכנית הלימודים (שהם עצמם מביאים) במודל בוהר לאטום המימן: גם אלקטרון הנע בשדה כשל גרעין המימן אינו מחוייב לנוע במעגל בלבד, ומסלולים אליפטיים (שלא לדבר על היפרבוליים) אפשריים ממש באותה מידה. לכן התייחסה השאלה בפרוש למסלולים מעגליים (ולא בורגיים), וכל מה שהנבחן נדרש היה ליישם את כלל הקוואנטיזציה של בוהר לתנועה מעגלית בשדה מגנטי.

בכך אנו מגיעים לסוג השני של טיעוניהם של מרחבקה וגניאל

הצלחתו של מודל בוהר עוד גדולה מזו שבאטום המימן. המצב אכן אינו כך ובמונחי מודל בוהר הסיבה היא בכך שהתנע המקיים את תנאי הקוואנטיזציה אינו התנע הקינמטי (mv) אלא התנע הקנוני שיש לו חלק אלקטרומגנטי $m v - e B r / 2 = m v - e A$. אם חוזרים על החישוב עם התיקון הזה מתקבלת התוצאה הקוואנטית הנכונה, עד כדי אנרגיית נקודת האפס המוסיפה קבוע חיבורי לא כל כך משמעותי לתוצאה.

המסקנה המתבקשת מן הטיעונים של מרחבקה וגניאל (למרות שהם עצמם לא העלו אותה) היא שהנושא "מודל בוהר" אינו מתאים לתכנית הלימודים בפיסיקה מכיוון שהוא אינו שלם ומשאיר נקודות רבות ללא תשובה. היינו יכולים אולי להסכים עם מסקנה כזו לו היה מדובר בתכנית לימודים במתמטיקה. אולם, טבעה של הפיסיקה היא שלעולם יהיו בה "קצוות פתוחים", ויותר שאלות מאשר תשובות. **יש ערך פדגוגי גדול גם להצגת פן זה של הפיסיקה**, והדוגמה של מודל בוהר היא דוגמה טובה לעניין זה, גם אם בינתיים נמצא לו תחליף מוצלח לאין שעור.

טוב המלמד את מודל בוהר מן הראוי שיעלה אותן, ויסביר כי תורת הקוואנטים סוטה מן הפיסיקה הקלאסית במערכות מיקרוסקופיות, ומתלכדת עמה בסקלות המיקרוסקופיות. נוסף לכך מן הראוי להדגיש כי הנחת הקוואנטיזציה של בוהר המוצגת בשיעורי הפיסיקה בצורתה הפשוטה ניתנת להרחבה למסלולים אליפטיים, יחד עם זאת מודל בוהר לאטום המימן אינו מספק את כל התשובות. את אלה אפשר לקבל רק במסגרת תורת הקוואנטים "החדשה". תלמיד שנכח בשעורים מעין אלה לא ייתקל בשום קושי מחשבתי חדש בבואו להחיל את הנחת הקוואנטיזציה של בוהר למסלול מעגלי של אלקטרון בשדה מגנטי, יפתור את השאלה וגם יפיק ממנה תועלת נוספת בכך שיכיר (אם לא הכיר קודם) מצב עניינים נוסף שבו יש תפקיד מועיל להנחת הקוואנטיזציה של בוהר. הנקודה היחידה שיש מקום לתקן בהקשר של השאלה הנדונה היא הנושא שמוזכר בדרך אגב על ידי מרחבקה וגניאל והוא ההבדל בגורם $1/2$ בין ערכי רמות האנרגיה המתקבלות ממודל בוהר ואלה המתקבלות מטיפול קוואנטי מסודר. נקודה זו אינה רלבנטית לנבחן, אך היא מן הראוי להדגיש בפתרון השאלה כדי שלא להותיר את הרושם שדווקא במקרה זה

הערות למכתבם של יוסף ורבין ועדי רוזן

אורי גניאל ואבי מרחבקה, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, רחובות.

להסביר בלעדיהן. נחוץ היה אדם בעל אינטואיציה מבריקה כשל בוהר, כדי להניח הנחות - שרירותיות לכאורה - שהולכנו לתוצאות נכונות מתוך מודל קלאסי ישן. עם זאת, חשוב להדגיש כי המודל הוא שעטנו של פיסיקה קלאסית עם הנחות שרירותיות, שהצדקתן היחידה היא בתוצאות שהן מובילות אליהן. רק לאחר שדה ברויי (de Broglie) הציע את גלי החומר התאפשר מעין "הסבר" (יחס שלם של אורכי גל $\lambda = h/p$ במסלול המעגלי, שמאפשר גל עומד: $2\pi r = nh/p$). גם "הסבר" זה הוא כמובן דחוק - ומה על המסלולים שאינם מעגליים? עם זאת, חשוב להזכיר כי מודל בוהר נותן תוצאות (עבור רמות האנרגיה ועבור רדיוס האטום) שהן **זהות לתוצאות** המתקבלות מתוך מכניקת הקוואנטים ובכך יש הצדקה נוספת להוראת מודל זה.

2. הרחבת "מודל בוהר"

לאחר כל מה שנאמר לעיל, בולט הניגוד בין מודל בוהר לאטום המימן, לבין הרחבתו כביכול, למקרה של אלקטרון הנע בשדה מגנטי. איזו הצדקה יש להפעיל את עקרון

בפתח דברינו נדגיש כי אנו שמחים על הדין שהתעורר, משום שויכוחים מסוג זה יכולים לתרום לטיב ההוראה. עם זאת, אנו מוצאים במכתב האחרון פירוש שגוי של הערותינו הקודמות, ועל כך ברצוננו להעיר.

1. על מודל בוהר

הוראת הפיסיקה בבית הספר התיכון אינה סוף פסוק, ופרקים רבים של מדע הפיסיקה אינם מוזכרים כלל ונשארים הרבה "קצוות פתוחים". (טענה זו נכונה גם ברמות גבוהות יותר, ולא רק בפיסיקה תיכונית). לפיכך המסקנה שמסיקים רוזן וורבין, כאילו מתוך טיעוננו נובע (אפילו לא אמרנו זאת) כי "מודל בוהר אינו מתאים לתוכנית הלימודים... משום שהוא משאיר נקודות רבות ללא תשובה" - היא מסקנה שאין לה שום סימוכין.

למודל בוהר יש ערך גדול בלימודי הפיסיקה בבית הספר התיכון. הוא מהווה דוגמה מרתקת של הרחבת הפיסיקה הקלאסית אל מעבר לתחומיה המוכרים בזמן נתון, תוך הוספת הנחות המאפשרות הסבר לתופעות שאי אפשר היה

אלגברי פשוט שלישי. הוכחה להבנה פיסיקלית כלשהי אין כאן כלל ועיקר.

טענתנו הקודמת עומדת בעינה: כדאי להימנע מהפיכת הפיסיקה לשדה תרגול של "התעמלות אלגברית", ולהשתדל להדגיש הבנה של מושגים ומודלים. השאלה הנדונה אינה עומדת בקריטריון זה. היא אינה מרחיבה את עולם המושגים הפיסיקליים של התלמיד, ואצל התלמיד המעמיק היא עלולה אפילו לגרום לבלבול. כיצד אמורה שאלה כזאת להבחין "בין תלמידים טובים מאוד לתלמידים מצטיינים"?

הקוואנטיזציה של בוהר למקרה זה? ההרחבה המוצעת איננה מתארת מודל פיסיקלי כלשהו ומה שמתבקש התלמיד לעשות הוא להציב ביטוי אלגברי אחד לתוך ביטוי אלגברי אחר, מבלי שתהיה לכך משמעות פיסיקלית כלשהי. ואכן - אפילו התוצאה המתקבלת איננה התוצאה הנכונה, כפי שכבר ציינו, בניגוד למקרה של האטום של בוהר.

3. מה למדו התלמידים.

העובדה שתלמידים רבים אכן פתרו שאלה זו בהצלחה איננה מוכיחה מאומה - פרט לעובדה שאכן קל להציב ביטוי אלגברי פשוט אחד לתוך ביטוי אלגברי פשוט אחר ולקבל ביטוי

תגובה למאמר "מהי המשמעות של המהירות בכוח מגנטי?", מאת יגאל גלילי ודב קפלן

יחיאל כהן-אלוזר, בית הספר התיכון האזורי, באר-טוביה

יתרה מזאת, היות שכל שינוי **במקור** המשפיע על B במרחב אינו מועבר מיידית לכל הנקודות במרחב, "נכון" יותר (בקיצור לשון) לייחס את המהירות ביחס **לשדה** הלוקאלי B מאשר ביחס למגנט (הכוונה כמובן, גם כאן, למערכות הייחוס המתאימות המייצגות את "השדה" או "המגנט").

מוסיפים גלילי וקפלן: "כידוע ממחקרים, המגמה הנפוצה אצל תלמידים היא לייחס למושגים פיסיקאליים מופשטים משמעות חומרית כמו זאת של חפצים גשמיים. גם בהקשר לשדות החשמלי והמגנטי, אנו מוצאים טעות תפיסתית גסה מסוג זה". לעומת זאת ע. רוזן וז. קרקובר¹, בתשובה לשאלה "האם שדה הוא דבר ממשי או ישות מתמטית בלבד? פוסקים: "עבור פיסיקאים שדה הוא דבר ממשי, כמו חומר".

נוח יותר לנתח תופעות הקשורות בכוח לורנץ ממערכת ייחוס בה השדה קבוע בזמן. ביטויים כמו "מהירות המטען ביחס לשדה" אינם פחות תקינים פיסיקלית מהתנסחויות מקוצרות רבות אחרות בפיסיקה כמו "מהירות ביחס למרכז המסה" "אנרגיה האגורה בשדה המגנטי או "מוקד של" עדשה".

יותר פשוט ויותר דידקטי להגיד: "סליל מסתובב בשדה מגנטי" (והמשתמע מכך תנועה יחסית לשדה) מאשר להתפתל בניסוח מעין: "סליל מסתובב ביחס לצופה הנמצא במערכת ייחוס בה הקונפיגורציה של השדה המגנטי הנמדד בלתי תלויה בזמן".

(1) רוזן, ע. וקרקובר, ז., מכניקה ניוטונית - כרך ב', עמ' 217, מהדורה ניסויית, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, 1996.

במאמר הנ"ל הדן ביחסיות השדה האלקטרומגנטי כותבים המחברים:

"... איננו יכולים לעבור לסדר היום לגבי אלה שכותבים כי המהירות v היא המהירות היחסית שבין המטען למגנט... במיוחד מצערים ביטויים מהסוג 'המטען נע יחסית לשדה המגנטי' (Halliday et al). בהרצאות של פיינמן ניתן למצוא מה חשב הפיזיקאי הגדול על ביטויים כגון 'שדה מגנטי נע עם המגנט' או 'השדה המגנטי נמצא במנוחה' (Feynman). "לביטויים כגון: 'תנועה של חלקיק יחסית לשדה' או 'השדה הנע' אין מקום אצל מי שתפקידו להקפיד על נכונותם המדעית של הסברים ולמנוע תפיסות מוטעות... כל ביטוי על 'השדה הנע' לעולם אינו תקף לצערנו; כך אין ללמד".

למרות הדברים הנוקבים וההיתלות בפיינמן, סיימתי לקרא את המאמר בתחושה של קבלת מסר עמום: מיד בהמשך לקטע המצוטט הנ"ל מתוארת דוגמא המתייחסת לכוח הפועל על מטען הנע בשדה מגנטי במילים אלו: "נתבונן במגנט הנמצא במנוחה במערכת הייחוס S של המעבדה והיוצר שדה מגנטי בכיוון ציר z. מטען q נע במהירות קבועה בכיוון ציר ה-x".

במילים אחרות, גלילי וקפלן אומרים לנו בין היתר כי במערכת הייחוס של המעבדה בה נמצא המגנט במנוחה, נע מטען q במהירות קבועה. האם אין בכך קביעה למעשה שמהירות המטען היא יחסית למגנט? בניסוח מוקפד יותר ניתן היה להתבטא כך: "מהירות המטען q הינה מהירות של מטען ביחס לצופה הנמצא במערכת ייחוס בה השדה המגנטי קבוע בזמן". אולם המעבר מהניסוח המפותל הזה להתבטאות כגון "מהירות ביחס למגנט" אינו אלא קיצור לשון (גם אם משובש לשון) המקובל גם בתחומים רבים אחרים בפיסיקה.

הערות למאמר: מהי המשמעות של המהירות בשדה המגנטי

צבי גלר, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, רחובות.

למערכת "תהודה" שלום,

במאמר "מהי המשמעות של המהירות בכוח המגנטי" שהתפרסם בחוברת האחרונה של "תהודה"¹, טוענים מחברי המאמר יגאל גלילי ודב קפלן כי בדקו מספר רב של ספרי לימוד לפיסיקה ומצאו שבספרים שבדקו מתעלמים באופן מוחלט מהשאלה המהווה נושא מרכזי במאמרם. כדוגמה לביסוס טענתם הם מציינים במיוחד את הספר "פרקי חשמל ומגנטיות" בהוצאת המחלקה להוראת המדעים של מכון ויצמן - ספר שכותב שורות אלה הוא אחד ממחבריו. דווקא מכיוון שאני תמים דעים עם מרבית הדברים הנאמרים על ידי גלילי וקפלן, מחובתי לציין כי בסעיפי "הרחבה והעמקה" של ספרנו קיימת התייחסות מסוימת לנושאים הנדונים במאמר². אם תועלה הטענה שהתייחסות זו היא איכותית בלבד ולכן איננה מספקת - לדעתי מן הראוי יהיה לקיים על כך דיון מקיף ומעמיק במסגרת מתאימה.

1. גלילי, י. וקפלן, ד., תהודה, 21(2), עמ' 17-21.

2. פרקי חשמל ומגנטיות, חלק ב' - פרקי מגנטיות, עמ' 65-66 ועמ' 101-100, מהדורת ניסוי, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, 1998.

תהודה

לידיעת המורים!

בהתאם לכתוב בחוזר מיוחד ה' תשנ"ה יזכו מאמרים שלכם שיפורסמו ב"תהודה" בגמול השתלמות כפי שפורסם בחוברת "זכויותיך", (אוקטובר-נובמבר 94, עמ' 47, אוקטובר 1994) סעיף 6 ג. להלן הקטע הרלבנטי:

עבודת מחקר או פרסום מדעי

עובד הוראה, שכתב עבודת מחקר או חיבור מדעי, שפורסם בכתב-עת או בקלטת, תיבדק זכותו לגמול השתלמות ע"י ועדה מיוחדת הפועלת ליד גף דירוג והסמכה באגף כוח-אדם בהוראה. זאת בתנאי שהעבודה הנדונה לא זיכתה את עובד ההוראה בדרגת שכר או בתואר. הוועדה תחליט על מספר הגמולים לפי שיקול דעתה ועפ"י הכללים כלהלן:

עריכה, ליקוט או תרגום אינם מזכים בגמול השתלמות.

עובד הוראה המועסק באגף תוכניות לימודים, במרכז להוראת המדעים (מל"מ), במרכז לטכנולוגיה חינוכית (מט"ח) וכיו"ב, לא יזכה בגמול בעד כתיבה בתוקף תפקידו.

עובד המועסק בהוראה בהיקף של 2/3 ממשרה מלאה לפחות, והוא מועסק גם בכתיבה באחת המסגרות הנ"ל בהיקף של עד 1/3 משרה, יהיה זכאי להגיש בקשה לגמול בעבור כתיבת חומר לימודי. לשם כך עליו להמציא אישור על שיעור משרתו משני מקומות העבודה.

משרד החינוך לא יתחייב להחזיר את הפרסומים. חלקם נשארים בספריות שונות של המשרד, אך רובם מוחזרים לבעליהם.

בקשות עפ"י סעיף זה יוגשו ע"ג טופס מיוחד מס' ח"ת 050.202, שניתן לקבלו בלשכות המחוזיות של משרד החינוך.