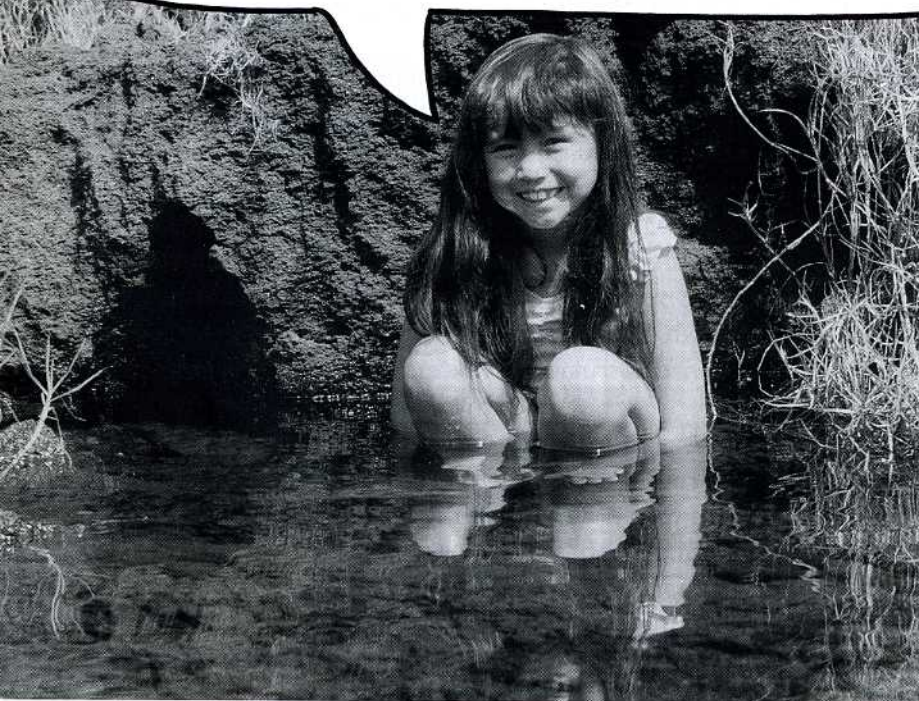
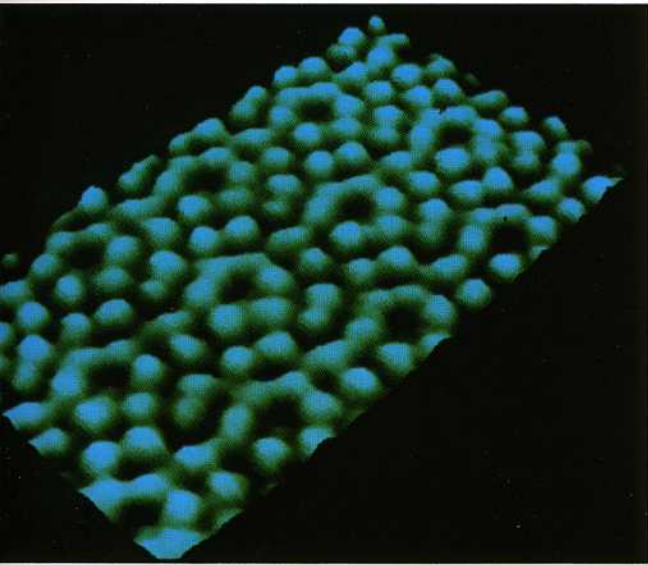


האטום והגרעין

"צדו אכס!" מקור המוס אלמדיין המוס המוס הזה או אזויזר או
אזר העדש הוא האניזיה הגרעיני - הרציואקטיוו של המיניאליס
שבמדה האצמה. האניזיה שמקורה בגרעיני האטומים (מזאג צומנו
מאז היווצרות כדור הארץ, ואינה מוגבלת לכורים הגרעיניים שנבנו
במיון. מה צדגבס על כך?!



האטום והקוונטים

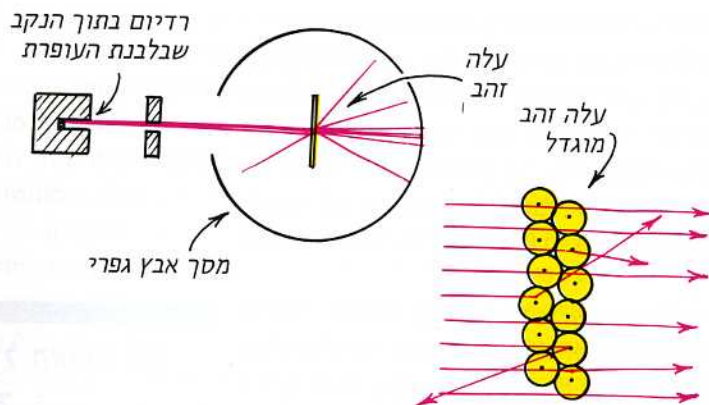


תמונת אטומי
צורן במיקרוסקופ
מינהור סורק

1 פרק 10 דנו באטום כאבן הבניין של החומר ובפרקים שלאחר מכן עסקנו בו כמקור קרינת האור. ידוע לנו שבמרכז האטום מצוי גרעין וכי הוא מוקף במערכת מורכבת של אלקטרונים; חקר מבנה האטום נקרא פיסיקה אטומית. בפרק זה נסקור חלק מההתפתחויות שהביאו להבנתנו הנוכחית בפיסיקה האטומית ונעקוב אחר ההתפתחויות שהובילו מהפיסיקה הקלאסית לפיסיקה הקוונטית. בשני הפרקים הבאים נלמד על חקר המבנה של גרעין האטום - פיסיקה גרעינית. לידע זה ולשימושיו השלכות משמעותיות ביותר על החברה האנושית. נתחיל את לימוד הפיסיקה האטומית והגרעינית בסקירה תמציתית של אחדים מהאירועים שהתרחשו בתחילת המאה ה-20 והובילו להבנת האטום כפי שהיא כיום.

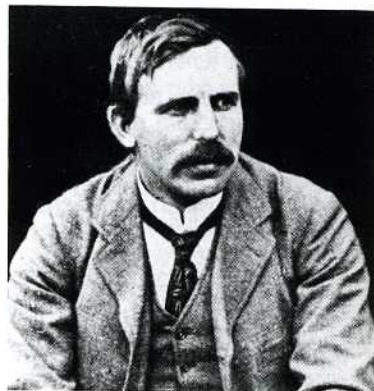
שנים מספר לאחר שאיינשטיין דיווח על התוצא הפוטואלקטרי, ערך הפיסיקאי הבריטי ארנסט רתרפורד את ניסוי המוכר כיום בשם "ניסוי עלה הזהב". הניסוי, שנערך ב-1909, הראה שרובו המוחלט של נפח האטום ריק לחלוטין, וכמעט כל מסתו של האטום מרוכזת במרכזו - בגרעין. בהדרכתו של רתרפורד, כיוונו ה"ו גייגר וא' מרסדן אלומה של חלקיקים טעונים חיובית (חלקיקי אלפא) שנפלטו ממקור רדיואקטיבי אל עלה זהב דק ביותר, ומדדו את זוויות הסטייה של החלקיקים ממסלולם הישר. מקום פגיעתם של החלקיקים נקבע בעזרת נקודות אור שנוצרו על מסך עשוי אבץ גפרי שהקיף את עלה הזהב

**גילוי גרעין
האטום**



איור 31.1

הפיזור של חלקיקי אלפא מעלה זהב, המתרחש לעיתים בזוויות גדולות, הוביל את רתרפורד לגילוי הגרעין הקטן שבמרכז האטום, שרוב מסת האטום מרוכזת בו.

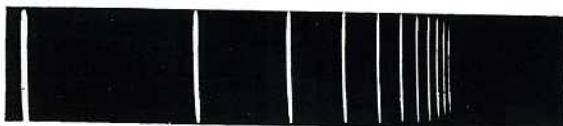


ארנסט רתרפורד

(איור 31.1). כצפוי, רוב החלקיקים המשיכו במסלול ישר פחות או יותר, לאחר שעברו דרך עלה הזהב. אך להפתעתם של עורכי הניסוי, חלקיקים אחדים סטו ממסלולם במידה ניכרת והיו אף כאלה שחזרו לאחור לאורך מסלול הפגיעה. הדבר דומה לגילוי קליעי רובה שנרתעים לאחור לאחר שנורו לעבר גיליון נייר. על פי הסברו של רתרפורד, החלקיקים שלא סטו ממסלולם עברו בחלקו הריקים של עלה הזהב, ואילו החלקיקים המעטים שהוטו ממסלולם נדחו ממרכזיהם של אטומי הזהב שחייבים, אם כך, להיות טעונים חיובית. כך גילה רתרפורד את גרעין האטום.

בתקופה שבה ערך רתרפורד את ניסוייו, השתמשו הכימאים בספקטרוסקופ (שתואר בפרק 29) לאנליזה כימית, בעוד הפיסיקאים מנסים למצוא סדר בתווה ובוהו של קווי הספקטרום. זמן רב ידעו שלאטום הקל מכולם, אטום המימן, ספקטרום פשוט ומסודר יותר מליסודות האחרים (איור 31.2). סדרה חשובה של קווי ספקטרום של המימן מתחילה בקו בודד בתחום האדום של הספקטרום, עוברת לקו אחד בתחום הכחול, משם למספר קווים בתחום הסגול, ולמספר רב של קווים בעל-סגול. המרווח בין הקווים העוקבים קטן והולך מהקו הראשון בתחום האדום ועד לקו אחרון בתחום העל-סגול, ולבסוף הקווים כה קרובים זה לזה עד שהם נראים כרצף. המורה השווייצי י"י בלמר היה הראשון שהצליח לבטא את מערך הקווים הללו בעזרת נוסחה מתמטית אחת. עם זאת, בלמר לא היה מסוגל להסביר מדוע נוסחתו מתאימה באורח מדויק כל כך. בעזרת נוסחה זו ניתן היה לאתר גם קווים שלא נמדדו עד אז. הצלחתו של בלמר הובילה למציאת נוסחאות דומות אחרות, שקבעו את מיקום הקווים של יסודות אחרים.

הספקטרום האטומי: המפתח למבנה האטום



איור 31.2

חלק מספקטרום המימן.

חוקיות נוספת בספקטרום האטומי גילה ג'י רידברג. הוא הבחין שלעיתים סכום התדירויות של שני קווים בספקטרום המימן שווה לתדירותו של קו שלישי. קשר זה פותח לאחר מכן לעיקרון כללי בידי ו' ריץ ונקרא **עקרון הצירוף של ריץ**. העיקרון קובע שתדירויות קווי הספקטרום של כל יסוד שוות לסכום או להפרש שתי תדירויות של קווי ספקטרום אחרים של אותו יסוד. בדומה לבלמר, גם ריץ לא ידע להסביר חוקיות זו. אך לפיסיקאי הדני נילס בוהר שימשו קשרים אלו מפתח להבנת מבנה האטום.

על יסוד התורה הקוונטית של פלאנק ואיינשטיין ודגם האטום בעל הגרעין של רתרפורד פיתח בוהר בשנת 1913 את המודל הפלנטרי המוכר של האטום (איור 31.3)*. בוהר טען שמצבי האנרגיה הבדידים של האלקטרון לפי פלאנק (שבהם דנו בפרק הקודם) מתאימים למסלולי אלקטרונים ברדיוסים שונים. הוא הצליח לחשב את רמות האנרגיה באטום המימן ולהוכיח את התאמתן למסלולים מעגליים "מקוונטים". בהסתמך על נוסחת בלמר חישב בוהר את התנע הזוויתי של האלקטרון בכל אחד מהמסלולים וטען שהתנע הזוויתי הוא כפולה שלמה של $\hbar$, כאשר $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ ו- h הוא קבוע פלאנק, הקבוע המקשר בין אנרגיית הפוטון לתדירות האור.

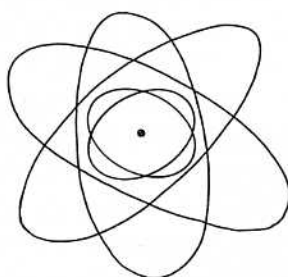
על פי בוהר, אלקטרון הנע במרחק רב יותר מהגרעין נמצא ברמת אנרגיה גבוהה יותר מאלקטרון הקרוב לגרעין. בוהר סבר שאור נפלט בעת מעבר של אלקטרון ממסלול גבוה לנמוך ושתדירות הקרינה הנפלטת נתונה ב- $E=hf$, כאשר E הוא ההפרש בין האנרגיות של האטום כשהאלקטרון נמצא במסלוליו השונים.

המודל הפלנטרי של בוהר עורר קושי משמעותי. אלקטרונים מואצים פולטים אנרגיה בצורת גלים אלקטרומגנטיים; האלקטרון המואץ מסביב לגרעין צריך להקרין אנרגיה באורח רציף. פליטה זו של אנרגיה צריכה לגרום לאלקטרון לאבד אנרגיה ולהסתחרר במסלול ספירלי לתוך הגרעין (איור 31.4).

מודל האטום של בוהר



נילס בוהר



איור 31.3
מודל האטום של בוהר. למרות פשטותו היתרה של המודל, הוא מסייע בהבנת תופעת פליטת האור.

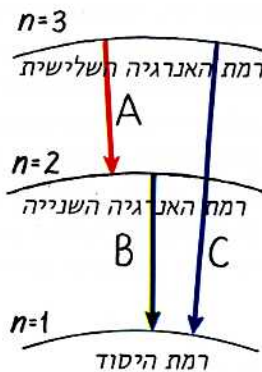
* למודל זה, כלמרבית המודלים, מגרעות רציניות, מפני שהאלקטרונים אינם נעים במסלול מישורי ככוכבי הלכת. המודל תוקן מאוחר יותר; "מסלולים" הפכו "קליפות". אנו נשתמש במונח מסלול, שעדיין מרבים להשתמש בו. אלקטרונים אינם בדיוק גופים, כמו כוכבי לכת, אלא דומים יותר לגלים הערוכים בקליפה צרה.

באומץ רב התנתק בוהר מהפיסיקה הקלאסית וקבע שהאלקטרון אינו פולט אור כאשר הוא מואץ מסביב לגרעין במסלול מסוים; רק בעת שהוא עובר ממסלול ברמת אנרגיה גבוהה למסלול ברמת אנרגיה נמוכה יותר נפלט אור. רמות האנרגיה של המסלולים המרוחקים מהגרעין גבוהות יותר מרמות האנרגיה של המסלולים הקרובים. האנרגיה של הפוטון הנפלט שווה להפרש באנרגיה שבין שתי הרמות, $E=hf$. הצבע תלוי בשיעור הקפיצה. הקוונטיזציה של אנרגיית האור תואמת להפליא את רמות האנרגיה של האלקטרון.

השקפתו של בוהר, אף שנראתה תמוהה ביותר בזמנו, הסבירה את החוקיות שהתגלתה בספקטרום האטומי. ההסבר של בוהר לעקרון הצירוף של ריץ מוצג באיור 31.5. אם מעלים אלקטרון לרמת האנרגיה השלישית, הוא יכול לשוב למצבו ההתחלתי במעבר יחיד מהרמה השלישית לראשונה, או במעבר כפול - ראשית לרמה השנייה, וממנה לראשונה. בשתי אפשרויות המעבר הללו ייווצרו שלושה קווי ספקטרום. שימו לב לכך שסכום הפרשי האנרגיה במעברים A ו-B שווה להפרש האנרגיה במעבר C. מכיוון שהתדירות מתכונתית לאנרגיה, גם סכום התדירויות של האור הנפלט במעברים A ו-B שווה לתדירות האור הנפלט במעבר C. עתה ניתן להבין מדוע סכום שתי תדירויות בספקטרום שווה לתדירות שלישית המופיעה גם היא בספקטרום.

בוהר גם הצליח לבאר את המקור לקרינת X ולהוכיח שהיא נפלטת כאשר אלקטרונים עוברים מהמסלולים החיצוניים באטום למסלולים הפנימיים ביותר. הוא חזה תדירויות בתחום קרינת X שאומתו לאחר מכן בניסויים. בוהר הצליח לחשב את "אנרגיית היינון" של אטום המימן - האנרגיה הדרושה כדי להרחיק את האלקטרון מהאטום לחלוטין. גם חישוב זה אומת בניסויים.

באמצעות מדידת תדירויות בתחום האור הנראה ובתחום קרינת X ניתן היה למפות את רמות האנרגיה האטומיות של כל היסודות. לפי המודל של בוהר, האלקטרונים נעים במסלולים מעגליים (או אליפטיים) המסודרים בקבוצות או בקליפות. מודל זה של האטום הסביר את התכונות הכימיות הכלליות של היסודות וחזה את תכונותיו של יסוד שהיה חסר בטבלה המחזורית, תחזית שהובילה לגילוי של היסוד הפניום.



איור 31.5

שלוש רמות ממספר רב של רמות באטום. סכום השינויים באנרגיה במעברים $A+B$ שווה לשינוי באנרגיה במעבר C. לכן סכום התדירויות של האור הנפלט במעבר A ובמעבר B שווה לתדירות האור הנפלט במעבר C.

שאלות

- מהו המספר המרבי של מעברים אפשריים באטום מימן מהרמה השלישית לרמת היסוד?
- תדירויותיהם של שני קווים בולטים בספקטרום של אטום המימן, האחד בתחום התת-אדום והשני באדום, הם 2.7×10^{14} הרץ ו- 4.6×10^{14} הרץ בהתאמה. התוכלו לחזות תדירות גבוהה יותר של קו בספקטרום אטום המימן?

תשובות:

- שלושה, כמתואר באיור 31.5.
- מחיבור התדירויות נקבל $2.7 \times 10^{14} + 4.6 \times 10^{14} = 7.3 \times 10^{14}$ Hz, וזו תדירותו של קו סגול בספקטרום אטום המימן. התוכלו לראות שאם הקו בתת-אדום מתאים למעבר הדומה למעבר A באיור 31.5 והקו האדום מתאים למעבר B, אזי הקו הסגול יתאים למעבר C?

בוהר הסיר את המסתורין שאפף את הספקטרום האטומי ויצר מודל שימושי ביותר של האטום. אך גם הוא עצמו הזדרז לציין כי יש להתייחס למודל שלו כאל התחלה בלתי מהוקצעת, וכי אין לראות בתמונת האלקטרונים הסובבים את הגרעין ככוכבי לכת את השמש תמונה מדויקת (עובדה שנעלמה מעיני רבים שניסו להציג לקהל הרחב את תורתו). המסלולים הבדידים רק ממחישים את מבנה האטום, אך כדי לתארו במדויק חייבים להיעזר בתורת הקוונטים. עם זאת, המודל הפלנטרי של האטום, שלפיו האלקטרונים נמצאים ברמות אנרגיה בדידות, עומד גם כיום בבסיס המודלים המורכבים יותר של האטום.

קוטר מסלולי האלקטרונים במודל של בוהר נקבע לפי כמות המטען בגרעין. הפרוטון החיובי באטום המימן, למשל, יחזיק אלקטרון אחד במסלול בעל רדיוס מסוים. אם נכפיל את המטען החיובי שבגרעין, האלקטרון המסתובב יימצא במסלול קרוב יותר שרדיוסו מחצית הרדיוס הקודם, מפני שהמשיכה החשמלית מוכפלת. אך למעשה אין אלה פני הדברים, שכן כאשר המטען בגרעין מוכפל, נמצא באטום אלקטרון שני המקטין את השפעת הגרעין החיובי. בנוכחות האלקטרון הנוסף האטום יהיה ניטרלי מבחינה חשמלית. אין זה עוד אטום מימן - זהו הליום.

שני האלקטרונים יימצאו במסלולים האופייניים להליום. צירוף פרוטון נוסף לגרעין ימשוך את האלקטרונים למסלול פנימי יותר, ובנוסף לכך יצטרף אלקטרון שלישי במסלול שני. זהו האטום ליתיום, שמספרו האטומי 3. ניתן להמשיך כך את התהליך הדמיוני שתיארנו - להגדיל את מספר הפרוטונים בגרעין ולהוסיף בהתאמה עוד אלקטרונים ומסלולים נוספים, עד שנגיע לאטומים שמספרם האטומי עולה על 100 - אל היסודות הרדיואקטיביים המלאכותיים*.

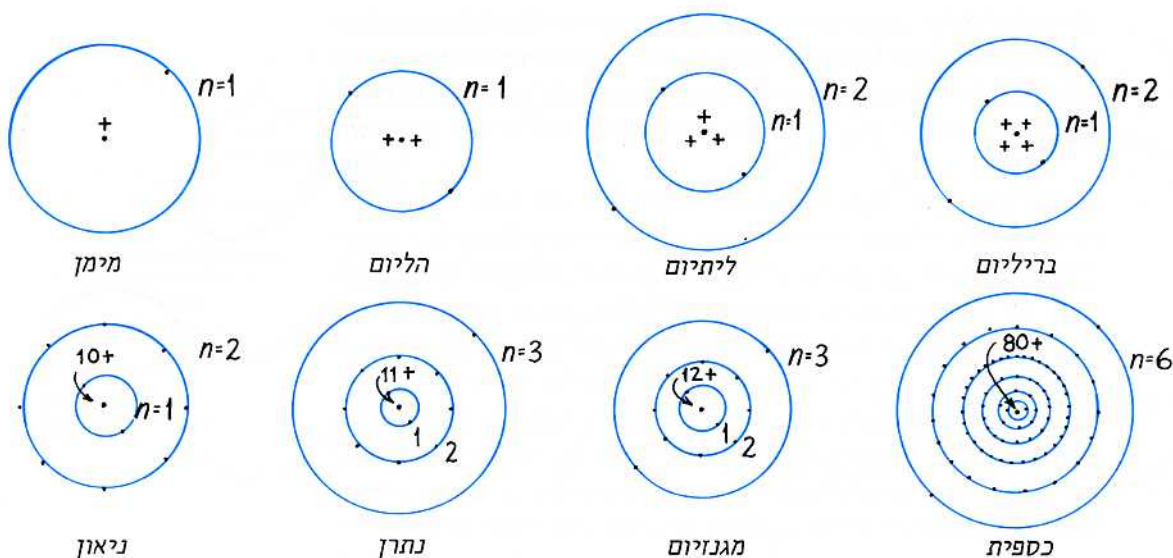
ככל שמטען הגרעין גדל ונוספים אלקטרונים במסלולים חיצוניים, קטן גודל המסלולים הפנימיים, מפני שמשיכת הגרעין מתחזקת. פירוש הדבר הוא שקוטר אטומי היסודות הכבדים אינו גדול בהרבה מקוטר היסודות הקלים. קוטר אטום האוראניום, למשל, גדול פי שלושה לערך מקוטר המימן, אף שמסתו גדולה פי 238. התרשימים הסכימטיים באיור 31.6 משורטטים כולם בקנה מידה אחד בקירוב.

גודלם היחסי של האטומים

שאלה איזה כוח יסודי מכתוב את גודל האטום?

תשובה: הכוח החשמלי.

* קיים מספר מרבי של אלקטרונים שיכולים להימצא בכל מסלול. כלל במכניקה הקוונטית קובע שמסלול מתמלא כאשר מספר האלקטרונים בו שווה $2n^2$, כאשר n שווה ל-1 במסלול הראשון, 2 במסלול השני, 3 בשלישי וכן הלאה. ב- $n=1$ יש 2 אלקטרונים, ב- $n=2$ יש $2(2^2)$ שהם 8 אלקטרונים, ב- $n=3$ המספר המרבי הוא $2(3^2)$ שהם 18 אלקטרונים, וכן הלאה. המספר n נקרא המספר הקוונטי הראשי.



איור 31.6

תיאור המסלולים עבור מספר אטומים קלים וכבדים בקנה מידה מקורב. שימו לב שהאטומים הכבדים יותר אינם גדולים במידה משמעותית מהאטומים הקלים.

מצאנו אם כן שלכל יסוד יש מערך של מסלולי אלקטרונים האופייני לו. רדיוסי המסלולים באטום הנתון, למשל, שווים בכל אטומי הנתון, אך הם שונים מרדיוסי המסלולים באטומים של יסודות אחרים. והיות שיש 92 אטומים הקיימים בטבע, הרי שיש 92 תבניות שונות של מסלולים - תבנית נפרדת לכל יסוד.

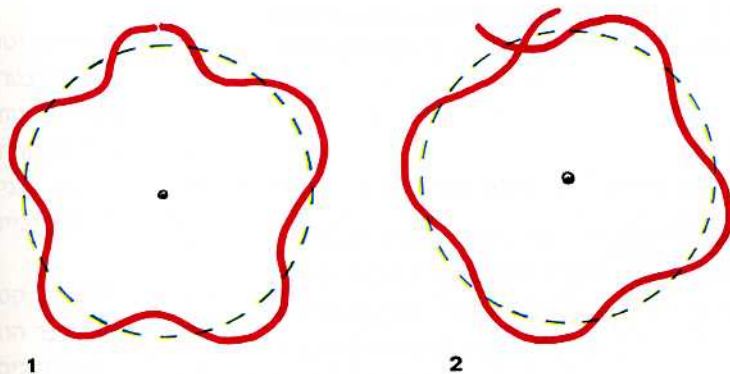
פוטונים נפלטים איפוא כאשר אלקטרונים עוברים מרמת אנרגיה גבוהה לנמוכה, ותדירות הפוטון שווה להפרש האנרגיה בין הרמות מחולק בקבוע פלאנק, h . אם הפרש האנרגיה בין הרמות שהאלקטרון עובר ביניהן הוא הפרש גדול, לפוטון הנפלט תהיה תדירות גבוהה - אולי בתחום העל-סגול. אם הפרש האנרגיה בין הרמות קטן, תדירות הפוטון הנפלט נמוכה יותר - מתקבל פרץ קצר של אור אדום. לכל יסוד רמות אנרגיה האופייניות לו; לפיכך, כתוצאה ממעברי האלקטרונים בין הרמות הללו נפלטים מכל אטום פוטונים בצבעים האופייניים לו. כל אחד מהיסודות פולט ספקטרום קווי בעל תבנית ייחודית.

הרעיון שלפיו האלקטרונים יכולים להימצא רק ברמות מסוימות הביך את החוקרים הראשונים ואף את בוהר עצמו. סיבת המבוכה היתה שהאלקטרון נחשב לחלקיק - גופיף זעיר הסובב סביב הגרעין ככוכב לכת הנע סביב השמש. ממש כשם שלווין יכול לנוע בכל מרחק מהשמש, נראה היה

**ההסבר לרמות
האנרגיה הבדידות:
גלי אלקטרונים**

שגם האלקטרון יוכל לנוע סביב הגרעין בכל רדיוס שהוא - התלוי במהירותו. המעבר בין המסלולים הללו היה מאפשר לאלקטרון לפלוט פוטונים בכל האנרגיות. אך הדבר אינו מתרחש. הוא אינו יכול להתרחש. נוכל להבין מדוע האלקטרון מצוי ברמות בדידות בלבד אם נחשוב עליו לא כעל חלקיק אלא כעל גל.

לואי דה ברויי טבע את המושג גלי חומר ב-1924. הוא הציע השערה שלפיה ניתן להתאים לכל חלקיק גל שאורך הגל שלו מתכונתי הפוך לתנע של החלקיק. **גלי דה ברויי** מתנהגים בדיוק כגלים אחרים; הם מוחזרים, נשברים, ובעקיפה יוצרים תבניות התאבכות. בהתבססו על התאבכות של גלי חומר, הראה דה ברויי שערכי התנע הזוויתי במסלולי בוהר הם תוצאה ישירה של קיום גלים עומדים של האלקטרון. מסלול בוהר מתקיים אם גל האלקטרון חוזר על עצמו. במצב זה הגלים בכל סיבוב מתאבכים התאבכות בונה, כשם שהגל העומד במיתר של כלי נגינה מתאבך התאבכות בונה עם החזרותיו. מנקודת מבט זו, האלקטרון מתנהג כאילו הוא מחולק כגל עומד המקיף את גרעין האטום, שאורך הגל שלו צריך להתאים במדויק להיקף המסלול (איור 31.7). היקף המסלול הפנימי ביותר שווה לאורך גל אחד של גל האלקטרון.

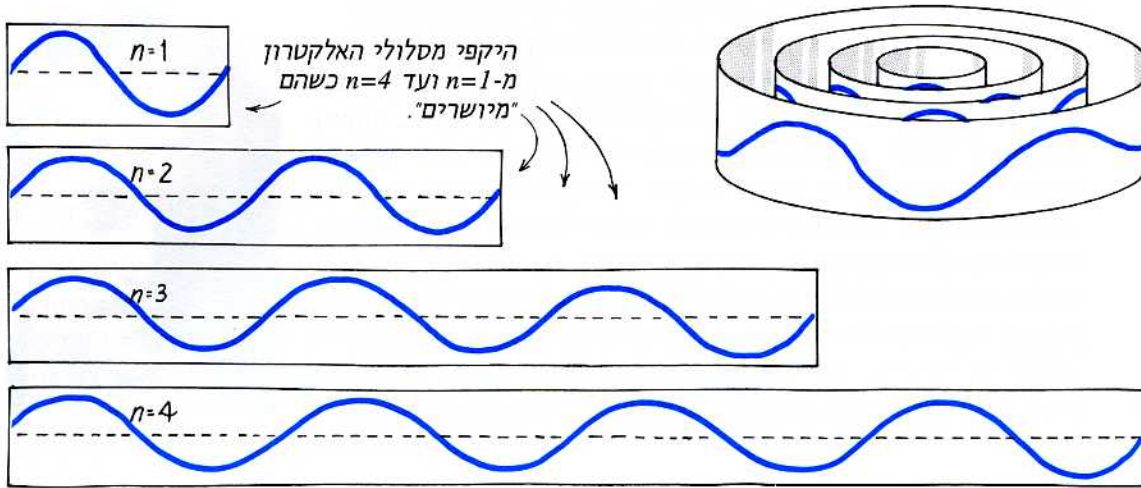


איור 31.7

- (1) אלקטרוני המסלול יוצרים גלים עומדים רק כאשר היקף המסלול שווה למספר שלם של כפולות של אורך הגל.
(2) כשהגל אינו נסגר ואינו חוזר על עצמו מתקבלת התאבכות הורסת.

למסלול השני היקף של שני אורכי גל של האלקטרון, לשלישי שלושה, וכך הלאה (איור 31.8). הדבר דומה למחרוזת העשויה מאטבי נייר. היקפה של המחרוזת שניצור, ללא תלות באורכה, ישווה לכפולה שלמה כלשהי של אורכו של אטב אחד*. מכיוון שלהיקפי המסלולים ערכים בדידים, הרי שגם לרדיוסיהם ולרמות האנרגיה שלהם ערכים בדידים.

* בכל מסלול יש לאלקטרון מהירות ייחודית, הקובעת את אורך הגל שלו. ככל שרדיוס המסלול גדל, מהירות האלקטרון פוחתת ואורך הגל גדל; ליתר דיוק, באנלוגיה שלנו, כדי להאריך את המחרוזת נצטרך להשתמש לא רק במספר רב יותר של אטבים, אלא גם באטבים גדולים יותר למחרוזת ארוכה יותר.



איור 31.8

למסלולי האלקטרונים באטום רדיוסים בדידים מפני שהיקפם הוא כפולה שלמה של אורכי הגל של האלקטרון. אורכי הגל שונים לאטומים שונים (ושונים גם למסלולים שונים של אותו אטום), ועקב כך לכל יסוד יש רדיוסי מסלולים, ואיתם רמות אנרגיה, האופייניים לו. האיור פשטני ביותר, שכן הגלים העומדים יוצרים קליפות כדוריות ואלפיסואידיות ולא שטוחות ומעגליות.

תמונה זו מבהירה מדוע האלקטרונים אינם מתקרבים לגרעין עוד ועוד וגורמים להתכווצות ממדי האטומים. אם מסלולו של כל אלקטרון מתואר כגל עומד, הרי שהיקפו של המסלול הקטן ביותר אינו קטן מאורך גל אחד - לא ניתן לקבל גל עומד מעגלי (או אליפסי) משבר של אורך גל.

באמצע שנות העשרים של המאה הנוכחית חלו שינויים רבים בפיסיקה. לא זו בלבד שהאור התגלה כבעל תכונות חלקיקיות, אלא אף התברר שלחלקיקים תכונות גליות. מהנחת גלי החומר של דה ברויי, פיתח הפיסיקאי האוסטרי-גרמני ארווין שרדינגר משוואה המתארת את השתנות גלי החומר בהשפעת כוחות חיצוניים. תפקידה של משוואת שרדינגר **במכניקת הקוונטים** דומה לזה של משוואת ניוטון (תאוצה=כוח/מסה) בפיסיקה הקלאסית*. בספר זה לא נדון בפרטי משוואת שרדינגר לגלי חומר ולכן דיוננו במשוואה זו יהיה קצר**.

מכניקת הקוונטים

* לחובבי המתמטיקה, משוואת שרדינגר היא

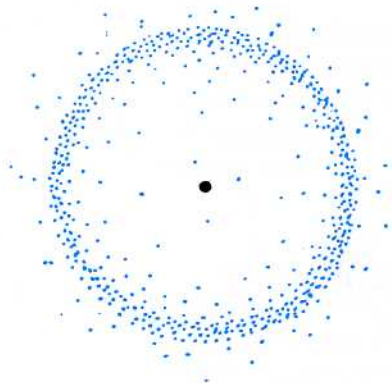
$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + V\right)\psi = i\hbar\frac{\partial\psi}{\partial t}$$

** דיוננו הקצר בנושא מורכב זה אינו יכול להוביל להבנה ממשית במכניקת הקוונטים. לכל היותר הוא יכול לשמש סקירה מתמצצת והקדמה אפשרית ללימוד הנושא בעתיד. הרשימה המומלצת לקריאה נוספת המובאת בסוף הפרק עשויה להועיל.



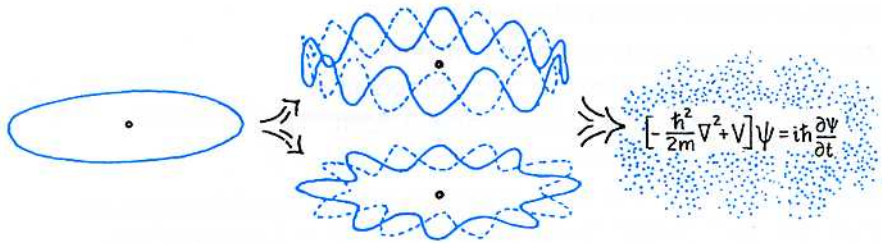
ארווין שרדינגר

למעשה כל המחקר בזמננו בפיסיקה מולקולרית, בתורת החומרים ובפיסיקה גרעינית מבוסס על משוואת הגל של שרדינגר. הדבר ה"מתנודד" הוא משרעת גל החומר שאינה חומרית - זהו גודל מתמטי הנקרא פונקציית הגל ומיוצג בסימן ψ (האות היוונית פסי). פונקציית הגל הנובעת ממשוואת שרדינגר מציגה את מצביה האפשריים של מערכת. למשל, מקומו של האלקטרון באטום המימן יכול להשתרע ממרכז הגרעין וכמעט עד למרחק אינסופי. מקומו האפשרי ומקומו המסתבר ביותר ברגע נתון אינם שווים. פיסיקאי יכול לחשב את מקומו המסתבר של האלקטרון באמצעות מכפלת פונקציית הגל בעצמה (ψ^2). הגודל המתמטי המתקבל נקרא פונקציית צפיפות ההסתברות, והוא מתאר בכל רגע נתון את ההסתברות ליחידת נפח למציאת האלקטרון במקום מסוים לכל אחת מהאפשרויות המיוצגות על ידי ψ . ה"מסלול", או האורביטל - בלשונם של הכימאים, הוא למעשה הצגה גרפית תלת-ממדית של ψ^2 .



איור 31.9
התפלגות ההסתברות של
ענן אלקטרוני.

באופן ניסויי, ההסתברות (הסיכוי) למצוא את האלקטרון באזור מסוים בכל רגע היא סופית - 0 פירושו לעולם לא, 1 פירושו תמיד. ערך ההסתברות נע בין הגבולות 0 ו-1. לדוגמה: אם ההסתברות למצוא את האלקטרון עד רדיוס מסוים היא 0.4, פירוש הדבר הוא שיש סיכוי של 40 אחוז למצוא אותו בתחום זה. לפיכך, משוואת שרדינגר אינה אומרת לפיסיקאי היכן נמצא האלקטרון באטום בכל רגע, אלא רק מה הסבירות למצוא אותו שם, או - אם יערכו מספר רב של מדידות - באיזה חלק מהן האלקטרון יימצא בכל אחד מהאזורים. אם למשל נחזור ונמדוד את מקום האלקטרון הנמצא ברמת האנרגיה הראשונה של אטום המימן ונסמן כל תוצאה כנקודה, תתקבל תבנית שתדמה למעין ענן אלקטרוני (איור 31.9). בזמנים שונים ניתן להבחין באלקטרון בודד בכל מקום בענן ההסתברות; יש אפילו סיכוי קטן, אך סופי, למצואו רגעית בתוך הגרעין. ואולם, רוב הזמן נגלה את האלקטרון במרחק מהגרעין שהוא קרוב לערך הממוצע השווה לרדיוס המסלול שתיאר נילס בוהר.



איור 31.10

ממודל האטום של בוהר
למודל המשופר של גלי
דה ברוי, ולמודל
המתמטי של שרדינגר.

רוב הפיסיקאים, אף כי לא כולם, רואים במכניקת הקוונטים את התורה היסודית של הטבע. מעניין לציין שאיינשטיין, אחד ממניחי היסודות לפיסיקה הקוונטית, לא קיבל אותה מעולם כתורה בסיסית; הוא ראה באופיין ההסתברותי של התופעות הקוונטיות תוצאה של פיסיקה בסיסית יותר. הוא קבע: "מכניקת הקוונטים היא בוודאי מרשימה. אך קול פנימי לוחש לי שהיא עדיין אינה הדבר האמיתי. התיאוריה אומרת רבות, אך היא אינה מקרבת אותנו לסודו של הבורא."

שאלות

1. נתבונן בתבנית עקיפה הנוצרת על ידי 100 פוטונים העוברים דרך סדק צר. אם גילינו 5 פוטונים באזור מסוים של תבנית העקיפה, מהי ההסתברות (בין 0 ל-1) לגלות באזור זה פוטון אחד?
2. נפתח סדק צר זה נוסף ובתבנית העקיפה נקבל פסים בהירים ופסים אפלים. נניח שבאזור שבו פגעו במקרה הקודם 5 פוטונים לא פוגע עתה אף פוטון; ההסתברות לגלות שם פוטון היא כעת 0. תורת הגלים קובעת שהגלים שפגעו קודם מבוטלים על ידי הגלים שעברו בסדק השני – ששיאים ושקעים התחברו ל-0. אך אנו מודדים פוטונים שפוגעים או אינם פוגעים. כיצד נסביר זאת מנקודת המבט של המכניקה הקוונטית?

כדי שתיאוריה חדשה תהיה תקפה, חייבות לנבוע ממנה גם התוצאות המוכחות של התיאוריה הישנה. זהו **עקרון ההתאמה**, שאותו ניסח לראשונה בוהר. התורה החדשה והתורה הישנה חייבות להתאים; כלומר, הן חייבות לחפוף זו את זו בתחומים שבהם תוצאות התורה הישנה הוכחו מעל לכל ספק*.

עקרון ההתאמה

1. ההסתברות לגלות פוטון במקום זה היא 0.05. במכניקת הקוונטים נאמר ש- $|\psi|^2 = 0.05$. שימו לב שאנו חוזים את ההסתברות להתרחשות מאורע ולא את המאורע עצמו.
2. בתנועתו מהסדקים למסך מתנהג האור כגל, ובפגעו במסך – כחלקיק. במכניקת הקוונטים אנו אומרים שפונקציית הגל ψ , שיכולה להיות חיובית או שלילית, מתקדמת מהסדקים למסך וקובעת היכן יפגע האור במסך כחלקיק. ריבוע הסכום של פונקציות הגל ψ_1 ו- ψ_2 משני הסדקים יתאפס באזור שבו לא יפגעו פוטונים. כלומר: $|\psi_1 + \psi_2|^2 = 0$.

תשובות:

* כלל זה מועיל לא רק בתחום מדעי הטבע אלא לכל תיאוריה טובה - גם בתחומים הרוחניים ממדע כקמפל, דת ומוסר.

כאשר מיישמים את השיטות של מכניקת הקוונטים למערכות גדולות, מקרוסקופיות, במקום למערכות אטומיות, התוצאות המתקבלות זהות למעשה לתוצאות המכניקה הקלאסית. בניתוח מערכת גדולה, כמו זו של תנועת כוכבי הלכת, שעבורה הפיסיקה הקלאסית פועלת בהצלחה רבה, ההבדל בין תוצאות משוואת שרדינגר לבין התוצאות הקלאסיות יהיה מזערי. שתי התורות חופפות זו את זו כשאורך גל דה ברויי קטן בהשוואה לממדי המערכת. כשממדי המערכת גדולים בהשוואה לממדים האטומיים, הפיסיקה הקלאסית פחות מסובכת ושימושית יותר מהפיסיקה הקוונטית, אך ברמה האטומית, הפיסיקה הקוונטית היא השלטת.

כאשר מיישמים את הפיסיקה הקוונטית למסלולים גדולים, היא מתקשרת, איפוא, באופן רציף לפיסיקה הקלאסית של ניוטון. בפרקים הבאים נדון במערכות גדולות מאוד ונגלה שהפיסיקה הניוטונית מתקשרת לתורת היחסות בתחום המסות הגדולות או המהירויות הגדולות.

תקציר מונחים

עקרון הצירוף של ריץ התיאוריה הקובעת שניתן לקבל את תדירותו של כל קו בספקטרום של כל אטום כסכום או כהפרש תדירויות של שני קווים אחרים באותו ספקטרום.

גלי החומר של דה ברויי התכונות הגליות המיוחדות לכל חלקיקי החומר. אורך הגל של חלקיק קשור לתנע ולקבוע פלאנק, h , בקשר:

$$\frac{h}{\text{התנע}} = \text{אורך הגל}$$

מכניקת הקוונטים התחום בפיסיקת הקוונטים העוסק בקביעת משרעות פונקציית ההסתברות של גלי החומר, ומבוסס בעיקר על מחקריהם של וורנר הייזנברג (1925) וארווין שרדינגר (1926).

משוואת הגל של שרדינגר המשוואה הבסיסית של מכניקת הקוונטים, המתארת את האופי הגלי של חלקיקי החומר באמצעות משרעת של גל ההסתברות וממלאת תפקיד דומה בחשיבותו לחוקי ניוטון במכניקה הקלאסית.

עקרון ההתאמה הכלל הקובע שתיאוריה חדשה תקפה בתנאי שתוצאותיה מתאימות לתוצאות של תיאוריה קודמת בתחום שבו הן חופפות.

לקריאה נוספת

איינשטיין א', ואיינפלד, ל'. התפתחות הפיזיקה החדשה - ממושגים ראשונים ועד יחסיות וקוונטים. ספריית פועלים, 1976.

פייגלס, ה'. הצופן הקוסמי - פיסיקת הקוונטים כשפת הטבע. עם עובד, 1991. ספר נאה ומומלץ ביותר לקריאה כללית.

אונג, י'. פיסיקת הקוונטים. ספריית אוניברסיטה משודרת-משרד הביטחון, 1993.

סגרה, א'. מקריני X ועד קוורקים. כתר, 1986.

נאמן, י', וקירש, י'. צידי החלקיקים. מסדה, 1983.

שאלות חזרה

1. מה בין פיסיקה אטומית לפיסיקה גרעינית?

גילוי גרעין האטום

2. מדוע גרעין האטום דוחה חלקיקי אלפא?

3. מדוע רוב חלקיקי האלפא הנורים דרך עלה זהב אינם סוטים ממסלולם?

האם נכון לומר שאלקטרון, ללא תלות במהותו, מתנהג כאילו הוא גל או חלקיק?

4. מדוע קומץ מחלקיקי האלפא הנורים דרך עלה זהב נרתעים לאחור?

הספקטרום האטומי: המפתח למבנה האטום

5. מה גילה י"י בלמר על הספקטרום האטומי?

6. מה גילה רידברג על הספקטרום האטומי?

מודל האטום של בוהר

7. מהי ההנחה שהניח בוהר בנוגע לקשר בין מסלולי האלקטרונים לבין פליטת האור?

8. האם לפי מודל בוהר יכול אלקטרון לפלוט יותר מפוטון אחד בעברו מרמה מעוררת לרמת היסוד?

9. מהו הקשר בין הפרשי האנרגיה בין הרמות של האטום לבין האור הנפלט?

10. האומנם קבע בוהר שהאטומים הם כמערכות שמש זעירות? האומנם כך הוא הדבר?

גודלם היחסי של האטומים

11. מדוע אטום ההליום קטן מאטום המימן?

12. מדוע האטומים הכבדים אינם גדולים במידה משמעותית מאטום המימן?

ההסבר לרמות אנרגיה בדידות: גלי אלקטרונים

13. כיצד פותרת ההתייחסות לאלקטרון כאל גל במקום כאל חלקיק את חידת המסלולים הבדידים?

14. כמה אורכי גל יש בגל האלקטרון הנמצא ברמה הראשונה? ברמה השנייה? ברמה ה- n -ית?

15. כיצד ניתן להסביר את העובדה שהאלקטרונים אינם נעים פנימה במסלולים ספירליים בכיוון הגרעין המושך אותם?

מכניקת הקוונטים

16. מה מייצגת פונקציית הגל?

17. מה בין פונקציית הגל לפונקציית צפיפות ההסתברות?

18. מה בין ענן ההסתברות של האלקטרון באטום המימן לרדיוס המסלול שתיאר נילס בוהר?

עקרון ההתאמה

19. מדוע עקרון ההתאמה משמש אבן בוחן לטכונותו של רעיון?

20. האם נכון לומר שהאלקטרון הוא גל או חלקיק? או

תרגילים

1. כיצד ניתן להסביר בעזרת מודל האטום של רתרפורד את הפיזור לאחור של חלקיקי האלפא שכוונו לעלה הזהב?

2. מדוע מתייחסים לעיתים לקווים הספקטראליים כאל "טביעות אצבע אטומיות"?

3. מסת האוראניום גדולה פי 238 ממסת המימן. מדוע אין קוטר אטום האוראניום גדול פי 238 מקוטר אטום המימן?

4. אילו היו לאטומים של אותו יסוד גדלים שונים, האם היתה לכך השפעה על המבנה הגבישי של החומר? כיצד?

5. כיצד מסביר המודל הגלי של האלקטרונים הסובבים את הגרעין את קיומן של רמות אנרגיה בדידות במקום ערכי אנרגיה כלשהם?

6. כיצד ייתכן כי אף שלאטום המימן יש אלקטרון בודד, כה רב מספר הקווים בספקטרום שלו?

7. הניחו שלאטום מסוים יש ארבע רמות אנרגיה שונות. בהנחה שכל המעברים בין רמות אלו מותרים, כמה קווי ספקטרום יהיו לאטום זה? אילו מעברים מתאימים לאור בעל האנרגיה הגבוהה ביותר? הנמוכה ביותר?

8. אלקטרון יורד מהרמה הרביעית לשלישית וממנה לרמת היסוד. שני פוטונים נפלטו. מה הקשר בין סכום האנרגיות של שני הפוטונים לבין האנרגיה של הפוטון היחיד שהיה נפלט אילו ירד האלקטרון מהרמה הרביעית ישירות לרמת היסוד?

9. מסת אטום ההליום גדולה ממסת אטום מימן. מדוע אטום ההליום קטן מאטום המימן?

10. מדוע לא קיים מסלול יציב של אלקטרון שהיקפו מתאים ל-2.5 אורכי גל דה ברויי?

11. מה ההבדל בין אורך הגל לבין המשרעת של גל חומר?

12. אילו קבוע פלאנק, h , היה גדול יותר, האם האטומים היו גדולים יותר? נמקו את תשובתכם.

13. אם עולם האטום הוא כה בלתי ודאי וכפוף לחוקי ההסתברות, כיצד ניתן למדוד במדויק גדלים כעוצמת אור, זרם חשמלי וטמפרטורה?

14. מדוע אנו אומרים שלאור יש תכונות חלקיקיות? מדוע אנו אומרים שלאור יש תכונות גליות?
15. מדוע אנו אומרים שלאלקטרון יש תכונות חלקיקיות? מדוע אנו אומרים שלאלקטרון יש תכונות גליות? היש בכך סתירה? הסבירו.
16. דונו בקביעה, "אם האלקטרון אינו חלקיק, אזי הוא חייב להיות גל." (האם תכופות אתם שומעים קביעה כזו?)
17. מהו העיקרון העומד בבסיס העובדה שעבור מערכות בעלות מספר גדול של קוונטים תוצאות הפיסיקה
- הקוונטית שוות לתוצאות הפיסיקה הקלאסית?
18. האם עקרון ההתאמה מתאים גם לעולם היומיומי המקרוסקופי?
19. הסבירו כיצד מקיימים החוק הראשון והשני של ניוטון את עקרון ההתאמה.
20. ריצ'רד פיינמן קובע בספרו על חוקי הפיסיקה: "פילוסוף טען פעם, 'הכרחי לעצם קיומו של מדע שאותם תנאים יובילו לאותן תוצאות.' ובכן, הם לא!" מי מהם דיבר על הפיסיקה הקלאסית ומי על הפיסיקה הקוונטית?