

קוונטים של אור



הפיסיקה הקלאסית שלמדנו עד עתה עסקה בשני סוגים של תופעות: חלקיקים וגלים. בהתאם לניסיונו היומיומי, "חלקיקים" הם עצמים זעירים כמו קליעים. יש להם מסה והם מקיימים את חוקי ניוטון - כשלא פועל עליהם כוח הם נעים במרחב בקווים ישרים. כמו כן, בהתאם לניסיונו היומיומי, "גלים", בדומה לגלים באוקיינוס, הם תופעה "המשתרעת" במרחב. כאשר גל עובר דרך פתח או מסביב למחסום, חלקים שונים שלו מתאבכים ונוצרת עקיפה. לכן, קל להבחין בין חלקיקים לגלים. למעשה, הם בעלי תכונות סותרות. עם זאת, שאלת מהות האור נותרה בגדר תעלומה במשך מאות שנים. אחת התורות הקדומות ביותר הדנה בטיבו של האור היא תורת אפלטון, שגרס כי האור מורכב מחלקיקים הנפלטים מן העין. גם איקלידס תמך בגישה זו. מעט לאחר מכן האמינו הפיתגוריאנים שמקור האור בעצמים מאירים וכי מהם הוא מגיע לעינינו כחלקיקים עדינים ביותר, ואילו אַמפֶדוקלס סבר שהאור מורכב מגלים מהירים ביותר מסוג כלשהו. ב-1704 תיאר ניוטון את האור כזרם של חלקיקים או גופיפים. הוא המשיך להחזיק בדעה זו למרות הניסוי שערך מאוחר יותר באור שהוחזר מלוחות זכוכית, ובו הבחין באזורי אור וחושך (טבעות ניוטון) וזיהה שלחלקיקי האור יש מעין אופי גלי. כריסטיאן הויגנס, בן דורו של ניוטון, תמך מאוד בתורה גלית של האור ופיתח אותה.

על רקע התמונה ההיסטורית שתיארנו ערך תומס יאנג, בשנת 1801, את "ניסוי שני הסדקים", ונראה היה כי זו ההוכחה הסופית לכך שהאור הוא תופעה גלית. חיזוק נוסף לגישה זו ניתן ב-1862 בעקבות תגליתו של מקסוול, שהראה שהאור הוא אנרגיה הנישאת באמצעות שדות חשמליים ומגנטיים משתנים. ההשקפה בדבר מהותו הגלית של האור זכתה לאישוש ניסויי נוסף 25 שנה לאחר מכן בידי הרץ. אולם ב-1905 פרסם אלברט איינשטיין מאמר שזיכה אותו בפרס נובל, ובו קרא תיגר על התורה הגלית של האור; במאמרו הראה איינשטיין שתגובת הגומלין של האור עם החומר אינה מתבצעת בגלים רציפים כפי שניבא מקסוול, אלא בצרורות זעירים של אנרגיה, שאינשטיין כינה פוטונים. התנהגות מוזרה זו של האור רמזה לראשונה על החוקים הקוונטיים השולטים בעולם האטומי. בפרק זה נחדור לעולמם של הדברים הזעירים מאוד ונדון בכמה מן ההיבטים המוזרים והמתמיהים של המציאות הקוונטית.

הולדת תורת הקוונטים

בסוף המאה ה-19 הגיעה הטכנולוגיה לרמה שאפשרה למדענים לתכנן ניסויים שבהם ניתן לבחון את התנהגותם של חלקיקים קטנים מאוד. עם גילוי האלקטרון ב-1897 ועריכת המחקרים בתופעת הרדיואקטיביות באותה עת, החלו החוקרים לבחון את המבנה האטומי של החומר. ב-1900 פרסם הפיסיקאי התיאורטיקן הגרמני מקס פלאנק את תגליתו העיונית, שלפיה האנרגיה של אלקטרונים המתנודדים במקורות אור לוחטים נפלטת בצרורות בדידים של אנרגיה, שהוא כינה **קוונטים** (מילה שפירושה "מנות"). תגליתו של פלאנק החלה מהפכה רעיונית ששינתה לחלוטין את תפיסת העולם הפיסיקלי. אנו נראה שהחוקים המתאימים לעולם המקרוסקופי היומיומי, חוקי ניוטון, הפועלים היטב עבור עצמים גדולים כמו כדורי-סל וכוכבי לכת, פשוט אינם מתאימים לעולם המיקרוסקופי של האטום. חקר התנועה בעולם המקרו נקרא מכניקה; חקר תנועת הקוונטים של עולם המיקרו נקרא **מכניקת הקוונטים**. וביתר הרחבה, כל החוקים שפותחו מ-1900 עד לסוף שנות ה-20 המתארים את מכלול התופעות הקוונטיות בעולם המיקרו ידועים בשם תורת הקוונטים.

הרעיון שגדלים פיסיקליים מופיעים בצרורות בדידים, קוונטים, לבטח אינו חדש בפיסיקה. החומר עצמו בדיד; לדוגמה, מסתו של מטיל זהב שווה לכפולה שלמה מסוימת של מסתו של אטום זהב בודד. גם החשמל מקוונטט, מפני שהמטען החשמלי הוא כפולה שלמה כלשהי של מטענו של אלקטרון יחיד.

קוונטים וקבוע פלאנק

הפיסיקה הקוונטית קובעת כי בעולמו הזעיר של האטום, כמות האנרגיה במערכת כלשהי היא "מקוונטטת" - לא כל ערכי האנרגיה אפשריים. טענה זו דומה לטענה שהטמפרטורה של מדורה יכולה להיות רק 450° או 451° אך בשום פנים ואופן אינה יכולה להיות 450.5° . הייתם מאמינים? אינכם צריכים להאמין, כי עד כמה שהתרמומטרים המקרוסקופיים שלנו מסוגלים למדוד, מדורה יכולה לבעור בכל טמפרטורה, כל עוד היא גבוהה מהטמפרטורה הנדרשת לקיום האש. אך למרבה העניין, האנרגיה של המדורה מורכבת ממספר

גדול ומגוון של מנות אנרגיה בסיסיות. דוגמה פשוטה יותר היא האנרגיה באלומה של אור לייזר, שהיא כפולה שלמה של ערך אנרגיה יחיד, מזערי - קוונט אחד של אנרגיה. הקוונטים של האור או של קרינה אלקטרומגנטית אחרת הם הפוטונים.

כזכור, בפרק הקודם ציינו שתדירותו של פוטון מתכונתית לאנרגיה שלו: $E \sim f$. כאשר מחלקים את אנרגיית הפוטון בתדירותו, תוצאת החילוק היא תמיד מספר אחד, שהוא קבוע הפרופורציה הנקרא **קבוע פלאנק**, h . בהמשך נראה שקבוע פלאנק הוא קבוע יסודי של הטבע המשמש לקביעת הגבול תחתון לגודלם של דברים. כקבוע יסודי של הטבע, h הוא בעל אותה דרגת חשיבות כמו מהירות האור, והוא מופיע שוב ושוב בפיסיקה הקוונטית. אם נציב את הקבוע בקשר הפרופורציה הנ"ל ונהפוך את הקשר לשוויון נקבל:

$$E = hf$$

משוואה זו מבטאת את מנת האנרגיה הקטנה ביותר של אור שתדירותו f . קרינת האור אינה נפלטת בזרם רציף אלא בזרם של פוטונים, הפועמים בתדירות f ולכל אחד אנרגיה hf .



מקס פלאנק

שאלה

מהי האנרגיה הכוללת של אלומה מונוכרומאטית המורכבת מ- n פוטונים שתדירותם f ?

הפיסיקה החדשה מספרת לנו שהעולם אינו המקום החלק והרציף שהורגלנו אליו, כי אם מקום "מחוספס", הבנוי גרגרים-גרגרים של צורות בדידים. עולם "השכל הישר" המתואר באמצעות הפיסיקה הקלאסית נראה חלק ורציף מפני שגודלם של הגרגרים זעום בהשוואה לגודלם של העצמים בעולם המוכר. קבוע פלאנק, בהיותו מבוטא ביחידות מוכרות, הוא גודל זעיר להדהים. לדוגמה, תערובת השחור, הלבן והאפור הרציפה בתמונתו של פלאנק שבעמוד זה ובתמונות אחרות לא תיראה כך כלל ועיקר אם תתבוננו באותן תמונות מבעד לזכוכית מגדלת. אז תגלו שהתמונה מורכבת מנקודות זעירות רבות. התמונה "מקוונטטת", אך הדבר אינו ניכר ממרחק. בהשתמשה בכלים מיוחדים, הפיסיקה הקוונטית מספקת לנו תיאור של העולם הגרעיני של האטומים והאנרגיה, שבהיטשטשו נגלה לנו בצורתו של העולם המוכר לנו. הפיסיקאים מיאנו לאמץ את מושג הקוונט, המושג המהפכני של פלאנק. בטרם יילקח בכובד ראש, צריך היה לאמתו באמצעים שאינם תלויים בפליטת אור ממקור לוהט. והנה, בתוך פחות מחמש שנים סיפק אלברט איינשטיין את ההוכחה המבוקשת. במאמר שהזכרנו, שזיכה אותו בפרס נובל, הרחיב איינשטיין את רעיונותיו של פלאנק כדי להסביר את התופעה הפוטואלקטרית.

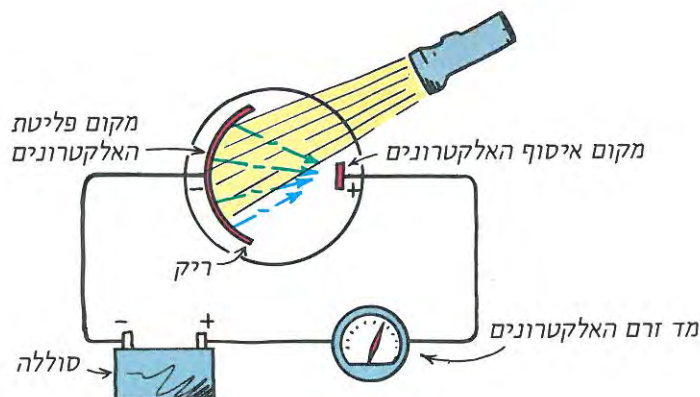
תשובה: האנרגיה של אלומה בת n קוונטים של אור היא $E = nhf$.

* ערכו המספרי של קבוע פלאנק, h , הוא 6.6×10^{-34} ג'ול.ש"י.

התוצא הפוטואלקטרי

בשלהי המאה ה-19 הבחינו מספר חוקרים שאור מסוגל לשחרר אלקטרונים ממשטחים מתכתיים שונים. זהו **התוצא הפוטואלקטרי**, המשמש כיום בהתקנים של "עין אלקטרונית", במד-האור של המצלמה ובפס הקול של סרטי קולנוע.

באיור 30.1 מתואר מערך ניסויי לצפייה בתוצא הפוטואלקטרי. אור המוקרן על משטח מתכתי הרגיש לאור וטעון שלילית משחרר ממנו אלקטרונים. האלקטרונים נמשכים ללוח החיובי ויוצרים זרם שאפשר למדוד. אם נטען לוח זה במטען שלילי שדי בו לגרום לדחיית האלקטרונים, הזרם ייפסק. במצב זה, באמצעות מדידה פשוטה של הפרש הפוטנציאלים בין הלוחות, ניתן לחשב את האנרגיות של האלקטרונים הנפלטים.



איור 30.1

מערכת ניסויית למדידת
התוצא הפוטואלקטרי.

התוצא הפוטואלקטרי לא הפתיע במיוחד את החוקרים הראשונים. ניתן היה להסביר את פליטת האלקטרונים באמצעות הפיסיקה הקלאסית, שלפיה גלי האור הפוגעים מגדילים עוד ועוד את משרעת התנודות של האלקטרון במתכת, עד שלבסוף הוא ניתק מהמשטח המתכתי - בדיוק כשם שטיפות מים ניתקות מפני השטח של מים רותחים. לפי הסבר זה יש להאיר את פני השטח במשך זמן רב עד להינתקות האלקטרונים ממנו. אולם למרבה הפלא התגלה שגם מקור אור חלש גורם לפליטת אלקטרונים מיד עם הדלקת האור - אם כי לא באותה כמות כמקור חזק. בחינה דקדקנית של התוצא

תשובה:

המונח קוונט, שפירושו המילולי הוא "מנה" או "כמות", מתייחס ליחידה הבסיסית הקטנה ביותר של גודל מסוים. אנרגיית קרינה למשל מורכבת מקוונטים רבים, שכל אחד מהם נקרא פוטון. לפיכך, ככל שמספרם של הפוטונים באלומת אור חד-צבעי הוא גדול יותר, רבה יותר האנרגיה של האלומה.

הפוטואלקטרי הובילה למספר הבחנות שהיו מנוגדות בתכלית לתמונת הגלים הקלאסית:

1. הפרש הזמן בין הדלקת האור לפליטת האלקטרון הראשון אינו מושפע מעוצמת האור או מתדירותו.
2. קל להבחין בתופעה באור סגול או על-סגול, אך לא באור אדום.
3. קצב פליטת האלקטרונים נמצא ביחס ישר לעוצמת האור.
4. האנרגיה המרבית של האלקטרונים הנפלטים אינה תלויה בעוצמת האור, אך היו רמזים לכך שהיא תלויה בתדירות האור.



איור 30.2

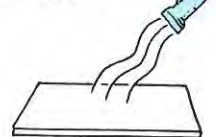
תלות התוצא הפוטואלקטרי בעוצמת האור.

הקושי העיקרי היה להבין במונחי תורת הגלים את העדר הפרש הזמן. בהתאם לתורת הגלים, באור עמום אלקטרון היה אמור לצבור כמות מספקת של אנרגיה - כזו המאפשרת את פליטתו - רק לאחר זמן מה, ואילו באור בהיר אמורה היתה פליטת האלקטרון להיות מיידית. אולם לא כך היה. לא נדיר היה לגלות אלקטרונים שנפלטו מיד גם באור החלש ביותר. העובדה שעוצמת האור אינה משפיעה כלל על האנרגיות של האלקטרונים הנפלטים היתה מדהימה. השדות החשמליים החזקים יותר של האור הבהיר יותר לא גרמו לאלקטרונים להיפלט במהירויות גבוהות יותר. בעוצמת אור גדולה יותר נפלטו אלקטרונים רבים יותר, אך מהירותם לא גדלה. לעומת זאת, אלוהמה חלשה של אור על-סגול גרמה לפליטת מספר קטן יותר של אלקטרונים, אך מהירותם של אלה היתה גבוהה יותר. הדבר היה מפתיע ביותר.

את התשובה לכל הקשיים הללו הציג איינשטיין ב-1905, השנה שבה הסביר את תנועת בראון ופרסם את תורת היחסות המצומצמת שלו. המפתח להסבר היה תורת הקרינה הקוונטית של פלאנק. פלאנק הניח שפליטת האור מתרחשת בקוונטים בשל מגבלותיהם של האלקטרונים המתנוודדים היוצרים את האור, וסבר כי האור עצמו הוא דפקים (פולסים) בדידים של הגלים האלקטרומגנטיים שתיאר מקסוול. איינשטיין, לעומת זאת, ייחס את התכונות הקוונטיות לאור עצמו וראה בקרינה "ברד" של חלקיקים. כדי להדגיש את נקודת המבט החלקיקית, בבואנו לדון באופיו החלקיקי של האור אנו מדברים על פוטונים (בדומה לאלקטרונים, פרוטונים וניטרונים). כל אלקטרון הנפלט מהמתכת בולע לחלוטין פוטון אחד. הבליעה היא תהליך של הכול או לא-כלום והיא מיידית, לכן לא חל עיכוב עד לצבירה מספקת של "אנרגיית הגל".

לגל אור חזית גל רחבה והאנרגיה שלו מחולקת על פניה. כדי שגל אור יגרום לפליטת אלקטרון אחד, כל האנרגיה שלו חייבת להתרכז באופן כלשהו באלקטרון זה. התרחשות כזו אינה סבירה בדיוק כשם שאין זה סביר שגל מן האוקיינוס הפוגע בחוף יעף צדף יחיד הרחק אל תוך היבשה בתוך שהוא מעניק לו את אנרגיית הגל במלואה. לכן, במקום לראות את האור כפוגע במשטח ברצף של גלים, מציע התוצא הפוטואלקטרי לתפוס אותו כפוגע במשטח או בגלאי כלשהו כסדרה של גופיפים או פוטונים. האנרגיה של כל פוטון מתכונתית לתדירות ואילו מספר הפוטונים קשור לעוצמת האור.

אור בעל תדירות נמוכה אינו גורם לפליטת אלקטרונים



אור בעל תדירות גבוהה גורם לפליטת אלקטרונים



איור 30.3

תלות התוצא הפוטואלקטרי בתדירות האור.

11 שנה לאחר מכן אימת הפיסיקאי האמריקאי רוברט מיליקן את הסברו של איינשטיין לתוצא הפוטואלקטרי באורח ניסויי. כל היבט של הסברו של איינשטיין אומת במלואו.

התוצא הפוטואלקטרי מוכיח בוודאות כי לאור תכונות חלקיקיות. איננו יכולים להבין את התוצא הפוטואלקטרי על בסיס תורת הגלים. לעומת זאת, ראינו שתופעת ההתאבכות מוכיחה בוודאות שלאור תכונות גליות. לא ניתן להסביר את ההתאבכות על יסוד ההנחה שהאור הוא חלקיקים. הדבר נראה כסתירה, ואכן זו סתירה במסגרת התורה הקלאסית. אך מנקודת המבט של הפיסיקה הקוונטית לאור יש תכונות של גל ושל חלקיק כאחד. הניסוי המסוים שעורכים הוא שקובע אם האור "מתנהג כגל" או "מתנהג כחלקיק". לעיתים נוח לחשוב על האור כעל חבילת גלים. אולי "גלקיק"? הפיסיקה הקוונטית מחייבת אותנו לצורת חשיבה חדשה בתכלית.

שאלות

1. האם אור חזק ישחרר ממשטח הרגיש לאור יותר אלקטרונים מאור חלש בעל אותה תדירות?
2. האם אור שתדירותו גבוהה ישחרר יותר אלקטרונים משישחרר אור שתדירותו נמוכה?

השניות חלקיק-גל

אופיו הגלי וחלקיקי כאחד של האור ניכר באופן יצירתן של דמויות אופטיות. את יצירת הדמות במצלמה אנו מבינים במונחים של גלי אור, המתפשטים מכל נקודה ונקודה בעצם, נשברים בעברם דרך מערכת העדשות ומתמקדים על סרט הצילום. ניתן לחשב את מסלול האור מהעצם דרך מערכת העדשות אל מישור המוקד בעזרת שיטות שפותחו על יסוד התורה הגלית של האור.

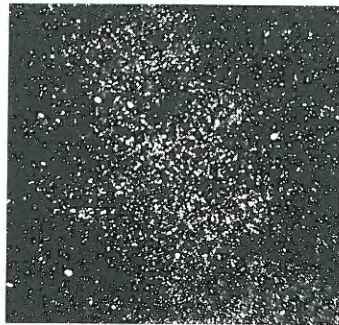
אך עתה נבחן ביסודיות את האופן שבו נוצרת התמונה על סרט הצילום. סרט הצילום מורכב מתחליב המכיל גרגירים גבישיים של תרכובת כסף ויסוד מסדרת ההלוגנים (למשל ברום). כל גרגיר כזה מכיל כ- 10^{10} אטומי כסף. כל פוטון שנבלע מוסר את האנרגיה שלו hf לגרגיר אחד בתחליב. האנרגיה משפעת את הגבישים הסמוכים בגרגיר כולו ומשמשת בפיתוח להשלמת התהליך הפוטו-כימי. פוטונים רבים המפעילים גרגירים רבים יוצרים את החשיפה הרגילה שבצילום. אך כאשר מצלמים באור חלש ביותר מגלים שהתמונה נוצרת באמצעות פוטונים בודדים המגיעים אחד-אחד ונראים מפוזרים אקראית. מצב מפליא זה מתואר באיור 30.4, המראה כיצד החשיפה מתפתחת עם פגיעת הפוטונים בזה אחר זה.

תשובות:

1. כן. מספר האלקטרונים הנפלטים תלוי במספר הפוטונים הפוגעים.
2. לא בהכרח. האנרגיה של האלקטרונים הנפלטים תלויה בתדירות הפוטונים המאירים ולא במספרם. כך למשל, מקור בהיר של אור כחול עשוי לשחרר יותר אלקטרונים מאשר מקור עמום של אור סגול, אך לא אלקטרונים בעלי אנרגיה גבוהה יותר.



ג



ב



א



י



ה



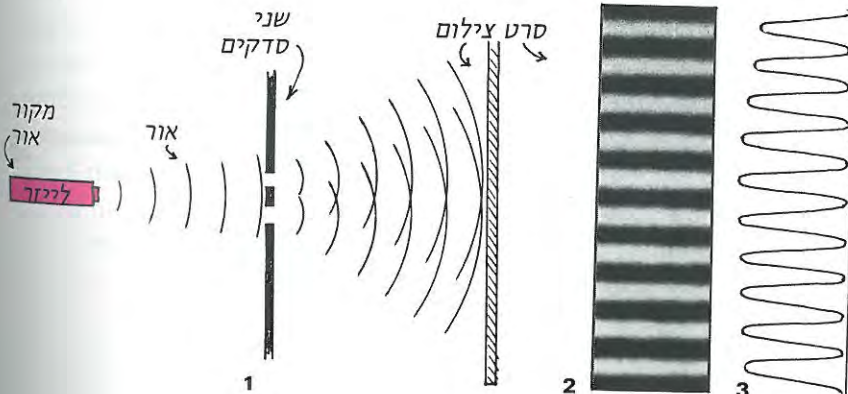
ד

איור 30.4

שליבים בחשיפה מגלים את אופן היווצרות התמונה פוטון אחר פוטון. מספר הפוטונים בכל שלב הוא בקירוב: (א) 3×10^3 , (ב) 1.2×10^4 , (ג) 9.3×10^4 , (ד) 7.6×10^5 , (ה) 3.6×10^6 , (ו) 2.8×10^7 .

הבה נזכר בניסוי שני הסדקים של תומס יאנג, שבפרק 28 דנו בו במונחי תורת הגלים. כזכור, כאשר מעבירים אור חד-צבעי דרך זוג סדקים צרים הקרובים זה לזה, נוצרת תבנית התאבכות (איור 30.5). עתה נדון בניסוי במונחי פוטונים.

ניסוי שני הסדקים



איור 30.5

- (1) המערך של ניסוי שני הסדקים.
- (2) תצלום תבנית העקיפה.
- (3) תרשים של התבנית.



א



ב



ג

איור 30.6

שליבים בהתהוות תמונת ההתאבכות בשני סדקים. תבנית החשיפה מתפתחת מ-(א) 28 פוטונים ל-(ב) 1000 פוטונים ל-(ג) 10,000 פוטונים. ככל שגודל מספר הפוטונים הפוגעים במסך, הולכת ומתגלה תבנית הפסים של ההתאבכות.

הניחו שאנו מעמעמים את מקור האור שלנו כך שלמעשה רק פוטון אחד מגיע בכל פעם אל המחסום שבו הסדקים הצרים. אם נחשוף את הסרט לאור למשך זמן קצר בלבד, תתקבל התמונה המתוארת באיור 30.6א. כל נקודה מייצגת מקום שבו נחשף הסרט לפוטון. אם חושפים את הסרט לאור למשך זמן רב יותר, מתחילה להצטייר תבנית פסים בדומה למתואר באיורים 30.6ב ו-30.6ג. זו תוצאה מפתיעה! הנקודות שעל הסרט נראות כמצטרפות, פוטון אחר פוטון, ליצירתה של תבנית ההתאבכות המאפיינת גלים!

איור 30.7

תמונת עקיפה בסדק יחיד.



אם נכסה את אחד הסדקים באופן שהפוטונים יוכלו לעבור רק בסדק יחיד לפני פגיעתם בסרט הצילום, הנקודות הזעירות תצטברנה על הסרט ותיצורנה בהדרגה תבנית של עקיפה בסדק יחיד (איור 30.7). נגלה שהפוטונים פוגעים בסרט במקומות שלא היו פוגעים בהם אילו היו שני הסדקים פתוחים! אם נתבונן בדבר מנקודת מבט קלאסית, אנו עשויים לתמוה כיצד "יודעים" הפוטונים העוברים בסדק יחיד שהסדק השני מכוסה ולכן עליהם להתפרש וליצור תבנית רחבה של עקיפה בסדק יחיד. כמו כן, אם שני הסדקים פתוחים, כיצד "יודעים" פוטונים העוברים דרך סדק אחד שהסדק השני פתוח ונמנעים מלהגיע לאזורים מסוימים, בהתקדמם רק לתחומים המתמלאים בסופו של דבר ויוצרים את תבנית הפסים של ההתאבכות משני סדקים*? אין בידנו תשובות מספקות לשאלות אלו, המניחות מראש שהאור מתנהג לפי כלליה של הפיסיקה הקלאסית. מה שידוע לנו הוא שאור המגיב עם סרט או עם גלאי אחר מתנהג כזרם של פוטונים, וכאשר הוא נע מהמקור אל הגלאי הוא מתנהג כגל. האור נע כגל ופוגע כזרם של פוטונים. פוטונים פוגעים בסרט במקומות שבהם היינו מצפים להתאבכות בונה של הגלים. העובדה שהאור מתנהג כחלקיק וכגל כאחד היא אחת התגליות המפתיעות והמרתקות שחשפה הפיסיקה במאה ה-20. מפתיעה עוד יותר היתה העובדה שגם בעצמים בעלי מסה מתגלה שניות זו של גל וחלקיק.

* מנקודת מבט ניוטונית, השניות (בלועזית: דואליות) גל-חלקיק היא אכן מסתורית. היו שהסיקו מכך שלקוונטים יש מעין מודעות, שלכל פוטון או אלקטרון יש "נפש" משלו. אולם המסתורין דומה ליופי: הוא קיים במוחו של המתבונן יותר מאשר בטבע עצמו. אנו יוצרים מודלים להבנת הטבע, וכאשר צצות אי-התאמות אנו משפרים את המודלים או משנים אותם. השניות גל-חלקיק אינה תואמת את המודל שהציע ניוטון. מודל חלופי הוא שלקוונטים יש תודעה משלהם. מודל אחר הוא הפיסיקה הקוונטית. בספר זה אנו חותמים על אפשרות אחרונה זו.

חלקיקים כגלים: עקיפת אלקטרונים

אם לאור יש תכונות של חלקיקים, האין זה הגיוני שלחלקיקים תהייה תכונות גליות? שאלה זו הציג הפיסיקאי הצרפתי לואי דה-ברויי בשנת 1924, עוד בהיותו תלמיד מחקר. את תשובתו ניסח בעבודת הדוקטורט שלו, שזיכתה אותו, מאוחר יותר, בפרס נובל בפיסיקה. על פי דה-ברויי, לכל חלקיק חומר קשור בצורה כלשהי גל המנחה אותו בתנועתו. לפיכך, בתנאים מתאימים, כל חלקיק ייצור תבנית התאבכות או עקיפה. כל הגופים - אלקטרונים, פרוטונים, אטומים, עכברים, אתם, כוכבי הלכת, השמשות - הם בעלי אורך גל הקשור לתנע שלהם בקשר:

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

באשר h הוא קבוע פלאנק. אורך הגל של גוף שמסתו גדולה ומהירותו רגילה הוא כה קטן, שתופעות ההתאבכות והעקיפה הקשורות בו זניחות; קליעי רובה עפים הישר למטרה ואינם מנקדים את מטרותיהם לאורך ולרוחב בתבניות התאבכות שניתן להבחין בהן*.



לואי דה-ברויי

איור 30.8 (משמאל)

פסים הנוצרים בעקיפה
(א) של אור, (ב) של אלומת
אלקטרונים.



ב



א

איור 30.9 (מימין)

מיקרוסקופ אלקטרונים הוא יישום מעשי של אופיים הגלי של האלקטרונים. אורך הגל האופייני לאלקטרונים קטן פי כמה אלפים מאורך הגל של האור הנראה, ולכן במיקרוסקופ אלקטרונים ניתן להבחין בפרטים שלא ניתן להבחין בהם במיקרוסקופ אור.

אלומות של אלקטרונים המכוונות דרך שני סדקים יוצרות תבניות התאבכות בדיוק כמו פוטונים. את ניסוי שני הסדקים שדנו בו בסעיף הקודם ניתן לבצע באלקטרונים בדיוק כמו בפוטונים. המערכת הניסויית עבור



* למשל, אורך גל דה-ברויי של קליע שמסתו 0.02 ק"ג, הנע במהירות של 330 מ"ש, הוא

$10^{-34} \text{ מ'} = \frac{6.6 \times 10^{-34} \text{ ג'ול-ש'}}{0.02 \text{ ק"ג} (330 \text{ מ'ש'})}$

המיליונית מגודלו של אטום המימן. לעומת זאת, אורך הגל של אלקטרון הנע במהירות השווה ל- 10^{-10} מ', אורך השווה לקוטרו של אטום המימן. ניתן למדוד את השפעות העקיפה של אלקטרונים, אך לא את אלה של קליעים.

אלקטרונים מורכבת יותר, אך בשני המקרים התהליך שווה למעשה. אם עוצמת המקור תוקטן כך שהאלקטרונים יעברו אחד-אחד דרך התקן שני הסדקים, תתקבלנה אותן תוצאות מדהימות כבניסוי הפוטונים. האלקטרונים, כמו הפוטונים, יפגעו במסך כחלקיקים, אך תבנית פגיעתם תהיה גלית. ההסחה הזוויתית של האלקטרונים אשר יוצרת את תבנית ההתאבכות מתאימה בדיוק לחישובים המתבססים על משוואת דה-ברויי לאורך הגל של האלקטרון. ניתן לצפות בתוצאותיו של תהליך דומה במיקרוסקופ אלקטרונים רגיל ובמנסרה אלקטרוסטטית שטוחה. אלומה של אלקטרונים בצפיפות זרם נמוכה ביותר מכוונת למנסרה; תבנית של פסים שיוצרים האלקטרונים הבודדים נבנית בהדרגה ומוצגת על מסך טלוויזיה. אט-אט מתמלאת התמונה באלקטרונים, ונוצרת תבנית התאבכות המיוחסת בדרך כלל לגלים. השניות-גל-חלקיק אינה מוגבלת לפוטונים ולאלקטרונים בלבד. נייטרונים, פרוטונים, אטומים, ובמידה שאינה ניתנת למדידה - אפילו קליעי רובים הנעים במהירות גבוהה - מגלים התנהגות דואלית של גל וחלקיק.

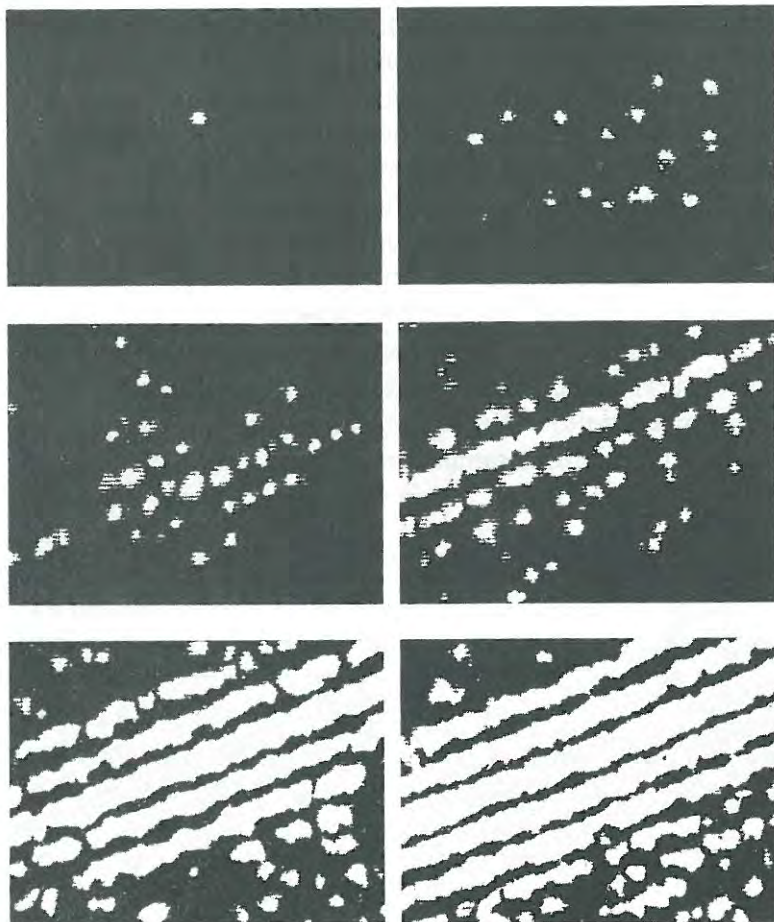


איור 30.10

קטע של ראש יתושה כפי שצולם במיקרוסקופ אלקטרונים סורק בהגדלה "קטנה" - פי 200.

איור 30.11

תבניות התאבכות של אלומת אלקטרונים בעוצמה נמוכה של מיקרוסקופ אלקטרונים לאחר שעברה במנסרה אלקטרוסטטית. התבניות צולמו ממסך טלוויזיה.



שאלות



1. אילו היו האלקטרונים מתנהגים כחלקיקים בלבד, איזו תבנית הייתה מצפים שתתקבל בעקבות מעברם דרך שני סדקים?
2. האם איננו מבחינים באורך גל דה-ברויי של כדור-בסיס שנזרק מפני שאורך הגל גדול מאוד או מפני שהוא קטן מאוד?
3. למי מהשניים מהירות גדולה יותר, לאלקטרון או לפרוטון, אם שניהם בעלי אותו אורך גל דה-ברויי?

עקרון אי-הוודאות

השניות גל-חלקיק עוררה דיונים מרתקים בדבר גבולות היכולת למדוד במדויק תכונות של עצמים קטנים. הדיונים מתמקדים ברעיון שפעולת המדידה משפיעה בדרך כלשהי על הגודל הנמדד.

אנו יודעים, למשל, שכאשר מכניסים תרמומטר לספל קפה חם טמפרטורת הקפה משתנה, מפני שחום נמסר מהקפה לתרמומטר. מכשיר המדידה משנה את הגודל הנמדד. סטיות כאלה במדידה אפשר לתקן אם ידועים טמפרטורת התרמומטר, המסות וערכי החום הסגולי המעורבים, וכן הלאה. תיקונים מעין אלה הם בתחום הפיסיקה הקלאסית - והם אינם אי-הוודאויות של הפיסיקה הקוונטית. מקור אי-הוודאויות הקוונטיות הוא בדואליות גל-חלקיק של החומר, ובגבול המהותי של היכולת לערוך מדידות ברמה הקוונטית, הקשור אליה. ניסויים לאין-ספור הוכיחו שכל מדידה המבוצעת בדרך כלשהי לבחינת מערכת גורמת בהכרח להפרעה במערכת. אם כך, בכל מדידה הכרוכה בתגובת גומלין בין המודד לנמדד מתחייב אי-דיוק מזערי.

אם נתבונן בכוס קפה חם הנמצאת בצידו השני של החדר ונקבע שהקפה חם על סמך האדים העולים מהכוס, מדידתנו לא תהיה כרוכה בבדיקה חודרנית. שיטת "מדידה" זו אינה מוסיפה לקפה אנרגיה ואינה גורעת אנרגיה ממנו. אולם הכנסת תרמומטר לספל היא עניין שונה לחלוטין. אז מקיימים תגובת גומלין פיסית עם הקפה ולפיכך כופים עליו שינוי. התרומה הקוונטית לשינויים אלה מתגמדת לחלוטין לנוכח אי-הוודאויות הקלאסיות וניתנת להזנחה. אי-הוודאויות הקוונטיות משמעותיות בעולם האטומי והתת-אטומי בלבד.

תשובות:

1. אילו אלקטרונים היו מתנהגים כחלקיקים בלבד, היו מתקבלים שני פסים כמתואר באיור א. אך למעשה, בשל אופיים הגלי, הם יוצרים תבנית כדוגמת זו שבאיור ב.



ב

א

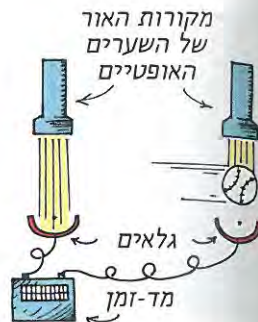
2. איננו מבחינים באורך הגל של כדור-בסיס שנזרק מפני שהוא קטן במידה מופלגת - פי 10^{-20} בקירוב - מגרעין האטום.
3. אם לשני החלקיקים אורך גל שווה, פירוש הדבר ששניהם בעלי תנע שווה. אם כך האלקטרון, שמסתו קטנה, צריך לנוע מהר יותר מהפרוטון הכבד ממנו.

נניח שרוצים למדוד את מהירותו של כדור טניס בהעברתו דרך זוג שערים אופטיים שמרחקם זה מזה ידוע (איור 30.12). משך המעבר של הכדור נמדד לפי הפסקת אלומות האור בשערים. הדיוק במדידת מהירות הכדור קשור לאי-ודאויות במרחק בין השערים ובמנגנון מדידת הזמן. תגובות הגומלין בין הכדור המקרוסקופי לפוטונים שהוא פוגש בדרכו אינן משמעותיות. אך לא כן הדבר במדידת גופים תת-אטומיים כמו אלקטרונים. אפילו פוטון יחיד המתנגש באלקטרון משנה במידה ניכרת ובאורח בלתי צפוי את תנועת האלקטרון. אם נרצה להתבונן באלקטרון ולקבוע את מקומו בעזרת אור, אורך הגל של האור יצטרך להיות קצר מאוד. אך כאן אנו נתקלים בבעיה: אורך גל קצר, שיאפשר "לראות" טוב יותר את האלקטרון הזעיר, מתאים לקוונט גדול של אנרגיה, שישנה במידה רבה את מצב תנועתו של האלקטרון. אם, לעומת זאת, נשתמש באור בעל אורך גל ארוך שיתאים לקוונט קטן יותר של אנרגיה, השינוי שייגרם במצב התנועה של האלקטרון יהיה קטן יותר, אך קביעת המקום בעזרת הגל המגושם תהיה פחות מדויקת. פעולת המדידה של דבר זעיר כמו אלקטרון יוצרת אי-ודאות ניכרת במקומו או בתנועתו. אף על פי שאי-ודאות זו זניחה לחלוטין במדידות של מקומם ותנועתם של חפצים יומיומיים (מקרוסקופיים), היא עובדת חיים מכרעת בתחום האטומי.

את עובדת קיומה של אי-ודאות במדידות בתחום האטומי ניסח לראשונה באופן מתמטי ורנר הייזנברג מגרמניה, והיא נקראה **עקרון אי-הוודאות**. זהו אחד מעקרונות היסוד של תורת הקוונטים. הייזנברג מצא שכאשר כופלים זו בזו את אי-הוודאויות במדידות התנע של חלקיק ומיקומו, המכפלה חייבת להיות שווה לקבוע פלאנק, h , מחולק ב- 2π - המיוצג באמצעות הסימון $\hbar$ (ונקרא h בר) - או גדולה ממנו. ניתן להציג את עקרון אי-הוודאות בנוסחה הפשוטה:

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar$$

הסימן Δ בקשר זה פירושו "אי-הוודאות ב-": Δp היא אי-הוודאות בתנע (הסימן המקובל לתנע הוא האות p), ו- Δx היא אי-הוודאות במקום. מכפלת שתי אי-הוודאויות אינה יכולה להיות פחותה מהגודל $\hbar$. במקרה של אי-ודאויות מזעריות המכפלה תשווה ל- $\hbar$; מכפלת אי-ודאויות גדולות יותר תעלה על ערך זה, אך בשום מקרה לא תהיה מכפלת אי-הוודאויות פחותה ממנו. משמעותו של עקרון אי-הוודאות היא שגם בתנאים הטובים ביותר, הגבול התחתון לאי-הוודאות הוא $\hbar$. פירושו של דבר שאם רצונו לדעת את התנע של אלקטרון בדיוק רב, אי-הוודאות במקומו תהיה גדולה. לעומת זאת, אם נרצה לדעת את מקומו בדיוק רב, הרי שאי-הוודאות המתאימה בתנע תהיה גדולה. ככל שמדידה אחת תהיה מדויקת יותר, המדידה האחרת תהיה מדויקת פחות. רק בגבול הקלאסי של העצמים הגדולים, שבו ניתן להתייחס ל- $\hbar$ כאל גודל אפסי, נוכל בפועל להקטין כרצוננו את אי-הוודאויות הן בתנע והן במקום. קבוע פלאנק גדול מאפס ולכן, עקרונית, איננו יכולים לדעת בו-זמנית את שני הגדלים בדיוק מוחלט.



איור 30.12

מהירות הכדור נמדדת בחלוקת המרחק בין השערים האופטיים בהפרש בין הזמנים שבהם הכדור חותך את מסלולי האור. השינויים החלים בתנועת הכדור בעקבות פגיעת הפוטונים בו קטנים מהשינוי החל בתנועת מכלית דלק ענקית כאשר זרבים אחדים מתנגשים בה.



ורנר הייזנברג

עקרון אי-הוודאות תקף במתכונת דומה גם ביחס לאנרגיה ולזמן. איננו יכולים למדוד את האנרגיה של חלקיק בדיוק מוחלט ברווח זמן קצר כרצוננו. אי-הוודאות בקביעת האנרגיה, ΔE , ומשך זמן מדידת האנרגיה, Δt , קשורים בקשר*

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar$$

הדיוק המרבי שניתן להשיג מתקבל במקרה שבו מכפלת אי-הוודאויות באנרגיה ובזמן שווה ל- $\hbar$. ככל שהאנרגיה של פוטון, אלקטרון או חלקיק אחר מסוג כלשהו נקבעת ביתר דיוק, כן תהיה אי-הוודאות גדולה יותר בידיעת משך הזמן שבמהלכו תהיה לחלקיק אנרגיה זו.

עקרון אי-הוודאות משמעותי בהקשר של תופעות קוונטיות בלבד. אי הדיוקים במדידת המקום והתנע של כדור טניס, למשל, הנובעים מפעולת הגומלין בינו לבין מכשירי המדידה, הינם זניחים לחלוטין. אך אי הדיוקים במדידת המקום והתנע של אלקטרון אינם זניחים כלל וכלל. הסיבה לכך היא שאי-הוודאויות בגדלים התת-אטומיים הן מסדר הגודל של הגדלים עצמם**.

ניסיון להחיל את עקרון אי-הוודאות מחוץ לתחומי תחום הפיסיקה הקוונטית, כרוך בסכנות לא מבוטלות. היו שניסו להסיק מן הקביעות בדבר השפעתה של פעולת הגומלין בין המודד לנמדד כי יקום שהוא בלתי תלוי בתצפיותינו אינו קיים "שם בחוץ", וכי המציאות היא יציר רוחו של הצופה. אחרים מפרשים את עקרון אי-הוודאות כאמצעי של הטבע להגן על סודותיו הכמוסים. אחדים ממבקרי המדע משתמשים בעקרון אי-הוודאות כהוכחה לכך שהמדע עצמו אינו ודאי. לממשות היקום - אם ניתן לראותה ואם לא - לסודות הטבע ולאי-הוודאויות של המדע אין כמעט דבר וחצי דבר עם עקרון אי-הוודאות של הייזנברג. עקרון אי-הוודאות קשור ביסודו לחוסר האפשרות להימנע, ברמה האטומית, מתגובת גומלין בין הטבע לבין האמצעים למדידתו.

* שימו לב כי הדבר תואם את אי-הוודאות בתנע ובמקום. כזכור, (תנע) Δp = כוח $\times$ (זמן) Δt , וכן (אנרגיה) ΔE = כוח $\times$ (מקום) Δx . לכן

$$\hbar = \Delta p \times \Delta x$$

$$= (\text{זמן}) \times (\text{מקום}) \times (\text{כוח})$$

$$= (\text{זמן}) \times (\text{אנרגיה})$$

** לגבי כדור טניס, אי-הוודאויות במדידות התנע, המקום, האנרגיה והזמן הנובעות מעקרון אי-הוודאות הן רק בסביבות 1 מתוך מיליון-מיליארדי-מיליארדים (10^{-34}). גם עבור חידק מהיר ביותר השפעות הקוונטיות זניחות והן בערך 1 מתוך מיליארד (10^{-9}). השפעות קוונטיות מתחילות להיות ניכרות עבור אטומים, שבהם אי-הוודאות היא בערך 1 מתוך מאה (10^{-2}). במדידות של האלקטרונים הנעים באטום, אי-הוודאויות הקוונטיות הן השולטות, ואז אנו נמצאים בלב-ליבו של העולם הקוונטי.

שאלות

1. האם עקרון אי-הוודאות של הייזנברג ישים עבור מדידה מעשית של טמפרטורת כוס מים בעזרת תרמומטר?
2. מונה גייגר מודד את ההתפרקות הרדיואקטיבית באמצעות רישום הדפקים החשמליים הנוצרים בשפופרת גז מחלקיקי קרינה העוברים דרכה. חלקיקי הקרינה נפלטים ממקור רדיואקטיבי - למשל היסוד רדיום. האם משנה פעולת המדידה של קצב ההתפרקות את הרדיום או את קצב התפרקותו?
3. האם הגיוני להחיל את תקפות העיקרון הקוונטי, הקובע שלא ניתן לצפות בדבר מה בלא לשנותו, על הטענה שנוצרת עיניים בגבו של זר תגרום לו להסתובב ולהתבונן כך?

עקרון ההשלמה

עולם הפיסיקה הקוונטית נראה מבלבל. גלי אור המתאבכים ויוצרים תמונות עקיפה מוסרים את האנרגיה שלהם בקוונטים, בצורות חלקיקיים. אלקטרונים הנעים במרחב במסלולים ישרים ומתנגשים כחלקיקים מתחלקים במרחב ויוצרים תבניות התאבכות כגלים. אך ביסוד הבלבול עומד סדר. התנהגות האור והתנהגותם של האלקטרונים מביכות באותו אופן! גם האור וגם האלקטרונים מפגינים תכונות גליות וחלקיקיות כאחד.

הפיסיקאי הדני נילס בוהר, ממייסדי תורת הקוונטים, ניסח מפורשות את השלמות הטבעה בשניות הקוונטיות. הוא כינה ביטוי זה של שלמות בשם **עקרון ההשלמה**. על פי עיקרון זה התופעות הקוונטיות מגלות תכונות משלימות (שלא ניתן להבחין בהן יחד) - תכונות חלקיקיות או גליות - בהתאם לסוג הניסוי שבו הן מתגלות. בניסויים שתוכננו לבדיקת מעברי אנרגיה ותנע בדידים מתגלות התכונות החלקיקיות, ואילו בניסויים שתוכננו לבדיקת ההתפלגות המרחבית של האנרגיה מופיעות התכונות הגליות. התכונות הגליות של האור והתכונות החלקיקיות שלו משלימות זו את זו, ושתייהן הכרחיות להבנת "האור".

תשובות:

1. לא. אף על פי שאנו גורמים לשינוי טמפרטורת המים כאשר אנו בוחנים אותה בתרמומטר, במיוחד אם הוא קר או חם מהמים בשיעור ניכר, הרי שאי-הוודאויות הקשורות לדיוקו של התרמומטר הן בתחום הפיסיקה הקלאסית. אי-הוודאויות ברמה התת-אטומית אינן ישימות כאן.
2. כלל וכלל לא, כי פעולת הגומלין מתרחשת בין המונה לבין הקרינה ולא בין המונה לרדיום. בעקבות המדידה משתנה התנהגות חלקיקי הקרינה אך לא הרדיום שממנו נפלטו. שימו לב כיצד הדבר מתקשר לשאלה הבאה.
3. לא. כאן עלינו להיות זהירים באשר למובנה של המילה תצפית. אם התצפית כרוכה בבדיקה (מסירה או לקיחה של אנרגיה), אזי אנו משנים במידה מסוימת את הדבר הנצפה. למשל, אם נאיר במקור אור את גבו של האדם, אזי תהיה תצפיתנו כרוכה בבדיקה המשנה - אפילו במידה זעירה - את מצבם של האטומים בגב. אם האדם יחוש בכך, אולי הוא יסתובב. אך התבוננות בגבו בלבד היא תצפית פסיבית לחלוטין. האור המגיע לעינינו או נחסם בעת מצמוץ העפעף, למשל, זה כבר נפלט מגבו. גם אם תנעצו בו את מבטכם, תפזלו לצדדים או תעצמו את עיניכם לחלוטין לא תוכלו לשנות בשום דרך פיסיקלית את המצב האטומי בגבו. הארה באור או בחינה באמצעות מכשיר כלשהו אינן דומות להתבוננות פסיבית. חוסר היכולת להבחין בין בדיקה לבין תצפית פסיבית הוא המקור להבליים רבים הנאמרים בהסתמך על הפיסיקה הקוונטית, כביכול. ניסוי פשוט שתוצאותיו יהיו חיוביות ישמש לטענה הנזכרת תמיכה סבירה יותר מאשר קביעה המנסה לנצל את שמה הטוב של תורת הקוונטים שנרכש במאמץ רב.



איור 30.13

סמל היין-יאנג של תרבויות המזרח הרחוק מייצג את הניגודים המשלימים זה את זה.

הרעיון שניגודים הם מרכיביה של השלמות אינו חדש. בתרבויות המזרח הקדומות רעיון זה מהווה חלק בלתי נפרד מתמונת העולם. הדבר מודגם בדיאגרמת יין-יאנג של טאי צ'י טו (איור 30.13). צידו האחד של המעגל נקרא יין וצידו השני יאנג. במקום שבו קיים יין, קיים יאנג. רק איחודם של יין ויאנג יוצר שלמות. במקום שבו קיים שפל, קיים גם רוש. במקום שבו יש לילה, יש גם יום. במקום שבו יש לידה, יש מוות. אדם שלם מאחד בתוכו יין (רגש, אינטואיציה, נשיות, מוח ימני) עם יאנג (מחשבה, היגיון, גבריות, מוח שמאלי). בכל אחד יש היבטים מהאחר. עבור נילס בוהר, דיאגרמת יין-יאנג מסמלת את עקרון ההשלמה. בתקופה מאוחרת יותר בחייו כתב בוהר על המסקנות העולות מעקרון ההשלמה בתחומי חיים שונים. ב-1947, כאשר הוכתר בתואר אבירות על תרומתו לפיסיקה, הוא בחר לשלט הגיבורים שלו את סמל היין-יאנג.

לקריאה נוספת

סגרה, א'. מקרני רנטגן ועד קוורקים. כתר, 1986.
אונא, י'. פיסיקת הקוונטים. משרד הביטחון-ההוצאה לאור, 1993.

תקציר מונחים

תורת הקוונטים התורה הקובעת שאנרגיה מוקרנת ביחידות מוגדרות של אנרגיה הנקראות קוונטים או פוטונים. בדיוק כשם שהחומר מורכב מאטומים, כך אנרגיית הקרינה מורכבת מקוונטים. התורה קובעת גם שלכל חלקיקי החומר יש תכונות גליות.

קבוע פלאנק קבוע יסודי, h , המקשר בין האנרגיה של קוונט אור לתדירותו:

$$h = 6.6 \times 10^{-34} \text{ ג'ול-שני}$$

התוצא הפוטואלקטרי פליטת אלקטרונים ממשטח מתכתי בעקבות הקרנת אור על המשטח.

עקרון אי-הוודאות העיקרון שניסח הייזנברג, הקובע כי את הדיוק המרבי האפשרי במדידה קובע גודלו של קבוע פלאנק, h . לא ניתן למדוד במדויק בו-זמנית את מקומו של חלקיק ואת התנע שלו, וכן לא ניתן למדוד במדויק בו-זמנית את האנרגיה של חלקיק ואת משך הזמן שבו יש לחלקיק אנרגיה זו.

עקרון ההשלמה העיקרון שטבע נילס בוהר, הקובע כי המודל הגלי והמודל החלקיקי של החומר והקרינה כאחד משלימים זה את זה ומספקים יחדיו את התמונה השלמה של כל אחד מהם.

שאלות חזרה

1. באיזו תורה תמכו הגילויים של יאנג, מקסוול והרץ - בתורה הגלית של האור או בתורה החלקיקית?
2. באיזו תורה תמכה תיאוריית הפוטון של איינשטיין - בתורה הגלית של האור או בתורה החלקיקית?
3. **הולדת תורת הקוונטים**
את מה בדיוק ראה מקס פלאנק כמקוונט, את האנרגיה הנפלסת מן האלקטרונים המתנוודים בחומר או את אנרגיית האור עצמו?
4. מהו ההבדל בין מכניקה למכניקת הקוונטים?
5. **קוונטים וקבוע פלאנק**
למה מתכוונים כשאומרים שגודל מסוים הוא "מקוונט"?

23. האם תנועת אלקטרונים אל מסך כאשר הם עוקפים בשני סדקים היא תנועה גלית או חלקיקית? האם אופיה של תבנית העקיפה המתקבלת הוא גלי או חלקיקי?

עקרון אי-הוודאות

24. באילו מהמדידות הבו-זמניות של מהירותם ומקומם של הגופים הבאים יש משמעות לאי-הוודאות הקוונטיות: כדור טניס, גולת זכוכית, אלקטרון?

25. מה קובע עקרון אי-הוודאות בקשר לתנועה ולמקום?

26. במדידות מדויקות של מקום האלקטרון, האם ניתן למדוד במדויק גם את התנע שלו? הסבירו.

27. במדידת הערך הממוצע של אנרגיית אלקטרון היורד מרמה לרמה, האם ניתן לקבל במדויק גם את משך האירוע? הסבירו.

28. האם יש הבדל בין תצפית פסיבית בדבר מה לבין בדיקה פעילה שלו? באיזה מקרה משפיעים על התנהגות הדבר?

עקרון ההשלמה

29. מהו עקרון ההשלמה?

30. כיצד מתייחס עקרון ההשלמה לתכונות הגליות והחלקיקיות של האור הסותרות אלו את אלו?

תרגילים

1. השוו בין פיסיקה קלאסית לפיסיקה קוונטית.

2. כיצד יכולה אנרגיית הפוטון להינתן בקשר $E = hf$ אם f המופיע בנוסחה הוא תדירות?

3. לאיזה מן הפוטונים הבאים האנרגיה הגדולה ביותר: פוטון תת-אדום, פוטון נראה או פוטון על-סגול?

4. אנו מדברים על פוטונים של אור אדום ועל פוטונים של אור ירוק. האם ניתן לדבר על פוטונים של אור לבן? נמקו.

5. לאלומת אור אדום ולאלומת אור כחול אותה אנרגיה. איזו אלומה מכילה מספר גדול יותר של פוטונים?

6. כאשר מחממים מוצק והוא מתחיל ללהוט, מדוע צבע האור המופיע ראשון הוא האדום?

7. כסף ברומי (AgBr) הוא חומר רגיש לאור המשמש בסוגים מסוימים של סרטי צילום. כדי ליצור חשיפה של הסרט, יש להאירו באור בעל אנרגיה המסוגלת לפרק את

6. מדוע אין האנרגיה של מדורה כפולה שלמה של קוונט יחיד, שלא כאנרגיה של אלומת לייזר?

7. כיצד נקרא קוונט האור?

8. בפרק הקודם למדנו על הקשר $E \sim f$. בפרק זה למדנו את הנוסחה $E = hf$. הסבירו את ההבדל בין שתי הנוסחאות. מהו h ?

9. האם ה- f המופיע בקשר $E = hf$ הוא תדירות האור כפי שהוגדרה בפרק 18?

10. לאיזה מהשניים קוונט אנרגיה קטן יותר: לאור אדום או לאור כחול? לגלי רדיו או לקרני X?

התוצא הפוטואלקטרי

11. מה הראיה לטבעו הגלי של האור? לטבעו החלקיקי?

12. אילו פוטונים יצליחו יותר בנייתוק אלקטרונים ממשטח מתכת, פוטונים של אור סגול או פוטונים של אור אדום? מדוע?

13. מדוע אלומה חזקה של אור אדום אינה מוסרת לאלקטרון יותר אנרגיה מאלומה חלשה של אור סגול?

14. את מה בדיוק ראה איינשטיין כמקוונט, את אנרגיית האלקטרונים המתנוודדים בחומר או את אנרגיית האור עצמו?

15. במה תלויה בראש ובראשונה עוצמתה של אלומת אור - בתדירות הפוטונים או במספרם?

16. איינשטיין הציע את הסברו לתוצא הפוטואלקטרי ב-1905. מתי אומתו השערותיו?

השניות חלקיק-גל

17. מדוע צילומים שהוגדלו נראים כעשויים גרגרים-גרגרים?

18. בתגובת הגומלין שלו עם גבישי החומר בסרט צילום, האם מתנהג האור בעיקר כגל או כחלקיק?

ניסויי שני הסדקים

19. כיצד נע האור ממקום אחד למשנהו - כגל או כחלקיק?

20. כיצד מתנהג האור בתגובת הגומלין שלו עם החומר - כגל או כחלקיק?

21. מתי מתנהג האור כגל? מתי הוא מתנהג כחלקיק?

חלקיקים כגלים: עקיפת אלקטרונים

22. איזו הוכחה תוכלו להביא לטבעם הגלי של חלקיקים?

האור. עם זאת, היווצרות התמונה צעד אחר צעד היא עדות לכך שהאור מורכב מפוטונים. כיצד ייתכן הדבר? מהו הסברך?

18. למה אורך גל ארוך יותר, לפרוטון או לאלקטרון הנעים באותה מהירות?

19. אלקטרון אחד נע במהירות כפולה מאלקטרון אחר. לאיזה מהם אורך גל ארוך יותר?

20. כשמהירותו של פרוטון גדלה, האם אורך גל דה-ברויי שלו מתארך או מתקצר?

21. למה אורך גל ארוך יותר, לפגז או לקליע רובה הנעים באותה מהירות?

22. במציאות היומיומית איננו מבחינים באורך הגל של חומר נע. האם הסיבה לכך היא שאורך הגל עצום או זעום?

23. מהו היתרון העיקרי של מיקרוסקופ אלקטרוני על פני מיקרוסקופ אופטי?

24. האם תהיה העקיפה של אלומת פרוטונים ב"מיקרוסקופ פרוטונים" גדולה יותר או קטנה יותר מעקיפת אלקטרונים בעלי אותה מהירות במיקרוסקופ אלקטרוני? נמקו את תשובתכם.

25. כיצד היה משתנה עקרון אי-הוודאות אילו היה ערכו של h שווה לאפס ולא לערכו הזעיר?

26. דונו ברעיון שהתיאוריה שמישהו מאמין בה מכתיבה את משמעות תצפיותיו ולא להיפך.

27. בקצה אפך יש לפחות אלקטרון אחד. האם תשתנה תנועת האלקטרון כשמישהו יתבונן בך? האם יחול שינוי בתנועתו אם יתבוננו בך בעין אחת עצומה? אם יתבוננו בך בשתי העיניים במבט זועף? האם מתאים עקרון אי-הוודאות לדוגמה זו?

28. במשאל דעת קהל, האם אנו משנים את מה שאנו מנסים לבדוק? האם עקרון אי-הוודאות מתאים לדוגמה זו?

המולקולות. מדוע לדעתכם ניתן לטפל בסרט זה בלא ש"ישרף" בחדר חושך המואר באור אדום? האם ניתן יהיה לטפל בו אם החדר יואר באור כחול? ומה בנוגע לאור אדום חזק בהשוואה לאור כחול עמום?

8. שיוף גורם נזק לתאי העור. מדוע אור על-סגול עלול לגרום נזק ואילו אור נראה אינו גורם נזק?

9. מה הגורם הקובע את מספר האלקטרונים הנפלטים בשנייה בתוצא הפוטואלקטרי - עוצמת האור או תדירותו?

10. הסבירו כיצד משמש התוצא הפוטואלקטרי לפתיחת דלתות אוטומטיות כשמתקרבים אליהן.

11. אם תאירו באור על-סגול את כדור המתכת של אלקטרוסקופ הטעון שלילית (כזה המתואר בתרגיל 7 בפרק 21), הוא יתפרק. אך אם האלקטרוסקופ טעון חיובית, הוא לא יתפרק. התוכלו להסביר זאת?

12. כשאור על-סגול פוגע בחומרי צבע מסוימים, נפלט אור נראה. מדוע הדבר אינו קורה כשפוגע בהם אור תת-אדום?

13. נסו לאמוד מה יהיו קריאות הזרם היחסיות באמפרמטר שבאיור 30.1 כשיאירו את הלוח הפוטואלקטרי באור בצבעים שונים ובעוצמות שונות.

14. הסבירו בקצרה את השימוש שעושים בתוצא הפוטואלקטרי בלפחות שניים מהיישומים הבאים: עין אלקטרונית, מד-אור במצלמה, פס הקול בסרט קולנוע.

15. האם התוצא הפוטואלקטרי מוכיח שהאור מורכב מחלקיקים? האם ניסויי ההתאבכות מוכיחים שהאור מורכב מגלים? (האם יש הבדל בין מהותו של דבר מה להתנהגותו?)

16. האם מפריך ההסבר של איינשטיין לתוצא הפוטואלקטרי את הסברו של יאנג לניסוי שני הסדקים? הסבירו.

17. במצלמה שצילמה את פני האישה (איור 30.4) השתמשו בעדשות רגילות, שכידוע גורמות לשבירה של גלי