

מה זה אור?

ברי ר. מסטרס

כל כך פשוט: "ויהי אור", ועדיין כל כך מסובך. אז בעצם, מה זה אור?



"ויאמר אלוהים, יהי אור, ויהי אור",
בראשית א, פסוק ג'.
"עד סוף ימי, אהרהר במהותו של האור."
(אלברט איינשטיין, 1917)
"כל חמישים שנות העיסוק שלי בנושא, לא
קרבו אותי לתשובה על השאלה: מהם
חלקיקי האור? מובן שכיום כל פרחה חושב
שהוא יודע את התשובה, אבל הוא משלה
את עצמו." (אלברט איינשטיין, 1951)

הזוהר הצפוני.

By Kshitijr96 (own work) [CC BY-SA 3.0
(<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0>)], via Wikimedia commons



העין היא גלאי פוטונים. על ידי Woodwalker.

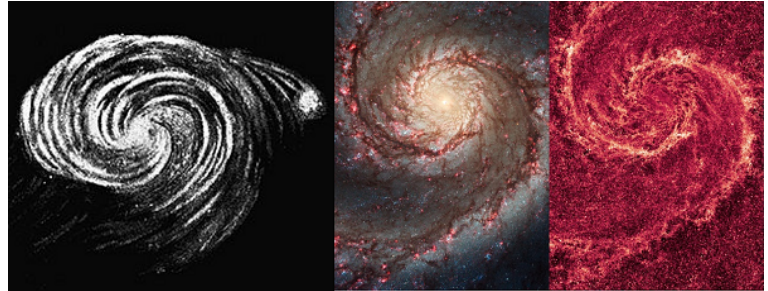
[CC BY 3.0

(<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0>) via
Wikimedia commons

אור הוא דרישה הכרחית לקיומם של חיים,
הואיל והוא המקור היסודי של האנרגיה
במזון. אור הוא חלק בלתי נפרד מהדת,
מסיפורי הבריאה, מהשירה, הספרות, השפה
והתרבות. אור הוא יופי אטמוספירי,
המשתקף בזריחה ובשקיעה, בקשת בענן
ובזוהר הקוטב. אור נדרש על מנת לראות.
אור נדרש לצורך ראייה, ובכוחם של מכשירים
אופטיים כגון משקפיים ועדשות מגע, כמו גם
של ניתוחי הלייזר לשפר את איכות הראייה.
ניתן לאבחן ולטפל במחלות הפוגעות בראיה
באמצעות אור. האינטראקציה בין אור
לאלקטרונים באטומים ובמולקולות משמשת
לגילוי אור. כך פועלים התאים הרגישים לאור
ברשתית העין שלנו, ובאותו אופן פועל גם
הרכיב החצי מוליך הרגיש לאור במצלמה.
לתיאוריה של האור והראייה היסטוריה סבוכה וארוכה, שהחלה עוד בתקופתם של הפילוסופים היוונים
והערבים.

צבעים מעשירים את סביבתנו, והגירוי וההנאה שאנו חשים בזכותם משותפים לבני המין האנושי בכל
הארצות. הם מוסיפים חן לבתינו, לערינו ולחיינו. אור השמש, אור הירח ונגה הכוכבים מעניקים יופי
מופלא לכל תושבי כדור הארץ. אור הוא אבן יסוד של העולם המודרני שסביבנו. הפקת אור, השליטה בו,

הולכתו וגילויו הם חלקים אינטגרליים ממערכות התקשורת והיצור שלנו, כמו גם מהמכשור הרפואי, האמנות, תכניות החינוך וציד המעבדה המאפשר מחקר ופיתוח מדעיים מתקדמים. אור הוא מקור האינפורמציה שיש בידינו על תהליכי יצירת היקום, על התפתחותם של כוכבים, ועל האוניברסליות של חוקי הטבע המוכרים לנו בכלל היקום. באמצעות כלים ספקטרוסקופיים, חקר האור הוביל אותנו להבנה תאורטית ומעשית של אטומים ומולקולות. חקר האור והאינטראקציה שלו עם חומר הובילו לפיתוח מכניקת הקוונטים. אור נמצא בליבת העיסוק של משוררים, פילוסופים (החל מהמאה החמישית לפנה"ס), אמנים, מדענים ומהנדסים. כיום, מחבר האור עמים, תרבויות ולאומים לכדי משפחה אנושית אחת. ילדים מתבוננים בפליאה כיצד קרני שמש הממוקדות על ידי זכוכית מגדלת מציתות אש. אנשים בכל העולם נדהמים מהמראות שנגלים לעיניהם כשהם מתבוננים באמצעות מיקרוסקופ או טלסקופ אל המיקרוקוסמוס או אל עולמות רחוקים.



היסטורית, ניתן היה להבין את מהות האור כגל, כחלקיק קוונטי או כשדה קוונטי. מסובך? בהחלט! אכן, לעתים קרובות מומרת השאלה "מה זה אור?" בשאלה "כיצד מתנהג האור?". ליתר

משמאל: איור של גלקסיה ספירלית כפי שנצפתה בטלסקופ של טירת ביר (טלסקופ מחזיר בקוטר 1.8 מטר) על ידי לורד רוס בשנת 1865. במרכז: תמונה דיגיטלית מעובדת המבוססת על מדידות מהטלסקופ הלאומי בקיט פיק ומטלסקופ החלל האבל (2005 NASA/ESA). מימין: אותה גלקסיה בתמונה אינפרא אדומה

דיוק, השאלה "מה זה אור?" מוחלפת בשאלה "כיצד מתפשט אור ומהי האינטראקציה שלו עם חומר?". בחיבור זה אציג כמה מהמקורות הקונספטואליים של הדואליות גל חלקיק ושל התיאוריות לתיאור האינטראקציה בין אור לחומר שפותחו בתחילת המאה העשרים.

אדון בתרומות היסודיות של אלברט איינשטיין לאופי ההבנה שלנו את האור ואת האינטראקציה שלו עם חומר. תורת היחסות של איינשטיין ואישושה הניסויי הפכו אותו לדמות מוכרת בעולם כולו. התרומה המוכרת פחות שלו לתחום האופטיקה שינתה את הדרך בה אנו מבינים את האור, כמו גם את היכולת שלנו לשלוט בו לצרכינו בתחומים נרחבים וביניהם רפואה, תקשורת, פוטוניקה וכן מחקר בסיסי בפיסיקה דרך תופעות כמו עיבוי בוז איינשטיין. פרסומיו של איינשטיין בנושא האור השפיעו על לואי דה ברולי ועל אריון שרדינגר והובילו להמצאת "מכניקת הגלים". איינשטיין גישר על הפער בין הבנת תופעות של התפשטות קרינה במרחב לבין הבנת האינטראקציה בין קרינה וחומר. בין השנים 1905 ל 1916 איינשטיין פיתח את התיאור המבוסס על בליעה ופליטה של קוונטות (יחידות בדידות) של אור לאינטראקציה בין אור וחומר, תוך שהוא מספק הסברים למספר תופעות פיזיקליות: כלל סטוקס לפלאורסנציה (הקובע שאורך הגל של האור הנפלט גדול מזה של האור הנבלע), יינון של גזים על ידי אור אולטרא סגול ואת האפקט הפוטואלקטרי. קיומה של תדירות סף לקרינה על מנת שתאפשר עקירת אלקטרונים ממשטח מתכתי היא תמצית האפקט הפוטואלקטרי, עיקרון הנמצא בשימוש נרחב גם כיום בגלאים כגון מכפילורים. ההיפותזה של איינשטיין בנוגע לקיומה של פליטה מאולצת מהווה את הבסיס להמצאת הלייזר, מכשיר שמשנה את עולמנו גם בימים אלה, כחמישים שנה מאוחר יותר.

הניסויים הראשונים בנושא אינטראקציה של אור וחומר

יש עניין רב בבחינה של מכלול הניסויים שקדמו לעבודתו של איינשטיין בנושא האינטראקציה בין אור לחומר. בשנת 1887 הבחין היינריך הרץ, שעסק ביצירת גלים אלקטרומגנטיים, גילויים ואפיון של התקדמותם, שאור אולטרה סגול מאפשר ליצור ניצוץ חשמלי בין שתי אלקטרודות ביתר קלות. עוזרו, ויליאם הולווקס, אישש והרחיב את התצפית הזו בשנת 1888, כשהראה שקרינה אולטרה סגולה גורמת לרכיב מתכתי שאינו טעון חשמלית להיטען במטען חיובי. בשנת 1899 ג'וזף תומפסון בחן את ההשפעה של קרינה אולטרה סגולה על פליטת "חלקיקים" (האלקטרונים המוכרים לנו כיום) ממשטח מתכתי באמצעות שפופרת קרוקס (שבה ואקום חלקי). תומפסון מצא שהזרם הנפלט גדל ככל שתדירות האור גבוהה יותר וככל שעוצמתו גבוהה יותר. הוא היה הראשון לטעון בפרסום מדעי שהשפעת האור האולטרה סגול מתבטאת בפליטת אלקטרונים מן המשטח. בשנת 1902, הדגים פיליפ לנארד שהקרינה קצרת אורך הגל הנפלטת ממנורת קשת פחמן גורמת לפליטת אלקטרונים ממשטח מתכתי. הוא הראה שמספר האלקטרונים הנפלטים גדל ככל שעוצמת האור גדולה יותר, אך האנרגיה הקינטית שלהם אינה גדלה. יתרה מכך, אור בתדירות נמוכה מספיק מסוים אינו מוביל כלל לפליטת אלקטרונים מהמשטח. באמצעות מדידות של משטחי אלומיניום תחת השפעת קרינה אולטרה סגולה בשלוש תדירויות שונות, לנארד הראה שהאנרגיה הקינטית של האלקטרונים הנפלטים מהמשטח תלויה רק בתדירות האור ולא בעוצמתו.

חלקיק האור של איינשטיין

בשנת 1905 פרסם איינשטיין את המאמר פורץ הדרך, "נקודת מבט יוריסטית על יצירת אור והטרנספורמציה שלו". במאמר זה הסיק איינשטיין, מתוך התאוריה הסטטיסטית של התרמודינמיקה שפותחה של ידי בולצמן, שלאנטרופיה של קרינה המתוארת על ידי התפלגות וין צורה זהה לאנטרופיה של גז של חלקיקים יסודיים או "קואנטות" של אנרגיה, שלכל אחד מהם אנרגיה פרופורציונית לתדירות של הגל האלקטרומגנטי המתאים. איינשטיין כתב: "קרינה מונוכרומטית בצפיפות נמוכה (בתוך תחום התקפות של נוסחת הגוף השחור של וין [כלומר $h\nu/kT \ll 1$]) מתנהגת, במובן התרמודינמי, כאילו הורכבה מיחידות קואנטיות בלתי תלויות זו בזו של קרינה $[h\nu]$ ", כאשר h הוא קבוע פלנק, k קבוע בולצמן, T הטמפרטורה בסקאלת קלווין ו ν תדירות האור. יתרה מזאת: "כאשר קרן אור מתפשטת ממקור נקודתי, האנרגיה שלה אינה מפולגת באופן רציף על נפח הולך וגדל, אלא נמצאת במספר סופי של יחידות אנרגיה בדידות הממוקמות בנקודות במרחב, נעות ללא יכולת להתחלק, ויכולות להיווצר או להיבלע רק כיחידות שלמות." איינשטיין השתמש בביטויים "יחידת אנרגיה" ($Energiequant$) ו "יחידת אור" ($Lichtquant$) באופן חילופי. העיקרון של התפלגות לא רציפה של האנרגיה בקרינה מתקדמת סתר את התיאוריה הגלית והרציפה שפיתח מקסוול לתיאור גלים אלקטרומגנטיים. עשור מאוחר יותר, בשנת 1916, איינשטיין דן בתנע $p=h\nu/c$ ובמסת המנוחה של קואנטת האור במאמרו "פליטת קרינה ובליעתה בתיאוריה קואנטית", *Deutsche Physikalische Gesellschaft. Verhandlungen* 18, 318.

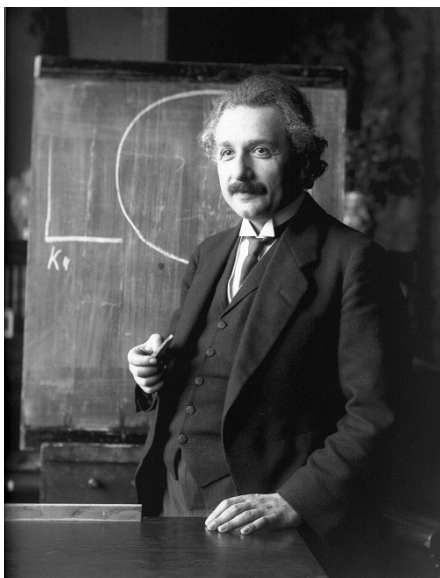
הפוטון

הכימאי הפיזיקלי האמריקאי גילברט נ. לואיס טבע את השם 'פוטון' במאמר שהתפרסם בכתב העת "נייצ'ר" בשנת 1926. "זה לא יראה הולם אם נדבר על אחת הישויות ההיפותטיות האלה כחלקיק של אור, כיחידה בדידה של אור או כקואנטום של אור אם נניח שהוא מבלה רק חלק זעיר מקיומו כנשא של אנרגיה קרינתית, וביתר הזמן נותר כאלמנט מבני חשוב בתוך האטום ... אקח לעצמי את החרות, לפיכך, להמציא עבור אטום היפותטי חדש זה, שאינו אור אך מהווה חלק חשוב מכל תהליך קרינתי, את השם 'פוטון'." לאחר שלואיס הציע את השם 'פוטון' בשנת 1926, הוא אומץ על ידי פיזיקאים רבים כשם ליחידת

האור הבדידה של איינשטיין. עם זאת, תפיסת לואיס את הפוטון הייתה שונה בתכלית מזו של איינשטיין. כפי שגילה מאוחר יותר ה. קרג, השם פוטון הוצע על ידי לפחות ארבעה מדענים שונים לפני 1926. השריד היחיד שנותר מהפוטון של לואיס הוא שמו. תובנות היסטוריות נוספות בנושא ניתן למצוא במאמרו של למב משנת 1995 "אנטי פוטון".

היפותזת קוונטת האור של איינשטיין מסבירה את האפקט הפוטואלקטרי

איינשטיין ישם את הרעיון של קוונטת אור על מנת להסביר את האפקט הפוטואלקטרי, שלא ניתן היה להסבירו באמצעות התיאוריה הגלית של מקסוול. איינשטיין כתב: "אם קרינה מונוכרומטית מתנהגת ... כאילו הקרינה הייתה מדיום לא רציף המורכב מיחידות בדידות



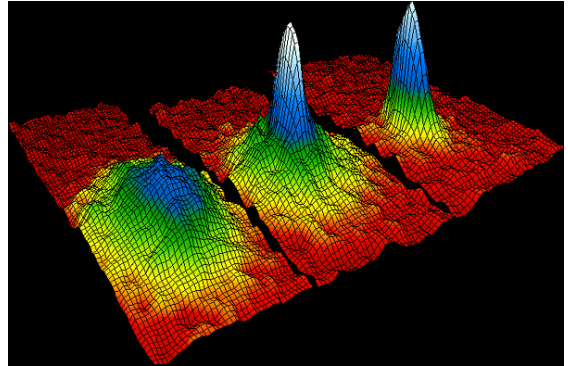
אלברט איינשטיין בשנת 1921, צולם על ידי פ. שמוצר.
[public domain], via Wikimedia commons.

של אנרגיה $h\nu$, אזי יש הגיון לבחון האם חוקי הפליטה והטרנספורמציה של אור בנויים אף הם מיחידות כאלה." איינשטיין הניח שאור מבצע אינטראקציה עם חומר על ידי בליעה או פליטה של קוונטות האור שאת קיומן הניח, ובכך הציע מנגנון חדש לתופעה המבלבלת של האפקט הפוטואלקטרי. תאורו של איינשטיין את האפקט היה כדלקמן: קוונטות האור חודרות את פני השטח של החומר, והאנרגיה שלהן מומרת לאנרגיה קינטית של האלקטרונים בחומר. כל האנרגיה שבקוונטת אור אחת מועברת לאלקטרון יחיד. הוא כתב: "אלקטרון בתוך החומר יאבד חלק מהאנרגיה שלו עד שיגיע לפני השטח." בנוסף, הניח איינשטיין כי אלקטרון בפני השטח חייב לבצע עבודה ϕ (שהיא תלויה בחומר, וקרויה פונקציית העבודה של החומר), על מנת להתגבר על כוחות המשיכה בתוך החומר ולעזוב את המשטח. האנרגיה הקינטית המקסימלית של אלקטרון כזה היא, לפיכך, $h\nu - \phi$. התיאור המודרני יותר קובע כי $eV = h\nu - \phi$, כאשר e הוא מטען האלקטרון ו V הפוטנציאל הנדרש על מנת לעצור את האלקטרונים המהירים ביותר. למעשה, זו המשוואה הראשונה בתיאוריה הקוונטית של אינטראקציית קרינה חומר. אישור ניסיוני של המנגנון שהוצע על ידי איינשטיין הגיע בשנת 1912, כאשר ארתור ה. יוז מדד את מהירותם המקסימלית של פוטואלקטרונים ממספר מתכות, תוך שהוא מאשש את התחזיות של איינשטיין.

האישוש הראשון של ההיפותזה הקוונטית, בתחום אחר של פיסיקה שאינו פיסיקה של קרינה, הגיע בשנת 1907 כאשר איינשטיין הסביר והדגים כיצד קוונטיזציה של אנרגיה יכולה להיות מיושמת במדע של חומר מעובה. הוא הסביר את התלות האנומלית של קיבול החום של מוצקים (קיבול החום יורד כתלות בטמפרטורה) בכך שבנה מודל לחומר המבוסס על מתנדים קוונטיים (שאינם רציפים). נוסחה זו של איינשטיין תאמה את התוצאות הניסיוניות שהוצגו בשנת 1910 על ידי ולטר נרנסט ועוזרו פרדריק א. לינדמן.

נימוקי הזכייה של איינשטיין בפרס נובל לפיסיקה בשנת 1922 התייחסו למאמרו משנת 1905 בנושא האפקט הפוטואלקטרי: "על תרומתו לפיסיקה התיאורטית, ובפרט על גילוי החוק המוביל לאפקט הפוטואלקטרי." בעת שאיינשטיין פיתח את התיאוריה שלו, רבים מבכירי הפיסיקאים בעולם, דוגמת מקס פלנק, הנדריק א. לורנץ, מקס פון לאוה, וילהלם וין וארנולד זומרפלד לא היו מוכנים לקבל את התיאוריה שלו, תוך שהם מביאים כנימוק את תופעת ההתאבכות של האור, שתואמת מודל גלי. גם פלנק וגם לורנץ

קיבלו את העובדה שקרינה וחומר מבצעים אינטראקציה בתהליך בדיד, אך דחו את הקונספט הטוען שקואנטות האור מתקדמות כגל. יוצא דופן בולט היה יוהנס סטרק, שבשנת 1909 הציע יחידות אנרגיה ממוקמות בקרני איקס, ותמך בהיפותזת איינשטיין בדבר קיומן של קואנטות אנרגיה. איינשטיין עצמו הבין שההיפותזה שלו דורשת אישוש או דחייה ניסיוניים, ובכנס סולביי בשנת 1911 הכריז: "אני מתעקש על אופיו הארעי של הקונספט [של חלקיקי אור בדידים]". בשנת 1921 דיווח מוריס דה ברולי בכנס סולביי השלישי בבריסל שהאנליזה שלו על תוצאות פליטת אלקטרונים מחומר על ידי הקרנתו בקרינת איקס מתיישבת עם ההנחה שלקרני איקס אנרגיה של $h\nu$. אחיו, לואיס דה ברולי, קרא את מאמריו של איינשטיין בנושא האור, ובעקבות הקונספט של קואנטות אור פיתח את התיאוריה שלו ל"גלי חומר". ארוין שרדינגר, בהתבסס על ניסוחים מוקדמים של לואיס דה ברולי, המציא את "מכניקת הגלים".



עיבוי בוז איינשטיין. תמונות התפלגות המהירויות של אטומי גז רובידיום בטמפרטורה יורדת משמאל לימין, המאששות את קיומו של מצב חדש לחומר, עיבוי בוז איינשטיין. שמאל: טרם מעבר הפאזה. מרכז: הופעת עיבוי בוז איינשטיין. ימין: לאחר קירור מירבי, כאשר כמעט כל הדוגמא במצב עיבוי בוז איינשטיין.

By NIST/JILA/CU-Boulder (NIST Image) [public domain], via Wikimedia commons.

ספקנות ולאחר מכן אישוש ניסיוני של יחידות האור הבדידות של איינשטיין

בשנת 1916, רוברט א. מיליקן אישש ניסיונית את התאוריה של איינשטיין בנוגע לאפקט הפוטואלקטרי, תוך שהוא מרחיב את היקף הניסויים שביצע לנאדר. מיליקן הראה שהאנרגיה הקינטית המקסימלית של האלקטרונים הנפלטים פרופורציונית לתדר של האור המעורר. מתוך הניסויים ניתן היה לראות שמתח העצירה של האלקטרונים תלוי לינארית בתדירות האור, כפי שצפה איינשטיין, ושקבוע הפרופורציה h עבור מספר מתכות זהה לערך שחישב פלאנק בשנת 1901. מיליקן גם

הראה שמספר האלקטרונים הנפלטים פרופורציוני לעוצמת האור. למרות זאת, מיליקן דחה את רעיון קואנטות האור שהציע איינשטיין.

קהילת הפיסיקה נטתה לקבל את קואנטות האור שהציע איינשטיין רק לאחר 1923, כאשר ארתור ה. קומפטון ולאחריו פטר דביי פרסמו את עבודותיהם על פיזור של קרינת איקס על ידי אלקטרונים, שהיו מבוססות על ההיפותזה של איינשטיין. קומפטון עסק בפיזור קרני איקס וקרני גאמה על ידי יסודות קלים. התיאוריה שלו משנת 1923 הראתה כי האנרגיה של האור (הבדיד) המפוזר פחותה מזו של האור המעורר, כשהפרש האנרגיה שווה לאנרגיה הקינטית של האלקטרון. קומפטון פיתח משוואה שקישרה בין אורך הגל הארוך יותר של האור המפוזר לבין הזווית בין האור המעורר לזה המפוזר. קואנטות אור בתדירות ν מפוזרת על ידי אלקטרון שמסתו m . קומפטון הניח שהאלקטרון נמצא במנוחה לפני תהליך הפיזור. לאחר הפיזור, האלקטרון נרתע. מתוך שיקולים של שימור תנע ושימור אנרגיה בתהליך הפיזור, הוא הגיע למשוואת המתארת את שינוי אורך גל קרינת האיקס בתהליך:

$$\lambda - \lambda_0 = \frac{h}{mc}(1 - \cos \theta)$$

קומפטון אישש את תקפות הנוסחה בשורה של ניסויים מדויקים וכתב: "ההתאמה היפהפייה בין הניבוי התיאורטי לתוצאות הניסיוניות מדהים אף יותר ... אין אף קבוע התאמה המקשר בין הערכים." הוא מצא

שהשינוי באורך הגל של קרינת האיקס אינו תלוי באורך הגל וסיכום: "פיזור קרני איקס היא תופעה קואנטית". וכן "... התיאוריה מראה באופן משכנע שקורנט האור נושאת עמה תנע מכוון ולא רק אנרגיה."

התיאוריה של איינשטיין על הדואליות חלקיק גל של האור

שורשי הדואליות חלקיק גל של האור נמצאים במאמר פורץ הדרך של איינשטיין משנת 1909 בנושא פלוקטואציות אנרגיה "על המצב הנוכחי של בעיית הקרינה". איינשטיין חישב את הפלוקטואציות של אנרגיה ושל תנע באנליזה שלו לתנועה הבראוונית (1905), ויישם את העקרונות האלה לקרינה של גוף שחור. בכך הוא הכליל את התיאוריה משנת 1905 למערכת שאינה מכנית. איינשטיין חקר את פלוקטואציות האנרגיה של קרינת גוף שחור המוכלת בנפח V של מהוד איזותרמי בטמפרטורה T . מתוך התפלגות קרינת הגוף השחור של פלנק, הוא הסיק שהשונות של פלוקטואציות האנרגיה מקיימת:

$$\langle (E - \langle E \rangle)^2 \rangle = \langle E \rangle h\nu + \frac{c^3 \langle E \rangle^2}{8\pi\nu^2 dvV}$$

כאשר $\langle \rangle$ מציינ ממוצע סטטיסטי, E היא אנרגיית הקרינה התדיריות שבין ν ל $\nu + d\nu$, c מהירות האור בריק. משוואה זו מוכרת כנוסחת איינשטיין לפלוקטואציות של קרינת גוף שחור. הוא טען משיקולים של מכניקה סטטיסטית שהאיבר הראשון בחלקה הימני של המשוואה מתייחס לתכונות הקואנטיות של הקרינה. איבר זה, שהנו לינארי באנרגיה הממוצעת, נמצא בתחום התדיריות הגבוהות שבו חוק וין תקף. איינשטיין הסיק שקרינה, ובפרט הפלוקטואציות באנרגיה שלה, מתנהגת כמו גז של חלקיקים בלתי תלויים, כלומר קואנטות של קרינה, שלכל אחד מהם אנרגיה $h\nu$. משיקולי ממדים הוא טען שהחלק השני, שהינו ריבועי באנרגיה הממוצעת, נובע מהתאבכות של גלים. איינשטיין הניח שהקרינה בתוך המהוד מורכבת ממצבים רבים שלכל אחד מהם אמפליטודה, פאזה וקיטוב, ושמתקדמים בכיוונים שונים. לפיכך, פלוקטואציות בכל נפח חלקי של המהוד יכלו לנבוע מהתאבכות בין גלים מישוריים שונים. בשנת 1909 רשם איינשטיין: "... השלב הבא בפיסיקה התיאורטית יביא אותנו לתיאוריה של האור שניתן יהיה לפרשה כשילוב של תאוריה גלית עם תאוריית הפליטה ..."

התיאוריה של איינשטיין על פליטה מאולצת

תשע שנים לאחר שהגה את קואנטת האור, איינשטיין חזר לבעיה של אינטראקציה בין קרינה לחומר, ובפרט למעברים בין רמות אנרגיה אטומיות ותפקידן של קואנטות האור בהקשר זה. בשנת 1916 הוא הציע את מנגנון הפליטה המאולצת במאמר פורץ הדרך "פליטת



פירוק של לייזר הרובי הראשון.

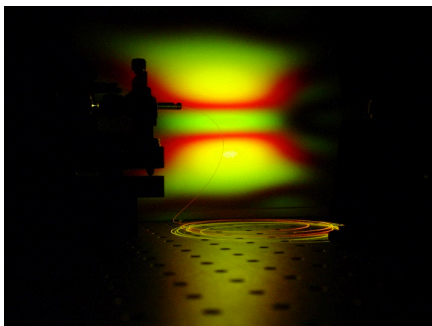
קרינה ובליעתה בתיאוריה קואנטית". מאמר זה ראוי לציון מיוחד על ההצגה של גישה הסתברותית לפיסיקה קואינטית. הוא הכיל את "מקדמי A ו B ", ואת הניבוי של תהליכי פליטה מאולצת ופליטה ספונטנית. באותה תקופה, הקונספט של מעברי רמות אנרגיה באטומים המתווכים על ידי קואנטות של אור עדיין לא זכה לקבלה רחבה בקהילת הפיסיקאים. התיאוריה של אטום המימן שפיתח בור לא השתמשה ברעיון הפוטון. למעשה, בור עצמו דחה את הקונספט עד לשנות העשרים המוקדמות. אפילו

מקס פלאנק, שנחשב כמי שייסד את התיאוריה הקוונטית בשנת 1900, לא הכיר במציאות של קוונטיזציה עד לשנת 1913, כאשר בור הפעיל אותה על רמות האנרגיה של אטום המימן.

איינשטיין טען ששדה הקרינה יכול לגרום להגדלת האנרגיה באטומים או להקטנתה. הוא הניח תהליך שבו מעורבים שני מצבי אנרגיה, אחד בעל אנרגיה נמוכה ואחד בעל אנרגיה גבוהה, כך שהמעברים בין שניהם מלווים בפליטה או בליעה של פוטון באנרגיה השווה להפרש האנרגיה בין שני המצבים. אם האטום בולע את הפוטון, האנרגיה שלו תגדל והוא יעבור למצב מעורר. אטום במצב המעורר יכול לפלוט פוטון באופן ספונטני תוך שהוא עובר למצב אנרגיה נמוך יותר או למצב היסוד. האנרגיה של הפוטון הנפלט תהיה שווה להפרש האנרגיה בין המצב המעורר למצב היסוד. פליטה ספונטנית יכולה להתרחש גם בהיעדר של קרינה. בפליטה מאולצת, אטום במצב מעורר נמצא באינטראקציה עם שדה אלקטרומגנטי, המאלצת מעבר מהמצב המעורר למצב אנרגיה נמוכה, והפרש האנרגיה מועבר לשדה האלקטרומגנטי. הפוטון שנוצר בתהליך זה זהה בתדירותו, בפאזה שלו, בקיטוב שלו ובכיוון ההתקדמות שלו לפוטונים שבשדה האלקטרומגנטי המאלץ.

איינשטיין הניח אוסף של אטומים בשיווי משקל תרמי. כמתואר לעיל, הוא הניח תהליך עם שני מצבי אנרגיה באנרגיות שונות, ומעבר ביניהם המתווך על ידי בליעה או פליטה של פוטון שהאנרגיה שלו זהה להפרש האנרגיה בין שני המצבים. מספר האטומים בכל מצב אינו תלוי בזמן, הואיל ובשיווי משקל תרמי אותו מספר אטומים יפלטו קרינה או יבלעו אותה.

בתנאים אלה, איינשטיין הבחין בין שני סוגי מעברים. הסוג הראשון הוא כאשר פליטת הקרינה מתרחשת ללא השפעה חיצונית, באנלוגיה לחוק הדעיכה הרדיואקטיבית של רתרפורד. במונחים מודרניים, מדובר בפליטה ספונטנית, המתרחשת גם בהיעדרה של קרינה חיצונית, ומאופיינת על ידי "מקדם A". הפוטון הנפלט בתהליך זה יכול להיפלט בכל כיוון התקדמות. איינשטיין הניח שההשפעה של קרינה חיצונית פרופורציונלית לצפיפותה, וגורמת למעבר בין המצבים. הוא גם הניח שהמערכת הפיכה ברמה המיקרוסקופית, כלומר קצב המעבר מהרמה המעוררת לרמה הנמוכה שווה לקצב המעבר ההפוך. איינשטיין דרש שתהליך הפליטה המאולצת יתקיים כך שבמצב שבו רמות האנרגיה האטומית והקרינה בשיווי משקל, שדה הקרינה יהיה קונסיסטנטי עם התפלגות בולצמן וחוק הקרינה של פלאנק. אילו מקדם איינשטיין לפליטה מאולצת היה אפס, לא הייתה מתקבלת התפלגות בולצמן של המצבים בשיווי משקל תרמי. במצב שיווי משקל, מספר האטומים שהאנרגיה שלהם גדלה צריך להשתוות למספר האטומים שהאנרגיה שלהם יורדת. לפיכך, הסיק איינשטיין, ההסתברויות של פליטה מאולצת ושל בליעה צריכות להיות זהות. מקדמי איינשטיין הנם, לפיכך, בלתי תלויים בצפיפות הקרינה.



יצירה של סופר קונטיאום בסיב אופטי מבוסס גביש פוטוני. באדיבות ג'ון דדלי, יו"ר ועדת ההיגוי של שנת האור 2015.

באופן נבואי כמעט, איינשטיין הציע שהמקדמים B ו A יהיו ניתנים לחישוב מתוך חישוב שבו האלקטרודינמיקה והמכניקה יהיו בהתאמה להיפותזה הקוונטית (כלומר מכניקת קוואנטים חדשה). תחזית זו מומשה בשנת 1927 כאשר דיראק הציג את גרסתו למכניקת הקוואנטים והשתמש בה כדי לחשב במאמר אחד את מקדם B ובמאמר שני את מקדם A לפליטה הספונטנית.

אישוש ניסיוני של הקונספט של פליטה מאולצת הגיע רק עשורים לאחר הניבוי של איינשטיין. ברטולוטי מציע הסבר לעיכוב ניכר זה במאמרו "מדוע הלייזר הומצא כל

כך מאוחר?" (ראה <http://e-ico.org/node/94>, ICO newsletter, January 2010, Number 82).

בשנת 1954 המציאו גורדון, זייגר וטאונס את המייזר (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) שפעל בתחום גלי המיקרו. בשנת 1960 תיאודור מיימן הפיק פליטה מאולצת מגביש רובי, ששימש מרכיב של הלייזר הראשון. פרס נובל לפיזיקה בשנת 1964 נחלק בין צ'רלס ה. טאונס, ניקולאי ג. באסוב ואלכסנדר מ. פרוחורוב על עבודתם הבלתי תלויה על הלייזר. אם כך, נותרה השאלה: מהו אור? איינשטיין הגה את הפוטון כמצב של השדה האלקטרומגנטי שלו תדירות ν , מספר גל k , אנרגיה $h\nu$ ותנע $\hbar k$. זהו חלקיק שמסת המנוחה שלו היא אפס, יש לו ספין של יחידה, ושני מצבי קיטוב. בשנת 1924 כתב איינשטיין: "התוצאות של קומפטון מוכיחות כי קרינה מתנהגת כאילו היא מורכבת מחלקיקי אנרגיה בדידים, לא רק בהקשר של מעבר אנרגיה אלא גם בהקשר של מעבר תנע." כך שגם לאחר שנים רבות אנו חוזרים לביטויים: "קרינה ... מתנהגת ... כאילו היא מורכבת ... ביטויים אלה אינם מתייחסים לשאלה מהו אור, אלא לשאלה כיצד הוא מתנהג. גם אם לא ענינו על השאלה המקורית, ההבנה הרחבה של האור הביאה יופי לחיינו ושינתה את העולם.

תודה על האור

[Reading list of suggested references](#)



על הכותב: פרופסור ברי ר. מסטרס הוא בוגר המכון הפוליטכני בברוקלין. את התואר השני שלו קיבל מאוניברסיטת פלורידה סטייט, ואת תואר הדוקטור ממכון ויצמן למדע. פרופסור מסטרס היה מדען אורח במחלקה להנדסה ביולוגית במכון הטכנולוגי של מסצ'וסטס, מדען אורח במחלקה להיסטוריה של המדע בהרווארד, פרופסור אורח במחלקה לאופטלמולוגיה באוניברסיטת ברן, ופרופסור לאנטומיה וביולוגיה של התא ב Uniformed Services University of the Health Sciences. הוא חבר באיגוד האמריקאי לקידום המדע (AAAS) ובאגודה האופטית של אמריקה (OSA). בשנים 1999-2000 שימש כיועץ מדעי מטעם ה-AAAS בקונגרס האמריקאי. הוא זכה בפרס Vogt למחקר אופטלמולוגי עם ד"ר בונקה על עבודתם בנושא "מיקרוסקופיה קונפוקאלית של הקרנית". פרופסור מסטרס פרסם 86 מאמרים ו 143 פרקים בספרים ומאמרים בכנסים. הוא ערך וכתב 10 ספרים, ביניהם "טכניקות לא פולשניות באופטלמולוגיה" ו

"מיקרוסקופיה קונפוקלית ולא לינארית". כעת הוא כותב ספר בנושא סופר רזולוציה במיקרוסקופיה, שעתיד להתפרסם בהוצאת אוניברסיטת קיימברידג'. הוא מרצה בעולם בנושא ניהול אחראי של מחקר מדעי, אתיקה ביו רפואית, חשיבה ביקורתית ופוטוניקה ביו רפואית.



על המתרגם:

פרופ' דן אורון חוקר את התכונות האופטיות של ננוחלקיקים, בעיקר בהקשרים של הדמיה ביולוגית. את לימודי התואר הראשון במתמטיקה ובפיסיקה ערך באוניברסיטה העברית, ואת לימודי התואר השני באוניברסיטת בן גוריון. בשנת 2005 סיים את לימודי הדוקטורט בנושא מיקרוסקופי רב-פוטונית במכון ויצמן. פרופ' אורון הצטרף לסגל המדעי של הפקולטה לפיסיקה במכון ויצמן בשנת 2007, לאחר לימודים בתר-דוקטוריאליים באוניברסיטה העברית. כיום הוא מכהן כראש המחלקה לפיסיקה של מערכות מורכבות במכון ויצמן.