

## מכניקה קוונטית למתחילים

צבי רובין

BA, מדעי הרוח והחברה, האוניברסיטה הפתוחה  
[rubin.tzvi@gmail.com](mailto:rubin.tzvi@gmail.com)

מכניקה קוונטית היא התיאוריה הפיזיקלית הבסיסית שמתארת את התנהגותם של חלקיקים זעירים - אלקטרונים, אטומים, פוטונים ועוד. בקנה מידה זה, הטבע מתנהג בצורה שונה לחלוטין מהעולם המוכר לנו והמתואר על ידי המכניקה הקלאסית. מדובר בתפיסה המנוגדת לאינטואיציה היומיומית שלנו - שצריכים להתרגל אליה.

מאפיינים מרכזיים:

דואליות גל-חלקיק - חלקיקים ואור מתנהגים גם כגלים וגם כחלקיקים.

סופרפוזיציה - חלקיק יכול להיות בכמה מצבים בו־זמנית עד שמודדים אותו.

שזירה קוונטית - שני חלקיקים יכולים להיות מקושרים כך שמדידת אחד מוסרת מיידית מידע על השני.

עקרון האי-ודאות - אי אפשר לדעת בו־זמנית בדיוק מוחלט גם את מיקום החלקיק וגם את מהירותו (תנע).

קוונטיזציה - אנרגיה, תנע ותכונות אחרות מופיעות בערכים בדידים ולא רציפים.

בחלקה הראשון של עבודה זו יתוארו שלושה ניסויים היסטוריים שערערו את מעמדה של המכניקה הקלאסית כתאוריה פיזיקלית מוחלטת ואוניברסלית - קרינת גוף שחור וגילוי הקוונטה; האפקט הפוטואלקטרי; ניסוי שני הסדקים.

בחלק השני יתוארו תופעות קוונטיות ונושאים שונים: ההבדל בין סופרפוזיציה לפונקציית הגל; החתול של שרדינגר ופרשנות קופנהגן; תופעת המנהור; עקרון האי-ודאות של הייזנברג; מחשב קוונטי.

### קרינת גוף שחור וגילוי הקוונטה

גוף שחור הוא עצם אידיאלי הבולע באופן מושלם קרינה אלקטרומגנטית בכל אורכי הגל ללא החזר. מצד שני, גוף שחור פולט קרינה אלקטרומגנטית באופן התלוי אך ורק בטמפרטורה שלו - ככל שהגוף חם יותר כך הקרינה חזקה יותר. קרינה זו מכונה קרינת גוף שחור.

הקרינה האלקטרומגנטית שגוף שחור פולט מקורה בתנודות חלקיקים אטומיים (במיוחד אלקטרונים) עקב טמפרטורת הגוף, וככל שהטמפרטורה גבוהה יותר כך גם הקרינה חזקה יותר.

גוף שחור אידיאלי לא קיים במציאות. עבור שימושים מדעיים ותעשייתיים, משתמשים לעיתים באמצעים אחרים המדמים בקירוב גוף שחור.

## מדוע תופעת הגוף השחור בישרה את הופעת המכניקה הקוונטית?

בהתאם למכניקה הקלאסית של סוף המאה ה-19 עוצמת קרינת גוף שחור תלויה בטמפרטורה של הגוף ובאורך הגל של הקרינה הנוצרת כתוצאה מכך (חוק ריילי-ג'ינס). בהתאם לנוסחה זו ככל שתדר הקרינה הנוצר גבוה יותר (לכיוון האור האולטרה-סגול), עוצמת הקרינה תעלה באופן תלול ללא הגבלה. למעשה, בהתאם לנוסחת החוק יוצא שמדובר בקרינה בעוצמה אינסופית\* מה שמנוגד להגיון, לחוק שימור האנרגיה ולמציאות מאחר שניסויים הראו שעוצמת הקרינה דווקא יורדת בתחום התדרים הגבוה במקום שתעלה (ראה איור למטה). כישלון צורב זה של המכניקה הקלאסית לנבא נכונה את עוצמת קרינת גוף שחור בתדרים גבוהים זכה לכינוי "הקטסטרופה של האולטרה סגול".

כדי לפתור את הבעיה ולהסביר את התופעה שהמכניקה הקלאסית (חוק ריילי-ג'ינס) נכשלה להסביר, מקס פלאנק הציע ב-1900 רעיון מהפכני: האנרגיה יכולה להיבלע או להיפלט רק כמנות בדידות - קוונטות. כלומר: רק מנת אנרגיה מעל גודל מינימלי מסוים יוצרת את התנודות האטומיות בתוך הגוף השחור המייצרות קרינה אלקטרומגנטית.

הנחה זו הובילה לנוסחת פלאנק שתיארה בצורה מושלמת את הקרינה הנמדדת מפליטת גוף שחור והצילה את הפיזיקה מה"קטסטרופה".

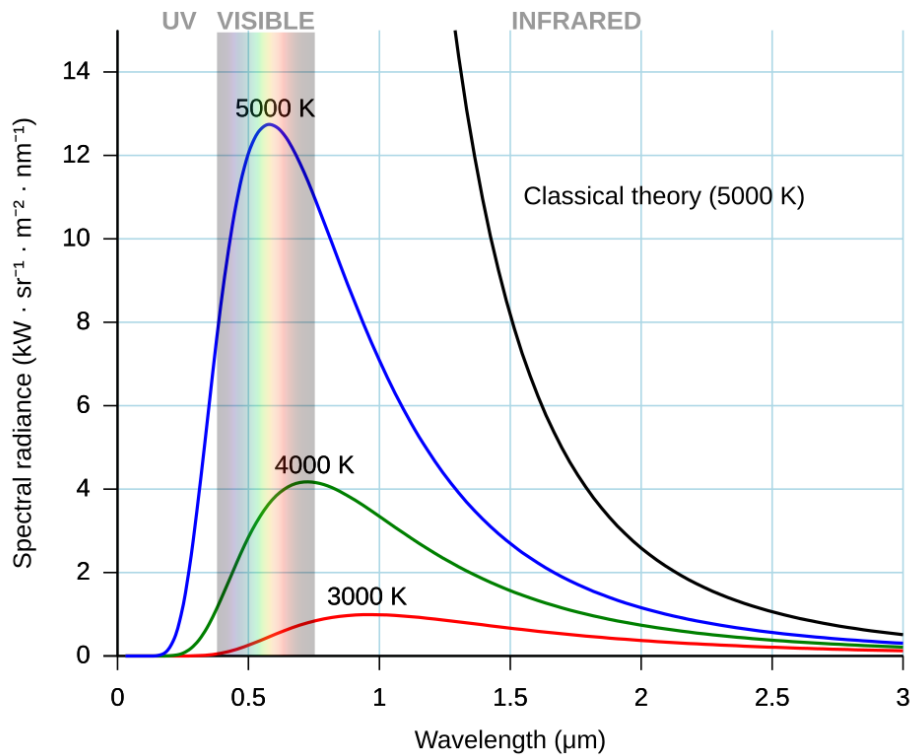
זה היה רגע הלידה של מכניקת הקוונטים.

לצורך פיתוח הנוסחה שמתארת את פליטת הקרינה של גוף שחור פלאנק פיתח את קבוע פלאנק  $h$ . הנוסחה:

$$E = hv$$

שמשמעותה: האנרגיה של קוונטה אחת שווה לקבוע פלאנק ( $h$ ) כפול התדר של הקרינה ( $v$ ) הנפלטת מגוף שחור.

מכאן עולה שעל מנת שגוף שחור יקרין קרינה בתדר גבוה נדרשת עוצמה תרמית מינימלית גבוהה מאוד ליצירת קוונטה אחת לפחות שתחולל את התנודות. המסקנה היא שבגוף שחור קל יותר לגלים בתדר נמוך להיווצר (כי הם זקוקים לפחות אנרגיה) מאשר לגלים בתדר גבוה מאחר שאלה זקוקים להרבה יותר אנרגיה תרמית שהיא כמעט ולא בנמצא. לכן ברור שלקרינה בתדר גבוה קשה להיווצר וממילא לא תוכל להגיע לערכים עצומים בהתאם לחוק ריילי-ג'ינס. במלים אחרות, ההסתברות לפליטת גלים בתדר גבוה הרבה יותר נמוכה מההסתברות לפליטת גלים בתדר נמוך. לעומת זאת נוסחת פלאנק מתארת היטב את הממצאים שעלו בניסויים – עוצמת קרינה ההולכת וקטנה בתחום האולטרה סגול המגיעה כמעט לאפס, בניגוד למה שניבאה המכניקה הקלאסית.



PD Wikipedia

קרינת גוף שחור בטמפרטורות גוף שחור שונות (עקומות צבעוניות) בהתאם לנוסחת פלאנק שעולה בקנה אחד עם מדידות מעבדה, והשוואה לחוק ריילי-ג'ינס והמכניקה הקלאסית (עקומה שחורה) שטסה למעלה ככל שהתדר עולה (אורך הגל קטן). ניתן לראות שעוצמת הקרינה בתחום האולטרה סגול יורדת בצורה תלולה במקום שתעלה ע"פ המכניקה הקלאסית.

מאקס פלאנק זכה בפרס נובל לפיזיקה ב-1918 על גילוי קוונט האנרגיה.

-----

\* אם בוחנים את נוסחת ריילי-ג'ינס, שמוצגת בהרבה מקומות ברשת, רואים מיד שהמונה קבוע ואילו במכנה מופיע אורך הגל ברביעית שהוא קטן ביותר ונמדד במיקרומטרים. לכן, ברור שהמכנה עקב חזקתו הרביעית קטן באופן תלול ככל שאורך הגל קטן, ובהתאם לכך הקרינה שמבוטאת בנוסחה גדלה לערכים עצומים, מה שלא קורה במציאות.

### האפקט הפוטואלקטרי

האפקט הפוטואלקטרי הוא תופעה פיזיקלית שבה נפלטים אלקטרונים מחומר כתוצאה מפגיעה של קרינה אלקטרומגנטית, כגון אור אולטרה סגול. אלקטרונים הנפלטים באופן זה מכונים פוטואלקטרונים.

תוצאות הניסויים של האפקט הפוטואלקטרי עומדות בסתירה לתחזיות האלקטרומגנטיות הקלאסית. על פי התאוריה הקלאסית, האור מתואר כגל רציף המעביר אנרגיה לאלקטרונים באופן הדרגתי עד שיצברו מספיק אנרגיה ויפלטו. אלקטרונים לא יפלטו אם האור בעוצמה נמוכה מדי.

בפועל, תוצאות הניסויים מראות תמונה שונה: אלקטרונים נפלטים רק כאשר תדירות האור עוברת סף מסוים, ללא תלות בעוצמת האור או במשך החשיפה. לדוגמה, אלומת אור אדום (תדירות נמוכה) בעוצמה גבוהה אינה גורמת לפליטת פוטואלקטרונים, גם אם מאירים על החומר זמן רב. לעומת זאת אלקטרונים יכולים להיפלט גם אם עוצמת האור נמוכה מאוד (אפילו פוטון אחד מספיק, ראה למטה) בתנאי שהתדר גבוה מספיק.

עובדה זו סותרת את התיאור הגלי של האור, שבו האנרגיה אמורה להצטבר לאורך זמן בצורה רציפה. כדי להסביר זאת, הציע אלברט איינשטיין שאור אינו גל רציף, אלא מורכב מחבילות אנרגיה בדידות, שכוננו מאוחר יותר פוטונים. כל פוטון נושא מנת אנרגיה (קוונטה) התלויה בתדירות האור. פליטת אלקטרון מתרחשת רק אם לפחות פוטון בודד בתדר גבוה מספיק פוגע באלקטרון ומעביר לו מספיק אנרגיה כדי להשתחרר מהחומר.

לפוטונים המרכיבים אלומת אור יש אנרגיה אופיינית, המכונה אנרגיית פוטון, והיא פרופורציונלית לתדירות האור. בתהליך הפליטה הפוטואלקטרית, כאשר אלקטרון בחומר בולע אנרגיה מפוטון, ומקבל אנרגיה הגבוהה מאנרגיית הקשר שלו – כלומר, האנרגיה המינימלית הדרושה כדי לשחרר את האלקטרון מהכוחות האטומיים הקושרים אותו לחומר – הוא עשוי להיפלט החוצה. אם אנרגיית הפוטון נמוכה מדי, האלקטרון לא יוכל להשתחרר.

הגברת עוצמת האור בתדירות נמוכה רק תגדיל את מספר הפוטונים הפוגעים בחומר, אך לא תשנה את האנרגיה של כל פוטון בודד. לכן, הגברת העוצמה לא תגרום לפליטה אם האנרגיה של כל פוטון אינה מספיקה. יתר על כן, האנרגיה הקינטית של האלקטרונים הנפלטים אינה תלויה בעוצמת האור הפוגע, אלא אך ורק באנרגיה של הפוטונים הבודדים הפוגעים והתלויה בתדר.

בשנת 1905, הציע אלברט איינשטיין תאוריה לאפקט הפוטואלקטרי, שהתבססה על הרעיון המהפכני שאור אינו גל רציף, אלא מורכב מחלקיקים בדידים של אנרגיה (קוונטות), המוכרים כיום כפוטונים. כל פוטון נושא מנת אנרגיה  $E$  הפרופורציונלית לתדירות  $\nu$  של הגל האלקטרומגנטי, על פי הנוסחה  $E = h\nu$ , כאשר  $h$  הוא קבוע פלאנק.

האפקט הפוטואלקטרי היה צעד מכריע בביסוס רעיון דואליות גל-חלקיק בטבעו של האור. האור מפגין בו-זמנית תכונות של גל ושל חלקיק, בהתאם לנסיבות.

לפני תחילת המאה ה-20, כל הניסויים הקלאסיים באור הראו התנהגות גלית ברורה - התאבכות, עקיפה, פולריזציה. לכן היה מקובל לחשוב שאור הוא גל אלקטרומגנטי. אבל התופעה הפוטואלקטרית רמזה שבעצם האור הוא גם חלקיקים.

אם האור היה גל רציף, היה לוקח זמן עד שהאלקטרון "יצבור" מספיק אנרגיה ויפלט אבל בפועל הפליטה מיידית לחלוטין. זה רומז לכך שפוטון בודד פוגע באלקטרון ומעביר לו אנרגיה ברגע אחד, מה שנראה מתאים לפגיעת חלקיק.

גם איינשטיין בעקבות פלאנק השתמש בקוונטות של אנרגיה לפי אותה נוסחה בדיוק:

$$E = hv$$

אז מה החידוש הגדול של איינשטיין בשונה מפלאנק?

פלאנק לא טען שהקרינה עצמה איננה גלית. מבחינתו, הקרינה האלקטרומגנטית היא עדיין גל, בדיוק כפי שמתארת תורת הגלים הקלאסית.

החידוש של פלאנק היה באופן שבו האנרגיה של הגל נפלטת ונספגת בקוונטות\* בחומר והוא לא הסיק מכך על חלקיקיות האור. לעומת זאת החידוש הגדול של איינשטיין היה שהוא התקדם צעד גדול מעבר לכך וטען שהקוונטות (פוטונים) הם לא רק רלבנטיות לתהליכים פיסיקליים בתוך החומר אלא הן חלק מתכונות האור עצמו. מה שהוביל לרעיון הדואליות של האור – גל-חלקיק.

אלברט איינשטיין זכה בפרס נובל פיסיקה ב-1921 עבור הסבריו לתופעה הפוטואלקטרית שהייתה נדבך מרכזי בפיתוח המכניקה הקוונטית.

### השוואה בין קרינת גוף שחור לאפקט הפוטואלקטרי

נושא	קרינת גוף שחור	האפקט הפוטואלקטרי
הבעיה הקלאסית	אסון אולטרה-סגול	תלות בתדר ולא בעוצמה
הסבר	קוונטים	פוטונים
מה נפלט	קרינה אלקטרומגנטית (אור)	אלקטרונים
הגורם לפליטה	טמפרטורה	קרינה אלקטרומגנטית
מה נלמד על האור	נפלט ונקלט במנות*	אור מתנהג כחלקיקים
תרומה למהפכה הקוונטית	קוונטיזציה, קבוע פלאנק	דואליות האור – גל-חלקיק
מי פתר את הבעיה	מקס פלאנק, 1900	אלברט איינשטיין, 1905
הכרה בינלאומית	פרס נובל לפיזיקה ב-1918	פרס נובל פיסיקה ב-1921

\* כאשר מקס פלאנק הציג ב-1900 את רעיון ה"קוונטים", הוא לא התכוון לומר שהאור עצמו מגיע בחבילות. הוא השתמש בקוונטיזציה כטריק מתמטי כדי לפתור את בעיית "הקטסטרופה של האולטרה סגול". פלאנק האמין עד סוף חייו שהאור הוא גל רציף, והקוונטים הם רק "טריק חישובי". הוא השתמש במתמטיקה שהוא עצמו לא האמין שהיא מתארת את המציאות, אלא רק כדי לקבל נוסחה שעובדת (נוסחת פלאנק) ושמתיימרת לניסויים בגוף שחור. פלאנק חשב שגם קבוע פלאנק הוא רק טריק מתמטי שלא מתאר את המציאות. אבל מאוחר יותר התברר (איינשטיין, מיליקן) שאכן הקבוע הוא מספר פיזיקלי אמיתי שמופיע בטבע, כמו מהירות האור או מטען האלקטרון. ניתן לומר שפלאנק הוא מבשר המכניקה הקוונטית ושימש כחוליה מקשרת בין המכניקה הקלאסית לזו הקוונטית.

### ניסוי שני הסדקים

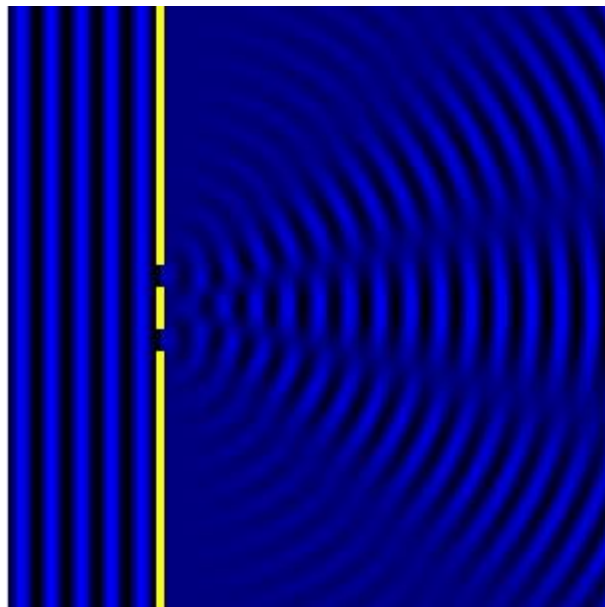
ניסוי שני הסדקים הוא אחד הניסויים החשובים ביותר בפיזיקה, שממחיש את הדואליות גל-חלקיק של האור ואת תפקיד הצופה במכניקה קוונטית. הניסוי מדגים שאור וחומר מתנהגים לפעמים כגלים ולפעמים כחלקיקים - תלוי בנסיבות.

עד ביצוע הניסוי, רווחו שתי תפיסות שונות בנוגע למהות האור. המודל החלקיקי, של ניוטון, גרס שהאור הוא אוסף של חלקיקים. תפיסה שנייה הציג כריסטיאן הויגנס בשנת 1690, והיא יצגה את האור כתופעה גלית. ניסוי שני הסדקים נועד להכריע בין שתי התפיסות הללו - החלקיקית והגלית.

הניסוי בוצע לראשונה בשנת 1801 על-ידי תומס יאנג כדי לבדוק האם אור הוא גל או חלקיק. הניסוי כלל שלושה מרכיבים בסיסיים:

מקור אור, מחיצה עם שני סדקים צרים, ומסך קליטה מאחור שבו נרשמת תבנית הפגיעה.

כאשר האור עובר דרך שני הסדקים, מתקבלת תבנית התאבכות - סדרה של פסים בהירים היכן ששיאי הגלים מתלכדים ומחזקים זה את זה, וכהים היכן ששיאי הגלים מבטלים זה את זה - תופעה שמאפיינת גלים.



Wikipedia [CC BY-SA 3.0](#) (Lookang)

אם האור היה מתנהג כחלקיקים, היינו מצפים לראות שני כתמים בהירים של פגיעת החלקיקים על המסך מאחורי שני הסדקים ולא תופעת התאבכות גלית.

ניתן להוכיח באמצעות ניסוי שני הסדקים גם את חלקיקיות האור. כאשר מחלישים את האור ומשגרים פוטונים בודדים אחד אחרי השני לעבר שני הסדקים באופן אקראי, המסך מציג נקודות של אור שמצטברות מאחורי הסדקים, כמו פגיעות של חלקיקים. רק לאחר זמן, עם הצטברות מספר רב של חלקיקים בודדים, הנקודות יוצרות את תבנית ההתאבכות המוכרת. לפיכך, הניסוי מדגים את הדואליות גל-חלקיק של האור הנע כגל, אך פוגע כחלקיק. כל פוטון בודד מתנהג כחלקיק, אבל ההתפלגות הסטטיסטית שלו על המסך מצייתת לחוקי גל (התאבכות).

בתחילת המאה ה-20, האלקטרונים נחשבו לחלקיקים מובהקים, ולכן ציפו שהם יראו התנהגות חלקיקית בניסוי - כאשר שני הסדקים פתוחים רוב האלקטרונים יתרכזו מול כל אחד מהסדקים.

בפועל התוצאות היו שונות: כאשר פתחו סדק אחד האלקטרונים התנהגו כמו חלקיקים ונוצר פס של פגיעות מאחורי הסדק. כאשר פתחו את שני הסדקים - במקום לקבל פס רציף מול כל אחד מהסדקים התקבלה תבנית התאבכות (פסים בהירים וכהים לסירוגין על המסך מאחורי הסדקים) כאילו האלקטרונים היו גלים.

היה ניסיון להסביר זאת באמצעות הסתברות של זרם חלקיקים שמתנהג כמו גל, כלומר, אינטראקציה כלשהי בין האלקטרונים לבין עצמם, אך ניסוי שבו כל אלקטרון שוגר לחוד (לא שוגר אלקטרון אחר כל עוד האלקטרון הקודם לא פגע במסך) לעבר הלוח ולא לעבר סדק מסוים הראה תוצאות זהות - תבנית ההתאבכות נשארה. תופעה זו ניתנת להסבר על ידי כך שהאלקטרון (או בעצם פונקציית הגל שלו) עובר בו-זמנית דרך שני הסדקים, כפי שמנבאת המכניקה הקוונטית.

איך יתכן שאלקטרון עובר דרך שני סדקים בו-זמנית? אם יורים את האלקטרונים אחד אחרי השני הם אמורים לעבור דרך אחד הסדקים באופן אקראי ולייצר שני פסים מאחורי הסדקים על המסך כמו פגיעת חלקיקים ולא התאבכות. התשובה פשוטה: כי שום הסבר אחר לא מצליח להסביר את דפוס ההתאבכות שנוצר.

מה המשמעות שפונקציית הגל עוברת דרך שני הסדקים? פונקציית הגל אינה ישות פיזית, היא תיאור מתמטי של ההתפשטות ההסתברותית האפשרית של האלקטרון במרחב. היא לא מספרת איפה בדיוק האלקטרון נמצא או ימצא, אלא מה ההסתברות למצוא אותו במקום מסוים, או בעצם מה הסיכוי של אלקטרון לעבור דרך סדק מסוים, ואם הסיכוי שווה (לא המעבר בפועל) נוצרת התאבכות.

אם מניחים גלאי ליד פתח אחד הסדקים כדי לאתר את האלקטרונים שעברו דרכו, האלקטרון שנמדד מופיע באופן פיזי וכבר לא הסתברותי כי מגלים את קיומו במקום מסוים מוחלט, דרך איזה סדק הוא עבר, ובעצם "מכריחים אותו" לבחור סדק ואז כמובן ההסתברותיות של האלקטרון נעלמת ואומרים שפונקציית הגל ההסתברותית קרסה למצב אחד. האלקטרון עצמו לא נמצא במספר מקומות, רק האפשרויות שלו כן. האלקטרון עצמו לא מתפצל בין שני הסדקים רק הגל ההסתברותי המתאר את הסתברות מיקומו מתפצל.

הגילוי של אלקטרון מתבצע באמצעות מדידה כשמנסים לבדוק דרך איזה סדק האלקטרון עבר באמצעות גלאים וחיישנים שמודדים וחשים את השפעת השדה החשמלי שלו וגם אמצעים אחרים. משתמשים בגלאים גם למדוד פוטונים לאותה מטרה.

בניח שלגלאי לא הייתה שום אינטראקציה (מדידת שדה חשמלי) עם האלקטרון והיה פסיבי לחלוטין, האם גם אז ההתאבכות או פונקציית הגל היו נהרסות. אם אין שום אינטראקציה אין אפשרות ללכוד את מיקומו של האלקטרון וממילא פונקציית הגל לא נהרסת. באופן תיאורטי גלאי מושלם בלי שום אינטראקציה לא יהרוס את ההתאבכות אבל אין דבר כזה.

נשאלת השאלה, האם המסך הפלואורסצנטי שמתעד פגיעות של אלקטרונים בצורת נקודות בהירות אין דינו כמו גלאי מאחר שניתן לראות לפי מיקום הפגיעה דרך איזה סדק האלקטרון עבר באמצעות אינטראקציה פיזית/כימית של פגיעה המדליקה נקודה על המסך. המסך שמודד את נקודת הפגיעה אינו יודע מאיזה סדק האלקטרון הגיע. הוא רק יודע איפה מסלול האלקטרון הסתיים על המסך ואין לו "תיעוד" לגביו. נקודת פגיעה על המסך אין משמעותה שהאלקטרון עבר דרך סדק מסוים גם אם הנקודה נמצאת מאחוריו. זה רק אומר שפונקציית הגל של האלקטרון הגיעה למסך אחרי שעברה דרך שני הסדקים בו זמנית ויצרה התאבכות. זה לא שקול להצבת גלאי בפתח אחד הסדקים, ולכן אין גם קריסה. או במלים אחרות, הפגיעות על המסך נוצרו אחרי שכבר ההתאבכות נוצרה ולכן היא לא קרסה, לעומת הגלאי שצופה באלקטרון לפני שהתאבכות נוצרה מאחר שהוא מוצב בפתח סדק, בתחילת המסלול ולא בסופו.

אפקט הצופה במכניקה קוונטית הוא התופעה שבה עצם פעולת המדידה או התצפית משנה את מצבה של המערכת הנמדדת. חלקיקים תת-אטומיים, הקיימים בסופרפוזיציה (כמה מצבים בו-זמנית), "קורסים" למצב יחיד ומוגדר ברגע שמודדים אותם. המשמעות היא שהצופה משפיע על המציאות ולא רק מתעד אותה. הצופה הוא לא גורם אנושי כמובן עם כל המשמעויות אלא גלאי פיזיקלי מסוג כלשהו.

### שזירה קוונטית

שזירה קוונטית היא תופעה שבה חלקיקים תת-אטומיים מקושרים זה לזה והם בעצם יחידה אחת, כך שמדידת מצבו של חלקיק אחד מוסרת מיידית את מצבו של השני, ללא קשר למרחק הפיזי ביניהם – אפילו קילומטרים. אם נמדוד תכונה (כמו ספין, ותכונות אחרות) של חלקיק אחד, נדע בוודאות מהי התכונה המקבילה של השני. עקרון המאתגר את תפיסת הפיזיקה הקלאסית שלגביה אינטראקציות פועלות רק דרך מגע ישיר או דרך שדה (אלקטרומגנטי) שמתפשט במהירות סופית ולא מיידית. מדובר כאן בתפיסה חדשה של המציאות שניסויים מודרניים איששו אותה שוב ושוב, והיא נחשבת כיום לאחד המאפיינים המרתקים והמסתוריים ביותר של המכניקה הקוונטית.

לפני מדידה, שני החלקיקים בסופרפוזיציה (מספר מצבים אפשריים בו-זמנית); אחרי מדידה, מדידת אחד מהם גורמת לקריסת הסופרפוזיציה המשותפת שלהם לאחד המצבים ונקבע מייד גם מצבו של השני. אם נדע את הספין או הקיטוב של חלקיק אחד נוכל לדעת בוודאות תכונות אלה של החלקיק השני מבלי לצפות בו, גם ממרחק.

דוגמה פשוטה שממחישה את העניין. נתאר לעצמנו שני מטבעות משוזרים קוונטית: לפני מדידה שניהם גם עץ וגם פלי. אחרי מדידה של אחד מצבו של השני נקבע מיידית, בלי קשר למרחק. אם אחד עץ, השני יהיה פלי באופן אוטומטי, ולהיפך.

אבל פגיעה יזומה כמו הפעלת כוח או שדה אלקטרומגנטי, שינוי תנע או ספין על חלקיק אחד לא ישפיע על השני כי שזירה היא קורלציה קוונטית התלויה בפונקציית הגל ולא מנגנון פיזיקלי. רק מדידות עושות את הטריק כי פגיעה יזומה לא משנה את פונקציית הגל. למעשה, זו תהיה רק פגיעה מקומית בחלקיק הראשון, מה שיכול להרוס את השזירה אבל החלקיק השני לא ישתנה כתוצאה מכך. בכל מקרה, נושא מרתק זה שנוי במחלוקת.

אז איך יכולה להתרחש קורלציה מרחוק בלי שום מגע?

קורלציה קלאסית דורשת השפעה ישירה כמו מגע פיזי, השפעה אלקטרומגנטית וכו'. קורלציה קוונטית — לא דורשת מגע לאחר ההפרדה.

בשזירה קוונטית, שני חלקיקים נוצרים ביחד כמערכת אחת, לא כשני חלקיקים נפרדים. הם לא "שני דברים נפרדים" עם תכונות משלהם — אלא מערכת אחת שמתוארת על ידי פונקציית גל אחת.

כאשר הם מתרחקים, הפונקציה הזו לא מתפצלת. היא עדיין מתארת מצב משותף.

לכן, כאשר מודדים אחד מהם, לא מגלים תכונה של החלקיק עצמו, אלא תכונה של המערכת המשותפת, וזו קובעת גם את תוצאת המדידה של החלקיק השני מאחר שמדובר במערכת אחת. כלומר, המדידה של חלקיק אחד מפרקת את פונקציית הגל ההסתברותית ומקריסה אותה למצב קוונקרטי לא הסתברותי.

אלברט איינשטיין התייחס לתופעה זו בספקנות וכינה אותה "פעולת רפאים מרחוק" מאחר שנראה שישנה העברת מידע בין החלקיקים באופן מידי במהירות הגבוהה ממהירות האור שהיא סופית, מה שסותר את תורת היחסות הפרטית שלו.

אבל ניסוי בל הוכיח מעל לכל ספק שכאשר מתבצעת מדידה על חלקיק אחד והסופרפוזיציה שלו נעלמת למצב קוונקרטי ספציפי, שום אינפורמציה לא מועברת לחלקיק השני שיעשה אותו הדבר. הקורלציה נובעת מהמצב המשותף, מה שקשה למוח האנושי האמון על המכניקה הקלאסית לקלוט, אבל זאת המציאות הקוונטית שצריכים להתרגל אליה. איינשטיין יכול להירגע, התיאוריה שלו עדיין בתוקף.

למה הדבר דומה: לשני רקדנים מקצועיים שלומדים ביחד את אותו הריקוד. אם נציב את הרקדנים במרחק אלפי ק"מ זה מזה והם יתחילו לרקוד באותו הזמן בדיוק, אז ברור שצפיה בצעד של רקדן אחד משמעותה שנוכל לדעת שהרקדן השני עושה בדיוק את אותו הצעד במרחק אלפי ק"מ באופן מיידי מבלי שנצפה בו.

אבל איך יוצרים חלקיקים שזורים?

משגרים פוטון לייזר לתוך גביש. לעיתים נדירות, הפוטון מתפרק לשני פוטונים חלשים יותר. שני הפוטונים החדשים נוצרים בו-זמנית ובאופן שמקיים חוקי שימור: אנרגיה, תנע, ספין, פולריזציה. כלומר, אם נצרף את התכונות של שני הפוטונים החלשים נקבל בדיוק את התכונה של הפוטון המקורי. בעצם, השניים הם אחד. בגלל השימור הזה, הפוטונים נמצאים במצב שזור וחולקים מצב משותף — למשל פולריזציה או תנע שזורים. יתכנו גם יותר משני חלקיקים שזורים.

אבל נשאלת השאלה, איך יודעים שהחלקיקים נמצאים מלכתחילה בסופרפוזיציה לפני המדידה אם כל מדידה מקריסה אותה. ובכן, באמצעות ניסויים מורכבים ועדינים כמו אי-שוויון בל, שזה לא המקום לפרט.

## ההבדל בין סופרפוזיציה לפונקציית הגל

מהי סופרפוזיציה?

סופרפוזיציה קוונטית (עקרון ההרכבה) היא מושג יסודי במכניקה קוונטית האומר שחלקיק יכול להימצא בכמה מצבים של תכונה פיסיקלית (כמו מיקום, אנרגיה או ספין) בו-זמנית, עד לרגע המדידה, המכריח אותו "לקרוס" למצב יחיד.

למשל, בניסוי שני הסדקים (ראה למעלה) אלקטרון יוצר התאבכות מה שמוכיח שהוא יכול לעבור בו-זמנית דרך שני הסדקים. כלומר, האלקטרון מתקיים בשני מצבים אפשריים בו זמנית הנמצאים בסופרפוזיציה. המשמעות היא שלא ניתן לדעת היכן האלקטרון נמצא או ימצא בדיוק, אלא מה ההסתברות למצוא אותו במקום מסוים, או בעצם מה הסיכוי של אלקטרון לעבור דרך סדק מסוים, ואם הסיכוי שווה נוצרת התאבכות.

דוגמה נוספת, מחשב רגיל עובד על סיביות בינאריות שיכולות לקבל ערכים של 0 או 1. לעומת זאת סיבית קוונטית (קיוביט) יכולה לקבל ערכים של 0 ו-1 בו זמנית באופן הסתברותי. זו הסיבה שמחשב קוונטי יכול להיות מהיר יותר ממחשב רגיל כי הוא יכול לנצל יותר אפשרויות חישוביות בזמנית (חישוב מקבילי).

מהי פונקציית הגל?

פונקציית הגל היא תיאור מתמטי מלא המכיל את כל המידע שניתן לדעת על חלקיק או מערכת קוונטית, ובאמצעותה מחשבים את ההסתברות למצוא את החלקיק במקום או במצב מסוים.

פונקציית הגל היא למעשה תוצר מתמטי המתאר את מצבה של מערכת או חלקיק כתוצאה של סופרפוזיציה. במילים אחרות, הסופרפוזיציה היא למעשה מה קיים בטבע ברמה הקוונטית, ופונקציית הגל היא תיאור מתמטי של זה.

כדי לחשב את ההסתברות של חלקיק להימצא במיקום מסוים בהתאם לפונקציית הגל שלו בזמן כלשהו משתמשים במשוואת שרדינגר שהוכחה כיעילה בחיזוי התנהגותם של חלקיקים בטבע ברמה הקוונטית. משוואת שרדינגר לא משמשת רק לחישוב מיקום הסתברותי של חלקיק. היא מתארת את כל המערכת הקוונטית לאורך זמן, כולל אנרגיה, תנע, התאבכות, מנהור ועוד.

בגלל חשיבותה הרבה של המשוואה שרדינגר זכה בפרס נובל לפיזיקה בשנת 1933.

## החתול של שרדינגר ופרשנות קופנהגן

"החתול של שרדינגר" הוא ניסוי מחשבתי בתורת הקוונטים, הממחיש את האבסורד שבמצב של סופרפוזיציה חתול יכול להיות גם חי וגם מת בו זמנית.

הניסוי שהוצג על ידי הפיזיקאי האוסטרי ארווין שרדינגר ב-1935, נועד להמחיש את הבעיות והפרדוקסים בתורת הקוונטים במיוחד כשמנסים ליישם אותה על העולם היומיומי. בניסוי מחשבתי זה, חתול מוכנס לתיבה אטומה, שבתוכה נמצא אטום של חומר רדיואקטיבי. לאטום יש סיכוי של 50% להתפרק במהלך הניסוי. אם החומר יתפרק, חיישן יגרום לשחרור רעל שיגרום למות החתול. אם החומר לא יתפרק, החתול יישאר בחיים. מהו הפרדוקס? כל עוד התיבה סגורה, לא ניתן לדעת אם החתול חי או מת. על פי פרשנות קופנהגן (ראה למטה) של תורת הקוונטים, החתול נמצא במצב של סופרפוזיציה, כלומר הוא גם חי וגם מת בו זמנית, עד שתבצע מדידה (פתיחת התיבה) ואז החתול ימצא במצב אחד ברור, או במלים אחרות, הסופרפוזיציה תקרוס למצב יחיד.

ארווין שרדינגר התנגד לפרשנות קופנהגן משום שראה בה אבסורד המנוגד לאינטואיציה ולמציאות המאקרוסקופית. הוא דחה את הרעיון שחלקיק נמצא בסופרפוזיציה (מספר מצבים בו-זמנית) עד לרגע המדידה, וכי המדידה עצמה קובעת את המציאות. כדי להמחיש את הבעייתיות, הגה את ניסוי ה"חתול של שרדינגר", שבו חתול חי ומת בו-זמנית.

סיבות מרכזיות להתנגדות:

בעיית המדידה: שרדינגר לא קיבל את הרעיון שהמציאות הפיזיקלית תלויה בצופה או בפעולת המדידה.

סופרפוזיציה במערכות גדולות: הוא מצא את הרעיון שחתול (עצם מאקרוסקופי) יכול להיות חי ומת בו-זמנית ("חי-מת") כאבסורדי. אם חלקיק רדיואקטיבי יכול להיות בסופרפוזיציה, והחתול גורלו תלוי בחלקיק, אז מן הסתם גם החתול חייב להיות בסופרפוזיציה.

דרישה למציאות אובייקטיבית: שרדינגר, בדומה לאיינשטיין (אלוהים לא מטיל קוביות), האמין שהפיזיקה צריכה לתאר מציאות אובייקטיבית ורציפה, ולא הסתברויות בלבד כמו במכניקה קוונטית.

העדפת השכל הישר: הוא התקשה לקבל את הניתוק של המכניקה הקוונטית מהאינטואיציה היומיומית.

החתול של שרדינגר נועד להראות כיצד פרשנות קופנהגן מביאה את המכניקה הקוונטית למבוי סתום.

פרשנות קופנהגן היא הפרשנות הנפוצה של המכניקה הקוונטית. מקורה בהגותם של נילס בוהר (דנמרק, פרס נובל בפיזיקה 1922) ואחרים, ומשמעותה שגדלים פיזיקליים קיימים ומוגדרים היטב רק אחרי שנמדדו בפועל על ידי מערכת מדידה מוגדרת היטב. כלומר, גודל פיזיקלי כלשהו נקבע רק בעת ביצוע המדידה.

לדוגמה: בניסוי שני הסדקים, לאלקטרון אין מיקום מוגדר אלא ברגע שהצופה מחליט לבצע מדידה על ידי סגירת אחד הסדקים או כאשר האלקטרון פוגע במסך. באופן חד יותר, לפי פרשנות זו בניסוחו הנחרץ של בוהר, לא ניתן להתייחס למהירות של אלקטרון לפני שהתבצע ניסוי למדוד אותה, כי רק אחרי המדידה לאלקטרון יש מהירות – לפני זה המהירות אינה ודאית אלא הסתברותית בלבד.

הפרשנות גורסת כי לפני המדידה לחלקיק אין מצב מוגדר אלא פונקציית גל - מצב קוונטי שמתאר את התוצאות האפשריות במדידה בצירוף ההסתברות לקבל אותן. רק בעת המדידה עצמה מתרחשת קריסה ובה החלקיק מקבל מצב פיזיקלי מוגדר (אחת מהתוצאות האפשריות). בוהר קבע שקריסה זו וקביעת המצב שאליו קורסת פונקציית הגל מתרחשת באופן אקראי לחלוטין.

כאמור, שרדינגר התנגד באופן החלטי לפרשנות קופנהגן. הוא חלק על הרעיון שהמציאות הקוונטית אינה מוגדרת עד לרגע המדידה. משתמע כביכול שלא לקטרוֹן אין מהירות לפני מדידה ולמעשה אין לה קיום עצמאי במנותק מהצופה, ואולי האלקטרון בכלל לא קיים. ביקורתו של שרדינגר הביאה בעקבותיה לפרשנויות שונות למכניקה הקוונטית.

עניין התלות של הקיום בצופה (מדידה), או האם יש קיום עצמאי בלי מדידה. העלה מספר שאלות פילוסופיות. "האם כשאני עוצם את עיני, הירח נעלם?", שאל איינשטיין. ברור לנו שלא, וברור לנו שלא יהיה זה המצב גם אם כולנו נעצום את עינינו. ואולם, כיצד אנו יכולים להיות בטוחים שהירח קיים, למרות שאין צופה?

כאן המקום לציין שאיינשטיין לא פסל את המכניקה הקוונטית והתחזיות המדויקות שלה, הוא רק שלל את האופי ההסתברותי שלה וחשב שהתיאוריה לא שלמה ועם הזמן יתווספו התיקונים הנדרשים.

### תופעת המנהור

מנהור קוונטי הוא תופעה שבה חלקיק עובר מחסום שאמור להיות בלתי-עביר עבורו מבחינה אנרגטית, בגלל שההתנהגות שלו נקבעת על ידי פונקציית גל ולא על ידי מסלול חד-משמעי. זו אחת ההוכחות החזקות לכך שהעולם הקוונטי פועל לפי חוקים שונים לחלוטין מהאינטואיציה היומיומית שלנו.

בהמשלה, תופעת המנהור היא תופעה שבה כדור הנזרק לעבר קיר, יעבור דרך הקיר ויפיע בצידו השני. במכניקה הקלאסית התופעה איננה יכולה להתרחש: חלקיקים אינם אמורים להימצא באזור שאין להם מספיק אנרגיה להגיע לשם. התופעה נובעת מאופיים הגלי של החלקיקים על פי תורת הקוונטים, ולכן ניתן לצפות בתופעה בתנאים בהם מכניקת הקוונטים תקפה - עבור חלקיקים קטנים ובטמפרטורות נמוכות. התופעה יכולה להתרחש מאחר שישנה הסתברות מסוימת שהחלקיק או יותר נכון פונקציית הגל שלו תחדור מבעד למחסום. או במלים אחרות ישנה הסתברות שהחלקיק ימצא גם מעבר למחסום.

מדוע זה קורה? במכניקה הקלאסית, אם לחלקיק אין מספיק אנרגיה כדי לעבור מחסום הוא נעצר. במכניקה קוונטית לחלקיק יש פונקציית גל, לא מיקום חד-משמעי. פונקציית הגל יכולה לעבור דרך מחסום ולהמשיך לצד השני, או במלים אחרות, ישנה הסתברות שהחלקיק ימצא מעבר למחסום. לכן יש הסתברות לא אפסית למצוא את החלקיק מעבר למחסום, גם אם אין לו אנרגיה מספיקה "לטפס" מעליו. זה לא שהחלקיק שובר את החוקים - זה פשוט חוק אחר לגמרי.

תופעת המנהור הוכחה בניסויים רבים ויש לה שימושים רבים כיום.

### עקרון האי-ודאות של הייזנברג

עקרון האי-ודאות של הייזנברג (1927) הוא חוק יסוד במכניקה קוונטית, הקובע כי לא ניתן לדעת בו-זמנית ובדיוק מוחלט זוגות של תכונות פיזיקליות מסוימות של חלקיק, כגון מיקום ותנע (מהירות המסה). ככל שנדייק יותר במדידת מיקומו של חלקיק, כך תקטן היכולת לדעת את מהירותו המדויקת, ולהפך.

האי-ודאות אינה נובעת מכלי מדידה לא מדויקים מספיק, אלא היא תכונה מובנית של הטבע ברמה התת-אטומית.

הניסוח המתמטי: המכפלה של אי-הוודאות במיקום של חלקיק באי-הוודאות בתנע שלו תמיד גדולה או שווה לערך קבוע.

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq h / (4 \pi)$$

$\Delta x$  = אי הודאות במיקום

$\Delta p$  = אי הוודאות בתנע

$h$  = קבוע פלאנק

משמעות המשוואה שהקטנת אי-הוודאות במיקום בהכרח גוררת הגדלה של אי-הוודאות בתנע (מהירות) ולהפך. עיקרון אי-הוודאות תקף גם עבור היחס שבין אנרגיה וזמן. העיקרון משמעותי עבור אטומים וחלקיקים, אך זניח עבור עצמים יומיומיים. הייזנברג הראה שזהו תוצר של הדו-פרצופיות גל-חלקיק של החומר. העיקרון מציג גישה הסתברותית לעולם הקוונטי, בניגוד לדטרמיניזם של הפיזיקה הקלאסית, ועורר ויכוחים עזים על טבע המציאות, בין היתר בין נילס בוהר לאלברט איינשטיין.

עיקרון אי הודאות פורסם ב-1927 על ידי הייזנברג שהיה ממניחי היסודות למכניקת הקוונטים, חתן פרס נובל לפיזיקה לשנת 1932.

### מחשב קוונטי

מחשב קוונטי הוא סוג חדשני של מחשב שמבוסס על עקרונות מכניקה קוונטית שעניינה התנהגות חלקיקים זעירים כמו אלקטרונים ופוטונים. במקום ביטים רגילים במחשב רגיל שיכולים להיות 0 או 1, מחשב קוונטי משתמש ב-קיוביטים\*, שיכולים להיות גם 0 וגם 1 בו-זמנית הנמצאים בסופרפוזיציה.

וזו הסיבה שמחשב קוונטי יכול להיות מהיר יותר ממחשב רגיל כי הוא יכול לנצל יותר אפשרויות חישוביות בו-זמנית (חישוב מקבילי). בעוד שמחשב רגיל בודק אפשרויות בזו אחר זו.

גם במחשב רגיל יש עיבוד מקבילי, אבל הוא מאוד שונה מהעיבוד המקבילי שקורה במחשב קוונטי. בפועל מדובר בשתי טכנולוגיות שונות לגמרי.

עיבוד מקבילי במחשב רגיל מתבצע על ידי כמה ליבות או כמה מחשבים שעובדים במקביל. כל ליבה מחשבת ביט אחד בכל פעם — 0 או 1. אם יש 1000 אפשרויות לבדוק, צריך לחלק אותן בין הליבות ולעבור עליהן אחת-אחת לפי הסדר. זה כמו להעסיק הרבה עובדים, שכל אחד בודק אפשרות אחרת.

עיבוד מקבילי במחשב קוונטי מבוסס על סופרפוזיציה. קיוביט אחד יכול להיות גם 0 וגם 1 בו-זמנית.  $n$  קיוביטים יכולים לייצג  $2^n$  מצבים שונים בו-זמנית. המחשב הקוונטי לא בודק כל אפשרות בנפרד, אלא מחשב את כל המצבים יחד. זה לא כמו הרבה עובדים שעושים את העבודה - זה כמו עובד אחד שיכול להיות בכל המקומות בו-זמנית.

מחשב רגיל, גם עם אלפי ליבות, צריך לעבור על כל אפשרות לפי הסדר. במחשב קוונטי, האלגוריתמים מנצלים את הסופרפוזיציה והשזירה כדי לכווץ את מספר הצעדים בצורה דרמטית.

אז למה לא פשוט להוסיף עוד ליבות למחשב רגיל? כי גם מיליון ליבות לא משתוות ל- $2^n$  מצבים בו-זמנית. 10 קיוביטים =  $2^{10} = 1024$  מצבים, 50 קיוביטים = יותר מצבים ממספר האטומים בכדור הארץ, 100 קיוביטים = מספר אסטרונומי של מצבים במקביל. מחשב רגיל לא יכול להתקרב לזה.

דוגמה, פירוק מספרים גדולים השימושי לפיצוח והגנת הצפנה - בניית מפתחות אבטחה חזקים או שבירת קיימים. למחשב רגיל זה ייקח אלפי שנים, למחשב קוונטי תאורטי - שעות.

איפה אנחנו היום? הטכנולוגיה עדיין בראשית הדרך: מחשבים קוונטיים ניסיוניים קיימים, אבל הם קטנים, רועשים ומוגבלים כי הם מאוד רגישים לסביבה שלהם. כל הפרעה קטנה - חום, רעידות, קרינה, אפילו שדות מגנטיים חלשים - יכולה לשבש את מצב הקיוביטים ולהרוס את החישוב. הם עדיין לא מחליפים מחשבים רגילים, אלא משלימים אותם. החזון לעתיד זה מחשבים קוונטיים גדולים ויציבים שיוכלו לבצע חישובים שאפילו מחשבי-על לא מסוגלים לבצע בזמן סביר.

-----

\* ביט של מחשב רגיל מיושם על ידי כל מערכת פיזיקלית שיכולה לייצג שני מצבים ברורים של 0 או 1 – כמו טרנזיסטור, מעגל חשמלי פתוח או סגור, או נקודת אור LCD על מסך דולקת או כבויה. לעומת זאת קיוביט (Qubit - quantum bit) של מחשב קוונטי מיושם על ידי מערכת שמצייתת לחוקים קוונטיים בטמפרטורה הקרובה לאפס המוחלט (מוליכות על) כדי למנוע הפרעות ושיבושים. מדובר בניצול תכונות של חלקיקים ברמה התת-אטומית הנמצאים בסופרפוזיציה כמו כיוון שונה של זרמים חשמליים זעירים, רמות אנרגיה שונות של אלקטרונים, פולריזציה של פוטונים (כיוון תנודות האור), הספין של חלקיקים תת-אטומיים, ועוד.