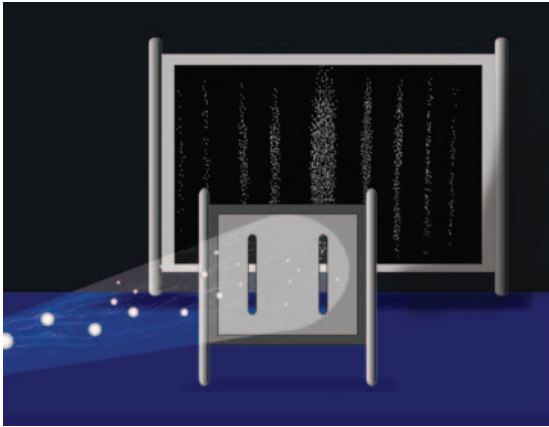


# העולם הקוונטי בהתקנים אלקטרוניים זעירים

מאת **מוטי הייבלום**



**איור 1:** ההתנהגות הספקטרלית של קרינת גוף שחור. התאוריה האלקטרומגנטית הקלאסית צופה התבררות באורכי הגל הקצרים שתוביל לעיוורון (קו שחור). הקרינה שנמדדת מראה מקסימום באורכי גל מסוימים, בעצמה ובאורך גל התלויים בטמפרטורות הגוף, ואילו באורכי גל קצרים מאוד או ארוכים מאוד היא דועכת (ככל שהטמפרטורה עולה שיהי הספקטרום נע מהאדום לעבר הירוק ולעבר הכחול).

כל חלקיק זעיר כגל ואת התנהגותם של חלקיקים זעירים אלה שלעתים היא כגלים ולעתים כחלקיקים. ועוד דוגמאות: תוצאות כל ניסוי תלויות בסביבה הבוחנת את הניסוי, דהיינו בחינה מדוקדקת של הסביבה תשפיע דרסטית על התנהגות החלקיקים. או עקרון הסופרפוזיציה, שלפיו כל חלקיק יכול להימצא ביותר ממצב אחד (של אנרגייה, תנע, מקום וכו') בו־זמנית. ולסיום, תכונות חלקיקים ממוזערים באזורים תחומים, הנובעות מהתנהגותם הגלית, הן קוונטיות, כלומר האנרגייה או התנע של החלקיקים אינם רציפים אלא יכולים לקבל ערכים בדידים בלבד. יסודות אלה ועוד, שעליהם מבוססת המכניקה הקוונטית, והנראים מוזרים, למרבה הפלא מסבירים כמעט את כל התופעות הפיזיקליות הנמדדות ומאפשרים לחזות את תוצאות מרבית הניסויים.

למשל, קרינת גוף שחור, שהוזכרה למעלה, הוסברה בניצול הקווינטיות של האנרגייה וביצירת המושג פוטון, שהוא נושא האנרגייה. המהפכה הייתה בהבנה שהאנרגייה של הפוטון אינה

ג'יימס קלרק מקסוול, מגדולי הפיזיקאים בהיסטוריה המודרנית, טען בנאום שנשא בשנת 1871 כי "בעוד כמה שנים כל נוסחאות הפיזיקה תהיינה ידועות וכל הקבועים הפיזיקליים יהיו ידועים ברמת דיוק זו או אחרת, ומה שיותר לאנשי המדע לעשות יהיה... לחשב את אותם קבועים ברמת דיוק גבוהה יותר". ואולם



טענתו זו, אשר ביטאה את הלך הרוח ששרר באותה העת ("אנו מבינים כיום את חוקי הפיזיקה"), נתחזרה כאופטימית יתר על המידה כאשר תופעות אחדות שנצפו אז הן עדיין בגדר תעלומה. אחת התופעות הייתה קרינת "גוף שחור" – הקרינה הנפלטת מפתח קטן בתנור חם סגור. התאוריה האלקטרומגנטית דאז (הקלאסית) צפתה כי עצמת קרינה זו תתבדר ("קטסטרופת האולטרה-סגול") באורכי גל קצרים (בתחום האולטרה-סגול). אולם הקרינה שנמדדה בפועל הייתה נמוכה מאוד באורכי גל קצרים וגם באורכי גל ארוכים, עם מקסימום ביניהם התלוי בטמפרטורת התנור (איור 1). תופעה אחרת הייתה קשורה לאלקטרוניים באטום: לאחר הגילוי שהלה בנוי מגרעין טעון חיובית ומאלקטרוניים המקיפים אותו, לא היה מובן מדוע האלקטרוניים אינם קורסים לתוך הגרעין, שכן בתנועתם מסביב לו הם צפויים על פי הפיזיקה הקלאסית לפלוט קרינה, לאבד אנרגייה ולקרוס לתוכו (איור 2).

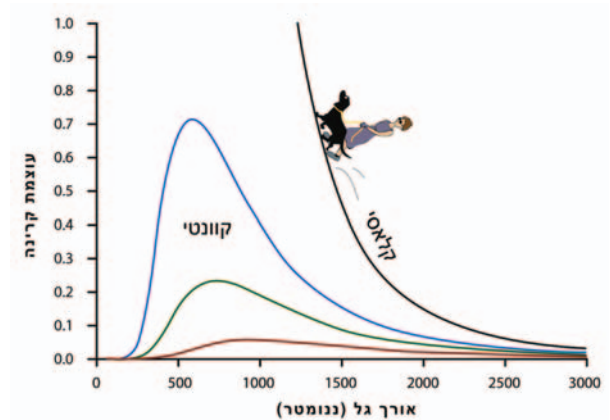
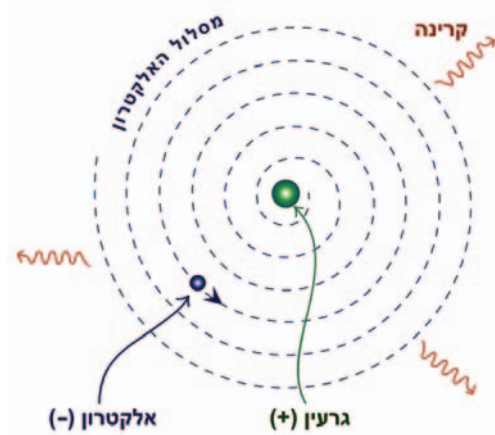
הצורך להבין ולהסביר תופעות אלו ואחרות הביא לפיתוחה של תאוריה חדשה המכונה בשם "הפיזיקה הקוונטית". הפיזיקה הקוונטית שונה במהותה מהפיזיקה הקלאסית (הניוטונית), האינטואיטיבית והמוכרת לנו מתופעות יום-יומיות, ומתבססת על כמה אקסיומות יסוד לא אינטואיטיביות בעליל. לדוגמה, תוצאות כל ניסוי ניתנות לחיזוי באופן הסתברותי בלבד, ורק לאחר מספר רב של ניסויים אפשר לגלות מהי התוצאה השכיחה ביותר. מהנחת יסוד זו נולדה "פונקציית הגל", המתארת לפעמים

הורסת ומצב האלקטרון לא יהיה יציב. הגל העומד, במקרה הפשוט, מתאר למעשה אלקטרון ה"מרוח" סביב הגרעין ונמצא בהסתברות זהה לאורך כל ההיקף. תאוריה זו מסבירה את הימצאות האורביטלים השונים סביב הגרעין (רמות אנרגייה בדידות). כל אחד מקורו בהתאבכות אלקטרוניים באורך גל שונה, וכל אחד מאכלס מספר אלקטרונים מסוים במצב היציב. האלקטרונים יימצאו רק באותם אורביטלים ולעולם לא "יפלו" לתוך הגרעין (איור 2).

תופעה אחרת המדגימה את הגרעין המהותי של הפיזיקה הקוונטית נמדדה בניסוי - "ניסוי שני הסדקים". כאשר חלקיקים משוגרים אל עבר מסך שנמצא מאחורי מחסום ובו שני סדקים, יגיעו החלקיקים שעוברים דרך הסדקים אל המסך וישקפו עליו את תמונת שני הסדקים. אולם כאשר הניסוי מבוצע עם אלקטרונים למשל, תופיע על המסך תמונת התאבכות, דהיינו יופיעו על המסך אלקטרונים באזורים שהמחסום מסתיר. ולא זה בלבד כי אם האלקטרונים המגיעים אל המסך מתארים תמונה מחזורית - אזורים "שחורים" ואזורים "בהירים" - היות שאלקטרון שמגיע למסך מייצר נקודת אור זעירה המעידה שחלקיק אמנם הגיע לשם (איור 3). הדרך היחידה להסביר את התופעה היא שכשהאלקטרון משוגר מהמקור כחלקיק, הוא נע לעבר המחסום כגל ועובר בו-זמנית דרך שני הסדקים. שני הגלים היוצאים מהסדקים מתאבכים זה עם זה ובהגיעם למסך הם יוצרים תמונת התאבכות - שוב של חלקיקים (אלה נקודות האור על המסך). כל ניסיון לבדוק דרך איזה סדק עבר כל אלקטרון נועד מראש לכישלון. אמנם יתגלה הסדק שבו עבר האלקטרון, אך תמונת ההתאבכות תיעלם והתמונה הקלאסית (של חלקיקים צפידים קלאסיים) תופיע מחדש.

יש לציין שהיום אנו יודעים להסביר תופעות פיזיקליות באמצעות ניצול חוקי הפיזיקה הקוונטית, אך איננו מבינים את מקורן או סיבתן. מקס פלנק, הראשון שהציע בתחילת המאה הקודמת שהערכים הפיזיקליים הם מקוונטים (ולא רציפים), אמר: "אם משהו אומר שהוא מסוגל לחשוב על קוונטים מבלי להסתחרר, משמע כי הוא לא הבין דבר לגביהם"; ריצ'ארד פיינמן, מגדולי הפיזיקאים במאה הקודמת, אמר: "אני חושב שאני יכול לומר בבטחה שאיש אינו מבין התנהגות קוונטית".

מה לכל זה ולרכיבים אלקטרוניים ממוזערים? ההערכה היא שכ-30% מהתוצר הלאומי של המדינות המפותחות מבוססים בדרך זו או אחרת על הפיזיקה הקוונטית. מפתיע?



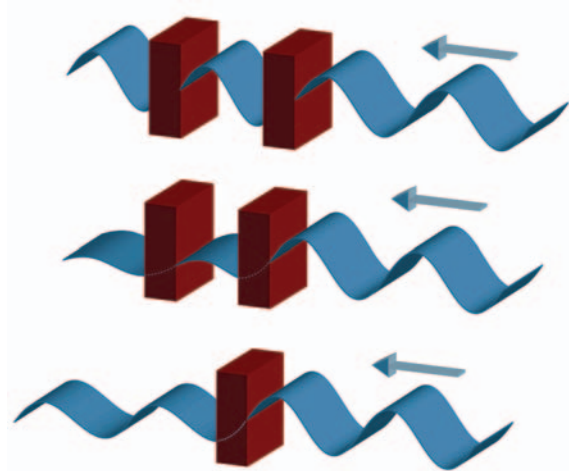
**איור 2:** התנהגות אלקטרונים באטום. א. לפי תורת האלקטרון מגנטיות הקלאסית, האלקטרון מואץ בנועו סביב הגרעין (תאוצה צנטריפטלית), ולכן הוא קורן אנרגייה אלקטרומגנטית וצפוי לקרום לעבר הגרעין החיובי. ב. לפי הפיזיקה הקוונטית, האלקטרון מתנהג כגל הנע סביב הגרעין, מתאבך עם עצמו, וההתאבכות הבונה יוצרת גל עומד שאפשרי רק באורביטלים מסוימים (רמות אנרגייה בדידות). לכן אלקטרונים יימצאו רק באורביטלים אלה ולא יקרום לגרעין.

תלויה בעצמת האור אלא באורך הגל שלו בלבד. עצמת האור פרופורציונלית למספר הפוטונים. לאחר שהניח זאת הצליח מקס פלנק, בתחילת המאה העשרים, להסביר את קרינת הגוף השחור. גם דוגמת "אי־קריסת האלקטרונים לגרעין האטום" ניתנת עתה להסבר אם לצורך ההבנה ננצל את ההתנהגות הגלית של האלקטרון. בהתנהגותו כגל המקיף את הגרעין האלקטרון מתאבך עם עצמו (ראש הגל פוגש את זנבו), וכך נוצר גל עומד לאורך מסלול ההיקף רק כאשר מספר שלם של אורכי גל תואם את היקף המסלול. אם לא, ההתאבכות תהיה

בהתנהגותם הגלית האלקטרוניים נרתעים מהאטומים שבדרכם ומוחזרים שנית קדימה מהאטומים שאותם כבר עברו וכן הלאה, וכך נוצרת התאבכות בין כל שברי הגלים הנעים קדימה ואחורה במבנה המחזורי, שבו האטומים מסודרים בגביש המוצק. ההתאבכות מאפשרת לגלים (אלקטרוניים) לנוע קדימה ללא הפרעה באנרגיות מסוימות שנוצרת בהן התאבכות בונה ולמנוע לחלוטין תנועה באנרגיות אחרות שהתאבכות בהן הורסת. במתכות תחום האנרגיות המאפשר תנועה חופשית זמין לאלקטרוניים, ובמבודדים – לא. תוצאה זו נובעת מפתרון משוואת הגלים בגבישים מחזוריים והיא אינה אינטואיטיבית. הדוגמה ממחישה את חשיבותה של הפיזיקה הקוונטית, שהביאה בסוף שנות הארבעים של המאה הקודמת להמצאת הטרנזיסטור – אולי ההמצאה הפיזיקלית החשובה ביותר אי פעם.

תעשיית המיקרואלקטרוניקה מתבססת על הטרנזיסטור. הטרנזיסטור בנוי מחומרים מוליכים-למחצה כמו סיליקון, גרמניום, גליום ארסניד ועוד. חומרים אלה אינם מוליכים טובים (כמתכות) ואינם מבודדים טובים (כזכוכית), אך יתרונם הוא באפשרות לשנות את מוליכותם באמצעות תוספת סיגים (זיהומים) לחומר או בהפעלת שדות חשמליים. פעולתו של הטרנזיסטור, בהיותו מגבר קטן, מושתתת על העיקרון ששינוי קטן בשדה חשמלי באחד מההדקים שלו מביא לשינוי גדול במוליכות שלו בזוג הדקים אחר ולכן גם בזרם הזורם בהם. שינוי קטן הגורם לשינוי גדול פירושו הגברה (כיתרון הכוח באמצעות גלגלת או בנדנדה לא סימטרית). בהיותם התקנים מְקרוסקופיים התנהגו הטרנזיסטורים בעבר הקרוב וגם היום התנהגות סמי-קלאסית, דהיינו לאחר רתימת הפיזיקה הקוונטית להבנת ההולכה במוליך-למחצה ומציאת האנרגיות שבהן ההולכה מותרת, התנהגותם מוסברת בקלות יחסית כאשר באנרגיות המותרות להולכה האלקטרוניים מתנהגים כחלקיקים צפידים קלאסיים לכל דבר, הנעים בחומר בחופשיות.

החל משנות החמישים של המאה הקודמת קיים דחף מתמיד למזער את הטרנזיסטורים. סיבות רבות לכך, למשל קבלת מהירות תגובה גבוהה יותר, חיסכון באנרגיה ובמקום, ייצור מעגלים אלקטרוניים קומפקטיים ונגישים ועלות נמוכה. אם בשנות החמישים של המאה הקודמת שפורות הוואקום הגדולות (החמות והיקרות) היו לב המערכות האלקטרוניות, ומחשב-על כלל כמה אלפים מהן בחדר ממוזג ותחנת כוח קטנה בצדו, היום בתוך כל מחשב שולחני, שגודל מערכת



**איור 3:** התאבכות שני הסדקים. גלי מים, גלי קול או גלי אור העוברים דרך שני סדקים במחסום אטום יוצרים תמונת התאבכות רציפה על פני מסך מאחורי המחסום. חלקיקים רגילים משקפים את תמונת שני הסדקים על המסך. אך חלקיקים קוונטיים, כמו האלקטרוניים שבאור, מייצרים תמונת התאבכות חלקיקית (כגלים) על המסך, דהיינו ישנם אזורים שבהם מספר החלקיקים הפוגע הוא גדול, ואזורים שבהם חלקיקים אינם פוגעים כלל. אפשר להבין זאת רק אם האלקטרון "מתחפש" לגל ועובר דרך שני הסדקים בו-זמנית. גלי האלקטרון משני הסדקים מתאבכים בהגעתם למסך. עצמת הגל המגיע בכל נקודה ונקודה קובעת את הסתברות הפגיעה של האלקטרון. לאחר מספר רב של ניסויים (מספר רב של אלקטרוניים משוגרים) מתקבלת תמונת "התאבכות חלקיקית".

לא כאשר מחלחלת התבונה שכל מוצרי המיקרואלקטרוניקה, המשובצים כיום כמעט בכל מערכת או מוצר שאנו משתמשים בהם – כמו טלפונים, טלוויזיות, מערכות שמע, מצלמות, מחשבים, מכוניות, מתקני הבית השונים ועוד רבים אחרים – מבוססים על הפיזיקה הקוונטית.

זה מתחיל בעובדה שאיננו יכולים להסביר את תופעת הולכת הזרם החשמלי על ידי אלקטרוניים במוליך באמצעות הפיזיקה הקלאסית. כל מוצק בנוי ממספר עצום ורב של אטומים, ולכן מתעוררת השאלה איך האלקטרוניים מצליחים לנוע במוליך כאשר כל כך הרבה מחסומים (אטומי המוליך) עומדים בדרכם. ועוד נשאל: מה גורם לחומר מסוים להיות מוליך טוב (מתכת) ולחומר אחר להיות מבודד (זכוכית, עץ)? הבנת המוליכות (על ידי פליקס בלוך, בעבודת התזה שלו ב-1928) התבססה על ההתנהגות הגלית של האלקטרוניים במוצקים:

כל התקן אלקטרוני בנוי ממספר רב של שכבות. נוסף על המוליכים-למחצה ישנן שכבות של מוליכים טובים ושכבות של מבודדים טובים. נשאלת השאלה מה קורה כאשר שכבות המבודדים הן דקות ביותר (וכיום הן אמנם דקות עד כדי כמה שכבות אטומיות בלבד). ובכן, מבודד עבה ימנע מהזרם לעבור דרכו ואכן זו מטרתו ככדור שנרתע מקיר כאשר מהירותו (והאנרגיה שלו) אינה מספקת לחודר דרכו. אולם בהגיע פונקציית הגל של האלקטרון למחסום המבודד, היא איננה נעלמת בתוכו לחלוטין אלא דועכת לתוכו באטיות; היה והמחסום דק ביותר, תציץ שארית זעירה מזנבה של פונקציית הגל מצדו האחר. השארית מתארת את ההסתברות שאותו אלקטרון יחדור את המבודד. ההסתברות אמנם קטנה, אולם מתבטאת בכך שמספר אלקטרונים לא זניח עובר את המבודד (היות שמספר האלקטרונים במוליך-למחצה, אלה המתנפצים על המחסום, הוא עצום ורב). הזרם ש"זילוג" דרך המבודד הדק מונע פעולה רצויה של ההתקן, ולכן יש למנוע אותו בכל מחיר. תופעה בלתי רצויה זו, הנקראת "תופעת המנהור" (tunnelling effect), מדמה את האלקטרון כחופר מנהרה בתוך המחסום שבה הוא עובר (איור 4א).

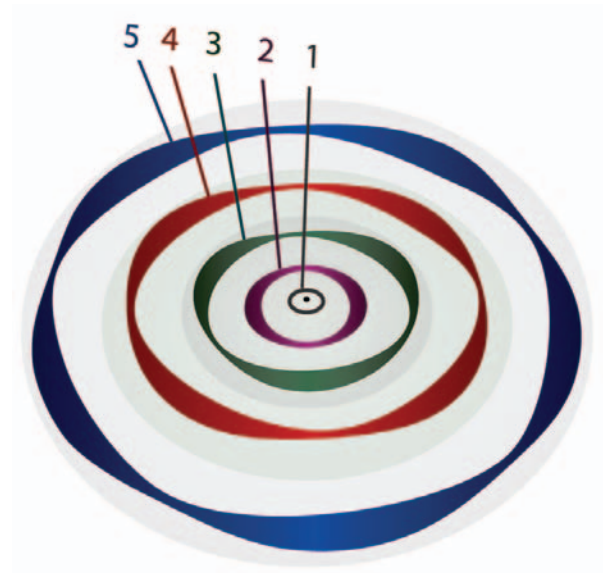
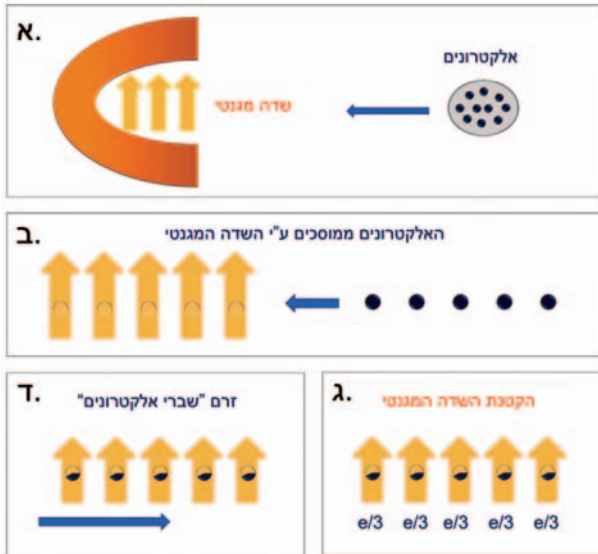
תופעה מוזרה שבעתים היא "תופעת המנהור התהודתי" (resonant tunnelling effect). דמיינו שני מחסומים, זה לאחר זה, רחוקים זה מזה מרחק-מה. אם נדבק בהבנה הקוונטית שרכשנו זה עתה, יהיה סביר לנחש שההסתברות לעבור את צמד המחסומים תהיה קטנה עשרת מונים מההסתברות לעבור מחסום אחד, היות שהחלק הקטן שיעבור את המחסום הראשון יונחת שנית (באותו יחס) על ידי המחסום השני (איור 4ב). זה אמנם יקרה ברבים מן המקרים, אך אם המרחק בין שני המחסומים יהיה קרוב ביותר למספר שלם של חצאי אורך גל של האלקטרון, יעברו כל האלקטרונים את צמד המחסומים ואלה יהיו כלא היו. במילים אחרות, הסתברות המעבר תהיה יחידה (איור 4ג). כיצד זה ייתכן? התופעה מזכירה את תנועת האלקטרונים בסריג המוליך כאשר האטומים המסודרים מפסיקים להיות מחסומים באנרגיות מסוימות עקב ההתאבכות הבונה. גם הגלים הכלואים בתווך שבין המחסומים נרתעים הלך וחזור ומסתכמים לכדי התאבכות בונה כזו שפונקציית הגל מופיעה בשלמותה בצד השני של צמד המחסומים.

ועוד דוגמה אחת לקינוח: מה יקרה אם נפעיל שדה מגנטי על אלקטרונים הכלואים בשכבה דקה? ובכן, בשדות נמוכים ינועו האלקטרונים במעגלים גדולים בתגובה לכוח לורנץ

העיבוד המרכזי שבו קטן מעשרה סמ"ר, דחוסים קרוב למיליארד טרנזיסטורים, ועלותו של כל אחד פחות מ-0.0001 הסנט. לעומת שפופרות הוואקום, שגודלן כמה סנטימטרים, גודלו של הטרנזיסטור המודרני הוא פחות ממיקרון (מיקרון הוא מיליונית המטר), ואזורי הרגישים קטנים אף מעשירית המיקרון. התפתחות מדהימה זו, במשך כחמישים שנה בלבד, העלתה לדוגמה את מהירות החישוב מאלפי פעולות בשנייה לכמה מיליארדים בשנייה.

עד כמה יהיה אפשר למזער? האם יש גבול למזעור הטרנזיסטור? הנחה סבירה היא שבקונצפט הטרנזיסטור הנוכחי, עם הדקי כניסה והדקי יציאה המופרדים אלה מאלה, לא יהיה אפשר למזער לגדלים הקרובים לאטומים בודדים. אך סביר בהחלט שיהיה אפשר להגיע לגודל המכיל מספר בודד של אלפי אטומים או אפילו פחות. אולם אפילו בגדלים הנוכחיים, כאשר כל טרנזיסטור מכיל היום למעלה ממיליארד אטומים, התנהגותם כבר חורגת מההתנהגות הסמי-קלאסית של הוריהם.

התנהגות זו נקראת "התנהגות מזוסקופית" (תחום הַיֵּין: בין הגדול ובין הקטן). לצורך הבנת ההתנהגות הזאת וכדי לאפשר תכנון רכיבים קטנים הרבה יותר בעתיד יש להכיר את רזי הפיזיקה הקוונטית ולשלוט בהם. אף על פי שהטרנזיסטורים היום עדיין גדולים בהרבה מאטום בודד, שם הפיזיקה הקוונטית שולטת, הם מכילים מספר קטן בלבד של "הפרעות" (המפרות את המבנה המחזורי של הגביש), ולכן תנועת האלקטרונים בהם היא כמעט חסרת התנגשויות שבהן האלקטרונים מאבדים אנרגיה. אי לכך בהרבה מובנים תנועת האלקטרונים מחקה את זו שבאטום הבודד, דהיינו התנהגותם היא כגלים הנעים בתוך ההתקן האלקטרוני, מתנפצים על דופןות ההתקן, מוחזרים מספר רב של פעמים ומתאבכים בינם לבין עצמם. כאשר ההתקנים קטנים והולכים, התאבכויות האלקטרונים גורמות לגלים עומדים בחומר בתנאי שפה כאלה שמאפשרים רק למספר שלם של חצאי אורך גל להיות תחומים בתוך ההתקן. זה מוביל לקווינטוט: אנרגיות ותנע בדידים בלבד לאלקטרונים. ההתנהגות האנלוגית המוכרת הופכת להיות התנהגות דיסקרטית, כאותם אלקטרונים הכלואים ברמות אנרגיה בדידות (אורביטלים) באטום. פועל יוצא מקווינטוט זה הוא למשל שהזרם אינו גדל באופן מונוטוני עם המתח המופעל ויכול אף לקטון עם העלאת מתח ההפעלה (אז הרכיב הוא בעל "התנגדות שלילית").



**איור 5:** מטענים שבריים. א. האלקטרונים בשכבה דקה ביותר, החווים שדה מגנטי ספציפי חזק, נעים לאורך שפת המוליך-למחצה הדק. ב. שדה מגנטי מסוים ממסך אותם ומעלים את מטענם. ג. בשדה הנמוך מאותו שדה מגנטי מיסוכם אינו מלא והם מתנהגים כחלקיקים בעלי מטען הקטן ממטען האלקטרון (בדוגמה שליש מטען האלקטרון,  $e/3$ ). ד. הזרם שיזרום בהשפעת שדה חשמלי יהיה של מטענים בעלי שליש מטען האלקטרון.

**איור 4:** תופעת המנהור והמנהור התהודתי. א. חלקיקים לא יעברו מחסום "בלתי חדיר". אולם אלקטרונים, בתנהגותם הגלית, דועכים לתוך המחסום וחלק קטן מפונקציית הגל שלהם מגיח מהצד השני. החלק המגיח מתקדם שנית כגל, ועצמתו פרופורציונית להסתברות המעבר דרך המחסום. התופעה נקראת תופעת המנהור. ב. בהימצאות שני מחסומים זה לאחר זה, במרחק אקראי ביניהם, יונחת גל האלקטרון פעמיים, ורק חלק זעיר ביותר ממנו יעבור את המחסומים. ג. בהימצאות שני מחסומים במרחק מסוים ביניהם, שהוא מספר שלם של חצאי אורכי גל של האלקטרון, ההתאבכות הגלית בין המחסומים תיצור גל עומד, והתוצאה תהיה כזו שהסתברות המעבר דרך שניהם תהיה יחידה, דהיינו המחסומים יהיו שקופים. התופעה נקראת תופעת המנהור התהודתי.

הרכיבים האלקטרוניים הממוזערים ולשנותם שינוי ניכר. חלקן יהיו מכשול גדול למזעור (כמו זליגת זרם דרך מבודדים בתופעת המנהור), וחלקן ינוצלו לצורך בניית התקנים חדשים המבוססים על עקרונות קוונטיים. ואמנם לאחרונה מתפתח תחום חדש שנקרא "עיבוד אינפורמציה קוונטית" (quantum information processing), שכולל רעיונות מבריקים לבניית מחשבים קוונטיים בעלי כושר חישוב הגדול בהרבה ממחשבים קלאסיים לצורך פתרון בעיות מסוימות. כל זה אפשרי תאורטית כל עוד החלקיקים הנושאים את האינפורמציה מתנהגים באורח קוונטי, זאת אומרת כל עוד איננו בוחנים בדקדקות יתר את מסלולי תנועתם, את מהירותם או כל תכונה אחרת שמייחדת אותם. במילים אחרות, כל עוד אנו מבודדים אותם כליל מהסביבה (אור, חום והפרעות אחרות), שלמעשה משחקת את תפקיד "מכשיר המדידה", במיוחד אז עקרון הסופרפוזיציה של הפיזיקה הקוונטית של החלקיקים האלמנטריים ינוצל לצורך חישובים מהירים – אפשרות שהיום כבר איננה בדיונית.

(המאונך לתנועתם ולשדה המגנטי), אך בשדות גבוהים ביותר, כאשר האלקטרונים ינועו במעגלים זעירים וייראו כעומדים במקומם בתוך השכבה הדקה, ינועו זרמים חשמליים רק לאורך שפתה (edge currents), ואם נמדוד את מטען החלקיקים נושאי הזרם לאורך השפה, נקבל מטענים הקטנים ממטען האלקטרון, דהיינו "מטענים שבריים" (fractional charges). אמנם האלקטרונים נשארים שלמים ואינם נשברים, אך התעטפותם במעטה של שמיכה מגנטית תאפשר רק לשבר מהמטען להתבטא בתנועת הזרם החשמלי. עד היום נמדדו שברים כמו שליש, חמישית, שביעית וגם רבע של מטען האלקטרון (איור 5). תופעות אלה ורבות אחרות חלקן צפויות, חלקן מפתיעות, וחלקן – שעדיין לא התגלו – מצופות להשיע על התנהגות