

על אלקטרוניקה, קוונטים, דיוק ויופי



מאת פרופ' עדי שטרן

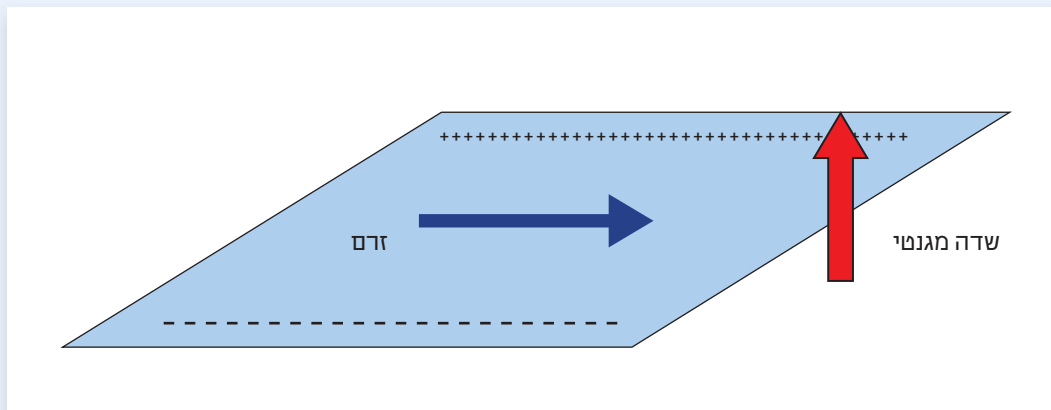
הוריי היו ממייסדי הרפואה הציבורית בנגב. מכיוון שכך, נולדתי וגדלתי בבאר שבע של שנות השישים והשבעים. הוריי היו אז חלק מאווירה מלהיבה של עשייה ושל יצירה. הם לא נבחנו על הצהרות נאמנות ריקות ועל המידה שבה הם זייפו כשהם שרו את ההמנון. הם וחבריהם נבחנו על החזון שאליו הם כיוונו, על ההתלהבות שבה הם הוציאו אותו לפועל, על המקצועיות שהם הפגינו, ובסך הכול על הדרך שבה הם קידמו, ולעיתים יצרו, את הרפואה בנגב.

גדלתי, ואת רוב שנותיי הבוגרות יש לי המזל והעונג לבלות במכון ויצמן למדע. גם במכון ויצמן לא מצפים ממני להצהרות נאמנות. להפך: חבריי, כולל כמובן הסטודנטים שאני מדריך, מצפים ממני להתנגדות, והם מקבלים אותה. אני מצדי מצפה מהם להתנגדות, ואני מקבל אותה ועוד איך... כשאני מגיע בבוקר, כולי נלהב מהרעיון שאני חושב עליו, הם חושפים את הרעיון שלי ואת הפגמים שלו לזרקורי מחשבתם הנוקבת. הם מטילים ספק בהנחות היסוד

מ אמר זה מבוסס על הרצאתי בישיבה הפתוחה השנתית של האקדמיה הלאומית בחנוכה 2018, שבה הצטרפתי אל שורות האקדמיה. אפתח בכמה פסקאות כלליות ואחר כך אציג את תחום המחקר שבו אני פעיל. ההצגה תהיה ברמה נגישה לכל נפש, אני מקווה.

קודם כול, אני מודה מעומק ליבי לחברי האקדמיה על שבחרו בי להימנות עימם. אני נרגש מכך שמצאו אותי ראוי לכבוד הזה. ההתרגשות שלי רק גדלה כשאני רואה כמה נאים בעיניי השכנים בשורת המצטרפים החדשים, חבריי פרופ' ברקאי, פרופ' שריר ופרופ' הופקינס.

מכיוון שמטרתו של מאמר זה היא להציג לקוראי "איגרת" גם את עצמי וגם את תחום המחקר שלי, אומר עוד כמה מילים על עצמי ועל הדרך שבה אני רואה את עולם המדע, לפני שאעבור לדבר על תחום המחקר שלי.



איור 1. אפקט הול הקוונטי: זרם חשמלי מוגבל לנוע בתוך המישור בכיוון המאוזן. השדה המגנטי מפעיל עליו כוח שמנסה להסיט אותו לכיוון המאונך. גודלו של כוח זה הוא ביחס ישר לגודל הזרם ולגודל השדה המגנטי. הכוח מתאזן על ידי מתח הול, המתח שבין הקצה התחתון לקצה העליון של הדוגמה. היחס בין מתח הול לבין הזרם הוא התנגדות הול, והוא לב העניין כאן.

מדידות של אפקט הול הקוונטי מתבצעות לרוב בטמפרטורות נמוכות, עד כמה מעלות בודדות מעל לאפס המוחלט. השדה המגנטי הוא בדרך כלל בעוצמה של מספר חדיספרתי של טסלה, והדוגמה עשויה לרוב מחצי מוליך. החומר המדויק והצורה המדויקת של הדוגמה אינם חשובים, כפי שמוסבר בטקסט.

“אלקטרוניקה, קוונטים, דיוק ויופי”. יכולתי גם לקרוא למאמר “מצבים טופולוגיים של החומר”, אבל נראה שיש בי איזושהי מידה מינימלית של הבנה שיוקית. ככל שהדבר יישמע מפתיע, אני מאמין שזה אותו הדבר. וכדי לשכנע את הקורא שאכן כך הוא הדבר, אפתח בהסבר על אפקט הול הקוונטי (Quantum Hall Effect).

אפקט הול הקוונטי הוא, אפשר לומר, אביהם של המצבים הטופולוגיים של החומר. נדמיין מערכת אלקטרונית בצורת מלבן ארוך, כלומר מערכת שבה זרם חשמלי מוגבל לנוע רק במישור, ורק משמאל לימין. איור 1 אמור לסייע לדמיון כאן. נפעיל על המערכת שדה מגנטי בכיוון המאונך למישור. להבנה מהו שדה מגנטי אפשר לדמיין שני מגנטים – האחד מעל המלבן שלנו ואחד מתחתיו. השדה המגנטי מפעיל על הזרם כוח שנקרא “כוח לורנץ” (Lorentz force). כוח לורנץ מכוון בתוך המישור ופועל בניצב לכיוון הזרם, כלומר הוא מנסה לגרום לאלקטרונים לנוע מעלה-מטה בתוך המישור. ◀

שלי, הם בוחנים את המסלול הלוגי שלי, והם מנסים להראות לי שאני סותר אמיתות יסוד של הפיזיקה. עד הערב, ברוב המקרים, הרעיון כבר נפסל, ואני קצת מאוכזב. לפעמים הוא שורד את הביקורת, ואז אני חוזר הביתה כשמחשבתי צלולה יותר, בהירה יותר, וההבנה שלי עמוקה יותר. בכל המקרים, אלה ואלה, אני חוזר הביתה נפעם.

אני אסיר תודה לחבריי על ההתנגדות שלהם ועל התרומה שלה לחשיבה שלי. אני לא מנסה לשלול מהם את מימון המחקר שלהם, ואני לא מנסה לעכב להם את התואר. האתגר שהם מציבים בפניי ובפני המחשבה שלי אינו איום אלא מתנה, ומתנה זו יקרה מאוד לליבי.

אני חושב שיש כאן מה ללמוד על הדרך שבה מתנהלים דיונים על אמיתות יסוד בחברה שלנו, וזאת הסיבה שסיפרתי את זה.

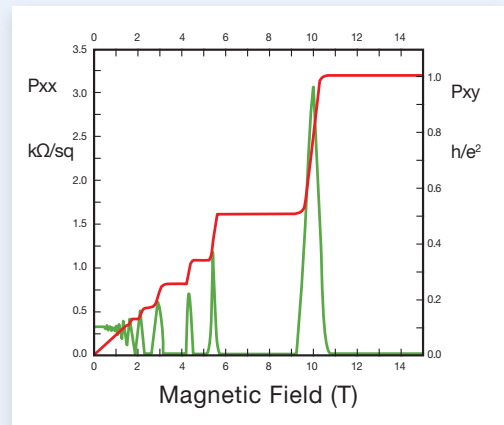
מכאן אעבור לחלק שנתן למאמר את שמו –

איור 2 מראה תוצאה של מדידה ניסיונית – מתח הול כפונקצייה של השדה המגנטי. למען הדיוק, מה שמצויר בגרף איננו מתח הול אלא התנגדות הול, היחס בין מתח הול לזרם. מכיוון שכוח לורנץ תלוי ביחס ישר גם בזרם, אנחנו מחלקים את המתח בזרם ומתמקדים בתלות בשדה המגנטי. כשהשדות המגנטיים חלשים, בצד שמאל של הגרף, אכן רואים יחס ישר, פרופורציונליות. אולם בשדות חזקים הקו הישר נשבר למדרגות. המדרגות הללו הן אפקט הול הקוונטי. הגילוי היפה כאן איננו בעובדה שחיכינו לקו ישר וקיבלנו מדרגות. You can't always get what you want, כמו שכבר טענו מיק ג'אגר ושאר האבנים במשפט שוודאי נכון גם לפיזיקה. הגילוי, ויופיו, הם בתכונות של המדרגות, שאותן נתאר עכשיו (פרטים על הניסוי מופיעים בהסבר לאיור 1).

כל אחת מהמדרגות מתחילה בשדה מגנטי מסוים ומסתיימת בשדה מגנטי אחר. ערכי ההתחלה והסיום של השדה המגנטי תלויים בחומר שממנו בנויה המערכת, בצורה של הדוגמה ואפילו בהגדרה המדויקת של "התחלה" ו"סיום". לעומת זאת ערך ההתנגדות על המדרגה נראה יציב למדי, כלומר הוא נראה כאילו איננו משתנה עם השדה המגנטי. ובכן, הוא לא "יציב למדי", הוא אחד הדברים היציבים ביותר שראיתם מימכם. השדה המגנטי יכול להשתנות ב-10%–20%, והתנגדות הול איננה משתנה – לא באחוז, לא במאית האחוז ואף לא במיליונית האחוז. יותר מזה, היחס בין הערכים שנמדדים במדרגות שונות הוא מספר "עגול" מדויק, למשל 2.000000000, עד לדיוק של חלק אחד ב- 10^9 . יותר גם מזה, ערכי ההתנגדות במדרגות שנמדדים בחומרים שונים ובצורות שונות של הדוגמה מתאימים זה לזה באותה מידה של דיוק. בדרך כלל אנחנו חושבים על התנגדות חשמלית כמושפעת מתכונות החומר – פלסטיק מתנגד לזרימת זרם חשמלי, ולכן השימוש הנפוץ

הם אינם יכולים לנוע כך, מכיוון שבכיוון הזה חוסם אותם קיר. המערכת מאפשרת להם לנוע רק בכיוון שמאל-ימין. לכן צריך להיווצר כוח שיאזן את כוח לורנץ. את הכוח המאזן הזה יוצרים מטענים חשמליים שמתאספים ליד קירות המערכת. בצד אחד של הדוגמה מטענים שליליים, ובצד השני – מטענים חיוביים. הכוח הזה צריך לאזן במדויק את כוח לורנץ, כדי שבסך הכול יוכל הזרם לזרום ישר. אנחנו יודעים למדוד את הכוח הזה, מכיוון שהוא יוצר מתח חשמלי מאונך לכיוון הזרם. המתח הזה נקרא "מתח הול", על שם פיזיקאי אמריקאי שמדד אותו במאה התשע-עשרה.

עכשיו, הכוח המגנטי פרופורציונלי לשדה המגנטי. מכיוון שכך, אנחנו מצפים שגם הכוח המאזן, או המתח שהוא יוצר, יהיו פרופורציונליים לשדה המגנטי. זו ציפייה שנשענת על מסע לוגי קצר שכולו על גבי קרקע מוצקה – הזרם חייב לנוע במקביל לקירות, ולכן כוחות לורנץ והול חייבים לבטל זה את זה. כוח לורנץ פרופורציונלי לשדה המגנטי (זו עובדת יסוד שאין עליה עוררין), ולכן גם כוח הול ומתח הול חייבים להיות פרופורציונלים לשדה המגנטי.



איור 2. התנגדות הול כתלות בשדה המגנטי. המדרגות (באדום) הן אפקט הול הקוונטי. הקו שבתחתית הגרף (בירוק) מתאר את ההתנגדות האורכית (בכיוון הולכת הזרם). נציין רק שבתחום אפקט הול הקוונטי התנגדות זו נעלמת. זהו פן מעניין וחשוב של האפקט, שחורג ממסגרת מאמר זה.

כדי להבין כמה מרעישה ההבחנה הזו, אנא הסתכלו באיור 3. זו הדוגמה שבה נמדד האפקט השבור בפעם הראשונה. מבט קצר על הדוגמה מראה מה מיוחד בה – כלום. זו דוגמה חצי-מוליכה, עשויה מתרכובת בשם גאליום-ארסניד, עם שישה חיבורים למכשירי מדידה. קל לראות שבדוגמה יש גם לכלוכים ופגמים, וברור שדוגמאות שונות לא ישחזרו במדויק את אותם לכלוכים ואותם פגמים. ועם זאת כל אחת מהדוגמאות נותנת לנו גישה למדידת היחס בין שניים מארבעת הקבועים היסודיים של היקום, מדידה שתוצאתה אינה תלויה כלל בפרטים של הדוגמה!



איור 3. תצלום הדוגמה המקורית שבה התגלה אפקט הול הקוונטי השבור (באדיבות הורסט שטרמר)

אין ספק שזהו סיפור על אלקטרוניקה (מערכת המדידה היא אלקטרונית), על דיוק (חלק אחד בביליון) ועל קוונטים (ראו הופעתו של הקבוע של פלאנק). כמו שרומזת כותרת המאמר, כותב שורות אלו רואה בזה גם סיפור של יופי, יופי מדעי שקשה למצוא כמותו.

אפקט הול הקוונטי התגלה בתחילת שנות השמונים של המאה הקודמת, והיה אך המבט הראשון אל עולם עשיר של תופעות, שאוכל לתאר כאן רק מספר קטן ממאפייניו. אפשר לתאר את המחקר שנבע מאותו מבט ראשון כמורכב מארבעה כיווני

בו הוא לבידוד; נחושת איננה מתנגדת, ולכן השימוש בה הוא להולכת זרם. כאן יש תכונה חשמלית שאינה רגישה כלל לתכונות החומר שבו היא נמדדת!

זה עוד לא הכול. הפן המרתק ביותר של המדרגות הוא הערך של התנגדות הול. התנגדות נמדדת ביחידות שנקראות אוהם (Ohm). המדרגות שנראות במדידות של אפקט הול הקוונטי נושאות כולן התנגדויות של $25812.807557/v$ כש- v הוא מספר "פשוט" – מספר שלם, בין אפס לעשרים (מדרגות אלו נקראות "אפקט הול הקוונטי השלם", ומי שגילו אותן הם פון קליצינג, דורדה ופפר (von Klitzing, Dorda & Pepper)), או שבר מהצורה $\frac{p}{q}$ כשגם p וגם q הם שלמים באותו תחום פחות או יותר (מדרגות אלו נקראות "אפקט הול הקוונטי השבור", וגילו אותן טסוי, שטרמר וגוסארד (Tsui, Störmer & Gossard)).

ב"פיזיקאית" אנחנו אומרים שהתנגדות הול מקוונטטת לערכים הללו. מהי המשמעות של הגודל הזה, 25812.807557 אוהם? בשנים האחרונות, ברגעי שיעמום, ביליתי במצטבר כרבע שעה בחיפוש אחרי גימטרייה נאה לקשר אליה את הגודל הזה. אין לי תוצאות לדווח, ולכן אשאר בתחום הפיזיקה. הגודל הזה, למרבה התדהמה והיופי, הוא היחס שבין הקבוע של פלאנק (Planck's constant), הקבוע שמגדיר את תורת הקוונטים, לבין מטען האלקטרון בריבוע, אחד משני הגדלים שמגדירים את התורה האלקטרומגנטית.

$$\frac{h}{e^2} - \text{פיזיקאית}$$

בואו נעצור רגע להתפעל... למיטב הבנתנו את היקום, יש בו ארבעה קבועים יסודיים – מהירות האור, הקבוע של פלנק, קבוע הגרוויטציה ומטען האלקטרון. אפקט הול הקוונטי מודד במדידה פשוטה יחסית, מבלי תלות בחומר, בצורה ובשאר פרטים, את היחס שבין שניים מארבעת הקבועים הללו.

שבור של u , האלקטרונים במערכת יכולים להתנהג כחלקיקים שמטענם הוא רק שבר ממטענם האמיתי. זוהי הפתעה רבת. זה כשישים שנה ידוע שהסוד של על-מוליכים הוא בנטייתם של אלקטרונים ליצור זוגות למרות הדחייה החשמלית שביניהם. ההתגברות על הדחייה דרשה מהפכה מחשבתית מסוימת, אבל העובדה הבסיסית ששני (אלקטרונים) בודדים יכולים ליצור זוג קלה להבנה. לעומת זאת כאן אוסף אלקטרונים שמטענם זהה יוצרים, במובן מסוים, חלקיקים שמטענם קטן ממטען האלקטרון הבודד! ההבנה הזאת החלה כהבנה תאורטית, אבל אושרה אחר כך בניסיונות.

החיפוש אחר אפקטים טופולוגיים נוספים הרחיב את גבולות התחום בכיוונים רבים נוספים. אפקט הול הקוונטי דורש מערכת דו-ממדית, חצי-מוליכה, בשדה מגנטי ובטמפרטורות קרות. אף אחד מן התנאים הללו איננו הכרחי, כך מתברר. בעקבות כשני עשורים של מחקר מוכרים היום חומרים טופולוגיים חד-ממדיים, דו-ממדיים ותלת-ממדיים, עם ובלי הפעלה של שדה מגנטי, ובטמפרטורות שאינן נמוכות מאוד. יותר מזה, אנחנו מכירים היום מבודדים טופולוגיים, חצי-מוליכים טופולוגיים, מתכות טופולוגיות, ואף על-מוליכים טופולוגיים.

יש כמה שימושים פוטנציאליים למצבים טופולוגיים של החומר, ומתוכם אזכיר שניים: הראשון כמעט מתבקש – שימוש באפקט הול הקוונטי על מנת לייצר סטנדרט נוח לשימוש להגדרת האוהם. הגדרתן המסורתית של יחידות מדידה הייתה באמצעות שימוש בסטנדרטים והשוואה אליהם. כך למשל הוגדר הקילוגרם בהשוואה לסטנדרט – גליל של פלטינום-אירידיום שהוחזק במשך שנים רבות אי שם על יד פריז. אז מובן ש-*"we will always have Paris"*, אבל יש עדיפות מובנת לשיטת הגדרה של יחידות שניתנת לשחזור עצמאי במקומות שונים. מדידת הערך המקוונטט

מחשבה עיקריים: ראשית שואל את עצמו הפיזיקאי המתעניין, מדוע האפקט הזה קורה; שנית, מבלי קשר לסיבה, אילו מסקנות הן היקשים לוגיים בלתי נמנעים מקיומו של האפקט; שלישית, אם יש אפקטים דומים נוספים; רביעית, אם נוכל להשתמש באפקט לצורך מעשי כלשהו. אנסה להתייחס בקצרה לכל אחד מהכיוונים.

פיזיקאי שיוצא להבין תופעה חדשה צריך כמעט תמיד להצטייד בכלי המתמטי המתאים. במקרה שלנו, הכלי המתמטי הוא הטופולוגיה, שמתארת תכונות מתמטיות שאינן רגישות לפרטים, בדומה לחוסר הרגישות לפרטים שמאפיין את התנגדות הול. אכן, היום ישנה הבנה המאפשרת לנסח את התנגדות הול (למען היושר, לא את התנגדות הול כפי שהיא נמדדת במעבדה, אבל גודל קרוב מאוד אליה) כגודל טופולוגי, להראות באילו תנאים הגודל הזה אינו תלוי בפרטים, ובאילו תנאים מתאפשר המעבר בין ערך אחד של u לאחר. הבנה זו מאפשרת להבין את המדרגות המדויקות של איור 2. התנגדות הול באפקט הול הקוונטי היא רק דוגמה ראשונה, שבעקבותיה התגלה אוסף של גדלים פיזיקליים מדידים שניתן לבטא אותם כ"אינווריאנטים טופולוגיים". הדיוק יוצא הדופן שבו אנחנו רואים את הגדלים הללו הוא תוצאה של מה שלמדנו לכוונת "הגנה באמצעות טופולוגיה" או – הלועזית מאפשרת כאן אסוציאציות חופשיות – "פרוטקשן טופולוגי".

הכיוון השני, החיפוש אחר מסקנות הנובעות מקיומו של אפקט הול הקוונטי מבלי לדרוש הבנה של שורשיו של האפקט, הוכיח את עצמו כפורה ומרתק. חיפוש זה יוצא משני סוגים של הנחות – קיומו של האפקט כעובדה ניסיונית שאין דרך לחלוק עליה מצד אחד, ועקרונות יסוד של הפיזיקה, כמו שימור אנרגיה ושימור מטען, מצד שני. השילוב של השניים מביא לכמה מסקנות מהפכניות, שמתוכן אזכיר רק אחת: בתנאים שבהם נמדדת התנגדות הול עם ערך

"אחד" אלא כאחוז מסוים של "אפס" ואחוז משלים של "אחד", כאשר האחוז שעליו מדובר הוא מספר רציף. נקבל מזה יתרון, והיתרון הוא מהירות. אבל אנחנו פותחים מחדש את תיבת הפנדורה של רגישות לרעשים ולטעויות. בחישוב קוונטי יש סוג חדש של רגישות, הרגישות לאובדן הקוהרנטיות הקוונטית. לצורך הדיון הנוכחי, זו עוד דוגמה לרעש.

אל מול הבעיה הזו ייתכן שהמצבים הטופולוגיים פותחים בפנינו אפשרות להגשים את התקווה האנושית הנצחית, לאכול את העוגה ולהשאיר אותה שלמה. בתרגום להקשר הנוכחי הכוונה היא לאפשרות ליהנות מהמגוון העצום של מצבים מקבילים שמציעה תורת הקוונטים מחד, מבלי להיות חשופים לאפקטים המפריעים של רעש ואובדן קוהרנטיות מאידך. ההגנה הטופולוגית על גדלים מסוימים מאפשרת, לפחות בתאוריה, להימנע מאפקטים מפריעים אלו גם כאשר המערכת הקוונטית נמצאת באינטראקציה עם סביבתה הקלאסית הרועשת. הדבר דורש שימוש בסוג מסוים של מצבים טופולוגיים, המכונה "מצבים טופולוגיים לא-אבליים" (non-Abelian states).

הפיזיקה שמאחורי מצבים אלו חורגת מהתחום שנכסה במאמר הזה. נסתפק כאן בלומר שנראה שמבין המצבים הטופולוגיים הלא-אבליים, הפשוטים ביותר ליצירה ולמחקר במעבדה, נובעים מעל-מוליכים, וקשורים למה שלפעמים נקרא "מצבי מיורנה" (Majorana states). לצידם קיימים גם מצבי הול לא-אבליים, שהתנאים ליצירתם קצת קשים יותר. כרגע נעשה בעולם מחקר ניסיוני רב בכיוון של מחשוב קוונטי טופולוגי, שמטרתו הראשונה היא ייצור ביט קוונטי טופולוגי ראשון. המחקר הזה כבר לימד אותנו כמה גדולים הקשיים במימושו של ביט כזה, אבל הוא הראה לנו (שוב) כמה יפה, לא צפויה ומשכילה היא הדרך המובילה אל פתרון בעיה מדעית מאתגרת. ■

של התנגדות הול מאפשרת הגדרה כזו בדיוק שמתחרה בכל הגדרה פריזאית ישנה, ומאז 1990 היא משמשת דרך להגדיר את האוהם.

השימוש השני הרבה פחות מובן מאליו, והרבה יותר קשה למימוש. מדובר בחישוב קוונטי באמצעות ביטים מבוססי טופולוגיה. אקדים לתיאור של הרעיון הזה כמה משפטים על חישוב קוונטי. אני מתנצל מראש, במשפטים הללו יהיו לא מעט עיגולי פינות, אבל את לב העניין הם יתארו בנאמנות.

מחשב קוונטי, אם ימומש, אמור להיות מסוגל לבצע חישובים מסוימים במהירות שהיא אקספוננציאלית גדולה מזו של מחשב קלאסי. כמו מחשב קלאסי, גם המחשב הקוונטי בנוי מביטים, שיכולים להיות במצב "אפס" ובמצב "אחד". הביט הקוונטי אמור לנצל את עקרון הסופרפוזיציה ולבלות את רוב זמן החישוב כשהוא נמצא, במובן הקוונטי של המילה, גם ב"אפס" וגם ב"אחד". בדומה לזה, אוסף של ביטים רבים יכול להימצא בעת ובעונה אחת במספר עצום של מצבים. רק עם סיום החישוב אמורים כל הביטים הקוונטיים לקבל ערך מוגדר, שהוא תוצאת החישוב. המקבילות העצומה שמתאפשרת בזכות הסופרפוזיציה הקוונטית היא שמאפשרת את המהירות.

במובן מסוים, יש לומר, אפשר לראות במחשב הקוונטי גרסיה בהיסטוריה, בהיותו ה"קאמבק" של העולם האנלוגי. אחרי הכול, כל הרעיון של העולם הדיגיטלי הוא השימוש בשפה שיש בה שתי מילים: אפס ואחד. היתרון בשפה כזאת הוא שגם אם לדובר יש מבטא, קל מאוד להבין את ההבדל בין אפס לאחד, אין רגישות לפרטים ולרעשים. העמידות הזו בפני רעשים היא שהופכת את המהפכה הדיגיטלית למוצלחת כל כך, למהפכה שהשתלטה על עולם התקשורת ועל עולם המחשוב זה כמעט מאה שנים. החישוב הקוונטי הולך אחורה. הוא אומר, נדבר בשפה לא מוגבלת. לא נתאר את המצב של הביט כ"אפס" או