

המדע הקוונטי מאחורי המחשב הקוונטי

יהושע קליסקי | 2 ביוני, 2026

במאמר זה אנו דנים באופן כללי בעקרונות הפעולה של מחשב קוונטי, ומתמקדים במחשב קוונטי שהקיוביטים שלו מבוססים על התקן לא-לינארי משולב של על-מוליכים וצומת ג'וזפסון. בהמשך המאמר נפרט בקצרה בדבר מספר שימושים למחשבים מסוג זה והשלכותיהם על החוסן הלאומי ועל ביטחון מדינת ישראל.

רקע מדעי

תורת הקוונטים שפותחה בראשית המאה ה-20 היא תורה פורצת דרך בעלת יישומים רבים בכל תחומי המדע ובחיי היום-יום. תורת הקוונטים פותחה כדי להסביר תופעות פיזיקליות שלא ניתן היה להסבירן באמצעות הפיזיקה הקלאסית. היא נתנה הסברים מדויקים לתכונות ולמאפיינים של מערכות אטומיות ומולקולריות (להלן: חלקיקים קוונטיים) ושל התקנים המבוססים על מערכות אלו. חלק מהתופעות הייחודיות למערכות קוונטיות הן תופעות הסתברותיות, מוזרות, לא הגיוניות ואף מנוגדות לאינטואיציה היום-יומית שלנו.

כך למשל, **ניסוי שני הסדקים של יאנג** מצביע על כך שחלקיקים המוקרנים על מערכת שבה שני סדקים מראים התנהגות אופיינית לגלים או לחלקיקים, תלוי בסוג הניסוי, כאשר עצם המדידה משפיעה על התוצאה. למעשה נקבע מאוחר יותר, בעקבות **השערת דה ברולי**, כי **לכל עצם בטבע יש אורך גל**. כל חומר בטבע מראה התנהגות דואלית של חלקיק ושל גל, ובהמשך הוכח בניסויים כי לחלקיקים קוונטיים יש **אורך גל** שניתן למדידה.

דוגמה נוספת – ההסבר שנתן הפיזיקאי מקס פלאנק **לקרינת גוף שחור** נחשב להולדתה של תורת הקוונטים. במסגרת המאמץ העיוני להסביר את הקשר בין פליטת קרינה אלקטרו-מגנטית באנרגיות שונות לבין טמפרטורת הגוף הפולט (כאשר בכל טמפרטורה יש שיא בעוצמת הפליטה באנרגיה מסוימת) מצא פלאנק כי התאמת התאוריה לניסוי אפשרית אך ורק בהנחה שהקרינה נפלטת במנות (קוונטות) של אור. דוגמה נוספת למוזרות של תורת הקוונטים היא **עקרון אי-הוודאות של הייזנברג**, הקובע כי אי אפשר לדעת את מצבו המדויק של חלקיק קוונטי בוודאות (מקומו ומהירותו למשל), והסיבה לכך היא כי המדידה עצמה גורמת לשינוי במצבו של החלקיק הקוונטי.

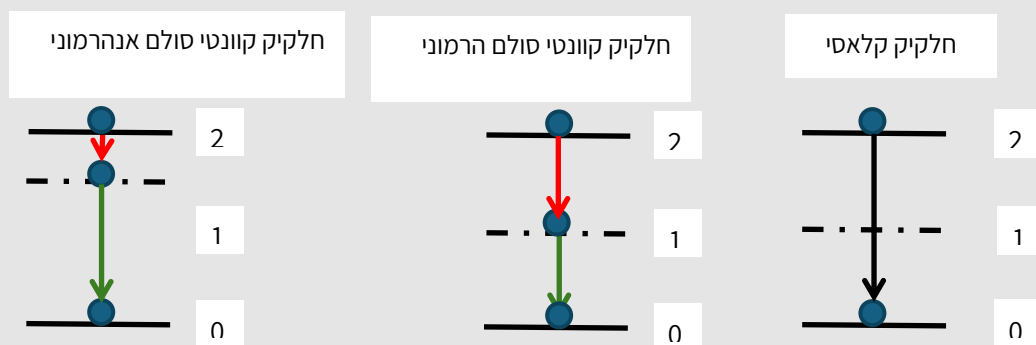
לסיכום, ההסבר לתופעות הניסיוניות שנסקרו לעיל מצביע על כך שלחלקיקים קוונטיים יש מספר תכונות אופייניות, לא אינטואיטיביות ומוזרות, המאפשרות מימוש יישומים מעבר לשימושים המקובלים. תכונות אלו הן:

סופרפוזיציה של מצבים: מערכת קוונטית יכולה להימצא לפני ביצוע מדידה בו-זמנית במספר רב של מצבים. דוגמה למצבים קוונטיים היא אטום הנמצא בו-זמנית במספר רמות אנרגיה, אלקטרון בעל ספין (סיבוב עצמי) עם כיוון השעון או נגדו, או פוטון הנמצא במספר מצבי קיטוב, כאשר לכל מצב יש משקל סטטיסטי משלו. במילים אחרות, חלקיק קוונטי יכול להימצא במספר מצבים, כאשר מצבו הכולל של החלקיק הקוונטי – בין שהוא אלקטרון, פוטון או אטום – הוא צירוף (סופרפוזיציה) של מצבים. מקובל לייצג את התכונות הפיזיקליות של המערכת הקוונטית כתופעה גלית והסתברותית (בעגה המקצועית: ייצוג על ידי פונקציית גל). יחידת המידע הקוונטית הבסיסית שמכילה את כל המידע על המערכת וכוללת מספר מצבים נקראת ביט קוונטי, או בקיצור קיוביט.

קריסת המצבים בעת מדידה: ביצוע מדידה על מערכת קוונטית, כלומר חשיפת המערכת הקוונטית לעולם הקלאסי, מביאה לקריסת כל מצבי המערכת למצב אחד בלבד. תופעה זו של אובדן הקוהרנטיות של המצבים הקוונטיים (quantum decoherence) פירושה אובדן המידע הקוונטי. המשמעות הפיזיקלית של עובדה זו היא שמערכת קוונטית חייבת להיות מבודדת מהסביבה החיצונית, ועצם ביצוע המדידה או חשיפה לסביבה משפיעים על התוצאה. תופעת הקריסה של המצבים הוגדרה על ידי **ג'ון פון נוימן** בספרו על היסודות המתמטיים של תורת הקוונטים כשרשרת פעולות הכוללת את המערכת הקוונטית, מערכת המדידה ומערכת שמתרגמת את תוצאת המדידה לערך יחיד, מדיד ומוחשי ונגיש לעינינו או למוחו של המתבונן. התופעה של קריסת המצבים ואובדן המידע הקוונטי היא בעצם היבט אחר של **עקרון אי-הוודאות של הייזנברג**, הקובע כי עצם ביצוע המדידה גורם לשינוי במצבו של החלקיק הקוונטי, ויותר מכך: שני העקרונות הללו מדגימים את המגבלות הפיזיקליות של יכולת המדידה וכמות המידע בעולם המיקרוסקופי.

מצבים אנרגטיים בדידים: חלקיקים המציינים לעקרונות תורת הקוונטים הם בעלי רמות אנרגיה בדידות, והם עוברים ממצב אנרגטי אחד לאחר באופן לא רציף אלא בקפיצות, תוך חילופי אנרגיה עם הסביבה. חלקיק קלאסי כמו כדור למשל, עובר באופן רציף ממצב 2 למצב 0 ללא מצבי ביניים, אך אילו היו לכדור הקלאסי תכונות קוונטיות הוא היה נעצר באוויר מספר פעמים תוך שחרור אנרגיה, למשל במצב 1, לפני הגיעו אל הקרקע. בניגוד לכך, חלקיק קוונטי כמו אלקטרון יעבור ממצב אנרגטי 2 למצב אנרגטי 0 דרך מצב ביניים – מצב 1 – כמודגם באיור להלן.

סולם אנרגיה אנהרמוני: חשוב לציין כי סולם האנרגיה של חלקיק קוונטי יכול להיות בעל מרווחי אנרגיה שווים – **סולם הרמוני**, או מרווחים בלתי שווים – **סולם אנהרמוני**. לעובדה זו חשיבות רבה בהבנת דרך הפעולה של מחשב קוונטי, שכן סולם אנרגיה אנהרמוני מאפשר הבחנה ברורה מאוד בין מצבי 0 ו-1 לעומת רמות אנרגיה גבוהות יותר, דבר שחיוני לפעולתו של מחשב קוונטי.



שזירה (entanglement):

נתונים זוג חלקיקים קוונטיים כגון זוג אלקטרונים בעלי תכונות זהות. שינוי מצבו של חלקיק אחד יורגש באופן מיידי על ידי החלקיק השני ללא תלות במרחק ביניהם, **ואי אפשר לתאר תכונות אינדיבידואליות (נפרדות) של חלקיקים קוונטיים אף אם הם נמצאים בשני קצות היקום** – כך לפי ניסוחו של **נילס בוהר**, מאבות תורת הקוונטים. מכיוון שתכונת השזירה היא **קריטית** לפעולה של מחשב קוונטי ואינה קיימת במקרה הקלאסי (ואף קשה לתפיסה ולהבנה, אלברט איינשטיין קרא לה "פעולת רפאים מרחוק"), חשוב להדגיש כמה נקודות עיקריות בהקשר של שזירה:

- מצב שזירה הוא מצב שבו למספר חלקיקים קוונטיים יש תכונה משותפת.
- מצב שזירה נתון אינו מכיל מידע כלשהו על חלקיקים נפרדים, אלא רק את העובדה שיש להם תכונות משותפות. לדוגמה, זוג אלקטרונים הם תמיד בעלי ספינים מנוגדים – מסתובבים סביב עצמם בכיוונים מנוגדים, כך שדיעה על הספין של אלקטרון אחד נותנת מיידית מידע על כיוון הספין של האלקטרון השני.
- עבור שני חלקיקים שזורים, אם מצבו של חלקיק אחד משתנה החלקיק השני משנה מייד את מצבו, בהתאם לחוקי מכניקת הקוונטים.

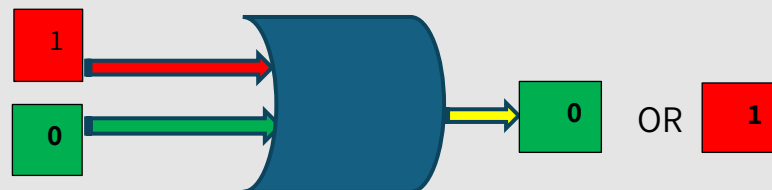
מדידה המתבצעת על חלקיק הנמצא בשזירה עם חלקיק אחר גורמת מיידית לקריסת המצבים של החלקיק האחר. באנלוגיה למצב קלאסי, כדי לפשט את ההסבר נציג אנלוגיה קלאסית **לא מושלמת** למצב השזירה באמצעות המקרה הבא: בחדר אטום לגמרי בדירה מסוימת יש זוגות גרביים רבים בצבעים שונים, כאשר כל זוג הוא בצבע זהה. אדם נכנס

לחדר האטום ובעיניים מכוסות מוציא גרב אחת בצבע מסוים, נניח צבע אדום, מניח את הגרב במעטפה אטומה וטס עימה למקום מרוחק אלפי קילומטרים מהדירה, ורק שם הוא פותח את המעטפה. כאשר הוא פותח ורואה כי בידו גרב בצבע אדום, הוא יודע מייד כי בחדר האטום בדירה יש עוד גרב בצבע זה, וכי למידע האמיתי יש משמעות רק עבור זוג גרביים. באנלוגיה למצב הקוונטי, עצם ביצוע המדידה, כלומר פתיחת המעטפה וגילוי צבע הגרב, מקנה מידע על המצבים, ולא ניתן לבצע ניסוי זה שוב.

עקרונות הפעולה של מחשב קוונטי

המחשב הקוונטי הוא נושא טכנולוגי שפרץ לתודעה בעשור האחרון עקב הפוטנציאל החישובי הגלום בו. בראשית שנות ה-80 של המאה הקודמת העלה הפיזיקאי וחתן פרס נובל ריצ'רד פיינמן את הרעיון שניתן ליישם את עקרונות תורת הקוונטים לביצוע חישובים מסוימים. בהמשך הציע הפיזיקאי דיויד דויטש ב-1985 דרכים מעשיות ועקרונות ליישום הרעיון של מחשב קוונטי אוניברסלי, בדומה לעקרונות של מחשב קלאסי אוניברסלי שהציע אלן טיורינג בשנות ה-40 של המאה הקודמת.

על פי פיינמן ודויטש, מחשב קוונטי פועל לפי עקרונות פיזיקליים המבוססים על תורת הקוונטים, כפי שהם מיושמים בחלקיקים קוונטיים שהם מערכות אטומיות או תת-אטומיות, וזאת בניגוד למחשב הדיגיטלי, הפועל על פי עקרונות קלאסיים. המחשב הדיגיטלי פועל בשיטה הבינארית כאשר השער הלוגי שלו, שהוא מעין מתג, מבצע את פעולות החישוב בטור שנמצא במצב שבו יחידת המידע (ביט) היא זוג מספרים 0, 1 המציין את קיומו של אות חשמלי (מצב פתוח שמסומן גם ב-1, או מצב של קיום אות חשמלי חלש או היעדר אות חשמלי – מצב סגור שמסומן ב-0), ופעולות החישוב מתבצעות באופן טורי. כך למשל, אם מזינים שער לוגי בשני ביטים, כלומר באותות חשמליים המייצגים מצב פתוח ומצב סגור, קרי 0 ו-1, התוצאה תהיה מצב 1 או מצב 0 בלבד, כמודגם באיור עבור שער לוגי קלאסי מסוג OR:



אם אחת הכניסות או שתיהן היא 1, התוצאה תהיה ערך 1 – מפסק פתוח. אם שתי הכניסות הן 0 – התוצאה תהיה מפסק סגור, קרי 0.

חיבור מספר שערים לוגיים עם תכונות מיוחדות מאפשר ביצוע פעולות חשבוניות סבוכות.

יחידת המידע במחשב הקוונטי, קיוביט, מבוססת על המצבים האנרגטיים של חלקיקים בעלי אופי קוונטי, למשל אלקטרונים או אטומים. במקרה של האלקטרון, מצבו האנרגטי מתאפיין בין היתר בסיבובו העצמי עם כיוון השעון או נגדו – ספין. נהוג להגדיר את המצב של סיבוב עצמי עם כיוון השעון כמצב פתוח (1), ואת הסיבוב נגד כיוון השעון כמצב סגור (0). יחידת המידע הקוונטית מיוצגת על ידי סופרפוזיציה של שני מצבי האלקטרון בו-זמנית ברגע נתון (קרי 1,0), כלומר יחידת המידע הבסיסית במחשב קוונטי היא מעין מתג הקיים במצב פתוח ובמצב סגור בו-זמנית, כל זמן שהמערכת מבודדת מסביבתה.

ניתן להראות כי עבור שני קיוביטים האלקטרון נמצא בארבעה מצבים בו-זמנית, עבור 10 קיוביטים נקבל 1,024 מצבים, ואילו עבור 50 קיוביטים נקבל כי המערכת הקוונטית נמצאת במספר עצום של אלפי מיליארד מצבים, והיא יכולה לבצע את אותו מספר חישובים במקביל. נדגיש כאן כי הסופרפוזיציה היא מצב של **אי-ודאות מתמטית-פיזיקלית**, ובאמצעות המדידה ניתן לקבל מצב אחד נתון, שהוא בעצם הפתרון המבוקש. חשוב עוד להדגיש כי הסופרפוזיציה בלבד אינה מספיקה לביצוע חישובים מסובכים, ויש צורך בפעולות נוספות מלבד יצירת הקיוביטים:

1. חיבור הקיוביטים על ידי **שערים לוגיים קוונטיים**. השער הלוגי הקוונטי אינו מופעל על ידי אות חשמלי אלא על ידי אות אופטי (קרן לייזר) או שדה מגנטי, המופעל על המערכת הקוונטית בעזרת אלגוריתם ייחודי וגורם לשינוי המצבים הקוונטיים של המערכת לסופרפוזיציה של מצבים אחרים בעלי הסתברויות שונות. בסופו של התהליך, בעת ביצוע המדידה על ידי התקן חיצוני, המערכת קורסת לערך היחיד המסתבר ביותר.

2. שזירת הקיוביטים, כלומר יצירת קורלציה בין הקיוביטים השונים. השזירה הכרחית לקיום קשר רציף בין פעולות הקיוביטים השונים לשם ביצוע יעיל ובמקביל של החישובים. שזירה קוונטית פירושה שלא ניתן לתאר כל חלקיק בנפרד, והדבר נובע מדרך יצירתם של חלקיקים אלו. לדוגמה, ניתן לייצר מחלקיק אור (פוטון) אחד זוג פוטונים – חלקיקי אור (פוטונים) שזורים בעלי תכונות זהות לפוטון המקורי בתהליך קוונטי המצייט, כמובן, לחוק שימור האנרגיה.

ניתן לסכם בקצרה את ההבדלים בין הביט לקיוביט:

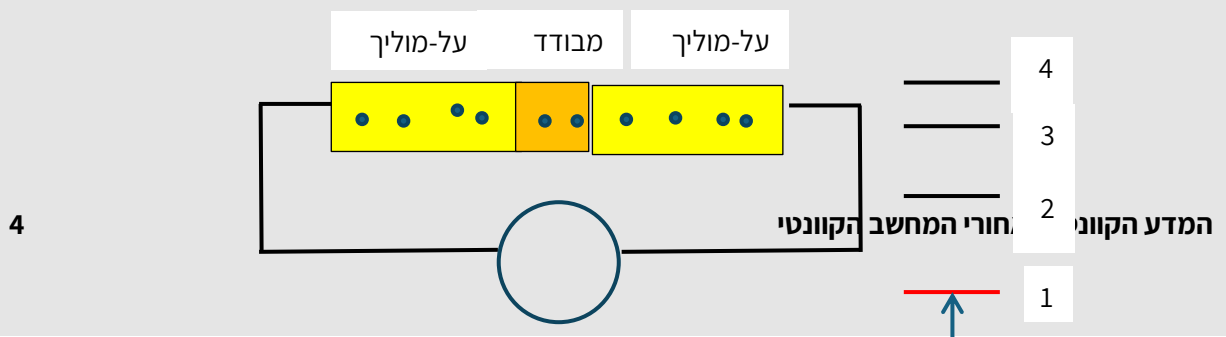
תכונות ביט	תכונות קיוביט
נמצא במצב בינארי יציב מוגדר, 0 או 1	נמצא בסופרפוזיציה של מצבים
ניתן למדידה ישירה	המדידה היא התוצאה המסתברת ביותר
עצם המדידה אינה משפיעה על המערכת	עצם המדידה משפיעה על המערכת ומביאה לקריסת הסופרפוזיציה לערך המסתבר ביותר
הביט נמצא במצב קלאסי שניתן להעתיקה	הקיוביט נמצא במצב קוונטי שלא ניתן להעתיקה
לא ניתן לייצר שזירה בין הביטים	ניתן לייצר קיוביטים שזורים
ניתן למחיקה (נוצר באופן קלאסי)	לא ניתן למחיקה – זהו המצב הטבעי של חלקיק קוונטי

קיוביט של על-מוליך וצומת ג'וזפסון

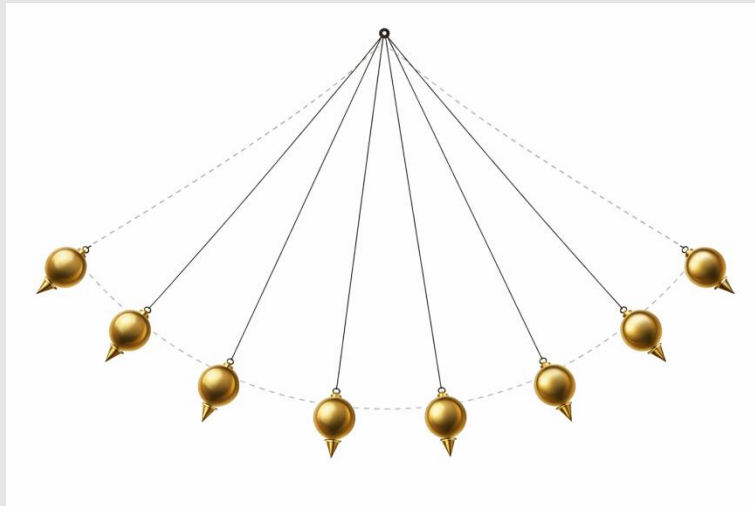
מערכת מחשב קוונטי שבו הקיוביטים מבוססי על-מוליכים (superconductors) היא מערכת ייחודית. מדובר בהתקן ייחודי קלאסי שמפגין תכונות קוונטיות המאפשרות יצירת קיוביטים.

כידוע מפיזיקה קלאסית, הולכה חשמלית במוליך מתכתי מבוססת על תנועת אלקטרונים בתווך מוליך בעל התנגדות הנובעת מהתנגשויות בין האלקטרונים הנעים בתווך המתכתי, תוך אובדן המידע והתכונות הקוונטיות. מתכות מסוימות מגלות תכונות של על-מוליכות בטמפרטורה נמוכה מאוד, קרובה לטמפרטורה הנמוכה השוררת בחלל החיצון. מדובר במוליכות חשמלית ללא התנגדות, והיא מתבצעת באמצעות זוגות של אלקטרונים ("זוגות קופר").

החלקיקים הנעים בעל-מוליך מתנהגים כישות אלקטרונית יחידה בעלת תכונות קוונטיות מוגדרות, אשר זורמת במעגל החשמלי ללא הפעלת מתח חשמלי. נוסף על כך, כאשר מפרידים את העל-מוליכים באמצעות מחסום העשוי משכבה דקה של חומר מבודד (צומת ג'וזפסון) זוגות האלקטרונים עוברים מחסום זה בתהליך שנקרא מנהור – תופעה שאינה קיימת במקרה הקלאסי, ובה חלקיקים קוונטיים יכולים לעבור בהסתברות נמוכה דרך מחסום אנרגטי, כפי שניתן לראות באיור:

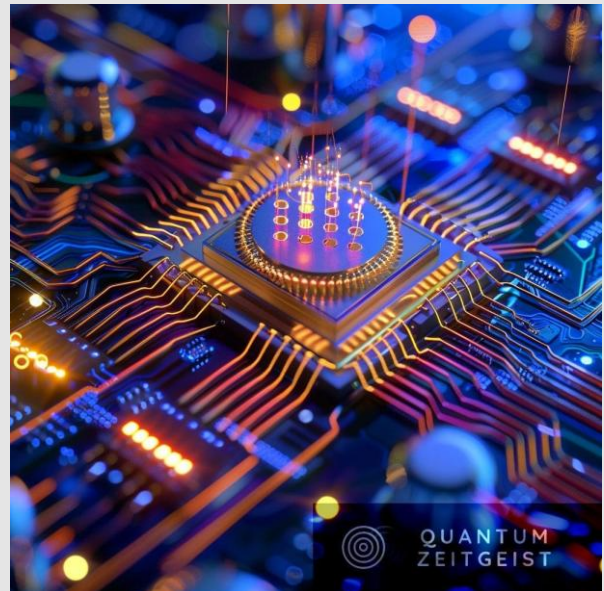


בחיבור צומת ג'וזפסון למקור מתח נוצר במערכת הקלאסית מעגל חשמלי בעל תכונות קוונטיות. במערכת זו נושאי המטען מתנועעים הלוך ושוב כמו במטוטלת קלאסית:



אך בשונה מהמקרה הקלאסי שבו המטוטלת נעה ברציפות מצד לצד, כלומר עוברת דרך שורת מצבי אנרגיה ברציפות, נושאי המטען במקרה הקוונטי עוברים דרך מצבי אנרגיה בדידים. במקרה זה ההתקן שבו נושאי המטען נעים הלוך וחזור בדומה לתנועת מטוטלת נקרא **חלל תהודה**. הכינור מהווה אף הוא חלל תהודה, שכן גלי הקול הנוצרים עקב תנועת המיתרים נעים הלוך ושוב בחלל הכינור ומפיקים צלילים בתדרים שונים. ניתן לומר (בהגזמה) כי ההתקן המבוסס על צומת ג'וזפסון אנלוגי לכינור המפיק צלילים בתדרים שונים.

בשל התכונות המיוחדות של צומת ג'וזפסון, המרווח האנרגטי בין מצבי 0 ו-1 שונה ממרווחי האנרגיה של הרמות העליונות יותר, במקרה שלנו 2, 3, 4 למשל, כמודגם באיור לעיל, ונוצר מצב המוגדר **סולם אנרגיה אנהרמוני**. המערכת הקלאסית צומת ג'וזפסון מתנהגת כמו מערכת קוונטית, מעין "**אטום מלאכותי**" עם רמות אנרגיה בדידות. התקן זה המוצג באיור הבא נקרא טרנסמון (Transmon).

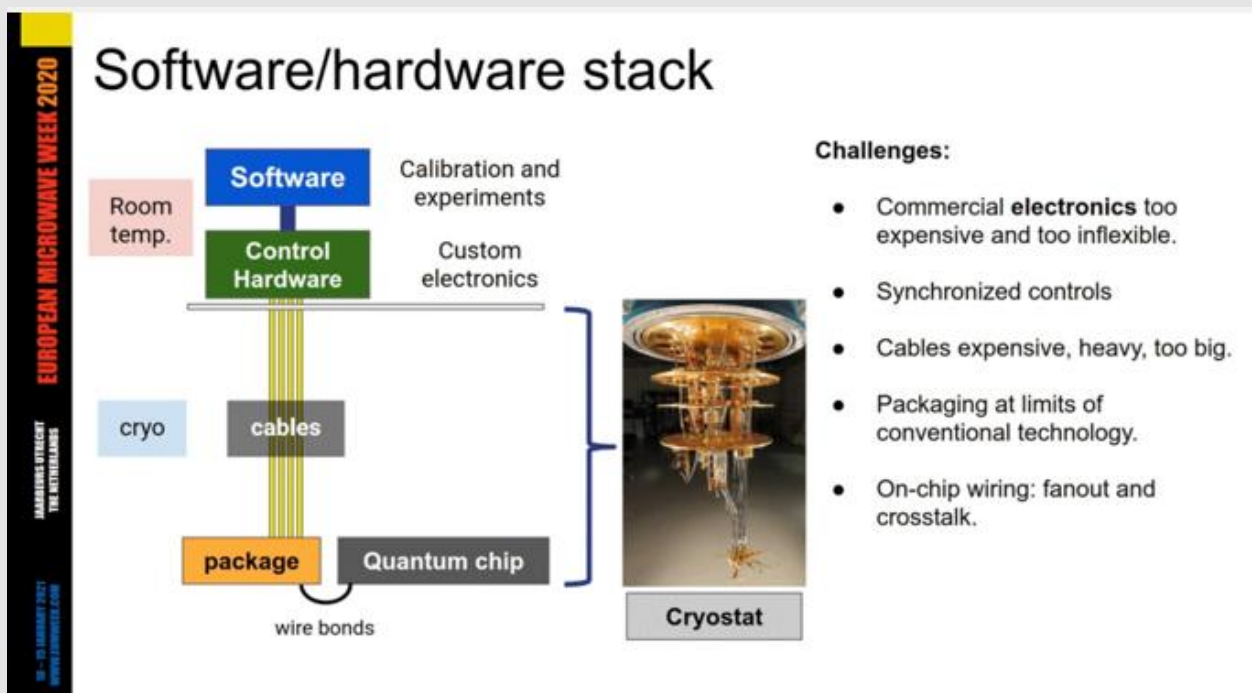


[איור של קוויביט מבוסס על התקן טרנסמון](#)

מבנה כללי של המערכת

ההתקן הקוונטי מקורר לטמפרטורה נמוכה ביותר, הקרובה לטמפרטורה השוררת בחלל החיצון, על מנת למנוע אובדן בעל-מוליך, למנוע **רעש תרמי** שמביא לקריסת מצבים ולאובדן הקוהרנטיות הנחוצה לקיום המצב הקוונטי, וכן להשאיר את המערכת הקוונטית במצב אנרגטי יסודי. הקירור נעשה במספר שלבים על ידי התקן קירור מיוחד (קריאוסטט) בשיטת 'קירור על ידי מיהול' (Dilution Refrigerator).

בעיקרון הקירור נוצר בתהליך הערבוב של שני איזוטופים של הליום השונים זה מזה בתכונות הפיזיקליות שלהם. עקב כך תהליך הערבוב יונק חום מהסביבה, ועל ידי כך מקרר אותה. התקן הקירור עשוי מזהב, וזאת על מנת לשמור על האיכות הכימית של רכיבי הקירור, על מוליכות תרמית טובה בין שלבי הקירור השונים ועל הגמישות של המחברים השונים במעבר מטמפרטורת החדר לטמפרטורה נמוכה באופן קיצוני ביותר. המבנה העקרוני של מחשב קוונטי המבוסס על צומת ג'וזפסון ועל-מוליכים מתואר באיור הבא:



[מקור: The superconducting transmon qubit as a microwave resonator](#)

מדידת תוצאת החישוב נעשית באמצעות מדידה עקיפה של המצב הקוונטי של המערכת, שכן מדידה ישירה תביא לקריסת המצבים הקוונטיים. המדידה העקיפה נעשית באמצעות שליחת פולס חלש של גלי מיקרו דרך חלל התהודה של הטרנסמון (כפי שהוגדר לעיל) באנרגיה שמתאימה להפרש האנרגיה בין המצבים 0 ו-1 של מערכת "האטום המלאכותי".

מודדים את השינוי באות החוזר אחרי שעבר בין שני המצבים 0 ו-1. כאשר הקיוביט נמצא במצב 0, שהוא מצב בעל אנרגיה נמוכה, גל המיקרו החוזר יהיה כמעט ללא שינוי. אם הקיוביט נמצא במצב אנרגטי 1, שהוא בעל אנרגיה גבוהה יותר, גל המיקרו יחזור עם שינוי מסוים לעומת האות המקורי שנשלח (אי-ההתאמה הזו נקראת שינוי פאזה), ומצב זה, גם אם הוא חלש מאוד, ניתן למדידה באמצעות מגברים מיוחדים. אי-ההתאמה בין פולס גל המיקרו שנשלח לבין הפולס החוזר, כאשר המערכת נמצאת למשל במצב 1, אנלוגית לבדיקת צליל שמע משני עצמים בעלי הרכב שונה, למשל עץ ומתכת. עצמים אלו יפיקו צלילים שונים כאשר נקיש עליהם.

לסיכום, ניתוח האותות החשמליים המתקבלים מאפשר לקבוע באופן בלתי ישיר את הערך המסתבר ביותר מבין 0 או 1 – ערכים המייצגים את שתי רמות האנרגיה שבה נמצאת המערכת של חלל התהודה.

יישומים

הטבלה הבאה מסכמת בקצרה את היישומים העיקריים של מחשבים קוונטיים:

סוג היישום	פירוט	הערות
פיצוח קודים	שימוש באלגוריתם Shor לפיצוח קודים בני אלפי ספרות (כגון צופן RSA המקובל כיום), המורכב בין היתר מפונקציות מתמטיות הקשורות למכפלת מספרים ראשוניים בני מאות ספרות כל אחד	מחשב קוונטי מבצע את הפעולה בעשרות עד מאות שניות, לעומת אלפי ואף מיליוני שנים שיידרשו למחשב קלאסי, תוך יישום שיטות מתמטיות מורכבות ובהתבסס על תכונות הסופרפוזיציה והשזירה של מצבים קוונטיים
שליטה במסדי נתונים ענקיים	אלגוריתם Grover לשליפת מפתח הצפנה מבוקש מתוך מסד נתונים בעל סדרה אקראי בן מאות מיליוני מפתחות הצפנה	מחשב קוונטי מבצע את הפעולה במקביל על כל מסד הנתונים העצום בפרק זמן קצר משמעותית ממחשב קלאסי
תקשורת חסינת האזנה	יישום תכונות קוונטיות של חלקיקים למניעת יירוט מידע על ידי מניעת יירוט מפתח הצפנה	האזנה פירושה "מדידה", קריסת המצבים הקוונטיים ושיבוש התקשורת. כשמדובר בזוגות שזורים, מדידת חלקיק אחד משפיעה מיידית על השני
אופטימיזציית תהליכים	שימוש בשיטות קוונטיות ייחודיות לאופטימיזציה של תהליכים מרובי משתנים, למשל בחירת מסלולים אופטימליים	חישוב סימולטני של מצבים מצומדים בשיטת quantum annealing
סימולציה של תהליכים פיזיקליים וכימיים	כוח המחשוב הקוונטי מאפשר ביצוע סימולציות מורכבות ביותר, שלא ניתן לבצען בכלים הקיימים	סימולציה של תהליכים ביולוגיים, חיזוי מזג אוויר, תיכנון אווירודינמי ותהליכי זרימה וריאקציות כימיות מורכבות
הנדסת חומרים	תיכנון חומרים חדשים ותהליכים כימיים-קוונטיים מורכבים בעזרת מחשב קוונטי, כדי להימנע מתהליכים רבים של ניסוי וטעייה	חיסכון בכוח אדם ובשעות מעבדה מרובות, מאחר שתכנון חומרים כימיים חדשים מחייב שעות מעבדה מרובות וניסיון מקצועי שלא תמיד זמין

<p>הגדלת מגוון היישומים של AI והתגברות על מגבלות המחשב הקלאסי, מכיוון שהמודלים של AI מצריכים ניתוח סטטיסטי מורכב של מסדי נתונים עצומים</p>	<p>שימוש בכוח החישוב המקבילי של מחשב קוונטי לביצוע פעולות מורכבות מבוססות על נתונים סטטיסטיים, כדי להפיק תוצאות אמינות</p>	<p>יישומי בינה מלאכותית AI</p>
<p>נושאים אלו אינם קשורים לפיתוח מחשבים קוונטיים אך מבוססים על עקרונות תורת הקוונטים</p>	<p>חישה קוונטית, שעונים אטומיים</p>	<p>יישומי מבוססים על תכונות של חלקיקים קוונטים</p>

הישגים עדכניים

הטבלה הבאה מציגה הישגים עדכניים בנושא פיתוח קיוביטים עבור מחשב קוונטי מבוסס [על-מוליכים](#):

חברה	שמות שבפיתוח	מספר הקיוביטים המרבי	הערות
IBM	Condor Eagle, Osprey	1121 - Condor	מתוכננים 4158 קיוביטים מקושרים
Google Quantum AI	Willow	105	פיתוח מערכת לתיקון שגיאות בשבבים
Rigetti Computing	Ankaa-3/Aspen	84	מפתחת שבבים ומערכות היברידיות
IQM-Quantum Computers	אין שם	54	300 קיוביטים מתוכננים לשנת 2027; פיתוח מערכות לתיקון שגיאות
D-Wave	D-wave advantage	5760	מבוסס על תהליכי אופטימיזציה שונים מהמקובל
SpinQ	Triangulum, Gemini	2-3	מערכות ניידות לצורכי חינוך והדגמה
QPIAI Indus		25	מתוכנן מעבד Kayen בן 64 קיוביטים
Amazon	Ocelot	אין מידע	תיקון שגיאות קוונטיות ביעילות פי 10 מחברות אחרות

סיכום

בעבודתנו זו סקרנו באופן כללי ביותר את עקרונות הפעולה של מחשב קוונטי, בהתבסס על עקרונות תורת הקוונטים. המיקוד כאן הוא על קיוביטים המבוססים על התקן לא-לינארי משולב עם על-מוליכים וצומת ג'וזפסון, כולל הסבר על שיטת הקירור המיוחדת של הקיוביטים, וזאת על מנת לאפשר פעולה יעילה של העל-מוליך ולבודד את המערכת הקוונטית מרעש תרמי.

הצורה הנוכחית של המחשב הקוונטי, שנובעת מדרישות הקירור, הופכת אותו לכלי מסורבל עם יישומים מוגבלים ביחס למחשבי-העל הנוכחיים. הישגים עדכניים בנושא, פרי פעילותן של מספר חברות מובילות, מצביעים על מאמץ טכנולוגי מרשים למימוש מרבי של [פוטנציאל הנושא](#). מן הראוי לציין כי ישנן שיטות נוספות ליצירת קיוביטים שקצרה היריעה מלפרטן

במאמר זה, כגון אטומים טעונים (יונים) כלואים, אטומים מעוררים לרמות גבוהות ולכודים על ידי קרני לייזר, קיוביטים טופולוגיים ועוד. במאמר הבא נסקור ביתר הרחבה את היישומים הפוטנציאליים של מחשבים קוונטיים ואת השפעתם הן על הביטחון הלאומי והן על המדע והתעשייה בארץ ובעולם.