



מסיבים אופטיים ועד אופטיקה קוונטית

מדינת ישראל תשקיע למעלה ממיליארד שקלים בפיתוח השליטה באור הקוונטי. ליכולות אלו יש השלכות מרחיקות לכת על תחומי התקשורת, ההצפנה והחיישה - אבל עד כמה? המהפכה השנייה כבר כאן | ד"ר אליהו כהן

שחקן חדש - לוויין סיני בשם Micius. באמצעותו כבר הודגמו ייצור של מפתח קוונטי סודי, והעברת חסינות של אינפורמציה קלאסית (תמונות ושיחות וידאו) וקוונטית (מצבים קוונטיים באמצעות טלפורטציה) למרחק של אלפי קילומטרים. זוהי התפתחות מסעירה שצפויה להימשך ביתר-שאת בשנים הקרובות, לעבר הפיתוח של 'אינטרנט קוונטי'.

נקודת אור בישראל

נתמך בדוגמה מייצגת. ניסוי LIGO מדד לראשונה גלי כבידה ב-2016, ובכך אישש את התחזיות של תורת היחסות הכללית. הניסוי מבוסס על מדידה מאוד רגישה שמסוגלת להבחין בעיוותים זעירים של המרחב-זמן. אבל עם הרגישות לאותות מגיעה גם הרגישות לרעש: בדצמבר 2019 פורסם שימוש ראשון של LIGO באור קוונטי 'דחוס'. במובן מסוים, האור הדחוס נהנה מהפחתה ברעש (אי-ודאות מופחתת של פרמטר מסוים) ובכך מגדיל כעת ב-50% את הסתברות הגילוי של גלי כבידה.

מעבדות באופטיקה קוונטית מצויות כמעט בכל האוניברסיטאות ומכוני המחקר בישראל, אולם עלויות האחזקה וההתעצמות הן גבוהות. כמו כן, עלינו להכשיר דור חדש של חוקרים ומהנדסים קוונטיים. על רקע זה אנו שוקדים באוניברסיטת בר-אילן על פיתוח של שני מסלולי לימוד חדשים בהנדסה קוונטית - האחד במסגרת תוכנית אודיסיאה של מדעני העתיד לתלמידי תיכון, והשני תחת התואר הראשון בהנדסת חשמל ופיזיקה.

אליהו כהן הוא ד"ר לפיזיקה, מרצה בכיר בפקולטה להנדסה של אוניברסיטת בר-אילן, ראש קבוצת "יסודות תורת הקוונטים וטכנולוגיות קוונטיות פוטוניות", וחבר במכון הננו-טכנולוגיה וחומרים מתקדמים (BINA) ומכון הקוונטים (QUEST) של האוניברסיטה.



להכשיר דור חדש של חוקרים ומהנדסים קוונטיים. ד"ר כהן | צילום: יח"צ

היא מייצרת את המצבים של הפוטונים בדרך א' או ב'. היא שולחת את הפוטונים לצד השני, 'בוב', שלא יודע כיצד הוכנו, וגם הוא מחליט אם הוא מודד אותם בדרך א' או ב'. לאור עקרון אי-הוודאות, לא ניתן לקבל את המידע גם על א' וגם על ב'. כאשר לוקחים בחשבון שצד שלישי, 'אייב', מסוגלת להאזין לתקשורת ביניהם ולבצע מדידת משלה, מבינים שזהו יתרון עצום. כי כעת, באמצעות תקשורת קלאסית, אליס ובוב יכולים לראות באילו מקרים השתמשו שניהם בדרך א' או בדרך ב', וכך גם להשוות את התוצאות שלהם. באופן זה, הם יודעים אם איב מדדה ושיתנה את מצב הפוטונים, כך שהם יכולים להתחיל מחדש בפעם אחרת מבלי לסכן את המפתח הסודי.

נותרה שאלה מהותית: כיצד יכולה אליס לשלוח פוטונים לבוב מבלי שיהרס המצב הקוונטי שלהם? עד כה, בוצע שימוש בסיבים אופטיים שהעבירו אותות קוונטיים למרחקים של כמה מאות קילומטרים, אולם ב-2016 נכנס לזירה

שרת את קיומן. במידה רבה, טכנולוגיות קוונטיות אופטיות נשענות על הפחתת חסרונותיה של אי-הוודאות, בד-בבד עם ניצול יתרונותיה.

'אליס' ו'בוב'

טכנולוגיה קוונטית פשוטה, שזמינה לא רק באופן מסחרי אלא אפילו בטלפונים הניידים של-נו, היא מחולל קוונטי של מספרים אקראיים. זה לא סוד ששיטות הצפנה רבות נשענות על ייצור של מספרים אקראיים. אם המספרים שאנחנו מגרילים כדי לייצר את המפתח הסודי הם לא ממש אקראיים, קיים חשש שהתוקף יוכל להבין את המנגנון שעומד בבסיס ייצורם וכך יגלה את המפתח. כאמור, העולם הקוונטי אקראי מטבעו ולכן מאפשר לייצר מספרים שהם אקראיים לחלוטין. מערכת בסיסית לייצור מספרים אקראיים קוונטיים מורכבת מדיודה פולטת אור, מפצל קרניים, שני גלאים רגישים מאוד לאור עד לרמת הפוטון הבודד, ומנגנוני תיאום. מפצל הקרניים יוצר 'סופרפוזיציה' של הפוטון הנכנס - כלומר, מפצל אותו כך שיש סיכוי זהה של 50% לכל אחד מהגלאים (ימני או שמאלי) שיגלה אותו. אם מגדירים שמאל: 0 וימין: 1, ניתן לייצר רצף ביינארי ארוך שהוא אקראי לחלוטין. מדובר ברכיב קומפקטי שיכול לחולל מספרים אקראיים, מאוד איכותיים ובקצב גבוה, אבל עוד יותר מפתיעה העובדה שאפילו המצלמות בטלפונים הניידים שלנו הן מערכות מספיק מתקדמות כדי לפעול ברגישות של פוטונים בודדים (למעשה, גם העין שלנו היא כזו).

אותה אי-ודאות קוונטית היא בעלת תפקיד מכריע גם בשיטות הפצה קוונטיות של מפתחות סודיים. בסכמה הבסיסית, צד אחד, 'אליס', משתמשת במספרים האקראיים כדי לבחור האם

אחרונה גובשה תוכנית חומש לאומית, בהיקף של למעלה ממיליארד שקלים, לקידום טכנולוגיה קוונטית - ובפרט, כזו שעושה שימוש במצבים קוונטיים של אור. הטכנולוגיה הזו כוללת חיישנים מדויקים, מדידות אולטרה-רגישות, חישוב וסימולציה מהירים, תקשורת והצפנה חסינים ועוד. כן, מתברר שאנחנו בעיצומה של המהפכה הקוונטית השנייה. המהפכה הראשונה, שהחלה לפני למעלה מ-100 שנה, הביאה לעולם אוסף חדש של חוקים לגבי הסקאלות הקטנות של הטבע (מולקולות, אטומים, אלקטרונים, פוטונים ועוד) כמו-גם אמצעים שאנו מכירים מהיום-יום כגון טרנזיסטורים, לייזרים ודימות רפואי באמצעות MRI. המהפכה השנייה מתייחסת לשלב הבא באבולוציה של טכנולוגיות קוונטיות, בהתבסס על יכולות חסרות תקדים של יצירה ושליטה על מצבי אור וחומר.

העולם הקוונטי ייחודי באי-הוודאות שלו. חלקנו זוכר שאלות מהתיכון בסגנון: 'אבן נזרקת כלפי מעלה במהירות התחלתית כלשהי, מה יהיה מיקומה לאחר כך וכך שניות?'. לשאלה זו ישנה תשובה ודאית במסגרת המכניקה הקלאסית, אבל בעולם הקוונטי ניתן לאמוד באופן כללי רק את ההסתברות למיקום כלשהו ברגע שנמדוד אותו, או את ההסתברות למהירות כלשהי. על-פי רוב, אין ודאות לגביהם אבל התנאי הקשיח באמת הוא לגבי צירופם: קיימת מגבלה יסודית שידועה כעקרון אי-הוודאות. לא ניתן להשיג דיוק מדידה אבסולוטי לגבי המהירות (תנע, ליתר דיוק) והמיקום גם-יחד, ויש להתפשר על הידע של אחד מהם או שניהם.

לאחרונה פיתחנו, חבריי ואני, את הטענה שלפיה אי-הוודאות לא רק מאפשרת הבנה טובה יותר של כל התופעות הקוונטיות, אלא למעשה מאפ-