<u>אפקט הפרפר בעולם המיקרוסקופי: כאוס ותורת הקוונטים נפגשים – הרצאה של פרופ' ניר דודזון, 15.3.2016</u>

בואו נעשה כזה דבר. נתחיל כי עכשיו הזמן אבל נראה סרט של שתי דקות אז מי שיאחר יפסיד את הסרט, אז אציג את עצמי ואז נתחיל את ההרצאה.

מי שבגילי ומעלה ראה את זה, זה היה להיט גדול בשנות ה-80. רואים סדרת אירועים אקראית שהגיבור והגיבורה בעקבותיהם נפגשים ומתאהבים. זה מתחיל בטיפה של מים.

זה עוד ממשיך. יש פקק, אז הגיבור וגיבורה נפגשים ומתאהבים. זה היה בשנות ה-80, זה לצעירים...

מה שראינו בסרט בטח מסביר לכולכם מה שקורה כל בוקר, אוסף דברים שקורים וזה מה שגורם לנו להגיד שאי אפשר לחזות את העתיד. כי זה אוסף אירועים נורא מסובכים, המון דברים יכולים לקרות. זה נקרא אפקט הפרפר. ההרצאה תהיה על אפקט הפרפר. והחצי הראשון של ההרצאה יהיה על אפקט הפרפר בעולם האמיתי של דברים גדולים, מפה נוצרה תורת הכאוס. יש משהו להגיד גם על אוסף האירועים המבולגן הזה. זה החצי הראשון של ההרצאה.

ואז נעשה מעבר חד ונרד לעולם של אטומים, של דברים קטנים, אטומים ומולקולות. שם זה לא דברים שרואים בחיי יומיום, שם יש תורה חדשה שמשתמשים בה במאה השנים האחרונות, תורת הקוונטים. אני בטוח שכולכם שמעתם כמה הרצאות על תורת הקוונטים, אגיד רק כמה מילים שתבינו על מה אני מדבר, תראו שהחומר יכול להיות בכמה מקומות בו זמנית, אפשר לעשות טלפורטציה כמו בסרטים. אלו דברים שקורים בסקאלה גדולה.

אשאל איך אפקט הפרפר, איך תורת הכאוס ותורת הקוונטים נפגשים. תראו שיש בעיה. אחר כך תראו את הפתרון של הבעיה.

האם יש כאוס בעולם המיקרוסקופי? זו השאלה.

זה לצעירים יותר, אולי את הסרט זה כן ראו, אפקט הפרפר, אומרים פה שאם משנים דבר אחד, משנים הכל. לגיבור היתה מכונת זמן, הוא חזר אחורה בזמן, ניסה שיִקרו דברים טובים לגיבורה, אבל תמיד זה התפקשש וקרו דברים רעים בעקבות חוסר היכולת שלנו לנבא מה יקרה בעתיד במצבים מורכבים. אולי זה יותר מוכר לחלק מכם – פרק במשפחת סימפסון שבו הומר מנסה לתקן טוסטר, בטעות הוא בונה מכונת זמן וחוזר לתקופת הדינוזאורים, בטעות הוא הורג את כל הדינוזאורים, עכשיו אנחנו יודעים מה קרה להם... ואז הוא חוזר להווה ומגלה שאין דונַטס. זה נושא הפרק.

יש לי שתי הדגמות, הדגמות לא תמיד מצליחות, תחזיקו אצבעות. אתחיל בהדגמה ראשונה כדי לראות את ההבדל בין תנועה רגולרית שניתנת לצפייה לבין תנועה קוונטית. אפקט הפרפר – מזג אוויר קשה לחזות, כולנו יודעים זאת היטב, הטענה היא אם יש פרפר שמנפנף בכנפיים בצד אחד של העולם, אם נחכה קצת זמן יהיה הוריקן בצד השני. זו מערכת מסובכת עם דרגות חופש, אולי לא מפתיע שקשה לחזות את זה – יש לחות, שמש, אנשים, מזג אוויר זה תופעה מסובכת.

תופעה פשוטה אַראה פה – זו מטוטלת, אבל שמו אותה על שולחן לא יציב. אבקש מגרי לשבת על השולחן כדי לייצב אותו, זה יעשה כאוס איפה שלא צריך...

זאת מטוטלת, פה יודעים לצפות מה יקרה בהמשך. זה קצת דומה למה שהיה פעם בבתים, שעון מטוטלת. את השעונים האלה בנו מדויקים מאוד, בכנסייה במרכז הכפר היה שעון כזה והוא היה מדייק ברמה של כמה שניות ביום. מאוד יפה. באיזשהו שלב אנשים הבינו שהיכולת למדוד זמן במדויק זו יכולת אסטרטגית, מי שיצליח

לבנות שעון טוב ישלוט בעולם. מי שהבין את זה ראשון היו האנגלים, לכן הם שלטו בעולם 200 שנה. הסיבה שזה קשור כי הם שלחו אוניות לכל מיני מקומות, כל זה כתוב בספר Longitude (שאת השער שלו רואים בשקף).

איך מנווטים בים? קו רוחב קל למדוד, אבל קו אורך קשה, כי כדור הארץ מסתובב, צריך תצפית אסטרונומית לשם כך, לכן רוב האסטרונומים המפורסמים כמו גליליאו גליליי חשבו על איך לנווט. האנגלים והצרפתים התחרו ביניהם. ג'ון הריסון היה נגר, לא פיזיקאי, הוא התחרה בכל גדולי הפיזיקאים כמו ניוטון וניצח אותם. הוא מצא את קו האורך. הוא לא אסביר איך, אבל אם יש שעון טוב ומודדים את זווית השמש בכיוון שהיא עולה ויורדת, יודעים מה קו האורך, צריך לדעת את זה בדיוק של כמה עשרות קילומטרים. לשם כך צריך שעון שמכוונים אותו כשיוצאים באנגליה, וכשמגיעים לאיי בהמה אחרי חציית האוקיינוס האטלנטי הוא לא סובל סטייה של יותר מדקה. אבל צריך לפתור הרבה בעיות מכניות, הריסון הנגר הטוב הצליח לפתור את כולן וקיבל פרס גדול ממלך אנגליה בתנאי שלא ימכור את ההמצאה שלו לצרפתים. את השעון שהוא בנה רואים בשקף. הוא עמד במשימה, את השעון הזה אפשר לשים באונייה, לכוון אותו באנגליה, לחצות את האוקיינוס האטלנטי, והתופעה הזאת קיימת כאן – אחרי מאות אלפי תנודות השעון היה מדויק.

יש מערכות שיודעים לצפות במדויק מה הן יעשו בעתיד. אם פעם חשבתם שאי אפשר לדעת שום דבר, אז יש דברים שאפשר לדעת. השעון הזה נמצא במוזיאון גריניץ'. הריסון בנה חמישה שעונים, זה אחד מהם. היום בונים שעונים שבהם לא מטוטלת מסתובבת אלא יון מסתובב במלכודת, השעון היום מאוד מדויק, טווח הטעות של השעון האטומי הוא 0.000,000,000,000,000,001 שנייה, כלומר דיוק של חלקיק שנייה. אם היינו מכוונים את השעון הזה לפני 15 מיליארד שנה, השגיאה שהיתה מצטברת עד עכשיו היתה עשירית שנייה. מי שבונה שעונים כאלה כאן במכון זה רועי עוזרי. אפילו פה יש בנייה מדויקת, יודעים לבנות דברים מדויקים.

אז הנה, הניסוי שעשיתי פה עם המטוטלת הצליח.

נעשה משהו אחר. גרי, אני צריך שתשב. היה כאן בורג שהחזיק את זה חזק ונתן רק זווית אחת, דרגת חופש אחת. יש גם חוק שימור אחד, חוק שימור האנרגיה. אם הייתי כותב משוואות, הייתם רואים משוואה אחת וחוק שימור אחד, מספר משוואות שאפשר לפתור בין מספר אילוצים (יש פה אילוץ אחד). לכן הטבע פתר את זה. אני מוסיף עוד דרגת חופש, יש פה הזווית הזאת ועוד הזווית הזאת, זו מטוטלת כאוטית. האם אתם מסוגלים לנבא מה יקרה? נדמה לנו שאנחנו יודעים מה קורה ואז היא מפתיעה אותנו. לפעמים זה מסתובב, זה מסתובב, זה נעצר, פתאום זה משתולל...

גרי שם פה צירים טובים כדי שזה יֵצא מרשים. צריך שולחן יציב, זה פחות הצליח.. אם נחכה עוד טיפה בסבלנות, נראה כאוס. זו אותה מערכת, יש בכל זאת חיכוך, גרי... האנרגיה ירדה, רואים שהתנועה הפכה להיות צפויה מראש. יש מערכת שבחלק מהפרמטרים באנרגיה גבוהה היא כאוטית, ובחלק רגולרית. באנרגיה נמוכה היא צפויה מראש. זו מערכת מעורבבת, mixed system. רוב המערכות בטבע הן כאלה, לא כאוטיות ולא רגולריות אלא תערובת כלשהי.

ההדגמה הזאת מאוד-מאוד מפתיעה לטעמי. תודה, גרי.

בשקף הבא זה אותו הדבר. מישהו פתר את המשוואות ושם עיפרון בקצה. זה מה שרואים פה, זה יאפשר למי שפחות הצליח לעקוב אחרי הניסוי, לעקוב אחרי הנקודה הזאת ולנסות לזהות חוקיות. מה קורה פה? יש פה שתי דרגות חופש, שתי זוויות, ורק חוק שימור אחד. יש דרגת חופש אחת נוספת של המערכת שאין מי שמאלץ אותה, זה מספיק. אם הייתי כותב משוואות, היו פה שתי משוואות עם אילוץ אחד, זה נותן תנועה כאוטית – ואוסיף לאנשים הטכניים פה – בתנאי שהמשוואות לא ליניאריות. כך זה במקרה הזה, כמעט כולן לא ליניאריות,

כמעט תמיד זה נכון. גם מערכת לא ליניארית בטבע תגדיל את מספר דרגות החופש, שבמקרה של מזג אוויר זה אלף, זה יהיה אחד ממספר אילוצים (חוק שימור אנרגיה וכו'), וכמעט תמיד נקבל כאוס.

מה זה אומר? מה זה כאוס? פה אני חוזר לציור הזה בצורה סכמטית. ניקח שני תנאי התחלה שונים, עיגול כחול ועיגול אדום. נניח שניסיתי להרכיב את המטוטלת בדיוק מאותו מצב, שיחררתי ומדדתי, אני רוצה לחזור על הניסוי. אני מכוון בזהירות כדי שהוא יהיה באותם תנאי התחלה. עשיתי שגיאה קטנטנה, של אלפית מילימטר, מיליונית מילימטר או מיליארדית מילימטר, לא משנה, בכאוס השגיאה תגדל באופן מעריכי, אקספוננציאלי. מה זה אקספוננט? בעוד שנייה השגיאה תהיה פי 2, עוד שנייה עוד פעם פי 2, זה אקספוננט. תוסיפו כל פעם אפס. לא משנה אם התחלת בדיוק של מילימטר או מיליארדית מילימטר, כי האקספוננט תמיד ינצח. לא משנה כמה מדויק תתחיל, תרוויח עוד זמן קצר והמערכת תצא משליטה, זה כאוס שמודגם פה. הגידול הזה מדגים גידול מעריכי, שנייה הקטנה שתוך זמן קצר תהיה כל כך גדולה שלא ייתכן שום ניבוי למצב המערכת.

רגישות אקספוננציאלית לתנאי התחלה, זה אומר שאי אפשר לנבא עתיד. זה ציטוט של אדוארד לורנץ מ-1965, שאמר שההווה קובע את העתיד, אבל קירוב של ההווה לא ינבא קירוב של העתיד. זה נכון, יש פה שתי משוואות בשני נעלמים. באופן פרקטי אם נתחיל משגיאה קטנטנה – קחו מחשב ותעשו חישוב, תמיד יש ספרה אחרונה שמעגלת, וכל שגיאה קטנה כזאת תגדל מעריכית; לכן כל קירוב של הווה לא ינבא קירוב של עתיד. זה כאוס. אפשר למצוא את זה בכל מקום. אראה כמה דוגמאות.

למשל, אם משחקים ביליארד על שולחן עגול ועוקבים אחרי המסלול של הכדור, הוא נראה רגולרי, שתי דרגות חופש. נחפש את שני האילוצים, כי מספר דרגות החופש ומספר האילוצים צריך להיות שווה כדי שזה יהיה רגולרי. בשולחן העגול זה נשמר, דרגת חופש אחת. אם לוקחים את הצורה הזאת (שרואים בשקף למטה מצד ימין), צורה שקצת מזכירה איצטדיון בייסבול אמריקאי – פה שברתי את העיגול. תעקבו אחרי המסלול של הכדור, זה יזכיר תנועת מטוטלת. לוקחים כדור ביליארד, הוא נע ישר, מתנגש בקיר וחוזר. זווית הפגיעה שווה לזווית ההחזרה. החוק פשוט. כל ילד יכול לפתור את זה ואף אחד לא יכול לפתור, כי כל שגיאה התחלתית תגדל אקספוננציאלית, אחרי הפגיעה בקיר לא נוכל לדעת מה קורה עם הכדור.

נפגוש זאת שוב בחלק השני של ההרצאה עם אטומים קוונטיים.

פה בשקף יש דוגמא נוספת מחיי יומיום. אם מסתכלים על הזרימה, יש צינור מים ובתוך הצינור זורם נוזל, אם מהירות הנוזל לא גדולה הזרימה היא למינרית. אם יש מכשולים או שהמהירות גדולה מדי או הקוטר קטן מדי, מקבלים זרימה טורבולנטית, יש בועות. גם באטמוספרה זה קורה, אנחנו רואים את כוכבים מנצנצים. אני לא רוצה להרוס את הרומנטיקה לאף אחד, אבל זה בגלל הטורבולנציה של האטמוספרה. פה אני מביא ציטוט מפיזיקאי בשם גרישה פלקוביץ. טולסטוי באנה קרנינה אמר שכל המשפחות המאושרות דומות זו לזו וכל משפחה אומללה היא אומללה בדרכה שלה, לכן בדרך כלל כותבים ספרים על אנשים שסובלים. פלקוביץ כתב בעקבותיו: כל הטורבולנציות דומות זו לזו, וכל זרימה למינרית היא למינרית בדרכה שלה. אם אעקם את הצינור של הזרימה הלמינרית אקבל חיצים שונים. בטורבולנציה תמיד זה חיצים שונים, אבל יש תכונות משותפות – בכל הזרימות הטורבולנטיות בכל מקום יש תכונות סטטיסטיות זהות, כאשר פיזיקאים באים לנתח מערכות כאוטיות טורבולנטיות, הם לא שואלים מה יקרה לַחֵץ הזה כי אין דרך לנבא, אז צריך לקחת את כל התנועות הכאוטיות ולשים בצד כי לא יודעים לפתור את זה. אבל פיזיקאים שואלים שאלות שהם כן יודעים לענות עליהן, הם יודעים לענות על שאלה סטטיסטית – מה התכונות הסטטיסטיות של הזרימה, ברוב המקרים

זה מה שמעניין. לא אכפת מה יקרה לכל חלקיק נוזל, רוצים לדעת כמה עירוב יהיה. בתורת הכאוס, בטורבולנציה, יודעים לענות על שאלות סטטיסטיות. סתם להגיד שאי אפשר לפתור זה לא מעניין.

עכשיו אעשה הדגמה קצת מסוכנת, בואו ננסה. החלק המסוכן לדעתי זה המחשב, בואו נראה. יש לי כאן שני גלילים שעשויים מפרספקס, שני גלילים עם רווח ל 3 מילימטר ביניהם, ברווח יש נוזל, זה גליצרין ולא מים כי הוא טיפה צמיגי, לא רוצים זרימה טורבולנטית אלא למינרית. עם ידית אסובב את הגליל החיצוני, אבל הגליל הפנימי נשאר, אז הגליצרין ירגיש תנועה כזאת שגוזרת אותו. זה מה שאני הולך לעשות. מה שרואים למעלה זה צבע שנשאר מניסויים קודמים. תראו את האזור הקטן למטה, אני הולך לשים שם קטע של צבע. הנה יש פה כתם של צבע ירוק. עכשיו אסובב את הידית, נראה מה קורה. נעשה את זה מהר. השתמשתי בזרימה למינרית, הזרימה גזרה את הכתם בעוביים שונים, במרחקים שונים, החלק שקרוב לצד הפנימי נע, מי שקרוב לצד החיצוני נגזר (נמתח). נסובב את הידית חמש פעמים, זה קצת נמרח. זו תופעה הזאת שנקראת echo, הֵד. מה שעשיתי – יצרתי דינמיקה בזמן, שנראתה מסובכת, רואים שהידית הולכת ומורחת את הצבע, וזה קורה ברבע סיבוב, עשיתי חמישה סיבובים. פה הוא לקח את הכתם הקטן והפך אותו לפס גדול שלא הצלחתם לראות. יש לי פה עוד צבעים, אבל הבנתם את זה רק עם מה שעשיתי עד עכשיו. קילקלתי את הסיגנל היפה הזה, מרחתי אותו על פני גודל עצום, אבל עשיתי את זה בצורה שאפשר להפוך אותה בזמן. איך הפכתי אותה לזמן? סובבתי את הבורג הזה, את הידית, בכיוון ההפוך, כך עושים NMR, תהודה מגנטית גרעינית. יש שם דברים מסתובבים, ספינים, הם לא מסתובבים באותו קצב, גם מסיבות מעניינות וגם מסיבות משעממות, למשל שגיאות בשדה מגנטי, אז עושים טריק של הפיכת כיוון. אם לא קרה משהו מעניין, כגון שהם התנגשו אחד בשני שזה כאוס, נקבל את הסיגנל הזה שהוא echo. איך נדע אם התנועה היא מסודרת? ננסה להפוך אותה בזמן ונראה אם נצליח. את זה ההדגמה הזאת אמורה להראות.

עכשיו אני רוצה לספר על הקשר בין כאוס לבין חץ הזמן. חץ הזמן אומר: האם אפשר להפוך את הזמן, האם אפשר לקחת סרט שנע קדימה להסריט אותו אחורה. אם הייתי מראה סרט שאני מפיל את המחשב שלי על הרצפה והוא מתרסק, או מראה סרט שבו השברים של המחשב הופכים למחשב שמציג מצגת, הייתם יודעים מה נכון ומה שגוי. כולם יודעים שרסיסים לא הופכים למחשב. הראשון ששם את העובדה הזאת על השולחן הוא בחור בשם בולצמן. מילה אחת למדענים בקהל – פה קבור בולצמן, פה קבורה המשפחה שלו. יש פה פאולה, ארתור, לודוויג בולצמן, על כל אחד מהם כתוב איזה תואר יש לו, על ארתור כתוב שיש לו דיפלומה בהנדסה, דוקטורט במשהו, גם על לודוויג כתובים כל מיני דברים, אבל בולצמן הוא רק בולצמן, לא כתוב עליו כלום. אולי זה סימן טוב. אם לא צריך לכתוב עליך כלום, סימן שעשית דברים.

קריאות: זה כתוב למעלה.

פרופ' ניר דודזון: זאת נוסחה של מדידת אי הסדר, שבולצמן גילה אותה. לאי סדר יש נטייה לגדול, כמו שאשתי אומרת תמיד. אז אנטרופיה תמיד גדלה, זה חץ הזמן, זו נוסחת האנטרופיה שבולצמן גילה, הוא קרא לזה מולקולת כאוס. אם אתה מתחיל במצב מסודר – למל גז שכל המולקולות פה מסודרות – ופותח מחיצה, מתישהו תקבל מצב כזה של אי סדר. אם הייתי הופך את החץ ושואל אם הדבר הזה יכול לחזור הנה, רובכם הייתם אומרים שלא. זו אקסיומה שנקראת מולקולת כאוס, שבולצמן נתן לה כלים חזקים לתאר את התרמודינמיקה, שזה הישג ענק בפיזיקה. הוא לא זכה לפרגון מצד הסובבים, וגדול הלא מפרגנים היה לושמיט, שבמובן מסוים היה המנטור של בולצמן, לושמיט אמר, באופן משכנע לצערנו, שלא ייתכן שאנחנו לוקחים סט משוואות כמו משוואות של אטומים שמתנגשים, של סימטריות בזמן, שאפשר לכתוב עם הזמן פלוס או מינוס ונקבל תופעה שאינה סימטרית בזמן – שזה הטיעון של בולצמן. כדי לחדד את הטיעון ולהפוך אותו לאכזרי כלפי

בולצמן – שהתאבד בסופו של דבר גם בגלל הוויכוחים האלה, והיום יודעים לבקש ממנו סליחה ולהבין שצדק – לושמיט אמר לבולצמן: אתה אומר שאנטרופיה תמיד גדלה; אם ניקח כל אחד מהחלקיקים אלה, מהמולקולות, שיש לה מהירות פִּי, ונהפוך את החץ ב-180 מעלות כמו שעשיתי פה ונחכה זמן זהה, נקבל בחזרה את המצב הקודם. לכן אמר לושמיט – קראו לזה ההד של לושמיט – בולצמן, אתה טועה, אנטרופיה לא תמיד גדלה. גם באך אמר את זה ועוד כמה אנשים מפורסמים, ואז בולצמן התאבד. היום יודעים להסביר את הנימוקים שמוכיחים שהוא צודק; עבור מערכת כאוטית לא ניתן להפוך את ציר הזמן, כי אם ננסה להפוך את ציר הזמן זה אף פעם לא יהיה מדויק, ובמערכת כאוטית ניסיון לחזור אחורה בזמן תיכשל כי כל שגיאה קטנה תגדל אקספוננציאלית. אבל זה כבר לא עוזר לבולצמן.

עכשיו הגיע הזמן לעבור לקוונטים, אבל עוד כמה אמירות על כאוס. לורנץ הוא מטאורולוג. גילו את הכאוס כמה פעמים, גם במאה ה-19, גם במאה ה-18, אבל לורנץ בשנות ה-60 הוא ראשון ששם את זה על המפה, שעשה משוואות מסובכות וכל הזמן נכשל, הוא אף פעם לא הצליח לנבא את מזג האוויר וזה עיצבן אותו. הוא היה מכין טבלאות של כרטיסים, עם מחשבים של אז, וכשהיה צריך להפסיק את החישוב ולהמשיך למחרת, הוא רשם תוצאת ביניים, למחרת החזיר את הכרטיס למחשב והחישוב היה ממשיך. לורנץ שם לב שלמרות שהוא מחשב אותן נוסחאות, הוא לא קיבל אותה תוצאה. כל מדען פה יודע שזה קורה כל הזמן, עושים אותו דבר ומקבלים תוצאה אחרת. אנחנו מתביישים, בודקים שאף אחד לא רואה, זורקים את הניסוי ועושים אותו שוב. לורנץ הבין שעלה על משהו, הוא שם לב שכאשר חזר על אותו חישוב שעשה אתמול, עיגל קצת, הוריד את הספרה האחרונה, הספרה העשירית, זה נתן תוצאה לגמרי שונה בגלל כאוס.

מכיוון שלורנץ היה מטאורולוג והיה חכם מאוד, הוא הבין שזו תופעה רחבה מאוד מעבר למטאורולוגיה. הוא כתב משוואות גנריות, לא ליניאריות, הן כאוטיות, יש להן תכונה שכל שגיאה קטנה גדלה אקספוננציאליות והן לא ניתנות לניבוי. הן מספיק פשוטות כדי לפתור אותן בעזרת מעגל כזה (כפי רואים בשקף), לוקחים כבלים ונגדים ומחברים בחוטים ואפשר להסתכל על הדינמיקה במסך, הוא ראה דברים יפים מאוד.

ניתן לכם טעימה, למה כאוס מעניין. בניגוד למטוטלת שנתנה תמונה מבולגנת מאוד, פה יש צורה יפה, דומה לפרפר. לורנץ קרא לזה אפקט השחף, שאם הוא מנפנף בכנפיים יכולה להיות לזה השראה איפשהו. מה ההבדל בין שחף לפרפר? רק פקטור 100, סיכמנו שזה לא משנה.. גם צורות יפות כאלה, כמו "המושך המוזר", אחת הצורות שרואים המון בכאוס – אני לא מבין למה זה נקרא מושך ומוזר, אבל זו תכונה מעניינת. הוא נראה מאוד מסודר, יש לו pattern, דפוס, מעגלים שמאלה ימינה, והוא עדיין הוא כאוטי. אם תנסו לשאול אם הוא הולך לצד שמאל או ימין אחרי הנקודה שזמן שווה 100, אין דרך לנבא זאת. הרבה אנשים חלקו פה תכונות מעניינות, גם פרופ' איתמר פרוקצ'ה שהוא מדען פה במכון. תמיד מסתכלים כמה אנשים ציטטו אותך, זה נותן אינדיקציה אם המחקר שלך מעניין. לגבי מדידת מוזרוּת הזאת, 3,000 אנשים קראו המאמר של איתמר והתרשמו מספיק כדי לצטט אותו, כי הוא יודע להסביר את התופעה הזאת שהיא שלוש משוואות לא ליניאריות עם שלושה נעלמים.

מי שלא מתעניין ביופי המדעי של דברים כאלה ורוצה דברים פרקטיים, יש לי בשבילו שלושה שקפים. אפשר להצפין בעזרת כאוס. יש ויכוח מתמטי, לפרופ' עדי שטרן יש משפטים מתמטיים שאומרים שזה לא נכון, אבל אנשים בכל זאת עושים זאת. נגיד שזה אינסטינקט נכון.

אתם לא רוצים לעשות הצפנה בעזרת כאוס, אלא בעזרת RSA, צריך מספרים ראשוניים לכל הצפנה. איך מייצרים מספרים ראשוניים? תחשבו על מספרים ראשוניים, אני מבטיח שאף אחד בעולם לא יצליח לייצר מאה מספרים אקראיים, בראש תמיד יש חוקיות. אפילו למחשבים קשה לעשות זאת, אם אתה מבקש ממחשב לייצר

מאה מספרים אקראיים ומבקש שוב, בדרך כלל הוא מייצר אותם מספרים אקראיים. תיזהרו. לא קל לייצר מספרים אקראיים. אפשר לעשות זאת אם אומרים לאנשים לפתור משוואות של לורנץ, אפשר ללכת לתופעה כאוטית. שני מדענים באוניברסיטת בר אילן לקחו לייזר, הפכו אותו להיות כאוטי, אז הוא עשה את התנודות האלה שרואים בשקף, והם פשוט מדדו את העוצמה שלו והפכו אותה ל-1 ואפס; כך יצרו את הסדרה הכי מהירה בעולם של מספרים ראשוניים ופירסמו את זה בעיתון חשוב. אלה מספרים אקראיים. אפשר להוריד מהאינטרנט תוכנה כדי לבדוק אם הם אקראיים באמת ולבדוק את הקורלציות. סוכנות ההצפנה האמריקאית, שמצותתת לכולם, משתמשת בזה. הלייזר הזה בבר אילן עמד בכל המבחנים של המצפינים האמריקאיים.

גם אני ואשר עושים את זה במכון ויצמן. לקחנו שני לייזרים, עשינו אותם כאוטים, מדדנו את העוצמה שלהם כפונקציה של זמן; אחד היה ירוק, אחד כחול, קיבלנו משהו כמו רעש, אבל אגלה לכם שזה כאוס. יש הבדל. לקחנו שני לייזרים וצימדנו אותם, לא חשוב איך, עדיין קיבלנו כאוס; אלה שני לייזרים שכל אחד מוציא סיגנל כאוטי שלא ניתן לצפות, בהינתן שיש שגיאה קטנה שגדלה מעריכית, אבל הוא זהה.

אנחנו מסתכלים על דבר שנקרא פונקציית קורלציה. בהינתן שאני יודע מה עוצמת הראשון אני יודע מה עוצמת השני. זה טוב שיש עותקים זהים של כאוס, אפשר אחד לשים ברחובות, אחד בחיפה, ולקשור לסיבים של בזק. ובכן, יש שני עותקים זהים של כאוס, אחד ברחובות אחד בחיפה, זה טוב להצפנה. אפשר לקחת את זה, להוסיף סיגנל חלש ולשלוח לחיפה; רק מי שיש לו כאוס זהה, יוכל להפחית את הרעש של הכאוס ולפענח את ההצפנה. אם יש עוד מישהו שלא השתכנע שכאוס זה שימושי – אומרים שמה שקורה בשוק ההון הוא גם כן כאוס, ומי שמבין כאוס יכול להפיק תועלת מהתובנות האלה.

עד כאן החלק הראשון, עכשיו אתם יודעים מה זה כאוס.

שאלה: אם רואים אורות רחוקים מנצנצים, זה מאותה סיבה?

פרופ' ניר דודזון: התשובה היא כן. בלילות שקטים או במדבר אורות לא מנצנצים כי לאטמוספרה יש תנועה למינרית.

תורת הקוונטים קיימת מאה שנה, היא נראית בערך כך (דף מלא נוסחאות). אבל בכל את אגיד כמה מילים פשוטות על התורה הזאת. עוד לפני שנולדה, נילס בּוהר, פיזיקאי מפורסם, הסתכל על אטום מימן, יש פה גרעין, פרוטון, ואלקטרונים מקיפים אותו. הוא ניסה לענות על השאלה למה אלקטרונים מקיפים את אותו אטום רק ברמות דיסקרטיות, קוונטיות. למה אטום לא יכול להיות בין שני מסלולים? למה הוא יכול להיות רק במרחק הזה, לא במרחק של אחד וחצי.

שבוהר גילה שאם אתה מחשב תכונה לאורך המסלול המחזורי, הוא חישב את התֶנַע הזוויתי, ואז אתה מקבל מספר שלם כפול משהו. לזה קוראים לקוונטט. העובדה שאתה מחשב ומסכם משהו לאורך מסלול ומקבל מספר שלם כפול משהו, ולא מספר שלם ועוד חצי, זה נותן מחזוריות. עשר שנים אחרי זה הבינו מה זה מספר שלם, מספר שלם של אורכי גל. אלקטרון הוא הגל שמקיף את זה, כדי לפגוש את עצמו חזרה הוא יפגוש את עצמו בפאזה, ייפגש עם עצמו.

בוהר הבין שצריך מסלולים מחזוריים כדי לנתח את הבעיה. ואז בה איינשטיין – תזכרו שאנחנו לפני תורת הקוונטים. 1917 זו היתה עוד שנה פורייה לאיינשטיין, הוא גמר לגלות את תורת היחסות, סיים לכתוב את המשוואות שהביאו ללייזר, ואז היה לו קצת זמן ותקף את שיטה של לקוונטט. הוא תרם לתורת הקוונטים, בכך ששם לב שבאופן גנרי בטבע ברוב המערכות אין מסלולים מחזוריים, ואז בעצם אין מה לעשות, יש משבר. איינשטיין היה איינשטיין, והוא גם הציע פתרון למשבר שלפעמים עובד ולפעמים לא. אתם רואים עבור איזה מערכות אין מסלולים מחזוריים? זה עבור מערכת כאוטית. איך מקוונטטים מערכת כאוטית? יהיה מי שיטען –

את מי זה מעניין; נשים פה סקאלה, הגודל של אטום מימן זה עשירית ננומטר, כל כך קטן, מה זה משנה מה קורה בפנים? אנחנו מתעניינים בדברים גדולים, בשוק ההון ובפרפרים.. אבל אולי אם יש דברים קטנים, צריך להשתמש בתורת הקוונטים לכל הדברים המוזרים. אם הם גדולים כמוני – יש תורה קלאסית, כאוס, לא כאוס, הכל בסדר.

בשקף רואים דוגמא של גלים רגילים. מישהו זרק שתי אבנים לבריכה, במקום שהגלים נפגשים הם יכולים לחזק אחד את השני או להרוג אחד את השני. רואים פה נקודה של שקט במקום שהם נפגשים, זו תכונה גלית קוונטית. זה קורה בסקאלה גדולה. לא מעניין אותנו מה שקטן, כך אמרו. האומנם?

אני אראה לכם תמונה דומה לזאת. יש גלים שבאים לפה, נפגשים, מתאבכים, יש כתם פה וכתם פה, גלים נפגשים; אלה אטומים של סודיום, נתרן. לפעמים הם מתחברים ולפעמים מתחסלים. אלה אטומים קטנים, אבל את זה אמרה תורת הקוונטים. אני רוצה להוסיף פה סקאלה מיקרוסקופית, זה ניסוי שעשה פטרלי ב-1975 וקיבל על זה פרס נובל. בתנאים מסוימים הוא אמר שתנועות קוונטיות של גלים קורים בסקאלה מקרוסקופית. האם קטן זה קוונטי וגדול זה קלאסי? לא. לא תמיד, יש דוגמאות שזה לא כך. אני חושב שזו דוגמא מוחשית בעין. גם מי שלא אוהב את תורת הקוונטים ולא רוצה להסתכל על דברים קטנים, שלא מעניין אותו מה קורה בתוך אטום, אלא רק רוצה להסתכל על דברים גדולים, אין לו ברירה, צריך לדעת איך תורת הקוונטים והתורה הקלאסית נפגשות. התשובה היא לא כשמשהו קטן הופך לגדול, יש הרבה תשובות אחרות. במקרה הזה מחפשים את הסיבה לכך שרואים תופעות קוונטיות בסקאלה מקרוסקופית. פה (בשקף) אנחנו מקררים אטומים בכמה מעלות מתחת לאפס המוחלט, זה קר מאוד, בספר השיאים של גיניס כתוב שזה 170 מיליארדי מעלות מעל האפס המוחלט. כאשר המים קרים, אפשר לראות זאת בעין חשופה. זה הכי קר בעולם. כל פיזיקאי אוהב לשבור שיאים. גם אם אתה לא מבין שום דבר, ברור שאם תעשה הכי, זה יהיה משהו מעניין. הכי קר יהיה משהו מעניין. יש פיזיקאים שרוצים הכי חם והכי אנרגטי, הם מאיצים חלקיקים במנהרה באורך עשרות קילומטרים שנמצאת מתחת לז'נבה, כדי לקבל את הכי חם והכי אנרגטי. כך מקבלים פיזיקה חדשה. אנחנו עושים את זה במכשיר שנמצא על השולחן, אפשר לעשות שינויים בתוך חדר במעבדה, שבהם תופעות קוונטיות מתרחשות בסקאלה מקרוסקופית. אם רוצים לדעת איך תורת הקוונטים ותורת הקלאסית נפגשות, נחפש משבר, שאלה דרמטית. השאלה הכי דרמטית שאני יכול להעלות היא כאוס. השתכנענו שיש כאוס במכניקה קלאסית. אני רוצה ללכת לתורה הקוונטית ולחפש שם את הכאוס. אם לא נמצא, תהיה לנו נקודת משבר. ניזכר מה זה כאוס. לקחנו מערכת דינמית כמו מטוטלת או ביליארד, התחלנו בשני תנאי התחלה קרובים, קידמנו בזמן וראינו שהמרחק גדל באופן מעריכי. בואו נעשה אותו דבר בקוונטים. נתחיל בשתי מערכות קוונטיות, שתי מערכות גלים (רואים בשקף), נשים אותן קרוב אחד לשנייה, עוד לפני שמתחילים יש בעיה, כי רואים סקאלה. מה שניסיתי לתאר זה אורך גל, אי ודאות איפה החלקיק נמצא. אין משמעות לְמַה שיקרה אם נשים את החלקיקים הרבה יותר קרוב, כמו שעשיתי כאן. פה עשיתי נקודה, יש פה אי ודאות אינהרנטית, אבל נשים אותה מתחת לשטיח. לגבי המרחק בין הכדורים (לא בין הגלים) – יש פה חפיפה. איך נדע אם הם חופפים או לא? נראה אם יש התאבכות. אם נראה התאבכות הם קרובים, אם אין התאבכות הם רחוקים. בואו נלחץ על הקליק ונעשה את הניסוי. קטסטרופה. מסתבר שאם פותרים את המשוואות של הדינמיקה הקוונטית, למשל של המטוטלת הזאת, לוקחים שני גלים ומקדמים אותם הפעם לא באופן קלאסי אלא באופן קוונטי, לא רק שהמרחק לא גדל אקספוננציאלית כמו בכאוס, הוא אפילו לא גדל באופן ליניארי, זה כמו שקורה במערכות למינריות. המרחק לא גדל בכלל, לא משתנה, החלקיקים נשארים חופפים באותה מידה

באופן מדויק; לא משנה אם אני שם פה מערכת קלאסית או מערכת קוונטית. זה נובע מהליניאריות של תורת הקוונטים. היינו צריך אי ליניאריות בשביל כאוס, ותורת הקוונטים היא לינארית. יש פה משבר.

אם כך, באתי לתת הרצאה על כאוס קוונטי ועכשיו אני אומר שאין כזה דבר... זאת בעיה שהציקה לאנשים רבים, היו לה פתרונות שאני מדלג עליהם. יש פתרונות, אנשים עבדו על כאוס קוונטי וגילו כל מיני תכונות של מערכות קוונטיות שמשתנות כאשר המערכות הן קוונטיות או קלאסיות. זה מאכזב, כי כאוס קלאסי הוא מאוד דרמטי, אני רוצה בקוונטים כאוס, אם לא נמצא זה לא מספיק טוב. פרופ' אשר פרס, שנפטר לא מזמן, איש חכם שהמציא את הטלפורטציה קוונטית – אגב, אדם קצת שובב. הוא למשל היה דיקן של הפקולטה לפיזיקה בטכניון, ומבקשים מדיקנים להמליץ על פרס נובל לפיזיקה אבל אסור לך להמליץ על עצמך. כשביקשו ממנו, הוא המליץ על מנחם בגין לקבל פרס נובל בפיזיקה, הוא שמגיע לו פרס נובל בפיזיקה כמו שמגיע לו פרס נובל לשלום. הוא באמת נתן את ההמלצה הזאת, בסוף הדיחו אותו מהדיקנות כי הוא עשה את זה על נייר רשמי של הטכניון. בכל אופן, אשר פרס היה מאוד חכם והוא הציע לשאול שאלה אחרת. השאלה שלו אמרה כך: נכון, לקחתי שני מצבים קרובים, קידמתי אותם תחת מערכת קוונטית, והמרחק ביניהם לא גדל, קידמתי אותם תחת אותה מערכת בתנאי התחלה שונים. בואו נעשה משהו אחר – ניקח את אותם תנאי התחלה, שהם כמעט נוגעים אחד בשני, ונקדם אותם בשתי מערכות שונות. פעם אחת נתחיל מתנאי ההתחלה האלה (בשקף) ונקדם את זה תחת מערכת 1 ופעם שנייה תחת מערכת 2. לדוגמא, נתחיל עם מטוטלת קוונטית באותם תנאי התחלה, נגיד שזה אפשרי, נשנה פרמטר במערכת, או שנשנה טיפה את האורך, ואז קודם כל נרגענו. אפשר להראות – מי שיודע לעשות חישובים קוונטיים, יכול לעשות זאת – שאם המערכות שונות המרחק לא ישתנה. ואז אפשר לשאול את השאלה. עכשיו נשאל – אם אני לוקח שתי מערכות קוונטיות כמעט זהות, עם הבדל קטן מאוד באורך המטוטלת, נתחיל באותם תנאי התחלה ונקדם אותם בזמן תחת מערכות מאוד קרובות, תחת הפרעה קטנה מאוד, האם המרחק ביניהם יגדל אקספוננציאלית או לא? אם הוא יגדל אקספוננציאלית במערכת קוונטית, גילינו כאוס קוונטי. אז יש עוד שאלה, האם נמצא קשר. האם כשאני לוקח את המערכת הזאת ומגדיל אותה כך שתהפוך להיות קלאסית, האם אמצא קשר שיביא למסקנה שמערכת קלאסית כאוטית היא גם קוונטית כאוטית? למזלנו אפשר לשאול הרבה שאלות, כי אם היתה רק שאלה אחת היית כותב מאמר אחד, כשיש הרבה שאלות אפשר לכתוב הרבה מאמרים.

אפשר לשאול כאן שלוש שאלות – אחת, האם יש קשר בין קצב הגידול לבין השאלה אם המערכת כאוטית או לא. את זה שאל אשר פרס. כדי שלא תהיו במתח, התשובה היא כן...

נשאל עוד שאלה. ניקח את המערכת הזאת, נלך איתה קדימה בזמן במערכת 1, עכשיו ננסה לחזור אחורה בזמן כמו שלושמיט הציע, נשנה את כיוון הספינים של השדה המגנטי וננסה לחזור להתחלה. האם נצליח? באופן קלאסי אנחנו יודעים שאם המערכת למינרית נצליח, אפילו אני הצלחתי לעשות זאת תוך כדי הדגמה פה, ואם המערכת היא כאוטית – לא הדגמתי אותה – אם הזרימה היא טורבולנטית הייתי נכשל. השאלה אם המערכת הקוונטית היא הפיכה בזמן, כלומר האם אין לה רגישות אקספוננציאלית לשגיאות קטנות או שיש לה רגישות כזאת. זו אותה שאלה בעצם. עוד שאלה מאוד פרקטית שאנשים שואלים, בואו ניקח דוגמא למערכת קוונטית, נניח שבנינו מחשב קוונטי – שעוד לא בנינו; אם נבנה נוכל לפתור בעיות קשות אקספוננציאלית – נרצה שאם נחשב אותה בעיה פעמיים, המחשב הקוונטי ייתן את אותו פתרון. השאלה אם המחשב הזה הוא כאוטי או למינרי, האם שגיאה קטנה בתנאי התחלה תיתן שגיאה אקספוננציאלית. השאלה הזאת תכריע אם זה יהיה מחשב קוונטי או לא. הרי בסוף יבנו מחשב קוונטי, האם הוא יהיה שימושי? זה תלוי בתשובה לשאלה אם תהיה לו רגישות אקספוננציאלית לתנאי התחלה או לא. אני לא יודע את התשובה. יש פה מערכת עשירה.

אשר פרס היה תיאורטיקן, לכן היה לו זמן לכתוב כל מיני הגיגים. השאלה אם אפשר לעשות את זה בניסוי. אנחנו רוצים לקחת מערכת קוונטית במצב מוגדר היטב ולקדם אותה בזמן; אחר כך לעשות זאת עוד פעם, לקחת שוב מערכת קוונטית ולקדם אותה בזמן, ולמדוד את המרחק ביניהן, למשל את החפיפה. השאלה איך אפשר לעשות את זה. אני רוצה לא לעשות את זה, אלא לקחת שתי מערכות בו זמנית שאחת תתקדם תחת מטוטלת ארוכה והשנייה תתקדם בו זמנית תחת מטוטלת קצת יותר קצרה. למרבה המזל תורת קוונטים מאפשרת לעשות זאת, להכין שני עותקים של אותה מערכת ולקדם אותה במקביל, כל אחת עם כוח קצת שונה. אתן דוגמא ציורית. ניקח כדור ביליארד, נדאג שחבילת גלים אדומה שרואה ביליארד אדום, וחבילת גלים כחולה שרואה ביליארד קצת שונה, כל אחת מהן מתנגשת בקירות, נמדוד את מרחק ביניהן על ידי זה שנראה חפיפה והתאבכות. לקחנו את האטומים הסוּפֶּר קרים שלנו ושמנו אותם במלכודות לייזר שמסתובבות נורא מהר, ננסה לקדם אותם.

יכולה להיות צורת עיגול, אתם זוכרים שהצורה העגולה היא רגולרית והצורה שמזכירה מגרש בייסבול היא כאוטית. עושים מדידות ומסתכלים באיזה קצב האטומים בורחים מהחור. צריך להראות שזה כאוס וזה רגולר. זה שלב ראשון, במקום כדורי ביליארד לקחנו חבילות גלים של אטומים קרים (בשקף), כך נראה אטומים. יש פה שלושה מסלולים פנימיים, שיודעים להכין את האטום במצב של חצי חצי, חצי במסלול שמאלי, חצי במסלול ימני. הם לוקחים את האטום בצירוף, בסופר פוזיציה של שני מסלולים. מתברר שהביליארד הוא אותו ביליארד, אבל כשהאטום במצב הפנימי שלו מרגיש כוח חזק יותר, פה הוא מרגיש כוח חלש יותר, כי חוזק אינטראקציות בלייזר שונה. הצלחנו לא רק לעשות שתי חבילות גלים שנמצאות במצבים זהים, אלא כל אחד מהעותקים מרגיש סביבה חיצונית קצת שונה; אנחנו יודעים לשלוט בסביבה, בחוזק ההפרעה. ניתן לאטום להתנגש בקירות, פעם אחת בעיגול, פעם אחת בצורה דמויית אצטדיון, פעם אחת בכאוס, פעם אחת במיני כאוס, ונראה כמה מהר חבילות הגלים נפרדות. כך זה נראה (בשקף). מודדים את הגלים אלה, את תבנית ההתאבכות, כפונקציה של זמן. אם רואים קווי התאבכות כמו גלים בים, סימן שהחפיפה גדולה. אם הם ירדו לחצי, החפיפה ירדה. אם קווי ההתאבכות קטנים, החפיפה קטנה. רואים כמה זמן לוקח לחבילות גלים להיפרד, למרות שלא רואים אותם כי הן בגודל שמתחת מיקרון. משתמשים בתכונה של התאבכות כדי לראות כמה מהר המרחק גדל – ליניארית, אקספוננציאלית. האם זה קשור לתנועה הקלאסית? התשובה היא כן. רואים את הציר וכמה חפיפה יש. פה מראים דעיכה של חפיפה בביליארד כאוטי. פה נשארה חפיפה גדולה גם אחרי הרבה זמן.

המסקנה היא שלא רק שיש כאוס קוונטי, אפילו מסוגלים למדוד אותו במעבדה. נדמה לי שזה בערך הכל.

יש עוד דברים שאפשר להגיד על כאוס קוונטי, אתן לכם ציור אחד נחמד. כך נראו מסלולים באצטדיון (בשקף), מסלולים כאוטיים. אחת התכונות שלהם היא שאם לוקחים נקודה מסוימת, החלקיק עובר הרבה פעמים בכל מיני כיוונים, מתאבך כל הזמן. מקבלים תבנית התאבכות מאוד מסובכת שנראית כך. חבילת גלים קוונטיים לא נראית כל כך יפה כמו שציירתי, קצת שיקרתי, הייתי צריך לצייר דברים כאלה שמאבדים את החפיפה אחד לַשֵּנִי. אם אתם רוצים, לפחות באופן ויזואלי חבילת הגלים הזאת נראית כאוטית. זה לא אומר שיש רגישות אקספוננציאלית מהתחלה. לכן אני מתעקש שצריך למדוד, לא מספיק להסתכל.

לא התאפקתי, אשאל שאלה שאף אחד לא יודע את התשובה עליה רק אני יודע, כי קראתי את המאמר הזה של אשר פרס שאין לו אף ציטוט. הוא שאל שאלה שקשורה לכאוס וקוונטיים – יש מחשב קוונטי, נגיד שבנינו אותו והוא עובד ואין לו כאוס, מה הוא ייתן לנו? חיזוק אקספוננציאלי ליכולת החישוב שלנו, נוכל לחשב מהר יותר כי הוא פותר את כל הקוונטים במקביל. אם יהיה מחשב שמורכב מאלף ביטים קוונטיים, לא מאה מיליארד כמו בצ'יפ של אינטל, הוא ינצח את הצ'יפ של אינטל. אם יהיה מחשב קוונטי מאוד חזק, הוא יהיה

אקספוננציאלית יותר חזק. נחפש בעיה אקספוננציאלית קשה; ננסה לעשות סימולציה של מערכת כאוטית, שאי אפשר לעשות אותה כי אי אפשר לחזות את העתיד כאשר שגיאה קטנה גדלה אקספוננציאלית. יש לנו כלי שלא קיים. תזכרו, אם יהיה קיים מחשב קוונטי שיהיה חזק אקספוננציאלית, אפשר יהיה לפתור בעיה אקספוננציאלית קשה. האם זה יצליח או לא? או יצליח חלקית? אני יודע את התשובה, אבל נשאיר אתכם במתח.

אסיים עם ציטוט של איינשטיין שלא קשור. איינשטיין לא האמין שאלוהים משחק בקוביות, הוא האמין שביקום יש יכולת דטרמיניסטית כך שהתשובה לשאלות שנשאל לא תהיה אולי כן, אולי לא ואולי חצי. לכן הוא נלחם בכל כוחו באינטרפרטציה של תורת הקוונטים. זה שאיינשטיין לא הבין את תורת הקוונטים זה לא נכון, הוא הבין אותה מספיק טוב כדי להבין את הקשיים שטמונים בה, לכן כעס. בו זמנית איינשטיין הבין היטב מה זה כאוס, במובן מסוים לא צריך את תורת הקוונטים כדי לטעון שאלוהים משחק בקוביות, גם בחיים אמיתיים הקלאסיים, גם לגבי המטוטלת הזאת, אומרים שאפילו אלוהים לא היה יודע מה יקרה. אני מסיים כאן, תודה.