**העבודה כוללת הערות המנחה במצב סקירה**

**יחסות וקוונטים ומה שביניהם**



**VS**



**המהפכה הקוונטית, ויכוחי איינשטיין-בוהר, עקרונות תורת היחסות והסתירות ביניהן**

**הקדמה**

במשך אלפי שנים, האנושות חיפשה את החוקים לפיהם פועלים דברים ביקום. תחילה ההסברים היו כללים ובצורות משונות שאנשים התחברו אליהן מאוד כגון אלילים וקסמים. יש בידינו ממצאים כבר מימי היוונים על ניסיונות לתת מענה על היקום: לדוגמא רעיון קיום האטום הבלתי ניתן לחלוקה נקבע על ידי דמוקריטוס במאה ה5 לפני הספירה כדי לענות על השאלה ממה מורכב החומר, ואריסטו פיתח תורת תנועה משלו עם עקרונות רבים ושימוש בכך שלפיו החומר בנוי מארבעה יסודות שכל אחד מהם מנסה להתחבר עם יסודות כמוהו בגופים אחרים. לפיו זה הכוח המניע ביקום יחד עם עוד כמה אקסיומות, חלקן נראות מטופשות היום כמו זו שדברים נמשכים לכדה"א כי הם רוצים להתאחד איתו או זו שגופים מאטים בתנועתם כי הם מתעייפים. ועדיין, הנחות אלה נראו סבירות באותה תקופה ונתנו מענה לשאלות רבות.

אולם המוני האנשים הלא מלומדים בעבר המשיכו לתת מענה לחוקי הטבע באמצעים מיסטיים. ב1066, דוכס נורמנדי תקף את אנגליה הפראית. כוכב שביט הגיע לשדה הקרב והפחיד את האנגלים הפגאנים ששהו שם ואז נורמנדי כבשה את אנגליה ונוצרה הממלכה האנגלית של היום. ב1622 אותו שביט עבר שוב מעל אנגליה! אנשים תהו מאיפה בא השביט? האם הוא מסמל את מות המלכים? האם זה שליח מגן עדן? ניוטון קרא על זה תיגר, עם גרביטציה. הוא הבין שהמתמטיקה של התקופה לא מספיק טובה לתאר את התיאוריה שלו, אז הוא פיתח את החשבון כדי שיהיו לו כלים. אדמונד היילי האציל העשיר בא לניוטון לשאול אותו מה הוא חושב על השביט, וניוטון אמר שהוא עושה תנועה אליפטית והוא צפה בו בכל יום כבר הרבה זמן וזה נכון והוא יודע לחשב תנועת כוכבים. היילי שאל: "למה אתה לא מפרסם את תוצאותיך?" ניוטון השיב שזה יקר, אז היילי פרנס אותו וקרא לשביט על שמו-היילי. מכאן יצא הספר של ניוטון שהוא אולי החשוב בפיזיקה. זוהי המכניקה.

החיפוש המתמיד של האנושות אחר מה שתואר על ידי פילוסופים כ"סיבת כל הסיבות" המניעה את העולם מראשית היקום ועד היום ממשיך להיעשות כל הדרך מאז ועד זמננו. אמנם רוב התיאוריות באלפי השנים הללו נפסלו או תוקנו פעמים רבות, אבל כל אחת מהן נתנה מענה לדברים מסוימים ועבדה במדויק בתחומים עליהם באה לתת מענה. הצליחו לתאר כמעט כל מה שרצו לתאר: כוכבים(כבידה ניוטונית), מכונות מלחמה, תנועת גופים על הקרקע, במים, באוויר. התפשטות גלים במים, קול, ועוד...

בתקופת הרנסאנס הגיעה הפיזיקה המודרנית לפריחה, עם ביסוסה של המכניקה הקלאסית ושל האלקטרומגנטיות אשר נתנו מענה לכמעט כל התופעות שניתן היה לחשוב עליהן אז. למרות שכל תורה שפותחה עבדה באזור מסוים של הפיזיקה, היה עדיין הצורך העז הזה לאחד הכל לתורה כוללת שתהיה סיבת כל הסיבות. המכניקה של ניוטון(מאה 17-18) ענתה על תחומה, ורעיונותיו של פאראדיי(מאה 18-19) היו נכונים בתחומם, אך מקסוול(מאה 19) הגיע עם הצורך האנושי לפתח את פאראדיי למשוואות פרקטיות יותר לחישובים וגם לאחד את תורות החשמל והמגנטיות לתורה אחת משותפת. כדי להכליל גם את ניוטון, הוגדר שיש שני כוחות שונים וכך התורות יכלו להתקיים במקביל תחת סיבת כל הסיבות המבוקשת.

במאה ה20 חלה תפנית עצומה בפיזיקה, בעקבות חקר האור וביטול קיומו של האתר, וכן בעקבות גילוי האטום וספקטרום הפליטה ממימן שיצרו דרישה עצומה להסברים. במאמרי אתייחס לתיאוריות במאה ה20, שהתפצלו לשתי תיאוריות שלא מתיישבות יחדיו: מצד אחד היחסות הכללית, שמתארת את המרחב והזמן המקרוסקופיים ונותנת את "סיבת הסיבות" עבור התנהגות האור והגופים השמימיים, אותה פיתח איינשטיין, ומצד שני תורת הקוונטים אשר נתנה מענה מיקרוסקופי לקוונטיזציות המשונות שניצפו והגדירה את חוקי התנהגות החלקיקים, בראשה עמד בוהר.

התורות תיקנו את כל מה שקדם להן ונתנו תיאור מושלם-כל אחת בתחומה, אך הן לא מסוגלות להתקיים יחדיו ולתת אותן תשובות על אותן שאלות. יתרה מזאת, עדיין נשארות שאלות שלא נפתרו גם על ידי תורות אלו. במאמר אתייחס לעקרונות התורות, לסתירות ביניהן ולמה שלא הצליחו לפתור בעזרתן.

**מכניקת הקוונטים**

בתחילת המאה ה20 כבר היה ידוע ספקטרום הפליטה הבדיד של אטום המימן. ידוע שאם מקרינים או אפילו מחממים מספיק אטום, הוא יפלוט את האנרגיה הזאת כקרינה וחשבו שניתן יהיה לראות קרינה רציפה בכל התדרים וגם בתחום הנראה. האלקטרונים מקבלים אנרגיה מסוימת ופולטים לפיה אור נראה (בין היתר), והאלקטרון חי בספקטרום אנרגיה רציף לפי התורה הקלאסית ולכן יכול לקבל כל ערך של אנרגיה ולפלוט כל תדר אור נראה. **אולם,** התקבלו רק כמה תדרים בדידים של פליטה בניסויים שנערכו... לכן המכניקה הקלאסית לא עבדה כאן ונדרש הסבר לתופעה ביזארית שכזו.

מלבד זאת, בסוף המאה ה19 ווין הגיע עם תיאוריה תרמודינמית קלאסית והסביר בצורה כמעט מדויקת את ספקטרום הפילטה של גוף שחור. ב1901, מקס פלאנק פרסם תיקון מדויק לחוק זה, מתוך ההנחה שהאנרגיה האלקטרומגנטית נפלטת במנות בדידות. הנחה זו נחשבת להצלחתו הגדולה של פלאנק למרות שהוא עצמו לא ייחס לה באותה תקופה הרבה חשיבות. בעקבותיו, איינשטין פרסם ב1905 הסבר לאפקט הפוטואלקטרי לפי הנחת המנות של האנרגיה, וטוען שהאור מורכב מחלקיקים בדידים. בכך החל רעיון "קוונטת האנרגיה" והחלה תורת הקוונטים. זה היה מנוגד לתורה הקלאסית, ובהתחלה עורר סערת תגובות עצומה בעולם הפיזיקאים.

נילס בוהר היה פיזיקאי צעיר בתחילת המאה ה20 שאהב לדסקס רעיונות פיזיקליים תוך כדי שהוא משחק פינגפונג. כדי להסביר את ספקטרום הפליטה הבדיד של אטום המימן, הוא עלה עם רעיון חדשני נוסף שלא עלה בקנה אחד עם המכניקה הקלאסית: הוא היה משוכנע שהפתרון טמון במבנה המיקרוסקופי של האטום וסבר שאטום הוא כמו מערכת שמש עם עוד המון מרכיבים יותר קטנים, האלקטרונים, שמסתובבים סביב הגרעין, ושיש רק מסלולים ספציפיים אפשריים! הוא לקח את קוונטוט האנרגיה בפליטה ויישם אותו על קוונטוט האנרגיה המותרת לאלקטרון(1913) בהשראה מאיינשטיין ופלאנק.

כך, הוא סיפק הסבר לפליטת אור מחימום- חימום מעורר אלקטרון ממסלול בעל אנרגיה נמוכה למסלול גבוה יותר ויש הפרש מדויק של אנרגיה בין מסלול למסלול ולכן יש קוונטוט של הספקטרום. מה מפתיע כאן? האלקטרון קופץ ממסלול אחד לשני- כמו טלפורטציה, וזה נראה לא הגיוני, וגם למה בכלל שיהיו רק מסלולים בדידים? בוהר הסביר זאת בכך שהאנרגיה של אלקטרון באטום באה במנות בדידות שלא ניתן לפרק, ולכן חייבת להיות קפיצה ממה למה?. עדיין מוזר, אבל יותר ויותר ניסויים הוכיחו את צדקתו.

בגלל ניסוי שני הסדקים, הוכח שלאור תכונות גליות. לעומת זאת איינשטיין טען שהאור עשוי חלקיקים בודדים. מכאן התפתחה דואליות של חלקיק-גל, שהיוותה את התיאוריה על פוטונים במאה ה20. זה הוביל את דה-ברולי להציע דואליות כזו גם לאלקטרונים, והציע את אורך גל דה ברולי שנקבע לפי תנע האלקטרון.

מיד לאחר מכן, 1924, מפותחת סטטיסטיקת בוז-איינשטיין, ושנה לאחר מכן פאולי פרסם את עקרון האיסור שלו, המספק הסברים רבים לטבלה המחזורית(כמו גיוונם של החומרים).

ב1925-6, פותחה הסופרפוזיציה הקוונטית. הייזנברג, בורן וז'ורדן פיתחו יחדיו את מכניקת המטריצות הקוונטית, ושרדינגר פיתח את משוואתו שמתארת את החלקיקים הגליים. בימים אלה נקבע מושג פונקציית הגל, ובעוד ששרדינגר פרש אותה כהימרחות האלקטרון על שטח גדול, בורן טען שזו פונקציה הסתברותית והאלקטרון עדיין קטן אבל נמצא בסופרפוזיציה של מקומות בהתפלגות הסתברותית כלשהי.

ב1925-1927, עבדו הייזנברג ובוהר על הפרשנות ההסתברותית של הקוונטים, שסתרה את היקום הדטרמיניסטי. פרשנותם, יחד עם מקס בורן, נקראה פרשנות קופנהגן, לפיה יש אי ודאות בתכונות פיזיקליות עד עצם המדידה, ויש הסתברויות שונות למדידת ערכים שונים. זה לא סותר מערכות גדולות כי הן כמו קזינו: זכייה גדולה של אדם בודד לא משפיעה(מדידת אלקטרון בודד עם אנרגיה גבוהה מדי), כי ההתנהגות קשורה רק במיצוע על מספרי אבוגדרו של חלקיקים, וערך התצפית של התפלגות התוצאות היא ערך דטרמיניסטי ונקבל אותה. אולם, נוצר עניין קצת פילוסופי-פיזיקלי של תלות מערכות פיזיקליות בנוכחות של צופה, ושל קריסת פונקצית הגל: איזו תודעה נדרשת להקרסה? אם חתול צופה במערכת האם יש קריסה? ומה עם נמלה? חיידק? ויותר מכל אלה- איך ייתכן שהיקום הוא הסתברותי ואין קשרי סיבה-תוצאה ישירים בין תוצאות?

זה יצר קונפליקט עם שאר הפיזיקה, והביא לעימות עם איינשטיין. איינשטיין לא פחד מרעיונות חדשים, אבל הכיוון בו הקוונטים התפתחו לא מצא חן בעיניו... זה סתר את הדטרמיניסטיות שהייתה היסוד של הפיזיקה והלוגיקה עד כה. כך נוצרו ויכוחים עצומים בין איינשטיין ובוהר בסוף שנות ה20 שנקראו הדיבייטים של איינשטיין-בוהר:

**הדיבייטים של איינשטיין בוהר**

איינשטיין שנא את הרעיון ההסתברותי. אבל מדענים אחרים הצטרפו לרעיון כי הוא נתן יכולת לחשב במדויק תנועה של קבוצות גדולות של חלקיקים, וזה הביא ליכולת לתקן ולהסביר את כל תוצאות הפיזיקה ולהנדס עוד יותר במדויק את הטכנולוגיה החשמלית במאה ה 20 וה21.

איינשטיין ובוהר היו מתווכחים המון גם לפני הדיבייטים: במשך עשרים שנה בוהר לא לגמרי קיבל את רעיון הפוטונים של איינשטיין, ואיינשטיין התווכח עם בוהר על קוונטוט האטום שהציע אך היה יותר גמיש ושוכנע בצדקת בוהר. במאה ה20 הוקם ארגון סולביי שאגרן ועידות של פסגת הפיזיקאים בעולם, כשהראשונה ב1911 עסקה בבעיית הדואליות בגישה לפיזיקה-קלאסית וקוונטית, ואיינשטיין היה השני הכי צעיר בוועידה. הוועידה המפורסמת ביותר הייתה החמישית, ב1927, ובה בוהר הציג את מסקנותיו ואת תורת הקוונטים המוגמרת וקבע שאלה הם העקרונות ואין מה להוסיף יותר. היו שם 29 פיזיקאים מתוכם 17 זכו בפרסי נובל, אך הדיבייט המרכזי היה בין איינשטיין ובוהר. זה היה מאבק בין שני זרמים: הריאליסטים, שרצו חוקים מדעיים מפיתוחים תיאורטיים דטרמיניסטיים, לבין האינסטרומנטליסים, אשר התעניינו יותר בתוצאות ובהתאמתן לניסויים ופחות בחוקים.

בוועידה זו איינשטיין הביא כמה ניסויים תיאורטיים שבעזרת שימור אנרגיה ותנע הביאו לסתירת האופי ההסתברותי של הקוונטים:

ניסוי ראשון, הוא מודולציה של שני הסדקים. מכוונים פוטונים בכיוון ימין, ולפי ההסכמה הרווחת הוא אמור להתנהג כמו גל, להתקדם לפי השרטוט וליצור התאבכות על המסך. איינשטיין טען שדרך S1 בשרטוט יעבור בסופו של דבר פוטון כל פעם, עם תנע ימינה. אם הוא משנה את כיוונו לאחד החורים b,c משהו הפעיל עליו כוח אנכי, וזה בהכרח חייב להיות הדבר היחיד שבאינטרקציה עם הפוטון-S1. לכן הקיר S1 יחוש לפי שימור מתקף תנע אנכי אינפיניטסימלי למעלה או למטה, שרעיונית ניתן למדוד, וכך לקבוע באיזה חור הפוטון עבר וליצור דטרמיניסטיות לפיה אין התאבכות!! הרי בוהר האמין שהמדידה משפיעה על פרמטרי המערכת, ולכן זה מה שאמור לקרות, ברגע שמודדים הסופרפוזיציה נעלמת. אבל אם אנחנו מודדים את המתקף על S1 שנייה אחרי שכל פוטון כבר עבר, הידיעה שלנו לא אמורה להשפיע על התוצאות כשהיא קרתה מאוחר מדי, ויש כאן סתירה לוגית כי מצד אחד אמורים לקבל התאבכות ומצד שני לא.

בוהר הגיב שראשית כל יש עניין אי ודאות בנוגע לתנע של הקיר טרם פגיעת הפוטון בו. צריך לדעת אותו בדיוק מאוד גבוה גם לפני וגם אחרי, וזה כמעט בלתי אפשרי. אבל נניח שהצלחנו למדוד במדויק את התנע האנכי, מעקרון אי הודאות נקבל אי ודאות במיקומו האנכי של הקיר. אם הוא זז למשל בחצי אורך גל למעלה, זה ייצור הפרש בדרך האופטית כך שנקודה d בשרטוט, בה כרגע יש התאבכות הורסת, תחווה התאבכות בונה. למעשה יש סופרפוזיציה במיקום הקיר וכל מיקום נותן תבנית התאבכות שונה לכן יש סופרפוזיציה בכל נקודה של כל ההתאבכויות האפשריות שזה סך הכל אור בינוני ואחיד בכל הנקודות=אין התאבכות. כך הוא מצא הסבר קוונטי לניסוי שאיינשטיין הציע.

בוהר הסתמך בתשובתו על קוונטיות של קיר מקרוסקופי, למרות שלפיו במערכות מקרוסקופיות התפלגות ההסתברויות היא דטרמיניסטית ויש ציות לתורה הקלאסית. לכן הבעיה שבניסוי זה נפתרה באופן משונה, ומאוחר יותר נכנסה תחת בעיית המדידה: מה צריך כדי להקריס פונקצית גל? אם נעמיד שם נמלה שתמדוד האם תצא אותה תוצאה? האם רטרואקטיבית ניתן להקריס ולשנות את תוצאות הניסוי כמו כאן? ניסוי החתול המפורסם של שרדינגר שואל האם באמת תהיה סופרפוזיציה, כי החתול כן ביצע מדידה על מצבו ולכן פונקציית הגל אמורה לקרוס אבל מבחינתו יש אי ודאות.

על כל העניין ההסתברותי בתוצאות, ועל כך שדברים לא נקבעים עד שמודדים אותם, איינשטיין אמר שני משפטים מפורסמים: "אלוהים לא משחק בקובייה" ו-"אני אוהב לחשוב שהירח נמצא שם גם כשאני לא מסתכל עליו". בכך הוא הביע את המגוכחות של קוונטים בעיני תפיסת היקום האנושית. אמנם הוא לא אמר שזה לא נכון, אבל האמין שמשהו חסר כדי להשלים את התורה. כבר ב1920 הוא כתב לבורן מכתב מודאג לגבי עבודתו על פליטת וקליטת קרינה, שהוא לא מספיק מקבל את רעיון הבדידות של היקום ושחוסר הדטרמיניסטיות חורה לו, ושלדעתו יש פתרון לעניין זה על ידי משוואות שלא יצרכו להיות להסתמך על ודאיות או רציפות(לא מקוונטטות), ועדיין יתנו פתרון\*. אמנם, הוא לא היה בטוח בצדקתו. בהמשך אותה שנה הוא הציג לבורן את הכרחיות הרציפות בשביל היחסות הכללית, ואת אי ההתאמה עם קוונטים. בוהר, מצדו, התנגד לרעיון הפוטון עד שקיבל תמיכה ניסיונית עצומה ב1922, והתווכח על כך עם איינשטיין בטענה שזה פוגע בכל האלקטרוסטטיקה. אלה היו עיקר ויכוחיהם עד 1927, שהתעוררו שוב מהתכתבויות להתכתשויות בוועידה נוספת ב1930.

בוועידה זו, איינשטיין הציע ניסוי רעיוני\*\* נוסף שבא לסתור את אי הודאות בין זמן ואנרגיה, אותה ניבאו הקוונטים. הוא הציע לקחת קופסא, בה יש קרינה אלקטרומגנטית ושעון ששולט על זמן פתיחתו של צוהר בקופסא באופן מדויק. כעת, בפרק הזמן T שהחלון פתוח, יש להניח שפוטון יצא החוצה. נניח שהוא לא מונוכרומטי ומתואר על ידי סופרפוזיציה במרחב התנע סביב ערב מסוים כי יש אי ודאות, אז זו חבילת גלים, ובהתאם נקטין כך גם את פריסת המיקום שלה הן מעקרון אי הודאות הן מאלגברת גלים. ניקח פרק זמן T כזה שכל אזור המיקום של הפוטון הספיק לצאת, ללא הנחת חבילת הגלים היינו מקבלים התפלגות מוזרה על כל המרחב עבור המיקום והניסוי לא היה אפשרי. כעת, השעון מדד במדויק את זמן יציאתו של הפוטון, ובהנחה שאנחנו יודעים את מסת המערכת לפני, נוכל לאחר הניסוי למדוד אותה שוב, ומכך שמסה שווה אנרגיה עד כדי פקטור נוכל לקבוע במדויק את איבוד האנרגיה של המערכת וזו תהיה אנרגיית הפוטון המדויקת בזמן יציאתו. כך יצא שידענו במדויק את הזמן והאנרגיה של הפוטון, בסתירה לאי הודאות!

לפי הסיפורים, בוהר זועזע מהרעיון ולא היה לו שמץ של מושג איך להגיב. הוא ישב על זה יום רצוף, וכל הנוכחים בכנס כבר חשבו שידו של איינשטיין על העליונה, רק כדי לראות את תשובת בוהר למחרת...

בוהר הגיע שמח וצוהל להציג לכולם את תשובתו, וכפי שאיינשטיין השתמש בשוויון מסה-אנרגיה מתורת היחסות, כך גם בוהר השתמש ביחסות כנגד היוצר שלה, ויותר ספציפית בתכונה של התארכות והתקצרות זמן ככל שנמצאים בשדה גרביטציה יותר חזק. נחזור לקופסא מקודם: בוהר שרטט את המערכת, והוסיף עוד שני פרטים: 1. המערכת נמצאת בשדה גרביטציוני(לא אחיד כמובן), 2. כדי למוד את מסת המערכת יש לחברה למשקל: היא מחוברת לקפיץ ויש לה סמן שמצביע על סרגל(שרטוט), כך שלאחר הניסוי מסתה תרד והיא תעלה קצת למעלה, ונוסיף לה מסה עד שתחזור למיקומה המקורי וזו תהיה המסה שנפלטה כלומר אנרגיית הפוטון. הסתירה היא כזו: מכיוון שיש אי ודאות תנע-מיקום, תהיה אי ודאות בתנע של הקופסא ובמיקומה. לא רק זה אלא שהוא גם מקבל תנע אי ודאי הפוך מהפוטון, וסך הכל לא נדע את התנע כלומר את המסלול שהקופסא עשתה עד עצירתה (שם מדדנו את מסתה שוב על ידי הוספת מסה עד לחזרה לנקודה ההתחלתית), ומכיוון שבנקודות שונות במסלול יש גרביטציה שונה, לפי יחסות כשנמדוד את האנרגיה השעון במערכת כבר לא יהיה מדויק, באי ודאות מסוימת. כעת, בגלל אי הודאות במיקום, מדידת המסה בעזרת משקל תהיה גם היא אי ודאית במקצת ולכן תהיה אי ודאות באנרגיה. בוהר הראה שסך היא הודאות זמן-אנרגיה באמת תהא גדולה מקבוע פלאנק המנורמל, וזו בדיוק הדרישה.

 החלש השני של הוויכוחים כבר נע לכיוון אחר. איינשטיין החליט להסכים עם עקרון אי הודאות עבור המדידה בלבד, והאמין שהוא קשור רק בכך שלא ניתן למדוד במדויק את הערך ובכך שהידע שלנו הוא אי ודאי. הוא המשיך להאמין שלערכים בטבע יש ערך ספציפי ודטרמיניסטי, פשוט אנחנו לא מסוגלים למדוד אותו במדויק. "..אני מאמין שהתיאוריה הזאת מייצגת רמה עמוקה של האמת, אבל אני גם מאמין שההגבלה לחוקים של טבע הסתברותי יתגלו להיות בני חלוף..." אמר איינשטיין, ובטענותיו על ערכם הדטרמיניסטי והלא מדיד של ערכים הוא יצר תורה חדשה, שנקראת תאוריית המשתנים החבויים, שבאה להשלים את תורת הקוונטים לתורה דטרמיניסטית. משתנים אלה משמעותם שלכל חלקיק יש מעין רשימה סודית של הערכים האמיתיים המתארים אותו, והיא לא הסתברותית, אבל אנחנו לא יכולים למדוד אותם במדויק.

ב1935, איינשטיין, פודולסקי ורוזן(שהיה ישראלי!) הציגו פרדוקס שנקרא EPR על שמותיהם: מקור מסוים משחרר שני פוטונים בכיוונים מנוגדים, כך שהם שזורים, משמע יש להם אותו קיטוב. קיטובם אי ודאי בהתחלה, אם נבחר את הכיוונים אופקי-אנכי אז לקיטוב יש סיכוי חצי להיות בכל כיוון משני אלה(כרגע אנחנו בסופרפוזיציה שלהם). כעבור זמן מסוים T, מגיע הפוטון שיצא ימינה אל צופה שמחזיק מקטב אנכי. נניח שהפוטון עבר, אז הצופה יודע בוודאות שלשני הפוטונים יש קיטוב אנכי. כך הצופה, בלי להשפיע מעבר למדידה זו על המערכת או על הפוטון השני, יודע בוודאות שהפוטון השני יעבור גם הוא מקטב אנכי. כך הוא למעשה קיבל מידע ודאי על פוטון רחוק, ובאופן מיידי. זה סותר את העקרון היחסותי שמידע לא יכול לעבור מהר יותר ממהירות האור! לפי הנחה זו, לא יכול שהמדידה הקריסה את פונקציית הגל וקבעה את תכונת הקיטוב, והמקנה היא שהכיוון האמיתי של הקיטוב תמיד היה משתנה חבוי של הפוטון והיה דטרמיניסטי מרגע היווצרותו. יותר מזה: לחילופין, אם היינו בוחרים לבדוק אם הוא מקוטב בזווית אחרת, היינו מקבלים תוצאה: אם הוא מקוטב בה או במאונך לה, ולפי המשפט הקודם נסיק שגם קיטוב זה הוא משתנה חבוי של הפוטון. אז לפוטון היו את תכונות הקיטוב שלו בשתי זוויות שונות כמשתנה חבוי מרגע היווצרותו, למרות שתכונות אלה הן בעלות אי ודאות לפי קוונטים. המסקנה היא שאמנם אנחנו לא יכולים למדוד בודאות את שתי התכונות האלה, אבל מבחנת הגדרה הן דטרמיניסטיות כמשתנים חבויים של הפוטון. ולכן אי הדטרמיניסטיות היא אך ורק במדידה, ותורת הקוונטים לא שלמה ללא המשתנים החבויים. מופלא! בעקבות זאת ניתן להגיד אותו דבר על מדידת מיקום החלקיקים או תנע החלקיקים, ולהסיק שיש משתנה חבוי של תנע, ומשתנה חבוי של מיקום, וששניהם קבועים ואין ביניהם אי ודאות.

לאחר כמה חודשים, בוהר פרסם מאמר תגובה. מבחינתו אין בעיה שידברו על משתנים חבויים: מה שעניין אותו היה רק ערכים שנמדדו. מבחינתו ערך פיזיקלי הוא רק כזה שנמדד, ולא ערכים חבויים היפותטיים. הבדל גישתי זה לפיזיקה הביא אותו למטרה אחת בלבד: הוא רק צריך לסתור את הסתירה לאי הודאות. כאן הדיון נהיה קצת פילוסופי, ובאמת חלק גדול מדיוניהם של איינשטיין ובוהר הוגדרו כ"פילוסופיה של המדע" ופתחו ענף חדש של ויכוחים מדעיים מהותיים ולא מתמטיים או אמפיריים. בוהר טען שבגלל שלא ניתן לדבר על מדידה באותו ניסוי של קיטוב אנכי וקיטוב בזווית, או לחילופין של תנע ושל מיקום, אז עקרון אי הודאות עדיין תקף: עבור מדידה מדויקת של מיקום, התנע לא מוגדר, ובאמת לא ניתן לדעת אותו, ולהפך. לפיו, EPR התעניינו במה שבאמת קיים, אך ללא יכולת מדידה, והוא לא נוקט בגישה זו אלא בגישה לפיה יש לדון רק בערכים שנמדדים. תשובתו לא הייתה מלאה לחלוטין אבל הביאה הגנה לקוונטים והפכה את הנושא למשהו מעורפל ולא מוכרע במשך עשרות שנים נוספות.

בכתיבתו האחרונה של הנושא, איינשטיין אמר שהוא עדיין מתנגד לקוונטים, וזה נובע מכך שקבלת התורה כתורה שלמה מכריחה ויתור על כל מימד של ריאליסטיות, אפילו ברמה המיקרוסקופית. הכל אי ודאי, הסתברותי, ולא תואם את תפיסת המציאות שלנו. הוויכוחים הסתיימו בלא הכרעה ממשית, אם כי גם אז וגם היום רוב העולם הפיזיקלי נוטה לצדקת הקוונטים.

תורת היחסות בקצרה

בעקבות ביטול תיאוריית האתר, איינשטיין פרסם ב1905 את הרעיון שמהירות האור היא מקסימלית וקבועה בכל מערכת ייחוס, רעיון ביזארי שלא מתיישב עם חוק חיבור המהירויות שאנו כה רגילים אליו. מה כן, שהתוצאות שהוא הסיק מכך היו לחלוטין לא רלוונטיות למהירויות היומיומיות ולכן לא מתנגש עם העולם הקלאסי שלנו. לא ארחיב במאמר זה על כל התהליך שעשה איינשטיין, אלא רק על המסקנות שהסיק. ראית, נבעה מכך יחסותיות של הפיזיקה: עבור שתי מערכות אינרציאליות שזזות במהירויות קרובות למהירות האור זו ביחס לזו, מדידות של מרחק וזמן יהיו שונות. איינשטיין הראה שתהיה התקצרות אורך של מה שזז במהירות הגבוהה, והתארכות של הזמן של גוף זה. אבל אם שתי המערכות אינרציאליות, מה קובע מי זזה ומי לא? אין קביעה. וזו בדיוק הסיבה שהכל יחסותי ולא מוחלט וגלובלי. יש כאן שבירת סימטריה בין שתי מערכות אינרציאליות, ואיינשטיין סיפר שתופעת המגנטיות, שתלויה במהירות שהיא דבר יחסי, היא זו שהביאה אותו לחשוב על תורה יחסותית שכזו. איינשטיין הראה גם שנמדוד מסה גבוהה יותר עבור מסה הנעה במהירות גבוהה, ולמסה במהירות האור תהיה מסה אינסופית לכן רק גופים חסרי מסה יוכלו לנוע במהירות האור. בניגוד לקוונטים, תורת היחסות נתנה הסברים מעולים לתופעות קוסמיות בסדרי גודל אסטרונומים, ובהצלחה רבה.

תורת היחסות הכללית באה להכליל תאוצה וכוחות בתמונה, ואיינשטיין פיתח אותה בהמשך ליחסות הפרטית עם המסקנות שקיבל ועם ההגדרה שזמן הוא פשוט אחד המימדים, למרות שאין לו סימטרי עם המרחב. כך הוא בנה מרחב 4-מימדי, ובעזרת כלים טופולוגיים מתקדמים של מתמטיקה התור מתארת את המרחב הזה כמתעקם על ידי כל מסה שנמצאת בו. כל מסה היא למעשה מעין שקע במרחב, והכוח הגרביטציוני הוא הימשכות כלפי השקעים של כל המסות. כמובן שהשקע דועך עם המרחק ומתנהג בדיוק כמו הגרביטציה שאנו מכירים, עם תיקונים יחסותיים. היא חזתה את השפעתו של המרח-זמן על האור: מסלול האור מתעקם בהשפעתן של מסות, וזו תופעה קוסמית שנמדדה בהצלחה. התופעות של חורים שחורים, גלי גרביטציה(נמדדו ב2016) והתנהגות המסות בחלל כולן מתוארות על ידי התורה. בתחילת דרכו של הGPS, לא התחשבו בכלל בעיקום המן-מרחב, והתוצאות לא היו טובות. היום הGPS פועל התחשבות בכך ובדיוק מפליא!

כחלק מהפיתוח המתמטי איינשטיין הניח שיש קבוע קוסמולוגי של אנרגיה שנמצאת באופן אחיד גם במרחב הריק, ובלעדי זה החישובים לא יצאו נכונים. בהמשך אגע בהסבר הקוונטי.

**הסתירות בין התורות**

הקוונטיים המודרניים כוללים בעיקרם את תורת השדות הקוונטיים. תורה זו מתייחסת לחלקיקים כמצבים מעוררים של המרחב הפיזי, ומשתמשת בשדות גם לתיאור האינטרקציה בין החלקיקים. כך ניתן לדון במצב הריק של המרחב וביצירתם והריסתם של חלקיקים, ומכאן התפתח **המודל הסטנדרטי** שמתאר את החלקיקים היסודיים המיקרוסקופיים, ואת שלושת הוכוחות: האלקטרומגנטי והגרעיני החלש והחזק, כנישאים על ידי חלקיקי כוח המוחלפים תמידית בין החלקיקים המפעילים אותם והמושפעים מהם. התורה ניסתה להכליל בתוכה יחסות על ידי הגרביטון-חלקיק שנושא את הכוח הגרביטציוני, אך התיאוריה לגביו לא שלמה. בגלל השוני של גרביטציה: יש לה השפעה על כל החלקיקים באשר הם(בניגוד להשפעה רק על חלקיקים טעונים), היא משפיעה על המרחב-זמן, והיא יכולה רק למשוך-מסות זהות לא דוחות ואין מסה שלילית בניגוד למטענים זהים שדוחים ולמטען הפוך. מתמטית, זה מוסבר באופן מסובך ביותר על ידי הספין של החלקיקים נושאי הכוח-בעוד שלפוטון ספין 1, לגרביטון, שאין עדיין הוכחה לקיומו, אמור להיות ספין 2.

היחסות הכללית נשארה כפי שהיא עד היום.

הסתירות בין היחסות והקוונטים הן רבות. בקצרה:

1. ביחסות אין שום דבר לא דטרמיניסטי או אי ודאי, בניגוד לקוונטים. זו סתירה מהותית שאיינשטיין התעקש עליה עד מותו.
2. הגדרת הכוחות לא שקולה בשתי התורות: ביחסות, המסה אומרת לזמן-מרחב איך להתעקם והעיקום הוא הכוח הפועל ואומר למסות איך לנוע. בקוונטים, חלקיקי התקשורת, "הבוזונים", הם נושאי הכוח ומעבירים בין חלקיקים אנרגיה וזה הכוח(אגע בכך עוד מעט).
3. המרחב המתואר על ידי תורת הקוונטים הוא אינווריאנטי לטרנספורמציות קונפורמיות. טרסנפורמציות אלה מעתיקות את המרחב לעיוות מסוים כך שהזוויות בחיתוך של כל שני ישרים נשמרות(שימור זוויות לוקאלי). יחסות כללית לעומת זאת, מגדירה את המרחב-זמן כמשהו עקום ומסובך טופולוגית, והעיקום משפיע על כל צורות האנרגיה, ואינו אינווריאנטי לטרספורמציות קונפורמיות. אז תחת טרנספורמציה מקבלים אותו דבר מבחינה קוונטית, ושינוי עצום מבחינה יחסותית.
4. ההבדל הגדול בין שתי התורות הוא במטרתן. היחסות באה לתאר תופעות מקרוסקופיות בחלל, תנועת גופים שמימיים והתנהגות היקום הרחב, ואינה נותנת מענה לתופעות המיקרוסקופיות שקוונטים מתארים(דואליות חלקיק-גל, קוונטוט ספקטרומים ואנרגיות, תוצאות מספריות לא קלאסיות של ניסויים...). הקוונטים, לעומת זאת, לא מתיימרים לתאר מערכות גדולות מאוד. הם לא מספקים הסבר להצלחות הגדולות של היחסות: תיאור התעקמות האור על ידי מסות בחלל, תנועת היקום, התארכות זמנים, התקצרות מרחקים ועליית מסה...
5. עקרון הפעולה המיידי: העברת מידע ללא צריכת זמן (בין שני חלקיקים שזורים) לא יושב מעולם. לא הגיוני שזה יקרה יותר מהר ממהירות האור לפי יחסות, אבל זו התוצאה הקוונטית המוכחת אמפירית. זה הביא בשנים האחרונות לפיתוח של טלפורטציה קוונטית, שכבר הראתה הצלחה עבור חלקיקים בודדים. הרעיון הוא לשזור שני חלקיקים ולהרחיקם למוקדי השיגור, ואז לקשור את האלקטרון המבוקש לאלקטרון המשוגר ובעזרת שזירה להעביר את המידע הקוונטי של האלקטרון המשוגר אל האטום השזור. בנוסף קורית העברה של הפוטון אל פוטון תעתיר מושלם שנוצר אצל החלקיק השזור.

מלבד כל אלה, ישנן סתירות עצמיות בתוך התורות שגם סותרות ביניהן:

1. רנורמליזציה:

כאשר תורת השדות הקוונטיים הכלילה את החלקיקים ואת הכוחות כשדות, נוצרה בעיית קונסיסטנטיות כי כל חלקיק יצר שדה אינסופי במיקומו, וכשחישבו את הכוח שהשדה מפעיל על החלקיק יצא אינסוף. ריצ'רד פיינמן התגבר על בעיה זו באמצעות מודולציה לשדות הקוונטיים. אולם בכל זאת, נשאר המצב שלפי השדות הקוונטיים חישובים קוסמיים מסוימים לא תאמו למדידות וכן פיתוחים מסדר שני של תורת ההפרעות הביאה להתבדרות-הסכום שבנוסחה יצא אינסופי ואפילו חלק מהאיברים התבדרו. אנרגיות עצמיות ופלקטואציות בואקום(מצב היסוד הריק) של השדה האלקטרומגנטי יצאו אינסופיים.

הפתרון לבעיה זו הוא רמאות מתמטית שלא ניכנס לפרטים שלה. זה קצת שנוי במחלוקת ומונע מאיתנו ליישב עקרונות יסוד מסוימים של התורה.

1. חלקיקים וירטואליים:

בכל נקודה במרחב, נוצרים ונהרסים תמידית זוגות של חלקיקים שזמן החיים שלהם אינפיניטסימלית קטן והם עצמם כמעט ולא מורגשים על ידי המדידות שלנו. זה נושא מרתק ומשונה עם המון תוצאות מפתיעות. ההסבר הבסיסי שלו הוא סוג של רמאות פיזיקלית: נחשוב על חלקיק שלא קיים; זמן החיים שלו הוא 0 ודאי. לכן יש לו אי ודאות מוחלטת באנרגיה לפי אי ודאות זמן-אנרגיה, והוא יכול לקבל אנרגיה. זה שיש לו אנרגיה מחייב אותו להיווצר, אבל רק עם אנטי חלקיק מתאים בסמוך אליו(משימור ורברסביליות), וכמעט בן רגע השניים מתאחדים ונעלמים כלא היו. כך קורה במספרים עצומים בכל המרחב. נפוצה ביותר היווצרות פוטונים, שכן הם חסרי מסה והם האנטי חלקיק של עצמם. כך יוצא שגם במרחב ריק יש צפיפות אנרגיה מסוימת, וזה אולי הקבוע הקוסמולוגי שאיינשטיין חיפש ביחסות הכללית. המשמעות של וירטואלי היא שהחלקיקים נעלמים לפני שניתן למדוד אותם.

אחת ההשלכות של זה היא אפקט קזימיר: אם ניקח שני לוחות מולכים קרובים, אז השדה עליהם מתאפס ולכן הם מציבים שני תנאי שפה סגורים על האזור שביניהם. לכן רק פוטונים עם סט בדיד של אורכי גל יוכלו להיווצר וירטואלית ביניהם בעוד שמחוץ לאזור אין שינוי. כך יוצא שביניהם יווצרו פחות פוטונים=פחות צפיפות אנרגיה, והלוחות יחוו משיכה פנימה. מרתק ואפילו נמדד בהצלחה!

השלכה נוספת היא פירוש מסוים של הכוחות, לפיו מטען למשל הוא פרמטר הסיכוי לייצר ולשלח פוטונים וירטואליים מתוך החלקיק. אלה הסברים קלאסיים ואינטואיטיביים שלא מדגימים את יכולת המשיכה, כדי להשלים את ההסבר צריך מתמטיקה גבוהה.

מבחינה קוונטית, כשלוקחים את המרחב להיות מאוד גדול, התרומה לאנרגיה מהחלקיקים הווירטואליים היא עצומה ולא הגיונית ואנחנו אמורים לקבל המון ויברציות בשדה המרחב-זמן שלא מתיישבות עם יחסות בכלל... זו אחת הבעיות של קוונטים בגדלים גדולים.

1. בעיית גודל פלאנק:

בגדלים מאוד מאוד קטנים, מתחת ליחסות וקוונטים שניהם, בסביבות אורך פלאנק: 35 סדרי גודל מתחת למטר, גם נוצרים חלקיקים וירטואליים. בגלל שהגודל כה קטן, היווצרות של אנרגיה לא קטנה מדי בנקודה תהיה למעשה צפיפות מסה עצומה וזהו חור שחור. כך שבגודל הזה נוצרים המוני חורים שחורים וירטואליים, ואף אחד לא יודע איך הפיזיקה תתנהג שם. שתי התורות מפסיקות לתת תשובות בגדלים קטנים מדי.

1. בעיית הסינגולריות והרחבה על חורים שחורים:

נקודה חשובה מאוד בכשלון שתי התורות היא חקר הסינגולריות. עבור צפיפות מסה עצומה, נקבל משהו בסדר גודל מאוד קטן, אבל עם שדה גרביטציה מאוד חזק: לכן גם קוונטים וגם יחסות אמורות לתאר את התופעה. הבעיה היא שעבור סינגולריות נקבל חור שחור מסביבה וזה יוצר המון בעיות; כל תורה מתארת אותן אחרת ויש התנגשות שגם לא תואמת למסקנות האסטרונומים היום. חור שחור הוא תחום שבמרכזו יש מסה צפופה מאוד שיוצרת סביבה את החור שהוא למעשה תחום בו שדה הגרביטציה מתגבר על מהירות הבריחה של האור ולא מאפשר לאור המגיע אליו להימלט. מכך נובע ששום מידע לא יכול לצאת מהפנים של החור. הגבול של המידע נקרא "אופק האירועים" או בקיצור א.א וככל שהמסה היוצרת גדולה יותר כך הא.א גדול יותר.

נוטים לחשוב שחורים שחורים הם סכנה נוראה שבולעת גלקסיות, אבל זה כלל לא נכון. בגלל שהזמן מאט בסביבתם, ייקח להם זמן אינסופי לבלוע גופים(מבחינת צופה חיצוני) והם לא ממש יתרחבו. חוץ מזה, האפקט שלהם הרבה יותר קטן מהדעה הרווחת: אם השמש למשל הייתה הופכת לחור שחור זה היה ברדיוס של שלושה קילומטרים בלבד ושדה הגרביטציה היה נשאר זהה כך שחוץ מזה שלא היה אור וחום וזה היה פוגע בכל החיים על כדור הארץ, מבחינת גרביטציה לא היה קורה כלום. אם לא מתקרבים אליו- לא נפגעים ממנו; כמו דוב שאם לא תתגרה בו אם מקל הוא לא יעשה לך כלום.

אם נזכר במה שאמרנו על חלקיקים וירטואליים, נבין שכאן יש מקרה מיוחד: אם זוג נוצר מאוד קרוב כך שאחד נופל מחוץ לא.א והשני בתוכו, אז כל המידע על הפנימי אבד והם לא יכולים "לתקשר" ולהתחבר כדי להעלם כי שום מידע לא עובר אל מחץ לא.א והם איבדו את הקשר ביניהם. כך החלקיק הוירטואלי החיצוני הופך לאחד אמיתי, ובורח החוצה. מבחינת צופה רחוק, האנרגיה ההתחלית שלו ליד החור יותר גדולה מזו שהוא ימדוד כשהחלקיק יגיע אליו בגלל יחסות כללית- בשדה גרביטציה חזק יותר המסה היחסותית גדולה יותר. לכן יש מעין איבוד אנרגיה של החלקיק עד הגעתו לצופה, וככל שהחור גדול יותר האיבוד גדול יותר. חלקיקים אלה הם קרינת הוקינג: מבחינתי מוצרים שם פוטונים באותה התפלגות אנרגיה של הריק ואז כשהם מגיעים אליי האנרגיה קטנה מזו ההתחלתית ואורך הגל גדל=הקרינה קרה. מסתבר שעבור כמעט כל חור שחור הקרינה כה קרה עד שהיא יותר קרה מטמפרטורת הריק, ולכן יזרום חום דווקא לתוך החור ויאכיל אותו באנרגיה. כך כל חור גדול מספיר שמוציא קרינה קרה מספיק גדל על חשבון אנרגיית הואקום של היקום. רק כאשר היקום יגדל בשמונה סדרי גודל ויתקרר מספיק, אז החורים הגדולים גם הם יקטנו. האפקט עוד לא נמדד אבל יש עליו הסכמה מאוד חזקה בקרב הקהילה המדעית: נצפה חום שנכנס לתוך חורים שחורים.

מכיוון שהפוטון יגיע אלינו עם אנרגיה מאוד מאוד קטנה, מבחינתנו זו תמיד היית האנרגיה שלו. פוטון על הא.א יאבד את כל האנרגיה שלו עד שהוא יגיע אליי בזמן אינסופי, לכן מבחינתי הוא עם אנרגיה אפס. לעומת זאת, הפוטון שנבלע הוא מבחינתי בעל אנרגיה שלילית(בנקודת המדידה שלי). לכן בנקודת המדידה שלי מה שיצא הוא שנוספה אנרגיה שלילית לחור שזוהי מסה שלילית, ולכן החור התכווץ. אז קרינת הוקינג בסופו של יום גורמת לדעיכתם של חורים אך להזנתם בטמפרטורה, ומסתבר שהפליטה מנצחת לרוב. לכן חורים מתכווצים לאט לאט.

בגלל שלא ניתן לקבל מידע על הפנים, לא ניתן לחקור מה קורה שם. מתקיים חיפוש אחר סינגולריות ערומה: ללא א.א, אך הדבר מסובך מאוד, למרות שהוכיחו שהוא יכול להתקיים בתנאים מאוד מאוד ספציפיים ומסובכים: חור מסתובב למשל, חווה הקטנה של הא.א וניתן להעזר בו. הוקינג התערב עם שני מדענים ב1991 שלעולם לא יוכיחו את קיום הסינגולריות הערומות, וב1997 הריצו סימולציית מחשב של חור דועך ומסתובב וקיבלו את מה שחיפשו, והוקינג הפסיד. בגלל שהעניין היה סינגל ערומה, העונש היה קשור בלבישת חולצת הודאה בהפסד שתכין לעצמך.

הבנתן של סינגולריות תביא לעוד התקדמות ביישוב בין התורות: היחסות הכללית חוזה שם תופעות התארכות זמנים, התקצרות מרחקים וגידול מסה גם עבור גופים שלא נעים במהירות האור, וקוונטים כלל לא מכירים בשדה המרחב-זמן ובעיקומו, כך שאולי על ידי הבנת אזור התפר הזה בו שתי התורות אמורות לעבוד(בניגוד לניסויים גדולים מדי בקוונטים או קטנים מדי ביחסות) נשפוך אור על התמונה. חוץ מזה, תחילת היקום-המפץ הגדול, היה סינגולריות, ונוכל להבין גם אותו טוב יותר.

**סיכום**

היחסות והקוונטים הן שתי תורות נפלאות אך לא שלמות, בעלות סתירות חיצוניות ופנימיות רבות גם מכפי שהצגתי כאן. בשל חוסר השלמות הזו, אני מתחבר לצורך האנושי החזק של התיאורטיקנים בעשרות השנים האחרונות למצוא איחוד לשתיהן. יש שיגידו שכל אחת עובדת בתחומה ואין צורך לבזבז מאמצים על איחודן, אבל פיזיקאים רבים ואני ביניהם לא יקבלו התפשרות על תורות לא שלמות, כי משהו חסר כאן. בחיבור לתחילת המאמר, אני קורא להמשיך את החיפוש האנושי הנצחי אחר סיבת כל הסיבות.