

# על הזמן והמרחב: כשתורת היחסות ותורת הקוואנטים נפגשות

פיסיקה הקלאסית, זו המוכרת לנו מחיי היומיום, הזמן והמרחב הם נפרדים לחלוטין ובלתי תלויים. בפרט, מאורעות בו-זמניים עבור צופה אחד, ייראו בו-זמניים גם לצופה שני הנע ביחס אליו במהירות קבועה. לעומת זאת, לפי **תורת היחסות** של איינשטיין, המאורעות כבר לא ייראו בו-זמניים לצופה השני. כל עוד המהירות היחסית שבין שני הצופים קטנה בהרבה ממהירות האור בריק (c), שני המאורעות עדיין ייראו לצופה השני כמעט בו-זמניים. אך ככל שמהירותם היחסית תתקרב למהירות האור, הפרש הזמן שייראה ביניהם יגדל ויגיע לגודל ניכר שקל יותר למדוד או להבחין בו. לדוגמה, נניח שהצופה הראשון יושב על ספסל בתחנת רכבת בעוד הצופה השני נוסע ברכבת החולפת בתחנה, ושני האירועים הם שתי מנורות הנדלקות בשני קצות התחנה. כל עוד מהירות הרכבת קטנה בהרבה ממהירות האור, יראה הצופה השני ששתי הנורות נדלקות כמעט באותו הזמן. אך ככל שמהירות הרכבת תתקרב למהירות האור, הוא יוכל להבחין ביתר קלות שהנורה הקדמית - ביחס לכיוון נסיעת הרכבת - נדלקת לפני הנורה האחורית.

דוגמה זו ממחישה שבתורת היחסות הזמן הוא יחסי ולא מוחלט, וקואורדינטות הזמן והמרחב מתערבכות כשעוברים בין תיאור של מאורעות על-ידי צופים שונים. ההכרה בעובדה זו הובילה להתפתחות המושג של מרחב-זמן ארבע-ממדי, בעל שלוש קואורדינטות מרחביות וקואורדינטת זמן אחת. מעבר לנוחות המתמטית שלו, למרחב-זמן יש גם משמעות פיסיקלית חשובה. בתורת היחסות הפרטית, שלא כוללת את השפעות הכבידה, המרחב-זמן הוא 'שטוח' (ללא עקמומיות) ואור או כל גוף שלא פועלים עליו כוחות חיצוניים נע בו בקווים ישרים. לעומת זאת, לפי תורת היחסות הכללית שמ' כלילה את היחסות הפרטית ומתחשבת בהשפעות הכבידה, חומר בעל מסה M או אנרגיה E - השקולים זה לזה, כפי שמראה המשוואה המפורסמת של איינשטיין ( $E=Mc^2$ ), מעקם את המרחב-זמן. לפיכך, אור או כל גוף שלא פועלים עליו כוחות חיצוניים (הכבידה עצמה לא נחשבת לכוח בתורת היחסות הכללית) כבר לא ינועו בקווים ישרים, אלא בקווים עקומים הקרויים גיאודזות. המסלול הקצר ביותר בין כל שתי נקודות במרחב העקום הוא לאורך גיאודזה. כך, למשל, הקו הקצר לטיסה בין ישראל לצפון אמריקה או כל יעד אחר, יהיה לאורך מעגל גדול שמרכזו במרכז כדור הארץ. לכן טבעי לחשוב על הגיאודזות כעל קווים ישרים במרחב-זמן עקום, והן רק נראות לנו עקומות ביחס למרחב-זמן שטוח.

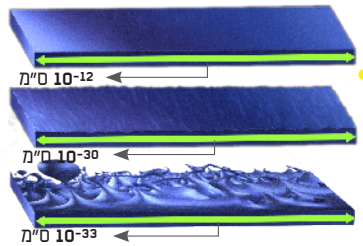
## הפוטון ומהירות האור

שתי התיאוריות הפיסיקליות החשובות ביותר של המאה ה-20 הן תורת היחסות של איינשטיין, המתארת את הכבידה שדומיננטית ביקום על-פני

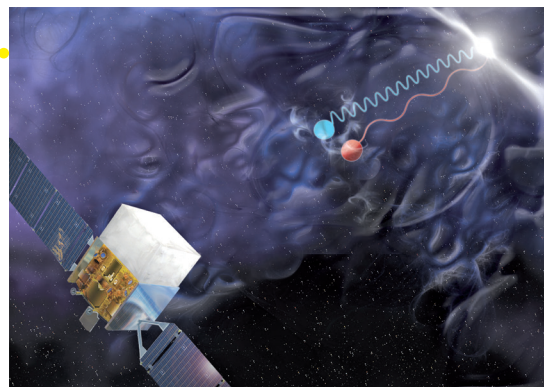
המרחקים הגדולים ביותר; ותורת הקוואנטים, שאחד מאבריה תיה הוא מקס פלאנק, הדומיננטית על-פני המרחקים הקטנים ביותר. עד היום לא הצליחו לאחד את שתי התורות הללו באופן משביע רצון. איחוד כזה הוא אחד היעדים החשובים ביותר של הפיסיקה העכשווית, וישנם ניסיונות רבים לבנות תורות מאוחדות כאלו של **כבידה קוואנטית**. בקו-התפר שבין שתי התורות, מצפים שהשפעת שתיהן תהיה חשובה, ובפרט ששקבועי הטבע - מהירות האור בריק (המרכזית בתורת היחסות הפרטית), קבוע הכבידה העולמי של ניוטון (המרכזי גם בתורת היחסות הכללית), וקבוע פלאנק (המרכזי בתורת הקוואנטים) - ישחקו תפקיד חשוב. קו התפר בין התורות הללו יהיה בסביבות הגדלים האופייניים ששלושת קבועי הטבע הללו מגדירים ביחד - מה שמכונה בפיסיקה 'סקאלת פלאנק', ומתייחס למידות זמן ומרחב זעירות ביותר (זמן פלאנק כ- $10^{-43}$  שניות, ואורך פלאנק - כ- $10^{-33}$  ס"מ) ולאנרגיה גבוהה ביותר ( $10^{19}$  ג'יגה-אלקטרון-וולט).

הנחת יסוד חשובה של תורת היחסות הפרטית היא שמהירות האור בריק היא קבוע אוניברסלי, ובפרט איננה תלויה באורך הגל של האור או באנרגיה של חלקיקי האור - הפוטונים. במסגרת המחקר שלי אני בוחן את ההנחה הזו באופן ניסיוני. מעבר לעצם החשיבות שבחינה ניסיונית של הנחת יסוד כה בסיסית, ישנה גם מוטיבציה לכך שיתכן והניחה זו נשברת בקרבת סדרי הגודל של סקאלת פלאנק, מכיוון ששם ההשפעה של תנודות קוואנטיות על מבנה המרחב-זמן צפויה להיות גדולה. סבורים שזה מתבטא בכך שעל-פני מרחקים זעירים מסדר גודל של אורך פלאנק, המרחב-זמן נהיה גבשושי כך שעקמומיות המרחב בכל נקודה היא גדולה ומשתנה במהירות ובאופן אקראי. כלומר, אילו יכולנו לצלם את המרחב בזמן חשיפה מזערי, בסדר גודל של זמן פלאנק וברזולוציה (עם גודל פיקסלים) מסדר גודל של אורך פלאנק, הוא היה נראה לנו מאוד גבשושי ותמונות כאלו בזמנים שונים היו שונות בפרטיהן אך דומות בתכונותיהן הסטטיסטיות.

עם זאת, ככל שהרזולוציה של תמונה כזו פוחתת (הפיקסלים גדלים) כך המרחב יראה לנו שטוח וחלק יותר. כשחלקיק אור (פוטון) נע, הוא 'רואה' את המרחב-זמן ברזולוציה שבסביבות אורך הגל שלו. לכן, ככל שאורך הגל קטן יותר, ובהתאמה האנרגיה של הפוטון גדולה יותר, הוא יושפע יותר מהתנודות הקוואנטיות במבנה המרחב-זמן בקרבת אורך פלאנק. משערים שיתכן והשפעה זו תתבטא בשינוי במהירות ההתקדמות של הפוטון, כתלות באנרגיה או באורך הגל. זה משול לחול בחוף הים, כאשר לנמלה קטנה כל גרגר חול נראה כמו סלע ומקשה עליה ללכת, ואילו לרכב גדול נראה החול חלק למדי וגרגרי החול הבודדים כמעט ולא מפריעים לנסיעתו. אפקט זה מודגם באיור 1.



מסיבה זו, כדי לבחון האם מהירות הפוטון תלויה באנרגיה שלו, נרצה להשתמש בפוטונים בעלי אנרגיות גבוהות יחסית כדי שהאפקט יהיה גדול יותר וקל יותר למדידה. בפרט, נרצה למדוד את ההפרש בזמני ההגעה אל מכשיר המדידה שלנו, של פוטונים בעלי אנרגיות שונות שיצאו כמעט ביחד ממקור מרוחק. לשם כך, השתמשנו בהבזק קרינת גמא קצר של כשנייה אחת (המאפשר לקבוע בדיוק טוב יחסית את זמני הפליטה של הפוטונים), שהתרחש במרחק מיליארדי שנות אור מאיתנו ונבע מפיצוץ קוסמי - ככל הנראה מיזוג של שני כוכבי נייטרונים או של כוכב נייטרונים וחור שחור. השתמשנו במכשירי המדידה שעל הלווין פרמי של נ.א.ס.א, הרגישים לפוטונים בתחום קרני הגמא (בעלי אנרגיות גבוהות בהרבה ביחס לאור נראה) ומודדים את זמני ההגעה של הפוטונים בדיוק רב מאוד, והשתמשנו במאות פוטונים בתחום אנרגיות



רחב. המרחק העצום בין המקור למכשיר המדידה שבלווין (איור 2) תורם לכך שאפילו הפרש זעיר בין המהירויות של פוטונים בעלי אנרגיות שונות, יצטבר לכדי הפרש שניתן למדידה בזמני ההגעה שלהם.

## הפוטון וסוגיית התלות

התלות של מהירות הפוטון באנרגיה שלו איננה ידועה. עם זאת, במידה שאכן יש תלות כזו, הרי שבאנרגיות קטנות בהרבה מאנרגיית פלאנק (מה שתקף לגבי כל הפוטונים אותם אנו יכולים למדוד) היא צפויה להיות חזקה מסוימת של האנרגיה. במחקרים שלי בחנו תלות ליניארית בה חזקה הזו היא 1, ורק עבורה התאפשר לנו לבחון את מבנה המרחב-זמן בקרבת סקאלת פלאנק.

בשני המחקרים הראשונים שלי בנושא זה הנחנו שהמהירות של כל פוטון תלויה רק באנרגיה שלו ונקבעת על ידי בדיוק, באופן דטרמיניסטי, ולכן היא זהה לחלוטין עבור כל הפוטונים באותה האנרגיה. השתמשנו בשלוש שיטות שונות לבחינת הפוטונים, שהגיעו מהבזק קרינת הגמא הקצר אשר נגרם כתוצאה מהפיצוץ הקוסמי שהתרחש במרחק מיליארדי שנות אור (הלוויין פרמי מגלה כ-250 פיצוצים כאלו בשנה). השיטה הראשונה מסתמכת על כך שהבזק קרינת הגמא היה פיצוץ חד-פעמי, כך שזמן הפליטה של כל הפוטונים ממנו לא יכול להיות לפני זמן הפיצוץ, שידוע לנו מתוך זמני ההגעה של הפוטונים הפחות אנרגטיים אשר כמעט ולא מושפעים מהאפקט אותו אנו בוחנים. השיטות השנייה והשלישית נעזרו בעובדה שחלק ניכר מהפוטונים הגיעו אלינו במספר שיאים (או פולסים) חדים, שאורכם כמאית או שתי מאיות

השנייה, הפרושים על-פני כשנייה אחת. השיטה השנייה קישרה בין פוטונים אנרגטיים בודדים, לבין הפולס של הפוטונים הפחות אנרגטיים שאיתו הם הגיעו. השיטה השלישית השתמשה במידע שהגיע מכל הפוטונים שמדדנו סמוך לשיא ההבזק, ונעזרה בעובדה שאילו האנרגיה האופיינית של האפקט הייתה קטנה מדי, כי-אז תלות המהירות באנרגיה הייתה גורמת להתרחבות של שיאים צרים, בניגוד למה שמ' דדנו. בעזרת כל אחת מהשיטות הללו קיבלנו במחקר הראשון שלי, על-פי הערכה שמרנית (בעזרת השיטות הראשונה והשנייה), שהאנרגיה האופיינית של האפקט הזה הייתה להיות גדולה לפחות פי 1.2 מאנרגיית פלאנק.

במחקר השני שיפרנו ושכללנו את השיטות בהן השתמשנו, וקיבלנו שהאנרגיה האופיינית חייבת להיות לפחות פי 7.6 מאנרגיית פלאנק. משמעות התוצאות שקיבלנו היא שתלות ישירה (ליניארית) של מהירות הפוטונים באנרגיה שלהם, כפי שהחות מספר תיאוריות של כבידה קוואנטית, היא מאוד לא סבירה.

## גם מהירות אקראית לא סבירה

במחקר האחרון שלי בנושא זה, בחנו את האפשרות שמהירות כל פוטון איננה תלויה רק באנרגיה שלו ואף איננה דטרמיניסטית, אלא נקבעת באופן אקראי (סטוכסטי) מתוך התפלגות רמלית) שהרוחב האופייני שלה תלוי באנרגיה. הנחנו התפלגות סימטרית סביב הגבול של מהירות האור באנרגיות נמוכות מאוד, עם סיכויים שווים למהירויות מעל ומתחת לערך זה. במודל כזה, רוחב ההתפלגות ממלא את התפקיד שהיה קודם להפרש (הדטרמיניסטי) שבין מהירות הפוטון ל-c. התפלגות מהירויות כזו, משמעותה שפוטונים אשר נפלטים ביחד מאותו המקור ובאותה האנרגיה יגיעו אל מכשיר המדידה בזמנים שונים, בהתאם להתפלגות הסטטיסטית של מהירותיהם.

ניתן לצפות למהירות אקראית כזו עבור פוטונים שונים באותה האנרגיה, אם נזכור שהמוטיבציה מאחורי הצפי לתלות של המהירות באנרגיה היא השפעתן של התנודות הקוואנטיות על מבנה המרחב-זמן בקרבת סקאלת פלאנק (ראו איור 1). התנודות הללו משתנות באופן אקראי כתלות במקום ובזמן, כך שכל פוטון יחווה תנודות שונות, אך עם זאת התכונות הסטטיסטיות של התנודות שיחוו פוטונים שונים בעלי אותה אנרגיה הן זהות, ובאופן כללי תלויות רק באנרגיה של הפוטון. פיתחנו שיטת ניתוח חדשה של המידע התצפיתי עבור המודל הזה, וגם עבור מצאנו שהאנרגיה האופיינית של האפקט הזה חייבת להיות גדולה מאנרגיית פלאנק (הפעם לפחות פי 2.8). משמעות הדבר היא שגם במודלים אקראיים (סטוכסטיים), תלות ליניארית של רוחב התפלגות מהירויות הפוטונים סביב c באנרגיה שלהם היא לא סבירה - מה שמציב מגבלות ניסיוניות חשובות עבור קבוצה משמעותית של תיאוריות כבידה קוואנטית.

מחקרים מסוג זה נעזרים בפרספקטיבה של תהליכים אסטרו-פיסיקליים, שהאור הנפלט מהם מגיע אלינו אחרי מיליארדי שנים. בעזרת היחס העצום שבין זמן ההגעה של מיליארדי שנה לבין זמן הפיצוץ של פחות משנייה, ניתן ללמוד על טבעו ומבנהו של המרחב-זמן על-פני אורכים מסדר גודל של אורך פלאנק, שהם קטנים בסדרי גודל רבים מאורך הגל של האור שמדדנו. בסופו של דבר, בניגוד לתיאוריות כבידה קוואנטית מסוימות שהוצעו, התברר שמהירות האור אינה משתנה אפילו עבור האנרגיות האופייניות הגבוהות ביותר שהצלחנו לבחון - ובכך תומכים הממצאים שלנו בהנחת היסוד של תורת היחסות של איינשטיין, לפיה מהירות האור בריק היא קבוע אוניברסלי.

איור 2: שני פוטונים בתחום קרני הגמא - האדום בעל אנרגיה נמוכה ואורך גל ארוך, והכחול בעל אנרגיה גבוהה ואורך גל קצר - בדרכם מהבזק קרינת גמא במרחק מיליארדי שנות אור (למעלה מימין) אל מכשיר המדידה שעל הלוויין פרמי (למטה משמאל).

פרופ' יהונתן גרנות הינו חבר במחלקה למדעי הטבע והחיים.

איור 1: מבנה המרחב-זמן שצפוי להיות גבשושי בקרבת אורך פלאנק אך הופך חלק יותר ויותר ככל שמתבוננים בו בחולוציה נמוכה יותר.