



## ליקוי החמה שהאיר את תורת היחסות של איינשטיין

Hanoch Gutfreund<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup>פרופסור אמריטוס באוניברסיטה העברית בירושלים, נשיא האוניברסיטה בין השנים 1992-1997

<sup>2</sup>מנהל מרכז איינשטיין

<sup>3</sup>ראש הוועד המנהל של הקרן הלאומית למדע

### סוקרים צעירים

SHACHAR

גיל: 13



YOTAM

גיל: 13



מאמר זה מתאר את אחד הפרקים החשובים בהיסטוריה של הרעיונות וההתהליכים אשר תרמו להבנה המודרנית של היקום. אלברט איינשטיין השלים את תורת היחסות הכללית שלו ב-1915, ובכך שינה את תפישת העולם שהיתה נהוגה עד אז והתבססה על רעיונותיו של אייזק ניוטון. כדי לתת לתורה החדשה תוקף, היה צורך לאשר את המסקנות הנובעות ממנה באמצעות עריכת ניסויים ותצפיות אסטרונומיות. אישור ראשון כזה התקבל בתצפיות, אשר אימתו את הטענה שלפיה המסלולים של קרני אור המגיעים אלינו מכוכבים רחוקים מתעקמים כאשר הם עוברים בקרבת השמש, בשל כוח המשיכה של השמש וטבעו של המרחב והזמן. פרסום תוצאה זו עורר עניין רב בקהילה המדעית ובציבור הרחב, ואיינשטיין הפך בן-יום לכוכב עליון.

### הודעה דרמטית – מהפכה במדע המשנה סדרי עולם

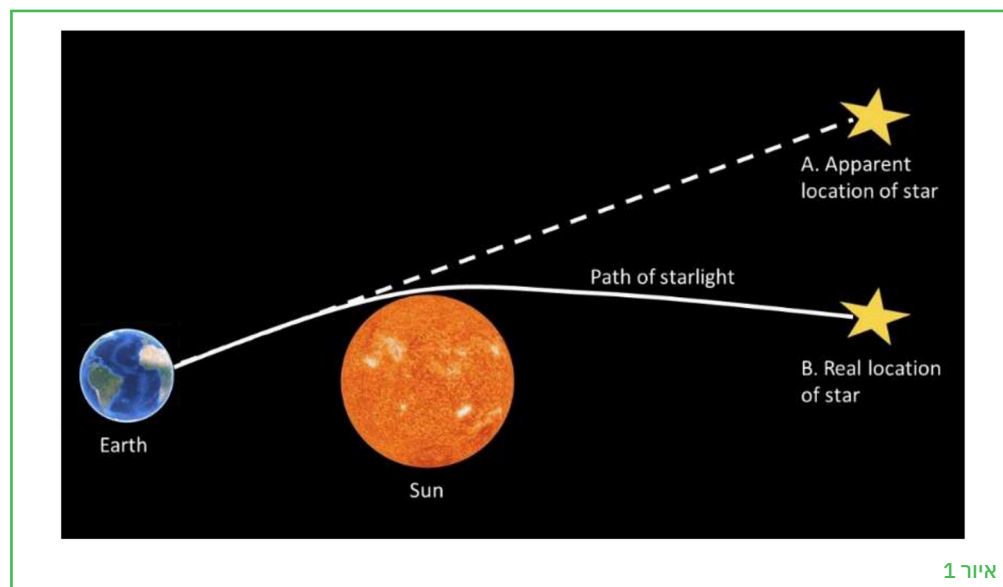
ב-7 בנובמבר 1919 התפרסמה בעיתון הבריטי London Times ידיעה תחת כותרת מרעושה: "מהפכה במדע – תיאוריה חדשה של היקום – הרעיונות של ניוטון הופרכו".

### ליקוי חמה (Solar eclipse)

תופעה המתרחשת כשהירח נמצא בדיוק בין השמש וכדור הארץ. במצב זה הירח מסתיר את השמש ויוצר את המראה המאפיין ליקוי, שבו השמש מתכסה על ידי צל הירח ונראית כחור אפל בשמיים.

### איור 1

תיאור סכמטי של התעקמות קרן אור מכוכב רחוק על ידי שדה הכבידה של השמש – שדה הכבידה גורם להזזה של מקום הכוכב על מפת השמיים (A) ביחס למקומו האמיתי (B).



איור 1

## תורת היחסות הפרטית

### תורת היחסות הפרטית (The theory of special relativity)

תיאוריה פיזיקלית שפותחה על ידי אלברט איינשטיין ופורסמה על ידו בשנת 1905. נחשבה לפורצת דרך בשעתה. תורה זו נועדה לפתור את הסתירות שהתגלו בין המכניקה הקלאסית והתורה האלקטרומגנטית.

בהמשך נחזור לאותן תצפיות, אבל לפני כן נסקור את מה שהוביל אליהן. שנת 1905 הייתה אחת השנים הפוריות בפעילותו המדעית של הפיזיקאי היהודי-גרמני אלברט איינשטיין. באותה השנה הוא ניסח את **תורת היחסות הפרטית**. תורה זו מבוססת על שתי הנחות:

א. חוקי הפיזיקה מתקיימים באופן זהה עבור מי שצופה בכל מערכת שנעה במהירות קבועה או נחה ביחס לרציף – את המשמעות של הנחה זו אפשר להסביר בדרך פשוטה: נניח שאדם יושב בקרון רכבת. החלונות אטומים ולא נשמע רעש של גלגלים על המסילה. אם הרכבת נוסעת במהירות קבועה, אין שום ניסוי שהאדם היושב

ברכבת יכול לעשות, שממנו יוכל להסיק באיזו מהירות הרכבת נוסעת, או אם היא בכלל עומדת.

ב. מהירות האור תמיד קבועה עבור מי שצופה בכל מערכת שנעה במהירות קבועה, זאת ללא תלות במהירות מקור האור – לעומת זאת מהירותו של גוף היא תמיד מהירות יחסית. אפשר להסביר זאת כך: כאשר אני נוסע במכונית ושואל מהי מהירות המכונית במסלול השכן, התשובה תלויה במצב התנועה שלי. אם אני נצמד לאותה מכונית הרי שהיא נמצאת במנוחה ביחס אליי. אם אני נוסע לאט יותר, הרי שהיא מתרחקת ממני מהר. התובנה המקורית של איינשטיין הייתה שהאור מתנהג אחרת – מהירות האור היא קבועה, אינה תלויה במצב התנועה של מי שמודד אותה וגם לא במהירות המקור שממנו האור נפלט.

משתי ההנחות האלה נובע שאם שני אנשים הנמצאים בתנועה זה ביחס לזה ימדדו את האורך של מוט מסוים, הם יקבלו תוצאות שונות (יחסיות המרחק בין שתי נקודות); ואם הם ימדדו את הזמן בין שני אירועים, הם לא יסכימו על התוצאה (יחסיות הזמן). לעיתים הם אפילו לא יסכימו לגבי איזה אירוע קדם לאחר. מדידות של מרחק, של זמן ושל הבו-זמניות (סימולטניות) של אירועים תלויות במצב התנועה של מי שמבצע את המדידות.

מושגי המרחק והזמן בתורת היחסות הפרטית של איינשטיין שונים מאוד ממשמעותם בתמונת העולם של הפיזיקאי והמתמטיקאי האנגלי אייזק ניוטון. במכניקה של ניוטון המרחב והזמן הם מוחלטים. תוצאות המדידות של מרחק ושל זמן אינן תלויות במצב התנועה של מי שמבצע את המדידות.

אחת המסקנות הידועות ביותר מהתיאוריה של איינשטיין היא שמסה ואנרגיה שקולות זו לזו – מסקנה אשר מיוצגת על ידי הנוסחה המפורסמת ביותר במדע:

$$E = mc^2$$

כאשר האות  $E$  מסמלת אנרגיה,  $m$  מסמלת מסה ו- $c$  היא מהירות האור. לפי נוסחה זו, בתהליכים מסוימים כמות קטנה של מסה יכולה להפוך לכמות אדירה של אנרגיה. בכורים המספקים אנרגיה גרעינית, תהליכים כאלה מתרחשים בצורה מבוקרת. בפצצה אטומית הם מתרחשים באופן בלתי מרוסן. בליבת השמש, ארבעה גרעינים של מימן מתמזגים, בתהליך מורכב, לגרעין של הליום. המסה של גרעין של הליום קצת יותר קטנה מהמסה של ארבעה גרעיני מימן. המסה שהולכת לאיבוד בתהליך הזה הופכת לאנרגיה, והיא המקור לאנרגיית השמש – מקור האנרגיה על פני כדור הארץ.

## תורת היחסות הכללית

לתורת היחסות הפרטית יש שתי מגבלות עיקריות: הראשונה, תיאוריה זו מתייחסת רק למערכות הנעות במהירות קבועה. אין בה מקום לתנועה מואצת. המגבלה השנייה היא שאין

## כוח הכבידה (Gravitation)

אחד הכוחות הבסיסיים בטבע. זהו כוח משיכה הפועל בין גופים ומושפע מהמסה שלהם ומהמרחק ביניהם.

## תורת היחסות הכללית (The theory of general relativity)

תיאוריה גיאומטרית של הכבידה שפרסם איינשטיין בשנת 1915, ומשמשת כתיאור הנוכחי של הכבידה בפיזיקה המודרנית. תורה זו עוסקת בנושאים שתורת היחסות הפרטית לא עסקה בהם.

בתורת היחסות הפרטית מקום לכוח המרכזי בטבע – **כוח הכבידה**. אותו כוח המחזיק את הירח במסלול קבוע סביב כדור הארץ, ואת כוכבי הלכת במסלולם סביב השמש.

אחרי השלמת תורת היחסות הפרטית התחיל איינשטיין בחיפוש תיאוריה שתהיה משוחררת משתי המגבלות האלה. פרי החיפוש הזה, שארך עשר שנים, הוא **תורת היחסות הכללית**. הרעיון המרכזי של התיאוריה הזו הוא שכוח הכבידה - כוח המשיכה בין שני גופים חומריים - איננו כוח, כמו בתורת ניוטון, אלא הוא תכונה של המרחב, או יותר נכון של המרחב והזמן. בתורה החדשה המרחב והזמן משולבים זה בזה לישות אחת – מרחב-זמן. בתורת ניוטון המרחב והזמן הם "הבמה" שעליה מתרחשים כל התהליכים הפיזיקליים. בתיאוריה של איינשטיין המרחב והזמן משתתפים בתהליכים האלה ומושפעים על ידם. התיאור של העיקרון הזה מתמצה במשפט האומר שהמסות ביקום מעקמות את המרחב-זמן בסביבתן, וגופים חומריים, כמו גם קרני האור, נעים במרחב-זמן עקום. קשה מאוד להסביר את המשפט האחרון באופן מוחשי. גם פיזיקאים אשר עוסקים בתחום מחקר זה מתקשים לדמיין לעצמם מרחב-זמן עקום. את המושגים האלה אפשר לתאר בשפת המתמטיקה, באמצעות שיטות מתמטיות שהתפתחו על ידי מתמטיקאים כבר במאה ה-19. בעזרת שיטות אלה מצא איינשטיין, בנובמבר 1915, את המשוואות המתארות את השפעת המסות על המבנה של המרחב-זמן, ואת משוואות התנועה המתחייבות מן ההשפעה הזו. משוואות אלה הן ההישג הגדול ביותר של איינשטיין, הן הבסיס של כל מה שאנו יודעים היום על היקום – איך הוא התחיל, כיצד הוא התפתח ומה המבנה שלו.

## ליקוי החמה של שנת 1914 – מלחמת העולם הראשונה טרפה את הקלפים

כבר בתחילת המסע שלו לתורת היחסות הכללית, ידע איינשטיין שקרני האור מתעקמות בסביבת השמש. הוא אפילו חישב את זווית הסטייה של קרניים אלה ממסלול ישר. את החישוב הזה הוא ביצע עדיין בשיטות שקדמו לתורת היחסות הכללית, וקיבל תוצאה הקטנה פי שניים מן הערך הנכון שאליו הגיע רק בסוף הדרך. ב-1913 שלח איינשטיין מכתב לאסטרונום ג'ורג' הייל, שהיה מנהל מצפה הכוכבים הגדול בהר וילסון בארה"ב, ובו שאל אותו אם יש אפשרות לצפות בשעות היום בכוכבים בסביבת השמש. הייל ענה לו שהדרך היחידה לצפות על שולי השמש היא בזמן של ליקוי חמה מלא.

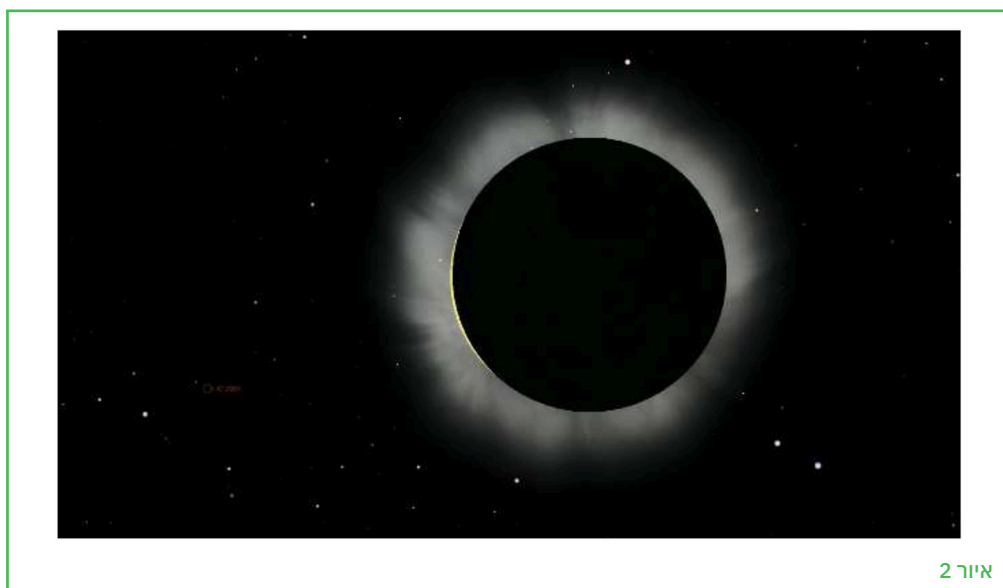
ליקוי חמה מתרחש מפני שמסלול התנועה של הירח סביב כדור הארץ נטוי ביחס למישור המסלול של תנועת כדור הארץ סביב השמש. מדי פעם קורה שכאשר הירח חוצה את המישור הזה, כדור הארץ, הירח והשמש נמצאים על קו ישר. במקרה כזה הירח מסתיר את השמש ומתרחש ליקוי חמה. אבל, הירח הוא קטן מכדי להטיל צל על כדור הארץ כולו, ולכן ישנם אזורים שבהם מתקבל ליקוי חמה מלא, ובאזורים אחרים הוא חלקי בלבד. משלחת אסטרונומית מגרמניה תכננה לבצע תצפיות בעת ליקוי חמה מלא שהיה צפוי להתרחש ב-21 באוגוסט 1914 באזור קרין ברוסיה. אבל, אז פרצה מלחמת העולם הראשונה, המשלחת נלקחה בשבי והציוד שלה הוחרם. במבט לאחור, הכישלון לבצע את התצפיות בהזדמנות הזו יצא לטובה. אם המשלחת הייתה מצליחה לבצע את התצפיות אז ולנתח את התוצאות כראוי, הייתה מתקבלת זווית סטייה של קרני האור שלא הייתה תואמת את מה שצפה איינשטיין באותם הימים. ההזדמנות הבאה שניתנה לחוקרים הייתה בעת ליקוי החמה ב-1919.

## ליקוי החמה של שנת 1919 – התצפיות שאיששו את תורת היחסות של איינשטיין

על פי תורת היחסות הכללית, זווית הסטייה של קרניים, הנושקות את מעטפת השמש, ממסלולן הישר היא כ-1.7" (1.7 שניות של מעלה; במעלה יש 3,600 שניות). זווית זו, כאמור, גדולה פי שניים מן הערך שהיה לאיינשטיין כאשר כתב את המכתב להייל בשנת 1913. אחרי כמה חודשים של ניתוח התצפיות, שנערכו ב-29 במאי 1919 (איור 2), תהליך שהיה לא פשוט באמצעים שעמדו לרשות החוקרים באותם הימים, הודיעו ראשי המשלחות ארתור אדינגטון וצ'רלס דוידסון עם האסטרונום המלכותי סר פרנק דייסון כי: "תוצאות המשלחות לסוברל ופרינציפה כמעט שאינן משאירות ספק שהתעקמות האור בסביבת השמש אכן מתקיימת, ושהשיעור שלה הוא כפי שנדרש על ידי תורת היחסות של איינשטיין".

### איור 2

ליקוי החמה של שנת 1919 וסביבו כוכבים. מקומותיהם של הכוכבים הנראים על מפת השמיים מוזזים ביחס למקומותיהם האמיתיים כאשר השמש נמצאת במקום אחר. מהסטיית במקומות הכוכבים אפשר לחשב את זווית ההתעקמות של קרני האור על ידי השמש.



איור 2

## התעקמות קרני האור על ידי גופים שמימיים

זו הייתה תוצאה חשובה ביותר. היא לא רק סיפקה אישור לתוקף של תורת היחסות הכללית, אלא גם הצביעה על אפשרות של תופעה אסטרונומית חדשה: זווית הסטייה של קרני האור הנגרמת על ידי השמש היא קטנה מאוד. גופים בעלי מסה גדולה הרבה יותר, כמו חורים שחורים או אפילו גלקסיות שלמות, יכולים לגרום לסטיות גדולות הרבה יותר, עד כדי האפשרות לרכז אלינו קרני אור ממקורות הנמצאים מאחוריהם ולפעול כמו עדשות אופטיות, אלא שכאן מדובר בעדשות כבידה. איינשטיין שם לב לאפשרות הזו כבר ב-1912, אבל פרסם את רעיונותיו וחישוביו בנושא רק 24 שנים מאוחר יותר. היום אנו יודעים שעידוש **כבידתי** הוא תופעה נפוצה, ואמצעי חשוב במחקר היקום.

## סיכום

ההודעה על הצלחת המשלחות הבריטיות היא מקור הכותרת המרעישה ב-London Times ובעיתונים אחרים, שבה פתחנו את המאמר. כותרת זו גרמה להתרגשות בקהילה המדעית ולהתלהבות בציבור הרחב, שאותן אפשר להבין על רקע התקופה שבה האירוע התרחש.

### עידוש כבידתי (Gravitational Lensing)

תופעה שבה כוח הכבידה של עצם בעל מסה גדולה מעקם את קרני האור, באופן דומה לעדשה. כתוצאה מכך מסלול האור מהמקור מתעקם, ומתקבלת דמות מעוותת.

זה קרה שנים מעטות אחרי מלחמת העולם הראשונה, אשר גבתה מיליוני קורבנות וגרמה הרס רב. הידיעה שפורסמה העידה על שיתוף פעולה בינלאומי במדע ועל תבונתו של המוח האנושי, והפיחה תקווה חדשה. העניין הציבורי באיינשטיין וההערצה אליו הרקיעו שחקים, והוא הפך בן-יום לכוכב עליון. ממעמד זה נהנה איינשטיין עד סוף ימיו, והרבה מעבר להם.

## לקריאה נוספת

בשנת המאה לפרשה שהיא נושא המאמר פורסמו שני ספרים, המתארים את ההקשרים המדעיים וההיסטוריים שלה:

S. James Gates, Jr. and Cathie Pelletier, *Proving Einstein Right – The Daring Expeditions That Changed How We Look at the Universe*, Hachette Book Group, 2019.

Daniel Kennefick, *No Shadow of a Doubt – the 1919 Eclipse That Confirmed Einstein's Theory of Relativity*, Princeton University Press, 2019.

פורסם אונליין: 20 בדצמבר 2022

נערך על ידי: Idan Segev

מנחים מדעיים: Osnat Cohen and Adva Ben Natan

ציטוט: Gutfreund H (2022) ליקוי החמה שהאיר את תורת היחסות של איינשטיין. Front. Young Minds. doi: 10.3389/frym.2022.747040-he

תורגם והתאם מ: Gutfreund H (2022) The Solar Eclipse That Validated Einstein's Theory of Relativity. Front. Young Minds 10:747040. doi: 10.3389/frym.2022.747040

הצהרת ניגוד אינטרסים: המחבר מצהיר כי המחקר נערך בהעדר כל קשר מסחרי או פיננסי שיכול להתפרש כניגוד אינטרסים פוטנציאלי.

**COPYRIGHT © 2022 © Gutfreund 2022.** זהו מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון **Creative Commons Attribution License (CC BY)**. השימוש, ההפצה או ההעתקה מותרים לשימוש בפורומים אחרים ובלבד שיינתן קרדיט למחבר(ים) המקוריים ולבעל זכויות היוצרים, ושהפרסום המקורי בעיתון זה מצוטט בהתאם למקובל באקדמיה. השימוש, ההפצה או ההעתקה אינם מותרים אם הם אינם עומדים בתנאים אלה.

## סוקרים צעירים

### SHACHAR, גיל: 13

היי, אני שחר, בן 13 וגר בעיר מודיעין. יש לי כלבה שאוהבת רק לאכול, וחתולה זקנה שבכלל לא אוכלת (ואם היא אוכלת, היא מקיאה).



### YOTAM, גיל: 13

שמי יותם, אני תלמיד בכיתה ז' – שנה ראשונה בחטיבת הביניים. אני אוהב ללמוד מתמטיקה ומדעים, ומתעניין מאוד במדעי המחשב ובתוכנה. אהבה גדולה אחרת שלי היא מוזיקה, במיוחד מוזיקת רוק ומוזיקה קלאסית. אני גם מנגן בגיטרה: חשמלית, קלאסית ואקוסטית, וחבר בלהקה שבה אני מנגן עם החברים שלי.

## הכותב

### HANOCH GUTFREUND

פרופ' חנוך גוטפרינד, פרופסור אמריטוס לפיסיקה עיונית באוניברסיטה העברית. הפעילות האקדמית שלו התמקדה במחקר עיוני בפיסיקה של מצב מוצק, בפיסיקה סטטיסטית ובחישוביות עיצבית (ממשק בין פיסיקה וחקר המוח). מילא בעבר תפקידים אקדמיים ומנהליים שונים באוניברסיטה – ראש המכון לפיזיקה, ראש המכון ללימודים מתקדמים, רקטור ונשיא. שימש בתפקידים אוניברסיטאיים וציבוריים שונים, בארץ ובחו"ל, הקשורים בחינוך ובמדיניות מדע. בשנים האחרונות הוא משמש כמנהל האקדמי של ארכיון אלברט איינשטיין באוניברסיטה העברית ואחראי על כל הפעולות, בארץ ובעולם, מטעם האוניברסיטה, הקשורות למורשתו של אלברט איינשטיין. [\\*hanoch.gutfreund@mail.huji.ac.il](mailto:hanoch.gutfreund@mail.huji.ac.il)



מוזיאון המדע ע"ש בלומפילד ירושלים  
متحف العلوم على اسم بلومفيلد القدس  
Bloomfield Science Museum Jerusalem



הוצאת פרונטירז מדע לצעירים ישראל  
Hebrew version provided by



THE SAGOL NETWORK