



## גלי כבידה – הטלסקופ החדש של היקום

Barry Barish\*

מעבדת LIGO, המכון הטכנולוגי של קליפורניה (Caltech), פסדינה, קליפורניה, ארצות הברית

### סוקרת צעירה

JIARUI

גיל: 13



דמיונו שהיה ניתן לכם זוג עיניים חדשות, שאיתן יכולתם לראות דברים במציאות שמעולם לא ראיתם קודם לכן. אולי הייתם בוחרים שתהיה לכם ראיית רנטגן, כמו לסופרמן, או שאולי הייתם מעדיפים להיות מסוגלים להביט מקרוב על דברים זעירים, ולהתרשם מנפלאותיו של העולם המיקרוסקופי. לאחרונה, המדע זכה בזוג עיניים חדשות – דרך חדשה להתבונן אל תוך המסתורין של היקום. אנו עושים זאת באמצעות 'גלי כבידה' – גלים המיוצרים על ידי תופעת הגרביטציה (כבידה) עצמה. במאמר זה, אקח אתכם למסע שיתחיל מהסבר לגבי גרביטציה – מהפרספקטיבה הקלאסית של אייזק ניוטון, ועד להשקפה המודרנית והמורכבת יותר של אלברט איינשטיין. לאחר מכן, אסביר לכם כיצד תנועות של אובייקטים מסיביים מייצרות גלי כבידה, שהם אדוות במרחב ובזמן, וכיצד גלים אלה יכולים לשמש כדי להאיר באור חדש חלק מהמסתורין של היקום, ואפילו לסייע לנו להבין את המקורות של כדור הארץ שלנו.

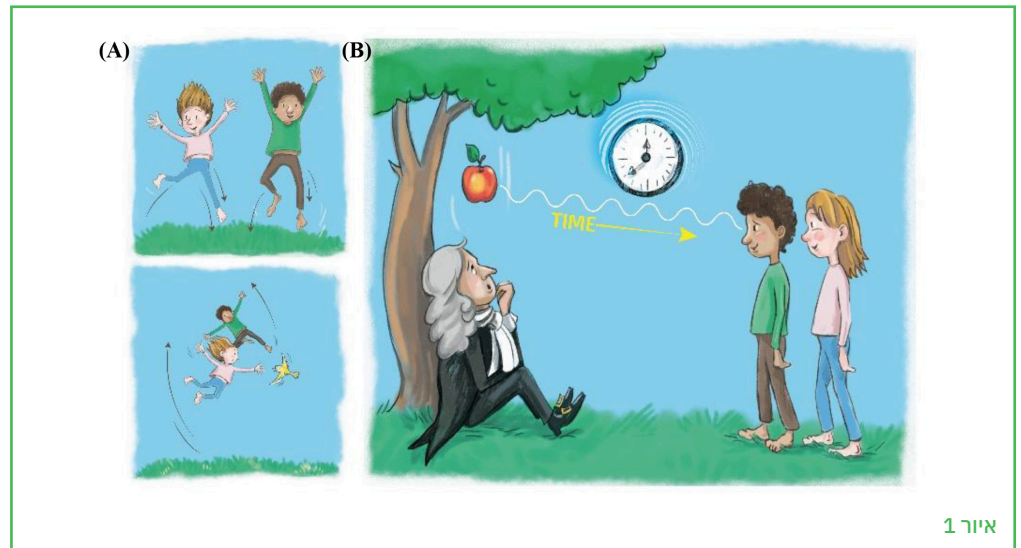
פרופסור בארי ברִיש זכה בפרס נובל לפיזיקה לשנת 2017, במשותף עם פרופסור ריינר וייס ופרופסור קיפ ת'ורן, עבור תרומותיהם המכריעות לגלאי LIGO ולצפייה בגלי כבידה.

## גרביטציה – מניוטון ועד איינשטיין

בשנת 1687, המתמטיקאי והפיזיקאי האנגלי הדגול אייזק ניוטון פרסם את ספרו המפורסם 'פְּרִינְקִיפִּיָּה' [1], שבו הציג את תיאוריית הגרביטציה שפיתח, שהייתה התיאוריה ה'אוניברסלית' הראשונה במדע. באמצעותה ניוטון הוכיח כי כוח הכבידה בין שני אובייקטים פרופורציוני למכפלת המסות שלהם, והופכי באופן פרופורציוני לריבוע המרחק ביניהם. זה אומנם נשמע מסובך, אך הרעיון בתמצית הוא שככל שלאובייקטים יש יותר מסה, וככל שהם קרובים יותר זה לזה, כך כוח הכבידה שיפעילו זה על זה יהיה חזק יותר. על אף נכונות הדברים, התברר כי התיאוריה הנפלאה של ניוטון לוקה בכמה מגבלות.

ראשית, האם אי פעם תהיתם מדוע כאשר תפוח נופל מעץ, הוא נופל כלפי מטה ולא כלפי מעלה? או, כשאתם קופצים – מדוע אתם חוזרים חזרה מטה אל כדור הארץ ולא עפים כלפי מעלה? התיאוריה של ניוטון אינה מספקת תשובות לשאלות הפשוטות הללו. היא רק אומרת לנו כמה כוח גרביטציוני שני אובייקטים מפעילים זה על זה, כמו הכוח שבין התפוח לבין כדור הארץ, או בינינו לבין כדור הארץ. אולם, התיאוריה של ניוטון אינה מביאה בחשבון את כיוון הכוח שבין שני אובייקטים (האם הכוח מקרב את האובייקטים זה לזה, או מרחיק ביניהם), וכן אינה מסבירה מהיכן גרביטציה מגיעה מלכתחילה (איור 1).

### איור 1



איור 1

כבידה לפי ניוטון. תיאוריית הגרביטציה המוצלחת של ניוטון לוקה בכמה מגבלות. (A) האם אי פעם תהיתם מדוע בעת קפיצה מעץ אתם נופלים חזרה אל כדור הארץ, במקום לעוף לשמיים? מה מושך אתכם חזרה אל כדור הארץ? התיאוריה של ניוטון לא הצליחה לענות על שאלה זו. (B) כאשר תפוח נופל מעץ, לוקח זמן עד שהצופה יודע שזה קרה, מאחר שהמידע מתקדם במהירות האור. התיאוריה של ניוטון מניחה כי הצופה רואה את התפוח נופל מייד, בדיק באותו הרגע שבו הוא נופל. שתי המגבלות הללו נפתרו על ידי תיאוריית הגרביטציה של איינשטיין.

הקושי השני עם התיאוריה של ניוטון מעט קשה יותר לתפיסה. דמיינו שהשמש הייתה נעלמת פתאום. אם היא נעלמה כרגע, יחלפו כשמונה דקות עד שנראה שהיא כבר אינה במקומה הרגיל, מאחר שלאור השמש לוקח שמונה דקות להגיע לעינינו. רעיון זה נכון עבור כל דבר אחר שמתרחש ביקום – למידע אורך זמן להגיע מהאירוע עד לצופה. אם כן, כאשר תפוח נופל מעץ, ייקח זמן מסוים (אפילו אם רק חלקיק שנייה) עד שהצופה ידע שזה אכן התרחש (איור 1). התיאוריה של ניוטון אינה מביאה בחשבון את פער הזמן הזה, כך שלפיה הצופה רואה את התפוח נופל בדיק באותו הרגע שבו הוא באמת נופל. אנו יודעים שאין זה כך במציאות; לכן, ביכולתנו להסיק שמהו חסר בתיאוריה של ניוטון.

כיצד ביכולתנו לפתור את שתי החידות האלה שהציבה התיאוריה של ניוטון? למרבה המזל, יותר מ-200 שנים לאחר זמנו של ניוטון, הפיזיקאי האהוב אלברט איינשטיין הציע פתרונות

עבורן. בשנת 1915, איינשטיין פרסם תיאוריה חדשה של גרביטציה, המכונה 'תורת היחסות הכללית' [2]. התיאוריה של איינשטיין מציעה דרך שונה לגמרי להסתכל על כבידה, ומסייעת לנו להבין דברים שהתיאוריה של ניוטון לא הייתה מסוגלת להסביר. אין זה אומר שהתיאוריה של ניוטון הייתה שגויה או בלתי מועילה – המשמעות היא רק שתיאוריית ניוטון לא הייתה שלמה, ושהתיאוריה החדשה יותר מסייעת לנו לעמוד על דברים באופן עמוק יותר. תיאוריית איינשטיין גורסת כי סביב לכל אובייקט מסיבי, מרחב וזמן מושפעים ונעשים מעוותים או מעוקמים, וזה יוצר משיכה לְעֵבֶר האובייקט.

הנה דרך פשוטה להבין את הרעיון של איינשטיין לגבי גרביטציה. דַמְיִנו שאתם ממקמים חרוז על גבי טרמפולינה שטוחה. החרוז עומד במקום ולא נע (איור 2A). אולם, אם תניחו כדור באולינג גדול במרכז הטרמפולינה, אשר יגרום לטרמפולינה להתעקם, החרוז ייפול לכיוון מרכז הטרמפולינה (איור 2B). נוכחות כדור הבאולינג הכבד עיוותה את המרחב שאוכלס על ידי הטרמפולינה באופן שגרם לחרוז לנוע לְעֵבֶר כדור הבאולינג, כאילו שהוא משך אותו כלפיו. זה באופן עקרוני הרעיון שעליו מבוססת תורת היחסות הכללית של איינשטיין. הנוכחות של כל מָסָה מעוותת את המרחב סביבה באופן שיוצר משיכה בין המָסוֹת. תמונת הכבידה הזו עונה על השאלה שניוטון לא ידע להשיב עליה: מדוע (וכיצד) גרביטציה יוצרת כוח משיכה, ומדוע אתם נופלים לְעֵבֶר כדור הארץ כשאתם קופצים כלפי מעלה? הבעיה השנייה, שקשורה לזמן, נפתרה אף היא על ידי איינשטיין כיוון שהתיאוריה שלו מביאה בחשבון את מהירות האור. בחלק הבא של המאמר, נכיר תופעה חשובה ומעניינת שנקראת 'גלי כבידה', שאותה חִזָּה תיאוריית הכבידה של איינשטיין.

## מהם גלי כבידה?

אחת התחזיות בתיאוריית היחסות הכללית של איינשטיין היא שגרביטציה צריכה להכיל גלים – **גלי כבידה** [3, 4]. דרך פשוטה לחשוב על גלים אלה היא לדמיין את עצמכם בבריכה עם מים שקטים. כעת, אתם משליכים אבן לבריכה. כאשר האבן פוגעת במי הבריכה היא משפריצה סביבה מים, ושוקעת לקרקעית. אף על פי שהאבן נחה בתחתית הבריכה, אתם עדיין יכולים לראות את ההשפעה שהייתה לה על פני השטח של המים, נְשָׁם הגלים נעים

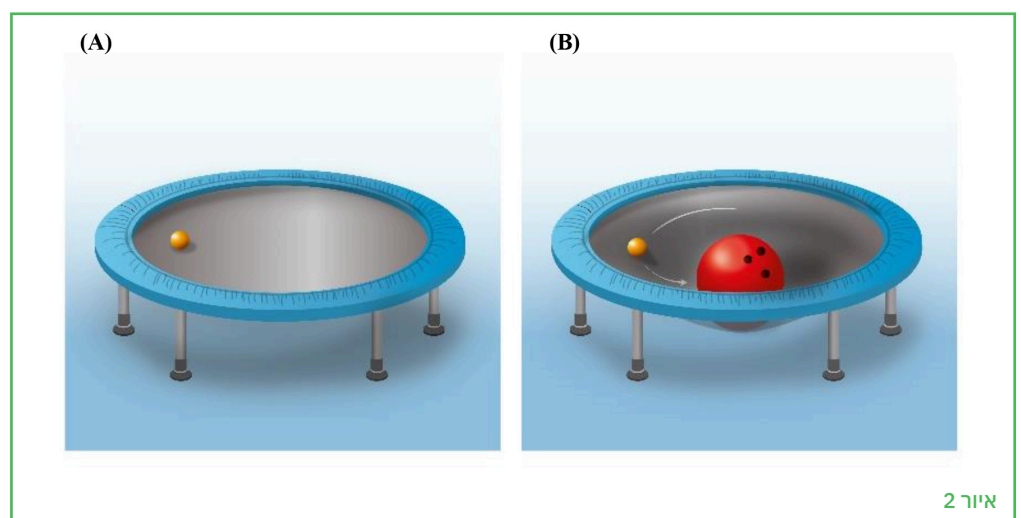
### גלי כבידה

#### (Gravitational Waves)

הפרעות בזמן ובמרחב הנגרמות כתוצאה מתנועת אובייקטים כבדים, ומתפשטות כגלים, במהירות האור.

### איור 2

כבידה לפי איינשטיין. (A) כשאתם מניחים חרוז על טרמפולינה שטוחה, הוא נשאר במקום. זה מייצג מצב של מרחב שאין בו אובייקטים מסיביים. (B) כשאתם מניחים כדור באולינג כבד במרכז של הטרמפולינה, הטרמפולינה מתעקמת. אם תניחו עליה כעת חרוז, החרוז ינוע לכיוון המרכז. זה מייצג את הגרביטציה במודל של איינשטיין, שבו אובייקט מסיבי (כמו כוכב) מעקם מרחב וזמן, ולכן מושך לכיוונו אובייקט אחר (כמו תפוח, או הגוף שלכם).

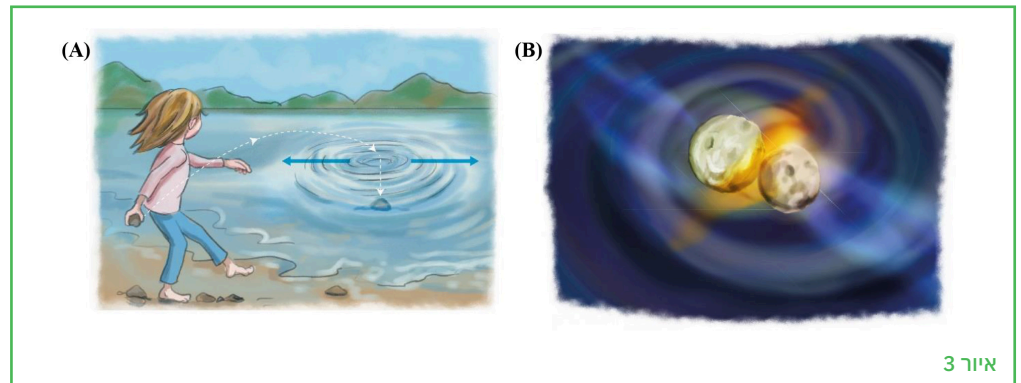


איור 2

מהמרכז כלפי חוץ (איור 3A). זו גם הדרך לדמיין מה קורה עם גלי כבידה. מה שגורם להיווצרותם של גלים אלה אינו אבן שנופלת לבריכה, אלא תנועה של אובייקטים מסיביים במרחב, או התנגשות ביניהם (איור 3B).

### איור 3

גלי כבידה. (A) כאשר אתם משליכים אבן לתוך בריכה שקטה, תוכלו לראות אֶדוֹות (גלים קטנים) שנעות על פני השטח של המים, אפילו כשהאבן כבר נחה בקרקעית הבריכה. לפי תיאוריית היחסות הכללית של איינשטיין, זה דומה לאופן שבו גלי כבידה נוצרים בעת התנגשות בין שני אובייקטים מסיביים. (B) גלי כבידה נוצרים כאמור כאשר שני אובייקטים מסיביים מתנגשים זה בזה. הגלים ממשיכים להתקדם במרחב, גם לאחר שההתנגשות התרחשה.



איור 3

## אתגרים והצלחות באיתור גלי כבידה

לאחר שהתיאוריה של איינשטיין חזתה את קיומם של גלי כבידה, פיזיקאים העוסקים בפיזיקה ניסויית החלו לנסות לֶאָתֵר אותם. אני עצמי הקדשתי יותר מ-20 שנים מחיי לפיתוח שיטות לאיתור גלי כבידה, ועוֹדֵנִי ממשיך בכך. מתברר שבנוגע לגלי כבידה, נפלו בחלקנו חוסר מזל גדול ומזל גדול גם יחד. חוסר המזל הוא שכיום אין לנו היכולת לייצר גלי כבידה במעבדותינו מאחר שהגלים שאנו מייצרים חלשים מדי מכדי שנוכל לֶאָתֵרם בעזרת השיטות שזמינות לנו. זהו חוסר מזל כיוון שניסויים טובים הם כאלה שבהם אנו מבינים את כל מה שמתרחש, וקל הרבה יותר להצליח בכך במעבדה.

לעומת זאת, בורכנו במזל גדול – הטבע עצמו יצר גלי כבידה שהם חזקים הרבה יותר מכל גל שהיינו יכולים לייצר במעבדה. המשמעות היא שאירועים אסטרונומיים מסוימים שיוצרים גלי כבידה – אשר שניים מתוכם אזכיר בהמשך המאמר – ניתן פוטנציאלית לֶאָתֵר על ידי הגֵלָאים המתקדמים ביותר המצויים בידינו. אף על פי שאירועים אסטרונומיים אלה נדרשים להיות האלימים והאנרגטיים ביותר ביקום כדי שנצליח לֶאָתֵרם, הם עדיין מתרחשים לעיתים קרובות מספיק כך שנוכל לחקור אותם. האירועים האלימים ביותר ביקום הם פיצוצים של אובייקטים כבדים להפליא, והתנגשויות המתרחשות ביניהם.

מקור מצוין לגלי כבידה שביכולתנו לֶאָתֵר הוא סוג של פיצוץ המכונה **סופֶרְנוּבָה**. התופעה מתרחשת כאשר כוכב מסיבי מזדקק וקורס במהירות כלפי פְּנִים. קריסה זו יוצרת עלייה משמעותית בטמפרטורה ובלחץ, מה שעשוי להגביר את תהליך ה**היתוך גרעיני**, שבו גרעינים קלים יותר באטומים משתלבים יחד לכדי גרעינים כבדים יותר, ומשחררים אנרגיה. תהליך זה עשוי לעורר מה שמכונה 'תגובות היתוך גרעיני נמלטות' ('runaway nuclear fusion'<sup>1</sup>), אשר גורמות לכוכב להתפוצץ עם אנרגיה אדירה. אנרגיה זו, לפי התיאוריה של איינשטיין, מובילה להיווצרות גלי כבידה חזקים.

כשמדובר בהתנגשויות אלימות במרחב, חלק מההתנגשויות האנרגטיות ביותר מתרחשות בין אובייקטים מסיביים, כמו למשל חורים שחורים וכוכבים נִיְטְרוֹנִים. **חורים שחורים** הם

### סופרנובה (Supernova)

כאשר כוכב מסיבי מזדקק, הוא מְכַלֵּה את הדלק שלו, מתקרר וקורס פנימה. תהליך זה מייצר כמות אדירה של אנרגיה, אשר מעוררת היתוך גרעיני שמוביל לפיצוץ אדיר.

### היתוך גרעיני (Nuclear Fusion)

תגובה שבה גרעיני אטומים מתאחדים ויוצרים גרעינים כבדים יותר. עקב כך משתחררת כמות אדירה של אנרגיה לסביבה. חום השמש ואורה נובעים מהיתוך גרעיני.

<sup>1</sup> כדי ללמוד עוד על תופעת ההימלטות – 'runaway', לחצו כאן וקראו על אודות 'בריחה תרמית'.

### חורים שחורים (Black Holes)

האובייקטים המסיביים ביותר שמוכרים ביקום, שבהם הכבידה חזקה כל כך עד ששום דבר, לרבות האור, אינו יכול לברוח.

### כוכבי ניטרונים (Neutron stars)

השאריות של כוכבי ענק שקורסים כשהדלק שלהם אוזל. קטרם של כוכבי ניטרונים בדרך כלל 10 קילומטרים בלבד, והם דחוסים ביותר.

האובייקטים המסיביים ביותר המוכרים ביקום. כוח הכבידה שלהם חזק כל כך שהם 'בולעים' כל דבר שמתקרב אליהם, אפילו כוכבים. דבר לא יכול לברוח מתוך חורים שחורים, אפילו לא אור – ומכאן מקור שמם. **כוכבי ניטרונים** הם שאריות של כוכבים ענקיים שקרסו, והם דחוסים מאוד ומכילים בעיקר חלקיקים תת-אטומיים ניטרליים המכונים ניטרונים.

בשנת 2015, התגלו גלי הכבידה הראשונים [5]. שנתיים בלבד מאוחר יותר, בשנת 2017, זכיתי בפרס נובל לפיזיקה עבור תגלית זו, במשותף עם שני עמיתיי לגילוי, פרופ' ריינר וייס ופרופ' קיפ ת'ורן. בדרך כלל, אורך 20 שנים לכל הפחות עד שמדענים מקבלים פרס נובל עבור עבודתם, אולם התגלית של גלי כבידה הייתה בעלת חשיבות מיוחדת, מסיבות שאפרט בהמשך המאמר. מאז התצפיות הראשונות של גלי כבידה שנוצרו עקב התנגשות בין שני חורים שחורים, איתרנו מאוחר יותר התנגשויות אחרות שייצרו גלי כבידה – אחת ב-2017, בין שני כוכבי ניטרונים [6], והשנייה ב-2020, בין חור שחור לכוכב ניטרונים [7].

### מדידת גלי כבידה

כשאנו מודדים גלי כבידה, אנו למעשה מודדים את העיוותים (אֶדְוֹוֹת) שהם יוצרים במרחב ובזמן. כאשר העיוותים האלה מגיעים לנגללים שלנו, הם קטנים להפליא – קטנים הרבה יותר מגודלו של פרוטון בודד. כדי למדוד אותות זעירים שכאלה, לגלאים שלנו צריכה להיות רמת דיוק העולה על אלפית (1/1000) מגודלו של פרוטון! כפי שתוכלו לדמיין, קשה ביותר להשיג רמת דיוק כזו, והדבר מצריך שימוש בשיטה מיוחדת מאוד שנקראת **אינטרפרומטריה**. לא אתאר כאן את השיטה לפרטים, אך בתמצית: אינטרפרומטריה משתמשת באינטראקציות בין קרני לייזר במטרה לאתר התכווצויות והתרחבויות קטנות מאוד של מרחב? כדי לערוך מדידות רגישות שכאלה, עלינו לבדוד את הציוד שלנו כך שדבר לא יפריע למדידותינו – אפילו תנועה זעירה עלולה להשתלט על האות שאנו מחפשים. מקור אחד להפרעות הוא תנועת כדור הארץ עצמו, אשר רועד כשהוא מסתובב סביב צירו (הרעידה הזו עדינה מדי מכדי להיות מורגשת על ידי בני אדם, אך היא ניתנת לאיתור באמצעות מכשירים רגישים). המשמעות היא שעלינו להחזיק את ציוד המדידה שלנו במקום באוויר כדי שלא יגיב לתנועות כדור הארץ.

בניית מכשור למדידת גלי כבידה הייתה משימה מאתגרת מאוד. הציוד שאנו משתמשים בו נקרא LIGO – ראשי התיבות של Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory [מֶצֶפֶה גלי כבידה המבוסס על אינטרפרומטריה (מד-הֶתְאֶבְכֹּת) לייזר]. אורכו של LIGO הוא כמה קילומטרים (איור 4). בנייתו ותפעולו הסתכמו בעלות של יותר ממיליארד דולר. מרבית עבודתי עדיין קשורה בפיתוח הטכנולוגיות שיאפשרו לנו להשיג רגישות גבוהה יותר באיתור גלי כבידה, בלי שתנועות בלתי רצויות יפגעו במדידותינו. אנשים רבים שואלים אותי אם אין זה מתסכל לעבוד על אותה הבעיה במשך יותר מ-20 שנים. תשובתי לשאלתם היא: לגמרי לא! אני נהנה מאוד מפתרון בעיות שונות לאורך הדרך, ורואה זכות גדולה בעשיית משהו שאף אדם אחר לא עָסַק בו לפניי.

### גלי כבידה – החלון החדש ליקום

אם כן, מהי חשיבותם של גלי כבידה כשאנו מנסים להבין את היקום? ראשית, גלי כבידה מסייעים לנו לאמת את נכונותה של תיאוריית היחסות הכללית של איינשטיין. אף על פי

### פרוטון (Proton)

חלקיק טעון חיובית שנמצא בגרעינים של כל האטומים. גודלם של פרוטונים קטן ממיליארדית מעובייה של שערה אנושית.

### אינטרפרומטריה (Interferometry)

שיטת מדידה המשתמשת בקרני לייזר לאיתור תופעות קטנות מאוד, כמו למשל גלי כבידה במקרה שלנו.

<sup>2</sup> לקריאה נוספת לגבי

אינטרפרומטריה והאופן שבו היא משמשת לאיתור גלי כבידה, ראו **כאן וכאן**. לחקירה מעמיקה יותר של גלי גרביטציה, **קראו כאן** ספר מבוא לתחום (באנגלית).

#### איור 4

גלאי LIGO לאיתור גלי כבידה (ליבינגסטון, לואיזיאנה, ארצות הברית). מבט ממעוף הציפור על אחד משני גלאי גלי הגרביטציה שאיתרו את גלי הכבידה הראשונים שנמדדו אי פעם, בשנת 2015. כל גלאי LIGO מורכב משתי זרועות, באורך 4 קילומטרים כל אחת. הזרועות עשויות צינורות ואקום מפלדה, ברוחב של 1.2 מטרים. הן מסודרות בצורת האות האנגלית 'L' ומכוסות על ידי מגן גֶטוֹן ברוחב 3 מטרים ובגובה 3.7 מטרים, אשר מגן על הצינורות מפני הסביבה. LIGO יכול לאתר גלי כבידה שמגיעים מכל כיוון, אפילו מלמטה (קרדיט לתמונה: מעבדת Caltech/MIT/LIGO).



איור 4

שנדמה כי התיאוריה של איינשטיין תִּקְפָּה ומדויקת מאוד, היא אינה התיאוריה היחידה שחֻזָּה גלי כבידה. כדי לְאֶשֶׁר כי התיאוריה של איינשטיין נכונה ויכולה להסביר מהי גרביטציה וכיצד היא פועלת, עָלֵינוּ למדוד את פרטיהם של גלי הכבידה שאנו מְאֶתְרִים.

שנית, גלי כבידה יכולים לסייע לנו ללמוד דברים חדשים לגבי היקום. תוכלו לחשוב על כך כעל עידן אסטרונומי חדש, ממש כמו זה שהאסטרונום המפורסם גִּילְיָאֵל גִּילְיָי פֶּתַח לפני כ-400 שנים, כשבנה טלסקופ והתבונן באמצעותו בשמיים. באפשרותנו להשתמש בגלי כבידה כדי להסתכל על היקום בדרך שונה לחלוטין מזו שדרכה צפינו בו בעבר – זאת באמצעות 'טלסקופ עידוש כבידתי'. חקירת גלי כבידה עשויה לסייע לנו להבין טוב יותר כיצד מתרחשים אירועים אסטרונומיים עוצמתיים מאוד, כמו למשל התנגשויות בין חורים שחורים וכוכבי ניטרונים. מידע זה יכול לְסַפֵּק לנו תובנות לגבי אירועים שהתרחשו בשלבים מוקדמים בהיווצרות היקום, ואף לסייע לנו למצוא תשובות לשאלות מסקרנות לגבי כוכב הלכת שלנו, כמו למשל כיצד יסודות כבדים כמו זהב ופְּלָטִינָה הגיעו לכדור הארץ.<sup>3</sup>

אולם, כיוון שעדיין איננו מתוחכמים ומיומנים בעבודה עם גלי כבידה, אנו בדרך כלל מְשַׁלְבִים את המידע שאנו מקבלים ממדידות גרביטציה עם מידע שכבר יש לנו מטלסקופים. זה מאפשר לנו לבנות תמונה של אירועים קוֹסְמִיִים שהיא הרבה יותר מפורטת ואיכותית מזו שיכולנו להרכיב ללא שימוש בגלי כבידה.

אלה הם זמנים מרגשים מאוד בְּקוֹסְמוֹלוֹגְיָה – תחום מדעי העוסק בחֶקֶר היווצרות היקום, מבנהו וטבעו. בעתיד, כשנשתפר באיתור גלי גרביטציה, אנו מקווים כי יהיה באפשרותנו להבחין בתופעות קוֹסְמוֹלוֹגְיָתִים באמצעות גלי כבידה בלבד. היכולת לְאֶתֶר גלים אלה פותחת עבורנו צֶהַר חדש לניתוח אירועים קוסמולוגיים, שסייע לנו להבין את היקום שלנו טוב יותר.

<sup>3</sup> אנו יודעים כי יסודות כבדים יכולים להיווצר מיסודות קלים יותר על ידי היתוך גרעיני בכוכבים. אולם, כשחקרנו את מחזור החיים של כוכבים, ראינו שהיסוד הכבד ביותר שנוצר באופן זה הוא ברזל (שמספרו האטומי 26). לאחר שהכוכבים נשרפים ומְכֻלִים את כל הברזל שלהם, הם קורסים ואינם ממשכים לייצר יסודות כבדים יותר. לכן, אמור להיות מנגנון אחר שיוצר את היסודות הללו. כיום, ההשערה השכיחה ביותר היא שיסודות כבדים יותר נייטרונים בהתנגשויות בין כוכבי ניטרונים, שניתן לְאֶתֶרן באמצעות גלי כבידה (למידע נוסף קראו **כתבה** זו). אנו מקווים כי בשנים הבאות, בעזרת שימוש בגלאי LIGO ו-VIRGO, ייאספו מספיק נתונים שבאמצעותם ניתן יהיה לְתַקֵּף את ההשערה לעיל בוודאות גבוהה יותר.

## המלצות למוחות צעירים

אחד השיעורים שלמדתי בחיי הוא שחשוב לשים לב לחלומותינו ולנסות להגשים. החלומות שלכם לגבי העתיד מספרים לכם משהו על מה שאתם רוצים בחיים – בין אם זה להיות פיזיקאי או אומן, או פשוט לעשות משהו מהנה, כמו לטייל או לעסוק בתחביב שאתם אוהבים. אינכם צריכים להצליח בכל דבר שחלומותיכם קוראים לכם לעשות, אך החלומות כן מכוונים אתכם לנתיבים שכדאי לכם לפסוע בהם.

שיעור גדול נוסף שלמדתי הוא כי כל מה שאני עושה בחיים מונע על ידי מילה אחת: סקרנות. אנשים צעירים הם סקרנים מאוד באופן טבעי. עליכם לנצח את הסקרנות הזו ולא לאפשר לשום דבר לעמם אותה – לא למורכם, לא להורכם, ולא לאף אחד אחר. עצתי אליכם היא ללכת אחרי סקרנותכם, ליהנות, להגשים את החלומות שלכם ולהתעלם מכל דבר בדרך שעשוי להגביל את התלהבותכם.

עבור אלה מכם שמתעניינים במדע, מדע יכול להיות כיף גדול. אין דבר טוב יותר בחיים מלעשות משהו טוב, ליהנות מהתהליך ואגב כך להתפרנס. אם כן, עבורי מדע הוא מקצוע מצוין. אך חשוב שתזכרו כי כישלון הוא חלק מהמדע, תקבלו את העובדה שלא כל דבר שתעשו יצליח, ותבינו שכישלון יכול להיות דבר חיובי. בפרט, כשאתם ניצבים בחזית המדע, ועושים משהו שלא נעשה מעולם לפני כן – זה לעיתים מתסכל. בכל יום תעמדו בפני סיטואציה שבה לא תדעו באמת אם תתקדמו או אולי אפילו תגלו תגלית חדשה, או אם תבצעו משהו שכלל לא יעבוד. עבור אנשים כמוני, חוסר ידיעה זה תורם להנאה הנלווית לעיסוק במדע!

## תודות

ברצוני להודות לנועה שגב על עריכת הריאיון שהיווה בסיס למאמר זה, ועל כתיבה משותפת של המאמר. תודה לשרון עמלני עבור איורים 1, 2, ו-3.

## מקורות

1. Newton, I. 1687. "Principia," in *The Principia: The Authoritative Translation and Guide*, eds I. B. Cohen, and A. Whitman (University of California Press). doi: 10.1525/9780520964815
2. Einstein, A. 1915. Erklärung der Perihelionbewegung der merkur aus der allgemeinen relativitätstheorie. *Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss.* 47:831–9.
3. Einstein, A., and Rosen, N. 1937. On gravitational waves. *J. Frank. Inst.* 223:43–54. doi: 10.1016/S0016-0032(37)90583-0
4. Barish, B. C., and Weiss, R. 1999. LIGO and the detection of gravitational waves. *Phys. Today* 52:44–50. doi: 10.1063/1.882861
5. Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., Abernathy, M. R., Acernese, F., Ackley, K., et al. 2016. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. *Phys. Rev. Lett.* 116:061102. doi: 10.1103/PhysRevLett.116.061102

6. Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., Abernathy, M. R., Acernese, F., Ackley, K., et al. 2017. GW170817: Observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral. *Phys. Rev. Lett.* 119:161101. doi: 10.1103/PhysRevLett.119.161101
7. Abbott, R., Abbott, T. D., Abraham, S., Acernese, F., Ackley, K., Adams, A., et al. 2021. Observation of gravitational waves from two neutron star–black hole coalescences. *Astrophys. J. Lett.* 915:L5. doi: 10.3847/2041-8213/ac082e

פורסם אונליין: 23 בדצמבר 2022

נערך על ידי: Joey Shapiro Key

מנחה מדעי: Jian Zhang

ציטוט: Barish B (2022) גלי כבידה – הטלסקופ החדש של היקום. *Front. Young Minds.* doi: 10.3389/frym.2022.858203-he

תורגם והתאם מ: Barish B (2022) Gravitational Waves—A New Window on the Universe. *Front. Young Minds* 10:858203. doi: 10.3389/frym.2022.858203

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

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

## סוקרת צעירה

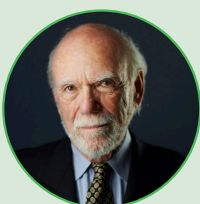
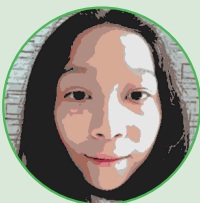
**Jiarui, גיל: 13**

שמי Jiarui ואני תלמידת כיתה ז בחטיבת ביניים. זכיתי בפרסים לאומיים בתחרויות נאומים באנגלית, ובפרסים מטעם המדינה בתחום תכנות. אני אוהבת לנגן בפסנתר, וקיבלתי תעודת הצטיינות במבחן ABRSM (מטעם הוועד המנהל של מוסדות הלימוד המלכותיים למוזיקה בבריטניה), לרמת כיתה ח. אני מגלה עניין רב בפיזיקה, נהנית לבשל ולאפות, ואוהבת כלבים – יש לי שני כלבי פּוֹדֵל.

## הכותב

**BARRY BARISH**

בָּרִישׁ בָּרִישׁ הוא פרופסור לפיזיקה במעבדת LIGO במכון הטכנולוגי של קליפורניה (Caltech), ארצות הברית. למד לתואר ראשון בפיזיקה ולדוקטורט בפיזיקה באוניברסיטת קליפורניה, בֶּרְקֵלִי, וקיבל את הדוקטורט שלו בשנת 1962. שנה לאחר מכן הגיע ל-Caltech, שם עסק בתחום של פיזיקת חלקיקים. במשך 30 השנים הבאות, פרופסור בריש עבד בכמה מאיצי חלקיקים, לרבות במאיץ SLAC באוניברסיטת





קטגוריה, קליפורניה, ובמאיץ CESR באוניברסיטת קורנל, ניו יורק. בשנת 1994, הצטרף לפרויקט LIGO [ראשי תיבות של Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory – מצפה גלי כבידה באינטרפרומטר (מד-התאבכות) לייזר] ב-Caltech, אשר עוסק באיתור גלי כבידה. פרופסור בריש זכה במגוון פרסים אקדמיים נכבדים בהם פרס לזכרו של קלופסטג (2002); פרס אגריקו פרמי (2016); מדליית הנרי דרייפר (2017) ופרס נובל לפיזיקה (2017). כיום, פרופסור בריש עוסק בפיתוח שיפורים נוספים לנלאי LIGO ו-VIRGO, לקראת רזולוציות גילוי גבוהות יותר של גלי כבידה. הוא נשוי לסמואן, ולהם שני ילדים, סטפני וקנת', ושלושה נכדים, מילו, ת'אה ואריאל. \*[barish@caltech.edu](mailto:barish@caltech.edu)

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