



תפיסת גלי גרביטציה באמצעות רשת פולֶסְרִים בגודל של גלקסיה

Stephen R. Taylor*

קבוצת TAPIR (Theoretical AstroPhysics Including Relativity & Cosmology), המכון הטכנולוגי של קליפורניה, פסדינה, קליפורניה, ארצות הברית

סוקרים צעירים

**DUARTE
HIGH
SCHOOL**
גיל: 15-18



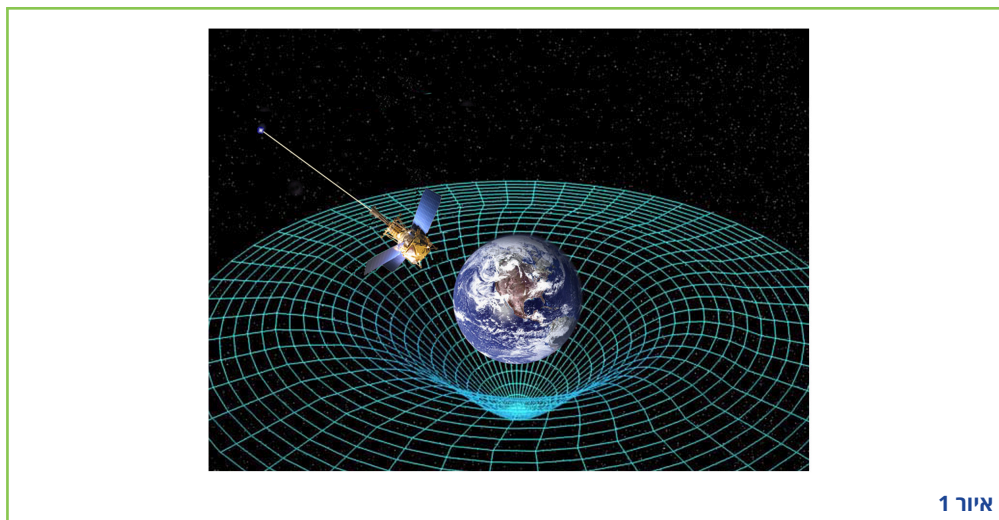
**LA CANADA
HIGH
SCHOOL**
גיל: 16-18



עד לא מזמן, הדרך היחידה לצפות ביקום הייתה באמצעות אור שנקלט על-ידי טלסקופים. אולם כעת אנו מסוגלים למדוד גלי גרביטציה, שהם אדוות במארג היקום שנחזו על-ידי אלברט איינשטיין. אם שני אובייקטים דחוסים מאוד (כמו חורים שחורים) חגים קרוב זה לזה, הם מעקמים את המרחב ושולחים החוצה גלי גרביטציה. עבור חורים שחורים שקרובים במסה שלהם למסת השמש, מדענים משתמשים בגלאי LIGO על כדור הארץ. אולם עבור החורים השחורים הגדולים ביותר ביקום (מאסיביים פי מיליארדים מהשמש), מדענים מנטרים רשת של כוכבי נויטרונים שמסתובבים במהרה (הנקראים פולסרים) לאורך שביל החלב. כל גל גרביטציה שעובר לידם יְשַׁנֶּה את כמות הזמן שייקח לגלי רדיו מהפולסרים האלה להגיע לכדור הארץ. קבוצת ה- NANOGrav Collaboration ניטרה 34 מהפולסרים האלה במהלך 11 שנים, בניסיון לאתר גלי גרביטציה מחורים שחורים ענקיים.

איור 1

כדור הארץ יוצר שקע במרחב החלל, כמו גם כל האובייקטים האחרים. ככל שאובייקטים מאסיביים יותר כך השקע גדול יותר. זה מה שגורם למשיכה של הגרביטציה ומאפשר לאובייקטים אחרים (כמו למשל לזוויינים) לבצע מסלולי הקפה. קרדיט לתמונה: NASA, https://www.nasa.gov/mission_pages/gpb/mission_pages/gpb_012.html



איור 1

הקדמה

ייתכן ששמעתם את הביטוי "מה שעולה חייב לרדת", אולם מדוע זה כך? הסיבה היא שכל הדברים (אתם, אני, טילים, טיפות גשם) נמשכים אל כדור הארץ על-ידי גרביטציה. חוזק המשיכה הזו גדול יותר לאובייקטים כבדים יותר ונעשה חלש עבור אובייקטים רחוקים. טילים מסוגלים לברוח ממשיכת הגרביטציה של כדור הארץ רק באמצעות שריפת כמויות אדירות של דלק כדי ליצור את כוח הדחף שיהיה חזק יותר מכוח המשיכה של כדור הארץ.

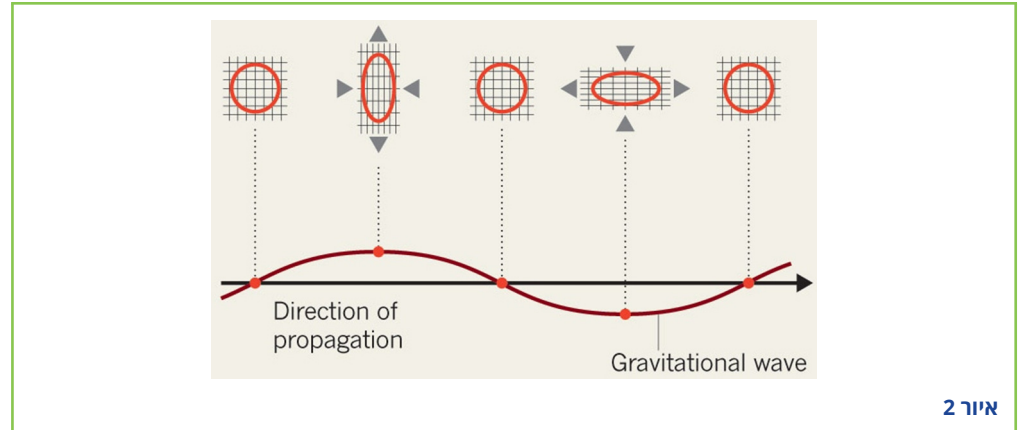
מה שמדהים זה שגרביטציה אינה ייחודית לכדור הארץ; כל האובייקטים ביקום מרגישים את אותו סוג של כוח גרביטציה, אשר מחזיק יחד כוכבים, מערכות שמש וגלקסיות. אפילו לפני 100 שנה אסטרונומים כבר ידעו כיצד לחזות היכן אובייקטים במערכת השמש יראו בשמי הלילה. אולם הם לא ידעו בדיוק מהי גרביטציה. זה התגלה כשלאלברט איינשטיין היה רעיון גדול מאוד: מה שאנו קוראים לו גרביטציה אינו למעשה "כוח משיכה" כמו במשיכת חבל. בתיאוריה של איינשטיין, החלל הוא יותר כמו משיכה נמתחת מאשר שולחן קשיח; כל אובייקט יוצר שקע בשמיכה הזו, אולם אובייקטים גדולים יותר יוצרים שקעים גדולים יותר. לכן, כוכב כמו השמש יוצר שקע גדול, וכדור הארץ יוצר שקע הרבה יותר קטן (ראו איור 1). כדור הארץ נע מספיק לאט כך שהוא נופל פנימה לעבר השקע של השמש, אולם גם מספיק מהר כדי שלא יפול פנימה בבת אחת: התנועה הזו נקראת באסטרונומיה מסלול (orbit).

גלי גרביטציה

מאחר שהמרחב הוא יותר כמו שמיכה מאשר שולחן קשיח, הוא יכול להתכווץ ולהימתח וליצור גלים. אתם יכולים לחשוב על עמידה במעגל עם קבוצת חברים, שכל אחד תופס חלק משמיכה עגולה. אם חברים בצד הנגדי של השמיכה ינעו את החלק שלהם למעלה ולמטה, אז החלק שלכם גם יזוז. אף על פי שנדמה שחלק השמיכה שלכם נע באותו הזמן כמו החלק של חברים, לקח מעט זמן עד שהגל הגיע אליכם. אותו הדבר קורה במרחב, פרט לכך שהמרחב יחסית קשיח בכל זאת, אז נדרשים אובייקטים עצומים כדי ליצור גל גדול. אם ישנם

איור 2

גלי גרביטציה מתקדמים במהירות האור. הם מותחים ומכווצים את מארג המרחב במישור ניצב לכיוון התקדמות הגל. קרדיט לתמונה: Markus Pössel/Einstein-online.info



איור 2

גל גרביטציה (Gravitational wave)

אדווה במרחב ובזמן שנגרמת על-ידי תאוצתו של אובייקט מאסיבי.

LIGO

ראשי תיבות של Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory. זוג גלאי גלי הגרביטציה הגדול הזה ממוקם ב-Hanford, וושינגטון, וב-Livingston, לואיזיאנה. הגלאים איתרו לראשונה גלי גרביטציה בשנת 2015.

Virgo

גלאי גרביטציה דומה ל-LIGO, אשר ממוקם באיטליה.

כוכב נויטרונים (Neutron star)

אובייקט דחוס מאוד שנוצר כאשר לכוכב רגיל נגמר הדלק והוא קורס לתוך עצמו כתוצאה מכוח הגרביטציה. הקריסה נבלמת על-ידי לחץ של נויטרונים שמתנגדים לגרביטציה.

חור שחור (Black hole)

כשכוכב לא יכול למנוע קריסה מוחלטת שנגרמת על-ידי גרביטציה, נוצר חור שחור. זו נקודה של צפיפות אינסופית. אפילו אור לא יכול לברוח מחור שחור.

שני אובייקטים שנעים אחד מסביב לשני במסלול, הם יכולים לנענע את המרחב מספיק כדי ליצור גלים. הגלים האלה נקראים **גלי גרביטציה**, והם נעים במהירות האור.

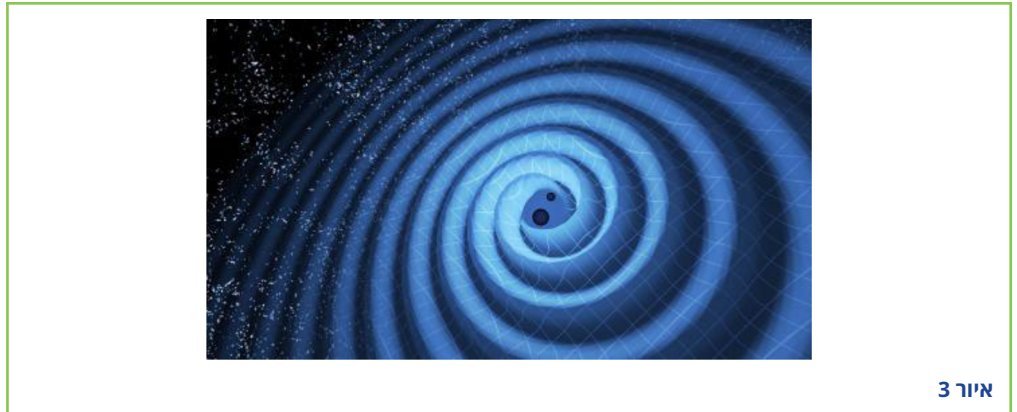
בזמן שגל גרביטציה מתקדם הוא מותח את המרחב ומכווץ אותו. אולם המתיחה והכיווץ האלה לא מתרחשים באותו הכיוון שבו הגל מתקדם. במקום זאת, המתיחה והכיווץ מתרחשים בניצב לכיוון שבו גל הגרביטציה מתקדם (ראו איור 2). מדענים השתמשו לאחרונה בציוד מיוחד כדי לבנות ניסויים גדולים שרגישים מספיק למדוד את המתיחה והכיווץ האלה, כמו למשל **LIGO** [1] ו-**Virgo** [2]. אולם, כפי שצוין לעיל, המרחב הוא קשיח ולכן אנו עדיין יכולים למדוד גדלים מסוגים מיוחדים מאוד של אובייקטים אסטרונומיים שהם קרובים מאוד זה לזה. האובייקטים האלה נקראים **כוכבי נויטרונים וחורים שחורים**.

כוכבי נויטרונים וחורים שחורים

בדומה לטילים, כוכבים צריכים לשרוף כמויות אדירות של דלק כדי ליצור כוח דחף קדימה שיעצור את קריסת הכוכב על-ידי הגרביטציה. כאשר לכוכב נגמר הדלק הוא מתחיל לקרוס פנימה, אולם הוא יכול להציל את עצמו מקריסה מוחלטת פעמיים לאורך הדרך. הפעם הראשונה היא כשטומים בתוך הכוכב לא יכולים להידחס קרוב יותר זה לזה. זה שומר על הכוכב למעט זמן, אולם אם הכוכב מספיק גדול אפילו הגרביטציה חזקה כל כך עד שהיא דוחסת את כל האטומים יחד. הסיכוי האחרון לכוכב הזה להימנע מקריסה על-ידי הגרביטציה הוא כשאבני הבניין הזעירות של האטום, שידועות כנויטרונים, עוצרות את עצמן מהידחסות זו אל זו. זה יוצר מה שנקרא כוכב נויטרונים. החומר בכוכב נויטרונים עטוף חזק כל כך יחד כך שכפית ממנו הייתה שוקלת כמו גורד שחקים! לבסוף, אם יש לנו כוכב ענק מאוד אז אפילו עמידותם של הנויטרונים שנדחסים לא תוכל לעצור קריסה מוחלטת. קריסה מוחלטת של כוכב יוצרת **חור שחור**. חורים שחורים לא מורכבים מחומר; הם מורכבים מהגרביטציה עצמה, ויוצרים שקע במארג החלל שהוא עמוק כל כך שאפילו אור לא יכול לברוח מהמשיכה שלו; זו הסיבה לכך שהם נקראים חורים "שחורים".

איור 3

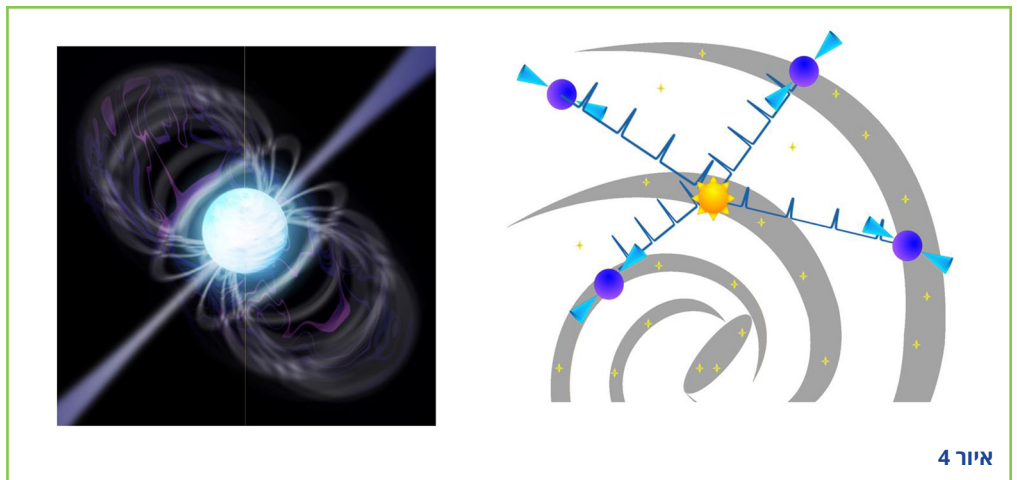
שני חורים שחורים שחגים זה סביב זה יגרמו לאדוות במרחב, שנקראות גלי גרביטציה. הגלים האלה ישאו אנרגיה הרחק ממסלולם של החורים השחורים, ובסופו של דבר זה יגרום לאיחודם של שני החורים השחורים. קרדיט לתמונה: LIGO/T. Pyle
<https://www.ligo.caltech.edu/image/ligo20160615f>



איור 3

איור 4

פולסרים (משמאל) הם סוג מיוחד מאוד של כוכבי נויטרונים שמסתובבים סביב במהירות של מאות פעמים בשנייה. הם שולחים באופן קבוע אלומות רדיו שאפשר למדוד על כדור הארץ בדיוק רב מאוד. באמצעות צפייה בפולסרים רבים ברחבי גלקסיית שביל החלב (מימין), אנו יכולים לחפש שינויים משותפים בזמני ההגעה של גלי רדיו מפולסרים שונים. השינויים האלה יכולים להיגרם על-ידי גלי גרביטציה שעוברים דרך שביל החלב. האיור מימין מראה המחשה קריקטורית של ארבעה פולסרים בשביל החלב שלנו (אזורים אפורים עם כוכבים צהובים) שמשדרים גלי רדיו לכיוון מערכת השמש שלנו. קרדיט לתמונה: Tonia Klein/Jeffrey Hazboun/The NANOGrav Physics Frontier Cente



איור 4

מדידת החורים השחורים המאסיביים ביותר ביקום

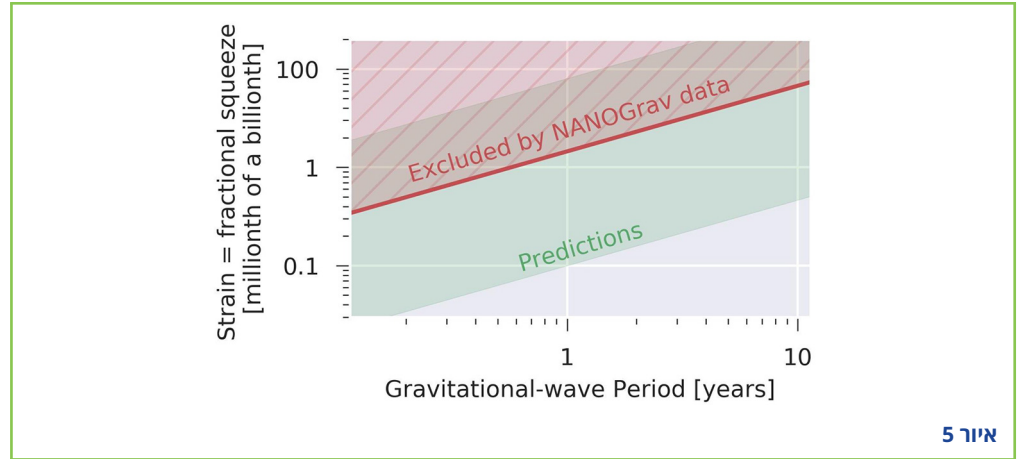
לעיתים חורים שחורים יכולים לחבור זה לזה ולהקיף אחד את השני (ראו איור 3). כששני חורים שחורים מתקרבים מאוד במסלולם, הם יכולים לפלוט גלי גרביטציה. קבוצה של מדענים שנקראת **NANOGrav** (ראשי תיבות של North American Nanohertz Observatory for Gravitational waves) [3] צדה גלי גרביטציה שנפלטים על-ידי זוגות של החורים השחורים המאסיביים ביותר ביקום. החורים השחורים האלה יכולים להיות מאסיביים כמו מיליארד שמשות, והם נמצאים רק במרכזיהן של גלקסיות ענקיות. במהלך ההיסטוריה של היקום, גלקסיות התנגשו זו עם זו ויצרו גלקסיות אפילו גדולות יותר. בהתנגשויות האלה, חורים שחורים ממרכזי הגלקסיות התמזגו ושלחו החוצה גלי גרביטציה שהם בעלי תדירות (הזמן שבין כל שני שיאים של הגל) של שנים עד עשרות שנים. מאחר שחורים שחורים לא פולטים אור כלל, הדרך היחידה לאתר אותם היא באמצעות גלי גרביטציה. מדידת גלי גרביטציה היא דרך חדשה באופן רדיקלי לצפות ביקום, והמדידות האלה מספרות לנו עוד על טבעה של הגרביטציה.

PULSAR TIMING ARRAYS

קבוצת NANOGrav מחפשת גלי גרביטציה באמצעות משהו שנקרא pulsar-timing array (PTA) [4]. פולסר הוא סוג מיוחד של כוכב נויטרונים שמסתובב במהרה (במהירות של מאות פעמים בשנייה) ויורה החוצה אלומות של גלי רדיו (ראו איור 4 משמאל). בכל פעם שפולסר

איור 5

NANOGrav שמה גבולות לגודלו של הכיוון היחסי שנגרם על-ידי גלי גרביטציה. כל דבר באזור האדום נשלט על-ידי הניתוח שלנו של נתוני pulsar-timing data מ-11 השנים האחרונות. האזור הירוק מראה אזור של תחזיות גלי גרביטציה שבוצעו על-ידי מדענים אחרים.



איור 5

PTA

ראשי תיבות של Pulsar Timing Array. פולסרים הם סוג מיוחד של כוכבי נייטרונים מסתובבים ששולחים החוצה אלומות של גלי רדיו. כאשר גלי גרביטציה נכנסים לגלקסיה שלנו הם גורמים לשינויים בהגעה של אלומות גלי רדיו מפולסרים. אנו מסתכלים על פולסרים רבים במטרה לוודא שהשינויים האלה נגרמים על-ידי גלי גרביטציה ולא על-ידי רעש.

מסתובב הוא יורה את אלומת גלי הרדיו לעבר כדור הארץ, שאותה אנו מודדים כ"פולס" רדיו. זה כמו מגדלור, שתמיד מאיר בלילה, אולם אנו רואים את האור שלו רק כשהוא מסתובב ופונה אלינו. פולסרים הם אמינים מאוד; אנו יכולים לצפות בדיוק מתי גלי הרדיו יגיעו לכדור הארץ. משמעות הדבר היא שאנו יכולים להשתמש בפולסרים כמו בסטופר, שבאמצעותו אנו מסמנים את מעבר הזמן על-ידי מספר פולסי הרדיו שקלטנו מפולסר מסוים. פולסרים הם סטופרים מעולים ונשארים אמינים לאורך שנים רבות.

אם גל גרביטציה חוצה את המרחב שבין כדור הארץ ופולסר, הוא ימתח את המרחב ויכווץ אותו. אם החלל נמתח, ייקח זמן רב יותר מהמצופה עד שאלומת הרדיו תגיע אלינו; הפולס יגיע באיחור! ההיפך נכון אם החלל מתכווץ, מאחר שפולס הרדיו יגיע מוקדם יותר מהמצופה. אנו יכולים לחסר בין התחזיות שלנו של מתי פולס הרדיו אמור להגיע לבין התצפיות האמיתיות שלנו, ולהסתכל על ההפרש. ההפרש הזה יכול להיות תוצאה של גלי גרביטציה! NANOGrav (וקבוצות אחרות באירופה, באוסטרליה, בהודו, בדרום אפריקה ובסין) השתמשו בטלסקופים של גלי רדיו כדי לצפות בפולסרים רבים וליצור "רשת" גדולה שיכולה לתפוס גלי גרביטציה.

התגלית החדשה של NANOGrav

בציד האחרון של NANOGrav [5], יצרנו רשת של 34 פולסרים כאלה שנצפו על-ידי אסטרונומים במשך 11 השנים האחרונות. לא מצאנו גלי גרביטציה, אולם אנו גם יודעים שלאותות שלנו לוקח זמן רב לבלוט מעבר לכל הרעש והדברים המוזרים שיכולים להשפיע על פולסרים. אף על פי שלא איתרנו כלום עדיין, אנו חושבים שייקח רק עוד 3 שנים, או לכל היותר 7 שנים, לפני שכן נאתר אותם [6]. אומנם עוד לא ראינו גלי גרביטציה, אולם המחסור הזה בגלים אֶפְשָׁר לנו להפריך את התחזיות שבוצעו על-ידי מדענים אחרים שחשבו שנראה משהו עד עכשיו. הנתונים שלנו יסייעו למדענים האלה לבחון מחדש את התחזיות שלהם ולעדכן אותן. התוצאות שקיבלנו גם יסייעו לנו להבין באיזו תדירות חורים שחורים מאסיביים מתמזגים יחד ביקום. מצאנו גם שגלי גרביטציה עם זמני מחזור של שנה אחת גורמים למתיחות ולכיווצים זעירים מאוד במרחב – קטנים כל כך שהשינוי שהם גורמים לגודל של כדור הארץ הוא רק פי 10 מרוחבו של גדיל דנ"א אנושי (ראו איור 5)!

העתיד

אנו מצפים שעתידה של אסטרונומיית גלי גרביטציה יהיה מרגש מאוד, ויאפשר לנו להציץ לתוך חלקים ביקום שטלסקופים אחרים לא יכולים לראות. איתורם של גלי גרביטציה על-ידי pulsar-timing arrays בעתיד הקרוב יהיה תגלית ענקית. ב-NANOGrav אנו בודקים סוגים אחרים של גלי גרביטציה שרשת הפולסרים האלה תדווח עליהם בשנה הקרובה. אנו מחפשים כל הזמן פולסרים חדשים כדי למלא את החורים ברשת שלנו, כך שנוכל למצוא גלי גרביטציה בצורה טובה יותר. התוצאות שלנו עד כה הן מרתקות, ואנו מתכוננים ליום הקרוב שבו נוכל לומר לעולם שראינו גלי גרביטציה מהחורים השחורים הכי מאסיביים ביקום כולו!

מימון

ST ממומן על-ידי NANOGrav Physics Frontier Center, אשר נתמך על-ידי מענק מספר NSF 1430284. ה-Green Bank Observatory הוא מתקן בקרן המדע הלאומית שמופעל תחת הסכם קואופרטיבי על-ידי האוניברסיטאות המקושרות בע"מ. ה-The Arecibo Observatory הוא מתקן של קרן המדע הלאומית שמופעל בהסכם קואופרטיבי על-ידי אוניברסיטת מרכז פלורידה בשיתוף עם Yang Enterprises, Inc. ועם אוניברסיטת מטרופוליטנה.

מאמר המקור

Arzoumanian, Z., Baker, P. T., Brazier, A., Burke-Spolaor, S., Chamberlin, S. J., Chatterjee, S., et al., The NANOGrav Collaboration. 2018. The NANOGrav 11 year data set: pulsar-timing constraints on the stochastic gravitational-wave background. *Astrophys. J.* 859:47. doi: 10.3847/1538-4357/aabd3b

מקורות

1. *LIGO*. Available online at: <https://www.ligo.caltech.edu/page/what-is-ligo>
2. *Virgo*. Available online at: <http://public.virgo-gw.eu/virgo-in-a-nutshell>
3. *NANOGrav Website*. Available online at: <http://nanograv.org>
4. Lommen, A. N. 2015. Pulsar timing arrays: the promise of gravitational wave detection. *Rep. Prog. Phys.* 78:124901. doi: 10.1088/0034-4885/78/12/124901
5. Arzoumanian, Z., Baker, P. T., Brazier, A., Burke-Spolaor, S., Chamberlin, S. J., Chatterjee, S., et al., The NANOGrav Collaboration. 2018. The NANOGrav 11 year data set: pulsar-timing constraints on the stochastic gravitational-wave background. *Astrophys. J.* 859:47. doi: 10.3847/1538-4357/aabd3b
6. Taylor, S. R., Vallisneri, M., Ellis, J. A., Mingarelli, C. M. F., Lazio, T. J. W., and van Haasteren, R. 2016. Are we there yet? Time to detection of nanohertz gravitational waves based on pulsar-timing array limits. *Astrophys. J. Lett.* 819:L6. doi: 10.3847/2041-8205/819/1/L6

פורסם אונליין: 28 בינואר 2021

Joey Shapiro Key, University of Washington Bothell, United States **נערך על ידי:**

ציטוט: Taylor SR (2021) תפיסת גלי גרביטציה באמצעות רשת פולסרים בגודל של גלקסיה.
Front. Young Minds. doi: 10.3389/frym.2019.00080-he

תורגם והותאם:

Taylor SR (2019) Catching Gravitational Waves With a Galaxy-Sized Net of Pulsars.
Front. Young Minds 7:80. doi: 10.3389/frym.2019.00080

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

COPYRIGHT © 2019 © 2020 Taylor. 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 למחברים (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

18-15, DUARTE HIGH SCHOOL

אנו תלמידי פיזיקה בכיתות 2 ו-3 של Mr. Traeger בתיכון Duarte שב-Duarte, קליפורניה. אנו מתעניינים בקידום המדע באמצעות תהליך הסקירה המדעית.

18-16, LA CANADA HIGH SCHOOL

אנו תלמידי AP Physics בכיתת 5 של Ms. Walsh בתיכון La Canada ב-La Canada, קליפורניה. אנו מתעניינים ללמוד עוד על התהליך המדעי דרך תהליך הסקירה המדעית.

הכותב

STEPHEN R. TAYLOR

כיום אני פוסט-דוקטורנט במכון הטכנולוגי של קליפורניה (Caltech), מדען מבקר במעבדת NASA's Jet Propulsion, ומסתיו 2019 אהיה פרופסור באוניברסיטת Vanderbilt. אני אסטרופיזיקאי שחוקר מה אנו יכולים ללמוד על היקום באמצעות איתור גלי גרביטציה. הגלים האלה מגיעים מחורים שחורים ומכוכבי נוירונים שמתנגשים זה בזה ברחבי היקום, ומספקים מידע שונה ממה שאנו מודדים באמצעות טלסקופים. בזמני הפנוי אני אוהב לקרוא, לטפס, לראות סרטים ולבלות זמן עם המשפחה שלי. *srtaylor@caltech.edu



Hebrew version provided by

מזיאון המדע ע"ש בלומפילד ירושלים (נ.ר.)
متحف العلوم على اسم بلومفيلد القدس
Bloomfield Science Museum Jerusalem

