

# הגל הגרביטציוני GW190425

## מערכת זוג כוכבי הניוטרונים הכבדה ביותר שאי פעם נצפתה?

תאריך: 6 בינואר 2020.

סיכום בפורמט PDF באנגלית ובשפות נוספות: <https://www.ligo.org/science/Publication-GW190425/>

### מה מצאנו?

מערך שיתוף הפעולה המדעי של ליג"ו (LIGO) ווירג"ו (VIRGO) מדווחים שב-25 באפריל 2019 זוהו גלים גרביטציוניים מהתמזגות שני גופים קומפקטיים. הסיגנל סומן כ-GW190425. ליג"ו כולל שני גלאי גלים גרביטציוניים, האחד ב**הנפורד**, **ווינגטון** והשני ב**ליבינגסטון, לואיזיאנה**. בזמן GW190425 גלאי ליג"ו-הנפורד היה זמנית בלתי-פעיל, אך הסיגנל החזק נמדד בליג"ו-ליבינגסטון. **הגלאי של וירג"ו**, הממוקם בקאשינה, איטליה היה פעיל, אבל בשל הבדל הרגישויות בין הגלאים של ליג"ו-ליבינגסטון ווירג"ו, הסיגנל היה מעל סף הרגישות רק בלגו-ליבינגסטון. אעפ"כ, הדאטא מוירג"ו סייע בניתוח הפרמטרים של מקור הסיגנל GW190425. מצאנו שהמסה הכוללת של הזוג הייתה בין 3.3 ל-3.7 פעמים מסת השמש. בהינתן טווח המסות הזה, ההסבר הסביר ביותר למקור הגל הוא התנגשות של שני **כוכבי ניוטרונים**, במרחק של כ-520 מיליון שנות אור מאתנו. מסת הזוג גדולה משמעותית משל כל זוג ידוע אחר של כוכבי ניוטרונים.

### מעט רקע



תמונה 1: איור אמנותי של התמזגות שני כוכבי ניוטרונים, GW190425. קרדיט: National Science Foundation/LIGO/Sonoma State University/A. Simonnet

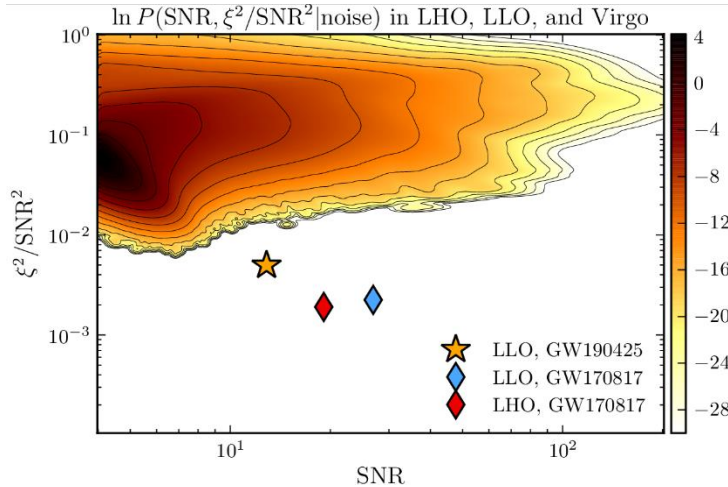
GW190425 התגלה במהלך הרצת התצפית השלישית (O3) של הדור המתקדם של ליג"ו ווירג"ו, שהחלה ב-1 באפריל 2019 ותסתיים ב-30 באפריל 2020. לפני ההרצה הזו היו שתי הרצות תצפית עם הגלאים המתקדמים, O1 (ספטמבר 2015-ינואר 2016) ו-O2 (נובמבר 2016-אוגוסט 2017), פרטים נוספים זמינים **כאן**. בין הרצות תצפית הגלאים משודרים בטכנולוגיות חדשות להגברת הרגישות.

במהלך הרצת O2, ליג"ו ווירג"ו צפו לראשונה בגלים גרביטציוניים מסיבוב-צלילה של שני כוכבי ניוטרונים, **GW170817**. הסיגנל הגרביטציוני לווה בהתנגשות ש**נצפתה לרוחב הספקטרום האלקטרומגנטי**. GW190425 היא כנראה התצפית השנייה של התמזגות כוכבי ניוטרונים באמצעות גלים גרביטציוניים. עד היום לא זוהה אות אלקטרומגנטי ולא נקלטו ניוטרינים

המקושרים ל-GW190425. זה לא מפתיע, כיוון שהמקור רחוק בהרבה לעומת GW170817, וכל סיגנל קשור היה מגיע חלש בהרבה. גורם נוסף הוא הקושי לאפיין באופן מדויק את המיקום בשמים ממנו הגיע הסיגנל GW190425, אשר הצלחנו למקם בתחום המכסה כ-16% מכלל שטח השמים – שטח עצום עבור כיוונו בטלסקופים מסורתיים.

## איך אנחנו יודעים ש-GW190425 הגיע ממקור אסטרופיסיקלי

יש כמה אלגוריתמי חיפוש אחר אותות גלים גרביטציוניים מהתמזגות של גופים קומפקטיים. הם משווים בין הנתונים הנאספים בגלאים לבין המבנה החזוי לאותות לפי [תורת היחסות הכללית](#) בטכניקה בשם [סינון מתואם](#). חיפוש שכזה איתר את הסיגל GW190425 בנתונים מליג"ו-ליבינגסטון.



תמונה 2: מדדי האות-לרעש (SNR) וממד התאמת הסיגל להתפתחות בזמן, עבור רקע סטטיסטי של 169.5 ימים מ-01 ו-02 ו-50 ימים מ-03. האותות של GW190425 (כוכב) ו-GW170817 (מעויינים) בולטים

השלב השני הוא הערכת המשמעות והחשיבות של הסיגל, כלומר השוואה לקצב בו ניתן היה להיתקל באות דומה באופן אקראי בתוך הרעשים האופייניים לגלאי. ערך זה מוכר כ"קצב/שיעור אזעקות השווא". על מנת להעריך זאת, עלינו להשוות את העוצמה של GW190425 ביחס להתפלגות הרקע. יצרנו רקע לניתוח הסטטיסטי באמצעות חזרה על החיפוש על 169.5 ימי נתונים מהרצות O1 ו-02 ו-50 ימים מ-03, אשר נדגמו בנפרד מליג"ו-ליבינגסטון, ליג"ו-הנפורד, ווירג'ו. מצאנו שקצב אזעקות השווא של GW190425 הוא אחת ל-69,000 שנים. תמונה 2 מראה שב-219.5 ימים המצטברים של נתוני רקע, GW190425 בולט באופן מובהק מתוך הרקע, לצד הזיהוי המאומת השני של התנגשות כוכבי ניוטרונים, GW170817.

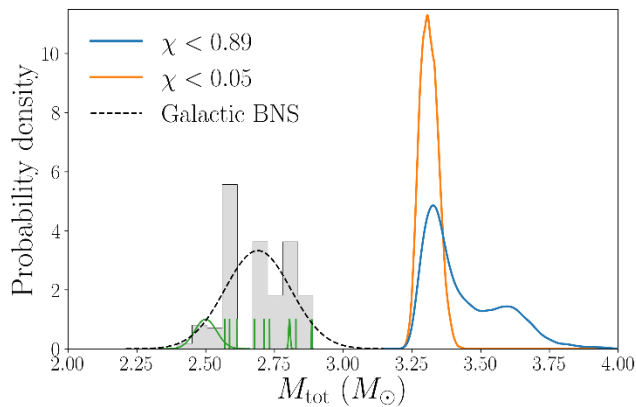
בנוסף לחיפוש, GW190425 עבר את פרוצדורות הניתוח הסטנדרטיות [כמו לאירועים הקודמים](#). בדיקות אלה כוללות בירור האם היו רעשים חולפים חריגים בליג"ו-ליבינגסטון שיכולים היו לייצר את האות של GW190425. לא מצאנו אף הפרעה סביבתית או מכשירית שכזו.

## מדוע GW190425 כ"כ מעניין?

מצאנו שמבין שני הגופים הקומפקטיים, המסה של הגוף הכבד הייתה בין 1.61 ל-2.52 פעמים מסת השמש, ושמסת הגוף השני הייתה בין 1.12 ל-1.68 פעמים מסת השמש. המסות האלה קונסיסטנטיות עם מסות שנמדדו עבור כוכבי ניוטרונים אחרים, כמו גם עם הציפיות שלנו מסימולציות של פיצוץ [סופרנובה](#). לכוכב הניוטרונים הכבד ביותר המוכר מתצפיות אלקטרומגנטיות, [PSR J0740+6620](#), נמדדה מסה של 2.05-2.24 פעמים מסת השמש. עבור GW190425 אי אפשר לשלול את האפשרות שאחד או שני המרכיבים היו חורים שחורים, אולם הפרשנות הישירה ביותר היא ששניהם היו כוכבי ניוטרונים. אם אכן כך היה, מה ניתן להסיק לגבי GW190524?

במובנים מסוימים, GW190425 לא דומה לזוגות אחרים של כוכבי ניוטרונים בגלקסיה שלנו. בעוד שהמסה של כל אחד מכוכבי הניוטרונים דומה לכוכבי ניוטרונים מוכרים, המסה הכוללת של הזוג מאד שונה. תמונה 3 מראה את סה"כ המסה עבור עשרה זוגות כוכבי ניוטרונים (בגלקסיה שלנו) אשר צפויים להשלים את התמזגותם במהלך זמן חייו של היקום. לעשר המערכות הותאמה [התפלגות נורמלית](#). הממוצע למסת זוג בגלקסיה שלנו הוא 2.69 מסות שמש, בעוד שמסת הזוג

GW190425 היא כ-3.4 מסות שמש – כלומר, 5 [סטיות תקן](#) מעל הממוצע הגלקטי. יש בכך לרמז שהזוג GW190425 נוצר האופן שונה מהזוגות המוכרים בגלקסיה שלנו.



תמונה 3: התפלגות שערורך המסה הכוללת של הזוג GW190425 לפי הנחות שונות על הספינים של המרכיבים (כחול וכתום); בירוק, המסה הכוללת של זוגות כוכבי נייטרונים בגלקסיה שלנו, הצפויים להתמזג העקומה המקווקו היא התאמת התפלגות נורמלית לזוגות הגלקטיים.

המערכת של GW190425 התפתחה באופן מבודד, המשמעות עשויה להיות שכוכבי הנייטרונים האלה נולדו מכוכבים [במתכניות](#) נמוכה, או שכאשר כוכב הנייטרונים הראשון בזוג נוצר בסופרנובה, מסה מהכוכב השני (שטרם התפוצץ והפך לכוכב נייטרונים) עברה לראשון והפכה אותו לכבד יותר.

בכל מקרה, הגילוי של GW190425 עשוי לסמן את קיומה של אוכלוסיית כוכבי נייטרונים עם זמני מחזור של פחות משעה, שאינם ניתנים לגילוי בסקירות האלקטרומגנטיות הקיימות.

בנוסף, ניסינו לבחון אם אפשר למדוד כמה מהר הסתובבו כוכבי הנייטרונים (ספין) לפני ההתנגשות. למרבה הצער, התוצאות שלנו לא מראות מה היו [הספינים](#) של כוכבי הנייטרונים. התוצאות קונסיסטנטיות עם שני הזוגות מהירי-הסיבוב ביותר מתוך זוגות כוכבי הנייטרונים הגלקטיים הצפויים להתמזג בזמן חיי היקום, PSR J0737–3039A/B ו-PSR J1946+2052. במערכת השניה מאלה, יש [פולסר](#) המשלים סיבוב כל 17 מילישניות.

אם נתייחס ל-GW190425 כהתמזגות זוג כוכבי נייטרונים, לצד הגילוי הקודם של התמזגות כוכבי נייטרונים (GW170817), אפשר לשערך את קצב ההתמזגות של כוכבי נייטרונים בנפח היקום מדי שנה. מצאנו שהקצב הוא בין 250 ל-2810 התמזגות כוכבי נייטרונים בשנה בגיגה-פארסק מעוקב.

GW190425 הוא פוטנציאלית התצפית השניה של התמזגות זוג כוכבי נייטרונים, והתצפית מספקת לנו מידע ייחודי נוסף על הגופים הללו.

## איפה ללמוד עוד:

- אתרי האינטרנט של ליג"ו ווירג"ו: [www.ligo.org](http://www.ligo.org), [www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)
- ההודעה לתקשורת על הגילוי מטעם ליג"ו: [ligo.caltech.edu/news/ligo20200106](http://ligo.caltech.edu/news/ligo20200106)

- המאמר המדעי המלא התפרסם כאן.

## מילון מונחים

- **גוף קומפקטי**: שם כללי לתיאור אובייקט כוכבי מאד קטן ומאד צפוף, כמו כוכבי ניוטרונים או חורים שחורים. המסה שלהם היא לפחות כמסת השמש, אבל דחוסים לרדיוס של כמה קילומטרים, עשרות קילומטרים או מאות קילומטרים
- **מערכת בינארית**: מערכת של שני גופים החגים זה סביב זה
- **כוכב ניוטרונים**: אובייקט דחוס מאד שנותר כשריד אחרי קריסה של כוכב גדול; מורכב ומוחזק מניוטרונים
- **חור שחור**: תחום במרחב-זמן שהעקמומיות סביבו, בעקבות המסה שבתוכו, כ"כ גבוהה עד שהיא מונעת מכל דבר, כולל אפילו אור, מלברוח.
- **ספין**: גודל המודד כמה מהר גוף מסתובב סביב עצמו. למשל, קצב הסיבוב של כדה"א הוא 1 ל-24 שעות.
- **פולסר**: כוכב ניוטרונים שנצפה באמצעות פולסים של קרינה אלקטרומגנטית (בד"כ קרינת רדיו) שהוא פולט. את חלקם הגדול של כוכבי הניוטרונים אי אפשר לראות כפולסרים, בין אם בגלל שהם לא פולטים מספיק קרינה, או בגלל שכיוון הפליטה אינו מכוון אל כדה"א..

תרגום לעברית: ד"ר אופק בירנהולץ, אליעד שטרובך, מקס אפלבאום (אוניברסיטת בר-אילן)