



זרמי כוכבים שופכים אור על תעלומת החומר האפל

Wayne Ngan*

המחלקה לאסטרונומיה ואסטרופיזיקה, אוניברסיטת טורונטו, טורונטו, אונטריו, קנדה

כשאנחנו אומרים "חומר" אנחנו מתכוונים לכל החומר שממנו עשוי היקום. חומר רגיל, כמו אטומים, מהווה רק כ-15% מכל החומר ביקום. 85 האחוזים הנוותרים הם מה שנקרא "חומר אפל". החומר האפל הוא בלתי נראה – אבל יש לו כוח למנוע מהגלקסיה שלנו להתפרק. מהו חומר אפל? כבר עשרות שנים מעלים האסטרונומים תשובות אפשריות לשאלה הזו, ועורכים תצפיות כדי לבדוק אותן. אחת התיאוריות המקובלות ביותר נקראת "חומר אפל קר" ובקיצור CDM. היא מסבירה בהצלחה תופעות רבות הקשורות לחומר אפל ביקום באופן כללי, אבל צריך עדיין לבדוק אותה בתוך הגלקסיה שלנו. במחקר זה אנחנו מראים כיצד אפשר לעשות זאת באמצעות הדמיית מחשב של זרמי כוכבים.

היקום – חומר למחשבה

כבר כמעט מאה שנה ידוע לאסטרונומים שהגלקסיה שלנו, שביל החלב, מורכבת בעיקר מכוכבים הנשארים זה בקרבת זה בזכות כוח הכבידה. כשמסתכלים בגלקסיות – בצילום או מבעד לטלסקופ – מה שרואים הוא בעצם האור של הכוכבים הללו. בשנות השבעים, כשהאסטרונומים ערכו מעקב מדויק אחר תנועת הכוכבים בשביל החלב, הם הבחינו שהכוכבים נעים מהר מדי – למעשה, במהירויות כאלה הם היו אמורים לעזוב את הגלקסיה

סוקרים צעירים

INDEPENDENT
ELEMENTARY
SCHOOL
גיל: 10-11



שלנו לפני זמן רב. כלומר, אם שביל החלב היה עשוי רק מהכוכבים שאנחנו מסוגלים לראות, הוא כבר מזמן היה מתפרק!

פירוש הדבר הוא שיש בשביל החלב משהו נוסף שהוא בלתי נראה, אבל בכוחו לגרום לכוכבים להישאר בגלקסיה. החומר הזה קיבל את הכינוי "חומר אפל". מדענים מנסים כבר עשרות שנים לעמוד על טיבו. כדי להבין למה הוא מסתורי כל כך, בואו נשווה אותו לחומר "הרגיל" שאנחנו מכירים. כל דבר שאנחנו רואים או ממששים בחיינו עשוי מאטומים של יסודות. אפילו הכוכבים עשויים ממימן, הליום, וכמויות זעירות של יסודות אחרים. אנחנו יודעים מניסיון שחומר רגיל מחזיר אור (כמו קירות, עצים וכו') או מפיץ אור (כמו כוכבים, נורות וכו'). בנוסף הוא יכול גם לחסום אור ולהטיל צל. החומר האפל, לעומת זאת, לא מתנהג באף אחת מהדרכים האלה. הוא לא מפיץ אור, לא מחזיר אור וגם לא חוסם אור (כך שלמען הדיוק הוא לא באמת "אפל" אלא "בלתי נראה"). אנחנו יודעים שהוא קיים אך ורק לפי כוח הכבידה שלו. הכבידה הזו היא שגורמת לכוכבים להישאר בתוך שביל החלב ולא מניחה להם "לברוח" ממנו אל היקום.

התעלומה הגדולה ביותר היא שחומר אפל לא סתם מפוזר פה ושם בכמויות קטנות כך שאפשר להתעלם ממנו. כבר כ-30 שנה אנו רואים לפי תצפיות מדעיות שהיקום כולו מלא חומר אפל. למעשה, רק כ-15% מכל החומר ביקום הוא "רגיל", ו-85% האחרים הנוותרים הם חומר אפל [1]. כלומר, היקום ברובו מלא בחומר שאנחנו לא מבינים בדיוק מהו! חומר אפל הוא אחד מתחומי המחקר העיקריים באסטרונומיה של היום, ומי שימצא תשובה לשאלה "מהו חומר אפל?" עשוי בהחלט לזכות בפרס נובל.

בעקבות תעלומת החומר האפל

השערה/היפותזה

(Hypothesis)

מתן הסבר אפשרי לתופעה כלשהי בהתבסס על ניחוש מושכל. את ההשערה בודקים באמצעות ניסויים כדי לראות אם הניחוש נכון או לא.

http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/lunar/apollo_15_feather_drop.html

אחד השלבים הראשונים בשיטה המדעית הוא ניסוח של **השערה**, או לפחות של ניחוש מושכל או תחזית, לגבי הסיבה לתופעה מסוימת או האופן שבו היא מתרחשת. בשלב הבא בודקים את ההשערה באמצעות ניסויים או תצפית, כדי לברר אם הניחוש נכון. לדוגמה, אחת ההשערות המפורסמות בהיסטוריה הייתה שמהירות הנפילה של עצם אינה תלויה במסתו. לפי השערה זו, פטיש ונוצה הנופלים מאותו גובה בתוך ריק (כלומר, חלל ללא אוויר ולכן ללא התנגדות) אמורים להגיע לקרקע באותו זמן. אחד האסטרונוטים שטסו לירח¹ אכן בחן את ההשערה הזו בכך שהפיל פטיש ונוצה על הירח (שבו אין אוויר)! הם אכן הגיעו לקרקע באותו רגע, מה שאימת את ההשערה.

עדיין לא ידוע בדיוק מהו חומר אפל, אבל האסטרונומים העלו במשך השנים הרבה מאוד רעיונות. לתיאוריה אחת המקובלת על רבים קוראים "חומר אפל קר" (CDM). הכוונה היא לא שהחומר קר למגע יד, אלא שהוא מורכב מחלקיקים שאינם נעים במהירות. מודל CDM מבוסס על ההשערה שקבוצות של גלקסיות נוטות להסתדר במבנים מאורגנים. שנים של תצפיות על גלקסיות הוכיחו שהן אכן ממוקמת כמעט בדיוק באופן שמנבא מודל CDM!

כמעט, אבל לא לגמרי

יש כבר ראיות רבות לכך שקבוצות של גלקסיות מסתדרות בהתאם למודל CDM. אבל עדיין אין מספיק ראיות לגבי האופן שבו מסתדרים המרכיבים של כל גלקסיה. נתבונן למשל מה יש בתוך

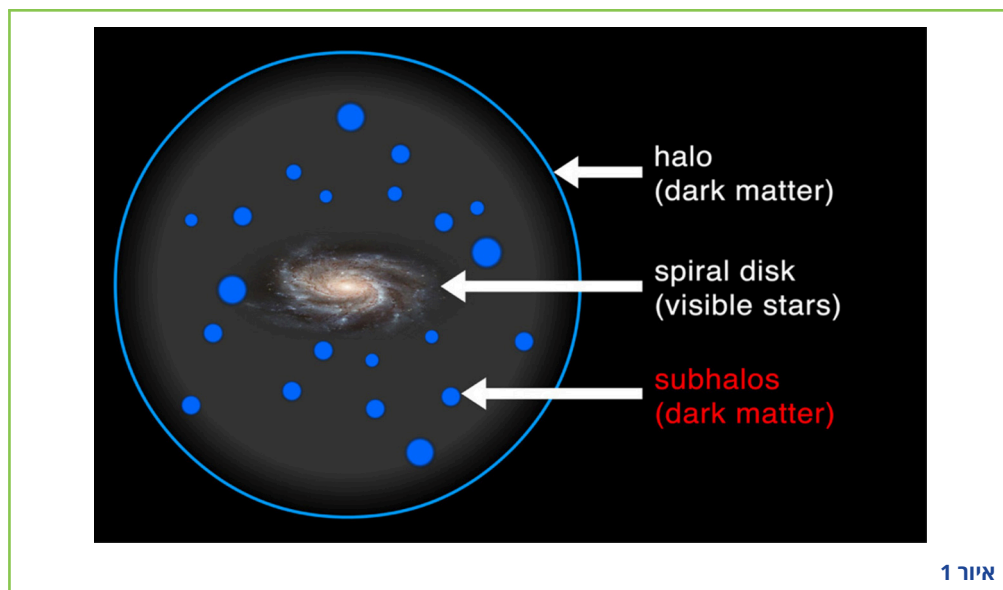
חומר אפל קר

(Cold Dark Matter – CDM)

מודל שלפיו חומר אפל מורכב מחלקיקים הנעים באיטיות. מחקרים רבים בוחנים כיום את ההשערה שעליה מבוססת התיאוריה הזו.

איור 1

מרכיבי שביל החלב (לא לפני קנה מידה מדויק). האסטרונומים בטוחים למדי שסביב שביל החלב יש הילה של חומר אפל, ובמרכזו - דסקית ספירלית של כוכבים. לפי אחת ההשערות בתיאוריית CDM, קיימות בשביל החלב גם תת-הילות של חומר אפל - הנקודות הכחולות באיור - אבל לא ידוע אם הדבר נכון. כדי לאשש את ההשערה הזו, יש למצוא דרך לבדוק אם קיימות תת-הילות כאלה.



איור 1

גלקסיה כמו שביל החלב [2]. כוכבי שביל החלב מסודרים בצורת דסקית עם קווים לולייניים. הכוכבים שהעין שלנו מסוגלת לראות הם רק חלק מהגלקסיה. סביבם יש הילה עצומה של חומר אפל, ובזכות הכבידה של החומר הזה הכוכבים נשארים יחד במרכז (איור 1).

אחת ההשערות של מודל CDM טוענת שדסקית הכוכבים שלנו, גלקסיית שביל החלב, לא נמצאת לבדה בתוך ההילה הזו, אלא מוקפת גושים רבים של חומר אפל, הנקראים "תת-הילות". תת-הילות הן מעין גרסאות מוקטנות של ההילה הגדולה, שמקננות בתוכה. האסטרונומים כבר בטוחים ששביל החלב נמצא בתוך הילה של חומר אפל, אבל עדיין אינם בטוחים אם יש בתוכה תת-הילות. אם נוכיח זאת, תהיה לנו ראייה חשובה שתתמוך במודל CDM. אם לא, נצטרך אולי למצוא תיאוריה אחרת שתסביר מהו חומר אפל.

גאות, שפל, וכוכבים

איך מחפשים תת-הילות העשויות מחומר בלתי נראה? ובכן, אמנם אין לנו אפשרות לראות ישירות את החומר האפל, אבל אנחנו יכולים לראות איך הוא משפיע על חומר נראה לעין - על כוכבים, למשל. לכוכבים יש נטייה להתקבץ יחד עם כוכבים שכנים וליצור **צבירי כוכבים**, בגלל כוח הכבידה ההדדי המושך אותם זה אל זה. אבל צבירי כוכבים לא מתקיימים לנצח; לא פעם הם מתפרקים בגלל **כוח הגאות** של הגלקסיה.

כוח הגאות של הגלקסיה פועל באופן דומה לכוח הגאות שהירח מפעיל על כדור הארץ. באוקיינוסים שלנו יש גאות ושפל משום שכוח הכבידה של הירח לא משפיע באותה מידה על כל המקומות בכדור הארץ. העיר הקרובה ביותר לירח בכל רגע נתון נמשכת אליו בעוצמה רבה יותר מהעיר הרחוקה ממנו ביותר (איור 2). ההפרש הזה בעוצמת המשיכה יוצר "מתיחה" של כדור הארץ מקצה לקצה. הכוח המותח הזה הוא כוח הגאות, והוא מחולל את הגאות והשפל באוקיינוסים.

צביר כוכבים

(Star cluster)

קבוצת כוכבים צפופה, שהכבידה שלהם מלכדת אותם - בדומה לגלקסיה קטנטנה. גלקסיית שביל החלב מכילה צבירי כוכבים רבים.

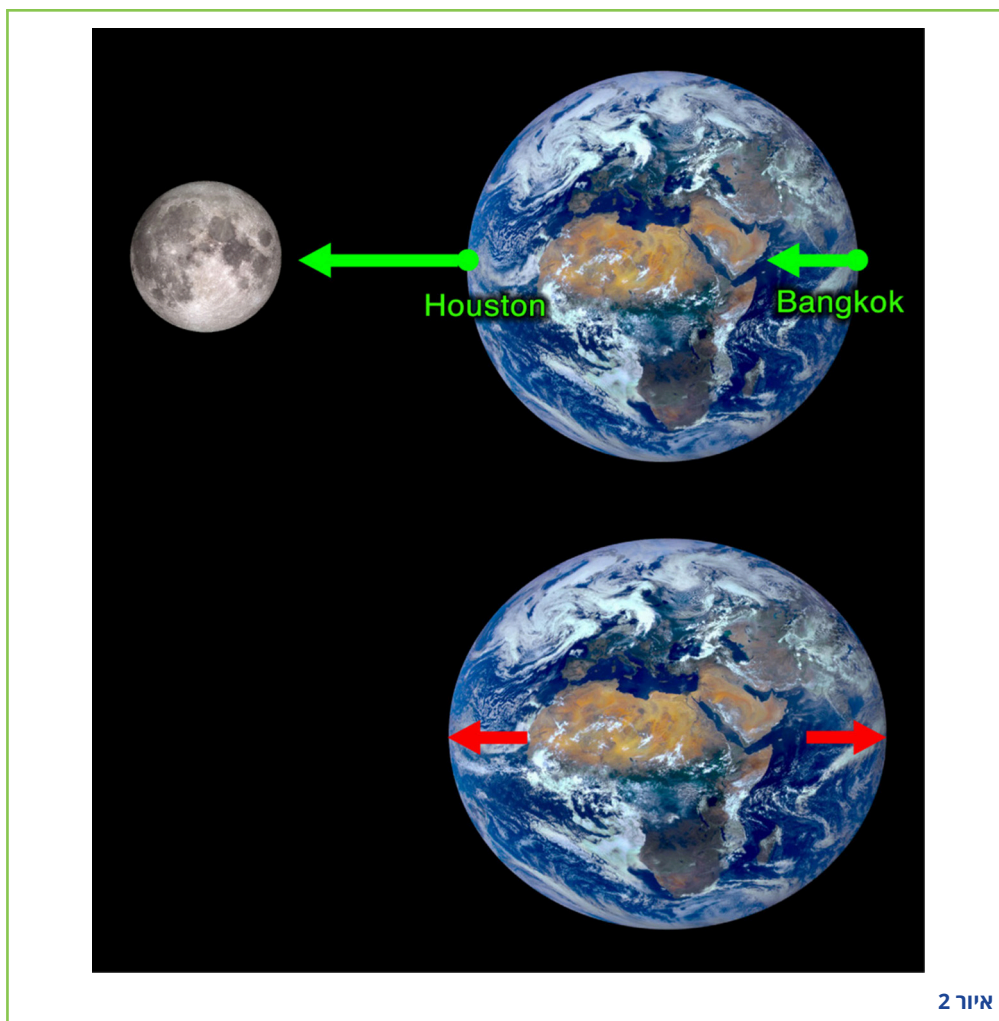
כוח הגאות

(Tidal force)

כוח המתיחה המופעל על כוכב לכת או גוף אחר כתוצאה מההפרש בהשפעת הכבידה על שני קצותיו.

איור 2

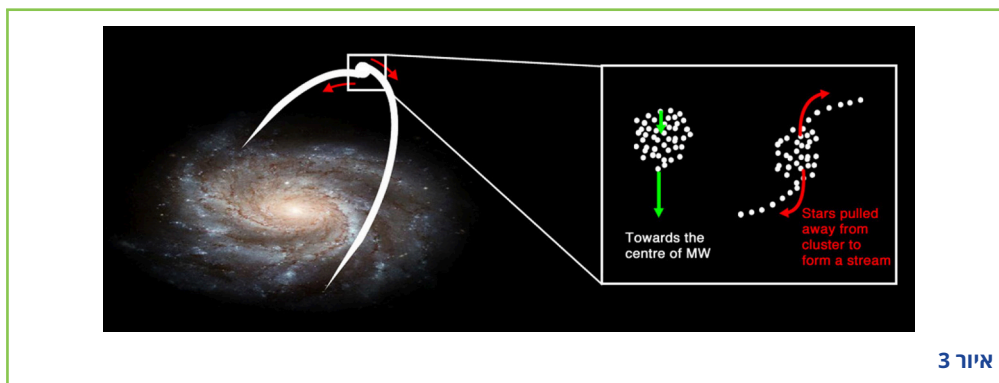
המחשה של כוח גאות (לא מאויר לפי קנה מידה). כוח המשיכה של הירח אינו שווה משני צדי כדור הארץ. בתמונה העליונה נראה כדור הארץ במצב שבו העיר יוסטון, משמאל, קרובה יותר לירח מאשר העיר בנגקוק מימין. לכן כוח המשיכה של הירח מורגש יותר ביוסטון, וכך נוצרת "מתיחה" של כדור הארץ מיוסטון לבנגקוק, כפי שמודגם בתמונה התחתונה.



איור 2

איור 3

התפרקות של צביר כוכבים לזרם כוכבים בהשפעת כוח הגאות של שביל החלב. בדומה להשפעה של הירח על כדור הארץ, גם כוח המשיכה של שביל החלב לא משפיע באופן שווה על כל החלקים של צביר כוכבים. איור זה דומה לאיור 2. האורך השונה של החצים הירוקים מייצג את ההבדלים בכוח המשיכה אל מרכז שביל החלב, והחצים האדומים מייצגים את המתיחה של צביר הכוכבים. המתיחה גורמת לכוכבים להתפרק אחד-אחד מהצביר ולהפוך לזרם הנכרך סביב הגלקסיה. הכוח המותח את הצביר גורם להיווצרות הזרם, כך שהזרם "צומח מתוך" צביר הכוכבים שבאמצע.



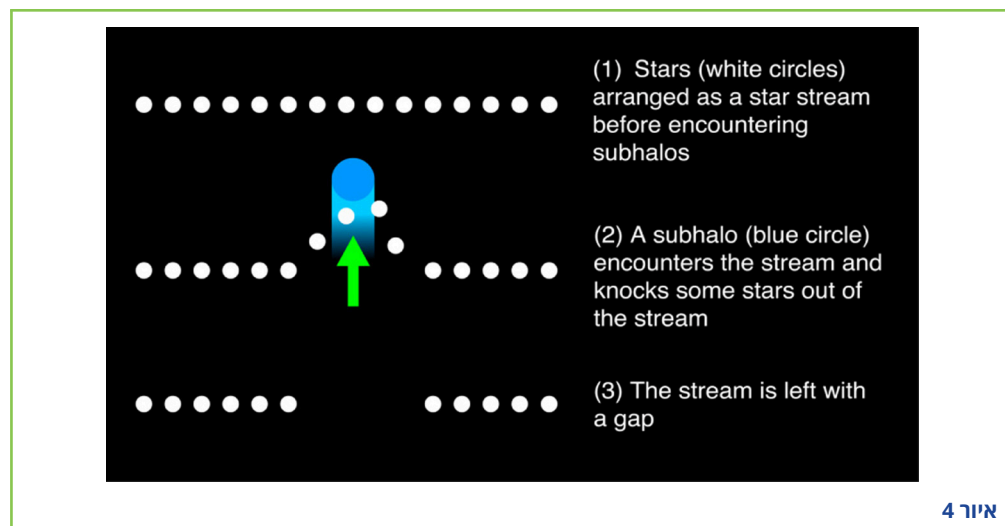
איור 3

כוח הגאות הפועל על צביר כוכבים הוא דומה. צבירי כוכבים בגלקסיית שביל החלב נמשכים תמיד אל מרכז הגלקסיה, אבל עוצמת המשיכה שונה בשני הקצוות שלהם.

הגלקסיה מותחת את צביר הכוכבים כפי שהירח מותח את כדור הארץ - אבל יש ביניהם הבדל גדול אחד. כדור הארץ הוא ברובו גוף אחד מוצק, ולכן כוח הגאות של הירח מותח אותו רק מעט, כאילו היה גומייה. צביר כוכבים, לעומת זאת, יכול בקלות להתפרק בגלל כוח הגאות של הגלקסיה! כאשר זה קורה, הכוכבים נתלשים מהצביר ומסתדרים בשורה, ויוצרים "זרם" של כוכבים הנכרך סביב הגלקסיה (איור 3). לתהליך הזה קוראים לפעמים "ספֶגֶטִּיפִּיקצִיה", (כאילו

איור 4

היווצרות של מרווח בזרם הכוכבים. כאשר אין בסביבה תת-הילה, הכוכבים בזרם מסודרים בשורה כמו מכוניות הנוסעות בכביש. כאשר תת-הילה נתקלת בזרם כוכבים, היא הודפת מתוכו כמה כוכבים. הכוכבים שליד נקודת המפגש של תת-הילה עם הזרם, יוצאים מהזרם ונוצר בו מרווח.



הצביר הופך לספגטי). התהליך שבו צביר כוכבים מתפרק והופך לזרם כוכבים נמשך בדרך כלל מיליארדי שנים, והזרם יכול להגיע לאורך של מאות אלפי שנות אור. שנת אור היא המרחק שעובר אור במשך שנה, והיא שווה לכ-9.5 טריליון קילומטר!

מרווחים בזרם

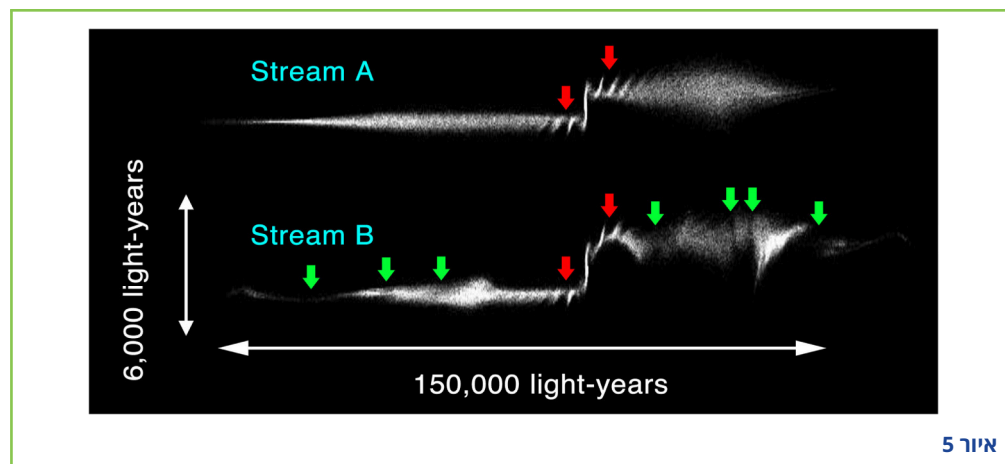
איך אפשר להיעזר בזרם של כוכבים מאירים כדי למצוא תת-הילות של חומר אפל? כאשר תת-הילה זרם כוכבים מתקרבים זה לזה, ייתכן שהתת-הילה תדחק מתוך הזרם את הכוכבים הקרובים אליה ביותר, ואז ייווצר מרווח בזרם (איור 4). אפשר להשוות זאת למכוניות בכביש עמוס. כשאחת מהן יוצאת לכביש אחר, נוצר מרווח בין המכוניות. בדומה, יציאה של כוכב מזרם הכוכבים תיצור מרווח בזרם.

אם יש בשביל החלב תת-הילות, הן עשויות להיתקל בזרמי כוכבים וליצור בהם מרווחים. לכן, אם אנחנו צופים בזרמי כוכבים ומגלים מרווחים, אנחנו יכולים לשער שקיימות לידם תת-הילות, ולהיעזר בכך כדי להבין אם מודל CDM הוא נכון. אבל זרמי כוכבים הם דבר לא פשוט: הם רגישים מאוד גם לדברים אחרים בגלקסיה. לכן, גם אם אין תת-הילות בגלקסיה שלנו, עדיין ייתכן שיהיו מרווחים בזרם הכוכבים. כלומר, כשאנחנו צופים בזרם כוכבים ומגלים שם מרווחים, לא תמיד הם נגרמים על-ידי תת-הילות.

ובכן, כאשר מגלים מרווח בזרם כוכבים, אחד האתגרים הגדולים הוא לדעת אם הוא אכן נגרם על-ידי תת-הילה של חומר אפל. לשם כך אפשר להיעזר בהדמיות מחשב. הדמיה נותנת לנו חופש "לבנות" גלקסיה בכל צורה שנרצה. כפי שראיתם באיור 1, אנחנו יודעים שלשביל החלב יש לפחות הילה אחת ודסקית, אבל עדיין לא ברור אם יש בה תת-הילות. נוכל ליצור הדמיה של שני זרמי כוכבים: אחד בגלקסיה שיש בה תת-הילות של חומר אפל, והשני בגלקסיה זהה לחלוטין, פרט לכך שאין בה תת-הילות. כשנשווה את ההבדלים בהתנהגות שני הזרמים האלה, נוכל לדעת בוודאות שהם נגרמים על-ידי תת-הילות – כי כל הגורמים האחרים בהדמיה זהים.

איור 5

הדמית מחשב של שני זרמי כוכבים. זרמי הכוכבים שבהדמיה מלופפים סביב גלקסיה דומה לזו שמופיעה באיור 3, אבל בהדמיה "יישרו" את הזרמים כדי שיהיה קל יותר לראות מה קורה להם. הזרמים זהים, אבל A היא הדמיה של זרם כוכבים בגלקסיה ללא תת-הילות, ו-B – הדמיה של זרם כוכבים בגלקסיה עם תת-הילות, כמו זו המופיעה באיור 1. החצים האדומים מצביעים על מרווחים המופיעים בשני הזרמים, כך שאפשר לדעת שהם לא נוצרו בגלל תת-הילות. אבל החצים הירוקים מצביעים על מרווחים המופיעים רק במבנה הפחות-מסודר של זרם B, ולכן אפשר לדעת שהם נגרמים בגלל תת-הילות. כדי להבין אם קיימות תת-הילות בשביל החלב צופים האסטרונומים בזרמי כוכבים כדי לראות אם הם דומים יותר לזרם A או לזרם B. באיור אפשר לראות שגודל הזרמים נמדד באופי שנות אור (שנת אור היא המרחק שאור עובר במשך שנה אחת).



איור 5

באיור 5 מופיעות שתי הדמיות של זרמי כוכבים. בהדמיה המקורית שערכנו, הם היו דקיקים ומלופפים סביב הגלקסיה כמו סרט ארוך, אבל באיור שמופיע כאן הבאנו גרסה מיושרת ומוגדלת, כדי להראות בבירור מה קרה להם. זרם A נוצר בהדמיה של גלקסיה עם הילה גדולה בלבד, וזרם B – בהדמיה של גלקסיה שיש בה גם תת-הילות. למען הפשטות לא כללנו בהדמיות את הדסקית.

בהדמיה, זרם A אמנם לא נתקל בתת-הילות, אבל בכל זאת נוצרו בו מרווחים (מסומנים בחצים אדומים באיור 5). זרם B, לעומתו, נתקל בתת-הילות רבות, והמרווחים שנוצרו בו (המסומנים בחצים ירוקים) שונים מאוד מהמרווחים בזרם A. מכך אפשר ללמוד שמרווחים הנוצרים בגלל תת-הילות יכולים להופיע בכל מקום בזרם, ולהיות בגדלים שונים. כשאנחנו צופים בזרמי כוכבים במציאות, אפשר להיעזר בהדמיות מחשב כאלה כדי לקבוע אלה מרווחים בזרם הם תוצאה של תת-הילות, ואלה נוצרו בגלל גורמים אחרים.

העתיך

המחקר של חומר אפל באמצעות מרווחים בזרמי כוכבים נמצא עדיין בשלבים מוקדמים מאוד. בהדמיה שבאיור 5 כללנו רק את ההילה ואת תת-הילות, אך לא את דסקית הכוכבים. אם נכלול את הדסקית, האם גם היא תיצור מרווחים בזרמי הכוכבים? בנוסף, ההילה בהדמיות זהה כמעט, אך לא לגמרי, להילה של שביל החלב. האם ייווצרו יותר מרווחים בזרמי כוכבים אם ההילה סביבם תהיה דומה יותר לזו של שביל החלב? כדי לענות על שאלות כאלה יש צורך בהדמיות מחשב נוספות.

בסופו של דבר צריך לחפש מרווחים בזרמי כוכבים במסגרת תצפית אמיתית ולא רק באמצעות הדמיות. כדי שנוכל להסתמך על מודל CDM, צריך לצפות בזרמי כוכבים רבים ככל האפשר ולחפש בהם מרווחים.

בינתיים הצליחו האסטרונומים לאתר בשביל החלב 10-20 זרמי כוכבים שעשויים להתאים לתצפיות כאלה [3]. לשמחתנו, רוב הסיכויים שבעתיד הקרוב הם יגלו זרמים נוספים, ויקרבו אותנו להבנת טיבו של החומר האפל.

מאמר המקור

Ngan, W. H. W., and Carlberg, R. G. 2014. Using gaps in N-body tidal streams to probe missing satellites. *Astrophys. J.* 788:181. doi: 10.1088/0004-637X/788/2/181

מקורות

1. Planck Collaboration, Ade, P. A. R., Aghanim, N., Armitage-Caplan, C., Arnaud, M., Ashdown, M., et al. 2014. Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters. *Astron. Astrophys.* 571:A16. doi: 10.1051/0004-6361/201321591
2. Binney, J., and Merrifield, M. 1998. *Galactic Astronomy. Princeton Paperbacks.* Princeton, NJ: Princeton University Press.
3. Grillmair, C. J. 2010. Stellar debris streams: new probes of galactic structure and formation. In *Galaxies and Their Masks*, eds D. L. Block, K. C. Freeman, and I. Puerari, 247. New York, NY: Springer.

פורסם אונליין: 31 בינואר 2019

נערך על ידי: Shane L. Larson, Northwestern University, United States

ציטוט: Ngan W (2019) זרמי כוכבים שופכים אור על תעלומת החומר האפל. *Front. Young Minds.* doi: 10.3389/frym.2017.00029-he

תורגם והותאם:

Ngan W (2017) Using Bright Streams to Learn about Dark Matter. *Front. Young Minds* 5:29. doi: 10.3389/frym.2017.00029

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

© Ngan 2017. זהו מאמר בנישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון **COPYRIGHT** 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

11-10, INDEPENDENT ELEMENTARY SCHOOL

אנחנו קבוצה מדליקה, גדולה, סקרנית, דינמית, נמרצת וכיפית של תלמידי כיתה ה' באזור מפרץ סן פרנסיסקו. אנחנו בעלי מחשבה עצמאית, ואנחנו מתים על מדע! לכבוד גדול לנו להשתתף בפרויקט הזה!





הכותב

WAYNE NGAN

מאז שהייתי ילד קטן ריתק אותי תחום האסטרונומיה. אהבתי מאוד לצפות בשמי הלילה ולבקר באנפי האסטרונומיה במרכזי מדע. כשגדלתי קצת, התחלתי גם לפתח אהבה לכתיבת תוכנות כדי לפתור בעיות. לכן בחרתי בלימודי אסטרונומיה חישובית. תחום המומחיות שלי הוא שימוש בהדמיות מחשב כדי לחקור גלקסיות.

*ngan@astro.utoronto.ca

Hebrew version
provided by

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

