

# החומר האפל באור חדש

## האומנם חסרים לנו תשעים וחמישה אחוזים מהיקום? \*

מרדכי מילגרומ, מכון ויצמן למדע, רחובות

למעשה, החל בגלקסיות ננסיות, דרך גלקסיות רגילות ובקבוצות של גלקסיות, וכלה בעל-צבירים הענקיים. ממדי הפער נעים בין כמה מונים לבין כמה מאות מונים.

הצורך בחומר נוסף מתעורר לא רק במערכות גלקטיות בעלות מבנה מפותח, אלא גם ביקום בכללותו. זמן רב בטרם נוצרו הגלקסיות היה היקום מלא בפלסמה של גרעיני אטומים ושל חלקיקים תת-אטומיים. הקרינה פעפה בפלסמה והבטיחה כמעט לגמרי את אחידותה המלאה. אם הופיעו תנודות בצפיפות הפלסמה לא היה להן כל סיכוי לגדול ולהתפתח לגלקסיות, לפני שהפלסמה נהפכה לגז נייטרלי, שפעולת הגומלין שלו עם הקרינה אינה כה חזקה. ידוע לנו מתי התרחש הניטרול הזה, ומה הייתה עוצמתן של תנודות הצפיפות באותה עת. הבעיה היא שפשוט לא היה די זמן להיפכות התנודות הללו לגלקסיות שאנו רואים כיום. החומר האפל היה עוזר כאן, משום שהוא נייטרלי על פי הגדרתו, ולכן הקרינה לא הייתה כופה עליו הומוגניות. כיוון שכך, הוא היה הולך ומתכווץ במשך כל הזמן הזה. לחומר האפל היה די זמן ליצור גופים בעלי מסות גלקטיות.

על-פי הדעה הרווחת, המסה הנוספת הזאת מכילה חומר רגיל שאינו פולט קרינה בעוצמה המאפשרת למכשירים המצויים בידינו כיום, לזהותה: כוכבי לכת, כוכבים ננסים, גז פושר. לחומר מסוג זה מוטב לקרוא "חומר עמום". ייתכן שכמותו

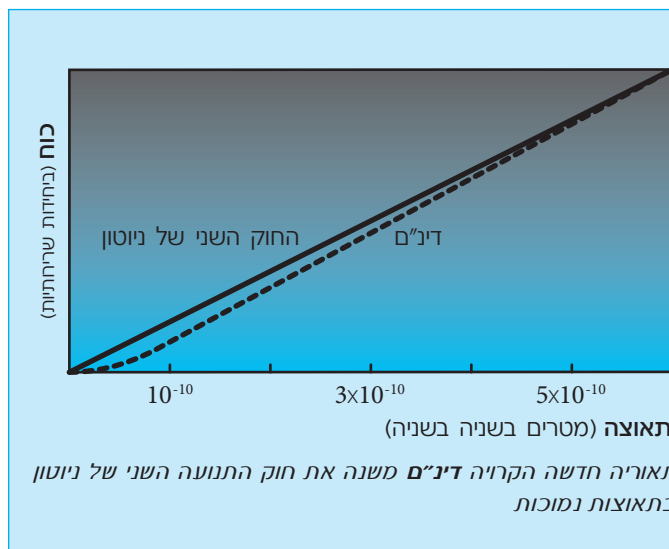
מכל התעלומות המרובות שניצבות לפני האסטרונומיה בימינו, אין דבר מטריד יותר מאשר טיבו של החומר האפל. רוב האסטרונומים סבורים שכמויות עתק של חומר בלתי מזוהה כלשהו ממלאות את היקום. כשם שהקהל בתיאטרון בובות צופה בתנועותיה המקרטעות של מריונטה ומסיק את קיומו של בובן נסתר, כן מתבוננים אנשי המחקר על תנועותיו הבלתי מוסברות של החומר הנראה ומסיקים כי יש בהכרח חומר בלתי נראה המושך בחוטים. ואף-על-פי-כן, החומר האפל הזה חמק עד כה מכל ניסיונותיהם של האסטרונומים והפיזיקאים להוציאו מן הצל אל האור. אחדים מאתנו חושדים שאולי אין הוא קיים כלל ועיקר, ואחרים מתחילים להתייחס ברצינות לאפשרות הזאת.

בעיית החומר האפל התעוררה משנתגלתה אי התאמה במסות של גלקסיות ושל מבנים קוסמיים גדולים יותר. מרכיבי המערכות הללו - כוכבים וגז, כשמדובר בגלקסיות, או גז וגלקסיות, כשמדובר בצבירי גלקסיות - נעים כה וכה אבל אינם בורחים, משום שבולמת אותם משיכת הכבידה של שאר המערכת. חוקי הפיזיקה מלמדים כמה מסה צריכה להימצא כדי לאזן את התנועות ולמנוע את התפזרות המערכת. מה שמדאיג הוא שסך כל המסה הגלויה במישרין לאסטרונומים רחוק מאוד מלעמוד בדרישה.

פער המסה הזה מצוי בכל מערכת ומערכת,

### סקירה תמציתית - חלופות לחומר האפל

- יש לאסטרונומים שתי דרכים לברר כמה חומר יש ביקום ומלואו. האחת היא לסכם את כל מה שהם רואים; האחרת היא למדוד את מהירות התנועה של הגופים הנראים, ולהסתייג בחוקי הפיזיקה כדי לקבוע כמה מסה דרושה ליצירת הכבידה הפועלת על גופים אלה. למגינת הלב, שתי השיטות מספקות תשובות שונות. לכן מסיקים רוב האסטרונומים שיש שם בחוץ מסה בלתי נראית כלשהי - החומר האפל הידוע לשמצה.
- ייתכן שקולר האשמה אינו תלוי בחומר אלא בחוקי הפיזיקה. המחבר הציע לעשות תיקון בחוקי התנועה של ניוטון (ראו גרף משמאל) - או תיקון שווה-ערך לזה בחוק הכבידה שלו - שיש בו כדי לסגור את הפער.
- במובנים רבים, התיקון הקרוי **דינ"ם**, מפליא לשחזר את תוצאות התצפיות, ומבחינה זו הוא עדיף על השערת החומר האפל. עם זאת, **דינ"ם** כרוכה בכמה בעיות, ואין לדעת אם הן חסרות חשיבות או הרסניות.



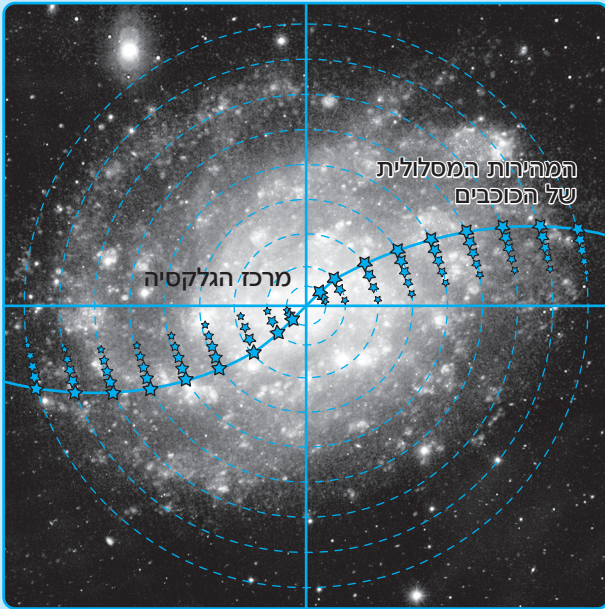
\* המאמר "החומר האפל באור חדש" מאת מרדכי מילגרומ מופיע בעמ' 48 - 55, בגיליון 2, דצמבר 2002 של סיינטיפיק אמריקן ישראל בהוצאת אורט ישראל

## תרשים 1: סחור סחור

כשם שכוכבי הלכת במערכת השמש חגים סביב השמש, כך חגים כוכביה של גלקסיה סביב מרכז הגלקסיה. לדוגמה, השמש משלימה הקפה אחת של שביל החלב מדי 200 מיליון שנה בערך. בגלקסיות חלזוניות, מסלולי הכוכבים כמעט מעגליים, ומהירויותיהם המסלוליות תלויות במרחקיהם מהמרכז.

שני גורמים מנתיבים את המהירות: התפלגות המסה, והיחלשות כוח הכבידה עם עליית המרחק. הגורם הראשון הוא עניין של גיאומטריה פשוטה - כמות המסה בתוך המעגל שמתווה מסלול כוכב, עולה ככל שרדיוס המסלול גדול יותר. גורם זה חולש על החלקים הפנימיים של הגלקסיה. רחוק יותר כלפי חוץ גוברת חשיבותו של הגורם השני. התוצאה נטו היא שהמהירויות המסלוליות עולות בתחילה עם עליית המרחק, אבל אחר-כך מת"צבות, ולבסוף מתחילות לרדת. יחס זה בין מהירות ומרחק נקרא "עקומת סיבוב".

לפי חוקי ניוטון, עקומת הסיבוב צריכה להוסיף ולרדת בלי גבול. אבל אם דינ"ם צודקת, עליה להגיע לערך קבוע. (מ"מ)



ניוטון (המייחס תאוצה לכוח). תאוצתו של גוף במסלול תלויה במהירותו ובגודל המסלול. מחיבור כל אלה יחד מקבלים את הקשר בין מסה, מהירות וגודל מסלול, כלומר מרחק.

חוקים אלה מסבירים במדויק את טיסתו של טיל בליסטי ואת תנועותיהם של כוכבי הלכת, אבל החלתם על גלקסיות לא עמדה מעולם למבחן. הייתכן שאין החוקים הללו חלים עליהן? אם החוקים אינם עומדים במבחן, אפשר שתיקונם יחסל את החומר האפל.

תיקון מעין זה לא יהיה חסר תקדים. בעבר, כבר הוכח הצורך להכניס שני שינויים קיצוניים בפיסיקה הניוטונית. הראשון, שדרג את הדינמיקה הניוטונית והפך אותה לתורת היחסות - הן תורת היחסות הפרטית (הכרוכה בשינוי החוק השני של ניוטון) והן תורת היחסות הכללית (המשנה את חוק הכבידה). השינוי השני הוליך לתורת הקוואנטים, המסבירה את התנהגותן של מערכות מיקרוסקופיות, ובתנאים מסוימים, אפילו של מערכות מאקרסקופיות. שתי ההרחבות המוכחות של הדינמיקה הניוטונית באות לידי ביטוי בתנאים קיצוניים, כגון מהירויות גבוהות ביותר (תורת היחסות הפרטית) או כבידה חזקה ביותר (תורת היחסות הכללית). רוב רובן של תופעות הדינמיקה הגלקטית אינן כרוכות כלל בתנאים המסוימים האלה.

אילו מתכונותיהן של מערכות גלקטיות יכולות להיות קיצוניות כל כך עד שיחייבו תיקון נוסף? האפשרות הראשונה העולה על הדעת היא גודל. אולי הכבידה חורגת מחוק ניוטון במרחקים גדולים? כבר ב-1923 הציע האסטרונום האנגלי ג'יימס ה' ג'ינס לתקן את תלותו של חוק הכבידה במרחק כשעוסקים

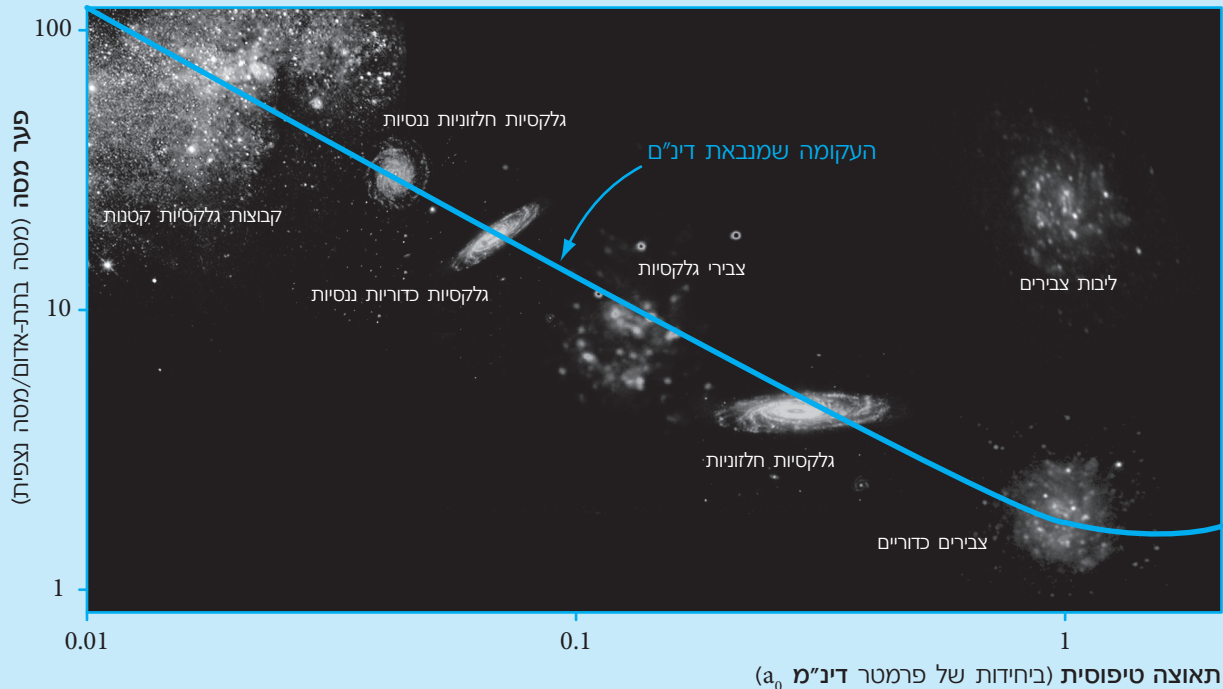
גדולה פי עשרה מכמות החומר שהאסטרונומים יכולים לראות, ובכל זאת אין הוא פותר אלא חלק קטן מבעיית המסה החסרה. כאשר החוקרים מדברים על חומר אפל, הם מתכוונים על פי רוב למין חומר "אקזוטי", המספק את הכמות הדרושה לסגירת הפער. וכדי להוסיף מבוכה על מהומה, הם חושדים גם בקיומה של אנרגיה אפלה - סוג נבדל של אנרגיה, העשוי לגרום את התפשטותו המואצת של היקום כפי שנתגלתה בתצפיות; את התופעה הזאת אי אפשר להסביר באמצעות החומר הרגיל והחומר האפל כאחד.

לסיכום, אסטרונומים רבים משוכנעים שתכולת האנרגיה העכשווית של היקום היא בערך ארבעה אחוזים חומר רגיל ("בְּרִיוֹנִי"), שכעשירית ממנו נראית לנו ככוכבים וכגז; כשליש חומר אפל בצורה לא ידועה כלשהי; וכשני שלישים אנרגיה אפלה, שטיבה מובן עוד פחות.

## בחסות האפלה

החומר האפל הוא ההסבר היחיד שהאסטרונומים מסוגלים להעלות בדעתם כדי לתרץ את פערי המסה השונים, אם נדבוק בחוקי הפיסיקה המקובלים. אבל אם נרהיב לחרוג מן החוקים התקניים הללו, נוכל להיפטר מהחומר האפל.

היבטיו השונים של פער המסה, כפי שהוא משתקף בתנועות שבתוך מערכות גלקטיות, נובעים מן השימוש בנוסחה אחת ויחידה מן הפיסיקה הניוטונית. נוסחה זו משלבת בתוכה שני חוקי יסוד: חוק הכבידה של ניוטון (המייחס את כוח הכבידה בין גופים למסות הגופים ולמרחקים ביניהם), והחוק השני של



## תרשים 2: דינ"ם במערכות גלקטיות

בכל סוגי המערכות הגלקטיות – בגדלים מגדלים שונים, החל מצבירי כוכבים כדוריים, דרך גלקסיות ננסיות וכלה בקבוצות ובצבירים של גלקסיות – מצוי פער מטריד בין המסה הנצפית ובין המסה הנובעת מהחישובים. פער זה עומד ביחס הפוך לתאוצה האופיינית, בדיוק כפי שמנבאת דינ"ם. דגמי החומר האפל אינם מסוגלים להסביר את המתאם. הכשל החשוב ביותר של דינ"ם מצוי בליבותיהם של צבירי גלקסיות גדולים

### צבירת מהירות

**דינ"ם** מכניסה קבוע חדש של הטבע, שממדיו הם ממדי התאוצה, והוא נקרא  $a_0$ . כאשר התאוצה הרבה יותר גדולה מ-  $a_0$ , החוק השני של ניוטון פועל כרגיל: הכוח עומד ביחס ישר לתאוצה. אבל אם התאוצה קטנה לעומת  $a_0$ , החוק השני של ניוטון משתנה: הכוח עומד מעתה ביחס ישר לריבוע התאוצה. בדרך זו, הכוח הדרוש להקניית תאוצה נתונה קטן תמיד ממה שמחייבת המכניקה הניוטונית. כדי להסביר את התאוצות הנצפות של הגלקסיות מנבאה **דינ"ם** כוח קטן יותר – ולפיכך פחות מסה מחוללת כבידה – ממה שמנבאת הדינמיקה הניוטונית (ראו תרשים בעמ' 4). בדרך זו יש בכוחו להיפטר מהצורך בחומר אפל.

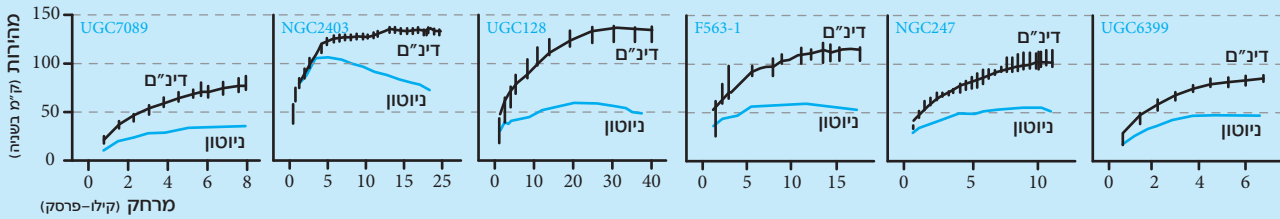
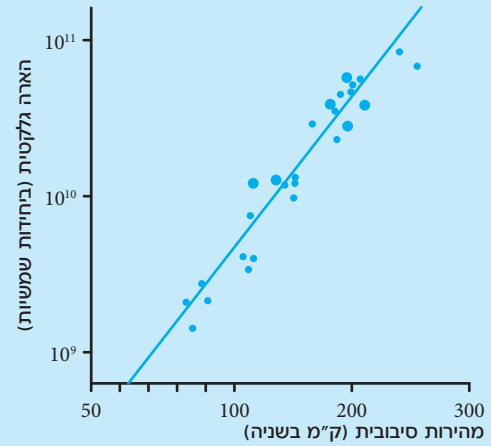
בשוליים החיצוניים של גלקסיות, התאוצה שמחוללת הכבידה פוחתת עם המרחק, ובסופו של דבר יורדת אל מתחת ל-  $a_0$ . השאלה היכן בדיוק קורה הדבר תלויה בערכו של  $a_0$  ובמסה. ככל שהמסה גדולה יותר, כך רחוק יותר המקום שבו מתחילה **דינ"ם** לתת את אותותיה. לערך  $a_0$  המתחייב על-פי הנתונים, ולגלקסיה בעלת מסה טיפוסית, התמורה מתחוללת במרחק של כמה רבבות שנות אור מהמרכז. כשמדובר במסה של צביר

בקני-מידה גלקטיים. אבל פערי התצפית שהוא ביקש להסביר בדרך זו לא נגעו לחומר האפל, וממילא הופרכו כעבור זמן. עוד שינוי בתלות במרחק הציע ב-1963 אריגו פינצי, אז באוניברסיטת רומא, כפתרון אפשרי לבעיית החומר האפל בצבירים. אבל בתחילת שנות השמונים (של המאה שעברה) הראיתי שתיקונים כאלה בתלות הכבידה במרחק אינם עולים בקנה אחד עם התצפיות.

אם כן, מה יכול להצליח? אחרי בדיקה שיטתית של המאפיינים השונים, החלטתי להתמקד בתאוצה. תאוצתן של מערכות גלקטיות קטנה בסדרי גודל רבים מהתאוצה המוכרת לנו בחיי היומיום. תאוצתה של מערכת השמש לעבר מרכז הגלקסיה שלנו (בערך אנגסטרם אחד, כלומר  $10^{-10}$  מטר, בשנייה לשנייה) היא אחד חלקי 100 מיליארד מתאוצתה של מעבורת החלל לעבר מרכז כדור הארץ (בערך 10 מ' בשנייה לשנייה). לפני כעשרים שנה הצעתי תיקון לחוק השני של ניוטון, שישנה את היחס בין כוח ותאוצה כאשר התאוצה נמוכה. זו הייתה ראשיתו של הרעיון הקרוי תיבות **דינ"ם** (דינמיקה ניוטונית מתוקנת, באנגלית **MOND** – Modified Newtonian Dynamics).

### תרשים 3: תיאוריה מול נתונים

דינ"ם משחזרת בדיוקנות מרשימה תצפיות גלקטיות חשובות. מימין נראה היחס הקרוי ע"ש טולי-פישר. למדגם של גלקסיות חלזוניות, מוצג המתאם בין המהירויות המסלוליות של כוכבים בשולי הגלקסיות עם מידת בהירותן של הגלקסיות. הקו הישר המקשר את הנתונים הולם, בגבולות דיוק התצפית, את היחס שמנבאת דינ"ם. מתחת, מדגם של עקומות סיבוב לגלקסיות שונות, המראה כיצד משתנה המהירות המסלולית עם המרחק ממרכז הגלקסיה. בגרפים רואים את התוצאות המדידות יחד עם שתי העקומות האחת לפי ניבוי דינ"ם (בצבע שחור) והשניה, לפי ניבוי ניוטון (בצבע כחול).



היה אפשר להבחין בשמץ מן הסדירויות האלה בעת שהצעתי את **דינ"ם** לראשונה; למען האמת, הן שסיפקו את הרמזים לבנייתו. מה שמעורר עניין רב עוד יותר ב**דינ"ם** הוא שעלה בידה לנבא אפקטים רבים, שלא היה אפשר להעמידם למבחן בכלל בעת שניסחתי אותה. לדוגמה אציג את שאלת טיבן של גלקסיות בעלות בהירות שטחית נמוכה - ריכוזי כוכבים דלילים כל כך עד שאי אפשר כמעט לראותם. בעוד התאוצה בגלקסיות רגילות עולה על  $a_0$  לעבר המרכז, וצונחת מתחת ל-  $a_0$  בשוליים, התאוצה בגלקסיות של בהירות שטחית נמוכה קטנה מ-  $a_0$  בכל אתר ואתר. לפי **דינ"ם**, פער המסה צריך לבוא לכלל ביטוי לכל אורכה ורוחבה של גלקסיה כזו. בעת שהצעתי את **דינ"ם** הכירו האסטרונומים רק מעט גלקסיות של בהירות שטחית נמוכה, ולא בדקו בפירוט אפילו באחת מהן. בזמן שעבר מאז התברר להם כי פער המסה אכן גדול לאין שיעור בגלקסיות כאלה מאשר ברגילות. **דינ"ם** חזתה זאת נכונה. היא אף חזתה את גודל הפערים. סיפור הצלחה אחר נוגע לצורתן של עקומות סיבוב גלקטיות - כלומר, לשינוי המדויק של המהירות המסלולית עם המרחק. רק מאז סוף שנות השמונים של המאה העשרים עורכים האסטרונומים תצפיות מפורטות במידה מספקת לשם השוואה עם הניבויים התיאורטיים, ואלה תואמות להפליא את ניבוי **דינ"ם** (ראו תרשים 3). השוואות כאלה כוללות פרמטר אחד שיש

גלקסיות טיפוסי, הדבר קורה כמה מיליוני שנות אור מהמרכז. נניח שרוב המסה של גלקסיה מרוכזת בתוך רדיוס מסוים. אם כן, לפי הדינמיקה הניוטונית, מעבר לרדיוס זה צריכה המהירות של גופים במסלולים מעגליים (כגון גז או כוכבים) לרדת עם הגדלת הרדיוס. זה מה שקורה במערכת השמש. רוב המסה של מערכת השמש מצויה בשמש עצמה, והמהירות המסלולית של כוכבי הלכת יורדת עם המרחק. לדוגמה, כוכב חמה מסתובב סביב השמש הרבה יותר מהר מאשר כדור הארץ. אבל במקום שבו **דינ"ם** תקפה, המצב שונה בתכלית. במרחקים גדולים די הצורך ממרכז של גלקסיה, המהירות המסלולית צריכה להפסיק לרדת לאחר שהגיעה לערך קבוע. מהירות קבועה זו צריכה לעמוד ביחס ישר לשורש הרביעי של מסת הגלקסיה. כיצד עומדת **דינ"ם** במבחן הנתונים? המהירויות המסלוליות בגלקסיות חלזוניות אינן יורדות עם המרחק ממרכז הגלקסיה, אלא מתמתנות עד שהן מגיעות לערך קבוע, כפי שמנבאה **דינ"ם**. יתר על כן, לפי המתאם התצפיתי הקרוי "יחס טולי-פישר", מהירות קבועה זו עומדת ביחס ישר לשורש הרביעי של הארת הגלקסיה. גם זה נובע מאליו מ**דינ"ם**. הנחת היסוד כאן היא שההארה, מצדה, עומדת ביחס ישר - או כמעט ישר - למסה. תצפיות שנערכו בזמן האחרון מאמתות את ההנחה: המתאם הישיר בין מהירות ומסה הדוק עוד יותר מאשר המתאם בין מהירות והארה.

להתאימו לכל גלקסיה בנפרד: מקדם ההמרה מאור הכוכבים למסה. ערכו המתקבל של פרמטר זה עולה בקנה אחד עם הציפיות התיאורטיות. לעומת זאת, במה שנוגע לחומר אפל, ההשוואה כרוכה לפחות בשני פרמטרים נוספים שיש להתאימם לכל גלקסיה – הכמות של החומר האפל ומסתו. למרות הגמישות הזאת, התיאוריות הנוכחיות בדבר החומר האפל אינן מיטיבות להסביר את נתוני הסיבוב כמו **דינ"ם**.

## יוצא מן הכלל?

במערכות גלקטיות אחרות, כאשר מתווים את פער המסה כנגד התאוצה הטיפוסית במערכת, מתקבלת תבנית שעולה בקנה אחד, כמעט בשלמות, עם ניבוי **דינ"ם** (ראו תרשים 2 בעמ' 6). היוצא מן הכלל היחיד מצוי בצבירים עתירי גלקסיות. אם מעיינים בצבירים בכללותם, הם מפגינים בדרך-כלל פער מסה של חמישה עד עשרה מונים בערך, שאותו מסוגלת **דינ"ם** להסביר. אבל אם מתרכזים בחלקים הפנימיים של צבירים כאלה, מתברר שעדיין נשאר פער. **דינ"ם** אינה נפטרת מכל המסה הבלתי נראית. אולי התיאוריה עצמה כושלת כאן, אבל אפשר גם שהתצפיות אינן שלמות. כמויות נכבדות של חומר עמום – חומר רגיל בדמות כוכבים שאורם חלש או גז פושר – עשויות לקנן בנבכייה של מערכות כאלה.

בעולם אידיאלי, היינו רוצים להעמיד את **דינ"ם** למבחן בניסויים פיסיקליים ולא רק בתצפיות אסטרונומיות. אך למרבה הצער ניסוי מעבדה אינם אפשריים. התאוצה העומדת באמות המידה של **דינ"ם** היא התאוצה המלאה ביחס למערכת ייחוס מוחלטת. בכדור הארץ, או בחלקיה הקרובים של מערכת השמש, יש תאוצת רקע גבוהה שמקורה בכבידת כדור הארץ, בסיבובו על צירו, בהקפתו את השמש ובאפקטים רבים אחרים – תאוצה שתאפיל על האפקטים של **דינ"ם** גם אם נוכל להתקין מערך ניסוי עם תאוצות פנימיות קטנות יחסית. בדומה לכך, קשה לבחון את **דינ"ם** מתוך עיון בתנועותיהם של כוכבי הלכת. תאוצתם של הגופים המקיפים את השמש אינה יורדת מתחת ל- $a_0$  לפני שמגיעים למרחק גדול פי עשרת אלפים בערך ממרחק הארץ מהשמש, כלומר הרחק מעבר למסילת פלוטו. ודאי, מבנה **דינ"ם** בתאוצות גבוהות – שבהן חורגת התיאוריה רק כחוט השערה מהדינמיקה הניוטונית – אינו ידוע עדיין. ייתכן שהחריגה, גם אם היא זעומה מאוד, בכל זאת עודנה גדולה די הצורך להפיק אפקטים הניתנים לתצפית. אם יאמתו הטענות בדבר האנומליה בתנועותיהן של חלליות פיוניר, יהיה אפשר להסבירן בטבעיות במסגרת **דינ"ם**.

כשם שקבוע פלנק מופיע בתפקידים שונים בתורת הקוואנטים, כן מופיע  $a_0$  בדרכים רבות בניבוי **דינ"ם** למערכות גלקטיות. אם אותו ערך עצמו – אנגסטרם אחד בשנייה לשנייה בקירוב –

פועל היטב בכל הופעותיו המרובות הללו, זוהי עדות להצלחתה של תיאוריה.

גם אם הדגם נוחל הצלחות, יש לראות כרגע את **דינ"ם** כתיאוריה פנומנולוגית מוגבלת – פנומנולוגית, כיוון שאין היא נובעת מעקרונות יסוד ואין היא מבוססת עליהם. היא נולדה מתוך צורך ישיר לתאר ולהסביר מכלול של תצפיות באופן שמזכיר את התפתחות מכניקת הקוואנטים (ובעצם, גם את רעיון החומר האפל). ומוגבלת, משום שעדיין אי אפשר ליישמה לכל התופעות השייכות לעניין.

הסיבה העיקרית היא ש**דינ"ם** לא שולבה עדיין בתיאוריה המצייתת לעקרונות היחסות, הפרטית או הכללית. אפשר ששילוב כזה לא יהיה אפשרי כלל, ואולי זורק שאלה של זמן. אחרי ככלות הכול, שנים רבות עברו בטרם הפך העיקרון הקוואנטי, כפי שהציגוהו מקס פלנק, איינשטיין ונילס בוהר, למשוואת שרדינגר; והזמן שנדרש לשילובו בתורת היחסות הפרטית היה ארוך עוד יותר. וגם כיום, למרות מאמצים ממושכים ומרוכזים, טרם הצליחו התיאורטיקנים להשיג קונסיסטנטיות בין פיסיקת הקוואנטים לבין תורת היחסות הכללית.

## מעבר להשגה

התופעות המצויות כיום מחוץ לתחום תחולתה של **דינ"ם** הן אלה שמעורבות בהן, מצד אחד, תאוצות נמוכות מ- $a_0$  (ובכך **דינ"ם** ממלאת תפקיד), ומצד אחר, מהירויות קיצוניות או כבידה חזקה ביותר (וכך גם תורת היחסות הכללית נכנסת לתמונה). חורים שחורים עומדים באמת המידה השנייה, אבל לא בראשונה: על מנת שהתאוצות בקרבת חור שחור יהיו קטנות מ- $a_0$ , צריך קוטר החור השחור להיות גדול יותר מכל היקום הנצפה. אבל אור שמתפשט בשדות הכבידה של מערכות גלקטיות יכול לעמוד בשני התנאים. **דינ"ם** אינה מסוגלת לטפל כראוי בתנועה זו, הנובעת מעידוש כבידתי. תצפיות שעושות שימוש בעדשות כבידה מגלות פער מסה דומה לזה שמוצאות התצפיות בדינמיקה של גלקסיות, אבל איננו יודעים עדיין אם **דינ"ם** מסוגלת להסביר את הפער בשני המקרים.

מערכת שנייה המחייבת את **דינ"ם** ואת תורת היחסות גם יחד היא היקום בכללותו. מכאן ש**דינ"ם** אינה מסוגלת לטפל בקוסמולוגיה. מגבלה זו חלה גם על השאלות הנוגעות לראשיתם של מבנים ביקום. אפשר ליישם את **דינ"ם** למערכות בעלות מבנה מפותח, שכבר התנתקו מן המרק הקוסמולוגי הכללי, אבל אין ביכולתה לתאר את הרגעים הראשונים, בטרם התבדלו המערכות הגלקטיות אלו מאלו.

כמה חוקרים עשו צעדים ראשונים בדרך להתמודדות עם הדמות שתהיה לתופעות אלה במסגרת תיאוריה היונקת את השראתה מ**דינ"ם**. לדוגמה, רוברט ה' סנדרס מהמכון האסטרונומי ע"ש קפטין בכרונינגן שבהולנד ועדי נוסר מהטכניון בחיפה, הציעו



תרחישים של היווצרות גלקסיות על ידי הוספת השערות עבודה אחרות לדינ"ם. אבל יש לומר כי בלא תשתית תיאורטית, אין לתת אמן מלא בשום ניסיון מסוג זה.

באיזה כיוון אפשר לחפש את התשתית התיאורטית הנוחצה? רמז לתשובה עשוי להימצא בערכו של  $a_0$ . אנגסטרם אחד בשנייה לשנייה היה מביא גוף ממצב מנוחה אל מהירות קרובה למהירות האור במשך חייו של היקום. במילים אחרות,  $a_0$  שווה בערך למכפלה של שני קבועים חשובים: מהירות האור וקבוע האבל, קצב ההתפשטות העכשווי של היקום. הוא גם קרוב לגורם אחר (שאינו קשור לאלה) והוא התאוצה שמחוללת האנרגיה האפלה. סמיכות מספרית זו, אם אינה צירוף מקרים גרידא, עשויה ללמדנו אחת משתיים: הקוסמולוגיה נכנסת איכשהו לחוקי הפיסיקה המקומיים, כגון חוק ההתמד. וחוק הכבידה, כדי ליצור את דינ"ם; ואם לא כן, הרי שגורם משותף משפיע גם על הקוסמולוגיה וגם על הפיסיקה המקומית, כך שהוא מטביע חותם דומה בזה ובזה.

## התנגדות

דומה כי משתמע מדינ"ם שההתמד - אינרציה, מידת היענותו של גוף לכוח - אינו תכונה מהותית של גופים, אלא הגופים רוכשים אותו עקב פעולת הגומלין שלהם עם היקום בכללותו. רעיון זה משתייך לעיקרון הנושן הקרוי על שם מאך, המייחס את ההתמד לפעולת גומלין זו.

הפיסיקה משופעת בדוגמאות של מקרים שבהם ההתמד בפועל של חלקיקים אינו תכונה מהותית, אלא הינו פועל יוצא של פעולת הגומלין בינם לבין התווך הנמצא ברקע שלהם. לדוגמה, אלקטרונים במוצקים מתנהגים לעתים כאילו ההתמד שלהם מושפע במידה ניכרת משאר המוצק. הייתכן שתוצא (אפקט) אנלוגי כזה אחראי להתמד אמיתי? ואם כן, מהו הגורם

שנוכחותו מכבידה על ההאצה ולפיכך יוצרת התמד?

אפשרות מרתקת גלומה בריק (ואקואום). הריק הוא מה שנשאר כאשר מסלקים את כל החומר שאפשר (או את שוות-ערכו, האנרגיה). לפי תורת הקוואנטים, מה שנותר אינו בגדר ריקנות גמורה, אלא הוא ייצוג מזערי של כל צורות האנרגיה. פעולת הגומלין של הריק עם חלקיקים עשויה לתרום להתמד של גופים. מעניין לציין שהריק נכנס גם לקוסמולוגיה כאחד ההסברים לאנרגיה האפלה. אבל איש אינו יודע לעת עתה אם אפשר לראות את הריק כאחראי בלעדי להתמד, ואם אפשר בכלל להסביר באמצעותו את דינ"ם.

חוקרים רבים גורסים שגם אם דינ"ם משחזרת היטב את הפנומולוגיה הגלקטית, אין לראות בה אמת בסיסית. לפי

טיעון זה, אולי דינ"ם היא סיכום חסכוני ושימושי של מה שאנו רואים בטבע, אבל היחסים והסדירויות הללו עתידים להגיח בבוא היום מתוך סבכיו של מערך החשיבה הקרוי חומר אפל. בשנה שעברה טענו מאנוג' קפלינגאט ומייקל ס' טרנר, שניהם מאוניברסיטת שיקגו, כי תאוצה אופיינית מעין  $a_0$  מופיעה מעצמה מתוך דגמים של חומר אפל. לפי התרחיש שלהם, דגמים אלה מנבאים את היווצרותן של הילות חומר אפל מסוג מוגבל סביב גלקסיות.

אלא שאני ציינתי, במענה, שהתרחיש הזה אינו פועל. קפלינגאט וטרנר ביססו את עבודתם על קירובים גולמיים שאינם עולים בקנה אחד עם ההילות הנצפות של חומר אפל ועם הדמיות מספריות מפורטות של התנהגות חומר אפל. הדמיות אלה, כפי שהן קיימות עכשיו, אינן משחזרות שום היבט של הפנומולוגיה של דינ"ם. זאת ועוד, התוצאה שקיבלו לטענתם מסבירה רק חלק קטן מהצלחותיה של דינ"ם. אבל ייתכן שדינ"ם נובעת ממערך החשיבה של החומר האפל בדרך אחרת. ימים יגידו.

בינתיים מתנהלת עבודה שתכליתה להבין את ההשלכות התצפיתיות של דינ"ם ולשפר את התיאוריה עצמה, ותורמים לה סנדרס, יעקב ד' בקנשטיין מהאוניברסיטה העברית בירושלים וסטייסי ס' מקגאו מאוניברסיטת מרילנד. דינ"ם היא עדיין החלופה המצליחה והעמידה ביותר לחומר האפל. התצפיות, לא זו בלבד שאינן מפריכות אותו, אלא דומה שהן מעדיפות אותו על החומר האפל. יש אמנם צידוק לספקנות שמגלים הבריות כלפי דינ"ם, אך בטרם נשיג ראיות מוצדקות בזכות החומר האפל או בזכות אחת החלופות לו, מוטב שנשמור על ראש פתוח.

## אם ברצונך לדעת יותר

Mordehai Milgrom, "A Modification of the Newtonian Dynamics as a Possible Alternative to the Hidden Mass Hypothesis", *Astrophysical Journal*, vol. 270, pp. 365-70; 15 July 1983. [adsabs.harvard.edu/](http://adsabs.harvard.edu/) ברשת.

Manoj Kaplinghat & Michael S. Turner, "How Cold Dark Matter Explains Milgrom's Law", *Astrophysical Journal*, vol. 569, No. 1, Pt. 2, pp. L19-L22; 22 April 2002 [arXiv.org/abs/astro-ph/0107284](http://arXiv.org/abs/astro-ph/0107284) ברשת.

Robert H. Sanders & Stacy S. McGaugh, "Modified Newtonian Dynamics as an Alternative to Dark Matter", *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics*, vol. 40; 2002. [astro-ph/0204521](http://astro-ph/0204521) ברשת.

אתר דינ"ם באינטרנט של סטייסי ס' מקגאו הוא:

[www.astro.umd.edu/~ssm/mond](http://www.astro.umd.edu/~ssm/mond).

המחבר מרדכי מילגרום הוא פרופסור לפיסיקה תיאורטית במכון ויצמן למדע ברחובות. הוא הגה את דינ"ם (MOND), החלופה המצליחה והעמידה ביותר לחומר האפל. תחומי עיסוקיו המדעיים האחרים משתייכים לקוסמולוגיה ולאסטרופיסיקה באנרגיות גבוהות.

# רעיון לגמרי לא רע

## דינ"ם רחוקה מהזרם המרכזי בחשיבה, אבל אין זה רעיון פרוע

מאת אנתוני אגיר\*

אם כי רובם של האסטרונומים מאמינים בקיומו של חומר אפל, ישנה השערה חלופית - דינמיקה ניוטונית מתוקנת (דינ"ם) - המחזיקה מעמד בשקט ובהתמדה, מאז שהוצעה לראשונה בשנת 1983. כפי שמסביר מרדכי מילגרם בגוף המאמר, דינ"ם רשאית להשתבח במספר מרשים של ניבויים נכונים בתחום הדינמיקה של גלקסיות. תגובותיהם של רוב האסטרונומים נחלקות לשלוש קבוצות:

1. דינ"ם היא טאוטולוגיה. היא מסבירה רק את מה שהיא מיועדת במפורש להסביר. שיחק לה מזלה לנבא כמה ניבויים, אבל חסידיה מפרזים במידת ההצלחה של ניבויים אלה.
2. דינ"ם מתארת סדירות מפתיעה, אולי אפילו מסתורית, בהיווצרות גלקסיות ובהתפתחותן. תורת הכבידה המקובלת עדיין תופסת, והחומר האפל עדיין קיים, אבל החומר האפל מְחַקָה איכשהו את דינ"ם. אם תיושם דינ"ם בפרוט לגלקסיות חריגות או למערכות שאינן גלקסיות, יתברר בסופו של דבר שהיא נכשלה.
3. דינ"ם מחליפה את הדינמיקה הניוטונית במצבים מסוימים. זהו אחד ההיבטים של תיאוריה שלמה של דינמיקה כבידתית, העתידה לתפוס את מקומה של תורת היחסות הכללית של איינשטיין.

ההשקפה הראשונה, שאינה מסבירה פנים לדינ"ם, היא זו שהחזיקו בה רוב האסטרופיסיקאים רוב ימי חייה של דינ"ם. אבל בשנים האחרונות נעשה יותר ויותר קשה לדחות אותה על הסף. ניבויים רבים מאוד של דינ"ם התאמתו. לרבים מהמחקרים האלה אחראים אנשים שיחסם להשערת מילגרם ביקורתי או נייטרלי. יתרה מזאת, דינ"ם מיטיבה לשחזר את הסטטיסטיקה של תכונותיהן של גלקסיות, לפחות כמו דגמי החומר האפל, אף-על-פי שדגמים אלה מתארים היבטים חיוניים של היווצרות הגלקסיות בדרך שרירותית. מרשימה מכול היא יכולתה של דינ"ם לנבא את פרטי הסיבוב הגלקטי באמצעות שני גורמים בלבד - התפלגות החומר הנראה והנחה של יחס מסה-הארה (קבוע) - הישג שהמודלים של החומר האפל אינם מסוגלים להגיע אליו. ניבויים אלה, והתצפיות שאליהן הם מושווים, חורגים הרחק מעבר למה שהיה ידוע בעת ניסוחה של דינ"ם. מכאן שדינ"ם אינה טאוטולוגית.

בה בעת נתקלה תיאוריית החומר האפל התקנית בקשיים, כאשר יושמה לגלקסיות. לדוגמה, היא מנבאת שליבות החומר האפל של הגלקסיות צריכות להיות הרבה יותר צפופות מכפי שמראות התצפיות. בעיות כאלה הן אולי פועל יוצא מלאכותי של מגבלות בעוצמת החישוב; החוקרים עדיין אינם מצוידים במחשבים חזקים די הצורך ליצור הדמיות מלאות של גלקסיות. אבל תיאורטיקנים רבים מתייחסים לפער זה ברצינות מרובה, ומוכנים לשקול שינויים בתכונות החומר האפל.

הצלחות דינ"ם למול בעיות החומר האפל הניעו כמה אסטרונומים לעבור מן ההשקפה הראשונה שהזכרנו ברשימה, להשקפה השנייה. אבל לא רבים, יחסית, עברו מהראשונה או מהשנייה לשלישית. מדוע? דומני שיש לכך שלוש סיבות:

ראשית, כפי שמוזכר גם מתנגדי דינ"ם וגם חסידיה, היא מתקנת רק את הדינמיקה הניוטונית. למרות אי אלה ניסיונות שנעשו, חסידי דינ"ם לא הצליחו עדיין לנסח באופן שאפשר להחילה על תופעות יחסותיות, כמו עדשות כבידה והתפשטות היקום. אפשר שאין בנמצא תיאוריה כזו, ואפשר שקשה לפתחה מטבע ברייתה. כך או כך, דינ"ם אינה מסוגלת להתעמת - ולפיכך להצליח או להיכשל - עם כמה מבחנים מרכזיים.

שנית, לא ברור שדינ"ם פועלת היטב במערכות אחרות, מלבד גלקסיות. לדוגמה, ניבוייה בדבר הטמפרטורה של גז לוחט בצבירי גלקסיות עומדים בניגוד בוטה לתצפיות, אלא אם כן חולש על הצבירים האלה - נחשו מה? - חומר בלתי נראה. אפשר לקוות (כפי שמקווים חסידי דינ"ם) שחומר זה יתגלה כבעל צורה פריונית, מובהקת אך לא נוחה לראייה, כמו כוכבים קטנים או גז פושר. כרגע אין איש פוסל את האפשרויות הללו, אבל התצפית והתיאוריה כאחת מטילות עליהן אילוצים מחמירים, וקשה לחוש בנוח אם התעורר צורך לגייס את החומר האפל (אפילו בצורתו הפרוזאית) להצלתה של תיאוריה שנועדה להיפטר מהחומר האפל.

הסיבה השלישית, הקשורה לשתי קודמותיה, היא שהתיאוריה התקנית של החומר האפל נחלה כמה הצלחות מרשימות בשנים האחרונות. הדמיות מספריות מנבאות התפלגות מרחבית של גז בין-גלקטי ההולמת להפליא את התצפיות. אומדנים של מסת החומר האפל בצבירים, שנערכו בנפרד זה מזה, מתאימים כולם זה לזה. וניבוי צמיחתם של מבנים מקשרים נכונה את התפלגות הגלקסיות שאנו רואים בקני-המידה הגדולים כיום, עם התנודות הזערוריות בטמפרטורה של קרינת הרקע הקוסמית בגלי מיקרו מלפני 13 מיליארד שנה.

ובכן, מה צריכים האסטרונומים לעשות? אלה מהם שהוגים אהדה רבה להשערת מילגרם צריכים להמשיך בחיפושים אחר תיאוריה בסיסית של דינ"ם, שכן בלעדיה לא יוכל הרעיון למשוך את לבבותיהם של רוב הפיסיקאים, הדבקים במערך החשיבה המקובל. אשר לאחרים, דומני שהם יפיקו תועלת אם ילמדו את דינ"ם, יבדקו אותה וינצלוה ככלל מעשי נוח לשימוש, בין שהם משלימים עם תיקון הדינמיקה הניוטונית ובין שלא. אולי נוכל לכנותה בשם אחר, "נוסחת ההתאמה של מילגרם" (ובראשי תיבות נה"ם), כדי להבהיר שאנו משתמשים בו ככלי מעשי, בעודנו נמנעים מלחרוץ משפט בשאלה: האומנם יש מום בפיסיקה המקובלת?

אם תורת היחסות הכללית צודקת, והחומר האפל קיים בפועל ממש, הרי שנה"ם עתידה להיכשל בסופו של דבר עם עליית הדיוק במדידות. בינתיים, אפשר לראות את נה"ם כסיכום מרוכז של ידע רב על היווצרות הגלקסיות והתפתחותן. אפשר להשתמש בו ככלי

בעל עוצמת ניבוי אדירה, או כמטרה תיאורטית חשובה שבעלי המודלים הגלקטיים חייבים להסבירה.

### תהודה

\* אנתוני אגיר הוא קוסמולוג תיאורטי במכון למחקר מתקדם בפרינסטון, ארה"ב. הוא המחבר הראשי של שני מחקרים ביקורתיים על דינ"ם שאפשר למוצאם ברשת באתרים: arXiv.org/abs/astro-ph/0105184, arXiv.org/abs/hep-ph/0105083