

עופר להב

אסטרונומיה

ויהי חושך ויהי אור

038

קשה להבין כיצד הצליח המושג "אנרגיה אפלה", שהוצע לפני 11 שנה, להתקבל במהירות מדהימה כל־כך בקרב קהילת האסטרונומים כמודל מוביל בפיזיקה וקוסמולוגיה. מדענים רבים מנסים עכשיו לבסס את קיומה ולהגדיר את מהותה של אנרגיה זו, בעוד אחרים מציעים אלטרנטיבות, הכוללות שינוי רדיקלי במודלים הפיזיקליים המקובלים <<

« << ■ המושג "אנרגיה אפלה" נטבע ב־1999, אם כי הרעיון הופיע לראשונה אצל אינשטיין כבר ב־1917 בצורת "הקבוע הקוסמולוגי". בשנים האחרונות הפכה האנרגיה האפלה לאחד הנושאים המסתוריים והשנויים ביותר במחלוקת בתחומי הפיזיקה, והעיסוק בה מלווה בתמורה בעמדות תרבותיות, בחדשנות תיאורטית ובהישגים טכנולוגיים מעוררי השתאות. סיפור האנרגיה האפלה מקיף תחומים רחבים של הפיזיקה והאסטרונומיה ומספק הארה מרתקת על הפילוסופיה של המדע, על הדרך בה הוא פועל, ועל מעמדם של ניבויים תיאורטיים שלא ניתן להוכיחם בזמן בו הם נעשים.

הון עתק ואינספור שעות מושקעים בהדמיה ובסקרים ספקטרוגרפיים, בניסיון להסביר מדוע תצפיות שונות מצביעות על התפשטותו המואצת של היקום. יש סיבה טובה להשקעה הזאת – כדי להסביר התפשטות זו נדרשת לא פחות מהבנה מחודשת של הרכב היקום כולו. ככל הנראה לנו היום, ההסבר להאצה טמון בכך שכדור הארץ, שאר הפלנטות, הכוכבים וכל חומר ידוע ומוכר לנו, תופסים 4 אחוזים בלבד מכלל החומר והאנרגיה שיש ביקום.

יותר ויותר ראיות מהימנות, שמקורן בסקרי גלקסיות ובמחקרים של קרינת הרקע הקוסמית בגלי מיקרו (CMB), מלמדות כי החומר האפל הקר הלא־בריוני (CDM) תופס 21 אחוזים נוספים, אבל כל 75 האחוזים הנתורים הם אנרגיה אפלה (ראה מסגרת), שמהותה אינה ברורה לנו בצורה מניחה את הדעת. התגליות האלה מצריכות שינוי דרמטי בתפיסתנו, אולי אפילו שינוי גדול מזה שנדרש לאחר שקופרניקוס הראה כי כדור הארץ נע סביב השמש.

ההיסטוריה של המדע רצופה בניבויים על תופעה שתתרחש בעתיד, או על חומר שעדיין לא התגלה. הניבוי מתבסס על תיאוריה מדעית קיימת. כך ניבא מנדלייב את היסודות שיימצאו בטבלה המחזורית,

"על רקע ההתרגשות הנוכחית שמעורר מושג האנרגיה האפלה, יש עניין בכך שניוטון גילה לפני 320 שנה מונח שעשוי להיות קשור אליה. אנו רואים שמונח ליניארי (קווי) פועל כ'אנטי־כבידה'. יהיה זה צחוק הגורל אם יתברר לאחר כל הספקולציות והסיבוכים וההתחכמות התיאורטית, כי התשובה לבעיה טמונה במשוואות המקוריות של ניוטון"

אדמונד האלי את מועד הגעתו של השביט האלי, ואינשטיין – את ההסטה של קרני האור כשהן עוברות בקרבת השמש. סוג שונה מעט של ניבוי נובע מתיאוריה מדעית, שבמסגרתה מתגלות תופעות שאינן מוסברות באמצעות המודל התיאורטי. אנשי המדע מנסים להוסיף למערכת התיאורטית אלמנט נוסף, לא מוכר, שיפתור את אי־ההתאמות בין התצפיות במציאות לתיאוריה. כך, למשל, כדי "למלא" את החלל הריק, "הומצא" האָתֶר כשדה המסוגל להוביל גלים אלקטרומגנטיים.

אינשטיין הציע והציג את הקבוע הקוסמולוגי, המסומן באות הלטינית למדא (Λ), כדי להתאים את הנתונים לתפיסת היקום התיאורטית שלו, אבל לא חלף זמן רב עד שהוא החל לראות בלמדא אלמנט מיותר ובלתי מצודד, ולבסוף ויתר עליו כליל. ההוספה של Λ למשוואות השדה הכבידתי היא התיקון היחיד המתקבל על הדעת שאינו משנה במידה ניכרת את מבנה התיאוריה, ודי היה בכך שמונח זה לא יישכח וייעלם. באופן מפתיע, סדרת תצפיות שנעשו במרוצת המאה ה־20, רמזה בהתמדה על נוכחותו.

השימוש של אינשטיין בקבוע הקוסמולוגי נועד לבטל את ההשפעות הדוחסות של הכבידה, שמנבאות את קריסת (או את התפשטות) היקום, מפני שהוא היה בטוח באותה תקופה כי היקום הוא סטטי ונצחי. אינשטיין ראה את הקבוע האמור כתכונה של המרחב עצמו, אבל אפשר לפרשו גם כצורה של אנרגיה שאחידותה ממלאת את כל המרחב. אם Λ הוא מספר חיובי, לאנרגיה האחידה יש לחץ שלילי וכבידה דחיייתית (הפוכה לכוח הכבידה). אינשטיין התאכזב מהמונח וזנח אותו סופית ב־1931, לאחר שאדווין האבל ומילטון הומאסון גילו שהיקום דווקא מתפשט.

מאז ואילך היה נראה כי Λ מוחזר לקוסמולוגיה כל אימת שיש להסביר בעיה, ומושלך מאוחר יותר, כאשר נתונים נוספים נעשים זמינים והופכים אותו, בעיני המדענים, למיותר ובלתי טבעי. כאשר יעקב זלדוביץ ייחס ב־1968 את Λ לצפיפות האנרגיה של הוואקום, הבעיה הייתה איך להסביר שהערך החזוי שלו היה גדול ב־120 סדרי גודל מהערך שנצפה בעליל. על־פי ההערכה המקובלת, היה צריך להימצא מנגנון כזה או אחר שיבטל את Λ לחלוטין ויעמידו בדיוק על אפס, ערך שהיה בזמנו מועדף על הפיזיקאים והקוסמולוגים לצורך המודלים. סטיבן וינברג הגדיר את הסיטואציה הזאת ב־1989 כ"בעיית הקבוע הקוסמולוגי".

ברגע ששתי קבוצות יריבות של צידי סופרנובות, אחת של שאול פרלמוטר והאחרת של בריאן שמידט, השלימו ב־1998 שנים של תצפיות מאומצות בתגלית המדהימה, שהתפשטות היקום היא תהליך מואץ, נקרא שוב הקבוע הקוסמולוגי של אינשטיין לדגל, כדי להסביר מה מניע את ההתפשטות המואצת הזו. ניתן היה להסביר את ההאצה בעזרת קבוע קוסמולוגי, שיש לו ערך שונה מזה שהוצע

בזמנו על־ידי אינשטיין והתאים ליקום סטטי.

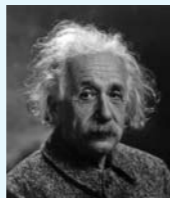
במהירות מפתיעה, כמעט בן לילה, אימצה הקהילה המדעית מודל חדש של היקום. מתברר שהאסטרונומיה הייתה בשלה לשינוי. אין ספק שהתצפיות בסופרנובות מילאו תפקיד מכריע בשינוי הפרספקטיבה של הנוגעים בדבר, אבל ההתקבלות המהירה של התיאוריה החדשה ושל מה שקיבל את השם "אנרגיה אפלה", מוסברת בעשור של הבשלה שקדם לתצפיות הללו.

אינפלציה קוסמית וחומר אפל קר

שורשי השינוי נעוצים ב־1980, אז הציע אלן גוט, פיזיקאי שעשה את עבודת הפוסט־דוקטורט שלו במרכז המאיי הליניארי סטנפורד, פתרון נועז לחלק מהבעיות שעוררה התיאוריה הסטנדרטית של המפץ הגדול בשנות השבעים. הוא גילה מנגנון שעשוי היה לגרום ליקום להתנפח, או לעבור אינפלציה בשיעור מדהים בפרק זמן קצר לבלי האמן. האינפלציה שהתרחשה מיד אחרי המפץ הגדול הייתה אדירה עד כדי כך, שהיקום התפשט במרחב זמן בן 10^{-35} שניות יותר מכפי שהתפשט ב־13.7 מיליארד השנים, לפי האומדן, מאז ואילך. תורת היחסות הכללית של אינשטיין, שעמדה עד כה בכל מבחן שנערך לה, אומרת לנו כי העקמומיות של המרחב נקבעת על־ידי הכמות של חומר ואנרגיה בכל נפח של אותו מרחב – צפיפות החומר/אנרגיה. רק שיעור מסוים ומיוחד של חומר ואנרגיה – הצפיפות הקריטית – ייתן גיאומטריה שטוחה.

אם צפיפות החומר/אנרגיה ביקום גדולה מהצפיפות הקריטית, המרחב יהיה עקום בצורה חיובית, כמו שטח הפנים של כדור. אם מדובר בערך נמוך מהצפיפות הקריטית, המרחב יהיה עקום בצורה שלילית, כמו אוכף. אם ההתפשטות במודל הסטנדרטי של המפץ הגדול מניעה את היקום מן השטיחות והצפיפות הקריטית והלאה, הרי שהאינפלציה שהציע גות מניעה את היקום אל עבר הצפיפות הקריטית, כך שעכשיו עליו להיות שטוח עד מאוד. לצורך אנלוגיה נתאר לעצמנו בלון שמנופח במהירות לממדים של פלנטה. שטח פניו ייראה שטוח יותר ויותר, כפי שמדבר נראה שטוח מנקודת הראות של יושביו. באמצע שנות השמונים אימצה הקהילה המדעית, רובה ככולה, נוסח מתוקן של מודל גות.

מהי אנרגיה אפלה



אפשר לתאר אנרגיה אפלה כמעין נוזל בצפיפות אנרגיה קבועה ובלחץ קבוע, המאופיין באמצעות פרמטר שכינזי $w = -1$, מנת החילוק של הלחץ בצפיפות. במקרה של קבוע קוסמולוגי $w = -1$, הלחץ השלילי גורם לכבידה דחיייתית, והוא יכול אפוא להאיץ את התפשטות היקום מרגע שדחייה זו גוברת על המשיכה הגרביטציונית. נתונים שוטפים שהתקבלו מסופרנובות מטיפוס Ia, תבניות בהתקבצות של גלקסיות ו-CMB-1, מצביעים כולם על המסקנה הזאת – יקום שטוח עם קבוע קוסמולוגי, ומודל "ΛCDM" מקובל היום על החוקרים. על כל פנים, קיימת גם אפשרות שהאנרגיה האפלה משתנה במרוצת הזמן ומתוארת באמצעות שדה סקלארי המתפתח בהדרגה. חוגים מסוימים מייחדים את המונח אנרגיה אפלה למצב זה. רעיון אחר אומר, שהתאוצה הקוסמית נובעת מאזורים של אי־הומוגניות או מפגמים טופולוגיים כמו "מיתרים". אין להוציא מכלל חשבון אפשרות מרחיקת לכת, שתורת היחסות הכללית אינה מושלמת, ועלינו לפתח תיאוריה מתקנת של כבידה שתהלום את התצפיות, כפי שמתואר בסוף המאמר.

אחת הדרכים החשובות ללמוד על חומר אפל ועל אנרגיה אפלה היא מחקר של השינויים הזעירים בטמפרטורה של קרינת הרקע הקוסמית בגלי מיקרו (CMB). הקרינה הזאת החלה לנוע לעברנו 380,000 שנים לאחר האירוע המקובל עלינו כתחילתו של היקום, כאשר גודלו של היקום הנצפה היה אלפית משיעורו הנוכחי, והטמפרטורה שלו 3,000 קלווין בקירוב. מתחת לטמפרטורה הזאת לא הייתה לפוטונים אנרגיה די הצורך להתיז אלקטרונים מתוך האטומים שלהם, ולכן פסקה האינטרקציה של הפוטונים עם האטומים והיקום נעשה שקוף לאור. ב־13.7 מיליארד השנים החוצצות בין העת ההיא ובין העת הנוכחית היקום התפשט והתקרר, וכיום אפשר לגלות את הפוטונים הראשונים בטמפרטורה של 2.7 קלווין בקירוב. אורכי הגל שלהם התמתחו, או עברו היסט לאדום, והגיעו לתחום גלי המיקרו של הספקטרום האלקטרומגנטי. על־פי הנמדד היום, הטמפרטורה של CMB זהה כמעט בדיוק בכל האזורים של השמים, והגילוי שלה ב־1965, על־ידי ארנו פנזיאס ורוברט וילסון, נחשב כראיה חזקה לנכונות התיאוריה הסטנדרטית של המפץ הגדול ויקום שטוח. גם הממצאים החדשים של לוויין WMAP מאשרים כי עקמומיותו של היקום היא אפס. קרי, היקום שטוח ומורכב מ־25 אחוזים חומר ו־75 אחוזים אנרגיה אפלה.

וכך, כדי להשלים את הרכיב החסר שמסביר את ההתפשטות המואצת והיקום השטוח, הכניסו קוסמולוגים לשימוש את השם "אנרגיה אפלה", כדי להקיף באמצעותו את כל הרעיונות שעלו עד אז. כאשר נתוני הסופרנובות הצביעו על כך שהתפשטות היקום מואצת והובעה דרישה להחזרת הקבוע הקוסמולוגי, היה קל <<

<< לעבור תהליך מהיר של אימוץ מושג האנרגיה האפלה. רבות מהתצפיות הקוסמולוגיות המתוכננות, או המבוצעות עתה, מיועדות להשיג תגליות נוספות בתחום זה. מוקד הקוסמולוגיה הוסט במלואו ובאופן דרמטי, במטרה לראות אם נוכל לפענח את המסתורין פשוט על־ידי הצבה מחדש של הקבוע הקוסמולוגי, או שמא יהיה עלינו להתבונן ולחשוף מה שנמצא מעבר לתורת היחסות הכללית, לחפש אפשרויות חדשות ומסעירות, כמו אלה שמוצעות, למשל, בתיאוריות חדשות כמו זו של "עולמות ממברנה" שנראה מייד.

לקראת חלופות ומודלים חדשים

אם אנחנו יכולים ללמוד משהו מההיסטוריה המדעית החדשה, הרי זה שאסור לנו להתעלם מהראיות כאשר הן מוטחות בפנינו. ההוספה של שני מונחים שאינם מובנים די הצורך – אנרגיה אפלה וחומר אפל – לתיאוריה של אינשטיין עלולה אמנם להשחית את האלגנטיות ואת היופי של



ניוטון ואנרגיה אפלה

במאמר נטען שבעיית האנרגיה האפלה היא בת עשר שנים, או לכל היותר בת תשעים שנה, אבל אפשר גם לומר שגילה הוא 320 שנה. שלושת כרכי ה"פרינקיפיה" של ניוטון פורסמו בלטינית ביולי 1687 והוציאו מוניטין לניוטון בן ה־45. במשפטים 70 עד 71 הוכיח ניוטון את חוק היפוך ריבוע המרחק של הכבידה, שקבע כי מסה נקודתית m, הנמצאת מחוץ לכדור שהמסה שלו היא M, נמשכת אל עבר מרכז הכדור בכוח F, ששיעורו פרופורציונלי להיפוך ריבוע המרחק r בינה ובין מרכז הכדור: $F = - G Mm/r^2$ ניוטון ממשיך ומראה כי הכוח פועל כאילו המסה M מרוכזת כולה במרכז הכדור, וכי אותו חוק עצמו תופס גם בין שני כדורים שונים, ופירוש הדבר הוא שאפשר ליישם את האנליזה המתמטית הזאת על הבעיות האקטואליות של האסטרונומיה. למרבה הפליאה, לאחר שניוטון משלים את הדיון הזה, הוא בוחן את התוצאות המתבקשות מטווח רחב של חוקי כוח מרכזי, ומגיע למסקנה שיש צורה נוספת לטיפול אפשרי במסות כדוריות סימטריות, כאילו כל המסה מצויה בנקודת המרכז. כך קורה כאשר "הכוח המורכב שבו מושכות המסות זו את זו, נוהג כמו המרחק בין מרכזי הכדורים" (ניוטון 1687, משפט 77, תאורמה 37). בהערה מבהירה (Scholium) הוא כותב:

"הסברתי זה עתה את שני המקרים העיקריים של משיכות: כאשר הכוחות הצנטריפטיים קטנים כריבוע היחס של המרחקים, או גדלים ביחס פשוט של המרחקים, גורמים לגופים בשני המקרים לנוע סחור סחור בחתכים חרוטיים ומחברים גופים כדוריים שהכוחות הצנטריפטיים שלהם מקיימים אותו חוק עצמו של הגדלה או הקטנה בניסיגה מהמרכז כפי שעושים הכוחות של החלקיקים עצמם; והדבר מרשים מאוד".

סברהמניאן צ'נדראסקאר, מי שכתב מחדש חלק ניכר של הספרים I, II ו-III של "פרינקיפיה" בסגנון נגיש יותר למדענים בני זמננו, ציין כי זה המקום היחיד שבו מתיר ניוטון לעצמו ביטוי של הפתעה ורגש!

ככל הידוע לנו, ניוטון לא שקל את הסופרפוזיציה של שני הכוחות, אבל יש בהחלט מקום לחשוב על הניסוח המלא של חוק הכוח המתאים למסה M באמצעות הסימון המודרני: $F/m = - GM/r^2 + \Lambda/3 r$ זהו, בעצם, גבול השדה החלש של תורת היחסות הכללית. על רקע ההתרגשות הנוכחית שמעורר מושג האנרגיה האפלה, יש עניין בכך שניוטון גילה לפני 320 שנה מונח שעשוי להיות קשור אליה. אנו רואים שמונח ליניארי (קווי) פועל כ"אנטי־כבידה". יהיה זה צחוק הגורל אם יתברר לאחר כל הספקולציות והסיבוכים וההתחכמות התיאורטית, כי התשובה לבעיה טמונה במשוואות המקוריות של ניוטון.

התיאוריה הזאת, אבל פשטות בפני עצמה אינה חוק טבע.

כך או כך, גם אם הטיעון בזכות האנרגיה האפלה קיבל חיזוקים רבים בעשר השנים שחלפו מאז הצגתו לראשונה, רבים אינם חשים בנוח עם המודל הקוסמולוגי הנוכחי. מודל זה אכן עולה בקנה אחד עם כל הנתונים השוטפים, אבל אין לו שום הסבר במונחים של פיזיקה יסודית, וגם הרכב היקום נראה במובן מסוים שרירותי. כתוצאה מכך הוצעו מספר חלופות אפשריות לאנרגיה האפלה, ואין לדחות על הסף את ההסתברות, שתפיסתנו את היקום תעבור מהפך נוסף בעשור הבא.

אילו רעיונות לשינויים פוטנציאליים במודל הפיזיקלי המוכר לנו

מוצעים היום ויכולים להסביר את התופעות? בשלב זה אנו יכולים

רק להמר על ארבע האופציות הבאות:

1) הפרה של העיקרון הקופרניקאי

כיום אנו מניחים ששביל החלב אינו תופס מקום ייחודי ומיוחד ביקום, אבל אם יתברר שאנו חיים בליבו של אזור תת־צפוף גדול, אולי יהיה בכך כדי להסביר מדוע הסופרנובות נראות לנו עמומות, אף אם אין קיום לשום צורה של אנרגיה אפלה. על כל פנים, הדרישה המתחייבת מחשיבה זו היא שהגלקסיה שלנו תתפוס עמדה מיוחדת, ודרישה כזו מנוגדת לרוב הנחות היסוד של הקוסמולוגיה, לפיהן אין ביקום צופה מועדף.



2) אנרגיה אפלה משתנה עם הזמן

מבחינה מתמטית, אנרגיית ואקום היא שוות ערך ל- Λ , אבל הערך החזוי על־פי התיאוריה היסודית, גבוה בסדרי גודל רבים מזה שהתצפיות יכולות להרשות, ואין שום פתרון קביל לבעיה. עד כה הוצעו הרבה רעיונות מעניינים לפתרון, ובכללם מודלים של אנרגיה אפלה המשתנה עם הזמן ושל שדה סקלארי, אבל אפילו הם אינם מסבירים את הערכים השרירותיים של 25 אחוזים של חומר ו־75 אחוזים של אנרגיה אפלה.

3) תיקון של הבנתנו את הכבידה

יכול להיות שעלינו לחפש תיאוריה מושלמת יותר של כבידה מעבר לתורת היחסות הכללית. התפתחויות מסעירות חדשות בתיאוריה של "עולמות ממברנה" מציעות השפעה של ממדים מרחביים נוספים, אבל סביר שהמסתורין של האנרגיה האפלה והתאוצה הקוסמית לא יפתרו לפני שיהיה אפשר לשלב בהצלחה את תורת הכבידה ותורת הקוונטים.

4) רב־יקומים

בשנות השמונים היו מי שהצביעו על כך, שההשפעה של Λ על ההיווצרות של מבנה ביקום יכולה להיות דרמטית. אילו היה הקבוע הקוסמי חיובי וגדול מדי, היה במצב זה כדי למנוע מהכבידה ליצור גלקסיות גדולות, כך שהחיים כפי שאנו מכירים אותם לא היו מופיעים מעולם. כעבור עשור השתמשו סטיבן ויינברג ואחרים בעקרון האנתרופי הזה לביאור הבעיות של הקבוע הקוסמולוגי, וחזו ל- Λ ערך קרוב במידה מרשימה למה שנצפה בסופו של דבר. על כל פנים, המשמעות של שימוש זה בתורת ההסתברות היא חיזוי מספר אינסופי של יקומים, ש- Λ יכול לקבל בהם את כל הערכים האפשריים. מדענים רבים אינם מאמינים ברעיונות אנתרופיים, מפני שהם אינם יוצרים חיזויים בני־הפרכה, ונראה כי משתמע מהם סוג של עקרון חיים או כוונה המצויים בדו־קיום עם חוקי

על עבודתו של אדם רבינוביץ' המוצגת בשער הכתבה: בתערוכה "תרדמון" יצר רבינוביץ' חויית חלל המתבססת על אפלה כמעט מוחלטת, שהשרתה תחושה של אינסופיות ועם זאת הפנתה זרקור אל אירציות מרחבית. במרכז החלל ניצבו שני מבנים קובייתיים שמעליהם נתלו כדורים. מבעד לחריצים במבנה בקעו לשונות עשן סינתטי וחגו סביב הכדורים. כתוצאה מהתעבות אדי הגז בשולי החריצים נקוו סביבם טיפות שמנוניות, דמויות־זיעה, שהקרינו ספק חום ספק קור. העירוב בין מצבי הצבירה השונים המחזי תמורות מולקולריות, מפגשי כלאיים ופרימה של יחסי חומר־צורה: המבנים כמו הובאו באחת לדרגת רתיחה, התכה, קפיאה, עיבוי והמראה, והדגימו אי־היקבעות של חומר, צורה וטמפרטורה.

הפיזיקה. כך או כך, תורת "עולמות הממברנה" חוזה מספר עצום של ואקומים עם ערכים אפשריים שונים של פרמטרים פיזיקליים, ומכאן מתבקשת מידה מסוימת של לגיטימציה לחשיבה אנתרופית כבסיס חדש לתיאוריות פיזיקליות.

לאור השאלות הללו מוקד המחקר בקוסמולוגיה השתנה בשנים האחרונות בצורה דרמטית, ורבות מהתצפיות האסטרונומיות המתוכננות או המבוצעות עתה, מיועדות בראש ובראשונה להוסיף תגליות על הגורם המצוי ביסוד ההאצה הקוסמית. לדוגמה, סקר האנרגיה האפלה (www.darkenergysurvey.org). בסקר זה ייעשה שימוש בטלסקופ מצויד במצלמה חדשה שקוטרו 4 מטרים, המוצב בצ'ילה. טלסקופ זה יעמיק להתבונן בשמים של חצי הכדור הדרומי וימפה את ההתפלגות של 300 מיליון גלקסיות על פני 5,000 מעלות רבועות (שמינית של השמים) עד להיסט לאדום של 2.

האנרגיה האפלה תימדד באמצעות ארבע בדיקות: התקבצות גלקסיות בקנה מידה גדול, העושר של צבירי גלקסיות כבדים, עיוות צורת הגלקסיות בשל הטיית אור הנגרמת על־ידי התפלגות המסה לאורך קו הראייה, וכן מדידת המרחקים אל סופרנובות.

התצפיות בטלסקופ זה יחלו ב־2011, והסקר יושלם ב־2016. בפרויקט כולו משתתפים יותר מ־100 מדענים מארה"ב, מבריטניה, מברזיל ומספרד, כולל כותב מאמר זה. המטרה, כאמור, היא למדוד בדיוק יחסי את הפרמטר w (ראו מסגרת על האנרגיה האפלה).

למרבה המזל, כמעט כל תוצאה אפשרית של הסקרים האלה תעורר עניין רב. אם טעויות שיטתיות גדולות בנתונים ילמדו ששוב אין צורך להניח את קיומה של אנרגיה אפלה, תהיה זו פריצת דרך חשובה. אם, לעומת זאת, הנתונים יתמכו בקיומה של אנרגיה אפלה או בתיקון של הכבידה, תהיה לכך השפעה יסודית על הפיזיקה בכללותה.

(המאמר נכתב בשיתוף עם לואיס קאלדר)