



עדשות גרביטציוניות באסטרונומיה

ע"מ הרפ"ל, המחלקה להוראת המדעים, אורניס, והמכון לחקר החלל ע"מ א"ר, טכניון

תקציר

התופעה של עדשות גרביטציוניות היא אחד הניבויים של תורת היחסות הכללית, אשר נתגלתה בתצפיות של עצמים אסטרונומיים, שנים רבות לאחר הופעת תורת היחסות. הופעה בולטת של תופעה זו היא "טבעת איינשטיין", שנתגלתה ב-1988. לאחרונה נחקרה הבעיה של "המסה החסרה" בגלקסיה שלנו, על-ידי עיקוב אחר הגברת האור של כוכבים רחוקים, כתוצאה מפעולת עדשה גרביטציונית, הנוצרת על-ידי עצמים אפלים, הנמצאים בעטרה של הגלקסיה שלנו.

מילות מפתח

תורת היחסות; עדשות גרביטציוניות; טבעת איינשטיין; המסה החסרה.

קרן אור יוצאת מכוכב הנמצא עבורנו מאחורי השמש. כאשר קרן האור עוברת סמוך לפני השמש, היא מתעקמת בכיוון שדה הגרביטציה של השמש, ומגיעה אל הצופה הנמצא על פני כדור הארץ במסלול שכיוונו שונה מכיוון הקרן המקורי. עבור הצופה, בבואת הכוכב נמצאת בהמשך מסלול הקרן המגיעה אליו, כלומר במקום אחר מן המקום בו נמצא הכוכב. נסמן את הזווית שבין הקרן המקורית למסלול הקרן לאחר התעקמותה באות Δ . הנוסחה עבור הזווית הזו המתקבלת מתורת היחסות הכללית היא:

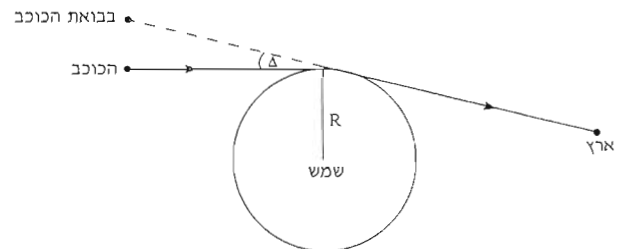
$$(1) \quad \Delta = \frac{4GM}{c^2 x_0}$$

כאשר G הוא קבוע הגרביטציה, M - מסת השמש, c - מהירות האור, ו x_0 הוא המרחק הניצב של המסלול המקורי ממרכז השמש (במקרה שלנו - רדיוס השמש). בהצבת הערכים של רדיוס השמש ומסתה מקבלים: $\Delta = 1.75''$ (הסימון "מציין שניית קשת = 1/3600 מעלה).

המדידה של סטייה כזו קשה מאד לביצוע באור נראה מכיוון שיש להבחין באור כוכבים העובר סמוך לפני השמש. הדרך הטובה לביצוע מדידה כזו היא לבצע אותה בזמן ליקוי חמה מלא. מצלמים את השמש וסביבתה בזמן ליקוי חמה ומשווים את התמונה המתקבלת לתמונה של אותו אזור בשמים שצולמה ללא נוכחות השמש. ההבדלים שיופיעו בין שתי התמונות במצב היחסי של הכוכבים, נוצרו בגלל נוכחות השמש. כוכבי השבת רחוקים ממערכת השמש מרחק רב, ולכן השמש יכלה להשפיע רק על מסלול האור המגיע מהם כאשר הוא עובר בקרבתה.

התופעה של התעקמות קרן אור במעבר בשדה גרביטציה היתה אחד החיזויים של תורת היחסות הכללית שאושר זמן לא רב לאחר שהתורה פורסמה על ידי איינשטיין. חשיבותה של תופעה זו היא בכך שלא היתה ידועה קודם, והיא ניבוי מקורי של תורת היחסות, ולכן אישורה בתצפית מהווה תמיכה חזקה בנכונותה של התורה. התופעה של סיבוב הפריהליון של כוכבי הלכת היתה ידועה עוד לפני הופעת תורת היחסות, והתורה הסבירה את התופעה. הסבר לתופעה ידועה אך בלתי מובנת, חשוב, אך אינו מהווה מבחן חזק לתאוריה, מכיוון שאפשר להניח שהתאוריה הותאמה כדי להסביר את התופעה הידועה. ניבוי תופעה בלתי מוכרת ואישורה בניסוי מהווה מבחן חזק לאימות התיאוריה, ובכך חשיבותה של התופעה הזו.

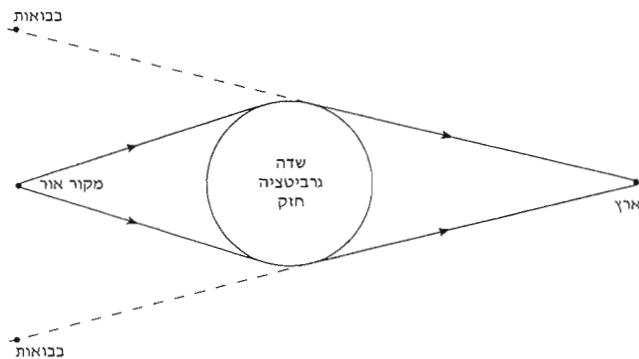
מבלי להיכנס לפרטי התיאוריה נתאר את התופעה בעזרת תרשים 1:



תרשים 1: התעקמות קרן-אור כתוצאה מגרביטציה. קרן-אור שיצאה מן הכוכב התעקמה במעבר ליד השמש. הצופה על הארץ מדמה שמקור האור הוא הבבואה הנמצאת בהמשך מסלול הקרן שהתעקמה. Δ היא הזווית בין המסלול המקורי והאסימפטוטה למסלול לאחר ההתעקמות.

התפלגות ספקטרלית אופיינית, שהיא מעין "טביעת אצבעות" שלו, והיא משמשת לזיהוי והבחנה בין מקורות שונים. ההסבר לשוויון ההתפלגות הספקטרלית של שני עצמים שונים הוא בכך ששני העצמים שאנו רואים אינם אלא שתי בבואות של אותו עצם. שתי הבבואות נוצרות מכיוון שאזור בו שורר שדה גרביטציה חזק נמצא בינינו ובין מקור האור המרוחק וגורם להתעקמות מסלול האור. ההשפעה של אזור הגרביטציה, שנכנה אותו "העדרה", פועלת לריכוז אלומת האור, ולכן שתי אלומות של אור שיצאו מן המקור הרחוק בכיוונים שונים, ועברו משני צידי העדרה, התעקמו פנימה, והגיעו אל מכשיר המדידה שלנו כאלו מכיוונים שונים. תרשים 2 מראה את המסלולים המשוערים של האלומות הנפרדות. תופעה זו נתגלתה כבר בכמה עצמים, ומנסים להשתמש בה כדי ללמוד יותר פרטים על טבע הגוף המשמש כעדשה.

המצב המתואר בתרשים 2 הוא מצב אידיאלי בו הארץ (הצופה), העדשה והמקור נמצאים על קו אחד, ובבואות המקור סימטריות ביחס לקו הזה. ברוב המקרים שניתקל בהם בהם בטבע, המצב לא יהיה כה אידיאלי, והבבואות לא תהיינה סימטריות.



תרשים 2: קרני-האור היוצאות מן המקור התעקמו במעברן בשדה-גרביטציה חזק. כתוצאה מתרכזות הקרניים ומגיעות לצופה כאילו מכיוונים שונים. הצופה מדמה לעצמו שהאור בא משני מקורות שונים.

ב 1936 פירסם איינשטיין מאמר בעיתון המדעי Science (A. Einstein, 1936) בו חישב מה יראה צופה במצב אידיאלי כמו זה המתואר בתרשים 2. הוא הראה שבגלל הסימטריה סביב הציר ארץ-עדשה-מקור, הבבואות תופענה במעגל סביב העדרה, ותיצורנה טבעת. בסוף מאמרו מעיר איינשטיין שהסיכויים לקיום תנאים לתצפית אידיאלית כזו שואפים לאפס, ולכן לחישובים אלה יש ערך תאורטי בלבד. כיום התצפיות האסטרונומיות משתרעות על טווח רחב מאד של אורכי גל, ומגיעות למרחקים גדולים מאד ביקום.

ב 1919 נערכה תצפית כזו על ידי אדינגטון (Eddington) והניבוי של תורת היחסות אומת. מאז נערכו חזרות רבות על המדידה והניבוי אומת שוב ושוב. כיום אפשר למדוד סטיות של קרינות אלקטרומגנטיות שאינן אור נראה, כמו קרינת רדיו וקרינות אחרות. מדידות אלה ניתנות לביצוע גם ללא ליקוי חמה ובדרגת דיוק גבוהה. גם מדידות אלה, שנערכו בשנים האחרונות אישרו את הניבוי של תורת היחסות.

ההסבר להתעקמות קרן האור הוא בכך שמרחב בו קיים שדה גרביטציה הוא מרחב עקום. במעבר האור בשדה גרביטציה, מהירותו קטנה, כמו בזמן מעבר האור בתווך בעל מקדם שבירה גדול מיחידה. השתנות של עצמת שדה הגרביטציה במרחב שמסביב לשמש, יוצרת מקדם שבירה משתנה, וכפי שאנו יודעים מלימוד האופטיקה, מקדם שבירה משתנה גורם להתעקמות קרן האור.

נסמן את מקדם השבירה ב-k. מקדם השבירה הגרביטציוני של עצם נקודתי נתון על ידי:

$$(2) \quad k = \frac{1}{\sqrt{1 + 2\phi/c^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - 2GM/c^2r}}$$

כאשר ϕ מייצגת את פוטנציאל הגרביטציה, M היא מסת העצם הנקודתי, ו r הוא המרחק של נקודת השדה ממרכז הגרביטציה. הביטוי המופיע באמצע משוואה (2) הוא ביטוי כללי המתאים לכל פוטנציאל גרביטציוני, והביטוי הימני במשוואה זו מתקבל לאחר שהצבנו את הפוטנציאל של מסה נקודתית. אנו מבחינים ש $k > 1$ ושואף ליחידה במרחק אינסופי ממרכז הגרביטציה. לפי משוואה (2), מהירות האור הנצפית על ידינו, של אור העובר בשדה גרביטציה של מסה נקודתית היא $c/k = c \cdot \sqrt{1 - 2GM/c^2r}$. חישוב מסלול האור בשדה גרביטציה יכול להתבצע תוך שימוש בעקרון פרמה, במרחב העקום סמוך לפני השמש, בו מקדם השבירה משתנה. השימוש במקדם השבירה של התווך מוביל אותנו למושג של "עדשות גרביטציוניות", אשר יכולות לרכז (או לפזר) אלומות של קרינה אלקטרומגנטית (אור, רדיו) העוברות דרכן. תופעות כאלה מתגלות בקרינה המגיעה ממקורות רחוקים, כאשר הקרינה עוברת דרך אזורים שבהם שוררת גרביטציה חזקה. תופעה כזו אכן נתגלתה כאשר התברר שלשני עצמים נפרדים, הנמצאים במרחק רב מאיתנו, יש בדיוק אותן תכונות ספקטרליות. התכונות הספקטרליות של מקור אור או ה"פילוג הספקטרלי" שלו מאפיינים את מקור האור באופן חד משמעי. ההתפלגות הספקטרלית של המקור תלויה גם בהרכב הכימי של החומר וגם בהתפלגות הטמפרטורה במקור. לכן, לכל מקור יש

בתצפיות בקרינת רדיו נתגלו כמה וכמה תופעות של עדשות גרביטציוניות, במיוחד בקרינה המגיעה מקוואסארים רחוקים, ואסטרונומים חיפשו את התופעה של "טבעת איינשטיין", כפי שכונתה התצפית החזויה של מצב אידיאלי שתואר לעיל. ב-1988 נתגלתה תופעה כזו על ידי Hewitt ו-Burke מ-MIT, ו-Turner מאוניברסיטת פרינסטון (J.N. Hewitt et al., 1988) ותצלום של הטבעת כפי שצולמה על ידם ניתן בתרשים 3 (בעמוד 56).

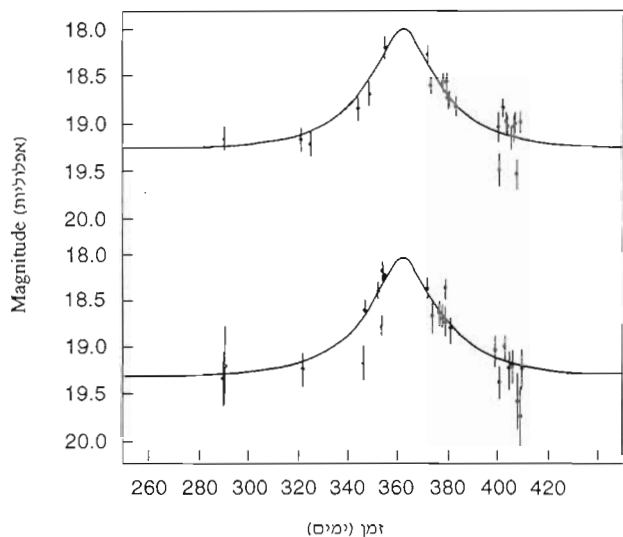
התצלום הוא של הקוואסאר MG1131+0456 (המספרים מציינים את הקואורדינטות השמימיות של המקור), שצולם בקרינת רדיו ($\lambda = 2 \text{ cm}$). המקור כולל ליבה דחוסה ושתי אונות הנמצאות משני צידי הליבה. האונות האלה משמשות מקור לקרינת רדיו חזקה. הכתמים הכתומים בתמונה (מסומנים ב-A, B) הם שתי בבואות של הליבה, שנוצרו על ידי שדה הגרביטציה של גלקסיה הנמצאת בינינו ובין הקוואסאר. הטבעת (הירוקה-כחולה) היא "טבעת איינשטיין", והיא הבבואה של אחת מאונות הקוואסאר הנמצאת בדיוק מאחורי הגלקסיה המשמשת כעדשה. מרחק הקוואסאר מאיתנו הוא מסדר גודל של מיליארד שנות אור, ומניחים שהגלקסיה נמצאת בערך במחצית המרחק לקוואסאר, על קו העובר מאיתנו דרך מרכז הטבעת. הארת הגלקסיה היא בעיקרה בתחום האור הנראה, ולכן אינה נראית בתמונה שצולמה באורך גל של קרינת רדיו.

הופעה נוספת של עדשה גרביטציונית באסטרונומיה נצפתה רק לאחרונה (1993), והיא קשורה לתופעה מעניינת אחרת - המסה החסרה בגלקסיה. הנושא של המסה החסרה בגלקסיה עלה מתוך השוואה של המסה הנצפית באופן ישיר, לכמות המסה הדרושה כדי לאזן את הכח הצנטריפוגלי הנוצר עקב סיבוב הגלקסיה. ספירת מקורות האור הנצפים בגלקסיה, ושימוש ביחס שבין מסת המקור לעצמת האור שהוא מפיץ, נותנים לנו הערכה לכמות החומר הנמצא בגלקסיה, המגיעה בערך ל 10^{11} פעמים מסת השמש. לעומת זאת, חישוב הדינמיקה של סיבוב הגלקסיה וההנחה שקיים שיווי משקל בין הכוח הצנטריפוגלי הנוצר בסיבוב וכוח הגרביטציה, מחייבים קיומו של חומר בכמות גדולה מזו המתקבלת מסיכום מקורות האור הנצפים בגלקסיה. הוצעו פתרונות תאורטיים שונים לבעייה של "המסה החסרה" לשיווי המשקל הדינמי. אחד הפתרונות שהוצעו (מילגרום 1983) מניח שכוח ההתמדה מתנהג לפי החוק השני של ניוטון עבור תאוצות מסדר גודל שאנו פוגשים בחיי יום יום, אולם עבור תאוצות קטנות מאד, בסדר גודל של 10^{-8} ס"מ/שני, הוא קטן יותר מזה המתקבל מן החוק השני.

פתרונות אחרים של הבעייה, המסתמכים על חוק הכוח הקונבנציונלי הניחו שקיימת בגלקסיה "מסה אפלה", בנוסף למסה הנצפית, והיא יוצרת את שיווי המשקל הדינמי בין הכוח הצנטריפוגלי וכוח הגרביטציה. המסה הזו אמורה להימצא בעיקר ב"עטרה" של הגלקסיה, כלומר מסביב למבנה העיקרי של החלק הנראה של הגלקסיה. גם על טבעה של המסה האפלה הזו הונחו הנחות שונות, החל מקיומם של נייטרינים בכמויות גדולות ו/או חלקיקים קלים אחרים, או קיומם של חלקיקים כבדים, שהאינטראקציה שלהם עם החומר הבריוני הרגיל חלשה במיוחד (Weakly Interacting Massive Particles - WIMPs). הנחה יותר שמרנית היא שקיימת מסה אפלה בצורת גופים המורכבים מחומר בריוני רגיל, שמסתם נמוכה מכדי ליצור אנרגיה גרעינית בתוכם, ולכן הם אינם מהווים מקורות אור. גופים אלה מכונים Jupiters, מכיוון שמסתם היא מסדר גודל של צדק (המסה המינימלית של כוכב הדרושה כדי לאפשר ייצור אנרגיה גרעינית היא בערך 0.08 ממסת שמש) ואילו מסתו של צדק היא כאלפית מסת השמש. כדי להוות את המסה החסרה בגלקסיה, מספר העצמים האפלים חייב להיות גדול מאד.

עם ביסוס התאוריה של עדשות גרביטציוניות, הועלתה סברה (Paczynski, 1986), שהגופים האפלים האלה עשויים לעבור מידי פעם על קו הראייה הקושר אותנו עם כוכב כלשהו הנמצא מחוץ לגלקסיה, ואפקט העדשה הגרביטציונית יגרום להגברה של אור הכוכב כל זמן שהכוכב והגוף האפל יהיו פחות או יותר על אותו קו. בדרך כלל, הסיכוי של התלכדות מדויקת של עצמים אסטרונומיים על קו ראייה אחד נמוך ביותר, אולם המספר העצום של העצמים האפלים החזוי בעטרת הגלקסיה מעלה את הסיכוי הזה לרמה סבירה. נערכו חישובים של כמות המסה החסרה והמספר הצפוי של העצמים האפלים, ולפי נתונים אלו חישוב את הסיכוי להתרחשות ארוע כזה. מן המהירות הממוצעת המחושבת של העצמים האפלים (מהירות הנוצרת עקב סיבוב הגלקסיה) ומרחקם מאיתנו, חישובו את הזמן שתארך הגברה כזו ואת עצמת ההגברה, והתקבל שההגברה תארך כמה עשרות שנים, ועצמתה הצפויה מעל 50%.

המבחן לכך שההגברה נגרמה על ידי עדשה גרביטציונית ולא על ידי גורם אחר הוא בכך שההגברה תהיה סימטרית בזמן ותהיה אחידה בכל אורכי הגל. אינטראקציה של אור עם חומר היא אינטראקציה עם שדות אלקטרומגנטיים, והיא תלויה באורך הגל של האור. מקדם השבירה הנוצר



תרשים 4: הגברה של אור כוכב הנמצא ב LMC על ידי כוכב אפל הנמצא בעטרת הגלקסיה. (באדיבותה של מערכת Nature).

לינואר 1991. הציר האנכי מציין את הארת הכוכב והוא לוגריתמי (ניתן ב magnitude*). אנו רואים בתרשים הגברה של הארת הכוכב הנמשכת כארבעים ימים, והמאפיינים שלה מתאימים להגברה של עדשה גרביטציונית. ההגברה שווה בתחום האדום והכחול של הספקטרום, והיא סימטרית בזמן ביחס למכסימום ההגברה. מכסימום ההגברה הוא בערך פי ארבעה מעצמת האור הקבועה, ובמשך כל תקופת התצפית לא הופיעה כל הגברה משמעותית אחרת לאותו כוכב. מספר הכוכבים שאורם הוגבר - שניים מתוך שלשה מיליונים במשך שלש שנים - מתאים לחישוב הסיכויים שנעשה להופעת הגברה כזו.

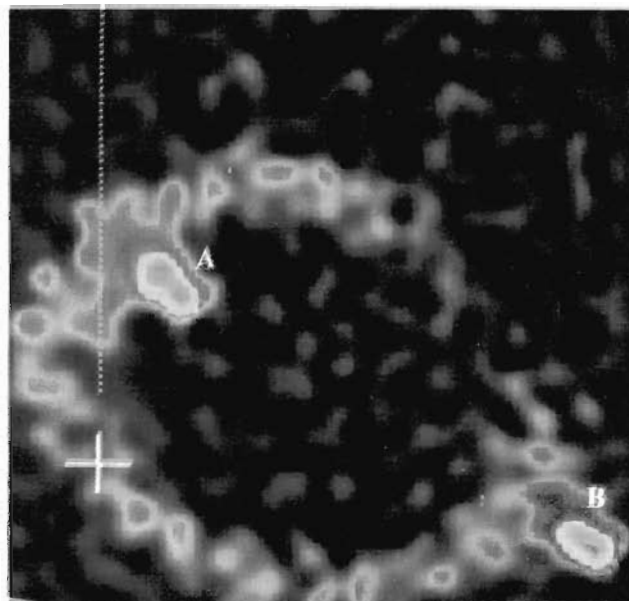
בעבודה זו נתקבל בפעם הראשונה אישור לקיום אוכלוסיה של עצמים אפלים בעטרת הגלקסיה. אם המשך המעקב במשך מספר שנים נוספות יגלה תוצאות דומות, יהיה בכך אישור לכך שעצמים אפלים בעלי מסה נמוכה אכן מהווים את המסה החסרה בגלקסיה. ניתוח מפורט של תצפיות רבות כאלה יתן גם את סקלת המסות של העצמים האלה.

ביבליוגרפיה:

1. Alcock et al., Nature, 1993, 365, 6447,621.
2. Aubourg et al., Nature, 1993, 365, 6447,623.
3. A. Einstein, Science, 1936, 8 4, 506.
4. J.N. Hewitt et al., 1988, Nature, 333, 537.
5. M. Milgrom, 1983, Astrophys. J., 270, 365.
6. B. Paczynski, 1986, Astrophys. J., 304, 1.

שמות מקבילים לשמות המופיעים במאמר:
 * magnitude = "גודל" = "אפלויות"
 עטרת הגלקסיה = הילת הגלקסיה
 הארת הכוכב = בהירות.

תהודה



תרשים 3: טבעת איינשטיין בתצלום רדיו של הקוואסאר MG1131+0456 (באדיבותה של מערכת Nature)

מאינטראקציה של אור עם חומר, שונה לאורכי גל שונים, ולכן מקבלים נפיצה של אור לבן במעברו דרך מנסרה. לעומת זאת, מקדם השבירה הגרביטציוני נוצר כתוצאה מהתעקמות המרחב בהשפעת שדה גרביטציה. התעקמות כזו משפיעה באופן שווה על כל הגופים (לכל המסות מוקנית אותה תאוצה בשדה גרביטציה), ועל כל אורכי הגל, ולכן, אם תיווצר הגברה של הארת הכוכב, היא תהיה אחידה לכל אורכי הגל.

בעתון Nature אשר הופיע באוקטובר 1993 התפרסמו תוצאות של שני מחקרים שבדקו את התופעה של הגברת אור כוכבים כתוצאה מפעולת עדשות גרביטציוניות בעטרת הגלקסיה. (Alcock et al., Aubourg et al., 1993) נתאר את העבודה שפורסמה באחד מהם (Aubourg et al., 1993) קבוצת החוקרים עקבה במשך שלש שנים אחר ההארה של שלשה מיליון כוכבים הנמצאים בענן מגלן הגדול (LMC), שהיא גלקסיה קטנה הנמצאת במרחק 165,000 שנות אור מכדור הארץ. העיקוב בוצע בעזרת צילומים של שדה הכוכבים האמור ב LMC, אשר צולמו פעמיים בלילה, בממוצע אחת לשלשה לילות, במצפה הכוכבים La Silla בצ'ילה, כאשר כל צילום בוצע פעמיים, פעם דרך פילטר אדום ופעם דרך פילטר כחול. מתוך כל הכוכבים שניצפו, נתגלו שניים בהם הופיעה הגברה אופיינית לעדשה גרביטציונית. תרשים 4 מראה את גרף ההארה לאחד מהם, בו ניתנת הארה באור אדום ובאור כחול. הציר האופקי מציין זמן הנמדד בימים, והוא מתחיל מראשון