

חותמו של איינשטיין באסטרופיסיקה ובקוסמולוגיה

יעקב שחם - האוניברסיטה העברית, ירושלים

הכללית של איינשטיין על האסטרופיסיקה והקוסמולוגיה. זאת נעשה הן מקוצר היריעה והן משום שהאסטרונומיה המודרנית - על הטלסקופים החדישים שלה, המודדים קרינת רדיו, קרינת X וקרינת גamma - נתנה לנו בעשור האחרון יותר אפשרויות לאמת רבות מתחזיותיה של תורת היחסות הכללית משהיו לנו משחר האסטרונומיה.

תחילה ננסה לסכם בקצרה את עקרונותיה של תורת היחסות; אחר כך נזכיר מספר מבחנים ניסויים קלאסיים לבדיקת אמיתותה, נדון בגלי כבידה (גראוויטאציה) ובחורים שחורים ונסקור את תמונת היקום כפי שמציינת אותה תורת היחסות הכללית. לבסוף - נתאר את ה"מעבדה" הטובה ביותר שגילו עד כה האסטרונומים לאימות תורת היחסות הכללית - ה"פולסאר הבינארי". הוא התגלה בשנת 1975, והתוצאות החשובות הראשונות של התצפיות בו פורסמו לפני חודשים אחדים.

מדוע אין השעונים מתקתקים יחד?

תורת היחסות החלה ללבוש את צורתה הידועה לנו כיום בעקבות ניסויים שנערכו בסוף המאה ה-19 ובתחילתה של המאה ה-20. הניסויים הוכיחו, שמדידה של מהירות האור נותנת תמיד אותו ערך, בין אם מבצע אותה צופה הנח ביחס למקור האור ובין אם מבצע אותה צופה הנע יחסית למקור. אנו מסמנים ערך זה באות c. בשעתה היתה זו תגלית מפתיעה. עד אז היה "ברור", שאם אנו בורחים מגוף נע הרי שמהירותו קטנה יחסית אלינו; בעוד שאם אנו רצים לקראתו - נראה לנו כאילו מהירותו גדלה. וכך, אם משיהו זורק עליך אבן תוך כדי שאתה רץ אליו תשיג אותך האבן מהר יותר מאשר אם אתה בורח ממנו - כלומר, מהירות האבן יחסית אליך גדולה יותר כאשר אתה רץ אל הזורק, והנה - לא כך מתנהג האור! איינשטיין הסיק מניסויים אלה את המסקנה הנועזת שעולמנו הפיסיקלי אינו תלת-ממדי, אלא ארבע-ממדי! הוא טען,

תורת היחסות הכללית שהגה איינשטיין חוללה מהפכה בהשקפת המדע על התפתחות היקום ומיבנהו. השפעתה של תורה זאת על תחומי האסטרופיסיקה ומדע היקום-הקוסמולוגיה נסקרת במאמר.

המאמר מבוסס על הרצאה שניתנה במרץ 1979, בכינוס ירושלים לציון מאה שנה להולדת איינשטיין, ברשותם האדיבה של מערכת "מדע" - עיתון מדעי לכל ופרופסור י. שחם.

בראיון לעיתונאי, בשנת 1908, סיפר אלברט איינשטיין על עבודתו במילים אלה: "...למעשה, אינני מבצע מחקר כלשהו, אני רק חושב, משום שרוצה אני להבין משהו מחוקי העולם הפיסיקלי... נושא עבודתי הוא היקום, לא יותר ולא פחות".

מטרת המאמר היא לתאר בלשון פשוטה, כיצד אמנם סייעה חשיבתו של איינשטיין למדעי האסטרופיסיקה והקוסמולוגיה להבין את התנהגות היקום בממדיו הגדולים ביותר - למן הממדים של גלקסיות וכוכבים ועד לממדיו של היקום כולו. אחדים מרעיונותיו של איינשטיין נוגעים ישירות לממדים גדולים כאלה: אחרים, המתארים את התנהגות היקום דווקא בממדיו המיקרוסקופיים, נוגעים לממדים הגדולים יותר משום שאלה מצידם בנויים מגדלים מיקרוסקופיים.

איינשטיין השאיר חותם בל יימחה על האסטרופיסיקה דרך רבים מרעיונותיו על מיבנה העולם המיקרוסקופי. כאלה הם למשל, רעיונותיו על תהליכי הבליעה של קרינה ופליטתה במערכות אטומיות. רעיונות אלה מונחים ביסודות הבנתנו את התפקיד שממלאת הקרינה במאזן האנרגיה ואת דרך ההתפתחות של מערכות אסטרופיסיקליות כגלקסיות, ענני גז גדולים, כוכבים וגם היקום בכללו. דוגמה אחרת היא תגליתו על השוויון של מסה ואנרגיה, כלומר עובדת קיומו של גודל יחיד - מסה-אנרגיה. תגלית זו היא יסוד הבנתנו את תהליכי יצירת האנרגיה בכוכבים באמצעות ריאקציות גרעיניות. עם זאת נתרכז במאמר זה בחותם שהטביעה תורת היחסות

(תרשים 1), יכולה לשמש לנו כמורה דרך למעבר מתורת היחסות המצומצמת אל תורת היחסות הכללית. בזמנו אמנם התעוררה בעיה זו כביקורת על תורת היחסות המצומצמת; אולם תורת היחסות הכללית היא שהשיבה עליה תשובה ניצחת.

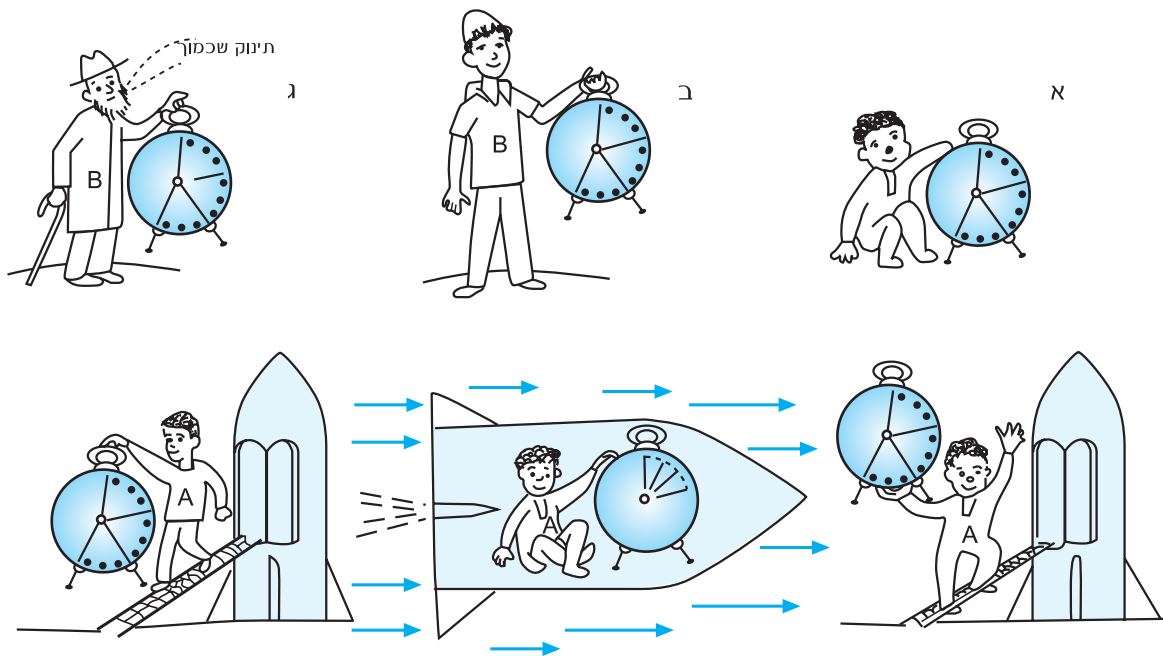
והנה הפרדוקס: תורת היחסות המצומצמת הראתה, שאם גוף A נע יחסית לגוף B, הרי התהליכים שמתחוללים על A נראים מ-B כאילו הם מתרחשים בקצב איטי יותר משמתרחשים תהליכים זהים על B. נתבונן על תהליך אחד כזה, הלא הוא תהליך ההזדקנות של יצורים חיים. נתאר לנו זוג תאומים A ו-B, הנולדים על כדור הארץ בהפרש זמן קטן מאוד, ונתאר לעצמנו שמייד עם לידתו מושם התאום A בחללית, נשלח במהירות של $\frac{1}{2}c$ לעבר כוכב רחוק, ומוחזר ממנו אחר כך באותה מהירות. כששני התאומים נפגשים שנית מוצא B ש-A יותר צעיר ממנו, שהרי הזקין יותר לאט! כך אומרת תורת היחסות המצומצמת.

תחזית מדהימה זו של תורת היחסות המצומצמת הוכחה כבר בניסויים רבים על זמני הקיום של חלקיקים אלמנטריים;

שהעובדה שמהירות האור קבועה ביחס לכל צופה אומרת לנו, ששעוניהם של שני צופים שונים, הנעים במהירויות שונות יחסית למקור האור, חייבים לתקתק בקצב שונה, כי רק כך יקבלו שני צופים אלה אותו ערך של מהירות האור*.

מכאן, שהזמן איננו סתם מין פֶּרְמֵטֵר אוניורסלי, כפי שחשבו קודם, אלא קואורדינטה פיסיקלית כמו האורך, הרחב והגובה, שגם הם משתנים בהתאם לתנועה. והואיל ומקור האור יכול להיות כלשהו הסיק איינשטיין שקצב השעונים כלל אינו תלוי במקור האור: כל צופה, הנע יחסית לחברו, שעונו מתקדם אחרת מזה של חברו.

תורת היחסות המצומצמת נוצרה בעקבות רעיונות אלה ודומים להם. בין עקרונותיה ראוי להזכיר שמוטות נעים – אורכם מתקצר, שעונים בתנועה – מתקתקים לאט יותר, שמהירות האור היא הערך הגבוה ביותר אליו ניתן להאיץ איזושהי מערכת פיסיקלית, ועוד. מובן מאליו שמיד עם פירסום התורה התעוררו שאלות רבות והושמעה ביקורת חריפה עליה. ואולם תורת היחסות המצומצמת התגברה על כל המיכשולים. בעיה אחת מאלה שהתעוררו אז, הלא היא "פרדוקס התאומים"



:1

תרשים

תהליך הזדקנותם של שני תאומים הנולדים על פני כדור הארץ. עם לידתו, נכנס תאום A לחללית (א') ונע בה במהירות רבה. הוא מזקין לאט יותר מתאומו (ב') כפי שאומנם מתברר כאשר חוזר A לכדור הארץ ופוגש את אחיו (ג'). השעונים שבצידי כל תאום מציינים את קצב התקדמות הזמן עבורם: בתמונה ב', למשל, בעוד זמנו של B מתקדם מרחק רב מתקדם זמנו של A פחות מחצי המרחק. (צייר בני עדן)

* ראה: "פרדוקס השעונים ויסודות תורת היחסות", מאת זאב בכלר: "מדע" י"ג-1, 1968, עמ' 41-36.

כל גוף בוחר קטן. "סביבה קרובה" דרושה לנו כדי שלא יוכלו הגופים לבנות שינוי מהירות גדולים עקב משיכה של מסות שונות.

ב. חוקי הפיסיקה היסודיים הם מקומיים בעיקרם.

ג. מתקיים "עקרון שוויון הצופים", היינו, שחוקי הפיסיקה זהים לגבי כל הצופים.

איינשטיין ניסח את תורת היחסות הכללית שלו בלשון הגיאומטריה - גיאומטריה של ארבעת ממדי המקום-זמן. על פי התמונה שהציג, אין המרחב הארבע-ממדי מרחב אוקלידי, אלא עקום. פירושו של דבר, שבמרחב הזה, הדרך הקצרה ביותר בין שתי נקודות איננה הקו הישר. שוו בדמיונכם יצורים דו-ממדיים החיים על מישטח פניו של כדור: גם עבורם, כדוגמא, המרחק הקטן ביותר בין שתי נקודות אינו קו ישר. אנו נחזור לתמונה זו מאוחר יותר, כשנעסוק בקוסמולוגיה. אך הבה נדגים את הרעיון המרכזי בתורת היחסות הכללית בעזרת אבן הנזרקה על כדור הארץ. כידוע, מסלולה של האבן הוא קטע של פרבולה, ולא קו ישר. והנה, בעוד שתורת המשיכה העולמית של ניוטון אמרה שהסטייה מתנועה בקו ישר פירושה שפועל עליה כוח משיכה, אומרת תורת היחסות הכללית שהתנועה בקו עקום היא תכונה של המרחב הארבע-ממדי עצמו, שהרי כל הגופים מבצעים אותה תנועה עצמה; אנו יודעים שמרחב זה הוא עקום מפני שאין האבן נעה במהירות קבועה ומקומה במרחב תלוי גם בזמן בצורה פרבולית, כדין תנועה מואצת.

הכלים המתמטיים לניסוח הגיאומטריה הארבע-ממדית שלו כבר היו בנמצא; היו אלה כלי תורת הגיאומטריה הדיפרנציאלית של רימן (Riemann). בגיאומטריה זאת אופיין המרחב בעזרת אוסף של 256 מיספרים, הנקראים "טנסור העקמומיות". מ-256 מיספרים אלה הורכב מיספר יחיד ששמו ה"עקמומיות של המרחב". איינשטיין השתמש בכל אלה והוסיף עומק פיסיקלי משלו. הוא כתב משוואות אשר קישרו את עקמומיות המרחב עם תכולת החומר והאנרגיה שלו. על פי משוואות אלה, המרחב הריק, נעדר החומר והאנרגיה, הוא תמיד אוקלידי; נוכחות חומר או אנרגיה היא ה"מעקמת" אותו. ואנו יכולים להבין זאת אם נזכור, שכאשר נזרק אותה אבן בחלל, הרחק מכל שדה משיכה, אמנם תנועוה זו בקו ישר! אלה הן משוואות איינשטיין של תורת היחסות הכללית. פיתרון אינו מידי משום שהן משוואות דיפרנציאליות לא ליניאריות. ידועים פתרונות מדויקים אחדים שלהן, הנכונים בנסיבות פיסיקליות פשוטות ומאוד מיוחדות; פתרונות ספורים אלה מסייעים בידינו, כמורי דרך, להבנת ההתנהגות בנסיבות

בינתיים, קל יותר לבצע ניסויים כאלה מאשר את ניסוי התאומים. ואולם, לפני פירסומה של תורת היחסות הכללית נראה היה שתחזית זו מעידה על סתירה פנימית בתורת היחסות המצומצמת. הרי התאום A, בחלליתו, רואה גם הוא את B נע ממנו וחוזר אליו, בתנועה הזזה בכול לתנועתו שלו, כפי שרואה אותה B, פרט לכך שכיוונה הפוך, אבל שינוי הכיוון אינו רלוואנטי לכאן. לכן צריך התאום A, בעת הפגישה, להגיע למסקנה שדווקא B הוא היותר צעיר.

ואולם, הסתכלות מעמיקה יותר בניסוי המחשבתי שלנו מראה שבעצם אין A ו-B שווים-ערך לגמרי. יש לשים לב לכך, שכשנולדו התאומים וכשנפגשו נמצאו שניהם במנוחה יחסית לכדור הארץ, ואולם, בעוד B ממשיך כל הזמן להיות במנוחה יחסית לכדור הארץ, משנה A את מצבו יחסית לו - הוא מאיץ כדי להגיע למהירות $\frac{1}{2}c$, ומאיץ כדי לשנות אחר כך את כיוון מהירותו, ולבסוף מאיץ כדי לחזור אל אחיו על כדור הארץ. שני התאומים אינם אקוויולנטיים, משום שמערכת הייחוס שבה הם משווים את גילם היא המערכת שבה נמצא רק אחד מהם במנוחה כל הזמן.

איינשטיין הסיק מייד, שכנראה גם תאוצה משפיעה על קצב התהליכים הפיסיקליים ובכלל זה על קצב תיקתוק השעונים. שהרי אם תורת היחסות המצומצמת נכונה, מה שראינו עתה דורש שהתאומים לא יהיו שווים-ערך; אבל השוני הקינמטי היחיד ביניהם הוא עניין התאוצה. איינשטיין טען, שמן הסתם, בעת שמתרחשות כל ההאצות וההאטות בתנועתו של A נראה לו B מזקין בקצב גדול יותר, כך שבסך הכל, בפגישתו עם B, גילו הכולל של B אמנם נראה ל-A גבוה יותר מגילו שלו. שימו לב שאמנם. בעת ש-A מאיץ יחסית ל-B, גם B מאיץ יחסית ל-A, אם גם בכיוון הפוך; אבל הנקודה הקובעת היא שהשוואת הגילים מתבצעת במערכת הייחוס של B.

מקור עקמומיות המרחב

מתאוצה עבר איינשטיין אל שדה הכבידה העולמי (שדה הגראוויטאציה). כולנו יודעים שבשדה כבידה נתון נעים כל הגופים באותה תאוצה (זאת בתנאי ש"מסת הכבידה" שווה ל"מסת ההתמדה" - הנחה יסודית בטיעוניו של איינשטיין). כלומר, שדה הכבידה הוא המקור היחיד הידוע לנו לתאוצה, שפועל באופן זהה על כל הגופים. מכאן ששדה הכבידה עצמו עשוי להשפיע על קצב תיקתוק השעונים. תורת היחסות הכללית באה מיד לאחר הכרה זו בחשיבות שדה הכבידה. ביסוסה היה על שלושה עקרונות יסוד:

א. תורת היחסות המצומצמת נכונה בסביבתו הקרובה של

מסובכות וכלליות יותר. כיום, בסיוע דור של מחשבים אלקטרוניים חדישים ויעילים, יש תקווה חדשה שנוכל לקבל עוד פתרונות מעניינים יותר.

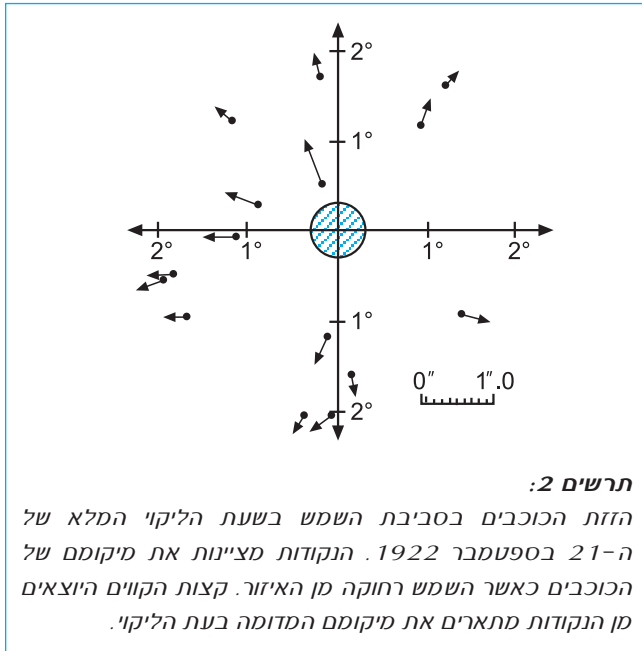
תורת היחסות הכללית עמדה במבחן

לתורת היחסות הכללית קמו תורות מתחרות אחדות, אשר ביסודן כולן מונחת תורת היחסות המצומצמת. מובן, שמיבחינים יעילים לנוכחותה של תורת היחסות הכללית ניתן לבצע רק במקרים שבהם שדה המשיכה גדול מספיק. והנה, עבור שדות כבידה שהם גדולים רק במעט מאלה שבהם תורת ניוטון עדיין תקפה, פותח פורמליזם שבעזרתו מאופיינות כל תורות הכבידה, כולל זו של איינשטיין, תוך שימוש בעשרה (10) גדלים בלבד. ניסויים אסטרונומיים שונים מאפשרים למדוד חלק מגדלים אלה בדיוק זה או אחר, ולקבוע עבורם תחומים שאינם בסתירה לתוצאות הניסויים הללו. עד עתה, עלה בידי מיבחינים אלה להטיל ספקות רציניים בנוכחותן של רוב התורות המתחרות; תורת היחסות הכללית של איינשטיין יצאה עד כה, מכולם ללא פגע!*

הרי שניים מהמבחנים הקלאסיים שניתן לבצעם בתחומי מערכת השמש שלנו.

א. תורת היחסות הכללית חוזה שקרן אור, העוברת באיזור שבו יש משיכת כבידה, תסטה ממסלולה (המרחב הוא עקום!). בניסוי מפורסם בשנת 1919, צילמה משלחת בריטית את הכוכבים שבסביבת השמש בעת ליקוי חמה מלא. קרני האור המגיעות אלינו מכוכבים אלה חייבות לעבור בסביבת השמש, ואם אמנם נכונה התחזית לעיל, הרי שכוח המשיכה של השמש יסיט אותן ממסלולן. עקב סטייה זו, ייראו לנו הכוכבים כאילו מרחקם הזוויתי מהשמש גדול יותר מכפי שהוא באמת. וזאת, אמנם, מצאה המשלחת הבריטית, אשר אף אישרה שגודל הסטייה מתאים לתחזית (תרשים 2).

מכשירים מודרניים מאפשרים כיום לערוך מדידות כאלה גם בכוכבים שמרחקם הזוויתי מן השמש גדול יותר וגם בקוואזארים הרחוקים, אשר ה"אור" שלהם בא אלינו בצורת גלי רדיו, ולכן אין אור השמש מפריע למדידה ואין צורך לחכות לליקוי. עקב התעקמות קרני האור מתארך גם "זמן התעופה" שלהן. בניסיונות אחרים שולחים היום קרן מכ"ם לכוכב לכת או לחללית הנמצאים מעבר השני של השמש ובודקים כעבור איזה זמן מגיעה אלינו הקרן המוחזרת מפני הכוכב או החללית. גודל האיחור בהגעתה הוא מיבחן נוסף לתורת היחסות הכללית.



תרשים 2:

הזזת הכוכבים בסביבת השמש בשעת הליקוי המלא של ה-21 בספטמבר 1922. הנקודות מציינות את מיקומם של הכוכבים כאשר השמש רחוקה מן האיזור. קצות הקווים היוצאים מן הנקודות מתארים את מיקומם המדומה בעת הליקוי.

ב. על פי תורת המשיכה של ניוטון, נעים כוכבי הלכת סביב השמש באליפסות קבועות. תורת היחסות הכללית חוזה שאליפסות אלה לא תישארנה קבועות, אלה תסתובבנה סביב השמש בקצב איטי, הגדל ככל שכוכב הלכת קרוב יותר לשמש. עבור כוכב חמה, שהוא הקרוב ביותר, צפוי קצב סיבוב של 43 שניות קשת למאה שנה. הסיבוב הזה אמנם נמדד, וגם הוא מתאים לתחזית (תרשים 3, וראה גם להלן).

עוד תחזית חשובה של תורת היחסות הכללית קשורה בשינוי תדירותו - היינו, צבעו - של אור כשהוא עובר באיזור שבו יש כוחות כבידה. "תדירות" של תהליך פיסיקלי אינה אלא מיספר הפעמים ששעונו הפנימי של התהליך "דופק" בשנייה - יהא זה קפיץ, מטוטלת, או השדה האלקטרומגנטי של האור. כבר אמרנו שקצב תיקתוק השעונים הזה מישתנה בהשפעת כוחות הכבידה, היינו, תאוצות. מכאן גם שינוי התדירות.

החוק הפשוט הוא, שאור נעשה אדום יותר כלומר, גליו מתארכים, אם הוא נפלט באיזור בעל תאוצת נפילה חפשית גבוהה ונצפה באיזור בעל תאוצת נפילה חפשית נמוכה (תרשים 4).

מיבחן אחד לתחזית זו הוא תצפית בקו פליטה ידוע, כמו הקו שסימונו D_1 של הנתרן, הבא מכוכב כמו השמש. ואמנם, אורך הגל של הקו הזה המגיע מן השמש מוסח כלפי האדום בדיוק כפי שהדבר מתחייב משדה הכובד של השמש ומתורת היחסות הכללית. מיבחן אחר אפשר לעשות על פני כדור הארץ עצמו. קרן γ (גאמא) נפלטת מגובה של 20 מטר מעל

* ראה: "אישור ניסויי לתורת היחסות הכללית", מאת יורם קירש "מדע" כ"א - 2 (1977), עמ' 84-85.

שלא מתקיים בתופעה זו סימן זיהוי חשוב מאוד. גל מתקדם מסייע אנרגיה למרחקים, ומשום כך תיחלש עוצמתו ביחס הפוך למרחק ממקום היפלטו. בתורת ניוטון, קֶטְנָה עוצמת השינויים בתנועת כוכבי הלכת הרבה יותר מהר עם המרחק, ואין אנרגיה מוסעת למרחקים!



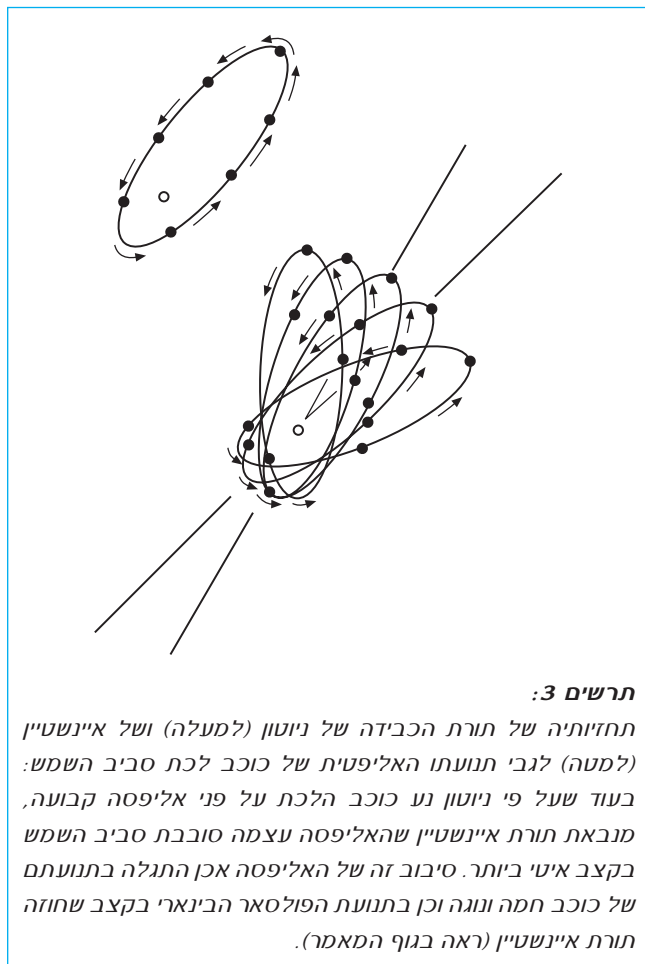
תרשים 4:

השינוי באנרגיה (שמייצג רדיוס הכדורים) ובאורך הגל של גל אור היוצא מן השמש ומגיע אל צופה על פני כדור הארץ.

לעומת זאת, חוזה תורת היחסות הכללית את קיומם של גלים ממש ואת אפשרות הסעתה של אנרגיית כבידה למרחקים. זאת ועוד, היא מנבאה שמהירות התפשטותם של גלים אלה היא ממש כמהירות התפשטותו של האור, היינו של הגלים האלקטרומגנטיים. ישנם הבדלים בין שני סוגי גלים אלה. ראשית, כמובן, הראשון "מנדנד" מסות, השני מנדנד "מיטענים". שנית, יש הבדל חשוב בתוצאת פעולתם, אותו נוכל להדגים תוך התבוננות בטבעת של חלקיקים זהים שהם בעלי מסה ובעלי מיטען כאחד. פגיעת גל אלקטרומגנטי המתקדם בניצב לטבעת תגרום לה לנוע כגוף צפיד, כשמרכז המסה שלה מבצע תנועה אליפטית מחזורית. פגיעת גל כבידה המתקדם באותו כיוון לא תשפיע על תנועת מרכז המסה של הטבעת אבל תגרום לה לשנות את צורתה באופן מחזורי לצורת אליפטיות ומעגליות לסירוגין.

הואיל ותורת ניוטון לא חזתה יצירת גלי כבידה, ומאחר שתורת היחסות הכללית שונה מתורת ניוטון שינוי מהותי רק בשדות כבידה חזקים יחסית, אנו מבינים שיצירת גלי כבידה בעוצמה נאותה יכולה לקרות רק בסביבות שדות חזקים.

פני כדור הארץ, ונקלטת בגלאי המוצב על פני כדור הארץ. הבדל תאוצת הכובד בין שני הגבהים הללו הוא רק שש אלפיות האחוז, והשינוי הצפוי בתדירויות קרן היץ הוא רק 2.5 מתוך 10^{15} ; בכל זאת ניתן המיבחן לביצוע, וההתאמה המתגלה לתורת היחסות הכללית טובה מאוד.



תרשים 3:

תחזיתיה של תורת הכבידה של ניוטון (למעלה) ושל איינשטיין (למטה) לגבי תנועתו האליפטית של כוכב לכת סביב השמש: בעוד שעל פי ניוטון נע כוכב הלכת על פני אליפסה קבועה, מנבאת תורת איינשטיין שהאליפסה עצמה סובבת סביב השמש בקצב איטי ביותר. סיבוב זה של האליפסה אכן התגלה בתנועתם של כוכב חמה ונוגה וכן בתנועת הפולסאר הבינארי בקצב שחווה תורת איינשטיין (ראה בגוף המאמר).

גלי כבידה

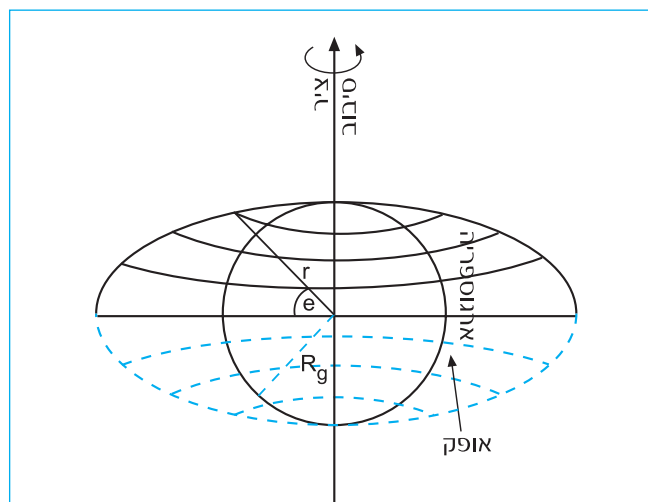
הבה נתאר עתה את אחת הנקודות החשובות שבהן נבדלת תורת היחסות הכללית מתורת המשיכה העולמית של ניוטון. מתורתו של ניוטון נובע, שאם יניע מישהו את השמש בתנועה מחזורית קטנה סביב הנקודה שבה היא נמצאת היום, נרגיש אנו על כדור הארץ באופן מיידי בשינויים מחזוריים בשדה הכובד הבא מהשמש, ומסלולו של כדור הארץ אף הוא יהיה גלי במקצת. מישהו יכול לטעון שאלה הם, בעצם, גלי כבידה: הנה, גרמה תנועתו של גוף אחד (השמש) הפועל ממרחק לשינוי בתנועתו של גוף אחר (כדור הארץ) - הראשון פלט גלי כבידה והשני קלט אותם. לאמיתו של דבר אין אלה גלים כלל, משום

* ראה: "קריסה גראוויטאציונית", מאת אורי בנשלום: א) "מדע" י"א-1 (1966), עמ' 51-44; ב) "מדע" י"א-6 עמ' 362-370, "קריסה גראוויטאציונית אל עבר הלא-כלום" מאת ניסים וידאל: "מדע" י"ח-5 (1974) עמ' 289-288.

שיש בהן סטייה רבה מתורת המשיכה העולמית של ניוטון. א. חלקיקים או אנרגיה אינם יכולים לחצות את האופק מבפנים החוצה: "מהירות ההימלטות" ממעטפת החור השחור היא מהירות האור והואיל ואין גוף היכול לנוע מהר יותר, לא תיתכן "בריחה" החוצה מתוך החור.

ב. על גופים הנעים לעבר האופק פועלים כוחות כבידה חזקים ביותר. אם תאוצתם הצנטריפוגלית אינה גדולה דייה, הם יסיימו את תנועתם בתוך האופק ולעולם לא יצאו ממנו. כוחות גיאות אדירים יקרעו את הגופים הללו לחתיכות מיקרוסקופיות תוך כדי מעבר האופק ואחרי.

ג. אור הנפלט מגוף הנע בסביבת האופק יגיע אלינו, כמובן, כשהוא מוסח לאדום במידה רבה ביותר. זה יגרום גם לירידה ניכרת בעוצמת האור (תרשים 5) משום שהקצב שבו הוא נפלט מסביבת האופק גדול בהרבה מהקצב שבו הוא מגיע אלינו (תיקתוק השעונים...). מאידך, חומר הנופל לעבר חור שחור עשוי, תוך כדי נפילתו, לפלוט את אנרגיית הנפילה שלו בצורת קרינה אנרגטית מאוד של קרני-X, אשר "מנצצת" בקצב מהיר (אחת ל-5 מיליוניות שנייה עבור חור שחור שמסתו מסת שמש).



תרשים 5:

מבט מן הצד על המרחב שבסביבת חור שחור. ציר הסיבוב של החור נמצא במישור הנייר ומכוון כלפי מעלה. הכדור הפנימי, בעל רדיוס R_g , מצוין את האופק שהוא גם מישטח השפה הפנימי של הארגוספירה. המישטח החיצוני, הנוגע באופק רק בקטבים, הצפוני והדרומי, הוא מישטח השפה החיצוני של הארגוספירה.

ד. מסלוליהם של חלקיקים ושל קרני אור מוסחים במידה רבה כשהם עוברים בסביבת האופק. כל כך חזקה המשיכה של החור השחור, שהאור עצמו יכול לנוע סביבו במסלול מעגלי.

שדות כאלה נוצרים, למשל, בעת הקריסה הגראוויטאציונית* המהירה של גופים אסטרונומיים, כמו כוכבים. נוח למדוד את ההספק של קרינת הכבידה ביחידות של $c^5/G = 3.6 \times 10^{59}$ ארג בשנייה (G הוא קבוע הכבידה העולמי). ההספק הזה הוא מסדר גודל של יחידה (ביחידות הללו) כשכוכב קורס ביעילות מרבית עד להיותו חור שחור (ראה בהמשך). מערכת של זוג כוכבים, הסובבים אחד סביב רעהו עקב משיכת הכובד ההדדית שלהם, קורנת גם היא קרינת כבידה, אבל בדרך כלל בהספק נמוך (ראה בסעיף האחרון).

בשנים האחרונות, נערכו ניסויים חלוציים לגילוי גלי כבידה מעצמים אסטרונומיים. מערכות ניסוי אחדות פועלות היום ובהן משמשים גלילים גדולים כגלאים של קרינת כבידה. טלסקופים אלה לגלי כבידה עשויים לפתוח חלון חדש לחקר היקום, נוסף על חלונות הקרינה האלקטרומגנטית בגלי רדיו, בתת-אדום, באור נראה, בעל-סגול, בקרינת-X ובקרינת-γ ונוסף על חלונות קרינת החלקיקים הקוסמית.

חורים שחורים

תורת היחסות הכללית מגיעה כאמור למלוא כוחה בשדות כבידה חזקים. ישנה קבוצה מיוחדת של עצמים אסטרונומיים בעלי שדה כבידה חזק אשר עצמם קיומם נחזה בתורת היחסות הכללית. אלה החורים השחורים**. תצפיות אסטרונומיות עדיין לא גילו בבירור חור שחור. ואולם, קיימים מיספר עצמים אסטרונומיים ש"חשודים" על היותם חורים שחורים. "חשדות" אלה העמיקו בצורה דרמטית בעשר השנים האחרונות. מאחר שחורים שחורים עדיין עשויים להיות ההתגלות המרשימה ביותר של תורת היחסות הכללית באסטרופיסיקה, נקדיש עתה שורות ספורות לתיאורם.

חור שחור כדורי הוא איזור כדורי במרחב, שממרחק גדול משפיע על גופים כאילו היה גוף רגיל בעל מסה ואולי גם בעל מיטען חשמלי. למעטפתו (הכדורית), שנקראת ה"אופק", רדיוס של כ-1.5-3 ק"מ, עבור חור שמסתו מסת השמש, והוא גדל ביחס ישר למסה. חור שחור לא כדורי נראה גם הוא כבעל מסה ואולי מיטען, אבל יש לו גם תנע זוויתי - כלומר זהו חור שחור מסתובב. לחור כזה שני מישטחי גבול חשובים: האחד הוא שוב האופק, שרדיוסו נע בין הערכים הנזכרים והשני הוא מישטח דמוי סופגניה, אשר נוגע בקטביו באופק, אך בקו המשווה שלו הוא יוצא אל מחוץ לאופק ועשוי להגיע עד למרחק כפול מרדיוס האופק. הנפח שבין שני המישטחים האלה ידוע כ"ארגוספירה".

הרי רשימה קצרה של תופעות בסביבות האופק של חור שחור,

** ראה: "משהו על חורים שחורים", מאת יעקב שחם; "מדע" כ"א-1 (1977) עמ' 35-29.

מדוע אפלים השמים בלילה?

המערכת הגדולה ביותר ביקום היא היקום עצמו. ב-1919 פירסם האבל (E. Hubble) את הקשר שמצא, בין ההסחה לאדום של האור הנפלט מגלקסיות רחוקות לבין בהירותן המדומה על כדור הארץ*. ההסחה לאדום גדולה יותר ככל שהגלקסיה חלשה יותר. הוכח כי קשר זה נכון עבור המרחקים הגדולים שהיו ידועים אז ביקום, מרחקים של מגאפרסקים ($1 \text{ Mpc} \approx 3 \times 10^{24} \text{ ס"מ}$).

אם נפרש את ההסחה לאדום כנובעת מתנועת בריחה של הגלקסיה מאיתנו - תופעה הדומה לירידה בתדירות הצופר של מכונת המתרחקת מאיתנו במהירות - ואם נפרש את חולשת האור מהגלקסיה כעדות לכך שהיא רחוקה מאיתנו, הרי אומר הקשר של האבל כי ככל שהגלקסיה רחוקה מאיתנו, כך היא בורחת מאיתנו במהירות גדולה יותר. הקבוע של האבל, שנהוג לסמנו H_0 , מודד את קצב השינוי של מהירות הבריחה עם המרחק, וערכו המדוד הוא בערך 50 ק"מ בשנייה למגאפרסק. גבולות היקום נמצאים, כנראה, במרחק שבו מהירות הבריחה של גלקסיות זהה למהירות האור, כ-6000 מגאפרסק מאיתנו (c/H_0 בערך).

אנו ננסה להבין כאן שתי שאלות יסוד על מיבנה היקום אשר תורת היחסות הכללית נתנה עליהן תשובות מספקות ביותר. השאלה האחת - מהו, בעצם, הפירוש של "גבולות היקום הנראה"? והשנייה - כיצד מתיישבת העובדה שכל החומר ביקום נראה כאילו הוא בורח ישירות מאיתנו, עם תחושתנו האינסטינקטיבית שפשוט לא ייתכן שאנחנו במרכז היקום?

אלה שתי שאלות מפתח שהציבה תגליתו של האבל בפני הפיסיקה. אבל, בטרם ניגש לטפל בהן, הבה נזכיר שהתגלית הזאת גם פתרה פרדוקס חשוב באסטרונומיה, אשר ניסח אולברס - (Heinrich Wilhelm Matthäus Olbers, 1758 - 1840) ב-1823. פרדוקס זה היה קשור בעובדה שבליילה השמים אפלים. אולברס טען כדלהלן: אם צפיפות הכוכבים ביקום קבועה בעיקרה, בין אם הם בודדים או אסופים בתוך גלקסיות, הרי שבתוך קליפה כדורית בעלת עובי קבוע, הנמצאת במרחק R מאיתנו, ימצאו כוכבים שמיספרם מתכונתי לשטח הקליפה, היינו, ל- R^2 . בהירותם המדומה של כוכבים אלה כפי שהיא נצפית על כדור הארץ מתכונתית הפוכה ל- R^2 , שכן זהו שיעור הירידה של עוצמת האור עם המרחק. מכאן שכל קליפה כזאת תורמת לאורם של השמים, כפי שהוא נראה על

ה. ניתן ל"עצור" את סיבובו של חור שחור מסתובב בעזרת תהליכים המתרחשים בארגוספירה. בתהליכים אלה מועברת אנרגיית הסיבוב הזה לחלקיקים, או לגופים גדולים יותר, אשר בדרך כלל נפלטים מהארגוספירה במהירויות הקרובות למהירות האור.

ו. גם את המסה של חור שחור ניתן להתמיר לאנרגיה הנפלטת החוצה, בתהליכים המתרחשים סמוך מאוד לאופק. תהליכים אלה הם השילוב הראשון שנחקר עד עתה בין תורת הקוואנטים ותורת היחסות, ובאמצעותם "מתאדים" חורים שחורים בקצב שהוא ביחס הפוך לריבוע המסה שלהם. הוא זניח, איפוא, עבור "מיני-חורים", שמסותיהם טונות ופחות.

מניין יבואו החורים השחורים ליקום? הם עשויים להיווצר עם קריסתם הגראוויטציונית של כוכבים בעת דעיכתם, כאשר לחצם הפנימי, המתנגד לקריסה, נחלש לפתע עם הסתתמות מקורות האנרגיה הפנימית שלהם. הם עשויים לגדול עקב "בליעת" כוכבים אחרים או חומר בצורה כלשהי. וכמובן - אחדים עשויים היו להיווצר יחד עם היקום כולו.

איך נזהה אותם? נוכל לחפש קרינה של גלי כבידה הנוצרת בעת הקריסה לחור שחור. נוכל לחפש אותם פשוט על פי משכיכת הכבידה שלהם, אם יש להם כוכב רגיל כשכן, או אם הם נמצאים במרכזו של צביר כוכבים או במרכז של גלקסיה. כאשר נופל עליהם חומר, בין אם הם "בולעים" את השכבות החיצוניות של כוכב שכן או אתם "בולעים" גז בין-כוכבי, נוכל לגלותם בעזרת הקרינה האלקטרומגנטית האופיינית שנוצרת, או בעזרת קרינת הכבידה האופיינית. בקבוצת הכוכבים "ברבור" יש גוף המשדר קרני X וסימונו Cyg X-1 האם יש שם כוכב ה"מזין" חור שחור? בקרבת האופק עשויים להיווצר סילונים של חלקיקים מהירים, שגודל מהירותם נמדד מן הספקטרום שלהם. האם הסילון בגלקסיה הענקית M87 נוצר בצורה זו? לחורים שחורים בעלי מיטען חשמלי יש שדה מגנטי, שסילוני חומר כאלה עשויים להיפלט לאורך קווי השדה שלו. האם כאלה הם הקוואזארים ומקורות הרדיו הקוויים שסביבם? בכוכב SS433 התגלה חומר הנע במהירויות של עד 45,000 ק"מ/שני; האם זהו חור שחור בעל מסה של למעלה ממיליון מסות שמש?

במשך כעשר השנים האחרונות הביאה לנו, כאמור, האסטרונומיה מועמדים רבים לזיהוי כחורים שחורים. אולי, בתוך העשור הבא, נמצא סוף סוף מועמד שלא יהיה לנו בו עוד שום ספק.

* ראה: "קרינת הרקע הקוסמית" מאת אבישי דקל; "מדע" כ"ג - 2 (1979) עמ' 77-72.

שיחזרו לאותה נקודה שממנה יצאו. כלומר - לעולמם שטח סופי (ובמקרה התלת-ממדי - נפח סופי).

לפני שהתפרסמו מדידותיו של האבל האמין איינשטיין שהיקום הוא סטטי, כלומר, שהעל-כדור הארבע-ממדי הוא בעל רדיוס קבוע והיקום התלת-ממדי שלנו הוא שפתו. מאוחר יותר יקרא לאמונתו זו "הטעות הגדולה ביותר" שעשה בחייו. עקב טעות זו הוכרח לשנות את משוואות תורת היחסות שלו, כשניסח את המודל הקוסמולוגי הראשון שלו ב-1917, ולכלול בהן איבר נוסף, ה"איבר הקוסמולוגי", אשר רק הוא הבטיח את הסטאטיות של היקום. האיבר הקוסמולוגי הכניס דחייה אפקטיבית בין מסות, אשר ניטרלה את המשיכה ואיפשרה יצירת איזור סטטי בין הכוחות ביקום. בעיות עם האיבר הקוסמולוגי לא חסרו - דה סיטה ביקום. בעיות עם האיבר הקוסמולוגי לא חסרו - דה סיטה ביקום. (Willem de Sitter, 1872-1934) מצא מייד פיתרון קוסמולוגי אחר למשוואות איינשטיין, שהסטאטיות שלו באה דווקא מהיות היקום ריק לגמרי ממסה ומאנרגיה. הוא הראה, שביקום כזה, אם יהיה בו חומר, יתרחקו כל שני חלקיקים זה מזה בתאוצה, עקב האיבר הקוסמולוגי. לבסוף ב-1930 הראה אדינגטון (Sir Arthur Stanley Eddington, 1882 - 1944) שהאיבר הקוסמולוגי גורם ליקום הסטטי שיהיה בלתי יציב, ואיינשטיין הציע מייד לזנוח את האיבר הזה. כתחליף, יצר ב-1932, יחד עם דה-סיטה, מודל של יקום שטוח, חסר לחץ, אשר הסביר את הקשר של האבל ולא נזקק לאיבר קוסמולוגי. המודל הזה ניבא צפיפות ממוצעת ביקום שסומנה באות ρ_c ושיעורה כ- 10^5 אטומי מימן/ס"מ³.

כיום יש בידינו מודלים אחרים שמתארים גם הם יקום אחיד, אולם הם מאפשרים צפיפות השונה מ- ρ_c . רוברטסון (Robertson) וולקר (Walker) הראו ב-1935 את כלליותם של מודלים אלה, המקרים המיוחדים שלהם נקראים על שם הפיסיקאי היהודי-רוסי פרידמן (Alexander Friedman, 1888-1925) ולמיטר (Georges Lemaitre, 1894 - 1966). במודלים אלה על-מישטח היקום איננו דווקא שפתו של כדור ארבעה-ממדי, אלא יכול להיות גם שפה של מישטח אחר כמו על-היפּרֶבּוּלוּאִיד. רדיוס המישטח הארבעה-ממדי מקיים משוואה דיפרנציאלית אחת המקשרת אותו עם צפיפות המסה-אנרגיה ביקום. למשוואה זו מצטרפת משוואה המתארת את שינוי צפיפות המסה-אנרגיה ביקום עם שינוי הרדיוס, וכן משוואה המקשרת בין הלחץ ביקום וצפיפות המסה-אנרגיה שלו. פתרונות אלה תלויים ביחס שבין הצפיפות לצפיפות ρ_c שהזכרנו: יחס זה נהוג לסמן באות Ω (אומגה). הואיל והצפיפויות מישתנות עם הזמן, וכך גם Ω , אלא אם $\Omega=1$, שאז הוא נשאר תמיד שווה ליחידה.

כדור הארץ, באותה מידה. אם היקום גדול, הרי נובע מכך ששמי הלילה צריכים להיות בהירים כשמי היום. העובדה שזה אינו המצב - זהו הפרדוקס של אולברס.

התורה של ניוטון נכשלה לחלוטין בהסבר הפרדוקס, ואסטרונומים נזקקו להניח שיש בליעת אור חזקה ביקום הגורמת לכך שאור הבא מקליפות רחוקות מונחת באופן ניכר. ואולם, הנחה זו החזיקה מעמד רק עד שהוכח בבירור שהיקום דווקא שקוף מאוד ובליעה כזאת פשוט אינה קיימת. בערך באותו זמן שבו הוכחה שקיפות היקום, נתנה תגליתו של האבל את ההסבר המקובל עד היום לפרדוקס של אולברס, בעזרת ההסחה לאדום: ככל שהקליפה רחוקה יותר כך גדולה יותר ההסחה לאדום של האור הבא ממנה. וכפי שהזכרנו לגבי ההסחה לאדום בחורים שחורים, גם כאן נכון הדבר, שאור המוסח לאדום - עוצמתו יורדת. מכאן שעוצמת האור מקליפות רחוקות איננה קבועה, והיא יורדת במהירות משום ההסחה לאדום.

זה היה הסבר תצפיתי (פנומנולוגי), ואולם, נשארה בתוקף אי-יכולתה של תורת ניוטון לבנות מודל קוסמולוגי משביע רצון. לעומתה, הביאה בעקבותיה תורת היחסות הכללית מודל קוסמולוגי אשר ענה על שאלות רבות שהתעוררו ואשר יצר מסגרת כללית לחשיבה על בעיות קוסמולוגיות, שלתוכה נוצקו אחר כך רעיונות מפורטים יותר.

לפי תפיסתו של איינשטיין, היקום הוא על-כדור תלת-ממדי בתוך על-מרחב ארבעה ממדי. וזהירות - זהו לא על-מרחב של המקום-זמן, אלא על-מרחב ארבע ממדי אחר; את קואורדינטת הזמן יש להוסיף בכל מקרה.

היקום פתוח או סגור

כדי להבין תפיסה זו, הבה נתבונן במישטח כדורי דו ממדי המשמש שפתו של נפח כדורי תלת-ממדי, ונניח שמישטח זה הוא היקום של יצורים דו-ממדיים החיים עליו. כל עוד חוקרים יצורים אלה את סביבתם הקרובה, נראה להם עולמם אוקלידי לחלוטין - המרחק הקצר ביותר בין שתי נקודות הוא אכן קו ישר. ואולם, כאשר הם מרחיבים את האיזור הגיאוגרפי של התעניינותם, יגלו מייד שהיקום שלהם הוא עקום (כפי שאנחנו, היצורים התלת-ממדיים, כבר יודעים), הם ישימו לב שלמעגלים בעולמם - אותם קווים המהווים את המקום הגיאומטרי של כל הנקודות על הכדור שמרחקן מנקודה נתונה קבוע - יש היקף אשר איננו שווה ל- 2π כפול במרחק הקבוע הזה. זאת ועוד - אם יתחילו לנוע בעולמם לכוון כלשהו על "קו ישר", סופם

עכשיו - הבה נהפוך את הדברים. נניח שבראשית היקום, כאשר היה $R=0$ ו- $t=0$, החלה כל נקודה ב"יקום" החד-ממדי הזה לשלוח אותות אור לשני הכיוונים על המעגל. צופה היושב על A ונע עם היקום - מהו המרחק הזוויתי המקסימלי ϕ_m שממנו הוא יכול לקבל אותות אור כשגיל היקום הוא t - היינו, מהו ה"יקום הנראה" שלו אז? מובן, שזהו האינטגרל:

$$\phi_m = c \int_0^t \frac{d\tau}{R(\tau)}$$

וערך זה יהיה סופי כל עוד, בראשית היקום, $R(t)$ מתאפס לאט יותר מאשר $t^{1-\epsilon}$ לכל $\epsilon > 0$; זהו, ככל הנראה, המצב האמיתי. זאת ועוד: ϕ_m גדלה עם הזמן. מכאן, שה"יקום הנראה" שלנו, כצופים, הוא תמיד סופי, אבל ממדיו גדלים עם הזמן.

אם נכתוב את $R(t)$ בעזרת נוסחה מהסוג

$$R(t) = at^{1-\epsilon}$$

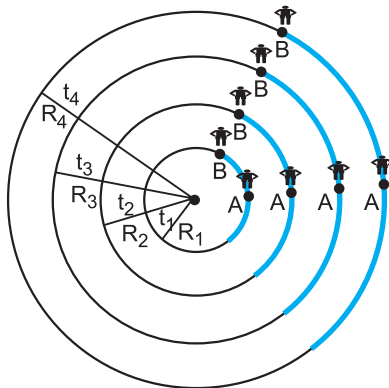
$$\phi_m = ca^{-1} \epsilon^{-1} t^\epsilon = \frac{1}{\epsilon} \frac{ct}{R(t)} \quad \text{אז יהיה}$$

$$H_0 = \frac{1-\epsilon}{t} \quad \text{וכן}$$

והמרחק אל קצה ה"יקום הנראה" יהיה

$$R(t) \phi_m = \frac{1}{\epsilon} ct = \frac{1-\epsilon}{t} \frac{c}{H_0}$$

ביקום שלנו, $\epsilon/(1-\epsilon)$ הוא מסדר גודל של יחידה: זה מצדיק את הערכתנו הקודמת לממדי ה"יקום הנראה" בתחילת הפרק הזה, של c/H_0 , כ-6000 מגאפארסק.



תרשים 6: התפתחותו של "עולם" מתפשט חד ממדי. ה"עולם" הוא היקף של מעגל, וחיים עליו בני אדם חד ממדיים. הציור מתאר את רדיוס המעגל בארבעה זמנים: t_1, t_2, t_3, t_4 . בעת שהיה ה"עולם" קטן מאוד, שלח אדם A אותות אור לשני הכיוונים. אור זה נע במהירות קבועה לאורך ה"עולם", ויגיע אל הצופה B , אשר הולך ומתרחק מ- A , בזמן t_4 . ה"עולם הנראה" לצופה B בזמן t_4 משתרע איפוא, עד A בצד אחד, וכמרחק הזה בצד השני.

אם $\Omega < 1$ היקום "פתוח" והרדיוס גדל לאינסוף; גם אם $\Omega = 1$, הרדיוס גדל, אך בקצב איטי יותר (והמקרה של איינשטיין - זה סיטה הוא דוגמה לכך); ואם $\Omega > 1$, הרדיוס יגיע לערך מרבי כלשהו ואחר כך ייקטן שוב. שלא כמו בתורה של ניוטון, קצב השינוי של הרדיוס תלוי ב- Ω בלבד, ולא באנרגיה ההתחלתית של ה"פיצוץ" או של ה"מפץ הגדול".

כפי שמראות תוצאות המדידות עד היום, נראה שביקום שלנו $\Omega < 1$. אולם, אפשרות הימצאותה של "מסה חשוכה", היינו, מסה שעדיין אינו יודעים על קיומה משום שאיננה מאירה, עדיין אינה מאפשרת לנו לומר שהיקום פתוח.

גודלו של היקום הנראה

הבה נחזור אל היצורים הדו ממדיים החיים על שפת כדור תלת ממדי שרדיוסו R , מישתנה עם הזמן. האם אומנם ימדוד האבל הדו ממדי וימצא את הקשר שמצא האבל שלנו? נשים לב לכך, שכל הגדלה של רדיוס הכדור R תגרום כמובן להגדלה במרחק שבין שתי נקודות נתונות A ו- B על הכדור. תוכלו להשתכנע בקלות שגידול זה במרחק ניכר יותר ככל ש- A ו- B מרוחקות יותר זו מזו מלכתחילה; השינוי הגדול ביותר במרחק יקרה עבור שתי נקודות הנמצאות בשני קטבים מנוגדים. קל להשתכנע ששינוי המרחק בין A ו- B ממש מתכונתי למרחקם ההתחלתי וכן מתכונתי לשינוי ברדיוס R . זאת ועוד; אם נתבונן במעגל הגדול על הכדור העובר דרך A ו- B בתחילה, נוכל לראות ש- A ו- B נשארות על אותו מעגל גדול גם אחרי ההתנפחות, כלומר, B מתרחקת ישירות מ- A . אלה הן בדיקת תוצאותיו של האבל. וכך הצליחו רעיונותיו הקוסמולוגיים של איינשטיין להסביר כיצד "נראה" כאילו אנחנו במרכז היקום, מבחינת בריחת כל הגלקסיות מאיתנו, אף שייתכן כי ליקום שלנו אין כלל מרכז - כשם שאין מרכז לפני הכדור.

עתה אנו מגיעים לשאלת ה"יקום הנראה" ל- A . כדי להדגים מה קורה כאן, הבה "נוריד" עוד מימד ונתבונן ביקום חד ממדי, (תרשים 6), שהוא מעגל ההיקף של עיגול מישורי שרדיוסו תלוי בזמן $R = R(t)$. הבה נתבונן באות של אור, אשר בזמן t_0 יוצא מנקודה A על היקף המעגל ומתחיל לנוע לאורך המעגל. לאחר זמן קצר dt מגיע אות האור לנקודה הנמצאת במרחק זוויתי $d\phi$

$$cdt = R(t) d\phi$$

מ- A , כאשר ϕ שעבר אות האור אחרי זמן סופי Δt היא

$$\phi = \int d\phi = c \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} \frac{d\tau}{R(\tau)}$$

כדאי לסיים את דיוננו זה על השלכותיה של תורת היחסות הכללית בתיאור של מה שהוא אולי המעבדה הטובה ביותר הידועה לנו כיום למדידתם של אפקטים הנובעים מתורת היחסות הכללית. זהו הפולסאר הבינארי, הידוע בשמו המקצועי PSR 1913 + 16, שגילו האלס (Hulse) וטיילור (Taylor) בשנת 1975. הפולסארים (תרשים 7) הם כוכבים דחוסים ביותר, הידועים ככוכבי ניטרונים, אשר מסתם כמסת השמש שלנו אבל רדיוסם כעשרה קילומטרים בלבד. כוכבים אלה פולטים קרינת רדיו באלומות חזקות. הנראות כאלומות מגדלור. הם גם מסתובבים במהירות רבה סביב עצמם, וכך אנו קולטים את קרינת הרדיו שלהם על כדור הארץ בדפקים (פולסים) - פעם אחת בכל סיבוב, כאשר האלומה פונה לכיוונו.

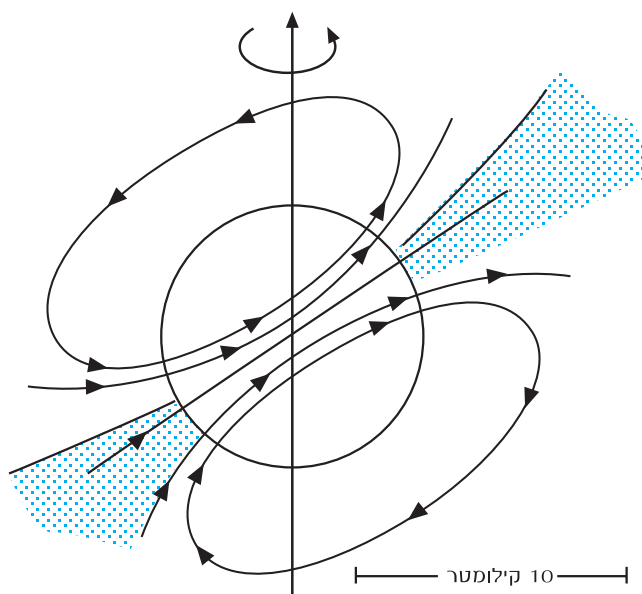
הפולסאר PSR 1913 + 16 מסתובב סביב עצמו פעם אחת בכל 59 אלפיות השנייה, ובניגוד לכל הפולסארים האחרים שאנו מכירים עד היום, יש לו בן זוג - כוכב אחר. שני הכוכבים סובבים אחד סביב השני במחזור של כ-7 שעות ו-45 דקות. אין רואים את בן הזוג כלל: אבל נוכחותו מורגשת משינויים מחזוריים שיש במחזור 59 אלפיות השנייה - השינויים חוזרים על עצמם אחת ל-7 שעות ו-45 דקות.

מחזור הסיבוב של שני הכוכבים זה סביב זה הוא קצר מאוד (זיכרו שהירח מקיף אותנו אחת ל-30 יום!) וחייב לנוע מהמרחק הקטן ביניהם, שהוא כנראה בערך כרדיוס השמש שלנו. מהירויות הכוכבים בתנועתם זה סביב זה הן, לכן, כאלפית מהירות האור. במערכת כה צמודה מופעל על כל כוכב שדה כבידה יותר משהיכרנו עד כה במערכות כוכבים, ולכן יש מקום לצפות בתופעות של תורת היחסות הכללית.

למשל, תנועתו של כל אחד מהכוכבים סביב רעהו היא אליפטית. הבה נזכור שמתורת היחסות הכללית נובע שאליפסה זו אינה קבועה, והיא מסתובבת בעצמה (תרשים 3). נזכור, שהאליפסה של כוכב חמה סביב השמש מסתובבת בקצב של 43 שניות קשת למאה שנה. כאן הקצב שנמדד גדול הרבה יותר - 2.4° לשנה! הסיבוב הזה נמצא מתאים לתורת היחסות הכללית אם לשני הכוכבים מסות בסביבת 4.1 מסות שמש - וזהו גם הגודל שאסטרופיסיקאים אחדים רואים בו כיום את המסה הרגילה של כוכב ניטרונים.

כדאי אולי להזכיר כאן, שסיבוב של האליפסה יכול להתרחש גם אם אין תורת היחסות הכללית נכונה, אבל כאשר לפחות אחד מהכוכבים אינו כדור מושלם. לו היתה השמש

בתמונת היקום של איינשטיין מצוי איפוא כל צופה במרכז של היקום הנראה שלו, ורואה מסביב לו יקום אחיד בכל הכיוונים. היקום הזה אינו אוקלידי: את הגיאומטריה שלו קובעת המסה-אנרגיה שהוא מכיל, והצופה יוכל לקבוע אותה בעצמו תוך מדידת מסלולי תנועה של גופים ומדידת צפיפויות של מסה-אנרגיה. התקדמות רבה הושגה בהבנתנו את היקום מאז נבנתה המסגרת הכללית - אנו מבינים עתה יותר את ההיסטוריה התרמית של היקום, את התפתחות המיבנה בו ויצירת המערכות האסטרופיסיקליות, וכן את השפעתה האפשרית של תורת הקוונטים. ואולם, חותמו של איינשטיין עדיין מורגש בעוצמה רבה בכל ההתפתחויות האלה, וודאי ימשיך להיות כך עוד לזמן רב.



תרשים 7:

תרשים של פולסאר. כוכב ניטרונים, שמסתו כמסת השמש ורדיוסו כ-10 קילומטרים בלבד. הוא סובב סביב ציר סיבוב נתון במהירות גדולה מאוד. השדה המגנטי של הכוכב, שקווי מתוארים בתמונה אינו מכוון לאורך ציר הסיבוב, ומשום כך סובבים קטבי השדה הזה סביב ציר הסיבוב. עקב שינוי מהיר זה בשדה המגנטי נוצרים מתחים אלקטרוסטטיים גבוהים אשר קורעים אלקטרונים ויונים מפני הכוכב ומשליכים אותם בתנועה מהירה מאוד החוצה, לאורך קווי השדה המגנטי שליד שני הקטבים. עקב תנועה מהירה זו קורנים המיטענים גלי רדיו, אור נראה ואף קרינת X. הכוכב נראה, איפוא, כמיגדלור, הקורן בשתי אלומות. בכל פעם שחולפת אלומה על פני כדור הארץ רושמים כאן הטלסקופים "יופק" (פולס) מן הפולסאר. קצב הגעת הפולסים האלה נותן את קצב הסיבוב של הכוכב.

העובדה שכדור הארץ אינו כדור מושלם. אבל - בפולסאר הבינארי אין הסטייה מכדוריות של הכוכבים מספיקה. לעומת זאת, קצב כזה יתאים יפה מאוד למצב שבו קורנת המערכת המסתובבת קרינה של גלי כבידה בקצב שתיארנו באחד הפרקים הקודמים, ושכתוצאה ממנה קָטן מחזור הסיבוב.

זו הבשורה שמביאה האסטרונומיה של 1979 לתורת היחסות הכללית של איינשטיין! הוכחה אפשרית של קיום גלי כבידה הולכת שלב אחד נוסף מעבר למיבחנים שידענו עד עתה לתורת היחסות הכללית, ומוסיפה מימד נוסף לאמונתנו בנכונותם של הרעיונות היסודיים שעליהם בנה אותה אינשטיין לפני כ־60 שנה.

שלנו פחוסה מספיק, (מה שכנראה איננה) היה זה מסביר את סיבוב האליפסה של כוכב חמה. אבל, במיקרה שלנו, הכוכבים היחידים שמתאימים למצב שבו המרחק ביניהם קטן הם כוכבים קטנים, אשר סטייתם מכדור היתה מספקת רק בתנאים מאוד מיוחדים, והאפשרות הזאת נראית בעלת הסתברות נמוכה מאוד.

הפולסאר הבינארי עשוי גם להביא לנו את העדות העקיפה הראשונה לקיומם של גלי כבידה. לפני חודשים אחדים דיווחו טיילור וחבריו על שינוי במחזור הסיבוב של הכוכבים אחד סביב רעהו: המחזור קָטן בקצב של 100 מיליוניות שנייה בשנה. שוב, יש מנגנונים שבהם יכול סיבוב כזה להשתנות למשל, מחזור הסיבוב של הירח סביבנו גדל בהתמדה, עקב

פרופ' יעקב שחם ז"ל (1941-1995) היה חבר במכון רקח לפיסיקה שבאוניברסיטה העברית בירושלים, בה גם קיבל את תואר הדוקטור ב-1971. נושאי התעניינותו בעת כתיבת המאמר היו שטחי האסטרופיסיקה (כוכבי ניטרונים וחורים שחורים), הגיאופיסיקה (אנרגיה אלסטית ופעילות סייסמית בכדור הארץ ובכוכבי לכת) והפיסיקה של טמפרטורות נמוכות (מוצקים ועל־נוזלים).

המאמר לקוח מ"תהודה" (1)8, עמ' 3, 1979.