

# גלי כבידה: צלילים שמימיים

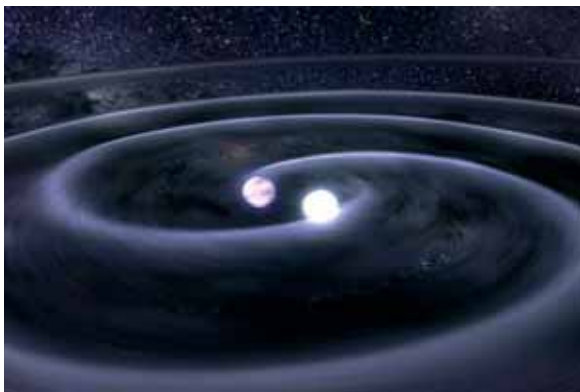
ברק קול

036

גליאן  
נובמבר  
2007

### מהם גלי כבידה?

כאשר מטילים אבן לבריכה, מתפשטות במים אדוות שמקורן בנקודת הפגיעה של האבן. באופן דומה, תורת הכבידה של איינשטיין (המוכרת גם בשם "יחסות כללית") חוזה כי תנועתן של מסות, למשל כוכבים במסלולם, תעורר אדוות במרחב-זמן עצמו, שתתפשטנה ברחבי היקום. לחלופין, אם נדמה את גלי הכבידה לגלי קול, אזי כוכבים במסלול מחזורי (ראו איור) מפיקים – כפי שניווכח בהמשך – צליל טהור, כעין קולן אסטרונומי (קולן, נזכיר, הוא מזלג מתכת המפיק צליל מתמשך, מדויק ונקי, ומשמש לכיוון כלי נגינה).



בעין האמן: מערכת כוכבים בינארית הכוללת שני כוכבים הנעים סביב מרכז המסה המשותף. תורת הכבידה של איינשטיין צופה כי מערכת כזו תעורר אדוות של עקמומיות בחלל-זמן, המכונות "גלי כבידה"

כדי להבין טוב יותר את מהותם של גלי כבידה, כדאי לחזור לעבר. בשנת 1687 הצליח ניוטון להסביר את תנועתם של כל כוכבי-הלכת שהיו ידועים בזמנו, וזאת באמצעות חוק יחיד, "חוק הכבידה האוניברסלי". לפי חוק זה, כל שתי מסות ביקום נמשכות זו לזו בכוח מתכונתי (פרופורציוני) הפוך לריבוע המרחק ביניהן. קשה להפריז ברישומו של הישג זה על התפתחות המדע. יחד עם זאת, ב-1905 הסתבר שחוק ניוטון, אשר שרד בלא שינוי במשך למעלה ממאתיים שנים, אינו שלם וכי נדרש לו תיקון. באותה שנה, בעקבות תגליות בתחום החשמל והמגנטיות, פרסם אלברט איינשטיין הצעיר את תורת היחסות הראשונה והמהפכנית שלו (אשר



באוגוסט 2002 הופעל לראשונה מתקן מדעי גדול ומשונה-למראה (ראו איור) במישור צחיח ליד האנפורד, במדינת וושינגטון בארצות-הברית. המתקן כולל שני צינורות ריק (ואקום) באורך 4 ק"מ כל אחד, היוצרים ביחד את צורת האות רי"ש. הצינורות, שקוטנם 1.2 מ', מחופים במבנה בטון ומהווים משכן לקרן לייזר, החוצה אותם הלך ושוב. בניית המתקן החלה ב-1996, והושקעו בו אלפי שנות אדם.

שמו של הפרויקט הוא לייגו (LIGO), ראשי תיבות של "מצפה גלי כבידה באמצעות אינטרפרומטר לייזר" (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory), והוא נועד לגלות גלי כבידה – גלים שקיומם הוא כיום בגדר השערה. שלושה גלאים בעלי עקרון פעולה דומה נבנו במקומות נוספים בעולם: וירגו (VIRGO) באיטליה, המופעל בשיתוף פעולה אירופי; גאו (GEO) בגרמניה, המופעל בשיתוף פעולה גרמני-אנגלי; וטאמה (TAMA) ביפן.

מהם גלי הכבידה הללו, שחוקרים ברחבי העולם מתחרים לגלותם? מהי חשיבותם? מדוע כה גדול האתגר שבגילויים? על שאלות אלה ואחרות ננסה לענות כאן.



אתר לייגו ליד האנפורד במדינת וושינגטון, ארצות-הברית שתי הזרועות (אחת מוחן נראית במלואה), באורך 4 ק"מ כל אחת, מכילות אינטרפרומטר לייזר לגילוי גלי כבידה באמצעות מדידת שינויים בהפרש האורך בין הזרועות. סדר הגודל של השינויים הנמדדים הוא  $10^{-18}$  מ'



מאוחר יותר כונתה ה"מצומצמת" או ה"פרטית"), שאחד מעקרונותיה המרכזיים הוא שאין שום תופעה פיזיקלית היכולה להתפשט מהר יותר מגל אלקטרומגנטי, היינו אין מהירות גבוהה ממהירות האור. ואולם, חוק הכוח של ניוטון אינו מתחשב כלל בתנועת הגופים, אלא מתייחס רק למרחק ביניהם. על פי המודל הניוטוני, ברגע שמסה שינתה את מקומה, למשל כדור-הארץ בתנועתו, הרי שכוח הכבידה שהיא מפעילה על גופים אחרים משתנה מיד בכל רחבי היקום, ודבר זה עומד בסתירה לעקרון המהירות המרבית של איינשטיין.

היות שבבסיס הרעיון "גלי כבידה" עומד המושג "גל", הבה נרענן מעט את זיכרוננו ביחס לטבעם של גלים. תופעות רבות מזוהות כתופעות גליות. אחת המוכרות שבהן היא גלי הים (וגלים במים בכלל). גלי ים, כמו כל תופעה גלית, מאופיינים באורך גל, במשך ובמהירות התקדמות מסוימים. אורך הגל הוא המרחק האופקי בין שני שיאים עוקבים של הגל, והמשרעת היא גובהו של השיא מעל לגובה פני הים, והיא מייצגת את עוצמת הגל. מהירות ההתקדמות של הגל אינה תלויה בדרך-כלל במשרעת או באורך הגל, אלא רק בסוג הגל ובתווך. לצורך השלמות נזכיר, כי לגלים מסוימים תכונה נוספת – קיטוב.

הגוף המעורר את הגלים נקרא מקור. למשל, טיפות הנופלות מברז מטפטף לכיור מלא מים הן מקור לגלים בכיור. מעניינת במיוחד הדוגמה של מקור המבצע תנועה מחזורית. בדוגמה כזו ברור כי זמן המחזור של הגלים יהיה כשל המקור.

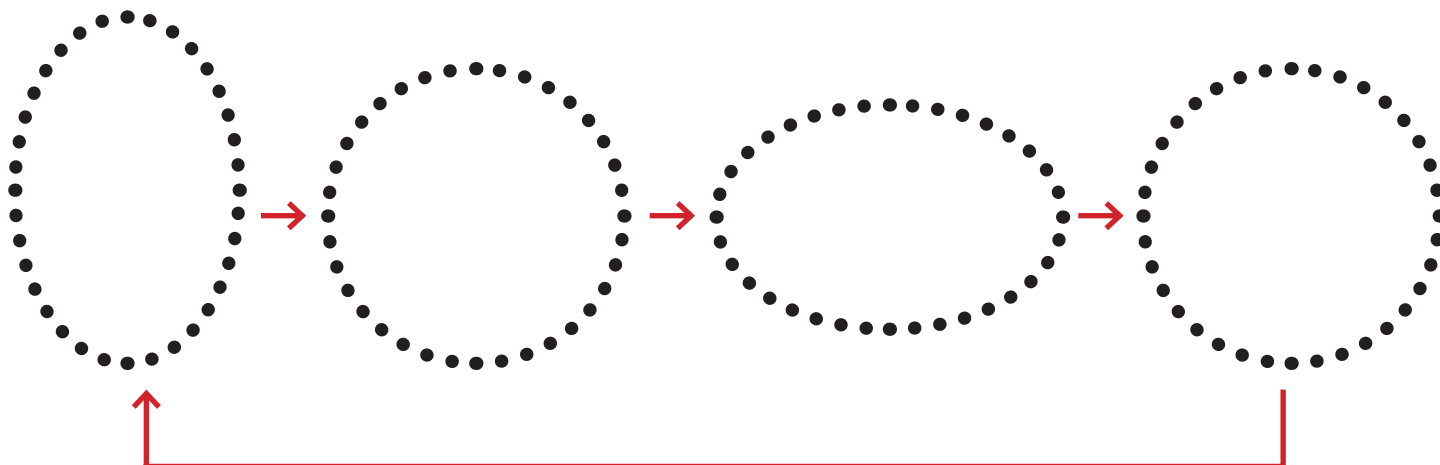
הקול והאור הם גלים: הקול הוא גל של שינויי צפיפות בתווך, והאור הוא גל אלקטרומגנטי. הגלים האלקטרו-מגנטיים רלוונטיים במיוחד כשמדובר בגלי הכבידה. כמו כוח הכובד הניוטוני, גם התיאור הכמותי הראשון של הכוח החשמלי (חוק קולון) התייחס רק למרחק בין שני גופים טעונים ולא לזמנים ולמהירויות. במהלך המאה ה-19 גובשה תורה מתקדמת יותר של מכלול התופעות האלקטרו-מגנטיות, תורה אשר נחתמה עם ניסוחן של "משוואות מקסוול" בידי ג'יימס קלרק מקסוול (Maxwell). המקורות לשדה האלקטרומגנטי הם גופים טעונים בחשמל. על פי תורה זו, הכוח החשמלי הודות למטען ישתנה כאשר המטען נוע ממקומו, אך השינוי אינו מיידי בכל רחבי היקום, אלא

ה"ידיעה" על השינוי מתפשטת במהירות האור בצורה של גל אלקטרומגנטי – גל העשוי משדה חשמלי ומגנטי רוטט. גלים כאלה היו תחזית של משוואות מקסוול. ואכן, קיומם אומת עשורים ספורים לאחר מכן, וכך התאפשר פיתוח הטכנולוגיה של שידור אלחוטי.

את מאפייניו האיכותיים של פתרון הסתירה בין תורת הכבידה של ניוטון לתורת היחסות (הפרטית) של איינשטיין ניתן להסיק באנלוגיה מהתורה האלקטרומגנטית שהיתה ידועה בעת ניסוח תורת היחסות הפרטית. כיוון שבתחום הכבידה מסות – ולא מטענים חשמליים – הן הממלאות את תפקיד המקורות, היה בוודאי ברור לאיינשטיין כי כשם שמטענים חשמליים נעים יוצרים גלים במהירות האור, כך גם מסות בתנועה חייבות ליצור גלים מסוג חדש, "גלי כבידה", המתקדמים גם הם במהירות האור.

איינשטיין הבין מיד שתורת היחסות (הפרטית) תגרוור שינוי בתורת הכבידה, כאשר הצורך בגלי כבידה הוא רק הדגמה אחת של הפער בין התורות, ובמהרה התברר שאין מדובר בשינוי קוסמטי ובהוספת תיקונים, אלא בשינוי עמוק ומקיף. המשימה היתה גדולה גם למידותיו של איינשטיין, והוא נאבק בה במשך כעשור עד שב-1915 הצליח להשלים את ניסוחה של תורה המשלבת את כוח הכובד יחד עם עקרונות תורת היחסות. את התורה הזאת כינה איינשטיין "תורת היחסות הכללית", בעוד שאת תורת היחסות הראשונה כינה מעתה "מצומצמת" או "פרטית". תורה חדשה זו היתה שונה בתכלית מכל תורה פיזיקלית שנודעה עד אותה עת. את המושג המאתגר של המרחב-זמן ה-4 ממדי של תורת היחסות המצומצמת מחליף כאן מושג מופשט ומפתיע עוד יותר, זה של מרחב-זמן עקום, וכוח הכובד עצמו "נעלם" מן התורה ומוחלף בעקמומיות גאומטרית של המרחב-זמן. במקרה זה היתה המתמטיקה מאתגרת ומתוחכמת כמעט כמו עומקם של המושגים הפיזיקליים, ויש בכך כדי להסביר את הקשיים שעמדו בפני איינשטיין ועיכבו אותו.

לתורת הכבידה החדשה של איינשטיין (היחסות הכללית) היו כמה השלכות מהפכניות, שהמרכזיות שבהן הן החיזוי של היקום הדינמי, של חורים שחורים, ולא פחות חשוב – של גלי כבידה המתפשטים במהירות האור. תורה זו מאפשרת גם לתאר בפירוט את תכונותיו הפיזיקליות של גל הכבידה. תכונתו היסודית של המרחב-זמן העקום היא שמרחקים בין



סדרת האיורים מציגה את תנועתו של אוסף מסות-מבחן (המבודדות מכוחות חיצוניים) בהשפעת גל כבידה. המסות מפוזרות במישור המאונך לכיוון התקדמותו של הגל. בטרם הגעת הגל הן מרחפות בתבנית מעגל, וכאשר הגל מגיע מיקומן מתעוות קלות לצורת אליפסה: ציר אחד מתכווץ בזמן שהציר האחר מתפשט קמענה. בהשפעת הגל, כל ציר ממשיך להתפשט ולהתכווץ לסיחגין. האוריינטציה של צירי האליפסה מעידה על הקיטוב של גל הכבידה

שחורים וקריסה של כוכבים, שמתרחשת בהם תנועה במהירויות הקרובות למהירות האור, ולפיכך יקרנו גלי כבידה חזקים בהרבה ואיבוד האנרגיה בעטיים יהיה משמעותי. לסיכום: את גלי הכבידה יוצרות מסות הנמצאות בתנועה, והם מתקדמים במהירות האור, מאופיינים באורך גל ובקיטוב, ובאים לידי ביטוי כעיוות ריתמי (מחזורי) של המרחב.

### המוטיבציה: עולם המקורות

נחזור ונדמה את גלי הכבידה לגלי קול. אילו יכולנו לגלות ו"לשמוע" אותם, אילו צלילים שמימיים היינו שומעים? מעבר לעניין (המדעי הטהור) שבגילוי סוג חדש של קרינה, מקווים החוקרים ללמוד על אותן מערכות ביקום הפולטות קרינה זו. ברור כי ככל שהמסות המעורבות תהיינה גדולות יותר ודחוסות יותר, וככל שתנועתן תהיה מהירה יותר, כך גלי הכבידה הנפלטים יהיו חזקים יותר (בעלי הספק גבוה יותר). אם כן, גלי הכבידה צפויים ללמד אותנו על מערכות אנרגטיות שכאלה ביקום, ונוכל להפיק מהם מידע משלים על המידע הנאסף בטלסקופים קיימים, ובמקרים מסוימים – מידע בלעדי.

בעזרת היכרותנו עם דייריו של היקום, ניתן להעריך באופן מושכל את טיבם של המקורות שסביר שיתגלו הודות לגלי כבידה. ראשית נציג כמה עצמים קטנים ומסיביים ולכן

נקודות אינם קשיחים, ובפרט הם עשויים להשתנות לאורך זמן. השפעתו של גל כבידה חולף היא כזו שמרחק בין שתי נקודות (אשר הקו המקשר ביניהן מאונך לכיוון התקדמותו של הגל ושאינן פועלים עליהן כוחות חיצוניים) משתנה באופן ריתמי (מחזורי; ראו איור). ליתר דיוק, השינוי המרבי במרחק בין הנקודות בנוכחות גל כבידה שווה למכפלה של משרעת הגל במרחק בין הנקודות.

בנקודה זו יכולה לעלות תהייה: כיצד הצליחה תורת ניוטון לתאר את תנועתם של גופים במערכת השמש, ולספק תחזיות שנבחנו בהצלחה לאורך כ-200 שנה לפי תצפיות אסטרונומיות שהתפתחו והגיעו לדיוק חסר תקדים, וכל זאת למרות חסרונותיה? ההסבר לכך הוא, שבמערכת השמש המהירות האופייניות לגופים מסיביים נמוכות בהרבה ממהירות האור, ולכן השפעתה של תורת היחסות קטנה בהתאם. למשל, מהירותו של כדור-הארץ במסלולו סביב השמש היא כ-30 ק"מ לשנייה. מהירות זו, שהיא אמנם גבוהה מאוד ביחס למהירויות יומיומיות (רכב במהירות של 90 קמ"ש עובר 25 מטרים בשנייה, היינו הוא אטי פי אלף ויותר), היא רק החלק האחד מתוך עשרת אלפים ביחס למהירות האור, שערכה כ-300,000 ק"מ בשנייה. בהתאם לכך, גלי הכבידה הנפלטים מגופים מסיביים במערכת השמש חלשים מאוד (הספקם נמוך). ואולם, בהמשך נתאר תהליכים אנרגטיים ביקום, כגון התנגשויות בין חורים



הגלקסיה מחוגה (Circinus) מוארת במרכז, על פי הסברה, על-ידי חומר המתלהט במהלך נפילתו אל חור שחור סופר-מסיבי. צולם באמצעות טלסקופ החלל האבל

סדר גודל של מסת השמש, הרי שתופעת ההבהוב מעידה שהם מסתובבים סביב עצמם במהירות עצומה. תופעה כזו תיתכן רק אם הכוכב קטן דיו ולכן דחוס ביותר. ואמנם, אסטרופיזיקאים סבורים שפולסרים הם כוכבי ניטרונים. את תופעת ההבהוב מסבירים כך: הפולסר פולט שתי קרניים של גלי רדיו משני הקטבים המגנטיים שלו כמין זרקור, ובשל הסיבוב העצמי המהיר שלו סביב ציר הסיבוב, השונה בדרך-כלל מן הציר המגנטי, הקרניים מסתובבות כמעין מגדלור קוסמי.

נוסף על החורים השחורים הנוצרים מקריסת כוכב, ומכונים חורים שחורים כוכביים, מוזהה מחלקה נוספת של עצמים כחורים שחורים. אלה הם עצמים קומפקטיים הנמצאים בליבות הגלקסיות, ומסתם ממיליוני מסות שמש ועד מיליארדים ויותר של מסות שמש (וראו: אריה מלמד-כץ, "גוליבר בארץ החורים השחורים", "גליליאו" 92). עצם כזה מכונה חור שחור סופר-מסיבי. למשל, במרכזה של הגלקסיה שלנו, שביל החלב, נמצא ענק שכזה במסה של



דחוסים, המכונים "עצמים קומפקטיים", ואשר צפיפותם הגדולה מאפשרת להם להשתתף בתהליכים האנרגטיים שצפוי כי הם מקרינים גלי כבידה משמעותיים (קרי, שהשפעתם אינה זניחה). מדובר בננסים לבנים, כוכבי ניטרונים, חורים שחורים כוכביים, פולסרים וחורים שחורים סופר-מסיביים. בהמשך נתאר את התהליכים האנרגטיים שבהם עצמים אלו עשויים להשתתף.

ננס לבן הוא כוכב שכבה לאחר שכילה את הדלק הגרעיני שלו; לאחר שפסק הלחץ הפנימי של המיזוג הגרעיני, קרס הכוכב תחת כובדו העצמי, תוך שנותרה תמיכתו של לחץ הנקרא "לחץ ניוון אלקטרוני". ננס לבן אשר מסתו (בתום הקריסה) היא כמסת השמש שלנו הוא דחוס עד כדי כך שגודלו כגודל כדור-הארץ.

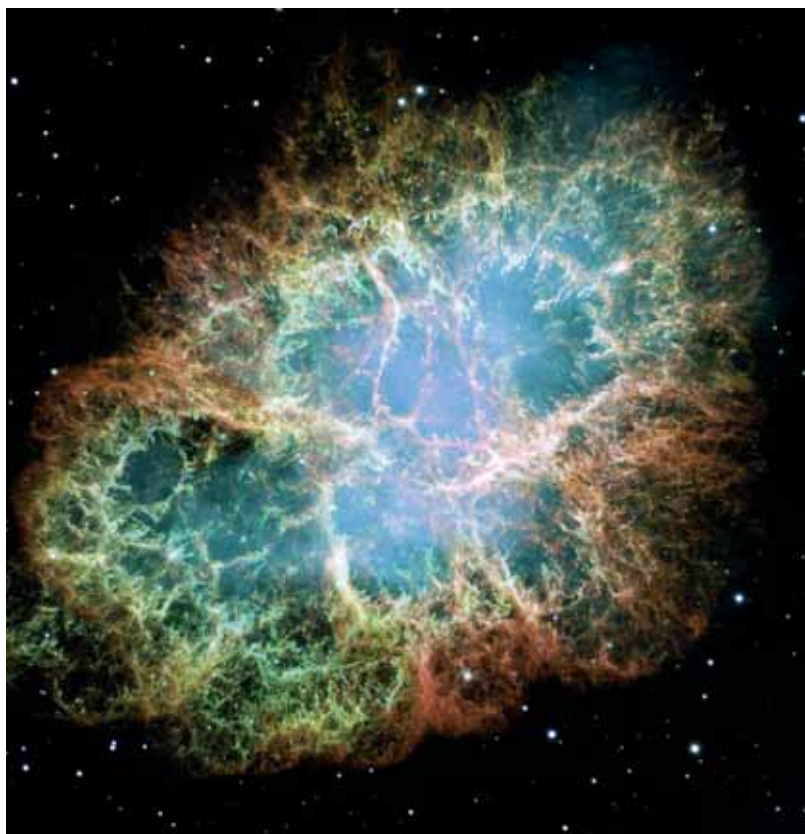
עבור כוכב מסיבי מעט יותר מהשמש שלנו, הקריסה לא תיעצר במצב ננס לבן, אלא תמשיך למצב של כוכב ניטרונים או חור שחור. בכוכב ניטרונים האטומים קורסים בהשפעת כוח הכובד, האלקטרונים בעלי המטען השלילי נבלעים בפרוטונים החיוביים שבגרעין ויוצרים ניטרונים, והתוצאה היא כוכב העשוי כולו ניטרונים בצפיפות של פי טריליון לערך ( $10^{12}$ ) מצפיפות המים. סבורים כי כוכבי ניטרונים נוצרים רק בתחום צר של מסות, וכי עבור כוכבים מסיביים יותר אין כל מנגנון העשוי לייצב את קריסתם והם קורסים למצב שחזתה תורת הכבידה של איינשטיין, מצב שהוא בעל הצפיפות הגדולה ביותר האפשרית: חור שחור. קוטרו של חור שחור שמסתו כפולה ממסת השמש הוא כ-12 ק"מ בלבד (!) וכוכבי ניטרונים גדולים אך במעט מחורים שחורים. החור השחור מאופיין בכך שהמרחב-זמן סביבו מתעקם כל-כך עד שנוצר משטח גבול הנקרא אופק, וכאשר הכוכב הקורס חוצה אותו הוא מאבד, מרוב הבחינות, את הקשר עם העולם החיצון. תורת היחסות הכללית צופה תכונות מרתקות לחורים שחורים, אשר היינו רוצים לבחון אותן הלכה למעשה בתצפית אסטרונומית.

הפולסרים הם קבוצה גדולה של מקורות, אשר נתגלו לראשונה באמצעות רדיו-טלסקופים בשנות השישים ומאופיינים בכך שהקרינה מהם מהבהבת בפולסים מהירים (בזמני מחזור שבין אלפית שנייה לעשר שניות). בעוד שהקרינה מעידה שמדובר בכוכבים שמסתם היא מאותו

1. וראו: [http://www.phys.huji.ac.il/~barak\\_kol/Frontier/GalaxyCenter.doc](http://www.phys.huji.ac.il/~barak_kol/Frontier/GalaxyCenter.doc)

הארץ ככוכב חדש – "נובה" או "סופר-נובה" (ראו איור). אירוע אסטרונומי אלים אחר שצפוי שיהיה מקור לגלי כבידה הוא התנגשות. ההתנגשות יכולה להתרחש בין מרכיביה של מערכת בינארית, לאחר שהמרכיבים מאבדים אנרגיה (למשל בשל קרינה של גלי כבידה) ומתקרבים זה לזה עד שהם מתנגשים. אפשרות אחרת היא התנגשות מקרית בחלל. התנגשות שכזו יכולה לקרות בין כוכבים או אף בין גלקסיות שלמות, ובפרט בין הליבות הסופר-מסיביות שלהן.

מלבד אירועים אלה עשויים להגיע אלינו גלי כבידה גם מהעבר הרחוק יותר, ואפשרות מעניינת במיוחד היא גלים שנוצרו במהלך ראשיתו הסוערת של היקום שלנו, המפץ



ערפילית הסרטן מכילה שאריות של סופרנובה שהופעתה (המתרחשת עם קריסתה) נצפתה בשנת 1054 לספירה. במרכז פולסר

כ-4 מיליון מסות שמש (לדוגמה נוספת, ראו איור מימין). לאחר תיאור קצר זה של ה"נפשות הפועלות", נוכל להמשיך ולתאר את המנגנונים העיקריים שמשערים שהם מייצרים קרינת כבידה: מערכת בינארית, קריסת כוכב, התנגשות בין עצמים ושרידים מהמפץ הגדול.

כבר נאמר: לא טוב היות האדם לבדו. מסתבר כי לא רק בני-אדם, אלא גם כוכבים מרבים להימצא במערכת זוגית, בשל תכונת היציבות שלה. מערכת כזו מורכבת משני עצמים הסובבים זה את זה (ליתר דיוק, את מרכז המסה המשותף שלהם), והיא נקראת "מערכת בינארית" (ראו איור בעמ' 37). העצמים המרכיבים מערכת בינארית יכולים להיות כל אחד מהעצמים שהזכרנו, כמו גם עצמים דחוסים פחות, כדוגמת כוכבים רגילים. מבחינים בין מערכות שבהן מסות שני העצמים הן מאותו סדר גודל, לבין מערכות שבהן אחד מבני הזוג מסיבי הרבה יותר מרעהו. במערכת מהסוג השני, העצם המסיבי יותר נייח למעשה, והעצם הקל סובב אותו. דוגמאות מוכרות למערכת בינארית הן מערכות ארץ-ירח וארץ-שמש (כאשר מתעלמים מכוכבי-הלכת האחרים).

מערכת בינארית מכילה מעצם הגדרתה מסות בתנועה, ולכן היא מקרינה גלי כבידה. למעשה, הגלים הם בעלי אופי ספירלי, היוצא מן הכוכבים כזרם מים מממטרה ומתפשט כלפי חוץ. גלי הכבידה, כמו כל הגלים האחרים, נושאים איתם אנרגיה. במקרה זה האנרגיה חייבת לבוא על חשבון אנרגיית התנועה המסלולית של המקור. לפיכך מסלולי הגופים ילכו ויתקרבו באטיות זה לזה, בשיעור שניתן לחשבו לפי תורת היחסות הכללית. במערכת ארץ-שמש, גלי הכבידה הם חלשים כל-כך עד כי פליטתם לא תשפיע משמעותית על מסלול כדור-הארץ גם לאורך זמן השווה לתוחלת החיים של השמש. ואולם, עבור מסות קומפקטיות הנמצאות במסלולים קרובים ולכן מהירים, האפקט משמעותי ביותר.

אירוע אסטרונומי אנרגטי, שהזכרנו כבר בקשר לעצמים קומפקטיים, הוא קריסת כוכבים. גם כאן ישנה מסה בתנועה וצפוי שידור של גלי כבידה. אך בעוד שניתן לדמות את המערכת הבינארית למיתר רוטט המפיק צליל טהור לאורך זמן, הרי שהקריסה דומה לפיצוץ והיא נמשכת זמן קצר יחסית. בתהליך הקריסה, כמו בפיצוץ, נפלטת אנרגיה רבה במשך זמן קצר, ובמקרים מסוימים המאורע יראה מכדור-



הגדול. נוסף על כך הועלו השערות אקזוטיות יותר למקורות של גלי כבידה, ותמיד עשויות להתגלות הפתעות חדשות שלא הובאו עד כה בחשבון. עתה, משסקרנו על קצה המזלג את מגוון המערכות המיוחדות והסוערות הצפויות לשדר גלי כבידה, העניין הרב בגילויים עשוי להיות ברור יותר.

### עדות עקיפה לקיומם של גלי כבידה

עד כה תיארונו עקרונות תיאורטיים המובילים אותנו לשער את דבר קיומם של גלי כבידה. ואולם, האם יש להם עדויות תצפיתיות ממשיות? מתברר שאף שגלי כבידה טרם נתגלו באופן ישיר, הרי שיש בידינו עדות עקיפה מרתקת לקיומם. ב-1974 ערכו ג'וזף טיילור (Taylor) ותלמידו באותה עת ראסל האלס (Hulse) תצפיות באמצעות הרדיו-טלסקופ ארסיבו (Arecibo) – אנטנה בקוטר של 305 מטרים, וגילו אות רדיו מעניין המגיע כנראה מן החלל. האות הבהב 17 פעמים בשנייה, באופן סדיר האופייני לפולסר. המיוחד בפולסר מסוים זה, שזכה בשם הטכני PSR 1913B+16 על שום מיקומו בכיפת השמיים, היה בשינויים מסוימים בקרינה ממנו (הסחת דופלר) שאירעו במחזוריות של 7 שעות ו-45 דקות. ממחזוריות זו הסיקו החוקרים שלפניהם פולסר בינארי, היינו פולסר המצומד אל כוכב נוסף כך ששניהם מקיפים את מרכז הכובד המשותף. זו היתה התצפית הראשונה בפולסר מסוג זה. כלומר, עבור הפולסר אורך ה"יום" הוא החלק ה-17 של שנייה, ואורך ה"שנה" הוא 7 שעות ו-45 דקות. אכן, זו מערכת כוכבים מהירה ואנרגטית ביותר...

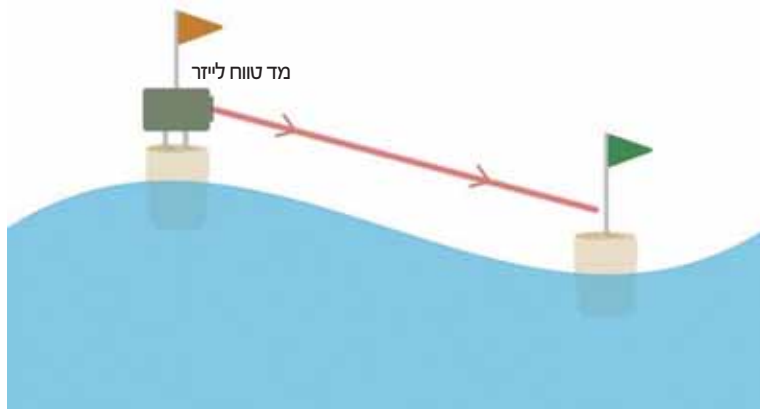
מן האותות האלה יכלו החוקרים להסיק במדויק את המסלול היחסי של הכוכבים, ומצאו שהוא תואם לחלוטין את חוקי קפלר המוכרים ממערכת השמש. ואולם, התגלית המעניינת ביותר ממערכת זו, התגלית שבזכותה היא נזכרת כאן, היא שבמדדות מדויקות לאורך שנים ניתן להבחין בשינוי קל במסלולי הכוכבים, המעיד על התקרבותם זה לזה. כאמור, יש לצפות להתקרבות כזו אם המערכת משדרת גלי כבידה. הנתונים המפורטים שנתקבלו בתצפיות לגבי שני הכוכבים ומסלוליהם אפשרו לחשב את גודלו של האפקט, ואכן, נמצא שהמדדות התאימו לערכים שחושבו! אם כן, הגם שגלי הכבידה עצמם מעולם לא נצפו ישירות,

מדענים רואים בתגלית זו של התקרבות אטית בין מסלולי הכוכבים עדות עקיפה אך חזקה לקיומם. על גילוי מערכת זו זכו האלס וטיילור בפרס נובל בפיזיקה לשנת 1993. מאז נמצאה התאמה זו לראשונה, שופר הדיוק במדידה ואף נתגלו מערכות דומות נוספות, וההתאמה הוסיפה להתקיים.

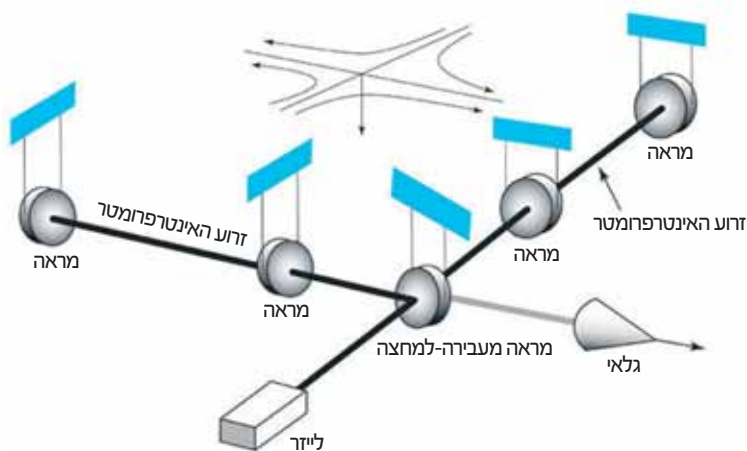
### כיצד ניתן לגלות גלי כבידה, ומדוע המשימה כה קשה?

נוכחנו כי השילוב של תורת הכבידה ותורת היחסות במסגרת תורת היחסות הכללית מחייב את קיומם של גלי כבידה, גלים השונים מכל סוגי הקרינה המוכרים לנו, וכי ישנה עדות עקיפה לקיומם מתצפיות במערכות פולסר בינאריות. ניתן לתמוה מדוע, חרף העניין הרב שגילה המדע בקרינה זו ומאמץ מחקרי הנמשך זה כ-40 שנה, גלי הכבידה מוסיפים לחמוק מגילוי ישיר.

השוואה מועילה היא בין גלי כבידה לגלי ים. נדמיין לעצמנו שני פקקי שעם צפים ביים. אם, משום מה, היצורים החיים על פני הפקק אינם ניחנים בחוש ראייה וכן אינם מבחינים בתנועתו האנכית של הפקק בנוכחות גלים, קשה



שני פקקים שעל אחד מהם מד-טווח לייזר: כך אפשר למדוד את השינויים במרחק בין הפקקים, הצפים על גלי הים. איור: אבי קלוסקי



תיאור סכמטי של אינטרפרומטר הלייזר של לייגו. האינטרפרומטר מסוגל למדוד שינוי זעיר בהפרש האורך בין שתי הזרועות

דוגמה: בעוד שאבן הנזרקת לבריכה מעוררת בה גלים רבים ותנועתה מואטת מיד, הרי שאותה האבן במהלך מעופה באוויר מעוררת בו גלי אוויר (רוח) חלשים בלבד, ומהלכה מואט אך במעט. אנו אומרים כי לאבן צימוד חזק למים ואילו צימוד חלש לאוויר; באותו אופן למסה השרויה בתנועה יש צימוד חלש לגלי כבידה. ניתן אף לכמת קביעה זו: התיאוריה קושרת בין עוצמת הצימוד לגלי כבידה לבין חוזקו של כוח הכובד עצמו. ואכן, לגבי זה האחרון ידוע כי הוא חלש ביותר ביחס לכוחות היסודיים האחרים המוכרים לנו. למשל, כוח המשיכה הכבידתי בין שני פרוטונים קטן פי  $10^{36}$  מכוח הדחייה החשמלי ביניהם!

### עם הפנים לעתיד

לסיום נתאר אתגרים אחדים לעתיד.

עד כה טרם התגלו גלי כבידה, אך מומחים בתחום סבורים שהדבר יתרחש בעתיד הנראה לעין. הגלאי לייגו מימש את יעדי התכנון שלו והשיג רגישות מדהימה. המקורות המוכרים לנו, כגון מערכות בינאריות מוכרות, אינם חזקים מספיק בכדי שגלאי זה יגלה אותם, ועד כה לא נמצא לנו מקור חזק דיו וקרוב מספיק אלינו.

המרדף נמשך, ועל לוח התכנון נמצאים שני גלאים עתידיים. הראשון הוא שדרוג של לייגו הנקרא "לייגו מתקדם", שרגישותו המתוכננת (השקולה לטווח הגילוי) גבוהה פי 10 משל לייגו הנוכחי, כך שנפח הגילוי ביקום יגדל פי אלף לערך. צופים שהעבודה על שדרוג זה תחל בשנה הקרובה, אם יאושר

להם לזהות את הגלים. נניח שבכל זאת חשוב להם לדעת על נוכחות הגלים, למשל כדי לזהות סערה מתקרבת. לשם כך הם עשויים להרכיב על כל אחד מהפקקים מד-טווח לייזר זעיר, ולזהות גלי ים באמצעות השינויים הריתמיים שימדדו במרחק בין הפקקים. למעשה, די במד-טווח לייזר יחיד על אחד הפקקים (ראו איור מימין).

מהו הנמשל? הגלים בפני הים מוחלפים בגלי הכבידה שבמרחב-זמן, הפקקים הצפים מוחלפים במראות גדולות המשולבות במערכת של בולמי זעזועים כדי לבדודן מכוחות חיצוניים ולקיים את תנאי הציפה החופשית, ולבסוף מד-טווח הלייזר מוחלף באינטרפרומטר לייזר (ראו איור משמאל), שעקרון הפעולה שלו שונה והוא מאפשר דיוק גבוה יותר במדידת המרחק. נעיר כי גילוי גלי כבידה דומה במהותו לפעולתה של אנטנה הקולטת גלים אלקטרו-מגנטיים, גם אם עקרון הפעולה שונה למדי.

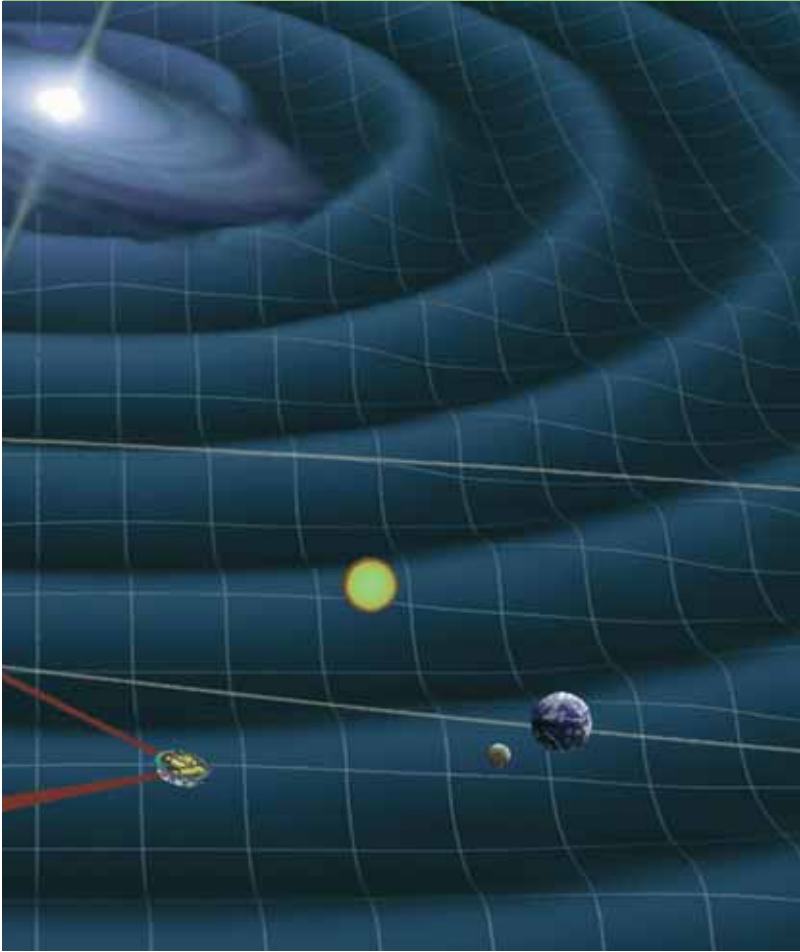
לצורך שלמות התיאור נציין, כי הגלאים האינטר-פרומטריים הם דור שני לגלאי הכבידה, והם מחלפים את גלאי המוט (bar detector) שהכניס לשימוש בתחילת שנות השישים ג'וזף ובר (Weber), חלוץ החוקרים בתחום. קוריוז מעניין מאותה תקופה הוא, כי ובר פרסם עוד ב-1969 מאמר בכתב-עת מוביל, ובו תיאר כיצד גילה את גלי הכבידה. בזמנו עורר הפרסום התרגשות רבה, אך בניסויים אחרים לא הצליחו חוקרים לשחזר את הגילוי, ובהדרגה התברר שהפרסום היה מוטעה.

נוכל לכמת את הקושי שבגילוי גלי כבידה על-ידי ציון משרעת הגל המזערית הניתנת לגילוי. כיוון שמשרעת הגל מתורגמת לגודל התנודה על-ידי כפל באורך הזרוע, ברור הצורך להגדיל את הזרועות, הבא לידי ביטוי באורכם של הגלאים הקיימים. השיאן העולמי ברגישותו לגלי כבידה, לייגו, מאפשר גלולתם החל במשרעת גל של  $10^{-21}$  בכדי להעריך הישג טכנולוגי כביר זה, נציין שמשרעת זו לאורך 4 ק"מ מתורגמת לרגישות לשינויי מרחק בין המראות של פחות ממאית קוטר של גרעין אטום המימן.

לאחר שתיארנו את השיא הטכנולוגי שאליו הגיע לייגו מבלי שהתגלו גלי כבידה, ברור יותר הקושי הטכנולוגי לבחון את קיומם, ומתעוררת השאלה: מדוע הגלים חלשים כל-כך? הבעיה המרכזית היא מה שמכונה הצימוד החלש של מסת המקור לגלי הכבידה. ניתן להבין את העניין בעזרת



## גלי כבידה: צלילים שמימיים



שיידרשו לו. מכל מקום, הפרויקט לא ישוגר לפני המחצית השנייה של העשור הבא.

תיארנו את המוטיבציה לחיפוש אחר גלי כבידה ואת מצב הניסויים בהווה ובעתיד. האם ישנם עדיין אתגרים תיאורטיים בתחום, או שתורת הכבידה של איינשטיין

המיומן, ותימשך כחמש שנים. התכנית היא ליישם התקדמות טכנולוגיות מהעשור האחרון, בעיקר בתחומים של לייזרים, אופטיקה ובידוד סיסמי. אף שברור שסיכויי הגילוי בלייגו מתקדם הם משמעותיים, לדעת כותב שורות אלו יש להודות כי אי-גילוי לא יהיה בלתי סביר. תכניות שדרוג דומות קיימות גם לחלק מן הגלאים הקיימים האחרים.

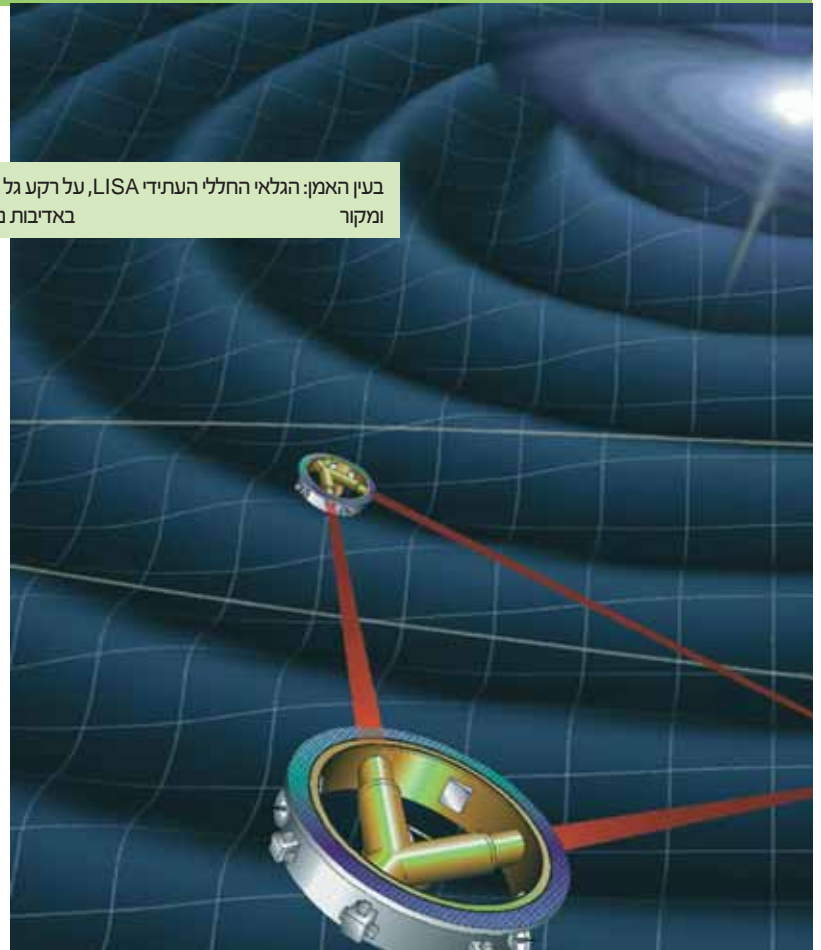
הגלאי המתוכנן השני הוא גלאי מסוג שונה, ואמור להבטיח גילוי. שמו ליסה (LISA) – ראשי תיבות ל"אנטנת חלל באמצעות אינטרפרומטריית לייזר" (Laser Interferometer Space Antenna). גם במקרה זה, כמו בלייגו, מדובר במדידת מרחק בין מראות "צפות" באמצעות לייזר, אך ההבדל הגדול הוא שאורך הזרועות המתוכנן הוא 5 מיליוני ק"מ ולא 4 ק"מ. מרחקים כאלה אי-אפשר להשיג על כדור-הארץ, כמובן, ויש לצאת לחלל. בהתאם תשתנה הגאומטריה, ובמקום הרי"ש של לייגו ייבנה משולש שווה צלעות שבקדקודיו שלושה לוויינים (ראו איור). היתרון הגדול הוא שהזרועות הארוכות תהיינה רגישות לאורכי הגל הצפויים מקרינה ממערכות בינאריות טיפוסיות. כמו כן, הרגישות של ליסה מתוכננת להיות טובה מספיק לגלות כמה מקורות בינאריים המוכרים לנו, ובשל כך ניתן לצפות לתוצאות חיוביות. ההערכה המקובלת בקרב הפיזיקאים היא שאכן יתגלו גלי כבידה. אם לא יתגלו, נראה שלא יהיה מנוס מלערוך שינוי מהותי בתורת גלי הכבידה. החיסרון של ליסה הוא במשאבים הגדולים שדורש פרויקט חללי ובכמות המחקר והפיתוח

בעין האמן: הגלאי החללי העתידי LISA, על רקע גלי כבידה ומקור באדיבות נאס"א

משלימות: הדמיה נומרית בעזרת מחשב וחישוב אנליטי. כך או כך, האתגרים עשירים וצופנים תגליות המעידות על עומקה של תורת הכבידה של איינשטיין.

### סיכום

הגילוי והפענוח של גלי כבידה צפויים לפתוח חלון חדש ליקום. הדבר דומה להבדל בין תמונה אופטית רגילה לבין תצפית במכשיר ראיית לילה תרמי: רואים יותר ורואים שונה. למען האמת, במקרה זה המהפך גדול אף יותר: בעוד שהתחום התרמי הוא קרינה אלקטרומגנטית ממש כמו התחום הנראה, הרי שקרינת הכבידה היא סוג קרינה שונה איכותית, ואנו מקווים לחזות בתהליכים אנרגטיים בין כוכבי הדרמה: חורים שחורים ועצמים קומפקטיים אחרים. תיארונו את העדויות העקיפות לקיום גלי כבידה במערכות בינאריות, שהראשונה שבהן שנצפתה – זו של האלס וטיילור – זיכתה את מגליה בפרס נובל. תיארונו את מאמצי הגילוי בהווה ששיאם בגלאים לייגו, וכן וירגו, גאו וטאמה, ואת האתגר שבמשימה, ותיארונו את המערכות העתידיות. נסיים בתקווה לזכות לשמוע בקרוב את צליליה הראשונים של הסימפוניה השמימית של גלי הכבידה. ■



מספקת כבר את כל התשובות? מתברר שיש עדיין שאלות תיאורטיות מסקרנות הנוגעות לאופן החישוב של תנועתה של מערכת בינארית ושל מאפייני הקרינה הנפלטת ממנה. לחישובים כאלה חשיבות רבה בתכנון הגלאים, והם נערכים בארץ ובעולם. ניתן לגשת לחישובים אלה משתי זוויות

**ברק קול הוא פרופסור חבר במכון רקח לפיזיקה באוניברסיטה העברית בירושלים. פרוץ קול עוסק בתורת הכבידה של איינשטיין ובתורות שדה לתיאור החלקיקים האלמנטריים.**

### לקריאה נוספת:

צלילים שמימיים – גלי כבידה מומחשים בצילי:  
<http://www.black-holes.org/explore1.html>

דפי מידע מצוינים על גלי כבידה, חורים שחורים ועוד, פרויקט SXS של קאלטק וקורנל:  
<http://www.black-holes.org/gwa1.html>

אוסף קישורים לקריאה נוספת:  
<http://www.black-holes.org/explore7.html>

תיאור לייגו מתוך אתר הבית של הפרויקט:  
[http://www.ligo.caltech.edu/LIGO\\_web/about/factsheet.html](http://www.ligo.caltech.edu/LIGO_web/about/factsheet.html)

ספרי לימוד על גלי כבידה ויחסות כללית:  
"General Relativity", R.M. Wald, The University of Chicago Press (1984).  
"Gravitation", C.W. Misner, K.S. Thorne and J.A. Wheeler, W.H. Freeman and company (1973).