

ד"ר נ. וידאל

צבא השמים

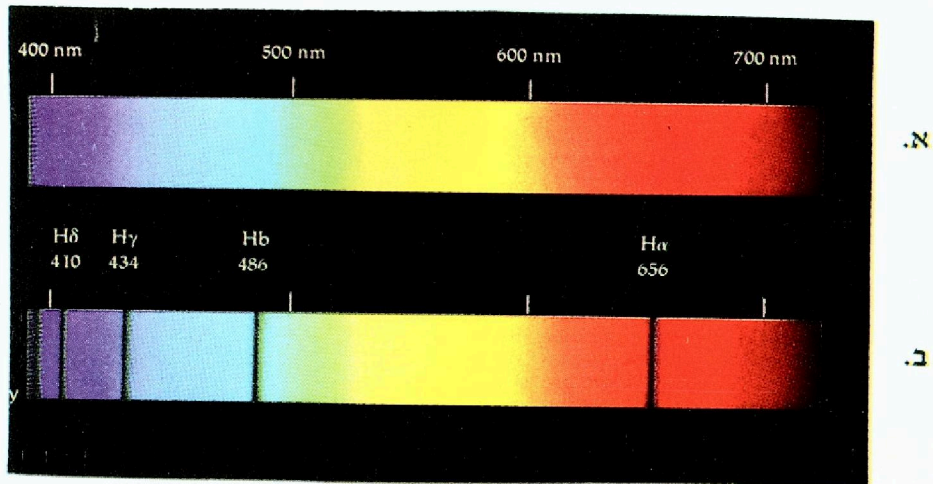
כרך ב

ד"ר נ. וידאל

צבא השמים

אסטרונומיה

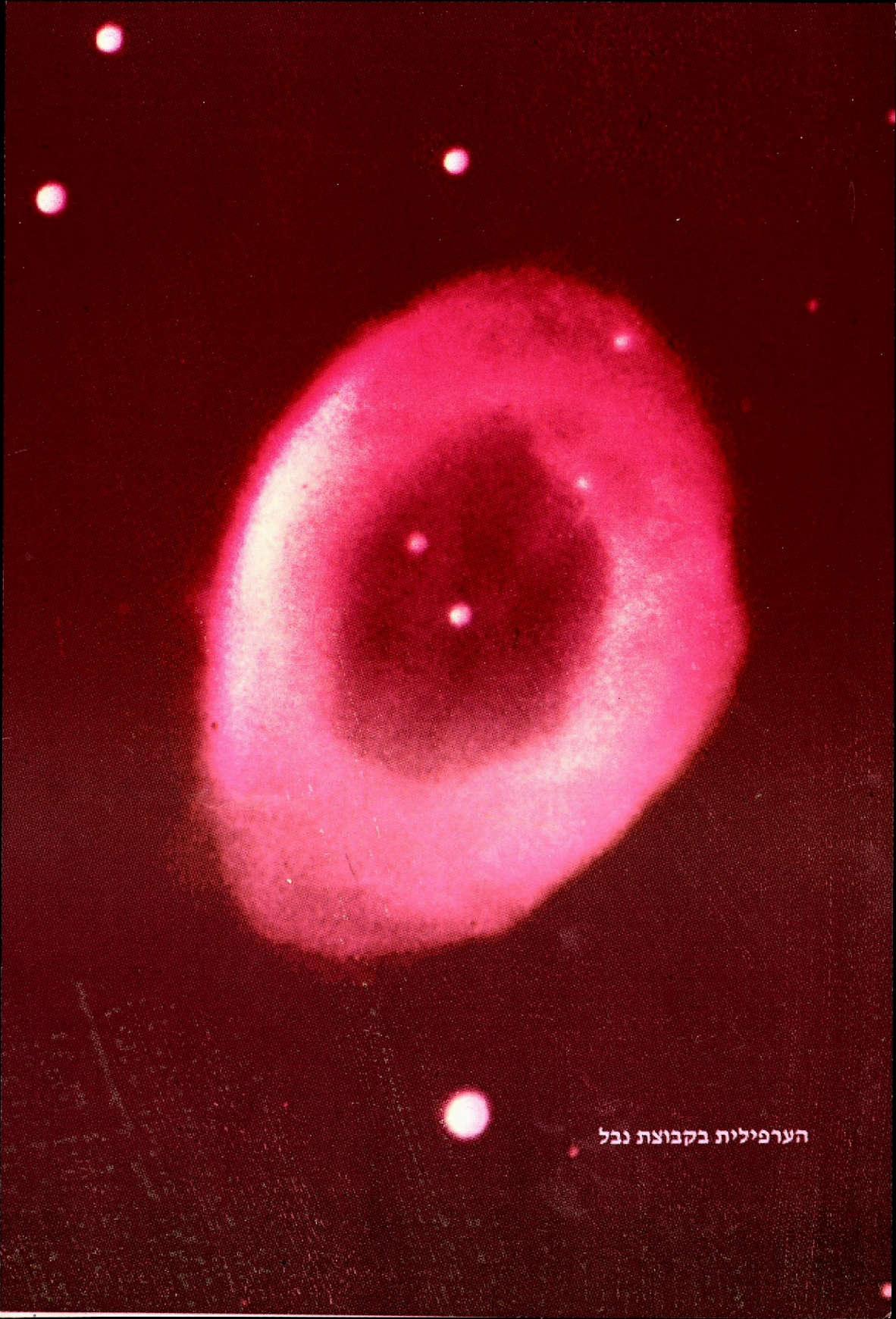
חלק ב'



- א. פיצול האור לצבעיו. שים לב לסדר הצבעים: (משמאל לימין) סגול, כחול, ירוק, צהוב, אדום.
 ב. הקווים השחורים שבתוך הצבעים הם הקווים הספקטראליים האופייניים לגז המימן. למשל הקו המסומן ב H α נמצא באיזור הצבע האדום של הספקטרום.



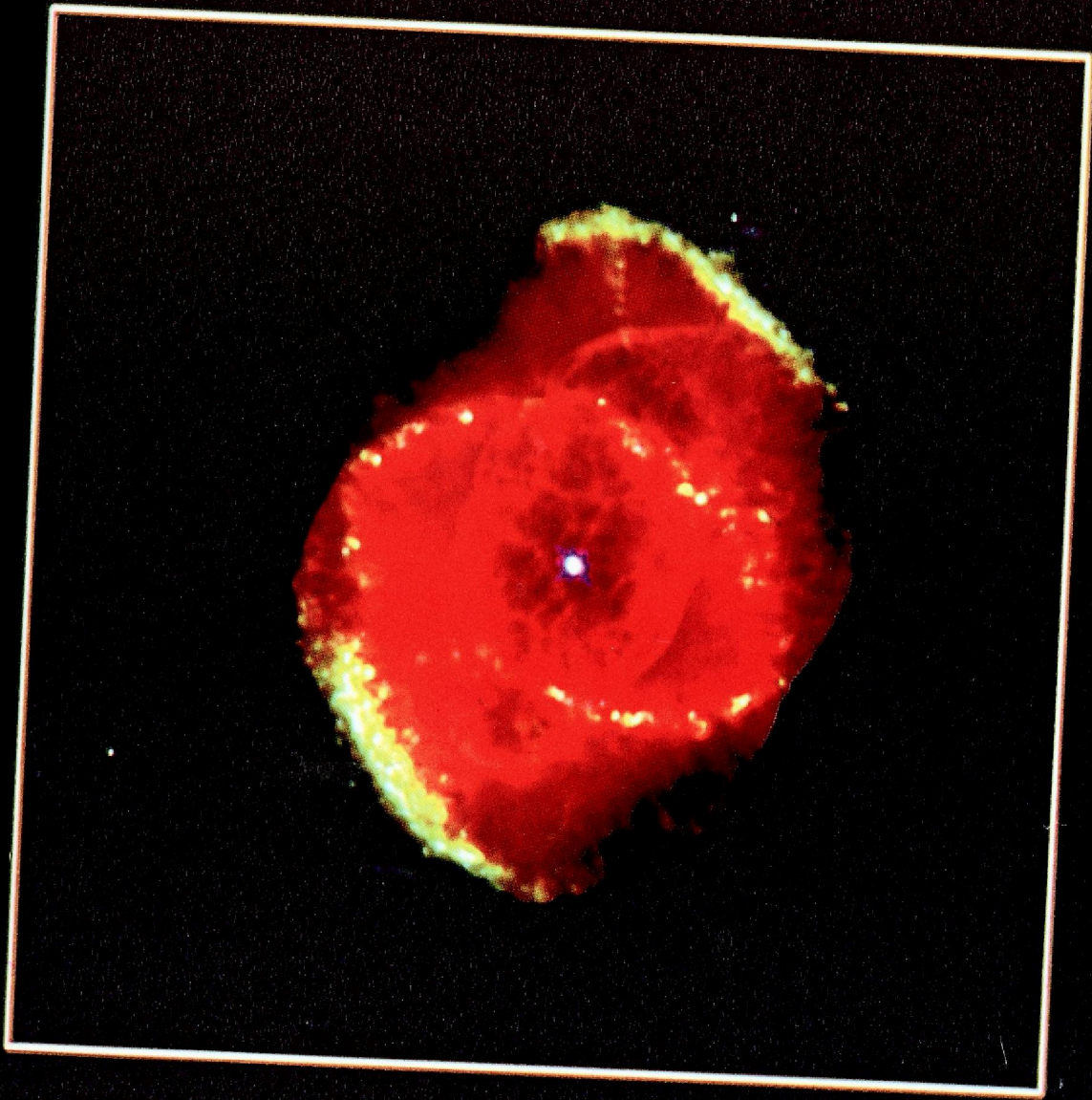
הרסיסים של השביט "שומכר-לוי" שנפלו על פני כוכב הלכת צדק בחודש יולי 1994.



הערפילית בקבוצת נבל



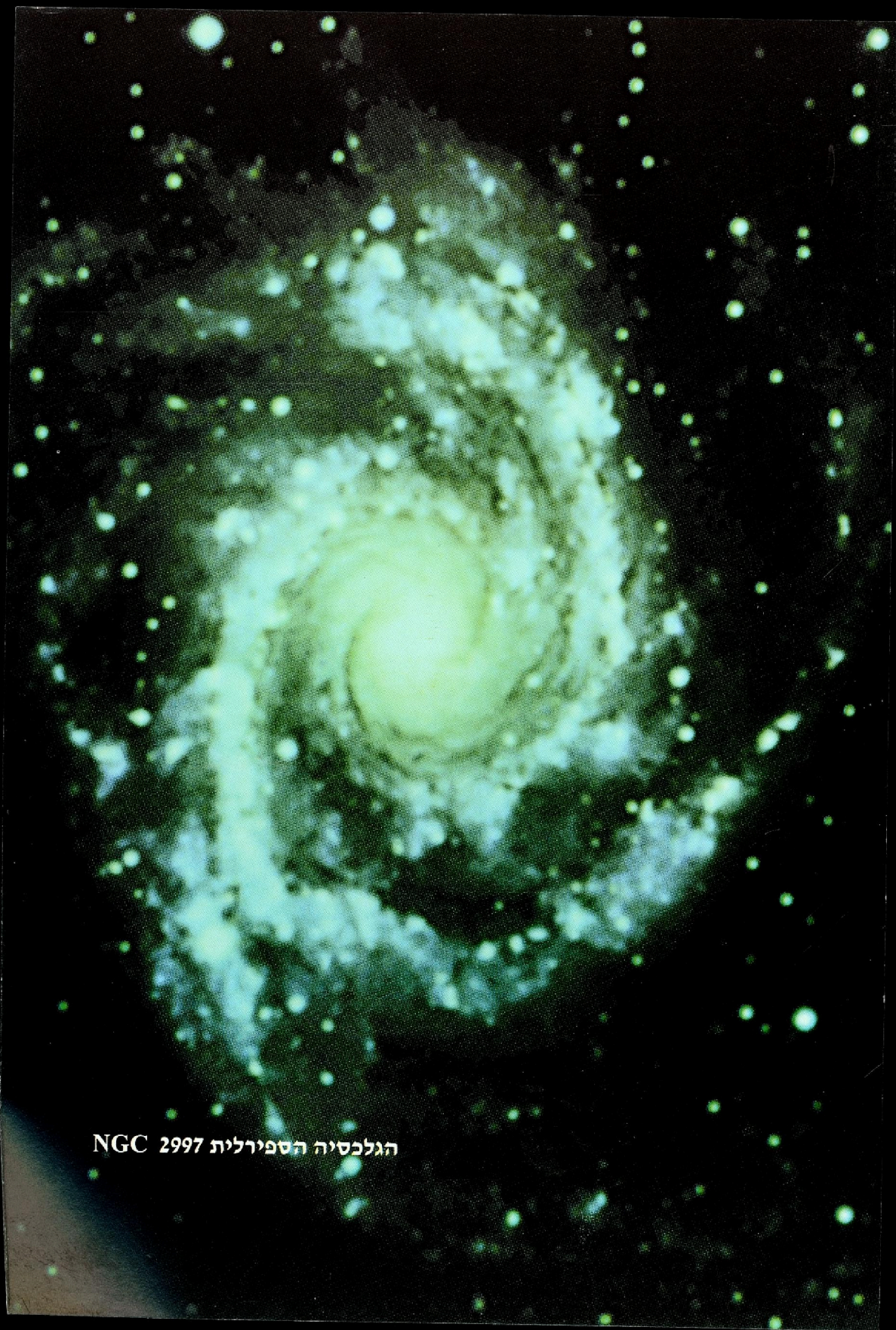
ערפילית הסרטן



ערפילית "עין החתול"



ערפילית ראש הסוס



הגלקסיה הספירלית NGC 2997



צביר גלקסיות בקצה היקום: שים לב שיש גלקסיות שצבען כחול וכאלה שצבען אדום.

צבא השמים

אסטרונומיה

חלק ב': הכוכבים והיקום

ד"ר נ. וידאל

לשעבר אסטרונום בכיר במצפה המלכותי גריניץ, אנגליה
אסטרונום במצפה הלאומי, אוסטרליה
פרופסור אורח במרכז לאסטרופיזיקה באוניברסיטת הרוורד, ארה"ב
פרופסור אורח באוניברסיטת וושינגטון, סיאטל, ארה"ב
אסטרונום במצפה הכוכבים ע"ש וייז, מצפה רמון, ישראל

אנו מודים לסוכנות החלל האמריקאית **נאסה**
על רשותם להדפיס את הצילומים בספר זה



המכון להוראת המדעים והטכנולוגיה

רח' בית וגן 81, ירושלים

טלפון: 02- 424254

תוכן הענינים

עמוד

1	..... המרחקים אל הכוכבים (א)	מאמר ראשון:
15	..... אור הכוכבים	מאמר שני:
30	..... אש הכוכבים	מאמר שלישי:
39	..... גודל הכוכבים	מאמר רביעי:
49	..... המרחקים אל הכוכבים (ב)	מאמר חמישי:
58	..... תנועת הכוכבים	מאמר שישי:
73	..... זוגות כוכבים	מאמר שביעי:
85	..... המסה של הכוכבים	מאמר שמיני:
99	..... סיבוב הכוכבים	מאמר תשיעי:
111	..... המגנטיות של הכוכבים	מאמר עשירי:
129	..... צבירי כוכבים	מאמר אחד עשר:
152	..... כוכבים משתנים	מאמר שנים עשר:
165	..... כוכבים בלתי יציבים	מאמר שלושה עשר:
194	..... שביל החלב	מאמר ארבעה עשר:
223	..... הגלכסיות והיקום	מאמר חמישה עשר:

מוקדש לעיני

א"מ **חיים בן דוד** ז"ל
ומרת **אמי אסתר** בת **משה** ז"ל

מוקדש לרבי ומורי
איש האמת

הקדמה

ספר זה הוא החלק השני של "צבא השמים". בספר הראשון תיארונו את מערכת השמש, דהיינו, כדור הארץ, השמש, כוכבי הלכת, הירחים וכו'. אמנם הצגנו את הממצאים המודרניים ביותר בנושא זה, אולם תמיד הקפדנו על כך שההסברים יועמדו באורם המדעי המדויק, ובכך להראות שכל ממצאי המדע כיום אינם סותרים ואינם יכולים לסתור את עקרונות השקפתנו ואמונתנו היהודית. רק מי שיודע לנתח היטב את ההנחות והשיקולים המדעיים בעומק הנכון יווכח לראות כי אכן אין למדע וגם לא יכולה להיות טענה כל שהיא כנגד אמונתנו כפי שטבעו אותה חז"ל.

גם בספר השני הלכנו באותה דרך, אולם הפעם נושא הספר הוא תיאור הכוכבים וקבוצות הכוכבים שהם רחוקים הרבה מעבר למערכת השמש. כוכבים אלה הם במרחקים של עשרות, אלפים ואפילו מיליוני ומיליארדי שנות אור מאתנו. האסטרונומיה המודרנית פיתחה כלים ודרכי חשיבה מתוחכמים ביותר על מנת להסיק על מרחקיהם ותכונותיהם של הכוכבים הרחוקים האלה עד לעמקי המרחב שסביבנו.

כפי שראינו כבר בחלק ראשון, העובדה המרשימה ביותר (אשר היתה כמובן ידועה לקדמונים) היא שבמערכת השמש נעים כדור הארץ כוכבי הלכת והירח במסלולים ידועים ומדויקים ביותר. חוקי התנועה של הגופים במערכת השמש הם מדהימים בדיוקם, וכמובן נותנים פתח לא רק להתפעל מן הסדר המיוחד הזה בשמים כשלעצמו, אלא הסדר והחוקים האלה מאפשרים לבני תמותה להתבונן ולטעום מעט מזעיר מחכמתו של בורא העולם יתברך. גם בחלק השני אנו מראים כי הסדר והחוקיות המדהימים האלה שראינו במערכת השמש, אכן יש להם המשך טבעי גם במעמקי ובמרחבי היקום כולו, כך שהסדר הקוסמי הזה נמשך עד אין סוף. אולם, עם כל ההתפעלות הזו מן הסדר הקוסמי יש לציין מילת אזהרה אחת: בניגוד לשמועה הרווחת שלחוקי הטבע יש כביכול ערך או אמת מוחלטת, הרי חוקי הטבע המתמטיים שאנו מגלים הם בעצם רק מודלים מחשבתיים שהם רק פרי דמיון ויצירה של בני אדם בלבד. לטבע כפי שהוא נראה לנו ובדרך שהוא פועל לפנינו, הוא אינו מראה במפורש ובגלוי שום חוק כשלעצמו, אלא אנו בני האדם, מציירים בדמיוננו חוק וסדר מסוים.

כלומר, אנו מקשרים בשכלנו ובעיני רוחנו את הדברים שאנו רואים במעבדה או בשמים ומנסחים חוק טבע אשר כל בסיסו הוא אינטלקטואלי בלבד. אף יותר מוזאת, בדור אחר יקשרו אנשי המדע את התופעות בסדר אחר (עם כמה "עובדות" חדשות) ויקבלו דגם מחשבתי אחר. אבל לבורא יתברך אין לו בהכרח מחשבה כזו של סדר, אלא עבור בני האדם שבכל דור נראה הדבר כסדר ולכן הם מנסחים חוקים ומתפעלים מהם, ובעקבות כך מתפעלים אף ממעשיו של בורא עולם.

כמובן שזו דרך לגיטימית בהחלט להכיר את הבורא ולהגיע אל האמונה, ואף מצוין במדרשים שאברהם אבינו הכיר את בוראו בדרך מעין זו, אולם, כיון שעצם החוקים והסדר האלה אינם מוחלטים והם תקפים לכל דור בפני עצמו, כך יוצא שאמונה הבאה מחמת התפעלות בסדר הקוסמי היא אמונה בדרגה נמוכה יחסית, כי היא נשענת על ניסוח חוקים שבני אדם מנסחים ומנמקים בהתאם להבנתם. ולהבדיל גם בלימוד תורה אנו נוהגים להשתמש בשכלנו ולתת טעמים רבים ושונים למצוות שאנו מצווים בהם, (ויש לזה כמובן יסודות עמוקים), אבל האמת היא שהמצוות רובן ככולן הן גזרות מן השמים ואין לנו הכרח כלל בטעמים השכליים, וזהו שורש האמונה האמיתית. חוקי הטבע כפי שהם מנוסחים במדעים הם אולי דרך נאה לסבר את האוזן השכלית דהיינו שכך וכך הם מעשיו של הקב"ה, אבל כבר אמר הנביא "לא מחשבותי מחשבותיכם ואל מי תדמיון אלי".

וכבר כתב על זה הר"ן לפני כשבע מאות שנה באוסף דרשותיו (הדרשה הראשונה על מעשה בראשית) שחקירת החומר בדרך מדעית לא תוביל להכרת האמת, כי הכרת תכונות החומר הגשמיות היא מוגבלת מדי בהיקפה ובעומקה ותכונות החומר יראו כל פעם חיצוניות מסוימת בלבד ובכל דור פנים אחרות. זוהי גם הסיבה שאין מקום להוכיח ח"ו את דבר תורתנו בדרך המדעית, כי לא רק שאין כל בסיס לזה, אלא שיכול הדבר אף להתפרש כפגיעה בקדושתה, כפי שנאמר אולי בלשון קצת חריפה, מה לכהן בבית הקברות.

אבל כאמור, הכרת הבורא דרך שכלו אפילו המוגבל של האדם גם היא יש לה זכות קיום, ואפילו לרוב בני האדם הלואי ורק יכירו את בוראם ויגיעו אל האמונה בדרך זו. ואפשר לאמר שיש בדרך זו תועלת גדולה כי היא בודאי גם פתח נאה לכניסה לאמונה האמיתית והצרופה שאין מאחוריה מחשבה כלל אלא אמונה צרופה והתדבקות ישירה של האדם בבוראו. לכן

בא ספר שני זה, להציג אולי את הפתח הזה, הפתח המדעי להכרת הבורא ומעשיו על מנת להגיע דרכו אל האמונה הצרופה שאינה תלויה לא בטעמים ולא בשיקולים מדעיים, אלא התדבקות ישירה בבורא עולם וקיום מצוותיו בבחינת נעשה ונשמע בלבד.

מאמר ראשון

המרחקים אל הכוכבים (א)

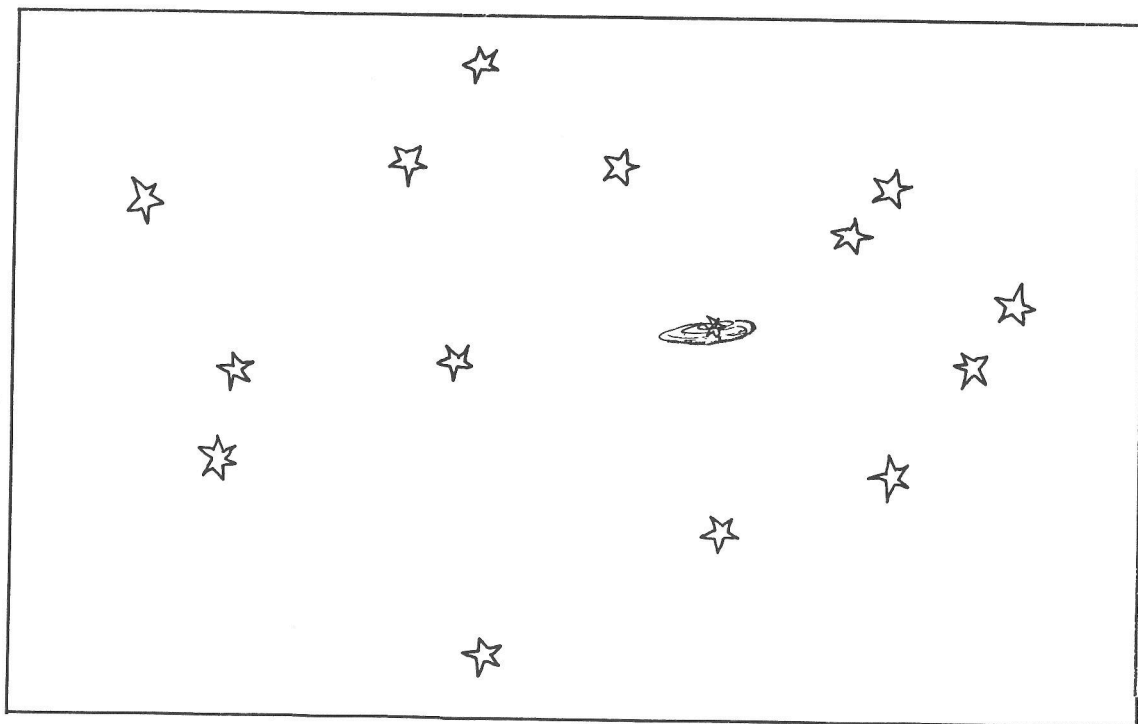
בספר הברית השלם (חלק א' מאמר ג') כתוב: "הבט נא השמימה וראה הכוכבים הקטנים אשר לא יספרו מרוב העומדים ברומו של עולם, אלה הנקראים בלשונם 'כוכבי שבת', בשביל מורים אותו ריחוק מאז ומקדם... והנה יש כוכבים שאין זיום ואורם מגיע אל עינינו משעה שנאצלו וירדו מהם, כי אם במשך ששה חודשים. ועתה צא וחשוב מה שאין הלב יכול לחשוב, ומזה תוכל לשער עומק רוב ועומק תחת ורחבת מקום בגלגל הנברא, ואם כן אחי תכין לבך להתבונן גדולת הבורא מה איום ומה נורא וכמה הוא ה' אדוננו אם כך מעשה אלוקנו".

המרחקים ביקום הם אכן עצומים. בפרט בשנים האחרונות, קצה היקום הנראה הוכפל ואף שולש ע"י האסטרונומים. האם יש ליקום סוף כל שהוא? מתברר כי ככל שעוצמת הטלסקופים שלנו גדולה יותר, כך גם אנו מסוגלים לראות יותר לעומק היקום. כך יוצא כי קצה היקום הנראה תלוי, פשוט, בעוצמת הטלסקופ. עד עתה, ככל שעוצמת הטלסקופ גדלה, תמיד ראו האסטרונומים גרמי שמים רחוקים יותר ויותר, והם לא ראו עדיין את האופק, אשר מעבר לו אין כלום. תמיד נמצאו גרמי שמים רחוקים יותר ויותר, והם ממלאים את כל היקום כולו ובכל הכוונים סביבנו.

מסופר על אדם הראשון כי היה יכול לראות את היקום כלו מסופו ועד סופו. "אותה האורה שנברא בה העולם אדם הראשון עמד והביט בה מסוף העולם ועד סופו" (בראשית רבה י') אבל זה היה בעזרת האור של שבעת ימי בראשית, שהוא אור מיוחד שהקב"ה גנז אותו. כיום אנו צריכים להסתפק באור רגיל שנשאר לאחר מכן, אותו אור כוכבים שענינו ראות דרך הטלסקופ, ואשר נקלט במוחו של בן תמותה.

כבר ראינו כי כדור הארץ הוא חלק ממערכת השמש, כוכב לכת המקיף את השמש אחת ל-365 יום. גודלה של כל מערכת השמש כולה הוא כשמור

נים שעות אור, דהיינו, כוכב הלכת הרחוק ביותר (פלוטו) מקיף את השמש במרחק שהאור במעופו מכסה בשמונים שעות בלבד. כל מערכת השמש היא אך נקודה זעירה ביותר במרחבי היקום. (תמונה 1).



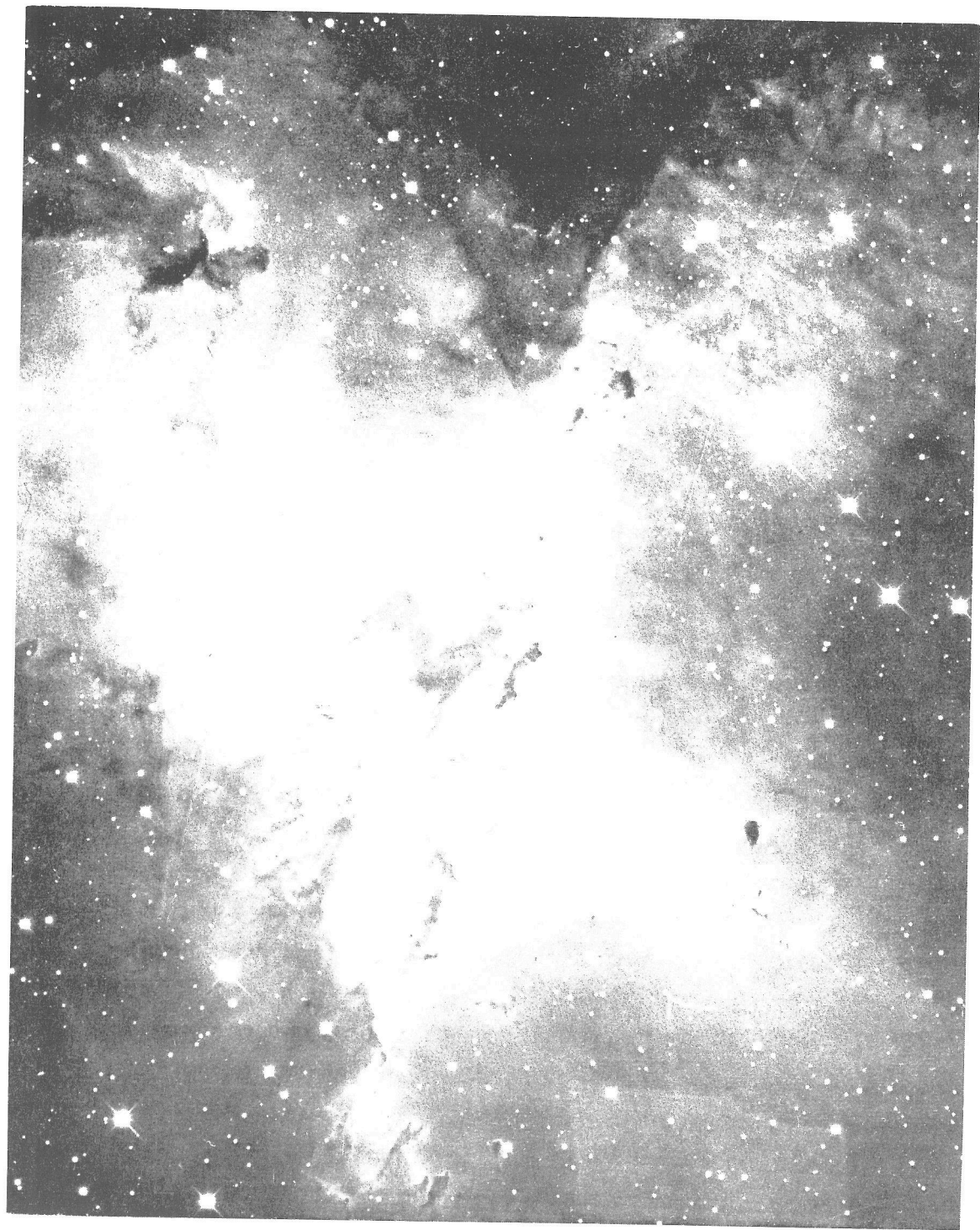
תמונה 1: מערכת השמש בין הכוכבים ביקום.

אם כי הכוכבים הם רחוקים מאד מאתנו, הנה בכל זאת, ישנם כאלה הקרובים אלינו יותר מאחרים. אמנם לכולם שם אחד והוא "כוכבי שבת" כי הם "יושבים" ואינם זזים (כמעט) כמו כוכבי הלכת, אולם יש כאלה שהם קרובים אלינו יותר, בכל זאת. אנו עוד נראה בהמשך כי כל הכוכבים הזוהרים בשמי הלילה הם בעצם "שמשות" כמו שלנו, אלא שהם כל כך רחוקים שהם נראים לנו כנקודות אור זעירות בלבד. ואמנם, אם היינו מתרחקים מן השמש שלנו מרחק של כ-10 שנות אור בלבד (המרחק

שעוברת קרן אור במשך עשר שנים) היינו רואים אותה גם כן כנקודת אור זעירה על רקע שמים חשוכים! אחת הבעיות המרכזיות ביותר באסטרונומיה היא מציאת המרחקים אל הכוכבים וגרמי השמים. הבעיה היא שכאשר מסתכלים בשמי הלילה, אנו רואים כאילו כל הכוכבים פרושים כלם על פני יריעת כדור השמים. אין אנו מסוגלים להבחין שכוכבים מסוימים הם קרובים אלינו יותר מאחרים, אלא, כלם נראים לנו זרועים על פני כדור השמים ללא שום פרספקטיבה של עומק. הסיבה לכך היא שהם רחוקים מאד מאתנו, אפילו הקרובים שבהם. כאשר אנו מסתכלים בהם, הרי בגלל מרחקם הרב, אנו משליכים את כל הנקודות הזוהרות של הכוכבים על פני כדור הנמצא במרחק אינסופי מאתנו. הקדמונים קראו לכדור זה בשם "גלגל כוכבי השמים" לשיטתם, זהו הגלגל המכיל את כל כוכבי השבת כלם. (תמונה 2).

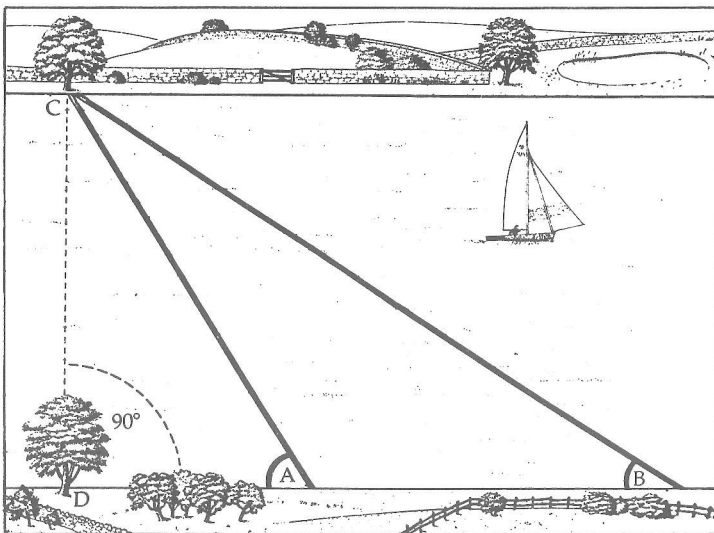
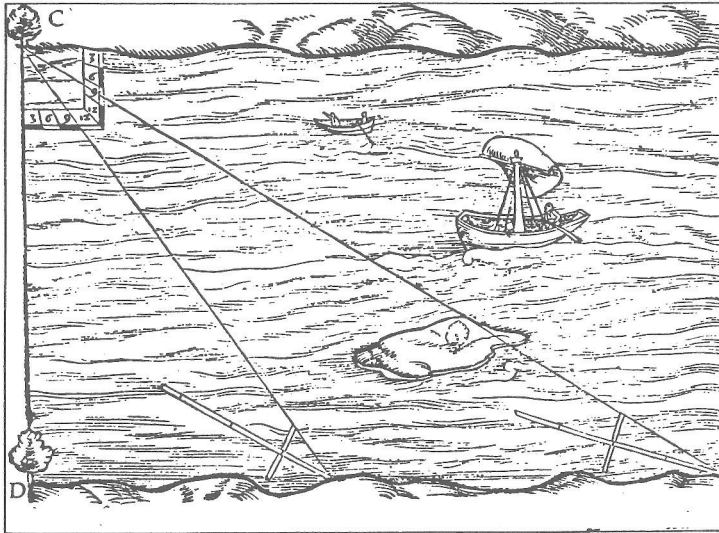
אולם, כיום, בעקבות שימוש במיכשור מדויק יותר, אנו מסוגלים להבחין כי כוכבי שבת מסוימים הם בכל זאת קרובים אלינו יותר מאחרים. ובעצם, כל כוכבי השבת זרועים כל אחד בעומק אחר בחלל סביבנו. כיצד מודדים את המרחקים אל הכוכבים? השיטות המודרניות למדידת מרחקים כאלה הן מתוחכמות ביותר. ברור כי אלו הן שיטות מדידה בלתי ישירות, (שהרי אף מכשיר מעשה ידי אדם עוד לא הגיע כיום אלא לקצה מערכת השמש בלבד). כלומר, אנו נאלצים לחשב את המרחקים אל הכוכבים בדרך עקיפה תוך כדי שימוש במדידות אחרות, וכן ע"י ניצול חוקי התנהגות האור המגיע מן הכוכבים אלינו.

בתחילה נראה שיטה פשוטה כיצד נוכל למדוד את המרחק אל עצם על פני כדור הארץ שאין אנו יכולים להגיע אליו. למשל, נסתכל בתמונה 3. אנו רוצים למצוא את הרוחב של הנהר, דהיינו, את המרחק בין העצים C ו-D משני עברי הנהר. אחת הדרכים הנפוצות (ואשר משתמשים בה מודדי הקרקעות) היא לקבוע שתי נקודות נוספות כל שהן A ו-B על הגדה האחת. כך נוצר המשולש בעל שלושת הקודקודים A,B,C. עתה, ממדידת שתי הזוויות A ו-B וכן המרחק בין שתי נקודות



תמונה 2: צילום של איזור בשמים אשר בו כוכבים וערפיליות. אי אפשר לאמוד את מרחקי הכוכבים, כי הם נראים לנו כאילו כלם פרושים על פני יריעת השמים.

A ו-B נוכל לחשב בשיטות הנדסיות את המרחק המקורי בין העצים C ו-D שרצינו, מבלי שנצטרך לעבור את הנהר כלל. יש לשים לב כי בשיטה זו אנו מודדים בפועל שתי זוויות ומרחק אחד, ואת המרחק שחפשנו לא מדדנו בפועל אלא חשבנו אותו בדרך הנדסית עקיפה על הנייר על סמך מדידות אלו. אנו מדגישים זאת במיוחד, כי כך



תמונה 3

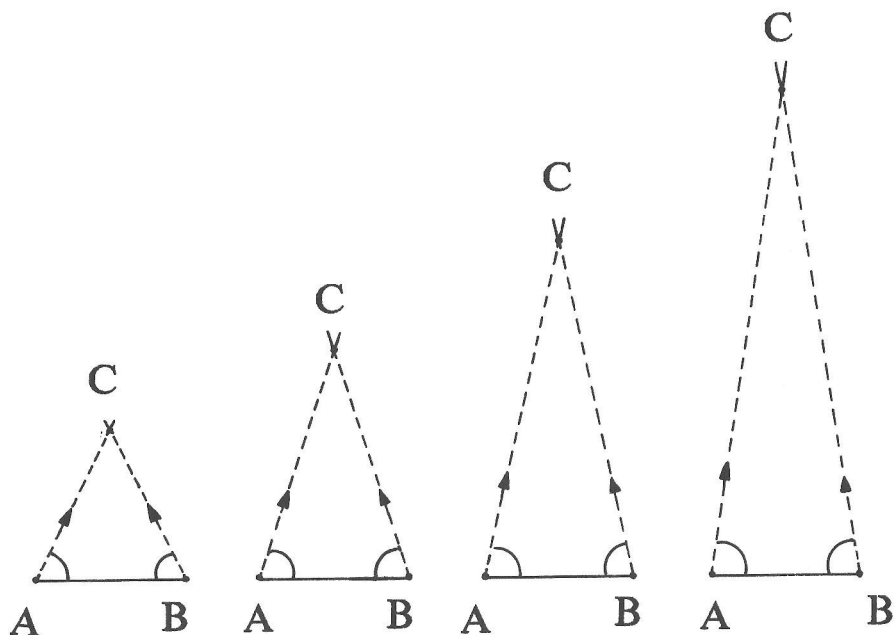
יוצא שהמרחק המבוקש הוא בעצם מרחק מחושב ולא נמדד בפועל, ולכך יש חשיבות עקרונית. אמנם במקרה שלנו ברור היטב כי אם היינו מודדים בפועל את המרחק בין שתי הגדות היינו בודאי מקבלים את אותה התוצאה כמו המרחק שחשבנו בדרך הנדסית על הנייר, אולם לא תמיד כך הדבר. הסיבה היא שהמדידות הראשונות הנעשות אינן תמיד כל כך פשוטות וישירות כמו במקרה הזה, כי לפעמים המדידות הראשונות גם הן אינן כל כך ישירות ולפעמים הן אפילו מניחות הנחות סמויות נוספות, וכך יוצא כי הגודל הסופי המחושב על פיהן אינו כל כך בטוח כמו במקרה של מדידות רוחב הנהר שתיארנו. יותר מזאת, אפשר לאמר כי כמעט כל הגדלים הידועים במדעים בכלל הם גדלים מחושבים ולא נמדדו באופן ישיר, כך שבכל מקרה יש לשים לב מה היו ההנחות הסמויות או הגלויות שהביאו לתוצאה המחושבת. כך יוצא כי החשבונות עצמם שהביאו לחישוב מרחקים, זמנים או מהירויות הם בודאי מדויקים, אולם ההנחות הגלויות או הסמויות שבשיטה הן הן הגורמות לאי הודאות בתוצאה המחושבת. בהמשך הדברים אנו נבהיר יותר נקודה זו.

שיטת מדידת מרחק בדרך הנ"ל נקראת בשם שיטת הטריאנגולציה (מלשון TRIANGLE = משולש) כי היא "מלבישה" משולש מלאכותי על השטח ואחרי כן, בדרך הנדסית, היא מחשבת על הנייר את המרחק המבוקש. כאמור, שיטת הטריאנגולציה תהיה טובה בכל מקרה שאנו רוצים לחשב את המרחק אל עצם שאין אנו רוצים או אין אנו יכולים להגיע אליו. האם אפשר להשתמש בשיטת הטריאנגולציה בכדי למדוד את המרחק אל גרמי השמים הרחוקים, כגון כוכבי השבת? מאז שחר ההיסטוריה ניסו האסטרונומים הקדמונים למדוד את זווית המשולש הנ"ל, אולם נתקלו בבעיה קשה: שתי הזוויות A ו-B היו תמיד שוות ל-90 מעלות כך שלא נוצר משולש כלל!

בכדי להבין את בעיית המדידה הזאת של האסטרונומים הקדמונים, נס'תכל מה באמת קורה לזווית B, A שבתמונה 4, ככל שהעץ C רחוק מאתנו יותר ויותר.

אנו רואים כי ככל שהנקודה C רחוקה יותר, שתי הזוויות הסמוכות ל-A ו-B הולכות ומתיישרות: במקרה שהנקודה C היא קרובה ביותר (בתמונה

משמאל) שתי הזוויות A ו-B הן חדות, אולם במקרה הקיצוני בו הנקודה C היא רחוקה ביותר (בתמונה מימין) הרי שתי הזוויות A ו-B הן כמעט ישרות, דהיינו כמעט 90 מעלות כל אחת.



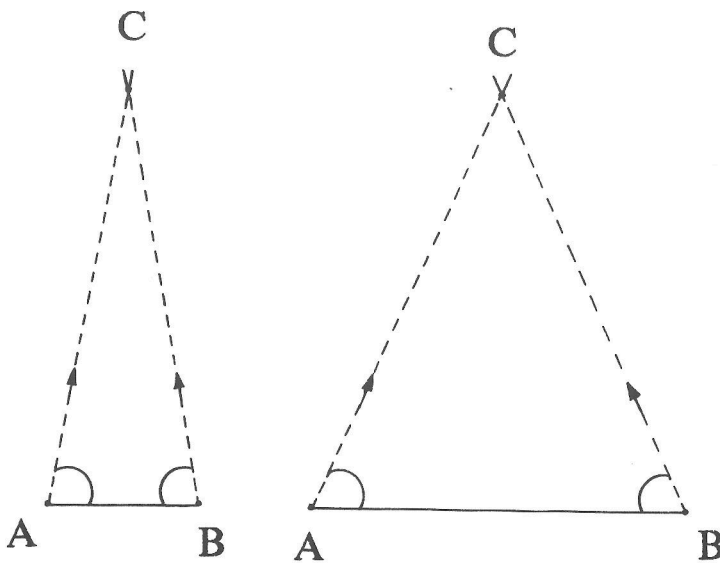
תמונה 4: ככל שנקודה C היא רחוקה יותר, כך הזוויות שליד A ו-B הולכות ומתיישרות יותר.

עתה, כיון שכוכבי השבת, אף הקרובים ביותר, הם רחוקים מאד מאתנו (נקודה C היא רחוקה ביותר), לכן, שתי הזוויות A ו-B מתקרבות עוד יותר ל-90, וקשה מאד למדוד כמה עוד חסר לאותה זווית כך שתגיע ממש ל-90. ברור כי אם הכוכב C הוא רחוק מאד מאד, אז ההפרש עד 90 יהיה עוד יותר קטן ואז אי אפשר בכלל למדוד זווית בדיוק כזה במכשירים שלנו. אולם, אם הכוכב C קצת יותר קרוב, יתכן ודיוק המכשירים שלנו אכן יוכל למדוד זווית אמנם קרובה מאד ל-90 אבל לא בדיוק 90 מעלות.

ואכן, זו היתה הבעיה של האסטרונומים הקדמונים, המכשירים שהיו בידיהם הראו תמיד כי שתי הזוויות A ו-B היו תמיד בנות 90 מעלות, כי

לא יכלו להבחין במכשירים שלהם כי בעצם הזוויות הן קצת יותר קטנות מ-90° (ובגודל מזערי מיוחד ביותר).

אמנם הם ניסו להתגבר על הבעיה הזו ע"י שהגדילו את בסיס המשולש כמה שאפשר, ע"י שהרחיקו את שתי הנקודות A ו-B על פני כדור הארץ. ואכן, תמונה 5 מראה כי ככל שמגדילים את הבסיס AB של המשולש, אז יש לנו סכוי טוב יותר להבחין כי הזוויות A ו-B אינן ממש 90° מעלות, אלא קצת פחות מזה.



תמונה 5: כאשר מגדילים את המרחק בין הנקודות A ו-B הזוויות שלידן נעשות חדות יותר.

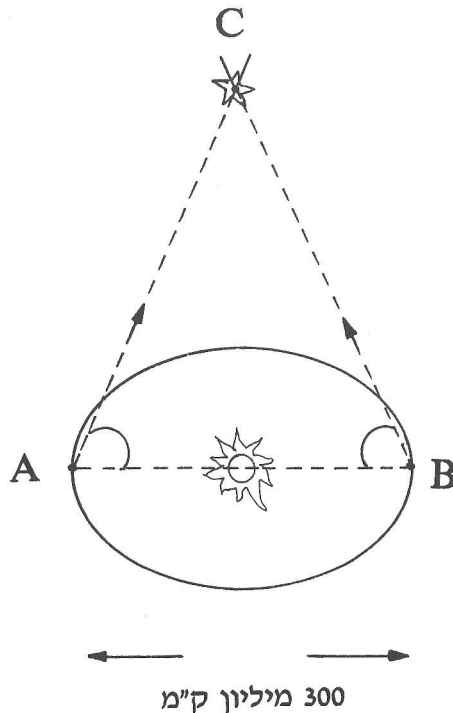
כלומר, הגדלת הבסיס AB של המשולש מאפשרת לראות בבירור כי הזוויות הן אכן פחות מ-90° מעלות ואפשר אפילו למדוד בפועל בכמה הן ממש קטנות מ-90° מעלות.

אולם, על אף שהאסטרונומים הרחיקו לכת, ובחרו שתי נקודות A, B רחוקות כמה שאפשר על פני כדור הארץ, כאשר הסתכלו במכשירים בכיוון כוכב C פעם מנקודה A ופעם מנקודה B, עדיין הדיוק של המדידה של הזוויות לא הראה כי הזוויות שונות מ-90° מעלות בשתייהן.

כבר בזמנים קדומים העלו את ההשערה, כי אם כדור הארץ מקיף את השמש, אז אולי נוכל להשתמש בבסיס של המשולש בין שתי הנקודות A ו-B על מסלול ההקפה עצמו (תמונה 6). דהיינו, נמדוד את הזווית ליד A, נאמר, בחודש טבת, ולאחר שישה חדשים, בחודש תמוז, כאשר כדור הארץ יהיה מן העבר השני של המסלול, נמדוד שוב את הזווית שליד B אל הכוכב C.

המרחק AB, שהוא עתה בסיס המשולש, הוא קוטר המסלול של הקפת כדור הארץ סביב השמש, דהיינו 300 מיליון ק"מ. אכן, זהו בסיס המשולש הגדול ביותר האפשרי (ללא שימוש בחלליות!).

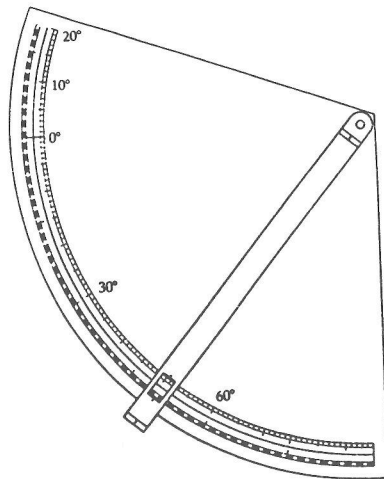
ואכן, במשך שנים רבות ניסו למדוד את הזוויות A ו-B, אולם הדיוק של מכשירי המדידה עדיין לא איפשר להבחין שהזוויות הן קצת פחות מ-90 מעלות.



תמונה 6: המרחק הגדול ביותר האפשרי (ללא חלליות) שיד אדם יכולה להגיע אליו הוא כאשר כדור הארץ נמצא בצד השני של מסלולו סביב השמש.

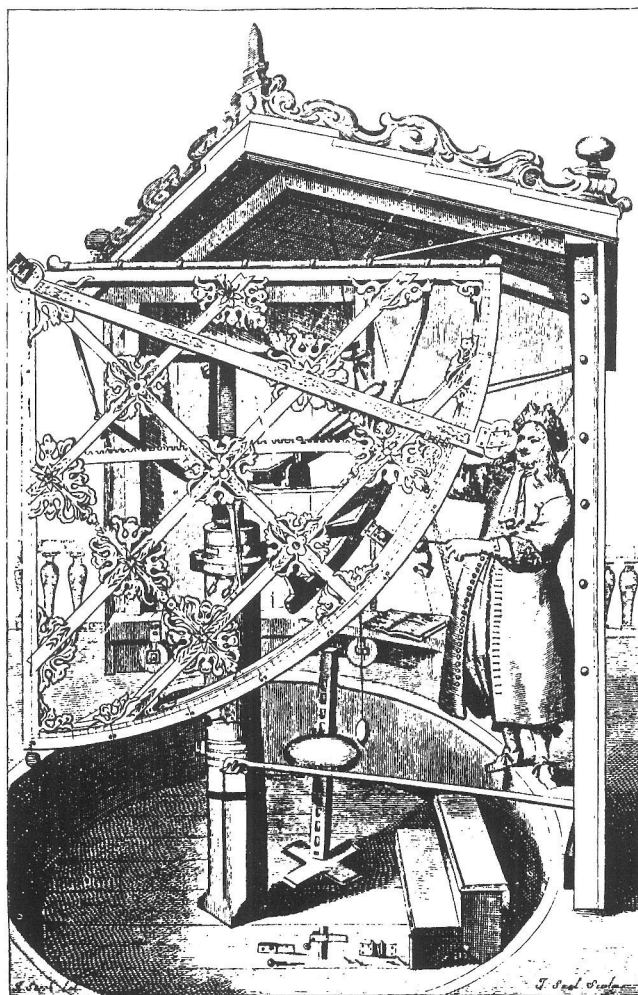
רק לפני כמאה וחמישים שנה הצליחו האסטרונומים, בעקבות שכלול ודיוק של המכשירים, להבחין כי אכן הזוויות A,B, אינן בדיוק 90 אלא קצת פחות מזה. הם מדדו אותן עבור כוכב בשם "סיריוס". התברר כי שתי הזוויות A ו-B לא היו בדיוק 90 אלא 89.9999895 מעלות כל אחת; ואכן, רואים עד כמה קשה המדידה המדויקת של זוויות אלה.

כידוע, היחידה היסודית של הזווית היא יחידת המעלה. קוראים לה בשם "מעלת קשת" (להבדיל "ממעלת חם", למשל). כאשר מחלקים כל מעלת קשת לששים חלקים מקבלים אזי "דקת קשת". וכאשר שוב מחלקים כל דקת קשת לששים, מקבלים אזי "שניית קשת", (יש להקפיד ולציין בכל פעם שהמדובר בקשת, אחרת יובן הדבר כדקת זמן או שניית זמן). למשל, תמונה 7 מראה מכשיר פשוט למדידת מעלות קשת, זהו מד המעלות הידוע. רואים כי המרווח של כל מעלה הוא קטן ביותר. אפשר להתגבר על בעיה זו ע"י שרטוט מעגל הרבה יותר גדול, ואז כל מרווח של מעלה יהיה גדול יותר, ואפשר אז לחלקו לחלקים נוספים של דקות או שניות קשת. אולם, גם לזה יש גבול (בגלל יציבות המתקן), האסטרונומים היונייים פתחו מכשירי מדידה אשר הגיעו לדיוק של כשתי דקות קשת. האסטרונום



תמונה 7: מד מעלות עם זרוע ניידת. אם המעגל היה יותר גדול, כל מרווח של מעלה היה גדול וברור יותר.

טיכו ברהה אשר חי לפני כחמש מאות שנה הקים מתקן מדידה גדול
 מאד והגיע לדיוק של כדקת קשת אחת. (תמונה 8).
 כאשר עושים את החשבון, רואים כי מדידת הזווית הנ"ל של 89.9999895
 מעלות קשת מראה על יכולת דיוק עד כדי עשירית שניית קשת אחת!
 מכאן יובן עד כמה היה האסטרונום טיכו ברהה ואלו שלפניו רחוקים
 מן הדיוק הדרוש למדידת הזוויות A ו-B של תמונה 6.



תמונה 8: מד מעלות עתיק למדידת זווית ראייה בין כוכבים.

במקום לציין את גודלן של הזויות A או B בתמונה 6, מעדיפים לציין רק את זוית C (כי ממילא המשולש הוא שווה שוקיים והזויות A ו-B שוות ביניהן). ובכן, אם עושים את החשבון, מתברר כי עבור כוכב סיריוס שצינינו לעיל, הזוית C היא 0.377 שניית קשת בלבד! כאמור, זוהי זוית מזערית ביותר הנובעת ממרחקו הרב של כוכב סיריוס מאתנו. המרחק הגדול גורם לכך שהמשולש בתמונה 6 יהיה מאורך מאד מאד, ואז הזוית C תהיה קטנה מאד, דהיינו רק 0.377 שניית קשת. עתה, בעזרת חישוב הנדסי פשוט, כפי שצינינו בתחילת המאמר, נוכל לחשב את המרחק אל סיריוס, דהיינו את הקטע AC או AB. הבסיס AB שהוא קוטר מסלול הקפת כדור הארץ סביב השמש נותן את קנה המידה הדרוש בשרטוט, ובסוף החישוב מתקבל מרחק של 8.6 שנות אור! כלומר, קרן האור הנפל-טת מן הכוכב סיריוס מגיעה אלינו לאחר 8.6 שנים! אכן, זהו מרחק עצום.

מאז שהוחל בשימוש בשיטת הטריאנגולציה למדידת מרחקי כוכבים הש-תכללו מאד שיטות המדידה. כיום, השיטה העיקרית היא ע"י צילומים באיכות גבוהה מאד יחד עם שיטת עיבוד של צילומים בעזרת מחשבים ושיטות מתמטיות מיוחדות. שיטות אלו הביאו לדיוקים גבוהים ביותר של מאית שניית קשת (0.01 שניית קשת).

כזכור, ככל שהכוכב בתמונה 6 הוא רחוק יותר, כך הזוית C היא קטנה עוד יותר. כלומר בכדי למדוד את המרחקים אל הכוכבים הרחוקים יותר עלינו לדייק עוד יותר במדידת הזויות של המשולש. עם הדיוק כיום של כ-0.01 שניית קשת ניתן למדוד בשיטת הטריאנגולציה מרחקים של הכוכבים עד כדי 320 שנות אור.

לאחרונה נשלחה חללית מיוחדת בשם "היפרקוס" אשר תפקידה הוא למ-דוד זויות בדיוק גדול יותר. כיום מצפים שהדיוק שלה במדידת זויות יהיה אלפית שניית קשת (0.001 שניית קשת). פירוש הדבר שבשיטת הטריאנגולציה נוכל לחשב מרחקים של הכוכבים הנמצאים במרחק של 3000 שנות אור מאתנו.

אולם, עידן החלליות אינו מאפשר רק מדידת זויות מדויקת יותר מאשר בעבר, אלא, בעזרת חלליות ניתן גם להגדיל במאד מאד את הבסיס

AB של המשולש בתמונה 6. כיום החלו כבר בתכנון של חללית אשר תסע בחלל כחמישים שנה, ואז כל המרחק שעברה במשך 50 שנה אלו יהווה את הבסיס של המשולש בתמונה 6. מרחק זה לא יהיה רק כ-300 מיליון ק"מ אלא פי מאה ויותר! עם הגדלת הבסיס בסדר גודל כזה נוכל להגיע למדידת מרחקים בשיטת הטריאנגולציה עד כדי 0.000001 שניית קשת, כלומר עד למרחק כשלוש מאות אלף שנות אור!

ומה עולה מידיעת המרחקים האלה אל הכוכבים? קודם כל מתברר כי הכוכב הקרוב ביותר אלינו, בשם אלפא שור, נמצא במרחק של כ-4.5 שנות אור מאתנו. זוהי "השמש" הקרובה ביותר אלינו. כלומר, חללית הטסה במהירות האור תגיע אליו לאחר 4.5 שנים. ומה עוד? מתברר כי המרחק הממוצע בין כוכב לכוכב הוא כעשר שנות אור, כלומר, למעשה החלל הוא ריק למדי. ומה עוד? ע"י מציאת המרחקים אל הכוכבים אנו יכולים לתאר את מבנה היקום כיצד היה נראה אם היינו "מחוצה לו". כלומר "במבט מלמעלה". ואכן, אנו עוד נראה בהמשך כיצד ידיעת המרחקים אל הכוכבים נותנת לנו תמונה של המציאות בחלל.

לפי מה שתיארנו עד עתה, נראה כאילו הנה כל היקום עומד לפנינו. כלומר, בכדי למדוד מרחקים גדולים יותר ויותר, כל מה שעלינו לעשות הוא פשוט להגדיל את בסיס המשולש. האמנם? האם באמת הדרך סלולה למדוד כל מרחק שהוא העולה בדעתנו? יתכן מאד כי כאשר נרחיק לכת עם החלליות אשר יטוסו במשך 50 או אפילו מאה שנה מכדור הארץ, אמנם יתקבל בסיס AB גדול מאד, אולם בודאי גם יתבררו עובדות ואולי אפילו חוקים חדשים שאינם עולים בדעתנו כיום. יתכן שתגליות אלו יעזרו עוד יותר או אולי אף יראו שהשיטה הזו מוגבלת מסיבות שאין אנו יודעים כיום. כבר ראינו זאת בהסטוריה של המדע שתהליך מדידה שנראה ברור בתקופה מסוימת התברר מאוחר יותר שאי אפשר להמשיכו עד אינסוף.

אם באמת היקום הוא כה גדול ורחב ידיים, דהיינו, שישנם כוכבים הנמ-צאים במרחק של 300.000 ש.א. או אפילו מיליון או מיליארד שנות אור, הרי זה רק מגדיל עוד יותר את השגתנו בגדלות ובנפלאות הבורא ב"ה כל יכול. שהרי במעשה אחד של הבריאה מלפני ה' תשנ"ה שנה בלבד

ברא הקב"ה את כדור הארץ, ואף את הכוכבים הרחוקים האלה במעמקי היקום. (אף יותר מזאת הוא ברא אפילו את קרן האור כאשר היתה בדרך מאותם כוכבים כך שהיא מגיעה אלינו היום) מעשה בריאה אחד ויחיד "ובגודל" כזה של היקום הוא אכן מעשה שרק היוצר שיצר בעצמו יכול ליצור, ואף לא אחד אחר. יתר על כן, הקב"ה ביחודו בכל היקום, הוא עושה ואף רואה את כל היקום כחטף ובמבט אחד, כאמור, "כי הוא לקצות הארץ יביט תחת כל השמים יראה" (איוב כ"ב, כ"ד). וגם על זה אנו אומרים כל בוקר בתפילתנו, אין כאלוקנו, אין כאדוננו, אין כמלכנו.

מאמר שני

אור הכוכבים

בפסוקי דזמרה של תפילת שחרית אנו אומרים: "הללויה, הללו את ה' מן השמים, הללוהו במרומים, הללוהו כל מלאכיו, הללוהו כל צב-איו, הללוהו שמש וירח, הללוהו כל כוכבי אור". הכוכבים המפיקים אור, אפילו שהם נראים לנו כנקודות זוהרות בלבד בשמי הלילה, גם הם מהללים את ה'. גם בברכת היוצר אנו אומרים בבוקר "מאורי אור שיצרת המה יפארוך סלה", כי הם פעילים, מפיקים אור, הם "חיים" ואינם "מתים", ככתוב "לא המתים יהללו י-ה". ולעומתם, כוכבי חושך, דהיינו, כוכבים כבויים שאינם מאירים, אלה הם כוכבים "מתים", ולכן אין ביכולתם לבטא את שמחת הבריאה החיה. ברור כי גם אלה נוצרו ע"י הקב"ה, שהרי כתוב "יוצר אור ובורא חושך".

בשנים האחרונות מראה המחקר האסטרונומי כי, אכן, ישנם כוכבים וגרמי שמים אחרים ביקום שאינם מאירים כלל, וישנן לכך ראיות עקיפות רבות. יתכן גם שהחומר הכבוי ביקום אף עולה בכמותו על כמות החומר המאיר. ישנם אסטרונומים המאמינים כי תשעים אחוז מן החומר ביקום הוא פשוט כבוי. ברור כי חומר כבוי אי אפשר לראות כלל, אולם המדידות האסטרונומיות מראות כי קיים חומר כבוי רב המשפיע על היקום מבלי שנוכל לראותו. המדידות הן עקיפות ביותר ועוד נדון בהן בהמשך מאמר-ינו אלה. בכל זאת הכוכבים הזוהרים ממלאים את היקום כלו ובכל מקום ובכל כוון בשמי הלילה ואורם ממלא עולם ומלואו.

אולם, הסתכלות שטחית בשמי הלילה מראה כי לכוכבים יש גם עוצמות אור שונות: ישנם כאלה שהם בהירים מאד, וישנם כאלה אשר ניתן להבחין בהם בקושי. מדידת עוצמת האור של כוכב היא מדידה חשובה ויסודית ביותר להכרת תכונותיו של הכוכב. האור הוא "השליח" היחידי המגיע אלינו מן הכוכב ולכן, הניתוח המדעי של האור לכל דקדוקיו יוכל "להסגיר" את תכונותיו של הכוכב עצמו. זוהי הסיבה שהאסטרונומים עמלים כל כך בהרכבת מכשירים אופטיים יקרים ומסובכים: הם מנסים למדוד

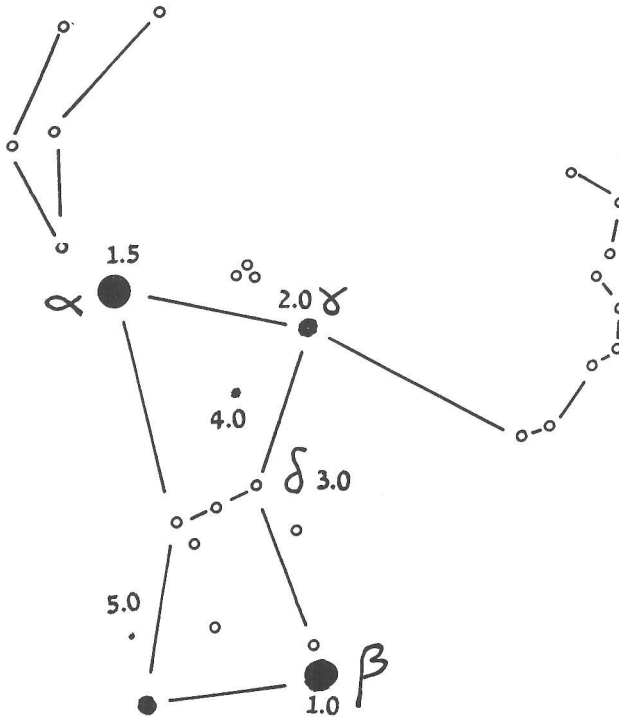
ולנתח בצורה מדויקת ביותר את כמות האור המזערית המגיעה אלינו מן הכוכבים. למרבה הפליאה, אנו עוד נראה כי ניתוחים מדעיים אלה מאפשרים לקבוע את תכונותיו של הכוכב, כגון: את גודלו, הטמפרטורה שלו, כמות החומר שבו, הרכבו הכימי ואפילו את מרחקו ותנועותיו בחלל! כאמור, המדידה הבסיסית ביותר של כוכב היא קודם כל עוצמת האור שלו המגיעה אלינו. כבר בזמנים קדומים נקבע סולם בהירויות של כוכבים אשר תחילתו 1 וסופו 6. לכוכבים הבהירים ביותר הנראים בעין נתנו "דרגת בהירות" 1 והחלשים ביותר אשר בקושי ניתן לראותם סומנו בדרגת בהירות 6. תמונה 1 מראה צילום של איזור הכוכבים בשמים המכונה בשם הצייד (אוריון). זהו מערך כוכבים (CONSTELLATION) אשר הקדמונים "הלבישו" עליו צורה של צייד. אמנם קשה לראות כאן דמות של צייד, ולכן, הבאנו בתמונה 2 את חיבור הכוכבים המראה דמות כזאת. (ראה "צבא השמים" כרך א', עמ' 177) רואים בבירור כוכבים בהירים וגם חלשים יותר. כאשר האטמוספירה היא נקיה לחלוטין מזיהום ניתן לראות בעין את רוב הכוכבים בתמונה 1, כלומר, זו גם התמונה שהקדמונים ראו בזמנם. תמונה 2 מראה את המיקום של מספר כוכבים המופיעים בתמונה 1, ולידם צוינה דרגת הבהירות שלהם. למשל דרגת הבהירות של הכוכב ביתא צייד היא 1, ודרגת הבהירות של הכוכב דלתא צייד היא 3. הכוכבים החלשים ביותר בתמונה 1 הם בדרגת 6, כלומר, זהו קצה הסולם של דרגת הבהירות שהעין יכולה לראות.

כאמור, בזמנים קדומים העריכו את דרגת הבהירות של הכוכבים בעזרת העין בלבד. בלילה בהיר וצלול ניתן היה בזמנם לראות כששת אלפים כוכבים מעל לראש הצופה ומאופק ועד אופק. אולם, כיום, בגלל זיהום האטמוספירה, אנו יכולים לראות כוכבים חלשים בדרגה 4 בלבד (זכור, דרגת בהירות גבוהה פירושה כוכב חלש יותר!). בערים הגדולות, מפאת האור וזיהום האטמוספירה גם יחד, ניתן אולי לראות כוכבים בדרגת 3 או אפילו 2 לכל היותר.

אולם המגבלה העיקרית בראיית כוכבים חלשים אינה רק זיהום האטמוספירה אלא העין של האדם עצמה. מתברר כי הגודל של עדשת העין (האישון של העין) אינו עולה על 0.5 ס"מ (קוטר) בלבד. משטח העדשה



תמונה 1 : צילום השמים באיזור הצייד. ישנם כוכבים בהירים מאד וכוכבים חלשים יחסית.
שים לב לשלשת הכוכבים בשורה אחת הנמצאים במרכז הצילום.



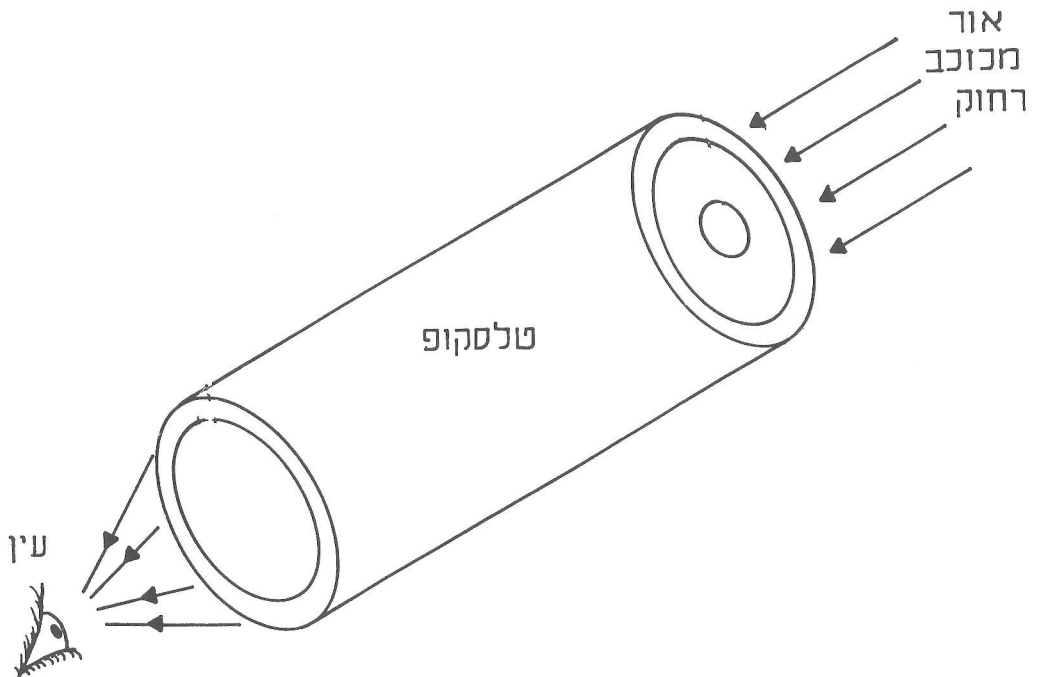
תמונה 2: כאשר מחברים בקוים ישרים כוכבים מסוימים בצילום של תמונה 1, מתקבלת דמות "הצייד". הכוכבים הבהירים סומנו בעיגולים גדולים יותר. שלושת הכוכבים שצוינו בתמונה 1 נמצאים על חגורת הצייד. הוא מחזיק בידו הימנית את האלה ובידו השמאלית את עור האריה שהוא צד. המספרים שליד כל כוכב הם דרגות הבהירות שלהם. שים לב כי דרגות הבהירות מחולקות גם עשרונית.

הקטן הזה הוא הוא הקולט את האור. אם העדשה של העין היתה בעלת מפתח גדול יותר היינו יכולים לקלוט כמות אור גדולה יותר, וכך להבחין בעצמים חלשים יותר. כאמור, בעין רגילה אנו יכולים לראות כוכבים חלשים שדרגת בהירותם מגיעה ל-6.

המצאת הטלסקופ ע"י גליליאו גליליי היתה בעיקרה הגדלת יכולת מפתח הראיה. כלומר, עדשת הטלסקופ (בגלל קוטר הגדול יחסית) קולטת כמות אור גדולה יותר ומרכזת אותה על העין (ראה תמונה 3). ככל שקוטר

העדשה של הטלסקופ הוא גדול יותר כך נקלוט אור בכמות גדולה יותר.
(תמונה 4)

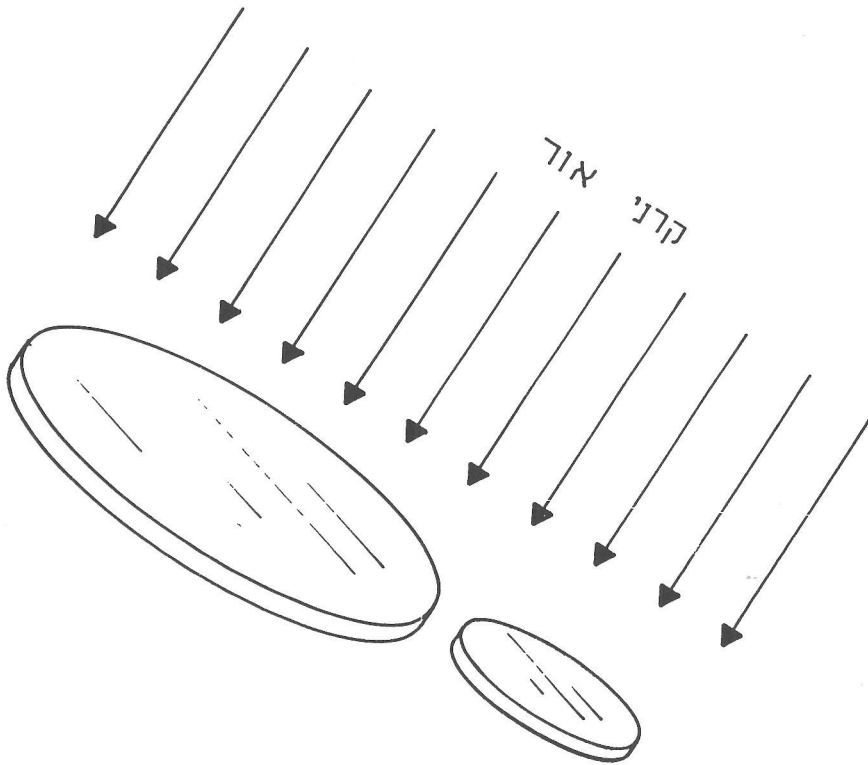
יש לשים לב כי תפקידה של העדשה הוא לקלוט יותר אור בתוקף היותה בעלת שטח קליטה גדול יותר מן העין, ואין לזה שום קשר עם יכולתה של העדשה גם להגדיל את העצמים, כלומר לפעול כזכוכית מגדלת. האמת



תמונה 3: קרני האור המגיעות מכוכב רחוק נכנסות (מצד ימין) במפתח הגדול של הטלסקופ ומתרכזות (בצד שמאל) כך שהעין "רואה" כמות אור גדולה יותר המגיעה אליה מהכוכב.

היא שהכוכבים הם כל כך רחוקים עד שאפילו בעדשות המגדילות מאד הם נשארים כנקודות זעירות ביותר ואין אפשרות להגדילם ולראות את קוטרם ממש. אמנם גופים במערכת השמש כגון כוכבי הלכת ניתן להגדיל בגלל קרבתם היחסית אלינו, אולם הכוכבים הרחוקים נשארים תמיד נקודתיים, גם בטלסקופים בעלי הגדלה גדולה. לכן, החשיבות המכרעת היא דוקא קוטר הטלסקופ ולא יכולתו להגדיל את גרמי השמים.

המצאת הטלסקופ לפני כארבע מאות שנה ע"י גליליאו גלילי הגדילה
מאד את תחום הראיה של הכוכבים החלשים. אי לכך היה צורך להרחיב
את סולם דרגת הבהירויות של הכוכבים שצינו לעיל גם מעבר לכוכבים



תמונה 4: העדשה הגדולה קולטת אור בהתאם לגודל השטח שלה. אם קוטר העדשה
הגדולה הוא פי שניים מקוטר העדשה הקטנה, יהיה שטחה גדול פי ארבעה, ולכן גם
תקלוט אור בכמות פי ארבעה מן העדשה הקטנה יותר.

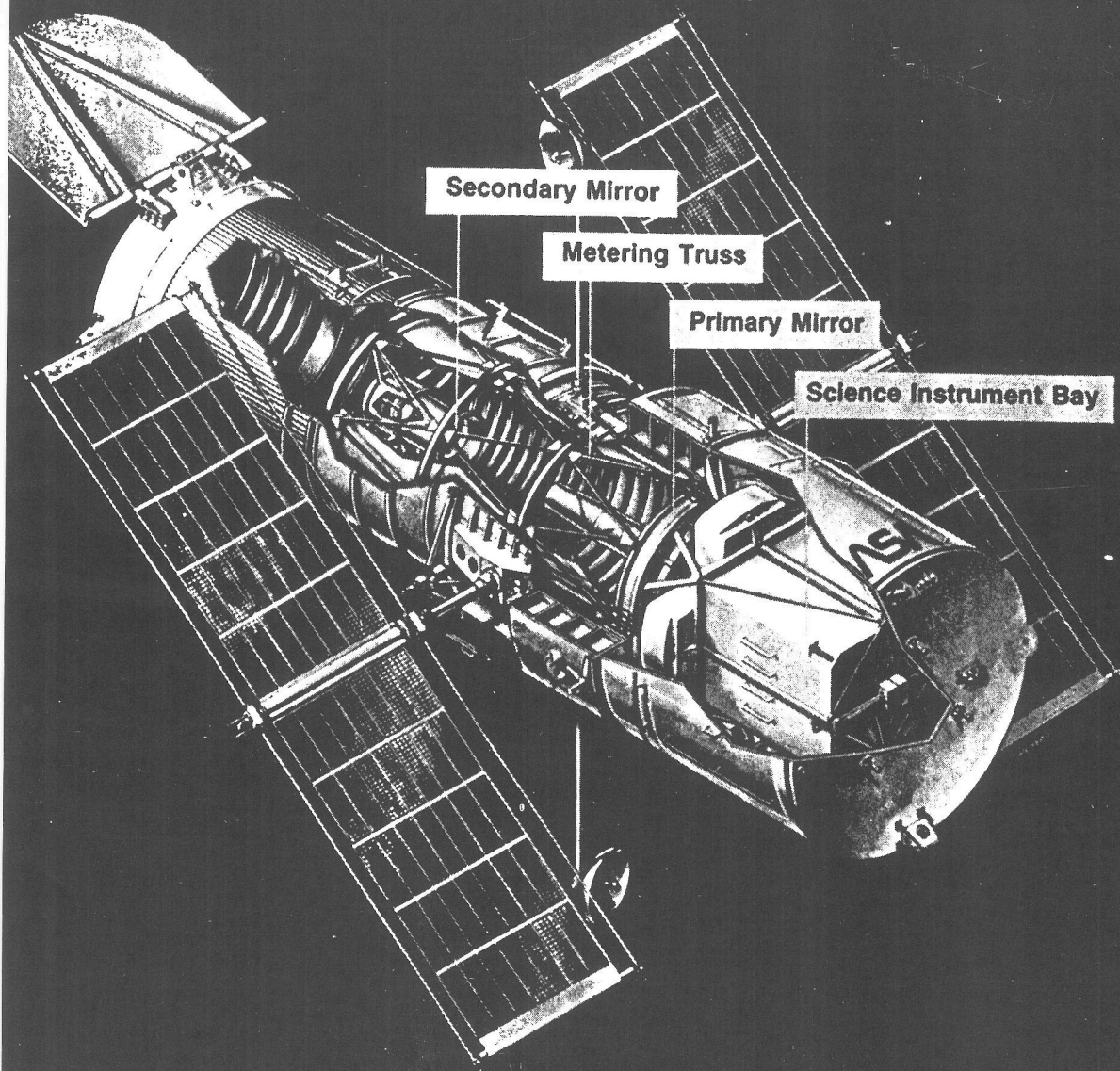
החלשים שדרגת בהירותם 6. סולם דרגות הבהירויות הורחב מאד גם
לכוכבים חלשים עוד יותר בדרגת בהירות 7,8, וכו'.
ככל שקוטר הטלסקופ הוא גדול יותר, כך ניתן לראות דרכו בעינינו

כוכבים חלשים יותר. הטבלה הבאה מראה מה היא דרגת הבהירות הח' לשה ביותר (דרגה גבולית) שאפשר לראות דרך טלסקופ בעל קוטר מסוים:

דרגת בהירות גבולית	קוטר הטלסקופ
6	0.5 ס"מ (קוטר עדשת העין)
9	3 ס"מ
12	10 ס"מ
17	1 מ'
20	4 מ'
22	10 מ'

לאחרונה נשלח טלסקופ חלל גדול מעל לאטמוספירה אשר קוטרו 2.40 מ' (תמונה 5). היתרון שלו הוא שחרור מוחלט מתלות באטמוספירה ובפרט יכולתו למקד את דמויות הכוכבים בצורה הרבה יותר חדה מאשר טלס-קופים על פני כדור הארץ. תמונה 6 מראה צילום אשר נעשה בטלסקופ זה והמראה את יכולתו להפריד בין כוכבים קרובים ביותר זה לזה. אי יכולתה של עין האדם לראות גרמי שמים חלשים נובעת לא רק מן הקוטר הקטן יחסית של אישון העין, אלא גם מתכונה אחרת לחלוטין. מתברר כי המוח שלנו מוחק כעשרים פעם בשניה את מה שהעין רואה. כלומר, בכל 0.05 של שניה נעשית מחיקה אחת. למשל, אם נסתכל בעצם מסוים ונפנה פתאום להסתכל בעצם אחר, אנו יכולים עדיין לראות את העצם הראשון במשך זמן קצר ביותר של 0.05 של שניה בלבד, ולאחר מכן התמונה נמחקת ע"י מוחנו והתמונה של העצם השני תופסת את מקומה במח. גם כאשר אנו מסתכלים על עצם מסוים במשך זמן מה, הרי המוח מוחק ללא הרף את התמונה של העצם הזה ומסלק אותה כעשרים פעם בשניה. ברגע שנפנה את ראשנו הלאה מן העצם הזה, תמונתו תשאר במוחנו לעוד 0.05 של שניה ולאחר מכן גם תמונתו תיעלם במוחנו ותמונת העצם הבא תתפוס את מקומו. (בעצם, על תכונה זו מבוססת מכונת הראינוע (או הקולנוע): התמונות מוקרנות בקצב של 24 תמונות בשניה ואז מוחנו קולט את התמונות בזו אחר זו, מוחק אותן לפי הסדר

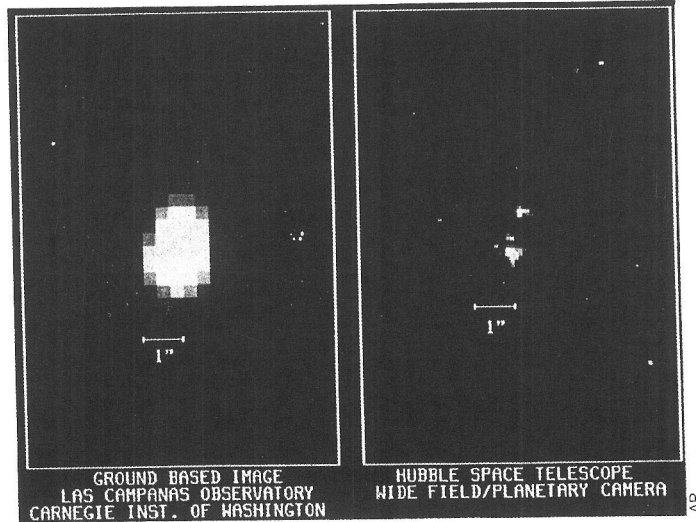
The Hubble Space Telescope



תמונה 5: טלסקופ החלל ע"ש האבל (HUBBLE)

בכל 0.05 של שניה ואז מתקבל הרושם במוח כאילו הגוף נע על פני המסך).

אפשר לתאר את פעולת העין והמוח בדרך הבאה: העין קולטת כל הזמן את האור המגיע אליה, אולם המוח מסוגל "לזכור" רק את כמות האור



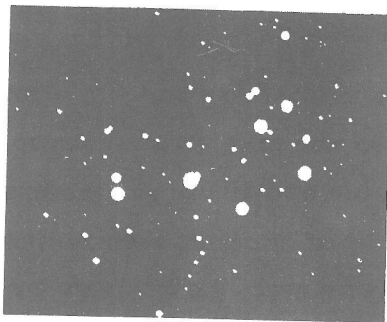
תמונה 6: הצילום משמאל נעשה ע"י טלסקופ על כדור הארץ. הצילום מימין נעשה ע"י טלסקופ החלל ע"ש האבל והוא של אותו גרם שמים שבתמונה משמאל. רואים כי טלסקופ החלל יוצר תמונות חדות יותר והוא הפריד את אותו עצם לשני כוכבים. כושר ההפרדה של הטלסקופ בתמונה זו הוא 0.7 שנית קשת בלבד, כלומר הוא יכול להבחין בין שתי שערות (שהן אכן נפרדות זו מזו) ממרחק של כשני קילומטרים.

שמגיעה במשך 0.05 של שניה בלבד. אם למשל, המוח היה מוחק את האינפורמציה שהוא מקבל מן העין פעם אחת בדקה אז במשך דקה זו היתה העין מספיקה לקלוט הרבה יותר אור ומעבירה למוח תמונה הרבה יותר מוארת. אולם, אין הדבר כך.

היתרון הגדול של המצלמה ביחס לעין הוא שאין בה תהליך שימחק את האור. ככל שכמות האור הנופלת על הפילם תארך זמן רב יותר, כלומר שזמן פתיחת המצלמה יארך יותר, כך הפילם ישחיר יותר ויותר. כלומר,

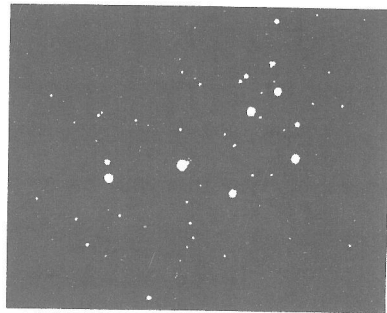
אם נפתח את המצלמה לשמי הלילה במשך מספר שעות ברציפות, אנו נוכל לאסוף אור יותר ויותר מכוכבים חלשים ביותר עד שהם יופיעו בבירור בתמונה. כלומר, בגלל יכולתו של לוח הצילום לאסוף אור יותר ויותר יופיעו עליו כוכבים חלשים ביותר אשר עיינינו אינן מסוגלות לראות. לעומת זאת אם נסתכל בשמי הלילה בעיינינו במשך מספר שעות ברציפות נראה כל הזמן אותם הכוכבים, כי המוח מוחק ללא הרף את תמונת הכוכב כעשרים פעם בשניה, בשעה שלוח הצילום יאגור ויאגור אור ברציפות וישחיר את התמונה יותר ויותר ולבסוף נוכל לראות גם כוכבים חלשים בתמונה. תמונה 7 מראה סדרה של צילומים אשר נעשו עם מצלמה (אשר חוברת אל טלסקופ) כאשר זמני הפתיחה שלה היו דקה אחת ועד ל- 30 דקות. רואים בבירור כי ככל שזמן פתיחת המצלמה היה ארוך יותר, כך הופיעו על לוח הצילום כוכבים חלשים יותר ויותר.

דוגמה ליתרון הצילום על פני העין בראית כוכבים חלשים הוא למשל הצילום דרך טלסקופ שקוטרו 1 מ'. בהתאם לטבלה לעיל, ניתן לראות בעין דרכו כוכבים שדרגת בהירותם 17 לכל היותר. לעומת זאת, אם



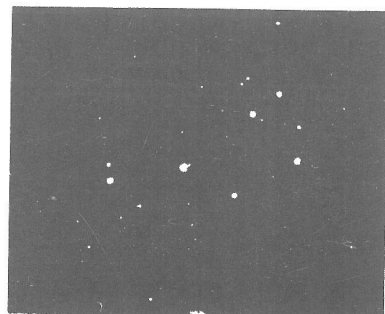
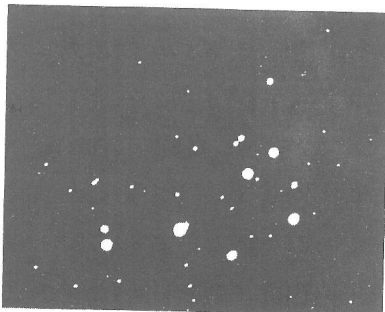
↑ 30 MIN. EXPOSURE

↓ 12 MIN.



↑ 3 MIN.

↓ 1 MIN.



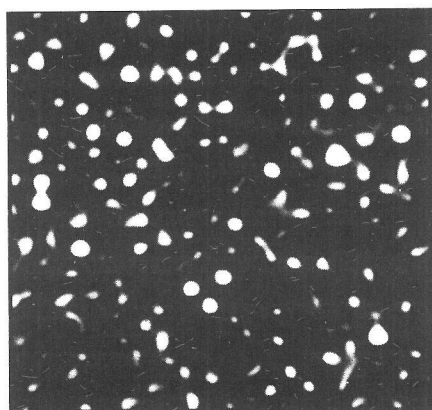
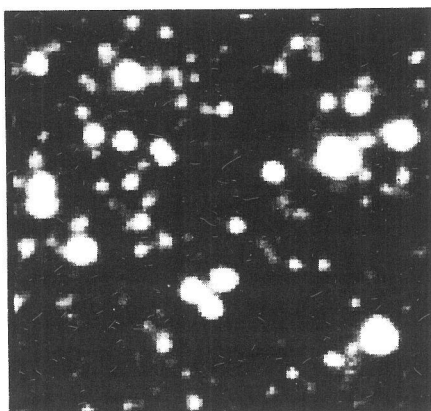
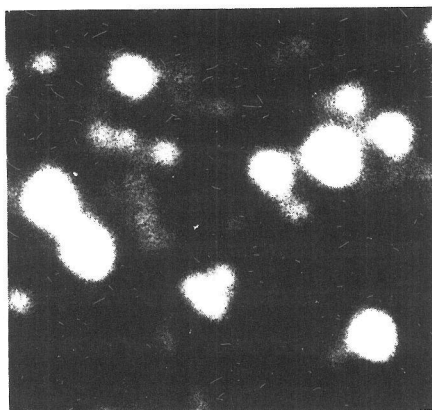
תמונה 7: צילומים שונים של אותם כוכבים אולם זמן הצילום שונה בכל פעם.

פותחים את המצלמה באותו טלסקופ למשך כשלוש שעות, יופיעו על לוח הצילום כוכבים שדרגת בהירותם 20 או יותר.

מצפים לכך שטלסקופ החלל שקוטרו 2.40 מ' יצלם כוכבים שדרגת בהירותם תהיה כ-28.

בשנים האחרונות החלו האסטרונומים להשתמש במצלמות אלקטרוניות מיוחדות הנקראות בשם מצלמות CCD המשתמשות למעשה בעקרון פעולת המוח והעין של האדם: המצלמה האלקטרונית קולטת את האור מגרמי השמים, ומדי פעם, בכל שבריר של שניה, פועל מתקן אלקטרוני נוסף "המטאטא" את הצילום ומעביר בצורה מסודרת את כל האינפורמציה שקבלה אל זכרון של מחשב. כך הדבר נעשה ללא הרף במשך כל זמן פתיחת המצלמה, ובמשך הזמן הולכת ונאגרת תמונה של האיזור המצולם בזכרון המחשב. אחרי כן הופכים שוב בחזרה את מה שנמצא בזכרון המחשב לתמונה רגילה על מסך או על נייר רגיל. שיטות הצילום האלקטרוניות מאפשרות עתה גם עיבוד תמונות מתוחכם ביותר בעזרת המחשב, וע"י כך ניתן לראות גרמי שמים חלשים יותר וגם בהגדרה טובה יותר (תמונה 8). כאמור, מציאותם של כוכבים חלשים הביאה את האסטרונומים להרחיב את סולם דרגות הבהירות של כוכבים מעבר למה שהעין רואה, כלומר מעבר לדרגה 6, כפי שראינו לעיל. כיום, גרמי השמים החלשים ביותר שאפשר לצפות בהם הם בדרגת בהירות של 28-29. גרמי שמים כאלה רואים בעזרת מצלמות מתוחכמות ביותר המחוברות לטלסקופ החלל ע"ש האבל.

מאידך, כתוצאה מעבודה מדעית מדויקת, אפשר כיום להרחיב את סולם דרגות הבהירות גם לגרמי השמים הבהירים ביותר הנמצאים בקצה השני של דרגות הבהירות, כלומר, לגרמי שמים שהם בהירים יותר מדרגת בהירות 1. דרגות הבהירות יותר מ 1 תהיינה לפיכך, 0, -1, -2, -3, וכו'... כלומר, ככל שהמספר הוא יותר שלילי כך הגרם השמימי הוא בהיר יותר. למשל, דרגת הבהירות של השמש, שהיא גרם השמים הבהיר ביותר היא



תמונה 8: שלושה צילומים שונים של אותם כוכבים באמצעים שונים: למעלה: צילום דרך טלסקופ רגיל. באמצע: צילום בעזרת מצלמה אלקטרונית. למטה: עיבוד מיוחד בעזרת מחשב של אותו צילום שמעליו. רואים בבירור את השיפור בחדות הכוכבים.

26.5- הטבלה הבאה מראה מספר דרגות טיפוסיות לאורך כל הסולם של הדרגות:

דרגת בהירות	גרם שמים
-26.5	שמש
-12.5	ירח
-4.0	נוגה (כוכב השחר)
-2.0	צדק
-1.5	סיריוס (אלפא כלב גדול)
-1.0	אלדבראן (אלפא שור)
-10.0	גבול הראיה במשקפת
	הגבול בטלסקופ 4 מ' עם
26	מצלמת CCD
	הגבול בטלסקופ החלל
28 - 29	ע"ש האבל

כל דרגות הבהירות שציינו לעיל הן אלו שאנו רואים כאן. אין זו עוצמת האור שהכוכבים מפיקים ממש כי חלק גדול מן הקרינה שלהם הולכת לאיבוד בדרך אלינו. עוצמת האור שאנו רואים כאן תלויה בשני גורמים: במרחק אל אותו גרם שמים וכן בעוצמת האור שלו ממש. למשל, אם כוכב נראה לנו בפועל חלש מאד, למשל שדרגת בהירותו 20, אין הדבר אומר דבר על זוהרו האמיתי, כי יתכן שהוא דוקא כוכב בהיר מאד אלא שהוא רחוק מאד מאתנו. ולהפך, יתכן שהוא דוקא קרוב מאד אלינו אבל הוא חלש מאד מאד.

אי לכך קבעו האסטרונומים כי דרגת הבהירות של כוכב כפי שהיא נמדדת על ידנו תקרא מעכשיו והלאה בשם "דרגת בהירות נראית" (APPARENT MAGNITUDE). ברור כי בכדי לקבוע את דרגת הבהירות האמיתית, עלינו גם לדעת מה המרחק אל הכוכב. לאחר זאת נוכל אז לקבוע בודאות את "דרגת הבהירות המוחלטת" של הכוכב.

כיום מקובל להשוות את עוצמות אור הכוכבים ע"י חישוב דרגת בהירותם אילו היו כלם עומדים במרחק קבוע של 32 שנות אור מאתנו. זהו מרחק סטנדרטי המאפשר לנו לקבוע מהו באמת זוהרו של הכוכב ביחס לאחרים. ואכן, אם היינו שמים למשל את השמש שלנו במרחק סטנדרטי כזה, היינו רואים שהוא כוכב בעל דרגת בהירות של 5 בלבד, כלומר, כמעט על גבול הראיה של עין האדם! כלומר, זוהר השמש הוא כזוהר של כוכב בינוני ביקום.

לדרגת הבהירות של כוכב כאשר הוא עומד במרחק של 32 ש.א. אנו קוראים בשם "דרגת הבהירות המוחלטת" שלו. בהירות זו אינה באמת "מוחלטת" אלא זהו שימוש במושג על מנת להשוות את זוהר הכוכבים זה ביחס לזה מאותו מרחק סטנדרטי.

החיפוש הבלתי נלאה אחרי גרמי שמים חלשים ובלתי ידועים עד כה נובע משתי סיבות:

א. לנסות לראות גרמי שמים חלשים יותר ויותר מתוך תקווה שהם באמת חלשים בגלל מרחקם מאתנו, כלומר, הם אולי מעידים על קצה היקום. לעת עתה, ככל שגדלה עוצמת הטלסקופים וכן התחכום של המכשיר, אנו עדיין רואים גרמי שמים רחוקים יותר ויותר וללא סוף. כלומר, בינתיים אין קצה ליקום, וככל שהטלסקופים גדלים יותר והמיכשור מתוחכם יותר, כך גם גדל היקום הנראה לנו. כך מתברר המצב המוזר לעת עתה, כי גודל היקום הנראה נקבע לפי המכשור שבידנו.

מאידך, סיבה שניה לחיפוש אחר גרמי שמים חלשים היא לנסות למצוא כוכבי לכת כמו שלנו במרחבי היקום. ואכן, כדור ארץ כמו שלנו אם היה עומד במרחק של מספר שנות אור בלבד מאתנו לא היה נראה לנו כלל. לעומתו כוכב הלכת צדק הוא הרבה יותר גדול מכדור הארץ ומתברר כי כיום, עם המיכשור והטלסקופים הקיימים, אפשר כבר להתחיל לחפש אחר כוכבי לכת שגודלם כמו כוכב הלכת צדק. בשנים האחרונות הלך וגבר החיפוש אחר גרמי שמים "זעירים" כאלה הנמצאים בקרבת כוכבים כמו השמש שלנו. מספר קבוצות של אסטרונומים טוענות כי מצאו "ננסים חומים" כאלה, אולם המחקר בתחום זה נמצא עדיין בחיתוליו. ("ננסים" כי הם כוכבים זעירים יחסית, "חומים" - כי הם אינם שחורים לגמרי

אלא מאירים במקצת) בכל אופן, אפשר לאמר כי החיפוש אחר מערכת שמש עם כוכבי לכת כמו שלנו במרחבי היקום כבר החלה, ואנו נשמע על תוצאות מעניינות בשנים הקרובות בנושא זה.

כזכור, פתחנו את המאמר הזה בנושא כוכבי האור. הבאנו את דעתם של האסטרונומים כיום כי ישנן עובדות עקיפות רבות המעידות על כך שכנראה ישנו חומר רב מאד ביקום שהוא כנראה כבוי. מאידך, יתכן שכל החומר "החסר" הזה שאין אנו רואים, הוא אכן מאיר, אלא שעוצמת אורו היא חלשה ביותר מכדי שנוכל לראותה כאן. קיימת השערה שכנראה רוב רובו של החומר הבלתי נראה הוא פשוט הרבה הרבה כוכבי לכת אולי כמו כוכב הלכת צדק שאורם חלש מאד וגם הם עצמם גופים קטנים יחסית כמו צדק. אורם הוא חלש, אולם הם אינם חשוכים או שתורים לגמרי. הם אמנם קיימים אבל גודלם הוא זעיר יחסית. יתכן שהיקום מכיל עוד מילארדים ומילארדים של ננסים חומים כאלה, ומספרם הוא כה רב עד שיתכן שהם עולים בכמותם הכוללת על הכוכבים המאירים לנו בשמי הלילה. ועל זה נאמר, "כוכבי השמים אשר לא יספרו מרוב".

מאמר שלישי

אש הכוכבים

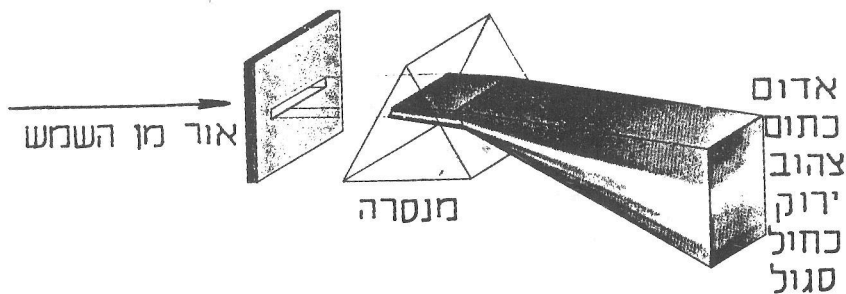
בספר פרקי דרבי אליעזר כתוב (פרק כ'): "רבי מנא אומר...חייב אדם לברך על כוס של יין לאור האש (במוצש"ק), ואומר: ברוך מאורי האש. וכשמחזיר ידו מן האש אומר: ברוך המבדיל בין קודש לחול. ואם אין לו יין, פושט את ידו לאור האש ומסתכל בצפורניו, שהן לבנות מן הגוף, ואומר: ברוך מאורי האש. וכיון שמרחיק ידו מן האש, אומר: ברוך המבדיל בין קודש לחול. ואם אין לו אש פושט ידו לאור הכוכבים שהן של אש, ויסתכל בצפורניו שהן לבנות מן הגוף ואומר ברוך מאורי האש". עכ"ל. אם כי לא הוזכר אור הכוכבים בהלכה לברכת מאורי האש (שו"ע ס' צח"ר), בכל זאת דעתו של רבי אליעזר היא "שהכוכבים הן של אש".

האש של כל כוכב נראית לנו כנקודה זעירה בשמי הלילה, בדיוק כפי שמדורה רחוקה מאד תיראה לנו בשדה כנקודת אור זעירה ביותר. כך גם הכוכבים הזוהרים בשמי הלילה נראים לנו רק כנקודות זעירות של אש, וזאת מפאת מרחקם הרב מאתנו. אם הכוכבים היו קרובים אלינו יותר, היינו יכולים לראות את גודלה וחומה של האש הזאת. ואכן העמיד הקב"ה את השמש (שגם היא כוכב, ראה "צבא השמים" חלק א') בקרבה יתירה אלינו כך שנוכל לראות ולחוש בעירה זו בכל עוצמתה והדרה. אולם אם היינו מסתכלים על השמש ממרחק של כעשר שנות אור בלבד, גם היא היתה נראית לנו כנקודה זעירה של אש בדיוק כמו שאר כוכבי הלילה.

אולם, כמו טבעה של האש על כדור הארץ, לא הרי אש זו כאש זו, לא הרי אש של נר כאש של מדורה, ולא אש של להבת גז במטבח כאש של נורת חשמל, אם כי לכלם תכונה משותפת של קרינת חום ואור. ועל זה כתוב באליהו רבא (סוף פרק ב') "מה גדלו מעשיך ה': בא וראה כמה מיני בהמות ומיני חיות ומיני עופות יש בעולם וכמה מיני דגים יש בים,

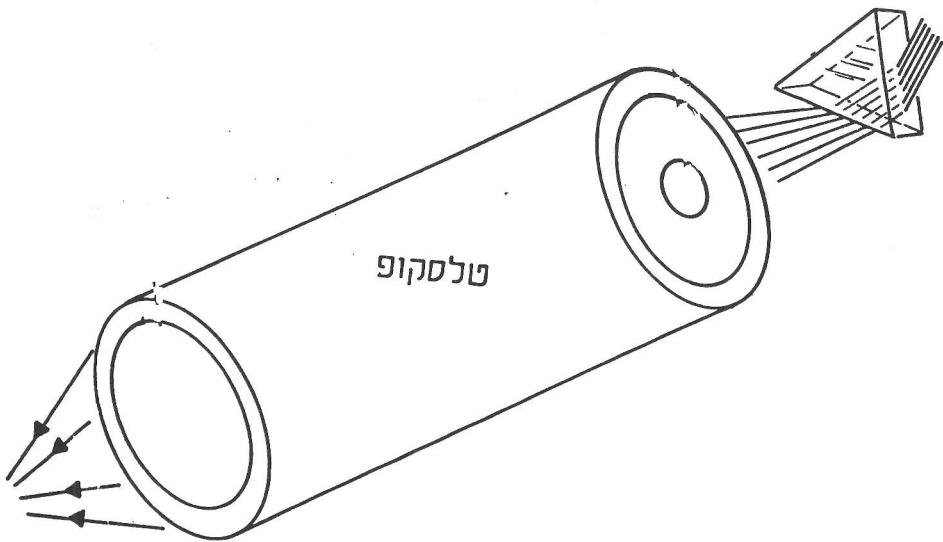
שמא קולו של זה דומה לזה, או מראה של זה דומה לזה, או שמא דעתו של זה דומה לזה, או שמא טעמו של זה דומה לזה. הא לא קול ולא מראה ולא דיעה ולא טעם של זה דומה לזה. וכך שנו חכמים במשנה להגיד גדולתו של מלך מלכי המלכים הקב"ה, טבע את כל אדם בחותמו של אדם הראשון ואין אדם דומה לחבירו, לכך נאמר מה גדלו מעשיך ה"י. ועל זה כתב רש"י (סנהדרין ל"ז) "שבחותם הראשון כל הצורות טב־עות, שלא היה תחילה אלא חותם אחד". כך באותה מידה, כאשר ברא הקב"ה את הכוכבים, אמנם עשאים כלם מאש, והם נראים לנו כנקודות זעירות של אש בשמי הלילה, אולם לכל כוכב וכוכב יש אש שהיא בטבעה שונה משל האחרים, וזהו מעשה גדולתו של ה', שבחותם אחד של אש עשה אותם בתחילה, ובכל זאת הם שונים זה מזה, בדיוק כפי שבני אדם אמנם עשויים בחותם אחד, ובכל זאת הם שונים זה מזה. ואכן, אנו נראה להלן כי אש הכוכבים אמנם אחידה בחותם האש, ובכל זאת לכל כוכב וכוכב אש אחרת טיפוסית לו לבדו.

כבר ראינו בחלק א' (צבא השמים) כי השמש שלנו היא כוכב הבורע מעצמו, היות ובמרכזה נמצא כור גרעיני הפועל בקצב איטי מאד. אש הבעירה הזאת מפיקה אור וחום לכל החלל מסביב. ראינו גם כי ניתן לפצל את אור השמש בעזרת מנסרה (פריסמה) העשויה מזכוכית, וכך אנו רואים את צבעי הקשת. צבעים אלה הם בעצם פיצול האור המגיע מן השמש. יש באור השמש צבע אדום, צהוב, ירוק, כתול וגם סגול (וצבעי ביניים רבים אחרים) המופיעים כולם בקשת הענן או בעזרת פריסמה במעבדה (תמונה 1). אם נאחד שוב את כל הצבעים האלה זה על גבי



תמונה 1: פיצול האור ע"י פריסמה (מנסרה).

זה, נקבל בחזרה את אור השמש הלבן (צהוב) כפי שהגיע אלינו בתחילה. האם נוכל לפצל גם את האור של הכוכבים ולראות מכל כוכב את צבעי הקשת שלו? הבעיה העיקרית היא כמובן שאור הכוכבים הוא חלש מאד, והפיצול שלו הוא למעשה חלוקה של עוצמת האור לצבעיו כך שכל צבע יהיה עתה בעל עוצמה עוד יותר חלשה. ובכל זאת, האסטרונומים מבצעים את הניסוי הזה ומעמידים פריסמה כזאת בראש הטלסקופ כמו בתמונה 2. כך הפריסמה מפצלת את האור של כל אחד מן הכוכבים לצבעיו וכך מתקבלת תמונה 3.



תמונה 2: הפריסמה המונחת בראש הטלסקופ מפצלת את האור המגיע מכל כוכב.

בתמונה זו רואים כיצד כל נקודה ונקודה זוהרת של כוכב התפצלה לצבעי הקשת האופייניים לה. כל אחד מהפיצולים האלה עומד בתמונה באותו מקום היכן שעומדת נקודה זוהרת של הכוכב, והפיזור של הפיצולים על גבי התמונה נובע פשוט מפיזור הכוכבים בתמונה. לפיצול האופייני של הצבעים של כל כוכב קוראים בשם "הספקטרום" של אור הכוכב. (ספקטרום - ביחיד, ספקטרה - ברבים). בתמונה סומנו במספרים כשלושים ספקטרה של כוכבים. כל אחד מן הספקטרה האלה מכיל את צבעי הקשת האופייניים לכל אחד מן הכוכבים, אולם התמונה כאן היא בשחור לבן.

2

5

6

7

8

9

10

11

14

13

12

15

P Cygni

16

19

20

21

22

23

24

26

תמונה 3: צילום של פיצול האור לצבעיו של כל אחד מן הכוכבים.

27

28

למשל, בספקטרום של כוכב מספר 10, הצד הימני בספקטרום הוא אדום, אחרי כן ככל שזזים שמאלה לאורך פס הספקטרום הזה רואים את צבעי הצהוב, ירוק וכחול. הצד השמאלי ביותר מתחת לספרה 9 הוא בצבע סגול.

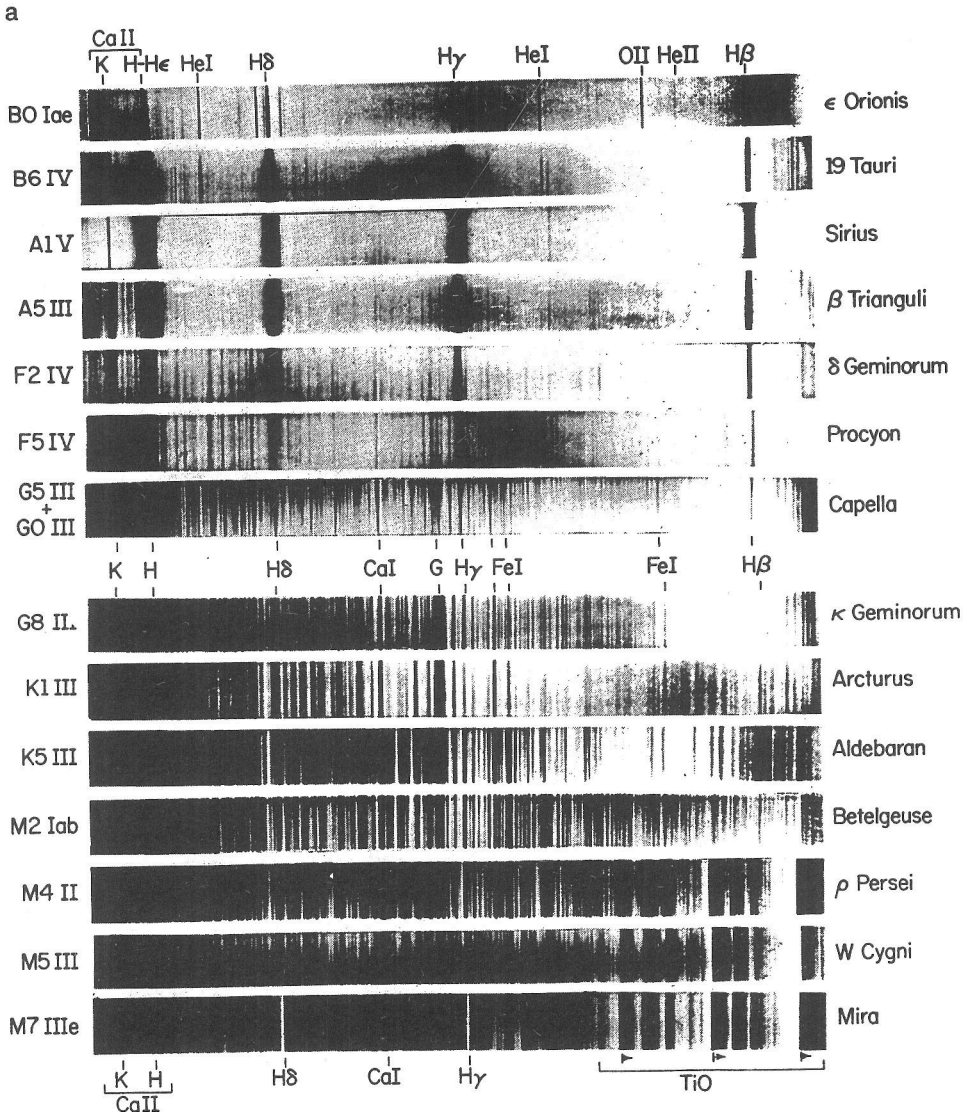
רואים גם כי ישנם ספקטרה של כוכבים שהם בהירים יותר מן האחרים. למשל, הספקטרום של כוכב 5 הוא בהיר יותר מן הספקטרום של כוכב 7. הסיבה לכך היא שהכוכב 5 הוא בהיר יותר מכוכב 7. כלומר, אם היינו מצלמים את הכוכבים באיזור זה של השמים באופן ישיר (בלי פריסמה), היינו רואים כי הכוכב 5 הוא פשוט בהיר יותר מהכוכב 7. באותה מידה היינו רואים גם כי הכוכב 5 נמצא מעל לכוכב 7. כלומר, המיקום של הספקטרה של הכוכבים והפיזור שלהם על פני כל התמונה נובע פשוט מן המיקום של הכוכבים זה ביחס לזה.

פרט לפיצול של הצבעים, רואים תופעה מעניינת נוספת בספקטרה של הכוכבים בתמונה 3. למשל, נסתכל בספקטרום של הכוכב 10. פרט לפיצול הצבעים לאורך פס הספקטרום בכוון אופקי, רואים גם פסים שחורים דקים בכוון אנכי. פסים אלה הם דקים יחסית וכאילו מפסיקים את הצבעים לאורך הספקטרום של הכוכב. ברור כי כל פס שחור כזה פירושו הוא חסרון והעדר צבע באותו מקום. לקיום שחורים אלה קוראים בשם "קוי בליעה" כי שם כאילו נעלם ונבלע הצבע.

הפיזור של הספקטרה של הכוכבים במקומות שונים על פני כל התמונה 3 מקשה על השוואתם זה לזה. לשם כך נגזרו הספקטרה ממקומם והונחו זה מתחת לזה כמו בתמונה 4, כאשר הצבע האדום של כולם נמצא בדיוק מצד ימין, כך שכלם מתחילים משם שמאלה ביחד בצורה מדויקת. בצורה זו ניתן להשוות בין הצבעים השונים בכל אחד מן הכוכבים ביחס לאחרים.

בכדי להקל על ההשוואה סומנו הספקטרה השונים באותיות שונות. ובכן, הדבר הבולט הראשון הוא כי בכוכב M בתחתית תמונה 4 אין כלל צבע כחול וסגול (או שהם חלשים מאד). פירוש הדבר הוא כי כוכב זה הוא בעיקרו אדום. ואכן, אם הכוכב הזה הוא בהיר יחסית, ניתן לראות אף בעין רגילה כי צבעו אדום. לעומתו, הספקטרום G מכיל צבע אדום וגם צהוב ולכן צבע הכוכב הוא בודאי אדום-צהוב. לעומתם, הכו-

כבים A, B, O, הם בעלי ספקטרה שיש בהם גם צבע כחול וסגול. כוכבים אלה נראים לנו בדרך כלל בצבע לבן-כחול. כזכור, מחלק א' (צבא השמים) הצבעים של הכוכבים מעידים על הטמפרטורה שלהם. כך כוכב שעיקרו אדום מעיד על טמפרטורה של כ-2,000 מעלות חם (ראה טבלה שם בעמ' 20) וכוכב כחול מעיד על טמפרטורה של 15,000 מעלות חם. הסדרה של הספקטרה של הכוכבים בתמונה 4



תמונה 4: סוגי הטיפוסים הספקטראליים של הכוכבים. מצד ימין: שמות הכוכבים, מצד שמאל: הטיפוס הספקטראלי שלהם.

מעידה על סולם של טמפרטורה הנעה בין כ-2,000 ועד ל-30,000 מעלות (ואף יותר).

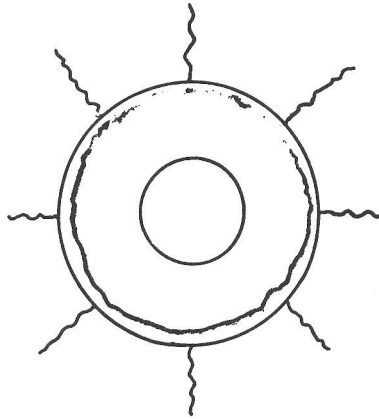
פרט לשינוי בצבעים מכוכב לכוכב ניתן לראות כי קוי הבליעה (המאונכים) אינם זהים בכל הספקטרה של הכוכבים בתמונה 4. למשל בספקטרה של הכוכבים G עד M יש הרבה קוי בליעה צפופים וחלשים, ולעומתם הספקטרה B עד A מכילים קוי בליעה מבודדים היטב שהרווחים ביניהם הולכים וקטנים שמאלה. כלומר, לא רק שהצבעים של הספקטרה של הכוכבים הם שונים מכוכב לכוכב, אלא גם קוי הבליעה משתנים גם הם.

בתחילת המאה העשרים התברר כי כמעט לכל הכוכבים ביקום, יש כשבעה ספקטרה בסיסיים טיפוסיים. כלומר, הספקטרום של כל כוכב ביקום הוא כמעט תמיד זהה באופן בסיסי לאחד משבעת הטיפוסים הספקטראליים האלה. שבעת הטיפוסים כונו באותיות הלטיניות O B A F G K M. למשל, ניתוח הספקטרום של השמש שלנו מראה כי היא מטיפוס ספקטראלי G. לשבעת הטיפוסים יש גם תת חלוקה, למשל, השמש שלנו שייכת לטיפוס G5 דוקא.

עתה נשאלת השאלה הבסיסית הבאה: מהו מקור הצבעים בספקטרה של הכוכבים ומדוע רואים בהם גם קוי בליעה בכלל?

ובכן, הקרינה של הכוכב נובעת קודם כל מן הכור הגרעיני הנמצא במרכזו. קרינה זו היא חמה ביותר (כחמש עשרה מיליון מעלות במרכז השמש, למשל). אולם, ככל שהיא יוצאת החוצה אל שפת הכוכב היא הולכת ונחלשת והופכת להיות קרינה הנראית לנו לצבעיה השונים (למשל, שפת השמש היא "רק" 6,000 מעלות). התהליך של מעבר הקרינה ממרכז הכוכב אל שפתו הוא מסובך ביותר, כאשר האטומים מוסרים זה לזה את האנרגיה הגרעינית שבמרכז עד לאחרוני האטומים שבאטמוספירה של הכוכב. כב. למשל, בשמש שלנו עובר תהליך זה לאורך כשש מאות אלף ק"מ, שהוא רדיוס השמש. בתהליך זה משתתפים גם הקרינה וגם האטומים שבדרך, ולבסוף אנו רואים את "המוצר הסופי" בספקטרום של הכוכב הן בצבעים והן בקוי הבליעה כמו בתמונה 3. כלומר, הספקטרום של

הכוכב מראה לנו בעצם את התנאים הפיזיקאליים השוררים בשפת הכוכב, דהיינו, באטמוספירה שלו. מתברר כי הצבעים שאנו רואים בספקטרום באים מעומק יחסי קטן על שפת הכוכב, בשעה שקוי הבליעה באים מהבליעה של הקרינה על ידי שכבות הגז החיצוניות יותר של הכוכב (תמונה 5). כך יוצא שאם אנו רואים בספקטרום קוי בליעה של היסוד



תמונה 5: קוי הבליעה בספקטרום של כוכב נוצרים באטמוספירה החיצונית של הכוכב.

מימין, סימן הוא לא רק שיש שם מימן, אלא גם שהתנאים הפיזיקאליים השוררים שם מאפשרים לאטומי גז המימן להיות פעילים ולבלוע את הקרינה באותם קוי בליעה מסוימים. כך הוא לגבי כל יסוד ויסוד, כגון פחמן, חמצן או ברזל, דהיינו, אם רואים קוים ספקטראליים של ברזל, סימן הוא לא רק שהיסוד ברזל נמצא באטמוספירה של הכוכב, אלא גם שהתנאים הפיזיקאליים כגון טמפרטורה, לחץ, או צפיפות מאפשרים לגז הברזל לבלוע את הקרינה של אותו צבע בספקטרום של הכוכב. הטבלה הבאה מסכמת את הטיפוסים הספקטראליים הבסיסיים של הכוכבים:

קוי הבליעה האופייניים	הטמפרטורה הממוצעת	הצבע הכולל	הטיפוס הספקטרלי
מעט מאד קוי בליעה קוי גז הליום מיונן*, קוי מימן חלשים קוים של הליום.	30,000-50,000	כחול-סגול	O
קוי מימן חזקים יותר לעומת O.	11,000-25,000	כחול	B
קוי מימן חזקים. גם מעט מתכות כגון מגנזיום וברזל מיוננים*.	7,500-11,000	לבן	A
קוי מימן הולכים ונחלשים. קוי מתכות מיוננים	6,000-7,500	לבן-צהוב	F
קוי סידן חזקים. מימן-חלשים מתכות חזקים.	5,000-6,000	צהוב	G
בעיקר קוי מתכות קוי מתכות חזקים.	3,500-5,000	צהוב-כתום	K
קוי מולקולות.	- 3,500	אדמדם	M

"אטום מיונן" - פירושו שאלקטרון אחד או יותר "נקרעו" מן האטום בגלל החום הרב השורר בגז.

מתברר כי כמעט כל הכוכבים ביקום זהים תמיד באופן בסיסי לאחד משבעת הטיפוסים הספקטרליים לעיל, דהיינו, אם נפצל את האור של הכוכב, כמעט-תמיד נקבל ספקטרום שנוכל לסווגו לאחד הטיפוסים לעיל. כלומר הקבי"ה אמנם טבע בכל הכוכבים ובשמש שלנו את חותם יסוד האש, אולם, בכל אחד מהם טבע את הטיפוסי והאופייני לו, ועל זה נאמר, מה גדלו מעשיך הי'.

מאמר רביעי

גודל הכוכבים

"כאשר ביקשו בני ישראל מאהרון הכהן במעשה העגל במדבר 'עשה לנו אלהים אשר ילכו לפנינו', לא לשם ע"ז התכוונו, כי אם להיות שופט במקומו של משה. וכן משמע, מדקאמר 'כי זה משה האיש אשר העלנו ממצרים, לא ידענו מה היה לו'. ומה שאמר דוד 'וימירו את כבודם בתבנית שור', שהמירו (העם את) משה, שעשה להם הקב"ה כמה ניסים על ידו, והוא דכתיב 'וישתחו לו', לכבוד ה', ולא לשם ע"ז" (דעת זקנים מבעלי התוספות, פ' תשא). ובאמת, אף בכל הדורות מסמל מעשה העגל את ההתרחקות המעשית מן השם ומצוותיו, שהרי אין בר דעת בעולם אשר לא יודה בכח עליון השולט בבני אדם וביקום כלו, אלא שהאדם מחפש לו "איש הביניים" בינו לבין הקב"ה, ובזמנם זכו בני ישראל במדבר והיה זה משה רבינו ע"ה, ואחרי כן טעו במעשה העגל וגם חזרו בהם. גם בדור אנוש טעו ועשו מן הכוכבים את "המ-תווכים" האלה עד שטעו ועשו אותם ע"ז (הרמב"ם, הלכות עבודת כוכבים). גם לפני 300 שנה, כאשר החל המדע המודרני להתפתח, היו אנשי המדע ובראשם ניוטון, אנשים בעלי אמונה דתית עמוקה, וראו בכל חוקי הטבע מסביבם אך את רצונו והשגחת ה' יתברך. (מספרים על ניוטון שכתב במו ידיו בספר התנ"ך שלו, כי הקב"ה הוא "אלקי ישראל אדון כל האדונים"). העשייה המדעית בזמנם היתה חדורה באמונה דתית, אלא שלצערנו, עם חלוף הזמן, כמו בדור אנוש, שכחו כיום את סיבת הסיבות ועילת העילות, ובלשון הרמב"ם "ועשו צורתו כדי להשתחוות לו כל העם... והתחילו על דרך זו לעשות צורות בהיכלות ותחת האילנות ובראשי ההרים ועל הגבעות ומתקבצין ומש-תחיים להם... וכיון שהתארכו הימים נשתכח השם הנכבד מן כל היקום ומדעתם לא הכירוהו". ואמנם כיום אין "עגל" ואין ע"ז, אולם ישנה האלהה של דעת המדע, האדם יוצר במו ידיו וממציא את החשיבה

המדעית, ואחרי כן הוא משתחוה "לעגל" הזה שהוא המציא במו ידיו. העשייה המדעית שהיתה פעם חלק בלתי נפרד מהאמונה, הפכה להיות "אמת" בפני עצמה, מנותקת מן המקור שלה. וכאשר רואים איזה הצלחות פה ושם בשם המדע והטכנולוגיה, מכריזים מיד כמו פרעה במצרים "לי יאורי ואני עשיתיני".

עבודתו היום יומית של היהודי, היא להסיר מעליו את "העגלים" האלה הנופלים עליו חדשים לבקרים. כל הישג אנושי (ולא רק מדעי) יש בו תמיד הסכנה שיהפך להיות "עגל" שישתחו ויסגדו לו. וזוהי באמת הדרך הקשה, להפריד ולהכיר את מקומה האמיתי של כל תגלית, מחשבה או מעשה כך שישארו במסגרת האמונה העמוקה בה' ובהשגחתו. ואכן, בתחילת המאה העשרים נתגלה קשר או חוק מסוים באסטרונומיה שהוא בעל חשיבות גדולה מאד. הקשר הזה מתבטא בצורת דיאגרמה הנקראת בשם דיאגרמת HR או ה-ר. דיאגרמה זו היא בעלת עוצמה רבה מאד באסטרונומיה המודרנית, ולכן נתעכב עליה בפירוט רב. אמנם התיאור של דיאגרמה הזו נראה פשוט ואף תמים ביותר, אולם השימוש שאפשר לעשות בה מרחיק לכת מאד, ונוגע אפילו לבעיות של אמונה והשקפת עולם, כפי שעוד נראה במאמרינו הבאים.

במאמר האחרון ראינו כי כאשר מפצלים את האור של כוכב לצבעים בעזרת מנסרה (פריזמה) מקבלים ספקטרום (פס צבעים עם קוי בליעה בתוכם) שהוא כמעט תמיד אחד משבעת טיפוסים הספקטרה האפשריים שסימונם O, B, A, F, G, K, M. כך רוב הכוכבים ביקום שייכים לאחד משבעת הטיפוסים הספקטראליים האלה. (למשל, השמש שלנו היא כוכב מסוג G). ראינו גם כי הסדרה של הטיפוסים הספקטראליים היא בעצם סדרה של טמפרטורות, דהיינו אם כוכב הוא בעל טיפוס ספקטראלי מסוים, הרי אפשר מיד להסיק מה הטמפרטורה של שפתו.

השאלה הבאה היא האם יש קשר כל שהוא בין הטמפרטורה של כוכב לבין זוהרו. ואכן, ברור כי ככל שכוכב הוא חם יותר, כך הוא מקרין

אנרגיה בעוצמה רבה יותר לחלל סביבו. למשל, שפת השמש שלנו היא בטמפרטורה של כ־6000 מעלות חם, והיא מקרינה אנרגיה בסך מיליארד מיליארד מיליארד נורות חשמל של 100 וואט כל אחת. אם השמש היתה חמה יותר, היתה בודאי מקרינה אנרגיה בעוצמה רבה יותר.

אולם לא רק הטמפרטורה קובעת את הזוהר של הכוכב, אלא גם גודלו של הכוכב, שהרי אם פני השטח הכדורי של הכוכב הוא גדול יותר, אז כל שטחו הכללי יפלוט יותר קרינה. למה הדבר דומה, לשתי פלטות חש־מליות חמות: אם שתי הפלטות הן באותה טמפרטורה, אז כל שטח של סנטימטר ריבועי שלהן אמנם יפלוט אותה קרינה של חם, אולם אם פני השטח של פלטה אחת גדולים יותר מן השניה, הרי סך הכל אנרגית החם הנפלטת מפני השטח של כל פלטה הוא גדול יותר, כי פשוט, יותר סנטימטרים ריבועיים פולטים קרינה, אף כי כל אחד מהם נמצא באותה טמפרטורה בשתי הפלטות. (תמונה 1)

כאשר אנו צופים בכוכבים, אנו רואים אותם רק כנקודות זעירות. אין לנו אפשרות לראות ממש את גודלם כמו רדיוס השמש שלנו, מפאת מרחקם הרב. אם שני כוכבים הם בעלי אותו צבע, כלומר, אותה טמפרטורה, הרי אם האחד הוא זוהר יותר, סימן הוא שפני שטחו הם גדולים יותר, ולכן הוא מקרין אנרגיה בכמות גדולה יותר.

בשני כוכבים בעלי אותה טמפרטורה, כל סנטימטר ריבועי על פני שטחם הכדורי מקרין כמות אנרגיה שווה, אולם, אם זוהרו של כוכב אחד הוא פי מיליון מזוהרו של הכוכב השני, סימן הוא שפני שטחו גדולים יותר פי מיליון. (אפילו שאנו רואים כאן את שני הכוכבים כנקודות בלבד).

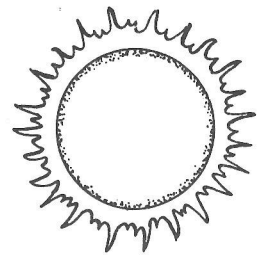
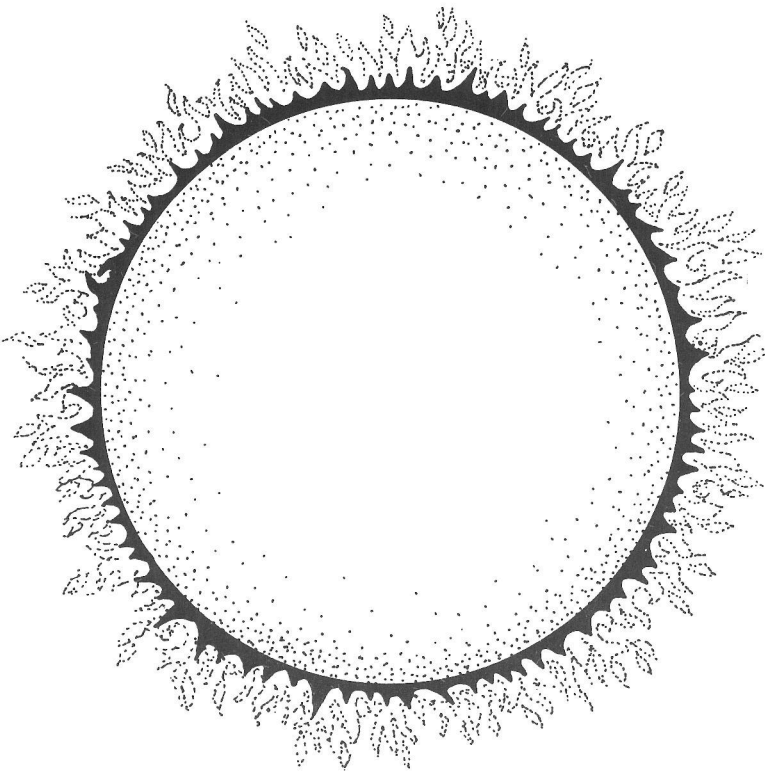
אולם, כיצד נמדוד בפועל את כמות האנרגיה שכוכב מקרין לחלל? לצורך זה אנו צריכים לדעת גם מהו מרחקו מאתנו, שהרי הבהירות שאנו רואים בפועל כאן על כדור הארץ אינה הבהירות האמיתית שלו, אלא מרחקו מאתנו מחליש את עוצמת אורו המגיעה אלינו. ברור כי אם נמדוד את הבהירות (החלשה) הנראית לנו בפועל כאן וכן נדע מהו המרחק אליו, נוכל לחשב מה היא כמות הקרינה (הבהירות) האמיתית שלו.

במאמר הראשון הראינו כיצד ניתן למדוד את המרחק אל הכוכבים

(הקרובים יחסית) בעזרת שיטת המשולש. ואכן, עבור כל אותם כוכבים שמדדנו את מרחקם בפועל, אנו יכולים לחשב את בהירותם האמיתית, כלומר כמה אנרגיה הם פולטים אל החלל. מדידות אסטרונומיות אלו נעשו כיום באלפי כוכבים. מתברר כי הבהירות של הכוכבים נעה בטווחים שונים מאד: ישנם כוכבים הפולטים אנרגיה בכמות שהיא גדולה פי מליון מזו של השמש, וכאלה שהם חלשים פי מאה מזו של השמש. עתה נשרטט

את דיאגרמת ה־ר שהזכרנו בתחילת המאמר (תמונה 2).

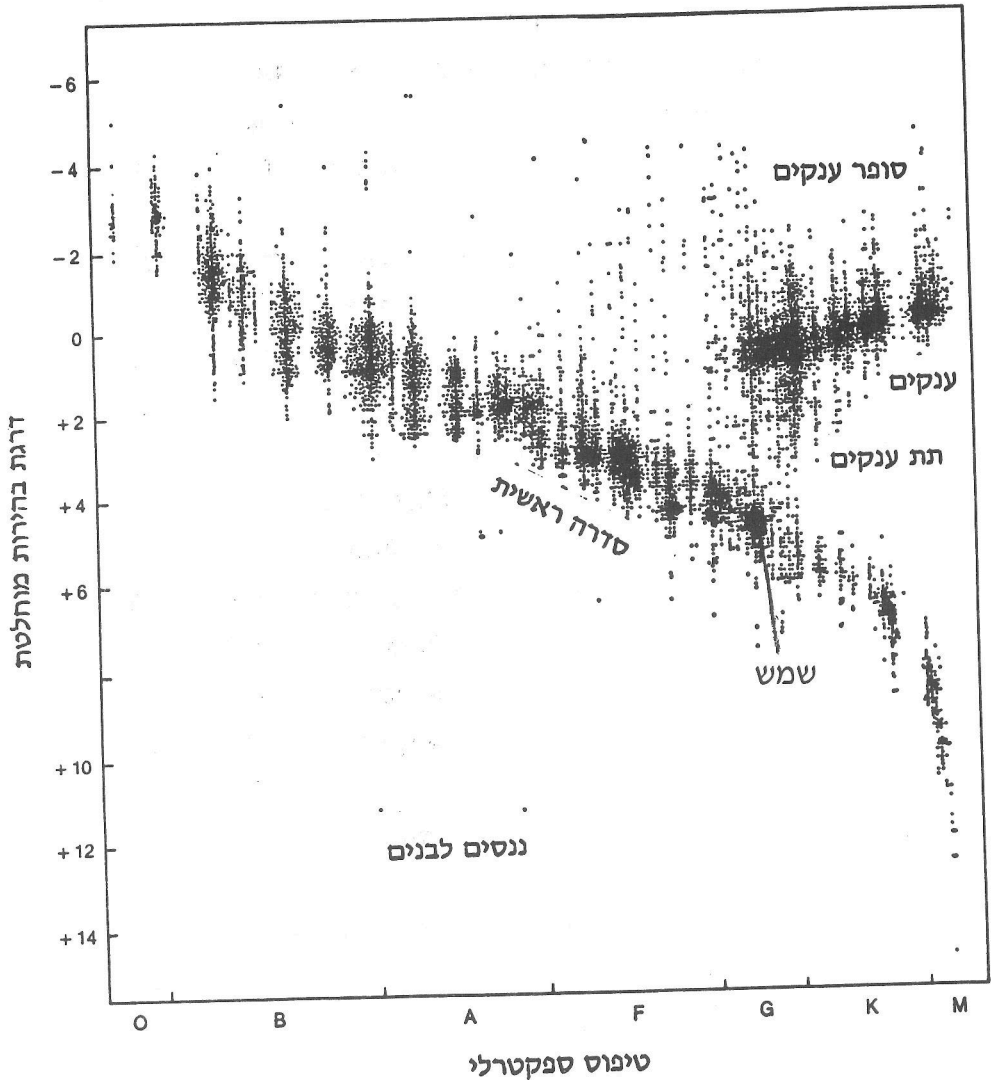
בדיאגרמה זו הציר האופקי הוא ציר הטמפרטורות (או הטיפוס הספקטי-רלי) והציר האנכי הוא ציר דרגות הבהירות המוחלטת. כיום נמדדו בפועל הטמפרטורות ודרגות הבהירות של אלפי כוכבים קרובים אלינו יחסית.



תמונה 1: כאשר שני הכוכבים הם בעלי אותה טמפרטורה, הכוכב הגדול יקרין

יותר אנרגיה לחלל בגלל פני שטחו הגדולים יותר.

נקודה בדיאגרמה זו מיצגת כוכב אחד אשר נמדדו עבורו בפועל הן ה-ט-מפרטורה והן דרגת הבהירות המחלטת שלו. יש לשים לב כי דיאגרמה זו אינה מראה את הפיזור של הכוכבים בחלל, אלא זוהי דיאגרמה של



תמונה 2: תיאור דיאגרמת ה-ר. הציר האנכי הוא דרגת הבהירות המחלטת של כוכבים, כלומר, דרגת הבהירות אם היו כלם עומדים במרחק סטנדרטי של 32 שנות אור. הציר האופקי הוא ציר הטיפוסים הספקטרליים (או הטמפרטורות).

תכונות של כוכבים. (נעיר גם כי סולם דרגות הבהירות המוחלטת הוסבר במאמר השני בסדרה זו)

בדיאגרמה זו מספר איפיונים חשובים:

1. הבולט ביותר ביניהם הוא העובדה שהכוכבים אינם ממלאים את פני הדיאגרמה במידה שווה, אלא במקומות מסוימים.
2. רוב הנקודות בדיאגרמה מצטופפות בקו אלכסוני בכיוון משמאל למעלה לימין למטה. קו זה נקרא בשם "הסדרה הראשית", כי רוב הכוכבים ביקום נמצאים על קו אלכסוני זה. השמש שלנו נמצאת מימין למרכז סדרה זו.
3. נסתכל בנקודות הנמצאות מעליה של הנקודה של השמש בדיאגרמה זו. כלומר אלו הן כל הנקודות שהן בעלות אותה טמפרטורה כמו השמש, דהיינו 6000 מעלות (או טיפוס G). אנו רואים כי ישנם כוכבים שבהירותם היא מעליה כלומר, אותם הכוכבים הם אמנם בעלי אותה טמפרטורה, אולם הם בהירים יותר מן השמש. בהתאם למה שהסברנו לעיל, המסקנה היא שהרדיוס של כוכבים אלה הוא גדול משל השמש.
4. ואכן, אנו רואים כי, למשל, מעל לסדרה הראשית ישנם כוכבים בהירים ב-8 דרגות יותר מהשמש אף כי יש להם אותה טמפרטורה. סימן הוא שלכוכבים אלה שטח פני כדור גדול מאד (כלומר רדיוס גדול מאד) ולכן קוראים להם בשם "ענקים" או אף "סופר ענקים". הרדיוסים של כוכבים סופר ענקים יכול להגיע אף ל-1000 רדיוסי שמש (רדיוס השמש הוא כ-600,000 ק"מ)
5. מתברר כי כל הכוכבים על פני הסדרה הראשית הם דומים ברדיוסם לזה של השמש.
6. מתחת לסדרה הראשית נמצאים כוכבים שהם קטנים יותר מן השמש. בפרט נמצאת קבוצה של כוכבים שהיא חמה יחסית (טמפ' של כ-10000 מעלות) ובכל זאת בהירותם חלשה ביותר. הסיבה לבהירות הנמוכה (על אף הטמפרטורה הגבוהה) היא שרדיוסם הוא קטן מאד, אף פי 100 מזה של השמש, ולכן הם נקראים בשם "ננסים".
7. כל הכוכבים הנמצאים מתחת לסדרה הראשית נקראים בשם "ננסים", כי, כאמור, הם בעלי רדיוסים הרבה יותר קטנים משל השמש. הננסים

הנמצאים בצד ימין של דיאגרמת ה-ר הם מטיפוסי M, כלומר צבעם הכללי הוא אדום, ולכן הם נקראים בשם "ננסים אדומים". לעומתם, הננסים הנמצאים מצד שמאל כלומר מטיפוסי A, הרי הם לבנים, ולכן הם נקראים בשם "ננסים לבנים".

בסיכום, דיאגרמה זו מחלקת את הכוכבים לארבעה סוגים עיקריים לפי גודלם: כוכבי הסדרה הראשית הקרובים בגודלם לשמש שלנו, ענקים, סופר ענקים, וננסים.

יש לשים לב כי מתוך ידיעת הטמפרטורה של הכוכב וכן דרגת בהירותו הגענו למסקנה כי הרדיוסים של הכוכבים חייבים להיות שונים זה מזה. (שים לב כי זוהי מסקנה ולא מדידה של הרדיוס של הכוכבים בפועל) קיימת נוסחה פיזיקלית פשוטה המאפשרת לחשב את הרדיוס של כוכב כאשר אנו יודעים את הטמפרטורה שלו והבהירות המוחלטת שלו (ממד-ידות). ראה טבלה בעמוד 46.

כל הכוכבים האלה נראים לנו כנקודות זעירות בשמי הלילה. אפילו הכוכבים הסופר ענקים כגון הכוכב אנטארס שרדיוסו לפי הטבלה לעיל הוא פי 560 מרדיוס השמש, גם הוא נראה לנו רק כנקודה זוהרת בשמי הלילה. ואכן, הסיבה לכך היא מרחקו הרב מאתנו (640 ש.א.). כזכור, רק כוכבי הלכת ניתן לראות ממש "כצלחות" בעלות רדיוס ברור. אולם כל שאר הכוכבים (שהם "שמשות" רחוקות) הם כלם נשארים נקודתיים אף בטלסקופים הגדולים ביותר כיום.

על אף זאת, ניסו האסטרונומים למדוד באופן ישיר את הרדיוסים הגדולים של הכוכבים הסופר ענקים, לשם כך השתמשו בשיטות מדידה פיזיקליות מתוחכמות ביותר (נושא זה נקרא אינטרפרומטריה), ואכן היו מספר הצלחות אשר תוצאותיהן התאימו בצורה מפליאה לרדיוסים המחושבים לעיל. למשל, התברר כי הכוכב אנטארס אמנם נראה לנו רק כנקודה זוהרת קטנה, אולם בשיטות המתוחכמות האלו אפשר להראות כי נקודה זו היא בעצם בעלת צורת דיסקית ממש עם זווית ראייה מזערית ביותר בת 0.04 שניות קשת! מידיעת המרחק אל הכוכב הזה חישבו את הרדיוס שלו והתברר שהוא פי 640 מרדיוס השמש. התבררה עוד עובדה מעניינת כי הכוכב בטלגוז שצוין לעיל הוא בעצם זוג כוכבים החגים זה

הטבלה הבאה מראה את הרדיוסים המחושבים בעזרת נוסחה זו וכן שאר התכונות של מספר כוכבים ידועים:

קרינת אנרגיה	רדיוס	טמפרטורה	טיפוס	מרחק	שם הכוכב
(פי כמה ביחס לשמש)	(ביחס לשמש)	(במעלות)	ספקטרלי	(בשנות אור)	
500,000	37	24800	B0	1600	E אוריון
90,000	74	11550	B8	880	ריגל
25	1.7	9970	A0	8.6	A סיריוס
130	14.1	5200	G	41	קפלה
120,000	1100	3250	M2	650	בטלגוז
0.06	0.007	30,000	נוס לבן	8.6	B סיריוס
50,000	640	3000	M	380	אנטארס

סביב זה שהמרחק ביניהם הוא פי 1100 מרדיוס השמש. כלומר הרדיוס שצוין לעיל בטבלה הוא בעצם המרחק בין שני בני הזוג ולא רדיוס של כוכב יחיד.

עתה נשאלת השאלה המעניינת הבאה: כיצד מתחלקים הכוכבים בין גודל-ליהם השונים? דהיינו, כמה כוכבים הם סופר ענקים או ננסים? כמובן שאי אפשר לענות על השאלה הזו באופן כללי לגבי כל היקום, אלא ניתן בודאי לברר זאת בתצפיות "בסביבתנו" הקרובה. ואכן, האסטרונומיים חקרו את רוב הכוכבים הנמצאים במרחק של כ-300 שנות אור מאתנו (ובכלל הכווננים), ומצאו כי רוב רובם של הכוכבים שייכים דוקא לננסים האדומים ומיעוטם ענקים או סופר-ענקים. נראה הדבר שכאשר ברא הקב"ה את העולם הוא יצר אותו מהרבה מאד "רסיסים" קטנים ומיעוטם "גושים" גדולים. "הרסיסים" הם הננסים האדומים "והגושים" הם הכוכבים הסופר-ענקים. וכך אנו רואים באמת גם על כדור הארץ, ישנם מעט מאד סלעים גדולים, אולם גרגירי חול יש "כחול אשר על שפת הים". כאמור, אלה הם הממצאים לגבי הכוכבים הנמצאים בתוך כדור שרדיוסו כ-300 שנות אור מסביבנו. במרחקים גדולים יותר לא נוכל לחקור מדגם שלם כזה של הכוכבים כי הננסים האדומים פשוט אינם נראים לנו כלל ולעומתם אנו רואים דוקא את הכוכבים הבהירים יותר, כלומר, המדגם של כוכבים רחוקים הוא סלקטיבי ונוטה לכוכבים הבהירים דוקא ולכן אינו מהימן. אולם, יש להניח כי ההתחלקות שמצאנו לגבי "סביבתנו" הקרובה היא מן הסתם נכונה באופן כללי גם במרחקים גדולים יותר (עד שנמצא עובדות הנוגדות הנחה זו).

הנה ראינו בעזרת דיאגרמה ה־ר כי הרדיוסים של הכוכבים יכולים להיות מאד שונים זה מזה, "מסופר ענקים" שהם פי אלף מרדיוס השמש, ועד "לננסים", שהם קטנים פי מאה מרדיוס השמש. עבורנו הצופים בעין רגילה, כל הכוכבים האלה נראים לנו רק כנקודות זוהרות וזהות זו לזו בגודלן בשמי הלילה. אולם הראינו כיצד בעזרת התבוננות מדוקדקת בספקטרה של הכוכבים וכן בעזרת שיקולים פשוטים של עוצמות קרינה ניתן לחשב את הרדיוס של הכוכבים אפילו שהם נראים לנו כנקודות בלבד.

זוהי גם עוצמתו של האדם שע"י חכמתו הוא יכול לתאר ולחשב דברים הנמצאים הרחק הרחק ממנו, כגון רדיוסים של כדורי כוכבים שהם נעל-מים ממנו לחלוטין. ועל זה כבר נאמר "ותחסרהו מעט מאלקים" (תהילים ט"ו), דהיינו שהאדם יכול להגיע לרמות גבוהות ביותר של חשיבה. והנה הישג אינטלקטואלי מרשים כזה יכול לסנוור את האדם, וגם להביאו למסקנה המוטעית כי הכל נתון בידיו, דהיינו שהוא שולט ויודע הכל, הוא יכול לחשב מרחקים, רדיוסים של כוכבים רחוקים, לשלוט בחוקי הטבע ולנבא מה יקרה לעולם וליקום כלו. לאט לאט הוא מתרגל להלכי רוח כאלה ואינו שם לב כי הוא כבר סוגד לעצמו וליכולתו, דהיינו, הוא עשה מעצמו ומהישיגיו "עגל" ומשתחוה להם.

אולם, אנו מאמינים בני מאמינים, עבורנו כל היקום, חוקיו ומשפטיו אינם אלא מעשה ה' לבדו ואנו יכולים לגלות רק חלק ממעשיו יתברך, מעט מזעיר, ואפילו אותו מעט המתגלה לנו דרך החקירה המדעית, הרי הוא רק מעיד על חכמתו ותבונתו האינסופית של הקב"ה, כי הכל הוא אך חלק ונגזר ממנו יתברך ככתוב "גדול אדוננו ורב כח, לתבונתו אין מספר". (תהילים קמ"ז).

מאמר חמישי

המרחקים אל הכוכבים (ב)

במסכת עבודה זרה כתוב (ח'): "ת"ר לפי שראה אדם הראשון יום שמתמעט והולך (בחודשי הסתו) אמר, אוי לי שסרחתי, עולם חשוך בעדי וחוזר לתהו ובוהו, וזו היא מיתה שנקנסה עלי מן השמים. עמד וישב ח' ימים בתענית ובתפילה. כיון שראה תקופת טבת (יום הקצר ביותר בשנה ואחריו הולכים ומתארכים הימים) וראה יום שמתארך והולך, אמר מנהגו של עולם הוא. הלך ועשה שמונה ימים טובים. לשנה האחרת עשאן אלו ואלו (שמונת ימי התענית ושמונת הימים שאחריהם) ימים טובים. הוא קבעם לשם שמים והם קבעום לשם עבודת כוכבים".

כלומר, כאשר נברא האדם הראשון היה זה בתחילת הסתו (למ"ד בתשרי ולא בניסן). הוא שם לב כי היום הולך ומתקצר והלילה הולך ומתארך. כיון שזה היה בשנה הראשונה לבריאה ועדיין לא ידע מנהגו של עולם, הוא חשב שאור היום הולך וכלה והחושך משתלט על העולם, וכי זהו עונש נוסף שהקב"ה הטיל עליו בגין החטא. אולם כאשר הגיע היום הקצר ביותר בראשית החורף, החלו הימים שוב להתארך והלילות להתקצר, ואז הוא הבין שזהו מנהגו של עולם ולכן עשה אותם ימים טובים. אולם, הגויים קבעום מאוחר יותר לשם עבודת כוכבים. (מענין לציין כאן כי בפירושו של רבינו חננאל בענין זה נפלו מספר "שיבושים" אשר דוקא רומזים על כוונת המשבשים וכך כתוב: "עכשיו (מחיקה) בתקופת טבת (מחיקה) וכיון שנולד, חזר השמש ונתארך היום". השי- מוש במלה "נולד" מרמזת אולי על כוונת השיבוש, דהיינו יום אידם עד היום. (25 בדצמבר).

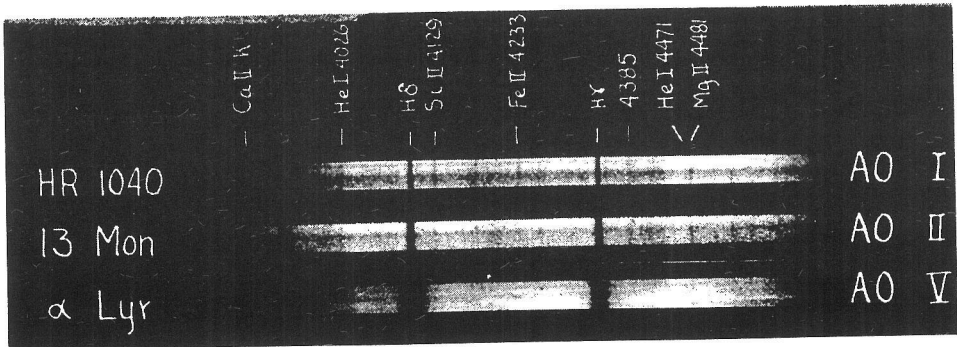
מלבד הענין הרב שיש בברייתא הנ"ל, הנה דוקא התצפית עצמה של האדם הראשון בדבר התקצרות היום והתארכותו לאחר מכן, גם היא יש בה ענין רב. כאשר מסתכלים בלוח של ימינו בזמני הזריחות והש-

קיעות של השמש סמוך ליום הקצר ביותר בשנה (בתקופת טבת, או 21 בדצמבר) רואים כי הימים הולכים ומתקצרים (ולאחר מכן מתארך- כיום) בדקה אחת לערך בכל יום. זהו מרווח זמן מזערי ביותר יחסית, ואדם מן הרחוב לא היה אפילו מבחין בזה מדי יום ביומו. אולם, אדם הראשון ידע להבחין מיד כי הימים החלו להתארך ומדי יום ביומו עשאו ימים טובים, כלומר, הוא הבחין אפילו בשינוי של דקה אחת ליום בלבד, ובודאי שזוהי אבחנה דקה ומיוחדת במינה, ודוקא הדיוק והאבחנה הדקה הזאת היא שהביאה למסקנה ולמשמעות אם לקיים יום תענית או יום טוב, אבל לאחר מכן התברר לו כי בעצם זהו מנהגו של עולם, וכי התהליך הזה הולך ומצטבר, ואין לזה קשר עם חטאו הראשון.

הנה המדרש הזה מראה כי ההסתכלות המדויקת בתופעות הטבע יכיר- לה להביא למסקנות חשובות ועמוקות. הפרש של דקה אחת ליום הוא אכן הפרש מזערי ביותר, אולם האבחנה בפרט קטן כזה יכולה להאיר ענין שלם. כלומר הסתכלות מדוקדקת בתופעות הטבע מביאה להבנה של עיקרי טבע חשובים. ההסתכלות בפרטים מסוימים יכולה להביא להבנה עמוקה ונכונה של דרכי ה' בהנהגת עולמו.

ואכן, כבר ראינו במאמרים קודמים, כי כאשר מסתכלים בצורה מדוקדקת בספקטרום של כוכב (פיצול האור שלו ע"י פריסמה) רואים לא רק את צבעי הקשת של אור הכוכב אלא ישנם קוי בליעה דקים מאד בתוכם. במאמר לקמן אנו נסתכל בצורה עוד יותר מדוקדקת במבנה עצמו של הקו הדק הזה בתוך הספקטרום, ואנו נראה כיצד גם כאן, ע"י אבחנות מדוקדקות ביותר, נוכל להגיע למסקנות בעלות חשיבות גדולה.

נסתכל בתמונה 1 המראה צילומים של שלושה ספקטרה של שלושה כוכבי- בים שונים, אשר כינוייהם HR 1040 (העליון בתמונה), MON 13 (האמצעי) ואלפא LYR (תחתון). כל פס כזה הוא פיצול האור של הכוכב בעזרת מנסרה (ראה מאמר קודם). אמנם הצילום כאן הוא בשחור לבן, אולם, צד ימין של כל פס הוא בצבע צהוב והצד השמאלי הוא בצבע כחול (ובאמצע - ירוק). בתוך הצבעים האלה רואים קוי בליעה מאונכים האופייניים ליסוד המימן. לשלושת הכוכבים בתמונה 1 אותם הצבעים



תמונה 1: שלושה ספקטרה של כוכבים שונים. לשלושתם אותו טיפוס ספקטרי A, אולם קוי הבליעה שונים בעוביים בכל ספקטרום. הספקטרום העליון הוא בעל קוים דקים יותר, והוא מעיד על כוכב סופר-ענק.

וכן אותם קוי הבליעה טיפוסיים לכוכב מטיפוס ספקטרי A דוקא. לכן, אפשר לאמר כי לשלושתם טמפרטורה זהה של כ-10000 מעלות. אולם, הסתכלות חדה בקוי הבליעה מראה כי קוי הבליעה של הכוכב HR 1040 (העליון) הם הרבה יותר דקים מן האחרים. מה יכולה להיות הסיבה לכך? (שהרי הטמפרטורה בשלושתם זהה!).

ובכן, מתברר כי לשלושת הכוכבים האלה בהירות שונה מאד זה מזה. הכוכב העליון בתמונה (HR 1040), הוא כוכב סופר - ענק, כלומר, גודלו הוא פי כמה מאות מרדיוס השמש שלנו. הכוכב האמצעי 13 MON הוא (רק) כוכב ענק, כלומר גודלו (רק) פי כמה עשרות מרדיוס השמש, והכוכב התחתון אלפא LYR - שייך לסדרה הראשית, כלומר, רדיוסו בערך כרדיוס השמש שלנו. התברר כי כל הכוכבים הידועים כסופר-ענקים אכן תמיד מראים קוי בליעה דקים ביותר ללא יוצא מן הכלל. מתברר גם כי אכן השערה זו נכונה, ואפשר להראות בעזרת חוקי הפיזיקה של גזים חמים מאד, כי אכן, כאשר קוי הבליעה הם דקים מאד, סימן הוא שהגז שם הוא דליל ביותר. הכוכב HR 1040 הוא דליל מאד בגלל גודלו הענקי, ומכאן העובי הדק של קוי הבליעה שלו.

כך יוצא כי מהסתכלות בספקטרום של כוכב, נוכל לדעת לא רק מהו הטיפוס הספקטרי שלו, אלא גם אם הוא ענק, סופר ענק, שייך לסדרה

הראשית או אפילו ננס: הסופר ענקים הם בעלי קוי בליעה דקים מאד והננסים הם בעלי קוי בליעה עבים ביותר.

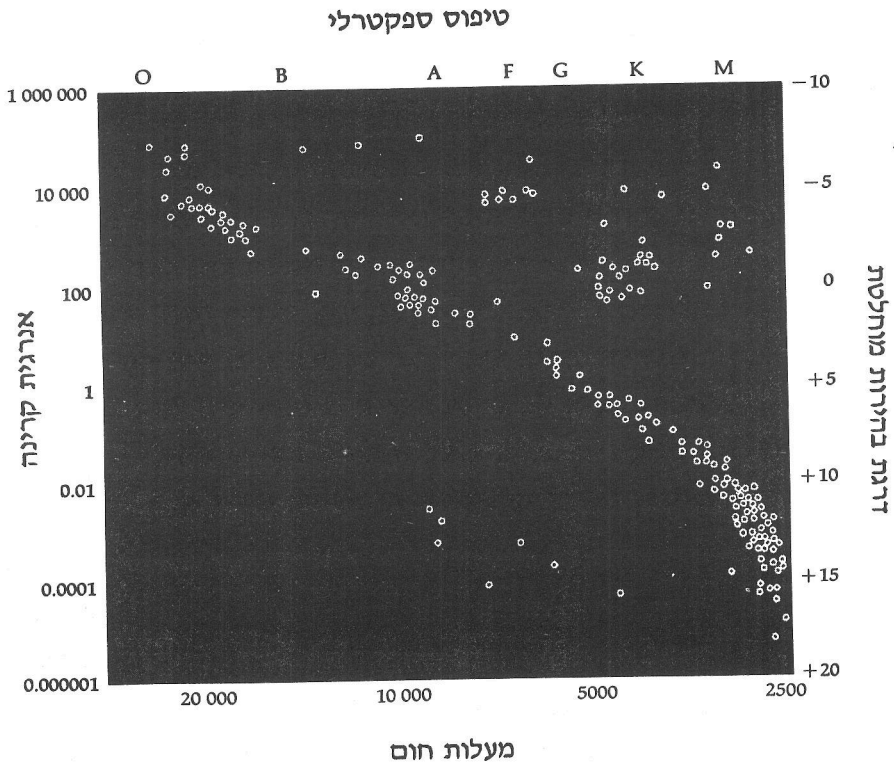
עתה נבאר כיצד פרט כל כך קטן כזה בקשר לעובי הקוים בספקטרום יכול להיות מכשיר רב עוצמה בכדי להעריך מרחקו הבלתי ידוע של כוכב. ובכן, הצעד הראשון הוא לקבל צילום של ספקטרום בעל איכות טובה של הכוכב. לשם כך משתמשים כיום בפריסמה קטנה יחסית המרכזת את פס הספקטרום של הכוכב על גבי מצלמה אלקטרונית משוכללת.

(כיום משתמשים במה שמכונה בשם "סריג אופטי" במקום בפריסמה). עתה בוחנים היטב את הספקטרום של הכוכב בצילום, (גם ע"י השוואה לכוכבים אחרים) וקובעים מהו הטיפוס הספקטרלי שלו. אף יותר מזה, כאמור לעיל, מתוך בחינת העובי של הקוים עצמם (שוב ע"י השוואה) אפשר לקבוע אם הכוכב הוא סופר ענק, ענק, על הסדרה הראשית או ננס.

אולם, צילום הספקטרום עדיין אינו מספיק בכדי להעריך את המרחק אל הכוכב הזה. יש למדוד במדויק גם את דרגת הבהירות הנראית של אותו כוכב, כלומר, מהו זוהרו הנראה לנו כאן בפועל. אולי לשם הדגמה נניח כי מצאנו שהטיפוס הספקטרלי של הכוכב הזה הוא מטיפוס M (כוכב אדום) וגם עובי הקוים שלו הם דקים והם מתאימים לכוכבים הסופר ענקים. נוסף לכך, מתברר כי מדידת דרגת הבהירות הנראית שלו היא +5.

עתה, ננסה למקם את הכוכב הזה בדיאגרמת ה־ר שהכרנו במאמר קודם. תמונה 2 מראה את דיאגרמת ה־ר עבור כ־200 כוכבים קרובים אשר נחקרו היטב. דהיינו, אנו יודעים את הטיפוס הספקטרלי שלהם, וכן אנו יודעים את דרגת בהירותם המוחלטת. דהיינו, מהי דרגת בהירותם אילו עמדו כלם במרחק סטנדרטי זהה של כשלושים ושתיים שנות אור (רק בדרך זו ניתן לשים את כלם בדיאגרמה אחת)

אמנם הכוכב שלנו הוא מטיפוס M, כלומר, הוא יופיע בדיאגרמת ה־ר שבתמונה 2 בקצה הימני של הדיאגרמה. כיון שמצאנו שהוא סופר-ענק, הוא היה צריך ליפול דוקא בצד הימני העליון, יחד עם כל הכוכבים הסופר-ענקים מסוגו (שהם כלם בעלי קוי בליעה דקים בספקטרה שלהם).



כלומר, אם היה במרחק של כ־32 שנות אור כמוהם, גם הוא היה צריך להיות בדרגת בהירות מוחלטת של -5 כמוהם (ראה סולם הבהירויות מצד ימין בדיאגרמה). אולם, כאמור, דרגת הבהירות הנראית שלו בפועל היא הרבה יותר חלשה והיא רק +5. כלומר, בגלל מרחקו מאתנו נחלש אורו וירד מ־5 ל־+5, כלומר, מרחקו הוא הגורם להחלשת אורו הנראה לנו בפועל ב־10 דרגות. כיצד נוכל עתה להעריך את מרחקו האמיתי, כאשר אנו יודעים כי אורו נחלש ב 10 דרגות בהירות בגלל מרחקו מאתנו?

כזכור ממאמר שני בספר זה (אור הכוכבים) הסברנו כי ירידה ב־10 דרגות בהירות פירושה ירידה של פי 10,000 בעוצמת אור הכוכב המגיע אלינו. כיצד נעריך את המרחק כאשר ירידת עוצמת האור היא פי 10,000?

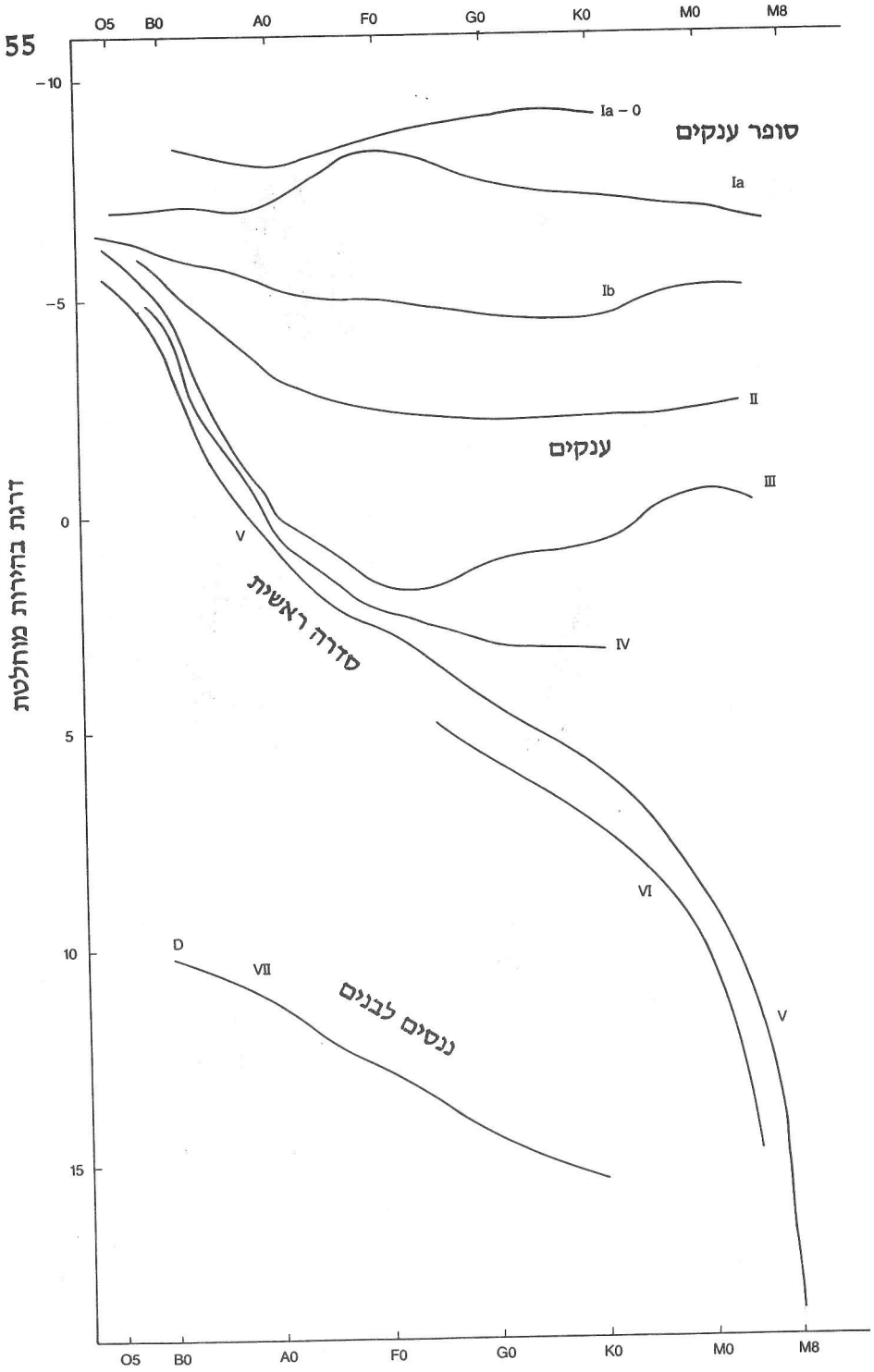
ידוע מתוקי הפיזיקה כי עוצמת האור יורדת עם ריבוע המרחק. כלומר, אם נגדיל את המרחק ממקור האור פי 2, נחלשת עוצמת האור פי 4. או אם נגדיל את המרחק פי 10, נחלשת עוצמת האור פי 100. או, בניסוח הפוך, אם עוצמת האור ירדה פי 100 סימן הוא שהמרחק גדל פי 10. במקרה שלנו, עוצמת האור ירדה פי 10.000 ולכן המרחק הוא גדול פי 100.

ביחס למה? ביחס למרחק של 32 שנות אור. שאם היה עומד שם הכוכב הזה הוא היה בדרגת בהירות מוחלטת של 5- כמו שאר הסופר-ענקים מסוגו, כמו בתמונה 2.

כלומר, מרחקו של הכוכב הוא 100X32, דהיינו 3200 שנות אור מאתנו, ובגלל זה דרגת הבהירות שלו המוחלטת של 5- (ככוכב סופר ענק העומד במרחק של 32 שנות אור) ירדה לדרגת בהירות של 5+. כך יוצא כי מתוך התבוננות מדוקדקת בספקטרום של כוכב וכן ע"י מדידת עוצמת אור הנראית לנו כאן בפועל, נוכל לתת הערכה למרחקו מאתנו.

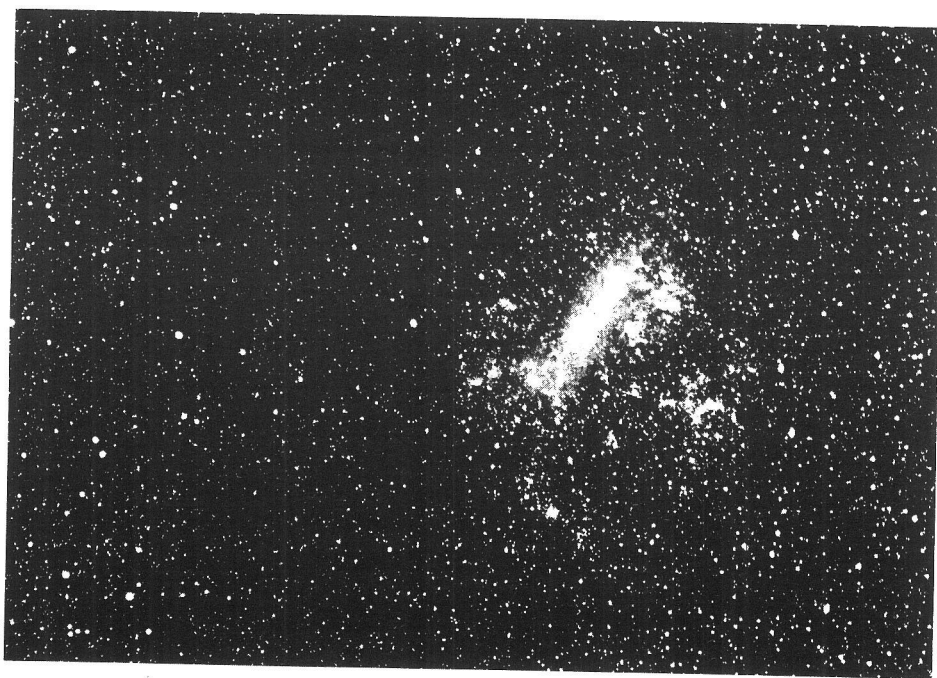
מפאת חשיבותה של דיאגרמת ה"ר הן להערכת מרחקים אל כוכבים והן לצרכים אחרים, היא הורחבה הרבה מעבר ל-200 הכוכבים אשר הובאו בדיאגרמה בתמונה 2. ואכן, תמונה 3 מראה את הסקיצה של דיאגרמה מורחבת כזאת המכילה אלפי כוכבים קרובים ורחוקים שנחקרו בצורה יסודית. הבולט ביותר בדיאגרמה מורחבת זו היא האבחנה הדקה יותר, למשל, בין הסופר-ענקים לתת קבוצות. כוכבים אלה חולקו לשלוש תת קבוצות של סופר-ענקים, אשר סימונם הוא IA IB או IA-0. דרגת הבהירות המוחלטת של IA היא בסביבת 5-, ולעומתה דרגת הבהירות המוחלטת של IA או IA-0 היא בין 7- לבין 10-. כל אחת מתת קבוצות אלו ניתן שוב להבחין ע"י עובי דק יותר של קווי הספקטרה (וכן מסימנים נוספים אחרים המופיעים בספקטרה).

כך הופכים הכוכבים הסופר-ענקים "למגדלי אור" של היקום, דהיינו, אלה הם הכוכבים הרחוקים ביותר שאפשר להבחין בהם במרחבי היקום, כי בהירותם העצמית היא הגדולה ביותר מבין הכוכבים ביקום בכלל. למשל, כאשר מסתכלים בגלכסיה הקרובה אלינו הנקראת בשם "העננים המגלאניים" (תמונה 4), רואים גם בה כוכבים סופר-ענקים. הבהירותם



טיפוס ספקטרלי

תמונה 3: דיאגרמת ה-ר המתבססת על מדידת תכונותיהם ומרחקיהם של אלפי כוכבים. הקווים המשורטטים הם סכימה של קווי בניינים ממוצעים של הרבה הרבה נקודות של כוכבים כמו בתמונה 2.



תמונה 4: גלכסית "העננים המגלאניים" היא בת לוייה לגלכסיית שביל החלב שלנו. הכוכבים הבהירים ביותר שם הם הסופר-ענקים.

ביותר שבהם סווגו בעזרת קוי הבליעה בספקטרה שלהם ונמצאו שייכים לתת קבוצה IA אשר דרגת בהירותם המוחלטת צריכה היתה להיות -8.5 (כוכבים אלה צבעם צהוב). אולם בפועל דרגת בהירותם הנראית לנו כאן היא $+10$, כלומר דרגת הבהירות ירדה ב 18.5 דרגות בגלל המרחק הרב מאתנו. אם נעריך את המרחק שלהם כפי שעשינו קודם, נקבל כי המרחק אל העננים המגלאניים הוא 160.000 שנות אור! עד כמה הערכת המרחק בדרך הזו היא מדויקת ומנין נובעים אי הדיוקים? ובכן, אי הדיוק העיקרי נובע מן ההנחה כי דרגת הבהירות המוחלטת של הכוכבים הסופר ענקים מסוג IA היא בדיוק -8.5 . האמת היא שדרגת בהירותם נעה בין -8 לבין -9 , והפרש כזה יכול לגרום לאי דיוק בתוצאה של 30.000 שנות אור ויותר. הנחה נוספת היא כי הכוכבים הסופר-ענקים מסוג IA בעננים המגלאניים הם זהים לכוכבים הסופר-ענקים IA בגלכסיה שלנו. אבל אם הרכבם

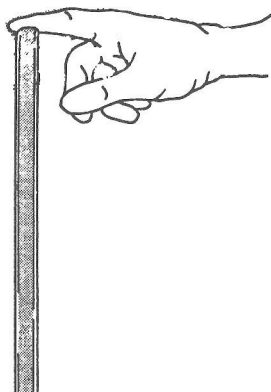
הכימי קצת שונה, יתכן ובהירותם המוחלטת משתנה בתחום בין 7.5- לבין 9.5 -, ואז המרחק שנקבל יהיה בלתי מדויק עוד יותר. לכן, השיטה שתיארנו לעיל היא הערכה גסה בלבד למרחקים אל כוכבים, ומשתמשים בה רק כהערכה ראשונית כאשר אין דרכים אחרות. בכל אופן, היא מהווה כלי רב עוצמה, כי אפילו לעננים המגלאניים, מרחקים בשיטה זו אינו יכול להיות פחות מ 100.000 שנות אור. (המרחק הידוע משיטות אחרות ומדויקות יותר הוא אכן 160.000 שנות אור כנ"ל).

הנה מתברר כי התבוננות מדוקדקת בעובי הקוים הספקטראליים יכולה להוות כלי רב עוצמה להערכת מרחקים אל כוכבים רחוקים ביותר ביקום. כפי שראינו לעיל, מרחקים אלה יכולים להגיע לעשרות ואף למאות אלפי שנות אור. אולם, כפי שהסברנו זאת כבר במאמרינו הקודמים, זמנים ארוכים כאלה אינם מהוים בעיה ביחס לבריאת העולם לפני ה'תשנ"ה שנה. כי הקב"ה ברא את עולמו בעשרה מאמרות אשר יצרו את כל היקום הגדול הזה מסופו ועד סופו, והוא יכול להיות בגודל של מאות, אלפים, מיליונים ואף מילארדי שנות אור. היקום שנברא לפני ה'תשנ"ה שנה מכיל את כל הכוכבים ואף את הקרינה המגיעה אלינו מהם כשהיתה בדרכה אלינו, (ראה צבא השמים חלק א' עמ' 96) והכל נעשה אך במאמרות אלו בלבד. "כי הוא אמר ויהי, הוא צווה ויעמוד".

מאמר שישי

תנועת הכוכבים

"ויעש אלקים את הרקיע ויבדל בין המים אשר מתחת לרקיע ובין המים אשר מעל לרקיע ויהי כן" (בראשית א', ז'). ועל זה פירש רש"י: "על הרקיע לא נאמר, אלא מעל לרקיע, לפי שהן תלויים באויר" דהיינו, המים העליונים אינם נסמכים על הרקיע, אלא הם מרחפים מעליו. על זה גם אמרו במסכת תענית (י'): "מים העליונים - במאמר הם תלויים". ועל זה גם פירש רש"י: "אינן נחות על שום דבר, אלא מכונסות ועומדות כמין בריכה, ותלויות במאמרו של הקב"ה". וגם בבראשית רבה בפרשה ד' (ד'): "כותי אחד שאל את רבי מאיר, אמר ליה אפשר המים העליונים תלויים במאמר? אמר לו: הן. אמר לו: הבא לי אפרכס (כלי עם נקבים למטה ולצדדים, ונקב אחד למעלה למלא בו מים). נתן עליה (כסה את הנקב העליון) טס של זהב, ולא עמדו מים (נזלו דרך הנקבים בתחתית). טס של כסף, ולא עמדו מים. כיון שנתן אצבעו (סתם באצבעו את הנקב העליון) עמדו מים. אמר לו: אצבעך את נותן (ראה תמונה 1). אמר לו: מה אני שאני בשר ודם אצבעי מעמדת מים, אצבעו של הקב"ה על אחת כמה וכמה. הוי מים העליונים תלויים במאמר".

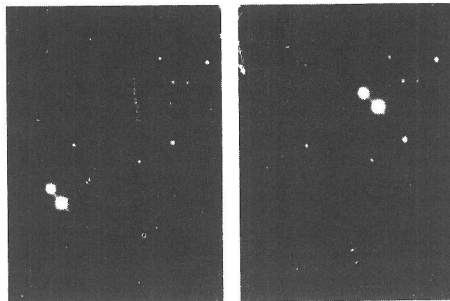


תמונה 1: סתימת הפתח העליון של הצנור גורמת לכך שהנוזל לא יזרום למטה בצד התחתון.

אם כי הדברים בודאי אינם כפשוטם, וכדברי הרמב"ן (שם) "זה מענין מעשה בראשית הוא, ואל תקוה ממני שאכתוב בו דבר, שהענין הוא מסתרי תורה, ואין הפסוקים צריכים לביאור בזה כי לא יאריך הכתוב בענינו, והפירוש אסור ליודעין וכל שכן אלינו". הנה בכל זאת ההדגמה של רבי מאיר לפני אותו כותי מסבירה לפחות את הקושיה כיצד באמת אפשר להחזיק מים שירחפו ושלא יפלו: מה אצבעו הקטנה של בן תמותה יכולה להחזיק את המים שלא יפלו מהצנור הנקוב, כך "אצבע אלקים" יכולה להחזיק את המים העליונים שיהיו מרחפים גם הם בחלל.

הבאנו את הענין הזה מפאת דמיונו הרב לקושיה אחרת הידועה לכל (ושאינה הלצה): כיצד זה הכוכבים שאנו רואים לילה לילה אינם נופלים עלינו? מהי במקרה זה וכיצד פועלת אותה "אצבע" אלקים המחזיקה אותם שלא יפלו? למרבה הפלא, האסטרונומיה המודרנית יכולה להצביע על אותה תופעה שהקב"ה ברא בעולמו ושהיא מונעת מן הכוכבים "ליפול עלינו". אנו נראה בהמשך כי הכוכבים נעים בלי הרף ובכל הכוונים בחלל הריק, ותנועה בלתי פוסקת זו שהקב"ה הפיח בכוכבים מששת ימי בראשית היא היא הגורמת לכך שלא יפלו זה על זה.

תמונה 2 מראה שני צילומים של הכוכב "ברבור 61" שצולמו בשנים 1916 ו-1948. כוכב זה הוא בעצם זוג כוכבים (כוכב "כפול") התחתון קצת יותר בהיר מן העליון. התבוננות בשני הצילומים מראה בבירור כי כוכב



תמונה 2: שני הכוכבים הבהירים בכל צילום הם הכוכב הכפול ברבור 61. הצילום השמאלי צולם בשנת 1916 והימני ב-1948. שני הכוכבים נעים ביחד בקצב של 5.22 שניות קשת בשנה. (ביחס לכוכבים ברקע).

(כפול) זה נע באלכסון כלפי הפינה הימנית העליונה והגיע לקבוצת כוכבים חלשה יותר הנמצאת באיזור זה של השמים. תנועה זו נראית לנו איטית מאד, ולכן דרושים שני צילומים בהפרש גדול מאד של זמן בכדי להבחין בבירור בשינוי מקום הכוכב. מעקב מדוקדק אחר מסלולו של כוכב זה בין שאר הכוכבים ברקע מראה כי הוא אינו מסתובב סביב השמש שלנו כמו כוכבי הלכת. יתר על כן, כאשר מסתכלים בספקטרום שלו (ראה מאמר שלישי בסדרה זו) רואים כי כוכב זה הוא "שמש" רחוקה בפני עצמה המאירה ומפיקה קרינה אל החלל סביב. (כידוע, כל כוכבי הלכת אין להם אור משל עצמם, אלא רק מחזירים את אור השמש).

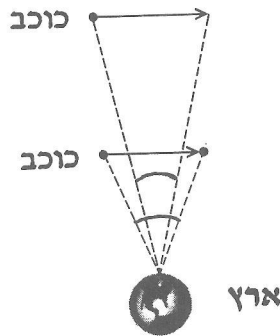
תמונה 3 מראה עוד כוכב המכונה בשם "כוכב ברנרד" המשנה את מקומו בין הכוכבים ברקע. קצב השינוי שלו גם הוא מזערי ביותר, ומגיע ל- 10.2 שניות קשת בשנה בלבד, אולם קל לראות כי אכן הוא שינה את מקומו בשני הצילומים. גם כוכב זה הוא שמש רחוקה בפני עצמה.



תמונה 3: הכוכב המסומן בחץ הוא "כוכב ברנרד". מן הצילומים רואים כי הוא עבר צפונה ומשמאל לכוכב שלידו. שני הצילומים נערכו בהפרש של כעשר שנים.

כזכור, הסברנו בספר הראשון (צבא השמים, חלק א') כי כל הכוכבים המאירים בשמים, פרט לכוכבי הלכת, הם בעצם "שמשות" רחוקות מאד מאתנו. קראו להם בשם "כוכבי שבת" כי עד להמצאת הטלסקופ והצילום לא ראו בעין רגילה את התנועה המזערית הזו שלהם. והנה, כפי שראינו בשני הצילומים לעיל, גם כוכבי השבת נעים בחלל בין הכוכבים האחרים בסביבתם, אלא שתנועה זו היא מזערית ביותר. אי לכך, ביחס לכוכבי הלכת הנעים בצורה ברורה אף בעין רגילה, אכן מוצדק לקרוא לאלה בשם "כוכבי שבת".

מתברר כי רק כמה עשרות כוכבי שבת מראים תנועה ברורה כזו (על רקע שאר הכוכבים) כמו שני הכוכבים לעיל ברבור 61 וכוכב ברנרד. הסיבה לכך היא ששני כוכבים אלה הם קרובים מאד אלינו יחסית. הכוכב ברבור 61 נמצא במרחק של כ-11 שנות אור, וכוכב ברנרד כ-8 שנות אור "בלבד". למשל אם שני כוכבים אלה היו במרחק גדול פי 10, היתה תנועתם נראית לנו קטנה פי 10, כלומר, כוכב ברנרד היה נראה לנו נע כשניית קשת אחת בשנה בלבד במקום כ-10 שניות קשת בשנה שציינו לעיל (תמונה 4).



תמונה 4: אם הכוכב הוא רחוק יותר, אנו נראה כי הזווית שהוא עובר בשנה אחת היא קטנה יותר.

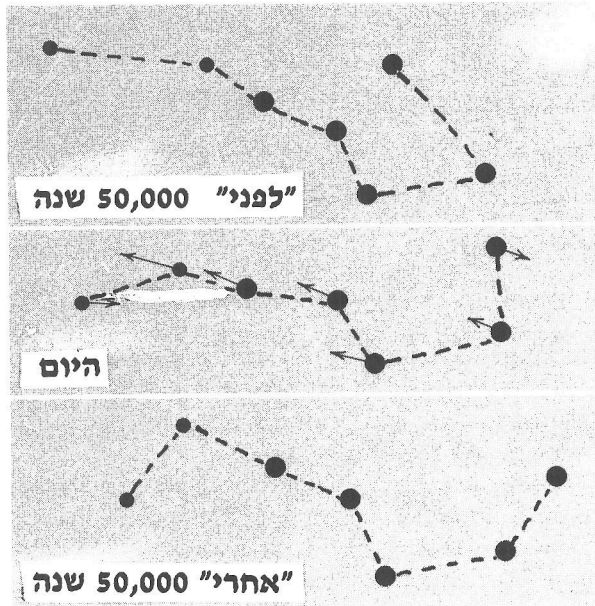
הטבלה הבאה מראה את תנועתם השנתית של מספר כוכבים קרובים אלינו ביותר וכן נתונים שונים על כוכבים אלה.

שם הכוכב	מרחק (ש.א.)	תנועה (שניות קשת בשנה)	תנועה רדיאלית (ק"מ בשניה)	טיפוס
כוכב ברנד	7.67	10.20	+13	M8
ברבור 61	11.16	5.22	-64	K5+K7
כוכב קפטיין	12.75	8.89	+245	MO
אלפא סנטאורי	4.89	3.68	-22	G2+KO
סיריוס	8.64	1.33	-8	ננס A1+

* אם הכוכב הוא כוכב כפול, הבאנו את הטיפוס הספקטרי של כל אחד מבני הזוג.

עד עתה ציינו את תנועת הכוכבים בשניות קשת בשנה. כלומר, מהי הזווית בשמים שהם עוברים במשך שנה אחת. אולם, אם אנו יודעים גם את המרחקים אל הכוכבים האלה (כגון אלה שבטבלה לעיל) נוכל לחשב את המהירות שלהם ממש. ואכן, מתברר כי חישוב פשוט מראה כי המהירות הטיפוסית של הכוכבים בחלל היא בדרך כלל בין 20 ל- 30 ק"מ בשניה. אם כי מהירות כזו היא אכן גדולה, בכל זאת, המרחקים בין הכוכבים הם עצומים ואין כמעט סיכוי שהכוכבים יתקרבו כל כך ויתנגשו זה בזה. אחת התוצאות המעניינות הנובעות מתנועת כוכבי השבת היא צורת המזל לות והקונסטלציות בשמים (ראה צבא השמים, חלק א'). כיון שכוכבי השבת נעים זה ביחס לזה, הרי הצורה של המזל המתקבלת מחיבור דמיוני של הכוכבים אינה נשמרת כל הזמן. למשל, תמונה 5 מראה כיצד משתנה צורת העגלה הגדולה במשך הזמן. כמובן שזהו חישוב תיאורטי הבא רק לחדד את ענין תנועת הכוכבים זה ביחס לזה.

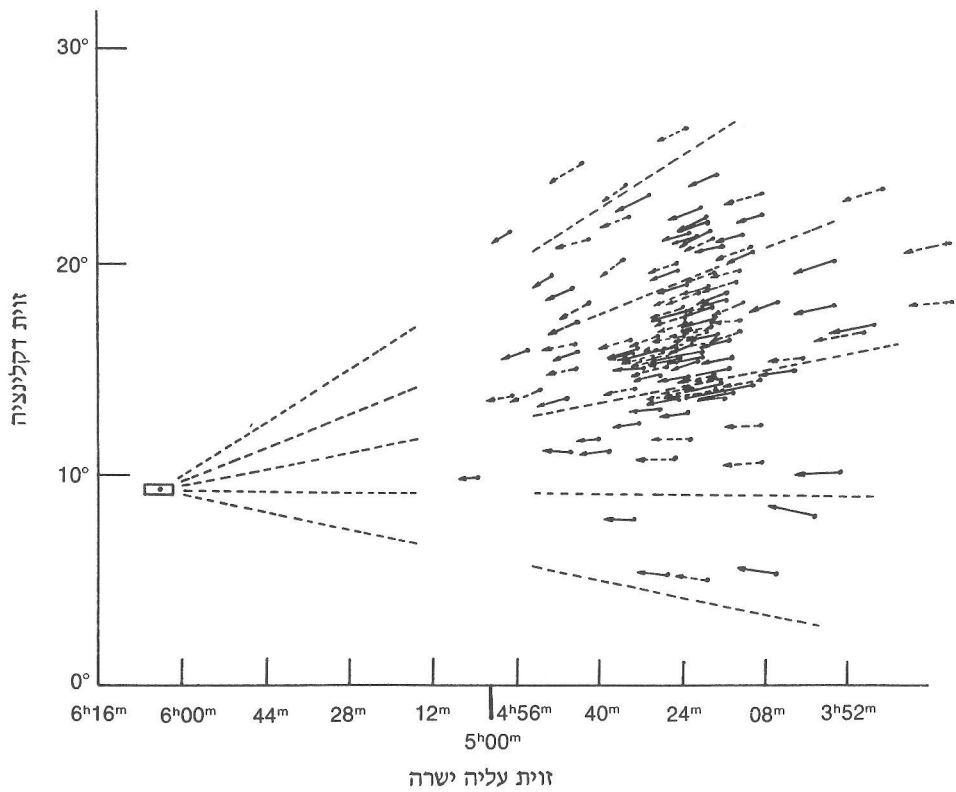
לפעמים רואים כי קבוצת כוכבים בשמים נעים לעבר נקודה אחת בחלל, כגון צביר הכוכבים המכונה בשם "כסיל" (HYADES). תמונה 6 מראה את המדידות בפועל של תנועת כוכבים אלה. ואכן, תנועת הכוכבים בצביר נראית כאילו הם כלם נעים בכיוון נקודה אחת בשמים. בכדי להסביר



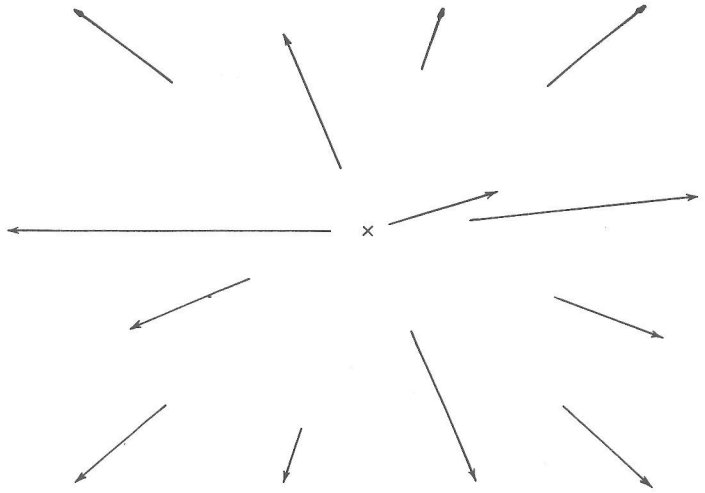
תמונה 5: חישוב תיאורטי המראה כיצד היתה יכולה להיראות צורת העגלה הגדולה לפני ואחרי "חמישים אלף שנה". התמונה המרכזית מראה את תנועת הכוכבים כפי שהיא נמדדת כיום. שים לב כי ישנם כוכבים בעגלה הגדולה הנעים בכוונים הפוכים זה לזה.

את התנועה הזאת נסתכל בתמונה 7. גם בתמונה זו רואים כאילו שני פסי הרכבת מתחברים בנקודה אחת אי שם באופק. האמת היא ששני פסי הרכבת הם תמיד מקבילים זה לזה וכוונם הכללי מראה בעצם את כוון נסיעת הרכבת. כך באותה מידה כל הכוכבים בצביר נעים כלם ביחד תנועה כללית מקבילה בכוון אחד, וכמו פסי הרכבת, גם הם נראים לנו כאילו הם מתחברים אי שם בנקודה אחת. האמת היא שהכוון של אותה נקודה בשמים הוא הכוון אליו נעים במקביל וביחד כל הכוכבים שבצביר. אנו עוד נראה כי יש חשיבות גדולה מאד לתנועת הצביר הזה בשמים, וכיצד משתמשים בו כאמת מידה ראשונית לקביעת מרחקים אחרים וגדלים מאד ביקום.

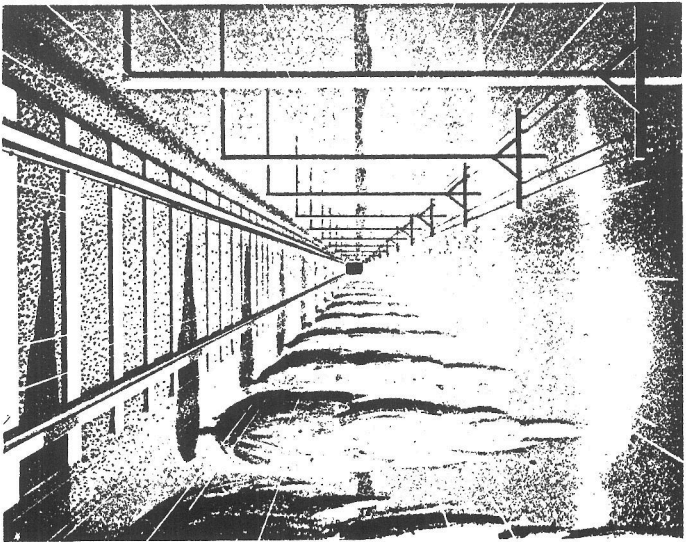
כאמור לעיל אנו נראה את התנועה של כוכב רק במידה והוא שינה את מקומו בין הכוכבים מתצלום לתצלום. אולם, אם תנועתו היא בדיוק



תמונה 6: כוון התנועה של הכוכבים בצביר "כסיל" (HYADES). אנו רואים כי תנועת כל הכוכבים בצביר כאילו מתכנסת לנקודה אחת במרחב. אולם האמת היא שכל הכוכבים נעים במקביל לאותו כוון כללי. (ראה תמונה 7).



ז'



ז

תמונה ז': (א) פסי המסילה נראים לנו במרחק כאילו הם נוגעים זה בזה, אולם זהו מראה מדומה. כוון הפסים המקבילים הוא הכוון הכללי של שני פסי הרכבת. (ב) באותה מידה יראו לנו כוכבים הנעים אלינו במקביל כאילו הם יוצאים מנקודה אחת בשמים.

בכוון קו הראיה שלנו אליו, הרי הוא ימשיך להתרחק מאתנו לאורך קו הראיה ולא נוכל לראות כלל שהוא שינה את מקומו ביחס לשאר הכוכבים (כי במרחקים גדולים כאלה אין לנו ראייה לעומק, תמונה 8א'. תנועה אורכית כזו לאורך קו הראיה יכולה גם להיות בכוון אלינו ולא נוכל להבחין בה כלל, כי גם בדרך זו לא נבחין בשינוי מקומו בין הכוכבים מתצלום לתצלום). לעומת התנועה האורכית הזו, הרי התנועה לרוחב קו הראיה תמיד תביא את הכוכב לרקע אחר של כוכבים כך שנוכל בקלות להבחין בה ולמודדה בפועל (תמונה 8ב'). המציאות היא שכוכב נע בדרך כלל בכוון אלכסוני ביחס לקו הראיה כך שתנועתו מורכבת חלקה מהתרחקות (או התקרבות) מאתנו, וחלקה מתנועה רוחבית בכוון ניצב לקו הראיה שלנו אליו (תמונה 8ג'). בסך הכל שתי התנועות של התרחקות ושל התנועה הרוחבית נותנות ביחד את תנועתו האלכסונית (כמו השקול במקבילית הכחות).

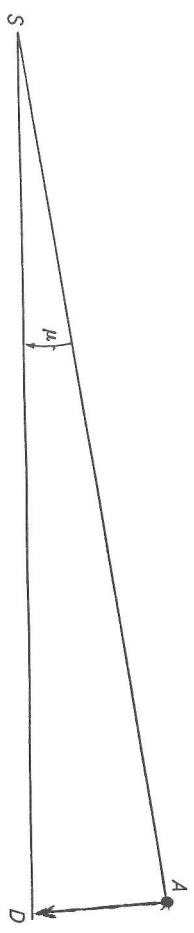
ברור כי עד עתה תיארונו לעיל (תמונות 2,3) את התנועה הרוחבית בלבד של הכוכבים, אשר אותה מדדנו ע"י גודל הזווית שהכוכב עובר בשנה אחת. אולם יתכן כי כל אחד מן הכוכבים האלה נע בעצם בכוון אלכסוני בחלל (תמונה 8ג'), כך שמה שמדדנו מתצלום לתצלום היה רק אותו חלק רוחבי בתנועתו האלכסונית ביחס אלינו. למשל, הזווית בת 10.2 שניות קשת בשנה של כוכב ברנרד אינה אלא החלק הרוחבי של תנועתו בלבד.

כיצד נמדוד את תנועתו האורכית של כוכב לאורך קו הראיה? ובכן, מדידה של המהירות האורכית, כלומר לאורך קו הראיה, מתבססת על תופעה ידועה מגלי הקול. נתאר זאת בפרוטרוט. כידוע, מכונית צופרת המתקרבת אלינו במהירות גדולה משנה את "הטון" של הצפירה ברגע שהיא חולפת על פנינו: כאשר היא מתקרבת אלינו-הטון של הצפירה הוא גבוה, וכאשר היא מתרחקת מאתנו - הטון של הצפירה יורד פתאום. (במושג "טון" אנו מתכוונים לגובה הצליל או תו מוסיקלי, ולא לעוצמה של הקול, ראה תמונה 9). אנו אומרים כי בגלל תנועתה של המכונית כלפינו היא משדרת צפירה בטון גבוה יותר, כלומר קול בגל קצר יותר מאשר אילו היתה עומדת. ולהפך, כאשר היא מתרחקת מאתנו גל הקול של הצפירה נשמע לנו בטון נמוך יותר, כלומר באורך גל ארוך יותר.

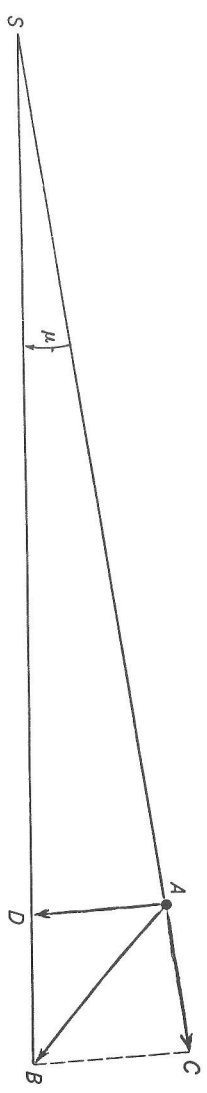


א'

אופל



ב'



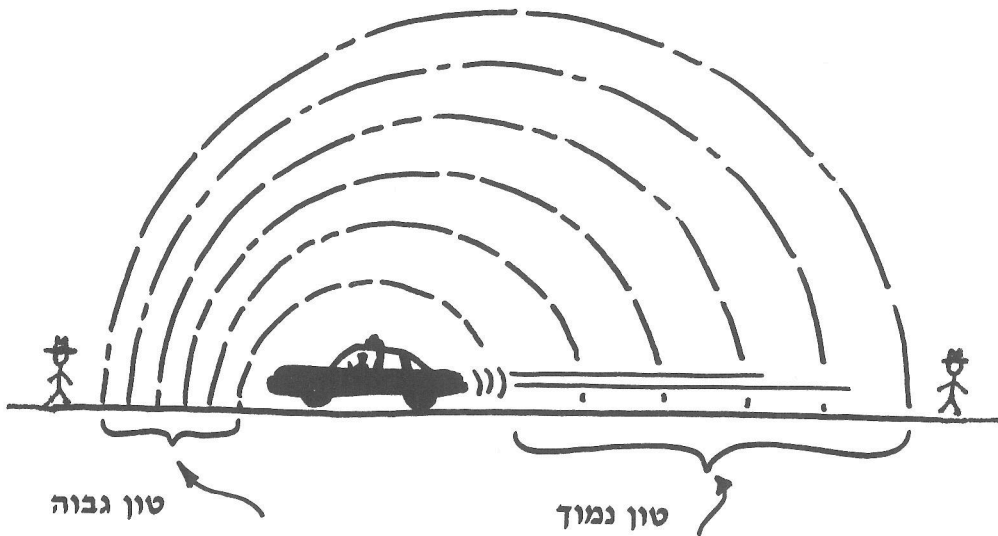
ג'

תמונה 8: א. הכוכב A הגע לאורך קו הראיה AC לא ישנה את מקומו בין הכוכבים כי אין אנו רואים את המרחק בין הכוכבים לעומק. אנו רגילים להשליך את דמויות הכוכבים כלם כאילו הם פרושים באותו מרחק מאתנו על יריעת השמים.

(ב. ג. בעמוד הבא)

ב. הכוכב A נע בניצב לקו הראיה ולכן אנו רואים כיצד הוא משנה את מקומו עד לנקודה D בין הכוכבים מתצלום לתצלום.

ג. אם הכוכב A נע באלכסון AB במרחב, אז ניתן לראות כאילו הוא נע בכיוון AC ובכיוון AD. שתי תנועות אלו מסתכמות ביחד לתנועה AB. (כמו שקול הכחות ע"י מקבילית).

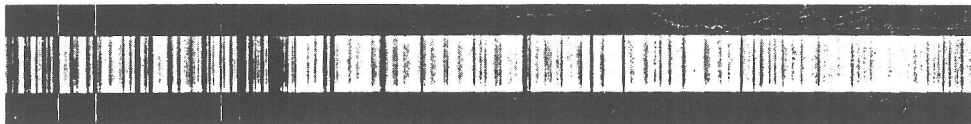


תמונה 9: כאשר מכונית צופרת מתקרבת אלינו, אנו שומעים שעוצמת הצפירה הולכת וגדלה. לאחר שהיא תחלוף על פנינו עוצמת הצפירה הנשמעת הולכת וקטנה. אולם, פרט לעוצמת הצפירה, מתברר כי גם הטון, דהיינו, התו המוסיקלי גם הוא משתנה: כאשר היא מתקרבת אנו שומעים טון גבוה יותר ממה שהיא צופרת באמת, וכאשר היא מתרחקת מאתנו אנו שומעים טון נמוך יותר. הנהג במכונית אינו מרגיש בהבדל כל שהוא.

כלומר אנו מפרשים את העליה או הירידה של הטון כשינוי באורך הגל של הקול. מתברר גם כי ככל שהמהירות של הגוף הצופר היא גדולה יותר, כך גם השינוי באורך הגל של הקול הוא גדול יותר. אף קיימת נוסחה פשוטה ביותר, המראה לנו את השינוי הזה באורך הגל ביחס לאדם השומע. לאפקט הזה בשינוי אורך הגל בגלל תנועת הצופר ביחס לשומע קוראים בשם "אפקט דופלר בקול".

אולם האפקט הזה של שינוי באורך הגל בגלל תנועת הגוף הצופר אינו בלעדי לתופעת הקול בלבד, אלא הוא נכון עבור כל תופעה גלית אחרת. הנה מתברר כי האור נחשב גם הוא לגל, וכל אחד מצבעי הקשת שאנו מכירים ניתן לאפיין ע"י אורך גל מסוים לכל צבע (תמונה 10). כך יוצא כי גם עבור צבעי האור יש לצפות לאפקט דופלר דומה. במצב מוגזם למשל, אם מכונית נעה ביחס אלינו במהירות גדולה מאד והיא "משדרת" באור גל ירוק (כלומר מאירה באור ירוק), הרי בגלל מהירותה ביחס אלינו, הצבע הירוק המקורי יראה לנו בצבע כחול אם המכונית מתקרבת (או צהוב אם המכונית מתרחקת). אולם על מנת שנוכל להבחין בשינוי צבע קיצוני כזה המכונית צריכה לנוע במהירות האור כמעט! כלומר, אפקט דופלר אמנם קיים גם בגלי אור, אולם השינויים בצבעים (באורך הגל של הצבע) הם מזעריים ביותר. זוהי הסיבה שמכונית הנעה על הכביש אינה משנה את צבעה ביחס אלינו אלא צבעה נשאר כפי שהיא, כי במהירות הארציות סביבנו לא ניכר אפקט דופלר בגלי האור.

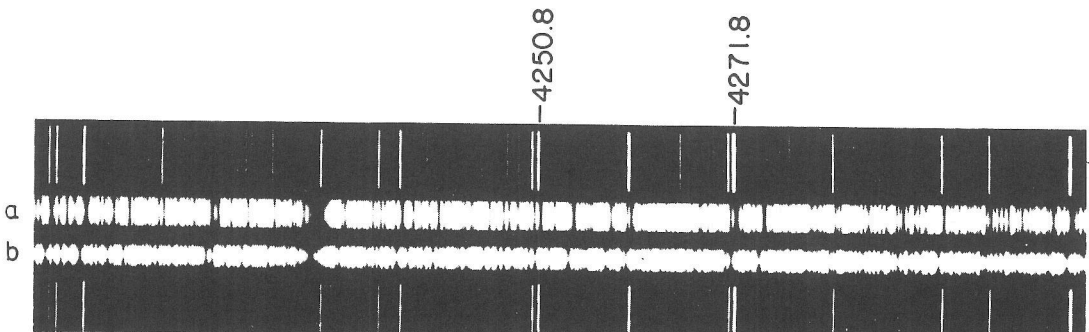
-4250



תמונה 10: זהו צילום של ספקטרום של כוכב, דהיינו הפיצול לצבעים של אור הכוכב. הצילום הוא אמנם בשחור-לבן, אולם במקורו הרי צד שמאל הוא כחול, במרכז ירוק וצהוב, ומימין הצבע האדום, כמו סדר צבעי הקשת. הקוים הדקים האפלים הם קווי בליעה ספקטרליים והם נמצאים באיזורי הצבעים השונים. כיון שהאור לצבעיו הוא תופעה גלית, הרי כל אחד מן הקוים הספקטרליים מאופיין ע"י אורך גל טיפוסי. (כך גם כל אחד מן הצבעים לגוני ולגוני גוניו, כל אחד מהם מאופיין ע"י אורך גל טיפוסי). למשל, הקו הספקטרילי המופיע באיזור הכחול השמאלי מאופיין ע"י אורך גל של 4250. יחידת האורך כאן היא מיוחדת ונקראת בשם "אנגסטרום" (החלק המאה מליונית של הסנטימטר). כלומר, גוון הצבע בו נמצא הקו הספקטרילי הזה מתאים לאורך גל של 4250 אנגסטרום (באיזור הצבע הכחול של צבעי הקשת).

אולם, כבר ראינו כי המהירויות של הכוכבים בחלל הן גדולות יחסית, ויש לצפות שאכן נראה שינויים באורכי הגל של הצבעים השונים שלהם בספקטרום, שהרי כל צבע פירושו אורך גל מסוים, ואם כוכב נע כלפינו או מתרחק מאתנו לאורך קו הראיה, יש לצפות שקו ספקטרי מסוים לא יופיע בדיוק בצבע הרגיל שלו (כחול או צהוב) אלא הוא יעמוד קצת בצבע אחר. מגודל התזוזה הזו של מקום הקו הספקטרי אנו יכולים לחשב את המהירות בה נע הכוכב ביחס אלינו בעזרת אותה הנוסחה שציינו קודם לגבי גלי הקול.

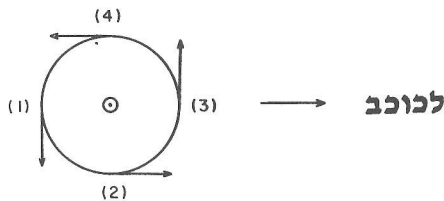
תמונה 11 מראה את ספקטרום הצבעים של אור המגיע מהכוכב בשם "ארקטורוס". התמונה מראה שני ספקטרה של צבעים של כוכב זה (A ו-B) שנלקחו בהפרש של שישה חודשים זה מזה. (הצבע הכחול הוא בצד שמאל של התמונה). הקוים הספקטריים מלמעלה ולמטה ל-B, A הם קוים ספקטריים של נורה זעירה ומלאכותית הנמצאת בטלסקופ ואשר ביחס אליהם מודדים את התזוזה של הקוים הספקטריים של הכוכב.



תמונה 11: שני ספקטרה של הכוכב ארקטורוס שנלקחו בהפרש של שישה חודשים. רואים בבירור כי הספקטרום B זז מעט מאד שמאלה ביחס לספקטרום A.

התבוננות חדה במיקום של הקוים הספקטריים בספקטרה B, A, מראה כי הקוים בספקטרום B נמצאים קצת שמאלה ביחס לקוים של הספקטרום A. התזוזה הזו היא מזערית ביותר והיא מגיעה לשני מילימטרים בלבד בצילום שבתמונה 11. מדידות מדויקות יותר של תזוזת הקוים הספקטריים וכן שימוש בנוסחה המקשרת בין השינוי באורך הגל והמ-

הירות, מראות כי בזמן שצולם הספקטרום A, התרחק הכוכב מאתנו במהירות של 18 ק"מ בשניה, ובזמן שצולם הספקטרום B התקרב הכוכב אלינו במהירות של 32 ק"מ בשניה, (מתברר כי לגבי הכוכב הספציפי ארקטורוס, הרי שתי המהירויות שנמדדו לעיל אינן משקפות את מהירותו ממש של כוכב זה בחלל, אלא את מהירותו של כדור הארץ סביב השמש. דהיינו, פעם התרחק כדור הארץ מארקטורוס, ולכן נמדדה מהירות בת 18 ק"מ בשניה, ופעם שניה נמדדה מהירות בת 32 ק"מ בשניה, והיא בגלל התקרבות כדור הארץ אל הכוכב (תמונה 12). הדוגמה של תנועת ארקטורוס מראה בבירור כי יש תמיד להביא בחשבון את מהירות כדור הארץ עצמו סביב השמש כאשר באים לחשב את המהירות של כוכב בחלל.



תמונה 12: כאשר כדור הארץ במצב (2) בסיבובו סביב השמש, הוא מתקרב אל הכוכב ארקטורוס. במצב (4) הוא מתרחק ממנו. בשני המצבים (1) (3) מהירות הכוכב היא אפס ביחס אל כדור הארץ.

ובכן, ראינו כי השימוש באפקט דופלר בצבעי הספקטרום של הכוכבים מאפשר לקבוע את מהירות ההתרחקות או ההתקרבות של גרם שמימי ביחס אלינו. אם גם נתקן מהירות זו ונפחית ממנה את המהירות של תנועת כדור הארץ סביב השמש, נוכל לקבל ממש את מהירותו בחלל. נוכל עתה להשתמש במדידת מהירות זו, שהיא המהירות האורכית שלו, יחד עם המהירות הרוחבית שאנו מודדים בפועל מתצלום לתצלום, ולקבל משתי מהירויות אלו את המהירות האלכסונית האמיתית של הכוכב בחלל. (תמונה 18').

זוהי הדרך בה מחשבים כיום את המהירויות של כוכבים בחלל. כיום נמדדו מהירויות של אלפי כוכבים, בפרט של אלה הקרובים אלינו יחסית (ראה טבלה לעיל, המהירות הרדיאלית היא המהירות האורכית שמצאנו בעזרת אפקט דופלר). מתברר כי המהירות הטיפוסית של כוכב היא כ-20-30 ק"מ בשניה. אולם ישנם גם כוכבים הרבה יותר מהירים, כמו כוכב "קפטיין" שהבאנו בטבלה לעיל: מהירותו האורכית בלבד מגיעה ל-245 ק"מ בשניה!

הנה הראנו כי הכוכבים ביקום נעים במהירויות שונות בחלל הריק, כמו בכוורת של דבורים כשכל דבורה נעה במהירות ובכוון אחר. תנועה זו של הכוכבים היא בלתי פוסקת מאז ששת ימי בראשית. בגלל מרחקים הרב של הכוכבים אין אנו רואים את התנועה הרוחשת הזו בכל עוזה. אולם, אם המהירויות היו הרבה יותר גדולות, נאמר פי 100,000, היינו רואים שמים עם כוכבים הנעים כלם בלי הרף ובכל הכוונים. תנועה זו שהפיח הקב"ה בכוכבים כלם היא היא הגורמת לכך שהכוכבים לא יפלו זה על זה מחמת משיכת הגרביטציה הפועלת ביניהם (ראה צבא השמים, חלק א'). שהרי ראינו כבר כי לא רק שעצמים רגילים על פני כדור הארץ נמשכים אליו בגלל כח הכבידה, אלא כל הכוכבים כלם מושכים זה את זה בכח כבידה דומה, כך שאלמלא תנועתם האקראית בחלל הם היו נמשכים זה לזה ונופלים זה על פני זה ללא הרף. התנועה האקראית הזו של הכוכבים מאזנת את כח המשיכה ביניהם ומשאירה את מערכת הכוכבים מאוזנת כפי שהיא נראית לנו בשמים מדי לילה. האיזון הנפלא הזה אולי ממחיש את הרעיון בתשובתו של רבי מאיר לאותו כותי (בתחילת המאמר) כיצד "אצבע" אלקים פועלת ביקום כך שהכוכבים לא יפלו זה על זה.

מאמר שביעי

זוגות כוכבים

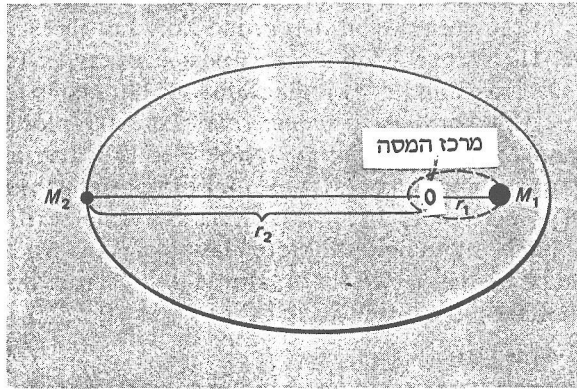
בגמרא (חולין ס:) כתוב: "רבי שמעון בן פזי רמי כתיב (בראשית א') ויעש אלקים את שני המאורות הגדולים' וכתיב 'את המאור הגדול ואת המאור הקטן' (כלומר, בתחילה עשה את שני המאורות שוים בגודלם, דהיינו, שניהם גדולים, ואחרי כן כתוב שהאחד הוא מאור גדול והשני מאור קטן. הכיצד? ומתרץ להלן ע"י המדרש) אמרה (הלבנה) לפני הקב"ה: רבש"ע, אפשר לשני מלכים (אני והשמש) שישתמשו בכתר אחד? אמר לה: לכי ומעטי עצמך (על שבקשה כביכול למשול לבדה). אמרה לפניו: רבש"ע, הואיל ואמרתי לפניך דבר הגון אמעיט את עצמי? אמר לה: לכי ומשול (משלי) ביום ובלילה (תוכלי להאיר גם ביום וגם בלילה, כפי שרואים בימים שאחרי אמצע החודש, שאפשר לראות את הלבנה גם ביום) אמרה ליה: מאי רבותיה? דשרגא בטיהרא מאי אהני? (מה התוסף לי? שהרי אני אז כמו נר המאיר בצהרים) אמר לה: זיל לימנו בך ישראל ימים ושנים. אמרה לה: יומא נמי אי אפשר דלא מנו ביה תקופותא, דכתיב 'והיו לאותות ולמועדים ולימים ולשנים' (אבל החמה אי אפשר שלא ימנו בה את התקופה, דהיינו תחילת ארבע עונות השנה, כך שאפילו אם אני מאירה ביום עדיין את התקופה קובעים לפי החמה שהיא נשארה להיות המאור הגדול למניית האותות והמועדים וכו' לבדה). זיל ליקרו צדיקי בשמך (שהצדיקים יקראו גם הם בשם "קטן" על שהם ממעטים עצמם בעוה"ז) יעקב הקטן, שמואל הקטן, דוד הקטן (שיעקב אבינו, שמואל הנביא וכן דוד המלך קראו לעצמם קטנים, דהיינו שהיו שפלי רוח) חזיה דלא מיתבא דעתה אמר הקב"ה: הביאו כפרה עלי שמעטתי את הירח, דהיינו, דאמר ר"ש בן לקיש: מה נשתנה שעיר של ראש חודש נאמר בו 'לה', אמר הקב"ה: שעיר זה יהא כפרה על שמיעטתי את הירח..."

(ראה הקב"ה שלא נתישבה דעתה של הלבנה, אמר לבני ישראל להביא עליו כפרה בכל ראש חודש על שמיעט את הלבנה, וזה מה שהעיר ר"ש בן לקיש, שהקרבן הזה הוא היחיד שמוזכר לקב"ה דוקא). עיקר המדרש לעיל מראה כי הקב"ה ברא בתחילה את השמש והירח "כזוג" כוכבים, ככתוב "ויעש אלקים את שני המאורות הגדולים", כלומר, שניהם נבראו "כשמשות", אלא שהלבנה קטרגה והקב"ה הקטין אותה ("לכי ומעטי עצמך") ולכן כתוב לאחר מכן שמאור אחד הוא גדול (לממשלת היום) והשני הוא מאור קטן (לממשלת הלילה). כיום הולכת ומתבררת העובדה המפליאה כי רוב הכוכבים ביקום גם הם בעצם זוגות. אמנם אנו רואים אותם כנקודות אור זעירות בלבד, אולם התבוננות מדוקדקת דרך הטלסקופ ובעזרת מיכשור מיוחד מראה כי כמעט כל נקודה זוהרת מורכבת משני כוכבים (ולפעמים יותר). גם הזוגות האלה מראים כי האחד מקיף את השני, בדיוק כמו כוכבי הלכת שלנו סביב השמש, אלא שזוגות כוכבים אלה הם ממש שמשות המאירות מעצמן המקיפות זו את זו. ישנם כוכבים קרובים שאפילו ללא עזרת מיכשור מיוחד ניתן לראות שהאחד מקיף את השני. תמונה 1 מראה את הכוכב שסימונו "קרורג 60". רואים בבירור כיצד "שמש" אחת מקיפה



תמונה 1: שלושה צילומים של הכוכב "קרורג 60" (משמאל בכל צילום) שצולמו בהפרש של כ-12 שנה. רואים בבירור כיצד הכוכב החלש מקיף את הכוכב הבהיר יותר. הזמן של הקפה אחת הוא כחמישים שנה. (רואים כי בהפרש של כ-12 שנה כיסה הכוכב כרבע מעגל).

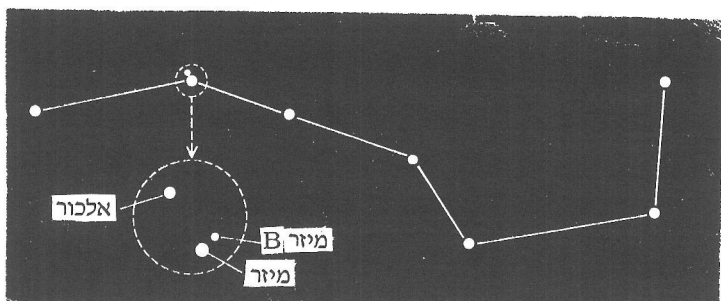
את השניה. גם הספקטרה של שני בני הזוג מראים כי אלה הם ממש שתי שמשות כל אחת בפני עצמה. שני בני הזוג הם מספיק רחוקים זה מזה על מנת שנוכל להפריד ביניהם בקלות. אולם לא תמיד הדבר כך. כפי שציינו קודם, רוב הכוכבים נראים לנו כנקודות אור זעירות. הסתכלות מדוקדקת יותר בתנועתם של בני הזוג מראה כי בעצם, לא רק כוכב אחד נע בסיבוב, אלא גם הכוכב השני נע סביב איזה נקודה דמיונית במרחב: זהו מרכז הכובד המשותף לשני הכוכבים (תמונה 2).



תמונה 2: מרכז הכובד המשותף של שני הכוכבים M_1 M_2 נמצא בנקודה 0. הכוכב M_1 מכיל יותר חומר ולכן מרכז הכובד 0 הוא קרוב אליו יותר. הכוכב M_1 נע באליפסה סביב הנקודה 0 במרחק R_1 . הכוכב M_2 נע באליפסה גדולה יותר במרחק R_2 סביב אותה נקודה 0. המונח "מרכז הכובד" אינו מתאים כאן, ובדרך כלל מדייקים יותר ומשתמשים במונח "מרכז המסה".

כלומר, כל אחד מבני הזוג נע סביב מרכז הכובד המשותף שלהם. ברור כי אם כוכב אחד מכיל יותר חומר הרי שמרכז הכובד יהיה קרוב אליו יותר. דהיינו, מרחקו ממרכז הכובד יהיה קצר יותר, ולכן הוא יסתובב באליפסה קטנה יותר סביב מרכז הכובד. הכוכב הקטן יהיה במרחק גדול יותר ממרכז הכובד ולכן הוא יקיף אותו ממרחק גדול יותר. גם במערכת השמש ניכרת התופעה הזאת, דהיינו, כוכבי הלכת מקיפים את השמש באליפסות גדולות סביב מרכז הכובד של כל מערכת השמש,

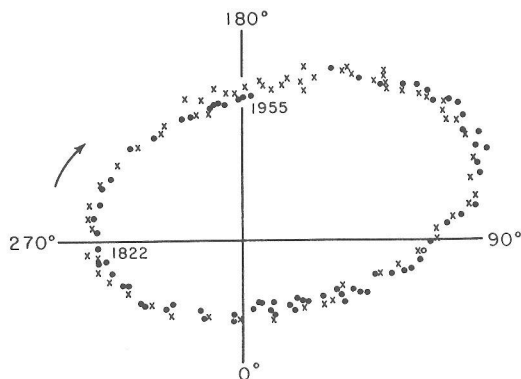
וגם השמש עצמה מקיפה את מרכז הכובד המשותף בסיבוב קטן מאד, כי היא הגוף המסיבי ביותר במערכת. מתברר כי מרכז הכובד של כל מערכת השמש נמצא במרחק של מספר קילומטרים בלבד ממרכז השמש עצמה (כלומר עדיין בתוכה, כי רדיוסה הוא כ-600.000 קילומטר!). דוגמה אחרת וידועה של כוכב "כפול" הוא שני הכוכבים המכונים בשם "מיזר A" ו"מיזר B" השייכים שניהם לעגלה הגדולה (תמונה 3). הכוכב



תמונה 3: אחד מכוכבי העגלה הגדולה נקרא "מיזר". זהו הכוכב הבהיר שבין שני הכוכבים הנמצאים בעגול הקטן המקוקו. הכוכב השני שבעגול נקרא בשם "אלכור". כאשר מסתכלים בעיון בטלסקופ רואים כי הכוכב מיזר מורכב בעצם משני כוכבים המקיפים זה את זה אחת לשישים שנה (ראה עגול גדול מקוקו).

"מיזר B" מקיף את הכוכב "מיזר A" במחזור של כ-60 שנה. תמונה 4 מראה את המסלול שעושה הכוכב "מיזר B" סביב "מיזר A". המדידות נעשו במשך שנים רבות, משנת 1822 עד שנת 1955, כך ששני מחזורי הקפות כוסו בצורה מלאה. רואים בבירור כי מסלול ההקפה בתמונה 4 הוא אליפסה, וזה שוב מאשר את החוק הראשון של קפלר (צבא השמים, חלק א'), דהיינו, שכוכב המקיף כוכב אחר נע במסלול אליפטי (ולאו דוקא במעגל). אולם, כאמור לעיל "מיזר B" אינו מקיף בדיוק את "מיזר A", אלא הוא מקיף את מרכז הכובד המשותף של שניהם (תמונה 2), וגם "מיזר A" בעצמו מקיף את מרכז הכובד המשותף הזה, אלא במרחק קטן יותר.

בשתי הדוגמאות של כוכבים "כפולים" שהבאנו, דהיינו "קרורג 60,



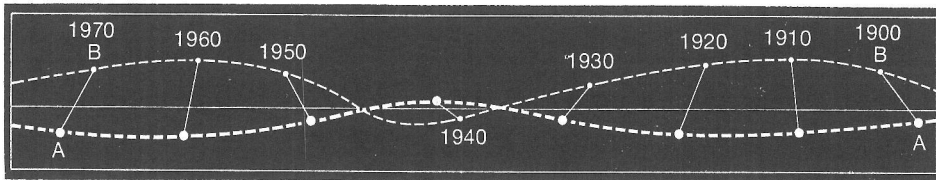
תמונה 4: המסלול של הכוכב "מיזר B" במשך 128 שנים. הוא נע באליפסה סביב מרכז הכובד שלו ושל "מיזר A".

ומיזר", אפשר לראות את שני בני הזוג ממש בעין רגילה דרך הטלסקופ. ישנן רק דוגמאות מעטות כאלו. אולם, בעזרת צילום ניתן לגלות אלפי כוכבים שהם בעצם זוגות. האסטרונומים מגלים זאת ע"י סדרת צילומים של אותם הכוכבים בהפרשי זמן, ואז ניתן לראות כיצד משנה כוכב אחד את מקומו מצילום לצילום מסביב לבן זוגו (כמו בתמונה 1, למשל). בדרך כלל עוצמת אורו של הכוכב המקיף היא חלשה יחסית, ולכן דרוש צילום ארוך בכדי לגלותו. לכוכבים אשר בהם ניתן לראות את שני בני הזוג (בצילום רגיל) אנו קוראים בשם "זוגות נראים".

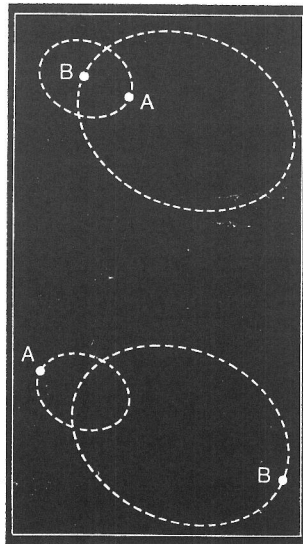
(אולי כאן המקום להעיר כי אם רואים בשמים, או אפילו בצילום, שני כוכבים סמוכים מאד זה לזה, אין פירוש הדבר עדיין שהם מהווים "זוג כוכבים". פשוט, יתכן ששני הכוכבים האלה הם סמוכים זה לזה בקו הראיה שלנו בלבד, והאמת היא ששניהם נמצאים במרחק גדול מאד זה מזה לעומק. בכדי לאשר שזוג כוכבים אכן קשורים זה לזה ומהווים מערכת אחת יש לערוך צילומים רבים ולעקוב אחר המסלולים שלהם עד שרואים בבירור כי, אכן, לפחות אחד מבני הזוג נע בקשת. אם אין מוצאים תנועה כזאת, סימן הוא ששני הכוכבים נמצאים במקרה באותו קו ראייה שלנו, והם נקראים אז בשם "זוגות אופטיים").

ישנן גם דרכים עקיפות בכדי לגלות את "בן הזוג" הבלתי נראה, במידה והוא קיים. להלן נראה מספר שיטות כאלו.

עוד בשנת 1844 התברר כי הכוכב הבהיר ביותר בשמים (כוכב השבת) המכונה בשם "סיריוס" אינו נע בקו ישר בשמים. ראינו במאמר הקודם כי הכוכבים נעים במהירות משלהם בחלל. בדרך כלל, לפי חוק ההתמדה הידוע, כוכב ימשיך לנוע בקו ישר כל זמן שאין כח אחר המשנה את כוון תנועתו. והנה המדידות הראו כי הכוכב "סיריוס" נע בתנועה גלית קטנה מאד בשמים החוזרת על עצמה בכל 50 שנה. (תמונה 5). משמע שיש כח



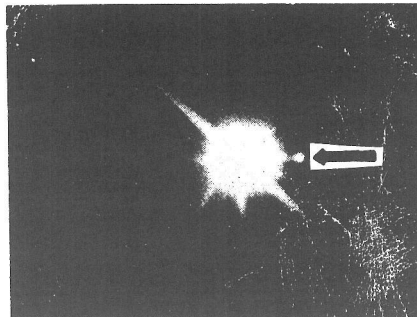
תמונה 5 א': הקו המקוקו העבה הוא המסלול הגלי הנראה של סיריוס. הקו המקוקו הדק יותר הוא המסלול של בן זוגו (סיריוס B). הקו המלא הישר מייצג את תנועת מרכז הכובד המשותף של שני הכוכבים סיריוס A וסיריוס B. שים לב כי המסלול הגלי של סיריוס A הוא קרוב יותר אל קו התנועה של מרכז הכובד כי הוא הכבד יותר מבין שני בני הזוג.



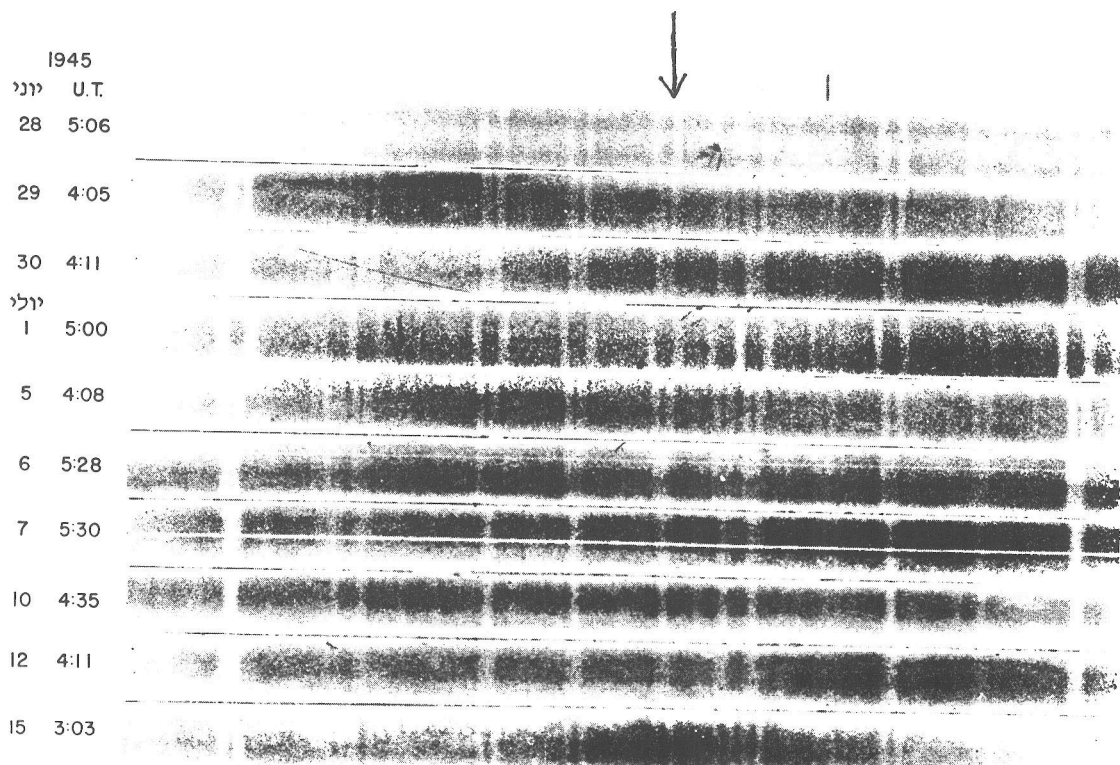
תמונה 5 ב': תנועת שני הכוכבים סיריוס A וסיריוס B סביב מרכז הכובד המשותף: כל כוכב נע באליפסה סביבו. הכוכב סיריוס B נע באליפסה רחוקה יותר כי הוא מכיל פחות מסה מסיריוס A.

חיצוני קבוע הגורם לתנועה הגלית הזו עם מחזור כזה. בתחילה שיערו שלכוכב "סיריוס" יש בן זוג חלש מאד המושך אליו את סיריוס ממסלולו ושאי אפשר לראותו, דהיינו שהמסלול הגלי בעצם מורכב משתי תנועות: האחת תנועה בקו ישר, והשניה היא סיבוב אליפטי קטן מאד סביב מרכז הכובד המשותף לו ולבן הזוג הבלתי נראה; וכאשר סיריוס משתתף בשתי התנועות האלו ביחד, אנו נראה בסך הכל תנועה גלית. ואכן כשמונה עשרה שנה מאוחר יותר התגלה בן הזוג של סיריוס. אולם הוא אינו כוכב חלש כל כך, אלא שבגלל זוהרו החזק של סיריוס עצמו, היה קשה לראות את בן זוגו החלש יותר.

לזוגות כוכבים המתגלים דרך התנועה הגלית שלהם (אף אם אין רואים את בן הזוג כלל, אף בצילום) קוראים בשם זוגות "אסטרומטריים". שיטה עקיפה אחרת לגלות כוכבים כפולים היא דרך התבוננות מדוקדקת בספקטרום שלהם (מאמר 3 בסדרה זו). תמונה 7 מראה סדרה של ספקטרה של כוכב הנמצא בעגלה הגדולה ומסומן באות היוונית "זיטא". נתבונן במיוחד בשני הספקטרה של כוכב זה שצולמו בתאריכים 6, ו-7 ביולי. רואים בבירור כי כל אחד מהקווים הספקטראליים שבצילום 7 ביולי הם שני קווים ספקטראליים שונים בצילום 6 ביולי. בתאריך 1 ביולי נראים הקווים בפיצול הגדול ביותר שלהם.



תמונה 6: צילום ישיר של הכוכב סיריוס ובן זוגו החלש יותר (מימין) הניצוצות מסביב לכוכב החזק נובעים מתהליך הצילום עצמו. (גם נצנוצי הכוכבים בלילה הם תוצאה של מערבולת אוויר קטנות באטמוספירה שלנו ואינן נובעות מן הכוכב).



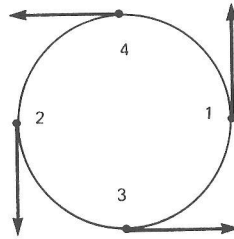
תמונה 7: הספקטרום של הכוכב זיתא בעגלה הגדולה שצולם בתאריכים שונים. התבונן בקו הספקטרלי המסומן בחץ. קו זה בעצמו מורכב משני קוים המשנים את המרחק ביניהם בצורה מחזורית מתאריך לתאריך. ביום 7 ביולי הם מתאחדים לגמרי לקו ספקטרלי יחיד.

אם נתחיל מהספקטרום העליון ביותר שצולם ב-28 ביוני, ונתבונן בצורה מסודרת בספקטרה כלפי מטה, נראה כי הפיצול של הקוים הספקטראליים הולך וקטן. הוא נעשה קטן ביותר ב-30 ביוני, לאחר מכן שוב נעשה גדול ביותר ב-1 ביולי. אחרי כן מתאחדים לגמרי הקוים ב-7 ביולי ואחרי כן שוב מתפצלים.

אנו רואים כי לספקטרום של כוכב זיתא בעגלה גדולה יש שתי תכונות:
 א. הספקטרום מורכב משני ספקטרה שונים המורכבים זה על גבי זה.
 ב. קוי הספקטרה עצמם אינם עומדים במקומם אלא זזים במחזוריות הלוך ושוב ימינה ושמאלה לאורך הספקטרום.

התכונה הראשונה פשוט מראה כי הכוכב זיתא בעגלה גדולה מורכב מזוג כוכבים ולא כוכב יחיד, כי אנו רואים בבירור שני ספקטרה המורכבים זה על גבי זה. (אפילו שבצילומים ישירים של הכוכב רואים רק נקודה זוהרת אחת!).

התכונה השניה מראה כי שני בני הזוג מתקרבים ומתרחקים מאתנו לסירוגין, כי כזכור, מאפקט דופלר (מאמר שישי בסדרה זו) כאשר קו ספקטרי אינו נמצא בדיוק במקום שהיה צריך להיות, אז מידת הסטיה מעידה על מהירות הכוכב ביחס אלינו. יתרה מזו, אם תזוזתו היא שמאלה לעבר הצבע הכחול בספקטרום, פירושו הוא שהכוכב מתקרב אלינו דוקא, ואם הוא אז ימינה לעבר הצבע האדום בספקטרום פירושו הוא שהכוכב מתרחק מאתנו. תמונה 8 מראה כיצד ניתן לפרש בצורה פשוטה את



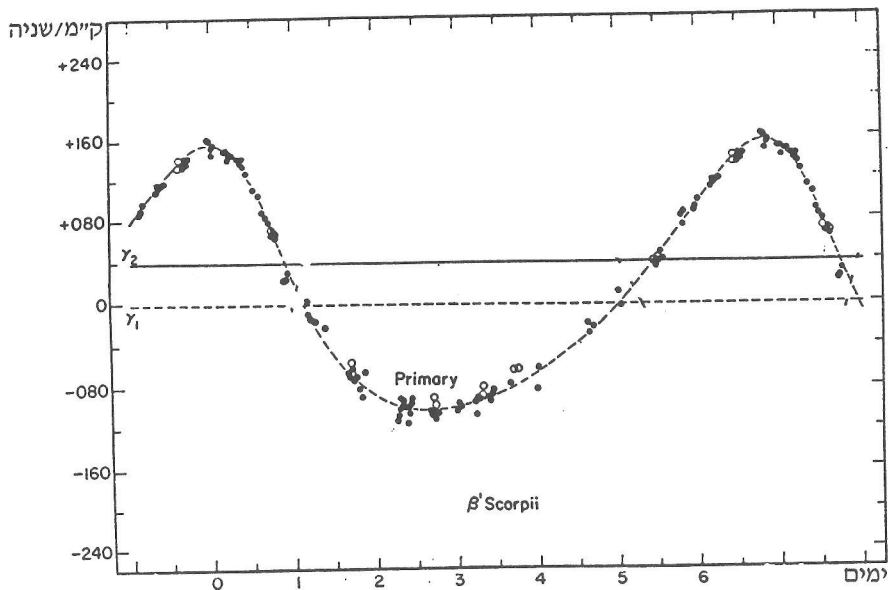
תמונה 8: כאשר כוכב נע במעגל (או באליפסה) הוא משנה את כוון תנועתו במשך סיבובו. במצב (1) הוא נראה מתרחק מאתנו, (2) מתקרב אלינו, (3) ו (4) נע בכוון רוחבי לקו ראיתנו (אם מישור ההקפה ניצב כלו לקו ראיתנו הכוכב ינוע אך ורק בכוון רוחבי ולא יתקרב).

התזוזות המחזוריות האלה של קוי הספקטרה: כאשר כוכב נע במחזוריות באליפסה (או במעגל), הרי הוא משנה את כוון מהירותו בהדרגה בהתאם למקומו על המעגל. במצב (1) הכוכב מתרחק מאתנו ולכן לפי אפקט דופלר, הקוים הספקטראליים יופיעו מעט מאד ימינה ממקומם הרגיל ביחס למקומם בספקטרום (במעבדה על כדור הארץ). במצב (2) הכוכב מתקרב אלינו ולכן הקוים הספקטראליים יופיעו מעט שמאלה. במצבים (3) או (4) לא נראה כל תזוזה של הקוים הספקטראליים והם יופיעו במקומם הרגיל, שהרי הכוכב אינו מתרחק וגם אינו מתקרב אלינו. (במצבים אלה התנועה היא רוחבית בכוון ניצב לקו ראיתנו, ולכן לא נראה את אפקט דופלר כלל). כלומר, כאשר אנו מסתכלים בספקטרום של כוכב הנע במעגל כמו בתמונה 8, אנו נראה כי קיימת מחזוריות בתנועת קוי הבליעה בספקטרום שלו. הם ינועו מיום ליום ימינה ושמאלה בהדרגה (ביחס למקומם הרגיל במעבדה), והדבר מעיד על תנועה מחזורית של הכוכב ביחס אלינו. הוא לפעמים מתרחק מאתנו ולפעמים הוא מתקרב אלינו, וכל זה כמובן בהדרגתיות. כזכור, כל אחת מן הסטיות האלו של הקוים ניתן לפרש בעזרת אפקט דופלר כגודל מסוים של מהירות. כך אם נמדוד בכל תצלום את הסטייה הזאת, נקבל את המהירות של הכוכב בכל רגע במשך הקפתו. תמונה 9 מראה גרף כזה של המהירות של הכוכב ביחס אלינו. "עקומת המהירות" הזאת היא חשובה מאד לקביעת תכונות רבות של בני הזוג שבמערכת, כפי שעוד נבאר במאמרינו בהמשך. על מנת "שעקומת המהירות" הזאת תהיה שלמה, יש לקחת תצלומים של הספקטרה במשך זמן מחזור שלם בזה אחר זה. ברוב המקרים אין יודעים מראש מהו זמן המחזור, ולכן יש לקחת צילומים בזה אחר זה עד שרואים שקוי הספקטרה בצילום "חזרו למקומם". מחזור הקפה אחת בכוכב כפול יכול לארוך שעות, ימים ואף שנים רבות כמו שראינו בכוכבים ("זוגות נראים") לעיל.

המסקנה העיקרית מדיוננו זה היא כי מתוך התבוננות בספקטרום של כוכב ניתן לפעמים לראות בבירור כי הכוכב מורכב משני בני זוג הנעים שניהם באליפסות בדיוק כפי שראינו גם בתמונה 2. לזוגות כוכבים

המתגלים דרך התבוננות בספקטרה שלהם קוראים בשם "זוגות ספקטר-וסקופיים".

לפעמים רואים כי אחד מבני הזוג של כוכב כפול מורכב בעצמו מזוג כוכבים. למשל, בזוג הכוכבים "מיזר A" ו"מיזר B" המקיפים זה את זה כפי שראינו לעיל, מתברר כי כל אחד מהם בנפרד מראה ספקטרום כפול! ופירוש הדבר הוא שזוהי מערכת המכילה בעצם ארבעה כוכבים, כאשר שניים מהם מיזר A ומיזר B מקיפים זה את זה, ונוסף על כך לכל אחד מהם בנפרד יש בן זוג!



תמונה 9: שינוי המהירויות של כוכב ביחס אלינו במשך מחזור אחד. הכוכב משנה את מהירותו בהדרגה מ-160 ק"מ בשנייה (מתרחק מאתנו) ועד ל-90 ק"מ בשנייה (מתקרב אלינו).

נעיר עוד כי שני בני הזוג הספקטרוסקופיים אינם בהכרח מאותו טיפוס ספקטראלי. למשל הכוכב "אנטארס" מורכב משני כוכבים שהאחד הוא כוכב אדום (מטיפוס ספקטראלי M, כ-3000 מעלות) ובן זוגו הוא כוכב כחול מטיפוס ספקטראלי B, כ-20000 מעלות). בתמונה 7 הספקטרום

מורכב משני כוכבים בעלי טיפוס ספקטרלי כמעט זהה, ולכן כל קו בליעה בספקטרום היה מורכב משני קוים זהים "שהתפצלו". אולם בכוכב כפול שבני הזוג אינם זהים, כמו למשל, בכוכב אנטארס, רואים שני טיפוסים ספקטראליים שונים זה מזה לחלוטין המופיעים זה על גבי זה. במקרה כזה רואים כיצד המיקום של קוי הבליעה בכל ספקטרום משתנה בפני עצמו בהתאם לתנועת כל כוכב ביחס אלינו, כאשר הוא מקיף את בן זוגו.

הנה כי כן, אף על פי שאין אנו יכולים לראות אם כוכבים מסוימים הם כפולים (כמו בתמונה 1 לעיל) בכל זאת, התבוננות מדוקדקת בספקטרום של כוכב מסגירה את העובדה שהוא מורכב משני כוכבים. לפעמים ניתן לראות באמצעים מתוחכמים ביותר כי זוג ספקטרוסקופי הוא אכן גם "זוג נראה". כלומר, ניתן לראות בתצלומים ממש שני כוכבים נפרדים ולא כוכב יחיד, אולם, ברוב המקרים דרושות טכניקות מיוחדות לשם כך. מצפים בעתיד שהטלסקופים המוצבים מחוץ לאטמוספירה אכן יוכלו להפריד הרבה כוכבים כך שנוכל לראותם כנפרדים ממש, אולם גם לגבי אלה מדובר על כוכבים קרובים אלינו יחסית.

במאמר הבא נביא שיטה עקיפה נוספת כיצד ניתן לזהות זוגות כוכבים ונסביר את חשיבותה למדידת המסה של כוכבים בכלל.

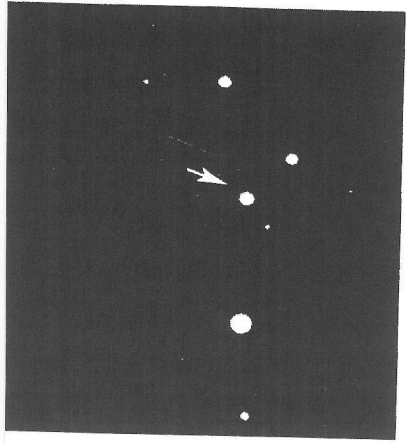
מאמר שמיני

המסה של הכוכבים

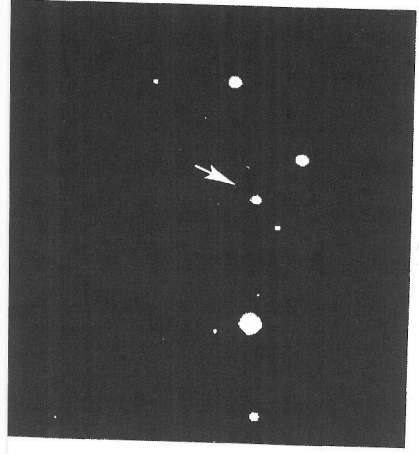
כתוב בגמרא סוכה (כט.): "בזמן שהחמה לוקה, סימן רע הוא לעולם. משל למה הדבר דומה? למלך בשר ודם שעשה סעודה לעבדיו והניח פנס לפניהם. כעס עליהם ואמר לעבדו: טול פנס מפניהם והשיבם בחושך. תניא רבי מאיר אומר, כל זמן שמאורות לוקין סימן רע לשונ-איהם של ישראל, מפני שמלומדים הם במכותיהן. משל לסופר שבא לבית הספר ורצועה בידו. מי דואג? מי שרגיל ללקות בכל יום הוא דואג. תנו רבנן: בזמן שהחמה לוקה - סימן רע לעובדי כוכבים. לבנה לוקה - סימן רע לשונאיהם של ישראל, מפני שישראל מונין ללבנה ועובדי כוכבים לחמה. לוקה במזרח - סימן רע ליושבי מזרח. במערב - סימן רע ליושבי מערב. באמצע הרקיע - סימן רע לכל העולם כלו... ואין לך כל אומה ואומה שלוקה שאין אלוהיה לוקה עמה, שנאמר: 'ובכל אלהי מצרים אעשה שפטים' (שמות י"ג). ובזמן שישראל עושין רצונו של מקום, אין מתיראין מכל אלו, שנאמר: 'כה אמר ה' אל דרך הגויים אל תלמדו ומאותות השמים אל תחתו, כי יחתו הגויים מהמה', (ירמיהו י'), עובדי כוכבים יחתו ואין ישראל יחתו".

והנה ידוע, כי ליקוי חמה נוצר כאשר השמש עומדת מאחורי הלבנה ולכן היא נסתרת מאתנו. (ראה צבא השמים חלק א'). במשך הליקוי עצמו הולכת ופוחתת עוצמת האור של החמה ואחרי כן שוב גדלה. ומאותה הסיבה בדיוק כוכב אחד יכול להסתיר את בן זוגו מאתנו כאשר הוא מקיף אותו. גם אז נראה כי עוצמת האור המתקבלת מן הכוכב הכפול פתאם מתחילה לדעוך ואחרי כן שוב לגדול (תמונה 1). זוגות כוכבים כאלה המסתירים זה את זה לסירוגין מתגלים ע"י מעקב מדויק מאד אחר עוצמת אורם. אפשר לעשות זאת ע"י צילומים עוקבים בזה אחר

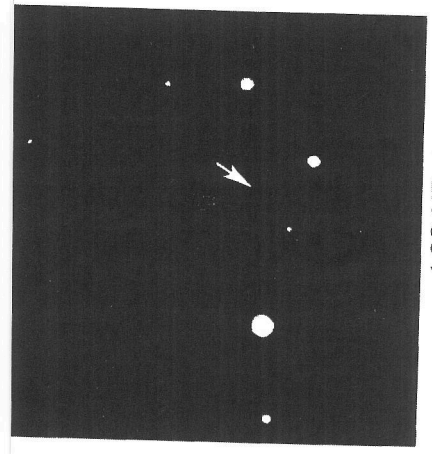
PG 1550 + 131
ליקוי ביום 4 ביולי 1988



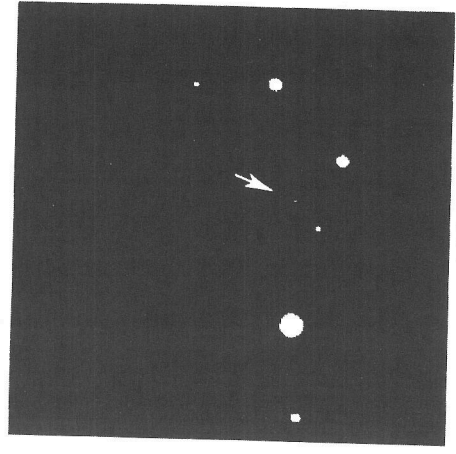
1:20 UT



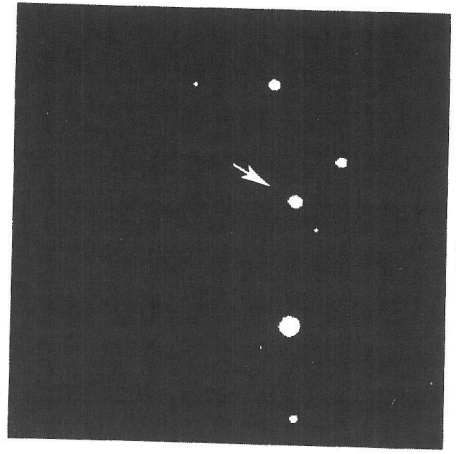
1:24 UT



1:28 UT



1:31 UT

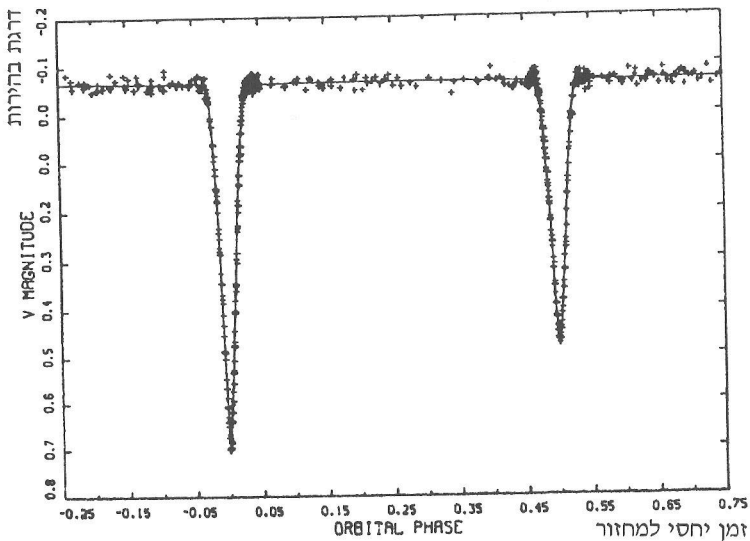


1:35 UT

תמונה 1: סדרת צילומים בהפרש של 4 - 3 דקות של קבוצת כוכבים. התבוננות בכוכב המסומן בחץ מראה כי בשעה 1:20 היתה עוצמת אירו רגילה. בשעה 1:24 קטנה מעט העוצמה, ובשעה 1:28 "נעלם" הכוכב לגמרי. בשעה 1:31 החל שוב הכוכב להאיר מעט ובשעה 1:35 "חזר לאיתנו" כבתחילה.

זה (כמו בתמונה 1) או ע"י מדידה אלקטרונית של עוצמת האור (כמו במד-אור של מצלמה רגילה).

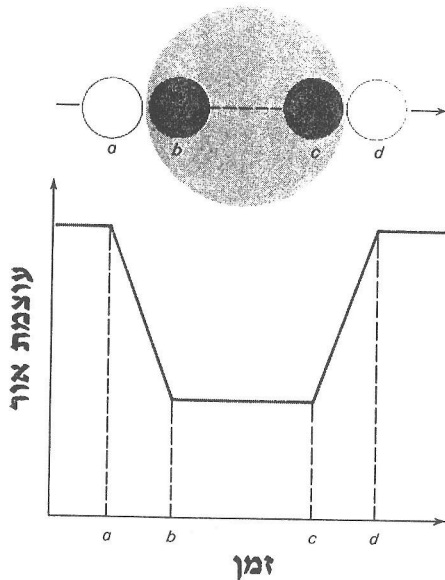
תמונה 2 מראה מעקב כזה אחר עוצמת האור של כוכב בעזרת מד אור אלקטרוני. רואים כי עם הזמן נוצרים שני "שקעים", (ולא שקע אחד) דהיינו, עוצמת האור של הכוכב דועכת פעמיים בצורה הדרגתית ובכל פעם היא שבה לעוצמה הקודמת.



תמונה 2: מדידות של עוצמת אור של כוכב וכיצד היא משתנה עם הזמן.

כבר בתחילה, כאשר נתגלו כוכבים כאלה המשנים עוצמתם לסירוגין הועלתה ההשערה שיתכן שהדעיכה בעוצמת האור נובעת מכך שהכוכב בעצם מורכב משני בני זוג המקיפים זה את זה: כאשר כוכב אחד עובר לפני הכוכב השני בקו ראיתנו, הוא פשוט מסתיר אותו מאתנו, ולכן אנו רואים בסך הכל עוצמת אור קטנה יותר. תמונה 3 מבארת בצורה סכימטית את תהליך ההסתרה: במצב A כאשר שני הכוכבים אינם מסתירים זה את זה, הרי עוצמת האור שאנו מקבלים שווה לסכום עוצמות האור הנפרדות של כל כוכב לחוד. כאשר הכוכב הקטן נכנס לאט לאט ומסתיר

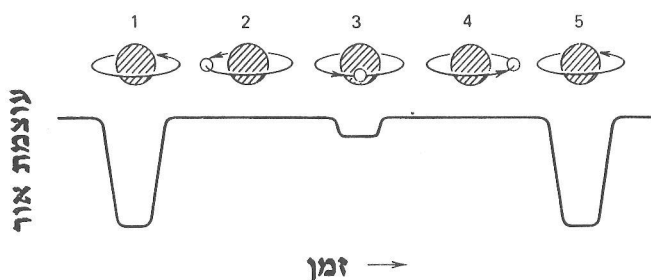
את הכוכב הגדול, נוצר ליקוי איטי של הכוכב הגדול וכך הולכת ופוחתת בהדרגה עוצמת האור הכללית שאנו מקבלים משני הכוכבים ביחד. זהו המצב מ-A ל-B. אחרי כן, בין המצב B לבין המצב C מסתיר הכוכב הקטן באופן קבוע חלק מן הכוכב הגדול. כאשר הוא מתחיל לצאת ממצב C למצב D, אז הולכת וחוזרת עוצמת האור בהדרגה לעוצמה של שניהם בנפרד, עד שבצד D מקבלים שוב את העוצמה המקסימלית כמו ב-A.



תמונה 3: שרטוט סכימטי המבאר את סיבת הליקויים בזוגות כוכבים.

המקרה שהבאנו כאן הוא של שני כוכבים המקיפים זה את זה במישור של קו ראיתנו ממש. גם במקרה שמישור ההקפה נטוי מעט לקו ראיתנו, ניתן לראות ליקויים, אולם פחות עמוקים. כאשר שני בני הזוג מקיפים זה את זה (בקו ראיתנו) נוצרים תמיד שני ליקויים בזה אתר זה בכל מחזור הקפה: ליקוי אחד נוצר כאשר כוכב אחד נמצא מאחורי הכוכב השני ואז הוא מסתיר אותו מאחוריו, וליקוי שני נוצר כאשר הכוכב הראשון מסתיר את השני.

תמונה 4 מדגימה את מצבי שני הכוכבים זה ביחס לזה וכיצד הליקויים גורמים לשינויים בעוצמת האור הנמדדת על ידינו: לשרטוט של שינויי עוצמת האור עם הזמן קוראים בשם "עקומת האור של הכוכב". הליקוי העמוק יותר מבין השניים הוא הליקוי אשר בו מוסתר דוקא הכוכב המקרין חזק יותר (חם יותר) והליקוי הפחות עמוק מתאים לליקוי של הכוכב הקר יותר. אם שני הליקויים עמוקים באותה מידה סימן הוא שלשני בני הזוג אותה טמפרטורה.



תמונה 4: הליקויים של זוג כוכבים ועקומת עוצמת האור: במצבים (2) (4) מקבלים אור משני הכוכבים כל אחד בנפרד כי הם אינם מסתירים זה את זה כלל. במצב (3) כאשר הכוכב הקטן עובר לפני הכוכב הגדול הוא מסתיר חלק מפניו, ולכן מתקבל ליקוי ראשון ועוצמת האור הכללית יורדת. במצב (1) כאשר הכוכב הגדול מסתיר לגמרי את הכוכב הקטן יותר, מתקבל גם כן ליקוי ועוצמת האור יורדת. במערכת זו הכוכב הגדול הוא קר יותר מהכוכב הקטן, כי עומק הליקוי ב-(1) הוא גדול יותר מעומק הליקוי ב-(3). מצב (5) הוא תחילתו של מחזור ההקפה הבא והוא זהה למצב (1).

העובדה התצפיתית שכוכב מסוים משנה את עוצמת אורו במחזוריות אינה מספיקה עדיין בכדי לפרש שהכוכב שנראה לנו הוא אכן כוכב כפול, כי יתכן מאד שהכוכב פשוט מתנדנד, דהיינו, הוא מתנפח ומתכווץ לסירוגין כמו כדור. אולם, בהמשך מאמרנו אלה אנו נראה כי עקומת האור של כוכב מתנדנד כזה צריכה להיות בעלת צורה אחרת לגמרי וכן עקומת המהירויות שראינו במאמר הקודם גם היא שונה מאד.

החשיבות הגדולה בגילוי זוגות הכוכבים בכלל אינה רק בעצם התגלית, אלא בעיקר בגלל שהם מאפשרים לנו לקבוע תכונות רבות של בני הזוג עצמם, כגון מהי כמות החומר (המסה) שיש בכל כוכב מבני הזוג, מהו רדיוסם, הטמפרטורה שלהם, מהירות הקפתם זה סביב זה, מידת הפחיתות של האליפסות, ואפילו שינויים בטמפרטורה של שני הכוכבים עצמם. "שלל" האינפורמציה הזו נובע מניתוח חשבוני מדויק מאד של "עקומת האור" שתיארנו לעיל, יחד עם "עקומת המהירויות" במשך הקפתם של בני הזוג שתיארנו במאמר הקודם.

את הניתוח החשבוני של שתי עקומות אלו מבצעים בעזרת תכניות מחשב ארוכות ומסובכות ומסיקים את כל הנתונים על הכוכבים בצורה מלאה. כאמור, אחד הנתונים החשובים ביותר שאפשר להסיק (ע"י חשבונות מתמטיים) מחקירת שתי העקומות האלו של זוגות כוכבים הוא המסה של כל אחד מבני הזוג. מסה זו נמדדת ביחידות מסה של השמש שלנו, דהיינו, המסה של השמש עצמה נחשבת כיחידה אחת. למשל מתוך ניתוח עקומות האור והמהירויות של זוג הכוכבים "סיריוס", (ראה מאמר קודם) אפשר לחשב שהמסה של סיריוס A היא 2.2 מסות שמש, (כלומר, פי 2.2 ממסת השמש) והמסה של סיריוס B היא 0.9 ממסה שמש (סיריוס B הוא כוכב "משונה" מאד, כפי שנראה להלן). מרחקם של בני הזוג זה מזה הוא כ-20 יחידות אסטרונומיות (יחידה אסטרונומית היא המרחק בין כדור הארץ לשמש, דהיינו כמאה וחמישים מיליון ק"מ. מסת השמש שלנו היא מיליארד מיליארד טון, ראה צבא השמים, חלק א'). הכוכב "קרוגר 60" שציינו במאמר הקודם הוא 0.28 ממסת שמש בלבד, ובן זוגו 0.16 ממסת השמש. מרחקם זה מזה הוא כ-10 יחידות אסטרונומיות.

אולי כהשוואה נציין כי השמש שלנו היא, כאמור, יחידת מסה אחת, וכוכב הלכת הגדול ביותר במערכת השמש, הרי הוא כוכב הלכת צדק, מכיל רק אלפית ממסת השמש (0.001 ממסת השמש), והוא נע במרחק של 5.2 יחידות אסטרונומיות ממנה.

עד עתה נצפו עשרות אלפים של כוכבים כפולים ונמדדו בפועל המסות של כמה מאות מהם בדיוק יחסי רב. מתברר כי הכוכב בעל המסה הגדולה

ביותר שנצפה ביקום עד היום מגיע לכ-40 מסות שמש. עובדה זו מראה אולי שהכוכבים שמסתם היא מעל למסה המקסימלית הזו אינם יציבים והם מתפוררים או מתפוצצים עוד לפני שנספיק לראות מהם אור כל שהוא. ההסבר המדעי המקובל הוא שחוקי הטבע ובפרט חוקי הפיזיקה הגרעינית שאנו מכירים כיום אינם מאפשרים לקיים כוכבים יציבים במסות גדולות יותר מן המקסימום שנצפה עד היום. אנו עוד נחזור לנושא זה כאשר נדון בתופעת הכוכבים המתפוצצים (סופר-נובה) והחורים השחורים. המקסימום הזה של מסת כוכב שאנו מוצאים ביקום הוא אמנם עובדה מעניינת בפני עצמה. אולם עובדה זו אינה שונה בעקרון מכל דבר אחר בטבע אשר גם הוא מוגבל עד לגודל מקסימלי, כגון הגובה של בני אדם אינו עולה על 2.70 מ', או משקלם אינו עולה על 200 ק"ג, ואכן גם רואים כי בני אדם המגיעים לגבולות כאלה הם בעלי תוחלת חיים קצרה בגלל מחלות שונות המתפתחות בהם.

מאידך, מתברר כי הכוכב בעל המסה הקטנה ביותר שנצפה עד היום אינו פחות מעשירית ממסת השמש (0.1). כלומר, בכוכב בעל מסה כזו עדיין רואים בבירור ספקטרום המעיד על כך שהוא מאיר מעצמו כמו השמש שלנו. כוכבים כאלה הם קטנים מאד בגודלם והם מאירים באור אדום (טיפוס ספקטראלי M). אי לכך הם נקראים בשם "ננסים אדומים" (ראה מאמר רביעי בסדרה זו). אפשר להראות גם מבחינה תיאורטית כי רק כוכבים שמסתם גדולה מ-0.1 מסות שמש יכולים להאיר מעצמם. כאשר המסה של כוכב היא קטנה, הלחץ (של הכובד) וכן הטמפרטורה במרכזו הם נמוכים יחסית ובקושי מספיקים בכדי להתחיל את הבעירה של "הכור הגרעיני" במרכזו. (ראה "כור גרעיני" בשמש, צבא השמים חלק א'). זוהי הסיבה שכוכבים כאלה נראים לנו אדומים ("אש נמוכה"). אם המסה של כוכב היא עוד יותר קטנה מעשירית מסת השמש, הלחץ והחם במרכזם אינם מספיקים בכדי להתחיל את "הבעירה הגרעינית" ולכן הם נשארים כבויים "לכל חייהם". אולי דוגמא אופיינית לכך היא כוכב הלכת צדק במערכת השמש שלנו שמסתו מגיעה רק לאלפית ממסת השמש, ולכן אין במרכזו "בעירה גרעינית" והוא אינו מפיק מעצמו אנרגיה אלא כל אורו נובע מהחזרת אור השמש בלבד, כמו כדור הארץ שלנו.

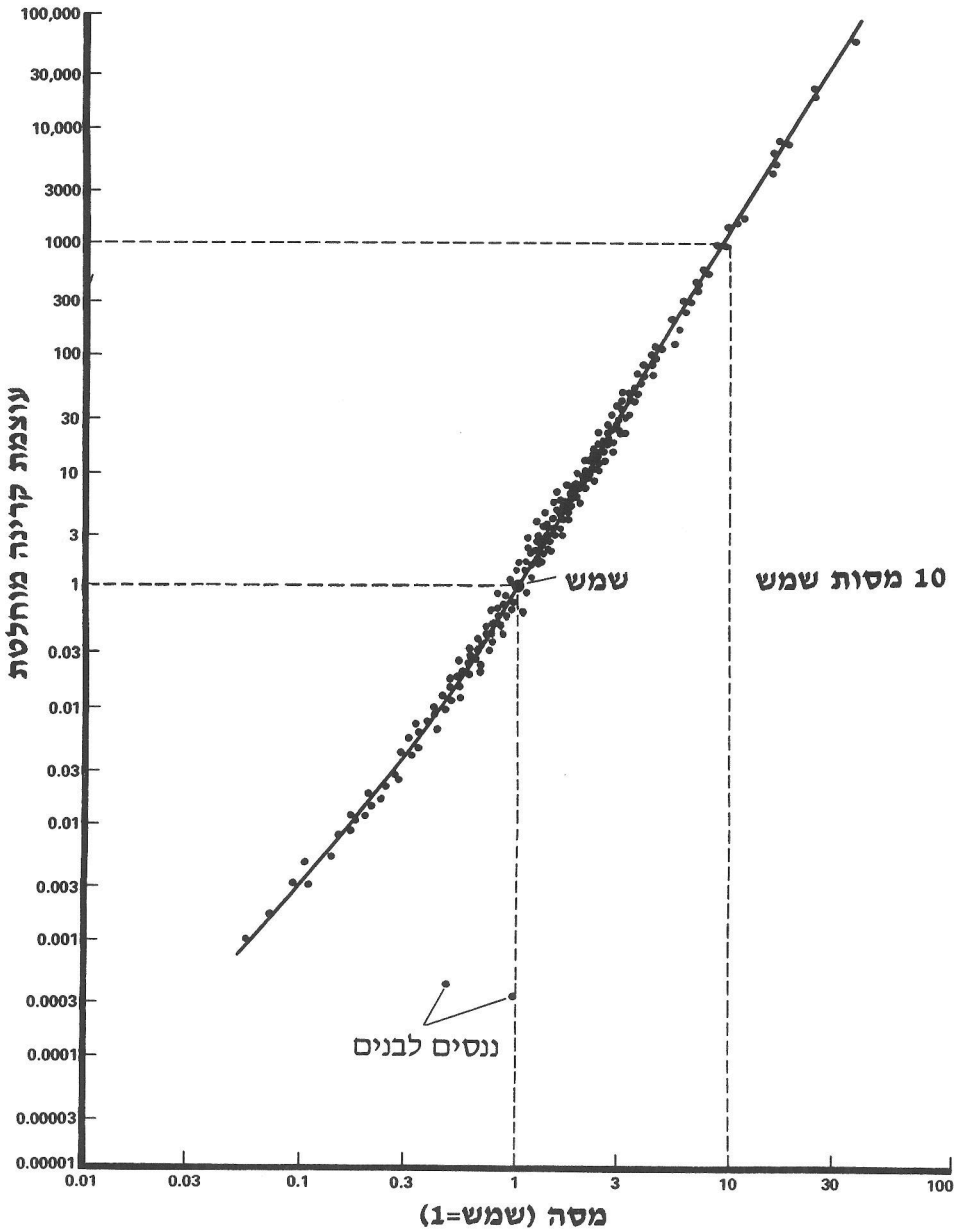
לעומתם, הכוכבים המאסיביים הגדולים בני 10, או 20 מסות שמש יוצרים לחצים וטמפרטורות גבוהים מאד במרכזם ואי לכך "הבעירה הגרעינית" במרכזם היא מואצת "ופרועה" ביותר, הם מקרינים בעוצמה רבה ומכלים את מלאי הדלק הגרעיני שלהם במהירות רבה. (אלה הם כוכבים סופר-ענקים כחולים, מטיפוס ספקטרלי O).

ידוע מן הפיסיקה הגרעינית כי אם הלחצים והטמפרטורה הם גבוהים מעל לגודל קריטי מסוים, אז חלה למעשה התפוצצות גרעינית הממוטטת את כל הכוכב כלו. תופעה כזאת יכולה לקרות כאשר הכוכב הוא מעל ל-40 מסות שמש כפי שצינו לעיל.

לפי השיקול הנ"ל, גודל המסה של הכוכב קובע את קצב "הבעירה הגרעינית" במרכזו ואי לכך גם את עוצמת הקרינה המגיעה אלינו ממנו. כוכב שמסתו גדולה יאיר בעוצמה רבה בשעה שכוכב שמסתו קטנה יאיר בעוצמה נמוכה יותר. ואכן, לאחר שנמדדו המסות של כמה מאות של כוכבים כפולים בצורה מדויקת כנ"ל, התברר כי עוצמת הקרינה שלהם היא ביחס ישר למסה שנמדדה. תמונה 5 מראה את תוצאות המדידות האלו, רואים בבירור כי ככל שהמסה של כוכב היא גדולה יותר כך הוא מקרין בעוצמה רבה יותר. כוכב שמסתו 40 מסות שמש מקרין פי 100,000 יותר מן השמש שלנו, ולעומתו, כוכב שמסתו כעשירית ממסת השמש מקרין רק כאלפית מקרינת השמש. אפשר למצוא יחס מתמטי מסוים לקשר הזה והוא מתבטא (פחות או יותר) באופן הבא: הגדלת המסה של כוכב פי 10 מגדילה את קרינתו פי 1,000, כלומר, היחס הוא כמו "קובית" המסה. מתברר כי החוק הזה נכון עבור כוכבים הנמצאים על הסדרה הראשית בדיאגרמת ה"ר בלבד (והם רוב הכוכבים הנראים ביקום, ראה מאמר רביעי).

יש לשים לב כי עוצמת האור של הכוכבים שבגרף בתמונה 5 אינה עוצמת האור של הכוכב שאנו מודדים כאן על פני כדור הארץ, אלא זוהי עוצמת האור שלהם ממש, מה שאנו קוראים בדרך כלל בשם "עוצמת האור המוחלטת" של הכוכב. כמובן שהיא נחלשת מאד עד שהיא מגיעה אלינו מפאת המרחק הרב אל הכוכב.

עתה נוכל להשתמש בגרף שבתמונה 5 בכדי להעריך את מסתו של כוכב



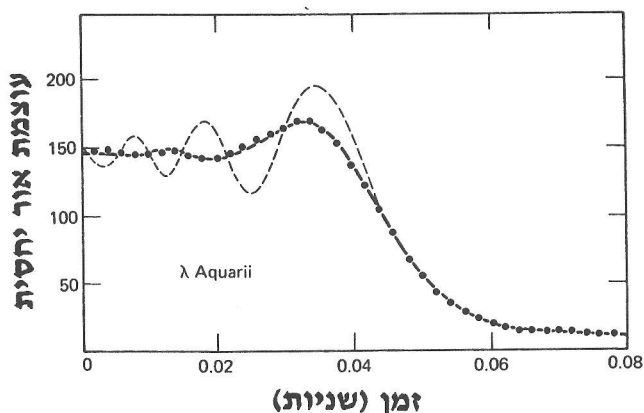
תמונה 5: ככל שמסת הכוכב גדולה יותר כך הוא מקרין אנרגיה גדולה יותר. חוק זה נכון עבור כוכבים מן הסדרה הראשית בדיאגרמת ה- H-R.

כל שהוא: אם אנו יכולים למדוד את מרחקו של כוכב אלינו, אז נוכל לתקן את עוצמת האור החלשה שלו שאנו מודדים כאן בפועל, ולהוסיף עליה את כל מה שנחלש ממנה מפאת המרחק, וכך להעריך את "עוצמת האור המוחלטת" של הכוכב.

כלומר, ידיעת המרחק אל כוכב מאפשרת לנו לחשב את עוצמת אורו המוחלטת של כוכב, ואז נוכל להשתמש ישירות בגרף שבתמונה 5 ולהעריך משם מה צריכה להיות מסתו. למשל, אם מצאנו שעוצמת האור המוחלטת של כוכב היא פי אלף מזו של השמש, אז מתוך הסתכלות בגרף רואים שמסתו צריכה להיות פי 10 מזו של השמש. (כל זה כמובן שהכוכב הוא בעל טיפוס ספקטרלי מן הסדרה הראשית בדיאגרמת ה-ר).

כזכור, כוכבים כפולים אינם מכילים רק בני זוג שהם שניהם מן הסדרה הראשית. ישנם זוגות רבים המכילים גם כוכבים ענקים, סופר-ענקים ואף ננסים. מדידת המסה של זוגות כאלה מאפשרת לתת הערכה גם למסתם של כוכבים דומים אחרים שאין להם בני זוג כלל. כך יוצא שתמיד ניתן לתת הערכה למסה של כוכב מסוג כל שהוא, ולא רק לכוכבים מן הסדרה הראשית בדיאגרמת ה-ר.

אם כן, כאמור, המסה של הכוכבים היא הנתון החשוב יותר שאפשר להסיק מחקירת זוגות כוכבים, הנה, כאמור, אפשר להסיק מחקירה זו גם נתון חשוב אחר כגון הרדיוס של כל אחד מבני הזוג. כבר ראינו במאמר הרביעי בסדרה זו כיצד ניתן להעריך את הרדיוסים של כוכבים בעזרת דיאגרמת ה-ר. כך יוצא כי הכרנו כבר שתי שיטות למדידת רדיוסי כוכבים. שיטה שלישית אחרת היא בעזרת מדידת האור המגיע מכוכב כאשר הירח (שלנו) מסתיר אותו, ואז הכוכב עצמו לוקה. ממבט ראשון נראה כי הירח היה צריך להסתיר פתאם את הכוכב, שהרי הכוכב הוא בסך הכל נקודת אור זעירה ביותר. אולם, אם הכוכב הוא קרוב יחסית, מתברר כי הירח מכסה לאט לאט את קוטרו של הכוכב, וניתן למדוד בצורה מדויקת מאד ולנתח בצורה מתמטית מדוקדקת את הדעיכה הזאת ולהסיק מהו קוטר הכוכב שלקה. תמונה 6 מראה עקומת דעיכה כזאת. כאמור, חקירה מתמטית של עקומה זו מאפשרת לחשב את הרדיוס של הכוכב שלקה. ישנן גם דרכים נוספות אחרות לקבוע את הרדיוסים של



תמונה 6: אם הכוכב הלוקה היה נקודה ממש אז הדעיכה של האור שלו מאחורי הירח היתה בהתאם לקו התיאורטי המקוקו בתמונה. אולם כיון שהכוכב אינו נקודה אלא בעל קוטר ממש, מתקבלת במציאות עקומת דעיכה אחרת המיוצגת ע"י הקו המלא עם הנקודות. הניתוח המתמטי של ההפרש בין שתי העקומות האלו, התיאורטית וזו שנמדדת במציאות, מאפשר לחשב בפועל את קוטר הכוכב שלקה מאחורי הירח.

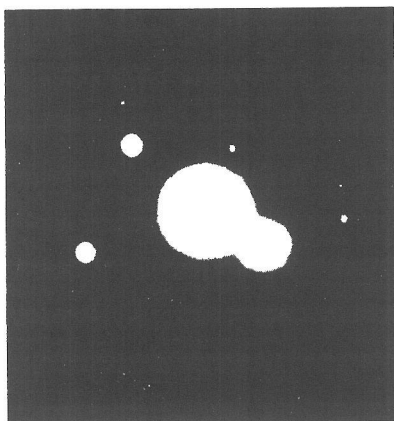
כוכבים אשר נכיר אי"ה בהמשך. מתברר כי כל השיטות האלו כולל חקירת זוגות כוכבים כנ"ל, שהן שונות מאד אחת מרעותה, מראות כלן תוצאות זהות כמעט.

ידיעת הרדיוס של כוכב מאפשרת לחשב את נפחו, בהנחה שצורתו היא כדורית. אם נחלק את המסה הידועה של הכוכב בנפחו, נקבל את הצפיפות הממוצעת, דהיינו, כמה חומר יש בכל יחידת נפח, כגון כמה גרם לסמ"ק. למשל, צפיפות המים היא, כידוע, 1 גרם לסמ"ק (כמו משקל סגולי). נתון כזה הוא לפעמים חשוב להסקת מסקנות פיזיקליות מענינות. למשל, מתברר כי הצפיפות הממוצעת של כדור הארץ היא 5.5 גרם לסמ"ק. מאידך, ידוע כי האדמה על פני כדור הארץ היא בעלת צפיפות שאינה עולה על 3-2 גרם לסמ"ק בלבד. לכן, מתוך איזון, סימן הוא שמרכז כדור הארץ הוא בעל צפיפות הרבה יותר גבוהה העולה על 6-7 גרם לסמ"ק. מזה אפשר להסיק כי מרכז כדור הארץ מכיל עופרות העשירות בברזל וניקל (ראה צבא השמים, חלק א').

אם נחשב את הצפיפות של השמש בדרך הנ"ל נקבל שצפיפותה הממוצעת היא 1.4 גרם לסמ"ק בלבד. כיון שהשמש היא כוכב בינוני אופייני ביקום, נוכל לאמר כי זוהי גם הצפיפות האופיינית המצויה בכוכבים. אולם, ישנם כמובן יוצאים מן הכלל. ואכן, אחת ההפתעות הגדולות במאה העשרים היתה התגלית כי הכוכבים המכונים בשם "הננסים הלבנים", כגון סיריוס B, הם מצד אחד בעלי מסה כמעט כמו זו של השמש, אולם, מאידך, הם בעלי רדיוסים פי מאה קטנים ממנה. אי לכך נפחם הוא קטן פי מיליון, ולכן צפיפותם היא פי מיליון גדולה משל השמש. כך מתברר כי סמ"ק אחד של חומר בכוכב ננס לבן מכיל כ-1,400,000 גרם, דהיינו, 1.4 טון! בצפיפויות גדולות כאלו חלקי פיזיקה אחרים לגמרי מאלה שאנו מכירים על פני כדור הארץ. ניתן רק לשער באופן תיאורטי מה יכולים להיות חוקים אלה. אנו עוד נראה בהמשך כי נמצאו סוגי כוכבים שצפיפותם אף עולה על זו של ננסים לבנים, כגון "כוכבי ניוטרונים" או "חורים שחורים".

בקצה השני של סולם הרדיוסים נמצאים הכוכבים הסופר־ענקים, דהיינו כוכבים שרדיוסם מגיע לכאלף רדיוסי שמש, ואי לכך נפחם גדול פי מיליארד מזה של השמש. אם נניח מסה מקסימלית בת 40 מסות שמש, נקבל כי הצפיפות הממוצעת בסופר־ענקים כאלה מגיעה לערך אפסי ביותר של כ-0.00000001 גרם לסמ"ק! כלומר, כוכבים אלה הם דלילים ביותר וצפיפותם מתאימה כמעט לואקום מוחלט!

עתה נשאלת השאלה המעניינת הבאה: מהו אחוז הכוכבים הכפולים ביקום? מדגמים של אלפי כוכבים מראים כי כנראה שכמעט כל הכוכבים ביקום הם בעצם זוגות. אף אלה שנחקרו בצורה מדוקדקת ביותר ולא נמצא להם בן זוג, משערים כי יתכן מאד שיש להם לפחות כוכב לכת אחד או יותר המקיפים אותם (כמו במערכת השמש שלנו). אף יותר מזאת, מתברר גם כי ישנם כוכבים רבים המורכבים לא רק מזוגות כוכבים אלא אפילו ממערכות של שלושה או ארבעה או אפילו ששה כוכבים המקיפים כולם את מרכז הכובד של כל המערכת. במאמר הקודם ראינו כבר כי הכוכב "מיזר" הוא בעצם מערכת של ארבעה כוכבים. תמונה 7 מראה צילום של מערכת של ארבעה כוכבים של הכוכב "ביתא לירא".



תמונה 7: מערכת של ארבעה כוכבים המקיפים את מרכז הכובד המשותף שלהם.

גם הכוכב הקרוב אלינו ביותר "אלפא סנטאורי" מורכב ממערכת של ארבעה כוכבים. אשר לשאלת התהוותם של מערכות כאלו ביקום הרי ישנן שתי אפשרויות: או שאלו מערכות שנוצרו כבר במעשה בראשית, או ששני הכוכבים היו קרובים מאד זה אל זה במעופם בחלל ונלכדו יחד בכח הגרביטציה שלהם.

הנושא של זוגות או יותר כוכבים במערכת אחת המקיפים את מרכזם המשותף הוא קרוב לנושא של חיפוש מערכות שמש דומות לשלנו ביקום. אם כי החיפושים אחר כוכבי לכת סביב שמשות אחרות נמשך כבר זמן רב, הנה לא הניב מחקר זה תוצאות חיוביות עד היום. אולם לאחרונה בעקבות פיתוח מיכשור חדש ומתוחכם יותר, החלו שוב החיפושים ביתר תנופה. מספר קבוצות מחקר הודיעו כי יש בידם מספר כוכבים "מועמדים" בעלי סיכוי טוב המכילים כוכב לכת בגודל כוכב הלכת צדק שלנו. השיטות מבוססות על אותם העקרונות שכבר הבאנו לעיל כגון חיפוש זוגות ספק-טרוסקופיים או אסטרוטריים, אלא שהשינויים בעקומות המהירויות (ראה מאמר שלפניו) הם קטנים ביותר ודורשים מיכשור מתוחכם ומדויק ביותר. השינויים הקטנים בעקומות אלו מראים כי בן הזוג יכול להיות כוכב לכת בעל מסה קטנה מאד יחסית, כמו זו של צדק. דרך אחרת היא לנסות לצפות בכוכבים קטנים מאד ובעלי טמפרטורות נמוכות מאד

(כ-800 מעלות בלבד) הפולטים קרינה בעיקר באינפרא אדום. גם בשיטה זו היו לאחרונה מספר הכרזות על תגליות של כוכבי לכת, אולם עדיין אין אישור מוחלט. בדרך כלל כל מה שנתגלו עד היום הם אולי לא כוכבי לכת ממש, אלא מה שמכנים בשם "ננסים חומים", כלומר, כוכבים אמנם קטנים מאד בגודלם, אולם עדיין יותר גדולים מכוכב הלכת צדק שלנו, הם נקראים "חומים" כי הם מקרינים מעט מאוד לחלל, (כלומר הם אינם לגמרי שחורים או כבויים).

אולם, אף אם ימצאו כוכבי לכת הדומים לצדק או אפילו לכדור הארץ, המרחק עד למציאת חיים בצורה כל שהיא על כוכבים כאלה הוא עדיין גדול מאד. אנו עוד נדון בענין מציאות החיים על כוכבים אחרים באחד המאמרים בהמשך.

מאמר תשיעי

סיבוב הכוכבים

כתוב בספר "משך חכמה" על הפסוק "זה ספר תולדות אדם" (בראשית ה') את פירושו על הפסוק בתהילים (קמה) "יודוך ה' כל מעשיך וחסידך יברכוכה. כבוד מלכותך יאמרו וגבורתך ידברו. להודיע לבני האדם גבורותיו וכבוד הדר מלכותו": הענין כי החסיד הדבוק להשי"ת באמת ובלי מסך מבדיל, יבטלו ממנו כל הדמיונים החומריים והטבעיים, ובלי יבדילו בין צורה ליוצרה. הנה כל הנבראים והמציאות וההשגה בכללה הוא שפע נשפע מזוהר רצונו יתברך בלי הפסק, והמה אורות מאירים מההשגחה כל רגע, ומזה ימלאון חדרי נפשו, כי זה המציאות וההנהגה וההשגחה המה כבוד הבורא, מהם יושג השי"ת ועל ידם יחזה להבורא ראייה מושכלת, וזה התפעלויות נפשו באמת. אבל מרוב תדירותם וההרגל אשר הורגלו בהם בני אדם הפשוטים, לא יתבוננו אל מעשי ה' זולת כאשר הבורא ית"ש משנה ההנהגה התדירית ועושה לזמן לא כביר הנהגה חדשה (כי הנס לא יתמיד, כי אם יתמיד, הוא שב לטבע ומתחייב שינוי רצון חלילה) וזה שאמר ש"חסידיך יברכוכה וכבוד מלכותך יאמרו", ואח"כ "וגבורתך ידברו". אבל "להודיע לבני האדם" (הפחותים במעלה ממעלת החסידים הדבקים בשמו יתברך) "גבורותיו וכבוד הדר מלכותו", שהמה יתבוננו מגבורותיו, כבודו והדרו, כי לחולשת ראית עיני שכלם יפרידו בין ההנהגה לבורא, וכאילו העולם עומד בפני עצמו ואינו מכיר כבוד הבורא רק ע"י ההערה שהעיר הבורא יתברך עליהם במה שמשנה הטבע ומשדד המערכה, בזה ידעו כי אלקים הוא המנהיג ובהשגחתו הוא מסובב כל הסיבות, וכל ההנהגה הטבעית ממנו הכל. וזה שאמר שלבני אדם מוכרח להודיע גבורותיו וזה כוונת הפסוק "ספרו בגויים כבודו בכל העמים נפלאותיו" עכ"ל.

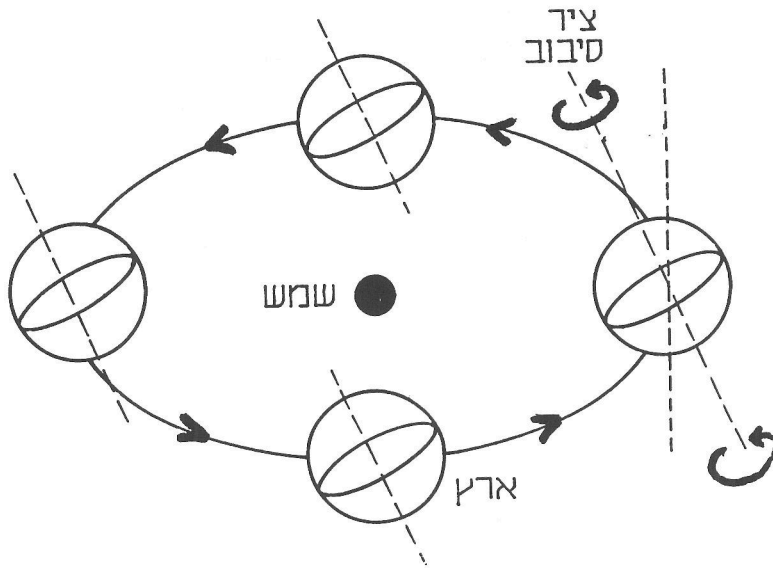
האדם החסיד הדבוק בשי"ת רואה יום יום בכל הבריאה סביבו את כבוד מלכותו של השי"ת, אם זה על הארץ או בשמים. "זרח השמש ובא השמש ואל מקומו שואף זורח הוא שם. הולך אל דרום וסובב אל צפון, סובב סובב הולך הרוח ועל סביבותיו שב הרוח" (קהלת א'). עבור בני האדם הרגילים הרי הזריחה והשקיעה של השמש (מרוב תדירותה) היא תופעה רגילה שאין בה לא כבוד ולא מלכות, אבל עבור החסיד הדבק בשי"ת, הרי תופעה זו היא עצם הפגנת כבוד מלכותו יתברך והיא באה מעצם "זוהר רצונו יתברך בלי הפסק, והמה מאורות מאירים מההשגחה כל רגע ומזה ימלאון כל חדרי נפשו" וכו'. לעומתם, בני האדם הפשוטים מכירים בהשגחת הבורא יתברך רק אם תנועת השמש היומית תפסק פתאום, כמו למשל בימי יהושע בן נון, כאשר עמדה השמש דום. רק אז הם רואים את גבורתו וכבוד הדר מלכותו ואז הם מכירים בהשגחה וממליכים את ה' יתברך עליהם. אבל כל התופעות המופיעות יום יום ובתדירות רגילה, הרי זה אינו מספיק עבורם, אלא הם זקוקים לנס המיוחד אשר יזעזע את נפשם עד אשר יכירו בבוראם.

כידוע, תנועת השמש היומית בשמים נובעת מסיבוב כדור הארץ סביב צירו (צבא השמים א'). והנה תופעה פשוטה ותדירה זו היא עצמה אחד מן הפלאים הגדולים לא רק מעצם מהותה, אלא גם מבחינה מדעית היא פלא שאין לו עדיין הסבר. למה בכלל כדור הארץ מסתובב סביב צירו? האם זו תופעה מיוחדת לו בלבד או לכל גרמי השמים?

כידוע, פרט לסיבוב סביב צירו אחת ל 24 שעות, מקיף כדור הארץ את השמש אחת ל-365 יום. אנו מבדילים בן המושגים "סובב" או "מקיף": "סובב" סביב צירו, "מקיף" גרם שמימי אחר (ציור 1).

מתברר כי סיבוב כדור הארץ סביב צירו הוא תופעה אופיינית לכל גרמי השמים ללא יוצא מן הכלל. הירח מקיף את הארץ אחת ל-27.3 יום (אבל אנו רואים מחזור חודשי של 29.5 יום) והוא גם מסתובב סביב צירו ב-27.3 יום.

ראינו כי גם השמש מסתובבת סביב צירה אחת לכ-27 יום. גם כל כוכבי הלכת ללא יוצא מן הכלל - אמנם מקיפים את השמש - אולם גם



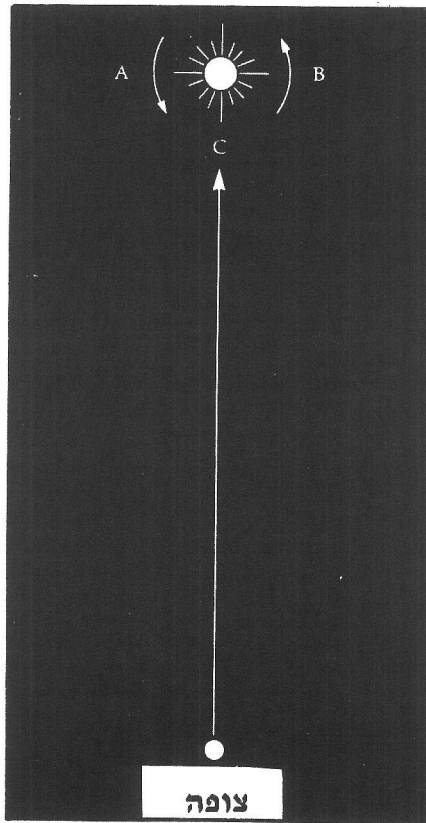
תמונה 1: כדור הארץ מקיף את השמש ובו בזמן הוא מסתובב סביב צירו. הוא משלים 365 סיבובים (ימים) במשך הקפה אחת סביב השמש (שנה).

הם מסתובבים סביב צירם במחזורים שונים. אפילו האסטרואידים וכוכבי השביט (ולו הקטנים ביותר שביניהם) יש להם סיבוב סביב צירם כאשר הם נעים בחלל. גם ללויניים המקיפים את כדור הארץ יש תנועת סיבוב איטית סביב צירם.

כיצד מגלים האסטרונומים שגם הכוכבים הרחוקים הנראים לנו גם הם גופים המסתובבים סביב צירם.

מתברר כי לשם כך עלינו שוב להסתכל בספקטרום של הכוכב, דהיינו, בפיצול אור הכוכב לצבעיו דרך פריסמה, וכן להתבונן היטב בקוים השחורים המופיעים בתוך הצבעים האלה ("הקוים הספקטראליים"). כיצד עושים זאת?

ובכן, נדמיין לעצמנו בתחילה כדור גדול המסתובב סביב ציר המאונך לדף (תמונה 2). צופה המסתכל בכדור כזה יראה כי כל החצי הימני של הכוכב מתרחק ממנו וכל הקצה השמאלי שלו מתקרב אליו, שהרי זהו הפירוש של עצם הסיבוב של הכוכב סביב צירו ביחס לצופה. עתה נסתכל

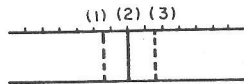
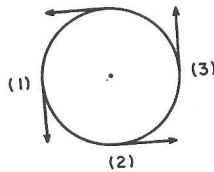


תמונה 2: צופה המסתכל בכדור מסתובב יראה את צד A מתקרב אליו וצד B מתרחק ממנו.

בתמונה 3 שהיא תמונה מפורטת יותר של גוף הכוכב. נקודת האמצע (2) אמנם נעה ימינה מעצם הסיבוב, אולם בהיות תנועה זו כלה בכיוון ניצב לקו הראייה של הצופה, היא אינה מתקרבת או מתרחקת ממנו. לעומת זאת כל הנקודות שבצד הימני, בין (2) ל-(1), יתקרבו כל אחת במהירות הולכת וגדלה עד שהנקודה (1) תתקרב במהירות הסיבוב הגדולה ביותר ביחס לצופה, והנקודה (3) תנוע במהירות גדולה ביותר כמו ב-(1) אבל בכיוון הפוך, כלומר תתרחק מהצופה.

עתה לשם פשטות, נניח שאנו רואים כוכב ממש נגד עינינו כמו כדור גדול ולא כנקודת אור, ונניח שאנו אף מסוגלים לראות את הנקודות

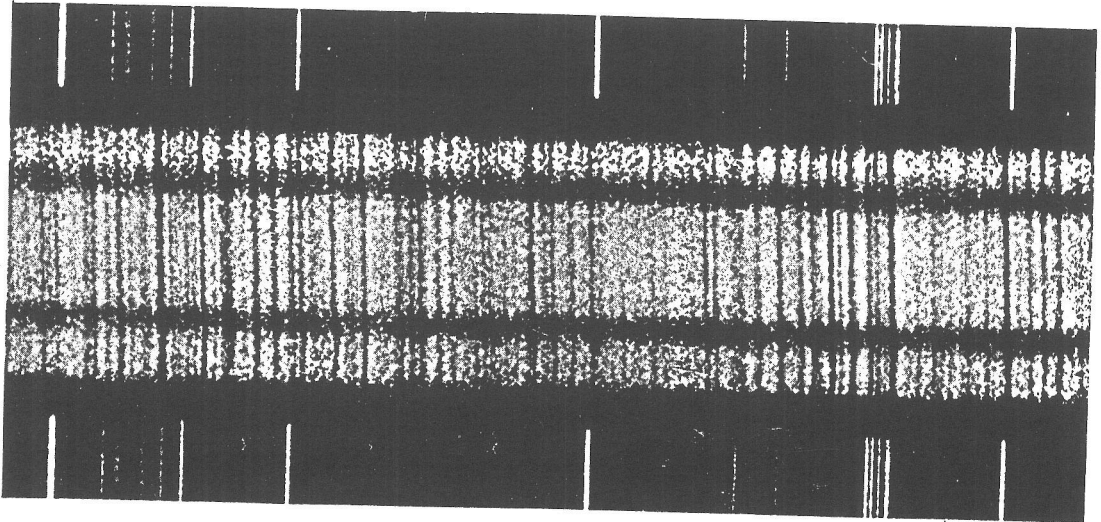
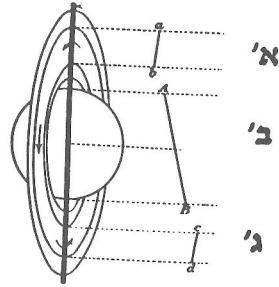
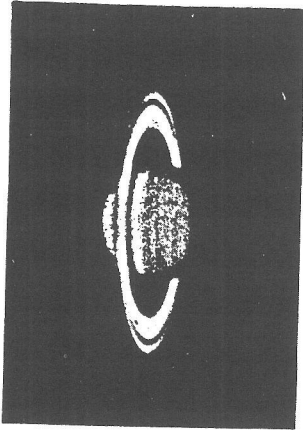
(1)(2)(3) כל אחת מהן בנפרד ואף לכוון את הטלסקופ שלנו לכל אחת מהן בנפרד (כמו שבודאי אפשרי לעשות כן בשמש שלנו שהיא גדולה למדי). בתחילה נכוון את הטלסקופ דוקא לנקודה (2) ונפצל את האור הבא מנקודה זו לצבעיו בעזרת פריסמה. כזכור, אנו נקבל לא רק את הצבעים, אלא גם קוי בליעה שחורים ודקים הפרושים על פני כל הצבעים (קוים ספקטריים). עתה נכוון את הטלסקופ לנקודה (1) ושוב נפצל לצבעיו את האור המגיע מנקודה זו, ואז נקבל שוב קוים ספקטריים דקים כמו אלה של נקודה (2). אולם, הפעם, בגלל אפקט דופלר, הקוים יהיו מוזזים מעט שמאלה ביחס לקוים של הנקודה (2) כי הנקודה (1)



תמונה 3: החיצים שבחלק העליון שבציור מתארים מהירויות של כוכב מסתובב סביב צירו. אור המגיע מנקודה (1) המתקרבת לצופה יפיק קו ספקטרי מוזז מעט שמאלה כמו בציור התחתון, בגלל אפקט דופלר. כן הדבר עבור הנקודה (3), אלא שהקו הספקטרי מוזז מעט ימינה בגלל התרחקות הנקודה (3) מהצופה. הנקודה (2) אינה מתקרבת ואינה מתרחקת מן הצופה ולכן הקו הספקטרי המגיע ממנה יעמוד במקומו הרגיל, ללא אפקט דופלר.

מתקרבת אלינו. (ראה מאמר שישי בסדרה זו) (בעצם כל הנקודות הנמצאות בין (1) לבין (2) כלן מתקרבות אלינו, ולכן כל אחת תתן סטייה של הקוים הספקטראליים מעט שמאלה אבל במידה שונה). באותה מידה, אם נפצל את הצבעים של האור המגיע מנקודה (3) נראה כי הקוים הספקטראליים מוזזים מעט, אבל ימינה ביחס לקוים הספקטראליים של הנקודה (2).

תמונה 4 מראה שלושה צילומים כאלה בדיוק שנלקחו בפועל משלוש

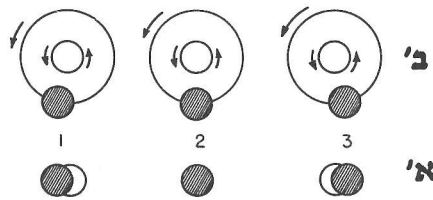


תמונה 4: שלושה ספקטרה משלושה איזורים שונים של הטבעות מסביב לכוכב הלכת שבתאי. הספקטרה מראים בבירור קוים ספקטראליים אלכסוניים, המעידים על מהירויות סיבוב שונות באיזורים א' ב' ג' של הטבעות.

נקודות שונות על פני הטבעות של כוכב הלכת שבתאי. הספקטרום העליון הוא של חלק הטבעת העליון והוא מראה שכל קוי הבליעה מוסטים מעט מאד שמאלה, כלומר קצה זה של הטבעת מתקרב אלינו. לעומתו הספקטרום התחתון הוא של קצה הטבעת התחתון והוא מראה כי קוי הבליעה מוסטים מעט ימינה, כלומר, קצה זה של הטבעת מתרחק מאתנו. הספקטרום האמצעי הוא מצבי ביניים בין שני הקצוות של הטבעות, ולכן הוא מחבר באלכסון את קוי הבליעה העליונים שמוסטים שמאלה עם קוי הבליעה התחתונים המוסטים ימינה. גודל הסטיה של הקוים הספקטריים בכוון שמאל (או ימין) מאפשר לחשב את מהירות הסיבוב של הטבעות סביב שבתאי בעזרת הנוסחה של אפקט דופלר. מתברר כי טבעות שבתאי מקיפות אותו בקצב של 11.2 שעות למחזור.

כאמור, הטבעות של שבתאי הן מספיק גדולות כך שנוכל לכוון את הטלסקופ לאיזורים שונים שלהם ולנתח את הספקטרום של כל נקודה בנפרד על פניהם. אולם, הכוכבים הרחוקים, על אף שהם כדורים ענקיים, הם נראים לנו בכל זאת רק כנקודות אור בלבד בגלל מרחקם הגדול מאתנו. כך יוצא כי לכאורה אין אפשרות מעשית לנתח את האור המגיע מאיזורים שונים של פני כוכב רחוק.

אולם, כבר בתחילת המאה הזאת התבררה תופעה מיוחדת, אשר למרבה המזל מאפשרת בדיוק לפתור את הבעיה שלפנינו. כזכור, ראינו במאמרים קודמים כי במערכת של זוגות כוכבים המקיפים זה את זה אנו רואים מדי פעם ליקוי, דהיינו, שכוכב אחד מסתיר את חברו (תוך כדי הקפתו). אולם הליקוי הזה אינו נוצר פתאום, אלא בהדרגה, דהיינו, כוכב אחד חולף על פני חברו באיטיות ואז מתכסים איזורים שונים מפניו של הכוכב השני בהדרגה (תמונה 5). כך יוצא כי בתחילת הליקוי עצמו אנו רואים צד אחד של הכוכב הלוקה שעדיין לא כוסה, ולקראת סוף הליקוי אנו רואים את הצד השני של הכוכב שהולך ומתגלה. אולם כאמור, התהליך הזה אינו נראה לנו ממש בפועל, שהרי כל הכוכב כלו (ואפילו יחד עם בן זוגו) נראים לנו כנקודת אור בודדת אחת. אולם, ההיחלשות ההדרגתית של האור מעידה על כיסוי איטי של כוכב אחד מבין השניים, אפילו שאין אנו רואים זאת בפועל.



תמונה 5: שלושת הציורים העליונים מראים מערכת של שני כוכבים המקיפים זה את זה, במבט "מלמעלה". שלושת הציורים התחתונים מראים את אותה המערכת במבט מן הצד. מצב (1) הוא לפני ליקוי מלא כאשר הכוכב המקוקו מסתיר את החצי השמאלי של הכוכב השני. מצב (2) הוא בזמן הליקוי ממש, כאשר הכוכב המקוקו מסתיר את כל הכוכב השני. מצב (3) הוא לקראת סוף הליקוי כאשר החצי השמאלי של הכוכב המרכזי מתחיל להתגלות. במצב (1) רואים את הכוכב המקוקו ואת החצי הימני של הכוכב המרכזי. במצב זה נראה בספקטרום של שני הכוכבים ביחד קוים ספקטראליים נוספים המעידים על כך שהחצי הימני של הכוכב המרכזי מתרחק מהצופה בגלל סיבובו סביב צירו. כן הדבר במצב (3), אולם בכיוון הפוך, דהיינו, נראה קוים ספקטראליים נוספים המעידים על התקרבות הצד השמאלי של הכוכב המרכזי אל הצופה.

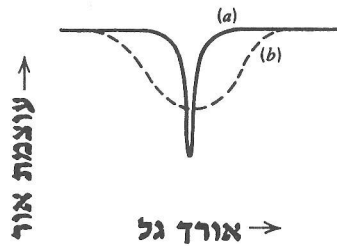
ואכן, במשך זמן ההיחלשות של האור, כלומר, בתחילת הליקוי, ובסופו ניתן אז לפצל את האור (החלש יותר!) לצבעיו ולקבל את הספקטרום. כך עושים ברגעים שונים של הליקוי עצמו ומקבלים ספקטרום אחד בכל רגע. מתברר אז כי מקבלים קוים ספקטראליים מוסטים מעט ממקומם הרגיל: בתחילת הליקוי הם מוסטים מעט בכיוון אחד ובסוף הליקוי הם מוסטים בכיוון השני. כלומר בתחילת הליקוי אנו רואים את החצי של הכוכב (המתקרב) אלינו ובסוף הליקוי אנו רואים את החצי השני שלו (המתרחק) מאתנו.

כלומר, אף מבלי לראות את כדור הכוכב כולו, ניתן בכל זאת לנתח את הספקטרום בתחילת הליקוי ובסופו, ולחשב מתוך גודל סטיית קוי הספ-קטרום את מהירות הסיבוב של הכוכב, כמו שראינו בטבעות כוכב הלכת שבתאי.

אם הכוכב הוא בודד ללא בן זוג, אז אם אנו לוקחים ספקטרום של כל אור הכוכב בבת אחת, אז כל קו ספקטראלי שיופיע בספקטרום יראה לנו

עבה יותר מן הרגיל, כי מאותה נקודת אור בודדת של הכוכב אנו מקבלים בפעם אחת את הקוים הספקטרליים של כל איזורי הכוכב: אלה המתקרבים אלינו ואלה המתרחקים מאתנו, וכל איזור כזה יש לו קו ספקטרלי מוזז מעט כך שמתקבל בסך בכל קו ספקטרלי עבה יותר מן הרגיל.

תמונה 6 מראה כיצד מתרחב כל קו ספקטרלי של אור של כוכב בגלל סיבוב הכוכב סביב צירו. ואכן ממדידת ההתרחבות הזו של כל אחד מן הקוים הספקטראליים ניתן לחשב את מהירות סיבוב הכוכב סביב צירו.



תמונה 6: כאשר כוכב מסתובב סביב צירו במהירות, הקוים הספקטראליים שלו מתרחבים. (a) קו ספקטרלי ללא סיבוב (b) קו ספקטרלי עם סיבוב

בכל שיקולינו לעיל אנו הנחנו שציר הסיבוב של הכוכב הוא ניצב לכיוון ראייתנו. במקרה כזה רואים בבירור כי מחצית אחת של הכוכב מתקרבת אלינו והמחצית השניה מתרחקת מאתנו. אולם אם ציר הסיבוב הוא ממש בכיוון ראייתנו, אנו כאילו רואים ממעוף ציפור את הכוכב וצירו, ולא נבחין בהתרחבות הקוים הספקטראליים. כלומר, אם לא הצלחנו למדוד מהירות סיבוב של כוכב סביב צירו, יתכן מאד שציר סיבובו נמצא בכיוון ראייתנו. כך באותה מידה מהירות הסיבוב שאנו מודדים בפועל מהספקטרום של כוכב אינה מהירות הסיבוב המדויקת שלו, כי יתכן שציר הסיבוב שלו נוטה בזווית כלפי קו ראייתנו. זווית נטיה כזו של הציר היא בדרך כלל נעלם גדול, ורק במקרים מועטים ניתן לחשבה משיקולים אחרים לגמרי.

אם כי אין אנו יודעים בדיוק את מהירות הסיבוב המדויקת של כל

כוכב, הרי אפשר בכל זאת להעריך באופן סטטיסטי מה הן המהירויות הסיבוביות של מדגם כוכבים, וזאת בהנחה שצירי הסיבוב במדגם כזה הם בעלי זווית נטיה אקראיות בין אפס לבין תשעים מעלות לכוון ראייתנו.

כאשר עושים מדגם כזה של מהירות סיבוב של כוכבים, מתברר כי מהירויות הכוכבים יכולות להגיע עד ל-500 ק"מ בשניה! פירושה של מהירות סיבוב גבוהה כזאת הוא שכוכב יכול לסיים סיבוב אחד בשלוש שעות בלבד! לעומת כוכב כזה, מסתובבת השמש שלנו במהירות איטית מאד והיא מסיימת סיבוב אחד בכ-27 יום בלבד.

כיום נמדדו מהירויות הסיבוב של כ-4000 כוכבים שונים. מתברר כי הכוכבים הכחולים (טיפוס ספקטרלי B) הם "הסביבונים" המהירים ביותר. מהירותם הסיבובית יכולה להגיע עד ל-500 ק"מ בשניה.

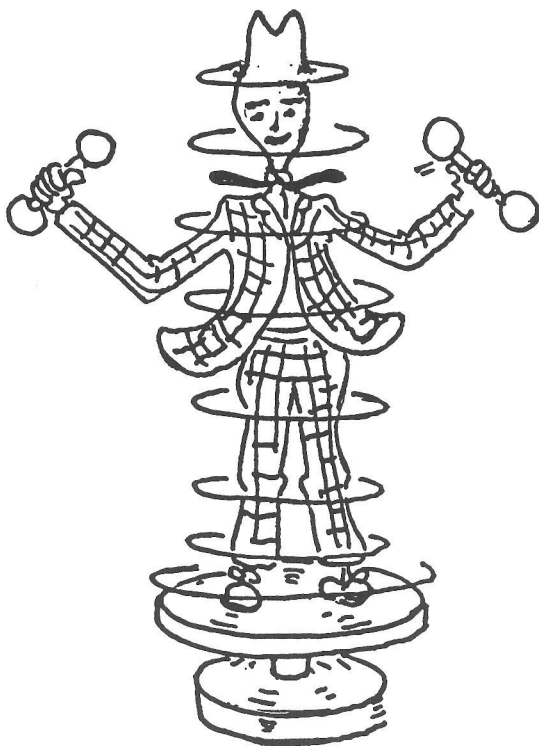
ההשפעה של סיבוב מהיר כזה על הכוכב יכולה להיות לפעמים קיצונית ביותר: א) הסיבוב המהיר יכול להתגבר על משיכת הגרביטציה של הכוכב עצמו ואז הגז שעל פניו "נקרע" ממנו החוצה. ואכן, בכוכבים כחולים רבים רואים קוים ספקטראליים ("קוי פליטה") המעידים על "בריחת" חומר כזה מפני הכוכב. ב) סיבוב מהיר יוצר פחיסות בקטבים: דהיינו, הכוכב מאבד את צורתו הכדורית ונעשה פתוס. (ראינו את התופעה הזו גם בכדור הארץ, ראה צבא השמים א'). ג) סיבוב הכוכבים סביב צירם, יחד עם מערבולות של הגז הלוהט, יכולים להביא את החומר שבשכבות הפנימיות אל שפתו של הכוכב. כזכור, במרכז הכוכבים מתחוללות ריאקציות גרעיניות היוצרות חומרים כימיים חדשים. מערבולות כאלו יכולות להביא את החומרים החדשים האלה אל שפת הכוכב, וכך אנו יכולים לצפות אותם באופן ישיר.

לעומת הכוכבים הכחולים הנחשבים "לסביבונים" מהירים, הרי הכוכבים הצהובים (כמו השמש שלנו) והאדומים הם ברובם "סביבונים" איטיים יחסית, אם כי ישנם גם יוצאים מן הכלל.

הסיבה לסיבובם של הכוכבים סביב צירם אינה ידועה, בדיוק כמו שגם הסיבה לסיבוב כדור הארץ סביב עצמו אינה ידועה. אין ספק כי תופעת סיבוב הכוכבים סביב צירם קיימת כבר מששת ימי בראשית. אולם יתכן

גם שסיבוב הכוכבים נוצר כאשר שני כוכבים חולפים זה על פני זה ואז אחד מהם יכול להעניק תנופת סיבוב לכוכב השני (בגלל כח משיכתו) סביב צירו ולגרום להאצה או להאטת הסיבוב.

סיבה אחרת להאצה או להאטת סיבובו של כוכב סביב צירו יכולה להיות התנפחותו או התכווצותו של כוכב מסיבה כל שהיא. עוד נדון במאמרינו הבאים בסיבות היכולות לגרום לתופעות כאלה. בכל אופן, אם לכוכב יש מהירות סיבובית כל שהיא, אז לאחר התנפחותו הוא מאיט את קצב סיבובו. לעומת זאת כאשר הוא מתכווץ - הוא מאיץ את סיבובו. את



תמונה 7: כאשר אדם מסתובב סביב ציר ולפתע הוא פושט את ידיו אז מהירות סיבובו יורדת. כאשר הוא מכווץ את ידיו אל גופו שוב עולה מהירות סיבובו. קיים מעין "חוק שימור תנופת הסיבוב", דהיינו, שתנופת הסיבוב נשארת בעינה: אם הוא פושט את ידיו יש צורך שמהירות הסיבוב תרד, ולהפך, כאשר הוא מקרב את ידיו אל גופו, מהירות הסיבוב צריכה לעלות בכדי לפצות על "קיצור הזרועות".

תופעת שינוי המהירות הזאת אנו מכירים בניסוי במעבדה כגון באדם העומד על פלטה מסתובבת במהירות: כאשר הוא פושט את ידיו ("מתנפח") מהירות סיבובו יורדת, וכאשר הוא מחזירן שוב לגופו (מתכווץ) מהירות סיבובו עולה. (תמונה 7).

ישנם מקרים אשר בהם קורס כל הכוכב תחתיו מרדיוס של כמיליון ק"מ לכעשרה ק"מ בלבד. במקרה כזה יסתובב הכוכב המכווץ במהירות עצומה וישלים סיבוב אחד בכאלפית השניה! בהמשך נדון בכוכבים מיוחדים כאלה אשר נצפו בפועל.

תופעת הסיבוב היא אופיינית לכל גרמי השמים ללא יוצא מן הכלל, מכדור הארץ הסובב סביב צירו אחת ל-24 שעות, ועד לכוכבים הענקים ביותר ביקום. מתברר כי תופעת הסיבוב סביב צירם מעניקה לכוכבים יציבות. כך למשל, סיבוב כדור הארץ סביב צירו גורם לכך שציר הסיבוב ישמור על כוון קבוע במרחב, וכך העונות נשמרות בקביעות למשך שנים רבות. כך באותה מידה רצה הקב"ה להאציל יציבות כזו לכל גרמי השמים ובכך מתאפשר לעקוב אחרי התופעות שעל פניהם בצורה סדירה.

מאמר עשירי

המגנטיות של הכוכבים

כתב ספר הברית (השלם) בחלק א', כתב יושר, מאמר ג' (נכתב לפני כמאתיים וחמישים שנה): "יש מחכמי התוכנים מגשימים את הכוכבים... האומרים שכל הכוכבים הן הקיימים (כוכבי שבת) הן הלכת, הם עול-מות גשמיים ממש, ובהם אדם ובהמה רבה והניצנים והדומם, הווים ונפסדים כמו בעולם הזה ממש. ומהם אומרים שהכוכבים שאינם מאירים הם הארציים, והעולמות המאירים (להם) הם השמשות לאותן העולמות, וכל כוכב המאיר הוא שמש לעולם אצלו.... והחוקר (העפע-ליוס) מתאמץ מאד בספרו להוכיח שיש בלבנה הרים וגבעות סלעים וימים ונהרות ככדור ארצנו ממש, באמרו כי מלבד הכתמים הגדולים בה הנראים לעין, נראה בתוכה ע"י כלי מחזה (טלסקופ) ג"כ כתמים קטנים... ואמר עוד שיש בה כתמים עומדים תמיד במקום אחד ויש ג"כ מהכתמים קטנים מתחלפים משנים צורתם ומידתם ומצבם בה מיום ליום, ואמר על הכתמים המתחלפים שהם צללים מן ההרים וסלעים הגבוהים אשר בה (בגלל השמש המחליפה מקומה) ויאמר על חלקי החשוכים שבה שהם ימים ומים, ויאמר על המקומות הבהיריים אשר בתוך הכתמים שהם האיים אשר באותן הימים. והרבה לספר דברים כאלה, כאילו עלה שמים וירד, ובעינו אז ראה ויספרה, וכל מה שראה בעוה"ז אשר בו הוא, ידמה לו כי המה בלבנה כמו כן (גם כן). והוא נדמה בזה לאדם יערי הנקרא, 'וואלד מאן', (פרא אדם) אשר מצא מראה מלוטשת גדולה הנקרא 'שפיגעל' עומדת בצד הר גדול אשר שכח שמה סוחר אחד מאנשי אירופא אשר עבר דרך אניה בלב ים אצל אותו היער, ויצא על היבשה ויחן שם נגד ההר יום או יומיים וישכחתי וילך. והנה זה האדם היערי הסתכל באספקלריא המאירה וראה בתוכה צורת אדם שחור ומקלו בידו כמוהו, גם צורת האילנות גם צורת נהר אחד שהיה שם ביער לנוכח המראה, ויירא ויאמר, אכן יש עולם מלא בתוך ההר הגדול הזה והתחכם והתפלסך

והעלה בדעתו ואמר אין זה כי אם שההר חלול ותלול ובתוכו נמצא הכל, גם עיר גם אילנות רבות כיער שלנו, גם נהרות ואיים בתוכו, גם בני איש גם בני אדם שחורים, כמונו כמוהם ממש, והעד שיש לכל אחד מהם מקל בידו כמנהגנו. ולא ידע כי בנפשו דבר ואת עצמו ראה".

בהמשך הדברים, מחבר ספר הברית אינו מכחיש בהכרח את הדברים שאמרו התוכנים האלה בזמנם, אלא אומר "כי על זאת אשיב להם שכלם לא נבראו אלא לתועלת הארץ הזאת והכל ברא לכבודו של האדם באדמה כמה שנאמר 'ואת המאור הקטן לממשלת הלילה ואת הכוכבים, ויתן אותם אלקים ברקיע השמים להאיר על הארץ' (ברא-שית א'), כאשר הוא באמת הם וכל אשר בהם לא נבראו אלא להשלמת תיקונו של האדם בארץ הלזו, אף שאין אתנו יודע מה התועלת שאנו משיגים מן הברואים ההם...."

כלומר, במידה וכל הדמיונות האלה של התוכנים הם לאמיתה, הרי הכל נברא לכבודו של האדם.

ואכן, בלי דמיונות באסטרונומיה אי אפשר. האסטרונומים כיום, ככל בני אדם, יכולים לראות בעיני רוחם רק דברים שהם בעלי צורה ודמות הקרובה אליהם, אם זה דומה לתופעות ולחוקי הטבע על פני כדור הארץ וסביבתו, או השמש שלנו וסביבתה. הרבה מאד דברים נאמרו על ידי התוכנים במשך ההיסטוריה, חלק מהם אכן התבררו עם הזמן כנכונים, אבל חלק אחר התברר כבלתי נכון: חלק מהדברים היו כמו אותו דמיון שראה "האדם היערי" במראה המלוטשת, אבל חלק אחר עדיין עומד שריר וקיים במבחן המציאות והתגליות.

בכל אופן, כעקרון, זוהי גם הדרך המדעית: לנסות לתאר את הדברים הרחוקים באותם האופנים שאנו רואים בסביבתנו אנו, אם זה העובדות עצמן, או אפילו חוקי הטבע שבסביבתנו אשר אנו משליכים אותם גם בכוכבים הרחוקים ומרחבי החלל, ובלשונו של ספר הברית "כאילו עלה השמים וירד, ראה ויספרה". במידה ומתברר עם הזמן כי ישנם דברים שאינם עומדים במבחן התגליות החדישות יותר, הרי הם נדחים ואחרים תופסים את מקומם. זוהי אולי חולשתו וגם עוצמתו של המדע: חולשתו-

כיון שאין בידו אמיתות מוחלטות. עוצמתו - כיון שבינתיים הוא מנוצל לרווחתו הטכנולוגית של האדם בשטחי ההנדסה והרפואה.

כמעט כל הנקודות הזוהרות בשמי הלילה הם בעיני האסטרונומים שמשות רחוקות הדומות לשמש שלנו. אף על פי שהן נראות רק כנקודות זעירות בלבד, בכל זאת, האסטרונומים מתארים אותם ככדורים גדולים, ואף מחשבים את גודלם, את חומם, את הרכבם הכימי, וכפי שנראה להלן, אף את המגנטיות שלהם. כל זה נעשה בעקבות ההנחה שהשמש שבקרבתנו היא דוגמה לכל הכוכבים הרחוקים מאתנו: עליה אנו מסתכלים ובונים בעיני רוחנו שכל הכוכבים בשמים דומים לה פחות או יותר. בעשרים השנים האחרונות התברר מתוך צילומים בטלסקופים גדולים, כי אכן לפחות ההנחה על היותם כדורים גדולים היא נכונה: הצילומים החדשים מראים כי אכן הכוכבים הקרובים אלינו הנראים לנו כנקודות זעירות בלבד, הרי הם כדורים ממש.

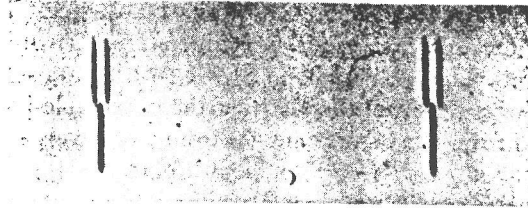
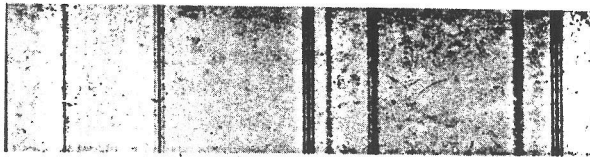
כבר ראינו (צבא השמים, חלק א') כי על פני השמש נתגלתה תופעת המגנטיות ואפילו בעוצמה רבה במיוחד. מה מקור המגנטיות של השמש? ואף יותר מזאת, אם נחקור את המגנטיות שלה, האם אפשר למצוא את התופעות המגנטיות האלו גם בכוכבים הרחוקים? באיזה מידה מסקנותינו על המגנטיות של הכוכבים הרחוקים תהיינה מבוססות, או אולי נהיה דומים שוב לאותו "אדם יערי" הרואה במראה רק בבואות דומות למציאות שמסביבו (השמש) ואין לזה כל קשר עם ההר שמולו (הכוכבים הרחוקים)?

בתחילה נתאר בפרוטרוט את המגנטיות של השמש ושל כוכבי הלכת מסביבה.

כזכור, תופעת המגנטיות עצמה תיארנו בהקשר למגנטיות כדור הארץ (צבא השמים, חלק א'). כידוע, המכשיר הבסיסי לגילוי המגנטיות של כדור הארץ הוא המצפן. אולם בשמש, אנו צריכים להשתמש במכשיר שיגלה זאת מרחוק, דהיינו, ע"י ניתוח קרינת האור המגיעה ממנה. ואכן, מתברר כי ישנה תופעה מיוחדת הידועה כבר במעבדות על כדור הארץ המאפשרת לנו לגלות את המגנטיות של השמש ע"י ניתוח האור המגיע ממנה. כידוע, האור של השמש ניתן לפצל לצבעיו בעזרת פריסמה. כבר

ראינו כי בתוך הצבעים עצמם ניתן לראות קוים שחורים דקים מאד (שכל אחד מהם אופייני ליסודות הכימיים שבשמש). לפיצול לצבעים וכן הקוים השחורים בתוכו קוראים בשם "הספקטרום של השמש", וכל קו שחור כזה קראנו בשם "קו ספקטראלי". כזכור, האור של השמש נוצר בגלל שהגז שעל פני השמש לוהט בטמפרטורה של כ-6000 מעלות. נוכל לבצע ניסוי דומה עם גז לוהט במעבדה על פני כדור הארץ ולפצל את האור הבוקע ממנו לצבעים בעזרת פריסמה, וכך לקבל את "הספקטרום" של האור של הגז הלוהט הזה במעבדה. ואכן, יתקבלו גם "קוים ספקטראליים" אופייניים לגז הלוהט. הניסוי הזה הוא אכן פשוט, ואפשר לעשותו אפילו עם נורת להט ביתית רגילה, דהיינו לפצל את אורה דרך פריסמה ולקבל במעבדה את "הספקטרום" של הגז הלוהט שבנורה.

אולם, כאשר מניחים את נורת הגז הלוהט במעבדה בתוך חלל בין שני מגנטים חזקים, (כלומר בתוך "שדה מגנטי" חזק), מתברר כי כל אחד מהקוים הספקטראליים שהיה בספקטרום הקודם (ללא המגנטים) מתפצל עתה לשני קוים! אולם, יש צורך במיקרוסקופ בכדי לראות שאכן כל קו התפצל. מתברר גם כי ככל שהשדה המגנטי הוא חזק יותר, כך גם הפיצול גדול יותר, דהיינו, המרחק בין זוג הקוים הוא גדול יותר (אולם יש להש-תמש עדיין במיקרוסקופ!) תמונה 1 מראה את תופעת הפיצול של קוים

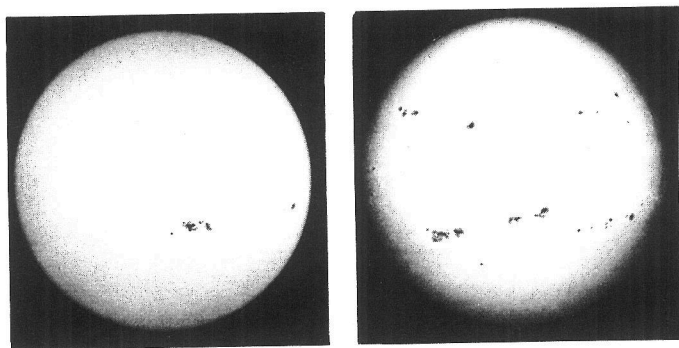


תמונה 1: הספקטרום העליון מראה את הפיצול של יסוד הברזל (כשהוא לוהט ומקרין מחם) בנוכחות שדה מגנטי. הספקטרום התחתון מראה פיצול של קוים ספקטראליים של כספית (שניהם צולמו במעבדה על כדור הארץ).

ספקטרליים בתוך שדה מגנטי בניסוי במעבדה. מתברר כי קיימת גם תופעת לוואי נוספת המאשרת שהפיצול אכן נובע משדה מגנטי ולא מגורם אחר: רואים כי הקוים שהתפצלו הם גם מה שמכנים בשם "בעלי אור מקוטב". כיצד מנצלים זאת לגילוי המגנטיות של השמש? בתחילה נחזור ונבאר מה הם "כתמי שמש".

כזכור (צבא השמים, חלק א') השמש שלנו אמנם היא גוף זוהר בטמפרטורה של כ-6000 מעלות, אולם מופיעים על פניה מדי פעם כתמים שחורים יחסית (בטמפרטורה של כ-4200 מעלות חם) הנשארים על פניה ימים וחודשים, ואחרי כן נעלמים.

תמונה 2 מראה את כדור השמש בצילום מיוחד המראה כתמים כאלה.



תמונה 2: שני צילומים של השמש בתקופות שונות.

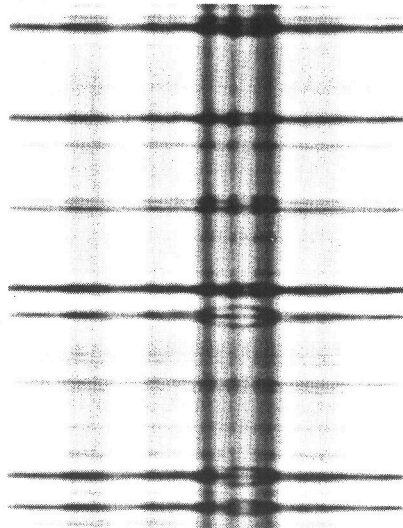
תמונה 3 היא הגדלה של אחד מכתמי השמש. אם מכוונים את הטלסקופ במיוחד אל איזור כזה של כתם שמש, אפשר אז לפצל את האור המגיע ממנו בעזרת פריסמה ולקבל את הספקטרום של האור המגיע מכתם זה (הכתם אינו חשוך לגמרי, אלא נמצא בטמפרטורה של כ-4000 מעלות, ורק ביחס לסביבתו הוא נראה "חשוך"). תמונה 4 מראה את קווי הספקטרום של האור המגיע מכתם כזה. רואים בבירור כי הקו הספקטרלי של הברזל (מסומן במספר 5250 בתמונה) מפוצל לשני רכיבים (בצורת קשת). פירוש הדבר הוא כי קיים שדה מגנטי בתוך כתם השמש עצמו, כפי שהסברנו קודם. מתברר גם כי הקוים שהתפצלו הם גם בעלי "אור מקוטב" (כפי שצינו לעיל) כך שהפיצול אכן נובע מקיום שדה מגנטי



1830 UT
7/4/74

תמונה 3: צילום מוגדל של כתם שמש.

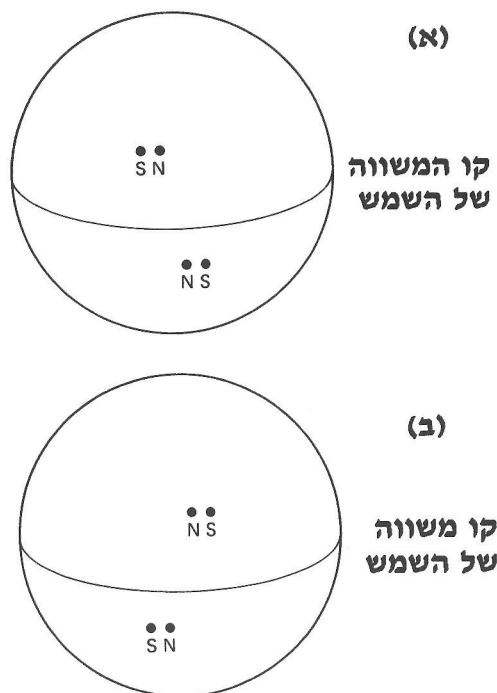
Fe 5250 Å



תמונה 4: הספקטרום של אור השמש הבא מתוך הכתם שבתמונה 3, ובפרט מהאור שבא באיזור המסומן בקו שחור בכתם.

בכתם. כאשר מודדים את גודל הפיצול (המרחק בין שני הקוים שהתפצלו) מקבלים שהשדה המגנטי בכתם זה הוא חזק פי 8000 בערך מהשדה המגנטי של כדור הארץ! בדרך כלל מודדים את עוצמת השדה המגנטי ביחידות הנקראות בשם "גאוס". לפי זה השדה המגנטי של כדור הארץ הוא 0.5 גאוס בלבד בשעה שהשדה המגנטי האופייני של כתמי השמש מגיע לכדי 3000-4000 גאוס ויותר!

כידוע, בכל שדה מגנטי יש קוטב צפוני וקוטב דרומי. מתברר כי מתוך המדידות בספקטרום אפשר אפילו לדעת אם השדה המגנטי הוא בעל קוטב צפוני או דרומי. מתברר כי לכל כתם יש אכן קוטב צפוני או דרומי, כלומר, אם כתם הוא למשל בעל קוטב מגנטי צפוני, אז יש לו תמיד כתם אחר שהוא בן זוגו, אבל בעל קוטב מגנטי דרומי. (ראה תמונה 5).

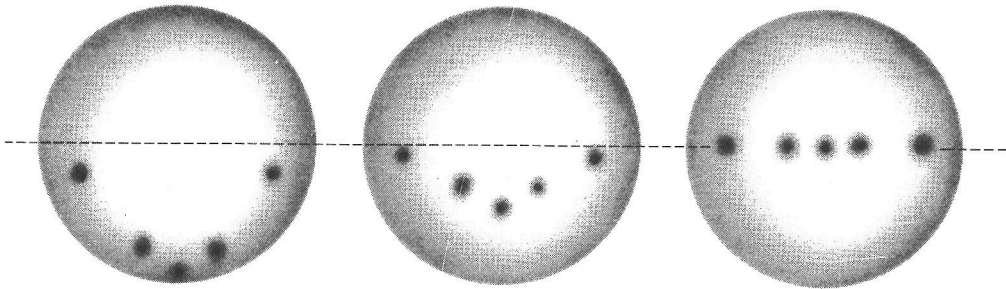


תמונה 5: זוגות כתמי השמש הם בעלי קוטביות הפוכה זה לזה (N מסמן קוטב צפוני, S - קוטב דרומי). השרטוט התחתון הוא לאחר מחזור של כ-11 שנה: מתברר כי הקוטביות של זוגות הכתמים התהפכה.

אף יותר מזאת, מתברר כי מספר הכתמים שעל פני השמש משתנה במחזוריות בכל 11 שנה (ראה צבא השמים חלק א'). כלומר, בכל 11 שנה (כמעט) נעלמים הכתמים על פני השמש. אי לכך יעלמו גם השדות המגנטיים האלה שעל פני השמש גם הם בהדרגה כל 11 שנים. כך יוצא כי העוצמה של השדה המגנטי הכולל של כל כתמי השמש ביחד משתנה במחזוריות של 22 שנה (בערך).

מה הסיבה ליצירת הכתמים בכלל ולשדות המגנטיים שבתוכם? אמנם אין כיום הסבר מדויק לתופעות אלו, אבל משערים שהסיבוב הבלתי אחיד של השמש סביב צירה וכן המערבולות החזקות שמתחת לשפת השמש יוצרים כנראה הן את השדות המגנטיים החזקים והן את הכתמים האלה. בתחילה נסביר כל תופעה לחוד.

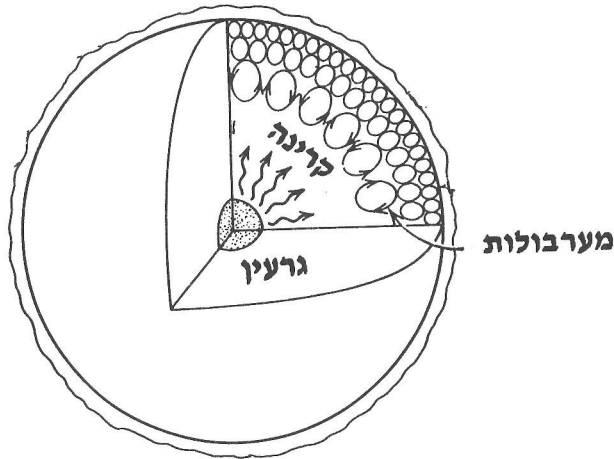
כזכור, ראינו כבר (צבא השמים חלק א') כי השמש אינה גוף מוצק, אלא מורכבת מגזים לוהטים. אי לכך היא אינה מסתובבת סביב צירה כמקשה אחת, אלא, מתברר כי קו המשווה שלה משלים סיבוב אחד ב-25 יום, בשעה שאיזור הקוטב הצפוני משלים סיבוב אחד ב-31 יום. כך יוצא כי הגזים על קו המשווה נעים מהר יותר מאשר הגזים בקו רוחב גבוהים יותר (צפונה או דרומה מקו המשווה, תמונה 6).



תמונה 6: כתמי השמש על קו המשווה נעים במהירות גדולה יותר מאשר בקוטב.

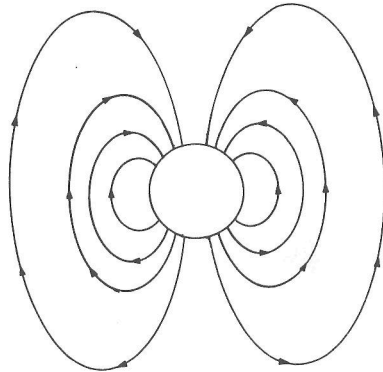
התנועה הבלתי אחידה הזו של הגזים על פני השמש מלווה גם בתנועה נוספת של מערבולות: תמונה 7 מראה כיצד נעים הגזים שמתחת לפני השמש במערבולות, דהיינו, כיצד הגז עולה ויורד בתנועה סיבובית מתחת לפני השמש. כך יוצא כי הגז שבשכבות העליונות של פני השמש משתתף

בשתי תנועות: האחת במהירות סיבובית בלתי אחידה, על פני השמש והשניה בתנועה מערבולית למעלה ולמטה בתוך השמש.



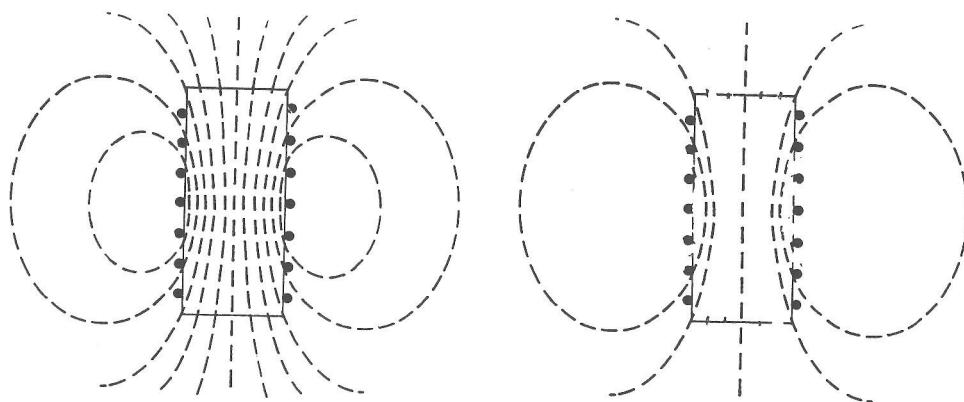
תמונה 7: בשכבות העליונות של כדור השמש שולטות מערבולות חזקות המניעות את הגז הלוהט בכוון מעלה - מטה.

פרט לגזים הלוהטים הנעים על פני השמש קיים גם שדה מגנטי קבוע אופייני לשמש שהוא בערך פי ארבע מזה של כדור הארץ (דהיינו כשני גאוסים). שדה מגנטי קבוע זה נמדד על כל פני השמש באופן בלתי תלוי בכתמים. תמונה 8 מראה את מה שמכנים בשם "קוי הכח של השדה המגנטי" של השמש. דהיינו, זהו מסלול הפעילות של הכח המגנטי מסביבה.



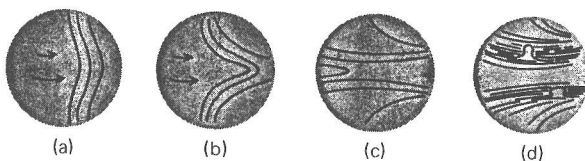
תמונה 8: "קוי כח מגנטיים" מסביב לשמש. מסלולים אלה אינם נראים במציאות אלא מייצגים את השפעת השדה המגנטי סביב השמש.

המסלולים האלה קובעים את הכוון של פעילות הכח המגנטי, וצפיפותם של קוים אלה מעידה על עוצמת השדה המגנטי עצמו: ככל שקויה הכח הם צפופים יותר, כך הם מייצגים שדה מגנטי חזק יותר (תמונה 9).



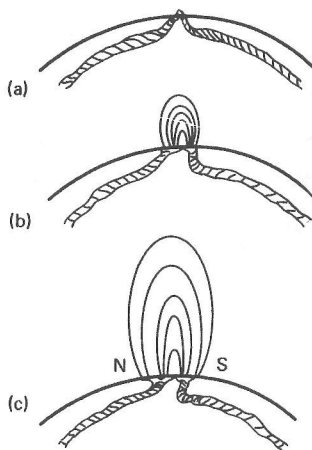
תמונה 9: צפיפות גדולה של "קויה כח" מגנטיים מייצגת עוצמת שדה מגנטי חזקה יותר (השרטוט מצד שמאל).

קויה הכח המגנטיים אינם ממשות הנראית לעין אלא מהוים רק דגם להבנת הפעילות המגנטית. קויה כח אלה הם דמיוניים בלבד אבל מאפשרים לנו לבאר תהליכים בצורה פשוטה. הם "ממלאים" את החלל סביב השמש אבל "נמצאים" גם בתוך הגז הלוהט עצמו. יש שהגז "נושא" אותם יחד אתו בתנועתו, וגם הם יכולים להחזיק את הגז "שבוי" בתוכם. לאחר שהסברנו את התנועה הבלתי אחידה של שפת השמש, את המערבורות וכן השדה המגנטי של השמש, נוכל עתה להסביר מהי ההשערה כיום ליצירת כתמי השמש וכן לשדות המגנטיים החזקים שבתוכם. תמונה 10 מראה כיצד קויה כח מגנטי העובר מן הקוטב המגנטי של השמש הולך



תמונה 10: קויה הכח המגנטיים הולכים ומתעוותים עם סבוב השמש סביב צירה.

ומתעוות תוך כדי תנועתו של הגז סביב השמש על קו המשווה: באיזור זה נע חלק קו הכח המגנטי יחד עם הגז במהירות גדולה יותר מאשר צפונה (או דרומה לו). התוצאה היא שככל שהשמש משלימה את סיבוביה בזה אחר זה, הולכים ומתעוותים קוי הכח המגנטיים, והם נעשים גם צפופים יותר ויותר. העוותים האלה מתחוללים על פני השמש וכן בשכבות הגזים הקרובות שמתחת. אולם, כבר ראינו כי המערבולות של הגזים שם נעות גם בסיבובים מעלה ומטה, כך שפרט לצפיפות קוי הכח שנוצרה בגלל הסיבוב הבלתי אחיד, הרי תנועת הגזים במערבולות גורמות עתה לליפוף של קוי הכח סביב עצמם כשהם היו צפופים מקודם בלאו הכי. כך נוצרות כאילו אלומות של קוי כח מגנטיים שהולכות ונכרכות סביב עצמן יותר ויותר בגלל סיבובי הגז במערבולות. תמונה 11 מראה את התוצאה של פיתול כזה של קוי כח, כאשר בסופו של דבר נוצרת לולאה של קוי כח הפורצת כלפי מעלה. ללולאה כזו יש שני קטבים מגנטיים, צפוני ודרומי, כמו שרואים בפועל בשני כתמים שכנים. הצפיפות של קוי הכח המפותלים היא עתה גדולה מאד ויכולה להעיד על שדה מגנטי של אלפי גאוס (במקום 2 גאוסים בלבד הקבועים שהתחלנו בהם קודם).



תמונה 11: למעלה, קוי כח מגנטיים הולכים ונכרכים סביב עצמם כמו חבל. כאשר המתח של הכריכה הוא גדול, נוצרת לולאה "המתפרצת" החוצה כמו בציור האמצעי והתחתון.

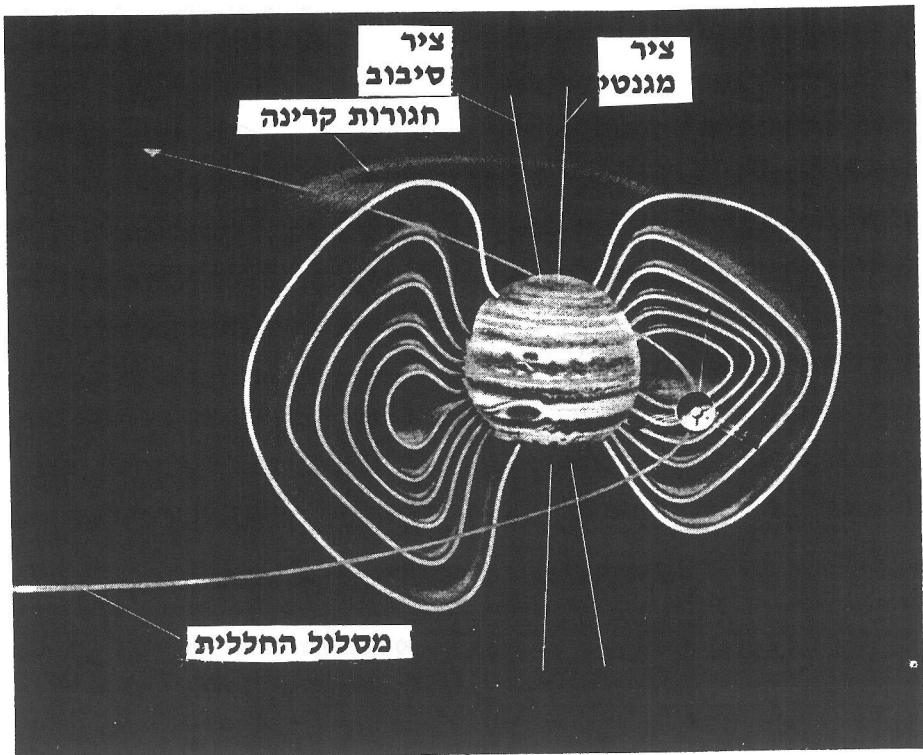
יתר על כן, עוצמת השדה המגנטי היא כה חזקה, שהיא מדכא את תנועת המערבולות והחימום שמתחת לפני השטח, ואי לכך נראה איזור כזה עמום יותר, דהיינו חשוך יותר מסביבתו הקרובה.

ברור כי הלולאות של אלומות קוי הכח המגנטיים יכולות להתחולל בצורה אקראית באיזורים שונים על פני השמש, כך שכתמי שמש יכולים להוצר בדרך משוערת כזו במקומות שונים. המענין הוא שמספר הלולאות האלה משתנה במחזוריות של כ-11 שנים, דהיינו כמעט ונעלמות מדי 11 שנה. גם כאן משערים שכנראה לאחר כ-11 שנה הלולאות של אלומות קוי הכח המגנטיים נעשות כל כך מפותלות עד שקוי הכח המפותלים "נקרעים", בדיוק כמו שחבל שהתפתל יותר מדי גם הוא נקרע בסופו של דבר. פעילות הגזים על פני השמש אינה מתבטא רק ביצירת כתמים, אלא קיימות גם התפרצויות חזקות של גזים לגובה עשרות אלפי קילומטרים. ישנם גם איזורים אחרים שהם דוקא חמים מאד ומגיעים לטמפרטורה של 10 מיליון מעלות! גם תופעות אלו מלוות בהופעה של שדות מגנטיים חזקים.

מתברר כי יצירת הכתמים והפעילות המגנטית בתוכם מלווה בתופעות נוספות: אחת מתופעות הלואי האלה היא הופעה חזקה במיוחד של קוים ספקטרליים מיוחדים בספקטרום של האור המגיע מן הכתם. כך למשל רואים קוים ספקטרליים חזקים מיוחדים (של פליטה) של היסודות הכימיים כגון סידן, מגנזיום, הליום, פתמן וחנקן. הקוים המיוחדים של היסודות הכימיים האלה נחלשים ומתחזקים גם הם במחזוריות של 11 שנה בערך כמו פעילות הכתמים בשמש. כך יוצא כי מדידת העוצמה של קוים מיוחדים אלה היא עדות מהימנה לפעילות המגנטית של השמש. ואכן, משתמשים בזה למדידת הפעילות המגנטית בכוכבים אחרים כפי שנראה להלן.

אם השמש היתה במרחק גדול מאתנו כמו כוכבי השבת הרחוקים, היינו רואים אותה כנקודת אור זעירה בשמי הלילה. אם היינו מודדים את השדה המגנטי שלה, היינו רואים תנודות מחזוריות בעוצמת השדה המגנטי טי כל 11 שנה. אף יותר מזאת, היינו יכולים לעקוב אחרי עוצמת הקו הספקטראלי של הסידן (למשל) ולראות כיצד משתנה עוצמתו במחזוריות של 11 שנה.

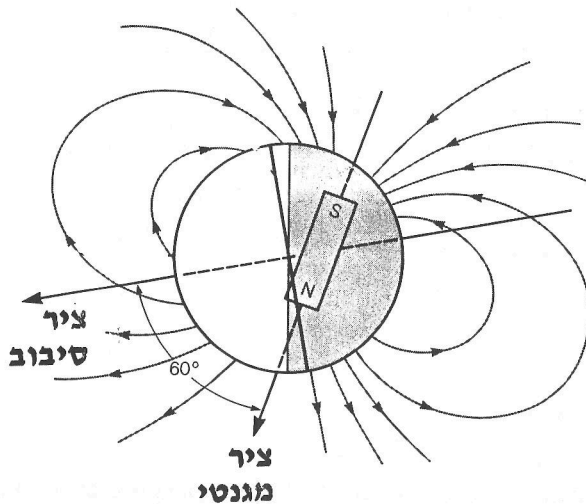
לא רק בשמש, אלא גם בכוכבי הלכת נתגלו שדות מגנטיים סביבם. החלל של השדה המגנטי מסביב נקרא בשם "המגנטוספירה". קוי הכח המגנטיים מסביב לשמש מהוים את המגנטוספירה שלה. בדרך כלל, המגנטוספרות של כוכבי הלכת נתגלו ע"י חלליות שהגיעו עד לקרבתם ממש. כך, למשל כוכב הלכת הגדול ביותר במערכת השמש, צדק, נתגלה השדה המגנטי שלו ע"י החלליות פיוניר וו'אג'ר. מתברר כי השדה המגנטי שלו הוא גדול פי 20-30 מזה של כדור הארץ (כ- 10^{-15} גאוס). תמונה 12 מראה סרטוט סכימטי של קוי הכח של השדה המגנטי. בעיקרו, דומה



תמונה 12: שרטוט סכימטי של המגנטוספירה סביב כוכב הלכת צדק: היא מורכבת משכבות שונות של חלקיקים השבויים בתוך השדה המגנטי סביב צדק. שים לב שציר השדה המגנטי נוטה באלכסון כלפי ציר הסיבוב. מתברר גם שהמגנטוספירה כולה מתכווצת ומתנפחת במחזוריות ומגיעה עד כדי שליש גודלה בחלל.

שדה מגנטי זה לזה של כדור הארץ, דהיינו, כאילו בתוך כוכב הלכת צדק מונח "מגנט מוט" ענק בכיוון צפון - דרום כמו בכדור הארץ. הכוון של הציר המגנטי צפון דרום אינו זהה לכוון ציר הסיבוב של צדק, אלא הוא נוטה ב-15 מעלות קשת ביחס אליו (תמונה 12). עובדה מעניינת נוספת היא שכיווני הקטבים המגנטיים צפון - דרום בצדק, הם הפוכים לכוון אלה של כדור הארץ.

גם לכוכבי הלכת שבתאי ואוראנוס יש שדות מגנטיים. תמונה 13 מראה בצורה סכימטית את קוי הכח של השדה המגנטי סביב לאוראנוס. המעניין בכוכב לכת זה הוא שהציר המגנטי שלו נוטה בזווית של 60 מעלות קשת ביחס לציר הסיבוב שלו!



תמונה 13: קוי הכח של השדה המגנטי סביב כוכב הלכת אוראנוס. שים לב שציר השדה המגנטי נוטה בזווית גדולה של 60 מעלות כלפי ציר הסיבוב שלו.

המגנטוספירות מסביב לכוכבי הלכת האלה נמשכות למרחקים גדולים יחסית. החשיבות שלהם היא בעיקר "בתפיסת" חלקיקים של "רוח השמש" כגון אלקטרונים הנפלטים ממנה. ברגע שחלקיקים כאלה נתקלים במעורבם בקו כח מגנטי, הם מתחילים להסתובב סביבו במסלול ספירלי ותוך כדי כך הם מקרינים קרינת רדיו הנקלטת כאן על כדור הארץ. לקרינה כזו של חלקיקים טעוני חשמל (כמו אלקטרונים) מסביב לקו כח מגנטי