

אוניברסיטת תל-אביב  
הפקולטה למדעים מדויקים  
החוג לגיאופיסיקה ולמדעים פלנטריים

## **הפרעות אטמוספריות באסטרונומיה**

או

**כיצד לפרוץ את תקרת הזכוכית**

עבודת סיכום במסגרת הקורס :

**תופעות חשמליות ואופטיות באטמוספירה**

מוגש לידי :

**פרופ' דינה פריאלניק-קובץ'**

מגיש : דוד פולישוק

יוני 2004

## תוכן עניינים

0	1. מבוא
3	2. בעיות אטמוספריות באסטרונומיה
3	2.1 פיזור (Scattering)
5	2.2 החזרה (Reflection) בליעה (Absorption) ופליטה (Emission)
6	2.3 הפחתה (Extinction)
7	2.4 חסימת תחומי תדרים
8	2.5 שבירה (Refraction) והפרדה (Resolution)
9	2.6 עננים
10	3. פתרונות אפשריים לבעיות אטמוספריות באסטרונומיה
10	3.1 פתרונות לבעיית הפיזור וזיהום האור
11	3.2 פתרון בעיית ההפחתה בעזרת משוואות פוטומטריות
12	3.3 פתרון בעיית השבירה בעזרת חוקי סנל
13	3.4 הגדרות ופתרונות לבעיית ההפרדה
15	3.5 מיקום המצפה כפתרון משמעותי
16	3.6 פתרון בעיית חסימת התדרים – יציאה אל החלל
18	4. סיכום
19	5. ביבליוגרפיה

## 1. מבוא

האטמוספירה איננה תווך ריק. היא מכילה מולקולות אוויר שונות, חלקיקי אבק, אירוסולים וזיהום תעשייתי. שלל החלקיקים הללו גורמים לתופעות אופטיות שונות המעוותות את אור הכוכבים, והמקשות על האסטרונום לבצע מלאכתו נאמנה, ולחקור את המגוון העשיר של מקורות קרינה המגיע אל כדור-הארץ מן החלל.

עבודה זו מפרטת שלל קשיים ומכשולים שמעמידה האטמוספירה בפני תצפיתנים, כמו הפחתת העוצמה, ושבירת קרני אור הכוכבים. הבעיות מוצגות בפרק הראשון, ואילו הפרק השני מתאר כיצד מתמודדת הקהילה האסטרונומית עם בעיות אלו בעזרת פתרונות רבים ומגוונים.



תרשים מס' 1: אטמוספירת כדור הארץ

## 2. בעיות אטמוספיריות באסטרונומיה

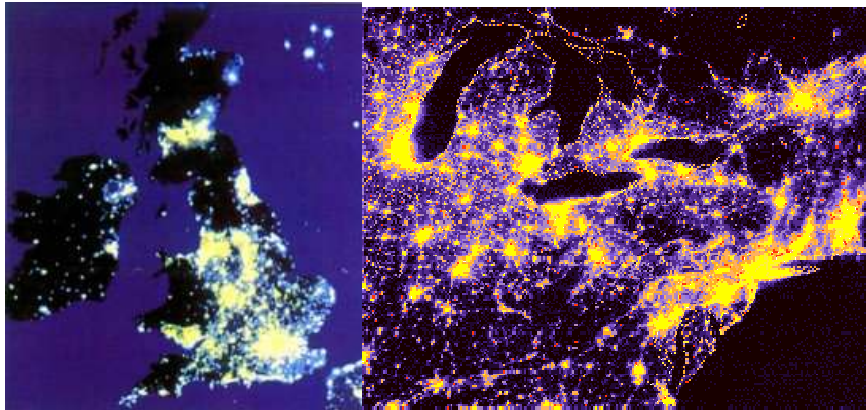
### 2.1 פיזור (Scattering)

בשעות היום לא ניתן לערוך תצפיות אסטרונומיות. על-אף שקוטרה הזוויתי של השמש הינו רק כחצי מעלה, אורה הבהיר שולט בכל כיפת השמים ולא מאפשר לנו לראות את שאר הכוכבים (החיוורים הרבה יותר). תופעה זו מתרחשת, כמובן, בזכות האטמוספירה: קרני השמש פוגעות במולקולות האוויר והללו מפזרות אותן לכל עבר. מולקולות האוויר הקטנות מיטיבות לפזר בעיקר את החלק הכחול בספקטרום אור השמש, שהוא הצבע בעל אורך הגל הקצר יותר. פיזור זה, הנקרא פיזור ריילי, הוא אפקטיבי פחות עבור קרינת השמש הכתומה והאדומה, ולכן השמיים אינם לבנים (כלומר מקרינים את כל תחום האור הנראה) אלא כחולים. חלקיקי אבק ורסיסי מים גדולים הרבה יותר ממולקולות האוויר, והם כן מצליחים לפזר היטב (ע"י פיזור מי) את כל הצבעים של קרינת השמש – ולכן בימים של אובך השמים לבנים.



תרשים מס' 2: האטמוספירה הכחולה של כדור-הארץ.

לצערם של האסטרונומים בני התקופה המודרנית, תופעת הפיזור מתרחשת גם בשעות הלילה. האור המלאכותי מן הערים, הרחובות והבתים, מופץ לכל עבר ומתפזר גם הוא בעזרת חלקיקי האטמוספירה. האור המלאכותי הוא כה חזק, שהצופה הממוצע בעיר גדולה דוגמת תל-אביב יכול להבחין בעין בלתי מזוינת בכוכבים בודדים בלבד, ולא פלא שישנם המקוננים על "היעלמותם" של שמי הלילה אודות לזיהום האור (Light Pollution). גם הצופה המקצועי, המשתמש בטלסקופ, יתקשה לצפות בגופים חיוורים, ומבחינתו רעש הרקע של השמים יעלה. היחס בין אור הכוכב הנמדד לאור הרקע נקרא יחס אות לרעש (Signal to Noise), וככל שהוא גבוה יותר, כך איכות התצפית טובה יותר. במידה ורעש הרקע הינו גבוה אודות לזיהום האור, יחס האות לרעש יהיה נמוך יותר, ואיכות התצפית תפגע.



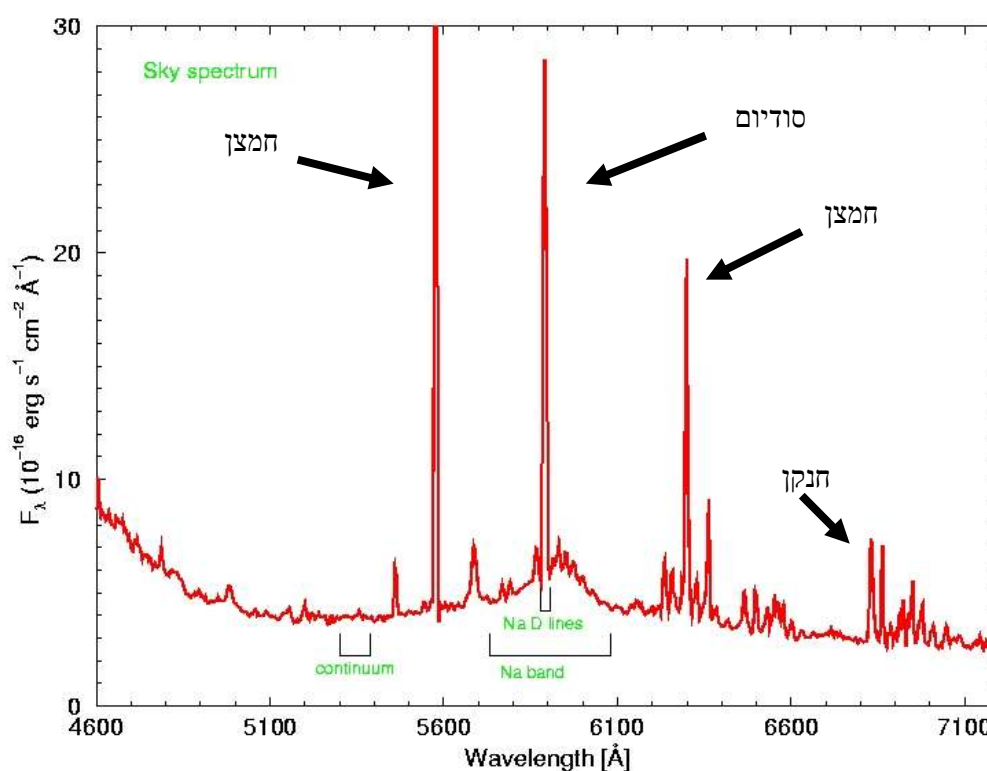
תרשים מס' 3: צילומי לוויין של צפון מזרח ארה"ב והאי הבריטי, המצביעות על הכמות העצומה של האור המלאכותי שמקרינה החברה האנושית.



תרשים מס' 4: זוג צילומים אלו של אותו אזור בשמים, ממחיש נאמנה את תוצאת פיזור האור המלאכותי בשמי הלילה, ועד כמה בעיית זיהום האור יכולה להפריע לאסטרונומים. התמונה מימין צולמה במקום מבודד, בעוד שהתמונה משמאל צולמה באזור עם זיהום אור גבוה.

## 2.2 החזרה (Reflection) בליעה (Absorption) ופליטה (Emission)

מולקולות האוויר שבאטמוספירה מפזרות כמובן גם את אור הכוכבים, ובנוסף הן אחראיות לשתי תופעות נוספות – החזרה (Reflection) ובליעה (Absorption). האטמוספירה מחזירה אל החלל עד כ- 50 אחוזים מאור הכוכבים החודר אליה ובכך מקטינה את כמות הפוטונים שמודדים האסטרונומים. תופעת הבליעה מתרחשת כאשר חלק מקרני האור הפוגעות במולקולות האוויר לא מתפזרות או מוחזרות מהן אלא דווקא נבלעות בהן, ומגיעות איתן לריאקציות כימיות שונות. ריאקציות אלו מסתיימות בפליטה (Emission) של קרינה בעלת אורך גל שונה מאורך הגל של הכוכב הנצפה. אורך הגל של קרינת הפליטה נקבע בעיקרו על-ידי סוג מולקולת האוויר. מבחינת האסטרונומים העוסקים בספקטרוגרפיה, הפליטה היא בעייתית במיוחד משום שספקטרום העצם הנצפה מכיל כעת גם קווי פליטה שהם תוצר ישיר של האטמוספירה ואין להם יד ורגל עם קווי הפליטה הספקטראליים המקוריים של העצם הנצפה.



תרשים מס' 5: תרשים זה מציג קווי פליטה ספקטראליים כפי שנמדדו במצפה הכוכבים וויז שבמצפה רמון. השיאים המסומנים הם תוצר ישיר של אדי מים, ומולקולות של חמצן וחנקן באטמוספירה, ושל נורות הסודיום המאירות את העיירה השכנה מצפה רמון.

### 2.3 הפחתה (Extinction)

האסטרונומים מכנים את תהליכי הפיזור, ההחזרה והבליעה בשם אחד: הפחתה (Extinction). עוצמת האור האמיתית של העצם הנצפה מופחתת בעקבות התהליכים השונים שהוזכרו למעלה והטלסקופ אוסף פחות פוטונים. ככל שקרני האור עוברות דרך "יותר" אטמוספירה, מספר הפוטונים הנמדדים, או בהירותו של העצם הנצפה, הולך ויורד וההפחתה גדולה יותר. מידת ההפחתה תלויה גם בתחום התדר, או בצבע, של אור העצם הנצפה, כך שאורם של כוכבים בעלי צבע שונה (או יחס צבעים שונה) ימדד בצורה שונה.

ככל שהאטמוספירה "מלוכלכת" יותר, כלומר, מכילה חלקיקי אבק רבים, תופעת ההפחתה מתחזקת. הדבר מתרחש למשל בשעת אובך או סופת אבק (עד כדי מצב שתצפיות אינן אפשריות כלל), אבל גם באזורים עם פעילות אנושית ענפה, כגון אזורים בהם מבערים יערות או באזורי תעשייה המגבירים את זיהום האוויר.

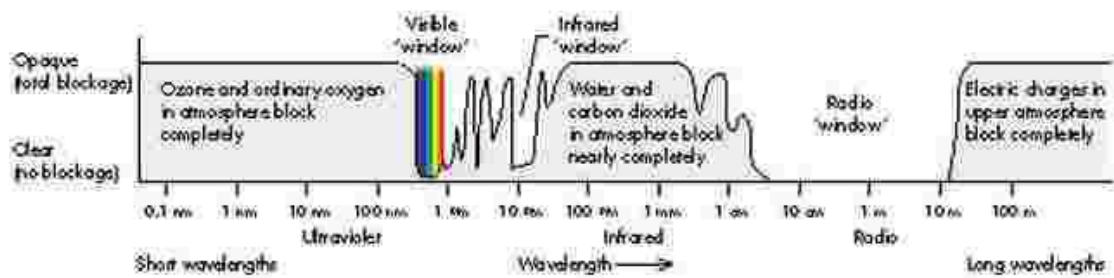
תרשים מס' 6: יום של אובך מעל תל-אביב. מיותר לציין שלא ניתן לקיים תצפיות במזג אוויר כזה.



תרשים מס' 7: חלקיקי האבק והלכלוך שפולטים מפעלי תעשייה מגדילים גם הם את תופעת ההפחתה, ומחלישים את עוצמת אור העצם הנצפה.

## 2.4 חסימת תחומי תדרים

מולקולות האוויר שבאטמוספירה מגיבות, כאמור, לאור הכוכבים ויוצרות את התופעות שהוזכרו למעלה כמו בליעה והחזרה. האפקט משתנה בעוצמתו בתחומי תדרים שונים: בעוד שתחום האור הנראה מצליח לחדור את חלקיקי האטמוספירה, תחומים אחרים נבלעים בה לחלוטין. כך למשל חלקיקי אוזון ומולקולות חמצן בולמות את קרינת הגאמה והרנטגן האנרגטיות וקצרות הגלים. גם הקרינה האולטרא-סגולה נבלעת ברובה הגדול באטמוספירה, ורק קצה התחום, בעל אורכי הגל הארוכים יותר, מצליחים לחדור אל כדור-הארץ, כפי שידוע כל אדם החושק בעור שזוף. מולקולות מים ותחמוצות פחמן מהוות חסם לקרינת המיקרוגל ולחלק מתחום האינפרא-אדום. יחד עם זאת, ישנם "חלונות" באטמוספירה המאפשרים תצפית בחלק מתחומי התדרים של האינפרא-אדום.

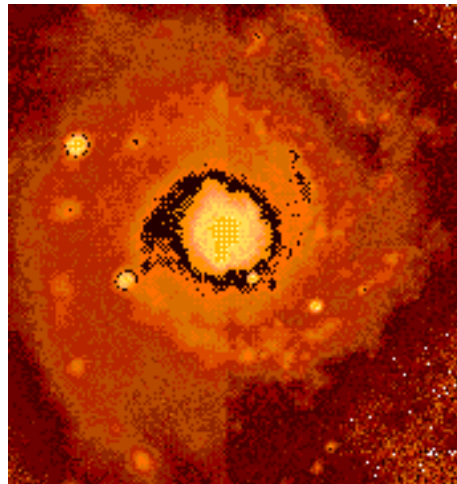


תרשים מס' 8: סולם תחומי התדרים של הקרינה האלקטרומגנטית, כפונקציה של הגובה מעל פני הקרקע. האזורים האפורים הינם אטומים לקרינה הרלבנטית, ואילו האזורים הלבנים הם "חלונות" המאפשרים צפייה בתחום התדרים כמו האור הנראה, חלק מהקרינה האינפרא-אדומה וקרינת הרדיו.



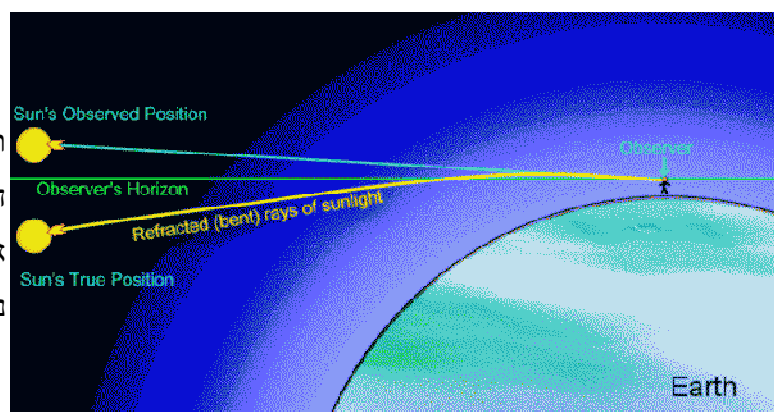
## 2.5 שבירה (Refraction) והפרדה (Resolution)

אם נתבונן באטמוספירה במבט מקרוסקופי נוכל לאפיין אותה כתווך המכיל מספר שכבות בעלות תכונות שונות. לכל שכבה מקדם שבירה משלה, התלוי בחלקיקים המרכיבים אותה ובטמפרטורה שלהם. מכיוון שטמפרטורות שונות יוצרות להצים שונים ותנועה של אוויר וחלקיקים, מקדם השבירה משתנה בין מקום למקום ובין זמן לזמן. כתוצאה מכך קרני אור המגיעות מאותו הכוכב יישברו בצורה שונה ולא יגיעו באופן מקבילי למראת הטלסקופ. תופעה זו גורמת לערפול של העצם הנצפה ול-"מריחתו" על פני מספר פיקסלים. הפרופיל הפוטומטרי של הכוכבים המתקבל בתמונה איננו קונצנטרי, והרזולוציה איננה מאפשרת להבחין בפרטים קטנים וקרובים זה לזה, ופוגמת באיכות התמונות.



תרשים מס' 9: שתי תמונות של גלקסיה ספיראלית שצולמו על-ידי אותו הטלסקופ בלילות שונים ובתנאים אטמוספריים שונים. שימו לב כיצד בלילה "נקי", מימין, הרזולוציה טובה לאין שיעור ומאפשרת להבחין במבנים קטנים בגלקסיה, בהשוואה לתמונה משמאל.

מלבד תהליכי השבירה בכל שכבה אטמוספירית, סכום שבירת קרני האור גורם להסתה של מיקומו הנראה של הכוכב ביחס למיקומו האמיתי. התופעה בולטת במיוחד כאשר השמש נמצאת באופק – למעשה אנו רואים את השמש בנקודה הגבוהה בחצי מעלה ממקומה האמיתי. תופעת השבירה מחייבת את האסטרונומים לנטרל את השגיאה במיקום הנראה של העצם הנצפה.



תרשים מס' 10: תופעת השבירה מאפשרת לנו לראות את השמש גם כאשר היא נמצאת מתחת לאופק.

## 2.6 עננים

בעיה אחרונה, אך משמעותית, שמונעת מאסטרונומים בכל רחבי העולם לבצע מלאכתם נאמנה היא העננות. כ-50% משטח כדור-הארץ מכוסים בעננים בפרק זמן נתון, ומכיוון שמצפי כוכבים הם מבנים קשיחים ועליהם להיות יציבים מאד, נקל עלינו להבין שלא נוכל לשנע אותם אל מקומות עם שמים בהירים...



תרשים מס' 11: כדור-הארץ מכוסה בעננים כפי שצולם על-ידי האסטרונוטים של אפולו 15.

### 3. פתרונות אפשריים לבעיות אטמוספירות באסטרונומיה

לשלא הבעיות שהציבה האטמוספירה בפני האסטרונומים וחוקרי החלל הגדירו מדענים ומהנדסים מושגים המקלים על העוסקים בתחום, הציעו פתרונות שונים ומצאו שיטות חישוב למידת השפעתה של האטמוספירה על המדידות האסטרונומיות.

#### 3.1 פתרונות לבעיית הפיזור וזיהום האור

מלבד תצפיות שמש, המלמדות אותנו על תכונותיה של החמה, או מאפשרות לנו לבחון מעבר פלנטרי יוצא דופן על פניה, שעות היום אינן מסבירות פניהן לאסטרונום. כנגד תוצאת תופעת הפיזור – השמים הכחולים – אין האסטרונום יכול לעשות דבר.

אם זאת, ניתן להימנע מפיזור תאורה מלאכותית בשמי הלילה בעזרת רצון טוב של תושבים ורשויות. כיום ישנה מודעות לתאורת חוצות אסטרונומית המקרינה את אור הנורה למטה, אל הכביש או המדרכה, ומונעת הקרנה אל השמים (מה גם ששיטה זו חוסכת בחשמל...). עוצמת התאורה משמעותית גם היא כאשר מנורות סודיום בלחץ נמוך, המאירות בצבע צהוב-כתום, מפחיתות את פיזור האור המלאכותי בשמי הלילה, ומאפשרות לילות אפלים יותר ולבנים פחות. במקומות מתוקנים הוכרזו אף "שמורות אסטרונומיות" – אזורים שמידת ההארה המלאכותית בהם היא מינימלית. בעת אירועים אסטרונומיים מיוחדים, דוגמת מטר הליאונידים בחודש נובמבר, ניאותה גם מועצת מצפה רמון להחשיך את אורות המועצה, לטובת תצפיות שנעשו במצפה הכוכבים ע"ש וויז.



תרשים מס' 12: תאורת חוצות "אסטרונומית", מימין, מקרינה אור כתום ישירות אל הכביש, ואילו תאורת חוצות "אנטי-אסטרונומית", משמאל, קורנת אור לבן ועוצמתי לכל עבר – כולל אל שמי הלילה.



תרשים מס' 13: תצפיות אסטרונומיות בשעות היום – המעבר של נוגה, 8 ביוני 2004, אוניברסיטת ת"א.

### 3.2 פתרון בעיית ההפחתה בעזרת משוואות פוטומטריות

את מידת ההפחתה שגורמת האטמוספירה כתוצאה מפיזור, החזרה ובליעה, ניתן לחשב, ולתקן בהתאם את המדידות הפוטומטריות של העצמים הנצפים. מושג חשוב בתחום זה הינו מסת האוויר (Air Mass) – הכמות היחסית של האוויר שבין הטלסקופ לעצם הנצפה. מסת האוויר  $X$  מחושבת מתוך הזווית  $Z$  שבין הזנית לטלסקופ:  $X = 1/\cos(Z)$ . מכאן שמסת אוויר מינימלית שווה ל-1, כאשר הטלסקופ מתבונן לזנית, והיא אינסופית כאשר הטלסקופ מקביל לאופק. מסת אוויר הגדולה מ-2.5, דורשת תיקונים משמעותיים יותר מסדר שני ומקשה על המדידות, ולכן נוהגים התצפיתנים לצפות עד למסת אוויר של 2.5 שהם כ-24 מעלות מעל לאופק.

בעזרת נתון מסת האוויר ניתן לחשב את השינוי בבהירותו של העצם הנצפה, בעזרת המשוואה:

$$V_{\text{abs}} = v_{\text{instrument}} + k_v X$$

כאשר  $v_{\text{instrument}}$  הינו "הבהירות המכשירית" – הבהירות הנמדדת של העצם הנצפה,  $V_{\text{abs}}$  הינה בהירותו האבסולוטית, כלומר בהירותו האמיתית כפי שהייתה נמדדת ללא ההפרעות האטמוספריות, ואילו  $k_v$  הינו קבוע המתאר את שינוי הבהירות כפונקציה של מסת האוויר  $X$ .

כוכבים שונים קורנים בצבעים שונים, והאסטרונומים משתמשים בפילטרים על מנת למדוד את אור העצם הנצפה בתחום תדרים צר מאד – למשל אור אדום, ירוק או כחול. מכיוון שכל צבע, או תחום תדרים של האור הנראה, נשבר בצורה שונה באטמוספירה, חישוב הבהירות האבסולוטית של העצם הנצפה יחושב כהפרש הבהירויות בצבעים שונים:

$$B-V_{\text{abs}} = b-v_{\text{instrument}} + k_{(b-v)} X$$

כאשר  $b-v_{\text{instrument}}$  הינו הפרש הבהירויות הנמדדות בפילטר כחול ( $b$ ) לפילטר ירוק ( $v$ ),  $B-V_{\text{abs}}$  הינו הפרש הבהירויות האבסולוטי, ו- $k_{(b-v)}$  הינו קבוע המתאר את שינוי הפרש הבהירויות הכחולות והירוקות כפונקציה של מסת האוויר  $X$ .

שיטת חישוב זו פותרת את העיוות בעוצמת האור שגורמת האטמוספירה כפונקציה של זווית התצפית, או כפונקציה של כמות האטמוספירה שבין הצופה לנצפה. יחד עם זאת, יש לזכור כי התווך האטמוספרי משתנה בין ליל תצפית אחד למשנהו, כאשר כמות האבק, האובך והחלקיקים באטמוספירה עולה או יורדת חליפות. כפי שצוין בסעיף המקביל בפרק הקודם, ככל שרבים החלקיקים באטמוספירה כך תהליך ההפחתה גדל, והבהירות הנצפית של הכוכב תקטן. על כן, האסטרונום השואף להשוות את נתוני תצפיותיו מלילות שונים, יאלץ לכייל את מדידותיו לסרגל אחיד, בעזרת הוספה או הפחתה של ערך הסטייה היומי. ערך זה נקרא סטייה מנקודת האפס (Zero Point Offset), ובטרם ניתן להציבו במשוואה שלמעלה יש צורך למדוד אותו. מדידה זו נעשית בעזרת תצפיות כיוול מיוחדות: האסטרונום צופה בשדות ובהם כוכבים שבהירותם האבסולוטית ידועה וקבועה (כלומר לא מדובר בכוכבים המשנים את בהירותם חליפות). מתוך ידיעת בהירותם האבסולוטית והשוואה לבהירותם הנמדדת, ניתן לחלץ את נקודת האפס:

$$M_{\text{calibration}} = M_{\text{instrument}} + \text{Zero Point} + kX$$

כאשר  $M_{\text{calibration}}$  הינו הבהירות האבסולוטית הידועה של הכוכב,  $M_{\text{instrument}}$  הינו בהירותו הנמדדת, ו- $kX$  מתאר את השינוי בבהירות כפונקציה של מסת האוויר.

את תצפיות הכיול יש לעשות במקביל לתצפיות בשדות הנחקרים, ובלילה פוטומטרי – כלומר לילה נקי מעננות ואובך כמה שניתן. את הסטייה מנקודת האפס נוסיף כעת למשוואה המקורית:

$$B-V_{\text{abs}} = b-v_{\text{inst}} + \text{Zero Point}_{(b-v)} + k_{(b-v)} X$$

יש לציין, שגם נקודת האפס תלויה בצבע, או בהפרש הצבעים, ועל כן חשוב לאסטרונום המכיל את מדידותיו לצפות בכוכבי כיול בצבעים שונים. כוכבי כיול אלו מכונים כוכבים סטנדרטים (Standards) וכיום קיימים קטלוגים שלהם המאפשרים לאסטרונום לערוך את הליך הכיול בקלות יחסית. המפורסם והיעיל מבין הקטלוגים הללו הוא קטלוג הכוכבים המשוונים של לאנדולט, שברשימתו אסף קבוצות של כוכבים סטנדרטים הקרובים זה לזה, כך שתצפית בכלם יחדיו, חוסכת זמן תצפית יקר. קבוצות הכוכבים הללו מפוזרות באופן אחיד על כל גלגל השמים, כך שניתן לצפות בהם בזמנים שונים בשנה, והן מצויות על המישור האקליפטי, כך שהצפייה בהן היא אפשרית מחלקיו הצפוני והדרומי של כדור-הארץ.

### 3.3 פתרון בעיית השבירה בעזרת חוקי סנל

על מנת לחשב את הסטייה בין מיקומו הנראה של העצם הנצפה למיקומו האמיתי, ובכך לנטרל את תוצאת אפקט השבירה האטמוספירית, נעזרים האסטרונומים בחוק סנל המבטא את היחס בין זווית הפגיעה לזווית השבירה בהתאם למקדמי השבירה של התווכים השונים, או בהתאם ליחס בין מהירויות האור בתווכים אלו. מכיוון שהאטמוספירה מורכבת למעשה משלל שכבות שלהן טמפרטורות שונות ומקדמי שבירה שונים, נוכל לסכם את זוויות השבירה בין כל שכבה בנפרד, ולקבל את חוק סנל בצורתו הפשוטה:

$$\sin(i) = (c/v) \sin(r)$$

כאשר  $i$  היא זווית הכניסה לאטמוספירה,  $r$  היא זווית השבירה,  $c$  היא מהירות האור בריק, ו- $v$  היא מהירות האור בתווך הקרוב לפני הקרקע.

נתייחס אל זווית השבירה  $r$  כאל ההפרש בין מיקומו האמיתי של הכוכב  $z$  אל מיקומו הנדמה  $z'$ :

$$z = r + z'$$

נבצע סינוס למשוואה, ונפתח אותה לכדי:

$$\sin(z) = \sin(r) \cos(z') + \cos(r) \sin(z')$$

מכיוון שזווית השבירה  $r$  היא קטנה למדי ושואפת לאפס נכתוב:

$$\sin(z) = r \cos(z') + \sin(z')$$

$$\sin(z)/\sin(z') = 1 + r / \tan(z')$$

או

כזכור מחוק סנל, נוכל לבטא את יחס הסינוסים של  $z$  ו- $z'$ , כיחס בין מהירות האור בריק לזאת שבתווך האטמוספירי:

$$c / v = 1 + r / \tan(z')$$

$$r = (c / v - 1) \tan(z')$$

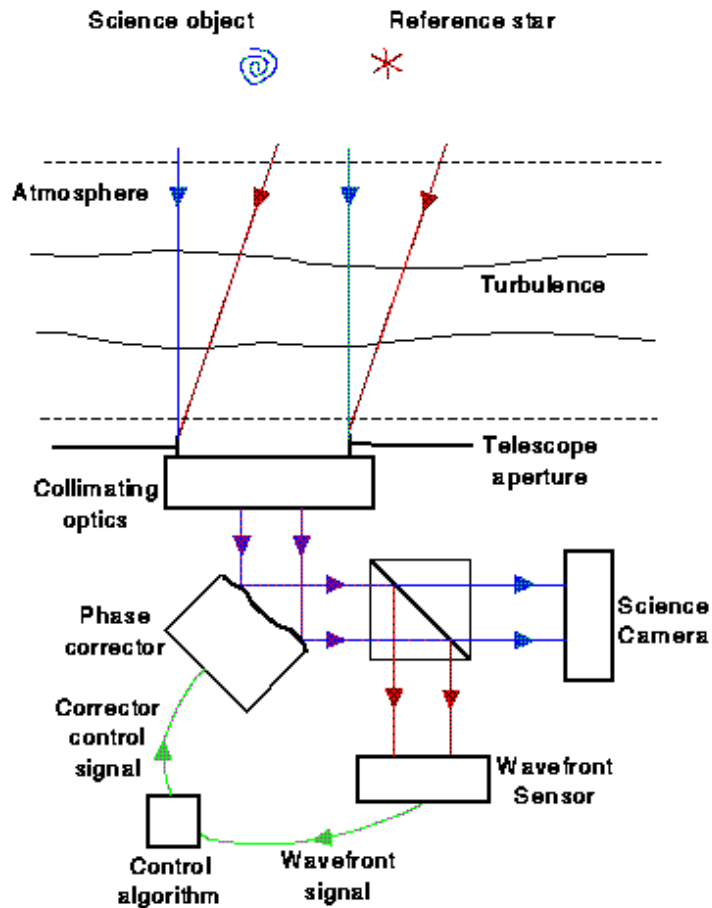
או

כך שקיבלנו ביטוי עבור זווית השבירה  $r$ , הכולל את המיקום הנראה של העצם הנצפה  $z'$ , ואת יחס מהירויות האור בריק  $c$  ובתווך האטמוספירי שמעל פני הקרקע  $v$ .

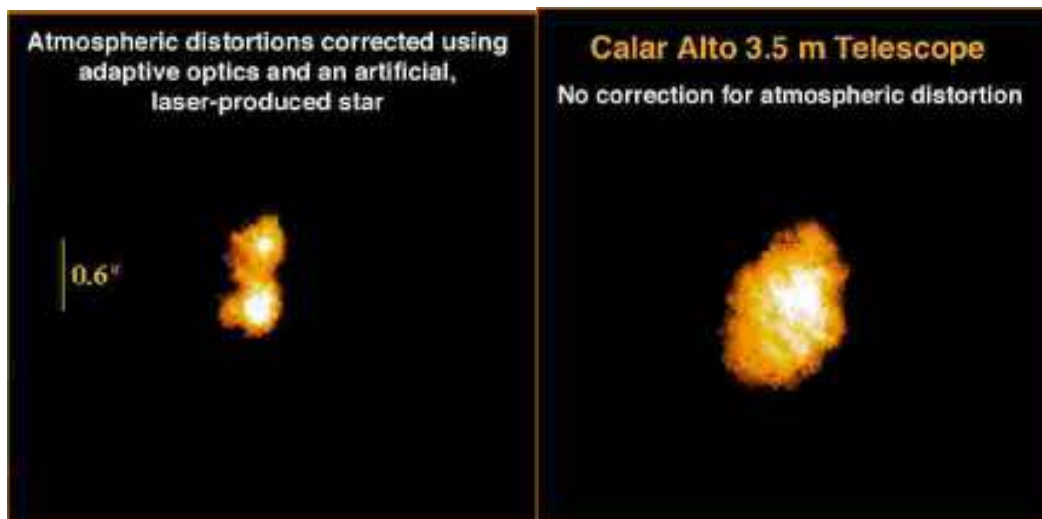
### 3.4 הגדרות ופתרונות לבעיית ההפרדה

כאמור, מתוך תהליך השבירה מתקבלת בעיית הרזולוציה הגרועה, הנגרמת ע"י שבירת קרני האור בשכבות אטמוספריות שונות, כך שקרני האור של הכוכב אינן מקבילות כאשר הן פוגעות בטלסקופ. על מנת לכמת בעיה זו הגדירו האסטרונומים את המושג *ראות - Seeing*. הראות נקבעת על-ידי התנאים האטמוספריים שבסביבת מצפה הכוכבים, והיא יכולה להשתנות גם בין ליל תצפית אחד למשנהו. הראות מגדירה את גבול ההפרדה, או הרזולוציה, של התמונה המתקבלת. גבול רזולוציה של שניית קשת אחת, מאפשרת להבחין בין גופים שונים שמרחקם בתמונה עולה על שניית קשת אחת. בעיקרון, גבול ההפרדה  $\theta$ , מוגדר כ- $\theta = \lambda/D$ , כאשר  $\lambda$  הינו אורך הגל של קרני האור, ו- $D$  הוא קוטר הטלסקופ. לטלסקופ הגדול בעולם, קק (Keck), שקוטר המראה הראשית שלו היא 10 מטרים, גבול הפרדה תיאורטי של "0.1 שניות קשת. למעשה, גבול ההפרדה נקבע גם מתוך התנאים האטמוספריים במקום ובזמן התצפית, כאשר תנאים אלו מגדילים את גבול ההפרדה ופוגעים באיכות התמונה. עבור הטלסקופ קק גבול ההפרדה המעשי עומד על שניית קשת אחת, פי 10 יותר מהערך ללא השפעת האטמוספירה. לשם השוואה, גבול ההפרדה במצפה הכוכבים וויז, בלילות טובים במיוחד, מגיע רק עד לכדי שתי שניות קשת.

על מנת לפתור את בעיית הרזולוציה ולתקן את העיוות בתמונה שיוצרת האטמוספירה, משתמשים האסטרונומים במערכת של *אופטיקה מסתגלת (Adaptive Optics)*. הרעיון העומד מאחורי האופטיקה המסתגלת דומה בעיקרון לשיטת הכיול הפוטומטרית עם כוכבים סטנדרטים שתוארה בסעיף הקודם, רק שבמקרה זה הכיול מתבצע בזמן אמיתי. בשעה שהטלסקופ צופה על העצם הנצפה, דואג האסטרונום, שבשדה התצפית ימצא כוכב סטנדרטי שבהירותו האבסולוטית ידועה מראש. לאחר שקרני האור מהעצם הנצפה ומהכוכב הסטנדרטי נקלטות במראות הטלסקופ, הן נקראות לתוכנה היודעת לחשב את התיקון הדרוש על מנת להציג את הכוכב הסטנדרטי בבהירות אמיתית ובפרופיל נכון. התוכנה שולחת את פקודותיה למטריצה צפופה של מראות קטנות היכולות לנוע במרחב ולשנות את הכיוון אליו הן פונות. מראות אלו קולטות גם הן את קרני האור מן הטלסקופ ושולחות אותן אל המצלמה בזווית מתוקנת. במידה ואין כוכב סטנדרטי הצמוד (עד מרחק של שתי דקות קשת) לעצם הנצפה, נעשה שימוש בקרן לייזר אימתנית הנורית אל האזור הצמוד לעצם הנצפה. הפרופיל של נקודת האור הנוצרת ע"י הלייזר הוא פרופיל ידוע, והוא מחליף למעשה את נקודת הייחוס של כוכב השוואה הסטנדרטי. מערכות של אופטיקה מסתגלת, שהן יקרות ומורכבות, נמצאות במצפים הגדולים בעולם דוגמת קק שעל הר Mauna Kea שבהוואי וה-VLT (Very Large Telescope) שבצפון צ'ילה.



תרשים מס' 14: מערכת של אופטיקה מסתגלת. קרני האור המגיעות מהעצם הנצפה ומכוכב ההשוואה הסטנדרטי, נקלטות בחיישן חזית הגל (Wavefront Sensor) ונמדדות ומחושבות בעזרת תוכנת מחשב, המפקחת על תנועת מטריצת המראות הקטנות (Phase Corrector). לבסוף נקלטים הפוטונים במצלמה.



תרשים מס' 15: ההפרעות האטמוספריות גורמות לכוכב להימרח בתמונה מימין. לאחר שנעשה שימוש במערכת של אופטיקה מסתגלת ניתן לראות שלמעשה אנו צופים בשני כוכבים שונים. במקרה זה זווית ההפרדה קטנה משניית קשת אחת.

### 3.5 מיקום המצפה כפתרון משמעותי

בבסיסם של שלל הפתרונות והשיטות לתיקון העיוותים האטמוספריים השונים, עומד מיקומו של מצפה הכוכבים. מצפה אידיאלי ימוקם באזור מבודד, גבוה ויבש. מבודד – כדי להימנע ככל האפשר מזיהום האור האנושי, גבוה – על מנת לצפות דרך כמה שפחות אטמוספירה, ולהותיר את העננים מתחת לקו הגובה של המצפה, ויבש – משום שמולקולות המים שבאוויר מגיבות לאור הכוכבים בתחומי גל מסוימים וחוסמות אותם לחלוטין. המקומות הטובים בעולם להקמת מצפי כוכבים הינם הר Mauna Kea שבהוואי, מדבר האטאקמה (Atacama) שבצפון צ'ילה והאיים הקנריים שממערב לספרד. מקומות אלו גבוהים במיוחד – גובהו של Mauna Kea עולה על 4,000 מטרים – והם מותרים עננים, לחות, ואורות רקע הרחק מתחתיהם. לשם השוואה, מצפה הכוכבים ע"ש וויז שבמצפה רמון, השייך לאוניברסיטת ת"א, נמצא בגובה של 900 מטר בלבד מעל פני הים, ואורותיה של העיריה מצפה-רמון נראים היטב ממרחק של כ-5 ק"מ ממזרח למצפה.



תרשים מס' 16:  
חות הטלסקופים  
שעל Mauna Kea  
שבהוואי. גובה ההר  
כ-4,150 מטר והוא  
בית לטלסקופים  
הגדולים בעולם –  
זוג טלסקופי הקק, שקוטר כל אחד מהם  
הוא 10 מטרים.



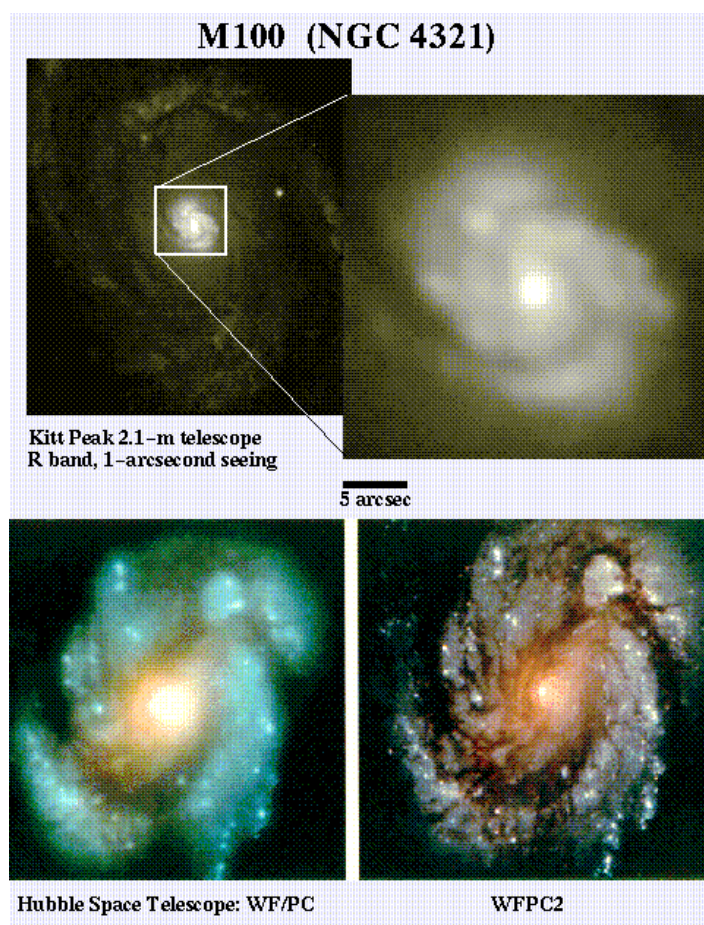
תרשים מס' 17: מצפה  
הכוכבים ע"ש וויז, שליד  
מכתש רמון. המצפה נמצא  
בגובה של 900 מטרים  
בלבד. המצפה שייך  
לאוניברסיטת ת"א ומשמש  
חוקרים וסטודנטים מהארץ  
ומחול'ל.



### 3.6 פתרון בעיית חסימת התדרים – יציאה אל החלל

כדי להימנע באופן מוחלט מן הבעיות שצוינו למעלה, ניתן להקים את מצפה הכוכבים גבוה אף יותר – בחלל עצמו – מעבר להשפעתה ההרסנית של האטמוספירה על קרינת הכוכבים. הבעיות שהוצגו בפרק הקודם נפתרות כולן – ניתן לבצע תצפיות בחלל גם "בשעות היום" משום שאין פיזור, לא מתקיימת הפחתה של בהירות האור על שלל גורמיה, וקרני האור אינן נשברות ומתעקמות. בנוסף, תהליכי בליעה ופליטה שאינם מאפשרים לקרינה באורכי גל מסוימים לחדור מבעד לאטמוספירה, לא מתרחשים בחלל. ואכן, טלסקופים רבים מקיפים את כדור-הארץ, וצופים בכל תחומי התדרים בקרינה המגיעה משלל עצמים בחלל החיצון. להלן מספר דוגמאות לטלסקופים חלליים:

טלסקופ החלל ע"ש האבל (HST), הוא טלסקופ החלל המפורסם והגדול ביותר. הטלסקופ, שקוטר מראתו הראשית הוא 2.4 מטרים, צופה בתחום האור הנראה ובתחום התדרים הנמוכים של האולטרא-סגול. ה-HST תוכנן ונבנה בשנות השבעים והשמונים ע"י נאס"א וסוכנות החלל האירופית, והוצב במסלול באפריל 1990. במהרה התגלתה בעיית "קוצר הראיה" של הטלסקופ, ובדצמבר 1993 נשלחו אסטרונומים שקבעו סט עדשות חדש בתוך הטלסקופ על מנת לתקן את הטעות האופטית שבבסיסו. מאז מאפשר הטלסקופ לאסטרונומים מכל העולם לחוות את מסתרי החלל בקרבה שלא הייתה אפשרית קודם לכן, וברזולוציה גבוהה ואיכותית.



תרשים מס' 18: השוואה בין תמונות שצולמו ע"י טלסקופ קרקעי בקיט פיק, אריזונה (למעלה), לתמונות שצולמו על-ידי טלסקופ החלל האבל, לפני התיקון (משמאל) ואחריו (מימין).

תחום קרינת ה-X נצפה ע"י טלסקופים רבים כמו XMM-Newton האירופאי, ו-Chandra האמריקאי. תחום זה חושף בפני האסטרונומים מקורות חמים מאד דוגמת תהליכי קריסה בננסים לבנים ובכוכבי ניוטרונים, ואת הנעשה במרכזי גלקסיות.



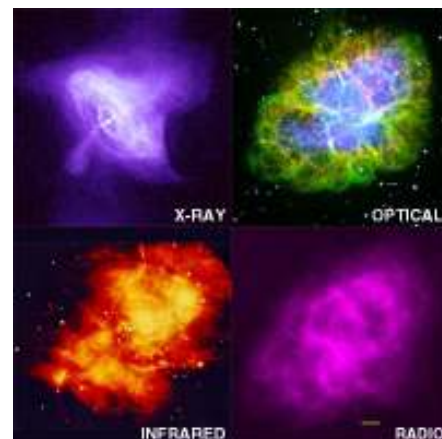
תרשים מס' 19: XMM-Newton מימין ו-Chandra משמאל.

תחום קרינת הגאמא מכוסה בין היתר ע"י רשת לווייני HETE. לוויינים אלו שתוכננו עבור הצבא האמריקאי על-מנת לגלות שרידי התפוצצויות גרעיניות על כדור-הארץ, כווננו לבסוף אל החלל וגילו מקורות רבים של קרינת גאמא. סוג עצמים חדש ומלהיב, שעל קיומו נודע רק בעזרת לוויינים אלו הנו מתפרץ קרינת גאמא – GRB – שהוא, כנראה, סופרנובה המתפוצצת לא בצורה רדיאלית אלא לאורכו של ציר דמיוני.

טלסקופים אחרים מתמקדים בעצמים מסוימים. טלסקופ החלל סוהו (SOHO), למשל, מרכז את תצפיותיו בשמש, גם בתחום הנראה ובעיקר בתחום האולטרא-סגול. הטלסקופ קובי (COBE) מדד את קרינת הרקע הקוסמית באינפרא-אדום ובקרינת מיקרוגל. הטלסקופ קפלר (Kepler) שמיועד לשיגור ב-2007, יחפש מעברים של כוכבי לכת ארציים על-פני שמשות רחוקות.

טלסקופים רבים נוספים משמשים את הקהילה האסטרונומית והמדעית מן החלל. על-אף עלותם הגבוהה, מורכבות בנייתם והפעלתם, והבעייתיות שבתחזוקתם השוטפת, ניתן לומר בפה מלא, שטלסקופים אלו הינם הצלחה גדולה, ושנות ה-90 של המאה ה-20 זכו לראות פריחה בידע האסטרונומי אודות לכלי מחקר מיוחדים אלו.

תרשים מס' 20: ערפילית העקרב בתחומי גל שונים. עם כיוון השעון: התחום הנראה (ימין למעלה), רדיו, אינפרא-אדום, קרינת X.



#### 4. סיכום

האטמוספירה, השקופה לכאורה, מהווה מכשול בפני השואפים לצפות ולחקור את רזי החלל. מולקולות אוויר, רסיסי מים וחלקיקי אבק, משנים את עוצמת אור הכוכבים, שוברים את קרני האור, ובולמים מבעדנו לקלוט את כל תחומי הקרינה האלקרומגנטית. שלל הפתרונות, שהוצגו בעבודה זו, בהם משתמשים האסטרונומים, כוללים משוואות הנדסיות, פיסיקליות ופוטומטריות לחישוב הסטיות מן הערכים האמיתיים שהיו נמדדים ללא האטמוספירה. בנוסף, מושקעת מחשבה רבה במיקום אפשרי של מצפי הכוכבים בעולם ונעשה שימוש גם במערכות תצפית מיוחדות כגון אופטיקה מסתגלת ומערכים של טלסקופי רדיו. בשני העשורים האחרונים הוצבו בחלל טלסקופים רבים הנמצאים מעבר להשפעתה של האטמוספירה, והמאפשרים לאסטרונומים לצפות בשלל תגליות חדשות ומרתקות.

## 5. ביבליוגרפיה

- <http://www.physics.co.il/ShowRiddle.asp?theID=37> :למה השמים כחולים:  
<http://userpages.umbc.edu/~fmorgal/lp/en/> :זיהום אור:  
השפעת תהליך הפליטה על ספקטרום השמים:  
Brosch, N. and Shemer, O., 2000, "Airglow and Meteor Rates over Israel during the 1999 Leonid Shower", in *Earth Moon and Planets*, vol. 82/83, pp. 535-543.  
<http://www.aavso.org/observing/programs/ccd/manual/4.shtml> :פוטומטריה:  
כוכבים סטנדרטים לכיול:  
Landolt, A., 1992, "UBVRI Photometric Standard Stars in the Magnitude Range of  $11.5 < V < 16.0$  Around the Celestial Equator", *The Astronomical Journal*, vol. 104, no. 1, pp. 340-371.  
<http://star-www.st-and.ac.uk/~fv/webnotes/chapt11.htm> :חישוב זווית השבירה באטמוספירה:  
<http://cfao.ucolick.org> :אופטיקה מסתגלת:  
<http://op.ph.ic.ac.uk/ao/overview.html>  
<http://www2.keck.hawaii.edu> :מצפה הכוכבים קק שבהוואי:  
<http://wise-obs.tau.ac.il> :מצפה הכוכבים ע"ש וויז:  
<http://hubblesite.org> :טלסקופ החלל האבל:  
<http://www.stsci.edu/hst/>  
<http://chandra.harvard.edu> :טלסקופ החלל צ'נדרה:  
<http://www.aerospace-technology.com/projects/xmm/> :טלסקופ החלל XMM-Newton