מושגי יסוד באסטרונומיה

הפרק מיועד לתלמידים בכל הרמות ולמורים. הפרק כולל גם ביטויים מתמטיים. המתקשים יכולים לדלג על הביטויים

לקריאה משלימה ולתרגולים

פרק זה מבוסס על פרקים א', ח', ט', י' בספר
מדריך להכרת השמים, ד"ר יגאל פת-אל, הוצאת קוסמוס טלסקופים
http://cosmos.co.il/wfile/catalog/books.htm

פרקי תרגול לפרק זה מצויים באתר זה בפרקי מבוא ובתרגולים למורים:
http://education.org.il/edication/lab_edu.htm

מושגי יסוד באסטרונומיה

הפרק יעסוק בנושאים הבאים:

שמשות וכוכבי לכת

זווית ראייה

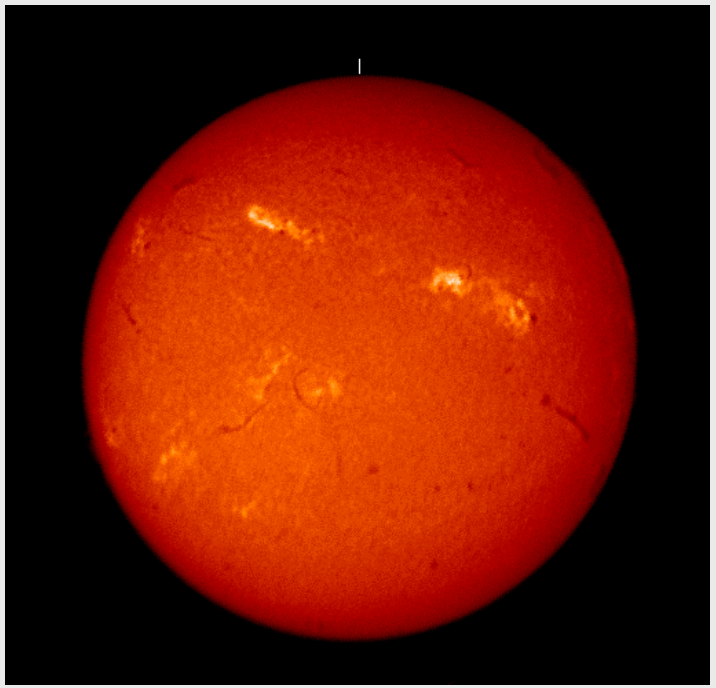
סולם המרחקים

בהירויות כוכבים

טלסקופים

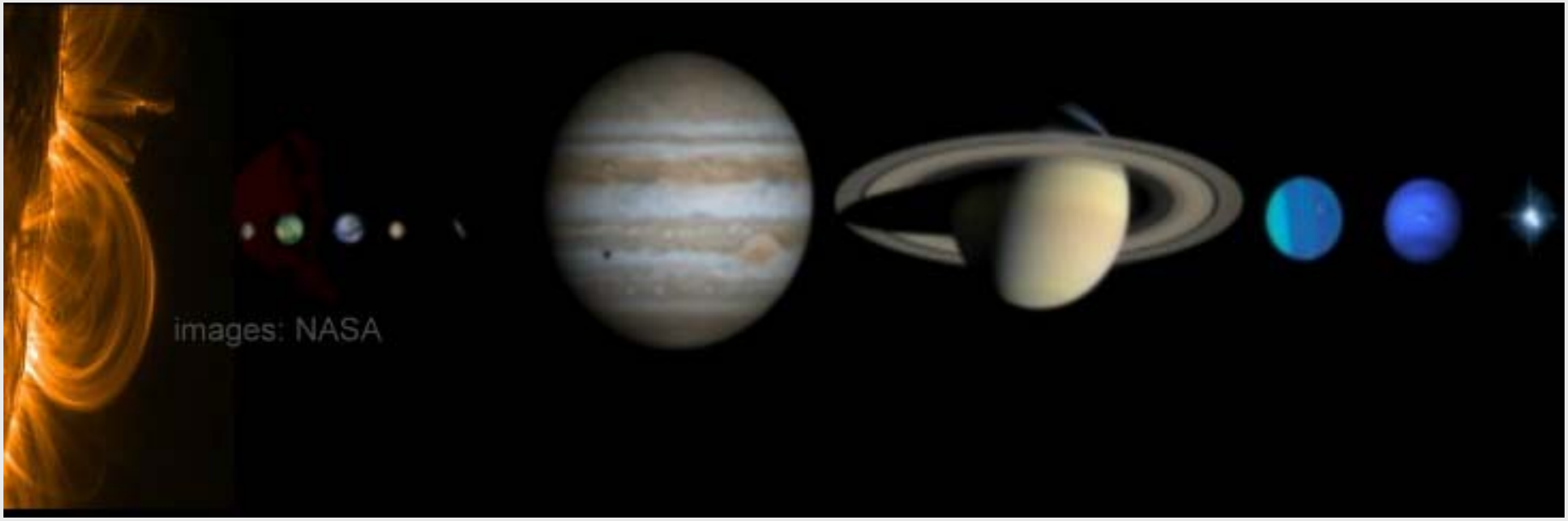
כוכבים הם שמשות רחוקות

- השמש היא כוכב
- לכוכבים מקור אנרגיה פנימי משלהם, המונע את קריסתם. בתחילת חייהם האנרגיה מופקת על ידי תהליכים תרמו-גרעיניים.
- צילום: NASA/ESA



כוכבי הלכת

- כוכבי לכת (פלנטות) כונו כך משום שנראו נעים על פני כיפת השמים וביחס לכוכבי השבת (שמשות)
- כוכבי הלכת סבים סביב שמשות
- במערכת השמש שלנו 8 כוכבי לכת
- ל-6 מהם יש ירח אחד או יותר



יחסי גדלים

- השמש גדולה פי מיליון בנפחה מכדור הארץ וגדולה פי אלף מצדק
- המסה הגבולית התחתונה של כוכב היא כעשירית מסת שמש
- המסה הגבולית העליונה לכוכב היא כמה מאות שמשות
- מסתו של כדור הארץ גדולה פי 81 מזו של הירח

הגדלים ביקום שלנו

אנו נגדיר שני סוגי גדלים:

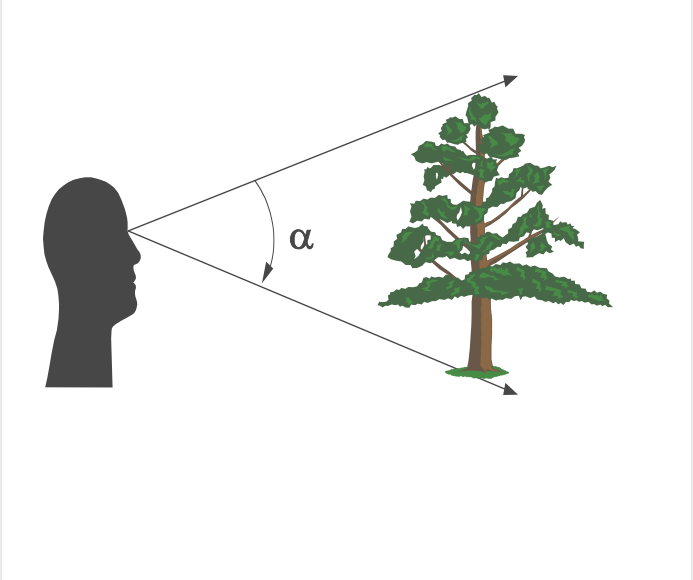
- הגדלים הנראים לעיננו
- מרחקים בין גרמי שמים

http://www.youtube.com/watch?v=2LUQVzerseI

זווית ראייה

הזווית הנוצרת בין העין לגוף.

תלויה בגודלו של הגוף ובמרחקו



זוויות

1 מעלת קשת 1^0

1 מעלה = 60 דקות קשת $1'$

1 דקת קשת = 60 שניות קשת $1''$

במעגל 360 מעלות קשת

במעלה 3600 שניות קשת

זווית הראייה של הירח – חצי מעלת קשת

- נגדיר:
- D – קוטר הירח
- R – מרחק הירח מאיתנו
- זווית הראייה – α תהיה:

$$tg\,\tfrac{1}{2}\alpha = \frac{D/2}{R} = \frac{3540/2}{385000} = 0.00045$$

$$\tfrac{1}{2}\alpha = 0.26^0 \Rightarrow \alpha = 0.52^0 = 31' = 1800''$$

סולם המרחקים

יחידות המדידה הבסיסיות

מ"מ

סנטימטר

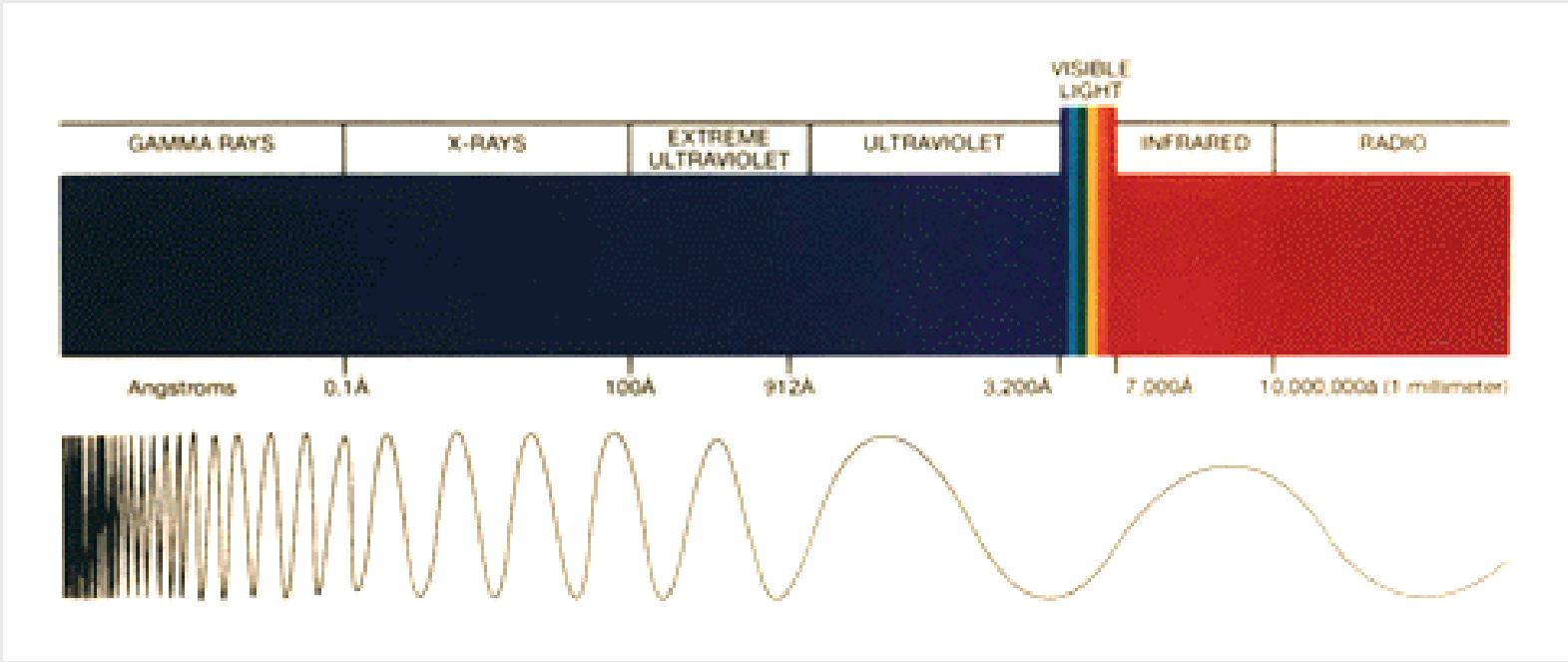
מטר

קילומטר

מרחקים בעולם המיקרו

נאנו-מטר מיליארדית המטר

אנגסטרם עשירית הנאנו מטר



מרחקים "ארציים"

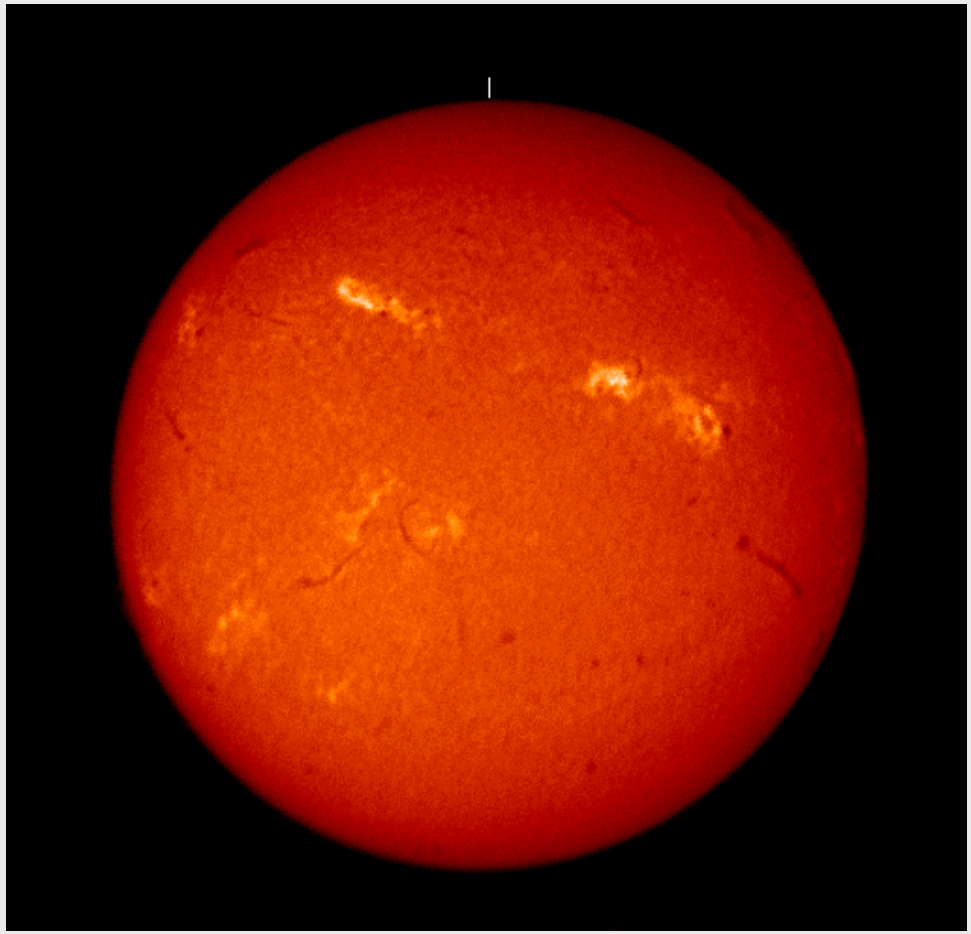
משמשים למדידת מרחקים בכדור הארץ

קוטר כדור הארץ – כ-13 אלף ק"מ

צילום: NASA

המרחק הממוצע לירח כ-380 אלף ק"מ

המרחק לשמש 150 מיליון ק"מ



- צילום: NASA/ESA

יחידה אסטרונומית אחת

הגדרה כללית - המרחק הממוצע של כדור הארץ מהשמש

יחידה אסטרונומית אחת שווה ל

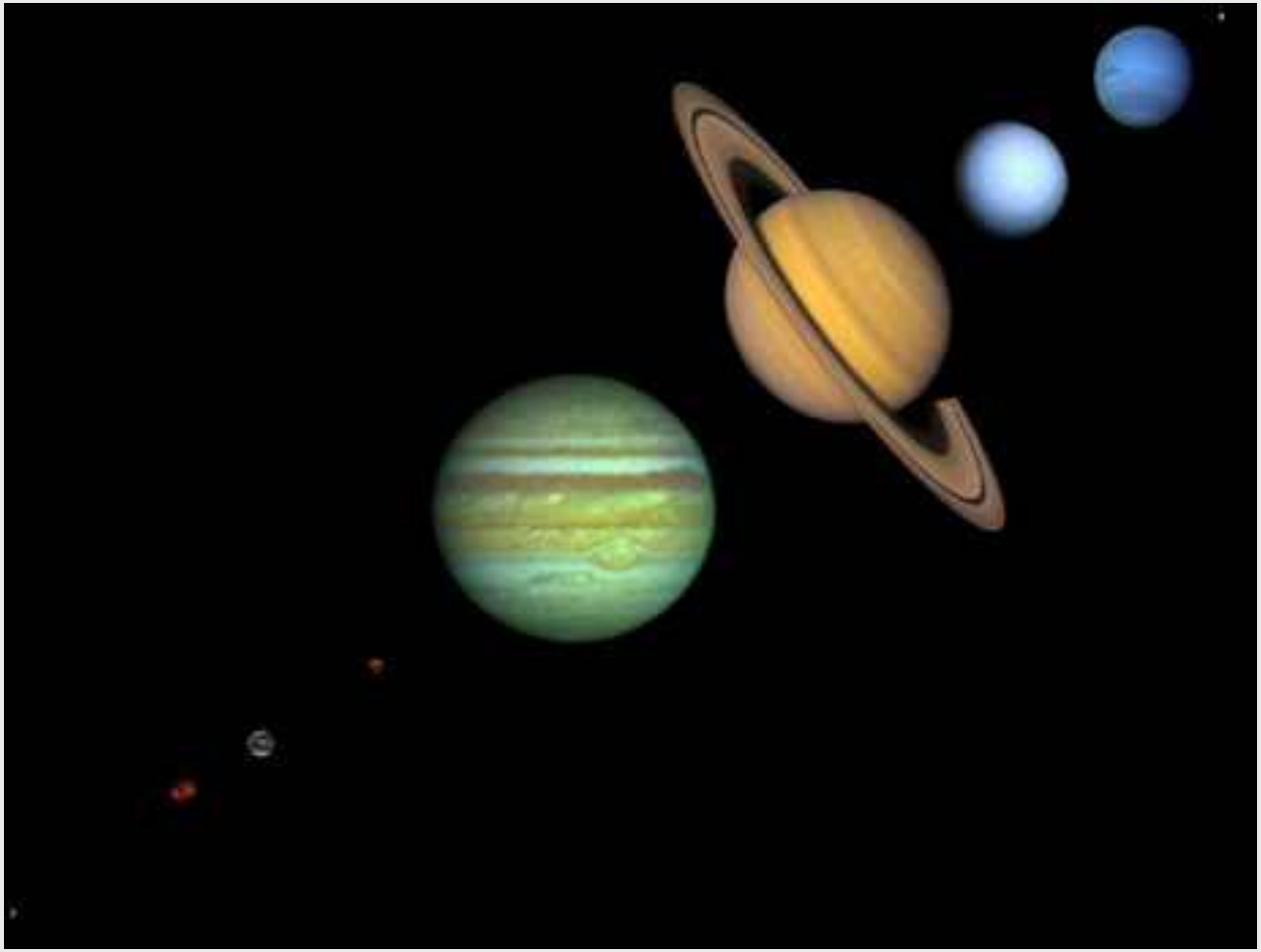
$$1A.U = 150{,}000{,}000 \text{ק"מ}$$

הגדרה פורמלית:

המרחק שבו ינוע גוף בעל מסה זניחה סביב השמש
במסלול מעגלי בזמן מחזור של שנה גאוסיינית אחת,
(כאשר אין גופים אחרים סביב השמש)

מערכת השמש הפנימית

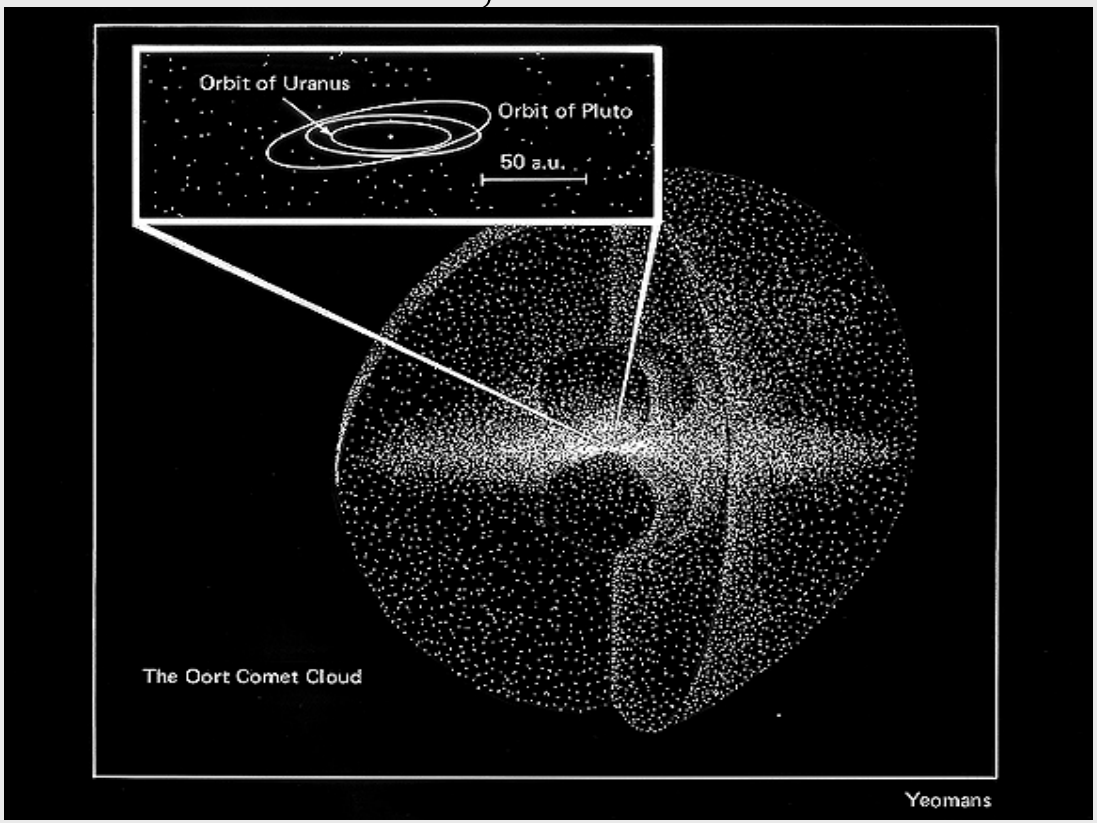
40 A.U



צילום כוכבי הלכת – NASA/HST

שולי מערכת השמש החיצונית

גבול מערכת השמש
70,000 A.U



- בתמונה – איור המראה את ענת אורט בה מצויים שביטים המגיעה עד לשולי מערכת השמש. מקור - NASA

שנת אור

כאשר יוצאים מגבולות מערכת השמש, גם יחידות אסטרונומיות הן קטנות מאוד ביחס למרחקים שבים הכוכבים הקרובים ביותר. לכן, אנו משתמשים ביחידת מידה גדולה יותר והיא – שנת אור.

שנת אור אינה יחידת זמן. היא מבטאת את המרחק שהאור עובר בשנה
מהירות האור 300 אלף ק"מ לשנייה
מספר השניות בשנה = 60x60x24x365

$$1\ L.Y = 9.46x10^{12}\ \ Km$$

$$1 \text{ שנת אור} = 9.46x10^{12} \text{ ק"מ}$$

גרמי שמים במערכת השמש

- מערכת השמש שלנו מכילה את הגופים הבאים:

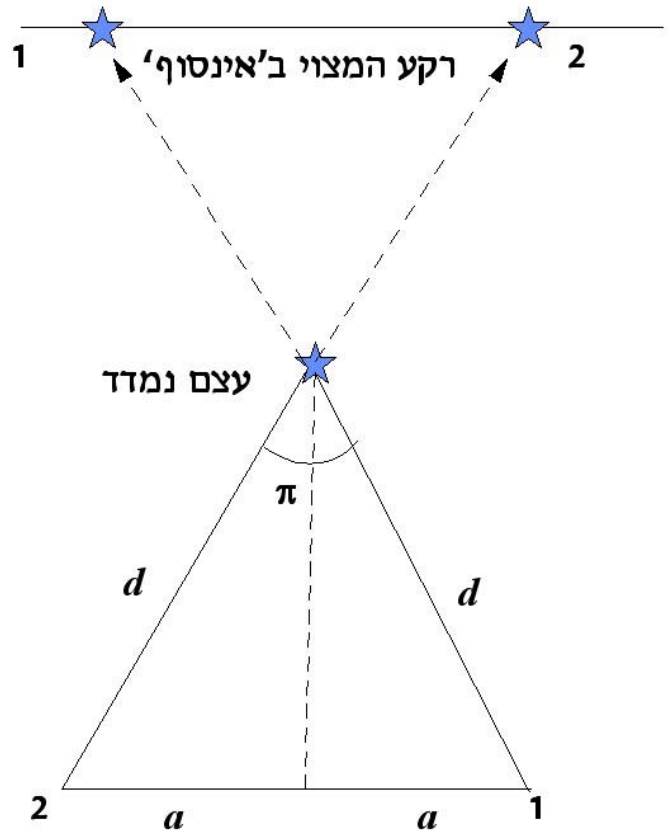
- כוכב מרכזי – השמש
- כוכבי לכת
- כוכבי לכת ננסיים
- ירחים
- שביטים
- אסטרואידים
- אבק
- פלסמה

מדידת מרחקים לכוכבים

- כיוון שכוכבים הם רחוקים מאוד, אי אפשר למדוד את מרחקם בשיטה ישירה. השיטה היעילה למדידת מרחק לכוכבים הקרובים ביותר היא על ידי מדידה גיאומטרית. שיטה זו קרויה שיטת הפרלקסה.

מהי פרלקסה?

פרלקסה היא זווית ההעתקה הנוצרת כאשר מביטים על עצם מסוים משתי נקודות שיש בינן מרחק כלשהו

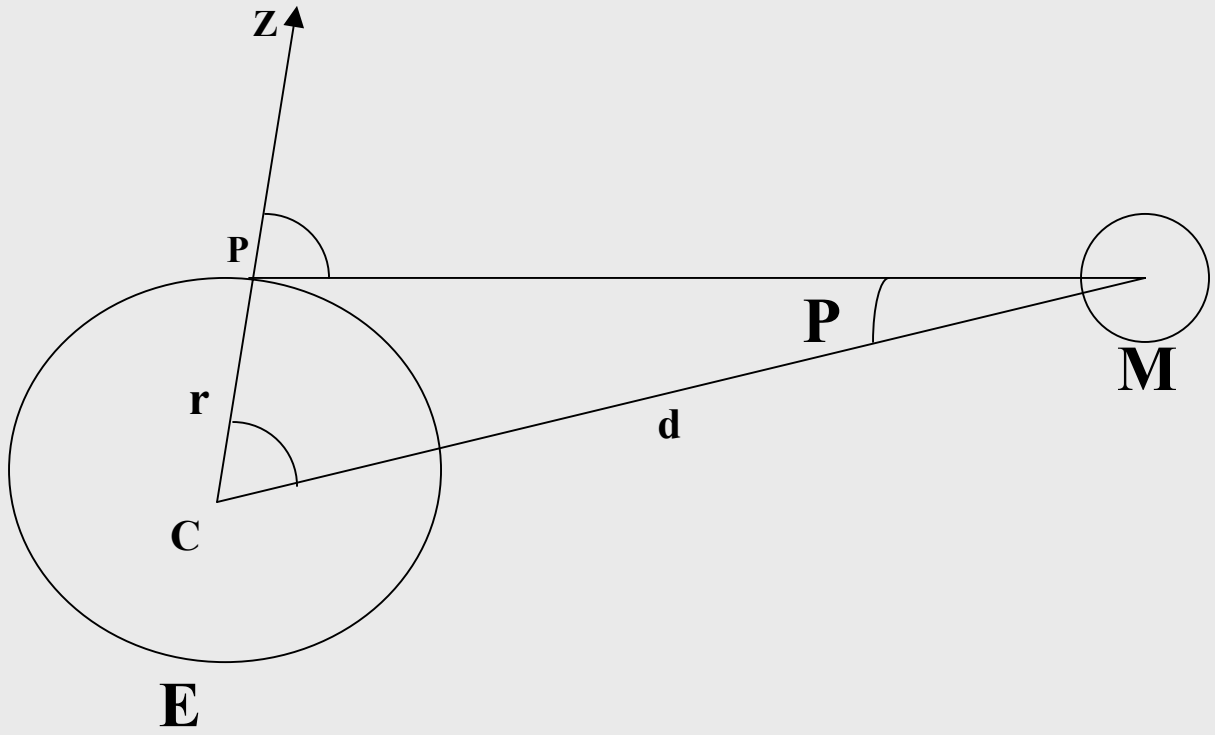


נניח שיש גוף במרחק d
ואנו מביטים עליו משתי
נקודות 1 ו- 2
שהמרחק בינן הוא 2a

זווית הפרלקסה תהיה זווית
הראש של המשולש, π

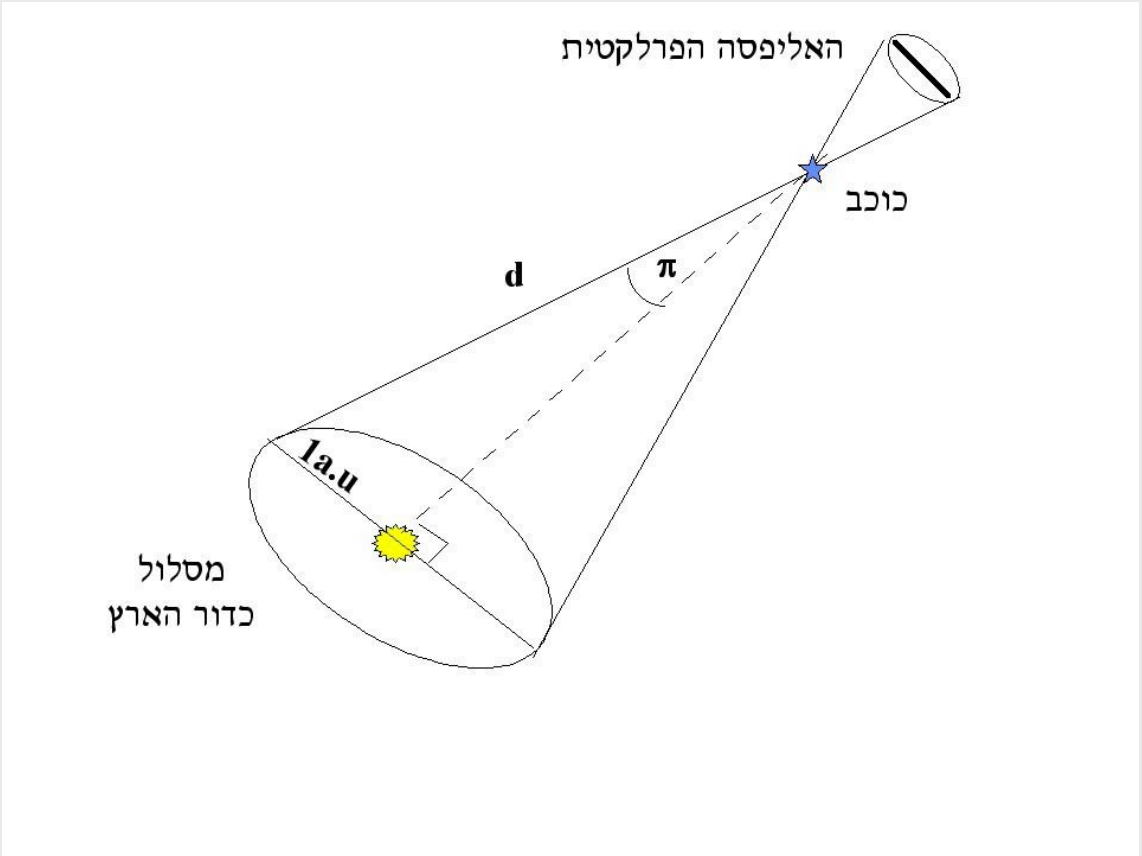
פרלקסה יומית

פרלקסה של גרם שמים, כמו הירח, הנמדדת בשל שינוי מיקום הצופה ביחס אליו כתוצאה מהסיבוב היומי של כדור הארץ (ראו בהרחבה בפרק – קואורדינטות שמימיות)



מדידת פרלקסה לכוכבים

כיוון שזווית הפרלקסה הנוצרת כאשר צופים בכוכבים משתי נקודות המרוחקות זו מזו מרחק השווה לקוטר כדור הארץ, היא כה קטנה ואי אפשר למדוד אותה באמצעים העומדים לרשותינו כיום, אנו זקוקים לבסיס רחב יותר. בסיס זה הוא קוטר מסלול כדור הארץ סביב השמש



בזוויות קטנות מתקיים:

$$Sin\pi = \pi$$

$$\pi = 1 = \frac{1A.U}{d}$$

D=3.2 L.Y

1Pc

$$\sin\pi = \frac{1A.U}{d}$$

הפרסק - Parsec

נגדיר יחידת אורך חדשה – פרסק (Pc)

זהו המרחק של גוף שזווית הפרלקסה שלו היא שניית קשת אחת
והוא שווה ל- 3.16 שנות אור בערך

נוח להשתמש ביחידה זו כיוון שהיא נותנת לנו מיידית את
המרחק לכוכב בהינתן הפרלקסה שלו. לדוגמה, מרחק של
כוכב שהפרלקסה שלו ½ שניית קשת יהיה 2 פרסק, כאשר
הפרלקסה שלו ¼ שניית קשת – 4 פרסק וכן הלאה

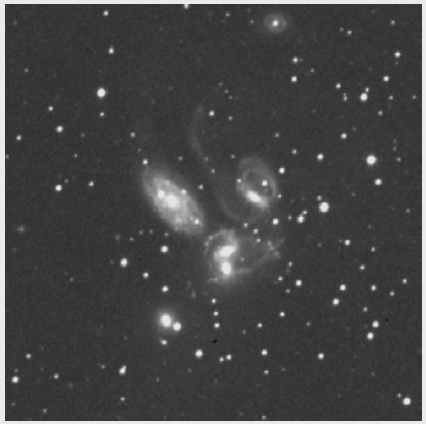
זווית הפרלקסה של הכוכב הקרוב ביותר

זווית הפרלקסה של הכוכב פרוקסימה קנטאורי המרוחק
כ-4.3 שנות אור היא = "0.72

גלקסיות ומרחקים קוסמולוגיים

מגה פרסק = מיליון פרסק

ג'יגה פרסק = מיליארד פרסק



בהירויות כוכבים

הגדרת הבהירות – עצמת האור הנמדדת של הכוכבים
המונח הלועזי הוא מגניטודה (Magnitude)
נוהגים לכנות כוכב שמאיר יותר ככוכב בהיר לעומת
כוכב חיוור שמאיר פחות

בהירות נראית

זו הבהירות שבה אנו רואים את הכוכב מכדור הארץ

אפשר למדוד את השטף המתקבל מהכוכבים כפי שאפשר למדוד
שטף של קרינה המתקבל מכל מקור קרינה (פוטונים ליחידת שטח ליחידת זמן).

סולם ההירויות של פוגסון

הראשון שהנהיג סולם בהירויות היה היווני היפארכוס, שדרג את הכוכבים בסולם יורד מ-1 ועד 6. הסולם של פוגסון הונהג במאה ה-19 וסיווג את בהירויות הכוכבים באופן מתמטי לפי הכללים הבאים:

- הבהירויות הן בסדר יורד, כלל שהמספר שמציין את הבהירות
- גדול יותר, כך השטף המתקבל קטן יותר והבהירות קטנה יותר
- כוכב בעל שטף קרינה גדול יותר- בהירות גדולה יותר – בהיר יותר
- כוכב בעל שטף קרינה קטן יותר – בהירות קטנה יותר – חיוור יותר
- הבהירויות הן בסולם חסר יחידות ורק מציינות יחס בין בהירות כוכבים
- היחס בין הבהירויות הוא לוגריתמי
- כוכב בבהירות 5 חיוור פי 100 מכוכב בבהירות 0

ניסוח מתמטי של סולם הבהירויות

היחס בין 5 בהירויות הוא 100
לפיכך, היחס בין שתי בהירויות עוקבות יהיה:

$$\frac{m_I}{m_J} = \left(\sqrt[5]{100}\right)^{(m_I - m_J)} = 2.51^{(m_I - m_J)}$$

נניח שיש כוכב בבהירות m_i
ונניח שיש כוכב בבהירות m_j
יחס הבהירויות בינם יהיה:

$$m_1 - m_2 = \sqrt[5]{100} \approx 2.5$$

בהירות נראית

הבהירות של הכוכב הנראית מכדור הארץ מצוינת לפי אורך הגל הנמדד

מקובל למדוד את הבהירות באורך הגל הצהוב, 500 ננומטר שהיא מחצית הספקטרום הנראה והיא תסומן כ- M_V

בעבר נהגו לסמן גם בהירות באורכי גל כחולים עבור פלטות צילום הרגישות לאור הכחול בהירויות אלו סומנו ב- M_{pg}

בהירויות עשויות להיות בנות מספר חיובי או שלילי

הבהירות של הכוכב ווגה, אלפא בקבוצת הכוכבים נבל, נקבעה כבהירות 0

אולם, כיוון שיש גרמי שמים בהירים יותר, יש גם ערכים שליליים

דוגמאות לבהירויות של גרמי שמים

- בהירות השמש -26.72
- בהירות הירח המלא -12.7
- כוכב הלכת הבהיר ביותר, נוגה, -4.4
- כוכב השבת הבהיר ביותר, סיריוס -1.68
- סף הראייה בלילה חשוך 6
- כוכבים הנגלים למשקפת שדה 50 מ"מ 10
- סף הגילוי בסרטי צילום כימיים 24
- העצמים החיוורים ביותר בטלסקופ החלל HST, 36

היחס בין בהירות השמש לגרם השמים החיוור ביותר

$$2.5^{36-(-26.72)} = 2.5^{62.72} = 10^{25}$$

בהירות בולומטרית

בהירות בולומטרית (Mb) מוגדרת כמדידת הבהירות של גרם השמים בכל הספקטרום האלקטרומגנטי

תנאי ראות Seeing

מגדירים את תנאי הריאות לפי ההפרדה המירבית הטובה ביותר שאנו משיגים עבור שני גרמי שמים צמודים במכשיר הקלט שלנו

תנאי הריאות תלויים במצב האטמוספירי. התנאים הקובעים את המצב האטמוספירי הם:

תנועות האוויר כתוצאה מהבדלי טמפרטורות באטמוספירה
שינויי צפיפות של שכבות אוויר שונות באטמוספירה
אבק, אדי מים, אירוסולים וכדומה
גובה האובייקט מעל האופק (מסת האטמוספירה ביננו לבין האובייקט)

נרמול בהירות של כוכבים

במדידת אור של כוכבים בתנאים שונים, בתאריכים שונים עלולים לקבל תוצאות שונות התלויות בתנאי התצפית. הפתרון:

הקמת מערכת של כוכבים סטנדרטיים, שבהירותם קבועה הבהירות נמדדת באותם אורכי גל (מבעד מסננים סטנדרטיים, בהם רוחב הספקטרום המועבר קבוע)

בדרך כלל מקובל למדוד את אורו של הכוכב אותו אנו מבקשים למדוד כאשר באותו שדה ראייה מצוי כוכב סטנדרטי.

אם לא, יש למדוד ביחס לכוכב הסטנדרטי הקרוב ביותר, באותם התנאים

אינדקס צבע

בגלל שגרמי השמים פולטים את שיא הקרינה שלהם באורכי גל שונים בהתאם
הטמפרטורה שלהם, מודדים את הבהירות של גרמי השמים באורכי גל שונים
המדידה מבוצעת במערכת מסננים תקנית, שבה לכל פילטר רוחב ספקטרום קבוע סביב
אורך הגל הרצוי
מערכת המסננים העיקרית המקובלת היא U B V R I
היחס B-V קרוי אינדקס הצבע והוא מציין את הבדלי הבהירויות בין המסנן הכחול
למסנן באור הנראה

היחס B-V קרוי אינדקס הצבע והוא מציין את הבדלי הבהירויות
בין המסנן הכחול למסנן באור הנראה

נרמול לפי ווגה

יש בעייה לנרמל בהירות לפי שטף
השטף המתקבל מכוכב מסוים תלוי בכמה גורמים:

נניח שאנו מודדים באותו טלסקופ. המשתנים הבאים יקשו לקבל תוצאה אחידה:
הבדל רגישויות בין שני מכשירי מדידה
הבדל רגישויות במכשיר המדידה עצמו לאורכי גל שונים
גובה האובייקט מעל האופק (Air Mass)
שקיפות האוויר
תנאי הריאות Seeing
שינויי השטף של הכוכב עצמו

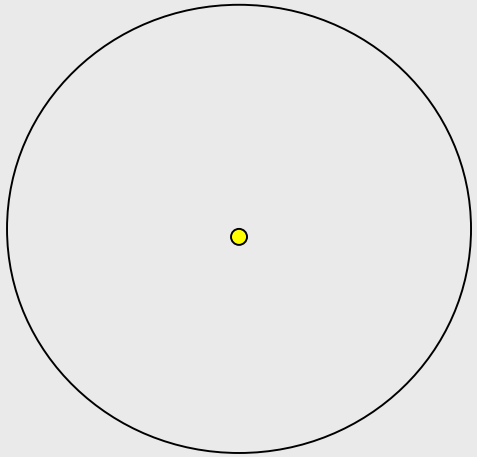
נקבע שבהירותו של ווגה במסנן V היא 0 וכי אינדקס הצבע שלו B-V=0

הבהירות הנראית אינה אומרת כלום על הכוכב

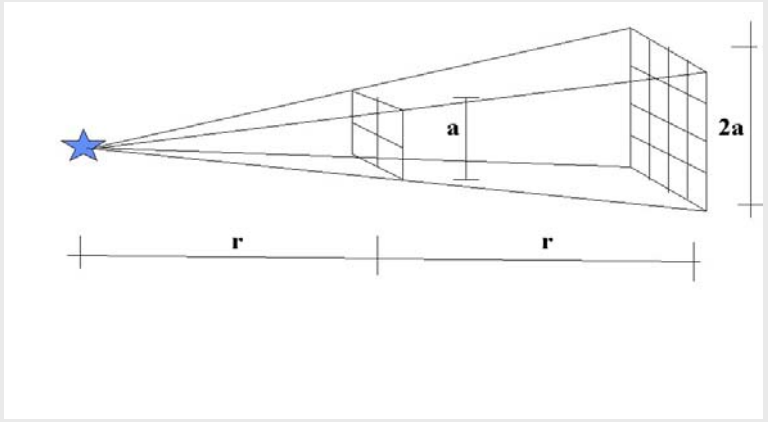
היא מסומנת באות m והיא מבטאת את בהירותו של הכוכב כפי שנראה מכדור הארץ. אם נשווה שתי בהירויות נראות של שני כוכבים, אי אפשר ללמוד מכך כלום על הבדלי עצמות האור האמיתיות בינם כיוון שהבהירות הנראית תלויה ב-

עצמת אורו האמיתית של הכוכב
מרחקו מאיתנו

האור נחלש ביחס הפוך לריבוע המרחק



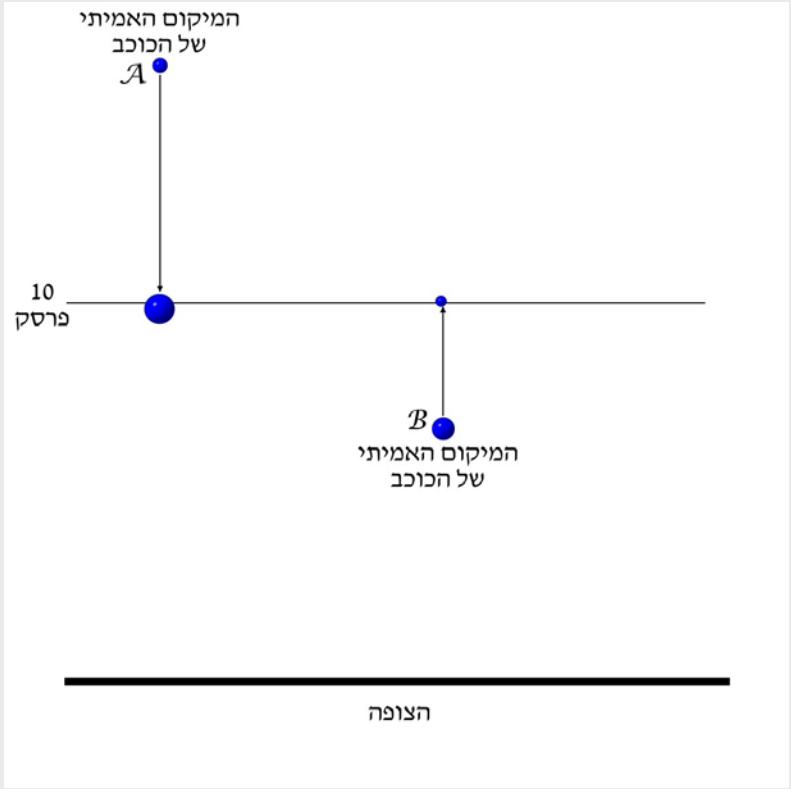
האור מתפשט בחלל כמו כדור
לכן, שטף הקרינה מתפזר בחלל ונחלש
ביחס הפוך לריבוע המרחק מאיתנו.



בהירות מוחלטת

בהירות מוחלטת מבטאת את בהירות הכוכב לו היה מצוי במרחק זהה מאיתנו. באופן זה, אם נדע את הבהירויות המוחלטות של שני גופים, נדע מהו היחס האמיתי בין עצמות האור בינם כיוון שנטרלנו את הבדל המרחק בינם.

בהירות מוחלטת של כוכבים מנורמלת עבור מרחק 10 פרסק



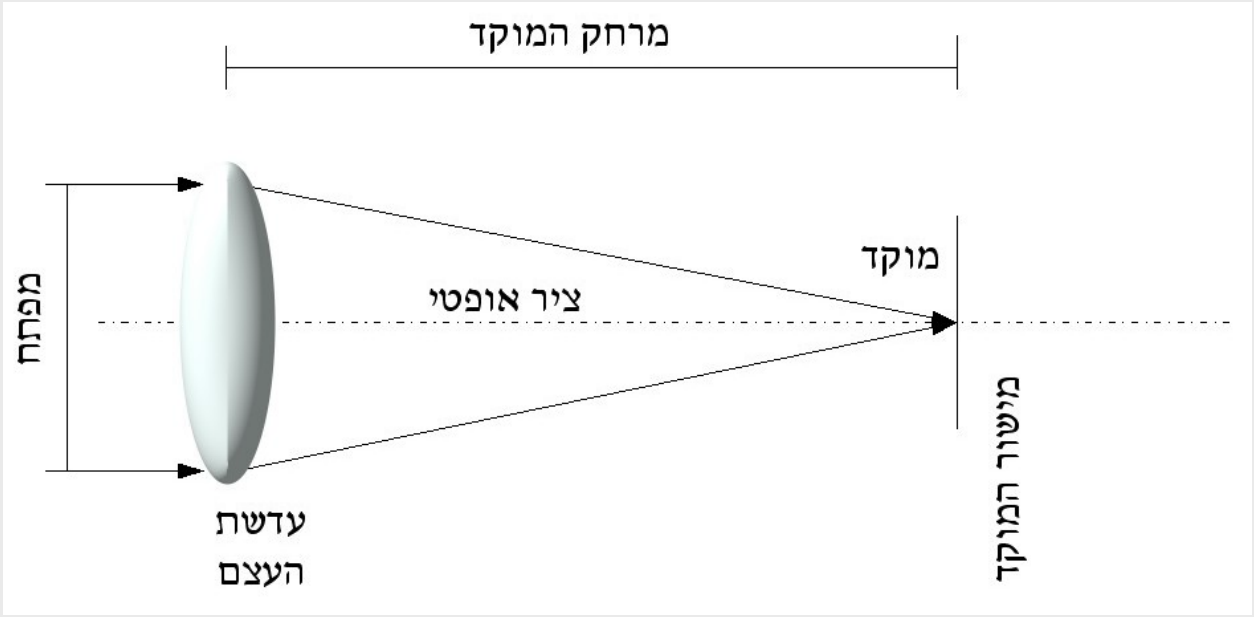
בהירות מוחלטת

מסומנת באות M

$$M = m + 5 - 5 \log D$$

מבנה הטלסקופ

המכנה המשותף של הטלסקופים הוא להביא את האור למוקד אחד

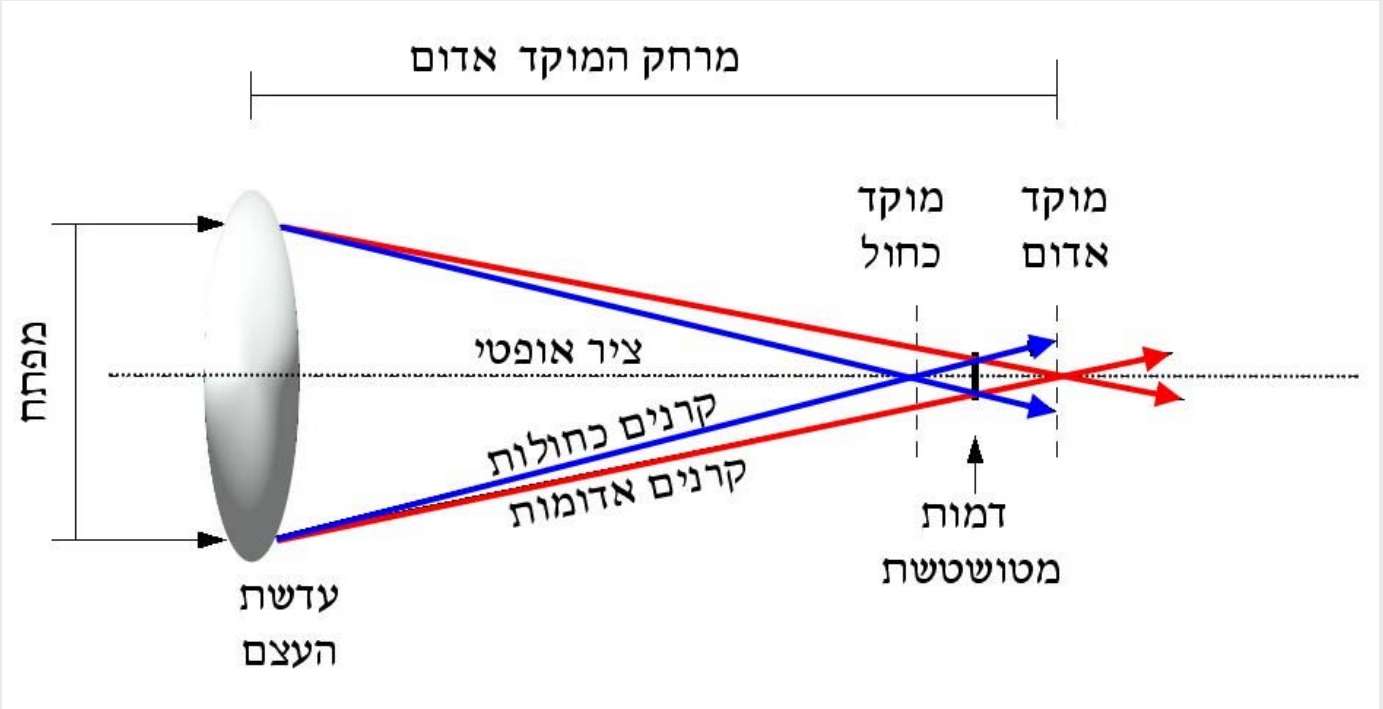


תכונות הטלסקופ

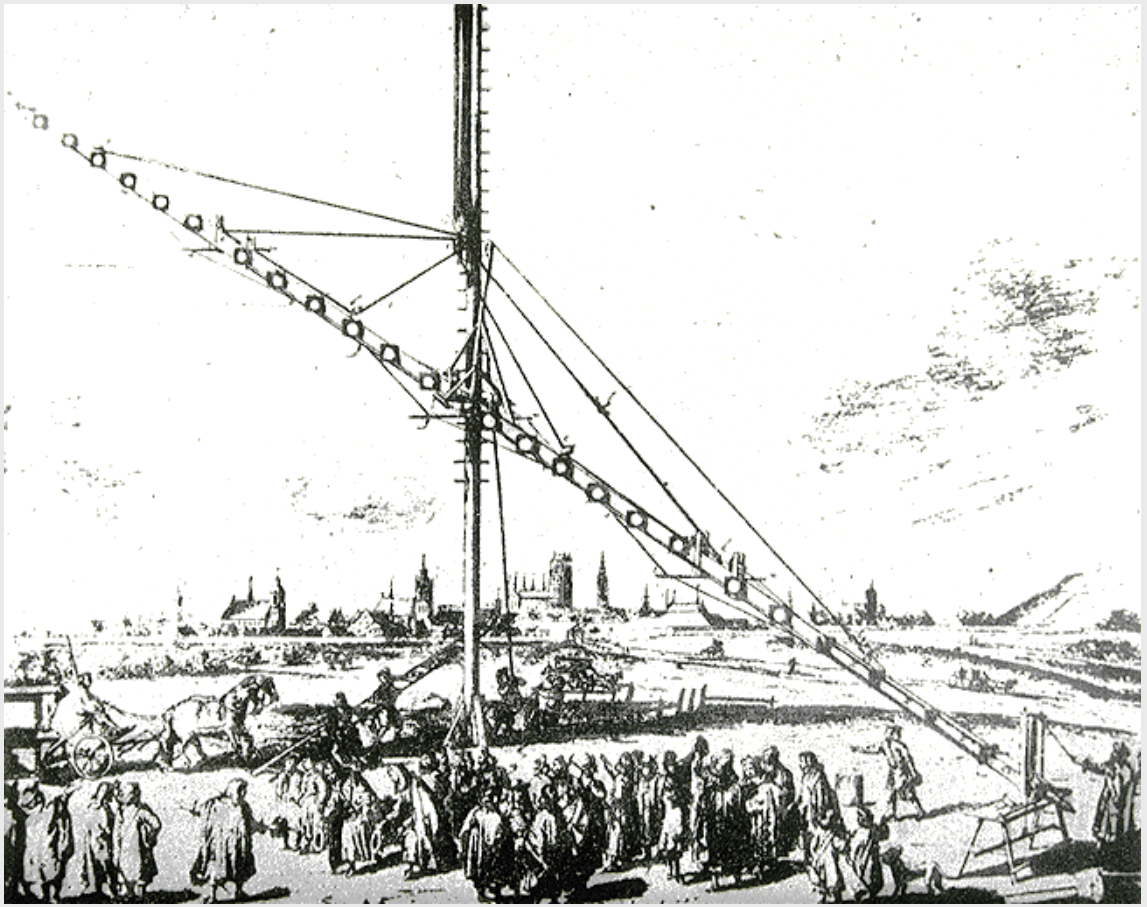
נניח טלסקופ בעל מפתח (קוטר) D
ואורך מוקד F

הטלסקופ שובר האור

פועל על עקרון שבירת האור – הבעייה – אברציה כרומטית, בה קרני אור באורכי גל שונים (צבעים שונים) מגיעים למרחק מוקד שונה



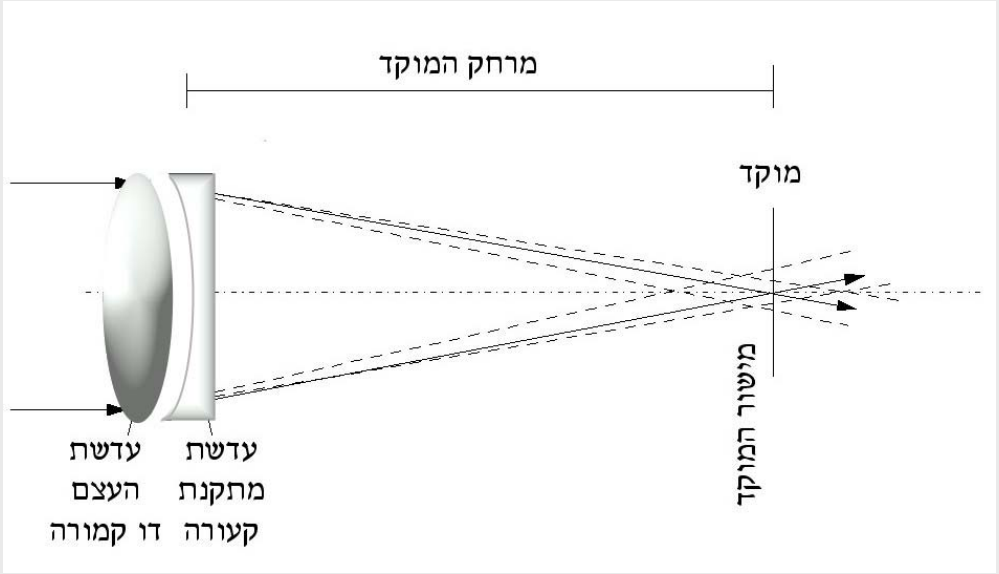
פתרון – הארכת אורך המוקד!



פתרון הגיוני יותר לבעיית השבירה

הפתרון – הוספת עדשה מתקנת
או – זכוכיות מחומרים שהרכבם
מפצה על השבירה ED

תיקון מסדר נוסף –
הוספת עדשה מתקנה עברו כל אורך גל

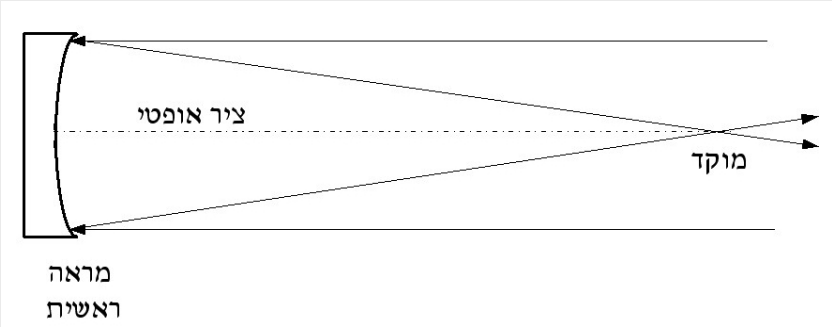


מערכת אופטית שוברת אור

הטלסקופ מחזיר האור (ניוטוני)

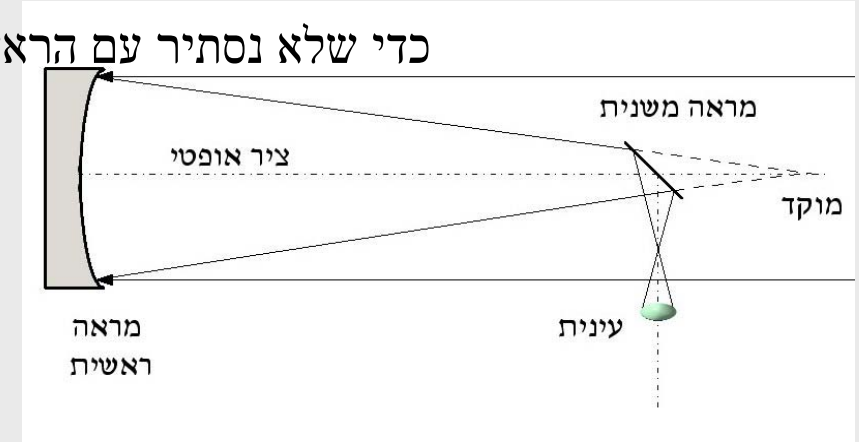
בעייה: עיוות ספרי על ידי החזרה ממשטח כדורי

הפתרון – משטח פרבולי



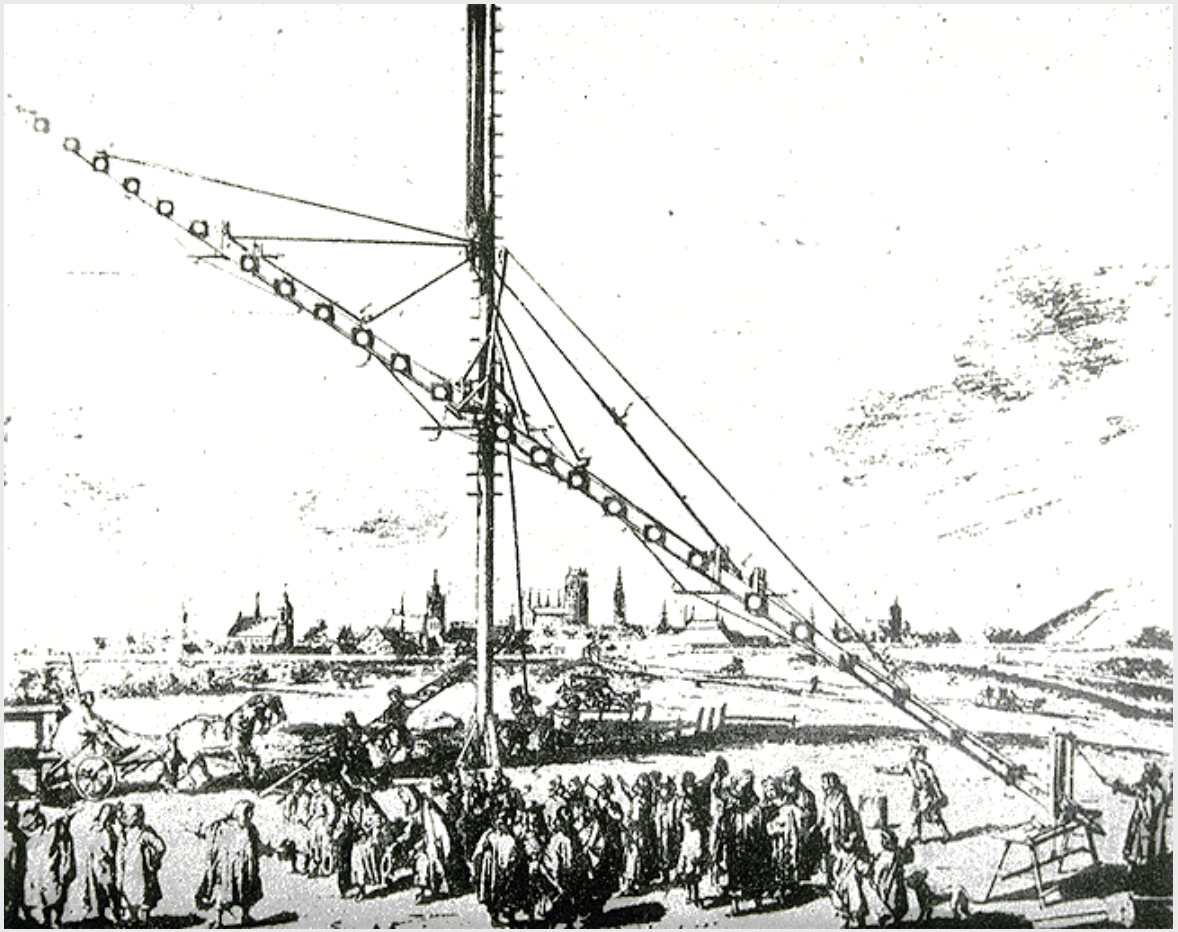
כדי שלא נסתיר עם הראש...

כדי שלא נסתיר עם הראש...



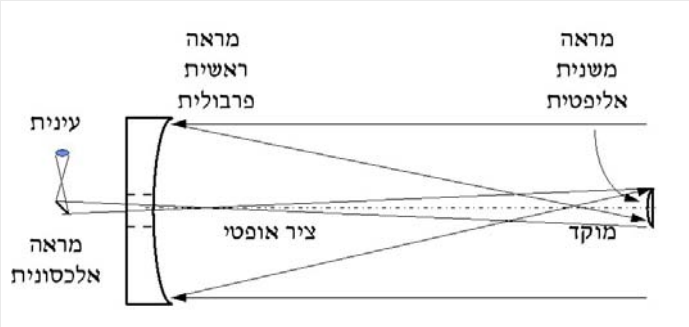
קצת ארוך....

אבל יכול להיות יותר גרוע...

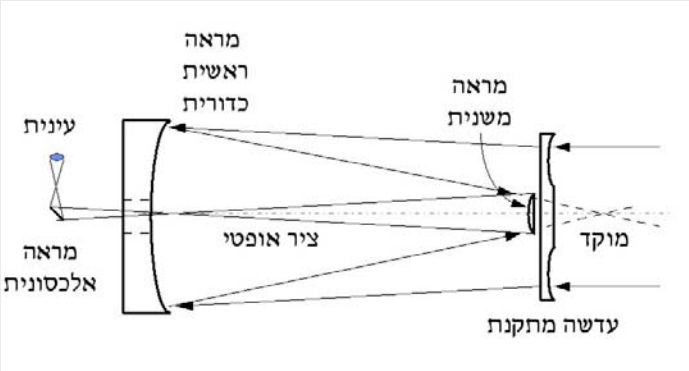


הפתרון: קיצור הטלסקופ – טלסקופ קטדיופטרי

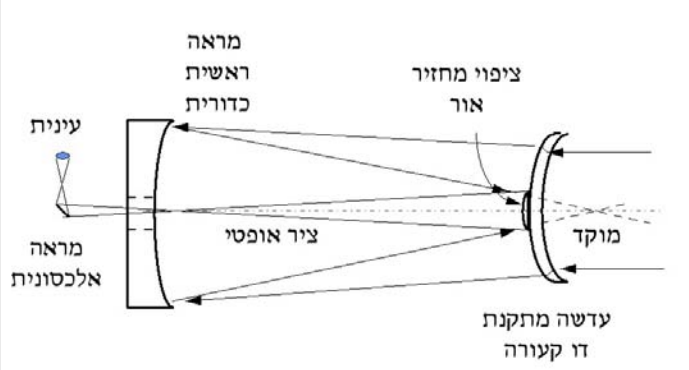
- קסיגריין



- שמידט – קסיגריין

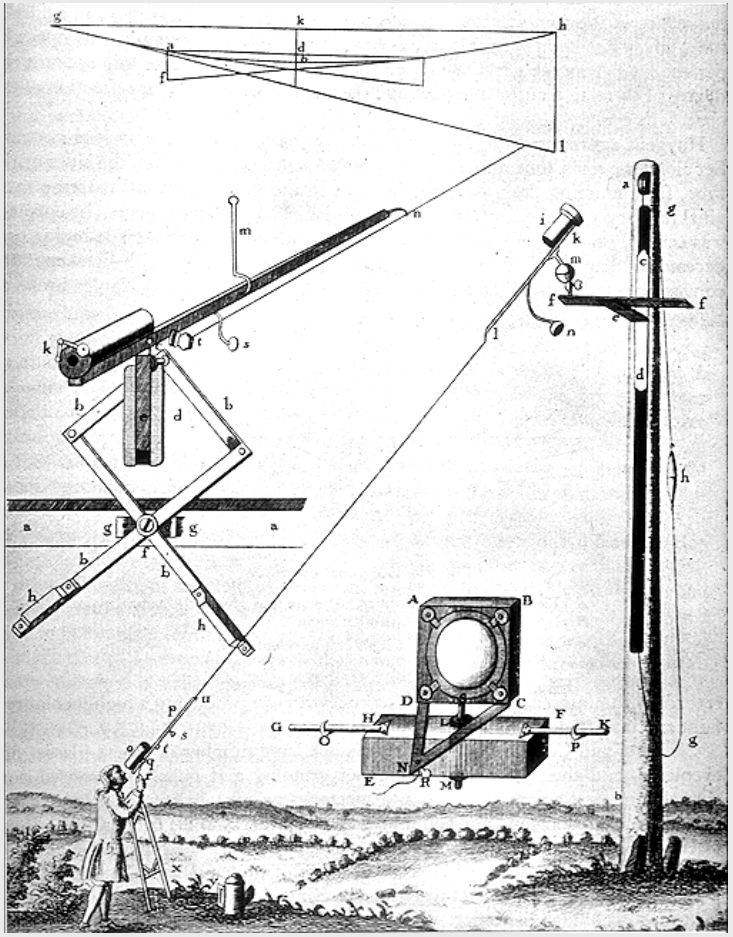


- מקסוטוב קסיגריין

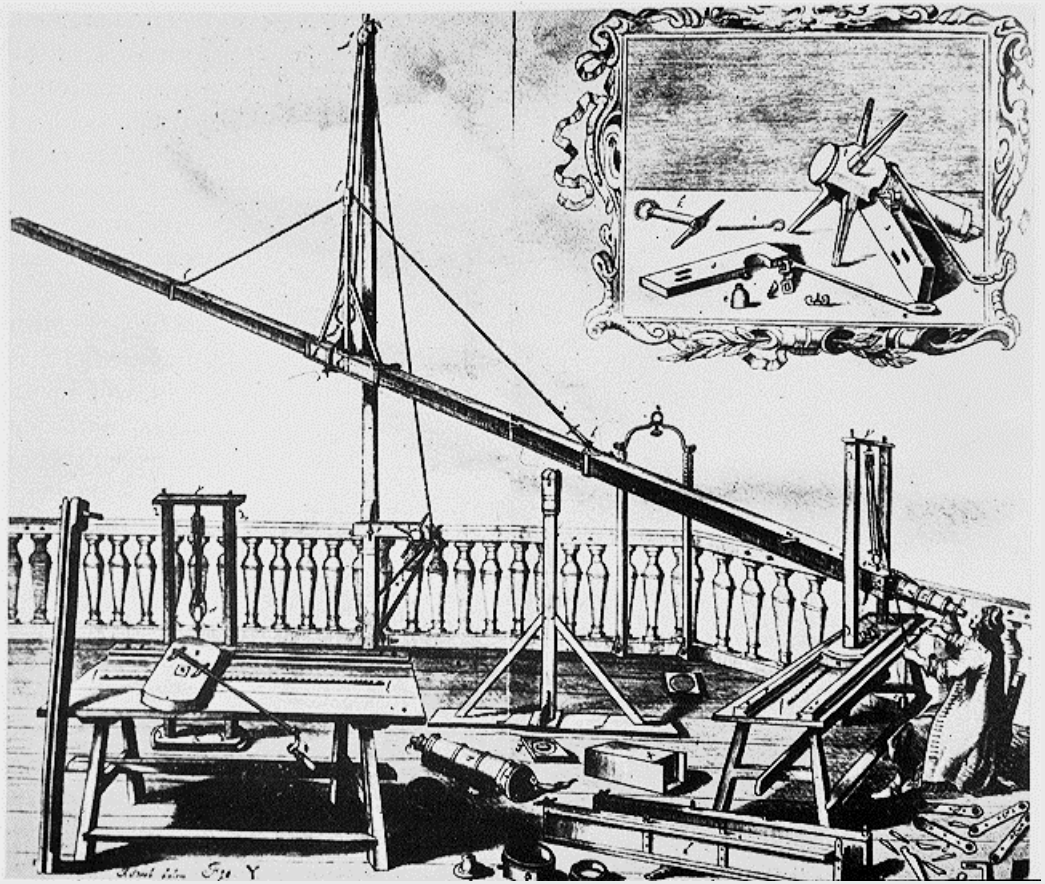


הטלסקופ הקטדיופטרי הקומפקטי

איך מכוונים לכוכבים ?

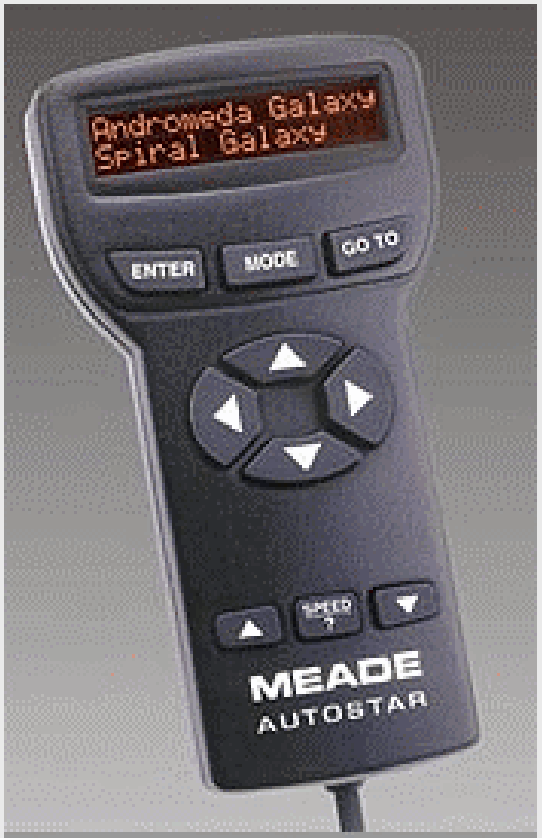


אפשר כך



אפשר כך

ואפשר גם אחרת



The Meade #494 Autostar Hand Controller permits fully automatic location of celestial objects.

הטלסקופ הקטדיופטרי

תכונות בסיסיות של טלסקופ

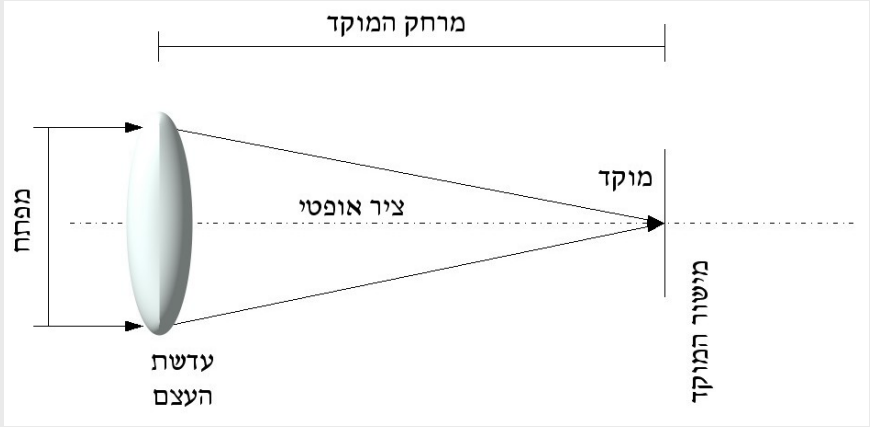
לטלסקופ יש שתי מטרות עיקריות:

1. איסוף אור – משמש למעשה כאנטנה שתפקידה
קליטת האור מגרמי שמיים רחוקים או חיוורים מאוד
לצורך זה, ככל שקוטר העדשה גדול יותר, כך איסוף האור טוב יותר

. הגדלת כושר ההפרדה (קרוי בלשון העם – הגדלה)

ככל שהקוטר של הטלסקופ גדול יותר, כך יגדל כושר ההגדלה

יחס המוקד



היחס בין אורך המוקד למפתח

נניח עינית בעלת שדה ראייה A ואורך מוקד f במ"מ
נניח טלסקופ בעל קוטר D במ"מ ואורך מוקד F

$$F_{ratio} = \frac{F}{D}$$

מקביל למינוח "צמצם" בצילום

כושר הפרדה של טלסקופ

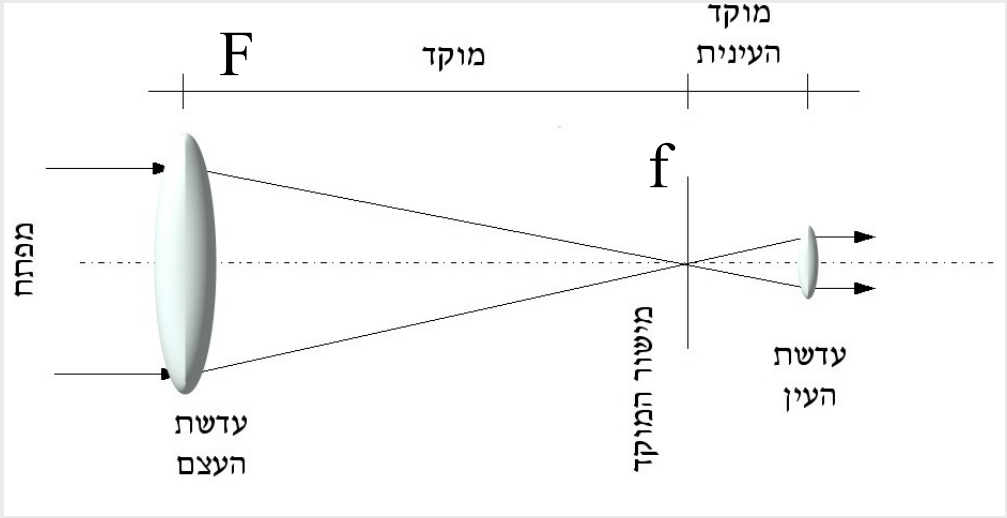
נוסחת Dawee נוסחה כללית עבור אורך גל

$$a'' = \frac{9.5x10^{-3}\,\lambda}{D}$$

אם פותרים עבור אורך גל נראה בתחום 500 נאנו מטר והקוטר נמדד באינטשים

$$a'' = \frac{4.7}{D''}$$

ההגדלה



נניח טלסקופ בעל אורך מוקד F

במישור המוקד מתקבלת דמות מדומה של האובייקט

העינית, היא למעשה זכוכית מגדלת שמגדילה את הדמות המדומה שנוצרת במישור המוקד

לעינית אורך מוקד f

ההגדלה של הטלסקופ היא למעשה

$$x = \frac{F}{f}$$

הגדלה מירבית של טלסקופ

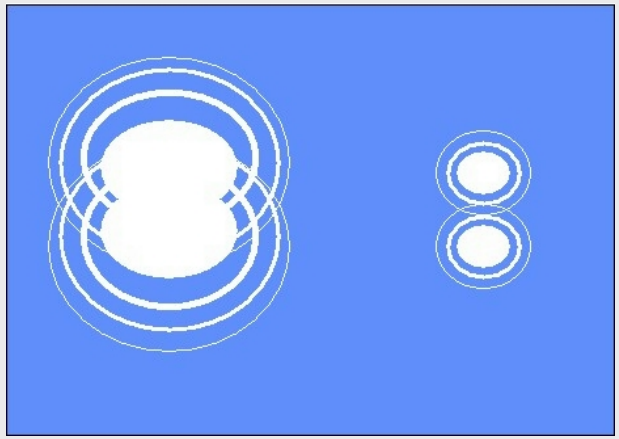
ההגדלה המירבית של הטלסקופ היא למעשה
כושר ההפרדה המירבי של הטלסקופ

כלל אצבע לקשר בין הגדלה מירבית X_{max} לקוטר D במ"מ:

$$X_{\max} \approx 2.5 D_{mm}$$

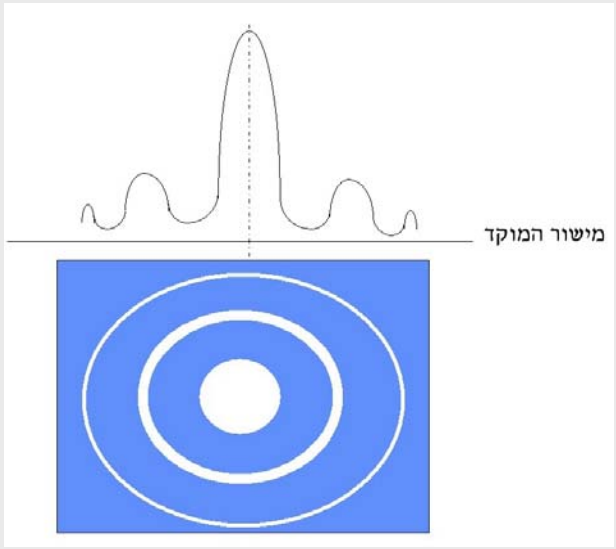
מגבלת ההתאבכות

התאבכות של שני גלים בעל אורכי גל זהים, המגיעים דרך שני סדקים אל מישור המוקד,



התאבכות בונה והתאבכות הורסת

גודל הדסקה המרכזית של כוכב שפולט קרינה באורך גל λ



$$2.44\frac{\lambda F}{D} = 2.4\lambda F_{ratio}$$

זווית ראייה של טלסקופ

תלויה באורך המוקד של הטלסקופ בלבד

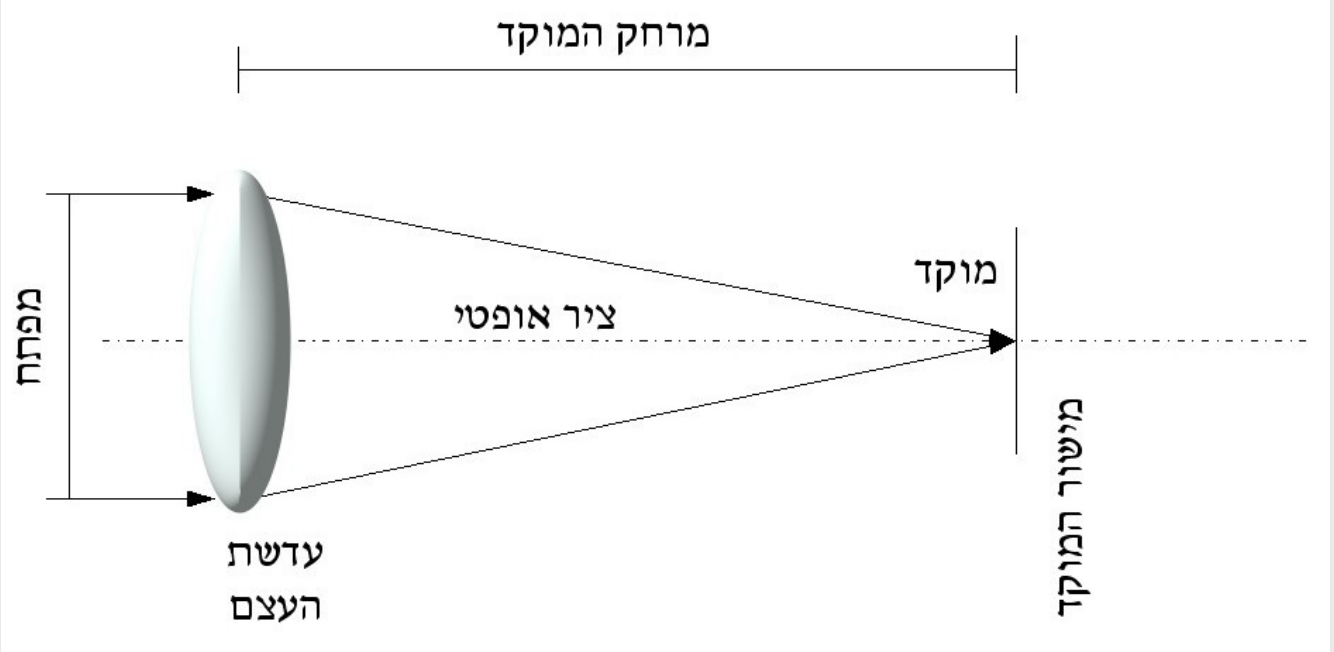
גודל במ"מ של מעלה אחת על שדה הראייה

יהי:
F אורך המוקד של הטלסקופ במ"מ
θ זווית ראייה (נמדדת ברדיאנים)
A גודל הדמות על מישור המוקד במ"מ

$$A_{mm} = F\theta$$

שדה ראייה של עינית

לכל עינית זווית ראייה משלה הנמדדת במעלות FOV



זווית ראייה בפועל

זווית הראייה תלויה הן בשדה הראייה של העינית ובהגדלה שלה

נניח עינית בעלת שדה ראייה A ואורך מוקד f במ"מ
נניח טלסקופ בעל קוטר D במ"מ ואורך מוקד F
ההגדלה של הטלסקופ תהיה

$$X = \frac{F}{f}$$

זווית הראיה, a תהיה

$$a = \frac{Af}{F}$$

ומקרה כללי:

$$a = \frac{A}{X}$$

בהירות מירבית שאפשר לראות בטלסקופ

תלויה באיסוף האור של הטלסקופ

נניח טלסקופ בעל קוטר D באינטשים, נקבל ביטוי אמפירי:

$$m = 9 + 5 \log D$$