



שגם לדמיוננו הם לעיתים חסרי משמעות.

לא רק לסדרי הגודל עלינו להסתגל, גם מערכת המושגים הבסיסית והמצבים הפיזיקליים, שאנו פוגשים בחקר כוכבים, מצויים הרבה מחוץ לסקאלות אליהן הורגלנו. כמו למשל גרעין השמש העשוי גז אך צפיפותו גדולה עשרת מונים מצפיפות הברזל...

עד כאן הכרות קצרה עם מספרים גדולים, ועתה לחייהם של כוכבים.

בכדי לתאר ולסקור את מהלך חייהם של כוכבים מן הראוי לברר תחילה מהו כוכב.

כוכב הוא גוף שמימי, עשוי גז, בדרך כלל, הממלא אחר שני התנאים הבאים:

\* הגוף **קורס** על ידי הגרביטציה העצמית שלו.

\* הגוף **מייצר** אנרגיה ופולט אותה לחלל היקום.

בהתאם להגדרה זו כוכבי הלכת אינם כוכבים שכן אין הם מייצרים אנרגיה אלא רק מחזירים את קרינת השמש הפוגעת בהם. השמש לעומת זאת היא כוכב, ומתברר שאפילו כוכב אופייני.

## מקור האנרגיה של כוכבים

ראינו, על פי ההגדרה, שתמצית חייו של כוכב היא ייצור האנרגיה ופליטתה. ננסה עתה להבין ולדון באמירה זו כשאנו מתמקדים בשמש.

תחילה נגדיר את מושג ה**בהיקות** (**luminosity**): בהיקות של כוכב היא כמות האנרגיה הנפלטת מפניו ביחידת זמן. בהיקות השמש לדוגמה היא  $4 \cdot 10^{33} \text{erg/s}$ . רק בכדי לקבל תחושה לערך זה נציין שכמות האנרגיה המנוצלת על ידי כלל המין האנושי, לכל צרכיו, היא  $10^{26} \text{erg/y}$ . כלומר, לו יכולנו לנצל את האנרגיה הנפלטת מפני השמש **בשניה אחת** היא הייתה מספיקה לכלל המין האנושי ליותר ממיליון שנים!

כמה זמן כבר פולטת השמש קרינה בעוצמה אדירה זו? ממצאים גיאולוגיים (מאובנים) על פני כדור הארץ מעידים על קיומם של בעלי חיים ימיים לפני יותר ממיליארד שנים. המסקנה מעובדה זו היא שגם לפני יותר ממיליארד שנה היו הטמפרטורות על פני כדור הארץ מעל אפס מעלות (המים לא קפאו) ומתחת למאה מעלות (המים לא רתחו והתאדו). במילים אחרות הטמפרטורות לפני יותר ממיליארד שנה לא היו שונות בהרבה מאלו של היום. עובדה זו תיתכן רק אם גם טמפרטורת השמש ובהיקותה לא השתנו ביותר מאחוזים בודדים. לכן, השמש קורנת, בבהיקותה הנוכחית, לפחות

מיליארד שנים. השאלה הברורה והמתבקשת היא: מה מקור האנרגיה המאפשר לשמש לפלוט כמויות כה גדולות של אנרגיה לאורך זמן כה רב? עלינו לזהות אפוא מקור אנרגיה המסוגל לספק:

$$4 \cdot 10^{33}(\text{erg/s}) \cdot 3 \cdot 10^7 \cdot 10^9\text{s} = 10^{50}\text{erg}$$

הניחושים הראשונים בדבר מקור האנרגיה של השמש ניתנו על ידי רופא גרמני בשם מאייר (Mayer). מאייר סבר, באופן טבעי, שהשמש עשויה מחומר הדלק הטוב ביותר המוכר לו, דהיינו פחם. על ידי חישוב פשוט ניתן להראות שגם לו השמש כולה הייתה עשויה פחם, שריפתו הייתה מאפשרת את בהיקות השמש רק לפרק זמן של כ- 5000 שנה.

ההשערה הראשונה בעלת משמעות פיזיקלית הייתה של שני הפיזיקאים קלווין והלמהולץ. הם העריכו שהשמש פולטת למעשה את האנרגיה הגרביטציונית המשתחררת בעקבות כיווצה מעטן גז דליל ומנופח לגודלה העכשווי. אנרגיה זו ניתנת להערכה טובה למדי (עד כדי קבוע הקרוב ליחידה), על ידי:

$$4 \cdot 10^{48} \text{erg} \cong \frac{GM^2}{R}$$

זו אכן כמות אדירה של אנרגיה, אך גם היא מספקת רק לכ- 30 מיליון שנה...

אדינגטון, פרופסור לאסטרונומיה באוניברסיטת קמברידג' (1926), טען שמקור האנרגיה של השמש הוא האנרגיה הגרעינית המתקבלת מבעירת גרעיני מימן לגרעיני הליום. עקרונית, בתהליך כזה הופכים ארבעה פרוטונים (ארבעה גרעיני מימן) לגרעין של הליום (שני פרוטונים ושני נויטרונים). כיוון שגרעין ההליום קל מארבעת גרעיני המימן בכ- 0.07% ניתן להעריך את כמות האנרגיה המשתחררת בריאקציה זו, לגרם אחד של מימן, על ידי:

$$E = \Delta m \cdot c^2 = 0.007 \cdot (3 \cdot 10^{10})^2 \sim 10^{19} \text{erg}$$

אם נכפול ערך זה במסת השמש ( $2 \cdot 10^{33} \text{g}$ ) נקבל כמות אנרגיה של  $10^{52} \text{erg}$ . כמות זו יכולה לספק את הבהיקות הנוכחית של השמש לכמה עשרות מיליארדי שנה. מסיבה זו היה אדינגטון משוכנע כי זה אכן מקור האנרגיה של קרינת השמש. הבעיה העיקרית בהסבר זה הייתה להראות כיצד אכן מתרחשת הריאקציה הגרעינית המבוקשת. שהרי הפרוטונים, הטעונים במטען חשמלי חיובי, דוחים זה את זה ודחייתם הולכת וגוברת ככל שהם מתקרבים זה לזה. רק כאשר המרחק ביניהם מתקרב לגודל הגרעין גוברת המשיכה הגרעינית על הדחייה הקולומבית.

מתוך ידיעת שיווי המשקל ההידרוסטטי בשמש יכול היה

- ד. השמש במודל תייצר אנרגיה בקצב השווה בדיוק לבהיקותה (לקצב בו נפלטת אנרגיה מפניה).
- ה. השמש במודל תפלוט אנרגיה בקצב השווה לזה הנצפה ( $\sim 4 \cdot 10^{33} \text{erg/s}$ ).
- ו. טמפרטורת השפה של השמש במודל תשווה לזו הנצפית ( $\sim 5600$  מעלות).

מודל תיאורטי העונה על כל הדרישות הללו אכן ניבנה והוא מכונה בשם ה"מודל הסטנדרטי של השמש". מן הדרישות שהוצבו בפני המודל הסטנדרטי של השמש ברור שהוא מקיים את התכונות הנצפות של השמש, כלומר את התנאים הפיזיקליים השוררים על שפת השמש. האם ניתן לקבל אישוש לתכונות המודל הסטנדרטי גם עבור המתרחש במרכז השמש? מתברר שכן. זאת באמצעות חלקיק חמקמק - הנויטרינו. לחלקיק זה, שהוא תוצר לוואי של הריאקציות הגרעיניות המתרחשות במרכז השמש, אינטראקציה אפסית עם חומר, ולכן מצליחים הנויטרינים הנוצרים במרכז השמש לחצות את כל נפחה ולהגיע, בין השאר, לכדור הארץ. שטף הנויטרינים המגיעים לפני כדור הארץ הוא כ-  $6 \cdot 10^{10}$  נויטרינים לסמ"ר, רובם ככולם חולפים דרך כדור הארץ וממשיכים בדרכם בחלל. במצב כזה נשאלת השאלה כיצד נוכל לצוד לפחות חלק מאותם נויטרינים על מנת לאשר או להפריך את קיומן של הריאקציות הגרעיניות במרכז השמש. הדבר נעשה, לפחות בניסויים הראשונים כמו זה של דייוויס בדרום דקוטה, באמצעות כמות עצומה של אטומי כלור  $^{37}\text{Cl}$  הכלואים במכלי ענק עמוק מתחת לפני הקרקע (בדרך כלל במכרות נטושים). אטום הכלור, באינטראקציה עם הנויטרינו, הופך לאטום ארגון (Ar), רדיואקטיבי אותו ניתן לאתר בקלות יחסית. כיום פוזרים ברחבי העולם ניסויים רבים ומתקדמים יותר לאיתור הנויטרינים הנפלטים מהשמש. התוצאות שנצטברו עד כה מתאימות לכמות של כשני שלישים מן הכמות המוערכת מתוך המודל הסטנדרטי. לא ברור אם חוסר התאמה זה מקורו באי דיוק של המודל הסטנדרטי או בגלל חוסר הבנה מסוים בפיזיקה של הנויטרינים.

### לידתם של כוכבים

מניין באים כוכבים לעולם? התשובה המתבקשת לכך היא אותם ענני גז מולקולרי ה- GMC (Giant Molecular Clouds) המשייטים בחלל היקום. הדרך ההגיונית לאתר את מקור היווצרותם של כוכבים היא לזהות ולמקם את ה"תיוקות" שביניהם. ראינו קודם לכן שמקור החיים של כוכב הוא

אדינגטון להעריך את הלחץ והצפיפות במרכזה ומתוך כך גם את הטמפרטורות. ההערכה הייתה שבמרכז השמש שוררת טמפרטורה של כ-40 מיליון מעלות. טמפרטורה זו שקולה למהירות גרעיני המימן של כ-1000 km/s. מהירות עצומה זו מאפשרת לשני פרוטונים להתקרב זה לזה, למרות הדחייה הקולומבית, למרחק קטן למדי אך עדיין גדול מהמרחק הגרעיני המבוקש. הטמפרטורות הנדרשות בכדי להתגבר כליל על המחסום הקולומבי גדולות בכשלושה סדרי גודל מאלו השוררות במרכז השמש. למרות זאת המשיך אדינגטון להאמין שמקור האנרגיה של השמש הוא אכן בבעירת המימן להליום, והתברר כי צדק.

באותו זמן שמעלה אדינגטון את רעיון מקור האנרגיה של השמש מתרחשת מהפיכה בפיזיקה, על ידי דה-ברויי, בור, שרדינגר, הייזנברג, דירק, אופנהיימר, טלר וגאמוב. בהתבסס על חידושי תורת הקוואנטים הראה גאמוב שלמרות שעל פי חוקי הפיזיקה הקלאסית לא יוכלו שני פרוטונים להתגבר על הדחייה הקולומבית עבור מהירויות יחסיות של כ-1000 km/s הרי שעל פי עקרונות התורה הקוואנטית יש לכך סיכוי, אמנם קטן, אך שונה מאפס. אפקט זה כונה בשם **אפקט המנהרה** (כאילו קיימת מנהרה, נסתרת מן העין, המאפשרת לפרוטונים להתקרב אחד אל השני, למרות נוכחות ה"הר" הקולומבי). יישומו של אפקט המנהרה להסבר אפשרות קיומן של ריאקציות גרעיניות בשמש המתין עוד כמה שנים עד שנעשה על ידי שני הפיזיקאים אטקינסון (Atkinson) והוטרמנס (Houtermans). ההסבר המלא של תהליכי הבעירה הגרעינית המתרחשים במרכז השמש ניתן על ידי הפיזיקאי הנס בטה (Hans Bethe) שזכה על תרומתו בפרס נובל. לא בכדי היה הנס בטה מהחוקרים המובילים בפרויקט פיתוח פצצת המימן. מרגע שהובנו התהליכים הגרעיניים במרכז השמש הייתה, לכאורה, ידועה כל הפיזיקה הנדרשת על מנת "לבנות שמש" - דהיינו, לאפיין בצורה חד משמעית את ההרכב החומרי, הצפיפות והטמפרטורה בכל נקודה בשמש, מהשפה החיצונית הנראית לעין ועד למרכזה. על מודל תיאורטי זה לעמוד בדרישות הבאות:

- רדיוס השמש במודל ישווה לרדיוס הנצפה ( $\sim 7 \cdot 10^{10} \text{cm}$ ).
- מסת השמש במודל תשווה למסה המוערכת מתצפיות ( $\sim 2 \cdot 10^{33} \text{g}$ ).
- השמש במודל תימצא בשיווי משקל דינמי מלא, כלומר, פער הלחצים (הלחץ הפנימי פחות הלחץ החיצוני) על כל קליפת מסה ישווה בדיוק למשיכה הגרביטציונית הפועלת על הקליפה.

החוצה, המנוגד לכיוון המשיכה הגרביטציונית. מאותה סיבה לא קורסת גם האטמוספירה של כדור הארץ.  
 \* שימור התנע הזוויתי. לענני הגז יש תנע זוויתי ראשוני. קריסת הענן מלווה לכן בגידול הכוחות הצנטריפוגליים המתנגדים לכוח הגרביטציוני.  
 \* שדות מגנטיים (השפעת השדות המגנטיים סבוכה יחסית לדיון תמציתי זה).

עקרונית, תנאי הכרחי ליצירת כוכב מענן הגז הוא שהאנרגיה הכוללת, גרביטציונית + תרמית, תהיה שלילית. דהיינו:

$$E_{th} + E_{gr} < 0$$

$$\frac{3R}{2\mu} M \bar{T} - \frac{3}{5} \frac{GM^2}{r} < 0 \quad \text{כלומר:}$$

כאשר R הוא קבוע הגזים ו- $\mu$  המשקל המולקולרי הממוצע, M מסת הכוכב, r רדיוסו ו T הטמפרטורה הממוצעת בתוכו. את הצפיפות הממוצעת  $\bar{\rho}$  ניתן לרשום על ידי:

$$\bar{\rho} = \frac{M}{\frac{4\pi}{3} r^3}$$

משוויון זה נבודד את r ונציב באי השוויון הקודם ונקבל את אי השוויון של ג'ינס (Jeans):

$$\frac{M}{M_{sun}} > 3300 \frac{\bar{T}_{100}^{3/2}}{\bar{\rho}_{23}^{1/2}}$$

כאשר הטמפרטורה ( $\bar{T}_{100}$ ) מדודה ביחידות של 100 מעלות (קלווין) והצפיפות  $\bar{\rho}_{23}$  מדודה ביחידות של  $10^{-23}$  גרם לסמ"ק. הביטוי בצד ימין, ידוע בשם **המסה של ג'ינס**, הוא מבטא את המסה המינימלית של ענן גז היכול לקרוס תחת הגרביטציה העצמית שלו כנגד כוחות הלחץ שיווצרו. הקשר אומר שמסת הענן המינימלית תגדל ככל שתקטן צפיפותו או תגדל הטמפרטורה שלו. הטמפרטורות והצפיפויות השוררות בענני הגז המולקולריים קרובות ליחידה, ביחידות שהוגדרו לעיל, ולכן המסה המינימלית לקריסה על פי הקשר של ג'ינס היא כ-3300 מסות שמש. ערך זה גדול עשרות מונים מן הכוכבים הנצפים בחלל היקום. ואכן, אם ענן הכבד ממסת ג'ינס מתחיל בקריסה, צפיפותו עולה והטמפרטורה נותרת קבועה בקירוב (בגלל שקיפות הענן) ולכן ערכה של המסה המינימלית, על פי הקשר של ג'ינס **קטן**. לפיכך, בשלב זה, תתרחשנה קריסות משנה של חלקים מן הענן המקורי. בתהליך מעין זה תלך מסתן של הקריסות המשניות ותקטן. בסופו

האנרגיה המיוצרת מהבעירה הגרעינית שבקרב. לכן, ניתן להעריך, באופן גס לפחות, את זמן החיים של כוכב כמנה של קיבולת האנרגיה בקצב הפליטה שלה (הבהיקות של הכוכב). קיבולת האנרגיה מתכונתית למסת הכוכב ( $E=Mc^2$ ). מתברר שכוכב של 10 מסות שמש בהיקותו גדולה פי 10,000 מזו של השמש. מכאן שזמן החיים שלו קטן פי 1000 מזה של השמש. כוכב של כ-100 מסות שמש, בהיקותו גדולה פי מיליון מזו של השמש, ולכן זמן החיים שלו הוא "רק" כמיליון שנה (קטן פי 10,000 מזה של השמש). מיליון שנה זה זמן קצר ביותר במונחים אסטרופיזיקליים, או במילים אחרות, במיליון שנה לא מתרחשים שינויים גדולים בסקאלות שמעבר לאלו של הכוכב הבודד. לכן סביר להניח שהכוכבים הכבדים יימצאו קרוב למקום לידתם. ואכן, מרבית הכוכבים הכבדים, המזוהים על ידי צבעם הכחול ובהיקותם הגבוהה, נצפים בסביבת ענני הגז המולקולרי (תמונה 1).



תמונה 1: עמודי גז מולקולרי בערפילית העיט (Eagle Nebula) - מקור היווצרותם של תינוקות כוכבים. הצילום 1995.

השאלה הבאה המתבקשת בדבר לידתם של כוכבים היא: כיצד נוצרים כוכבים מתוך ענני הגז המולקולרי? במחשבה ראשונה נידמה שאין קל מזה, שהרי כל ענני הגז צריכים היו לקרוס תחת הגרביטציה העצמית שלהם ולהפוך לגופים קומפקטיים דמויי כוכבים. ולכן, מן הראוי היה לשאול תחילה מה **מונע** מאותם ענני גז לקרוס בהשפעת הגרביטציה העצמית שלהם. לכך, מסתבר, שלוש סיבות עיקריות:  
 \* עם תחילת ההתכווצות של הענן נוצר שדה לחצים העולה כלפי מרכז הענן. פרופיל לחצים זה מפעיל לפיכך כוח בכיוון

של התהליך נקבל צביר של כוכבים, במסות שונות שבין כמאית למאה פעמים מסת השמש.

### תקופת הבגרות בחי" כוכב

שלב הקריסה של כוכב נעצר כאשר גראדיינט הלחץ, המתפתח בקרבו, מאזן את הכוח הגרביטציוני. במצב זה, המכונה מצב שיווי המשקל הדינמי, חייב הלחץ לעלות כלפי פנים הכוכב וכן גם הצפיפות. בשלב בו נעשה הכוכב אטום לקרינה, גם הטמפרטורה עולה כלפי מרכז הכוכב. בשלב זה, המכונה בשם "פרוטו-כוכב", אין עדיין ייצור אנרגיה, שכן הטמפרטורות השוררות במרכז הכוכב נמוכות מכדי לאפשר את בעירת המימן. מאידך, הכוכב כבר חם מסביבתו, ולכן קורן ומאבד אנרגיה. איבוד האנרגיה של הכוכב גורם לו, עד כמה שהדבר מפתיע, **להתחמם**. תכונה מוזרה זו ידועה כ"קיבול חום שלילי של כוכבים". תכונה זו ניתנת להבנה באופן הבא: על פי המשפט הוויריאלי, המקשר בין האנרגיה התרמית הפנימית לבין אנרגיית הכבידה בכוכבים (לא יוכח כאן אך קל ופשוט להוכחה), קיים:

$$2E_{th} = -E_{gr}$$

כאשר  $E_{th}$ ,  $E_{gr}$  הן האנרגיה הגרביטציונית והתרמית של הכוכב בהתאמה.

מאידך,  $E_{tot}$  - האנרגיה הכוללת של הכוכב:

$$E_{tot} = E_{th} + E_{gr}$$

ולכן:

$$E_{tot} = \frac{1}{2} E_{gr} = -E_{th}$$

כלומר, כאשר כוכב מאבד אנרגיה -  $E_{tot}$  קטן (נעשה שלילי יותר) האנרגיה התרמית -  $E_{th}$  **גדלה**, והאנרגיה הגרביטציונית **קטנה**. במילים אחרות, כוכב **המאבד** אנרגיה **מתכווץ ומתחמם**. התכווצות הכוכב משחררת אנרגיה גרביטציונית, מחציתה מכסה את איבודי האנרגיה הנפלטת לחלל ומחציתה הופכת לאנרגיית חום. קריסת הכוכב, המלווה בעליית הטמפרטורות בקרבו, תימשך עד להצתת הריאקציות הגרעיניות - בעירת המימן להליום. אז יושג מצב שיווי משקל תרמודינמי מלא. דהיינו, בנוסף לשיווי המשקל הדינמי שתואר קודם לכן, יימצא הכוכב גם בשיווי משקל תרמי - קצב איבוד האנרגיה של הכוכב ישווה בדיוק לקצב ייצור האנרגיה במרכזו. שלב זה יימשך כל עוד לא ישתנו תנאי הבעירה הגרעינית, והללו ישתנו רק כאשר כמות הדלק, המימן, תאזל מאזור הבעירה במרכז הכוכב. שלב זה של איזון

תרמודינמי הוא אפוא השלב בו מבלה הכוכב את מרבית "חיי". גם השמש שלנו מצויה כיום בשלב זה ותימצא בו, כאמור, עוד כמה מיליארדי שנים.

ככל שגדלה מסת הכוכב גדל כמובן גם הלחץ במרכזו, הנדרש בכדי לאזן את המשיכה הגרביטציונית. גידול זה של הלחץ מלווה בגידול יחסי של הצפיפות והטמפרטורה. כיוון שקצב ייצור האנרגיה, בבעירת מימן להליום, תלוי, כך מסתבר, בצורה חריפה ביותר בטמפרטורה, הרי שבכוכבים כבדים גדול קצב ייצור האנרגיה במידה ניכרת מזו המתרחשת בכוכבים קלים. לפיכך, במצב שיווי המשקל התרמודינמי גדולה הבהיקות = קצב פליטת האנרגיה (= קצב ייצור האנרגיה), בכוכבים כבדים, במידה ניכרת מבהיקותם של כוכבים קלים. או בקצרה -

### ככל שגדלה מסתו של הכוכב גדלה גם בהיקותו.

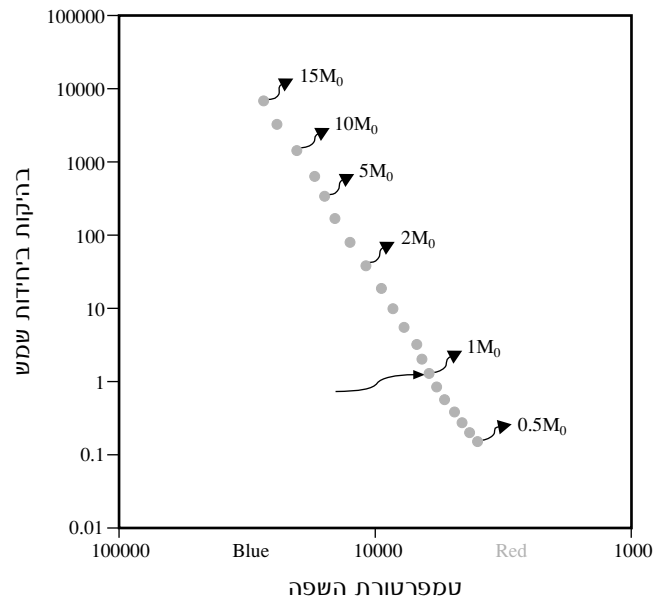
בהיקות הכוכב תלויה למעשה בשני גדלים, גודלו של השטח הקורן וטמפרטורת החומר הקורן. בכוכבים, בשלב האיזון התרמודינמי, גידול הבהיקות מלווה הן בגידול רדיוס הכוכב (השטח הקורן) והן בגידול טמפרטורת האזור הקורן (טמפרטורת שפת הכוכב).

נניח עתה את קיומו של צביר כוכבים בעלי מסות שונות, שנוצרו באותו הזמן (בקירוב). כאשר יגיעו כוכבים אלו למצב שיווי המשקל התרמודינמי הם יתפלגו לבהיקויות שונות ולטמפרטורות שפה שונות, בהתאם למסתם. תצפיתית, אם נתבונן בצביר כוכבים בני אותו הגיל, נמצא שבהיקותם תלך ותגדל עם עליית טמפרטורת השפה שלהם. לאלו בעלי הבהיקות הגבוהה ביותר (פי מיליון מהשמש) תהיה טמפרטורת שפה גבוהה (~50,000 מעלות) וצבעם יהיה כחול, אלו יהיו כמובן הכוכבים הכבדים יחסית. לכוכבים שבהיקותם נמוכה (~כמאית מבהיקות השמש) תהיה טמפרטורה של כ-3000 מעלות בלבד וצבעם יתקרב לאדום, אלו הכוכבים שמסתם קטנה ביותר. הרצועה לאורכה יימצאו הכוכבים הללו בדיאגרמה של הבהיקות כנגד טמפרטורת השפה, נקראת "**הסדרה הראשית**", והדיאגרמה, בה מתוארת הסדרה הראשית, נקראת "**דיאגרמת הרצשפרונג-ראסל**". תרשים 1 מתאר, תיאורטית, את הסדרה הראשית בדיאגרמת "הרצשפרונג ראסל". "סדרות ראשיות" מהסוג שחזינו בדיון לעיל אכן נצפות בצבירים שונים של כוכבים בחלל היקום. זכור ראינו שככל שמסת הכוכב גדולה יותר כך הוא מכלה **מהר יותר** את המימן במרכזו. לפיכך, ככל שמסתו של הכוכב גדולה יותר כך הוא יסיים מהר יותר את שלב האיזון

הכוכבים העוזבים את הסדרה הראשית נעים, בדיאגרמת הרצפרונג ראסל, לעבר אזור הענקים האדומים - איזור המאופיין בטמפרטורות שפה נמוכות (צבע אדום) ובהיקות גבוהה. על טיבם של הענקים האדומים נדון בהמשך.

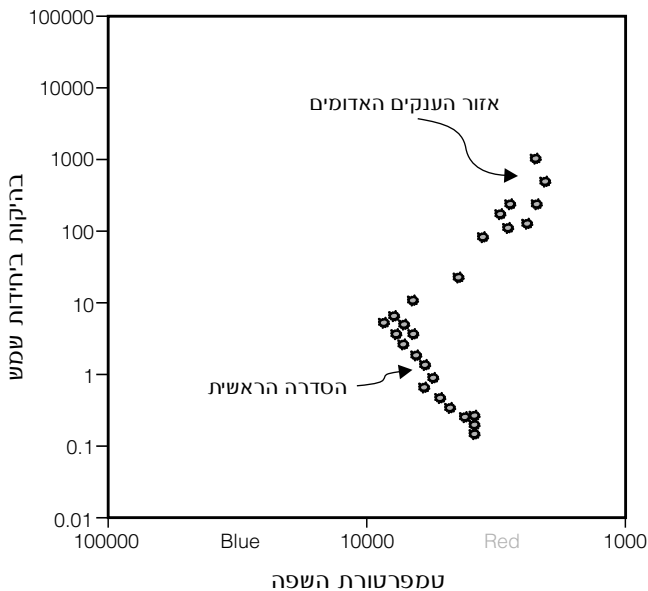
### "גיל המעבר"

כאשר מכלה הכוכב את המימן במרכזו, נעצר בהכרח ייצור האנרגיה. מרכז הכוכב, המכונה הגרעין, מכיל, בשלב זה, את תוצר בעירת המימן - הליום. מרגע שפוסק ייצור האנרגיה בגרעין הכוכב, אין "כיסוי" לאנרגיה הנפלטת מפניו, ולכן הכוכב מאבד אנרגיה וכתוצאה מכך, כפי שראינו, הוא מתכווץ ומתחמם. הטמפרטורות הן בגרעין ההליום והן בבסיס מעטפת המימן שסביבו עולות. בשלב מסוים עולות הטמפרטורות בקליפת המימן הקרובה לגרעין ההליום במידה מספקת בכדי להצית מחדש את בעירת המימן, הפעם בקליפה. המימן בקליפה בוער, בקצב מהיר למדי, והופך להליום. הקליפה הבווערת מתקדמת אל תוך מעטפת המימן כשהיא מותירה אחריה את תוצר הבעירה, הליום, המצטרף לגרעין (ראה תרשים 4). בשלב זה עולה בהיקות הכוכב במידה ניכרת, והיא גדולה פי כמה אלפים מבהיקות השמש. מעטפת המימן של הכוכב, בשלב זה, מתנפחת מאד, בכדי לאפשר את העברת כמויות האנרגיה העצומות המיוצרות בקליפה הבווערת. רדיוס הכוכב גדל לכמה מאות רדיוסי שמש וצבעו של הכוכב משתנה

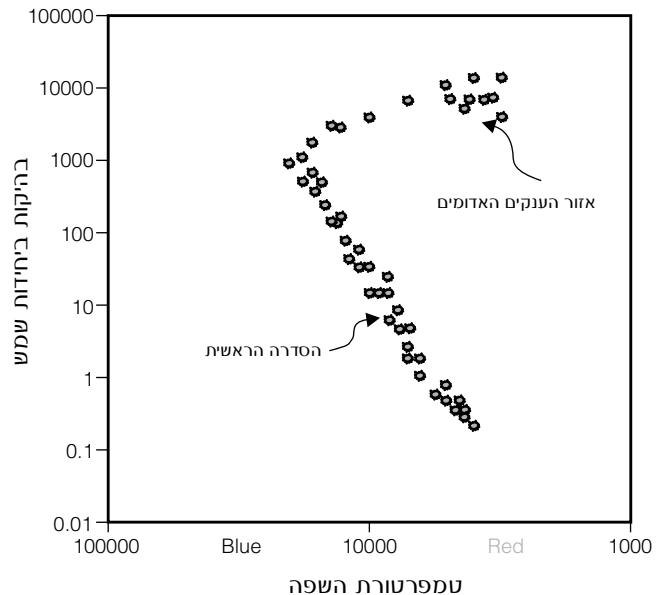


תרשים 1: הסדרה הראשית בדיאגרמת הרצפרונג-ראסל

התרמודינמי, ויעזוב את ה"סדרה הראשית". ה"סדרה הראשית" מתמוססת איפוא מן הקצה העליון. ככל שגילו של הצביר גדול יותר כך ייוותר חלק קטן יותר מה"סדרה הראשית" שלו. הקצה העליון של ה"סדרה הראשית" יכול לשמש כאינדיקציה לגילו של הצביר. תרשימים 2 ו-3 מתארים את דיאגרמות "הרצפרונג ראסל" התצפיתית, עבור שני צבירים. האחד "צעיר" יחסית והשני "זקן". שימו לב עד להיכן התמוססה הסדרה הראשית בשתי הדיאגרמות.

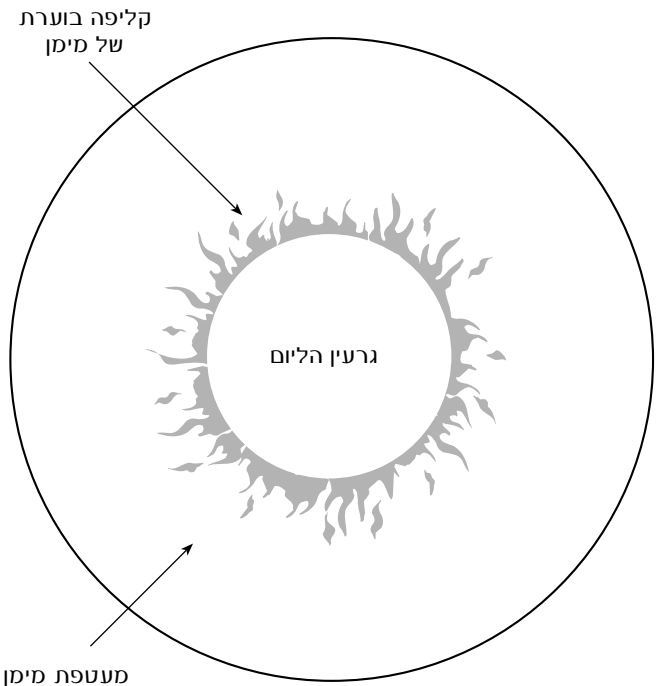


תרשים 3: דיאגרמת הרצפרונג-ראסל התצפיתית עבור צביר "זקן" יחסית

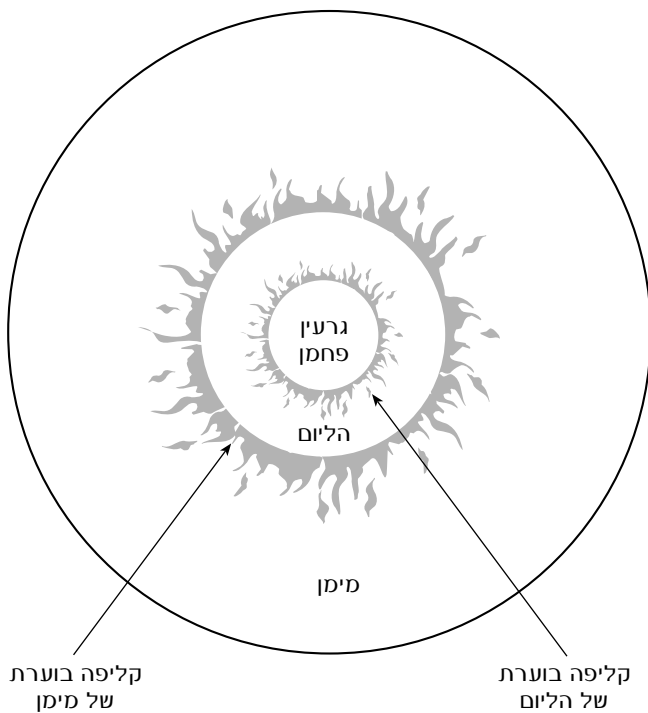


תרשים 2: דיאגרמת הרצפרונג-ראסל התצפיתית עבור צביר "צעיר" יחסית

זה הדברים סבוכים יותר. הסיבה לכך היא שגרעין הבריליום, המכיל שמונה חלקיקים, הוא מאד בלתי יציב ולכן הוא מתפרק, כמעט מיידית, בחזרה לשני גרעיני הליום. הדרך היחידה ליצור גרעין יציב, במקרה זה, היא לפגישה סימולטנית של **שלושה** גרעיני הליום (ריאקציה הנודעת בשם triple alpha) וליצירת פחמן. ברור שהסיכוי לכך קטן בהרבה ולכן ריאקציה משולשת כזו תוכל להתרחש רק בתנאים מיוחדים - טמפרטורה וצפיפות גבוהים במידה ניכרת מאלו הנדרשים לריאקציה הדו-חלקיקית. בעירת ההליום מתרחשת איפוא בטמפרטורה של כמאה מיליון מעלות ובצפיפות הקרובה ל-  $10^6 \text{ g/cm}^3$ . גם בעירת ההליום במרכז הכוכב תבוא לסיומה כאשר כמות ההליום, באזור הבווער, תפחת באופן ניכר. בשלב זה, בדומה לתרחיש שתואר עם סיום בעירת המימן, עשוי ההליום להידלק בקליפה העוטפת את גרעין ההליום השרוף - הפחמן. במקרה זה יהיה לכוכב המבנה הבא (תרשים 5):



תרשים 4: קליפת המימן הבווערת מתקדמת אל תוך מעטפת המימן כשהיא מותירה אחריה את תוצר הבעירה, הליום, המצטרף לגרעין



תרשים 5: לכוכב שתי קליפות בוערות המתקדמות החוצה כשהחומר השרוף שהן מותירות מצטרף לגרעין הפנימי. בשלב זה אם עוברים ממרכז הכוכב אל שפתו יורדים מהגרעין הכבד ביותר, פחמן, אל הקל ביותר, מימן. מבנה הכוכב בשלב זה הוא מודל המכונה מודל "הבצל".

גרעין צפוף של פחמן, סביבו קליפה בוערת של הליום המתקדמת אל תוך שכבת הליום, דקה יחסית, זו מסתיימת

לאדום (טמפרטורת השפה יורדת מ-5000 מעלות בשלב הסדרה הראשית ל-3000 מעלות). שלב זה בהתפתחות הכוכב נקרא לפיכך שלב **הענק האדום**. כשהשמש תגיע לשלב זה, בעוד כמה מיליארדי שנה, היא תבלע את כדור הארץ בתוך המעטפת המנופחת סביבה....

התקדמות הקליפה הבווערת יחד עם גידול גרעין ההליום יימשכו עד שתקרה אחת משתי האפשרויות הבאות:

א. בשל אי-יציבות דינמית יאבד הכוכב את כל מעטפת המימן סביב לגרעין ההליום.

ב. יוצת גרעין ההליום במרכז הכוכב.

במקרה שתתרחש האפשרות הראשונה, תפוזר מסת מעטפת המימן של הכוכב כעננה כדורית שתתפשט אל חלל היקום. תצפיתית מזוהה תופעה זו עם תופעת ה"ערפילית הפלאנטרית". בגרעין ההליום שייותר לא יוצתו יותר ריאקציות גרעיניות והוא יסיים את חייו תוך דעיכה איטית. במקרה שתתרחש האפשרות השניה יוצת כאמור ההליום בגרעין הכוכב. לכאורה ניתן היה להעריך שהצתת גרעיני ההליום תיעשה בדומה להצתת המימן, דהיינו, כאשר שני גרעיני הליום ינועו זה לקראת זה במהירות שתאפשר להם להתגבר על המחסום הקולומבי, ונקבל גרעין של בריליום בתוספת האנרגיה הגרעינית שהשתחררה. מתברר שבמקרה

כללית ניתן לקבוע כי מותם של הכוכבים הקלים נעשה באופן מתון בעוד שמותם של הכבדים מלווה באירועים דרמטיים. בכוכבים שמסתם קטנה מ- 0.04 מסות שמש כלל לא ניצתות ריאקציות גרעיניות ולכן כוכב כזה ידעך כשהוא מאבד את האנרגיה הגרביטציונית שלו כקרינה בטמפרטורות נמוכות. לכוכב כזה קוראים **ננס אדום**.

בכוכבים כבדים יותר, שמסתם קטנה מכ-8 פעמים ממסת השמש, בשלב בו בוער המימן להליום בקליפה, ופנימה יותר בוער ההליום לפחמן גם כן בקליפה (תרשים 5), מתרחשת תופעה, שעד היום ההסבר לה אינו ברור לחלוטין. מעטפת הכוכב - כל החומר המצוי מעבר לקליפות הבווערות - נפלט מן הכוכב החוצה ויוצר עננה העוטפת את הכוכב ומתרחקת ממנו אל תוך המרחב. כאשר החומר בעננה זו מתייבן כתוצאה מקרינת הכוכב הנותר, נצפית העננה כטבעת זוהרת מרהיבה ביופייה המכונה "ערפילית פלנטרית" (תמונה 2). החומר בעננה, המתפשט בחלל עשוי לשמש בעתיד כחומר היולי ליצירת כוכבים חדשים. גרעין הכוכב הנותר אינו אלא חומר כבוי, במסה הקרובה למסת השמש (יתרת המסה נפלטה מן הכוכב בתהליך יצירת הערפילית הפלאנטרית), שבמצבו אינו יכול להידלק ולבעור בעירה גרעינית נוספת. לכן, הוא פולט חום ומתכווץ, תחת הכוח הגרביטציוני, ואגב כך מתקרר. לכוכב הנותר אנו קוראים **ננס לבן**. זהו כוכב שכאמור מכיל אפר גרעיני (בדרך כלל פחמן + חמצן), רדיוסו קרוב לרדיוס כדור הארץ, כ- 1% מגודלה של השמש, ומסתו כזכור, כמסת השמש. צפיפותו לפיכך עצומה. המסה של קוביית משחק העשויה מננס לבן גדולה יותר מטון!



תמונה 2: ערפילית הטבעת (M57) מקבוצת הנבל (Lyra).

בקליפה בוערת של מימן הנעה אל תוך מעטפת מימן מנופחת. במצב זה לכוכב שתי קליפות בוערות המתקדמות החוצה כשהחומר השרוף, שהן מותירות, מצטרף לגרעין הפנימי. בשלב זה, אם עוברים ממרכז הכוכב אל שפתו, יורדים מהגרעין הכבד ביותר, פחמן, אל הקל ביותר, מימן. מבנה הכוכב בשלב זה הוא מודל שמבחינה עקרונית ילווה אותנו גם בכוכבים שיעברו שלבי בעירה מתקדמים יותר, הוא מכונה בשם מודל ה"בצל".

מה הם שלבי הבעירה הבאים שיעבור הכוכב? תחילה נדגיש שיצירת הפחמן אינה בהכרח התחנה האחרונה של בעירת ההליום. מסתבר שאינטראקציה של גרעין פחמן עם גרעין הליום עשויה ליצור גרעין, יציב גם כן, של חמצן עם ששה עשר נוקליאונים.

כאשר הטמפרטורה בגרעין הפחמן (+חמצן) תגיע לכשש מאות מיליון מעלות וצפיפות הגדולה פי כמה מאות אלפים מצפיפות המים, יתחיל הפחמן לבעור. בעירה זו תיצור חמצן, ניאון, מגנזיום ומעט סודיום. כאשר הטמפרטורה תמשיך לעלות, מעבר למיליארד מעלות, ייווצרו גרעינים כבדים עוד יותר כמו סיליקון, גופרית וזרחן. כאשר הטמפרטורה תתקרב לשלושה מיליארד מעלות יתקבלו, במרכז הכוכב, גרעיני ברזל המכילים 56 נוקליאונים. גרעיני הברזל הם התחנה הסופית בשרשרת הריאקציות הגרעיניות, שכן לגרעין זה אנרגיית הקשר המרבית לנוקלאון.

נדגיש כי רק בחלק, קטן יחסית, של הכוכבים, מתרחשת כל שרשרת הריאקציות הגרעיניות שתוארה. במרביתם נקטעת השרשרת בשלב זה או אחר על ידי מאורעות דרמטיים הקורים בכוכב, כפי שיתואר בסעיף הבא.

מכל מקום, מן הראוי לציין, שתוצרי הבעירה בשרשרת הריאקציות הגרעיניות שתוארה הם הם מקור היסודות השונים הממלאים את היקום. כפי שנראה בסעיף הבא, תוצרי בעירה מגוונים אלו יתפזרו, בחלקם הגדול, אל חלל היקום, בעקבות תהליכי "התפוצצות" שונים. חומר זה, שיתפזר בחלל, ישמש, בשלבים מאוחרים יותר, כחומר היולי לבניינם של כוכבים חדשים או כוכבי לכת כדוגמת כדור הארץ שלנו. לכן, בצורה הנשמעת פיוטית מעט, אך נכונה לחלוטין מבחינה מדעית, אנו והקרקע עליה אנו חיים אינם אלא "אבק של כוכבים".

## מותם של כוכבים

שתי שאלות מעניינות קשורות ב"מותם" של כוכבים: כיצד הם מסיימים את חייהם ומה הם מותירים אחריהם.



בתחילת דרכו, לאחר יצירת הערפילית הפלאנטרית, הננס הלבן חם יחסית, ומכאן צבעו הלבן, אך הוא מאבד את חומו באיטיות והופך עם הזמן לננס שחור.

הלחץ השורר בננס הלבן, זה המאזן את כוחות הגרביטציה, מסופק בעיקרו על ידי האלקטרונים הקלופים מן האטומים שלהם. במצב זה לכוכב מוליכות חום מצוינת ולכן איבוד האנרגיה שלו מתחלק במהירות על פני הכוכב כולו. זו הסיבה לכך שטמפרטורת השפה של ננס לבן אינה משתנה במהירות והוא נראה כמתקרר לאט.

בכוכבים כבדים עוד יותר, כבד יותר גם הגרעין הצפוף המכיל את שאריות בעירת ההליום. בגרעין זה מתקבלות טמפרטורות גבוהות מספיק בכדי להצית את הפחמן, הסיליקון וכו' עד לברזל. עם עליה נוספת של הטמפרטורות מגיע שלב בו הקרינה מסוגלת לפרק את גרעיני הברזל לגרעינים קלים יותר. ברגע שמתחיל תהליך כזה להתרחש קטן הלחץ הפנימי, שמנע עד כה את קריסת הכוכב, בצורה דרסטית. כתוצאה מכך קורס גרעין הברזל, תחת הכוח הגרביטציוני, תוך אלפיות שניה, לרדיוס של כ- 10 ק"מ. תהליך זה מלווה לכן בפליטה עצומה של אנרגיה. כמות האנרגיה הנפלטת שקולה לזו הנפלטת ממיליארד שמשות - מגלקסיה שלמה. חלק מן האנרגיה נפלט כקרינה, חלק אחר כאנרגיה קינטית של המסה המועפת מן הכוכב ועיקרה כשטף עצום של נויטרונים. תופעה דרמטית זו נקראת "סופרנובה" (תמונה 3). הכוכב הנוותר לאחר התפוצצות הסופרנובה נקרא **כוכב נויטרונים**. רדיוסו כאמור הוא כ- 10 ק"מ ומסתו קרובה למסת השמש. צפיפותו לפיכך

עצומה. מסתה של קוביית משחק העשויה מכוכב נויטרונים היא כמיליון טון.

כוכב הנויטרונים, כשמו כן הוא, עשוי נויטרונים, שכן בצפיפויות העצומות השוררות בקרבו בולעים הפרוטונים את האלקטרונים החופשיים והופכים לנויטרונים. במרחקים קטנים דוחים הנויטרונים זה את זה מה שיוצר לחץ בגז הנויטרונים. לחץ זה הוא הבולם את כוחות הגרביטציה ומאפשר את השגת שיווי המשקל בכוכב.

תצפיתית נתגלו כוכבי הנויטרונים כעצמים הקורנים לחלל קרינת רדיו בתדירות של כ- 30 תנודות בשניה. תדירות כה גבוהה ניתן היה להסביר רק כתוצאה של כוכב מסתובב ברדיוס של **קילומטרים ספורים**, שכן כוכב ברדיוס גדול יותר היה מתפרק תחת הכוחות הצנטריפוגליים של סיבוב מהיר שכזה. הכוכבים הפולטים את קרינת הרדיו בתדירויות הללו כונו בשם "**פולסרים**". כיום מזוהים הפולסרים עם כוכבי הנויטרונים.

לחץ גז הנויטרונים מסוגל לעמוד כנגד כוחות הגרביטציה כל עוד כוכב הנויטרונים אינו כבד מכ- 2 מסות שמש. נשאלת כמובן השאלה מה גורלו של כוכב נויטרונים הכבד מערך זה. במקרה זה לא יימצא כוח שיעמוד כנגד כוחות הקריסה הגרביטציוניים, והכוכב אכן יקרוס ללא גבול וייצור מה שמכונה "**חור שחור**".

בכדי להבין בפשטות את מהות המושג "חור שחור" ניזכר לרגע בהגדרת "מהירות הבריחה" מכוכב - זו המהירות המינימלית הנדרשת, על פני הכוכב, בכדי להשתחרר ממשיכתו הגרביטציונית. כזכור:

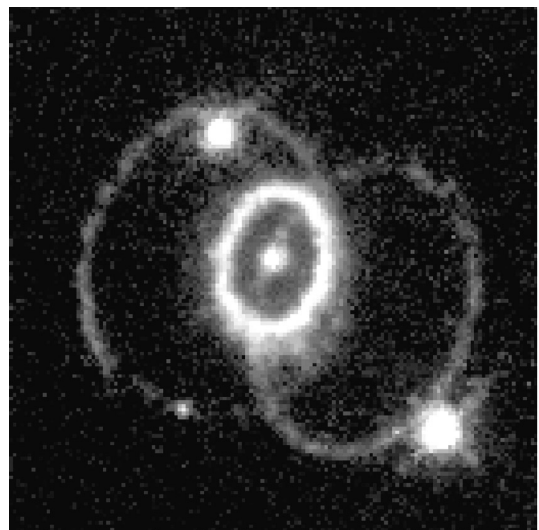
$$v_{\text{esc}} = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

כאשר M מסת הכוכב, R רדיוסו, G קבוע הגרביטציה ו- $v_{\text{esc}}$  מהירות הבריחה. עתה תארו לעצמכם שאנו מחפשים את הכוכב שמהירות הבריחה מפניו **גדולה ממהירות האור!!** מהשוויון הקודם נקבל:

$$r = \frac{2GM}{v_{\text{esc}}^2}$$

ואם נציב במקום  $v_{\text{esc}}$  את מהירות האור (ועבור המסה נציב את מסת השמש) נקבל:

$$r_s = \frac{2 \cdot 6.7 \cdot 10^{-11} \cdot 2 \cdot 10^{30}}{(3 \cdot 10^8)^2} \cong 3000 \text{m}$$



תמונה 3: טבעות המקיפות את אתר הסופרנובה 1987A כפי שצולמו על-ידי טלסקופ החלל Hubble.

## מכונה הרדיוס של שורצשילד.

לכן, אם כוכב במסת שמש אחת יתכווץ לרדיוס הקטן מכ-3 ק"מ אפילו האור לא יוכל להימלט מפניו. זה מקור השם "חור שחור". קיומו של החור השחור הוא תופעה סבוכה ומעניינת שכאן קצרה היריעה אפילו לגעת בקציה...

עד כאן, קיצור תולדות הכוכבים....

ולאלו שבעקבות קריאת מאמר זה צפים בחלל היקום ומחפשים כיוון או נקודת אחיזה, מן הראוי לסיים בשירו של נתן אלתרמן שהופיע לראשונה בקובץ ה"טור השביעי" בראשית שנות החמישים, זאת בעקבות פרסום עיתונאי שטען כי: "השמש, מבחינה מדעית, היא פצצת מימן".

## לקריאה נוספת:

1. מידב, מ. (עורך), אסטרופיסיקה - קובץ הרצאות למורה ולתלמיד, הוצאת רמות - אוניברסיטת תל-אביב, 1992.
2. גלר, צ., פרקים באסטרופיסיקה, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, 1987.
3. מידב, מ., ברוש, נ., נצר, ח., היקום - יסודות האסטרופיסיקה, האוניברסיטה הפתוחה, מהדורת תש"ס, תל-אביב, 2000.
4. <http://zebu.uoregon.edu/imamura/208/feb28/feb28.html>
5. <http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap990502.html>
6. <http://oposite.stsci.edu/pubinfo/pr/94122.html>

תהודה

## באור חדש/ נתן אלתרמן

על ספסל אם תשב: מבחינה  
מדעית -  
מה עשית?  
גופך בכל גרם ביוכימי  
התישב על ריבוא חביות דינמיט...  
הלא כן? די אינטימי...  
אין ספסל. אין ממש. הכל אפס  
רושף.  
אך בכל זאת -  
שב.

כן, בכל זאת נוצר איזה רגש מועם  
של דיסטנץ מסוים..  
יתכן כי רק איזה ישיש מול האור  
יהלך בגינה בפסיעות חלושות  
ויחם את גופו וילחש לו לאמור:  
"הפצצה היא היום מחייה-נפשות"  
הוא יחם את גופו... אבל מהו הגוף  
מבחינת המדע?  
אשלייה וסילוף.

האזרח בימינו בפיזיקה דש.  
המדע מציפנו כים.  
העולם מתגלה באור חדש.  
מושגיו הישנים-אים?  
הרקיע בהיר כזכוכית רחוצה.  
יום יפה. בוא נצא נא בשניים  
ונישא את עינינו אל זו הפצצה  
שקראנו לה שמש  
בימי הביניים.

שב ושמור שהאפס הזה המהימן  
לא ילך לאיבוד  
עם שדי המימן.

אין גופים ואין כלי ואין חפץ.  
הכל  
תהליך של נפץ.

לא חשדנו בה שום חשדות בעבר,  
בקומה מדי בוקר לזרוח.  
והנה... לא קרה עוד, חלילה, דבר..  
אבל כך ...  
קצת לא נוח.

כי באפס הוא  
- כך עולה במחשבת -  
לא יהיה גם על מה לשבת.

אל תסמוך על החומר ובו אל  
תגילה.  
כל פרודה  
היא גורילה.

קל לומר כמובן: "אין לפחוד  
ולחשוש".  
אך בכל זאת -  
פצצה על הראש!